

建築研究資料

Building Research Data

No. 113

February 2008

21世紀鋼構造フォーラム研究報告 —6年半の活動とその成果—

Research Report on the 21th Century Steel Structure Forum
-Activities and Results of six years and a half-

21世紀鋼構造フォーラム

(独立行政法人建築研究所、社団法人日本鋼構造協会、社団法人日本鉄鋼連盟)

The 21th Century Steel Structures Forum organized
by Building Research Institute, Japan Society of Steel Construction,
and The Japan Iron and Steel Federation

独立行政法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

Incorporated Administrative Agency, Japan

はしがき

21世紀鋼構造フォーラムは、2001年6月、独立行政法人建築研究所が、社団法人日本鉄鋼連盟及び社団法人日本鋼構造協会に、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」の開催を呼びかけたことを機に、シンポジウムでのテーマ提案のため、これからの鋼構造技術の担い手である若手の研究者、技術者、設計者を、3団体及び学識経験者より募り、設立・発足したものです。

シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」(2002年11月)をターゲットとした第一期では、テーマを固定せず、「生きる」、「進化する」、「解き放たれた」鋼構造、と言うシンボリックな概念を掲げ、新しい提案を行いました。並行して、斬新な鋼構造建築に関する作品および論文を広く公募し、優れたアイデアを表彰しました。続く第二期は、これらの提案及びシンポジウムで公募したアイデアを具現化する活動を行い、2004年11月、鋼構造シンポジウム2004特別セッションにおいてその成果を発表しました。2005年からの第三期では、それまでの検討を基に、新たに4つのテーマを選定し、2ヶ年計画で調査研究をスタートしました。2006年11月には、鋼構造シンポジウム2006特別セッションで進捗状況の中間報告を行い、そして、2007年11月の鋼構造シンポジウム2007特別セッションにおいて最終成果を報告しました。

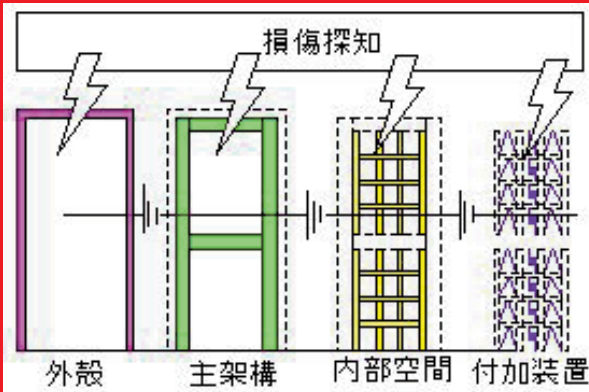
以上のように、フォーラムの発足後、三期6年半にわたり、参加された各位の強い熱意により、活発な活動を続け、様々な成果を生みました。これは、「21世紀にふさわしい斬新な発想による鋼構造建築の創出」という、フォーラム発足当初の理念に加えて、3団体と学識経験者のコラボレーションによる人的ネットワークが求心力となった為と思われまふ。捉え方によっては、このことこそ、フォーラムを支えてきた力であり、そして21世紀の新たな鋼構造建築を生み出す原動力になるだろうと考えられます。

本建築研究資料では、フォーラムの理念と成果が新しい鋼構造建築物の創出に繋がるべく、今後、新たな活動が生まれ、21世紀の鋼構造建築がより一層魅力あるものとなることを期待し、そのための一助となればと考え、6年半のフォーラム活動とその成果をとりまとめました。

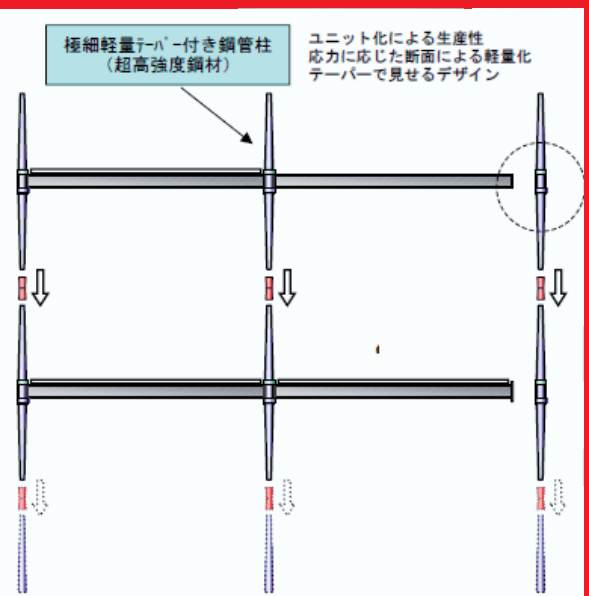
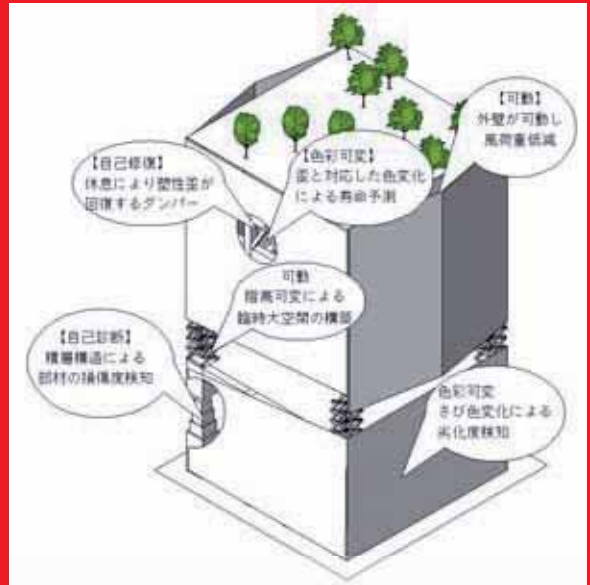
最後になりますが、フォーラムのこれまでの活動にご尽力いただいた、参加された各位、事務局および関係団体の方々に深く感謝申し上げます。

平成20年2月

独立行政法人建築研究所
山内泰之



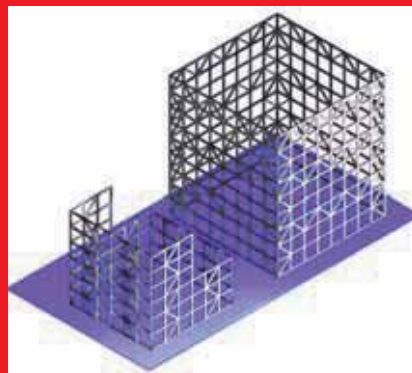
生きる



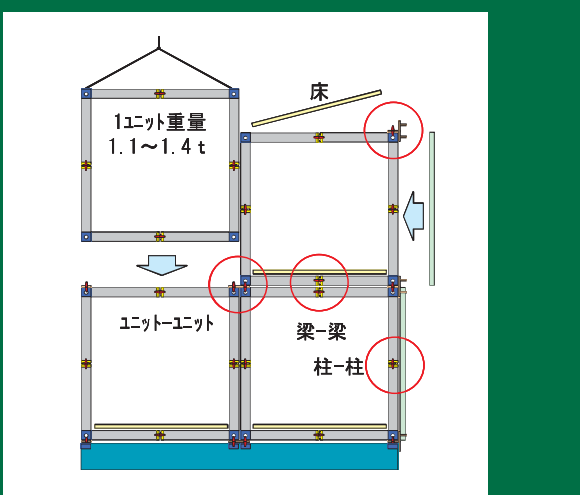
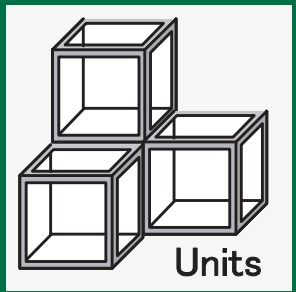
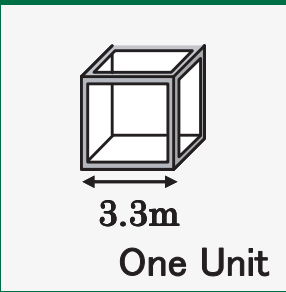
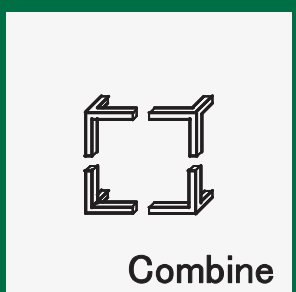
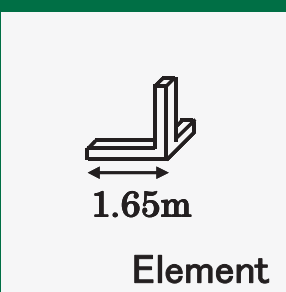
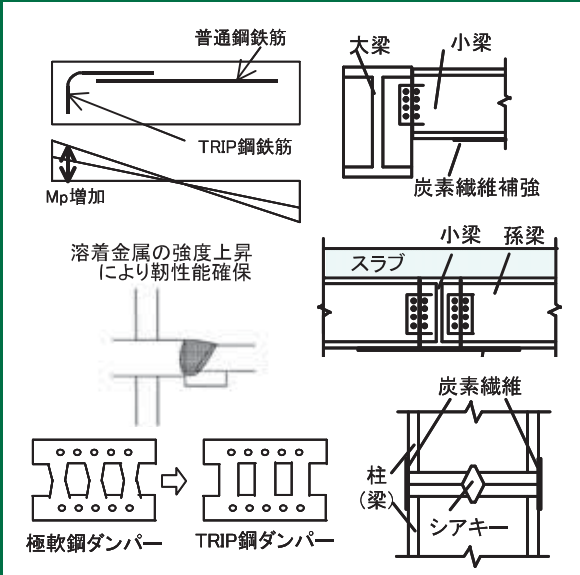
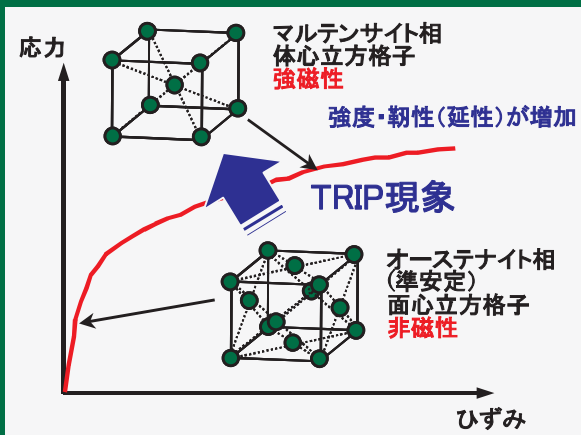
進化する



解き放たれた

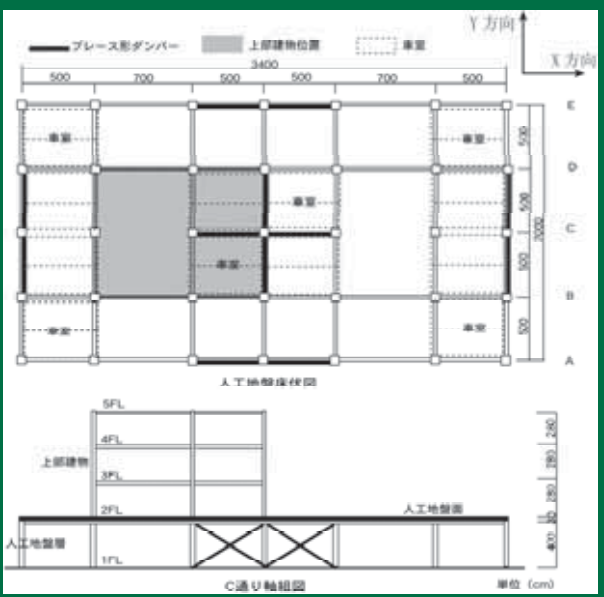


高性能

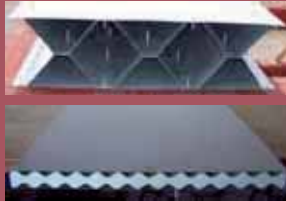
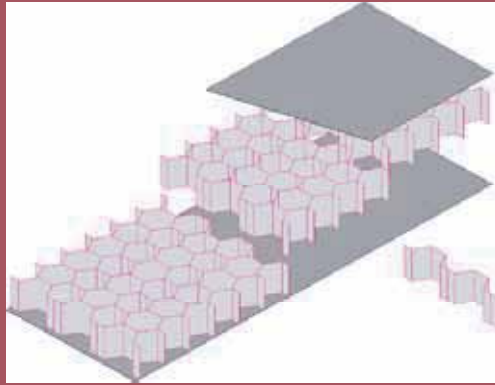


ユニットセル

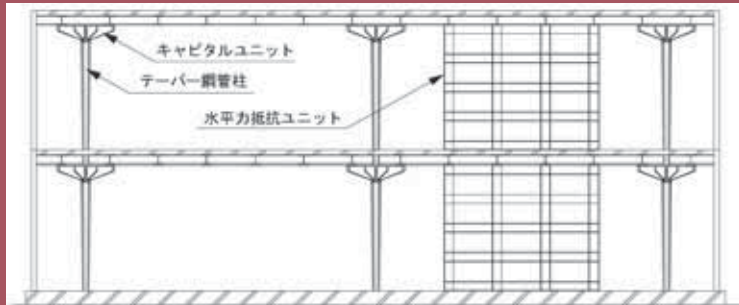
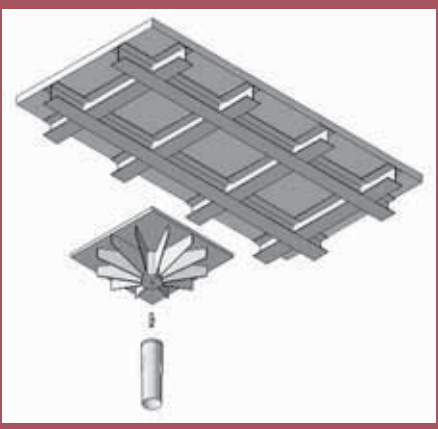
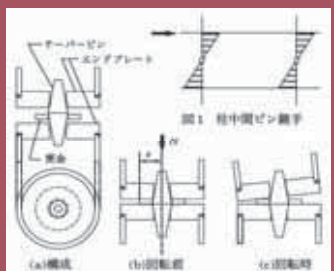
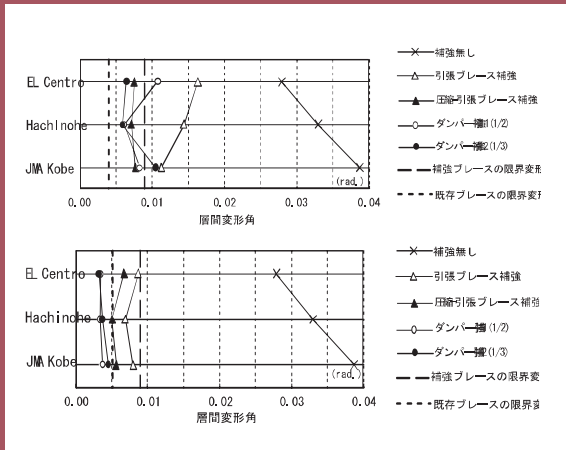
防災システム



薄板

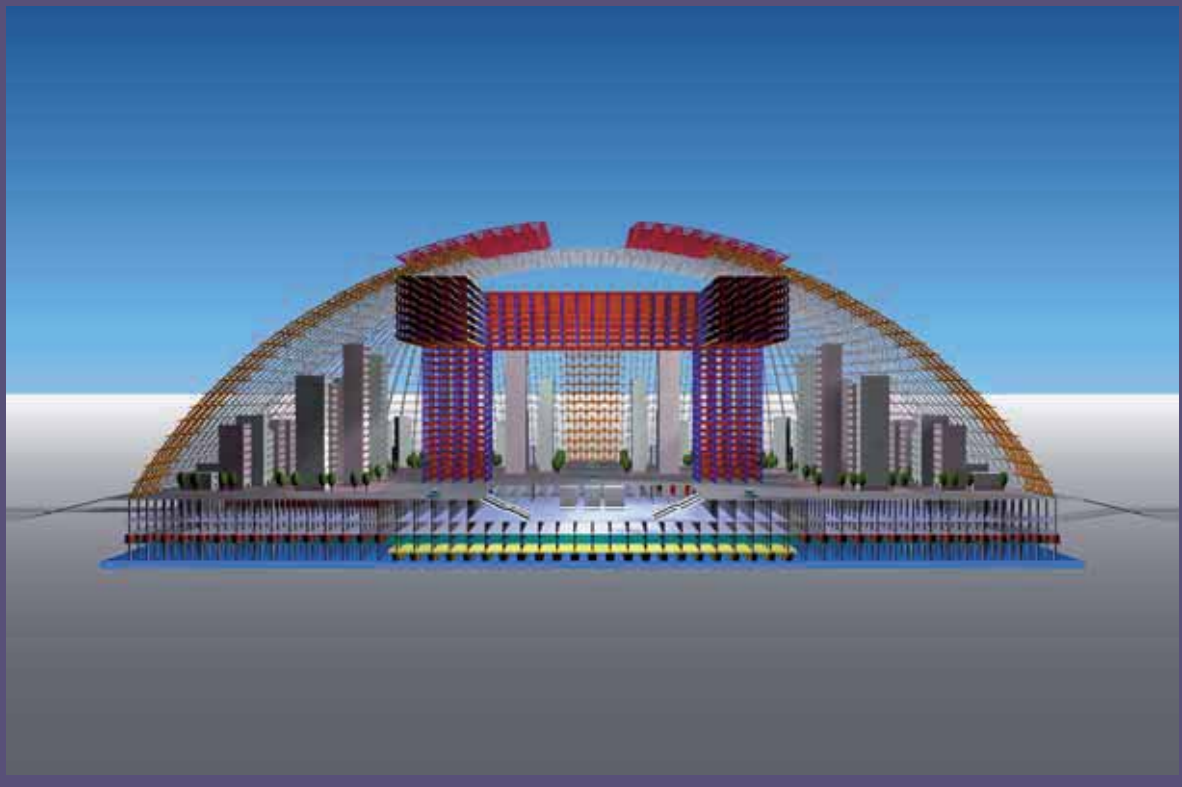
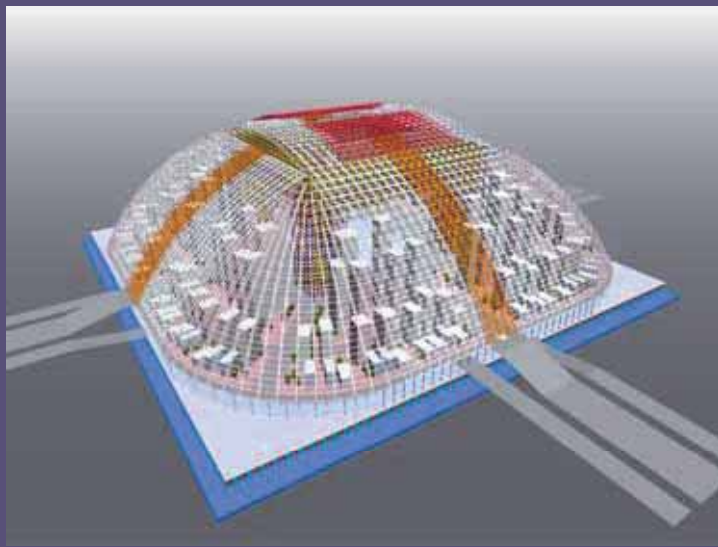
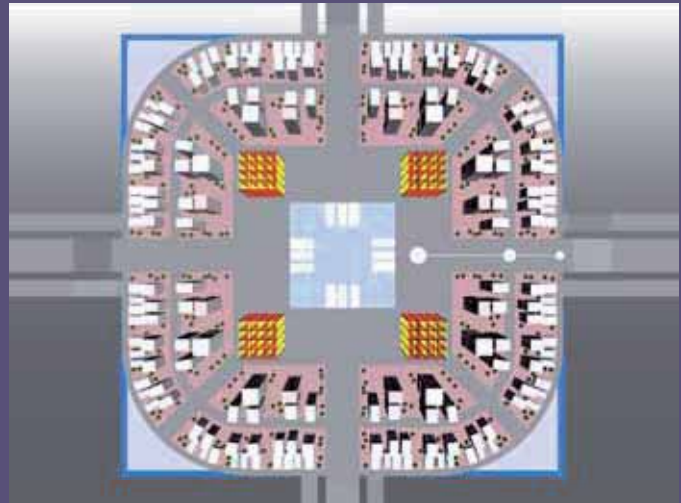


ダンパー



テーパー

展開構造



21世紀鋼構造フォーラム研究報告 －6年半の活動とその成果－

目次

はしがき

グラビア

第1章 設立経緯	(1～1)	
1.1 21世紀鋼構造フォーラムの概要	1	1
1.2 21世紀鋼構造フォーラムの設立趣意書	1	1
第2章 研究活動の概要	(2～13)	
2.1 21世紀鋼構造フォーラムの活動変遷	2	2
2.2 21世紀鋼構造フォーラムの活動体制	5	5
2.3 21世紀鋼構造フォーラム活動参加者	6	6
第3章 第一期の活動成果	(14～49)	
3.1 21世紀鋼構造フォーラム A グループ提案 ー生きる建築へのアプローチ	14	14
3.2 21世紀鋼構造フォーラム B グループ提案 ー進化する鋼構造	19	19
3.3 21世紀鋼構造フォーラム C グループ提案 ー解き放たれた鋼構造	24	24
3.4 公募作品部門入賞作品・論文	29	29
第4章 第二期の活動成果	(50～99)	
4.1 21世紀鋼構造フォーラム WG1 の活動	50	50
① 高性能要素の建築分野への適用	51	51
② ユニットセル構造システムの提案	56	56
③ 地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム	61	61
4.2 21世紀鋼構造フォーラム WG2 の活動	70	70
4.3 21世紀鋼構造フォーラム WG3 の活動	75	75
① 建築鋼構造技術曼荼羅	76	76
② 21世紀鋼構造フォーラム新技術探索セミナー	77	77
4.4 独立研究テーマ	86	86
① 鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及び		

	その設計技法に関する研究	87
②	リユース可能な新しい鋼構造骨組システム —テーパーピンによるシアキーを用いたピン継手の提案と載荷実験—	95
第5章	第三期の活動成果	(100~165)
5.1	鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究	100
5.2	薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探究と開発	113
5.3	テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の研究	131
5.4	展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究	141
第6章	今後に向けて	(166~177)
6.1	今後に向けて	166
6.2	無題	167
6.3	21世紀鋼構造フォーラム発足時の経緯と今後に向けた提案	168
6.4	環境・防災・教育—21世紀型価値創造への挑戦と次世代への継承—	168
6.5	雑感：フォーラム活動を終えるにあたって	170
6.6	鉄骨造体育館の耐震補強の重要性と今後の展開	171
6.7	21世紀の技術とはどのようなものか	173
6.8	Objectivityの追求	175
	まとめと謝辞	178
	資料 (DVD-ROM)	

代表執筆者一覧

第1章

西山 功（国土技術政策総合研究所）

第2章

西山 功（前出）

第3章

3.1 金子佳生（東北大学大学院）

3.2 向井昭義（国土技術政策総合研究所）

3.3 河野 守（国土技術政策総合研究所）

3.4 作本好文（新日本製鐵）

第4章

4.1 金子佳生（前出）

4.2 作本好文（前出）

4.3 河野 守（前出）

4.4 作本好文（前出）

第5章

5.1 長谷川隆（日本建築防災協会）

5.2 富岡義人（三重大学大学院）

5.3 辻 聖晃（京都大学大学院）

5.4 金子佳生（前出）

第6章

6.1 山内泰之（建築研究所）

6.2 藤盛紀明（清水建設）

6.3 作本好文（前出）

6.4 猪砂利次（JFE スチール）

6.5 西山 功（前出）

6.6 長谷川隆（前出）

6.7 富岡義人（前出）

6.8 金子佳生（前出）

まとめと謝辞

西山 功（前出）

第 1 章 設立経緯

1.1 21 世紀鋼構造フォーラムの概要

21 世紀鋼構造フォーラムは、これからの鋼構造技術の担い手である若手研究者、技術者および設計者が参加し、自由な発想、自由な立場で斬新な鋼構造研究の提案などを行う意見交換の場として、独立行政法人建築研究所（理事長：山内泰之）が呼びかけ、社団法人日本鋼構造協会（会長：千速晃）、社団法人日本鉄鋼連盟（会長：千速晃）の三者で 2001 年 6 月に設立した。

フォーラムで提案された内容を対外的に発信する場として、また関係者に広く意見を提案していただく場として 2002 年 11 月にシンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」を開催した第一期の活動、その後、第一期の活動において提案されたテーマを具体化した第二期、成果とりまとめを行った第三期では、鋼構造シンポジウム 2004、2006、2007 を成果発表の場として活動を行った。この間、フォーラムは、2001 年 6 月～2007 年 11 月までの 6 年半の活動を行った。

1.2 21 世紀鋼構造フォーラムの設立趣意書

21 世紀鋼構造フォーラムの設立趣意書 —シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」開催に向けて—

21 世紀は我々のこれまでの社会生活を支えてきた大量生産、大量消費システムの時代から、地球環境を機軸にした新たな循環型社会システムへの変換の時代として位置付けられ、今まさにそのための様々な取り組みが世界中で実行に移されようとしております。

また、その一方では新たな社会システムの構築にむけて、産・官・学各界とも新たな枠組みを目指して再編され、あるいは再編されつつあります。

鋼構造技術者・研究者もこれまで、各界において技術開発等により豊かな社会生活の具現化に尽力してきたわけですが、このような新たな時代の要請に対し、今後どのように答えていくか、また何ができるのか、またそのためには何が必要なのか検討することは、技術者・研究者に課せられた大きな課題といえます。

これらの社会情勢を踏まえ、これからの鋼構造技術の担い手である若手の技術者・研究者および設計者に呼びかけ、自由な発想でまた自由な立場での斬新な鋼構造研究の新機軸の提案を期待し、意見交換の場としての「21 世紀鋼構造フォーラム」の設立を企画致しました。

ここで検討提案されたものについては、各種メディアやシンポジウム開催等を通じて広く対外的に発信し、より広がりのあるものにして行く方針であり、当面の目標としては 2002 年 11 月にシンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」開催を計画しており、広く内外関係者にお集まり頂き有意義なものとしたいと考えております。

本趣旨にご賛同頂く技術者・研究者のご参加を期待致します。

2001 年 6 月

独立行政法人建築研究所 理事長 山内 泰之
社団法人日本鋼構造協会 技術委員長 藤盛 紀明
社団法人日本鉄鋼連盟 建築専門委員長 作本 好文

第2章 研究活動の概要

2.1 21世紀鋼構造フォーラムの活動変遷

21世紀鋼構造フォーラムの活動は、図2.1の21世紀鋼構造フォーラム研究変遷図に示すように第一期から第三期に区分される。それぞれでの研究活動の概要を以下に記述する。

21世紀鋼構造フォーラムの研究活動は、21世紀鋼構造フォーラムの概要(1.1節)に記述したように、新たな世紀を迎え、若い研究者、技術者、設計者など鋼構造の担い手が自由な発想で意見をぶつけ合うことができる場を提供し、その中から新たな鋼構造研究の提案を行うことである。

この目的のために、第一期では、フォーラム内に3つのWGを設置し、多人数では意見が出にくいので、数名程度と互いに臆せず発言できるWG規模として活動を始めた。また、テーマを決めずに単に21世紀の鋼構造に関して意見を出し合うといっても難しいので、抽象的だがヒントとなる簡単なキーワード(具体的すぎないことが重要)として「生きる」「進化する」「解き放たれた」を設定した。各WGの成果は、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」(平成14年11月)においてフォーラム発表として提案され、WG-A(Aグループ)では、建築は考える葦となりうるか、鋼構造への適用と技術的検討の2編、WG-B(Bグループ)では、着脱可能な接合部の探求、次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案の2編、WG-C(Cグループ)では、解き放たれた鋼構造—スチール・メゾンリー、産業用建築物ユニットのケーススタディの2編の論文にまとめた。第一期は、テーマ提案の時期と言える。

一方で、広くフォーラムの外に対して論文、作品の公募(それぞれ公募テーマは、「鉄を使った新しい空間・機能を持った建築を支える技術」、「鉄を使った新しい空間・機能を持った建築を支える建築」とした)を行った。高梨晃一東京大学名誉教授を審査委員長とする審査委員会による審査を行い、論文部門では、トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築(真瀬伸治氏)、作品部門では、折板フレーム構造空間の探求(菅正太郎氏)が、それぞれ最優秀賞を獲得した。

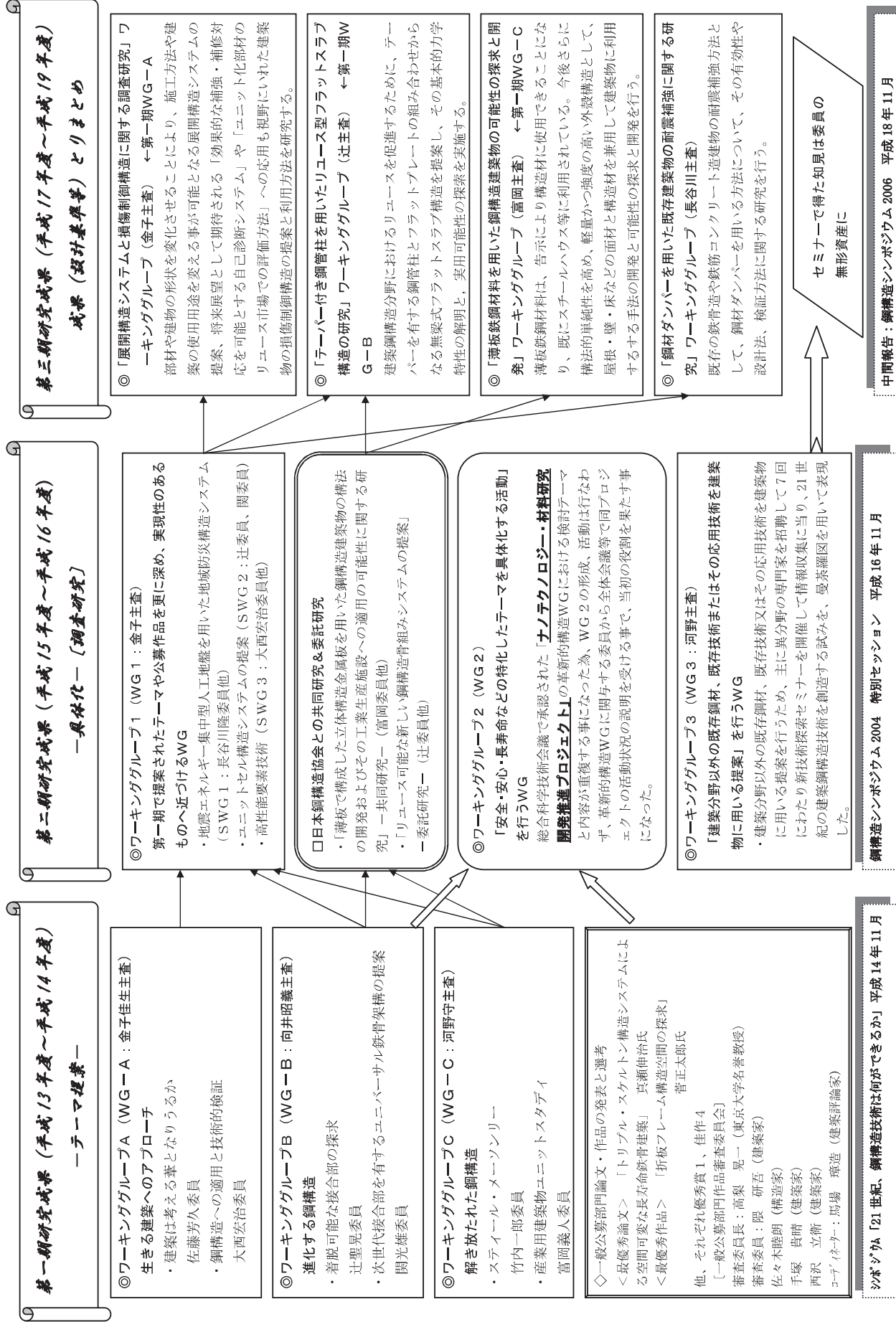
第二期では、第一期に提案されたテーマや論文・作品を更に深め、実現性のあるものに近づけるための、いわゆる具体化の時期であり、3つのWGによる活動を行うこととするとともに、第一期において提案されたテーマなどの内で既にかなり具体的となっていた2つのテーマについては、日本鋼構造協会との共同研究あるいは委託研究としてフォーラム活動とは一線を画して研究を進めた。

各WGの研究成果としては、WG1では、地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム、ユニットセル構造システムの提案、高性能要素技術の3論文に検討の成果をまとめた。WG2では、第一期に提案された複数のテーマを複合させ、高強度鋼材の開発という新たな要素を付け加えて安全・安心・長寿命などに特化したテーマを府省連携プロジェクトとして提案し、このテーマの実現に向けた検討を予定した。しかし、この提案が総合科学技術会議においてナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトとして採択され、内閣府のほか、国土交通省、経済産業省の連携テーマとなったため、

フォーラム活動としてはWGの活動を休止した。WG3では、建築分野以外に目を向け、既存鋼材、既存技術またはその応用技術で建築に用いる提案を検討すべく新技術探索セミナーを開催するとともに、21世紀の建築鋼構造技術を創造する試みとして曼荼羅を作成した。これらの研究成果は、鋼構造シンポジウム2004（平成16年11月）の特別セッションで発表された。

第三期では、第二期までの成果を実用化するために設計基準等の形にとりまとめる活動をめざして行った。WG-A～WG-Dの4つのWG活動を行い、展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究（WG-A）では、フォーラム当初から粘り強く掘り下げて考察してきた生きる建築のイメージ（知覚能力等）を各所に取り込んだ展開構造システムの提案を行った。テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の研究（WG-B）では、リユース性を高め、かつ、実現性の高いフラットスラブ構造システムの提案を行い、試設計に基づいて中層程度まで適用可能であることを検証した。薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発（WG-C）では、研究を通じて性能空間という新たな概念の提案を行い、今後の建材開発における目標設定の在り方について一石を投じる提案を行った。鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究（WG-D）では、鉄骨系建築物の耐震補強という喫緊の課題に対して耐震補強の実態調査の他、履歴型ダンパーを適用する耐震補強方法の可能性についてとりまとめを行った。これらの成果を得るには、第一期や第二期よりもより長い時間を要したが、鋼構造シンポジウム2006（平成18年11月）で中間報告、鋼構造シンポジウム2007（平成19年11月）で最終報告を行った。

図 2.1 21 世紀鋼構造フォーラム研究変遷図



2.2 21世紀鋼構造フォーラムの活動体制

21世紀鋼構造フォーラムの活動体制は、21世紀鋼構造フォーラムを全体会議と位置付け、その下に、フォーラムメンバーを中心に構成する少人数のWGを設置して研究を進めた。なお、各WGではフォーラムメンバー以外から特定分野の専門家に協力委員として参加して頂いた。また、それぞれのWGでの活動を総合調整するとともに、成果の公表に向けた企画などは幹事会で行った。

全体会議は年に2～3回程度としフォーラムメンバー全員の参加で開催した。幹事会は随時開催として年に数回程度、また、研究活動の中心となるWGは1～2か月に1回程度開催した。

図2.2には第三期における活動体制を参考に示す。

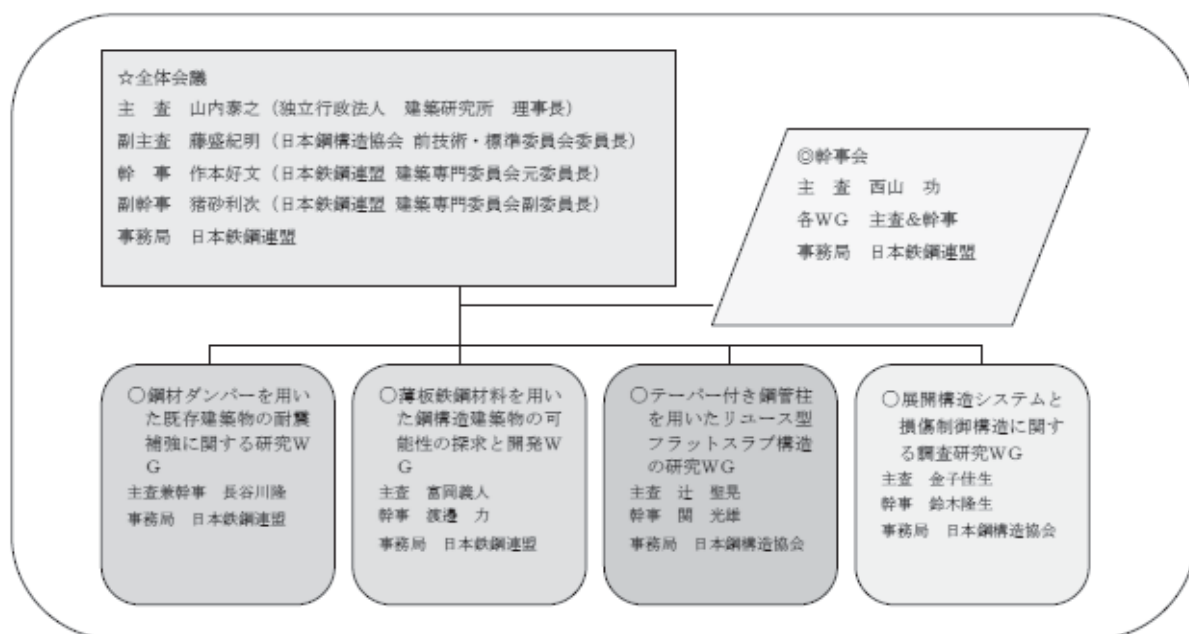


図 2.2 21世紀鋼構造フォーラム活動体制図 (第三期の例)

2.3 21世紀鋼構造フォーラム活動参加者

21世紀鋼構造フォーラムの正式な活動は2001年6月から、2007年11月の最終の研究発表会まで三期6年半にわたって行われました。同フォーラムは、1.2節に記述したフォーラムの思想、精神（21世紀鋼構造フォーラムの設立趣意書を参照）に賛同を頂き、研究活動を支援頂いていた方々にもご参加頂きました。ここでは活動参加者を以下の通り紹介致します。

21世紀鋼構造フォーラム活動全参加者 (2001.6~2007.11)

(順不同・敬称略)

主査	山内 泰之	独立行政法人建築研究所 理事長
副主査	藤盛 紀明	清水建設(株) 顧問
委員	大井 謙一	神戸大学 工学部建設学科 教授
委員	富岡 義人	三重大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授
委員	金子 佳生	東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授
委員	吹田 啓一郎	京都大学 防災研究所 助教授
委員	辻 聖晃	京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 准教授
委員	五十嵐規矩夫	東京工業大学大学院 理工学研究科 建築学専攻 准教授
委員	西山 功	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部長
委員	向井 昭義	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室 室長
委員	河野 守	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 建築品質研究官
委員	長谷川 隆	(財)日本建築防災協会 企画調査部研究課長
委員	石原 直	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 基準認証システム研究室 主任研究官
委員	小野 潤一郎	(株)日建設計 構造設計室 構造設計主管
委員	荻野 雅士	(株)日本設計 構造設計群 構造設計グループ 主任技師
委員	大西 宏治	(株)大林組 東京本社 設計本部 設計部 副主査(構造担当)
委員	矢部 喜堂	清水建設(株) 技術研究所 副所長
委員	田村 和夫	清水建設(株) 技術研究所 副所長
委員	斎藤 利昭	清水建設(株) 設計本部 構造設計部2部 グループ長
委員	澤本 佳和	鹿島建設(株) 技術研究所 建築構造グループ 上席研究員
委員	関 光雄	(株)竹中工務店 東京本店 設計部 構造課長
委員	佐藤 芳久	大成建設(株) 設計本部 構造グループ プロジェクトリーダー
委員	河村 克彦	(株)三菱地所設計 構造設計部 参与
委員	羅 黄順	(株)計測リサーチコンサルタント 管理部企画開発室チーフエンジニア
委員	宮本 則幸	(株)計測リサーチコンサルタント 企画開発部 部長
委員	穂苅 實	ケイエムスリー建築・建材研究所 代表
委員	竹内 一郎	新日本製鐵(株) 建材開発技術部 建築建材技術グループ マネジャー
委員	清水 信孝	新日本製鐵(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研

		役員
委員	植木 卓也	J F E スチール(株) 西日本製鉄所 設備部 開発・設計室 係長
委員	石井 匠	J F E 技研(株) 土木・建築研究部 建築チーム 主任研究員
委員	高橋 英孝	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長
委員	鈴木 隆生	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長
委員	北濱 雅司	住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 建材技術部 建築技術研究室
委員	北岡 聡	住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 建築技術研究室
委員	渡邊 力	日新製鋼(株) 建材総合開発室 住宅鋼材総合開発チーム 専門部員
委員	藤田 正則	日鉄住金鋼板(株) 建材開発技術部 建築技術グループ グループ長
委員	石丸 亮	日鉄建材工業(株) 建築商品開発部 商品開発グループ係長
委員	中川 治彦	日鉄住金建材(株) 建築商品開発部
委員	太田 克也	J F E 鋼板(株) 商品開発センター 加工商品開発室 主任部員 (課長)
委員	大隅 康令	(株) 淀川製鋼所 営業本部 本社建材部 開発グループ 建材開発チーム 課長代理 (チームリーダー)
委員	形山 忠輝	日本鑄造(株) エンジニアリング事業部 営業部 建築金物グループ 技術担当
委員	大室 彰男	日新総合建材(株) 塗装建材事業部 市場開発チームリーダー
協力委員	桑原 進	京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 准教授
協力委員	永野 康行	福井工業大学 建設工学科 建築学専攻 准教授
幹事	作本 好文	新日本製鐵(株) 建材事業部 建材開発技術部 部長
幹事	高井 正行	J F E スチール(株) プロジェクト営業部長
副幹事	猪砂 利次	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室長 (部長)

注 1 : 第一期活動開始以降、フォーラムへ正式に参画した委員は全て掲載しています。

注 2 : 所属機関、役職は、2007 年 11 月の研究発表会終了時点、途中退会した委員については退会時のものを掲載してあります。

注 3 : 幹事は、第一期と第三期は作本委員、第二期は高井委員が担当しました。

注 4 : 副幹事は第二期から設けられ、第二期は作本委員、第三期は猪砂委員が担当しました。

21 世紀鋼構造フォーラム幹事会

21 世紀鋼構造フォーラムでは、活動を効果的且つ効率的に運営するため幹事会を設置しました。委員には、同フォーラムに所属する産官学の代表者、各 WG の主査及び幹事等がその任を受けて幹事会運営に当たりました。

第一期は、シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」開催準備会が実質的な幹事会の役割を担い、第二期からは幹事会が正式に設置されております。

◎シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」開催準備会（2001.1～2002.11）

主 査	西山 功	独立行政法人建築研究所 建築生産研究グループ 上席研究員
委 員	大井 謙一	東京大学大学院 生産技術研究所 助教授
委 員	矢部 喜堂	清水建設㈱ 構造研究開発部 部長
委 員	三木 正久	社団法人日本鋼構造協会 次長
委 員	作本 好文	新日本製鐵㈱ 建材事業部 建材開発技術部 専門部長
委 員	植木 卓也	NKK 建材センター 建材技術開発部 建築建材チーム
委 員	石井 匠	JFE川崎製鉄㈱ 建材技術部 技術室主査
委 員	北濱 雅司	住友金属工業㈱ 鋼板・建材カンパニー 建材技術部 建築技術研究室

注：所属機関、役職は、活動全参加者の 2002 年 11 月のシンポジウム開催時点、途中退会した委員については退会時のものを掲載してあります。

◎第二期 21 世紀鋼構造フォーラム幹事会（2002.12～2004.11）

主 査	西山 功	国土交通省 国土技術政策総合研究所 住宅研究部長
委 員	矢部 喜堂	清水建設㈱ 技術研究所 副所長
委 員	金子 佳生	東北大学大学院 東北大学大学院 助教授
委 員	河野 守	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準研究室 室長
委 員	鈴木 隆生	JFEスチール㈱ 建材センター 建材技術部 建築技術室 係長
委 員	北岡 聡	住友金属工業㈱ 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 建築技術研究室
幹 事	高井 正行	JFEスチール㈱ プロジェクト営業部長
副幹事	作本 好文	新日本製鐵㈱ 建材事業部 建材開発技術部 専門部長

注：所属機関、役職は、活動全参加者の 2004 年 11 月の研究発表会開催時点、途中退会した委員については退会時のものを掲載してあります。

◎第三期 21 世紀鋼構造フォーラム幹事会（2004.12～2007.11）

主 査	西山 功	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部長
委 員	大井 謙一	神戸大学 工学部建設学科 教授
委 員	矢部 喜堂	清水建設㈱ 技術研究所 副所長
委 員	田村 和夫	清水建設㈱ 技術研究所 副所長
委 員	長谷川 隆	(財)日本建築防災協会 企画調査部研究課長
委 員	富岡 義人	三重大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 准教授

委員	辻 聖晃	京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 准教授
委員	金子 佳生	東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授
委員	渡邊 力	日新製鋼(株) 建材総合開発室 住宅鋼材総合開発チーム 専門部員
委員	関 光雄	(株)竹中工務店 東京本店 設計部 構造課長
委員	鈴木 隆生	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長
幹事	作本 好文	新日本製鐵(株) 建材事業部 建材開発技術部 部長
副幹事	猪砂 利次	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室長 (部長)

注：所属機関、役職は、活動全参加者の 2007 年 11 月の研究発表会開催時点、途中退会した委員については退会時のものを掲載してあります。

21 世紀鋼構造フォーラム WG 別参加者

21 世紀鋼構造フォーラムは、各研究のテーマごとに WG を設置して、研究活動に取り組みました。

第一期は、A、B、C のグループの活動参加者を掲載しております。

第二期は、WG 1、WG 3 のグループの活動参加者を掲載しております。WG 2 については、WG の委員構成の検討、調整をしている段階において、「革新的構造材料を用いた新構造システム建築物」研究開発プロジェクトと内容が重複するため WG 2 は設立しなかったため、名簿は掲載されておられません。

第三期は、4 つのグループの活動参加者を掲載しております。

各期ごとの委員異動については、21 世紀鋼構造フォーラム会合にて正式に手続きが承認された時点のものを掲載しており、委員の一部では前出の全参加者名簿に掲載されている所属、役職が異なっています。

所属、役職は、原則として第一期は 2002 年 11 月、第二期は 2004 年 11 月、第三期は 2007 年 11 月の研究発表会にて配布しました報告書に基づき記載しております。

◎第一期 (2001.6~2002.11)

A グループ：生きる建築へのアプローチ (2001.6~2002.11)

主査	金子 佳生	東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助教授
委員	長谷川 隆	国土交通省 国土技術政策総合研究所 主任研究員
委員	小野潤一郎	(株)日建設計 構造設計室
委員	大西 宏治	(株)大林組 東京本社 設計本部 設計部
委員	佐藤 芳久	大成建設(株) 設計本部 シニアエンジニア
幹事	植木 卓也	NKK 建材センター 建材技術開発部 建築建材チーム
幹事	形山 忠輝	J F E 日本鋼管(株) 基盤技術研究所 主任研究員

B グループ：進化する鋼構造 (2001.6~2002.11)

主査	向井 昭義	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 上席研究員
委員	辻 聖晃	京都工芸繊維大学 工芸学部 造形工学科 助教授

委員	荻野 雅士	(株)日本設計 構造設計群 構造設計部 主任技師
委員	澤本 佳和	鹿島建設(株) 技術研究所 主任研究員
委員	関 光雄	(株)竹中工務店 設計部 主任
幹事	石井 匠	J F E 川崎製鉄(株) 建材技術部 技術室 主査

Cグループ：解き放たれた鋼構造（2001.6～2002.11）

主査	河野 守	独立行政法人建築研究所 防火研究グループ 上席研究員
委員	富岡 義人	三重大学 工学部建築学科 教授
委員	斎藤 利昭	清水建設(株) 設計本部 設計長
委員	河村 克彦	(株)三菱地所 設計設計構造部 主事
委員	竹内 一郎	新日本製鐵(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員
幹事	北濱 雅司	住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 建築技術研究室

◇第一期委員異動

《入会》

2002年4月	大井 謙一	東京大学 生産技術研究所 助教授
2002年4月	富岡 義人	三重大学 工学部 助教授
2002年4月	金子 佳生	東北大学大学院 工学研究科 助教授
2002年4月	吹田 啓一郎	京都大学 防災研究所 助教授
2002年4月	形山 忠輝	日本鋼管(株) 基盤技術研究所 主任研究員
2002年8月	辻 聖晃	京都工芸繊維大学 工芸学部造形工学科 助教授

《退会》

2002年8月	吹田 啓一郎	京都大学 防災研究所 助教授
2002年11月	佐藤 芳久	大成建設(株) 設計本部 構造グループ プロジェクトリーダー

◎第二期（2002.12～2004.11）

WG1：これまでに挙げたテーマを具体化する活動をしていく（2002.12～2004.11）

主査	金子 佳生	東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 助教授
委員	向井 昭義	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室 室長
委員	辻 聖晃	京都大学工学部 都市環境工学専攻 助教授
委員	長谷川 隆	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員
委員	河村 克彦	(株)三菱地所設計 構造設計部 主事
委員	大西 宏治	(株)大林組 東京本社 設計本部 設計部 副主査
委員	関 光雄	(株)竹中工務店 東京本店 設計部 課長代理 構造担当
委員	羅 黄順	(株)計測リサーチコンサルタント 管理部企画開発室チーフエンジニア
幹事	高橋 英孝	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長
幹事	鈴木 隆生	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室 係長

WG2：安全・安心・長寿命などに特化したテーマを具体化する活動をしていく

WG 招聘者	西山 功	独立行政法人建築研究所 建築生産研究グループ 上席研究員
WG 招聘者	藤盛 紀明	清水建設（株） 常務執行役員 技術研究所長

総合科学技術会議のナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトチームの下、設置された革新的構造材料ワーキンググループ（主査：最上公彦）の招聘者として、21世紀鋼構造フォーラムのメンバー2名が参加した。フォーラム内にWGを設置して活動する予定であったが、府省連携プロジェクトとして別の体制で研究を開始することとなったので、フォーラム内でのWG活動は見送られた。

WG3：建築分野以外の既存鋼材、既存技術またはその応用技術を用いた建築物の提案を行っていく（2002.12～2004.11）

主 査	河野 守	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準研究室 室長
委 員	富岡 義人	三重大学 工学部建築学科 助教授
委 員	石原 直	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 基準認証システム研究室 研究官
委 員	小野潤一郎	㈱日建設計 構造設計室 主管
委 員	荻野 雅士	㈱日本設計 構造設計群 構造設計部 主任技師
委 員	斎藤 利昭	清水建設㈱ 設計本部 構造計画設計部第2部グループ長
委 員	澤本 佳和	鹿島建設㈱ 技術研究所 建築技術研究部 構造・耐震グループ 上席研究員
幹 事	北岡 聡	住友金属工業㈱ 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 建築技術研究室

◇第二期委員異動

＜入会＞

2003年7月	石原 直	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 基準認証システム研究室 研究官
2003年7月	高橋 英孝	JFEスチール㈱ 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長
2003年7月	北岡 聡	住友金属工業㈱ 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 建築技術研究室
2004年7月	高井 正行	JFEスチール㈱ 建材センター 建材技術部 建築技術室 室長
2004年7月	鈴木 隆生	JFEスチール㈱ 建材センター 建材技術部 建築技術室 係長
2004年7月	羅 黄順	㈱計測リサーチコンサルタント 管理部企画開発室チーフエンジニア

＜退会＞

2003年7月	石井 匠	JFE技研㈱ 土木・建築研究部建築チーム 主任研究員
2003年7月	形山 忠輝	JFE日本鋼管㈱ 都市工学研究部建築チーム 主任研究員
2003年7月	北濱 雅司	住友金属工業㈱ 鋼板・建材カンパニー 建材技術部 建築技術研究室
2003年12月	高橋 英孝	JFEスチール㈱ 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長
2004年7月	植木 卓也	JFEスチール㈱ 西日本製鉄所 設備部 開発・設計室 係長

◎第三期（2004.12～2007.11）

鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関するWG（2004.12～2007.11）

主査兼幹事	長谷川 隆	(財)日本建築防災協会 企画調査部研究課長
委員	小野潤一郎	(株)日建設計 構造設計室 構造設計主管
委員	荻野 雅士	(株)日本設計 構造設計群 構造設計グループ 主任技師
委員	斎藤 利昭	清水建設(株) 設計本部 構造設計部2部 グループ長
委員	河村 克彦	(株)三菱地所設計 構造設計部 参与
委員	竹内 一郎	新日本製鐵(株)建材開発技術部 建築建材技術グループ マネジャー

薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 WG (2004.12~2007.11)

主査	富岡 義人	三重大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授
委員	五十嵐規矩夫	東京工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻 准教授
委員	河野 守	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 建築品質研究官
委員	石原 直	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 基準認証システム研究室 主任研究官
委員	穂苅 實	ケイエムスリー建築・建材研究所 代表
委員	作本 好文	新日本製鐵(株)建材事業部 建材開発技術部 部長
委員	清水 信孝	新日本製鐵(株)技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員
委員	藤田 正則	日鉄住金鋼板(株) 建材開発技術部 建築技術グループ グループ長
委員	中川 治彦	日鉄住金建材(株) 建築商品開発部
委員	太田 克也	JFE鋼板(株) 商品開発センター 加工商品開発室 主任部員 (課長)
委員	大隅 康令	(株)淀川製鋼所 営業本部 本社建材部 開発グループ 建材開発チーム課長代理 (チームリーダー)
委員	大室 彰男	日新総合建材(株) 塗装建材事業部 市場開発チームリーダー
幹事	渡邊 力	日新製鋼(株) 建材総合開発室 住宅鋼材総合開発チーム 専門部員

テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の研究 WG (2004.12~2007.11)

主査	辻 聖晃	京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 准教授
委員	澤本 佳和	鹿島建設(株) 技術研究所 建築構造グループ 上席研究員
委員	北岡 聡	住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 建設技術部 建築技術研究室
協力委員	桑原 進	京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 准教授
協力委員	永野 康行	福井工業大学 建設工学科 建築学専攻 准教授
幹事	関 光雄	(株)竹中工務店 東京本店 設計部 構造課長

展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究 WG (2004.12~2007.11)

主査	金子 佳生	東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授
委員	大西 宏治	(株)大林組 東京本社 設計本部 設計部 副主査
委員	佐藤 芳久	大成建設(株) 設計本部 構造グループ プロジェクトリーダー
委員	宮本 則幸	(株)計測リサーチ企画開発部 部長

委員	形山 忠輝	日本鑄造(株) エンジニアリング事業部営業部 建築金物グループ技術担当
委員	関 光雄	(株)竹中工務店 東京本店 設計部 構造課長
幹事	鈴木 隆生	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室 副課長

◇第三期委員異動

《入会》

2005年11月	穂苅 實	ケイエムスリー建築・建材研究所代表
2005年11月	清水 信孝	新日本製鐵(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員
2005年11月	藤田 正則	日鉄住金鋼板(株) 建材開発技術部 建築技術グループ グループ長
2005年11月	石丸 亮	日鉄建材工業(株) 建築商品開発部 商品開発グループ係長
2005年11月	太田 克也	J F E 鋼板(株) 商品開発センター 加工商品開発室 主任部員(課長)
2005年11月	大隅 康令	(株)淀川製鋼所 営業本部 本社建材部 開発グループ 建材開発チーム 課長代理(チームリーダー)
2005年11月	渡邊 力	日新製鋼(株) 建材総合開発室 住宅鋼材総合開発チーム 専門部員
2005年11月	宮本 則幸	(株)計測リサーチコンサルタント 企画開発部 部長
2006年7月	五十嵐規矩夫	東京工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻 助教授
2006年7月	大室 彰男	日新総合建材(株) 塗装建材事業部 市場開発チームリーダー
2006年7月	桑原 進	京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 助教授
2006年7月	永野 康行	福井工業大学 建設工学科 建築学専攻 准教授
2006年7月	形山 忠輝	日本鑄造(株) エンジニアリング事業部営業部 建築金物グループ技術担当
2006年7月	佐藤 芳久	大成建設(株) 設計本部 構造グループ プロジェクトリーダー
2006年7月	猪砂 利次	J F E スチール(株) 建材センター 建材技術部 建築技術室長(副部長)
2003年7月	矢部 喜堂	清水建設(株) 技術研究所 副所長
2006年7月	田村 和夫	清水建設(株) 技術研究所 副所長
2006年11月	中川 治彦	日鉄建材工業(株) 建築開発技術部 商品開発グループ係長
2007年5月	永野 康行	福井工業大学 建設工学科 建築学専攻 准教授

《退会》

2005年11月	羅 黄順	(株)計測リサーチコンサルタント 管理部企画開発室チーフエンジニア
2003年7月	高井 正行	J F E スチール(株) プロジェクト営業部長
2006年7月	矢部 喜堂	清水建設(株) 技術研究所 施設基盤技術センター所長
2006年11月	石丸 亮	日鉄建材工業(株) 建築商品開発部 商品開発グループ係長
2007年1月	大井 謙一	神戸大学 工学部建設学科 教授

第3章 第一期の活動成果

3.1 21世紀鋼構造フォーラムAグループ提案—生きる建築へのアプローチ

- ①生きる建築物へのアプローチ（その1）建築は考える葦となりうるか
- ②生きる建築物へのアプローチ（その2）鋼構造への適用と技術的検証

20世紀まで完成に至らなかった建築の進化した姿について、（その1）で人間の機能を建築に置き換えたとき、どのような発展性が残されているかを検討し、（その2）では「生きる建築」のうち、「色彩可変」「自己診断」「自己修復」「可動」について、現時点で鋼構造への適用性が高いと思われる現状技術を検証した。

以下に「生きる建築」のイメージを要約する。

- (1)表情：色変化のある材料、魅せる接合
- (2)治癒（自己保存）能力：自己修復、損傷をセンサーにより感知・補修、水の循環や Sensor による温度調節
- (3)動く：用途変化に対応、転倒防止機能、外力低減、建築または人工地盤を宙に浮かすアクティブ免震、伸縮・着脱
- (4)エネルギーの蓄積及び地域共有：外壁風力発電・地震動・落雷のような自然エネルギーを蓄積
- (5)その他：ナノテクノロジーを利用した高強度で軽量の鉄、炭素繊維を利用した高強度部材、4次元CADによる仮想建築、リユースを想定した材料・構法の規格化・ユニット化

「生きる建築」があり、個々の機能が発展して、特徴をもった建築が有機的に効率よく連動することが可能になれば、地域としてさらによいものが得られるはずである。これまで個別に発展してきた耐震、耐風技術は、そのまま特定地域の（人工または天然の）地盤に対して応用することで、建築の新しい形が生まれる。これを「地域防災制御システム」と定義すると、地域での防災制御だけでなく、エネルギー共有、さらには個々の構造体の単純化という、新しい建築の創生まで発展していく可能性を秘めたものになる。

生きる建築へのアプローチ (その1) 建築は考える葦となりうるか

21世紀鋼構造フォーラムグループA

生きる	表情	治癒
動く建築	エネルギー循環	地域防災

1. はじめに

1.1 21世紀とは

地球は46億年前に誕生し、その5億年後に生命の源となる海ができた。更にその5億年後の36億年前のはるか昔に生命が誕生したのである。人類の誕生は数百万年前であり、生命の誕生からすればはるかに短い期間である。今を生きることにすべてがあるわけではない。長い生命の歴史からすれば今我々の生きている21世紀はほんの一瞬である。しかしそれは「遠い未来へ生命を受け渡す重要な瞬間」である。

1.2 建築技術の発展

様々な機械の発明による産業革命に端を発する大量生産技術とその供給体制の確立により、建築物の主要構造材料である鉄(鋼)及びコンクリートが、今日まで建築構造用材料の主流として使用されてきた。この発展を象徴とする20世紀に対し、21世紀の建築はどのような形で発展していくのか。

本論では、20世紀では完成に至らなかった建築物の進化した姿について、その1では人間の機能を建築に置き換えたとき、どのような発展性が残されているか、その2ではそれらのうち、鋼構造建築物に適用可能な機能について技術的検証を行う。

2. 現在の建築技術

2.1 地球と建築物

建築物とは本来、無機なるものであり、人間を含めた生物は有機なるものである。しかし、地球は無機物の集まりでありながら、それ自身がエネルギーを蓄え、まだ明らかにされていない機能を有している、いわば「擬似生命体」である。これまで、地球はこうしたエネルギーや豊富な資源を、我々地球上に存在する全てのものに対して提供し続けてきた。つまり、長年にわたり、地球上にあるすべてのものは、地球と共存してきたのである。

2.2 環境への対応

地球上の生物は、環境変化に対応していくために、時間をかけて進化を繰り返して生存し続けてきた。しかし急激な進化を行うことは難しいため、その代わりに、建築を含む技術を進歩させることで、大自然の脅威から身を守ってきたのである。その結果副作用として、地球環境を悪化してきたことに気がついてきた。

2.3 既存概念からの脱却と生きる意味

建築物は無機なるものである限り、擬似生命体である地球の発する大自然の脅威、その代表格である

地震や台風、洪水などに対して、受け身の存在でしかありえない。擬似生命体との関係をうまく保つためには、建築物を「無機なるもの」から「擬似生命体」に昇格させるという、これまでとは違った概念を建築物に持たせる必要がある。

建築物は、これまでの既成概念から解き放たれることにより、大いに進化する可能性を秘めている。

3. 21世紀の処方箋 「生きる」

3.1 Thinking Reed 概念の導入

生物と無生物は、「自己複製」と「物質とエネルギーの代謝」を行なう点で区別できるとされている。生物は自らの意志によって活動(Action)を起こすことにより、受け身としての存在からの脱却を図ることができる存在である。ただ生きながらえるのではなく、「知性を持った擬似生命体」として生きる建築物の未来像を想定し、論じていく。

21世紀は、前世紀の「機械文明」から「知能/環境文明」への転換の時期である。建築にも動物や植物のように「生きる」ものとして魂を吹き込み「生きる」状態の具現化を図る。動かない財産「不動産」と呼ばれる建築物は本当に動けないのか。建築物は、人間が家族との共同生活を行うように、ごく一般的に協力しあって成立することはできないのか。

これらを解決するための1つの方法として、人間の機能に置き換えて建築物を考えること、すなわち、建築物を我々人間と同じく、「生きる」ものと捉えることを試みる。

3.2 「生きる」建築物の機能構成

建築物を機能毎に図1及び以下のように分類する²⁾。

- | | |
|-----------------|------------|
| ①外殻 (Skin) | : 内外分離機能 |
| ②主架構 (Backbone) | : 恒久機能 |
| ③内部空間 (Organs) | : 変容機能 |
| ④付加装置 (Fuse) | : 損傷制御機能 |
| ⑤損傷探知 (Sensor) | : 情報感知伝達機能 |
| ⑥生きる (to Live) | : 擬似生命体機能 |

20世紀までの建築物は、Skinにより建築物と周囲との環境を分離し、かつデザイン性を持たせ、Backboneにより恒久的な安全性を確保し、Organsを持つサブストラクチャーにより内部の空間を自由に変容させ、Fuseにより損傷を制御することまでが可能であった。

21世紀の「生きる」建築物は、今までの建築物の機能に加え、活動するためのエネルギーを自然界から受容し Organs に蓄え、外部からの情報を検知し、内部の損傷を感知伝達する Sensor を備え、更

には Fuse をよりパッシブに機能させることで外乱に対し建築物の損傷を制御する。これらの機能を備えることで、あたかも生命を与えられたような擬似生命体「生きる」建築物が構築される。我々が産み出した 21 世紀の「生きる」建築物は、我々に対してこれまでにない可能性を提供してくれるはずである。

4. 未来の技術

4.1 未来の建築技術

「生きる」建築物のイメージを図 2 に示す。

(1) 表情のある建築物

- ・光、風、音、熱、応力等に応じて色変化のある材料（装飾的、損傷・疲労度の明示）
- ・「魅せる」接合

(2) 治癒（自己保存）能力をもった建築物

- ・自身で損傷を感知し、修復する自己修復システム（形状記憶合金、インテリジェントコンクリート）
- ・損傷をセンサーにより感知し、補修をうながすシステム（色変化・ひずみ感知塗料、複合材）
- ・水の循環や Sensor による温度調節システム

(3) 動く建築物

- ・形状変化によって用途変化に対応する建築物
- ・2 足歩行ロボットのような重心移動による転倒防止機能をもった建築物
- ・風に対し翼の形状や角度を変化させることで外力低減できる建築物
- ・センサーにより外力を感知し、リニアモーター等の超電導により建築物または人工地盤を宙に浮かすアクティブ免震システム
- ・伸縮・着脱が容易な構造物

(4) エネルギーの蓄積および地域共有

- ・外壁風力発電のような自然エネルギーを効率よく蓄積するシステム
- ・地震の振動エネルギーをコントロールすることによりエネルギーを蓄積するシステム
- ・落雷エネルギーの蓄電システム
- ・人工地盤上に建築物を構築することによる地域防災制御システム

(5) その他

- ・ナノテクノロジーを利用した高強度かつ軽量の鉄
- ・炭素繊維を利用した高強度部材（複合部材）
- ・4 次元 CAD による仮想建築システム
- ・リユースを想定した構法・材料の規格化、ユニット化

4.2 未来に向けて

ここまで生きる建築物単体の可能性を示した。生きる建築物があり、個々の機能が発展して、特徴をもった建築物が有機的に効率よく連動することが可

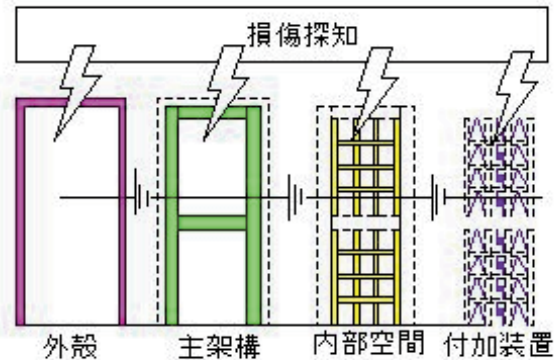


図1 生きる建築物の機能構成

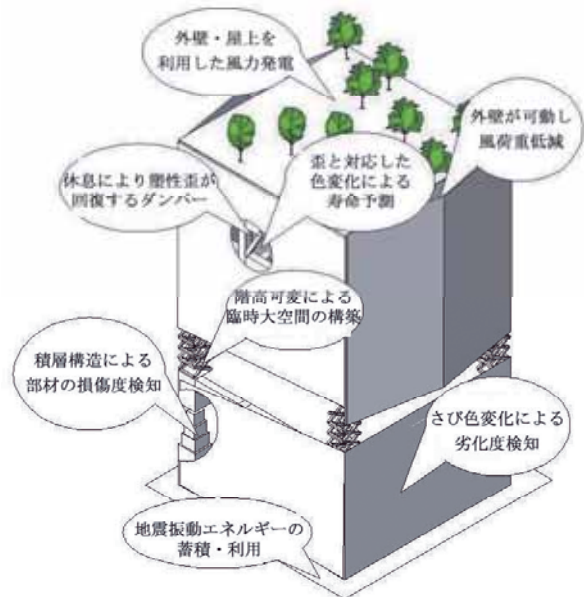


図2 「生きる」建築のイメージ

能になれば、地域としてさらによいものが得られるはずである。これまで個別に発展してきた耐震、耐風技術は、そのまま特定地域の（人工または天然の）地盤に対して応用することで、建築物の新しい形が生まれるものと推測できる。これを地域防災制御と呼ぶことにすると、これは、地域での防災制御だけでなく、エネルギー共有、さらには個々の構造体の単純化、というところまで発展していく可能性を秘めたものになるであろう。

参考文献

- 1) 鈴木啓三：エネルギー・環境・生命－ケミカルサイエンスと人間社会－、化学同人、1990
- 2) Organic Structural System Utilizing Mega-Sub Control Mechanism : Akira MITA and Yoshio KANEKO, A New Direction in Seismic Design, Tokyo, 9-10 October 1995

生きる建築へのアプローチ (その2) 鋼構造への適用と技術的検証

21世紀鋼構造フォーラムグループA

色彩可変
可動構造

自己診断
塗 装 材

自己修復
複合部材

1. はじめに

その2では、その1で提案された「生きる建築のイメージ」で示されたシステムのうち「色彩可変」「自己診断」「自己修復」「可動」について、現時点で鋼構造への適用性の高いと思われる現状技術の検証と適用可能性について述べる。

2. 色彩可変

2.1 色彩可変システムの提案

外乱（地震、風、積雪、熱、光等）に反応して、鋼材の表面の色を変化させることができれば、様々な用途での利用可能性が生まれる。構造物を対象と考えるならば、構造安全性検知としての利用可能性や装飾効果としての利用が考えられる。

しかし、応力等に反応して鋼材自体の色を変化させるのは、現状技術では、かなり困難なものと考えられる。一方、様々な外乱に対して色や形が変化する塗料や、鋼材の表層面に様々な機能を持たせた材料を接着させて複合部材（または合金）として同様の機能を持たせる方法は、実現の可能性が比較的高いと考えられる。

以下に、塗装材及び複合部材に関する技術的検証とさびの発色の利用可能性について述べる。

2.2 現状技術的検証と適用可能性

2.2.1 塗装材による損傷（応力）検知

文献1)では、地震後の鉄骨部材の損傷程度を、さび止め塗料の剥離状況により推定可能かどうか調べている。0.2%程度のひずみから塗料の剥離が観察され、損傷を受けていることは把握できるが、ひずみ量を正確に同定するのは現状では、やや困難と思われる。さび止め機能以外に、ひずみ検知としての機能も持つ塗料（剥離開始のひずみが異なる塗料）を開発すれば、それを梁端部等の損傷を受ける部位に数種類塗布することで、ひずみ量をより正確に検知できるようになる（図1参照）。

2.2.2 表層面に別の材料を接着させた複合部材

フィルムやシート等の添付または接着による複合材を開発し、表層面には鋼材では実現できない機能を持たせることによって、部材の色彩可変機能を代替できると考えられる（図1参照）。このような複合部材では、ひずみや熱に対して何らかの変化が視覚によって確認できる材料を接着させることで対応させることになる。この材料に、太陽光を吸収させて、夜、発光させるというようなことは、可能性があると考えられる。このような複合材は、ひずみ検

知や装飾効果以外にも、補強材としての使い方も考えられ、床振動音減衰材としての複合部材は、すでに実用化されている。

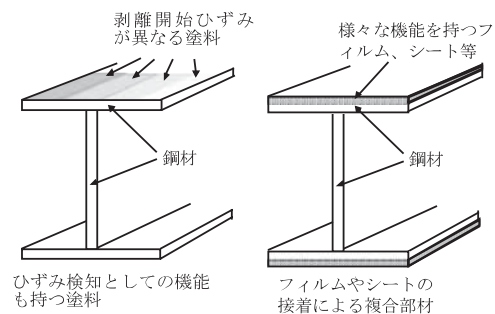


図1 塗料、フィルム等による損傷検知

2.2.3 さびの色の制御

鋼材に発生するさびの色として、白、黒、黄、淡褐色、オレンジ、赤、褐色、緑などがある²⁾。1つの鋼材で、年数を経るとともに、これらの色を次々と発色させることができれば、装飾効果や、より詳細な経年劣化検知に利用できる可能性がある。

3. 自己診断

3.1 自己診断システムの提案

柱、梁、床、壁といった構造体の疲労度や損傷度を検知するシステムがあれば、たとえ仕上げ材で覆われていても、迅速かつ信頼性の高い検査が可能となる。これにより、大事故になる前に検知した状況に応じた補強措置や適切な安全対策を施すことができる。

3.2 現状技術的検証と適用可能性

すでに航空機の外壁パネル等に用いられている技術で、複合材積層板の層間に格子状の光ファイバーセンサーを配置している³⁾。光ファイバーセンサーは、温度・ひずみに敏感で、耐電磁干渉性にも優れる。他に、損傷発生に伴う動的現象への応答に優れた圧電セラミックスや多点の情報を利用して損傷位置の特定を行う piezo（圧電）フィルム等がある。また、磁場や電場をかけると見掛けの粘性が増大する性質をもった磁気・電気粘性流体も制御機能をもたせるのに有効である。圧電材料等で自然エネルギーによる発電機能を持たせたり、内部層に、粘性流体をいれて減衰を調整したり、図2に示すように透水層を設け水を循環させることで耐火被覆や断熱を不要とするなど、積層構造の各層に様々な機能を併せ持たせることで幅広い利用が可能となる。

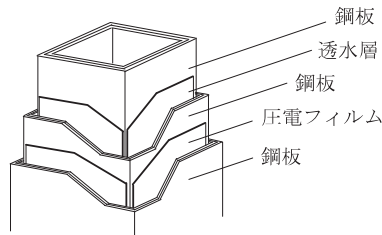


図2 鋼管柱への適用

4. 自己修復

4.1 自己修復システムの提案

地震時に鋼部材に発生するひずみを除去したり、亀裂や破断を防止できるような機能を材料自体に持たせることができれば、鋼構造物の耐震設計に対して、極めて有効な手段となりえる。ここでは、そのような特性を持つ鋼材について紹介し、その適用可能性を探る。

4.2 現状技術の検証と適用可能性

4.2.1 トリップ鋼

図3に示すようにトリップとは、室温で、原子の結晶構造としての準安定のオーステナイト（面心立方格子）が、引張によりくびれが生じて、マルテンサイト（体心立方格子）に変わる（加工誘起マルテンサイトと呼ぶ）現象である⁴⁾。それによって、くびれた部分の強度が増加し、そこでは変形が進行せず、他の部分で変形が進行し、結果として大きな均一伸びが得られる。

このような性質の鋼材を、地震時に塑性化する部分の構造用の鋼材として利用することによって、大きな耐力と変形能力が得られ、これまでよりも経済的な断面設計への可能性が考えられる。

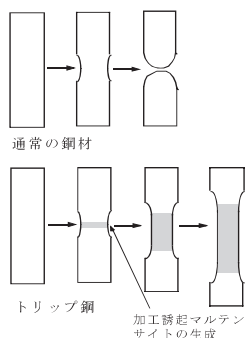


図3 トリップ鋼の概念図

4.2.2 形状記憶合金

形状記憶合金を構造物の耐震要素として利用するための研究はすでに進んでいる。材料特性⁵⁾、筋かい⁶⁾、半剛接合部のボルト、梁の主筋及びアンカーボルトとしての利用可能性等が検討されている。現状では30mm程度の径が最大である。より大断面での製造が、利用拡大につながると思われる。これらの部材が、大地震で塑性化した後にひずみが除去

されれば、エネルギー吸収部材として大きな効果が期待できる。

5. 可動

5.1 可動システムの提案

建物の形状を変化させることができれば、受光面を常に太陽に向けたり、図4に示すように受風面を調整して建物に作用する外力を低減したり、用途に応じて階高やスパンを変化させる等様々な利用可能性が広がる。

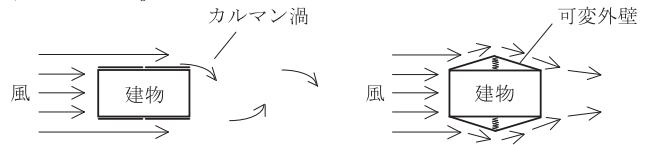


図4 可変構造の適用

5.2 現状技術の検証と適用可能性

小さく折りたたんで大きく展開できるシザースシステム⁷⁾やトラスの一部が伸縮する可変形状トラス⁸⁾等の形状を変化させることのできる既存技術は確立されているが、規模が大きくなり荷重条件が厳しくなると、動力部の納まりと部材剛性および強度の確保が必須条件となり、如何に適用していくかが今後の課題であると考えられる。

また、増築や改修工事においてエレベータ等の部材搬入路の制限を受けることが多く、仮設部材だけでなく本設部材に対しても、コンパクトに折りたたんで使用場所で大きく広げる技術の適用は新たな施工方法に結びつくものと考えられる。

6. まとめ

現状技術に着目し、実現性のあるものとして「生きる鋼構造」の幾つかの提案を示した。今後は、ナノテクノロジーの発展により新たなインテリジェント材料が開発され、よりヒューマンライクな利用法が実用化されることを期待する。

参考文献

- 1) 西山功、他：さび止め塗装の剥離状況による鋼材の損傷度評価、日本建築学会大会梗概集 C-1、pp315-316、1999.9
- 2) 三澤俊平：さびサイエンスと耐候性鋼さび層研究進歩、ふえらむ Vol.6(2001)No.5
- 3) 日本機械学会編：「インテリジェント技術 材料・構造」、日刊工業新聞社
- 4) 牧正志：鋼の加工熱処理の最近の動向、熱処理 37 巻 1号、平成9年2月
- 5) 福田俊文、北川良和、守護嘉朗：Ni-Ti系形状記憶合金の応力歪み特性、鋼構造年次論文報告集、第9巻、pp141-144、2001.11
- 6) 大井謙一、他：超弾性筋かい・履歴型ダンパー併用構造の耐震性能、鋼構造年次論文報告集、第9巻、pp397-404、2001.11
- 7) 日経BP社：「日経アーキテクチャー 2002.8.19」
- 8) 井上文宏、栗田康平、古屋則之、汐川孝、名取通弘：可変形状トラスを用いた可動型構造物の適用実験、第9回建設ロボットシンポジウム論文集、pp.259-266、July 2002

3.2 21世紀鋼構造フォーラムBグループ提案—進化する鋼構造

①着脱可能な接合部の探求

②次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案

「進化」のキーワードに対する具体的な構造性能を、階高・床面積・建築物の高さの変更を可能とする性能または再利用を可能とする性能であると考えた。そしてそれらを実現する技術・工法は、架構の組み立て作業および解体作業を容易にするものつまり接合に工夫を凝らしたものとすることが必須であろう。

そこで、他分野における着脱可能な接合部の鋼構造建築部への適用可能性を検討すると共に着脱可能な接合方式を有する新鉄骨架構の提案を試みた。

着脱可能な接合部の探求

21世紀鋼構造フォーラムグループB

地球環境
接合

進化
着脱可能

可変性
解体

1. 緒言

1.1 背景

建築は地球環境に多大な負荷をもたらしており、その改善が強く求められてきている。建築には実現、運用、除却などに関わる営みを多く含んでいるため、地球環境を保全するために克服すべき課題は多い。

2000年6月に日本建築学会等が「地球環境・建築憲章」を発表している¹⁾。21世紀の建築創造に対する以下の5つの目標を掲げ、取り組むことを宣言したものである。

1) 長寿命, 2) 自然共生, 3) 省エネルギー, 4) 省資源・循環, 5) 継承

上記目標のうち、1)と4)については構造が果たせる役割がとくに大きいと考えられる。本論文では、この目標を達成するために必要となる、鋼構造建築における接合部の「進化」の可能性について考えてみたい。

1.2 “進化”の方向性・手段

建物の寿命は、社会環境の変化や用途変更によって決まる場合が多く、「長寿命化」する場合はこのことを考慮する必要がある²⁾。具体的には、階高・床面積・建物高さの変更を可能にすることである。一方、仮設シアターやショッピングセンター、テナント商業ビル等の中には、使用期間を短く限定した建物が多く、その要求される使用期間、機能、性能等に応じて、「再利用化」できる場合もある³⁾。したがって、拡張や再利用を考慮した、現状よりも「進化」した技術・工法が必要となる。例えば、目標1)と4)を達成するために必要な技術として、柱・梁骨組の組立作業および解体作業を容易にすること、つまりは、部材と部材をつなぐ「接合」に工夫を凝らすことが挙げられる。

現在の鋼構造・鋼製品における接合の方法は、機械的接合、溶接および接着など図1に示すように多岐

にわたっている。どの接合方法を採用するかは対象となる部品の形状、材質あるいは表面状態などから選択されている。鋼構造建築分野の接合では、溶接に属する融接と機械的接合に属するボルト接合が主流となっている。ただし、これらの接合方法は接合部の解体容易性を必ずしも考慮したものはなっていない。さらに、溶接については、溶接工の高齢化に伴う人員不足、ボルト接合については、接合部の重量増加等の大きな問題を抱えている。

一方、「進化した」新しい接合方法に考慮しなければならない性能は、作りやすさ・外しやすさなど”施工時”に求められるものと安全・安心など出来上がった”製品（接合部）”に求められるものに分けられる(図2)。目標1)と4)を達成するためには、前者に重きを置くことになる。すなわち、前述のように組立作業および解体作業を容易にすること＝”容易に着脱可能な接合”とすることが、鋼構造建築の接合部を「進化」させるための重要課題となる。

そこで以下では、着脱可能な接合技術をいくつか取り上げ、定性的に評価するとともに、鋼構造建築分野への適用可能性について検討する。

2. 着脱可能な接合部

2.1 着脱可能な接合技術

他の分野で行っていることを真似ることは、自分の分野では独創となりうる。そのような観点から他分野における”着脱可能な”接合技術を調査し、鋼構造建築分野への転用・応用が可能かどうかについて検討し、新しい接合方法への”進化”の足掛かりとした。

他分野技術を探索した結果、具体的な技術として表1に掲げるものが見つかった。それらの技術は「嵌合系」、「摩擦系」、「接着系」の3つに分類できる。なお、他にも適用が可能と考えられる技術もあった

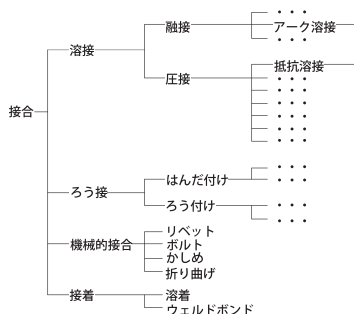


図1 接合の種類

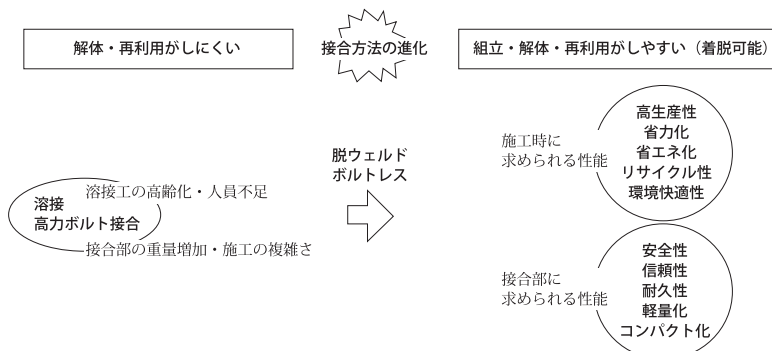


図2 建築分野の「接合方法」の進化

が、建築物に導入した際に重大な障害を引き起こす可能性が考えられるものは除外した（例えば、「マグネット」は電波妨害を起こす可能性がある）。

2. 2 接合部の評価

表1に示した他分野における接合技術を、「構造適応性」と「現場適応性」の2つの観点から評価する。

「構造適応性」については、適用する接合形式を図3のように想定し、評価を行った。Type-Aは継手タイプの接合を、Type-Bは仕口タイプの接合を、Type-Cは床材・壁材などの面材と柱材（梁材）の接合を想定している。それぞれのTypeの接合形式に対して表1の接合技術には構造的な見地から得手・不得手があるが、その適応性をまとめると表2のようになる。

続いて「現場適応性」について示す。表4に、各接合技術を表3に示した評価基準に基づいて評価したものを示す。また、それぞれの特徴および適用接合形式も同表に合せて示した。なお、各接合要素の評価ポイントは当グループの委員（6名）が各評価項目に対して3段階評価（良い：3点、普通：2点、悪い：1点）したポイントの平均点である。

評価が高い接合技術は「ワンタッチコネクタ」、「締付けリング」、「ホック」でいずれも「嵌合系」の接合部であった。これらの接合技術を想定する接合形式に対して適宜組合せて適用すれば、目標1）、4）の

目標に叶った接合部が実現できると考えられる。一例として、「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案」論文で示される、建物形状に可変性を持つ新鉄骨架構への適用が挙げられる。

3. まとめ

建物の組立・解体を考慮し、着脱可能な接合技術をいくつか取り上げ、定性的に評価を行った。その結果、「嵌合系」の接合技術が評価が高く、適用範囲が広いことがわかった。

参考文献

- 1) 地球環境・建築憲章委員会：「地球環境・建築憲章」パンフレット，2000年6月
- 2) 日本機械工業連合会・日本鉄鋼協会：平成11年度 循環型社会における金属系材料の在り方に関する調査研究報告書，2000年3月
- 3) 平石澄夫，飯塚信一，齋藤美佐男：「西松式リユース鉄骨工法（N-RUSS工法）の開発，鉄構技術，Vol.15，No.172，pp26-pp30，2002年9月
- 4) 日経アーキテクチュア2002 5-27：プロジェクトナビ「邑楽町庁舎は山本理顕氏の伸縮自在なシステムに」，第719号，pp32，2002年5月

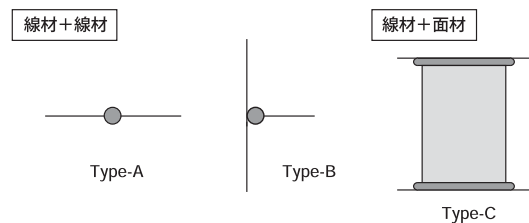


図3 想定する接合形式
表3 評価基準

表1 着脱可能な接合技術

嵌合系	ワンタッチコネクタ	ホック	ジッパー	マジックテープ	締付けリング
摩擦系	締付けリング	圧着ベルト			
接着系	はんだ	粘着テープ			

表2 想定する接合形式への構造適応性

		嵌合系	摩擦系	接着系
接合形式	Type-A	適	適	不適
	Type-B	適	適	不適
	Type-C	適	可	適

表3 評価基準

接合部に関する評価基準	具体的項目
①施工性	スキルレスである。管理項目が少ない。着脱が容易である。
②環境条件作用	油脂類・溶剤に耐える特性を持つ。耐熱性、耐水性、耐腐食性がある。
③検査	検査が容易かつ確実に行える。

表4 各種着脱可能な接合技術の現場適応性

	ワンタッチコネクタ	ホック	ジッパー	マジックテープ	締付けリング
1) 施工性	3.0	3.0	3.0	2.7	3.0
2) 環境条件作用	3.0	3.0	3.0	2.7	3.0
3) 検査	3.0	3.0	3.0	2.7	3.0
特性	ワンタッチコネクタは、簡単に着脱できる。また、施工性が高い。また、環境条件作用に強い。また、検査が容易かつ確実に行える。	ホックは、簡単に着脱できる。また、施工性が高い。また、環境条件作用に強い。また、検査が容易かつ確実に行える。	ジッパーは、簡単に着脱できる。また、施工性が高い。また、環境条件作用に強い。また、検査が容易かつ確実に行える。	マジックテープは、簡単に着脱できる。また、施工性が高い。また、環境条件作用に強い。また、検査が容易かつ確実に行える。	締付けリングは、簡単に着脱できる。また、施工性が高い。また、環境条件作用に強い。また、検査が容易かつ確実に行える。
適用接合形式	Type-A, B	Type-A, B	Type-A, B	Type-A, B	Type-A, B

次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案

21世紀鋼構造フォーラムグループB

可変性
接合

持続性
360度

着脱可能
ユニット化

1. 緒言

成熟化社会を迎えた21世紀となった現在、地球環境負荷低減における対応は、個人レベル以上に生産者企業が主体となって取り組むべき大きな課題である。その対応に呼応するように建設業界も大きな転換期にあり、図1に示すように建築物に対する社会的概念が「A」から「B」に変化している。この変化は、環境負荷低減と同時に、建築物が社会的変化の乏しい中での不動産価値であったものを、多様な社会変化に対して時間軸を有した動産価値として評価していく意識の表れとも考えられる。

一方、建築物における構造体は、基本的には「要素」（種々の材料）を「加工」して「結合」（鉄骨造においては溶接等、コンクリート造においては鉄筋を含むセメントの硬化）するという構成方法に還元できる。そこでこの3つの構成方法の中から図1の「B」の概念を有し、環境負荷低減・動産価値評価の観点から、従来の技術を革新する効果的な着目点と考えた場合、「接合方法」が第1にあげられる。特に鋼構造建築物においては、溶接・ボルト接合が一般的で、逆にそのことが21世紀の課題解決を阻むと予想される。他分野を含めた接合方法の分析は、「着脱可能な接合部の探求」の論文において建築分野における応用を示唆しているので参照することとし、本論文では、次世代接合部を含めた実現可能な新鉄骨架構の提案を試みる。

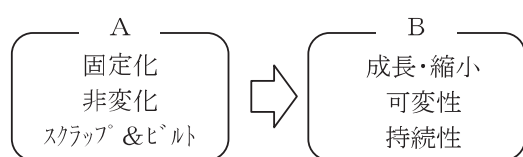


図1 建築物に対する社会的概念の変化

2. 提案

2.1 次世代接合を含む架構への要求について

次世代接合部を含む架構への要求は上記「B」の概念を満足するものと考えると以下のような項目があげられる。

- ・容易な接合と同時に分解可能
- ・架構形態の自由な構成が可能
- ・単位部材によるシステム構成
- ・運搬・施工の容易性
- ・部材の伸長・縮小性
- ・軽量化

以上の項目はお互いに独立した項目ではなく、求める具体案は、同時に満足するものでもあり、また、矛盾を解決するものが求められる。例えば、ユニット化により通常、部材の生産性・再利用が考えられるが同時に平面プランの許容自由度・可変性が失われる。

2.2 接合部と架構体の提案

本論文で提案する架構を図2に示す。名称は、「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構」（略称NUS架構）とする。NUS架構の特徴の項目と、その主要内容を下記に示す。

- ・柱中央部ピン接合
- ・テーパー鋼管柱
- ・360度方向大梁接合
- ・リング嵌合接合
- ・仕口鋼管と柱のねじ留め接合
- ・スラブと大梁の接着接合
- ・最小限の構成要素

柱中央ピン接合方式は、従来の接合位置と考える端部ではなく、階高の中央とすること、さらにメタルタッチとすることで大きな効果が得られる接合方式である。まず中央とすることで、水平力によって生じる曲げモーメントの反曲点位置（ $M=0$ ）が必然的に中央部となり応力の均等化が図れる。従って計算不要の可能性と同時に断面標準化による部材の規格化ができる。また、応力分布に応じて高強度鋼材を用いたテーパー鋼管とすることで、材料の軽量化、柱のデザイン化が図れる。また、最近増加しつつある建築物の用途変更に応じる階高拡張も、接合部のかさ上げにより容易に対応できる。

次に仕口部の接合方式について述べる。まず大梁には端部に曲面エンドプレートをあらかじめ接合しておく。一方柱仕口部鋼管には一回り直径の大きい下部リングプレートがあり、このすきま部分に大梁のエンドプレートを上から差込み嵌合し、その上からさらに上部リングプレートをかぶせる。この接合方式により、大梁の取り付け方は360度方向を可能とする。従って柱位置も非グリッド上で問題なく架構構成でき、建築平面形態の自由度は、大幅に大きくなる（図3）。また、嵌合接合であるため、着脱・解体は容易となる。

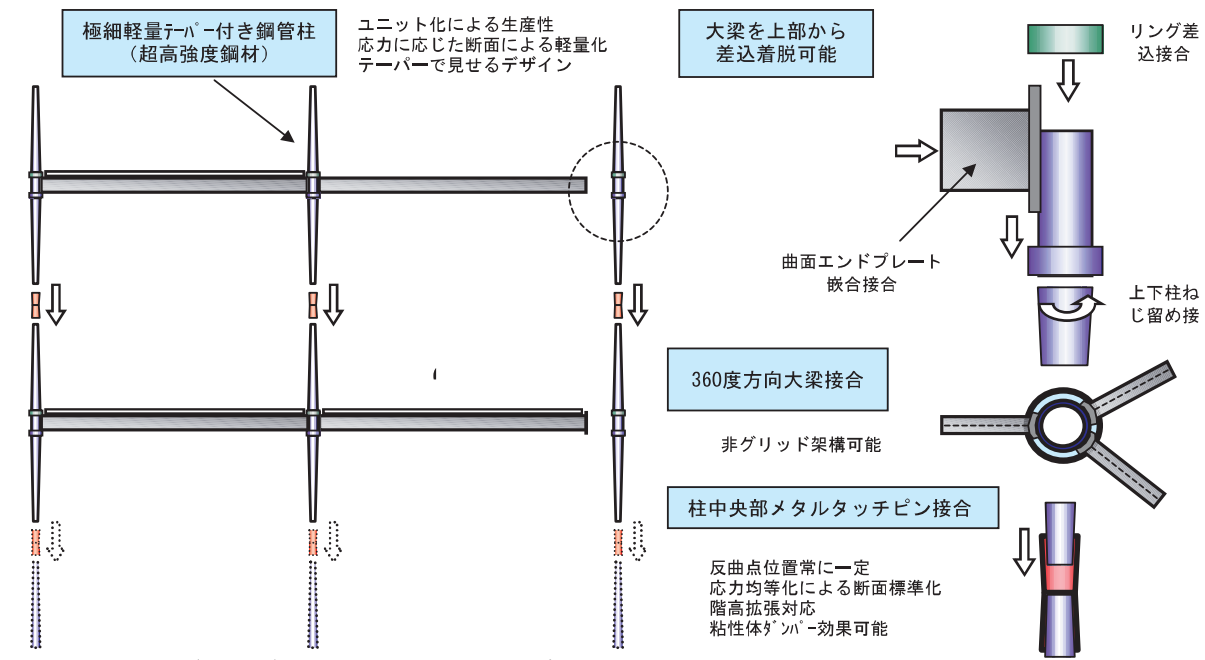


図2 次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構

2. 3 予測される効果

予想される効果を以下に示す。

- ・環境負荷低減としての建築物として、着脱式接合方式による解体・再利用が容易となり、資源循環化が増大できる。また、そのことによりイニシャルコストも大幅に低減される。
- ・動産価値評価としての建築物として、増築、減築、移築、階高変更、平面プラン形態の変更が容易になり、資産価値が増大、また、事業計画の変更にも対応、経済市場を拡大する。

2. 4 応用可能性

本提案に対し応用提案を以下に示す(図4)。

- ・伸縮柱
テーパ鋼管の円錐形状を利用、コップ形態の入れ子状態で運搬し、建設現場で上方に引き伸ばし、構築する伸縮性を有する柱の提案。仮設建築物など、移築の多い場合に有効である。
- ・伸縮大梁
伸縮柱と同様に大梁断面を角形鋼管とした上に、入れ子状態で運搬し、引き伸ばす大梁の提案。
- ・フラットパネルとの組み合わせ
図のような単位要素のフラットパネルを組み合わせ柱に接合する提案。大梁はなく、正方形・正三角形のパネルをプレストレス(P S)等で締め付ける方法とする。
- ・教育模型
学生にラーメン架構を教える場合、現在適切な模型がない。このNUS架構の縮小版であれば模型材料として使用できる。

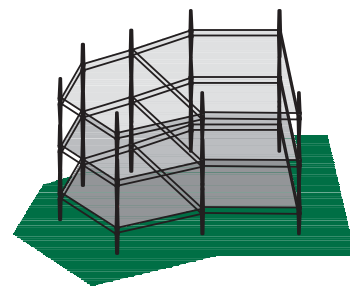


図3 ネットワーク型架構

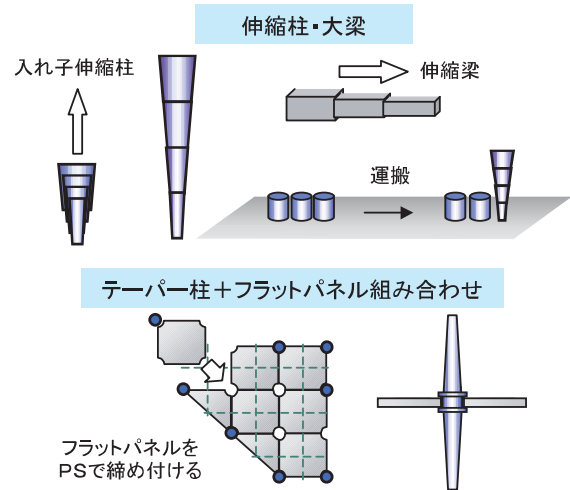


図4 応用提案

3. まとめ

- ・地球環境対応に伴い、建築物に対する社会概念の変化(可変性、持続性)に対応する、新しく進化した鉄骨架構の提案を試みた。
- ・着脱方式となる接合方式に着目し、自由な架構形態が構成でき、単位部材によるシステム架構となる「NUS架構」が提案できた。

3.3 21世紀鋼構造フォーラムCグループ提案—解き放たれた鋼構造

①解き放たれた鋼構造 — スティール・メゾンリー

②産業用建築物ユニットのケーススタディ

2つの意味で「解き放たれた」鋼構造を模索した。1つは「市民に」解き放たれたであり、他の一つは鋼構造の「常識から」解き放たれた、である。

建築物は、元々人間にとって身近な天然材料を自ら加工し、組み立てることによってシェルターとすることから発展してきた。より強い材料、より合理的な工法を追求することにより20世紀までの鋼構造は目覚ましい発展を遂げたわけであるが、一方で、鋼構造建築物を生産するためには、設計者・ファブリケータ・施工者等の高度な専門家の存在が不可欠となり、市民は純然たる利用者としてしか鋼構造建築物と関わるができなくなってしまった。そこで、丸太を組み合わせるが如く、レンガを組み上げるが如くに、自らの手で建築物を作るための鋼構造「要素」を模索した。スティール・メゾンリーは、市民に解き放たれた鋼構造建築物であり、単なる懐古趣味に留まらず新世紀に向けた高性能を秘めた、答えである。

鋼構造建築物には、解き放たれるべき3つの常識＝呪縛があるのではないか。すなわち、

- (1) 常識的な姿
- (2) 常識的な付加的構築システム
- (3) 常識的な規格概念

である。これらを解き放つとは、質素であっても粗末ではない鋼構造建築の新しい姿を探求すること、骨組構造という多段階の構築システムを単純化した新しい構築システムを構想すること、新しい規格構造を考え、それを活用した新しい産業構造の在り方を構想することが必要となる。これらに関して、産業用建築物ユニットのスタディを試みた。

なお、産業用建築物ユニットのスタディについては、作品の形で提案を行っている。

解き放たれた鋼構造 — スティール・メーソンリー

21世紀鋼構造フォーラムグループC
メーソンリー ユニット構造 標準化
生産システム 流通体制 リユース

1. はじめに

20世紀は、人類が技術により多くの不可能を可能とし、世界の多くの市民がその恩恵に授かることが可能になった最初の世紀といえるかもしれない。鋼構造建築もその例外ではない。素材・部材が構造材として高性能化されただけでなく、設計から施工まで高度な建設技術が確立されてきた。これにより、木造や組石造では想像できないような摩天楼や大空間建築を出現させた。経済的かつ大量生産を可能とする生産・流通システムを構築してきたことも見のがせない。鋼構造建築は、今や、国内全着工面積の3分の1を占めるにまで至っている。

しかし、鋼構造を含めた20世紀の建設技術は、一面では華々しい実績を収めたものの、他方ではその技術の進歩に伴い、高度な技能者に限られた＝市民から遠ざかったものとなっているのではないだろうか。

本論で提案する小型鋼ユニット＝スティール・メーソンリーは、鋼構造建築を極限られた技能者から市民の手の届くものへと解き放つことを目指すものである。この小型鋼ユニット＝スティール・メーソンリーは、しかし、レンガに代表される伝統的なメーソンリーとはまったく異なる。後者が勘と経験に基づいた手作業を前提とした建築「要素」であるのに対して、スティール・メーソンリーは、高度な工業プロセスにより生産され、また高度な設計技術に裏打ちされた高性能な「要素」であり、技術が昇華して市民に舞い戻った、手に届く「要素」である。

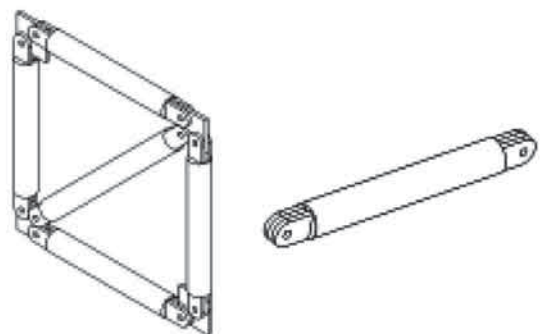
2. スティール・メーソンリー

スティール・メーソンリー構造では、建設および建替えニーズの多い低層住宅や倉庫、工場などを主な対象と

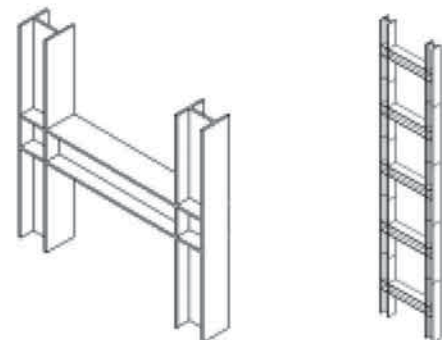
する。大量生産のメリットを活かすために、部材種類は最小限に留める。

2種類のスティール・メーソンリー案を図1、図2に示す。

・案1(図1):システムトラス型。部材はパイプで構成し、接合部はピン接合とする。耐力や剛性はパイプの断面積で調整する。斜材をダンパーとすることにより、ダンパー機能付きメーソンリーとすることも可能である。



(a) 基本モジュール (b) 標準部材
図1 システムトラス型メーソンリー



(a) 基本モジュール (b) 組立図
図2 フィーレンディールトラス型メーソンリー

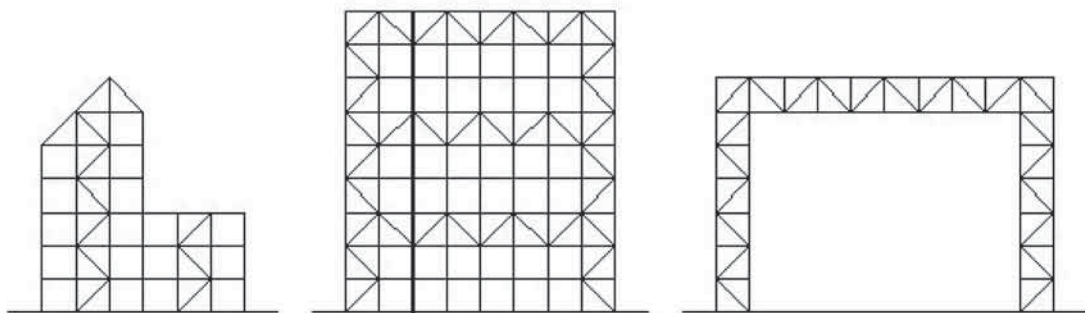


図3 スティール・メーソンリーを用いた骨組

A new structure using Steel Masonry

・案2 (図2) : フィーレンディールトラス型。外力に対しては部材の曲げで抵抗させる。メーソソリーの接合部は反曲点位置とする。

いずれの場合も、意匠設計の自由度や汎用性を高めるために小さなモジュールを採用する。対象とする建物規模にもよるが、スチール・メーソソリーの基本寸法は、200mm、500mm、1000mm程度の3～4種類揃えればよいであろう。接合部は組立て、解体の容易なメカニカル接合とする。また、メカニカル接合とすることで、施主自らによる増改築、部分的な補強も容易とできる。

構造形式 (図3) としては、スチール・メーソソリーの組立てによるトラス構造、壁式構造、ラーメン構造など、種々の形式が考えられる。スチール・メーソソリーの組合せにより提供できるのは骨組だけであり、バリエーション豊かな内・外装材を取り揃え、これらもユニット化することが望ましい。

3. 生産・流通のプロトタイプ

現状の鋼構造建築の生産流通システムは、素材・部材製造、加工、設計、施工のそれぞれは、メーカーやファブリケーター、設計事務所、工務店などにより、ほぼ完全な分業体制となっている (図4)。高品質かつ高性能なスチール・メーソソリーを提供していくためには、標準設計ソフト、施工マニュアルは、メーカーと設計事務所がタイアップして作成する必要がある (図5)。またスチール・メーソソリー骨組を施主＝市民による設計・施工が容易にするために、徹底した仕様規定とすること

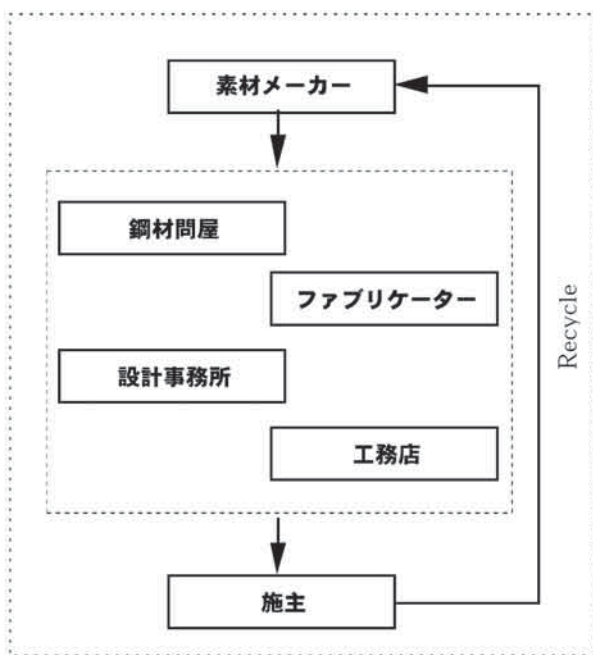


図4 現状の流通体系

が望ましいであろう。仕様規定の方向性としては、例えばラーメン構造の梁として用いる場合はスパン制約を設ける、壁式構造の場合は壁倍率を設定する等が考えられる。

メーカーはスチール・メーソソリーを構成する部材を製造し、スチール・メーソソリーの組立てはファブリケーターで行う。ホームセンターに代表されるD. I. Y. 店や工務店では、スチール・メーソソリーの販売に加え、施主自らが設計・施工するにあたってのアドバイスを行うことが必要であろう。

なおスチール・メーソソリー骨組の解体後は、スチール・メーソソリーのリユースが可能であり、環境に優しい骨組とできるだけでなく、骨組の資産価値を高めることも可能である。

4. まとめ

本論では、鋼構造建築を限られた技能者から市民の手の届くものへと解き放つことを可能とする構造として、スチール・メーソソリー骨組を提案した。実現にあたっては、スチール・メーソソリーの基本モジュールの検討から生産・流通体制の整備まで多くの課題があり、業界を横断した取組みや新規格制定などが必要となる。しかし、鋼構造の建設技術を、今一度、市民の手元に引き戻すことは、ややもすれば無機質で人間味の少なくなりがちな建築空間を、より優しく、豊かにできるはずである。本論における提案は、有効な一手法であると考えられる。

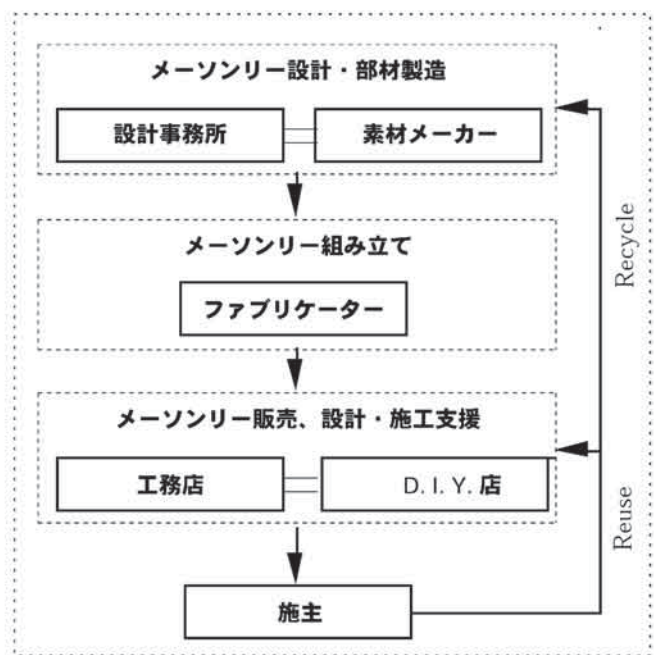
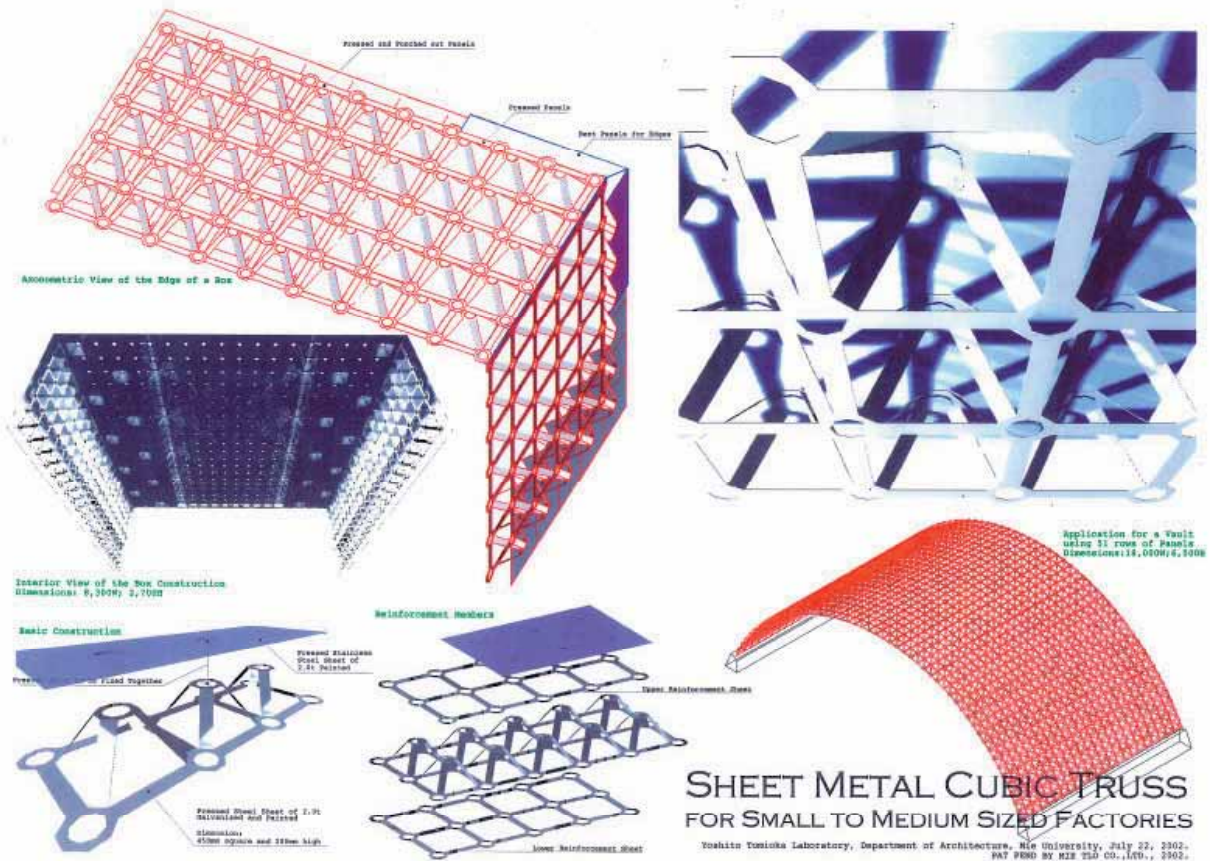
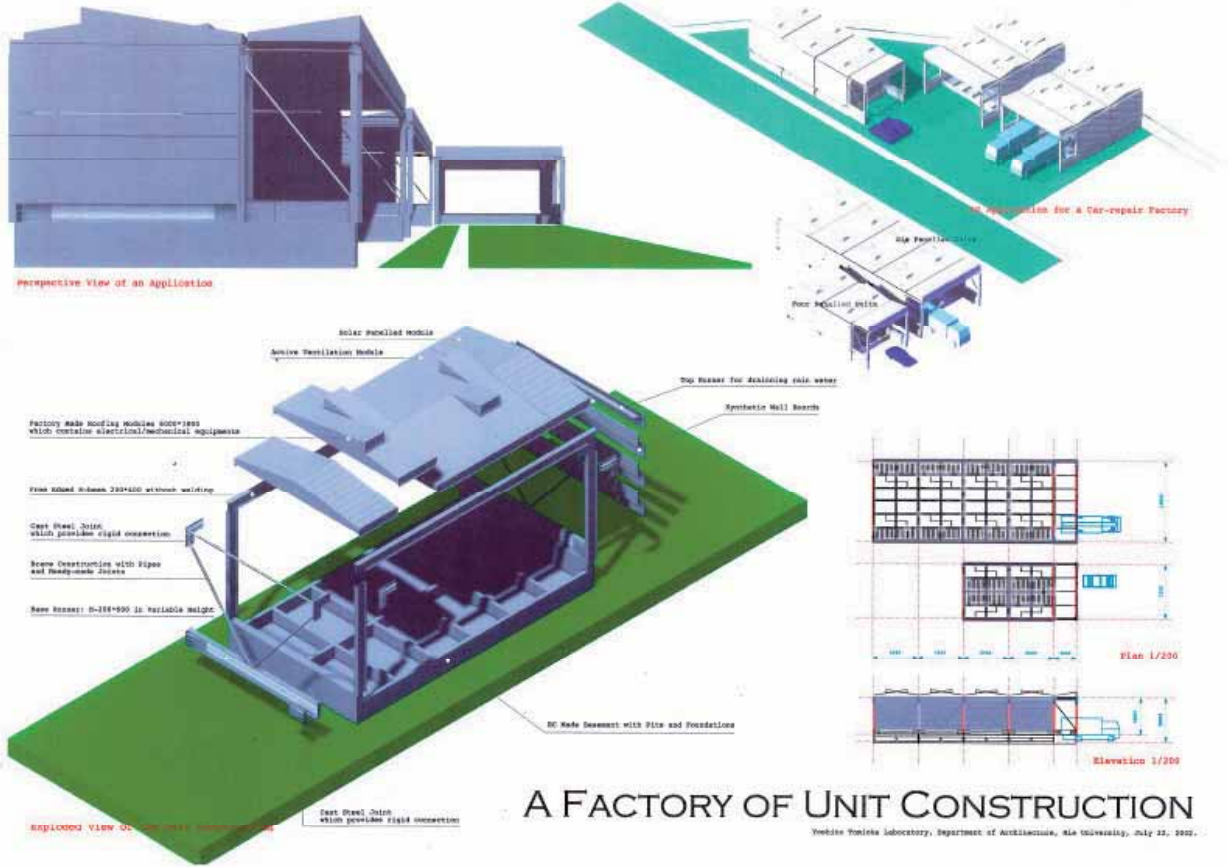


図5 スチール・メーソソリーの流通体系プロトタイプ



3.4 公募作品部門入賞作品・論文

シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」では、フォーラムからの提案に加えて、一般から広くアイデアを募集することとした。

募集は、アイデア部門（図面で提出）および論文部門とし、各々、アイデア：27編、論文：16編の応募を得た。

審査は、アイデア部門では、高梨晃一東大名誉教授を委員長に、招待講演をお願いした隈研吾氏に加えて、佐々木睦朗、手塚貴晴、西沢立衛、馬場樟造の各氏を審査員とし、審査委員会を構成した。審査員各氏は、いずれも、現在、建築デザインのトップにある方々で、これにより、多くのアイデアの応募を得ることが出来た。審査は、審査委員会による一次審査で選出した6点について、シンポジウム当日、応募者のプレゼンテーションによる公開審査を行い、最優秀、優秀、各1点、佳作4点を決定した。

論文部門は、同じく、高梨晃一東大名誉教授を委員長に、フォーラムを構成する3団体の代表、すなわち、(独)建築研究所からは、山内泰之理事長（フォーラム主査）、(社)日本鋼構造協会からは、藤盛紀明構造委員長（フォーラム副主査）、そして、(社)日本鉄鋼連盟からは、私（フォーラム幹事）を審査委員とした。

この結果、(社)日本鋼構造協会の会員会社などからの応募が多く得られた。

論文部門の審査は、審査委員会による審査で、最優秀、優秀、各1点、佳作4点を選出した。入選した6点は、シンポジウムでプレゼンテーションを行った。

3.4.1 アイデア部門入賞作品

最優秀賞（建築研究所理事長賞）

「折版構造空間の探求」（管 正太郎氏）

本作品は、柱、梁を用いず、折版（デッキプレート）のみを構造材として、住宅（自宅）を設計したもので、鋼材の使い方の斬新さが高く評価された。

優秀賞（日本鉄鋼連盟会長賞）

「Acrylics Structure」（武蔵工業大学）

本作品は、アクリル版とワイヤーを組み合わせることにより、自由な空間を創造するもので、武蔵工業大学の女子学生チームの応募である。この提案が、すぐに実現する、あるいは、大きな鉄需を生み出すとは考えられないが、その自由な発想が評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「曖庵～鉄を使った新しい空間・機能を持った建築の提案」（芝川構造設計室）

本作品は、有孔耐震壁を組み合わせ、ある種、透明で、光と影が織り成す空間を提案したもので、「鉄」を積極的にデザインに利用する姿勢が印象深かった。

佳作（審査委員会委員長賞）

「鉄を使った新しい空間」（佐伯力建築設計事務所）

本作品は、一種の空中浮揚体で、正直、審査員にもその意図するところが理解出来ないものであったが、その発想の大胆さが注目された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「HP防音シェルのあるスタジオ住宅」EDH遠藤設計室）

本作品は、軽量H形鋼とキーストンプレートを組み合わせた建築で、屋根・壁全体が

一体的なシェルになっている。完成建物であり、鋼材の使い方の面白さが評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「Punching Metal Structure」佐々木暁生（東京工業大学）

本作品は、パンチングメタルを間仕切りに利用し半透明で陰影のある空間を演出したもので、鉄を軽快に使うアイデアが注目された。

なお、アイデア部門受賞作品を、新建築 2003 年 1 月号 No. 78、p210-212 に掲載した。また、これらの作品は、次項で解説する論文とともに、次項のうしろに掲載している。ここで、作品の作者名については、作品中に示されている。

3. 4. 2 論文部門入賞論文

最優秀賞（建築研究所理事長賞）

「トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築」

（真瀬伸治他）

本論文は、鉄骨の架構を、解体時まで継続使用する第 1 スケルトンと、大規模、あるいは小規模の改修が出来る第 2、第 3 スケルトンの、3 つの部分に区分けし、リユースと空間可変が可能な架構を提案したもので、従来のスケルトン・インフィルの考え方を拡張したものとして、高い評価を得た。

優秀賞（日本鉄鋼連盟会長賞）

「鉄がこれからも主役であり続けるために」（鈴木直幹）

本論文では、躍進著しい RC 造に対して、鉄の競争力を維持するために、材料、架構、接合の各項目に数多くの提案が行われており、鉄のシンパとの印象が強く、注目された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「再利用可能な粘弾性接合部をもつクモの巣状空間構造システムの開発」（武藤至）

本論文は、システムトラス分野で、「生物生態学」に基づくクモの巣状空間構造システムにリユースの考え方をもち込んだもので、そのユニークさが注目された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「解体鉄骨の商品化とそれを利用した環境負荷低減建築構法」（田中直樹）

本論文は、建築鉄骨のリユースを体系的に進めるため、解体鉄骨に IC タグを取り付け、トレーサビリティを確保した上で、例えば、解体時に切断したボックスコラムを繋ぎ合わせてコラムとする、あるいは縦割りにし床のデッキに利用するなど、従来のリユースの提案には見られない具体性が評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「鋼の高比強度を活かした環境適応型無柱空間構造：スケルトンシェルシステム」

（杉崎健一）

本論文は、単層ラチスシェルシステムに上下の弦材を取り付け面外の構造安定性を強化するとともに、ケーブルと圧縮材の比強度を利用し軽量化を図った、スケルトンシェルシステムの提案で、その斬新さが評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「鉄を身近に」（山田耕司）

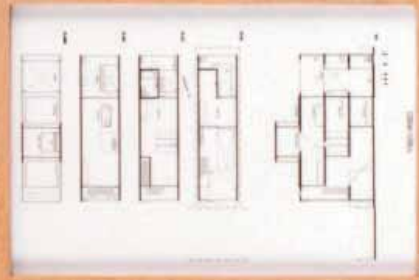
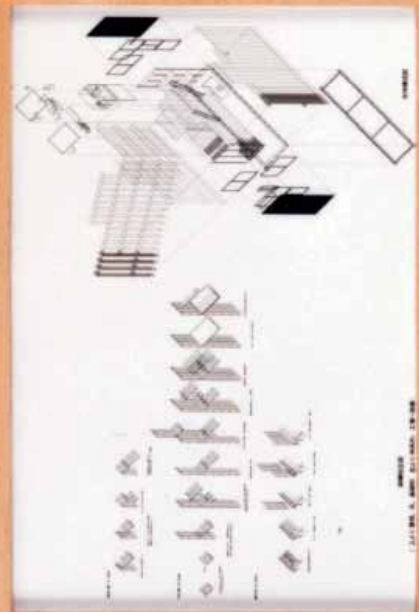
本論文は、鋼構造建築のさらなる発展には、一般の人々が簡単に扱えるような「鉄」

があるべきだと言う持論を展開したものである。

例えば、人々が愛着を感じている「木材」と同じように、軽量で簡便に加工（切断、孔開けが出来るような「鉄」を提案するなど、応募者の「鉄」への思い入れが感じられ、注目された。

なお、優秀賞および優秀論文を、建築技術 2003 年 1 月号 No. 636、p189-197 に掲載した。これらの論文については、前項で解説した作品と併せて本項のうしろに掲載している。ここで、論文の著者名については、論文中に示されている。

折板フレーム構造空間の探求/菅 正太郎 (s/a)



建築家：菅正太郎
建築事務所：s/a
1987-1988

Acrylics Steel Structure/大村 成美、川向涼子 (武蔵工業大学)



Acrylics
Steel
Structure



糸状のステール
- 用によって簡単に編むことができる
- 繊維のような柔らかさをもつ
- 使用に優しい

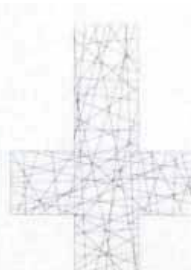


↑
アクリル板

用によって変化する
- 厚みは自由に設定できる
- 構造も変化する

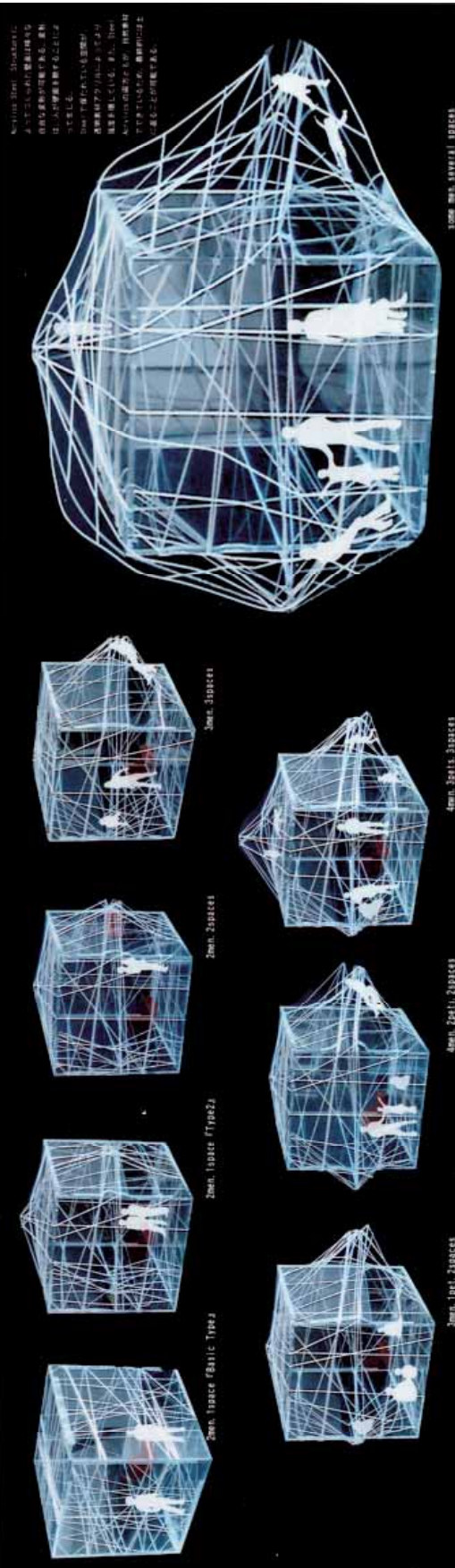


↑
2つの素材を組み合わせることによって自由な形に対応する
- アクリルはステールの重量の約半分程度に抑えることができる
- 剛性を自由に調整できる
- 1つの面だけでなく、面と面の間も自由に調整できる



CUBE

基本となる空間をつくる
- 正方形のステールの両面に
- 立方体を覆い、立方体の中
- へ入る。単純な形に包
- めることで空間を定義する
- もしくは、立方体の内
- 部を自由に調整する
- ことができるように調整
- している。そうしてつく
- られた空間は、壁、天井
- などによって定義している



Acrylics Steel Structure
- 糸状のステールとアクリル板の
- 自由な組み合わせによる、柔軟
- な空間の構築を目的としたコ
- ンクリート
- 2mm, 1space (Ballic Type)
- 2mm, 1space (Type2)
- 2mm, 2space
- 2mm, 3space
- 4mm, 2space (Space)
- 4mm, 3space
- 10mm, 10m, 10space (Space)
- 自由な組み合わせによる、柔軟
- な空間の構築を目的としたコ
- ンクリート

暖庵

他の構造素材と比較して、湿度、断熱性ともに高い「鉄」で造られた建築は、元来シニア層やアロギア層で信頼なシムルネットを映し出していた。それは、相図にまで取り込まれた無い木材で巧みな手法により接合し、美しい姿を構築していた。

しかし、数多くの改善、いや、むしろそれを背棄としたシステム化された評価基準により、それは強く強い壁へと変わってしまっているのではないだろうか。

一方、湿度が高いということ、更にそれが湿度という問題を引き起こすため、鋼構造は鋼材として用いられることが多かったが、鉄筋コンクリート構造と同様、耐震性という面材としての応用が注目されている。比較的新しい技術である鋼製耐震壁は、変形能力の問題からスリットや孔を設け、曲げ歪へと変換する事により使用されている。

しかしながらその活用も、「面」で構成されているという建築的な物性が、美しく表現されていない。

それらを踏まえ、われわれが提案する建物は、ありふれた材料を、ありふれた構造で、さりげなく使うことを主題とする。

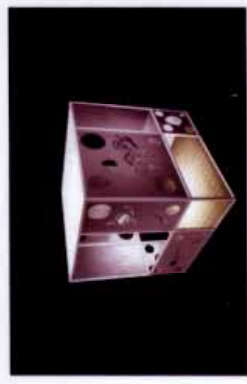
先に耐力の問題ではなく、「鉄」を使った建物が、技術論でないところで「できること」を探求し、成熟することになることの方の可能性を見いだすものとしたら、

そこでわれわれは、一つの領域を通し、限りなく強い耐力のみを受けるフレームと、耐力、断熱性とも巧みに制御できる有孔鋼板を用いて、壁やかに、そしてしなやかな、建築の可能性を提案する。

21世紀の美しい鋼構造を求めて...

観客が ... それはいつもにも異様に見える様子
 曲りを受けない、もっぱら耐力のみを受け持つ支持部材
 そこに、無限の開口オーバーゲージがある

しなやかに ... それは、やわらかくたわむ様子
 張りつめた引張の場だけでなく、また扉田の生じないやわらかさ
 そこに、確信でしたよかさを感にさせるのらくら物がある



作り過ぎない技術 作り過ぎない技術
 作り過ぎない技術 作り過ぎない技術

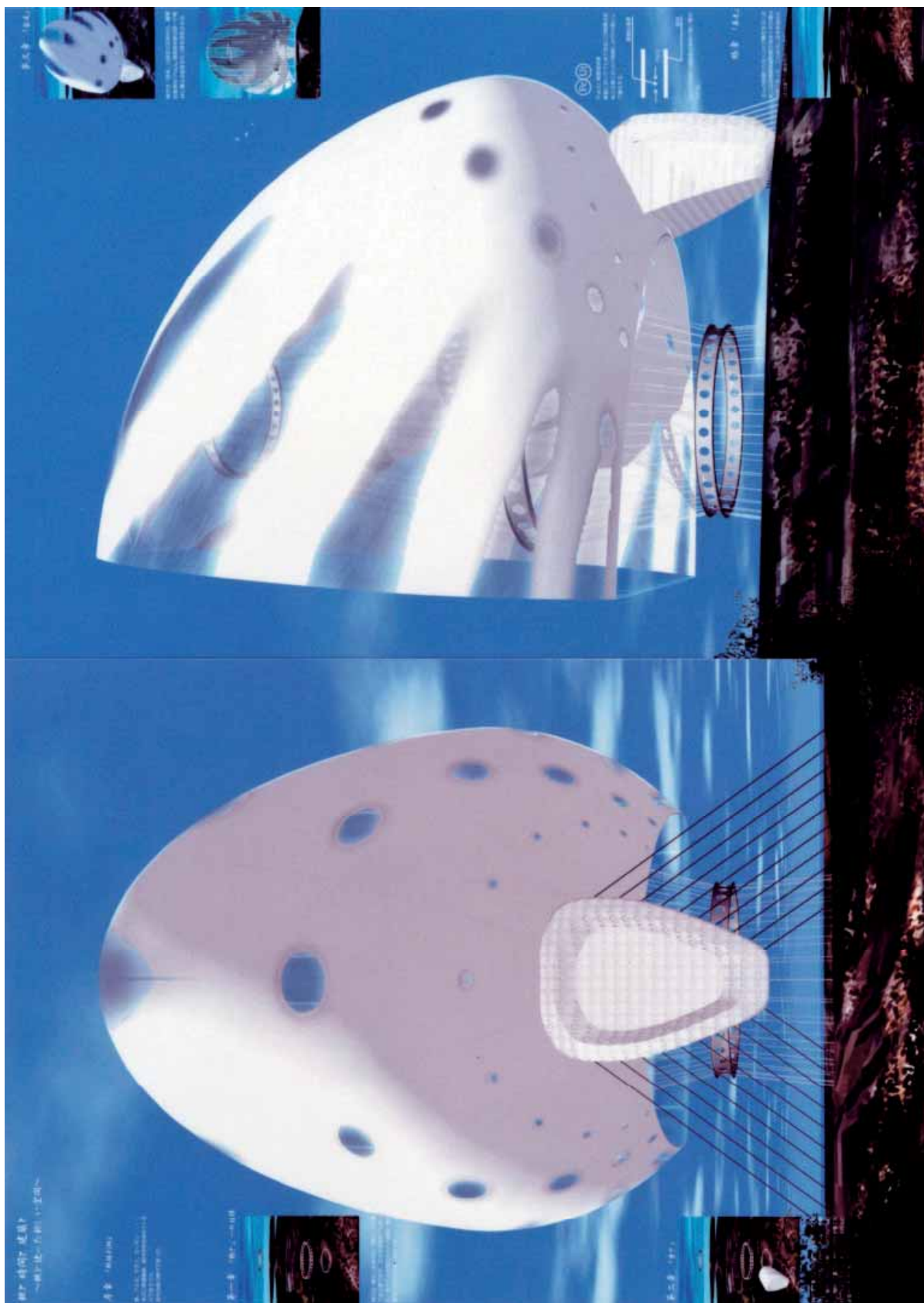
さてどうも、自然現象の前では何も及ばない人間が作り出している技術。

今ある技術で手が出せる、考に入れられる物が、
 “建築”の中にはあるような気がしてならない。

まぐそここにある価値ある物のためには、この技術で挑みたい...

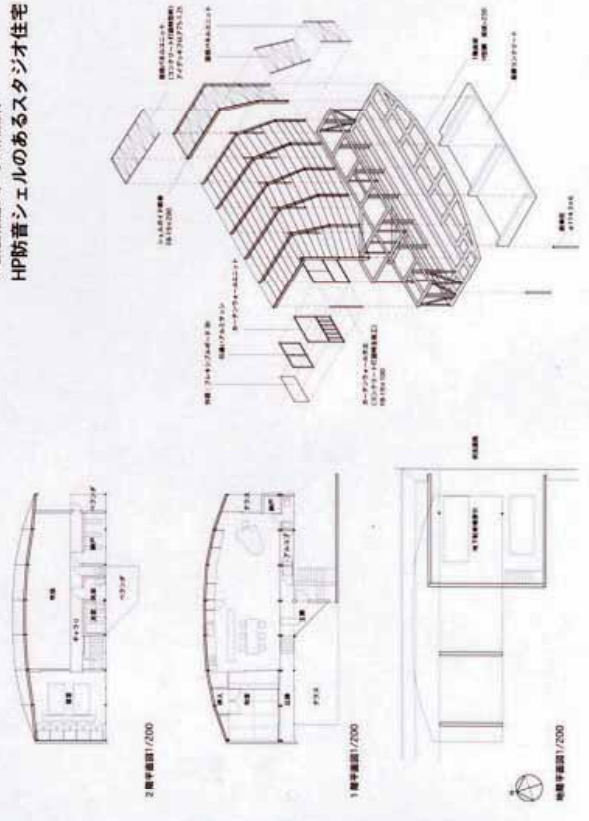
「2」田尻、鋼構造技術は何ができるのか
 鉄を柱のた新しい空間・機能をもつた建築の提案

鉄と時間と建築と～鉄を使った新しい空間/佐伯 力 (佐伯力建築設計事務所)





21世紀建築語フォーラム作品部門
HP防音シエルのあるスタジオ住宅



この建物は、住宅地に建つ新しい実験のための住宅事業スタジオである。本は建築界の専門家として経験を積み、海外ではアジアの先進地で建設が得意な、彼らの日本生活はそれと異なる。そこで、住まいの中に小さなコンクリートの防音室を設けるのではなく、生活空間そのものを防音室や防音室に設計した実験的な一室型としてスタジオ化するところを考えた。

具体的には、防音上有効なコンクリートとスチール素材とを併用することによって、HP防音シエルの構築する、HP-防音防音室という実験室を併用しつづけていくことで完成される。その計画は非常に繊細で、HP-防音防音室は併用しつづけていくことだけでなく、防音室の形状で外方に音漏れを減らすことである。またHP防音室は音漏れ防止層中を貫く構造も持っているため、当部の計画にたいして極めて精緻な状況であるといえる。

24m幅に達する連続的なスチール素材は19x200mm基本構造とし、その間を内側は上げ、横型材を並べたアイブレットを打ち出し、鉄筋プレートでつなぎ、その上に防音上効果となる100mmのコンクリート層を打設する。この構造とすることで、スチールとコンクリートとが一体となった一棟の防音室が完成する。

また、HPシエルの打ち出し部は19x180mmで高さが決まっている。これはコンクリート打ち出し部として機能し、構造はアイブレットの打ち出し部である。このようにコンクリートの防音室と可動性も兼ねる。防音室の打ち出し部は、HP防音シエルの打ち出し部、かつ構造的にも重要なにも有効な防音室の打ち出し部である。



Punching Metal Structure(PMS) Sectional Flexibility/佐々木暁生 (東京工業大学)

~Sectional Flexibility=鋼構造による新しい空間システム~

Punching Metal Structure (PMS)

床スラブの位置を自由に変え、壁がなくても特殊構造も可能。
 異形体の空間は、PMSによるフレキシブルなシステムは新たな示唆を創出する。

scale: 1/110	sectional detail
scale: 1/250	section (equipment)
scale: 1/500	section (component)
scale: 1/500	section (component)

トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築

○真瀬 伸治^{*} 寺田岳彦^{*} 坂本真一^{*} 田村和夫^{*}
 構造システム 長寿命 スケルトン・インフィル
 可変空間 リユース 無溶接接合

1. はじめに

21世紀においては、前世紀の負の遺産である地球規模の環境破壊に対する反省から、地球環境に配慮した持続可能な循環型社会システムの構築が緊急課題であり、建築分野も例外ではない。建築構造の分野では、建設時、使用時ならびに解体時における環境負荷の低減が課題となる。一方、自然災害や人災に対する安全・安心は、建物に根源的に要求される機能である。さらに、現在の生活水準を低下させることなく、時代とともに変遷する多様な価値観に基づく快適性も満足させなければならない。

本論では、図1に示すように21世紀の社会に適合できる機能を満足する建築構造システムとして、長寿命で柔軟な空間を提供する「トリプル・スケルトン構造システム」を提案する。

2. トリプル・スケルトン構造システム

本システムのコンセプトを図2に示す。トリプル・スケルトン構造システムは、第1、第2および第3の各スケルトンにより構成される。主要な構造材として、長期にわたる品質の安定性や、大きな空間を構成できるという観点から鉄骨部材を用いる。第1スケルトン部は、建物全体を解体時まで継続して使用できる高い耐久性と、地震や台風などの外力に対して建物全体の機能を損ねることがないような高い安全性を備える。一方、第2および第3スケルトン部は、それぞれ社会の要求に伴う大規模な改修および小規模な改修時に、内部空間の再構築を容易に実現できる機能を有する。さらに、改修時や解体時に不要となった部材は、他の建物でリユースできるように、部材の加工が少なく解体が容易な接合工法を採用する。

架構の構成を図3に示す。本システムは、種々の用途や規模を有

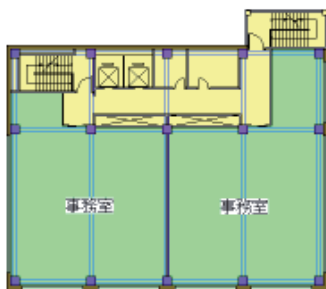


図4 対象とした建物プラン

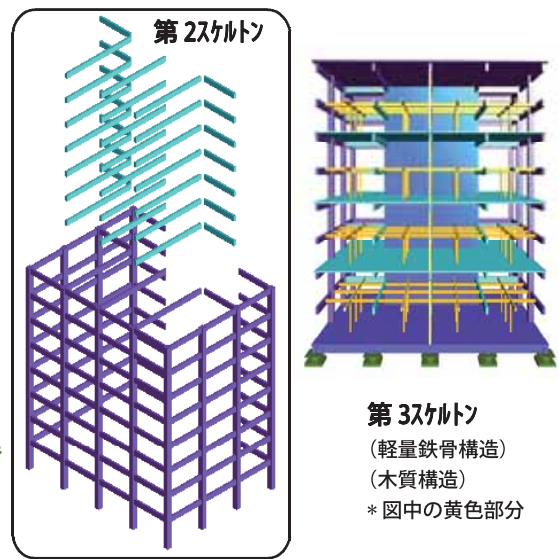
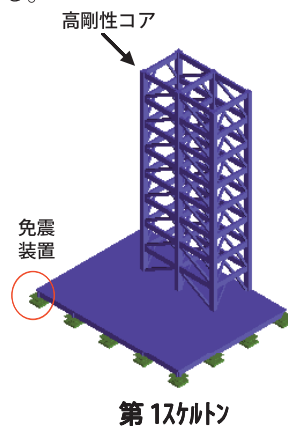


図3 架構の構成

する建物に適用可能なものであるが、部材リユースの実現性を考慮し、図3に示すような市場規模の大きな中低層の事務所ビル(図4に平面図を示す。)に適用した場合を一例として示す。

第1スケルトンは、免震装置に支えられたコンク

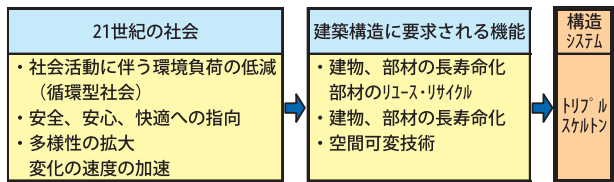


図1 21世紀の社会に適合できる建築構造の機能

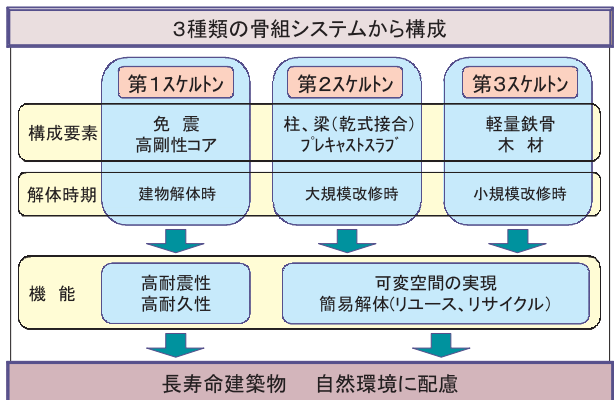


図2 本システムのコンセプト

リートスラブと高剛性のコアから構成される。基礎免震構造は、建物の上部構造への地震水平力を大幅に低減し、高い耐震性能を実現する。高剛性のコアは、地震や風などの非常時水平荷重を受け持つ。これにより、第2・第3スケルトンは非常時水平力から解放される。

第2スケルトンは、複数の第3スケルトンを内包できるような大きな立体空間を支えるものであり、柱・梁の外郭と床スラブで構成される。構造的には、固定荷重と積載荷重のみを支持できる性能を満足すれば良い。ただし、第3スケルトンの変化を見込んだ余裕度を持たせる。各部の接合部には乾式工法を採用し、大きな社会的ニーズの変化に応じた大規模な立体空間の再構成を容易に実現できる。

第3スケルトンは、複数の単位空間を構成するための構造である。構成部材には、小規模な改修に対応できるように組立・解体が容易な軽量鉄骨を用いる。ただし、ぬくもり感、快適感や炭酸ガスの固定化のために、木質構造とすることもできる。

このように、本システムは、スケルトンを階層化することによって、短期および中期の空間へのニーズの変化に対して柔軟に対応でき、建物全体を長期にわたって維持することを可能としたものであり、環境負荷を最小限に抑えながら持続可能な社会に適応したものである。

3. 要素技術

本システムを支える要素技術のうち、主なものを詳述する。

図5に、第1スケルトン部の杭頭免震構造を示す。免震構造を採用することで、従来の骨組に比べて地震時の入力力を1/5に低減できる。また、免震層の下の部

分のつなぎ梁を省略し、地下部分の掘削土量を減らすことで建設時のCO₂排出量を抑えることができる。

図6に、第2スケルトン部で採用する各部の乾式接合工法を示す。柱と梁は、リングパネルと言うピースを介して剛接合される²⁾。梁とリングパネルは高力ボルトによって、柱とリングパネルは粘弾性体やモルタル等を充填することで剛接合される。また、スラブにはプレキャストコンクリートスラブを用い、ボルトで鉄骨梁に接合する。両工法も、部材を傷めず簡単に取り外しでき、リユースできる技術である。

これらの技術を採用することによって、第3スケルトンの変更のみならず、第2スケルトンの梁やスラブを一部撤去して大きな空間を再構成することも可能となる。

4. おわりに

循環型社会に適合する建物として、内部空間の再構築を可能としたトリプル・スケルトン構造システムを提案し、そのシステムを支える技術について紹介した。今後、部材のリユースを実現するためには、ハード面の技術のみならず、図7に示すような社会的なシステムを社会全体で進めていく必要がある。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：LCCO₂30%削減、耐用年数3倍延伸をめざす建築設計、フリースペース・ビルディングの提案、2001
- 2) 塚越、坂本、神野：混合構造におけるリングパネルを用いた接合部の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、2002.8
- 3) 鋼材倶楽部：サステナブル建築とスチール、シンポジウム資料、2001.10

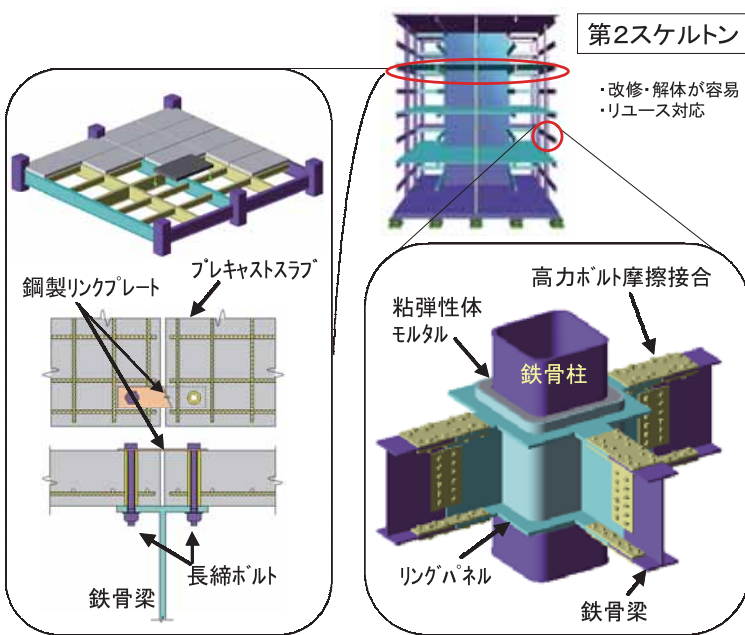


図6 各部の乾式接合工法

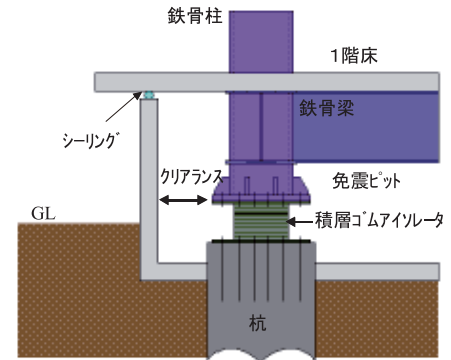


図5 免震システム

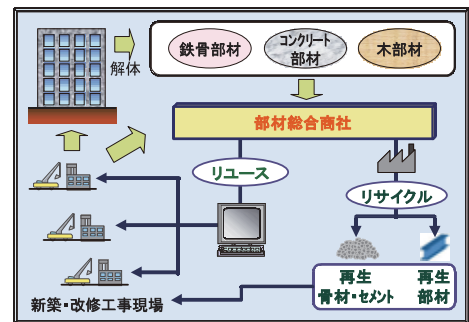


図7 部材リユースシステム

*)清水建設(株) 技術研究所構造研究開発部

鉄がこれからも主役であり続けるために

21 世紀 主役	鈴木 直幹 ^{*)} 構造設計者 ブレインストーミング	既成概念 ブレイクスルー
-------------	--	-----------------

1. はじめに

20 世紀、鉄はコンクリートやガラスと共に建築を支える主要な材料であり続けた。特に超高層建築や大空間建築では鉄を用いた数々の名作が生み出され、この分野において鋼構造が主役であったことに異論はないだろう。

翻って 21 世紀の現在、鋼構造の現状はどうであろうか？ 20 世紀、主役でありつづけた超高層の分野においては RC 造の躍進が著しい。現在、超高層住宅が大量供給されているが、この分野においてはほぼ RC 造の独壇場と言っても過言ではない。また、阪神大震災では今まであまり問題にされなかった鋼構造の弱点（溶接部の脆性的破断など）が露呈し一般社会における鉄に対する信頼が低下した問題や、過当競争によるファブリケーターの体力消耗など、むしろ 21 世紀に鋼構造が衰退していくような要因の方が多く感じられる状況である。（もちろん震災を契機に数々の鋼製ダンパーや溶接部の脆性的破断防止の研究が精力的に行われ、研究者や技術者の努力により良好な社会的ストックの形成が進められていることは言うまでもないが。）

本論ではこのような状況を踏まえ、鋼構造が今世紀においても建築分野の主役であり続けることを願う技術者の 1 人として、今後の鋼構造技術の方向性を個別の技術に特定するのではなく、大きな方向性として提案し、論じていきたい。

2. 今後の鋼構造に求められるものとは

2. 1 既成概念をブレイクスルーするために

筆者は、建築構造設計を専門とする技術者である。日常業務では鋼構造だけでなく RC 造、SRC 造、木構造など様々な構造形式に携わっている。日頃から鉄の長所である軽量・高靱性・加工性や、短所である溶接施工の大変さ、座屈の問題などを学びながら構造設計を行っている。

ここでは既成概念をブレイクスルーするために筆者を含む 20 代後半～30 代後半の比較的若年層の技術者（15 名）により鋼構造に今後何を求めていくかブレインストーミングを行った。

2. 2 ブレインストーミングの結果

ブレインストーミングの結果得られた提案を以下に列挙する。なお既成概念をブレイクスルーするためにまったく技術的裏付けのない荒唐無稽な提案や筆者の調査不足で既に存在する技術も含まれる恐れ

もあるが本論の主旨をご理解のうえ批判はご容赦願いたい。

2. 2. 1 材料に関する提案

- ①形状記憶鉄骨骨組
外力を受けて変形しても熱を加えることで元に戻る修復性に優れた鋼構造。
- ②超高強度鉄骨
靱性はまったく期待せず強度だけを追求する。制震部材との組み合わせでスレンダーな超高層を実現する。
- ③耐火鋼の反対
きわめて熱に弱く熱を加えることで容易に倒壊する解体性に優れた鋼構造。
- ④発泡鋼板
無数の気泡を鋼材内発生させより軽量の鋼構造を可能にする。
- ⑤ヤング率調整鋼
ヤング率を自由に設定することで建物剛性は長期荷重と無関係に設定できるようになる。完全なる制震建物も可能となる。
- ⑥損傷自己修復性鋼材
地震時に生じた主架構の軽微な損傷を自己修復するような成分を開発し地震後の補修を不要とする。
- ⑦高減衰鋼材
鋼構造の弱点である居住性の問題を解決し、RC 造の独壇場である高層集合住宅に鋼構造を採用できるようにする。
- ⑧電炉のトランプエレメント抽出技術
リサイクル時代の今、電炉鋼は鋼構造に欠かせない存在である。トランプエレメントは現在希釈により対応しているが抽出技術があれば電炉鋼の活躍の場は飛躍的に広がると考えられる。
- ⑥電流により剛性が変化する鉄
電圧の強弱により鉄骨骨組の剛性が変化。地震や風等の大きさにより電圧を変化させ、骨組を最適な剛性にして応答を低減する。

2. 2. 2 架構形式に関する提案

- ①磁気浮上鋼構造物
磁気で浮上させた完全免震構造。地震力は完全にゼロとなる。
- ②ローコスト可変剛性架構
鉄の利点は磁性があることである。この性質を利用して地震時に様々な剛性をもてるようにブレイ

スを設置しておき普段は主架構と縁を切っておく。地震が発生したら即時に地震の特性を解析し最適な剛性になるように設置したブレースを選び電磁石を作動させるシステム。

③配管構造

柱梁を全て□か○にして中に配管として利用する。配管スペース用のスペースが不要。

④伝統工法鋼構造

伝統木組みのように、鉄にほぞなどを用いて、架構を形成する。

⑤鋼製ブロック壁構造

鍛造製のSB（スチールブロック）をCBのように積み上げて鋼製壁を構築する。各段はボルトまたは溶接で接合する。

2. 2. 3 接合や施工法に関する提案

①鉄骨接着接合

鉄骨用接着材を開発し溶接やボルト接合をなくす。

②全体溶接建物

仮ボルトで組立てて最後に1階の足元から大電流を流して建物の接合部を溶接するシステム

③鉄骨現場打ちシステム

低熔融点鋼を開発し、鋼製型枠に現場で打設する。コンクリートではないと難しい形態も鉄で可能になる。

2. 2. 4 解体やリサイクルに関する提案

①鉄骨オークション

インターネットのオークションで解体予定の鉄骨を安く収集し新築のS造をつくる。鉄骨のサイズと接合部の状況の情報が必要。

②解体用バクテリア

鉄を瞬時に激しく腐食させるバクテリアを育成し、解体に使う。

3. 設計者が夢見る鋼構造技術

構造設計は様々な制約条件を統合して建築空間を創造する行為である。最近では経済状況を反映してますます低コスト・短工期で安全性の高い建築を求められる場面が増加している。前章で列記した提案はその制約条件の中で「鉄にこのような性能があればもっと鋼構造を採用する場面が増えるのではないだろうか？」という構造設計者の素朴な夢と解釈することができる。

材料を生かした設計をする役目は構造設計者にある。鉄という材料の特性が大きく変わらない限り構造設計者は架構形式で革新し続けていく必要がある。しかしながらこの革新を架構形式だけで行っていくにも前世紀である意味あらゆるバリエーションが模索されているため、限界があるとも考えがちである。設計者の夢で材料に関するものが多いのはそのためではないだろうか。

建物を設計する側からは荒唐無稽ではあるが新材料（新鉄骨）が必要であるというのが結論であろう。一方、材料を供給する側のミルメーカーの技術者や研究者の方々、実際に鉄骨を製作するファブリケーターの方々は上記の提案をどう捉えられるのであろうか？「素人が荒唐無稽なことを」となるのか「なるほどやってみよう」となるのか。

いずれにせよ個々の技術者がそれぞれの業界や会社の枠組みの中で考えるよりも「今世紀も建築の主役は鉄で」と思う技術者が枠を超えて集まる場をつくり議論の中から開発の方向性を決定するべきであろう。大袈裟に言えばそこに鉄の未来がかかっている。本論では技術提案ではなくこの技術を生み出す土壌をこの日本に生み出すことを提案する。

多くの偉大な先輩技術者・研究者達が鉄の発展を支えてきた。我々はその恩恵にあずかり設計をしている。身近なところにもはじまりは誰も相手にしないような提案があったのではないだろうか。FR鋼や耐候性鋼など現在普通に使われている材料にも先輩達の苦勞がしのばれるのである。我々は停滞したこの国の状況から図-1の点線に示すような技術の限界を勝手に考えているのではないだろうか？先輩達が常に技術は向上していくものだと思じたように我々も図-1の実線のような技術の未来に希望をもって進んでいく必要があると考えている。鋼構造に関わる技術者達がこう考えて進めば21世紀鉄は引き続き建築の主役であり続けるだろう。

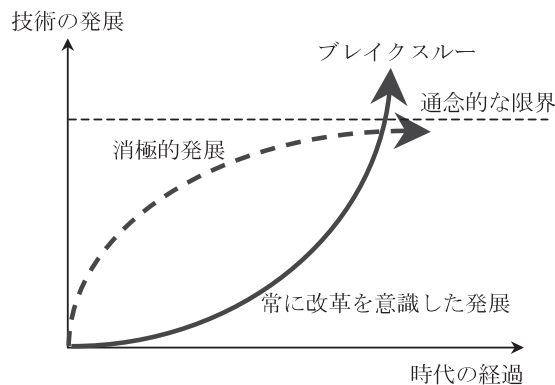


図-1 技術の発展と時代の関係

4. おわりに

状況の厳しさから鋼構造は現在衰退の危機にあると思われる場面に遭遇することが増えてきている。しかしながら鋼構造に関わる技術者が協力し、真剣に鋼構造の未来を見据えた議論を行い、新たな材料や架構に挑戦していくことで前世紀末と同様に今世紀末においても建築分野の主役であり続けると確信している。やはり鉄ほど素晴らしい材料はないと信じるからである。本論における提案がその一助となり研究者・技術者・一般市民の議論が行われるようになれば幸いである。

*) 榊竹中工務店 設計部

再利用可能な粘弾性接合部をもつクモの巣状空間構造システムの開発

空間構造 再利用(リユース)	武藤 至*) 粘弾性接合 擬自己建て方	クモの巣 可動性
-------------------	---------------------------	-------------

1 はじめに

空間構造システムは、20世紀に急速に研究開発され「システムトラス」と呼ばれる優れた手法が多用されてきている。一方で、サステイナブルな環境負荷低減のニーズが問われ¹⁾、同時に全地球レベルでのエコロジー問題から資源の再利用²⁾も現実の建設行為で議論が始まってきている。

提案する空間構造システムは、両者を考慮した次世代の建設に貢献できるものと考えられる。すなわち、(1)空間構造の形態デザインの多様化のなかで、ある意味ルネッサンスとして「クモの巣の建設プロセスおよび、素材特性」に着目する、(2)接合部の新たな開発方針として「粘弾性」あるいは、「ガタ」の論理をメカニカルジョイントシステムへ導入する、(3)部材要素レベルでの再利用、すなわち「ディスジョイント」の概念の実用化、を提案するものである。

2 空間構造形態のデザイン

自然物の形態を模倣し、例えば「シェル」構造が有名である。ケーブル、膜およびネット構造は、クモの巣の模倣による場合が多い。つまり、自然物から何らかの形態生成アルゴリズムを考察し(空間)構造形態のデザインを実現する研究がコンピュータ利用下で研究する分野が「Structural Morphology」として台頭してきている。

3 クモの巣の建設プロセスと素材特性

クモの巣を直接「生物生態学」として従来から研究され、クモの巣の巣づくりのメカニズム、クモの糸そのものの材料特性と風を受けるときの挙動分析、巣づくりの修正と餌の確保など具体的な研究成果が報告されている。基本は、素材が粘性(粘着性)を有しつつ、断面強度が寸法の割に高いとか、縦糸横糸のスパイラルの形成メカニズムとその機能などが研究されてきた。構造工学の分野でも、この事に着目し1990年代から2000年代に再考されつつある。本研究は、クモの巣の製作プロセスと糸の組合せにおける「接合部」の意味と、支持材に対する糸の配置など通常のネット、ラチス構造物の網目パターンと基本的な構造特性(接合部特性を反映した)について検討してきている。特に、クモの巣の建設過程を模倣、模擬してどのような、網目状空間骨組が可能なのかを考察した。結局、実構造物(人工物)との違いが、根本的な設計概念の相違によって明白である事が分かってきた³⁾。そこで、クモの巣のメカニズム(網目生成アルゴリズムを含む)をフラクタル幾何学で修正して、人工物の形態デザインアルゴリズムへ還元する手法が有効であろうと確認し

ている。素材レベルでは、単位強度(断面積、部材長さあたり)を同程度に確保でき、接合部のあらたな限界をも実現可能なモデルを構築する必要があるとの結論に達した。

4 粘弾性ジョイントとディスジョイントのメカニズム

以上の、構想を実現する時「接合部のモデル化」と最終形状をどのようにして初期形状から発展させるのかが、重大なテーマであると判断される。まず、接合部は「粘弾性特性」を有し、かなりの幾何学的非線形挙動が許容されるジョイントシステムの開発が急務である。また、それぞれの接合部と部材の単位構造要素が、十分フレキシブルかつ、可動性を期待できる施工、建設技術の開発も重要な課題⁴⁾となろう。ひいては、ディスジョイントのメカニズムと完成形状からの部分構造(不完全形状、不安定構造系の意味)へのリダクションと、あわせて、要素に分解してから、再構築(部材と接合部の再利用の意味)のプロセスと、実現技術を今後開発研究することが必要と考えられる。

5 実現の可能性と問題点

以下に、現時点までに想定される可能性について、考察している。なお、既存の建設、施工手法からみても、かなり新しい技術を必要とする事もあって以下に述べる展望は、相容れない部分もあろう。

ご存知のように、既存構造物(空間構造系)の部材データや構造データおよび基本的な挙動データ(座屈特性、耐力特性など)が、予め「ドナーバンク」に類似のデータベースに登録されている事⁵⁾が前提となる。また、経年効果を考慮し強度低減に関するデータも共存している事が不可欠である。なお、本論では、いわゆる「使い古しの感情論」は、考慮していない。

既に「コンバージョン」の考え方から、主に躯体以外の部分:内装、家具など、を転用して室内の利用方法が変更になる建物の使い方が進められている。もちろん、再利用において元の用途を変更する事は当然であるが、本論では、躯体構造自体も含めて組替えてきな転用が主眼であり、その際思慕の変更、形状の変更をも可能にするリユースを提案している。次頁には、本論の発想に関連する研究と最近のプロジェクト及び実施例(既存建物の用途変更に伴う屋根架構の新築例)を使い可能性と問題点を概略する。

Reusable Spatial Structure System like Cob Web with Visco-Elastic Joint Connections

Fig. A クモの巣の例（上に凸の実現例）

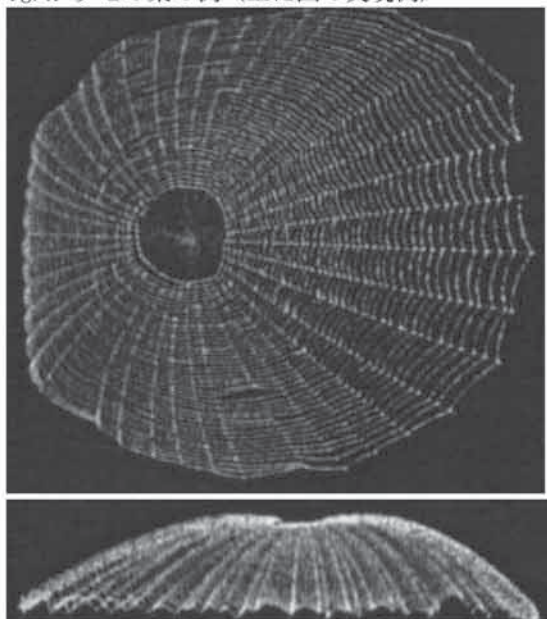


Fig. B ドームを月へプロジェクト(引用)



Fig. C 再利用(屋根架構の施工例)

具体的な提案例を以下に概説する。

Fig. A は、クモの巣が風によってむくみを持っているシミュレーション例である。本論では、念男性

ジョイントの遊びを利用して、吊り下がっている状態から自己可動により、「タグ」を閉めるような周方向へのポストテンションを導入する事で粘弾性メカニズムが調整される^{b)}。もちろん、網目パターンは、多様であり Fig. B にあるドーム状の構造形態が実現できる。

Fig. B では、地球上での製作を粘弾性ジョイントで実現する時必要なら、「折り畳み」可能なファブリケーションののち、月面まで搬送していける。また、規模など仕様に応じて形態変化が可能となろう。

Fig. C は、実際に施工されたものであり、もちろんリユースではないが、既存のガスタンクを通常の集合住宅に再利用する為、屋根架構をラチスシェルで作り変えたものである。本論で提案する手法では、この屋根架構に既存の構造物をなんらかの形状、規模変更の後、再利用する事になる。すわなち、粘弾性ジョイントの一部をディスジョイントして調整し搬送してクレーンで組み立てる事が可能となる。

ここで、最近提案されている「ドナーバンク」データベースへ登録されている既存のラチスシェルが、再利用できると考える。なお、ディスジョイントの論理と技術が実現できれば、溶接接合と本論の粘弾性ジョイントとを複合して新たな、構造形態の創生が要求された場合の再利用も十分可能となると考えられる。さらに、クモの巣の建設プロセスで素材そのものがねばねばなものも必要があれば開発されよう。そのとき、さらに複雑かつ自由な屋根架構形態が議論できるものと考えられる。

課題など

上記より、「ディスジョイント」のメカニカルモデルと「粘弾性ジョイント」の開発技術の実現が、本論の提案の基本的な克服事項であるため、今後具体的に検討する必要がある。

参考文献

- 0) 河村研究室：リカレント建築・都市研究会ニュースレタ、No. 1 創刊号、1999. 11
- 1) 2nd Int. Seminar on Environmentally Compatible Structures & Structural Materials, Czech Tech. Univ., Prague, Oct. 2001, 220p.
- 2) 河村廣：建築構造に求められるものは何か、Structure No. 72, 1999. 10, 21-24
- 3) 河村・谷他 2 名：GA を用いた鉄骨建築物解体順序の最適化、AIJ 近畿支部研究報告集、H13, 289-292

* 現在研究発表中の論文など

a) クモの巣のメカニズム

Space Structures 5 @ University of Surrey, Aug. 2002

b) 再利用関係

3rd Int. Prague Seminar on Environmentally Compatible Structures & structural Materials (IASS WG18), JUNE 2002

P. 2

*)岐阜工業高等専門学校

解体鉄骨の商品化とそれを利用した環境負荷低減建築構法

田中 直樹*)

キーワード1：古鉄骨 キーワード2：環境負荷低減 キーワード3：柱材
 キーワード4：床材 キーワード5：リユース キーワード6：コンクリート塊

1. 危機に瀕したRC系部材

鉄骨建物は着工建築面積から言えばRC建物より多く、ここ2、3年は木造を抜いて首位である。短工期を武器として低層建築(工場、倉庫、店舗)で圧倒的なシェアを誇る。しかし、中高層住宅や高層事務所の花形部門では、高層RC建築や鋼管コンクリートにコスト競争で破れ、これが全体的な鉄骨衰退の感をあおっている。だが、悲観することはない。図1に建設副産物排出量(発生土は除く)の推移を示す¹⁾。2002年度は全体で1億8200万トン、土木工事が55%、建築(新築、解体)工事が45%である。種類別ではコンクリート塊(コン塊)やアスファルト系コンクリート(アスコン塊)が約1億4000万トンを占める。これらは、2010年には1970年代RC系建築物が更年期に達するため2~3倍(約2~3億トン)に膨張する。コン塊やアスコン塊は、従来路盤材、路床材として処理されてきたが、その年間需要2億トンは飽和状態に近い。今年5月に始まった建設リサイクル法は、これら溢れ出るコン塊等処理のための技術開発費用としてRC系構造物のコストを確実に押し上げる。一方、ほぼ100%リサイクルに到達した鉄骨にはこの危惧がなく、未来は比較的明るい。但し、人類に突き付けられた環境負荷低減は生易しいものではない。

本論文は、鉄を資産蓄積の面からみてその積極的な利用を促すと共に、解体鉄骨の商品化を図りそれを再利用することで資産を更に有効利用し、最終的に環境負荷の少ない建築を提案するものである。

2. 資産としての鉄骨の積極的な利用

自動車、造船、機械等を含めた我が国の年間鉄鋼生産量は約7400万トン、その内建築は2100万トンである²⁾。図2は、建築の内鉄筋や薄鋼板を除く鉄骨の需要で、平均的に年間800万トン前後で推移している³⁾。図中の累積需要量は、1970年以前は、1959年のH形鋼生産開始

を起点として1969年度の600万トンまで直線補完し、2002年度以降は年間一律700万トンとして求めたものである。2002年度現在、累積需要量は約3億トンに達し、トン当たり10万円とすると約30兆円の資産を有することになる。これは、ここ2、3年の民間建設投資額に相当し将来も確実に増加する。RC系部材が今後確実に負の資産(負債)を蓄積していくことを考えると、早急に土木・建築とも鉄系部材へ移行することが望ましい。

3. 解体鉄骨の商品化と環境負荷低減

鉄骨建物の建設に際し、部材のリユースは魅力的である。しかし、これには数十年先の見通しや一品注文生産における建築のモジュール化の難しさ等が立ちはだかる。また、用途変更や増改築は何ら脈絡なく突発的に発生する。建物が玩具のレゴブロック等で構成されていない限り、解体・建て替えは避けられない。現時点では、「必要に応じ解体し使える部材を次に使う」との発想が、我々が慣れ親しんだものであり現実的である。先の図2には、新築は30年で解体するとして求めた解体鉄骨の累積量を示してある。2002年度では既に5000万トンにも達し、年間鉄骨需要の6倍に相当する。現段階ではこれらは全てスクラップとして回収され電炉や転炉により再生されている。ここでは、これら解体鉄骨を利用した建材並びにその商品化、そして試みとして大半をリユース、リサイクル材で賄った環境負荷低減構法を示す。

図3は再利用可能な建築解体部位とその商品流通のためのインターネット(IT)化を示したものである。解体部位として、梁は設備配管のための貫通孔、鉛直スタフナ、床との合成のためのスタッド等が再利用を阻む。また接合部は溶接が密集し健全部分が期待できない。従って、通常のラーメン骨組からは、残念なことに柱だけしか利用できない。しかし、これが使用鉄骨量の20%程度としても、2002年度でも1000万トンの量となる。この

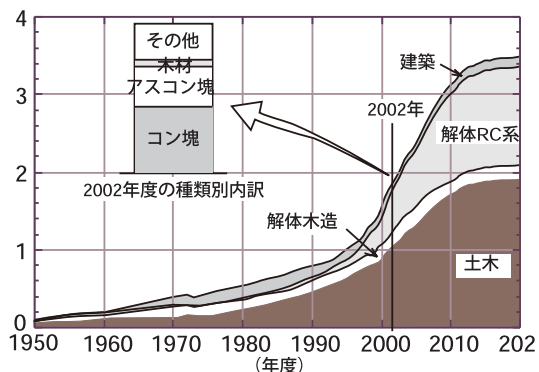


図1 建設副産物排出量の推移¹⁾

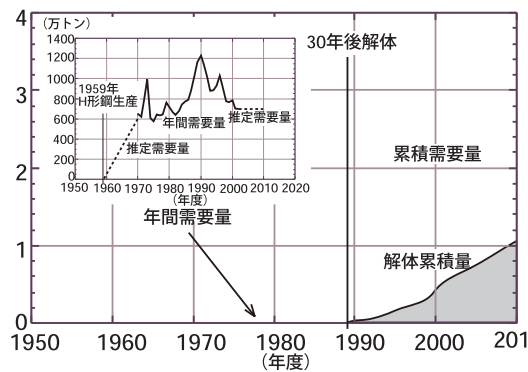


図2 鉄骨累積量と解体累積量の推移

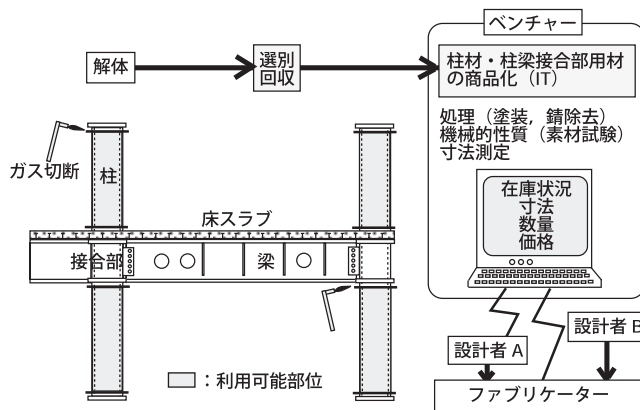


図3 解体部位と商品IT化

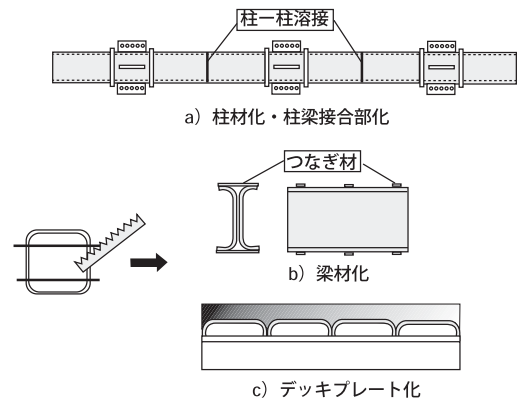


図4 解体鉄骨柱からの建材再生

表1 解体ビジネスの成立性

(万円/トン)				
	回収・保管	材料費	加工費	合計
新品	—	10	5	15
古品	1*1	2*2	4*3	7

(注記) *1: ガス切断費用は通常解体行為として含めない
 *2: くず鉄0.5万円/トンを基準
 *3: 曲げ加工費低減

解体鉄骨は素材試験により機械的性質が明かされ、塗装や錆が除去され、寸法が測定される。これらは、保管されると共に在庫状況としてITにより発信される。設計者は在庫部材を利用した設計を行い、ファブリケーターは部材を取り寄せ、それを図4のように柱材、梁材、デッキプレート材に加工する。このビジネスの成立性をコストの観点から見たものが表1である。算定根拠が幾分恣意的ではあるが、解体鉄骨利用品(古品)は新品の50%程度となり十分競合できる。

図5は解体鉄骨及びコン塊から再生された部材を床版に使用し、環境負荷低減を極力意図した建築である。デッキプレートのみで十分床荷重と剛性が確保できると考えると、歩行感触としてのコンクリートが必要となるが、これにコン塊を利用した長尺でしかも相互連結を考慮した床材を使用する(現状技術で可能と判断)。勿論、両者の間には防水、防音、固定等の機能を有したシーリング層が必要である。梁はダブルウェブなので設備開孔のための補強は不要となる可能性もある。なお、解体鉄骨利用は初めてのことであるから、以下のような配慮が必要である。

- 建築基準法の緩和：使用済み鉄骨材の追加
- 用途制限：工場、倉庫、事務所、店舗
- 層数制限：3層以下
- 応力制限：部材弾性
- 寿命制限：5～10年程度
- グリーン購入法による法的支援

これらを眺めると、飽き易く短絡的な世の中に適合しする。更に、このビジネスを展開させて行くためには以下の事が必要である。

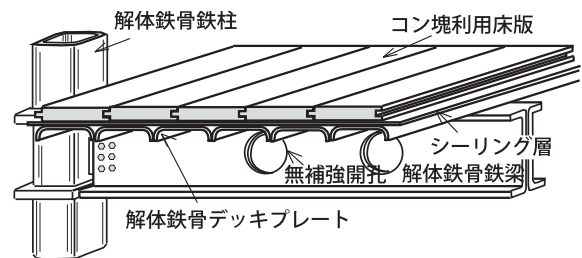


図5 解体鉄骨材とコン塊利用床版による建築構法

- 鉄骨の積極的な使用：地下に着目した桑村等のスチールファウンデーション⁴⁾は良い例である。
- 分離しやすく再利用しやすい部材：鉄骨でも梁は無開孔、無スタッドボルト、無補強スチフナが望ましい。
- 分離しやすい構法：SRC、CFT、RCなどの断面合成構造から異種部材分離構造への転換し、選別を用意にする。
- 鉄骨材のアイデンティティ：マイクロITタグ等による使用履歴自動認識は有効である。

4. まとめ

建設副産物発生的一面からRC系構造物の危惧的状況を鑑み、積極的な鉄骨の利用を推奨した。また、緊急な環境負荷低減要請に対し、解体鉄骨の再利用を図りそれを商品化することで資産を有効利用するとともに、コン塊も利用した構法を提案した。目先の利益を自制し将来に思いを馳せれば、鉄骨ひいては建築界の未来は明るい。

参考文献

- 竹ヶ原啓介, 佐藤明子: 建設リサイクル法とリサイクルビジネス, 建設物価5月号, pp.29-35, 2002年
- 千田光: 鋼材の資源循環環境負荷, 日本建築学会鋼構造運営委員会PD資料, 2002年8月, pp.15-24
- 鉄構技術: 平成2年までの着工面積と鉄骨需要, 1991年3月, p.93, 2001年度の着工面積と鉄骨需要量, 2002年6月, p.87
- 桑村仁, 伊山潤, 宮澤秀明: スチール・ファウンデーション(鋼製基礎), 建築雑誌 vol.117, No.1488, 2002年5号, pp.81-82

*) 鹿島技術研究所 建築技術研究部

鋼の高比強度を活かした環境適応型無柱空間構造：スケルトンシェルシステム

単層ラチスシェル構造
可変空間

杉崎 健一*)
ケーブル構造
新素材

リユース
省力化工法

1. はじめに

大きな空間を構築することは、建築の原点である。鋼は比強度の高さを活かし、多くの大空間・大スパン構造建築に利用されてきた。また、空間構造には、常に、最先端の鋼構造技術が使われ、同技術の発展に大きく寄与してきた。これまでの空間構造技術の開発は、「無柱空間をいかに合理的に構築するか」に注がれてきた。近年の社会情勢を考えると、21世紀には、さらに次の技術が求められる。

- (1) 質の高い構造
- (2) 社会環境の変化に適応する構造
- (3) 自然環境の変化に適応する構造
- (4) 合理的な生産
- (5) 新技術分野への展開

本論文では、上記5項目の技術を導入した新しい空間構造「スケルトンシェルシステム」(図1)についての概要と21世紀における可能性を述べる。

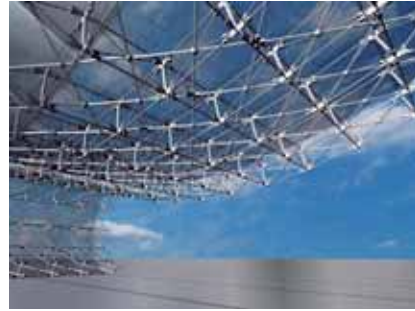


図1 スケルトンシェルシステムのイメージ

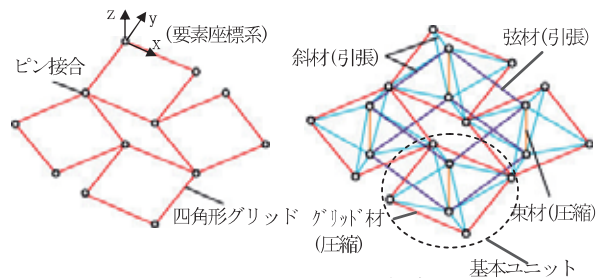


図2 構造システムのご概念

2. 構造システムの概要

図2に本構造の構造システムのご概念¹⁾を、図3に基本的な力の抵抗方法を、図4に接合部詳細例を示す。本構造は、構造的に不安定な四角形グリッドで構成するピン接合単層ラチスシェル構造の上下に細い引張材(以下、弦材という)を配置し、一般的にピン接合の単層ラチスシェル構造にはほとんどない面外曲げ剛性(xあるいはy軸回りの曲げ)を付加した構造である。面外曲げ剛性を付加することによって、任意の形状でも全体座屈を生じ難くし、形態抵抗を利用せず自由な形状の屋根、壁あるいは床を構成できる。弦材とグリッド材間は、斜材と束材によって接続し、形状を保持させる。図2に示すように、初期に、弦材と斜材に引張軸力を、束材とグリッド材に圧縮軸力を導入することによって、構造全体を部材の軸力のみで抵抗する自己釣り合い型構造とし、形態を保持する。また、適切な初期軸力の導入によって、外力に対して常に、弦材と斜材は引張軸力のみを、束材とグリッド材は圧縮軸力のみを発生させることができる。各構成部材の応力的な役割分担の明確化によって、引張材に鋼ケーブル、圧縮材に鋼管等のように、各種鋼材の特性を十分活かすことができ、鋼の高比強度を十二分に活かした軽量化と経済設計を可能にする。

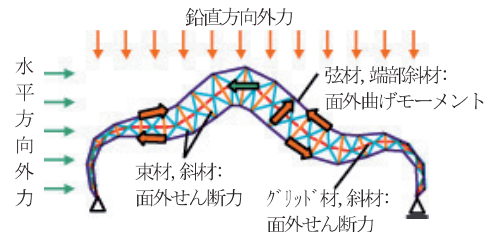


図3 構造システムのご概念

3. 質の高い構造

空間構造は、不特定多数が利用する建物や地震災害時等の防災拠点に利用されることが多く、さらに、社会資本のストック化が進む中、質の高い構造が要求される。本構造

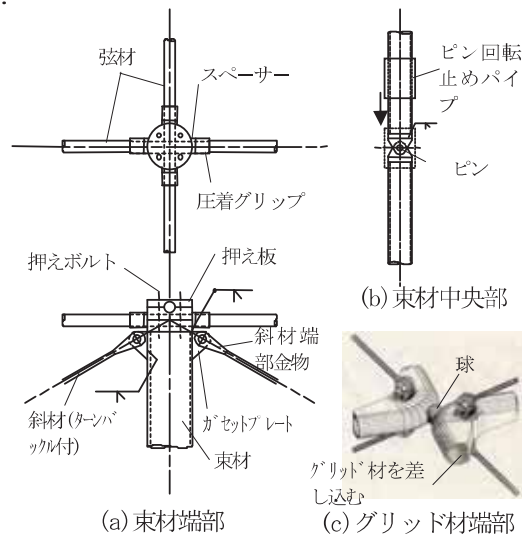


図4 接合部詳細(例)

は、軽量であるため耐震性能に優れ、地震国のわが国に適した構造である。一方、軽量でありながら、高い耐力、高い剛性および高い冗長性を有している。以上の本構造の構造性能は、構造実験および構造解析によって検証している¹⁾。また、弦材にアクチュエーター等を取付け、荷重時の軸力変動を制御する知的適応構造物も構築可能である。

4. 社会環境の変化に適応する構造

経済活動の成熟に伴い、都市を含めた地域性が重視されるようになり、個人生活や企業活動も多様化してきた。空間構造においても、社会環境の変化と多様化に適応する必要がある。本構造は、軽量かつ弦材の長さのみを変化させることによって図2に示す基本ユニットの組み合わせのみで任意の形状を構成できる。従って、既存建物に屋根を架ける、増改築、建物形状の変化(図5)等、社会環境変化に伴うニーズに柔軟に対応できる。

5. 自然環境の変化に適応する構造

地球温暖化が国際的な問題になっている。現在、鋼は100%リサイクル可能であるが、今後、100%リユースが課題である。本構造は、同一基本ユニットの構成のみで任意形状の空間を構成できる。また、各構成部材の応力的な役割分担を明確にすることによって、接合部を簡易にし、溶接を最小限にした乾式接合としている。この部材構成と簡易接合部によって、基本ユニットあるいは構成部材をそのまま再利用して、別の異なる形状建物を構築することができる(図5)。本構造は、ほぼ100%リユース可能であり、自然環境に極めて優しい構造である。

6. 合理的な生産

少子高齢化に伴い、今後、労働人口の減少が予想されている。労働集約型産業である建設業においては、機械化等

を含め、革新的な生産合理化が必要である。本構造は、地組した基本ユニットを弦材で接合し、束材の伸長あるいは屈伸のみのワンタッチで初期軸力を導入する(図6)。また、軽量であるため、大ブロックのプレアッセンブルが容易である。よって、機械化等による労務低減を可能にする。

7. 新技術分野への展開

アルミニウム合金²⁾やCFRP³⁾等、建築においても新しい材料が用いられるようになった。本構造は、鋼管製グリッド材をアルミニウム合金やCFRP製管に置き換え、鋼構造分野において発展した技術を他の材料技術に応用可能である。また、図7に示すように展開構造を構築し、地上構造物だけでなく、宇宙構造物にも適用できる。

8. まとめ

本論文では、スケルトンシェルシステムが21世紀に求められる5つの技術(第1章参照)を有していることを示した。鋼構造技術は、鋼材料建築に適用するだけでなく、新しい材料や建築以外の構造物にも応用可能である。この応用は鋼構造技術発展への1つの手掛かりとなり、本システムは、その1例として有用である。

参考文献

- 1) 兼光知巳他:引張材で補剛したピン接合単層ラチスシェル構造に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 561, 2002年11月(掲載予定)
- 2) 杉崎健一他:アルミニウム単層トラスの構造挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 480, pp. 113-122, 1996年2月
- 3) 米丸啓介他:CFRPトラス部材の圧縮特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 556, pp. 197-204, 2002年6月

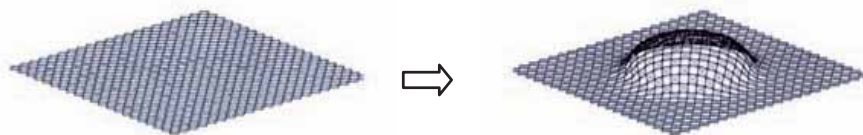


図5 社会環境の変化に伴う形状変化(平板からドームへ)

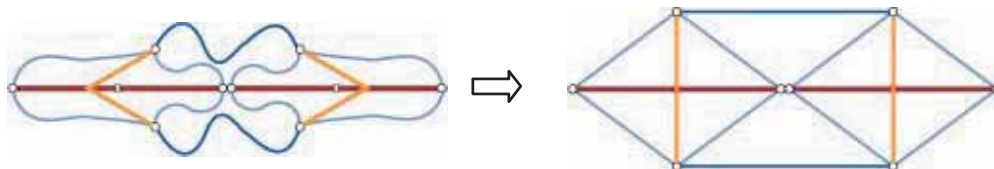


図6 束材屈伸による初期軸力導入



図7 展開構造への応用

*)清水建設(株) 技術研究所建築研究開発部兼構造研究開発部

鉄を身近に

山田 耕司^{*)}
道具
一般市民

日曜大工
簡単な技術

材料として鋼材
普及活動

1. 序

日常生活の中で見かける鉄は、ほとんどが工業製品となっている。鋼構造で用いる鉄もファブリーケーターで作成した鉄骨（半製品）を現場に搬入して組み立てる。一方、下地材として用いる軽量鉄骨は素材で現場に搬入され、現場で加工・組立が行われる。

さて、「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」、「鉄を使った新しい空間・機能をもった建築を支える技術」を考える前置きとして、鋼材の性質を考える。建築構造材料として見た鋼材は、物理的品質が安定している、耐火性が低い、酸化・腐食する、接合法が主に 2 種類存在する、などがある。この内、耐火性に対しては耐火鋼の開発、耐火被覆材の改良が行われている。腐食に対しては耐候性鋼が開発されている。また、さらに高強度の鋼鉄の開発も行われている。「鋼構造技術は何ができるか」という問いに対して、答えは「(お金をかければ)ほとんどのことが技術的には可能である」となるだろう。また、リサイクル材の品質を一般材程度の品質に保証するのは大変な手間を必要とし、低性能材料の有効利用策を検討する必要もあるだろう。リサイクル材の活用を考えると図 1 のように安価な材料としての普及、一般民生材料としての普及、木材代替品としての普及の 3 つが考えられる。

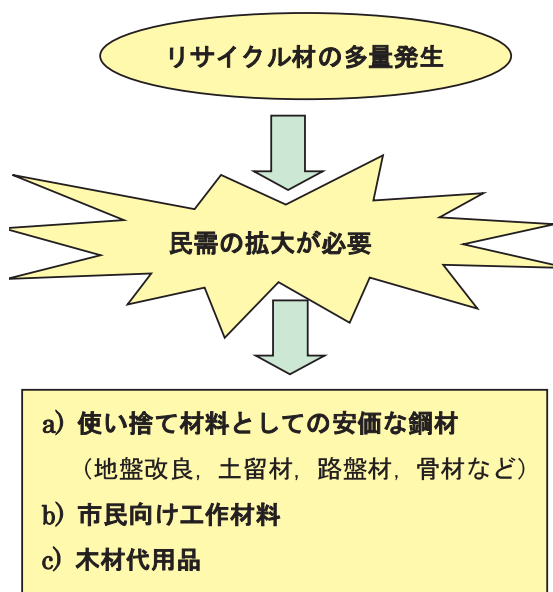


図 1 リサイクル材の活用に向けて

一方、技術者にのみ扱える材料は、製品としてしか市場に流れない。リサイクルを意図して一般に普及させるには、鋼材を一般市民が扱える身近な材料とすることが「21 世紀」の課題と考える。つまり、図 1 中の b), c) を目的とした材料開発が必要となる。

2. 身近な材料

一般市民が扱える身近な材料として、木材がある。我々は小学校から木工に親しみ、木を肌で感じ、木を自らの手で加工してきた。それ故、木材を加工するための道具、加工方法、注意点などを把握している。しかし、鋼材に関して同様の経験を持つ者は非常に少ない。図 2 に鋼材の一般市民への普及を阻害する負の連鎖を示す。この負の連鎖が回転することで、一般市民が日曜大工感覚で鋼材を使用する機会を奪っている。そのため、本来生ずるはずの市場も活性化していない。一方、木材の場合は図 2 の“ない”が消え、正の連鎖が生じ、民生材料としての市場が発生している。つまり、鋼材の一般人への普及を計るためには、木材と同レベルで一般人にも加工可能な鋼材、加工器具、接合用具の開発と学校における教育活動、一般への普及キャンペーン（啓蒙活動）が必要と考える。

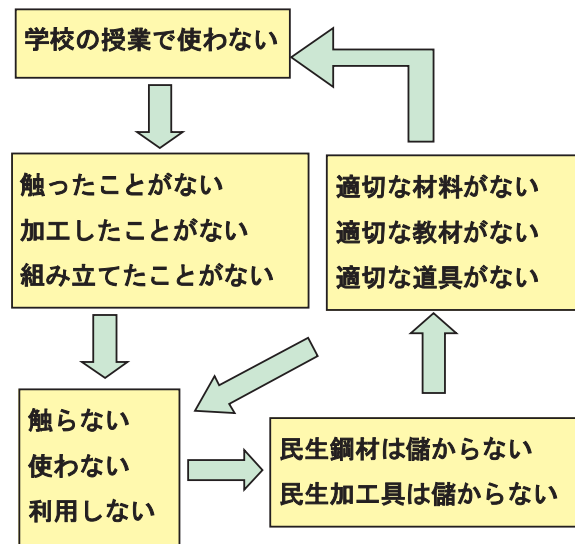


図 2 鉄鋼になぜ親しまないか

3. 商品開発目標

これまで、軽量型鋼を用いたスティールハウスの開発は行われているものの、鉄を木材と同レベルにまで身近にする研究開発は行われていないようである。そこで図3に示すように、木材および木材用加工具の代替品となる鋼材、加工器具、接合用具の開発が必要である。

鋼材の一般的普及を計るためには、木材と同等レベルの長さ当たり重量、加工性、接合性を有する必要がある。ここで定義する加工性、接合性とは、木造軸組構法住宅の木造部分を構法・施工法をそのまま鋼材に置き換えることのできるレベルを指す。従って、1人の人間が扱える重さの材料、施工道具である必要がある。

そこで次の商品開発目標を設定する。

- ・木材と同等の重量の鉄骨（柱で 7.2kg/m、梁で 30kg/m 以下）
- ・上記の鋼材専用の梁柱仕口部品
- ・上記の鋼材に簡単に取り付けられる2次部材接合具（2次部材は既製品の軽量型鋼等を利用、簡易なものは接着、機械的接合で取り付け）
- ・上記の鋼材の切断、孔あけ、を容易に行える電動工具（木造用市販レベルの価格で）
- ・上記の鋼材専用の安価なトルクレンチ
- ・スタッド溶接程度の簡易な溶接法およびその機材（家庭用品市販レベルの価格で）
- ・以上の利用ガイド（一般的ガイドとマンガ）

以上が商品開発目標となる。

また商品開発と並行して、次節で取り上げる普及活動サンプル品として、学校用教材、小学生の夏休み課題用キット、犬小屋キットなどを開発する必要がある。

4. 普及活動

普及活動には、2つの主軸が考えられる。1つは学校教育での利用、もう1つはホームセンター、東急ハンズなどでの一般市民へのデモンストレーションである。

学校教育に対しては、小学校4年～中学校3年間での教材開発と教育研究会でのデモンストレーション。学校への教材貸し出し、が必要となる。教材例として、表1の例が考えられる。また、小中学校への出張授業を大学などとタイアップして行う方法もある

一般市民への普及拠点として、各地に存在するホームセンターは有効と考える。しかし、商品化初期における一般市民へのデモンストレーションとして、東急ハンズでのデモンストレーション、モノ・マガジン（文林堂）などの特集記事、広告が必要となる。広告方針として、本田技研工業が米国でオートバイを売り出した時のキャンペーン「You meet the

nicest people on a Honda」のように利用法、入手法などを分かりやすくした広告を行う必要がある。また、当面は、工具の利用方法などを説明できる販売代理店（できれば金物屋程度）などを展開する必要がある。

5. 型式認定

以上に述べた鋼材は、木造軸組構法住宅用木材を目標として開発するので、できれば簡易な構造設計法を確立し、型式認定を取ると良い。型式認定を取り、誰でも計算可能な簡単な構造設計法（もしくは設計ツール）が存在し、木造と同等の重量、加工性を有するならば、木造と並ぶ構法になる可能性がある。

6. 結語

本報では、鋼材のリサイクル性を生かし、鋼材の利用促進を図る方策として、鋼材の一般市民への普及を提案し、その具体的対策を述べた。鋼材の利用を促進するためには、高付加価値の鋼材の開発、新たな需要の喚起が一般的手段であるが、リサイクル性を十分に生かすには、需要の喚起が必要と考える。本提案はその1つに過ぎず、時間と初期（教育・啓蒙）投資を必要とする。しかし、鋼材の有効利用を図る上では良い手段と考える。

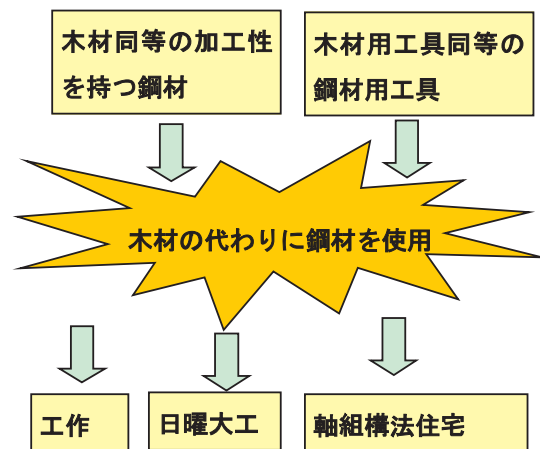


図3 商品開発と普及

表1 教材例

小学校4年	ボルト接合トラス橋キットの作成
小学校5年	ベルトドライブによる4輪車組立キットの作成
小学校6年	ボルト接合によるイスの作成
中学校1年	ボルト接合による小屋キットの作成
中学校2年	ボルト接合による犬小屋の作成
中学校3年	板金加工と溶接による工具箱作成

*)豊田工業高等専門学校

第4章 第二期の活動成果

4.1 21世紀鋼構造フォーラム WG1の活動

- ①高性能要素の建築分野への適用
- ②ユニットセル構造システムの提案
- ③地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム

本 WG では、資源循環社会を構築するための新たな要素技術や計測技術に基づき、図 4.1 に示すエネルギー集中型人工地盤と再利用可能な簡易ユニット建築による地域防災制御システムの提案を目指し、以下の3領域の研究を行った。

領域 1)：高性能要素との複合化による鋼部材の高機能化：高性能材と鋼材とを複合化した新たな要素技術の可能性検討、及び高性能材を接合部材やセンサーとして機能させる新しい利用法の提案を行った。

領域 2)：ボックス型立体フレームによる積層建物：角形鋼管を三方向に溶接した単一ユニット同士を、着脱可能な機械式継ぎ手により 3.3m 角の立方体フレームに組み立て、さらにこの立方体フレームを連結・積層することで建築物を構築する架構システムの提案を行った。

領域 3)：地震エネルギー集中型人工地盤：人工地盤に地震エネルギー吸収のための鋼材ダンパーを設け、大地震時にも人工地盤上の建物をほとんど無被害にできるような人工地盤について検討を行った。

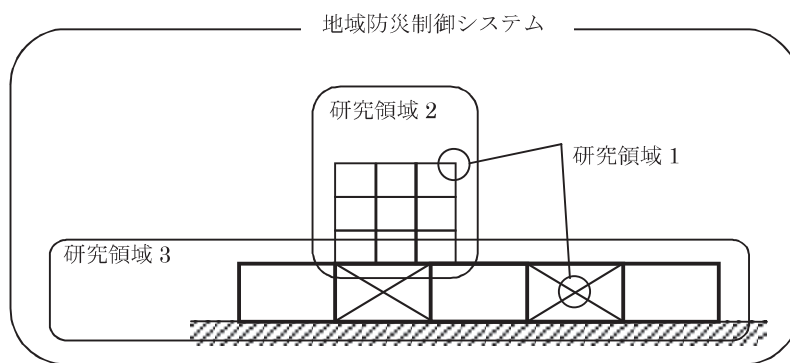


図 4.1 地域防災制御システム

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・高性能材料の力学挙動と損傷検出に関する検討を行い、その特性を明らかにした。
- ・ボックス型立体フレームを積層して構成する多段免震構造の耐震性能を、基礎免震構造と比較して明らかにした。
- ・人工地盤層で建物への入力地震動を低減することを目的とした地震エネルギー集中型人工地盤の構造設計法、及びその有効性を明らかにした。

高性能要素の建築分野への適用

21世紀鋼構造フォーラム WG1

自己増強
劣化診断

高 靱 性
繊維補強

リユース
複合部材

1. はじめに

部材の高性能化には、①素材そのものが優れた特性を有するものと、②異なる素材との複合化により優れた特性を有するものがある。①については、高強度・高靱性材料、自己修復材料や形状記憶合金等が、一方②については、繊維強化した複合材料等が挙げられる。これら高性能要素の現状技術を紹介し、建築分野への適用方法について述べる。

2. TRIP 鋼

2.1 TRIP 鋼の特徴

特定部分に使用される自動車用鋼板や一部のオーステナイト系ステンレス鋼には、図1に示すように応力がかかり、あるひずみに達すると原子の結晶構造として準安定のオーステナイト（面心立方格子）が、加工誘起マルテンサイト（体心立方格子）に変態し、強度、延性が増加する性質がある。このような変態現象の起こる鋼材は「変態誘起塑性鋼」、通称「TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼」と呼ばれている¹⁾。

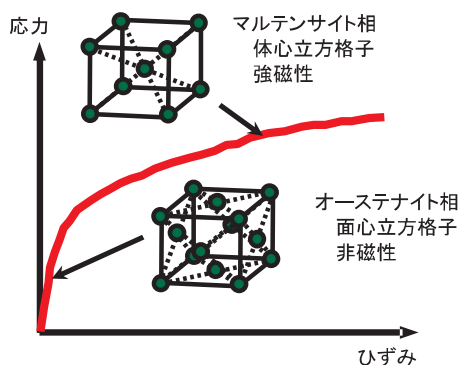


図1 応力-ひずみ関係と結晶構造²⁾

したがって、図2に示すように例えば通常の鋼材が引張力を受けると応力の最も大きい部分から塑性化してくびれが生じ、その場所から破断するのに対し、TRIP 鋼の場合は、応力の最も大きい部分からオーステナイトの一部が硬質で強度の高いマルテンサイトに変態していく。つまり、局部的に弱点となる部分を自ら変態することで増強するので、塑性範囲が次第に広がっていき、結果的に、部材全体として50%以上の大きな均一伸びが得られるのである。

さらに TRIP 鋼には、ひずみを受けるに従い磁性が強くなる性質がある。これはオーステナイトが非

磁性でマルテンサイトが強磁性であることに起因する。そして一旦変態した結晶構造は荷重を取り除いても元の結晶構造には戻らない。

つまり鋼材の塑性の程度は変態したマルテンサイト量すなわち磁性の強さとよい相関を示す²⁾。

以上より、TRIP 鋼には、①高靱性（高延性）の材料で、破断強度も高く、②過去に受けた最大ひずみが磁性の強さとして記憶されるという特徴がある。さらに一部のオーステナイト系ステンレス鋼の TRIP 鋼の場合には、③さびにくいという特徴も付加される。

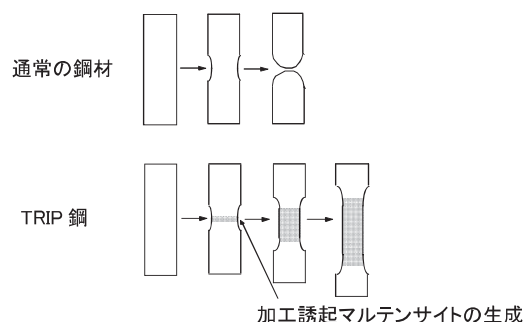


図2 高靱性（高延性）のメカニズム³⁾

2.2 自動車分野への適用

自動車の分野では、「燃費の向上」と「安全性の向上」の両立が社会的なニーズとなっている。自動車部材用鋼板を高強度化することは、鋼板の薄肉化すなわち車体の軽量化につながり、これらの要求を満たすための手段となる。

また一方では、強度特性以外に種々の複雑な形状に対する「造形性（加工性）」も強く要求される。自動車の鋼板は、プレス加工によって最終的な部材形状に成形されるので、一般に強度上昇にともない低下する鋼板の延性が重要となる。

そこで、図3に示すように円盤状の鋼板を円筒カップ状に成形する深絞り成形において、同一強度の従来鋼ではある伸びで壁部に亀裂が入ってしまうのに対し、「自動車鋼板用の TRIP 鋼（低合金 TRIP 鋼：フェライト+ベイナイト+準安定の残留オーステナイト）」では十分な延性（加工性）に優れている。

また、加工後の強度が高く、衝撃エネルギー吸収能力および疲労耐久性にも優れるという特徴をもつことからバンパーをはじめとする衝突安全部品等に適した高強度鋼板であるといえる⁴⁾。

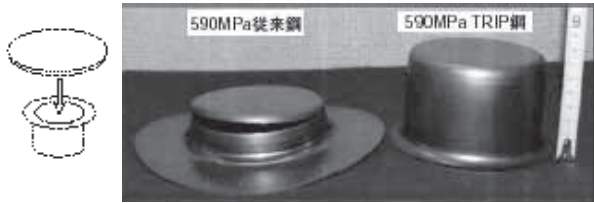


図3 深絞り成形性（プレス加工性）⁴⁾

2.3 センサー分野への適用

過去に受けた最大ひずみが磁性の強さとして残る、という性質を利用して、TRIP 鋼と磁気測定装置を組み合わせることで最大ひずみセンサーとして利用する方法が確立されている。

ここで用いられている TRIP 鋼は、計測を主目的としているため、規格化されたオーステナイト系ステンレス鋼の代表である SUS304 鋼に対し、磁性測定の安定性および信頼性を高めるべく成分調整した特殊なステンレス合金である²⁾。

また、図4は両サイドに切欠きを入れた SUS304 鋼の試料を引張った時の磁性の強さをガリウム・ヒ素の薄膜を使った半導体素子による磁気センサーを用いて測定し、ビジュアル表現したものである⁵⁾。

このように、磁気像を可視化する技術も研究されており、今後、疲労や劣化も含めた非破壊診断システムの実用化が期待される。

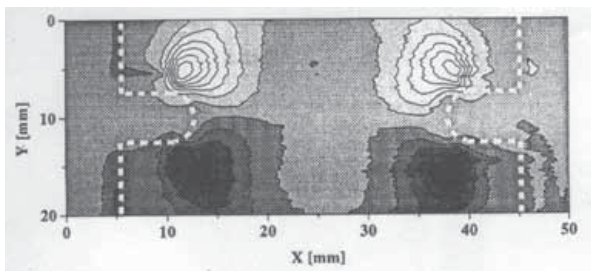


図4 SUS304 鋼の応力による磁気像⁵⁾

2.4 建築構造部材への適用

自動車分野やセンサー分野で用いる TRIP 鋼は、ステンレス鋼（SUS304 鋼）に近い機械的特性を示すものと考えられる。したがって、「ステンレス建築構造設計施工基準・同解説⁶⁾」に準拠すれば、規模に制限が設けられているものの技術的にはある程度は設計可能である。

今後は、普通鋼よりも高強度・高靱性であるという特徴を大いに生かして、靱性能を期待する部位への積極的な適用を可能にしていくことや大規模建築にまで対象枠を拡大していくことへの対応が望まれる。

図5～9に適用例を示す。図5は、RC 部材の端部鉄筋に TRIP 鋼を用いたもので、部材端部の曲げ強度が上昇し、塑性領域の広がり期待される。図6は、強度上昇と靱性能向上を考慮してアンカーボ

ルト径を小さくすることが可能となる。図7は、ダンパー鋼板へ利用したもので、TRIP 鋼の場合はモーメント勾配に合わせた束部分の形状となるような配慮が不要となる。図8は強度上昇と靱性能向上を考慮してスプライスプレートの厚さやボルト孔部の縁空きを小さくすることでプレートサイズを小さくできる。また、高靱性なので HTB 接合部を梁端部に配置することも考えられる。図9は梁端部の鋼材として適用したものである。母材の強度上昇により相対的に弱点とならないよう溶着金属の強度を上昇することで梁端部の靱性能を十分に期待することが可能となる。

また、自動車用鋼板のようにプレス加工後の材料強度を重視する薄板構造や折板構造、冷間成形形鋼管等にも適した鋼材であるといえる。

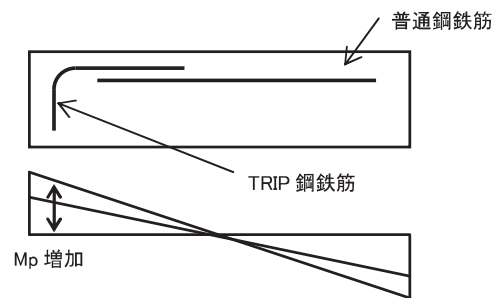


図5 RC 部材の端部鉄筋への適用

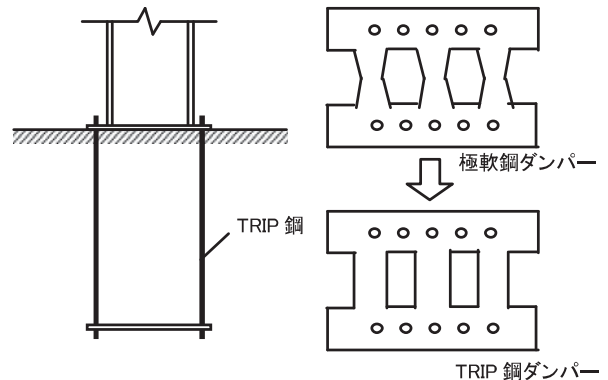


図6 アンカーボルト利用 図7 ダンパー鋼板利用

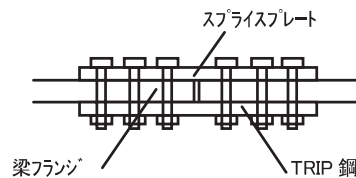


図8 HTB 接合のスプライスプレートへの適用

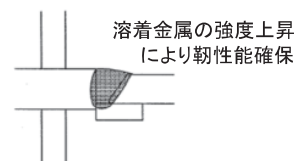


図9 梁端部の鋼材への適用

2.5 リユース市場への展開

資源循環社会へのニーズが高まる中で、建築構造部材をユニット化し、再利用をはかるリユース市場の確立が模索されている。そしてこの市場ではリユース部材の損傷評価が重要な項目となる。

現在の評価方法としては、目視検査の他、放射線や超音波等を用いた非破壊検査が主であるが、材料に実際にクラック等が発生した後でないとは異常を検出できない。しかし、クラック発生以前の劣化損傷により変化する磁場を測定し、かつこれを定量化することで材料の劣化損傷の程度が評価できる。

したがって、TRIP 鋼を用いたリユース部材であれば、磁気測定結果および損傷の程度を IC タグに記録していくことで、履歴付きのリユース部材が比較的容易に作る事が可能である。

2.6 自己診断システムに向けて

TRIP 鋼を用いた柱、梁、床、壁といった構造物の疲労度や損傷度を検知するシステムができれば、たとえ人がいけない場所であっても、超音波探傷検査のように長い時間をかけずに、迅速かつ精度の高い検査が可能となる。これにより、大事故になる前に検知した状況に応じた補強措置や適切な安全対策を施すことができる。

土木分野では RC 梁に TRIP 鋼の主筋を用いた自己診断型インテリジェント構造が提案されている²⁾。

2.7 TRIP 鋼に関するまとめ

図 10 に TRIP 鋼の特徴を活かした適用別分類を示す。

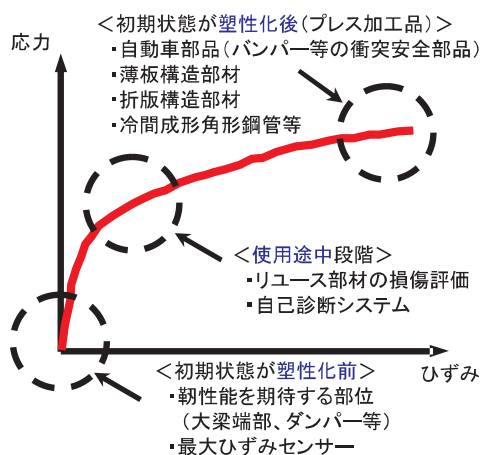


図 10 TRIP 鋼の適用別分類

ユニット化されたリユース部材としての TRIP 鋼材を普通鋼よりも優れた防錆効果や高靱性能を必要とする部位に採用し、磁性測定による劣化損傷自己診断機能を発展させたモニタリングシステムと組み

合わせることで資源循環型でかつ安全性の高い建築物の実現が期待される。

なお、TRIP 鋼の磁気特性について、細径の鋼棒に一樣引張応力が作用する状態でのセンサー利用が主であったため、圧縮応力が作用した場合のデータが不足している。そのため、一方向および交番繰り返し載荷時の素材実験により、磁気特性を把握することや SUS304 との材料特性の比較を行うことは、実用化に向けて重要な研究課題である。

3. 繊維強化金属

3.1 繊維強化金属とは

高い強度と剛性、導電性、電気絶縁性、耐摩耗性、耐熱性、耐浸食性、放射線吸収性等々といった様々な性質をもつ材料を複合化することで単独材料では得られないような特性を持った新材料をつくる事が可能である。

特にプラスチックの特性は繊維との複合化によりその効果が発揮され、FRP（繊維強化プラスチック：Fiber Reinforced Plastics）として航空宇宙分野や医療分野、スポーツ・レジャー分野へと既に身の回りに幅広く利用されている状況である。

一方、金属についても繊維との複合化が実用化されており、FRM（繊維強化金属：Fiber Reinforced Metals）と呼ばれている。特に繊維を包み込むマトリクス（基盤）の材料を金属とした場合には、FRP に比べ高温下での特性に優れる点の特徴であり、軽量化と高い強度の確保が重要な条件となる航空宇宙分野等で利用されている⁷⁾。

3.2 繊維強化金属の適用

3.2.1 アルミナ繊維

高電波透過性、高電気絶縁性、耐摩耗性、耐熱性に優れた繊維で、レーダー保護用ドームや高圧送電線、砥石等に利用されている。また、マグネシウムをマトリクスとした FRM は、耐熱性を活かして自動車エンジン用プッシュロッドとして製品化されている。1000 度以上の耐高温クリープ性は構造材の強化繊維として有効である⁸⁾。

3.2.2 ボロン繊維

高強度、低熱膨張率、高硬度、耐疲労性、振動減衰性、中性子吸収能力等に優れた繊維である。特に圧縮強度が引張強度の 2 倍もある繊維材料は他に類を見ない。

航空宇宙分野では主に製品化された FRP シートが利用されている。またアルミニウムをマトリクスとした FRM 複合管材はスペースシャトルの主要構造部品として標準使用されている。基本的に非常に高い

剛性と一定の熱膨張率が要求されるような過酷な条件に適した繊維材料であるといえる。

スポーツ・レジャー分野では、優れた振動減衰性と高い圧縮強度からゴルフシャフトや釣竿、スキー板等に炭素繊維と組み合わせて用いられている。正の熱膨張率をもつボロン繊維と負の熱膨張率をもつ炭素繊維のハイブリッド使用で熱膨張率をゼロにすることも可能である。その他、高い硬度を必要とする工業製品や中性子吸収能力を活かした核燃料廃棄物の貯蔵施設等への適用が期待される。

図 11 にアルミニウムをマトリクスとした FRM の拡散接合による成形方法を示す。拡散接合とは、2 つ以上の金属板に一定の加圧・加熱を加える事により、接触部分で原子や分子がお互いに行き来して二つの物体が一体化する熱圧着接合法である。ここでは、ボロン繊維を特殊なアクリル樹脂によって仮接着したプリフォームシートが利用されている。なお、アクリル樹脂は予備加熱の段階で完全に蒸発する⁸⁾。

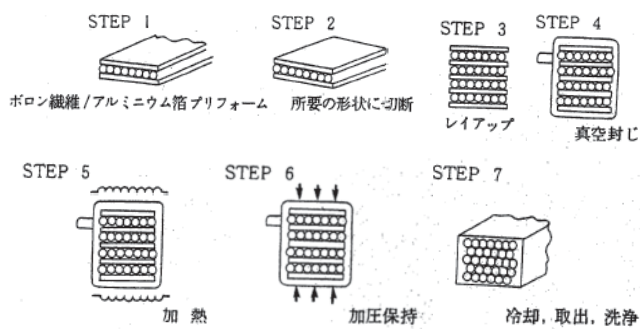


図 11 ボロン/アルミニウムの拡散接合⁸⁾

3.2.3 炭素繊維

高強度（鉄の 5~10 倍）、高弾性率（鉄の 2~3 倍）、低比重（鉄の 1/4.6 倍）、耐疲労性、導電性、低熱膨張率（寸法安定性）、耐熱性、電磁波遮蔽特性、化学安定性（耐腐食性）等に優れた繊維で、繊維補強材として「軽くて、強く、腐食しない」といった優れた機械的性質をもつ材料である。

航空宇宙分野では、人工衛星のソーラーパネルやアンテナ、ロケットノズル等、スポーツ・レジャー分野では、ゴルフシャフトや釣竿、ヨットのマスト等、土木・建築分野では、トラス部材や柱・梁・床の補強等に幅広く利用されている。

しかしこれらは、FRP としての利用がほとんどで、金属材料との複合化においてもエポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維ストランドまたは炭素繊維シートをエポキシ樹脂系接着剤で貼り付ける方法等が用いられている⁸⁾。

金属をマトリクスとする場合については、アルミニウム系またはマグネシウム系の合金によるプリフォームワイヤを並べてホットプレスする方法が主で

あるが、様々な種類の存在する炭素繊維全般にわたっての有効性は確かめられていない⁷⁾。

したがって、鋼材との主な複合化としては、引張力のみを受ける部位に製品化された FRP の炭素繊維シートを取り付ける方法が考えられる。図 12 は曲げ応力を受ける小梁や間柱の中央下端（引張側）フランジ面に炭素繊維シートを配置した例である⁹⁾。図 13 は格子梁の接合部を「ピン接合ディテール+炭素繊維シート」としたものである。図 14 は軸力がメタルタッチにて、せん断力がシアキー等にて伝達できるピン接合形式の柱（梁）接合部の鋼材表面に炭素繊維シートを配置することで曲げ応力も伝達できる剛接合形式としたものである。

これら FRP の炭素繊維シートの代わりにアルミニウム合金等による FRM の炭素繊維プレートを着着剤で貼り付けたり、スプライスプレートとして高力摩擦ボルト接合することも考えられる。

その他、張弦梁のテンション材としての利用も考えられる。

炭素繊維シート等を鋼材に貼る場合には、接着剤が比較的低い温度から耐力低下を起こすため、長期鉛直荷重を受ける部材に関しては、耐火性能について十分な注意が必要である。

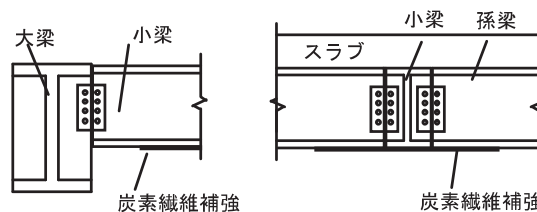


図 12 小梁(間柱)への適用

図 13 格子梁への適用

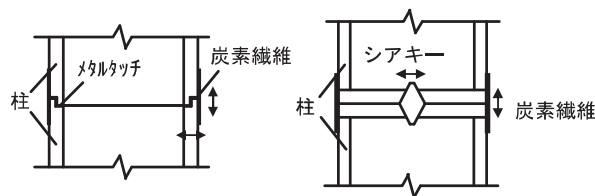


図 14 柱(梁)への適用

3.2.4 SiC 繊維

高強度、高弾性率、耐熱性、耐熱衝撃性、耐酸化性、電波吸収性に優れた繊維である。航空宇宙分野では、FRP として航空機の機体構造体に実用化されている。また、SiC 繊維をホットプレスして製造される超耐熱・高靱性セラミックスを用いた部材の開発が行われている⁸⁾。

3.2.5 アラミド繊維

高強度、高弾性率、耐熱性、耐摩耗性、振動減衰性に優れた繊維で、コードやホース等の繊維強化ゴ

ムの用途に多く使用されているが、それ以上に利用されているのがFRP用途である。非導電性、非磁性の性質を活かして鉄道関係や高速道路の橋脚耐震補強等に適用されている。また、図15に示すように鉄筋の替わりとしてパラ系アラミド繊維を組紐状に編み、エポキシ樹脂で固めた棒材（AFRP ロッド）が製品化されており、超高層住宅の電波障害対策として外装プレキャスト板の補強筋に使用された実績がある⁸⁾。

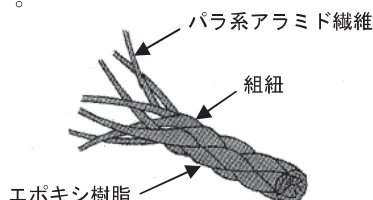


図15 AFRP ロッド (フィブラロッド)⁸⁾

3.2.6 PBO 繊維

高強度、高弾性、クリープ特性、耐熱性、難燃性、耐衝撃特性、振動減衰性に優れた繊維である。図16にPBO 繊維（ザイロン）と炭素繊維、アラミド繊維の振動減衰挙動を示す。PBO 繊維は炭素繊維と同等の高い弾性率でありながら減衰性が良い。

膜材利用以外ではテニスラケットやヘルメット等にもFRPとして利用されているが、その優れた特性をさらに活かすよう応用開発が進められている⁸⁾。

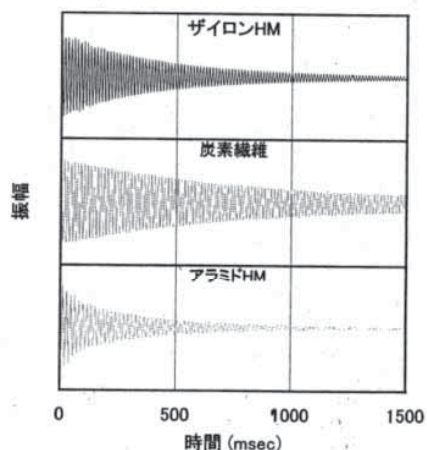


図16 一方向強化複合材料の減衰挙動⁸⁾

3.3 繊維強化金属のまとめ

繊維強化金属として、FRPと鋼材の複合化については接着剤の性能、特に耐熱性が課題であり、長期鉛直荷重を受ける部位への適用には十分な注意を要する。また、マトリクス金属としてはアルミニウムやマグネシウム等が適しており、鋼材をマトリクスとしたFRMは製造が困難である。

しかし、繊維は単に強度面の強化だけでなく、そ

の種類によって低熱膨張率や電波吸収性、耐熱性、振動減衰性といった様々な特性を合わせもっており、要求性能に応じて適切な繊維を選択することによる効果は多岐にわたる。

また、繊維シートに代表されるように非常に薄い層状であるため、母材を含めて複数のシートを積層させることによる複合化が可能である。

1種類の繊維に限らず複数の繊維からなる複合材の組み合わせは数限りなく存在し、今後の可能性に期待したい。

4. まとめ

TRIP 鋼および繊維強化金属の特徴と利用方法の紹介およびその将来性について示した。

両者とも建築分野に限らず様々な分野での活用の可能性をもった高性能材料であることから、1つの分野に規制されずに、その特徴を有効に活かした利用方法を今後も提案していきたいと考えている。

[謝辞]

TRIP 鋼の情報提供および実験に向けての試験体製作等に対しJFEテクノリサーチ(株)の大坪宏氏、TRIP 鋼の計測センサー製作等に対し(株)光電製作所の流郷繁氏には多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 藤田利夫他訳：「鉄鋼材料の設計と理論」、pp.177-179、丸善株式会社
- 2) 足立幸郎他：「自己診断機能を有する構造材料を用いたインテリジェント耐震構造に関する研究」、土木学会第55回年次学術講演会、pp.506-507、2000.9
- 3) 生きる建築へのアプローチ(その2) 鋼構造への適用と技術的検証、21世紀鋼構造フォーラム シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」、独立行政法人建築研究所、pp.11-12、2002.11
- 4) 高橋 学：「自動車用高強度鋼板の開発」、新日鉄技報 第378号、pp.2~6、2003
- 5) 日刊工業新聞、1999.9.22、豊橋科学技術大学 太田研究室
- 6) 「ステンレス建築構造設計施工基準・同解説」、ステンレス構造建築協会、1995.7
- 7) 香川 豊著：「繊維強化複合金属の基礎」、シーエムシー出版
- 8) 「繊維強化材と複合材料への応用特集」、強化プラスチック Vol.47 No.8、2003.8
- 9) 服部明生他：「連続繊維プレートによる鋼構造建物の長寿命化に関する基礎的研究(その1~3)」、日本建築学会中国支部研究報告集 第27巻、pp.217~228、2004.3

ユニットセル構造システムの提案

21世紀鋼構造フォーラムWG1

リユース
積層構造

ユニット化
着脱容易な接合

ボックスフレーム
多段免震構造

1. はじめに

現在、資源循環型社会を目指す途上において、建設行為が果たす役割が益々重要となってきている。特に従来のようなスクラップ&ビルトから脱却する、新しい性能と技術を持った建設システムが要求されてきている。

実際、博覧会のイベント施設の仮設建築物に、解体・リユース・移築を前提とする接合部をもった構造物や、仮設建築物以外でも、ある低層ホテルでは、建物全体の移築、部分保管可能なシステムを採用している事例も見られるようになり、社会的ニーズだけでなくビジネスニーズも十分高まってきている。

本論文では、そのニーズに答え、従来技術を使い実現性を高めながらかつ、斬新な鉄骨架構体とその接合及び新材料を取り込んだ、「ユニットセル構造システム」の提案、またこのシステムならではの応用となる「多段免震構造」のスタディーを試みたので報告する。

2. 提案

2.1 要求されるシステム

さて、全章で述べた要求される、新しい性能・技術を持った建設システムとは何か。以下の項目を満たすものが考えられる。

- ・プラン可変性
- ・リユース性
- ・施工・解体・運搬・保管の容易性
- ・耐震性
- ・経済性

上記の要求される性能に対応するためには、現在の建物の構築方法を見直す必要がある。すなわち、構築の全体性、現場施工性、建物の1回性、地震リスクの担保方法、非履歴性である。解決するには、以下の方法が考えられる。

- ・建物の構成単位のブロック化
- ・単位部材の構成によるユニット化
- ・接合部の着脱容易化
- ・軽量化
- ・主架構保護、地震応答低減容易化
- ・材料履歴保証化

満足する回答としては、様々に考えられるが、現在の技術及び最近の新技术を組み合わせる1つの回答として次に示す。

2.2 提案システム概要

提案するユニットセル構造システムを図1、2に示す。このシステムの特徴を以下に示す。

- ①BOX型の積層構造物
- ②3.3m角のモジュールを採用
- ③材中央で接合部をもつエレメントで構成
- ④エレメントの主要接合方法はシアーキー
- ⑤部材は、角型鋼管（150角～200角）
- ⑥極稀地震で弾性設計
- ⑦ユニット間にデバイス装置挿入可能

(1) 積層構造

建物の全体を部分の集積と捉え、構成している部分をユニット化とすることが、リユースを可能とする早道である。但し、ユニットとする場合、可変性に対応するユニット単位が重要となる。本提案では、ユニットの構成は2段階とし、1つは、BOX型フレームを1ユニットとし、1ユニットはさらに基本的に8つのエレメントで構成する。エレメントは既に製作されている。建物はユニットを平面に隣接、あるいは積層して構築する。本提案では、5階程度の建物を想定している。

(2) モジュール

1ユニットは、3.3mの立方体とした。通常の住宅、事務所の建物階高は3m～3.5m程度であること、1ユニット10m²程度すなわち3坪（6畳）であり、身近な空間単位であること、3X3ユニットが10mX10mの大きさになることから、このモジュールを採用した。

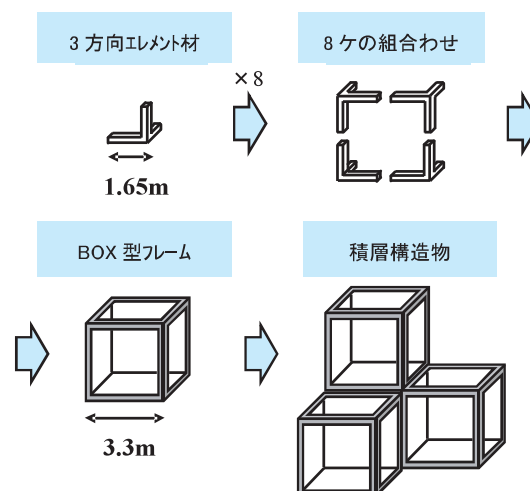


図1：ユニットセル構造システム

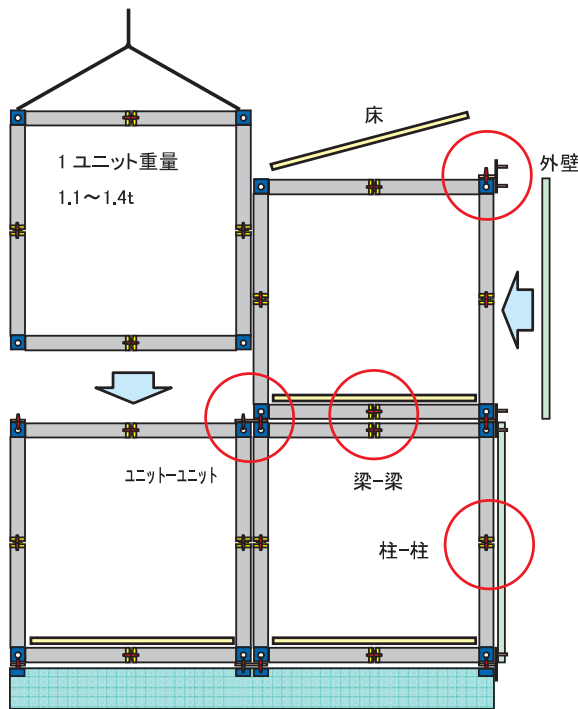


図2：ユニット積層図

(3) 3方向エレメント材

BOX型ユニットを構成するエレメントをどのように分割すれば最良になるか。応力条件、簡易な接合、コストを満足する必要がある。1つの方法として、直線材とその接合部に分けることが考えられる。しかし、最大の問題は、部材の集まる接合部を剛にするため着脱可能な簡易な接合の実現が難しい。本提案は、部材の中央にエレメントの接合を設け、3方向に向けた角型鋼管部材を接合した単位を1エレメント「3方向エレメント材」としたことを特徴とする。このエレメントは、どの方向でも柱梁に使用でき、また、地震時曲げ応力が中央部で0となることから、エレメント接合がピン接合となる利点がある。

(4) 接合方法と建物構成

接合方法を各部位毎に述べる。

①柱-柱

柱と柱は図3にあるように、テーパ付きシアーキーとリング状鋼板を用いる。シアーキーは取り外しができ、せん断力のみ伝達する。リング鋼板により接合部のスムーズな回転ができる。上下方向の離間にも対応できる。

②梁-梁

梁と梁は、基本的に柱間と同じ機構としている。但し、エレメントの離間に対応するため、「炭素繊維補強バンド」により端部の孔明どうしを締め付ける、あるいは、端部の溝をシアーとして、鋼板をあてがい、炭素繊維で巻きつける方法を考えている。

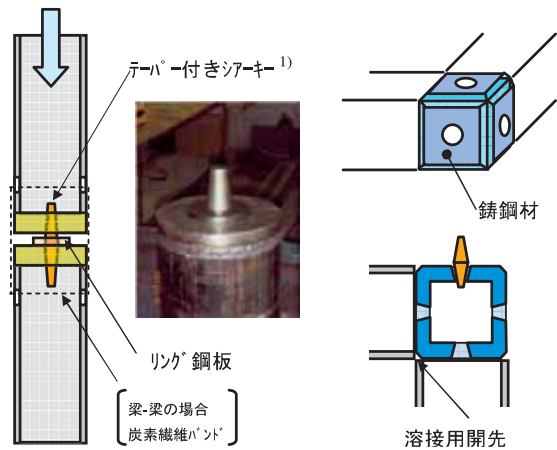


図3：柱-柱接合部

図4：鋳鋼造接合部

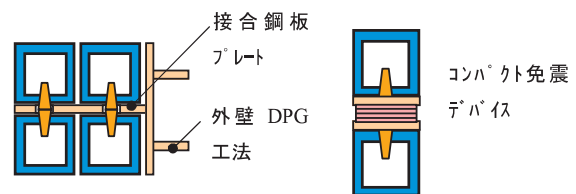


図5：ユニット間接合部

図6：免震デバイス

③柱梁-接合パネル

接合パネルは、図4に示す、立方体の鋳鋼材とする。鋳鋼体は、内部を空洞とし、3面にシアーキーが差し込める円径孔、3面に角型鋼管部材溶接用の開先形状を造る。角型鋼管部材はあらかじめ鋳鋼体と工場溶接で一体化する。

④ユニット間

ユニット間は、図5に示す、上下方向をシアーキー、隣接方向は鋼板プレートを挟んで結合する。ユニット隣接パターンによって3種類のプレートで結合できる。また、防振ゴムを挟むことも可能である。

⑤床・外壁

床材は、既存のALCもしくは、サンドイッチパネルを四隅を切り欠いたもので対応可能とする。

外壁材は、図5に示すように、ユニット間鋼板プレートを外壁側にT型となるような鋼板プレートにDPG方式で支持する方式とする。

⑥免震デバイス

本提案は、ユニット間に免震デバイスを挟むことができるシステムであり、後述する「多段免震構造」による地震応答低減が可能となる。本システムが積層になっていることを利用し、従来構造にはない免震システムに拡張ができる。免震デバイスは、図6に示すような上下フランジにシアーキーがついたもので良い。多段免震構造の場合、各層の変形は小さいため、従来のような径の大きなものは必要なく、10cm程度のコンパクトな装置で十分であることが分かっており、部材内に上手く納まる。

(5) 部材断面

部材の大きさは、架構解析及び地震応答解析から、免震デバイスがない場合、□-200 X 200 X 6 程度である。また、免震デバイスがある場合は□-150 X 150 X 6 程度としている。一般角型鋼管を使用することで、市場性、低コストを考えた。

(6) 設計法

耐震性は、極稀地震において弾性に留まるような部材とした。損傷履歴を残さないリユース材としての利用が前提だからである。なお、後述するように、最近の新材料として注目を集める「トリップ鋼材」は、損傷履歴計測が可能であり、部材の取替えができることから、弾性設計によらない方法も可能である。従って部材の縮小化、軽量化が図れる。

2. 3 システムの運用

本システムは下記の想定範囲の適用において、容易な施工と解体、低コストを実現できる。

(1) 適用範囲

本システムは、用途として住宅、事務所、ホテル、コンビニエンスストア、ファミリーレストラン、イベントでの仮設小屋、海の家等の季節小屋、災害時の避難施設等を想定、階数は、5階以下の低層建物を想定している。急施工、解体、移築頻度が比較的多い建築物を狙いとしている。但し、BOXフレームをスケルトンインフィルの人工地盤上構造物として、適用することも十分可能である。

(2) 施工方法

リユース製品となる、3方向エレメント材、シアーキーを用いて、BOX型フレームを現場で組み立てる。なお、1単位当りの重量については、鋼管断面により、3方向エレメント材は 175kg~140kg/個、BOX型フレームは、1,400kg~1,100kg/ユニットである。エレメント材は小型フォークリフト程度の運搬で、ユニット材の吊り上げは小型クレーン車で十分可能である。

(3) 建設コスト

上記鉄骨重量より、面積当たり鉄骨量は 130kg/m²~100kg/m² となり、床材と合わせて 1 ユニット当たり体工事コストは 10 万/坪程度と想定される。但し、リユースによる転用回数を 5 回と見込むと、2 万/坪程度の体工事コストとなり、十分安い価格で提供できる。

(4) 解体・保管・移築

接合部がシアーキー接合のため、解体は容易である。また、1 エレメントまで分解すれば、トラックによる運搬も容易である。防錆は溶融亜鉛メッキあるいは塗装を施し、保管はエレメントを重ね



最小ブロックで運搬・保管

あわせることができるため、場所をとらない。ビジネスに合わせて、移築も容易である。

2. 4 システムの応用

(1) 階高変更

柱-柱間はシアーキーでのみ接合しているため、この部分のかさ上げにより、階高を大きくすることも可能である。用途変更や、テナント誘致のために天井高を大きくする必要があるときに有効である。

(2) 二重床の活用

ユニット上下間のスペースを、設備配管スペースとして活用したり、住宅の収納スペースにも活用でき、マンション、ホテルに有効である。

(2) 損傷履歴

リユース材にとって損傷の履歴（特に地震時）が何らかの方法で記録され、後で読み取れば、さらに確実な材料管理ができる。例えば、本システムの柱-柱間のシアーキーを、「トリップ鋼材」に置き換えると、地震時に加わる変形によって磁力場が形成され、柱周辺の磁力を計測することで、入力地震情報が得られ、部材の損傷度合いを推測することも可能である。

(3) 多段免震構造

本システムの拡張として、ユニット間に免震デバイスをはさみ、多段免震構造が可能となる。従来の基礎免震と異なる最大の利点は、1 階床レベルで免震の逃げ寸法（約 30~50cm）を大きく必要とせず、5cm 以下程度で済む点である。各階でエネルギー吸収し、ユニットは損傷を受けないようにできる。多段免震による応答低減効果のイメージは、3 章で詳しく述べる。



多段免震構造

(4) 人工地盤免震上の構造物として

地震応答を低減できる人工地盤によって、街区全体の安全を確保する地域防災型都市システムが提案されている。本提案システムも、人工地盤面上に構築することで、免震デバイスを組み込むことなく、耐震安全性の向上、軽量化が可能となる。

2. 5 予測される効果

- ①簡易建物のユニット化によって、資源の有効活用、CO₂ の排出低減が図れる。
- ②経済変化に合わせ、建物の増床、縮小、移築ができるため、効果的なビジネスを展開できる可能性があり、経済活性化の誘引となりうる。
- ③リユースシステムの新たな市場が形成できると共に、建設コストの低減で、新たな需要が掘り起こせる。
- ④自由なアレンジによるプラン変更ができる個人住宅に応用でき、造る人=使う人の「住宅の原点」

に戻れる。

3. 多段免震構造による応答低減効果

3.1 多段免震構造

ユニットセルフフレームを積層する際に、各ユニット間に水平方向に柔軟な免震装置を挿入することで、多段免震構造とすることができる。多段免震構造は、高層建築物を対象とする免震構造形式の一種として近年提案されたもの²⁾であり、免震層や免震装置に通常の免震構造ほどは大きな許容変形を必要とせず、通常の免震構造と同等の免震効果が得られるという利点がある。ところが、通常の施工形式をとる架構システムでは、建物内に複数の免震層を設置する多段免震構造は、施工に要する手数の問題から、実際に採用された事例は存在しない。一方、本研究で提案するような積層型の施工方法をとる架構システムでは、各層のユニットを設置する際に免震装置を挿入すればよいので、施工上の手数はほとんど増えない。

本章では、各ユニット間をシアキーを介した剛せん断接続とした場合と、免震装置を介して柔せん断接続した場合とを比較して、ユニットセルフフレーム架構に多段免震構造を導入することの有効性を示す³⁾。

3.2 解析モデル

ここでは3層ユニットセルフフレーム架構について、多段免震構造を導入したモデル（多段免震モデル）、基礎免震構造を導入したモデル（基礎免震モデル）、免震構造を導入しないモデル（非免震モデル）のそれぞれについての地震応答解析結果を比較する。

構造物モデルは、各層の質量を床面レベルと天井面レベルに2分して集中させ、その間をユニットセルフフレーム剛性および免震装置剛性を表現した弾性バネ要素で接続したせん断質点系を用い、解析モデルの諸元は次のとおりとした。各層のユニットセルフフレームの層剛性 k_j は278kN/cm、質量 m_j は30tonとした。これは、各層が6個のユニットセルフフレームで構成されている場合に相当している。ユニットセルフフレーム自身の構造減衰は、免震構造を導入しないときに1次の減衰定数が2%となるように、各ユニットセルフフレームの減衰係数を決定した。多段免震モデルおよび基礎免震モデルにおける免震装置は高減衰積層ゴムを想定して、水平変形に対する層剛性 k_j と減衰係数 c_j の比率は $c_j/k_j = 0.09\text{sec}$ とした。多段免震モデルでの免震装置層剛性 k_{fj} は、以下の4ケースを設定した：470kN/cm (Case1)、235kN/cm (Case2)、118kN/cm (Case3)、58.8kN/cm (Case4)。また、基礎免震モデルでの免震装置層剛性 k_{f1} は以下の2ケースを設定した：39.4kN/cm (Case5)、19.4kN/cm (Case6)。なお、これにならって非免震モデルはCase0と呼ぶこととする。

地震入力には、El Centro 1940 NS、Taft 1953 EW、

JMA Kobe 1995 NS の各記録地震波および、Newmark and Hall の Design Spectrum⁴⁾に適合するように作成した模擬地震波の合計4種を、地動最大速度が25cm/secとなるように振幅を調整して用いた。この地震入力に対する最大応答評価は、時刻歴応答解析により実行し、解析アルゴリズムにはNewmark β 法を採用した。

3.3 免震層剛性の影響

図1には、模擬地震波とEl Centro波に対する最大層間変位を、図2には同波に対する最大絶対加速度分布を示す。図3には多段免震モデルについて、免震装置の層剛性をパラメタとしたときの最下ユニットセルフフレーム層間変位、最下免震層層間変位、建物頂部水平変位、建物頂部絶対加速度の最大値の変化を示す。なお、図3において横軸の値ゼロでの縦軸の値は、非免震モデルでの値を示している。

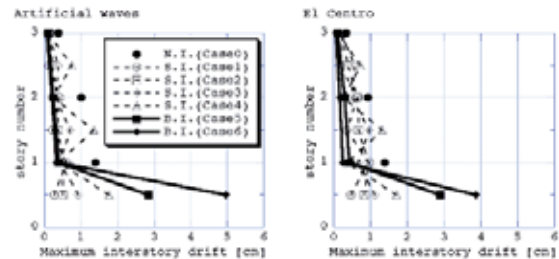


図1 層間変位分布

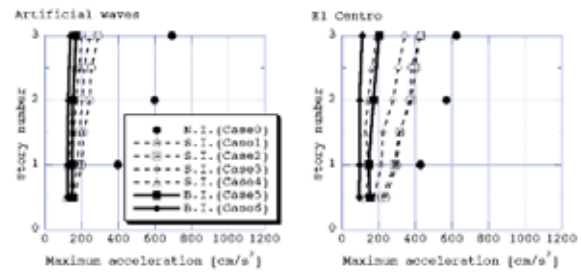


図2 絶対加速度分布

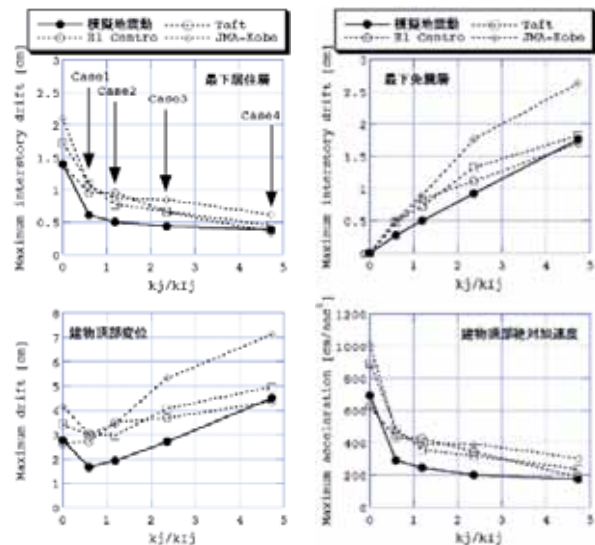


図3 免震層剛性の変化に対する各種応答量の変化

図より以下のことが観察される。

(1)多段免震モデルでは、ユニットセルフフレーム層剛性と免震層層剛性の比 k_j/k_{Tj} が1付近までは、 k_j/k_{Tj} の増加（すなわち免震層剛性の低下）とともに急激にユニットセルフフレームの層間変位は減少するが、 k_j/k_{Tj} が1を越えると、その割合は小さくなる。建物頂部の絶対加速度でも同様の傾向がある。一方、免震層の層間変位は、 k_j/k_{Tj} にほぼ比例して増加する。

(2)多段免震モデルの建物頂部の最大変位は、 k_j/k_{Tj} が0.5付近で最小となる。また、 k_j/k_{Tj} が0から2程度の範囲では、非免震モデルでの頂部最大変位よりも小さな値を示す。しかしながら k_j/k_{Tj} が2を越えるあたりから、 k_j/k_{Tj} の増加の割合にほぼ比例して、多段免震モデルの頂部最大変位は非免震構造のそれに比べて増加するようになる。

(3)ユニットセルフフレームの層間変位分布がほぼ同等な、基礎免震モデル（Case5 および Case6）と多段免震モデル（Case4）の免震層最大層間変位を比較すると、同じ地震動に対しては後者は前者の2分の1～数分の1程度に収まっている。

なお、ここで数値例を示した以外の諸元を持つモデルについても、上記と同様の観察が得られた。

3. 4 免震層減衰の影響

図4に、多段免震モデルのCase2とCase3について、免震装置の減衰係数を変化させたときの、最下ユニットセルフフレームおよび最下免震装置に生じる最大層間変位の変化を示す。なお、横軸は、免震装置の減衰係数 c_{Tj} と剛性 k_j の比 c_{Tj}/k_j であり、X.3.節で示した解析例はこの値が0.09の場合のものである。

図より以下のことが観察される。

(1) c_{Tj}/k_j を大きくすると、ユニットセルフフレームの層間変位、免震装置の層間変位とも小さくなる傾向がある。ただし、ユニットセルフフレームの層間変位は、 $c_{Tj}/k_j=0.06$ （固有周期2.0sec時の等価減衰定数で10%に相当）あたりから停留、あるいは増加に転じる。一方、免震装置の層間変位は、 $c_{Tj}/k_j=0.12$ （固有周期2.0sec時の等価減衰定数で20%に相当）を越えてもまだ減少している。

(2)免震装置の剛性 k_j がユニットセルフフレームの層剛性 k_j に比べて十分に小さくなく（ k_j/k_{Tj} が1以下）、かつ、免震装置の減衰係数が十分確保されない場合には、多段免震構造の導入による応答低減効果がほとんど得られない、あるいは、逆に応答が増大することもありうる。ただし、高減衰積層ゴムのように十分な減衰性能を有する免震装置を用いた場合には、 k_j/k_{Tj} がかなり小さな領域から、多段免震構造による応答低減効果が発揮される。

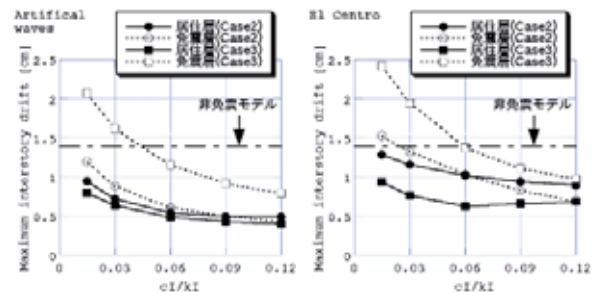


図4 免震層減衰の変化に対する各種応答量の変化

3. 5 多段免震構造による応答低減効果のまとめ

ユニットセルフフレーム架構に、高い減衰性能を有する免震装置を用いた多段免震構造を導入することで、建物頂部での水平変形を増加させることなく、各ユニットセルフフレームに生じる地震時層間変位を半減以下とすることが可能である。したがって、多段免震構造を導入することを前提としてユニットセルフフレームの設計を行えば、導入しないときに比べていっそうの軽量化を実現することができる。

4. まとめ

- ①資源循環型社会に対応する、積層型鉄骨架構となる「ユニットセル構造システム」の提案を行い、その適用範囲、応用方法を提示した。
- ②モジュール構成、各接合方法の検討を行い、特に部材中央のピン接合方法を利用したフレーム構成の方法を提示した。
- ③ユニットセル構造システムの利点を活かす「多段免震構造」の提案と、地震時の挙動を検討し、基礎免震構造と比較しても十分応答低減効果があることを確認した。

参考文献

- 1) 21世紀鋼構造フォーラム研究成果「リユース可能な新しい鋼構造骨組みシステム」, 鋼構造シンポジウム2004 特別セッション1
- 2) Tso-Chien Pan, et al. : Seismic Response of Segmental Buildings, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 24, pp.1039-1048 (1995)
- 3) 辻, 関 : 各層間に免震装置を有する多段免震構造物の地震挙動, 構造工学論文集, Vol. 51B (2004)
- 4) N. M. Newmark and W. J. Hall : *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA (1982)

地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム

21世紀鋼構造フォーラム WG1

人工地盤 地域防災 地震エネルギー
 履歴型ダンパー 半剛接合 構造システム

1. はじめに

都市の中心市街地において、道路、駐車場、公園等の公共空地を整備し、その上空に人工地盤を設け、そこに住宅、商業、業務等の用途に供する建築物を建てて立体利用することは、中心市街地の活性化や都市再開発のための有効な手段となる可能性がある¹⁾。また、人工地盤層で大地震時の入力地震動を低減することができれば、人工地盤上に建つ建物の耐震性能を相対的に向上させることになり、地域単位で地震被害を軽減できるため²⁾、住宅密集地域や都市中心部での地震による災害の拡大を防止するための1つの有効な手段になると考えられる。

人工地盤層での入力地震動の低減のためには、免震人工地盤とすることが有効であると考えられるが、本研究では、免震人工地盤よりも安価になると考えられる構造システムとして、半剛接合による鉄骨造フレームと履歴型ダンパーを組み合わせた人工地盤（地震エネルギー集中型人工地盤）を提案し、それが、免震人工地盤に近い応答となるか等の有効性や実現可能性を地震応答解析により検討する。

本報告では、まず、通常の地盤上の建物と人工地盤上の建物への地震入力の大きさ等の地震層せん断力の違いや応答変形等、人工地盤を有する建物の基本的な地震応答特性について、人工地盤を有する試設計建物を対象にした地震応答解析により明らかにする。次に、人工地盤上の建物への入力地震動を低減することを目的とした半剛接合による鉄骨造フレームと履歴型ダンパーを組み合わせた人工地盤（地震エネルギー集中型人工地盤）の提案を行い、一般的なラーメン人工地盤や免震人工地盤との地震応答の比較を行い、その有効性を検討した結果を示す。

2. 試設計の概要

2.1 骨組形状と試設計の目的

図1に、本研究で検討の対象にした人工地盤を有

する試設計建物の床伏図及び軸組図を示す。人工地盤層は駐車場としての用途を持つものとし、車路及び車室に対応した柱配置を設定している。人工地盤上には自由な位置に建物を建設できることが望ましいが、ここでは、人工地盤層の柱芯と上部の建物の柱芯が一致することを条件とする。

表1に示すように、ここでは、検討目的に応じて設計条件が異なる2種類の試設計を行っている。試設計Aは、人工地盤を有する骨組の基本的な地震応答特性を明らかにするための設計であり、この建物を有して、人工地盤を有する骨組の地震層せん断力の検討やラーメン人工地盤とダンパー付人工地盤の地震応答の比較、上部建物の設計ベースシャー

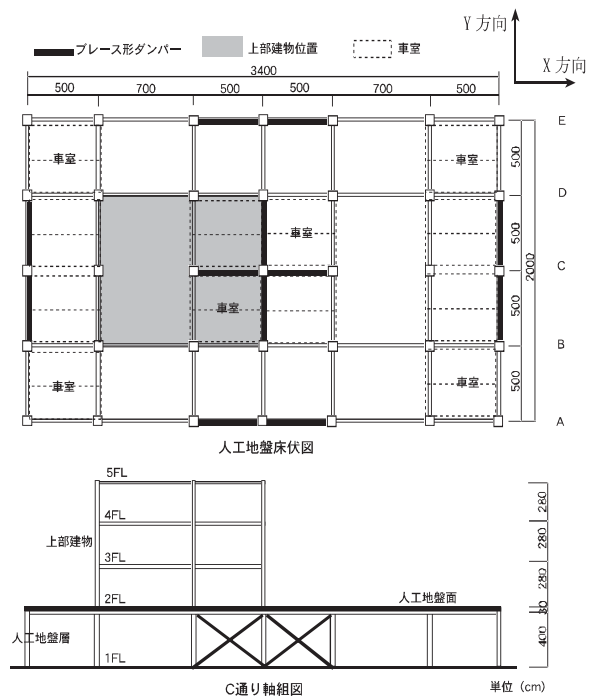


図1 試設計建物の床伏図及び軸組図

表1 試設計の目的と設計条件

設計種別	目的と検討項目	人工地盤		上部建物			
		構造	設計荷重	構造	設計ベースシャー	層数	人工地盤上の棟数
試設計A	人工地盤を有する骨組の一般的な地震応答特性の把握 1) 地盤上と人工地盤上の建物への地震入力の相違 2) ラーメン人工地盤とダンパー付き人工地盤の地震応答比較 3) 上部建物の設計ベースシャーの影響	ラーメン人工地盤、ダンパー付人工地盤の2種類	30kN/m ²	ラーメン骨組	0.20及び0.45	3層	1棟
試設計B	エネルギー集中型人工地盤の有効性の検討 1) ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤の地震応答比較 2) 人工地盤上の重量変化の影響	ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤の3種類	5kN/m ²	ブレース骨組	0.30	3層及び2層	1棟及び2棟

の影響等の検討を行う。

試設計 B は、建物への入力地震動の低減を目的としたエネルギー集中型人工地盤の有効性を明らかにするための試設計である。この建物を用いた地震応答解析によって、ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤を有する骨組の地震応答を比較する。また、人工地盤上に建設される建物の層数や棟数等の変化による重量変化が応答に及ぼす影響を検討する。

2.2 試設計 A の設計方法

試設計 A では、人工地盤上のどの位置にも 4 層程度の鉄骨造事務所、住宅、店舗等が建設できることを想定して、人工地盤上の積載荷重として 30kN/m²を設定し、この荷重の配分として、15kN/m²を床均し荷重とし、残り半分を柱の集中荷重とする。また、人工地盤層のフレーム用荷重、地震用荷重を、それぞれ、12kN/m²、10kN/m²とする。人工地盤面のスラブ厚は、植栽等を考慮してコンクリー厚 300mm とする。人工地盤の構造形式として履歴型ダンパーを用いるものと、純ラーメン構造の 2 種類とする。履歴型ダンパーは、図 1 の床伏図に示す位置に配置する。

人工地盤上の建物として、ラーメン構造の 3 層の共同住宅を設定し、図 1 の床伏図に示す位置に建設されるものとする。この 3 層建物の設計ベースシヤール係数 (C₀) を 0.20 と 0.45 の 2 種類で設計する。C₀=0.20 は、通常の地盤上に建つ建物の設計ベースシヤール係数である。一方、ここで扱うような人工地盤層の重量比が上部建物に比べて極端に大きい場合には、人工地盤を含む建物全体について、基準法の Ai 分布を計算すると、人工地盤上の建物の地震層せん断力が、通常の地盤上に建設される場合の 2.5 倍程度の値となる (図 2 参照)。そこで、ここでは、C₀=0.45 で設計される建物についても試設計し、比較検討する。

このような設計条件で試設計されたラーメン人工地盤、ダンパー付人工地盤及び C₀=0.20、0.45 の上部建物の部材断面とその組み合わせを表 2 に示す。ダンパー付人工地盤のダンパー断面積は、降伏点 235N/mm² で設計しているが、ダンパーの降伏点を 100N/mm² として、ダンパーを早期に塑性化させる場合についても設定している。骨組名称は、

C₀=0.20、0.45 の上部建物 (ラーメン骨組) をそれぞれ、R020、R045 で表し、ラーメン人工地盤を R、ダンパー付人工地盤を D100 (降伏点 100N/mm²)、D235 (降伏点 235N/mm²) で表す。例えば、R020-D100 は、C₀=0.20 の上部建物がダンパー降伏点 100N/mm² のダンパー付人工地盤上にある場合の骨組名称である。

3. 地震層せん断力係数の検討

3.1 Ai 分布及び SRSS による分布

図 2 は、試設計 A で設計した骨組について、基準法 Ai で計算される層せん断力係数分布 (α_i/α_1) を比較したものである。 α_i は i 層の層せん断力係数である。図中の 3) は、ここで設計した人工地盤層の重量を上部建物と同程度にした場合である。表 3 に、この Ai 分布の計算に用いた各層の重量比 (m_i/M) 及び階高を示す。ここで、m_i は i 層の重量、M は骨組全重量である。なお、試設計 A の骨組の解析では、人工地盤上には最大の積載荷重 30kN/m² の重量が掲載されているものとしている。この計算結果から、ここで対象としたような人工地盤を有する骨組では、骨組全質量 (M) に対する第 1 層の質量 (m₁) の比が大きいため、図 2 の 1) の上部建物 (2-4 層) の層せん断力係数は、2) や 3) の結果に比べて 2.5 倍程度になっている。

これらの骨組の地震時の層せん断力係数分布がどの程度であるか確かめるため、ラーメン人工地盤骨組 R045-R とダンパー付人工地盤骨組 R045-D100 を対象にして、3 地震波 (EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS) を用いて、入力速度 10cm/sec として、質点系モデルの地震応答解析を行う。各層の復元力特性は、図 1 の X 方向の骨組の静的漸増載荷から得られる荷重-変形関係に基づいてバイリニア型とした。これらの解析では R045-R と R045-D100 骨組ともに、弾性挙動であった。得られた結果を図 3(a)、(b) に示す。ラーメン人工地盤の方が、ダンパー付人工地盤よりも 2 層以上のせん断力係数がやや大きいのがわかる。これは、ラーメン人工地盤の方が、ダンパー付き人工地盤に比べて、人工地盤層の剛性が小さいためと考えられる。

図 4 は、R045-R と D045-D100 骨組について固有

表 2 試設計 A の建物部材断面一覧

骨組名称	R020-R			R020-D100、R020-D235				R045-R			R045-D100、R045-D235				
	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	ダンパー (LY100, SN400)	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	ダンパー (LY100, SN400)	
	5mスパン	7mスパン		5mスパン	7mスパン			5mスパン	7mスパン		5mスパン	7mスパン			
上部建物	4/5	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-250×9	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-250×9	—	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-300×9	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-300×9	—
	3/4	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-250×9	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-250×9	—	H-400×175×9×12	H-400×200×8×13	□-300×12	H-400×175×9×12	H-400×200×8×13	□-300×12	—
	2/3	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-250×9	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-250×9	—	H-400×175×9×12	H-400×200×8×13	□-300×12	H-400×175×9×12	H-400×200×8×13	□-300×12	—
人工地盤	1/2	H-500×200×10×16	H-488×300×11×18	□-400×16	H-450×200×9×14	H-600×200×11×17	□-400×12	断面積47.5cm ²	H-500×200×10×16	H-488×300×11×18	□-400×16	H-450×200×9×14	H-600×200×11×17	□-400×12	断面積47.5cm ²

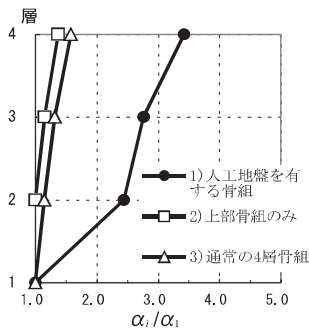


図2 基準法Aiで計算される層せん断力分布

表3 骨組の重量分布

階	階高 (m)	重量分布 (mi/N)		
		1) 人工地盤を有する骨組	2) 上部骨組のみ	3) 通常規模の4層骨組
4	2.8	0.028	0.365	0.272
3	2.8	0.024	0.312	0.232
2	2.8	0.025	0.322	0.240
1	1.0	0.921	0.0	0.256

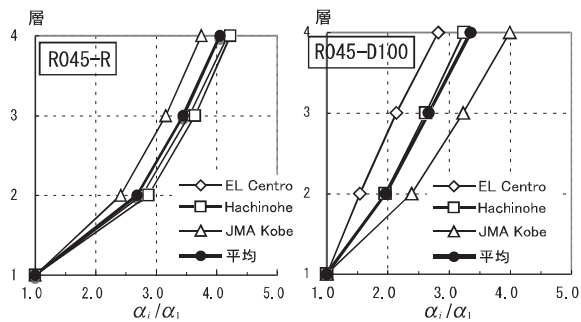


図3(a) 応答解析から得られる層せん断力分布 (R045-R)

図3(b) 応答解析から得られる層せん断力分布 (R045-D100)

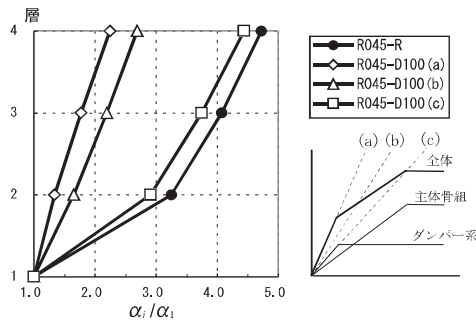


図4 SRSSで計算される層せん断力分布

値解析を行い、SRSS (2乗和平方) によって計算した層せん断力係数分布である。R045-D100 骨組については、ダンパー付き人工地盤層の剛性の評価として、図中に示す (a) ~ (c) の3種類の剛性を設定して固有値計算している。ダンパー付き人工地盤骨組の人工地盤層の剛性を高く評価するほど、2層以上の層せん断力係数が小さくなっている。

図2~4の結果を比較すると、ラーメン人工地盤骨組については、図3(a)の応答解析から得られる層せん断力係数分布は、SRSSで計算される値よりも小さく、基準法Aiの計算よりやや大きくなっている。ダンパー付き人工地盤骨組については、図3(b)の応答解析から得られる分布は、基準法Aiの計算より小さく、初期剛性と降伏耐力点割線剛性の平均の剛性を用いてSRSSで計算した値よりも、や

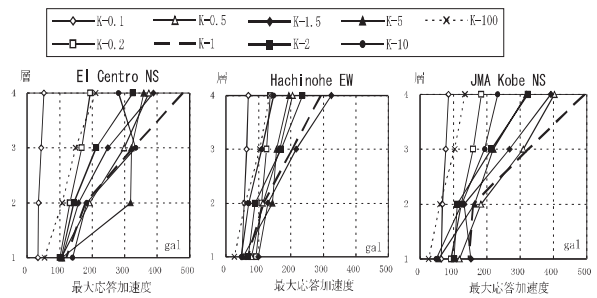


図5 各層の最大応答加速度の比較

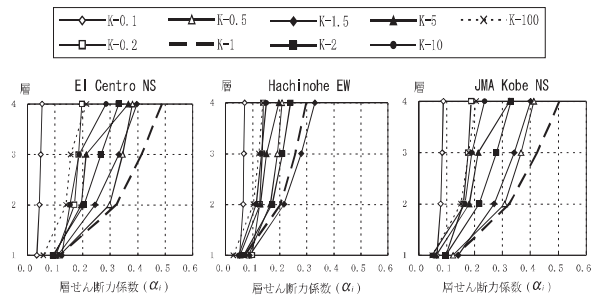


図6 各層の層せん断力係数の比較

や大きい結果となっている。

3.2 人工地盤層の剛性が地震応答に及ぼす影響

前節での検討から、人工地盤上の建物の地震層せん断力の大きさは、人工地盤層の剛性が影響を及ぼす可能性があることが示された。そこで、ここでは、人工地盤層の剛性を变化させた地震応答解析を実施し、骨組各層の最大応答加速度、各層の層せん断力がどのように変化するか明らかにする。

解析対象骨組は、R045-Rで、この骨組の人工地盤層の剛性を0.1倍(K=0.1)~100倍(K=100)に変化させ、質点系モデルによる弾性地震応答解析を行う。入力地震動は、5cm/secの入力速度とし、EL Centro NS(51cm/sec²)、Hachinohe EW(25cm/sec²)、JMA Kobe NS(45cm/sec²)の3波とした。

図5に、応答解析の結果得られた各層の最大応答加速度分布を地震波毎に示す。人工地盤層の剛性を0.1倍~100倍まで変化させた9ケースについて比較している。この図から、人工地盤層の剛性を小さくすると、上部建物の応答加速度は小さくなり、K=0.1では、他に比べて応答が小さく、50~80cm/sec²程度となる。剛性を大きくしていった場合にも、応答加速度は小さくなる傾向があるが、K=1.5~K=10までは、大きな差はない。K=100では、人工地盤層の応答加速度は入力地震動の加速度とほぼ等しくなり、人工地盤層が地盤と一体で応答している。

図6に、各層の層せん断力係数(α_i)を地震波毎に示す。各層の層せん断力係数は、上記の加速度分布と同様の傾向が見られ、人工地盤層の剛性が大きくなっても、小さくなくても、上部建物のせん断力

係数は小さくなる傾向があり、剛性が0.1倍の場合(K=0.1)は、せん断力係数は極端に小さくなる。一方、人工地盤層自体のせん断力係数は、上部建物に比べれば、変化が小さい。

これらの結果から、人工地盤層の剛性を小さくする方が、より効率的に上部建物の層せん断力を低減できるものと考えられる。また、人工地盤層が地盤と一体として挙動する程度に人工地盤層の剛性を大きく（このケースでは100倍）できるならば、上部建物は地盤上に建設されるものとして設計できると考えられる。

4. 人工地盤を有する建物の大地震時の応答

4.1 解析の目的

試設計Aで設計した骨組について、部材レベルの解析モデルを用いた地震応答解析を行い、通常地盤上の建物の地震応答とラーメン人工地盤上での応答、ダンパー付人工地盤上での応答の比較を行う。また、上部建物の設計ベースシヤール係数が応答に及ぼす影響を明らかにする。

4.2 解析方法

地震応答解析は、図1のX方向の骨組を対象とする。図7に例として、ダンパー付人工地盤骨組の解析モデルを示す。ここでは文献3)の非線形解析プログラムを用いて、平面骨組モデルによる擬似立体解析を行う。図1に示すように、X方向骨組は全5構面のうち履歴型ダンパー付構面が3構面、ラーメン構面が2構面である。そこで、履歴型ダンパー付構面のA、C構面、ラーメン構面のB構面を取り出し、C構面の各層重量とヤング係数および鋼材強度を1/2にして擬似立体解析を行う。擬似立体解析では、剛床仮定を用い対応する節点の変位を等値する拘束条件を課している。

応答解析における柱、梁、履歴型ダンパーの復元力特性は歪硬化2%のバイリニア型とする。接合パネル部は弾性とする。減衰は1次減衰定数2%の剛性比例型とする。数値積分はNewmark β 法、時間刻みは1/200秒とする。入力地震動にはEl Centro NS、Hachinohe EW、Taft EW（継続時間20秒）を用いる。入力地震動の大きさは、各解析骨組毎に、建物への損傷に寄与するエネルギー⁴⁾が、文献4)のSvスペクトルの値になるように最大加速度を調整する⁵⁾。

表4に、本報で対象にした7つの解析骨組の弾性固有周期及びダンパー付人工地盤のダンパー耐力分担率、剛性比及びダンパー適正分担率⁶⁾、分担率上限値を示す。R020-D100及びR045-D100では履歴型ダンパーの耐力分担率はほぼ適正分担率となっているが、D235の履歴型ダンパー付人工地盤では適正值の上限を上回っており、履歴減衰効果がD100ほど期待できないと予想される。

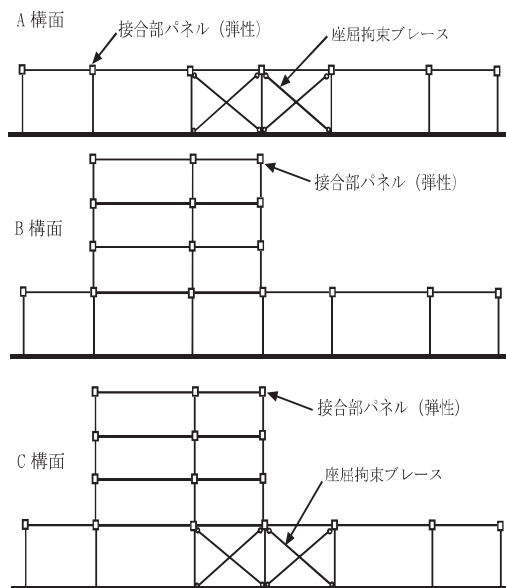


図7 ダンパー付人工地盤骨組の解析モデル

表4 解析骨組の周期等

モデル名称	上部骨組のみ		ラーメン人工地盤	ダンパー付き人工地盤			
	R020	R045	R045-R	R020-D235	R020-D100	R045-D235	R045-D100
弾性固有周期 (秒)	0.76	0.45	0.51	0.77	0.77	0.46	0.46
ダンパー耐力分担率 β	—	—	—	0.71	0.36	0.74	0.37
ダンパー/フレーム剛性比 k	—	—	—	2.41		2.63	
ダンパー適正分担率	—	—	—	0.34		0.35	
ダンパー分担率上限	—	—	—	0.46		0.48	

4.3 地震応答解析の結果

図8に、R045骨組（設計ベースシヤール係数0.45）の各層の最大層間変形角について、単独の解析結果（R045）と、100N/mm²級と235N/mm²級のダンパー付人工地盤上の結果（R045-D100、R045-D235）及びラーメン人工地盤上の結果（R045-R）を地震波毎に比較して示す。R045単独解析では、各層の最大層間変形角は、0.01rad程度である。この骨組がラーメン人工地盤上にある場合の応答変形が最も大きく、235N/mm²級ダンパー、100N/mm²級ダンパーの順に、上部骨組の応答変形は小さくなる。

図9は、骨組各層の損傷としての平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) の値について、R045、R045-D100、R045-Rを比較したものである。単独の解析では骨組の損傷 ($\bar{\eta}$) は0.2程度でほとんど塑性化していないが、ラーメン人工地盤上になると4~5程度の大きな損傷になっていることがわかる。100N/mm²のダンパー付人工地盤上では、損傷は1以下であり、比較的小さな値と言える。

図10に、R020骨組（設計ベースシヤール係数0.20）の各層の最大層間変形角について、単独の解析結果（R020）と、100N/mm²級のダンパー付人工地盤上

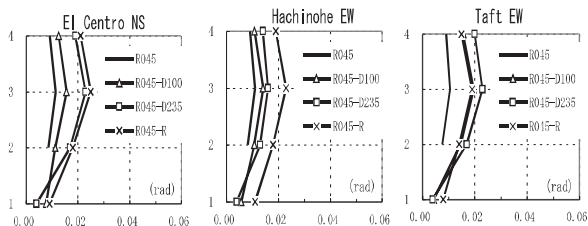


図 8 R045 骨組の最大層間変形角の比較

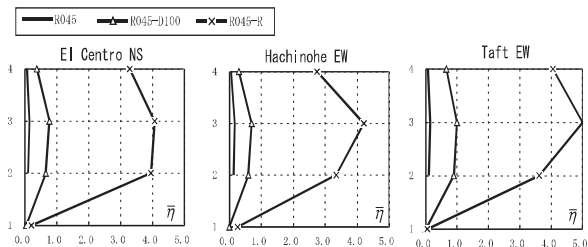


図 9 R045 骨組の各層の平均累積塑性変形倍率の比較

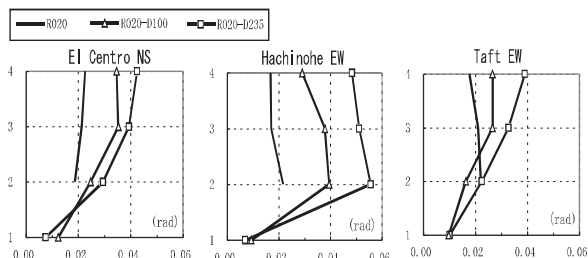


図 10 R020 骨組の最大層間変形角の比較

の結果 (R020-D100)、 235N/mm^2 級のダンパー付人工地盤上の結果 (R020-D235) を地震波毎に比較して示す。R020 骨組単独の応答解析では、各層の最大層間変形角はおおよそ 0.02rad であり、図 8 の R045 に比べて大きくなっている。この骨組が D100 及び D235 の人工地盤上にある場合には、地震波によるばらつきはあるが、変形がかなり大きくなり、D235 のダンパー付人工地盤上では 0.05rad 程度に達する場合がある。D100 の応答と D235 の応答を比較すると、D100 の方が上部建物の応答変形を小さくできることがわかる。これは、D100 はダンパーを早期に降伏させてダンパーでの履歴減衰効果を高めているからと考えられる。

これらの解析結果から、上部骨組の設計ベースシヤール係数を 0.20 で設計した骨組では、ダンパー付人工地盤上でも、 0.04rad 程度の大きな変形になる可能性がある。そのため、通常のラーメン骨組による人工地盤上の建物の設計ベースシヤール係数は通常建物の $2\sim3$ 倍程度にする必要があると考えられる。また、ダンパー付人工地盤を採用することによって、ラーメン人工地盤に比べて人工地盤上の建物の損傷をかなり小さくできる。

5. 地震エネルギー集中型人工地盤骨組の地震応答

5.1 試設計 B の目的と設計

試設計 A の地震応答解析から、ラーメン人工地盤上に建設される建物は、通常の建物の $2\sim3$ 倍程度に設計地震力を割り増す必要があり、ダンパー付人工地盤にした場合でも、地盤上に建設される場合よりも応答変形や損傷が大きくなることがわかった。人工地盤層で入力地震動を低減することができれば、人工地盤上に建設される建物の耐震性能が相対的に向上することになり、地域単位での防災性能を向上させることができると考えられる。

人工地盤層で入力地震動を低減するためには、免震人工地盤にすることが最も有効な方法と考えられるが、ここでは、免震人工地盤よりも安価な構造システムとして、半剛接フレームに履歴型ダンパーを組み込んだ人工地盤 (地震エネルギー集中型人工地盤) を提案し、このシステムによって入力地震動が低減され、上部建物にほとんど損傷が生じないようにできるかどうか、地震応答解析によって明らかにする。

ここで応答解析の対象とする骨組は、表 1 の試設計 B に示す条件によって設計を行ったものである。試設計 B では、人工地盤の構造として、ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤の設計を行う。ここでは、人工地盤上の積載荷重を 5kN/m^2 とし、実質的な荷重条件下での解析を行う。

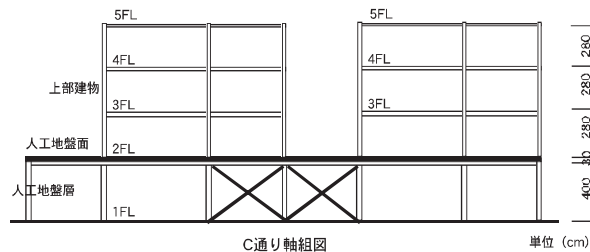


図 11 試設計 B の建物軸組図

表 5 試設計 B の上部建物部材断面一覧

Story/Floor	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	ブレース (SS400)	
	5m スパン	7m スパン			
上部建物 (ブレース構造)	4/5	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-200×9	L-75×75×6
	3/4	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-200×9	L-90×90×7
	2/3	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-200×9	L-100×100×10

表 6 試設計 B の人工地盤層部材断面一覧

人工地盤の種類	Story/Floor	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	ダンパー
		5m スパン	7m スパン		
ラーメン人工地盤	1/2	H-400×200×8×13	H-500×200×10×16	□-300×9	—
エネルギー集中型人工地盤	1/2	H-450×200×9×14	H-600×200×11×17	□-350×9	断面積: 6.37cm^2 降伏点: 180N/mm^2

上部建物の構造をブレース構造としているのは、ここで提案するエネルギー集中型人工地盤がより有効となる範囲として、上部建物の周期が比較的短周期の場合であるためである。また、人工地盤上に建設される建物の規模や棟数によって、人工地盤上の積載重量が変化し、人工地盤上で目標とする応答が得られない可能性があるため、図 11 に示すように、2 棟建設されている場合を基本とし、層数及び棟数を変化させた設計も行っている。上部建物の部材断面等を表 5 に、ラーメン人工地盤と地震エネルギー集中型人工地盤の部材を表 6 に示す。地震エネルギー集中型人工地盤では、梁端部をピンとして設計している。

5.2 地震エネルギー集中型人工地盤の概要と設計方法

ここで提案する地震エネルギー集中型人工地盤は、免震人工地盤に類似した応答特性を有することを意図しており、免震のアイソレーターに相当する部分を、半剛接フレームとし、それに座屈拘束ブレース型の履歴型ダンパーを組み込んだ構造である。一般に、履歴型ダンパーには、免震層で想定するような大変形を生じさせることはできないと考えられる。ここでは、履歴型ダンパーが耐力低下せずに変形できる最大の層間変形角を 0.04rad と想定し、設計された人工地盤の大地震の応答を 0.03rad 程度にすることを目標値とし、半剛接フレームと履歴型ダンパーの耐力、剛性を設定する。また、大地震時には、ダンパーのみ交換し、半剛接フレームは塑性化させないものとするため、半剛接フレームの降伏変形角を 0.04rad 程度とする。

人口地盤層の初期降伏耐力及び 2 次剛性を小さくすることによって、人工地盤上の建物の応答加速度を小さくできるが、初期降伏耐力及び 2 次剛性が小さすぎると、人工地盤層の応答変形が過大になる。ここでは、ダンパーとフレームの耐力と剛性を試行錯誤変化させた質点系モデルの地震応答解析を行い、図 12 に示すようなダンパーと半剛接フレームの復元力特性で、上部建物の応答が最も小さくな

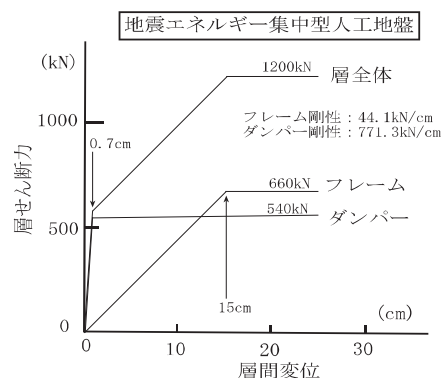


図 12 地震エネルギー集中型人工地盤の層せん断力 - 層間変位関係

る結果を得た。人工地盤層の層全体の耐力として、ベースシヤール係数 0.2 程度を設定し、ダンパーとフレームの耐力と剛性を変化させて、数ケースの検討を行うことで、比較的容易に最適な組み合わせが見つかると考えられる。

次に、試設計骨組の地震エネルギー集中型人工地盤層の層せん断力 - 層間変位関係が、図 12 で示した荷重 - 変形関係になるように、人口地盤層のフレームと座屈拘束ブレース型のダンパーの設計を行う。フレームは層間変位 15cm (0.0375rad) で降伏するものであり、一般の剛接フレームの剛性に比べて、かなり小さくなっている。そのため、フレームのすべての柱脚をピン接合とし、大部分の梁端部をピン接合にし、一部を半剛接にすることで対応する。ここでは文献 7) に示される設計方法に基づいて、以下の手順で半剛接フレームの設計を行う。

- 1) 現設計の梁に対して、 $M_m / M_{bp} = \alpha$ (ここでは $\alpha = 0.5$ とした) となるスプリットティーを設計。 M_m は接合部最大曲げ耐力、 M_{bp} は梁全塑性モーメント。
- 2) 文献 7) の剛性評価法により梁の等価剛性を算定。
- 3) 梁の等価剛性から、層の半剛接接合部数を決定。
- 4) 半剛接接合部数と必要耐力から、スプリットティーの降伏点 (材料) を決定 (ここでは $\sigma_y = 440\text{N/mm}^2$ となり、SA440 とした)。
- 5) 半剛接架構としての耐力を算定。

座屈拘束ブレース型のダンパーについては、層としての降伏変形が、図 12 に示すように 0.7cm となるように断面を決め、必要耐力になるように降伏点を定め、材料を決定する (ここでは 180N/mm^2 となった)。このように設計された地震エネルギー集中型人口地盤層のフレームとダンパーの荷重 - 変形関係が、おおよそ図 12 に近くなることを静的漸増載荷で確認した。

なお、免震人工地盤については、文献 8)、9) を参考にして、免震人工地盤として適切な応答になるように、転がり支承と鉛プラグ入り積層ゴム免震装置を組み合わせるものとして、図 13 のように、層の荷重 - 変形関係を定めた。

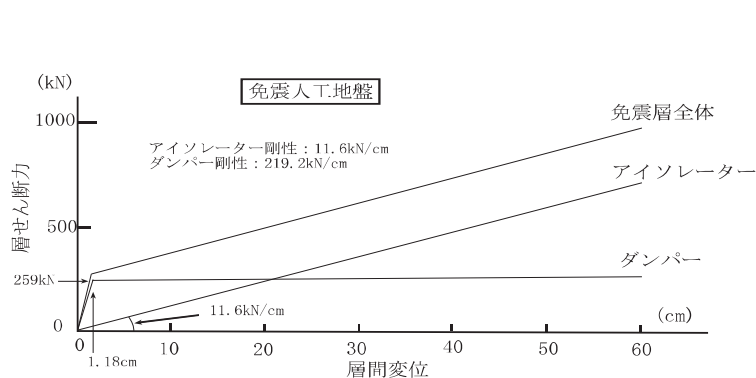


図 13 免震人工地盤の層せん断力 - 層間変位関係

5.3 解析方法

解析方法は、4.2で示したものと同様に、建物の半分を解析対象にしてモデル化し、応答解析を行う。図14に地震エネルギー集中型人工地盤を用いた骨組の解析モデルを例として示す。上部建物は2棟建設されているものとし、B構面のみがブレース構造で、C構面はラーメン構造である。エネルギー集中型人工地盤層における梁端部半剛接部分は、A構面の4カ所のみで、その他はピン接合としている。座屈拘束ブレース型のダンパーは、図に示すようにA、C構面に配置する。A、B、C構面の節点の変位を等置して、擬似立体解析により地震応答解析を行う。入力地震動にはEl Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NSを用いる。入力地震動の大きさは、4.2と同様に、各解析骨組毎に、建物への損傷に寄与するエネルギーが、設計速度応答スペクトルの値になるように最大加速度を調整する。その他の解析条件は4.2と同様である。なお、免震人工地盤骨組だけは、質点系モデルで応答解析を行っている。

本解析では、エネルギー集中型人工地盤骨組の有効性を明らかにするため、エネルギー集中型人工地盤骨組、ラーメン人工地盤骨組、免震人工地盤骨組及び上部建物単独の地震応答の比較を行う。表7にこれらの4つの解析骨組の固有周期等を示す。フ

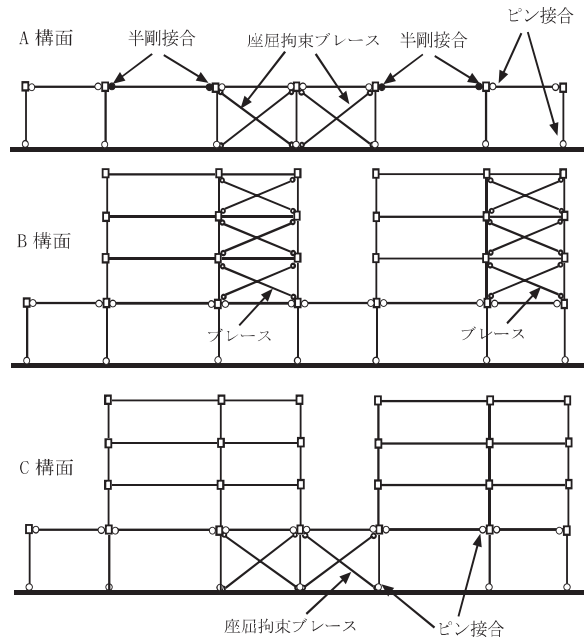


図14 エネルギー集中型人工地盤骨組の解析モデル

表7 各解析骨組の固有周期一覧

モデル名称	3層上部建物 (ブレース構造) B030(3)	ラーメン人工地盤 B030(33)-R	エネルギー集中型人工地盤 B030(33)-EC	免震人工地盤 B030(33)-IS
建物全体の弾性固有周期	0.36秒	0.56秒	0.53秒	1.03秒
フレームまたはアイソレーター の剛性で計算される人工地盤層の周期	---	0.54秒	2.34秒	4.57秒

レームまたはアイソレーターの剛性で計算される周期は、免震人工地盤では4.57秒、エネルギー集中型人工地盤では2.34秒となっている。

5.4 地震応答解析の結果

図15に、地震応答解析の結果得られた4つの骨組の各層の最大層間変形角を示す。上部建物単独(B030)の各層の最大応答変形に比べて、ラーメン人工地盤(B030-R)上での上部建物の応答変形は大きくなり、逆に、エネルギー集中型人工地盤(B030-EC)、免震人工地盤(B030-IS)上での上部建物の応答変形は、かなり小さくなっている。

図16は、上部建物の各層のブレース部材の平均累積塑性変形倍率($\bar{\eta}$)の最大値の分布を示す。2層に損傷が集中しているが、上部建物のみ(B030)では4~5程度であるが、ラーメン人工地盤上では(B030-R)6~8程度に大きくなっている。一方、

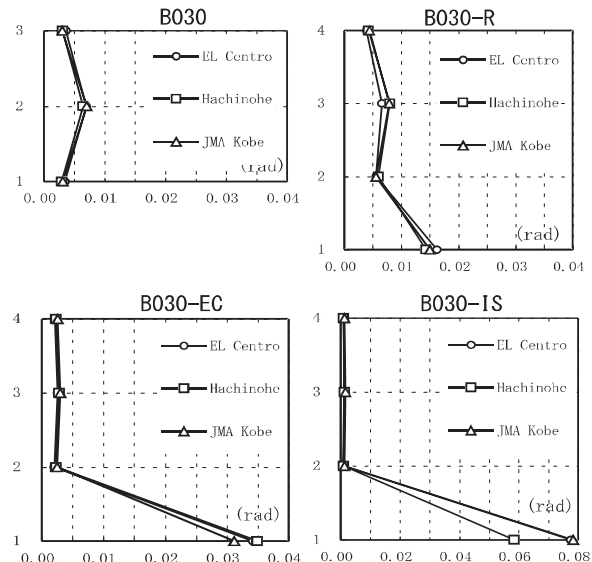


図15 各骨組の最大層間変形角の比較

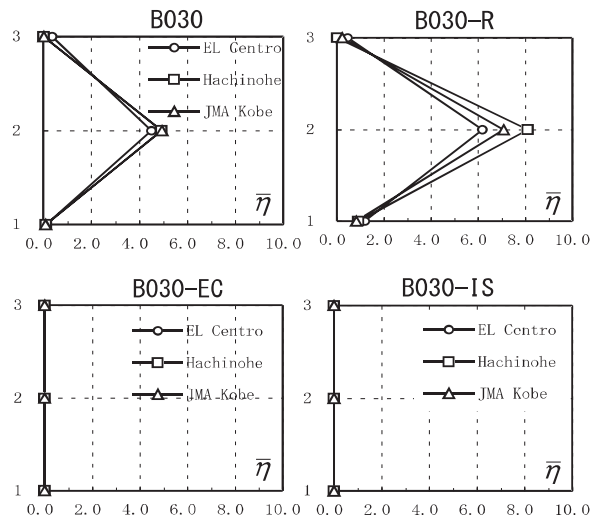


図16 上部建物のブレースの平均累積塑性変形倍率の比較

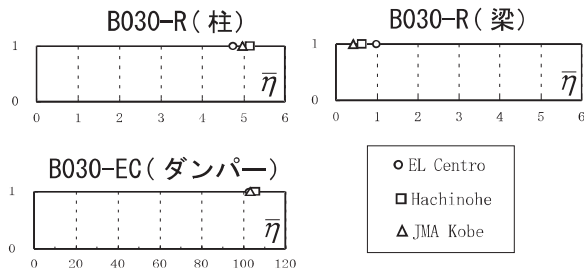


図 17 人工地盤層の各部材の平均累積塑性変形倍率の比較

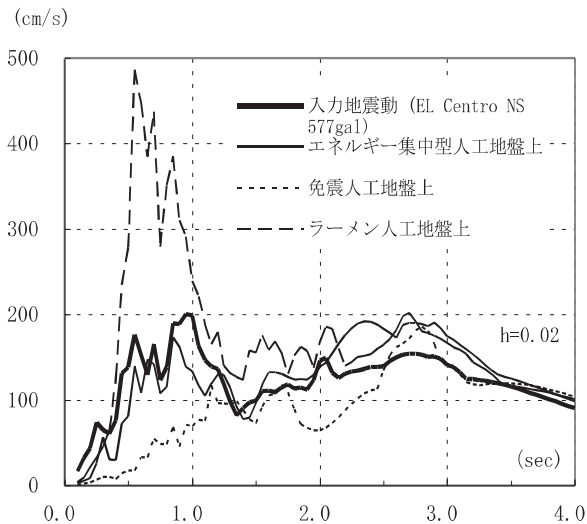


図 18 入力地震動及び各人工地盤上での入力地震動の速度応答スペクトル

エネルギー集中型及び免震人工地盤上では、塑性化していないことがわかる。

図 17 は、ラーメン人工地盤 (B030-R) の柱及び梁の $\bar{\eta}$ 及びエネルギー集中型人工地盤のダンパーの $\bar{\eta}$ を示す。ラーメン人工地盤の柱には $\bar{\eta}=5$ 程度の比較的大きな損傷が生じている。エネルギー集中型人工地盤 (B030-EC) のダンパー部材の $\bar{\eta}$ は 105 程度である。また、半剛接フレームは塑性化せず、弾性挙動であった。

図 18 には、最大加速度 577cm/sec^2 の El Centro NS の入力地震動の速度応答スペクトルと、その地震動を入力したエネルギー集中型人工地盤上、免震人工地盤上、ラーメン人工地盤上での絶対加速度の速度応答スペクトルを比較して示す。エネルギー集中型地盤上では 1.2 秒程度までは、入力地震動のスペクトルに比べて、値が小さくなり、特に、0.5 秒以下では、半分程度になっている。免震人工地盤上では、1.2 秒程度までの範囲で、その値はさらに小さくなっており、免震人工地盤が上部建物への入力地震動の低減に最も有効であることがわかる。一方、ラーメン人工地盤上では、0.5 ～ 1 秒程度の周期の建物に対しては通常の地盤上に比べて入力

地震動が大きく、2 倍以上になる場合がある。ここでは示していないが、Hachinohe や JMA Kobe の地震波に関しても同様の傾向が見られた。

これらの結果から、ここで提案したエネルギー集中型人工地盤上では、通常の地盤上に建設する場合よりも上部建物の応答変形や損傷を低減することができる。また、このエネルギー集中型人工地盤上が有効となる適用範囲として、上部建物の固有周期が 1 秒程度以下の建物と考えられるが、0.5 秒程度以下の短周期の建物にはより効果的になると考えられる。

5.5 ユニットセル構造¹⁰⁾ 骨組の地震応答解析

ここで設計した 3 層ブレース構造の上部建物 (B030) とは異なる規模の建物が建設された場合に、エネルギー集中型人工地盤上で同様の応答低減効果が見られるかどうか検討する。ここでは、図 11 に示す 2 棟の上部建物のうちの 1 棟を、文献 10) で示されているリユース等を目的とした 3 層のユニットセル構造骨組が建設されているものとして解析を行う。このユニットセル骨組は、総重量が 12.5ton であり、B030 骨組は 85.8ton である。この重量の違い (減少) が応答に及ぼす影響についても明らかにする。3 層ユニットセル骨組単体の固有周期は 0.40 秒、エネルギー集中型人工地盤上にある場合の骨組全体の弾性固有周期は 0.52 秒、重量調整を行った場合は、0.55 秒である。ユニットセル骨組の詳細情報は、文献 10) を参照されたい。

この 3 層ユニットセル骨組単体の地震応答と、エネルギー集中型人工地盤上での応答、重量を調整した場合の応答を比較するために、それぞれの解析骨組に対して、入力速度を 50cm/sec に設定した EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS を用いて、質点系モデルの地震応答解析を行う。ユニットセル骨組の各層の荷重 - 変形関係は文献 10) により決定し、人工地盤層の荷重 - 変形関係は図 12 に示すものとした。

図 19 に、ユニットセル骨組単体 (UC) の各層の最大層間変形角、エネルギー集中型人工地盤上での応答 (UC-EC) 及び重量を調整した場合の応答 (UC-EC(+Mass)) を比較して、地震波毎に示す。EL

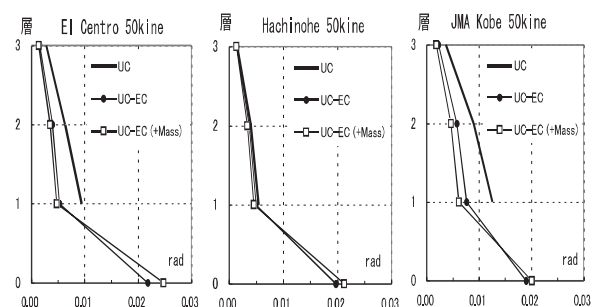


図 19 ユニットセル構造骨組の各層の最大層間変形角の比較

Centro 及び JMA Kobe では、エネルギー集中型人工地盤上での応答変形が、単独の場合の応答の半分程度になり、有効であることがわかる。また、重量の影響は小さく、重量の差分 73ton を付加しても、上部建物の応答はほとんど変わらない。B030-EC 骨組の全重量は 611.9ton であり、1 割程度の重量減少に対しては、応答に及ぼす影響はほとんどないことがわかる。

仮に、上部建物の建設規模が小さくなって、応答に影響を及ぼす可能性がある場合には、人工地盤層に防災用の貯水槽等を設け、人工地盤上に建設される建物の棟数や層数に応じて、貯水量を調整することによって、上部建物の規模や建設状況による重量変化の影響を排除することができると考えられる。このような防災用の貯水槽は、耐震性能をコントロールする機能を持つとともに、一般的には、豪雨のための遊水池としての機能や人工地盤層及び人工地盤上建物の火災時の消化のための役割等を果たすものであり、本報で提案する地域単位で防災を行う構造システムを実現する上で、重要な設備になるものと考えられる。

6. まとめ

本報告では、通常の地盤上の建物と人工地盤上の建物への地震入力の大さき等を検討するとともに、人工地盤層で建物への入力地震動を低減することを目的とした地震エネルギー集中型人工地盤の提案を行い、提案した構造システムが有効であることを地震応答解析により示した。本報の解析で得られた結論を要約して以下に示す。

- 1) ラーメン骨組による人工地盤上の建物の設計ベースシヤール係数は、通常建物の 2 ～ 3 倍程度に割り増す必要がある。
- 2) ダンパー付人工地盤を採用することによって、ラーメン人工地盤に比べて、人工地盤上の建物の損傷をかなり小さくできる。
- 3) 設計用の地震層せん断力係数分布に関しては、基準法の A_i 分布では、必ずしも安全でない場合があるため、SRSS 等の剛性が評価できる方法で地震層せん断力係数を算定すべきと考えられる。
- 4) 半剛接フレームと履歴型ダンパーを組み合わせた地震エネルギー集中型人工地盤を提案し、地盤上よりも上部骨組の応答変形や損傷を低減できることを確認した。
- 5) ここで提案した地震エネルギー集中型人工地盤の適用範囲は、上部建物の固有周期がおおよそ 1 秒程度以下であるが、0.5 秒程度までの低層または剛性の高い建物に対しては特に有効となる。
- 6) ユニットセル構造骨組の応答解析を行い、ここで提案した地震エネルギー集中型人工地盤が、ユニットセル構造骨組に対しても有効であることを

確認した。また、1 割程度の人工地盤上の重量変化は、応答にほとんど影響を及ぼさない。

謝辞

本報告の一部は、国土技術政策総合研究所「アーバンスケルトン方式等による都市再生技術に関する研究」(委員長：小林秀樹千葉大学教授)の一環として実施したものである。本報告で示した試設計や解析を進めるにあたり、構造企画研究所河村昌俊氏、JFE 技研(株)加村久哉氏、住友金属工業(株)加藤真一郎氏には、多大なご協力をいただきました。ここに記して、謝意を表します。質点系の応答解析プログラムとして、熊本大学小川厚治先生が作成された Shearms. f を使用させていただきました。

参考文献

- 1) 小林秀樹、藤本秀一、江袋総司：立体基盤建築物を成立させる法制度の研究、国土交通省国土技術政策総合研究所研究報告、No. 11、平成 15 年 3 月
- 2) 生きる建築へのアプローチ (その 1) 建築は考える輩となりうるか、21 世紀鋼構造フォーラム シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」、独立行政法人建築研究所、pp. 9-10、2002. 11
- 3) 小川厚治、多田元英：柱・梁接合部パネル部の変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発、第 17 回情報システム技術シンポジウム、pp. 79-84、1994. 12.
- 4) 長谷川隆、西山功、向井昭義、石原直、加村久哉：エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震応答予測、日本建築学会構造系論文集、第 582 号、pp. 147-154、2004. 8
- 5) 加村久哉、長谷川隆、植木卓也、河村克彦：人工地盤を有する建築物の地震応答特性 (その 2 地震応答解析結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp. 995-996、2004. 8
- 6) 加村久哉、河村昌俊、小川厚治、井上一朗：許容応力度等計算に準拠して設計された履歴型ダンパー付鋼構造骨組の地震応答、日本鋼構造協会 鋼構造論文集、Vol10、No. 38、pp. 91-104、2003. 6
- 7) 高力ボルト接合による靱性型鉄骨架構の構造設計マニュアル、(社)日本鉄鋼連盟、2003. 3
- 8) 免震構造設計指針、日本建築学会、2001. 9
- 9) 免震建築物の技術基準解説及び計算例と解説、工学図書株式会社、平成 13 年 5 月
- 10) ユニットセル構造システムの提案、JSSC 鋼構造シンポジウム 2004 技術特別セッション 21 世紀鋼構造フォーラム研究成果発表資料、2004. 11

4.2 21世紀鋼構造フォーラム WG2の活動

第二期の活動の開始当時、小泉首相が議長を務める総合科学技術会議では、骨太の産業発掘戦略の一環として、NTPT（ナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトチーム）を発足し、その下に「革新的構造材料」ワーキンググループが組織され、府省横断的なテーマを検討していた。

鉄鋼材料については、組織の微細化技術が、「ナノ」の世界に入っていることから、鉄鋼分野から、ナノテクノロジーにより、建築構造用鋼材の強度を現在の2倍（800N/mm²鋼）とする革新的構造材料を開発し、これにより「複合機能＋内部構造可変＋長寿命型」の新構造建築物の実現を達成目標とする府省連携プロジェクト提案がなされていた。

このNTPTからの提案の実現に、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」において出されたアイデアを活用できるのではないかと考え、21世紀鋼構造フォーラムの有志が中心となって、経済産業省からは、一般公募部門論文で、最優秀賞となった「トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築」を、国土交通省からは、「ユニットセル構造システム」を基本とする具体化のための提案を行った。これらの提案の採否に関わらず、本フォーラムとしては「安全・安心・長寿命などに特化したテーマを具体化する活動」を実施する集まりとしてWG2を設置することとしていたが、NTPTの正式なテーマとして採択されたため、最終的にWG2の形成、活動は行なわず、上記の革新的構造材料ワーキングに関与する委員が同プロジェクトの活動状況の報告を全体会議などで行い、WG2の機能の役割を果たす事になった。

NTPTにおける本テーマの実施では、当初、連携機関としては、独立行政法人建築研究所〔国土交通省〕、社団法人日本鋼構造協会〔国土交通省〕、社団法人日本鉄鋼連盟〔経済産業省〕、財団法人金属系材料研究開発センター〔経済産業省〕であったが、2004年度より、（社）新都市ハウジング協会加え、2009年度以降の実用化を目指して、5ヵ年計画、年間予算約4億円で、実行に付されており、現在、鉄鋼各社による材料一般認定の取得と、実大モデルによる実証実験（実験後、移設、リユース）が進んでいる。なお、これと平行して、国土交通省国土技術政策総合研究所では、総合技術開発プロジェクト「高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発」（2005年度～2008年度）を進めるなど、鋼構造建築研究における一大プロジェクトとなっている。（添付）国土交通省、経済産業省の申請書

「ナノテクノロジー・材料」産業発掘戦略に係る連携プロジェクトについて

国土交通省

連携プロジェクト名：

高強度鋼・高機能鋼等の建築分野への活用技術の開発

連携機関：独立行政法人建築研究所〔国土交通省〕

社団法人日本鋼構造協会〔国土交通省〕

社団法人日本鉄鋼連盟〔経済産業省〕

財団法人金属系材料研究開発センター〔経済産業省〕

活動内容：高強度鋼・高機能鋼等の建築分野への利用促進のためには、良質な建築ストックの実現とリサイクル・リユース技術の活用による環境対応、軽量化による超々高層建築の実現による都市人口集中への対応のほか、想定外外乱に対するリダンダンシーの確保による安全性の向上などが、求められている。

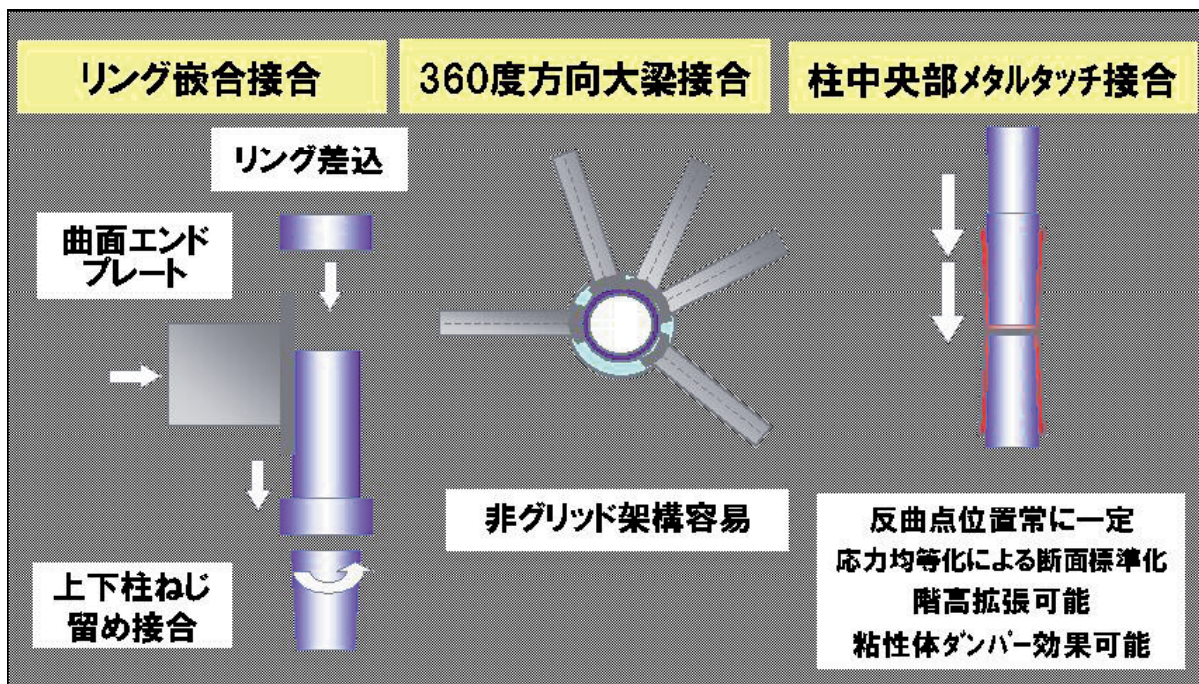
そこで、建築分野において先行して研究が進められている高強度鋼（600N級鋼）、高耐震性鋼、高耐火性鋼、高施工性・高性能接合に関する技術を、超高強度鋼のシーズ技術によりさらに発展させることで、鋼材・接合材・部材の開発も含めて、上記の各要求性能に対応した建築構造体の構築技術を構築する。

このために、高強度鋼・高機能鋼等に求められる性能の把握、構造設計手法の構築の開発を実施している独立行政法人建築研究所と、高強度鋼・高機能鋼等を用いた建築物の耐震性・耐火性確認（実大実験、既存建築物との比較）および機械式接合工法、リユース工法（ITを利用した鋼部材循環システム）、溶接技術の開発を実施している社団法人日本鋼構造協会・社団法人日本鉄鋼連盟、高強度鋼の開発を実施している財団法人金属系材料研究開発センターが連携し、効率的に研究開発を実施する。

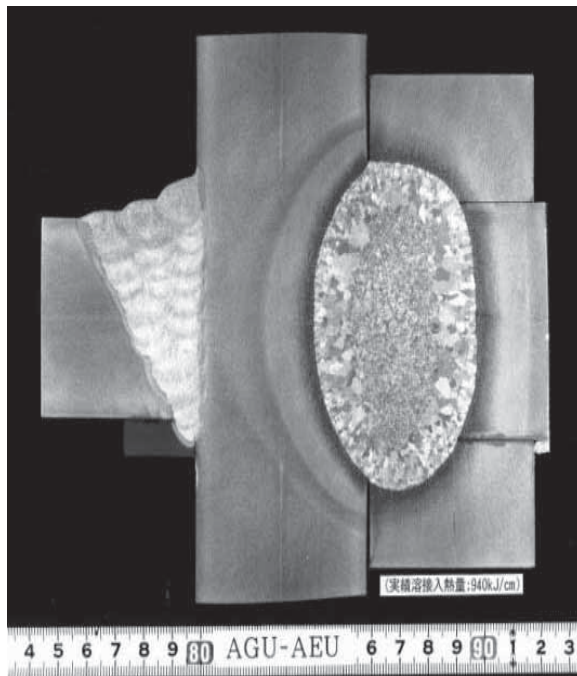
連携の現状：

- ・ 平成13年6月より、独立行政法人建築研究所、社団法人日本鋼構造協会、社団法人日本鉄鋼連盟の3者により、21世紀鋼構造フォーラムを組織し、産・学・官の鋼構造研究者および実務者により、環境に配慮した新時代につながる鋼材のあるべき姿、その利用技術に関して情報交換を実施。
- ・ 日本鉄鋼連盟では、建築分野への適用を対象とした800N級鋼の溶接技術に関する研究を進めている。

参 考：



リユースを考慮した鋼の建築分野への応用のイメージ



高 HAZ 靱性鋼（高機能鋼）の電ロスラグ溶接と溶接継手部構造性能の検討の例

<出典>

シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」独立行政法人建築研究所、ほか

「ナノテクノロジー・材料」産業発掘戦略に係る連携プロジェクトについて

経済産業省

連携プロジェクト名：

高強度・高機能鋼を用いた安心・安全・超寿命建築物（スケルトン）の開発

連携機関： 社団法人日本鉄鋼連盟〔経済産業省〕

財団法人金属系材料研究開発センター〔経済産業省〕

独立行政法人建築研究所〔国土交通省〕

社団法人日本鋼構造協会〔国土交通省〕 (検討中)

活動内容：建築物の骨組（スケルトン）には、現在、強度400～500N級の鋼材に、機能（耐震性・耐火性・耐久性など）をその都度付与した鋼材で構築されているが、超高強度（800～1000N級）に各機能を複合した鋼材を開発することで、安心・安全・超寿命の建築物を経済的に実現することが可能である。

すなわち、超高強度化により軽量化（1/2）することで、建設コストを低減（基礎の簡素化なども含めて）し、リデュース（省資源）・リユース（ハンドリング容易）を促進するとともに、各機能を合わせ持つことで、高機能で環境に優しく良質な建築物を実現することができる。

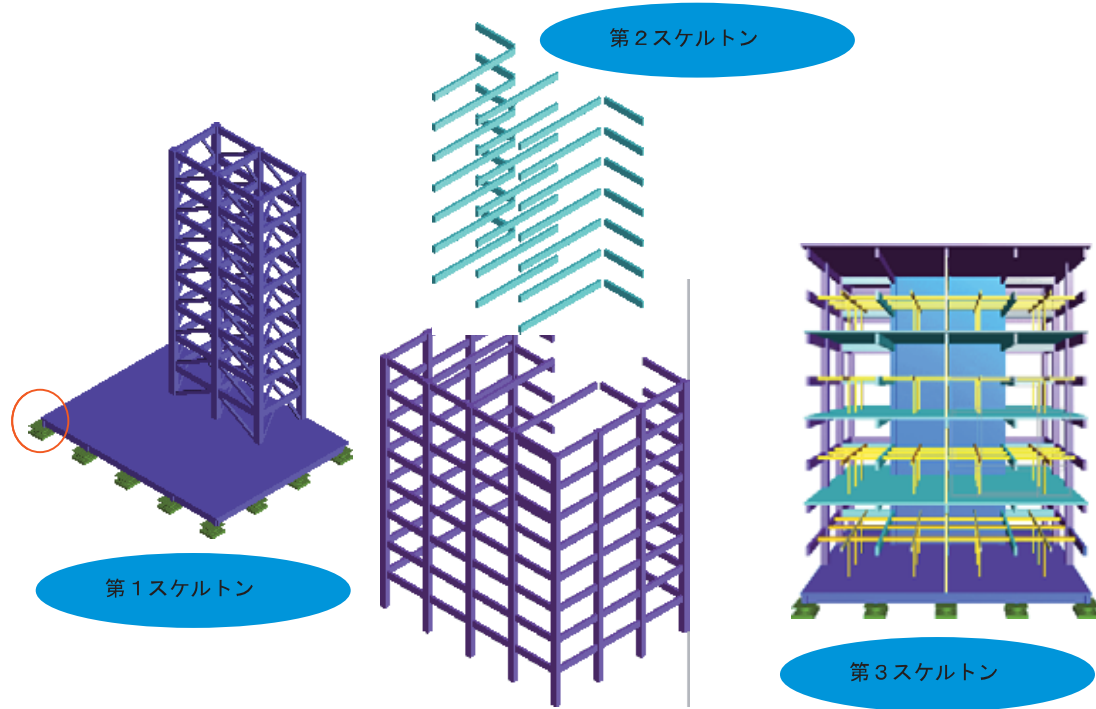
しかしながら、超高強度鋼についてはシーズ技術（超微細鋼など）があり実現可能であるものの、超高強度鋼に各機能を複合した鋼材、その接合工法（溶接、機械式）などの開発は着手されておらず、また、建築設計の手法（超高強度鋼・高機能鋼がその特性を発揮できる）も整備されていない。

このようなことから、高強度・高機能鋼およびその接合材などの開発およびこれらを用いたスケルトンの性能検証（実大構造・火災実験など）に関する研究（別紙）を長年実施している社団法人日本鉄鋼連盟と、超高強度鋼の開発を進めている財団法人金属系材料研究開発センター、高強度・高機能鋼等に求められる性能の把握、構造設計手法の構築の開発を実施している独立行政法人建築研究所および社団法人日本鋼構造協会が連携し効率的に研究開発を実施する。

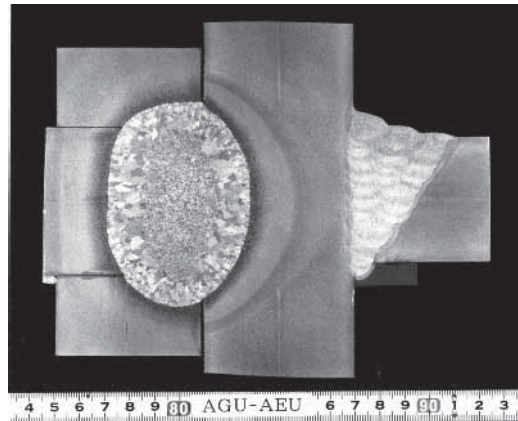
連携の現状：

- ・ 日本鉄鋼連盟では、建築用の600N級鋼に加えて800N級鋼の研究を進めている。
- ・ 平成13年6月より、社団法人日本鉄鋼連盟、独立行政法人建築研究所、社団法人日本鋼構造協会の3者により、21世紀鋼構造フォーラムを組織し、産・学・官の鋼構造研究者および実務者により、新時代にふさわしいスケルトンに関して情報交換を実施（提案されたスケルトン別紙）。

参考1：高強度・高機能鋼を用いたスケルトンの例（トリプル・スケルトン）



参考2：高靱性鋼（高機能鋼）の接合研究



4.3 21世紀鋼構造フォーラム WG3の活動

- ①建築鋼構造技術曼荼羅
- ②21世紀鋼構造フォーラム新技術探索セミナー

従来はあまり話題に出なかったものの少し開発の方向を変化させれば建築鋼構造に利用可能となりそうな技術を含めて、建築鋼構造を支え、取り巻き、協働する技術を調査することを通して、建築鋼構造技術の世界を考えた。

建築鋼構造を支える技術としては、これまでに手にした実用技術、今まさに手に入れようとしている開発中技術、そして、もしこのような技術があればもっと可能性が広がるという将来技術、というような開発の時間軸を機軸として考えることが一つの視座であろう。しかしながら、WG3では、実用技術や開発中技術を網羅的に位置づけ、それらを念頭に置くことによって、さらなる発想の展開や新しい発想の注入を加味することで将来技術のアイデアも浮んで来ると考えた。それならば、我々の知っている技術（さらには、欲しいと思う技術）をやや大袈裟に言えば「一幅の画」に表現して、21世紀建築鋼構造技術の世界を俯瞰してみようではないかというチャレンジを開始した。目指すは21世紀の鋼構造技術の世界を「曼荼羅」に、ということになったわけである。

次ページに、現段階の作品を示している。図にあるように、技術を分類するとともに、関連する画像情報を埋め込んで、技術を俯瞰しようとした。次項に述べる新技術探索セミナーによって得られた技術情報も適切な位置にとり入れている。

現状は、残念ながら、最終目標とした「曼荼羅」の域には到達しているとは言い難い。我々が目指した技術を俯瞰するという目的に、なんとか使える絵になっているといったところであろうか。今後、更なる改良を加えてまたの機会には「曼荼羅」と胸を張っていえる作品に仕上げたいと考えている。

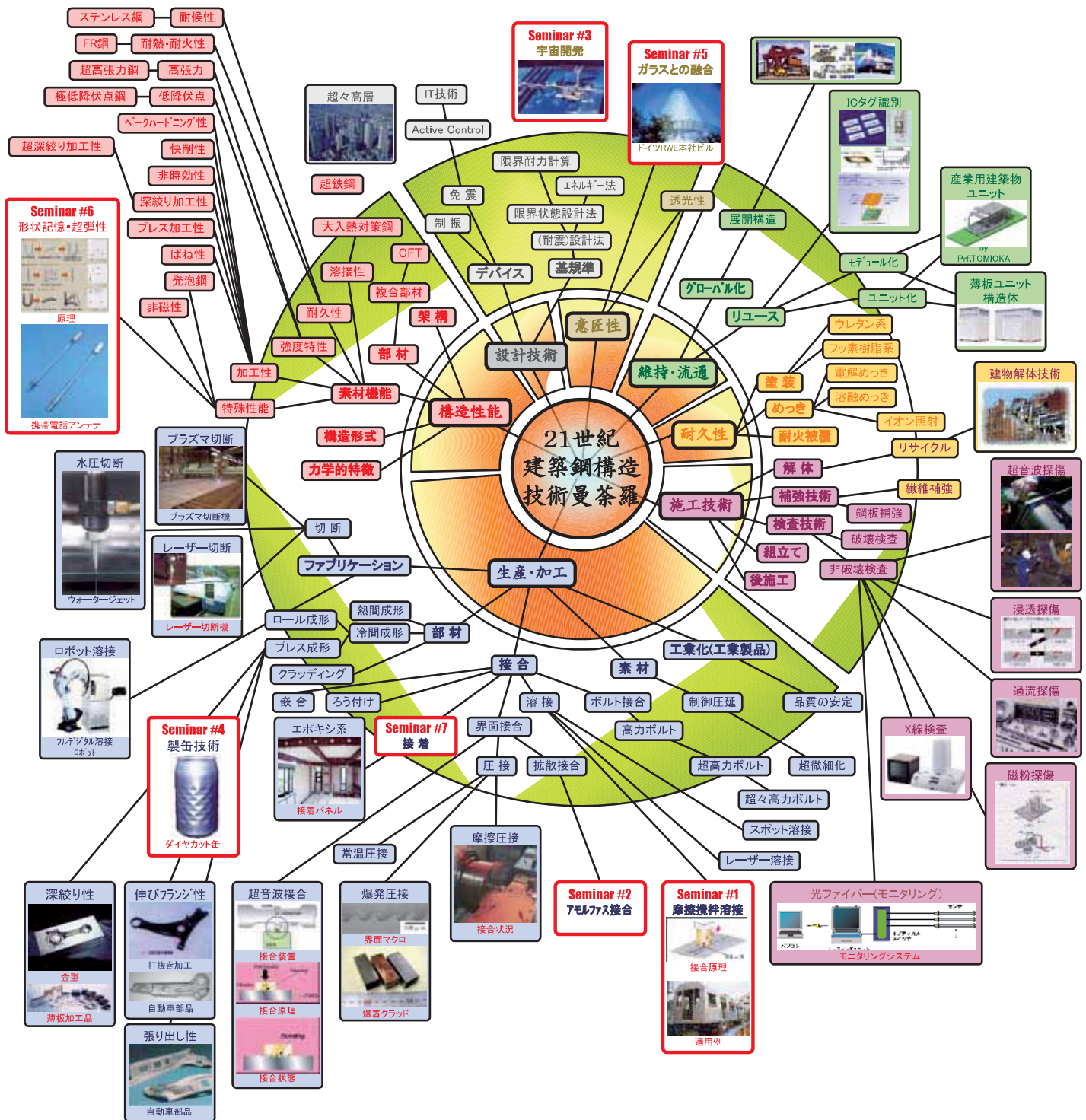
これとは別に、技術の可能性を探る上ではWG3メンバーの議論だけに頼ることなく、素材メーカー、異分野の専門家の話を聞くことが必要だと考え、フォーラムメンバーの勉強の場として「新技術探索セミナー」を開催した（下表）。各セミナーの概要を報告する。

新技術探索セミナー

回	月日	テーマ	講師
1	2/12	摩擦攪拌接合とその適用性について	川崎重工業(株)・古賀信治氏
2	3/17	アモルファス接合について	住友金属工業(株)・高田啓一氏
3	4/26	宇宙開発と材料について	(独)宇宙航空研究開発機構・山本昌孝氏
4	6/7	特殊ガラス構法の変遷と今後	日本板硝子 D&G システム(株)・松延晋氏
5	7/30	製缶分野におけるプレス加工技術と材料について	東洋製罐(株)・只木康文氏
6	9/10	形状記憶合金の特性とその用途	大同特殊鋼(株)・森井浩一氏
7	10/14	接着について	コニシ(株)・杉田 博氏

21世紀鋼構造フォーラムWG3 21世紀建築鋼構造技術曼荼羅

—他分野既存鋼材、既存技術およびその応用技術の探索—



「21世紀鋼構造フォーラム 第1回新技術探索セミナー」の開催結果報告

「21世紀鋼構造フォーラム」は、これからの鋼構造技術の担い手である若手研究者、技術者および設計者が参加し、自由な発想、自由な立場で斬新な鋼構造研究の提案などを行う意見交換の場として、2001年6月に設立されました。昨年度には、本フォーラムで提案された内容を対外的に発信し、また、関係者に広く意見を提案して頂くために、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」を開催しました。本フォーラムでは、今年度からの二年間を新たな活動期間と位置付け、2つのWG (WG1、WG3) を設けて以下の活動を行なっています。

WG1：「これまでに挙げたテーマを具体化する活動」

WG3：「建築分野以外の既存鋼材、既存技術またはその応用技術を用いた建築物の提案」

WG3では建築分野での新たなニーズ探索を目的に、その最初のステップとして、建築分野以外の専門家を招聘し、その分野で用いられている材料、接合技術、構造等について紹介して頂き、建築分野への適用を検討しております。

今回ご紹介する「新技術探索セミナー」は、WG3の活動の一環として開催されたものです。第1回は、川崎重工株式会社の古賀信次博士を講師に迎え、現在、アルミニウム合金の接合において脚光を浴びている「摩擦攪拌溶接」をテーマとして取り上げ、紹介して頂きました。今後も建築分野以外の専門家の招聘し、その分野で用いられている材料、接合技術、構造等について紹介して頂く予定です。

■第1回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年2月12日（木）午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 第1会議室（鉄鋼会館4階）

テーマ：「摩擦攪拌接合とその適用性について」

講師：古賀 信次 氏

工学博士（大阪大学）、技術開発本部システム技術開発センター製造技術部 接合グループ長、1981年に大阪大学大学院工学研究科（溶接工学専攻）修士課程を終了し、川崎重工業株式会社入社、1993～1994年 米マサチューセッツ工科大学客員講師。

講演概要：

1) 摩擦攪拌接合とは

摩擦攪拌接合法 (FSW : Friction Stir Welding) は、1990年代初頭に英国 TWI によって開発されたもので、低歪、高能率、省エネルギー等の数多くの特徴を持ち、難接合材の代表であるアルミニウム合金やマグネシウム合金の溶接施工にとって革新的な接合法です。1995年に米 Welding Journal 誌に発表され、正式に産学会に登場してから10年弱ですが、わが国においても TWI から研究ライセンスを取得した幾つかの大学や研究所で活発な研究が行われるとともに、アルミ素材メーカーやファブリーケータの数十社が使用ライセンスを取得して実製品への適用を進めつつあります。FSWによる接合は、ピンと呼ばれる小突起を先端に持

つ円柱形状の接合ツールを回転させながら被接合材料に押し付け、ピンを埋没させた状態で接合線に沿ってツールを移動させることにより行われます (図1)。被接合材料はピンおよび接合ツール下面との動摩擦により発熱・軟化し、ツールの回転に引きずられる形で塑性流動を起こして一体化します (アルミニウム合金の場合の加熱温度は融点よりやや低い750～800K←材料の溶融は起こらない: 固相接合)。また、図2に示すように継手中央には高温への加熱と大きな塑性流動により生じた再結晶からなる部分 (攪拌部: Stir Zone) が形成され、攪拌部では組織が細粒化され母材原質部より破壊靱性が向上します。FSWの長所・短所をまとめると表1となります。

表1 FSWの長所・短所

長 所	
固相接合のメリット	溶接変形が極めて小さい。 表裏面とも溶接ビードの形成なし(図3)
自動プロセス	凝固・溶融に伴う溶接欠陥が発生しない 機械加工に準じた完全自動プロセス
省エネ・クリーン	機械操作に特別な熟練や経験必要なし 大容量電源が不要で冷却水も必要なし 騒音・ヒューム・スパッタ等も発生せず ツール寿命が長く、消耗材が殆どない
短 所	
被接合ワークへの接触・加圧	接合装置・被接合ワークに高い剛性が必要 複雑な形状の溶接線には適用困難
対象継手が限定される	手動によるフレキシブルな接合が不可能 板厚・材質に制限有り
開先精度要求が厳しい	ギャップ・目違い許容度が小さい 接合ツールの位置決め精度要求が高い
終端処理に工夫が必要	終端部にピン孔が残存

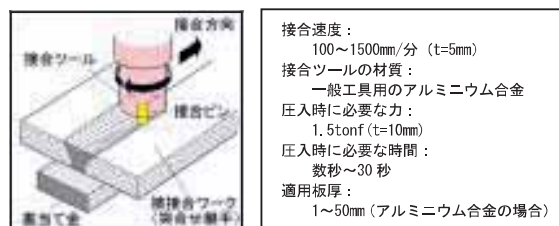


図1 FSWの接合模式図

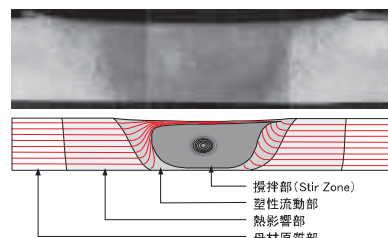


図2 FSW継手の組織分類 (7075-T6 3.2mm)

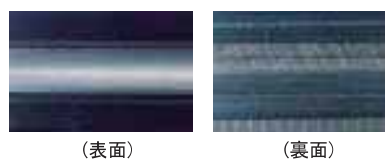


図3 FSW継手の外観

2) 現在の適用事例

FSWが適用されている分野と主な事例を表2に示します。基本的には、従来の接合法（アーク溶接、リベット）をFSWに代えることで、コストダウンと継手品質の向上を図っています。具体的には、アーク溶接の場合では溶接歪が大きく矯正作業が大きな割合を占めていましたが、FSWに変更することで矯正作業がほとんど必要なくなり、製作工数が低減され、コストダウンが図れます。

表2 FSWが適用されている分野

分野	適用部位	適用のメリット
航空宇宙分野	Deltaロケット燃料タンク (Boeing社) (図4)	溶接のコストダウンと継手品質向上
	自家用小型ジェット機胴体 (Eclipse Aviation社) (図5) 旅客機胴体 (Dymler-Crysler社、エアバス社)	リベット全廃によるコストダウンと機体重量低減
鉄道車両分野	在来線車輦胴体 (日立製作所) (図6)	溶接のコストダウンと継手品質向上
	700系新幹線床パネル (住友軽金属工業) (図7)	
船舶・海洋分野	高速フェリー船殻パネル (Marine Aluminum社) 調査船上部構造用パネル (住友軽金属工業)	溶接のコストダウンと継手品質向上
自動車分野	サスペンションアーム (昭和電工)	従来のアーク溶接と比較し、ブローホール等の気孔欠陥の発生がない
その他分野	半導体製造装置冷却基板 (Cu合金) (日立製作所)	従来の電子ビーム溶接と比較し、優れた機械的性質を有する
	医療用ストレッチャー (Mg合金) (兵庫県立工業技術センター)	Mg合金を用いることで従来のアルミ製に比べて、軽量・高剛性化を実現



図4 Delta ロケット用燃料タンクのFSW状況 (Boeing社)



図5 自家用小型ジェット機胴体への適用 (Eclipse Aviation社)

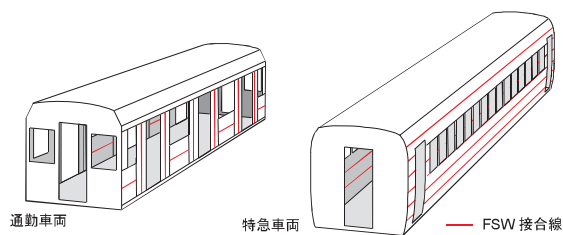


図6 鉄道車両構体側構におけるFSW適用例

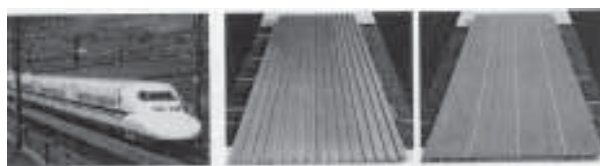


図7 700系新幹線車輦の床パネル (住友軽金属)

3) 今後の展開

表2にも示すようにFSWは、アルミニウム合金以外にマグネシウム、銅の合金に対する実用化が進められており、現在は、アルミニウム合金／銅合金の異種材接合や適用対象を炭素鋼、ステンレス鋼、ニッケル合金に拡大しようとする試みが大学・研究機関レベルでなされつつあります。

高融点の鉄鋼材料に対してFSWを可能とするためには、1300℃以上の高温でも強度や耐磨耗性を保持するツール材料の開発が不可欠となっており、その材料の最有力候補として、セラミックス系の非金属材料（例えば、CBN: Cubic Boron Nitride (立方晶窒化ホウ素)）が検討されています。ただし、現状ではツール材料の消耗が早く、4mm厚の鋼板を溶接する際に長さ100mm程度しか溶接できませんが、今後の研究・開発の進展によっては、鉄鋼材料へ実用化される日がくると考えられます。

また、FSWをスポット的に用いた新しいアルミ接合法 (FSJ 継手: Friction Spot Joining) が提案されており、リベットに代わる接合法として注目を集めています (図8)。

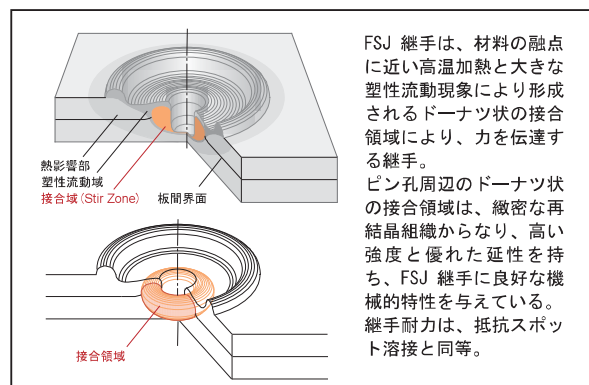


図8 FSJ継手の概要 (川崎重工業)

所見: FSWの鋼構造分野への適用は、まだ先のことになりそうですが、FSWは、溶接歪が小さい等の従来のアーク溶接がもっていない特徴を有しており、興味深い。今後の開発状況を見守りたいと思います。

(鹿島技術研究所 建築構造グループ 澤本佳和)

「21世紀鋼構造フォーラム 第2回新技術探索セミナー」の開催結果報告

第1回新技術探索セミナー「摩擦攪拌接合とその適用性について」(講師：古賀博士、川崎重工業)に続き、建築鉄骨の新しい接合法の探索をテーマとして開催しました、第2回新技術探索セミナーの概要について報告します。

■第2回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年3月17日(水) 午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 第4会議室(鉄鋼会館6階)

テーマ：「アモルファス接合について」

講師：高田 啓一

工学博士(東京大学)、住友金属工業 鋼板・建材カンパニー建設技術部長、1976年に東京大学工学部建築学科を卒業し、住友金属工業(株)総合技術研究所に入社、現在に至る。

講演概要：

1) アモルファス接合とは

近年、材料の接合技術において精度・性能の高度化、あるいは高能率化の観点から界面接合(ろう付けおよび拡散接合等、材料を面と面とで接合する方法)が注目されつつあります。その中で接合界面に低融点材料(アモルファス金属等)を挿入し、液層を形成して接合を行うものが液層拡散接合法であり、この手法に外力によるアプセットを付加したものがアモルファス接合です。アモルファス接合は、通常の溶接法に比べ加熱温度が低いため、母材の変形が小さく、溶接熱影響部の材質劣化が小さいだけでなく、比較的量産性に富んでいるという利点を有しています。

2) 接合原理

アモルファス接合は、アモルファス金属箔中の融点降下元素(ボロン等)の拡散現象を利用した、液層拡散接合法に分類されます。拡散接合の基本原理は、平滑かつ清浄な金属面同士を接触させ、接触面間に原子間引力が作用するまで原子を熱拡散によって密着させて接合するというものですが、現実の接合面はミクロ的な凹凸があり、かつ酸化被膜で覆われているため、健全な接合を得ることは容易ではありません。しかしながら、液層を介した場合、原始的なつながりが容易に起こり、拡散接合を比較的容易に行うことができます。

アモルファス接合の原理および接合プロセスを図1および図2に、接合システムの装置構成を図3に各々示します。被接合材より低い融点を有するアモルファス金属箔を被接合材端面間に挿入し、高周波誘導加熱装置により接合部をアモルファス金属箔の融点直上に加熱し、接合端面間の空隙を熔融金属で満たします(図1-第1段階)。その温度で一定時間等温保持する間にアモルファス金属中に含まれる融点降下元素(ボロン等)が母材中に拡散する為、熔融金属中の融点降下元素濃度が低下し(図1-第2段階)、それとともに熔融金属の融点が徐々に上昇します。融点降下元素濃度が凝固温度点にまで低下すると、熔融金属が等温凝固し接合が完成します(図1-第3段階)。

3) 適用事例

アモルファス接合の適用事例として鋼管および鉄筋の現場接合の事例を図4および図5に各々示します。アモルファス接合は、接合工程が自動制御されるため作業者の熟練性や技量を必要とせず、また、現場接合とする場合においても良好な継手性能を確保できることが、これまでの適用事例において確認されています。

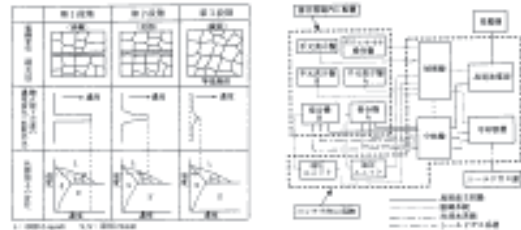


図1 接合原理

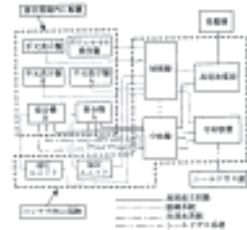


図3 装置構成



図2 接合プロセス

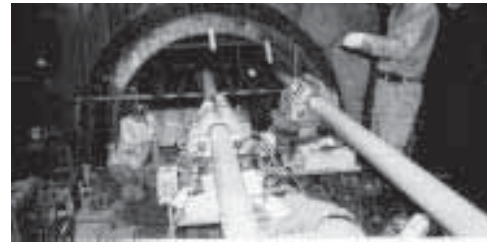


図4 鋼管接合への適用事例



図5 鉄筋接合への適用事例

所見：装置が大型であることや接合面の精度確保等の問題から、現状では適用範囲が限られますが、母材性能に頼り大入熱を許容するという、現在の建築鉄骨の溶接接合の技術開発のトレンドとは一線を画す接合法と言えます。建築鉄骨の新しい接合法としての界面接合の分野のさらなる技術開発に期待したいと思います。

(住友金属工業 建築技術研究室 北岡 聡)

「21世紀鋼構造フォーラム 第3回新技術探索セミナー」の開催結果報告

第3回新技術探索セミナーは、宇宙開発分野での材料利用をテーマに開催されました。第1回、第2回テーマの接合法とは対象が大きく異なり、我々鋼構造技術者が普段ほとんど聞くことが出来ないお話をお伺いすることが出来たと思います。以下に、第3回新技術探索セミナーの概要について報告します。

■ 第3回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年4月26日（月）午後2時～4時

場所：日本鉄鋼連盟 第1会議室（鉄鋼会館4階）

テーマ：「宇宙開発と材料について」

講師：山本 昌孝

工学博士、(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙環境利用センター 主任研究員、1965年千葉工業大学を卒業し、同年東京大学生産技術研究所入所、1981年宇宙開発事業団入社

講演概要：

1) 宇宙開発の歴史

宇宙開発は、1950年代に旧ソ連と米国により始められました。1960年代に入ると宇宙開発の大開拓時代に入り、ガガーリン(ソ連)の宇宙飛行、アポロ11号(米国)による月面着陸など、めざましい進歩を遂げました。その後、競争から国際協調による時代となり、スペースシャトルが登場し、ハッブル望遠鏡の打上げや宇宙ステーションの建設開始など、宇宙環境を利用する時代へと突入しています。

日本でも、1969年の宇宙開発事業団設立からロケット及び人工衛星の開発が行われています。

2) 宇宙開発の現状

日本の最新型ロケットは、H-IIA型と呼ばれ、全質量285ton、全長53m、衛星等の積載荷重2tonとなっています。全質量の内訳は、躯体が約10%、残りは全て燃料です。この10%を軽量化するために、新しい材料や形態の開発がされています。

人工衛星は、打上げ時にはコンパクトに折りたたまれ、宇宙空間で大きく太陽電池パネルの羽を開く構造となっています(図1、図2)。ロケットの積載荷重に納めるため、徹底的な軽量化が図られています。

15カ国が参加した国際協力プロジェクトとして、国際宇宙ステーション(International Space Station: ISS)の建設が進められています。既に全体の約50%が完成し、大きさは110m×75m程度、全質量415ton、搭乗員数は最大7名となっています(図4)。

3) 宇宙開発の材料

宇宙構造物に要求される性能として、軽量性、稼働時の柔軟性、打上げ時の収納性、高い制御性、耐温度性、耐久性等があげられます。使われる材料は軽量化を図るため、必然的に比剛性、比強度の高いものが求められ、アルミ材やCFRP(カーボンファイバーに樹脂を含浸させたもの)、カーボンカーボン(CFRPに対し、蒸焼きと樹脂含浸を繰返

して作られたもの)などが主として使われています。国産ロケットH-II型では補助ロケットケースに高張力鋼が使われていましたが、最新型のH-IIA型ではCFRPに変更されています(図3)。スペースシャトルの表面材等には、セラミックタイルが使用されています。

4) 宇宙開発の展望

国際宇宙ステーション(ISS)は2010年までに完成させ、長期の宇宙飛行に関する医学・生物学の研究に重点を移していきます。スペースシャトルに変わる新しい有人探査機もその後実用化されて、2020年までには月に人類の拠点を築くことになる予定です。月に拠点を置くことは、宇宙探査の次のステップに向うことを可能にする意味があります。

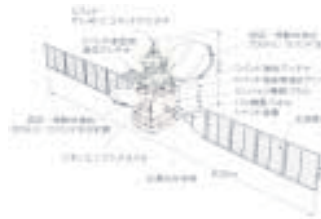


図1 人工衛星(軌道上)



図2 人工衛星(打上げ時)

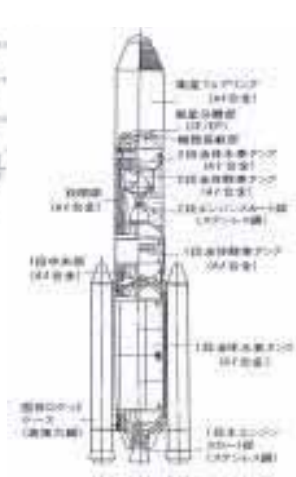


図3 H-IIロケットの材料



図4 宇宙ステーション完成予想図

所見：ロケット重量の90%が燃料で、本体は10%程度なのは驚きましたが、そのわずかな重量比の中で軽量化に鎊を削る宇宙技術者の姿勢に、建物重量の軽量化を目指し日夜努力する建築構造技術者として、共感を覚えました。地球の内、外と活躍の場は違っていても、技術の基本は変わらないようです。宇宙分野では、鋼があまり使われていないとのこと。ちょっと残念でした。

(清水建設 構造設計部 斎藤 利昭)

「21世紀鋼構造フォーラム 第4回新技術探索セミナー」の開催結果報告

新技術探索セミナーでは、現在までに他分野での接合方法として2回、第3回では宇宙分野技術からの適用性についてセミナーが開催されました。第4回は、最近話題となることの多いガラスを多用した透明建築を題材に開催されましたので、概要について報告します。

■第4回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年6月7日(月)午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 804 会議室(鉄鋼会館8階)

テーマ：「特殊ガラス構法の変遷と今後」

講師：松延 晋

日本板硝子D&Gシステム 営業部開発営業グループ次長、1987年に東京理科大学工学部建築学科を卒業し、日本板硝子(株)に入社、現在に至る。

講演概要：

1) ガラスに関する基礎知識

板ガラスは主にシリカ(珪砂)から成り、耐熱機器に使用する場合や工芸品として使用するものは、その組成も異なっています。ガラスの製造法の内、一般的なフロート法には、約800mの製造ラインが必要で、その内、徐冷部分に500～600mの長さが必要となります。ガラスの加工法は、素板(もといた)のまま使用する場合と、素板を「合わせ」で使用する場合、断熱性を高める目的でガラス表面を「コーティング」や「複層」で用いる場合、素板に焼き入れを行って強度を高めた「強化」があります。

2) 80年代までのカーテンウォール

30年代ニューヨークに現れた第一世代超高層ビルは、現代建築の構造と古典のファサードが融合したものと いえます。第二世代は、第二次大戦後に現れ、モダニズムの基本となったガラスカーテンウォール(以下、G.C.W)初期の超高層です。この世代の超高層ビルでは、G.C.Wを用いることで単調なデザインに成りがちな欠点を克服するために、建物全体の形状変化、多色のガラスを使用、古典的デザインをガラスで表現する方法などが用いられました。

3) 90年代の特殊構法

90年代に入るとフォスター、ロジャース、ピアノなどのヨーロッパの建築家により、特殊なガラス構法を用いた建物が現れるようになりました。

一方、日本では昭和45年(1970年)の大阪万博後、強化ガラスを使って特徴的なガラスファサードを持つ建物(写真1,2)が現れましたが、残念なことにガラスの破損事故やオイルショックを迎え、技術的進歩が停滞してしまいました。しかし、そのまま日本で開発が進んでいけば、世界のガラス技術をリードできたとの話もあり、興味深く拝聴しました。

90年代に多く現れた、ガラス自体に孔を開けてボルトを留める技術も、70年代後半にスカッシュコート(壁面にガラスを用い、接合部を皿孔により平滑に仕上げる技術から

発展しています(写真3,4)。日本でもオイルショック以降、開発が停滞していたガラス支持特殊構法が90年代に競って開発されました。

4) 近年ヨーロッパの状況

現在では、東西合併後のドイツに多くの注目すべきガラス建築や自然エネルギーを積極的に利用したエコロジカル建築が見られます。また、多重曲面のファサードや非透過材を覆う半透明スキンを持つ建物もヨーロッパ各地に見受けられるようになりました。

ヨーロッパで展開される最先端のガラス技術から、今後のガラス工事に求められる技術として、①多重曲面への適用、②他種類のガラスの使用、③光学的特性の把握、④力学的な適用の複雑化が上げられています。

5) ガラスの構造的用途

最後に、ガラスを積極的に構造要素として用いる国内の最新事例紹介がありました。

表1 ガラス建築を考える上で重要な建築物

年代	建築物	キーワード
1930年代	クライスラービル、エンパイーステートビル、ロックフェラービル	アールデコ、石、剛構造、金属板
1948～1970年代	レイクショアドライブ(ミス)	鉄とガラスのカーテンウォール
	国際連合	39階建てガラス建築
	シーグラムビル(ミス)	ハイ・モダンの最高傑作
	ジョンハンコックセンター(ペイ)	ガラスカーテンウォール
1990年代	ホンピドーセンター(ピアノ/ロジャース)、香港上海銀行(ロジャース)	ハイテク建築家の登場
	ループル美術館/ガラスピラミッド(ペイ)、アラブ・世界研究所(ヌーベル)	斬新なガラス・ファサードへ
	ラ・ビレット科学産業館(写真5)	ガラス特殊構法
	関西国際空港	建設市場の開放 海外デザイナー流入
2000年代	ソニーセンター(ヤーン)(写真6)、タイムランティ(ピアノ他)(写真7)、国会議事堂(フォスター)、Klantzlerビル(ヤーン)	ベルリンのガラス建築群
	RWE本社ビル(フォーフェン)(写真8)、ホストター(ヤーン)(写真9)	ドイツを代表するエコロジカル建築
	スイス本社ター、大ロンドン庁舎、タープレイスビル(フォスター)	ロンドンの再開発ビル
	大英博物館グレーコート(フォスター)、DB銀行、グッゲンハイム美術館(ケイリー)(写真10)、パレンシア科学未来都市(カトラハ)(写真11)	多重曲面のファサード
	ブレゲンツ美術館(スントール)(写真12)、クルサールホール(モネオ)(写真13)	半透明スキン

所見：日頃、設計者と建物のファサードを考える時に、外力や保有すべき性能ばかりに構造設計者の話題の中心になりがちだが、今回のように学生時代に戻った気分でお聴きした最新建築デザイン動向も視野に入れた上で、設計を進められれば、さらに良い設計に繋がるのではと感じた。

(日建設 構造設計室 小野 潤一郎)



写真1 広島バスターミナル



写真2 鶴屋デパート

日本の特殊構法の初期



写真3 スカッシュコート



写真4 取付け詳細



写真8 RWE 本社ビル



写真9 ポストタワー

ドイツを代表するエコ建築



写真10 グッゲンハイム美術館



写真11 バレンシア科学未来都市

多重曲面のファサード



写真5 ラレレット化学産業館

特殊ガラス構法競争時代



写真12 プレゲンツ美術館



写真13 クルサーールホール

半透明スキン



写真6 ソニーセンター



写真7 ダイムラーシティ

ベルリンのガラス建築群

「21世紀鋼構造フォーラム 第5回新技術探索セミナー」の開催結果報告

建築分野における鉄鋼材料の新しい地平を開くため、建築以外の分野での新技術についてセミナーを開催しています。第5回は、製缶に於ける加工・接合技術をテーマとしました。その概要を以下に報告します。

■第5回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年7月30日（金）午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 804 会議室（鉄鋼会館8階）

テーマ：「製缶分野におけるプレス加工技術と材料について」

講師：只木 康文

東洋製罐株式会社 開発本部メタル容器開発部 主任部員

講演概要：

1) 飲料缶の構成と加工

食品や飲料用の缶は、大きく3ピース缶（胴部と頂、底部のふたの三部品から成る缶）と2ピース缶（胴底部と頂部ふたの二部品から成る缶）の二種に分けられます。（図1）

3ピース缶は、まず平板を筒状に丸め、電気溶接ないし接着によって胴部を形成し、これに頂部、底部ふたを二重巻き締めで固定して製造します。

これに対して、2ピース缶では、胴底部を一体成形します。この方法の一つが「ドロー・アンド・アイアニング」（Draw and Ironing）であり、この方式による缶を「DI缶」とも呼びます。概略円形の平板をプレス加工によりカップ状に成形した後、リドロー・アイアニング工程で、クーラントを噴射しながら同カップを押し出しつつ、外周部をしごき延ばし、薄肉一体の胴底部を形成します。（図2）これに表面印刷や内面コート、さらにフランジ加工を施し、内容物充填後、頂部のふたを二重巻き締めにより固定します。



図1 飲料容器の種類

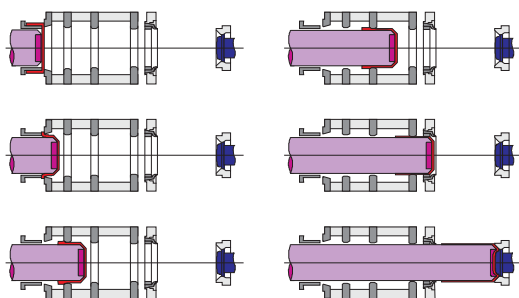


図2 リドロー・アイアニング工程

2) TULC 缶の構成と加工

TULC 缶は、東洋製罐の独自製品の名称で、缶金属の内外表面にポリエステルフィルム（PET）をラミネートした2ピース缶を指します。ラミネートは原板時に行われ、以後DI缶とおおむね同様に加工されますが、DI缶と異なる点は、フィルムが加工潤滑の役割を果たすため、工程中のクーラントが不要となることです。

また、PET 層を多層化し、金属材料内の介在物を減ずることで、更なる薄肉化や、リシール缶（図3）のようなきわめて複雑な形状への加工が可能となっています。



図3 リシール缶の成形プロセス

3) ダイヤカット缶の構成

ダイヤカット缶（図4）は、陰圧缶（コーヒーのように高温殺菌処理のため製品内部圧が大気圧より低くなる缶のこと。ビールなどの発泡飲料の缶は陽圧缶と呼ぶ）の胴部の板厚をさらに減じつつ強度を上げるための工夫として研究されました。これは菱形の折目を胴部中央に付与するもので、外気圧等によるへこみや潰れに抵抗します。同じ形状を陽圧缶に利用すると、開缶に伴う減圧によって缶の形状が変化します。これが商品価値となって、現在市場に出回っています。



図4 ダイヤカット缶

所見：日常目にしてている缶を改めて眺めてみますと、すばらしい薄板加工技術が凝縮されていることが分かります。建築の骨組構造とは、技術のあり方が全く異なる分野に見えますが、鉄を様々な形状に魔法のように変えてしまう手腕は、もしかしたら建築における薄板加工/接合技術のあらたな地平の展開に役立つのかもしれない。

（三重大学工学部助教授 富岡義人）

「21世紀鋼構造フォーラム 第6回新技術探索セミナー」の開催結果報告

「21世紀鋼構造フォーラム」WG3による新技術探索セミナーは第6回を迎えました。今回のテーマは、形状記憶合金です。知っているようでよく知らない形状記憶合金について、その特性から身近に見られる応用例まで、当日は実物によるデモンストレーションを交えてご紹介いただきました。以下に概要を報告します。

■第6回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年9月10日（木）午後2時～4時
 場所：日本鉄鋼連盟 第1会議室（鉄鋼会館4階）
 テーマ：「形状記憶合金の特性とその用途」
 講師：森井 浩一

大同特殊鋼株式会社技術開発研究所電磁材料研究部機能性材料研究チーム長。'91年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了、同年に同社入社。現在、機能性金属粉末の開発、Ti-Ni系形状記憶合金の新規用途開発を担当。

講演概要：

1) 形状記憶合金とは

形状記憶合金(以下 SMA)の主な性質としては、名前のとおり形状を記憶する性質のほか、超弾性(擬弾性)と呼ばれる性質があり、この2つの性質が用途に応じて利用されています。形状記憶とは変形した合金に熱を加えると元の形状に戻る性質のことを言い、超弾性とは見かけ上の弾性限界を超えて変形させても力を除くと元の形状に戻る性質を言います。(図1)

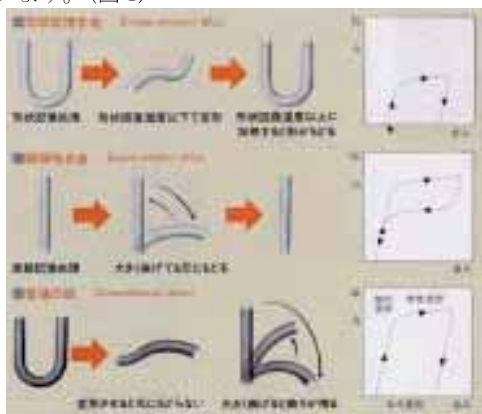


図1 形状記憶合金の性質

SMAの2つの性質については、図2のように説明されます。横軸が温度、縦軸が応力です。形状記憶については、常温で左下の図の状態にあります。応力を加えると左上の図のように原子の配列が変化することによって巨視的に変形し、力を除いても残留変形が残ります。ここで熱を加えて温度を上げると、予め記憶させてあった形状に戻ります。この過程でマルテンサイト相(面心立方格子)と呼ばれる状態から母相(体心立方格子)と呼ばれる状態に変化しています。形状が回復した段階で常温に戻すと、見かけ上の変形を生じることなく、マルテンサイト相に戻ります。一方、超弾性については常温で右下の図の状態にあります。

応力を加えると母相からマルテンサイト相に変化することで変形を生じますが、力を除くと母相に戻り、残留変形が残りにません。

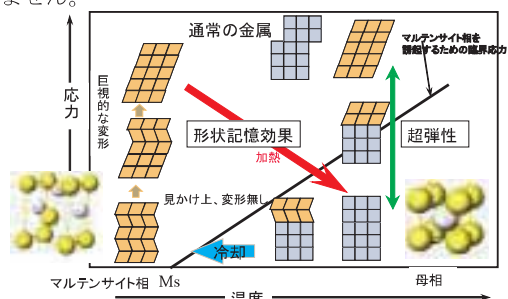


図2 形状記憶効果・超弾性のしくみ

形状記憶や超弾性の特性は、合金の組成、冷間加工率、形状記憶熱処理条件、使用条件などによって左右されます。0.1%の組成変動により、形状回復の終了する温度Afが10℃も変化するため、SMAの製造には厳密な組成管理が必要となります。Ti-Ni合金では、Af=20~100℃程度で、この温度の範囲で利用されています。

2) 形状記憶合金の応用例

形状記憶効果を応用した代表例としては、温水-冷水混合栓温度調整バルブがあります。図3に示すように、SMAでできたコイルばねと通常のばねとを組み合わせた機構により、温度に応じて温水と冷水を調節するものです。普及した理由としては、システムとしてコンパクトになり電気的な動作より有利であること、温和な環境(0~100℃)であることなどが挙げられます。

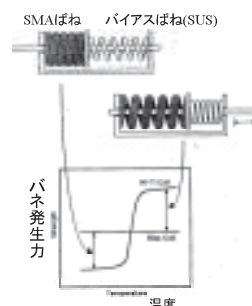


図3 利用形態

超弾性の性質を応用した例としては、携帯電話用アンテナ、眼鏡フレーム、ブラジャー用のワイヤー、医療用のカテーテルガイドワイヤーなどがあります。残留変形が残らないことも重要ですが、いずれも大きな変形にすなやかに追従することによる使用性(使用感)の向上がSMAを採用する大きな理由のようです。その他、建築構造への応用を検討した例¹⁾等が紹介されました。

所見：現状では非常にコンパクトなサイズでの利用に留まっていますが、形状記憶と超弾性という興味深い性質を利用することによって、例えば全く新しい鉄骨接合法などが考えられるかもしれません。

(国土技術政策総合研究所 石原直)

参考文献

- 1) 例えば、福田、北川：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究 (その26) Ni-Ti系形状記憶合金の圧縮引張特性、日本建築学会大会梗概集、B-2、p.233、2001.9

「21世紀鋼構造フォーラム 第7回新技術探索セミナー」の開催結果報告

「21世紀鋼構造フォーラム」WG3による新技術探索セミナーも7回目を向かえ、今回が最終回となりました。最後のテーマは、他分野における接着技術の探索です。以下に第7回新技術探索セミナーの概要について報告します。

■第7回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年10月14日（木）午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 706会議室（鉄鋼会館7階）

テーマ：「接着について」

講師：杉田 博

コニシ株式会社 浦和研究所 研究開発第4部リーダー。
1988年に日本大学大学院理工学研究科工業化学科を卒業し、コニシ株式会社に入社。浦和研究所、大阪研究所を経て、現在に至る。

講演概要：

1) 接着技術の変遷

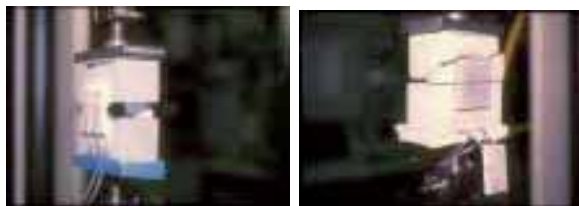
接着の歴史は古く、紀元前2000年頃には、すでに漆を用いた接着が使われていました。また日本では、平安時代に、米糊、漆喰、膠を用いた接着が使われていました。近年用いている接着では、接着テープが1930年に、エポキシ樹脂接着剤が1950年にそれぞれ実用に至っています。接着を成功させるためには設計の段階から「接着の要素」と呼ばれる接着の原理、接着する物質の表面状態および接合方法、および接着後の使用環境を十分に吟味し、接着剤を決定することが大切です。また、環境問題がクローズアップされてきた昨今では、リサイクル問題も含めた接着剤、接着工法の開発が求められています。

2) 接着の原理と分類

接着の原理は、大きく分けて機械的結合、水素結合、化学結合に分類されます。また接着は、材料(主成分)による分類、硬化方法及び形態(性状)による分類、接着強さにより分類できます。現在使われている接着剤は、エポキシ系、アクリル系、変成シリコン系、ウレタン系およびホットメルト系等が一例に挙げられます。(表1)

3) 接着における留意点

ものものを接着する場合、最も留意しなければならないものに接着面にかかる応力を如何に回避するかということが挙げられます。これには弾性タイプの接着剤が有効であることがわかっています。また、接着したあとの耐久性についても考慮しておかなければなりません。



変形に追従する弾性タイプ 追従できず破壊した硬質タイプ

図1 接着剤の変形追従性

4) 分野における接着の適用

現在の接着技術は各分野で活躍しています。建築分野では耐震補強工事で用いるあと施工アンカーや、カーボン繊維補強に、エポキシ系の接着剤が適用されています。また、カーテンウォールやガラスサッシの目地には、ムーブメント吸収とシーリングを兼ねた接着剤として、変成シリコン系が適用されています。さらに、自動車関連、半導体素子、液晶ディスプレイ、音響機器(磁石の接着)、ゴルフ道具、航空宇宙関連、システムキッチンなど、様々な分野で適材適所に各種接着剤が適用されています。

表1 各種接着剤の特徴

	接着剤	長所	短所
熱硬化型	エポキシ系	接着剤の中では高強度であり、実績がある 硬化収縮が比較的小さい 耐水性が比較的良好	アミンは皮膚刺激性があり、エポキシは変異原性物質である 低温で硬化が著しく遅延する 紫外線に対する耐候性が悪い 弾性率が高いので、変形追従性が低い
	アクリル系	広範囲の接着性がある 低温でも硬化が速く、弾性を維持 或る程度の油面でも接着することができる	金属を腐食する場合があります 硬化収縮が大きいので、薄い金属を接着することがある 主成分はアクリルモノマーなので異様な臭気があり、これは劇物に相当する 嫌気性硬化型なので、はみ出した部分や酸素を通す多孔質の場合は硬化しない
	変成シリコン系	人体に対する毒性は比較マイルド 低温でも弾性を維持 広範囲な接着性	一液の場合は硬化のために湿気が必要である 比較的耐水性が低い
	ウレタン系	原料が比較的安価 比較的広範囲のものに対して接着性がある	耐アルカリ性が悪い 硬化剤のイソシアネートには毒性がある 材料によっては発泡することがある 一液の場合は湿気が供給されないと硬化しない
熱可塑型	接着剤が冷却すれば硬化するので作業時間が短い 溶剤のような揮発成分がないため、安全性が高い	独自のアプリケーションが必要 被着体への濡れが完全でない間に硬化するため、投锚効果が期待できない	

所見：他の工業分野では例外なく接着技術が適用されている中、建築鉄鋼に関しては、難接着金属(表面処理)、コスト、接着後の非破壊検査、耐火性能など、高いハードルをクリアしなければならないことから、殆ど適用されていません。しかし、ちょっとした発想の転換や発見により、将来的には建築鉄骨加工に広く適用されるのではないかと、という印象を受けました。

(日本設計 構造設計部 荻野 雅士)

4.4 独立研究テーマ

- ①鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及びその設計技法に関する研究
- ②リユース可能な新しい鋼構造骨組システム
ーテーパーピンによるシアキーを用いたピン継手の提案と載荷実験ー

21世紀鋼構造フォーラムから、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」に提案された、アイデアの中から、具体化が比較的早く可能と思われる、

Bグループ

- ・着脱可能な接合部の探求
- ・次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構

Cグループ

- ・スチールメゾンリー

を、21世紀鋼構造フォーラムから（社）日本鋼構造協会に移し、委員会を発足させた。

Cグループは、「鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発およびその設計技法に関する研究」とし、2003年4月から2005年3月までの期間で、この提案のベースとなる、シートメタル構造を提案した、富岡義人三重大助教授を委員長に、新たに同協会で、委員を募集し、研究をスタートさせた。研究成果は、「鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発およびその設計技法に関する研究」報告書（2005年3月）にまとめている。

一方、Bグループの提案は、同協会の「鋼構造建築物の循環使用を視野に入れた構築手法に関する小委員会（リユース委員会）」（委員長：松村秀一東京大学助教授）傘下のワーキング「リユース可能な新鋼構造骨組システム検討ワーキング」（委員長：山田 哲東京工業大学助教授）に、提案者のひとりの、辻 聖晃助教授（京都工芸繊維大学）が加わり、始まった。結果は、同名報告書（2004年5月）にまとめている。

鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及びその設計技法に関する研究

(社) 日本鋼構造協会

鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発とその設計技法に関する研究委員会

森野 捷輔 三重大学・委員長	富岡 義人 三重大学	川口 淳 三重大学
竹内 徹 東京工業大学	新谷 真人 (株) オーク構造設計	真瀬 伸治 清水建設 (株)
宮崎 賢一 (株) 竹中工務店	渡邊 秀仁 戸田建設 (株)	佐藤 鋭治 日鐵建材工業 (株)
穂苅 實 日鉄鋼板 (株)	原田 晶利 JFE 建材 (株)	沖 晃司 JFE 技研 (株)
川上 宏 (株) 神戸製鋼所	菅野 良一 新日本製鐵 (株)	清水 秀夫 住友金属工業 (株)・幹事
作本 好文 新日鐵製鐵 (株)・オブザーバー	矢部 喜堂 清水建設 (株)・オブザーバー	久保 久志 三重大学大学院・研究協力者

キーワード：鉄鋼薄板材料 モノコック構造 立体構造板 形態の多様性 多層性 環境制御

1. はじめに

(独) 建築研究所、(社) 日本鉄鋼連盟(以下、鉄連)、(社) 日本鋼構造協会(以下、JSSC) によって、2001年に設置された21世紀鋼構造フォーラム、Cグループの提案のひとつとして、鉄鋼薄板材料を利用したモノコック構造物が提案された(注1、注2)。2003年9月、鉄連からの研究委託に基づき、JSSCに「鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及びその設計技法に関する研究委員会」が設置され、2005年3月までを目処として、研究を進めてきた。本報告は、同委員会におけるこれまでの研究の概要をまとめたものである。

2. 研究の目的

本研究は、鉄鋼薄板材料を加工して、剛性の高い立体構造板を形成し、これを用いて鋼構造建築物を形成する可能性を幅広く検討するとともに、新たなプロトタイプの開発、及びその設計技法の開拓を目標とするものである。

3. ワーキンググループの構成

本研究は、研究分野が多岐にわたるため、表1のようにワーキンググループを設け、分担して研究を行っている。

表1：細分研究テーマとワーキンググループ分担表

ワーキンググループ名称	研究項目		分担	
			業界	担当者名
加工・生産ワーキング	1. プレス加工要素実験	1. 板厚一最大矢高関係 2. プレス径比一矢高関係 3. 曲面加工試作	鉄鋼 建材	菅野 沖 清水 川上 佐藤 原田 穂苅
	2. 嵌合接合	1. 工場加工方法 2. 現場加工方法		
	3. 嵌合接合実験	1. 試験体製作 2. 接合加工実験		
構造ワーキング	1. 実験	1. 嵌合接合部の試験 2. 部材試験 3. 加工硬化等ばらつき誤差試験	鉄鋼 大学 設計	富岡 川口 竹内 新谷 菅野 沖 渡邊
	2. 有限要素解析	1. 曲面モデリング 2. 応力分布・集中 3. 板厚・プレス径比一応力分布関係		
	3. 設計法	1. 段階的設計法		
空間ワーキング	1. 中規模空間	1. ヴォールト空間 2. ドーム空間	大学 設計	富岡 川口 竹内 新谷
	2. 小規模空間	1. ボックスカルバート 2. 集合住宅基本設計矩計		
構法ワーキング	1. 標準詳細作成	1. パネル相互接合部 2. 床一壁接合部 3. 基礎定着部 4. 開口部 5. 雑詳細	建設 建材	真瀬 宮崎 渡邊 佐藤 原田 穂苅
環境ワーキング	1. パッシブ	1. 断熱 2. 受熱 3. 蓄熱 4. 層厚構成	大学	富岡 川口
	2. アクティブ	1. ペルチェ・ヒートポンプ・パネル 2. ソーラー発電パネル 3. 層内換気制御		

4. 鉄鋼薄板構造に関わる

特許技術のスペクトラム

4.1. キーワードの設定、分析・チャート化

現在、鉄鋼薄板材料が、どのような分野で、またどのような用途で使われているかを把握するために、特許庁のホームページ（注4）で公開されている平成5年度以降の発明から鉄鋼薄板関連の技術検索を行った（2004年7月検索）。

その際、「(金属板 or 金属薄板 or パネル) and 構造 and (折り曲げ or プレス or サンドイッチ or ハニカム or トラス)」という9つのキーワードを用いた検索を行い、かつ建築の分野にしばり、ディテールなど細部に偏ったものを除いて、92件を選び出した。

これらを総覧して、大きく薄板挟み込み系、薄板加工系のカテゴリに分別し、さらに細分類を加え、チャート化したのが図1である。なお、各々の発明の技術目標を、デザイン・構造・環境・施工の4種のキーワードで図中に記した。

4.2. チャートから読みとられる事柄

チャートから、サンドイッチパネルに関する発明が全体の6割程度を占めており、内容もディテールに関するものが多く、活発な技術開発が行われてきたことを物語る。残りの4割は、薄板加工の新たな方向を目指す萌芽的なもので、多様なアイデアを含んでいるが、確立した技術とは言いがたく、発展の余地を大きく残している。

これらのアイデアは、大きく、1) ハニカム系、2) 折り曲げ系、3) プレス加工系に分けられる。ハニカム系、及び折り曲げ系の立体構造板は、モノコック建築物の外壁・屋根等に用いた場合、熱伝導の点で、大きな欠点が予想されることから、新たなプロトタイプ開発の材料として、図2に示すプレス加工系の立体構造板を取りあげることとした。（注3）

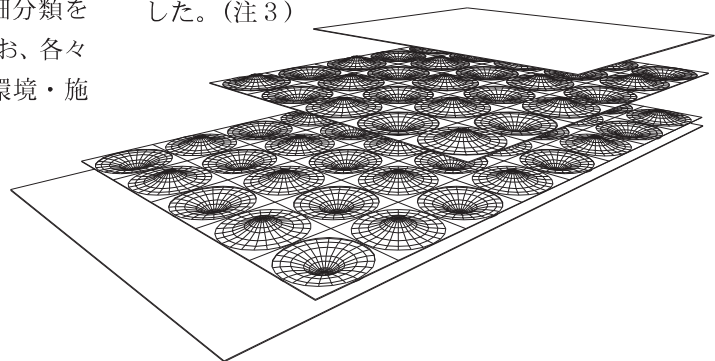


図3 縮小模型制作の加工方法

5. プレス加工

5.1. 縮小模型の制作実験

研究対象となった立体構造板は、円形開口部を持つプレス雌型と、雌型よりも径が小さい円筒形棒状プレス雄型との間に、薄板を挿入し、雄型を回転させながら雌型に貫入させることにより、円



図4 縮小模型で実現された多様な形態

錐状の突起接合部を形成し、これを相互に嵌合接合して形成されるものである(図3上段)(注3)。シェル面を多く含み、軽量でありながら剛性が高く、また、突起部の深さを変化させることで、自由な厚みや曲面が形成できるため、きわめて応用性が高い加工方法であると考えられる。

直径25mmの雌型を自作し、円筒形押し棒を有するボール盤に装着して、0.27mmの鉄板をプレス加工し、自作した嵌合工具により、これを相互に組み立てる方法(図3下段)で、様々な形状の模型制作実験を行った(図4)。

5.2. 実寸に準じたプレス加工実験と考察

縮小模型の制作実験での経験に基づき、実際の寸法に準じた200φの金型を試作し、0.5mm厚の表面処理鋼板を用いてプレス加工実験を行った(図5)。

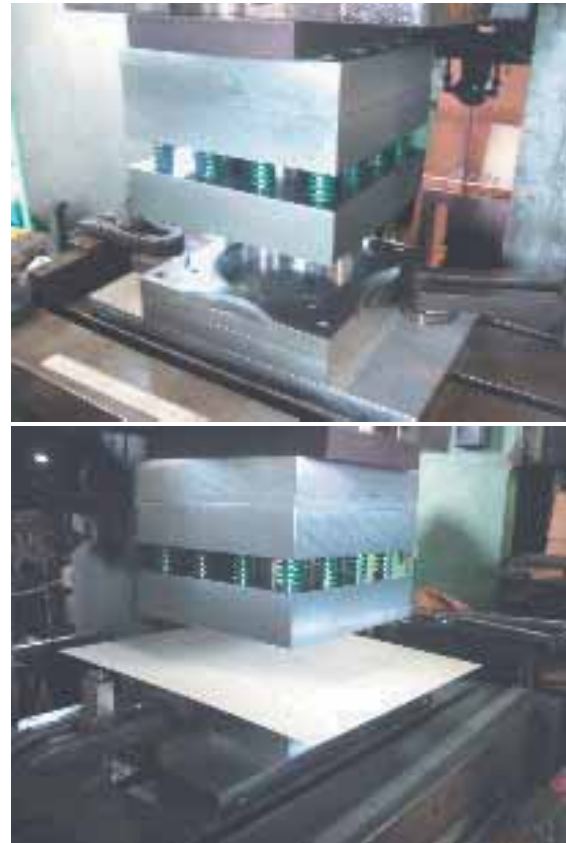


図5 実寸に準じたプレス成形金型

図6はこの結果を示す。突起部矢高が12mm以上になると、円錐形表面に折れ傷が入ることが確認された。この折れ傷は、鋼板周辺部をフランジ加工すると入りにくくなることから、プレス部分への周辺部引き込みによるものと考えられる。

板形状 プレス位置 DP (矢高)	CORNER打ち			CENTER打ち			
	加工なし	R加工	90° 曲げ加工	加工なし		90° 曲げ加工	
				中心穴なし	中心穴 10.4φ	中心穴なし	中心穴 10.4φ
DP=9.0mm							
DP=12.0mm							
DP=13.5mm							
DP=15.0mm							
DP=16.5mm							
DP=18.0mm							

図6 加工実験試験体マトリックス

プレス加工系の立体構造板では、1枚の鋼板に連続して繰り返しプレス加工する技術の確立が重要であり、このためには、周辺部からの板の引き込みを起こさないようにする必要があることがわかった。現在、改良金型での実験を準備している。

6. 構造

6.1. 構造試験体の設計と実験計画

プレス部周辺を十分に拘束でき、加工実績のある既存の70φおわん型プレス金型を用い、構造試験体(曲げ・せん断・圧縮)を設計した(図7)。現在立案されている実験計画を表2に示す。

表2 基礎的力学性状を把握するための実験計画表

試験体名	载荷試験方法	層数(面材数)	载荷履歴	試験体サイズ(mm)
B-1-①	曲げ	1	単調载荷	500×1100×15
B-1-②				
B-3-①				
S-1-M-①	せん断	1	単調载荷	500×1100×15
S-1-C-①			繰返载荷	
S-3-M-①		3	単調载荷	500×1100×60
S-3-C-①			繰返载荷	
C-1-①	圧縮	1	単調载荷	500×1100×15
C-3-①		3		500×1100×60

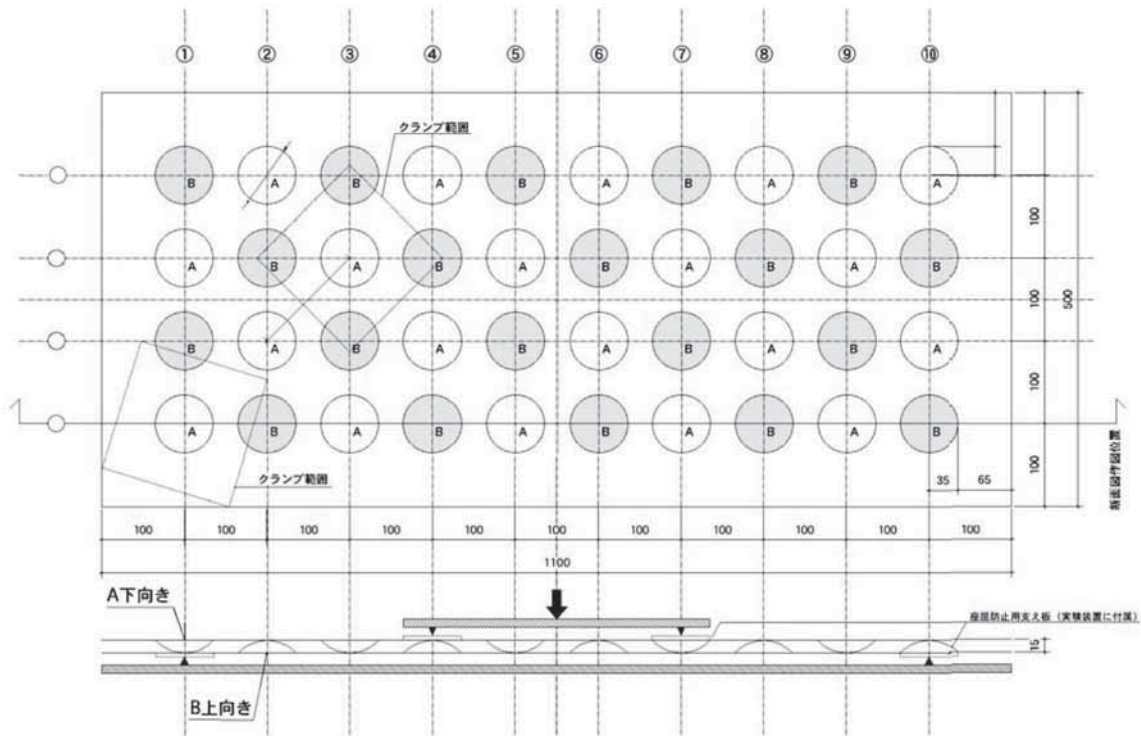
試験体名の凡例

B- 载荷試験方法
B: 曲げ試験
S: せん断試験
C: 圧縮試験

1- 層数
1: 1層(2枚)
3: 3層(4枚)

M- 载荷履歴
M: 単調载荷
C: 繰返载荷

① 同一変数の試験体の一連番号



共通仕様					
ニップル径 (mm)	矢高 (mm)	ニップル数 (列)	接合方法	端部曲げ加工	材質・材厚
70	15	4×10	φ3. 2プラインドリベット締め	なし	建築用カラー鋼板 0.5mm

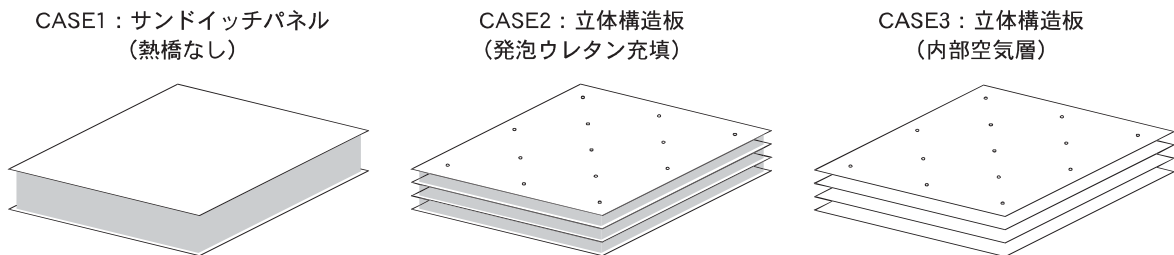
図7 70φおわん型構造試験体例 (曲げ試験体)

7. 熱環境

7.1. 熱橋効果の実験

折り曲げ系と比べて、プレス加工系の立体構造板は、表裏金属同士が線ではなく、点で接合しているため、熱伝導率は比較的小さいものと考えられる。しかし熱橋が存在すること自体に変わりはなく、その効果の程度を知っておく必要がある。そのため、縮小模型を用いて、熱橋効果の測定実験を行った。

試験体は、3層4枚とし、内部にウレタンフォームを充填したもの (CASE2)、閉鎖空気層としたもの (CASE3) を制作した。また、比較対照のために、全体の層厚を同じにした単層サンドイッチパネル (CASE1) を制作した (図8)。



試験体寸法	試験体: 292mm×292mm、層厚: 14mm (t=0.27mmの鉄板使用)		
試験体名	CASE1	CASE2	CASE3
層構成	1層2枚	3層4枚	3層4枚
断熱材	スタイロフォーム	ウレタンフォーム	なし (閉鎖空気層3層)
熱橋	なし	あり	あり

図8 熱橋効果の測定実験に使用した試験体

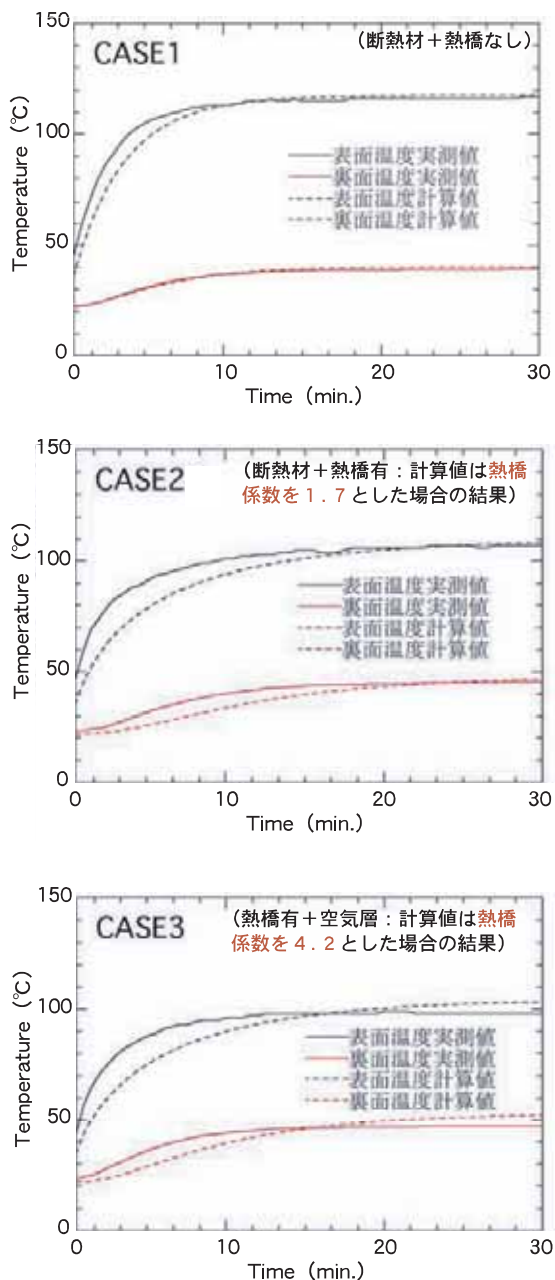


図9 測定値と熱抵抗推定による計算値との比較

実験方法は、それぞれの試験体の片側（白色側）を室外側とし、80Wの白熱電球により熱負荷を与え、30秒ごとに室内外両表面温度を測定した。その結果を、図9に示す。

この実験結果から、CASE2のウレタンフォームを充填した立体構造板の熱橋係数を推定したところ、1.7となった。サンドイッチパネルと比較しうる程度の性能を保つことが出来るものと期待される。

7.2. 熱交換パネルの設計

立体構造板の多層性を利用して、層内に断熱層や蓄熱層を形成し、ペルチェ素子（半導体ヒートポンプ）などを組み合わせることによって、能動的に室内環境制御を行うことが考えられる。

ペルチェ素子は、可動部分がなく機械的に単純であり、直流低電圧大電流で駆動されるので、太陽電池との相性がよいという特徴を持っている。また、極性を反転させることで熱流方向も反転するので、冷暖房の切替えも容易である。これまで鉄鋼材料の欠点と捉えられていた高い熱伝導性を逆手に取ったアイデアである。

以上の着想に基づいて、熱交換パネルを設計した（図10）。2行2列の突起接合部を持つ立体構造板の内部各層に、表面断熱層、空冷層、断熱層、蓄熱層等を配し、ペルチェ素子で熱交換を行うものである。この試験体を用いて、実験室内及び室外環境曝露実験を行い、実効エネルギー密度等の性能を把握する予定としている。

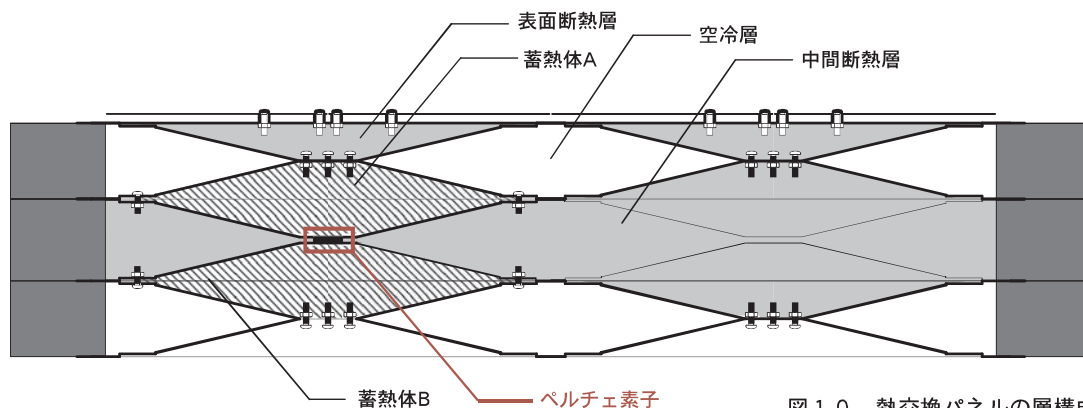


図10 熱交換パネルの層構成

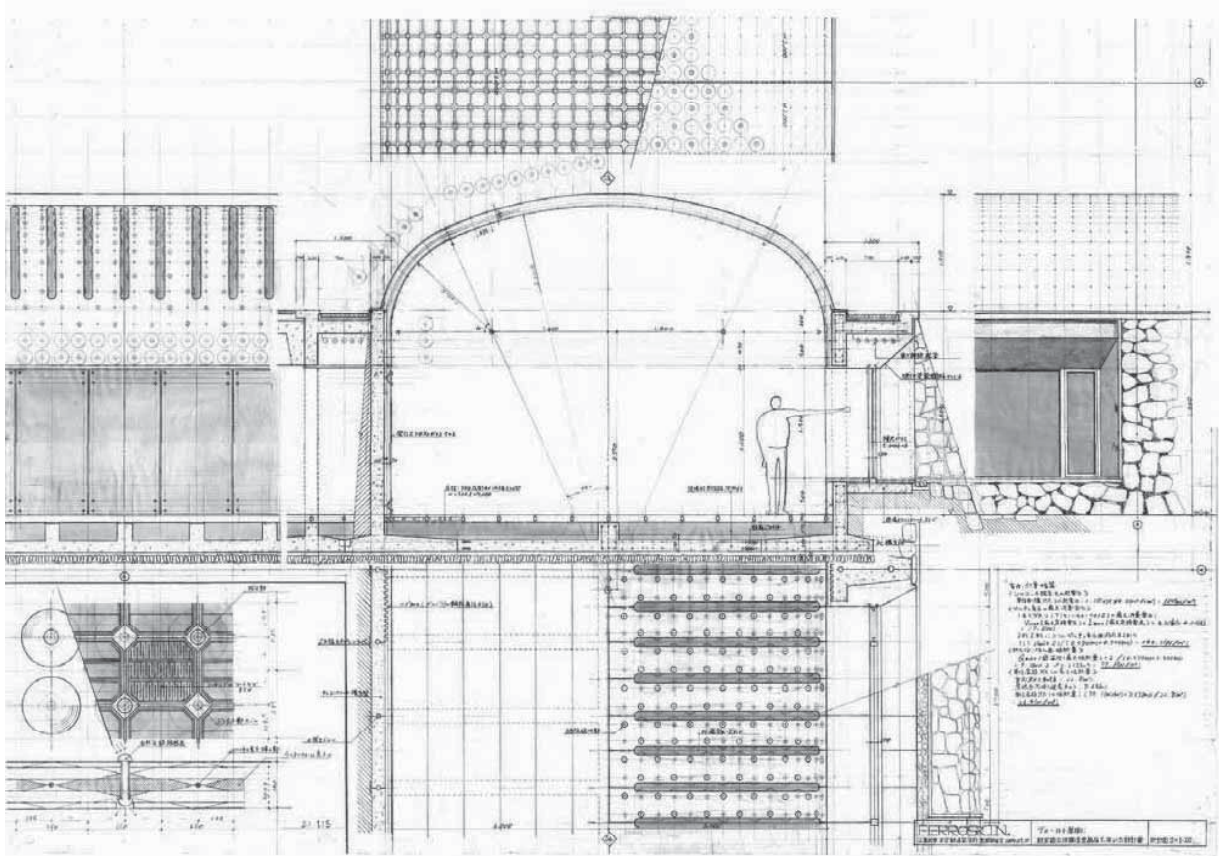


図 1 1 ヴォールト屋根に熱交換パネルを用いた設計案 矩計図

8. 設計案の作成

本研究の立体構造板の形態の自由度の高さを生かした設計案として、ヴォールト屋根に熱交換パネルを用いた設計案を作成した（図 1 1）。

9. 今後の展望

以上研究の概要を報告した。各ワーキンググループごとの今後の展望を下記に示す。

加工・生産ワーキング：

引き続きプレス加工実験を行い、加工技術の基本的要件を探る。

構造ワーキング：

70φおわん型プレス試験体の曲げ試験・せん断試験・圧縮試験により、この形式のパネルの基本的力学性状を知る。

空間ワーキング：

ボックスカルバート、ドーム形状等の建物の試験設計を行う。

構法ワーキング：

パネル相互結合部／床壁接合部／開口部などの各部標準詳細を検討する。

環境ワーキング：

熱交換パネルを制作し、実験により、実効エネルギー密度・効率を探る。

平均層厚構成モデルの定常解析で、熱効率が良好となる設計条件を知る。

10. 謝辞

三重大学永井久也助教授には熱橋係数の解析について助力をあおいだ。記して感謝申し上げる。

注：

注 1) 産業用建築物ユニットのスタディ、21世紀鋼構造フォーラム・シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」、(独) 建築研究所、(社) 日本鉄鋼連盟、(社) 日本鋼構造協会、pp.19-20、2002.11.

注 2) 「トラス状成形金属板の箆合接合方法およびその立体構造金属板」、出願者：(株) 三重 TLO、特願 2002-265367、特開 2004-100326.

注 3) 「立体構造金属板及びその加工方法」、出願者：(株) 三重 TLO、特願 2003-418915.

注 4) 特許電子図書館、<http://www.ipdl.jpo.go.jp/homepg.idol>

リユース可能な新しい鋼構造骨組システム

- テーパーピンによるシアキーを用いたピン継手の提案と載荷実験 -

辻 聖晃¹, 桑原 進², 関 光雄³, 山田 哲¹

リユース
シアキー

ピン継手
柱継手

載荷実験
嵌合接合

1. はじめに

2002年11月に開催されたシンポジウム「21世紀、鋼構造技術はなにができるか」において、21世紀鋼構造フォーラム B グループにより「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構 (NUS 架構)」の提案がなされた¹⁾。NUS 架構は、リユースの容易さを主たる目的としており、そのために柱ユニットと梁ユニットを嵌合により接合して骨組架構を構成している。また、21世紀鋼構造フォーラム WG1 による本シンポジウム技術特別セッションにおける発表²⁾でも、柱同志の接合継手を嵌合形式とする、リユースを前提とした新しい鋼架構システムが提案されている。

NUS 架構に限らず、鋼部材の (リサイクルではなく) リユースを促進するためには、設計用荷重の作用下では外れることなく、かつ、分解時には部材を損傷させることがない継手・仕口の開発が必要となる。

柱同志の継手は、一般にフランジ・ウェブともに溶接あるいはボルト接合を行う剛継手とすることが多い。しかしながら、柱継手は一般に柱の中間部分に設けられることが多いため、継手部分に作用する曲げモーメントは、柱に生じる最大の曲げモーメントに比べればずっと小さい。したがって、柱継手に嵌合形式の接合方法を採用する場合に、より容易に施工と分解が可能であると思われるピン継手を採用したとしても、外力に対する骨組の挙動には大きな影響を与えないと予想できる。弾性骨組を対象としたケーススタディーでは、柱継手をピン継手とすることで、剛継手とした場合に比べて水平変形の増大、低層階梁部材の曲げモーメントの増大といったデメリットは生じるものの、柱および梁に生じる最大モーメントが減少するという利点も得られることが明らかにされている³⁾。

そこで本研究では、リユース型の低層鋼架構システムにおける柱・柱接合仕口として、施工・分解が特に容易であり、なおかつ、せん断力と圧縮軸力に

対しては十分な抵抗性能を持つようなピン継手の提案と、性能確認のための載荷実験を行う。

2. シアキーを用いたピン継手の提案

2. 1 ピン継手に要求する性能

リユース型の架構に用いられるピン継手は、次のような性能を有することが望ましい。

- (i) 製作が容易であること
- (ii) 施工および分解が容易であること
- (iii) できるだけ軽量であること
- (iv) 地震時に継手部が無損傷、あるいは、損傷が生じるとしても容易に交換可能な構成要素に限られること
- (v) 継手部はできるだけ理想的なピンに近いこと
- (vi) 十分なせん断力の伝達能力を持つこと

また、低層鋼骨組の柱継手を対象とすることを考慮して、引き抜き力に対する抵抗能力はピン継手には期待しないこととする。

以上の要求性能を勘案して、本研究ではテーパーピンをシアキーとし、リングプレート (座金) を継手回転のクリアランスの確保に利用するピン継手を提案し、その載荷実験を実施する。載荷実験の主たる目的は、上記の要求性能の(iv)~(vi)が提案する継手で確保できるかどうかを検証することにある。

2. 2 シアキーを用いたピン継手

本研究で提案するピン継手の組み立て図と断面図を図 1に示す。このピン継手は、柱脚側の柱端に溶接したエンドプレートに側面がテーパーとなった円孔を開け、その円孔にちょうど収まるように製作したテーパーピンをせん断力に抵抗するためのシアキーとして落とし込み、座金となるリングプレートを介して、柱脚側と同様の端部を有する柱頭側の柱を落とし込むことで構成されている。

このピン継手が軸力と曲げを同時に受けた場合、図 1の断面図にも示したように、座金の一端を回転中心として柱頭側の柱と柱脚側の柱に相対的な回転が生じることになるため、この継手部の回転に伴う継手部分の浮き上がり、座金とエンドプレートの

接触部への応力集中が予想される。載荷実験では、この浮き上がり、座金およびエンドプレートの損傷、および、テーパピンの損傷についても観察することとする。

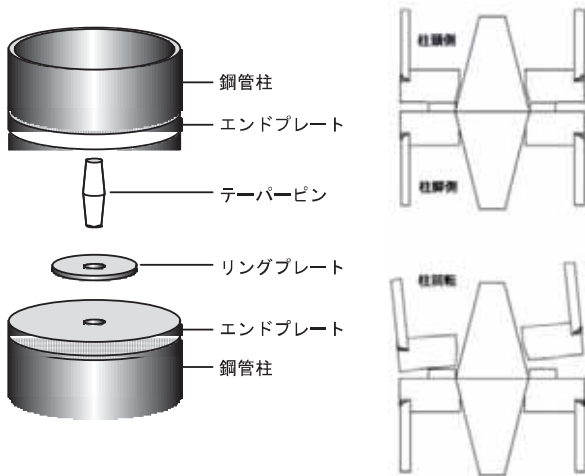
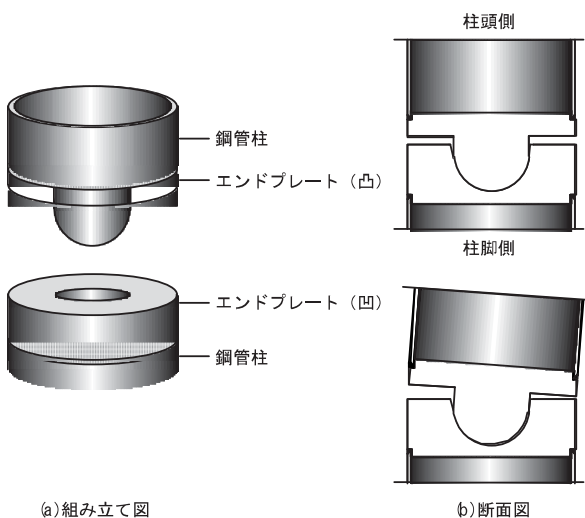


図1 シアキーを用いたピン継手の組立図と断面図

2. 3 球座を用いたピン継手

シアキーを用いたピン継手に対する比較対象として、上記要求性能の(v)と(vi)については十分に確保できることが容易に予想できる、削り出しによる球座を用いたピン継手に対する載荷実験も実施する。このピン継手の組み立て図と断面図を図2に示す。

ここで用いる球座を用いたピン継手は、(ii)、(iv)についてはシアキーを用いたピン継手と同等の性能を有すると考えられるが、(i)、(iii)については明らかに劣るため、リユース型の架構への適用は難しいように思われる。



(a)組み立て図

(b)断面図

図2 球座を用いたピン継手の組立図と断面図

3. 載荷実験

3. 1 実験計画と試験体

試験体は、図4の右上に示すように、ピン継手部分とそれに取り付く一方の柱部分のみを取り出した

ことに相当するものとして製作する。この試験体を加力フレーム内に横置きし、一定軸力を作用させながら両振り載荷を実施することで、提案するシアキータイプピン継手の性能確認を行う。

試験体継手部のサイズを図3に示す。なお、シアキーを用いたピン継手は、座金を6mmとした場合のものが示されている。

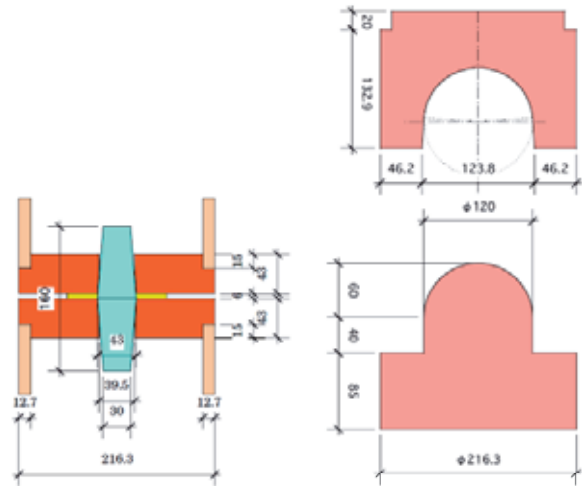


図3 試験体サイズ

試験体の柱部分は、STK490の円形鋼管を用いる。なお全塑性モーメントは、公称値で171kNm、実測値で211kNmであった。シアキータイプ継手のエンドプレート・シアキーと、球座タイプ継手のエンドプレートには、焼き入れをしたS45C鋼材を用いる。シアキータイプ継手の座金には、SS400鋼材およびLYP100鋼材を用いる。

3. 2 載荷・測定方法

図4に加力フレームと試験体の設置状況を、図5に変位測定位置を、図6に載荷プログラムをそれぞれ示す。

柱の部材角 θ_c 、ピン継手部のエンドプレートに生じる相対的な回転角(継手部回転角) θ_{pin} 、および柱の軸伸縮 δ_N は、図5に示した箇所で計測された変位を用いて、次式によりそれぞれ算定する。

$$\theta_c = \frac{U_2 - U_3}{h} - \frac{V_3 - V_4}{B} \quad (1)$$

$$\theta_{pin} = \frac{D_n - D_s}{B'} \quad (2)$$

$$\delta_N = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{V_3 + V_4}{2} \quad (3)$$

ここで B は柱の外径、 B' はピン継手に取り付けた変位計間距離を表す。

継手部に作用している曲げモーメント M_{pin} を直接測定することは困難であるため、柱に添付したひずみゲージより測定したひずみから柱に生じている曲げモーメントを推定し、これを直線補完することで、継手部に作用している曲げモーメント M_{pin} を算定する。

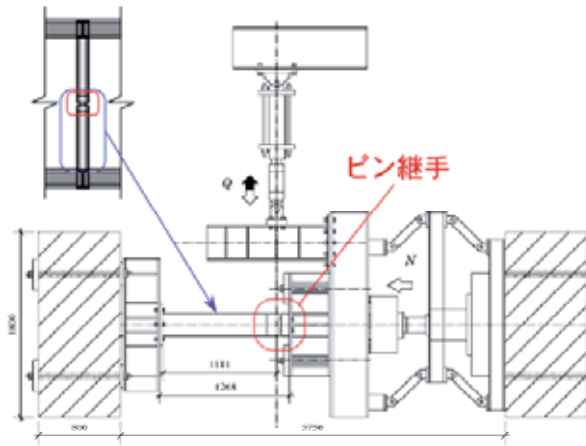


図4 荷重方法

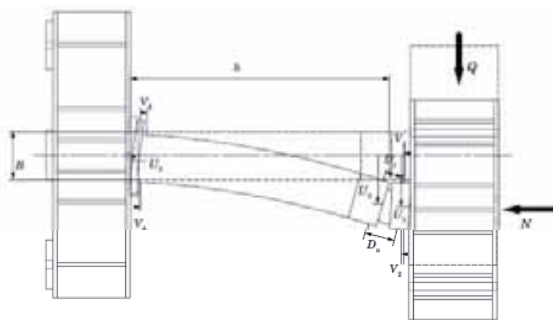


図5 変位測定位置

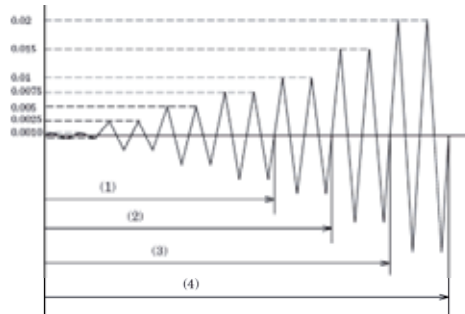


図6 荷重プログラム

3.3 実験パラメータ

表 1 に試験体の一覧を示す. なお, 軸力 250kN 導入時には, 試験体の柱部はほぼ弾性範囲内にあるため, 軸力 500kN 導入用の試験体は, 軸力 250kN 導入時に用いた試験体を実験終了後にそのまま用いることとする.

表1 試験体一覧

試験体名	実験パラメータ		
	座金	導入軸力	荷重プログラム
SS09-25	SS400-9mm	250kN	柱弾性域 (下図(1))
SS09-50		500kN	柱弾塑性域 (下図(2))
SS06-25	SS400-6mm	250kN	柱弾性域 (下図(1))
SS06-50		500kN	柱弾塑性域 (下図(2))
LY09-25	LYP100-9mm	250kN	柱弾性域 (下図(1))
LY09-50		500kN	柱弾塑性域 (下図(3))
SP-25	なし (球座)	250kN	柱弾性域 (下図(1))
SP-50		500kN	柱弾塑性域 (下図(4))

3.4 せん断力 - 部材角関係

図 7 には, 軸力 250kN 導入時の, せん断力 Q - 部材角 θ_c 関係を, 図 8 には, 軸力 500kN 導入時の同関係を示す. なお, 図中の点線は, 柱試験体の両端が完全固定であると仮定したときの弾性勾配であり, 破線は, 一端が完全固定, もう一端が完全ピンとしたときの弾性勾配である.

図より, 柱部がほぼ弾性範囲内にある軸力 250kN 導入時にも, わずかながら Q - θ_c 関係が履歴ループを描いていることがわかる. この履歴の原因は, 座金の塑性変形およびシアキーとエンドプレート円孔間のクリアランスのずれ (以上いずれもシアキータイプ), あるいは, 球座同士の摩擦 (球座タイプ) によるものと思われる.

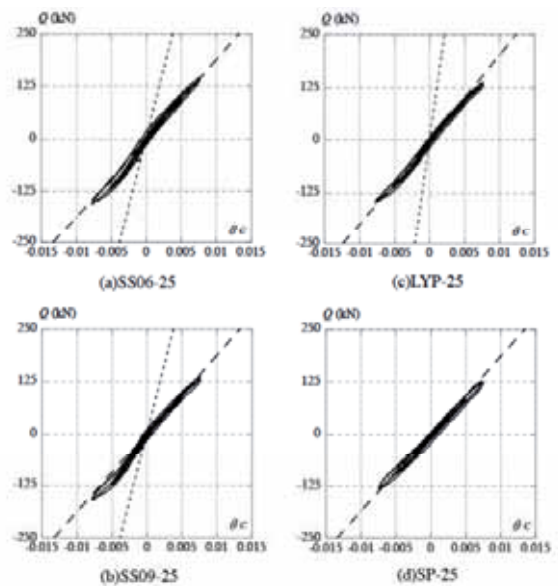


図7 軸力 250kN 導入時のせん断力 - 部材角関係

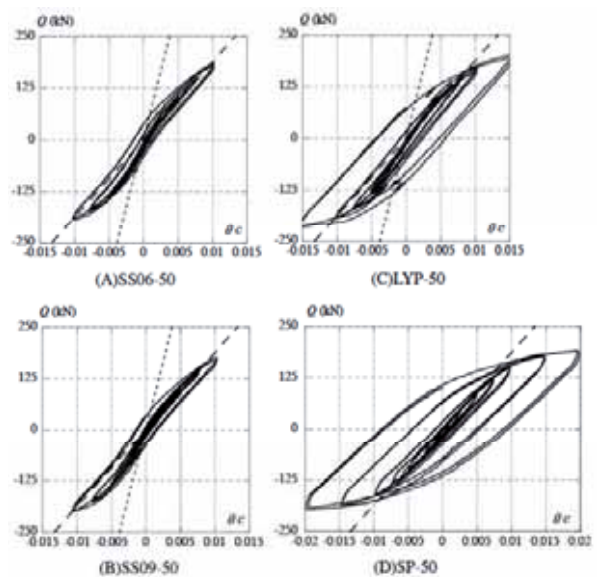


図8 軸力 500kN 導入時のせん断力 - 部材角関係

3. 5 継手部モーメント - 継手部回転角関係

図 9 に、軸力 500kN 導入時の、継手部曲げモーメント M_{pin} - 継手部回転角 θ_{pin} 関係を示す。なお、図中の破線は、試験体に作用する軸力 $N=500kN$ に、軸力作用位置から座金縁までの距離 $e=55mm$ を掛けたものであり、この値が、理論上はシアキータイプの継手部曲げモーメント M_{pin} の上限となる。

図より、球座タイプの継手部では、球座同士の摩擦によるものと思われるわずかな履歴ループを描くものの、柱部の全塑性モーメントに比べると十分小さな曲げモーメントしか生じず、理想的なピン継手の挙動を示していることがわかる。一方、シアキータイプの継手部では、座金に SS400 鋼材を用いた場合にはほとんど履歴面積を持たない S 字型の履歴ループを、座金に LYP100 鋼材を用いた場合には座金の降伏によるものと思われる履歴面積をもつ S 字型の履歴ループを描き、両者は球座タイプの継手に比べれば理想的なピン継手からは遠い挙動を示していることがわかる。しかしながら、継手部を含む柱要素としてみたときには、3.4 節で示したように、シアキータイプの継手でも十分ピン継手としてみなせるともいえる。

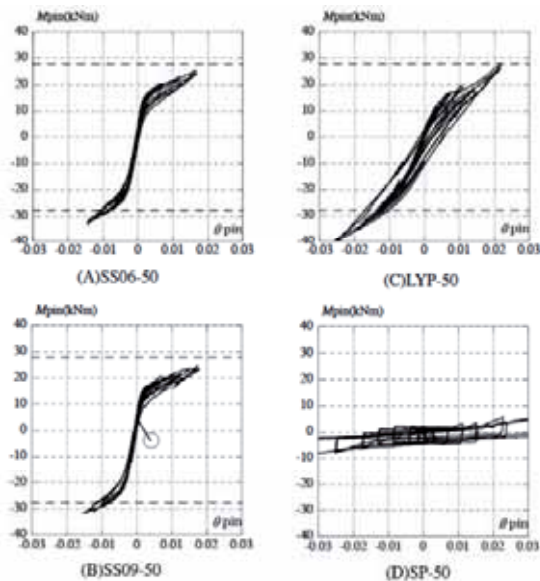


図9 軸力 500kN 導入時の継手部モーメント - 継手部回転角関係

3. 6 継手部回転に伴う軸伸縮

図 10 に、軸力 250kN 導入時の、軸力 N - 軸変形 δ_N 関係を示す。図より、座金に SS400 鋼材を用いたシアキータイプの継手を有する試験体では、軸力のみを作用させた場合よりも、せん断力も作用させて柱を曲げ変形させたほうが、柱の軸変形が小さくなっていることがわかる。これは、継手部の回転にともなって座金縁を中心として継手部の浮き上がりが生じて、柱の軸変形を見掛け上小さくしているためであると思われる。一方、座金に LYP100 鋼材を用いたシアキータイプの継手を有する試験体では、せん断力を作用させるにつれて柱の軸変形が進行していることがわかる。これは、次節で示すように、座金に LYP100 を用いた場合には継手部の回転に伴って座金が大きく塑性変形し、継手部の浮き上がりではなく沈み込みが生じているためであると思われる。

用いたシアキータイプの継手を有する試験体では、せん断力を作用させるにつれて柱の軸変形が進行していることがわかる。これは、次節で示すように、座金に LYP100 を用いた場合には継手部の回転に伴って座金が大きく塑性変形し、継手部の浮き上がりではなく沈み込みが生じているためであると思われる。

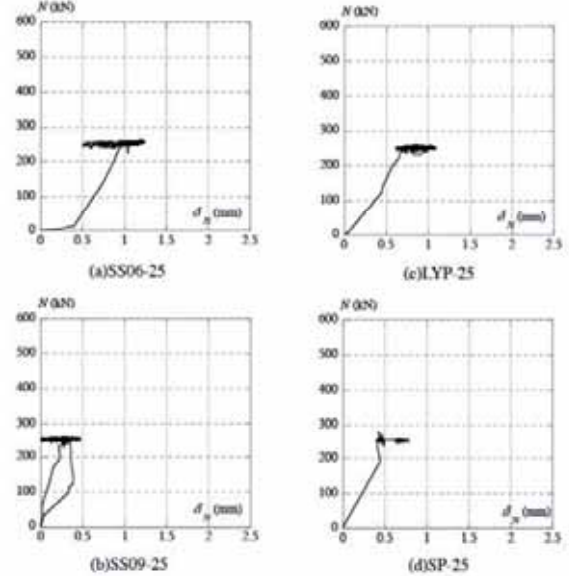


図10 軸力 250kN 導入時の軸力 - 軸変形関係

3. 7 座金の変形

図 11 に、全ての载荷実験を終了した後の、シアキータイプの継手に用いた座金の変形の状況を示す。図より、SS400 鋼材を用いた座金では、継手の回転による局所荷重を受ける座金縁部のみで塑性変形がみられ、座金の板厚はほとんど変化していないのに対し、LYP100 鋼材を用いた座金では、座金縁部に顕著な塑性変形がみられるばかりではなく、座金全体も薄くなっていることがわかる。

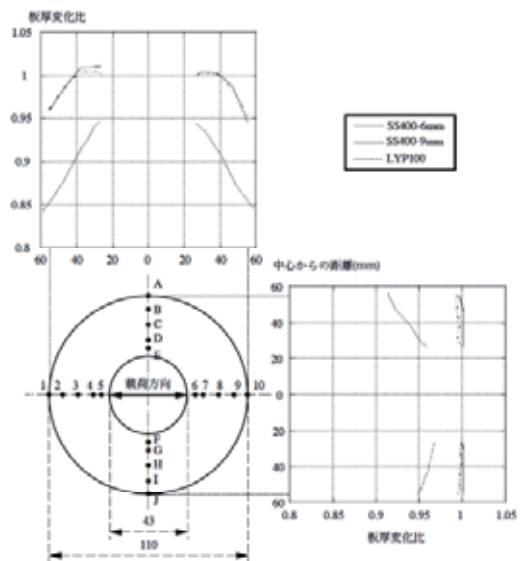


図11 実験終了後の座金の変形

3. 8 エンドプレートとテーパーピンの損傷

球座タイプ、シアキータイプの継手とも、実験終了後のエンドプレートには、座金の移動によるものと思われる擦過傷が若干みられたものの、目視できるほどの大きなへこみなどの損傷は観察されなかった(写真1)。

一方、実験終了後のテーパーピンには、エンドプレートからの支圧が原因と思われるわずかな傷が観察された(写真2)。

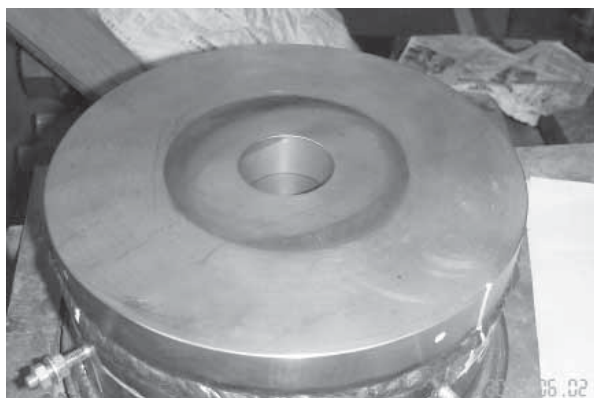


写真1 実験終了後のエンドプレート

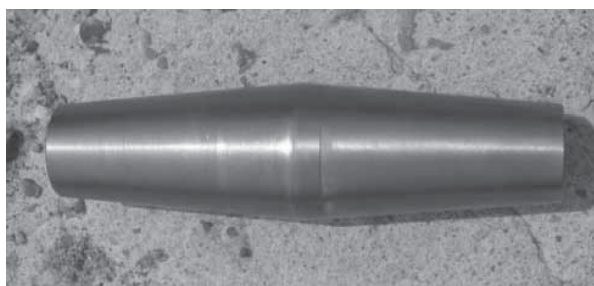


写真2 実験終了後のテーパーピン

4. おわりに

本研究では、リユース型の低層鋼架構の柱継手に用いることを前提とした、施工・分解とも容易なピン継手を提案した。このピン継手は、テーパー付きの円孔を有する柱脚側柱端エンドプレートに、テーパーピンをシアキーとして挿入し、継手部の回転を容易にするための座金を介して、同様のエンドプレートを有する柱頭側柱を落とし込んで構成される。

次に、提案したピン継手を一端に有する柱試験体に対して、一定軸力下での両振り載荷実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) 柱が弾性範囲以内にあるときのせん断力 - 部材角関係は、一端が理想的なピンであるとしたときの同関係とほぼ対応するものであった。
- (2) 座金に SS400 鋼材を用いた場合には、継手部の回転に伴って、柱に見掛け上の伸び変形が観察された。ただしこの見掛け上の伸び量は、一定軸力による柱の縮み量と同程度あるいはそれよりも小さいものであった。

(3) 柱の固定端側が塑性化するような大きな変形を与えた場合でも、せん断力 - 部材角関係は安定した紡錘形の履歴ループを描いた。

以上の結果より、本研究で提案したシアキーと座金を用いた継手は、圧縮力とせん断力のみで抵抗するピン継手としては十分な性能を有しており、リユース型の鋼架構における柱ピン継手として実用可能であると結論づけることができる。

謝辞

本研究における実験では、山下直紀さん(大阪大学工学部地球総合工学科建築コース)と岡田郁夫さん(大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻)から、実験計画・実験実施・データ整理において多大なる協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 21 世紀鋼構造フォーラムグループB(向井昭義ほか): 次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案, 21世紀鋼構造フォーラム提案発表, 建築技術, 2003 年1月, pp192-193
- 2) 21 世紀鋼構造フォーラム WG1(関光雄ほか): ユニットセル構造システムの提案, 鋼構造シンポジウム 2004 技術特別セッション 21 世紀鋼構造フォーラム発表資料, 2004 年 11 月
- 3) 山本真一郎ほか: リユースを目的として柱中間部をピン接合した鋼構造骨組の力学特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, Pa.No.22493, 北海道 (2004)

¹ 京都大学

² 大阪大学

³ 竹中工務店

⁴ 東京工業大学

第5章 第三期の活動成果

5.1 鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究

兵庫県南部地震における地震被害では、1981年以前に設計された旧基準の建物の被害は、1981年以後のいわゆる「新耐震設計法」で設計された建物の被害に比べ、大破、倒壊等の大きな被害の割合が多いことが指摘され、旧基準の建物の耐震補強を行うことの重要性が明らかになった。その後、耐震改修を促進させるための法律が制定されるとともに、様々な行政的な支援も行われ、耐震改修の方法に関しても研究や実務レベルで、様々な方法も示されている。しかしながら、現状で、旧基準で設計された建物の耐震改修は、必ずしも十分に進んではいないと考えられる。

21世紀鋼構造フォーラムでは、鋼材ダンパーを用いる耐震補強方法に着目し、この方法が、これまでの一般的な補強方法よりも高性能で、かつ、施工も容易な補強方法となる可能性があると考えられることから、フォーラムの第三期目（平成17年秋～19年秋）の研究活動の1つとして「鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究WG」を設置して、鋼材ダンパーを用いた耐震補強に関し、現状の問題点、有効性、適用範囲、評価法、設計法等に関して基礎的な検討を実施することとした。

約2年間の研究期間で、以下の項目について、アンケート調査や解析的な検討を行い、有益な結果を得ることができた。

- 1) 耐震補強の実状（ダンパー補強割合等）に関するアンケート調査
- 2) 鋼材ダンパーを用いた耐震補強の有効性や適用範囲に関する地震応答解析
- 3) 補強後の建物の性能評価法としてのエネルギー法の適用可能性に関する検討
- 4) 鉄骨造体育館の鋼材ダンパーを用いた高性能な補強設計法の検討

これらの調査、研究の結果、鋼材ダンパーを用いた耐震補強方法は、既存のブレースを用いた補強方法に比べ、優れた性能を発揮する可能性があることがわかった。今後、コスト的な検討を行う必要はあるが、耐震補強を一層促進させるための方法として、有効なものになると考えられる。このWGで実施した基礎的な検討が、さらに実用的な検討に引き継がれ、発展することを期待する。

鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究

耐震補強	鋼材ダンパー	補強事例調査
エネルギー法	鉄骨体育館	地震応答解析

長谷川隆（日本建築防災協会）	荻野雅士（日本設計）	小野潤一郎（日建設計）
河村克彦（三菱地所設計）	斉藤利昭（清水建設）	竹内一郎（新日本製鐵）

1. はじめに

兵庫県南部地震における地震被害では、1981年以前に設計された旧基準の建物の被害は、1981年以後のいわゆる「新耐震設計法」で設計された建物の被害に比べ、大破、倒壊等の大きな被害の割合が多いことが指摘された。この地震被害の教訓の1つとして、旧基準の建物の耐震補強を行う必要性が指摘され、その後、耐震改修を促進させるための法律が制定されるとともに、耐震改修を促進させるための様々な行政的な支援も行われている。また、耐震改修の方法に関しても研究や実務レベルで、様々な方法が示されてきている。しかしながら、現時点で、旧基準で設計された建物の耐震改修は、必ずしも十分に進んではいない。

21世紀鋼構造フォーラムでは、この緊急に解決しなければならない問題に焦点を当て、鋼構造建築物の実務設計や研究等に携わる立場から、どのようなことができるか検討することとした。特に、ここでは、鋼材ダンパーを用いる耐震補強方法に着目し、この方法が、これまでの補強方法よりも高性能で、かつ、施工も容易な補強方法となる可能性があると考えられることから、21世紀鋼構造フォーラムの第3期目（平成17年秋～19年秋）の研究活動の1つとして「鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究WG」を設置して、鋼材ダンパーを用いた耐震補強に関し、現状の問題点、有効性、適用範囲、評価法、設計法等に関して基礎的な検討をすることとした。

2. 全体の研究項目と中間報告の内容

このWGにおける当初の研究活動の検討項目として、以下の4つを掲げている。

- 1) 鋼材ダンパーを用いた補強事例の実態
- 2) 鋼材ダンパーによる補強の有効性（適用範囲）
- 3) 評価法としてのエネルギー法の適用可能性
- 4) 非構造部材の落下に対する効果

平成18年秋には、本WGにおける研究の中間報告として、平成17年秋から約1年間で実施してきた

研究として、上記の項目のうちの2)及び3)に関連する研究成果を報告した¹⁾。

このうち、2)の「鋼材ダンパーによる補強の有効性（適用範囲）」に関しては、強度型ブレースによる補強とダンパーによる補強の地震応答の違いを、質点系モデルを用いた地震応答解析により検討を行った²⁾。この解析では、ブレースは引張型（スリップ）と引張・圧縮型（スリップ+バイリニア）の2種類について、復元力特性を設定し、ダンパーとの比較を行った。解析の結果、低層建物で直下型の地震以外の場合には、ダンパーによる補強はブレースによる補強と同程度かそれ以上の応答低減効果が見られた。また、引張型ブレースは引張・圧縮型ブレースに比べて、同一強度では補強効果が劣ることがわかった。

3)の「評価法としてのエネルギー法の適用可能性」については、現状では新築の建物に関しては、鋼材ダンパーを用いた場合でも、エネルギー法を適用することで、主事確認によって建設が可能な状況である。そのことから、鋼材ダンパーを用いた耐震補強の場合にも、同様に、エネルギー法が適用できるかどうか、RC造のピロティ建物と学校校舎を解析対象にして、地震応答解析により検討を行った。解析の結果、エネルギー法によって鋼材ダンパーで補強したRC造ピロティ建物の応答を精度よく予測できることがわかった³⁾。また、精度のよい応答予測するためには、既存のRCフレーム部分の荷重-変形関係の設定に注意が必要であることがわかった。

本報告では、中間報告から現時点までのおおよそ1年間で実施してきた以下の3つの検討内容、結果について、主に記述している。

- a) 補強建物の事例の調査と分析
- b) 鋼材ダンパーによる鉄骨造体育館の高性能な耐震補強設計法に関する検討
- c) 旧基準で設計されている鉄骨造事務所建物の鋼材ダンパーによる耐震補強

これらは、このWGの研究項目のうちの1)～3)に

に関して、研究を行ったものである。a) の補強建物の事例の調査は、本WG委員の所属会社を対象にして、各会社で設計（施工）をした耐震補強建物について調査を行い、補強の実態を調査、分析したものである。b) は、鉄骨造体育館の耐震補強として、鋼材ダンパーを用いる場合の有用性を検討したものである。c) は兵庫県南部地震で被災した建物を対象にして、ダンパーによる補強の効果とエネルギー法の適用性を検討したものである。中間報告では主にRC造建物について、ダンパー補強の有効性やエネルギー法の適用性を発表しているため、最終報告ではS造の体育館、事務所建物を解析対象にした検討の結果を報告する。

3. 耐震補強建物の事例の調査と分析

3.1 調査の目的

建物の耐震補強が実施された件数は、実質的には1995年の兵庫県南部地震以降に、かなり増加しているものと推測される。しかし、実際に補強される建物の構造種別、用途、補強方法やそれらの年度推移などの実態は、データとして公表されにくく、必ずしも明らかではない。また、これまでにダンパーを用いた耐震補強がどの程度の割合で実施されて

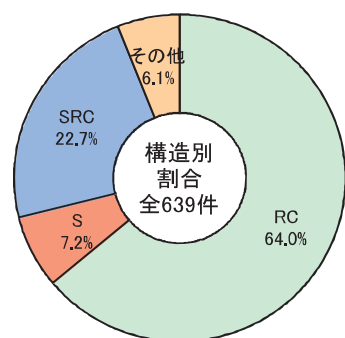


図1 調査対象建物の構造種別

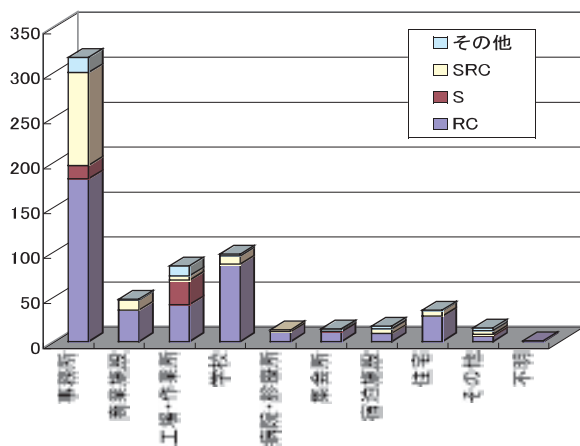


図2 調査対象建物の用途

いるかも明らかではない。そこで、本WGでは、実際に耐震補強が実施された建物についての調査を行うこととした。

3.2 調査方法

調査は本WG委員の所属会社4社（日建設計、日本設計、三菱地所設計、清水建設）で耐震補強の設計または施工を実施し、実際に耐震補強工事が行われた建物について調査を実施した。補強件数は兵庫県南部地震以降に増加していると考えられるため、主に、1995年以降の補強建物を調査対象にしているが、それ以前に補強された建物のデータも可能な限り収集している。主な調査項目としては、補強対象となった建物の、建物層数、構造種別、用途、補強年、竣工年、及び補強方法として、どのような補強（耐震壁、鉄骨ブレース、柱補強、免震、制振、その他）を行ったかについて調査を行った。結果として、4社で合計639件の補強実施建物のデータを収集することができた。

3.3 調査結果及び分析

図1は収集した639件の補強建物の構造種別の内訳である。補強した建物のうちRC造とSRC造で

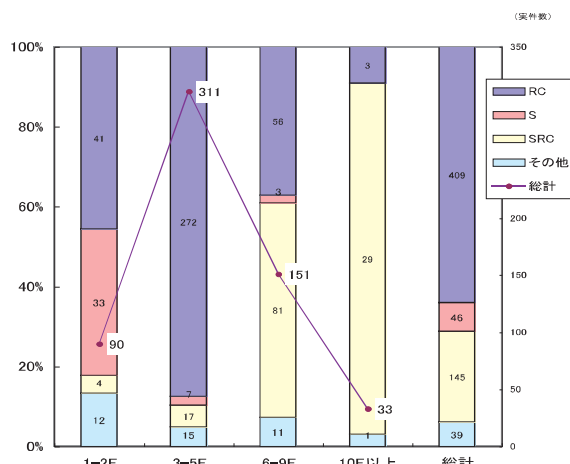


図3 階数別の構造種別

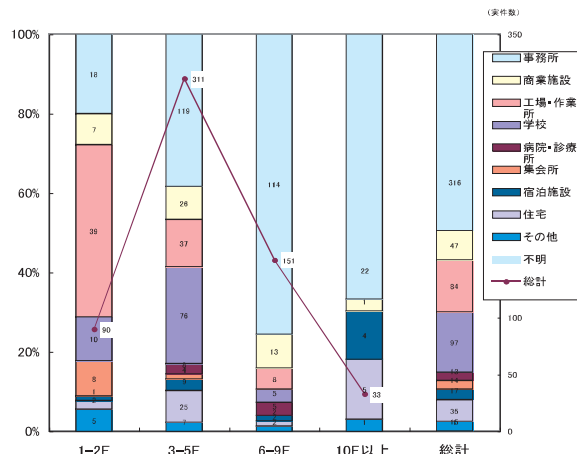


図4 階数別の建物用途

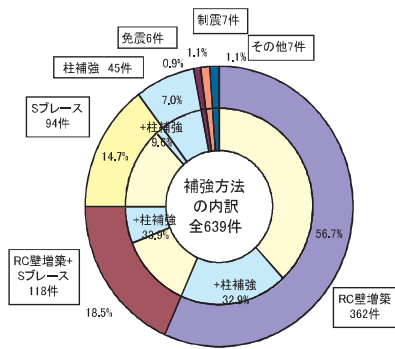


図5 補強方法の内訳（全体）

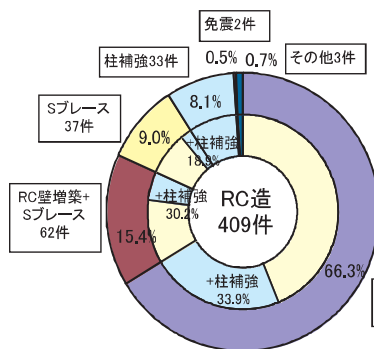


図6 RC造建物の補強方法

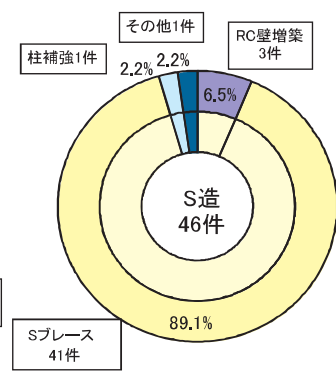


図7 S造建物の補強方法

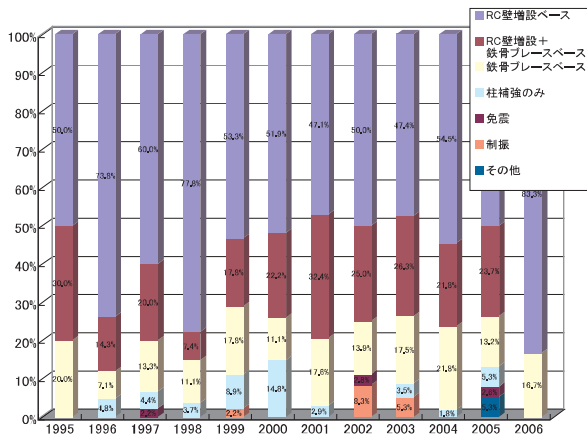


図8 補強方法の年度別推移

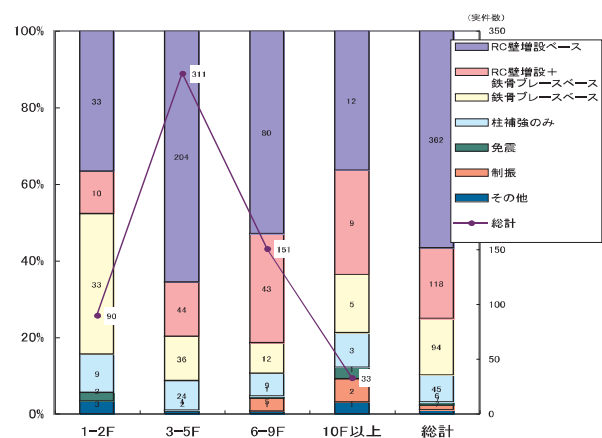


図9 階数別の補強方法内訳

85%程度となり、S造は7%程度である。図2はこれらの調査建物の建物用途別に構造種別の割合を示している。用途としては事務所が最も多く300件以上で、割合としては5割程度である。次いで、学校、工場・作業所の順となっている。S造建物は、工場・作業所で3割程度、事務所に1割弱程度であるが、その他の用途では、ほとんど見られない。図3は階数別に構造種別の割合を示したものである。1-2Fの建物ではS造の建物の割合が3割程度であるが、3F以上ではS造の建物の割合が極めて少ない。3-5FではRC造が大半であり、10F以上ではSRC造の割合が多くなる。図4は階数別に建物用途の割合を示している。1-2Fの建物では工場・作業所の割合が多く4割以上である。また、3F以上の建物では事務所の割合が多くなる。

図5はここで収集した639件の補強建物の補強方法の内訳である。補強方法の分類として、ここでは、RC壁増築、S造ブレース、柱補強、免震、制振、その他の6種類で分類しているが、97%がRC壁増築、S造ブレース、柱補強による補強であり、それらの単独または、それぞれを組み合わせた補強が行われているので、それらの割合がわかるように示している。RC壁増築による補強方法は、単独及び他の補

強との組み合わせも入れると、その割合は全体の75%程度になっている。また、S造ブレースを用いた補強は、単独の補強及びRC造壁増設、柱補強との組み合わせも入れると、全体の33%程度の割合になっている。制振補強は7件あり、1.1%である。図6はRC造建物の補強方法の内訳である。RC壁増築による補強（単独及び組み合わせ）は8割以上である。また、S造ブレースを用いた補強（単独及び組み合わせ）は、25%程度である。図7はS造建物の補強方法の内訳である。補強建物がS造の場合には9割以上がS造ブレースによる補強が用いられる。

図8は各補強方法の割合を1995年から年度別に示したものである。S造ブレースを用いた補強は3〜4割強程度であり、10年間でその割合はあまり変化していない。図9は階数別に補強方法の割合を示したものである。ブレースを用いた補強の割合は、1-2Fの低層建物で多く（50%程度）、3-5Fでは少なくなるが、10F以上の建物では、やや多くなる（40%程度）傾向が見られる。1-2Fの低層建物としては工場・作業所がブレースによる補強の対象になっているものと考えられる。

3.4 まとめ

本WG委員の所属会社4社を対象にして、各会社で設計(施工)した耐震補強建物に関して、合計639棟の建物のデータを収集し分析した。これらの調査結果の概要を以下に示す。また、調査結果の一覧を本報告の後に付録として掲載する。

- 1) 収集した639件の補強建物のうち、RC造とSRC造で85%程度、S造は7%であった。また、用途は事務所が最も多く、5割程度であった。
- 2) 階数別の構造種別の割合は、1-2Fの建物はS造の建物の割合が3割程度、3-5FではRC造が大半であり、10F以上ではSRC造の割合が多かった。建物用途としては、1-2Fの建物では工場・作業所の割合が多く4割以上であった。
- 3) 補強方法は、収集した建物の97%が、RC壁増築、S造ブレース、柱補強による補強であり、それらの単独または組み合わせによる補強であった。
- 4) S造ブレースによる補強は全体の33%であった。また、制振補強は1.1%であった。
- 5) ブレースによる補強の割合は1995年から3-4割程度であり、大きく変化していない。また、ブレースを用いた補強は1-2Fの低層建物で比較的多い。

4. 鋼材ダンパーによる鉄骨造体育館の高性能な耐震補強設計法に関する検討

4.1 研究目的

旧基準で設計されている鉄骨造体育館の典型的な被害である桁方向ブレース及びその接合部の座屈や破断を防止するために、桁方向を鋼材ダンパーによって補強する方法の有効性に関する検討を行う。本報告では、質点系モデルを用いた地震応答解析によって、これまで一般的に用いられているブレースで補強する場合とダンパーで補強する場合の鉄骨造体育館の地震応答を比較し、鋼材ダンパーによって補強する方法の有効性を明らかにする。

4.2 解析方法

旧基準で設計されている体育館の桁方向について、ダンパーで補強した場合と、ブレースで補強した場合について地震応答解析を実施する。ここで解析検討で着目する点及び解析パラメーターは以下である。

- 1) 補強部材: 引張ブレース(スリップ)、引張・圧縮ブレース(スリップ+パイリニア)、履歴型ダンパー(パイリニア)の3種類で補強し、比較検討する。
- 2) 既存部分の補修、補強方法: 文献4)を参考として、以下の3つの補強方法について比較検討する。
①既存部分の施工不良を改善しない場合(施工状態

が悪いブレースであるが、これを改善せず、既存部分の耐力を無視して補強設計を行い、解析上も、既存部分を無視する)

②施工不良の改善処置を行う場合(施工不良部分を改良するもので、解析上、既存部分はF値1.3程度の変形能力の改善が行われる場合)

③既存部分の靱性が期待できる性状に改善する場合(施工不良の改善とともに接合部の補強を行い、部材、接合部の靱性が期待できる性状に改善する)

3) 補強後の目標 I_s 指標(${}_R I_{50}$): 補強後の鉄骨層の目標 I_s 指標を、0.7、1.0、1.2の3種類設定し、補強設計を行う。

4.3 解析モデルの設定

対象とする旧基準体育館は、低層部RC造で、体育館のギャラリーから上部が鉄骨造となっているものとし、このような体育館の桁行方向をモデル化して、質点系の地震応答解析を行う。これまでの地震被害報告からは、低層部RC部分はほとんど無被害であり、ここでは、文献4)を参考として、この部分のベースシヤ係数を1.8、降伏変形角0.0035radとする。鉄骨層の桁行方向はほとんどの場合ブレース構造であり、ここではその部分の耐力係数 $Q_i/(W_i \cdot A)$ を0.3とし、降伏層間変形角を0.004radとする。このような骨組に対して、上記で示す3つの補強方法と補強部材によって、補強設計を行う。

本報では、補強後の目標 I_s 指標を1.0として補強設計を行った場合の解析結果を示す。図10-図12に、既存部分及び補強部分の荷重-変形関係を示す。図10は、上記の補強方法のうち、①既存部分の施工不良を改善しない場合、である。ブレースによる補強では、補強ブレースのF値を2.2(変形性能は3.0で評価)として、保有性能を表す指標 $E_{0i} \geq 1.0$ として、既存部分の耐力は無視して、補強ブレースの耐力 $Q_i/(W_i \cdot A)$ (0.45)を設定している。補強ブレースの降伏変形角は0.003radとしている。ダンパーによる補強は、ダンパー1としてブレース補強の場合のブレース耐力の1/2の場合、ダンパー2として、ブレース耐力の1/3の場合の2種類(それぞれ(b)と(c))を設定している。ダンパーの耐力を小さくすることによって、ダンパーの本数を減少させて、ブレース補強とのコスト面での優位性も確保することを意図している。ブレースによる補強では、細長比が大きい引張ブレースによる補強と細長比が小さい(50以下)引張・圧縮ブレースによる補強の2種類を設定している。引張ブレースによる補強では、復元力特性をスリップ型に仮定し、引張・圧縮ブレースによる補強はスリップとパイリ

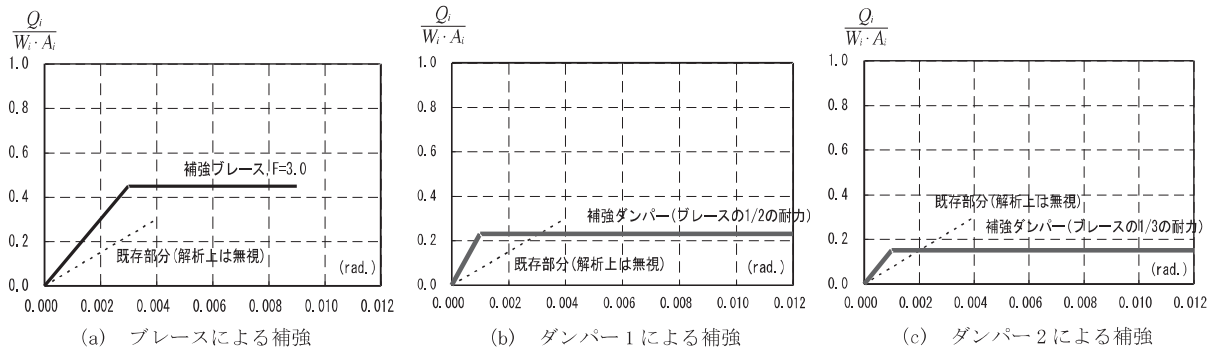


図 10 補強方法①の既存部分及び補強部分の荷重 - 変形関係の設定

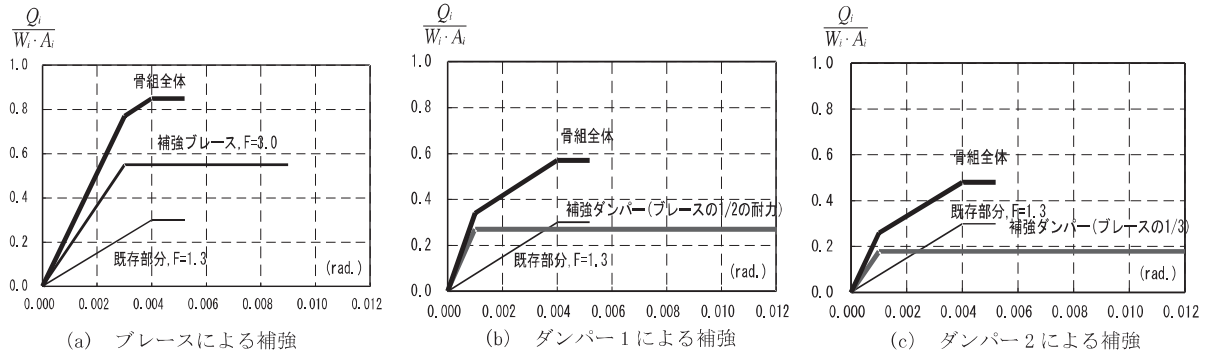


図 11 補強方法②の既存部分及び補強部分の荷重 - 変形関係の設定

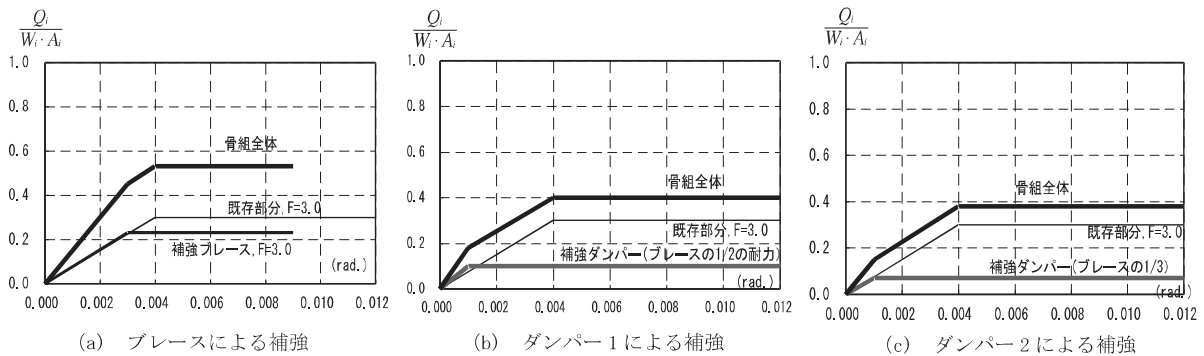


図 12 補強方法③の既存部分及び補強部分の荷重 - 変形関係の設定

ニアを組み合わせた復元力特性とし、スリップ成分とバイリニア成分の耐力比を 3 : 2 に設定している⁵⁾。ダンパー補強の復元力特性はバイリニア型である。ブレース補強、ダンパー補強の復元力特性の 2 次勾配は 0% である。この①の補強方法の地震応答解析では、既存部分の復元力は無いものとして解析を行う。

図 11 は、3 つの補強方法のうちの、②既存部分の施工不良の改善処置を行う場合、である。この場合では、既存部分の F 値は 1.3 (変形性能は 2.0 で評価) に改善されるものとし、この F 値に基づいて、補強ブレース + 既存ブレースの耐力 $Q_i / (W_i \cdot A_i)$ を 0.77 として、補強ブレースの必要耐力を図 11(a) のように設定している。ブレース補強では、このブレース耐力によって、引張ブレースと引張・圧縮

ブレースの 2 つを設定する。ダンパー補強は、(b)、(c) に示すように、補強ブレースのブレース耐力の 1/2 と 1/3 の 2 種類を設定する。ブレース補強及びダンパー補強の復元力特性は、①の場合と同様である。また、ブレース補強の場合の骨組全体としての変形限界値は、図に示すように既存部分の変形性能 (F=1.3) の制限値がそのまま骨組全体の限界変形となる。

図 12 は、3 つの補強方法のうちの、③既存部分の靱性が期待できる性状に改善する場合、である。この場合では、既存部分の F 値は 2.2 (変形性能は 3.0 で評価) に改善されるものとし、この F 値に基づいて、補強ブレース + 既存ブレースの耐力 $Q_i / (W_i \cdot A_i)$ を 0.45 として、補強ブレースの必要耐力を図 12(a) のように設定している。①、②と同

様に、ブレース補強では、引張ブレースと引張・圧縮ブレースの2つを設定し、ダンパー補強でも、2種類設定している。ブレース補強の場合の骨組全体としての変形限界値は、図に示すように補強部分の変形性能 (F=3.0) の制限値がそのまま骨組全体の限界変形となる。

4.4 応答解析の方法

ここでの地震応答解析では、入力地震動として、EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NSの3つの地震波を用いることとする。入力地震動の大きさは、各骨組の地震応答解析における骨組の損傷に寄与する地震入力エネルギーVdが、エネルギー法告示⁶⁾の2種地盤で与えられるVs値になるように、入力地震動の最大加速度を調整する方法を基本とする。ただし、本解析では補強後の建物の目標I_s指標が1.0に設定されていることから、地震応答解析における骨組の損傷に寄与する地震入力エネルギーVdは、エネルギー法告示のVsの、1/1.2=0.83倍で解析している。

Vsを算定するための骨組の有効周期は、補強無しの骨組は、弾性1次固有周期を1.2倍にした周期で算定し、補強した骨組については、ブレース補強した骨組の弾性1次固有周期を1.2倍にした周期で算定している。減衰は、レーリー型減衰で2%とした。

4.5 解析結果

図13は、補強方法が、①の場合（既存部分の施工不良を改善しない場合）の鉄骨層の最大層間変形角について、補強無し、引張ブレース補強、引張・圧縮ブレース補強、ダンパー補強1、ダンパー補強2の場合の応答を、EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NSについて示したものである。また、図中には、補強ブレースの限界変形角と既存ブレースの限界変形角を示している。補強ブレースの限界変形角は弾性限界変形角0.003radの3倍の値である。既存ブレースの限界変形角は、弾性限界変形角0.004radとしているが、施工不良がある場合には、これよりも小さくなる可能性がある。この図から、

全ての補強方法の最大層間変形角は、既存ブレースの限界変形角である弾性限界変形角0.004radを超えていることから、既存部分では破断等の被害が生じている可能性がある。圧縮・引張ブレース補強の場合の応答は、補強ブレースの限界変形角0.009radより小さいことがわかる。ダンパーによる補強では、地震動によっては、0.01radを超える応答になる場合がある。引張ブレースによる補強の場合には、0.015rad程度の変形になる可能性があり、補強ブレースの限界変形角を超えている。補強しない場合の応答は、0.04rad程度に達する可能性があり、大きな被害が生じると考えられる。この補強方法では、圧縮・引張ブレース補強の場合とダンパー補強の場合には、大地震時の安全性が確保できるが、既存部分は、かなり破壊されている可能性がある。

図14は、補強方法が、②の場合（施工不良の改善処置を行う場合）の鉄骨層の最大層間変形角である。補強ブレースの限界変形角は弾性限界変形角0.003radの3倍の0.009radである。既存ブレースの限界変形角は、弾性限界変形角0.004radの1.3倍の0.0052radである。この補強方法ではダンパーによる補強は既存ブレースの限界変形角より小さな応答結果であり、圧縮・引張ブレース補強の場合よりも小さな変形となっている。ダンパーによる応答では、ダンパー1とダンパー2の応答にほとんど差がない。圧縮・引張ブレース補強の場合には、既存ブレースの限界変形角程度の変形となっている。引張ブレースによる補強は既存ブレースの限界変形角より大きな変形になっている。これらの補強は、補強ブレースの限界変形よりも小さな応答である。この補強方法では、ダンパーによる補強が応答変形を小さくする上で、最も有効であり、既存部分もほとんど損傷無しの応答にすることが可能である。

図15は、補強方法が③の場合（既存部分の靱性が期待できる性状に改善する場合）である。補強ブレースの限界変形角は弾性限界変形角0.003radの3倍の0.009radである。既存ブレースの限界変形角は、弾性限界変形角0.004radの3倍の0.012radであ

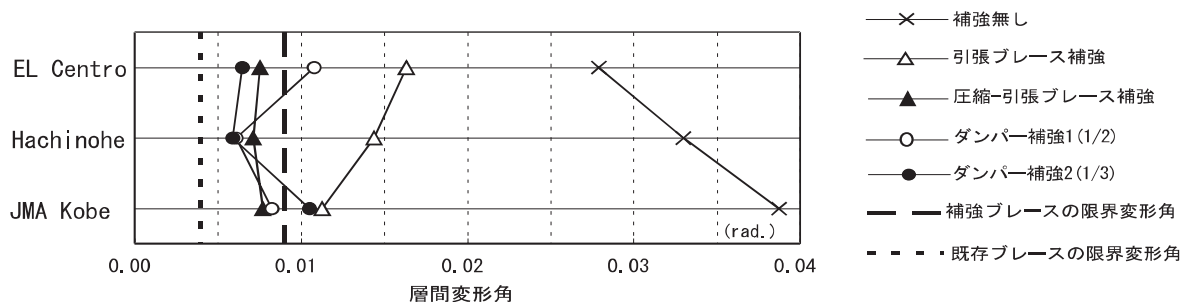


図13 補強方法①の場合の鉄骨層の最大層間変形角

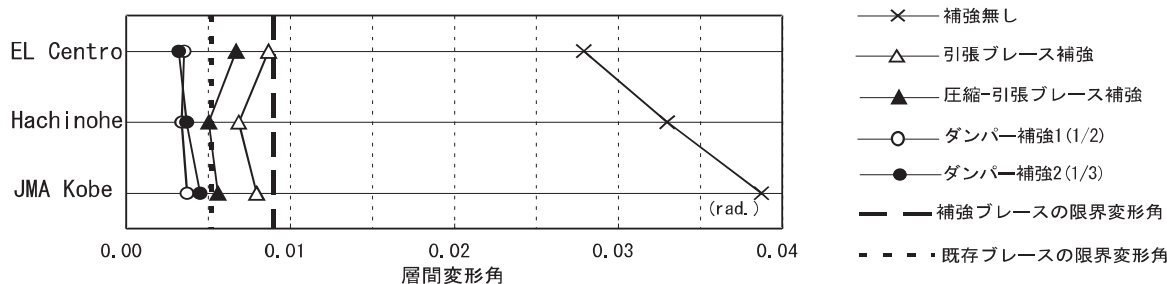


図 14 補強方法②の場合の鉄骨層の最大層間変形角

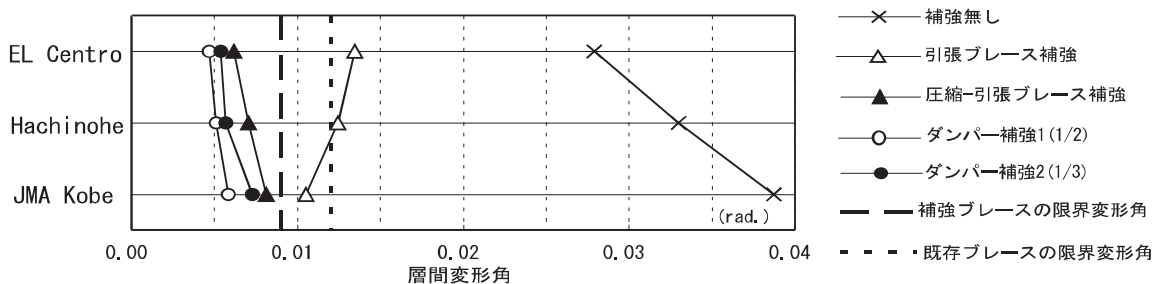


図 15 補強方法③の場合の鉄骨層の最大層間変形角

る。ダンパー 1 による応答は、最も応答変形を小さくすることができ、圧縮・引張ブレース補強の場合には、ダンパーの場合よりも応答変形が大きくなる。圧縮・引張ブレース補強の場合には、既存ブレース及び補強ブレースの限界変形角より小さな応答になっていることから、大地震時の安全性が確保できると言える。引張ブレースでは、補強ブレースの限界変形を超えていることから、安全性が確保できないことになる。この補強方法では、ダンパーによる補強と圧縮・引張ブレース補強の場合に、安全性が確保できる。

4.6 まとめ

旧基準で設計されている鉄骨造体育館に関して、質点系モデルを用いた地震応答解析によって、一般的に用いられているブレース補強とダンパーで補強する場合の地震応答を既存部分の補修方法をパラメーターとして比較し、鋼材ダンパーによって補強する方法の有効性を示した。ここでの解析から得られた結果を以下にまとめて示す。

- 1) 既存部分の施工不良を改善しない場合には、ブレースによる補強では、補強ブレースの限界変形角より小さな応答となり、ダンパーによる補強よりも最大変形にばらつきが無かった。また、既存部分の破壊をさけるためには既存部分を取り除く方が良いかもしれない。
- 2) 既存部分の施工不良のみを改善する場合には、ダンパーによる補強は、最大層間変形角が 0.005rad より小さく、圧縮・引張ブレースによる補強よりも応答変形を小さくすることができた。また、地震

動によるばらつきも少なく、最も有効にダンパーが働いた。一方、ブレース補強による応答は既存部分の限界変形角を超えた。

3) 既存部分の靱性を改善する場合には、ダンパーの補強は、圧縮・引張ブレースによる補強よりも応答変形を小さくすることができたが、応答変形は 0.005rad より大きくなった。圧縮・引張ブレース補強による応答は既存部分の限界変形角を超えなかった。

4) 引張ブレースによる補強は、最大応答変形が既存部分または補強部分の限界変形角を超え、安全が確保できない可能性がある。

5. 旧基準で設計されている鉄骨造事務所建物の鋼材ダンパーによる耐震補強^{7),8)}

5.1 はじめに

1980 年以前の旧基準で設計されている鉄骨造事務所建物の耐震補強については、RC 造学校校舎や S 造体育館等に比べれば、その必要性の認識は、必ずしも高くないように感じられる。しかし、実際には旧基準で設計されている S 造事務所建物においても、高さ方向の設計外力が A_i 分布でないことや、接合部が保有耐力接合されていない、等、現行基準の建物に比べれば、耐力と変形能の両面で劣っていると考えられる。また、柱として、角形鋼管ではなく H 形鋼を用いている場合も多いため、接合部パネルの早期の降伏が及ぼす影響等も懸念される。

そこで、旧基準で設計されている S 造事務所建物を対象にして、耐震補強の方法とその効果や検証方

法の検討を行う。旧基準の建物では、高さ方向の耐力分布や接合部の変形能に問題があると考えられ、ここでは、既存フレームへの影響が小さいと考えられる履歴型ダンパーを付加した補強を行い、補強後の建物が、接合部パネルや梁部材等、元のフレームの各部位が、ほとんど塑性化しない性能を目指す。ここで検討対象としたS造事務所建物は、兵庫県南部地震で接合部破断等の大きな被害を受けた旧基準の建物である⁹⁾。以下に、選定した建物の概要と兵庫県南部地震での被害状況、履歴型ダンパーによる補強の効果と応答評価方法としてのエネルギー法の適用結果について述べる。

5.2 選定建物の構造概要

検討対象として選定した建物は、昭和48年に建設された建物で、旧基準の設計である。この建物は神戸市に建設され、兵庫県南部地震で震度7の地域

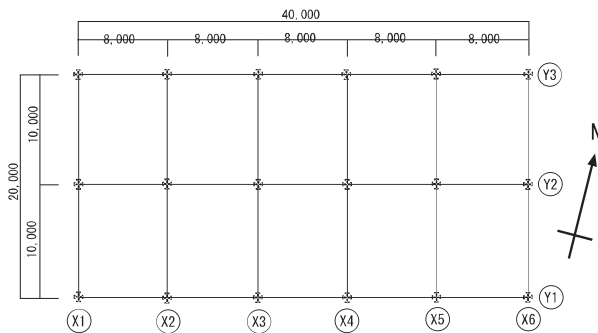


図16 被災建物の平面図

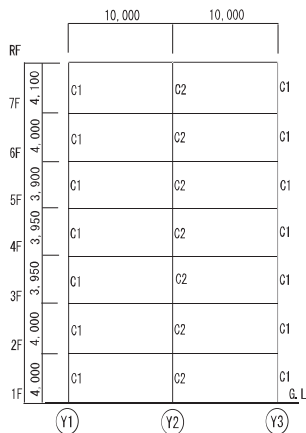


図17 南北方向軸組

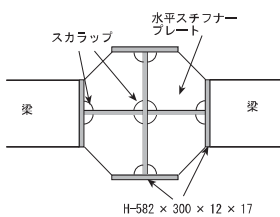


図18 接合部柱断面

表1 柱断面一覧

階	方向	柱	
		外柱 (C1)	内柱 (C2)
7	強軸	H-182×300×11×15	H-482×300×11×15
	弱軸	H-582×300×12×17	同上
6	強軸	H-182×300×11×15	H-182×300×11×15
	弱軸	H-582×300×12×17	同上
5	強軸	H-582×300×12×17	H-582×300×12×17
	弱軸	同上	同上
4	強軸	H-582×300×12×17	H-594×302×14×23
	弱軸	同上	H-582×300×12×17
3	強軸	H-588×300×12×20	H-600×300×16×28
	弱軸	同上	H-588×300×12×20
2	強軸	H-594×302×14×23	H-600×300×16×32
	弱軸	同上	H-594×302×14×23
1	強軸	H-600×300×16×28	H-600×300×16×30
	弱軸	同上	H-600×300×16×32

表2 梁断面一覧

階	梁	
	X2-X5通り	X1, X6通り
RF	H-582×300×12×17	H-582×300×12×17
7F	H-588×300×12×20	同上
6F	H-600×300×16×28	H-588×300×12×20
5F	H-692×300×13×20	H-692×300×13×20
4F	H-700×300×13×24	H-692×300×13×20
3F	H-792×300×14×22	H-792×300×14×22
2F	H-800×300×14×26	同上

にあったため、柱梁接合部に破断等の被害が生じた。地震後に、被害部位を補修して使用していたが、現在は解体されている。図16に、この建物の平面図、図17に被害が大きかった南北方向の軸組図を示す。建物は地下1階、地上7階のS造事務所建物であるが、X1、X2、Y1、Y2構面に囲まれた部分にはRC耐震壁があり、SRC造となっている。このため、南北方向の入力に対して偏心が生じる。図18に、この建物の柱梁接合部の柱断面の1例を示す。柱はH形鋼を組み合わせた十字柱である。表1に柱断面一覧を、表2には、内側構面(X2-X5)と外側構面(X1, X6)の梁断面を示す。柱断面として、南北方向を主軸とした場合の強軸、弱軸それぞれの断面を示す。柱、梁部材の鋼種はSM50である。

5.3 建物の被害状況

建物の外観上の被害としては、東面の外壁の被害が最も大きく、この部分のALCパネルがほとんど脱落している。一方、北面のALCパネルは目地等の部分的な損傷、西面は仕上げモルタルの剥がれ、南面はほとんど損傷がなかった。構造部材の被害としては、X4、X5、X6通りの中間層の柱梁接合部で母材に破断が生じていた。被害状況から、南北方向の大きな地震入力に対し、建物の偏心の影響によりX5、X6通りが大きく振られてこのような被害になったと推定される。

図19は被害が大きかったX4、X5、X6通りのうち、X6通りの被害状況を示す。この建物の典型的な被害は、中間層の外柱の柱梁接合部内部における、接合部パネルの顕著な降伏と破断及び接合部内の水平スチフナー(図18参照)のスカラップからの破断である。接合部内の弱軸柱のフランジがせん断降伏した様子はなかった。このような被害は、接合部内のせん断パネルの強度不足と水平スチフナーの板厚不足によると推測されるが、後で述べるように、この付近の入力地震動が、現行基準法のレベルよりもかなり大きかったと推定されることから、少なからず構造被害は生じると考えられる。

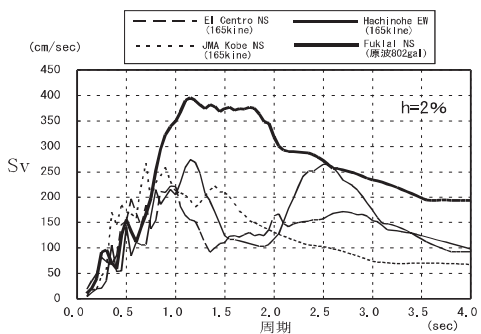


図20 入力地震動の速度応答スペクトル

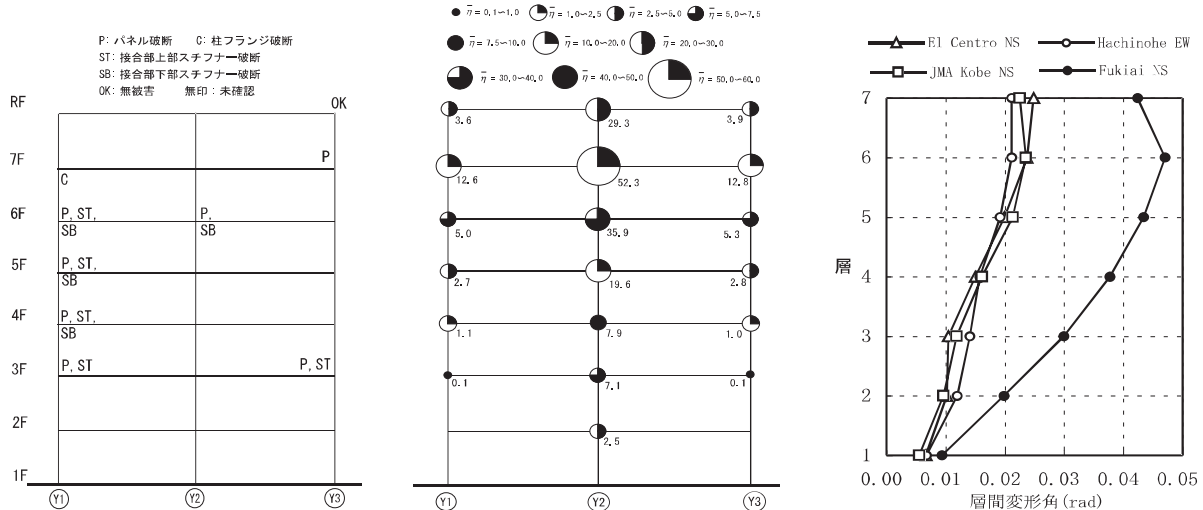


図 19 建物の被害状況 (X6 通り) 図 21 X6 通りの各部材の損傷 (JMA Kobe) 図 22 各層の最大層間変形角

5.4 建物の地震応答解析

この建物の被害状況を検証するために地震応答解析を実施する。解析条件を単純にするため、RC耐震壁による偏心を無視し、この建物の東西方向の半分を対象にして、X4、X5、X6 構面をモデル化し、それらの各層を変位等置した解析を行う。応答解析は、接合部パネルのせん断変形が考慮できる部材レベルの応答解析プログラムを使用する¹⁰⁾。各部材の降伏点は、公称値の 1.1 倍、各層重量は 0.8 ton/cm^2 、減衰は剛性比例型で 2% とする。この解析骨組の固有周期は 1.47 秒である。

入力地震動は、EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS 及び Fukiai (大阪瓦斯葺合供給所 N030W 成分) の 4 波である。EL Centro、Hachinohe、JMA Kobe の 3 波は、損傷に寄与するエネルギーの速度換算値が、エネルギー法⁹⁾の 2 種地盤での極稀地震のレベルである 165 cm/s になるように最大加速度を調整して解析し、Fukiai は原波 (802 cm/s^2) で解析する。この建物は、大阪瓦斯葺合供給所から 200 ~ 300m 程度に位置していたため、葺合供給所での観測地震動記録が、概ねこの建物にも入力したものと思われる。図 20 から、Fukiai の速度応答値が、他の 3 波の 2 倍程度であることがわかる。

図 21 に JMA Kobe による X6 通りの損傷を示す。解析結果は、実際の被害のパネル部への損傷集中や高さ方向の損傷分布の傾向を概ねとらえている。また、応答解析では、梁端部には損傷が生じていない。図 22 は、4 波による最大層間変形角である。現行基準の極稀地震の入力レベルとした EL Centro、Hachinohe、JMA Kobe の 3 波の解析では、最大層間変形角が 0.025 rad 程度となっている。一方、Fukiai の解析では上層階は 0.04 rad 以上の応

答となり、他の 3 波に比べかなり大きくなっている。

5.5 履歴型ダンパーによる補強設計

検討対象建物の地震被害の形態は、接合部パネルへの損傷集中によるパネルの過度な塑性化と破断である。パネルのダブルプレートによる補強は施工が煩雑であり、現実的ではないと考えられるので、ここでは、周辺フレームへの影響も小さいと考えられる履歴型ダンパーによる補強を行い、ダンパーで地震エネルギーを吸収することでパネルへの応力を抑え、パネルの塑性化をできるだけ小さくすることを目標とする。H 形鋼柱の接合部パネルの塑性変形能力は、一般的にはかなり大きいため、少々の塑性化は問題にならない。そこで、補強後の建物での大地震時のパネルの部材としての損傷が平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) で、5 以下になること、及び補強後の骨組の各層の最大層間変形角が $1/100$ 以下になることを設計目標として、各層の履歴型ダンパーの断面設計を行う。

ダンパーは座屈拘束ブレース型とし、建物の X1、X6 構面に、図 23 に示すように各階に逆 V 字状に配置する。なお、元の骨組では、X1、X2、Y1、Y2 で囲まれた部分に RC 耐震壁があり、偏心を有する建物であるが、解析条件を単純にするため、この部分も S 造であると仮定し、偏心が無い建物とする。この条件下で、各層の履歴型ダンパーを設計し、以後の検討を行う。ダンパーは鋼管コンクリートで芯材を補剛するタイプとし、芯材の鋼種を LY225 とし、塑性化部分の長さにより剛性を調整する。設計後の各層のダンパーの降伏軸力及び等価断面積を表 3 に示す。

5.6 エネルギー法による応答の計算

履歴型ダンパーによる補強後の建物の最大応答

と各層のダンパーやフレームの損傷を確認するために、エネルギー法⁶⁾を用いてこれらの計算を行う。エネルギー法の計算を行うためには、骨組各層のダンパーとフレームそれぞれの層せん断力-変形関係が必要である。図24の実線は補強後の建物の静的漸増載荷から得られた第1層のダンパー及びフレームの層せん断力-変形関係であり、破線はエネルギー法の計算で用いるための完全弾塑性への置換である。フレームは1/100の変形までで面積等価になるように置換している。表4は、エネルギー法計算における2種地盤を仮定した極稀地震時の

建物全体のエネルギーの計算である。表中のフレームの弾性歪エネルギー及びダンパーの弾塑性歪エネルギーは最弱層のフレームが保有水平耐力点に達するまでの変形で計算した値である。

表5に、極稀地震時のフレームの損傷とダンパーの損傷の計算を示す。表4で計算された必要エネルギー吸収量(Es)は告示に示される損傷配分則を用いて、各層(Esi)に配分され、さらにこれがフレーム(Esfi)とダンパー(Esdi)に配分される。ダンパーは、最弱層のフレームが保有水平耐力点に達するまでで計算されるダンパーの塑性歪エネルギー

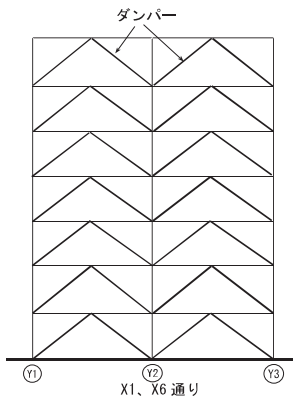


図23 ダンパーの配置

表3 ダンパーの降伏軸力と等価断面積

階	ダンパー (LY225)	
	降伏軸力 (kN)	等価断面積 (cm ²)
7	500	42.9
6	500	37.0
5	750	56.5
4	750	55.0
3	750	52.6
2	750	50.8
1	500	37.6

表4 建物全体のエネルギー計算結果一覧

有効周期 Ts(sec)	1.05
作用するエネルギーの速度換算値 Vs(m/sec)	1.65
建物全体の質量 M(ton)	2240
作用するエネルギー (1/2)MV ² (kN・m)	3049.6
フレームの弾性歪エネルギー Wf(kN・m)	247.8
ダンパーの弾塑性歪エネルギー Wd(kN・m)	2527.1
必要エネルギー吸収量 Es(kN・m)	274.7

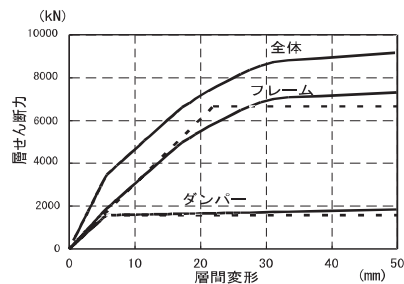


図24 第1層の層せん断力-変形関係

表5 各層の塑性歪エネルギー計算結果一覧

層	各層の必要エネルギーの配分						フレームの損傷		ダンパーの損傷		
	Si	Pi	Esi/Es	Esi (kN・m)	Esf _i (kN・m)	$\bar{\eta}_d$	Esd _i * (kN・m)	Esd _{pi} (kN・m)	Esd _i (kN・m)	$\bar{\eta}_d$	
7	0.399	0.970	0.037	10.2	4.2	0.1	6.0	512.2	518.2	25.5	
6	0.747	0.886	0.100	27.6	16.1	0.1	11.5	1098.3	1109.8	52.6	
5	1.045	0.880	0.144	39.6	19.9	0.1	19.7	1657.9	1677.6	50.3	
4	1.232	0.839	0.206	56.6	32.2	0.2	24.4	1931.7	1956.1	64.2	
3	1.345	0.838	0.226	62.2	38.0	0.2	24.2	2023.8	2048.0	65.4	
2	1.399	0.869	0.203	55.8	36.1	0.1	19.7	1902.7	1922.4	59.7	
1	1.000	1.000	0.083	22.8	18.4	0.1	4.4	795.5	799.9	45.4	

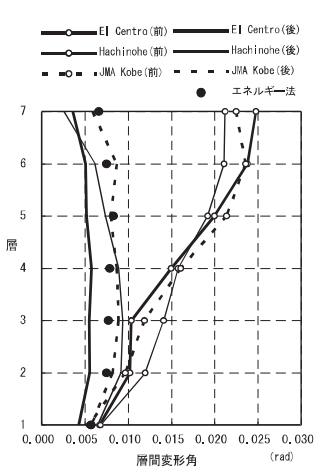


図25 最大層間変形角

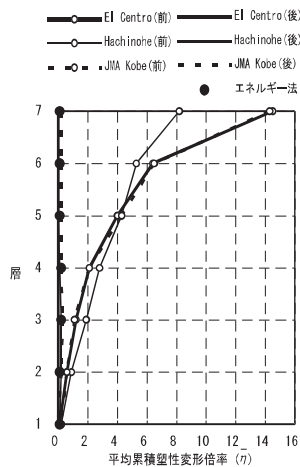


図26 フレームの損傷

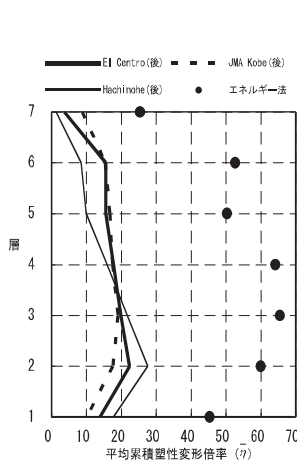


図27 ダンパーの損傷

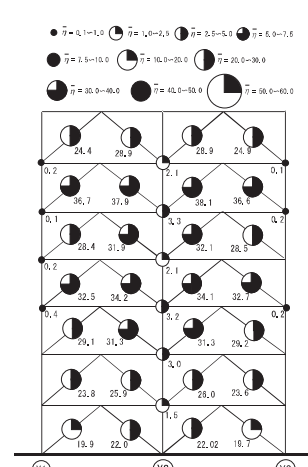


図28 各部材の損傷 (JMA Kobe)

(Esdpi) との和により、ダンパーの塑性歪エネルギー (Esd_i) が計算される。Esf_i からフレームの損傷 $\bar{\eta}_f$ が、Esd_i からダンパーの損傷 $\bar{\eta}_d$ が計算される。各層の最大層間変形は、層の最大塑性率 μ と $\bar{\eta}_f$ の関係が、 $\mu = (\bar{\eta}_f / 2) + 1$ で表されることから計算される¹⁾。

計算された損傷の評価については、表 5 で示されるフレームの損傷は 0.2 以下であり、フレームには損傷がほとんど生じない程度と考えられる⁵⁾。一方、ダンパーの損傷は最大で 65 程度である。これに対して、層としてのダンパーのエネルギー吸収能力は、最大層間変形時のダンパーの軸変形量から塑性化部分の長さを考慮してダンパー部材単体の保有性能を求め、これを層に変換して算出することになるが、今回想定したダンパーの疲労特性¹⁾ によると、十分余裕があることが確認されている。

5.7 地震応答解析

ダンパーによる補強の効果とエネルギー法による計算の妥当性を明らかにするため、補強後の建物の地震応答解析を行う。5.4 の解析モデルの X6 の構面に表 3 のダンパーを入れたモデルによって、5.4 と同様の解析条件で応答解析を行う。入力地震動も、EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS の 3 波であり、骨組への損傷に寄与するエネルギーの速度換算値が、165cm/s になるように入力する。

図 25 は、各層の最大層間変形角について、補強前、補強後の地震応答解析結果及びエネルギー法の計算値を示す。補強後は、1/100rad 以下の変形になり、上層階で補強の効果が大きいことがわかる。またエネルギー法の計算値も概ね、応答解析結果に近い。図 26 は、補強前後での各層のフレームの損傷である。補強後は、各層の損傷がほとんど 0 であり、エネルギー法の計算値も、概ね、同程度になっている。図 27 は、ダンパーの損傷であり、エネルギー法の計算値は、2～3 倍程度の安全率を持って予測している⁶⁾。図 28 は、JMA Kobe による X6 通りの各部材の損傷の解析結果である。パネルの損傷は、図 21 の補強前の損傷に比べて、小さくなっているのがわかる。

5.8 まとめ

旧基準で設計されている S 造事務所建物を対象にして、履歴型ダンパーで補強した場合の補強効果とエネルギー法による検証方法について検討を行った。その結果、ダンパー補強による最大応答変形とフレームの損傷の低減が確認され、エネルギー法による計算結果の妥当性が確認された。

6. おわりに

6.1 最終報告のまとめ

本報告では、21 世紀鋼構造フォーラム第 3 期の研究 WG の 1 つである「鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究 WG」における研究の最終報告として、中間報告以降の研究結果について主に述べた。本報告の検討結果の概要をまとめて以下に示す。

(1) 補強建物の実例の調査と分析：

- ・収集した 639 件の補強建物のうち、RC 造と SRC 造で 85% 程度、S 造は 7% であった。
- ・補強方法は、収集した建物の 97% が、RC 壁増築、S 造ブレース、柱補強による補強であり、それらの単独または組み合わせによる補強であった。
- ・S 造ブレースによる補強は全体の 33% であった。また、制振補強は 1.1% であった。ブレースによる補強の割合は 1995 年から 3～4 割程度であり、大きく変化していない。

(2) 鋼材ダンパーによる鉄骨造体育館の高性能な耐震補強設計法に関する検討：

- ・既存部分の施工不良のみを改善する場合、ダンパーによる補強は、最大層間変形角が 0.005rad より小さく、圧縮・引張ブレースによる補強よりも応答変形を小さくすることができた。また、地震動によるばらつきも少なく、非常に有効にダンパーが働いた。
- ・既存部分の靱性を改善する場合には、ダンパーの補強は、圧縮・引張ブレースによる補強よりも応答変形を小さくすることができたが、応答変形は 0.005rad より大きくなった。
- (3) 旧基準で設計されている鉄骨造事務所建物の鋼材ダンパーによる耐震補強：
 - ・対象とした建物では接合部パネルに損傷が集中し、補強しない場合は、最大層間変形角が 0.025rad 程度になる。
 - ・ダンパー補強による最大応答変形とフレームの損傷の低減が確認され、エネルギー法による計算結果の妥当性が確認された。

6.2 今後の展開

本 WG でのアンケート調査で明らかになったように、現時点で鉄骨造建物の補強割合は、RC 造や SRC 造に比べて非常に少ない。しかし、2004 年新潟県中越地震でも鉄骨造体育館では、旧基準の体育館がかなり大きな被害を受けて、実際に避難所として使用できなかった例が多く見られた¹²⁾。これらのことから、少なくとも鉄骨造体育館については、今後、耐震補強を積極的に進める必要があると考えられる。そのための補強方法の 1 つとして、本 WG で提案した補強方法がさらに検討され、実現されること

を期待したい。

また、現在、(独)建築研究所の研究課題として、「耐震化率向上を目指した普及型耐震改修技術の開発(平成18～20年)」が実施され、その中の鋼構造分科会では、鋼材ダンパーを用いた高性能な耐震改修技術の設計法(主査:東京理科大学、北村春幸教授)について研究が行われている。21世紀鋼構造フォーラムの本WGで得られた基礎的な研究成果が、この研究課題の中でも生かされることを期待する。

謝辞

本報告には、(独)建築研究所の研究課題「耐震化率向上を目指した普及型耐震改修技術の開発(平成18～20年)」の鋼構造分科会(主査:東京理科大学、北村春幸教授)で検討した内容を一部含んでいる。

参考文献

- 1) 鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究、;第3期21世紀鋼構造フォーラム研究、中間報告概要集、pp11-18、2006年11月
- 2) 長谷川隆:履歴型ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C-1、pp.685-686、2006.9
- 3) 井澤保一、荻野雅士、長谷川隆:エネルギー法を適用したピロティ形式鉄筋コンクリート造建物の履歴型ダンパーによる耐震補強、日本建築学会大会学術講演梗概集C-2、pp.625-626、2006.9
- 4) 実務者のための既存鉄骨造体育館等の耐震改修の手引きと事例、(財)日本建築防災協会、(社)建築研究振興協会、2004.8
- 5) 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)、日本建築学会、1990.10
- 6) エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法の技術基準解説及び計算例とその解説、(財)日本建築センター、2005.10
- 7) 長谷川隆、西本晃治、竹内一郎:旧基準で設計されている鉄骨造建物の履歴型ダンパーによる耐震補強(その1 建物概要と兵庫県南部地震での被害状況)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp.945-946、2007.8
- 8) 西本晃治、長谷川隆、竹内一郎:旧基準で設計されている鉄骨造建物の履歴型ダンパーによる耐震補強(その2 補強の効果とエネルギー法による検証)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp.947-948、2007.8
- 9) 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書、

建設省建築研究所、pp.106-110、平成8年3月

10) 小川厚治、多田元英:柱・梁接合部パネルの変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発、第17回情報システム利用技術シンポジウム、pp.79-84、1994.12

11) 中村博志、他:実大アンボンドブレースの疲労性能(その2:実験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp.815-816、1999.9

12) 長谷川隆、向井昭義、西田和生、石原直:新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査(その1 構造被害の分析)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.569-570、2005.9

5.2 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探究と開発

薄板を用いた鋼構造の可能性というテーマについては、21世紀鋼構造フォーラム第一～三期全体にわたって探求および開発が継続した。第一期の公募設計競技においても多くの貴重な提案があったこと、第二期で構造・意匠・環境・技術開発の動向にわたる広範囲なスペクトラムを整理することができたことが、第三期の成果の基礎にある。また、この6年あまりの間、建築家の前衛的な試みとして、薄板鋼構造の作品が格段に多く発表されるようになり、デザイン的にも技術的にも洗練が進んでいる。

以上の背景のもとで得られた、第三期の成果を列記する。

- 1) 鋼薄板を題材として、各種断面形状および要素技術の技術的可能性を、幅広く実験的に検討し、基礎資料を得た。
- 2) 局部座屈を起ししやすい1mm厚以下の薄板を用いて、面外力・面内力に十分抵抗できる建築部材を構成できることを示した。
- 3) 仕様変数が多岐にわたる建材製品開発の実験評価方法として、規準化および性能空間の理論を準備した。
- 4) 規基準適合上の諸問題と取り組みのロードマップを示した。
- 5) 建築意匠上の表現の開拓にどのようなインパクトを及ぼすか、予測と整理をした。
- 6) 適用すべき部材種別およびグレードを想定して、今後の開発のロードマップを示した。

以上のように、第三期の成果の特質は、その具体性と幅広さにある。これは参加したメンバーの多くが、建材開発の第一線にいる技術者であったことによる。ふだん競争関係にある各建材メーカーが一堂に会し、将来の技術の基礎を共同で据えたことは、真に特筆すべきことである。WGで戦わされる議論も、厳しさと共感を同時に込めたものであった。また参加者の積極的意志により、試験体数も当初の予測を大幅に越え、要素技術も幅広く涉猟することができた。

端的に言えば、第三期の成果は、薄板鋼構造を実際に建設できる水準にまで引き上げることができたことにある。プロトタイプを建築物として実現してみせることは、もはや十分に可能である。自社施設など好適なチャンスがあれば、ぜひ技術開発の機会としても活かしていただきたい。その次のステップは、合理的製品として商品化し、また規基準に見合った建設資材としての「市民権」を育て上げることである。前者については、建材開発の性質上、本WGのような開かれた場での開発研究は困難である。このため今後は、参加会社と研究者の間での守秘原則の共同研究に移行することとなるだろう。後者については、産学官の布置を備えた本WGのスキームは再び力を発揮することになるはずである。本WGは、そのときのための種子として蒔かれたものでもある。製品開発に一定の進歩があった段階で、自ずと発芽することになるだろう。

薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発

鋼薄板，面内応力，構造パネル，性能評価，製品開発

富岡義人，五十嵐規矩夫，河野守，石原直，穂苅實，作本好文，
清水信孝，藤田正則，石丸亮，中川治彦，太田克也，大隅康令，大室彰男，渡邊力

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

鉄鋼材料は，近代建築の黎明期以降，建築物の主体構造の主要材料として広く用いられ，その空間形態・構造形態の変革に大きな影響を与え続けてきた^{1)~4)}。しかし「鉄骨構造」という日常語が示す通り，これまで鋼構造はほぼ骨組構造に限定して捉えられてきた。すなわち，建築物全体は，構造要素たる骨組に非耐力の壁体や屋根など（以下「空間規定部材」という）が取り付けられて完成するものと捉えられてきた。

この考え方には，構造設計の前提を明快に設定し，実構造物の力学的挙動との整合性を高く保つという利点があるが，一方，ほとんどの空間規定部材の構造性能を積極的に利用せず単なる固定荷重とみなしてしまうこと，工数やコストが累積することなど，非効率な面をあわせ持っている。とくに意匠設計の立場から見た場合，構造体・二次部材・胴縁材・仕上材という多段階性が，ディテールを複雑化し，要素厚を増して，鋼本来のシャープで軽快な表情を大きく殺してしまうことが多い。

この冗長な構成を単純化し，鋼の利点を生かした屋根・壁・床などの空間規定部材と構造材を一体化する構造形式（以下「鋼薄板構造」という）を開発することによって，鋼構造の技術・デザインの格段の発展が期待できよう。このような構造形式には，大きく骨組ハイブリッド構造とモノコック構造のふたつがある。前者は構造物に流れる力を骨組と表面材が協調して伝えることを前提とする考え方，後者は表面材のみが伝えることを前提とする面構造の考え方である。

鋼薄板材料（以下「薄板」という）は，これまで建築物の構造体として用いられることは少なかったものの，非耐力の内外装建材として幅広く用いられてきた。鋼板サンドイッチパネルは，その代表例である。この分野では防錆，表面処理，加工，接合など，精緻な技術が蓄積されており，薄板を利用して空間規定部材と構造材を兼ねることに十分な技術的ポテンシャルが培われていると考えられる。また，自動車生産などの分野では，薄板に適した様々な加工法や接合法が開発され続けている。これらの新技術を建築生産に積極的に取り入れることで，更なる飛躍が期待できよう。

平成13年，告示により軽量形鋼の構造材利用への

途が拓かれ，薄板軽量形鋼造，いわゆるスチールハウスの設計指針が成立し実用に供されている⁵⁾。薄板軽量形鋼造は，基本的に軽量形鋼を主たる骨組として用いているものの，構面に張り渡した石膏ボードや構造用合板によって合成耐力壁を形成し，各種外力に抵抗するという枠組壁構法と同様のコンセプトは，鋼薄板構造へとつながる第一歩ととらえることもできる。さらに鋼板サンドイッチパネルの面内耐力性能を評価した論考も発表されており^{6)~8)}，鋼薄板構造の研究の機運は徐々に多面的な高まりを見せつつある。

なお，この経緯と並行するように，最近発表された作品では構造体に鋼板を用いたものが散見されるようになった。これらはデザイン的にも構造的にも，鋼構造の今後の姿を示唆する事例として，注目を集めるに至っている⁹⁾。

1.2 研究の全体目的

以上の背景に基づき，本研究は，薄板を利用した鋼構造建築物の可能性を探求し，詳細な研究開発のなすべき萌芽を発見収集することを目的とする。

2. 研究の範囲

本研究では，特定の製品開発には踏み込まず，個別の新製品の開発に資し得る汎用技術の総覧ならびに開発・評価方法の構築という基礎的一般的事項を探究することとした。その範囲は以下の通りである。

2.1 想定する構造形式

本研究において主題とする薄板は，おおむね $t=0.1\sim 3.0\text{mm}$ 程度の範囲のめっき鋼板・塗装鋼板とする。想定する用途・部位は，住宅・小規模集合住宅，3階程度までのビル，産業用建築物（工場建屋や倉庫）の壁・屋根・床とする。

以上のように，本研究が想定する鋼薄板構造は，薄板建材の技術を発展させて，その実用化を構想しようとするものである。この際，骨組材を一切排除した，純粋なモノコック型の面構造には固執しない。建築物はいずれにせよ多数の運搬可能な大きさの部材から構成されざるを得ず，それゆえパネル間を結合する仲立材が必要となる。また施工上も，一定の幾何学的規準をもたらす定規材が必要である。こうした役割を担う微細な骨組状の材がパネル材を緊結一体化し，全体として面構造を形成するような構造形式を念頭に置いて

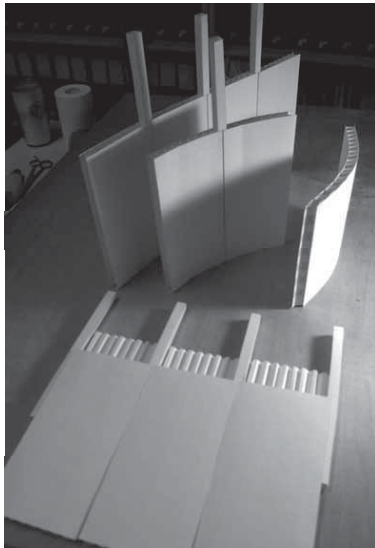


写真1 構造パネルの基本構成のアイデア

いる(写真1)。すなわち、これまで分散した面外力の負担材としてのみ取り扱われてきた薄板を、面内力の負担材としてとらえなおし、小径の骨組材と協調しながら一体の面状の構造体を形成することを基本的なコンセプトに据える。このとき、骨組材にパネル材よりも卓越した構造性能を期待して設計する場合には骨組ハイブリッド構造、パネル材同等の性能しか期待せずに設計する場合にはモノコック構造とみなすことができるであろう。

2.2 構造パネルの断面形

試験に供する薄板パネルの仕様を決定するために、まず断面形の調査を行うとともに提案をつのり、バリエーションを整理した。その結果、FP：折板挟み込み断面(段ボール状)、SW：サンドイッチ形状(発泡材充填構成)、HC：ハネカム形状ないし切板はめ込み形状、P：プレス加工板接合形状の4種が見いだされた(図1)。このバリエーションのうち、既存の生産技術の蓄積、および適用可能な要素技術が十分に発展していること、などの点から、FPないしSWが有利であるとの感触を得て、この種の断面形の実験研究を行うこととした。

2.3 研究の全体構成

以上の目的を達成するために、本研究は大きく次の4領域に区分して取り組むこととした。

第一に、パネル要素の力学的実験研究である。この領域では、鋼薄板を利用した様々なパネル材の断面形状、部品構成を構想し、それらを各種構造試験に供し、その性能を多面的に把握することを主眼とする。

第二に、各種構造性能の総合評価のあり方の考察、ひいては建材開発論の研究である。実験に供される試験体は、形状・部品構成・接合技術が多彩であり、また得られる力学的性能も多岐にわたる。このように確

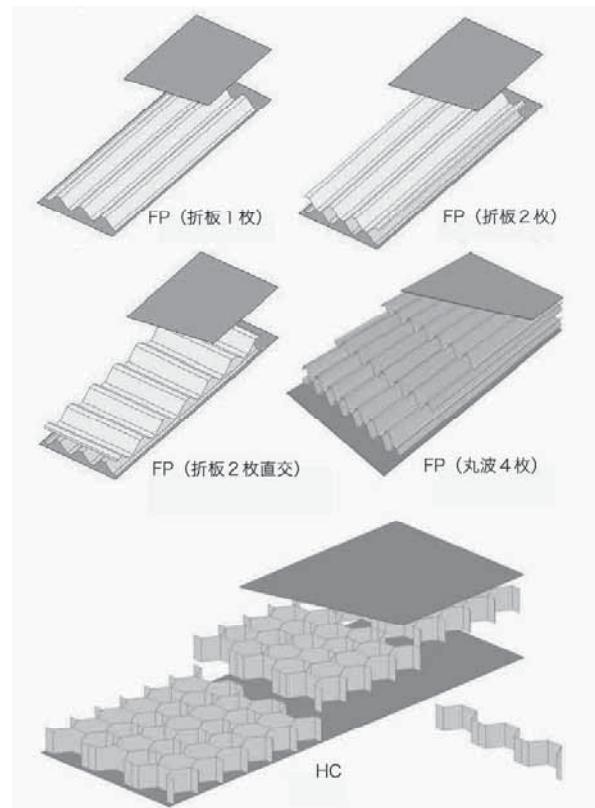


図1 構造パネルの断面形のバリエーション

定的なパラメータがない総合的研究は、実験変数を厳しく限定する通常の実験研究とは明らかに異なる水準にある。このときまず必要となるのは、多彩な試験体の多岐にわたる性能を、総合的に評価する理論である。

第三に、規基準に対応するための課題整理である。鋼薄板構造の実用化に向けた法規上備えるべき構造並びに防火関係の課題を整理することを目的とする。

第四に、これらのアイデアが指し示す意匠的可能性の把握である。この領域では、設計案の作成を通じて、今後の発展の可能性を発見・指摘することを主眼とする。本報告に示す概要コメントとともに、発表と同時に展示するパネルおよび模型をご覧いただきたい。

3. 構造特性確認実験

3.1 構造特性確認実験の全体像

鋼薄板構造要素の力学特性を確認するための実験手法として面外曲げ試験、面外振動試験、面内圧縮試験、面内せん断(曲げ)試験の4種の実験を計画し、実施した。それぞれの実験目的は、以下の通りである。

1) 面外曲げ試験では、鋼薄板構造要素の基本的な力学特性を検証する。またその結果により、風圧力等を受ける壁、積載荷重を受ける床、屋根等に鋼薄板構造要素を使用する際の剛性及び強度を確認する。

2) 面外振動試験では、単純支持された鋼薄板構造要素の振動特性を把握することを目的としている。これ

により、鋼薄板構造要素を床材として使用した場合の特性を把握し、床材としての可能性を探索するための基礎資料とする。

3) 面内せん断（曲げ）試験では、鋼薄板構造要素を面材として配置し、地震力等による水平力を負担する部位として用いる鋼構造建築物の可能性を検討する。この面材としてのせん断剛性、強度を確認する。あわせてエネルギー吸収要素としての可能性も検討する。

4) 面内圧縮試験では、面内圧縮力を受けた場合の力学特性を把握する事を目的としており、特に鋼薄板構造要素の座屈特性を検討する。この検討により、薄板構造要素をモノコック構造あるいはシェル構造等の軸力系鋼構造建築物への適用の可能性を探索するための基礎資料とする。

以上は鋼薄板構造要素の力学特性を確認するための基本的な実験手法であるが、要素単体としての力学特性を把握することの他に、接合手法およびその特性を把握しておく事は重要である。この接合技術の中には、a) パネル要素単体を構成するための技術、b) パネル要素相互あるいはパネル要素と骨組との接合技術、に大きく分類して考えることができる。

これらのうち a) については、パネル要素の基本的性能として、第一に 1) 面外曲げ試験、2) 面外振動試験によって検討すべき問題と捉えられるが、3) 面

内せん断（曲げ）試験、4) 面内圧縮試験については、パネル要素の用途・部位に依存するだけでなく、パネル間あるいは骨組との接合部の性状が重要なパラメータとなる。

従って b) については、パネル要素自体の性能を観察し、具体的な適用部位と要求性能を限定した上で、順次検討していくのが合理的である。

以上の理由から、a) パネル要素単体の 1) 試験を最初に行ない、続いて、b) 接合方法を導入し、3), 4) 試験を行なう方針とした。2) 試験について本研究では、試験体の一部に対して行った。

構造特性を把握する上では、素材の機械的性質を把握することは必要不可欠であり、その応力度ひずみ度曲線を知ることは重要である。現在一般的に使用されている薄板あるいは構造要素として使用することを考えている薄板の材料特性を素材引張試験を通して確認、整理する。その際、素材の機械的特性のばらつきを把握する。

以上を通じて、鋼薄板構造要素の選定、新たな鋼薄板構造要素の提案を行い、薄板の建築物への利用可能性の具体的なあり方を提示できることとなる。

3.2 提案断面とその部品構成

載荷試験に供せられる薄板パネルの断面形は、本研究を遂行するワーキンググループの委員が既存製品や工作上の様々な条件を勘案して提案したものである。その際の試験体寸法については、試験装置への取付上の制限はあるものの、その他については特に制限は設けず、実際に容易に製作できる断面形を自由に提案し、比較検討の結果、試験体として採用したものである。

断面形としては全ての試験体が、概ね FP：折板挟み込み断面（段ボール状）に分類できるものである。一部その断面に発泡ウレタンを充填した SW との混合構成も含まれる。コアの形状に注目すると提案された試験体は次の 3 つに分類できる。

- A) 折板コア型挟み込み断面パネル
- B) 丸波コア型挟み込み断面パネル
- C) 角波コア型挟み込み断面パネル

コア部分の詳細を、図 2 に示す。ほとんどのものが薄板を折り曲げて製作されており、角波コアの閉断面は、角部でかしめて構成されている。これら試験体について各種実験を行った。なお、面内圧縮実験では、鋼薄板を表面材とした一般的な鋼板サンドイッチパネルを加えた。

3.3 薄板の材料特性

使用した薄板の素材引張試験結果の一部を、応力度ひずみ度曲線で表し、図 3 に示す。一部板厚 0.19mm の極薄板のみ未焼鈍材であったため、極端に降伏応力度が高く、伸び能力が低かった。その他は降伏応力度がほぼ 300N/mm² 程度であり、降伏比は高いものの明確な降伏棚を有した SS400 によく似た応力度ひずみ度

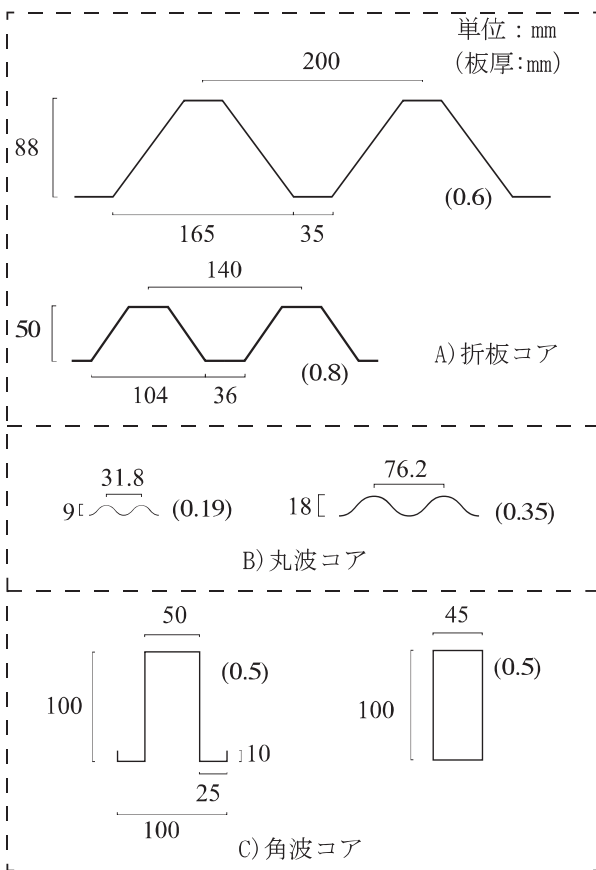


図 2 コア断面

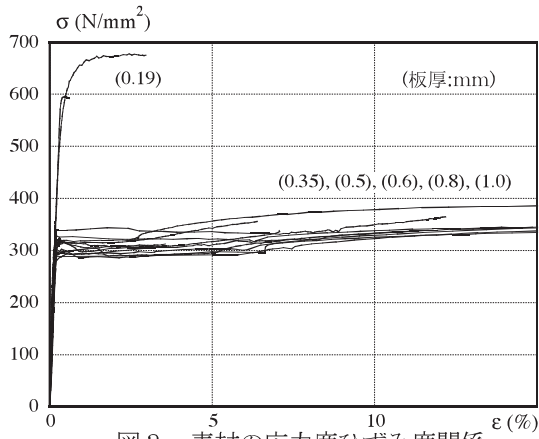


図3 素材の応力度ひずみ度関係

表1 使用鋼材の機械的性質

test-piece		t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	Elong (%)	Y.R.
AS80	A1b, A2b, A3b, A4b	0.82	277	330	195	33.0	0.83
AC60	A1b, A2b, A3b, A4b	0.64	291	349	166	31.4	0.83
AS100	A5b, A5s	1.02	305	361	180	35.2	0.84
AC80	A5b, A5s	0.83	312	350	189	37.6	0.89
BSS0_1	B1b, B2b, B3b, BU1b, BU2b	0.57	313	347	176	23.8	0.90
BC35	B1b	0.43	304	338	168	21.6	0.90
BC19_1	B2b, B3b, BU1b, BU2b	0.22	591	592	187	1.60	1.00
BSS0_2	B4b, BU1b, BU2b, B2s, B5s	0.57	287	360	197	28.8	0.80
BC19_2	B4b, BU1b, BU2b, B2s, B5s	0.20	607	678	196	4.60	0.90
CS100_1	C2b	1.00	342	417	212	27.1	0.82
CSC50	C1b, C2b	0.50	372	401	226	32.9	0.93
CS100_2	C2b, C3b, C3s, C4s, C5s, C3c	1.02	322	387	189	30.6	0.83
CC50_1	C3b, C3s, C4s, C5s, C3c	0.48	316	379	172	30.4	0.83
CC50_2	C2b	0.54	321	365	158	28.1	0.88
DS50_1	D1c, D2c, D3c	0.55	363	365	190	36.4	0.99
DS50_2	D1c, D2c, D3c	0.54	337	353	183	22.2	0.95

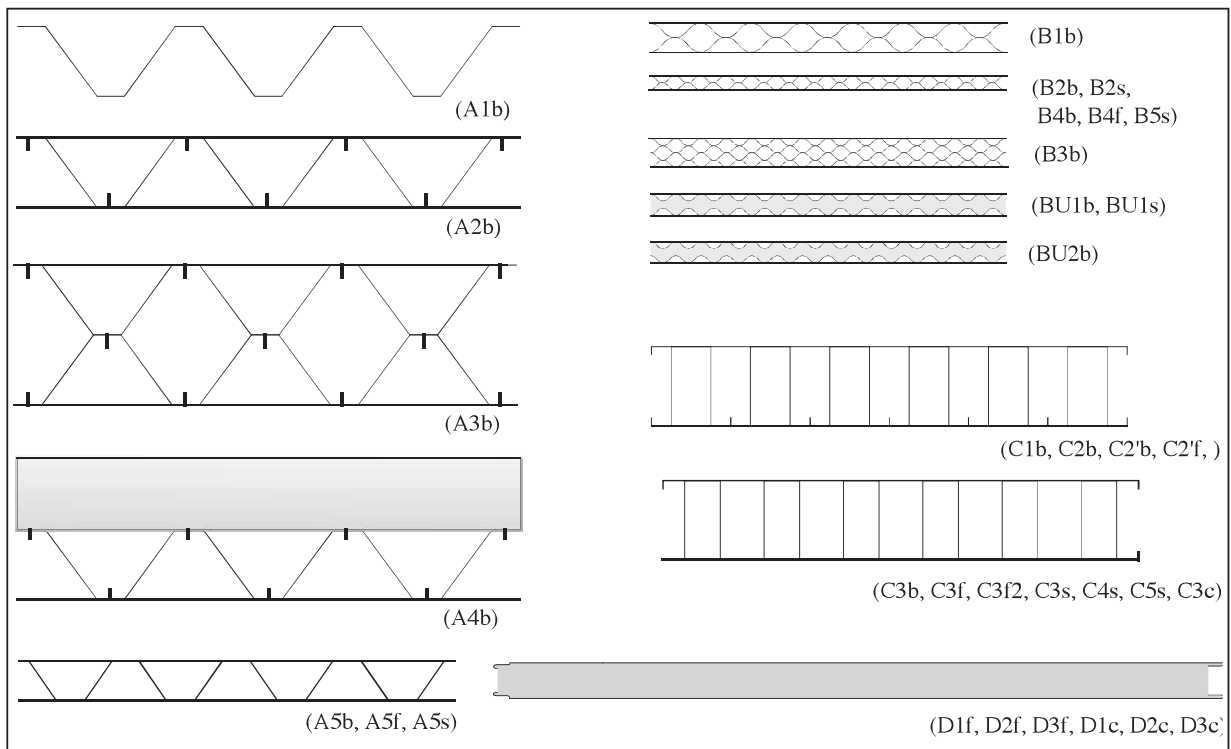


図4 試験体断面構成

曲線となっている。これらの材料特性は板厚によらず等しいものであった。この機械的性質を表1に使用した試験体名との対応とともに示す。

試験体全体の断面は、図4に示すとおりであり、その各要素の実験ごとの仕様については表2に示している。これらの要素の組み立てはおおむね手作業によって行われている。写真2は製作の様子の一例を示したものである。A) の折板コア型挟み込み断面パネルはドリルねじあるいは低反力片面スポット溶接により、B) 丸波コア型挟み込み断面パネルはシリコン系接着剤あるいは低反力片面スポット溶接により、C) 角波コア型挟み込み断面パネルはウレタン系接着剤によって薄板を接合し、要素を構成している。

3.4 面外曲げ実験の概要

本実験の手法として、4点曲げ試験を行うこととした。この載荷は、図5に示すように、面外等分布荷重を受けた際のモーメント分布を近似的に再現するものである。またこの載荷手法は、JIS A1414-1994「建築用構成材(パネル)及びその構造部分の性能試験方法」に示されている載荷手法に類似したものである。

なおこの実験で採用した載荷手法は、鋼薄板構造要素の面外挙動を把握するために確立された実験方法ではないため、今後は本実験結果を分析しながら、薄板構造要素の構造特性確認実験手法の確立も視野に入れた検討も必要である。

図6に実験を行った試験体の材中央下面のたわみ δ

表2 試験体一覧

記号	面外曲げ試験	コア形状	コア重ね総数	コア板厚 (mm)	表面平鋼板厚 (mm)	接合方法	要素厚 (mm)	要素幅 (mm)	反力支点間距離 (mm)	備考
A1b	折板のみ	折板	1	0.6	-	-	88	650	2000	タイバー有
A2b	折板1層	折板	1	0.6	0.8	ねじ (ピッチ200mm)	89.6	650	2000	
A3b	折板2層	折板	2 (平行)	0.6	0.8	ねじ (ピッチ200mm)	177.6	650	2000	
A4b	折板2層	折板	2 (直交)	0.6	0.8	ねじ (ピッチ200mm)	177.6	650	2000	
A5b	折板1層2	折板	1	0.8	1.0	スポット溶接 (ピッチ140mm)	52	550	1680	
B1b	丸波大波2層	丸大波	2	0.35	0.5	シリコン系接着剤	37	450	1120	
B2b	丸波小波2層	丸小波	2	0.19	0.5	シリコン系接着剤	19	450	1120	
B3b	丸波小波4層	丸小波	4	0.19	0.5	シリコン系接着剤	29	450	1120	
B4b	丸波小波2層2	丸小波	2	0.19	0.5	シリコン系接着剤	19	550	1680	
BU1b	丸波小波発泡ウレタン逆位相	丸小波	2	0.19	0.5	シリコン系接着剤	28	450	1120	発泡ウレタン充填
BU2b	丸波小波発泡ウレタン同位相	丸小波	2 (同位相)	0.19	0.5	シリコン系接着剤	28	450	1120	発泡ウレタン充填
C1b	角波表面板0.5	角波 (ハット型)	1	0.5	0.5	ウレタン系接着剤	101	600	2000	
C2b	角波表面板1.0	角波 (ハット型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	600	2000	
C2'b	角波ハット型 (再)	角波 (ハット型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	600	2000	
C3b	角波角型	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	600	2000	

記号	振動試験	コア形状	コア重ね総数	コア板厚 (mm)	表面平鋼板厚 (mm)	接合方法	要素厚 (mm)	要素幅 (mm)	反力支点間距離 (mm)	備考
A5f	折板1層スポット溶接	折板	1	0.8	1.0	スポット溶接 (ピッチ140mm)	52	550	1820	
B4f	丸波小波2層2	丸小波	2	0.19	0.5	シリコン系接着剤	19	550	1820	
C2'f	角波ハット型 (再)	角波 (ハット型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	600	2200	
C3f	角波角型1	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	600	2200	
C3'f2	角波角型2	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	750	2200	
D1f	鋼板サンドイッチパネル1500	発泡ウレタン	-	-	0.5	発泡ウレタン	45	920	1400	
D2f	鋼板サンドイッチパネル2000	発泡ウレタン	-	-	0.5	発泡ウレタン	45	920	1900	
D3f	鋼板サンドイッチパネル2500	発泡ウレタン	-	-	0.5	発泡ウレタン	45	920	2400	

記号	面内せん断試験	コア形状	コア重ね総数	コア板厚 (mm)	表面平鋼板厚 (mm)	接合方法	要素厚 (mm)	要素幅 (mm)	要素長さ (mm)	備考
A5s	折板せん断スポット溶接	折板	1	0.8	1.0	スポット溶接 (ピッチ140mm)	52	550	1980	
B2s	丸波せん断接着剤接合	丸小波	2	0.19	0.5	シリコン系接着剤	19	550	1980	
B5s	丸波せん断スポット溶接	丸小波	2	0.19	0.5	スポット溶接 (ピッチ140mm)	19	550	1980	
BU1s	丸波発泡ウレタン接着剤接合	丸小波	2	0.19	0.5	シリコン系接着剤	28	550	1980	発泡ウレタン充填
C3s	角波せん断外枠0.5	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	653	2260	
C4s	角波せん断外枠2.3	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	653	2260	枠材のみ2.3mm
C5s	角波せん断外枠2.3ダブル	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	1390	2260	C4sを二丁合わせ

記号	面内圧縮試験	コア形状	コア重ね総数	折板板厚 (mm)	表面平鋼板厚 (mm)	接合方法	要素厚 (mm)	要素幅 (mm)	要素長さ (mm)	備考
C3c	角波角形2	角波 (角型)	1	0.5	1.0	ウレタン系接着剤	102	750	2350	
D1c	鋼板サンドイッチパネル1500	発泡ウレタン	-	-	0.5	発泡ウレタン	45	920	1500	
D2c	鋼板サンドイッチパネル2000	発泡ウレタン	-	-	0.5	発泡ウレタン	45	920	2000	
D3c	鋼板サンドイッチパネル2500	発泡ウレタン	-	-	0.5	発泡ウレタン	45	920	2500	



角波コア型挟み込み断面パネルのビス接合組立
丸波コア型挟み込み断面パネルの接着接合組立



スポット溶接接合組立
角波コア型挟み込み断面パネルの2丁合わせ現場接着接合製作風景

を横軸にとり、荷重の合計を縦軸にとった荷重変位関係を示す。ただしこれらのグラフの縦軸、横軸は、コア形状ごとに変えてあることに注意願いたい。

A) 折板コア型挟み込み断面パネルの荷重変位関係を見ると、当然の事ながら折板のみのA1bより他のもの

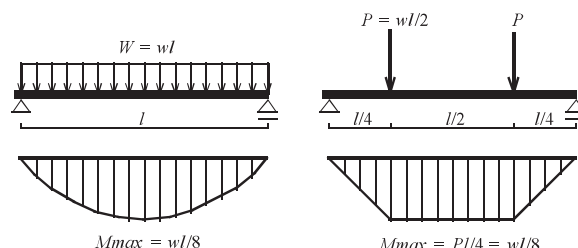
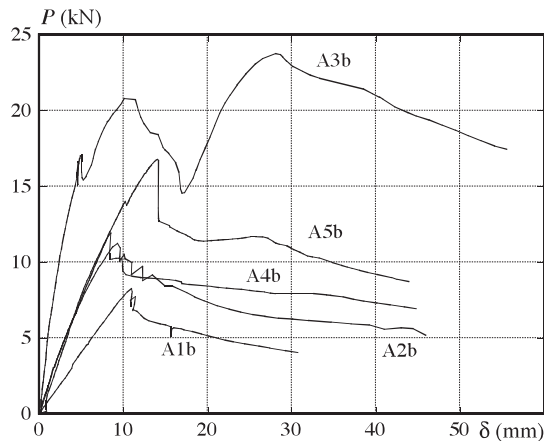


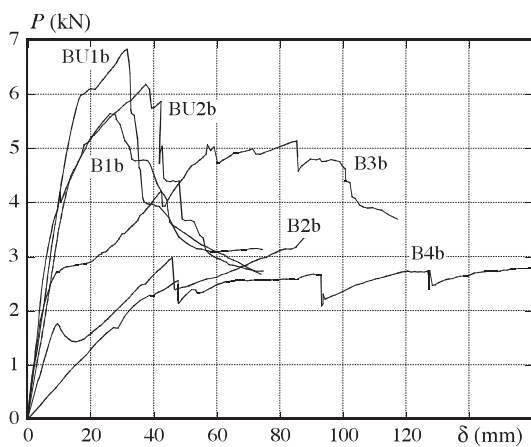
図5 曲げ実験概要

のは剛性、最大耐力共に大きくなっている。また、コアを平行に2層重ねたA3bは、一層のA2bに比べ、剛性、最大耐力ともほぼ2倍程度の値となり、積層の効果が現れている。また、変位10mm程度で一旦大きく耐力低下した後、再度耐力上昇に転じている。これは、変位10mm程度の最大耐力は、1層分のコア部の局所変形により決定しているが、その変形を他の層の折板コアが拘束し、応力再配分により耐力上昇に転じたためであると考えられる。

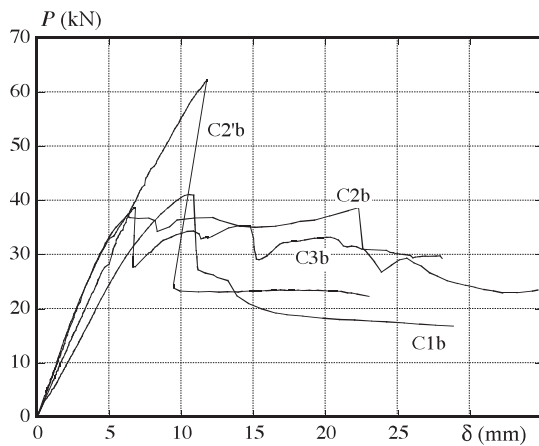
また、コアの方向を直角にして積層したA4bの荷重変位関係の中で剛性と最大耐力は、一層のA2bのものとはほぼ等しいことから、直交型の積層は、面外曲げに対する効果は小さいと考えられる。しかし、最大耐力後



(a) 折板コア型挟み込み断面パネル



(b) 丸波コア型挟み込み断面パネル

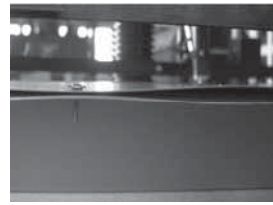


(c) 角波コア型挟み込み断面パネル

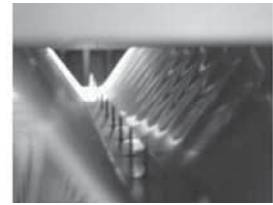
図6 面外曲げ実験結果

の耐力劣化勾配は若干ではあるが緩やかである。

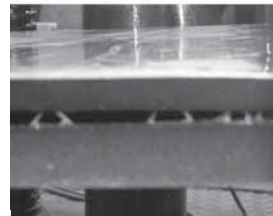
またコアや表面の薄板の板厚を厚くし、スポット溶接で接合し構造要素を構成した A5b は、同系の A2b に比較して要素厚が薄いにもかかわらず、初期剛性は同程度である。また最大耐力も高い。しかし、最大耐力が高い分その後の耐力劣化は急激である。接合方法として、ねじとスポット溶接という違いはあるが、どち



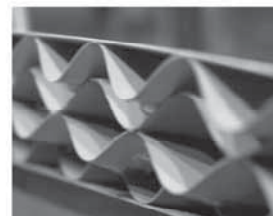
A2b : 表面板とコア材の分離



A2b : 折板ウェブの座屈



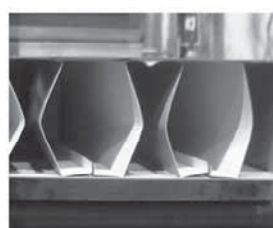
B1b : 接着箇所ではがれ



B3b : 接着箇所でのずれ



C1b : 表面薄板の座屈



C2b : コアの局部変形

写真3 崩壊形式の例

らも離散的に接合しているという点で等しいため、この2つの接合方法が構造特性に大きな影響を及ぼすことは無いと考えられる。

B) 丸波コア型挟み込み断面パネルの荷重変位関係からは、初期弾性勾配とその後の2次勾配が明確に見てとれる。この明確な2次勾配は、接着による接合部のずれに伴う断面の平面保持が崩れたことによるものであると推測している。その後は、接合部のずれを伴いながら最大耐力を迎え、接合部のはがれ、コア波のつぶれ等により徐々に剛性低下している。耐力は低いものの、大波 B1b よりも小波 B2b, B3b の方がその挙動は大変安定しており、急激な耐力劣化は見られない。

また、B4b は B2b に比べ、せん断スパンが長いものであるが、B4b のほうが見かけ上降伏した後の挙動は大変安定したものとなっている。これらは、接着接合により要素が構成されているものであるが、この接着箇所の挙動にせん断応力度が大きく影響していると考えられ、せん断スパン比の違いが曲げの構造特性に大きな違いを及ぼしているものと思われる。

発泡ウレタンを充填した BU1b, BU2b は、B2b に比べて弾性剛性が高くなっている。また当然の事ながら最大耐力も大きくなっている。しかし、耐力が大きくなったことにより最大耐力以降の耐力劣化勾配は急になっている。これは、載荷点近傍におけるウレタン部分のせん断変形を伴う圧壊によるものである。

C) 角波コア型挟み込み断面パネルの荷重変位関係

では、コアが等しく表面薄板の板厚 0.5mm と 1.0mm で異なっている C1b と C2b で大きな差異が見られる。表面薄板が薄い C1b の最大耐力点は表面薄板の座屈で決定されている。これに対して、C2b はコアウェブの局所的な変形により決定されている。C1b の表面薄板の座屈による耐力低下は急激であるが、C2b のコア部の局所変形による耐力低下は必ずしも急激な耐力低下を伴うものではなく、順次コア断面が変形していくことで、応力再配分により急激な耐力低下が抑えられながら変形するものと考えられる。

C2b はコア部形状がハット形、C3b は閉矩形断面という違いはあるが、これら 2 つの挙動に大きな違いはない。これはパネル要素を構成する板厚が等しいため、崩壊形式がほぼ等しいものであったことに起因しているものと考えられる。また、C2b と C2' b は、コア形状、表面板厚とも全く同じ試験体であるが、その最大耐力とその後の挙動に大きな違いがある。最大耐力は、コア部の局部変形で決定しているため、コア部や断面構成時の施工に伴う僅かな不整等による違いが大きな違いとなって現れたものであると考えている。

なお、分類された 3 種類の断面形について代表的な崩壊状態を写真 3 に示している。これら写真には載荷途中のものと同載荷終了後のものが含まれている。

崩壊形式は、概ね 3 種類に大別できる。1) コア部分の局所崩壊、2) 表面薄板の座屈崩壊、3) 接合部の崩壊、である。これら崩壊形式が、最大耐力並びに最大耐力以降の耐力劣化勾配を決定していることから、鋼薄板構造要素の必要性能との関わりで、これら崩壊の抑制、遅延のための方策を施すことになる。また当然のことながら、使用方法、使用範囲によっては、写真のような崩壊を許容することもあり得る。

3.5 面外振動実験の概要

振動実験は、先の面外曲げ試験及び後述する圧縮試

験に用いた試験体に対し、本試験の前に一部の試験体を用いて行った実験である。

試験方法は、図 7 に示すように試験体を適度なスパンで置いたピンの上に自然状態で置き、砂袋を等分布で載せた場合、自重のみの場合などいくつかの荷重条件で実験を行った。試験体には加速度計を設置し、加速度で振動特性を把握した。加振は、砂袋を落下させる方法、ハンマーで軽く打撃する方法をためし、良好な波形、振幅値が得られたものを適宜選択した。

図 8 に試験体中央の加速度の時刻歴の一例として丸波コア型挟み込み断面パネル試験体 B4f についての結果を示している。得られた固有振動数及び減衰定数の結果を表 3 に示す。固有振動数に関しては、様々な載荷条件で得られた振動数から一旦試験体の剛性に変換し、それらの平均を用いて、自重のみの振動数を求めた結果である。また減衰定数は、波形が安定した後の極大値、極小値から求めた値の平均値である。

これらの結果より折板コア型挟み込み断面パネルや角波コア型挟み込み断面パネルは、比較的振動数が高く、減衰定数が小さい傾向にあった。これらの値は、応答加速度にもよるが、床の居住性という観点からいっても十分対応可能な範囲にある。丸波コア型挟み込み断面パネルは、その振動数が床居住性の観点から若干低いかも知れないが、減衰性はかなり良い値を示している。これは、断面形もさることながらシリコン系接着の効果が現れているものと考えられる。断面形厚を上げたり、断面形をもう少し工夫することで振動数の向上を図れば、床として十分機能するものと思われる。

なお、表 3 には、鋼薄板構造要素の全断面有効として求めた曲げ剛性から得られる固有振動数並びに先の面外曲げ実験の初期剛性より得られた固有振動数を記載している。面外曲げ実験より得られた固有振動数

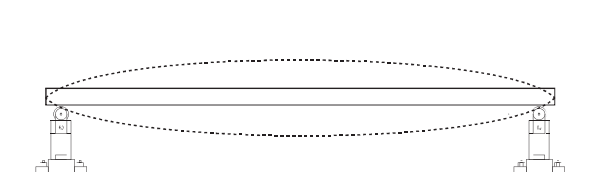


図 7 振動実験概要

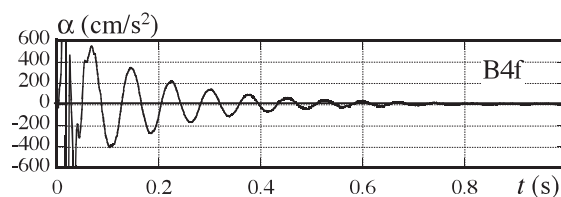


図 8 振動実験結果 (加速度 - 時間)

表 3 振動実験結果一覧

記号		固有振動数 (Hz) (全断面有効)	固有振動数 (Hz) (面外曲げ実験)	固有振動数 (Hz) (振動実験)	減衰定数 (%)
A5f	折板 1 層スポット溶接	72.4	55.6	43.4	3.02
B4f	丸波小波 2 層 2	13.1	8.2	12.6	6.53
C2' f	角波 (ハット型)	68.0	63.5	53.2	3.95
C3f	角波(角型)	65.1	60.7	63.2	2.86
C3f2	角波(角型)	62.7	*	51.4	2.16
D1f	鋼板サンドイッチパネル1500	72.6	*	35.3	2.31
D2f	鋼板サンドイッチパネル2000	39.7	*	24.9	1.54
D3f	鋼板サンドイッチパネル2500	25.0	*	18.4	0.87

と本振動実験より得られた固有振動数を比較すると、少々ばらつきはあるものの、概ね一致している。簡易的な方法による振動実験であることを考慮すれば、振動実験で概ね面外曲げ剛性を推定できていると判断できる。この結果は、鋼薄板構造要素の非破壊的な製品検査手法の一つとして振動試験が有用な手法となり得ることを示唆するものである。

3.6 面内せん断実験の概要

面内せん断実験は、鋼薄板構造要素を壁材に使用することを意識した実験方法を取った。荷重は、図9に示すように基本的には壁下側を固定し、頭部に水平力を一方向に静的に加力する形式とした。

折板コア型挟み込み断面パネル、丸波コア型挟み込み断面パネルについては、4辺に角形鋼管を置き、その中央にコア材を配し、この角形鋼管とコア材を表面板で覆い接合することで要素を構成している。この枠材の上下辺を高力ボルトを用いて多点で載荷治具に接合し、左右の壁長辺は両面より角形鋼管を配して面外曲げ剛性を付与し、擬似的に面外変位を拘束している。

角波コア型挟み込み断面パネルについては、まずパネルを構成し、外周立て枠の4隅に軸組木造用ホールダウン金物を介して上下載荷治具にアンカーボルトで取付けている。またパネルを水平方向に連続的に設置することを想定し、2丁合せの試験体についても検討した。この試験体は、荷重2日前に、現場でパネル同士をウレタン系接着剤（コア接着材と同じもの）で接着した。

図10に実験を行った試験体のパネルのせん断変形を横軸に、水平荷重を縦軸にとった荷重変位関係を示す。ただしこれらのグラフの縦軸、横軸は、コア形状ごとに変えてあることに注意願いたい。

A) 折板コア型挟み込み断面パネルは、そのせん断

強度が十分高く、110kNのせん断力に対しても見かけ上降伏することはなかった。この最大耐力は、下側のボルト接合箇所において、留め付け金具としての山形鋼孔周りの局所的な変形（写真4）が大きくなってきたために荷重を終了したことによる。したがって、この時点で表面板に若干の波打ちのような変形は見られるものの、構造パネルとしては何ら問題ない状態であった。

この図中には、参考のために表面板2枚の合計の板厚の平板の弾性せん断座屈耐力値 Q_{cr1} ならびに全断面の合計板厚からなる平板の弾性せん断座屈耐力値 Q_{cr2} を示している。この値は、純せん断応力を受ける周辺固定支持平板の座屈耐力から求めている。荷重変位関係は、これら2つの値のほぼ中間点から、その勾配が変わっており、座屈現象が生じている可能性を示唆するものである。この折れ曲がり点は表面板のせん断座屈によるものと考えられる。また全断面の合計板厚からなる平板の弾性せん断座屈耐力値 Q_{cr2} を遙かに上回っていることから、表面板とコアからなる本鋼薄板構造要素はせん断力に抗する部材にも適していると考えられる。

B) 丸波コア型挟み込み断面パネルでは安定したせん断挙動が得られている。またこの図にも先の折波コア型挟み込み断面パネルの場合と同様に、 Q_{cr1} 、 Q_{cr2} が示されている。いずれの最大耐力もこれらの値を大きく上回り、40kN程度で見かけ上降伏し、その後は張力場を形成、成長させながら安定した挙動を示している。ただし、発泡ウレタンを入れた試験体BU1sは、50kN弱まで線形的な高い剛性を維持している。これはウレタンによる面外変形の拘束のためと考えられる。しかし、せん断力によりウレタンが圧壊すると急激に耐力が劣化し、ウレタンが入っていないB2s、

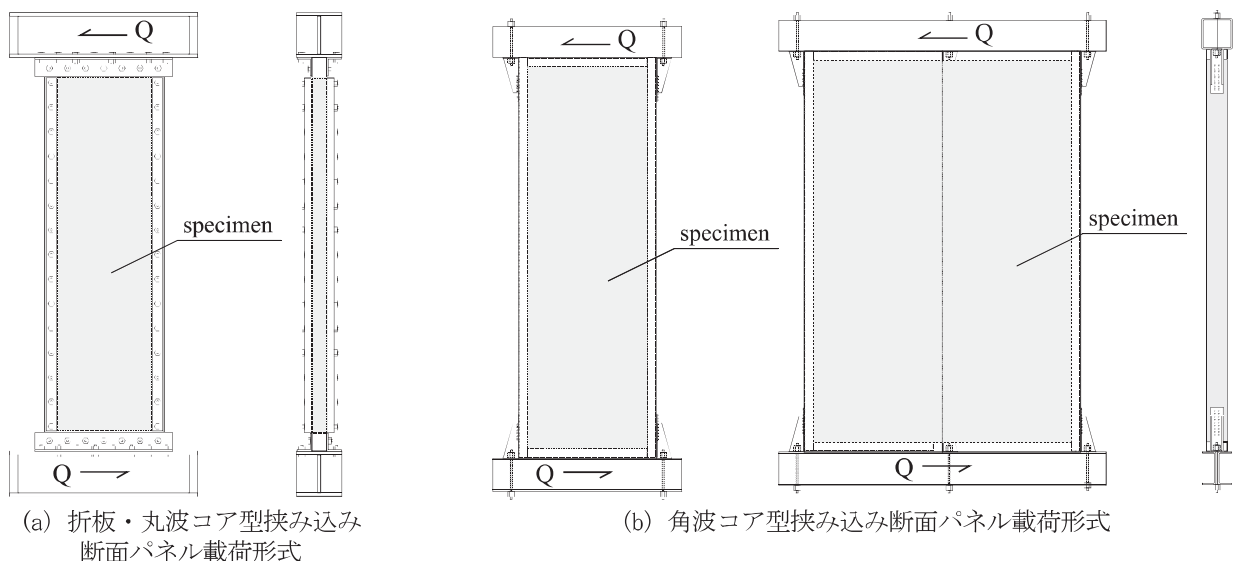
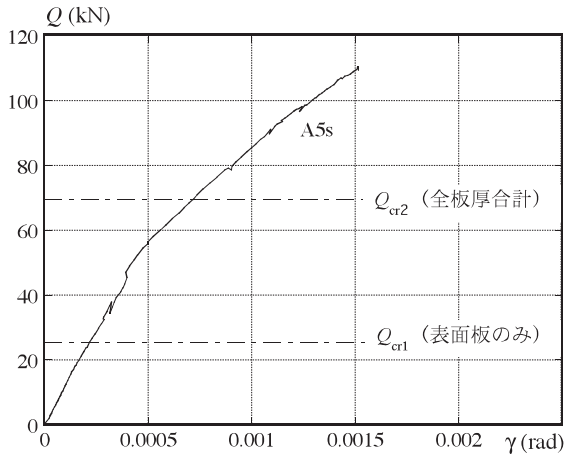
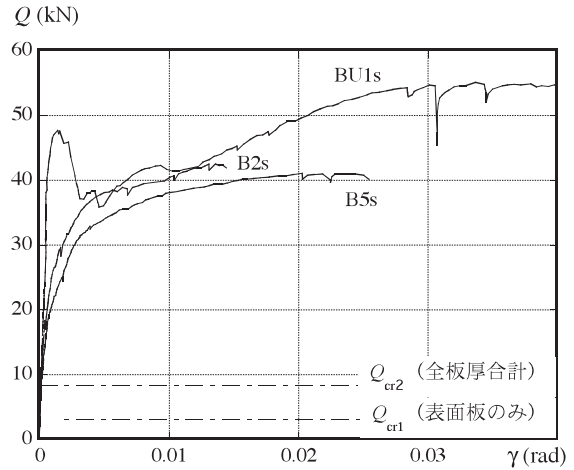


図9 面内せん断実験概要



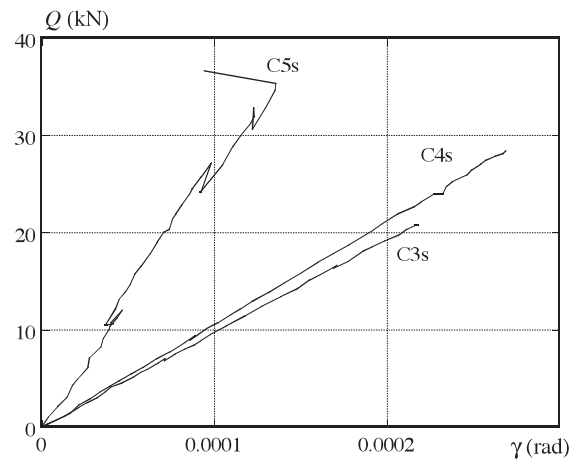
(a) 折板コア型挟み込み断面パネル



(b) 丸波コア型挟み込み断面パネル

B5s と同様な挙動を示すようになる。

次に丸波コア挟み込み断面で要素構成のための接合方法が異なる B2s と B5s の荷重変位関係を比較する。B2s がシリコン系接着剤による接合、B5s がスポット溶接による離散的接合である。接着材による接合をした B2s の方が、B5s に比べて初期線形関係から離れる荷重が高く、最大耐力も高くなっている。これは、接着が線的・面的な接合で要素を構成しているのに対し、スポット溶接は離散的な点状接合であるため、断面としての一体性が崩れ易いためと考えられる。しかし、スポット溶接を行ったものでも表面板とコア材の部分的な乖離もなく、最終的に要素一体として安定した張力場を形成した。写真 5 に B2s の最終的な張力場形成後の変形状態を示す。



(c) 角波コア型挟み込み断面パネル

図 10 面内せん断実験結果

C) 角波コア型挟み込み断面パネルの最大耐力決定要因は、2 丁合わせの C5s が、現場接合部付近での接着材のはがれによるパネル同士のずれであり、その他の 2 体は写真 4 に示すようにホールダウン金物及びその周辺の破壊によるものであった。したがって、パネル部自体は全く問題なく、弾性状態を保っているといえる。また、ホールダウン金物近傍の破壊は、縦材の板厚が 2.3mm と厚い C4s で遅れている。このように、角波コア型挟み込み断面パネルは、それ自体のせん弾剛性及びせん断耐力は、薄板のみより十分高いと予測できるが、骨としてのフレーム部分にいかに接合するかが大きな課題として明確になった。今後は、この接合方式について、パネルごとの適正を見極めながら熟考していく必要がある。

3.7 面内圧縮実験の概要

面内圧縮実験は、鉛直力支持の壁材あるいは屋根から壁へとつながる一連の軸力支持材としての性能を把握するための基礎実験として行い、鋼薄板構造要素の座屈特性を把握することを目的としている。

試験体は、角波コア型挟み込み断面パネルと鋼薄板を表面材とした一般的な鋼板サンドイッチパネルの 2



A5s : ボルト孔の
支圧によるのび



C3s : ホールダウン金物
接合部の破壊

写真 4 接合部における破壊

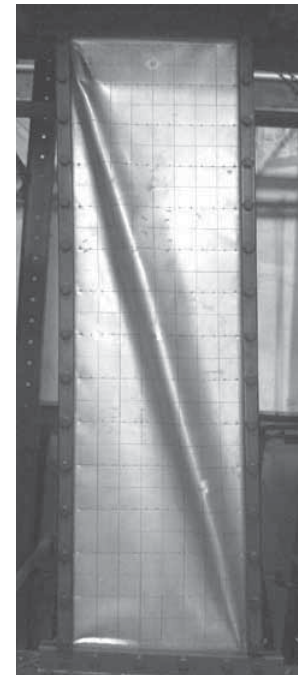


写真 5 最終破壊状態
(B2s)

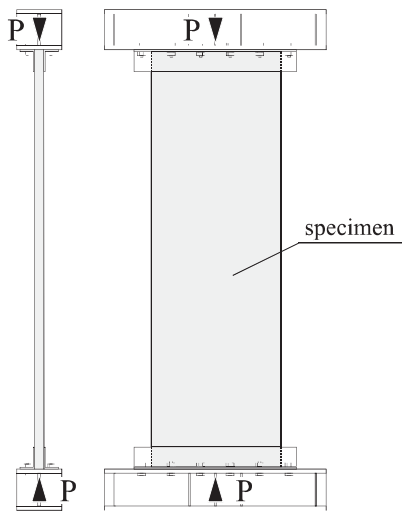


図 11 面内圧縮実験概要



写真 6
座屈後変形 (D3c)

種類である。荷重は、図 11 に示すように上下端の短辺を山形鋼を用いて両面から挟み込む形で面外拘束しているが、その他は自由として、長辺材軸方向に圧縮する形式で行った。

図 12 に材軸方向の平均縮み量を取り、縦軸には荷重をとって示している。ただし、これらのグラフの縦軸、横軸はコア形状ごとに変えてあることに注意願いたい。

角波コア型挟み込み断面パネルについては一体のみの試験であり、使用変数による違いの考察を行うことはできない。この試験体は、要素としての面外曲げ剛性が相当大きいため、荷重途中でのパネル全体としての面外方向への変形は見られなかった。崩壊形式は、角パイプの局所的な座屈によるものであった。

鋼板サンドイッチパネルについては、3種類の長さに対し、荷重を行ったが全ての試験体で最大耐力はほぼ等しかった。これは、その崩壊形式によるものであ

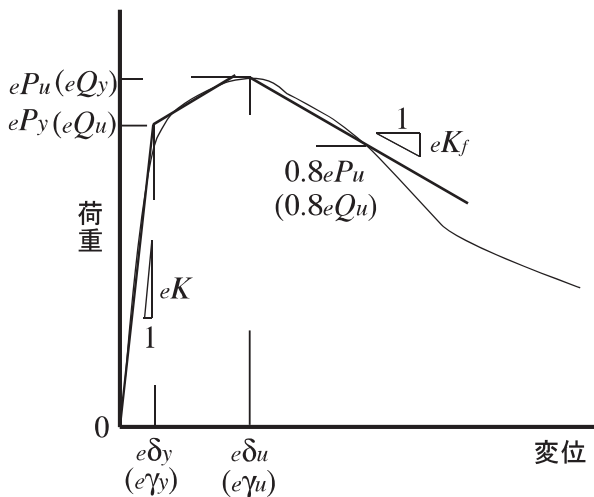
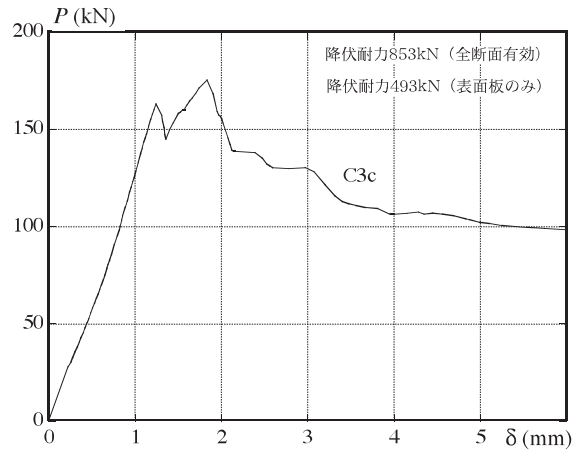
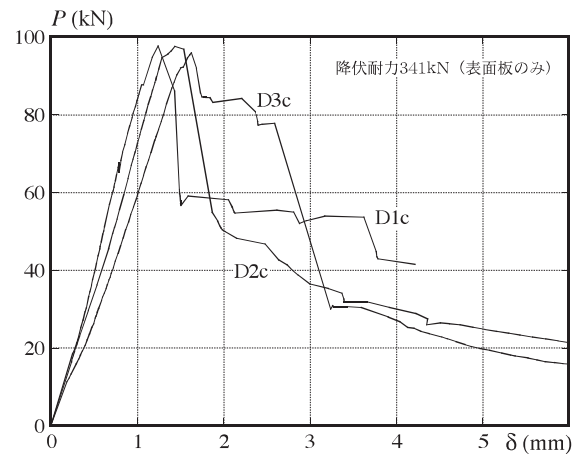


図 13 断面性能の抽出



(a) 角波コア型挟み込み断面パネル



(b) 鋼板サンドイッチパネル

図 12 面内圧縮実験結果

る。写真 6 に示すように、全ての試験体で表面板が中央部付近で局所的に座屈している。最大耐力は、この局部座屈により決定していると考えられる。従って、実験を行った試験体程度の面外曲げ剛性を有する鋼板サンドイッチパネルで、全体的な面外曲げ変形が生じることはない判断できる。しかし、これはパネル全体としての面外曲げ剛性と表面板の局部座屈耐力の相関関係で決まるものであり、今後検討していく課題である。実験でもこの現象は目で捉えられている。材長が一番長い 2500mm の試験体は荷重途中において若干全体的な面外変形が見られたと同時に表面板の座屈が発生し、最大耐力となった。

3.8 性能特性値の抽出

前節までの基本的構造特性確認実験としての面外曲げ試験、面内せん断試験、面内圧縮試験より得られた荷重変位関係を一般化すれば図 13 のようになる。この荷重変位関係及び実験観察より、鋼薄板構造要素の初期剛性 K 、降伏耐力 P_y (Q_y)、最大耐力 P_u (Q_u) の値を抽出できる。初期剛性 K については、たわみ量 $1/300$ 荷重時あるいは最大荷重の $1/2$ 荷重時の割線剛性の小さい方の値であり、降伏耐力 P_y (Q_y) は、

表4 断面性能一覧

記号	コア部構成	単位重量 W(kg/mm ²)	要素厚 T(mm)	表面板厚 t(mm)	コア板厚 t(mm)	初期剛性 K (N/mm)	降伏耐力 ePy (eQy) (kN)	最大耐力 ePu (eQu) (kN)	エネルギー吸収量 (kN・mm)	固有振動数 (Hz)	減衰定数	耐力劣化勾配 eKf (N/mm)
A1b	折板のみ	8.10	87.5	-	0.64	794	7.08	8.26	47.9	-	-	-1730
A2b	折板1層	18.8	90.2	0.83	0.64	1690	7.22	11.2	65.2	-	-	-499
A3b	折板2層平行	25.3	176	0.83	0.64	4870	12.6	23.8	506	-	-	-239
A4b	折板2層直交	25.8	173	0.83	0.64	1530	9.26	11.9	53.7	-	-	-4760
A5b	折板1層2	24.3	52.0	1.02	0.82	1501	9.25	16.7	139	46.4	3.02	-222693
B1b	丸波大波2層	14.8	34.5	0.57	0.43	458	3.76	5.64	103	-	-	-81
B2b	丸波小波2層	11.9	18.0	0.57	0.22	146	1.58	2.98	202	-	-	-
B3b	丸波小波4層	15.7	34.7	0.57	0.22	518	2.63	5.14	330	-	-	-58
B4b	丸波小波2層2	13.1	17.6	0.57	0.20	65	1.96	2.91	441	13.2	6.53	-52.9
BU1b	丸波小波発泡ウレタン逆位相	13.0	30.9	0.57	0.22	348	5.96	6.83	170	-	-	-949
BU2b	丸波小波発泡ウレタン同位相	12.4	31.4	0.57	0.22	339	4.76	6.18	152	-	-	-236
C1b	角波表面板0.5	21.3	102	0.50	0.50	4820	30.9	41.1	264	-	-	-18200
C2b	角波表面板1.0	29.2	104	1.00	0.50	7170	26.6	38.7	713	-	-	-20600
C2'b	角波ハット型(再)	29.3	102	1.02	0.55	5881	38.5	62.1	393	50.1	3.95	*(∞)
C3b	角波角型	38.7	102	1.02	0.55	5862	21.8	38.7	623	71.4	2.16	*(∞)
A5s	折板せん断スポット溶接	24.3	52.0	0.83	0.82	57268	*(110)	*(110)	-	-	-	-
B2s	丸波せん断接着剤接合	12.4	19.0	0.57	0.22	27707	25.4	42.4	941	-	-	-
B5s	丸波せん断スポット溶接	12.4	19.0	0.57	0.22	38570	25.4	40.9	1226	-	-	-
BU1s	丸波ウレタン接着剤接合	12.9	28.0	0.57	0.22	30117	46.6	54.2	2553	-	-	-
C3s	角波せん断外枠0.5	29.2	102	1.02	0.48	41412	-	-	-	-	-	-
C4s	角波せん断外枠2.3	29.2	102	1.02	0.48	44132	-	-	-	-	-	-
C5s	角波せん断外枠2.3ダブル	29.2	102	1.02	0.48	101658	-	-	-	-	-	-
C3c	角波角形2	33.6	102	1.02	0.48	113918	158	175	190	51.4	2.86	-40271
D1c	鋼板サンドイッチパネル1500	10.7	44.6	0.55	-	94516	87.8	97.6	61.6	35.3	2.31	-65047
D2c	鋼板サンドイッチパネル2000	10.7	44.7	0.55	-	80419	87.7	97.5	70.5	24.9	1.54	-11696
D3c	鋼板サンドイッチパネル2500	10.7	44.5	0.55	-	65628	86.2	95.8	76.6	18.4	0.87	-14737

文献5)に示されている方法により求めている。最大耐力以降の劣化勾配については、明確な劣化を示したものが少なかったため、本研究においては評価の対象から外している。またエネルギー吸収量を最大耐力時変位までの荷重変位関係で囲まれた面積で算出した。

振動実験に関しては、先に示したように固有振動数ならびに減衰定数を鋼薄板構造要素が有する特性として抽出した。

以上のようにして得られた各特性値を表4に示す。参考のため、要素全厚、コアに使用した薄板の板厚、表面板に使用した薄板の板厚の実測値も記載している。次章でこれら特性値を用途・部位に適した評価尺度により相対評価する。

4. 性能評価と開発の方針

4.1 性能評価の必要性

前章では、構造実験から得られた知見について試験体コア形状ごとに述べた。しかし、すべての実験を総合的に把握し、今後の開発の方向を定めようとする場合、個別の実験結果の総覧では不十分である。

今回の実験に供した試験体は、参加各社の手持ちの製品や工作技術を適用して製作したため、実験変数が十分少数に厳選されていない。それゆえ、直接の実験結果を相互に比較することができない。

さらに言えば、このことは建材製品の開発研究には本質的につきまとう特徴的なものとも言える。建材製品の開発においては、設計変数は非常に多岐にわたり、評価すべき性能もまた多彩である。こうした問題に通常の実験研究のアプローチで取り組もうとすれ

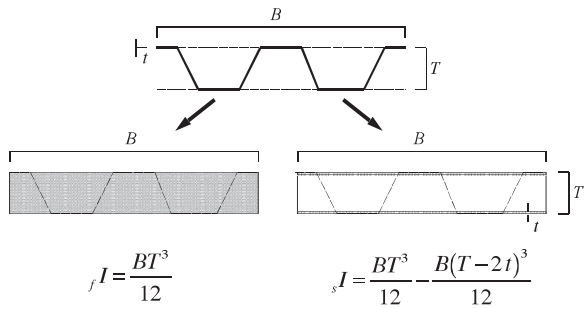
ば、実験変数、実験ケース数ともに累乗的に増加してしまい、効率的開発が困難になる。一定の予測のもとに実験を企画することになるが、その場合、他の設計変数の及ぼす影響は無視されることになり、重要な開発の契機を見逃すことにもなりかねない。こうした困難さゆえ、開発対象物に対する評価は、漠とした感覚的・経験的・自己納得的判断や、あるいは競合製品との直接の比較に頼ることが多かった。しかし、適切かつ論理的な総合評価は、本来、開発の要となるべきものである。

この課題を解決するためには、多変数の開発対象物を共通に評価する性能指標を導入する必要がある。本章では、3章で述べた鋼薄板構造要素の実験を題材として、多様な実験結果相互の体系的評価を試みる。

4.2 性能評価のための規準化

多変数の開発対象物を共通に評価する性能指標に換算する方法のことを、本稿では「規準化」と呼ぶ。規準化の換算法を次のように定義する。すなわち、当該「試験体の特定の規準化された性能指標」は「実験で得られた当該試験体の特定の性能値」を「当該試験体の基本的構成を抽象化したモデルに当該試験体の仕様の一部を代入したときに得られる当該モデルの特定性能の理論値」で除した値である。

ゆえに規準化された性能指標の値は、無次元数であり、採用された規準化のためのモデルによって異なる値となる。規準化の際使用したモデルを「規準化モデル」と呼ぶ。本研究で提案された断面は、基本的には、薄板で構成された折板、丸波、角波からなるコア材とそれらを上下から挟み込む2枚の表面薄板とから構成



(a) ソリッドモデル (b) 理想サンドイッチモデル

図 14 断面性能の規準化

されている。この断面は、表面板2枚を何らかのコア材を挟んで対向させたサンドイッチ断面と捉えることもでき、また、密実一体の無垢の鋼材の断面から、特定の部分を除去し空洞化したものと捉えることもできる。すなわち本研究での提案断面は、いずれも密実断面とサンドイッチ断面の中間的なものであると考えてよい。そこで、本稿で採用する規準化モデルを次の2種とした。

1) ソリッドモデル

試験体の断面の輪郭寸法のみを参照し、その断面がすべて鋼材で置き換えられたとした断面を、以下「ソリッドモデル」と呼ぶ。ソリッドモデルによる規準化は、実際には複合的な構成をもった試験体を、均質な素材とみなして、無垢の鋼との能力比を算出する方法とも考えられよう。ゆえに、コンクリート、ALC、木材など、他の材料と比較可能な性能指標が得られるという特徴を持っている。

2) 理想サンドイッチモデル

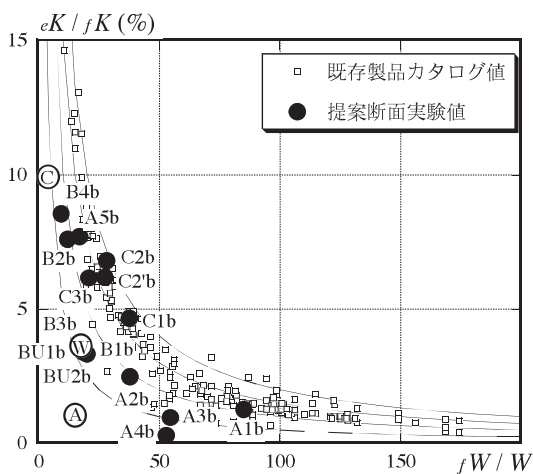
試験体の断面の輪郭寸法に加え、表面薄板自体の厚みを参照し、断面を、対向する2枚の表面薄板のみからなるものとし、かつ厚み一定のまま互いにずれを生ぜず、一体となって挙動するものとした理想サンド

イッチ断面を、以下「理想サンドイッチモデル」と呼ぶ。理想サンドイッチモデルによる規準化は、コア材の材料・形状・接合法といった詳細を無視して、サンドイッチパネルとしての性能を、理想状態との比で表現する方法で、本研究で対象とした断面は、いずれもこのように規準化することができる。この規準化モデルは、ソリッドモデルにくらべ、表面板厚という仕様変数がひとつ多く取られている。そのため、ソリッドモデルに比して、開発対象物の現実の部品構成に近づいた規準化モデルであると言える。

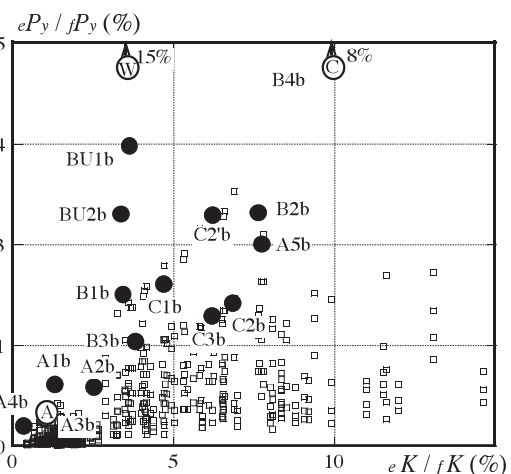
このことを敷衍して考えると次のようになる。規準化モデルが現実の部品構成に近づけば近づくほど、実験結果を正確に再現できる構造モデルに近づくが、同時に、構成の異なる様々な試験体との相互比較はできなくなる。逆に規準化モデルを抽象的に設定すれば、相互比較の幅は広がるが、正確な仕様-性能関係の再現は難しくなる。ゆえに規準化モデルは、比較対象の範囲と、現下の開発が必要とする精密さの両者を見定めながら決定すべきものと考えられる。

以上に基づき、本研究では対象断面を図14のようなソリッドモデル及び理想サンドイッチモデルを用いて提案断面性能及び既往製品性能を規準化した。以降、本文中およびグラフ中の記号の左下に実験値はe、ソリッドモデル値はf、理想サンドイッチモデル値はsを付け区別している。

なお、曲げ試験の性能については、実験で得られた提案断面の性能値に加え、各社のカタログや技術資料で公表された既存製品の性能値と比較することが可能である。このことは研究成果の位置付けと今後の新たな開発の方向性を探る上で重要と考えられる。そこで、本ワーキンググループ委員各社の製品カタログより既存製品の性能値を読み取り、それらの値と本実験で得られた性能指標の比較を試みた。既存製品のほとんどは、折板及びデッキプレートであり、一部鋼板サンド



(a) 重量比逆数 - 初期剛性比



(b) 初期剛性比 - 降伏耐力比

図 15 ソリッドモデルにより規準化された性能評価空間例 (面外曲げ性能)

イチパネルが含まれる。ただし表面薄板のない折板及びデッキプレートについては、板厚を表面板厚とみなして規準化した。これは、A1bの実験結果についても同様である。

4.3 規準化した性能比較

図15にソリッドモデルを用いて規準化した性能2次元空間を示す。(a)は横軸に見付面積あたりの重量比の逆数を取り、縦軸には、面外曲げ初期剛性比をとって示した性能空間である。ここで、重量比について、本研究では重量が軽いものほど性能が良いとして評価しているため、逆数で表現している。また(b)は横軸に面外曲げ剛性比、縦軸に面外曲げ降伏(許容)耐力比をとった性能空間である。□が既存製品性能、●が本研究での断面性能、丸で囲ったC, W, Aはそれぞれコンクリート製品、木製品、ALC製品の概略位置を示している。

(a)より、Cシリーズ試験体は、□で示した既存製品性能限界近傍に位置し、それ以外は若干劣る結果となっている。しかし、B, BUシリーズ試験体に関しては、ALC製品と同等の重量比を有しながらも剛性は高く、木製品のものとほぼ一致している。このように本研究で提案された鋼薄板構造要素は、構造体の性能として木材の材料特性を有するようなものに仕上げることも可能であり、金属を用いて他の材料と同等な性能を有する製品開発の可能性を示唆するものである。(b)より、本研究での断面性能は、耐力の面で木材やコンクリート製品に及ばないものの、既存製品に比べれば、それらが有する曲げ剛性の割には曲げ耐力は大きいものであったことがわかる。

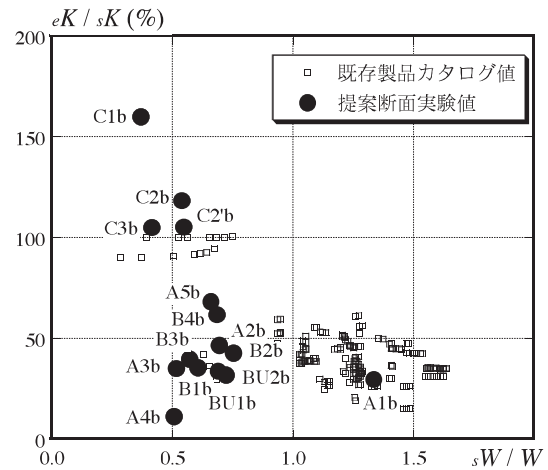


図16 理想サンドイッチモデルにより規準化された性能評価空間例(面外曲げ性能)
(重量比逆数-初期剛性比)

また図16は理想サンドイッチモデルを用いて規準化した性能2次元空間である。この既存製品の中で縦軸100%近傍に位置するものは鋼板サンドイッチパネルのものであり、その他は折板、デッキプレートのものである。この図からは本研究での提案断面は金属サンドイッチパネルと折板の中間的な存在として位置づけられる。参考までに理想サンドイッチモデルで規準化した性能を表5に示す。

以上図15, 16で示した性能評価空間はほんの一面を示すにすぎない。評価手法には根本的に総合性・多次元性があり、開発者の観点ねらいに応じて定められるべきものである。適切な評価空間を見極め開発を進

表5 理想サンドイッチモデルで規準化された断面性能一覧

記号	コア部構成	単位重量 (理想サンドイッチ) sW (kg/mm ²)	剛性 (理想サンドイッチ) sK (N/mm)	降伏耐力 (理想サンドイッチ) sPy (sQy) (kN)	sW/W	eK/sK	ePy/sPy (eQy/sQy)	ePu/sPu (eQu/sQu)	エネルギー比
A1b	折板のみ	-	3406	50.7	-	0.23	0.14	0.16	0.12
A2b	折板1層	13.0	3622	52.3	0.69	0.47	0.14	0.22	0.17
A3b	折板2層平行	13.0	13849	103	0.52	0.35	0.12	0.23	1.33
A4b	折板2層直交	13.0	13503	101	0.51	0.11	0.09	0.12	0.14
A5b	折板1層2	16.0	2029	41.7	0.66	0.74	0.22	0.40	0.33
B1b	丸波大波2層	8.95	1289	19.1	0.60	0.36	0.20	0.30	0.73
B2b	丸波小波2層	8.95	342	9.7	0.75	0.43	0.16	0.31	1.47
B3b	丸波小波4層	8.95	1304	19.2	0.57	0.40	0.14	0.27	2.33
B4b	丸波小波2層2	8.95	132	7.06	0.68	0.49	0.28	0.41	2.33
BU1b	丸波小波ウレタン逆位相	8.95	1030	17.0	0.69	0.34	0.35	0.40	1.21
BU2b	丸波小波ウレタン同位相	8.95	1065	17.3	0.72	0.32	0.27	0.36	1.08
C1b	角波表面板0.5	7.85	3014	44.8	0.37	1.60	0.69	0.92	0.79
C2b	角波表面板1.0	15.7	6051	85.8	0.54	1.18	0.31	0.45	1.17
C2'b	角波ハット型(再)	16.0	5147	78.8	0.55	1.14	0.49	0.79	0.65
C3b	角波角型	16.0	5147	78.8	0.41	1.14	0.28	0.49	1.03
A5s	折板せん断スロット溶接	13.0	40384	343	0.54	1.42	*(0.34)	*(0.34)	-
B2s	丸波せん断接着剤接合	8.95	21047	158	0.72	1.32	0.16	0.27	1.59
B5s	丸波せん断スロット溶接	8.95	21047	158	0.72	1.83	0.16	0.26	2.07
BU1s	丸波ウレタン接着剤接合	8.95	21047	158	0.70	1.43	0.30	0.34	4.31
C3s	角波せん断外枠0.5	16.0	41493	415	0.55	1.00	-	-	-
C4s	角波せん断外枠2.3	16.0	41493	415	0.55	1.06	-	-	-
C5s	角波せん断外枠2.3ダブル	16.0	82985	831	0.55	1.23	-	-	-
C3c	角波角形2	16.0	123051	493	0.48	0.93	0.32	0.36	0.19
D1c	鋼板サンドイッチパネル1500	8.64	125488	341	0.81	0.75	0.26	0.29	0.13
D2c	鋼板サンドイッチパネル2000	8.64	94116	341	0.81	0.85	0.26	0.29	0.11
D3c	鋼板サンドイッチパネル2500	8.64	75293	341	0.81	0.87	0.25	0.28	0.10

めていく必要がある。

4.4 今後の開発方向の提案

次に今後の開発方向の可能性を知るために、本研究で取り扱った各試験体を次の4つの型に類型化し、それぞれの型の性質を明らかにする。

1) 折板スポット接合型：コアに折板を用い、表面板とはドリルねじ、スポット溶接を用いて離散的に接合し要素を構成するもの。

2) 丸波シリコン接着型：コアに丸波を用い、比較的柔軟性のある変性シリコン系接着剤を用いて、コア及び表面板を接合し、要素を構成するもの。

3) 丸波発泡ウレタン型：先の丸波シリコン接着型に発泡ウレタンを充填して要素を構成するもの。

4) 角波ウレタン接着型：コアにハット形断面、角パイプ等を用い、表面板とは比較的硬質なウレタン系接着剤を用いて面的に接合し、要素を構成するもの。

以上の1)には試験体A2b, A5b, A5s, 2)には試験体B2b, B4b, B2s, 3)には試験体BU1b, BU2b,

BU1s, 4)には試験体C1b, C2b, C2'b, C3b, C3s, C4s, C5sが該当する。これら試験体の規準化後の性能値を平均してその型の性能指標の現状の成果と考えることとした。ただし規準化には理想サンドイッチモデルのみを用いることとした。

性能指標には、曲げ剛性指標、曲げ降伏耐力指標、曲げ最大耐力指標、曲げエネルギー吸収量指標、せん断剛性指標、せん断降伏耐力指標、せん断最大耐力指標、せん断エネルギー吸収量指標、曲げ振動減衰定数指標をとり、これに単位見付面積あたりの重量指標を加えた。さらに型相互の比較を容易にするため、それぞれの指標でもっとも高い性能を発揮した試験体の性能値を1として性能軸を調整した。なお、重量の指標は、重量比の逆数を採用した。これは、性能指標の値の増加が、製品の価値の向上の方向と一致するように配慮したためである。

このようにして作成したレーダーグラフが図17である。なお、図17の諸値については、表6に示して

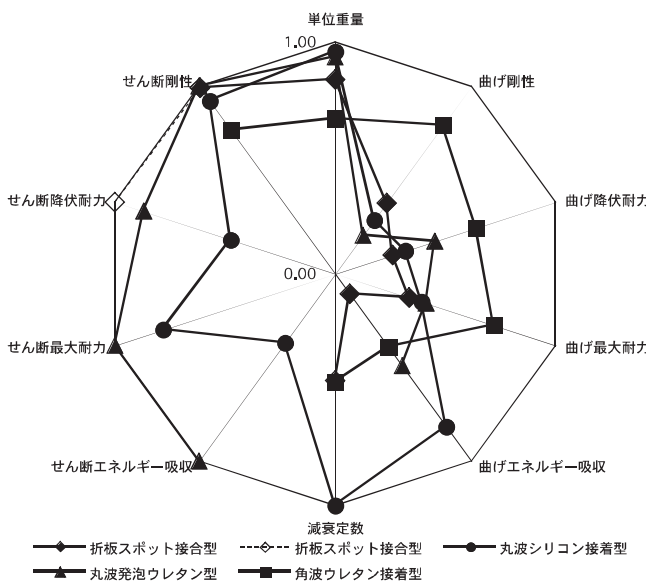


図17 分類型による多軸性能評価値

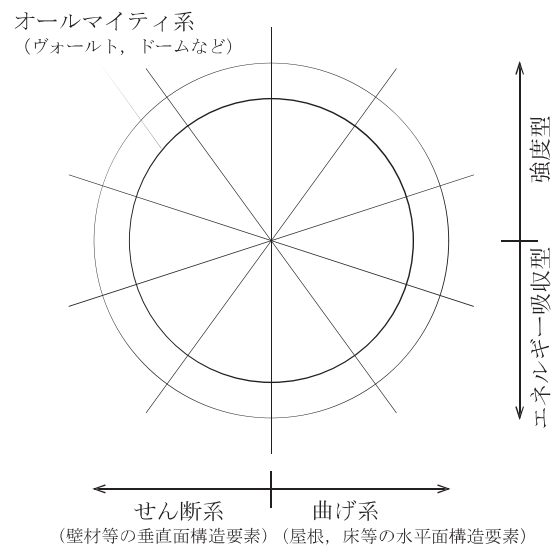


図18 多軸性能評価による各型の特性分類概念図

表6 規準化された断面性能とパネルタイプごとの平均値

型名	試験体名	コア部品構成	曲げ剛性 K/Ks	曲げ降伏耐力 ePy/sPy	曲げ最大耐力 ePu/sPu	曲げエネルギー吸収	せん断剛性 K/Ks	せん断降伏耐力 eQy/sQy	せん断最大耐力 eQu/sQu	せん断エネルギー吸収	単位重量 W/sW	減衰定数
折板スポット接合型	A2b	折板1層	0.47 (0.29)	0.14 (0.20)	0.22 (0.23)	0.17 (0.07)					0.69 (0.92)	
	A5b	折板1層2	0.74 (0.46)	0.22 (0.32)	0.40 (0.44)	0.33 (0.14)					0.66 (0.88)	3.02 (0.46)
	A5s	折板せん断スポット溶接					1.42 (0.99)	0.34 (1.00)			0.54 (0.71)	
	(平均)		(0.38)	(0.26)	(0.33)	(0.11)	(0.99)	1			(0.84)	(0.46)
丸波シリコン接着型	B2b	丸波小波2層	0.43 (0.27)	0.16 (0.24)	0.31 (0.33)	1.47 (0.63)					0.75 (1.00)	
	B4b	丸波小波2層2	0.49 (0.31)	0.28 (0.40)	0.41 (0.45)	2.33 (1.00)					0.68 (0.91)	6.53 (1.00)
	B2s	丸波せん断接着剤接合					1.32 (0.92)	0.16 (0.47)	0.27 (0.78)	1.59 (0.37)	0.72 (0.96)	
	(平均)		(0.29)	(0.32)	(0.39)	(0.82)	(0.92)	(0.47)	(0.78)	(0.37)	(0.96)	(1.00)
丸波発泡ウレタン型	BU1b	丸波小波発泡ウレタン逆位相	0.34 (0.21)	0.35 (0.51)	0.40 (0.44)	1.21 (0.52)					0.69 (0.92)	
	BU2b	丸波小波発泡ウレタン同位相	0.32 (0.20)	0.27 (0.40)	0.36 (0.39)	1.08 (0.46)					0.72 (0.96)	
	BU1s	丸波ウレタン接着剤接合					1.43 (1.00)	0.30 (0.87)	0.34 (1.00)	4.31 (1.00)	0.70 (0.93)	
	(平均)		(0.21)	(0.45)	(0.41)	(0.49)	(1.00)	(0.87)		(1.00)	(0.94)	
角波ウレタン接着型	C1b	角波表面板0.5	1.60 (1.00)	0.69 (1.00)	0.92 (1.00)	0.79 (0.34)					0.37 (0.49)	
	C2b	角波表面板1.0	1.18 (0.74)	0.31 (0.45)	0.45 (0.49)	1.17 (0.50)					0.54 (0.72)	
	C2'b	角波ハット型 (再)	1.14 (0.71)	0.49 (0.71)	0.79 (0.86)	0.65 (0.28)					0.55 (0.73)	3.95 (0.6)
	C3b	角波角型	1.14 (0.71)	0.28 (0.40)	0.48 (0.53)	1.03 (0.44)					0.41 (0.55)	2.16 (0.33)
	C3s	角波せん断外枠0.5					1.00 (0.70)				0.55 (0.73)	
	C4s	角波せん断外枠2.3					1.06 (0.74)				0.55 (0.73)	
	C5s	角波せん断外枠2.3ダブル					1.23 (0.86)				0.55 (0.73)	
(平均)		(0.79)	(0.64)	(0.72)	(0.39)	(0.77)				(0.67)	(0.47)	

いる。このレーダーグラフの軸の配列は工夫しており、概ね図 18 に示すような特徴が直観的に理解できるようになっている。なお、一部の型については、せん断試験の際、パネルの崩壊にいたる以前に取付け部等の局部的な破壊がおこったため、パネルそのものの性能を評価できないものもあった。こうしたものはグラフ上にプロットしていない。このレーダーグラフから以下のことを読み取ることができる。

角波ウレタン接着型が特に曲げ剛性、せん断剛性が高いこと、それとは対比的に丸波シリコン接着型がエネルギー吸収に優れていることがわかる。ゆえに前者は強度型、後者はエネルギー吸収型の構造要素として進化していくことが可能である。

折板スポット接合型は曲げ領域での性能は、角波ウレタン接着型よりも、性能値で半分程度しか発揮されていない。これは主として、コア材のウェブ板の傾斜や離散的な接合方法によるものと思われる。折板スポット接合型に接着を併用すれば性能の向上が望めよう。また弱軸方向の曲げ性能は、そのコア材の形状からみて、折板の方が高いものと思われ、その点でウェブの角度は単位重量、コスト等の多元的な検討を経て最良点がきまるのではないかと予想される。

丸波発泡ウレタン型と丸波シリコン接着型を比較してみると、発泡ウレタンを充填することにより、せん断系の性能が飛躍的に高くなる一方、ウレタンを充填しない場合の特徴である曲げ系のエネルギー吸収性能が多少減ずることが見て取れる。

本研究では構造性能以外の性能について論じてこなかったが、熱、音響・振動など、構造以外の様々な性能が今後課題となってくるであろう。たとえば屋根の場合、熱によって生ずる外側表面板の伸びのパイメタルの様な変形作用が考えられる。柔軟性の高いシリコン系接着材の利用は、このような熱変形を吸収するのに適していると考えられる。このように、本研究で試みられた技術それぞれの存在理由が、多面的評価のなかで発見されるであろう。

5. 本研究から得られた知見と今後の展望

5.1 鋼薄板構造の力学的特質

本研究で行った構造特性確認実験で扱った薄板は、全て 1mm 以下のものであった。この程度の薄板を単独で用いた場合、通常の部材にくらべ、その面外曲げ剛性は限りなく 0 に近く、せん断力や圧縮力に対しても早期に不安定挙動を示し耐力低下するため、構造要素としてはその使用が限定される。しかし、薄板同士を組合せ、コアと表面薄板からなる断面構成とすることで、面外力、面内力に抗する構造部材として十分な特性を達成できることが確認できた。

具体的には、全ての試験体のせん断耐力が非常に大きいという特徴が確認できた。また丸波コアのものに

関してではあるが、鋼薄板構造全体に一種の張力場が形成され、安定した塑性変形が見られた。ただし、骨としてのフレームへの接合方法については再考する余地がある。この課題をクリアすることで、より効果的なせん断部材として実用化がはかれると考えている。

鋼薄板構造を構成するための接合方式として、ウレタン系接着、シリコン系接着や離散的なドリルねじ接合、スポット溶接接合を試みた。この接合方式による構造特性の違いもある程度明らかになった。とくに面外曲げ性能においてこれらの違いが強く現れている。構造性能という面からみれば、接着接合で構成したパネルの性能が比較的良好という結果となった。特にエネルギー吸収や振動減衰という面である。この特徴を有効活用していく方向性は十分あり得る。

さらに、規準化という概念にもとづいた従来製品や他材料製品との特性比較を行うことによって、鋼薄板の新たな性格も発見できた。たとえば薄鋼板パネルが木材や ALC とよく似た性能を有する部材として構成できるという事実である。この点は、従来、鋼の性能を自明の前提と考えてきた骨組構造の常識を転換するユニークな方針を示唆していると言えるであろう。

以上、他部材との接合という点で若干解決すべき課題は残っているが、鋼薄板構造要素を用いた鋼構造建築物の可能性について、ある程度の自由度と多様性を示すことができたと考えている。

5.2 規基準適合上の諸問題と解決の方向

鋼薄板構造の実用化に向けて、法規上、構造関係で備えるべき条件としては、1. 該当する構造種別の判別、2. 構造耐力上主要な部分としての位置付け、3. 構造計算上の F 値の指定、が最重要項目として挙げられる。

これらについての計算方法の詳細は、運用によるものになると思われるが、許容応力度等計算などの法令上の計算方法に沿った方法でなければならない。

また、実験で検証すべき事項としては、法 37 条の材料関連として、特殊な鋼材を用いる場合の材料特性の検証がある。また、令 67 条の鉄骨接合関連として、特殊な接合方法を用いる場合の接合性能（鉄骨造の接合としての認定、又は告示のただし書を適用する場合、又はかしめ接合）などがある。

一方、防火関係での法規上の制約については、1. 防火上の目標レベルをどこにするか、2. どの構造部位に使うか、の観点からの整理が必要になってくる。耐火性能で要求されるレベルは、建設地・用途・建築物の規模によって違ってくる。目標レベルとして、耐火建築物（又は耐火構造）、準耐火建築物（又は準耐火構造）、防火構造がある。また、どの構造部位への適用かについては、主要構造物なのか、壁なら耐力壁か非耐力壁か、さらに床、屋根への適用などが考えられる。

防火上の検定としては、たとえば「耐火構造」であることを耐火試験で示すことができればよい。屋根・壁等のパーツとして開発するならこの方法が最適である。「構造」としての規制への適合に関しては、試験方法は業務方法書に定められている通りなので、それ以外の方法はない。

なお、「耐火建築物」については、建築物として耐火性能検証法（ルートB）とすることは可能ではあるが、鋼薄板構造に適した耐火性能検証手法を開発する必要がある。また「建築物」としての耐火性能評価（ルートC）では、空間の特性に応じた発熱性状と、それに対する主要構造部の挙動解析が必要になる。計算解析が難しい先鋭的な鋼薄板構造が開発された場合は、実大規模での確認実験が必要となる。ある程度計算が可能であっても接合部が複雑な場合、その挙動については実験で確認することも必要になると思われる。

鋼材は不燃材料であり、絶対的欠落事由にあたることはない。しかしその一方で、鉄は熱が伝わりやすく、薄ければ高温になり易いので、熱膨張に伴う変形等に対しても、抵抗ではなく逃げ等による対応方法の工夫が必要になると思われる。

本研究での試験体製作では材料、接合方法等について、現行の規基準に過剰にとらわれることなく設計した。一例を挙げれば接合方法では、一般に火災に弱いとされる接着剤接合も用いている。接着剤接合については新たな接合技術として今後さらに実験・検証が重ねられるものと予想されるが、スポット溶接、ドリルねじといった既に性能が検証された他の接合方法との併用による使用は、現段階でも可能と思われる。

以上、鋼薄板構造の実用化にあたっては、実験による構造的・防火的な性能の検証に加え、現行規基準の制約に対して法適合性を順次戦略的に備えていく必要がある。

5.3 建築意匠上の表現の開拓

実験結果および性能評価から言える鋼薄板構造の最大の特徴は、せん断耐力が非常に大きく、かつその変形が非常に小さいことである。このことは意匠上、建築物の壁面の層間変形目地の一掃、あるいは目地幅の大幅な減少が可能であることを意味している。一般的に目地は、慎重にデザインすれば、建築物に魅力を与える有用なアクセントともなり得るが、反面、設計に寸法上の規制を与えて手間を増加させたり、あるいは逆に安易な設計に流れがちになるなどの弊害を持っている。この点で、鋼薄板構造の実用化は、鋼構造のあたらしいデザイン領域を開拓する意義が非常に大きい。なお、層間変形をもたない突きつけ目地の処理については、自動車钣金で開発されたパテ埋め技術の応用も考えられる。

鋼薄板構造が開拓する意匠上の第二の可能性は、構法的大幅な単純化である。もともと建材製品として活

用されてきたことが示す通り、鋼薄板材料には、屋根、壁面としての防水性能、遮音性能など、構造的性能を確保する技術がすでに十分に存在する。これにもし構造的性能を組み合わせることができれば、構造体と仕上げ材が統合した建材ができ、構法を劇的に単純化でき、かつ壁体の全体厚をかなり減少させられることを意味する。このことを通じて、建築物の単純化、軽量化、総合コストの低減など、さまざまなメリットが、今後さらに追求できるであろう。

これらの表現領域の開拓は、これまでの鋼構造に付き物であった意匠的制約をなくし、コンクリート系材料に限定されてきた表現手法を鋼構造にももたらすという意味で、いずれも建築家の創作意欲を大幅に高めると考えられる。

5.4 難易度から見た今後の開発プログラム

次に、開発の難易度から見た今後の開発プログラムについて展望を試みる。

まず最も開発が容易であると思われるのは、階高程度の高さを一材で架け渡すことのできる大型壁パネルである。例えばサイディングやサンドイッチパネルのような小幅の建材に、二次部材や胴縁材の構造性能を持たせ、大型化できれば、壁全体の工数および全体厚はかなり減らすことができ、さらに水平力抵抗要素としての性能が期待できる。さらに耐火性能を付与できれば、適用可能な建物は、一段と拡大できよう。

これにくらべれば、屋根パネルは難しい開発となりそうである。防水性能と構造性能の両者を成り立たせる現場接合部の開発が必須である。これもまず母屋材までの性能をパネルに付与できれば、設計者に好感をもって迎えられるであろう。さらに、もし目地なしでの防水接合部が開発できれば、鉄骨構造の外観意匠に画期的な自由度をもたらすはずである。

以上の2つの開発が済めば、平屋ないし低層の建物を鋼薄板だけで建設することができる。低層のプロトタイプ建築を造形的なデザインで建設し、設計界をリードしていけば、前衛的な建築家たちに共感の輪を広げられよう。同時に汎用性の高い建材を開発できれば、先進的デザインが徐々に一般の建築にも取り入れられていくはずである。

床については、現状ではデッキプレート合成床が主流となっているが、かつて超高層ビルで薄板の複合断面が試みられた事例¹⁰⁾があるように、自重を減じ地震力を低減する上で、薄板の持っているポテンシャルは高いものと思われる。まず2～3階程度の連続住宅の床（上下に別の家族が住まない形式のもの）を開発し、振動周波数や伝達、減衰などの検討を十分に積み重ねれば、デッキプレート合成床に替わる床材、ひいては小梁の性能を飲み込んだ床材の開発につながっていくはずである。

6. 結

以上のように本研究では、鋼薄板を用いた骨組みハイブリッドないしモノコック構造にむけて、各種構造パネルの基本的構造性能を検討し、各パネル形式の比較を行っただけでなく、あわせて開発上の性能評価手法の提案、規基準への対応、建築デザインへのインパクト、今後の開発プログラムの展望を試みた。本研究が、鋼構造の新たなあり方のさらなる探求・開拓、長期にわたる鋼板需要の維持、構法の簡略化と合理化、建設コストの低減、ひいては建築の環境負荷の総合的減低に向けての第一歩となれば幸いである。

追記

本報告の一部は、平成19年度日本建築学会大会において発表している^{11)~17)}。

謝辞

本WGの運営に常に助力と配慮を惜しまれなかった、日本鉄鋼連盟・糸野徳一氏に、衷心より感謝申し上げます。また本研究は、同フォーラム第1~2期において探究され発展してきたアイデアに連なっている。これらの研究に加わられた諸氏に深く感謝申し上げます。

また試験体製作の一部は、三重大学大学院生 飯島誠之君、加納浩史君をはじめ富岡研究室の学生・卒業生諸君、構造実験及びデータ整理は、東京工業大学大学院生 佐藤圭一君、中野修太君をはじめ五十嵐研究室の学生諸君の協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 磯辺聡, 川口淳, 森野捷輔, 富岡義人: 近代鉄骨建築における構造と意匠設計の関係に関する考察(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 構造III, pp. 977~978, 1999.9
- 2) 磯辺聡, 川口淳, 森野捷輔, 富岡義人: 近代鉄骨建築における構造と意匠設計の関係に関する考察(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造III, pp. 1065~1066, 2000.9
- 3) 吉田恵実, 川口淳, 森野捷輔, 富岡義人, 磯辺聡: 近代鉄骨建築における構造と意匠設計の関係に関する考察(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造III, pp. 477~478, 2001.9
- 4) 吉田恵実, 川口淳, 森野捷輔, 富岡義人, 磯辺聡: 近代鉄骨建築における構造と意匠設計の関係に関する考察(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 構造III, pp. 929~930, 2002.8
- 5) 日本鉄鋼連盟「薄板軽量形鋼構造建築物設計の手引き」編集委員会: 薄板軽量形鋼構造建築物設計の手引き, 2002.6

- 6) 平井義行, 藤田正則, 管野良一, 井上隆二: 金属系断熱サンドイッチパネルを用いた耐力壁の面内せん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造III, pp. 853~854, 2004.
- 7) 藤田正則・管野良一・井上隆二: 接合部を補強した鋼板サンドイッチパネルの面内せん断実験, 日本建築学会構造系論文集, 第593号, pp. 169~176, 2005.7
- 8) 平井義行, 藤田正則, 井上隆二: 鋼板サンドイッチパネルを使用した低層鉄骨造用耐力壁の面内せん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 構造III, pp. 923~924, 2006.9
- 9) 例えば「スチールデザイン」には、近年の先進的作品の写真及び構造上の解説が掲載されている。日本鉄鋼連盟: スチールデザイン, No. 5, 7, 8, 2005, 2006.
- 10) 穂苅實: 高層建築における新しい床システム, 建築技術, No. 283, pp. 109~121, 1975.3
- 11) 富岡義人, 河野守, 石原直, 渡邊力, 大隅康令, 五十嵐規矩夫: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その1 鋼薄板を利用した構造形式の構想と研究の全体像, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 971~972, 2007.8
- 12) 富岡義人, 加納浩史: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その2 先進例の形態分析から見た薄板構造の将来像, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 973~974, 2007.8
- 13) 渡邊力, 富岡義人, 五十嵐規矩夫, 大隅康令, 太田克也, 清水信孝: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その3 全体実験計画及び面外曲げ試験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 975~976, 2007.8
- 14) 大隅康令, 富岡義人, 五十嵐規矩夫, 渡邊力, 山田一裕, 清水正志: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その4 折板コア挟み込み断面パネル, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 977~978, 2007.8
- 15) 中野修太, 富岡義人, 五十嵐規矩夫, 渡邊力, 藤田正則, 大室彰男: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その5 丸波コア挟み込み断面パネル, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 979~980, 2007.8
- 16) 太田克也, 富岡義人, 五十嵐規矩夫, 渡邊力: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その6 角波コア挟み込み断面パネル, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 981~982, 2007.8
- 17) 五十嵐規矩夫, 富岡義人, 渡邊力, 穂苅實, 藤田正則, 中川治彦: 薄板鉄鋼材料を用いた鋼構造建築物の可能性の探求と開発 その7 各種断面パネルの性能比較と開発の方向性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 材料施工, pp. 983~984, 2007.8

5.3 テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の研究

本研究では、テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の提案と、その実現可能性の探索を目的として、約 1 年半の研究期間中に、15 回の会議を開催し、WG メンバー間での情報交換ならびに討論を実施した。また、京都大学桂キャンパスにおいて実大供試体に対する静的載荷実験、京都工芸繊維大学において有限要素解析ソフトウェアを用いた数値解析実験、ならびに、福井工業大学において構造一貫計算ソフトウェアを用いた試設計を実施した。その成果は下記のとおりである。

- (1) 容易な組み立てと解体が可能となるように、テーパーピンをシアキーとして用いる柱 - 柱ピン継手を提案し、実大継手要素供試体に対する静的載荷実験を実施して、有限要素解析から予想される耐力を保有していることを確認した。
- (2) 小径 H 形鋼の格子梁とコンクリートスラブからなる合成フラットスラブユニットを、鋼板トッププレートにリブを溶接したキャピタルユニットで受けるフラットスラブ架構システムを提案し、実大部分架構供試体に対する静的載荷実験を実施して、想定する架構規模（階数は 5 階程度まで、スパンは 8m 程度まで）から予想される柱軸力に対してキャピタルユニットが十分な耐力と剛性を有していることを確認した。

本 WG で得られた成果を活かし、外壁システムやリユース可能な耐震要素など、未検討の課題を解決することで、下記のような対象への適用が期待できる。

- (1) リユース型架構としての環境にやさしい新たな建築システムであることを活かした、ショッピングセンターや事務所などの商業建築
- (2) 短工期・非熟練工による建方が可能なこと、部材の簡略化により工場生産性が上がること、リユースがキャッチフレーズになることを活かした、供用期間が比較的短い、郊外型のシステム建築

テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の研究

リユース, 3つのR, テーパー柱, フラットスラブ, 着脱可能, ピン接合

辻聖晃 (京都大学), 関光雄 (竹中工務店), 澤本佳和 (鹿島建設), 北岡聡 (住友金属), 桑原進 (京都工芸繊維大学), 永野康行 (福井工業大学)

1. 序

全産業が排出する廃棄物（最終処分量）および二酸化炭素のうち、約40%が建設産業によるものであるとされている（厚生省などの調査による）。この廃棄物ならびに二酸化炭素をいかに削減するかが、現在の建設業界に求められている最重要課題の一つとあって差し支えない。

廃棄物および二酸化炭素の削減を図るためのキーワードとなるのが3つのR, すなわち, **Reduce, Recycle** そして **Reuse** である。鋼は、スクラップを原料にした電炉鋼が広く一般に使用されているなど（日本においては粗鋼生産量の約25%, 米国においては約50%）、**Recycle** 性に富む材料であることは指摘するまでもないことである[1]。また、鋼を主材料とする金属系の架構システムは、建設現場用の足場や工事事務所にみられるように、古くから **Resuse** の仕組みが確立されている。さらに近年では、事務所、倉庫、店舗、ホテルなど、さまざまな用途を対象とした、金属系の架構システムが提案、実用化されている[2][3][4][5]。

本研究の目的は、鋼構造分野における **Reuse** 推進の一つの試みとして、テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造を提案し、その実現のためのフィージビリティスタディーを実施することにある。

2. 本研究につながるこれまでの流れ

2.1 着脱可能な接合部の探求

21世紀鋼構造フォーラムでは、2002年度に「進化する鋼構造」と題したテーマでの調査・研究を実施し、そのなかで、建築以外の分野で使用されている着脱可能な接合部についてのサーベイを実施した[6]。図1にそのときに抽出された8種類の接合方法を示す。着脱可能な接合部は、「嵌合系」（ワンタッチコネクタ、ホック、ジッパー、マジックテープ）、「摩擦系」（締付けリング、圧着ベルト）、「接着系」（はんだづけ、粘着テープ）に大別できるが、主として力学性能や汎用性の観点から、建築構造には嵌合系が適しているとの結論となった（図2）。

建築家の山本理顕氏は、邑楽町役場コンペにおい

て、60cm角の角パイプを溶接して作製した梯子状のユニットを、図1にも示された梱包用の圧着ベルトで圧着してリユース可能な骨組架構を構成するアイデアを提示した[7]。これは上記の分類では摩擦系に属する。コンペではこの案が当選したが、諸般の事情で実現されていない。

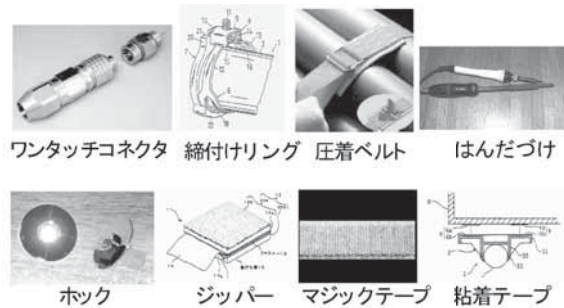


図1 着脱可能な接合方法

接合形式	線材+線材			線材+面材		
	Type-A	Type-B	Type-C	嵌合系	摩擦系	接着系
Type-A	適	適	不適	適	適	不適
Type-B	適	適	不適	適	適	不適
Type-C	適	適	適	可	可	適

図2 検討結果

2.2 次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構

21世紀鋼構造フォーラムによる前述の調査・研究において、着脱可能な接合部を有するリユース型の鋼骨組架構「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構」を提案した[6]。図3にその模型写真を、図4にその接合部概念図を示す。本架構は、図4左に示すような、柱にねじ締め接合された接合部ユニットへの締付けリングによる梁-柱接合と、図4右に示すような、メタルタッチによるピン継手形式の柱-柱接合からなっており、架構を構成する各部材の分解と再利用が可能となることを目指したものである。

柱の中間をピン継手とすることによる力学的な影響を明らかにするため、骨組モデルに対する静的応力解析を実施したところ、変形はやや増加するものの、反曲点位置が柱中間に来ることにより、柱およ

Innovative reusable structure composed by steel tapered column and steel flat-slab

Masaaki TSUJI, Mitsuo SEKI, Yosikazu SAWAMOTO, Satoshi KITAOKA, Susumu KUWAHARA, and Yasuyuki NAGANO

び梁の曲げモーメントが全体的に減少することが明らかとなった[8]. 図 5に解析した骨組の一例を, 表 1と表 2に解析結果の一例を示す. しかしながら, 架構の一部が塑性化した場合には, 一般的な剛接合ラーメンに比べて早期にメカニズムを構成することになり, リダンダンシーに乏しいのではないかと指摘もあった.



図3 ユニバーサル鉄骨架構模型写真

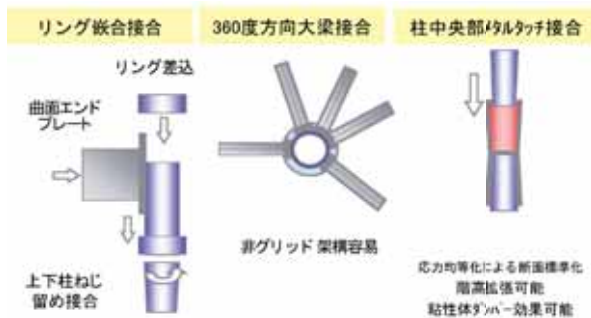


図4 ユニバーサル鉄骨架構における接合部

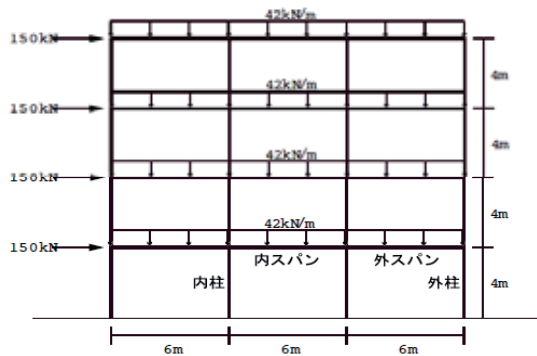


図5 骨組解析例

表1 柱中間をピン継手とすることによる部材曲げモーメントの増減 (△: 上昇, ▼: 減少)

層	外柱	内柱	階	外スパン梁	内スパン梁
4	▼ 16.7%	▼ 16.2%	R	▼ 16.7%	▼ 2.5%
3	▼ 13.5%	▼ 10.0%	4	△ 3.1%	▼ 2.0%
2	▼ 8.0%	△ 1.4%	3	▼ 0.3%	△ 3.2%
1	▼ 20.9%	▼ 9.0%	2	△ 14.2%	△ 8.6%

表2 柱中間をピン継手とすることによる層間変位と層変位の増減 (△: 上昇, ▼: 減少)

層	層間	階	水平
4	▼ 3.6%	R	△ 3.7%
3	△ 0.1%	4	△ 4.8%
2	△ 6.3%	3	△ 6.6%
1	△ 6.9%	2	△ 6.9%

2.3 テーパーピンを用いた柱中間ピン継手の水平加力実験および有限要素解析による力学性能評価

前記架構の実現のための一つのキーとなる, 柱 - 柱のピン接合について, テーパーピンと座金からなるピン継手を提案した. その概要を図 6に示す. テーパーピンが, 柱の相対回転を拘束することなく, せん断力を伝達する仕組みとなっている. 柱の端部エンドプレート間に挿入する座金の径を調整することで, 柱が相対回転を開始する曲げモーメントをコントロールすることが可能となる.

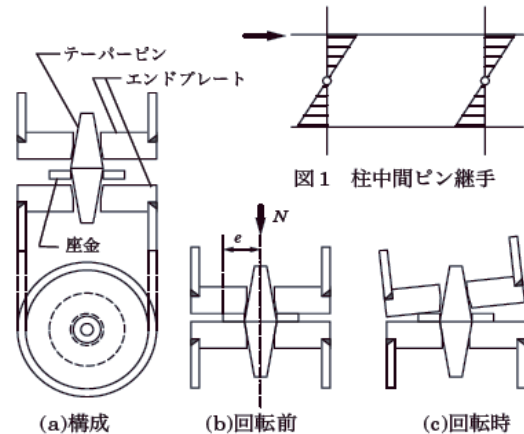


図6 テーパーピンを用いた柱中間ピン継手

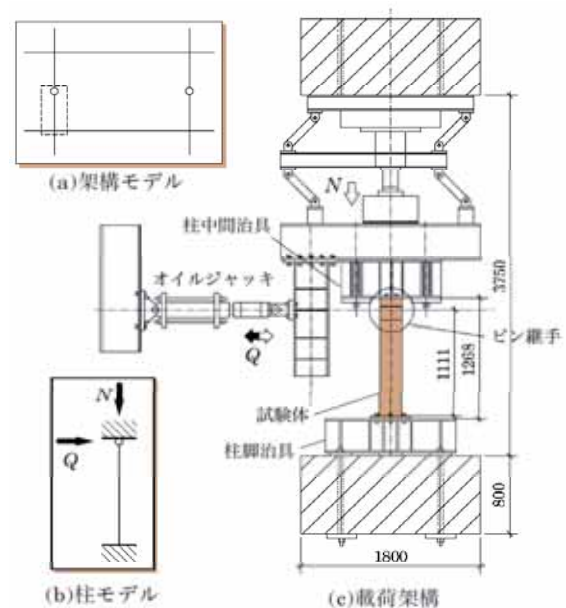


図7 実験装置概要

提案した継手が想定した力学性能を発揮できるかどうかを確認するため, 鋼管柱の一端を固定, もう一端に提案するピン継手を組み込んだ試験体に対して, 柱材軸方向力とそれに直交する力(せん断力)を同時に作用させる静的荷重実験を実施した[9]. 図 7に実験装置概要を, 図 8に実験により得られたせん断力 - 層間変形関係を示す. 図8中で, SS06-25およびSS09-25は, それぞれ 6mm 厚および 9mm 厚の普

通鋼座金を用いた場合で、LY09-25は9mm厚の低降伏点鋼を用いた場合である。また、SP-25は、比較のために実施した、球面加工した球座からなるピン継手の場合である。図中の破線は、継手が剛であったときの弾性剛性を、一点鎖線は、継手が完全にピンであったときの弾性剛性を示している。提案したピン継手は、いずれも、継手が完全にピンであるときとほぼ同等の剛性が実現できていることがわかる。

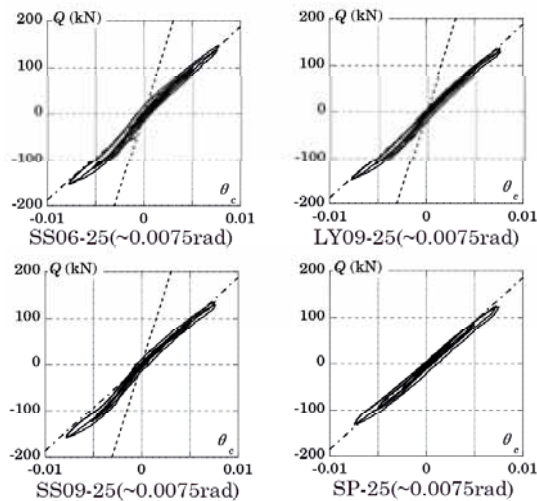


図8 実験により得られたせん断力 - 層間変形関係

2.4 ユニットセル構造システム

架構システムのリユースのためには、使用されている要素の種類ができるだけ少ない方が、不要な在庫を減らせること、部材の転用が容易に図れるといった意味で有利である。そこで、基本的には1種類の骨組構成部材から骨組架構を構築できる架構システムを提案した[10]。この架構システムのコンセプトを図9に、模型写真を図10に示す。

本架構システムは、一層分のユニットを積層する形式であるため、各層間に免震装置を挿入することで、一般の基礎免震構造に比べて小型の免震装置で同等の免震効果を得ることが可能な「多段免震構造」[11]を容易に実現可能である。

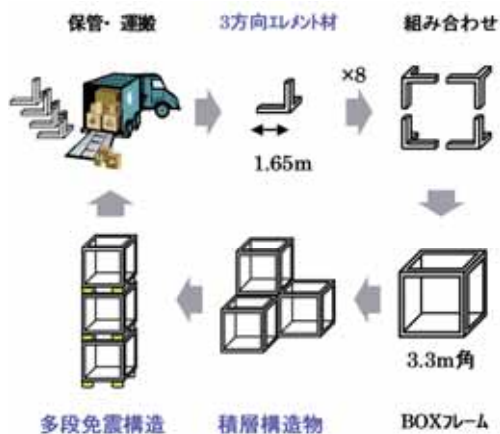


図9 ユニットセル構造システムのコンセプト



図10 ユニットセル構造システムの模型写真

2.5 取り外しと再接続が可能な柱継手

2.3で提案した柱継手は、曲げモーメントを伝達できず、かつ、引き抜きに対しても抵抗できない。力学的なリダンダンシーを確保する意味では、このような継手は構造的欠点ともなり得る。そこで、曲げモーメントを伝達でき、かつ、引き抜きにも抵抗できる機械式柱継手（必ずしも着脱可能とは限らない）について、あらためて既存技術のサーベイを行った。サーベイされた既存技術については、方法の概要とインターネットコンテンツの紹介に留める。(1)接合金物とコーナークリッパーをかみ合わせてボルトで締付ける[12]、(2)接合金物同士をねじ込みあるいはドリフトピンで接合する[13][14]、(3)階段状の断面を有する接合金物同士を、リングキーとセットボルトで締付ける[15]、(4)鋼管端部を内外の添接板によって挟み込み、これをボルトで固定する方法[16]。各技術の詳細は、末尾に挙げたURLを参照されたい。

3. テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の概要

3.1 架構の概要

上述した21世紀鋼構造フォーラムでのこれまでの調査・研究に基づいて、以下のような特徴を有するリユース型鋼構造架構を提案する。架構全体を図11に、柱と床スラブの接合部見上げを図12に示す。

- ・ テーパーを有する鋼管柱と、ユニット化されたスラブからなるフラットスラブ構造。
- ・ スラブユニットは、格子状に組んだ小サイズH形鋼と鉄筋コンクリートスラブの剛性床、あるいは、鋼折板を多層に溶接した鋼製床とする。
- ・ 柱は両端ピン接合とし、長期荷重のみを支持。
- ・ 柱のピン接合には、2.3に示したテーパーピンを用いたピン継手を用いる。
- ・ スラブのたわみを抑制することを目的として、柱頭には鋼板リブプレート放射状に溶接して作製したキャピタルユニットを設置する（スパンが短い場合には、キャピタルを設置せず、フラットプレート構造とすることも可）。
- ・ 水平荷重は、柱とは別途設ける水平荷重抵抗ユニットにより支持。

なお、建物規模としては5層程度まで、主スパンは

6～8m 程度，建物用途としては，季節建築物（海の家，イベント施設）・工事現場事務所・被災時避難施設（仮設住宅など）を想定している。

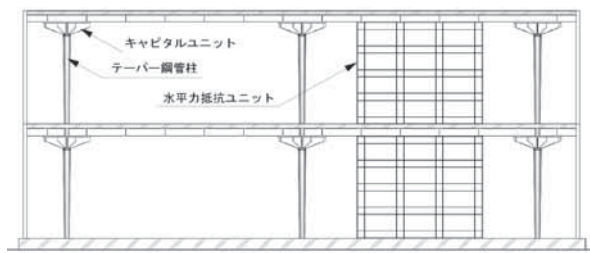


図11 架構全体図（断面図）

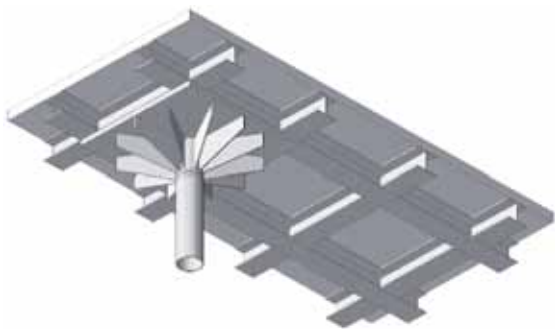


図12 スラブユニット - キャピタル - 柱頭部詳細

3.2 テーパー付き鋼管柱

昭和37年，高速道路網新設ラッシュに応じる形で主に道路照明用として，先端径が細くなったテーパースタブ柱が登場した。テーパースタブ柱の製造方法は，従来，金型プレスによる冷間成形方式が主流であったが，近年，電縫鋼管による冷間または熱間の回転圧延（スピニング）方式が実用化されている（図13）。この方式はテーパ率が高く（1/100～1/75），管の途中でテーパ率を変更することが可能である（道路照明用のテーパースタブ柱の製造範囲は下端の最大径が318.5mm，最大板厚9mmである）。

本架構でテーパースタブ柱を用いることとしているのは，主として，後述する柱 - 床スラブ接合部での応力伝達をスムーズにするためと，デザイン上の理由によるものである。

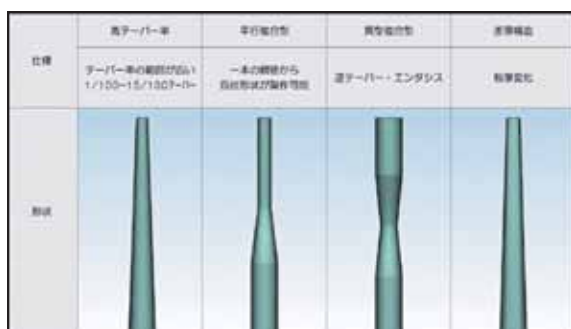


図13 回転圧延方式によるテーパースタブ柱（[17]より転載）

3.3 基本的力学特性

テーパースタブ柱とキャピタルを有するフラットスラブ

架構の弾性時基本的力学特性を明らかにするため，弾性有限要素モデルを用いたパラメトリックスタディを実施した[18]。ただし解析モデルは，柱頭はキャピタルを介して床スラブに剛接合，キャピタルはリブプレートを放射状に溶接したのではなく円錐状の鋼管，柱脚は床スラブに剛接合ないしはピン接合としたため，本稿で提示する架構システムとは力学特性に完全に同一というわけではない。

図14には有限要素モデルの一例を，図15および図16にはそれぞれ，鉛直荷重および鉛直荷重に対するたわみの解析例を示す。主たる結果を以下に述べる。

- ・ キャピタルは，床スラブのたわみを抑制するには有効である。
- ・ 水平荷重に対する水平変形は，キャピタルの有無やそのサイズにはほとんど依存しない。
- ・ 柱脚をピン接合とすると，架構の水平剛性が極端に低下する。

これらの結果を考慮して，3.1で述べたように，本研究で提案する架構では，水平荷重は柱には負担させず，別途設けた水平力抵抗機構に負担させることとした。柱に水平荷重を負担させないことにより，分解と再組立が容易なピン継手の導入が可能となる。

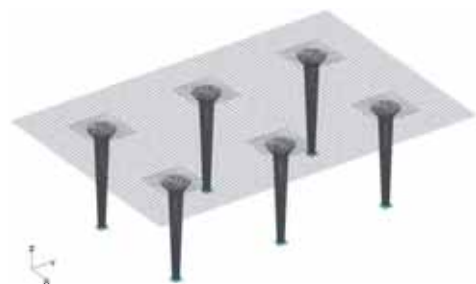


図14 有限要素モデル

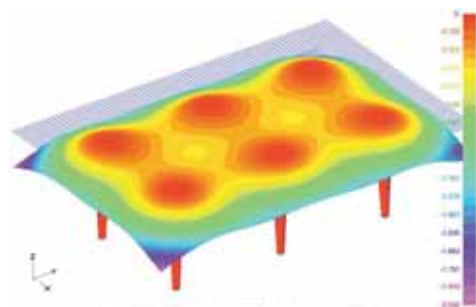


図15 鉛直荷重に対する変形



図16 水平荷重に対する変形（柱脚剛接合）

3.4. 分解と再組立が容易な柱 - 床スラブ接合方法

本架構では、架構を構成する各ユニットを、どのようにして接合し、分解と再組立が容易とするかが最大のキーとなる。21世紀鋼構造フォーラムでのこれまでの調査・研究成果を参考にして、図17に示すような柱 - 床スラブ接合方法を提案する。なお、図中の寸法（単位は mm）は参考寸法であり、最終確定値ではない。

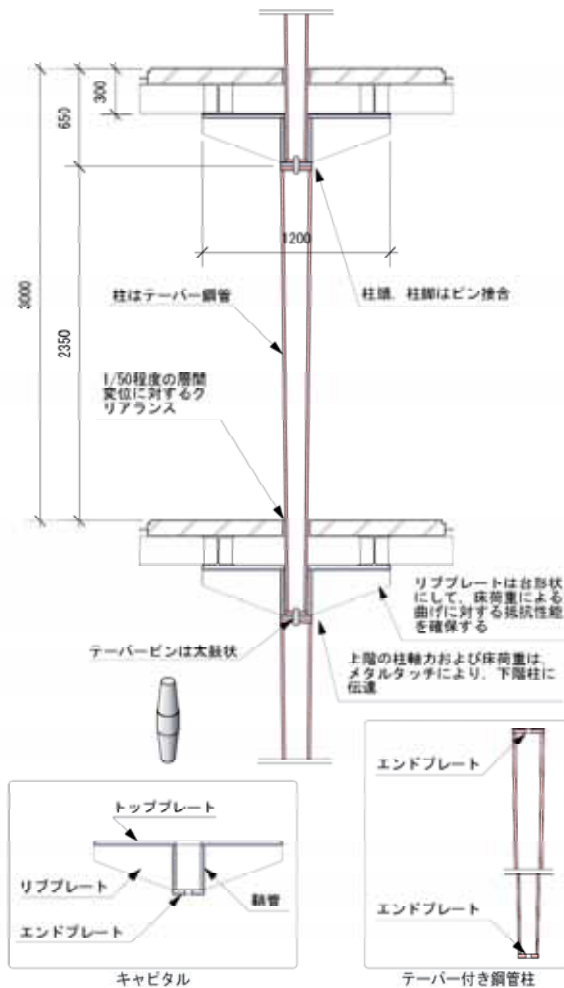


図17 分解と再組立が容易な柱 - スラブ接合方法

本接合方法は、以下のような特徴を有する。

- ・テーパ柱の柱頭部と柱脚部に溶接されたエンドプレートが、キャピタルの底部に溶接されたエンドプレートおよびエンドプレート間に挿入された座金を介して接触し、上階柱からの軸力をメタルタッチにより下階柱に伝達する。
- ・キャピタルのトッププレートと床スラブは高力ボルト接合とする。
- ・床スラブから柱への荷重伝達も、キャピタル底部エンドプレートと柱頭エンドプレートのメタルタッチにより行われる。
- ・テーパ柱の柱脚部は、キャピタルユニット内の鞘管に、鞘管管壁および床スラブと適切なく

リアランスを設けたうえで挿入される。建物が極大な水平荷重を受けた場合、柱脚部が鞘管管壁および床スラブと接触し、終局時水平耐力の上昇をもたらす。

なお、本架構はリユースを前提としているため、極稀に発生する外力に対しても、架構を構成する主要部材（鋼管柱、キャピタル、床スラブ）は弾性範囲以内に留まることを想定している。また、エンドプレート間に座金を挿入するのは、水平力作用時に隣接する2枚のエンドプレートに相対的な回転が生じたとき、座金に損傷を集中させ、エンドプレートを損傷させないためである。

4. 接合要素の有限要素解析による基本特性の把握

3節で提案した架構の実現可能性を検討するため、本架構の最も特徴的な箇所である、キャピタルユニットとテーパ柱の柱頭部を取り出して有限要素モデルを作成し、キャピタルユニットを構成する板材（リブプレートおよびトッププレート）の寸法や厚さ、柱鋼管厚や柱端エンドプレート厚、キャピタルユニットと柱端エンドプレート間に挿入する座金の径や厚さをパラメータとして、弾性解析を実施した。解析にはMSC Marcを使用した。解析に用いた有限要素モデルとその境界条件を図18に、解析結果の一例（Von Mises 応力分布）を図19、図20に示す。

有限要素モデルを用いたパラメトリック解析により、下記のことが明らかになった。

- ・柱外径よりも径が小さな座金をエンドプレート間に挿入した場合には、柱側、キャピタルユニット側双方のエンドプレートと座金外周の接触部に、大きな Von Mises 応力が生じる。
- ・エンドプレートの面外変形に伴って柱鋼管の端部にも面外変形が生じ、その結果として、柱端部にも中間部に比べて大きな Von Mises 応力が生じる。
- ・上記2つの応力に対して、座金の径およびエンドプレートの厚さが大きな影響を持つ。
- ・トッププレートの厚さは、上記2つの応力に対してはほとんど影響を持たない。
- ・トッププレート対角線方向のリブプレートと、トッププレート四辺に平行なリブプレートとを比較すると、前者の方により大きな Von Mises 応力が生じる。

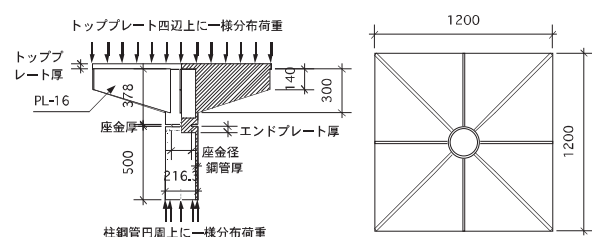


図18 有限要素モデルと境界条件

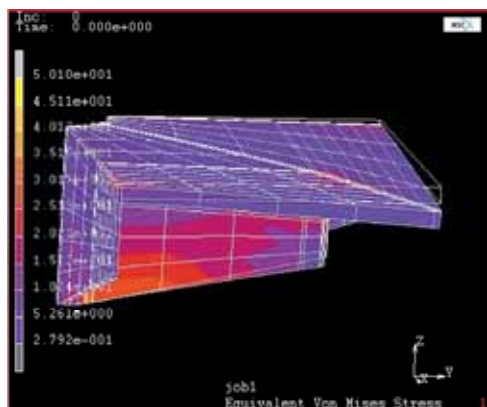
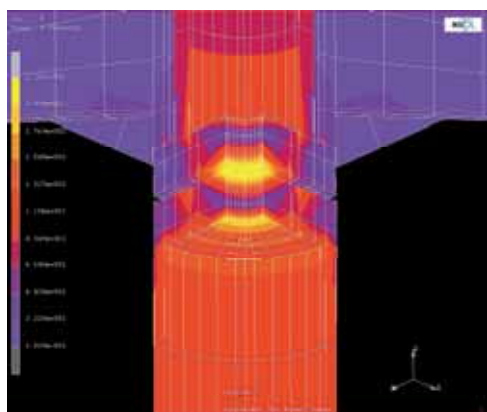
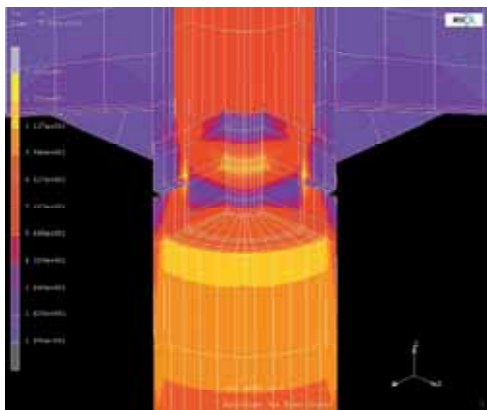


図19 解析結果の一例（トッププレートの変形とリブプレート表面に生じた Von Mises 応力）



(a)座金径 110mm



(b)座金径 140mm

図20 解析結果の一例（座金径による違い）

上記の結果も考慮して、スパンが6～8m程度、高さが5階程度までの規模の架構に対する標準的な接合要素寸法として、下記の値を設定した。エンドプレート厚：43mm、座金径：140mm、座金厚：9mm、柱鋼管厚：12.7mm、トッププレート厚：32mm。

5. 実大接合要素試験体に対する静的载荷実験

5.1. 実験概要

本架構の力学性能に対して最も影響を持つであろうと思われる、以下の2種類の接合要素に対し、実物大の試験体を作成し、静的な载荷実験を実施した：(1)柱 - キャピタル接合要素 (2)柱 - 柱接合要素。

5.2. 柱 - キャピタル接合要素に対する二方向载荷実験

実験に使用する試験体は、テーパ鋼管柱の柱頭部を表わすための柱要素、キャピタルユニット、格子梁ユニット、テーパピン、座金からなる。試験体の主要な寸法を図21に、試験体の構成を図22に示す。この試験体は、前節で提示した標準寸法に基づき製作した。図23に示すように、格子梁ユニットの四隅を反力床に鋼製土台を介して固定し、柱要素端部に取り付けたジャッキ取り付け治具に200kN級アクチュエータ（鉛直荷重V用）と200kN級オイルジャッキ（水平荷重H用）を接続し、静的な载荷を行った。トッププレート下面および格子梁下面での鉛直変位と、リブプレート表面でのひずみを計測した。変位とひずみの計測位置を図24に示す。

载荷経路は次のとおりである。(1-1)H=0のまま、Vを0から50kNまで漸増载荷、(1-2)Vを50kNに保ったまま、Hを0から2.5kNまで漸増载荷、その後、Hを除荷、(2-1)H=0のまま、Vを50kNから100kNまで漸増载荷、(2-2)Vを100kNに保ったまま、Hを0から5.0kNまで漸増载荷、その後、Hを除荷、(3-1)H=0のまま、Vを100kNから150kNまで漸増载荷、(3-2)Vを150kNに保ったまま、Hを0から7.5kNまで漸増载荷、その後、Hを除荷、(4-1)H=0のまま、Vを150kNから192.5kNまで漸増载荷。なお、鉛直力Vの最大値は、アクチュエータの载荷能力から決定されたものであり、使用した鋼管の降伏荷重（公称値で2,640kN）[9]に対しては十分に余裕がある。また、水平力Hの大きさは、鉛直力Vによって決まる座金とエンドプレートの離間モーメント $M(=V \times \text{座金半径})$ からアクチュエータの偏心による付加曲げモーメントを引いた値を、水平力作用点から柱要素の回転中心までの距離（425mm）で割った値から決定した。

図25に鉛直荷重と鉛直変位の関係を、図26に鉛直荷重とリブプレート表面の主ひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 およびせん断ひずみ γ の関係を、図27に鉛直荷重とリブプレート表面の Von Mises 応力 σ_{mises} の関係をそれぞれ示す。なお、Von Mises 応力は、三軸ゲージにより計測された三軸ひずみから主ひずみ ϵ_1 と ϵ_2 を計算し、その主ひずみを用いて弾性範囲以内であるものと仮定して計算したリブプレート面内の主応力 σ_1 と σ_2 から下式により算出したものである。

$$\sigma_{mises} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 \right]} \quad (1)$$

実験より、下記のようなことが観察された。

- ・トッププレート対角線方向のリブプレートと、トッププレート四辺に平行なリブプレートとを比較すると、前者の方により大きな主ひずみおよび Von Mises 応力が生じている。
- ・リブプレート内側（柱側）と外側（トッププレート四辺側）を比べると、前者により大きな主

ひずみおよび Von Mises 応力が生じている。
上記はいずれも、前節で示した有限要素解析の結果と対応している。

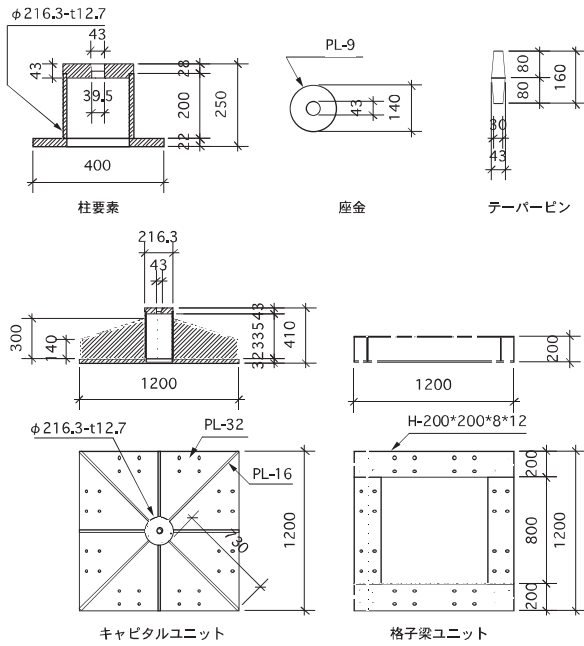


図21 試験体構成要素の寸法

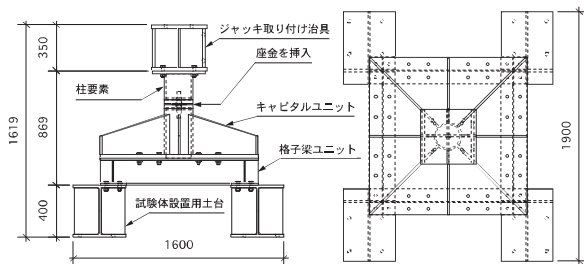


図22 試験体の構成

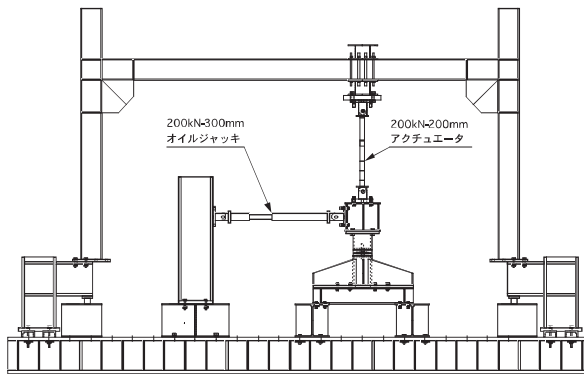


図 23 試験装置全体構成

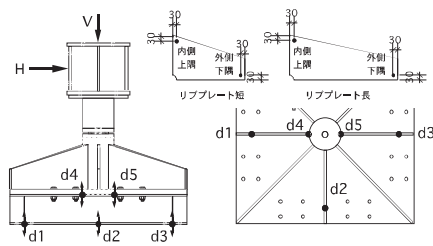


図24 ひずみと変位の計測位置

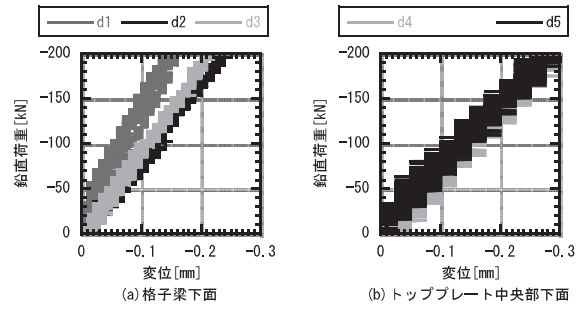


図25 鉛直荷重 - 鉛直変位関係

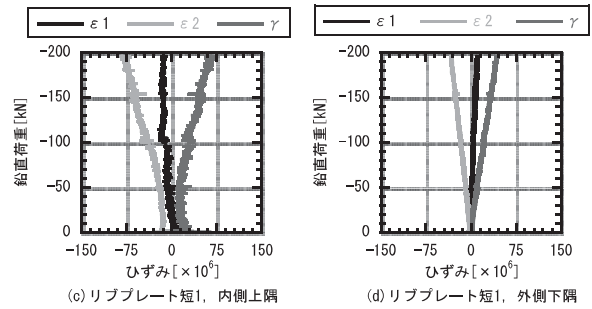
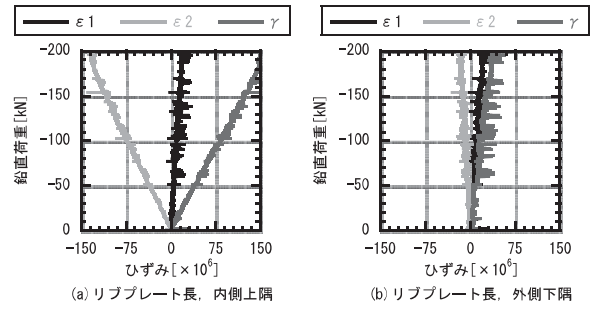


図26 鉛直荷重 - リブプレートひずみ関係

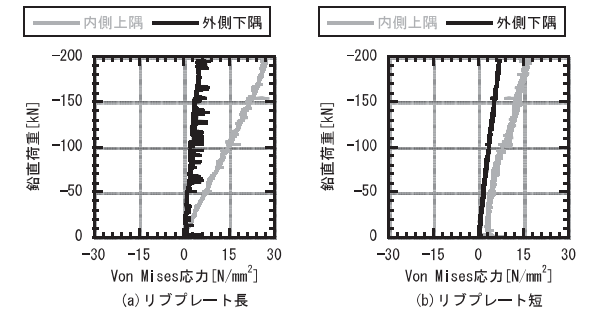


図27 鉛直荷重 - リブプレート Von Mises 応力関係

5.3. 柱 - 柱接合要素に対する一方向載荷実験

実験に使用する試験体は、テーパ鋼管柱の柱頭部を表わすための柱要素と、それに座金を介して上階からの柱軸力を伝達することになる、テーパ鋼管柱の柱脚部を表わすための柱要素とからなっている。試験体の寸法および変位とひずみの計測位置を図 28 に示す。鋼管には STK490、両柱要素のエンドプレートには SM490 (焼入れ処理はせず)、座金には SS400 鋼材を使用した。この試験体を 2MN (2000kN) 級万能試験機に挿入し、単調圧縮実験を実施した。

実験はまず、140mm 径の座金を 2 つの柱要素間に挿入して、試験機の性能上限まで載荷した後に除荷

し、座金のみを110mm径のものに取り換えて、再度、試験機の性能上限まで荷重した後に除荷した。図29には鉛直荷重と鉛直変位の関係を、図30には座金径が140mmの場合についての鉛直荷重とひずみの関係を、図31には鉛直荷重と Von Mises 応力の関係をそれぞれ示す。ただし、Von Mises 応力は、弾性時の応力 - ひずみ関係から算出したものである。

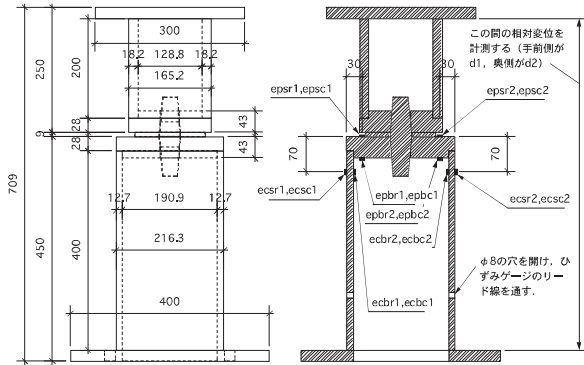


図28 試験体寸法と変位・ひずみ計測位置

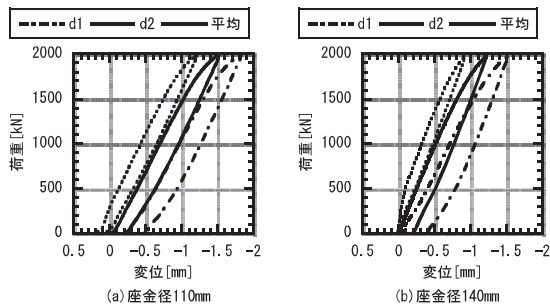


図29 鉛直荷重 - 鉛直変位関係

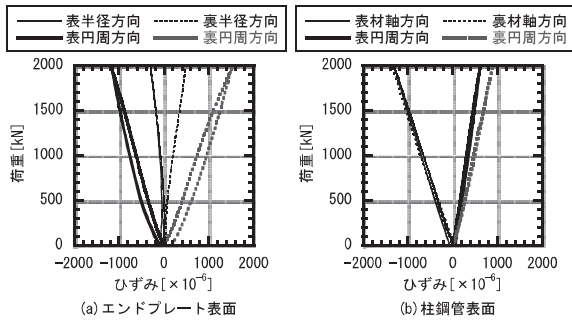


図30 鉛直荷重 - ひずみ関係 (座金径 140mm)

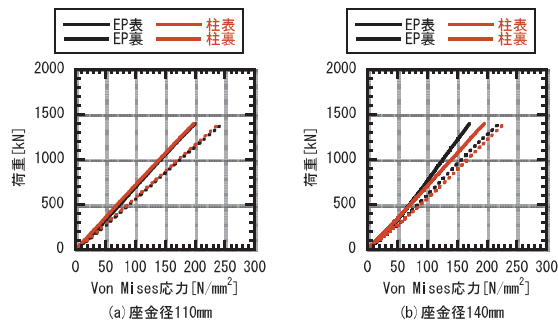


図31 鉛直荷重 - Von Mises 応力関係

実験より、下記のようなことが観察された。
 ・柱鋼管の降伏軸力 (公称値で 2,640kN) に比べて

かなり小さな鉛直荷重 (約 1,400kN) で、鉛直荷重 - 鉛直変位関係が非線形の領域に達している。これは、エンドプレートが座金の支圧により曲げを受け、一部で塑性化が生じたものと思われる。

- ・柱鋼管のエンドプレート近傍では、裏側 (内側) により大きな Von Mises 応力が生じている。これは、4 節で示した有限要素解析結果 (例えば図 20) と対応している。
- ・座金径が 110mm の場合と 140mm の場合を比較すると、前者の方により大きな Von Mises 応力が生じている。このことも 4 節で示した有限要素解析結果と対応している。

6. 試設計

テーパ付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の試設計を実施した。ここで、スラブユニットを構成する H 形鋼は、1,000N/m²の床荷重 (仕上げ) として入力している。また解析モデルでは、柱はテーパではなく、ストレート鋼管に置換している。耐震要素としては、ブレースを内蔵する耐震コアを組み込むものとした。図32に試設計モデル伏図を、図33に耐震要素構面を含む軸組図 (A'通り) を示す。構造計算には、建築構造設計システム「BRAIN」 (販売元: TIS 株式会社) を用いた。

表3に、設計用層せん断力と、それに対する層間変形角を示す。層間変形角については適切な耐震要素を設置することにより、全ての層で OK とすることができている。

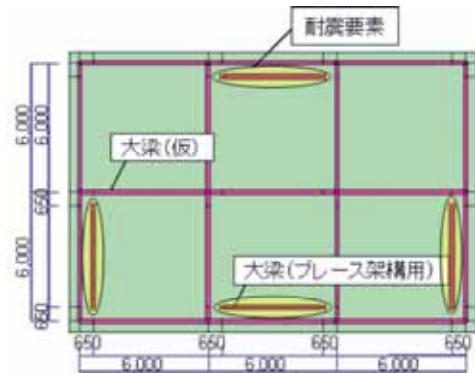


図32 試設計モデル伏せ図

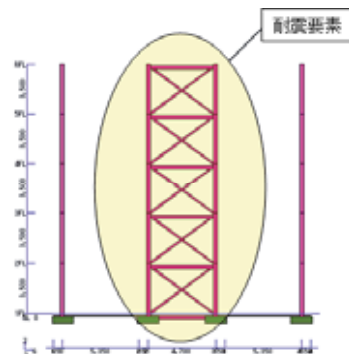


図33 A'通り軸組図

表3 設計用層せん断力と層間変形角

	階	階高 (m)	層せん断力 (kN)	平均層間 変形角	最大層間 変形角	層間変形角 判定
X	5	3.5	425	1/308	1/307	OK
	4	3.5	695	1/287	1/286	OK
	3	3.5	904	1/290	1/290	OK
	2	3.5	1063	1/326	1/326	OK
	1	3.5	1177	1/435	1/433	OK
Y	5	3.5	425	1/308	1/307	OK
	4	3.5	695	1/286	1/286	OK
	3	3.5	904	1/289	1/289	OK
	2	3.5	1063	1/325	1/325	OK
	1	3.5	1177	1/435	1/435	OK

7. 今後の研究課題

テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の実現に向けては、さらに下記のような項目について検討することが必要である。

- ・コストのスタディー
- ・リユース可能な耐震要素
- ・より薄く、シンプルな床版システム
- ・外装も含めたトータル建築システム
- ・小規模架構の実現

8. まとめ

本研究では、テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造を提案し、骨組モデル、有限要素モデルに対する解析、および、部分要素試験体に対する載荷実験により、実現可能性について検討し、技術的には十分実現可能であることを確認した。今後もその実現に向けて、理論的・数值的・実験的研究を継続する予定である。

謝辞

本研究は、日本鉄鋼連盟からの研究助成によるものです。また、本研究に際して、以下の方々から多大なご助言、ご協力を頂戴しました：21世紀鋼構造フォーラムの委員・協力委員の皆様、山田哲准教授（東京工業大学）、岡田郁夫様（大阪大学）、山下直紀様（同）、吉田亘利様（京都大学）、益田五男様（同）、松尾真太郎様（同）、岩本千明様（京都工芸繊維大学）、三井裕雄様（福井工業大学）。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] <http://www.fudenkou.jp/index.html>（普通鋼電炉工業会ホームページ）
- [2] 佐藤孝典ほか：リユース制震構造の開発 その1～その5，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），構造II，691-700（2003）
- [3] 會澤貴浩ほか：サステナブルビル構造システムの提案とその基本的特性，日本建築学会環境系論文集，第581号，109-116（2004.7）
- [4] <http://www.aluminum.or.jp/alken/katudo.htm>（アルミニウム建築構造協議会ホームページ）

- [5] 石井大吾ほか：リユース型リングパネル構法の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），構造III，527-528（2006）
- [6] 次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案，建築技術，2003年1月号，192-193（2003）
- [7] 日経アーキテクチュア2002年5月13日号
- [8] 山本真一郎ほか：リユースを目的として柱中間部をピン接合した鋼構造骨組の力学特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，Pa.No.22493（2004）
- [9] 岡田郁夫ほか：テーパーピンを用いたピン継手を有する鋼管柱の履歴性状（その1～その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造III，731-736（2005）
- [10] 21世紀鋼構造フォーラムWG1：ユニットセル構造システムの提案，鋼構造シンポジウム2004技術特別セッション21世紀鋼構造フォーラム発表資料，11-15（2004.11）
- [11] 辻聖晃，関光雄：各層間に免震装置を有する多段免震構造物の地震挙動，構造工学論文集，Vol.51B，255-260（2005.4）
- [12] www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/news/2005/co060110.html
- [13] caststeel.kubota.co.jp/j/jmc/jmc-b.html
- [14] www.gbrc.or.jp/contents/documents/center/gijyutu_n_insho_pdf/gbrcat_05-05.pdf
- [15] www.gbrc.or.jp/contents/documents/center/gijyutu_n_insho_pdf/gbrcat_01-12.pdf
- [16] www.ibrain.jp/kui.html
- [17] www.ypole.co.jp/pole/product/prd_003.html
- [18] 森津祥：テーパー付き鋼管柱を用いたリユース型フラットスラブ構造の基本的力学特性，平成17年度京都工芸繊維大学修士論文（2006）

5.4 展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究

- ①「動く」をテーマとして、部材や建物の形状を可変させることにより、施工方法や建築の用途を変えることが可能となる「展開構造システム」
- ②「感じる」をテーマとして、効果的な補強・補修対応を可能とし、自己診断やユニット化部材のリユース市場での評価方法への応用も視野に入れた建築物の「損傷制御構造」

本研究では、21世紀に求められる建築の姿としての「生きる建築」は、「感じた」結果として「動く」ことにより付加価値を高める建築であるものと考え、「動く」と「感じる」にテーマを絞って検討した。

「生きる建築」について「動く」と「感じる」にテーマを絞った展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究の結果を整理し、これまでに検討されていなかった展開構造システム・損傷制御構造において、幾つかの要素技術の提案と重要な要素となるセンシングについて検討を行い、21世紀における「生きる建築」のコンセプトモデルを示した。さらに、高性能要素技術である TRIP 鋼の活用法を明らかにするため、力学的性能及びモニタリング性能に関する基礎実験を行い、本鋼材の利用方法の検討及び素材の機械的性質や、損傷評価方法について検討を行った。

今回提案した地域防災制御システムのコンセプトモデルは、現段階での具体化の可能性について示したものであり、今後多くの課題を検討する必要がある。

TRIP 鋼については、機械的性質、塑性変形によるひずみの検知方法、及び構造部材への適用方法と一連の基礎実験を行い、今後の利用への端緒を得ることができた。

全体の研究活動を通して、21世紀の建築には何が必要かを考え、アイデアの検討や調査を行った。また、時には「建築の使命」や「今後どうあるべきか」といった思想的な議論も行われ、その結果として、地域防災制御システムのコンセプトモデルに結実した。本研究の成果は、今後の建築の向かってゆく1つの方向を示したものであり、今後の鋼構造建築の発展の一助となれば幸いである。

展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究

地域防災 可変構造 自己診断
自己修復 長 寿 命 リユース

金子佳生、鈴木隆生、大西宏治、形山忠輝、佐藤芳久、宮本則幸

1. はじめに

2001年に発足した21世紀鋼構造フォーラムの活動も第3期を迎え、3つのテーマ「生きる、進化する、解き放たれた」から派生する次世代の鋼構造の姿として、テーマ毎に議論を重ねてきた。ここでは「生きる建築とは何か」という命題から派生した鋼構造技術に関して、第1期では、図1から図3に示す21世紀の建築として「生きる建築」「地域防災制御」の考え方を提案し、建物単体としてだけでなく、特定地域の建物群としての地域防災制御システムのあり方を示した。また、色彩可変、自己診断、可変というキーワードによる要素技術の可能性を探った¹⁾。第2期では、第1期で示した地域防災制御の考え方を基に地震エネルギー集中型人工地盤²⁾およびユニット化構造システムの提案³⁾、さらに、それらを実現する高性能要素技術としてTRIP鋼および繊維強化金属について、より具体的な調査・研究を行った⁴⁾。

本稿では、第3期として、21世紀に求められる建築の姿としての「生きる建築」は、「感じた」結果として「動く」ことにより付加価値を高める建築であるものと考え、以下に示す「動く」と「感じる」にテーマを絞って検討した。

- ①「動く」をテーマとして、部材や建物の形状を可変させることにより、施工方法や建築の用途を変えることが可能となる「展開構造システム」
- ②「感じる」をテーマとして、効果的な補強・補修対応を可能とし、自己診断やユニット化部材のリユース市場での評価方法への応用も視野に入れた建築物の「損傷制御構造」

「生きる建築」について「動く」と「感じる」にテーマを絞った展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究の結果を整理し、これまでに検討されていなかった幾つかのキーワード「可変、自己診断、自己修復」の具体的な例を示すとともに、今後の可能性についての展望を述べる。さらに、各要素技術の具体的な利用方法の一つの考えとして、地域防



図1 生きる建築のイメージ

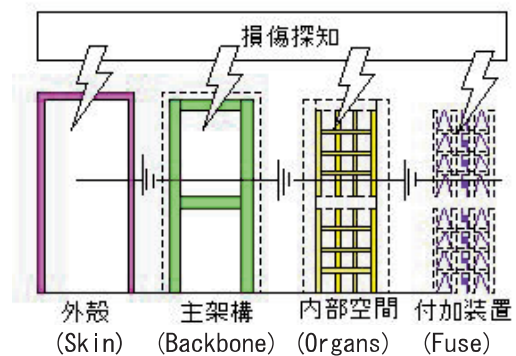


図2 生きる建築の構成要素

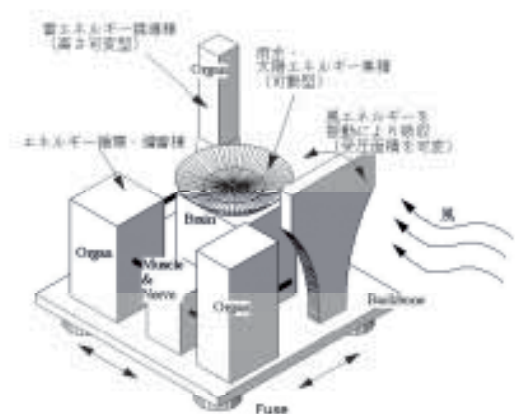


図3 地域防災制御のイメージ

災制御システムのコンセプトモデルの提案を行った。

さらに、高性能要素技術である TRIP 鋼の活用法を明らかにするため、力学的性能及びモニタリング性能に関する基礎実験を行った。

2. 展開構造システム

2.1 システム概要

展開すなわち形状が変化することで何らかの効果が出るものとして、①運搬時・施工時に効果が出るもの、②使用時に効果が出るもの、に大別される。

まず、コンパクトに折りたためることで運搬性が向上し、使用・設置時には必要形状に展開・変形する事例としては、身近なもので、テント、テーブル、椅子等のアウトドア用品、折りたたみ傘、風呂敷等がそれにあたる。建築物の場合も同様に、運搬・施工時にコンパクトな荷姿になり、設置時に所定の形態に変化できれば、それだけで工期・コスト・安全面で従来よりも優位に建設することができる。番傘をイメージした出雲ドーム⁵⁾のプッシュアップ工法(図4)などは、こうした展開構造システムを応用することで大幅な仮設構台の縮減がなされた事例である。また、運搬効率が重要視される宇宙構造物や災害時の仮設建物構築などにも大きな効果が期待される。

次に、建築物の一部が「動く」ことによって新たな機能を付加したものの事例としては、引き違い扉を大規模にした「開閉式ドーム屋根」やシザーズ構造(図5(a))を応用した「可動庇(awning)」などがあり、雨よけ、採光、遮光、通風、開放感といった機能を付加している。また、「跳ね橋」のように船・人車の動線干渉を回避したものや、「回転レストラン」や「観覧車」のように眺望の変化を得るものなどがある。

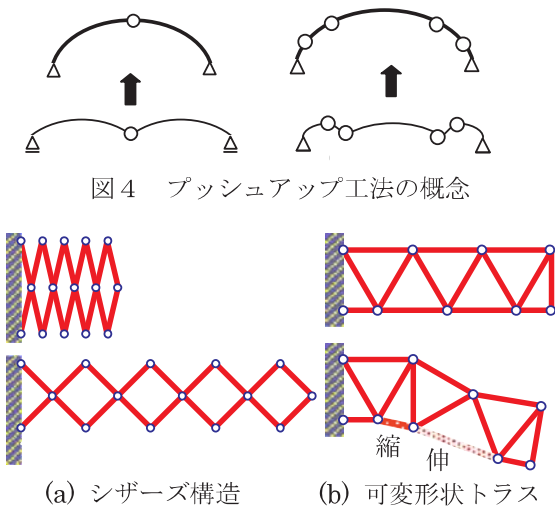


図4 プッシュアップ工法概念

(a) シザーズ構造 (b) 可変形状トラス

図5 可変トラス構造

このように展開構造システムは身近に存在し、展開方法の応用により今後さらに様々な付加価値が創出されるものと期待される。

2.2 要素技術

人を感知して扉が開閉する自動扉や煙を感知して窓が開く排煙窓はまさに「生きる建築」のよい実例である。ここでは、センサ技術と組み合わせて可動する要素技術案を示す。

(1) 可変ブレース

P波とS波の到達時間差を利用して何秒後にどの程度の地震による揺れが起こるかを発令するシステムが実現化してきた。あわてず「机の下に逃げる」「ガスの元栓を閉める」といった行動のための「心の備え」を得る効果の他、電車やエレベーターといった輸送・搬送システムを早期に停止させて被害を最小限にとどめる対応もなされてきた。しかし、もっと積極的にこのシステムを活用するためには、建物の損傷を回避する防災技術との連携が必要である。

そこで、通常時は躯体に収納され必要なときだけ耐震要素に変形して機能する「可変ブレース」をその一例として提案する。図6に可変ブレースの動作タイプを示す。このように軸長伸縮タイプでも軸長固定タイプでも動作可能であるし、減衰を付加するために軸材にダンパーを設置するなど様々なバリエ

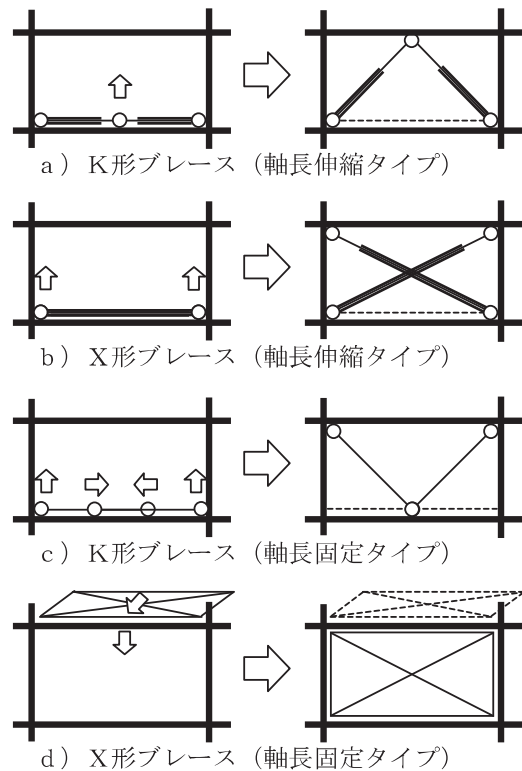


図6 可変ブレースの動作タイプ

ーションが考えられるが、共通の重要事項である「可動部の滑動・ロック機構」については今後の検討を要する。

図7に用途別ブレース配置と非常時の補強ブレース配置の例を示す。広い内部空間の確保を重視する場合はブレースを外壁側に配置し、外部空間への眺望（View）を重視する場合はブレースを内部空間に配置するなど用途に応じてブレース配置を変化させることが可能である。また、大地震時や補修・取替え時といった非常時には残りの収納されているブレースを利用して一時的な補強への対応も可能となる。このように可変ブレースは常時における空間利用の自由度を高める効果とともに、非常時における建物補強としての機能をあわせもった要素技術といえる。ただし、ある程度バランスを保持するためあらかじめ配置バリエーションを設定しておく必要がある。もともと使用空間での可変技術は、使用者が挟まらない等の安全面での対応が不可欠であることを忘れてはならない。

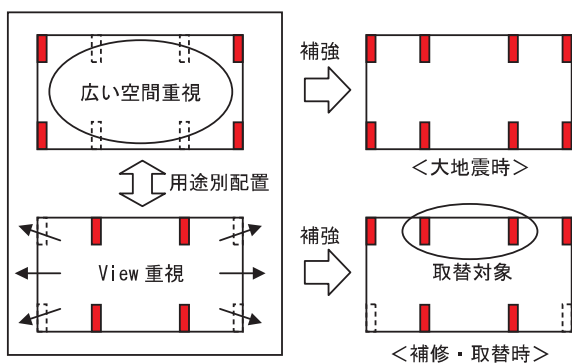


図7 用途別平面配置と補強例

(2) 可変周期免震構造

「可変ブレース」と同様に建物損傷を回避する防災技術の一例として、免震周期を可変させることで外乱による建物挙動を最小限に抑制する「可変周期免震構造」を提案する。

図8に免震周期の調整方法について示す。a) は免震装置自体の剛性が変化するもので、例えば積層構造となる部分の一部に磁性流体を含む層を設けた

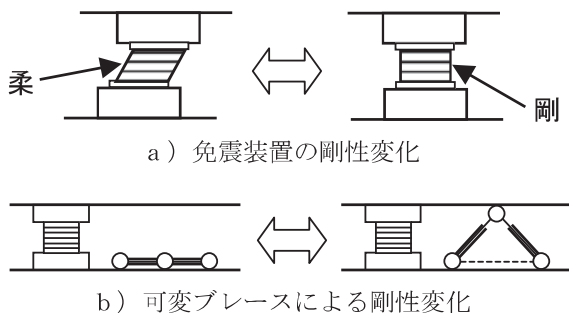


図8 免震周期の調整方法

装置が考えられる。磁性流体の磁場の強さによって見かけの粘性が変化する性質を利用したものである。また、b) は免震装置以外の部材によって免震層の剛性が変化するもので、例えば可変ブレースを免震層に配置する方法などが考えられる。

このように免震層の剛性を変えることにより建物の実重量の変動に合わせて最適な免震周期に調整したり、強風時に免震層の剛性を高くして変位を抑制したりすることが可能となるので従来の免震構造の制限緩和につながる要素技術であるといえる。

(3) 壁面可変形状システム

外壁形状を可変させることで風による建物の揺れを抑える「壁面可変形状システム」を提案する。図9に壁面可変形状システムのイメージ図を示す。

塔状比の大きな建物に風荷重が作用すると建物の外壁形状と風向きによっては、居住性能を著しく低下させる揺れが発生する。これに対し、外壁形状（全体形状または部分形状）を可変させることでカルマン渦のような周期的な風の乱れの発生を抑制したり、その周期をずらして建物との共振を避けるなど建物の揺れを最小限に抑えることができる。またこのシステムは、居住性改善のみならず設計外力である風荷重自体の低減やビル風対策、逆に風の通り道をつくることによる環境制御、多様な外装デザインへの対応、さらに内壁や天井に用いれば多目的ホールの音響調整幅の拡大など防災面だけでなく広い範囲にわたり活用できる要素技術である。

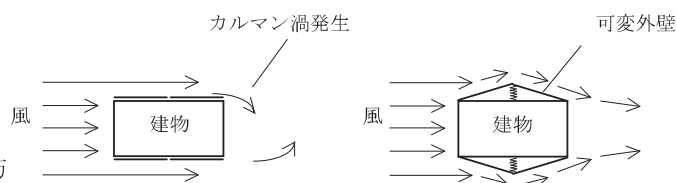


図9 壁面可変形状システム

3. 損傷制御システム

3.1 システム概要

損傷制御構造とは、一般的には主架構の損傷を防ぐために集中的にエネルギーを吸収するデバイス部材を配置した構造、すなわち損傷する箇所を限定する構造を示すが、ここではもっと広い意味で損傷した箇所を検知して補修対応を容易にする構造を示すこととする。

建物の長寿命化やリユースなど部材単位での長期間にわたる再利用への要求に伴い、新たに経年劣化や疲労の蓄積、軽微な損傷などに対する危険回避への必要性が高まってきた。したがって、これまでさ

ほど注意を払ってこなかった次に示す機能について克服していく必要がある。

- ①弱点（損傷箇所）を特定する「自己診断機能」
- ②軽微な損傷なら自ら修復できる「自己修復機能」

「自己診断機能」について、損傷には降伏や破断のように目に見える損傷と疲労のように目に見えない損傷があるので、まずはどの程度の「自己診断」が可能であるのかを調査する必要がある。

この機能により、トンネルや橋、鉄道のように診断対象が非常に大きい場合や原子力施設のように被爆の危険性があり容易に人が近づけない場所であっても遠隔操作で疲労、損傷等の被害の発生箇所・程度をすぐに検知し、迅速な状況把握と適切な安全対策を施すことで事故に至る前に危険を回避することが可能となる。

また、もし疲労度の認知ができれば、寿命の長さによって部材をランク分けして建物の要求グレードに応じて準用していくことができる。すなわち疲労度を知ることによって無理せず安心してより長く使うことが可能となり、部材のユニット化と併せて循環型社会におけるリユース市場への大きな一助につながる技術となる。

「自己修復機能」について、カサブタのように亀裂部分に安定した化合物が析出し、亀裂の進行を止める鋼材が開発されている⁶⁾が、建築の分野ではまだ実用化には至っていない。

このように損傷制御構造では、建築物を「人間」として捉えようとしている。人間の場合には、定期検診など医療技術の助けを得る場合の他、神経が主要な役割を果たしている。「生きる」建築では、この神経を代用するものとして、センサ技術が不可欠となってくる。

3. 2 モニターの対象

一戸建て、共同住宅ともに、ガス漏れ検知、火災の検知や防犯用監視モニターなど、現在でも建築分野では、センサが活用されている。これを荷重に応用するとしても荷重は適宜変化するものであり、時刻歴ごとの荷重をセンサによって把握することは、瞬間ごとの破壊予想箇所の把握、それに伴う避難計画にも有効であると考えられる。特に地域全体の防災を考えた場合には、対象とする領域が建築単体から広がるため、建物の構造計画では、「避難完了まで安全である」という前提が通用しなくなってくる。したがって、災害の発生を最小限に食い止める、という方向に変わっていくものと思われる。

現状においてセンサが有効に作用しているのは、

センサの対象がある程度特定されており、反応レベルがほぼ確定できるものに限られている。建物に想定される荷重の場合、状況によって許容される損傷レベルが変わることもあり、デジタルでその判定を行うことは難しいこともある。許容レベルがデジタル化できるだけのデータが蓄積されるまでは、モニタリングルームなどの集中制御システムが中心となる。モニターの対象例を以下に示す。

- ・犯罪防止
- ・構造変化（形状変化）
- ・構造体異常（躯体、免震・制震デバイス）
- ・開閉機構異常
- ・火災発生検知
- ・異常温度、湿度の検知
- ・漏水
- ・不審者・テロ発生
- ・地震速報受信と告知

3. 3 構造要素に関するセンシング

建築物の構造部材にかかる応力は、ランダムな上に、塑性域に入る場合もあって複雑なため、終局状態に至るまでの寿命を特定することは容易ではない。

しかし、制震・免震デバイス近傍に、ピーク時の変位（図10）を容易に計測できるセンサ（図11）を設置する場合であれば、破壊箇所があらかじめ特定されている構造要素であることから、安全側に寿命を短く設定することで当該センサとしての必要性を得ることができる。

また弾性限以下の応力に限定すれば、部材の状態を適切にモニターすることで、経年劣化や疲労寿命を推定することは可能である。ただし、経年劣化や疲労による損傷が生じそうな部位を特定し、残存の寿命がどのくらいとなるかを想定する方法であり、損傷した部位を直接見つけるのではない。

損傷箇所が予想と異なる場合、あらかじめ設置したセンサが有効にならないことや、弾性範囲の損傷状態を外観で判別することが困難な上、定量的に計

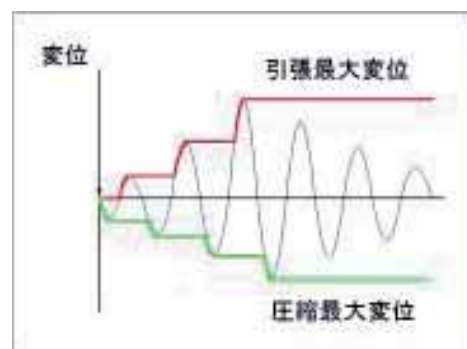


図10 最大変位測定イメージ図

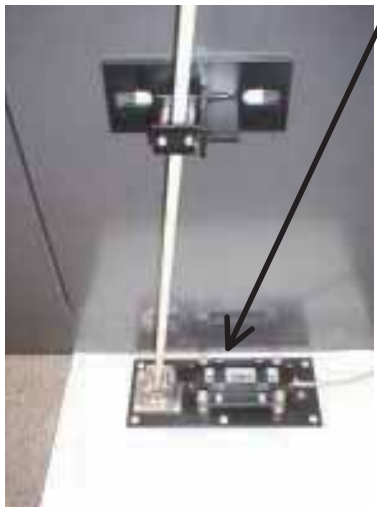
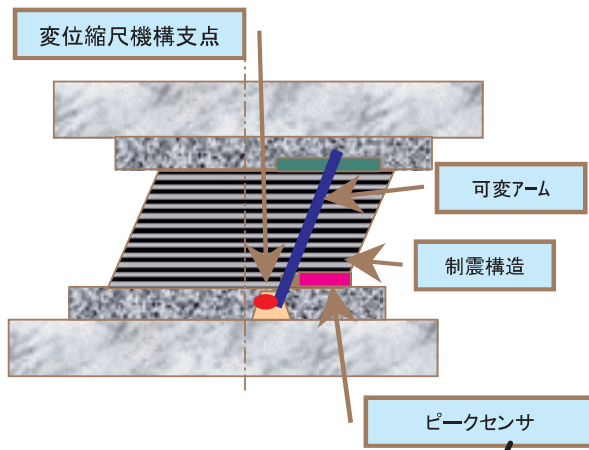


図 1 1 ピークセンサ

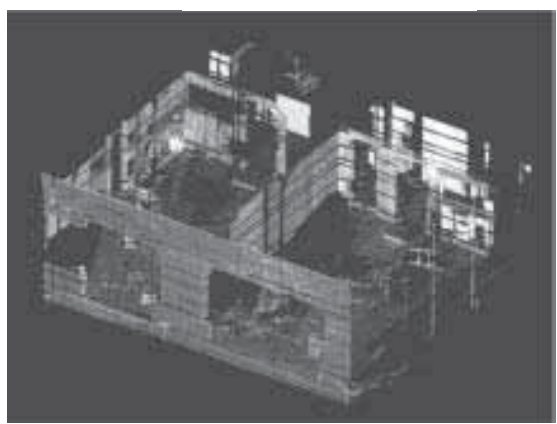


図 1 2 3次元レーザースキャナーによる測定例

測できる機器がなかったことなどの理由からモニタリング技術が充足していない状況であるが、21世紀の建築であれば、そこまで踏み込んだものが必要とされる。

3. 4 センサと建築物の将来

現在、建築物等の劣化状況（変位、たわみ、応力、

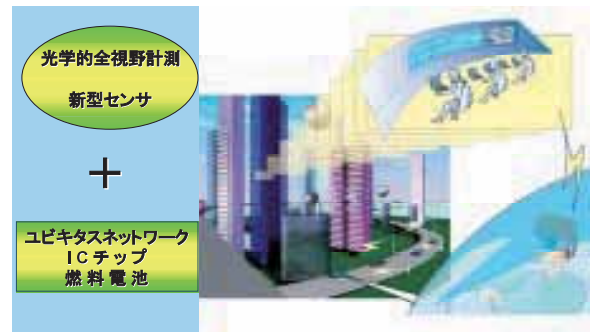


図 1 3 ユビキタスネットワーク社会のモニタリング

振動、ひび割れ、剥離、鉄筋腐食など）を調査する方法としては、目視からはじまり、磁気式、電気式、音、光等さまざまな原理を用いたセンサ技術が使用されている。一方、公共インフラに対するモニターを考えると、LCC（Life Cycle Cost）の低減という点からセンサ技術に求められるものに、耐久性・シンプル・安価・信頼性・リアルタイム等をあげる事ができ、光ファイバーやレーザーを用いたセンサやカメラ技術を駆使したセンサ技術の進歩が伺える。

また、IT技術の進化に伴い、デジタル化・無線化・高速化・省電力化と言った技術がシステム全体の様相を進化させており、遠隔・非接触において測定する技術が実現してきている。例えば、構造物の固有振動を計測する場合、レーザー変位計によって数百mの遠隔からの測定が可能であり、無線通信を駆使すればどこからでもその情報を得る事が可能である。

また、3次元レーザースキャナー技術を用いれば構造物の3次元データ（図12）を容易に取得することも可能である。あるいは、カメラ技術とその評価手法によって、分布的なひずみ特性の情報を得たり、パターン認識の解析によって、漏水の発見、異物発見等も可能である。このように、センサ技術としてのキーワードとしては、レーザー、赤外線、光ファイバー、超音波、電磁波、弾性波、カメラ、磁気特性などが挙げられる。

このように、センシング技術は時代とともに進化し、より高度化、高精度化していくことは間違いなく、その到達点は予想をはるかに超えるものと考えられる（図13）。しかし、ここで重要な事は、センシングしたデータの継続性である。データベースとして、管理機関や担当が代わろうとも、定量的に評価されたデータが継続的に受け継がれてこそ進化していくセンシング技術が本当の意味を持つものとなる。

4. 地域防災制御システム

4. 1 コンセプトモデルの概要

今まで述べて来た各要素技術および 21 世紀に求められる建築物の 1 つの姿として、具体的なコンセプトモデルをここで提案する。ここで具体化する地域防災制御システムは、主要構造部が「動く」展開構造のドーム屋根とそれを支えるセンター建物（メガストラクチャー）、そして道路、駐車場、公園等の公共空地やインフラ等を備えた免震化された基盤構造体で構成している。そして基盤構造体の上部に広がる共有地盤に中低層の建物群が建設されるものと設定する。以下に地域防災制御システムの概要を、図 1 4 に示す。

(1) 耐震・耐風性能

基盤構造体を免震構造にすることによって、地震に対しては共有地盤上の建物への地震入力が低減される。また、風、雪荷重に対しては、ドーム屋根とセンター建物（メガストラクチャー）が荷重を支えることとする。これにより、共有地盤上の建物に要求される構造性能は長期荷重と低減された地震力、耐久性に対して設定される事になる。

(2) 耐久性能

共有地盤上の建物は、建て替え後も継続使用することを目標としているため、長寿命を目標とする。地域防災制御システム自体のメインフレームは、弾性設計とし、仮にメインフレームの損傷が発生した場合には、それを早急に検知し、補修や交換を行う。

錆などへの対策のためにも、ステンレス構造の可能性についても検討する必要がある。

(3) 環境維持と防災性能

ドーム屋根を持つ地域防災制御システムであれば、内部の建物への、降雨、降雪、暴風の影響を制御することができ、外壁の断熱や防水なども簡素化が可能となる。また、最下階に貯水層を設け、雨水利用を図る事も可能である。

さらに、地表面における紫外線量の増加、酸性雨、温暖化など、これまで外乱として無視してきた問題に対しても、災害の一つとして意識し、対策を立てていく必要が求められてくる。これらの問題に対しても、地域防災制御システムは有効な解決方法となり得ると思われる。

4. 2 免震構造

建物の設計において考慮すべき荷重は、固定荷重、積載荷重、地震、風、雪と多岐にわたる。なかでも地震力は日本では重要度が大きい。したがって、共有地盤を地面から完全に切り離して地震力が伝達されないようにすることが理想である。この理想に近づける構造はやはり免震構造と考える。

免震構造で重要視されるのは、建物の固有周期と免震周期の調整であり、共有地盤上の建物の建設と取り壊しによる重量変動が基盤構造体の固有周期に大きく影響してしまう。地域防災制御システムは基本的には 1 街区で構造的に完結した形を想定してい

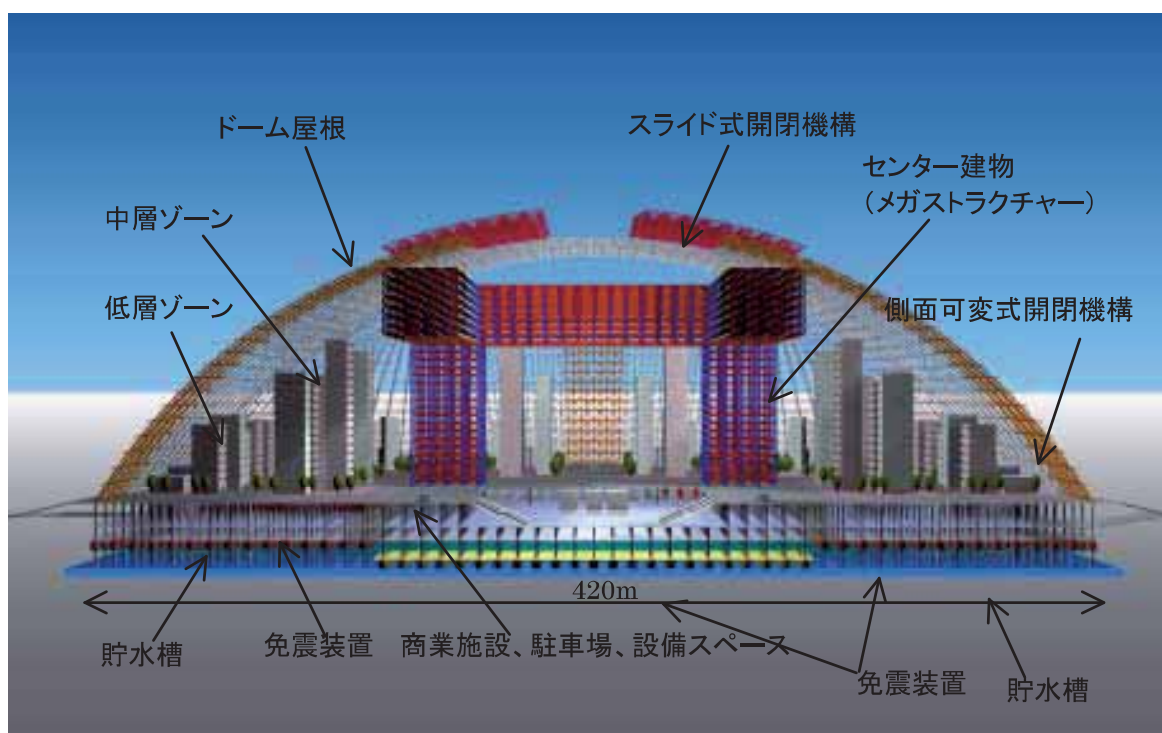


図 1 4 地域防災制御システムのコンセプトモデルの概要

るが、以下に示す2つの考えを取り入れることで免震化への制限を緩和することができる。

1つめは、1街区の地域防災制御システムが水平方向に多数連結している状況を想定する。振動モデルにおきかえればちょうど免震構造で用いる1massモデルが多数連結して大きな1massモデルが形成された状況(図15)である。

したがって、1街区の共有地盤上の建物重量が大きく変動しても全体の大きなmassに比べれば小さな重量変動にすぎなくなり、全体の免震性能への影響が極めて小さくなる。

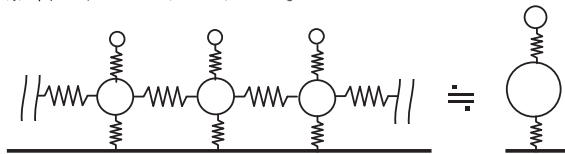


図15 街区の連結モデル

2つめは、1街区単独でもその重量変動を計測することで適切な免震性能を維持することが可能な可変周期免震構造とする方法である。

4.3 構造設計条件

(1) 建物重量

- ・平面 420m×420mの平面形状
- ・屋根形状より建築可能高さのゾーン区分を行い(低層ゾーン、中層ゾーン、センター建物(メガストラクチャー))、その敷地面積に想定した建ぺい率の建物が建つと仮定して、免震ダンパー設計用荷重を想定する。

- センター建物(メガストラクチャー) 150万kN (8kN/m²、平面形状約30m×30m、25層×4棟、連結部7層)
- 屋根 70万kN (2.5kN/m²、2層立体トラス)
- 低層ゾーン 100万kN (8kN/m²、約10万m²、建ぺい率40%、平均2層)
- 中層ゾーン 130万kN (8kN/m²、約4万m²、建ぺい率40%、平均10層)
- 基盤構造体 1250万kN (70kN/m²、盛土1.2m+3層分)

以上より、建物総重量を1700万kNと仮定する。

(2) 地震荷重及び風荷重

基盤構造体およびセンター建物(メガストラクチャー)、ドーム屋根は長期利用を考えるため、地震動については、稀に発生する地震動(レベル1)、極めて稀に発生する地震動(レベル2)に加え、巨大地震動(レベル3:レベル2の1.5倍の地震動を設定)に対しての検討を行う。また地盤については、第1

種地盤を想定した。風荷重については、基準風速(レベル1)に加え、基準風速の1.5倍の暴風時(レベル2)の検討も加える。

(3) 基盤構造体

基盤構造体は、8mスパンの各柱直下に1個の免震支承を配置する。免震のシステムは、天然ゴム系積層ゴム支承と弾性すべり支承にオイルダンパーと鋼

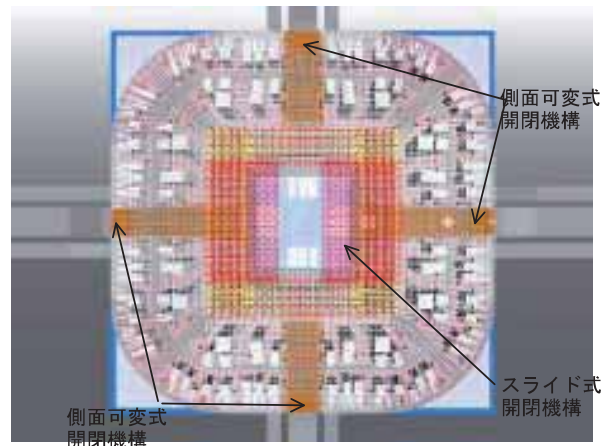


図16 ドーム屋根の外観図

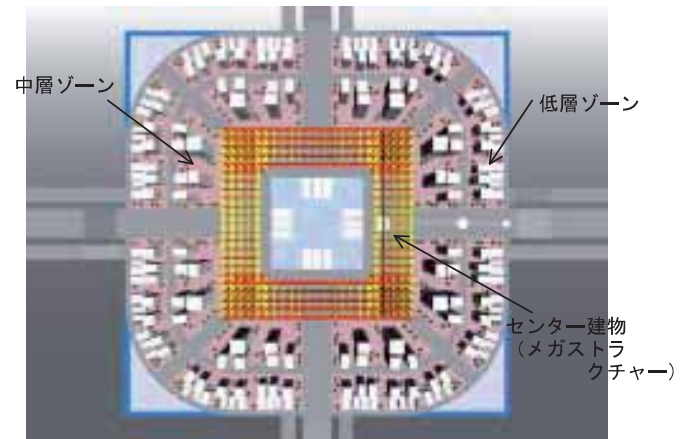


図17 ドームの内部図

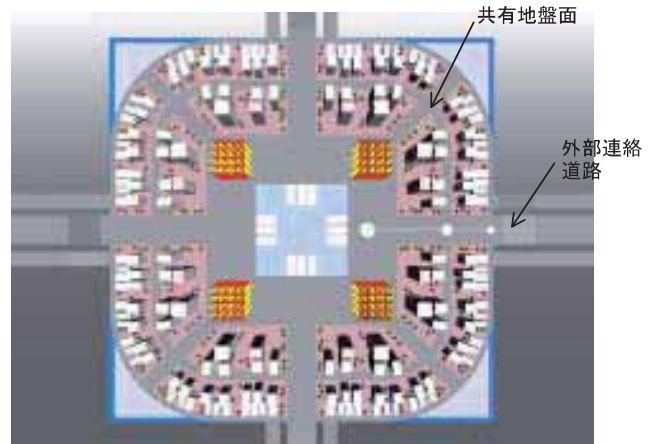


図18 2階平面図(共有地盤面)

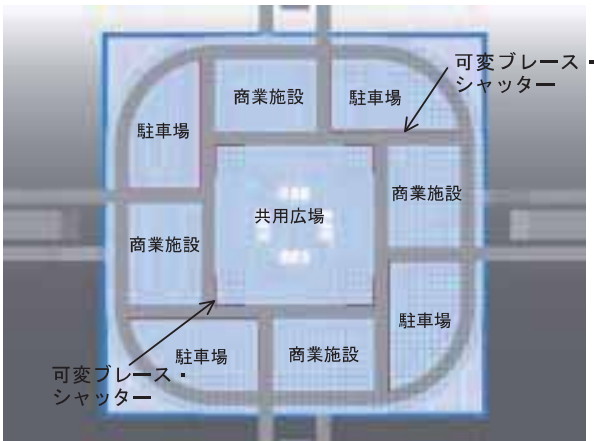


図 19 1階平面図

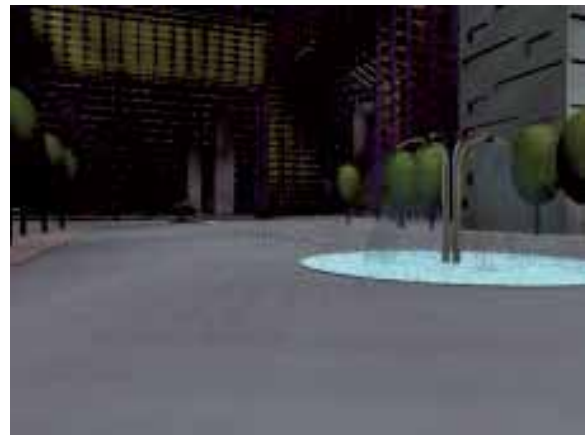


図 22 内観パース

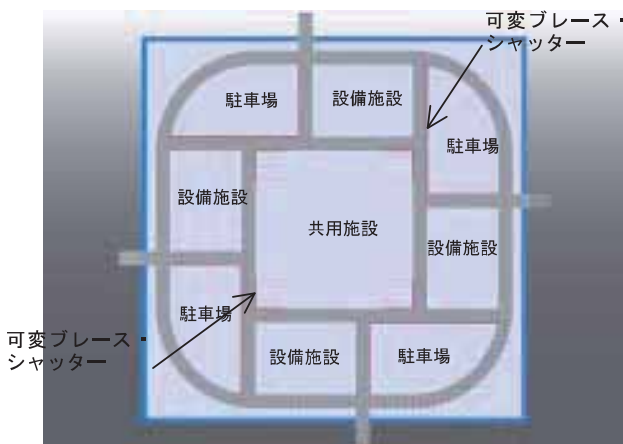


図 20 地下1階平面図

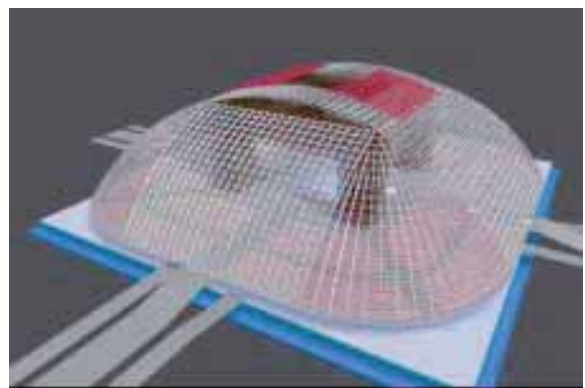


図 23 スライド式開閉機構

積層ゴム支承、弾性すべり支承、オイルダンパー、鋼製ダンパー

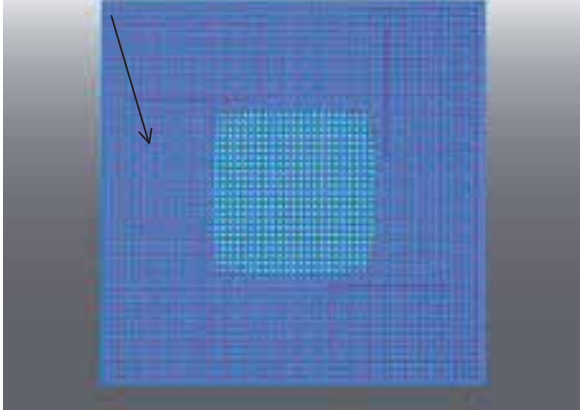


図 21 免震層部分平面図

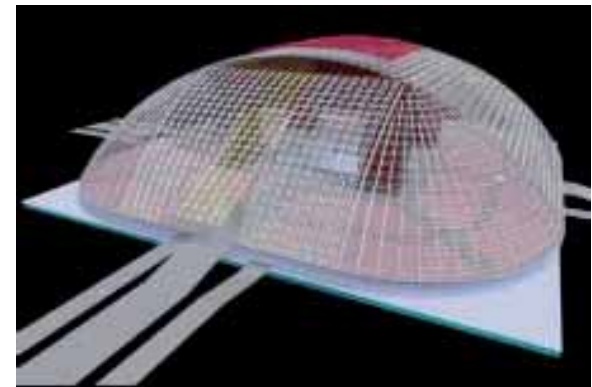


図 24 側面可変式開閉機構

材系ダンパーを適切に加えた組み合わせとし、目標周期は約 5 秒とした。また図 16～図 24 に全体の詳細図を示す。適宜ブレースを配置し各層の剛性を確保している。共有地盤面には、予め柱を納める鞘管がセットされており、柱の脱着により中低層建物の変更を可能にした。基礎はマットスラブによる直接基礎とする。免震層の復元力は、闇雲にケーススタディを行うのではなく、例えば図 25 の概念図の

ような加速度スペクトルと変位スペクトルから免震層の応答値を予測し設定すると良い。応答スペクトル法を用いた応答予測は種々提案されたおり、例えば「平成 12 年建設省告示 2009 号」などがあるが、どの手法を用いるかは設計者の判断に委ねたい。

図 26 や図 27 のように対象の地盤での応答スペクトルからターゲットとする固有周期領域や応答値を概ね掴み、復元力を設定する。

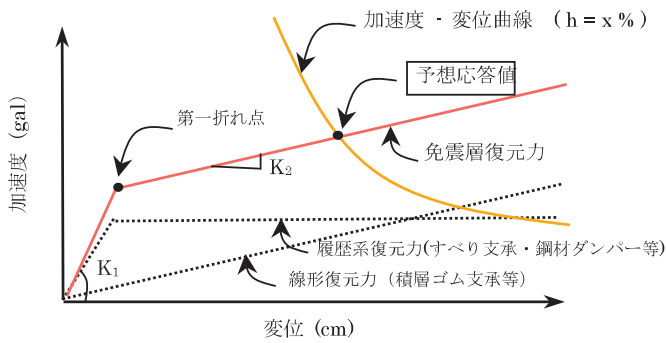


図 2 5 設計用地震動 (レベル 3 地震時)

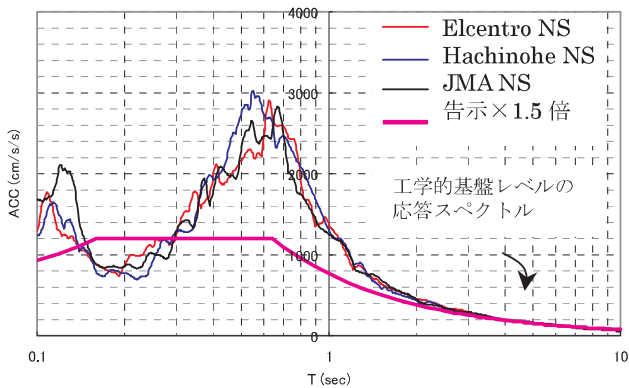


図 2 6 加速度応答スペクトル (レベル 3 地震時 h=5%)

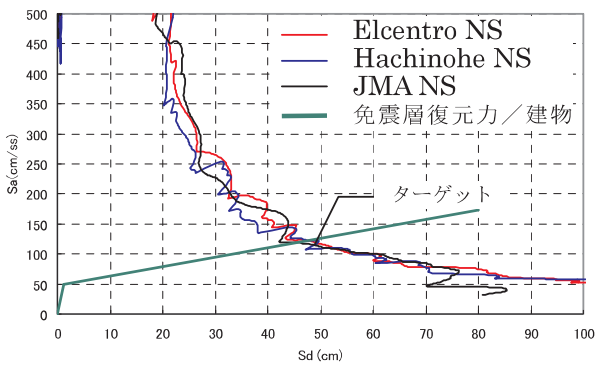


図 2 7 加速度-変位応答スペクトル

本検討においては、およそ 50cm 変形時に地表面に増幅された地震波が工学的基盤における加速度応答スペクトルレベルとなる等価周期が 4.0sec 程度となるように復元力特性を設定することとした。具体的な復元力の目標値は、以下とした。

- ・ 第一折れ点でのせん断力係数 $C = 0.05$
- ・ 初期剛性 K_1 での固有周期 $T_1 = 1.0\text{sec}$
- ・ 接線剛性 K_2 での固有周期 $T_2 = 5.0\text{sec}$

(4) センター建物 (メガストラクチャー)

約 30m×30m のメガ柱・メガ梁より構成される 4 本柱の構造体である。ドーム屋根の荷重を支持し、免震周期に対し十分な剛性と耐力を確保する。

(5) ドーム屋根

直径 300mm の鋼管により構成される 2 層立体トラス構造である。トラスせいは約 3m で上下弦材はそれぞれ一定の曲率半径を有する形状である。センター建物 (メガストラクチャー) と基盤構造体により支持される。また頂部にスライド式、側面に可変式の開閉機構を設け、ドーム内の熱環境等の調節に活用する。

(6) 耐震・耐風目標

免震層は、レベル 1 の地震動に対しては、安定変形以内 (せん断ひずみ 125%)、レベル 2、3 に対して性能保証変形 (せん断ひずみ 300%) 以内とする。基盤構造体および上部構造は、レベル 1、2 の地震動に対して許容応力度以内、レベル 3 の地震動に対して概ね弾性耐力以下とする。

耐風目標は、レベル 2 の風荷重に対しても、免震層がすべらないこととする。検討の結果、設定した免震システムおよび基盤構造体、ドーム屋根、センター建物 (メガストラクチャー) は地震動・風荷重に対して概ね目標を満足した。

4. 4 センサ技術の考察

地域防災制御システムは長寿命が要求されることからセンサ技術は重要な役割を果たす。これより、地域防災制御システム全体の安全性を把握するため、モニタリングの必要事項として以下の項目が挙げられる。

(a) モニタリング場所

人間が目視できない、行き来できない場所等

(b) 無人化

機械 (ロボット) の使用

(c) 遠隔操作

モニタリング装置の無線化による遠隔操作

(d) 非接触レーザー光線等を用いたモニタリング

これらの項目について、ロボット技術を用いることによりセンシングを行う場所・時間の空間を大き

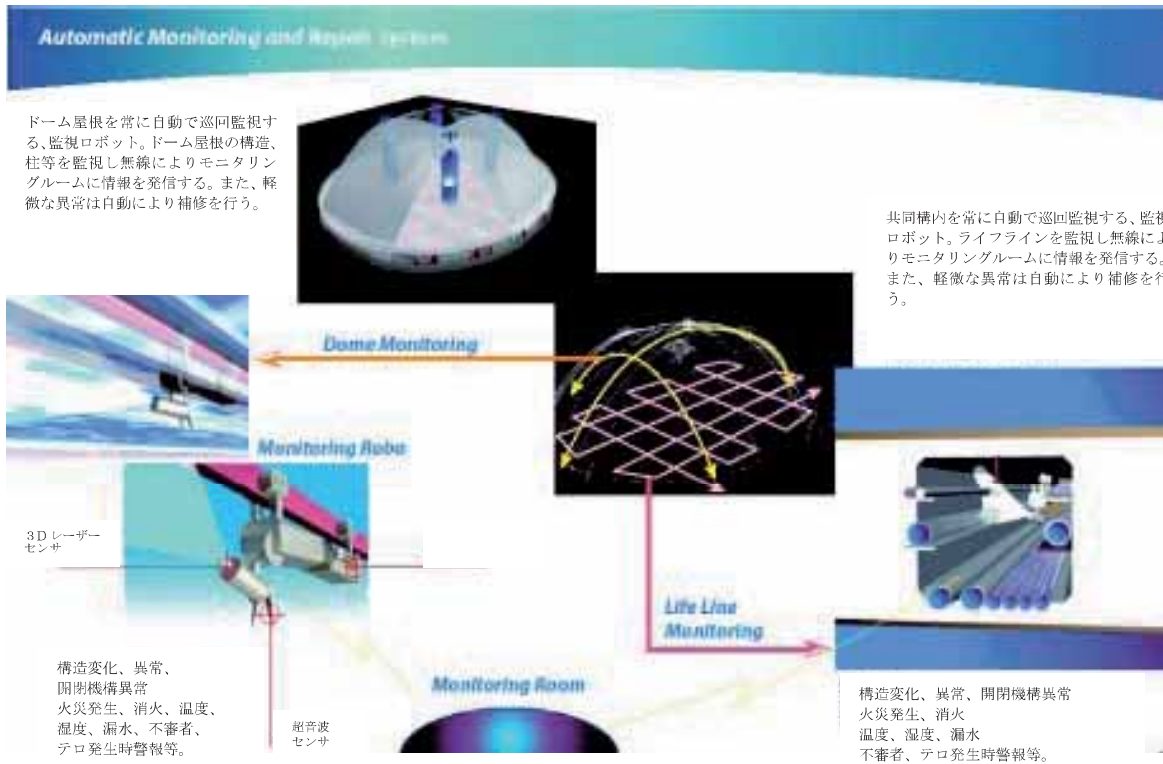


図 2 8 自動検査ロボットイメージ図

く拡大する事が期待でき、図 2 8 に示す自動検査ロボットイメージ図の様に所定の検査ルートによる安定したモニター情報の提供することにより、地域防災制御システム全体の安全性を確保することになる。

5. TRIP 鋼の損傷検出特性

5. 1 TRIP 鋼の概要

自動車部品の特定部位に使用される鋼板や一部のオーステナイト系ステンレス鋼には、図 2 9 に示すように、あるひずみに達すると原子の結晶構造として準安定のオーステナイトが、加工誘起マルテンサイトに変態し、強度、延性が増加する性質がある。このような変態現象の起こる鋼材は「変態誘起塑性鋼」、即ち「TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼」と呼ばれている⁷⁾。TRIP 鋼は、Zackay ら⁸⁾によって高強度・高靱性鋼として最初に報告され、Thompson ら⁹⁾によって構造安全性を簡単に検査することが可能なセンサとして活用するための研究が行われてきた。

本 WG では、この TRIP 鋼の利用方法を検討するため、文献 1 0)において自己診断機能を有する構造材料として検討された、Fe-Cr 系のステンレス合金である TRIP 鋼と通常ステンレス鋼(SUS304)の 2 種類の鋼材を用い、TRIP 鋼の損傷検出特性に関する

実験的検討を行った。

5. 2 TRIP 鋼の材料特性と応用

一般に、弾性領域を越える荷重を金属に加えると塑性領域に移行する。この過程で、オーステナイトに焼鈍されたステンレス合金は常温中でマルテンサイトに変態し、マルテンサイトの割合は塑性量に概ね比例する。この時、いったんマルテンサイトに変化した結晶は除荷した後も、オーステナイトに戻ることはない(非可逆性)。図 3 0 に示すように、通常の鋼材が引張力を受けると応力の最も大きい部分から塑性化してくびれが生じ、その場所から破断するのに対し、TRIP 鋼の場合は、応力の最も大きい部分

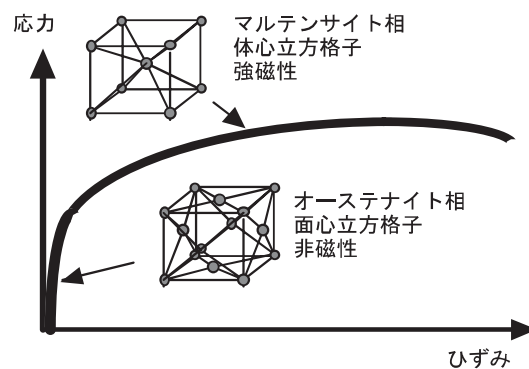


図 2 9 応力-ひずみ関係と結晶構造

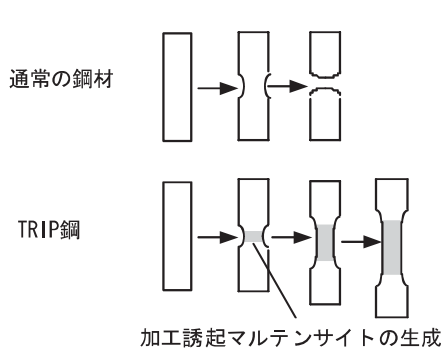


図 3 0 高靱性のメカニズム

からオーステナイトの一部が硬質で強度の高いマルテンサイトに変態していく^{11), 12)}。そのため、局部的に弱点となる部分を自ら変態することで増強し、塑性範囲が次第に広がっていき、50%以上の大きな均一伸びが得られる。さらに先述したひずみの増加に伴う、強磁性材マルテンサイト量の増加とその非可逆性を活用し、鋼材の塑性レベル（変形レベル）を変態したマルテンサイト量すなわち磁性の強さから、同定するヘルスマonitoring機構として活用することが考えられる。

これに対し、高靱性（高延性）能、高破断強度、磁性量に関連付けた最大ひずみ記憶能、さらに一部のオーステナイト系ステンレス鋼に見られるさびへの耐食性を活用した、以下のような新しい建築への応用も考えられる¹³⁾。(図 3 1 参照)

- ・鉄筋コンクリート部材の端部鉄筋への適用による損傷検出、及び部材端部の曲げ耐力上昇と塑性領域の拡大
- ・強度上昇と靱性能向上に着目したアンカーボルトへの適用による損傷検出と数量低減
- ・ダンパ鋼板への適用による損傷検出と等断面における塑性領域の拡大
- ・強度上昇と靱性向上に着目したスプライスプレートへの適用による損傷検出と数量低減
- ・プレス加工後の材料強度を重視する薄板構造、折板構造、冷間成形角形鋼管等への適用
- ・磁気測定結果及び損傷の程度を記録した IC タグへの適用
- ・損傷履歴付きのリニューアル部材への適用
- ・鉄骨ブレースに代表される耐震補強部材への適用

TRIP 鋼の磁気特性については、細径の鋼棒に一樣引張応力が作用する状態でのセンサ利用が主であったため、圧縮応力が作用した場合のデータが不足している。また、文献 1 0)においても、TRIP 鋼を構造材料かつ損傷診断センサとして用いた場合、構造物の累積ひずみに関係する量を診断できる可能性が

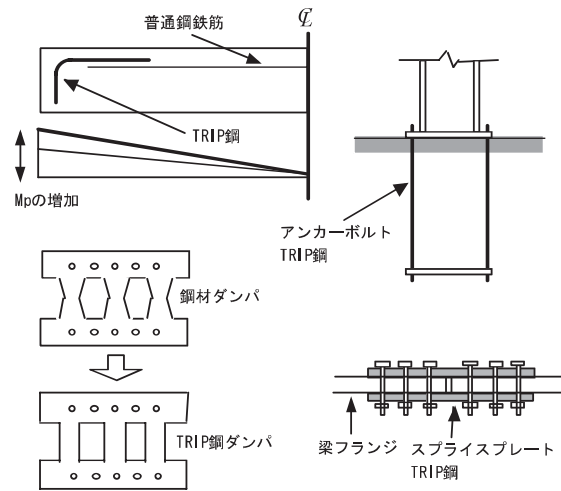


図 3 1 TRIP 鋼の新たな建築への応用

ある。一方、マルテンサイト変態量が外部応力方向に対して等方性を有しておらず、センサとしての実用性を高めるためには、マルテンサイト変態量に及ぼす応力方向の影響を把握する必要があることが指摘されている。このように、本WGが研究対象とした TRIP 鋼については、センサとして用いる研究がなされているが、主に「最大ひずみの検出」を目的としているため、引張応力状態での場合でしか検討されておらず、建築物の構造材等に適用するためには、今までの研究成果だけでは十分とはいえない。このような観点から、基本的な性状（引張、圧縮）を把握するための素材実験を行い、その機械的性質と最大ひずみの検出可否について確かめることや、通常のオーステナイト系ステンレス鋼についても比較検討することが望まれる。そのため、一方向及び交番繰返し载荷時の素材実験により磁気特性を把握し、通常のステンレス鋼(SUS304)との材料特性の比較を行うことは、実用化に向けた重要な研究課題である。

本稿では、棒鋼試験片を用いた引張圧縮载荷による応力・ひずみ関係と磁気の変化との相関に関する材料実験結果、及び既存構造部材の部分補修や損傷記憶用 IC タグとしての適用性を評価するため、平板試験片を用いた実験結果を報告する^{14), 15), 16)}。

5. 3 棒鋼試験片を用いた引張圧縮実験

5. 3. 1 実験概要

表 1 と表 2 に本研究で使用した TRIP 鋼の代表的な化学成分と機械的性質を示す。

試験体は、図 3 2 に示すように交番载荷時の座屈を抑制するため試験片平行部を短くした試験体 A（平行部 14 mm）と、磁性測定を重視するため試験

片平行部を長くした試験体 B (平行部 24 mm) の 2 種類とした。なお、試験体には加工により発生した磁性の消磁処理 (熱処理) を行っている。図 3 3 に測定方法を、表 3 に試験体概要をそれぞれ示す。ひずみ測定は、試験体 A・B 共に、試験体中央 2 面にひずみゲージを取付け計測すると共に、突起部分に支持プレートを用いて取り付けられたクリップゲージによる測定変位を標点間距離(試験体 A : 17.44mm、試験体 B : 26mm)で除して評価する。磁性の強さは、試験片平行部に取り付けた磁性測定コイルを用いて誘導電圧として測定する。試験体 A のコイル長は 8 mm とし、磁性の測定を重視する試験体 B のコイル長は、14 mm とする。TRIP 鋼の場合は、試験体 A・B に対して、引張载荷、圧縮载荷、交番载荷を行い、ステンレス鋼の場合は、交番载荷のみ行うこととした。図 3 4 に実験状況を示す。

表 1 TRIP 鋼の代表的な化学成分(重量%)

C	Si	Mn	P	S
0.01	0.003	15.3	0.001	0.003

表 2 TRIP 鋼の機械的性質

降伏点(N/mm ²)		引張強さ(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)	破断伸び(%)
0.1% オフセット	0.2% オフセット			
243	278	647	167	56.6

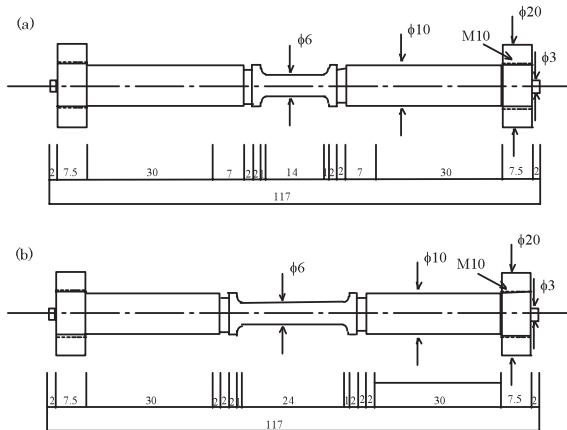


図 3 2 試験体形状 : (a) 試験体 A と (b) 試験体 B

表 3 試験体概要

試験体名	载荷法	試験体形状	材料
TRIP1A	引張载荷	A	TRIP 鋼
TRIP1B	引張载荷	B	TRIP 鋼
TRIP2A	圧縮载荷	A	TRIP 鋼
TRIP2B	圧縮载荷	B	TRIP 鋼
TRIP3A1、TRIP3A2	交番载荷	A	TRIP 鋼
TRIP3B1、TRIP3B2	交番载荷	B	TRIP 鋼
SUSA1、SUSA2	交番载荷	A	SUS304
SUSB1、SUSB2	交番载荷	B	SUS304

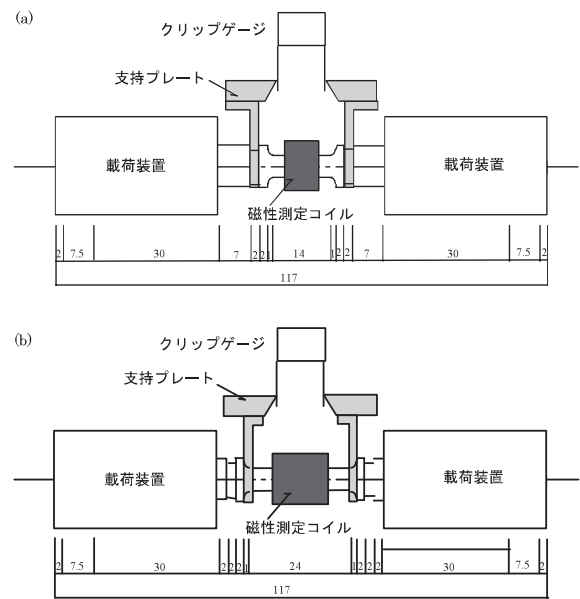


図 3 3 測定方法 : (a) 試験体 A と (b) 試験体 B



図 3 4 実験状況

各試験体の载荷用設定ひずみ履歴を以下に示す。

- ・引張载荷：
 $0_{-0.2\%_{+0.4\%_{+0.8\%_{+1.0\%_{+2.0\%_{+3.0\%}}$
- ・圧縮载荷：
 $0_{-0.2\%_{-0.4\%_{-0.8\%_{-1.0\%_{-2.0\%_{+3.0\%}}$
- ・交番载荷：
 $0_{\pm 0.2\%_{\pm 0.4\%_{\pm 0.8\%_{\pm 1.0\%_{\pm 2.0\%_{\pm 3.0\%}}$

载荷はクリップゲージの測定変位で制御し、载荷速度は、試験片平行部を短くした試験体 A に対しては、ひずみが概ね±0.2%までは0.01mm/min、それ以降は0.1mm/minとし、試験片平行部を長くした試験体 B に対しては、ひずみが概ね±0.2%までは0.0025mm/min、それ以降は0.025mm/minとした。

5. 3. 2 実験結果と考察

引張载荷を行った TRIP 鋼試験体の履歴性状を図 3 5、圧縮载荷を行った TRIP 鋼試験体の履歴性状を図 3 6、交番载荷を行った TRIP 鋼試験体の履歴性状を図 3 7、交番载荷を行ったステンレス鋼試験体の履歴性状を図 3 8、試験体形状 A の TRIP 鋼とステンレス鋼試験体の履歴性状の比較を図 3 9、試

験体形状 B の TRIP 鋼とステンレス鋼試験体の履歴性状の比較を図 4 0 にそれぞれ示す。図より、TRIP 鋼、ステンレス鋼ともに、試験片平行部の長さに依存しない応力-ひずみ履歴を示すのに対し、出力電圧は試験体の長さに依存し、ほぼコイル長比と同じ 2 倍程度の差異が生じていることがわかる。応力-ひずみ履歴に関しては、TRIP 鋼とステンレス鋼に明らかな違いが見られ、TRIP 鋼の高いひずみ硬化性状が顕著となっている。

また、ステンレス鋼は TRIP 鋼に比べて出力電圧が 10 分の 1 以下と非常に小さく、除荷時に出力電圧が低下するのに対し、TRIP 鋼は概ね载荷時の出力電圧を維持している。さらに TRIP 鋼は、応力方向に依存せず、引張・圧縮载荷ともに同様な出力電圧-ひずみ履歴を示し、ひずみが概ね±0.5%を超えたひずみ領域から出力電圧の上昇が顕著となり 30mV から 50mV の出力電圧オーダーにまで達し、既往の引張载荷実験結果¹⁾とも整合する。

これらの結果より、高強度・高靱性かつ自己診断材料としての TRIP 鋼の特性とステンレス鋼との違いが明らかとなった。

5. 4 平板試験片を用いた曲げ実験

棒材試験片の実験で得られた最大ひずみ記憶特性に関する材料基本情報に加え、平板試験片を用いて簡便な曲げ実験を行い、TRIP 鋼材損傷検出特性の部材への適用可能性を定性的に検討する。

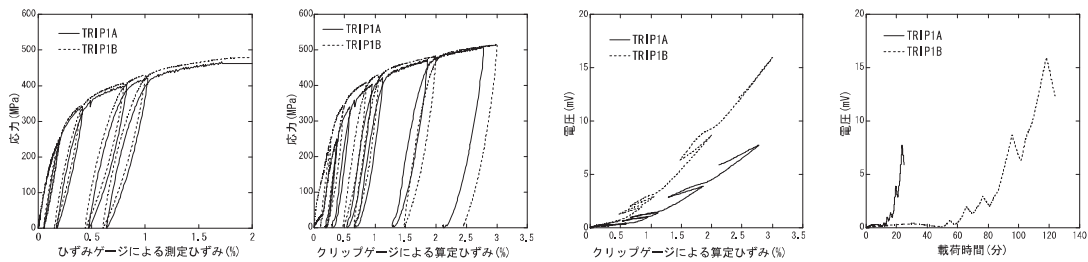


図 3 5 TRIP 鋼の引張载荷履歴性状

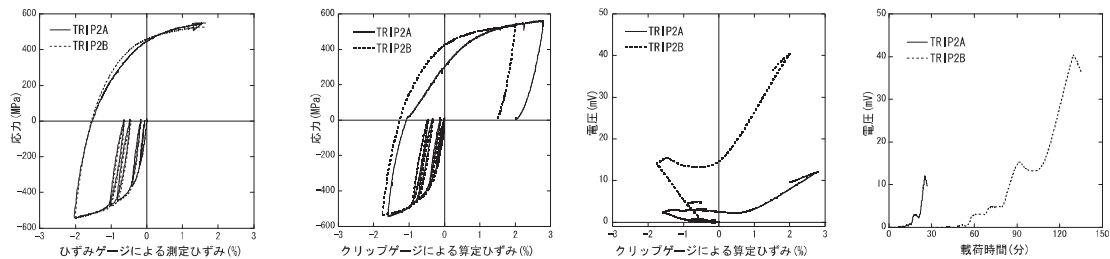


図 3 6 TRIP 鋼の圧縮载荷履歴性状

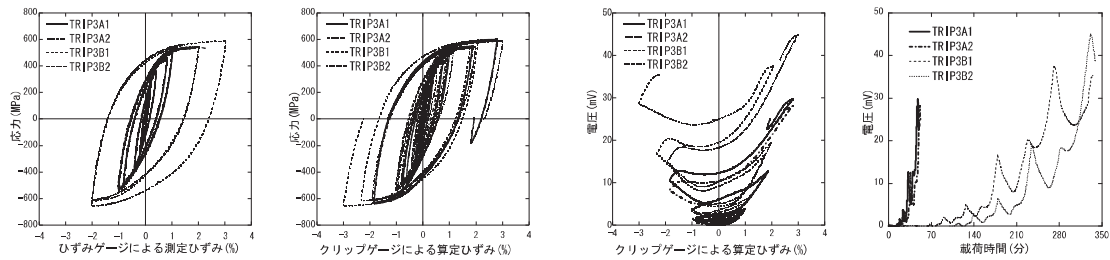


図 3-7 TRIP 鋼の交番载荷履歴

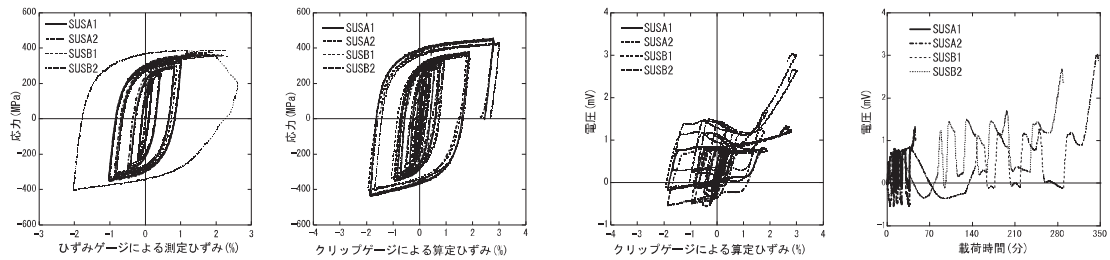


図 3-8 ステンレス鋼の交番载荷履歴

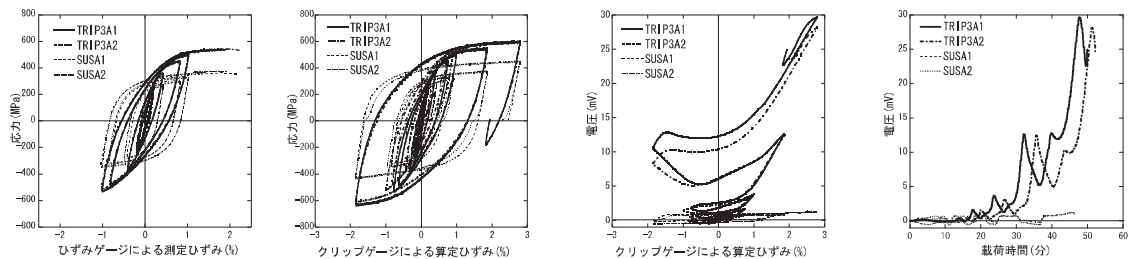


図 3-9 TRIP 鋼とステンレス鋼の履歴(試験体 A)

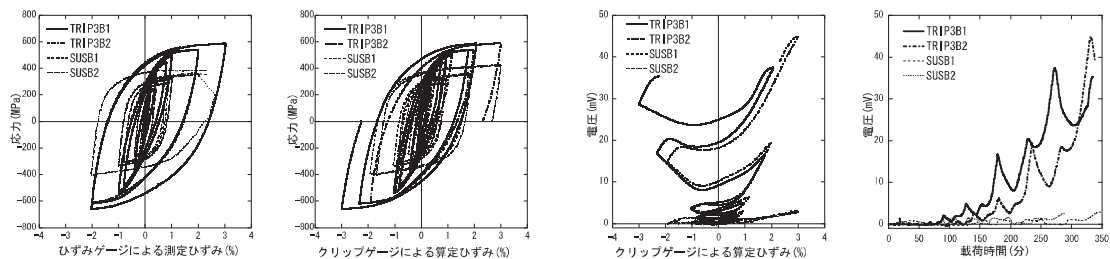


図 4-0 TRIP 鋼とステンレス鋼の履歴(試験体 B)

ここでは、TRIP 鋼板(PL-50×100×1.0)及びステンレス鋼板(SUS304: PL-50×100×0.8)を用い手で折り曲げ、板中央線に曲げ変形を与え磁気の検出を行い比較検討した。曲げ変形は、図 4-1 に示すように、平板の中央(図 4-2、図 4-3 に塑性変形させるように平板に曲げを加えた。なお、試験片には加工により発生した磁性の消磁処理を行っている。磁気の検出にはフェライトスコープを用いた。フェライトスコープは、内部にコイルの巻かれたプローブを試験

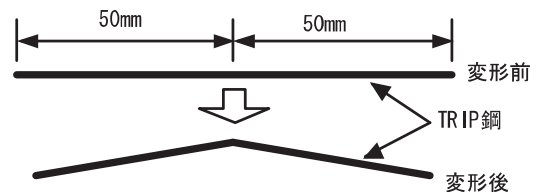


図 4-1 平板曲げ要領

(I)初期値 升目は1cm四方を表す

0.41	0.46	0.44	0.40	0.46	0.42	0.41	0.43	0.42	0.38
0.44	0.41	0.38	0.39	0.42	0.36	0.36	0.41	0.43	0.41
0.47	0.42	0.43	0.37	0.45	0.38	0.37	0.38	0.41	0.41
0.51	0.47	0.43	0.43	0.49	0.39	0.39	0.40	0.42	0.40
0.58	0.53	0.50	0.46	0.52	0.43	0.44	0.41	0.40	0.38

(II)第1回曲げ

0.44	0.46	0.47	0.67	1.80	1.40	0.54	0.45	0.44	0.39
0.46	0.41	0.37	0.55	1.90	1.80	0.48	0.44	0.46	0.41
0.45	0.42	0.37	0.58	2.00	1.80	0.50	0.41	0.43	0.41
0.51	0.48	0.44	0.59	1.90	1.70	0.51	0.43	0.43	0.39
0.58	0.52	0.51	0.67	1.70	1.60	0.60	0.44	0.43	0.40

(III)第2回曲げ(第1回曲げより大きな変形)

				2.20	*2.00			2.9	
				2.20	*2.80			2.6	
				2.00	*3.10			2.8	
				2.00	*3.00			3.1	
				2.10	*2.60			2.9	

(IV)第1回曲げ戻し

0.41	0.46	0.47	0.64	1.70	1.40	0.58	0.44	0.43	0.38
0.44	0.38	0.36	0.51	1.70	1.60	0.49	0.42	0.39	0.38
0.46	0.37	0.41	0.54	1.70	1.90	0.49	0.41	0.41	0.38
0.52	0.44	0.44	0.56	1.80	2.00	0.54	0.43	0.41	0.36
0.57	0.51	0.50	0.62	1.50	1.80	0.58	0.44	0.40	0.32

(V)第3回曲げ(第1回曲げと同程度)

				2.20	2.00				
				2.20	2.80				
				2.00	3.10				
				2.00	3.00				
				2.10	2.60				

(VI)第2回曲げ戻し(初期形状まで)

				2.10	*1.60			3.6	
				2.70	*2.10			3.0	
				2.40	*2.30			3.2	
				2.30	*2.70			2.9	
				1.90	*1.90			3.3	

図4-2 TRIP鋼実験結果

片に当て、厚さ方向に発生する渦磁場による誘導電流を計測することによってフェライト含有体積率(%)に相当する値を測定する装置である。プローブ先端の垂直方向数ミリ先の磁場まで検出されるため、プローブ先端部を鋼板垂直方向に完全に接触させ計測する必要がある。検出は鋼板を1cm四方のメッシュに区切り各メッシュの中央部について計測を行った。

実験では、曲げ変形を与えた後に変形を戻すことを繰り返し、その前後で計測を行った。図4-2にTRIP鋼の実験結果を示す。図中の数字は、フェライト含有体積率(%)を示す。図より、変形を与えた中央部に近いほど大きな計測値の増加が得られ、変形を戻した後も計測値は減少していないことがわかる。図4-3にステンレス鋼の実験結果を示す。図より、ステンレス鋼の場合は、若干の計測値の増加が見られたがTRIP鋼と比べほとんど増加していないことがわかる。

(I)初期値 升目は1cm四方を表す

0.21	0.21	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20
0.21	0.20	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20
0.18	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21
0.21	0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22
0.22	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.23	0.21	0.21

(II)第1回曲げ

0.21	0.21	0.21	0.21	0.24	0.22	0.21	0.21	0.21	0.23
0.21	0.20	0.21	0.21	0.24	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
0.21	0.21	0.21	0.21	0.24	0.21	0.22	0.21	0.21	0.21
0.20	0.21	0.21	0.21	0.25	0.22	0.21	0.21	0.22	0.22
0.21	0.21	0.21	0.21	0.25	0.22	0.21	0.21	0.21	0.20

(III)第2回曲げ(第1回曲げより大きな変形)

0.21	0.21	0.21	0.22	0.26	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21
0.21	0.21	0.21	0.21	0.26	0.24	0.21	0.21	0.21	0.21
0.20	0.20	0.21	0.21	0.26	0.23	0.22	0.22	0.21	0.21
0.21	0.21	0.22	0.21	0.26	0.24	0.22	0.21	0.21	0.21
0.21	0.21	0.21	0.22	0.27	0.23	0.21	0.22	0.21	0.21

(IV)第1回曲げ戻し

0.20	0.22	0.21	0.21	0.27	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21
0.20	0.20	0.22	0.21	0.28	0.24	0.21	0.20	0.20	0.21
0.21	0.21	0.21	0.21	0.28	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21
0.22	0.21	0.21	0.21	0.28	0.23	0.21	0.21	0.21	0.21
0.21	0.22	0.22	0.21	0.28	0.23	0.19	0.20	0.22	0.22

(V)第3回曲げ(第1回曲げと同程度)

0.21	0.21	0.21	0.21	0.29	0.25	0.22	0.21	0.21	0.21
0.21	0.22	0.22	0.22	0.32	0.26	0.21	0.21	0.21	0.21
0.20	0.21	0.23	0.22	0.32	0.26	0.22	0.21	0.22	0.22
0.21	0.21	0.21	0.22	0.31	0.26	0.22	0.21	0.21	0.21
0.20	0.21	0.21	0.22	0.29	0.25	0.22	0.22	0.22	0.22

(VI)第2回曲げ戻し(初期形状まで)

0.21	0.21	0.20	0.21	0.29	0.25	0.22	0.21	0.21	0.21
0.21	0.21	0.21	0.21	0.32	0.27	0.21	0.21	0.21	0.21
0.20	0.21	0.21	0.22	0.31	0.27	0.22	0.22	0.22	0.22
0.21	0.21	0.21	0.21	0.31	0.27	0.21	0.21	0.21	0.21
0.20	0.21	0.21	0.21	0.29	0.25	0.21	0.22	0.21	0.21

図4-3 ステンレス鋼実験結果

5. 5 部材実験

5. 5. 1 部材実験1

試験体は鋼製梁(H-100×100×6×8: $\sigma_y=387\text{MPa}$; SN490B)にTRIP鋼板(PL-50×100×1.0)を圧縮側と引張側のフランジに取り付け、鋼材が全塑性に達する載荷点変位の0.3倍、0.4倍、0.5倍、1倍、2倍、4倍の変位で制御した。取り付け方法として隅肉溶接(ソリッドワイヤ SE-50T)による部分溶接と全周溶接、さらに接着剤(共和ゲージ用接着剤 CC-33A)による取り付けの3種類を行い、磁気計測値への影響と接合強さについて比較検討した。試験体は4体でTRIP鋼板の取り付け方法が異なる。表4および図4-4に試験体概要を示す。なおTRIP-B4では鋼材の磁性が計測値へ与える影響を考慮しTRIP鋼板の下に非磁性材料である3mm厚の木板を挟んだうえで全周隅肉溶接を行った。

計測は鋼板曲げ実験と同様に鋼板を1cm四方のメッシュに区切り各メッシュの中央部について測定を

行った。溶接による TRIP 鋼板端部への熱影響を考慮し、比較対象とする数値は、図 4 5 に示すように 3ヶ所各 6 点の平均値を領域①・領域②・領域③の値とした。図 4 6 に示すように、接着剤による取り付け、全周溶接共に取り付け後で同程度の計測値増加がみられた。取り付けにより TRIP 鋼板が鋼材により密着したためであり溶接熱による磁気への影響は少なかったと考えられる。

図 4 7 に各試験体における荷重-ひずみ関係、荷重-載荷点変位関係のグラフを示す。鋼材が全塑性化するのに十分な変位を与えたが、TRIP 鋼板を取りつけた梁中央部において得られたひずみは 2000×10^{-6} から 3000×10^{-6} 程度であり概ね降伏点近傍のひずみである。

表 4 各試験体取り付け方法

試験体名	鋼材への取付け方法	鋼材と TRIP 鋼の位置関係
TRIP-B1	部分溶接	密着
TRIP-B2	全周溶接	密着
TRIP-B3	接着剤	密着
TRIP-B4	全周溶接	3mm 厚板挟み



TRIP-B1



TRIP-B2



TRIP-B3



TRIP-B4

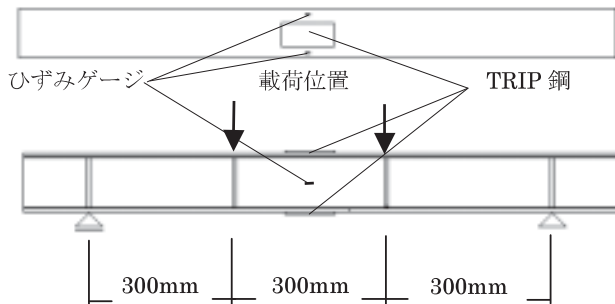


図 4 4 部材実験 1 の試験体概要

なお TRIP-B1 の試験体では鋼材が全塑性に達する載荷点変位の 2 倍、その他の試験体では鋼材が全塑性に達する載荷点変位の 4 倍の変位まで載荷を行った。

各試験体の領域①・領域②・領域③におけるフェライト含有量-ひずみ関係のグラフを図 4 8 に示す。ひずみ 2000×10^{-6} から 2500×10^{-6} の範囲において TRIP-B2 引張側でひずみの増加に伴うフェライト含有量の急激な増加が見られたが、その他の試験体では見られなかった。

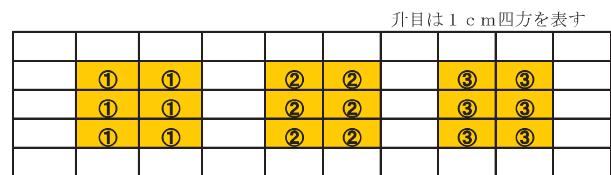


図 4 5 計測領域

(I)接着剤取り付け前

2.40	2.60	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.60	2.70	2.70
2.30	2.20	2.40	2.40	2.40	2.30	2.20	2.10	2.20	2.50
2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20	2.10	2.00	2.40
2.40	2.20	2.20	2.10	2.20	2.20	2.10	2.10	2.40	2.40
2.90	2.80	2.50	2.50	2.50	2.70	2.70	2.70	2.80	2.70

(II)接着剤取り付け後

3.00	3.10	3.20	3.10	3.20	3.20	3.20	3.20	3.10	3.00
3.00	3.10	3.10	2.90	3.00	3.10	3.00	3.00	3.00	2.90
3.10	3.00	3.00	2.50	2.90	3.00	2.90	3.00	2.90	2.30
2.40	2.50	3.10	2.70	3.00	3.00	3.10	3.00	3.00	2.90
3.00	3.30	3.20	3.10	2.70	2.40	2.90	3.10	3.20	3.10

(III)全周溶接取り付け前

2.50	2.70	2.80	2.60	2.80	2.60	2.70	2.80	2.80	2.70
2.40	2.40	2.60	2.50	2.50	2.40	2.50	2.60	2.60	2.60
2.30	2.30	2.20	2.40	2.30	2.30	2.30	2.40	2.40	2.60
2.50	2.20	2.20	2.40	2.36	2.30	2.40	2.60	2.60	2.50
2.50	2.60	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.60	2.50	2.70

(IV)全周溶接取り付け後

3.10	3.20	3.00	3.30	3.10	3.00	2.90	2.80	2.60	2.60
2.80	2.80	2.80	2.80	3.00	2.80	2.80	2.90	2.80	2.40
2.80	2.80	2.80	2.80	3.00	2.80	2.80	2.90	2.80	2.80
3.00	3.00	3.00	2.90	3.10	3.10	3.00	2.90	2.90	2.80
3.00	3.00	3.00	3.20	3.00	2.90	2.80	3.10	2.90	2.90

図 4 6 取り付け前後の計測値

5. 5. 2 部材実験 2

試験体は鋼製梁(H-100×100×6×8: $\sigma_y=298\text{MPa}$ 、及び H-100×50×5×7: $\sigma_y=336\text{MPa}$ 、SS400)に TRIP 鋼板(PL-50×100×1.0)を圧縮側と引張側のフランジまたはウェブに取り付け、鋼材が全塑性に達する載荷点変位の 0.3 倍、0.4 倍、0.5 倍、1 倍、2 倍、4 倍、6 倍、8 倍の変位で制御した。取り付け方法は、全て全周隅肉溶接(ソリッドワイヤ SE-50T)と

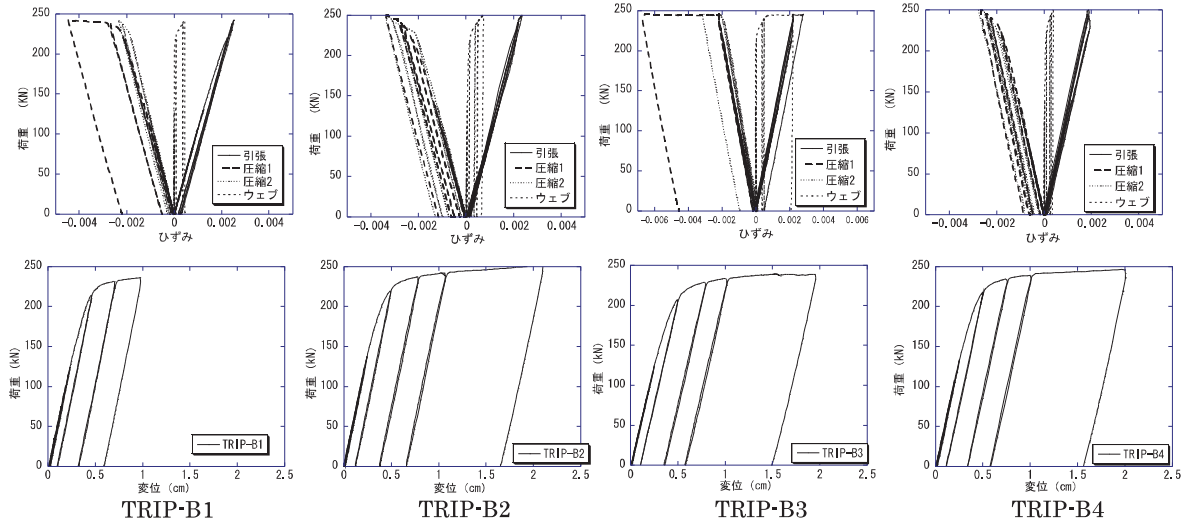


図 4-7 荷重 - ひずみ関係及び荷重 - 載荷点変位関係

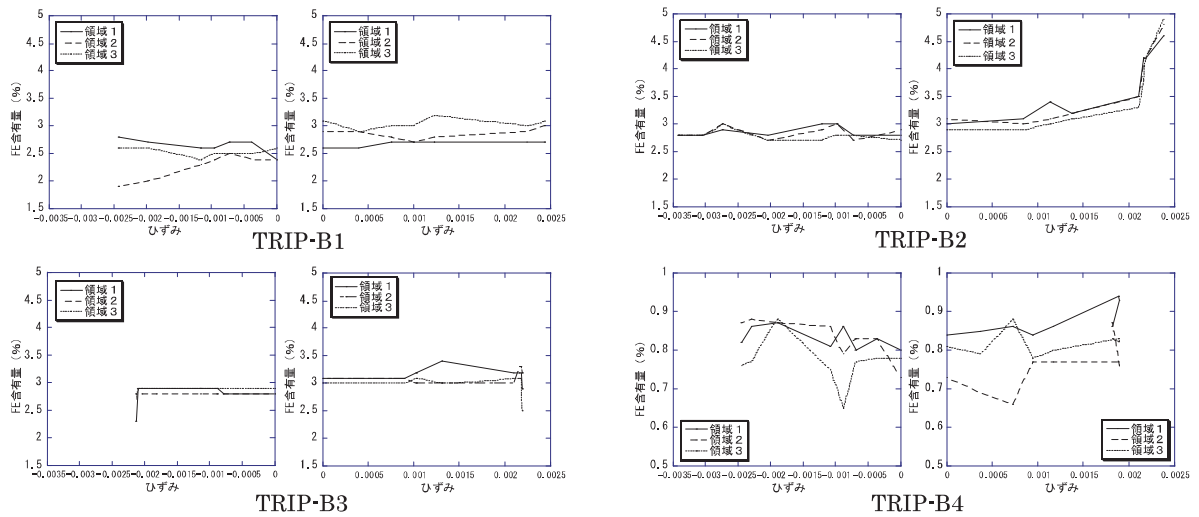


図 4-8 フェライト含有量 - ひずみ関係

した。試験体は、H-100×100×6×8を3体、H-100×50×5×7を3体の計6体とし、図4-9に示すようにそれぞれフランジ（圧縮引張両面）、ウェブ（片面または両面）にTRIP鋼を取り付けた。

表5及び図4-9に試験体概要を示す。計測は鋼板曲げ実験と同様に鋼版を1cm四方のメッシュに区切り各メッシュの中央部について測定を行った。溶接によるTRIP鋼板端部への熱影響を考慮し、比較対象とする数値は、図4-5に示すように3ヶ所各6点の平均値を領域①・領域②・領域③の値とした。

鋼材取り付けによる計測値への影響に関しては、図5-0に示すように、部材実験1と同様、溶接熱によるTRIP鋼の磁性への影響はわずかであると考えられる。

図5-1に各試験体における荷重-ひずみ関係及び荷重-載荷点変位関係のグラフを示す。全ての試験体で鋼材が全塑性に達する載荷点変位の8倍の変位を

与えても荷重が低下しなかった。試験体TRIP-F1からF3の圧縮側フランジに取り付けたTRIP鋼は、概ね4倍の載荷サイクルで座屈により盛り上がる現象を示した。ウェブにTRIP鋼を取り付けた試験体TRIP-F4からF6では、載荷中に弱軸方向座屈が確認されたが、その後も荷重が低下することはなく片面、両面取り付け共に鋼材が全塑性に達する載荷点変位の8倍まで載荷した。

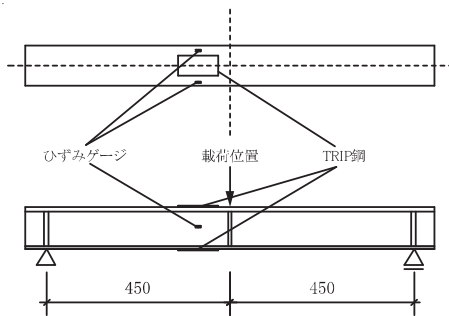
各試験体の領域①・領域②・領域③におけるフェライト含有量-ひずみ関係のグラフを図5-2に示す。試験体TRIP-F1からF3では、圧縮フランジ側で、ひずみ 15000×10^{-6} レベルから顕著なフェライト含有量の上昇が見られるが、これは座屈によるひずみ分布のばらつきの影響が大きいと考えられる。

一方、引張フランジ側では、ひずみ 5000×10^{-6} レベルから顕著なフェライト含有量の上昇が見られ、最終載荷後の除荷時においても低下しなかった。これは、棒鋼試験片による引張圧縮実験で観察され

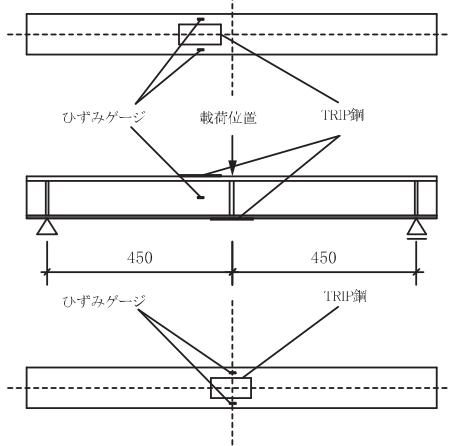
表5 各試験体取り付け方法

試験体名	H形鋼	TRIP鋼の取り付け位置
TRIP-F1, F3	H-100×100×6×8	TYPE 1
TRIP-F2	H-100×100×6×8	TYPE 2
TRIP-F 4	H-100×50×5×7	TYPE 3
TRIP-F 5, F6	H-100×50×5×7	TYPE 4

(I) 鋼材への取り付け方法 (TYPE1: 上下フランジ)



(II) 鋼材への取り付け方法 (TYPE2: 上下フランジ、下フランジ梁中央)



(III) 鋼材への取り付け方法 (TYPE3: ウェブ片面、TYPE4: ウェブ両面)

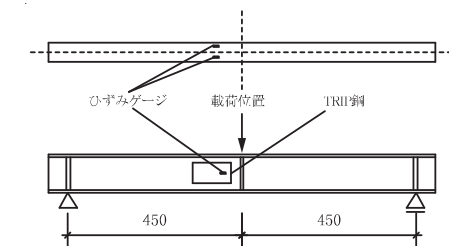


図49 部材実験2の試験体概要

た顕著な出力電圧の上昇と同レベルの応答であり、試験体形状に関係なく、このひずみレベルでの大きな材料変態挙動が推察できる。

一方、試験体 TRIP-F4 から F6 では、TRIP-F4 でひずみ 600×10^{-6} レベルから若干のフェライト含有量の上昇が見られる程度であった。

(I) 鋼材取り付け前

0.26	0.25	0.27	0.26	0.26	0.26	0.24	0.24	0.24	0.23
0.23	0.23	0.24	0.24	0.23	0.24	0.24	0.22	0.21	0.20
0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21	0.19	0.19	0.19	0.19
0.20	0.20	0.20	0.22	0.23	0.23	0.21	0.19	0.19	0.20
0.21	0.21	0.20	0.21	0.21	0.20	0.18	0.18	0.18	0.17

(II) 鋼材上設置(溶接前)

2.3	2.2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7
2.1	1.9	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3	2.3	2.4	2.5
1.9	1.6	1.8	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4
1.6	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5
1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6

(III) 鋼材上設置(溶接後)

2.5	2.4	2.5	2.4	2.5	2.6	2.5	2.4	2.5	2.5
2.5	2.3	2.3	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.5	2.4
2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.3	2.5	2.4	2.6	2.7
2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.6
2.5	2.4	2.4	2.5	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5

図50 取り付け前後の計測値 (TRIP-F6)

5.6 まとめ

実験より、Fe-Cr系のステンレス合金であるTRIP鋼とステンレス鋼の2種類の鋼材を用い、その損傷検出特性に関する実験的検討を行った。実用化に向けて重要な研究課題である一方向及び交番繰返し載荷時の磁気特性を材料実験により把握し、ステンレス鋼との材料特性の比較を行い、応力-ひずみ履歴と磁気(誘導電圧)の変化との相関に関し検討した。

また、TRIP鋼とステンレス鋼の2種類の平板試験片についてフェライトスコープを用いた計測による簡便な曲げ実験を行った。

さらに、H形鋼部材にTRIP鋼を張り付けることによってひずみを測定する実験を行い、ひずみ検出の有効性を確認した。

本実験の範囲内では、以下の知見が得られた。

(1) 引張圧縮実験

1-1) TRIP鋼、ステンレス鋼ともに、試験片平行部の長さ依存しない応力-ひずみ履歴を示すのに対し、出力電圧は試験体の長さに依存した。

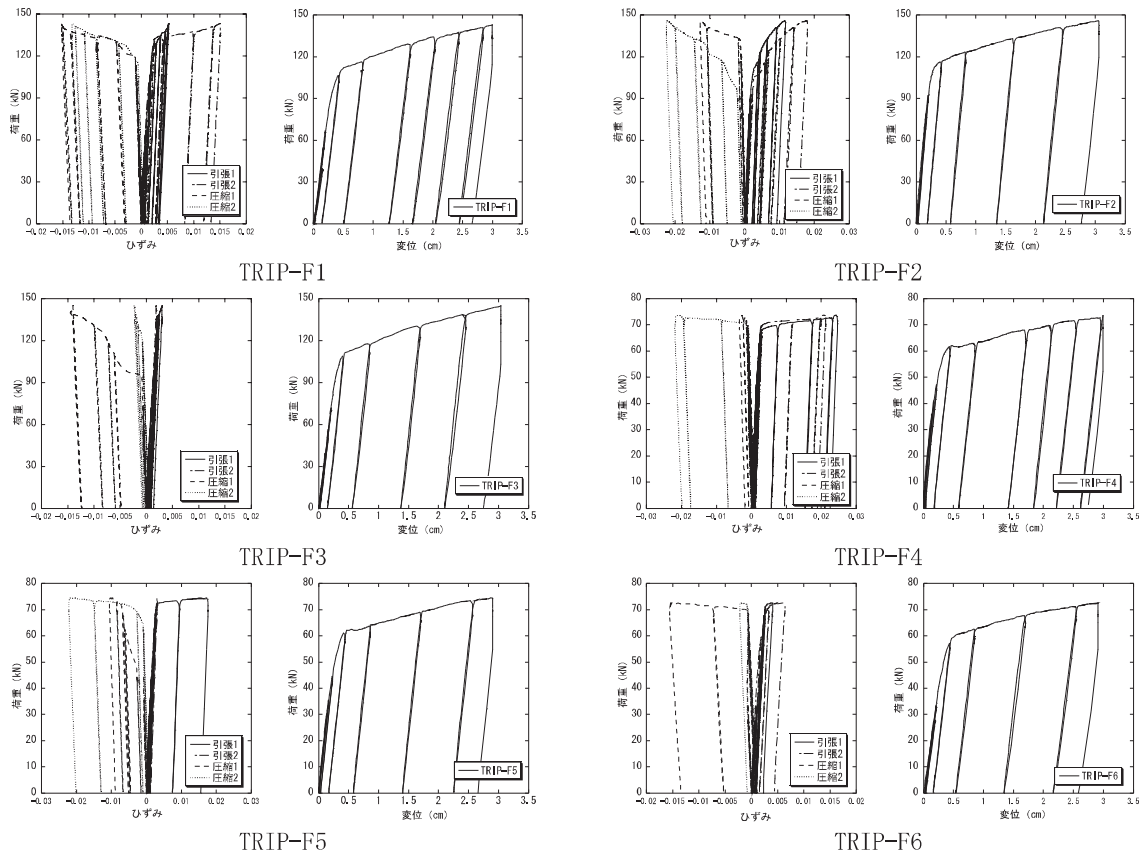


図 5 1 荷重 - ひずみ関係、及び荷重 - 载荷点変位関係

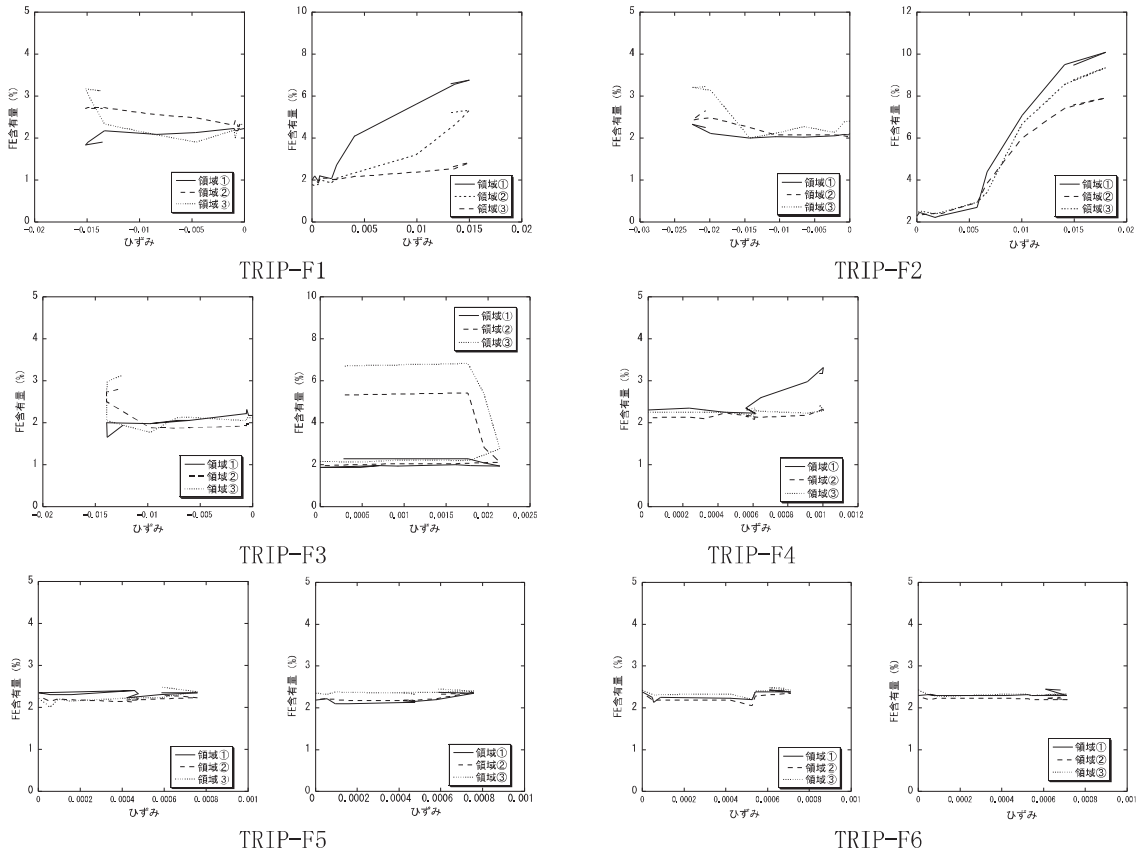


図 5 2 フェライト含有量 - ひずみ関係

- 1-2) 応力-ひずみ履歴に関しては、高いひずみ硬化性状を示した TRIP 鋼とステンレス鋼に明らかな違いが見られた。
- 1-3) ステンレス鋼は TRIP 鋼に比べて出力電圧が非常に小さく、除荷時に出力電圧が低下したのに対し、TRIP 鋼は概ね載荷時の出力電圧を維持し、応力方向に依存せず引張・圧縮載荷ともに同様な出力電圧-ひずみ履歴を示し、ひずみが概ね $\pm 0.5\%$ を超えたひずみ領域から出力電圧の上昇が顕著となった。

(2) 曲げ実験

- 2-1) TRIP 鋼に変形を与えた場合、変形の中心に近いほど大きな計測値の変化が得られ、変形が戻った後も計測値は減少しなかった。
- 2-2) ステンレス鋼に変形を与えた場合、若干の計測値の増加が見られたが TRIP 鋼と比べほとんど増加しなかった。

(3) 部材試験

- 3-1) 全周溶接した試験体については、フェライト含有量の顕著な上昇と維持が確認できた。
- 3-2) 引張フランジ側のフェライト含有量の顕著な上昇は、棒鋼試験片による引張圧縮実験で観察された、顕著な出力電圧の上昇と同レベルの応答であり、試験体形状に関係なく、このひずみレベルでの大きな材料変態挙動が確認できた。

6. まとめ

展開構造システム・損傷制御構造において、幾つかの要素技術の提案と重要な要素となるセンシングについて検討を行い、21 世紀の「生きる建築」の 1 つのコンセプトモデルを示した。また、要素技術の 1 つとして TRIP 鋼を取り上げ、本鋼材の利用方法の検討及び素材の機械的性質や、損傷評価方法について検討を行った。

今回提案した地域防災制御システムのコンセプトモデルは、現段階での具体化の可能性について検討を実施したのみであり、今後多くの課題を検討する必要がある。さらに、共有地盤と建築群においては、共有部分の保全、建替等について、権利関係が複雑になりすぎるため、責任範囲が明確となるような共有・専有の区分方法など、技術的な検討項目以外についても解決しなければならない課題がある。

TRIP 鋼については、機械的性質、塑性変形によるひずみの検知方法および構造部材への適用方法と一連の基礎実験を行い、今後の利用への端緒を得ることができた。

全体の活動を通して、21 世紀の建築物には何が必要かを考え、アイデアの検討や調査が行われた。また、時には「建築物の使命」や「今後どうあるべき

か」といった思想的な議論も本 WG の中で行われ、その結果として、地域防災制御システムのコンセプトモデルに結実したと言っても過言ではない。本研究の成果は、今後の建築物の向かってゆく 1 つの方向を示せたのではないかと筆者らは確信している。本 WG の活動の成果である本稿が、今後の建築構造物の発展の一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 生きる建築へのアプローチ：21 世紀鋼構造フォーラム シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術に何ができるか」、独立行政法人建築研究所, pp.9-12, 2002.11
- 2) 地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム：21 世紀鋼構造フォーラム研究成果発表, 鋼構造シンポジウム, pp.11-15, 2004.
- 3) ユニットセル構造システムの提案：21 世紀鋼構造フォーラム研究成果発表, 鋼構造シンポジウム, pp.17-25, 2004.
- 4) 高性能要素の建築分野への適用：21 世紀鋼構造フォーラム研究成果発表, 鋼構造シンポジウム, pp.5-9, 2004.
- 5) 斎藤公男：「空間構造物語」(彰国社),2003.10
- 6) 自己修復材料研究会編：ここまできた自己修復材料研究会編(工業調査会),2003.5
- 7) 藤田利夫他訳：「鉄鋼材料の設計と理論」, 丸善株式会社,pp.177-179,1981.
- 8) Zackay, V., Parker, E., Fahr, D. and Busch, R.: The Enhancement of Ductility in High-strength Steels, Trans. Of ASM, 60,pp.252-259, 1967.
- 9) Thompson, L. and Westermo, B.: A New Strain Measurement Technology for Material Damage assessment, Proc. Smart Sensing, Processing, and Instrumentation Control, Ed. by J.S. Sirkis, SPIE Vol. 2191, pp.380-391, 1993.
- 10) 足立幸郎, 運上茂樹：自己診断機能を有する構造材料を用いたインテリジェント耐震構造に関する研究, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp.506-507, 2000.9
- 11) 21 世紀鋼構造フォーラムグループ A：生きる建築へのアプローチ(要約版)、建築技術、No. 636, pp.190-191, 2003.1
- 12) 高橋学：自動車用高強度鋼板の開発、新日鉄技報, 第 378 号, pp.2-6, 2003.
- 13) 21 世紀鋼構造フォーラム WG1：高性能要素の建築分野への適用、鋼構造シンポジウム 2004, 特別セッション 1, pp.5-9, 2004.11
- 14) Y. Kaneko, K. Kirikoshi, K. Onishi, T. Suzuki, N. Miyamoto and S. Sumitro, "APPLICATION OF HIGH PERFORMANCE

ALLOY WITH SELF DIAGNOSIS TO ARCHITECTURE", Proceeding of Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, Yokohama, Japan, 4-6 December, pp.181-194, 2006.


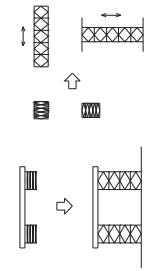

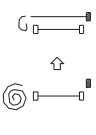
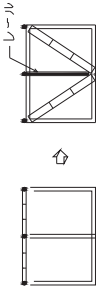
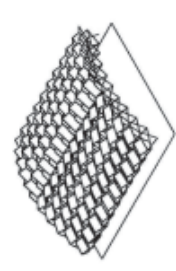
1 5) 金子佳生、桐越一紀、大西宏治、鈴木隆生、宮本則幸、羅黃順：自己診断機能を有する TRIP 鋼の材料特性とその応用、鋼構造論文集第 1 4 巻第 3 5 号, pp.59-65, 2007.3



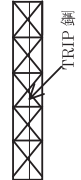
1 6) Y. Kaneko, K. Kirikoshi, K. Onishi, T. Suzuki, N. Miyamoto and S. Sumitro, "Material characteristics of TRIP steel with self-diagnosis and application to structural systems", Journal of Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing, Vol. 16, pp. 2464-2476, 2007.

「展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究」

ワーキング活動で提案されたアイデア案の一覧表

以下、展開構造システム・損傷制御構造のアイデアを一覧表にまとめためたものである。

<p>A 展開構造の目的</p> <ul style="list-style-type: none"> ・展開（可動）することにより何らかの付加価値が生まれる。 ・自然災害時の事前対策、シェルターとしての機能 	<p>A-1 部材レベル 運搬のために部材をコパ[®]外にし、施工時に展開する</p> <p>①メタモルフオーシス 施工時に変形することにより短時間で施工</p>  <p>②張弦センサー 柱・梁部材をセンサー型にして運搬時にコパ[®]外にし、施工性の向上を計る。通常の形態では搬入・搬出が困難な場所に適応</p>  <p>A-2 建物レベル 外観形状、建物内部の形状変化</p> <p>①外乱から建物を守るため、外乱時に外部と内部を遮断する蛇腹式の壁（防風壁）</p> <p>②人工地盤上に可動する大屋根（シェルター）を設置し、災害時にその大屋根を可動させ、内部の建築物を外力から守る方法</p>  <p>③耐震シャッター 通常時は開口部分とし、地震時に耐震壁となるシャッターが下降し、建物の耐震性を向上させる。</p>  <p>④可動ブレース 通常時には梁部分の位置に設置されているが、地震時には、開口部の斜め材となる位置に移動して、建物の耐震性を向上させる。</p>  <p>⑤多層の地蔵防災システムを建設するため、一部の架構（人工地盤）が上下する案</p> 
---	--

<p>B 損傷制御構造の目的</p> <ul style="list-style-type: none"> ・建築物の長寿命化させるために、免震、制震、センシングを行う。 ・部材のリユースのために部材の損傷状態を把握 	<p>B-1 入力エネルギーを減らす（免震）</p> <p>①地震時にアイルナーを可動させ人工地盤部分に密着させることにより固有周期を調節</p>  <p>②剛性を可変できる免震装置による固有周期の制御</p>  <p>③地震時に揺れない（免震、浮遊）構造方法</p>	<p>B-2 入力エネルギーを吸収する（制震）</p> <p>①多層人工地盤化や人工地盤同士をつなげて行く事による質量増加に伴う揺れの低減</p> <p>②貯水層を設け、貯める水量で質量調節を行い、固有周期を制御</p> <p>③地震エネルギーの蓄積（方法は未定）</p>	<p>B-3 構造の損傷評価法</p> <p>①高強度・高靱性の TRIP 鋼ブレースの利用とそれにあわせて TRIP 鋼の損傷測定することにより、架構全体の損傷を推定</p>  <p>②トラス構造梁の内部に TRIP 鋼の線材を設置し、トラスの変形をこれに伝え、測定することにより梁全体の損傷を推定</p>  <p>B-4 センシング</p> <p>①TRIP 鋼</p> <ul style="list-style-type: none"> ・TRIP 鋼を用いた最大ひずみセンサー ・弾性疲労の測定（弾性疲労時にマデットに変態するかは確認が必要） <p>②EM センサー 部材の応力を直接モニタリング可能</p> <p>③スマートスキン（構造体に光ファイバーを張り巡らせたもの）で面的な変形を測定可能</p> <p>B-5 リユース</p> <p>①TRIP 鋼の変態特性やICタグを用いることにより、部材の損傷を把握し、部材のリユースに役立てる</p> <p>B-6 素材</p> <p>①ステンレス鋼 一般鋼材に比べ高い耐食性を有する</p> <p>B-7 フェールセーフ</p> <p>①TRIP 鋼を主要構造部分に用いたフェールセーフ機能</p> <p>②TRIP 鋼の薄板を箱型にし、免震建物と地盤部分とが衝突する場合の衝撃吸収材材として使用</p> <p>B-8 設計</p> <p>①弾性設計 地震後の再使用を可能とする（風荷重による弾性疲労が問題）</p>
---	---	---	---

以下、地域防災制御システムのアイデアを一覧表にまとめたものである。

C 地域防災制御システム

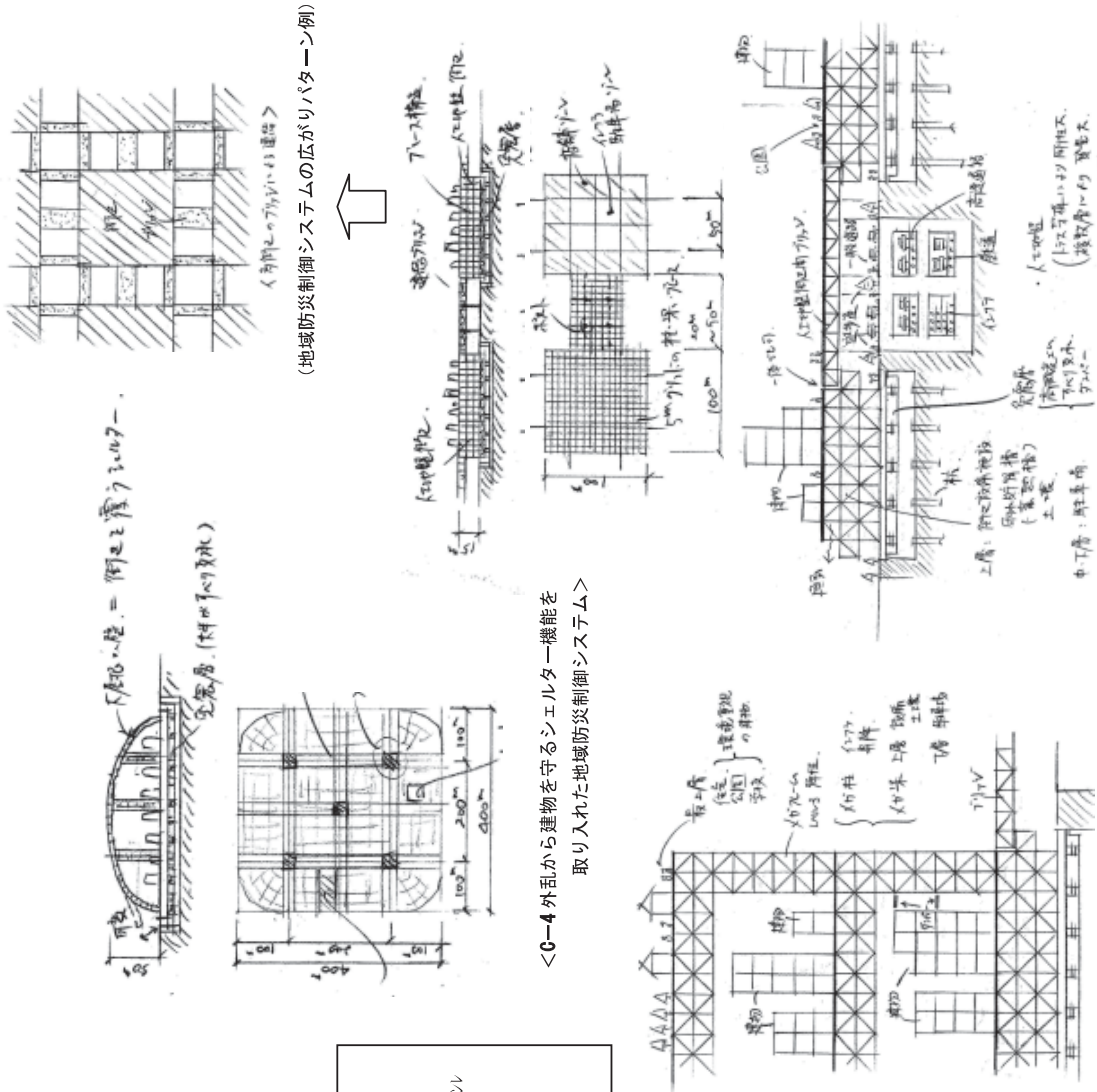
目的：地域全体としての安全株の確保

<地域防災制御システムのアイデア>

- ・柱・ストラクチャー構造
- ・柱・ストラクチャー構造は弾性設計
- ・柱・ストラクチャーの部材はステンレス鋼を適用
- ・柱・ストラクチャー内部にライブランを設置
- ・柱・ストラクチャー内部に昇降設備を設置
- ・柱・ストラクチャー内に駐車場を設置
- ・内部構造の建物は、耐震設計不要

<地域防災制御システムの構造(案)>

- C-4 をベースにする場合
- ・大屋根部分を変形測定
 - ・規模 幅 400m × 長さ 400m
 - ・高さ 100m
 - ・免震構造を採用 (周期可変)
 - ・大屋根の外周部分が可動
 - ・システム内の建物→地震・風荷重なしで設計



(地域防災制御システムの広がりパターン例)

<C-4 外乱から建物を守るシェルター機能を
取り入れた地域防災制御システム>

<C-1 地域防災制御システム>

<C-2 多層型の地域防災制御システム>

<C-3 広がりを持った地域防災制御システム>

第 6 章 今後に向けて

21 世紀鋼構造フォーラムの主査、副主査の他、各 WG 主査の方から、フォーラム活動を通して感じたこと、考えたこと、また、常々21 世紀の鋼構造のあり方について考えていること、今後に向けて、若い建築家、研究者、実務家などに期待することなどを投稿していただきました。

6.1 今後に向けて

本建築研究資料に詳細に記述されているように、「21 世紀鋼構造フォーラム」は、2001 年 6 月に発足してから 6 年半にわたり、これからの鋼構造建築技術を担うであろう、若手の研究者、技術者および設計者を中心に、活動の底流として最初のシンポジウムのテーマとした「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」を主題として活発な活動を行ってきました。この挑戦的な主題の基本的な理念は、「21 世紀にふさわしい斬新な発想による鋼構造建築物の創出」ということですが、これは発足当時の鋼構造建築に関する研究開発や技術開発の沈滞した閉塞状況を打ち砕こうという熱い意思と決意を表明したものです。

ところで、新たな 2008 年が明けた今、わが国の社会・経済そして技術の状況は、依然として芳しくありません。年明けのマスコミの論調では、「日本も遂に二流国に成り下がった」という類いの悲観的なものが多数を占めています。一流、二流という見方はさておき、確かに社会・経済だけでなく、科学技術や研究開発の分野の状況を見ても、総体として、未来の可能性を思わせる魅力ある輝きや活力を失っている状況です。

明治維新以来、1980 年代まで、「和魂洋才」という言葉に代表されるように、日本固有の精神や文化を活かしながら、西欧の才や技を採り入れるというキャッチアップを基本とする日本型社会システムにより、わが国は第二次世界大戦の敗戦からの驚異的な復興を含め、大いなる繁栄を遂げました。しかし、1990 年代に入り、日本経済のバブル崩壊、東西冷戦の終結による世界のグローバル化と大競争時代への突入、中国やインドなど発展途上国の急速な経済的台頭などと、それらへのわが国の対応の遅れにより、日本の社会・経済ならびに科学技術や研究開発はその勢いを失いました。よくいわれるように、西欧先進国に追いつけ追い越せのキャッチアップで生きていける時代は終わったのです。

現在、日本が直面している様々な問題、例えば少子高齢化社会や格差の問題、環境問題、エネルギー問題など、どれをとっても事態は他国より深刻に進んでおり、もはや、その解決策の範を他国に求めることは出来ません。そのためには、日本固有のよいところを活かしながら、自らで目標を定め、創造性に富む才と技を以て、道なき原野に道を切り拓き、上記の深刻な問題を世界に先駆けて解決していくリーダーシップが求められているといえます。すなわち「和魂創才」をもって、フロントランナーになることが求められているのです。

科学技術の分野に目を向けても、わが国は、上記の諸問題の科学技術面からの検討を含め、この十年余り、科学技術創造立国を標榜しています。しかしながら、具体的方策

とその結果において、必ずしも順調に推移しているとは言い難く、いろいろな試行錯誤を行っているのが現在の姿と考えます。たとえば、総合科学技術会議の創設、国立大学や国立研究所の独立行政法人化、国の科学技術研究費の競争的資金化など、ひとつひとつが未だ最終打ではなく、試行錯誤の段階です。よって、いろいろな成功しそうなアイデアを試し、うまくいかないときは、率直に修正や別の方策に切り替えることが望まれます。つまり、大きく見れば科学技術や研究開発の分野でも、政策や具体の研究開発課題の選定ならびに研究開発の実施において、フォロントランナーであり、夢のあるイノベーションを希求する基本的な考えと方針を持つことが重要です。

もし、これから、わが国が科学技術分野を含め、フロントランナーになれないなら、年頭のマスコミの「わが国もついに二流国に成り下がった」という悲観的な論調が当を得たものとなります。歴史をみれば明らかなように、主体が何であれ、栄えるものは、フロントランナーを続けようとする特別の努力とその成果がない限り、その隆盛を長く続けられず、いずれ衰退するものと考えられます。

鋼構造建築技術の分野でも全く同じことがいえます。振り返れば、「21世紀鋼構造フォーラム」の活動は、その主題と理念に沿って、鋼構造建築技術のフロントランナーになることを宣言し、それに向かって特別の努力を払ったことだったと考えられます。よって、「21世紀鋼構造フォーラム」は本資料の発刊をもって終了しますが、フロントランナーを目指した「21世紀鋼構造フォーラム」の主題と理念は、これからも生き続ける、いや、生き続けさせなければ、わが国の鋼構造建築技術は、恐らく二流に成り下がるでしょう。

最後になりますが、わが国の鋼構造建築技術とその成果が一流であり続けるために、心ある若き技術者、研究者そして設計者に、本資料に記述した「21世紀鋼構造フォーラム」設立の精神と活動をより深く理解していただき、その主題と理念の実現を目指してより一層、奮起して頂くことを期待して止まないところであります。

6.2 無題

1987年米国に駐在することとなった。目的は21世紀の建設業に必要な技術探索、探索技術の筆頭は新しい構造材料であった。米国駐在に先立ち、コロンバス州オハイオ市にあるバテルメモリアル研究所に「21世紀の構造材料探索」を依頼した。バテルメモリアル研究所からは200以上の提案があった。一部を示すと「エネルギー吸収構造材」「発泡鋼材」「透明コンクリート」「生きた材料・自己修復材料」「ニューハニカム材料」「折り紙金属」「CFRP」「ハイブリット金属」などである。今回のフォーラムのテーマとかなり重なる部分があり、20年前の発想の実現に向けて進めたのが本フォーラムではないかと思うほどである。

本フォーラムの方向発想は間違いの無いものであり、若手研究者・技術者の力を結集するのに相応しいテーマと成果が得られたと確信する。

近年MOT教育が盛んである。技術開発は出来るがその実用化・ビジネス化が難しく、如何にダーウインの海を渡るかを教育するものである。フォーラムの成果も実用化・社会への普及への一層の努力が期待され、フォーラムに参画した各機関・個人の努力が期待される。

6.3 21世紀鋼構造フォーラム発足時の経緯と今後に向けた提案

21世紀は、波乱の幕開けとなった。当時、鉄冷えの中、団体統合の一環として、1947年以降、我が国の鋼構造建築の市場開発において、その推進役を担った（社）鋼材倶楽部と（社）日本鉄鋼連盟が統合することとなった。

私は、まさにその議論の渦中の2001年4月、建築専門委員長に就任した。就任して間もない同6月、「はしがき」にあるように、同4月、独立行政法人となった建築研究所から、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」開催の呼びかけがあった。

私は、公的研究機関である建築研究所から、「鋼構造」に限定したシンポジウムを持ちかけていただいたことに関して、長年の鋼材倶楽部と、建築研究所との、ことに山内理事長との関係の深さに想いを馳せ、感謝の気持ちでこの提案に積極的に応じることとした。

その背景には、歴史ある「鋼材倶楽部」の看板が使えなくなったことへの危機感から、（独）建築研究所、（社）日本鋼構造協会など関連団体間の連携をさらに深化させなければならぬという認識があり、このシンポジウムをその象徴的事業に位置付けようと考えたこともある。

しかしながら、実行段階に入ると、「21世紀の鋼構造技術」に相応しい提案が出来るか懸念された。

そこで、急遽、シンポジウムに向けたアイデア出し委員会、「21世紀鋼構造フォーラム」を発足させた次第である。

何分、期日に余裕がなかったことから、委員及びテーマの選定に当たっては、独断的なものがあったことを、この場を借りてお詫び申し上げます。

しかし、その後、このフォーラムが、6年半も継続されたことは、結果的に、無理をして立ち上げて良かったと思っております。

さて、今後に向けてですが、本フォーラムの「産官学の連携を機軸に、自由な発想による提案活動」と言う、山内理事長が掲げられた理念が、継承され、新しい形で、再スタートされることを望んでおります。

6.4 環境・防災・教育—21世紀型価値創造への挑戦と次世代への継承—

21世紀鋼構造フォーラムとは、「環境」、「防災」、「教育」の領域における、21世紀型価値創造への挑戦だと捉えることができる。

地球温暖化、異常気象の頻発といった地球規模での不安が募る中、アル・ゴア氏の「不都合な真実」がベストセラーとなり、長期にわたり人類の生きる環境をいかに持続させるかが関心事となっている。地球が回復不能な打撃を受けないようにするためには、ここ20～30年間で勝負とさえ言われている。地球環境保護には、廃棄物削減、資源の有効利用、CO2削減などへの取り組みが重要であるが、建築部門では長寿命化とリサイクルという視点が欠かせない。

住宅の平均寿命は、アメリカは45年、ヨーロッパは75年、日本は30年と言われている。日本だけが極端に短命で、寿命が来る前に取り壊すというのがこれまでの常識だった。しかし一昨年、成熟社会にふさわしい豊かな住環境の実現を目指す「住生活基本法」

が施行され、国の住宅政策は量から質へと大きく転換した。

鋼材ダンパーに関する研究は、既存建物を高耐久にする技術展開であり、既存ストックの有効活用と災害の未然防止・減災、建物の長寿化、社会全体の環境負荷低減のニーズに合致したものであり、リスクとコストのバランスの取れた取り組みである。

また、テーパー付き鋼管柱に関する研究は、まさにリユースによる環境負荷低減を志向したものであり、他の構造材料に比べ、鉄鋼の特性を最大に生かせる領域であるとともに、コストパフォーマンスに十分配慮したコンセプトとなっている。

建築物を長期に渡って利用するためには、まず何より耐久性を高める必要がある。それにはスケルトンの強化が重要であるが、高強度で高性能な鋼材はそれを可能にする。仮に、寿命が来たとしても鉄鋼はリサイクルの優等性であり、リサイクルでかなりの環境負荷低減に貢献できると見込んでいる。建築物を長期間壊さなくすれば、廃棄物削減につながる。更に、省エネ性能に優れた建物が増えれば、民生部門のCO2排出削減にも貢献する。

今後、建築計画において、「経済性」のみならず、「環境性能」が意思決定のパラメーターとして重要な地位を占めるのは間違いない。環境性能が建物の価値を決める時代だ。平成7年の阪神淡路大震災では、数多くの建物や都市基盤施設が倒壊し、土木建築の安全神話が脆くも崩れ去った。近年、東南海・南海地震の発生が現実的になる一方（今後30年以内に、60～70%の確率で発生）、東海水害や福岡水害に見られるような豪雨に対する都市の脆弱さが露呈している。また、21世紀になって建築基準法は性能規定へと移行し、「性能設計」という言葉が世の中を席卷するようになった。しかし、現在、社会との対話はまだ緒についているところであり、科学技術の成果を享受する立場にある生活者が耐震安全性について十分な理解を得るには至っていないのが現状である。

展開構造システム等に関する研究を通じて、都市防災にかかわる数々の解決策が提案されている。それらの技術の一つひとつが、大きな可能性を秘めた重要な要素技術である。

生活者が、防災という施策に対して置かれている現状をどう評価し、どうあるべきかについて、社会に対して情報発信することの重要性が本研究を通して読み解ける。

また、薄板鉄鋼材料を用いた研究では、構造仕上げ要素と接合形式の多様な組み合わせがその要求性能に与える影響について、多くの性能評価軸により査定する方式を提案している。これからの展開を図る上で、研究の方向性、優先順位を多元的にイメージできる研究計画支援システムとも言える。

これらに共通する事は、住生活の多様化により、単なる建築分野における価値判断だけでは、理想的な姿が見えづらくなってきているということである。建築分野が、たとえば社会学、経済学、心理学等の分野と融合することによって、変化する暮らしや社会に対応した最適解を提案する時代に、我々は今、直面しているのではないだろうか。そして、真にこの世界は、コラボレーションの観点で、今後、産官学公の多様な価値観の融合効果によって新しい価値を創造していくべき領域ではないかと考えている。

先般発表された経済協力開発機構の、2006年国際学習到達度調査の結果は、衝撃的であった。数学的応用力が前回2003年の6位から10位に、科学的応用力が2位から6位に順位を下げ、学力が世界のトップクラスから転落していることが明らかになった。そ

れにも増して、科学に興味や意欲をなくしていることの方が問題という指摘も多い。科学者や技術者という言葉に夢が感じられなくなった昨今、想像以上に「科学離れ」が進んでいるのが現実だ。

本フォーラムは、科学的見地から、6年半の間、多種多様なシーズを探索し、防災、環境保護という21世紀になくてはならない社会的要請に対し、鋼構造という切り口で解決すべく産官学公の連携体制で進めてこられた。各分野より選抜された方々が、熱き思いを持って御自身の持つ技術的ポテンシャルを最大限に発揮し、研究をリードしてこられた。ロボット作りが子供の意欲や好奇心を高める効果があるように、若き技術者、研究者たちも先輩諸兄の活動に大きな刺激を受け、科学技術への関心が従前より高まったことは想像に難しくない。そういう意味で、若手技術者の人材育成に本フォーラムが果たした役割は大きい。今後、国と学界、産業界、そして大人社会全体で、科学技術の魅力を子供達や若手技術者に伝えられるような社会を築いていくことの必要性、価値を痛感している。

本フォーラムは、団体組織間で昔のような大らかな交流がなくなった現代社会において、その閉塞感を打破し、21世紀初頭に確かな足跡を残したと実感している。本フォーラムで壊かれた科学技術に馳せる熱き思いと組織横断的な一体感、理念は、次の世代へと必ずや引き継がれていくことと確信している。

6.5 雑感：フォーラム活動を終えるにあたって

21世紀鋼構造フォーラムには設立当初から参加した。鋼構造分野に活気がないなと感じていた時期であった。鋼構造技術で骨組みは構築できるが、ひとが使う空間は、建築家（アーキテクト）のような構造研究とは異なる分野の人達と連携しないと良くできない。フォーラムがこのような機会を与えてくれるものと期待していた。実際にはフォーラム参加者の多くは構造分野であったが、普段の専門分野の仕事から離れて自由に発言できる環境が提供された。

「フォーラムの成果は何か？」と問われれば、参加した人数を見れば歴然であるし、そのものずばり、幅広い視点から検討された本資料が成果そのものである。「生きる」、「進化する」、「解き放たれた」というシンボリックな概念を掲げての提案と、その実現に向けた検討成果である。しかし、6年半の活動プロセスにおいてフォーラム参加者に形成された無形の財産の方がより大きかったのでないかと考えている。本資料をかつちりとした論文にまとめなかったのは、活動プロセスの中で発想された各アイデアが形式にこだわる論文にまとめることによって消え去ってしまうのではないかと考えたため、活動の各段階での意見交換をホットな内にレポートとした資料をそのままの形で載せることとした。その意図が本資料で達成されたかどうかは、読者にゆずりたい。

さて、鋼構造から建築分野全体に目を転じて、最近、イノベーションの議論が盛んである。過去を振り返ってみて、イノベーションと呼べる技術があったのかと問えば、構造分野に限っても、コンピュータの発展に支えられた構造解析や時刻歴応答解析の普及、これを裏付ける実験と観測、震度法に取って代わった新耐震設計法、免震・制震技術の実用化、コンクリート充填鋼管構造の一般化、高強度コンクリート（いわゆる、New RC）による超高層住宅、カーボンファイバーなど新材料の利用などがある。しかし、

これらイノベーションと思われる技術が、未来から見ても、良好な資産を残すことに寄与したと言えるのか、まだ結論は出ていないようにも思う。

最近、地球規模での環境問題が盛んに議論されている。門外漢としては「本当なの？白黒はっきりさせて！」と言いたくなる場面が多い。バイオ燃料に頼りすぎはかえって地球環境に良くない、牛肉の輸入はその牛を育てた環境と水を輸入しているようなものだ、鋼材輸出は国内で排出したCO₂の代償だ、などなど。物事は、適切な視点から見て（境界条件に基づいて）評価されなければならないという証である。上記の各開発技術がイノベーションであったかどうかの評価も同様な視点で、行わなければいけないであろう。

6年半のフォーラム活動では、どちらかという境界条件をあまり意識せずに思いつくままに色々な提案を行ってきたが、今後も同じスタンスでより自由にアイデアの発想ができればよいと思う。その一方で、しっかりと適切な境界条件を見定めた議論をする場が設けられ、発想されたアイデアの中から、未来から見ても良好な資産を作り上げる技術であったと認められるような技術が、旅立つことを確信し、そのような今後の活動に、フォーラム成果をまとめた本資料が役立てられることを期待して止まない。

6.6 鉄骨造体育館の耐震補強の重要性と今後の展開

21世紀鋼構造フォーラムの第三期目（平成17年秋～19年秋）の研究活動として、私自身は「鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究WG」を担当した。このWGでは、実務設計者である委員の方々とともに、鋼材ダンパーを用いた耐震補強に関し、補強の実態を明らかにするためのアンケート調査や鋼材ダンパーの有効性や設計法を検討するための地震応答解析等を行い、有益な結果を得ることができた。このWGで実施したアンケート調査では、WGの委員が所属する会社（4社）で、実際に耐震補強を実施した建物についてのデータを収集し、それを分析した。それらの結果の詳細はWG報告を見ていただくとして、この調査から得られた結論の1つとして注目すべきは、補強建物のうち鉄骨造建物は全体の7%であり、ほとんどがRC造またはSRC造であったことである。

RC造の学校校舎や集合住宅等については耐震補強を早急に行うべきであろうとの一般的な認識があり、補強もある程度は進められていると考えられるので、このような結果になることも予測できるが、鉄骨造建物の割合は、やはりかなり少ないとの印象を受けた。これは、鉄骨造建物が、RC造やSRC造の建物に比べて、耐震補強の対象となる建物が多いためか、それとも、単に、建物用途として重要度が低いため、後回しになっているためか、この調査だけでは、明らかにすることはできなかった。一般的に、鉄骨造建物は耐震補強の対象としては、あまり重要視されていないような印象を受ける。そこで、本稿では、鉄骨造建物の中でも耐震補強が重要と考えられる体育館を取り上げ、地震被害調査で耐震補強の効果が見られた事例を紹介するとともに、体育館の耐震補強に関する今後の展望について述べたい。

2004年の新潟県中越地震では、旧基準の鉄骨造体育館で、桁行方向ブレースの破断や座屈の被害が見られ、被災地では体育館を避難所として使用することができなかった例が多く見られた。この地震による鉄骨造体育館の被害調査を、国土交通省国土技術政策

総合研究所、(独) 建築研究所、(社) 日本鉄鋼連盟、(社) 日本鋼構造協会の共同調査として実施した。その調査結果¹⁾では調査した 63 棟の体育館のうち、1981 年以前の旧基準の体育館が 38 棟であり、この中で耐震補強を実施していたものがわずかに 1 棟だけであった。学校校舎は補強を行っても体育館までは予算上補強が難しいケースが以外に多いものと考えられる。体育館は地震後に避難所として使用されるものであり、これまでのように、学校校舎は耐震補強したが、体育館は補強しないということが続くことになると、被災地の避難計画をたてる上で、今後、大きな問題が生じる可能性がある。体育館の耐震補強も学校校舎同様に実施されることが強く望まれる。

この地震被害調査で、唯一、耐震補強されていた体育館は、川口町の震度 7 の地域に 1970 年代に建設され、1997 年に耐震補強を実施していたものである。地震後の調査では、体育館の床が数 cm 程度沈下していただけで、構造的な被害とともに天井材（木毛セメント板）の落下等の非構造の被害も見られなかった。この体育館では、桁行方向の既存ブレースは、L 型アングル材ブレースが間柱を介して、8 構面に設置されていたが、耐震補強では、既存部材はそのままとし、新たに、鋼管ブレース（ $\phi 101.6 \times 4.2$ ）を 8 構面に増設している（写真 6.1、6.2）。

一方、上記の体育館とほとんど同じ規模で、同一形状の屋根を持ち、建設年も 1970 年代である体育館が、数キロ程度の近隣にあった。桁行方向の既存ブレースの構造形式も無被害であった体育館と同様に、L 型アングル材ブレースが間柱を介して設置されているものであるが、こちらは耐震改修を行っていなかった。この体育館では、桁行方向で、既存のブレース材及び接合部の破断や座屈等の比較的大きな構造的被害が見られた。（写真 6.3）また、天井の木毛セメント板が全体の 1/4 程度落下していた（写真 6.4）。これら 2 つの体育館の被害状況を比較してみると、適切な耐震補強を行っていれば、ほとんど大きな被害を受けることなく、継続的にその建物の機能を維持して使用することが可能であることがわかり、耐震補強を行うことの重要性を認識できる。

21 世紀フォーラムにおける「鋼材ダンパーを用いた既存建築物の耐震補強に関する研究 WG」でも、鉄骨造体育館の耐震補強として、鋼材ダンパーを用いる方法について地震応答解析による検討を行った。その解析の結果では、既存のブレースの弾性変形を活用して、柔剛混合構造として鋼材ダンパーを用いることで、ブレース増設による補強よりも、変形を小さくすることが可能であることがわかった。鋼材ダンパーは強度型の補強ではないため、強度型のブレース補強に比べ、建物全体としての必要な補強強度をブレース補強の場合の 1/3～1/4 程度にできる可能性がある。したがって、1 本あたりのブレースとダンパーの強度を同じと仮定すれば、ダンパーの設置数をブレースの場合の 1/3～1/4 にすることも可能となり、コスト面でも、ブレースによる補強に比べて優位にたてる可能もある。鉄骨造体育館の鋼材ダンパーによる補強方法については、今後、さらに検討する必要があるが、学校体育館の補強では財政的な問題もあるので、より安価で高性能な補強方法が早急に提案されることが望まれる。

【参考文献】

1) 長谷川隆、向井昭義、西田和生、石原直：新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査（その1 構造被害の分析）、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp569-570、2005.9

◆耐震改修済みの体育館



写真 6.1 既存ブレースと補強ブレースの設置



写真 6.2 天井等非構造部材の被害無し

◆耐震改修していない体育館



写真 6.3 既存ブレース接合部破断



写真 6.4 天井木毛セメント板の落下

6.7 21世紀の技術とはどのようなものか

6年あまりにわたって、本フォーラムの様々な活動に参加しながら、心中常に考えてきたことは、今後21世紀の技術がいかなるものとして成長を遂げるか、あるいは遂げるべきかということであった。21世紀のまさに初頭に、このことを産業界の方々とともに探索できたことは、建築史やデザイン史を講ずる身にとって、同時代からの直接の刺激は、大変印象深いものであった。

なかでも、もっとも注意をひいたのは、21世紀の鋼構造、その構想の仕方自体の水準で、参加者の間にふたつの異なった構えが、対立・共存しているように思われたことである。ひとつは既存の20世紀的な技術・社会・経済観の延長上に21世紀を構想しようとする態度である。「次はどんな技術か」という問題意識と言い替えられるだろう。もう

ひとつは、21世紀にこれまでとは異なった性格を予感し、それに至る変革を、技術がどのようにサポートできるか構想しようとする態度である。こちらは「技術は何をなすべきか」という問題意識である。このふたつの問題意識は時に鋭く対立し、異なった研究態度を主張しあうことにもなったが、しかし時にひとつの思考の中で渦巻いて、迷いや勇気をもたらした。

私たちは今、19世紀から20世紀にかけての技術の大変革のあとに位置している。ここまでの経緯を俯瞰的に見れば、基本的技術が完成するまでの実験期、安定した実践的技術が成立する古典期、経済社会のなかに技術が組み込まれ淘汰・最適化されてゆく洗練期に三分できよう。私たちが現在手にしている技術は、洗練期をくぐり抜けた技術である。非常に合理的で便利で経済的で、私たちの経済・社会の現状において、局所最適に達している技術である。

このような技術を前にして、その変革を模索することは、ドンキホーテの行いと見られかねないものである。2・3年先しか視線の届かない人物には、到底理解できないことだろう。19～20世紀の文明、それは大量生産—大量消費の枠組みで人々の生活の利便性の向上を図ろうとした時期であった。産業社会がその軌道の上で発展し、いま私たちはそこで暮らしている。私たちににとって自明とさえ見えるこの状況の安定が、もし21世紀中に崩れることがないなら、その初頭にドンキホーテは必要ない。

しかし、状況が大きく変化した瞬間、局所最適解の有効性は崩れ去る。一見安定したかのように見える現在の産業社会の枠組みにも、厳然たる限界が立ち現れつつある。ひとつは大量生産の可能性を牛耳る資源の限界であり、もうひとつが大量消費のあとに立ちだかる廃棄の限界である。21世紀は、これらの限界に直面する時期になるように思う。効率よく大量の商品を販売し流通させて利潤を獲得しようとする考え方、すなわち資源消費と廃棄を伴わざるを得ない産業社会自体は、少なくとも調整局面に入っていくはずである。

その時に求められる技術者たち、彼らにこそドンキホーテの青臭さが必要となる。おそらくこの時のための芽を残しておこうというのが、このフォーラムを企画するについての核心であったろう。技術の可能性を信じて、あれこれ図面を引き、あれこれ計算を繰り返し、自ら工具をにぎって部材をつくり、トラックを運転して加工場に届け、溶接の火花に身をさらし、破壊試験の後の破片に注意の目を配ること。この技術者の文化と共同こそ、現代をつくりあげる上での基礎となったものである。この意気をぜひ伝えたい、その意図に私たちは応えたのである。

こうして様々な風車に突撃を繰り返した。そうした成果を発表するたびに、多くの方々から、同じようなアイデアがかつてあったと助言された。調べてみるとどれも1950～60年代、すなわち古典期の業績である。20世紀の技術にこうした息吹があったこと、それが半端でない厚みを持っていたこと、洗練期を通じて影を薄くしたものの、まだ私たちの発想と興味を引きつけるだけの生命力を保っていることに感銘を受けた。

しかし、21世紀の初頭にいる私たちに、技術に全幅の信頼を寄せていたあのころの夢自体は、もはや全く響かない。バイオリンを繊細かつ巧妙に弾くロボットがあらわれたと聞いても、鉄腕アトムの線上にあるその夢に、もはや熱狂的価値を感じることはない。ロボット交響楽団など、もはやSFマンガの題材にすらできないのだ。だから、古典期の

技術の種子にいまだ生命力があったとしても、それがその頃の価値観に沿って成長することはないのである。

こうして私たちの手には、変革の予兆と、技術者の当為と、20 世紀に芽吹くことのなかった数多くの種子が残されている。これらをひとつのものに結びあわせるために私たちがなさなければならないのは、21 世紀独自の技術の価値を確立することである。技術者は、人間と技術が再び結びあう価値の構想に力を尽くさなければならない。このことを通じて、20 世紀後半の洗練と淘汰が反省され、クラフトマンシップと技術者の役割が見直され、産業社会のあたらしいあり方を動機付けていくことになるはずである。

6.8 Objectivity の追求

本稿では、これまでの 21 世紀鋼構造フォーラムの活動において、主査を担当させて頂いた以下の WG から私自身が学んだこと、そして 21 世紀の社会・科学領域に貢献したいと熱望する理念を述べることにします。

(第一期)A グループ：生きる建築へのアプローチ

(第二期)WG1：第一期で提案されたテーマの実現化推進

(第三期)WG：展開構造システムと損傷制御構造に関する調査研究

21 世紀は、前世紀の「機械文明」から「知能・環境文明」への転換の時期である。これまで材料レベルから構造レベルまで、それぞれの領域で発展してきた建築技術を地域防災制御の観点から総合的に見直すことは、単なる災害防止だけでなく、エネルギーの共有、さらには個々の建築形態の進化へと発展していく可能性を秘めている。こういった観点から 21 世紀鋼構造フォーラムを展望すると、我々の材料・構造技術が、日本や国際社会、そして全ての時空間に対し、どのような意義を持つのかを考える必要性が見えてくる。最初に、これまでの全活動から、今後の我々が歩むべき道標となるキーワードを探ることにする。

「生きる建築とは何か」という命題から派生した鋼構造技術に関して、第一期では、図 6.1 と図 6.2 に示す 21 世紀の建築として「生きる建築」「地域防災制御システム」の考え方を提案し、建物単体としてだけでなく、特定地域の建物群としての地域防災制御のあり方を示した。また、色彩可変、自己診断、可変というキーワードによる要素技術の可能性を探った。ここでは、「Organic Structural System／生きる表情／治癒／動く建築／エネルギー循環／地域防災／21 世紀の処方箋／考える葦(Thinking Reed)」がキーワードとなっている。

第二期では、第一期で示した地域防災制御システムの考え方を基に地震エネルギー集中型人工地盤及びユニット化構造システムの提案、さらに、それらを実現する高性能要素技術として TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼及び繊維強化金属について研究を行った。ここでは、「自己増強／高靱性／リユース／劣化診断／繊維補強／複合部材／TRIP 鋼」がキーワードとなっている。



図 6.1 生きる建築

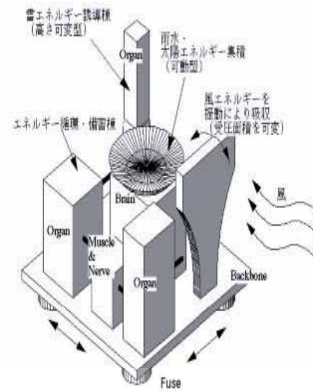


図 6.2 地域防災制御システム

第三期では、21 世紀に求められる建築の姿としての「生きる建築」は、「感じた」結果として「動く」ことにより付加価値を高める建築であるものと考え、「動く」と「感じる」にテーマを絞って研究を行った。ここでは、「展開構造システム／損傷制御構造／地域防災／可変構造／自己診断／自己修復／長寿命／リユース／新しい免震構造／建物の性能の明確化」がキーワードとなっている。

次に、発想の転換を図り、地震動そのものを低減する研究について少し触れておきたい。これは、現在の耐震設計が建物単体のみに着目して行われていることに対し、地震動そのものを制御することを目的としており、21 世紀鋼構造フォーラムにおいて私が担当させて頂いた全ての活動の根源となる理念である。

これまでの建築は、建物に伝達される地震動を科学的かつ経験的に評価し、設計の対象となる建物のみ安全性を確保することに努めてきた。これに対し、全人類に同等な安全性を供給するという地域防災制御の立場から地震動そのもののパワーを低減する手法を開発することが必要ではないだろうか。地震動は、基盤のプレートが運動することにより、プレート内に存在する断層 (Fault) 部分で歪エネルギーが蓄積され、ある破壊靱性値に達した時に断層がすべることにより、エネルギーを開放し、地震波動として伝播したものと考えられる。そこで、材料学・破壊力学の観点から、図 6.3 に示すような現存する断層面にすべりを抑制する補強部材 (イメージしやすいものとして、摩擦杭が考えられる) を打設し、断層のすべりに対し、補強部材の Bridging 効果により地震動のエネルギーを減少させることが考えられる。ここで述べた断層補強は、断層の位置が明確に予測でき、かつ補強するエレメントがどういったものかを科学的に評価する必要があることは言うまでもないが、ここで紹介した概念が地域防災制御システムの一つとして発展していくことを多に期待する。

本稿では、材料技術と構造技術の Collaboration、さらに Objectivity の追求として地域防災制御への期待を論じた。21 世紀に向けて建築設計の自由度は確実に広がるであろう。しかし、自然の節理に適った適切な耐力、靱性、バランスのよい剛性分布を確保するという原則は変わらず、また変わるべきでない。

最後に、21 世紀鋼構造フォーラムの活動が、材料・構造技術の可能性と現時点での技術的限界及び将来の可能性への理解を広く市民に啓蒙し、「市民による、市民のための、市民の鋼構造」が達成されることを期待する。また、常に新しい設計思想を発信し続け、

人類と地球環境に貢献されることを確信して、本稿を終える。

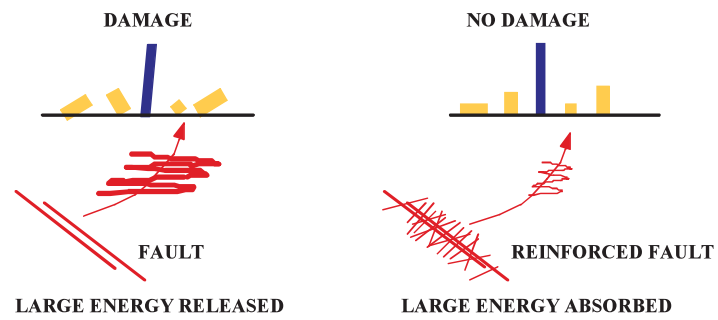


図 6.3 断層面のすべり制御

まとめと謝辞

21世紀鋼構造フォーラムの設立の当初からフォーラム活動に参加した。鋼構造研究分野での活気がないと感じていた時期であったためだ。また、鋼構造技術で建物の骨組みは構築できるが、ひとが使う空間は、床や屋根や壁など鋼構造技術以外の分野、非構造部材などやその選択をする建築家との連携が不可欠であると感じていたので、フォーラムがよい機会を与えてくれるのではないかと期待していた。

フォーラムの設立とともに、第一期の活動として、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」に向けフォーラムからどのような提案をするかが議論された。「生きる」、「進化する」、「解き放たれた」鋼構造と言うシンボリックな概念を掲げて検討しては如何か、と提案した。鋼構造と言えば、ラーメン構造、ブレース構造、そしてシェル構造と相場は決まっているので、そこから発想したのでは21世紀に相応しい提案などまでとても到達できないと思われたからだ。幸い、若手のフォーラムメンバーが、積極的かつ自由な立場でWG活動に参加してくれたので、上記シンポジウムにおいてフォーラム提案を行うことができた。

その後も、第二期、第三期と第一期で提案されたテーマを掘り下げていく検討をしつつ、具体化し、成果とりまとめを行うことができた。レポートの形でできあがった成果以上に、それまでのプロセスでの意見交換を通して、若手の研究者、技術者、実務家間のネットワークが密となったことは、将来、必ずもっと大きな実を結んでくれるものと考えている。

一方で、6年半のフォーラム活動を通じて掲げられた提案の多くは、未だ具体化に向けて検討が開始されていないものも多いが、将来、新たな提案のヒントとなる内容を含んだものであり、活動の足跡は後世に残す価値があるものと信じている。

本資料作成の提案から極短期間で建築研究資料としてまとめることができたのは、各テーマ毎にビジュアルなレポートをこれまできちんとまとめてきたWGメンバーの努力と、建築研究資料の全体構成提案後、師走そして大学入試の忙しい時期にも係わらず短期間で各担当原稿の執筆をして頂いたフォーラムメンバーが居たからである。

最後に、発起人の山内泰之、藤盛紀明、作本好文の各博士をはじめ、御関係いただいたWGリーダーの方々、国土技術政策総合研究所、建築研究所、大学、設計事務所、建設会社、鋼材メーカーの方々に謝意を表します。また、事務局として縁の下からフォーラム活動を支え、また、本資料作成においても過去の資料の収集など日本鉄鋼連盟の糸野徳一氏には大変お世話になりました。ここに記して謝意を表します。

資料 (DVD-ROM)

1. 第一期 21 世紀鋼構造フォーラム

シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」説明用パワーポイント

- ・ (タイトル+ファイル名)
- ・ A グループ報告+1-1-01_生きる.ppt
- ・ B グループ報告 1+1-1-02_進化する 1.ppt
- ・ B グループ報告 2+1-1-03_進化する 2.ppt
- ・ C グループ報告+1-1-04_解き放たれた.pdf
- ・ シンポジウム総まとめ+1-1-05_21 世紀鋼構造技術は何ができるか.ppt

2. 第二期 21 世紀鋼構造フォーラム

鋼構造シンポジウム 2004 説明用パワーポイント

- ・ WG 1 報告 1+2-1-01_ユニットセル.ppt
- ・ WG 1 報告 2+2-1-02_高性能要素.ppt
- ・ WG 1 報告 3+2-1-03_人工地盤.ppt
- ・ WG 3 報告+2-1-04_技術曼荼羅.ppt
- ・ 独立研究テーマ報告 1+2-1-05_薄板鉄鋼材料.ppt
- ・ 独立研究テーマ報告 2+2-1-06_リユース骨組.pdf

鋼構造シンポジウム 2004・ポスターセッション資料

- ・ WG 1 ポスター1+2-2-01_ユニットセルポスター.ppt
- ・ WG 1 ポスター2+2-2-02_高性能要素ポスター.ppt
- ・ WG 1 ポスター3+2-2-03_人工地盤ポスター.ppt
- ・ WG 3 ポスター+2-2-04_技術曼荼羅ポスター.pdf

3. 第三期 21 世紀鋼構造フォーラム

鋼構造シンポジウム 2007 説明用パワーポイント

- ・ 鋼材ダンパーWG 報告+3-1-01_鋼材ダンパー最終報告.ppt
- ・ 薄板鉄鋼 WG 報告+3-1-02_薄板鉄鋼最終報告.ppt
- ・ テーパーWG 報告+3-1-03_テーパー最終報告.pdf
- ・ 展開構造 WG 報告+3-1-04_展開構造最終報告.ppt

鋼構造シンポジウム 2007・ポスターセッション資料

- ・ 鋼材ダンパーWG ポスター1+3-2-01_鋼材ダンパーポスター1.pdf
- ・ 鋼材ダンパーWG ポスター2+3-2-02_鋼材ダンパーポスター2.pdf
- ・ 薄板鉄鋼 WG ポスター1+3-2-03_薄板鉄鋼ポスター1.pdf
- ・ 薄板鉄鋼 WG ポスター2+3-2-04_薄板鉄鋼ポスター2.pdf
- ・ 薄板鉄鋼 WG ポスター3+3-2-05_薄板鉄鋼ポスター3.pdf
- ・ 薄板鉄鋼 WG ポスター4+3-2-06_薄板鉄鋼ポスター4.pdf
- ・ テーパーWG ポスター+3-2-07_テーパーポスター.pdf

- ・展開構造 WG ポスター1+3-2-08_展開構造ポスター1.pdf
- ・展開構造 WG ポスター2+3-2-09_展開構造ポスター2.pdf

4. 21世紀フォーラム最終報告用パワーポイント

- ・21世紀鋼構造フォーラム最終報告+4-1-01_21世紀鋼構造フォーラム最終報告.ppt

参考. 建築研究資料

- ・建築研究資料+5-1-01_建築研究資料.pdf

© 建築研究資料 第113号

平成20年 3月21日 印刷

平成20年 3月28日 発行

編集
発行 独立行政法人建築研究所

〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地
電話(029) 864-2151 (代)
