

「極大地震に対する鋼構造建築物の倒壊防止に関する設計・評価技術の開発」(令和1年度～令和3年度) 評価書 (年度)

令和 3年 2月4日 (木)
建築研究所研究評価委員会
構造分科会長 林 静雄

1. 研究課題の概要

(1) 背景及び目的・必要性

今後、発生が懸念される首都直下地震や巨大海溝型地震などでは、これまでの設計の想定よりも大きな速度応答スペクトルの地震動や長い継続時間の地震動（大きなエネルギー・スペクトルの地震動）が建築物に作用する可能性がある。現在、相模トラフ沿いの地震についての検討が行われており、そこで想定される地震動は、1～2秒程度の短周期領域での速度応答スペクトルが、地域によっては現状の耐震基準の数倍程度のレベルになることが予想されている。このような地震動に対して、現状の耐震基準で設計されている中低層建築物には大きな損傷が生じることが予想され、建築物の倒壊や崩壊の危険性も考えられるレベルである。このような、現行基準法の極稀地震のレベルを超えるような極大地震動に対して、建築物の倒壊、崩壊を防止するためには、建築物の最大耐力以後の終局状態の挙動の解明と倒壊防止のための評価法、設計法の確立が急務である。

このような極大地震動に対する鋼構造建築物の倒壊、崩壊挙動では、梁端部の破断とともに柱にもヒンジが発生して、最終的には柱の座屈や破断による耐力低下によって建築物が崩壊すると考えられる。鋼構造建築物の倒壊、崩壊を防止するためには、柱の局部座屈や破断に伴う耐力劣化現象を解明し、それを評価する方法が必要となる。前年度までの課題では、梁端部破断までの疲労限界性能とそれを用いた評価法を検討した。そこで本研究課題では、鋼構造建築物の倒壊や崩壊を防止するために、鋼構造柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討を行うとともに、柱の耐力劣化による建築物の倒壊を防止するための評価法や設計法を確立することを目的として、実験的、解析的検討を行う。

また、鋼構造建築物では、構造躯体が内外装材に覆われているために、地震後に梁端部等で破断が生じているかどうか容易に確認できない。前年度までに実施した梁端部の損傷検知手法のうち、実用化の可能性が高いと判断された手法について、外装材等の非構造部材や床スラブなどがある場合の影響を調べるための実験的検討を行う。

相模トラフ沿いの地震については、近々に、内閣府等から情報が公表されると考えられる。それに対して、建築物がどのような応答になるか等を適切に評価し、倒壊や崩壊を防止する方法を確立することは、建築研として重要な任務と考えられる。

(2) 研究開発の概要

本研究課題では、鋼構造建築物の柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討を行うとともに、柱部材の耐力劣化による建築物の倒壊を防止する評価法や設計法を確立することを目的として、実験的、解析的検討を行う。また、地震後の梁端部等の破断等の損傷検知手法に関しては、実用化の可能性が高いと考えられる手法を対象にして、外装材等の非構造部材の影響を調べるための検討を行う。

1) 鋼構造柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討

鋼構造建築物の柱部材に関して、繰り返し変形に対する柱の破断や局部座屈による耐力劣化までの限界繰り返し性能を明らかにするために、一定振幅での多数回繰り返し载荷による実験を行い、柱の疲労限界性能曲線を検討する。

2) 柱部材の破断等を伴う鋼構造建築物の倒壊を防止するための評価法と設計法の検討

柱の破断や局部座屈に伴う耐力劣化による建築物の倒壊を防止するための評価法や設計法を確立することを目的として、振動台実験や相模トラフ沿いの巨大地震で想定される地震動による地震応答解析等を行う。また、柱の疲労限界性能曲線を考慮した評価法としてエネルギー法による評価法について検討し、建築物の倒壊を防止するための設計法を検討する。

3) 地震後の鋼構造建築物の梁端部破断等の推定のための非構造部材等の影響を考慮した実用的な損傷検知手法の検討

地震後に梁端部の破断が容易に確認できないと考えられる鋼構造建築物の安全性確保を目的として、前年度までの検討で実用化の可能性が高いと判断された手法（地震計の加速度の積分、スマホによる被災度評価、ピエゾセンサによる破断検知、等）について、外装材等の非構造部材等がセンサの検知に及ぼす影響を調べるための実験的検討を行う。

(3) 達成すべき目標

- 1) 鋼構造建築物の柱部材の破断や局部座屈による耐力低下を考慮した疲労限界性能曲線式の提示。
- 2) 柱部材の破断等による鋼構造建築物の倒壊までの評価法と倒壊防止に関する設計法に関する技術資料の提示。
- 3) 実建物の地震後の梁端部の破断の発生の推定が可能な実用化も考慮した手法に関する技術資料の提示。

(4) 2年度の進捗・達成状況

1) 鋼構造柱部材の破断や局部座屈に関する疲労限界性能の検討

繰り返し変形に対する鉄骨柱の破断や局部座屈による耐力劣化までの限界繰り返し性能を把握するために、一定振幅での鋼管柱試験体の多数回繰り返し载荷による実験を行った。実験パラメータは、幅厚比、軸力比、せん断スパン比、载荷履歴（一定振幅、漸増载荷）であり、合計 28 体の実験結果について、柱部材の限界繰り返し性能に関するデータ整理と分析を行った。幅厚比や履歴振幅によって、終局状態は写真 2 に示すような破断または局部座屈に分類されることがわかり、それらの疲労性能を整理し、疲労性能評価式を検討した。

2) 柱部材の破断等を伴う鋼構造建築物の倒壊を防止するための評価法と設計法の検討

建築基準法の極希地震よりも大きな地震動に対して倒壊や崩壊を防止するための設計法を検討し、設計事例集を作成するために、このような入力地震動や部材の疲労性能評価式を考慮することができる方法として、エネルギー法による評価法を用いて検討を行った。5 つの試設計建物（4 層事務所、8 層事務所、12 層事務所、4 層物流倉庫、9 層事務所）を設定し、通常の極希地震、入力エネルギーが 3 倍の長継続時間地震、速度応答スペクトルが極希地震の 2 倍の直下地震に対する安全性の検証を行った。検討結果の一例として、9 層事務所建物について、エネルギー法による計算結果として、保有エネルギー（棒グラフ）と必要エネルギー（プロット）の比較結果を示す。極希地震の 2 倍の直下地震に対しては、この建物は安全が確保できない可能性があることがわかる。来年度は、これらの大きな地震動に対しても安全が確保される設計法について検討する。

3) 地震後の鋼構造建築物の梁端部破断等の推定のための非構造部材等の影響を考慮した実用的な損傷検知手法の検討

地震計の加速度記録を積分して、各階の慣性力-層間変形関係と部材の疲労性能曲線式から梁端部の損傷（亀裂や破断）を推定する方法について、既往の E-ディフェンスの実大鉄骨造建物の振動台実験（3 層、4 層、18 層建物）や建築研の強震観測建物（咲洲庁舎、千葉県庁）の記録を用いて、建物の一部の階に設置された地震計の記録から、設置していない階の加速度応答を推定し、設置していない階の梁端部の損傷を予測する方法を検討した。例として咲洲庁舎の検討結果を示す。咲洲庁舎は 1、18、38、52 階に地震計が設置されている。ここでは、2011 年東北地方太平洋沖地震の 1 階の観測記録を 2.5 倍した加速度による地震応答解析を行い、地震計設置階の加速度応答を用いて他の階の加速度応答を推定し、それを積分して梁端部の損傷度 D 値を計算した。ここで検討した方法によって、地震応答解析による梁端部の損傷度 D 値を概ね推定できることが明らかになった。来年度は、川崎市の 7 階建ての S 造建物を対象にして、全ての階に無線式の地震計を設置して実用化に向けた検証を行う予定である。

地震計の加速度記録から、梁端部等の損傷を推定する方法について、外装材等の非構造部材の影響を検討するため、1 層 1 スパン骨組の振動台実験を実施した。入力地震動特性（直下地震と長継続時間地震）、非構造部材（ALC 外壁と LGS 間仕切り壁）の有無をパラメータとした 4 体の骨組の実験を実施した。実験の結果、加速度記録の積分は、変位計と精度良く対応していることがわかった。また、今回の実験結果からは、地震計の加速度記録を積分して梁端部の損傷を推定する方法について、非構造部材の影響はほとんどないと考えられるが、今後さらに分析を行う予定である。

2. 研究評価委員会（分科会）の所見（担当分科会名：構造分科会）

- 1) 実用性も含めて、質・量ともに十分な研究成果があがっていると考える。エネルギー法をどの地域でどの程度の極大地震動を考えるのが妥当かなど、成果の適切な使い方なども含めて、社会で役立つように情報発信していただきたい。
- 2) 社会的にも重要な課題と認められ、また、研究も順調に進展していると認められる。
- 3) 直下地震として代表される兵庫県南部地震の JMA 神戸波形、長時間継続地震としての東北地方太平洋沖地震の東北大波形を入力地震動とする、強震動と長周期地震動の構造物への影響を詳しく検討している。将来、国内外で起きる可能性のある地震動として、この 2 波形で十分か、さらに 2016 年熊本地震の西原村や益城町での観測記録のように、永久変位（フリングステップ）を含んだ断層ごく近傍強震動は、地表に活断層が現れる浅い活断層地震（上町断層や警固断層など）の際に出現する可能性が高く、これらの新たに観測された強震動についても今後検討が必要かと思う。
- 4) 極大地震に対する鉄骨造建築構造の性状を広く把握し、それを一般の設計者でも容易にその知見を用いることができるようになることは地震に強い社会を作るうえで有用である。過去の研究で鉄骨梁の検討がよくなされていることを鑑み、鉄骨柱に絞った静的加力実験を行い、鉄骨骨組全体の性状を効率的に把握するように研究計画が立案されている。解析的検討や振動台実験もなされて多面的な検討が進められている。なお、これらの成果を整理して来年度では極大地震に対する鉄骨造建築構造の挙動に関する平易な評価方法を確立することが期待される。
- 5) 研究開発は順調に進捗しており、成果が期待できる。エネルギー法の適用に当たっては、その評価の妥当性について振動応答解析などとの対応も確認されてはいかか。また、倒壊、崩壊の検証のみならず、継続使用性の検討にも使える設計法にしていただけると良いのではないか。
- 6) 実験では非構造部材に損傷がみられないが、実際の地震被害では外壁の崩落など被害が多くみられる。非構造部材に損傷が発生すると提案の損傷予測に影響が出るということはないか。
- 7) 非構造部材を取り付けた振動台実験について、なかなか大きな地震が発生しないことを考えると、弾性

範囲内での対応として、非構造部材が取り付くことによって減衰に何か影響があるかについては、興味深いところである。

参考：建築研究所としての対応内容

- 1)、2) エネルギー法における極大地震動の設定方法など、ここで提案する方法の適切な使い方にも注意して、社会に役立つような情報発信をしていきたいと思えます。
- 3) 今後、様々な特性の地震動に対する建築物の応答などについても検討し、それらに対する応答評価についても、ここで提案するエネルギー法の手法の中で考慮できるように研究を進めていきたいと思えます。
- 4) 来年度（最終年度）には、ここで実施した静的加力実験、振動台実験、試設計等も含めた解析的検討に基づいて、一般の設計者が容易に用いることができる評価方法を提示したいと思えます。
- 5) エネルギー法による評価方法の地震応答解析による検証についても、いくつか実施しておりますので、これらの評価法の提案とともに地震応答解析による検証結果も併せて公表していきたいと思えます。また、現状で、継続使用性の検討にも使えるように検討していますので、それらについても、順次公表していきたいと思えます。
- 6) E-ディフェンスで行われた既往の実大4層鉄骨造建物の振動台実験では、外装材が取り付けられた試験体の実験が行われており、その結果が公表されています。それらのデータを検討した結果、地震応答中に外装材に損傷が発生していても、ここで提案する加速度積分による評価方法にほとんど影響を及ぼさないことを確認しています。ですので、大地震時において、非構造部材に損傷が生じた場合でも、ここで提案する方法は使用できるものと考えています。
- 7) ここで実施した振動台実験のデータを分析して、弾性範囲内での減衰について、外装材の影響がどの程度であるか検討する予定です。

3. 評価結果

- A 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができる。
- B 研究開発課題として、目標の達成を概ね見込むことができる。
- C 研究開発課題として、目標の達成を見込むことができない。