

# 損傷制御に向けた高靱性コンクリートの可能性

構造研究グループ 上席研究員 福山 洋

## 目次

### はじめに

#### 研究の背景

#### 1) 損傷制御の必要性

地球環境問題

阪神淡路大震災の教訓

耐震補強における目標の設定

既存建築ストックの問題

#### 2) 性能設計と技術開発

高靱性コンクリートの特徴

高靱性コンクリートの構造部材への適用（部材自身の損傷制御）

##### 1) 梁部材の構造性能向上効果

##### 2) 柱部材の構造性能向上効果

##### 3) 部材の損傷低減効果

高靱性コンクリートの応答制御要素への適用（建物全体の損傷制御）

##### 1) 応答制御要素の概要と適用の考え方

##### 2) 既存ピロティ建築物の損傷制御

ピロティ建築物の1階層崩壊の要因

ピロティ補強に対する条件

既存ピロティ建築物の応答制御方法

応答制御の効果

### おわりに

#### 参考文献

### はじめに

土木・建築構造物に対する社会的な要求は、社会および経済の発展に伴い常に変化してきたが、近年における生活パターンや社会的活動の急速な多様化に比例して、その項目や水準もますます多様化してきている。おそらく、社会が成熟・発展を続ける限りこの傾向は将来においても持続していくものと考えられ、21世紀の技術開発においては、それらの要求を如何に適切に充足できるかが求められる。

これはすなわち、法が規定するような最低限の項目やレベルを大きく超える性能の実現を意味するため、そこには必ず新たな技術や材料が求められることになる。

本稿では、安全・安心を目的とした社会からの新たな要求として、建築物の損傷制御を取り上げる。これは修復性に係わるもので、損傷に起因する何らかの性能の低下（一般には、安全性、使用性、耐久性などの低下を指す）が生じないようにするため、もしくは、低下してもその性能を

容易な修復により元のレベルに回復できるようにするために、損傷を防止もしくは抑制することの総称である。ここでは、まず研究の背景として損傷制御の必要性を整理し、次に、そのための新しい材料技術の一例として高靱性コンクリートを紹介する。特に、新材料の特徴を如何に損傷制御という高いレベルの要求性能の実現に結びつけるか、に重点を置いて論を進める。

## 研究の背景

### 1) 損傷制御の必要性<sup>1)</sup>

#### 地球環境問題

短命でスクラップアンドビルドを繰り返す我が国の建築物の長寿命化は、省エネルギーや廃棄物の削減といった地球環境問題の観点から喫緊の課題となっている。建築物の長寿命化を実現するためには、空間的な要求の充足、設備等の維持更新の容易さ、および構造物としての耐久性の向上が不可欠である<sup>2)</sup>が、さらに耐用年限中に遭遇する大地震などの外乱に対しても損傷・劣化を適切に抑制・防止し、地震後も容易な修復により（出来れば修復無しで）建築物の長年にわたる継続使用を保証するような技術の開発も求められる。

#### 阪神淡路大震災の教訓

このような、大地震に対する建築物の損傷を抑制・防止するという要求は、兵庫県南部地震において、人命は守られたが損傷が大きく修復コストが高いため、結局は取り壊され建て替えられた建築物（図 - 1）が多く見られたという事実から沸き起こったものであり、ライフサイクルコストの概念が必要であることを示唆している。また、大地震後も、通常の生活や社会・経済活動が維持できること（もしくは迅速に回復できること）という要求も強い。すなわち、構造物の安全性や使用性といった一般性能に加えて、修復性の評価が極めて重要であることを物語っている。

#### 耐震改修における目標の設定

現在、既存建築物の耐震改修が全国で進められているが、その目標は人命の保護であり直接的に損傷を防止しているわけではないため、近い将来に発生する大地震では補強された建築物がある程度の損傷を受けることは十分に予想される。その損傷に対して、再度多大な修復コストが掛かるとすると、社会はそれを許容するであろうか。

耐震補強においても、修復に莫大な費用を要する（そのため場合によっては取り壊して新築に建て替えられる）ような建築物の損傷は、適切に制御されなければならない。



(a) 建物全体（構造は鉄筋コンクリート造剛節架構）



(b) 柱のせん断破壊や損傷 (c) 柱、梁、接合部の損傷

図 - 1 1995年兵庫県南部地震により、倒壊は免れたが大きな損傷を受けた新耐震設計の建築物

#### 既存建築ストックの問題

また、我が国では高度成長期に建設された膨大な建築ストックの更新を検討する時期が差し迫っていることから、それらを良好な長寿命ストックに改修し、建て替えコストと廃棄物を削減するための技術開発も喫緊の課題である。ここでも、崩壊しただけでなく損傷も受けず、持続的供用が可能な構造物が強く求められているが、これを社会が許容するコストで実現できる技術は、まだ全く不足している状況である。

#### 2) 性能設計と技術開発

前述した、社会からの構造物へのさまざまな要求性能を適切に充足するためには、性能に基づく設計システムの導入と新しい構造・材料技術の開発が不可欠となる。前者は、構造物の性能を多様にかつ自由に設定でき、その要求され

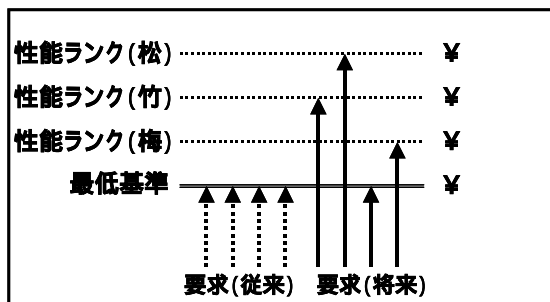


図 - 2 要求性能とコストの比較

た性能に基づき設計者が構造物を具現化するとともに要求性能が充足されていることを適切な方法で検証し、その検証された性能が明示されるといった性能設計システムであり、後者はこれまでよりも高い要求もしくは新たな種類の要求を適切に具現化し得る技術である。

構造物の性能が評価され、評価された性能が開示されるようになると、発注者は、自動車やコンピュータのように性能レベルとコストを比較した商品として構造物を扱うことができるようになり(図 - 2) 当然、最低基準である法の要求よりも高いレベルの性能の要求が出てくる。結果として、要求される高性能を実現できるような新たな技術が求められることとなる。

構造設計の目標を例に挙げると、従来の構造技術は、主として人命の保全を目的として技術開発がなされ設計・施工が行われてきたため、その目標が損傷制御に変わることは、従来技術だけでは必ずしも目標をクリアできないことを意味し、新たな目標に沿った技術開発が不可欠であることを表している。

高靱性コンクリートの利用は、従来の鉄筋コンクリート(RC)構造物に対してより高い性能や新たな種類の価値を付与できる可能性を有しており、これが社会の要求と合致すれば性能設計における有用な一つの技術となる。次章から、この材料の特徴とそれを活かした適用の例を紹介する。

### 高靱性コンクリートの特徴

高靱性コンクリート(本原稿では「高靱性コンクリート」と略称しているが、正式には「高靱性繊維補強セメント複合材料(HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)」と呼ばれている)は、モルタルマトリックス中に短繊維を体積比で 1~2%程度混入することにより、引張応力下において最初のひびわれが発生した後も 1~2%程度のひずみまで応力が低下しないひずみ硬化挙動(strain hardening property)を示し、かつマ

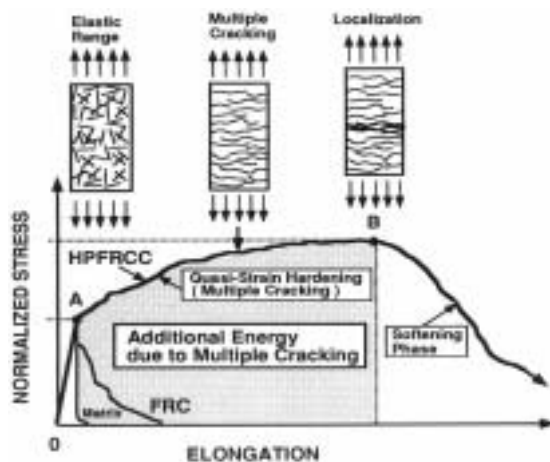


図 - 3 高靱性セメント複合材料(HPFRCC)の引張応力と伸びの関係<sup>3)</sup>



図 - 4 高靱性セメント複合材料(HPFRCC)の曲げ試験の状況

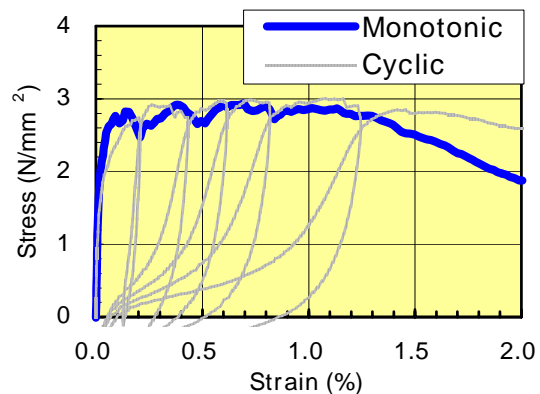


図 - 5 HPFRCCの引張応力 - ひずみ関係の例(ポリエチレンとスチールコードをそれぞれ1%づつW/C=45%のモルタルに混入したHPFRCCの場合)

ルチブルクラッキング(Multiple cracking property)と呼ばれる多数の微細なひび割れが分散発生する特徴を有する<sup>4)</sup>(図 - 3)。このような特徴を有するHPFRCCのみで作製された薄板の曲げ試験の様子を図 - 4に示す。この写真は、従来のセメント系材料の「引張に脆い」という欠点が

HPFRCC によって克服されたことを物語っている。なお、混入する繊維の種類によっては、引張特性のみならず、圧縮特性においても横補強筋によって拘束されたコンクリートと同様な靱性能が得られる。

ひずみ硬化特性やマルチプルクラッキングを実現するための必要条件は、ひび割れ面で繊維により架橋される力がマトリクスのひび割れ時の引張力を上回ることである。これには繊維の強度、マトリクスの強度、繊維とマトリクスの付着強度、繊維の混入量、マトリクスの空気量など多くの要因が影響するが、これらは同時に、繊維の分散性や HPFRCC の施工性にも関係する。一般に、HPFRCC の調合に対する条件は、力学特性の観点からと施工性や繊維の分散性の観点からでは相反する場合が多く、これが HPFRCC の実現を難しくしている。しかし、これは逆に考えると、多くの影響因子を適切にコントロールできれば、さまざまな種類の HPFRCC を実現できることも意味している。材料については、既に幾つかの機関で複数の HPFRCC が開発されてきており、一部ではその調合条件等も開示されているので、材料開発の段階は既にクリアしている。図 - 5 に、シリンダーの一軸引張試験より得られた HPFRCC の引張応力 - ひずみ関係を、一例として示す。

これらの優れた材料特性は、HPFRCC をコンクリートの代わりに用いることにより、鉄筋コンクリート系部材の破壊機構、変形能、履歴特性および損傷度等を適切にコントロールできる可能性を示唆している。しかも、HPFRCC はセメント系の材料であるため、さまざまな形状を創製でき、その部材の形状や構成材料の種類により剛性や強度等も容易にコントロールできる。このため、HPFRCC にはさまざまな適用が考えられるが、ここではその例として構造部材に適用して、当該部材の構造性能を向上させ損傷を低減する適用方法と、応答制御要素として適用することにより建築物の地震応答変位を低減し、それにより既存 RC 建築物全体の損傷を低減する方法を取り上げ、その特徴と可能性および適用に当たっての考え方を示す。

#### 高靱性コンクリートの構造部材への適用（部材自身の損傷制御）

HPFRCC を適用した構造要素について、実験によりその構造性能を検討した例を以下に紹介する<sup>5) 6) 7)</sup>。

##### 1) 梁部材の構造性能向上効果

図 - 6、7 に RC 梁と HPFRCC を用いた梁のせん断力 - 変形角関係および変形角 5 % 時の損傷状況を比較して示

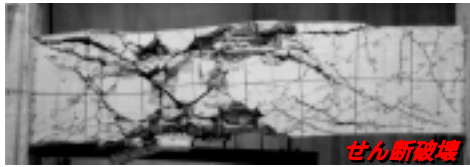
す。図 - 6 は、RC 試験体がせん断破壊するように設計されたもの、図 - 7 は RC 試験体が付着割裂破壊するように設計されたものであり、それぞれ形状や配筋は同一でコンクリートのみを PVA 繊維を体積比で 1.5% 混入した HPFRCC に置き換えた試験体を用意し、比較実験を行っている。試験体は、何れも断面  $200 \times 270\text{mm}$ 、クリアスパン  $1080\text{mm}$  であり、実験時の圧縮強度は HPFRCC が  $52.5 \text{ N/mm}^2$ 、コンクリートが  $58.3 \text{ N/mm}^2$  である。実験は、大野式による逆対称モーメントを正負交番繰り返し載荷する方法により行われた。

実験では、図 - 6 に示すように、HPFRCC を用いることによって、RC で見られたせん断破壊や付着割裂破壊が防止され、曲げ降伏型の靱性に富む履歴性状が得られている。これは、HPFRCC の引張靱性により、HPFRCC がせん断補強筋と共にせん断伝達機構の一つであるトラス機構を形成しせん断力に抵抗すること、および、HPFRCC 中の繊維がマトリクスの割裂に対して有効に抵抗し、破壊を防止することによるものである。また、RC 試験体がコンクリートの打ち直しといった大規模な補修を要するほどの損傷を受けたのに対し HPFRCC では写真に示すように非常に細かなひび割れが試験体全体に分散して発生しており、損傷の程度は大きく軽減されている。これらより、HPFRCC には部材のせん断強度や付着割裂強度を向上させ、また、損傷を低減させる効果があることが確認された。なお、HPFRCC 試験体は、マルチプルクラッキングにより部材内の応力の流れを伺うことができるというユニークな特徴も有している。

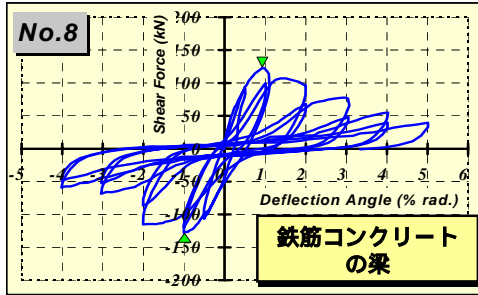
##### 2) 柱部材の構造性能向上効果

図 - 8 にせん断破壊型に設計された RC 柱と、そのコンクリートのみを HPFRCC に置き換えた柱との、せん断力 - 変形角関係および変形角 2 % 時の損傷状況を示す。ここに示す試験体は、何れも断面  $300 \times 300\text{mm}$ 、クリアスパン  $900\text{mm}$ 、帯筋比 0.6% で、実験時の軸力比は 0.2、圧縮強度は HPFRCC が  $21.0 \text{ N/mm}^2$ 、コンクリートが  $27.2 \text{ N/mm}^2$  である。加力は、建研式の逆対称モーメントを正負交番繰り返し載荷する方法で行われた。

実験では、梁の場合と同様に、RC 柱が曲げ降伏に先行してせん断破壊し、耐力低下の大きな履歴性状を示したのに対し、HPFRCC 柱は脆性破壊を防止し、曲げ降伏型の靱性に富む履歴性状を示した。また、HPFRCC 柱では、RC 柱で見られた大きなせん断ひび割れや付着割裂ひび割れは見られず、損傷程度も大きく改善された。



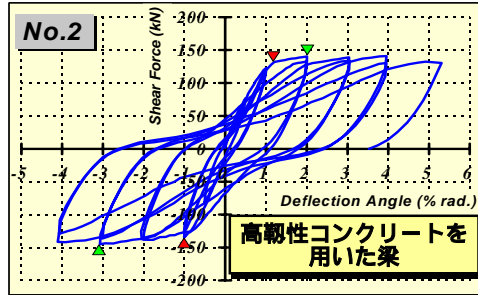
鉄筋コンクリート造の梁：  
せん断破壊により、激しく損傷している



(a) RC 梁 (せん断破壊)



左と同じ配筋で、高靱性コンクリートを用いた梁：  
破壊は防止されており、損傷もずっと小さい

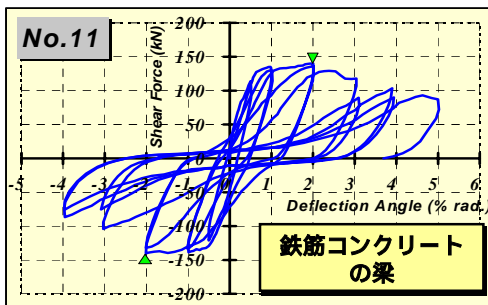


(b) HPFRCC 梁 (曲げ降伏)

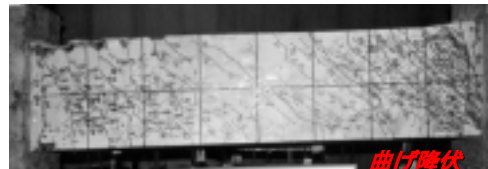
図 - 6 せん断破壊型に設計された RC 梁と、同一配筋の HPFRCC 梁の比較



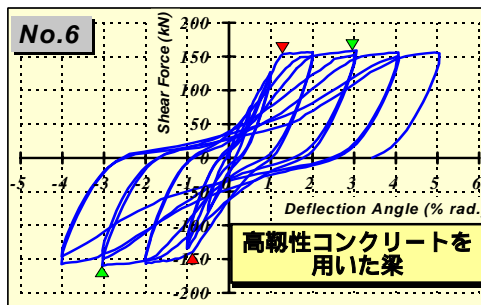
鉄筋コンクリート造の梁：  
付着割裂破壊により、損傷が大きい



(a) RC 梁 (付着割裂破壊)



左と同じ配筋で、高靱性コンクリートを用いた梁：  
破壊は防止されており、損傷もずっと小さい



(b) HPFRCC 梁 (曲げ降伏)

図 - 7 付着割裂破壊型に設計された RC 梁と、同一配筋の HPFRCC 梁の比較

また、軸力比を 0.4 に上げた実験において、HPFRCC がかぶりコンクリートの剥落を防止すると共にせん断補強筋のひずみを低減させることから、せん断補強効果と共にコンクリートの拘束効果が向上することも確認されている。

### 3) 部材の損傷低減効果

図 - 9 に、梁試験体 (No.8 と No.2) および柱試験体で観察された、最大せん断ひび割れ幅と部材変形角の関係を示す。最大せん断ひび割れ幅は、RC 試験体では 1% rad. 程度の変形角で急激に増加し 1mm を超えているのに対し、HPFRCC 試験体では、2% rad. の変形角までは、何れも

0.2~0.3mm 程度に収まっている。さらにそれ以降でも、一部のせん断ひび割れ幅は大きく口開いたが、ほとんどのせん断ひび割れ幅は、実験における最大変形角 5% rad. まで 0.2mm を越えることはなかった。この程度のひび割れ幅は、一般の RC 構造においては耐久性や使用性の観点から許容されるひび割れ幅の限界値と考えられていることから、以上の結果は、大地震後においても構造物の使用性や耐久性が確保でき、この観点からの修復を要しない可能性があることを示唆するものである。

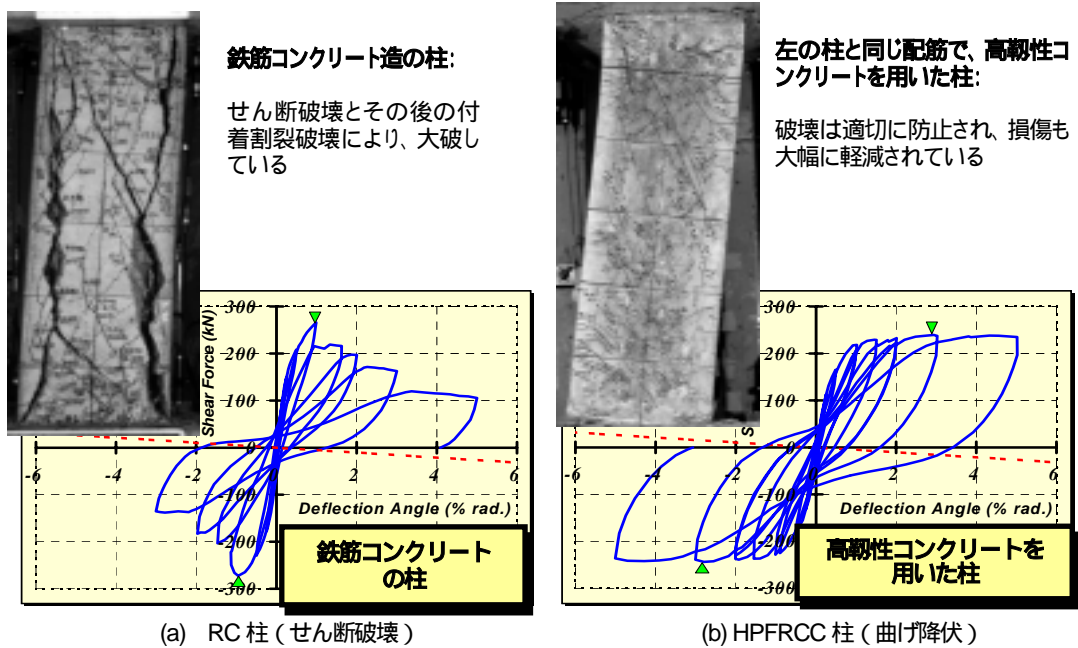


図 - 8 せん断破壊型に設計された RC 柱と、同一配筋の HPFRCC 柱の比較

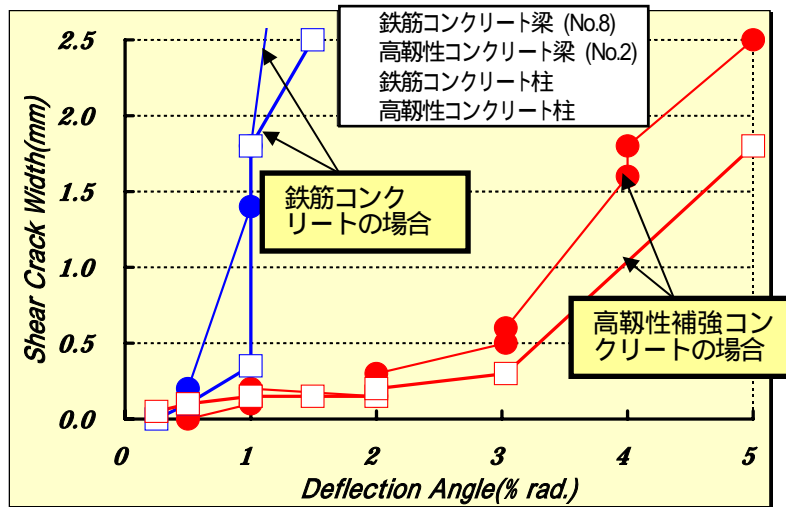


図 - 9 残留せん断ひび割れ幅の推移

### 高靱性コンクリートの応答制御要素への適用 (建物全体の損傷制御)

#### 1) 応答制御要素の概要と適用の考え方

構造物全体の応答変位を低減させ、各建物構成部材の損傷を低減させる応答制御要素として、図 - 10 に示す短スパンの柱部材を想定している。これは、高い剛性と強度および靱性能を兼ね備えた構造要素であり、小さな変形より高い応力を負担し効率的に応答制御を行うことができるため、鋼構造のほか鋼構造に比べて比較的剛性の大きなコンクリート系構造物の応答制御にも適している。

しかも、要素の剛性や耐力は、その形状や配筋および HPFRCC の種類により容易に変えられることから、自由な成形性を有するセメント材料であることから、特性や形状が個々の構造物に最適化された応答制御要素を得ることができる。図 - 10 では、スタブを設けて短スパンの応答制御要素とすることで、比較的小さな要素で大きな剛性と強度 (水平抵抗力) を得ることを意図している。なお、スタブの役割は、応答制御要素のスパン調節の他に、主筋の定着および要素を架構へ緊結することである。



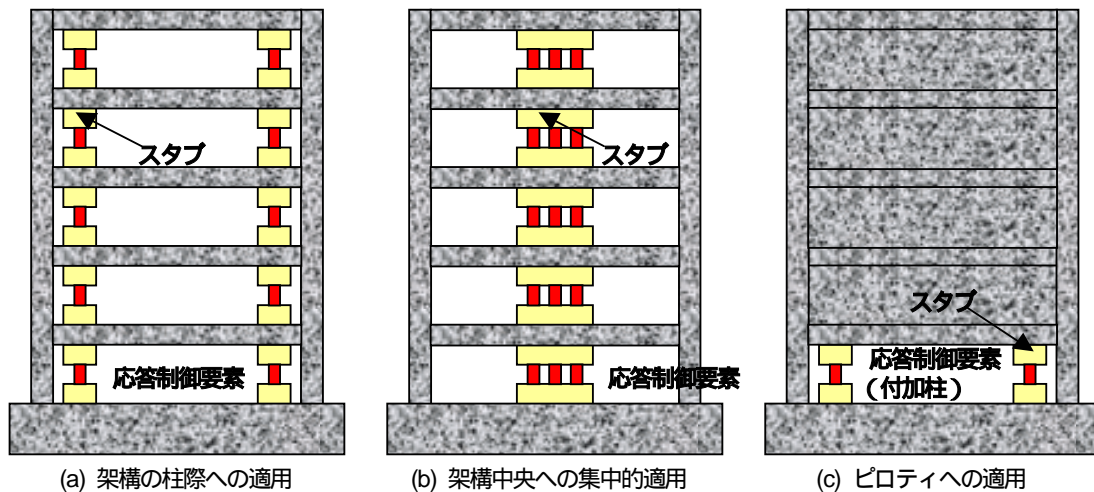


図 - 10 応答制御要素のイメージ

このような応答制御要素の構造性能を静的加力実験により調べたところ、図 - 11 に示すように、従来のモルタルやコンクリートでは損傷が大きく、最終的には大きなせん断と圧縮の力により破壊し、十分な変形能が得られなかったが、HPFRCC を用いることにより、12% rad.以上の大きな変形能と損傷の低減効果が確認できた<sup>8)</sup>。

建築物においては、この応答制御要素を構造設計上無視している非構造部位へ適用することにより、平面計画に影響を及ぼさずに性能を向上させることができる。さらに大きな特徴は、安価なセメント系材料なので、繊維を混入してもなお、低降伏点鋼、摩擦、粘弾性体、粘性流体などを用いた既存の制振ダンパーに比べて大きなコスト低減が見込まれることである。

なお、HPFRCC 応答制御要素のエネルギー吸収は主として鉄筋による効果に期待しており、HPFRCC 材料のエネルギー吸収そのものに期待しているわけではない。HPFRCC の役割は、応答制御要素が大変形まで効果的にエネルギー吸収能や高い応力負担能力を発揮できるように鉄筋とマトリクスの一団性を最大限に確保することであり、具体的には、鉄筋降伏後も含めてせん断破壊、付着割裂破壊、定着破壊などの脆性的な破壊を防止するためである。また、応答制御要素はその端部の曲げ変形が卓越することにより図 - 11(b)の写真のように回転変形が生じるが、それによる鉛直伸びが架構により拘束されるため応答制御要素には大きな圧縮力が作用する。そのため、HPFRCC には脆性的な圧縮破壊を防止するという役割も期待されている。

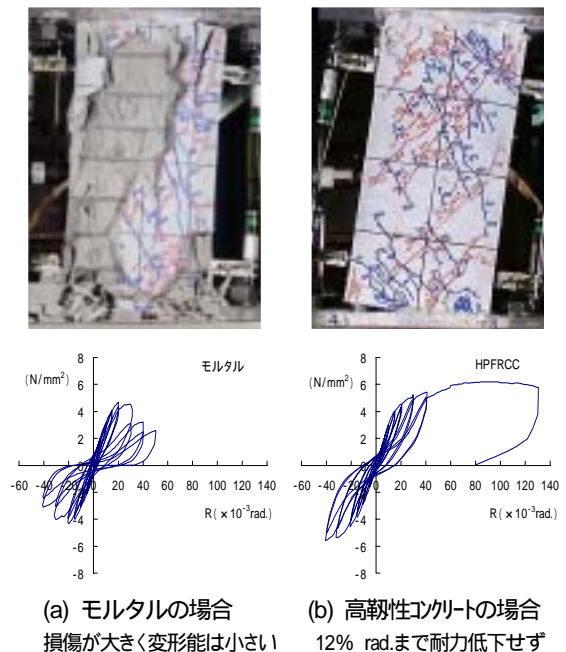
## 2) 既存ピロティ建築物の損傷制御

ここでは、図 10(c)に示すピロティへの適用を対象に、

その考え方と適用の可能性についての検討結果を紹介する。

### ピロティ建築物の1階層崩壊の要因

図 - 12 はピロティ建築物の代表的な被害例を示したものである。図 - 12(a)は、過去の地震被害で度々見られた柱のせん断破壊にともなう1階層崩壊である。この種の被害は現行基準により設計されたピロティ建築物ではほぼ防止されてきており、兵庫県南部地震においてはこれ以外の被害が、ピロティ建築物の新たな特筆すべき被害として見られた。それは図 - 12(b)に示すような1階の水平耐力不足



(a) モルタルの場合 損傷が大きく変形能は小さい (b) 高靱性コンクリートの場合 12% rad.まで耐力低下せず

図 - 11 HPFRCC 応答制御要素の水平加力実験結果

により変形が1階に集中したことによる層崩壊と、図-12(c)に示すような転倒モーメントに起因する大きな変動軸力が作用したことによる1階柱の破壊である。図-12(c)において主筋の座屈は、引張応力下において主筋が降伏した後の大きな圧縮軸力により生じたものと考えられる。仮に、主筋の座屈後に再度大きな引張軸力が柱に作用した場合には、主筋の破断が生じる可能性も考えられる。これらより、ピロティ建築物の安全性を考える上では、柱のせん断破壊の防止に加えて1階の応答変位を小さくするとともに、柱に生じる軸力を出来るだけ小さくすることが重要であるといえる。

#### ピロティ補強に対する条件

ピロティ建築物においてピロティ階の応答を低減する方法としては、一般にピロティ階の張り間方向に耐力壁を設けて1階から連続する連層耐力壁とし、この部分に水平力の多くを負担させる方法が考えられる。しかしながら、ピロティ構造はもともと下層階に広いスペースを設けることにより、そこを駐車場や店舗などとして利用するために空間をデザインされた構造であるため、耐力壁を設けることはピロティ空間の機能を制限する、もしくは変えることを意味する。

建築物の機能の観点から耐力壁を設けることが許容される場合には、そのような応答制御方法は構造的に信頼でき望ましい方法であると考えられるが、ピロティ階の広い空間の確保が要求される場合には、耐力壁のみならず空間

を塞ぐブレースや制振装置などは用いることができない。

#### 既存ピロティ建築物の応答制御方法

ピロティ建築物は損傷がピロティ階に集中しやすい構造であるが、もしそのピロティ階の応答や損傷を適切に制御できれば、建築物全体の損傷制御を容易に実現できることとなり、むしろ損傷制御には適した構造であるとも言える。制御した結果、損傷が上層へ移行するような状態はもろん避けなければならないので、ピロティ階をただ強くすればいいと言うものでもない。

本稿では、ピロティ建築物の応答変位を低減させ建物全体の損傷を低減させる応答制御要素として、図-10(c)に示す付加柱を提案する。この付加柱の特徴は、比較的小さな要素でピロティ層の剛性と強度を大幅に増加させられることと、軸力を負担できることである。更に、上階が耐力壁なので、柱梁剛節架構の場合に考えられる梁の早期降伏を防ぐための特別な補強をしなくても、応答制御要素を有効に効かせることができる。つまり、この付加柱は図-12(b)および(c)に示したピロティ建築物の崩壊要因の両ケースに対して効果があると考えられる。

#### 応答制御の効果

既存柱のすぐ隣に靱性のある付加柱を設ける方法により、ピロティ空間をほぼ確保しつつ地震に対する損傷を軽減できることを、パラメトリック地震応答解析の結果に基づき示す。



(a) 柱のせん断破壊による崩壊



(b) 1階に過度の変形集中が生じたことによる層崩壊



(c) 転倒モーメントによる大きな変動軸力が柱に作用したことによる崩壊

図-12 ピロティ建築物の崩壊形式の分類



### a. 解析概要

解析検討を行った建築物は、桁行方向が7.2m×6スパン、張り間方向が10.8m×1スパンの6階および10階建て共同住宅である。図-13に建築物の平面図および張り間方向の軸組図を示す。検討対象建築物は兵庫県南部地震が発生した1995年以前の設計基準に基づき設計を行った。検討対象建築物の付加柱無しでのベースシア係数は6階建てが0.51、10階建てが0.48である。

解析は建築物の張り間方向1スパンのみを取り出し、各部材をバネモデルに置換して時刻歴地震応答解析を行った<sup>9)</sup>。入力地震波は、El Centro NS、Taft EW、Hachinohe NSを最大速度で50cm/secに基準化したものを用いた。

付加柱にはさまざまな設定方法があるが、ここではピロティ層の既存柱を基準とし、寸法はその半分(断面は1/4)長さは1/2とした。その結果、体積は柱の1/8となる。なお、柱に比べて断面の曲げ強度は1/4、曲げ降伏時せん断力は1/2となるように主筋量を設定した。

### b. 応答解析結果

図-14に応答最大層間変形角の分布を示す。6階、10階建物とも、付加柱が無い場合の1階層間変形角は最大で約2%であるが、これが付加柱を設置することにより0.5%前後に低減されている。すなわち、既存柱はほぼ弾性域に留まっており、このような大地震に対しても、修復を要するような損傷は回避できている。

なお、付加柱の軸力は全軸力の概ね3割程度を負担しており、付加柱が負担した分だけ既存柱の軸力負担が軽減されている。例えば、10階建てのEl Centro NS波の場合に、既存柱の最大軸力比は付加柱無しの0.36から0.24となった。

次に、より大きな入力地震波に対するの応答性状を確認するために、入力レベルを最大速度で75cm/secに基準化した場合の、El Centro NS波についての応答結果を図-15に示す。6階建ての場合、10階建てと比較して1階への変形集中の度合いが高いため、50cm/sec入力時と同様に付加柱の効果が顕著に現れ、付加柱無しの場合の1階層間変形角約4.3%を1.2%と、応答変位は大きく低減されており、建物には多少の損傷は生じるが、安全性は十分に確保できるレベルである。一方、10階建てについては、付加柱無しの1階層間変形3.8%が半分以下の約1.5%に低減されているが、2階以上の壁にせん断破壊が生じている。ここでは、主として1層の強度を上げることによる応答変位の低減を意図しているが、上げ過ぎるとこのように損傷が2階に生

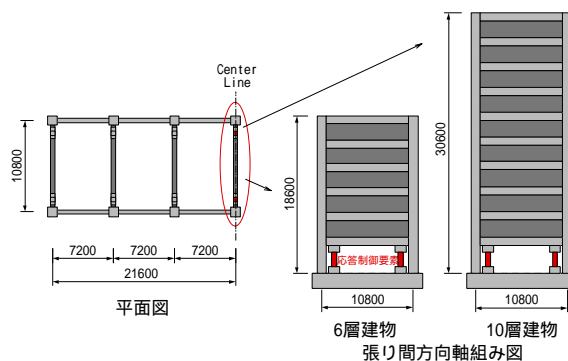
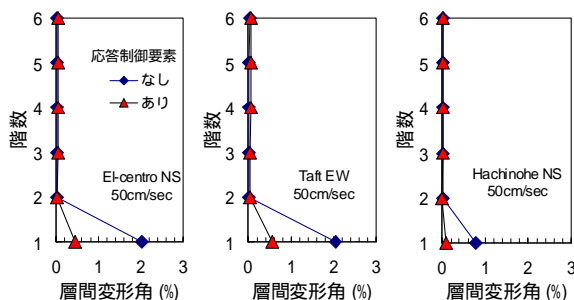
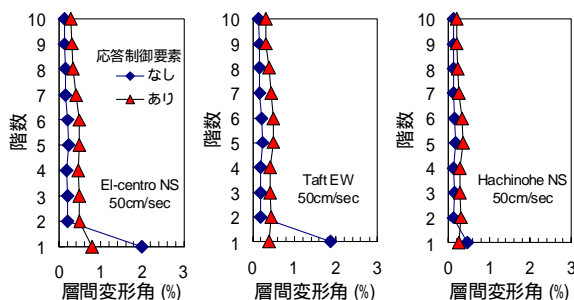


図-13 平面図および張り間方向軸組図

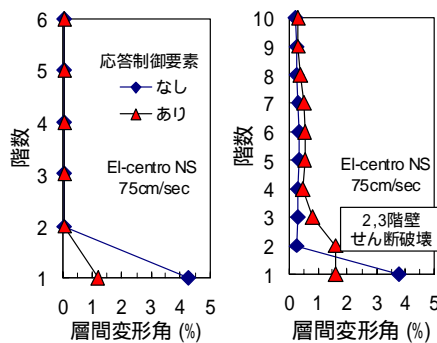


(a) 6階建て建築物



(b) 10階建て建築物

図-14 地震応答解析結果(入力地震動を最大速度で50cm/secに基準化した場合)



(a) 6階建て建築物 (b) 10階建て建築物

図-15 地震応答解析結果(入力地震動を最大速度で75cm/secに基準化した場合)

じる場合もあり注意を要する。

何れにしても、ここで提案する応答制御要素(HPFRCC付加柱)により、通常の設計で考慮されるレベルの大地震に対しても、ピロティ建築物の応答変位をほぼ弾性範囲に留めることにより、損傷を防止することが可能であることが確認できた。

### おわりに

本稿では、安全・安心を目的とした社会からの新たな要求として、建築物の損傷制御を取り上げた。第2章でも述べたように、地球環境問題、阪神淡路大震災の教訓、耐震補強における目標の設定、既存建築ストックの問題、および性能設計と技術開発の関係の観点から考えると、損傷制御の必要性は今後ますます重要性を増すと考えられる。

損傷制御の実現には、その設計体系の確立とそれを実現する技術の蓄積を要するが、これはこれまで安全性に関して行ってきたものと同等レベルの研究開発が必要とされることを意味する。今後、多くの関連する機関が目的意識を共有し、有機的かつ継続的な活動を行っていく必要がある。

ここでは、損傷制御のための新しい材料技術の一例として高靱性コンクリートを例に挙げ、その特徴を如何に損傷制御という高いレベルの要求性能の実現に結びつけるかに重点を置いて話を進めた。このような損傷制御技術が一般の建築物に適用されるためには、性能に照らし合わせて社会に受け入れられるコストでの実現が不可欠である。これから、真の意味での性能設計体系が構築されていかなければならない。

### 参考文献

- 1) 福山洋：コンクリート構造への新素材の利用、セメント・コンクリート、No.660、pp.1-12、2002.2
- 2) 藤本秀一：建築物の長期耐用化を考える 長期耐用型集合住宅(SI住宅)の建設・供給技術、BRI-H14講演会テキスト、独立行政法人建築研究所、pp.5-12、2003.3
- 3) High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Volume 2 (HPFRCC-95): Pre-Proceedings of the Second International RILEM Workshop on HPFRCC, Edited by A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, 1995
- 4) 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、2002.1
- 5) 蔵谷幸憲、福山洋、中野克彦、松崎育弘：高靱性型セメント系複合材料を用いた梁部材の構造性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.3、pp.511~516、1999.7
- 6) 笠原美幸、松崎育弘、中野克彦、福山洋：高靱性型セメント系複合材料を用いた柱部材の構造性能に関する実験研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.3、pp.385-390、2000.6
- 7) Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H.: Structural Performance of Engineered Cementitious Composite Elements, Composite and Hybrid Structures, Proceedings of 6th ASCCS Conference, ASCCS-6 Secretariat, pp.969-976, 2000.3
- 8) Fukuyama, H. and Suwada, H.: Experimental Response of HPFRCC Dampers for Structural Control, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.3, pp. 317-326, 2003.11
- 9) 岩淵一徳、福山洋、諏訪田晴彦：高靱性セメント複合材料を用いた付加柱によるピロティ建築物の応答制御、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、pp.1327~1332、2003