

HFRCC 部材の構造性能評価と高耐震・損傷低減型ピロティ建物の提案

EVALUATION OF STRUCTURAL PERFORMANCE FOR HFRCC MEMBERS AND PROPOSAL OF SOFT FIRST STORY BUILDING WITH HIGH SEISMIC PERFORMANCE AND DAMAGE MITIGATION

鶴飼 和也 (リハビリテーション工学分野)
Kazuya TSURUGAI

Abstract

A static loading test on columns and walls using HFRCC and push-over analysis for soft first story were carried out to propose soft first story buildings with high seismic performance. In this paper, four topics based on these tests and analysis were shown as follows:

1. Application of HFRCC in columns and walls resulted in damage mitigation by the effect of multiple-cracking from the range of small deformation in the members comparing to RC columns.
2. Restriction on shear stress in HFRCC lower than tensile strength σ_T is the condition to avoid brittle shear failure.
3. In the case of application of HFRCC members for soft first story having walls, the safety limit for seismic performance was about 1.7 times higher than RC buildings in the same condition. Furthermore, the performance was at the same level when comparing to non soft first story RC building.
4. In the case of application of HFRCC columns for soft first story without walls, the building damage-mitigated from small drift angle comparing to RC buildings in same condition. Therefore, it was recommended to design HFRCC soft first story buildings using the same section of RC members in order to improve the damage mitigation.

Keywords : Hybrid fiber reinforced cementitious composite, Column, Shear wall, Damage mitigation, deformation capacity, Soft first story building

ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料, 柱, 耐震壁, 損傷低減, 変形性能, ピロティ建物

1. はじめに

筆者らは、これまでに行った柱・耐震壁部材実験から HFRCC を用いた部材では、ひび割れ分散効果により損傷が低減し大変形時まで大きな残留ひび割れや圧壊が生じず、せん断・軸耐力が維持されることを確認した。しかし、一方で柱部材において横補強筋量を 1/5 程度に減少させた場合に脆性的な破壊が発生した。これは軸力支持能力が特に重要視されるピロティ柱部材において解決すべき問題である。これらを受け、大変形や高圧縮軸力が作用するピロティ層に HFRCC 部材を適用することで、高耐震・損傷低減型のピロティ構造を実現することを目標とし、①部材実験を通して HFRCC 柱・耐震壁部材の損傷モデルを作成すること、②一部の HFRCC 柱で見られた脆性破壊を防ぐ指標を提案すること、③HFRCC 部材を適用したピロティ建物の解析結果を評価することによって建物の耐震性能を把握し、設計法を提案することの 3 点を本研究の目的とする。

2. 柱・耐震壁部材静的載荷実験

対象建物は、ピロティ階を有する 10 階建 RC 造集合住宅とした。断面については鉄筋コンクリート構造計算用資料集²⁾を参考に決定した。

2.1 実験概要

試験体一覧を表-1、表-2 に、配筋図を図-1 に示す。試験体は対象建物の 1/4 スケールを想定した。柱試験体は、断面(250mm 角)、内法高さ(800mm)を同一とし、せん断余裕

度を実験因子とした 3 体を設計した。耐震壁試験体は、側柱を普通コンクリートとし、壁板のせい(1750mm)、側柱断面(250mm 角)を同一とし、壁厚、壁筋量を実験因子とした。柱実験の載荷は、ピロティ建物を想定した変動軸力を与え、逆対称曲げモーメントが生じるように水平力を加えた。耐震壁は、一定軸力下でシアスパン比 M/QD が 1 となるように載荷した。

表-1 柱試験体一覧

試験体名	材料	帯筋	D_w/σ_{wy}	Q_w/Q_{wc}
V-NC3.65	NC	2-D6@55(SD295)	3.65	1.29
V-HF2.11	HFRCC	2-D6@95(SD785)	2.11	1.38
V-HF12.10	HFRCC	2-D6@67(SD295)	1.35	1.19

表-2 耐震壁試験体一覧

試験体名	壁板			側柱 主筋
	材料	壁厚(mm)	壁配筋	
NC-WR	NC	60	D4@50 Double	2.83 12-D16 SD295
HF-WR	HFRCC	60	D4@100 Single	0.71
HF-W0.89	HFRCC	80	D4@100 Double	0.89 12-D10 SD390

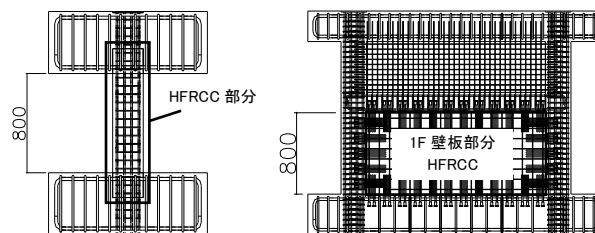


図-1 試験体配筋図(左:柱部材, 右:耐震壁部材)

2.2 部材の損傷度評価と損傷度モデル

実験結果の荷重-変形角関係と破壊性状から損傷度評価を行う。RC部材の損傷度は、被災度区分判定基準³⁾や耐震性能評価指針⁴⁾に基づき評価し、HFRCC部材の評価は、ひび割れ分散効果でRC部材よりひび割れ幅が小さくなるため判断は難しいが、RC部材を参考に被り部分の損傷や耐力低下に基づき行った。

柱部材の荷重-変形角関係を包絡線で図-2に示す。変形角3%時の損傷状況を写真-1に示す。HFRCC試験体2体は、変形角2%程度まで残留ひび割れ幅が0.2mm未満で修復不要であった。V-NC3.65は最大耐力後にコンクリートの圧壊、被りコンクリートの剥落が生じ急激に耐力が低下したのに対し、HFRCC試験体には最大耐力後も目立った損傷は見られず安定した挙動を示した。また、HFRCC部材の終局変形角(最大耐力の80%まで低下する変形角)は6%であり、その時点でも想定した変動軸力(軸力比0.4)を支持した。以上の結果から損傷度を総合的に判断し、曲げ型HFRCC柱部材の損傷度を図-2に示すように設定する。

耐震壁部材の荷重-変形角関係を包絡線で図-2に示す。変形角1.5%時の損傷状況を写真-1に示す。HFRCC試験体2体は、変形角1%程度まで残留ひび割れ幅が0.2mm未満で修復不要であった。普通コンクリート試験体は、最大耐力後に壁板のせん断圧縮破壊により変形が急に進んだのに対し、HFRCC試験体では最大耐力後も急激な耐力低下は見られず安定した挙動を示した。また、同じくHFRCCを用いた場合でもNC-WRに対し壁筋量を1/4としたHF-WRに比べ、1/2としたHF-W0.89の方が最大耐力後の耐力低下の点では緩やかであり、終局変形もNC-WRの1.5%に対して2%となった。今回、HFRCC耐震壁の壁筋量をRC部材の1/2程度と想定し図-2のように損傷度モデルを設定した。

今回設定したHFRCC部材の損傷度とRC部材の損傷度の比較をすると(図-3)、柱部材では変形が大きくなるほど両者の差が拡大し、終局変形では4倍の変形能力であった。耐震壁部材では損傷度IVとなる変形角が1.5倍となっている。以上より柱・耐震壁にHFRCCを使用することでの損傷低減効果を確認し、損傷度を評価した。

2.3 曲げ降伏後の脆性破壊を防止する条件

曲げ降伏後に脆性破壊を起こす条件を調べるために、本研究では、曲げ降伏時に見かけ上HFRCCに作用するせん断応力度 τ_{HF} を以下の式[1]で定義し、破壊モードの傾向を分析した。分析は、既往の実験結果を用いて作成したデータベース⁵⁾と本実験結果により行った。

$$\tau_{HF} = \tau_{mu} - \tau_{su} = Q_{mu}/bj - Q_{su}/bj \quad \dots \text{式}[1]$$

式[1]で、第1項は曲げ降伏時の断面の平均せん断応力度、第2項はHFRCCの引張強度 σ_T を無視したせん断耐力 Q_{su} をせん断応力度に換算したものであり、これらの差 τ_{HF} (HFRCCの負担せん断応力度)は、部材の曲げ降伏するために必要な、HFRCCが負担するべきせん断応力度と考えることにした。図-4にHFRCCの負担せん断応力度と引張強度の比 τ_{HF}/σ_T と実験での塑性変形角 R_p の関係を示す。ここで塑性変形角 R_p は、実験においてせん断力が8割まで低下した変形角 R_u と菅野式から計算によって求められる降伏変形角 R_y との差である。計算上の τ_{HF}/σ_T が大きくなると変形能力が低下する傾向がみられ、特に、 τ_{HF} が σ_T を上回った場合、急激に変形能力が失われる。これは、 τ_{HF} が σ_T を超えるとHFRCCの引張応力-歪み関係で軟化領域に入るため、脆性的な破壊につながると考えられる。

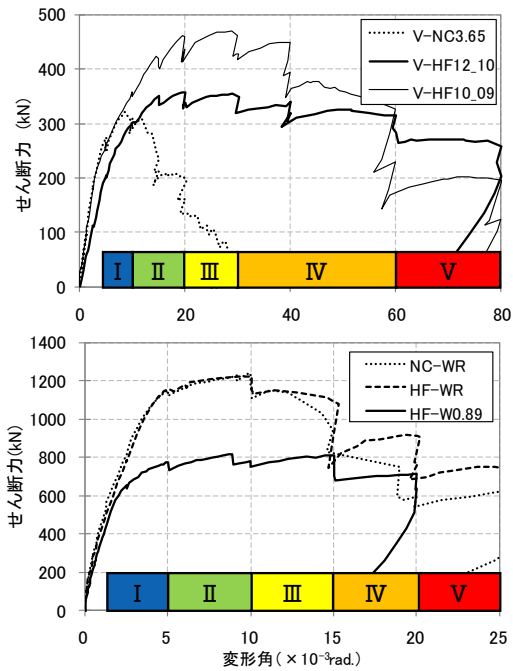


図-2 荷重変形関係と損傷度モデル

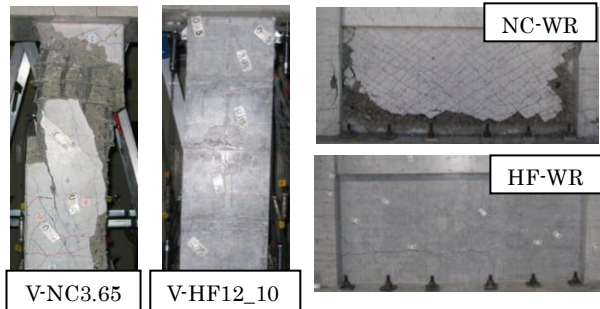


写真-1 HFRCCの損傷低減効果

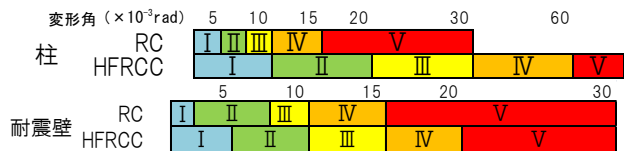


図-3 部材損傷度モデルの比較

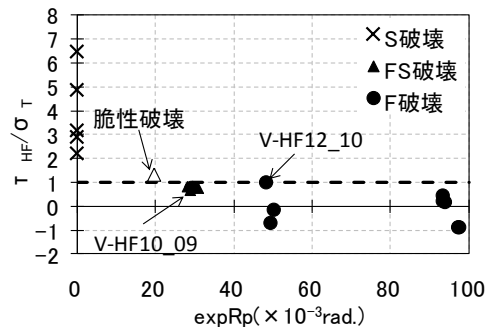


図-4 HFRCCの負担せん断応力と変形能力

図-5に τ_{HF}/σ_T とせん断余裕度 Q'_{su}/Q_{mu} との関係を示す。 Q'_{su} はHFRCCの引張強度 σ_T を考慮したせん断終局強度⁶⁾である。図より、 Q'_{su}/Q_{mu} が小さくなると、見かけ上のHFRCCの負担せん断応力度 τ_{HF} が大きくなり、破壊モードも脆性的になる傾向がみられる。HFRCC試験体3体(本実験の2体+過去に脆性破壊に至った1体)は Q'_{su}/Q_{mu} が全て1以上であった。しかし

$\tau_{HF}/\sigma_T > 1$ であった過去の試験体のみ、せん断ひび割れが激激に拡大し軸力支持能力を失う脆性破壊に至り、 $\tau_{HF}/\sigma_T < 1$ の2体は、大変形時まで靱性的挙動を示したことから、せん断余裕度に加え、ここで検討した指標 τ_{HF}/σ_T が破壊モードに影響する可能性があると考えられる。

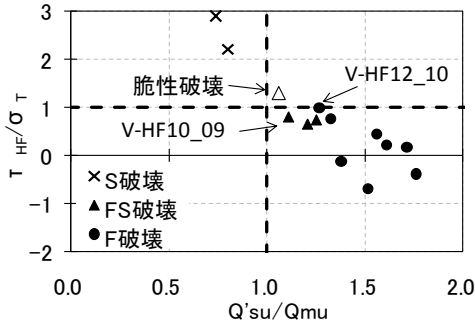


図-5 せん断余裕度と HFRCC の負担せん断能力度

3. HFRCC 部材を用いたピロティ建物の耐震性能

2章では柱・耐震壁に HFRCC を用いた場合に变形性能や損傷度に差があることを示した。3章では、これらの部材をピロティ層に適用した建物の耐震性能を評価し、RC 造の場合と比較する。対象建物は連層耐震壁を有するピロティ建物と純ピロティ建物とした。

3.1 解析ケースの設定

RC 構造計算規準資料集²⁾に記載されている集合住宅を参考に、1層にピロティ階を有する RC 造建物を想定した。図-6に対象建物伏せ図の一例を示す。以下に示すような連層耐震壁構面を有するピロティ構造3ケースと純ピロティ構造3ケースについて、図-3に示す損傷度モデルにより評価した。連層耐震壁を有するピロティ建物は耐震壁脚部の曲げ降伏により耐力の決定するモデルとした。

連層耐震壁を有するピロティ建物	純ピロティ建物
・10層8構面モデル	・10層8構面モデル
①非ピロティ(RC)	①基準柱(RC)
②壁枚数半減(RC)	②基準柱(HFRCC)
③壁枚数半減(HFRCC)	③断面8割柱(HFRCC)
計3ケース	計3ケース

3.2 架構の解析モデルと push-over 解析

架構の解析モデルは、フレームモデルとし、ピロティ柱は MS モデルとせん断バネを有する線材に、耐震壁は剛梁、壁板置換柱、両端ピンの側柱からなるエレメント置換モデルとした(図-7)。以上のようにモデル化を行い、外力を A_i 分布とした静的漸増荷重解析 (Push-over 解析) を行った。破壊の進展状況は、連層耐震壁を有するピロティ構造では耐震壁脚部の曲げ降伏、引張柱の軸降伏、圧縮柱脚部における曲げ降伏の順にヒンジが発生して層崩壊となっており、純ピロティ構造では引張側柱の脚部・頭部曲げ降伏に次いで圧縮側柱の脚部・頭部で曲げ降伏が生じ層崩壊に至っている。

3.3 耐震性能残存率 R の算出法

耐震性能残存率 R の算出方法については以下に示す。

①Push-over 解析の各ステップから1階の耐震壁、柱の負担せん断力を求める。②1階の層間変形角から各部材の損傷度を求める。③損傷度(図-3)から耐震性能低減係数 η を求める。④式[2]で耐震性能残存率 R を求める。⑤耐震性能残存率 R は不連続の値になるため、各境界での値を直線で結びスムージングする。例として、純ピロティ建物における1層層間変形-耐震性能残存率 R 関係を図-8に示す。

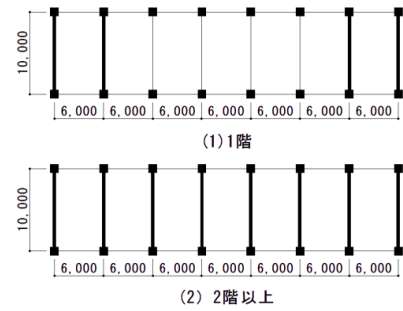


図-6 対象建物伏図例 (単位:mm)

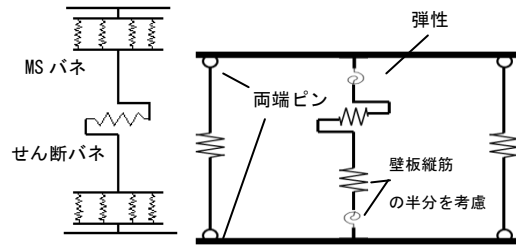


図-7 部材モデル(左: MS モデル, 右: エレメント置換)

$$R = \frac{\sum \eta_w Q_{wi} + \sum \eta_c Q_{ci}}{\sum Q_{wi} + \sum Q_{ci}} \times 100(\%) \quad \dots \text{式}[2]$$

ただし、 Q_{wi}, Q_{ci} : i step 時の耐震壁及び柱の負担せん断力

η_w, η_c : i step 時の耐震壁及び柱の耐震性能低減係数

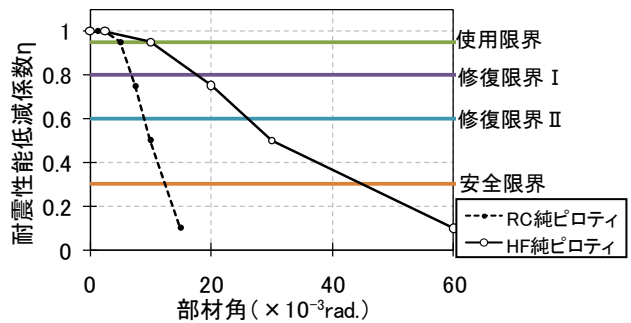


図-8 耐震性能残存率-1層層間変形角関係

3.4 適用建物の耐震性能評価

建物の限界状態は、被災度区分判定基準³⁾を参考に耐震性能残存率 R によって図-8に示すように、 $R=0.95, 0.8, 0.6, 0.3$ をそれぞれ使用限界、修復限界 I、修復限界 II、安全限界として評価した。各限界状態を縮小-自由度系の荷重変形曲線上に示し(図-9、図-11)、限界耐力計算法と同様に、基準地震動と限界地震動の比から各限界状態における保有耐震性能指標を評価した(図-10、図-12)。基準地震動は建築基準法の限界耐力計算⁷⁾で用いる設計用 Sa-Sd スペクトル(2種地盤)を使用した。

3.4.1 連層耐震壁構面を有するピロティ建物への適用

全構面連層耐震壁を有する RC 非ピロティモデルを RC (8/8)、壁枚数を半数とし RC 部材、HFRCC 部材を用いたモデルを RC(4/8)、HF(4/8)と呼ぶ。RC(8/8)は、安全限界時の保有耐震性能が 1.4 程度で設計用地震動に対して十分安全な建物である。RC(4/8)は安全限界時における保有耐震性能指標が 1 以下と、基準法を満足しない。これらに対し HF(4/8)は、全ての限界状態において RC(4/8)を上回り、さらに RC(8/8)モデルと同等の耐震性能を持つことを確認した。

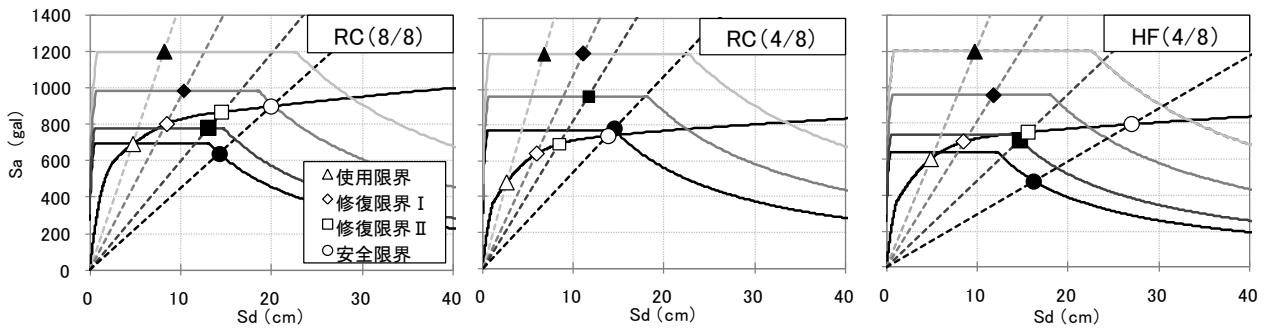


図-9 Sa-Sd 関係と各限界状態 (連層耐震壁構面有) ※図中▲◆■●は応答値

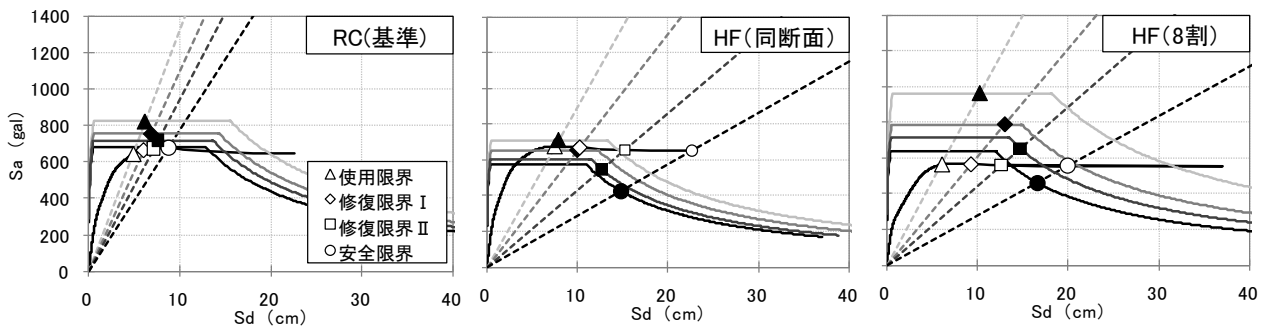


図-11 Sa-Sd 関係と各限界状態 (純ピロティ) ※図中▲◆■●は応答値

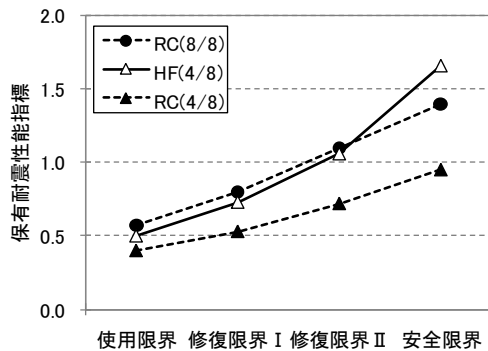


図-10 各限界状態と保有耐震性能(耐震壁付ピロティ)

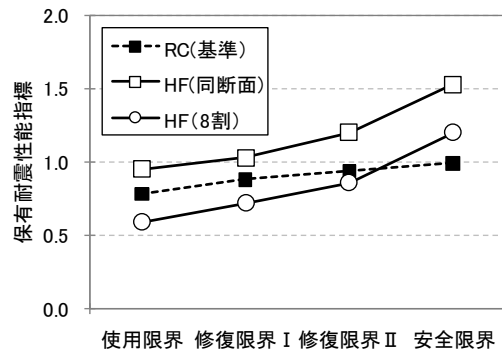


図-12 各限界状態での保有耐震性能(純ピロティ)

3.4.2 純ピロティ建物への適用

柱断面を1m角としたRCモデル(RC(基準))は、安全限界時の保有耐震性能指標が1程度と基準法をほぼ満足する結果となる。これに対し、HFRCCを用いた場合の変形性能向上を見込み、柱断面積を8割に縮小したモデル(HF(8割))では、修復限界II以降でRC(基準)と同程度の耐震性能を持つことを確認した。またRC(基準)と同断面でHFRCCを用いたモデル(HF(同断面))は、小変形時から性能に2割程度の向上がみられ、さらに安全限界時には耐震性能が1.7倍となっており、変形が大きくなるほど性能がより向上することがわかる。以上のことから純ピロティ建物において、小変形時からHFRCC特有の損傷低減効果を発揮するためには同断面での設計が望ましいと考えられる。

4.まとめ

高耐震・損傷低減型ピロティ構造の提案を目的とし、HFRCC部材の静的載荷実験を行うことで、損傷度を評価し、それを考慮した建物解析を行うことで以下の知見を得た。

- 1)部材にHFRCCを用いることで、ひび割れ分散などにより小変形から損傷を抑えることが出来る。
- 2)横補強量が比較的小さいHFRCC柱部材では、曲げ降伏後に脆性破壊をする場合がある。曲げ降伏時の見かけ上のHFRCCの負担せん断応力度 τ_{HF} を引張強度 σ_T 以下に制限することで、脆性的な破壊を防止できる可能性がある。

- 3)連層耐震壁を有するピロティ構造にHFRCC部材を適用する場合には、同条件のRC建物と比較すると安全限界時での耐震性能は1.7倍程度であり、また全構面RC耐震壁とした場合と同程度以上の耐震性能を有することを確認した。
- 4)純ピロティ構造にHFRCC部材を適用する場合、RCと同断面でHFRCCを用いた場合に、小変形時からの損傷低減効果を確認した。HFRCC特有の損傷低減効果を発揮するためには同断面での設計をすることが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1)中村匠:修士論文「ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料のピロティ構造部材への適用に関する研究」,2008
- 2)日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算用資料集,2001
- 3)日本建築防災協会:震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針,2001
- 4)日本建築学会:耐震性能評価指針(案)・同解説,2004
- 5)前田匡樹,鶴飼和也,中村匠,迫田丈志:ハイブリッドセメント系複合材料を用いた柱部材のせん断耐力と変形性能,コンクリート工学論文集,vol22, No.1, pp1~10,2011
- 6)永井寛・金子貴司・関田徹志・丸田誠:高靱性繊維補強セメント複合材料用いたダンパー部材の構造性能, Vol.26, No.2, pp.1513-1518, 2004
- 7)日本建築センター:2007年度版建築物の構造関係技術基準解説書,2007