論文 セメント系部材の履歴特性コントロールに関する基礎的研究

諏訪田 晴彦*1・福山 洋*2・梁 一承*3

要旨:本研究では、セメント系部材に高靭性型セメント系複合材料を用いることによって破壊性状、変形能、履歴特性および損傷度等のコントロールが可能であるかを明らかにするため、水平変形に伴う浮き上がり変形を拘束される方立て壁タイプのセメント系部材を対象として、材料の種類と配筋方法を実験因子とした曲げせん断実験を行った。実験の結果、高靭性型セメント系複合材料を使用することにより部材の損傷を抑制し、大変形まで安定した履歴特性が得られることを確認した。

キーワード:セメント系部材,高靱性型セメント系複合材料,履歴特性,変動付加軸力

1. はじめに

著者らはこれまでに、コンクリート系構造物 のより高い安全性、修復性および耐久性の実現 を目指し、高い靭性能と微小ひびわれの分散に よる自己損傷低減性を兼ね備えた高靭性型セメ ント系複合材料(以下, HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cement Composite) の開発を行ってきた。HPFRCC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という特徴を有する。また、 混入する繊維の種類によっては、最大圧縮強度 以降の応力低下が緩やかになり、 横補強筋によ って拘束されたコンクリートと類似の材料特性 を示す。これらの優れた材料特性は鉄筋コンク 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 性を有し、かつ部材の形状により剛性や強度等 も容易にコントロールできるため、地震時にお ける建築物の応答制御を従来の制震装置よりも 容易に行える可能性がある。そこで本研究では、 HPFRCC を用いることにより、上述のようなコ ントロールが可能であるかを調べるため、配筋 方法の異なるセメント系部材を対象とした曲げ せん断実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、方立て壁あるいは間柱タイプの構 」造要素を想定した。試験体諸元を**表-1**に,配 筋図を図-1にそれぞれ示す。実験因子は配筋 方法およびセメント系材料の種類である。配筋 方法は3タイプとし、タイプ1は主筋を平行配 筋とし、せん断補強筋を使用したもの。タイプ 2は主筋を X 型配筋とし、せん断補強筋を使用 しないもの。タイプ3は主筋をX型配筋とし、 平行筋に補助筋(4-D6)を用いてせん断補強筋 を使用したものである。主筋にはねじ節鉄筋を 用い、鉄骨の加力冶具にロックナットにより直 接接合した。使用したセメント系材料はモルタ ル, PE - HPFRCC および PS - HPFRCC の 3 種 類であり、モルタルは水セメント比45%、砂セ メント比40%とし、HPFRCCのモルタルマトリ ックスと同一の調合とした。PE - HPFRCC はこ のモルタルマトリックスにポリエチレン繊維を 体積比で 1%混入したもの, PS-HPFRCC はポ リエチレン繊維とスチールコードを体積比でそ

*1 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 構造基準研究室研究官 (正会員)
*2 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ上席研究員 工博 (正会員)
*3 独立行政法人建築研究所 建築生産研究グループ 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体緒元

試験体名	断面	配筋タイプ	主筋	せん断補強筋	材料種類
MO-1	150 × 200 (mm)	1	4-D13(平行配筋)	2-D6@50	モルタル
PE-1					PE-HPFRCC
PS-1					PS-HPFRCC
MO-2		2	4-D13(X型配筋)	なし	モルタル
PE-2					PE-HPFRCC
PS-2					PS-HPFRCC
MO-3		3 4-D13(X型配筋	/	2-D6@50	モルタル
PE-3				2 00@30	PE-HPFRCC



図-1 試験体配筋図(配筋タイプ:3)

表-2 材料特性一覧

カケトムな社会	圧縮強度 ヤング係数		針笛	降伏応力	降伏ひずみ
2721 381747	N/mm ²	N/mm ²	单入升기	N/mm ²	μ
モルタル	78.0	1.83×10 ⁴	D13	341.5	1891.5
PE-HPFRCC	55.1	1.77×10 ⁴	D6	425.1	2474.0
PS-HPFRCC	54.5	1.82×10^{4}	/	/	/



図-3 載荷履歴

れぞれ1%づつ混入したものである。なお,使 用したポリエチレン繊維は長さ15mm,径12 μ の素線,スチールコードは長さ32mm,径405 μ のより線(ϕ 130 μ ×5本)である。試験体名は、材料種類(MO:モルタル,PE:PE - HPFRCC, PS:PS - HPFRCC) - 配筋タイプ(1, 2, 3)で表記した。材料特性一覧を**表**-2に、HPFRCC



図-2 HPFRCC の応力-ひずみ関係

の応力-ひずみ関係を図-2にそれぞれ示す。 HPFRCCの引張試験および引張圧縮繰り返し試 験は,文献3)の方法で行った。なお,引張圧 縮繰り返し試験の圧縮側加力は最大圧縮強度の 1/3までとした。図中,圧縮側の応力-ひずみ関 係において HPFRCC よりもプレーンモルタル のほうが最大圧縮応力度が高いが,これは空気 量の違い(モルタル:0.6%, PE-HPFRCC:4.5%, PS-HPFRCC:3.3%)に起因しているものと考え られる。

2.2 実験方法

加力には建研式加力装置を用いた。水平力は



逆対称モーメント加力方式による正負交番繰り 返し載荷とし,図-3に示す載荷履歴に従い, 変位制御により加力した。また,初期軸力は導 入せず(載荷フレームの重量はカウンターウエ イトによりキャンセルした),水平変形(回転変 形)に伴う軸方向変形(浮き上がり変形)を拘 束するように軸力ジャッキを制御した。

3. 実験結果および考察

3.1 履歴性状

各試験体の平均せん断応力-部材角関係(以 下, τ-R関係)を図-4に示す。配筋タイプ 1の試験体では, MO-1が R=0.03(rad.)のサイク ルで主筋の降伏に伴い, 脚部が圧壊し, 耐力が 低下する履歴性状を示しているのに対し, PE-1 は 0.067(rad.), PS-1 は 0.093(rad.)まで耐力低下 のない安定した履歴性状を示しており, HPFRCCによるせん断補強効果および圧縮側の 拘束効果が発揮されているものと推察される。

なお, PE-1 と PS-1 では, あまり大きな差は見 られないが, PS-1 は PE-1 に比べ, 曲げ降伏後, 変形の増大に伴い若干耐力が上昇する傾向が見 られる。これは、最終破壊状況およびひび割れ 幅の推移から推察するに PE-1 よりも PS-1 のほ うがせん断ひび割れが少なく、ひび割れ幅も小 さいため,全体変形に占めるせん断変形の割合 が少なく(回転変形の割合が多く),より大きな 付加軸力が作用したことによって耐力が上昇し ていると考えられる。配筋タイプ2の試験体で は, せん断補強筋がないため, いずれの試験体 も最大耐力に達すると同時にX型主筋に沿って、 部材に形成された圧縮ストラットを割裂くよう に斜めせん断ひび割れが一気に拡幅し、急激に 耐力が低下するといった破壊性状であったが、 材料の違いによる変形能力の差が顕著に表れて おり、HPFRCC のせん断補強効果を如実に示す 結果が得られた。特に PS-2 に関しては、±0.04



(rad.)のサイクルまで安定した履歴性状を示 した。配筋タイプ3の試験体では,MO-3に比 ベ PE-3 が変形の増大に伴う耐力の上昇が顕著 であるが,これも配筋タイプ1の PE-1と PS-1 の違いと同様に,変形成分の違いによる付加軸 力の大きさの違いに起因しているものと推察さ れる。以上の結果を全体的に考察すると,本実 験では軸方向の浮き上がり変形を軸力ジャッキ により拘束しているため,部材の圧縮ストラッ トのせん断力負担割合が卓越しているものと考 えられ,現にモルタルを使用した試験体では脚 部の圧壊や部材の斜め圧縮ストラットに沿った ひび割れによって比較的小さな変形で耐力を失 っている(MO-1,2)。このことは,HPFRCC



図-5 最大ひび割れ幅-部材角関係

が引張側の抵抗機構だけではなく圧縮側の抵抗 機構としても有効に作用していることを示唆し ているものと考えられる。しかし,本実験で扱 った試験体に関しては,いずれも逆S字型の履 歴曲線を描き,エネルギー吸収能力に優れた紡 錘型の履歴曲線は得られなかった。その大きな 原因の一つは危険断面における目開き(試験区 間からの主筋の抜け出し変形)であると考えら れる。

3.2 損傷性状

写真-1 に最終破壊状況を、図-5に各サイ クルピーク時の最大せん断ひびわれ幅-部材角 関係(以下,W_{cr}-R関係)をそれぞれ示す。こ れらによれば,配筋および材料の違いにより,



図-6 軸力比-部材角関係 表-3 実験結果と計算値一覧

試験体	最大耐力	最大耐力時 の軸力	最大耐力時 の軸力比	最大耐力時 の部材角	Qmu ^{*1}	Qsu ^{*2}	Qsu/Qmu	破壊モード
	(kN)	(kN)		$(\times 10^{-3} rad.)$	(kN)	(kN)		
MO-1	140.73	260.54	0.11	20.06	185.15	243.35	1.31	曲げ→せん断
PE-1	176.77	424.75	0.26	67.48	226.60	213.82	0.94	曲げ
PS-1	186.33	504.14	0.31	93.48	243.50	218.96	0.90	曲げ
MO-2	91.69	88.77	0.04	14.86	112.10	82.21	0.73	せん断
PE-2	165.73	303.58	0.18	25.83	193.00	98.83	0.51	曲げ→せん断
PS-2	193.19	439.10	0.27	56.01	230.00	110.57	0.48	曲げ→せん断
MO-3	162.30	348.06	0.15	40.23	217.55	142.88	0.66	曲げ
PE-3	212.80	545.01	0.33	75.39	252.05	158.74	0.63	曲げ

*1:曲げ終局強度式(略算式)⁴⁾による計算値 *2:せん断終局強度式^{5),6)}による計算値



図-7 曲げモーメントー軸力相関関係

ひびわれの発生状況が大きく異なっていること がわかる。配筋タイプ1の試験体では、いずれ の材料においても部材全体にほぼ斜め45度の 方向にひびわれが生じており、入力せん断力に 対し、トラス機構が形成されている様子が見て 取れる。これに対し配筋タイプ2の試験体では、 ひびわれはX型主筋に沿ってのみ発生しており、 最終的に部材を斜めに割り裂くような大きなひ び割れに進展している。配筋タイプ3の試験体 はタイプ1と2の中間的なひび割れ発生状況で、 X型主筋を用いた場合でも補助筋を使用してせ ん断補強筋を施工することにより損傷性状をコ ントロール(ひび割れの局所化を抑制)できる ことを示唆している。なお、HPFRCCを使用し た試験体は、一見するとひび割れの数も多く、 大きな損傷を受けているように見えるが、これ は、マジックペンでひび割れをなぞっているた めで、 W_{cr} -R関係からもわかるように実際には HPFRCC特有の微細なひび割れが分散して発生 しており、モルタルを用いた試験体に比べ、ひ び割れを肉眼で観察するのは困難で、損傷のレ ベルは低いものと考えられる。なお、ここでい う損傷とは、補修を要するひび割れと定義して おり、実部材に対しては残留ひび割れ幅が概ね 0.3mm以下に収まっていれば、補修を要しない と言われているが、本研究では試験体が実部材 の縮小模型ではないため、W_{cr}-R関係に基づい て考察している。

3.3 変形拘束による変動付加軸力

本実験では、方立て壁タイプの構造要素を想 定し、水平変形(回転変形)に伴う軸方向変形 (浮き上がり変形)を軸力ジャッキにより拘束 した。これにより試験体には変動付加軸力が作 用する。各サイクルピーク時の軸力比(作用軸 応力/材料の最大圧縮応力)-部材角関係(以 下、η-R関係)を図-6に示す。これによる と今回行った実験の範囲において、変形拘束に よる付加軸力は、最大で軸力比 0.36 まで増大し た。

3.4 終局強度

本実験より得られた各試験体の最大耐力、最 大耐力時の軸力(比),部材角および終局強度計 算値の一覧を表-3に、材料試験結果を用いて 曲げ終局強度略算式 4)により算出した曲げモー メントー軸力相関図に実験値をプロットしたも のを図-7に示す。なお、HPFRCC の終局強度 の計算にあたっては、HPFRCC 自体のせん断補 強効果は考慮していない。これによると、本実 験において取り扱った試験体の最大耐力および 破壊モードは、一般的に用いられる終局強度式 (曲げ:略算式⁴⁾, せん断:修正荒川式⁵⁾+X型 主筋の終局せん断耐力式⁶⁾)による計算値およ びせん断余裕度から想定される破壊モードと必 ずしも一致していない。これらのうち、ほぼ鉄 筋によって耐力が決定される曲げ破壊モードの 試験体について曲げ略算式による計算値が実験 値を過大に評価しているのは、部材せいが 50cm 以下であるためと考えられる ⁷⁾。こうしたこと から今後、断面解析や FEM 解析等により詳細 な耐力機構を検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

セメント系部材に HPFRCC を用いることに より破壊機構,変形能,履歴特性および損傷度 等のコントロールが可能であるかどうかを調べ るために,配筋方法と HPFRCC の種類が異なる 方立て壁タイプのセメント系部材を対象に繰り 返し曲げせん断実験を行った。本実験により得 られた知見を以下に示す。

- (1) HPFRCC を用いることにより,浮き上がり変 形を拘束しても比較的大きな変形まで安定 した履歴特性が得られる。
- (2) HPFRCC を用いることにより、ひび割れの開 口を抑制し、損傷を低減することができる。
- (3) 水平変形に伴う浮き上がり変形を拘束する ことによって生じる変動付加軸力は最大で 軸力比 0.36 まで上昇した。

謝辞

本研究は、日米共同構造実験研究「高知能建築 構造システムの開発」(委員長:小谷俊介 東京大 学教授)における大型実験研究の一環として行わ れたものである。本実験を行うにあたりご協力を 頂いた独立行政法人建築研究所交流研究員福田顕 議氏,ならびに岩渕一徳氏に感謝の意を表します。 また、鉄筋をご提供いただいた東京鐵鋼株式会社 ならびに繊維をご提供いただいた東洋紡績、東京 製綱株式会社に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 諏訪田晴彦,福山洋,磯雅人:構造物の 高性能化に向けた高靭性繊維補強セメント系 複合材料の開発,コンクリート工学年次論文 集,Vol.23, No.3, pp.133-138, 2001
- 福山 洋, 倉本 洋: スマートコンクリート -高じん性コンクリートー, コンクリートエ 学, Vol.39, No.1, pp.104-109, 2001.1
- 佐藤幸博,福山洋,諏訪田晴彦:高靭性型 セメント系複合材料の一軸引張-圧縮繰り返 し試験方法の提案,日本建築学会構造系論文 集,No.539, pp.7~12, 2001.1
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規 準・同解説 - 許容応力度設計法 - , 1999
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課,日本建築主事 会議,財団法人日本建築センター編集:2001 年版建築物の構造関係技術基準解説書,工学 図書株式会社,平成13年3月
- 6) 社団法人日本建築士事務所協会連合会編集: 鉄筋コンクリート部材設計における新しい考 え方「X型配筋部材の設計と施工」
- 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料