論文 ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部 材の構造性能に関する実験的研究

石原 誠一郎\*1・三橋 博三\*2・金子 佳生\*3・和地 正浩\*4

要旨:モルタルにスチールコードとポリエチレン繊維を混入したハイブリッド型繊維補強セ メント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材を開発する目的で作製した部材の耐力・変形 性能の確認実験を行った。その結果,X 形配筋を使用し,さらにモーメント分布に応じて, 試験体の断面形状を変化させることで,エネルギー吸収性能に優れた紡錘型の履歴性状を示 し,さらに大変形の履歴を受けても損傷の少ないエネルギー吸収部材が可能であることを確 認できた。

キーワード:高靭性セメント系複合材料,ハイブリッド,繊維補強,エネルギー吸収部材

1. はじめに

近年,セメント系材料を繊維で補強した複合 材料で,曲げ応力下において複数ひび割れ特性 を示し,曲げ,引張,圧縮破壊時の靭性が大幅 に向上した高靭性セメント系複合材料の研究が 盛んに行われている<sup>1)2)</sup>。

この靭性に富み,優れたエネルギー吸収性能 のある材料を活かしたエネルギー吸収部材の開 発が期待されている。松崎・福山らはモルタル 中に PVA 繊維を体積比で 1.5%混入した高靭性 セメント系複合材料を用いた制震デバイスの構 造性能を検証し,エネルギー吸収材として機能 を発揮できることを示している。しかし,デバ イスはスリップ型の履歴性状を示し,エネルギ ー吸収能力は十分とは言えない<sup>3)</sup>。

一方,鉄筋コンクリート構造部材の耐力と靭 性を向上させる X 形配筋<sup>4)</sup> を利用した鉄筋コ ンクリート部材による制震デバイスに関しての 研究も行われている<sup>5)</sup>。X 形配筋を用いること で部材の靭性能は向上しているが,大変形時に は最大耐力が徐々に低下し,さらにかぶりも剥 落し部材の損傷程度も大きくなるため,デバイ スの維持管理・補修面から問題がある。

\*1 (㈱淺沼組 技術研究所 (正会員)

\*2 東北大学大学院教授 工学研究科都市・建築学専攻 工博 (正会員)

\*3 東北大学大学院助教授 工学研究科都市・建築学専攻 PhD (正会員)

\*4 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (正会員)

本研究では,既往の研究を踏まえ,エネルギ ー吸収性能に優れた紡錘型の履歴性状を示し, さらに大変形の履歴を受けても損傷の少ないエ ネルギー吸収部材を目指して開発したハイブリ ッド型繊維補強セメント系複合材料を用いた部 材の性能確認実験の結果について報告する。

2. エネルギー吸収部材の概要

本研究で検証したエネルギー吸収部材の材料 および部材の特徴を以下に示す。

(1) 材料面の特徴<sup>6)</sup>

本研究では,モルタルにスチールコードと呼 ばれる鋼繊維とポリエチレン繊維を混入したハ イブリッド型繊維補強セメント系複合材料 (HFRCC: Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites)を用いた。

- (2) 部材面の特徴<sup>7)</sup>
- 1) 剛強なスタブを設けて,変形を強制的にエ ネルギー吸収部材に与える。
- モーメント分布に応じて、断面形状を変化 させることによって、ひび割れを分散させ 鉄筋の塑性領域を拡大し、塑性エネルギー を最大限に利用する。(図 - 1 参照)

3) 上記の形状に合せて X 形配筋を使用する。

4) 帯筋を密に配して, 靭性能を向上させる。

## 3. 実験概要

# 3.1 試験体

試験体一覧を表 - 1 に,試験体の形状および 配筋を図 - 2 に示す。試験体は4体製作した。 No.1~3の試験の断面寸法は210×450mmとし, No.4 は前述したようにモーメント分布に応じ て,断面形状を変化させた。せん断スパン比は 1とした。以下に各試験体の特徴を示す。

[No.1:HFRCC-1A]文献 3)に準じて,試験体 形状を決めた。提案したエネルギー吸収部材と の比較対象となる。軸力は加えない。

[No.2:HFRCC-1AA] 試験体形状および配筋 は HFRCC-1A と同じで,軸力を加え性状の変化 を調べた。軸力比 0.2 の軸力をかけて,試験を 開始したが 載荷装置の許容能力を超えたため, 一旦除荷し,軸力比を 0.05 まで低下させて再度



図 - 1 エネルギー吸収部材の概要

載荷した。

[No.3:HFRCC-1B] HFRCC-1A と同じ形状で, 配筋に X 形配筋を 1 対加え性状の変化を調べた。 軸力は加えない。

[No.4:HFRCC-3] モーメント分布に応じて, 断面形状を変化させ,変化させた断面に沿うよ うに X 形配筋を 2 対加えた。

エネルギー吸収部材のみ HFRCC を用いた。 スタブ部分には,骨材径 20mm の高強度コンク

表 - 1 試験体一覧

No.         試験体名         B         D         力         の         方         の         方         の         方         の         方         の         方         の         方         の         方         の         の         方         の         の         方         の         方         の         の         の         の         の         の         の         の         の         の         No.         試験体名         B         D         力         の         の         の         の         の         の         No.         No. <th>a/D</th>	a/D
(nm)         圧         (N/mm <sup>2</sup> ) (N/m <sup>2</sup>	u, D
1         HFRCC-1A         210         450         0         65.6         13.2         18.2         67.0         4.5         31.6         4-D19         37.8         D10         60         382         1.13           3         HFRCC-1AA         210         450         0         66.6         10.6         18.3         74.5         -         -         Pg (96)=         37.8         D10         60         382         1.13           4         HFRCC-1B         210         450         0         66.6         10.6         18.3         74.5         -         -         1.21         37.8         D10         60         382         1.13           4         HFRCC-3         210         450 (300)         0         70.3         12.8         18.2         74.5         -         -         1.21         37.8         D10         60         382         1.13           4         HFRCC-3         210         450 (300)         0         70.3         12.8         18.2         74.5         -         -         1.21         37.8         D10         60         382         1.13           4.5         5.5         5.5         5.5         5.5	
2         HFRCC-1AA         210         450         0.05         59.2         11.3         18.3         63.5         -         -         -         Pg (%) =         378         D10         60         382         1.13           4         HFRCC-1B         210         450 (300)         0         70.3         12.8         18.2         74.5         -         -         1.21         378         D10         60         382         1.13           4         HFRCC-3         210         450 (300)         0         70.3         12.8         18.2         74.5         -         -         1.21         378         D10         60         382         1.13           V/7常接100mm以上           1.13         15.6         10.6         10.8.3         74.5         -         -         1.21         378         D10         60         382         1.13           V/7常接100mm以上         1.5         1.6         10.6         10.8.2         1.13         1.5         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13         1.13	
<u>3 HFRCC-1B 210 450 0 66.6 10.6 18.3 74.5 Pg (%6)=</u> <u>4 HFRCC-3 210 450 (300) 0 70.3 12.8 18.2 74.5 1.21</u>	1
$\frac{4 \text{ HFRCC-3}}{4 \text{ HFRCC-3}} 210 450 (300) 0 70.3 12.8 18.2 74.5 1.21$	
V/?йłg 100mm以上         1/??йłg 100mm以上           1/0         1/??           1/0         1/??           1/0         1/??           1/0         1/??           1/0         1/??           1/0         1/??           1/0         1/??           1/?         1/??           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/?           1/?         1/? <td></td>	
$(1) HFRCC-1A \cdot 1AA$ $(2) HFRCC-1B$ $(3) HFRCC-3$	-D19 遭 (4-D1)

図-2 試験体の形状および配筋

リートを使用した。HFRCC の調合を表 - 2 に, 使用繊維の性質を表 - 3 に示す。HFRCC に使用 した材料はスチールコード(SC),ポリエチレン 繊維(PE),シリカフュームセメント,珪砂7号, 高性能 AE 減水剤である。強制ミキサーで練混 ぜ,打設した。文献 6)の方法に準じて得られた 曲げ試験結果を多直線近似法による引張軟化曲 線推定プログラム<sup>8)</sup>を用いて算出した,HFRCC の引張応力 - 開口変位関係を図 - 3 に示す。

表 - 1 に示すように HFRCC とスタブのコン クリートの圧縮強度は, ほぼ同じであるが, 割 裂引張強度は繊維が混入された HFRCC が大き い,一方,弾性係数は,剛性の高い粗骨材がな く微細な細骨材のみ使用した HFRCC が,スタ ブのコンクリートに比べ小さくなっている。 なお,各試験体ともエネルギー吸収部材とスタ ブとの界面に図 - 2 に示すようなコッターを設 けた。エネルギー吸収部材の打継ぎ部に凝結遅 延シートを貼付け,打設後,目荒し処理し,そ の後,スタブ部のコンクリートを打設した。

3.2 実験方法

図 - 4 に載荷装置を示す。加力は建研式逆対 称載荷装置により正負交番繰り返し載荷を行っ た。加力は上下スタブ間の相対変位による変位 制御とした。なお,各試験体とも,軸力負荷の 有無に拘わらず,載荷装置の自重約40kNが載 荷されている。載荷履歴を図 - 5に示す。

変位計測は,スタブ間の層間変位,軸方向変 位およびエネルギー吸収部材とスタブ部間の目 開きを計測した。

ひずみ計測は,図-2 に示す位置で主筋,X 形配筋について行った。

4. 実験結果および考察

4.1 破壊進行状況

実験結果を表 - 4 に示す。各試験体のひび割 れ進展状況を図 - 6 に,最終破壊状況を写真 - 1 に示す。各試験体ともエネルギー吸収部材には 通常のコンクリートに見られるような目視で

#### 表 - 2 HFRCC の調合

水セメント比	砂セメント比	繊維混入	率(vol%)
(%)	(%)	SC	PE
45	40	1.0	1.0

繊維長さ(mm)

繊維種類

2

0	•	02	.15	2000	
PI	E	12	12	2600	
	1:	2			
	11	<b>1</b>			
	) (MPa				
-	心心	6			
Ì	<u>ل</u> م	4 •			
	:	2			
	(	٥ ــــــــــــــــــــــــــــــــــــ	2 3		
		- 開口:	之 3 变位(mm)	7	
	义	- 3 引張応	力 - 開口変 <sup>,</sup>	位関係	
		$\square$	$\prod$	4	
		7		4	
	R			4	
	/	3000kN ジャッキ	$\mathcal{N}$	反力驶	
				4	
			$\mp$		
	₽₽		2000kN ジャ	×+	
		試験体		회 🗸	
	4				
	4			4	
				. 4	
		図 - 4	載荷装置		
				+16	
	1/20				
	1/33			+14	
邨	1/50		+	12	
材	1/100	+4	<u>+8</u> / / /		
角	1/200 1/800 -1/800			+++++++++	サイク
(rad.)	-1/100	-4. *	<u>*V</u> VVV	$\vee \vee \vee \vee \vee \vee$	
	-1/50			-12	
	-1/33			-14	
	-1/20				
	1/ 20			-16	

表-3 使用繊維の性質

繊維径(µm)

引張強度(MPa)

2650

図 - 5 載荷履歴 表 - 4 実験結果一覧

			最大耐力	最大耐力時変位
	No.	試験体記号	(kN)	(rad.)
	1	HFRCC-1A	538.86	0.04
	2	HFRCC-1AA	862.28	0.04
	3	HFRCC-1B	746.62	0.04
	4	HFRCC-3	837.80	0.05

はっきり確認できる程度のひび割れ幅(0.1mm 以上)のひび割れがほとんど見られず,肉眼でよ うやく確認できる程度のひび割れ幅の(0.1mm 以下)微細なマイクロクラックが分散して発生 した。各試験体の破壊進行状況を以下に示す。 [No.1:HFRCC-1A]部材角 1/300(rad.)あたり でエネルギー吸収部材とスタブとの界面に剥離 破壊に伴う目開きが発生した。その後,目開き は次第に拡大した。部材角 1/200(rad.)までは, エネルギー吸収部材のスタブ近傍を中心に主筋 に沿いマイクロクラックが進展した。部材角 1/50(rad.)頃になると損傷が目開きに集中し,マ イクロクラックは進展しなかった。

[No.2: HFRCC-1AA] HFRCC-1A と同様なひ び割れ進展を示したが,軸力が加わっているた め,各部材角とも HFRCC-1A に比べ,ひび割れ 数が少なかった。

[No.3:HFRCC-1B] 主筋および X 形配筋に沿 いマイクロクラックがエネルギー吸収部材全体 に分布し,HFRCC-1A に比べひび割れ数は増加



図-6 ひび割れ進展状況

写真 - 1 最終状況



図 - 7 荷重 - 部材角関係

した。しかし,平行配筋の試験体同様,部材角 1/50(rad.)頃になると最終的には,損傷が界面の 目開きに集中し部材角 1/50(rad.)以降になると マイクロクラックは進展しなかった。

[No.4:HFRCC-3]まず,エネルギー吸収部材 のハンチ部にマイクロクラックが発生し,主筋 およびX形配筋に沿うように部材全体に進展し た。界面の剥離破壊に伴う目開きは,部材角 1/200(rad.)あたりで発生したが,他の試験体 に比べ,損傷が界面の目開きのみに集中せず, 部材角 1/20(rad.)頃になるまでマイクロクラッ クの進展が見られた。

4.2 変形性状

各試験体の荷重 - 部材角関係を図 - 7 に示す。 平行配筋の HFRCC-1A は,1/20(rad.)の大変形 時にも耐力が低下せず,優れた靭性能を示した が,スリップ型の履歴性状を示した。

軸力を加えた HFRCC-1AA は,軸力比 0.05 の 低軸力にも拘わらず,大幅な耐力増加が見られ, 1/25(rad.)まで耐力が増大した。しかし,履歴 性状はスリップ型であった。X 形配筋を加えた HFRCC-1B は, HFRCC-1A に比べ大幅にエネル ギー吸収性能が向上したが,やはりスリップ型 の履歴性状であった。HFRCC-3 はエネルギー吸 収性能に優れた紡錘型の履歴性状を示し,部材 角 1/20(rad.)まで耐力が増大した。

0.04

0.04

0.06

0.06

4.3 鉄筋のひずみ

各試験体の主筋およびX形配筋のひずみ分布 を図 - 8に示す。HFRCC-1A,1AAおよび1Bは, スタブに近い部分の主筋ひずみが降伏している が,HFRCC-3は,主筋の中央部付近も降伏近く までひずみが発生している。さらに,X形配筋 をみると,載荷に順じて,圧縮と引張の応力が 交互に X 形配筋に負荷されている。さらに, HFRCC-1B にくらべ,HFRCC-3 では X 形配筋 の中央部まで降伏していることがわかる。

以上のこのことからハイブリッド型繊維補強 セメント系複合材料および X 形配筋を使用し, さらにモーメント分布に応じて,試験体の断面 形状を変化させることで、主筋および X 形配筋 ともに鉄筋の塑性領域が拡大し,エネルギー吸 収性能に優れた紡錘型の履歴性状を示したと考 えられる。

# 5. まとめ

本実験から得られた結論を以下にまとめる。 (1) ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材 料を用いることで,通常のコンクリートに見ら れるようなひび割れの局所化が見られず,非常 に微細なマイクロクラックが分散して発生した。 (2) 平行配筋を使用したエネルギー吸収部材は, 大変形時にも耐力が低下せず,優れた靭性能を 示すが,スリップ型の履歴性状を示した。 (3) X 形配筋を使用し, さらにモーメント分布

に応じて,試験体の断面形状を変化させること で,鉄筋の塑性領域が拡大し,エネルギー吸収 性能に優れた紡錘型の履歴性状を示し、さらに 大変形の履歴を受けても損傷の少ないエネル ギー吸収部材が可能であることが確認できた。

### 謝辞

本研究の一部は,平成 14 年度科学研究費補助金(基盤 B;研究代表者:三橋博三)により共同研究として行わ れたものである。

## 参考文献

- 日本コンクリート工学協会:高靭性セメント複合 1) 材料を知る・作る・使う,2002.1
- 2) 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,コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.104-109, 2001.1
- 藤原徳郎,松崎育弘,磯 雅人,福山 洋:高靭 3) 性セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性 能に関する実験的研究,コンクリート工学年次論 文報告集,Vol.23,No.3,pp.87-95,2001.7
   4) 例えば、南、宏一,松谷輝雄他:X 形配筋ガイダン
- ス,建築技術, No.483, pp.101-162, 1991.5
- 5) 田口耕一,小島 博,杉本訓祥:RC 造制震装置を 使用した高層 RC 造集合住宅の設計・施工,コンク リート工学, Vol.40, No.6, pp.28-34, 2002.6
- 6) 川又 篤,三橋博三,福山 洋:ハイブリッド型 繊維補強セメント系複合材料における水結合材比 及び繊維長の影響に関する研究,日本建築学会大 会学術講演梗概集,材料施工,pp.501-502,2002.8 7) 和地正浩,金子佳生,三橋博三:繊維補強セメン
- 和地正浩,金子佳生,三橋博三:繊維補強セメン ト系複合材料を用いたエネルギー吸収部材の開発 に関する数値解析的研究,日本建築学会大会学術 講演梗概集,構造 , pp.659-660 , 2002.8
- 土木学会:コンクリートの寸法効果と引張軟化曲 8) 線,1997.5

