

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

Experimental Study on the Structural Performance of Energy Absorption Device Using HFRCC

石原誠一郎* 森 浩二*²
内井 栄二*² 立松 和彦*
山崎 順二*

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は、靱性に富み、エネルギー吸収性能に優れた材料である。この材料を用いたエネルギー吸収部材を開発する目的で、部材の耐力・変形性能の確認実験を行った。その結果、試験体にX形配筋を使用し、さらにモーメント分布に応じた断面形状とすることで、紡錘型の履歴性状を有し優れたエネルギー吸収性能を持つことが判った。さらにこのような部材は大変形の履歴を受けても損傷が少ないことを確認した。

キーワード：高靱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、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性を大幅に向上できる高靱性セメント系複合材料の研究が盛んに行われている¹⁾²⁾。この靱性に富み、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実用化が期待されている。

松崎・福山らは、モルタル中にPVA繊維を体積比で1.5%混入した高靱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、構造性能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³⁾。

一方、鉄筋コンクリート構造部材の耐力と靱性を向上させるX形配筋⁴⁾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する研究も行われている⁵⁾。しかし、X形配筋を用いることで部材の靱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、さらにかぶりコンクリート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・補修の面から問題がある。

本研究では、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エネルギー吸収性能および大変形の履歴を受けた際の損傷の程度を確認するために行った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⁶⁾

エネルギー吸収部材には、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⁷⁾

- 1) 剛強なスタブを設けて、図-1に示すエネルギー吸収部材に変形を強制的に与える。
- 2) モーメント分布に応じて、図-1のように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。
- 3) 変化した断面形状に合わせてX形配筋を使用する。
- 4) 帯筋を密に配して、靱性能を向上させる。

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の試験体の断面寸法は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。せん断スパン比は全て1とした。以下に各試験体の特徴を示す。

*建築研究グループ *²構造研究グループ

[No.1：HFRCC-1A] 文献3)に準じて、試験体形状を決めた。他の試験体との比較対象の基準となる試験体である。軸力は0とした。

[No.2：HFRCC-1AA] 試験体形状および配筋は、HFRCC-1Aと同じとした。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載荷した。

[No.3：HFRCC-1B] HFRCC-1Aと同じ形状で、X形配筋を1対追加した。軸力は0とした。

[No.4：HFRCC-3] モーメント分布に応じて、断面形状を変化させ、断面に沿うようにX形配筋を2対追加した。

HFRCCはエネルギー吸収部材のみに用いた。スタブ部分には、粗骨材の最大寸法20mmの高強度コンクリートを使用した。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)、シリカフェウムセメント、珪砂7号、高性能AE減水剤である。HFRCCは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

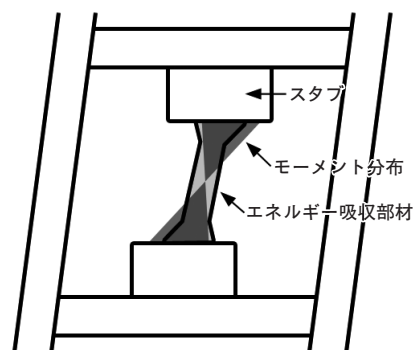


図-1 エネルギー吸収部材の概要

引張軟化曲線推定プログラム⁸⁾を用いて算出した、HFRCCの引張応力-ひび割れ開口変位関係を図-3に示す。

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とスタブとの打継ぎ部には、凝結遅延シートを貼付けて、コンクリート打設後に、目荒し処理した。その後、スタブ部のコンクリートを打設して一体化を図った。

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	断 面		軸力 比	エネルギー吸収部材			ス タ ブ			主筋(SD345)		せん断補強筋(SD295)			せん断スパン比 a/D	
		B	D		σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	配筋	σ_y (N/mm ²)	径	間隔 (mm)	σ_y (N/mm ²)		Pw (%)
		(mm)															
1	HFRCC-1A	210	450	0	65.6	13.2	18.2	67.0	4.5	31.6	4-D19 P _s (%)=1.21	378	D10	60	382	1.13	1
2	HFRCC-1AA	210	450	0.05	59.2	11.3	18.3	63.5	—	—							
3	HFRCC-1B	210	450	0	66.6	10.6	18.3	74.5	—	—							
4	HFRCC-3	210	450(300)	0	70.3	12.8	18.2	74.5	—	—							

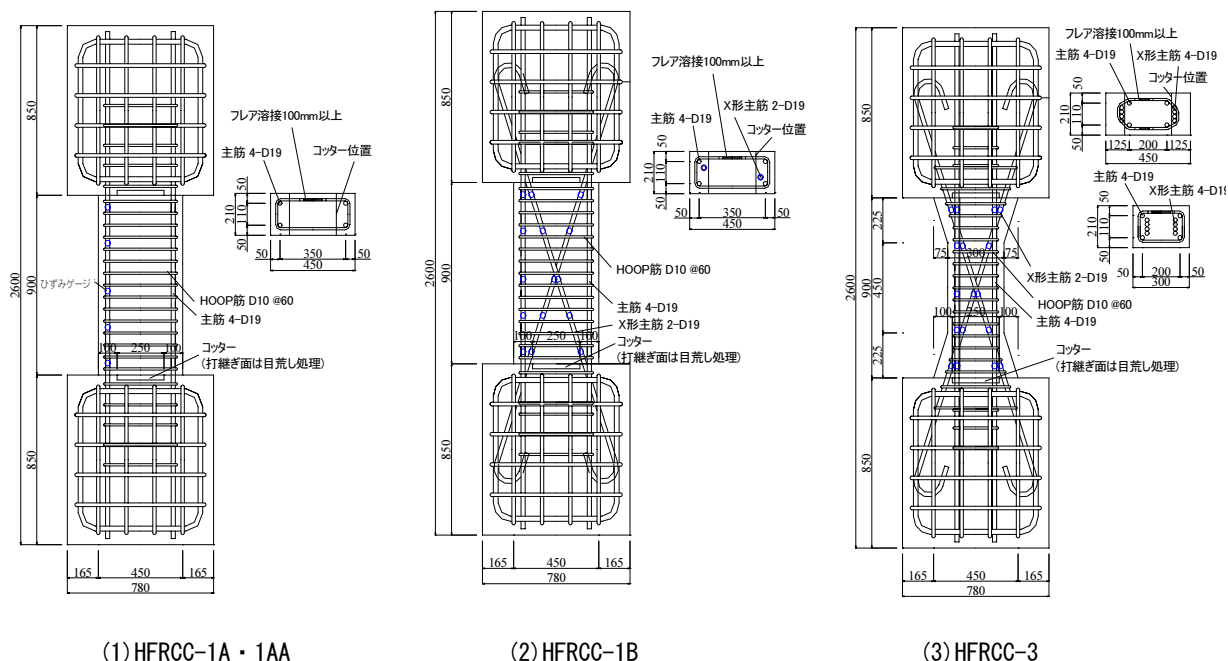


図-2 試験体の形状及び配筋

3.2 実験方法

図-4に荷重装置を示す。加力は建研式逆対称荷重装置により正負交番繰り返しとした。加力方法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、軸力の有無に拘わらず、荷重装置の自重約40kNが荷重されている。荷重履歴を図-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およびズレを計測した。主筋、X形配筋について図-2に示す位置で、ひずみ計測を行った。

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ははっきり確認できるひび割れ（ひび割れ幅0.1mm以上）がほとんど見られず、肉眼でようやく確認できる程度の微細ひび割れ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端部付近において、主筋に沿って微細ひび割れが進展した。部材角1/50(rad.)付近では、微細ひび割れは進展せず、損傷が脚部に集中し、脚部の目開きが大きくなった。

[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、HFRCC-1Aに比べ各部材角時での、ひび割れ数が少なかった。

[No.3：HFRCC-1B] 主筋およびX形筋に沿って微細ひび割れがエネルギー吸収部材全体に分布し、HFRCC-1Aに比べひび割れ数が増加した。しかし、平行配筋の試験体同様、部材角1/50(rad.)近辺では微細ひび割れは進展せず、それ以降になると、損傷が脚部に集中し、脚部の目開きが大きくなった。

[No.4：HFRCC-3] まず、エネルギー吸収部材のハンチ部に微細ひび割れが発生し、主筋およびX形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、損傷が脚部のみに集中せず、部材角1/20(rad.)付近になるまで、エネルギー吸収部材全体に微細ひび割れの進展が見られた。

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

表-3 使用繊維の性質

繊維種類	繊維長さ(mm)	繊維径(μ m)	引張強度(MPa)
SC	32	415	2650
PE	12	12	2600

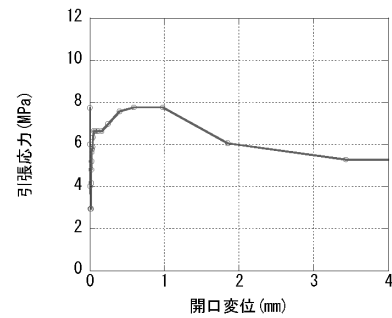


図-3 引張応力-開口変位関係

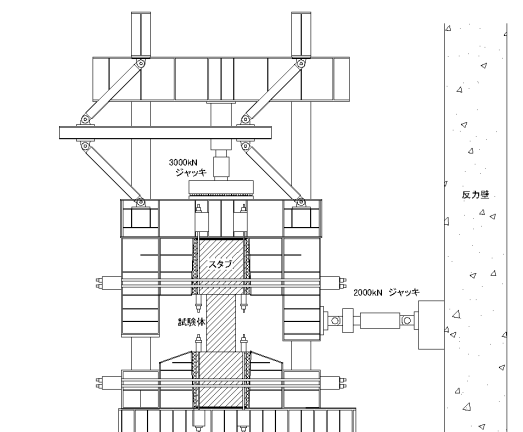


図-4 荷重装置

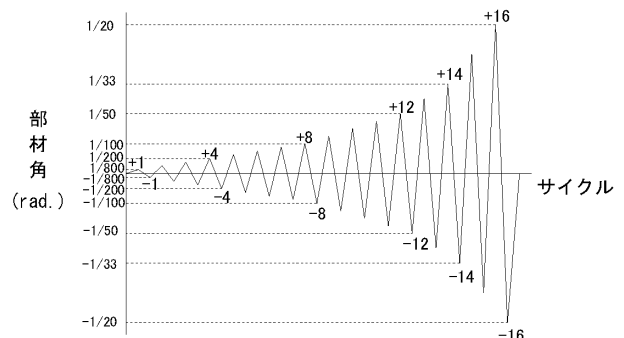


図-5 荷重履歴

表-4 実験結果一覧

No.	試験体記号	最大耐力 (kN)	最大耐力時部材角 (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

4.2 変形状

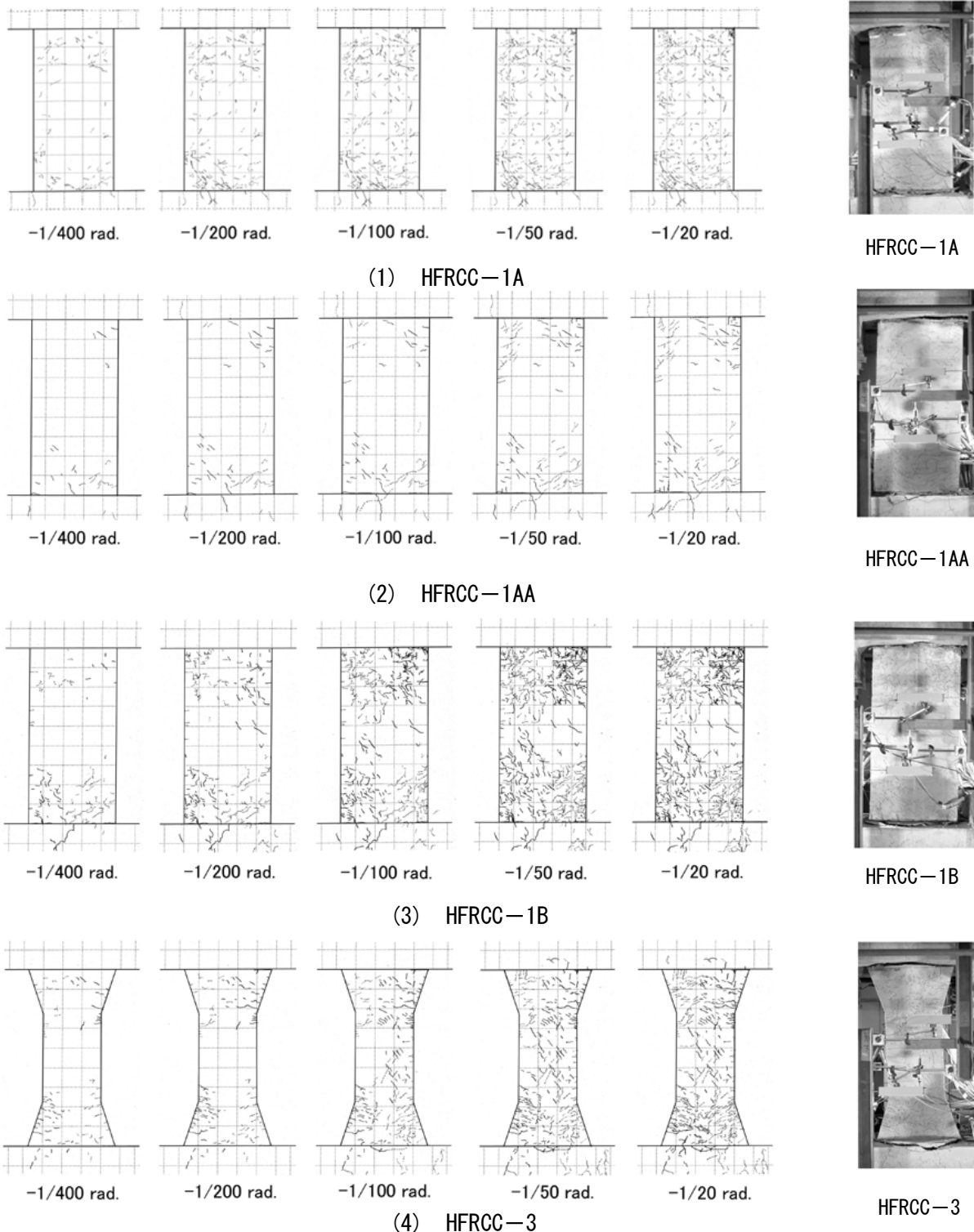
各試験体の荷重－部材角関係を図－7に示す。平行配筋のHFRCC-1Aは、 $1/20(\text{rad.})$ の大変形時にも耐力が低下せず、優れた靱性能を示したが、スリップ型の履歴性状を示した。

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、 $1/25(\text{rad.})$ まで耐

力が増大したが、履歴性状はスリップ型であった。

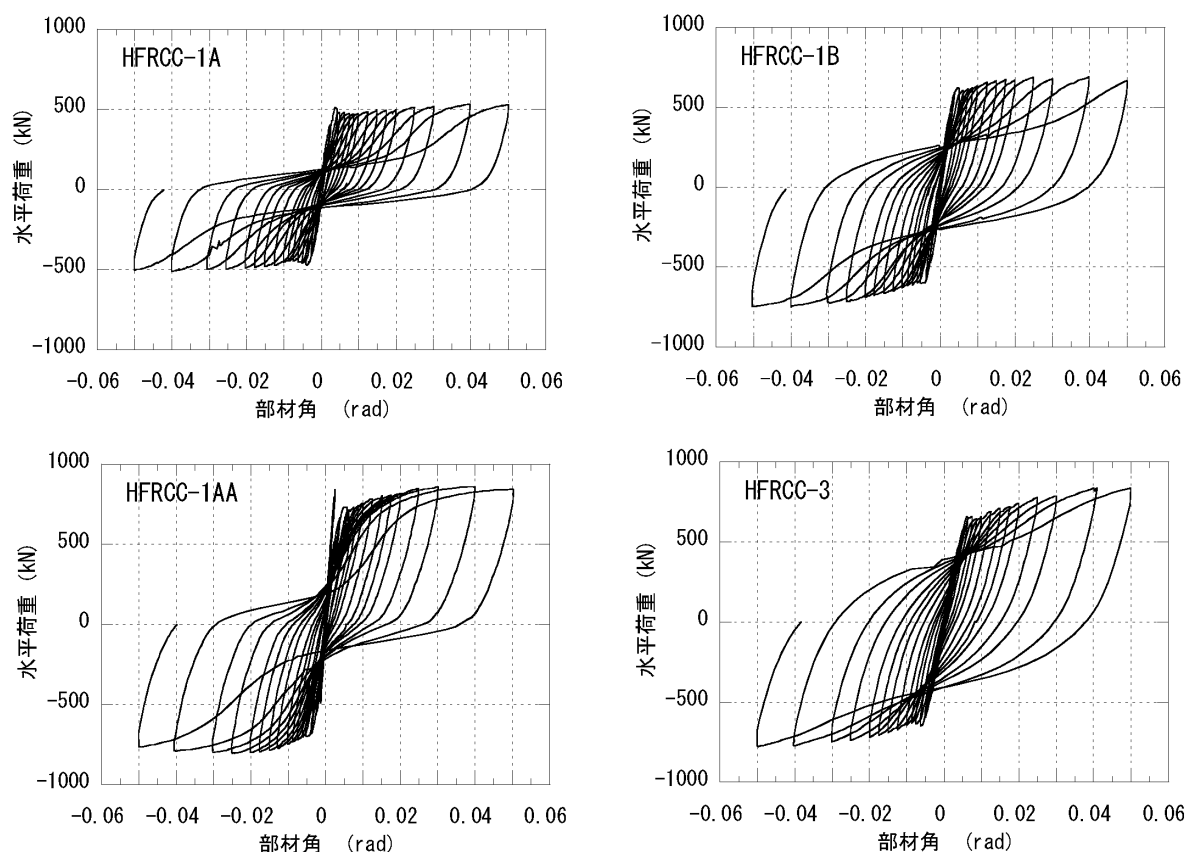
X形配筋を加えたHFRCC-1Bは、HFRCC-1Aに比べて大幅にエネルギー吸収性能が向上したが、やはりスリップ型の履歴性状であった。

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 $1/20(\text{rad.})$ まで耐力が増大した。



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

4.3 等価粘性減衰定数

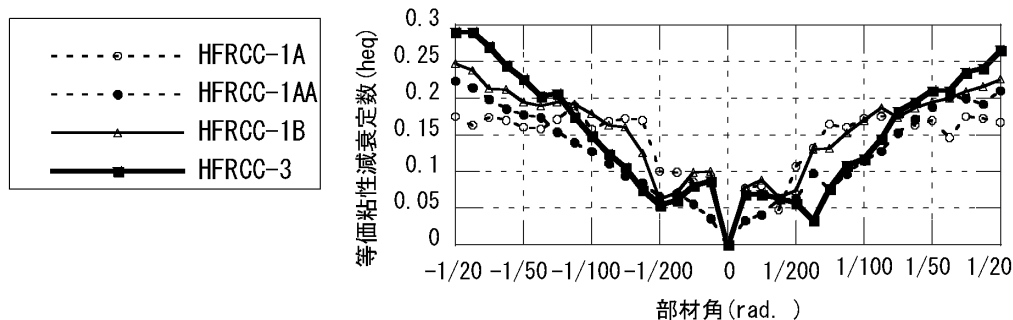
各試験体の等価粘性減衰定数を図－8に示す。HFRCC-3は他の試験体に比べ、大きな部材角においても高い等価粘性減衰定数を示した。

4.4 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－9に示す。HFRCC-1A、1AAおよび1Bではスタブに近い部分のみ主筋が降伏しているが、HFRCC-3では主筋のひずみが、スタブに近い部分において降伏するだけでなく中央部付近も降伏近くまで進展している。

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発生している。

さらに、HFRCC-1Bに比べ、HFRCC-3では、X形配筋のひずみが、スタブに近い部分において降伏するだけでなく中央部まで降伏していることがわかる。以上のことから、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。



図－8 等価粘性減衰定数

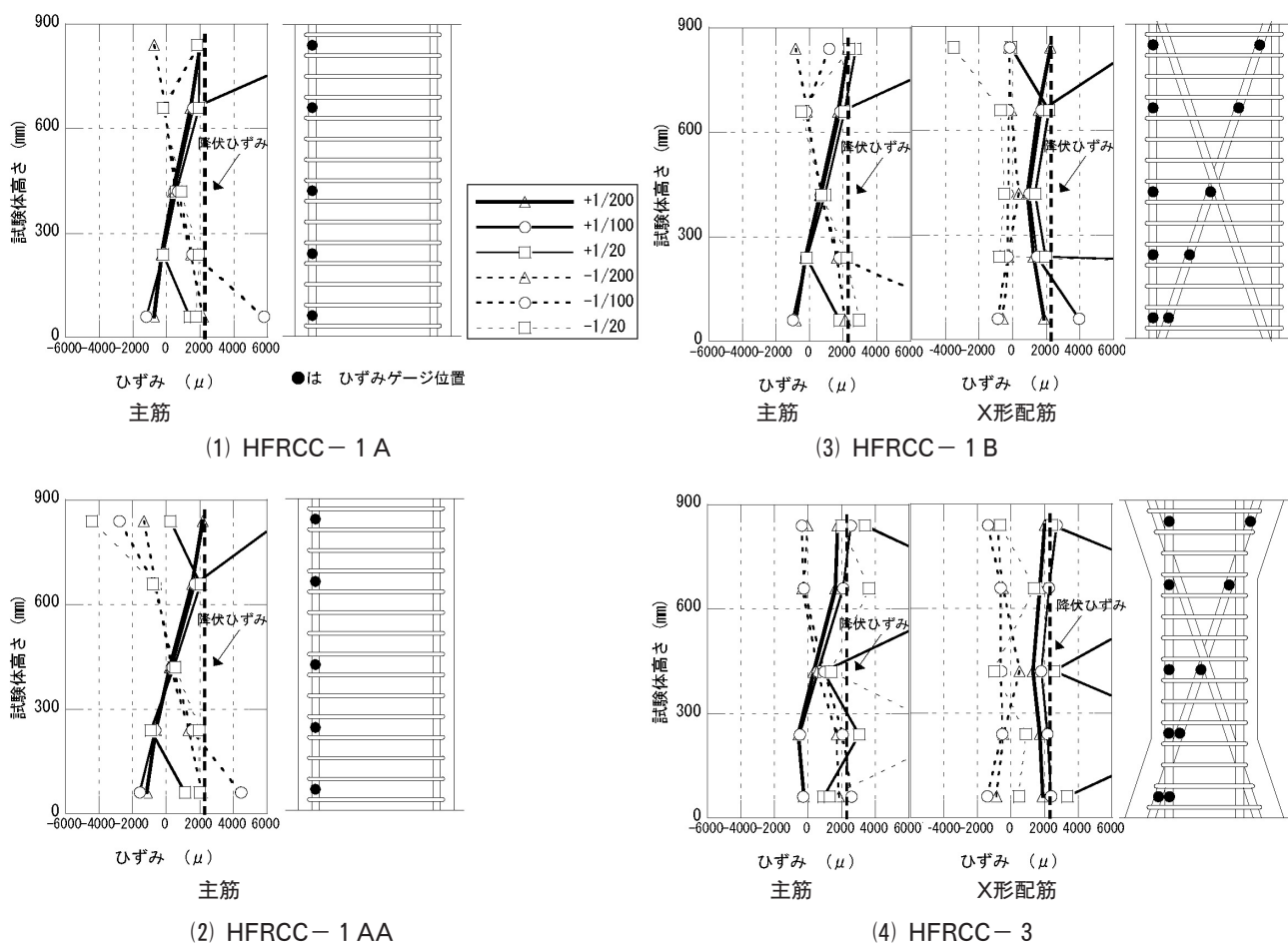


図-9 主筋およびX形配筋のひずみ分布

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、微細ひび割れ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に優れた靱性能を示すが、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た断面形状とすることで、紡錘型の履歴性状を有し優れたエネルギー吸収性能を持つことが判った。さらにこのような部材は大変形の履歴を受けても損傷が少ないことを確認した。

〔謝 辞〕

本実験に際し、御指導いただいた東北大学大学院工学研究科の三橋博三教授および金子佳生助教授に謝意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・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
- 3) 藤原徳郎、松崎育弘、磯 雅人、福山 洋：高靱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IV、pp.659-660、2002.8
- 8) 土木学会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線、1997.