

論文 補修により再利用可能な HFRCC エネルギー吸収部材の性状について

石原誠一郎^{*1}・金子佳生^{*2}・三橋博三^{*3}・森 浩二^{*4}

要旨：高靱性セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材が地震により大きく変形し損傷した場合に、補修することで、変形を受ける前の構造性能に回復させ再利用することが可能であるかを確認した。補修は、一般に行われるエポキシ樹脂低圧注入工法と新たに考案した部材内部に埋込んだ注入ホースによるエポキシ樹脂注入工法により補修し、それぞれの効果を検討した。その結果、エポキシ樹脂低圧注入工法による補修では、構造性能が損傷を受ける前に比べ大幅に低下したが、注入ホースによるエポキシ樹脂注入工法による補修では、損傷前と同程度に回復でき、エネルギー吸収部材として再利用できることが確認された。

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

高靱性セメント系複合材料を、エネルギー吸収部材等の構造部材用途に適用するための研究が精力的に行われている^{1),2),3)}。筆者らは、既報⁴⁾において、高靱性セメント系複合材料の一つであるハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料（以下、HFRCC と記す）を用いた部材の曲げせん断実験を行ない、HFRCC と平行配筋、X 形配筋を併用し、さらに図-1 のように曲げ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エネルギー吸収部材が可能となることを示した。筆者らはこの高靱性セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材を高層建築物の制震装置として適用し、大地震時の柱・梁の損傷を出来るだけ少なくしたいと考えているが、以下のような問題があると考えられる。

高靱性セメント系複合材料をエネルギー吸収部材に用いた場合、強風や地震などの外力を受け変形すると微細な複数ひび割れが分散して形成されるが、大地震などで大きく変形し、数%

以上のひずみを生じると、分散していたひび割れがいくつかに局所化しひび割れ幅が拡大し、変形の程度によってはひび割れが数ミリ程度にまで拡幅する。損傷を受けたエネルギー吸収部材は、重量が重いため居住者のいる建物内での取替えは非常に困難である。さらに高靱性セメント系複合材料は繊維補強されているため、通常のコンクリート以上に解体も容易でない。

上記の問題を解決するため、高靱性セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材を補修することで、変形を受ける前の構造性能に回復させ再利用を可能にする必要がある。しかし、既往の研究では高靱性セメント系複合材料を、

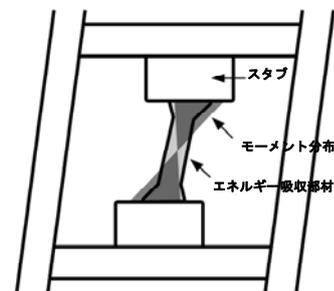


図-1 エネルギー吸収部材の概要

*1 ㈱浅沼組 技術研究所 課長 博士(工学) (正会員)

*2 東北大学大学院助教授 工学研究科都市・建築学専攻 Ph.D. (正会員)

*3 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)

*4 ㈱浅沼組 技術研究所

エネルギー吸収部材に適用できる可能性を示す文献はあるが、損傷した高靱性セメント系複合材料部材を補修することで構造性能がどのように変化するかは報告はなされていない。

本研究では、高靱性セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材に荷重により大きな損傷を与えた後、従来から行われているエポキシ樹脂低圧注入工法および新たに提案する部材内部に配した注入ホースによるエポキシ樹脂注入工法で、それぞれ補修した試験体を再荷重し補修後の構造性能を検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 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。試験体は曲げモーメント分布に応じて断面形状を変化させた2体のエネルギー吸収部材とスタブで構成されている。試験体はF-A, F-Bの2種類で(補修後の試験体は除く)、試験体形状は同じである。試験体F-Aは、

エネルギー吸収部材およびスタブのうちエネルギー吸収部材との取合い部にHFRCCを用い、それらを一度に打設し、スタブの残り部分には高強度コンクリートを打設した。試験体F-Bは、エネルギー吸収部材のみHFRCCを用い、スタブ部分には高強度コンクリートを用いた。なお、高強度コンクリートの設計基準強度は 60N/mm^2 である。試験体F-Bでは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、打継いだ。さらに補修用の注入ホースを打ち込んだ。

HFRCCの調合を表-2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)、シリカフェームセメント(試験体F-Aではシリカフェームとセメントを別々に投入)、珪砂、高性能減水剤である。表-3に使用繊維の物性を示す。

強制ミキサーで練混ぜ、打設した。

2.2 補修方法

損傷を受けた試験体F-Aは、ひび割れに低圧

表-1 試験体一覧

試験体記号	エネルギー吸収部材		軸力比	エネルギー吸収部材	スタブ	X形配筋・平行筋		せん断補強筋		
	スタブ界面	中央部		吸収部材	圧縮強度 (N/mm ²)	配筋	降伏強度 (N/mm ²)	径	間隔 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)
F-A	B×D (mm)		0.1	63.5	78.7	X形配筋 4-D13	353	D10	60 (溶接で閉鎖型)	367
F-AR	160	160	0.1	71.6	84.8					
F-B	×	×	0.1	68.2	85.7	平行筋 4-D13	370			
F-BR	250	150	0.1							
F-BR2			0.1							

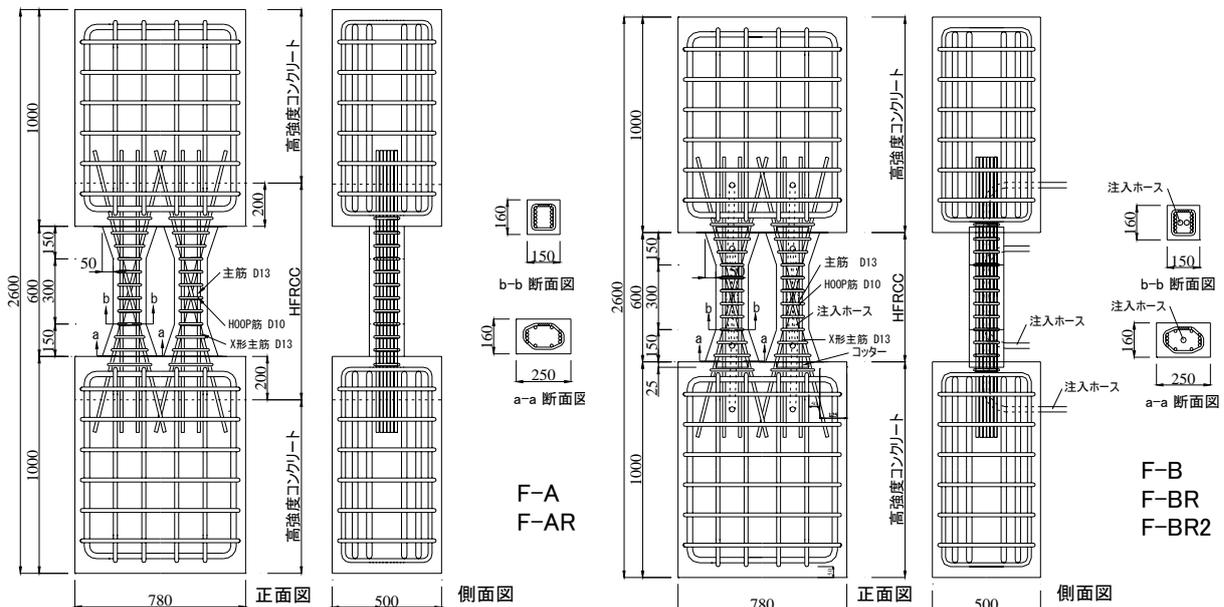


図-2 試験体の形状および配筋

注入工法でエポキシ樹脂を注入して補修した。

まず、試験体の表面をケレンし掃除後、注入座を取付け、ひび割れをパテでシールし、翌日、注入座からエポキシ樹脂を注入した（写真-1を参照）。その後、注入座を撤去し、表面をサンダーで平滑に仕上げた。

試験体 F-A の補修効果の検討をふまえ、試験体 F-B では、新たな補修方法を適用した。まず、これまで打継ぎ処理に使用されていた中空のプラスチックコアと逆止弁の機能を持ったゴム製の連続弁から構成された注入ホースを試験体に打ち込んだ。載荷後の試験体表面のひび割れをシール後、打ち込んだパイプの注入口からケミカルポンプによりエポキシ樹脂を圧入し、部材内のパイプの孔から出たエポキシ樹脂がひび割れに入り込み、ひび割れ部分が補修材で満たされ、最後にひび割れからのエポキシ樹脂の漏出により、充填を確認する新たな注入方法によって補修した（写真-2を参照）。エネルギー吸収部材1体につき2本の注入ホースを図-2のように打ち込んだ。エポキシ樹脂のポンプによる圧入によって、損傷の激しいエネルギー吸収部材とスタブの界面だけでなく、0.1mm程度の微細なひび割れからもエポキシ樹脂の漏出が確認された。

2.3 実験方法

加力は、建研式逆対称載荷装置により、鉛直方向油圧ジャッキで軸力比 0.1 の定軸力を加えながら、水平方向油圧ジャッキで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、載荷装置の自重約 40 kN が載荷されている。

試験体 F-A は、図-3 に示すような履歴で部材角 60/1000rad.まで載荷を行った。補修後、同じ履歴で部材角 60/1000rad.まで載荷を行った。なお、補修後の試験体記号は F-AR とする。

試験体 F-B では、この部材を高層建築物の制震装置とした場合に大地震によって変形すると想定される部材角 30/1000rad.まで図-3 に示す載荷履歴で載荷を行い、補修を行った（補修後

表-2 HFRCC の調合

水粉体比 (%)	砂粉体比 (%)	繊維混入率 (vol%)	
		SC	PE
45	45	0.75	0.75

表-3 使用繊維の物性

種類	記号	繊維長 (mm)	繊維径 (μ m)	引張強度 (N/mm ²)
スチールコード	SC	32	415	2650
ポリエチレン	PE	6	12	2770

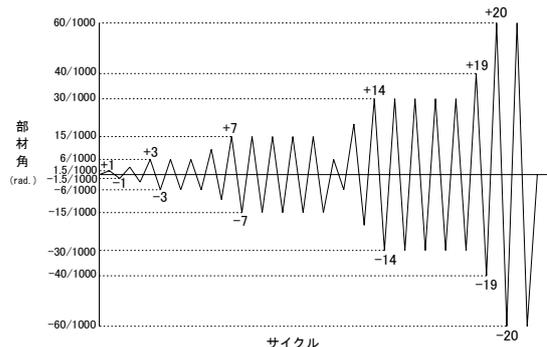


図-3 載荷履歴



写真-1 樹脂低圧注入工法



写真-2 注入ホースによる樹脂注入

の試験体記号は F-BR)。次に、補修した試験体 F-BR を部材角 40/1000rad.まで載荷を行った。その後、再度補修した（試験体記号は F-BR2）。この試験体 F-BR2 を同様に部材角 60/1000rad.まで載荷し、部材角 80/1000rad.で正負 2 回載荷し、その後 +150/1000rad.まで載荷した。

3. 実験結果

各試験体の水平荷重と部材角の関係を図-4 および図-6 にそれぞれ示す。

試験体 F-A は、 $\pm 1.5/1000$ rad.の加力時にエネルギー吸収部材のハンチ部側面にひび割れ幅 0.1 mm 以下の微細なひび割れ（以下、微細ひび割れ

と呼ぶ)が発生し、部材角の増大にともない、微細ひび割れの範囲が拡大し正面にも広がった。±10~15/1000rad.のサイクルで X 形配筋のハンチ部分が降伏するとともに、エネルギー吸収部材の中央部とハンチ部との取り合い部(以下、エネルギー吸収部材絞部と呼ぶ)近傍の平行筋が降伏後、ひび割れが局所化し、ひび割れ幅が0.8 mm程度まで拡大した。-15/1000rad.のサイクル終了時(-11 サイクル、図-3 参照)のひび割れ状況を図-5(a)に示す。±30/1000rad.のサイクルでエネルギー吸収部材絞部のひび割れ幅は4~5 mmまで拡大し、耐力の低下が見られた。-60/1000rad.のサイクル終了時(-21 サイクル)には、ハンチ部や絞部のひび割れ幅は最大で8mm程度まで拡大した(図-5(a)参照)。なお、スタブには損傷が見られなかった。

試験体 F-AR は、±3/1000rad.のサイクル終了までほとんどひび割れが確認されなかった。部材角の増大にともない、エネルギー吸収部材絞部の近傍に微細ひび割れが徐々に進展したが、-15/1000rad.のサイクル終了時(-11 サイクル)のひび割れ状況を見ると(図-5(b)参照)、試験

体 F-A にくらべ、ひび割れが少なかった。±30/1000rad.の加力時に、ハンチ部の補修したひび割れ近傍に生じたひび割れの幅が2~2.5 mmに拡大した。±60/1000rad.のサイクル終了時にはひび割れも試験体 F-AR と同程度見られ、ハンチ部のひび割れ幅は6~8 mmに拡大した(図-5(b)参照)。

試験体 F-B は、±3/1000rad.の加力時にエネルギー吸収部材のハンチ部および絞部の側面および正面に微細ひび割れが発生し、部材角の増大にともない、微細ひび割れの範囲が拡大した。±10/1000rad.のサイクルで、試験体 F-A と異なり、エネルギー吸収部材とスタブとの界面(以下、界面と呼ぶ)に0.3 mm程度のひび割れが発生した。±10~15/1000rad.のサイクルで X 形配筋のハンチ部分が降伏した。±15/1000rad.の加力時には、試験体 F-A で見られたエネルギー吸収部材絞部でのひび割れの局所化は見られず、界面のひび割れ幅が1mm程度まで拡大しつつも、図-7(a)に示すように、試験体 F-A よりも多数の微細ひび割れが試験体全体に分散して生じた。また、エネルギー吸収部材の近傍のスタブ表面にひび割れが少し発生したが、荷重-部材角への

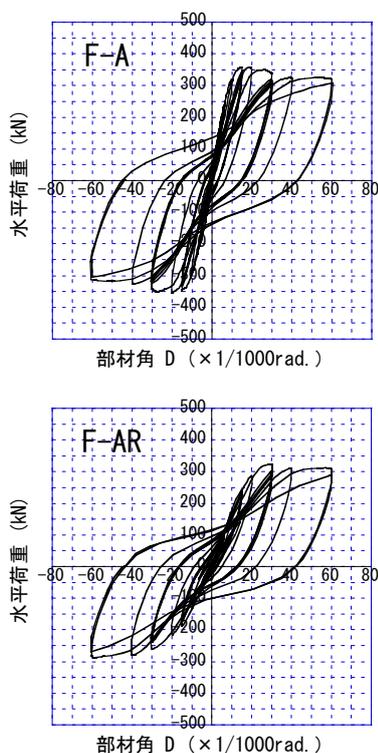


図-4 試験体 F-A・AR の水平荷重-部材角関係

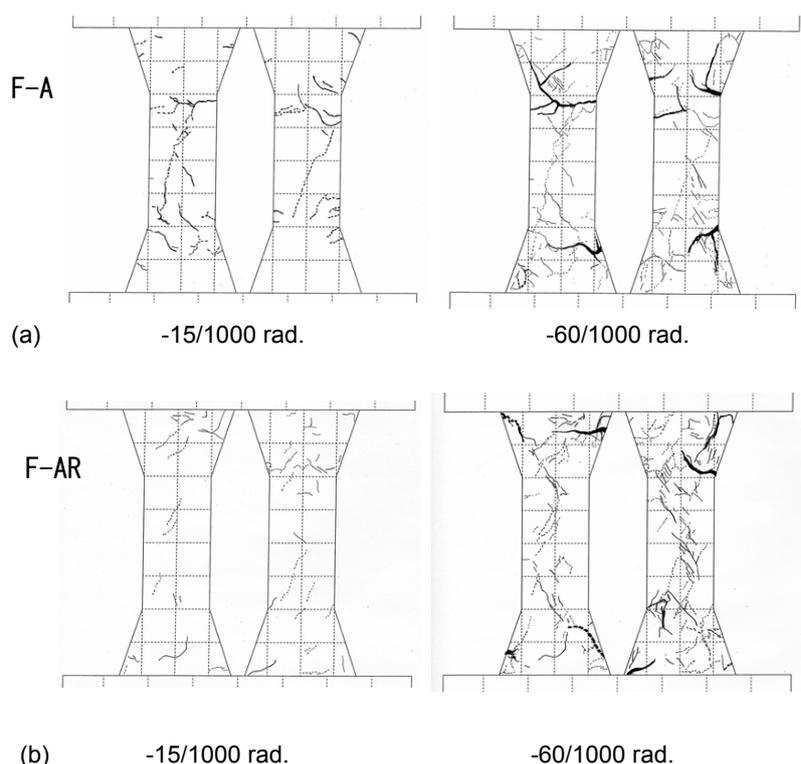


図-5 (a)試験体 F-A (b) 試験体 F-AR の破壊状況

影響はこの段階ではほとんどないと考えられる。 $\pm 30/1000\text{rad}$ のサイクルでは、界面でスタブの表面コンクリートの一部がめくれあがり、ひび割れ幅が 5 mm まで拡大したが、微細ひび割れも増加した (図-7(a)参照)。

試験体 F-BR は、 $\pm 6/1000\text{rad}$ のサイクルまでひび割れが確認されず、 $\pm 10/1000\text{rad}$ の加力時にエネルギー吸収部材のハンチ部側面に微細ひび割れが発生した。 $-15/1000\text{rad}$ のサイクル終了時 (-11 サイクル) のひび割れ状況を見ると (図-7(b)参照)、試験体 F-A に比べ、ひび割れが非常に少なかった。 $\pm 30/1000\text{rad}$ のサイクルでは、界面において補修した箇所と別の部分でスタブ

の表面コンクリートの一部がめくれあがり、ひび割れ幅が 5 mm 程度まで拡大した。 $\pm 40/1000\text{rad}$ の加力時には、界面のひび割れ幅は 7 mm 程度までに拡大し、ハンチ部のひび割れ幅も一部が 2 ~ 2.5 mm に拡大した。さらに、微細ひび割れの分散も試験体 F-B ほどには見られなかった。ただ、試験体 F-B で生じたひび割れとは異なる位置で多くのひび割れが発生したため、試験体 F-B で生じたひび割れには補修によってエポキシ樹脂が注入されていたと考えられる。

試験体 F-BR2 も、 $\pm 6/1000\text{rad}$ のサイクルまでひび割れが確認されず、 $\pm 10/1000\text{rad}$ の加力時にハンチ部側面に微細ひび割れが発生した。部材

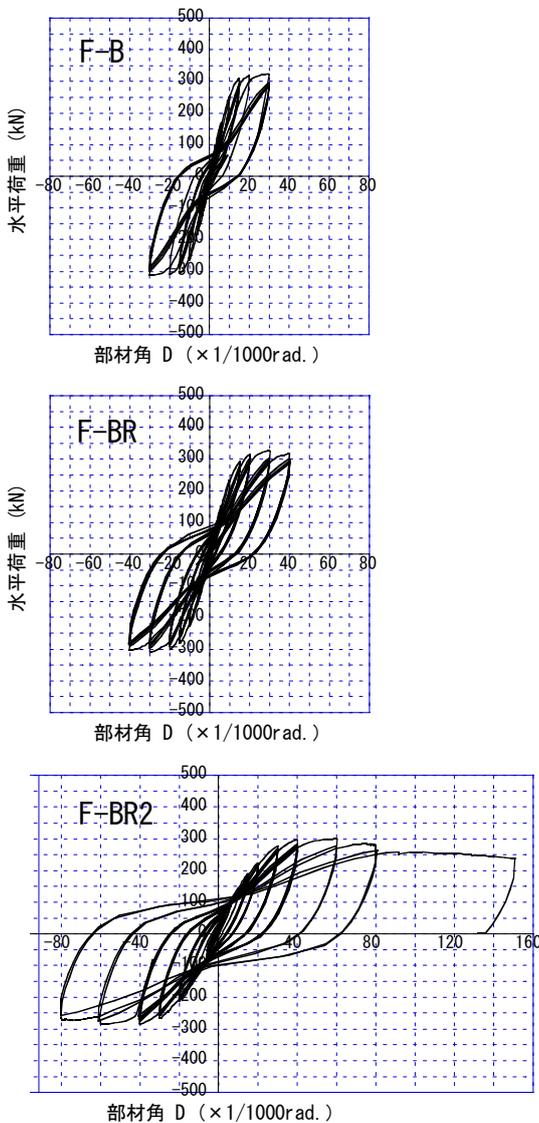


図-6 試験体 F-B・BR・BR2 の水平荷重-部材角関係

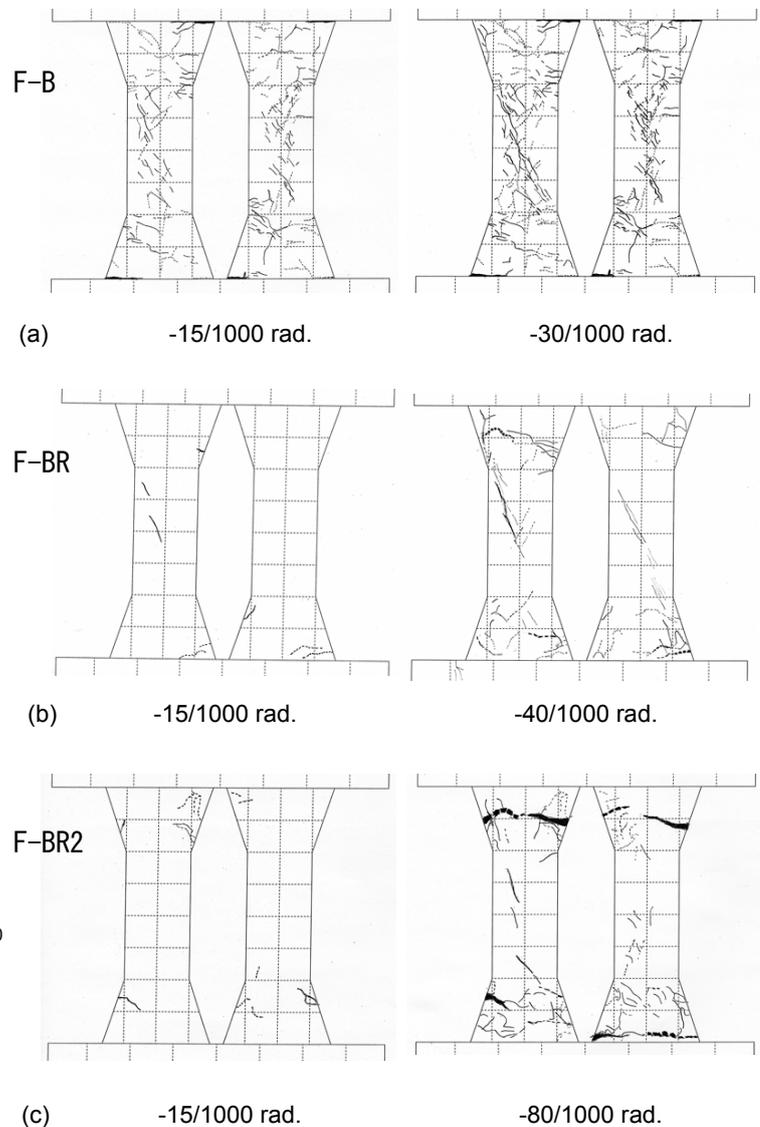


図-7 (a) 試験体 F-B (b) F-BR (c) F-BR2 の破壊状況

角の増大にともない、新たにひび割れが生じるよりも試験体 F-BR で生じたひび割れに損傷が局所化し、ひび割れ幅が拡大したケースが多かったため (図-7(c)参照) 試験体 F-BR で生じたひび割れには補修によってエポキシ樹脂が十分に注入されていないと考えられる。

4. 考察

試験体 F-A と F-AR の水平荷重-部材角の関係の包絡線を図-8 (a) に示す。試験体 F-AR は試験体 F-A にくらべ、初期の水平荷重および剛性が大きく低下し、最大耐力も低下している。さらに試験体 F-A では、正加力と負加力で各部材角ともほぼ同じ水平荷重で、最大耐力も同じであったが、補修後の試験体 F-AR では、正加力にくらべ負加力の水平荷重が各部材角とも大幅に低下した。このことから、エポキシ樹脂低圧注入工法による試験体のひび割れ補修が均一になされていないと考えられる。この原因としては、高靱性セメント系複合材料の損傷は微細なひび割れが多いために、外側からひび割れにエポキシ樹脂を注入することは困難で、さらに内部への補修材の充填状況が確認できないため、エポキシ樹脂が十分に注入されていないひび割れが生じたことによると考えられる。

試験体 F-B, F-BR, F-BR2 の水平荷重-部材角の関係の包絡線を図-8 (b) に示す。試験体 F-BR の水平荷重および剛性は、試験体 F-B にくらべ、部材角 30/1000rad. まで僅かな低下しか見られなかった。さらに、試験体 F-BR の正加力と負加力の各部材角での水平荷重は負加力の方が若干小さいが、試験体 F-B でも同様の傾向が見られ、試験体 F-A で見られたような正負加力による大幅な違いは見られなかった。これらのことから、損傷を受けた試験体 F-BR は、注入ホースによるエポキシ樹脂注入工法により適切に補修され、損傷を受ける前の構造性能にほぼ回復されたと考えられる。

再度補修した試験体 F-BR2 の水平荷重および剛性は、試験体 F-BR にくらべ部材角 20/1000rad.

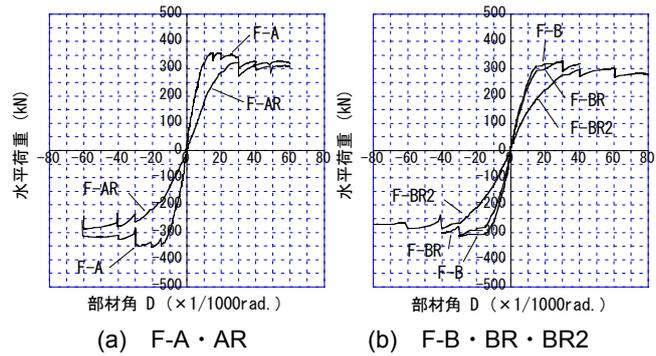


図-8 各試験体の水平荷重-部材角の包絡線

まで大幅な低下が見られたが部材角 40/1000rad. までは少し改善した。その後、部材角 80/1000rad. までは耐力を維持し、安定した履歴を描いた。再度補修した試験体 F-BR2 が、試験体 F-BR にくらべ構造性能が大きく低下した原因は、1 回目のエポキシ樹脂の注入により、注入ホース近傍の空隙が塞がれたため、再補修時のエポキシ樹脂注入が 1 回目ほど十分に注入できなかったためと考えられる。

5. まとめ

高靱性セメント系複合材料を用いたエネルギー吸収部材が大地震により大きく変形し損傷を受けた場合に、補修することで変形を受ける前の構造性能に回復させ再利用が可能であることを確認した。その結果、一般に行われているエポキシ樹脂低圧注入工法による補修では構造性能が損傷を受ける前にくらべ大幅に低下したが、注入ホースによるエポキシ樹脂注入工法による補修では構造性能が損傷を受ける前と同程度まで回復されることが確認できた。

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の性能評価と構造利用研究委員会報告書 (II)，2004.5
- 2) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，2005.7
- 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) 石原誠一郎，三橋博三，金子佳生，和地正浩：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1705-1710，2003