

補修により再利用可能なHFRCCエネルギー吸収部材に関する研究

Study on Repairable Energy Absorption Device Using HFRCC

石原 誠一郎* 立松 和彦*

森 浩二*²

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について、地震により大きく変形し損傷した場合に、損傷部分をエポキシ樹脂で補修することで、変形を受ける前の構造性能に回復させることを目的として実験を行った。補修方法は、一般に行われてい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の2種類とした。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を確認した。

キーワード：高靱性セメント系複合材料／エネルギー吸収部材／補修／繊維補強

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、高靱性セメント系複合材料をエネルギー吸収性能に優れたエネルギー吸収部材として利用できることを示した。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。その適用にあたっては、以下のような問題がある。

- (1) 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局所化し、ひび割れ幅も拡大して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。
 - (2) 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。
 - (3) 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が容易でない。
- これら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。

既往の研究では、高靱性セメント系複合材料を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を示した報告はなされていない。

本報告では、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、繰返し載荷により大きな損傷を与えた後、コンクリートのひび割れ補修として一般に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載荷し、補修後の構造性能を検討した結果を述べる。

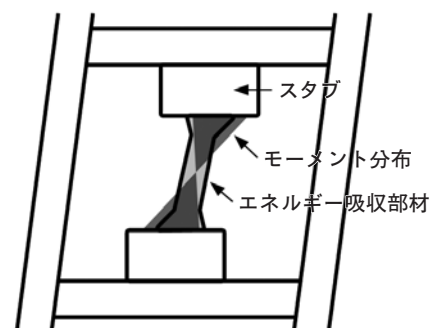


図-1 エネルギー吸収部材の概要

*建築研究グループ

*²構造研究グループ

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、試験体形状は同じである（F-ARはF-Aを載荷終了後に補修した試験体。F-BRはF-Bを載荷終了後に補修した試験体。F-BR2はF-BRを載荷終了後に再度補修した試験体である。）

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/mm²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コッ

ターを設けて（図－２を参照）打継いだ。また、試験体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に使用した補強繊維の物性を示す。

これらの材料を強制ミキサーで練混ぜた後に、打設した。

2.2 補修方法

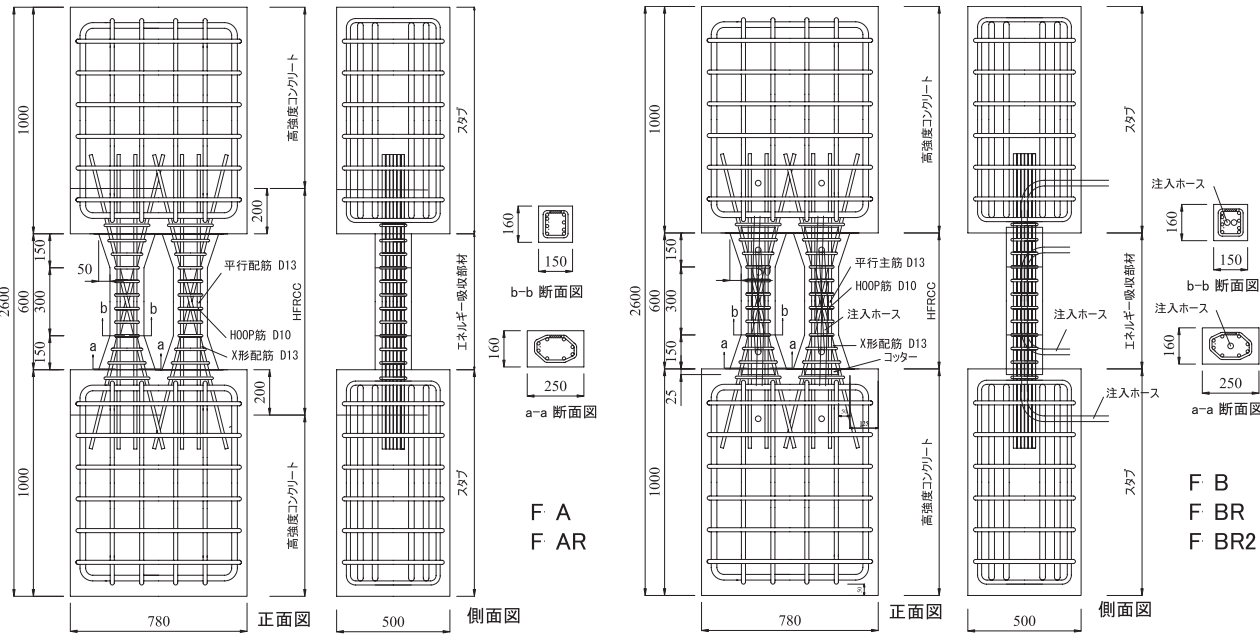
載荷により損傷を受けた試験体F-Aは、ひび割れに低圧注入工法でエポキシ樹脂を注入し補修した。

以下に、その手順を示す。

- 1) 試験体の表面をケレンし、掃除した後に、注入座を取付け、ひび割れをパテでシールした。
- 2) 翌日、注入座からエポキシ樹脂を注入した（写真－１を参照）。

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・平行配筋		せん断補強筋		
	スタブ界面	中央部				配筋	降伏強度 (N/mm ²)	径	間隔 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)
	B×D (mm)									
F-A	160 × 250	160 × 150	0.1	63.5	78.7	X形配筋 4-D13 平行配筋 4-D13	353	D10	60 (溶接で 閉鎖型)	367
F-AR (1回補修施工)			0.1	71.6	84.8		370			370
F-B			0.1	68.2	85.7					
F-BR (1回補修施工)			0.1							
F-BR2 (2回補修施工)			0.1							



図－２ 試験体の形状および配筋

3) 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の補修効果の検討結果をふまえ、試験体F-Bでは新たな補修方法を適用した。以下にその手順を示す。

1) 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、試験体製作時に、試験体に**写真－2**のように配して打ち込んだ。

2) 载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た（**写真－3**を参照）。

3) 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**写真－4**のようにひび割れからのエポキシ樹脂の漏出によって、充填されたことを確認した。

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、エネルギー吸収部材とスタブとの界面の損傷の激しい部分だけでなく、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

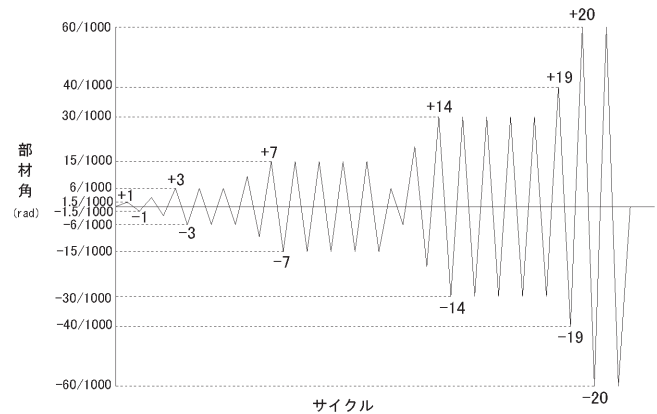
加力には、建研式逆対称载荷装置を用いた。鉛直方向油圧ジャッキで軸力比0.1の定軸力を加えながら、水平方向油圧ジャッキで正負交番繰返し载荷を行った。加力方法は上下スタブ間の相対変位による変位制御とした。なお、各試験体には、载荷装置の自重約40kNが载荷されている。

各試験体の実験時の最終部材角の一覧を**表－4**に示す。試験体F-Aについては、**図－3**に示すような履歴で部材角60/1000radまで载荷を行った。载荷後、補修した試験体F-ARは同じ履歴で部材角60/1000radまで载荷を行った。

試験体F-Bでは、この部材を高層建築物の制震装置として使用した場合に、大地震によって変形すると想定さ

表－4 試験体の最終部材角の一覧

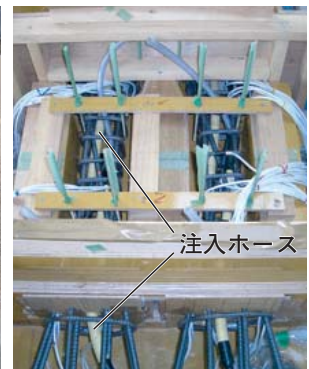
試験体記号	最終部材角 (rad.)
F-A	60/1000
F-AR (1回補修施工)	60/1000
F-B	30/1000
F-BR (1回補修施工)	40/1000
F-BR2 (2回補修施工)	150/1000



図－3 载荷履歴



写真－1 樹脂低圧注入工法



写真－2 注入ホース設置

表－2 HFRCCの調合

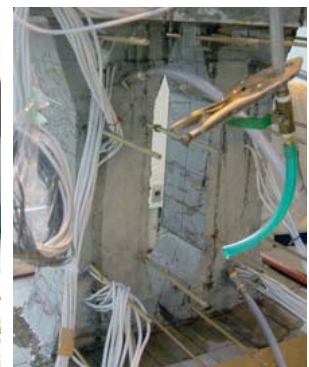
水粉体比 (%)	砂粉体比 (%)	繊維混入率 (vol%)	
		SC	PE
45	45	0.75	0.75

表－3 使用繊維の物性

種類	記号	繊維長 (mm)	繊維径 (μm)	引張強度 (N/mm²)
スチールコード	SC	32	415	2650
ポリエチレン	PE	6	12	2770



写真－3 注入ホースによる樹脂注入施工状況



写真－4 ひび割れからの樹脂の漏出状況

れる部材角30/1000radまで図-3に示す载荷履歴で载荷を行った後に、補修した。次に、補修した試験体F-BRを部材角40/1000radまで载荷を行った。その後、2回目の補修を行った試験体F-BR2を同様に部材角60/1000radまで载荷し、部材角80/1000radで正負2回载荷し、その後+150/1000radまで载荷した。

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、各試験体の破壊状況を図-5および図-7にそれぞれ示す。

試験体F-Aでは、 $\pm 1.5/1000\text{rad}$ の加力時にエネルギー吸収部材のハンチ部側面にひび割れ幅0.1mm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。 $\pm 10\sim 15/1000\text{rad}$ 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り部と呼ぶ）近傍の平行配筋が降伏した後、ひび割れが局所化し、ひび割れ幅が0.8mm程度まで拡大した。 $-15/1000\text{rad}$ 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。その後、 $\pm 30/1000\text{rad}$ のサイクルでエネルギー吸収部材絞

り部のひび割れ幅は4~5mmまで拡大し、耐力の低下が見られた。 $-60/1000\text{rad}$ のサイクル終了時（-21サイクル）には、ハンチ部や絞り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では、 $\pm 3/1000\text{rad}$ 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。部材角の増大に伴い、エネルギー吸収部材絞り部の近傍に微細ひび割れが徐々に進展したが、 $-15/1000\text{rad}$ 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-5(b)参照）、試験体F-Aに比べ、ひび割れが少なかった。その後、 $\pm 30/1000\text{rad}$ 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2~2.5mmに拡大した。 $\pm 60/1000\text{rad}$ のサイクル終了時にはひび割れも試験体F-Aと同程度見られ、ハンチ部のひび割れ幅は6~8mmに拡大した（図-5(b)参照）。

試験体F-Bでは、 $\pm 3/1000\text{rad}$ の加力時にエネルギー吸収部材のハンチ部および絞り部の側面および正面に微細ひび割れが発生し、部材角の増大に伴い、微細ひび割れの範囲が拡大した。 $\pm 10/1000\text{rad}$ 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0.3mm程度のひび割れが発生した。 $\pm 10\sim 15/1000\text{rad}$ のサイクルでX形に配筋された鉄

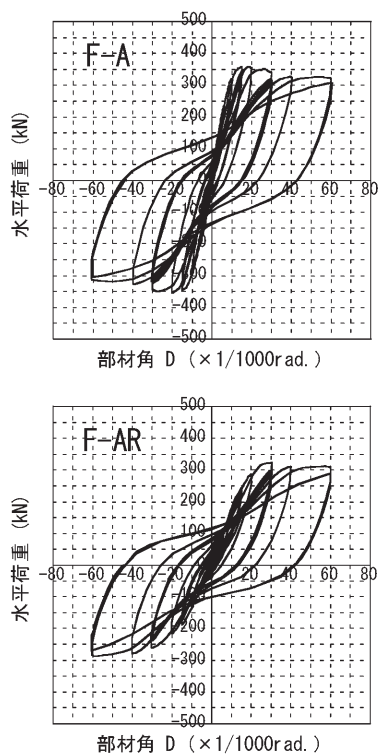


図-4 試験体F-A・ARの
水平荷重－部材角関係

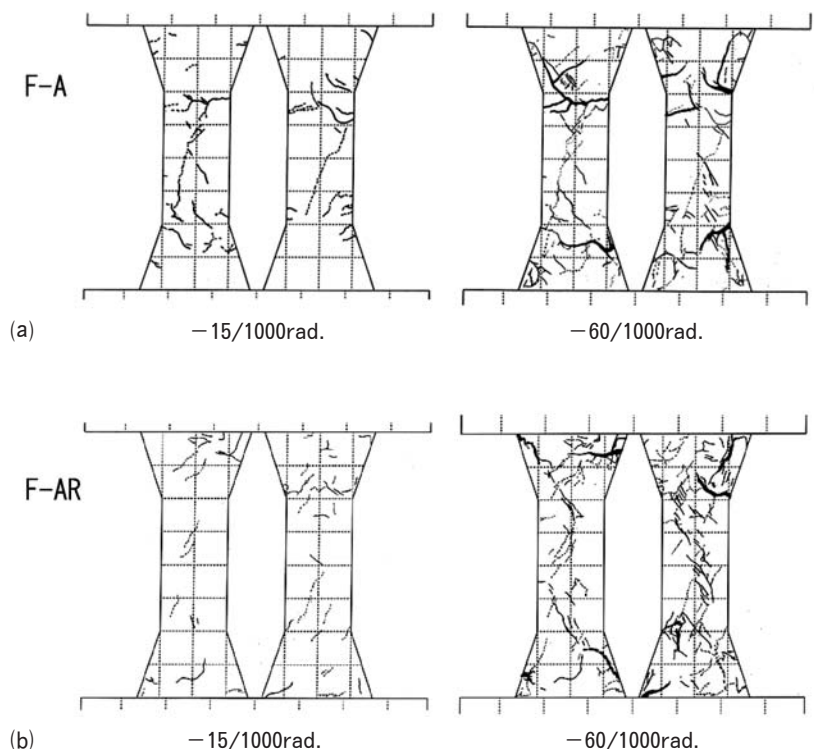


図-5 (a) 試験体F-A (b) 試験体F-ARの破壊状況

筋がハンチ位置で降伏した。±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り部近傍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近傍のスタブ表面にひび割れが少し発生した。ただ、この段階では、ひび割れの荷重-部材角関係への影響はほとんどなかった。±30/1000rad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5mmまで拡大し、微細ひび割れも増加した(図-7(a)参照)。

試験体F-BRでは、±6/1000radのサイクルまでひび割

れが確認されず、±10/1000rad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。-15/1000rad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-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。±30/1000radのサイクルでは、界面において補修していない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5mm程度まで拡大した。

±40/1000radの加力時には、界面のひび割れ幅は7mm程度までに拡大し、ハンチ部のひび割れ幅も一部が2~2.5mm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。しかし、試験体F-BRで新

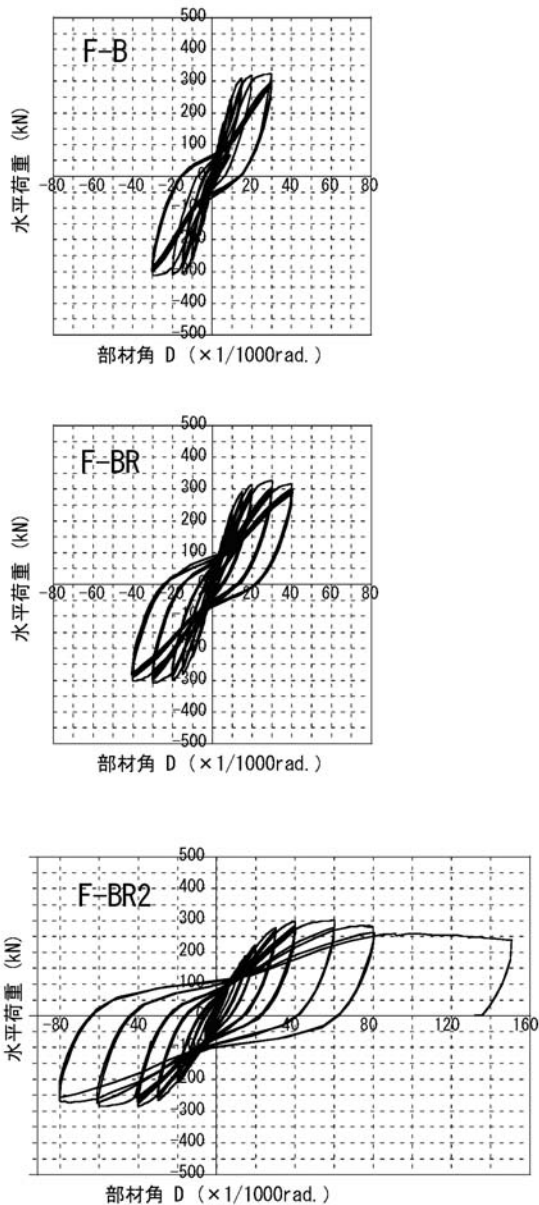


図-6 試験体F-B・BR・BR2の水平荷重-部材角関係

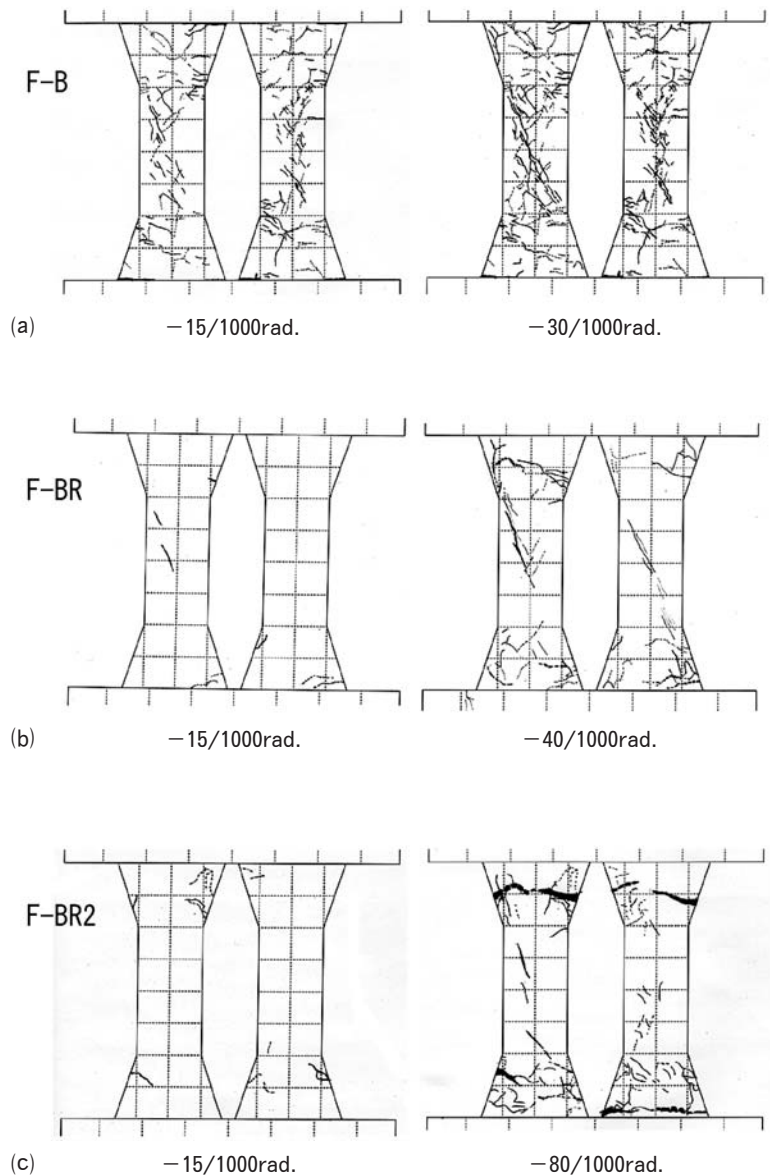
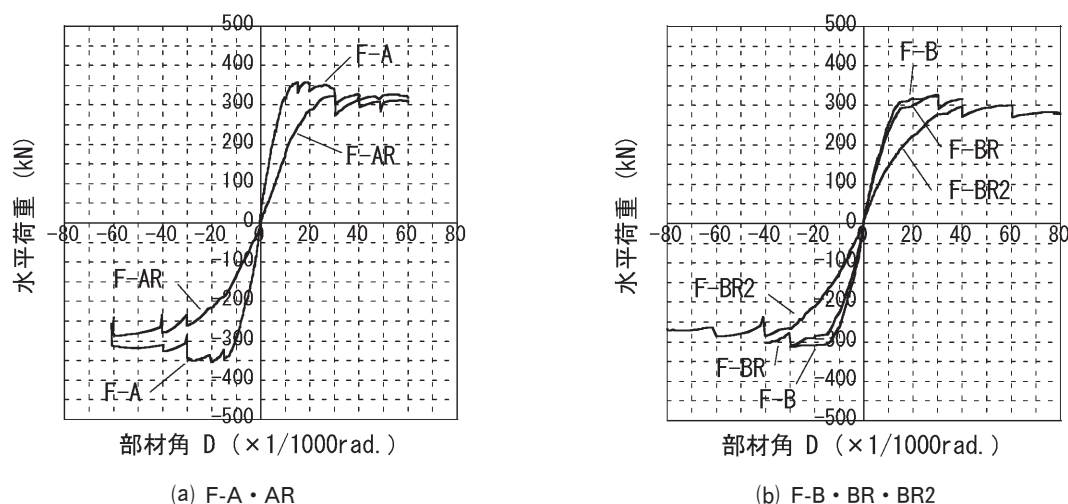


図-7 (a) 試験体F-B (b) F-BR (c) F-BR2の破壊状況



図－8 各試験体の水平荷重一部材角の包絡線

たに発生したひび割れの多くが、試験体F-Bで生じたひび割れとは異なる位置に見られることから、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適切に注入されていたと考えられる。

試験体F-BR2では、±6/1000radのサイクルまでひび割れが確認されず、±10/1000radの加力時にハンチ部側面に微細ひび割れが発生した。部材角の増大に伴い、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かったと考えられる。

4. 考察

試験体F-AとF-ARの水平荷重一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に比べ、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所定部材角時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、正加力に比べ負加力の水平荷重が各所定部材角時とも大幅に低下した。これらのことから、エポキシ樹脂低圧注入工法では、試験体のひび割れ補修が均一になされていないことが考えられる。この原因として、高靱性セメント系複合材料の損傷では微細なひび割れが多いため、試験体の外部からひび割れにエポキシ樹脂を注入することは困難であること、さらにひび割れへの補修材の充填状況が確認できないことが考えられる。

試験体F-B, F-BR, F-BR2の水平荷重一部材角の関係

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に比べ、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所定部材角時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-Bが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たため、試験体F-BRは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。

2回目の補修を施した試験体F-BR2の水平荷重および剛性は、試験体F-BRに比べ部材角20/1000radまで大幅な低下が見られたが、部材角40/1000radでは少し改善した。その後、部材角80/1000radまで耐力を維持し、安定した履歴を描いた。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、2回目の補修時にエポキシ樹脂が1回目ほど十分にひび割れに注入され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て損傷を受けた場合、ひび割れにエポキシ樹脂を注入する補修によって、損傷したエネルギー吸収部材を、損傷前の構造性能まで回復させ、再利用することの可能性を検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 損傷を受けた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の構造性能は、コンクリートのひび

割れ補修で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損傷前の性能まで回復せず、高靱性セメント系複合材料を用いた部材のひび割れを補修する工法としては、問題があると考えられる。

- (2) 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されたエネルギー吸収部材は、損傷前の構造性能と同程度まで回復されたことから、注入ホースによるエポキシ樹脂注入工法は高靱性セメント系複合材料を用いた部材のひび割れを補修する工法としては、有効であると考えられる。

[謝辞]

本研究に際し、御指導いただいた東北大学大学院工学研究科准教授 金子佳生博士に謝意を表します。

[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、森 浩二、内井栄二、立松和彦、山崎順二：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、(株)浅沼組技術研究所報No.15、pp.27-32、2003

