

大変形領域の交番載荷荷重により損傷した高じん性 RC 柱の補修効果に関する試験結果

東日本旅客鉄道株式会社	正会員	海原 卓也
同 上	フェロー会員	石橋 忠良
同 上	正会員	松田 芳範
同 上	正会員	小林 薫

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC という）構造物の柱部材が兵庫県南部地震級の大地震に対して崩壊しないためには、従来とほぼ同様の断面、主鉄筋量として部材変形でエネルギーを吸収させようとした場合、部材降伏以降の変位量が降伏変位量の 10 倍程度以上の変形能力が必要となる。また、この考え方で設計を行った部材が地震等の外力を受け大きく損傷した場合も、従来の構造物と同様に、早期に機能を復旧することが重要である。

著者らはこれまでに、部材じん性率が 10 程度の RC 柱を大変形領域の交番載荷荷重で損傷させ、これをエポキシ樹脂やアクリル樹脂等で補修した後の部材について試験を行い、補修後の変形性能を確認した^{1) 2)}。

本文では、交番載荷荷重を受けて損傷した高じん性 RC 柱をプレミックスモルタルで補修し、再び交番載荷試験を行って補修後の変形性能を確認したので、これまでの試験結果^{1) 2)}と併せて報告する。

2. 交番載荷試験概要

2.1 試験体

試験設備等の制約から試験体は鉄道用高架橋柱を想定した 1/2 縮小モデルとし、合計で 4 体製作した。試験体配筋図の例および試験体諸元を図-1、表-1 に示す。

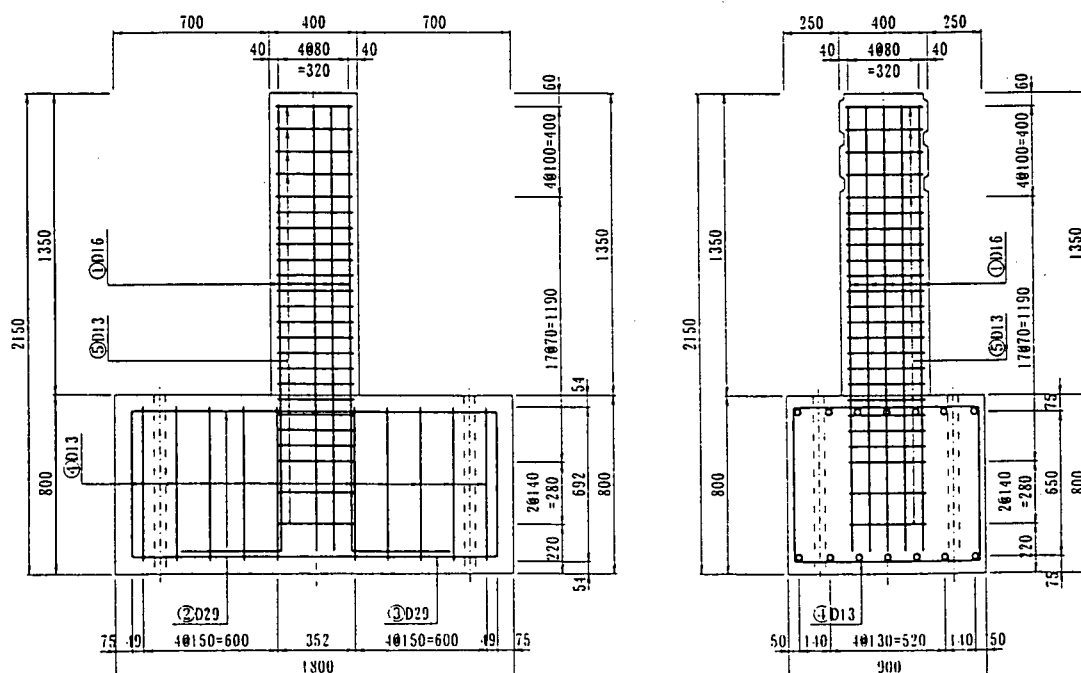


図-1 試験体配筋図の例(HD-A3)

キーワード: 補修、高じん性 RC 柱、大変形領域、交番載荷

〒151-8578 東京都渋谷区代々木 2-2-2 TEL(03)5334-1288 FAX(03)5334-1289

表－1 試験体諸元

No	断面寸法 b×h(mm)	有効高さ d(mm)	せん断スパン a(mm)	せん断スパン比 a/d	軸方向鉄筋 p(%)	引張鉄筋 pt(%)	帯鉄筋		軸方向圧縮 応力度 σ_0 (N/mm ²)	耐力比 Vyd/Vmu
								pw(%)		
HD-A1	400×400	360	1150	3.19	D19×16 2.865	D19×5 0.995	D13-1 ctc.80	0.79	1.0	2.13
HD-A2	400×400	360	1150	3.19	D19×16 2.865	D19×5 0.995	D13-1 ctc.60	1.06	1.0	2.64
HD-A3	400×400	360	1150	3.19	D16×16 1.986	D16×5 0.690	D13-1 ctc.70	0.90	0.5	3.19
HD-A4	400×400	360	1150	3.19	D19×16 2.865	D19×5 0.995	D16-1 ctc.60	1.65	1.0	3.72

試験体はすべて断面を 400mm×400mm、かぶりを 40mm、水平荷重載荷点からフチング天端までの長さ（以下、せん断スパン(La)という）を 1150mm に統一し、軸方向鉄筋比、せん断補強鉄筋比をそれぞれ変化させ、せん断耐力比（試験体のせん断耐力(Vyd)と曲げ耐力(Mu)に達するときのせん断力(Vmu)の比：以下、耐力比という）を 2.5～3.5 の間で変化させたものを用いた。試験体のコンクリートの設計基準強度は 27N/mm²、鉄筋は SD345 を用いた。材料試験の結果は表－2 に示す通りである。

表－2 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度(N/mm ²)				記 事
	1	2	3	Ave	
HD-A1	27.9	27.6	26.9	27.5	材齢14日
HD-A2	23.9	24.0	24.9	24.3	材齢15日
HD-A3	28.1	28.0	27.4	27.8	材齢13日
HD-A4	17.9	17.7	17.9	17.8	材齢7日

鉄 筋	降伏強度(N/mm ²)	降伏ひずみ(μ)	記 事
D13	385.4	1980	
D16	393.7	2150	
D19	361.9	2050	

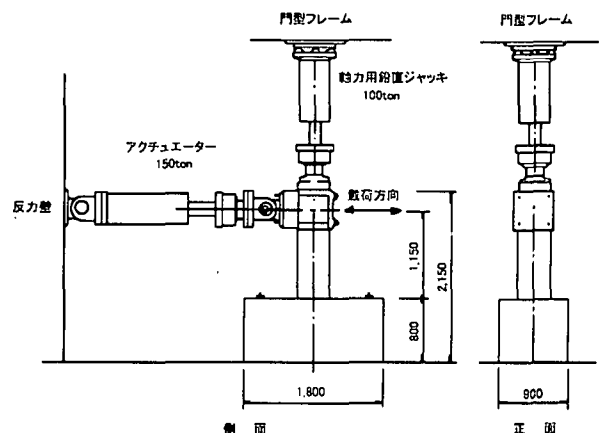
2. 2 載荷方法

試験目的が補修した RC 高架橋柱の地震時変形性能を確認することとしているため、荷重の載荷は一定軸力下の正負水平交番載荷とした。試験装置を図－2 に示す。

載荷方法は、各試験体とも軸圧縮応力度を 1N/mm²(HD-A3は 0.5N/mm²)とし、まず荷重制御により引張側の鉄筋ひずみが降伏ひずみに達するまで正負の交番載荷を行った。このときの水平荷重載荷点での試験体水平変位を降伏変位(1 δ_y)と定義し、これ以降の載荷は降伏変位の整数倍(2 δ_y 、3 δ_y 、4 δ_y …)を片振幅として、変位制御で正負各 1 サイクルずつとした（図－3）。載荷終了の目安は、載荷荷重が引張側鉄筋の降伏時荷重の 80% に低下した時点までとし、ここでは、荷重変位曲線の包絡線が、降伏時荷重を下回ったときの載荷点変位を終局変位とした。

2. 3 使用材料および補修概要

前項に記す正負交番載荷で損傷させた試験体の補修には、クラック注入および断面修復を目的と



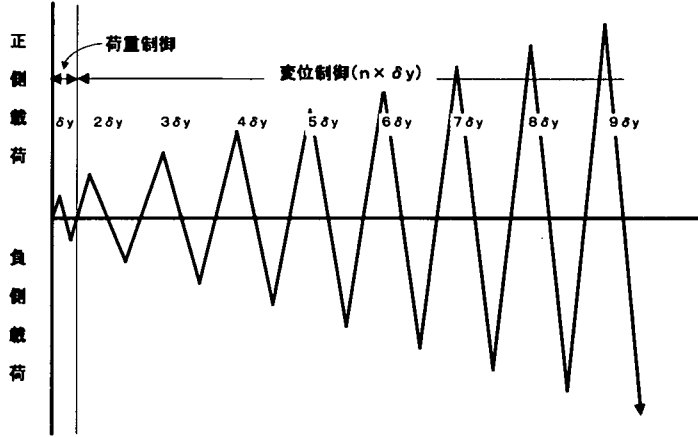
図－2 交番載荷試験装置

して各試験体について表－3 に示す材料を用いた。

今回用いた補修材料（クラック注入）は有機系、無機系の2タイプとし、A1、A2試験体にはエポキシ樹脂およびアクリル樹脂の有機系材料を、A3試験体にはセメント系注入材である無機系材料を使用した。なおA4試験体については、交番载荷終了後の状態で0.2mm以上のクラックが発生していなかったためクラック注入は行っていない。

次に断面修復材料にはA1試験体にエポキシ樹脂モルタル、A2試験体に超速硬セメントモルタル（一部、ポリマーセメントモルタル使用）、A3試験体にポリマーセメントモルタル、A4試験体にプレミックスモルタルを使用した。ここでA2、A3、A4の試験体については交番载荷の結果、軸方向鉄筋が外側にはらみ出し、同一断面(400mm×400mm)への修復では所要のかぶりが確保できない状態となったことから、A2試験体についてはフチング上面から350mmの範囲で470mm（载荷方向）×440mm（直角方向）に、A3試験体についてはフチング上面から315mmの範囲で440mm×440mmに、A4試験体についてはフチング上面から450mmの範囲で470mm（载荷方向）×415mm（直角方向）にそれぞれ断面を増加した。具体的な補修手順は表－4に示す通りである。

以上により補修した試験体の補修後の交番载荷方法は、基本的には補修前と同様としたが、補修前の交番载荷で鉄筋のひずみゲージが使用不能となったため、



図－3 载荷サイクル

表－3 補修材料

No	使用材料	
	クラック注入	断面修復
HD-A1	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂モルタル
HD-A2	アクリル樹脂	超速硬セメントモルタル 一部ポリマーセメント
HD-A3	セメント系超微粒子 クラック注入材	ポリマーセメントモルタル
HD-A4	――	プレミックスモルタル

表－4 補修手順

順序	施工内容
①	交番载荷終了後の供試体清掃
②	柱部材のクラック発生状況確認
③	クラック注入用治具取付け
④	断面修復用型枠組み立て
⑤	断面修復材料練り混ぜ、打設、養生
⑥	型枠撤去
⑦	クラック注入流失防止用シール貼付
⑧	クラック注入材料練り混ぜ、打設、養生
⑨	治具、シール撤去

表－5 補修材料特性値

試験項目	単位	クラック注入材			断面修復材			
		エポキシ樹脂	アクリル樹脂	セメント系超微粒子 クラック注入材	エポキシ樹脂 モルタル	超速硬セメント モルタル	ポリマーセメント モルタル	プレミックス モルタル
粘度	cps	560	140	500※				
比重		1.22	1.18		1.6			
圧縮強度	N/mm ²	66.7		20.4～24.5※	47.5	46.0	35.7～40.8※	56.8
曲げ強度	N/mm ²	56.8	66.5		19.4			

※には材料の公称値を示す。

ここでは補修前の降伏変位を用いて $1\delta y$ から変位制御による載荷とした。また A1、A2 試験体については鉄筋の低サイクル疲労による破断を防止する目的で、載荷ステップのうち $3\delta y$ 、 $5\delta y$ 、 $7\delta y$ を省いたパターンで正負 1 サイクルずつ載荷した。なお補修後の試験体は、養生期間を最低 2 週間設けており、試験時点の材料試験結果は表 - 5 に示す通りである。

3. 試験結果および考察

3.1 損傷状況

a) A1 試験体

写真 - 1 に、補修前における載荷荷重が鉄筋降伏荷重の 80% まで低下した時点での試験体の損傷状況を示す。試験体の損傷はフチング上面から約 400mm の範囲で、無数のせん断

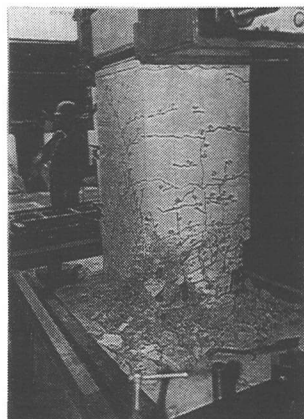


写真 - 1
HD-A1($10\delta y$)

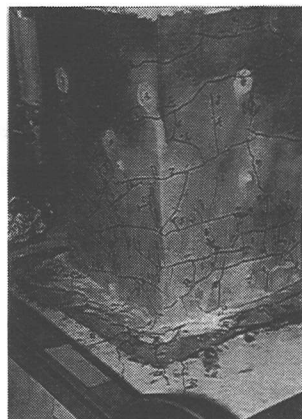


写真 - 2
HD-A1R($10\delta y$)

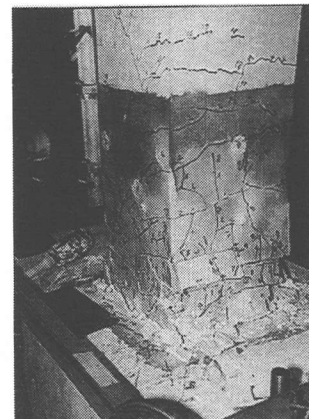


写真 - 3
HD-A1R($17\delta y$)

および曲げひび割れが発生し、かぶりコンクリートの剥落が試験体全面に生じ、若干の軸方向鉄筋のはらみ出しも見受けられた。なお、この時点での載荷点における試験体変位量は $10\delta y$ (約 80mm) となった。

次にエポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタルにより補修を行った試験体の、 $10\delta y$ 時の損傷状況を写真 - 2 に示す。この時点での補修後試験体の損傷形態は、試験体全面にかなり大きな幅のひび割れが発生したものの、断面修復材やかぶりコンクリートの剥離等はほとんど無く、まだ健全な状態を保持していた。またこれ以降の交番載荷においては、 $14\delta y$ で荷重載荷面の断面修復材が長方形のブロック状で剥落、 $15\delta y$ 以降の各載荷ステップで軸方向鉄筋の破断に伴い耐力が大幅に低下して $17\delta y$ で終局状態となった (写真 - 3)。

b) A2 試験体

写真 - 4 に、補修前降伏荷重の 80% 低下時の損傷状況を示す。この試験体も A1 試験体と同様にフチング上面から約 400mm の範囲で、せん断および曲げひび割れが集中して発生し、かぶりコンクリートの剥落も試験体全面に生じた。さらに柱基部では軸方向鉄筋が大きくはらみ出すなどの損傷が生じた。この時点での試験体変位量は $12\delta y$ (約 88mm) となった。

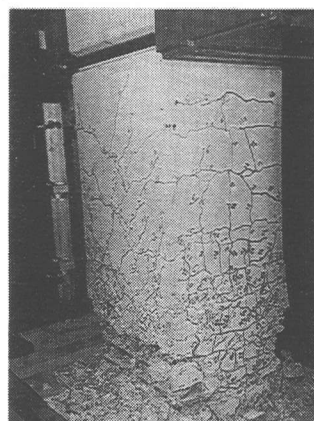


写真 - 4
HD-A2($12\delta y$)

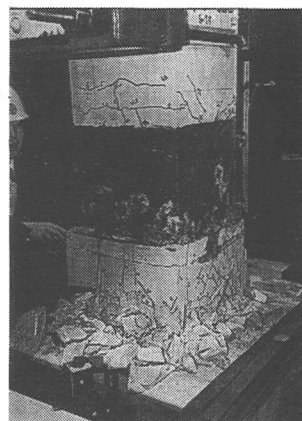


写真 - 5
HD-A2R($12\delta y$)

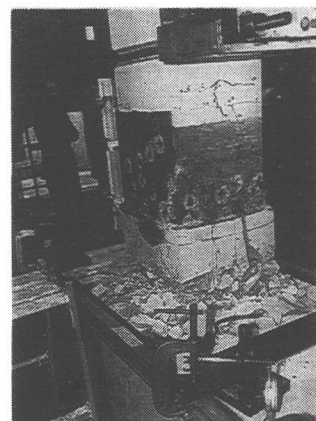


写真 - 6
HD-A2R($14\delta y$)

アクリル樹脂および超速硬セメントモルタルにより補修した試験体の、 $12\delta y$ 時の損傷状況を写真 - 5 に示す。このときの損傷形態は試験体全面に断面修復材の剥落が見られたが、その範囲は小さくフチング上面から約 150mm 程度に止まっていた。なお補修後の損傷進行状況は、 $4\delta y$ の載荷ス

テップで荷重載荷面の断面修復材に縦ひび割れが発生し、これが荷重ステップを重ねる毎にひび割れ幅、長さとも進行、 $8\delta y$ で荷重載荷面の断面修復材が剥離、終局時($14\delta y$)には断面修復材が試験体全面でブロック状に剥落し耐力が低下する要因となった(写真-6)。

c) A3 試験体

写真-7 に補修前降伏荷重の 80% 低下時、写真-8 に補修後試験体の終局時($9\delta y$)の損傷状況をそれぞれ示す。

まず補修前の損傷は、フチンク上面から約 300mm の範囲でひび割れの集中発生およびかぶりコンクリートの剥落を生じ、軸方向鉄筋のはらみ出しも比較的大きなものであった。このときの試験体変位量は $14\delta y$ (約 85mm) となった。

一方、セメント系超微粒子クラック注入材およびポリマ-セメントモルタルで補修した試験体は、 $6\delta y$ 時までは試験体全面で断面修復材に若干のひび割れが発生する程度の損傷であったが、 $7\delta y$ で軸方向鉄筋が破断したことで急激に耐力が低下し、 $8\sim 9\delta y$ で荷重載荷面の断面修復材が剥離・剥落、 $10\delta y$ で再び軸方向鉄筋の破断によって終局に至る結果となった。

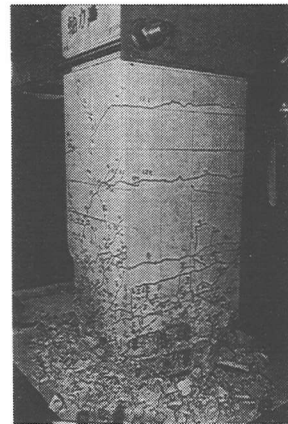


写真-7
HD-A3($14\delta y$)

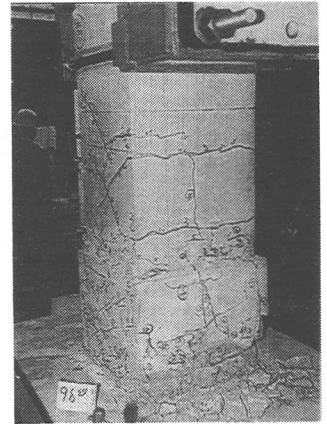


写真-8
HD-A3R($9\delta y$)

d) A4 試験体

写真-9 に補修前 80% 低下時、写真-10 に補修後試験体の終局時($11\delta y$)の損傷状況をそれぞれ示す。

補修前試験体では写真に示す通り、フチンク上面から約 300mm の範囲でかぶりコンクリートがほぼ全面にわたって剥落し、内部の帯鉄筋および軸方向鉄筋が露出する状態となった。これに併せて軸方向鉄筋が大きくはらみ出し、変位量が $14\delta y$ (約 94mm) で終局に至った。

次にフレックスモルタルで断面修復した補修後の試験体は、 $5\delta y$ 時に荷重載荷面の断面修復材が剥離・剥落し始め、以降変位を漸増するにしたがい修復材の損傷が進行した。また $12\delta y$ 時には軸方向鉄筋の破断が発生した。終局時における損傷形態は、柱基部において断面修復材が剥落したことで柱断面が欠損し耐力を失っていく結果となった。このときの荷重ステップは $13\delta y$ であった。

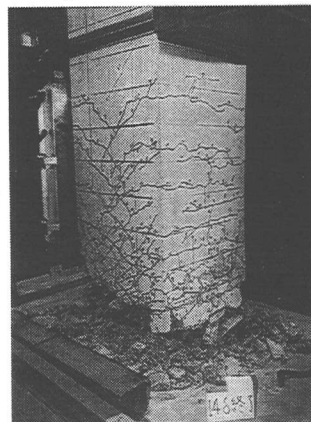


写真-9
HD-A4($14\delta y$)

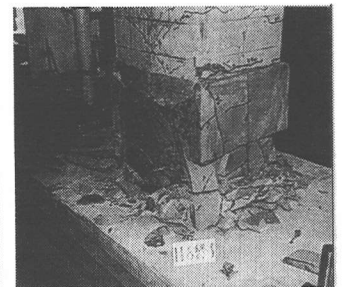
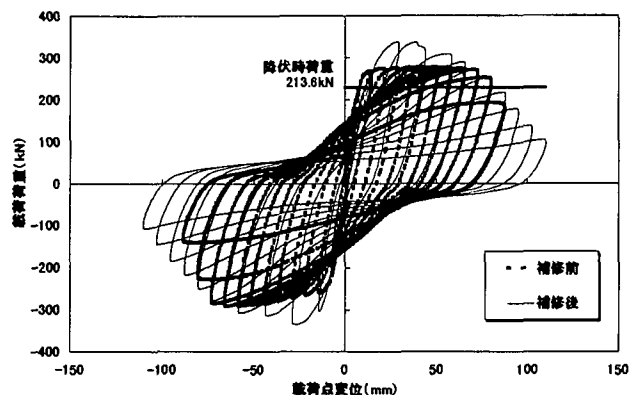


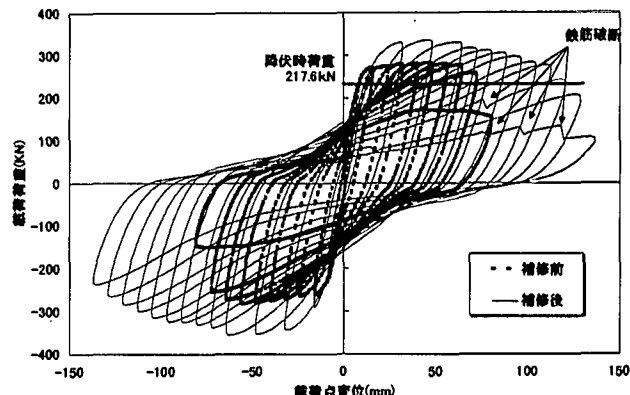
写真-10
HD-A4($11\delta y$)

3. 2 荷重変位曲線およびじん性率

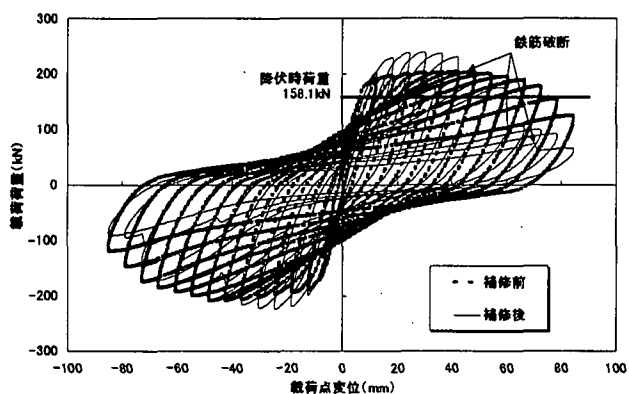
A1 試験体から A4 試験体までの正負交番荷重試験から得られた荷重変位曲線について補修前、補修後で比較したものを図-4 に示す。この図から分かるように、A1 および A2 の補修後試験体については補修前の試験体が終局状態となった荷重ステップにおいても耐力を保持しているが、A3 および A4 の補修後試験体については、軸方向鉄筋の破断等の影響があり、補修前の終局状態となった荷重ステップ以前に耐力が低下している。しかし A3 補修後試験体については、鉄筋が破断する直前($6\delta y$)までは補修前の試験体以上に荷重が増加している。また A4 補修後試験体については、最大耐力を迎えた($4\delta y$)以降から包絡線が緩やかに下降してい



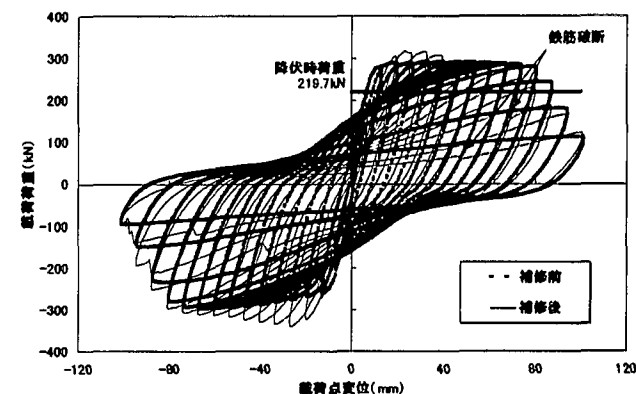
(a) HD-A1



(b) HD-A2



(c) HD-A3



(d) HD-A4

図-4 荷重変位曲線

き、補修前のように最大耐力付近を維持し続けるような傾向はなく、補修効果が他の補修試験体に比較してやや低下する結果となった。

試験結果の総括を表-6に示す。

今回の試験で得られた降伏変位および終局変位から、それぞれの試験体について算出したじん性率は、補修前の試験体ではいずれも10程度を示しており、ほぼ設計値通りの結果となった。また補修後の試験体のじん性率はA1、A2試験体で10以上となり、補修前の変形性能まで回復する結果となった。A3

試験体についてはじん性率10以下に止まったものの、これは鉄筋の破断による影響と考えられ、破断の生じない範囲まではほぼ補修前の変形性能に回復した。なおA4試験体についてはじん性率7に止まる結果となった。ここで補修後のじん性率の算出に当たっては、補修前の試験でひずみゲージが破損したことで、補修後の降伏変位が明確ではなかったため、後述する初期剛性の低減率で、補修前の降伏変位を補正した値を降伏変位として用いた。

次にそれぞれの試験体について補修前後の最大荷重を比較した結果、A1試験体では1.25倍、A2試験体では1.28倍、A3試験体では1.18倍、A4試験体では1.08倍といずれの試験体も、補修後に最大荷重が増加した。

このうち、補修後に試験体断面を増加した分の影響を修正すると、A2およびA3試験体に

表-6 試験結果

供試体 NO	降伏変位 δ_y (mm)	終局変位 δ_u (mm)	じん性率 $\mu = \delta_u / \delta_y$	最大荷重 Pmax(kN)
HD-A1	8.1	73.0	9	267.5
HD-A1(R)	(10.5)※	120.6	12	335.2
HD-A2	7.4	82.0	11	262.6
HD-A2(R)	(9.4)※	90.0	10	336.1
HD-A3	6.7	72.6	11	204.0
HD-A3(R)	(8.4)※	58.0	7	240.3
HD-A4	6.7	87.4	13	287.7
HD-A4(R)	(10.5)※	73.2	7	310.3

Rは補修後の結果を示す。

※は初期剛性の値で低減した数値。

については、補修前の最大荷重に対して、補修後も同程度の荷重となることが分かった。またクラック注入を行わなかった A4 試験体については、逆に補修前の最大荷重に対して 0.87 倍となり、耐力が低下する結果となった。

表－7 初期剛性

供試体 NO	①降伏変位 $\delta y(\text{mm})$	②降伏時荷重 $P_y(\text{kN})$	初期剛性(②/①) $K(\text{kN/mm})$	補修後(K) 補修前(K)
HD-A1	8.1	217.6	26.9	0.77
HD-A1(R)	8.1	168.6	20.8	
HD-A2	7.4	213.6	28.9	0.78
HD-A2(R)	7.4	167.6	22.6	
HD-A3	6.7	158.1	23.6	0.80
HD-A3(R)	6.7	126.5	18.9	
HD-A4	6.7	219.7	32.8	0.64
HD-A4(R)	6.7	140.8	21.0	

Rは補修後の結果を示す。

3. 4 初期剛性

各試験体の引張側鉄筋が降伏した時の荷重を、補修前の試験体における降伏変位で除した初期剛性と、補修前後での初期剛性の比較を表－7 に示す。試験ではいずれの試験体も補修後の初期剛性が 80％以下に低下しており、特に A4 試験体については約 65％という結果であった。初期剛性の低下した原因には①一旦発生したひび割れが、荷重の除荷に伴い細く閉じてしまい、その結果注入されていないものが多数存在する、②大変形領域において、軸方向鉄筋の定着部で付着低下が生じ鉄筋の抜け出しが大きくなる、等が考えられ、補修材料として共にセメント系の材料を使用した A3、A4 試験体の結果から、A4 試験体については特に①の要因が大きかったと思われる。

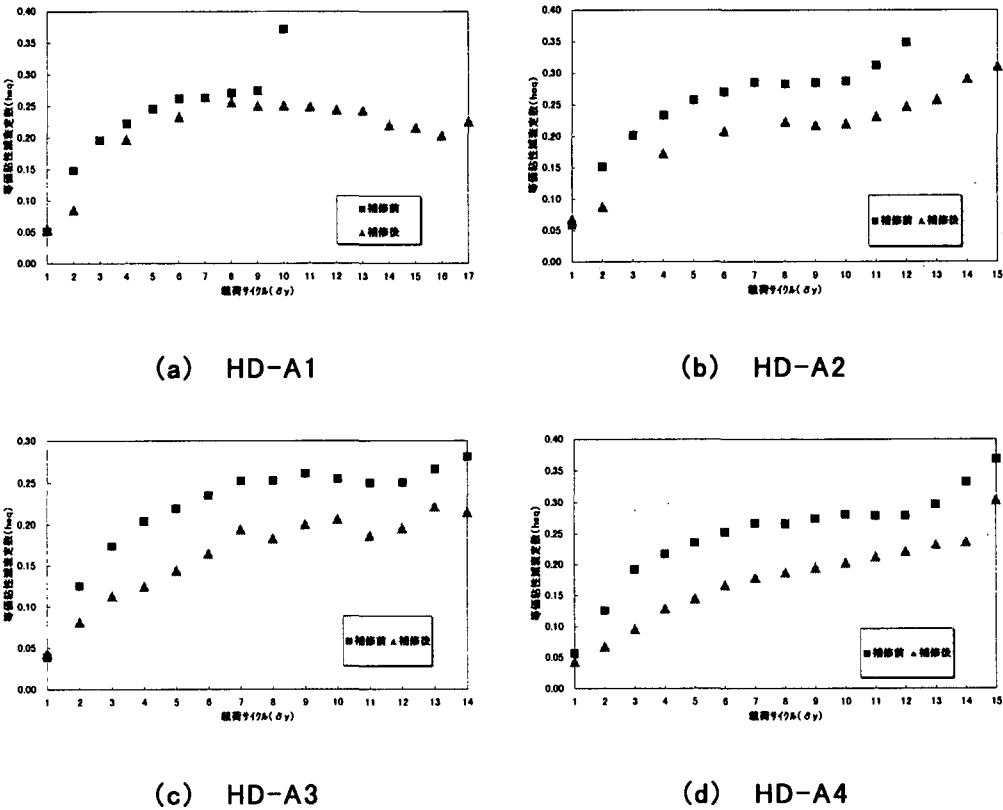
3. 5 等価粘性減衰定数(heq)

図－5 に各載荷ステップの履歴ループから求まる等価粘性減衰定数を表わす。

まず補修前の試験体における、A1、A2、A4 試験体の heq は、およそ 0.15～0.25 の範囲で安定しており、また A3 試験体では 0.10～0.25 という結果であった。

次に補修後の試験体における heq は、概ね A1 試験

体が 0.20～0.25、A2 試験体が 0.20～0.30、A3 試験体が 0.10～0.20、A4 試験体が 0.10～0.25 となり、それぞれ補修後試験体の方が補修前より若干低下することとなった。このときの低下率は、A1 試験体で約 10％、A2 試験体で約 23％、A3 試験体で約 25％、A4 試験体では約 35％である。



図－5 等価粘性減衰定数(heq)

4. まとめ

本試験で行った、大変形領域（塑性率 10 程度）での損傷を受けた高じん性 RC 柱の補修後の変形性能について得られた結果をまとめると、本試験体の範囲内では概ね以下のことが言える。

①Eポキシ樹脂およびEポキシ樹脂モルタルで補修することによって、部材の変形性能は補修前以上に回復し、最大耐力についても 25% 程度増加する傾向がみられる。

②アクリル樹脂および超速硬セメントモルタル（一部、ポリマーセメントモルタル使用）で補修することによって、部材の変形性能および最大耐力は補修前程度に回復する。

③セメント系超微粒子クラック注入材およびポリマーセメントモルタルで補修した試験体は、鉄筋が破断しない範囲では変形性能および最大耐力が補修前程度に回復する。

④プレミックスモルタルで断面修復のみ行った試験体については、圧縮側での断面修復材の圧壊が生じ、その結果、変形性能および最大耐力が補修前に比べて若干低下する。

⑤補修後試験体の初期剛性は、補修前試験体の初期剛性に対して約 80% 程度まで低下する。また補修材料として共にセメント系材料を使用した A3 および A4 試験体の補修後試験結果から、クラック注入を行った場合は初期剛性が大きくなる。

⑥補修後試験体の等価粘性減衰定数(h_{eq})は、補修前試験体に比較して 10%～35% 程度低下する。特にクラック注入を行わなかった A4 試験体は補修後に h_{eq} が約 35% 低下しており、A3 試験体の補修後に対しての低下率は約 1.5 倍となる。

【参考文献】

1) 小林薫、中山弥須夫、石橋忠良：大変形領域の交番載荷荷重により損傷した RC 柱の補修効果に関する実験的研究、日本コンクリート工学協会「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集 pp209～214、97.4.

2) 海原卓也、石橋忠良、小林薫、中山弥須夫：大変形領域での交番載荷荷重により損傷した RC 柱のポリマーセメントモルタルによる補修効果に関する実験結果、土木学会 第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部 pp326～327、平成 9 年 9 月