

論文 曲げ損傷を受けた RC 柱の補修後の部材特性に関する実験的研究

仁平 達也*1・谷村 幸裕*2・岡本 大*3・田所 敏弥*4

要旨：曲げ損傷の程度が異なる実大 RC 柱を無収縮モルタルにより補修し、補修前の損傷状況と補修条件が、補修後の RC 柱の部材性能に与える影響を実験的に検討した。補修前の軸方向鉄筋の座屈の有無、断面修復材の割合(置換率)、ひび割れ注入の有無で整理した結果、座屈しない程度の損傷の場合には、無損傷の試験体の荷重-変位関係とほとんど差異はない。座屈する程度の損傷の場合には、最大荷重の値は置換率が高いほど大きくなる。復元力曲線は、補修前の座屈の影響を受け、逆 S 字型になり等価粘性減衰定数が小さくなる。また、初期剛性は、ひび割れ注入を施しても無損傷の試験体より低下することがわかった。

キーワード：復旧性, 曲げ損傷, 断面修復, ひび割れ注入, 部材性能, 等価粘性減衰定数

1. はじめに

RC 構造物の設計において、地震作用に対する要求性能として、復旧性が設定される場合がある。復旧性の照査は、被災した構造物の機能回復の難易度を照査することである。この機能回復は補修後の構造物が損傷前と同様の性能を保有することを前提としている。既往の研究では、損傷を受けた RC 柱の補修後の性能は、概ね補修前と同等の性能を有するとされているものが多い。しかし、部材の損傷状態、補修方法および補修材の影響と性能回復との関係を整理するまでには至っていないのが現状である¹⁾。

本論文では、曲げ損傷の程度が異なる鉄道ラーメン高架橋柱の実大モデルを補修し、正負交番荷試験を行い、部材の損傷状態と補修条件が、補修した RC 柱の部材性能に与える影響について実験的検討を行った。

2. 実験概要および補修方法

2.1 実験概要

本実験のパラメータは、RC 柱部材の損傷前の最大変位と、補修方法である。試験体は実大 RC

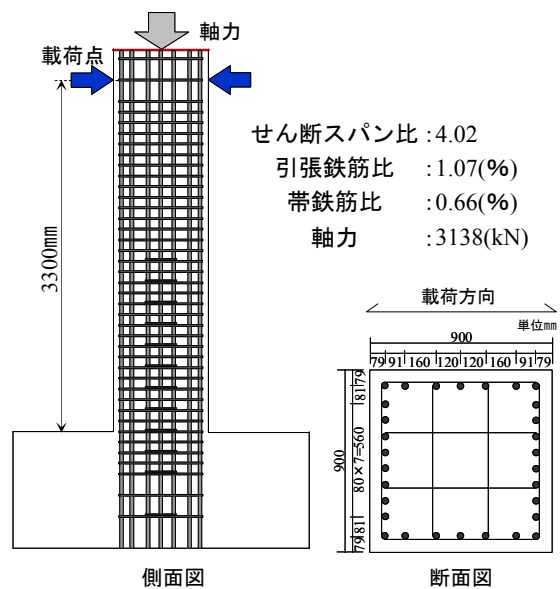


図-1 無損傷時の試験体形状

柱 2 体(No.1, No.2)であり、本実験の比較対象は、同一形状、荷重方法で、荷重前に損傷や補修のない無損傷の基準試験体²⁾である。

図-1 に無損傷時の試験体形状を示す。断面形状は 900×900 mm の正方形断面、せん断スパンは 3300 mm (せん断スパン比は 4.02)、引張鉄筋比は 1.07%、帯鉄筋比は 0.66%、軸方向鉄筋は D32、

*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 工修 (正会員)

*4 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 博(工) (正会員)

表-1 補修前の最大変位と補修方法

手順	No.1 ²⁾	No.2 ²⁾
①載荷	↓(3δ _y)	↓(6δ _y)
②補修	No.1-R	No.2-R
	ひび割れ注入 断面修復	断面修復
③再載荷	↓(5δ _y)	↓(6δ _y)
④再補修	No.1-RR	No.2-RR
	ひび割れ注入 断面修復	ひび割れ注入 断面修復
⑤再々載荷	↓(6δ _y)	↓(6δ _y)

※載荷欄の括弧内は最大変位を示す。

表-2 コンクリート・補修材の配合表

配合	W/C W/P (%)	単位量(kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
コンクリート	56	296	166	786	1031	3.2
断面修復材	36 [*]	938 ^{**}	338	938	—	—

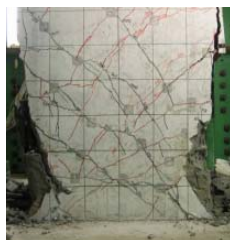
※水粉体比 ※※ポリマーセメントの単位量

帯鉄筋は D16 である。帯鉄筋の接合方法はフレア溶接である。表-1 に示すように、1 試験体につき載荷、補修、再載荷、再補修、再々載荷を実施した。補修した試験体を R(No.1-R, No.2-R)、再補修した試験体を RR(No.1-RR, No.2-RR)とし、以下補修試験体とする。表-2 にコンクリートと断面修復材の配合表を、表-3 にコンクリートと補修材の強度特性を、表-4 に鉄筋の強度特性を示す。

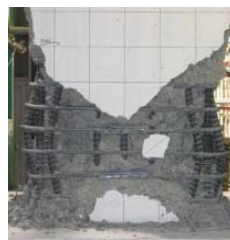
載荷方法は、基準試験体の最外縁鉄筋の降伏ひずみに達した変位 25 mm を降伏変位(1δ_y)とし、図-2 に示すように、1δ_yの整数倍の正負 1 回繰返し漸増載荷を表-1 に示す最大変位まで実施した。なお、試験体の補修は、残留変位が荷重-変位関係に及ぼす影響を避けるため、各試験体ともに水平変位、および荷重をゼロに戻した状態で行った。



a) No. 1-R



b) No. 1-RR



c) No. 2-R



d) No. 2-RR

写真-1 各試験体の補修前の損傷状況

表-3 コンクリート・補修材の強度特性

試験体	コンクリート		断面修復材		ひび割れ注入材	
	f'c	Ec	f'c	Ec	f'c	Ec
No.1 - R	39.6	27.7	45.5	21.6	23.3	6.4
No.1 - RR	39.3	27.7	47.8	17.7	29.5	7.0
No.2 - R	36.3	27.5	55.9	20.8	—	—
No.2 - RR	38.3	28.3	53.4	21.4	33.3	8.0
基準試験体	31.8	24.4	-	-	-	-

表-4 鉄筋の強度特性

試験体	軸方向鉄筋(D32)		帯鉄筋(D16)	
	fsy	Es	fsy	Es
No.1,2 共通	370	195	377	196
基準試験体	368	161	409	153

※f'c : 圧縮強度(N/mm²) fsy:引張降伏強度(N/mm²)

Ec,Es :ヤング係数(kN/mm²)

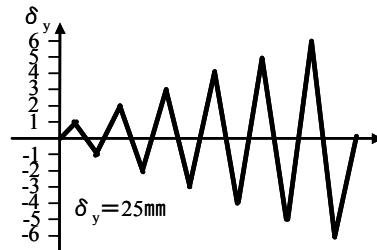


図-2 補修試験体の載荷(例)

2.2 補修前の損傷状況

写真-1 に各試験体を補修する前における試験体の基部付近の損傷状況を示す。補修前の最大変位が 3δ_y(75 mm)である No.1-R(写真-1 a))は、軸方向鉄筋は降伏したが、座屈は確認されなかった。コンクリートは、隅角部に部分的なはく落が見られたが、概ねかぶりにひび割れが発生した損傷であった。補修前の最大変位が 5δ_y(125 mm)である No.1-RR(写真-1 b))は、軸方向鉄筋はらみ出しがかぶりを超えない程度の軽微な座屈であり、かぶりのはく落が生じ、コアコンクリートにひび割れが生じた損傷であった。補修前の最大変位が 6δ_y(150 mm)である No.2-R(写真-1 c))と No.2-RR(写真-1 d))は、軸方向鉄筋のはら

表-5 補修試験体の補修状況

試験体	No.1-R	No.1-RR	No.2-R	No.2-RR
試験体の種類	降伏補修試験体		座屈補修試験体	
断面修復材の置換率※	6.9%	20.8%	42.4%	55.7%
ひび割れ注入量	0.7kg	1.2kg	—	5.2kg
補修状況 (図中の単位はmm)				

※置換率 = $\frac{\text{断面修復材の容積(補修時に拡大した部分の断面修復材の容積は除く)}}{\text{基部から900mmの範囲の容積(900×900×900mm)}}$

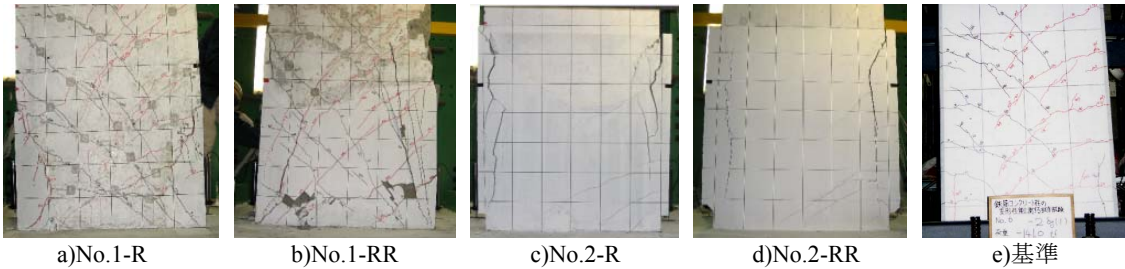


写真-2 各試験体の $2\delta_y$ の損傷状況

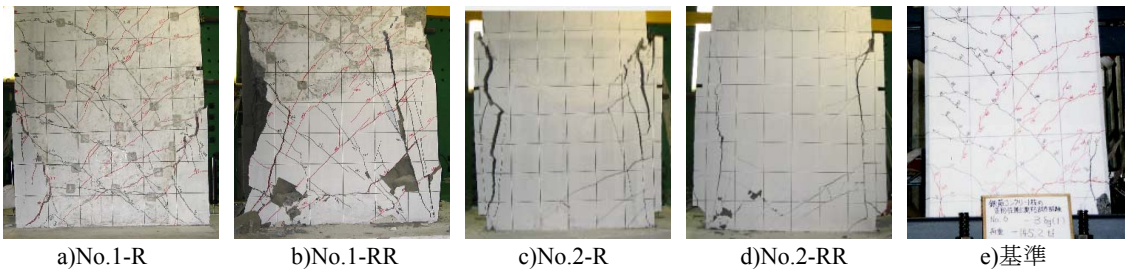


写真-3 各試験体の $3\delta_y$ の損傷状況

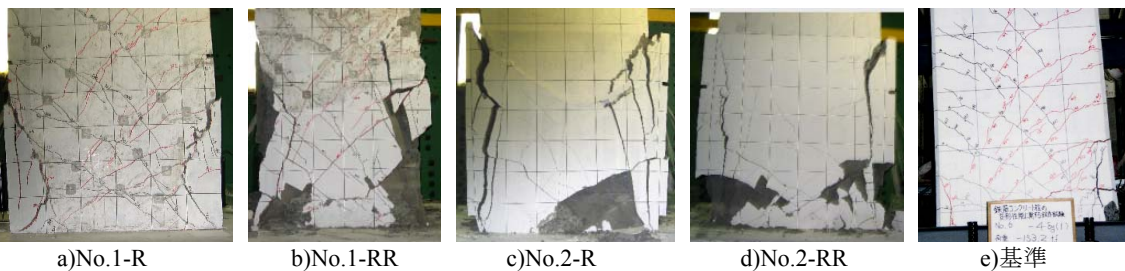


写真-4 各試験体の $4\delta_y$ の損傷状況

み出しの最大値が、それぞれ 40 mm, 55 mm かぶりを超える座屈であり、かぶりのほく落が生じ、コアコンクリートはひび割れと一部細粒化が生じた損傷であった。

補修前の損傷状況は、軸方向鉄筋、コンクリートともに No.2-RR が最も進行していた。

2.3 補修方法

表-1 に各試験体の補修方法を、表-5 に補修状況を示す。

軸方向鉄筋の曲げ戻しおよび帯鉄筋の取替えは行わなかった。なお、軸方向鉄筋 1 本の破断が確認された No.2-RR については、エンクローズ溶接を実施した。ひび割れ注入は表-1 に示す

ように、No.1-R、No.1-RR および No.2-RR の表面ひび割れ幅 0.2 mm以上の箇所に、平均粒径 $4\mu\text{m}$ のセメント粒子を主成分としたセメント系微粒子ひび割れ注入材を低圧注入した。断面修復は、既存コンクリートとの一体性を考慮して、損傷を受け浮きやはく離が生じた箇所については可能な限りコンクリートを除去し、試験体基部に型枠を用いて、表-2 に示す断面修復材を打設した。軸方向鉄筋の座屈がかぶりを超えていた No.2-R と No.2-RR は、表-5 に示すように、鉄筋のかぶりを確保するため断面を拡大したが、基部から高さ 80 mmの範囲は、断面の拡大による曲げ耐力の上昇を防ぐために断面の拡大を実施しなかった。また、断面修復材の試験体基部を置換した割合を「置換率」とし、表-5 に示した。

3. 実験結果

3.1 各試験体の損傷状況

写真-2~4 に $2\sim 4\delta_y$ における No.1-R~No.2-RR と基準試験体の損傷状況を示す。

写真-2 に示すように、補修試験体は $2\delta_y$ に基部の圧壊と、断面修復材とコンクリートの境界付近にひび割れが確認された。特に、No.1-RR は他の試験体と異なりはく落が確認された(写真-2 b)。

写真-3、4 に示すように、補修試験体の $3\delta_y$ 以降は、 $2\delta_y$ において発生したひび割れに沿ってかぶりのはく離、はく落が進行した。写真-3 に示す $3\delta_y$ において、補修試験体は、基準試験体よりもはく離、はく落した範囲が大きかった。写真-4 に示す $4\delta_y$ において、座屈補修試験体間の比較すると、断面修復材の置換率が小さい No.1-RR、No.2-R、No.2-RR の順に、かぶりのはく離、はく落が顕著であった。

なお、降伏補修試験体の No.1-R は、座屈補修試験体と比べ、はく離、はく落した範囲が小さかった。

3.2 荷重-変位関係および包絡線

図 3~6 に各補修試験体と基準試験体の荷重-変位関係の比較を示す。なお、荷重-変位関係

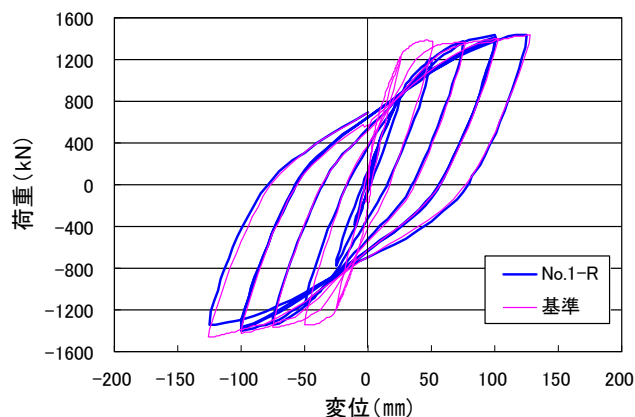


図-3 No. 1-R と基準試験体の荷重-変位関係

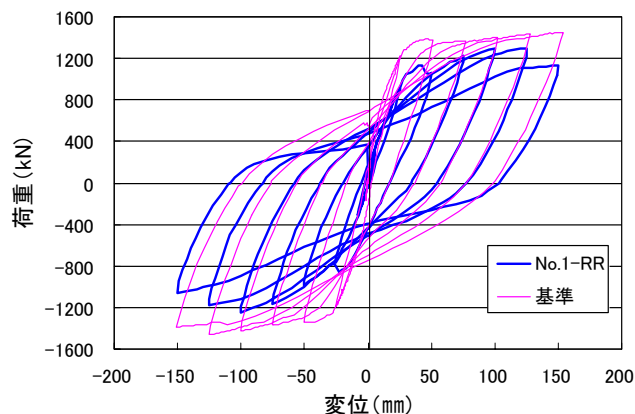


図-4 No. 1-RR と基準試験体の荷重-変位関係

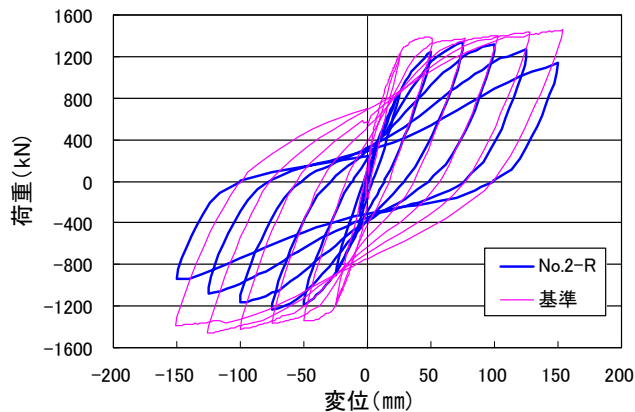


図-5 No. 2-R と基準試験体の荷重-変位関係

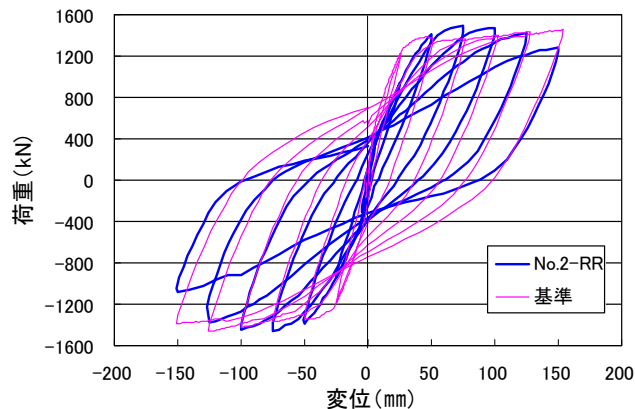


図-6 No. 2-RR と基準試験体の荷重-変位関係

は、軸力による付加曲げモーメントに対する補正を行ったものである。

図-3のNo.1-Rは、復元力曲線は紡錘型を示し、 $3\delta_y$ 以降の荷重-変位関係は基準試験体とほとんど差異は無かった。

図-4のNo.1-RRは、最大荷重時の変位は $4\delta_y$ であった。損傷状況は写真-4 b)である。なお、 $2\delta_y$ 載荷中に荷重が低下しているのは、写真-2 b)に示すかぶりのはく落の影響している。復元力曲線は、かぶりコンクリートのはく落が生じた $2\delta_y$ 以降、逆S字型に移行していった。

図-5, 図-6のNo.2-R, No.2-RRは、最大荷重時の変位は $3\delta_y$ であった。損傷状況は写真-3 c) d)である。No.2-R, No.2-RRはNo.1-RRと比べ、復元力曲線が逆S字型の傾向が顕著であった。この傾向はかぶりのはく離、はく落が確認された $3\delta_y$ 以降に顕著に確認された。

図-7に各試験体の包絡線を示す。座屈補修試験体の最大荷重はNo.1-RR, No.2-R, No.2-RRの順に大きくなり、補修材の置換率の大小関係と一致した。その理由として、置換率が高まると、断面修復材が軸方向鉄筋の裏側まで十分に充填されることにより、写真-3の $3\delta_y$ の損傷状況に示すように、かぶりがはく離しにくくなり、断面修復材が圧縮力を負担したためであると考えられる。

3.3 初期剛性・降伏剛性

図-8に基準試験体に対する補修試験体の初期剛性比、降伏剛性比を示す。初期剛性は、基準試験体の基部ひび割れ発生時(水平変位1.6mm)における割線剛性であり、降伏剛性は、 $1\delta_y$ 時における割線剛性である。なお、補修試験体は水平変位1.6mm時に基部にひび割れは確認されていない。

初期剛性比は、基準試験体に対し47.6~60.0%であり、ひび割れ注入の有無に関わらず、基準試験体の初期剛性よりも低下している。ひび割れ注入材を、表面ひび割れ幅0.2mm以上の箇所注入したが、試験体内部のひび割れを完全に充填することは出来なかったためと推測される。

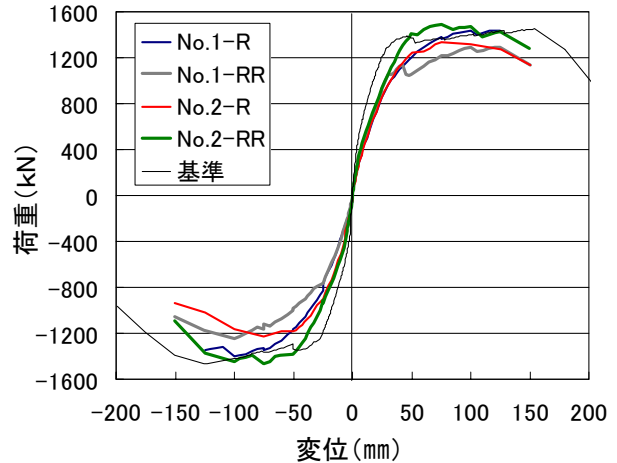


図-7 各試験体の荷重-変位関係の包絡線の比較

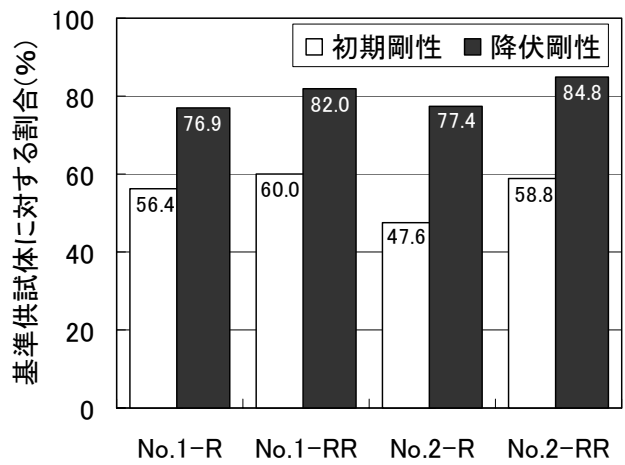


図-8 基準試験体に対する初期剛性、降伏剛性比

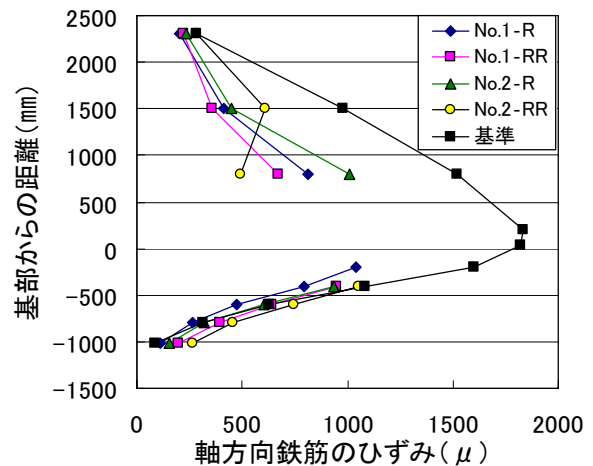


図-9 $1\delta_y$ の軸方向鉄筋のひずみ分布

降伏剛性比は、基準試験体に対し76.9~84.8%であり、基準試験体の降伏剛性よりも低下している。また、補修前の軸方向鉄筋の座屈の有無、ひび割れ注入の有無および断面修復材の置換率といった試験条件が異なるにも関わらず、補修

試験体間に大きな差異は見られなかった。

図-9 に $1\delta_y$ 時における軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。補修試験体は基準試験体と比べ、フーチング内のひずみ値が同様であり、基準試験体と比べ、フーチングからの伸出量に起因した変形量に大きな差異はないと考えられる。一方、基部からの高さ 800 mm 以上の範囲において、ひずみ値が小さくなっていることから、この部分の変形量は、基準試験体と比べ小さくなっていると考えられる。以上のことから、補修試験体は基準試験体と比べ、試験体基部付近の変形量の割合が大きいと推測される。

3.4 等価粘性減衰定数

図-10 に各試験体の等価粘性減衰定数を示す。基準試験体に比べて、降伏補修試験体(No.1-R)は部材剛性の違いから、 $3\delta_y$ 以下の範囲において、等価粘性減衰定数が小さな値となっているが、 $3\delta_y$ 以降については、ほぼ同様な値を示している。基準試験体と差異はなかった。座屈補修試験体(No.1-RR, No.2-R, No.2-RR)は基準試験体に比べ、 $3\delta_y$ 以降のよりも等価粘性減衰定数の値が小さかった。このことは、座屈補修試験体の復元力曲線が逆 S 字型に移行したことに起因している。

座屈補修試験体間の比較では、補修前の軸方向鉄筋の座屈が軽微であった No.1-RR の等価粘性減衰定数の値が最も大きかった。このことは、補修前に軸方向鉄筋の座屈が進行している場合、写真-3 に示すように、かぶりのはく離、はく落によって、座屈がさらに進行し、圧縮剛性が低下したことにより、復元力曲線の形状が顕著な逆 S 字型になったことに起因していると考えられる。

4.まとめ

曲げ損傷の程度が異なる RC 柱を無収縮モルタルにより補修し、載荷試験を行い、補修前の軸方向鉄筋の損傷の程度、試験体基部付近に占める断面修復材の割合(置換率)、ひび割れ注入の有無で整理し、無損傷の試験体である基準試験

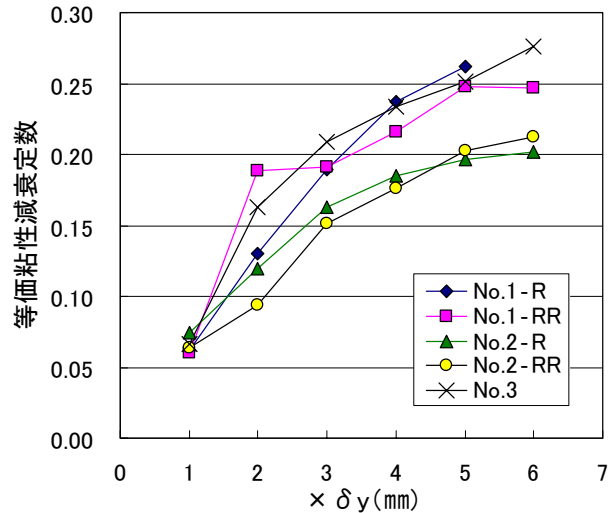


図-10 各試験体の等価粘性減衰定数

体と比較した結果、今回の実験の範囲において以下のことがわかった。

- (1)軸方向鉄筋が降伏する程度の損傷を補修した試験体は、無損傷の試験体と比べ、荷重—変位関係にほとんど差異はない。
- (2)軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷を補修した試験体の最大荷重は、断面修復材の置換率が高いほど値が大きくなる。
- (3)軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷を補修した試験体の復元力曲線は、補修前の軸方向鉄筋の座屈の損傷が大きいほど、逆 S 字型が顕著となり、等価粘性減衰定数が無損傷の試験体よりも小さくなる。
- (4)補修供試体の初期剛性は、ひび割れ注入を施しても、無損傷供試体の剛性よりも低下する。
- (5)補修供試体の降伏剛性は、補修前の軸方向鉄筋の損傷、ひび割れ注入の有無および断面修復材の置換率に関係無く、無損傷の試験体の剛性よりも低下する。

参考文献

- 1) 地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計—設計と照査の現状と将来展望—, 土木学会, 2006.9
- 2) 仁平達也, 谷村幸裕, 岡本大, 田所敏弥: 載荷履歴が RC 柱の損傷に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.2, pp.943-948, 2005