

論文 曲げ損傷を受けた RC 柱の部材特性に及ぼす補修方法の影響

仁平 達也^{*1}・谷村 幸裕^{*2}・岡本 大^{*3}・田所 敏弥^{*4}

要旨：軸方向鉄筋が座屈する程度の曲げ損傷を受けた実大 RC 柱について，異なる 3 種類の補修（無収縮モルタルによる断面修復，鋼板巻き立てによる補修，樹脂モルタルによる断面修復）を施し，交番載荷実験により補修方法が補修後の部材特性に及ぼす影響について検討した。その結果，無収縮モルタルによる断面修復は無損傷試験体に比べ最大荷重以降の荷重が早期に低下すること，鋼板巻き立てによる補修と樹脂モルタルによる断面修復は荷重低下が小さいこと，初期剛性の回復には鋼板巻き立てによる補修が有効であること等がわかった。

キーワード：復旧性，曲げ損傷，座屈，補修，部材性能，履歴吸収エネルギー

1. はじめに

鉄道 RC 構造物の設計は，性能照査型の設計体系を採用しており¹⁾，地震作用に対する要求性能として復旧性が設定されている。復旧性は，損傷を受けた RC 構造物の機能回復の難易度に対する要求性能である。

復旧性は部材が受けた損傷の程度と密接な関係がある。既往の研究²⁾では，異なる曲げ損傷を受けた RC 柱に対して，補修による部材性能の回復の程度を検討した。その結果，軸方向鉄筋が座屈する程度の大きな曲げ損傷を受けた場合，無収縮モルタルによる断面修復のみでは十分な部材性能の回復が望めないことが確認された。

そこで，本論文では，軸方向鉄筋が座屈する程度の曲げ損傷を受けた RC 柱を異なる方法で補修し，補修方法の違いが部材性能に与える影響について，正負交番載荷試験により検討した。

2. 実験概要および補修方法

2.1 損傷前の試験体の諸元

検討に用いた試験体は全部で 4 体である。1 体は基準試験体²⁾で終局まで載荷したものであり，他の 3 体は所定の損傷を与えた後，異なる 3 種

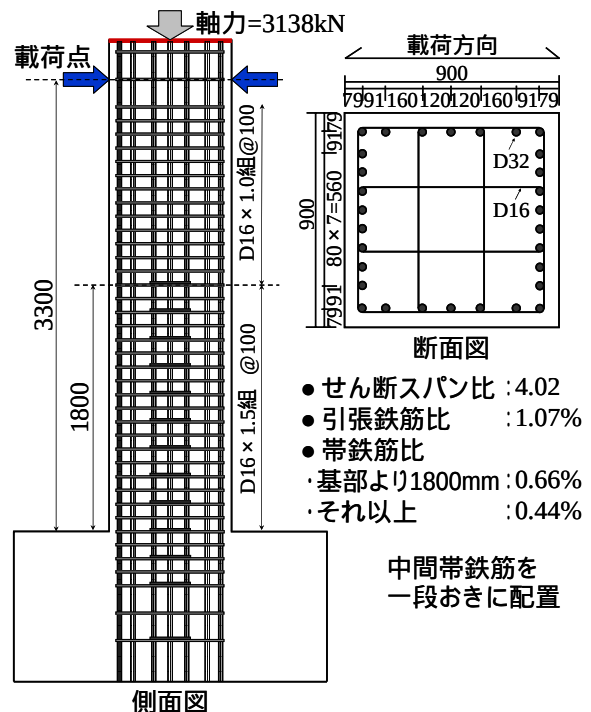


図 - 1 損傷前の試験体諸元 (単位mm)

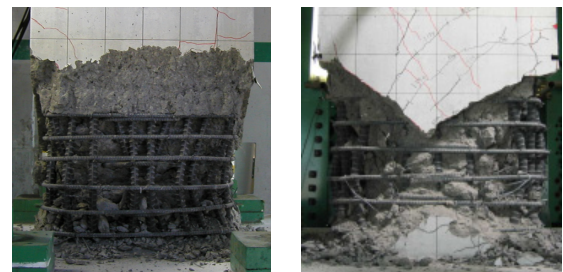


写真 - 1 補修前の損傷程度

*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 研究室長 博(工) (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造 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 副主任研究員 博(工) (正会員)

表 - 1 補修方法

試験体	Type-A	Type-B	Type-C
断面修復材	無収縮モルタル	無収縮モルタル	樹脂モルタル
断面修復材の置換率	55.7%	69.1%	100%
鋼板の有無	なし	SS400 (厚さ 6mm)	なし
ひび割れ注入材	セメントグラウト	セメントグラウト	エポキシ樹脂
補修状況 (図中の単位は mm)			

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

類の方法で補修した試験体である。

図 - 1 に損傷前の試験体の諸元を示す。試験体は鉄道ラーメン高架橋柱の実大モデルであり、断面形状は 900×900mm の正方形断面、せん断スパンを 3300mm (せん断スパン比は 4.02) とした。軸方向鉄筋には D32 を使用し、引張鉄筋比は 1.07% とした。また、帯鉄筋には D16 を用い、帯鉄筋比を 0.66% とした。なお、帯鉄筋の接合にはフレア溶接を用いた。

補修前に与えた損傷は、正負交番载荷により最大 $6\delta_y$ (150mm) の変位を与え、写真 - 1 に示す程度に軸方向鉄筋を座屈させたものであり、各試験体とも共通とした。なお、 $1\delta_y$ は同一諸元の基準試験体の最外縁の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した変位 25mm^2 である。補修前に与えた最大変位の $6\delta_y$ (150mm) は、鉄道標準¹⁾に示される骨格曲線上では、最大荷重点である M 点 (108mm) を越えるポストピーク領域である。

2.2 補修方法

本実験で用いた補修方法を表 - 1 に示す。

Type-A は、浮きやはく離を生じたコンクリートのみを除去し、断面修復に無収縮モルタルを用いた。また、表面ひび割れ幅 0.2mm 以上の箇所にセメントグラウトによるひび割れ注入を行った。Type-B は、Type-A 同様に浮きやはく離を生じたコンクリートを可能な限り除去し、基部より 80～980mm の範囲に厚さ 6mm の鋼板を巻

表 - 2 コンクリート・補修材料の材料試験結果

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	ft	f'c	Ec
Type-A	39.7	28.5	53.4	21.4	3.87	33.3	8.0
Type-B	43.1	28.7	67.3	25.2	3.64	16.6	7.1
Type-C	36.3	27.5	35.1	5.2	6.67	49.2	1.7
基準	31.8	24.4	-	-	-	-	-

f'c:圧縮強度(N/mm²),ft:引張強度(N/mm²),Ec:ヤング係数(kN/mm²)

表 - 3 鉄筋の材料試験結果

試験体	軸方向鉄筋		帯鉄筋		鋼板	
	fsy	Es	fsy	Es	fsy	Es
Type-A	370	195	377	196	-	-
Type-B	371	198	364	195	279	205
Type-C	371	198	364	195	-	-
基準	368	161	409	153	-	-

fsy:引張降伏強度(N/mm²),Es:ヤング係数(kN/mm²)

き立てた後、補強鋼板と既設柱の間に無収縮モルタルを充填した。また、表面ひび割れ幅 0.2mm 以上の箇所にセメントグラウトによるひび割れ注入を行った。以上の箇所にセメントグラウトによるひび割れ注入を行った。Type-C は、かぶりコンクリートのはく落を生じている範囲のコンクリートすべてをはつり落とし、断面修復に樹脂モルタルを用いた。また、表面ひび割れ幅 0.1mm 以上の箇所にエポキシ樹脂によるひび割れ注入を行った。

各試験体の補修は、残留変位が 0mm の状態で施すこととした。軸方向鉄筋の曲げ戻し、帯鉄筋の取替えは行わなかった。なお、1 本の軸方向鉄筋の破断が確認された Type-A については、破

断箇所をエンクローズ溶接により接合した。また、断面修復においては、軸方向鉄筋の座屈により、損傷前断面よりも外にはみ出していたため、鉄筋のかぶりを確保する目的で、表 - 1 に示すように断面を拡大した。ただし、柱基部から高さ 80mm の範囲は、断面の拡大による曲げ耐力の大幅な上昇を避けるために損傷前の断面と同一の寸法とした。

表 - 2 にコンクリートと補修材料の材料試験結果を、表 - 3 に鉄筋の材料試験結果を示す。

断面修復材により試験体基部を置換した割合（置換率）は表 - 1 に示すように、Type-A が 55.7%、Type-B は 69.1%、Type-C は 100% となった。

2.3 载荷方法

補修を行った試験体の载荷は、繰返し回数の増加により早期に軸方向鉄筋が破断することを避けるために、 $1\delta_y$ (25mm) の整数倍の正負 1 回繰返し漸増载荷とし、 $8\delta_y$ (200mm) まで行った。なお、各試験体ともに 3 回繰返しの正負交番载荷試験により損傷を与えた、そのため、同一方法の载荷²⁾かつ同一断面諸元の試験体を基準試験体とした。

3. 実験結果

3.1 損傷状況

写真 - 2 に $3\delta_y$ 時、写真 - 3 に $5\delta_y$ 時、写真 - 4 に $7\delta_y$ 時における Type-A ~ Type-C および基準試験体のせん断面から観察された基部付近の損傷状況を示す。

$3\delta_y$ 時において、Type-A は断面修復材のひび割れ、および一部ではく離が生じた。Type-B は鋼板下部において断面修復材のはく離、はく落が若干確認される程度であり、鋼板のはらみ出しは確認されなかった。Type-C は、ひび割れが生じているものの断面修復材のはく落は確認されなかった。

$5\delta_y$ 時において、Type-A は断面修復材のはく離、はく落が基部付近において広範囲に生じた。Type-B は $4\delta_y$ に軽微な鋼板のはらみ出しが確認されたが、目視による顕著な進展は確認されなかった。Type-C は基部付近において軸方向鉄筋に沿ったひび割れが確認されたが、Type-A に比べると損傷は軽微であった。

$7\delta_y$ 時において、Type-A は断面修復材のはく離、はく落がさらに進展した。Type-B は鋼板下

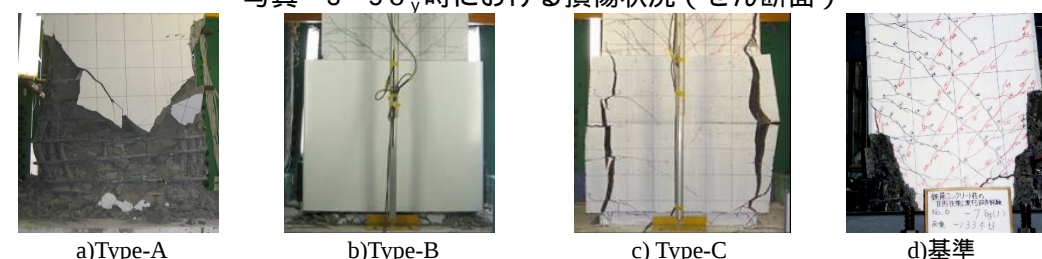
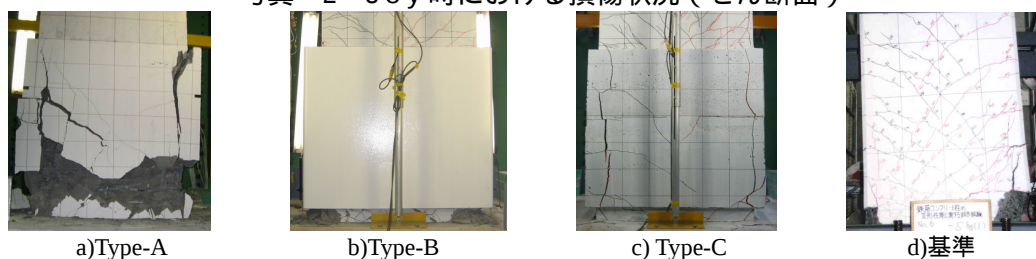
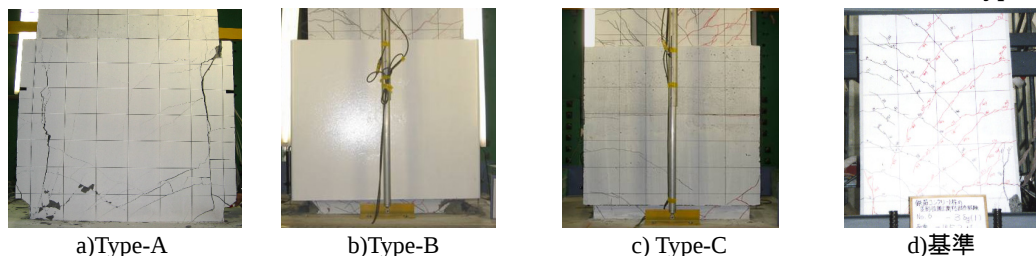


写真 - 4 $7\delta_y$ 時における損傷状況（せん断面）

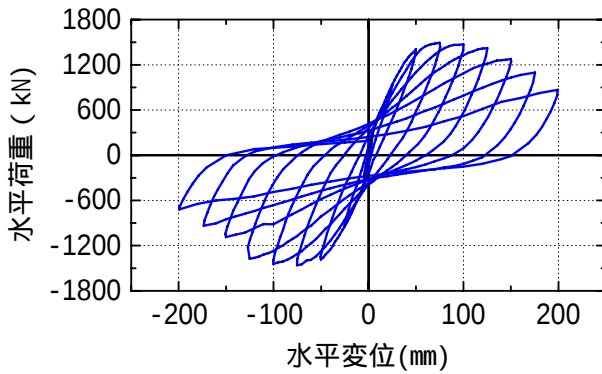


図 - 4 Type-A の荷重 - 変位関係

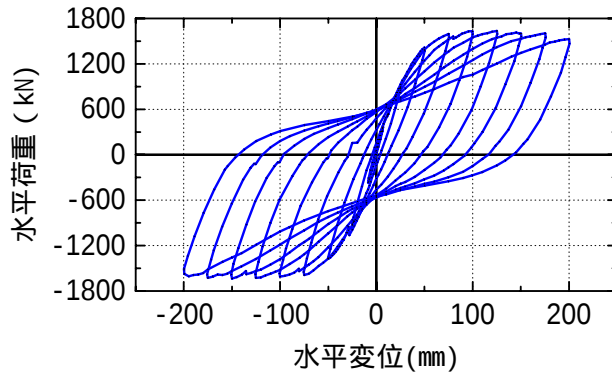


図 - 6 Type-C の荷重 - 変位関係

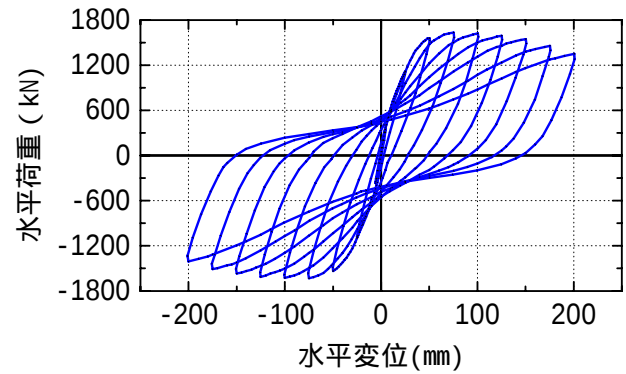


図 - 5 Type-B の荷重 - 変位関係

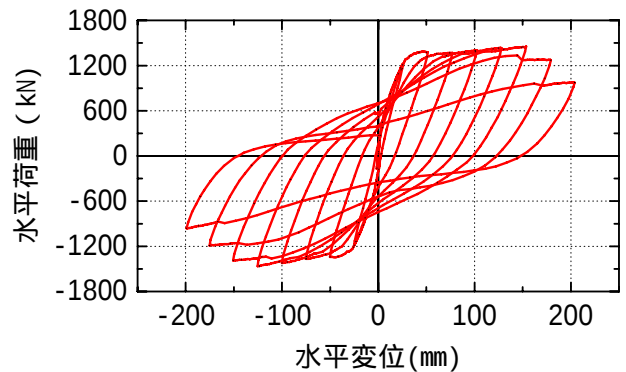


図 - 7 基準試験体の荷重 - 変位関係

部より細粒化した断面修復材の落下が確認された。Type-C は断面拡大部のはく離が生じたものの、Type-A に見られるような基部周辺のはく落は確認されなかった。また、Type-A は $-6\delta_y$ 、基準試験体は $+8\delta_y$ 載荷時に軸方向鉄筋の破断が確認された。基準試験体は Type-A よりも小さい範囲でコンクリートのはく離、はく落が生じ、 $7\delta_y$ で軸方向鉄筋の座屈が確認された。

写真 - 2 ~ 4 の a), c) に示す Type-A, Type-C については、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが基準試験体よりも広範囲に生じた。Type-A, Type-C は座屈した軸方向鉄筋の曲げ戻しを行わなかった。そのため、軸方向鉄筋圧縮時に座屈方向に力が加わりやすく、断面修復材に引張応力が生じやすかったと考えられる。

3.2 荷重 - 変位関係

図 - 4 ~ 7 に Type-A ~ C および基準試験体の荷重 - 変位関係を示す。なお、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。

Type-A ~ C の復元力曲線は、基準試験体と比較すると逆 S 字型となる傾向があった。こ

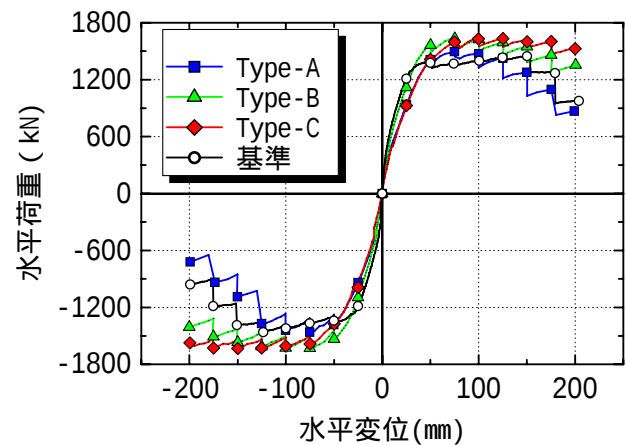


図 - 8 各試験体の荷重 - 変位関係の包絡線

引張力を負担する軸方向鉄筋が載荷前に座屈していたことに起因していると考えられる。

図 - 8 に各試験体の荷重 - 変位関係の包絡線を示す。最大荷重は基準試験体と比べ、Type-A は 103% ($3\delta_y$)、Type-B ($3\delta_y$) と Type-C ($5\delta_y$) はともに 112% となり、すべての試験体において基準試験体の値を上回った。これは、断面修復材の置換率が 55.7 ~ 100% と高く、軸方向鉄筋の裏側まで十分に充填されていたことにより、鉄筋との付着が確保されたため、 $3\delta_y$ 程度まで

は断面修復材のはく落せず、圧縮力を負担したためであると考えられる。また、補修前に座屈している軸方向鉄筋が、ひずみ硬化領域に達しているため、無損傷時よりも引張力の負担を増加したこと等も考えられる。

最大荷重以降の各サイクルのピーク時における荷重において、基準試験体は、最大荷重時の $6\delta_y$ を基準にすると、 $7\delta_y$ で 88%、 $8\delta_y$ で 67% となった。Type-A は基準試験体に比べ荷重低下が早期に生じ、最大荷重時の $3\delta_y$ を基準にすると、 $7\delta_y$ で 72%、 $8\delta_y$ で 58% となった。これは、写真 - 4 の a) に示すように、かぶり部分のはく離、はく落により、圧縮力の負担が十分に出来なかったためと考えられる。一方、Type-B と Type-C は、荷重低下が小さく、それぞれの最大荷重 $3\delta_y$ 、 $5\delta_y$ を基準にすると、Type-B は $7\delta_y$ で 89%、 $8\delta_y$ で 83% となり、Type-C は $7\delta_y$ で 98%、 $8\delta_y$ で 96% となった。これは、写真 - 4 の b)、c) に示すように、断面修復材のはく落や、鉄筋の座屈の顕著な進行が生じなかったために、圧縮力を負担したことが考えられる。これは、無収縮モルタルによる断面修復のみであった Type-A と異なり、Type-B は断面修復材のはく落や軸方向鉄筋の座屈を鋼板により面的に抑制する効果があったと考えられる。Type-C は樹脂モルタルの引張強度が無収縮モルタルの約 2 倍程度であるため、断面修復材のはく離が生じにくく、繰返し載荷を行っても、軸方向鉄筋の座屈を抑制する効果が高かったためと考えられる。

3.3 鉛直変位

図 - 9 に各試験体の各サイクルのピーク時における鉛直変位と水平変位の関係を示す。

Type-A と基準試験体は $+7\delta_y$ (175mm) 時に鉛直変位の減少がみられ、基準試験体では軸方向鉄筋の座屈が確認された。Type-B、Type-C は $8\delta_y$ (200mm) 時においても、鉛直変位の減少が見られなかった。このことより、両試験体は Type-A と比べて軸方向鉄筋の座屈の進展が少なかったことが推測される。

軸方向鉄筋の座屈が進行すると、同一変位に

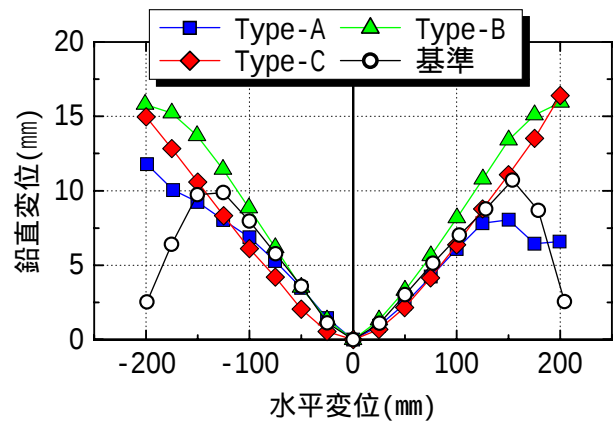


図 - 9 鉛直変位と水平変位の関係

表 - 4 基準試験体との剛性比

試験体	初期剛性比(%)	降伏剛性比(%)
Type-A	57.4	76.5
Type-B	72.7	92.9
Type-C	59.0	74.0

おける繰返しにおいても荷重低下を生じること、あるいは同一水平力に対しても変位が増加することなどが懸念される。Type-B、Type-C の補修方法は座屈の進展を抑制する効果が確認されたため、補修後に再度被災した場合においても、これらを防ぐことが期待できる。

3.4 初期剛性・降伏剛性

表 - 4 に Type-A ~ C の基準試験体に対する初期剛性比、降伏剛性比を示す。初期剛性は、水平変位 1.6mm (基準試験体の基部ひび割れ発生時の水平変位) における割線剛性であり、降伏剛性は、 $1\delta_y$ (水平変位 25mm) 時における割線剛性である。なお、各試験体ともに水平変位 1.6mm 時に基部にひび割れは確認されていない。

Type-A ~ C は基準試験体と比べ、初期剛性は 57.4 ~ 72.7%、降伏剛性は 74.0 ~ 92.9% となり、基準試験体の値を下回った。この理由として、ひび割れ注入を行っても、水平荷重を除荷して補修したため、コンクリートに生じた多くのひび割れは閉じてしまい、ひび割れ注入が十分行えなかったこと等が考えられる。

Type-B は他の補修試験体に比べて初期剛性、降伏剛性の値が 15% 程度大きくなり、鋼板巻き立てによる補修は、他の方法よりも剛性が回復するのに有効であった。これは、巻き立てた鋼

板が断面修復材と一体化し、引張力を負担し、曲げ剛性に寄与したためであると考えられる。

3.5 等価粘性減衰定数・履歴吸収エネルギー

図 - 10 に各試験体の等価粘性減衰定数を示す。Type-A ~ C に大きな差は見られず、各サイクルにおいて基準試験体の値を下回り、75mm($3\delta_y$)において 72 ~ 83%、175mm($7\delta_y$)において 78 ~ 84%となった。これは、載荷前から軸方向鉄筋が座屈しているため、いずれの補修方法を用いても復元力曲線が逆 S 字型となったことに起因している。

図 - 11 に各試験体の累積履歴吸収エネルギーを示す。Type-A は基準試験体を大きく下回っているが、これは最大荷重以降の荷重低下が大きかったこと、復元力曲線が逆 S 字型になったことに起因している。一方、Type-B と Type-C は基準試験体とほとんど差異はなかった。これは、図 - 8 に示すように、両試験体ともに、最大荷重以降の各サイクルのピーク荷重が基準試験体を上回り、復元力曲線が逆 S 字型になったことによる部材のエネルギー吸収能力の低下を補ったためである。

4. まとめ

軸方向鉄筋が座屈する程度の曲げ損傷を受けた RC 柱について、補修方法の相違が補修後の部材特性に及ぼす影響について実験的に検討した。この結果、今回の実験の範囲において以下のことがわかった。

- (1)無収縮モルタルにより断面修復をした試験体は、断面修復材のはく落が生じたため、最大荷重以降の荷重低下が基準試験体よりも早期に生じた。
- (2)鋼板巻き立てにより補修した試験体、および樹脂モルタルにより断面修復をした試験体は、鉄筋の座屈の進展が抑制され、基準試験体と比べ最大荷重以降の荷重低下が緩やかとなり、鉛直変位の減少も見られなかった。
- (3)鋼板巻き立てにより補修した試験体は、初期剛性、降伏剛性が無収縮モルタルによる断面

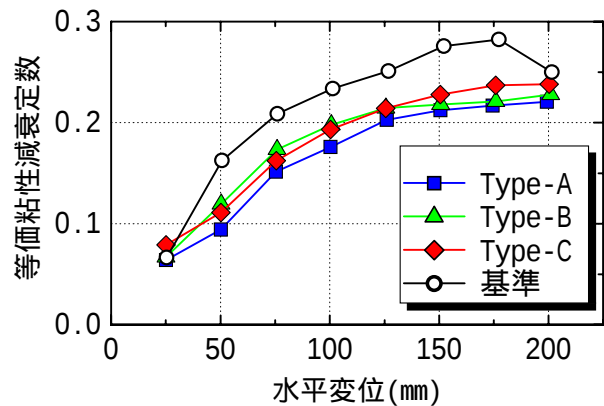


図 - 10 等価粘性減衰定数

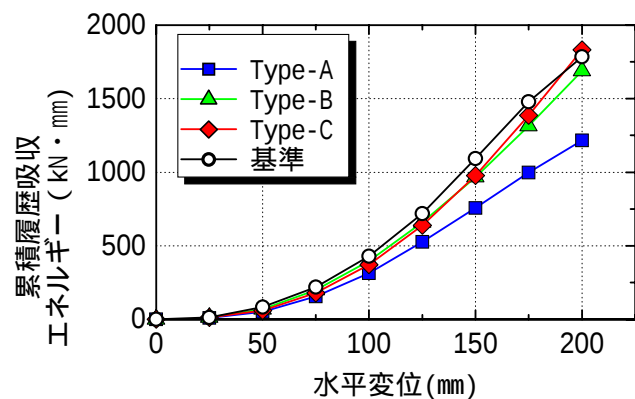


図 - 11 累積履歴吸収エネルギー

修復のみの試験体よりも 15%程度大きく、鋼板巻き立てによる補修は剛性を回復するのに有効であることが確認された。

- (4)補修した場合の等価粘性減衰定数は、いずれも基準試験体の場合を下回った。一方、累積履歴吸収エネルギーに関しては、無収縮モルタルで断面修復した場合は基準試験体の場合を下回るが、鋼板巻き立てによる補修ならびに樹脂モルタルで断面修復した場合は、基準試験体と大きな差異はなかった。

参考文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)，丸善，2004.
- 2) 仁平達也，谷村幸裕，岡本大，田所敏弥：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.2，pp.1519-1524，2006.7.