

震害を受け補修したラーメン高架橋柱の部材特性

仁平 達也* 谷村 幸裕*

岡本 大** 田所 敏弥*

Characteristic of Repaired Columns of RC Rigid-frame Viaducts Damaged by Earthquakes

Tatsuya NIHEI Yukihiro TANIMURA

Masaru OKAMOTO Toshiya TADOKORO

In this paper, we studied the characteristic of repaired columns of RC rigid-frame viaducts affected by damage due to bending caused by earthquakes. Based on the horizontal cyclic loading tests using real size RC columns, we confirmed the followings. Firstly, in the case of damage without buckling of axial reinforcement, the characteristic of repaired columns by shrinkage-free mortars has no difference from that of sound columns. Secondly, in the case of damage accompanied with buckling of axial reinforcement, the characteristic of repaired columns by shrinkage-free mortars is inferior to that of sound columns. Thirdly, in the case of damage accompanied with buckling of axial reinforcement, the effective repaired methods of damaged columns are steel jackets and resin mortars.

キーワード：復旧性、曲げ損傷、補修、累積履歴吸収エネルギー、部材性能

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）¹⁾（以下、RC標準）では、性能照査型の設計体系を採用しており、要求性能の一つとして復旧性が設定されている。復旧性は、地震などにより損傷を受けたRC構造物の機能回復の難易度に対する要求性能であり、部材が受けた損傷の状態と密接な関係がある。

RC部材の損傷は破壊形態により、せん断損傷と曲げ損傷に大別され、せん断損傷を受けたRC部材に対しては、ひび割れ充填を行い、鋼板巻き立て補強を行うことで部材性能が回復されることが確認されている²⁾。曲げ損傷を受けた部材については、既往の研究において、補修を施すことで概ね補修前と同等程度まで回復すると報告されている例もあるが、損傷の程度や補修方法が補修後の部材性能に及ぼす影響を把握するまでには至っていないのが現状である^{3)~5)}。

そこで、本研究では、曲げ損傷を受けた鉄道ラーメン高架橋柱の補修後の部材性能に対して、補修の程度や補修方法が及ぼす影響を把握し、損傷の程度に応じた効果的な補修方法を提案することを目的とした。

2. 実験概要および補修方法

2.1 実験の手順と試験体の諸元

本検討は、以下の手順で行った。

- ① 予備載荷（正負交番載荷）によって、各試験体に目標とする損傷を与える。
- ② 種々の方法で損傷を補修し、再度、正負交番載荷実験を行う。
- ③ 基準試験体⁶⁾（処女載荷の試験体）を含めた各試験体間の比較により、損傷の程度、および補修方法が部材性能に与える影響について評価する。

実験を行った試験体は、鉄道ラーメン高架橋柱の実大モデルであり、損傷程度と補修方法をパラメータとして、表1に示すNo.1～No.6の6体の試験体について実験を行った。図1に試験体の配筋詳細を示す。試験体は断面形状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を使用し、基部より1800mmの範囲は200mm間隔で中間帯鉄筋を配し、帯鉄筋比は0.66%とした。それ以外の範囲は、帯鉄筋比は0.44%とした。

2.2 補修前の損傷状況

各試験体の損傷程度は、予備載荷により与える最大変位により制御した。予備載荷により所定の損傷を与え、

* 構造物技術研究部（コンクリート構造）

** 構造物技術研究部（耐震構造）

特集：構造物の耐震技術

表1 損傷状況および補修方法

| 試験体 | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 |
|--------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|--------|--------|
| 予備荷重で与えた損傷 | 軸方向鉄筋降伏 | 軸方向鉄筋の軽微な座屈 | 軸方向鉄筋の座屈 | | | |
| | かぶりコンクリートのはく離、はく落 | | | | | |
| 予備荷重の最大変位 | 3δ _y (75mm) | 5δ _y (125mm) | 6δ _y (150mm) | | | |
| 断面修復材 | 無収縮モルタル | | | | 鋼板巻き立て | 樹脂モルタル |
| 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 (単位 mm) | | | | | | |

その損傷を補修した後に、再度正負交番荷重を行うことにより補修後の部材性能の検討を行った。荷重方法は、基準試験体の最外縁鉄筋の降伏ひずみに達した時の水平変位 25 mm を降伏変位 (1δ_y) とし、1δ_y の整数倍の正負繰返し漸増荷重を所定の最大変位まで実施した。

予備荷重により与えた損傷は、表1に示すように、No.1 は、軸方向鉄筋が降伏し座屈を生じていないもの、No.2 は、軽微な座屈を生じているもの、No.3～No.6 は、比較的大きな座屈を生じているものとした。予備荷重の最大変位は、No.1 が3δ_y、No.2 が5δ_y、No.3～No.6 が6δ_yである。

2.3 補修方法

各試験体の補修方法は表1に示すとおりである。No.1～No.4は無収縮モルタルによる断面修復、No.5は鋼板巻き立てによる補修、No.6は樹脂モルタルによる断面修復とした。No.1～No.4は、浮きやはく離を生じたコンクリートを除去した後、無収縮モルタルを用いて欠損部分の断面修復を施した。No.5は、浮きやはく離を生じたコンクリートを除去した後、基部付近に厚さ6mmの鋼板を巻き立て、補強鋼板と既設柱の間隙に無収縮モルタルを充填した。No.6は、かぶりコンクリートのはく落が生じた範囲のコンクリートすべてをはく落とし、樹脂モルタルを用いて欠損部分の断面修復を施した。また、No.3を除いて、注入可能なひび割れ箇所にはひび割れ注入を施した。

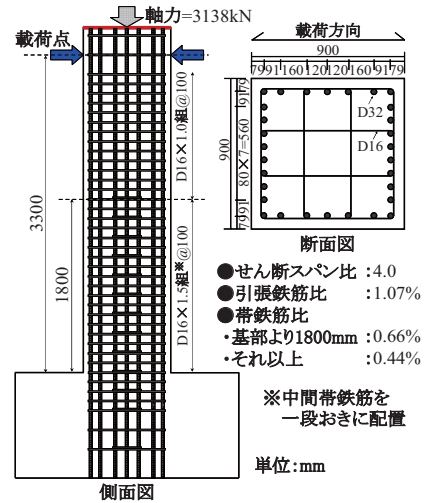


図1 試験体の配筋詳細

表2 鋼材の材料試験結果

| 試験体 | 軸方向鉄筋 D32 | | 帯鉄筋 D16 | | 鋼板 SS400 | |
|------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | f _{sy} | E _s | f _{sy} | E _s | f _{sy} | E _s |
| No.1 | 370 | 195 | 377 | 196 | — | — |
| No.2 | | | | | — | — |
| No.3 | | | | | — | — |
| No.4 | | | | | — | — |
| No.5 | 371 | 198 | 364 | 195 | 279 | 205 |
| No.6 | | | | | — | — |
| 基準 | 368 | 161 | 409 | 153 | — | — |

※ f_{sy}: 引張降伏強度 (N/mm²) , E_s: ヤング係数 (kN/mm²)

表3 コンクリート、断面修復材、ひび割れ注入材の材料試験結果

| 試験体 | コンクリート | | 断面修復材 | | ひび割れ注入材 | | |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | f _c | E _c | f _c | E _c | f _t | f _c | E _c |
| No.1 | 40.6 | 29.1 | 45.5 | 21.6 | 2.80 | 23.3 | 6.4 |
| No.2 | 43.9 | 28.4 | 47.8 | 17.7 | 2.32 | 29.5 | 7.0 |
| No.3 | 34.8 | 27.7 | 55.9 | 20.8 | 3.67 | — | — |
| No.4 | 39.7 | 28.5 | 53.4 | 21.4 | 3.87 | 33.3 | 8.0 |
| No.5 | 42.3 | 29.7 | 35.1 | 5.2 | 6.67 | 49.2 | 1.7 |
| No.6 | 43.1 | 28.7 | 67.3 | 25.2 | 3.64 | 16.6 | 7.1 |
| 基準 | 31.8 | 24.4 | — | — | — | — | — |

※ f_c: 圧縮強度 (N/mm²) , f_t: 引張強度 (N/mm²) , E_c: ヤング係数 (kN/mm²)

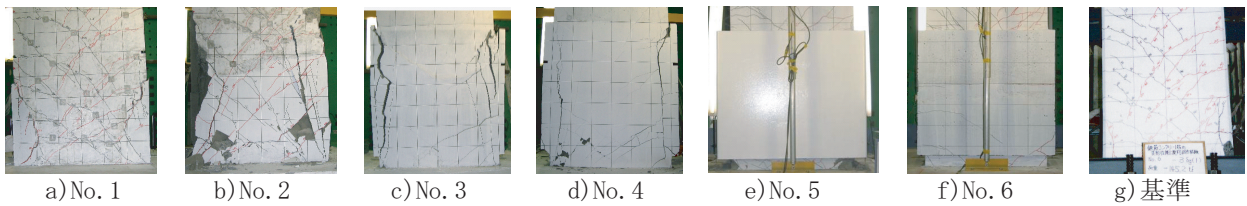


図2 各試験体の $3\delta_y$ (75mm) の損傷状況 (せん断面)

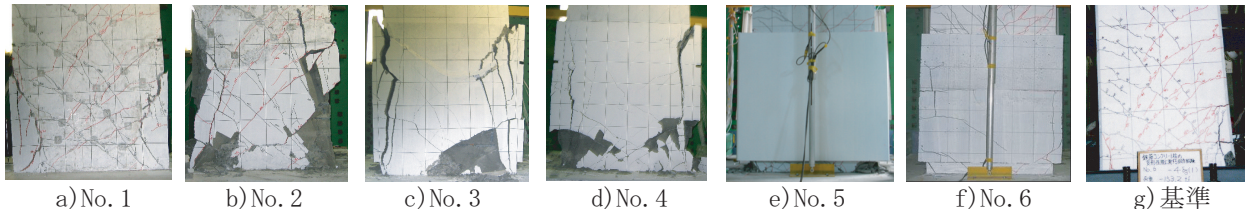


図3 各試験体の $4\delta_y$ (100mm) の損傷状況 (せん断面)

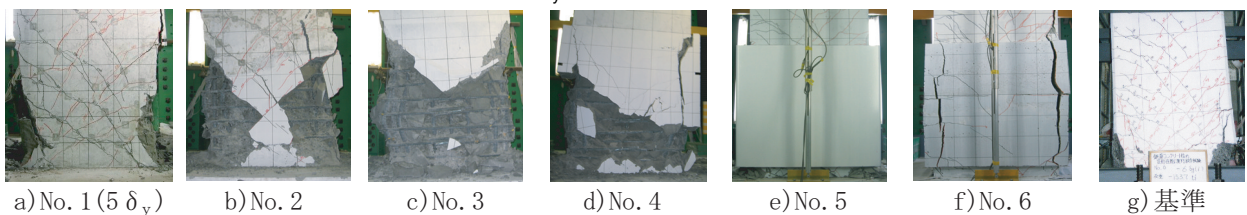


図4 各試験体の $6\delta_y$ (150mm) の損傷状況 (せん断面)

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。また、軸方向鉄筋の座屈により鉄筋がかぶり位置を越えていた場合や、施工上、断面修復材の流動性を確保する必要がある場合などは、断面を拡幅することとしたが、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。なお、座屈した軸方向鉄筋の曲げ戻しは施していない。表2に鋼材の材料試験結果を、表3にコンクリート、断面修復材、ひび割れ注入材の材料試験結果を示す。

2.4 荷重方法

荷重方法は、基準試験体と同様に水平変位25mmを $1\delta_y$ とし、 $1\delta_y$ の整数倍の正負1回繰返し漸増荷重とした。荷重時の軸圧縮力は3138kN (3.87N/mm²)である。これは、RC ラーメン高架橋柱における、地震時の軸力変動により生じる最大軸圧縮力を想定して設定した。

3. 実験結果および考察

3.1 各試験体の損傷状況

図2に $3\delta_y$ 、図3に $4\delta_y$ 、図4に $5\delta_y$ におけるNo.1および $6\delta_y$ におけるNo.2～No.6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。

無収縮モルタルにより断面修復を施したNo.1～No.4は、断面修復材とコンクリートの境界付近にひび割れが発生し、このひび割れに沿ってかぶりのはく離、はく落

が進行した。はく落が生じている範囲は、いずれの試験体も基準試験体よりも広範囲であった。No.1は、補修前に軸方向鉄筋の座屈が生じていたNo.2～No.4に比べて、はく落した範囲が小さかった。No.2～No.4は、座屈の程度が小さいものほど、言い換えれば、断面修復時に置き換える補修材の量が少ないほど、はく落した範囲が大きくなった。

鋼板を巻き立てたNo.5は、 $3\delta_y$ においては、鋼板下部の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。 $4\delta_y$ においては、軽微な鋼板のはらみ出しが確認された。 $6\delta_y$ においては、鋼板下部より細粒化した断面修復材の落下が確認された。

樹脂モルタルを断面修復材としたNo.6は、 $3\delta_y$ においては、曲げひび割れが生じる程度であった。 $4\delta_y$ において、軸方向鉄筋に沿ったひび割れが確認されたが、断面修復材に無収縮モルタルを用いたNo.2～No.4に比べると損傷は軽微であった。 $6\delta_y$ において、断面拡大部にはく離が生じたものの、No.2～No.4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。

3.2 軸方向鉄筋の座屈がない場合の補修後の部材性能

軸方向鉄筋の座屈がない場合の補修後の部材性能について、No.1と基準試験体の比較により検討を行った。

図5に荷重－変位関係、図6にNo.1と基準試験体の累積履歴吸収エネルギーを示す。なお、荷重－変位関係においては、軸力による付加曲げモーメントに対する補正を行っている。これらの図から、初期剛性はNo.1の方が

特集：構造物の耐震技術

小さい傾向を示しているが、最大荷重、累積履歴吸収エネルギーはほぼ同一となっていることがわかる。このことから、軸方向鉄筋が座屈していない損傷の場合、無収縮モルタルを用いた断面修復が有効であると考えられる。

3.3 軸方向鉄筋の座屈がある場合の補修後の部材性能
(1) 座屈の程度が補修後の部材性能に与える影響

軸方向鉄筋の座屈の程度が補修後の部材性能に与える影響について、無収縮モルタルにより断面修復を行い、ひび割れ注入を施したNo.2とNo.4と、基準試験体の比較により部材性能の検討を行った。

図7にNo.2、図8にNo.4と基準試験体の荷重-変位関係を示す。No.2、No.4は基準試験体と比べ、復元力曲線が逆S字型となった。最大荷重は、基準試験体と比べて、No.2は89%、No.4は103%となった。No.4は、軸方向鉄筋裏側の損傷が進行したコンクリートを除去し、断面修復材を軸方向鉄筋裏側まで十分に充填している。このため、 $3\delta_y$ の損傷状況である、図2のd)に示すように、かぶりのはく離しにくくなり、断面修復材が圧縮力を負担したと考えられる。

図9にNo.2、No.4と基準試験体の累積履歴吸収エネルギーを示す。両試験体とも、累積履歴吸収エネルギーは基準試験体よりも小さくなった。これは、最大荷重が基準試験体よりも小さかったこと、No.4の復元力曲線が逆S字型となったこと等の影響による。

以上のように軸方向鉄筋が座屈している場合、無収縮モルタルによる断面修復では、部材性能が十分回復しないことがわかった。

(2) 補修方法の相違が補修後の部材性能に与える影響

補修方法の相違が補修後の部材性能に与える影響について、補修前の軸方向鉄筋の座屈が同程度で、補修方法が異なる、No.4（無収縮モルタル）、No.5（鋼板巻き立て）、No.6（樹脂モルタル）と、基準試験体の比較により部材性能の検討を行った。

図10にNo.5、図11にNo.6と基準試験体の荷重-変位関係を示す。なお、荷重-変位関係は、両試験体ともに、基準試験体と比べ、復元力曲線が逆S字型となった。図12にNo.4～No.6と基準試験体の包絡線を示す。No.5とNo.6の最大荷重は、基準試験体と比べてともに112%となり、無収縮モルタルによる断面修復を施したNo.4と同様に基準試験体の値を上回った。これは、各試験体ともに、軸方向鉄筋の裏側まで断面修復材が十分に充填されていたために、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。

最大荷重以降の荷重低下において、No.4は、基準試験体と比べて小さい水平変位で荷重低下が生じ、その低下割合も基準試験体に比べて大きい。これに対して、No.5、No.6は、基準試験体と同等の変位まで荷重低下を生じず、最大荷重以降の荷重低下割合も小さなものとなって

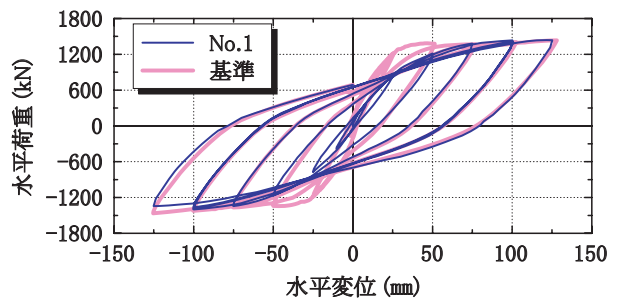


図5 No.1と基準試験体の荷重-変位関係

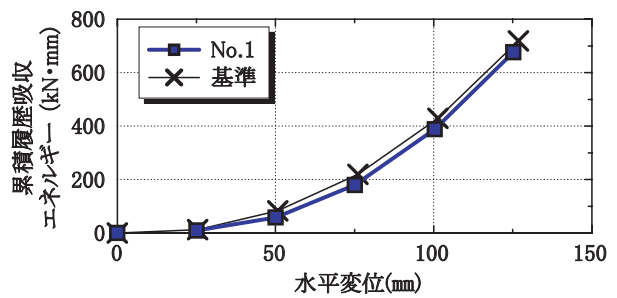


図6 累積履歴吸収エネルギー (No.1, 基準)

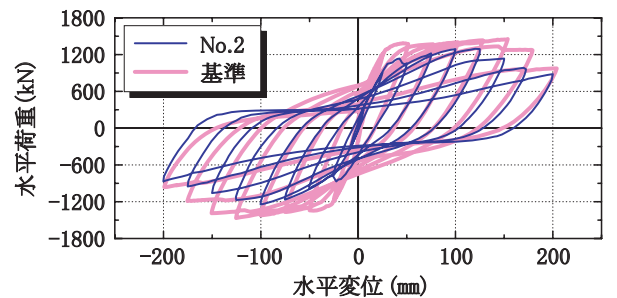


図7 No.2と基準試験体の荷重-変位関係

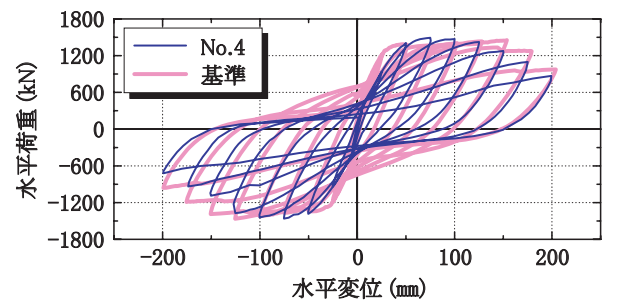


図8 No.4と基準試験体の荷重-変位関係

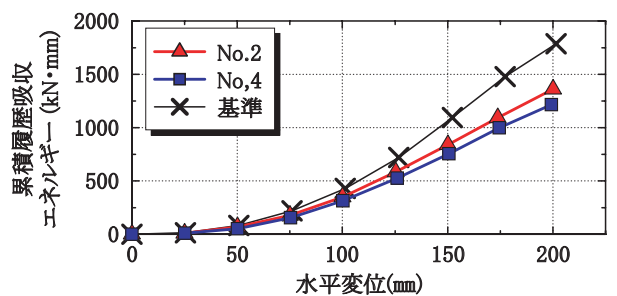


図9 累積履歴吸収エネルギー (No.2, No.4, 基準)

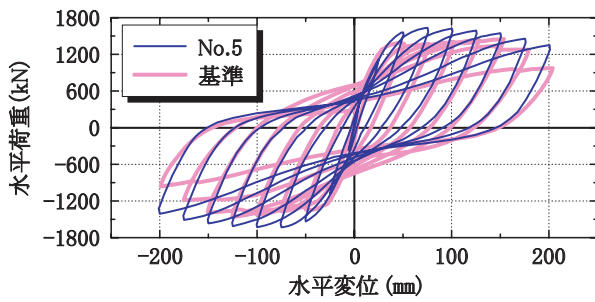


図10 No.5と基準試験体の荷重-変位関係

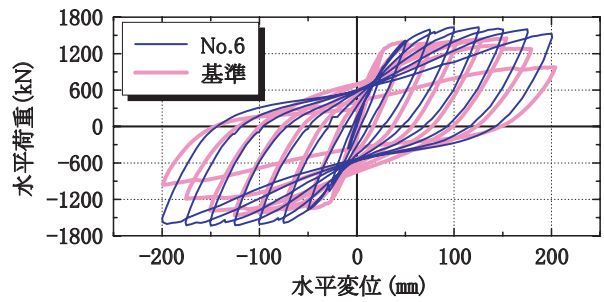


図11 No.6と基準試験体の荷重-変位関係

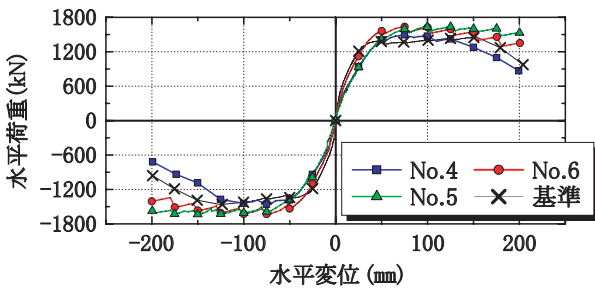


図12 包絡線 (No.4～No.6, 基準)

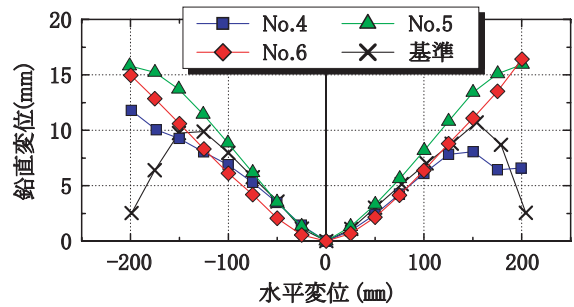


図13 鉛直変位と水平変位 (No.4～No.6, 基準)

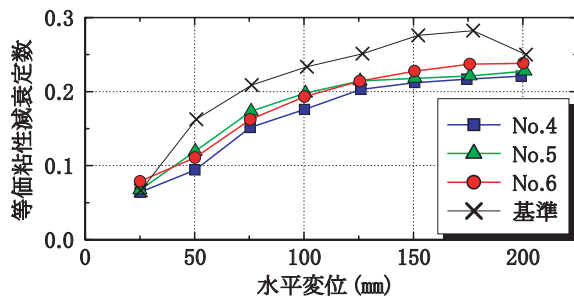


図14 等価粘性減衰定数 (No.4～No.6, 基準)

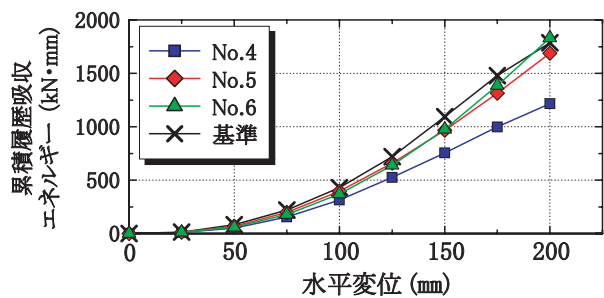


図15 累積履歴吸収エネルギー (No.4～No.6, 基準)

いる。この理由として、No.5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ことが考えられる。また、No.6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、繰返し荷重を行っても、軸方向鉄筋の座屈を抑制する効果が高かったと考えられる。

図13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。No.4と基準試験体は $17\delta_y$ 時(175mm)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。一方、No.5とNo.6は、 $8\delta_y$ においても鉛直変位の減少が見られなかった。このことから、No.5とNo.6はNo.4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。No.5, No.6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。

図14に各試験体の等価粘性減衰定数を示す。No.4～

No.6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、 $3\delta_y$ において72～83%、 $7\delta_y$ において78～84%となり、試験体間に大きな差異はなかった。このことから、補修後の復元力曲線は、補修方法によらず、荷重前の軸方向鉄筋が座屈している影響により逆S字型となり、等価粘性減衰定数が小さくなることがわかった。

図15に各試験体の累積履歴吸収エネルギーを示す。No.4は基準試験体を大きく下回っているが、No.5とNo.6は基準試験体とほとんど差異はなかった。これは、最大荷重以降の荷重の低下割合が小さかったため、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。

以上から、軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷を受けた場合には、鋼板巻き立てによる補修や樹脂モルタルによる断面修復など、軸方向鉄筋の座屈の進行を効果的に抑制する補修工法が有効であると考えられる。

3.4 ひび割れ注入が補修後の部材性能に与える影響

表4に基準試験体に対する各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のひび割

特集：構造物の耐震技術

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 δ_y 時における割線剛性である。

鋼板を巻き立てたNo.5以外は，基準試験体に対し，初期剛性比は47.0～59.1%であり，降伏剛性比は，70.8～75.5%であった。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た。ひび割れ注入材は，水平荷重を除荷して注入したため，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。このことから，ひび割れ注入による剛性の回復は難しいと考えられる。

鋼板を巻き立てたNo.5は，他の試験体に比べて初期剛性および降伏剛性が大きくなった。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。

4. 損傷状況に応じた補修方法選定フローの提案

本検討結果，およびせん断損傷に対する既往の研究結果から，図16に示す，地震により損傷を受けたRC柱の補修方法の選定フローを作成した。以下に概要を示す。

せん断損傷の場合，ひび割れ注入後，鋼板巻き立て補修を行う²⁾。

曲げ損傷の場合，かぶりコンクリートのはく落がない程度の損傷は補修不要とする。かぶりコンクリートのはく落があり軸方向鉄筋の座屈がない程度の損傷は，無収縮モルタルによる断面修復を施す。座屈している場合は，鋼板巻き立て補修または樹脂モルタル補修を行う。なお，ひび割れ注入については，受けた損傷が比較的軽微な場合においては，注入による部材の初期剛性，降伏剛性の回復が難しいものの，最大荷重，累積履歴吸収エネルギー等の部材性能の回復が可能である。このため，ひび割れ箇所から鋼材腐食が生じる恐れがある場合において，耐久性の配慮から必要に応じて施すこととした。

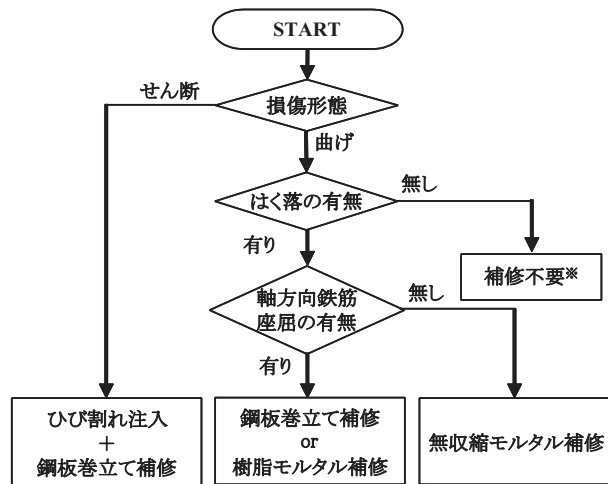
5. おわりに

本研究では，地震により曲げ損傷を受けたRC柱の補修後の部材性能を実験的に検討し，以下の結果が得られた。

- (1) 軸方向鉄筋の座屈がない程度の損傷に，無収縮モルタルによる断面修復を施した場合，最大荷重を回復し，累積履歴吸収エネルギーが概ね同一となる。
- (2) 軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷に，無収縮モルタルによる断面修復を施した場合，断面修復材を軸方向鉄筋の裏側まで十分充填しても，累積履歴吸収エネルギーは回復しない。
- (3) 軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷に，鋼板を巻き立てた場合，また樹脂モルタルによる断面修復を施した場合，最大荷重，累積履歴吸収エネルギーを回復する。

表4 基準試験体との剛性比

| 試験体 | 初期剛性 (%) | 降伏剛性 (%) |
|------|----------|----------|
| No.1 | 54.3 | 70.8 |
| No.2 | 59.1 | 75.5 |
| No.3 | 47.0 | 71.3 |
| No.4 | 57.4 | 76.5 |
| No.5 | 72.7 | 92.9 |
| No.6 | 59.0 | 74.0 |



※曲げひび割れ:耐久性の配慮から必要に応じてひび割れ注入

図16 補修方法選定フロー

(4) 損傷の程度によらず，ひび割れ注入を施しても，初期剛性，降伏剛性を回復するのは難しい。

これらに基づき損傷に応じた補修方法の選定フローを提案した。提案したフローは既設構造物が地震により被災した場合の適切な復旧方法の選定のほか，新設構造物の設計においても，復旧性を考慮した最適設計に活用できるものと考えている。

文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.1
- 2) 石橋忠良，加藤勝美：中層梁の地震被害と復旧について，構造物設計資料 No.67，1981.9
- 3) 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
- 4) 石橋忠良，津吉毅，小林薫，小林将志：大変形正負交番載荷を受けるRC柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究，土木学会論文集，第648号/IV-48，pp.55-69，2000.5
- 5) 稲熊弘，関雅樹：損傷レベル4の大変形領域まで損傷させた鉄道高架橋RC柱の補修効果に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.51A，pp.769-780，2005.3
- 6) 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，2005.7