

地震による損傷とセメント系材料により補修を繰り返した RC部材の最大荷重保持点に関する検討

仁平 達也¹・渡辺忠朋²・谷村幸裕¹・岡本大¹

¹正会員 公益財団法人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
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 北武コンサルタント株式会社 (〒062-0020 北海道札幌市豊平区月寒中央通り7丁目)

1. はじめに

復旧性に関しては、最近、学協会等で検討が進められつつあるが^{1)~4)}、補修後の部材性能に関する研究は、地震による構造物の被害を鑑みて実施されてきた。石橋ら⁵⁾は、1978年の宮城県沖地震の被害状況からせん断破壊した中層梁を対象とした研究を、佐藤ら⁶⁾は、1995年の兵庫県南部地震の被害状況からせん断破壊した柱を対象とした研究をそれぞれ実施し、鋼板補強が有効であることを明らかにしている。曲げ破壊した部材については、稲熊ら^{7), 8)}、海原ら⁹⁾、渡邊ら^{10), 11)}が、補修後の部材性能について検討している。著者らは、曲げ破壊した部材に対して、これら既往の実験結果も含めた検討により、補修前の軸方向鉄筋の損傷程度が補修後の部材性能を決定する重要な指標であることを明らかにし、補修後の部材性能が損傷前と変化する可能性を示した¹²⁾。しかしながら、これらの研究は、一度損傷を与えて補修した部材の検討にとどまっている。

ところで、土木構造物は長期間にわたって供用されることが多く、現在でも既に建設後100年程度供用されている構造物が少なくない。わが国は地震多発地帯に位置しており、設計耐用期間内に構造物が損傷する程度の規模の地震を複数回受けることが十分に想定される。また、大規模地震の後には、規模の大きい余震を伴うことが多く、本震で損傷した構造物を補修した後、余震によって再び損傷することも十分考えられる。実際に、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、本震により損傷を受け、補修された高架橋柱が、4月7日に発

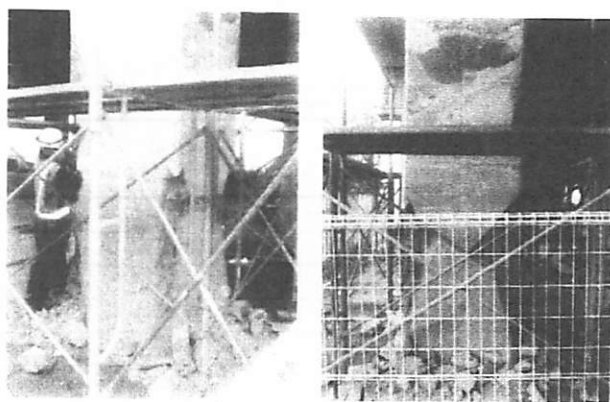


図-1 補修後に損傷した事例¹³⁾

生した余震により再び損傷する事象が報告されている(図-1)。したがって、構造物の復旧性を検討する場合には、損傷と補修を繰り返した部材性能を念頭に置いておく必要があるものと考えられる。

そこで、本研究では、構造物が複数回の地震により損傷することを想定し、曲げ損傷と補修を繰り返したRC部材、特にセメント系材料を用いて補修したRC部材において正負交番載荷実験を実施した。実験結果等より、部材性能の大きな指標でもある最大荷重保持点に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体の製作

破壊形態が曲げ破壊形態を有する鉄道橋のRCラーメン高架橋の柱をモデル化した試験体(以下、無損傷試験体という)に予め正負交番載荷実験を行い、損傷を発生させ補修を行った後(以下、補修試験体という)、再度、正負交番載荷実験を行い、損傷を

表-1 実験の概要

順序	イベント	1-N	2-N
①	初期荷 の最大変位 (損傷)	$3\delta_y$: 75mm ひび割れ・はく離	$6\delta_y$: 150mm 軸方向鉄筋座屈
②	補修試験体 注入材 断面修復材	1-M セメントグラウト 無修復モルタル	2-M なし 無収縮モルタル
③	再荷 の最大変位 (損傷)	$5\delta_y$: 150mm 軸方向鉄筋座屈	$6\delta_y$: 150mm 軸方向鉄筋座屈
④	再補修 注入材 断面修復材	1-MM セメントグラウト 無修復モルタル	2-MM セメントグラウト 無収縮モルタル
⑤	再々荷 の最大変位	$8\delta_y$: 200mm	$8\delta_y$: 200mm

※1: 荷方法は同一変位 ($1\delta_y$: 25mm) の正負漸増の1回繰返し荷※2: 荷時の軸方向圧縮度は 3.87N/mm^2 (3138kN)

※3: 初期荷時の最大変位

表-2 コンクリートの配合表

試験体	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
1-N, 2-N	56	296	166	786	1031	3.2

表-4 各試験体のコンクリート、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			フーチング		断面修復材			ひび割れ注入材		
	f_c	E_c	f_t	f_c	E_c	f_c	E_c	f_t	f_c	E_c	f_t
1-N	39.7	28.5	3.03	36.2	26.9	—	—	—	—	—	—
2-N	34.7	27.7	3.06	32.8	27.0	—	—	—	—	—	—
1-M	39.6	27.7	—	37.9	27.1	45.5	21.6	2.80	23.3	6.4	1.06
2-M	36.3	27.5	—	36.0	27.7	55.9	20.8	3.67	—	—	—
1-MM	39.3	27.7	—	37.1	27.9	47.8	17.7	2.32	29.5	7.0	1.11
2-MM	38.3	28.3	—	35.3	26.7	53.4	21.4	3.87	33.3	8.0	1.35

※ f_c : 圧縮強度(N/mm^2), f_t : 引張強度(N/mm^2), E_c : ヤング係数 (kN/mm^2)

※1-M, 1-MM, 2-M, 2-MM 試験体の断面修復材は無収縮モルタル (セメント, 砂, 水を 20 : 20 : 72 で配合)

発生させ補修を行った (以下, 再補修試験体という)。補修行為, 再補修行為が部材性能に及ぼす影響およびその差異について検討を行った。表-1 に本実験の概要を示す。

無損傷試験体は, 同一諸元の3体 (1-N, 2-N および 4-N) である。試験体名の第1項は試験体番号であり, 第2項は, 試験前に無損傷 (N) であること示している。比較検討に用いた試験体は, 同一諸元で同一変位の正負交番荷を1回繰返した5-N試験体と, 3回繰返した0-N試験体である。試験体の名称は, 著者らの既往の研究¹⁹⁾と整合性を取ることとした。

補修試験体と再補修試験体は, それぞれ無損傷試験体を補修, 補修試験体を補修したものである。補修試験体は1-M, 2-M, 4-R試験体, 再補修試験体は1-MM, 2-MM, 4-RR試験体である。試験体名の第2項と第3項は, 補修方法を示している。Mは無

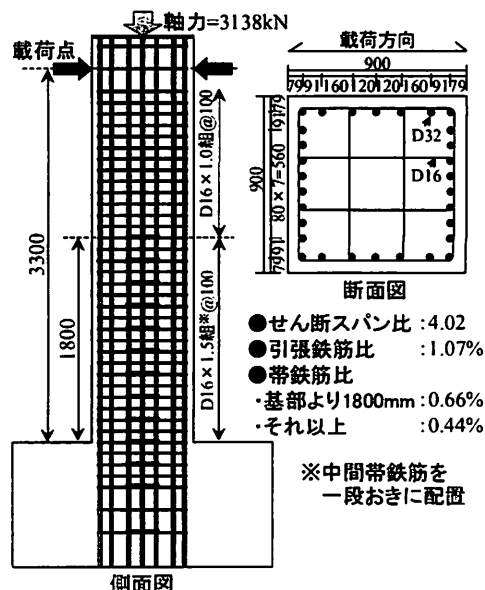


図-2 無損傷試験体の諸元 (単位 mm)

表-3 鋼材の材料試験結果

試験体	軸方向鉄筋 (D32)		帯鉄筋 (D16)	
	f_{sy}	E_s	f_{sy}	E_s
1-N, 2-N	370	195	377	196

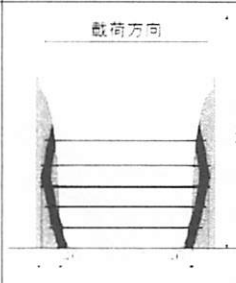
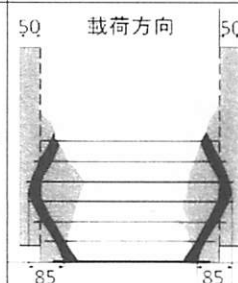
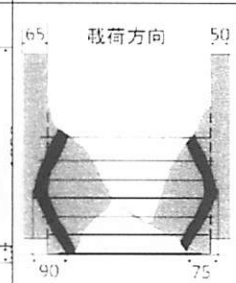
※ f_{sy} : 引張降伏強度(N/mm^2), E_s : ヤング係数(kN/mm^2)表-5 無損傷試験体の最大変位と荷方法¹⁹⁾

試験体	最大変位	荷方法
1-N	75mm ($3\delta_y$)	3→2→1→3→2→1→3→2→ $1\delta_y$
2-N	150mm ($6\delta_y$)	6→5→4→3→2→1→6→5→4→3→2→1→6→5→4→3→2→ $1\delta_y$
5-N	200mm ($8\delta_y$)	同一変位各1回繰返し ($1\delta_y$ ずつ漸増)
0-N	160mm ($6\delta_y$)	同一変位各3回繰返し ($1\delta_y$ ずつ漸増)

収縮モルタルによる断面修復, R は樹脂モルタルによる断面修復を施した試験体である。例えば, 1-M は1-N試験体は無収縮モルタルで断面修復した補修試験体であり, 4-RR は4-R試験体を樹脂モルタルで断面修復した再補修試験体であることを意味する。

図-2 に無損傷試験体の諸元を示す。各試験体の諸元は同一である。断面形状は $900 \times 900\text{mm}$ の正方

表-6 補修方法

試験体	1-M	1-MM	2-M	2-MM
補修 or 再補修	補修	再補修	補修	再補修
施工方法	左官工法	型枠充填工法		
断面修復材の置換率※1	6.9%	20.8%	42.4%	55.7%
ひび割れ注入材	セメントグラウト	セメントグラウト	なし	セメントグラウト
注入量	0.7kg	1.2kg	—	5.2kg
備考				軸方向鉄筋1本 エンクローズアーク溶接
補修状況 (せん断面：単位 mm)				

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

※2：注入でロスした量の測定値がないため全使用量を示した

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。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。それ以上の範囲は、帯鉄筋比を 0.44% とした。帯鉄筋の接合にはフレア溶接を用いた。表-2 に各試験体の配合表を示す。表-3 に鉄筋の材料試験結果を、表-4 にコンクリートの材料試験結果を示す。

(2) 載荷 1 回目（初期載荷）

表-5 に無損傷試験体の載荷方法を示す。各試験体ともに、25mm を降伏変位 (δ_y) とした¹⁹⁾。それぞれの最大変位は 1-N 試験体については軸方向鉄筋が座屈しない 75mm ($3\delta_y$)、2-N 試験体と 4-N 試験体については軸方向鉄筋の座屈が確認された変位 150mm ($6\delta_y$) とした。

(3) 補修 1 回目（補修）

表-6 に補修方法を示す。表内に補修材の使用量を置換率として示した。表-4 にコンクリート、断面修復材およびひび割れ注入材の材料試験結果を示す。

補修試験体は、残留変位が荷重－変位関係に及ぼす影響を避けるため、水平変位、および水平荷重をゼロに戻した状態で補修を施した。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、断面修復材の充填性を確保する必要がある場合等は、断面を拡幅することとした。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上昇を避けるために損傷前の断面と同一の寸法とした。軸方向鉄筋の曲げ戻し、帯鉄筋の取

替えは行わなかった。以下に各試験体の補修方法の詳細を示す。

a) 1-M 試験体の補修方法

浮きやはく離を生じたコンクリートのみを除去し、無収縮モルタルを用いて欠損部分の断面修復を施した。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施した。断面修復は、かぶり位置程度の欠損範囲であったため左官工法とした。

b) 2-M 試験体の補修方法

浮きやはく離を生じたコンクリートのみを除去した。その後、型枠を配し無収縮モルタルを用いて欠損部分の断面修復を施した。ひび割れ注入は施さなかった。

(4) 載荷 2 回目（補修後載荷）

載荷方法は、 $1\delta_y$ (25mm) の整数倍の正負 1 回繰返し漸増載荷とした。1-M 試験体の最大変位は $5\delta_y$ とした。2-M と 4-R 試験体は $6\delta_y$ とした。なお、補修後載荷終了時には、1-M 試験体において軸方向鉄筋の座屈が確認された。

(5) 補修 2 回目（再補修）

前述した補修試験体と同様に実施した。以下に各試験体の補修方法の詳細を示す。

a) 1-MM 試験体の補修方法

浮きやはく離を生じたコンクリートおよび断面修復材のみを除去した。その後、型枠を配し無収縮モルタルを用いて欠損部分の断面修復を施した。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施した。

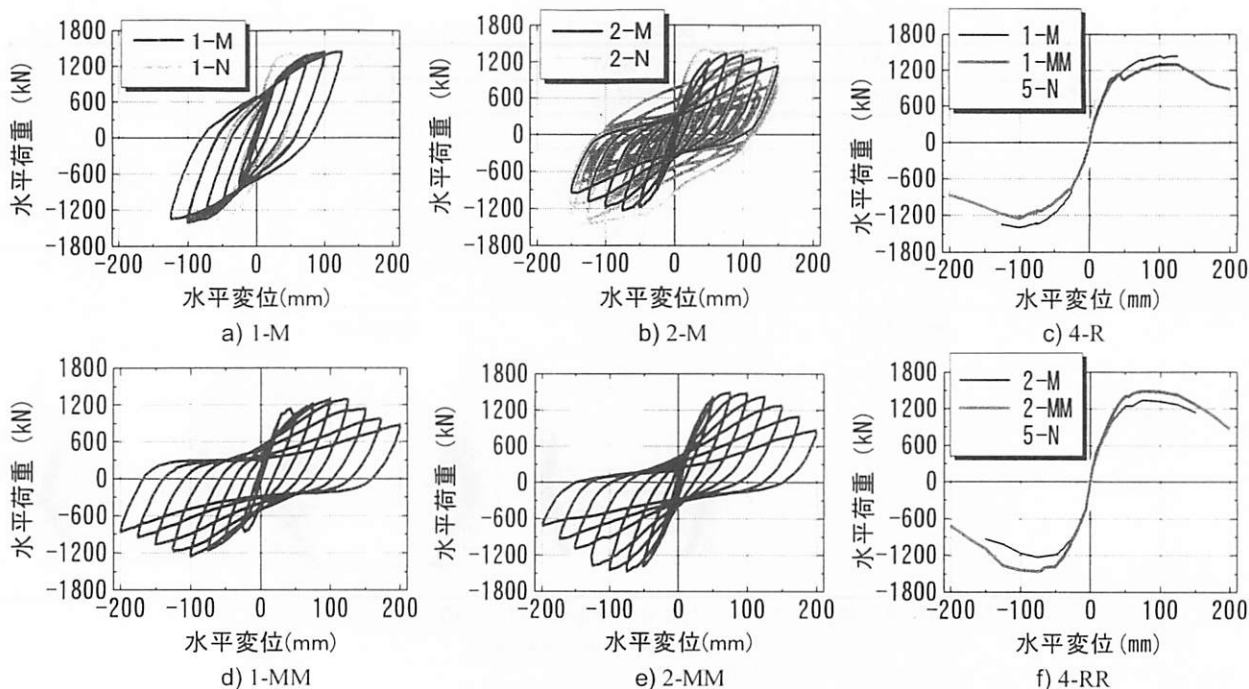


図-5 荷重-変位関係と包絡線

b) 2-MM 試験体の補修方法

浮きやはく離を生じたコンクリートおよび断面修復材のみを除去した。軸方向鉄筋 1 本の破断が確認されたため、エンクローズアーク溶接を実施した。また、他の試験体と補修順番が異なり、ひび割れ注入後に断面修復を施した。すなわち、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施した。その後、型枠を配し無収縮モルタルを用いて欠損部分の断面修復を施した。

はく落が生じている範囲のコンクリートすべてをはかり落とし、欠損部分の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。

(6) 載荷 3 回目 (再補修後載荷)

載荷方法は、 $1\delta_y$ (25mm) の整数倍の正負 1 回繰返し漸増載荷とした。1-MM, 2-MM, 4-RR 試験体すべて $8\delta_y$ まで載荷した。

3. 実験結果

図-5 に各試験体の荷重-変位関係と包絡線を示す。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ている。参考として、1-N, 2-N, 4-N 試験体の荷重-変位関係も示した。包絡線には、同一諸元で同一変位 1 回繰返し載荷を行った 5-N 試験体¹⁹⁾も示す。図-5 において、軸方向鉄筋の座屈がない程度の損傷を補修した 1-M 試験体は、無損傷の RC 部材と同様に紡錘型の復元力曲線の形状を示した。一方、軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷

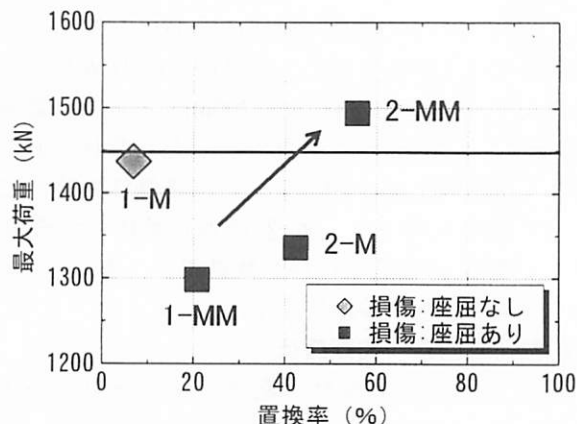


図-6 最大荷重と置換率の関係

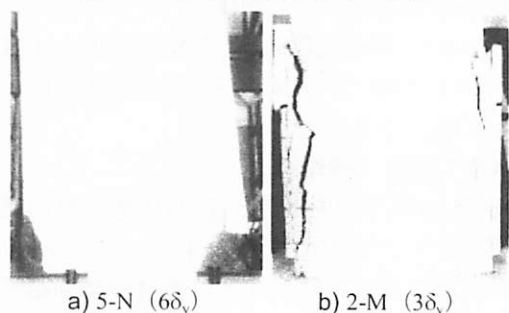


図-7 最大荷重時の基部せん断面の損傷状況

を受けた他の試験体は、補修試験体、再補修試験体ともに、復元力曲線が逆 S 字型の形状を示す傾向が見られた。これらのことから、復元力曲線の形状は、補修方法に関係なく、軸方向鉄筋の損傷程度の影響を受けるものと考えられる。

図-6 に最大荷重と置換率 (置換率とは、基部のコンクリートもしくは断面修復材の損傷程度を示すものであり、算出方法は表-6 に示している。) の

関係を示す。軸方向鉄筋が座屈しない程度の損傷を補修した 1-M 試験体は、かぶり程度を断面修復したため、置換率が 10%以下である。最大荷重は 5-N 試験体¹²⁾とほぼ同等となった。このことから、軸方向鉄筋が座屈しない程度の損傷であれば、最大荷重は無損傷時と概ね同等となると考えることが出来る。次に、軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷を補修した試験体について検討した。5-N 試験体の最大荷重を下回る試験体 (1-MM, 2-M 試験体) が存在したのは、5-N 試験体よりも最大荷重時におけるはく離、はく落範囲が大きかったことや、コアコンクリートが載荷前に既に損傷を受けていたこと等に起因すると考える。また、置換率の増加に伴って最大荷重が増加したのは、断面修復材が軸方向鉄筋の裏側まで十分充填されたことにより、圧縮力をより負担したこと等によると考えられる。なお、軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷を受けた試験体は、図-7 に示すように、無損傷試験体 (5-N 試験体) と異なり、軸線方向に発生したひび割れ箇所のはく離発生時に概ね最大荷重となったことから、断面修復材とコンクリートとの界面はく離や軸方向鉄筋と断面修復材の付着破壊時に最大荷重となったことが推測される。

4. 最大荷重保持点に関する検討

著者らは、補修した部材の変形性能を表す指標「損傷度 D 」と「補修効果 R 」を提案している¹²⁾。

損傷度 D とは、最大荷重保持点 (M 点) の変位に対する損傷度を表す指標である。 M 点の部材角に相当する最大応答部材角を経験した場合は 1.0、 M 点以上の部材角の最大応答部材角を経験した場合には 1.0 以上となり、無損傷の M 点の変位に対する損傷度を表す指標である。既往の実験により¹⁴⁾ M 点を超える変位を経験すると、軸方向鉄筋の座屈が開始することが観察されており、 D が 1.0 以上の場合、軸方向鉄筋の座屈が生じていると考えることが出来る。

補修効果 R は、無損傷試験体に対する補修試験体の補修効果を表す指標である。補修効果 R が 1.0 を下回る場合は、補修により無損傷試験体以下の変形性能であることを意味するものである。すなわち、 R が 1.0 であれば無損傷時の M 点と同一であり、 R が 1.0 を下回るとそれよりも小さくなることを意味する。これらを用いて、再補修試験体の補修効果についても検討することとした。

式 (1) と損傷度 D 、式 (2) に補修効果 R を示す。

$$D = \frac{E \theta_{\max} - N \theta_y}{N \theta_m - N \theta_y} \quad (1)$$

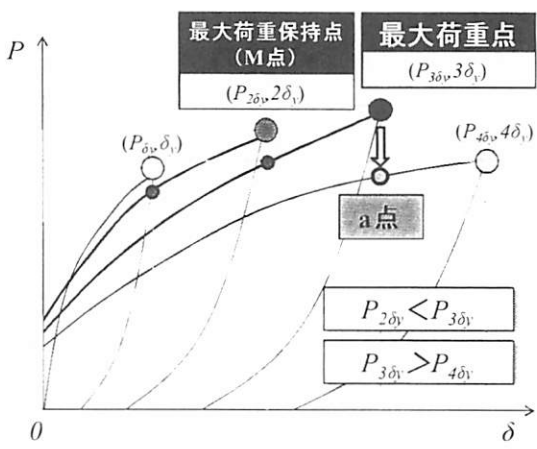


図-9 最大荷重保持点 (M 点) の設定方法 (M 点を $2\delta_y$ とする場合)

ここで、

- D : 損傷度
- $E \theta_{\max}$: 再補修までに経験した試験体の最大部材角
- $N \theta_m$: 無損傷試験体の M 点の部材角
- $N \theta_y$: 無損傷試験体の降伏部材角

$$R = \frac{R \theta_m - N \theta_y}{N \theta_m - N \theta_y} \quad (2)$$

ここで、

- R : 補修効果
- $R \theta_m$: 再補修試験体の M 点の部材角 (最大荷重を経験した $1\delta_y$ 前の部材角)
- $N \theta_m$: 無損傷試験体の M 点の部材角 (本検討では同一諸元で同一変位を 3 回繰り返した 0-N 試験体¹²⁾ の M 点の部材角)
- $N \theta_y$: 無損傷試験体の降伏部材角

図-9 に再補修試験体の最大荷重保持点 (M 点) の設定方法を示す。図は M 点を $2\delta_y$ とする場合を示している。本実験の補修試験体の載荷方法は同一変位の繰返しを 1 回としている。そのため、同一変位の 3 回繰返し載荷を行った 0-N 試験体のように明確に荷重保持点が現れないと考えられる。そこで、荷重-変位関係において、最大荷重点の変位よりも $1\delta_y$ 大きな変位を載荷する際に、図内の a 点 (最大荷重点と同一変位時の荷重) が顕著に小さくなっていることに着目した。すなわち、最大荷重点においては、同一変位の繰返し載荷による荷重低下が生じると推定し、最大荷重点よりも $1\delta_y$ 小さい変位を補修試験体の最大荷重保持点とした。新設部材の載荷実験の結果においても、最大荷重点の同一変位での繰返し載荷によって荷重低下を引き起こし、最大荷重点と最大荷重保持点が一致しない場合もあることから、図-9 に示す設定方法によって得られる最大

荷重保持点は、繰返し回数に依存せずに、座屈の発生がない、または座屈の進行がないことを保証する安全側の最大変位であると考える。

図-10 に横軸に損傷度 D 、縦軸に補修効果 R としたグラフを示す。損傷度 (D) が増加する (図内①) と補修効果 (R) は低下した。また、損傷度が同一 (図内②) において、補修効果 (R) は変わらなかった。このことは、補修効果 (R) は損傷度 (D) に依存する、すなわち、再補修後の RC 部材の最大荷重保持点は、損傷と補修の繰返しの影響を直接受けるのではなく、補修後の RC 部材と同様に、補修前の軸方向鉄筋の損傷状態の影響を受けると考える。

5. まとめ

- (1) 損傷を受け補修した RC 部材の復元力曲線の形状は、補修前の軸方向鉄筋の損傷程度の影響を受ける。座屈しない程度の損傷を補修した場合には紡錘型の履歴形状を示すが、座屈する程度の損傷を補修した場合には、逆 S 字型の履歴形状を示す。
- (2) 損傷を受け補修した RC 部材の最大荷重は、基部付近の断面修復材の置換割合の影響を受ける。軸方向鉄筋が座屈する程度の損傷を受けた場合でも、断面修復材として無収縮モルタルを用いた場合、鉄筋の裏側まで十分充填すれば無損傷時と同等程度となる。
- (3) 損傷を受け補修した RC 部材の最大荷重保持点は、補修後部材、再補修部材ともに、損傷と補修の繰返しの影響を直接受けるのではなく、補修前の軸方向鉄筋損傷状態の影響を受ける。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の耐震性能照査技術－現状と将来展望－，コンクリート技術シリーズ 48，2002.12
- 2) 日本コンクリート工学協会：被災構造物の補修補強後の耐力変形状研究委員会報告書，2005.3
- 3) 土木学会：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－，コンクリート技術シリーズ 67，2005.9
- 4) 日本コンクリート工学協会：被災構造物の復旧性能評価研究委員会報告書，2007.8
- 5) 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，pp.15-20，1981.9
- 6) 佐藤勉，渡辺忠朋，西川佳祐，市川篤司：兵庫県南部地震で被災した RC 柱の鋼板巻き補強効果，第 3 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-6，1995.11
- 7) 稲熊弘，関雅樹：大損傷を受けた RC 柱のエポキシ樹脂モルタルによる補修効果確認実験，土木学会第 58 回年次学術講演会，V-344，2003.9
- 8) 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，構造工学論文集，Vol.51A，pp.769-780，2005.3
- 9) 海原卓也，石橋忠良，松田芳範，小林薫：大変形領域の交番載荷荷重により損傷した高じん性 RC 梁の補修効果に関する試験結果，第 2 回「耐震補強・補修技術，耐震診断技術に関するシンポジウム」講演論文集，土木学会，No.2，pp.71-78，1998.7
- 10) 渡邊一悟，池田憲二，岸徳光，長谷川正：エポキシ樹脂注入補修を施した RC 橋脚の補修効果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.26，No.2，pp.1723-1728，2004.7
- 11) 渡邊一悟，畑山朗，岸徳光，長谷川正：正負交番載荷を行った RC 橋脚の補修効果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.25，No.2，pp.1903-1908，2003.7
- 12) 仁平達也，渡辺忠朋，滝本和志，笹谷輝勝，土屋智史，原夏生，谷村幸裕，岡本大：損傷履歴を考慮した修復部材の性能評価に関する一考察，土木学会論文集 E，Vol.65，No.4，pp.490-507，2009.11
- 13) 土木学会地震工学委員会：東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告，2011.5
- 14) 渡辺忠朋，谷村幸裕，瀧口将志，佐藤勉：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.31～45，2001.8.

(2011. 07. 15 受付)

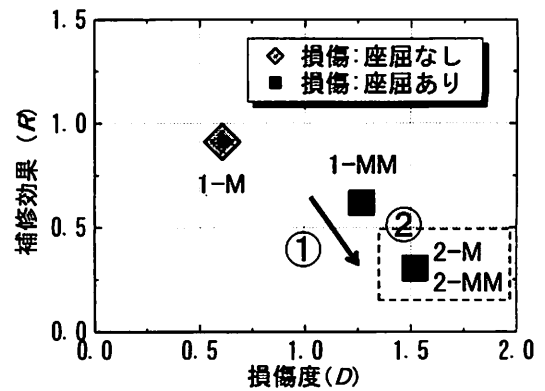


図-10 損傷度 (D) と補修効果 (R) の関係