

再補修RC部材の部材性能に関する検討

EVALUATION OF DEFORMATION CAPACITY OF RE-REPAIR RC MEMBERS

北海道旅客鉄道(株) ○正会員 仁平 達也 (Tatsuya Nihei)
 北武コンサルタント(株) 正会員 渡辺 忠朋 (Tadatomo Watanabe)
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 谷村 幸裕 (Yukihiro Tanimura)
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 岡本 大 (Masaru Okamoto)

1. はじめに

著者らはRC部材の補修後の部材性能について検討を行い、その部材性能は、初期損傷の程度や修復工法によって異なり、かつ、軸方向鉄筋の座屈の有無が重要な閾値となることを明らかにしている¹⁾。補修後、供用期間内に再び被災する可能性は否定できないことを考慮すると、補修し、再び被災した構造物を補修(再補修)した際の部材性能も明らかにする必要があると考える。そこで、本論文では、実大試験体を用いて、再補修した部材の部材性能について検討を行った。

2. 再補修RC部材の部材性能に関する検討

2.1 実験および検討概要

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、初期損傷試験体)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)、再度、正負交番載荷実験を行い、損傷を発生させ補修を行った(以下、再補修試験体)。これにより、修復行為(補修、再補修)が部材性能(剛性、変形性能)に及ぼす影響およびその差異について検討を行った。

2.2 初期損傷試験体の諸元

初期損傷試験体は5体(1-N~5-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。なお、著者らが過去に実施した実験において、同一断面諸元であり、かつ同一変位の正負交番載荷を3回繰返した試験体0-Nと、同一変位の正負交番載荷を1回繰返した試験体5-Nを、以降の補修部材、再補修部材の変形性能を比較検討に用いる試験体とする。図-1に初期損傷試験体の諸元を示す。表-1に各試験体に用いた鉄筋の材料試験結果およびコンクリートの材料試験結果を示す。

2.3 実験結果および考察

a) 補修方法、破壊状況および荷重-変位関係

1-N~4-N試験体の降伏変位(δ_y)は、5-N試験体の最外縁鉄筋の降伏ひずみに達した変位25mmとした。なお、材料諸元が異なる0-N試験体の降伏変位は26.8mmであった。初期損傷試験体の最大変位は、軸方向鉄筋の座屈の有無から判断した。具

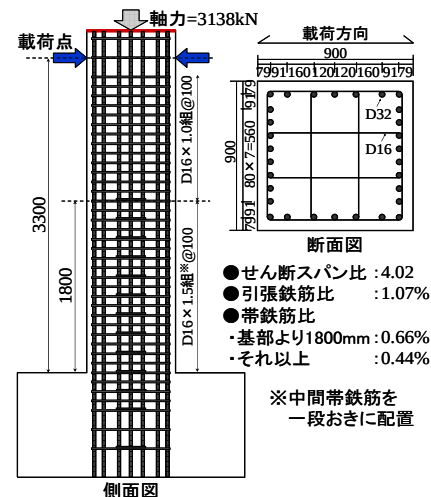


図-1 初期損傷試験体の諸元(単位: mm)

表-1 鉄筋とコンクリートの材料試験結果

試験体	軸方向鉄筋 (D32)		帯鉄筋 (D16)		コンクリート		フーチング
	f_{ty}	E_s	f_{ty}	E_s	f_c	E_c	
0-N	368	161	409	153	26.9	24.4	25.6
1-N	370	195	377	196	39.7	28.5	36.2
2-N					34.7	27.7	32.8
3-N	371	198	364	195	40.6	29.1	42.2
4-N					43.9	28.4	41.1
5-N	368	161	409	153	31.8	24.4	34.0

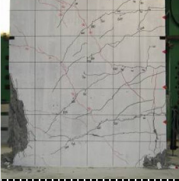
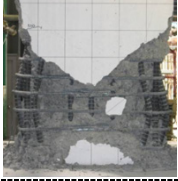
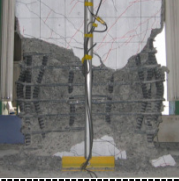
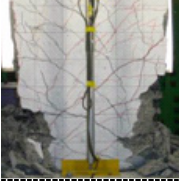
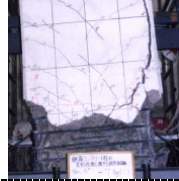
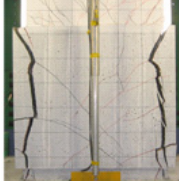
※ f_{ty} : 引張降伏強度(N/mm²), f_c : 圧縮強度(N/mm²), E_s : ヤング係数(kN/mm²)

体的には、1-N試験体は軸方向鉄筋の座屈がない変位を最大変位とし、それ以外の試験体は軸方向鉄筋の座屈が確認される変位以上を最大変位とした。

補修、再補修に際しては、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。また、基部より870mmの範囲を断面修復材に置き換えた4-RR以外は、損傷した範囲を可能な限りはつり出した。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。

表-2に各試験体の最大変位と補修方法を示す。表-3に材料試験結果を示す。表-4に軸方向鉄筋が座屈する損傷を受け、断面修復材に無収縮モルタル、ひび割れ注入材にセメントグラ

表-2 補修前の最大変位と補修方法

順序	イベント	1-N	2-N	3-N	4-N	5-N
①	初期載荷	↓ ($3\delta_y$: 75mm) 	↓ ($6\delta_y$: 150mm) 	↓ ($6\delta_y$: 150mm) 	↓ ($6\delta_y$: 150mm) 	↓ ($6\delta_y$: 200mm) 
	(損傷)	ひび割れ・はく離	軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋座屈
②	補修	1-M ひび割れ注入 : セメントグラウト 断面修復 : 無収縮モルタル	2-M ひび割れ注入 : なし 断面修復 : 無収縮モルタル	3-SJ ひび割れ注入 : セメントグラウト, 鋼板巻き立て	4-R ひび割れ注入 : エポキシ樹脂 断面修復 : 樹脂モルタル	5-C ひび割れ注入 : セメントグラウト 断面修復 : コンクリート
	再載荷	↓ ($5\delta_y$: 150mm) 	↓ ($6\delta_y$: 150mm) 	($8\delta_y$: 200mm) (実験終了)	↓ ($6\delta_y$: 150mm) 	($7\delta_y$: 175mm) (実験終了)
	(損傷)	軸方向鉄筋座屈	軸方向鉄筋座屈進行		軸方向鉄筋座屈進行	
④	再補修	1-MM ひび割れ注入 : セメントグラウト 断面修復 : 無収縮モルタル	2-MM ひび割れ注入 : セメントグラウト 断面修復 : 無収縮モルタル		4-RR ひび割れ注入 : エポキシ樹脂 断面修復 : 樹脂モルタル※3	
	再々載荷	($8\delta_y$: 200mm)	($8\delta_y$: 200mm)		($8\delta_y$: 200mm)	

※1: 載荷方法は同一変位の正負漸増の1回繰返し載荷 ※2: 載荷時の軸方向圧縮度は 3.87N/mm^2 (3138kN) ※3: 4-RRは基部範囲を全置換

表-3 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	E_c	f_c	E_c	f_t	f_c	E_c	f_t
1-M	40.6	29.1	45.5	21.6	2.80	233	6.4	1.06
1-MM	43.9	28.4	47.8	17.7	2.32	29.5	7.0	1.11
2-M	34.8	27.7	55.9	20.8	3.67	—	—	—
2-MM	39.7	28.5	53.4	21.4	3.87	33.3	8.0	1.35
3-SJ	43.1	28.7	67.3	25.2	3.64	16.6	7.1	0.78
4-R	42.4	28.9	33.3	4.8	6.14	49.2	1.7	15.8
4-RR	42.3	29.7	35.1	5.2	6.67			
5-C	32.5	28.8	28.7	25.2	2.70	※2	※2	※2
5-N	31.8	24.4	—	—	—	—	—	—

※1: 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)

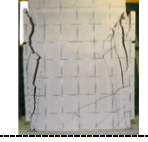
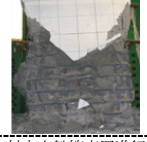
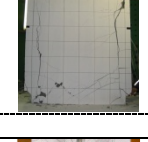
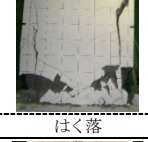
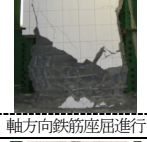
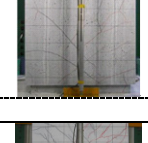
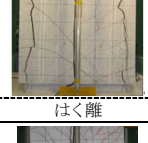
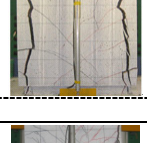
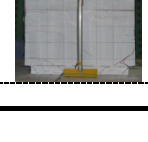
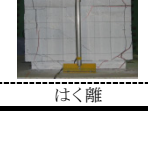
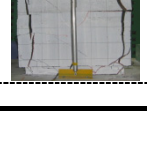
※2: データなし

ウトを用いた補修試験体 2-M, 再補修試験体 1-MM, 2-MM と、断面修復材に樹脂モルタル、ひび割れ注入材にエポキシ樹脂を用いた補修試験体 4-R, 再補修試験体 4-RR の損傷の進行状況を示す。

b) 荷重-変位関係

図-2 に各試験体の荷重-変位関係を示す。図は、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。図-3 に各試験体の包絡線を示す。図内には、最大荷重と最大荷重時の変位も示す。復元力曲線は、1-M 以外の軸方向鉄筋が座屈する損傷を受け補修した試験体は、基準試験体と比較すると逆 S 字型となる傾向がみられた。これは引張力を負担する軸方向鉄筋が補修前に座屈し、湾曲していたことに起因していると考えられる。

表-4 補修試験体と再補修試験体の損傷の進行状況

試験体	$3\delta_y$	$4\delta_y$	$6\delta_y$
1-MM			
	外観	はく落 ($3\delta_y$ 時)	軸方向鉄筋座屈進行
2-M			
	外観	はく落	軸方向鉄筋座屈進行
2-MM			
	外観	はく落	軸方向鉄筋座屈進行
4-R			
	外観	はく離	
4-RR			
	外観	はく離	

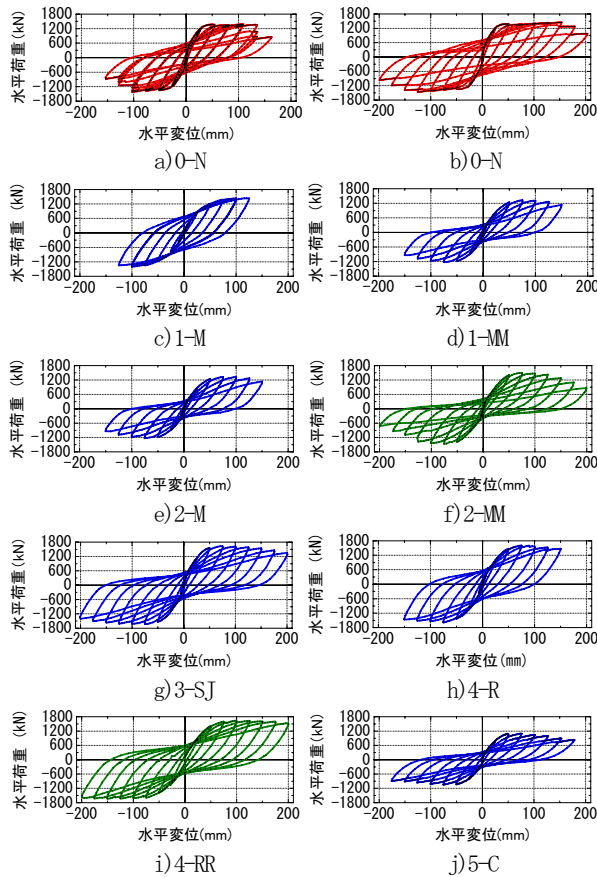


図-2 荷重-変位関係

c) 剛性の検討

表-5 に補修試験体の基準試験体に対する降伏剛性の割合を示す。降伏剛性とは、降伏変位 δ_y (水平変位 25mm) における割線剛性である。

降伏剛性は、ひび割れ注入の有無、断面修復材の相違、損傷程度、補修、再補修に関わらず、すべての試験体が 5-N 試験体の値を下回った。この原因として、水平荷重を除荷して補修したため、生じた多くのひび割れは閉じてしまい、すべてのひび割れを閉塞させることが難しかったためであると考えられる。このことは実構造物に対しても同様であると考えられ、補修、再補修試験体の剛性の回復は期待できないと考えられる。なお、3-SJ が他の試験体よりも大きかったのは、鋼板が剛性に寄与したためであると考えられる。

著者らは、補修試験体の初期剛性を算定するモデルを提案している¹⁾。ここでいう、初期剛性とは、補修区間の初期剛性を、初期損傷試験体の降伏時の荷重と変位から定まる剛性であり、算定モデルとは、通常の RC 部材と同様に式 (1) を用いて低下率を変化させる図-4 に示すモデルである。本モデルを再補修試験体に対しても適用し、検討を行った。

$$k_t = k_1 \left| \frac{\theta_{\max}}{\theta_c} \right|^{-\beta} \quad (1)$$

ここに、

k_t : 補修、再補修部材の塑性ヒンジ領域の初期剛性

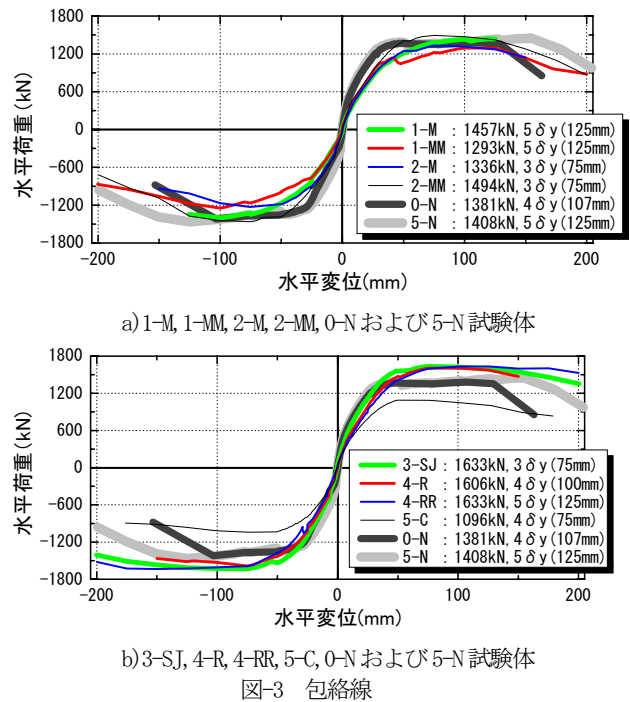


図-3 包絡線

表-5 5-N 試験体に対する初期剛性・降伏剛性比

試験体	ひび割れ 注入材	注入量 (kg)	降伏剛性比 (%)
1-M	セメント グラウト	0.7	70.8
1-MM		1.2	75.8
2-M		—	71.3
2-MM		5.2	76.3
3-SJ		0.8	92.9
4-R	エポキシ 樹脂	0.8	81.9
4-RR		1.0	74.0
5-C		2.9*	65.4

*注入時の使用量 (注入ロス分を含む)

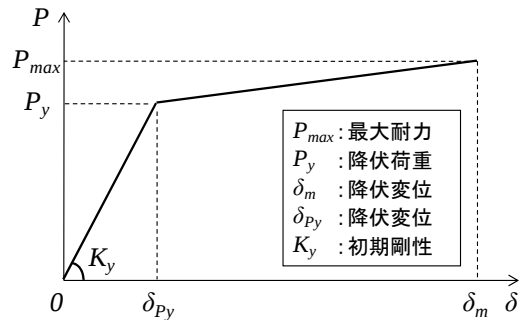


図-4 補修した部材の初期剛性のモデル

k_t : 塑性ヒンジ領域の全断面有効の剛性

θ_c : 初期損傷時のひび割れ発生時の回転角

$\theta_{\max}$: 初期損傷時の降伏時の回転角

β : 剛性低下率

補修、再補修区間の初期剛性を、初期損傷試験体の降伏時の荷重と変位から定まる剛性としたのは、補修、再補修部材の荷重-変位関係が、初期損傷時の荷重-変位関係と異なり部材として明確な降伏点が表れないためである。ここで、実験値とは、初期損傷時の降伏荷重が作用した時の修(再)試験体の変位であり、計算値とは、初期損傷時の降伏荷重を用いて、塑性ヒンジ以外の領域には、塑性ヒンジ上部で降伏曲げモーメントとなる曲げモーメント分布を仮定した部材の再載荷剛性、塑性ヒンジ

領域には式 (1) で定まる剛性を、それぞれ用いて算定した変位である。なお、補修試験体は、剛性低下率 β が 0.4~0.5 程度で実験値と概ね一致することを把握している¹⁾。

図-5 に、剛性低下率 β を 0.2~0.6 と変化させた場合の実験値と計算値の関係を示す。図より、再補修試験体は、補修試験体同様に、剛性低下率 β が 0.4~0.5 程度で実験値と概ね一致することがわかった。

d) 変形性能に関する検討

著者らは、補修した部材の変形性能を表す指標として、「損傷度 : D 」と「補修効果 : R 」を提案している¹⁾。

損傷度 D は、M 点²⁾の部材角に対する損傷度を表す指標である。初期損傷がない場合は 0 となり、M 点の部材角に相当する損傷を与えた場合は 1.0、M 点以上の部材角の損傷を与えた場合には 1.0 以上となる。補修効果 R は、初期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。補修試験体の M 点が初期損傷試験体 M 点以下の場合 1.0 を下回り、補修試験体は初期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。なお、補修、再補修試験体は同一変位 1 回繰返しの正負交番荷重を行っており、最大荷重点の $1\delta_y$ 前の変位 ($1\theta_y$ 前の部材角) を補修試験体の M 点としている。両指標を再補修試験体にも適用し、検討を行った。

$$D = \frac{N\theta_{\max} - N\theta_y}{N\theta_m - N\theta_y} \quad (2)$$

ここに、

D : 損傷度

$N\theta_{\max}$: 経験した試験体の最大部材角

$N\theta_m$: 初期損傷試験体の M 点の部材角

(本検討では 0-N 試験体の M 点の部材角)

$N\theta_y$: 初期損傷試験体の降伏部材角

$$R = \frac{R\theta_m - N\theta_y}{N\theta_m - N\theta_y} \quad (3)$$

ここに、

R : 補修効果

$R\theta_m$: 補修試験体、再補修試験体の M 点の部材角

(最大荷重を経験した $1\theta_y$ 前の部材角)

$N\theta_m$: 初期損傷試験体の M 点の部材角

(本検討では 0-N 試験体の M 点の部材角)

$N\theta_y$: 初期損傷試験体の降伏部材角

図-6 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。同じ損傷度である、2-M、2-MM、3-SJ、4-R、4-RR を比較すると、4-R と 4-RR の補修効果が高いのは、断面修復材が樹脂モルタルであったため、無収縮モルタルよりも引張強度が大きく、表-4 に示すように、はく離しにくかったことに起因すると考えられる。また、4-RR の補修効果は 4-R を上回った。

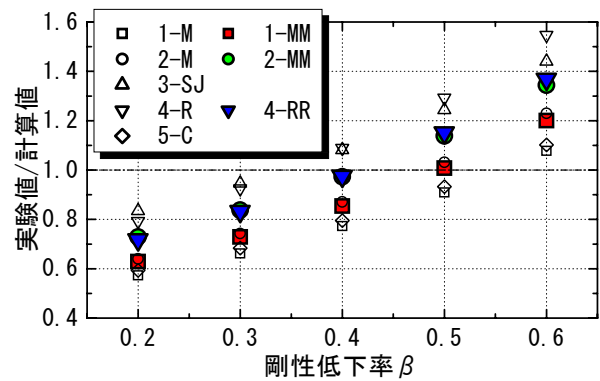


図-5 剛性低下率と実験値/計算値の関係

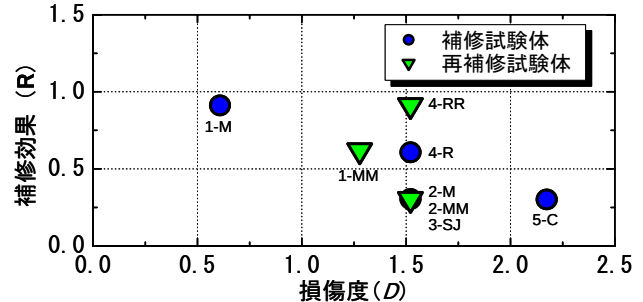


図-6 損傷度 (D) と補修効果 (R) の関係

これは、4-RR は基部を樹脂モルタルに全置換したため、より軸方向鉄筋に樹脂モルタルが付着し、座屈の進行を抑制したことによるものと推定される。

図より、損傷度 D が大きくなるにつれて、補修効果 R が小さくなる傾向がみられた。このことから、補修効果は、補修、再補修に関わらず、損傷度に依存すると考えられる。すなわち、再補修試験体の変形性能は、補修試験体同様に、経験した最大部材角に依存すると考えられる。

3. まとめ

本検討の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 修復後の修復領域の剛性を評価することによって、修復後の部材の初期剛性を算定した結果、再補修試験体は、補修試験体同様に、剛性低下率 β が 0.4~0.5 程度で実験値と概ね一致した。
- 2) 損傷度 D が大きくなるにつれて、補修効果 R が小さくなる傾向がみられたことから、再補修試験体の変形性能は、補修試験体同様に、経験した最大部材角に依存すると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) (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, 1999.10