正負繰返し载荷によるRCはり豆板補修部の 界面剥離挙動の分析と提案補修工法の検証

佐々木 尚美¹・小林 薫²・半井 健一郎³

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社, JR東日本研究開発センター
(〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2丁目)

E-mail: naomi-sasaki@jreast.co.jp

²フェロー会員 東日本旅客鉄道株式会社, JR東日本研究開発センター (同上)

E-mail: kaoru-kobayashi@jreast.co.jp

³正会員 広島大学大学院准教授 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail: nakarai@hiroshima-u.ac.jp

豆板を取り除いて断面修復する従来の補修工法では, 連続的な補修境界面(界面)ができ, 補修部が剥離・剥落する可能性がある. 本研究では, 豆板を取り除かずにエポキシ樹脂を注入して補修する工法を提案し, その提案工法で補修したRCはりとは従来工法で補修したRCはり試験体を用いて, 補修部の挙動に着目した正負繰返し曲げ载荷試験を行った. 豆板のない健全な試験体と比べ, 提案工法で補修した試験体の補修部の曲げひび割れ発生荷重は増大し, ひび割れ幅は減少した. また, 界面位置での剥離は生じなかった. 一方, 従来工法で補修した試験体の界面剥離は载荷当初より発生し, 補修部のひび割れ幅・剥離幅は载荷とともに増大した. 従来工法で補修した試験体の界面剥離挙動について分析し, 正負繰返し载荷は界面剥離を進展させる要因となることを確認した.

Key Words : cyclic loading, delamination behavior, honeycombing, repair boundary, repair method, resin injection

1. はじめに

コンクリート構造物に発生する初期欠陥(不具合)のひとつに豆板がある. 実構造物に発生する豆板は, 部材のかぶり部に多くみられる. はり下面に発生した豆板の例を写真-1に示す. RC部材のかぶり部に豆板が発生した場合, かぶりコンクリートとしての機能が不足するため, 中性化や塩害に対する耐久性が低下することが指摘されている¹²⁾. よって, このような豆板が発見されると, 補修が行われるのが一般的である³⁾.

通常の補修は, 豆板を取り除き, 取り除いた部分を断面修復する方法⁴⁻⁸⁾(以降, 従来補修工法という.)により行われる. 従来補修工法の補修手順の例を図-1⁹⁾に示す. 図-1(a)は, コンクリートはり断面の下端に豆板が発生した状況を示している. 従来補修工法による豆板の補修方法は, 豆板を完全に取り除き, 豆板を取り除いた後の健全部のコンクリート表面にプライマーを塗布し, 断面修復する方法が一般的である. このような従来補修工法では, 豆板を取り除くため, 図-1(d)に示すように,

写真-1 はり下面に発生した豆板の例

健全なコンクリート部と補修部の間に, 連続的な補修境界面(界面)ができる.

従来補修工法に関する既往の研究では, はつり処理後に断面修復した場合, 健全部のコンクリートに微細なひび割れが多く発生することで, 打継ぎ界面の付着強度が低下すること¹⁰⁾や, 補修境界面に欠陥部があると, 水や酸素が供給され, 鉄筋の腐食が著しく速くなること^{11,12)}等が指摘されている. また, 部材の構造実験に関する研究では, はり下面のかぶり部に補修箇所を有するRCは

りの載荷試験において、鉛直方向の補修境界面での目開きが生じること¹³⁾や、吹付モルタルを充填して断面修復補修したはりの静的載荷試験では、水平方向の補修境界面でのひび割れが荷重の増加に対して連続的に拡幅し、疲労試験では、断面修復補修した RC はりの疲労寿命は、健全な RC はりの半分程度であること¹⁴⁾等が報告されている。しかし、補修境界面の剥離挙動について、詳細な検討が行われた事例は少ない。

また、RC部材の例として、列車荷重を支持するRCラーメン高架橋のはりには、列車走行時の繰返し作用の影響により、正負の曲げモーメントが作用する。さらに供用期間中は、数千万回の列車荷重が繰返し作用することになる。よって、このようなはり部材に発生した豆板の補修においては、正負の繰返し載荷による影響を踏まえて、補修部の剥離の進展など、将来にわたる変状の発生についての検討を行っていくことが、より重要であると考えられる。しかし、正負の繰返し載荷による補修境界面の剥離挙動について検討された事例も、ほとんどない。

一方、著者らは、従来補修工法のような連続的な補修境界面を作らない補修を行うことを目的とし、豆板を取り除かず、樹脂注入を行う新たな補修方法（以降、提案補修工法という。）を提案し、補修した材料レベルでの検証を行ってきた^{9),15)}。提案補修工法の補修手順を図-2⁹⁾に示す。提案補修工法は、豆板を取り除かず、豆板の表面にシール材を塗布し、小径の孔を削孔して、内部に樹脂を注入する補修方法である。本補修工法は、表面に露出した粗骨材は相互に結合し、容易には剥落することはない程度の豆板を対象としている³⁾。

提案補修工法に関する材料レベルでの検証では、補修境界面を模擬した供試体での直接引張強度確認試験や、豆板補修部を有する供試体での曲げ強度確認試験を行い、提案補修工法を用いた供試体の補修境界面での剥離は発生せず、健全供試体と同等の強度を有したことから、従来補修工法を用いた供試体は補修境界面での剥離が生じ、健全供試体の強度に及ばなかったことを確認している⁹⁾。

そこで本研究では、部材レベルでの検証として、豆板を補修した箇所（以降、補修部という。）を有するRC はりの構造性能について確認することとした。ここでは、補修境界面の剥離発生挙動および正負の繰返し載荷による補修境界面の剥離進展挙動について分析を行うことと、提案補修工法の適用性の検証を行うことを目的とした。具体的には、RCラーメン高架橋の縦ばりのかぶり部に豆板が発生した状況を想定し、補修部をかぶり部に設けたRCはり試験体で曲げ載荷試験を行った。豆板の補修には、従来補修工法と提案補修工法を用いた。載荷は、はり部材が繰返し載荷を受け、補修部に正負の曲げモーメントが繰返し作用する状態を模擬した。載荷試験により、曲げモーメントが卓越する等曲げモーメント区間

図-1 豆板部の従来補修工法の補修手順の例⁹⁾

図-2 豆板部の提案補修工法の補修手順⁹⁾

（以降、等曲げ区間という）内の補修部に、正負の荷重が繰返し作用した場合のひび割れや剥離の発生状況、補修境界面の剥離進展状況を確認した。従来補修工法を用いた試験体については、水平補修境界面の剥離進展挙動について、実験結果をもとに考察した。

2. RCはり試験体の曲げ載荷試験概要

(1) RCはり試験体の概要

a) 試験体の諸元

試験体の諸元を表-1 に、各試験体の概要を図-3 に示す。試験体は中央で対称であるため、概要図は片側半分で示した。試験体の種類は、健全な状態と補修方法による違いを確認するため、豆板の無い健全な試験体（以降、健全試験体という。）、従来補修工法による補修部を有する試験体（以降、従来補修試験体という。）、提案補修工法による補修部を有する試験体（以降、提案補修試験体という。）の3体とした。試験体の諸元は、一般的な RC ラーメン高架橋（スパン：10～15m 程度）^{16),17)}を参考に設定した。試験体の寸法は、幅 300mm×高さ 500mm×長さ 5,000mm である。断面寸法は、近年設計された RC ラーメン高架橋（付録、表-A1）の縦はりの 1/3 程度とした。主鉄筋は、D19 (SD345) を上側および下側に 4 列に 2 本ずつ束ねて配置し、せん断補強鉄筋は、D13 (SD345) を 100mm 間隔で配置した。比較的鉄筋比の高い実構造物の配筋状態を模擬した結果、試験体の主鉄筋比は、3.02% となった。なお、調査した実構造物では主鉄筋に SD390 を用いているが、載荷試験装置の能力の関係から、試験体の主鉄筋には、SD345 を用いた。

表-1 試験体の諸元

試験体名	豆板補修部	断面幅 (mm)	高さ (mm)	長さ (mm)	主鉄筋の呼び名 と本数	主鉄筋比	せん断補強鉄筋 の呼び名と間隔 (mm)	有効高さ (mm)
健全	無	300	500	5000	上側・下側 D19 2本束ね 4列	3.02%	D13－100	上側 82 下側 403
従来補修	有							
提案補修								

図-3(b), (c)に示すように、従来補修および提案補修試験体の補修部は、等曲げ区間内のはり下面のかぶり部に設定した。補修部の幅は、はりの断面幅と同じ 300mm とした。補修部の長さは、コンクリート標準示方書¹⁸⁾のひび割れ幅算定式から算定されるひび割れ間隔(341.4mm)の3倍程度である 1,000mm とした。この理由は、補修部内に2本以上のひび割れを発生させ、ひび割れの分散状況を確認するためである。また、はり側面の豆板の形状は、上底 950mm、下底 1,000mm、高さ 50mm の台形とした。図-3(c)の提案補修試験体の補修部に示した空気孔と注入孔は、樹脂注入の際に削孔した孔を示している。各孔の詳細については、(2) b)で述べる。

b) 使用材料

試験体の健全部および豆板部のベースとなるコンクリートの配合を表-2に、コンクリートの材料を表-3に、使用した骨材の粒度分布を図-4に示す。また、試験体を使用した材料の物性値を表-4に示す。表-4の従来補修および提案補修試験体の補修部の強度は、円柱供試体(直径 100mm×高さ 200mm)の強度試験の結果である。従来補修試験体の補修部には、一般的な補修材であるポリマーセメントモルタル(以降、PCMという。)を用いた。提案補修試験体の補修部には、2種類のエポキシ樹脂を用いた。使用したエポキシ樹脂¹⁹⁾の材料物性を表-5に示す。

試験体強度確認用の円柱供試体は、RCはり試験体と同時に作製した。従来補修試験体のPCM円柱供試体は、RCはり試験体補修時に用いたPCMを採取して作製した。提案補修試験体の樹脂を注入して補修した豆板円柱供試体は、はりの豆板部を作製した豆板コンクリートを、円柱の軽量鋼製型枠(モールド缶)に入れて硬化させた後、はり試験体の補修と同時に樹脂を注入して作製した⁹⁾。写真-1のような豆板を想定して作製した豆板円柱供試体の補修前のコンクリート未充填率⁹⁾(健全供試体に対する豆板供試体のコンクリート未充填部の割合)の計測値は、平均で15.1%であった。円柱供試体の例を写真-2に示す。

表-4に示す圧縮強度は、健全部のコンクリートで 26.1 ~ 33.5 N/mm²、従来補修材のPCMで 46.3 N/mm²、提案補修の樹脂注入した豆板で 38.1 N/mm²であった。補修部単体の圧縮強度は、従来補修および提案補修とも、健全部

(a) 健全試験体

(b) 従来補修試験体

(c) 提案補修試験体

図-3 各試験体の概要

のコンクリート以上の強度を示した。鉄筋は、全試験体で共通である。

c) RCはり試験体の作製手順

RCはり試験体の作製手順を表-6に示す。

補修部を有するRCはり試験体では、はじめに、豆板部を作製する。健全試験体と同じ配合(表-2)のコンクリートを15mmの網目を有するふるい機に投入し、ふるい機に振動を与えてモルタルやペーストを振るい落とす。ふるい上に残ったコンクリートを締め固めず、型枠に詰めて豆板を作製する⁹⁾。今回の豆板は、240Hzの振動周波数で30秒程度の振動を与えて作製した。豆板部の養生方法は蒸気養生とし、養生シート内(最高温度約50℃)で約15時間養生し、蒸気養生後は、気中で養生した。蒸気養生とした理由は、コンクリート打込み後、試験体を比較的早期に移動させる必要があったことから、コンクリートの初期強度発現を促進させるためである。よって、

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	石灰石 微粉末	混和剤	
										A ₁	A ₂
20	15.0±2.5	60	4.5±1.5	48.5	170	283	869	933	100	245	0.08

表-3 コンクリートの材料

材料名	品 質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16 g/cm ³ , 比表面積: 3,340 cm ² /g
細骨材	佐野市葛生産, 砕砂, 吸水率: 1.53% 表乾密度: 2.72 g/cm ³
粗骨材	佐野市葛生産, 砕石, 吸水率: 1.67% 表乾密度: 2.75 g/cm ³
石灰石 微粉末	密度: 2.71 g/cm ³ , 比表面積: 4,810 cm ² /g
混和剤	A ₁ : 高性能減水剤, A ₂ : AE剤

図-4 骨材の粒度分布

表-4 使用材料の物性値

コンクリートおよび補修材				鉄 筋		
試験体	部位	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	主鉄筋 D19(SD345)		
				降伏強度 f_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ε_y (μ)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)
健全	健全部	26.1	24.3	384	2,152	184
	補修部	—	—			
従来補修	健全部	29.7	28.9	せん断補強鉄筋 D13 (SD345)		
	補修部 ^{*1}	46.3	21.1	降伏強度 f_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ε_y (μ)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)
提案補修	健全部	33.5	32.1	361	2,407	173
	補修部 ^{*2}	38.1	22.3			

*1: ポリマーセメントモルタル(PCM), *2: 樹脂注入補修した豆板

表-5 エポキシ樹脂の物性¹⁹⁾

樹脂の種類	物性値の例
注入材 (低粘度系)	圧縮降伏強さ: 88 N/mm ² , 圧縮弾性率: 2.2 kN/mm ² , 曲げ強さ: 69.3 N/mm ² , 引張強さ: 50.8 N/mm ² , 硬化収縮率: 2%, 引張破壊伸び: 7%, 粘性: 580 mPa·s
表面シール材 (高粘度系)	(圧縮降伏強さ: 50 N/mm ² , 圧縮弾性率: 1.0 kN/mm ² , 曲げ強さ: 30 N/mm ² , 引張強さ: 20 N/mm ²) 以上, 硬化収縮率: 2%, 引張破壊伸び: 3%, スランブ性: 0 mm

(a) PCM

(b) 豆 板

(c) 樹脂注入後の豆板

写真-2 円柱供試体の例

表-6 RCはり試験体の作製手順

材 齢 (週 間)	1	2	3	4	5	6
試 験 体	健全	▼コンクリート打込み			▼試験開始	
		▼豆板作製				
	従来補修	▼コンクリート打込み			▼試験開始	
			▼豆板はつり ▲断面修復			
	提案補修	▼豆板作製			▼試験開始	
		▼コンクリート打込み	▼表面樹脂塗布 ▲樹脂注入

写真-3 補修部を有する RCはり試験体の豆板部を設置した状態

写真-4 はり下面から見た豆板部の状態

【従来補修工法】

(a1) 従来補修（豆板部のはつり後）

(a2) 従来補修（PCMを充填し、表面を均した状態）

【提案補修工法】

(b1) 提案補修（表面シール後）

(b2) 提案補修（樹脂注入）

写真-5 各補修段階の試験体の状態

図-5 従来補修工法におけるポリマーセメントモルタル（PCM）の充填方法（断面図）

図-6 提案補修工法における表面シール材の塗布範囲と注入孔および空気孔の配置

豆板部を含め、試験体はすべて蒸気養生とした。

次に、RCはり試験体の健全部を作製する。はり試験体の型枠は、はり側面が打込み面となるように組み立てている。はり試験体の下面となる型枠面に沿うように、材齢約1週間の豆板部を型枠内に設置する(写真-3)。その後、豆板部の周りに健全部のコンクリートを打ち込み、蒸気養生を行う。写真-4は、はりの下面からみた豆板部の状態である。豆板部の補修は、健全部のコンクリートの材齢約1週間後に行った。

(2) 豆板部の補修方法

a) 従来補修試験体の補修方法

従来補修試験体の補修は、下面からの補修作業とした。その理由は、実構造物の補修を踏まえ、作業のしづらに上向き作業を想定したためである。補修の段階における試験体の状態を写真-5(a1)、(a2)に示す。

はじめに、健全部が確認できるまで豆板をはつり取る。はつり作業は、従来補修工法で用いられている電動ハンマドリルや空気式高速タガネを用いて、はり下面から行った。はつり後の状況を写真-5(a1)に示す。豆板部と健全部は一体化しており、はつり面には凹凸が見られる。次に、はつり出した健全コンクリート面にプライマーを塗布し、1~2時間程度乾燥させる。その後、断面修復する箇所の片側のはり側面と下面に鋼板型枠を設置し、練り混ぜたPCMを押し付けるように充填していく。PCMの充填方法を図-5に示す。下面の型枠は3分割し、型枠を順次継ぎ足して、断面を修復する。均し面となる側面をコテで仕上げ、型枠で塞いで固定する。その後、試験体の補修部をシートで覆い、養生した。写真-5(a2)は、はり側面の均し面側を型枠で塞ぐ前の状態である。

b) 提案補修試験体の補修方法

提案補修試験体の補修は、従来補修試験体と同様、はり下面から作業を行った。補修段階における試験体の状態を写真-5(b1)、(b2)に示す。また、補修方法の詳細として、表面シール材の塗布範囲と注入孔および空気孔の配置を図-6に示す。

図-6(a)は、はりの側面を示し、表面シール材の塗布範囲と各孔の削孔長を示している。はじめに、エポキシ樹脂(低粘度系)の注入にあたり、豆板の表面からのエポキシ樹脂の漏出を防ぐため、表面シール材のエポキシ樹脂(高粘度系)を塗布する。表面シール材の塗布範囲は、豆板の範囲より50mm大きい範囲とした。表面シール材の硬化後、豆板部に直径10mm程度の注入孔と空気孔を削孔する。注入孔は補修部から健全部へ50mm程度入った位置(削孔長100mm)まで削孔した。空気孔は豆板下面から40mm程度(削孔長40mm)まで削孔した。空気孔にはポリエチレンパイプを挿入し、空気およびエポキシ樹脂が豆板の奥から排出されるようにした。

図-6(b)は、はりの下面から見た状態を示し、注入孔と空気孔の配置を示している。注入孔は20ヶ所、空気孔は10ヶ所設けた。図中に赤い破線で示したように、注入孔の中心から半径100mmの円の範囲を注入孔1ヶ所あたりの注入範囲とし、注入範囲が重なるように注入孔を配置した。空気孔は、近接する注入孔からできるだけ間隔を空けた位置に配置した。各孔は鉄筋を避けた位置に配置した。

エポキシ樹脂の注入は、自動低圧樹脂注入工法²⁰⁾のうち、輪ゴムの復元力を利用する注入器²¹⁾を用いる工法により、一定の圧力(0.1MPa程度)で行った。表面シール後の状態を写真-5(b1)に、樹脂注入の状況を写真-5(b2)に示す。

ここで、豆板部の寸法とコンクリート未充填率15%(同時に作製した円柱供試体より算出)、および注入孔、空気孔の容積から、豆板の空隙を埋めるのに必要な樹脂量(約2,555g)を算出した上で、実際に注入した樹脂量(約2,433g)から樹脂注入率を算出した。その結果、樹脂注入率は約95%となり、空隙はほぼ100%充填されたことを確認した。

各試験体は、試験まで気中で養生した。従来補修試験体は補修から約3週間後に、提案補修試験体は注入補修から約2週間後に試験を開始した。健全試験体は、材齢約4週間後に試験を開始した(表-6)。

(3) 載荷方法

載荷点の位置を図-3に示す。載荷点は、支点内側の2点 P_1 と支点外側の2点 P_2 である。載荷点 P_1 、 P_2 は、支点を挟んで、支点からそれぞれ650mm位置の等間隔となっている。支点内側の2点 P_1 と外側の2点 P_2 に交互に載荷することにより、支点間に正負の曲げモーメントが作用するようにした。また、補修部(長さ1,000mm)が等曲げ区間内に位置するように載荷点 P_1 間距離を1,200mmとした。載荷は、1本あたり500kNまで載荷可能であるアクチュエータを4本用いて行った。

ここでは、支点間に作用する曲げモーメントが、はりの下側が引張側となる曲げモーメントを正の曲げモーメントとし、正の曲げモーメントを発生させる荷重 P_1 を正荷重とした。これに対し、はりの上側が引張側となる曲げモーメントを負の曲げモーメントとし、負の曲げモーメントを発生させる荷重 P_2 を負荷重とした。載荷荷重は、引張側となる鉄筋の応力度が目標とする応力度に達する荷重までとした。載荷試験では、別途行った鉄筋単体の引張試験(表-4)に基づき、目標とする応力度に対応する鉄筋のひずみの値を目安に載荷した。載荷は、使用限界状態(以降、使用状態という。)応力レベルでの繰返し載荷を対象とし、5ステップで段階的に行った。本研究の載荷は、使用状態での繰返し載荷後に段階的に載荷

表-7 載荷ステップ

載荷ステップ	1	2	3	4	5
通算載荷回数 (回)	1~2	3~1,001	1,002~7,151	7,152~自動停止	最終
静的載荷 ^{*1} 実施回	1, 2	3, 31, (70, 200, 400, 600) ^{*2} , 1,001	7,151	100,001, 200,001	最終
最大載荷荷重時の引張鉄筋ひずみの目安	0.6 ϵ_y 程度 (1,290 μ 程度)	0.9 ϵ_y 程度 (1,950 μ 程度)	ϵ_y 程度 (2,150 μ 程度)	載荷ステップ1の荷重と同程度	剥落確認
載荷荷重	2P ₁	600kN	830kN	780kN	630kN
	2P ₂	-600kN	-850kN	-720kN	-630kN
動的載荷速度	—	664~680kN/s	576~624kN/s	504kN/s	—

 ϵ_y : 鉄筋の降伏ひずみ

*1: 静的載荷速度: 0.6-0.8kN/s

*2: ()は、従来補修試験体のみ実施

荷重を増加させた既往の研究^{22)~25)}を参考に実施した。載荷ステップは、最初に実施した従来補修試験体の載荷試験で確定し、他の2つの試験体はこれに準じて行った。載荷ステップを表-7に示す。載荷ステップ2以降は、静的載荷により目標とする鉄筋ひずみに達した荷重を把握して載荷荷重を設定し、動的載荷を行った。なお、各載荷ステップの詳細については、次項a)~c)で述べる。

a) 載荷ステップ1

表-7の載荷ステップ1は、補修部における曲げひび割れの発生状況を確認する目的で実施した。載荷は、図-3の載荷点P₁の2点集中載荷により、正の曲げモーメントが作用する状態から開始した。載荷ステップ1の載荷荷重は、実構造物の使用状態における主鉄筋の発生応力レベル程度とした。この理由は、使用状態応力レベルでの、ひび割れの発生状況を把握するためである。実構造物の使用状態の応力については、近年設計されたRCラーメン高架橋の縦ばりの応力度を調査して設定した。その結果、調査したRCラーメン高架橋(付録、表-A1)の縦ばりのハンチ支点上側またはスパン中央の鉄筋に発生する応力度は、12~217N/mm²であり、鉄筋の規格降伏強度の0.03~0.56倍程度であった。そこで、一番厳しい応力状態を踏まえ、鉄筋降伏強度の0.6倍を使用状態の応力度の目標値とした。載荷にあたっては、表-4の鉄筋の物性値より、目標とする応力度に達する引張側の鉄筋ひずみの値を0.6 ϵ_y (1,290 μ)程度とし、そのひずみに達した荷重を載荷荷重とした。また、荷重を増加させても新たなひび割れが発生しない状態(定常状態)²⁶⁾になることも載荷の目安とした。載荷は、ひび割れの発生荷重を把握するため、全荷重20kN(アクチュエータ1本あたり10kN)ずつとし、各荷重段階でひび割れ発生の有無を目視観察した。載荷速度は、0.6~0.8kN/sである。載荷は、P₁に載荷して除荷後、P₂に載荷して除荷するまでを1サイクルとした。ひび割れの発生状況を再確認するため、載荷は2回繰返した。

b) 載荷ステップ2,3,4

表-7の載荷ステップ2~4は、正負の曲げモーメントが繰返し作用することによる、補修部のひび割れおよび補

修境界面の剥離の進展状況を確認するために実施した。繰返し載荷時は、載荷点の移動を防ぐため、静的載荷時以外は各載荷荷重の最小荷重を20kNとした。載荷速度は、1サイクル504~680kN/sとした。

載荷ステップ2の載荷時の目安となる鉄筋のひずみの値は、0.9 ϵ_y (1,950 μ)程度とした。この理由は、載荷ステップ1の使用状態よりも高い応力状態とし、試験体が大きく損傷しない程度で疲労状態を促進させるためである。

載荷ステップ3は、鉄筋のひずみが ϵ_y (2,150 μ)程度となるまで荷重を低減した段階である。載荷ステップ2において、損傷が蓄積し、鉄筋のひずみの計測値が降伏ひずみに近接してきたことを確認したため、損傷が急激に進まないようにするために荷重を低減した。

載荷ステップ4は、鉄筋のひずみが降伏ひずみに達していたため、載荷ステップ1と同程度の荷重(630kN)まで低減した段階である。繰返し載荷は、載荷ステップ4の載荷荷重設定時の試験体の載荷点位置での変位が、正負の最大値から15mm以上増加した時点で自動停止するように設定した。

載荷ステップ2~4では、繰返し載荷における剛性の変化を確認するため、載荷速度0.6~0.8kN/s程度で静的載荷を行った。静的載荷は、通算載荷回数3, 31, 70, 200, 400, 600, 1,001, 7,151, 100,001, 200,001回時に実施した。ただし、70, 200, 400, 600回時は、従来補修試験体のみ実施した。

c) 載荷ステップ5

表-7の載荷ステップ5は、載荷ステップ4終了後に、正荷重載荷で補修部が剥落するか確認したものである。載荷は、静的載荷とし、載荷荷重は1,000kN(アクチュエータの載荷可能荷重)まで行った。

(4) 計測概要

試験時の主な計測項目は、荷重、中央変位、鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみ、曲げひび割れ幅、補修境界面の剥離幅またはひずみである。なお、中央変位は試験体下面中央で計測したが、載荷ステップ5(補修部の

剥落確認)時は、試験体中央のはり側面にも変位計を追加して計測を行った。

a) 鉄筋およびコンクリートのひずみ

鉄筋とコンクリートのひずみは、ひずみゲージにより計測した。等曲げ区間における、鉄筋とコンクリートのひずみゲージ位置を図-7に示す。ここでは、試験体の軸方向の位置を試験体の中央から左側を北、右側を南、側面を東、西として表示する。鉄筋のひずみゲージは、上側鉄筋は試験体中央位置、下側鉄筋は試験体中央と荷重点位置に、鉄筋の両側面に貼り付けた。コンクリートのひずみゲージは、試験体上面の中央および中央から南北へそれぞれ500mmの位置に貼り付けた。

b) 曲げひび割れ幅および補修境界面の剥離幅

曲げひび割れ幅および補修境界面の剥離幅の計測にはパイ型変位計(測定基準長100mm, 感度約2,000 μ /mm)を用いた。パイ型変位計の設置位置を図-7に示す。変位計は、はり側面(下側鉄筋位置)およびはり下面(断面中央位置)に北500から南500の位置まで、100mm間隔でそれぞれ11ヶ所に配置した。試験時は、等曲げ区間内のはり側面およびはり下面の曲げひび割れの発生位置および本数を目視観察し、各ひび割れ幅および補修境界面の剥離幅を計測した。

c) 補修境界面のひずみ

補修境界面の剥離状況を把握するため、補修境界面位置にコンクリートひずみゲージを貼った。ここでは、はりの下面に対し、平行方向に位置する補修境界面を水平補修境界面、はりの下面に対して鉛直方向に位置する補修境界面を鉛直補修境界面という。今回の試験体では、補修部が台形となっているため、鉛直補修境界面は約63°の角度を有している。

水平補修境界面のひずみ計測位置を図-8に示す。図-8は、はり側面を示している。ひずみゲージは、中央と中央からそれぞれ南北に450mmの位置の3ヶ所に、はりの両側面(東、西)に鉛直に貼り付けた。なお、比較のため、健全試験体についても、同じ位置にコンクリートひずみゲージを貼り付けてひずみを計測した。

また、従来補修試験体については、荷重ステップ2の途中(通算荷重回数70回時)で、はり側面(東側)の水平補修境界面のひずみゲージと並列にパイ型変位計を設置し、水平補修境界面の剥離挙動を計測した。

3. ひび割れおよび剥離発生(荷重ステップ1)

静的荷重1回目の使用状態応力レベルでの、ひび割れおよび剥離発生状況の比較を行うため、荷重ステップ1の P_1 点荷重(正の曲げモーメント作用)時の結果を以下に示す。荷重は、全荷重600kNまで行った。

図-7 各ひずみゲージおよびパイ型変位計の位置
(水平補修境界面の計測位置は除く)

図-8 水平補修境界面のひずみ計測位置

(1) 荷重と試験体中央の変位

荷重と試験体中央の変位の関係を図-9に示す。中央変位の計測は糸式変位計(精度0.2mm)を用いたため、グラフは階段状の結果を示している。

いずれの試験体も、600kNでひび割れは概ね定常状態となった。また、いずれの試験体も100~250kNでグラフの傾きが変化した。曲げひび割れが入ったことにより剛性が低下したことを示している。試験体は3体とも600kNまではほぼ同じ挙動を示し、変位には大きな差はみられなかった。

(2) 曲げひび割れ

a) 曲げひび割れの発生状況

各試験体の等曲げ区間付近における、はり側面のひび割れ発生状況を図-10に示す。ひび割れ図は、パイ型変位計を設置した面側を示している。各図のはり下側に示した破線は、下側鉄筋の位置である。ひび割れについては、図中の凡例に示すように、各荷重段階別に、発生したひび割れを色分けして示した。はり側面に記載している数値は、当該ひび割れの目視によるひび割れ発生荷重である。

また、はり下面に取り付けたパイ型変位計の変位(ひび割れ幅)の変化も合わせて確認した。各試験体の荷重とはり下面のパイ型変位計によるひび割れ幅の計測結果を図-11に示す。図中の凡例に示したパイ型変位計の位

置は、図-7 に示した、はり下面のパイ型変位計の位置である。

図-10 (a)および図-11 (a)に、健全試験体の結果を示す。120kNで等曲げ区間内に最初の曲げひび割れが目視で観察されたが、ひび割れ発生位置（はり下面中央）におけるパイ型変位計の計測結果は、115kN程度で値が急増している。その後、荷重の増加とともにひび割れが拡大し、ひび割れ本数も増加した。

図-10 (b) および図-11(b)に、従来補修試験体の結果を示す。載荷前の目視観察により、補修中央部および補修端部の鉛直補修境界面の3ヶ所に微細なひび割れが確認された（図中の赤破線部で、下面のパイ型変位計では、北500, 北100, 南500の位置である）。この3ヶ所のひび割れ発生荷重は0kNと表記している。これらの微細なひび割れは、既往の研究^{27)~29)}にも示されているように、PCMの硬化収縮による引張力により発生したものと考えられる。しかし、はりの初期剛性に影響を与えるようなひび割れではなかった。

載荷による構造的なひび割れの発生は、200kN時のパイ型変位計（北300位置）の計測値の急増から確認でき、目視で確認された200kNのひび割れと対応する。このひび割れは、載荷前から確認されたひび割れとは独立して発生した。この変位計の計測値は、220kN付近で再び急増している。補修部に発生したひび割れの進展が水平補修境界面で一旦停止し、その後の荷重増加によって健全部に進展したためである。さらに荷重を増加させると、健全部のひび割れが分散して進展するとともに、補修部では離散化したひび割れのひび割れ幅が拡大した。

図-10 (c) および図-11 (c)に、提案補修試験体の結果を示す。160kN で等曲げ区間外に最初のひび割れが発生した。280kN を超えて補修部より上の健全部にひび割れが観察された。その後、補修部のパイ型変位計の計測値は、いずれも増加した。これは補修内部でのひび割れの分散と表面シーラ材の樹脂の伸び（引張破壊伸び率：3%程度、表-5）によるものと思われる。さらに荷重が増加していくと、健全部のひび割れが拡大し、本数も増加した。460kN 程度で初めて、補修部の上側に2本のひび割れが目視で確認された。図-11 (c)では、北100, 北200および南100, 南200位置付近である。この2本のひび割れは健全部からはり下縁側に進展したひび割れであり、この時点でも、補修部下面から発生するひび割れは確認されなかった。なお、図-11 (c)のはり下面の北500 および南500 位置のパイ型変位計の計測値は、350kN および380kN 付近でひび割れ幅が急増しているが、これらは図-10(c)の補修部の外側の健全コンクリートにひび割れが発生したためであり、補修境界面の剥離ではなかった。補修部におけるはり下面のひび割れは、600kN 時も確認されなかった。

図-9 荷重と中央変位の関係

b) ひび割れ間隔と本数

図-10 の各試験体の下側には、かぶり部に発生したひび割れの間隔を、括弧内の数値として示した。健全試験体のひび割れ間隔は 98~263mm, 従来補修試験体のひび割れ間隔は 224~306mm, 提案補修試験体のひび割れ間隔は 295~380mm となった。

また、各荷重段階における等曲げ区間内のはり側面および下面の曲げひび割れ発生本数をまとめた結果を表-8 に示す。従来補修および提案補修試験体は、健全部である側面（鉄筋位置）のひび割れ本数に対し、側面（かぶり位置）である補修部のひび割れ本数は少なく、補修部のひび割れは集中した。

c) ひび割れ幅

はり側面（下側鉄筋位置）で計測したひび割れ幅の平均値と最大最小値の範囲を図-12(a)に、はり下面で計測したひび割れ幅の平均値と最大最小値の範囲を図-12 (b) に示す。はり側面（下側鉄筋位置）の計測位置は、3 体とも健全部に位置する。

図-12 (a), (b)に示すように、健全試験体と従来補修試験体のひび割れ幅の増加傾向は類似している。図-12 (b) の従来補修試験体のはり下面のひび割れの各値は、健全試験体より大きい値を示している。これは、従来補修の下面のひび割れが集中したためであると考えられる。

一方、提案補修試験体のはり側面のひび割れ幅は、図-12 (a)に示すように、健全および従来補修試験体に比べて、平均および最大の値が小さい。これは、図-12 (b)に示すように、下面のひび割れが発生しなかったため、補修部の上に位置する健全部のひび割れも大きく開かず、小さい値を示したものと考えられる。

(3) 水平補修境界面のひずみ

各試験体の荷重と水平補修境界面位置のひずみの関係を図-13 に示す。各ひずみゲージの位置は、図-8 に示したとおりである。ここでは、東側の計測結果を示す。

図-13(a)の健全試験体および図-13(c)の提案補修試験体

(a) 健全試験体のひび割れ発生状況

(a) 健全試験体の下面の位置ごとのひび割れ幅

(b) 従来補修試験体のひび割れ発生状況

(b) 従来補修試験体の補修部下面の位置ごとのひび割れ幅

(c) 提案補修試験体のひび割れ発生状況

(c) 提案補修試験体の補修部下面の位置ごとのひび割れ幅

図-10 等曲げ区間付近におけるはり側面のひび割れ発生状況

図-11 各試験体の荷重とはり下面のパイ型変位計によるひび割れ幅の計測結果

表-8 各荷重段階における等曲げ区間内のはり下面および側面（かぶり位置，鉄筋位置）の曲げひび割れ発生本数

荷重 位置 試験体	200kN			400kN			600kN		
	はり 下面	側面 (かぶり位置 ^{*)})	側面 (鉄筋位置)	はり 下面	側面 (かぶり位置 ^{*)})	側面 (鉄筋位置)	はり 下面	側面 (かぶり位置 ^{*)})	側面 (鉄筋位置)
健全	4	4	4	7	7	7	8	8	10
従来補修	3	3	3	4	4	6	5	5	8
提案補修	0	0	0	0	0	4	0 ²⁾	2	8

*1: はり下面から 50mm までの範囲

*2: 載荷 2 サイクル目では，ひび割れが確認された

図-12 各荷重段階時のはり側面および下面のひびわれ幅

図-13 各試験体の荷重と水平補修境界面位置のひずみ関係（東側）

は、最大荷重 600kN 時の引張ひずみは最大で 20 μ 程度である。一方、図-13 (b) の従来補修試験体は、特に東南と東中央位置でひずみが伸びており、600kN 時には最大 4,300 μ 程度引張ひずみが発生している。

これらより、提案補修試験体の水平補修境界面位置は、健全試験体に近い挙動を示すことを確認した。また、従来補修試験体の水平補修境界面には剥離が生じ、提案補修試験体の水平補修境界面には剥離が生じていないことを目視確認したが、これらは、図-13 の結果にも表れていた。

ここで、従来補修試験体で生じた水平補修境界面の剥離発生メカニズムについて考察する。荷重の増加に伴い、はり下面から発生した曲げひび割れや鉛直補修境界面の剥離が補修部上側の水平補修境界面位置まで達すると、補修部が応力解放されて縮むため、健全部とひび割れた補修部の水平補修境界面にはせん断応力が働く。同時に、はりのたわみの増加に伴い、引張応力が水平補修境界面に生じる。このような引張応力とせん断応力が作用する状態は、既往の研究^{27,30)~34)}におけるコンクリートに PCM を打ち継いだ場合の境界面に発生する引張応力とせん断応力の状態と類似しており、これらの応力に対し、補修境界面の付着強度で抵抗できなくなった時点で水平補修境界面の剥離が発生したと考えられる。

4. 正負繰返し载荷によるひび割れおよび剥離の進展挙動（载荷ステップ2~4）

正負の曲げモーメントが繰返し作用した場合のひび割れおよび剥離の進展挙動について、繰返し载荷後の各静的载荷時の結果を用いて考察する。

(1) 正負繰返し载荷回数と载荷後の状況

正負繰返し载荷（载荷ステップ 4）終了までの通算载荷回数の結果を表-9 に示す。健全および従来補修試験体の通算载荷回数はほぼ同程度であったのに対して、提案補修試験体は約 1.6 倍の回数であった。いずれの試験体も、負の曲げモーメント作用（ P_2 点载荷）時に载荷は自動停止した。自動停止した主要因は、繰返し载荷に伴う上側鉄筋ひずみの増大であると考えられる。鉄筋ひずみの変化については、以降で説明する。

载荷ステップ 4 の自動停止後に荷重を 0kN まで戻した後の試験体の状況を写真-6 に示す。各試験体のはり中央部とかぶり部（中央部の破線枠内の拡大）である。また、大きく損傷していた箇所を実線で囲んで示した。

写真-6 (a1) の健全試験体は、南側（写真右側）の载荷点 P_1 付近のはり上部のコンクリートのひび割れが大きく開いた状態で载荷が停止した。写真と反対側の上部コンクリートの一部は、ひび割れ間で浮いていた。下側の鉄筋位置の上下に水平ひび割れが発生していた（写真-6

(a2)) .

写真-6 (b1)の従来補修試験体は、はり中央上部のコンクリートのひび割れが大きく開いた状態で荷重が停止した。健全試験体同様、上部コンクリートは浮いていた。スパン中央の水平補修境界面には4mm程度の隙間が生じていた(写真-6 (b2))。水平補修境界面は、ほぼ全域に渡って隙間が生じていたが、補修部は剥落していなかった。

写真-6(c1)の提案補修試験体は、北側(写真左側)の荷重点P₁付近のはり上部のコンクリートのひび割れが大きく開いた状態で荷重が停止した。上部コンクリートの浮きは無く、下側鉄筋位置の上側の健全部に水平にひび割れが発生していたが、従来補修試験体のような補修境界面での剥離は生じていなかった(写真-6(c2))。

(2) 試験体中央の変位の変化

各繰返し荷重後の静的荷重時における、各試験体の荷重と中央変位の関係を図-14に示す。図-14は、通算荷重回数1, 3, 7,151, 200,001回時の結果を示した。正の曲げモーメント作用時が正荷重、負の曲げモーメント作用時が負荷重である。

各試験体の200,001回時の正負の曲げモーメント作用時の最大変位は、健全試験体は、正6.5mm, 負3.0mm, 従来補修試験体は、正6.8mm, 負2.7mm, 提案補修試験体は、正6.1mm, 負2.6mmであった。荷重や荷重回数の増加に伴う変位の変化は、健全および従来補修試験体に対して、提案補修試験体は若干小さい傾向を示した。

(3) 鉄筋のひずみの変化

各繰返し荷重後の静的荷重時における、引張側となる鉄筋(上側, 下側の試験体中央位置)のひずみを図-15に示す。図-15 (a)は上側中央鉄筋, 図-15 (b)は下側中央鉄筋のひずみである。なお、正負の荷重は、使用状態の荷重である、各静的荷重600kN時のひずみの値を示した。

図-15(a)の上側鉄筋のひずみは、荷重回数1,001回目まで試験体ごとの差が生じた。その後、健全と従来補修試験体はおおよそ同等の値を示し、7,151回時には降伏ひずみを超え、100,001回時には鉄筋のひずみは計測できない状態であった。

一方、提案補修試験体の上側鉄筋は、200,001回時点でも降伏ひずみに達していなかった。健全や従来補修試験体のような降伏が生じなかったことは、圧縮側となる上部コンクリートの繰返し荷重による損傷が、他の試験体に比べて小さかったことが原因であると考えられる。提案補修試験体は、正の荷重作用時に引張側となる補修部が引張応力の一部を負担することで、上部コンクリートに作用する圧縮応力が小さくなったと考える。このため、上部コンクリートの損傷が抑えられることにより、

表-9 荷重ステップ4までの通算荷重回数

試験体名	通算荷重回数 (回)
健全	214,980
従来補修	230,837
提案補修	352,927

負荷重作用時の上側鉄筋の引張応力も小さくなり、繰返し荷重による上側鉄筋の引張応力の増加につながらなかったものと考えられる。

コンクリート上縁のひずみは測定できていないが、提案補修試験体の上部コンクリートの圧縮応力が小さいことは、破壊時の提案補修試験体の上部コンクリートの損傷が小さかった(浮きが生じていなかった(写真-6))ことから推察できる。また、提案補修した補修部の引張強度が高いことは、既往の研究¹⁵⁾に示したように、豆板に樹脂注入補修した試験体の一軸引張試験において、鉄筋の降伏強度を超える荷重を与えても、試験体の表面にはひび割れが発生しなかったことから推定される。

図-15 (b)の下側鉄筋のひずみは、上側鉄筋ほどの試験体による差は見られなかった。健全および従来補修は100,001回時、提案補修試験体は200,001回時の鉄筋のひずみは計測できない状態となった。

(4) ひび割れ本数およびひび割れ幅の変化

各繰返し荷重後の静的荷重時の等曲げ区間におけるひび割れ本数およびひび割れ幅の変化について、図-16に示す。パイ型変位計が設置されている範囲内の正の荷重(600kN)作用時の結果のみを示した。

はり側面および下面のひび割れ本数の変化を図-16 (a)に示す。側面の本数は、いずれの試験体もほぼ一定の本数で変わらなかった。健全および従来補修試験体の下面のひび割れ本数は、荷重初期に発生した本数と荷重終了時の本数に変化はなかったが、提案補修試験体は、作用曲げモーメントの増加時である3回目と荷重回数1,001回時に本数が増加していた。3. (2) a)で述べたが、提案補修試験体は、表面シーリング材の樹脂が伸びることで、はり下面のひび割れ発生荷重が大きくなったものと考えられる。

はり側面(下側鉄筋位置)のひび割れ幅の最大値と平均値の変化を図-16 (b)に、はり下面のひび割れ幅の最大値と平均値の変化を図-16(c)示す。

図-16 (b)に示すように、はり側面のひび割れ幅の平均値は試験体による差は無いが、最大値は健全試験体が大きい値を示した。

図-16 (c)に示すように、はり下面のひび割れ幅は、最大および平均値とも、健全試験体と従来補修試験体はほぼ

写真-6 荷重ステップ4終了時 (自動停止後に荷重を0kNまで戻した後) の各試験体の状況

図-14 各荷重回数時の荷重と中央変位の関係

同等で、提案補修試験体は、最大および平均値とも、他の試験体の半分程度の値を示した。1,001 回目に平均値が下がったが、これは、図-16 (a)のはり下面のひび割れ本数が増え、ひび割れが分散したためである。

提案補修試験体は、健全試験体に比べ、ひび割れ本数が少ないにも関わらず、側面および下面のひび割れ幅は、他の試験体と比較して、同等または小さい値を示した。

(5) 従来補修試験体の水平補修境界面の剥離進展状況

従来補修試験体について、繰返し荷重による水平補修境界面の剥離進展状況について検討を行う。提案補修試験体については、繰返し荷重後も水平補修境界面での剥離は確認されなかったため、ここでは議論しない。

水平補修境界面の各計測位置における剥離幅の変化を図-17 に示す。縦軸には荷重、横軸には水平補修境界面の剥離幅を示した。剥離幅は、通算荷重回数 70 回時に追加したパイ型変位計で計測した値である。ここでは、

補修中央部（東中央）と補修端部（東南）の載荷回数 70, 200, 400, 600, 1,001, 7,151, 200,001 回時の計測結果を示す。

図-17 (a)は、補修中央部の水平補修境界面の剥離幅の変化である。補修境界面は、正の荷重時には開き、負の荷重載荷時は閉じる挙動を繰返しながら、徐々に拡大し、1,000回以降はほぼ一定の値となった。

図-17 (b)は、補修端部の水平補修境界面の剥離幅の変化である。補修境界面は、正負いずれの荷重載荷時にも開く挙動を繰返しながら、徐々に拡大し、1,000回以降はほぼ一定の値となった。

補修中央部および補修端部とも、載荷回数の増加により、水平補修境界面の剥離幅は拡大したが、1,000回以降、剥離幅はほぼ一定となった。これは、1,000回以降は載荷荷重を下げたことにより、剥離の進行も鈍くなったものと考えられる。

ここで、水平補修境界面に達した、はり下面からのひび割れおよび鉛直補修境界面の挙動についても確認することとした。はり下面のひび割れ幅および鉛直補修境界面の剥離幅の変化を図-18に示す。繰返し回数 1, 70, 1,001, 200,001 回時の結果を示した。

図-18 (a)は補修中央部の下面のひび割れ、図-18 (b)は補修端部の鉛直補修境界面のパイ型変位計の計測結果である。いずれの位置も正荷重作用時は開き、負荷重作用時は閉じる挙動を示した。また、いずれの位置も、1,000回以降大きな変化はない。これは、水平補修境界面の剥離の進行が鈍くなった段階と一致している。

(6) 従来補修試験体の水平補修境界面の剥離進展メカニズム

図-17に示したように、補修中央部と補修端部では、正負の荷重作用時に水平補修境界面の剥離は異なる挙動を示した。そこで、補修部の位置による水平補修境界面の剥離進展メカニズムについて、概念図をもとに考察を行った。メカニズムについては、剥離の進展が見られた繰返し回数 1,000 回程度までの状態で検討した。水平補修境界面の剥離進展メカニズムの概念図を図-19に示す。

図-19 (a)は補修中央部、図-19 (b)は補修端部の各荷重作用時の状態を示す。各図は、補修部を含むはりの側面下部を示しており、上側が健全部で下側が補修部である。

a) 正荷重作用時

補修中央部の状態を図-19 (a1)に、補修端部の状態を図-19 (b1)に示す。正の曲げモーメントにより、はり下縁側に引張応力が作用するため、下面のひび割れおよび鉛直補修境界面は開く。水平補修境界面には、

(a) 上側鉄筋 D19 中央

(b) 下側鉄筋 D19 中央

図-15 各静的載荷 (600kN) 時のひずみ

(a) はり側面および下面のひび割れ本数

(b) はり側面 (下側鉄筋位置) のひび割れ幅の最大値と平均値

(c) はり下面のひび割れ幅の最大値と平均値

図-16 各静的載荷時のひび割れ本数とひび割れ幅の変化

(a) 補修中央部（東中央）の水平補修境界面の剥離幅

(b) 補修端部（東南）の水平補修境界面の剥離幅

図-17 水平補修境界面の各計測位置における剥離幅の変化

(a) 補修中央部 下面のひび割れ幅

(b) 補修端部 下面（鉛直補修境界面）の剥離幅

図-18 はり下面のひび割れ幅または鉛直補修境界面の剥離幅の変化

(a1) 補修中央部（正荷重用時）

(b1) 補修端部（正荷重用時）

(a2) 補修中央部（荷重除荷時）

(b2) 補修端部（荷重除荷時）

(a3) 補修中央部（負荷重用時）

(b3) 補修端部（負荷重用時）

図-19 水平補修境界面の剥離進展メカニズムの概念図

3. (3)で述べたような引張応力とせん断応力が作用し、水平補修境界面は開く。この挙動が繰り返されることにより、剥離区間および剥離幅は拡大していったものと考えられる。

b) 荷重除荷時

補修中央部の状態を図-19 (a2) に、補修端部の状態を図-19 (b2)に示す。荷重除荷時は、各作用力が無くなり、開いていたひび割れや水平補修境界面は閉じる。しかし、繰返し載荷回数が増加とともに、水平補修境界面は完全には閉じなくなる。これは、豆板をはつり取ったコンクリートと PCM との補修境界面（剥離面）の凹凸の影響であると考えられる。正荷重作用時に開いた剥離面が閉じる際、剥離面の凹凸のかみ合わせがずれることにより、補修境界面は完全には閉じなくなる。この挙動が繰り返されることにより、残留剥離幅も拡大していったものと考えられる。

c) 負荷重作用時

補修中央部の状態を図-19 (a3) に、補修端部の状態を図-19 (b3)に示す。負の曲げモーメントにより、はり下面には圧縮応力が作用し、ひび割れおよび補修境界面は閉じる。しかし、補修端部の水平補修境界面のみ、開く挙動を示した（図-17 (b)）。これは、鉛直補修境界面は角度（約 63° ）を有しているため、補修端部に圧縮応力が作用すると、補修部が下に滑り出そうとする力と、鉛直補修境界面に垂直に作用する力に分解される。これらの力の作用により、補修端部は下側へ押し出されることがとなり、鉛直補修境界面にはずれが生じる。この鉛直補修境界面がずれることにより、水平補修境界面は開く挙動を示したと考えられる。補修部が下に押し出されている状況について、写真-7 に示す。写真-7 は、繰返し載荷回数 約 1,000 回時の負荷重載荷時に、はり下面から鉛直補修境界面を撮影したものである。補修部が下側にずれていることが確認できる。繰返し載荷による水平補修境界面の剥離幅の拡大に伴い、補修部も下に押し出されやすくなり、負荷重作用時の水平補修境界面の剥離幅も拡大していったものと考えられる。

5. 補修部の剥落

載荷ステップ5では、補修部の剥落について確認した。正荷重載荷における荷重と中央変位の関係を図-20に示す。図-20に示す中央変位は、試験体中央のはり側面の変位を示したものである。従来補修試験体については、剥落が生じたことから、はり下面の変位も合わせて示した。健全試験体のかぶり部および提案補修試験体の補修部には剥離が発生しなかったため、はり下面の変位と図-20に示したはり側面の変位の挙動に差は生じなかった。

写真-7 補修部が押し出されている状況（従来補修試験体）

図-20 各試験体の荷重と中央変位の関係

写真-8 補修部の剥落の様子（従来補修試験体）

従来補修試験体では、補修部の剥離によって、はりの側面と下面で大きく異なる変位が記録された。はり側面の変位は他の試験体と同様な挙動を示したが、はり下面においては、荷重の増加とともに剥離した補修部が徐々に下に垂れ下がっていく状態となり、変位は増加し、約 880kN で補修部が剥落した（図中のx印）。

補修部の剥落の様子を写真-8に示す。補修部は、北側（写真左側）の鉛直補修境界面から約10cmの範囲を残し、ほぼ全域が剥落した。補修部の剥落は、補修部の下縁から発生した曲げひび割れと補修境界面（鉛直および水平）の剥離により、補修部がブロック状に分割されたことにより生じたものと考えられる。

載荷ステップ4までの繰返し載荷時は、ブロック化さ

れた補修部の端部が互いに接触した状態となり、剥落しなかったが、載荷ステップ5では、より大きな変位を作用させたことで、補修部端部の接触部分が小さくなり、剥落に至ったものと考えられる。

なお、3つの試験体の曲げ降伏荷重算定値は947～979kNであり、実験値とほぼ一致した。

また、剥落後の補修境界面（剥離面）の状態について、写真-9に示す。写真-9(a)は補修中央部、写真-9(b)は補修端部の剥離面の状態である。水平および鉛直補修境界面のいずれの剥離面もはつり面の凹凸が確認できる。

(a) 補修中央部

(b) 補修端部

写真-9 補修部剥落後の水平および鉛直補修境界面（剥離面）の状態

6. まとめ

RCラーメン高架橋の縦ばりを想定し、はり下面のかぶり部に豆板を補修した箇所を有するRCはり試験体を用いて、正負の荷重が繰返し作用する曲げ載荷試験を行った。曲げモーメントが卓越する等曲げモーメント区間内の豆板補修部において、曲げひび割れや補修境界面の剥離の発生、および正負の荷重が繰返し作用する場合の水平補修境界面の剥離進展挙動について分析した。また、提案補修工法の適用性の検討を行った。

今回の試験の範囲内で確認したことを、以下に述べる。

(1) 従来補修試験体の水平補修境界面の剥離進展挙動

以下に示すように、従来補修工法は、荷重の小さい段階から水平補修境界面での剥離が発生し、正負の繰返し載荷により剥離が拡大し、剥落することを確認した。

a) 使用限界状態応力レベルでの静的載荷試験

- ・豆板をはつり取り、ポリマーセメントモルタル(PCM)で断面修復した従来補修試験体は、PCMの硬化収縮により、載荷前から補修中央部にはひび割れが、補修端部の鉛直補修境界面には剥離が発生していた。
- ・曲げひび割れが水平補修境界面に達すると、水平補修境界面には引張応力とせん断応力が働き、水平補修境界面で剥離が生じた。

b) 正負の荷重が繰返し作用する載荷試験

- ・繰返し載荷により、補修境界面の剥離は、正の曲げモーメント作用時は開き、負の曲げモーメント作用時は、補修端部の水平補修境界面のみ開く挙動を示した。いずれの位置においても、正負の繰返し作用は、水平補修境界面の剥離を進展させ、剥離幅を拡大させる要因となることが示された。

c) 補修部の剥落確認試験

載荷荷重を上げ、はりの変形を大きくすると、従来補修試験体の補修部は剥落した。

(2) 提案補修試験体の構造性能

以下に示すように、提案補修工法は健全なコンクリートと同等以上の部材性能を有し、有効な豆板補修工法であることを確認した。なお、本論文では力学的な性能の検証を行ったが、今後は、耐久性に関する検証も必要であると考えられる。

a) 使用限界状態応力レベルでの静的載荷試験

- ・豆板をはつり取らずに、樹脂を注入して補修した提案補修試験体は、健全試験体に比べ、等曲げ区間における曲げひび割れ発生荷重は大きく、はり下面および側面（鉄筋位置）のひび割れ幅は、健全試験体と同等または小さくなった。曲げひび割れは、健全部、補修部の順に発生したが、補修した豆板部の引張強度が高いことが示された。

b) 正負の荷重が繰返し作用する載荷試験

- ・水平補修境界面位置は、健全試験体に近い挙動を示し、試験終了時まで補修境界面位置の剥離は生じなかった。
- ・繰返し載荷による鉄筋のひずみは、降伏ひずみに至るまでの回数が多くなり、通算載荷回数は健全試験体の1.6倍となり、ひび割れ発生状況等から、豆板を補修した箇所を有する影響はほとんどなく、健全試験体と同等以上の耐疲労性を有した。

c) 補修部の剥落確認試験

提案補修工法で補修した箇所は、さらに変形を与えて

も、豆板補修部の剥離や剥落は生じなかった。

今回の試験体は、実構造物に発生する豆板の範囲を考慮して設定したが、限定された諸元である。よって、豆板の程度や、豆板補修部の寸法や配置の違いなどについても、今後、検討していくことが課題であると考える。

付録

試験体の諸元および載荷荷重の設定にあたり、一般的なRCラーメン高架橋の縦ばりの諸元および設計値について調査した。

鉄道構造物であるRCラーメン高架橋の一般的なスパンは、10～15m程度である^{16),17)}。そこで、RCラーメン高架橋の照査例¹⁶⁾および、近年設計されたスパン10～15m程度のRCラーメン高架橋の実設計例を調査した。調査したRCラーメン高架橋の縦ばりの断面諸元および設計値を表-A1に示す。表-A1より、主な数値は以下のとおりである。実設計では、いずれの高架橋も軸方向鉄筋に

SD390を用いていた。

- ・はり断面寸法：幅600mm×高さ1,100mm～幅1,700mm×高さ1,700mm
- ・主鉄筋比：0.93%～2.80%程度
- ・使用限界状態での応力度
【最小応力度+変動応力度】：12N/mm²～217N/mm²

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会，コンクリート基本技術調査委員会 不具合補修 WG：コンクリート基本技術調査委員会 不具合補修 WG 報告書，2012.8
- 2) 松田芳範，徳光卓，十河茂幸：施工中に発生した不具合の対処方法についてーコンクリート基本技術調査委員会不具合補修 WG 活動報告ー，コンクリート工学，Vol.51，No.10，pp.807-813，2013.10
- 3) 公共建築協会：建築工事監理指針（上巻），平成 22 年版，6 章 コンクリート工事，pp.395-396，2010.11
- 4) 日本コンクリート工学協会，コンクリート構造物の補修工法研究委員会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(III)，1996.10
- 5) 本間淳史，横山和昭，玉置一清，三加崇：PC 橋の断面修復に関する実験的研究，プレストレストコンク

表-A1 RC ラーメン高架橋（鉄道構造物）の縦ばりの設計例

RC ラーメン高架橋		A（照査例） ¹⁶⁾		B（実設計）		C（実設計）		D（実設計*）		E（実設計*）	
構造形式		ビームスラブ式		背割り式		背割り式		背割り式		背割り式	
線路方向径間数		5径間 (9.57m+10.0m×3+9.57m)		3径間 (15.0m×3)		5径間 (16.5m×2+17.0m×3)		4径間 (16.0m+18.0m+17.5m+21.0m)		4径間 (16.0m+18.0m+17.5m+21.0m)	
線路直角方向径間数		1径間 (5.0m)		3径間 (4.0m+5.0m+5.8m)		3径間 (4.9m+8.2m+7.7m)		1径間 (6.7m)		1径間 (6.7m)	
接続形式		ゲルバー桁		背割り式		背割り式		背割り式		背割り式	
列車荷重 ²⁰⁾ ，線数		EA-17，2線		EA-17，4線		EA-17，5線		EA-17，2線		EA-17，2線	
スパン(m)		9.57		15.00		16.00		16.00		21.00	
断面寸法	幅 B(mm)	750		1,600		1,700		1,100		1,100	
	高さ H(mm)	1,200		1,500		1,700		1,700		1,700	
軸方向鉄筋	上側	D32-6本		D32-14本		D38-14本		D38-10，6本		D38-10，10本	
	下側	D32-7本，1本		D32-14本		D38-14，4本		D38-10，6本		D38-10，10，6本	
主鉄筋比		1.24%		0.93%		1.26%		1.95%		2.80%	
照査箇所		スパン中央	ハンチ支点上側	スパン中央	ハンチ支点上側	スパン中央	ハンチ支点上側	スパン中央	ハンチ支点上側	スパン中央	ハンチ支点上側
最小応力度 $\sigma_{\min}$ (N/mm ²)		12.7	9.5	81.5	0.0	115.0	36.7	82.2	55.1	102.7	72.1
変動応力度 σ_{fl} (N/mm ²)		128.5	75.1	49.2	12.1	102.4	46.3	64.3	39.4	65.4	45.7
設計引張疲労強度 f_{td} (N/mm ²)		147.0	148.0	126.3	216.0	210.0	147.7	119.6	224.5	117.6	244.2

RC ラーメン高架橋		F（実設計）		G（実設計）		H（実設計*）		I（実設計*）	
構造形式		張出し式ビームスラブ		張出し式ビームスラブ		張出し式ビームスラブ		張出し式ビームスラブ	
線路方向径間数		2径間 (5.0m+10.0m×2+5.0m)		4径間 (5.0m+10.0m×4+5.0m)		8径間 (4.5m+11.0~13.5m×8+3.0m)		8径間 (4.5m+11.0~13.5m×8+3.0m)	
線路直角方向径間数		3径間 (7.6m+7.0m+8.1m)		3径間 (4.2m+5.0m+4.3m)		5径間 (5.6m+4.6m+8.3m+7.0m+8.0)		5径間 (5.6m+4.6m+8.3m+7.0m+8.0)	
接続形式		張出し式ビームスラブ		張出し式ビームスラブ		張出し式ビームスラブ		張出し式ビームスラブ	
列車荷重 ²⁰⁾ ，線数		EA-17，4線		EA-17，2線		EA-17，5線		EA-17，5線	
スパン(m)		10.00		10.00		12.00		12.00	
断面寸法	幅 B(mm)	900		600		900		900	
	高さ H(mm)	1,400		1,100		1,300		1,300	
軸方向鉄筋	上側	D32-8，8本		D32-6本，6本		D32-9，6本		D29-9，2本	
	下側	D32-8本		D32-6本，2本		D32-9，5本		D29-9，2本	
主鉄筋比		1.51%		2.41%		1.97%		1.10%	
照査箇所		スパン中央	張出し部上側	スパン中央	張出し部上側	スパン中央	ハンチ支点上側	スパン中央	ハンチ支点上側
最小応力度 $\sigma_{\min}$ (N/mm ²)		0.0	0.0	0.0	0.0	58.6	6.5	17.7	33.8
変動応力度 σ_{fl} (N/mm ²)		149.2	49.5	93.8	108.6	104.0	83.0	72.0	49.0
設計引張疲労強度 f_{td} (N/mm ²)		201.0	201.1	112.2	157.4	112.0	208.0	115.0	192.0

*: H4設計標準³⁵⁾ (限界状態設計). 無印: H16設計標準³⁶⁾ (性能照査型設計)

- リート, Vol.49, No.1, pp.51-58, 2007.1
- 6) 槇島修, 加藤佳孝, 魚本健人: コンクリート構造物の耐久性を考慮した断面修復工法の適用と断面修復材の性能評価に関する一考察, 土木学会論文集 F, Vol.66, No.1, pp.101-111, 2010.2
- 7) 上田洋, 玉井謙, 工藤輝大: コンクリートと断面修復材との界面における接着性と水分移動抵抗性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第11巻, pp.13-18, 2011.10
- 8) Cement & concrete institute (CCI), Repairing the surface of concrete - casting defects and minor damage, The cement & concrete institute, Midrand, South Africa, 2010.
- 9) 佐々木尚美, 小林薫, 半井健一郎: 樹脂注入による豆板補修工法の提案と各種材料強度の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.2, pp.252-271, 2014.6
- 10) 渡邊晋也, 後藤昭彦, 松本政徳, 宮永憲一: 打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.775-780, 2013.
- 11) 飯島亨, 工藤輝大, 玉井謙: コンクリートの部分断面補修箇所周辺の鉄筋腐食機構, 鉄道総研報告, 第24巻8号, pp.17-22, 2010.8
- 12) 上田洋, 松田芳範, 栗林健一, 水野清他: 断面修復および表面被覆がコンクリート構造物の水分分布に与える影響, 土木学会第65回年次学術講演会, pp.611-612, 2010.9
- 13) 新井泰, 有賀貴志, 平野勝識, 渡辺忠朋: 断面欠損が生じた RC はり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集, Vol.28, No.2, pp. 1525-530, 2006.
- 14) 黒川章二, 鈴木正志, 羅黄順, 嶋野慶次: 高性能吹き付けモルタルを用いた断面修復 RC 梁の疲労性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1785-1790, 2004.
- 15) 佐々木尚美, 小林薫, 半井健一郎: 樹脂で補修した RC 部材のテンションスティフニング効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.397-402, 2014.
- 16) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 照査例 RC ラーメン高架橋, 2005.3
- 17) 大迫勝彦, 野澤伸一郎: 新たな空間を創出した工事と取り組み, JR EAST Technical Review, No.18, pp.13-18, Winter, 2007. http://www.jreast.co.jp/development/tech/pdf_18/Tech-18-13-18.pdf.
- 18) 土木学会, 土木学会コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002 制定
- 19) 例えば, コニシ(株): ボンド E206, E208
- 20) 低圧注入工法, <http://lpis.jp/about/#Head>
- 21) コニシ株式会社: ボンドシリンドー工法, カタログ
- 22) 中山紀男: 各種異形鉄筋を用いた T 形ばりの疲労試験, 土木学会論文集, 第122号, pp.43-50, 1965.10
- 23) 国分正胤, 多田美朝, 立花一郎, 松本嘉司: 各種の高引張力異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート大型ばりの疲労に関する研究, 土木学会論文集, 第122号, pp.51-74, 1965.10
- 24) 井上真澄, 大島正記, 高木宣章, 児島孝之: 炭素繊維プレートで補強した RC はりの曲げ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1405-1410, 2002.
- 25) 横山和昭, 鹿野善則, 紫桃孝一郎: 下面増厚した RC 床板の輪荷重走行試験による疲労耐久性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1717-1722, 2004.
- 26) 竹内祐樹, 渡辺博志, 古賀裕久, 青山尚: PRC 部材の桁高が曲げひび割れ性状に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.517-522, 2009.
- 27) 徳重英信, 川上洵, 外館英樹, 土居内一範: ポリマーモルタルにより補修されたコンクリート部材の応力と変形, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.127-132, 1999.
- 28) 粕谷菜穂, 栗原哲彦, 小玉克己: ポリマーモルタルの収縮性と付着強度, 土木学会第56回年次学術講演会, pp.1182-1183, 2001.10
- 29) 伊藤正憲, 魚本健人: 環境条件を考慮したポリマーセメント系断面修復材の性能評価, コンクリート工学論文集, 第19巻, 第3号, pp.1-10, 2008.9
- 30) 磐田吾郎, 松本高志: ポリマーモルタル/コンクリート間界面剥離の実験と解析, 土木学会第56回年次学術講演会, V-590, pp.1180-1181, 2001.10
- 31) Mahaboonpachai, T. and Matsumoto, T.: Investigation of interfacial resistance between concrete and polymer-cement mortar and development of constitutive material for the interface, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 8, pp. 977-985, 2005.8
- 32) 恒岡聡, 古内仁, 角田興史雄, 吉住彰: 吹付けモルタルを用いた下面増厚補強 RC 部材におけるモルタルの剥離挙動について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1573-1578, 2002.
- 33) 佐藤貢一, 小玉克己: ポリマーセメントモルタル増厚補強部材の付着界面せん断剥離性状に関する研究, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.77-87, 2003.5
- 34) Satoh, K. and Kodama, K.: Central peeling failure behavior polymer cement mortar retrofitting of reinforced concrete beams, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, Issue 2, pp. 126-136, 2005.4
- 35) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 1992.4
- 36) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 2004.4

(2014. 11. 25 受付)

ANALYSIS OF DELAMINATION BEHAVIOR AT CONVENTIONAL REPAIRED BOUNDARY OF HONEYCOMBING OF RC BEAMS AND EFFECTIVENESS OF PROPOSED REPAIR METHOD BY CYCLIC LOADING TEST

Naomi SASAKI, Kaoru KOBAYASHI and Kenichiro NAKARAI

In the conventional repair method of honeycombing of RC structures, the repair boundary with sound concrete may cause delamination. In this study, we proposed a new repair method which injects the epoxy resin without removing the honeycombing and then performed cyclic loading tests of RC beam specimens repaired by the proposed and conventional methods, in order to investigate delamination behaviors. The experimental results showed that the specimen repaired by the proposed method increased cracking bending capacity and decreased crack width, compared to the sound concrete specimen. In addition, delamination at boundary was not observed. On the other hand, the specimen repaired by the conventional repair method showed delamination because of shrinkage before loading and the delamination width was increased by loading. It was also found that the cyclic loading accelerated delamination in the specimen repaired by the conventional method.