

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

Experimental study on the restoration of railway viaduct RC columns greatly deformed at damage level 4

稲熊 弘*, 関 雅樹**

Hiroshi INAGUMA, Masaki SEKI

*東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545 番 33)

** 博 (工) 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 (同上)

In order for an immediate restoration of concrete structures damaged by an earthquake, it is necessary to establish a reasonable and effective emergent restoration method in advance. In this research an attempt was made to restore the dynamic performance of RC railway viaduct columns which had been deliberately damaged by cyclic loading tests until they reached damage level 4, when the load was 50% of the yield load. Here cyclic loading tests were carried out choosing a couple of effective repair materials, the thickness of partial replacement, and the loading cycles for the experimental parameters. As a result it has been confirmed that the loading capacity and the deformation performance can be restored by means of crack injections, partial repairs, and tie-hoop replacement at the plastic hinge region for the columns of damage level 4 which cannot even endure the axial load.

Key Words: railway viaduct column, cyclic loading test, repair, damage level 4

キーワード: 鉄道高架橋柱, 交番載荷試験, 補修, 損傷レベル4

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、鉄道構造物ではRCラーメン高架橋（以下、高架橋）の一部に被害が発生した。山陽新幹線での被災状況を鑑み、列車の長期不通防止を目的として、高架橋の中でせん断破壊先行型の柱部材を対象に耐震補強¹⁾が実施されている。一方、曲げ破壊先行型の柱は対策対象外となっている。ところで、東海地震、南海地震、東南海地震などの大規模地震が、近い将来に到来することが予測されている。鉄道は、救援の人や物資などの輸送基幹であり、震災後の社会復興には重要な役割を担う。そのため、鉄道のダウンタイム（列車運行休止時間）の短縮には、事前対策として実施されているせん断破壊先行型柱の耐震補強のほか、曲げ破壊先行型の柱の終局状態を把握することにより、事後対策での補修方法を定める必要がある。具体的には、大変形領域の損傷状況および損傷部位別に損傷度に応じた効果的な補修方法を予め定めておくことが重要な課題である。

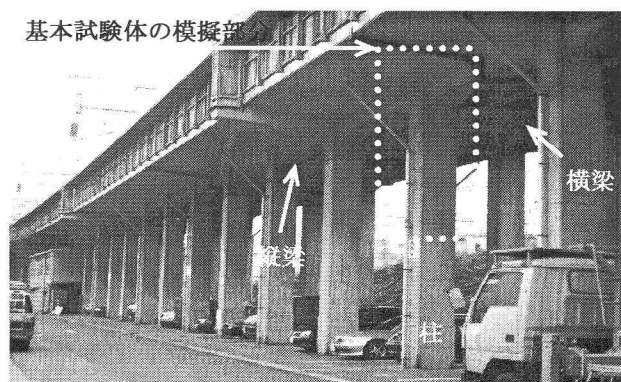
兵庫県南部地震では、東海道新幹線高架橋の一部の柱部材が損傷レベル3²⁾まで被災を受けた。被災高架橋の復旧では、鋼板巻き工法による復旧方法が施工された。この復旧方法により、東海道新幹線はわずか3日間で運転が

再開された。なお、著者ら³⁾は、鋼板巻き工法を施工することにより、被災柱は被災前と同等以上の耐震性能に復元できることを確認している。また、兵庫県南部地震では、復旧時に多くの教訓が得られた。例えば、復旧工事では、補強鋼板および断面修復用無収縮モルタルなどの資材の調達が困難であった。今後、広域エリアで大規模地震の発生が予測されるため、汎用性の高い材料による復旧方法の確立が望まれる。

損傷レベル4における大変形領域まで損傷させたRC柱の補修方法に関する交番載荷試験では、載荷装置の破損の危険性等の制約条件から、既往の研究報告は少ない。最近では石橋ら^{4, 5)}により、損傷レベル4における補修方法に関する研究として、履歴ループの最大荷重がポストピーク領域の降伏荷重の70%程度を下回るまで損傷させたRC柱の復元性能について報告されている。本研究では、曲げ破壊先行型のRC柱を対象に、事後対策としての被災後の各種補修方法の有効性を確認するため、模型実験を実施した。模型実験では、これまで部材の取替が前提である損傷レベル4における履歴ループの最大荷重が降伏荷重の50%を下回るまでの交番載荷試験を実施し、補修後のRC柱の復元性能を確認したので報告する。

表－1 試験体の諸元

試験体 No	試験体 区 分	柱断面寸法 $b \times h$ (mm)	有効高さ d (mm)	せん断 スパン a (m)	せん断 スパン比 a/d	引 張 鉄筋比 p_t (%)	軸方向 鉄筋比 p (%)	帯鉄筋比 p_w (%)	柱部材の 破壊形態	曲げせん断 耐力比 (V_{yd} / V_{mu})
C1	基本	300×300	270	1.45	5.37	D16×4 0.981	D16×12 2.648	φ 4-1ctc50 0.168	曲げ破壊	1.817
C2										
C3										
C4										
C5	比較									



写真－1 試験体の模擬部分

2. 研究の目的

本研究の目的は、既存の鉄道高架橋RC柱について、履歴ループの最大荷重がポストピーク領域の降伏荷重の50%を下回るまで損傷させた柱部材の補修による復元効果を確認することである。実験方法および実験に使用する試験体は、以下の事項を確認するために決定した。

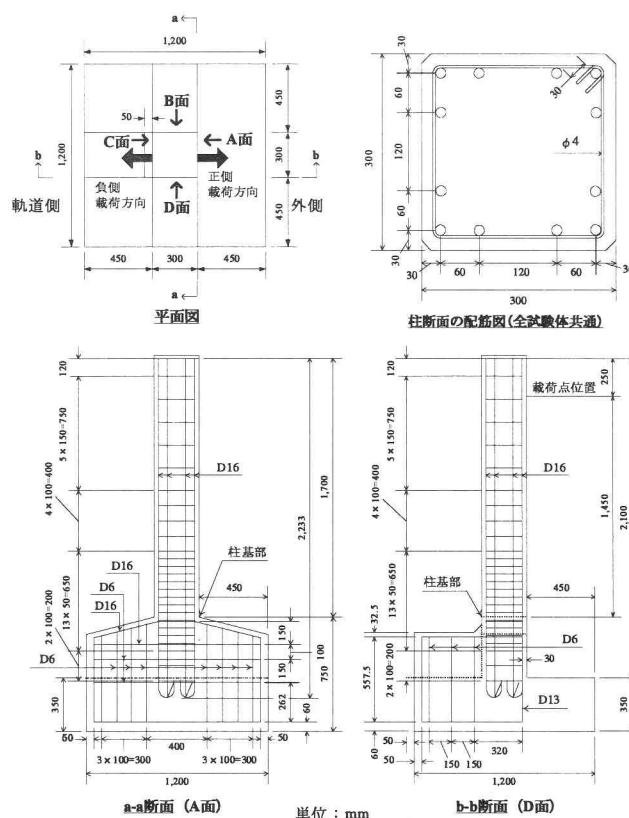
- ① 補修材料（3種類）の違いによる復元効果
- ② 繰返し載荷回数が3回と1回との違いおよびひび割れ注入範囲の違いによる復元効果
- ③ 試験体形状の違いおよび断面修復材の補修厚さの違いによる復元効果

3. 実験概要

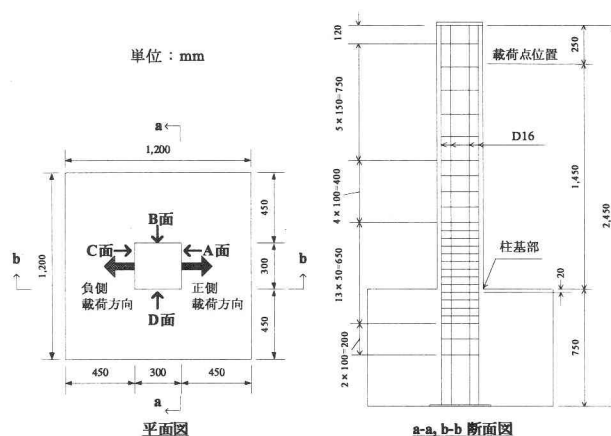
3.1 試験体の諸元

本研究における模型試験体は、東海道新幹線の標準高架橋をモデルに、写真－1に示す実際の鉄道高架橋の部材形状を考慮して、高架橋スラブ、縦梁、横梁と柱との接合部を模擬した柱端部の試験体4体を用いた。また、比較のため、一般的に交番載荷試験で用いられる柱端部を模擬した試験体1体も使用した。試験体の諸元を表－1に示す。試験体の柱、梁および接合部の断面寸法は、実構造物の1/2に縮小したものである。試験体の配筋図を図－1、2に示す。基本試験体は図－1に示すように、高架橋の軌道側と外側では、横梁の有無により非対称になっているのが特徴である。

試験体の配筋は同一であり、柱の破壊形態は曲げ破壊



図－1 柱端部試験体の配筋図（基本試験体）



図－2 柱端部試験体の配筋図（比較試験体）

表-2 コンクリートの材料試験値

試験体 No	材料の種類	材令 (日)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	ポアソン 比
C1	コンクリート	47	28.8	28.8	0.198
C2		47	28.8	28.8	0.198
C3		22	26.7	28.3	0.210
C4		26	27.4	27.0	0.199
C5		16	24.9	26.1	0.190

表-3 鋼材の材料試験値

鋼材の 種 類	降伏強度 f_{sy} (N/mm ²)	引張強度 f_{su} (N/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	降伏 ひずみ (μ)	破断 伸び (%)
主筋 D16	379.4	553.6	186.8	2,030	25.2
帯筋 $\phi 4$	534.0	588.9	205.5	2,600	13.6

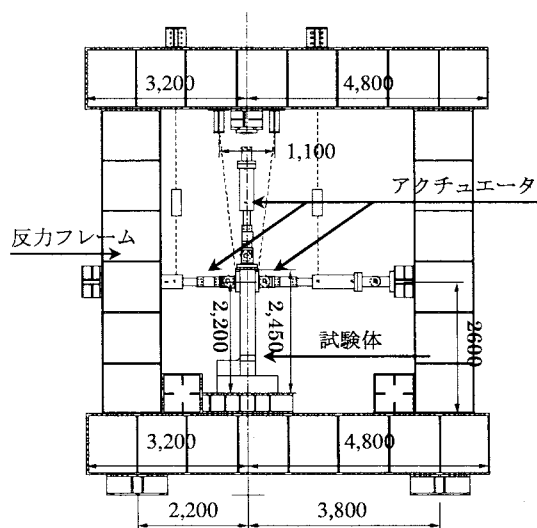


図-3 荷重装置の概要図

先行型である。柱の帯鉄筋の配筋は、曲げせん断耐力比を基準に決定した。また、縦梁および横梁の主鉄筋および帯鉄筋の配筋についても、鉄筋径、鉄筋のかぶり、鉄筋の間隔、鉄筋の定着長、鉄筋のフックの折曲げ端からの長さも1/2とした。帯鉄筋の径は $\phi 9$ に対して $\phi 4$ を、スターラップはD13に対してD6を使用した。試験体の柱部材のコンクリートの材料試験値を表-2、鋼材の材料試験値を表-3にそれぞれ示す。なお、表-2のコンクリートの材料試験値は、各試験体の荷重試験実施日の値であり、現状の東海道新幹線の実強度と同程度である。

3.2 荷重方法

(1) 荷重方法

交番荷重試験における荷重装置の概要図を図-3に示す。水平荷重の荷重位置は、試験体の柱長さをせん断スパンとしているため、実高架橋の柱の中間部となる位置

とした。荷重方法は、変位制御による交番荷重試験により、各試験体に損傷を与え、試験体を補修後、再度交番荷重試験を実施した。1回目の交番荷重試験における試験体の降伏変位の設定は、鉄筋の材料試験結果を用いた試験体の事前解析を行い、設計降伏変位および設計降伏荷重を予測した。この計算値を参考に、交番荷重時において、柱基部の最外縁の主鉄筋に貼り付けたひずみゲージの測定値が、事前の鉄筋の引張試験により求めた降伏ひずみ $2,030\mu$ に達する時点の変位とした。2回目となる補修後の交番荷重試験も変位制御とし、補修による復元効果を確認するため、各試験体の1回目の変位制御と同一とした。試験体の荷重方法の種別を表-4に示す。荷重方向は、高架橋の橋軸直角方向である。

荷重パターンは、パターンⅠとパターンⅡの2種類を設定した。パターンⅠは、本実験における基本パターンであり、設計降伏荷重の75%の予備荷重と実測による降伏変位($1\delta_y$)の整数倍の変位($\pm 1\delta_y$, $\pm 2\delta_y$, $\pm 3\delta_y$, ...)での正負交番荷重で、繰返し荷重回数は正負1回ずつである。一方、パターンⅡは、 $\pm 1\delta_y$ 以降の繰返し荷重回数が正負3回ずつであることを除き、その他はパターンⅠと同一である。なお、パターンⅠの繰返し回数を基本としたのは、本実験で使用する試験体は2回の交番荷重試験を実施するため、軸方向鉄筋の低サイクル疲労による破断を懸念したためである。しかしながら、RC部材の挙動を把握する交番荷重試験では、繰返し荷重回数10回⁶⁾を基本に実施されてきた。現在では、3回行えば荷重低下も安定するという知見から、「鉄道耐震設計標準²⁾」においては、パターンⅡの繰返し回数3回で実施されている。そこで、繰返し荷重回数の違いが補修による復元効果に及ぼす影響を確認するため、繰返し回数3回での交番荷重試験も実施した。

(2) 加力範囲

水平荷重の加力範囲は、履歴ループの最大荷重がポストピーク領域における降伏荷重の50%を下回る時点を目標に実施した。しかし、本実験における試験体においては、この目標加力範囲は、軸力を保持できなくなった状態であった。

(3) 軸力荷重

水平交番荷重中の軸力は、全試験体とも共通で、一定軸力294kNを荷重した。また、表-4に示す試験体C4を除く試験体には、一定軸力とは別に、水平交番荷重開始前と各荷重ステップにおける負側荷重後に、水平荷重を開放させ、残留変位の状態で422kNまで軸力を一時的に荷重して鉛直変位を計測した。なお、一定軸力294kNは、地震時における実高架橋の柱1本当りに付加する荷重を想定したものであり、(死荷重+片線分の地震時列車荷重+2柱分の変動軸力)相当の荷重である。一方、増載荷重軸力422kNは、列車が複線荷重した状態を想定し

表－4 試験体の載荷方法

試験体 No	載荷パターン	加力範囲	一定軸力 (294kN)	増載荷軸力 (422kN)	補修後の試験体 No	補修方法の種類	載荷パターン	加力範囲	一定軸力 (294kN)	増載荷軸力 (422kN)
C1	I	履歴ループの最大荷重が降伏荷重の50%を下回るまで	有	有	C1R	α	I	履歴ループの最大荷重が降伏荷重の50%を下回るまで	有	有
C2					C2R	β				
C3					C3R	γ				
C4	II		無	無	C4R	α	II		無	無
C5	I				C5R		I			

表－5 補修方法の種類

補修方法	補修種別	使用材料
補修方法 α	ひび割れ注入	エポキシ樹脂
	断面修復	エポキシ樹脂モルタル
補修方法 β	ひび割れ注入	セメント系超微粒子注入材
	断面修復	ポリマーセメントモルタル
補修方法 γ	ひび割れ注入	エポキシ樹脂
	断面修復	超速硬セメントモルタル
	柱外周被覆	ポリエステル製繊維シート

表－6 ひび割れ注入材の材料試験値

補修後の試験体No	ひび割れ注入材料の種類	材令 (日)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)
C1R, C3R, C4R, C5R	エポキシ樹脂	28	66.4
C2R	セメント系超微粒子注入材	28	30.9

たものであり、(死荷重+複線分の列車荷重+衝撃)相当に安全率を考慮した荷重である。増載荷軸力は、高架橋柱の損傷程度と列車走行時における軸力抵抗との関係を把握するために設定した軸力である。

3.3 補修方法

(1) 補修方法の種類

補修方法の種類は表－5 に示す 3 種類である。これらの補修方法は、作業性、汎用性、貯蔵性、材料特性などを観点に、補修による可能性を検討する目的の代表例として選定した。以下、補修方法 α は RM 補修、補修方法 β は PCM 補修、補修方法 γ は HM 補修とする。

(2) ひび割れ注入方法

ひび割れ注入方法は、柱全面注入と柱部分注入の 2 種類の方法を設定した。柱全面注入は、柱全長のひび割れを対象に注入を施した。柱部分注入は、柱基部から 1.5D (D: 柱幅) の高さ 45cm の範囲のひび割れを注入した。

なお、柱部分注入は、ひび割れ注入の施工は多くの時間を要することから、必要最小限の施工範囲での有効性を確認するために設定した。また、注入範囲の設定は、ひび割れ幅を計測した結果、強制水平荷重時に 0.2mm 以上のひび割れを開口したのは柱幅の 1.5 倍の高さであったため、この範囲を施工対象とした。ひび割れ注入材の

表－7 断面修復材の材料試験値

補修後の試験体 No	断面修復材料の種類	材令 (日)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	ポアソン比
C1R	エポキシ樹脂モルタル	23	66.4	13.6	0.272
		1	26.8	-	-
C2R	ポリマーセメントモルタル	29	56.1	23.2	0.217
		1	9.1	-	-
C3R	超速硬セメントモルタル	35	21.4	10.6	0.221
C4R C5R	エポキシ樹脂モルタル	26	68.4	14.9	0.260
		1	26.6	-	-

材料試験値を表－6 に示す。

(3) 断面修復方法

試験体 C1R, C2R, C3R および C4R は、粉砕したコンクリート粉および素手で除去可能なコンクリート塊を取り除き、剥落箇所を対象に、座屈した柱主鉄筋から 30mm の厚さを確保できるようにアプローチをとり、それぞれの試験体で修復後の厚さが異ならないように断面修復材を施工した。一方、試験体 C5R については、断面修復厚さを 50mm とした。

なお、断面修復材の施工は、実構造物に対する施工を考慮して、柱上端を模擬した基本試験体はコテ仕上げによる方法とし、柱下端を模擬した比較試験体 C5R は、型枠を使用しての填充方法とした。また、今回の断面修復の施工時期は、気象条件の厳しい 1 月から 2 月であり、施工は室内実験棟内で実施したが、室内温度は 2℃前後であった。そこで、施工および養生には実施工でも施工可能なジェットヒーターを使用した。

断面修復材の材料試験値を表－7 に示す。表中の材令の上段は、交番載荷試験実施日の材令である。材令の下段は、エポキシ樹脂モルタルおよびポリマーセメントモルタルの初期の強度発現を確認するため、材令 1 日についても、圧縮強度試験を実施した。エポキシ樹脂モルタルは、寒中の厳しい養生条件においても、ポリマーセメントモルタルと比較して、1 日強度の発現は優れていた。

(4) 鉄筋の整正方法

柱の軸方向鉄筋の整正は、座屈した状態で再利用し、

表－8 補修方法の分類と帯鉄筋の補修実績

補修後の試験体 No	補修方法	ひび割れ注入範囲	断面修復方法	帯鉄筋の整正方法 (本数)		
				曲げ加工	フレア溶接	鉄筋交換
C1R	α	部分注入	コテ仕上げ	2	2	0
C2R	β			2	3	0
C3R	γ			2	2	0
C4R	α	全面注入	型枠充填	3	0	2
C5R				1	0	4

表－9 ポリエステル製繊維シート の材料試験値

シート名	厚さ (mm)	幅 (mm)	破断強度 (N/mm ²)	破断時歪 (%)	弾性係数 (kN/mm ²)
SRF450	4	45	478	11.4	6.27

表－10 各試験体の降伏荷重と最大荷重との関係

	試験体 No	正 側			負 側		
		ステップ	変 位	荷 重	ステップ	変 位	荷 重
降伏時	C1		13.2mm	80.1kN		-13.0mm	-81.6kN
	C2	+1 δ_y	13.7mm	81.8kN	-1 δ_y	-13.6mm	-79.0kN
	C3		14.2mm	79.9kN		-13.0mm	-79.9kN
最大荷重時	C1	+2 δ_y	25.2mm	95.0kN	-2 δ_y	-24.0mm	-96.7kN
	C2	+3 δ_y	34.1mm	96.5kN	-2 δ_y	-25.3mm	-95.1kN
	C3	+3 δ_y	32.3mm	93.1kN	-2 δ_y	-25.2mm	-92.8kN

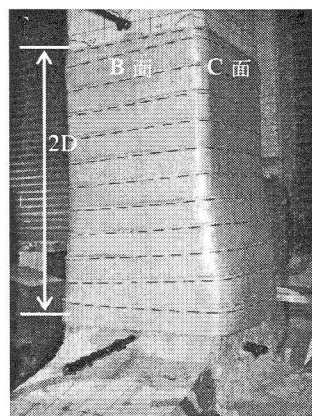
一切補修は施さないこととした。一方、柱の帯鉄筋の整正についても、軸方向鉄筋の整正方法と同様に、再利用することを基本としたが、兵庫県南部地震以降に定めた JR 東海での復旧方法に基づき、帯鉄筋の損傷状態に合わせて、つぎの整正方法の中から選択した。

- ① フックが外れたものは、曲げ加工による整正
- ② 破断したものは、同一材料、同一径の鉄筋を用いたフレア溶接による整正
- ③ 被りコンクリートを除去することなく簡単に帯鉄筋を取り外せるものは取替えて、継手の結合方式はフレア溶接による整正

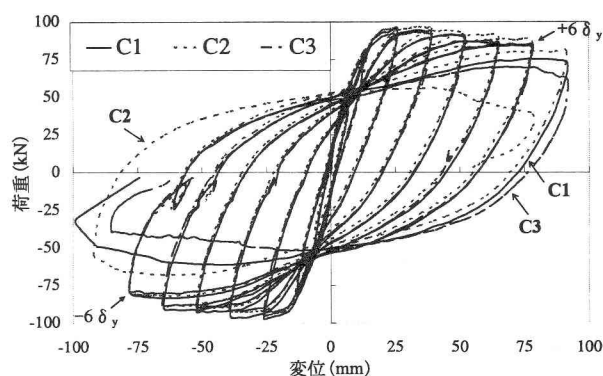
各試験体の補修方法の分類と帯鉄筋の補修実績を表－8 に示す。

(5) 外周被覆材

補修方法 γ における外周被覆材のポリエステル製繊維シートとは、SRF 補強と呼ばれる主に建築物の柱を対象にした耐震補強工法であり、著者ら⁷⁾は、鉄道高架橋の柱部材にも、耐震補強として効果を有することを確認している。



写真－2 繊維シート



図－4 試験体C1, C2, C3の荷重－変位履歴曲線

ポリエステル製繊維シートの施工は、断面修復材を施工した後、柱基部から2D区間の柱にシート1層を巻きつけた。ポリエステル製繊維シートを巻付けた補修完了状態を写真－2に、繊維シートの材料試験値を表－9に示す。

4. 実験結果と考察

4.1 試験体の損傷状況の評価

本研究の目的は、各種の補修材料の効果を比較確認することである。このため、比較する試験体の損傷程度が同一であることが必須条件である。そこで、比較対象の試験体C1, C2およびC3について、第1回目の交番載荷試験における保有性能と損傷状況に着目して、その相違に関する考察を以下に述べる。

(1) 荷重－変位関係の比較

試験体C1, C2およびC3の降伏荷重と最大荷重の関係を表－10に、荷重－変位履歴曲線を図－4にそれぞれ示す。

降伏時における変位および荷重は、3試験体ともに、正側も負側も概ね同等である。最大荷重時の比較では、試験体C1の正側の最大荷重のピーク時の変位に多少違いが見られるが、荷重の大きさは同等である。

荷重－変位履歴曲線の比較では、3試験体ともに $\pm 6 \delta_y$ の履歴までは、概ね同一の履歴経路を辿っている。しかしながら、 $+7 \delta_y$ 載荷時のピーク変位から荷重の低下度合いに違いが生じている。これは、本試験体の柱部材の帯鉄筋の結合方法がフック結合であるため、かぶりコンクリートの剥落進展状況に違いが生じ、軸方向鉄筋の座屈抵抗力が異なったことによるものと考えられる。

(2) 損傷状況の比較

載荷終了後の損傷状況を写真－3～5に示す。なお、各試験体の載荷終了ステップは、試験体C1は $-7 \delta_y$ 、試験体C2は $+8 \delta_y$ 途中、試験体C3は $-7 \delta_y$ 途中である。各試験体の経験最大水平変位と最大低下荷重を表－11に示す。

試験体C2はその他の試験体と異なり、 $-7 \delta_y$ の載荷ステップにおいても軸力を保持できたため、 $+8 \delta_y$ の載荷を

表－11 経験最大水平変位と最大低下荷重

試験体 No	最大載荷 ステップ	経験最大水平変位 (mm)		最大低下荷重 (kN)	
		正側	負側	正側	負側
C1	$-7\delta_y$	91.56	-98.81	72.8	-30.4
C2	$+8\delta_y$ 途中	91.54	-92.04	38.8	-54.9
C3	$-7\delta_y$ 途中	91.99	-85.36	60.7	-32.1

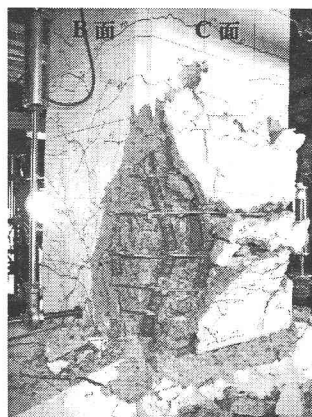


写真-3 C1($-7\delta_y$)



写真-4 C2($+8\delta_y$)

実施した。しかし、載荷の途中で、荷重が増加せず、変位のみが増大したため、 $+8\delta_y$ の載荷途中で終了した。終局時の損傷状況の比較では、かぶりコンクリートの剥落範囲は柱基部から1D区間の柱部であり、大きな差異は見られなかった。柱の軸方向鉄筋の損傷状況の比較では、他の試験体に比べて、試験体C1の軸方向鉄筋の座屈が顕著であった。

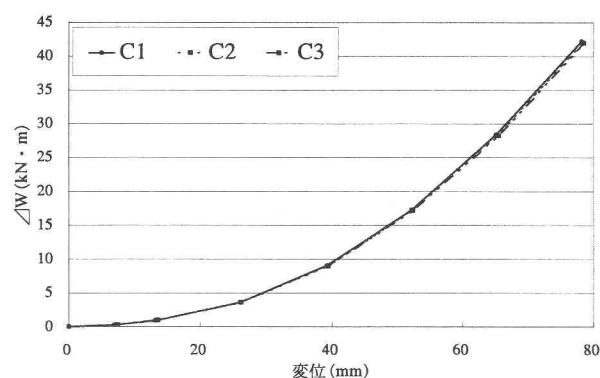
これは、試験体C1はその他の試験体よりも、負側の経験最大水平変位が大きいことが原因であると考えられる。

なお、加力範囲の目標は降伏荷重の50%を下回るまでであり、本試験体での目標荷重値は約40kNであるが、試験体C1および試験体C3の最大低下荷重が30.4kN (37%低下)と32.1kN (40%低下)と小さいのは、軸力を保持できなくなり、変位が進行したためである。

(3) 保有性能の比較

保有性能の比較は、累積吸収エネルギー (ΔW) により、各試験体の性能の相違を検証するものとする。

図－5に、試験体C1, C2およびC3の水平変位に対する累積吸収エネルギーの比較グラフを示す。3試験体ともに、各変位における累積吸収エネルギー量は同等であり、これらの試験体の保有性能は同等であると評価できる。



図－5 累積吸収エネルギー量の比較

表－12 試験開始前および試験終了後の固有振動数

試験体No	試験開始前		試験終了時		固有振動数 損失率
	載荷 STEP	固有 振動数 (Hz)	載荷 STEP	固有 振動数 (Hz)	
C1	初期値	36.3	$-7\delta_y$ 後	16.6	46%
C2	初期値	34.5	$+8\delta_y$ 後	16.0	46%
C3	初期値	35.8	$-7\delta_y$ 後	15.0	42%

(4) 固有振動数による剛性低下程度の推定

関ら⁸⁾により、RC柱部材の被災前後および復旧前後の固有振動数を測定すれば、曲げ剛性の復元率が確認できることが報告されている。ここでは、試験体の初期状態、交番載荷試験による損傷程度および補修後の剛性回復を推定するため、①第1回目の交番載荷試験実施前、②第1回目の交番載荷試験終了後（終局時の状態）、③補修後の第2回目の交番載荷試験開始前に、衝撃振動試験（impact II）⁸⁾により、各試験体の柱部材の2次モードの固有振動数を測定した。試験開始前と試験終了後に測定した各試験体の固有振動数を表－12に示す。

試験開始前の固有振動数は34.5Hz～36.3Hz、第1回目の交番載荷試験終了後の固有振動数は15.0Hz～16.6Hzであり、いずれも同等な値を示している。ポストピーク領域まで損傷したRC部材の剛性低下程度を、固有振動数の低下率により定量的に評価することは、かぶりコンクリートの剥落状態やコアコンクリートの圧壊状態の違いにより困難ではあるが、試験開始前と試験終了後との固有振動数の損失率は、3試験体ともに同等の値を示していることから、試験体の剛性低下程度も概ね同等であると推察することができる。

4.2 補修材料の違いによる復元効果

(1) 固有振動数の復元率の比較

交番載荷試験を実施する前の試験体C1, C2, C3の固有振動数と、第1回目の交番載荷試験終了後に補修した試験体C1R, C2R, C3Rの固有振動数の比較を表－13に示す。

表-13 補修前後の固有振動数

試験体No	C1	C1R	C2	C2R	C3	C3R
固有振動数 (Hz)	36.3	27.8	34.5	24.3	35.8	30.9
復元率	77%		70%		86%	

表-14 降伏時および最大荷重時の荷重復元率

	試験体の種類	正 側				負 側				正負平均荷重復元率 (%)
		STEP	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重復元率 (%)	STEP	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重復元率 (%)	
降伏荷重時	C1		13.2	80.1	80		-13.0	-81.6	96	88
	C1R		13.7	64.0			-13.8	-78.6		
	C2	+1 δ_y	13.7	81.8	57	-1 δ_y	-13.6	-79.0	67	62
	C2R		13.0	46.4			-13.0	-53.0		
	C3		14.2	79.9	76		-13.0	-79.9	85	80
	C3R		13.0	60.4			-13.0	-67.7		
最大荷重時	C1	+2 δ_y	25.2	95.0	105	-2 δ_y	-24.0	-96.7	114	110
	C1R	+3 δ_y	37.0	99.7		-3 δ_y	-36.7	-110.4		
	C2	+3 δ_y	34.1	96.5	60	-2 δ_y	-25.3	-95.1	77	68
	C2R	+2 δ_y	26.1	57.8		-2 δ_y	-26.1	-72.8		
	C3	+3 δ_y	32.3	93.1	93	-2 δ_y	-25.2	-92.8	98	96
	C3R	+3 δ_y	37.8	86.5		-3 δ_y	-37.2	-91.2		

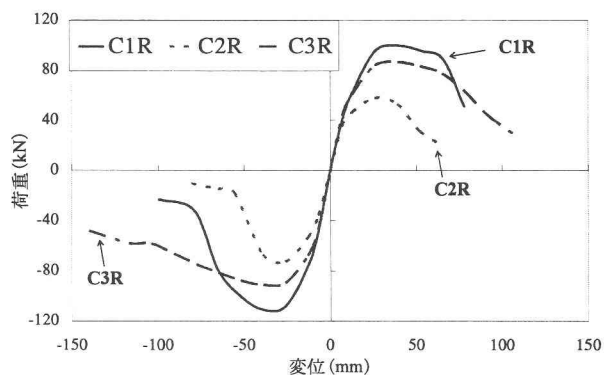


図-6 試験体 C1R, C2R, C3R の包絡線

RM 補修の試験体 C1R の固有振動数の復元率は 77%, PCM 補修の試験体 C2R は 70%, HM 補修の試験体 C3R は 86%であった。

(2) 荷重-変位関係の比較

第1回目の交番荷重試験および補修後の第2回目の交番荷重試験における降伏荷重時と最大荷重時の荷重復元率を表-14に、補修後の試験体CRの荷重-変位履歴曲線から求めた包絡線の比較を図-6にそれぞれ示す。

降伏荷重時の正負平均の荷重復元率は、試験体C1Rは88%、試験体C3Rは80%であり、この2体は80%以上復元されているが、試験体C2Rは62%と低い値である。最大荷重時の荷重復元率については、試験体C1Rの正負平均値は110%であり、損傷前の性能以上に復元されている。

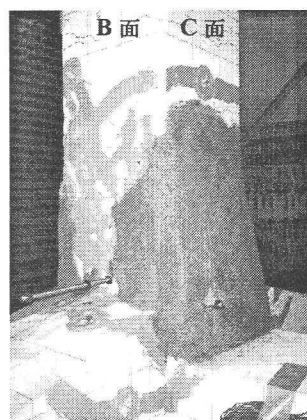


写真-6 C1R(補修後)

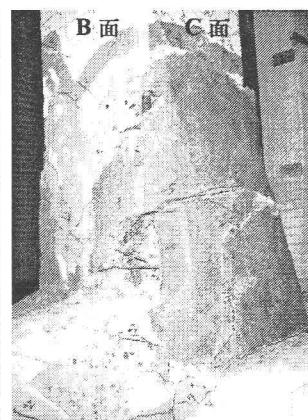


写真-7 C1R(載荷後)

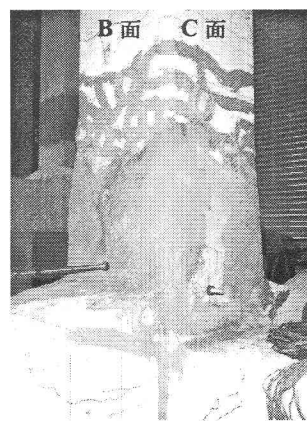


写真-8 C2R(補修後)

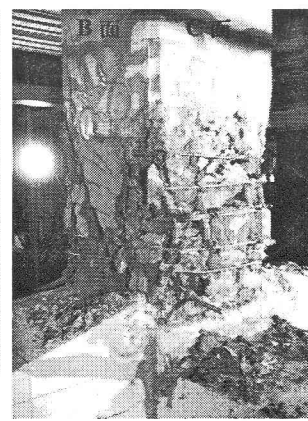


写真-9 C2R(載荷後)

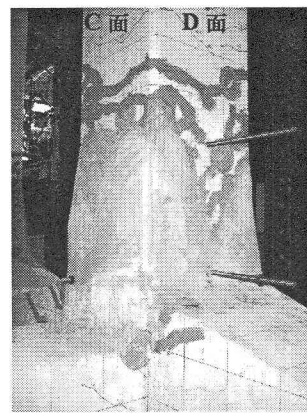


写真-10 C3R(補修後)

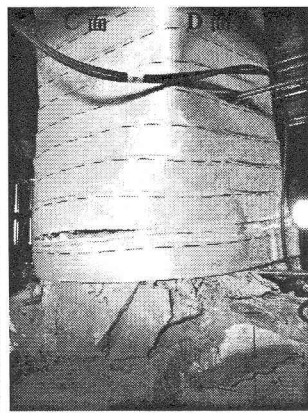


写真-11 C3R(載荷後)

試験体C3Rの正負平均値は96%であり、概ね損傷前の性能まで復元している。一方、試験体C2Rの正負平均値は68%と降伏時の荷重復元率と同様に小さな値であり、正負とも補修後の最大荷重は、損傷前の試験体C2の降伏荷重までも復元できない結果であった。図-6の包絡線の比較からも、試験体C2Rの履歴特性はその他の試験体に比べて、著しく劣っていることが伺われる。

つぎに、各試験体の補修完了状態を写真-6, 8, 10に、2回目の載荷試験終了後の終局時の損傷状況を写真-7, 9, 11に示す。また、写真-12, 13に試験体C1Rおよび試験体C2Rの+2 δ_y 載荷後の損傷状況をそれぞれ示す。なお、

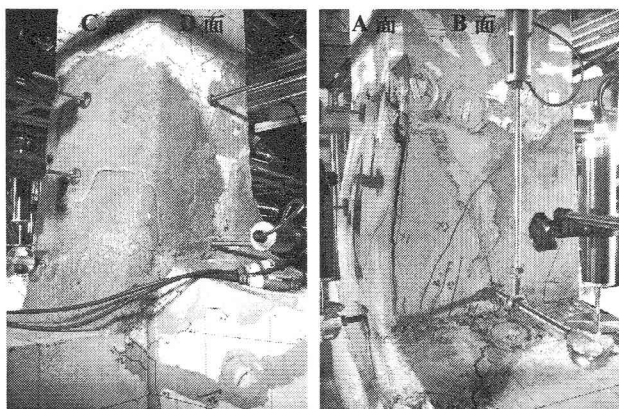


写真-12 C1R(+2δ_y) 写真-13 C2R(+2δ_y)

写真-10の試験体C3Rの補修状況は、ポリエステル製繊維シートを施工する前の状態のものである。

試験体C2Rの降伏荷重時および最大荷重時の荷重復元率がその他の試験体に比べて小さい理由としては、写真-13に示すように、+2δ_y載荷時において、断面修復材の部材軸方向に付着割裂ひび割れが生じたためと考えられる。降伏荷重時および最大荷重時の復元率が優れた試験体C1Rでは、写真-12に示すように、+2δ_y載荷時において、断面修復材に水平方向の曲げひび割れが発生しているが、顕著な付着割裂は生じていない。また、写真-7に示すように、終局状態においても、断面修復材は軸方向鉄筋に密着している。もう1体の試験体C3Rについては、3種類の断面修復材料の中で一番圧縮強度が小さいが、断面修復材の外周に巻きつけたポリエステル製繊維シートにより、断面修復材の剥落を抑制できたため、材料強度が小さい試験体C3Rの復元力が優れた結果になったものと考えられる。

(3) 初期剛性の復元率

初期剛性の復元率を表-15に示す。補修試験体CRの降伏変位は、損傷前の試験体Cの降伏変位を基準とした。ここで示す初期剛性とは、降伏点における割線剛性である。

試験体C1Rと試験体C3Rの初期剛性の復元率は、それぞれ85%と84%であるが、試験体C2Rでは65%である。初期剛性の低下の原因は、ひび割れが閉じてしまっているため、すべてのひび割れ箇所を完全に注入にできないことや、大変形領域までの損傷を与えていることから、軸方向鉄筋の定着部の抜け出しが大きくなっていることなどが考えられる。また、試験体C2Rの初期剛性が他の試験体に比べて小さい原因としては、上記の原因のほか、断面修復材料の付着強度特性による影響と考えられる。

(4) 変形性能（じん性率）の復元率

ポストピーク領域の降伏荷重に至った変位（以下、N点変位）に対するじん性率 μ_1 の復元率を表-16に示す。ここで示すじん性率 μ_1 とは、各試験体の荷重-変位履歴

表-15 初期剛性の復元率

	正負	降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	初期剛性 (kN/mm)	平均剛性 (kN/mm)	復元率 (%)
C1	正側	80.1	13.2	5.97	6.12	85
	負側	-81.6	-13.0	6.27		
C1R	正側	64.0	13.7	4.68	5.18	
	負側	-78.6	-13.8	5.69		
C2	正側	81.8	13.7	5.96	5.90	65
	負側	-79.0	-13.6	5.83		
C2R	正側	46.4	13.0	3.57	3.82	
	負側	-53.0	-13.0	4.07		
C3	正側	79.9	14.2	5.63	5.89	84
	負側	-79.9	-13.0	6.14		
C3R	正側	60.4	13.0	4.65	4.92	
	負側	-67.7	-13.0	5.19		

表-16 N点変位に対するじん性率 μ_1 の復元率

試験体 No	載荷 方向	降伏変位 (mm)	N点変位 (mm)	じん性率 (μ_1)	正負平均 じん性率	復元率 (%)
C1	正側	13.2	82.5	6.3	6.1	88
	負側	-13.0	-76.1	5.9		
C1R	正側	-	69.3	5.2	5.3	
	負側	-	-64.5	5.5		
C2	正側	13.7	87.7	6.4	6.1	0
	負側	-13.6	-79.2	5.8		
C2R	正側	-	0	0	0.0	
	負側	-	0	0		
C3	正側	14.2	81.8	5.8	5.9	81
	負側	-13.0	-77.9	6.0		
C3R	正側	-	61.1	4.3	4.8	
	負側	-	-68.0	5.2		

表-17 終局変位に対するじん性率 μ_2 の比較

試験体 No	載荷 方向	降伏変位 (mm)	終局変位 (mm)	終局荷重 (kN)	じん性率 (μ_2)	復元率 (%)
C1	負側	-13.0	-98.8	-30.4	7.6	81
C1R		-	-80.1		6.2	
C2	正側	13.7	91.5	38.8	6.7	52
C2R		-	47.6		3.5	
C3	負側	-13.0	-85.4	-32.1	6.6	164
C3R		-	-140.2		10.8	

曲線から求めた包絡線におけるN点変位を降伏変位で除した値である。また、補修試験体は既に軸方向鉄筋が降伏しているため、補修試験体の降伏変位は、損傷前の試験体の降伏変位とした。

試験体C1Rと試験体C3Rの復元率は、それぞれ88%と81%であり、軸力を保持できなくなるまで損傷させた帯鉄筋を整流による再利用だけでも、N点までのじん性率は80%以上復元できている。一方、試験体C2Rの最大荷重は、損傷前の試験体C2の降伏荷重すら復元できなかったため、じん性率 μ_1 はゼロとなった。試験体C2Rのじん

性率 μ_1 の復元性能が悪い理由としては、载荷の早い段階から、写真-13に示す付着割裂と思われる縦ひび割れが発生し、これにより軸方向鉄筋の座屈を遅延できなかったためと考えられる。

つぎに、軸力を保持できなくなった変位（以下、終局変位）に対するじん性率 μ_2 の復元率の比較を表-17に示す。損傷前の試験体Cの終局は、正負のどちらか一方で、降伏荷重の50%を下回った時点と定めて载荷試験を実施したことから、補修後の試験体CRの終局変位の設定は、試験体Cの終局時と同一载荷方向面とし、各試験体の最大低下荷重時の変位を終局変位として算出した。

終局変位に対するじん性率 μ_2 の復元率は、試験体C1Rは81%、試験体C2Rは52%、試験体C3Rは164%である。試験体C3Rのじん性率 μ_2 の復元率は、損傷前の性能を遙かに上回っている。これは、ポリエステル製繊維シート補強により、かぶりコンクリートの剥落および軸方向鉄筋の座屈の進展を遅延させたためと考えられる。本手法は復旧材料として、変形性能の向上効果⁷⁾もあることを改めて確認できた。また、N点におけるじん性率 μ_1 では、その復元効果は見られなかったことから、本繊維巻き工法の効果は、N点以降で発揮されるといえる。

(5) エネルギー吸収能力

各試験体の水平変位に対する累積吸収エネルギー（ ΔW ）の比較を図-7に示す。ここで示す累積吸収エネルギーとは、接合部と柱部材でのエネルギー吸収量である。

各载荷ステップにおける吸収エネルギーの復元率は、終局時を除いて、各载荷ステップでは大きな変動はなく、平均で試験体C1Rは81%、試験体C2Rは67%、試験体C3Rは77%であった。また、終局時における累積吸収エネルギーの復元率は、試験体C1Rは59%、試験体C2Rは27%、試験体C3Rは138%であった。試験体C3Rの累積吸収エネルギーが100%を超えているのは、変形性能が損傷前の試験体よりも向上したためである。

4.3 繰返し载荷回数が3回と1回との違いおよびひび割れ注入範囲の違いによる復元効果

(1) 試験目的

ここでは、繰返し回数を3回とした試験体C4について、繰返し回数1回の試験体C1との比較により、繰返し回数の違いによる損傷度および補修による復元効果について述べる。また、これらの試験体のひび割れ注入範囲は、全面注入（試験体C4R）と部分注入（試験体C1R）であり、ひび割れ注入範囲の違いによる剛性復元効果の違いについても述べる。

(2) 荷重-変位関係の比較

第1回目の交番载荷試験および補修後の第2回目の交番载荷試験における降伏荷重時と最大荷重時の荷重復元率を表-18に示す。

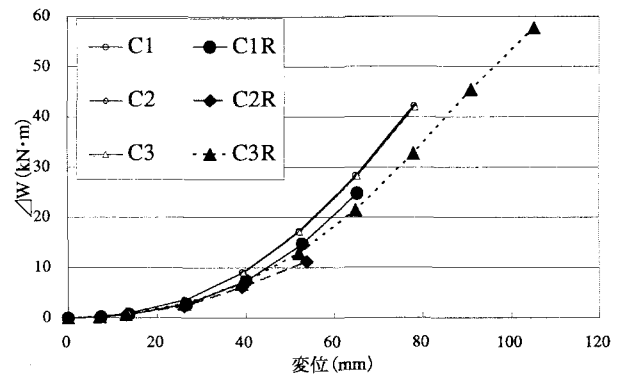


図-7 累積吸収エネルギーの比較

表-18 降伏時および最大荷重時の荷重復元率

試験体の種類	STEP	正 側			STEP	負 側			正負平均荷重復元率 (%)
		変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重復元率 (%)		変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重復元率 (%)	
降伏荷重時	C4		13.0	79.0	-1 δ_y	-12.7	-82.9	96	89
	C4R		13.0	64.6		-13.0	-79.4		
	C1		13.2	80.1		-13.0	-81.6		
	C1R		13.7	64.0		-13.8	-78.6		
最大荷重時	C4	+2 δ_y	26.0	93.4	-2 δ_y	-25.9	-94.8	113	109
	C4R	+3 δ_y	39.1	99.3		-26.1	-106.7		
	C1	+2 δ_y	25.2	95.0		-24.0	-96.7		
	C1R	+3 δ_y	37.0	99.7		-36.7	-110.4		

表-19 初期剛性の復元率

	正負	降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	初期剛性 (kN/mm)	平均剛性 (kN/mm)	復元率 (%)
C4	正側	79.0	13.0	6.08	6.30	88
	負側	-82.9	-12.7	6.53		
C4R	正側	64.6	13.0	4.96	5.53	85
	負側	-79.4	-13.0	6.10		
C1	正側	80.1	13.2	5.97	6.12	85
	負側	-81.6	-13.0	6.27		
C1R	正側	64.0	13.7	4.68	5.18	85
	負側	-78.6	-13.8	5.69		

降伏荷重時と最大荷重時の荷重復元率およびその荷重の大きさは、正負ともに同等の値を示している。繰返し回数3回の試験体C4Rの帯鉄筋が2本取替されていることおよびひび割れ注入範囲が異なることを除けば、その他の補修方法は同一であるため、繰返し载荷回数が3回と1回の場合では、降伏荷重時と最大荷重時の復元効果には大きな違いが無いものといえる。

(3) 初期剛性の復元率

初期剛性の復元率を表-19に示す。柱全面注入の試験体C4Rは88%、柱基部から1.5D区間の柱部分注入の試験体C1Rは85%であり、ひび割れ注入範囲の違いによる初期剛性の復元率に大きな差はみられない。

表-20 N点変位に対するじん性率 μ_1 の復元率

試験体 No	載荷 方向	降伏変位 (mm)	N点変位 (mm)	じん性率 (μ_1)	正負平均 じん性率	復元率 (%)
C4	正側	13.0	65.8	5.1	4.9	113
	負側	-12.7	-61.2	4.8		
C4R	正側	-	76.1	5.9	5.6	
	負側	-	-67.6	5.3		
C1	正側	13.2	82.5	6.3	6.1	88
	負側	-13.0	-76.1	5.9		
C1R	正側	-	69.3	5.2	5.3	
	負側	-	-64.5	5.5		

表-21 終局変位に対するじん性率 μ_2 の比較

試験体 No	載荷方向	降伏変位 (mm)	終局変位 (mm)	終局荷重 (kN)	じん性率 (μ_2)	復元率 (%)
C4	正側	13.0	79.1	29.4	6.1	116
C4R		-	91.8		7.1	
C1	負側	-13.0	-98.8	-30.4	7.6	81
C1R		-	-80.1		6.2	

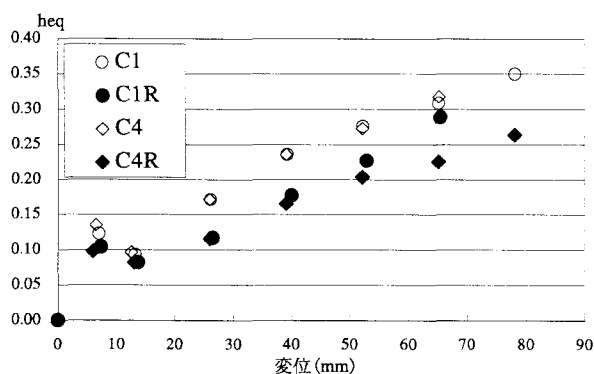


図-8 等価粘性減衰定数の比較

表-22 降伏時および最大荷重時の荷重復元率

	試験体の種類	正 側				負 側				正負平均 荷重復元率 (%)
		STEP	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重復元率 (%)	STEP	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重復元率 (%)	
降伏荷重時	C5	+1 δ_y	10.5	85.6	96	-1 δ_y	-10.5	-86.4	98	97
	C5R		10.5	82.3			-10.5	-84.4		
最大荷重時	C5	+2 δ_y	21.0	104.0	110	-2 δ_y	-20.9	-101.5	121	115
	C5R	+3 δ_y	26.1	114.6		-3 δ_y	-30.1	-122.5		

(4) 変形性能 (じん性率) の復元率

N点に対するじん性率 μ_1 の復元率を表-20に示す。繰返し回数1回の試験体C1Rの復元率88%に対し、繰返し回数3回の試験体C4Rの復元率は113%であった。

つぎに、終局変位に対するじん性率 μ_2 の復元率の比較を表-21に示す。試験体C1Rのじん性率 μ_2 の復元率は81%であり、試験体C4Rは116%である。繰返し回数が多い試験体の復元率が大い理由は、試験体C4Rは塑性領域の帯鉄筋2本を取替えて、かつ、帯鉄筋の継手

をフレア溶接により補修したため、じん性率が100%以上に復元できたものと考えられる。

なお、補修前の試験体C4と試験体C1のN点に対するじん性率 μ_1 を比較すると、試験体C4は試験体C1の80%であり、繰返し回数の違いによる影響がみられる。

(5) エネルギー吸収能力

繰返し回数が異なることの影響を、エネルギー吸収能力は等価粘性減衰定数 (heq) によって比較する。各載荷ステップにおける履歴ループから求めた等価粘性減衰定数を図-8に示す。等価粘性減衰定数の低下率は、補修試験体CRは2体とも、15~30%程度である。水平変位が40mm以降から、試験体C4Rと試験体C1Rの等価粘性減衰定数の値に差が徐々に生じている。このことから、繰返し載荷回数の違いは、最大荷重以降のポストピーク領域のエネルギー吸収能力に違いがあるものと考えられる。

4.4 試験体形状の違いおよび断面修復材の補修厚さの違いによる復元効果

比較試験体である試験体C5の補修による復元効果を以下に述べる。補修方法は、帯鉄筋の取替および整正、柱全面のひび割れへのエポキシ樹脂の注入、エポキシ樹脂モルタルによる断面修復であるが、他の試験体と異なるところは、断面修復厚さを30mmから50mmに変えているところである。

(1) 荷重-変位関係の復元率

第1回目の交番載荷試験および補修後の第2回目の交番載荷試験における降伏荷重時と最大荷重時の荷重復元率を表-22に示す。降伏荷重時と最大荷重時の正負平均の復元率は、それぞれ97%と115%であり、基本試験体に比べ、比較試験体は優れた復元率となっている。復元率が優れた理由としては、①比較試験体は基本試験体の形状と異なり、載荷方向に対して左右対象であるため、正負交番載荷による損傷がある1面側に局所化しないこと、②断面修復材の補修厚さが50mmと厚く、塑性ヒンジ箇所がせん断スパンの短くなる柱上方に拡大したこと、が大きな要因と考えられる。

(2) 終局時の損傷状況の比較

試験体C5およびこれを補修した試験体C5Rの終局時の損傷状況を写真-14, 15に示す。

試験体C5の終局は、-8 δ_y 載荷において、柱基部から1D区間で柱の軸方向鉄筋が座屈して終局を迎えた。終局時のかぶりコンクリートの剥落箇所は柱4面であり、写真-14に示す柱基部から1.3Dの範囲であった。一方、試験体C5Rの終局は、-9 δ_y 載荷において、柱基部からのせん断ひび割れが卓越し、終局に至った。終局時の変形量は、補修試験体C5Rのほうが大きい結果であった。

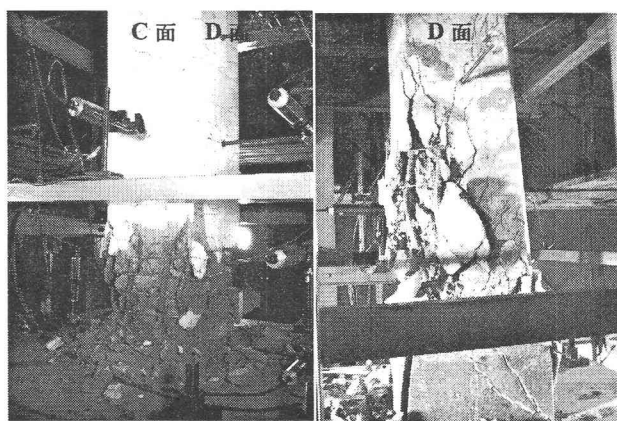


写真-14 C5(終局)

写真-15 C5R(終局)

表-23 初期剛性の復元率

	正負	降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	初期剛性 (kN/mm)	平均剛性 (kN/mm)	復元率 (%)
C5	正側	85.6	10.5	8.15	8.19	97
	負側	-86.4	-10.5	8.23		
C5R	正側	82.3	10.5	7.84	7.94	
	負側	-84.4	-10.5	8.04		

表-24 N点変位に対するじん性率 μ_1 の復元率

試験体 No	載荷 方向	降伏変位 (mm)	N点変位 (mm)	じん性率 (μ_1)	正負平均 じん性率	復元率 (%)
C5	正側	10.5	66.0	6.3	5.9	122
	負側	-10.5	-58.7	5.6		
C5R	正側	-	71.9	6.8	7.2	
	負側	-	-79.7	7.6		

表-25 終局変位に対するじん性率 μ_2 の比較

試験体 No	載荷 方向	降伏変位 (mm)	終局変位 (mm)	終局荷重 (kN)	じん性率 (μ_2)	復元率 (%)
C5	正側	10.5	86.8	37.0	8.3	110
C5R		-	95.5		9.1	

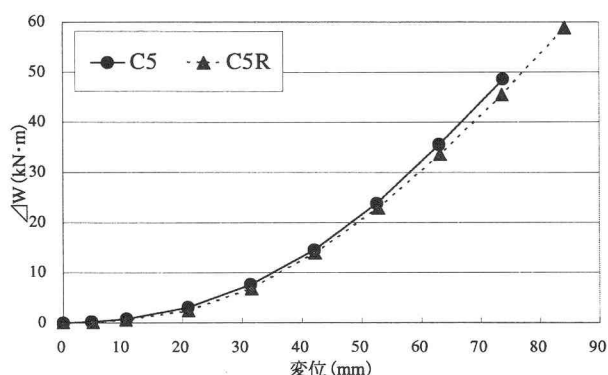


図-9 累積吸収エネルギー

(3) 初期剛性の復元率

初期剛性の復元率を表-23に示す。試験体C5Rの初期剛性の復元率は97%であり、概ね100%近くに復元されて

いる。しかしながら、初期剛性の復元率がよかったのは、損傷状況から補修箇所の剛性が強くなり、塑性ヒンジ区間が柱部材上方に拡大し、同一変位における作用モーメントが小さくなったことによるものと推測される。

(4) 変形性能（じん性率）の復元率

N点に対するじん性率 μ_1 の復元率を表-24に示す。試験体C5Rの復元率は122%であり、損傷前の試験体C5のじん性率を上回っている。

つぎに、終局変位に対するじん性率 μ_2 の復元率を表-25に示す。終局変位に対するじん性率 μ_2 の復元率についても、試験体C5Rは110%であり、損傷前の性能以上に復元されている。試験体C5Rは、前に述べた試験体C4Rと同様に、塑性領域の帯鉄筋4本を取替え、また、帯鉄筋の継手をフレア溶接としたため、損傷前の性能以上に向上されたものと考えられる。

(5) エネルギー吸収能力

水平変位と累積吸収エネルギー(ΔW)との関係を図-9に示す。

各載荷ステップにおける吸収エネルギーの復元率は、初期の載荷ステップの復元率が悪く、 $2\delta_y$ までは68%程度であったが、それ以降では94%程度であった。初期の載荷ステップの復元率が悪い理由としては、補修の際、注入幅の限界もあり、柱部材のひび割れを完全に注入できなかったためと考えられる。しかしながら、終局時における累積吸収エネルギーの復元率は121%であり、損傷前の性能以上に復元された。

5. まとめ

本研究により得られた知見は、以下のとおりである。

1) 補修材料の違いによる復元効果の比較においては、初期剛性の復元率は、ひび割れ注入材にエポキシ樹脂を用いて補修した試験体は2体とも約85%であった。一方、セメント系超微粒子注入材を用いて補修した試験体は65%であった。初期剛性の復元には、ひび割れ部への充填性が優れ、圧縮強度が大きいエポキシ樹脂が有効である。

最大荷重の復元率は、断面修復材としてエポキシ樹脂モルタルを用いて補修した試験体(RM補修試験体)は110%、ポリマーセメントモルタルにより補修した試験体(PCM補修試験体)は68%、超速硬セメントモルタル+ポリエステル繊維シートにより補修した試験体(HM補修試験体)は96%であった。最大荷重の復元には、エポキシ樹脂モルタルによる断面修復が有効である。

N点に対するじん性率の復元率は、RM補修試験体は88%、PCM補修試験体は0%、HM補修試験体は81%であった。一方、終局点に対するじん性率の復元率は、RM補修試験体は81%、PCM補修試験体は52%、HM補修試験体は164%であった。ポリエステル製繊維シートは、N点

以降のじん性率の復元効果に大きく寄与する。

よって、繰返し回数1回で軸力が保持できない損傷レベル4まで損傷させたRC柱についても、エポキシ樹脂によるひび割れ注入、エポキシ樹脂モルタルによる断面修復、帯鉄筋の整正を行うことにより、初期剛性、最大耐荷重およびじん性率は81%以上に復元可能である。

2) 繰返し載荷回数が3回と1回との違いおよびひび割れ注入範囲の違いによる復元効果の比較では、降伏荷重および最大荷重の復元率には、繰返し回数3回と1回の違いによる試験方法での影響は見られない。繰返し回数の違いによる影響は、ポストピーク領域におけるエネルギー吸収能力で見られるが、試験方法での影響があるとはいえない値であった。

塑性化した帯鉄筋を取替えた繰返し回数3回のRM補修試験体では、じん性率、累積吸収エネルギーともに100%以上に復元した。最終的には、繰返し回数3回で軸力が保持できない損傷レベル4まで損傷させたRC柱についても、エポキシ樹脂によるひび割れ注入、損傷した帯鉄筋の交換・整正、並びにエポキシ樹脂モルタルでの断面修復による補修を行うことにより、初期剛性を除いて、保有性能は損傷前の性能と同等以上に復元できる。列車運行再開へ向けた応急処置としては、この値は十分な評価を得る値である。

また、柱全面注入と柱基部から1.5D区間への柱部分注入のひび割れ注入範囲の違いでは、初期剛性の復元率に大きな差はみられなかった。

3) 試験体形状の違いおよび断面修復材の補修厚さの違いによる復元効果の比較では、エポキシ樹脂モルタルによる断面修復材の厚さを50mmで補修した比較試験体の初期剛性の復元率は97%、降伏荷重時と最大荷重時の正負平均の復元率は、それぞれ97%と115%であり、断面修復材の厚さ30mmの場合に比べ、降伏時の荷重の復元率に大きな効果がみられた。比較試験体は、基本試験体の形状と異なり、正負交番載荷による損傷がある1面側に局所化しないが、断面修復材の補修厚さの影響のために、塑性ヒンジ箇所が柱上方に拡大したことにより、損傷度が大きくなることが確認された。したがって、剛性が大きくなる材料を使用する場合には、断面修復材の補修厚さには、十分留意する必要がある。

6. あとがき

本研究では、兵庫県南部地震以降に事前対策として実施されている耐震補強対象外の曲げ破壊先行型の鉄道高架橋柱について、事後対策としての補修による有効性を確認した。損傷レベル4における軸力を保持できなくなった損傷柱についても、エポキシ樹脂によるひび割れ注入、損傷した帯鉄筋の交換・整正、並びにエポキシ樹脂モル

タルを用いた断面修復による補修を施すことにより、初期剛性を除いて、保有性能は損傷前の性能と同等以上に復元することを確認した。しかしながら、本復旧のためには、柱部材全域を鋼板などにより、被覆補強が必要と考える。

なお、早期復旧を考慮すると、鋼板巻き工法の代用として、作業性がよく、材料加工、溶接作業等が不要な補修方法が必要である。特に、N点を超える大変形領域での変形性能を向上させる目的ならば、本実験で採用したポリエステル繊維シート等の繊維巻き工法も有効であると思われる。

実験で採用したエポキシ樹脂およびエポキシ樹脂モルタル等の補修材料は、汎用性、施工性並びに貯蔵性を踏まえ選定した。しかしながら、本実験結果を踏まえ、今後、さらに合理的、かつ適正な材料を求めたいと考える。

謝 辞

本模型試験を実施するにあたり、清水建設(株)技術研究所の滝本氏から貴重な助言を受けた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 鋼板巻立て補強編，1999.7.
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.10.
- 3) 稲熊 弘，町田文昭，中嶋 繁，滝本和志：実高架橋の柱部材を用いた補修効果確認実験，土木学会第57回年次学術講演会，V-122，2002.9.
- 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，No.648，V-47，pp.55-69，2000.5.
- 5) 小林 薫，中山弥須夫，石橋忠良：大変形領域の交番載荷荷重により損傷したRC柱の補修効果に関する実験的研究，「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集，pp209-214，1997.4.
- 6) 石橋忠良，吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究，土木学会論文集，No.390，V-8，pp.57-66，1988.2.
- 7) 稲熊 弘，関 雅樹：鉄道高架橋柱のポリエステル繊維巻き耐震補強に関する実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.50A，pp.515-526，2004.3.
- 8) 関 雅樹，水谷健太，中野 聡，西村昭彦：兵庫県南部地震によるラーメン高架橋の振動特性に関する考察，土木学会論文集，No.550，V-33，pp.145-153，1996.1.

(2004年9月17日受付)