

# 論文 鉄道高架橋の鋼板巻き補強柱の復旧方法に関する実験的研究

稲熊 弘<sup>\*1</sup>・関 雅樹<sup>\*2</sup>

**要旨**：鉄道高架橋の鋼板巻き耐震補強柱の震災復旧方法を確立することを目的として、高架橋の縦梁、横梁並びに接合部を模擬した鋼板巻き補強単柱試験体を用いて、補修による復元性能を確認する交番載荷試験を実施した。その結果、ポストピーク領域における降伏荷重の50%を下回るまで損傷させた柱でも、アンカーボルトと鋼板を用いて、損傷部の接合部を補修することにより、補修後の耐震性能は既性能と同等に復元できることを確認した。

**キーワード**：鉄道高架橋柱、鋼板巻き補強、交番載荷試験、復旧方法、復元力効果

## 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以降、鉄道では、RC ラーメン高架橋（以下、高架橋）のせん断破壊先行型の柱部材を対象に、鋼板巻き補強<sup>1)</sup>などの耐震補強を実施している。平成16年10月23日に発生した新潟中越地震では、上越新幹線高架橋の一部の柱部材に損傷を受けたが、鋼板巻き補強された柱には目立った損傷は無く、実構造物においても、その補強効果が示された。しかしながら、東海地震、南海地震、東南海地震などの大規模地震の到来が予測されるなか、耐震補強された高架橋柱でも、震源地からの距離や地盤種別などの立地条件によっては、ある程度の損傷を受ける可能性も考えられる。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（列車運行休止期間）の短縮には、事前対策としての構造物に致命的な損傷を生じさせないための耐震補強のほか、事後対策として、損傷を受けた構造物の復旧方法を確立しておく必要がある。また、復旧方法は、構造物の種別ごとに、損傷が発生する部位を予測し、損傷度に応じた補修方法あるいは取替方法を整備しておく必要がある。著者らは、耐震補強対象外である曲げ破壊

先行型の無補強 RC 柱の復旧方法について、大損傷を受けた RC 柱の補修効果に関する実験研究<sup>2)</sup>を行った。本研究では、大変形領域まで損傷した鋼板巻き補強柱の復旧方法を確立するため、実高架橋を模擬した単柱試験体を用いた静的正負交番載荷試験（以下、載荷試験）を実施し、橋軸方向と橋軸直角方向の2方向のケースについて、補修による場合の復元効果を確認した。

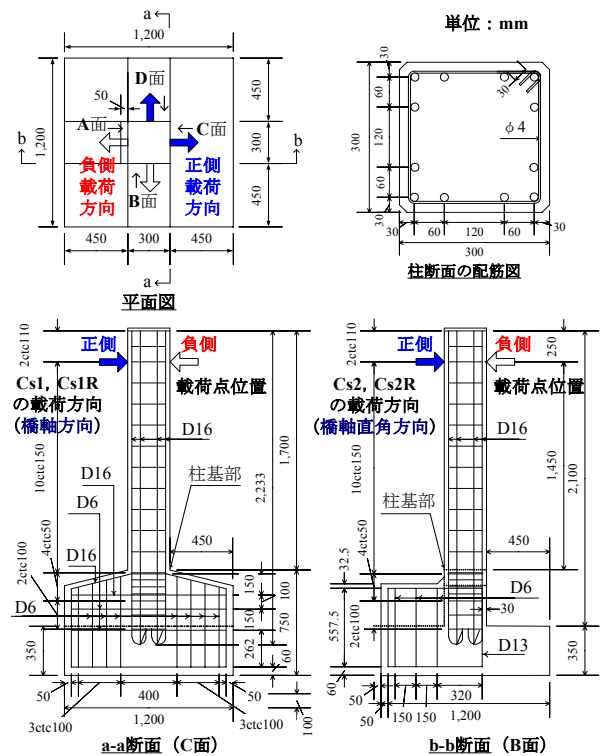


図-1 試験体の配筋図

\*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 コンクリートグループ (正会員)

\*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 博(工) (正会員)

表一 試験体の種類

試験体No	試験体の種別	荷重方向
Cs1	鋼板巻き補強試験体	橋軸方向
Cs1R	Cs1を補修した試験体	
Cs2	鋼板巻き補強試験体	橋軸直角方向
Cs2R	Cs2を補修した試験体	

表二 試験体の補修方法

試験体No	補修方法	使用材料
Cs1R	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
Cs2R	ひび割れ注入	エポキシ樹脂
	柱部断面修復	エポキシ樹脂モルタル
	接合部	鋼板+アンカー
	接合部断面修復	無収縮モルタル

表三 試験体の諸元

試験体No	柱断面寸法 b×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 <sub>t</sub> (%)	軸方向鉄筋比 P (%)	帯鉄筋比 P <sub>w</sub> (%)
Cs1	300×300	270	1.45	5.37	D16×4 0.981	D16×12 2.648	φ4-1ctc50 0.168
Cs2							

表四 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 <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 E <sub>c</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
Cs1	コンクリート	22	26.7	28.3	0.210
	無収縮モルタル	12	48.9	24.3	0.207
Cs2	コンクリート	37	27.6	28.4	0.207
	無収縮モルタル	18	47.9	22.9	0.204

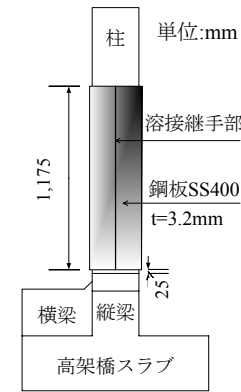
表五 鋼材の材料試験値

鋼材の種類	降伏強度 f <sub>sy</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 f <sub>su</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 E <sub>s</sub> (kN/mm <sup>2</sup> )	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	φ4	534.0	588.9	205.5	2,600	13.6

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体の概要

試験体は、高架橋の柱上端部を模擬したものであり、高架橋スラブ、縦梁、横梁及び接合部を模擬した試験体である。試験体のモデルは、東海道新幹線の複線の標準高架橋であり、試験体の各部位の断面寸法は、実構造物の1/2に縮小したものである。試験体数は同一試験体の2体であり、それぞれ橋軸方向と橋軸直角方向に荷重



図一 試験体の断面図  
図二 補強範囲

試験により損傷させ<sup>3)</sup>、補修後、再度、荷重試験を実施した。試験体の種類と補修方法を表一、二、試験体の諸元と配筋図を表三、図一、コンクリート及び鋼材の材料試験値を表四、五、鋼板巻き補強範囲を図二にそれぞれ示す。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。鋼板巻き補強の仕様<sup>1)</sup>に準拠したものであり、試験体のスケールに合わせ、鋼板厚さ(実構造物 t=6mm)を除き、実際の補強仕様の1/2とした。

### 2.2 交番荷重試験

荷重試験は、試験体を上下方向に逆にした状態で実施した。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、実際の高架橋の柱の中間部となる位置とした。

荷重方法、繰返し回数及び荷重パターンは、全試験体ともに同一である。荷重方法は変位制御とし、繰返し回数は柱主鉄筋の低サイクル疲労による破断を懸念して正負1回ずつとした。荷重パターンは、計算降伏荷重の75%の予備荷重と降伏変位の整数倍の変位を±4δ<sub>y</sub>まで荷重した後、偶数倍(±6δ<sub>y</sub>, ±8δ<sub>y</sub>, ±10δ<sub>y</sub>...)での正負交番荷重とした。降伏変位の設定については、試験体Cs1とCs2は、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、鉄筋の引張試験により求めた降伏ひずみ2,030μに達した時点の変位とした。一方、試験体Cs1RとCs2Rは、主鉄筋が既に降伏しているため、損傷前の試験体Cs1とCs2の降伏変位とした。

水平荷重の加力範囲は、想定地震力には関係無く、履歴ループの最大荷重が降伏荷重の50%を下回る時点を目標に実施した。なお、本実験における試験体では、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。

表－6 断面修復材の材料試験値

試験体 No	対象部位	断面修復材の種類	材令 (日)	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
Cs1R	柱 接合部	エポキシ樹脂 モルタル	13	55.2	12.6	0.258
Cs2R	柱	エポキシ樹脂 モルタル	13	55.2	12.6	0.258
	接合部	無収縮セメント モルタル	12	43.2	20.5	0.182

表－7 断面修復の補修実績

柱基部からの高さ (mm)	試験体Cs1R				試験体Cs2R			
	A面	B面	C面	D面	A面	B面	C面	D面
0	27	68	39	53	43	30	29	21
-100			41				30	
-200			26				30	
-300							30	
-400							52	

「柱基部からの高さ」のマイナスは、接合部内の方向を示す

水平交番荷重中の軸力<sup>3)</sup>は、全試験体ともに一定軸力294kNを荷重した。また、試験体Cs2とCs2Rについては、一定軸力に加えて、荷重試験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。

### 2.3 補修方法

#### (1) 柱部材のひび割れ注入方法

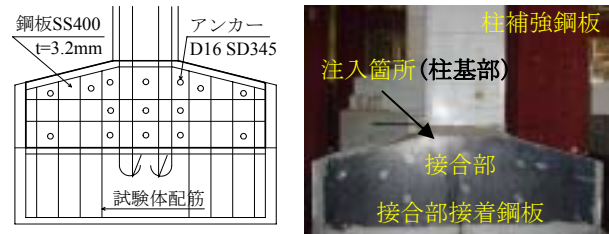
ひび割れ注入の施工は、柱補強鋼板の整正や取り外しをしないことを前提とした。注入対象範囲は、両試験体ともに、図－3に示す柱補強鋼板と接合部との隙間の柱基部を対象とした。ひび割れ注入に用いた材料はエポキシ樹脂であり、材令28日の圧縮強度は66.4N/mm<sup>2</sup>であった。

#### (2) 柱部材の断面修復方法

柱部材の断面修復方法は、両試験体とも同一であり、粉砕したコンクリート粉及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って補修した。断面修復の施工は、実構造物での施工を考慮して、コテ仕上げによる方法とした。一方、柱補強鋼板部については、補強鋼板とRC柱部材との隙間に断面修復材を詰め込んだ。断面修復材の

表－8 補修方法の分類と帯鉄筋の補修実績

試験体 No	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
Cs1R	柱基部	コテ仕上げ	1	1	0
Cs2R			0	5	0



図－3 試験体 Cs2R の接合部の補修概要

材料試験値を表－6、断面修復の補修実績（元の断面からの増加量）を表－7に示す。

#### (3) 鉄筋の整正方法

柱の主鉄筋の整正は、座屈した状態で再利用し、一切補修は施さないこととした。一方、帯鉄筋の整正についても、主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、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。

- フックが外れたものは、曲げ加工による整正
- 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
- 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

補修前の損傷させた試験体の軸方向変位は、荷重試験実施前に対して、2体とも0.4mm伸びた状態であり、荷重試験中の経験最大軸方向変位の伸び量は、試験体Cs1とCs2はそれぞれ3.6mmと2.4mmであった。つぎに、帯鉄筋の補修実績を表－8に示す。帯鉄筋の整正箇所は、全て柱基部と接合部内である。

#### (4) 接合部の補修方法

接合部の補修方法は、試験体Cs1Rは柱部材の断面修復方法と同様に、エポキシ樹脂モルタルによる断面修復とした。一方、試験体Cs2Rは図－3に示す鋼板接着による方法とした。接合部に用いた鋼板は、柱部材の補強鋼板と同一の厚さ

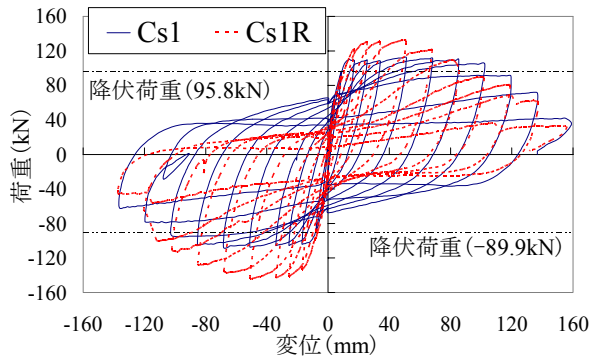


図-4 Cs1/Cs1Rの荷重-変位履歴曲線

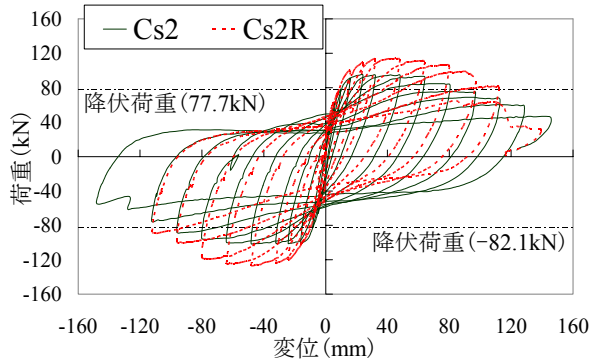


図-5 Cs2/Cs2Rの荷重-変位履歴曲線

3.2mm (SS400) とし、鋼板と接合部との隙間には、柱の補強鋼板の充填材と同一の無収縮モルタルを充填した。また、鋼板の接着方法は、無収縮モルタル (表-6) によるあと施工アンカー定着とし、アンカーの埋込み長は  $15\phi$ 、アンカー材料は異形鉄筋 D16 (SD345) を用い、鋼板とアンカーとの定着はプレストレスを導入しないで、ナットで結合した。アンカーの本数は、水平荷重の載荷位置から接合部中心までの長さをせん断スパンとして、試験体の最大荷重を作用させた場合に対する発生応力に 1.2 倍の安全率を加えた荷重に耐えうるように決定した。

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 終局時の損傷状況

荷重-変位履歴曲線を図-4, 5, 載荷終了後の終局時の損傷状況を写真-1~4 に示す。

損傷状況の観察から、試験体 Cs1R の損傷箇所は、試験体 Cs1 の損傷部と概ね同一箇所であった。一方、試験体 Cs2R については、試験体 Cs2 では接合部に損傷が集中し、柱部にはほとんど



写真-1 Cs1 (C面)



写真-3 Cs2 (C面)



写真-2 Cs1R (C面)



写真-4 Cs2R (C面)

損傷が生じていなかったが、試験体Cs2Rでは、柱部にも損傷が生じていた。これは、接合部を鋼板で補修したことにより、塑性箇所が上方へ移行したためと思われる。試験体Cs2Rの接合部の損傷は、アンカーの抜け出しや破断はなかったものの、写真-4から伺えるように、接合部に接着した鋼板がかなり変形していた。

#### 3.2 荷重-変位関係の復元率

降伏荷重時と最大荷重時の荷重複元率を表-9、荷重-変位履歴曲線から求めた包絡線の比較を図-6に示す。降伏荷重時の正負平均の荷重複元率は、試験体Cs1Rは103%、試験体Cs2Rは91%であり、最大荷重時の荷重複元率は、試験体Cs1Rは126%、試験体Cs2Rは123%である。試験体Cs1Rは、降伏時の荷重及び最大荷重ともに、既性能以上に復元されている。また、試験体Cs2Rについても、降伏時の荷重複元率は91%であるが、最大荷重は既性能以上に復元されている。図-6の包絡線の比較からも、橋軸方向載荷の試験体Cs1Rの最大荷重までの履歴特性は、橋軸直角方向載荷の試験体Cs2Rに比べて、大きく改善されている。試験体Cs1Rが試験体Cs2Rよりも復元性能が優れている理由としては、試験体形状が左右対称であることによるものと考えられる。ま

表-9 降伏時及び最大荷重時の荷重複元率

試験体の種類	正側				負側				正負平均荷重複元率 (%)
	STEP	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重複元率 (%)	STEP	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重複元率 (%)	
降伏荷重時	Cs1	+1 $\delta_y$	8.6	95.8	-1 $\delta_y$	-7.8	-89.9	112	103
	Cs1R		8.5	90.6		-8.6	-100.5		
	Cs2	9.8	77.7	-8.0	-82.1	85			
	Cs2R	8.0	74.7	-8.1	-70.1				
最大荷重時	Cs1	+6 $\delta_y$	49.2	112.1	-8 $\delta_y$	-65.9	-108.0	133	126
	Cs1R	+6 $\delta_y$	49.1	132.3	-6 $\delta_y$	-49.6	-143.7	125	
	Cs2	+6 $\delta_y$	42.3	94.7	-6 $\delta_y$	-44.3	-101.2	125	
	Cs2R	+6 $\delta_y$	45.3	114.0	-6 $\delta_y$	-46.1	-126.5		

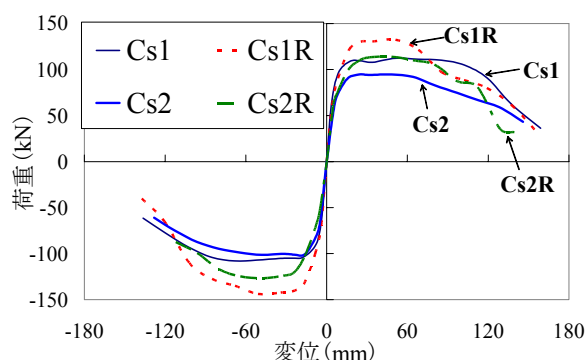


図-6 包絡線

た、座屈した鉄筋を用いた試験体の最大荷重が、既性能以上に改善された理由としては、損傷箇所を元の材料よりも強度が大きい材料で補修し、かつ、断面増となったことから、塑性ヒンジ領域が元の損傷位置から、せん断スパンが短くなる方向の位置に移行したためと考えられる。

### 3.3 初期剛性の復元率

初期剛性の復元率を表-10に示す。試験体Cs1RとCs2Rの降伏変位は、それぞれ試験体Cs1とCs2の降伏変位であり、初期剛性は、降伏点における割線剛性である。試験体Cs1Rと試験体Cs2Rの初期剛性の復元率は、それぞれ99%と100%であり、既性能と同等まで復元されている。

### 3.4 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（N点変位）に対するじん性率  $\mu_1$  の復元率を表-11に示す。ここで示すじん性率  $\mu_1$  とは、各試験体の荷重-変位履歴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。試験体Cs1RとCs2Rの復元率は、それぞれ90%と116%で

表-10 初期剛性の復元率

試験体 No	載荷種別	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 (%)
Cs1	正側	95.8	8.6	11.16	11.31	99
	負側	-89.9	-7.8	11.46		
Cs1R	正側	90.6	8.5	10.63	11.15	
	負側	-100.5	-8.6	11.67		
Cs2	正側	77.7	9.8	7.97	9.03	100
	負側	-82.1	-8.1	10.10		
Cs2R	正側	74.7	8.0	9.35	9.03	
	負側	-70.1	-8.1	8.71		

表-11 N点変位に対するじん性率の復元率

試験体 No	載荷種別	降伏変位 (mm)	N点変位 (mm)	じん性率 ( $\mu_1$ )	正負平均じん性率	復元率 (%)
Cs1	正側	8.6	114.6	13.3	13.4	90
	負側	-7.8	-106.3	13.6		
Cs1R	正側	-	87.1	10.1	12.1	
	負側	-	-110.6	14.1		
Cs2	正側	9.8	90.6	9.2	11.1	116
	負側	-8.0	-103.9	13.0		
Cs2R	正側	-	113.7	11.7	12.8	
	負側	-	-112.1	14.0		

表-12 終局変位に対するじん性率の復元率

試験体 No	載荷種別	降伏変位 (mm)	終局変位 (mm)	終局荷重 (kN)	じん性率 ( $\mu_2$ )	復元率 (%)
Cs1	正側	8.6	155.0	42.0	18.0	97
		-	150.1		17.5	
Cs2	正側	9.8	144.0	43.3	14.7	87
		-	124.4		12.8	

あり、軸力を保持できなくなるまで損傷させても、帯鉄筋を整正することにより、N点までのじん性率は90%以上復元されている。つぎに、軸力を保持できなくなった変位（終局変位）に対するじん性率  $\mu_2$  の復元率の比較を表-12に示す。終局変位の設定は、損傷前の試験体Csの終局は、正負のどちらかで降伏荷重の50%を下回った時点と定めて載荷試験を実施したことから、補修後の試験体CsRの終局変位の設定は、試験体Csの終局時と同一載荷方向面とし、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  $\mu_2$  の復元率は、試験体Cs1Rが97%、試験体Cs2Rが87%である。なお、試験体Cs2RのN点に対するじん性率  $\mu_1$  の復元率が116%と優れているのに対し、終局変位に対するじん性率  $\mu_2$  の復元率が87%と劣っているのは、

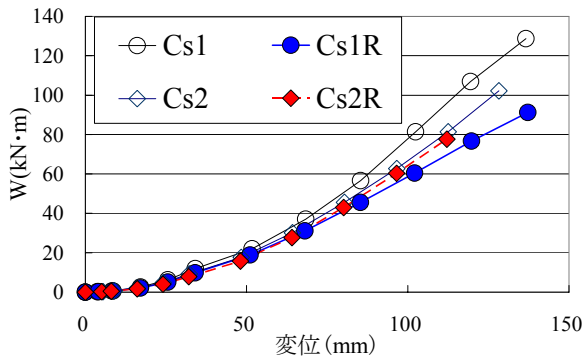


図-12 累積エネルギー吸収量の比較

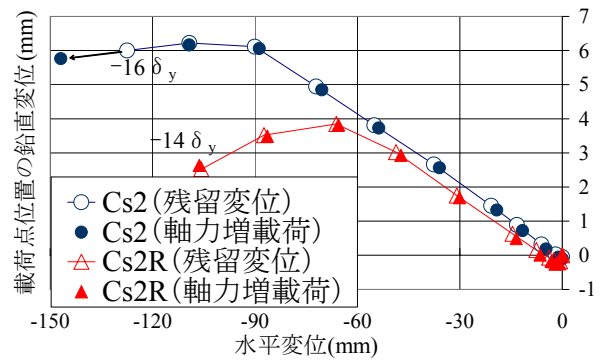


図-13 残留変位と鉛直変位との関係

軸方向鉄筋が荷重中に破断したためである。

### 3.5 エネルギー吸収能力

各試験体の水平変位に対する累積エネルギー吸収量 (W) の比較を図-12に示す。試験体Cs2とCs2Rの比較では、水平変位112mmまでの累積エネルギー吸収量は同等であり、補修効果が伺われる。一方、試験体Cs1とCs1Rとの比較では、水平変位が約50mmから累積エネルギー吸収量に差が生じており、水平変位140mm程度では30%の差が生じている。橋軸直角方向荷重の試験体Cs2Rの復元性が優れ、橋軸方向荷重の試験体Cs1Rの復元性が劣っている理由としては、接合部の鋼板接着の有無によるものと考えられる。

### 3.6 軸力抵抗の復元力

試験体Cs2及びCs2Rの負側の各荷重ステップにおける残留変位 (軸力294kN荷重時) と軸力増載荷時 (422kN) の荷重点における鉛直変位との関係を図-13に示す。 $-14\delta_y$ までの範囲 (水平変位112mm) では、軸力を増加させても、水平変位は小さくなる傾向にある。 $-14\delta_y$ までの範囲では、軸力を294kNから422kNまで増加させた場合における水平変位 $H_d$ と鉛直変位 $V_d$ の最大移動量の絶対値は、試験体Cs2が $H_d=1.7\text{mm}$ と $V_d=0.2\text{mm}$ 、試験体Cs2Rが $H_d=1.5\text{mm}$ と $V_d=0.1\text{mm}$ であり、N点変位までの残留変位であれば、増載荷軸力による影響は小さいといえる。

## 4. まとめ

交番荷重試験により、履歴ループの最大荷重が降伏荷重の50%を下回るまで損傷させた鋼板

巻きRC柱を補修し、再度、交番荷重試験を実施した結果から、得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 橋軸荷重方向の試験体は、柱基部のひび割れ注入、柱基部及び接合部の断面修復、並びに接合部内の帯鉄筋の整正を施すことにより、初期剛性の復元率は99%、最大荷重の復元率は126%、N点に対するじん性率は90%、終局変位に対するじん性率は97%、終局時における累積エネルギー吸収量の復元率は70%であった。
- (2) 橋軸直角荷重方向の試験体は、柱基部のひび割れ注入及び断面修復、接合部内の帯鉄筋の整正、並びに接合部の鋼板接着を施すことにより、初期剛性の復元率は100%、最大荷重の復元率は123%、N点に対するじん性率は116%、終局変位に対するじん性率は87%、終局時における累積エネルギー吸収量の復元率は76%であった。

## 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) 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.
- 3) 稲熊 弘，関 雅樹，岩田秀治：荷重方向の違いによる高架橋柱の耐震性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1345-1350，2004.3.