

論文 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

渡邊 一悟^{*1}・池田 憲二^{*2}・岸 徳光^{*3}・長谷川 正^{*4}

要旨：地震により被災したRC橋脚の合理的な補修工法を確立することを目的として、エポキシ樹脂注入補修を施したRC橋脚模型に関する正負交番載荷実験を行った。供試体は、実際の補修工事に極力近い条件を再現するため、あらかじめ損傷を与えた実規模RC橋脚模型である。実験の結果、補修後の供試体は、降伏変位時の剛性が低下するものの、補修前の供試体と同程度以上の塑性変形性能を有すること等が明らかとなった。

キーワード：エポキシ樹脂注入，RC橋脚，補修，靱性能，実規模供試体

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震において、多くのRC橋脚が甚大なる被害を受けたことから、部材降伏以降の塑性変形性能に着目した地震時保有水平耐力法による設計手法が本格的に導入され、RC橋脚の耐震性能は飛躍的に向上している。

しかしながら、本設計手法では、塑性領域における損傷を許容することから、被災後の供用には、機能回復のための補修を行う必要がある。

著者らはこれまでに、被災後のRC橋脚に対する合理的な補修技術を確立することを目的として、水平交番載荷により損傷を与えた小規模RC橋脚供試体に対してエポキシ樹脂注入補修を施し、補修完了後に再度交番載荷を行う方法で補修効果の確認実験を行っている。

実験の結果、かぶりコンクリートが膨らみ出さない程度の損傷範囲で補修を施した供試体は、初期剛性が低下するものの、補修前と同程度以上の耐震性能を確保できること、かぶりコンクリートが膨らみ出した後に補修を施した供試体は、十分な補修効果が得られないこと等が明らかになっている。¹⁾

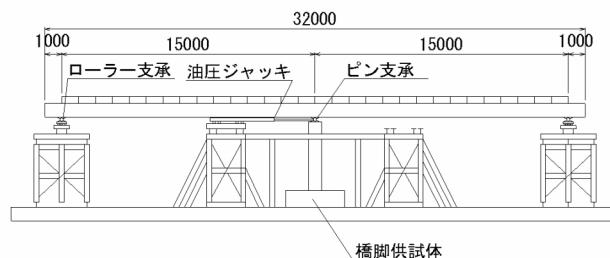


図-1 実験装置概要図

また、ひび割れへのエポキシ樹脂注入効率は、ひび割れ開口幅、深さに依存するため、補修対象となる構造物のひび割れ性状をできる限り再現することが、実際の補修工事における補修効果の評価を行うために重要であると考えられる。

そこで、本研究では、躯体寸法、鉄筋比、荷重載荷条件等を実構造物に極力近づけるために、実規模RC橋脚供試体を用いた正負交番載荷実験を行い、ひび割れ補修効果について評価・検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験方法

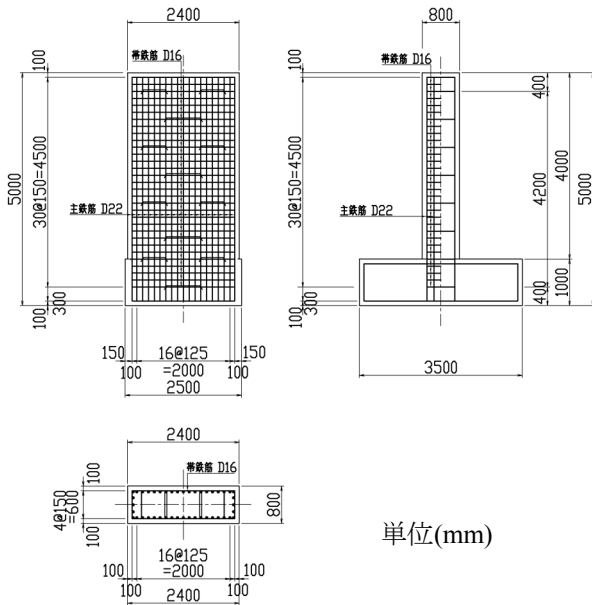
図-1に実験装置概要図を示す。水平交番載荷実験は、実構造物に極力近い荷重状態を再現

*1 北海道開発土木研究所 構造研究室研究員 (正会員)

*2 北海道開発土木研究所 構造研究室室長 (正会員)

*3 室蘭工業大学 建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*4 (株)長大 札幌支店 技術部門



図－２ 供試体形状・配筋概要図

するため、橋梁上部工を模した鋼桁をRC橋脚供試体上に搭載した状態で行った。実験装置は、全長 15.0+15.0=30.0m、幅員 3.0m、桁高 0.8m、総重量 1058kN の鋼製 2 主桁、上下部工を接合する支承部、油圧ジャッキ、反力架台で構成されている。なお、支承条件は中間支点部をピン支承、桁両端の橋台部ではローラー支承とする、中間支点部 1 点固定としている。

実験は、中間支点部の RC 橋脚供試体に桁重量による鉛直荷重 747.3kN (実測値) が作用する状態で、RC 橋脚供試体上のピン支承支点部に設置した圧縮・引張両用の油圧ジャッキにより水平方向に交番加力することにより実施した。

交番荷重は、軸方向鉄筋の降伏ひずみを材料試験により得られた 1920μ と設定し、橋脚基部の鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の荷重点変位を降伏変位 δy 、その時点の荷重を降伏荷重 P_y とし、 $2\delta y$ 、 $3\delta y$ ・・・と変位振幅を漸増させることにより行った。なお、各変位振幅毎の繰り返し荷重回数は 3 回としている。

終局変位は、各変位振幅の 1 回目荷重時における正負いずれかの荷重荷重が降伏荷重 P_y を下回った時点と定義している。

なお、補修供試体については、予備荷重により所定の損傷を与えた後に補修を行い、再度載

表－１ 供試体一覧表

供試体名	予備荷重 変位振幅	樹脂注入 延長(mm)	樹脂注入量 (cc)
4.0-N	—	—	—
4.0-R-4	$4\delta y$	19,345	12,333
4.0-R-6	$6\delta y$	38,640	27,101

表－２ 使用材料の力学的特性値

供試体名	材料名	圧縮強度(MPa)	
		予備荷重時	補修後
4.0-N	コンクリート	26.2	—
4.0-R-4	コンクリート	31.1	32.4
	エポキシ樹脂	—	48.4
4.0-R-6	コンクリート	27.7	31.1
	エポキシ樹脂	—	60.4

荷実験を行うものとした。予備荷重の段階で軸方向鉄筋ひずみゲージが測定不可能となることから、補修供試体の繰り返し荷重の基準変位は、基準供試体の降伏変位 δy を用いるものとした。

2.2 供試体

供試体は、道路橋で一般に見られる壁式 RC 橋脚を想定し、実橋脚に極力近い規模のものを用いた。図－２には供試体の形状寸法・配筋概要図を示している。

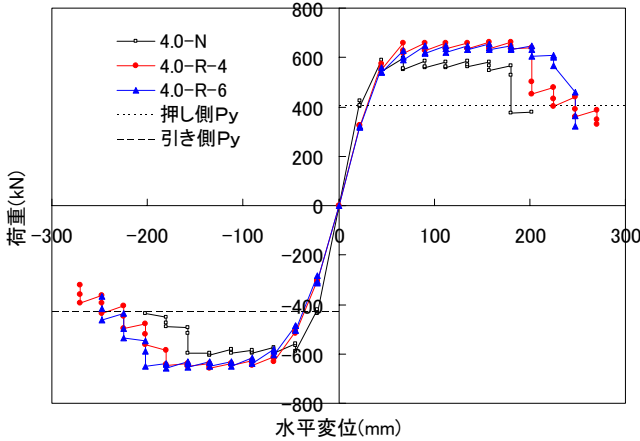
供試体形状寸法は、躯体高 4.0m、断面寸法 $0.80\text{m} \times 2.40\text{m}$ の長方形断面(辺長比 1:3)であり、引張鉄筋比は $P_t=0.38\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s=0.24\%$ である。

道路橋示方書耐震設計編²⁾に準拠して算出した本供試体の保有水平耐力は $P_a=469\text{kN}$ 、降伏変位は $\delta y=17.6\text{mm}$ 、許容塑性率は $\mu_a=5.562$ であった。

補修を行う供試体は、損傷状況としてひび割れ幅が 1mm 程度まで進展した状態から、かぶりコンクリートが膨らみ出す寸前までの状態を想定し、予備荷重を $4\delta y$ 、 $6\delta y$ の 2 段階に設定した。ひび割れの補修は、被災後に残留傾斜を戻して補修することを想定し、予備荷重終了後、

表－3 実験結果一覧表

供試体名	変位(mm)		荷重(kN)		塑性率
	δy	δu	P_y	P_a	$\delta y / \delta u$
4.0-N	22.5	202.5	431	606	9
4.0-R-4	22.5	270.0	316	662	12
4.0-R-6	22.5	247.5	315	657	11



図－3 荷重変位関係包絡線

水平変位を 0 に戻した状態で低圧低速注入工法にてエポキシ樹脂注入を行っている。

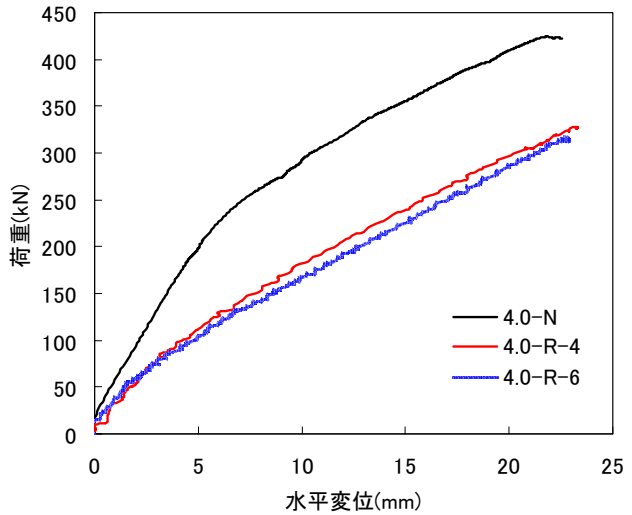
表－1には使用した供試体の一覧を示している。表中、供試体名の第1項目は供試体高、第2項目は補修の有無（N：無補修，R：樹脂注入）、第3項目は予備載荷変位振幅（ $\delta / \delta y$ ）を示している。

供試体製作に用いたコンクリートは呼び強度 24MPa の普通コンクリートであり、鉄筋は SD345 材である。鉄筋の平均降伏点強度は 390MPa であった。表－2にはコンクリート及びエポキシ樹脂の材料試験結果を一覧にして示している。なお、コンクリート材料の補修前後における圧縮強度は円柱供試体を用いた試験結果に基づいて評価している。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

表－3には、実験結果を一覧表にして示している。表中の δy 、 P_y は降伏時の載荷点変位、



図－4 荷重変位包絡線（載荷開始～ $1 \delta y$ ）

荷点荷重を、 P_a は載荷荷重の最大値を、 δu は終局時の変位を示している。また、図－3には、荷重－変位関係の包絡線を示している。補修後の供試体の降伏荷重 P_y は、いずれの場合も無補修供試体 4.0-N の 73%程度と低い値を示している。しかしながら、 $3 \delta y$ 載荷以降の荷重は、無補修供試体の荷重を上回っており、最大荷重は逆に 8～9%程度大きな値を示している。また、終局変位は 4.0-N 供試体が 202.5mm ($9 \delta y$) であるのに対して 4.0-R-4 供試体では 270.0mm ($12 \delta y$)、4.0-R-6 供試体では 247.5mm ($11 \delta y$) であり、基準供試体である無補修供試体 4.0-N より大きな値を示した。

図－4には、載荷開始から $1 \delta y$ の1回目押し載荷までの荷重－変位関係を示している。図より、4.0-N 供試体では、ひび割れ発生前の水平変位 0～6mm までの剛性と、ひび割れ発生後の水平変位 6mm～22.5mm までの剛性に明瞭な差が見られるのに対して、4.0-R-4、4.0-R-6 供試体では、載荷開始から $1 \delta y$ まで明確な剛性変化が見られず、4.0-N 供試体のひび割れ発生後の、水平変位 6mm～22.5mm における剛性と同程度であることがわかる。

これは、エポキシ樹脂注入を行った場合の初期曲げ剛性が、エポキシ樹脂注入が不可能な微細なひび割れ（ひび割れ幅 0.05mm 程度以下）が残存することによって、基準供試体のひび割れ

発生後の剛性と同程度まで低下することを暗示している。

3.2 供試体損傷状況

写真-1には、各供試体の実験終了時の破壊性状を示している。

基準供試体である無補修の 4.0-N 供試体は、1 δy 載荷時に基部から高さ方向に 200~300mm 程度の間隔で水平ひび割れが発生した。その後、4 δy 載荷までは水平ひび割れが増加、進展し、5 δy 載荷時に斜めひび割れに移行した。

6 δy 載荷時には圧縮側の基部においてかぶりコンクリートの小片剥離が目立つようになり、7 δy 載荷時にはかぶりコンクリートが広範囲で膨らみ出した。8 δy 載荷時にはかぶりコンクリートが広範囲で剥落して急激に荷重が低下し、9 δy 載荷時に荷重が P_y を下回り終局に至った。なお、かぶりコンクリート剥落範囲は、基部から 800mm 程度の範囲であった。

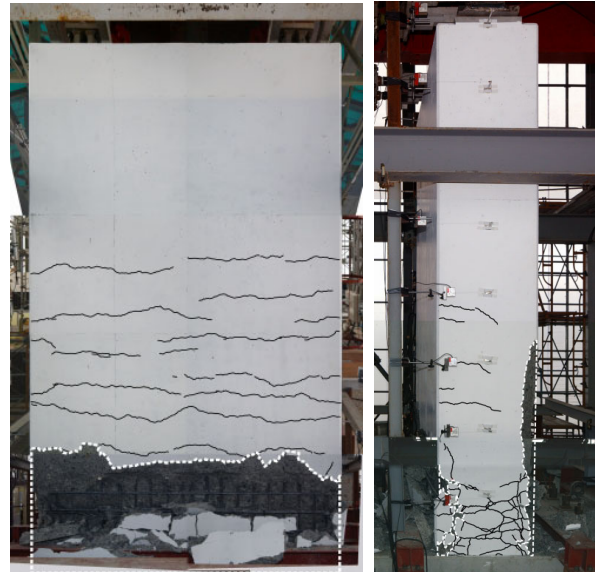
4.0-R-4 供試体の場合には、水平ひび割れが卓越し、ひび割れ幅が 1mm 程度まで進展した状態である 4 δy まで予備載荷を行うものとした。

予備載荷終了時の供試体の損傷は、4.0-N 供試体と同様に水平ひび割れが卓越しており、基部から 500mm 程度の範囲のひび割れ幅は最大で 1.5mm 程度、それより上方では 0.05mm 程度であった。

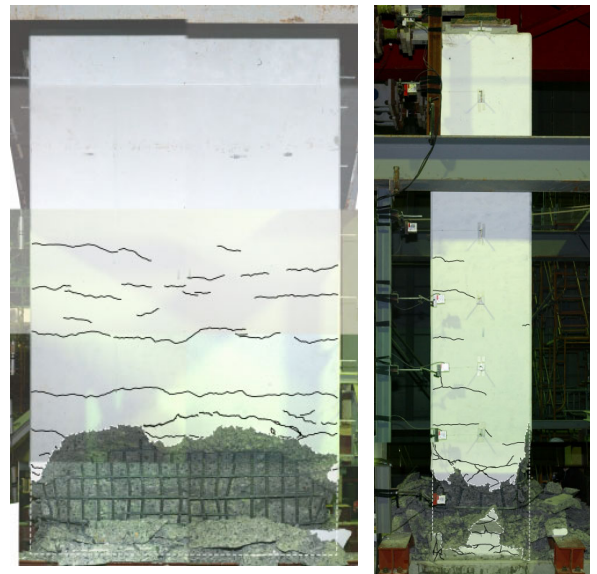
基部から 500mm 程度の区間のひび割れにエポキシ樹脂注入補修を施した後の載荷では、1 δy ~ 3 δy 載荷にかけて、エポキシ樹脂注入箇所を避けるように水平ひび割れが発生、進展した。

4 δy ~ 7 δy 載荷時には壁厚方向に発生した曲げひび割れが斜めひび割れに移行している。8 δy 載荷時にかぶりコンクリートが広範囲で膨らみ出し、9 δy 載荷時には基部から 1000mm 程度の範囲でかぶりコンクリートが剥離し、耐力が急激に低下した。その後の載荷では荷重が徐々に低下し、12 δy 載荷時に P_y を下回り終局に至った。

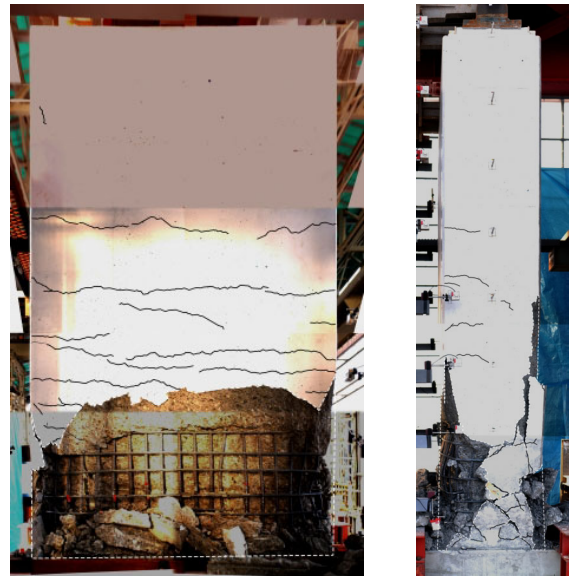
4.0-R-6 供試体の場合には、かぶりコンクリートが膨らみ出す寸前の状態である 6 δy まで予備



(a) 4.0-N 供試体終局時

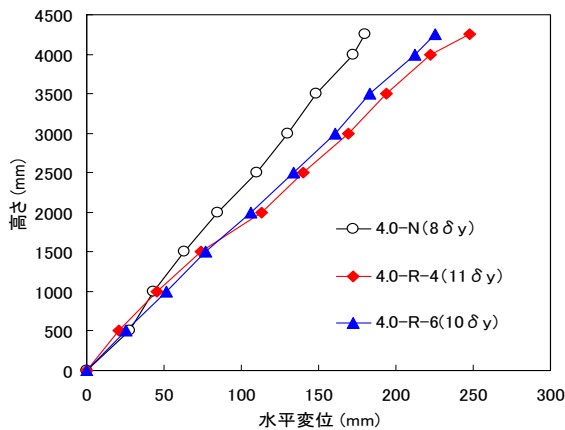


(b) 4.0-R-4 供試体終局時



(c) 4.0-R-6 供試体終局時

写真-1 供試体損傷状況



図－5 水平変位の高さ方向分布

載荷を行うものとした。

予備載荷終了時の供試体の損傷は、4.0-N 供試体と同様に基部で小片の剥離が見られるものかぶりコンクリートの膨らみ出しは見られない。基部から 600mm 程度の範囲のひび割れ幅は最大で 2.0mm 程度、それより上方では 0.05mm 程度であった。

基部から 600mm 程度の区間のひび割れにエポキシ樹脂注入補修を施した後の載荷では、1 δy ~ 3 δy 載荷にかけて、エポキシ樹脂注入部を避けるようにひび割れが発生、進展している。

4 δy ~ 8 δy 載荷時には壁厚方向に発生した曲げひび割れが斜めひび割れに移行、進展したが、かぶりコンクリートの膨らみ出しは見られなかった。その後、9 δy 載荷時には、補修範囲の上端付近を中心として広範囲でかぶりコンクリートが膨らみ出し、10 δy 載荷時には基部から 1200mm 程度の範囲でかぶりコンクリートが剥落した。11 δy 載荷時には、主鉄筋の破断により急激に荷重が低下して P_y を下回り終局に至っている。

各供試体の損傷を比較すると、4.0-R-4, 4.0-R-6 のかぶりコンクリート剥離時の変位振幅が 4.0-N より大きいこと、剥離範囲が拡大していることから、エポキシ樹脂を注入することによって、軸方向鉄筋や横拘束筋とコンクリートとの付着性能が向上したことや、注入したエポキシ樹脂が剥離に対して抵抗する効果を示したため、4.0-N と比較して終局変位が大きな値を示した

と考えられる。

なお、主鉄筋の座屈は 4.0-N 供試体では高さ 30cm 付近を中心に生じているのに対し、4.0-R-4 供試体では高さ 50cm 程度、4.0-R-6 供試体では高さ 60cm 程度を中心に発生している。

3.3 水平変位分布

図－5 には、各供試体の終局直前の載荷 (4.0-N : 8 δy , 4.0-R-4 : 11 δy , 4.0-R-6 : 10 δy) における、水平変位の高さ方向分布を示している。なお、水平変位は、載荷点位置および供試体の側面に、基部から高さ方向に 500mm ピッチで設置したワイヤー式変位計にて計測を行った。

図より、4.0-N 供試体では、基部～載荷点までの水平変位分布がほぼ線形であることから、基部～500mm 区間の回転角が支配的であり、この部分に塑性ヒンジが生じていると考えられる。

それに対して、4.0-R-4, 4.0-R-6 供試体では、基部から高さ 1500mm 地点近傍で不連続となる水平変位分布を示していることから、基部近傍における損傷に加え、高さ 1500mm より上方付近においても損傷が進行し、変形が大きく示されている。このことは、終局時におけるかぶりコンクリート剥落範囲および主鉄筋座屈位置が上方に移行する傾向と一致している。

これは、基部近傍の剛性がエポキシ樹脂注入によってある程度回復するのに対して、無補修部の剛性は劣化の進行を抑制できないため、結果的に損傷範囲が上方に拡大したことによるものと考えられる。

3.4 履歴吸収エネルギー量

図－6 に、各供試体の終局変位までの履歴吸収エネルギー量の累積値と水平変位との関係を示す。履歴吸収エネルギー量は、各変位振幅 ($\delta / \delta y$) における荷重－変位関係より算出している。図より、補修を施した供試体は、載荷初期の段階では 4.0-N 供試体より若干低い値を示しているが、4.0-R-4 供試体は 7 δy 載荷時、4.0-R-6 供試体は 8 δy 載荷時以降において 4.0-N 供試体を上回っている。4.0-N 供試体が終局となる 9 δy 載荷時点でのエネルギー吸収量の累積値

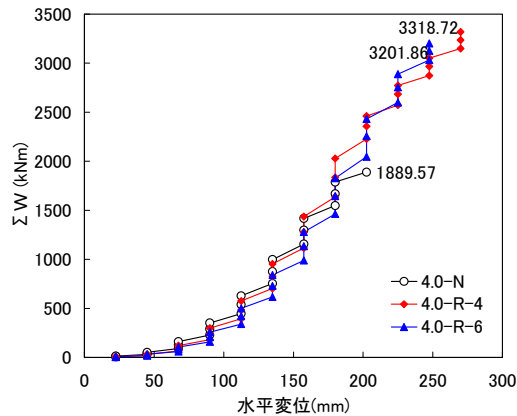


図-6 履歴吸収エネルギー量

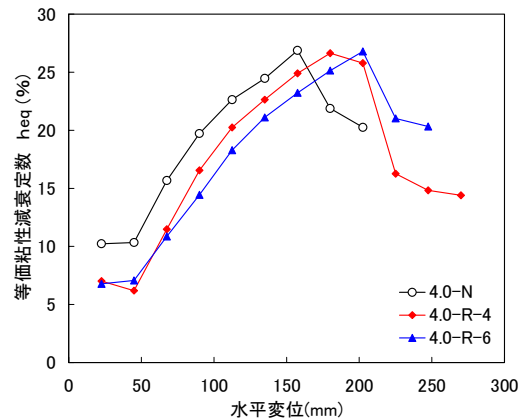


図-7 等価粘性減衰定数

は、4.0-N 供試体が 1889.57kNm であるのに対して、4.0-R-4 供試体は 2227.25kNm、4.0-R-6 供試体は 2046.58kNm と、4.0-N 供試体に比較して 1.08～1.18 倍程度大きな値を示している。

また、補修を施した供試体の終局時における履歴吸収エネルギー量の累積値は、4.0-R-4 供試体が 3318.72kNm、4.0-R-6 供試体が 3201.86kNm であり、4.0-N 供試体と比較して 1.69～1.76 倍程度と、非常に大きなエネルギー吸収性能を示していることが分かる。

3.5 等価粘性減衰定数

図-7 には、各変位振幅の履歴曲線から算出される等価粘性減衰定数を示している。

基準となる 4.0-N 供試体の等価粘性減衰定数 h_{eq} は、1 δy 載荷時の 10.2% から徐々に増加し、最大値は 7 δy 載荷時に 26.9% を示している。

4.0-R-4、4.0-R-6 供試体は、7 δy 載荷時までは 4.0-N 供試体より小さな値を示しているが、8 δy 載荷時以降は 4.0-N 供試体の値を上回っている。最大値は 4.0-R-4 供試体が 26.6% (8 δy)、4.0-R-6 供試体が 26.8% (9 δy) を示しており、基準供試体とほぼ等しい値を示す結果が得られた。

5. まとめ

被災後の RC 橋脚に対する合理的な補修工法を確立することを目的として、実規模 RC 橋脚供試体を用いた交番載荷実験によりエポキシ樹脂注入工法の補修効果について検討を行った。本研究により得られた結果を整理すると、以下

の通りである。

- (1) エポキシ樹脂注入工法により補修を行うことで終局変位は補修前以上の値を示す。これは、エポキシ樹脂がかぶりコンクリートの剥離を抑制する効果を示したためと考えられる。
- (2) 載荷初期の剛性は、エポキシ樹脂注入が不可能な微細なひび割れが残留することから、補修前と比較して 73% 程度と小さな値を示す。
- (3) 履歴吸収エネルギーの累積値は、載荷初期の段階では基準供試体と比較して若干小さな値を示すが、基準供試体が終局となる載荷段階では、基準供試体を上回る値を示す。
- (4) エポキシ樹脂注入部の剛性がある程度回復することにより、かぶりコンクリートの膨らみ出しおよび主鉄筋の座屈が生じる範囲が上方に移行する傾向を示す。

以上より、水平ひび割れが卓越した状態からかぶりコンクリートが剥離する寸前までの損傷状態では、ひび割れへのエポキシ樹脂注入による簡易な補修で、損傷前と同程度以上に耐震性能を回復可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 渡邊他：正負交番載荷を行った壁式 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集, Vol.25, No.2, 2318, 2003
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3