

実規模RC橋脚載荷実験に基づくエポキシ樹脂注入補修効果に関する一考察

A consideration of repairing effects due to epoxy-resin injection method
based on prototype cyclic loading test of RC piers

北海道開発土木研究所
北海道開発土木研究所
室蘭工業大学建設システム工学科
(株)長大 札幌支店

○正員 渡邊 一悟 (Kazunori WATANABE)
正員 池田 憲二 (Kenji IKEDA)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu KISHI)
正員 長谷川 正 (Tadashi HASEGAWA)

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、本手法により設計された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、補修完了後に再度載荷を行う方法で補修効果の確認実験を行った。

実験の結果、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、ひび割れに注入されたエポキシ樹脂量により補修効果に違いが見られること等が明らかになった。¹⁾²⁾³⁾

本研究では、これまでの実験結果を踏まえ、補修を施す際のひび割れ幅、載荷荷重等の条件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、エポキシ樹脂注入工法を適用した場合の補修効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験装置

図-1および写真-1に実験装置概要図を示す。本実験装置は、実構造物に極力近い荷重状態が再現可能な支間長が15.0+15.0=30.0mで、上部工が幅員3.0m、桁高0.8m、総重量1058kNの2径間連続鋼2主桁から成り立つものであり、その中間支点部にピン支承を介してRC橋脚供試体を設置し、ピン支承支点部に設置した油圧ジャッキによる水平交番載荷が可能な装置である。

なお、桁両端の橋台部はローラー支承とし、中間支点部1点固定の支承条件としている。

2.2 実験方法

実験は、RC橋脚供試体に上部工死荷重747.3kNが作用する状態で、RC橋脚供試体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。交番載荷は、軸方向鉄筋の降伏ひずみを材料試験より得られた $1,920\mu$ と設定し、橋脚

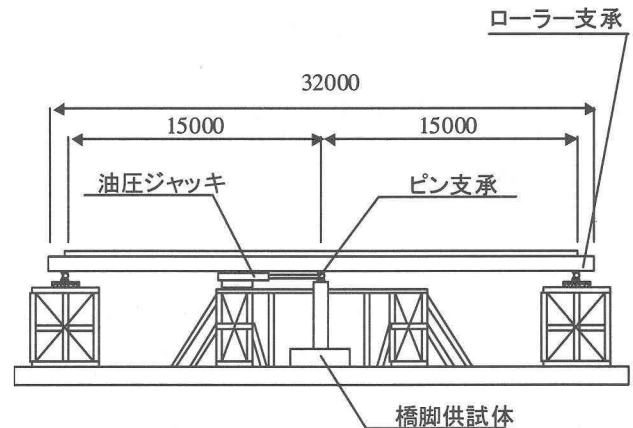


図-1 実験装置概要図

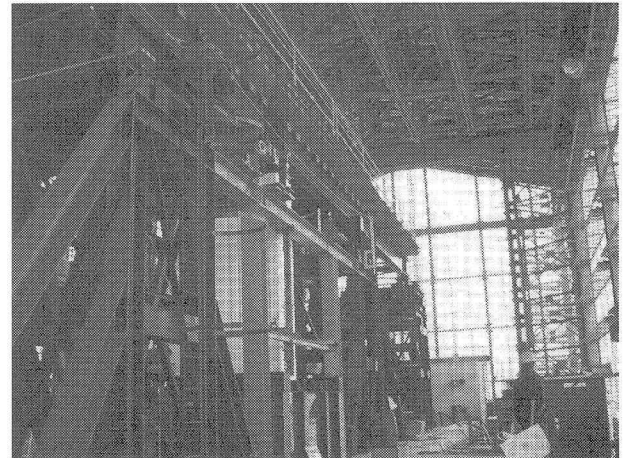


写真-1 実験装置全景

基部の鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の載荷点変位を降伏変位 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て、各変位振幅毎に3回繰り返し載荷する方法とした。

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

なお、補修を行う供試体については、予備載荷により所定の損傷を与えた後に補修を行い、再度載荷実験を行うものとした。予備載荷の段階で、主鉄筋ひずみゲージが使用不可能となることから、補修供試体の繰り返し載荷の基準変位は、基準供試体の降伏変位 δy を用いるものとした。

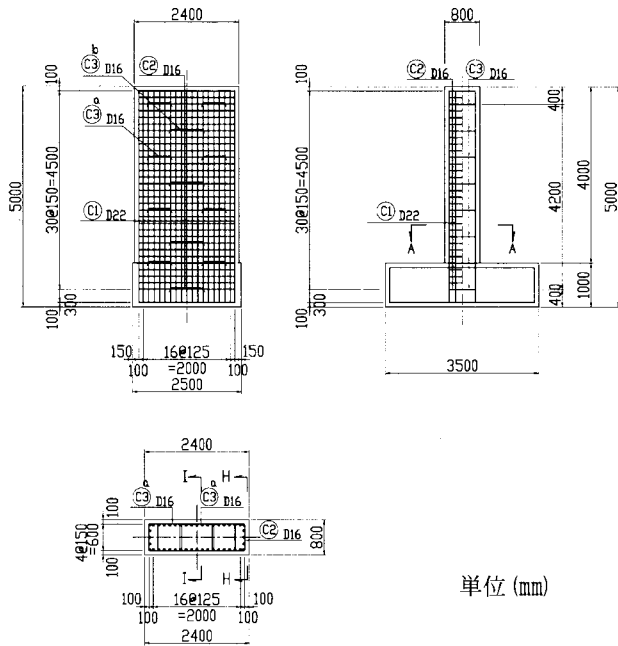


図-2 供試体形状・配筋概要図

表-1 供試体一覧表

供試体	予備載荷 (δy)	補修工法
4.0-N	—	(基準供試体)
4.0-R-4	4	樹脂注入 (エポキシ樹脂)

表-2 材料物性値一覧表

供試体	材料名	圧縮強度 (MPa)	
		予備載荷時	補強後
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

2.3 実験供試体

供試体は、道路橋で一般的に見られる壁式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に供試体の形状・配筋概要図を示す。

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

供試体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る。鉄筋はSD345材を用いた。その平均降伏点強度は390MPaであった。

補修を行う供試体は、損傷状況として水平ひび割れが卓越している状態を想定し、基準供試体の載荷実験結果より、 $4\delta y$ まで予備載荷を実施するものとした。

比較を行う供試体は、予備載荷後に発生したひび割れに柱基部から500mm程度の区間においてエポキシ樹脂注入を行った4.0-R-4供試体と、基準供試体となる無補修の

表-3 実験結果一覧表

試験体	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

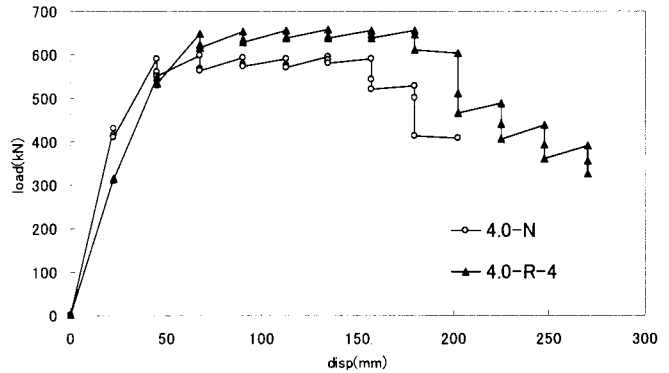


図-3 荷重-変位関係包絡線

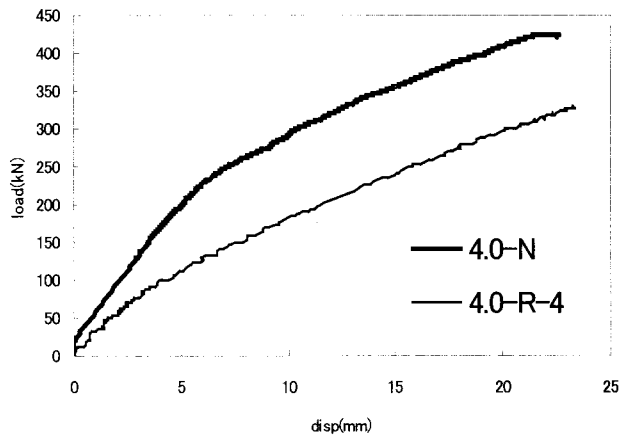


図-4 荷重-変位包絡線(載荷開始~ $1\delta y$)

4.0-N供試体の2体である。使用供試体の一覧を表-1に示す。なお、供試体名の第1項は供試体高、第2項は補修の有無(N:無補修、R:樹脂注入)、第3項は予備載荷変位振幅($\delta / \delta y$)を示す。

使用材料の物性値を表-2に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変位関係

表-3に実験結果の一覧表を、図-3に荷重-変位関係の包絡線(押引平均)を示す。表中の δy 、 P_y は降伏時の載荷点変位、載荷点荷重を、 P_a は載荷荷重の最大値(押引平均)を、 δu は終局時の変位を示している。

表より、補修を施した供試体の降伏変位時荷重 P_y は基準供試体の73%程度と低い値を示しているが、 $3\delta y$ 以降の荷重は、補修前の荷重を上回っており、最大荷重は4.0-N供試体と比較して9.2%増加していることがわかる。

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($12\delta y$)を示し、基準供試体より大きな靱性を示す結果が得られた。

図-4に載荷開始から $1\delta y$ の1回目押し載荷までの荷重-変位関係を示す。

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 までの剛性差が明確であるのに対して、4.0-R-4 供試体では、載荷開始から $1\delta y$ までの剛性変化が少なく、4.0-N 供試体の6mm~22.5mmの剛性と同程度であることがわかる。

このことは、エポキシ樹脂注入を行った場合の初期曲げ剛性は、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)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

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

$6\delta y$ 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、 $7\delta y$ 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。

$8\delta y$ 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、 $9\delta y$ 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 供試体は、4.0-N 供試体の損傷状況から、水平ひび割れが卓越している $4\delta y$ まで予備載荷を行うものとした。

予備載荷における $4\delta y$ 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、 $1\delta y$ ~ $3\delta y$ 載荷にかけて、エポキシ樹脂注入部を避けるように水平ひび割れが発生、進展した。

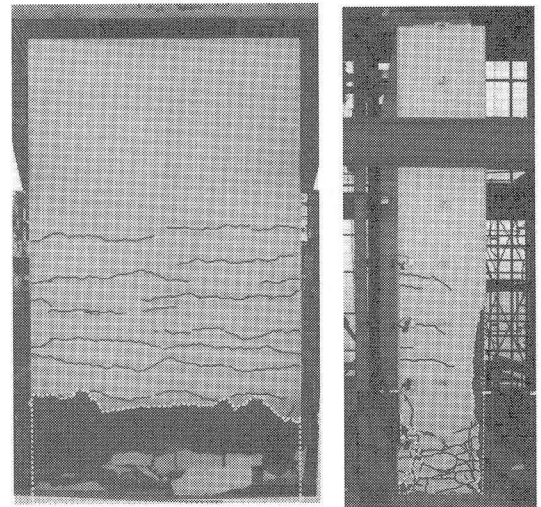
$4\delta y$ ~ $7\delta y$ 載荷時には斜めひび割れに移行し、 $8\delta y$ 載荷時にかぶりコンクリートが広範囲で膨らみ出し、 $9\delta y$ 載荷時には基部から1000mm程度の範囲でかぶりコンクリートが剥落し、急激に耐力が低下した。

その後の載荷では荷重が徐々に低下し、 $12\delta y$ 載荷時に P_y を下回り終局に至った。

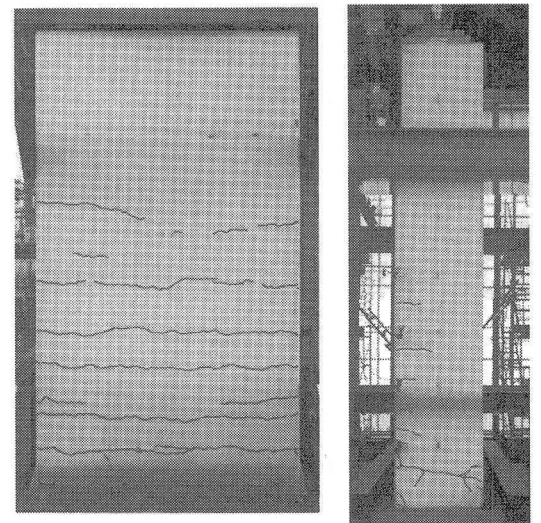
なお、主鉄筋の座屈は4.0-N 供試体では高さ30cm付近を中心に生じているのに対し、4.0-R-4 供試体では高さ50cm付近を中心に発生している。

このことから、エポキシ樹脂注入補修により橋脚最下端の損傷が抑制されたことにより、損傷部位が上方に移行しかぶりコンクリート剥落範囲が拡大したものと考えられる。

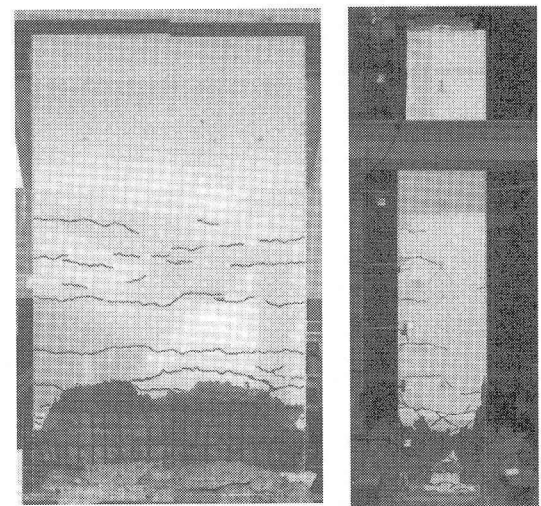
写真-2には各供試体の実験終了時の破壊性状を示している。



(a) 4.0-N 供試体終局時



(b) 4.0-R-4 供試体予備載荷終了時



(c) 4.0-R-4 供試体終局時
写真-2 供試体損傷状況

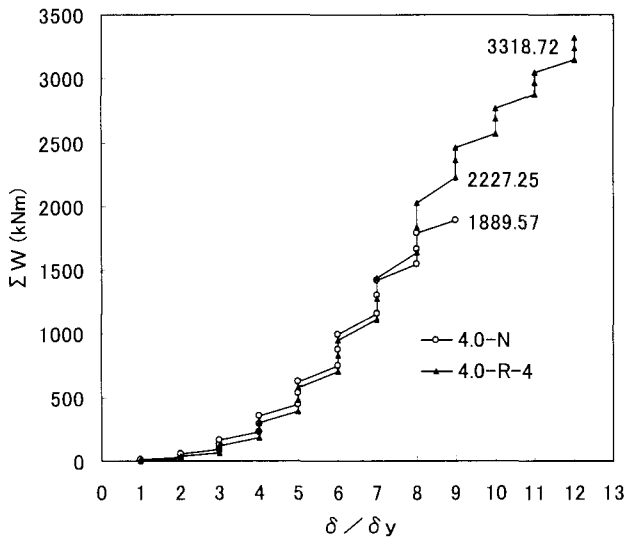


図-5 履歴吸収エネルギー量

3.3 履歴吸収エネルギー量

図-5に、各供試体の終局変位までの履歴吸収エネルギー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 (δ/δ_y) における荷重-変位関係より算出している。

図より、4.0-R-4 供試体は $6\delta_y$ までは 4.0-N 供試体より若干低い値を示しているが、 $7\delta_y$ 以降は上回り、4.0-N 供試体が終局となる $9\delta_y$ 時点でのエネルギー吸収量の累積値は、4.0-N 供試体が 1889.57 kJ/m であるのに対して、4.0-R-4 供試体は 2227.25 kJ/m と 1.18 倍程度大きな値を示している。

また、4.0-R-4 供試体が終局となる $12\delta_y$ 時点における履歴吸収エネルギー量の累積値は 3318.72 kJ/m であり、4.0-N 供試体と比較して 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わかる。

3.4 水平変位分布

図-6に、各供試体の終局時 (4.0-N: $9\delta_y$ 、4.0-R-4: $12\delta_y$) における、各供試体の水平変位の高さ方向分布を示す。

なお、水平変位は、荷重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ている。

図より、4.0-N 供試体では、基部~荷重点までの変位分布がほぼ線形であり、損傷が基部から 500mm の区間に集中して角折れ状態になっていることがわかる。

それに対して、4.0-R-4 供試体では、基部付近のみならず、1000mm から 1500mm 付近においても損傷が生じ、それに対応して天端の変形量も増大している。

これは、エポキシ樹脂注入部の剛性がある程度回復したことにより、相対的に剛性の低い上方向に損傷が移行し、かつかぶりコンクリートの剥離や鉄筋が座屈したことによるものと推察される。

また、基部断面における変形量は、各供試体ともにほぼ等しい値を示している。

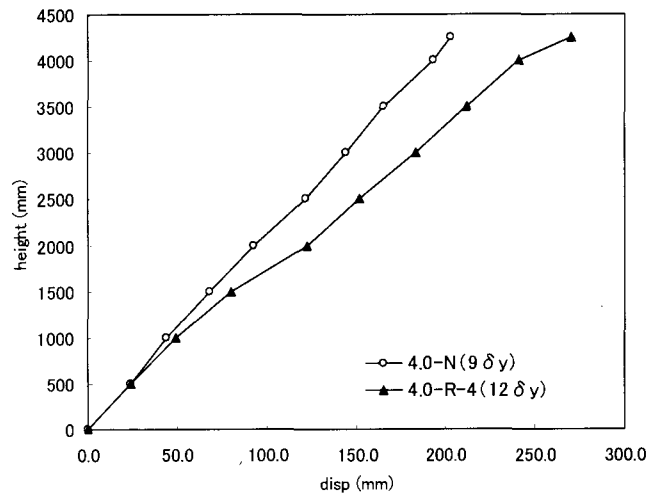


図-6 水平変位の高さ方向分布 (終局時)

4. まとめ

被災後の RC 橋脚に対する合理的な補修技術を確認することを目的として、交番荷重により損傷を与えた実規模 RC 橋脚供試体を用いた正負交番荷重実験を行い、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以下に示すと、以下の通りである。

- (1) 水平ひび割れが卓越する程度に損傷した RC 橋脚に対して、エポキシ樹脂注入工法を用いて補修を行うことで、変形性能は補修前以上に回復する。また、水平荷重についても $3\delta_y$ 以降では補修前以上の値を示す。
- (2) 降伏変位時の荷重は、エポキシ樹脂注入が不可能な微小なひび割れが残留することから、補修前と比較して低下する。
- (3) 終局までの履歴吸収エネルギーの累積値は、補修前と比較して 1.7 倍以上と、大きなエネルギー吸収能力を示す。
- (4) エポキシ樹脂注入部の剛性が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する程度の損傷範囲内で、エポキシ樹脂注入工法によって補修を行うことにより、補修前と同程度以上の耐震性能を確保できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 渡邊、畑山、岸、長谷川：補修工法が RC 橋脚の耐震性能に及ぼす影響に関する一考察、土木学会北海道支部論文報告集第 59 号、V-14、pp. 746-749、2003。
- 2) 渡邊、畑山、岸、長谷川：正負交番荷重を行った壁式 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、No2、2318、2003。
- 3) 渡邊、畑山、長谷川、岸：エポキシ樹脂注入補修を施した RC 橋脚の耐震性能に関する実験的研究、土木学会第 58 回年次学術講演概要集、V-127、2003。