

RC逆L字橋脚の耐震補強法の開発

福田智之¹・川島一彦²・渡邊学歩³・永田聖二⁴

¹学生会員 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

²正会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

³正会員 工修 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

⁴学生会員 工修 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. まえがき

RC 逆 L 字型橋脚の耐震性を評価すると同時に、耐震補強効果を検討するために、橋脚模型の繰り返し載荷実験、およびハイブリッド載荷実験を行った。現状の RC 逆 L 字型橋脚の耐震性を評価すると同時に、鋼板巻立てを用いて耐震補強した場合の補強効果については別途報告¹⁾するとおりである。

ここでは、偏心圧縮側に補強のための RC 断面を設置する場合（以下、圧縮側 RC 補強と呼ぶ）、圧縮側 RC 補強に加えて、偏心引張り側にプレストレスを導入した場合（以下、圧縮側 RC+PC 補強と呼ぶ）の結果について示す。

2. 実験供試体および載荷方法

(1) 実験供試体

実験供試体を図-1 に示す。圧縮側 RC 補強をした橋脚模型は、無補強橋脚模型の圧縮側に RC 断面を 100mm 増し打ちしたものである。無補強橋脚模型と同様に圧縮側の RC には、軸方向鉄筋として、D13（SD295A）を 10 本、帯鉄筋として、D6（SD195A）を 50mm 間隔でそれぞれ配置した。断面寸法は 400mm×500mm の長方形断面となる。圧縮側の RC の軸方向鉄筋はフーチング内部に鉄筋直径（13mm）の 20 倍に相当する 260mm を定着させた。橋脚張り出し部には定着させていない。また、圧縮側 RC と既存の橋脚との定着をよくするために 100mm 間隔で差筋を設置した。既存の橋脚内部への差筋の定着長は鉄筋直径（6mm）の 20 倍に相当する 120mm とした。圧縮側 RC 補強では、本来は、後施工で RC 補強部材を施工する必要があるが、本

研究では、補強部材と既存橋脚との一体化が完全に行われた状態を仮定し、最初から、補強部材と既存橋脚を一体としてコンクリート打設した。

圧縮側 RC+PC 補強の場合は、圧縮側の補強部材の施工は上記の圧縮側 RC 補強と同じである。引張側には 3 本の PC 鋼棒（SBPR B 種 1 号）を用いてプレストレスを与えることにより補強を行った。PC 鋼棒を設置するためには、後打ちで実橋脚の偏心引張側にコンクリート部材を設置し、この中に PC 鋼棒を設置することになると考えられる。実橋脚では、後打ち部材の厚さはせいぜい 50cm 程度（橋脚断面寸法の 10%程度）と考えらるが、模型では、後打ち部材の厚さを 5cm とした。その結果、断面寸法は 400mm×550mm の長方形断面となる。引張側補強部材には PC 鋼棒の他に、D13（SD295A）を 4 本配置し、帯鉄筋として、D6（SD195A）を 50mm 間隔でそれぞれ配置した。

ここで、PC 鋼棒のプレストレス量は次式を満足するように決定した。

$$P \cdot e_p = D \cdot e \quad (1)$$

ここで、 P ：PC 鋼棒によるプレストレス、 D ：上部構造の死荷重、 e ：死荷重作用点の偏心量、 e_p ：プレストレス作用点の偏心量である。

ここでは、 $D=16\text{tf}$ 、 $e=375\text{mm}$ 、 $e_p=231.5\text{mm}$ であるため、 $p=25.9\text{tf}$ となり、これを 3 本の PC 鋼棒で負担すると、1 本当たりの PC 鋼棒のプレストレス量は 8.6tf となる。これは、PC 鋼棒の降伏荷重の約 50% にあたる。

模型製作においては、後打ち部材と既存橋脚を一体としてコンクリート打設した。コンクリートを張り出し部中央の高さまで打設後、PC 鋼棒にプレスト

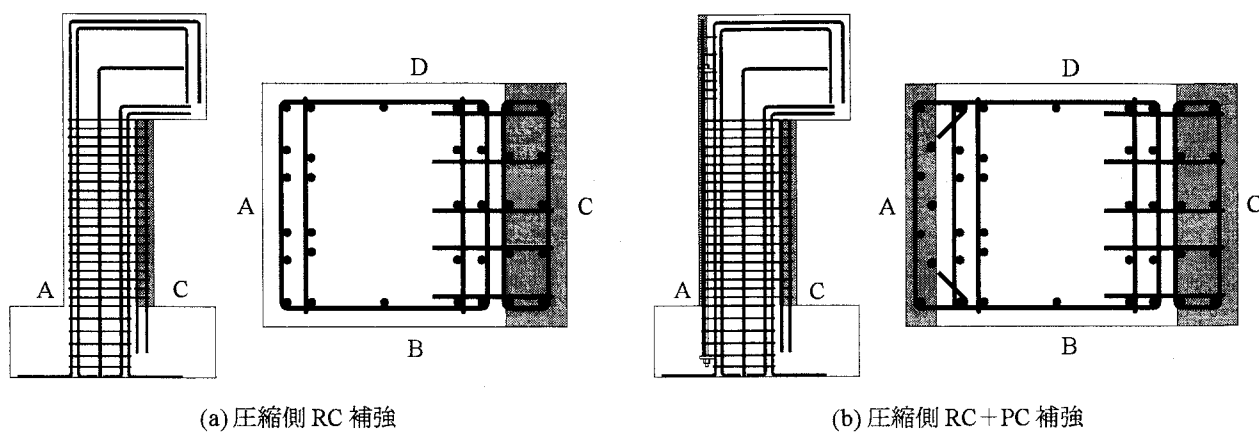


図-1 実験供試体

表-1 載荷実験に用いた橋脚模型の特性

実験ケース	C-3	C-4	H-3	H-4
補強法	圧縮側 RC	圧縮側 RC+PC	圧縮側 RC	圧縮側 RC+PC
コンクリート強度(MPa)	29.8	35.7	31.3	35.1
載荷方法	繰り返し	繰り返し	ハイブリッド	ハイブリッド

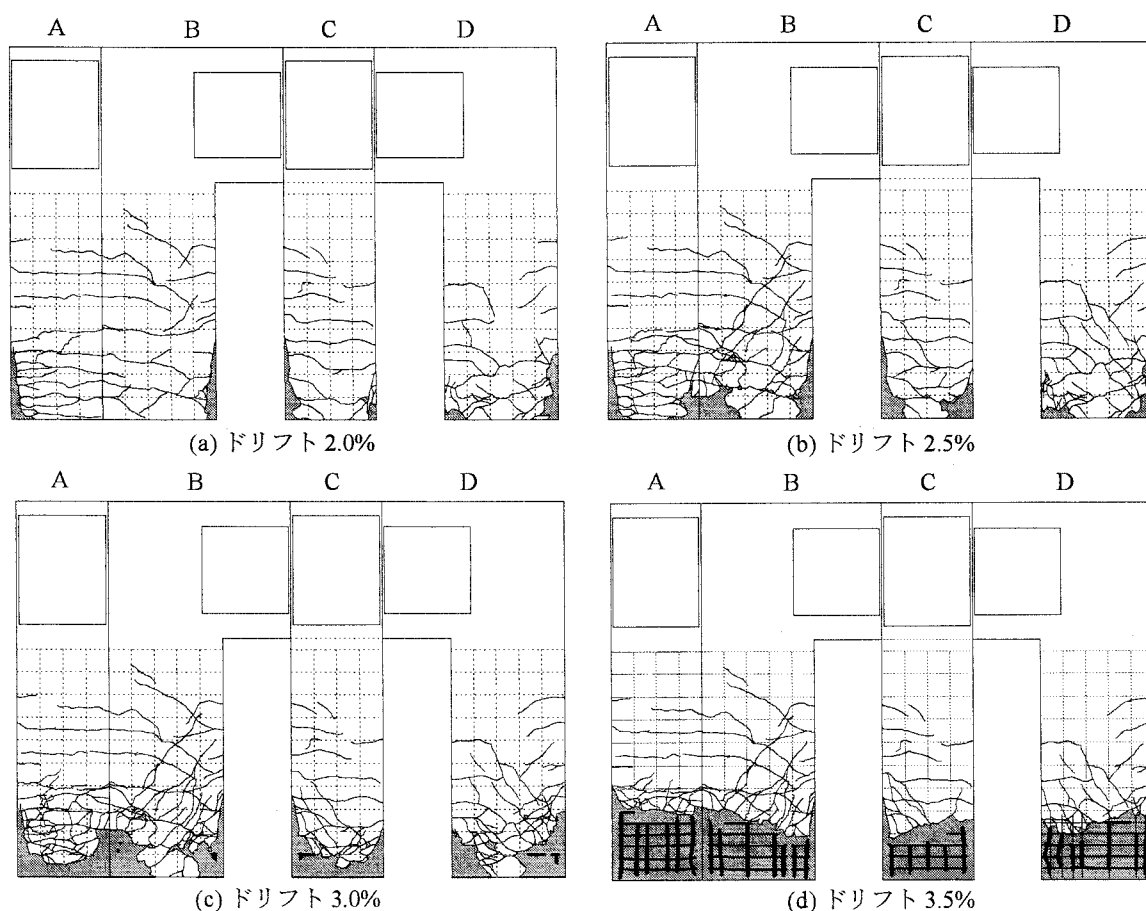


図-2 圧縮側 RC 補強した橋脚を矩形載荷した場合の損傷状況

レスを導入し、残りのコンクリートを打設した。そのため、PC鋼棒の両端はデッドアンカーとなっている。

表-1は、模型橋脚の特性と載荷方法を示した結果である。圧縮側RC補強の場合と圧縮側RC+PC補強

の場合の橋脚をそれぞれ2体ずつ、計4体製作した。いずれの模型橋脚にも普通ポルトランドセメントを用い、載荷当日に一軸圧縮試験を実施した。この結果、コンクリート圧縮強度は、29.7MPa～35.7MPaとなった。

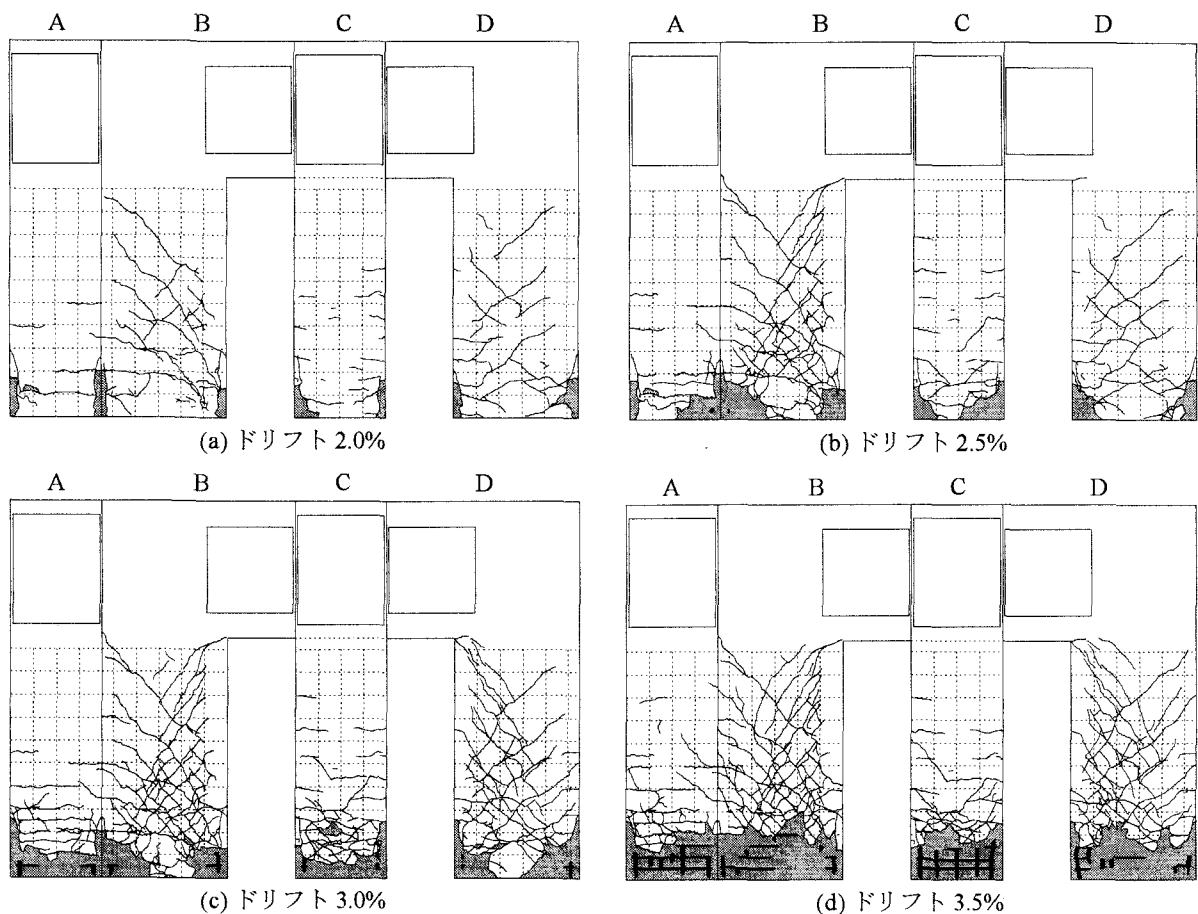


図-3 圧縮側RC+PC補強した橋脚を矩形載荷した場合の損傷状況

(2) 実験方法

載荷実験は、東京工業大学の耐震実験施設を用いて行った。繰り返し載荷実験、ハイブリッド実験の方法については参考文献¹⁾に示すとおりである。

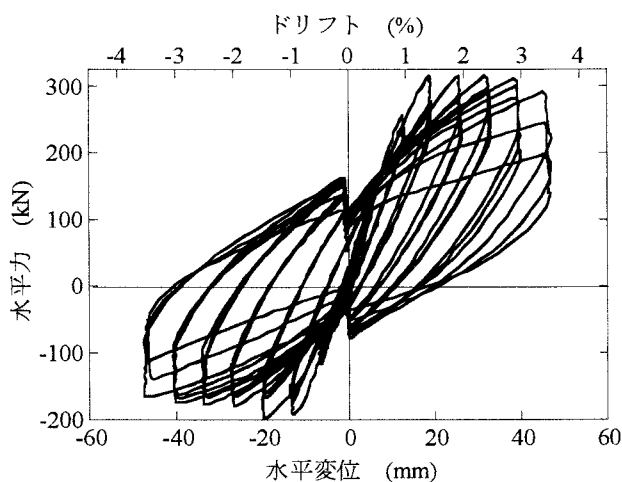
3. 繰り返し載荷した場合の履歴特性

(1) 損傷状況

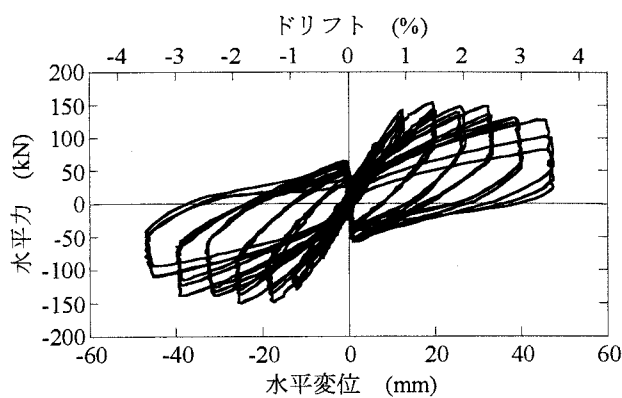
圧縮側RC補強した橋脚を矩形載荷した場合の損傷の進展状況をドリフト2%～3.5%の場合を例に図-2に示す。ドリフト0.5%で、A、B面に曲げクラックが生じ始め、ドリフト1%になると、全面に曲げクラックが生じる。ドリフト1.5%になると、CD隅各部に縦方向のクラックが生じ始め、コンクリートが剥落する。また、B面の上部に斜めクラックが生じる。ドリフト2%になると、AD隅角部、BC隅角部において、コンクリートが剥落する。ドリフト2.5%になると、AB隅角部においてコンクリートが剥落し、B面、D面において、斜めクラックが進展する。ドリフト3%では、隅角部だけでなく、4面で隔離コンクリートの剥落が顕著になり、一部では軸方向鉄筋も露出する。ドリフト3.5%に達すると、損傷は急激に進展し、4面の基部から300～400mmの範囲でか

ぶりコンクリートの剥落だけでなくコアコンクリートにも著しい損傷が生じ、軸方向鉄筋や帯鉄筋が露出する。

圧縮側RC+PC補強した橋脚を矩形載荷した場合の損傷の進展状況をドリフト2%～3.5%の場合を例に図-3に示す。ドリフト1.5%で、A面、C面に曲げクラックが生じ始め、B面、D面では斜めせん断クラックが生じ始める。また、AB隅角部、CD隅角部において、コンクリートの剥落が生じる。ドリフト2%になると、AD隅角部、BC隅角部においてもコンクリートの剥落が生じる。ドリフト2.5%になると、4隅角部から進展する形でコンクリートが剥落し、B面、D面の斜めせん断クラックが大きく進展する。ドリフト3%では、4隅角部において鉄筋が露出し、D面の斜めせん断クラックが進展する。ドリフト3.5%に達すると、基部から150～300mmの範囲でコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋や帯鉄筋が露出する。圧縮側RC補強の場合と比較すると、A面の曲げクラックの発生があまり見られない。これは、PC鋼棒のプレストレスによるものと考えられる。これに対して、B面、D面の斜めせん断クラックは、圧縮側RC補強の場合と比較して、数多く発生している。また、ドリフト3%までの両者の損傷の進展はほぼ

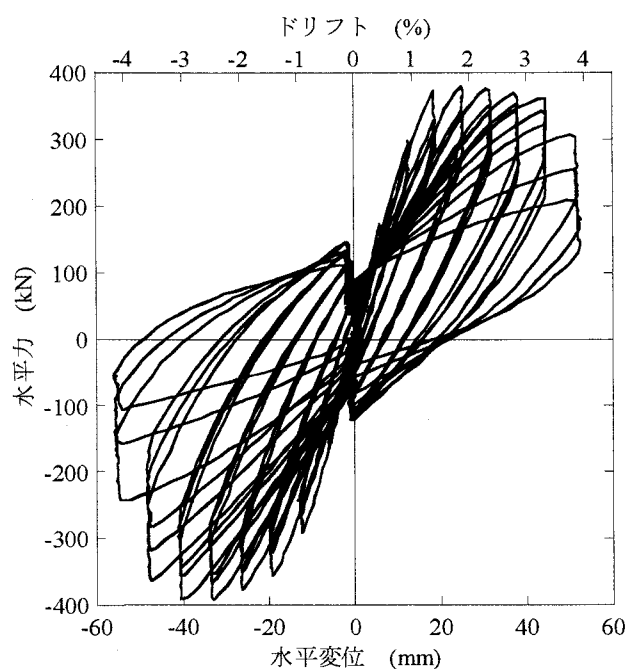


(a) 偏心方向

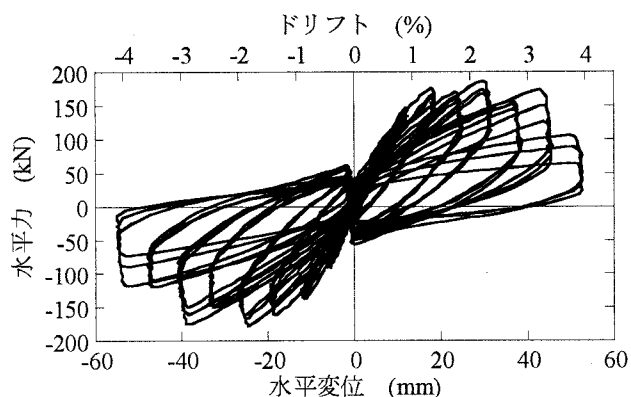


(b) 偏心直角方向

図-4 圧縮側RC補強した橋脚を繰り返し载荷した場合の繰り返し履歴曲線



(a) 偏心方向



(b) 偏心直角方向

図-5 圧縮側RC+PC補強した橋脚を繰り返し载荷した場合の履歴曲線

同じであるが、3.5%の損傷状況は圧縮側RC補強の場合の方が著しい。

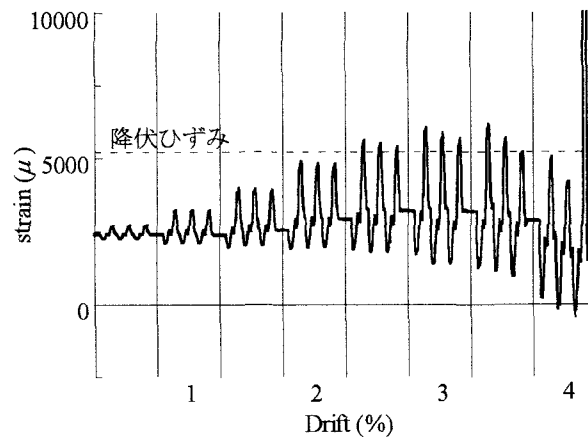
(2) 履歴特性

図-4は圧縮側RC補強した場合の水平力作用位置における水平力～水平変位の履歴曲線を偏心方向と偏心直角方向に分けて示した結果である。これによれば、偏心引張側には、ドリフト1.5%で耐力は最大（316kN）となり、その後、ドリフト3%までほぼ安定した水平耐力を保つ。これに対して、偏心圧縮側にはドリフト1.5%で耐力は最大（198kN）となる。これは偏心引張側の場合の0.63倍である。その後、耐力はわずかずつ低下し、ドリフト3.5%で最大耐力の80%程度となる。終局変位は3%ドリフトというこ

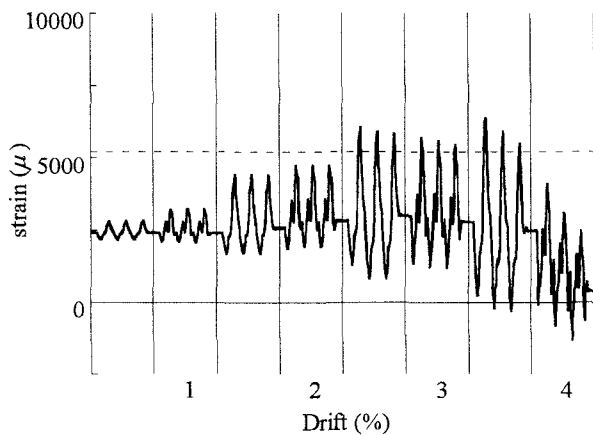
とになる。偏心直角方向では、+側、-側ともにドリフト1.5%で耐力は最大（154kN、-150kN）となる。

無補強の場合¹⁾と比較すると、圧縮側RC補強した場合には、偏心圧縮側、偏心引張側、偏心直角方向の最大耐力はそれぞれ、1.63倍、1.68倍、1.47倍となるが、偏心引張側に対する偏心圧縮側の最大耐力の比は無補強、圧縮側RC補強の場合でそれぞれ、0.61倍、0.63倍と、ほぼ同じである。また、無補強、鋼板補強の場合と同様に、偏心圧縮側の降伏後の包絡線は勾配が負となっており、地震力を受けた場合にはこの方向に残留変位が生じやすいことを示している。

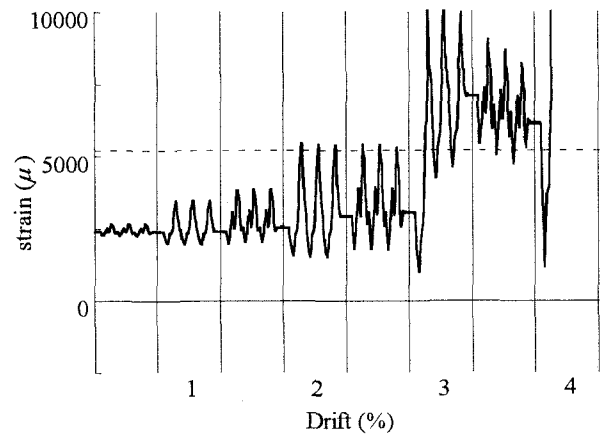
図-5は圧縮側RC+PC補強の場合の水平力作用位置における水平力～水平変位の履歴曲線を示した結



(a) 中央

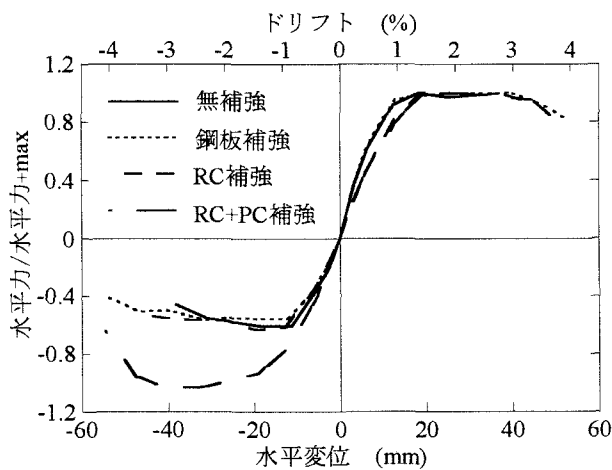


(b) B 面側

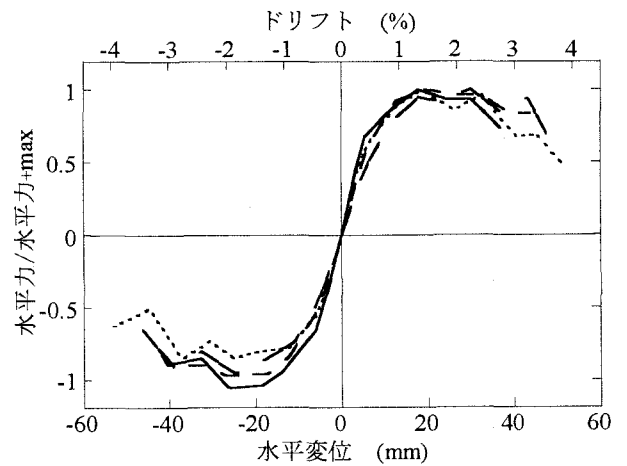


(c) D 面側

図-6 繰り返し載荷実験における PC 鋼棒のひずみ (基部から 25mm)



(a) 偏心方向



(b) 偏心直角方向

図-7 繰り返し載荷実験における無次元化した包絡線の比較

果である。これによれば、偏心引張側には、ドリフト1.5%以降、水平力は安定し、ドリフト2%で耐力は最大 (380kN) となる。これは圧縮側RC補強の場合の1.2倍となっている。その後、ドリフト3.5%まではほぼ安定した水平耐力を保つが、ドリフト4%以降になると、2回目、3回目の耐力低下が著しくなる。偏心圧縮側には、ドリフト1.5%以降耐力は除々

に増加していき、ドリフト2.5%で耐力は最大 (393kN) となる。これは偏心引張の場合のよりもわずかに大きくなる結果となっている。その後、ドリフト3%まで耐力は安定するが、ドリフト3.5%で耐力低下が著しくなり、最大耐力の80%を下回るようになる。終局変位は3%ドリフトということになる。偏心直角方向の+側では、ドリフト2.5%で耐力

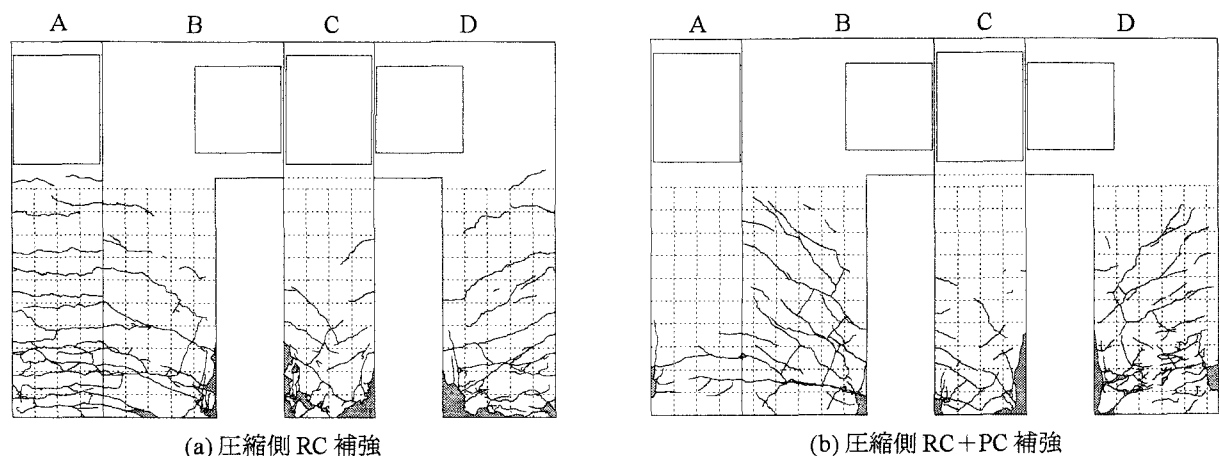


図-8 ハイブリッド載荷試験後の損傷状況

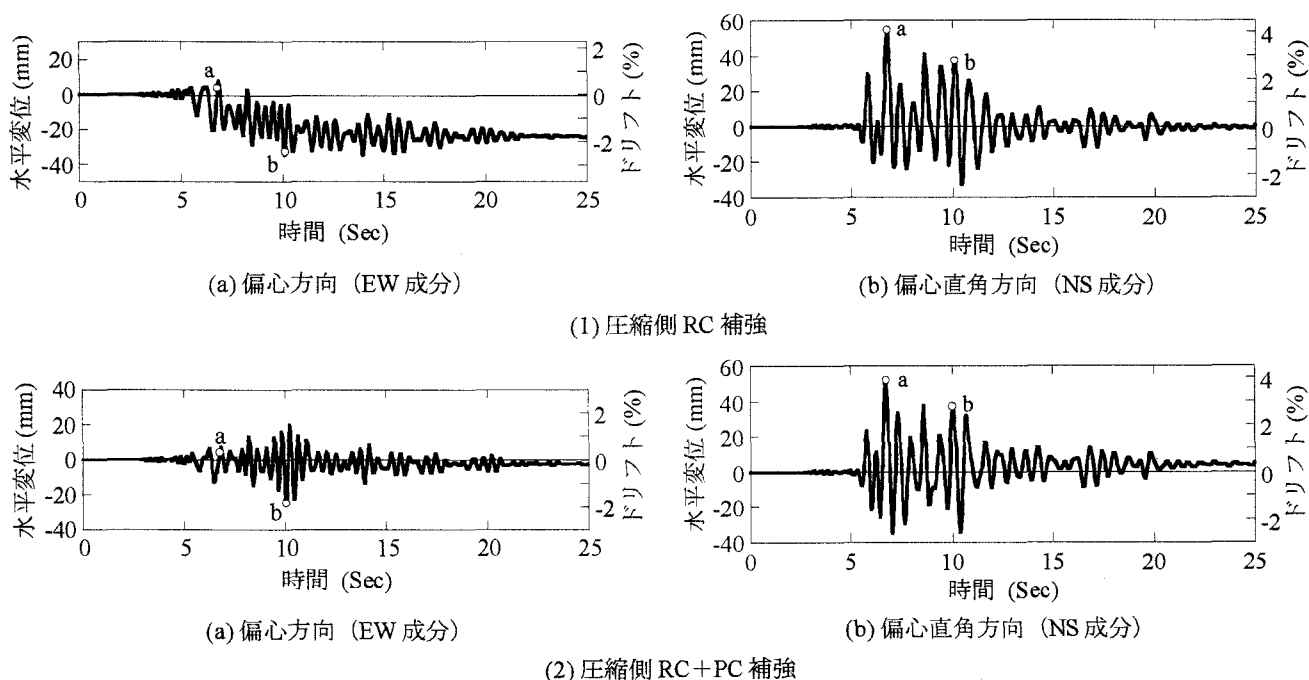


図-9 ハイブリッド実験の変位応答

は最大（187kN）となり、一側では、ドリフト2%で耐力は最大（179kN）と、圧縮側RC補強と比較してそれぞれ、1.21倍、1.19倍となっている。

ドリフトの増加にともなうPC鋼棒のひずみの進展を示したものが図-6である。これによれば、D面側に位置するPC鋼棒はドリフト2.5%まで、中央とB面側に位置するPC鋼棒はドリフト3.5%まで有効に機能していると考えられる。

図-7に水平力～水平変位の包絡線を偏心引張側の最大値で除したものを示す。ここには無補強の場合と鋼板補強の場合の結果¹⁾も示してある。これによれば、PC鋼棒のプレストレスによって偏心引張側と偏心圧縮側の最大耐力の偏りが改善され、偏心圧縮側において、ドリフト3%程度まで耐力が安定して増加することがわかる。

4. ハイブリッド載荷実験による地震応答

(1) 圧縮側RC補強の場合

兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録を入力した。ハイブリッド載荷実験¹⁾後の圧縮側RC補強の場合の損傷状況、変位応答をそれぞれ、図-8、図-9に示す。ここには、比較のため、後述する圧縮側RC+PC補強の場合の結果も示している。これによれば、A面において基部から高さ1mまでの区間で、多数の曲げクラックが生じる。B面、D面では、曲げクラックに加えて、斜めせん断クラックが生じる。C面にも斜めクラックが生じているが、これは、橋脚がねじれることに起因するものである。また、BC隅角部、CD隅角部においてコンクリートの剥落が生じるが、鉄筋は露出してない。

最大応答変位は、偏心方向（EW成分）では、6.8

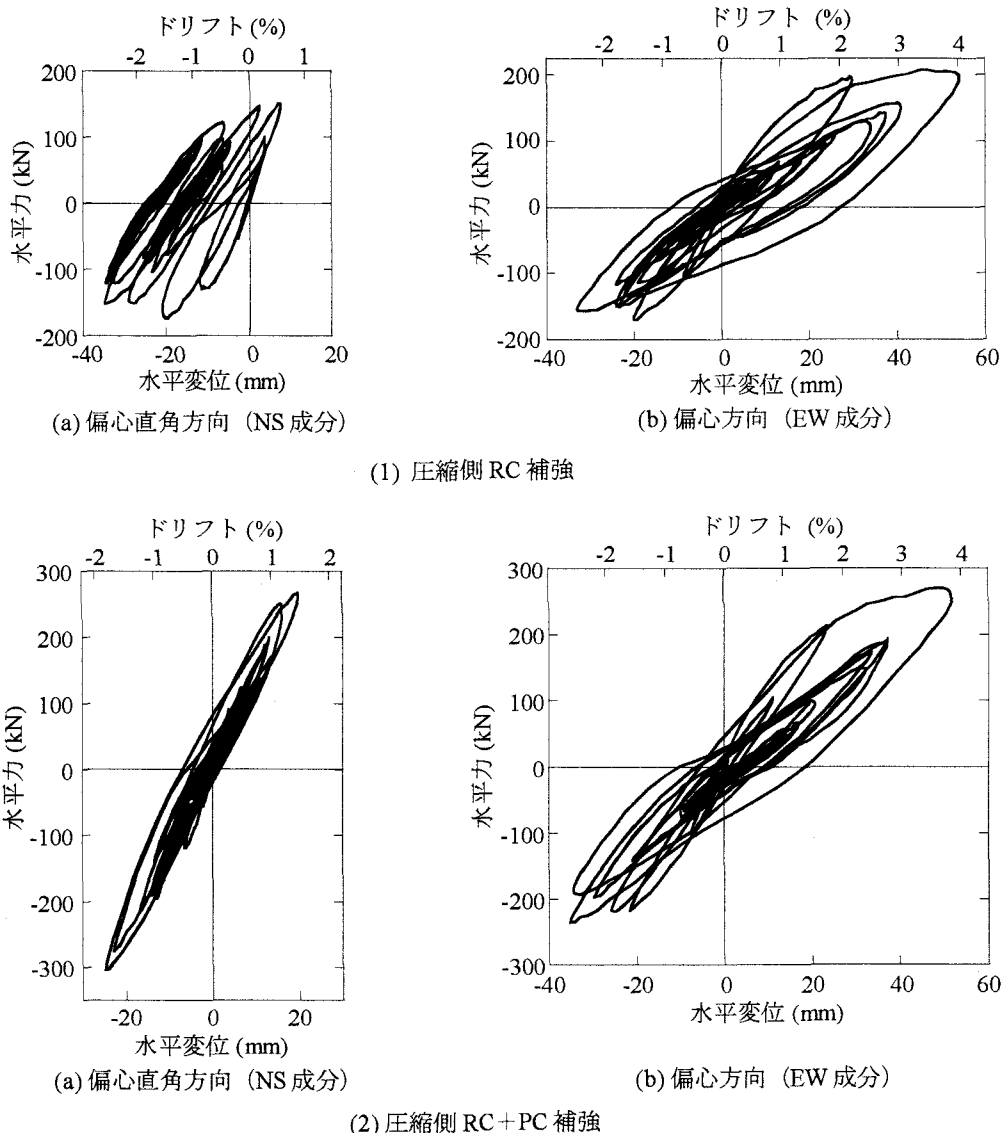


図-10 ハイブリッド載荷実験の水平力～水平変位の履歴曲線

秒で引張側に最大0.6%ドリフトに達した後は圧縮側にドリフトし始める。圧縮側の最大応答変位は2.6%ドリフトであり、最終的に1.8%ドリフトの残留変位が生じる。これに対して、偏心直角方向（NS成分）では、+側（D面側）で最大4.0%ドリフト、-側（B面側）で2.5%ドリフトとなる。

水平力～水平変位の履歴を示すと、図-10のようになる。ここには、比較のため、後述する圧縮側RC+PC補強の場合の結果も示す。偏心方向（EW成分）の圧縮側では、1.5%ドリフト付近で最大耐力174.3kNとなる。また、偏心直角方向（NS成分）では、最大耐力は+207.5kNとなる。

(2) 圧縮側RC+PC補強の場合

圧縮側RC+PC補強の場合では、A面において基部から高さ350mmまでの区間で、曲げクラックが生じる。B面、D面では、曲げクラックに加えて、斜

めせん断クラックが多数生じる。C面では、曲げクラックとねじれによる斜めクラックが生じる。BC隅角部、CD隅角部においてコンクリートの剥落が生じるが、鉄筋は露出していない。また、圧縮側RC補強の場合には見られなかったA面隅角部のコンクリートの剥離が生じる。補強圧縮側RC補強の場合と比較すると、A面における曲げクラックの発生は少ないが、他の3面においてはほぼ同等の損傷状況となっている。

最大応答変位は、偏心方向（EW成分）では、10.1秒に圧縮側で1.8%ドリフトとなる。圧縮側RC補強の場合のように、偏心圧縮側にドリフトすることではなく、最終的に0.2%ドリフトの残留変位となり、1%ドリフトを大きく下回る。

水平力～水平変位の履歴曲線によると、偏心方向（EW成分）の履歴曲線は線形領域に納まる形となっている。最大耐力は偏心圧縮側で、304.8kNとな

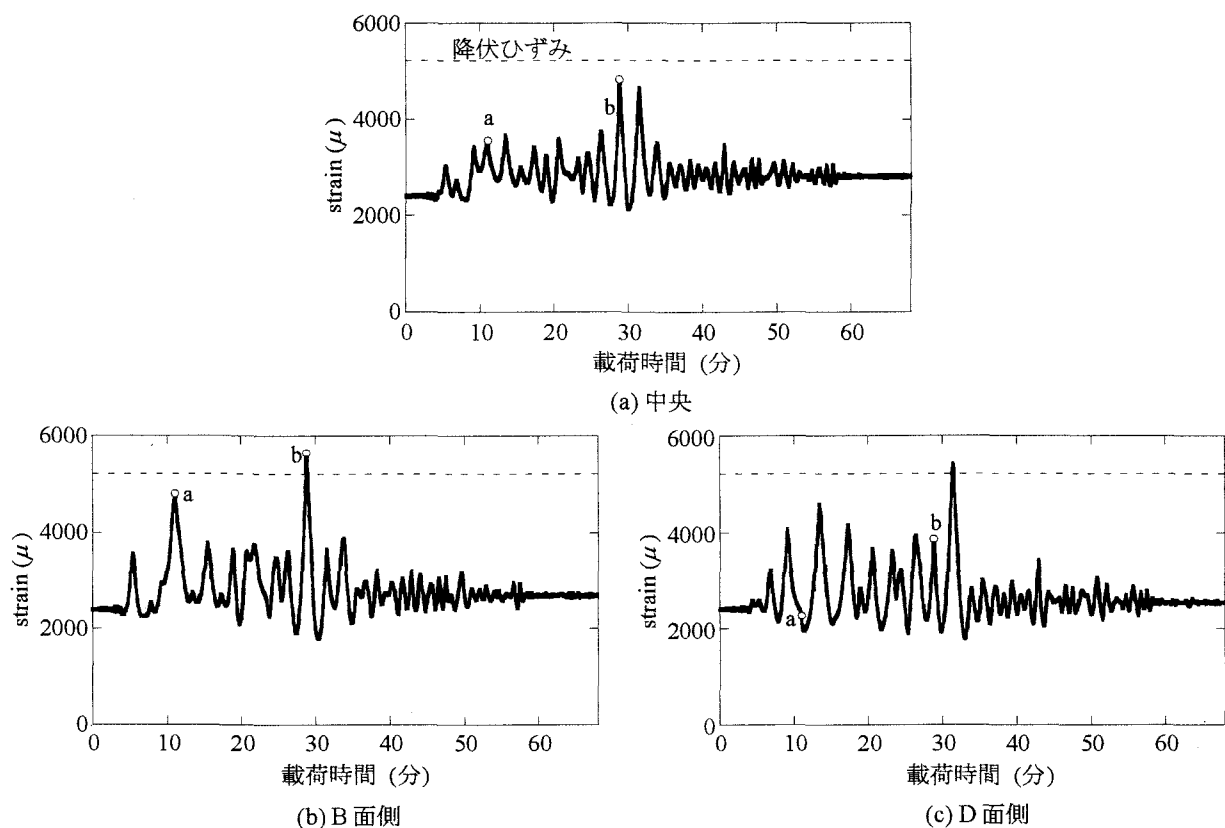


図-11 ハイブリッド載荷実験におけるPC鋼棒のひずみ（基部から25mm）

る。また、偏心直角方向（NS成分）では、最大耐力は+270.0kNとなり、圧縮側RC補強の1.3倍となる。

ハイブリッド載荷実験におけるPC鋼棒のひずみを図-11に示す。これによれば、PC鋼棒は載荷後にほとんど残留ひずみを生じていない。

5. 結論

本研究では、RC逆L字型橋脚の耐震補強法として、圧縮側RC補強、圧縮側RC+PC補強を提案し、繰り返し載荷実験およびハイブリッド載荷実験を行って補強効果を検討した。その結果以下の結論を得た。

- 1) 圧縮側RC補強した場合には、繰り返し載荷実験では、最大耐力は無補強の場合と比較して、偏心方向、偏心直角方向にそれぞれ、1.68倍、1.47倍となるが、偏心引張側に対する偏心圧縮側の最大耐力の比は、0.63となり、無補強の場合とほとんど変わらない。また、偏心圧縮側の

降伏後の包絡線は、無補強の場合と同様に、勾配が負となる。この橋脚に対してハイブリッド載荷実験を行うと、無補強の場合と比較して応答は低減するが、依然として偏心圧縮側に残留変位（1.8%ドリフト）が生じる。

- 2) 圧縮側RC+PC補強した場合、繰り返し載荷実験では、最大耐力は圧縮側RC補強と比べて大きくなるだけでなく、偏心圧縮側と偏心引張側の最大耐力がほぼ同程度となる。この橋脚に対してハイブリッド載荷実験を行うと、偏心圧縮側にはほとんど残留変位が生じない。したがって、この工法はRC逆L字型橋脚の耐震補強として優れていると考えられる。

参考文献

- 1) 福田智之、川島一彦、渡邊学歩、永田聖二：RC逆L字型橋脚の耐震性及び鋼板巻立て工法の適応性に関する研究、第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2005