

ハイブリッド載荷実験に基づく RC 逆 L 字橋脚の耐震性

永田聖二¹，渡辺学歩²，川島一彦³，荻本英典⁴

¹東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

²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）

³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）

⁴東京工業大学 工学部土木工学科（同上）

1. まえがき

RC 逆 L 字橋脚の耐震性に関して，振動台実験，繰返し載荷実験により検討されてきた¹⁾⁴⁾．これらの結果のうち重要な点は，偏心直角方向に載荷した場合に，偏心曲げモーメントによって圧縮を受ける面（以下，偏心圧縮面と呼ぶ）において，コンクリートの圧壊が早期に生じると同時に，鉛直軸まわりのねじりが生じる結果，偏心圧縮側に大きな残留変位が生じることである．川島らは，水平 2 方向の繰返し載荷実験を行った結果，水平 2 方向に載荷した場合，1 方向載荷した場合に比較して降伏耐力および変形性能が小さくなることを指摘している⁴⁾．

しかしながら，水平 2 方向に加振した場合の RC 逆 L 字橋脚の地震応答は明らかにされていないため，本研究では，偏心直角方向，偏心+偏心直角方向のハイブリッド載荷実験を行う．また，これと同時に，川島らによる繰返し載荷実験の結果⁴⁾も取り入れて，RC 逆 L 字橋脚の耐震性の検討を行ったので，その結果を報告する．

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．模型橋脚は，模型橋脚の有効高さは 1350mm，断面寸法は 400mm×400mm の正方形断面であり，偏心がない場合，偏心距離 e を橋脚の幅 D の 1/2 倍とした場合，1 倍とした場合，計 3 種類製作した．橋脚が支持する上部構造質量を 16t，帯鉄筋は D6 を 50mm 間隔で配筋するという条件で，地震時保有耐力法の照査を満足するように軸方向鉄筋の配置を決定した⁴⁾．

偏心が無い場合には，全ての面に軸方向鉄筋として D13 を各 5 本ずつ，計 16 本配置する．軸方向鉄筋比は，1.27 %となる．帯鉄筋としては D6 を 50mm

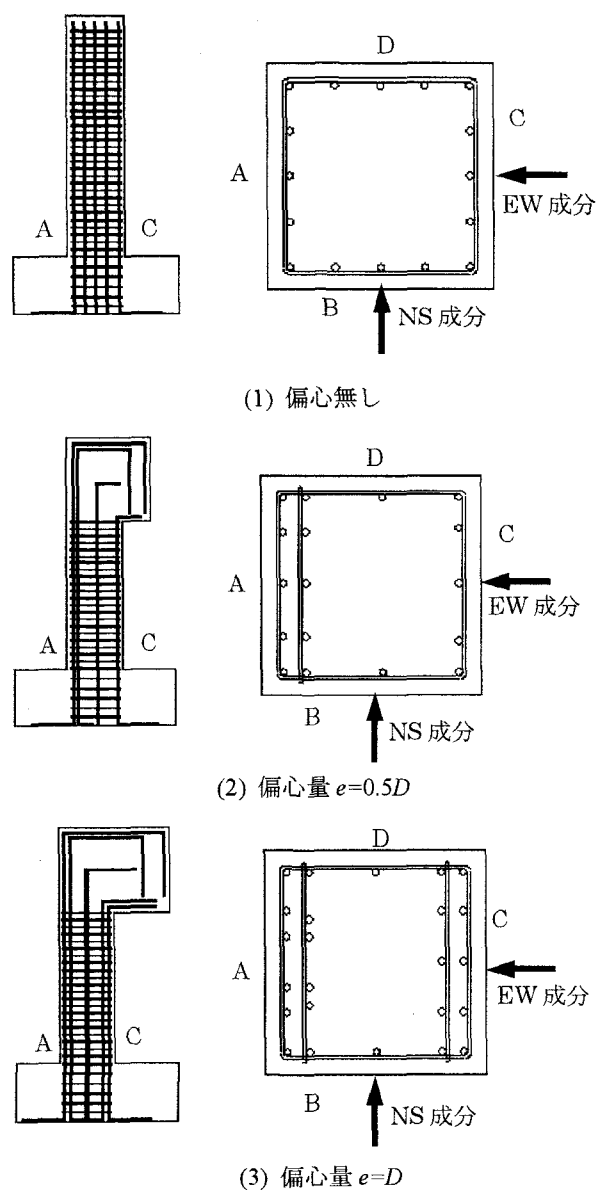
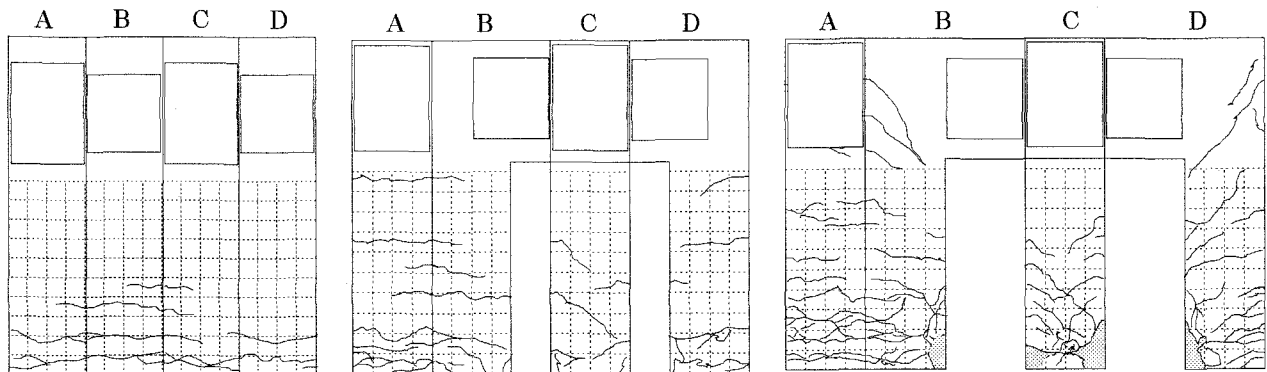


図-1 実験供試体

表-1 ハイブリッド載荷実験に用いた模型橋脚の特性

模型橋脚	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6
偏心量	無	0.5D	D	無	0.5D	D
軸鉄筋比(%)	1.27	1.35	1.9	1.27	1.35	1.9
帯鉄筋比(%)	0.79	0.99	1.19	0.79	0.99	1.19
コンクリート強度(MPa)	28.7	32.1	31.3	31.2	29.1	28.6
載荷方向	偏心直角			偏心+偏心直角		



(1) 偏心無し (H-1)

(2) 偏心量 (H-2)

(3) 偏心量 (H-3)

図-2 実験終了後の損傷状況（偏心直角方向に加振した場合）

間隔で配置すると、帯鉄筋比（体積比） ρ_s は、0.79%である。偏心量 $e=0.5D$ の場合には、偏心引張側で軸方向鉄筋が2段必要となり、このため、帯鉄筋も2段配置となる。軸方向鉄筋比は1.35%、帯鉄筋比 ρ_s は0.99%となる。また、偏心量 $e=D$ の場合には、偏心引張側だけでなく、偏心圧縮側にも軸方向鉄筋が2段必要となる。軸方向鉄筋比は1.9%、帯鉄筋比 ρ_s は1.19%となる。

表-1は、模型橋脚の特性と載荷方法を示した結果である。偏心量が0, 0.5D, Dの橋脚をそれぞれ2体ずつ、計6体製作した。これは、偏心直角方向、偏心+偏心直角方向と、2種類の載荷方式を用いたためである。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、28.6MPa～32.1MPaとなった。

(2) 実験方法

実験は、東京工業大学の耐震実験施設を用いて行なった。ハイブリッド載荷実験では、解析上で模型橋脚を水平2方向にそれぞれ1自由度系と仮定して、鉛直アクチュエータによる160kN（橋脚基部における圧縮応力1MPaに相当する）の一定鉛直荷重の作用下で、2台の水平アクチュエータでハイブリッド制御する。ここでは、水平2方向に作用する上部構造の質量は、3径間分に相当する50tとした。

入力地震動としては、兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測されたNS成分およびEW成分の加速度振幅をオリジナルの30%に縮小して用いた。偏心方向にはNS成分を、偏心直角方向にはEW成分をそれぞれ用いた。

偏心がある場合には、鉛直荷重を加えると、偏心圧縮側に偏心 $e=0.5D$ の橋脚では0.5mm、偏心 $e=D$ の橋脚では1.9mmだけ変位する。このため、どの点を初期条件として実験を行うかが重要である。実橋では、橋脚が完成し、桁が架設されて偏心圧縮側に変位した状態から、地震力を受けることになる。このため、ここでは、鉛直荷重を与えて橋脚が変位した状態を初期条件として実験を行うこととする。

また、実験では、水平力作用高さにおける偏心方向、偏心直角方向の変位、荷重を計測した。また、偏心直角方向には橋脚の水平力作用点の左右両端で変位を計測し、橋脚の鉛直軸まわりのねじり角を求めた。なお、以下では時間軸として2種類を用いる。1つは実時間であり、もう一つは実験を行った通りの時間（載荷時間）である。測定装置の制約でねじり角だけは、実時間ではなく載荷時間で示すこととする。なお、両者の対応がつきやすいように、NS成分を与えた場合に変位が大きくなる6.8秒、10.2秒の点をそれぞれ点a, bと呼ぶ。

3. ハイブリッド載荷実験による地震応答

(1) 偏心直角方向に載荷した場合

偏心直角方向に加振した橋脚H-1, H-2, H-3の実験終了後の損傷、応答変位をそれぞれ図-2, 図-3に示す。偏心の無いH-1では、基部から高さ0.1m, 0.2mの位置で、曲げ引張水平クラックが全面に生じるが、コンクリートは剥離するに至らない。また、鉄筋にも損傷は生じていない。最大変位は+側に3.4%、-側に2.0%である。なお、残留変位はほとんど生じていない。

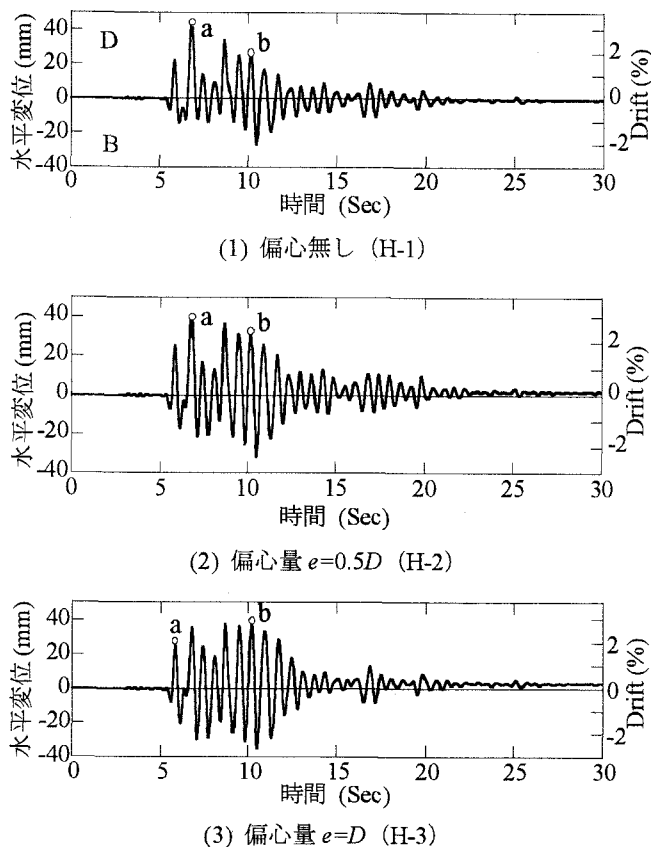


図-3 応答変位（偏心直角方向に加振した場合）

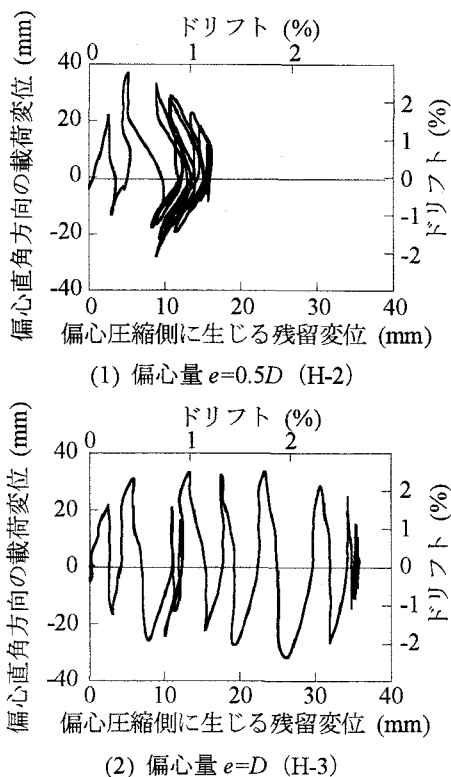


図-5 偏心圧縮方向に生じた残留変位の進展（偏心直角方向に加振した場合）

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すと図-4 のようになる。ここには、比較のため、後述する H-2、H-3 の場合も示している。これによると、1%ドリフト付近から模型橋脚は塑性化し始め、最大変位+3.4%ドリフトまで水平耐力は安

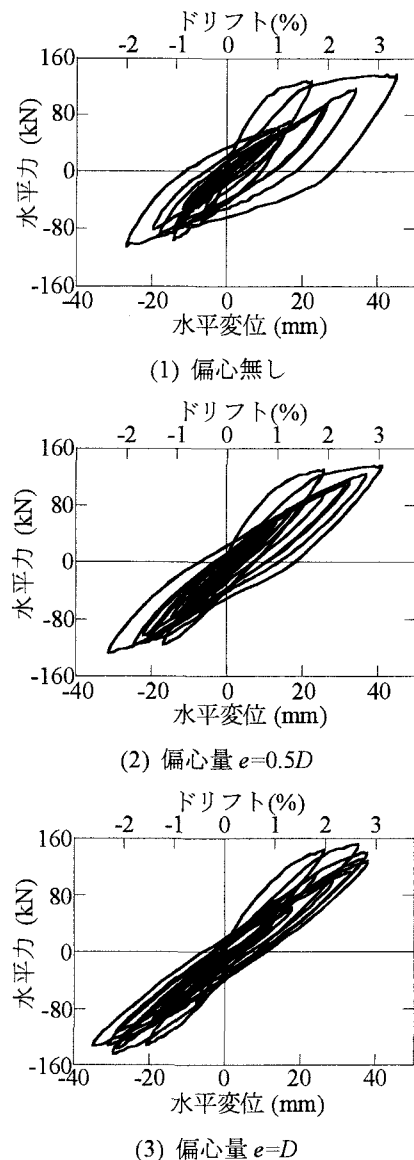


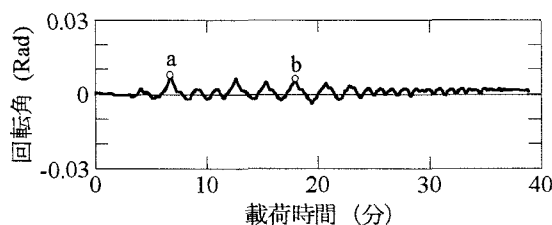
図-4 水平力～水平変位の履歴曲線（偏心直角方向に加振した場合）

定している。+側および-側の最大耐力は、それぞれ 139.5kN、106.6kN である。

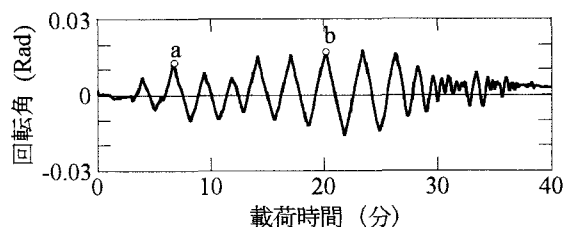
次に、偏心量が $0.5D$ （橋脚 H-2）の場合には、図-2(2)に示すように、基部から高さ $0.2m$ までの範囲で曲げ引張クラックが生じる。また、B 面と C 面のコーナー（以後、BC 角と呼ぶ）、C 面と D 面のコーナー（以後、CD 角と呼ぶ）では、縦方向にひび割れが発生する。なお、鉄筋には損傷は生じない。

図-5 は偏心圧縮方向に生じた残留変位の履歴を、また図-6 は鉛直軸回りの回転角を示している。ここには、比較のため、後述する H-3 の結果も示している。前述したように、図-6 のねじり角は載荷時間で示している。偏心直角方向の変位に伴い、偏心圧縮方向に残留変位が徐々に増大していき、最終的には 1.3%に達する。ねじり角は点 a で最大となり、 $0.008rad$ となる。

次に、偏心量 D （橋脚 H-3）の場合には、図-2(3)に示すように、B 面、D 面に加えて、より著しい損

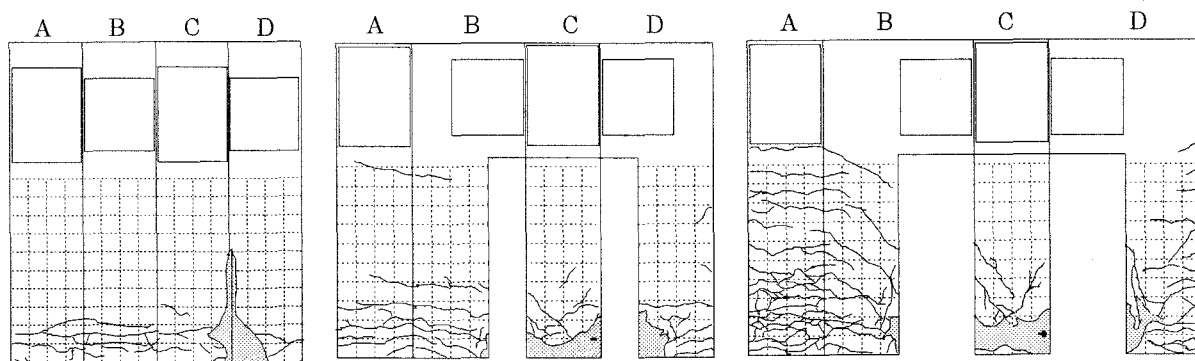


(1) 偏心量 $e=0.5D$ (H-2)



(2) 偏心量 $e=D$ (H-3)

図-6 橋脚のねじり角の進展 (偏心直角方向に加振した場合)



(1) 偏心無し (H-4)

(2) 偏心量 $e=0.5D$ (H-5)

(3) 偏心量 $e=D$ (H-6)

図-7 実験終了後の損傷状況 (偏心+偏心直角方向に加振した場合)

傷が偏心圧縮側の C 面に生じている。なお、軸方向鉄筋には損傷は生じなかった。

最大応答変位は、図-3(3)に示すように、+側(D面側)で2.9%ドリフト、-側(B面側)で2.8%ドリフトとなる。水平力～水平変位の履歴曲線によると、+側、-側の最大耐力はそれぞれ152.5kN、145.0kNとなる。

図-5(2)によれば、残留変位は偏心圧縮側に2.7%ドリフトとなる。これは、偏心量が0.5Dの場合(H-2)よりも2.1倍大きい。

図-6によれば、載荷が繰り返されるにつれて、ねじり角は徐々に大きくなり、点bで最大となり、ねじり角0.019radとなる。これは、H-2の場合の2.4倍に相当する

(2) 偏心+偏心直角方向に載荷した場合

偏心+偏心直角方向に加振した橋脚 H-4 の実験終了後の損傷、変位応答をそれぞれ図-7、図-8 に示す。ここには後述する H-5、H-6 の結果も比較のために示している。これによれば、基部から高さ 0.2m までの範囲で、曲げ水平クラックが全面に生じている。CD 角では、曲げ圧縮によりかぶりコンクリートが剥落する。剥落は基部から 0.6m の高さにまで達している。また、AB 角においてもかぶりコンクリートが剥離したが、CD 角のように大きく剥離するには至らなかった。なお、鉄筋については特に損傷は見られない。

また、NS 成分を与えた方向における最大応答変位は+4.3%ドリフト (D 面側) であり、これは 1 方向

加振した橋脚 H-1 の場合の 1.27 倍と大きくなっている。一方、EW 成分を与えた方向では、+側 (A 面側)、-側 (C 面側) の最大応答変位はそれぞれ 2.2%ドリフト、3.6%ドリフトとなっている。このように C 面側および D 面側に応答変位が偏った結果、上述したような CD 角の損傷が、AB 角に比較して大きくなったと考えられる。また、前述した 1 方向加振した H-1 の場合には、残留変位がほとんど生じなかったのに対して、この場合には、NS 成分を与えた方向には、+0.8%ドリフトに相当する残留変位が生じている。

水平力～水平変位の履歴を示すと図-9 のようになる。ここには、比較のため、後述する H-5、H-6 の結果も示す。これによると最大耐力は、NS 成分を与えた方向では、+側 (D 面側) で 115.2kN、-側 (B 面側) で 128.1kN となっており、これは 1 方向加振した場合 (H-1) に比較して+側 (D 面側) で 0.82 倍、-側 (B 面側) 0.83 倍と、それぞれ小さくなっている。また、EW 成分を与えた方向では、最大耐力は+側 (A 面側) で 120.5kN、-側 (C 面側) で 127.7kN となる。なお、-側 (C 面側) の履歴曲線のコーナーが丸みを帯びているが、これは、2 軸曲げによる曲げ耐力のインターアクション⁶⁾によるものである。

橋脚に水平 2 方向の地震力を与えると、アクチュエータの P-Δ効果によって、偏心が無くても、わずかに鉛直軸回りのねじりが生じる場合がある⁴⁾。図-10 は、鉛直軸まわりのねじれ角が載荷の進展とともにどのように増大したかを示した結果である。こ

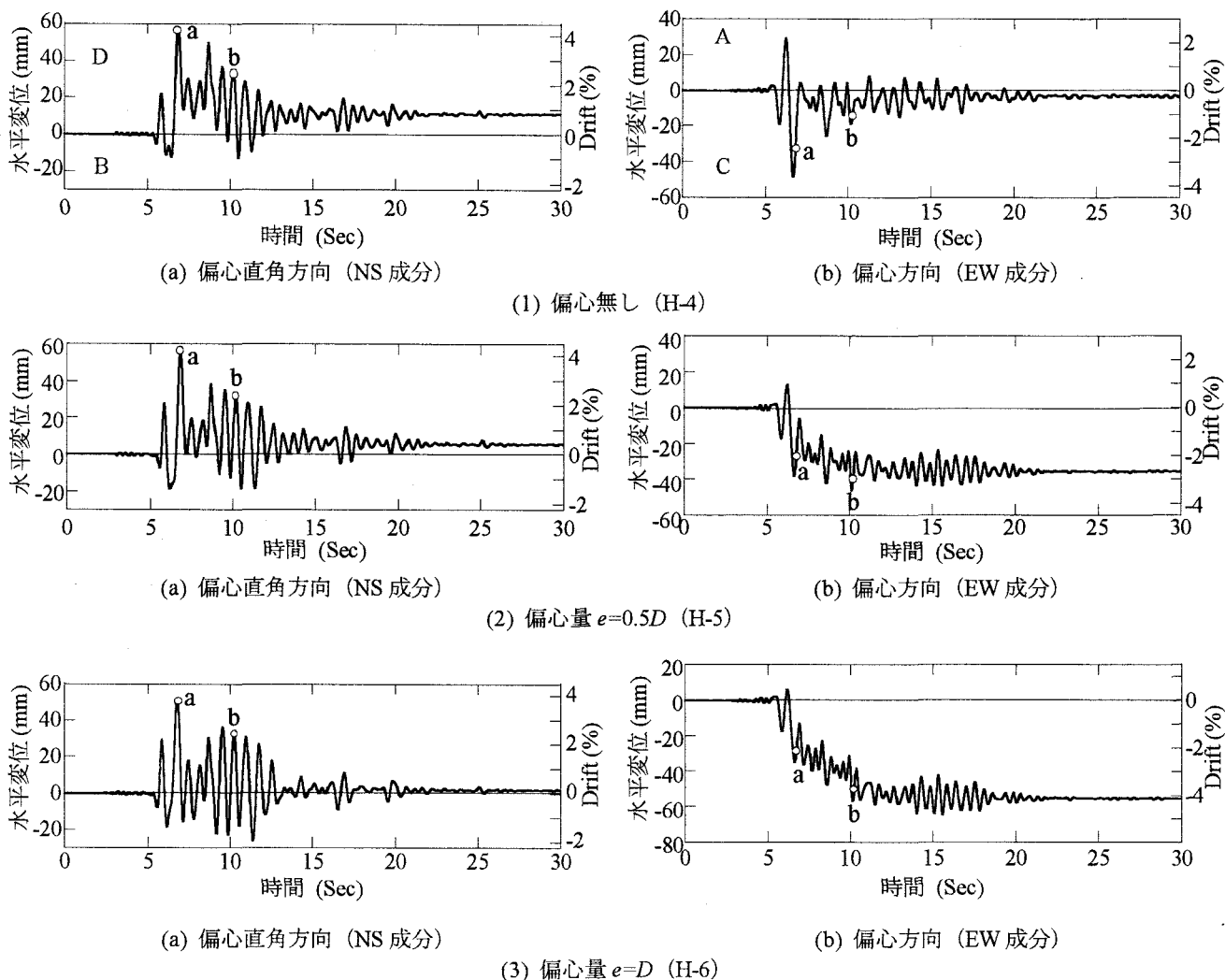


図-8 応答変位 (偏心+偏心直角方向に加振した場合)

こには、比較のため、後述する H-5、H-6 の場合も示している。ねじりは点 a で 0.005rad 程度と最大となるが、まだ小さい。

次に偏心量が $0.5D$ の場合には、基部から高さ 0.3m までの区間で曲げ引張水平クラックが生じる。CD 角でも、かぶりコンクリートの損傷が生じている。ただし、鉄筋に損傷は生じていない。特に偏心圧縮側の C 面の損傷が著しい。

最大応答変位は、偏心直角方向+側 (D 面側) で 4.2% ドリフト、一側 (B 面側) で 1.4% ドリフトとなり、上述した 1 方向入力した H-1 の場合と比較すると、+側では 1.4 倍に大きくなり、一側では 0.6 倍と小さくなる。これに対して、偏心方向 (EW 成分) では、 6.5 秒に一度+側で最大 1.0% ドリフトに達した後は、一側にドリフトし、そのまま一側だけに振動している。一側の最大応答は 3.5% ドリフトであり、最終的に 2.7% ドリフトに相当する残留変位が生じる。これは、偏心方向に加振した H-2 の場合の 2.1 倍である。これが、偏心がある橋脚に懸念されている偏心側へのドリフトであるが、興味深いのは 6.5

秒付近から一側へのドリフトが始まった後、ほぼ 11 秒付近でドリフトの蓄積は終了し、その後は、この軸のまわりを振動している点である。したがって、地震動の主要動で一気に蓄積が進むドリフトも、主要動が終わった後は、ある値に収束していくことを示している。

水平力～水平変位の履歴曲線 (図-9(2)) によると、偏心直角方向 (NS 成分) では、最大耐力は $+129.8\text{kN}$ となり、1 方向に加振した場合の 93% である。また、偏心方向を与えた方向 (EW 成分) の一側では、 2% ドリフト付近で最大耐力 114.8kN となった後、 3% 、 3.5% ドリフト付近で、耐力がそれぞれ 88.5kN 、 82.8kN となる。

予想されたように偏心によりねじり (図-10(3)) は大きくなっており、ねじり角は点 a で最大となり、 0.013rad である。これは、1 方向加振した H-2 の場合の 1.7 倍に相当する。

これに対して、偏心量が D の場合 (H-6) では、基部から高さ 1.1m までの区間で、多数の曲げ引張クラックが生じる。C 面では基部から 0.2m の高さに

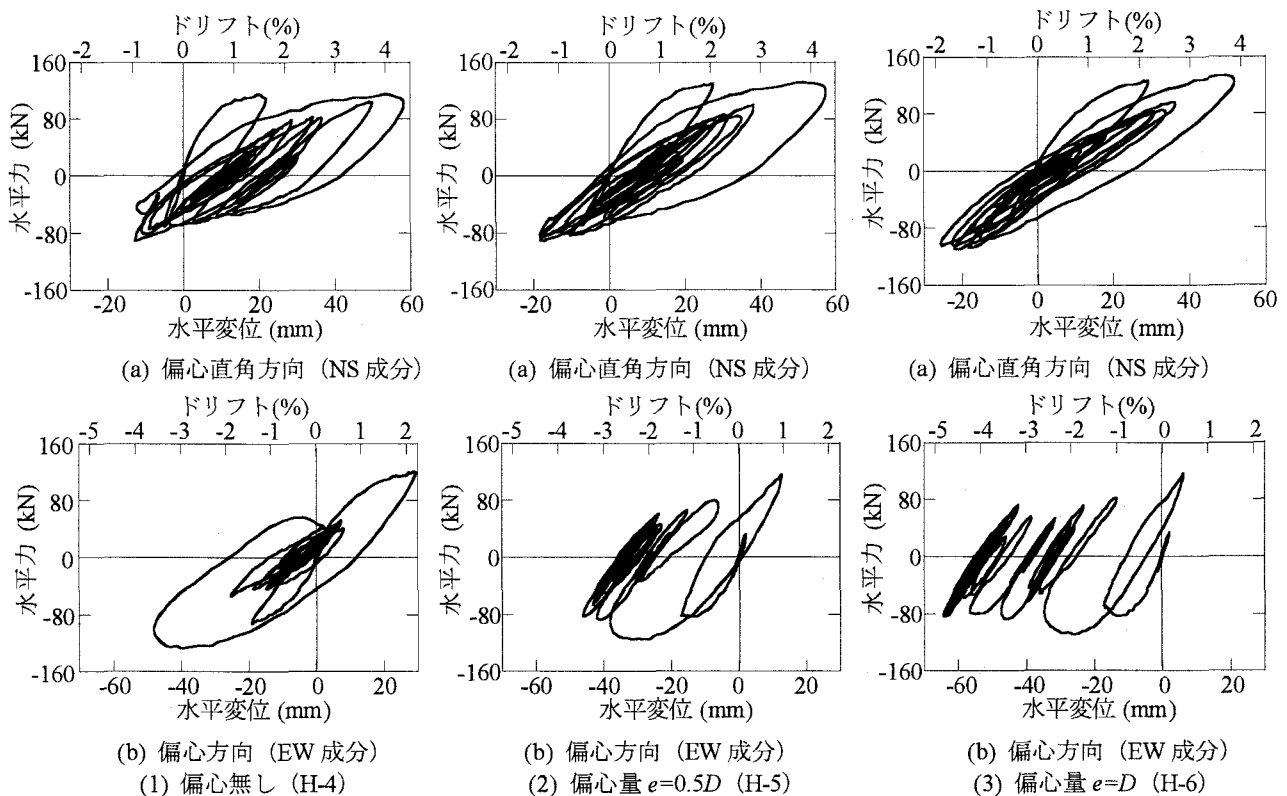


図-9 水平力～水平変位の履歴曲線 (偏心+偏心直角方向に加振した場合)

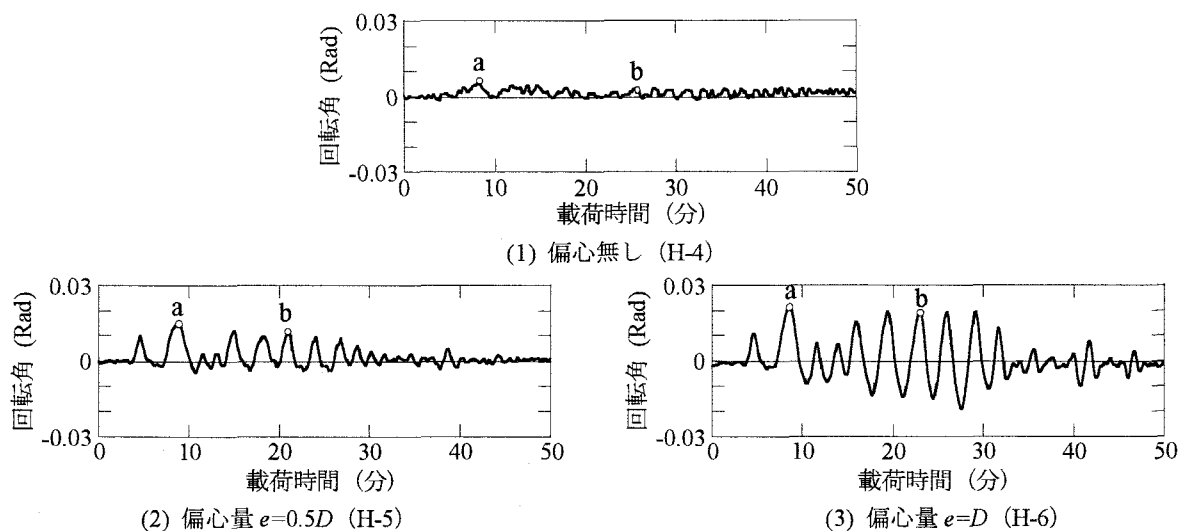


図-10 橋脚のねじり角の進展 (偏心+偏心直角方向に加振した場合)

まで、かぶりコンクリートの剥落が生じている。曲げ水平引張クラックとC面のコンクリートの損傷は、1方向加振したH-3の場合よりもさらに激しくなっている。前出した偏心がない場合、偏心量 $0.5D$ の場合も含めて、1方向加振した場合より、2方向加振した場合の方が橋脚の損傷は大きくなっている。

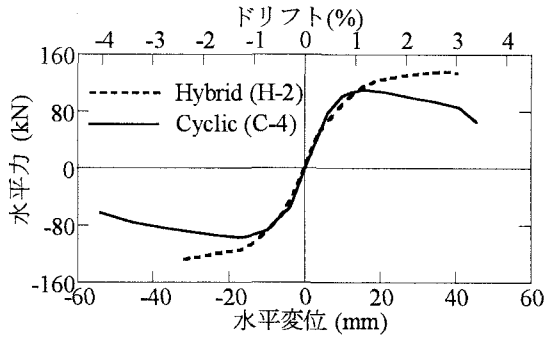
最大応答変位は、偏心直角方向の+側(C面側)で3.9%ドリフト、-側(A面側)で1.9%ドリフトとなり、これは1方向加振した(H-3)の場合の+側で1.34倍、-側で0.68倍となっている。これに対して、偏心方向(EW成分)では、6.5秒に一度最大0.4%ドリフトに達した後は一側にドリフトし、そのまま一

側だけで振動している。一側の応答変位は4.6%ドリフトであり、最終的に4.1%ドリフトの残留変位が生じる。これは偏心方向に加振したH-3の場合の1.5倍に相当する。

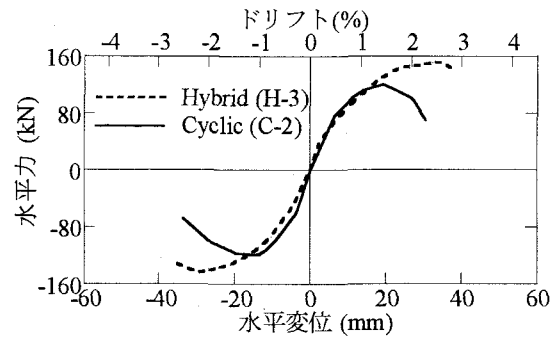
水平力～水平変位の履歴曲線によると、偏心直角方向(NS成分)では、最大耐力は+133.6kNとなり、これは偏心直角方向だけに加振したH-3の場合の0.88倍となる。また、偏心方向を与えた方向(EW成分)の一側では、1.8%ドリフト付近で最大耐力109.2kNとなった後、3.4%、4.2%、4.6%ドリフト付近で、耐力がそれぞれ、86.6kN、80.9kN、82.8kNとなっている。

表-2 繰り返し載荷実験⁴⁾に用いられた模型橋脚の特性

模型橋脚	C-1	C-2	C-3	C-4
偏心量	0.5D	D	0.5D	D
軸鉄筋比(%)	1.35	1.9	1.35	1.9
帯鉄筋比(%)	0.99	1.19	0.99	1.19
コンクリート強度(Mpa)	24.3	24.9	24.3	25.5
載荷方向	偏心直角		偏心+偏心直角	



(1) 偏心量 $e=0.5D$



(2) 偏心量 $e=D$

図-11 ハイブリッド載荷実験と繰り返し載荷実験の包絡線の比較（偏心直角方向に載荷した場合）

ねじり角は点 a で最大 0.022rad (H-5 の 1.6 倍) となり、その後も 0.02rad 程度のねじりが 4 回生じる。

4. 繰り返し載荷実験³⁾との比較

川島らによって行われた繰り返し載荷実験⁴⁾は、同一変位振幅における繰り返し回数を 3 回とした変位漸増型で行なわれた。表-2 は、模型橋脚の特性と載荷方法を示している。ここには、偏心量 $0.5D$ 、 D の橋脚を 1 方向（偏心直角方向）および 2 方向に載荷した場合を示している。2 方向載荷では水平 2 方向に作用する地震力を単純化した矩形オービット⁴⁾が用いられている。以下には、紙面の都合により、ハイブリッド載荷実験と繰り返し載荷実験による履歴曲線を包絡線で比較した結果だけを示す。

図-11 は、偏心直角方向にハイブリッド載荷した場合と繰り返し載荷した場合による履歴曲線を包絡線で比較した結果である。これによると、C-1（偏心量 $0.5D$ ）の場合、1.5%ドリフト付近から生じ始めた水平耐力の低下が、3%ドリフト付近になると著しくなる。また、C-2（偏心量 D ）の場合では、1.5%付近から水平耐力が著しく低下し始める。これに対して、ハイブリッド載荷した H-2、H-3 の場合では、耐力低下はそれぞれ生じていない。C-1、C-2 の最大耐力は、それぞれ 111kN 、 118.6kN であり、ハイブリッド加振した H-2、H-3 のそれぞれ 0.79 倍、0.78 倍と小さくなる。これは、同一変位振幅の繰り返し回数を 3 回とした繰り返し載荷の方がハイブリッド載荷よりも、同じだけ変位した場合の橋脚損傷が著しくなるためである。

図-12 は、2 方向にハイブリッド載荷した場合と繰り返し載荷した場合の結果を履歴曲線の包絡線で比較した結果である。これによると、繰り返し載荷した C-3、C-4 では、それぞれ 2%、1.5%ドリフト付近から水平耐力が著しく低下し始めるのに対して、ハイブリッド載荷した H-5、H-6 では、著しい水平耐力の低下は見られない。ハイブリッド載荷で応答が卓越する側で最大耐力を比較すると、繰り返し載荷した場合には、ハイブリッド載荷した場合の 0.63～0.83 倍となっている。矩形オービットにより 2 方向繰り返し載荷した場合には、偏心圧縮面に生じ始めたコンクリートと鉄筋の損傷が、終局状態では全面に進展するのに対して、2 方向ハイブリッド載荷した場合には、応答が偏心圧縮側の卓越するため損傷もこの面に集中する。同じだけ変位した場合の偏心圧縮面の損傷は繰り返し載荷実験の方がハイブリッド載荷実験よりも著しい。

5. 結論

本研究では、水平 2 方向地震力を受ける RC 逆 L 字橋脚の地震応答特性を明らかにするため、ハイブリッド載荷実験を行うと同時に、繰り返し載荷実験の結果⁴⁾も取り入れて、RC 逆 L 字橋脚の耐震性を検討した。その結果、以下の結論を得た。

1) 偏心曲げを受ける RC 橋脚では、偏心直角方向に載荷した場合、偏心+偏心直角方向に載荷した場合いずれにおいても、偏心圧縮側に損傷が卓越する。この結果、橋脚は偏心圧縮側に残留変位を生じる。

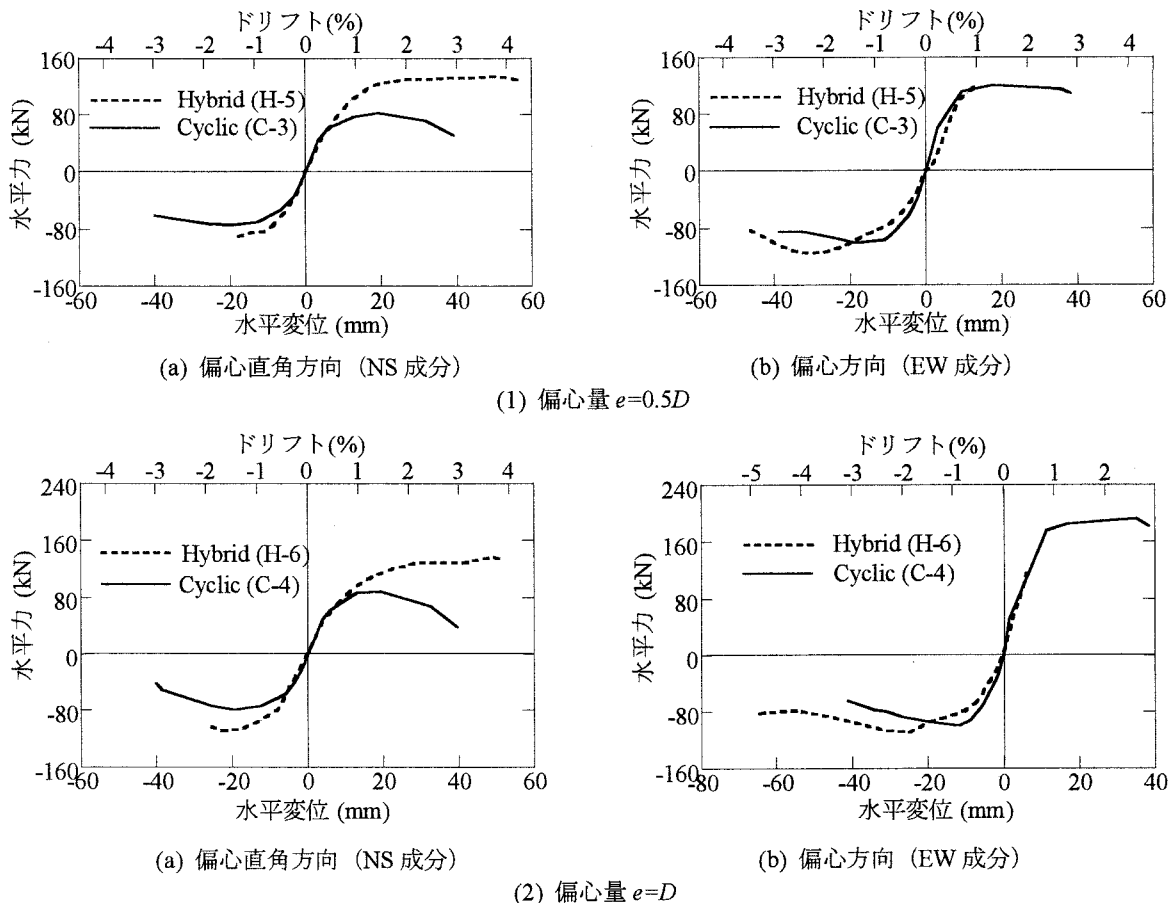


図-12 ハイブリッド載荷実験と繰り返し載荷実験の包絡線の比較 (偏心直角方向に載荷した場合)

損傷の度合いと残留変位は、偏心直角方向に載荷した場合よりも偏心+偏心直角方向に載荷した場合の方が大きい。

2) 偏心直角方向、偏心+偏心直角方向のいずれに載荷しても、橋脚は鉛直軸回りにねじれを生じる。ねじれは一度生じると、主要動を越えた段階まで比較的大きな値が続く。このような特性は、いずれも偏心量が大きくなるほど顕著となる。

3) 同一変位振幅における繰り返し回数を3回とした矩形オービットにより繰り返し載荷した場合に比較して、ハイブリッド載荷では橋脚の損傷は小さく、耐力の低下も小さい。特に、2方向繰り返し載荷した場合には、偏心圧縮面に生じ始めた損傷が、終局状態では全面に進展するのに対して、2方向ハイブリッド載荷した場合には、偏心圧縮側に応答が卓越する結果、損傷も偏心圧縮面に集中し、その他の面の損傷は小さい。

謝辞： 模型橋脚を製作と実験に際しては、東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻の中澤宣貴、松川亮平、下山田英介、中村剛、早川涼二、福田智

之、宮路健太郎、市川吉洋、木島健、タイからの研究生である Suminieng Ongsupankul の各氏に絶大な協力を得た。ここに記して厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 川島一彦, 運上茂樹: 偏心曲げを受けるRC橋脚の地震応答特性, 第9回日本地震工学シンポジウム, pH-1963-1968, 1994
- 2) 小坂寛己, 前川宏一, 小笠原政文, 津野和宏, 市川衡, 福田暁: ねじれモーメントが作用するRC橋脚の耐震性能確認実験, 第1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, pH-167-170, 1998
- 3) 土屋智史, 小笠原政文, 津野和宏, 市川衡, 前川宏一: 常時偏心軸力が作用する鉄筋コンクリート柱の多軸曲げ挙動と非線形解析, 土木学会論文集, No. 634/V-45, pH-131-143, 1999
- 4) 川島一彦, 渡邊学歩, 畑田俊輔, 早川涼二: 逆L字形鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.745/I-65, 171-189, 2003
- 5) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 水平2方向地震力を受ける単柱式RC橋脚の耐震性, 土木学会論文集, 2004, 投稿中