

RC逆L字型橋脚の模型実験に対するファイバー要素解析

永田聖二¹・川島一彦²・渡邊学歩³

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フェロー 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）

1. まえがき

市街地の橋梁には、上部構造による常時荷重が橋脚の軸線から偏心して作用する逆L字型橋脚がよく用いられている。逆L字型橋脚には、偏心モーメントの作用によって圧縮側となる面（以下、偏心圧縮面と呼ぶ）に損傷が生じやすく、さらに、橋軸方向の地震力が偏心して作用する結果、鉛直軸回りのねじりも生じるため、複雑な履歴特性を有することが知られている。

RC逆L字型橋脚の耐震性に関する実験的検討によれば、RC逆L字橋脚が強振動を受けると、偏心圧縮面に損傷が卓越し、偏心圧縮側に大きな残留変位が生じることが明らかにされている¹⁾⁴⁾。一方、解析的検討としては、土屋、前川らが、RC逆L字型橋脚の耐震性を照査する際には3次元数値解析に基づく検討が必要であると指摘し、偏心直角方向に繰返し載荷した場合のRC逆L字型橋脚の履歴特性や残留変位の進展をファイバー要素解析により精度良く再現できることを示している²⁾。

今後、ファイバー要素解析に基づいてRC逆L字型橋脚の耐震性を検討するためには、より事実に近い条件で行われた模型実験の結果に基づいて、ファイバー要素解析の適用性を検討する必要がある。そこで本研究では、RC逆L字型橋脚の水平2方向の繰返し載荷実験³⁾およびハイブリッド載荷実験⁴⁾を

対象としてファイバー要素解析を行い、その解析精度を検討したのでその結果を示す。

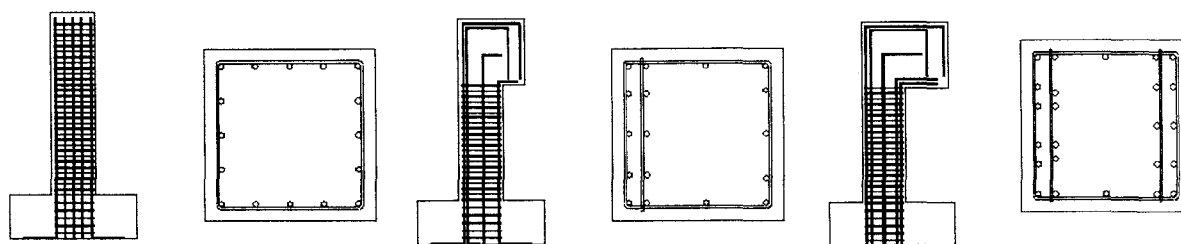
2. 実験供試体およびそのモデル化

(1) 実験供試体および実験方法

繰返し載荷実験³⁾およびハイブリッド載荷実験⁴⁾は、いずれも図-1に示す橋脚模型を対象として行われた。橋脚模型は、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種類である。いずれの橋脚も有効高さは1350mm、断面寸法は400mm x 400mmの正方形断面である。軸方向鉄筋の配置は、地震時保有耐力法の照査⁵⁾を満足するように決定されている。載荷実験に用いられた橋脚の鉄筋比、鉄筋の引張強度、コンクリートの圧縮強度は表-1に示す通りである。

両載荷実験ともに東京工業大学の耐震載荷装置が用いられた。実験には鉛直1軸、水平2軸のアクチュエータを用いており、偏心直角方向のアクチュエータは橋脚の軸線から偏心させて取り付けられている。このため、偏心直角方向に載荷により、橋脚には曲げに加えて鉛直軸回りのねじりが生じる。

繰返し載荷実験では、160kN（橋脚基部における圧縮応力1MPaに相当する）の一定鉛直荷重を荷重制御によって模型に与えた状態で、ドリフト0.5%を基準変位とし、この整数倍で各変位振幅ごとに3



(1) 偏心量 $e=0$

(2) 偏心量 $e=0.5D$

(3) 偏心量 $e=D$

図-1 模型供試体

表-1 実験に用いられた橋脚模型の特性

(1) 繰返し載荷実験			
偏心量 e	0	$0.5D$	D
軸鉄筋比(%)	1.27	1.35	1.9
帯鉄筋比(%)	0.79	0.99	1.19
軸鉄筋引張強度(MPa)	486		
帯鉄筋引張強度(MPa)	492		
コンクリート強度(MPa)	31.3	27.1	25.5
(2) ハイブリッド載荷実験			
偏心量	0	$0.5D$	D
軸鉄筋比(%)	1.27	1.35	1.9
帯鉄筋比(%)	0.79	0.99	1.19
軸鉄筋引張強度(MPa)	481		
帯鉄筋引張強度(MPa)	486		
コンクリート強度(MPa)	31.2	29.1	28.6

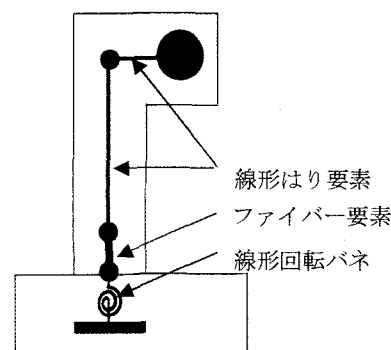


図-2 ファイバー要素を用いた橋脚のモデル化

回の繰返し荷重を変位制御により与えられている。水平2方向の荷重は、変位制御により変位の履歴が矩形オービットとなるように与えている³⁾。

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160 kNの一定鉛直荷重の作用下で、2台の水平アクチュエータにより水平地震力を与えられている。なお、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50 tとしている。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、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ている。

(2) 実験供試体のモデル化

上述した条件で行われた載荷実験による橋脚の履歴特性や地震応答を再現するため、橋脚を図-2に示すようにモデル化した。橋脚基部から高さ200 mmまでの区間を塑性ヒンジとみなして、高さ方向に1段のファイバー要素でモデル化した。塑性ヒンジ区間以外の橋脚躯体は線形はり要素でモデル化した。橋脚躯体の剛性としては、橋脚の降伏剛性を用いた。

また、フーチング内の軸方向鉄筋の伸出の影響を線形回転バネでモデル化した。ここで、回転バネの定数をどのように求めるかが重要である。ここでは、曲率を計測する目的で橋脚基部から25 mm(偏心方向)、62.5 mm(偏心直角方向)の高さに取り付け付けた鋼棒の上下方向変位から回転角を計測し、これとモーメントとの履歴を求め、その剛性を回転バネのバネ定数とした。

ファイバー要素解析では、コンクリートおよび軸方向鉄筋の履歴特性を正しく与えなければならない。コンクリートの応力～ひずみ関係としては、包絡線には、Hoshikuma et al.による提案式⁷⁾を、除荷・再載荷には、堺らによる履歴モデル⁸⁾を用いた。軸方向鉄筋の応力～ひずみ関係としては、Bauschinger効果を考慮できるMenegotto-Pintoモデル⁹⁾を、小振幅で除荷・再載荷しても応力が過大評価されないよ

うに、堺・川島が修正したモデル¹⁰⁾を用いた。

ねじりに対しては、ねじりに抵抗する鉛直軸まわりの回転バネでモデル化することとした。ただし、ねじりと曲げは本来連成する^{11), 12)}が、ここではこの効果を見捨てる、ねじりは曲げに対して独立であると仮定した。ねじりを表すバネ定数は、橋脚躯体を全断面有効の線形バネと仮定した。

3. 繰返し載荷実験に対するシミュレーション

(1) 繰返し載荷実験による履歴特性

偏心が無い場合、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合の繰返し載荷による水平力～水平変位の履歴曲線を示すと図-3のようになる。ここには比較のため、後述する解析による履歴曲線も同時に示している。偏心が無い場合には、偏心方向には、ドリフト1%の段階で耐力は最大(120 kN)となり、ドリフト3.5%になると、2回目、3回目の繰返しの過程で急速に耐力は低下していく。偏心直角方向には、ドリフト2.5%で耐力は最大(109 kN)となり、ドリフト3.5%になると耐力低下が著しくなる。

紙面上の都合により、ここには損傷状況は示していないが、橋脚の損傷は、ドリフト2%になると、かぶりコンクリートが剥離し始め、ドリフト3.5%になると激しくなり、橋脚4面の基部において、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る。ドリフト4%に達すると、ほぼ全ての軸方向鉄筋が座屈する。

偏心がある場合の履歴曲線を見ると、偏心方向では、最大耐力は偏心圧縮側(一侧)に比較して偏心引張側(+側)の方が大きくなるのが特徴である。これは、常時荷重により偏心曲げモーメントが作用するためである。圧縮側と引張側の耐力差は、偏心が大きくなるにしたがって大きくなる。偏心量 $0.5D$ の場合の引張側、圧縮側の最大耐力はそれぞれ127 kN、99 kNであり、偏心量 D の場合にはそれぞれ192 kN、100 kNである。一方、偏心直角方向では、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに1.5%ドリフトで耐力はそれぞれ最大(81 kN、87 kN)となり、その後2%ドリフトからそれぞれ著しく低下し始める。

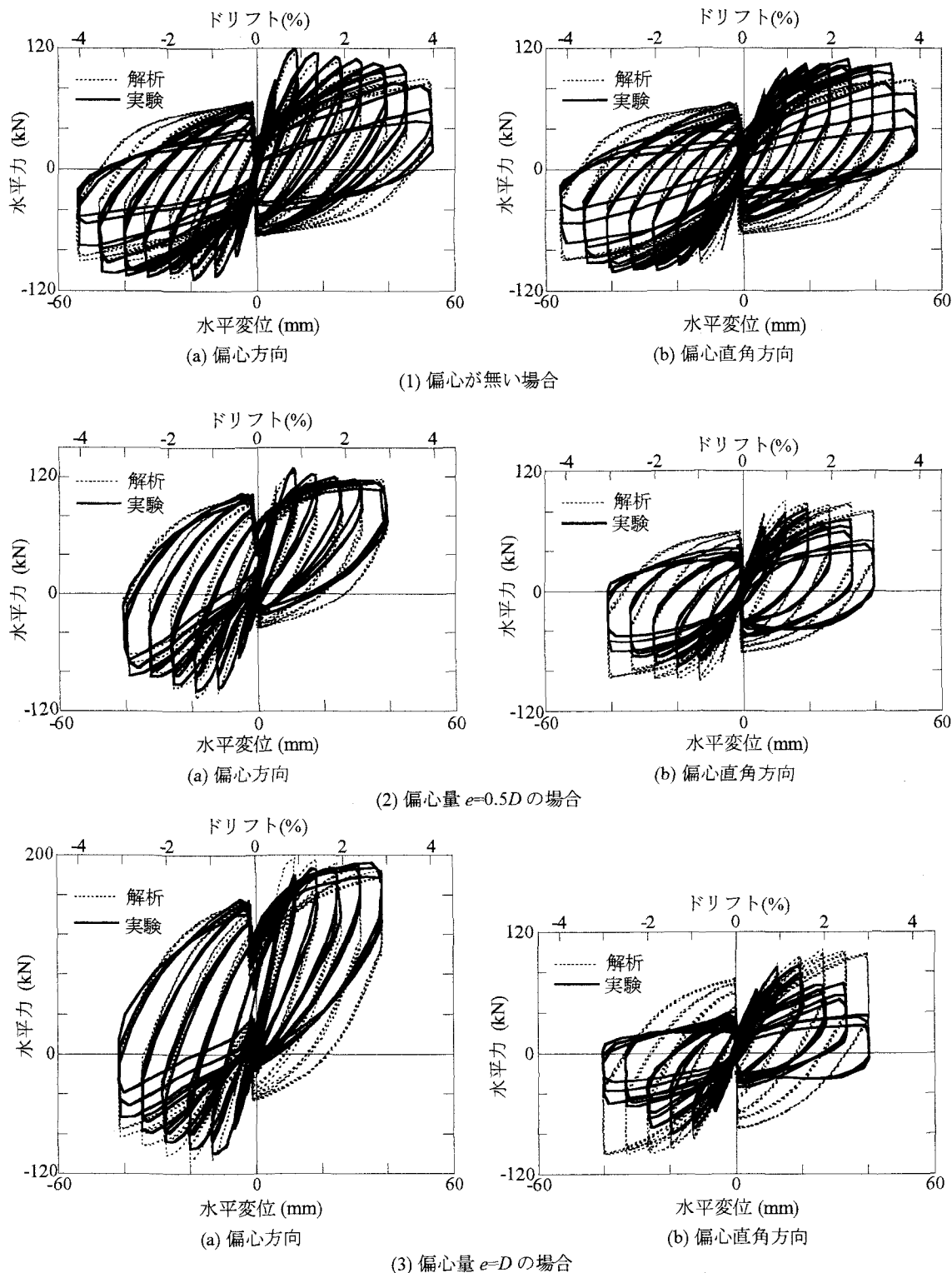


図-3 繰返し載荷実験による水平力～水平変位の履歴曲線と解析による履歴曲線の比較

損傷の特徴としては、上述した偏心が無い場合には、4面ではほぼ同様に損傷が進展するのに対して、偏心がある場合には、偏心引張面に比較して圧縮面の方が損傷は早く、かつ著しい。例えば、偏心量 D の場合には、ドリフト 2.5 %では、偏心圧縮面およびその両端の隅角部のかぶりコンクリートが剥落し、

軸方向鉄筋が露出する。ドリフト 3 %に達すると、4面でかぶりコンクリートだけでなく、コアコンクリートにまで損傷が進展し、ほぼ全ての軸方向鉄筋が座屈する。特に偏心圧縮面では、2段目の軸方向鉄筋が露出するほどにまでコアコンクリートが著しく損傷する。

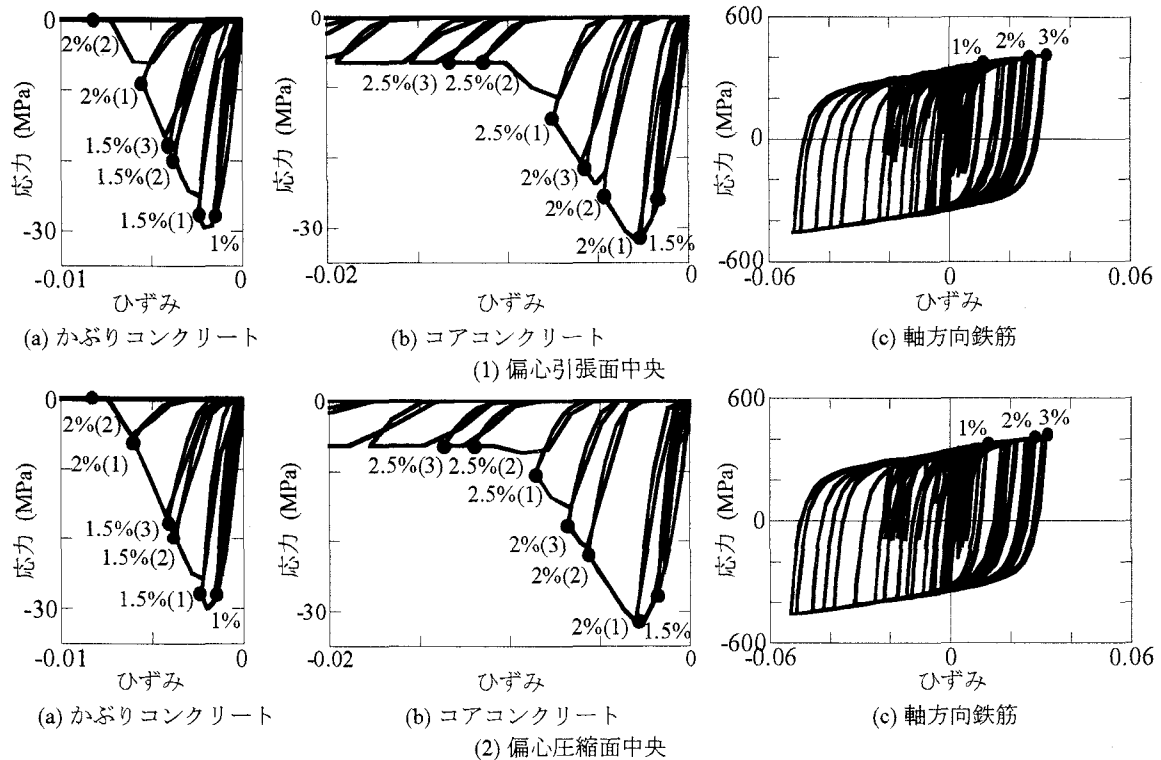


図-4 コンクリートおよび軸方向鉄筋の応力～ひずみの履歴曲線（偏心無し，繰返し載荷実験を再現した場合，図中の(i)はiサイクル目の応力～ひずみであることを示す）

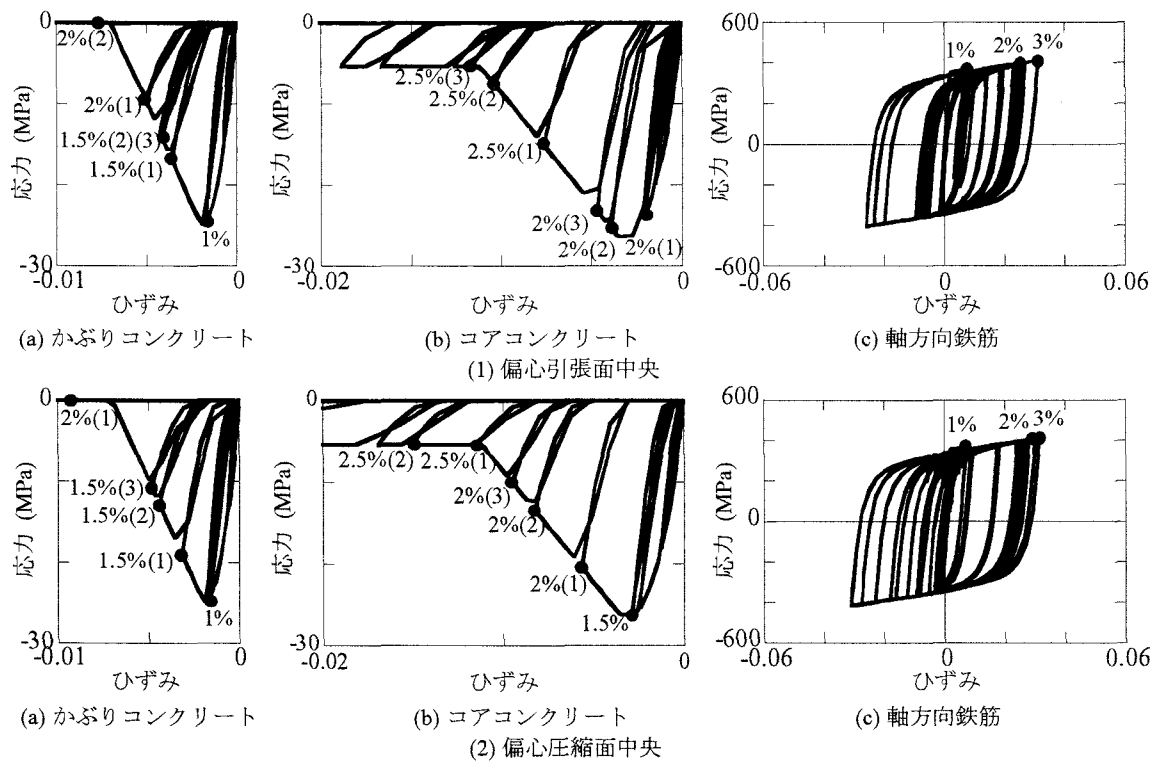


図-5 コンクリートおよび軸方向鉄筋の応力～ひずみの履歴曲線（偏心量 $e=D$ ，繰返し載荷実験に対する解析，図中の(i)はiサイクル目の応力～ひずみであることを示す）

(2) ファイバー要素解析による履歴特性

図-3に示した実験と解析による水平力～水平変位の履歴曲線の比較によれば，まず，偏心が無い場合には，3.5 %ドリフトの1サイクル目までは，ファ

イバー要素解析による履歴曲線は，実験結果と良く一致している．3.5 %ドリフトの2サイクル目から，上述したように，実験では，かぶりコンクリートだけでなく，コアコンクリートにまで損傷が著しく進

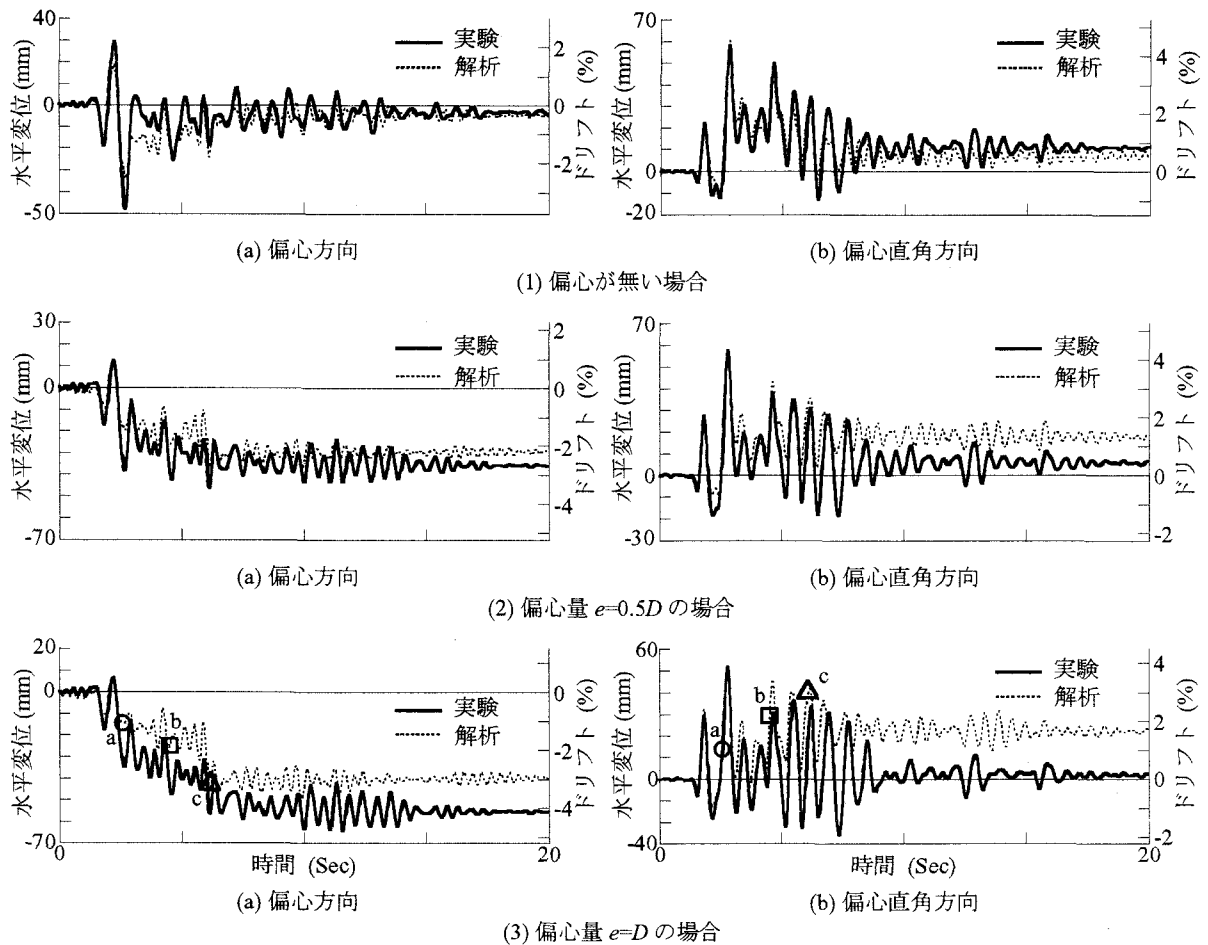


図-6 ハイブリッド載荷実験による応答変位と解析による応答変位の比較

展し、軸方向鉄筋にまで損傷が及んだため、両者の一致度は低下する。

図-4は、ファイバー要素解析によって求めた偏心引張面中央および圧縮面中央のかぶりコンクリート、コアコンクリートおよび軸方向鉄筋の応力～ひずみ履歴を示した結果である。これによると、コンクリートおよび軸方向鉄筋のひずみの進展には、偏心引張側と偏心圧縮側で、それほど大きな違いはない。

これに対して、偏心がある場合の実験と解析の水平力～水平変位の履歴曲線を比較すると、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに、偏心方向では、解析による履歴曲線は、実験結果と全体的に良く一致している。一方、偏心直角方向では、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに、特に2 % ドリフト載荷以降、解析による耐力が実験結果よりも大きくなるため、一致度が低下する。これは、解析では、曲げとねじりの同時作用による影響を見込んでいないためと考えられる。

図-5は、偏心量 D の場合を例として、ファイバー要素解析によって求めた偏心引張面中央および圧縮面中央のかぶりコンクリート、コアコンクリートおよび軸方向鉄筋の応力～ひずみ履歴を示した結果である。上述した偏心が無い場合には、当然ながら、偏心引張側と圧縮側ではかぶりコンクリート、コアコンクリート、軸方向鉄筋の応力～ひずみ履歴は同

程度であるのに対して、偏心がある場合には、偏心引張側に比較して偏心圧縮側の方が、コンクリートに生じる圧縮ひずみの進展が早い。これは、前述した実験において、偏心引張面に比較して圧縮面の方が損傷は早く、かつ著しかったことと対応している。例えば、コアコンクリートの履歴に着目すると、偏心引張側では、ドリフト2 % の2 サイクル目で最大応力に達した後、応力は急激に低下し、2.5 % の3 サイクル目で、最大応力の20 % にまで低下するのに対して、偏心圧縮側では、1.5 % ドリフト載荷時には最大応力に達し、2.5 % ドリフトの1 サイクル目で既に最大応力の20 % にまで低下している。

4. ハイブリッド載荷実験に対するシミュレーション

(1) ハイブリッド載荷実験による地震応答特性

偏心が無い場合、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合のハイブリッド載荷による応答変位、水平力～水平変位の履歴曲線をそれぞれ示すと図-6、図-7 のようになる。ここには比較のため、後述する解析による履歴曲線も同時に示している。なお、偏心量 D の場合には、偏心圧縮側の応答が大きくなる2.4 秒、4.8 秒、6.2 秒の点をそれぞれ a、b、c と呼び、これらに対応する点をそれぞれ示しているが、これについ

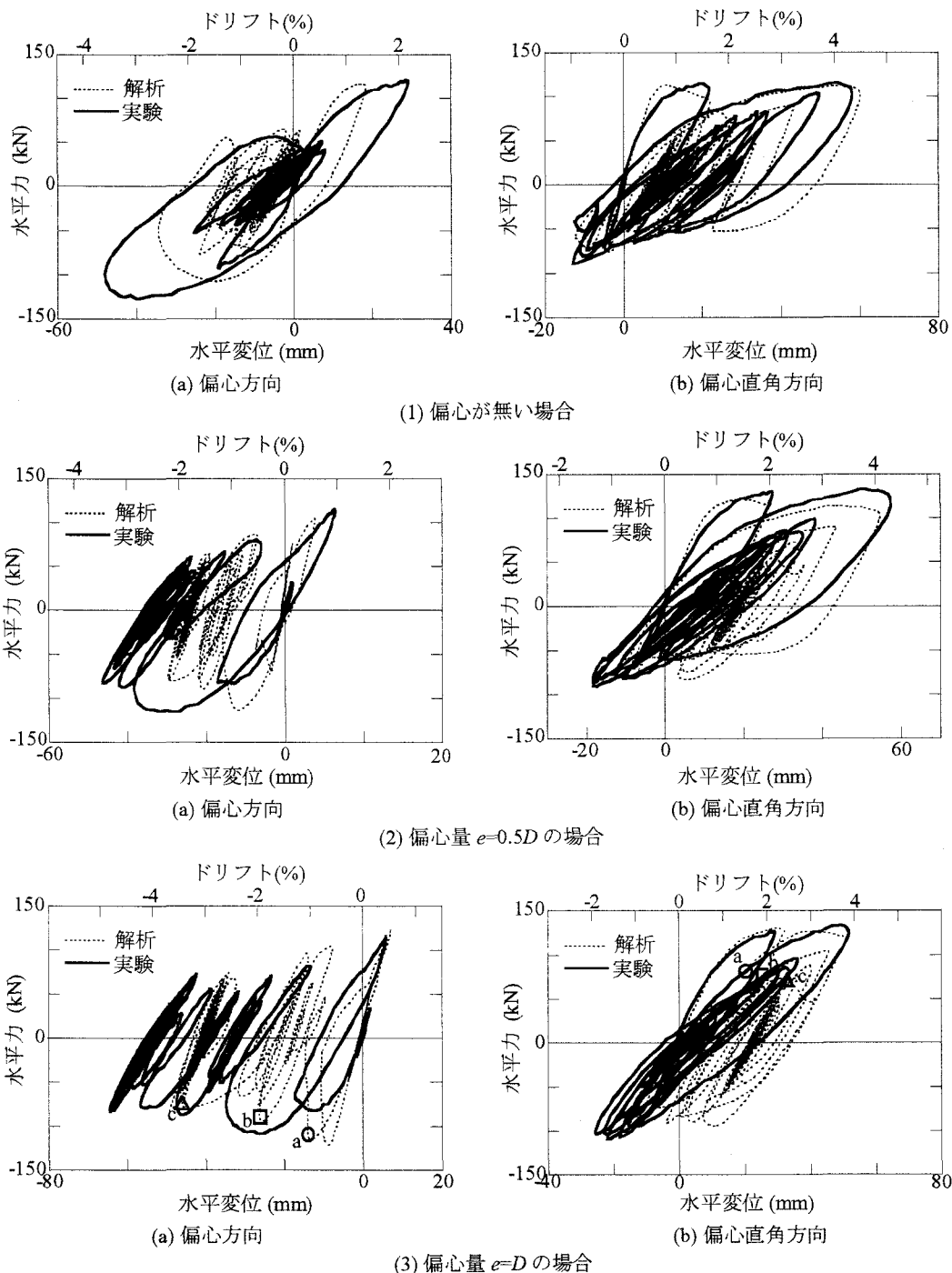


図-7 ハイブリッド載荷実験による水平力～水平変位の履歴曲線と解析による履歴曲線の比較

ては後述する。偏心の無い場合には、最大応答は、偏心方向、偏心直角方向にそれぞれ -3.6% ドリフト、 $+4.3\%$ ドリフトである。実験終了後には偏心直角方向に、 $+0.8\%$ ドリフトの残留変位が生じる。

水平力～水平変位の履歴曲線によると、最大耐力は、偏心方向、偏心直角方向にそれぞれ -128 kN 、 $+127\text{ kN}$ である。実験終了後には、橋脚基部の4面に曲げ水平クラックが生じると同時に、応答が卓越した偏心方向の一侧と偏心直角方向の+側の隅角部では、かぶりコンクリートが剥落する。ただし、

鉄筋には外観から判別できる損傷は生じていない。

偏心があると、偏心方向の応答変位には、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに、2.5秒付近で一度大きな応答が生じた後は、一侧（偏心圧縮側）にドリフトし、そのまま一侧だけで振動する。最大応答は、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合には、それぞれ -3.5% ドリフト、 -4.6% ドリフトである。偏心が大きくなるにつれて、残留変位は大きくなり、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合には、それぞれ -2.7% ドリフト、 -4.1% ドリフトである。一方、偏心直角方向の最大変位は、偏心

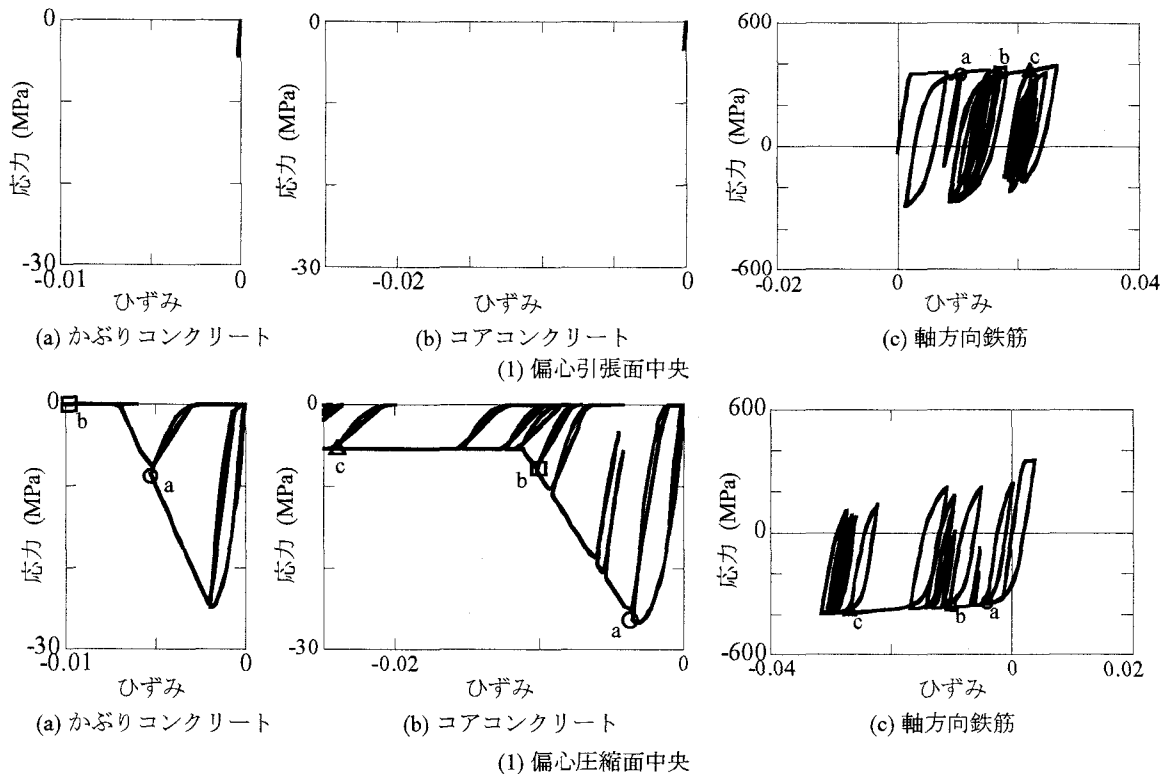


図-8 コンクリートおよび軸方向鉄筋の応力～ひずみの履歴曲線（偏心量 $e=D$ 、ハイブリッド載荷実験に対する解析）

量 $0.5D$ 、 D の場合には、それぞれ $+4.2\%$ ドリフト、 $+3.9\%$ ドリフトであり、残留変位は偏心量 $0.5D$ 、 D の場合でそれぞれ $+0.4\%$ ドリフト、 $+0.2\%$ ドリフトである。

水平力～水平変位の履歴曲線によれば、偏心方向の最大耐力は、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合に、それぞれ -111 kN 、 -109 kN となる。一方、偏心直角方向の最大耐力は、偏心量 $0.5D$ の場合には、それぞれ $+130\text{ kN}$ 、 D の場合には $+133\text{ kN}$ となる。

実験終了後には、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに、橋脚の4面に曲げ引張水平クラックが生じ、偏心圧縮面のかぶりコンクリートが剥落する。水平クラックと偏心圧縮側のかぶりコンクリートの損傷は偏心が大きくなるほど著しい。ただし、いずれの場合にも、鉄筋には外観から判別可能な損傷は生じていない。

(2) ファイバー要素解析による地震応答特性

図-6、図-7に示した解析による応答変位および水平力～水平変位の履歴曲線を実験結果と比較すると、偏心が無い場合には、ファイバー要素解析による応答変位および履歴曲線は、実験結果と全体的に良く一致している。

これに対して、偏心がある場合には、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに、偏心方向では、2.5秒付近に一侧（偏心圧縮側）に、一度、変位した後、そのまま側にドリフトしていくといった実験の特徴を解析により再現している。ただし、解析による残留変位は、偏心量 $0.5D$ の場合には、ドリフト 0.6% 、 D の場合に

は、ドリフト 1.1% だけ、それぞれ実験結果より小さい。

応答変位の比較によると、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合ともに、最大応答となる3秒付近までは良く一致している。ただし、その後、解析による応答は、実験結果よりも+側にドリフトする結果、一致度が徐々に低下していく。解析による残留変位は、偏心量 $0.5D$ の場合にはドリフト 0.9% 、 D の場合にはドリフト 1.5% だけ、それぞれ実験結果より大きい。

図-8は、偏心量 D の場合を例として、ファイバー要素解析による偏心引張面中央および圧縮面中央のかぶりコンクリート、コアコンクリートおよび軸方向鉄筋の応力～ひずみ履歴を示した結果である。ここには、上述した点a, b, cに対応する点をそれぞれ示している。まず、かぶりコンクリート、コアコンクリートに着目すると、偏心引張側では、圧縮ひずみはほとんど生じないのに対して、偏心圧縮側では、圧縮ひずみは大きくなっている。偏心圧縮側のかぶりコンクリートの履歴では、最大応力に達した後、点aまで応力は急激に低下しており、点bには、応力は0にまで低下する。偏心圧縮側のコアコンクリートの履歴では、点aで最大応力に達し、その後、点bまで応力は急激に低下し、点cには、応力は最大応力の20%にまで低下する。軸方向鉄筋の応力～ひずみ履歴を見ると、点a, b, cと、加振が進むにつれて、偏心引張側には引張ひずみが、偏心圧縮側には圧縮ひずみがそれぞれ増大し、最終的には、偏心引張側、偏心圧縮側には、それぞれ 0.021 、 -0.029 程度のひずみが残留している。

5. 結論

本研究では、RC 逆 L 字型橋脚模型を対象とした水平 2 方向の繰返し載荷実験およびハイブリッド載荷実験の結果をファイバー要素解析により再現し、その解析精度を検討した。その結果、以下の結論を得た。

1) 繰返し載荷実験に対する解析結果によれば、偏心方向では、解析による水平力～水平変位に履歴曲線は、実験結果と良く一致するのに対して、偏心直角方向では、特に 2 % ドリフト載荷以降、解析による耐力が実験結果よりも大きくなる。これは、解析では、ねじり剛性の回転角依存性を見込んでいないためと考えられる。

2) ハイブリッド載荷実験に対する解析結果によれば、偏心方向では、偏心圧縮側に残留変位が徐々に蓄積するといった現象を、解析により再現することができる。ただし、解析による残留変位は、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合では、それぞれドリフト 0.6 %、ドリフト 1.1 % だけ実験値よりも小さい。これに対して、偏心直角方向では、最大応答付近までは良く一致しているが、その後、解析による応答は、実験結果よりも+側にドリフトし、一致度が低下する。この結果、解析による残留変位は、偏心量 $0.5D$ 、 D の場合では、それぞれドリフト 0.9 %、ドリフト 1.5 % 実験値よりも大きくなる。

謝辞：本解析に際しては、東京工業大学大学院の早川涼二氏、福田智之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, pp. 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, pp. 167-170, 1998.
- 3) 川島一彦, 渡邊学歩, 畑田俊輔, 早川涼二: 逆 L 字型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, pp. 171-189, 2003.
- 4) 永田聖二, 川島一彦, 渡邊学歩, 荻本英典: ハイブリッド載荷実験に基づく 2 方向地震力を受ける RC 逆 L 字型橋脚の耐震性, 土木学会論文集, 投稿中.
- 5) 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, pp. 131-143, 1999.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・第 V 編耐震設計編, 丸善, 1996.
- 7) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., and Taylor, A. W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633, 1997.
- 8) 堺淳一, 川島一彦, 庄司学: 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No. 654/I-52, 297-316, 2000.
- 9) Menegotto, M. and Pinto, P.E.: Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, *Proc. of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, pp. 15-22, 1973.
- 10) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, 土木学会論文集, 738/I-64, 159-169, 2003.
- 11) 大塚久哲, 竹下永造, 王堯, 矢葺亘, 角本周, 吉村徹: 軸力, 曲げ及びねじりの複合荷重を受ける RC 部材の履歴復元力に関する実験的考察, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, CD-ROM, No. 67, 2003.
- 12) Tirasit, P., Kawashima, K., Watanabe, G.: Seismic Performance of RC Columns under Cyclic Bending-Torsional Loading, 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, 2005, 投稿中.