

## 2方向地震力を受けるRC橋脚の耐震性に関する研究

早川涼二<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・渡邊学歩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科国際開発工学専攻修士課程  
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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. はじめに

兵庫県南部地震以降、地震時保有耐力法が橋梁の耐震設計の主流になって来たが、2方向地震力の取り扱いに関しては従来の慣習がそのまま踏襲され、橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ独立に耐震設計すれば2方向の地震力作用下においても橋脚の耐震性は満足されると見なされている。しかしながら、1方向から地震動が作用する場合に比較して2方向から地震動を受ければより橋脚の損傷が大きくなるのは当然であり、この事実を取り入れない限り、耐震設計法としては不十分と言える。

橋梁を対象とした2曲げに対する検討としては、須田らが斜張橋の主塔のように高軸力を受ける長方形断面RC部材が2軸の繰り返し曲げを受けた場合のモーメント～曲率関係を実験的に求め、ファイバー要素解析により精度良く再現できることを明らかにした<sup>1)</sup>。川島及び川島・長谷川はそれぞれ斜め方向及び水平2方向に地震力が作用した場合の単柱式RC橋脚の変形性能、水平耐力を実験的に検討している<sup>2) 3)</sup>。この結果、斜め方向や水平2方向に繰り返し荷重を加えると、1方向荷重する場合に比較して、水平耐力の低下が著しいことを明らかにしているが、荷重装置の制約から、上下方向荷重は作用されていない。また、最近では、益子らが2方向のハイブリッド荷重装置を用いてRC部材の損傷度を検討し、ある1方向の変形が大きい場合には、2軸曲げを加えることにより、これとは直角方向の耐力低下が著しいことを明らかにしている<sup>4)</sup>。

以上のように、水平2方向同時作用の影響に関する研究はまだ非常に少なく、特に、2方向曲げが曲げ耐力および変形性能に及ぼす影響が明らかにされていない。このため、ここでは5体のRC橋脚模型に対し

て4種類の履歴パスを用いた2方向荷重実験を行い、水平2方向同時荷重の影響を実験的に検討すると同時に、ファイバー要素解析によってこれらの点を検討した結果を示す。

### 2. 実験に用いた供試体及び荷重方法

#### (1) 実験供試体

実験には同一仕様の5体の供試体を用いた。いずれも400mm x 400mmの正方形断面を有し、橋脚基部から上端までの高さは1750mm、橋脚基部から水平力作用点までの高さ(有効高さ)は1350mmである。かぶりコンクリートの厚さは40mm、せん断支間比は3.75である。

橋脚模型は、これらを小さな実物と考えて、1996年道路橋示方書に基づいて地震時保有耐力法<sup>5)</sup>により耐震設計した。上部構造の重量によって橋脚基部に作用する圧縮応力を1MPa程度と見込み、これに相当する160kNの軸力を橋脚頂部に作用させた。

このようにして定めた断面は図-1に示すとおりである。軸方向鉄筋としてはD13(SD295A)を16本配置し、帯鉄筋としてはD6(SD295A)を柱基部から高さ1100mmまでは50mm間隔(これより上部では100mm間隔)、フーチング内では70mm間隔に設置した。軸方向鉄筋比および帯鉄筋体積比はそれぞれ1.27%、0.79%(基部～1100mm区間)となる。

#### (2) 荷重方法

東京工業大学の耐震実験施設を用いて荷重実験を行った。3台の動的アクチュエータを用いて、荷重制御による一定軸力作用下で水平2方向の水平力を変位制御によって橋脚模型に与えた。荷重履歴として、図-2に示すように、4種類の荷重を用いた。矩

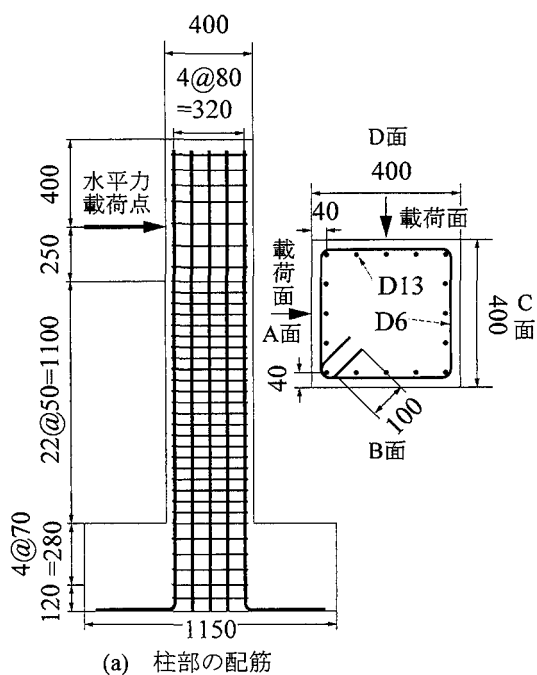


図-1 実験供試体

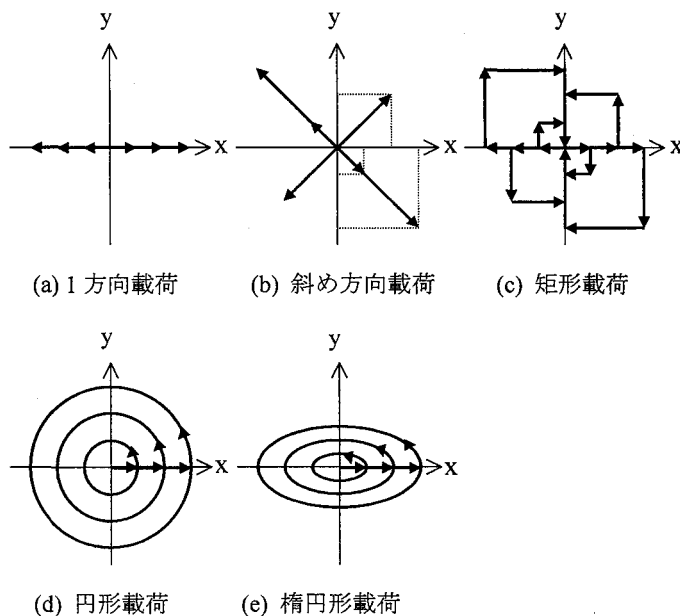


図-2 水平面内の荷重履歴

形荷重とは、矩形状に2方向の変位を交互に与えるものである。変位の軌跡は、最初の0.5%ドリフトによる荷重では第II、第IV象限、次の1%ドリフトによる荷重では第I、第III象限というように、交互にくり返していった。これはある特定方向への損傷を防止するためである。

円形荷重、楕円形荷重では、1方向(図-2のy方向)の変位を他方向(図-2のx方向)の変位のそれぞれ1倍、1/2倍とした。

また、比較のために、1方向荷重した場合と橋脚の主軸から45度方向に斜め荷重した場合も実験することとした。ただし、斜め方向荷重では、最初の0.5%ドリフトによる荷重では第I、第III象限、次の1%ドリフトによる荷重では第II、第IV象限というように、荷重を作用させる方向を交互に変化させた。

いずれの場合にも、荷重変位はドリフト0.5%(=6.75mm)を基準にし、その整数倍で順次変位を増加させ、同一変位による繰返しは3回とした。

以下、1方向荷重、斜め45度方向荷重した橋脚模型をそれぞれP-1、P-2、矩形荷重、円形荷重、楕円形荷重した橋脚をそれぞれP-3、P-4、P-5と呼ぶ。

### 3. 1方向および斜め方向荷重した場合の履歴特性

1方向荷重(図-1中のAC方向に荷重、以下、x方向と呼ぶ)した場合には、荷重変位振幅の増大とともに橋脚基部で水平曲げひび割れが次第に成長し

てくる。ドリフト3.5%になると、A面、C面がかぶりコンクリートの圧縮破壊が生じ始める。

図-3は荷重作用点における水平力～水平変位の履歴曲線である。ここでは、後述する斜め方向荷重した場合の履歴曲線も比較のために示している。これによれば、ドリフト1%以降水平耐力が安定し、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%に入ると、かぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈により耐力が低下し始め、最大耐力の78%にまで低下する。

これに対して、斜め方向荷重したP-2では、隅角部での損傷が著しい。例えば、2.5%ドリフト荷重になるとかぶりコンクリートの圧壊が顕著になるが、2.5%ドリフト荷重ではA面とD面のコーナー(以下、AD隅角部と呼ぶ)とB面とC面のコーナー(以下、BC隅角部と呼ぶ)の方向に荷重しているためである。ドリフト3.5%の荷重になると、全面がかぶりコンクリートが剥落する。軸方向鉄筋も2、3本座屈した。斜め方向に荷重した場合には、上述した1方向荷重した場合に比較して、明らかに損傷が著しい。

図-3(2)に示した履歴曲線によれば、x方向、y方向ともによく似た特性を示し、両方向とも、ドリフト1%以降耐力は安定し、ドリフト3.5%の1回目(x方向)～2回目(y方向)の繰返しで耐力はそれぞれ最大耐力の約80%に低下する。これは、上述したように、隅角部におけるかぶりコンクリートの著しい剥落によるものである。

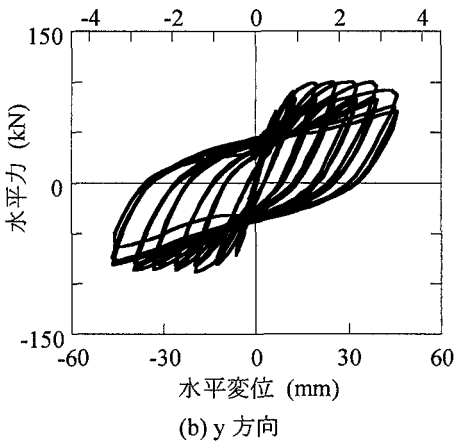
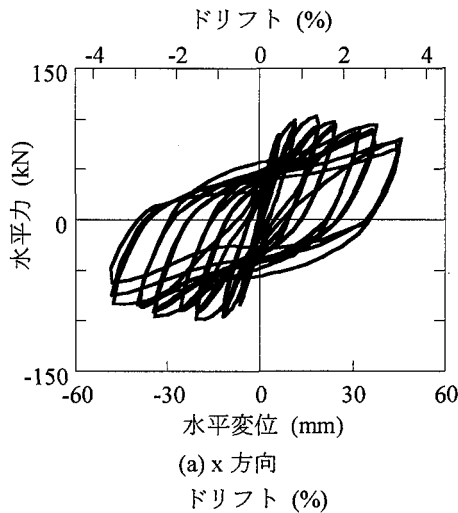
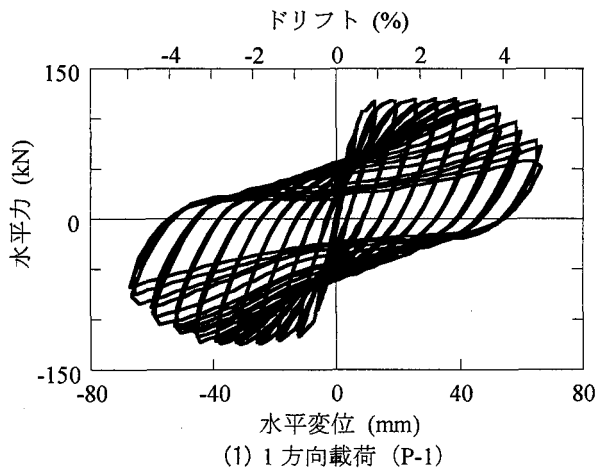


図-3 1方向載荷および斜め方向載荷した場合の履歴曲線

#### 4. 矩形載荷した場合の履歴特性

矩形載荷した場合、損傷は1方向載荷したP-1よりも著しく、0.5%ドリフトから多数のひび割れが4面にわたって生じる。ドリフト2.5%では第II象限と第IV象限で加力するため、AB隅角部とCD隅角部にかぶりコンクリートの縦ひび割れや剥落が生じ、

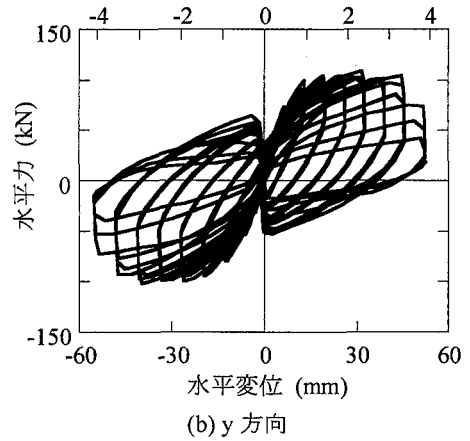
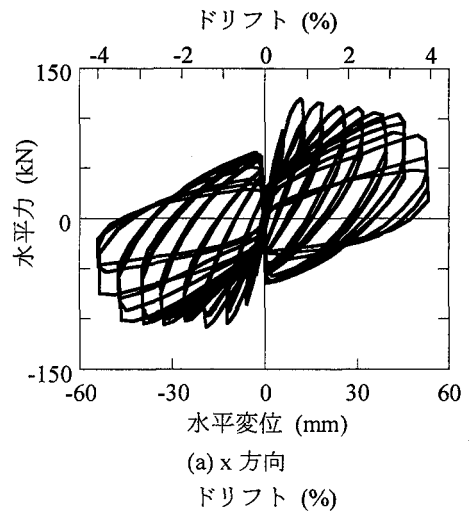


図-4 矩形載荷した場合の履歴曲線

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、A、C、D面の基部から200~300mmの範囲でコアコンクリートにも著しい損傷が生じ、軸方向鉄筋は4隅において、いろいろな方向に複雑にねじ曲げられるように座屈する。

図-4は、履歴曲線を示した結果である。x方向、y方向に分けて履歴曲線を示しているが、いずれの方向にも、履歴曲線は変位が0付近でくびれた特異な形状となる。これは、ある1方向の載荷変位を0に戻す過程で他方向の復元力が減少するために起こる現象であり、2方向載荷したことによる2方向間の復元力低下のインターアクションを表している。

図-4によれば、x方向には、ドリフト1%の段階で最大耐力120kNに達し、その後、耐力はわずかずつ低下し、ドリフト3%では最大耐力の80%になる。これに対して、y方向には、ドリフト1%載荷以降耐力は安定し、ドリフト3.5%になると、2回目、3回目のくり返しにおける耐力低下が著しく、最大耐力の80%を下回るようになる。

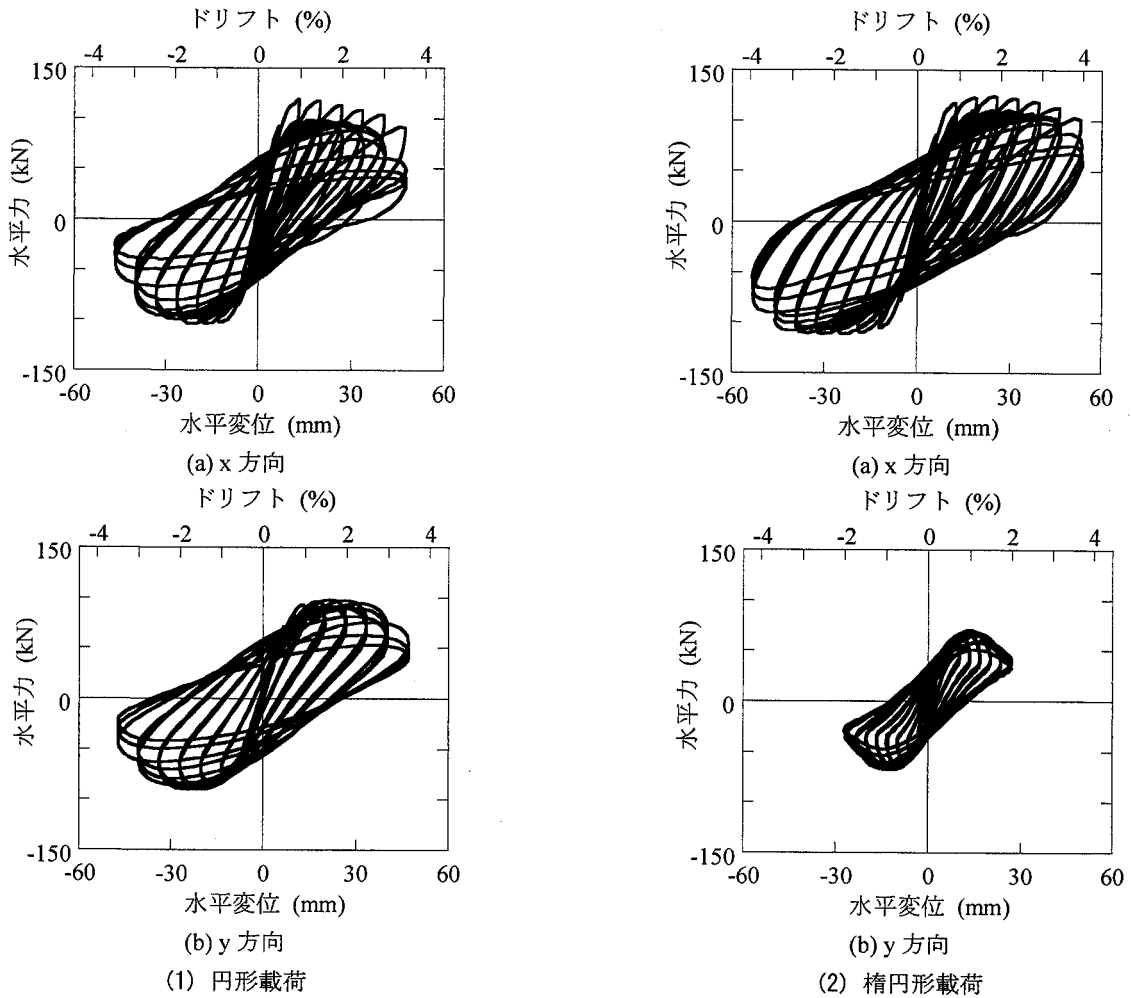


図-5 円形載荷および楕円形載荷した場合の履歴曲線

## 5. 円形及び楕円形載荷した場合の履歴特性

円形載荷した場合には、ドリフト 1.5%で4隅に斜めや縦方向のひび割れが入り、2.5%ドリフトになると4隅だけではなく4面がかぶりコンクリートの剥落が顕著になる。ドリフト 3.5%では橋脚基部から200mm程度の範囲がかぶりコンクリートが全面的に剥落し、全ての軸方向鉄筋が座屈する。また、楕円形載荷した場合にも、円形載荷した場合とほぼ同様なプロセスで損傷が進んでいくが、損傷の進展は円形載荷した場合に比べ、0.5%ドリフト程度遅い。

図-5は、円形載荷した場合と楕円形載荷した場合の履歴曲線である。ともにx向、y向に分けて履歴曲線を示しているが、いずれの場合も履歴曲線のコーナーが丸くなっている。これは、矩形載荷の箇所を示したように、2方向載荷の過程において、ある1方向に載荷したことに伴う他方向の曲げ耐力の低減によるものである。円形載荷した場合には、2方向の載荷変位のベクトル和が最大となる付近で、耐力

低下が連続的に生じる結果、最大耐力付近の履歴曲線が丸みを帯びる。

なお、x方向の履歴曲線では、それぞれの載荷ステップごとに、第1回目の+側への載荷ではそれ以降の載荷に比較して、水平力が大きくなっている。これは、この段階では図-2に示したように、x方向のみに載荷しており、いわば1方向載荷した場合と同じ履歴となっているためである。したがって、第1回目の+側への載荷の際の水平力と2回目以降の載荷の水平力の差は、1方向と2方向載荷の違いを表しているといえることができる。

楕円形載荷した場合にも、円形載荷した場合と同じ原理で、履歴曲線のコーナーが丸みを帯びてくる。

## 7. ファイバー要素解析

### (1) 解析モデル

橋脚の履歴特性をファイバー要素で解析するために、模型橋脚を図-7に示すようにモデル化した。塑性ヒンジ区間はファイバー要素で、塑性ヒンジ区間

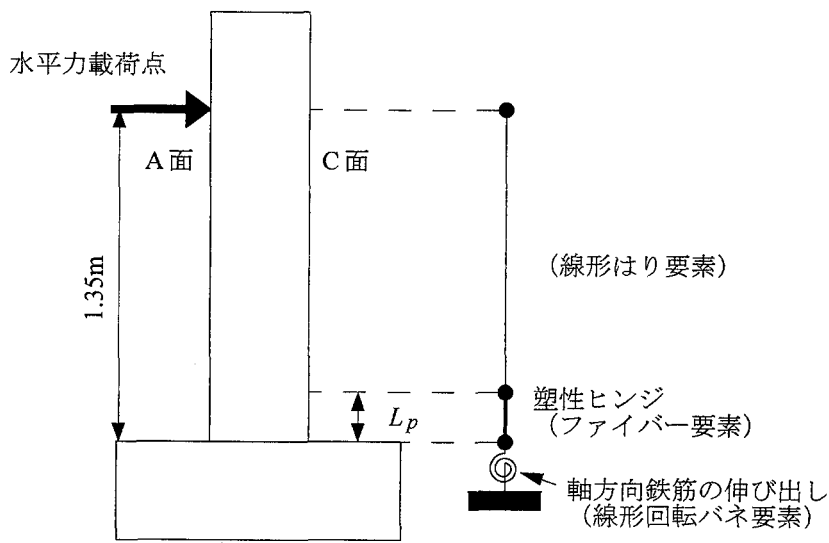


図-7 実験供試体のモデル化

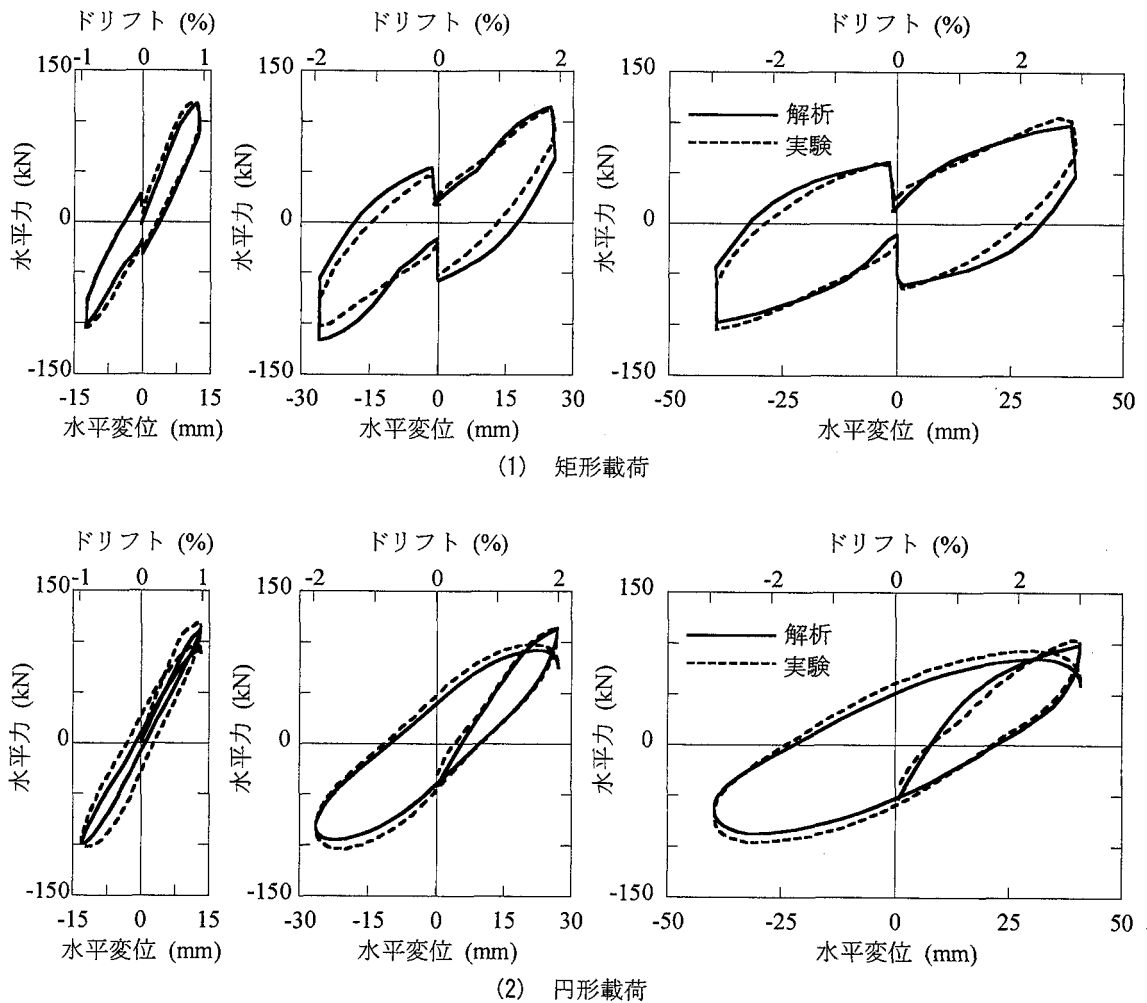


図-8 ドリフト1%, 2%, 3%載荷における履歴曲線の比較 (x方向)

以外の橋脚躯体は線形はり要素でそれぞれモデル化し、フーチング内の軸方向鉄筋の伸びだしを考慮し、線形回転ばねでモデル化した。

コンクリートの応力～ひずみ関係は、包絡線には、Hoshikuma et al.による提案式<sup>5)</sup>、除荷、再載荷履歴には堺らのモデル<sup>6)</sup>を用いた。これは帯鉄筋で横拘束

されたコンクリートの圧縮実験に基づいて提案されたモデルであり、除荷、再載荷がくり返される場合の塑性点ひずみ、除荷点における応力をよく表すことができる。軸方向鉄筋の応力～ひずみ関係は、Bauschinger効果を考慮できるMenegotto-Pintoモデル<sup>7)</sup>を用いた。

## (2) ファイバー要素解析

### a) 矩形載荷した場合

矩形載荷した場合に対するファイバー要素解析による履歴曲線を実験結果と比較して示すと、図-8(1)の通りである。ここでは、ドリフト 1%, 2%, 3%載荷の場合の履歴曲線を x 方向に関して比較した結果を示している。変位が 0 付近のくびれも含めて、全体として、ファイバー要素解析によって求めた履歴曲線は実験結果の特徴をよく再現している。

### b) 円形載荷した場合

同様に、円形載荷した場合の履歴曲線の比較を図-8(2)に示す。これらによれば、ファイバー要素解析による履歴曲線は繰り返し載荷実験から求めた履歴曲線のコーナーが丸みを帯びてくる特徴を含め、極めてよい精度で再現できている。

## 8. 結論

2方向地震力を受ける RC 橋脚の曲げ耐力及び変形性能を明らかにするために、水平 2 方向の作用を単純化した履歴を用いて、繰り返し載荷実験を行うと同時に、コンクリートおよび軸方向鉄筋の履歴特性を考慮したファイバー要素解析を行った。本研究の結果得られた結論は、以下の通りである。

(1) 水平 1 方向だけに載荷した場合に比較して、水平 2 方向に載荷すると、曲げ耐力が低下すると同時に、変形性能も低下する。特に、円形載荷、矩形載荷した場合に、この影響は顕著である。

(2) 水平 1 方向に載荷した場合には、載荷方向に直交する 2 面において損傷が進展するが、矩形載荷、円形載荷、楕円形載荷する場合には、隅角部から損傷が始まり、これが 4 面に進展していく。

(3) 除荷、再載荷の影響および載荷繰り返しによる塑性点ひずみの増加と除荷点応力の低下を考慮したコンクリートの構成則を用いたファイバー要素解析を行うと、繰り返し載荷実験から得られる履歴曲線を精度よく再現することができる。

謝辞：模型橋脚の設計は、(株)長大の矢部正明氏に多大なご協力をいただいた。繰り返し載荷実験に際しては、東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻川島研究室のメンバーに絶大なご協力を得た。ここに記して厚くお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 須田久美子, 村山八洲雄, 古市耕輔：高軸力・二軸曲げを受ける RC 部材の  $M-\phi$  関係, コンクリート工学年次論文報告集, 12-2, pp.251-256, 1990
- 2) 川島一彦：鉄筋コンクリート橋脚の動的耐力及び変形

性能に及ぼす斜め方向載荷の影響, 土木技術資料, 33-8, pp. 27-33, 1991

- 3) 川島一彦, 長谷川金二：鉄筋コンクリート橋脚の動的耐力に及ぼす水平 2 方向同時載荷の影響, 土木技術資料, 34-7, pp. 38-43, 1992
- 4) 益子直人, 睦好宏史, Willam Tanzo, 町田篤彦：仮動的実験を用いた 2 方向地震力を受ける RC 橋脚の弾塑性応答性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.1271-1276, 1994
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・第 V 編 耐震設計編, 1996
- 6) 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, 654/I-522, 297-316, 2000
- 7) 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