

2 方向地震力を受ける R C 橋脚の耐震性

早川涼二¹・川島一彦²・渡邊学歩³

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

E-mail:ryohaya@cv.titech.ac.jp

²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)

E-mail:kawasima@cv.titech.ac.jp

³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)

E-mail:gappo@cv.titech.ac.jp

兵庫県南部地震以降、地震時保有水平耐力法が橋梁の耐震設計法として適応されるようになってきたが、2方向地震力の取り扱いに関しては従来の慣例が残されている。つまり、橋軸、橋軸直角方向にそれぞれ地震力を作用させ、独立に耐震設計を行い、この条件を満足すれば2方向地震動の作用下においても耐震性は確保されるとしている。しかし、実際の地震動は水平方向2成分同時に作用することから、1方向から地震動が作用する場合に比較してより複雑な挙動を示すと考えられる。本研究では、5体のRC橋脚模型に対する各種の履歴を用いた2方向載荷実験を行い、破壊特性および履歴特性に関する実験的検討を行ったので、この結果について報告する。

Key Words : Seismic design, Ductility, Flexural Strength, Reinforced Concrete, Bridge, Column

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。

しかしながら、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方向載荷実験を行い、水平2方向同時載荷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載荷方法

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ると、1996年道路橋示方書に基づいて地震時保有耐力法¹⁾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 に示す通りである。

東京工業大学の耐震実験施設を用いて載荷実験を行った。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。載荷履歴として、図-2 に示すように、4 種類の載荷を用いた。紙面の都合により、斜め方向載荷および楕円形載荷はここには示されていない。矩形載荷とは、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%ドリフトによる載荷では第 II、第 IV 象限、次の 1%ドリフトによる載荷では第 I、

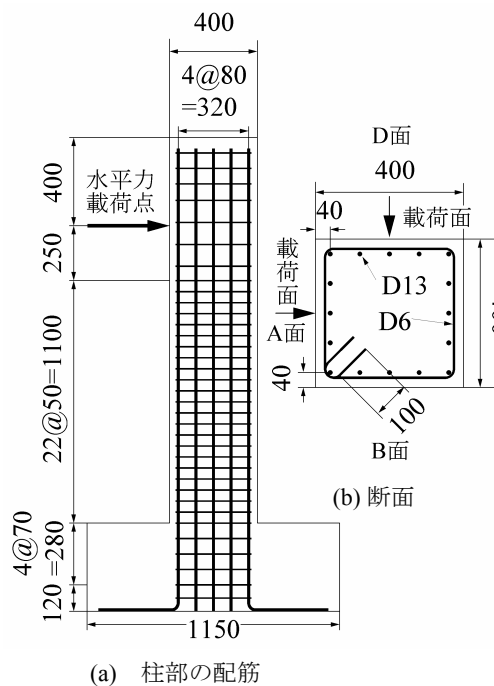


図-1 実験供試体

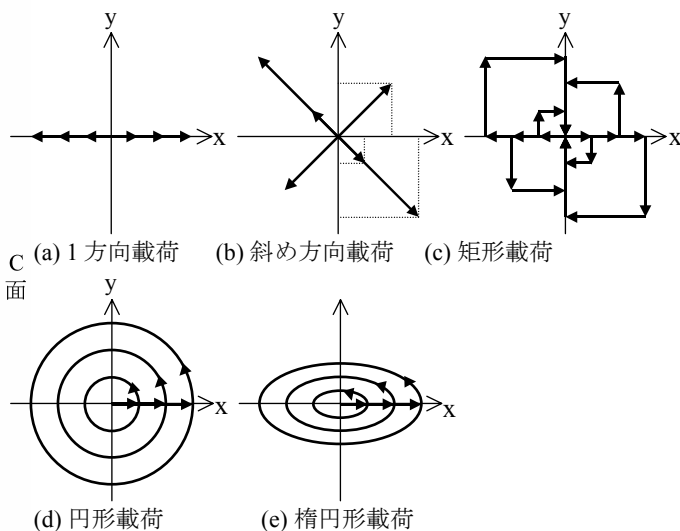


図-2 水平面内の荷重履歴

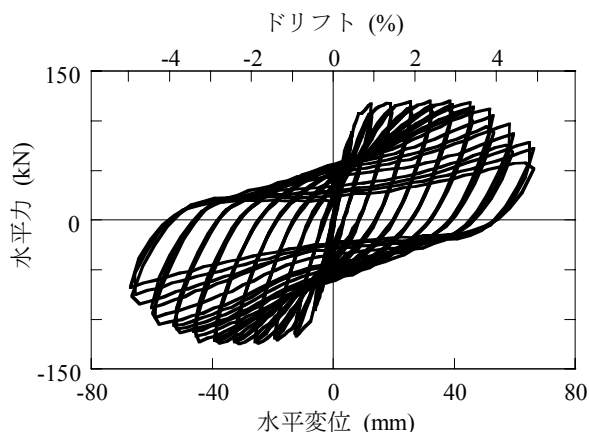


図-3 一方向荷重した場合の履歴曲線

第 III 象限というように、交互に順次整数倍で変位を増加させながら、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。円形荷重では、最初にドリフト 0.5%を半径とし、荷重を行い順次半径を整数倍で増加させた。また、比較のために、1 方向荷重した場合も実験することとした。いずれの場合にも、同一変位による繰り返しは 3 回とした。

3. 各荷重履歴を受けた橋脚の履歴特性

図-3は、一方向荷重を行った場合の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

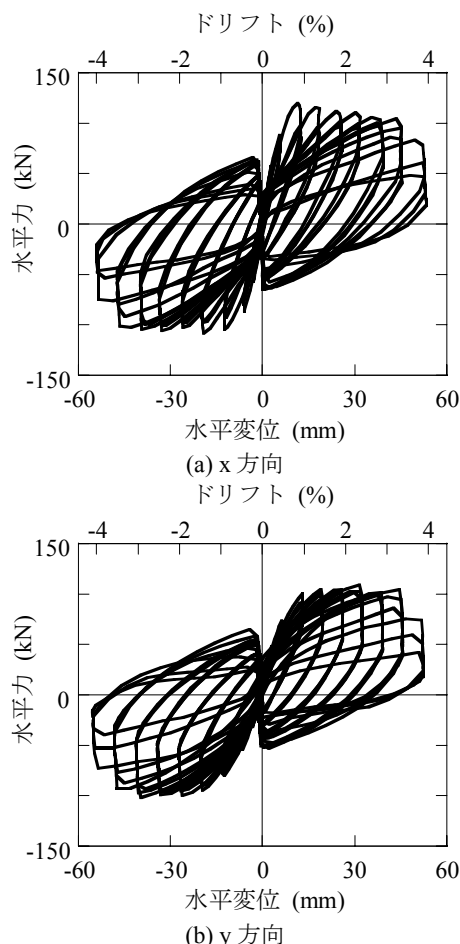
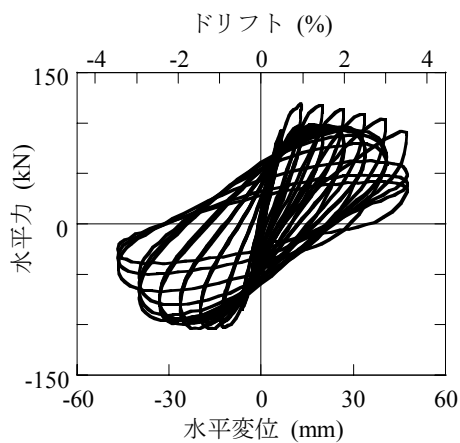


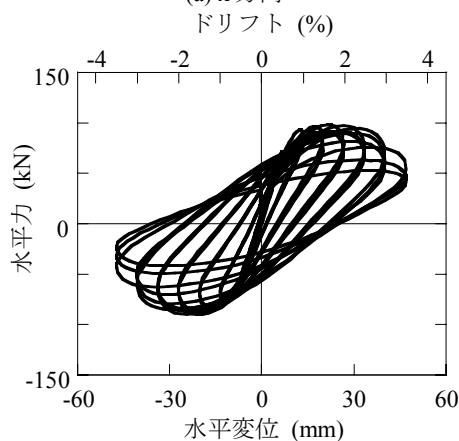
図-4 矩形荷重した場合の履歴曲線

め、最大耐力の78%にまで低下する。

図-4 は、矩形荷重を行った場合の橋脚の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



(a) x 方向



(b) y 方向

図-5 円形載荷した場合の履歴曲線

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は、円形載荷した場合の履歴曲線である。x向、y向に分けて履歴曲線を示しているが、履歴曲線のコーナーが丸くなっている。これは、矩形載荷の箇所ですしたように、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

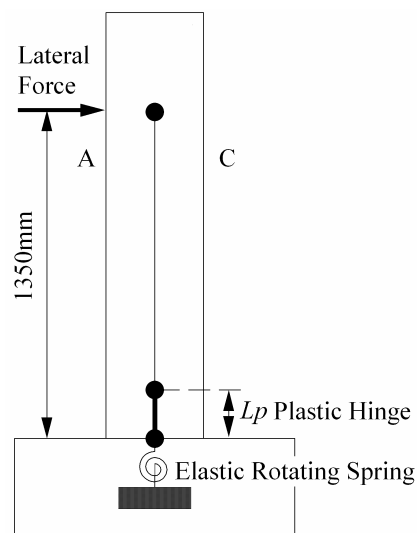
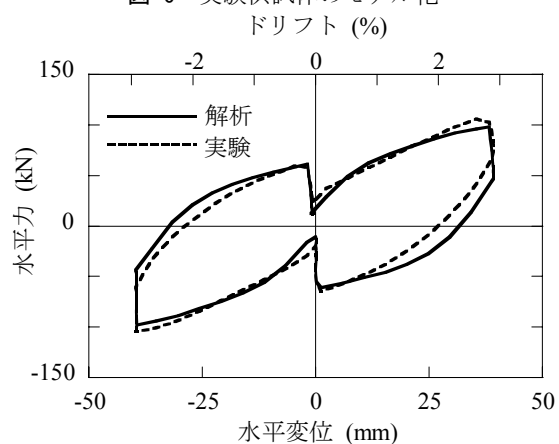
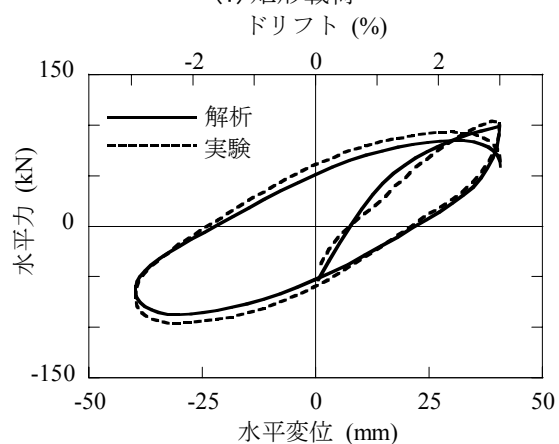


図-6 実験供試体のモデル化



(1) 矩形載荷



(2) 円形載荷

図-7 ドリフト 3% 載荷における履歴曲線の比較 (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。

4. 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-6 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¹⁾、除荷、再載荷履歴には堺らのモデル²⁾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 効果を考慮できる修正 Menegotto-Pinto モデル³⁾を用いた。

(2) ファイバー要素解析

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-7(1)の通りである。ここでは、ドリフト 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。

同様に、円形載荷した場合の履歴曲線の比較を図-7(2)に示す。これによれば、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。

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。

(2) 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、解析に際してはカリフォルニア大学パークレイ校の堺淳一氏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) 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
- 2) 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
- 3) 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, 2000

5. 結論

2 方向地震力を受ける RC 橋脚の曲げ耐力及び変

(2003. 10. 10 受付)

EFFECT OF BILATERAL LOADINGS ON THE FLEXURAL STRENGTH AND DUCTILITY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS

Ryoji HAYAKAWA, Kazuhiko KAWASHIMA and Gakuho WATANABE

This paper describes the flexural strength and ductility of reinforced concrete bridge columns under bilateral loadings. Under a constant vertical load, the columns were subjected to bilateral loadings with four orbits (diagonal, rectangular, circular and ellipse). A fiber element analysis was conducted. It was found that the deterioration of strength and ductility of the columns resulted from the bilateral loadings is substantial, and that the fiber element analysis is effective to reproduce the hysteretic behavior of the columns under the bilateral loadings.