

論文

[2212] 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

益子直人*1・睦好宏史*2・Willam Tanzo*3・町田篤彦*4

1. はじめに

地震力を受けるRC橋脚において外力が1方向から作用する場合に比べ、2方向から同時に作用する場合はその応答性状は、より厳しくなることが考えられる。現在の耐震設計においては構造物を各直交方向について独立に検討を行っているために、このような影響が考慮されていない。本研究では2方向外力の入力が可能である載荷実験システムを開発し、そのシステムを用いて、2方向外力を受けるRC橋脚の基本的な性質及びその弾塑性応答性状を実験的に明確にする事を目的とした。

2. 実験システムの概要

2.1 セットアップ方法

本研究では2方向地震力を同時に供試体に入力するために、載荷設備等の理由から2台の電気油圧式アクチュエータを用いた載荷システムを開発した。両アクチュエータは供試体の変形に常に追随し、かつアクチュエータ及び治具には軸力のみが作用するように、その両端はヒンジとした。このために両アクチュエータは直交を保つことができないため、供試体に強制する変形量は各アクチュエータの増分変形量に変換される必要がある。また計測される復元力も同様の理由で変換される必要がある。そのための変換式に関しては次節<2.2 制御システム>で詳しく解説する。また供試体断面の中心と両アクチュエータの載荷点とが一致しない場合には供試体にねじりのモーメントが発生する。これを防ぐために、供試体とアクチュエータは供試体断面の中心から伸ばされたPC鋼棒にピロボール（ヒンジ）を介したうえで接続した。これにより供試体には純粋に曲げだけが作用する。また、アクチュエータの自重による影響を除去するために水平方向のアクチュエータは錘によりバランスをとった。これらのセットアップ状況を図-1に示す。図-1において供試体は紙面の鉛直方向裏側にPC鋼棒により設置されている。尚、このセットアップ方法においては供試体のねじれ方向の回転は自由となる。

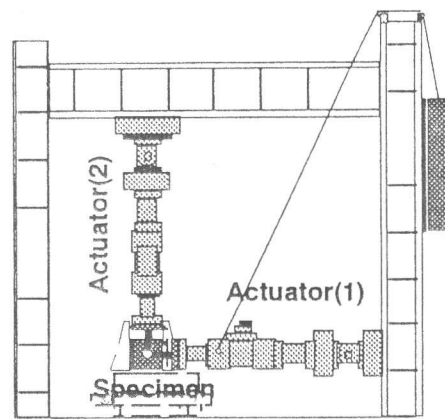


図-1 セットアップ状況

- *1 首都高速道路公団 工修（正会員）
 *2 埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）
 *3 埼玉大学助手 工学部建設工学科、工博（正会員）
 *4 埼玉大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

2.2 制御システム

制御用コンピューター内で算出された供試体断面の目標座標{x,y}は、変換プログラム(1)により各アクチュエーターの増分変形量{Lact(1),Lact(2)}に変換され、D/Aコンバータを通じてアクチュエーターへ送られる。また各アクチュエーターで計測された復元力{load(1),load(2)}はA/Dコンバータを通じて制御用コンピューターへフィードバックされ、変換プログラム(2)によりNS、EW成分の復元力{load(x),load(y)}に変換される。以上の過程を1ステップとして実験は最終ステップまで自動的に継続される。D/Aコンバータの最小分解能及びアクチュエーターの制御装置の性能から理論的に制御可能な最小変形量は0.048mmである。また変換の概念図を図-2に示す。

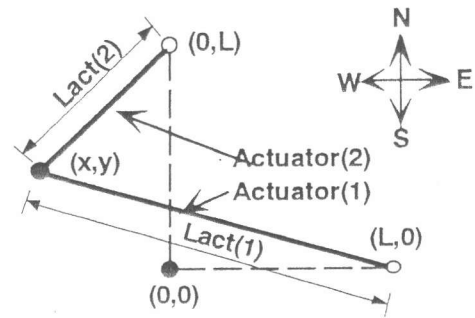


図-2 変換概念図

$$\left. \begin{aligned} Lact(1) &= \sqrt{(x-L)^2 + y^2} \\ Lact(2) &= \sqrt{x^2 + (y-L)^2} \end{aligned} \right\} \text{----- (1)}$$

$$\left. \begin{aligned} load(x) &= load(1) * \frac{L-x}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2}} + load(2) * \frac{0-x}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2}} \\ load(y) &= load(1) * \frac{0-y}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2}} + load(2) * \frac{L-y}{\sqrt{x^2 + (y-L)^2}} \end{aligned} \right\} \text{----- (2)}$$

3. 実験概要

3.1 供試体

2方向外力が問題となるRC橋脚の断面形状として正方形または円形が考えられる。ここでは供試体の形状は全て図-3のような正方形断面とし、強軸弱軸のない形状及び諸元とした。供試体は反力床との固定用のフーチング部分、RC橋脚を模した部分、PC鋼棒緊結用のプレートを接続するためのヘッド部分で構成される。供試体は水平方向に設置され、フーチング部分を反力床に緊結し、両アクチュエーターと接続しPC鋼棒緊結用プレートとヘッド部分とを緊結した。供試体は1方向仮動的実験用に2体(PDU-1,2)、2方向仮動的実験用に3体(PDB-1,2,3)の計5体を作製した。PDU-1には地震波のNS成分を、PDU-2にはEW成分を、PDB-1には地震波のNS、EW成分を同時に入力し、耐震性能及び崩壊性状の比較を行い、PDB-2とPDB-3においては共に入力地震波を同一とし、靱性能の違いによる弾塑性応答性状の比較を行った。各供試体の諸元、入力条件を表-1に示す。また使用したコンクリート及び鉄筋の力学的性質を表-2に示す。

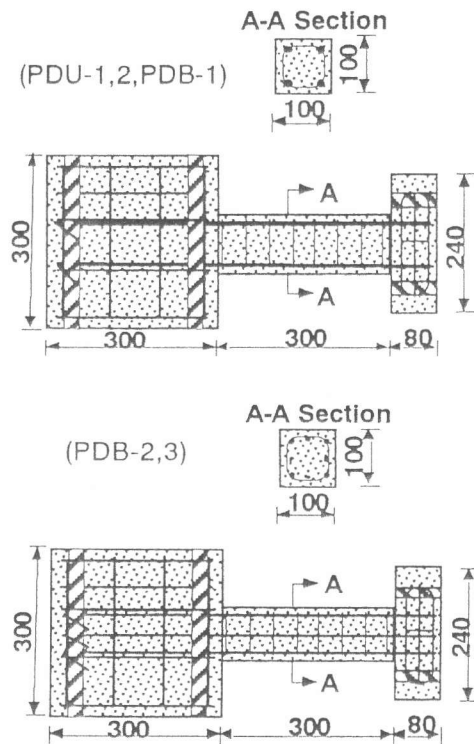


図-3 供試体の形状寸法

表-1 供試体諸元

供試体	入力成分 El-Centro	最大加速度 (gal)	主鉄筋	帯鉄筋
PDU-1	NS	620	D10-4	D3-@4
PDU-2	EW	557	D10-4	D3-@4
PDB-1	NS & EW	620&432	D10-4	D3-@4
PDB-2	NS & EW	800&557	D6-8	D3-@4
PDB-3	NS & EW	800&557	D6-8	D3-@15

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート強度(MPa)		36.7
鉄筋引張 強度 (MPa)	D10	386.1
	D6	476.6
	D3	249.0

3.2 2方向地震波を入力した仮動的実験

実験供試体は独立柱式RC橋脚を模したもので、1質点系としてモデル化した。上載荷重としての質量は実構造物に生じる軸応力の大きさと等しくなるように9800Nと仮定した。実験の手順を以下に示す。(1)各方向の入力地震波と供試体から計測された復元力とを読み込む。(2)各方向の予測子変位を算出し、それらを目標座標に変換し、供試体に強制する。(3)各アクチュエーターより復元力を計測後、各方向成分に変換し運動方程式に取り込む。(4)数値積分を行い、修正子変位、及びその他の応答値を求める。このような手順を地震波終了まで繰り返す。この実験手法により同時に2方向からの地震力を受けるRC橋脚の応答を再現することが可能となる。また1方向仮動的実験を行う際は地震波を入力しない方向の加速度を全ステップにわたって0.0とし、目標座標のその方向成分も全ステップにわたって0.0とした。地震波にはエルセントロ波のNS、EW成分を使用し、その最大加速度を拡大して用いた。時間刻みは時間軸を供試体の縮尺率から相似則を用いて1/3に圧縮し、 $\Delta t=0.0033$ 秒とした。地震継続時間は6.66秒となる。また地震応答解析に用いる数値積分法にはオペレータ・スプリッティング法を用いた。この積分法により、従来の数値積分法と比較して、アルゴリズムが非常に簡単であり、かつ積分条件が大幅に緩和される。また減衰率は部材の降伏前を2.0%とし、降伏後を0.0%とした。仮動的実験の概念図を図-4に、実験の流れを図-5に示す。

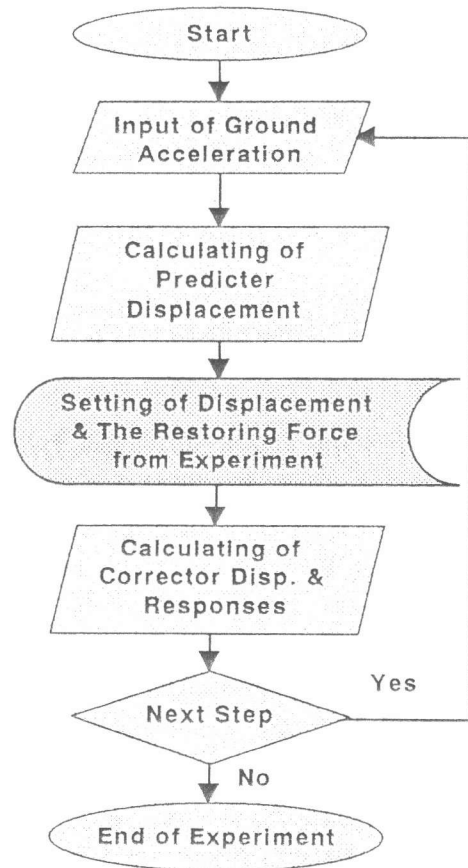


図-5 実験の流れ

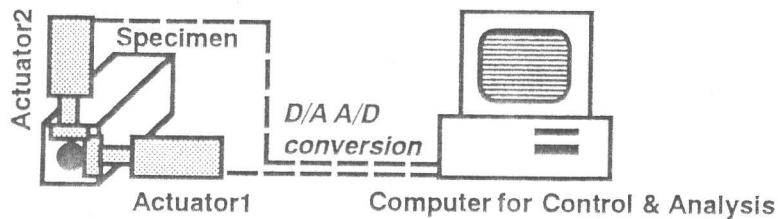


図-4 実験概念図

4. 実験結果

図-6に実験から得られたPDU-1（1方向、NS620gal）の履歴曲線を示す。供試体はS側で約0.7秒時に降伏し、それ以降は応答がS側に片寄った形になっている。応答塑性率はS側で約4.5であった。また、履歴曲線より、耐力低下には至っていないことが確認できる。

図-7(a)と図-7(b)にPDB-1（2方向、NS620、EW432gal）で得られたNS方向とEW方向の履歴曲線を、図-7(c)に変形量の軌跡を示す。NS方向ではS側において約0.6秒時に降伏しその後の応答はS方向へ片寄った結果となった。また降伏時の回転角及びモーメントは0.18rad、4.66kN-mであり応答塑性率は4.7であり、PDU-1同様耐力低下には至っていない。PDU-1と比較すると、降伏時の回転角は106%、モーメントは78%であった。また履歴曲線において、ループに丸みを帯びているのはある一方向において変形が小さいときにその直交方向で载荷または除荷が行われたときに耐力が低下する2軸相互作用の影響である。次にEW方向では降伏時の回転角及びモーメントは0.13rad、3.35kN-mであった。応答塑性率は約2.0であり、EW方向においても耐力低下には至っていない。またNS成分と同様に2軸相互作用の影響でループに丸みを帯びていることが確認できる。

次に1方向と2方向の地震入力が破壊性状に及ぼす影響を比較するために、同じ供試体を用いて、PDU-1にNS成分800galをPDB-1にNS成分800gal、EW成分557galを入力した。PDB-1の履歴曲線を図-8(a),(b)にそれぞれ示す。その結果PDB-1では0.5秒程度まで履歴を描いた後、NS方向においてN側にEW方向ではW側に応答が一気に進み、供試体としては、SE方向へ変形し崩壊に至った。PDU-1の2回目の実験においては耐力低下は見られなかった。このため2方向外力を受ける供試体においてのみ崩壊が見られ、その終局破壊性状はより著しくなることが明らかとなった。

1方向EW成分を入力したPDU-2より得られた履歴曲線を図-9に示す。降伏回転角及びモーメントは0.265rad、4.56kN-mでありPDB-1のEW成分と比較して204%.136%でありNS成分以上に降伏点の差が見られる。最大耐力においてもPDB-1EW成分と比較し約131%となりその差は大きくなっている。この理由はPDB-1においてはEW方向の応答変形量以上にNS方向の応答変形量が大きく、それによる2軸相互作用によりEW方向における降伏点及び最大耐力の低下が大きかったと考えられる。表-3に各供試体の最大回転角及び最大モーメントを示す。

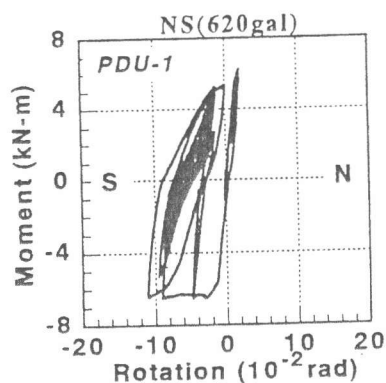


図-6 履歴曲線(PDU-1)
NS(620gal)

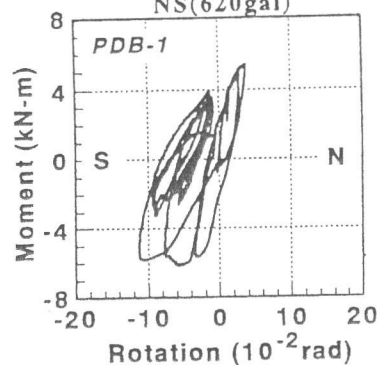


図-7(a) 履歴曲線(PDB-1)

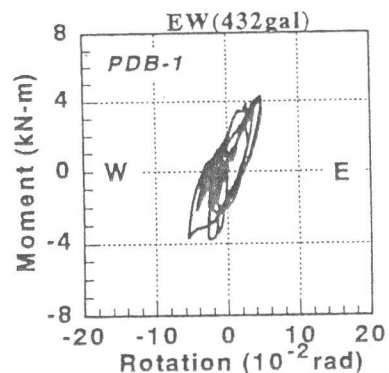


図-7(b) 履歴曲線(PDB-1)

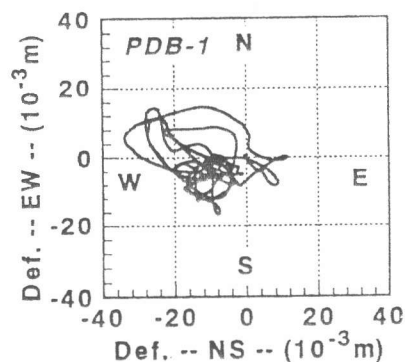


図-7(c) 軌跡(PDB-1)

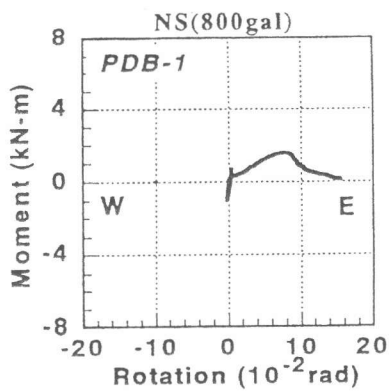


図-8(a) 履歴曲線(PDB-1)

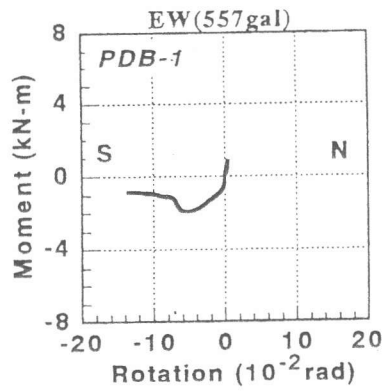


図-8(b) 履歴曲線(PDB-1)

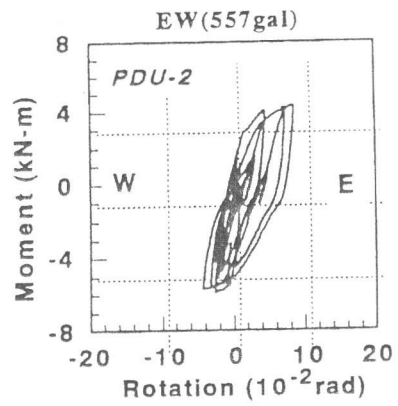


図-9 履歴曲線(PDU-2)

次にせん断補強筋量を変えることによって、靱性能を変化させた供試体(PDB-2,3)を用いて、応答性状の比較を行った。靱性能が高いPDB-2の履歴曲線を図-10(a)、(b)に、変位の軌跡を(c)に、また靱性能の低いPDB-3の履歴曲線を図-11(a)、(b)に変位の軌跡を(c)にそれぞれ示す。PDB-2はEW方向において約1.5秒時に耐力が低下しており、崩壊に至っているが、NS方向においては全ステップにわたって、耐力低下は生じていない。またPDB-3においてはNS方向では約1秒時にS側で耐力が低下し、その後約1.5秒時にN側でも耐力が低下した。また約2.4秒以降にS側へ一気に応答が進みD/Aコンバーターの限界変形量を越えたためにプログラムが停止した。EW方向では約3秒時に耐力が低下した。それぞれの供試体における靱性率を比較してみると、終局時を耐力が最大耐力の80%まで低下した時と定義すると、PDB-2のNS方向側では終局をしていないので靱性率を求めることはできないが、応答塑性率にして約7程度であるのに対してPDB-3のNS方向のN側においては靱性は約4.7であった。またそれぞれのEW側における応答塑性率に大きな違いは見られないが耐力低下の度合いはPDB-2に較べてPDB-3は非常に急激であることがわかる。これはPDB-3ではNS方向の変形が急激に進んだためにEW方向の耐力が低下したためであり、2軸相互作用による耐力の低下が原因であると考えられる。各供試体の最大回転角及びモーメントを表-3に示す。なお、表中の第3、及び6項目目の最大値はステップ毎の各方向成分値の2乗和を平方根化したものの最大値である。尚、部材の降伏は剛性が明らかに変化したところとした。

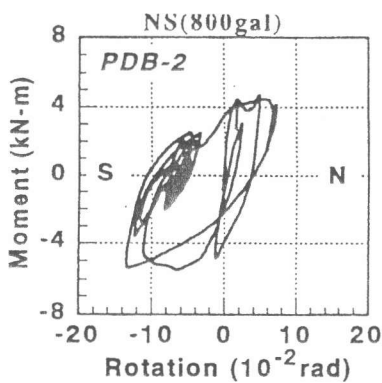


図-10(a) 履歴曲線(PDB-2)

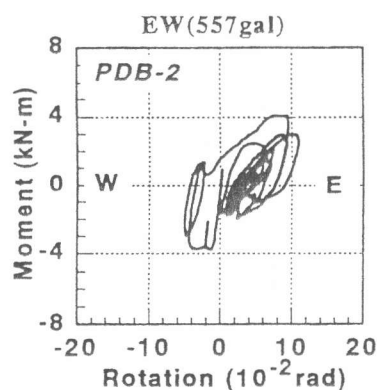


図-10(b) 履歴曲線(PDB-2)

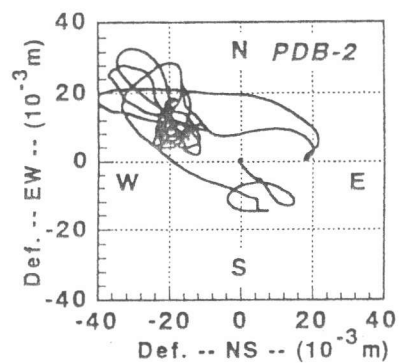


図-10(c) 軌跡(PDB-2)

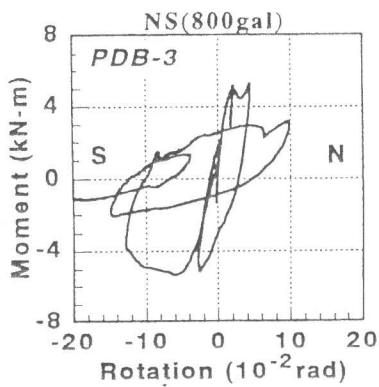


図-11(a) 履歴曲線(PDB-3)

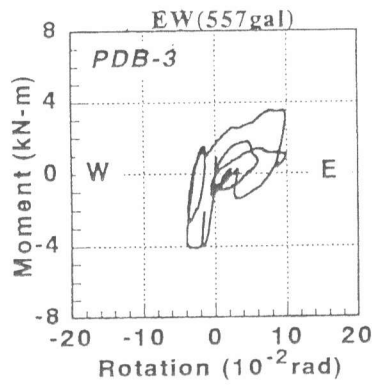


図-11(b) 履歴曲線(PDB-3)

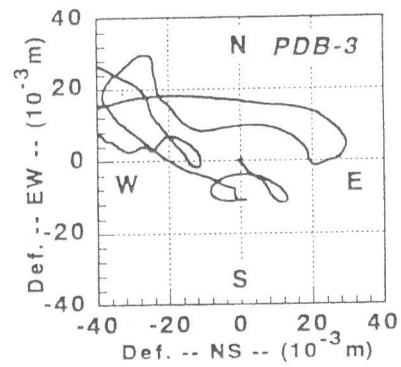


図-11(c) 軌跡(PDB-3)

表-3 最大回転角、モーメント

供試体	最大回転角 (NS) rad	最大回転角 (EW) rad	最大回転角 rad	最大モーメント (NS) kN-m	最大モーメント (EW) kN-m	最大モーメント kN-m
PDU-1	0.11		0.11	6.52		6.52
PDU-2		0.077	0.077		5.55	5.55
PDB-1	0.112	0.0554	0.114	6.18	4.21	6.90
PDB-2	0.134	0.109	0.153	5.49	4.07	5.75
PDB-3	0.204	0.099	0.221	5.37	4.10	6.41

5. まとめ

本研究は2方向地震を同時に入力できる仮動的実験システムを開発し、そのシステムを用いて2方向地震力を受けるRC部材の応答性状を明らかにするための実験的検討を行った。その結果、本研究から以下の点が明らかとなった。

(1) 2方向からの地震力がRC部材に作用する場合、ある一方の変形が大きい場合、2軸相互作用によりその直交方向に大きな耐力低下がみられ、この影響を耐震設計では考慮する必要がある。

(2) 2方向からの地震力がRC部材に作用する場合、部材の特性のモデル化が難しいため、仮動的実験のような復元力モデルを必要としない実験手法は有効であるといえる。

謝辞

本研究は文部省科学研究費(課題番号05650428)により行った。本論文をまとめるにあたり、神山貴男(大学院生)君には供試体作製から、結果処理まで多大なご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 貞末・睦好・Tanzo・町田：“サブストラクチャー仮動的実験によるRC2層ラーメン橋脚の地震時弾塑性応答”、日本コンクリート工学協会第15巻第2号、pp1119-1124、1993
- [2] 岡田・関・朴・岡田：“2方向地震入力に対する鉄筋コンクリート建物の応答(その2)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、1977.10