

## 断層近傍上下方向地震動による変動軸力と水平変位の位相差が RC橋脚の耐震性に及ぼす影響

松崎 裕<sup>1</sup>・太田 啓介<sup>2</sup>・川島 一彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻  
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>フェロー会員 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)

### 1. はじめに

近年の強震観測網の充実により、1994年Northridge地震Arlita記録や、2008年岩手・宮城内陸地震KiK-net一関西記録(以降、一関西記録と呼ぶ)などのように、断層近傍において、水平方向地震動に比べて最大加速度が大きく、短周期成分が卓越した上下方向地震動が国内外で観測されてきている。観測された地震動の生起メカニズムや特性に関しては様々な議論がなされているが<sup>1),2)</sup>、短周期成分が減衰する断層から遠方の場合とは異なり、断層近傍では短周期成分が卓越した大加速度振幅の上下方向地震動が橋梁に作用し、単柱式橋脚であっても、自重による橋脚基部での圧縮力の大きさに匹敵する程の引張力を含むような大振幅の変動軸力が生じる<sup>3),4),5)</sup>。

大振幅の変動軸力がRC橋脚の耐震性に及ぼす影響に関する実験的研究として、堺・川島<sup>6)</sup>は、ラーメン橋脚の柱部材を対象に、水平変位と同位相で生じる引張力を含む変動軸力がRC橋脚の変形性能に及ぼす影響を検討している。Kim et al.<sup>7)</sup>は、水平方向地震動と上下方向地震動を同時入力したハイブリッド載荷実験を行っているが、入力した上下方向地震動の最大加速度は0.6g程度であり、概ね圧縮の範囲内での変動軸力を作用させた載荷実験である。著者らは、引張力を含む変動軸力を生じさせるような短周期成分が卓越した大振幅の上下方向地震動がRC橋脚の耐震性に及ぼす影響を静的正負交番繰返載荷実験により検討している<sup>8)</sup>。以上のように、断層近傍上下方向地震動がRC橋脚の耐震性に及ぼす影響に関しては、解析的研究に加えて実験的研究も行われてきているが、水平方向と上下方向の地震動

が同時に作用するRC橋脚は、変動軸力と曲げの連成作用下にあり、変動軸力と曲げによる圧縮・引張の組み合わせが問題となる。すなわち、変動軸力による圧縮力が水平方向地震動に伴う曲げモーメントによる圧縮応力の載荷中に作用するのか、それとも除荷中に作用するのかで、変動軸力がRC橋脚の損傷進展に及ぼす影響は異なると考えられる。

そこで、本研究では、まず、参考文献8)で行われた静的正負交番繰返載荷実験における変動軸力の位相を逆位相として、変動軸力と水平変位の位相差がRC橋脚の損傷進展に及ぼす影響をファイバー要素解析に基づいて検討する。その上で、参考文献8)とは逆位相の変動軸力作用下での静的正負交番繰返載荷実験を行い、断層近傍上下方向地震動による変動軸力と水平変位の位相差がRC橋脚の耐震性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

### 2. 対象供試体と載荷条件

本研究における解析および実験で対象とする供試体は、参考文献8)における実験供試体と同一寸法、同一配筋である道路橋示方書<sup>9)</sup>に基づいて設計された図-1に示すRC橋脚模型である。供試体は400mm×400mmの正方形断面であり、橋脚基部から頂部までの高さは1750mm、橋脚基部から水平荷重載荷点までの高さは1350mm、せん断支間比は3.75である。軸方向鉄筋としてはD13-SD295を20本配置し、軸方向鉄筋比は1.58%である。帯鉄筋としてはD6-SD295を50mm間隔で配置しており、横拘束筋体積比は0.79%である。帯鉄筋の定着長は100mmであり、135度曲がりフックを用いている。なお、供試

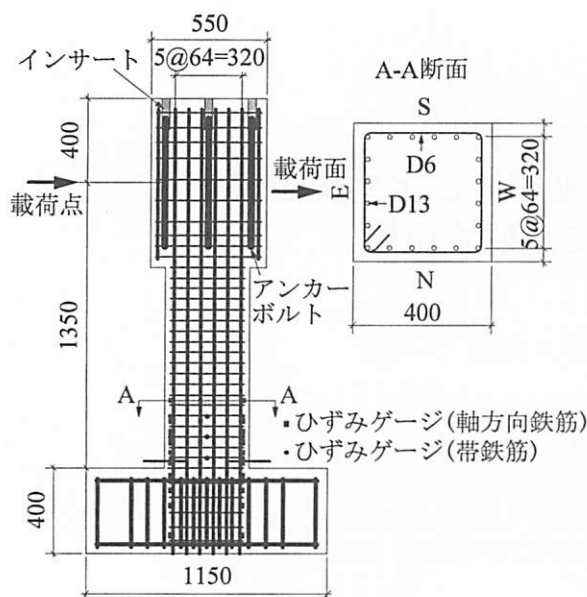


図-1 供試体の諸元

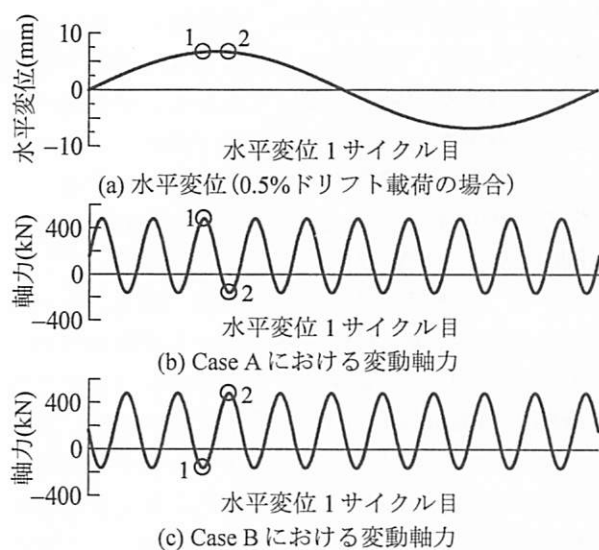
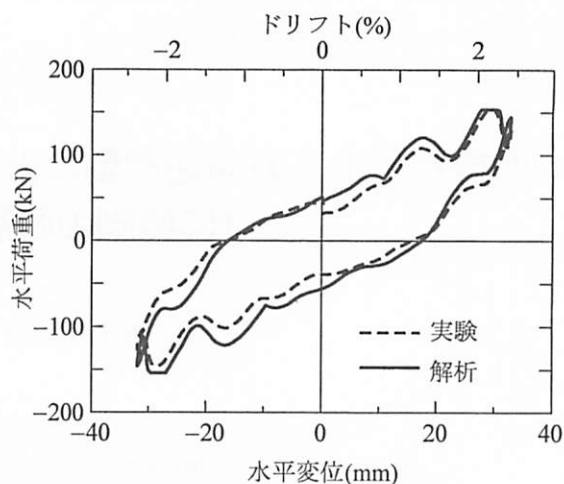


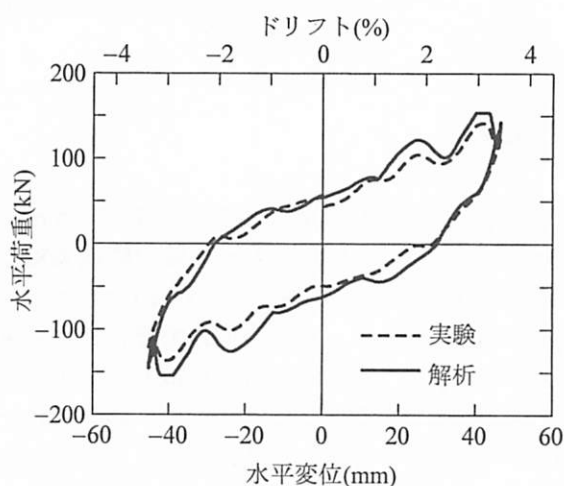
図-2 入力した水平変位および変動軸力

体の加力部にはM27のアンカーボルトを8本埋め込み、アンカーボルト上部のインサートを介して、加振機のスイベルヘッドを取り付けることで、引張力を含む変動軸力を与えられるようにしている。

入力した水平変位および変動軸力を図-2に示す。Case Aは参考文献8)において実施された引張 $1\text{N/mm}^2$ ～圧縮 $3\text{N/mm}^2$ の変動軸力を作用させる荷荷条件であり、Case BはCase Aとは互いに逆位相の関係にある引張 $1\text{N/mm}^2$ ～圧縮 $3\text{N/mm}^2$ の変動軸力を作用させる荷荷条件である。Case AおよびCase Bのいずれの荷荷条件も、同一変位振幅における水平変位の繰返回数は3回とし、水平変位振幅を0.5%ドリフトから0.5%ドリフト刻みで漸増させて荷荷を行った。図-2において、点1は最大水平変位前に圧縮軸力または引張軸力が最大となる点、点2は最大水平変位後に



(a) Case Aのドリフト2.5%荷荷



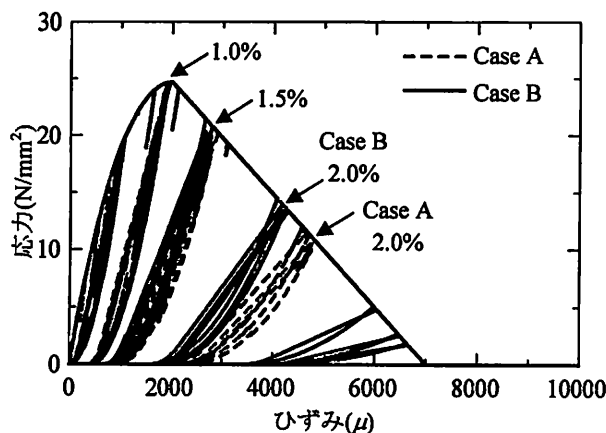
(b) Case Aのドリフト3.5%荷荷

図-3 実験および解析により得られた水平荷重—水平変位の履歴の比較

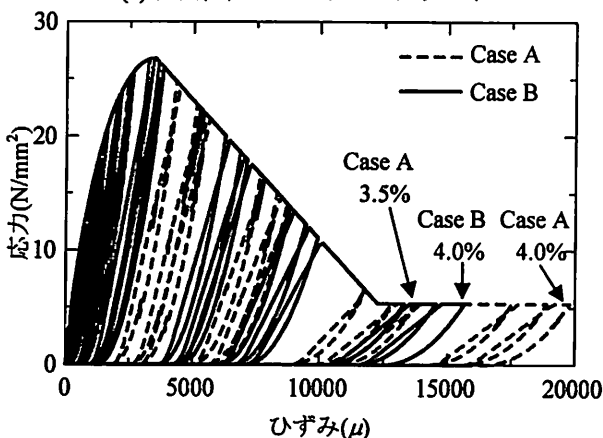
圧縮軸力または引張軸力が最大となる点である。すなわち、Case Aでは、曲げで圧縮側となる面において、点1において曲げによる圧縮応力の荷荷中にさらに変動軸力による最大圧縮応力が作用するのに対し、Case Bでは、点2において曲げによる圧縮応力の除荷中に変動軸力による最大圧縮応力が作用する荷荷条件となっている。

### 3. ファイバー要素解析に基づく事前解析

前記したCase AとCase Bにおける変動軸力の位相の違いがRC橋脚の損傷進展に及ぼす影響を検討するため、ファイバー要素解析に基づく検討を行う。解析においては、橋脚模型の基部をファイバー要素、橋脚模型の加力部を線形はり要素によってモデル化し、フーチングからの軸方向鉄筋の抜け出しに伴う橋脚基部の曲げモーメント—回転角関係には、武藤モデル<sup>10)</sup>を用いた。塑性ヒンジ部におけるコンクリ



(a) 表面位置のかぶりコンクリート

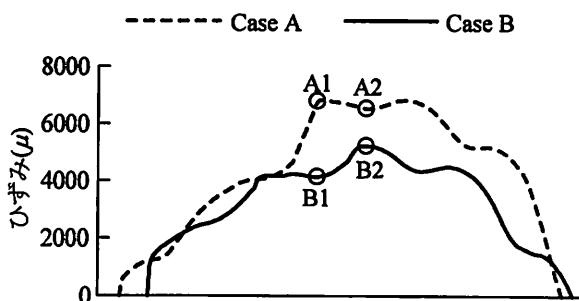


(b) 軸方向鉄筋位置のコアコンクリート

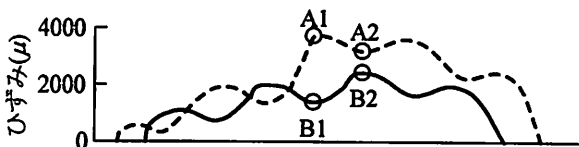
図-4 変動軸力の位相がコンクリートの応力-ひずみの履歴に及ぼす影響

ートの応力-ひずみ履歴については、包絡線は Hoshikuma et al.による提案モデル<sup>11)</sup>を、除荷・再載荷履歴には Sakai and Kawashimaによるモデル<sup>12)</sup>を用いた。また、鉄筋の応力-ひずみ履歴には 堺・川島による修正 Menegotto-Pintoモデル<sup>13)</sup>を用い、ひずみ硬化の影響を取り込むために、鉄筋の降伏後の剛性は初期弾性係数の2%と仮定した。なお、解析においては、軸方向鉄筋の座屈に伴う耐力低下の影響は考慮しておらず、解析における材料物性については、参考文献8)と同様の値を想定した。

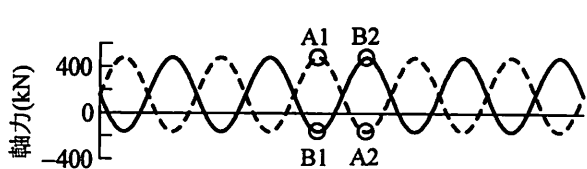
まず、引張 $1\text{N/mm}^2$ ～圧縮 $3\text{N/mm}^2$ のように、引張力を含む大振幅の変動軸力下のRC橋脚の耐震解析に対して、ファイバー要素解析を適用することの妥当性を検討した。参考文献8)に示されるように、Case Aの荷重条件では、ドリフト4.0%荷重において軸方向鉄筋の座屈が生じているが、図-3にドリフト2.5%荷重とドリフト3.5%荷重に対する実験および解析により得られた水平荷重-水平変位の履歴を例示するように、軸方向鉄筋の座屈発生前までであれば、引張力を含む大振幅の変動軸力下のRC橋脚の耐震解析に対して軸方向鉄筋の座屈を考慮しないファイ



ドリフト2.5%荷重の1サイクル目  
(a) 表面位置のかぶりコンクリート



ドリフト2.5%荷重の1サイクル目  
(b) 軸方向鉄筋位置のコアコンクリート



ドリフト2.5%荷重の1サイクル目  
(c) 変動軸力

図-5 変動軸力の位相がコンクリートの圧縮ひずみに及ぼす影響

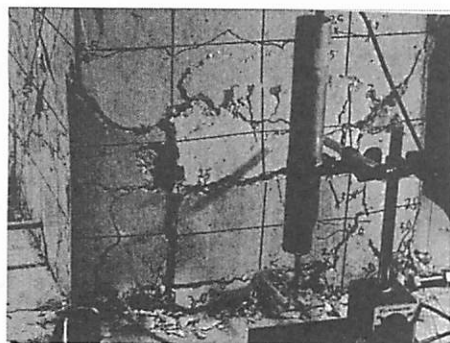
表-1 各供試体の材料物性

|                               | Model A | Model B |
|-------------------------------|---------|---------|
| コンクリート圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ ) | 24.7    | 29.0    |
| 軸方向鉄筋の降伏強度( $\text{N/mm}^2$ ) | 373.9   | 366.5   |
| 帯鉄筋の降伏強度( $\text{N/mm}^2$ )   | 374.8   | 339.2   |

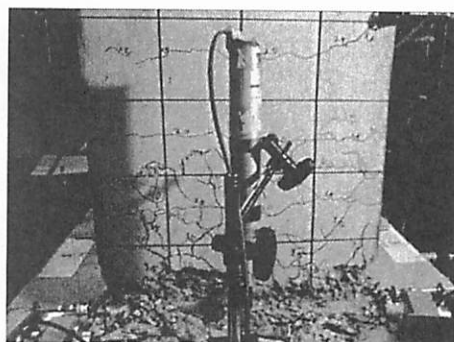
バー要素解析を適用することで、実験で得られる水平荷重-水平変位の履歴を良好に再現できる。

引張力を含む変動軸力作用下でのRC橋脚の耐震解析へのファイバー要素解析の適用の妥当性が示されたことから、続いて、材料物性については参考文献8)と同様に与えた上で、荷重条件のみをCase AとCase Bのように変えた場合のコアコンクリートの圧縮側での応力-ひずみの履歴に及ぼす影響を図-4に示す。図-4(b)に示されるように、軸方向鉄筋位置のコアコンクリートにおいて、Case Aにおけるドリフト3.5%時のひずみがCase Bにおけるドリフト4.0%時のひずみと同程度になるまで、Case Aの方がCase Bよりもひずみ大きい。

Case Aの方がCase Bよりもコンクリートに生じる圧縮ひずみ大きいことは、前記したように、Case

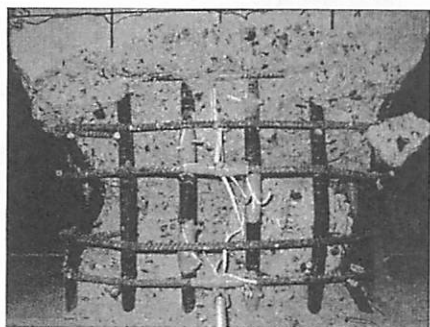


(a) Case A

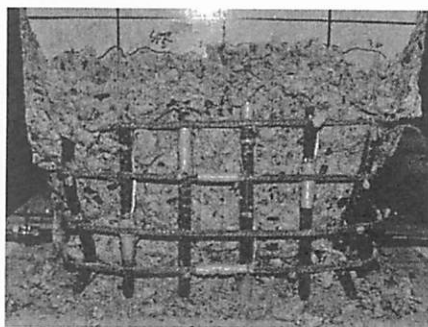


(b) Case B

写真-1 ドリフト 4.0%載荷終了後の E 面の損傷状況



(a) Case A

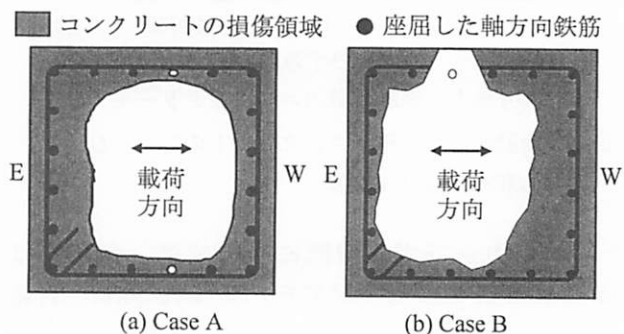


(b) Case B

写真-2 ドリフト 5.5%載荷終了後の E 面の損傷状況

Aは、曲げによる圧縮応力の載荷中に変動軸力による最大圧縮応力が付加的に作用する条件である一方で、Case Bは曲げによる圧縮応力の除荷中に変動軸力による最大圧縮応力が作用する条件であることに起因している。表面位置のかぶりコンクリートおよび軸方向鉄筋位置のコアコンクリートに生じるひずみについて、Case AとCase Bとの間で顕著な違いが生じ始めたドリフト2.5%載荷の1サイクル目のひずみの履歴を図-5に示す。図-5のA1およびB1はそれぞれCase 1およびCase 2の図-2の点1に対応し、A2およびB2はそれぞれ図-2のCase 1およびCase 2の点2に対応する。Case Aの場合には、最大水平変位を迎える前、すなわちA1において曲げモーメントによる圧縮応力の載荷中に変動軸力による圧縮応力が作用することで、コンクリートに生じる圧縮ひずみが増加している。一方、Case Bの場合には、最大水平変位を迎える前のB1において、引張軸力が作用して除荷されており、最大水平変位後のB2において、曲げモーメントによる圧縮応力の除荷中に、変動軸力による最大圧縮応力が作用しても、コンクリートに生じる圧縮ひずみの増加は大きくならない。結果として、図-5(b)に示すように、コアコンクリートに生じる圧縮ひずみは、Case BのB2において $2.4 \times 10^3 \mu$ であるのに対して、Case Aの場合にはA1において $3.7 \times 10^3 \mu$ に達しており、50%もの違いが生じている。

以上をまとめると、ファイバー要素解析により、参考文献8)における水平荷重－水平変位の履歴の実



(a) Case A

(b) Case B

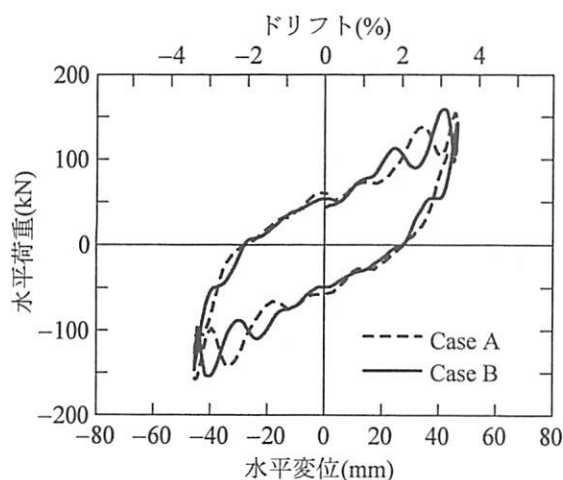
図-6 載荷終了後における橋脚基部の損傷状況

験結果を妥当に評価できることを確認した上で、曲げと変動軸力による圧縮応力の両者がコアコンクリートのひずみを増加させる載荷条件Case Aの方がCase Bよりも損傷進展が大きくなることが明らかとなった。

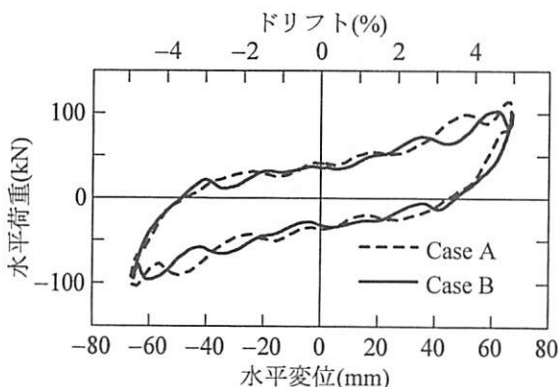
#### 4. 静的正負交番繰返載荷実験と事後解析

##### (1) 供試体の材料物性

上記の事前解析結果を受けて、載荷条件Case Bでの載荷実験を行うため、供試体を製作したが、参考文献8)における供試体Model Aの材料物性と比較する形で、Case Bでの載荷実験用に製作した供試体Model Bの材料試験で得られた材料物性を表-1に示す。Model AとModel Bとで同様の材料物性を意図していたものの、表-1に示すように、コンクリート圧縮強度はModel Bの方が高く、帯鉄筋の降伏強度は



(a) ドリフト 3.5% 載荷



(b) ドリフト 5.0% 載荷

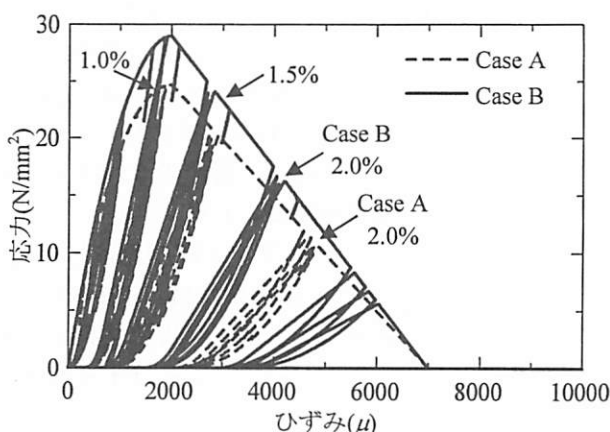
図-7 変動軸力の位相が水平荷重－水平変位の履歴に及ぼす影響

Model Bの方が小さい結果であった。

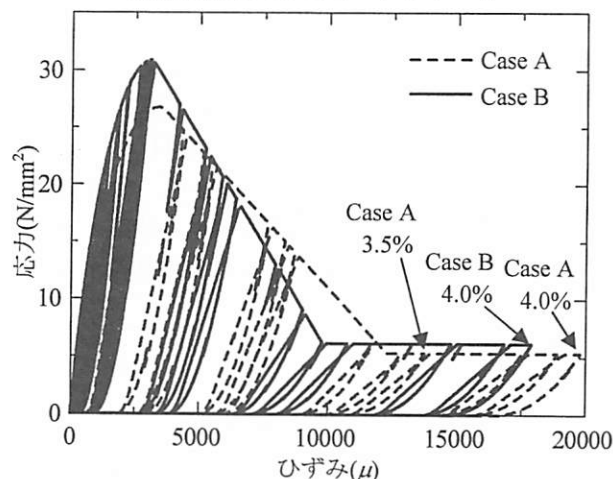
## (2) 損傷の進展状況

載荷条件Case A, Case Bともに、ドリフト3.0%載荷において、W面の橋脚基部でかぶりコンクリートの圧壊が生じ、ドリフト3.5%載荷終了時には、それぞれ最大で基部から50mmおよび40mmの高さまでかぶりコンクリートの圧壊が生じた。ドリフト4.0%載荷になると、写真-1に示すように橋脚基部から250mmの高さの範囲でかぶりコンクリートが剥離し、軸方向鉄筋の座屈やコアコンクリートの圧壊を伴う損傷が生じた。軸方向鉄筋の座屈後は、塑性ヒンジ部がせん断変形をしながら、引張軸力から圧縮軸力への変化の際に橋脚基部のコアコンクリートの未損傷部分が繰り返し押しつぶされ、コアコンクリートの圧壊が急速に進展した。

Case Bにおいても、Case Aと同様に、ドリフト5.5%載荷において、コアコンクリートの損傷に伴って水平荷重が急速に低下したため、最終載荷とした。ドリフト5.5%載荷終了後におけるかぶりコンクリート除去後のE面の状況を写真-2、橋脚基部において



(a) 表面位置のかぶりコンクリート



(b) 軸方向鉄筋位置のコアコンクリート

図-8 実際の材料物性を用いた場合のコンクリートの応力－ひずみの履歴

損傷が最も著しかったフーチング表面から高さ約130mm(Case A)および120mm(Case B)における最終的な損傷状況を図-6に示す。図-6に示すように、Case AおよびCase Bのいずれも、コアコンクリートの約6割が損傷しており、Case Aでは20本中18本の軸方向鉄筋が座屈し、Case Bでは20本中19本の軸方向鉄筋が座屈した。

以上のように、外見からの損傷進展の状況としては、Case AとCase Bとで顕著な相違は認められなかった。

## (3) 水平荷重－水平変位の履歴

載荷実験で得られたCase AとCase Bのドリフト3.5%載荷およびドリフト5.0%載荷における水平荷重－水平変位の履歴を図-7に示す。Case AとCase Bとで変動軸力は互いに逆位相の関係にあるため、同一水平変位での水平荷重の変動特性は逆位相となっているが、水平荷重－水平変位の履歴全体へ及ぼす載荷条件の違いの影響は認められない。

#### (4) ファイバー要素解析に基づく事後解析

3章で示した事前解析では、Case Aの载荷に用いられた表-1のModel Aの材料物性をCase A、Case Bに共通して用いたが、Case Bの解析において表-1のModel Bの材料物性を適用した場合のコンクリートの応力-ひずみの履歴を図-8に示す。

前記したように、コンクリート圧縮強度はModel Bの方が高く、帯鉄筋の降伏強度はModel Bの方が小さい結果として、図-4に示す事前解析の結果よりも、Case Bの同一ドリフトにおいて生じるひずみが大きくなり、Case AとCase Bとで違いがほとんど生じなくなっていることが示されている。

以上のように、ファイバー要素解析により妥当に実験結果を再現できていることを踏まえると、材料物性が同一であれば、载荷条件による違いが生じたと考えられるものの、材料物性に意図しない違いが生じてしまったことが主な原因となり、载荷実験においてCase AとCase Bの損傷進展や水平荷重-水平変位の履歴に顕著な違いが認められなかったと考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、互いに逆位相の関係にある引張 $1\text{N/mm}^2$ ～圧縮 $3\text{N/mm}^2$ の変動軸力の作用がRC橋脚の損傷進展に及ぼす影響をファイバー要素解析に基づいて検討した上で、RC橋脚の静的正負交番繰返载荷実験を行い、断層近傍上下方向地震動による変動軸力と水平変位の位相差がRC橋脚の耐震性に及ぼす影響を検討した。本研究により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 引張力を含む大振幅の変動軸力作用下のRC橋脚の耐震解析にファイバー要素解析を適用することで、実験で得られる水平荷重-水平変位の履歴を妥当に再現できる。
- 2) 曲げによる圧縮応力の载荷中に変動軸力による圧縮応力が作用する载荷条件では、曲げによる圧縮応力の除荷中に変動軸力による圧縮応力が作用する载荷条件よりも、コアコンクリートに圧縮ひずみが50%程度大きく生じることがファイバー要素解析により示された。
- 3) 载荷実験を行った結果、損傷の進展や水平荷重-水平変位の履歴の観点からは、変動軸力と水平変位の位相差の影響は特に認められなかったが、これは対象供試体における材料物性の違いに主に起因したものであり、上記1)、2)の結果を踏まえると、変動軸力と水平変位の位相差が損傷進展に及ぼす影響はあると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 若手研究(B)(課題番号：22760338、研究代表者：松崎裕)により実施しました。载荷実験に際しては東京工業大学川島研究室のメンバーに御助力を頂きました。ここに記して厚く御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Trampoline Effect in Extreme Ground Motion, *Science*, 322, pp. 727-730, 2008.
- 2) 大町達夫, 井上修作, 水野剣一, 山田雅人: 2008 年岩手・宮城内陸地震の KiK-net 一関西における大加速度記録の成因の推定, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 1 号, pp. 32-47, 2011.
- 3) Papazoglou, A. J. and Elnashai, A. S.: Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.25, No.10, pp.1109-1137, 1996.
- 4) Elnashai, A. S. and Papazoglou, J.: Procedure and spectra for analysis of RC Structures subjected to strong vertical earthquake loads, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.1, No.1, pp.121-155, 1997.
- 5) 松崎裕, 川島一彦: 短周期成分が卓越した上下方向地震動が橋梁の地震応答に及ぼす影響, 土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp. 499-506, 2009.
- 6) 堺淳一, 川島一彦: 引張軸力を含む軸力変動が RC 橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 735-746, 2002.
- 7) Kim, S. J., Holub, C. J. and Elnashai, A. S.: Experimental Investigation of the Behavior of RC Bridge Piers Subjected to Horizontal and Vertical Earthquake Motion, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 33, No. 7, pp. 2221-2235, 2011.
- 8) 松崎裕, 熊谷祐二, 川島一彦: 断層近傍上下方向地震動による変動軸力下の RC 橋脚の耐震性に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 印刷中.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 10) 武藤清: 耐震設計シリーズ/応用編 構造物の動的設計, 丸善, 1977.
- 11) Hoshikuma, J., Kawashima, K. and Taylor, A.W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997.
- 12) Sakai, J. and Kawashima, K.: Unloading and Reloading Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.132, No.1, pp.112-122, 2006.
- 13) 堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再载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, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.