

水平2方向地震動を受ける鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形と損傷 に関する検討

青戸拡起¹・牧原成樹²・吉川弘道³

¹株式会社 フォーラムエイト 大阪支社（〒530-6013 大阪府大阪市北区天満橋 1-8-30 OAP タワー13F）

²武蔵工業大学大学院 工学研究科 都市基盤工学専攻（〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1）

³武蔵工業大学 工学部 都市基盤工学科 教授（〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1）

1. はじめに

地震動は多方向から作用し、その時、構造物は様々な方向に振動する3次元的な複雑な挙動となる。橋梁の場合、橋軸方向と橋軸直角方向に同時に地震動が作用するため、橋脚などの柱部材は、本来、2軸曲作用下の部材となる。しかし、現在実施される非線形動的解析による橋梁の耐震性能照査は、そのほとんどが1方向入力、すなわち、橋軸方向と橋軸直角方向別々に地震動を作用させており¹⁾²⁾³⁾、さらに1軸曲げ作用下の部材の性能と比較する事によりその耐震性能を評価している。

水平2方向荷重による2軸曲げ作用下の鉄筋コンクリート部材は、1方向荷重が作用する場合に比べて、耐荷力が低下し破壊性状がより厳しくなること⁴⁾⁵⁾、最大応答が増大する事⁶⁾⁷⁾が確認されている。また、2軸曲げ作用下のRC柱の挙動について、ファイバー要素を用いた解析が非常に有効な解析手法である事も確認されている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。2軸曲げ作用下の性能を把握し反映させることは、より現実の挙動を評価出来るだけでなく、部材および構造系の崩壊などに対する安全性をより正しく評価する事につながるため、非常に重要なことと考える¹¹⁾。

そこで、本論では、実規模の鉄筋コンクリート単柱橋脚を対象にして、実際の地震動と同様に水平2方向（橋軸方向と橋軸直角方向）同時に地震動を入力した動的な非線形解析を、多数の観測波形により実施する。そして、その最大応答値に着目し、1方向に地震動を入力する（橋軸方向と橋軸直角方向別々に作用させる）場合と比較することにより、水平2方向同時に地震動が作用する時の、鉄筋コンクリート橋脚の基本的な動的な非線形応答特性について整理

する。さらに、水平2方向同時に地震動を入力する場合について、その入力方向を様々変化した感度解析を行い、その時の最大応答値のばらつきについても検証している。

2. 解析手法の概要

(1) 解析対象

図-1に示す、円形断面を有する鉄筋コンクリート単柱橋脚を解析対象とする。なお、レベル2地震動に対し、道示V¹⁾の地震時保有水平耐力法を満足する様、断面寸法と配筋を決定している。

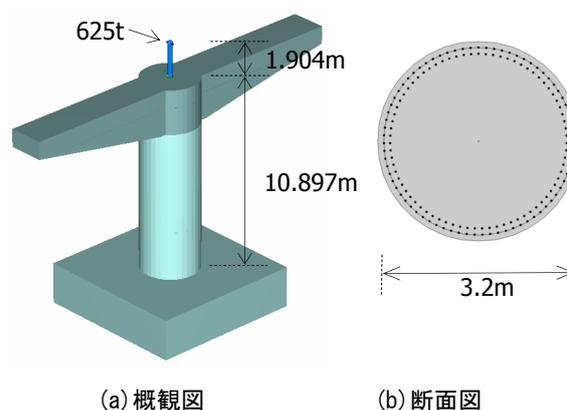


図-1 解析対象諸元

(2) 解析モデルと解析手法

図-2に示す骨組みを用い、後述する材料非線形履歴モデルを適用して、ファイバー要素を用いた非線形動的解析を行う。柱基部に、断面高さ程度のファイバー要素を設け、他の部材は剛あるいは弾性要素とした。この時、支承位置にばね要素を設定し、橋軸回りを固定、橋軸直角回りを自由（=ピン）とす

ることで、橋軸方向と橋軸直角方向の、上部構造の慣性力作用位置の違いを考慮している。張出梁部分の回転慣性質量は無視した。支持条件は、フーチング底面において固定とする。動的解析に用いる数値積分法は、Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) による。なお、解析コードには、UC-win/Frames(3D)^{12) 13)}を用いる。

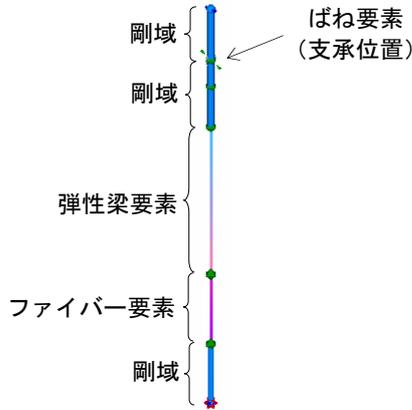
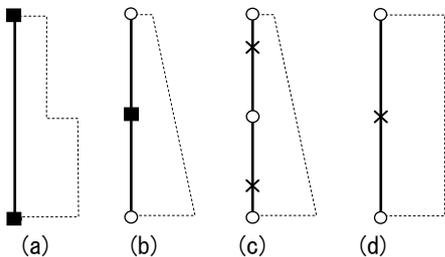


図-2 解析モデル図

なお、用いる剛性マトリクスによって、部材軸方向の曲率分布がいくつか仮定できる。本解析コードでは、図-3 に示す(a)～(d)のモデルが利用出来る。(a)は、部材両端で剛性を制御するもので、部材軸方向に曲率が一定値を示す区間を2区間持ち、これが部材中央で変化するモデルである¹¹⁾。道示Vにおいて、塑性ヒンジ区間(=塑性ヒンジ長 L_p)では、『塑性曲率は一定値を示すものと仮定』されており、(a)のモデルを用いるとこの仮定をよく表現出来る。よって、本論では、(a)のモデルを利用した。このモデルによると、鉄筋コンクリート単柱の正負交番静的載荷実験における荷重変位特性がよく表現できること、また Takeda モデルによる2次元動的非線形解析の結果とよく一致することを確認している¹³⁾。



- a: 剛体リンク分布ばねモデル
- b: 弾性梁要素用モデル
- c: アイソパラメトリック (2次) モデル
- d: アイソパラメトリック (1次) モデル
- 要素剛性評価点 ×ガウス積分点

図-3 各モデルの曲率分布の仮定

図-4 に、ファイバー要素に適用する材料非線形モデルを示す。

コンクリートについて、圧縮領域は、その骨格特性を道示 V10.4 に準じて設定し、徐荷履歴は2次曲線、再載荷履歴は過去の最大圧縮ひずみ点を指向する直線としている。引張領域は、ひびわれ発生後の軟化を初期ヤング係数の1/10程度の直線とし、徐荷・再載荷履歴は、初期ヤング係数の勾配をもつ直線とする(図-4(a))。また、圧縮履歴が、その最大圧縮応力点に達した後は引張応力が発生しない、経路依存型の構成則となっている。引張から圧縮に向かう際の再接触、および付着応力の効果は考慮していない。かぶりコンクリートについては、横拘束効果が及ばないもの(=横拘束筋量を0)とし、その骨格特性はコアコンクリートと区別している⁸⁾(図-4(b))。この時の下降勾配 E_{des} は、RC柱の実験との比較をもとに 10000N/mm^2 としている¹³⁾。

鉄筋については、降伏後の剛性を $E_s/100$ としたバイリニア型の骨格とし、Giuffre-Menegotto-Pinto モデル¹⁴⁾によりバウシinger効果を考慮している(図-4(c))。なお、座屈や破断にともなう現象は考慮していない。

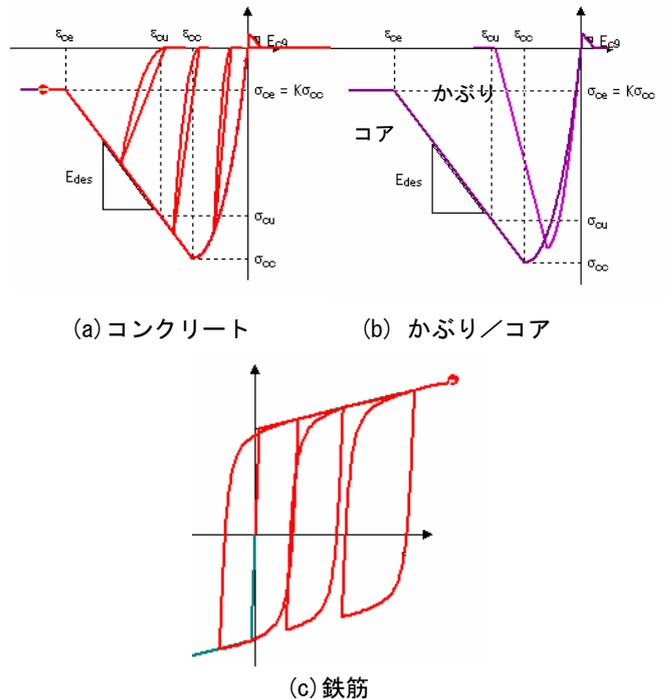


図-4 ファイバー要素に適用する材料履歴モデル

減衰マトリクスは要素別剛性比例を用いる。ただし、コンクリートは十分な履歴減衰が発生する履歴モデルであることから、コンクリート部分には粘性減衰が作用しないものとした。一方、鋼材は線形域でも減衰自由振動が認められることから、鉄筋には粘性減衰定数を与え(ここでは5%と仮定)、鉄筋分

のみの剛性に比例させるモデルとした。なお、断面全体に対する鉄筋分の剛性は小さいため、ファイバー要素に作用する粘性減衰は非常に小さくなる。

(3) 時刻歴解析に用いる地震動

非線形応答は、波形の位相特性により応答性状が大きく変わるが、実態をより正確につかむために、本論では観測波形を利用することにする。

表-1 解析に用いる地震動

| No | 発生日 | マグニチュード | 地震名称 | 利用した観測点数 |
|----|------------|---------|----------|----------|
| 1 | 1995.1.17 | 7.2 | 兵庫県南部 | 1 |
| 2 | 1997.5.13 | 6.4 | 鹿児島県薩摩地方 | 2 |
| 3 | 2000.10.6 | 7.3 | 島根県東部 | 1 |
| 4 | 2001.3.24 | 6.7 | 安芸灘 | 2 |
| 5 | 2003.5.26 | 7.1 | 宮城県沖 | 3 |
| 6 | 2003.9.26 | 8.0 | 釧路沖 | 7 |
| 7 | 2003.9.26 | 7.1 | 十勝沖 | 1 |
| 8 | 2004.10.23 | 6.8 | 新潟県中越地方 | 5 |
| 9 | 2005.8.16 | 7.2 | 宮城県沖 | 1 |

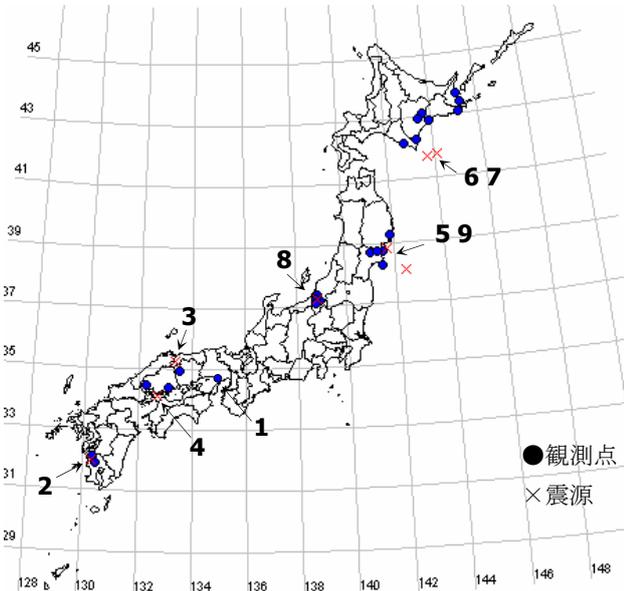


図-5 解析に用いる地震動の震源と観測点

過去に震度 6 以上を記録した地震を対象に、最大加速度で 400Gal 以上を観測した K-NET¹⁵⁾ 観測点の記録と、兵庫県南部地震での記録を利用する。表-1 に利用した地震と観測点数を、図-5 に利用した地震の震源と観測点の位置を示す。なお、有感地震の検索

および地震名称は、気象庁の震度データベース検索¹⁶⁾を参照した。

図-6 に、加速度波形の例として、兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された波形を示す。水平成分の観測は、一般に、南北(NS)方向と東西(EW)方向の加速度波形が記録されており、本論では、これを水平 2 成分の地震動として利用する。鉛直動の影響については無視した。

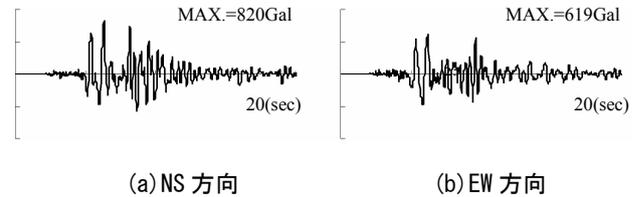


図-6 兵庫県南部地震で観測された加速度波形

3. 水平 2 方向地震動の与え方に関する検討

(1) 入力地震動の作用方法

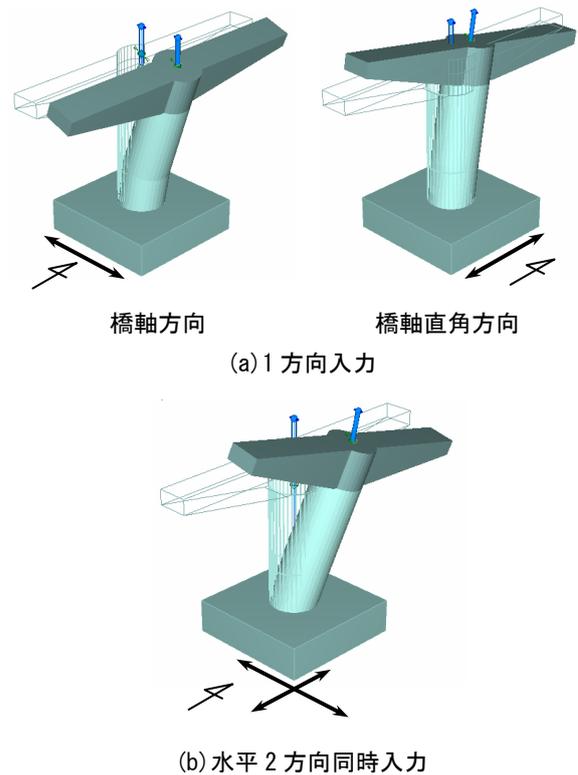


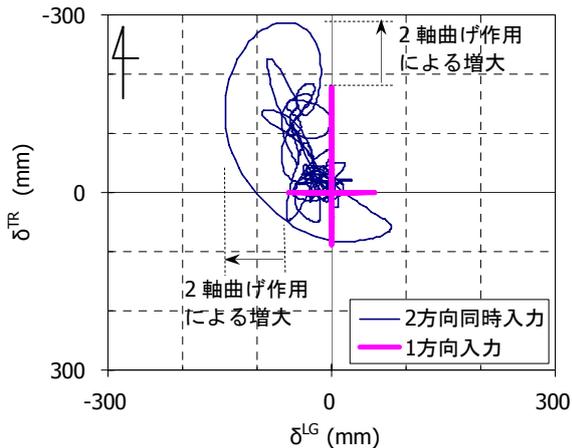
図-7 地震動の入力方向と方位

ここでは、図-7 に示す 2 種類の入力方法の違いが、鉄筋コンクリート単柱橋脚の最大応答に及ぼす影響について、整理する。同図 (a) の方法は、現在実施される多くの動的解析の手法に従うもので、橋軸方向と橋軸直角方向別々に地震動を作用させる方法である (これを水平 1 方向入力と呼ぶ)。同図 (b) の方法は、実際の地震の様に水平 2 方向の地震動を同時に

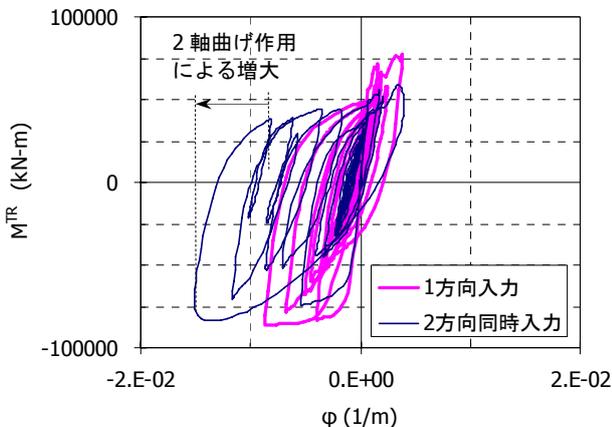
作用させる方法である（これを水平 2 方向同時入力とよぶ）。なお、地震動の入力方向（＝方位）によっても、最大応答が変化する事が予想されるが、ここでは、1 方向入力と水平 2 方向同時入力の違いに着目するため、EW 方向は橋軸方向に、NS 方向は橋軸直角方向に、それぞれ一致させるものと仮定する。入力方向が与える影響については、次章で検討する。

(2) 動的解析結果

図-8 に、例として兵庫県南部地震の観測波形を作用させた場合の解析結果を示す。同図 (a) は橋脚天端における応答変位の軌跡、(b) は柱基部における橋軸回りの M-φ 履歴図である。橋軸直角方向に着目した最大応答変位は、1 方向入力時は 179mm、水平 2 方向入力時は 287mm であった。よって、最大応答変位の増大率は 1.6 倍となり、この地震においては、水平 2 方向同時入力の影響、すなわち 2 軸曲げ作用により最大応答変位が増大したことになる。同様に、同図 (b) から、2 軸曲げ作用により最大応答曲率が増大したことがわかる。



(a) 橋脚天端の応答変位の軌跡



(b) 橋脚基部の M-φ 履歴 (橋軸回り)

図-8 時刻歴応答波形および履歴 (兵庫県南部地震)

図-9 に、断面の各所に生じた最大圧縮ひずみの分布を示す。ここでは、最大圧縮ひずみ ϵ' の大きさに応じ、次式に示す 4 段階に区分して示している。Level2 は道示 V におけるタイプ 1 地震動用の終局ひずみを越えた事を表し、Level3 はタイプ 2 地震動用の終局ひずみを越えた事を表す。Level4 は、コンクリートが圧縮応力に対し抵抗していない状態を表す。

$$\begin{aligned}
 \text{Level1} & \quad \epsilon'_{cc} > \epsilon' \\
 \text{Level2} & \quad \epsilon'_{cu} > \epsilon' \geq \epsilon'_{cc} \\
 \text{Level3} & \quad \epsilon'_{ce} > \epsilon' \geq \epsilon'_{cu} \\
 \text{Level4} & \quad \epsilon' \geq \epsilon'_{ce}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

コアコンクリート内部に生じた損傷の Level を比較すると、1 方向入力時は橋軸直角方向への入力時に Level2 (■) がわずかに認められる程度であるのに対し、水平 2 方向同時入力時は Level2 (■) の領域が拡大するとともに Level3 (■) に達していることが確認される。コアコンクリート最外縁における最大圧縮ひずみの値は、1 方向入力時は 5544μ 、水平 2 方向入力時は 10259μ となり、増大率は 1.85 となる。

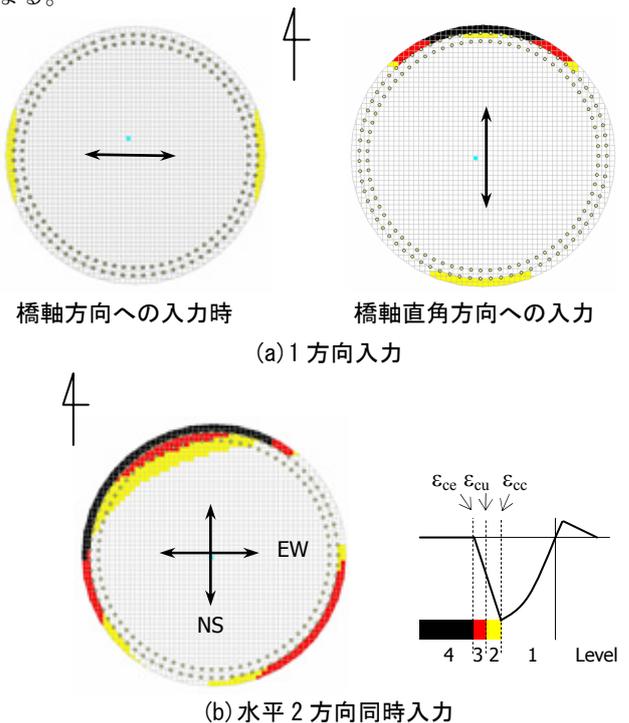


図-9 橋脚基部断面の損傷状況 (兵庫県南部地震)

図-10 に、対象とした全ての地震動について、入力地震動の最大加速度(P.G.A)と最大応答塑性率の関係を整理した。水平 2 方向同時入力および 1 方向入力いずれの場合においても、入力地震動の加速度が構造物の応答変位と比例しない事が、改めて確認できる。また、図-11 に、各観測点の計測震度と最大

応答塑性率の関係を整理した。計測震度が大きいほど、最大応答塑性率も大きくなる傾向にあるが、ばらつきは大きい。

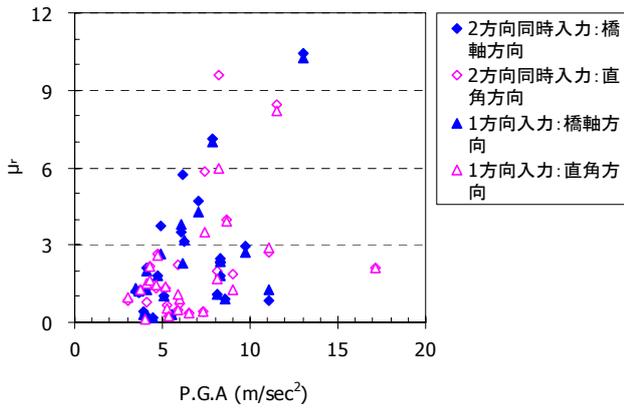


図-10 地震動の最大加速度と最大応答塑性率

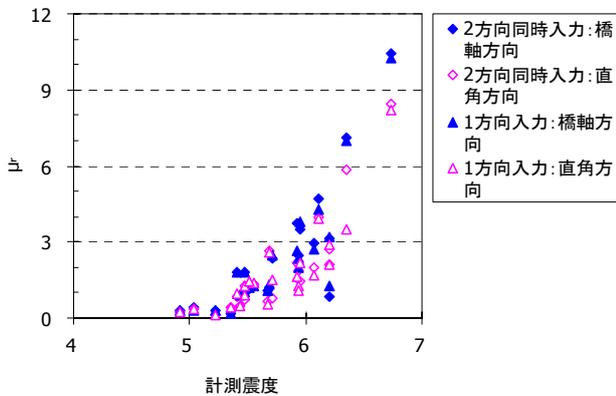


図-11 計測震度と最大応答塑性率

図-12 に、1 方向入力時の最大応答塑性率 $\mu_r^{(1)}$ と、水平 2 方向同時入力時の最大応答塑性率 $\mu_r^{(多)}$ を整理した。最大応答塑性率の大きい箇所データが少ないが、水平 2 方向同時入力時の最大応答の方が、1 方向入力時に比べて上回る丸傾向が見られる。

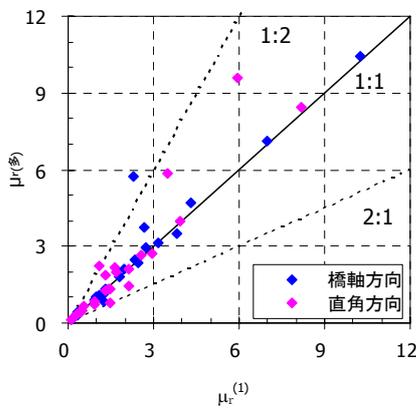


図-12 地震動入力方法と最大応答塑性率

ここで、最大応答塑性率の増大率を次の様に定義する。

$$\zeta_{\mu}^{LG} = \mu_r^{LG(1)} / \mu_r^{LG(多)} \quad (2a)$$

$$\zeta_{\mu}^{TR} = \mu_r^{TR(1)} / \mu_r^{TR(多)} \quad (2b)$$

ここで

ζ_{μ}^{LG} : 2 軸曲げ作用による最大応答塑性率の増大率

ζ_{μ}^{TR} : 2 軸曲げ作用による最大応答塑性率の増大率

$\mu_r^{LG(1)}$: 1 方向入力時の橋軸方向の最大応答塑性率

$\mu_r^{TR(1)}$: 1 方向入力時の直角方向の最大応答塑性率

$\mu_r^{LG(多)}$: 水平 2 方向同時入力時の橋軸方向の最大応答塑性率

$\mu_r^{TR(多)}$: 水平 2 方向同時入力時の直角方向の最大応答塑性率

塑性率を求める際に用いる降伏変位として、ここでは、1 方向入力時、すなわち 1 軸曲げ作用下での降伏時の変位とする。水平 2 方向同時入力時は、部材が降伏するときの方向は、地震動の入力方法や地震動によって異なり、最大応答変位の発生する方向とも異なる。よって、通常用いる 1 軸曲げ作用下の部材で利用する塑性率とは、やや定義が異なることに注意しなければならない。ここでは、塑性化の度合いとしてではなく、正規化した指標として、このような塑性率を用いることとし、1 軸曲げ作用下での降伏変位を利用して、2 軸曲げ作用下の塑性率を表現する事にした。

図-13 に、対象とした全ての地震動について、最大応答塑性率の増大率 ζ_{μ} を整理した。最大は 2.47、平均値は 1.09 であったが、1 を下回るものもある。よって、2 軸曲げ作用が必ずしも橋軸方向および橋軸直角方向への最大応答変位を増大させる作用ではない事がわかる。

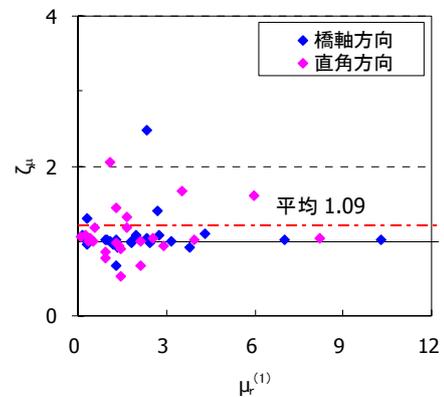


図-13 各地震による最大応答塑性率の増大率 ζ_{μ}

ここで、最大圧縮ひずみの増大率を次の様に定義

する。

$$\zeta_{\varepsilon} = \varepsilon'^{(多)} / \varepsilon'^{(1)} \quad (3)$$

ここで

ζ_{ε} : 2軸曲げ作用による最大圧縮ひずみの増大率

$\varepsilon'^{(1)} = \text{MAX}(\varepsilon'^{LG}, \varepsilon'^{TR})$

$\varepsilon'^{(多)}$: 水平2方向同時入力時の最大圧縮ひずみ

$\varepsilon'^{(1)}$: 1方向入力時の最大圧縮ひずみ

ε'^{LG} : 橋軸方向への1方向入力時の最大圧縮ひずみ

ε'^{TR} : 直角方向への1方向入力時の最大圧縮ひずみ

図-14に、対象地震動全てにおける最大圧縮ひずみの増大率 ζ_{ε} を整理した。これについては、ほぼ全てのケースにおいて、1を上回っている。すなわち、2軸曲げ作用により、最大圧縮ひずみが増加する($\zeta_{\varepsilon} \geq 1$)ことを示している。なお、増大率は、最大で1.85、平均は1.18であった。

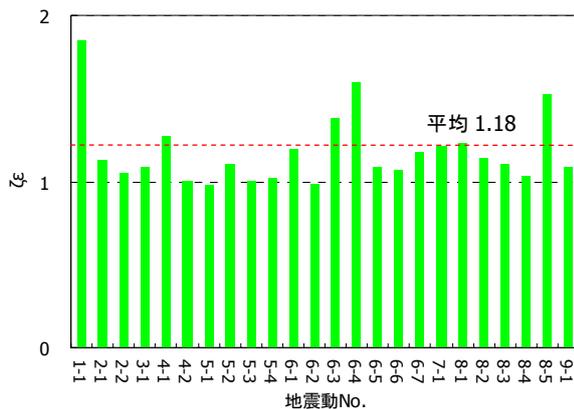


図-14 最大圧縮ひずみの増大率 ζ_{ε}

以上より、最大応答変位と最大圧縮ひずみについて、2軸曲げ作用により増大する可能性が改めて確認できた。その増大率は、地震動によって大きくばらついたが、平均的には、最大応答塑性率で10%程度、最大圧縮ひずみで20%程度であった。よって、現在よく実施される1方向入力による動的非線形解析で得られる最大応答よりも、実際の地震時には、より大きな応答が発生する可能性があることになる。水平2方向同時入力により、非線形応答を検討することの重要性を示すものと考えられる。

4. 水平2方向地震動の入力方向に関する検討

(1) 入力地震動の作用方法

水平2方向同時入力による検討においては、その入力方向が問題となる。ここでは、水平2方向同時入力において、図-15に示すように、構造物に対する地震動の入力方向を変化させ、鉄筋コンクリート橋脚の最大応答に及ぼす影響を検討するものである。なお、 0° の時、EW方向を橋軸方向に一致させ、入力角度を 5° 刻みで変化させる。 90° の時、EW方向は橋軸直角方向に一致する。

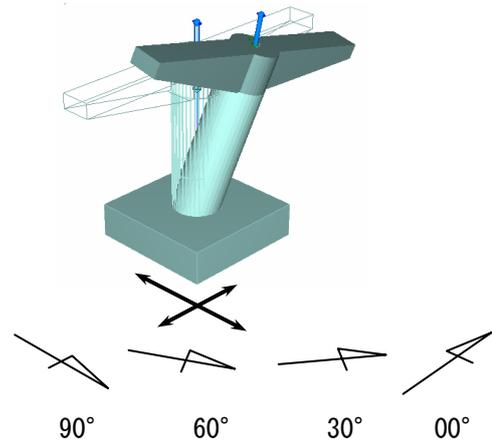


図-15 入力方向の変化

(2) 動的解析の結果

図-16に、兵庫県南部地震の観測波形を用いた場合について、各入力方向における橋脚天端の応答変位の軌跡図を示す。地震動の入力方向(=方位)の回転に追従して、応答変位の軌跡の主要振動方向も変化するが、軌跡の形状は大きく変化する、最大応答変位も大きく変化する事がわかる。

図-17に、兵庫県南部地震の観測波形を用いた場合について、各入力方向における最大圧縮ひずみの分布図を示す。地震動の入力方向(=方位)の回転に追従して、損傷が集中する方向や領域が変化している事がわかる。

図-18に、兵庫県南部地震の観測波形を用いた場合について、入力方向と最大応答塑性率 μ_r の関係を示す。入力方向により、最大応答塑性率が連続的に変化し、応答が最小となる方向、あるいは最大となる方向が存在する事がわかる。変動の大きい、橋軸方向に着目すると、最大応答塑性率に関する変動係数 v_{μ} は0.34、最大値と最小値の比 α_{μ} をとると2.93となった。

図-19に、対象とした全ての地震動について、入力方向の違いで生じた最大応答塑性率の、最大値と

最小値の比 α_{μ} を整理した。最小で 1.17、最大で 4.92、平均は 1.88 となった。すなわち、入力方向を限定して検討した場合には、平均的にその 2 倍程度の大きな応答が発生する可能性を考慮しなければならないことになる。入力方向を限定して検討することが、不十分であることを示すものとする。

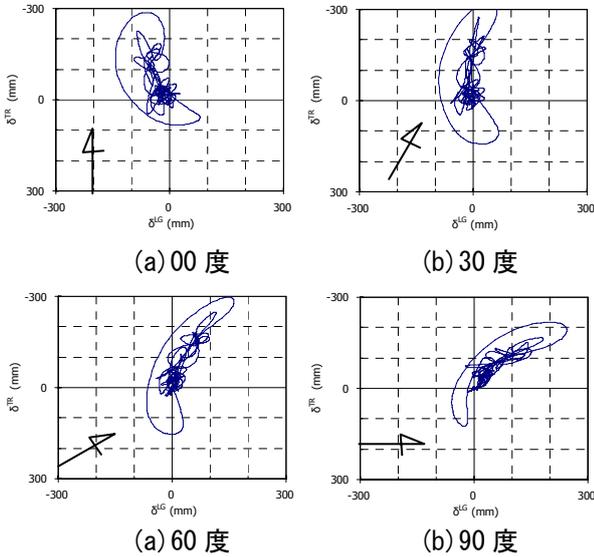


図-16 各入力方向における応答変位の軌跡 (兵庫県南部地震)

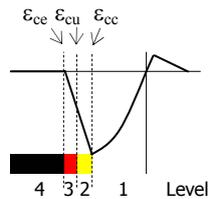
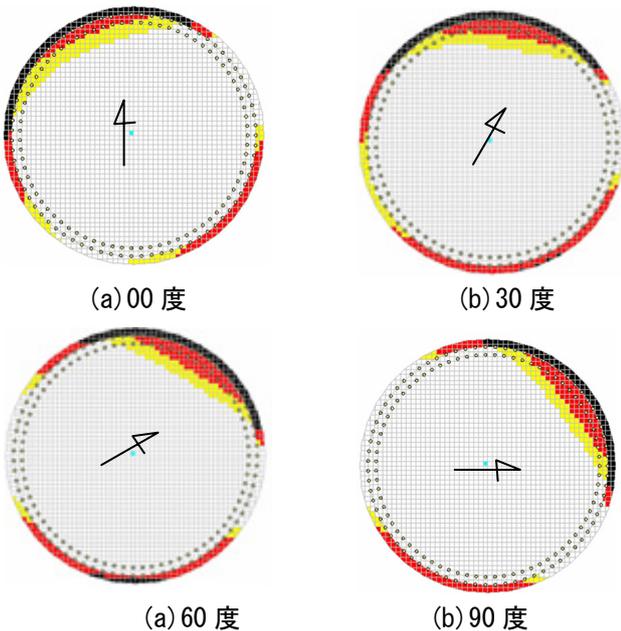


図-17 各入力角度における最大圧縮ひずみの分布 (兵庫県南部地震)

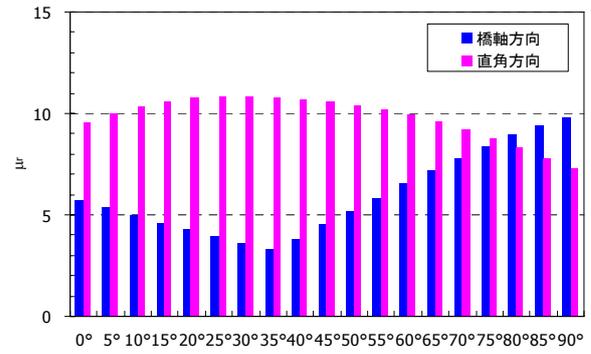


図-18 入力角度による最大応答塑性率の変化 (兵庫県南部地震)

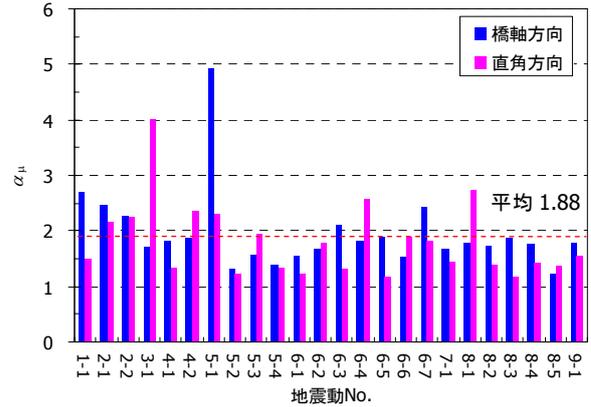


図-19 最大応答塑性率の最大値/最小値

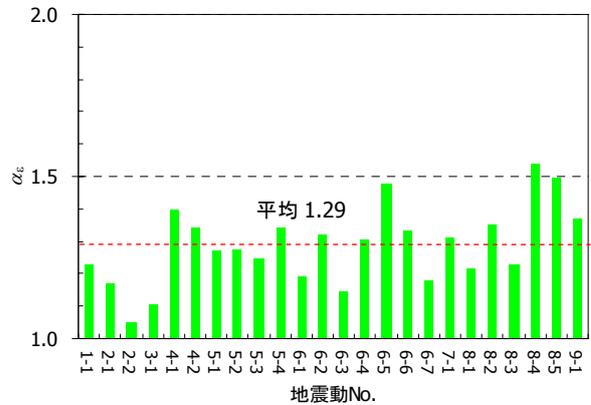


図-20 最大圧縮ひずみの最大値/最小値

図-20 に、コアコンクリート最外縁に生じた圧縮ひずみについて、最大値と最小値の比 α_{ϵ} を整理した。最小で 1.05、最大で 1.54、平均は 1.29 となった。

以上より、水平 2 方向同時に地震動を作用させる場合には、その入力方向が構造物の応答、ここでは最大応答塑性率と最大圧縮ひずみに対して、影響を及ぼす事が多数の地震動において確認された。すなわち、水平 2 方向同時入力による動的解析において観測波形を入力地震動として用いた場合には、1つの入力方向だけで地震時の安全性を検討することの危険性を示すものとする。これらの現象について、地震動の特性との関連性などには全く触れていない

が、これについては今後の課題としたい。

5. まとめ

以上の検討から、水平 2 方向同時入力により非線形応答を評価する事の重要性を確認する事ができた。加えて、次の結果が得られた。

- 1) 現状よく用いられる地震動の作用方法 (=1 方向入力) と比べ、実際の地震と同様に水平 2 方向同時に地震動を作用させた場合、最大応答塑性率、最大圧縮ひずみは増加する傾向にある。すなわち損傷状態がより厳しく評価される。多数の地震動で検討した結果、最大応答塑性率は最大で 2 倍程度、平均で 1.1 倍程、増大する結果となった。
- 2) 実際の地震動と同じように、水平 2 方向同時に地震動を作用させた場合に、その入力方向によって最大応答が大きく変動する。多数の地震動で検討した結果、入力方向の違いによって最大応答塑性率は平均で 2 倍程度の差が生じる結果となった。

なお、今回は円形断面を有する橋脚を用いた検討のみとなったが、矩形断面を有する橋脚についても、同様の検討を進めたいと考えている。

謝辞: 防災科学技術研究所 K-NET の観測記録を使わせて頂きました。関係諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編 平成 14 年 3 月
- 2) (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 平成 9 年 3 月, 1997.3.
- 3) (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 平成 10 年 1 月, 1998.3
- 4) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 水平 2 方向地震力を受ける単柱式 RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.79-98, 2004.4
- 5) 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, 1994
- 6) 土屋智史, 福浦尚之, 前川宏一: Fiber Model を用いた 3 次元有限要素動的解析による水平 2 方向入力を受ける RC 橋脚の応答, 「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, pp.359-368, 1998.8
- 7) 青戸拡起, 大江亮二, 吉川弘道: 2 方向地震力を受ける RC 単柱橋脚のせん断強度劣化, 第 3 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講演論文集, 1999.12
- 8) 萩本英典, 川島一彦, 渡邊学歩, 永田聖二: ファイバー要素解析に基づく 2 方向地震力を同時に受ける RC 単柱式橋脚の耐震性, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁構造の耐震設計に関するシンポジウム, 2005.2
- 9) 永田聖二, 川島一彦, 渡邊学歩: 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, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2005.2
- 10) 芳村 学, 青山 博之, 川村 満: 2 方向外力を受ける鉄筋コンクリート構造物の解析 その 1. 2 軸曲げを受ける RC 柱の解析, 日本建築学会論文報告集, 第 298 号 pp.31-41, 1980.12
- 11) COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON: RC FRAMES UNDER EARTHQUAKE LOADING -STATE OF THE ART REPORT-, Tohmas telford, 1996
- 12) 株式会社フォーラムエイト: UC-win/FRAM(3D)電子マニュアル, 2005.10
- 13) 高梨和光, 青戸拡起: 3 次元動的解析法を用いた耐震性能照査方法に関する考察, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2005.2
- 14) Rajesh Prasad Dhakal, Koichi Maekawa: Path-dependent cyclic stress-strain relationship of reinforcing bar including buckling, Engineering Structures 24, pp1383-1396, 2002
- 15) 防災科学技術研究所ホームページ: 強震ネットワーク K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 16) 気象庁ホームページ: 震度データベース検索, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html