

地震動の入力方向の不確定性が構造物の 非線形応答特性に及ぼす影響

西田 秀明¹・運上 茂樹²

¹独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

E-mail:nisida@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ上席研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

E-mail:unjoh@pwri.go.jp

地震時における構造物の応答は、構造物の保有する耐力・変形性能に加え入力特性にも依存する。そのため、同一構造物であっても、ある地震記録における任意の一方成分から求めた構造物の応答値が、その地震記録を用いて求めた構造物の最大応答であるとは限らない。本研究では、橋脚を非線形履歴特性を有する1質点系でモデル化し、地震記録の水平二方向成分を用いて求めた任意の一方成分の地震動成分を一定角度毎に入力した非線形応答解析を行い、目標塑性率となる際の荷重低減係数や最大応答変位のばらつきについて評価した。また、任意の方向における地震動成分に対する応答値から、地震動の入力方向の不確定性の影響を考慮したうえで水平面内での最大応答値を推定するために必要な補正係数を提案した。

Key Words : input direction of ground motion, variation, nonlinear response, bridge pier

1. はじめに

地震時における構造物の応答は、構造物が保有する耐力・変形性能が同一であっても、作用する外力である地震動の振幅特性や位相特性により異なる。このため、橋梁の耐震設計では、地盤種別や地域区分を考慮し、一般に地震動の大きさをレベル1（中規模程度の地震による地震動）とレベル2（大規模な地震による地震動）の2段階に、さらにレベル2地震動についてはプレート境界型と内陸直下型に分けて検討される。しかし、同一分類に属する地震記録を用いても構造物の応答が異なることはもとより、ある特定の地震記録を用いた場合でも、構造物に対してその地震動がどのような方向から入力したかにより応答は異なる。一般には、地震動が収録された方向成分（例えば、南北成分や東西成分）の記録がそのまま用いられることが多い。しかし、この記録はあくまで便宜的に定めた軸に対するものであり、その地震動により生じる構造物の最大応答値と一致するとは限らない。この影響を考慮するためには、構造物に対する地震動の入力方向を変えた解析を行うことが必要とされ、曲線橋や多径間連続橋などではこのような検討を行う場合もあるが、一般的には実務上煩雑になることなどが考慮され、橋軸及び橋軸直角方向の二方向に対して入力する

場合が多い。さらに、線形の応答特性を有する弾性体構造物に対する地震動入力方向の影響については検討事例があり^{例えは 1),2)}、例えば道路橋示方書³⁾において設計地震動として示されている標準加速度応答スペクトルにはその結果が反映されているが、地震動の入力方向の不確定性が構造物の非線形応答特性に及ぼす影響については定量的な評価が十分されていない。

以上のような背景から、本研究では、非線形履歴特性を有する構造物を対象として、任意の地震動入力方向に対する構造物の応答値のばらつきを定量的に評価した。さらに、任意の方向における地震動成分に対する応答値から、地震動の入力方向の不確定性の影響を考慮したうえで水平面内での最大応答値を推定するために必要な補正係数を提案した。

2. 解析手法および解析条件

線形の応答特性を有する構造物では、二次元平面内での最大応答値は、入力方向により断面形状の影響は生じるものの二軸曲げの影響は少ないことから⁴⁾直交する地震動の主軸成分に対して独立に求めた応答値のベクトル和の最大値としてほぼ近似できる⁵⁾。ここで、二軸曲げ

とは、断面の平面保持を仮定した際に、部材の曲げに伴う中立軸の移動が並行移動でない場合を指すものとする。従って、例えば矩形断面の対角軸方向に繰り返し曲げ作用を受ける場合は二軸曲げとは考えない。これに対し、非線形応答特性を有する構造物では、線形時に考慮する点の他に、材料剛性の低下により二軸曲げの影響が顕著になるため同様な方法で最大応答値を求めることはできない。しかし、外力である地震動の入力方向と構造物の特性である二軸曲げを同時に考慮すると応答値に影響を及ぼす可能性のある要因が多くなることから、本研究では、このうち地震動の入力方向の違いが構造物の応答特性に及ぼす影響に着目した。また、応答方向は一方方向のみとすることで二軸曲げの影響が生じないようにした。

対象構造物は鉄筋コンクリート（以下、「RC」と呼ぶ）橋脚およびコンクリート充填鋼製橋脚とし、非線形履歴特性を有する1質点系としてモデル化した。履歴モデルは、RC橋脚では二次剛性比0のバイリニア武田モデル（剛性低下率0.5、減衰定数0.02）、コンクリート充填鋼製橋脚では二次剛性比0.05のバイリニアモデル（減衰定数0.01）とした³⁾。初期剛性から求めた構造物の固有周期（以下、「初期固有周期」と呼ぶ）0.1秒から5.0秒を対象として、目標塑性率 μ_T となるような降伏震度 k_y を非線形応答解析の繰り返し計算から求め、その時の荷重低減係数 R_μ および応答変位を算出した。初期固有周期は0.1秒から2.0秒までは0.1秒刻み、以後5.0秒までは0.2秒刻みとした。また、 μ_T は3および5とした。

入力は、直交する水平二方向成分の地震記録から15°刻みで回転させた主軸に対する加速度波形（図-1）とした。地震動としては、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台、JR鷹取駅および東神戸大橋、1993年釧路沖地震における釧路気象台、1994年ノースリッジ地震におけるシルマー駐車場、の5記録を用いた。

以上の解析結果から、初期固有周期毎に R_μ および最大応答変位のばらつきを評価した。なお、 R_μ は、式(1)に示すようなある任意の方向の地震波から求めた弾性応答に対応する復元力ではなく、水平面内における最大弾性応答変位（以下、「TRSD」(Two-dimensional Response Spectrum of Displacement)と呼ぶ）⁵⁾に対する復元力として式(2)のように定義したものについて整理した。

$$R_{\mu 1} = \frac{F_e}{F_y} \quad (1)$$

$$R_{\mu 2} = \frac{F_{TRSD}}{F_y} \quad (2)$$

F_e ：任意の方向の地震波から求めた弾性応答に対

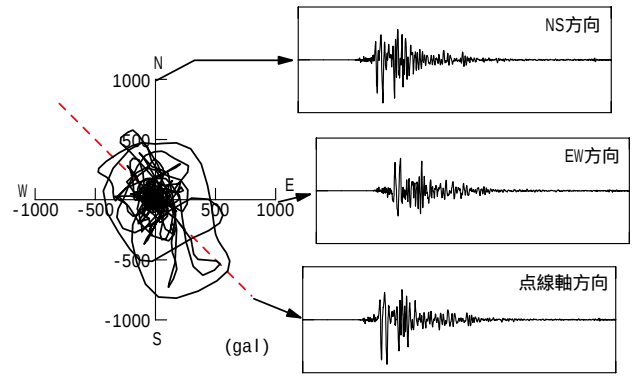


図-1 主軸を変えた場合の加速度波形の例
(神戸海洋気象台波)

応する復元力

F_{TRSD} ：TRSDに対応する復元力

F_y ：降伏耐力

各初期固有周期における R_μ および最大応答変位は、応答値の分布形状から対数正規分布に従うと仮定して、平均値 λ と標準偏差 ζ を求めた。ここで、応答値の絶対量は地震動により差があるため、このままでは同一レベルで地震動の入力方向に起因するばらつきのみを比較することは困難である。そこで、変動係数を求めて地震動が異なるデータ間のばらつきを比較した。変動係数は、対数正規分布と正規分布の関係をを用いて、対数正規分布の λ および ζ から、平均値 μ および標準偏差 σ を算出して求めた。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right) \\ \sigma &= \mu\sqrt{\exp(\zeta^2)-1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

次に、目標応答塑性率となる時に生じる水平面内の最大応答変位を推定した。本来、この値は地震動の主軸方向をより細かく回転させて非線形応答解析を行った結果から求める必要がある。しかし、計算量が多くなること、多少の入力地震動の主軸方向の差が応答値に大きく影響しないと考えられることから、先に求めた15°刻みの最大応答変位に対する統計量を用い、非超過確率がある一定値となる時の値を、地震動の入力方向の不確定性を考慮した場合に生じうる水平面内での最大応答変位と定義することとした。

最後に、ある任意の方向における地震動成分に対する応答値から水平面内での最大応答変位を推定する方法を検討した。直交する水平二方向成分の加速度波形に対して、目標塑性率となる時の最大応答変位をそれぞれ独立に求め二乗平方和（以下、「SRSS」と呼ぶ）を求めた。SRSSと水平面内での最大応答変位の比が各初期固有周期に対して対数正規分布に従うと仮定し、比の分布性状を評価した。地震動間のばらつきを考慮しつつ、

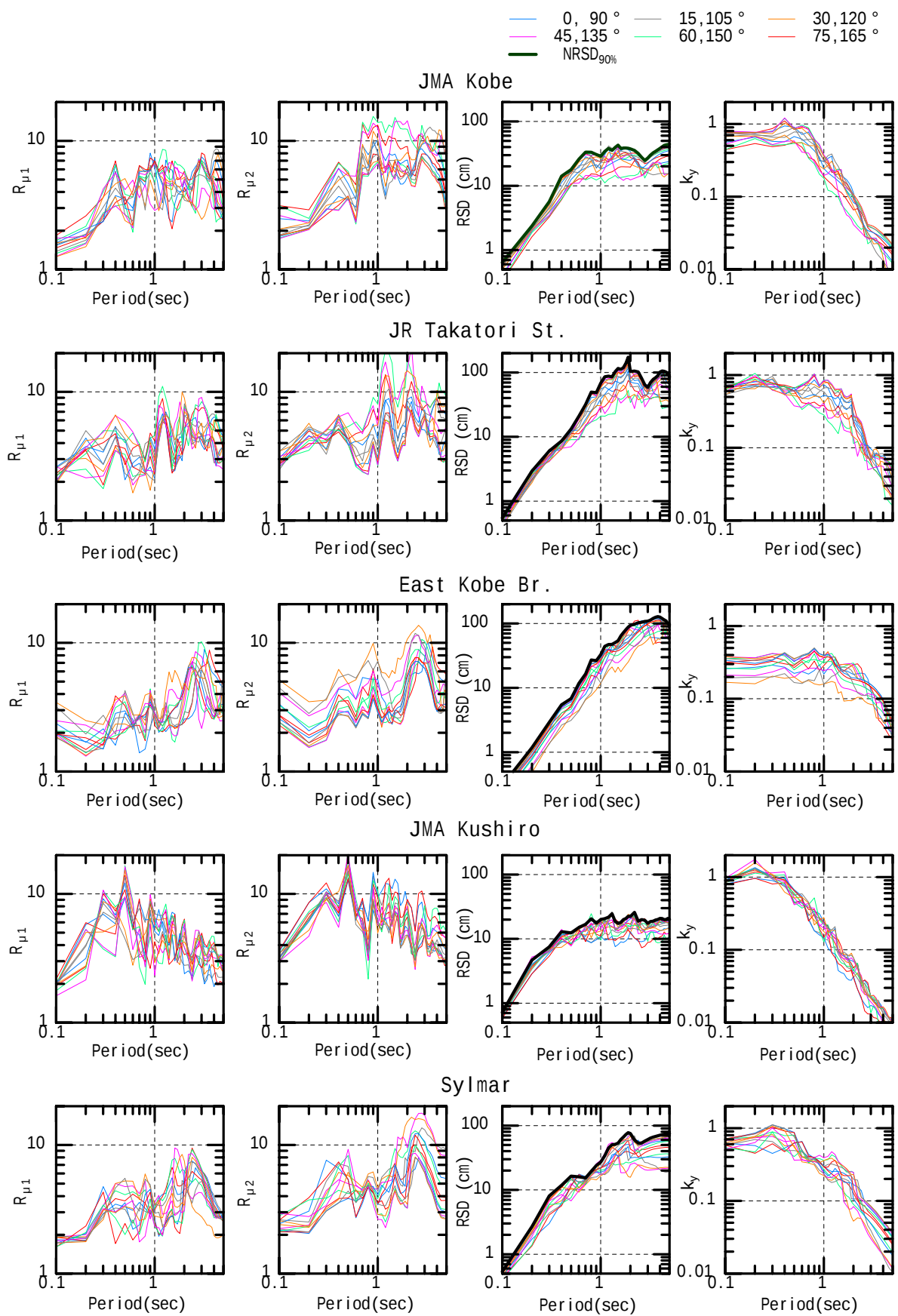


図-2(1) R_{μ} , 最大応答変位および降伏震度 k_y の分布 ($\mu_T=3$ パイリニアモデル)

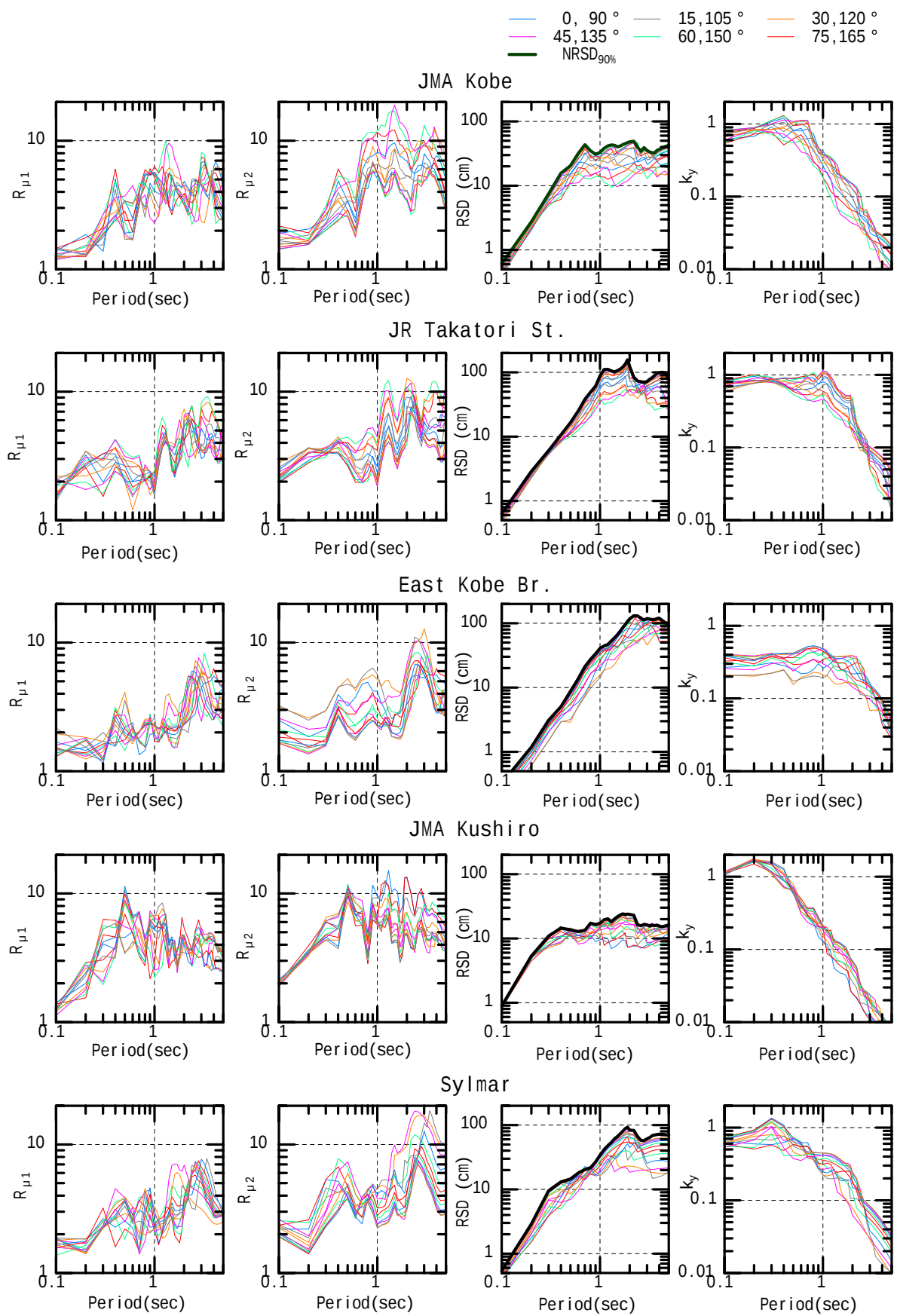


図-2(2) R_{μ} , 最大応答変位および降伏震度 k_y の分布 ($\mu_T=3$ 武田モデル)

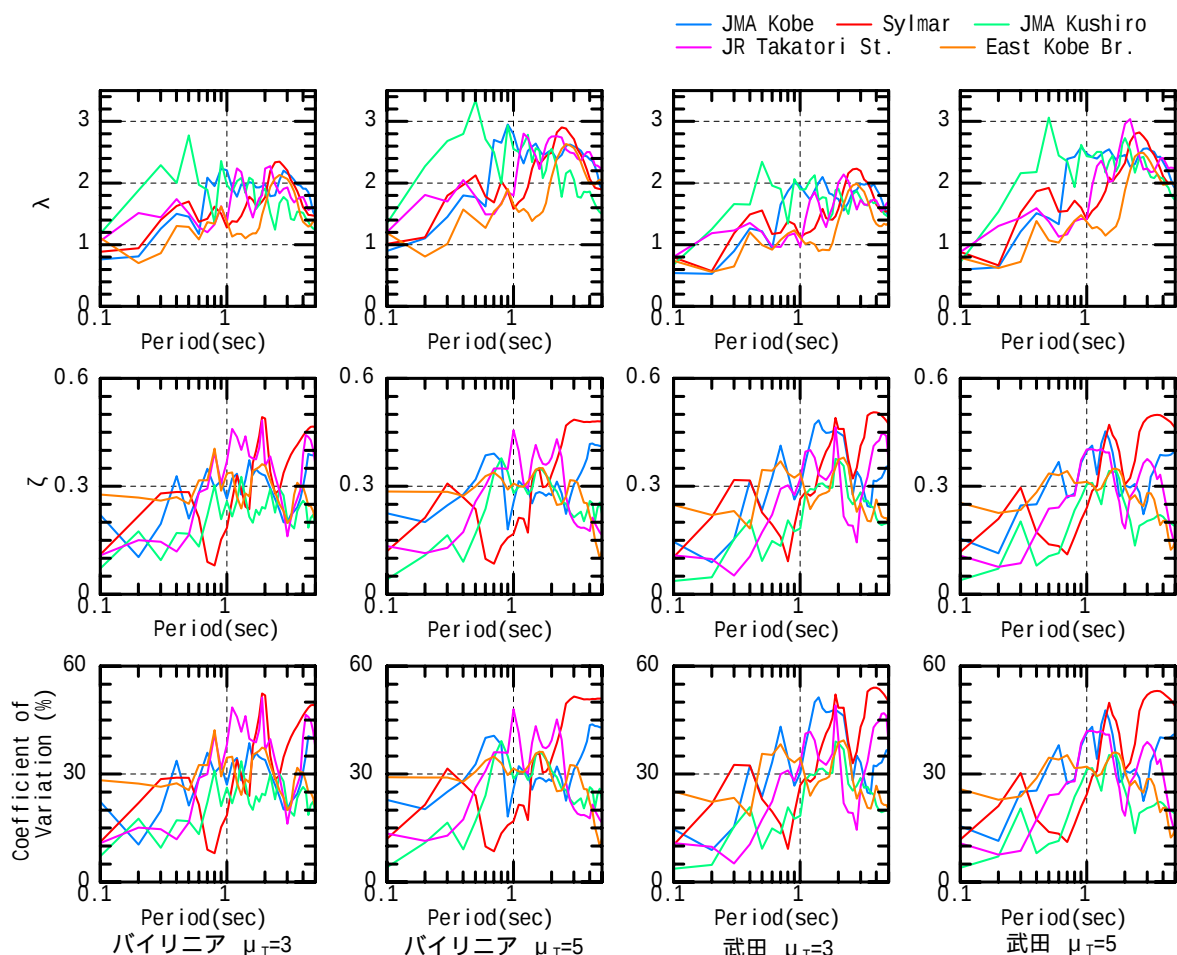


図-3 TRSDに対する R_{μ} の平均値 λ ，標準偏差 ζ および変動係数の分布

SRSSから水平面内での最大応答変位の平均的な値を推定するために必要な補正係数をモデル化した。

3．地震動の入力方向の不確実性が応答値に及ぼす影響の評価

目標塑性率 μ_T が3の場合における R_{μ} ，最大変位および降伏震度 k_y を図-2に示す．なお，後述する最大水平応答変位（NRSD_{90%}）も示している．

いずれの地震動においても，入力方向の違いにより， R_{μ} ，最大応答変位ともに全周期帯域にわたってばらつきがあることが分かる．また， R_{μ} ，最大応答変位とも最小と最大で3～4倍程度差が生じている．このことは，ある特定の方向の地震動入力に対する応答値のみに基づいて構造物の保有する耐震性能を判定すると，設計での想定を上回る損傷が生じる場合があることを示している．

式(2)で定義したTRSDに対する R_{μ} （ $R_{\mu 2}$ ）の平均値 λ ，標準偏差 ζ および変動係数を図-3に示す．変動係数は，地震動間でばらつきが大きいものの， μ_T や履歴モデルによらず，平均的に短周期帯域で20%程度，固有周期1

秒付近で30%程度，3～5秒で40%程度と初期固有周期が長くなるにつれ大きくなる傾向がある．

これらのことは，短周期帯域では入力方向の違いが応答に及ぼす影響が長周期帯域に比べて小さいことを示している．逆に，長周期帯域では，入力方向の違いが応答値により大きな影響を及ぼすことを示しているといえる．

4．最大水平応答変位の推定

(1)最大水平応答変位の推定

地震動間の最大振幅のばらつきを考慮するような場合と異なり，地震動の入力方向によるばらつきのみを考えた場合，ある特定の地震記録に対する水平面内における非線形最大応答変位は，無限に大きな値となるわけではなく有限の値である．また，真の水平面内における非線形最大応答変位は，前章で考慮した程度の角度（15°）毎に算出した応答値を基にすればその最大値とさほど大きな差はないと考えられる．以上より，水平面内における非線形最大応答変位は，15°毎に算出した応答値の最大値程度であると仮定し，前章で求めた最大応答変位の分布に関する統計量（ λ および ζ ）から求めた非超過確

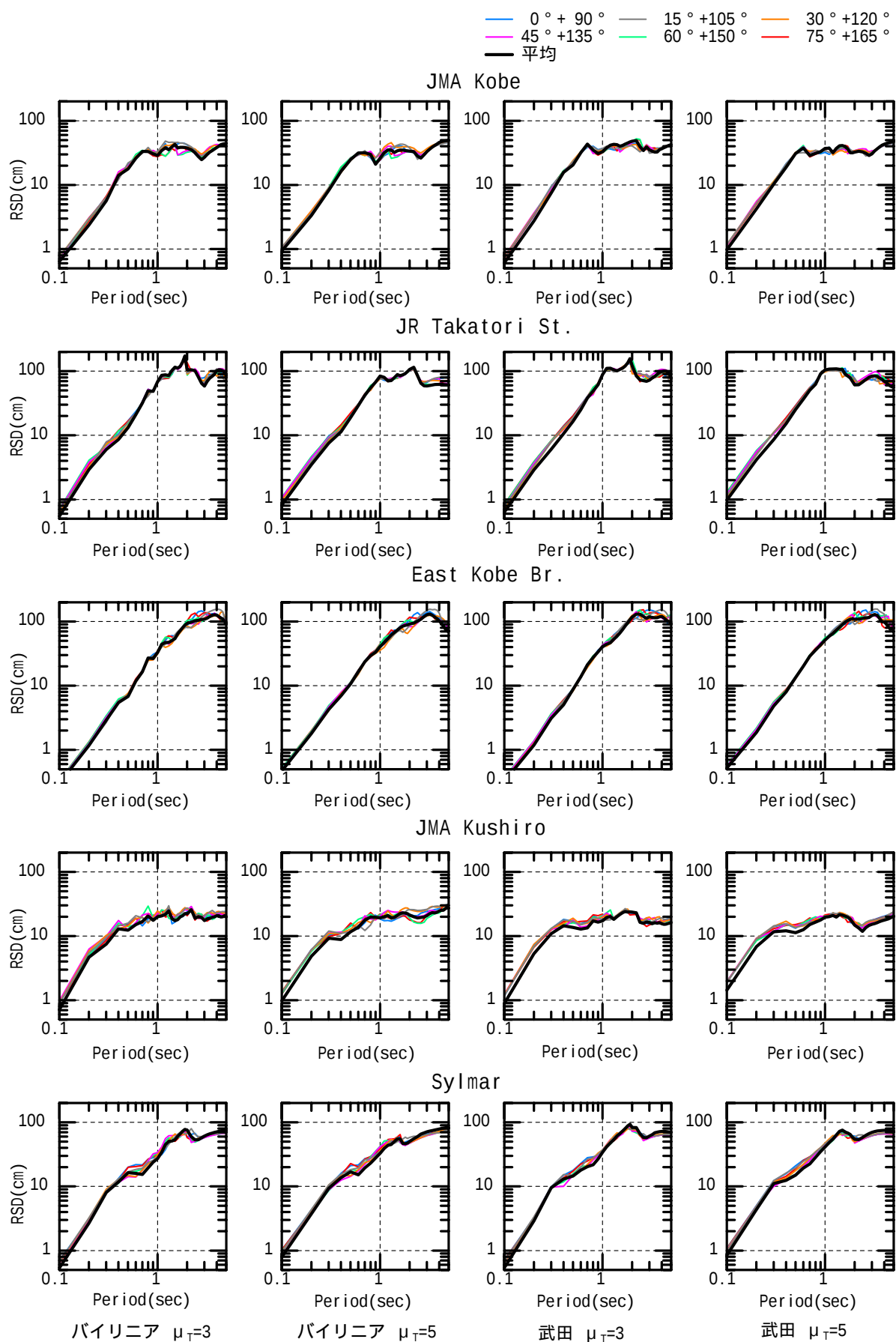


図-4 各地震動における SRSS と NRSD_{90%} の比較

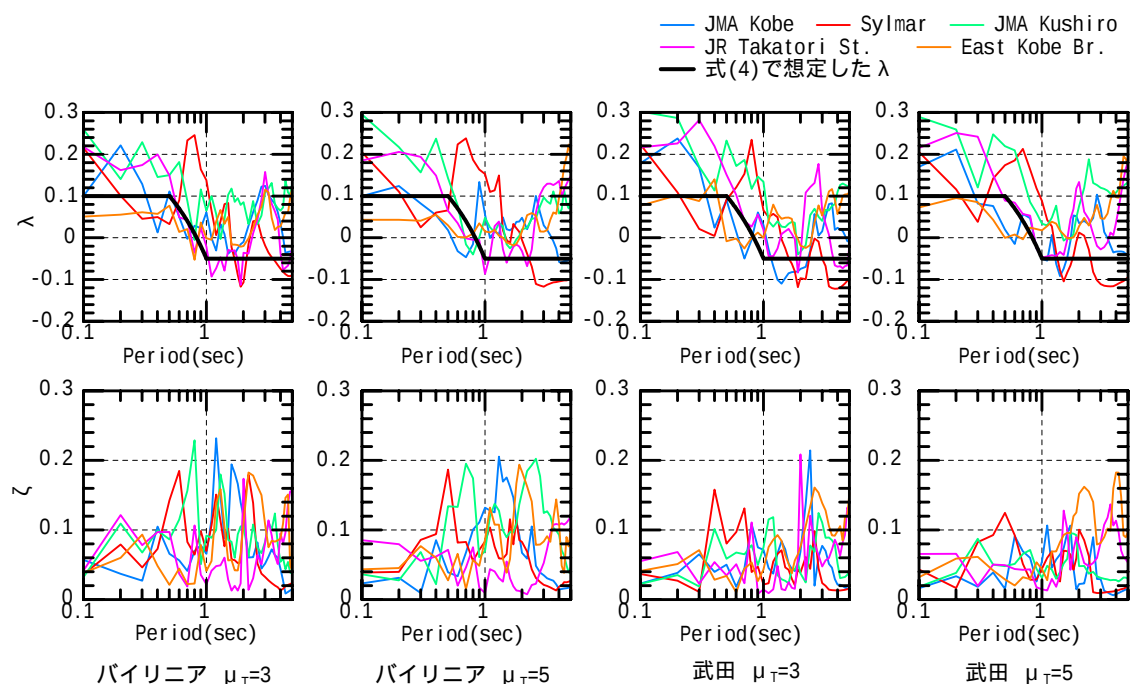


図-5 SRSS/NRSD_{90%}の平均値λおよび標準偏差σの分布

率が90%となる値を水平面内の最大応答変位（以下、「NRSD_{90%}」と呼ぶ）とした。

各地震動に対するNRSD_{90%}を図-2に合わせて示す。15°毎に回転させて求めた最大応答変位がNRSD_{90%}を超えるケースも若干あるが、ほぼ応答値の最大を包絡するスペクトル形状となっており、水平面内の最大応答変位として妥当であると考えられる。

(2) SRSSによるNRSD_{90%}の推定

水平面内の最大応答変位NRSD_{90%}を任意の方向における地震動成分に対する応答値から推定する方法を検討した。設計実務の観点からすると、非線形解析の回数はより少ない方がよいと、任意の成分に対する地震記録から求めた結果のみから推定できることが望ましい。しかし、図-2に示すように最大応答変位スペクトルは、全体的傾向は入力方向によらず類似しているが、詳細形状にはばらつきがある。このことから、任意の成分に対する地震記録から求めた結果により水平面内における最大応答変位を推定しても十分な精度が得られないと考えられる。そこで、直交する水平二成分の記録を用い各々の成分における最大応答値を求め、その二乗平方和(SRSS)からNRSD_{90%}を推定することとした。ここで、SRSSは入力方向を15°毎に回転させた応答値から、直交する成分を用いて求めた。

各地震動におけるSRSSとNRSD_{90%}の比較を図-4に示す。目標塑性率や履歴モデル、直交成分の組み合わせによらず、いずれのケースでもSRSSとNRSD_{90%}のスペクトル形状や大きさは局所的なピークを含め全周期帯域においてほぼ一致していることから、NRSD_{90%}をSRSSを基に精度

良く推定できると考えられる。そこで、NRSD_{90%}に対するSRSSの比をとり、この比が対数正規分布すると仮定して求めた平均値λと標準偏差σを図-5に示す。固有周期および地震動によりばらつきはあるものの、全体的傾向としては目標塑性率や履歴モデルに関わらず平均値λは固有周期0.1～0.5秒付近の短周期帯域で大きく、1～5秒の長周期帯域では1を下回るほど低下するケースもある。このため、SRSSをそのまま用いると、固有周期が長い場合にNRSD_{90%}を小さめに評価する可能性がある。小さめに評価する割合をある一定値とするための確率論的な評価は、スペクトル比が1を下回る際の比の大きさや周期が地震動特性に大きく依存することから、より多くの地震動を用いた検討が必要である。そこで、今回は確率論に基づく評価は行わず、5地震記録からの解析結果から、SRSSからNRSD_{90%}を推定するために必要な補正係数γの設定のみ行うこととした。ここで、γは目標塑性率や履歴モデルによらず共通であるものとして設定した。λは、その平均的な値と固有周期依存性から、固有周期0.1～0.5秒では0.10、1.0～5.0秒では-0.05、0.5～1.0秒の間はそれを補完するようにモデル化した。これを図-5に合わせて示す。補正係数γは、応答値に対するものであることから式(4)のように割り増し係数として取り扱うことを考慮し式(5)とした。

$$NRSD_{90\%} = \gamma \cdot SRSS \quad (4)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0.95 & (0.1 \leq T \leq 0.5) \\ 0.30T + 0.80 & (0.5 < T < 1.0) \\ 1.10 & (1.0 \leq T) \end{cases} \quad (5)$$

T : 構造物の初期固有周期 (秒)

標準偏差 ζ の平均的な値は、固有周期によらずバイリニアモデルでは平均0.1程度であるのに対し、武田モデルではその半分程度である。二次剛性比や構造減衰定数も異なるので一概に比較できないものの、ばらつきの指標である標準偏差は武田モデルの方が小さいことから、NRSD_{90%}の推定式は同一であっても履歴モデルにより推定精度に差があることが分かる。

5. まとめ

地震動の入力方向の不確定性が、構造物の非線形応答特性に与える影響について、橋脚を対象とした非線形応答解析を行い、以下のような結論を得た。

- ・ある唯一の地震動記録を用いても、構造物に作用する入力方向が異なると、最大応答変位は最大で 3-4 倍程度異なる。このことは、ある特定の方向の地震動入力に対する応答値のみに基づいて構造物の保有する耐震性能を判定すると、設計での想定を上回る損傷が生じうることを示している。
- ・TRSD に対する R_{μ} の変動係数は、目標塑性率や履歴モデルによらず、平均的に短周期帯域で 20%程度、固有周期 1 秒付近で 30%程度、3~5 秒で 40%程度と初期固有周期が長くなるにつれ変動係数が大きくなる傾向がある。
- ・地震動の入力方向の不確定性を考慮して水平面内における最大応答値 NRSD_{90%}を統計的手法により推定し、

その妥当性を検証した。

- ・NRSD_{90%}を、直交する水平二成分の記録を用い各々の成分における最大応答値を求め、その二乗平方和 (SRSS) をもとに推定する方法を提案した。また、SRSS と NRSD_{90%}の比の関係を基に、推定精度を向上させるため必要な補正係数 γ を固有周期に依存した関数として提案した。

水平二方向入力を受ける非線形解析においては、最初に述べたように二軸曲げを考慮することも重要であり、これらが応答特性に及ぼす影響について定量的に評価することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 川島一彦, 相沢興, 高橋和之: 最大地震動及び応答スペクトルの推定式に及ぼす強震記録の水平2成分合成の影響, 土木学会論文報告集, 第329号, pp.49-56, 1983.
- 2) Edward L. Wilson, Iqbal Suharwardy and Ashraf Habibullah: A Clarification of the Orthogonal Effects in a Three-Dimensional Seismic Analysis, Earthquake Spectra, Vol.11, No.4, 1995.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2003.
- 4) 西田秀明, 運上茂樹, 長屋和宏: 正方形断面RC柱の水平二方向加振振動台実験 (線形領域加振の場合), 第56回年次学術講演会講演概要集, 1-B, 2001.
- 5) 西田秀明, 運上茂樹: 地震動の入力方向の不確定性を考慮した加速度応答スペクトル特性, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.627-632, 2002.
- 6) Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 伊藤学, 亀田弘行訳, 丸善, 1977.

(2003. 6. 30 受付)

EVALUATION OF NON-LINEAR RESPONSE CHARACTERISTICS OF BRIDGE PIER CAUSED BY DIRECTIONAL UNCERTAINTY OF GROUND MOTION

Hideaki NISHIDA and Shigeki UNJOH

This paper presents that the evaluation of nonlinear response characteristics of the bridge pier caused by the effect of directional uncertainty of ground motion. Nonlinear response analyses in which the input direction of the ground motions for 5 records was varied were carried out for SDOF system, and the variation of reduction factor (R_{μ}) and maximum response spectrum of displacement (RSD) was evaluated statistically. Furthermore, RSD value that was not exceeded 90% of probability (NRSD_{90%}) was estimated. The results showed that the variation of R_{μ} and RSD was 3-4 times at the maximum, and that NRSD_{90%} could be estimated using RSD for two perpendicular components and proposed modification factor.