

水平 2 方向地震動を受ける鋼製橋脚の 弾塑性地震応答解析

岡崎靖一郎¹・葛西昭²・宇佐美勉³

¹名古屋大学大学院博士課程前期課程 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail:okazaki@sts.civil.nagoya-u.ac.jp

²名古屋大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail:kasai@civil.nagoya-u.ac.jp

³名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail:usami@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究は、水平 2 方向外力を想定した終局耐震設計法の確立のための基礎的データを提供するものである。特に、要求性能である地震外力を受ける際の応答値に着目した検討を行った。対象とした構造物は鋼製橋脚であり、その橋脚基部にレベル 2 地震動を水平 2 方向から入力する弾塑性地震応答解析を行った。固有周期に関するパラメトリックスタディを通じて、2 方向外力を受ける場合の地震時挙動は 1 方向時に比べ、最大応答変位が 3 倍も増幅する場合があるなど、耐震設計に対する 2 方向地震動入力の導入の必然性を提唱した。

Key Words : Ductility, Steel Bridge Pier, Seismic Response Analysis, Bi-directional Horizontal Loads

1. 緒言

橋梁構造物の耐震設計は、その橋軸方向および橋軸直角方向に対して独立に所定の地震力を与えて耐震検討を行うのが現状である¹⁾。すなわち、限界値 (Capacity) を求める場合には、例えば、1 方向への Pushover 解析や繰り返し載荷実験などから得られる強度や変形能を用い、応答値 (Demand) を求める場合には、各方向に独立に地震動を入力し、その結果得られる応答変位を用いるのが大多数である。独立 1 方向入力は現象を捉えやすいため、1 方向への載荷を想定した諸研究は急速かつ詳細に進んできており、ほぼ完備されている感がある。しかしこれに対して、水平 2 方向を念頭に置いた耐震安全性の検討例は文献 2)~6)に見られる程度でまだ少なく、基礎的資料に乏しい。文献 2)の研究は、鋼製橋脚を対象とし、水平 2 方向への単調・繰り返し載荷実験についてまとめたものであり、耐震設計を行う上での限界値を評価するものである。鉄筋コンクリートフレーム構造の分野においても文献 3)などで検討されているが、これも同様な研究であり、文献 4)も RC 構造物の限界値をまとめたものであり、特に変形能を

評価する上で載荷パターンの違いに着目した検討を行っている。著者らも同様の検討を実験的⁷⁾および解析的⁸⁾に行っている。以上の研究は、限界値についてまとめたものばかりであり、応答値に関する検討をしたものはあまりなく、特に、レベル 2 地震動を想定した例はない。そこで本研究では、レベル 2 地震動が水平 2 方向に作用する場合を想定した応答値を解析的に評価し、その評価結果が 1 方向地震力の場合とどのように異なるかをまとめる。

地震外力を 2 方向から入力することを想定した検討は既に文献 9)で行われており、簡易的に取り扱う方法を提示している。その骨子は、地震動の水平 2 方向入力による橋脚の応答値を求める際には、ある 1 方向の地震力に対して、その直交方向の地震力の一部を考慮するというものである。すなわち、建物の直交軸を X, Y とし、それぞれの方向の地震作用の成分を E_X , E_Y とした場合、全設計地震作用としては、次の 2 つの組み合わせを考慮する。

$$1) E = E_X + \lambda E_Y$$

$$2) E = \lambda E_X + E_Y$$

ここで、 λ の値は特定の値が決められることとなるが、文献 9)では λ の値は 0.3 としている。ここでの

議論は地震外力についてであり，その結果として表れる応答値についての知見をまとめたものではない．また，文献 10)では建築分野における水平 2 方向地震力の考え方がまとめてあり，応答値についてもスペクトルとしてまとめている．ここでの解析モデルは水平方向へ 2 自由度とした単純なモデルではあるが，2 方向の地震動を入力することは，応答値についても 1 方向時の 30% 程度の上昇となることが述べられている．そこで，本研究では，2 方向地震動入力に対して，はり要素を用いた，より精緻な解析を通して，水平 2 方向地震入力時の弾塑性地震応答解析における応答変位性状をまとめることに重点をおいた．

具体的に本研究では，正方形無補剛断面鋼製橋脚を対象として，はり要素を用いた解析モデルに対して地震動を水平 2 方向同時入力および水平 1 方向単独入力する弾塑性地震応答解析を行い，2 方向同時入力が橋脚の応答値に及ぼす影響に対する考察を行う．

2. 解析概要

(1) 解析モデル

解析モデルは桁に相当する上部構造重量を橋脚天端に 1 質点に集中化したモデルを用いる(図-1 参照)．鋼製橋脚部分ははり要素を用いてモデル化し，橋脚基部には，X 方向に EW 成分の地震動を，Y 方向に

は NS 成分の地震動を同時，またはその一方を入力することを想定した弾塑性地震応答解析を実施し，その地震応答性状を求める．解析に用いたソフトは汎用構造解析プログラム ABAQUS⁽¹⁾である．はり要素の構成則としては弾性，パイリニア型移動硬化則(図-2)，修正 2 曲面モデル(図-3)の 3 種類を想定し，構成則の違いについても論じる．修正 2 曲面モデルに関する詳細は文献 12)を参照されたい．また，はり要素には Timoshenko のはり理論に基づくはり要素 B31 を用いた．鋼材は SM490 とし，材料定数は表-1 に示されるような公称値を用いた．ここで，表-1 において， E :ヤング係数， ν :ポアソン比， σ_y :降伏応力， σ_u :引張強度， E_{st} :初期硬化係数， ε_{st} :初期硬化ひずみ， ε_y :降伏ひずみを意味している．また，減衰定数は 0.05 として質量比例型減衰を用いた．

表-1 材料定数

鋼材	E [GPa]	ν	σ_y [MPa]
SM490	200	0.3	315
	σ_u [MPa]	$\frac{E}{E_{st}}$	$\frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y}$
	490	30	7

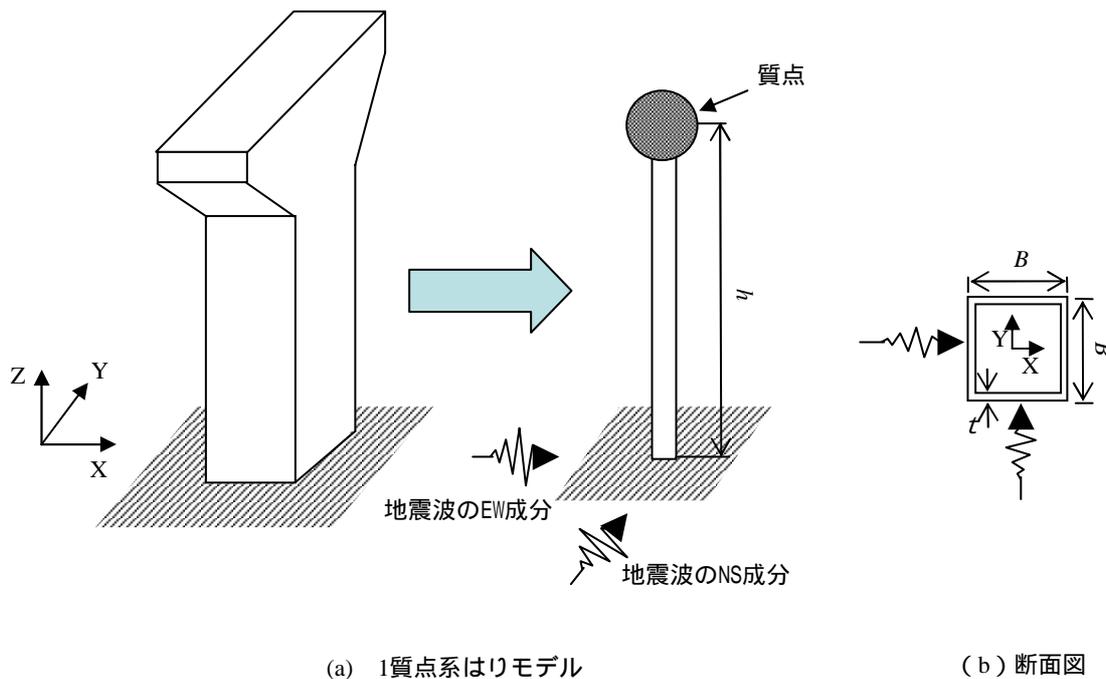


図-1 解析モデル

表-2 橋脚のパラメータ

幅厚比 パラメータ R_f	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	固有周期 T [sec]			軸力比 P/P_y		
		地盤種			地盤種		
0.5	0.2	0.331	0.306	0.293	0.282	0.242	0.220
	0.3	0.495	0.454	0.422	0.211	0.178	0.154
	0.4	0.666	0.608	0.563	0.169	0.141	0.121
	0.5	0.841	0.765	0.707	0.141	0.116	0.099
	0.6	1.018	0.924	0.852	0.121	0.099	0.084
	0.7	1.234	1.084	0.999	0.112	0.087	0.073
	0.8	1.505	1.245	1.146	0.112	0.077	0.065
	0.9	1.756	1.451	1.294	0.108	0.073	0.058

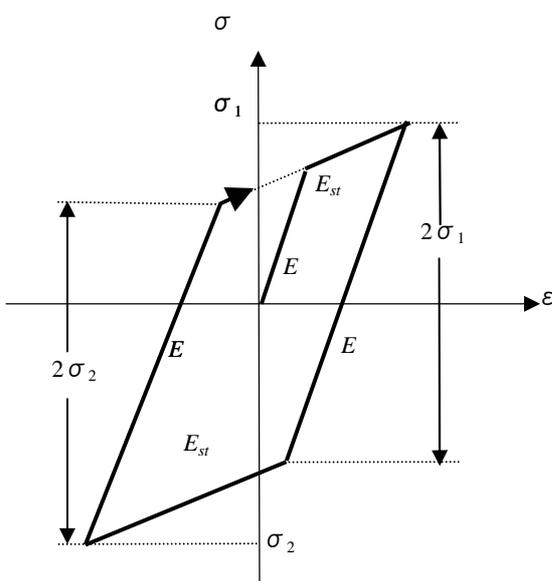


図-2 バイリニア型移動硬化則

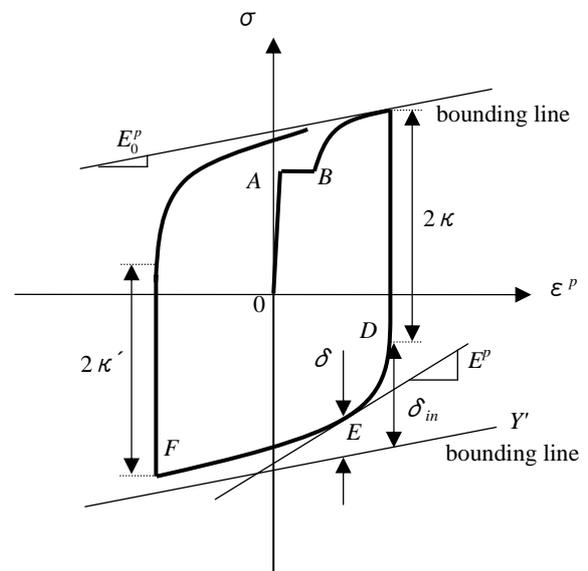


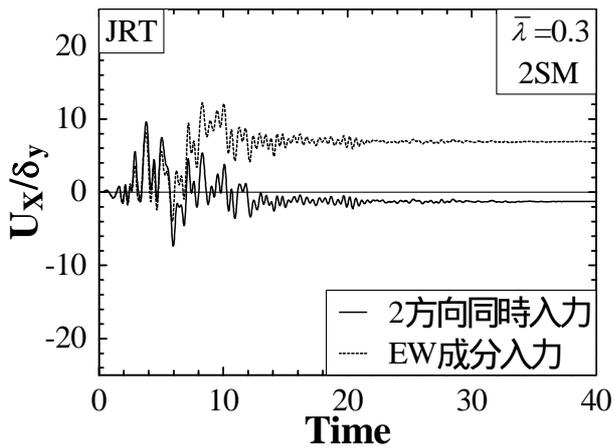
図-3 修正2曲面モデル

(2) 入力地震波

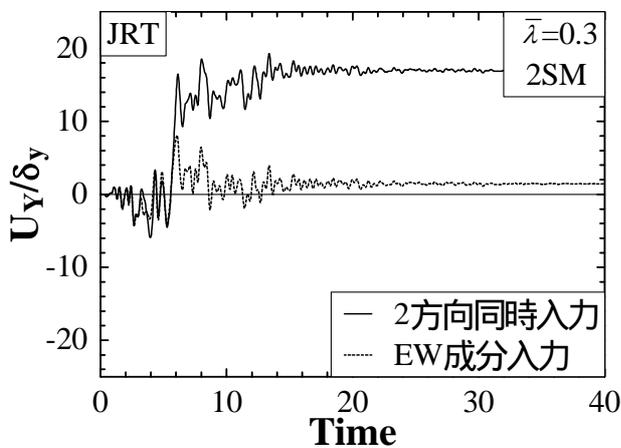
解析に使用する入力地震波は、独立行政法人土木研究所によって提案されている道路橋の動的時刻歴応答解析用標準地震入力波のうちレベル2タイプ2に属するものを用いた。このうち東西方向、南北方向がはっきりとしている波形を用い、種地盤用として神戸海洋気象台（以下 JMA）、種地盤用として JR 警報地震計（鷹取）（以下 JRT）、種地盤用として神戸ポートアイランド（以下 PIS）の以上3種類の地震波を入力地震動として用いた。

(3) パラメトリック解析

ここでは、正方形無補剛箱形断面鋼製橋脚のフランジ幅厚比パラメータを 0.5 に固定し、細長比パラメータを変化させることにより種々の固有周期を有する鋼製橋脚についてパラメトリック解析を行う。表-2 にその具体的な数値をまとめる。なお、想定する固有周期帯は、種地盤の場合 0.3~1.8 秒、種地盤の場合 0.3~1.5 秒、種地盤の場合 0.3~1.3 秒となる。入力地震波の NS 成分および EW 成分、また 2 方向成分の同時入力をそれぞれ対応する地盤種に対して行い、パラメトリック解析を計 243 通り行った。



(a)X 方向



(b)Y 方向

図-4 はり頂部の変位の時刻歴

3. 解析結果

まず、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が 0.3、構成則として修正 2 曲面モデル、地震波として JRT を用いた時の解析結果を、降伏変位 δ_y で無次元化されたはり頂部の変位の時刻歴で図-4 に示す。実線が 2 方向同時入力による応答を、点線が 1 方向単独入力による応答である。

この図より 2 方向同時入力と 1 方向単独入力、X 方向・Y 方向ともにその挙動の周期特性は合っているものの振幅が大きく差が生じている部分が発生している。例えば、X 方向に関して言えば、6 秒付近においてマイナス側に振れるときに大きく異なっており、単独の時には、 $-4\delta_y$ 程度であるものが、2 方向では、 $-8\delta_y$ 程度まででている。このズレには地

震波の EW 成分と NS 成分の周期的な相互関係が密接に関連している。また、X 方向では最大応答変位も残留変位も 1 方向入力の方が小さくなっている。これは地震による Y 方向成分の作用力が、この 6 秒付近で非常に卓越的であり、その結果、Y 方向における変位増分も大きくなっている。ただし、X 方向については、同時刻が揺れ戻しに相当するところであったため、大きな揺れ戻しを誘発し、結果的に X 方向については 2 方向入力した場合には、最大応答変位が小さくなった。残留変位についてもこの大きな変位増分が X 方向については小さくなる方向に働き、Y 方向については大きくなる方向に働いたことが結果から読みとれる。そこで 2 方向同時入力と 1 方向同時入力による応答の違いを包括的に解釈するために、ここでは 2 方向同時入力による X 方向・Y 方向の応答を時刻歴で 2 乗和平方根をとり、その最大応答値を 1 方向単独入力の最大応答変位と比較することとした。

パラメトリック解析を行った結果を横軸に固有周期、縦軸に最大応答変位 $|U|/\delta_y$ をとり、図-5 に示す。ここで、 δ_y は降伏変位である。図は弾性地震応答解析を、JMA を入力とした場合であり、実線で示される 'NS + EW' は地震波の EW 成分・NS 成分の同時入力したときにおける各方向の応答変位をそれぞれ 2 乗して足したものの平方根のうちの最大値をとっており、その他の点線で EW 成分および NS 成分の単独入力による最大応答変位の絶対値を示している。したがって、以上の関係をまとめると次のようになる。

- ・ 2 方向同時入力の時

$$|U| = \text{Max}(\sqrt{U_x^2 + U_y^2}) \quad (1)$$

ここで、 $U_x \cdot U_y$ は X 方向・Y 方向で見たときの応答値である。

- ・ 1 方向単独入力の時

$$|U| = \text{Max}(|U_x| \text{ or } |U_y|) \quad (2)$$

ここで、 $|U|$ は EW 成分・NS 成分とそれぞれ同じ方向の最大応答値である。

この図より、概ね 2 方向同時入力により、断面で見ると、中心からの距離が増幅されていることが分かる。よってどの程度増幅されているか把握するために、構成則、地震波を変えて解析した結果を横軸に固有周期、縦軸に応答スペクトル比 $((NS+EW)/(NS \text{ と } EW \text{ の大きい方}))$ をとったものを図-6 に示す。これらの結果について以下で考察する。

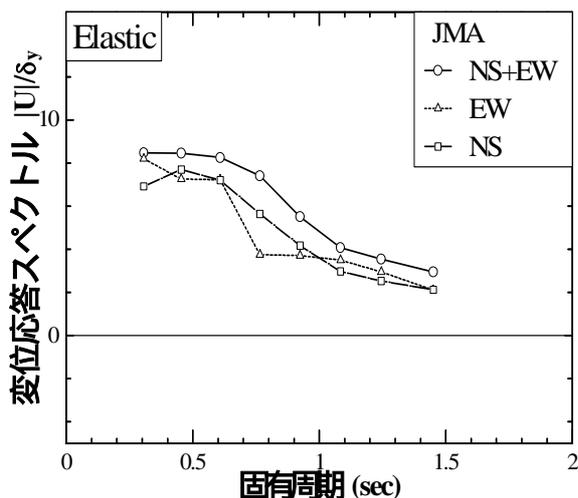


図-5 2方向同時入力による応答の各方向単独入力による応答の違い

(1) 弾性変位応答スペクトル比

構成則が弾性的の場合、図-6(a), (b), (c)から分かるように、どの地震波を用いても応答スペクトルの比が1~1.4に推移している。弾性の時の応答は重ねあわせであるため、2方向同時入力を行っても、X方向・Y方向で見れば1方向単独入力による応答と同じ挙動を示す。2方向同時入力によって、最大で2乗和平方根は40%増加することもあるが、しかし、弾性応答解析時には、本検討で利用した地震動においては最大で固有周期に依存することなく、1方向の最大応答変位を30%増大させることによって、2方向同時入力時の中心からの応答値を予測することができる。

(2) 構成則の違いによる影響

構成則としてバイリニア型移動硬化則を用いた場合と、修正2曲面モデルを用いた場合とで、図-6(d), (g), (e), (h), (f), (i)からわかるように、結果に与える影響はほとんどみられなかった。これは、文献13)でも示しているように、最大応答変位の予測に関しては構成則の違いによる応答値の差異があまりないためである。

(2) 地震波の違いによる影響

a) 神戸海洋気象台地震波 (JMA, 種地盤)

神戸海洋気象台の地震波を入力したときの無補剛箱断面橋脚の応答は図-6(d), (g)から分かるように、固有周期が1.2秒以上の長周期の橋脚は、変位応答スペクトル比が1.4以上となり、部材の塑性域を考慮すると、2方向同時入力による応答が増大す

る。ただし、極端に大きなスペクトル比の領域はなく、弾性応答変位スペクトル比に、他の2波に比べると近い。本解析例で唯一応答スペクトルが1方向の場合に比べて、小さくなる固有周期領域を持っているのが、この地震動を入力したときで、固有周期が0.5秒付近の時である。これは、図-4にも見られるように、X方向成分の地震波の作用によって、Y方向について大きな揺れ戻しが働いたためで、2方向同時入力による応答が1方向入力よりも減少したためである。

b) JR 鷹取駅地震波 (JRT, 種地盤)

JR 鷹取駅の地震波を入力した場合のパラメトリック解析結果を図-6(e), (h)に示す。この地震波は最大加速度が640gal程度で、兵庫県南部地震で観測された中では中程度の地震波であるが、変位応答スペクトル比は固有周期が0.5秒以下の領域で、1.4以上、最大2.8程度に達している。この領域が弾性応答スペクトル比とは特に異なる領域である。このようにJRTは0.5秒以下の短周期の領域で2方向同時入力と1方向単独入力でその応答に大きな相違が生じる。JMAの地震波が最初に非常に大きな加速度があり、その後の加速度があまり大きくないのに対して、JRTは地震開始から約10秒ほど500gal程度の比較的大きな加速度が周期的に作用するといった特徴があり、また地震波のEW成分とNS成分の兼ね合いによって2方向同時入力の効果が大きく表れるということがこのような結果になった原因として考えられる。

c) 神戸ポートアイランド地震波 (PIS, 種地盤)

神戸ポートアイランドの地震波を入力した場合のパラメトリック解析結果を図-6(f), (i)に示す。この地震波による変位応答スペクトル比は他の2つの地震波と比べても大きな値を示している。特に固有周期が0.6~1.0程度の時の比は2以上となっており、増大率は非常に大きなものとなっていることが分かった。

(3) 2乗和平方根の最大値水平分布

ここでは、これまで論じてきた2乗和平方根の最大値が水平面内でどのような分布を示すかということ調べた。図-8に横軸に2乗和平方根が最大値を示す時のX方向応答変位を降伏変位 δ_x で無次元化してとり、同様に縦軸にはY方向応答変位を降伏変位 δ_y で無次元化してとっている。三角の記号がJMA、四角がJRT、丸がPISの地震波を与えた時の結果を

示している．前述した2方向同時入力による応答の増大率では，各地震動によってその推移にはあるパターンがあるということが分かった．この図からも地震波による応答性状の違いを確認した．JMAはどちらかといえば，変位の小さい領域で分布し，JRTについてはNS成分が卓越的であり，PISはEW・NS成分によって平均的に応答している．これが，一概に地震波の特徴を把握するものとは言えないものの，地震波のEW成分・NS成分の相互関係を認識するには非常に簡便なものである．2方向同時入力による効果を検証するためには，方向の卓越性についても検討する必要がある．

(4) 増大率と相関係数

各地震波を用いて2方向同時入力による地震応答解析を行った結果を横軸にX方向の変位を，縦軸にY方向の変位をとって図-7に示す．図の中では図-7(c)のPISが卓越方向に応答していることが分かる．この時の2方向同時入力による増大率は図-6より3程度と非常に大きくなっている．よってこのように卓越方向に変形が進展することと増大率の関係を考慮し，相関係数を調べた．結果として，図-7(a)の場合相関係数は0.53，図-7(b)では0.77，図-7(c)は0.87となった．本例では相関係数の高いものほど，増大率が大きくなる傾向を示しているが，この相関係数の値と増大率との間の関係を今後詳しく検討していく必要がある．

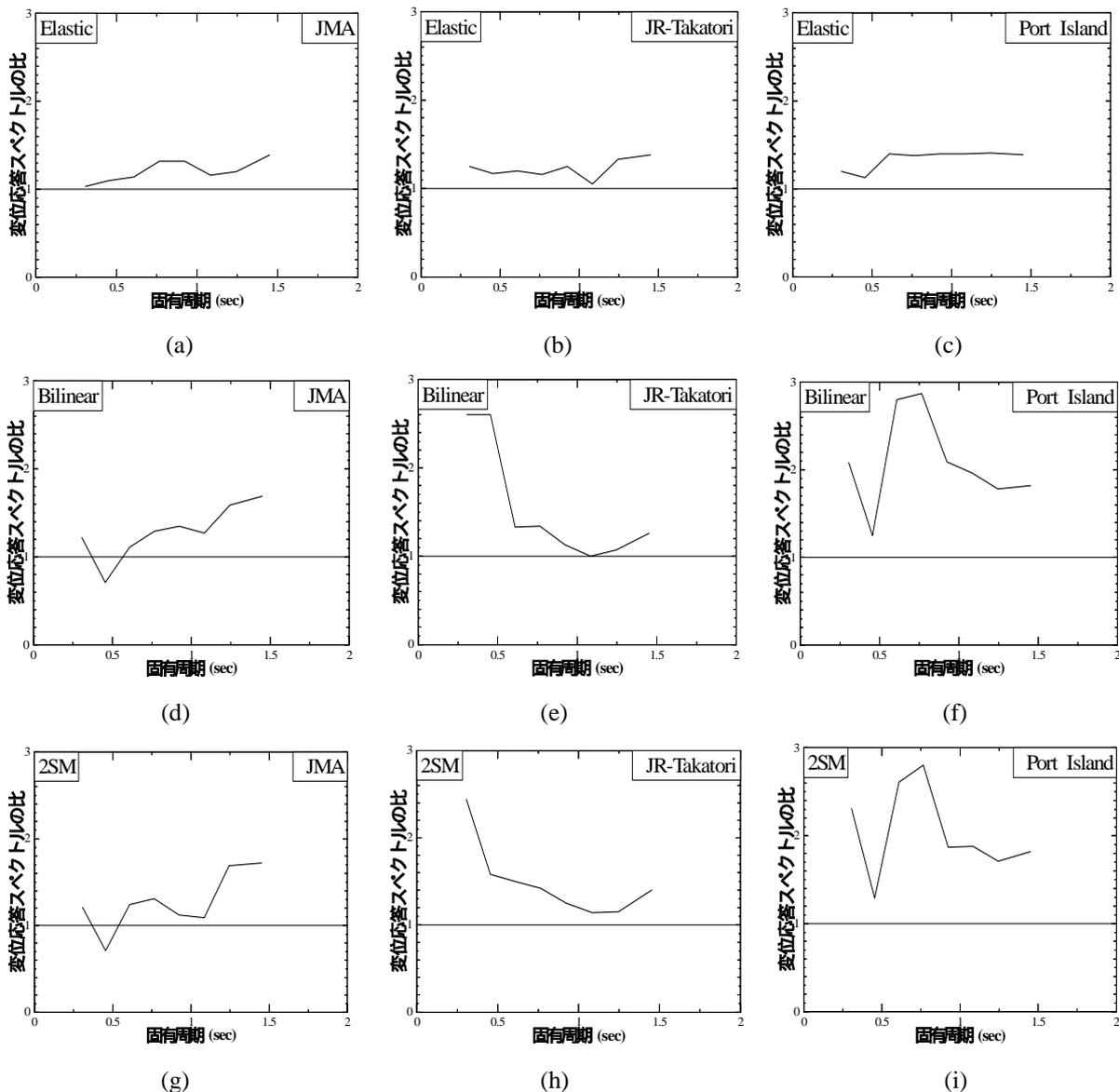
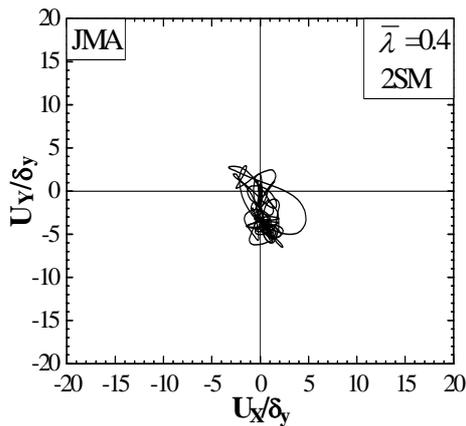
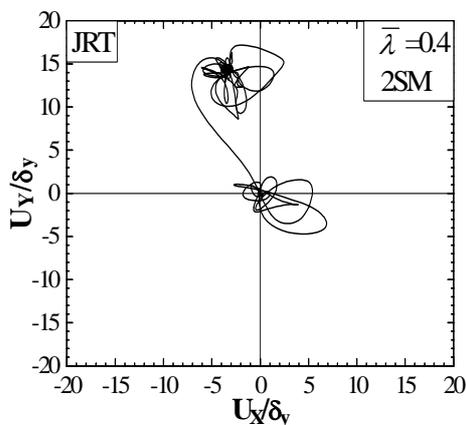


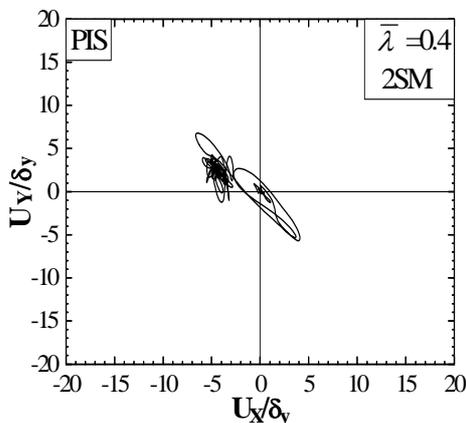
図-6 2方向同時入力による応答の増大



(a)



(b)



(c)

図-7 2方向同時入力によるはり頂部の水平変位

4. 結言

本研究では、兵庫県南部地震の修正地震波である、神戸海洋気象台、JR鷹取駅、神戸ポートアイランドを用いて正方形無補剛箱形断面鋼製橋脚

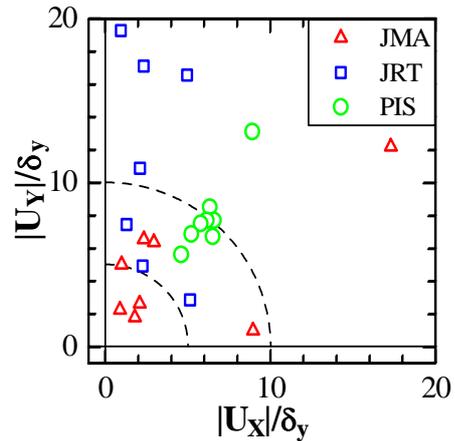


図-8 2方向同時入力による応答の各方向単独入力による応答の違い

の弾塑性地震応答解析を行い、固有周期の相違による鋼製橋脚の挙動の違いについて考察した。本研究で得られた結論の主なものを列挙すると以下のようになる。

- 1) 道路橋示方書に提示されている地震動を入力して固有周期に関するパラメトリック解析を行った結果、弾性的場合、2方向入力時の最大応答合成変位は概ね1方向の最大応答変位の30%増大したものとなる。
- 2) パイリニア型移動硬化則と修正2曲面モデルの両構成則のどちらを用いても、最大変位応答スペクトル比の特徴を掴む上では大差がない。
- 3) 部材の塑性域を考慮した場合、2方向同時入力による応答の増分が30%では済まず、場合によっては180%程度になる場合もあり、1方向入力時の最大応答変位からは予測が難しいことが分かった。また、地震動によって、最大応答変位スペクトル比の増大する領域はある程度限定されていることが判明した。
- 4) 2方向同時入力によって得られた中心からの距離の最大値に相当するX方向およびY方向変位を水平面内でプロットすると、各地震波によって卓越的な方向が存在することが分かった。
- 5) 以上を総括して、これまでの1方向に独立に入力した場合の地震応答性状は2方向の場合と大きく異なる場合があるため、今後の耐震設計法としては2方向同時入力による評価を下す必要があると言える。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説書（Ⅴ 耐震設計編），丸善，2002.3.
- 2) Eiichi Watanabe, Kunitomo Sugiura and Walter O. Oyawa：Effects of Multi-Directional Displacement Paths on the Cyclic Behavior of Rectangular Hollow Steel Columns, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol. 17, No.1, 69s-85s, 2000.
- 3) 朴在泳, 小川淳二, 柴田明德, 渋谷純一：一軸及び二軸水平力を受ける PCa 柱の曲げ強度と靱性, 構造工学論文集, Vol. 42B, pp.181-190, 1996.
- 4) S. N. Bousias, T. B. Panagiotakos and M. N. Fardis：Modelling of RC Members under Cyclic Biaxial Flexure and Axial Force, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 6, No. 2, pp.213-238, 2002.
- 5) 永田聖二, 早川涼二, 川島一彦, 渡辺学歩：ハイブリッド載荷実験に基づく 2 方向地震力を受ける RC 橋脚の耐震性, 第 6 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, pp.57-64, 2003.
- 6) 早川涼二, 川島一彦, 渡辺学歩：2 方向地震力を受ける RC 橋脚の耐震性に関する研究, 第 6 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, pp.65-70, 2003.
- 7) 大西哲広, 青木徹彦, 宇佐美勉, 水野豪, 高原英彰：水平 2 方向荷重を受ける鋼製橋脚の強度と変形能に関する実験的研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.7-8, 2003.
- 8) 高原英彰, K.A.S. Susantha, 宇佐美勉, 葛西昭, 青木徹彦：2 方向水平力を受ける鋼製橋脚の弾塑性挙動, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.9-10, 2003.
- 9) European Committee for Standardization：European Prestandard, Eurocode 8-Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 2-Bridges, 1994.
- 10) 日本建築学会：地震荷重-その現状と将来の展望, pp.132-134, 1987.
- 11) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver 6.3, 2003.
- 12) Shen, C., Mamaghani, I.H.P., Mizuno, E. and Usami, T.: Cyclic Behavior of Structural Steels. : Theory, J. of Eng. Mech., ASCE, Vol.121, No.11, pp.1165-1172, 1995.
- 13) (社)土木学会・(社)日本鋼構造協会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化, 2000.

(2003.6.30.受付)

Elasto-Plastic Dynamic Analysis of Steel Bridge Piers Subjected to Bi-Directional Horizontal Earthquakes

Seiichiro OKAZAKI, Tsutomu USAMI and Akira KASAI

This study provides the fundamental data in order to establish a seismic design code for steel bridge piers subjected to bi-directional external force. For this purpose, elasto-plastic seismic response analysis subjected to bi-directional large earthquake motion was carried out. As a result of the parametric study on the natural periods, it is obtained that the maximum response displacement of the pier in the case of bi-direction can be amplified about 3 times as much as that of uni-direction. Finally, a directivity of earthquake wave is discussed.