水平2方向地震動の軌跡特性が 構造物の2方向弾塑性応答に及ぼす影響

井上 和真¹・渡辺 和明²・五十嵐 晃³

¹正会員 大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1新宿センタービル)

E-mail: inukzm00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 原子力本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1新宿センタービル)

E-mail: kwatanab@ce.taisei.co.jp

³正会員 京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

本研究では、3次元地震応答解析による耐震設計・耐震性能照査に用いる水平2方向の設計用地震動を合理的に設定するために、水平2方向地震動の軌跡特性が構造物の弾塑性応答に及ぼす影響について検討した。まず、従来の振幅調整によるスペクトル適合法を2次元に拡張し、観測記録の実位相を用いた2方向スペクトル適合波の作成法を提案した。次に、構造物への入力エネルギー量を定量的に評価するために、従来のエネルギースペクトルを2次元に拡張し、水平2方向地震動の軌跡特性と地震応答の関係を調べた。更に、2軸非線形の地震応答が考慮できる構造モデルを用いた漸増動的解析 (IDA) を行った。その結果、水平2方向地震動として円形軌跡とした場合に、観測記録の実位相による軌跡などに比べて、構造物の弾塑性応答が大きくなる傾向が確認された。

Key Words : *bi-axial response spectrum, bi-axial energy spectrum, acceleration trajectory, spectrum-compatible accelerograms, elastic-plastic seismic response*

1. はじめに

近年の目覚ましいコンピュータの演算処理能力の発達により、様々な現象に対するモデリング技術も飛躍的に向上している。地震工学・耐震工学においては、堀・市村らの研究グループのように、統合地震シミュレータを用いて断層から都市域までをモデル化した大規模地震応答解析¹⁾が行われたり、広さ8.0×7.5kmの領域の約25万棟の建物をモデル化し、多数の地震シナリオに対する都市被害想定へのHPCの適用性を検討²⁾している例もある。このように、一昔前では考えられない様な大規模モデルによる地震応答解析を行える解析環境が整いつつある。

一方で、多次元性を考慮した実験に目を向けると、荻本らはRC単柱橋脚を対象に水平2方向加振によるハイブリッド載荷実験を行い、2方向加振の場合、1方向加振時と比べて損傷が大きく、最大耐力が低下する傾向を示した³⁾。また、党らは、正方形断面鋼製橋脚に対して水平2方向載荷のハイブリッド実験を行い、荻本らのRC単柱における成果と同様の傾向を示した⁴⁾。このように、従来の耐震設計で想定する1方向入力とした場合よりも、

水平2方向入力とした場合に、土木構造物の地震応答特性に違いが見られることが既往の実験で確認されている。

このように、解析環境の向上や実験データの蓄積により、水平2方向入力による3次元地震応答解析を用いた耐震設計・耐震性能照査の環境が整いつつあるが、水平2次元の地震時挙動における入力と応答の關係に着目した研究は少なく、水平2方向入力による耐震設計・耐震性能照査体系の構築にあたっては、この入力と応答の關係を整理することは重要な課題である。

著者らはこれまでに耐震設計・耐震性能照査における水平2方向入力の設定法に着目した研究を行っている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。従来の水平1方向入力における設計用地震動の考え方を踏襲し、設計用の応答スペクトル適合波による水平2方向地震動の設定を基本方針としている。応答スペクトルによって設計用地震動を定義することは、震源断層モデルによって作成されるサイト波とは異なり、簡易な1質点系の構造モデルの応答特性を加味して地震動が定義されることを意味する。一般に、スペクトル適合波の設定においては、対象構造物の応答特性は考慮されない。そのため、曲線橋や不整形地盤中の地中構造物な

ど、非対称な構造物の設計・照査では設定された地震動の入力角度を変化させ、その影響を反映させる必要がある。これまで提案した水平2方向入力、実際の地震動が持つ複雑な軌跡では無く、1方向のスペクトル適合波を基準に、直交成分の位相を調整しているため、円形や楕円形の加速度軌跡としていた。このような加速度軌跡となる2方向入力は、目標とする2方向応答スペクトルに適合しているため、一定の入力強度を有しているが、実際の地震動が有する複雑な加速度軌跡による入力と地震応答への影響をより定量的に分析する必要がある。

本研究では、まず、2方向応答スペクトルに適合した複雑な加速度軌跡を有する地震動を作成するため、従来の1次元の振幅調整によるスペクトル適合法を2次元に拡張し、目標とする2方向応答スペクトルへの適合法を提案した。提案手法は、水平直交2成分の振幅調整を行い、目標とする応答スペクトルに適合させるため、観測記録などの原波の位相特性を保持することが出来る。

続いて、地震動の構造物への入力エネルギーを評価できるエネルギースペクトル⁸⁾について、従来の1次元から2次元に拡張した2方向エネルギースペクトルを提案した。これを用いて、同一の2方向応答スペクトルに適合した2方向入力についても、加速度軌跡の違いによる2方向エネルギースペクトルの変化を分析した。

更に、構造物の2軸非線形を考慮できるMSSモデルやファイバーモデルを用いた水平2方向入力による漸増動的解析を行い、様々な振幅レベルにおける入力地震動の加速度軌跡が構造モデルの弾塑性応答に及ぼす影響について調べた。ここで、MSSモデルは並進の自由度のみ有する1質点系2自由度モデルであること、塑性変形が進んでも荷重-変位関係が負勾配にならない簡易なモデルである。ファイバーモデルは、MSSモデルに比べ、並進と回転を考慮した多自由度モデルで、RCのコンクリートおよび鉄筋の非線形挙動を考慮できるより精緻なモデルである。なお、ファイバーモデルによる検討は、荻本ら³⁾や党ら⁴⁾の水平2方向加振実験のように、単柱式橋脚を対象としている。

2. 2方向応答スペクトルに適合した2方向入力

(1) 2方向応答スペクトル

時間を t 、水平面を x - y 座標系で定義した場合に、与えられた2方向入力に対する固有周期 T を変数にした等方な2次元線形弾性1質点振動子(図-1)の水平2次元応答値の x 方向成分、 y 方向成分の応答値を $d_x(T, t)$ 、 $d_y(T, t)$ とする。水平2次元応答の動径方向の最大値 $S_{rd}(T)$ と、固有周期 T の関係を2方向応答スペクトルと呼び、この定義を式(1)に示す。また、2方向応答スペクトルの例として、減衰

図-1 2次元線形弾性1質点振動子

図-2 2方向応答スペクトルの例 (JMA神戸の観測記録)

比 h は0.05とした場合の1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の観測記録の2方向加速度応答スペクトルとNS成分、EW成分の加速度応答スペクトルを図-2に示す。

$$S_{rd}(T) = \max_t \sqrt{d_x(T, t)^2 + d_y(T, t)^2} \quad (1)$$

(2) 既往の2方向応答スペクトルに適合した2方向入力

既往の2方向応答スペクトルに適合した2方向入力の作成法として、設計・照査用の応答スペクトルに適合した標準波とその標準波のヒルベルト変換により求まる相補直交成分波の組合せを用いる手法が提案されている⁵⁾。また、相補直交成分波に楕円偏極指標を導入し、相補直交成分波の振幅を調整した水平2方向入力の作成法も検討されている⁶⁾。これらの2方向入力地震動の作成法は、水平直交2成分のうちの1成分を標準波とし、その直交方向は標準波にヒルベルト変換を適用した加速度波形であり、水平直交2成分間の加速度波形の位相差は全ての周波数で 90° となる。そのため、それらの2方向入力の加速度軌跡は円形あるいは楕円形なものになる。この場合、標準波の1方向入力の応答スペクトルと2方向入力の2方向応答スペクトルは、ほぼ同一となる。特に、1方向入力を基準・指針等で定義された設計・照査用スペクトル適合波とした場合、そのヒルベルト変換波との2方向応答スペクトルは、1方向の設計・照査用の応答スペクトルと一致する。そのため2方向応答スペクトルの入力強度は従来の設計・照査用の応答スペクトルと等価になる。

(3) 複雑な加速度軌跡の2方向応答スペクトル適合波の作成法

実際の地震動のような複雑な加速度軌跡を持つ2方向応答スペクトル適合波の作成は、互いに直交する2つの単振動が描く平面図形(リサーチ図形)の考え方に基づいており、直交する2つの単振動が同じ振動数で、かつ位相差を有していれば、2つの単振動が描く軌跡が楕円形になることに着目したスペクトル適合法⁷⁾である。提案するスペクトル適合法には、楕円の長軸長を2方向応答スペクトルの大きさとみなし、2方向応答スペクトルの適合度に応じて楕円の長軸長を修正し、適合条件を満足するまで繰り返し計算するものであり、従来の1次元の振幅調整によるスペクトル適合法⁹⁾を2次元に拡張したものと言える。

著者らは過去にリサーチ図形の概念に基づいて、2方向入力それぞれの成分の目標となる1方向応答スペクトルに適合し、かつ、目標の水平2方向応答スペクトルに適合する方法⁷⁾を示しているが、今回の手法では、目標となる応答スペクトルは2方向応答スペクトルのみであり、それぞれの1方向の応答スペクトルの大きさには制約を設けていない。また、目標となる2方向応答スペクトルへの適合の際に、水平直交2方向地震動の位相を調整する方法も考えられるが、本手法では原波の持つ複雑な軌跡特性を保持するために、振幅のみを調整し、観測波の実位相をそのまま適用するものとする。

地震動の観測記録など、工学的に関連のある水平直交2成分の加速度時刻歴を $x(t)$, $y(t)$ とし、これらを三角関数を用いて表記すると、

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cos(2\pi f_k t + \phi_{x-k}) + \frac{a_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t \quad (2)$$

$$y(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \sqrt{c_k^2 + d_k^2} \cos(2\pi f_k t + \phi_{y-k}) + \frac{c_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_{N/2} t \quad (3)$$

$k=1 \sim N/2-1$ までのある振動数 f_k に着目すると、

$$x_k(t) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cos(2\pi f_k t + \phi_{x-k}) = A_k \cos(2\pi f_k t + \phi_{x-k}) \quad (4)$$

$$y_k(t) = \sqrt{c_k^2 + d_k^2} \cos(2\pi f_k t + \phi_{y-k}) = B_k \cos(2\pi f_k t + \phi_{y-k}) \quad (5)$$

となり、 $x_k(t)$, $y_k(t)$ を同時入力すると、水平面内で楕円軌跡を描く。振動数 f_k における、楕円軌跡の軸方向 θ_k は

$$\tan 2\theta_k = \frac{2A_k B_k}{A_k^2 - B_k^2} \cos(\phi_{y-k} - \phi_{x-k}) \quad (6)$$

より、位相差を $\delta_k = \phi_{x-k} - \phi_{y-k}$ とおいて、

$$\theta_k = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2A_k B_k}{A_k^2 - B_k^2} \cos \delta_k \right) \quad (7)$$

となる。直交する2つの楕円軸の長さを l_{1k} , l_{2k} とすると、

$$l_{1k} = \sqrt{A_k^2 \cos^2 \theta_k + B_k^2 \sin^2 \theta_k + 2A_k B_k \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k} \quad (8)$$

$$l_{2k} = \sqrt{A_k^2 \sin^2 \theta_k + B_k^2 \cos^2 \theta_k - 2A_k B_k \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k} \quad (9)$$

楕円軸 l_{1k} , l_{2k} の2つのうち、長い方が楕円の長軸の長さ $l_{\max,k}$ 、短い方が楕円の長軸に直交する楕円の短軸の長さ $l_{\min,k}$ となる。

$$l_{\max,k} = \max(l_{1k}, l_{2k}) \quad (10)$$

$$l_{\min,k} = \min(l_{1k}, l_{2k}) \quad (11)$$

図-3に振幅 A_k , B_k と楕円の長軸長 $l_{\max,k}$ の関係を示す。

図-3に示すように、 $x_k(t)$ と $y_k(t)$ の間で位相差を有していることから、振幅 A_k , B_k と楕円の長軸長 $l_{\max,k}$ の間で、三平方の定理の関係は成立しない。従来の1方向の応答スペクトルへの適合手法における振幅修正と同様に、楕円の長軸を2方向応答スペクトルのスペクトル適合度で除すことで、修正した振幅を算出する。水平直交2成分の加速度時刻歴を $x(t)$, $y(t)$ から算出される2方向加速度応答スペクトルを $S_{Rd}(T)$ 、目標となる2方向加速度応答スペクトルを $DS_R(T)$ とすると、2方向応答スペクトルの適合度 $\gamma_R(T)$ は、

$$\gamma_R(T) = \frac{S_{Rd}(T)}{DS_R(T)} \quad (12)$$

となる。このスペクトル適合度を周波数領域 γ_{RK} で表し、現状の楕円の長軸長 $l_{\max,k}$ を2方向応答スペクトルの適合度 γ_{RK} で除すことで、修正された楕円の長軸長 $l_{\max_new,k}$ を算出することが出来る。

$$l_{\max_new,k} = \frac{l_{\max,k}}{\gamma_{RK}} \quad (13)$$

式(13)の関係を、楕円の長軸の式(8)あるいは式(9)に代入すると、

$$l_{\max_new,k} = \frac{\sqrt{A_k^2 \cos^2 \theta_k + B_k^2 \sin^2 \theta_k + 2A_k B_k \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k}}{\gamma_{RK}} \quad (14)$$

$$l_{\max_new,k} = \frac{\sqrt{A_k^2 \sin^2 \theta_k + B_k^2 \cos^2 \theta_k - 2A_k B_k \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k}}{\gamma_{RK}} \quad (15)$$

式(14), 式(15)を変換すると

$$l_{\max_new,k} = \sqrt{\frac{A_k^2}{\gamma_{RK}^2} \cos^2 \theta_k + \frac{B_k^2}{\gamma_{RK}^2} \sin^2 \theta_k + 2 \frac{A_k B_k}{\gamma_{RK} \gamma_{RK}} \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k} \quad (16)$$

$$l_{\max_new,k} = \sqrt{\frac{A_k^2}{\gamma_{RK}^2} \sin^2 \theta_k + \frac{B_k^2}{\gamma_{RK}^2} \cos^2 \theta_k - 2 \frac{A_k B_k}{\gamma_{RK} \gamma_{RK}} \cos \theta_k \sin \theta_k \cos \delta_k} \quad (17)$$

式(8), 式(9)と式(16), 式(17)を比較すると、楕円の長軸長の修正は振幅 A_k , B_k をスペクトル適合度 γ_{RK} で除すのみで済み、実際の計算の流れでは、楕円軌跡の軸方向 θ_k や楕円の長軸 $l_{\max,k}$ の計算は不要であることが示された。よって、修正した振幅をそれぞれ $A_{new,k}$, $B_{new,k}$ とすると式(18), (19)のように表すことができる。

図-3 各振動数成分における振幅と楕円長軸のイメージ図

図-4 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の加速度軌跡

図-5 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の
2方向応答スペクトル適合波

図-6 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の
応答スペクトル (スペクトル適合前)

図-7 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の
応答スペクトル (スペクトル適合後)

$$A_{new_k} = A_k / \gamma_{Rk} \quad (18)$$

$$B_{new_k} = B_k / \gamma_{Rk} \quad (19)$$

$k=1 \sim N/2-1$ までのある振動数 f_k の単振動の単振動は

$$x_{new_k}(t) = A_{new_k} \cos(2\pi f_k t + \phi_{x_k}) \quad (20)$$

$$y_{new_k}(t) = B_{new_k} \cos(2\pi f_k t + \phi_{y_k}) \quad (21)$$

となり、式(18)、式(19)の処理をスペクトル適合度を満足するまで繰り返す。

この手法における作成例として、1995 年兵庫県南部地震における JR 鷹取駅構内地盤上観測波を原波として、道路橋示方書のレベル 2 地震動タイプ II の II 種地盤の標準加速度応答スペクトル S_{10}^{10} を目標とする 2 方向応答スペクトルとした。応答スペクトルの適合条件は、原子力発電所耐震設計技術指針¹⁰⁾を参考に、目標とする応答スペクトルとの比の最小値が 0.85 以上であること、目標とする応答スペクトルとの SI 比が 1.0 以上あることを判定基準とした。図-4 に本計算例の原波である兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の加速度軌跡を、図-5 に提案した手法による 2 方向スペクトル適合波の加速度軌跡を示す。また、兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波のスペクトル適合前後の応答スペクトルを図-6、図-7 にそれぞれ示す。図-6、図-7 に示すように、2 方向応答スペクトルの形状が変化し、最終的には良好な適合がなされていることが確認できる。

(4) 加速度軌跡の異なる 2 方向応答スペクトル適合波

道路橋示方書¹⁰⁾に示されるレベル 2 地震のタイプ II の II 種地盤の兵庫県南部地震 JR 鷹取駅構内地盤上 NS 成分の振幅調整波 (以下、II-II-1 波) とその応答スペクトルを基本とし、同一の 2 方向応答スペクトルに適合する 4 ケースの入力地震動を表-1 に示す。この 4 ケースの地震動を 3 章、4 章、5 章の検討で用いる 2 方向入力とする。図-8 から図-11 に各ケースの加速度軌跡を、図-12 に各ケースの 2 方向加速度応答スペクトルを、図-13 に各ケースの 2 方向変位応答スペクトルを重ね書きした図を示す。図-12、図-13 に示されるように、各ケースの 2 方向

応答スペクトルはほぼ等しいことがわかる。また、図-14 から図-17 に各ケースにおける水平直交 2 成分の応答スペクトルと 2 方向応答スペクトルを示す。

表-1 入力地震動のケース一覧

ケース	入力の 加速度 軌跡	成分	地震動	振幅 倍率
Case 1	斜め 入斜	x	II-II-1波	$1/\sqrt{2}$
		y	II-II-1波	$1/\sqrt{2}$
Case 2 ⁵⁾	円形	x	II-II-1波	1.0
		y	II-II-1波の 相補直交成分波 (ヒルベルト変換波)	1.0
Case 3 ⁶⁾	楕円形	x	II-II-1波	1.0
		y	II-II-1波の 相補直交成分波 (ヒルベルト変換波)	0.3
Case 4	実位相	x	JR鷹取駅観測波 EW成分の振幅調整波	1.0
		y	JR鷹取駅観測波 NS成分の振幅調整波	1.0

図-10 Case 3 (楕円形軌跡) の加速度軌跡

図-11 Case 4 (実位相) の加速度軌跡

図-8 Case 1 (斜め入射) の加速度軌跡

図-12 各ケースの 2 方向加速度応答スペクトル

図-9 Case 2 (円形軌跡) の加速度軌跡

図-13 各ケースの 2 方向変位応答スペクトル

図-14 Case 1 (斜め入射) の応答スペクトル

図-15 Case 2 (円形軌跡) の応答スペクトル

図-16 Case 3 (楕円軌跡) の応答スペクトル

図-17 Case 4 (実位相) の応答スペクトル

3. 2方向エネルギースペクトルによる2方向応答スペクトル適合波の評価

(1) エネルギースペクトル

エネルギースペクトルとは、1 質点弾性減衰系への入力エネルギー E の速度換算値 V_E を各固有周期に対して求めたものである。

$$V_E = \sqrt{2E/m} \quad (22)$$

ここに、 E : 入力エネルギー、 m : 質点質量

構造物への入力エネルギーは構造物の復元力特性、質量分布や剛性分布の影響を受けず、主に構造物の総重量や固有周期に依存することが知られている。具体的な算出方法として、1 次元線形弾性 1 質点振動子を対象にした運動方程式を式(23)とすると、

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f(x) = -m\ddot{x}_0 \quad (23)$$

ここに、 $c\dot{x}$: 減衰力、 $f(x)$: 復元力、

$-m\ddot{x}_0$: 地震力、 x_0 : 水平地動、

x : 質点の地面に対する相対変位

式(23)の両辺に、相対変位増分 $dx = \dot{x}dt$ を乗じて地震動の継続時間 t_0 に渡って積分すると、エネルギーの釣り合い式となり、式(24)のように表される。

$$\begin{aligned} m \int_0^{t_0} \ddot{x} \dot{x} dt + c \int_0^{t_0} \dot{x} \dot{x} dt + \int_0^{t_0} f(x) \dot{x} dt \\ = -m \int_0^{t_0} \ddot{x}_0 \dot{x} dt \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)の左辺の第一項目からそれぞれ、弾性振動エネルギー、減衰によるエネルギー吸収量、累積塑性ひずみエネルギーであり、これらの和が右辺である入力エネルギー E と等しいというものである。

$$E = -m \int_0^{t_0} \ddot{x}_0 \dot{x} dt \quad (25)$$

固有周期 T としたときの、応答速度時刻歴 $\dot{x}(=dx/dt)$ を算出し、入力加速度 $\ddot{x}_0$ との積を dt で積分すると、固有周期ごとに総エネルギー入力が算出され、これを総エネルギー換算速度に置き換えることにより、速度の次元を持つエネルギースペクトルを算出することができる。

(2) 2方向エネルギースペクトル

水平面を $x-y$ 座標系で定義した場合の 2 次元線形弾性 1 質点振動子に水平 2 方向入力をした際の運動方程式は、式(26)のように表すことが出来る。

$$M \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} + C \frac{d\mathbf{r}}{dt} + \mathbf{F} = -M\ddot{\mathbf{r}}_0 \quad (26)$$

ここに、

$$M = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_0 = \begin{pmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{y}_0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y$$

M : 質量マトリックス, C : 減衰マトリックス,
 $\mathbf{F}$: 復元力ベクトル, $\mathbf{r}_0$: 水平地動ベクトル
 $\mathbf{r}$: 位置ベクトル, $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$: 単位ベクトル
である。

1次元のエネルギースペクトルの算出過程と同様に,
式(26)の両辺に相対変位増分ベクトル $d\mathbf{r} = \dot{\mathbf{r}} dt$ を乗じ
て地震動の継続時間 t_0 に渡って積分すると, 2次元のエ
ネルギーの釣り合い式となり, 式(27)のように表される。

$$\begin{aligned} m \int_0^{t_0} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt + c \int_0^{t_0} \frac{d\mathbf{r}}{dt} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt + \int_0^{t_0} \mathbf{F} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt \\ = -m \int_0^{t_0} \ddot{\mathbf{r}}_0 \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)の右辺に着目して x 成分と y 成分で表記すると

$$\begin{aligned} -m \int_0^{t_0} \mathbf{r}_0 \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt \\ = -m \int_0^{t_0} (\ddot{x}_0 \dot{x} + \ddot{y}_0 \dot{y}) dt \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} = -m \int_0^{t_0} \ddot{x}_0 \dot{x} dt - m \int_0^{t_0} \ddot{y}_0 \dot{y} dt \\ E_x = -m \int_0^{t_0} \ddot{x}_0 \dot{x} dt \end{aligned} \quad (29)$$

$$E_y = -m \int_0^{t_0} \ddot{y}_0 \dot{y} dt \quad (30)$$

とすると, 2次元性を考慮した全入力エネルギーは, 式
(31)に示すように, x 方向と y 方向の入力エネルギーの和
で示すことが出来る。

$$E = E_x + E_y \quad (31)$$

1次元の場合と同様に 2次元のエネルギースペクトルを
換算速度で表すと

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} = \sqrt{\frac{2(E_x + E_y)}{M}} \quad (32)$$

となる。図-18に2.4)の4ケースの2方向入力に対して,
式(32)で算出した2方向エネルギースペクトルを示す。
なお, 2方向エネルギースペクトルを算出する際の減衰
定数は10%とした¹²⁾。2方向応答スペクトルが同一であ
っても, 加速度軌跡の違い, x 方向と y 方向の両成

図-18 各ケースの2方向エネルギースペクトル

分の入力加速度が大きいこと, また, それに伴う応答速
度が大きいことにより, Case 2の入力エネルギーは, 他
のケースに比べて大きいことがわかる。

4. 水平2方向地震動の軌跡特性がMSSモデルの弾 塑性応答に及ぼす影響

(1) 解析条件

対象とする解析モデルは, 構造物の水平2方向の応答
特性を評価するために, 8本のせん断ばねで構成された
MSS(Multi Shear Spring)モデルによる簡便な1質点系モデ
ルとした。図-19にMSSモデルの概要図を示す。表-2に
示すような弾性固有周期の異なる3種類の解析モデルを
設定した。なお, MSSモデルは, 図-20に示すようなバ
イリニア型の履歴特性を有するばねを等間隔に配置する
ことで, 水平2方向の非線形応答に相関性を持たせるこ
とができる。本検討のように各ばねを図-20に示すバイ
リニア型でモデル化すると, 複数のばねの降伏するタイ
ミングが異なることでMSSモデルの全体挙動としては図
-21に示すような明確な降伏点を持たない復元力特性と
なる。本検討では, MSSモデルを構成するのせん断ばね
は二次剛性比0.05のバイリニア型の弾塑性モデルとした。
また, 本検討で用いたMSSモデルは並進のみの自由度を
有するため, MSSモデルを構成するばねを弾性モデルと
すると, 2方向応答スペクトルを算出するモデルと一致
する。本検討に用いるモデルのパラメーターは参考文献
6)を参考に設定した。MSSモデルの諸元を表-2に示す。
入力地震動は, 2.4)に示されるCase1からCase4の4ケー
スの水平2方向入力とした。また, 地震動入力の振幅を
徐々に増加させながら非線形動的解析を行う漸増動的解
析¹³⁾ (IDA, Incremental Dynamic Analysis)を行い, 各入力
地震動ケースにおける最大応答変位に関するIDA曲線
(横軸に最大応答変位, 縦軸に振幅倍率 (S.F)) を作
成した。

図-19 MSSモデルの概要図

表-2 MSSモデルの諸元

質量(t)	50		
重量(kN)	490.5		
降伏力(kN)	245.3		
減衰	0.05		
2次剛性比	0.05		
弾性固有周期 T (s)	0.4	1.0	1.8
初期剛性(kN/m)	12337	1974	609
降伏変位(mm)	19.9	124.2	402.6

図-20 MSSモデルの構成する各せん断ばねの荷重-変位関係

図-21 MSSモデル全体の荷重-変位関係

(2) 解析結果

表-3に解析結果として、各ケースの最大応答変位を示す。各ケースの2方向入力が同一の2方向応答スペクトルに適合しているため、MSSモデルを弾性とした場合の最大応答変位は、ほぼ同一の値となっている。MSSモデルを弾塑性モデルとした場合の最大応答変位は、各ケースで最大応答が異なり、いずれの弾性固有周期の場合でもCase2(円形軌跡)を入力とした場合が最大応答変位が大きい結果となった。

図-22から図-25に弾性固有周期1.0秒とした場合の弾性、弾塑性モデルに対する応答変位軌跡を示す。MSSモデルを弾性、弾塑性モデルとした場合で、応答変位軌跡の特徴が異なることがわかる。

また、図-26から図-28に各弾性固有周期に対する最大応答変位のIDA曲線を示す。最大応答変位が降伏変位以下となる振幅レベルでは、弾性挙動のため最大応答変位が各地震動ケースごとで等しい。最大応答変位が降伏変位以上となる振幅レベルでは、各ケースの最大応答変位のIDA曲線が交差することも見られるが、おおむねCase2

の円形軌跡を入力とした場合に、最大応答変位が最大となる傾向が見られた。これは、3.(2)で示した各ケースの2方向エネルギー応答スペクトルの大小関係が、最大応答変位の傾向として表れている。また、弾性固有周期1.0秒のモデルにおいて、振幅倍率1.5以上の範囲に着目すると、Case2よりもCase1やCase3の最大応答変位が大きくなる傾向が見られる。これについては、水平2方向入力による2方向弾塑性挙動の更なる分析が必要と考えられる。ただし、危機耐性の観点から見れば、2方向入力による漸増動的解析による耐震設計・照査の必要性が示される結果となった。

表-3 最大応答変位一覧

ケース	入力の加速度軌跡	構造モデル	最大応答変位 (cm)		
			弾性固有周期0.4(sec)	弾性固有周期1.0(sec)	弾性固有周期1.8(sec)
Case1	斜め入射	弾性	7.0	44.0	73.0
		弾塑性	7.3	43.1	59.1
Case2	円形	弾性	7.1	45.8	74.2
		弾塑性	10.0	50.8	81.0
Case3	楕円形	弾性	7.0	44.0	73.0
		弾塑性	7.8	44.6	58.1
Case4	実位相	弾性	7.0	40.9	74.0
		弾塑性	6.2	39.1	67.1

図-22 Case1の応答変位軌跡 (弾性固有周期: 1.0秒)

図-23 Case2の応答変位軌跡 (弾性固有周期: 1.0秒)

図-24 Case 3 の応答変位曲線 (弾性固有周期: 1.0 秒)

図-28 最大応答変位の IDA 曲線 (弾性固有周期: 1.8 秒)

図-25 Case 4 の応答変位軌跡 (弾性固有周期: 1.0 秒)

図-26 最大応答変位の IDA 曲線 (弾性固有周期: 0.4 秒)

図-27 最大応答変位の IDA 曲線 (弾性固有周期: 1.0 秒)

5. 水平2方向地震動の軌跡特性がファイバーモデルの弾塑性応答に及ぼす影響

(1) 解析条件

解析モデルは、橋梁の上部構造と円形断面のRC橋脚の1本柱を取り出したようなモデルを対象とする。モデル底面から上部構造を模擬した質点までをファイバー要素と線形はり要素で合わせて10等分したモデルとし、それぞれの要素長を1.0mあるいは2.0mとすることで、モデルの高さが10mと20mとなる2ケースのモデルを対象とした(図-29)。モデルはNEXCO三社の設計要領第二集橋梁建設編¹⁴⁾を参考に、モデル下部のフーチングとモデル上部桁部は線形はり要素で剛域を設けた。また、塑性変形が発生すると予想される橋脚基部をファイバー要素でモデル化をした。高さ10mと20mのモデルのそれぞれのモデルの弾性固有周期は約0.4秒、約1.2秒である。ファイバー要素部分は、材料非線形性を考慮し、コンクリートおよび鉄筋の非線形性を考慮している。ファイバー要素部の断面分割を図-30に、本解析用に設定した物性値を表-4に示す。RC断面の諸元は参考文献の15)を参考に設定し、2.0mの円形断面に、鉄筋は降伏強度345N/mm²としたD35の鉄筋を2段で36本ずつ、円周状に配置している。コンクリートの圧縮強度は30N/mm²として、圧縮側の応力-ひずみ曲線はコンクリート標準示方書設計編¹⁶⁾を参考に設定し、引張側の強度は見込んでいない。鉄筋は、降伏強度345N/mm²としたバイリニア型の応力-ひずみ関係とし、降伏剛性は初期剛性の1/1000とした。解析に用いたコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係をそれぞれ図-31、図-32に示す。

なお、本モデル底面の境界条件は基礎固定しており、逸散減衰が考慮されないため、2.(4)で示す水平2方向入力をもそのまま用いると、構造モデルに対して非常に大きな入力となる。そこで、IDAにおける振幅倍率は0.1から開始し、コンクリート圧壊直前となる振幅倍率0.7まで実施した。

図-29 解析モデル

図-30 ファイバーモデル断面図

図-31 コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ曲線

図-32 鉄筋の応力-ひずみ曲線

表-4 解析モデルの物性値

要素	材料/部材	弾性係数 (kN/m^2)	ポアソン 比	単位 体積重量 (kN/m^3)	減衰 定数
ファイバー 要素	コンクリート	2.8×10^7	0.2	23	0.02
	鉄筋	2.0×10^8	0.3	77	0.02
線形はり 要素	鉄筋コンクリート	2.8×10^7	0.2	24.5	0.05

(2) 解析結果

解析結果として、図-33、図-34に弾性固有周期0.4秒と弾性固有周期1.2秒のモデルを対象に、弾性解析とした場合の最大応答変位分布を示す。同様に図-35、図-36にはそれぞれのモデルを弾塑性解析とした場合の最大応答変位分布を示す。RC橋脚を弾性体とした場合の最大応答変位は、加速度軌跡の違いに依らず概ね等しい結果となっている。一方、RC橋脚を弾塑性体とした場合、Case2(円形軌跡)を入力とした場合の最大応答変位が大きくなる結果となった。

また、図-37、図-38に弾性固有周期0.4秒と弾性固有周期1.2秒のモデルを対象にしたコンクリートの最大圧縮ひずみに関するIDA曲線を示す。コンクリートの圧縮ひずみが非線形化する振幅レベルにおいては、Case2(円形軌跡)を入力した場合の応答が大きくなることが示された。水平2方向入力の加速度軌跡が構造物の弾塑性応答に及ぼす影響の傾向として、MSSモデルのような並進のみの自由度を有するモデルと同様に、本章で検討した並進と回転の自由度を有するモデルに対しても、Case2(円形軌跡)の入力が弾塑性応答に及ぼす影響が最も大きいことが確認された。

図-33 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 0.4 秒 弾性モデル)

図-34 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 1.2 秒 弾性モデル)

図-35 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 0.4 秒 弾塑性モデル)

図-37 コンクリート最大圧縮ひずみの IDA 曲線
(弾性固有周期 0.4 秒 弾塑性モデル)

図-36 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 1.2 秒 弾塑性モデル)

図-38 コンクリート最大圧縮ひずみの IDA 曲線
(弾性固有周期 1.2 秒 弾塑性モデル)

6. 結論

本研究は、3次元地震応答解析による耐震設計・耐震性能照査において、2方向応答スペクトルに適合した水平2方向地震動の合理的な設定法の提案を目的に、水平2方向地震動の加速度軌跡が構造物の弾塑性応答に及ぼす影響の検討を行った。本研究を通じて得られた知見は以下の通りである。

- 1) 従来の1次元の振幅調整によるスペクトル適合法を、2次元に拡張したスペクトル適合法を提案し、観測記録の位相特性を有した加速度軌跡の2方向応答スペクトル適合波の作成法を提案した。本論文では1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅での観測波の一例を示したが、他の観測記録にも適用できる有効な手法である。
- 2) 地震動の構造物への入力エネルギーを評価できるエネルギー Spektral を従来の1次元から2次元に拡張し、水平2方向エネルギー Spektral を提案した。この指標を用いることで、同一の2方向応答スペク

ルを従来の1次元から2次元に拡張し、水平2方向エネルギー Spektral を提案した。この指標を用いることで、同一の2方向応答スペクトルに適合した水平2方向入力でも、加速度軌跡によって2方向エネルギー Spektral が異なることを示した。特に、標準波-相補直交成分波（ヒルベルト変換波）のような円形軌跡の場合に、他の加速度軌跡に比べて、2方向エネルギー Spektral は大きくなることが明らかになった。

- 3) 簡易なMSSモデルとより実挙動を模擬できるファイバーモデルを用い、水平2方向入力の加速度軌跡の違いが弾塑性応答に及ぼす影響について検討した。いずれのモデルによる比較解析においても、標準波-相補直交成分波（ヒルベルト変換波）のような円形軌跡が他の加速度軌跡よりも弾塑性応答が大きくなる傾向となった。ただし、漸増動的解析の結果によると、振幅レベルによっては、必ずしも円形軌跡を入力とした場合に最大応答変位が最大とならない結果も示された。また、地震動レベルによって地震応答の傾向が変化することは、危機耐性の観点から

見れば、水平2方向入力による漸増動的解析の必要性が示された。

また、今後の課題を以下に示す。

- 1) 今回の水平2方向地震動の検討結果は、1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅での観測波のみを対象にしたものである。今後は地震タイプの異なる継続時間の長い海洋型地震動や他の観測地震動を対象にした検討も行う必要があると考えられる。
- 2) 今回の研究で対象とした構造モデルは線形弾性時に等方なモデルであり、かつ幾何的にも対称構造である。今後は、幾何的に非対称であり、ねじれモードが生じるような構造モデルを対象に2方向入力による検討を行う必要があると考えられる。
- 3) 振幅レベルによって、最大応答が最大となる加速度軌跡が異なる結果となった。複雑な弾塑性応答についてより詳細に分析する必要がある。

参考文献

- 1) 本間俊介, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, Seckin CITAK, 堀高峰: 断層-都市系のパラメータの不確実性を考慮可能な統合地震シミュレータの開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震), Vol. 70, No. 4, pp.I_199-I_209, 2014.
- 2) 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, M. L. L. Wijerathne, 田中聖三: 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のための HPC による基礎検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 69, No. 2, pp. I_415-I_424, 2013.
- 3) 荻本英典, 川島一彦, 渡邊学歩, 永田聖二: 水平 2 方向地震力の同時作用が RC 単柱式橋脚の耐震性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 801/I-73, pp. 33-50, 2005.
- 4) 党紀, 中村太郎, 青木徹彦, 鈴木森晶: 正方形断面鋼製橋脚の水平 2 方向載荷ハイブリッド実験, 土木学会構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 367-380, 2010.
- 5) 五十嵐晃, 井上和真, 古川愛子, 宇野裕恵, 松田宏: 標準波-相補直交成分波の組合せによる橋梁の耐震照査用水平 2 方向入力地震動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, pp. I_458-I_469, 2012.
- 6) Igarashi, A. and Gigyuu, S.: Synthesis of spectrum-compatible bidirectional seismic accelerograms with target elliptical component of polarization, *Earthquake Resistant Engineering Structures X, WIT Transactions on The Built Environment*, Vol. 152, pp. 63-72, DOI: 10.2495/ERES150051, 2015.
- 7) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃, 畑明仁: 強震動の観測記録の水平 2 方向特性の分析と水平 2 方向応答スペクトルに適合する入力地震動の作成法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, pp. I_555-I_568, 2016.
- 8) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2002.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2012.
- 11) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2015.
- 12) 内藤伸幸, 松田泰治, 大塚久哲: 地震入力エネルギーに基づく模擬地震波の作成について, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp1149-1152, 2001.
- 13) 谷口惺, 五十嵐晃, 木田秀人: 漸増動的解析(IDA)に基づく長大橋の耐震性能評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp.I_323-I_333, 2014.
- 14) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 設計要領第二集 橋梁建設編, 高速道路総合技術研究所, 2015.7.
- 15) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦, 佐々木智大, 運上茂樹, 堺淳一, 高橋良和, 幸左賢二, 矢部正明, 松崎裕: EDefense を用いた実大 RC 橋脚(C1-5 橋脚)震動破壊実験研究報告—現在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験およびその解析—, 防災科学技術研究所研究資料, 第 369 号, 2012.10.
- 16) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2012.
- 17) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料, 丸善, 2015.
- 18) 日本建築学会: 多次元入力地震動と構造物の応答, 丸善出版, 1998.
- 19) 下村修一, 安達俊夫, 酒匂教明: エネルギーの釣合に基づく地盤の地震時挙動の評価に関する研究—飽和砂地盤の損傷程度及び入力エネルギーの評価—, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 650 号, pp. 807-815, 2010.4.
- 20) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 水平 2 方向入力の加速度軌跡が構造物モデルの非線形応答に及ぼす影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, No.I-175, 2016.

(2016. 11. 2 受付, 2016. 12. 27 修正, 2017. 2. 18 受理)

EFFECT OF PARTICLE ORBIT CHARACTERISTICS ON ELASTIC-PLASTIC SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURAL MODELS

Kazuma INOUE, Kazuaki WATANABE and Akira IGARASHI

In this paper, the difference of orbit characteristics of bi-directional input waves affecting the elastic-plastic response of structural models is investigated. The proposed method extends conventional 1D spectrum-compatible method to 2D, and shows how to match the random trajectory time histories, which is orthogonal in the horizontal plane, with the target bi-axial response spectrum. By extending the energy spectrum which represents the energy of input seismic motion, the concept of bi-axial energy spectrum is proposed. Using this spectrum, differences in input seismic energy is shown when acceleration trajectories of the waves vary. In addition, incremental dynamic analysis (IDA) was carried out for elasto-plastic structural model, causing excitation by bi-axial response spectrum-compatible accelerograms with different acceleration trajectories. As a result, there is tendency for using circular trajectory as seismic input to show conservative result of elasto-plastic seismic response analysis.