

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、水平2方向地震動の軌跡特性が構造モデル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、実際の地震動が持つランダム軌跡の2方向スペクトル適合波を作成する方法を示した。また、地震動の入力エネルギーを示すエネルギースペクトルを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、同一の2方向応答スペクトルに適合しても軌跡特性が異なることにより、入力エネルギー量に有意な差が生じることを示した。さらに、加速度軌跡の異なる2方向応答スペクトル適合波を入力とし、2軸非線形が考慮できる構造モデルを対象に漸増動的解析 (IDA) を行った。その結果、円形軌跡の2方向入力とした場合に、構造物の弾塑性応答が大きくなる傾向を示した。

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展により、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おり、その一連の流れは地震工学・耐震工学の分野でも同様である。例えば、堀・市村らの研究グループは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⁾や、広さ8.0×7.5kmの領域にモデル化された約25万棟の建物を対象に、多数の地震シナリオに対する都市被害想定のためHPCの適用性を検討している²⁾。このように、一昔前では考えられない様な大規模モデルを対象にした地震工学・耐震工学の問題を扱える解析環境が整いつつある。

その一方で、実務レベルで3次元地震応答解析を用いる場合、従来の耐震設計・耐震性能照査が2次元断面を対象としてきたことを背景に、解決すべき課題は多いと言える。例えば、3次元地震応答解析に必要な技術として、3次元性を考慮した構造物モデルや地盤モデルの構成則、大規模化、細部までにわたる3次元のモデリング技術、解析速度の高速化などが挙げられ、様々なアプローチで研究が進められている。そのような中、著者らは

これまでに、3次元地震応答解析による耐震設計・耐震性能照査における水平2方向入力の設定方法に着目して研究を継続してきている³⁾⁴⁾。これまでの研究で提案した水平2方向入力は、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、実際の地震動が持つランダムな軌跡では無く、円形、楕円形の加速度軌跡となる。提案した円形あるいは楕円形の加速度軌跡となる2方向入力は、目標の2方向応答スペクトルに適合しているという意味では、一定の入力強度を有しているが、実際の地震動が有するランダムな加速度軌跡との関係をより定量的に示す必要があると考えられる。

本研究では、まず、2方向応答スペクトルに適合したランダムな加速度軌跡の地震動を作成するために、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、目標となる2方向応答スペクトルへの適合法を示した。ここで示す新たな手法は、水平直交2成分の振幅調整によりスペクトル適合を行うため、著者らがこれまでに提案してきた2方向応答スペクトル適合波とは異なり、観測記録などの原波の位相特性を保持したランダム軌跡を有する2方向スペクトル適合波を作成することが出来る。

続いて、建築分野ではよく用いられる地震動の入力エネルギーを評価できるエネルギースペクトルを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。これにより、同一の2方向応答スペクトルに適合し、かつ経時特性が等しい2方向入力においても、加速度軌跡の違いにより、2方向エネルギースペクトルが異なる事例を示した。

更に、同一の2方向応答スペクトルに適合した加速度軌跡の異なる2方向地震動を入力として、構造物の2軸非線形の考慮できるMSSモデルやファイバーモデルを対象に水平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。

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

2方向応答スペクトル³⁾とは、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 の関係を式(1)に示す。また、2方向応答スペクトルの例として、減衰比 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。

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

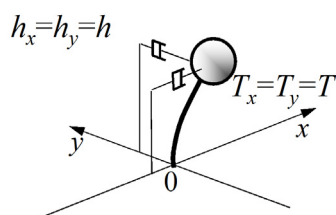


図-1 2次元線形弾性1質点振動子

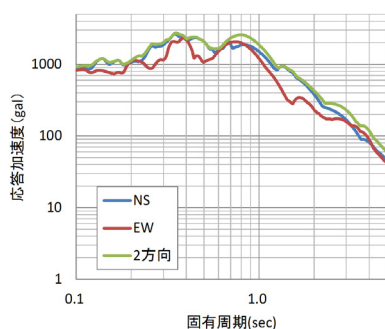


図-2 2方向応答スペクトルの例（JMA神戸の観測記録）

(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³⁾。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⁴⁾。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一律 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ため、その2方向応答スペクトルは入力強度として明確な設計・照査用の応答スペクトルとほぼ等価になる。

(3) ランダム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法

実際の地震動のようなランダム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つの単振動を合成して得られる平面図形（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⁵⁾ことに着目したスペクトル適合法である。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、従来の振幅調整によるスペクトル適合法⁶⁾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方向入力が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⁵⁾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、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ランダムな軌跡特性を保持するために、振幅のみを調整する。

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,

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

or

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

式(14), 式(15)を変換すると

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

or

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

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.

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

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

$k=1 \sim N/2-1$ 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 年の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_{II0}^7 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⁸⁾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.

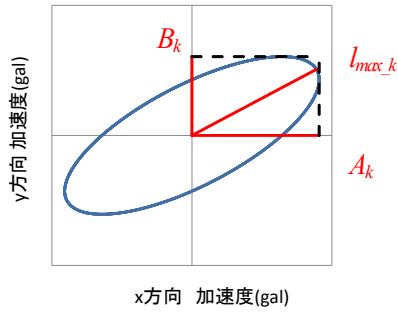


図-3 各振動数成分における振幅と楕円長軸のイメージ図

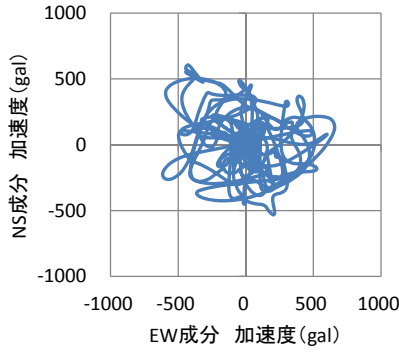


図-4 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の加速度軌跡

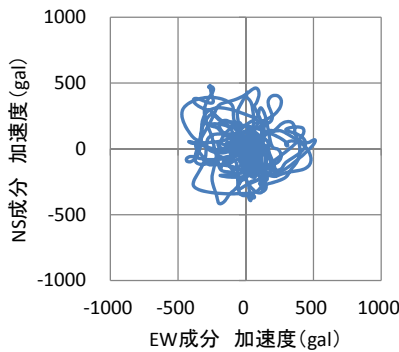


図-5 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の
2方向応答スペクトル適合波

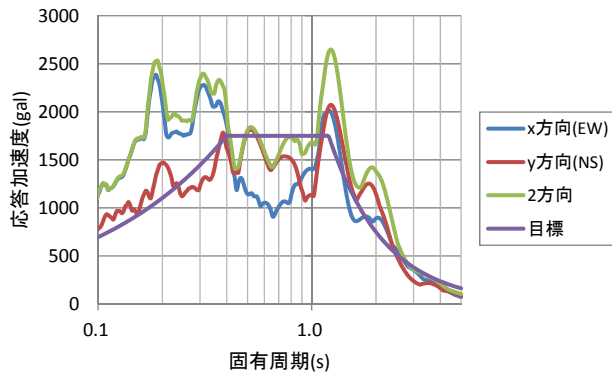


図-6 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の
応答スペクトル (スペクトル適合前)

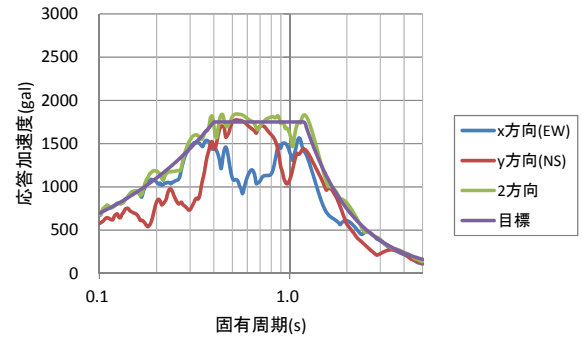


図-7 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の
応答スペクトル (スペクトル適合後)

(4) 加速度軌跡の異なる2方向応答スペクトル適合波

基本となる地震動を道路橋示方書⁷⁾に示されるレベル2地震のタイプⅡのⅡ種地盤兵庫県南部地震 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 ³⁾	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 ⁴⁾	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	ランダム	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

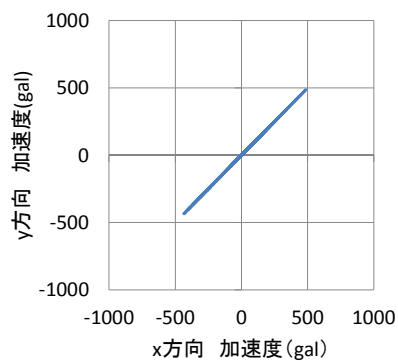


図-8 Case 1 (斜め入射) の加速度軌跡

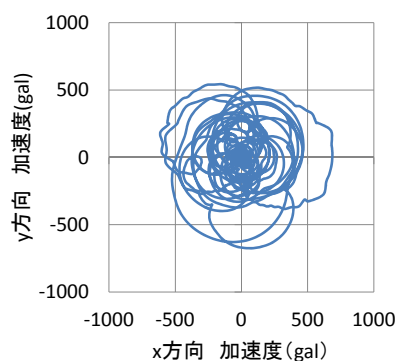


図-9 Case 2 (円形軌跡) の加速度軌跡

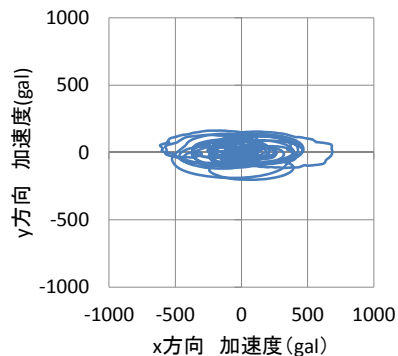


図-10 Case 3 (楕円形軌跡) の加速度軌跡

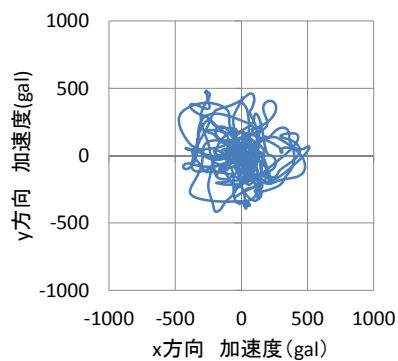


図-11 Case 4 (ランダム軌跡) の加速度軌跡

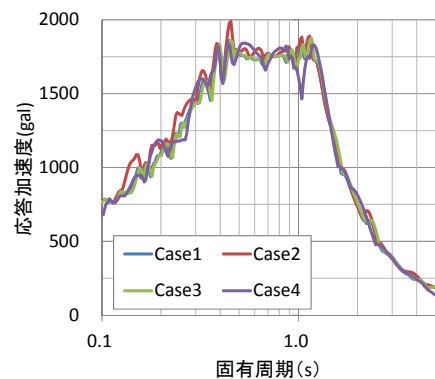


図-12 各ケース 2 方向加速度応答スペクトル

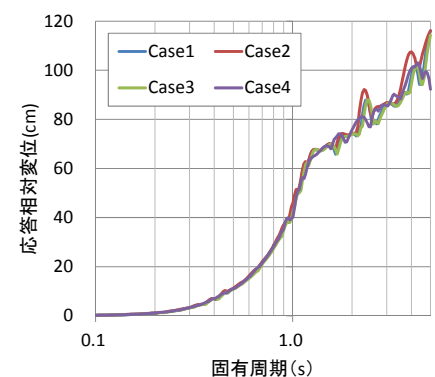


図-13 各ケース 2 方向変位応答スペクトル

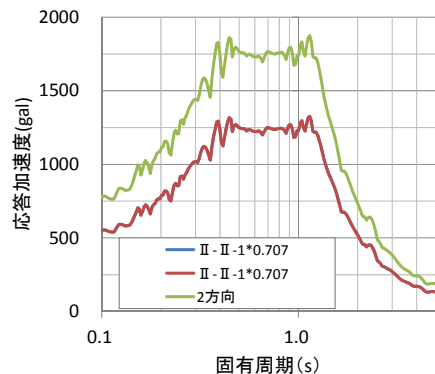


図-14 Case 1 (斜め入射) の応答スペクトル

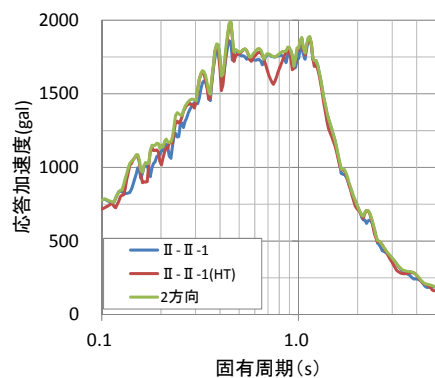


図-15 Case 2 (円形軌跡) の応答スペクトル

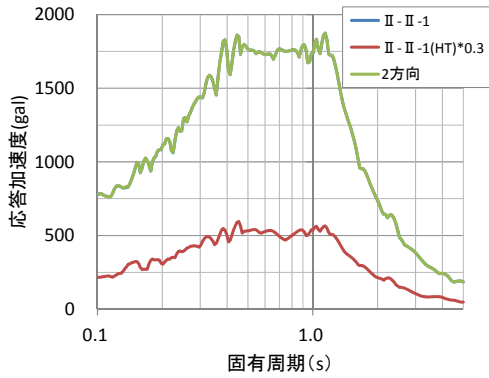


図-16 Case3 (楕円軌跡) の応答スペクトル

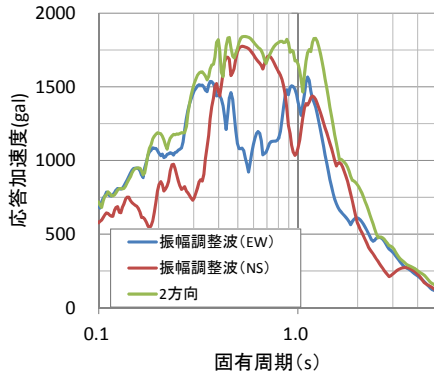


図-17 Case4 (ランダム軌跡) の応答スペクトル

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⁹⁾。

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

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は無く、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できる。

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

ここに、

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

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

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

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

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

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

とすると、2次元性を考慮した全入力エネルギーは、式

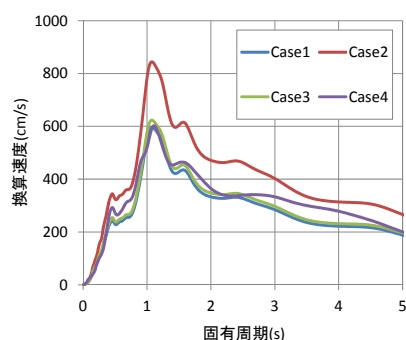


図-18 各ケースの2方向エネルギースペクトル

(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

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

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¹⁰⁾。経時特性と2方向応答スペクトルが同一であっても、加速度軌跡の違いにより、Case2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。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、水平2方向からの外力に対して2軸非線形性を考慮することができる。本検討では、それぞれのせん断ばねバイリニア型の弾塑性モデルとした。また、本検討で用いた解析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は参考文献(4)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

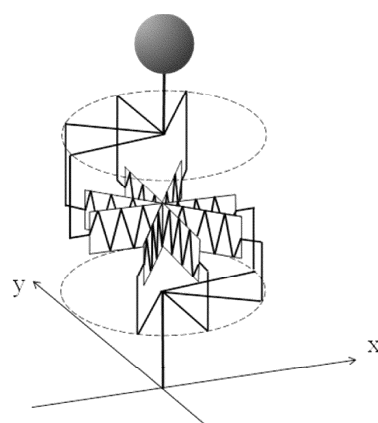


図-19 MSSモデルの概要図

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

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¹¹⁾(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。

(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-20から図-23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-24から図-26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、Case2の円形軌

跡を入力とした場合の最大応答変位が最大となる場合が多い傾向を示した。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いことが確認できる。これは、水平2方向入力による2方向弾塑性挙動の複雑性を示しており、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	ランダム	弾性	7.0	40.9	74.0
		弾塑性	6.2	39.1	67.1

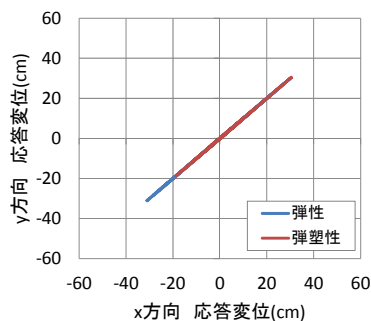


図-20 Case1の応答変位軌跡（弾性固有周期：1.0秒）

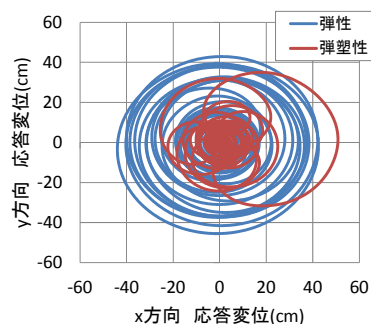


図-21 Case2の応答変位軌跡（弾性固有周期：1.0秒）

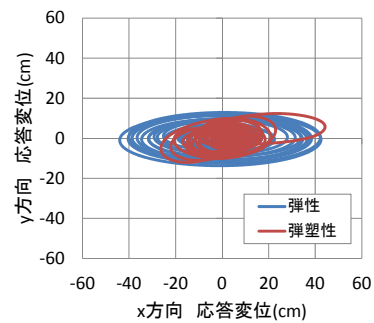


図-22 Case3の応答変位曲線（弾性固有周期：1.0秒）

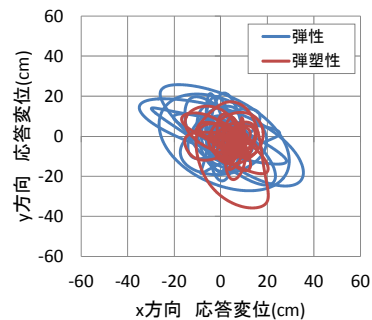


図-23 Case4の応答変位軌跡（弾性固有周期：1.0秒）

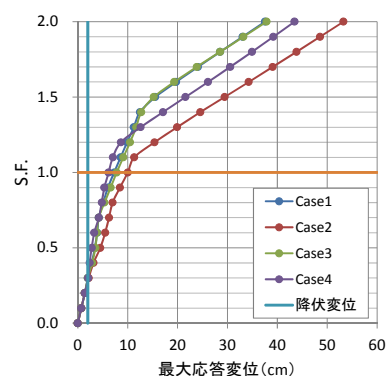


図-24 最大応答変位の IDA 曲線（弾性固有周期：0.4秒）

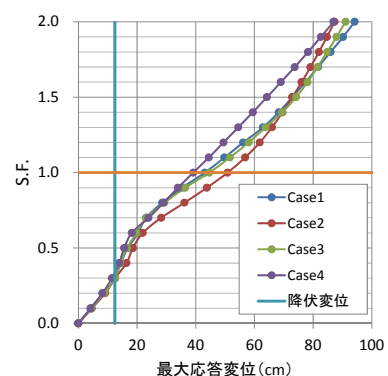


図-25 最大応答変位の IDA 曲線（弾性固有周期：1.0秒）

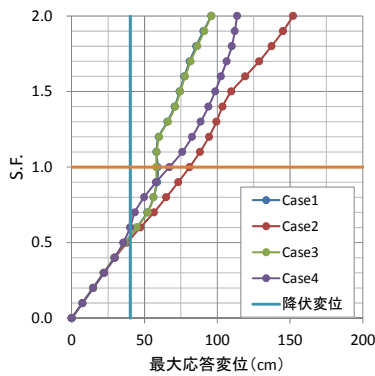


図-26 最大応答変位の IDA 曲線（弾性固有周期：1.8 秒）

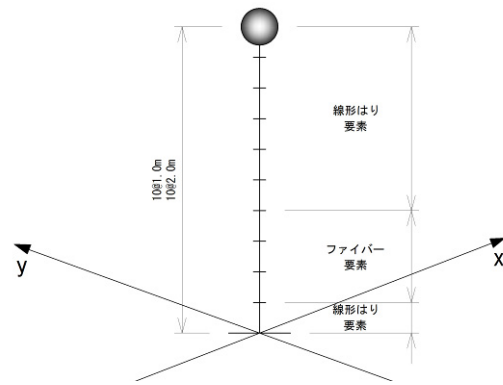


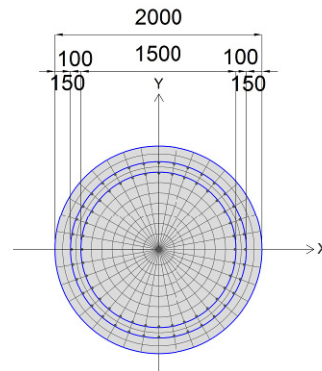
図-27 解析モデル

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橋脚から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となるの2ケースの構造モデルを対象とした（図-27）。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-28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12)を参考に設定し、2.0mの円形断面に、鉄筋は降伏強度 345N/mm^2 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/mm^2 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¹³⁾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/mm^2 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-29、図-30に示す。

なお、モデル底面の境界条件は並進と回転を固定しており、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、非常に大きな入力となる。そこで、入力と応答の関係を見て、2. (4) で示す水平2方向入力の70%の振幅を最大としたIDAを実施した。



鉛直筋 D35@36bar×2

図-28 ファイバーモデル断面図

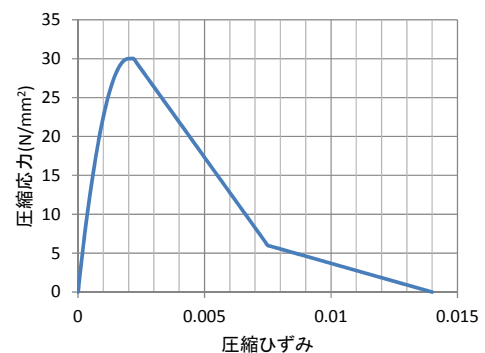


図-29 コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ曲線

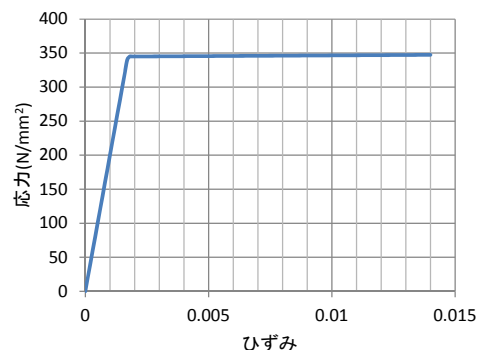


図-30 鉄筋の応力-ひずみ曲線

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-31、図-32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弾性解析とした場合の最大応答変位分布を、図-33、図-34に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-35、図-36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。

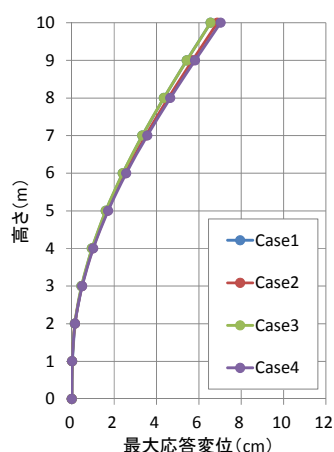


図-31 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 0.4 秒 弾性モデル)

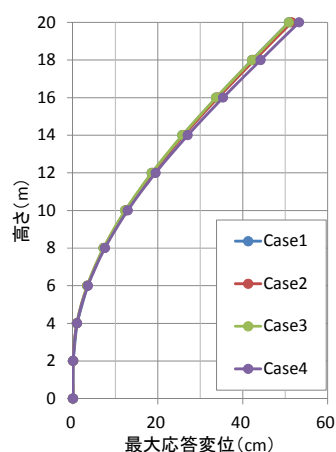


図-32 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 1.2 秒 弾性モデル)

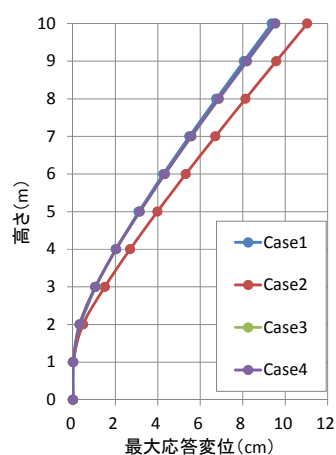


図-33 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 0.4 秒 弾塑性モデル)

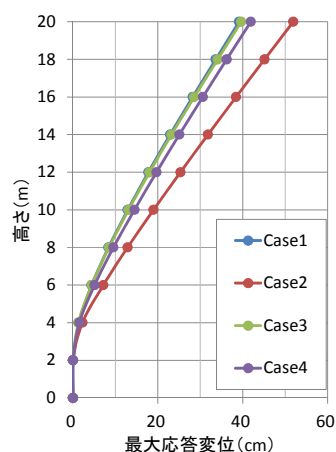


図-34 最大応答変位分布図
(弾性固有周期 1.2 秒 弾塑性モデル)

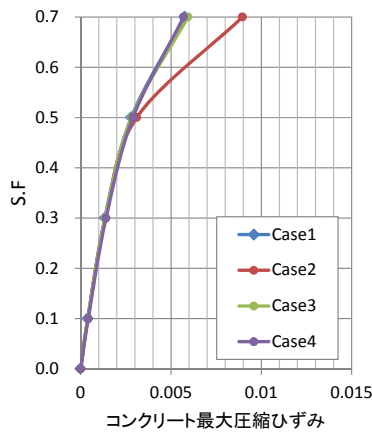


図-35 コンクリート最大圧縮ひずみの IDA 曲線
(弾性固有周期 0.4 秒 弾塑性モデル)

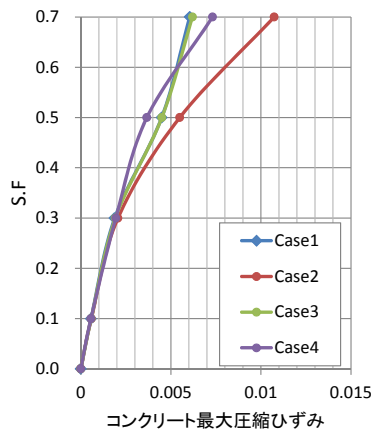


図-36 コンクリート最大圧縮ひずみの IDA 曲線
(弾性固有周期 1.2 秒 弾塑性モデル)

6. 結論

本研究は、同一の2方向応答スペクトルに適合した加速度軌跡の異なる水平2方向地震動を用いた比較解析により、MSSモデルやファイバーモデルでモデル化された構造モデルを対象に、入力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) 従来の振幅調整による1次元のスペクトル適合法を楕円軌跡の考え方にに基づき、振幅調整を2次元に拡張したスペクトル適合法を提案した。この提案手法により、実際の地震動が持つランダムな加速度軌跡を有した2方向応答スペクトル適合波を作成することが可能となった。
- 2) 1次元のエネルギースペクトルを拡張し、水平2方向エネルギースペクトルを提案した。この結果、同

一の2方向応答スペクトルに適合し、かつ同一の経時特性を有する加速度軌跡の異なる水平2方向入力の2方向エネルギースペクトルは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の2方向エネルギースペクトルは大きくなることがわかった。

- 3) 並進のみの自由度を有するMSSモデルと並進と回転の自由度を有するファイバーモデルを対象に、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結果、両者のモデルに対しても、標準波-相補直交成分波（ヒルベルト変換波）のような円形軌跡の場合に弾塑性応答が大きくなる場合が多い。その一方で、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ており、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) 今回の研究における水平2方向地震動は、1995年の兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波のみを対象にした検討結果である。例えば、継続時間の長い海洋型を対象にした研究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。これは、弾塑性応答の複雑さが要因の一つと考えられるが、このような結果となるメカニズムを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.4p. 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.2p. I_415- I_424, 2013

- 3) 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.
- 4) Igarashi, A., Gigyu, S.: Synthesis of Spectrum-compatible Bi-directional 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.
- 5) 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
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善, 2002
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善, 2012
- 8) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2015
- 9) 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
- 10) 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, p1149-p1152, 2001
- 11) 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, I_323-I333, 2014
- 12) 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: E-Defense を用いた実大 RC 橋脚(CI-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 年 10 月
- 13) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2012
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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, 807-815, 2010 年 4 月
- 17) 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 年 7 月
- 18) 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

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.