

2 方向非線形応答スペクトルによる 加速度軌跡の異なる 2 方向応答スペクトル適合波の評価

井上 和真¹・渡辺 和明¹・五十嵐 晃²

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）

²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）

1. はじめに

近年、計算処理速度の高速化に伴い、地震工学・耐震工学において、3次元非線形地震応答解析の環境が整いつつある。例えば、土屋らは、6基のLNG地下タンクからなるタンクヤード全体を対象に、約57,000要素、総自由度は約67万となる大規模モデルを作成し、3次元非線形FEM地震応答解析によって、複数の近接するタンク同士の群効果や構造物と地盤の相互作用を含む地震の応答挙動の予測信頼性評価を行った¹⁾。また、ハツ元らは兵庫県南部地震によって構成部材が破壊状態に至った長大斜張橋を対象に、高度化した構造要素を用いて支承等の細部までモデル化し、スーパーコンピュータ「京」を用いた大規模並列計算による地震応答解析により、被災状況の再現を試みている²⁾。このように、一昔前では考えられないような大規模モデルを対象にした3次元非線形地震応答解析が可能となり、計算環境の発展による、地震工学・耐震工学における解析技術の向上は目覚ましい。

一方、実務における構造物の耐震性能照査では、1次元あるいは水平と鉛直の2次元断面でモデル化し、検討を行うことが一般的である。道路橋示方書³⁾や鉄道構造物等耐設計標準⁴⁾、原子力発電所耐震設計技術指針⁵⁾等の指針では、耐震性能照査に用いる地震動は応答スペクトルで定義されており、1次元もしくは水平と鉛直の2次元で解析と照査が行われている。

このように実務においては、1次元あるいは2次元地震応答解析が主流であるが、3次元地震応答解析によって構造物の耐震性能照査を行う場合、水平2方向入力による地震応答解析が可能となる。実際の

地震動は複雑な軌跡特性（水平直交2成分間の位相特性）を持つことから、従来の耐震性能照査手法である水平1方向入力による地震応答解析に加え、水平2方向入力による地震応答解析を行うことは、耐震性能照査の合理性や安全性、実地震動に対する挙動の予測や確認の点で重要であると考えられる。

水平2方向入力による3次元地震応答解析を行う場合は、多方向加震に対応した構造物や地盤の弾塑性モデルでなければならず、構成則の高度化に関して、多くの研究がなされている^{6),7)}。その一方で、水平2方向入力による耐震性能照査を実用化するためには、水平2方向地震動を評価する指標や入力と応答の関係をより明確にする必要がある。現状の地震動の大きさを評価する指標としては、フーリエスペクトル、応答スペクトル、非線形応答スペクトルなどが挙げられるが、いずれも1次元の地震動を対象としたものである。

このような背景から、著者らは、耐震性能照査に用いる水平2方向地震動に関する研究を行っており、2方向応答スペクトルや2方向エネルギースペクトルといった水平2方向地震動の大きさを示す指標について、検討や考案^{8),9),10),11)}をしてきた。

また、観測地震動の位相特性を用いて、実際の地震動が持つような複雑な加速度軌跡を持ちながら、2方向応答スペクトルに適合する方法を考案した¹¹⁾。この方法を用いて、同一の2方向弾性加速度応答スペクトルに適合するが、加速度軌跡は異なる地震動を対象に比較解析を行い、加速度軌跡の特徴が構造物の弾塑性応答に及ぼす影響を検討した。しかし、ここで対象とした構造モデルは、特定の固有周期のモデルであり、より一般的に加速度軌跡の違いが構造モデルの弾塑性応答に及ぼす影響を調査する必要

がある。

本研究では水平2方向入力が構造物モデルの弾塑性応答に与える影響をより一般的に評価するために、非線形応答スペクトルを2次元に拡張した2方向非線形応答スペクトルを提案した。また、提案した2方向非線形応答スペクトルを用いて、同一の2方向弾性加速度応答スペクトルに適合するが、加速度軌跡の異なる2方向地震動が構造物モデルの弾塑性応答に及ぼす影響をより詳細に分析した。

2. 2方向弾性応答スペクトルとその適合波

(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 方向成分を $a_x(T, t)$ 、 $a_y(T, t)$ とする。水平2次元応答の動径方向の最大値 $S_{Ra}(T)$ 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。1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における観測記録(以下、JMA神戸波)の加速度軌跡を図-2に示す。また、JMA神戸波を例に、減衰比 h を0.05とした場合の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-3に示す。なお、図-2の破線は、加速度軌跡の主軸方向¹²⁾であり、主軸方向は加速度軌跡を構成する離散データの分散が最大となる方向としている。図-2の加速度軌跡と主軸方向から、主軸方向は北北西-南南東の方向を示しておりNS方向と近いことがわかる。図-3からも2方向応答スペクトルとNS方向の応答スペクトルの大きさが近いことがわかる。

$$S_{Ra}(T) = \max_t \sqrt{a_x(T, t)^2 + a_y(T, t)^2} \quad (1)$$

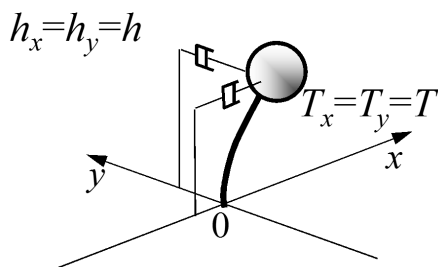


図-1 2次元線形弾性1質点振動子

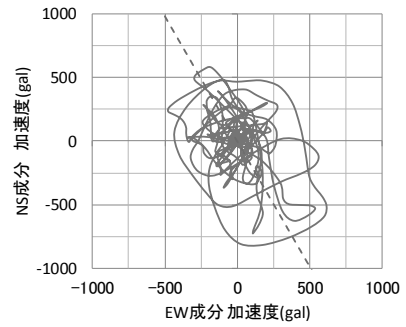


図-2 JMA神戸波の加速度軌跡と主軸方向

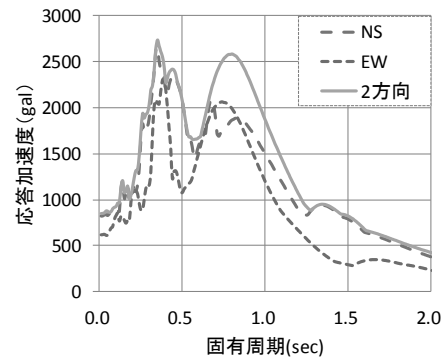


図-3 JMA神戸波の2方向応答スペクトル

(2) 2方向弾性加速度応答スペクトル適合波

2方向応答スペクトルに適合した2方向入力地震動の作成法として、耐震性能照査用の加速度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⁸⁾。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⁹⁾。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成分を耐震性能照査に定義されたスペクトル適合波、すなわち標準波とし、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とするというものである。ヒルベルト変換は、原波の位相を90度シフトさせるものであり、原波（標準波）とヒルベルト変換波（相補直交成分波）の水平直交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。また、相補直交成分波は、標準波から周波数領域における振幅を調整していないため、それぞれ1方向の応答スペクトルは、ほぼ同一の形状となる。さらに、標準波と相補直交成分波の2方向入力による2方向応答スペクトルも、それぞれの1方向入力の応

答スペクトルとほぼ同一の形状となる．標準波と相補直交成分波の 2 方向入力の場合、2 方向応答スペクトルは、耐震性能照査用の応答スペクトルに適合しているという観点で見れば、入力地震動の大きさ・強度という意味で担保されている．しかし、標準波と相補直交成分波の 2 方向入力は、構造物の耐震性能照査においては 1 方向入力時に比べて、若干保守的になる可能性があることや、加速度軌跡は円形となることから実際の地震動が持つ複雑な軌跡特性を有していないなどの課題がある．

このような背景を踏まえて、著者らは、観測記録の水平 2 成分の位相特性を用いて、2 方向応答スペクトルへの適合手法を考案した¹¹⁾．この手法では、目標となる応答スペクトルは 2 方向応答スペクトルとし、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．ここで、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 $x(t)$, $y(t)$ とする．これらを周波数領域で表現し、ある k 番目の $x_k(t)$, $y_k(t)$ は式(2), (3)のような三角関数で表される．これらを同時入力すると、水平面内で楕円軌跡を描く．

$$x_k(t) = A_k \cos(2\pi f_k t + \phi_{x_k}) \quad (2)$$

$$y_k(t) = B_k \cos(2\pi f_k t + \phi_{y_k}) \quad (3)$$

図-4に振幅 A_k , B_k と楕円の長軸長 l_{max_k} のイメージ図を示す． $x_k(t)$ と $y_k(t)$ の間で位相差を有していることから、図-4に示すように、振幅 A_k , B_k と楕円の長軸長 l_{max_k} の間で、二乗和平方根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である、正弦波合成法における振幅修正と同様に、楕円の長軸を目標とする 2 方向応答スペクトルとの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、

$$\gamma_R(T) = \frac{S_{Rd}(T)}{DS_R(T)} \quad (4)$$

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．

$$l_{max_new_k} = \frac{l_{max_k}}{\gamma_{Rk}} \quad (5)$$

具体的には、 $x_k(t)$, $y_k(t)$ の振幅 A_k , B_k を 2 方向応答スペクトルの適合度 γ_{Rk} で除すのみで、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．

$$A_{new_k} = A_k / \gamma_{Rk} \quad (6)$$

$$B_{new_k} = B_k / \gamma_{Rk} \quad (7)$$

この手法による実位相軌跡の 2 方向応答スペクトル適合波の作成例として、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（以下、JR 鷹取波）を原波とし、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} ³⁾ を目標とする 2 方向応答スペクトルを示す．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⁵⁾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-5 に本計算例の原波である JR 鷹取波の加速度軌跡を、図-6 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、JR 鷹取波のスペクトル適合前後の応答スペクトルと目標応答スペクトルの関係を図-7 に示す．図-7 に示すように、2 方向応答スペクトルの形状が観測波から変化し、最終的には目標応答スペクトルに対して良好な適合がなされていることが確認できる．

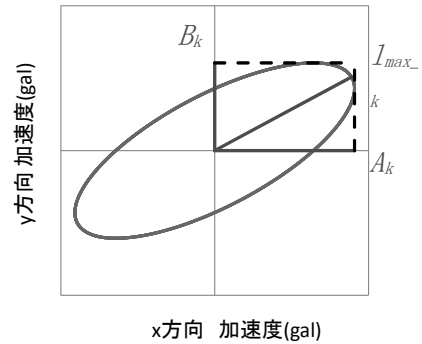


図-4 各振動数成分における振幅と楕円長軸

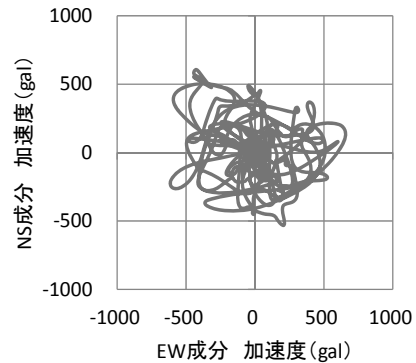


図-5 JR 鷹取波の加速度軌跡
(2 方向応答スペクトル適合前)

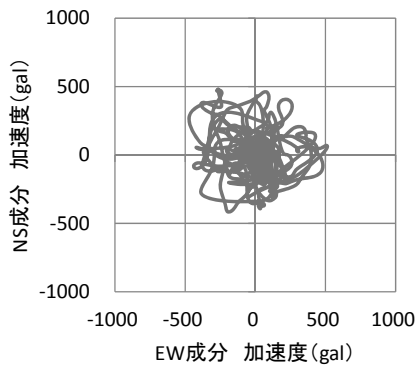


図-6 JR 鷹取波の加速度軌跡
(2方向応答スペクトル適合後)

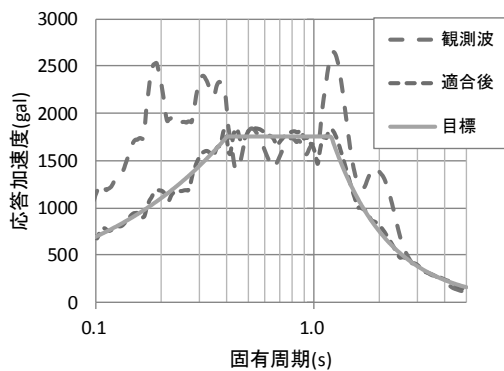


図-7 JR 鷹取波の2方向応答スペクトルの適合前後の比較

3. 2方向非線形応答スペクトル

非線形応答スペクトルとは、名前の通り、応答スペクトルを算出する過程において、構造モデルの非線形応答を考慮したものである。この非線形応答スペクトルの概念は、耐震設計において構造物が非線形領域に入ることの許容する考え方に基づいている。非線形応答スペクトルのひとつに、横軸に固有周期、縦軸に降伏震度をとって図示した所要降伏震度スペクトルがある。この所要降伏震度スペクトルを2次元に拡張したものを、2方向非線形応答スペクトルと呼ぶこととする。2方向非線形応答スペクトルは、従来の1方向の所要降伏震度応答スペクトルと同様に、横軸に固有周期 T 、縦軸に降伏震度 k_{hy} (降伏耐力 Q_y と質点重量 W の比)をとり、水平2次元の応答を考慮した応答塑性率 μ ごとに固有周期と降伏震度の関係を図示したものである(図-8)。この非線形応答スペクトルの評価に用いる解析モデルは、複数のせん断ばねで構成されたMulti Shear Springモデル(以下、MSSモデルと略す)による水平2自由度を有する簡易

な等方の1質点系モデルであるが、水平2方向の非線形応答の相互作用を考慮できる。図-9にMSSモデルの概念図を示す。2方向非線形応答スペクトルの算定では、各弾性固有周期で計算した応答塑性率と目標とする応答塑性率が一致するように、MSSモデルの降伏震度 k_{hy} を変数とした繰り返し計算を行う。応答塑性率 μ は、水平2次元の動径方向の最大応答変位 $\delta_{max}(T)$ と全体のばね挙動の降伏変位 $\delta_y(T)$ の比から算出することで、2次元性が考慮される。図-10にMSSモデルの全体挙動とMSSモデルを構成するばねの関係を示す。また、図-11に2次元の降伏変位と応答変位軌跡の関係を、式(8)、(9)に2次元の応答塑性率の算定方法を示す。2方向非線形応答スペクトルは、入力地震動の強度が大きいと降伏震度も大きくなり、任意の応答塑性率に対して、複数の地震動の入力強度の比較に適用することが出来る。

$$\mu(T) = \delta_{max}(T) / \delta_y(T) \quad (8)$$

$$\delta_{max}(T) = \max_t \sqrt{d_x(T, t)^2 + d_y(T, t)^2} \quad (9)$$

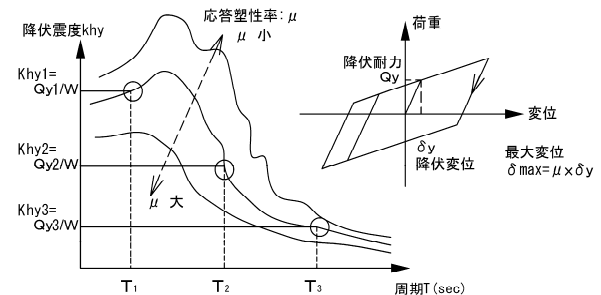


図-8 2方向非線形応答スペクトルの概念図

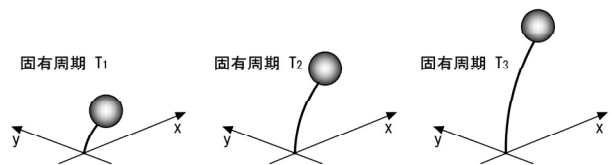


図-9 MSSモデルの概念図

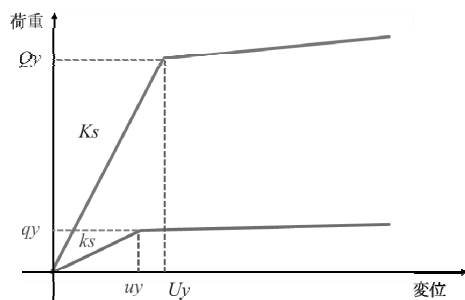


図-10 MSSモデルの全体挙動と構成ばねの関係

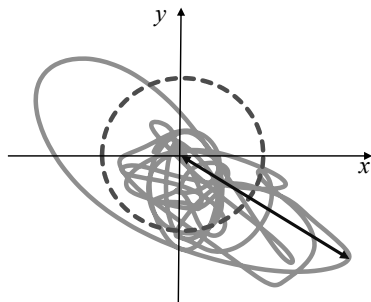


図-11 2次元応答変位軌跡と降伏変位の関係
(破線：降伏変位 実線：応答変位軌跡)

4. 加速度軌跡の異なるスペクトル適合波に対する2方向非線形応答スペクトルの分析

(1) 加速度軌跡の異なる2方向弾性応答スペクトル適合波

道路橋示方書に示されているレベル2地震のタイプIIのII種地盤のJR鷹取波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、2方向非線形応答スペクトル算出用の2方向入力地震動とする。図-12から図-15に各ケースの加速度軌跡を、図-16から図-19に応答スペクトルを示す。なお、Case1の直線軌跡は図-12に示すように、斜め45度方向の1方向入力に相当する。図-20に各ケースの2方向加速度応答スペクトルを重ね書きした図を示す。図-20から、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-21に各ケースの2方向エネルギースペクトルを示す。2方向エネルギースペクトルは、式(10)で定義される。式(8)中の E_x 、 E_y はx方向、y方向それぞれの全入力エネルギーで、式(11)、(12)のように表すことができる。図-17から、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。

$$V_E = \sqrt{2E/M} = \sqrt{\frac{2(E_x + E_y)}{M}} \quad (10)$$

$$E_x = -m \int_0^{t_0} \ddot{x}_0 \dot{x} dt \quad (11)$$

$$E_y = -m \int_0^{t_0} \ddot{y}_0 \dot{y} dt \quad (12)$$

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	直線	x	II-II-1波	$1/\sqrt{2}$
		y	II-II-1波	$1/\sqrt{2}$
Case 2	円形 ⁸⁾	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	楕円形 ⁹⁾	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 ¹¹⁾	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

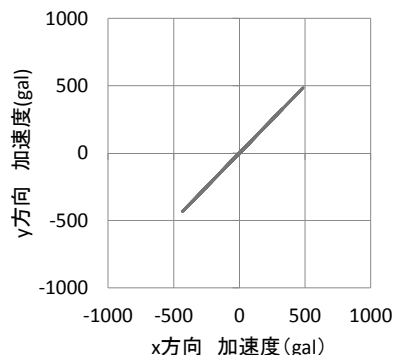


図-12 Case 1（直線軌跡）の加速度軌跡

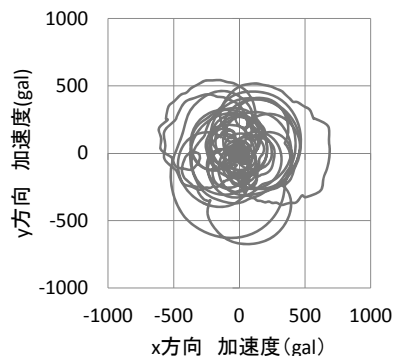


図-13 Case 2（円形軌跡）の加速度軌跡

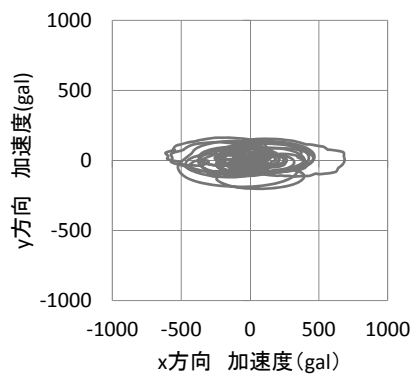


図-14 Case 3 (楕円形軌跡) の加速度軌跡

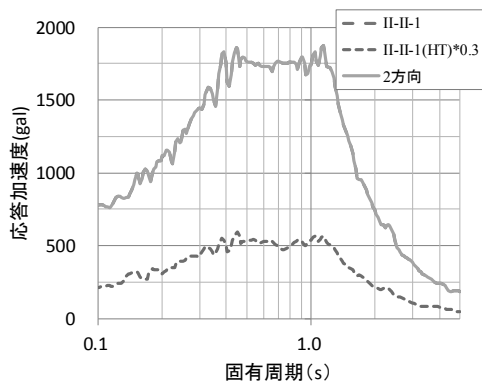


図-18 Case 3 の加速度応答スペクトル

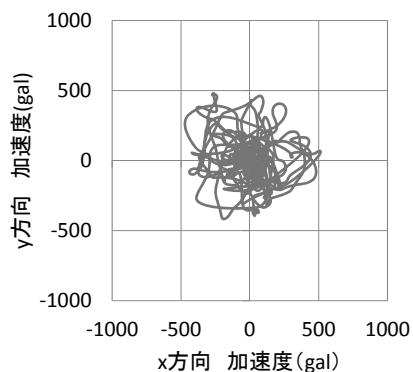


図-15 Case 4 (実位相) の加速度軌跡

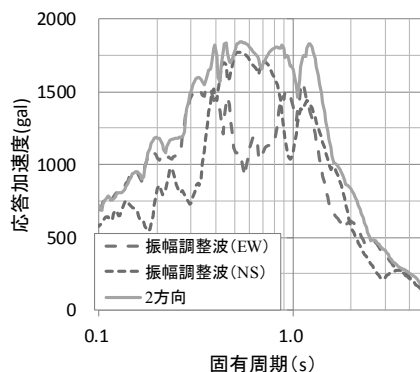


図-19 Case 4 の加速度応答スペクトル

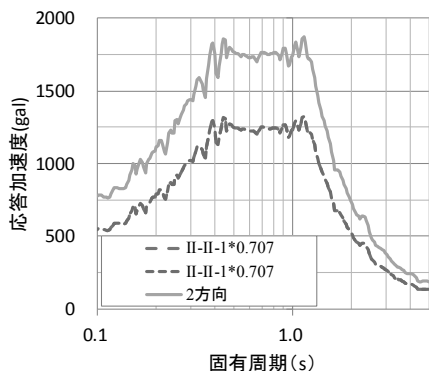


図-16 Case 1 の加速度応答スペクトル

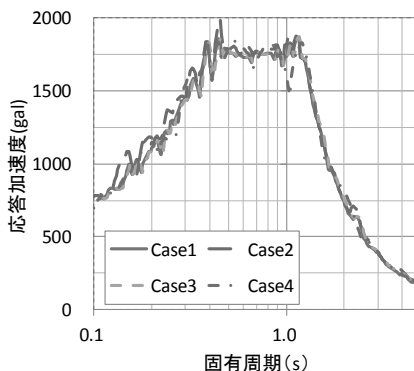


図-20 各ケースの2方向加速度応答スペクトル

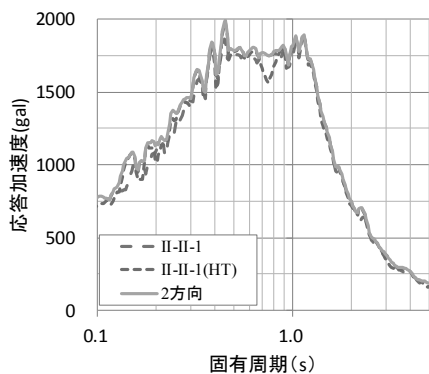


図-17 Case 2 の加速度応答スペクトル

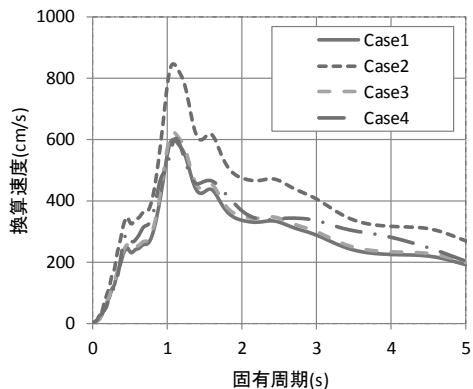


図-21 各ケースの2方向エネルギースペクトル

(2) 2方向非線形応答スペクトルの分析

加速度軌跡は異なるが同一の2方向応答スペクトルに適合する2方向入力地震動（表-1）に対して、2方向非線形応答スペクトルの分析を実施した。図-22、図-23に応答塑性率 $\mu=2,4$ とした場合の各ケースの2方向非線形応答スペクトルを示す。いずれの応答塑性率においても、円形軌跡としたCase2で降伏震度が大きくなる傾向となり、2方向入力としての強度が大きいことが示された。2方向スペクトル適合波の位相特性を円形軌跡とすることで、構造モデルの弾塑性応答に及ぼす影響が大きくなり、耐震性能照査において保守側の設定となる可能性があることが示唆される。

図-24から図-26に2方向入力（円形、楕円形、実位相軌跡：Case2, Case3, Case4）と1方向入力（直線軌跡：Case1）の2方向非線形応答スペクトル比，すなわち降伏震度比を示す。降伏震度比が1.0を上回る場合、1方向入力に比べて、2方向入力の方が地震時の弾塑性応答が大きくなることを意味している。一方、降伏震度比が1.0を下回る場合、1方向入力に比べて、2方向入力の方が地震時の弾塑性応答が小さくなることを意味している。楕円形軌跡の場合、降伏震度比は約1.0となり、入力を2方向とした影響は小さいと言える。円形軌跡の場合、多くの固有周期帯で降伏震度比が1.0を上回る傾向となり、2方向入力が弾塑性応答に与える影響が有意にあると言える。また、実位相軌跡の場合、降伏震度比は固有周期帯による変動が大きく、固有周期によっては1.0を下回る結果となったが、1.4以上となる場合も存在する。

以上より、2方向入力の加速度軌跡の特徴が構造物の弾塑性応答に与える影響をより定量的に評価することができた。また、2方向入力と1方向入力の降伏震度比が1.0以上になる固有周期帯も多く存在することから、危機耐性の観点から2方向入力による地震応答解析の必要性が示された結果とも言える。

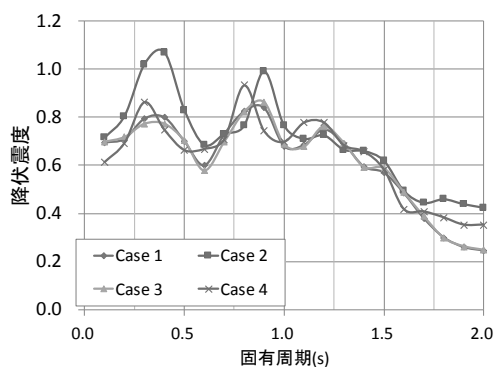


図-22 2方向非線形応答スペクトル($\mu=2$)

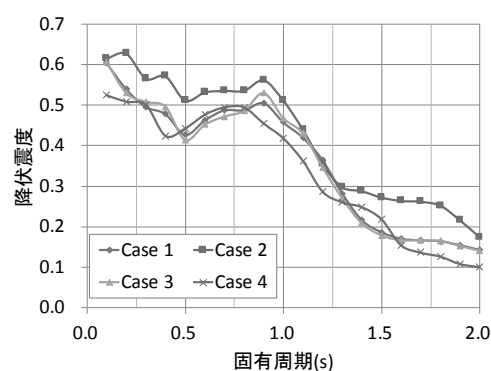


図-23 2方向非線形応答スペクトル($\mu=4$)

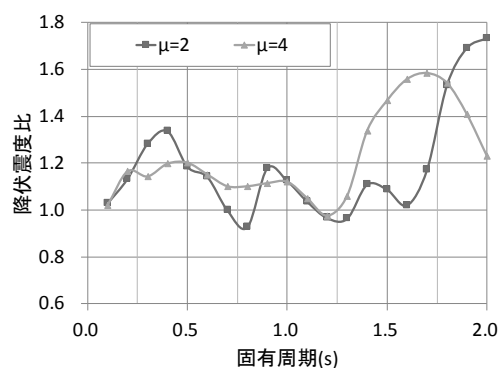


図-24 降伏震度比 (Case2/Case1: 円形/直線)

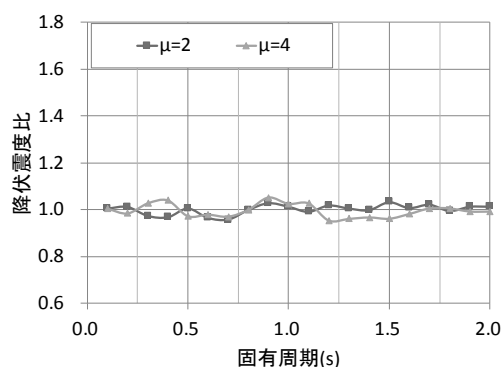


図-25 降伏震度比 (Case3/Case1: 楕円形/直線)

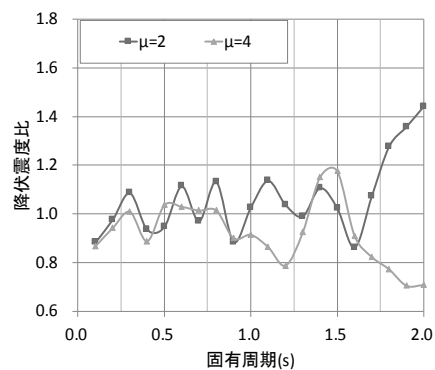


図-26 降伏震度比 (Case4/Case1: 実位相/直線)

5. まとめ

本研究では、従来の非線形応答スペクトルを2次元に拡張した2方向非線形応答スペクトルを考案した。また、考案した2方向非線形スペクトルと降伏震度比を用いて、同一の2方向弾性応答スペクトルに適合するが、加速度軌跡の異なる2方向地震動の評価を行った。本研究の成果を以下にまとめる。

- 1) 従来の非線形応答スペクトルを2次元に拡張した2方向非線形応答スペクトルを考案した。2方向非線形応答スペクトルの算出には、水平2方向の非線形応答の相互作用を考慮できるMSSモデルを用いた。また、2方向非線形応答スペクトルを用いることにより、2方向入力地震動の入力強度を評価することが出来た。
- 2) 同一の2方向弾性応答スペクトルに適合するが、加速度軌跡の異なる2方向地震動の2方向非線形応答スペクトルを比較した場合、加速度軌跡が円形軌跡である場合の2方向非線形応答スペクトルが大きくなる傾向を示した。
- 3) 円形軌跡と1方向入力の降伏震度比（非線形応答スペクトルの比）は1.0以上となる傾向を示し、2方向入力による影響が大きいことが示された。また、周期によっては降伏震度比は1.6以上にもなった。
- 4) 楕円形軌跡と1方向入力の降伏震度比は固有周期によらず約1.0の値を示し、2方向入力による影響は小さいことが確認できた。
- 5) 実位相軌跡と1方向入力の降伏震度比は周期帯による変動が大きく、約0.7～1.4の範囲となった。また、周期によっては降伏震度比は1.0以下となる場合もある。

参考文献

- 1) 土屋智史, 千々和伸浩, 原田光男, 三島徹也, 前川宏一: 近接するLNG地下タンク群と地盤で構成されるタンクヤード全体の3次元動的応答解析, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 71, No.3, pp. 429-448, 2015.
- 2) 八ツ元仁, 馬越一也, 金治英貞, 野中哲也, 中村真貴: 大規模計算による長大橋地震応答解析の構造要

素モデルの高度化に関する検討, 土木学会 第20回応用力学シンポジウム講演概要集pp. 107-108, 2017.

- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 丸善, 2012.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 2012
- 5) 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-2015.
- 6) 福浦尚之, 前川宏一: 非線形支配ひび割れ面の三次元同定と空間平均化構成則の高度化, 土木学会論文集E Vol.65 No.1, pp.118-137, 2009, 3
- 7) Nishimura,S. and Towhata,I: A three-dimensional stress-strain model of sand undergoing cyclic rotation of principal axes,*Soils and Foundations* Vol.44,No.2,pp.103-116,2004.4
- 8) 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.
- 9) Igarashi, A. and Gigy, 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.
- 10) 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こうあ土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 72, pp. I_555-I_568, 2016.
- 11) 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃: 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, 第36回土木学会地震工学研究発表会, B21-958, 2016, 10.
- 12) 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.
- 13) 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..
- 14) 井上和真, 五十嵐晃, 渡辺和明: 2方向非線形応答スペクトルを用いた水平2方向地震動の評価, 土木学会第20回応用力学シンポジウム講演概要集pp. 255-256, 2017