

1. はじめに

入力地震動の多次元性を考慮した構造物の耐震性能照査への適用を目的に、与えられた応答スペクトルに適合する水平 2 方向地震動の加速度波形を生成する手段として、1 方向のスペクトル適合地震動とその「相補直交成分波」を組み合わせで作成する方法²⁾が提案されている。この方法では 360° 全ての加振方向に関して入力の応答スペクトル強度が一樣になる性質（特定の方向性を持たない等方性）を近似的に持つ 2 方向入力が見られる。しかし、例えば道路橋示方書¹⁾の照査方法のような一方向の入力地震動に比べ構造物に対する作用が結果的にやや大きく現れる傾向があることや、構造物モデルへの地震動作用の近似の観点から見た場合、実際の入力の持つ方向性が完全に無視されている等の課題があった。そこで本研究では、生成される水平 2 方向入力地震動の楕円偏極指標に着目することで、構造物の耐震性能の検証への適用性の高いスペクトル適合水平 2 方向入力地震動を作成する方法を提案する。

2. 水平 2 方向入力地震動の分析

(1) 水平 2 方向入力のスペクトル適合：その入力の 2 方向応答スペクトル (bi-axial response spectrum) が、与えられた応答スペクトルに一致することと定義する²⁾。ここで 2 方向応答スペクトルとは、様々な固有周期 T の等方な 2 次元線形弾性 1 質点振動子の水平 2 方向入力に対する応答軌跡の動径方向最大値（2 方向応答の合成値の最大値）と固有周期 T との関係であり、従来の応答スペクトルの概念を 2 次元に拡張したものである。

(2) 楕円偏極指標：地震動に伴う 3 次元的な粒子運動の軌跡を定量化する手法である楕円偏極フィルタ (Complex Polarization Filter) 分析³⁾では、粒子運動の軌跡を楕円運動とした時の楕円の扁平度に相当する楕円偏極指標 P_E が定義される (図 1 参照)。楕円偏極指標 P_E は $0 \leq P_E \leq 1$ の範囲の値を取る時刻 t の関数であり、値が 0 であれば特定の方向性を有する一方向に近い入力であり、1 であれば特定の方向性を持たない円運動に対応する。

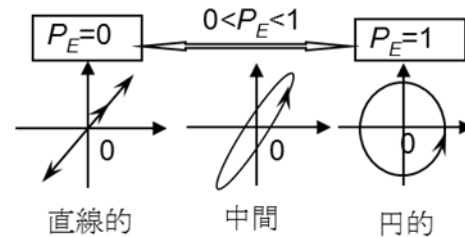


図 1 楕円偏極指標と平面軌跡の関係

3. 楕円偏極指標を規定した水平 2 方向地震動の作成

与えられた応答スペクトルに適合するとともに、楕円偏極指標 P_E の値が予め与えた値 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) となるような水平 2 方向地震動は、以下の手順により作成することができる。

1. 与えられた応答スペクトルに適合する 1 方向加速度波形 $a_x(t)$ を用意する。例えば、道路橋示方書の設計スペクトルに対しては、振幅調整を行った「標準波」が与えられている。
2. この波形のヒルベルト変換を計算し、「相補直交成分波」 $a_y(t)$ を作成する。
3. x - y 軸平面座標における x 軸からの偏角が θ となる方向を定義し、2 次元ベクトル $\{a_x(t), a_y(t)\}$ のその直角方向成分のみ α 倍した 2 方向ベクトル $\{a'_x(t), a'_y(t)\}$ を算出する。

$$\begin{Bmatrix} a'_x(t) \\ a'_y(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\alpha \sin \theta & \alpha \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{Bmatrix}$$

得られた $\{a'_x(t), a'_y(t)\}$ が、求める水平 2 方向加速度波形である。

α の具体的な値は、実際の地震動の分析に基づいて決定することが考えられる。図 2(a) に示す兵庫県南部地震での東神戸大橋記録での例を示す。本記録の楕円偏極指標 $P_E(t)$ と合成加速度 $(a_{EW}^2(t) + a_{NS}^2(t))^{1/2}$ の関係を図 2(b) に示す。その重み付き平均は $\alpha=0.2566$ であった。道路橋示方書のレベル 2 地震動のタイプ II・III 種地盤用の標準波 II-III-3 より、提案手法 ($\theta=50^\circ$ を仮定) により作成した水平 2 方向入力を作成した結果を図 2(c) に示す。楕円偏極指標と合成加速度の関係を同様に整理した結果を図 2(b) に重ねて示している。図 3 に示すように、スペクトルの適合は十分に確保されている。

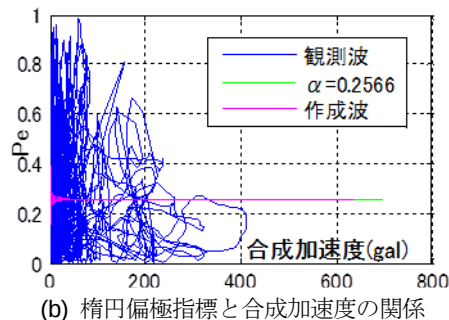
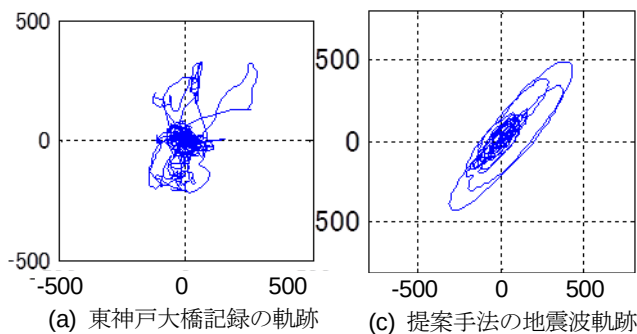
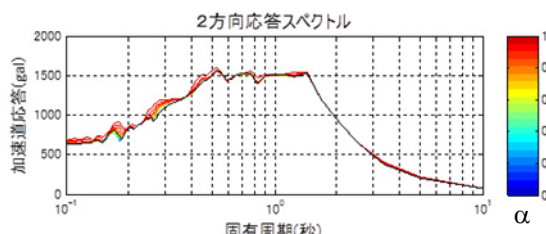


図2 観測記録波と作成した水平2方向地震動



4. 弾塑性系モデルの応答の検討

提案手法により作成した2方向地震波を1質点弾塑性系モデルに入力した場合の応答を検討する。弾塑性復元力モデルとして、図4に示すバイリニア型の Multi-Shear Spring (MSS)モデルを用いた。モデル特性値を表1に示す。短周期、長周期とその中間の周期に相当する3種類の弾性固有周期を設定して検討を行った。

ケースI(固有周期=0.4s)での変位応答軌跡を図5に、変位-復元力特性を図6に示す。参考のため標準波を1方向入力した際の最大変位応答を半径とする円も重ねて示している。 $\alpha=1$ の入力では1方向入力や提案手法による入力の場合よりも大きな応答が生じている。

弾塑性最大応答変位と楕円偏極指標 α の関係を図7に示す。3本の実線は、各ケースについて α を0~1で変化させて作成した水平2方向入力の結果に対応している。提案手法により作成した入力の最大変位応答は赤点に、標準波は緑点に、標準波-相補直交成分波入力では $\alpha=1$ の値に相当する。

これ以外の複数の標準波(5波)を基にして作成した

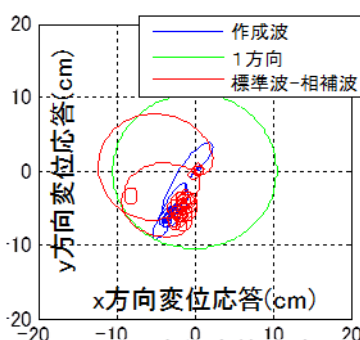
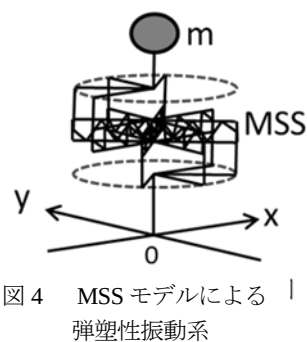
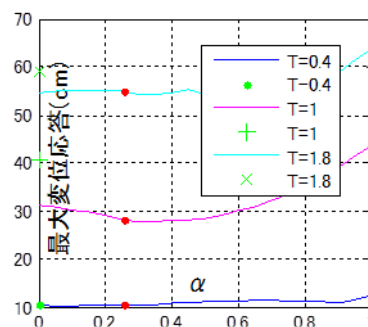
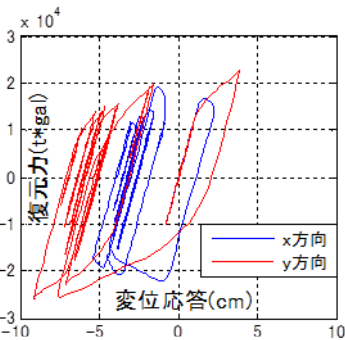


表1 振動系特性値と計算ケース

質量	50(t)		
降伏力	24525(t*gal)		
2次剛性比	0.05		
	ケースI	II	III
弾性固有周期	0.4s	1s	1.8s
1次剛性	12337 (t/s ²)	1974 (t/s ²)	609 (t/s ²)
降伏変位	1.99(cm)	12.42 (cm)	40.25 (cm)



2方向入力について同様の比較を行った。提案手法により作成した入力の場合の最大変位応答は標準波-相補波入力時よりも小さくなるが、標準波の1方向入力時の最大変位応答の大小関係は、入力波やモデルの弾性固有周期により異なることがわかった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012。
- 2) 五十嵐・井上・古川・宇野・松田：標準波-相補直交成分波の組み合わ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, 68(4), pp.I_458-I_469, 2012。
- 3) Vidale, J.E.: Complex polarization analysis of particle motion, Bull. Seism. Soc. Am. 76(5), pp.1393-1405, 1986。