

水平 2 方向入力加速度軌跡が構造モデルの非線形応答に及ぼす影響

大成建設(株) 正会員 ○井上 和真 正会員 渡辺 和明
京都大学防災研究所 正会員 五十嵐 晃

1. はじめに

解析環境の向上に伴い、耐震設計において構造物や地盤の非線形性を考慮した 3 次元地震応答解析が一般に適用され始めている。しかしながら、多次元挙動における地震動の入力と構造物応答の関係は、十分に解明されていない。その 1 つとして、水平 2 方向入力加速度軌跡が非線形応答に及ぼす影響は、設計用水平 2 方向地震動の設定において重要な課題として挙げられる。本研究では、特徴の異なる加速度軌跡を有する水平 2 方向入力とした場合の構造物の地震応答に着目して検討を行った。

2. 水平 2 方向入力による動的解析の条件

検討に用いる地震動としては、道路橋示方書のレベル 2 地震動タイプⅡのⅡ-Ⅱ-1 地震動(以下、Ⅱ-Ⅱ-1 波)を基本とし、以下の 4 ケースを設定した。なお、各ケースの 2 方向入力による 2 方向応答スペクトル¹⁾は同一の大きさを有するものとした(図-1)。

- ・Case1 加速度軌跡：斜め入射 x 方向：Ⅱ-Ⅱ-1 波 $\times\sqrt{2}$ y 方向：Ⅱ-Ⅱ-1 波 $\times\sqrt{2}$
- ・Case2 加速度軌跡：円形軌跡 x 方向：Ⅱ-Ⅱ-1 波 y 方向：Ⅱ-Ⅱ-1 のヒルベルト変換波¹⁾
- ・Case3 加速度軌跡：楕円形軌跡 x 方向：Ⅱ-Ⅱ-1 波 y 方向：Ⅱ-Ⅱ-1 のヒルベルト変換波 $\times 0.3$ 倍²⁾
- ・Case4 加速度軌跡：ランダム軌跡 x 方向：兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波 EW 成分振幅調整波
 y 方向：兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波 NS 成分振幅調整波

Case4 は兵庫県南部地震の JR 鷹取駅の観測波の水平 2 成分による 2 方向応答スペクトルを、Ⅱ-Ⅱ-1 波の応答スペクトルに適合したものである。なお、2 方向応答スペクトルへの適合は、従来の 1 方向の応答スペクトルへの適合方法である振幅調整を水平 2 方向に拡張したものであり、位相は原波から調整していない。

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-1 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²⁾。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の非線形特性はバイリニア型の弾塑性モデルとした。

3. 動的解析結果

表-2 に入力加速度軌跡と弾性固有周期 1.0 秒とした場合の応答変位軌跡の例を、表-3 に各ケースにおける最大応答変位を示す。せん断ばねが線形の場合、各ケースの 2 方向応答スペクトルが等しいことにより、同程度の最大応答変位となっている。これに対して非線形の場合、水平 2 方向入力を直線状やランダムな加速度軌跡としたケースと比べて、Case2 のような円形状の軌跡とするケースの方が、最大応答変位は大きくなる傾向となった。

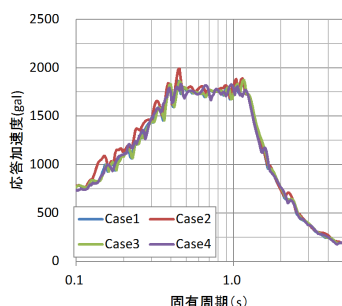


図-1 各ケースの 2 方向応答スペクトル

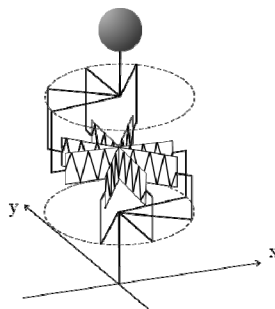


図-2 MSS モデルの概要図

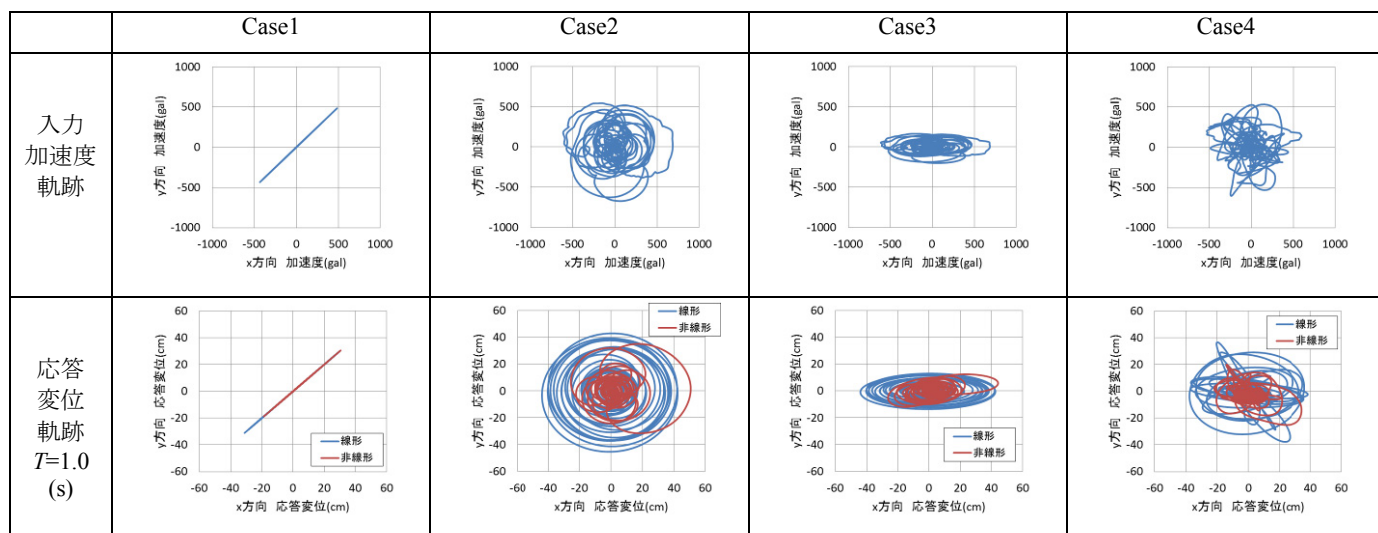
表-1 モデルの諸元²⁾

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

キーワード 水平 2 方向入力, 2 方向応答スペクトル, 加速度軌跡, MSS モデル

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株) 原子力本部 TEL 03-5381-5196

表-2 入力加速度軌跡と応答変位軌跡の例 (T=1.0(s))



4. 2方向静的変位増分解析による分析とまとめ

構造物の非線形地震応答は、塑性化に伴う長周期化や履歴減衰による減衰特性の変化など、様々な要因の影響を受ける。そこで、動的解析における入力加速度軌跡と非線形応答の関係を簡易な2方向静的変位増分解析により分析する。

表-1の弾性固有周期が0.4秒のモデルに対して、図-3に示す軌跡の異なる3ケースの強制変位を降伏変位の5倍まで与える。図-4に2方向合成の強制変位と解析ステップの関係を示す。解析は4つのフェーズに分けて行い、フェーズ1と3の終了時には各ケースでの強制変位量は異なるが、フェーズ2と4の終了時は各ケースで水平面内で同一の強制変位量となる。静的変位増分解析のCase A, Case B, Case Cは、それぞれ動的解析のCase1, Case2, Case3に対応している。また、図-5にばね反力より得られる2方向合成の荷重と解析ステップの関係を示す。フェーズ2およびフェーズ4終了時の2方向合成荷重を各ケースで比較すると、同じ強制変位量にも関わらずCase AおよびCase Cの荷重はCase Bの荷重を上回る結果となった。この結果における各ケースの荷重差は、载荷経路の中での各ばねの载荷・除荷の状態や塑性化の度合い等の応答状態によって生じており、载荷経路を考慮した荷重は、Case Bが一番小さいことから、動的解析結果と同様の傾向を示した。以上より、MSSモデルに対して、同じ2方向応答スペクトルで異なる加速度軌跡の水平2方向入力とした場合に、Case Bのような円形軌跡の入力が厳しくなる傾向を示した。

表-3 動的解析結果

解析ケース	構造物モデル	最大応答変位 (cm)		
		T=0.4(s)	T=1.0(s)	T=1.8(s)
Case1	線形	7.0	44.0	73.0
	非線形	7.3	43.1	59.1
Case2	線形	7.1	45.8	74.2
	非線形	10.0	50.8	81.3
Case3	線形	7.0	44.0	73.0
	非線形	7.8	44.6	58.1
Case4	線形	7.0	45.1	72.5
	非線形	8.0	39.1	50.2

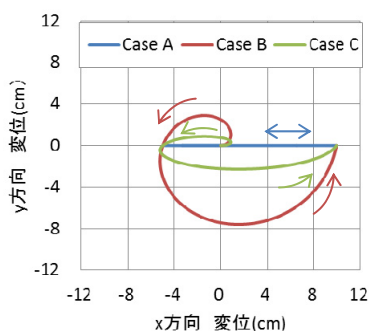


図-3 強制変位の軌跡

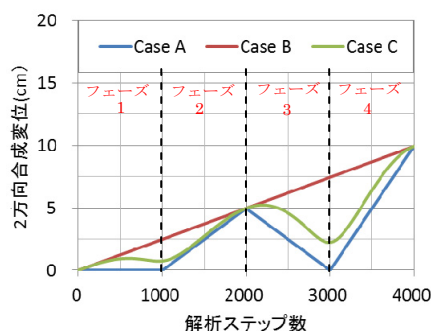


図-4 強制変位-解析ステップ関係

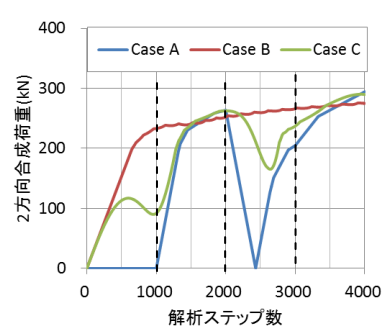


図-5 荷重-解析ステップ関係

参考文献

- 1) 五十嵐, 井上, 古川, 宇野, 松田: 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, 土木学会論文集中A1(構造・地震工学), Vol. 68, pp. I_458-I_469, 2012.
- 2) 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.