

バイリニア型 1 自由度系に対する限界地震動の作成について

金沢大学大学院 学生会員 ○ 梅田 洋平

金沢大学大学院 学生会員 Abdolhossein Fallahi

金沢大学工学部 河合 梨絵子

金沢大学工学部 フェロー 北浦 勝

1.はじめに

土木学会による土木構造物の耐震基準等に関する提言¹⁾におけるレベル 2 地震動の定義は、“極めて稀であるが非常に強い地震動”、“構造物が損傷することを考慮し、その損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査する水準を示す設計地震動”となっている。

さらなる提言として、“現在から将来にわたり、当該地点で考えられる最大級の強さを持つ地震動”とされている。これらの提言から、レベル 2 地震動の本質は内陸直下地震による強力な地震作用の上限を示すことにある。これが限界地震動の基本的概念である。

主要な構造物全てに対して、順次このような地震動を設定すること、普遍的な規定を見出すことは困難な問題である。そのため、対象構造物毎に順次解決していく必要がある。

本研究では、対象構造物の限界地震動を“既往最大”と“確率論”の考えをもって作成し、その検証を行う。

2.対象強震記録と対象構造物

道路橋示方書²⁾で既定された構造物の耐震性照査において、「加速度波形としては、一般に 1 波形だけではなく、3 波形程度」を用いることを推奨し、「3 波形程度の応答に対する平均値を持って耐震性の照査をするのがよい」としている。

そこで、本研究では、1995 年兵庫県南部地震における強震記録を用いて、地盤種別ごとの限界地震動の作成とその検証を行う（表-1）。

対象構造物としては、固有振動数 $f_n=3\text{Hz}$ (固有周期 $T_n=0.3\text{s}$)、減衰定数 $\zeta=2\%$ 、降伏変位 $X_y=3.43\text{cm}$ 、第 2 剛性と第 1 剛性の傾きの比 $k_2/k_1=0.05$ であるバイリニア復元力を有する 1 自由度系を対象構造物とした場合を中心に説明する。

3.限界地震動波形の作成手法

次に示す 3 手法は、地震動波形の振幅特性、すなわち包絡線や最大値と、全継続時間に対する振動特性に注目し、これらの相対誤差が限界地震動波形と基準地震動波形とである範囲内にあるという制約条件を満足させるようにした。

3-1.特定振動数成分増強法

- 対象とする地震の加速度波形を数区間に分けたのち以下のステップを繰り返すことにより作成される。
1. 第 1 区間の加速度波形を基に構造物モデルの応答変位を算出する。
 2. 構造物モデルの応答変位を解析することで導出される第 1 区間におけるパワースペクトル密度³⁾ (Power Spectral Density : 以下 PSD とする)の卓越振動数を f_p とする。
 3. 第 2 区間の PSD を $f_p - \Delta f_p$ から $f_p + \Delta f_p$ 、幅 $2\Delta f_p$ の範囲で $a\%$ 増幅させ、同時に他の振動数領域では PSD を減少させ、PSD の面積が基と同じ値となるようにする。
 4. この加工された PSD から確率分布を求める。
 5. 得られた振動数の確率分布から地震波形 (模擬地震波) を作成する。
 6. 対象とする地震の加速度波形の包絡線を作成された地震波形に乗ずる。
- 以降、ステップ 6 で得られた限界地震波をステップ 1 に転用して、1~6 のステップをさらにに行い、次区間

表-1 1995 年兵庫県南部地震における強震記録

地盤種別	マグニチュード	記録場所	成分	最大加速度 (gal)
Ⅰ 種地盤	7.2	気象庁神戸海洋気象台地盤上	NS	812.02
		阪高 猪名川架橋予定地点地盤上	NS	780.05
JR鷹取駅構内地盤上		NS	686.83	
Ⅱ 種地盤		大阪ガス葛合供給所構内地盤上	N30W	736.33
Ⅲ 種地盤		阪高 被害氏神戸大橋周辺地盤上	N12W	591.03
		ポートアイランド地盤上	EW	619.19

における限界地震波を作成する。以上の過程を繰り返し、各区間における限界地震波が作成される。それらの波形を繋ぎ合わせたものを限界地震動とする。

3-2. 非定常パワースペクトル $G(t, f)$ を使用する方法

本方法は、地震動波形のパワーの大きい時刻と対象とする振動系の固有振動数成分が大きくなる時刻とを合致させ、応答を一気に大きくするという考えに基づくものである。そのためには、地震動波形の各振動数成分の時間的变化、すなわち非定常パワースペクトル密度をできる限り正確に計算する必要があることから、ここでは亀田の非定常パワースペクトル $G(t, f)$ ⁴⁾ を用いた。

バイリニア系においては、変位応答が大きくなるにつれて卓越振動数は低下するが、たいていの時間では線形時の固有振動数で振動している。そこで線形時の固有振動数 f_n の成分 $G(t, f_n)$ が最大の時刻 t_1 を地震動波形のパワーの大きい時刻 t_2 に移動させる。このとき移動させる非定常パワースペクトルの成分の数は f_n に対応する1つもしくは、 f_n 周辺の複数個である。これらのスペクトルを加え合わせた波形を限界地震動とする。

3-3. 多重フィルター $F(t, f)$ を使用する方法

本方法は、前節の非定常パワースペクトルの考え方に類似している。

非定常パワースペクトルの代わりに1自由度系の加速度応答 $F(t, f)$ を振動数成分として使用する。

対象構造物の線形時における固有振動数付近の成分を地震動波形のパワーの大きい時刻に移動させて限界地震動波形を作成する。

なお、線形多重フィルターを用いる場合、得られた波形の固有振動数付近のパワースペクトル密度が大きくなり、パワースペクトル密度の包絡線の最大値同士の相対誤差が30%以内に収まらなかったため、フィルターを線形系から非線形弾性系の運動方程式に替えた。

$$\ddot{x}(t) + 2h\omega_n \dot{x}(t) + \omega_n^2 R\{x(t)\} = -\ddot{y}(t) \quad (\ddot{y}(t) ; \text{基準地震動波形}) \quad \dots (2)$$

このとき、 $x(t)$ と $R\{x(t)\}$ の関係を $x = R + \varepsilon R^3$ なるソフトスプリング型とした。なお R に関する3次式の ε を定めるためにいくつかの基準地震動波形に対して試算した結果、 $\varepsilon = 0.8$ が全体的に良い結果を与え、以降、この値を用いた。これらの加速度応答を加え合わせた波形を限界地震動とする。

4. 限界地震動波形の検証

神戸海洋気象台の波形(基準地震動波形)と特定振動数成分増強法(手法1)、非定常パワースペクトル法(手法2)、多重フィルター法(手法3)によるその限界地震動波形の対象構造物への入力シミュレーションの結果、手法1、2において基準波形を上回る変位応答を示した。(図1)特に、手法1では、限界地震動に対する塑性率1.8がとなり、基準波形に対する塑性率の1.5倍となった。

しかし、手法3による限界地震動では、基準波形に比べるとその塑性率は低い値となった。このことからこの手法は、狭帯域の振動数特性を有している地震動波形では有効ではないと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会 耐震基準等に関する提言集、1996。
- 2) 社団法人：日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1996。
- 3) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版社、pp. 83 - 84、1994。
- 4) 亀田 弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察、土木学会論文報告集、No. 235、pp. 55-62、1975。
- 5) Abdolhossein Fallahi・北浦 勝・宮島 昌克：構造物の非線形性と地震動の非定常性を考慮した耐震性照査のための地震動波形の作成、土木学会地震工学論文集、2003. 12 (CD-ROM)。

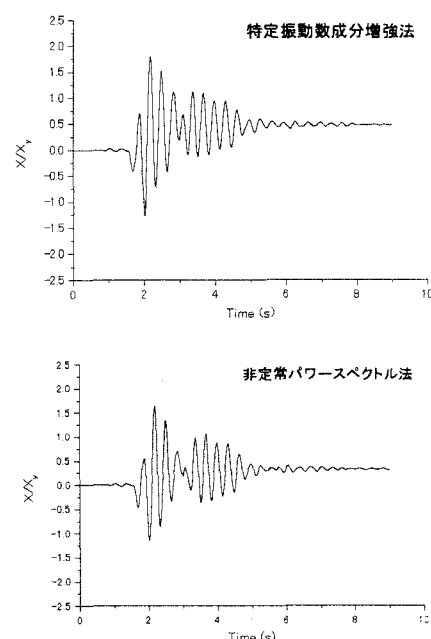


図-1 限界地震動入力による応答