

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

九州大学大学院 学生会員 ○内藤 伸幸
九州大学大学院 正会員 松田 泰治
九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲

1. はじめに

現在道路橋示方書で定められている動的解析に用いる標準波は線形系の加速度応答スペクトルを基に振動数領域で振幅補正が加えられたものである。したがって非線形系に対しては必ずしも必要とする強度の入力を与えていない。そこで本研究ではエネルギー入力スペクトルを基に振動数領域で振幅補正を行った模擬地震波の作成を試みた。そして従来の方法によって作成された波と本手法によって作成した波を非線形系に入力し、応答の比較を行った。

2. エネルギー入力スペクトル

粘性減衰を考慮した1自由度系の運動方程式(1)の両辺に微小時間における系の変位量を乗じて地震の全継続時間にわたって積分するとエネルギーの釣り合い式(2)が得られる。これを質量に依存しないよう等価速度 V_E に換算したものを周期に対してプロットしたものがエネルギー換算速度応答スペクトル(V_E スペクトル)である。 V_E スペクトルの以下に示す特性を基に地震波の振幅補正を行った。

- ・ 無減衰弾性1自由度系の V_E スペクトルはフーリエ振幅スペクトルと一致する
- ・ 減衰系・完全弾塑性系の V_E スペクトルはフーリエ振幅スペクトルを単に平滑化したものに近似する。

3. スペクトル適合法による模擬地震波の作成

(1) 目標とする模擬地震波の特性

保耐法で定めるTYPE2の地震動を想定して神戸海洋気象台 NS 成分の観測波(Jmakobe-ns)(図-1)より減衰弾性系($h=0.1$)の V_E スペクトルを包絡することで減衰弾性系($h=0.1$)に対する目標 V_E スペクトルを定めた。(図-2) また完全弾塑性系では短周期側で減衰弾性系よりもエネルギー入力が大きくなることから、図-3に示すように完全弾塑性系($\alpha=0.5$)の V_E スペクトルを包絡することで完全弾塑性系($\alpha=0.5$)に対する目標 V_E スペクトルを定めた。

(2) 模擬地震波の作成手順

以下に示す手順で模擬地震波の作成を行った。

1. 初期振幅及び位相特性を定める
2. フーリエ逆変換によって加速度時刻歴を求める
3. 2. で求めた加速度から V_E スペクトルを計算し目標スペクトルに適合するように振幅補正を行う
4. 収束誤差を求め、許容誤差(0.05と定めた)より大きければ2.に戻る。許容誤差以下であれば終了する

ここで弾性1自由度系の V_E スペクトルがフーリエ振幅を平滑化したものと近似であることから、減衰定数0.1の目標スペクトルを初期振幅とした。また手順2. では地震終了時の残留速度が0となるように基線補正を行っている。手順3. で計算する V_E スペクトルの減衰定数および降伏震度は模擬地震波の作成条件として指定する。収束誤差は、目標 V_E の値と3. で計算した V_E の比を各周期で求めこれを2乗平均したものである。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + F(y) = -m\ddot{z}_0 \quad (1)$$

$$m \int_0^{t_0} \ddot{y} dt + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = -m \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y} dt = E \quad (2)$$

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (3)$$

m : 質点質量, $c\dot{y}$: 粘性減衰力,
 $F(y)$: 復元力, $-m\ddot{z}_0$: 地震外力,
 y : 地震による地動変位, z_0 : 質点相対変位

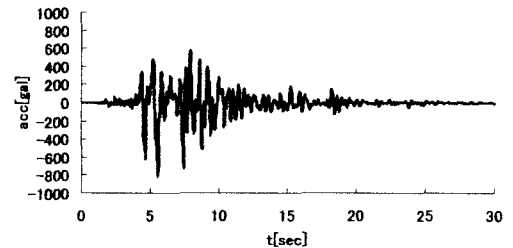
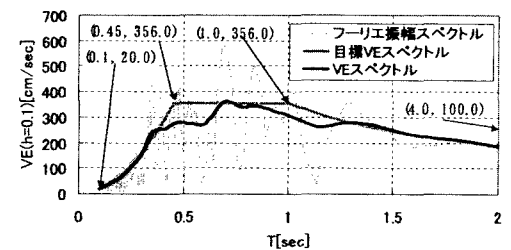
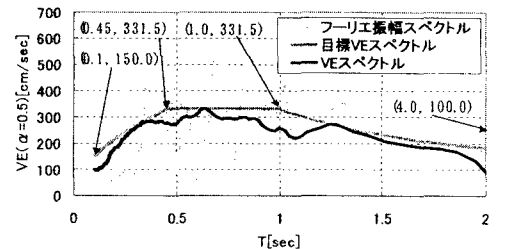


図-1 神戸海洋気象台NS成分

図-2 目標 $V_E(h=0.1)$ スペクトルの設定図-3 目標 $V_E(\alpha=0.5)$ スペクトルの設定

(3) 作成した模擬地震波の特性

例として Jmakobe_ns の位相を用いて減衰弾性 1 自由度系 ($h=0.1$) および完全弾塑性 1 自由度系 ($\alpha=0.5$) の V_E スペクトルをそれぞれの目標スペクトルに収束させて模擬地震波を作成した。図-4 は減衰弾性 1 自由度系 ($h=0.1$) の V_E スペクトルを目標スペクトルに適合させた加速度波形「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」である。図-5 にその V_E スペクトルの収束状況を示している。収束に要した振幅補正の回数は 3 回で収束誤差は 0.035 となった。図-6 は完全弾塑性 1 自由度系 ($\alpha=0.5$) の V_E スペクトルを目標スペクトルに適合させた加速度波形「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」である。収束に要した振幅補正の回数は 2 回で収束誤差は 0.050 となった。図-7 はその収束状況を示している。振幅補正はいずれも固有周期 0.1~5.0 秒の範囲で行っている。

図-8、9 では「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」・「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」および加速度応答スペクトル($h=0.05$)を道示の標準加速度応答スペクトル(タイプⅡの 1 種地盤)に適合させて作った波「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」をそれぞれ同じ降伏震度 0.5 の系に入力したときの V_E スペクトルと応答塑性率の比較を行っている。

図-8 に V_E スペクトルの比較、図-9 に応答塑性率の比較を示す。図-8 より V_E スペクトルは「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」では周期の変化に対して変動が大きい、図-9 より「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」が周期の変化に対して応答塑性率が大きく変動する個所が存在するのに比べて「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」・「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」は周期の変化に対して応答塑性率の変動が小さい。別の位相を用いて作成した波についても程度の違いはあるが同様の傾向にあることを確認している。

4. まとめ

地震入力エネルギーを基にして入力地震動を設定する方法を提案した。解析結果の比較より周期の変化に対して応答塑性率の変動が少ない平等な入力を与える手法を示した。また今回は減衰系のエネルギー入力スペクトルを振幅補正の基準とした波と完全弾塑性系のエネルギー入力スペクトルを振幅補正の基準にした波の応答にあまり差異が認められなかった。今後は降伏震度の異なる系に対しても検討する必要がある。

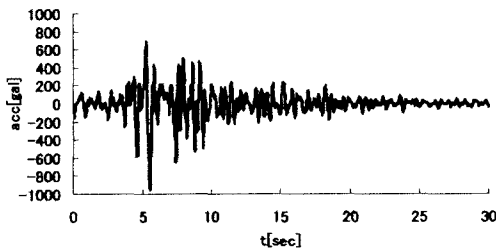


図-4 $V_E(h=0.1)$ 適合波

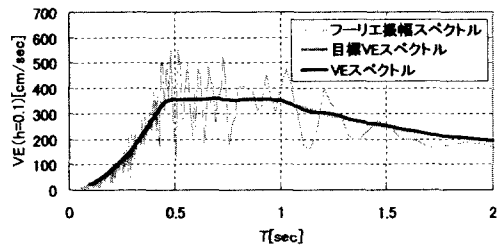


図-5 $V_E(h=0.1)$ の収束状況

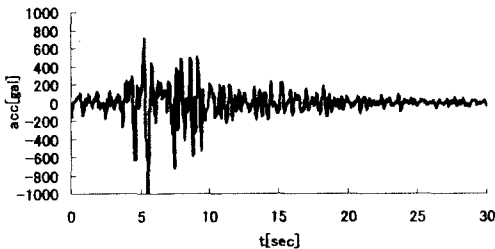


図-6 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波

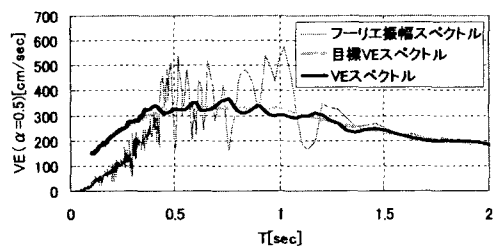


図-7 $V_E(\alpha=0.5)$ の収束状況

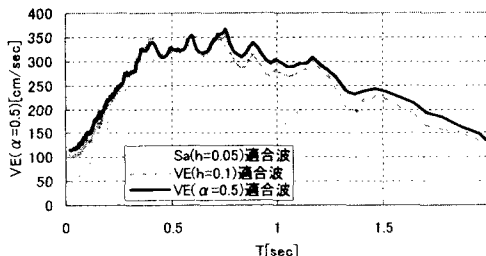


図-8 V_E スペクトル比較(位相: Jmakobe_ns)

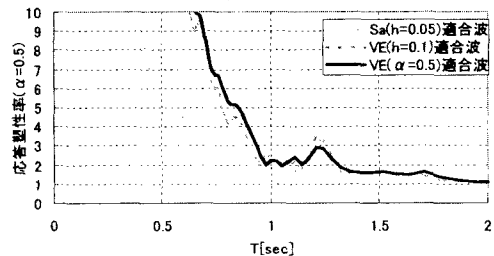


図-9 応答塑性率比較(位相: Jmakobe_ns)