

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

松田泰治¹・大塚久哲²・内藤伸幸³

¹正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究科建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³学生員 九州大学大学院修士 工学府建設システム工学 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

1. はじめに

平成8年に改定された道路橋示方書では、地震時に複雑な挙動を示す橋梁の設計を行う際には時刻歴応答解析による照査が義務付けられている。時刻歴応答解析に用いる地震動としては、架橋地点で観測された強震記録を用いるのが望ましいが、一般にはそのような記録は得られていない場合が多い。そこでこれまで、道路橋示方書に示されている標準加速度応答スペクトルに従い、地盤種別毎に観測で得られた加速度波形の位相を用いて振動数領域で振幅調整した波を入力地震動として用いている。しかしこの振幅補正は線形系の加速度応答をもとに行うため、非線形挙動を考慮した構造物に対しては、必要な強度の地震入力を与えていたとはいえない。

そこで本研究では、エネルギー入力スペクトルに基づいて振動数領域で地震波の振幅補正を行った模擬地震波を作成することを試みた。また加速度応答スペクトルに基づいて振動数領域で振幅補正を行って作成した模擬地震波と本方法による模擬地震波をそれぞれ非線形系に入力した場合の応答比較を行った。

2. エネルギー入力スペクトル

ここでは、本研究で用いるエネルギー入力スペクトルについて説明する。1自由度系モデルの粘性減衰を考慮した振動方程式は(1)式である。

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

ここで、

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

(1)式の両辺に微小時間における系の変位量をかけ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

釣り合いを表す(2)式が得られる。

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

(2)式において左辺第1項は地震終了時の運動エネルギー、第2項は粘性減衰による吸収エネルギー、第3項は履歴吸収エネルギーそして右辺は地震動による系へのエネルギー入力の総量 E を表す。このエネルギー入力の総量は式(2)に示されるとおり質量 m に依存する。このため(3)式により等価速度 V_E に換算し、構造物の規模に依存しない形で一般化して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(以下 V_E スペクトルと略す)である。

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

V_E スペクトルの特徴として以下のものがある。

- ・ 無減衰弾性1自由度系の V_E スペクトルは、地震加速度の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。

また V_E スペクトルは、構造物の弾性固有周期のみに支配され、それ以外の構造特性にはほとんど依存しないきわめて安定した量である。^{1), 2)}

そこで本研究では、非線形系に対して必要な強度を持つ模擬地震波を作成するために、一般に用いられる加速度応答スペクトルや速度応答スペクトルではなく、この V_E スペクトルを用いることにした。

3. スペクトル適合法³⁾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

スペクトル適合法では、振動数領域で振幅調整を行うための目標スペクトルが必要である。本研究では内

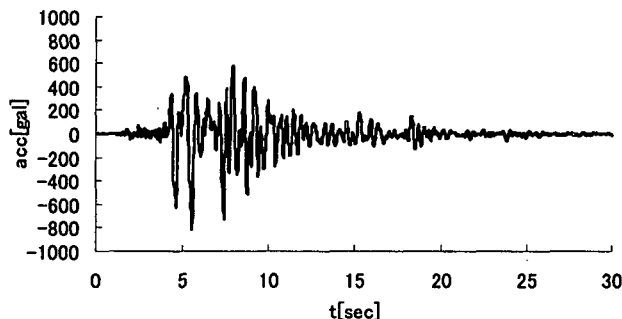


図-1 神戸海洋気象台NS成分

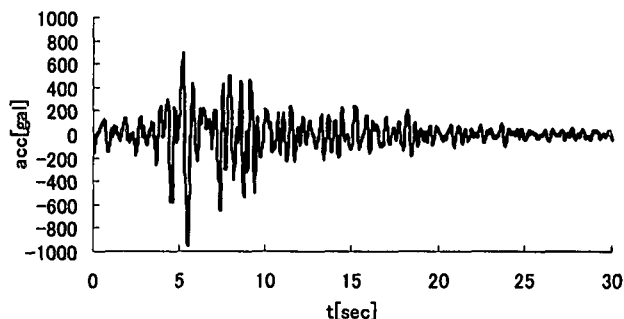


図-4 $V_E(h=0.1)$ 適合波

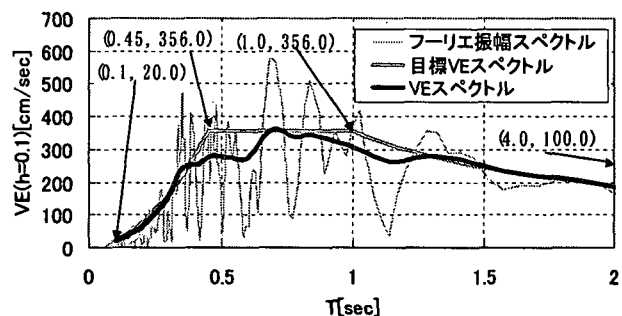


図-2 目標 $V_E(h=0.1)$ スペクトルの設定

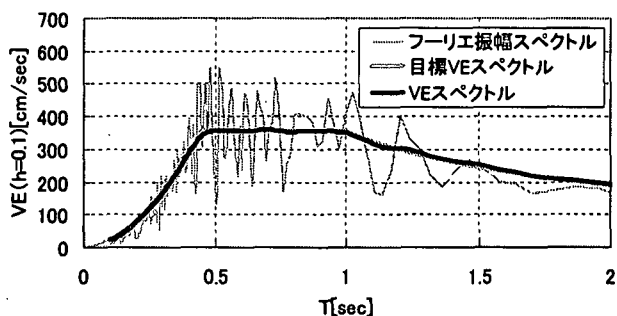


図-5 $V_E(h=0.1)$ の収束状況

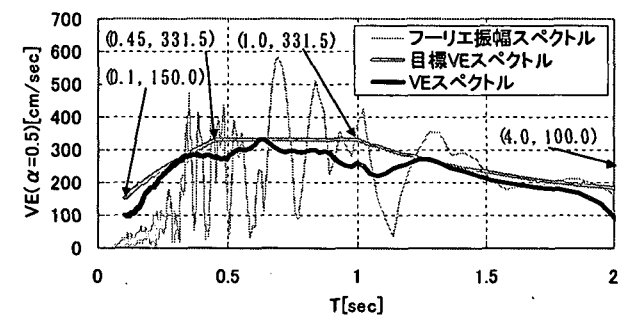


図-3 目標 $V_E(\alpha=0.5)$ スペクトルの設定

陸直下型の地震動(TYPE II)を想定して、図-1に示す神戸海洋気象台 NS 成分の観測波(Jmakobe-ns)より減衰弾性 1 自由度系 (減衰定数 $h=0.1$) の V_E スペクトルを求め、これを図-2のように包絡することで、減衰弾性 1 自由度系 ($h=0.1$) に対する目標スペクトルを定めた。一方「 V_E スペクトルの短周期側の値が完全弾塑性 1 自由度系のほうが減衰弾性 1 自由度系よりも大きい」ことから、完全弾塑性 1 自由度系の V_E スペクトルを図-2の目標スペクトルに適合させることは適当でない。このため図-3のように完全弾塑性 1 自由度系 (降伏震度 $\alpha=0.5$) の V_E スペクトルを包絡して完全弾塑性 1 自由度系 ($\alpha=0.5$) に対する目標スペクトルを別途定めた。

(2) 模擬地震波の作成手順

以下の手順に従って模擬地震波を作成する。

1. 初期振幅およ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。

(3) 作成した模擬地震波の特性

まず例として 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、その収束性についての検討を行った。

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。振幅補正は固有周期 0.1~5.0 秒の範囲で行っている。 V_E スペクトルは目標スペクトルに非常によく収束し、(2)に示した手順を 3 回繰

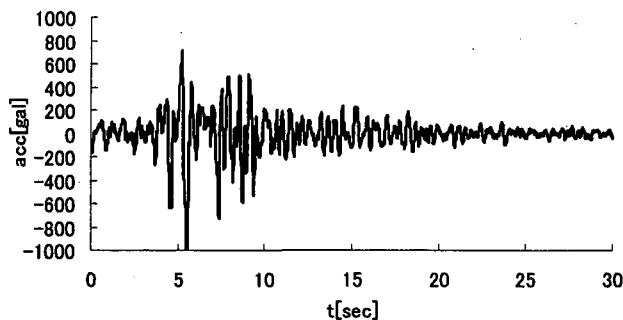


図-6 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波

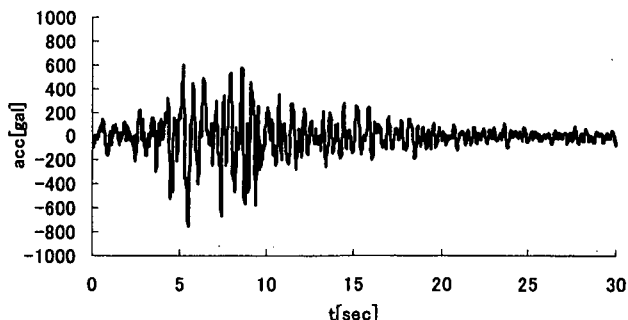


図-8 $Sa(h=0.05)$ 適合波

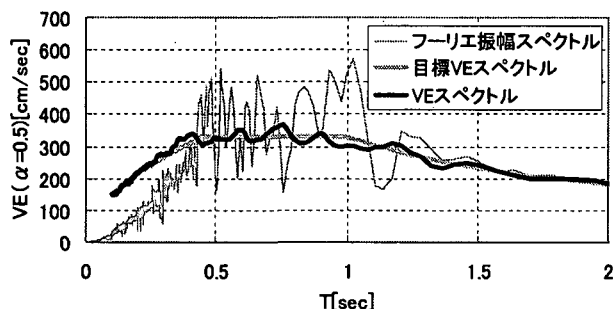


図-7 $V_E(\alpha=0.5)$ の収束状況

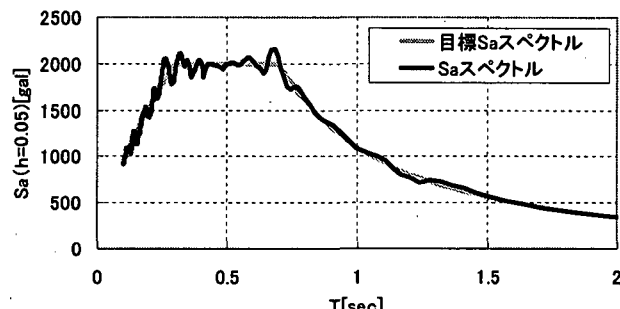


図-9 $Sa(h=0.05)$ の収束状況

り返すことで収束誤差は 0.035 となり許容誤差に収まった。

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適合させた加速度波形「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」である。図-7 はその収束状況を示している。振幅補正は固有周期 0.1~5.0 秒の範囲で行っている。最終的な V_E スペクトルは減衰系ほど一致してはいないが、(2)に示した手順を 2 回繰り返すことで収束誤差は 0.05 となり許容誤差に収まっている。

次に「 $V_E(h=0.1)$ 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た。図-8 は「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」、図-9 は $Sa(h=0.05)$ の収束状況である。

図-10 に V_E スペクトルの比較、図-11 に応答塑性率の比較を示す。図-10 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-11 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。

さらに、このような傾向が一般に現れるのかを確認するため、Taft_ns・Hchinohe_ew・Elcentro_ns の位相を用いて同様に「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」・「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」・「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」の 3 波づつを作成し降伏震度 0.5 の系に入力したときの応答比較を行った。

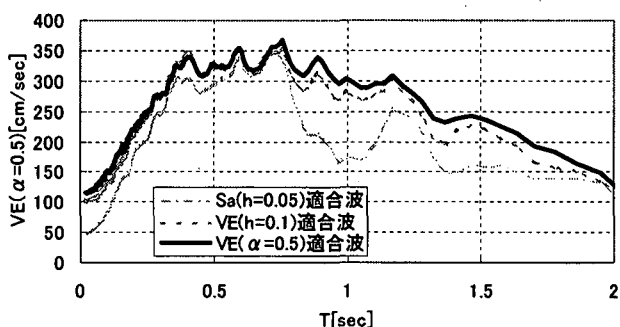


図-10 V_E スペクトル比較(位相:Jmakobe_ns)

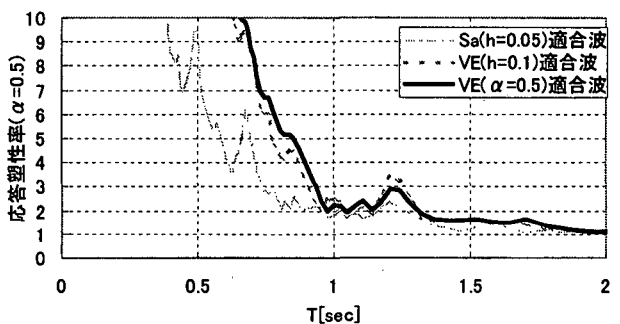


図-11 応答塑性率比較(位相:Jmakobe_ns)

なお地震波作成時のスペクトルの収束性は位相を Elcentro_ns としたときの「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」だけが収束誤差 0.57 までしか収束しなかった。それ以外は、すべて(2)に示した手順を 4~5 回繰り返すことで許容誤差に収まった。

図-12~図-14 はそれぞれの位相を用いた地震波の V_E スペクトル ($\alpha=0.5$) の比較である。ここでも「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」が「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」・「 $V_E(\alpha$

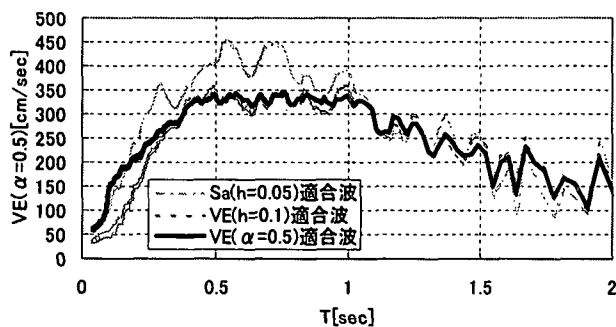


図-12 V_E スペクトル比較(位相:Taft_ns)

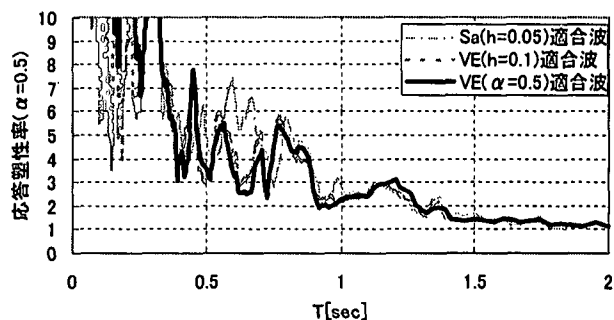


図-15 応答塑性率比較(位相:Taft_ns)

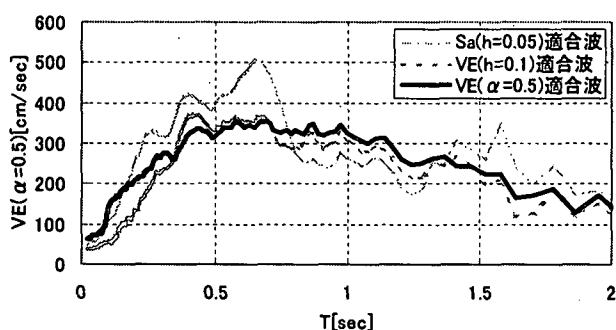


図-13 V_E スペクトル比較(位相:Hachinohe_ew)

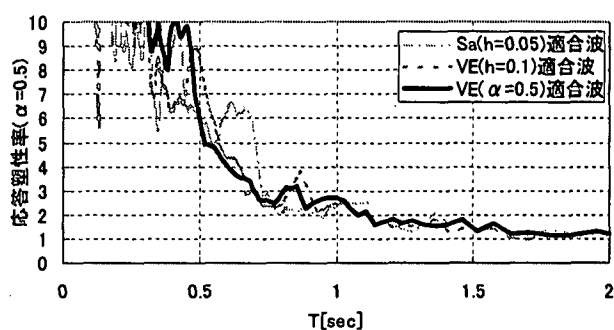


図-16 応答塑性率比較(位相:Hachinohe_ew)

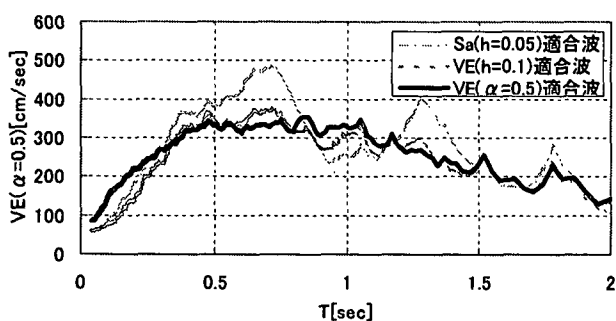


図-14 V_E スペクトル比較(位相:Elcentro_ns)

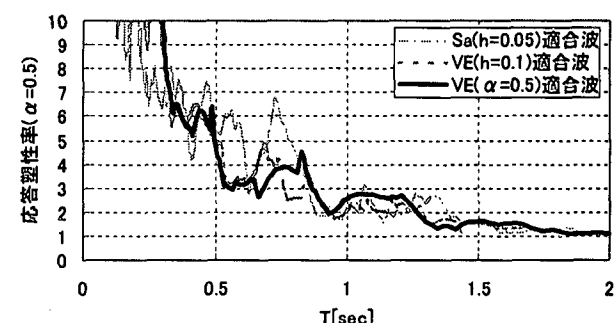


図-17 応答塑性率比較(位相:Elcentro_ns)

＝0.5)適合波」に比べて V_E スペクトルでも周期の変化に対して V_E の変化が大きく不平等な入力となっていることが分かる。ただし、「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」と「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」の差異は少ない。

図-15～図-17 はそれぞれの位相を用いたときの応答塑性率の比較である。位相によって程度の違いはあるが「 $Sa(h=0.05)$ 適合波」よりも「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」・「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」のほうが周期の変化に対して応答塑性率の変動が小さい。ただしここでも「 $V_E(h=0.1)$ 適合波」と「 $V_E(\alpha=0.5)$ 適合波」の差異はあまり認められなかった。

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。

参考文献

- 1) 桑村 仁, 秋山 宏: フーリエ振幅スペクトルの平滑化による地震入力エネルギー評価, 日本建築学会構造系論文集, 第442号・1992.12
- 2) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 1980.9
- 3) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.5