

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

内藤伸幸¹・松田泰治²・大塚久哲³

¹ 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)

² 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)

³ 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)

本論文では、時刻歴応答解析に用いる地震波の入力レベルを規定するために、構造物への地震入力エネルギーを表すエネルギー入力スペクトルを目標スペクトルに適合させた模擬地震波の作成を試みた。目標スペクトルは、神戸海洋気象台 NS 成分の観測波のエネルギー入力スペクトルを包絡することで定めた。またスペクトルを求めるための 1 質点系モデルは線形バネを有するものおよび構造物の非線形性を考慮するために降伏震度を変えた完全弾塑性系を用いた。

Key Words: energy input spectrum, simulated wave, the yield strength

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のが普通である。たとえば内陸部の活断層によって生じるタイプ II の地震入力を定める際には、主に平成 7 年の兵庫県南部地震で得られた強震記録に基づき加速度応答スペクトルを定め、そのような特性を有する振動数領域で振幅調整した地震波が用いられる。しかし、応答スペクトルの算出は線形の 1 質点系に対して行われる。このため、この応答スペクトルを一定のレベルに規定しても、非線形を考慮した実際の構造系に対しては、必ずしも所要の厳しさを有する地震入力を与えているとは言えない。

そこで本研究では非線形系に対する応答のレベルを地震入力エネルギーによって規定し、これに基づく模擬地震波の作成する方法についての検討を行った。

2. エネルギー入力スペクトル

ここでは、本研究で模擬地震波の入力レベルを規定するために用いるエネルギー入力スペクトルについて説明する。1 質点系モデルに対して粘性減衰を考慮すると振動方程式は(1)式のように書ける。

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

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

z_0 : 地震による地動変位 y : 質点相対変位

(1)式の両辺に $dy = \dot{y}dt$ を乗じて地震の全継続時間 t_0 にわたって積分すれば(2)式が得られる。これがエネルギーに基づく釣り合い方程式である。

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

(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。さらにエネルギー入力総量が質量 m に依存することを考慮して(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 スペクトルには、無減衰弾性1質点系については、地震加速度のフーリエ振幅スペクトルと一致し、減衰系・完全弾塑性系については、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という特徴がある。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、入力レベルを規定した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³⁾では、振幅調整を行うため振動数領域での目標スペクトルが必要となる。本研究では、内陸直下型の地震動(タイプⅡ)を想定して、神戸海洋気象台 NS 成分の観測波(図-1)より減衰弾性系(減衰 10%)の V_E スペクトルを求め、これを包絡することで目標スペクトルを定めた(図-2 にフーリエ振幅スペクトルとともに示す)。これによって地震動の周波数特性を規定した。また、観測波の加速度時刻歴の包絡形を用いることで、地震動の時間特性を規定した。

(2) 模擬地震波の作成手順

スペクトル適合法では、以下の手順にしたがって模擬地震波を作成する。

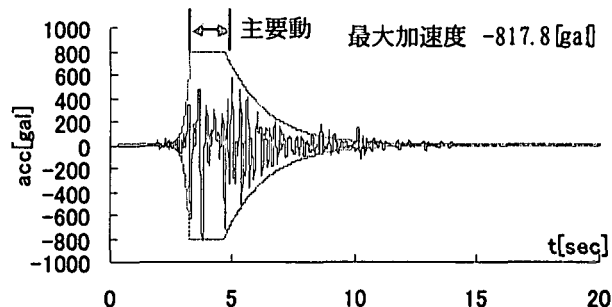


図-1 神戸海洋気象台 NS 成分加速度時刻歴

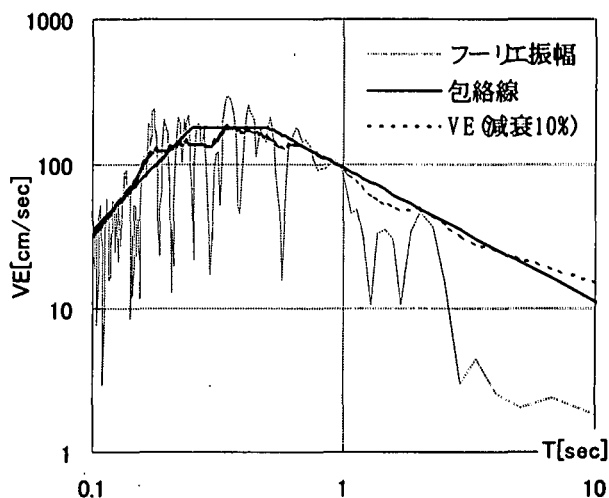


図-2 神戸海洋気象台 NS 成分 V_E スペクトル

1. 与えられた条件にしたがって目標スペクトルおよび位相特性を定める。
2. 振幅と位相からフーリエ逆変換によって加速度時刻歴を作成する。
3. V_E スペクトルを求め目標スペクトルと適合するように振幅の修正を行う。

まず、想定される地震動に応じた目標スペクトルを定めるが、今回は例としてタイプⅡの観測波について検討を行った。位相特性については、一様乱数と加速度時刻歴の包絡形によって与えた。

次にフーリエ逆変換によって、加速度時刻歴を求めるが、このとき地震終了時に残留速度が 0 となるように基線補正を行う。

最後に、この加速度時刻歴から V_E スペクトルを求め、振動数ごとに目標スペクトルとの比(誤差)を計算しこれを用いて振幅の修正を行う(ここまでの1ステップ)。そして、この誤差の2乗平均が許容誤差より小さくなったところ

で計算を終了し、このときの加速度時刻歴を模擬地震波とする。

(3) 作成された模擬地震波の特性

減衰弾性1質点系(減衰10%)の V_E スペクトルおよび完全弾塑性系(降伏震度0.5)の V_E スペクトルをそれぞれ同じ目標スペクトルに適合させて作成した模擬地震波を図-3に示す。いずれの波も観測波を目標として作成したが、時間領域における全体的な傾向はほぼ再現できている。ただし、位相情報を与えるために乱数を用いているため、作成した模擬地震波の時間特性異なっており、最大加速度にも差が見られる。これは地震動の継続時間にわたる総エネルギー入力を規定して地震波を作成しているため、主要動が短い波は、主要動が長い波に比べて短時間で同じ総入力エネルギーを与えるため最大加速度が大きくなるという関係に基づくものである。また、2つの模擬地震波のフーリエ振幅スペクトルを見比べてみると(図-4)、弾塑性系の V_E スペクトルを目標スペクトルに適合させて作成した模擬地震波からは周期の短い成分(0.2秒程度以下)が抜け落ちてしまっているのを確認できる。これは、模擬地震波の作成過程において毎ステップ周期ごとに振幅の補正を行っているが、短周期側は弾塑性系においては振幅の補正によって V_E スペクトルを目標スペクトルに収束させることができなかったことを示している。本研究では、10ステップで収束しない場合はそこで計算を打ち切っているが、その間補正を繰り返し、結果として作成された地震波からは周期の短い成分が抜け落ちてしまっている。

このように周期の短い成分において弾塑性系の V_E スペクトルが減衰弾性系の V_E スペクトルより大きな値を示す要因として次のことが考えられる。本研究ではスペクトルを算出するための固有周期の異なる系は重量を一定として剛性を変化させて定めている。このため固有周期の非常に短い系では、剛性が非常に大きくなり、弾塑性系では非常に小さな降伏変位となる。したがって、すぐに塑性域に入ること大

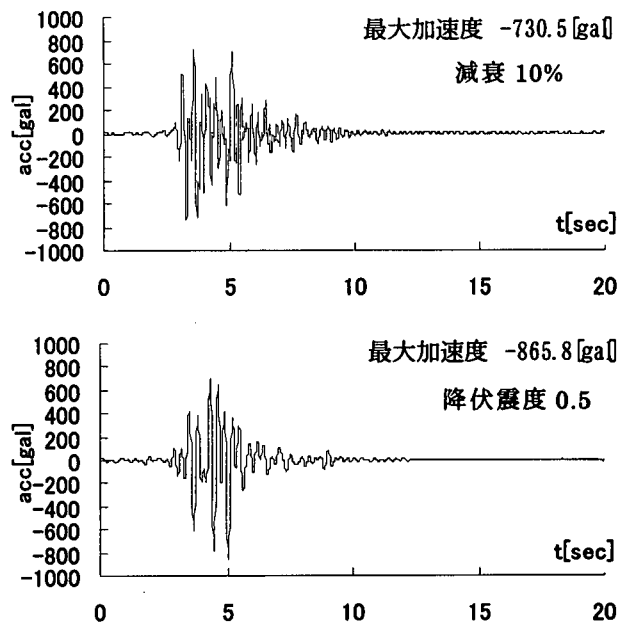


図-3 作成した模擬地震波

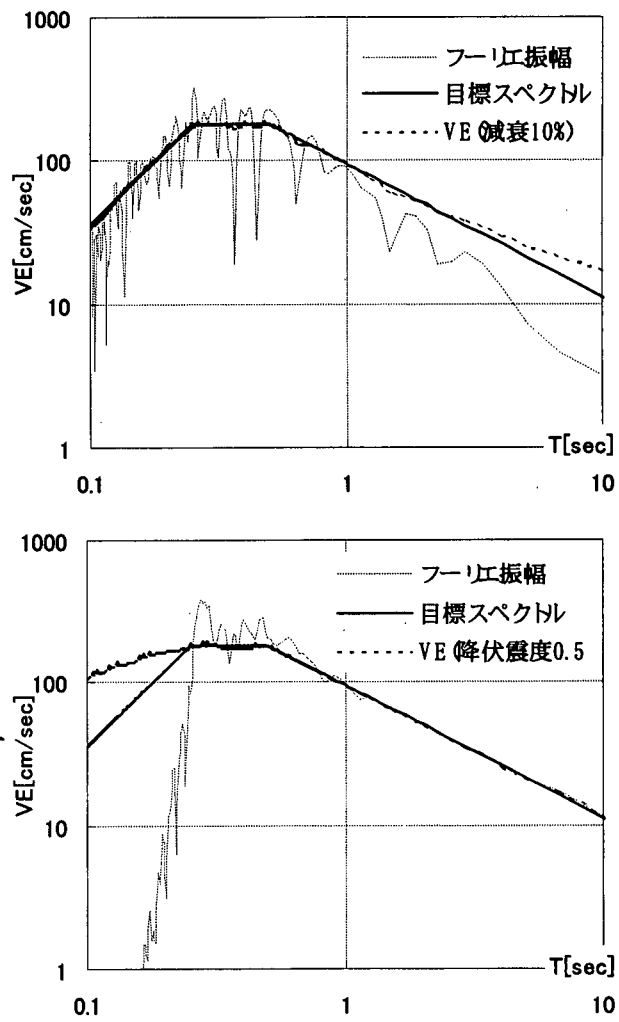


図-4 模擬地震波のスペクトル

きな塑性変形を起こし履歴吸収エネルギーが大きくなり、結果として V_E は大きな値を示す。

したがって弾塑性系の V_E スペクトルを規定して模擬地震波を作成するためには、減衰系とは異なる目標スペクトルが必要と考えられる。そこで神戸気象台 NS 成分の観測波について弾塑性系に対する V_E スペクトルを降伏震度ごとに求めたものを図-5 に示す。これによると減衰弾性系の V_E スペクトルが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のに対して、弾塑性系の V_E スペクトルは、降伏震度を小さくすると周期の短い成分の値が大きくなる一方、全体的に平均化する傾向にある。このため降伏震度をパラメータとして弾塑性系の V_E スペクトルを規定して模擬地震波を作成する場合には、目標スペクトルの設定方法について単に短周期側だけを補正するだけでなく再検討が必要である。

さらに、短周期成分が抜け落ちている影響が構造物に及ぼす影響を見るために、作成した 2 つの模擬地震波と目標とした観測波を同じ構造系(降伏震度 0.5 の完全弾塑性 1 質点系)に入力したときの応答を調べたが(図-6)、短周期成分が抜け落ちていることによって非線形応答には顕著な違いは見られなかった。

4. まとめ

地震入力エネルギーを規定した模擬地震波を作成した。減衰弾性 1 質点系の V_E スペクトルを規定して模擬地震波を作成した場合は、目標 V_E スペクトルへの収束も非常によく、また時間特性としても目標とした観測波をよく再現している。ただし、弾塑性系の V_E スペクトルを規定して模擬地震波を作成した場合は、周期の比較的長い成分(0.2 秒程度以上)に関してはよく目標 V_E スペクトルに収束するが、それより周期の短い成分に関しては、降伏震度によってある一定の値に収束し、フーリエ振幅の補正によって目標 V_E スペクトルに近づけることはできなかった。

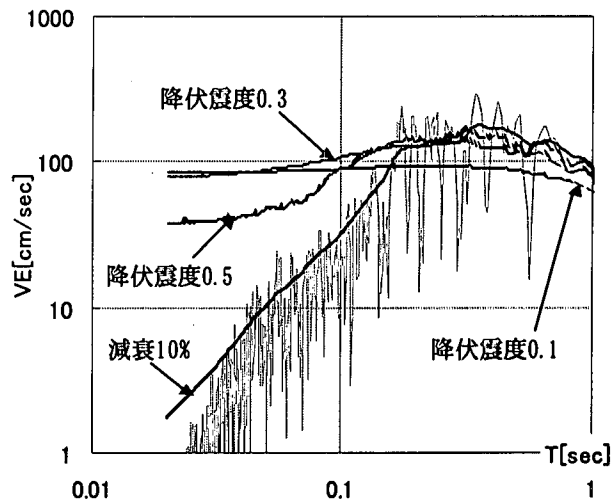


図-5 神戸海洋気象台 NS 成分 V_E スペクトル

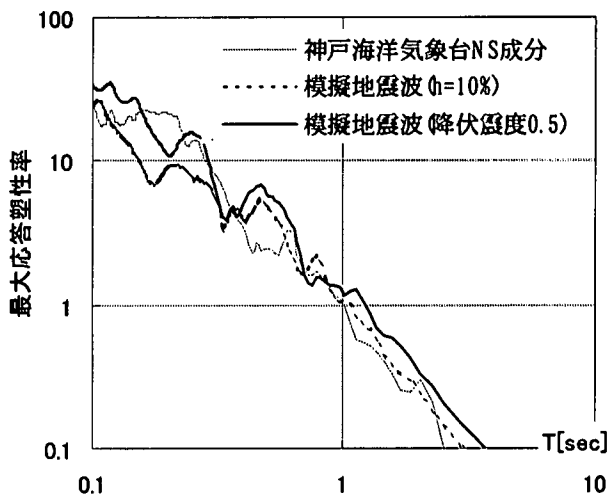


図-6 応答比較

しかしながら、土木構造物で一般に問題となる周期の範囲では、周期の短い成分が実際の構造物に及ぼす影響があまり見られないため、目標スペクトルの設定方法を再検討することとあわせて今後の課題である。

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・地震動スペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.5