

非線形応答スペクトル群 適合型模擬地震動の作成方法

室野 剛隆¹・佐藤 忠信²

¹正会員 博(工) (公財) 鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 (〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 工博 東南大学 (中華人民共和国江蘇省南京市四牌路2、210096)

1. はじめに

土木構造物の耐震設計基準においては、設計の便を考
えて、地震動特性は標準的な設計加速度応答スペクトル
が与えられている場合が多い¹⁾²⁾。この場合、動的解析
に必要な時刻歴波形は、設計応答スペクトルに適合する
ことが要求される。

従来の設計体系では、この波形は、弾性応答スペク
トルに適合するように作成される（ここでは、『応答スペ
クトル適合波』と呼ぶ）。応答スペクトル適合波の作成
方法には、これまで周波数領域による方法や時間領域に
よる方法など、いくつかの方法が提案されている³⁾⁴⁾など。
しかし、L2 地震を対象とした昨今の耐震設計体系下で
は構造物は塑性域に立ち入って設計されるので、その耐
震性能を、弾性応答スペクトルに適合させた波形で照査
すると、構造物の非線形応答特性を的確に評価できない
ことが、耐震設計体系の問題点として指摘されて久しい。
例えば、弾性応答スペクトルとしての標準設計応答スペ
クトルは観測記録等に基づき、ある安全率を有した形で
規定されるが、この設計応答スペクトル（弾性応答スペ
クトル）に適合させた波形を用いて算定された非線形応
答値は、この安全率と同等の安全率が必ずしも補償され
ないことになる。

また、性能照査型設計では塑性率 μ をパラメータと
した非線形応答スペクトルを用いて、構造物を設計する
ことが多い¹⁾。

そこで、本研究では、非線形応答スペクトルに適合す
る地震波形を決定する方法を開発する。ただし、事前に
応答塑性率 μ がどの程度になるかは分からないので、
複数の塑性率 μ を対象とした非線形応答スペクトル群
に適合していることが要求される。等価線形化法を用い、
非線形応答スペクトル群に適合させる問題を多価減衰ス

ペクトルに適合させる問題に帰着させる。そして、目標
スペクトルへの適合方法として、原波形に時間と振幅調
整をした短周期の Ricker ウェーブレットを重ね合わせ、
このウェーブレットの振幅を調整することにより、任意
の塑性率 μ に対応した非線形応答スペクトル群に適合
した模擬波形を作成するためのアルゴリズムを開発する。

2. 時間領域での応答スペクトル適合波作成方法

(1) 基本コンセプト

微小な波形 $\delta a(t)$ に対する減衰定数 h_k 、固有振動数 ω_i
における1自由度系の最大応答加速度 $\delta R(\omega_i, h_k)$ は

$$\delta R(\omega_i, h_k) = \delta R_{i,k} = \int_0^{t_i} \delta a(\tau) \cdot g_{ik}(t_i - \tau) d\tau \quad (1)$$

である。ここに、 $g_{ik}(t)$ は固有振動数 ω_i および減衰定数
 h_k の1自由度系のインパルス応答関数である。また、 t_i
は最大応答値の生起時刻である。この場合、ある入力波
 $a(t)$ に $\delta a(t)$ を付け加えた場合の、加速度応答のスペ
クトル値の変化は式(1)で与えられる $\delta R(\omega_i, h_k)$ そのものである。
よって、目標応答スペクトルと原波 $a(t)$ の計算応
答スペクトルの差異 $\delta R(\omega_i, h_k)$ が既知の場合には、式(1)
を解くことにより、微小な付加波 $\delta a(t)$ を求め、これを
原波 $a(t)$ に付け加えることにより、スペクトル適合波を
求めることができる。これが、Lilhanand and Tseng⁴⁾によ
り提案されたアルゴリズムの基本である。

M 個の固有振動数 ω_j ： $j=1 \cdots M$ に対して、 N セット
の減衰定数 h_l ： $l=1 \cdots N$ の目標応答スペクトル（多価
減衰応答スペクトル）に適合させることを考える。この
ためには、独立な $M \times N$ 個の微小な調整波群 $f_{jl}(t)$ が必
要となる。ここに、下付添え字 j は応答スペクトルの計
算点で $j=1 \cdots M$ 、 l は減衰定数の種別で $l=1 \cdots N$ であ
る。この場合には、付加波 $\delta a(t)$ は式(2)で表現させる。

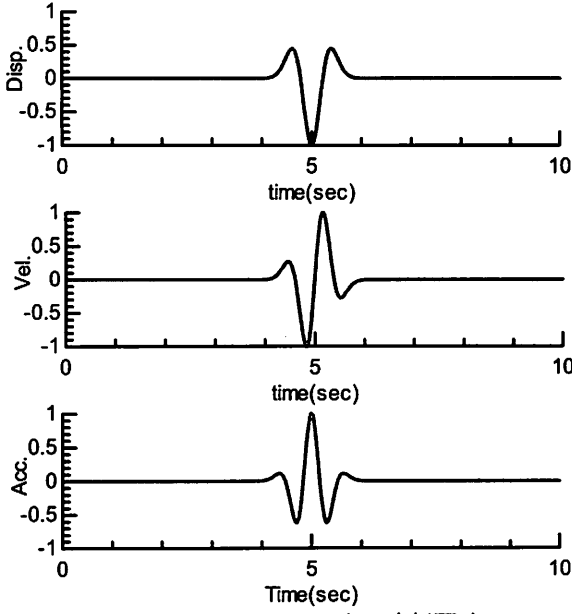


図1 Ricker wavelet 波の時刻歴波形

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^N b_{jl} \cdot f_{jl}(t) \quad (2)$$

ここに、 b_{jl} は微小調整波群 $f_{jl}(t)$ の振幅であり、これが求めるべき未知数である。式(2)を式(1)に代入すると、

$$\{\delta R_{ik}\} = [C_{ik,jl}] \{b_{jl}\} \quad (3)$$

となる。つまり、 $C_{ik,jl}$ は微小調整波 $f_{jl}(t)$ に対する固有振動数 ω_l 、減衰定数 h_k の系の応答倍率で、

$$C_{ik,jl} = \int_0^{t_i} h_{ik}(t_i - \tau) \cdot f_{jl}(\tau) d\tau \quad (4)$$

である。 t_i は最大応答値の生起時刻である。

式(3)を解くことにより係数 $\{b_{jl}\}$ を算定し、式(2)により付加波形 $\delta a(t)$ を求めることができる。ある繰返しステップ s における波形 $a_s(t)$ は式(5)で表される。

$$a_s(t) = a_{s-1}(t) + \delta a_s(t) \quad (5)$$

この波形 $a_s(t)$ に対する計算応答スペクトルが目標応答スペクトルに収斂するまで、上記の操作を繰返すことにより、多価減衰応答スペクトル適合波を作成する。

(2) 本研究で採用する微小調整波

微小調整波 $f_{jl}(t)$ としては、(i)積分した際に残留値が残らないのがよい、(ii)原波の経時特性を極力残すために時間軸上でコンパクトである方がよい。例えば、Lilhanand and Tseng は微小調整波形としてインパルス応答関数を用いることを提案しているが⁴⁾、時間軸上でコンパクトさに欠ける。また、志波・岡本⁹⁾は振幅が異なる2波長分の正弦波を用いることを提案しているが、この

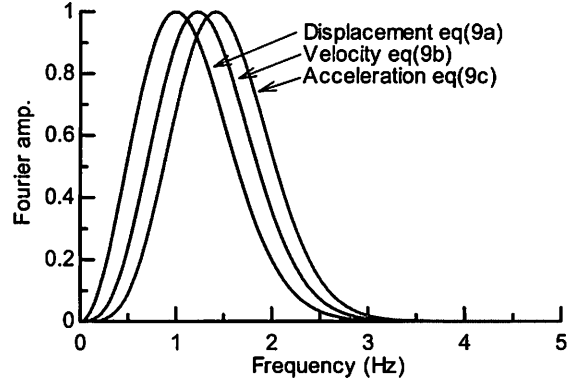


図2 Ricker wavelet 波のフーリエスペクト

関数では不連続が生じること、および解析プログラムでの取扱いが面倒である。そこで、本研究では調整波として Ricker Wavelet 波を用いることとした。Ricker Wavelet 波の変位波形は、式(6)で表わされる⁶⁾。

$$f(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\alpha - 0.5) \cdot e^{-\alpha} \quad (6)$$

$$\alpha = \left\{ \frac{\pi(t - t_p)}{T_p} \right\}^2$$

ここで、 T_p は変位フーリエスペクトルのピーク周期、 t_p は時間域の最大振幅に対応する時間である。また、速度、加速度波形は、

$$f'(t) = -\frac{\pi^{2.5}}{T_p^2} (t - t_p) (1.5 - \alpha) \cdot e^{-\alpha} \quad (7)$$

$$f''(t) = \frac{2\pi^{2.5}}{T_p^2} (\alpha - 2.5) \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha} + \frac{f'(t)}{t - t_p} \quad (8)$$

で表わされる。例えば $T_p = 1.0$ (sec)、 $t_p = 5.0$ (sec) とした場合の Ricker wavelet 波の変位、速度、加速度波形をそれぞれ示すと図1のようになる。

さらに、式(6)(7)(8)より、Ricker wavelet 波の変位、速度、加速度波形のフーリエスペクトルを理論的に求めると、式(9)が得られる。

$$F_D(\omega) = \left(\frac{T_p^2}{e^{-1}} \right) \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^2 \cdot e^{-\left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^2 T_p^2} \quad (9a)$$

$$F_V(\omega) = \left(\frac{T_p^3}{1.5^{1.5} e^{-1.5}} \right) \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^3 \cdot e^{-\left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^2 T_p^2} \quad (9b)$$

$$F_A(\omega) = \left(\frac{T_p^4}{4e^{-2}} \right) \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^4 \cdot e^{-\left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^2 T_p^2} \quad (9c)$$

図2にフーリエスペクトルを示す。このとき、フーリエスペクトルが最大値をとる角振動数 $\omega_{\max}$ はそれぞれ、式(10)となる。条件は図1と同じである。

$$\omega_{\max D} = \frac{2\pi}{T_p} \quad (10a)$$

$$\omega_{\max V} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_p} \right) \quad (10b)$$

$$\omega_{\max A} = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_p} \right) \quad (10c)$$

微小調整波として式(6)(8)を用いると、図 1 から分かるように片振れの波形になる可能性が高い。一方、式(7)は正負対称のため、調整波としては癖のない波形と言える。そこで、本研究では、式(7)の速度波形を、加速度波形と見立てて、微小調整波 $f_{ji}(t)$ として採用した。

ただし、目標応答スペクトルと原波 $a(t)$ の計算応答スペクトルの差異 $\delta R(\omega_i, h_k)$ をもっとも効率的に調整するために、以下の調整を行った。

- ① s ステップ目の波形 $a_s(t)$ に対する系の最大応答値が生じる時刻と、微小調整波 $f_{ji}(t)$ に対する最大応答値が発生する時刻が合致するように、調整波を重ねるタイミングを合わせることで、効率良く最大応答値を制御した。
- ② 入力卓越振動数と調整しようとする系の固有振動数 ω_i が合致している方がよい。式(10b)または図 2 から分かるように、卓越振動数のズレを考慮する必要がある、

$$T'_p = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{2\pi}{\omega_i} \right) \quad (11)$$

とした上で、式(7)の T_p の代わりに式(11)の T'_p を用いた。

以上により、微小調整波 $f_{ji}(t)$ を

$$f_{ji}(t) = -\frac{\pi^{2.5}}{(T'_p)^2} (t - t_i)(1.5 - \alpha) \cdot e^{-\alpha'} \quad (12)$$

として定義した。ただし、

$$\alpha' = \left\{ \frac{\pi(t - t_i)}{T'_p} \right\}^2 \quad (13)$$

である。ここに、 t_i は、 s ステップ目の波形 $a_s(t)$ に対する固有振動数 ω_i の振動系の最大応答値の生起時刻である。

3. 非線形応答スペクトル群適合波の作成方法

(1) 作成方法の概略

本研究では、非線形応答スペクトル群（所要降伏震度スペクトル群）に適合した波形を作成する方法として、等価線形化法による等価固有周期と等価粘性減衰を用い

て、上記の時間領域における多価減衰応答スペクトル適合波の作成問題に帰着させる方法を提案する。具体的な手順を以下に示す。

Step1

各塑性率 μ 毎の所要降伏震度スペクトル $S_{khy}(\mu, \omega)$ を非線形応答加速度スペクトル $S_A^{NL}(\mu, \omega)$ に変換する。

Step2

等価線形化法を用いて、各塑性率 μ に応じた等価剛性 k_{eq} 、等価粘性減衰 h_{eq} を設定する。

Step3

等価剛性 k_{eq} 、等価粘性減衰 h_{eq} を有する等価線形加速度応答スペクトル $S_A^{eq}(\mu, \omega)$ を算定する。これが Step2 で求めた非線形応答加速度スペクトル $S_A^{NL}(\mu, \omega)$ に適合するまで繰返し計算を行う。適合は、3 章の方法で実施する。

Step4

Step3 で得られた波形が、非線形応答スペクトル群適合波となる。

(2) 所要降伏震度スペクトルから非線形加速度応答スペクトルへの変換

所要降伏震度スペクトル $S_{khy}(\mu, \omega)$ は、横軸が振動数 ω （一般には周期 T で表示するが、本論文では振動数 ω で表示する）、縦軸が必要降伏震度 $k_{hy}(\mu, \omega)$ で表示されている⁷⁾。一般には、振動系は降伏加速度 $k_{hy}g$ （ g ：重力加速度）以上の加速度を伝えることはできないため、系が降伏した場合には、その最大応答加速度は概ね $k_{hy}g$ と解釈できる。よって、理想的には、所要降伏震度スペクトルの縦軸を g 倍することで、非線形加速度応答スペクトル $S_A^{NL}(\mu, \omega)$ に変換できると考える。

しかし、実際には、系の最大応答加速度には変動がある。今、地動 $\ddot{z}$ を受ける非線形復元力特性を有する 1 自由度系の運動方程式は、

$$m(\ddot{x} + \ddot{z}) + c\dot{x} + Q(x) = 0 \quad (14)$$

となる。ここに、 m は質量、 c は減衰係数、 $Q(x)$ は復元力、 x は変位である。このとき、式(14)を変形すると、

$$(\ddot{x} + \ddot{z}) = -\left(\frac{c}{m}\right)\dot{x} - Q(x) \quad (15)$$

となる。つまり、応答加速度 $\ddot{x} + \ddot{z}$ は、復元力項に依存した項と減衰力に依存した項の和で表されるため、例えば、復元力 $Q(x)$ が頭打ちをしたとしても、減衰力に依存した分だけ加速度が生じることが分かる。

また、骨格曲線には降伏後剛性があるため、応答加速度は降伏加速度よりも大きくなる。一般には、2 次勾配比 γ （降伏剛性に対する降伏後剛性の比率）は 0.001～0.1 程度である。

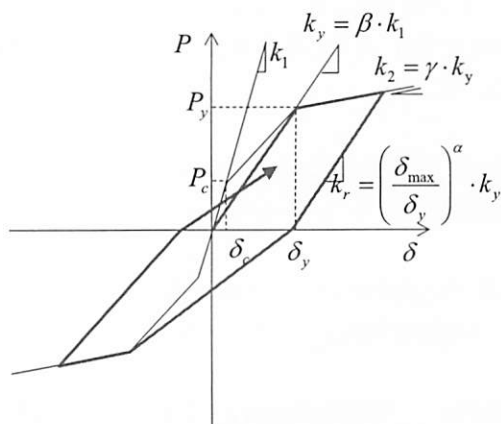


図3 Cloughモデルの詳細

表1 設定したパラメータ

パラメータ	設定した値
周期 T	0.1、0.5、1.0、2.0秒
降伏震度 k_{hy}	0.4、0.8
復元力特性	Cloughモデル
第二勾配比 κ	0.001、0.01、0.1
初期減衰定数 h	0.05
入力地震動	兵庫県南部地震17波（KOB波群） 釧路沖地震18波（KSR波群）
最大加速度	50、100～1,000gal まで100galピッチ

以上より、非線形加速度応答スペクトル $S_A^{NL}(\mu, \omega)$ を

$$\begin{aligned} S_A^{NL}(\mu, \omega) &= \eta \times [k_{hy}(\mu, \omega) \times g] \\ &= \eta \times g \times S_{khy}(\mu, \omega) \end{aligned} \quad (16)$$

と考え、この倍率 η を系の周期、降伏震度、入力地震動を変えた動的解析を実施することで、経験的に定めた。表1に用いたパラメータを示す。また、解析に用いた復元力特性はCloughモデル（図3）とした。

図4に解析結果の例を示す。縦軸は、最大応答加速度を降伏加速度で除しているの、縦軸が式(16)における倍率 η に相当する。図4には、表1に示す全ての結果を固有周期別に重ねて示している。実際の塑性率の範囲 $\mu < 5$ では、降伏加速度の1～1.5倍程度の最大応答加速度が生じていることを表している。詳細に見ると、 η の平均的特性は第二勾配比 γ で分類されており、同一 η の中ではばらつきが小さいことから、降伏震度や地震動による依存性は少ないと言える。第二勾配比 γ が大きいほど倍率 η は大きくなっている。

倍率 η が1.0よりも大きい理由は先述したように、(i)第二勾配比 γ が存在すること、(ii)減衰が存在すること、の2点が大きな理由であると考えられるので、倍率 η を式(17)に示すように考える。

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (17)$$

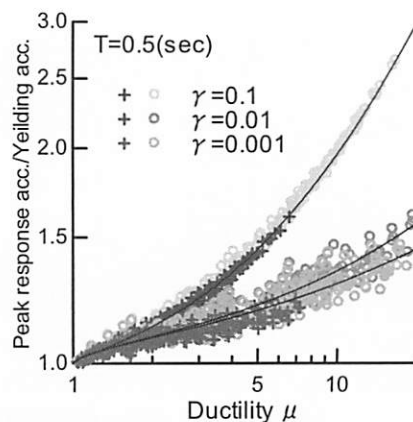


図4 最大応答加速度の降伏加速度からの変動と回帰モデルの例（ $T=0.5$ の場合）

ここに、 η_1 は上記(i)による影響、 η_2 は上記(ii)による影響である。(i)については理論的に

$$\eta_1 = 1.0 + \gamma(\mu - 1) \quad (18)$$

と表わすことができる。また、(ii)については、理論的に表現できないので、図4を参考に

$$\eta_2 = \alpha \times (\mu - 1)^\beta \quad (19)$$

と仮定した。係数 α と β は最小二乗法により決定した。最終的には、

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 + \eta_2 \\ &= 1.0 + \gamma(\mu - 1) + \alpha \times (\mu - 1)^\beta \end{aligned} \quad (20a)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.103 + 0.0212 \ln(T) - 0.60\gamma \\ \beta &= 0.55 - 1.80\gamma \end{aligned} \quad (20b)$$

を得る。図4には、式(20)でモデル化した倍率 η についても示しているが、概ね計算値をよく表現できている。

(3) 等価剛性と等価減衰の算定

本研究では、ある塑性率 μ に対する非線形加速度応答スペクトルを、等価線形化法を用いて表現するため、塑性率 μ に応じた等価剛性、等価粘性減衰を求める必要がある。

等価剛性 k_{eq} は、非線形解析時の最大応答変位の剛性を弾性応答における等価剛性と考え、

$$k_{eq} = \frac{k_y}{\mu} \{1 + \gamma(\mu - 1)\} \quad (21)$$

で定義される⁹⁾ので、等価固有周期は、

$$T_{eq} = T_y \sqrt{\frac{\mu}{1 + \gamma(\mu - 1)}} \quad (22)$$

となる。ここに、 k_y は降伏剛性、 T_y は降伏周期である。

等価粘性減衰 h_{eq} は、非線形応答解析中に消費されるエネルギーが、等価粘性減衰 h_{eq} を持つ弾性系で吸収されるエネルギーと等価であると考えることにより得られるが、様々なモデルが提案されている。近藤・吉川⁹⁾は、感度解析より式(23)～(25)を提案している。

(a)塑性率

$$\mu = 0.7 \times \frac{\delta_{max}}{\delta_y} \quad (23)$$

(b)等価剛性

$$k_{eq} = \frac{k_y}{\mu} \{1 + \gamma(\mu - 1)\} \quad (24)$$

(c)等価粘性減衰定数

$$h_{eq} = 1.3 \times \frac{1}{\pi} \left[1 - \frac{1 + (\delta_c/\delta_y)}{1 + (P_c/P_y)} \mu^a \cdot \frac{1 - \beta + \beta\mu}{\mu} \right] \quad (25)$$

本研究でも、事前の検討結果から、近藤・吉川⁹⁾の方法が有効であることを確認できたので、式(23)～(25)を用いることとした。ただし、本研究では、全ての解析において Clough モデルを用いていることから、上式において、 $\beta = 1.0$ 、 $\delta_c/\delta_y = 1.0$ 、 $P_c/P_y = 1.0$ としている。また、式(25)では、塑性率 $\mu = 1.0$ のときに $h_{eq} = 0.0$ となってしまう、弾性時に有している初期減衰 h_0 が反映されず、線形から非線形への連続性が確保されず都合が悪い。そこで、本研究では、等価粘性減衰定数として、

$$h_{eq} = h_0 + 1.3 \times \frac{1}{\pi} \left[1 - \frac{1 + (\delta_c/\delta_y)}{1 + (P_c/P_y)} \mu^a \cdot \frac{1 - \beta + \beta\mu}{\mu} \right] \quad (26)$$

とした。

さて、神戸海洋気象台波 (KOB 波) および釧路気象台波 (KSR 波) に対して、逐次非線形解析により得られた所要降伏震度スペクトルと、上記の等価剛性 k_{eq} 、等価粘性減衰 h_{eq} を用いた等価線形化法により計算された等価所要降伏震度スペクトルとを比較した。なお、等価所要降伏震度スペクトルを算定する際には、等価線形化法で計算した加速度応答スペクトルを式(20)で除すことで算定している。紙面の都合で図は省略するが、等価線形化法による所要降伏震度スペクトルの方が、全周期帯域において大きく評価されていることが分かった。つまり、等価線形化法による応答値の方が大きく算定されたため、ある塑性率に収めるための降伏震度が高く評価されたことを意味している。

そこで、逐次非線形解析により得られる所要降伏震度に対する、等価線形解析で得られる所要降伏震度の比を示すと、図5が得られた。この結果を

$$\xi = \exp(a + b \ln(T)) \quad (27)$$

でモデル化する。塑性率 $\mu = 1$ のときには、周期 T にか

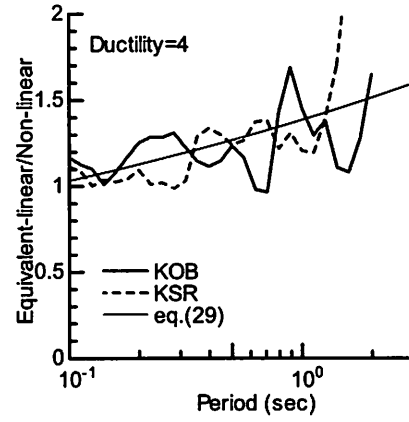


図5 非線形解析および等価線形化法による所要降伏震度比 (塑性率4の場合)

かわらず、係数 $\xi = 1.0$ でなければならない。よって、 $a|_{\mu=1.0} = 0.0$ 、 $b|_{\mu=1.0} = 0$ となる。この条件を加えて係数 a 、 b を最小二乗法により決定すると、式(28)が得られる。

$$a = 0.235 \times \ln(\mu) \quad (28a)$$

$$b = 0.0918 \times \ln(\mu) \quad (28b)$$

ただし、この回帰分析は、少ないデータから得られたものであり、今後は精度を高める必要があるが、それは本研究の主目的でないことから、ここでは、この程度に留めることにした。なお、式(29)により求めた降伏震度比 ξ を図5に重ねて示すが、良好に再現されている。

(4) 等価線形加速度応答スペクトルへの適合

2章で述べたアルゴリズムを用いる。具体的には、目標となる所要降伏震度スペクトル $S_{khy}(\mu, \omega)$ から、降伏加速度と最大応答加速度との差を考慮して、式(16)により非線形応答スペクトル $S_A^{NL}(\mu, \omega)$ に換算する。さらに、等価線形化法と逐次非線形化法との差異を考慮するために、 $S_A^{NL}(\mu, \omega)$ に式(27)の ξ を乗じることで、等価線形加速度応答スペクトル $S_A^L(\mu, \omega)$ に変換する。これを計算上の目標スペクトルとする。原波に対して等価固有振動数 $\omega_{eq,i}$ 、等価粘性減衰定数 $h_{eq,k}$ の振動系の応答値を算出し、その差分を $\{\delta R_k\}$ とする。これに対して、次式により、式(3)により微小調整形群 $f_{ji}(t)$ の振幅 b_{ji} を求め、式(2)により、付加波 $\delta a(t)$ を求め、原波に足しこむ。この操作を目標スペクトルと計算スペクトルとの差が十分小さくなるまで繰返し計算する。

この手法の計算上の難しさは、計算の不安定性である。つまり、ある周波数 ω_j の微小調整波 $f_{ji}(t)$ を付加させた場合、対象とする固有振動数 $\omega_{eq,j}$ を有する系以外に、その周辺の固有振動数を有する系の周波数応答関数と干渉するため、対象とする振動数以外 $\omega_{eq,j}$ の応答スペクトル値にも影響を及ぼしてしまうためである。そこで、下記のスキームを導入した。

① 過剰条件下での最小二乗法の適用

多価減衰の場合、上述したように周波数間の干渉効果以外に減衰定数間の干渉効果があるため、式(3)の連立方程式を厳密に解くと、解が定まらず発散することが多々あることが分かった。つまり、“厳密な解”よりも“ルーズな解”を求めるのがよいと思われる。そこで、応答スペクトルの計算は、全ての減衰定数 h_k と固有周波数 ω_i について行うものの、微小調整波を構成する固有周波数成分 ω_j は、それらの中の一部から抽出する。この場合、方程式の数が未知数よりも多い連立方程式となるので、 $[C_{ik,jl}]$ のQR分解を利用して、過剰条件下での式(3)の最小二乗解 $\{b_{jl}\}$ を求めることで、ルーズな解を求めることとした。

② 反復スキーム

今回のスキームでは、原理から分かるように、目標応答スペクトルと原波の計算応答スペクトルの残差が小さいことが望まれる。そこで、連立方程式(3)の左辺を既知量として、その残差をそのままとらず、低減係数を乗じる。これにはいくつかの方法が考えられるが、以下の反復スキームを用いることとした¹⁰⁾。

収斂計算の全反復回数を N 回とする。このとき、式(3)の左辺既知量を、

$$\partial R^{(s+1)} = \frac{R^{(t)} - R^{(s)}}{N - s + 1} \quad (29)$$

とする。ここに、 $R^{(t)}$ は目標スペクトル、 $R^{(s)}$ は s ステップの計算スペクトルである。こうすることで、目標スペクトルと計算スペクトルの誤差を見かけ上小さくすることができる。この反復スキームによれば、 N 回の反復後の左辺既知量が、目標スペクトルと計算スペクトルの残差に相当する。

5. 非線形応答スペクトル群適合波の作成例

(1) 単一の非線形スペクトルに適合した波形

ここでは、本論文で提案した手法により、ある1つの塑性率 μ に対する非線形応答スペクトル $S_{khy}(\mu, \omega)$ （所要降伏震度スペクトル）に適合した波形が作成できることを確認する。そこで、鉄道耐震標準¹¹⁾に示した $S_{khy}(\mu=4, \omega)$ を目標スペクトルとして、適合波を3章の手法で作成した。なお、原波は前述の検討でも用いたKOB波である。

図6には目標とした $\mu=4$ の所要降伏震度スペクトル、および計算点 ω_i における等価線形化法による計算値（図中○印）を示す。図7には、得られたスペクトル適合波の時刻歴を示す。ここで、図6を見る限りは、目標とした非線形応答スペクトルに良好に適合しているよう

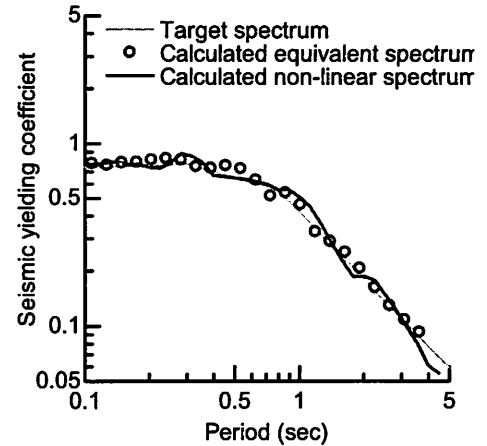


図6 $\mu=4$ の所要降伏震度スペクトル

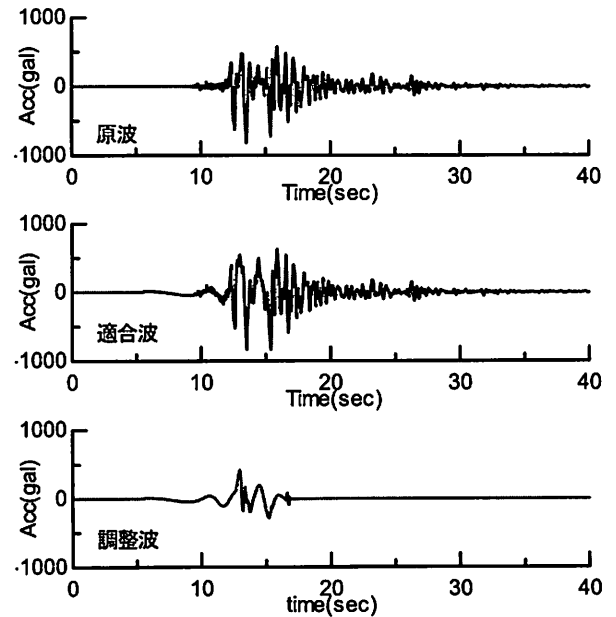
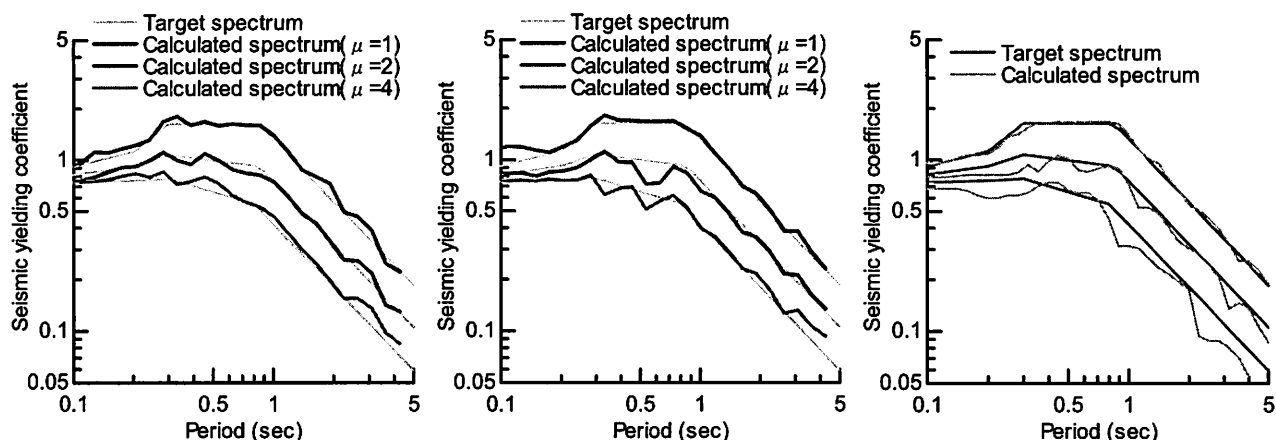


図7 $\mu=4$ の所要降伏震度スペクトル適合波形

に見えるが、これは等価線形化法による所要降伏震度スペクトルである。実際には、逐次非線形解析においても、目標非線形応答スペクトルに適合していることが要求される。そこで、図7で得られたスペクトル適合波に対して、逐次非線形解析により正確に所要降伏震度スペクトルを求めた。その結果を図6に実線で示した。等価線形化法によるスペクトルと逐次非線形解析によるスペクトルでは多少の差があり、逐次非線形解析による厳密な非線形応答スペクトルの一致度は多少劣るものの、それでも十分に有効なレベルで、所要降伏震度スペクトルに適合した波形が作成できることが確認できた。

(2) 複数の非線形スペクトル群に適合した波形

次に、本論文で提案した手法により、同時に塑性率 $\mu=1, 2$ および4に対応する所要降伏震度スペクトル群 $S_{khy}(\mu=1, 2, 4, \omega)$ に適合させた波形を作成する。目標とした所要降伏震度スペクトルは、鉄道耐震標準¹¹⁾に示し

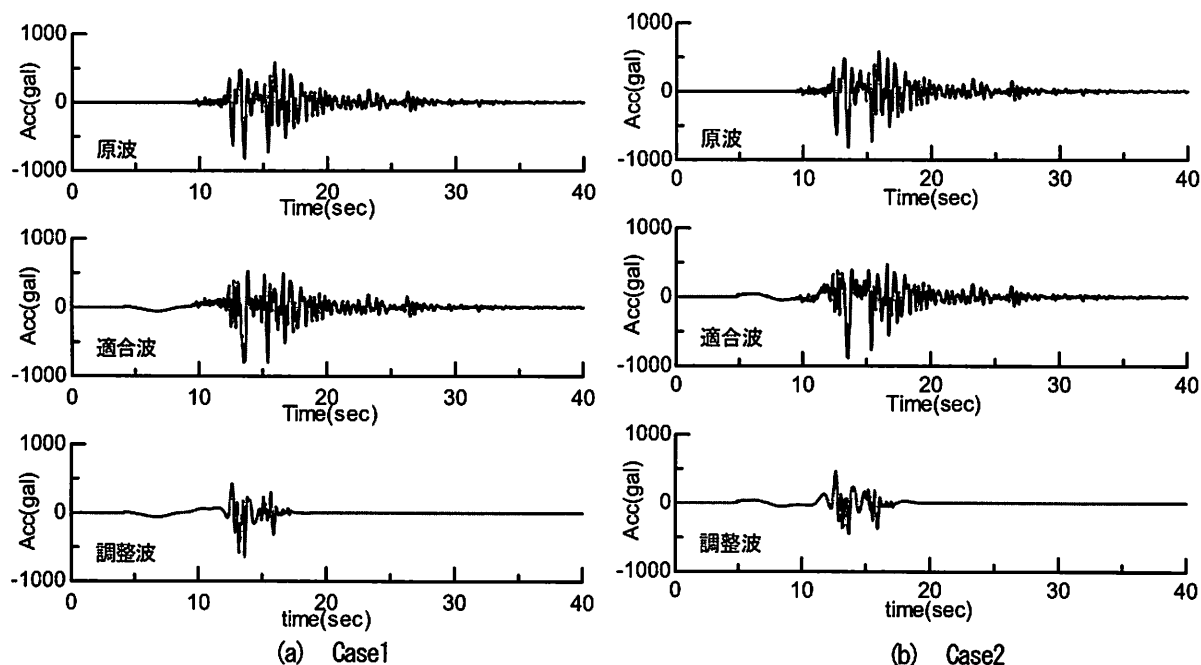


(a) 提案法 (Case1)

(b) 提案法 (Case2)

(c) 従来法 (弾性スペクトル適合波)

図8 目標所要降伏震度スペクトルと適合波の所要降伏震度スペクトル



(a) Case1

(b) Case2

図9 非線形スペクトル群適合波形

たものと同じものである。なお、原波は前述の検討でも用いた KOB 波である。

ただし、計算にあたっては、3(4)で述べたように、計算点 $i = \{1 \dots N\}$ のうちから、微小調整波を構成する点 $\{j\}$ を抽出する。多数の試算を行ったところ、微小調整波を構成する点の組合せ $\{j\}$ を変えて収束計算を繰り返すのがよいことが分かった。ここでは、抽出する構成点 $\{j\}$ の組み合わせをいくつか変えた解析を実施した。

図8には目標とした $\mu=1, 2, 4$ の所要降伏震度スペクトルとスペクトル適合波(図9)に対して逐次非線形解析を行い実際に算出された所要降伏震度スペクトルを比較している。微小調整波を構成する点の組合せ $\{j\}$ により、差は生じるものの、弾性応答スペクトルに適合させることを目的とした従来の方法と比べると、 $\mu=1$ 、つまり弾性応答スペクトルへの適合性はほぼそのままに、

他の塑性率については適合度が大幅に向上している。また、時刻歴波形を見ても、付加波は限定的であり、原波の特性を最大限残していることも確認できる。本研究で提案した手法は従来の方法を大幅に改善することができ、有効な手法であると思われる。ただし、細かく見ると、Case1 も Case2 も 0.5~1.0 秒の範囲で、塑性率 $\mu=2$ に対する適合性が悪くなっている。これについては、理由は分からないが、逐次非線形解析と等価線形解析に起因する誤差と収束計算のアルゴリズムの改良により解消できる可能性はある。この点に関しては、今後の課題としたい。

(3) 耐震設計への応用

著者らは、位相スペクトルが持つ意義に注目して、これまで一連の位相スペクトルのモデル化を行ってきた^{12),13),14)}。今回の方法でも、経時特性は原波のものが比較

的良好に残されることから、位相モデルに関する既往の研究成果を活かすことが可能である。以下にその方法を簡単に示す。

まず、減衰定数 $\eta=0.0$ の弾性速度応答スペクトルがフーリエ振幅スペクトルに似ているという性質を利用して、これを初期のフーリエ振幅スペクトル $A_0(\omega)$ とする。なお、弾性速度応答スペクトルは目標とする設計加速度応答スペクトルから変換する。

次に、初期フーリエ振幅スペクトル $A_0(\omega)$ と位相スペクトル $\phi(\omega)$ 、初期波形 $x(t)$ を算定し、3章で示した手法により、目標とした非線形スペクトル群に適合させる。これにより、設計地震動を合理的に算定することが可能になる。

5. まとめ

土木構造物の耐震設計基準においては、設計の便を考えると、地震動特性は標準的な設計加速度応答スペクトルが与えられている場合が多い。動的解析法に必要な時刻歴波形は、設計応答スペクトルに適合することが要求されるが、従来の設計体系では、この波形は、弾性応答スペクトルに適合するように作成されてきた。しかし、L2 地震を対象とした昨今の耐震設計体系下では構造物は塑性域に立ち入って設計されるので、その耐震性能を、弾性応答スペクトルに適合させた波形で照査すると、構造物の非線形応答特性を的確に評価できないことが、耐震設計体系の問題点として指摘されて久しい。

そこで、本研究では、複数の非線形応答スペクトル群に適合する地震波形を決定する方法を開発した。本手法の概略は以下の通りである。

- (i) 原波形に時間と振幅調整をした短周期の Ricker ウェーブレットを重ね合わせ、このウェーブレットの振幅を調整することにより、任意の塑性率に対応した非線形応答スペクトル群に適合した模擬波形を作成する。
- (ii) 等価線形化法を用いることで、非線形スペクトルを等価周期、等価粘性減衰を有する等価線形系の加速度応答スペクトルと解釈し、複数の非線形スペクトルに適合させる問題を、多価減衰の弾性スペクトルに適合させる問題に帰着させた。

計算例をいくつか示すことにより、本手法により、非線形スペクトル群に適合した波形を作成できることを示し、本手法の有用性を示した。なお、連立方程式の解の安定性、等価線形化法の適用性には、まだ改善の余地がある。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：構造物等設計標準同解説 耐震設計、丸善出版、2012。
- 2) 道路橋示方書・同解説 IV 耐震設計編、日本道路協会、2012。
- 3) 荒川直士、川島一彦、相沢興：応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形、土木技術資料、第26巻、第7号、1984。
- 4) Kiat Lilhanand and Wen Tseng：Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple-damping design spectra, Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering, Japan, Vol.III, pp.819-824, 1988。
- 5) 志波由紀夫、岡本晋：設計応答スペクトルに適合する地震動波形の作成法に関する検討、第51回土木学会年次学術講演会概要集、pp.394-395, 1996。
- 6) Ricker, N.: The computation of output disturbances from amplifiers for true wavelet inputs, Geophysics, 10, pp.207-220, 1945。
- 7) 西村昭彦、室野剛隆、齋藤正人：所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用、地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、Vol. 3, pp. 43-48, 1999。
- 8) 柴田明徳：等価線形解析による非線形地震応答の解析に関する一考察、東北大学建築学報、第16号、pp.27-39、1975。
- 9) 近藤由樹、吉川弘道：RC単柱橋脚に適用する等価線形化の一考察、<http://c-pe8.civil.musashi-tech.ac.jp/RC/>
- 10) 馮徳民、平沢光春、高崎芳夫：多価減衰スペクトルに適合した模擬地震動の作成法：反復法における新しい収束 algorithm、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、構造 I、397-398、1994。
- 11) (財) 鉄道総合技術研究所：構造物等設計標準同解説 耐震設計、丸善出版、1999。
- 12) 佐藤忠信、室野剛隆、西村昭彦：震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化、土木学会論文集 I-46、No.612、pp.201-213、1999。
- 13) 佐藤忠信、室野剛隆、西村昭彦：観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化、土木学会論文集、No.640/I-50、pp.119-130、2000。
- 14) 室野剛隆、西村昭彦、佐藤忠信：鉄道の耐震設計における設計入力地震動の位相特性の考え方、土木構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を考えるシンポジウム発表論文集、pp.15-16、1998。