第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

構造物の耐震設計に用いる
非線形応答スペクトルの表現方法の検討

坂井　公俊[1]

[1]正会員　博士（工学）　　鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

構造物の耐震設計を行う際の地震作用の表現方法は，応答値の算定法に合わせて様々なものが採用されている．例えば，構造物の弾性応答値を簡易に算定するためには弾性応答スペクトルが用いられることが多く，動的解析によって応答値を算定することを念頭に，時刻歴波形による地震作用の表現が行われることもある[例えば 1),2)]．

鉄道構造物の耐震設計においても，基本的にはこの弾性応答スペクトル，時刻歴波形による表現方法が用いられている [2)]．ただし，設計実務における一般的な橋りょう・高架橋の L2 地震に対する地震応答値を算定する際には，非線形応答スペクトルを用いて直接的に応答値を算定する方法（以下，非線形応答スペクトル法）[2)]が一般的に用いられており，これに対応する形で地盤条件，構造物条件毎にそれぞれ「所要降伏震度スペクトル」が用意されている．この非線形応答スペクトル法を用いることで，エネルギー一定則や変位一定則のような近似的な地震応答値の算定手法と比較してより適切な非線形応答値を比較的簡易に算定可能であるため，設計時の構造物応答値算定法として有用な手法であると考えられている[例えば 3)]．

所要降伏震度スペクトルは，入力地震動の時刻歴波形を用いた非線形動的解析を繰り返すことで比較的容易に算定可能であるが，鉄道構造物の耐震設計ではこの計算結果（例えば**図-1** の橙線）をそのまま用いることはせず，**図-1** の青線で示すような複数の直線を組み合わせた表現を行っている．これは，現時点での設計地震動の算定精度や構造物の周期特性の算定精度等の現状を鑑みて，構造物の固有周期の変化に伴って要求される強度（降伏震度）が極端に変化することを避けるような配慮であるとともに，設計時の取り扱いの容易さも考慮した対応である．

この直線化した所要降伏震度を設定する際には，応答塑性率毎に複数の折れ点を決定する必要があり，**図-1** で示したケースでは応答塑性率μ=1~10 の範囲で計 37 個のコントロールポイント（等価固有周期 T_{eq} と所要降伏震度 k_{hy} の 74 個の数値）を目視にて設定している [2)]．このような作業をある一つの基盤地震動を固定した場合に，地盤条件毎，構造種別毎に設定することになるため，設計で用いる所要降伏震度スペクトル設定には比較的多くの作業が必要になる．基盤地震動が一つに固定されていれば，この直線化作業は実務設計においてそれほど大きな問題にならないが，近年では基盤位置での設計地震動を地域ごとに個別に評価する事例[例えば 4)]も増えてきており，このような目視によるスペクトルの直線化作業を毎回実施することが弊害になりつつある．ある地震動に対して計算された所要降伏震度スペクトルを何かしらの手法によって自動的に数式等で表現することが出来れば，設計実務の省力化に貢献するとともに，作業者による結果のバラツキを抑制すること

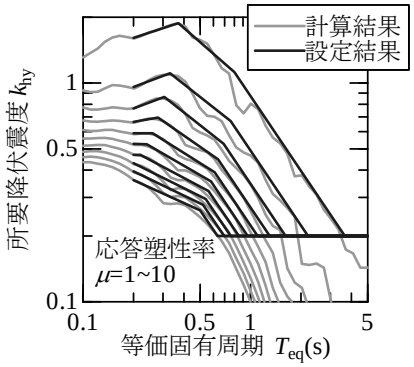


図-1　設計スペクトルの例 [2)]

も可能となる．

また，地震発生時の地震動を簡易に表現，予測するための地震動予測式はこれまで数多く検討，提案されている[例えば 5),6)]が，これらは基本的に地震動指標の最大値や構造物の弾性応答に限られている．大規模地震時の構造物の損傷予測，被害予測という観点からは，上述した非線形応答スペクトルを簡易に予測することも有効であると考えられるが，このような試みはほとんど実施されていない．この時に，非線形応答スペクトルの地震動予測式を検討する際には，物理的に有意な表現とする事で，例えば応答スペクトルの予測式の結果等との比較も可能となる．

以上を踏まえて本検討では，設計時に用いる所要降伏震度スペクトルを自動的に設定可能な手法の構築を目的とした検討を行う．この時には，比較的簡易な数式による表現方法を提案するとともに，回帰の手順・方法についても整理を行う．この時の数式表現は，将来的な地震動予測式への展開も念頭に置いて物理的な解釈が可能となるような配慮も行う．

2. 所要降伏震度スペクトルの表現方法の検討

(1) 表現方法の検討

ここではまず，所要降伏震度スペクトルの表現方法とパラメータ推定の方法を整理する．まず所要降伏震度スペクトルは**図-1** で示したように等価固有周期 T_{eq} と所要降伏震度 k_{hy} を軸として，同一の応答塑性率μとなる構造物特性の点を繋ぎ合わせることで表示される．一般的にはμが 1~10 の範囲で 1 刻みで計算，表示されることが多い[例えば 2)]ため，本検討でもこの表示方法を踏襲する．これまでの経験から各塑性率のスペクトル形状は応答塑性率μ=1（応答変位δ_{max} = 降伏変位δ_y）の結果と類似していることが分かっているが，これは構造物の応答塑性率によらず弾性加速度応答スペクトルと概ね同様の形状となることを指しており，これを数式表現したものが活用できる可能性が考えられる．

弾性応答スペクトルについては，距離減衰式等で数多くの数式表現が試みられている[例えば 6)]．しかしながら一般的な応答スペクトルの距離減衰式は，観測記録を適切に再現することを重視しているため，地震規模や震源からの距離に応じた各係数を周期毎に同定することが一般的であり，周期間の関係についてはそれほど重要な意味を有していない．そのため，ある一つの地震動に対する所要降伏震度スペクトルを簡易かつ適切に表現しようと考えた場合には，これらの表現形式を活用することは難しい．

その一方で例えば速度応答スペクトルは，地震動のフーリエ振幅スペクトルの形状と類似する[例えば7)]ため，フーリエ振幅スペクトルの数式表現を活用することも考えられる．フーリエ振幅であれば地震の物理に基づく表現が可能であるとともに，周期毎の変化も自動的に表現される．例えば点震源を仮定した場合の岩盤位置の振幅スペクトル$A(f)$は，次式で表現することができる．

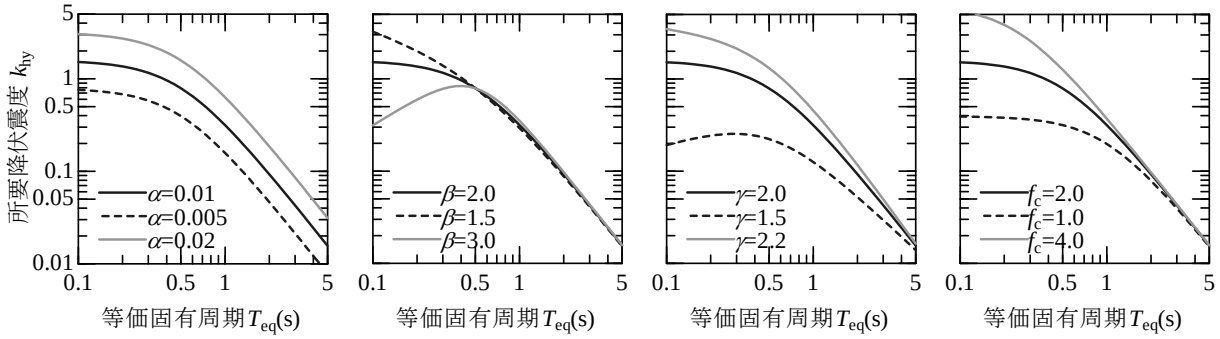
$$A(f)=\frac{R_{\theta\phi}\cdot FS\cdot PRTITN}{4\pi\rho V_s^3}\times M_0 \times\frac{(2\pi f)^2}{1+(f/f_c)^2}\times\frac{\exp(-\pi fR/Q_sV_s)}{R} \quad (1)$$

ここで，M_0：地震モーメント，$R_{\theta\phi}$：ラディエーションパターン係数，FS：自由表面の影響による増幅，$PRTITN$：エネルギーの水平2成分への分散を表す係数，ρ：地盤の密度，V_s：地盤のせん断弾性波速度，f_c：コーナー周波数，R：震源からの距離(km)，Q_s：伝播経路におけるQ値である．このうち，距離減衰に関する項を無視するとともに，M_0以前の項を定数αとし，スペクトル長周期，短周期側の勾配を支配する指数部を変数β, γと置くと式(1)は次のように簡略化できる．

$$A(f)=\alpha\cdot\frac{(2\pi f)^\gamma}{1+(f/f_c)^\beta} \quad (2)$$

このように表現することで，地震動の振幅スペクトルが有する物理的な関係性を保持しつつ，パラメータをα, β, γ, f_cのみに絞った表現が可能となる．また，この各パラメータを式(1)に立ち戻って拡張し，地震規模や距離に応じた表現形式とすることで，将来的には所要降伏震度スペクトルの地震動予測式の実現も期待される．ここで，式(2)で表現される $A(f)$ に関して，α=0.01, β=2.0, γ=2.0, f_c=2.0 を基本として各パラメータを変化させた場合のスペクトル形状の変化を算定した結果を**図-2** に示す．これを見ると，4 つのパラメータを変化させることで，比較的自由度の高いスペクトル表現が可能になること，スペクトルの全体的な形状として**図-1** に示した所要降伏震度スペクトルと類似していることが分かる．そこで以降ではこの式(2)を基本としつつ，設計者が理解しやすいような記載方法に変更した式(3)によって，実際の地震動を対象とした所要降伏震度スペクトルの表現を試みる．

$$K_{hy}(\mu,T_{eq})=\alpha\cdot\frac{(2\pi/T_{eq})^\gamma}{1+(T_c/T_{eq})^\beta} \quad (3)$$



(a) αが変化した場合　(b) βが変化した場合　(c) γが変化した場合　(d) f_c (=1/T_c)が変化した場合

図-2　パラメータの変化に伴うスペクトル特性の変化（α=0.01, β=2.0, γ=2.0, f_c=2.0 を基本）

ここで，T_{eq}：構造物の等価固有周期(s)，$K_{hy}(\mu, T_{eq})$：対象とする地震動に対して等価固有周期T_{eq}(s)の構造物が応答塑性率μとなる降伏震度（所要降伏震度），$\alpha, \beta, \gamma, T_c$：構造物の応答塑性率$\mu$に対して変化する回帰係数である．

(2) パラメータ回帰方法の検討

前節で提案を行った式(3)を用いて所要降伏震度スペクトルを表現するが，この時のパラメータの回帰手順についても整理を行う必要がある．この時には，地震動毎，応答塑性率毎に計算結果を最も表現するパラメータを同定する方法も考えられるが，その場合には最終的な各パラメータの物理的解釈が困難になり，将来的な地震動予測式への拡張に課題が残る可能性も考えられる．そこで**図-1**，**図-3**に示す所要降伏震度スペクトルの一般的な形状を勘案して，以下の手順によって各パラメータの推定を行うこととした．パラメータ推定の手順，イメージも**図-3**に示している．

[1] 所要降伏震度スペクトルの長周期成分の勾配からγを最小二乗法によって算定する．このγは応答塑性率μによらず全てのμで共通した値とする．

[2] 所要降伏震度スペクトルの短周期成分の値から，αを最小二乗法によって算定する．このαは応答塑性率μ毎に算定する（μ=1~10 まで 10 個の値を個別に同定）．

[3] 上記[1], [2]によって表現される 2 直線の交点からコーナー周波数に相当する T_c (f_c)を算定する．これも応答塑性μ率毎に算定する．

[4] パラメータ（γ, α, T_c）を固定した状況で，計算される所要降伏震度スペクトルに最も合致するβを最小二乗法によって算定する．このβも応答塑性率μ毎に算定する（μ=1~10 まで 10 個の値を個別に同定）．

以上の手順を経ることで，地震波によって様々な

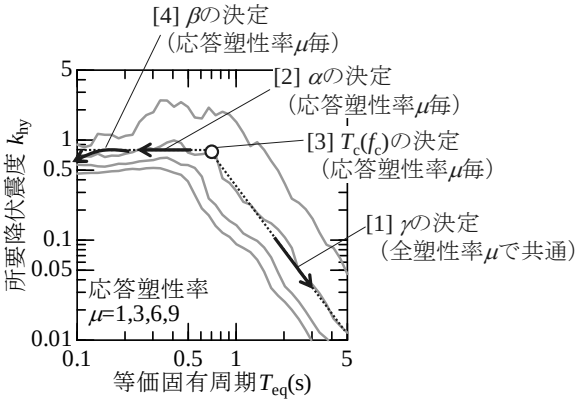


図-3　所要降伏震度スペクトルのパラメータ回帰の手順

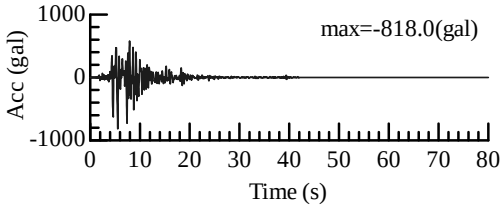
形状を有する所要降伏震度スペクトルに対しても比較的安定したパラメータ同定が期待されるとともに，例えば応答塑性率μを1~10の10タイプとした場合の係数の数が31個（γ：1個，α, T_c, β：各10個）と比較的少なく抑えることが出来る．また幅広い地震条件に応じて各パラメータを同定し，これを考察するとともに各パラメータの表現形式を拡張することで，例えば地震規模，距離等に応じた所要降伏震度スペクトルの距離減衰式の実現も期待される．

3. 提案手法の有効性の確認

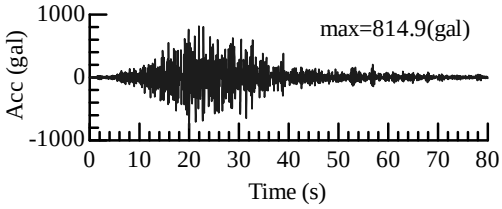
(1) 代表的な記録に対する分析

a) 対象とする地震動，計算条件

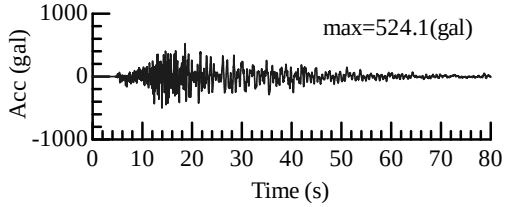
前章で提案を行った所要降伏震度スペクトルの数式表現を実際の地震動に対して適用し，手法の有効性を確認する．検討を行う地震動波形を**図-4** に，弾性加速度応答スペクトルを**図-5** に示すが，ここでは代表的な地震観測記録として1995年兵庫県南部地震の JMA 神戸観測記録（NS 成分）（以降，JMA 神戸），1993 年釧路沖地震動 JMA 釧路観測記録（NS 成分）（以降，JMA 釧路）の 2 波形を対象とすると



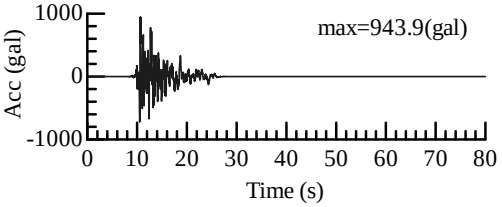
(a) 兵庫県南部地震 JMA 神戸



(b) 釧路沖地震 JMA 釧路



(c) スペクトル I（G1 地盤）



(d) スペクトル II（G1 地盤）

図-4　検討に用いる地震動の時刻歴波形

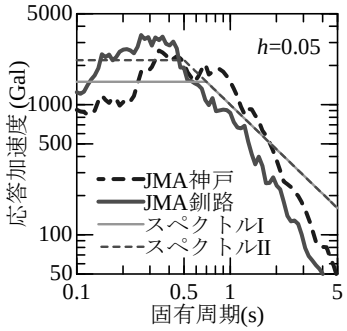


図-5　検討に用いる地震動の弾性加速度応答スペクトル

ともに，鉄道構造物の耐震設計で用いられている標準 L2 地震動スペクトル I, II（G1 地盤）[2)]も用いた．

これらの地震動波形に対して所要降伏震度スペクトルを計算する．この時に対象とする構造物条件，計算条件としては，鉄道構造物の耐震設計 [2)]における RC 橋りょう・高架橋を対象とした所要降伏震度スペクトルの計算条件と同様とした．具体的には，構造物の非線形特性として骨格をバイリニアモデル，履歴をクラフモデル（α=0.1, β=0.2）で設定し，応答塑性率がμ=1~10（1 刻み）となる構造物の降伏震度 k_{hy} を収束計算によって求める．構造物の等価固有周期 T_{eq} は 0.1~5 秒の範囲で対数軸において等間隔に 40 個設定した．構造物の減衰定数は固有周期に依存させず h=0.05 で一定とした．

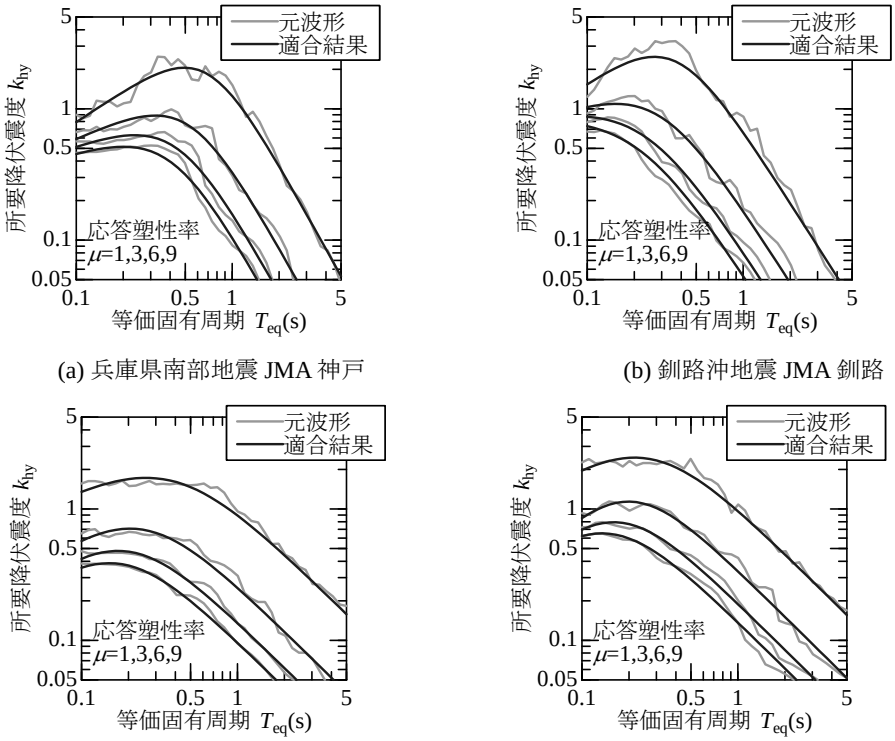
以上の条件に基づいて各地震波形の所要降伏震度スペクトルを計算した結果（μ =1, 3, 6, 9のみ）を**図-6**に橙線で示す．所要降伏震度スペクトルの大まかな形状としては**図-3**に示したように，応答塑性率μ毎にある固有周期で所要降伏震度k_{hy}が大きくなり，それ以外では徐々にk_{hy}が小さくなる形状であるとともに，長周期側の下り勾配はμに依らず概ね類似している．また使用する地震波形の違いによって応答の全体的な大きさ，ピークを示す周期，下り勾配等が異なっている．そのため前章で定義したように，表現方法としてある程度の自由度を有したスペクトルフィッティングを行う必要があることが分かる．

b）スペクトルフィッティングの結果

前述した 4 地震波形の所要降伏震度スペクトル（**図-6** の橙線）に対して，式(3)による表現を試みる．この時には今回整理した手順に従ってパラメータγ, α, T_c, βの同定を行う．パラメータ同定時には，基本的に各パラメータの存在範囲，制約条件等を設けていないが，短周期側のスペクトルの勾配を制御するパラメータβについては，最終的な推定結果が地震波毎に大きくばらつく場合があったこと，極端に大きな値や小さな値を設定した場合にも所要降伏震度スペクトルの形状・適合度にはそれほど大きな変化・改善が見られなかったため，1.0≦β≦5.0 の範囲で制約を設けた．

以上の条件で，地震動毎に所要降伏震度スペクトルのフィッティングを実施した．最終的に得られた所要降伏震度スペクトルを**図-6** に青線で示す．これらの結果より，今回提案した定式化，フィッティング手順によって，いずれの地震動，応答塑性率μを対象とした場合にも所要降伏震度スペクトルの特徴を適切に表現できていることが分かる．また元波形にみられる周期毎のスペクトルの凸凹について，今回の手法で得られるスペクトルはこれを平滑化したような結果となっており，1 章で述べた耐震設計に用いることを念頭に実施するスペクトル直線化の意図を適切に汲んだ結果が得られている．

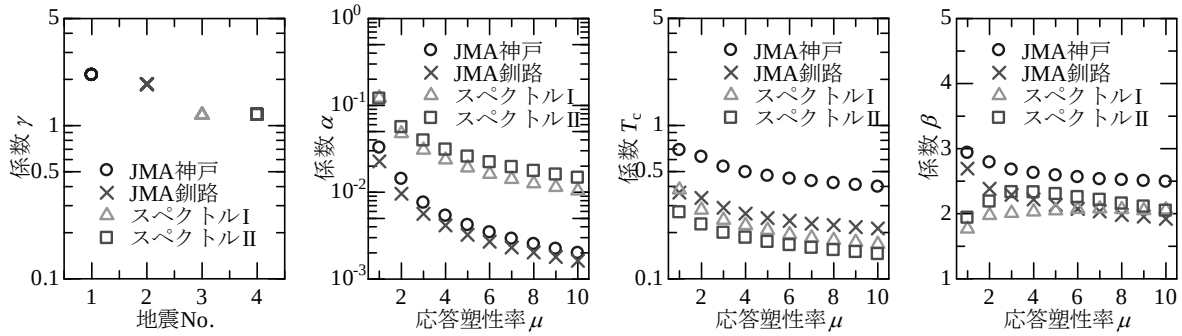
さらに，各地震動に対して算定された回帰係数をまとめて**図-7** に示す．これを見ると，まず長周期側



(a) 兵庫県南部地震 JMA 神戸　　(b) 釧路沖地震 JMA 釧路

(c) スペクトル I（G1 地盤）　　(d) スペクトル II（G1 地盤）

図-6　所要降伏震度スペクトルの適合結果



(a) 係数γ　　(b) 係数α　　(c) 係数 T_c　　(d) 係数β

図-7　各パラメータの同定結果

の勾配の程度を表す指標であるγは，JMA 神戸，JMA 釧路，標準 L2 地震動（スペクトル I，スペクトル II）の順に徐々に小さくなっており，スペクトル I とスペクトル II はほぼ同一の値が得られた．これは，弾性加速度応答スペクトルの長周期成分の勾配と同様の傾向を示している．特にスペクトル I とスペクトル II では，設計地震動の取り扱いの容易さを考慮して弾性加速度応答スペクトルの長周期成分の勾配を同一としている [2]が，同定されたγはこの傾向と合致しており，パラメータ同定が適切に実施できていることを示す一つの結果であると捉えることもできる．

次に，所要降伏震度スペクトルの最大値を規定するパラメータであるαは，各地震で応答塑性率μ=1 の時に最大値を示すとともに，μが大きくなるに従って徐々にαが小さくなっている．μ=1 時のαは弾性時の構造物応答の大小を示しているとともに，μの変化に伴うαの変化程度は構造物の塑性化時の応答増大程度の大小を示している．このような観点で観測記録（JMA 神戸，JMA 釧路）と設計地震動（スペクトル I，スペクトル II）を比較すると，μ=1 時の値は設計地震動の方が大きいとともに，μの変化に伴うαの変化程度は小さくなっている．スペクトル I，スペクトル II は，構造物の非線形挙動の影響にも配慮して，同一の弾性加速度応答となる時刻歴波形の中で非線形化しやすい位相特性を設定しており，αの変化程度が観測記録よりも小さくなっているという今回の結果は，設計地震動の位相設定の有効性を示すものである．

続いて，所要降伏震度スペクトルのピーク周期に

影響を与える T_c は，応答塑性率μの増大に伴って小さくなるとともに，JMA 神戸を対象とした結果のみ全体的な値が大きくなっている．これは**図-5** や**図-6** の結果からも分かる通り，応答のピーク周期が JMA 神戸においてより長周期側にみられるとともに，構造物の塑性化程度の増大（振動中の卓越周期の長周期化）に伴ってこれが徐々に短周期側に移行していることを表現したものである．

最後に短周期側のスペクトル低減程度を表現する係数βは，対象とする地震動によって増加，低減の傾向が異なるが，観測記録を対象とした場合には応答塑性率μが大きくなるにしたがってβが徐々に小さくなっている．これには対象とする周期帯（今回は T_{eq}=0.1~5s を対象）の影響も含まれるが，塑性化が大きくなるに従い構造物の履歴減衰が増大する結果，スペクトル形状が徐々に平坦になる効果を表現したものであると捉えることもできる．

以上のように，今回整理した式(3)とパラメータの推定手順に従って所要降伏震度スペクトルを表現することで，実地震動に基づくスペクトルの全体的な傾向を適切に再現可能であるとともに，スペクトル形状の自動設定が可能となる．そのため，従来の目視による直線化作業と比較して大幅な省力化，パラメータ数の低減（μ=1~10の範囲で従来：74個，今回：31個）を実現している．また各パラメータが有する物理的な意味も明快であるため，このような観点での所要降伏震度スペクトルの考察も可能となるという利点も有している．なお今回は元波形の平均的な傾向を再現するために最小二乗法によってパラメータ推定を行ったが，状況によっては例えば周期毎のスペクトルの変動を安全側に設定する等の配慮が要求される場合もある．この時には全結果を包絡する，ある一定割合で上回る等の制約条件を付加することで適切なパラメータ推定も可能であるため，今回提案した定式化，パラメータ推定手法は，耐震設計における非線形応答スペクトルの設定，提示手法として有効であると考えられる．

c）パラメータの低減，任意の応答塑性率への拡張

前節の検討により，式(3)による表現で各応答塑性率μ（μ=1~10の範囲で1刻み）の所要降伏震度スペクトルを適切に表現できることを確認した．ただし，設計実務を考えると各構造物の応答塑性率μ，応答変位を詳細に把握する必要があり，任意の応答塑性率μにおける等価固有周期T_{eq}と降伏震度k_{hy}の組み合わせが必要になる．そこで，パラメータα, T_c, βをそれぞれ次式によって回帰することで，あらゆる応答塑性率μにおいても所要降伏震度スペクトルを容易に表示可能な形に拡張する．

$$\log\alpha(\mu)=\sum_{n=0}^{3}k_{\alpha,n}\cdot\mu^n \tag{4}$$

$$T_c(\mu)=\sum_{n=0}^{3}k_{T_c,n}\cdot\mu^n \tag{5}$$

$$\beta(\mu)=\sum_{n=0}^{3}k_{\beta,n}\cdot\mu^n \tag{6}$$

ここで，$k_{x,n}$：各パラメータ x を表現するための係数（n=0, 1, 2, 3），μ：応答塑性率（1≦μ≦10）である．今回対象とした地震動のうちJMA神戸に対して $k_{x,n}$ を最小二乗法によって評価した結果を**表-1** に，これによって計算される所要降伏震度スペクトルを**図-8** に示すが，この表現方法で各応答塑性率のスペクトルを適切に再現していることが分かる．また今回は省略するが，他の 3 地震動に対しても同様に適切な所要降伏震度スペクトルを評価可能であることを確認しており，式(3)～式(6)を用いることで，使用するパラメータ数をさらに低減（計13個）した上で，任意の応答塑性率μの所要降伏震度スペクトルを表現可能となる．そのためこの表現形式により，設計実務における有用性がさらに向上すると言える．

(2) 多様な記録を対象とした検討

続いて，前節で検討を行った所要降伏震度スペクトルのフィッティングを多様な地震記録に対して実施することで，各パラメータの存在範囲の把握や地震特性による変化等の考察を行う．検討を行う地震記録は，防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net で公開

表-1　γ, $k_{x,n}$ の評価結果（JMA 神戸の場合）

n	γ	$k_{\alpha,n}$	$k_{Tc,n}$	$k_{\beta,n}$
0	2.143E+00	-1.049E+00	8.072E-01	3.111E+00
1		-5.061E-01	-1.238E-01	-2.053E-01
2		6.071E-02	1.412E-02	2.538E-02
3		-2.673E-03	-5.827E-04	-1.109E-03

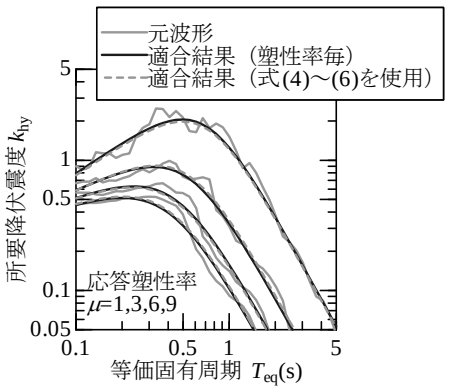
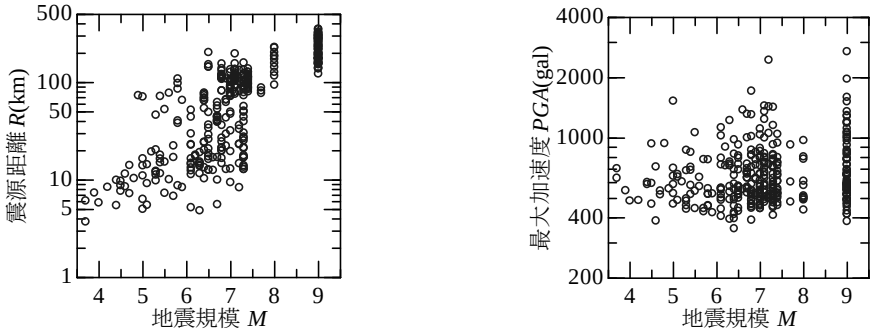


図-8　所要降伏震度スペクトルの適合結果
（式(4)~(6), **表-1** による表現）



(a) 地震規模－震源距離の関係　　(b) 地震規模－最大加速度の関係

図-9　検討に用いた観測記録（346 記録）の条件

されている記録のうち，2022 年 8 月 28 日までに 3 成分合成で 500gal 以上を観測した記録（346 記録）の水平 2 成分のうち大きな方向を用いる．検討に用いた観測記録の地震規模と震源距離，最大加速度の関係を**図-9** に示す．これら各観測記録に対して所要降伏震度スペクトルを算定し，式(3)によって所要降伏震度スペクトルを再現するパラメータの同定を実施する．この時の所要降伏震度スペクトルの計算条件，スペクトルフィッティングの条件等は全て前節と同様とした．

以上の条件に基づいて得られたスペクトルフィッティングの例を**図-10** に，全記録に対する各パラメータの同定結果を地震規模に対してプロットした結果を**図-11** に示す．

まず**図-10** を見ると，様々な振幅特性，周期特性を有する地震波形に対しても，式(3)による簡易な表現と複数のパラメータによって観測記録の所要降伏震度スペクトルの全体的な傾向を適切に表現できている．さらに設定された所要降伏震度スペクトルは，元波形が有する周期毎の所要降伏震度の変化を平滑化したような結果となっている．そのため今回提案を行った所要降伏震度スペクトルの表現方法，フィッティング手順は高い汎用性，有効性を有していると言える．

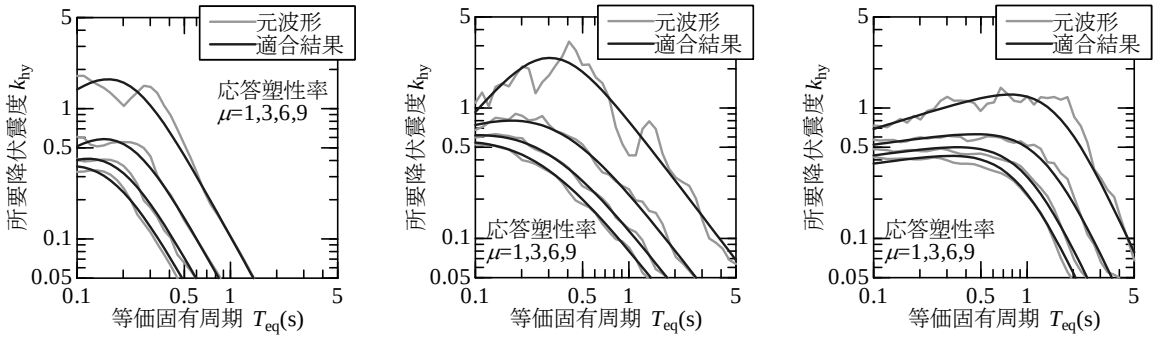
続いて，**図-11** に示した地震規模の変化と回帰係数の変化の関係を見ると，地震記録毎のばらつきは非常に大きいが，地震規模毎の各係数の平均値を見ると一定の傾向が見られる．具体的には，地震規模 M の増大に伴って係数γは減少，αは増大，T_c は多少増大しており，係数βは地震規模との関係は明瞭に見られず大きくばらついている．このうちαの増大は，地震規模の増大に伴う振幅レベルの増大を表現しており，γの減少は，地震規模の増大に伴う長周期成分の相対的な増大を表現している．さらに T_c の増加傾向も，地震規模の増大によってコーナー周波数が徐々に低振動数側に移行していることを表現していると捉えることができる．その一方で係数βは，今回対象とした範囲内での極短周期成分のフィッティング程度を表現したものであるため，物理的な意味を持っていない可能性も考えられる．このように，今回提示した式(3)による所要降伏震度スペクトルの表現を行うとともに各係数の変化を考察することで，地震動の震源スペクトルとの関係での解釈，考察が可能になる．さらにこれと同様の検討を多数の地震観測記録に対して実施し，各係数を地震規模や震源距離等の関数で表現，回帰することで，所要降伏震度スペクトルの地震動予測式の実現も期待される．

以上のように，今回提案した手法によって非線形応答スペクトルを表現，回帰することで，従来よりも作業の手間と情報を大幅に低減した上でのスペクトル表現が可能となるだけでなく，構造物の地震時非線形応答を地震学，地震工学という観点に基づいて評価，考察することが可能となる．そのため，設計時の所要降伏震度スペクトルの表現手法としてだけでなく，これをより一層高度化するための表現方法として，今回の提案法の活用が期待される．

4. まとめ

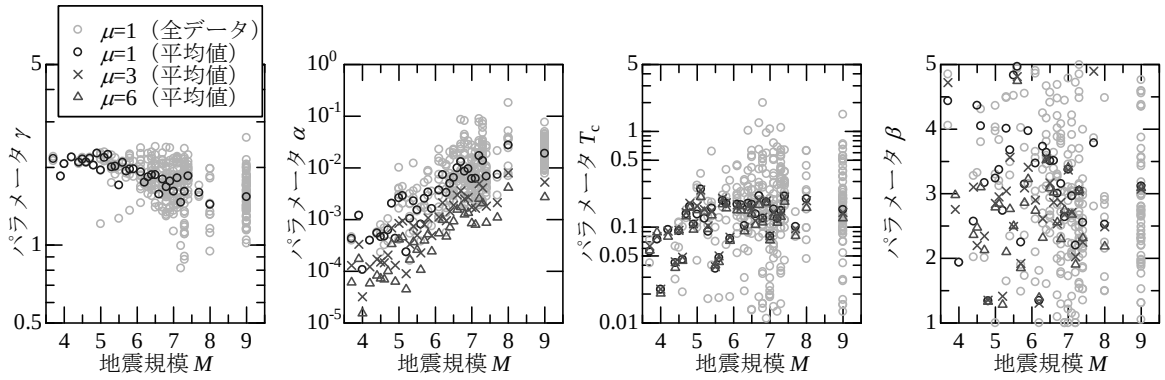
本検討では，設計時の非線形挙動を算定するための所要降伏震度スペクトルを自動的に設定可能な手法の構築を目的とした検討を行った．本検討により得られた成果を以下にまとめる．

(1) 地震動の所要降伏震度スペクトルを比較的簡易な数式による表現方法を提案するとともに，パラメータ推定の手順の提案を行った．基本的な表現方法は地震動の震源スペクトルに準拠しており，これに複数の係数を用いることで，自由度の高い表現を可能としている．



(a) M=5.1, R=14km　(b) M=7.3, R=13km　(c) M9.0, R=180km

図-10　スペクトルフィッティング結果の例



(a) 係数γ　(b) 係数α　(c) 係数 T_c　(d) 係数β

図-11　各パラメータの同定結果

(2) 実際の地震観測記録，鉄道構造物の設計地震動を対象に，提案手法を用いた所要降伏震度スペクトルの表現を試みた．その結果，提案手法によって自動的にスペクトルの全体的な傾向を適切に再現可能であることを確認した．提案手法を用いることで，従来の目視による直線化作業と比較して大幅な省力化と，パラメータ数の低減（μ=1~10の範囲で従来：74 個，今回：31 個）を実現している．また，回帰係数を応答塑性率に関して連続的に表現することで，パラメータ数をさらに低減（計 13 個）した上で，任意の応答塑性率μの所要降伏震度スペクトルを表現可能であることも確認した．この表現形式を用いることで，設計実務における有用性が向上する．

(3) 提案手法を多様な地震観測記録に適用することで，手法の幅広い適用性を確認するとともに，地震記録の特性変化に伴って係数も一定の傾向で変化することを確認した．そのため今回の手法による係数を地震規模，震源距離等の条件で表現することで，所要降伏震度スペクトルの地震動予測式の実現も期待される．

謝辞：本検討では，防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を使用させていただきました．記して謝意を表します．

参考文献

1) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編），2012.
2) （公財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善出版，2012.
3) 家村浩和，三上卓：目標耐震性能に必要な降伏強度と塑性率のスペクトル，土木学会論文集，No. 689/I-57，pp. 333-342，2001.
4) 朝長光，西恭彦，青柳広樹，神澤拓，坂井公俊：常時微動観測に基づくサイト増幅特性評価とこれを考慮した設計地震動評価，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol. 23，pp. 155-162，2019.
5) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第 523 号，pp. 63-70，1999.
6) Boore, D. M. and Atkinson, G. M.: Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10.0s, *Earthquake Spectra*, Vol. 24, pp.99-138, 2008.
7) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.