

多数の参照地震動群と構造物非線形挙動を考慮した 設計地震動波形の合成

坂井 公俊* 室野 剛隆**

Construction Method of Design Earthquake Motion Considering of
Much Reference Earthquake Motion and Structural Nonlinear Response

Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

A calculation method of design earthquake motion which constructs appropriate structural nonlinear response from much reference earthquake motion was proposed. In the method, the waveform that mostly matching the target nonlinear response spectrum is evaluated by convoluting the wavelet coefficients of reference earthquake motions. The proposed method was applied to many waveforms. As a result, an appropriate waveform was synthesized in consideration of the natural period of the bridge, nonlinear response and the deformation of the ground structure. By using the proposed method, seismic design of various type of structures in the same region are carried out by using a unique design motion.

キーワード：設計地震動，参照地震動，所要降伏震度スペクトル，強震動予測

1. はじめに

近年の土木構造物の耐震設計に用いる地震作用として、対象とする震源域を特定した強震動予測手法により評価する機会が多くなっている(例えば1)2)。しかしながら強震動予測手法において評価される地震動波形には、破壊開始点、アスペリティ(地震時に大きなエネルギーを放出する領域)の位置や位相算定時の乱数セットの設定、その他各震源パラメータの設定等の多様なバラツキ、不確実性が含まれている(例えば3)。具体的な例として、 $M_w 6.8$ の地震が近傍で発生した場合を想定し、アスペリティ、破壊開始点、断層破壊の揺らぎ等を考慮した1000ケースの地震動評価結果⁴⁾を図1(時刻歴波形の例)、図2(弾性加速度応答スペクトル)、図3(所要降伏震度スペクトル)に示すが、同一の地震規模を想定した場合にも、設定するシナリオによって時刻歴波形の形状、構造物の弾塑性応答が大きく変化することが分かる。そのため、1回の計算によって得られる地震動波形は多数想定される母集団のうちの1サンプルでしかなく、これをそのまま用いて構造物の耐震設計を行う場合には、十分な注意を要する。また、仮にこれらの地震動波形群の中から1波を取り出すことを考えた場合にも、対象とする構造物の振動特性(固有周期、変形性能など)によってはこれが不適切なものになっている可能性もある。図2の弾性応

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター

答スペクトル群の平均値に最も近い時刻歴波形を抽出した結果を図4に示す。この時刻歴波形の弾性応答スペク

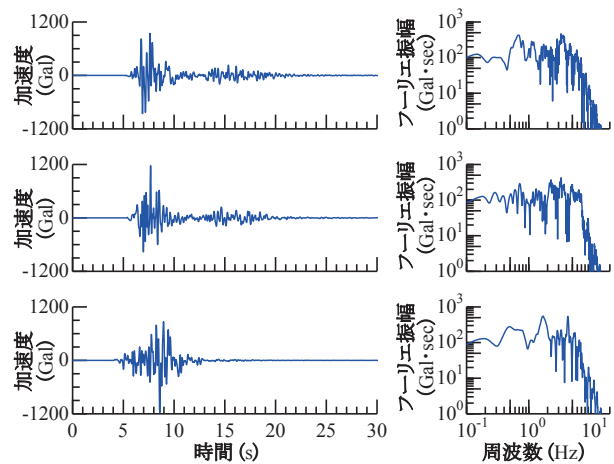


図1 強震動予測手法によって得られた参照地震動波形の例

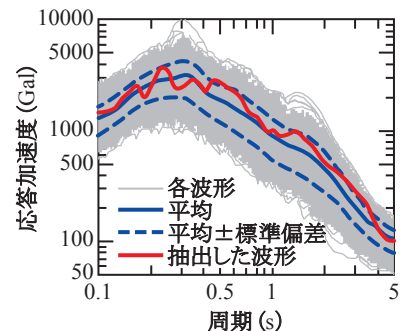


図2 参照地震動群の弾性加速度応答スペクトル(h=0.05)

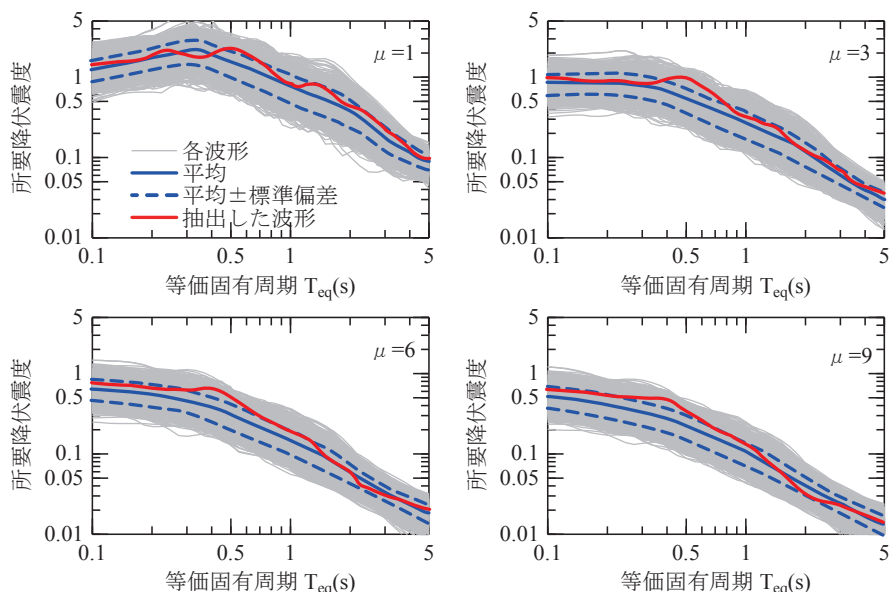


図3 参照地震動群の所要降伏震度スペクトル

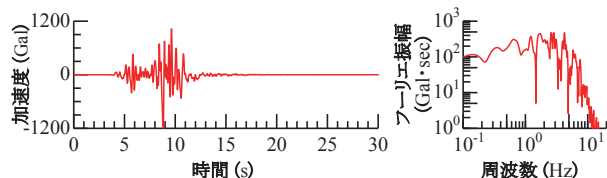


図4 弾性加速度応答スペクトル群(図-2)の平均に最も近い地震動波形

トル、所要降伏震度スペクトルをそれぞれ図2、図3に赤線で示しているが、構造物の周期、応答塑性率によっては全波形の平均値とは大きく異なる応答値となる場合も存在することが分かる。このような問題を解消するためには、各種不確定性を全て考慮した上で、モンテカルロシミュレーション等により想定される多数の地震動群を作成し、この波形群を全て用いる、という方法が考えられる。

しかしながら、鉄道構造物の耐震設計においては、設計地震動を耐震設計上の基盤面において設定し、それより上層の地盤の影響、構造物の応答は地点毎の時刻歴動的解析によって評価することを原則としている⁵⁾。この時、上述したモンテカルロシミュレーションに基づいた多数の地震動波形群が与えられた場合には、設計者は地盤、構造物の挙動評価として膨大な計算を実施し、その全ての応答評価結果に対して性能照査を行うという、実務的に現状の設計手続きにおいては到底対応不可能な要求を課することになりかねない。

このような中で、国際基準では reference earthquake motion (参照地震動) と seismic action (地震作用) を明確に分離して定義している⁶⁾。このうち参照地震動は構造物の耐震性能評価のために規定する地震動であり、地震作用は、参照地震動に基づいて次の段階で規定することになっている。そのため耐震設計上の基盤面位置に

おいて算定された多数の地震動群を参照地震動と定義した場合、この位置で何らかの手法を用いて適切な地震作用(設計地震動)を設定することも考えられる。こうすることで、実務上にも現実的な作業量で、各種不確定性を考慮した上で強震動予測手法に基づいた構造物の耐震設計が可能となる。

以上を踏まえ本検討では、多数の参照地震動群の中から、構造物の非線形挙動を念頭においた上で適切な設計地震動1波を合成する手法について検討を行う。この時に対象とする構造物は、ある単一の構造のみには限定するのではなく、振動特性の異なる複数の構造形式や幅広い断面諸元に対しても同一の時刻歴波形1波によって性能を評価できるものを目指す。

提案手法の特徴としては、まず①構造物の設計時に重要な指標である非線形応答量を目標とした波形合成を行っている点にある。さらに②断面諸元、周期特性や変形性能の異なる複数の橋梁・高架橋だけでなく、盛土といった振動特性の大きく異なる構造物を対象とした場合にも同一の時刻歴波形によって非線形応答値の評価が可能となる点や、③波形合成を行う際の要素地震としては、参照地震動群のみを用いているため、地震規模等の変化に伴う経時特性、サイト増幅特性などの影響を含んだ上で、因果性を満足する地震動波形を評価することができる点も特徴として挙げられる。

2. 設計地震動波形の合成方法

多数の参照地震動群から、構造物の非線形挙動を考慮した上で設計地震動1波を合成する手法を提案する。具体的な手順は2.1節以降に示すが、それぞれの参照地震動群のウェーブレット係数を加重平均することで、各

波形の特性を含んだ上での時刻歴波形を合成する。合成波形によって算定される構造物の応答量が目標とする応答量に最も近くなる各波形の重み係数を最適化手法によって評価する。

2.1 問題の設定

ある時刻歴波形 $y(t)$ が作用した場合の構造物の応答量を $[D(y)]$ と定義する。ここでの構造物の応答値は、高架橋だけに限定したものではなく、任意の構造形式の構造を含めた応答を意味する。また応答が線形であるか、非線形であるかも問わない。

例えば複数の高架橋と盛土を対象とした場合の応答値 $[D(y)]$ は、以下のようなベクトルで表現する。

$$[D(y)] = [k_{hy}(\mu_1, T_1, y), k_{hy}(\mu_2, T_2, y), \dots, k_{hy}(\mu_k, T_k, y), k_{hy}(\mu_{21}, T_{21}, y), k_{hy}(\mu_{22}, T_{22}, y), \dots, k_{hy}(\mu_{2k}, T_{2k}, y), \dots, k_{hy}(\mu_{11}, T_{11}, y), k_{hy}(\mu_{12}, T_{12}, y), \dots, k_{hy}(\mu_{1k}, T_{1k}, y), \alpha \cdot \delta^b(k_{h1}, y), \alpha \cdot \delta^b(k_{h2}, y), \dots, \alpha \cdot \delta^b(k_{hy}, y)] \quad (1)$$

ここで、

$k_{hy}(\mu_i, T_k, y)$: 固有周期 T_k 秒の高架橋に時刻歴波形 $y(t)$ を入力した場合に、応答塑性率が μ_i となるような高架橋の降伏震度

$\delta^b(k_{hy}, y)$: 降伏震度 k_{hy} の盛土に時刻歴波形 $y(t)$ を入力した場合の基準化滑動変形量 (m)

α : 高架橋応答と盛土応答の評価指標、パラメータ数、重みを補正するための係数 (今回は $\alpha=1$ とする) である。

続いて、多数の時刻歴波形群の中のある時刻歴波形 $x^{(i)}(t)$ を考える。ここで i は、 L 個の時刻歴波形 (参照地震動群) の i 番目の波形であることを意味している ($i=1, 2, 3, \dots, L$)。この波形をウェーブレット変換すると式 (2.1)、式 (2.2) のように表わせる。

$$x^{(i)}(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{N-1} a_{j,k}^{(i)} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (2.1)$$

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (2.2)$$

ここで、 $N=2^j$ である。 $\psi(t)$ はアナライジングウェーブレットであり、今回は周波数領域でコンパクトサポートな直行ウェーブレットである Meyer によるもの⁷⁾を用いる。

・ $\frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3}$ の場合

$$\psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sin\left(\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3|\omega|}{2\pi} - 1\right)\right) \exp\left(\frac{j\omega}{2}\right) \quad (3.1)$$

・ $\frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3}$ の場合

$$\psi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cos\left(\frac{\pi}{2} v \left(\frac{3|\omega|}{2\pi} - 1\right)\right) \exp\left(\frac{j\omega}{2}\right) \quad (3.2)$$

・ それ以外の場合

$$\psi(\omega) = 0 \quad (3.3)$$

この L 個の時刻歴波形 $x^{(i)}(t)$ を用いて、次式により時刻歴波形 $y(t)$ を合成する。

$$y(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{N-1} \beta_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (4.1)$$

$$\beta_{j,k} = \sum_{i=1}^L W_j^{(i)} \cdot a_{j,k}^{(i)} \quad (W_j^{(i)} \geq 0) \quad (4.2)$$

ここで、 $W_j^{(i)}$: i 番目の波形の j 次における重み係数であり、式 (4) で評価される時刻歴波形 $y(t)$ による応答値 $[D(y)]$ が、予め設定した目標応答値 $[D^{target}]$ に十分近くなるような重み係数 $W_j^{(i)}$ を算定することとする。また、重み係数 $W_j^{(i)}$ が小さくなるという Tikhonov の正則化法による拘束⁸⁾も与える。具体的には目的関数を次式で定義する。

$$\varepsilon = |D^{target} - D(y)|^2 + \lambda^2 |W|^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

ここで、最適な正規化パラメータ λ を算定するためには、GCV⁹⁾、Lカーブ法¹⁰⁾等が用いられるが、今回は簡易的に一律の値 ($\lambda=0.01$) を用いた。

2.2 最適化の方法

式 (5) の目的関数を最適化する方法としては、ヒューリスティックアルゴリズムの一つである遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)¹¹⁾を用いることとした。GA は初期モデルの制約が少なく、かつロバスト性が高いために、観測記録等を説明する地盤構造の推定等に数多く適用されている^{例えは¹²⁾}。本検討における GA の各種計算条件を以下に示す。

まず、適応度の高い解周辺を探索し、より最適な解を求めるために、ルーレット選択規則を用いる。また、局所的な解にとどまることを防ぎ、より広範囲な解を探索するために、動的な突然変異を発生させる。重み係数 $W_j^{(i)}$ の範囲は、 $0 \leq W_j^{(i)} \leq 1$ とし、これを 8 ビットで離散化する。GA のパラメータとして、個体数 20、交差確率 70%、世代数は 1000 とする。以上の操作を初期乱数を変化させてそれぞれ独立に 10 回繰返し、最終的に得られた 10 個の波形の中から式 (5) の目的関数を最も満足する時刻歴波形 1 波を抽出する。

3. 提案手法の適用性の確認

前章で提案した波形合成手法を実際の時刻歴波形群に適用することで、手法の有効性を確認する。まず、強震動予測によって評価された多数の参照地震動群に対する高架橋の非線形応答を対象とした検証を行う (3.1 節)。続いて振動特性の大きく異なる土構造物の応答も含めた最適化を実施することで、本手法によって得られる地震動波形 1 波が複数の振動特性の異なる構造を対象とした

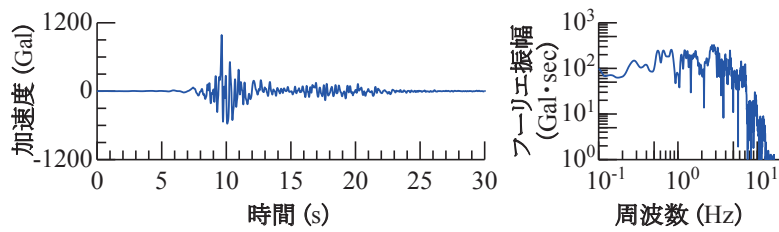


図5 合成された時刻歴波形（対象：所要降伏震度スペクトル）

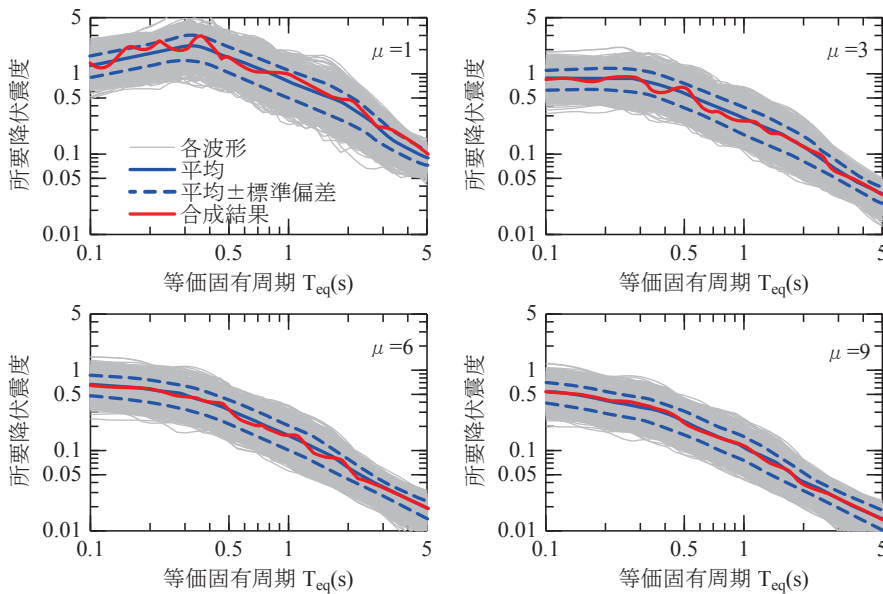


図6 合成された時刻歴波形の所要降伏震度スペクトル（対象：所要降伏震度スペクトル）

場合にも適用可能であることを確認する（3.2節）。

$$T' = T_{eq} \times \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha(\mu - 1)}} \quad (6)$$

3.1 高架橋の非線形応答を対象とした場合

ここでは、強震動予測結果から得られる多数の参照地震動群に対する高架橋の非線形応答を対象として提案手法を適用し、設計地震動の合成を試みる。対象とする参照地震動群は、1章で示した合計1000個の時刻歴波形とした。各波形の弾性加速度応答スペクトルを図2に示しているが、それぞれの波形は大きくばらついている。

目標応答値 $[D^{target}]$ としては、鉄道RC高架橋⁵⁾を対象とした所要降伏震度スペクトルを用いる。対象とする周期は、構造物の固有周期が0.1～5.0秒とし、その間を対数軸で均等に40分割して与えた。応答塑性率 μ は、1（弾性時）、3、6、9の4種類のスペクトルを全て用いる。

続いて最適化の実施前に、最大加速度の出現時刻を両波形で一致させるように、時間軸を移動させた。さらにウェーブレット次数 j は18次まで考慮することとし、データ数 $N=262,144$ として元波形には後続の0を加えている。

最適化時に対象とする周期帯は、構造物の非線形化に伴う振動周期の長周期化を考慮した。具体的には、次式により構造物の非線形応答時の卓越周期を簡易的に算定し、これをサポートする周期帯域までを対象とした。

ここで、 T_{eq} は構造物の固有周期、 μ は応答塑性率、 T' は構造物の振動卓越周期である。具体的には、対象とする構造物の周期のうち最も短いものが周期0.1秒の構造が弾性応答 ($\mu=1$) した場合 ($T'=0.1$ 秒)、最も長いものは周期5秒の構造が応答塑性率9となった場合 ($T'=11.2$ 秒) であるため、この範囲 (0.1～11.2 秒) をサポートするウェーブレット次数を対象とした。また、対象周期以外のウェーブレット次数における最適化は実施しないこととし、これらの次数における重み係数は参照地震動群の数 L の逆数 $1/L (=0.5)$ を固定で与えた。

さらに、最適化を実施する際に対象とする波形群としては、1000波全てを用いるのではなく、各波形による応答と目標スペクトルとの差を事前に算定し、この差が小さな100波のみ選択して用いることとした。対象とする構造物の応答値 $[D(y)]$ は、参照地震動群の所要降伏震度スペクトル（応答塑性率 $\mu=1, 3, 6, 9$ ）の平均値とした（図3の青線）。

以上の条件に基づき、最適な重み係数を算定した。最終的に得られた時刻歴波形を図5に、この波形の所要降伏震度スペクトルを図6に赤線で示す。これを見ると、合成された時刻歴波形は、幅広い周期帯域、非線形応答

量（応答塑性率）に対して目標スペクトルを適切に表現している。さらに、参照地震動群の中から弾性応答スペクトルに近い1波を選定した結果（図3の赤線）と比較すると、明らかに今回合成された波形の方が目標スペクトルとの一致度が高いことが分かる。また、最終的に得られた時刻歴波形（図5）は継続時間が短かつ強震動予測実施時に設定した2つのアスペリティの影響を表現できており、対象とする震源域、地点の影響を含んだ地震動波形となっていると言える。つまり、本手法によって波形合成を行うことで、地点の地震環境、震源の破壊過程の不確定性を考慮した上で、構造物の非線形応答量の観点からも適切な設計地震動の評価が可能となっている。

3.2 土構造物と高架橋の応答を同時に対象とした場合

上記3.1節の検討は、構造物の応答値 $[D(y)]$ を評価する構造形式として高架橋のみとしていた。一方で、土構造物はこれとは振動特性が異なり、かつ応答の評価法も大きく異なる。そのため高架橋の応答にとって適切な地震動波形が土構造物の応答にとって適切な波形とはなっていないことも十分考えられる。そこで、構造物の応答値 $[D(y)]$ に盛土の変形量も加味した波形合成を実施することで、複数の振動特性を対象とした場合の提案手法の適用性を確認する。

目標とする構造物の応答値 $[D(y)]$ のうち、高架橋の応答は前節と同様に参照地震動1000波の平均応答値（図2の青線）を用いる。盛土の応答値も、これと同様の参照地震動1000波を用いた基準化変形量¹³⁾の平均値（図9の青線）を対象とする。なお、盛土の降伏震度 k_y は0.2～1.0までを0.05刻みで算定している。

重み係数を算定する手法も基本的には前節と同様とする。ただし、今回用いた盛土の変形量評価手法¹⁴⁾では、構造の振動特性は考慮していない。そのため、最適化を行うウェーブレット係数を構造の周期特性から限定するという手法をそのまま用いることは出来ない。一方で、今回の盛土の変形量算定法は、地震動の加速度波形をダイレクトに用いるため、波形の短周期成分の影響が非常に大きくなると考えられる。そこで、高架橋を対象とした場合の対象周期帯よりも短周期側のウェーブレット係数も対象として最適化を実施することとした。

以上の条件に基づき、最適な重み係数を算定した。最終的に得られた結果を、図7（時刻歴波形）、図8（所要降伏震度スペクトル）、図9（盛土の基準化変形量）に示す。まず、図8の所要降伏震度スペクトルは、目標スペクトルを良好に再現しており、土構造物の影響を無視した場合（図6の赤線）と概ね同程度の一致度を示している。また図9より、今回得られた時刻歴波形は各波形

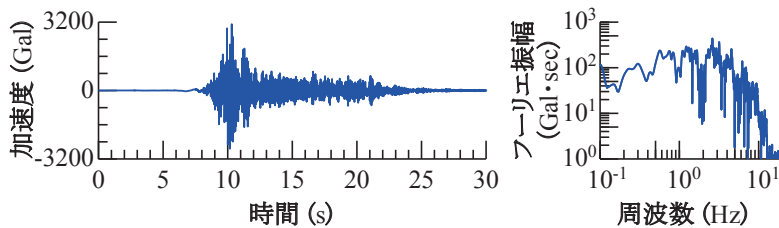


図7 合成後された時刻歴波形（対象：所要降伏震度スペクトル+基準化変形量）

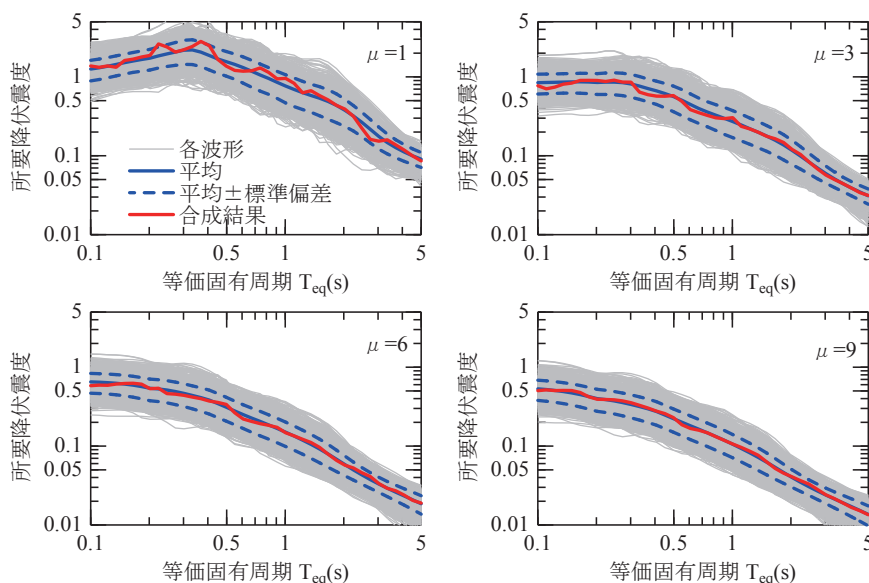


図8 合成された時刻歴波形の所要降伏震度スペクトル（対象：所要降伏震度スペクトル+基準化変形量）

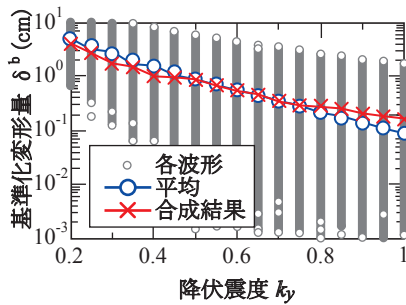


図9 合成された時刻歴波形の基準化変形量
(対象：所要降伏震度スペクトル+基準化変形量)

の基準化滑動変形量の平均をほぼ再現しており、盛土の応答の観点からも適切な波形となっていることが分かる。

ここで、土構造物の応答は波形の短周期成分の影響が非常に大きいため、得られる波形の形状(図7)としては、短周期成分が大きく卓越したような波形となっており、加速度が非常に大きくなっている。そのためこの波形は実際の地震動波形と多少の乖離があると考えられる。ただし、この時刻歴波形を用いて構造物の応答値算定、性能照査を行うことで、構造物諸元の変化、構造形式の違いによらず、1波の応答解析のみで目標とする性能(ここでは全波形の平均的な応答に対する性能)を満足する構造を設計可能であるため、設計地震動として要求される条件を具備していると言える。

4. まとめ

各種の地震動評価手法を用いることで、地震の震源、伝播経路、サイトの各特性を考慮した場合での地震動波形1波が得られる。しかしながら依然として、断層の破壊過程等の各種パラメータは多くの不確定性を含んでおり、これらを全て考慮した場合には、バラツキの大きな多数の地震動波形が評価される。この地震動波形群の各波形を参照地震動と考え、これらの各特性を反映した中で、構造物の非線形挙動の観点から適切な設計地震動を評価する手法を提案した。

具体的には、目標とする非線形応答スペクトル、その他各指標に適合するような時刻歴波形を各参照地震動群のウェーブレット係数を適切に重ね合わせることで評価する。重ね合わせを行う際の重み係数は、遺伝的アルゴリズムを用いることで、ロバストかつ現実的な時間で決定することが可能である。

提案した手法を実際の強震動予測に基づく地震動波形群に適用することで、幅広い指標(高架橋の固有周期・非線形応答量、土構造物の滑動変形量)を全て考慮した上で、適切な目標応答を表現する時刻歴波形を合成可能であることを確認した。本手法を用いることで、多数の

地震動波形群の中から、構造物の非線形挙動の観点から適切な設計地震動の合成が可能となった。また、同一地点に存在する複数の土木構造物に対しても、同一の設計地震動による応答値算定、性能照査のみで適切な耐震設計が可能となる。

文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007
- 2) 小森和男, 吉川博, 小田桐直幸, 木下琢雄, 溝口孝夫, 藤野陽三, 矢部正明：首都高速道路における長大橋耐震補強の基本方針と入力地震動, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.1-20, 2005
- 3) 山田雅行, 先名重樹, 藤原広行：強震動予測レシビに基づく予測結果のバラツキ評価の検討～震源パラメータのバラツキについて～, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第1号, pp.43-60, 2007
- 4) 坂井公俊, 室野剛隆, 日野篤志：鉄道構造物の安全性照査のための地震動評価例 ～立川断層帯による地震を対象として～, 第48回地盤工学研究発表会発表会講演集, 2013
- 5) (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), 2012
- 6) ISO TC 98/SC3/WG10: Basis for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 7) Meyer, Y.: Orthonormal Wavelets, Inverse Problems and Theoretical Imaging, pp 21-37, 1989.
- 8) Tikhonov, A. N.: On the problems with approximately specified information, *Ill-posed problems in the Natural sciences*, 1987.
- 9) Wahba, G.: Practical approximate solutions to linear operator equations when the data are noisy, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 14(4), pp.651-667, 1977.
- 10) Hansen, P. C.: Truncated singular value decomposition solutions to discrete ill-posed problems with ill-determined numerical rank, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 11(3), pp.503-518, 1990.
- 11) 長尾智晴：最適化アルゴリズム, 昭晃堂, 2000
- 12) 山中浩明, 石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.468, pp.9-17, 1995
- 13) 坂井公俊, 室野剛隆, 京野光男：鉄道盛土の地震被害簡易推定手法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.3, pp.542-552, 2012
- 14) 館山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己：盛土の耐震設計法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.12, No.4, pp.7-12, 1998