論文 地震基盤波形データベースを用いた 設計地震動評価に関する検討

田中 浩平¹·坂井 公俊²

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所(〒185-8540東京都国分寺市光町二丁目8-38) E-mail:khtnk@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38) E-mail:ksakai@rtri.or.jp

平成24年鉄道構造物等設計標準・同解説では、耐震設計に用いる設計地震動の設定における考え方が変 更されており、構造物の破壊に関する安全性照査に用いるL2地震動を、地点依存の強震動予測手法により 算定することが原則となっている.強震動予測手法による地震動評価を実施する場合には、震源特性、伝 播特性、サイト増幅特性を適切に考慮した詳細な検討が必要である.しかし、地震動評価を実施する場合 には、震源特性や伝播特性について地点固有に設定するための十分な情報が存在するとは限らず、標準的 な値が設定されることも多い.一方、地震基盤~工学的基盤までの地震増幅特性を表すサイト増幅特性に ついては、地点固有に設定することが一般的である.そこで、地震基盤位置で全国共通の地震基盤波形デ ータベースを構築し、簡便に地点固有の設計地震動を評価する方法について検討を行ったので報告する.

Key Words : Design ground motion, Strong ground motion estimation, seismic bedrock, site amplification

1. はじめに

平成 24 年鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計))の改訂に伴い,耐震設計に用いる設計地震動の設定に関する考え方が変更されている.具体的には,構造物の破壊に関する安全性照査に用いる L2 地震動は,建設地点で想定される最大級の地震動を設定する.また,L2 地震動の算定においては,最大級の地震動をもたらす対象地震を特定し,原則として強震動予測手法に基づく地点固有の地震動評価^{例えば2}を実施する必要がある.

地震動に影響を与える特性として、震源特性、伝播特 性、サイト増幅特性があり、強震動予測を実施するにあ たってこれらの特性を設定する必要がある.このうち、 特に、発生頻度の低い内陸活断層で発生する地震では、 震源特性を規定する諸元として、事前に地点固有に設定 できるものは少なく、強震動レシピ等³を参照して標準 的な値を設定することが多い.また、伝播特性も散乱減 衰の設定に地域固有の値が用いられる程度である.一方 で、地震基盤~工学的基盤までの地震増幅特性を表すサ イト増幅特性については、地震観測や常時微動観測を実 施して地点固有に設定することが一般的である^{例には)}.

すなわち,強震動予測を実施するにあたって,震源特 性や伝播特性に対しては,事前に地点固有に設定するも のは少なく,地震基盤位置で評価された地震動について は、評価地点によらず、全国共通の結果を活用できる. すなわち、標準的な特性を設定した強震動予測手法により地震基盤位置の波形データベースを構築し、これに地 点ごとのサイト増幅特性を考慮することで、地点固有の 地震動を簡便に評価できる可能性がある.

このデータベースには、様々な震源特性、伝播特性を 設定した膨大な地震動が含まれていることから、利用す るにあたっては、建設地点の対象地震の特性に合致した 波形群を選定する作業が必要となる。田中ら⁹は、強震 観測記録や強震動予測波形を収集した工学的基盤位置の 地震波形データベースと、この各データの属性情報(例 えば、震源規模、距離等)を整理したインベントリー (目録)を用意することで、設計者が属性情報の値を設 定すれば、対象地震の特性に合致した波形群を選定する 枠組みを提案している。この手法によれば、評価地点ご とに変化する事前情報の多寡に対応した地震動を評価す ることも可能である。事前情報が多ければ、選定される 地震動のばらつきが小さくなり、設計地震動として、実 現値に近い地震動を設定することが可能となる。

上記のような状況から,特に,内陸活断層で発生する 地震に対して,強震動予測手法に基づく地点固有の設計 地震動を設定する方法として,以下のようなフローを提 案する.また,設定にあたっての概念図を図-1に示す. 図内の番号はフローの番号と対応している.

- 様々な震源特性を有する内陸活断層に対して、網 羅的な評価地点を想定して、強震動予測手法に基 づく地震基盤位置の地震動評価を実施し、波形デ ータベースを作成する.作成した波形データのイ ンベントリーを整理する.
- ② 設計地震動を設定するにあたって対象となる地震について、事前に特定できる情報(例えば、地震規模や距離等)から、波形インベントリーの考え方に基づいて、データベースから目的に合致した波形群を抽出する.
- ③ 抽出した波形群を設計に用いることも可能である が、この波形数は膨大であり、設計コストがかか るため、この波形群を代表するような地震動を、 地震基盤位置の設計地震動として設定する。
- ④ 地震基盤位置で設定された設計地震動に、サイト 増幅特性を乗じることで、工学的基盤位置におけ る設計地震動波形を設定する。



設計地震動評価の概念図

本論文の構成について述べる.はじめに、2章におい て地震基盤における波形データベースの構築を行う.具 体的には、データベース内の地震動を評価するために用 いた強震動予測手法について説明し、評価された地震動 の妥当性を観測記録との比較により確認する.続いて、 3章において波形データベースから設計地震動を評価す る方法について述べる.3章(1)では、波形インベントリ ーに基づき波形群の抽出方法について説明する.3章(2) では、これらの波形群を表現する代表波を抽出する方法 について述べる.3章(3)では、工学的基盤位置における 設計地震動波形の評価事例について説明する.

2. 地震基盤波形データベースの構築

ここでは、地震基盤位置における波形データベースを 構築する.データベースには、実際に観測された強震記 録を収納することも考えられる.しかし、耐震設計で対 象となるような大規模地震の震源近傍の地震記録が十分 に存在するとは限らない.また、強震記録が存在してい ても、本検討における評価位置である地震基盤まで、地 震動を引き戻すための、地震増幅特性や地盤構造が全て の地震観測点で判明しているとは限らない.

そこで、本検討では、地震基盤位置における波形デー タベースは、強震動予測手法に基づき作成されたシミュ レーション波で構築することとした.シミュレーション 波が、観測記録と同様の傾向を有することを確認するこ とでデータベースの妥当性を確認する.

(1) 強震動予測手法の概要

地震動の位相特性が構造物の非線形応答に与える影響 は大きいことから、構造物の耐震設計に用いる地震動と しては、地震動の位相特性に十分配慮した波形である必 要がある.そこで、地震動の評価手法としては、震源・ 伝播経路・サイト特性をそれぞれモデル化した位相特性 と観測記録に基づく振幅の経験的サイト増幅特性を用い た統計的グリーン関数法³を用いる.

手法の概要を以下に示す.まず,小規模地震u(t)による地震動が評価されている場合,これを設定した断層面(図-2)に対して式(1)^のを重ね合わせることにより,大規模地震による地震動を算定する.

$$U(t) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \left[\frac{r}{r_{ij}} \cdot f(t) * u(t - t_{ij}) \right]$$
(1)

なお,式(1)の ƒ(t), t_{ij}は, それぞれ式(2a), (2b)のように表 される.

$$f(t) = \delta(t) + \frac{1}{n'(1 - e^{-1})} \cdot \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[\exp\left(-\frac{k - 1}{(N-1)n'}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{(k-1)\tau}{(N-1)n'}\right) \right]$$
(2a)
$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{\beta} + \frac{\xi_{ij}}{V_r}$$
(2b)

ここで、U(t):大地震の地震動、u(t):小地震の地震動 (グリーン関数)、f(t):大地震と小地震のすべり速度時間 関数の違いを補正するための関数、r:小地震の震源か ら対象地点までの距離、 r_i :小断層(i_i)要素から対象地点 までの距離、N:大地震の断層分割数、 $\delta(t)$:ディラック のデルタ関数、 τ :ライズタイム、n':波形の重ね合わ せの際に現れる見かけの周期性を除去するための任意の 整数、 r_0 :大地震の破壊開始点から対象地点までの距離、 ξ_i :破壊開始点から小断層(i_i)要素までの距離、 β :基盤 のせん断弾性波速度, Vr:破壊伝播速度である.

小規模地震による地震動 u(t)は,振幅 A(f)を式(3a),位 相 $\varphi(f)$ (ここではこの微分形 $t_{g}(f)$)を式(3b)でそれぞれ評 価し,フーリエ逆変換によって算定する.

$$A(f) = G(f) \cdot \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRTITN}{4\pi\rho\beta^3}.$$

$$M_0 S(f, f_c) \cdot \frac{\exp(-\pi fR/Q_s\beta)}{R}$$

$$t_{or}(f) = t_{or}^s(f) + t_{or}^P(f) + t_{or}^L(f)$$
(3b)

ここで、G(f): サイト増幅特性、Mo: 小地震の地震モー メント, $S(f, f_c)$:震源スペクトル, f_c : コーナー周波数, R:小断層から対象地点までの距離, Q: 伝播経路にお ける S 波の Q 値, R_{θ_a} : ラディエーション係数, PRTITN: 地震動のエネルギーが水平2方向に分散する 効果を表す係数,FS:地表面における増幅効果を表す 係数, ρ: 基盤の密度である. 式(3b)の t_o(f)は地震動の群 遅延時間, 添字 S, P, L は, 震源特性, 伝播経路特性, サイト特性を表し、それぞれ観測記録に基づき経験的、 理論的にモデル化されたもの ¹⁰⁹を用いる. また,本検 討では震源近傍の地震動評価を行うため、近地項・中間 項の影響を考慮する ?. 地震基盤位置の地震動を推定す るため、サイト増幅特性 G(f)は1.0 である. 高周波遮断 周波数 f_{max} は 6.0Hz, ラディエーション係数 $R_{\theta_{\theta}}$ は全方位 の平均値として 0.63, 地震動を水平方向の 2 成分に分配 する係数 PRTITN は $1/\sqrt{2}$, 自由表面の影響による増幅 FSは2.0をそれぞれ用いる.

地震動位相の震源特性を評価する際には、図-2におけ る各小断層をさらに10×10に分割した極小断層を設定し、 これらの重ね合わせを行った.また、断層の破壊進展の 不均質性による地震動評価結果の変化に配慮するため、 小断層に分割した際の震源位置として6セット、小地震 の位相スペクトル算定時の震源位置として6セット、ラ ンダムに設定した評価を行う.1つの震源モデルに対し、 地点ごとに36波形の地震動を評価することになるが、こ の程度のサンプル数で、地震動の平均値や標準偏差とい った統計的特性が概ね収束することを確認している¹⁰.



(2) 評価条件の設定

強震動予測手法を実施するにあたって必要となる情報 として、震源モデルと評価地点の設定について述べる. 対象とする震源は、地震調査推進本部で公開されている 主要断層帯とした¹¹⁾.この断層帯に対して、地震動評価 を実施するにあたって必要となる震源モデルを、公開情 報¹²⁾や強震動レシピ³⁾などを参照して設定した.なお、 震源パラメータや幾何学的形状が同じものを省いて、 *M*_{*}6.2~7.6の中で224ケースを設定した.

評価地点は、破壊伝播効果等による地震動の変動を適切に表現できるように設定した(図-3). 各測線に2.0km間隔とし、設定領域を断層サイズごとに変化させた. Mw=7.0の断層で200点程度の地点数となり、合計では35,288地点、1,270,368波形をデータベースに収納した.



図-3 地震動評価地点の配置(平面図)

(3) データベースの検証

構築した地震データベースについて妥当性を検証する. 具体的には、設定した地震規模、距離に合致する波形群 の統計的特性が、両者で概ね一致することを確認する. 本検討では、地震規模が比較的大きく、観測記録が存在 するMw6.6の地震を対象として検証を行った.

表-1に対象となる地震を示す. 震源近傍で甚大な構造 物被害が発生した地震も含まれており,内陸地殻内地震 のうち,観測記録が存在するものとして十分に大きな規 模である. 収集された観測波形は震源距離が50km以内 の観測点における記録とし,水平2成分を独立として考 えて85地点170波形を抽出した。なお,データベースに おけるシミュレーション波形は,地震基盤位置で評価さ れているのに対し,各観測記録は地表面で観測されたも のである. よって,これらを評価位置を合わせるために, 観測記録を,その地震観測点のサイト増幅特性¹³で除す ことで地震基盤位置の記録に変換した.

データベースに収納されたMw6.6のシミュレーション 波形は,**表-2**に示す活断層を対象にして強震動予測手法 により評価された地震動(57,744波形)である.

図4に最大加速度分布の比較結果を示す. 観測記録の 数を確保するため,計算結果が存在しない震源距離40-50kmのデータも併せて表示した. 観測値は,概ね計算 値上にプロットされており,距離減衰の傾向は調和的で ある.上下限値の範囲も同程度であることが確認できる.

図-5には、震源距離35km以内の比較的震源近傍の記録

表-1 比較対象となる既往地震

発生日	地震名	M ₀ (N • m)
2000年10月6日	鳥取県西部地震	8.62E+18
2004年10月23日	新潟県中越地震	7.53E+18
2005年3月20日	福岡県西方沖地震	7.80E+18
2007年7月16日	新潟県中越沖地震	9.30E+18
2011年4月11日	福島県浜通りの地震	9.58E+18

表-2 シミュレーションにおける対象震源

断層帯名	長さ (km)	幅 (km)	傾斜角 (度)	M0 (N•m)
六甲・淡路島断層帯	28.0	16.0	80.0	1.07E+19
高山・大原断層帯	28.0	14.0	90.0	8.55E+18
濃尾断層帯	28.0	14.0	90.0	1.17E+19
雲仙断層群	26.0	18.0	60.0	1.07E+19
函館平野西縁断層帯	26.0	18.0	45.0	1.17E+19
庄内平野東縁断層帯	26.0	18.0	30.0	1.17E+19
人吉盆地南縁断層	24.0	18.0	60.0	9.84E+18
屏風山・恵那山断層帯 及び猿投山断層帯	24.0	18.0	60.0	1.07E+19
琵琶湖西岸断層帯	24.0	18.0	45.0	1.07E+19
新庄盆地断層帯	24.0	18.0	35.0	9.83E+18
濃尾断層帯	22.0	18.0	90.0	8.98E+18
伊勢原断層	22.0	18.0	60.0	8.98E+18
宇部沖断層群	12.0	18.0	90.0	9.84E+18









に対して加速度応答スペクトルの比較を行った. 観測結 果に応答値が極端に大きくなるものが散見されるが,両 者は概ね同様の傾向である. 図-5(c)に両者のスペクトル についてを比較したものを示す. 平均値は広い周期帯で 一致しており,データベースから抽出した波形群が観測 記録と同様の特性を有していることが確認できる.

標準偏差の値については、観測結果に比べて計算結果 が若干小さくなる.この原因としては、シミュレーショ ンにおいて考慮している入力パラメータの変動が小さく、 計算結果のばらつきを過小評価している可能性や、観測 記録の引き戻しの際に地震増幅特性の変動や表層地盤の 非線形性を考慮しておらず、観測結果において地震基盤 波のばらつきを過大評価している可能性が挙げられる. これらの高精度化は今後の課題としたい.

3. データベースに基づく設計地震動評価

本章では、データベースに基づく設計地震動の評価方 法について説明する.はじめに、データベースから、対 象地震の波形群を波形インベントリーに基づき選定する. 今後発生する地震動を事前推定する場合には、破壊開始 点や強震動生成域の位置等の情報を事前に特定すること は困難であり、選定された波形群は膨大な数となる.そ のため、波形群から1波の設計地震動を設定する必要が あり、波形群を代表する地震動を作成する.最後に、工 学的基盤位置における設計地震動の評価を行う.

(1) インベントリーによるデータの抽出

データベースから,波形インベントリーを用いて地震 動群を選定する場合には,選定パラメータを設定する必 要がある.震源特性は,パラメータとして地震規模Mw が考えられる.伝播特性としては,距離のパラメータを 設定するが,本検討では震源距離を採用した.対象地震 の断層面が特定できる場合には,断層最短距離や中線距 離¹⁴⁹等も設定可能である.また,これらのパラメータに ついては,事前に特定できる情報の多寡に応じて設定す ることも可能である.情報が豊富な場合には,各特性の パラメータをより詳細に設定することができるため,選 定される地震動群のばらつきは小さくなり,より現実に 即した地震動が設定することも可能である.

(2) 地震基盤位置の設計地震動評価

選定された波形群から、代表的な地震動を設計地震動 として設定するには、以下に示す坂井ら¹⁵の方法に従い、 任意の所要降伏震度スペクトル(本検討では、波形群の 平均値,平均値±標準偏差)に適合する波形を作成する.

基本的には、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^{urge}]に十分近くなるような重み

係数行列W(=(W⁰))を評価する(式(4)).

$$\mathcal{E} = \left| D^{t \operatorname{arget}} - D(y) \right|^2 + \lambda^2 |W|^2 \to \min$$
(4)

本検討では、式(4)の[D(y)]として、時刻歴波形 y(t)の所要 降伏震度スペクトルを用いる. y(t)は、各参照地震動 $x^{0}(t)$ から、式(5a)、(5b)で合成する時刻歴波形である.

$$y(t) = \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=0}^{N-1} \beta_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t)$$
(5a)
$$\beta_{j,k} = \sum_{k=0}^{L} W_{j}^{(i)} \cdot a_{j,k}^{(i)}$$
(5b)

ここで、 $d^{0}\mu$:各波形 $x^{0}(t)$ のウェーブレット係数、 W^{0} :*i* 番目の波形の*j*次における重み係数、 $\Psi(t)$:アナライジン グウェーブレットであり、今回はMeyerによるもの¹⁰を 用いる.式(4)の最適化には、遺伝的アルゴリズムを用 いることとし、正規化パラメータ λ は0.01とした.

図-6に、M_{*}6.6、震源距離30kmの設定で選定された波 形群(6000波)から評価した代表波形を示す. 選定され た波形群はばらつきを有するため,設定した安全率に従 って代表的な地震動は変化する.図-7に設計地震動の所 要降伏震度スペクトルを示す.設定したターゲットスペ クトルに適合する地震動が作成されている.

(3) 工学的基盤位置の設計地震動評価

3.(2)で評価された地震基盤位置の地震動から,耐震設計上の設計地震動を評価するにあたっては,地震基盤~ 工学的基盤位置までの増幅特性を乗じる.なお,本検討で示す事例は,のちに地表面位置の観測記録と比較するため,地震基盤~地表面位置の増幅特性を乗じている. *M*,66,震源距離30kmの地震基盤位置の設計地震動(図-6)に,K-NET長岡(NIG017)のサイト増幅特性を乗じ て評価された設計地震動を図-8に示す.図-6に示した地 震基盤の波形から増幅し,周波数特性も変化していることが確認できる.なお,本検討では,サイト増幅特性と して,振幅特性の補正のみしか実施していないため,継続時間等の経時特性については変化がない.この部分の 改善については,今後の課題としたい.

この設計地震動の所要降伏震度スペクトルを図-9に示 す.K-NET長岡では、新潟県中越沖地震(M_w6.6)で震 源距離30km程度の記録が観測されている.この記録と 所要降伏震度スペクトルの比較を行った.その結果、観 測記録のスペクトルが、設計地震動として設定したスペ クトルと大きく乖離していないことを確認した.

4. まとめ

強震動予測手法による設計地震動の設定を簡略化する ことを目的として、地震基盤位置の地震動データベース に基づき設計地震動を設定する手法を提案した.



- ・ 強震動予測を実施し、地震基盤位置の波形データ ベースを構築した.シミュレーションと観測記録 と比較し、類似した特性を有することを確認した.
- データベースから波形群を選定し、この特性を反
 映した代表波形として、所要降伏震度スペクトル
 に適合した地震動を設計地震動として評価した.
- ・ 地震基盤位置の設計地震動に、サイト増幅特性を 乗じることにより、耐震設計上の基盤面における 設計地震動を評価した。観測記録と比較し、妥当 な結果が得られていることを確認した。

今後は、本手法の検証・改良を続けるとともに、地震 基盤から工学的基盤への波形の変換において、経時特性 も考慮した手法の検討を行う予定である.

謝辞:本検討では,防災科学技術研究所の K-NET 観測 網で観測された強震記録を使用させていただきました.

参考文献

- (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,p.418,2012.
- 2) 坂井公俊:土木構造物の非線形応答特性を考慮した性能 設計のための地震動評価の高度化に関する研究,京都大 学学位論文,p.259, 2014.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:震源断層を特定 した地震動の強震動予測手法(「レシピ」),平成28年 (2016年)6月(12月修正版),2016.
- (独)港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 地震動 研究チーム:サイト増幅特性評価手法-松竹梅, http://www. pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2008 /research_29/method_rev2.pdf, (参照日:2017年4月1日)
- 5) 田中浩平,高田毅士:既往観測波形インベントリーを用 いた地震動予測のための波形選定手法の提案,日本建築 学会構造系論文集,第646号, pp.2219-2225, 2009.
- 6) 入倉孝次郎,香川敬生,関口春子:経験的グリーン関数

を用いた強震動予測手法の改良,日本地震学会講演予稿 集, No.2, B25, 1997.

- 7) 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, No.612/146, pp.201-213, 1999.
- Sakai, K., Murono, Y., Sawada, S.: A study for modeling path and site effects in consideration of spatial variation of earthquake ground motions, *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems*, 2013.
- 9) 野津厚:統計的グリーン関数法に近地項と中間項を導入 するための簡便な方法,第12回日本地震工学シンポジウ ム論文集,pp.190-193,2006.
- 10) 田中浩平,坂井公俊,王寺秀介:地震基盤位置における 波形データベースを用いた設計地震動評価に関する基礎 的検討,第71回年次学術講演会,2016.
- 地震調査研究推進本部:主要活断層帯の長期評価, http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/major_active_f ault/(参照日:2017年4月1日)
- 防災科学技術研究所:「全国地震動予測地図」作成手法の検討,防災科学技術研究所研究資料,第336号,2009.
- 13) 野津厚,長尾毅,山田雅行:スペクトルインバージョン に基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性と これを利用した強震動評価事例,日本地震工学会,Vol.7, No.2, pp.215-234,2007.
- 司宏俊, 纐纈一起, 三宅弘恵: 中線距離の提案と地震動
 予測式の構築, 第14回日本地震工学シンポジウムDVD ROM, GO16-Fri-7, 2014.
- 15) 坂井公俊,室野剛隆: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,鉄道総研報告, Vol.29, No.3, pp.11-16, 2015
- Meyer, Y.: Orthonormal Wavelets, Inverse Problems and Theoretical Imaging, pp 21-37, 1989.

(2017.4.7 受付)

EVALUATION OF DESIGN GROUND MOTION BASED ON GROUND MOTION DATABASE AT SEISMIC BEDROCK

Kohei TANAKA, Kimitoshi SAKAI

In design standards for railway structures (anti-seismic design standard), L2 earthquake motion using for the verification of structural safety shall be set as the site-specific ground motion evaluated by strong ground motion estimation method. When performing these evaluation, it is necessary to appropriately model three characteristics, such as source and propagation, site amplification characteristics. However, there is not necessarily enough information to model source and propagation characteristics, so standard values are used in general. On the other hand, it is common that site amplification is modeled site-specifically. Therefore, we propose the method to set the site-specific design ground motion estimation based on ground motion database at seismic bedrock. In this method, the database is commonly used to all sites and site amplification characteristics is considered separately for each site.