

# 巨大地震の発生を想定した設計地震動の評価

田中 浩平\* 坂井 公俊\* 室野 剛隆\*\*

The Evaluation of Design Ground Motion Considering with the Occurrence of Massive Earthquakes

Kohei TANAKA Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

Design standards for railway structures and commentary (Seismic structural design) were revised in 2012 and the applicable cases where the L2 earthquake motion can be evaluated with a simplified method are clearly defined. In the construction site which doesn't correspond to these cases, it is required that the detailed study for the evaluation of the L2 earthquake motion is conducted based on the strong ground motion prediction method. In Japan, there are many plates where large-scale subduction zone earthquakes such as the Nankai trough megathrust earthquake ( $M_w$ 9.0) could occur and many active faults where the earthquakes of  $M_w$ 7.0. or greater could occur. In this report, some case studies of the simulation of ground motions conducted in Shikoku region with strong ground motion prediction method are shown. The design ground motion compatible with the target non-linear response spectrum is evaluated from the combination of simulated ground motions.

キーワード：耐震標準，強震動予測手法，L2地震動，南海トラフの巨大地震，中央構造線の地震

## 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)<sup>1)</sup>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。構造物の破壊に関する安全性照査に用いる L2 地震動は、構造物の建設地点で想定される最大級の地震動を設定する。これに対して、簡易な手法で算定する L2 地震動(標準 L2 地震動)が用意されているが、周辺に存在する震源の規模や対象地点の地震増幅特性に関して、明確な適用条件が設定されている。この条件を満たさない地点では、L2 地震動の算定時に、詳細な検討として、強震動予測手法に基づく地点依存の地震動評価(例えば<sup>2)</sup>)を行う必要がある。

日本では多くの海溝型巨大地震が想定されており、例えば南海トラフの巨大地震は、地震規模  $M_w$ 9.0 とされている<sup>3)</sup>。地震調査推進本部より公開されている主要な内陸活断層<sup>4)</sup>においても、 $M_w$ 7.0 を超える震源が複数想定されている。これらの震源は、地震規模の点から標準 L2 地震動の適用条件<sup>1)</sup>を上回る震源である。そこで、本報告では、強震動予測手法による L2 地震動の算定手順について説明するとともに、具体的な検討方法を説明する。さらには、巨大地震の発生が懸念される四国地域を対象として、耐震設計上の基盤面における L2 地震動を強震動予測手法により評価した事例について報告する。

## 2. 強震動予測手法による L2 地震動の算定

### 2.1 L2 地震動の算定手順

強震動予測手法により L2 地震動を算定するための具体的な手順例を図 1 に示す。強震動予測手法を実施するにあたっては、下記の 2 つの情報を整理する必要がある。

- ① 対象地点の基盤サイト増幅特性 (Step1)
- ② L2 地震動の対象地震の震源特性 (Step2)

ここで、①の基盤サイト増幅特性は、地震基盤から耐震設計上の基盤面までの地震動の増幅特性を表しており、対象地点における地震観測、常時微動観測を実施して評価する。②の震源モデルは、地震調査推進本部の公開情報<sup>4)</sup>や文献<sup>5)</sup>などを参照して設定する。

以上の情報から、強震動予測手法により耐震設計上の基盤面における地震動を評価する (Step3)。この際、断層破壊の不確定性や伝播経路の不均質性を考慮した複数ケースの地震動評価を実施し、1 地点に対して数百の地

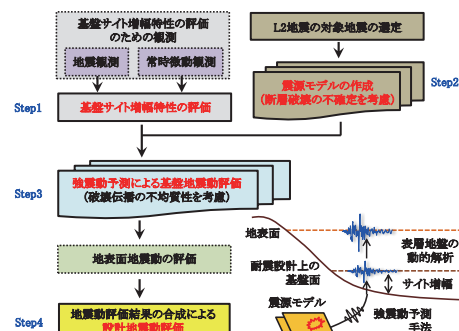


図 1 強震動予測手法による L2 地震動の算定手順例

\* 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

特集：地震防災・耐震技術

震動を評価する。この後、一般的には表層地盤の非線形挙動を考慮した動的解析を実施して地表面波形を評価するが、本検討ではこの評価については実施していない。最後に、これらの評価結果を統合し、鉄道構造物の非線形応答に配慮した設計地震動を1波設定する (Step4)。

2.2 強震動予測手法の概要

本検討では、図1のStep3で実施する強震動予測手法として、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<sup>5)</sup>を用いた。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 (1) 式<sup>7)</sup> を重ね合わせるにより、大規模地震による地震動を算定する。

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

なお、(1) 式の  $f(t)$ ,  $t_{ij}$  は、以下のように表される。

$$f(t) = \delta(t) + \frac{1}{n(1-e^{-1})} \times \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \left[ \exp\left(-\frac{k-1}{(N-1)n'}\right) \cdot \delta\left(t - \frac{(k-1)\tau}{(N-1)n'}\right) \right]$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{\beta} + \frac{\xi_{ij}}{V_r}$$

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,  $r_{ij}$ : 小断層  $(i,j)$  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,  $\tau$ : 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,  $\xi_{ij}$ : 破壊開始点から小断層  $(i,j)$  要素までの距離,  $\beta$ : 基盤のせん断弾性波速度,  $V_r$ : 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 (2) 式、位相  $\phi(f)$  (ここではこの微分形  $t_{gr}(f)$ ) を (3) 式でそれぞれ評価し、フーリエ逆変換によって算定する。

$$A(f) = G(f) \cdot \frac{R_{0\theta} \cdot FS \cdot PRITIN}{4\pi\rho\beta^3} \cdot M_0 S(f, f_c) \frac{\exp(-\pi f R / Q_s \beta)}{R} \quad (2)$$

$$t_{gr}(f) = t_{gr}^S(f) + t_{gr}^P(f) + t_{gr}^L(f) \quad (3)$$

ここで、 $G(f)$ : 基盤サイト増幅特性,  $M_0$ : 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,  $Q_s$ : 伝播経路におけるS波のQ値,  $R_{0\theta}$ : ラディエーション係数,  $PRITIN$ : 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,  $\rho$ : 基盤の密度である。(3)式の  $t_{gr}(f)$  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<sup>8) 9)</sup>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<sup>10)</sup>。

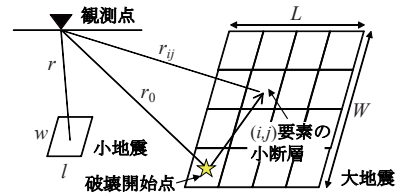


図2 断層分割のイメージ

地震動位相の震源特性は、図2における各小断層をさらに  $10 \times 10$  の極小断層に分割し、これを重ね合わせることで算定する。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設定として10セット、小地震の位相スペクトル算定時の震源位置設定として10セット変化させた検討を行う。すなわち、1つの震源モデルに対し、地点ごとに100波形の地震動評価を実施する。

2.3 設計地震動波形の合成方法の概要

今後発生が予想される地震動を推定する場合には、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現時点では困難であり、構造物の安全性評価等を行う場合には、それらを網羅的に変化させた多数のシナリオに対して強震動予測を実施する機会が多い<sup>例えば11)</sup>。

そのため、耐震設計には、図1のStep3で評価された多数の地震動から、1波の設計地震動を設定する必要がある。本検討では、地震動評価結果を統合して適切な設計地震動を設定する手法として、多数の地震動波形群を参照地震動として用い、目標とする所要降伏震度スペクトルを満足する時刻歴波形を合成する手法を用いた。

手法の概要を以下に示す。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  $[D^{target}]$  に十分近くなるような重み係数行列  $W (= (W_j^{(i)}))$  を求める。以上を定式化すると (4) 式ようになる。

$$\varepsilon = |D^{target} - D(y)|^2 + \lambda^2 |W|^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

本検討では、(4) 式の  $[D(y)]$  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。ここで、 $y(t)$  は、各参照地震動  $x^{(i)}(t)$  から、(5) 式で合成する時刻歴波形である。

$$y(t) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=0}^{N-1} \beta_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \left( \beta_{j,k} = \sum_{i=1}^L W_j^{(i)} \cdot a_{j,k}^{(i)} \right) \quad (5)$$

ここで、 $a_{j,k}^{(i)}$ : 各波形  $x^{(i)}(t)$  のウェーブレット係数,  $W_j^{(i)}$ :  $i$  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<sup>12)</sup>を用いる。(4) 式の最適化には、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  $\lambda$  は 0.01 とした。

3. 四国地域における算定事例

3.1 四国地域の概要

図1の算定手順に基づき、四国地域におけるL2地震

動を算定した事例を報告する。地震調査推進本部より公開されている四国地域における主要な震源<sup>4)</sup>を図3に示す。四国地域には、詳細な検討が必要となる  $M_w7.0$  よりも大きな震源域<sup>1)</sup>として、下記の3つが存在する。

- ① 中央構造線断層帯讃岐山脈南縁-石鎚山脈北縁東部 ( $M_w7.6$ )
- ② 中央構造線断層帯石鎚山脈北縁西部-伊予灘 ( $M_w7.4$ )
- ③ 南海トラフの巨大地震 ( $M_w9.0$ )

本検討では、内陸活断層の地震の①、海溝型巨大地震の③について、それぞれ評価を行った事例を報告する。

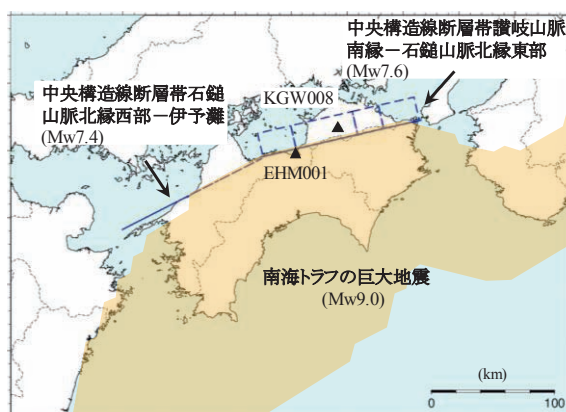


図3 四国地域における主要な震源

### 3.2 基盤サイト増幅特性の整理

全国の公的地震観測点 (K-NET<sup>13)</sup>) において、地震観測記録を用いたスペクトルインバージョンにより、地震基盤から地表面までの地震増幅特性が評価されている<sup>14)</sup>。この増幅特性を地震基盤面～耐震設計上の基盤面までの増幅特性に変換することで基盤サイト増幅特性を評価している<sup>15)</sup>。本検討では、地震動評価を公的観測点で実施し、各地点で評価された基盤サイト増幅特性を用いる。

図4に四国地域の基盤サイト増幅特性を重ね書きしたものを示す。同一の地域であっても、地点によって大きなばらつきがあることがわかる。また図4には、全国の地震観測点で評価された基盤サイト増幅特性の平均、平均+標準偏差を示しており、対象地点の揺れやすさの程度を知る上で参考となる。特に平均+標準偏差の値は、標準L2地震動において想定されている基盤サイト増幅特性であり、これを超過する基盤サイト増幅特性を有する地点はL2地震動の算定に詳細な検討が必要となる<sup>1)</sup>。図4には、EHM001、KGW008の2地点の基盤サイト増幅特性を示しているが、それぞれ周期0.7-0.9秒、0.1-0.3秒付近で平均+標準偏差の値に近くなっており、この周期帯で地震動が大きくなることが予想される。

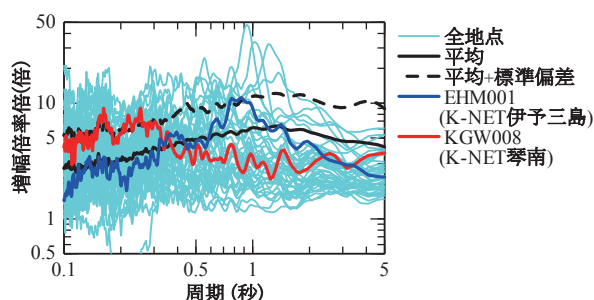


図4 四国地域における基盤サイト増幅特性

四国地域の全地点で評価した、周期0.4-0.7秒の基盤サイト増幅特性の平均値を図5に示す。また、J-SHISで公開されている地震基盤深さの分布<sup>16)</sup>を図5に併せて示す。周期帯により傾向は若干異なるが、基盤深さとサイト増幅特性の大きさには関係が見られることが指摘されている<sup>15)</sup>。図5でも、基盤の深い平野部で増幅倍率が大きく、基盤の浅い山岳部で増幅倍率が小さくなる傾向がある。

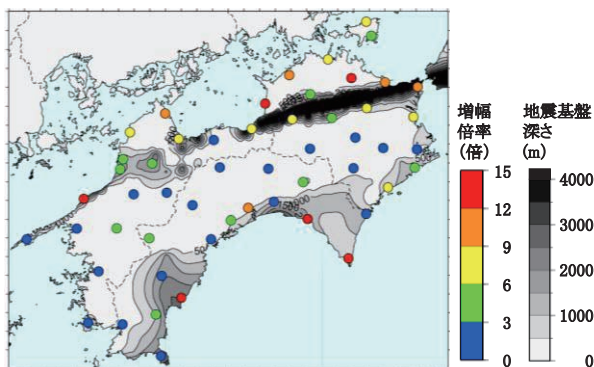


図5 基盤サイト増幅特性の平均値（周期0.4-0.7秒）と地震基盤深さ（km）のコンター

### 3.3 中央構造線による地震

#### 3.3.1 震源モデルの設定

中央構造線断層帯における震源特性は、防災科学技術研究所にて公開されている震源モデル<sup>4)</sup>をもとに設定した。具体的にはそれぞれの断層ごとに、震源モデルパラメータの与え方を変えた震源モデル2ケースと断層の破壊開始点（震源）を変えた2ケースの、合わせて4ケー

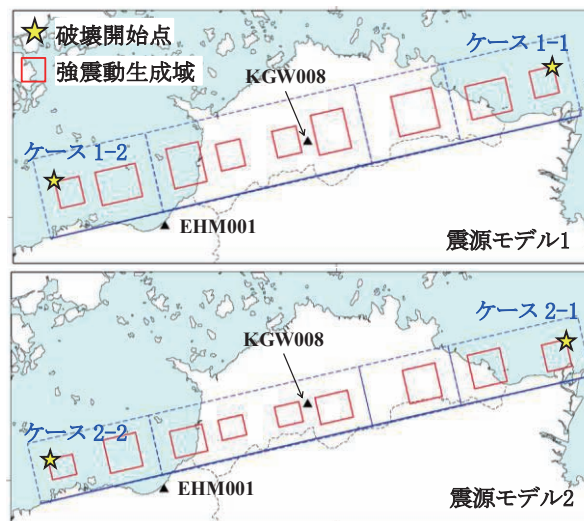


図6 中央構造線の地震における震源モデルの概要

特集：地震防災・耐震技術

スの検討を実施した。実際に設定した断層面，強震動生成域，破壊開始点位置の配置状況を図6に示す。なお，図6中の☆印は破壊開始点を表し，各図に破壊開始点を変化させた2ケースの配置を示している。また，青い四角で囲んだ部分は震源域の全域を表し，実線部分が断層上端線を表す。赤い四角で囲んだ部分は，大きなエネルギーを放出する領域（強震動生成域）を表している。

3.3.2 地震動評価結果

強震動予測に基づく地震動評価結果として，図7，図8にそれぞれEHM001(K-NET 伊予三島), KGW008(K-NET 琴南)の結果を示す。これらの位置は，図6に示すようにいずれも断層直上に位置する地点である。また，各地点の基盤サイト増幅特性は図4に示したものをを用いた。

図7(a)にEHM001の時刻歴波形を示す。各ケースで経時特性が異なり，ケース1-2, 2-2の地震動はケース1-1, 2-1と比べて，継続時間が長い地震動になっている。これはEHM001から見た時に，ケース1-1, 2-1では断層が地点に近づいてくるように破壊するのにに対し，ケース1-2と2-2では遠ざかるように破壊するためである。一方で，図8(a)に示したKGW008の時刻歴波形は，ケースごとに違いが見られない。これは，TKS010地点が断層の中央に位置するためである。以上のように，断層の破壊性状に応じて評価される地震動は大きく異なる。よって，これらの設定に不確実性がある場合には，破壊性状を変化させた解析を網羅的に実施し，評価される地震動の特性を十分に把握する必要がある。

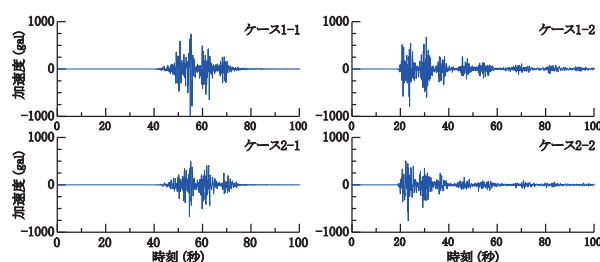
図7(b), 図8(b)には加速度応答スペクトルを示す。この図では，全ケースのスペクトルを水色線で重ね書きしている。断層破壊の不確実性を考慮して評価された地震動は，大きなばらつきを有することが確認できる。

全ケースのスペクトルに対して評価した非超過確率90%のスペクトル(赤線)は，EHM001地点で0.7-0.9秒の長周期領域，TKS010地点で0.1-0.5秒の短周期領域で標準L2地震動のスペクトルIIを超過する。これは，図4に示した基盤サイト増幅特性が全国の平均+標準偏差に近くなる周期帯域と対応している。本地点はサイト増幅特性が大きい上に， $M_w$ が7.0を超える震源の直上に位置するため，鉄道標準スペクトルIIを超過する地震動が評価されたと考えられる。

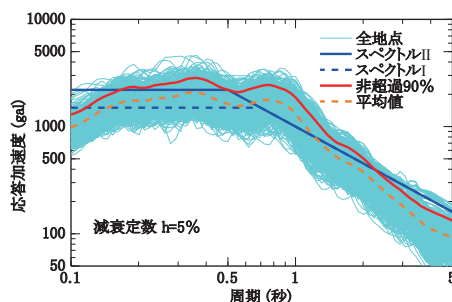
3.4 南海トラフの巨大地震

3.4.1 震源モデルの設定

南海トラフの巨大地震については，内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」において提案されているモデルを用いる<sup>3)</sup>。この検討会では，震源の破壊パターンとして「基本ケース」, 「東側ケース」, 「西側ケース」, 「陸側ケース」の4ケースの検討を実施しているが，本検討では，中央防災会議による東海地震，東南海・南海地震

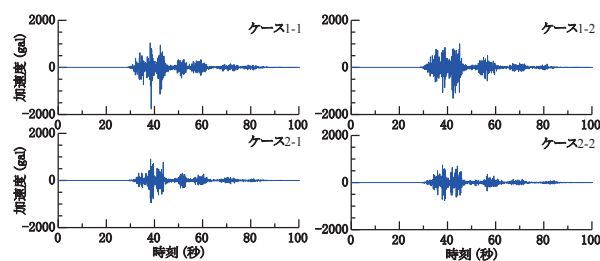


(a) 時刻歴波形の例

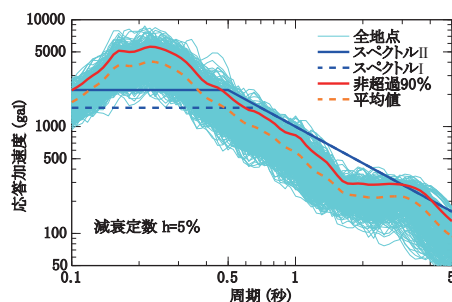


(b) 加速度応答スペクトル

図7 EHM001 (K-NET 伊予三島) の地震動評価結果



(a) 時刻歴波形の例



(b) 加速度応答スペクトル

図8 KGW008 (K-NET 琴南) の地震動評価結果

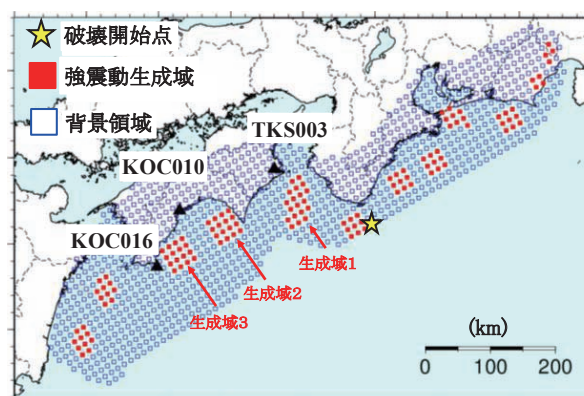


図9 南海トラフの巨大地震における震源モデルの概要

の検討結果を参考に設定された「基本ケース」における評価結果を示す。

実際に設定した断層面、強震動生成域、破壊開始点位置の配置状況を図9に示す。断層面は日向灘から駿河湾まで達し、四国地域全体に広がっている。12の強震動生成域からなり、ここでは四国地域に近い紀伊水道と土佐湾における3つの生成域をそれぞれ生成域1、2、3とよぶことにする。破壊開始点は紀伊半島沖にあり、四国地域に向かって断層破壊が進行する。

### 3.4.2 地震動評価結果

地震動評価は、図9に示す強震動生成域に近い3地点(TKS003, KOC010, KOC016)において実施した。これらの地点の基盤サイト増幅特性を図10に示すが、いずれも基盤サイト増幅特性が比較的小さな地点である。

評価された地震動を図11に示す。いずれも強震動生成域に近接する地点であるが、基盤サイト増幅特性が小さいため、最大加速度は大きくとも1000gal程度である。特に、KOC010における基盤サイト増幅特性は、全周帯で小さく、最大加速度は500gal程度である。

評価された地震動は、いずれの地点も複数の波群を有しており、それぞれ近接する強震動生成域の影響を受けている。図12に各強震動生成域のみを考慮して、KOC010の地震動を評価した結果を示す。この結果から、KOC010の第1波群は土佐沖の生成域2により形成され、第2波群は同じく土佐沖の生成域3により形成されていることがわかる。生成域1の波群は距離が遠いため、影響は小さい。図には示していないが、TKS003の波形は生成域1から形成した波群が支配的で、KOC016の波形は生成域2,3の波群が重なって第1波群となっている。

なお、KOC010に対して、全領域を考慮して評価した地震動と、生成域2,3のみを考慮して評価した地震動はほぼ一致しており、地震動に与える影響がほとんど強震動生成域に集中していることがわかる。図9に示したように断層面は四国全域を覆うほどに大きいですが、背景領域が地震動に与える影響は小さい。

### 3.5 設計地震動の評価事例

3.3, 3.4で評価された強震動予測手法に基づく地震動は、設定パラメータの不確実性を考慮した地震動群が評価されている。これをそのまま設計地震動として用いることも可能であるが、作業が煩雑になるため、代表した1波形に絞り込むことが望ましい。本報告では、2.3で説明した通り、ターゲットとする所要降伏震度スペクトルに適合する地震動を設計地震動とする。本節では3.3におけるKOC010(K-NET須崎)における設計地震動を評価した事例を報告する。

本手法では、はじめにターゲットとする所要降伏震度スペクトルを設定する必要がある。KOC010で評価され

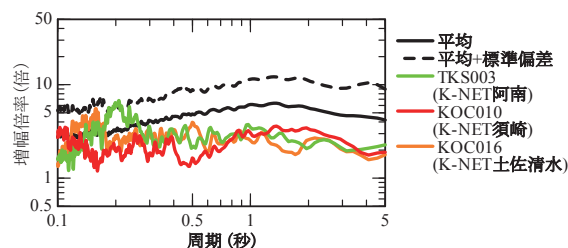


図10 地震動評価地点における基盤サイト増幅特性

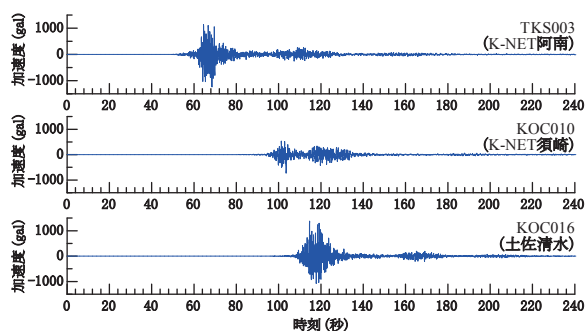


図11 南海トラフの巨大地震における3地点の地震動

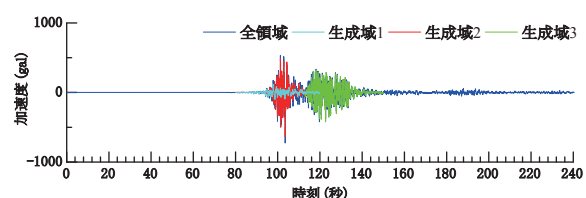


図12 各生成域で評価される地震動の比較 (KOC010)

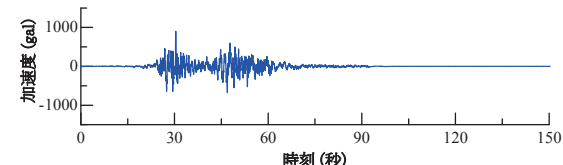
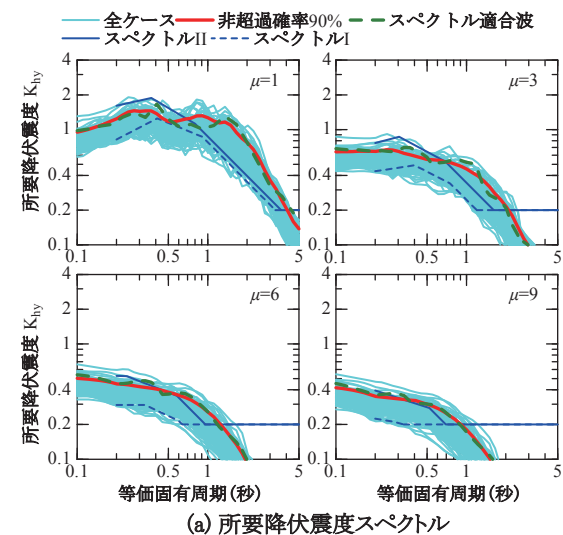


図13 KOC010 (K-NET 須崎) における設計地震動評価

た地震動群に対して評価した所要降伏震度スペクトルを図13(a)に示す。評価されたスペクトルは断層破壊の不確実性を反映し、ばらつきを有している。これらの不

特集：地震防災・耐震技術

確実性は、事前には低減できないため、様々なケースを実施した上で工学的判断を行うことが望ましい。本検討では、非超過確率 90% のスペクトル（赤線）をターゲットとして設計地震動を評価した。

2.3 で説明した手法に基づき、KOC010 で評価された 100 波形を参照地震動として、これらを合成してターゲットスペクトルに適合する波を作成した。最終的に評価された設計地震動の時刻歴波形を図 13 (b) に示す。評価された時刻歴波形は、図 11 で示した地震動に近い経時特性を有している。これは、強震動予測手法により得られた地震動の経時特性を反映した上で設計地震動が作成できていることを表す。また、作成した設計地震動の所要降伏震度スペクトルをターゲットスペクトルに重ね書きしたものを図 13 (a) に示す。いずれの塑性率  $\mu$  においてもターゲットとする非超過確率 90% のスペクトルに近い所要降伏震度スペクトルを有しており、構造物の非線形応答まで配慮した設計地震動が評価できていることが確認できる。

4. おわりに

本検討では、平成 24 年耐震標準に示される強震動予測手法による L2 地震動の評価方法に関する具体的な手順と評価手法の説明を行った。また、四国地域において、中央構造線断層帯讃岐山脈南縁―石鎚山脈北縁東部および南海トラフの巨大地震を対象として、強震動予測手法による基盤地震動を評価した事例を報告した。最後に、複数ケースから評価された多数の地震動群から、1 波の設計地震動を作成した。作成された地震動は、震源特性、伝播特性、サイト増幅特性に考慮した地点依存の地震動であるとともに、鉄道構造物の非線形応答まで配慮した設計地震動となっていることを確認した。

謝 辞

検討では、防災科学技術研究所の K-NET のボーリング情報を使用させていただきました。一部の図の作成には、GMT<sup>17)</sup> を用いました。記して謝意を表します。

文 献

1) (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) 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法，丸善，p.162，2009  
 3) 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編

―強震断層モデルと震度分布について―，2012  
 4) 地震調査推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図―地図を見て 私の街の 揺れを知る― 技術報告集，2009  
 5) 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」），[http://jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/g\\_furoku3.pdf](http://jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf)，（参照日：2016 年 1 月 22 日）  
 6) 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，京大博士学位論文，p.259，2014  
 7) 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  
 8) 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/I-46，pp.201-213，1999  
 9) Sakai, K., Muroho, 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.  
 10) 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  
 11) 山田雅行，先名重樹，藤原広行：強震動予測レシピ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～，日本地震工学学会論文集，Vol.7，No.1，pp.43-60，2007  
 12) Meyer, Y.: *Orthonormal Wavelets, Inverse Problems and Theoretical Imaging*, pp.21-37, 1989.  
 13) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-net），<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>，（参照日：2016 年 1 月 22 日）  
 14) 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  
 15) 坂井公俊，室野剛隆，川野有祐：耐震設計上注意を要する地点の簡易抽出法に関する検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.70，No.4，pp.527-534，2014  
 16) 藤原広行，河合伸一，青井真，森川信之，先名重樹，工藤暢章，大井昌弘，はお憲生，早川譲，遠山信彦，松山尚典，岩本鋼司，鈴木晴彦，劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，第 337 号，2009  
 17) Wessel, P. and Smith, W.H.F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS, Trans. AGU*, Vol.79, p.579, 1998.