

特集 「自然災害にそなえる」

広域での長周期地震動の予測技術

田中清和 野畑有秀

Evaluation of Long-Period Strong Ground Motion for Wide Area

Kiyokazu Tanaka Arihide Nobata

Abstract

Long-period seismic ground motions attracted public attention after the Tokachi-oki earthquake in 2003. However, these motions have not been sufficiently evaluated in terms of methods for predicting strong ground motions adopted by national and local governments for damage estimation. In plain regions, where long-period ground motions are strongly amplified, many long-period structures such as high-rise buildings and base isolation buildings have been built. Therefore, it is necessary to alter the input ground motion evaluation for seismic design to take into account long-period ground motion. This paper first reviews methods for predicting strong ground motions including long-period motions, and then predicts strong seismic ground motions for the expected Nankai earthquake as an example using recent knowledge about deep ground structures of plain regions and source characteristics. This earthquake has a high probability of occurrence and is expected to cause severe damage over a wide area. Adoption of these predicted strong motions in structural design and damage estimation such as by the BCP project will enable us to better prepare for expected earthquakes.

概要

2003年十勝沖地震で注目された地震動の長周期成分は、国や自治体が被害想定に用いている強震動予測手法では十分に評価できていない。特に長周期成分が問題となる平野部には超高層や免震などの長周期構造物が多く立地しており、地震動入力の見直しの必要が生じている。本報告では、長周期地震動を含む地震動予測手法の特徴について概観した後に、発生確率が高まっており広域での大きな被害が懸念される南海地震の面的な強震動予測を、平野の地下構造や震源特性など最近の知見を反映して実施した例を示す。評価された予測強震動を、耐震設計やBCP等の被害想定へ適用することにより、より精度の良い地震への備えが可能となる。

1. はじめに

阪神大震災以降、各自治体が地震被害想定を見直してほぼ10年が経過した。この間、被害地震も多く発生している。このうち2003年十勝沖地震では地震時に発生した石油タンク火災の原因として地震動の長周期成分が再脚光を浴び注目された。しかし、地震動の長周期成分は、国の中央防災会議や自治体が被害想定に用いている強震動予測手法では十分に評価できておらず、予測の問題点として指摘されている。特に、長周期成分が問題となる平野部には都市が形成され、超高層や免震などの長周期構造物が多く立地しており、強震動予測手法を長周期地震動を十分に評価可能なものへ見直す必要が生じている。一方、長周期構造物の設計の面では、従来からの地震動予測手法において深部地盤からの一次元的な地震動増幅を考慮することにより長周期地震動が考慮されている。しかし、平野部の深い地盤がもつ三次元的な不整形構造による長周期地震動の増幅特性については未考慮であり、この点についてより精度の高い地震動予測手法が必要とされている。

これらの要望に対応するための広域での長周期地震動

の予測技術として、ハイブリッド法と呼ばれる地震動予測手法がある。本報告では、まず長周期地震動を含む地震動予測手法の特徴について概観を述べる。次に、この地震動予測手法の適用実施例として、発生確率が高まっており地震が発生時には非常に広域での被害が懸念される南海地震を想定した面的な強震動予測を、平野の地下構造や震源特性など最近の知見を反映して行った例を示す。

2. 地震動予測と長周期地震動

地震による地盤の揺れ、すなわち地震動の特性を決定する要因は、大きく分けて震源特性、伝播特性、サイトの地盤増幅特性が挙げられる。地震動予測においては、これらの各要因を理論的或いは経験的にモデル化し、地震動時刻歴波形や応答スペクトル等を算定することとなる。各種の地震動予測手法¹⁾についてTable 1 にまとめて示す。

長周期成分を含む地震動の予測には、半経験的手法の経験的波形合成法（経験的グリーン関数法）や理論的手法の有限差分法が比較的多く用いられる。しかし、経験

Table 1 主な地震動予測手法
Prediction Methods of Strong Ground Motion

予測手法		対象周期域	高精度化に関わる要因考慮の可否 (○可能、×不可能)		その他 (○長所、×短所)
			震源の複雑な破壊過程	不整形地盤による影響	
分類	主な方法				
経験的方法	距離減衰式	短～長	×	×	○実記録の平均的特性を反映 ×単純な震源に限定
	小林・翠川の方法	短～5秒	×	×	○実記録の平均的特性を反映 ×単純な震源に限定
半経験的方法	経験的グリーン関数法	短～長	○	○	○実地震記録を用いるのでサイト・伝播特性の情報不要 ×地震記録がないと適用不可
	統計的グリーン関数法	短～(長)	○	×	○地震記録が不要
理論的方法	三次元有限差分法	1秒～長	○	○	×不整形地盤等の多くの情報が必要 ×計算機負荷が大きい
	三次元FEM				
	波数積分法	(短)～長	○	×	×短周期評価にやや難あり
ハイブリッド法	理論的方法と半経験的方法の組合せ	短～長	○	○	○組合せにより広帯域に対応 ×接続周期や組合せ手法間の整合性に要注意

的波形合成法ではグリーン関数とするための評価サイトでの地震観測記録が必要であったり、差分法では使用可能な計算機能力の容量制限や地盤構造データの不足により計算対象が主に長周期成分のみに限定される、といった制約条件がある。このため、短周期から長周期までの広帯域の地震動成分を含む地震動予測には、短周期評価が得意な半経験的手法と長周期評価が得意な理論的手法による地震動を合成するハイブリッド手法が適用されることが多い。特に、観測記録の存在しない任意の地点を含む広域での地震動予測には、統計的波形合成法と差分法によるハイブリッド手法が有用である。次章では、この統計的波形合成法と差分法によるハイブリッド手法を適用する。

3. 大阪平野における長周期地震動の予測

3.1 地震動予測の概要

広域での長周期地震動予測として、大阪平野を対象とした想定南海地震による地震動予測をハイブリッド手法により実施した。周期2秒程度以上の長周期地震動を三次元有限差分法で計算し、周期2秒程度以下の短周期地震動を統計的波形合成法により求めて、これらを時刻歴で合成することによって広帯域の地震動波形を予測している。なお、地震動予測の評価位置は解放工学的基盤面上 (V_s 500m/s層上面) とした。

3.2 長周期地震動予測の方法

長周期地震動のシミュレーション解析計算には不等間隔格子のスタaggerドグリッドを用いた空間4次時間2次精度の三次元有限差分法^{2),3)}を用いた。解析モデル範囲は、東西345km、南北320km、深さ44.7kmの領域である。Fig. 1 にモデル化範囲を示す。解析に当たっては時間刻みを0.012秒、差分メッシュ間隔は堆積平野部分で水平200m、

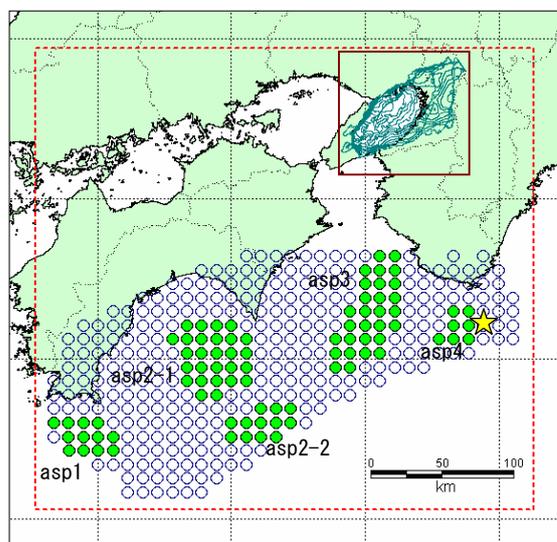


Fig. 1 南海地震の断層位置と差分モデル化範囲
Location of the Fault Model of the Nankai Earthquake and Region of Finite-Difference Modeling

上下150m、岩盤部分で600mとし、最小S波速度500m/sの層において周期2.0秒以上の帯域で計算精度が確保されるように設定した。

減衰の考慮についてはGraves²⁾による手法を用いることとし、地盤各層のQ値を $Q_0=V_s[m/s]/10$ として与えてリファレンス周期 T_0 が5秒で所定の値となるように設定した。なお、Graves²⁾の手法は周波数依存の減衰Q値 $Q(f)=Q_0*f/f_0$, $f_0=1/T_0$ を持つこととなることから、この設定は $Q(f)=(V_s/10)*f/(1/5)=(V_s/2)*f/1$ と解釈でき、川辺ほか⁴⁾が大阪平野における観測記録のシミュレーション解析に基づき長周期地震動評価に適するとして提案しているリファレンス周期1秒で $Q=V_s/2$ とする設定と等価である。

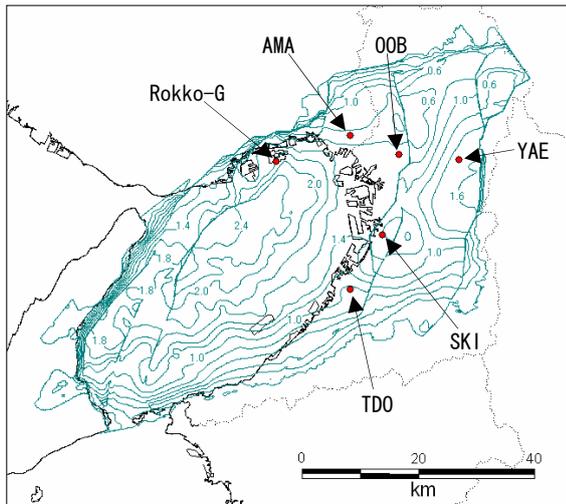


Fig. 2 大阪堆積盆地モデルの基盤構造 (等深度線図)
Depth Contours for the Sediment-Bedrock Interface
of the Osaka Basin Structure Model

3.3 短周期地震動予測の方法

短周期地震動の計算では、サイト直下の地震基盤における地震動を統計的波形合成法（統計的グリーン関数法）により算定し、求めた地震基盤波（水平動）を一次元平行成層地盤に鉛直入射して解放工学的基盤面での地震波を算定した。統計的波形合成法には壇ほか⁵⁾の手法を採用し、地震基盤における要素断層波の包絡形は佐藤ほか⁶⁾による統計的経時特性を使用した。震源の放射特性（ラディエーションパターン係数）は、断層滑り角が不確定であることおよび短周期域では散乱等により放射特性が不明瞭なることを考慮し、平均的な特性としてS波の全震源球面での平均値⁷⁾である0.63を設定した。

3.4 震源モデル

南海地震の震源設定には、中央防災会議の東南海、南海地震等に関する専門調査会^{8), 9)}が震度想定を目的とした強震動予測のために設定した想定震源モデルを採用することとした。詳細な断層パラメータについては中央防災会議から公開されている震源データ¹⁰⁾を使用して設定した。想定する南海地震の震源モデルの位置と形状をFig. 1に、主要な震源パラメータをTable 2に示す。断層面はフィリピン海プレート上面に沿う形で三次元的な曲面形状となっており、361個の小断層で近似して表現されている。小断層の面積は約100km²であり、各小断層毎の走行角や傾斜角、すべり角はそれぞれに異なる。破壊開始点は紀伊半島沖に設定され、破壊伝播速度は2.7km/sとされている。

長周期地震動計算では、断層面の離散化によるスペクトルの山谷の発生を少なくするため小断層を正方形として更に5×5 = 25分割した約2km四方の要素断層を設定し、各要素断層を点震源でモデル化した。各点震源の震源時間関数については、短周期帯域の過小評価を避けるため

Table 2 想定南海地震の震源パラメータ
Source Parameters of the Nankai Earthquake

		パラメータ	設定値
巨視的 震源 特性		総地震モーメントM0	8.76E+21 N*m
		モーメント マグニチュードMw	8.6
		断層面積S	36864 km ²
		平均すべり量D	5.8 m
微視的 震源 特性	アスペ リティ 1	地震モーメントM0a	4.32E+20 N*m
		面積Sa	1222 km ²
		平均すべり量Da	8.6 m
		実効応力 Δσa	24.6 MPa
	アスペ リティ 2-1	地震モーメントM0a	1.46E+21 N*m
		面積Sa	2758 km ²
		平均すべり量Da	12.9 m
		実効応力 Δσa	24.6 MPa
	アスペ リティ 2-2	地震モーメントM0a	4.34E+20 N*m
		面積Sa	1226 km ²
		平均すべり量Da	8.6 m
		実効応力 Δσa	24.6 MPa
	アスペ リティ 3	地震モーメントM0a	1.63E+21 N*m
		面積Sa	2963 km ²
		平均すべり量Da	13.4 m
		実効応力 Δσa	24.6 MPa
アスペ リティ 4	地震モーメントM0a	1.93E+20 N*m	
	面積Sa	715 km ²	
	平均すべり量Da	6.6 m	
	実効応力 Δσa	24.6 MPa	
背景 領域	地震モーメントM0b	4.60E+21 N*m	
	面積Sb	約28100 km ²	
	平均すべり量Db	4.0 m	
	実効応力 Δσb	2.4 MPa	
その他 の震源 特性	剛性率μ	4.1E+10 N/m ²	
	平均S波速度Vs	3.82 km/s	
	破壊伝播速度Vr	2.7 km/s	

※中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会（公開データ、2005）による想定地震のパラメータを参照して設定。

Table 3 大阪堆積盆地構造モデルの地盤定数
Layer Parameters of the Osaka Basin Structure Model

Layer	Depth [km]	Vp [km/s]	Vs [km/s]	Density [t/m ³]	Q value
堆積層 1	0~0.6	1.8	0.50	1.8	50
堆積層 2	0~0.8	1.9	0.65	2.0	65
堆積層 3	0~1.0	2.2	0.80	2.1	80
堆積層 4	0~1.6	2.3	0.95	2.1	95
堆積層 5	0~2.6	2.5	1.10	2.1	110
基盤	0~5.0	5.4	3.20	2.7	320
上部地殻	~20	6.0	3.46	2.7	600
下部地殻	~32	6.7	3.87	2.8	700
	—	7.8	4.50	3.5	800

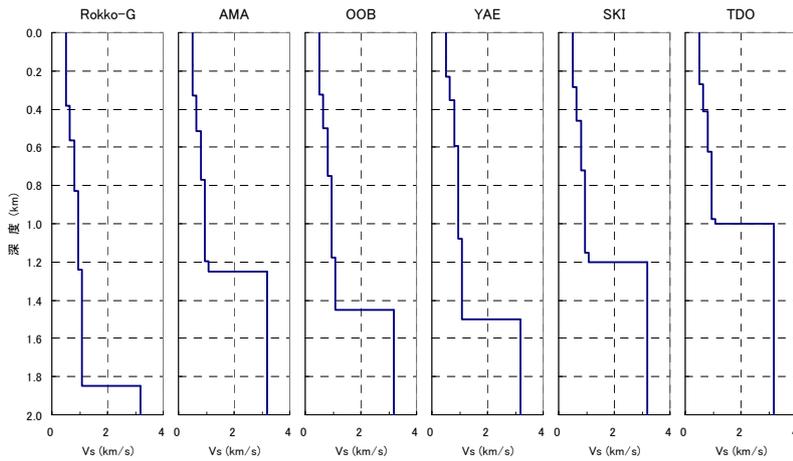


Fig. 3 評価サイトのS波速度構造
S-wave Velocity Structure at Evaluation Sites

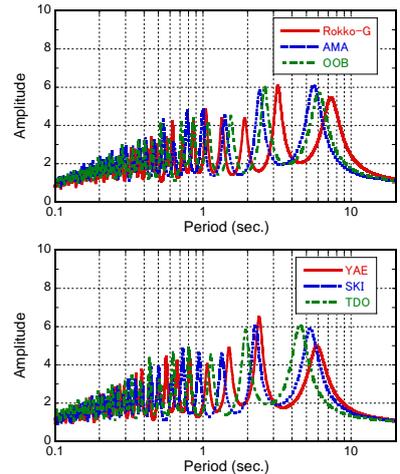


Fig. 4 S波の一次元増幅特性
1-D Amplification Characteristics of S-wave

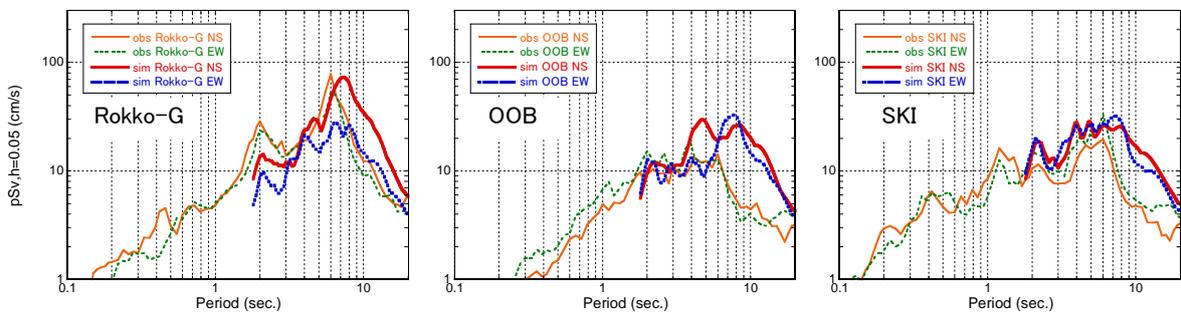


Fig. 5 2004年紀伊半島沖の地震の観測記録(obs)と計算波(sim)の擬似速度応答スペクトル
Pseudo-velocity Response Spectra of Recorded and Simulated Seismograms of the 2004 Kii-hanto-oki Earthquake

に中村ほか¹¹⁾のすべり速度時間関数をモーメントレート関数として適用することとし、このとき必要なパラメータ(断層幅など)は各アスペリティ領域または背景領域単位で設定して与えた。

短周期地震動計算では、小断層を約10km四方のサイズのまま要素断層として用いた。要素断層地震波のスペクトル特性に関わる高周波遮断周波数 f_{max} と高周波数遮断フィルター $((1 + (f/f_{max})^n)^{-1/2})$ の減少勾配 n については、既往の検討例(佐藤ほか¹²⁾, 佐藤ほか¹³⁾などを参考に、 $f_{max}=10\text{Hz}$, $n=4.2$ を用いた。

3.5 地盤構造モデル

大阪湾を含めた大阪堆積平野(大阪堆積盆地)部分の地下構造については三次元不整形地盤モデルを設定し、堆積盆地外の領域については堆積地盤を省略して岩盤が露頭しているとしてモデル化した。堆積盆地の三次元地盤構造は、産総研が公開するモデル(堀川ほか¹⁴⁾)に基づくこととし、その堆積層を5層構造に置き換えて用いた。地震基盤および以深の地殻の地盤構造については平行成層4層構造として設定した。設定した地下構造モデルの基盤深度分布をFig. 2に、地盤定数をTable 3に示す。

なお、短周期地震動計算の波形合成法に用いる地殻(地震波の伝播経路)の減衰 Q 値は、地震調査研究推進本部

の地震調査委員会による南海地震の強震動予測¹⁵⁾に使用される設定($Q=100f^{0.7}$ ($f>1\text{Hz}$), $Q=100$ ($f\leq 1\text{Hz}$), [f : 周波数])を用いることとした。

3.6 評価サイトと地盤増幅特性

解析対象地点を堆積盆地内に位置する6地点(Rokko-G, AMA, OOB, YAE, SKI, TDO)とした。短周期地震動計算のための各サイトの一次元地盤構造は、三次元地盤における該当位置の構造を用いた。Fig. 3に V_s 構造を示す。地盤増幅特性については、工学的基盤以深のみを対象とするため弾性地盤として計算する。このときの地盤増幅特性をFig. 4に示す。深部までの地盤構造による一次元増幅特性の1次卓越周期は約4~8秒に、2次卓越周期は約2~3.5秒に分布している。

3.7 ハイブリッドの接続周期

短周期地震動と長周期地震動の足し合わせの際の接続周期については、長周期地震動の計算精度の限界周期を考慮して、周期2秒弱に設定した。

3.8 2004年紀伊半島南東沖地震の長周期地震動シミュレーション

南海地震の地震動予測を実施するに先立ち、長周期地

震動評価に用いる予測手法と地盤モデル設定の妥当性を検証するために、実際に発生した地震のシミュレーションを実施した。対象とした地震は、東南海地震の震源域内に相当する紀伊半島南東沖で2004年9月5日23:57に発生した地震(Mj7.4)である。震源は点震源とし、八木¹⁶⁾による震源インバージョン結果を参考に、南傾斜の逆断層と南北方向の右横ずれ断層の2つの断層面に対してそれぞれ3つの三角形から成る震源すべり速度関数を与えた。

Fig. 5 に差分法により計算した2004年紀伊半島南東沖の地震の際のRokko-G地点, OOB地点, SKI地点での長周期地震動(周期約2秒以上)のシミュレーション計算結果の応答スペクトルを示す。Fig. 5 中には同地震の際のRokko-G地点(地表), OOB地点(建物B2F), SKI地点(地表)での実地震観測記録の応答スペクトルを併せて示している。シミュレーション計算結果と観測記録との

比較では、各サイト共に周期7秒以上で計算の方がレベルが大きい、Rokko-G地点の周期6~8秒とOOB地点の周期4秒以上での卓越周期にやや差違が見られる、といった違いがあるものの、スペクトル振幅やスペクトル形状は概ね各サイトで観測と同様となっていることから、長周期地震動の考慮が概ね妥当であると判断できる。

3.9 想定南海地震の地震動予測結果

3.9.1 長周期地震動の波動伝播の様子と最大速度分布

長周期地震動の波動伝播(速度, 水平成分, バンドパスフィルター2~20秒)のスナップショットおよび最大速度値分布をFig. 6 に示す。Fig. 6 (a) には南海地震震源域から四国, 近畿を含む解析領域全体での発震時から時刻T=60秒までの様子を示し, Fig. 6 (b) には時刻T=60秒以降の大阪平野周辺地域での様子を拡大して示している。

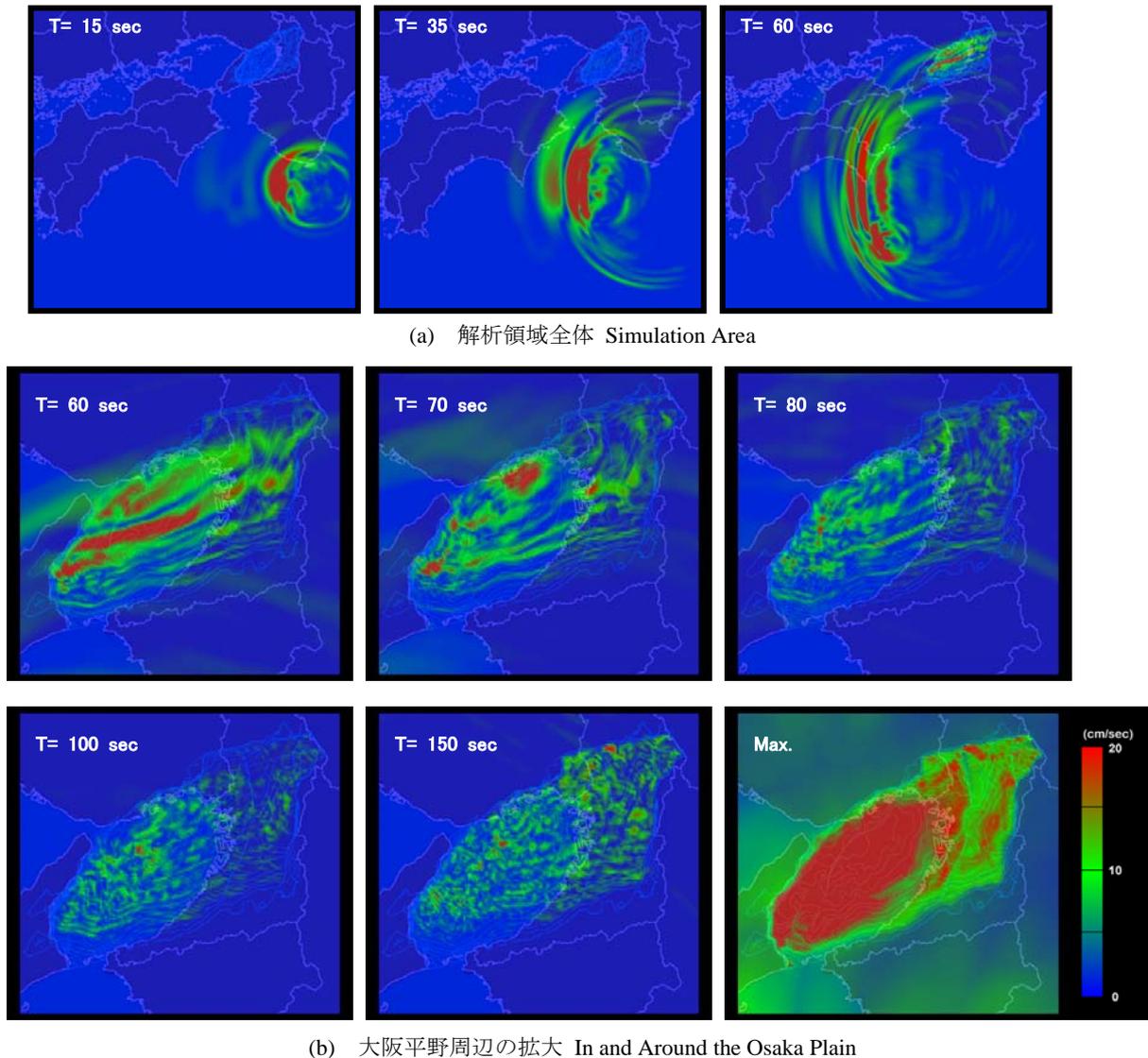


Fig. 6 南海地震による長周期地震動の波動伝播(速度, 水平方向成分絶対値, BPF 2~20 sec)
Synthetic Long Period Ground Motion of the Nankai Earthquake (Absolute Value of Horizontal Velocity Component)

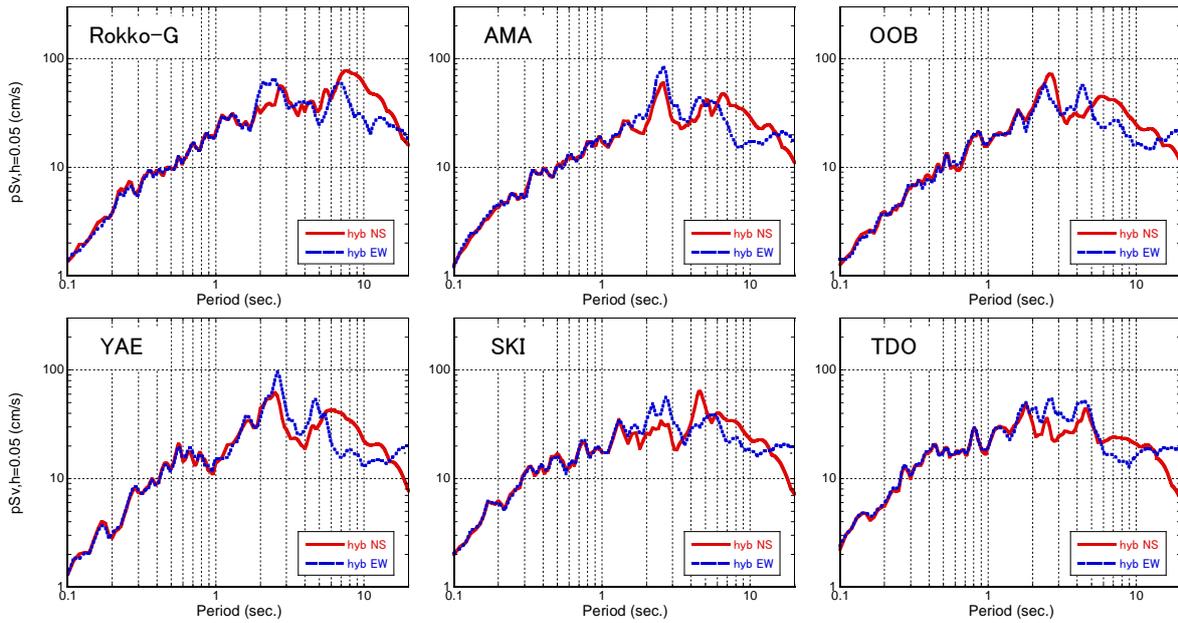


Fig. 8 南海地震の予測地震動の擬似速度応答スペクトル (ハイブリッド法)
Pseudo-velocity Response Spectra of Calculated Ground Motion of the Nankai Earthquake (Hybrid Method)

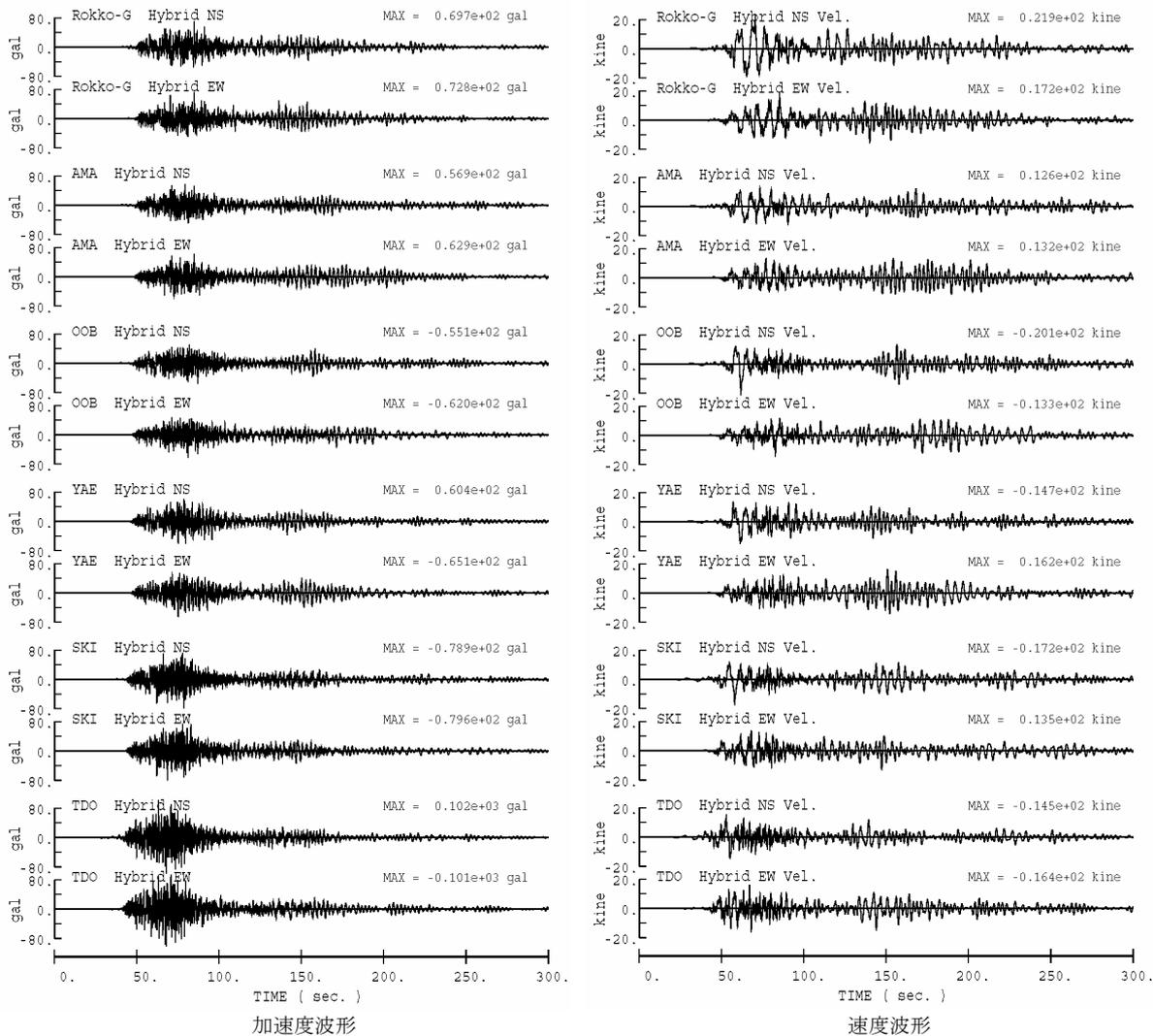


Fig. 7 南海地震の予測地震動波形 (ハイブリッド法)
Calculated Ground Motion Waveforms of the Nankai Earthquake (Hybrid Method)

震源からの波動伝播は、最初に破壊開始点に近いアスペリティ4, 3付近からの波が堆積盆地の南南東側から入射するが、その後は破壊が西へ進むに連れて振幅が相対的に小さい波が南西側から入射するようになる。また、堆積盆地内では入射波群が通過した後も盆地内に閉じ込められた波が大きな振幅で揺れ続けて後続波を生成していることが分かる。最大速度値については、堆積盆地北側寄りや上町断層西側、生駒断層西側といった基盤が深い領域で大きな値となっており、地盤構造との関連が伺われる。

3.9.2 時刻歴波形と応答スペクトル 長周期地震動と短周期地震動を足し合わせて作成したハイブリッド波の時刻歴波形をFig. 7に、擬似速度応答スペクトル(減衰5%)をFig. 8に示す。時刻歴波形において時刻50~100秒付近と150秒付近で振幅が大きくなっているのはアスペリティの破壊による波動が到達したことによるものである。波形の時刻150秒以降では長周期成分を主とする揺れが300秒まで続いており、長周期地震動の特性を表現できている。応答スペクトルからは周期2~3秒付近および周期4~6秒付近に長周期地震動による卓越が確認できる。

4. まとめ

長周期地震動を含む地震動予測手法の特徴について整理した。次に、広域での長周期地震動の予測技術の適用実施例として、大阪平野を対象とした想定南海地震のハイブリッド手法による地震動予測の結果を示した。このような予測地震動を耐震設計やBCP(事業継続計画)等における被害想定へ適用、展開を計ることにより、より精度の良い地震への備えが可能となるものと期待される。また、この長周期地震動の予測技術については、大阪のみならず関東や濃尾、仙台等の各平野での長周期地震動予測に適用し、超高層や免震などの長周期構造物の設計や既存耐震性検討に資する予定である。

謝辞

関西地震観測研究協議会および港湾地域強震観測システムによる観測記録を使用させて頂きました。また、地震動計算を実施するに当たり、工学院大学・久田嘉章教授が公開されている波数積分法プログラムおよび京都大学・川辺秀憲助手より提供して頂いた差分法プログラムを利用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：地盤震動—現象と理論—，日本建築学会，pp. 310，(2005)
- 2) Graves, R. W. : Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid

- finite differences., Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No. 4, pp. 1091-1106, (1996)
- 3) Pitarka, A. : 3D elastic finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 89, No. 1, pp. 54-68, (1999)
- 4) 川辺秀憲，他：長周期地震動評価のための Q_s 値の周期依存性に関する検討，日本地震学会2004年秋季大会予稿集，B034，(2004)
- 5) 壇一男，他：統計的グリーン関数法による1923年関東地震(Mjma7.9)の広域強震動評価，日本建築学会構造系論文集，No. 530，pp. 53-62，(2000)
- 6) 佐藤智美，他：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性，仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析，日本建築学会構造系論文集，No. 462，pp. 79-89，(1994)
- 7) Boore, D. M. and Boatwright, J. : Average body-wave radiation coefficients, Bull. Seism. Soc. Am., 74, 5, pp. 1615-1621., (1984)
- 8) 中央防災会議：東南海，南海地震等に関する専門調査会(第7回)資料，(2002)
- 9) 中央防災会議：東南海，南海地震等に関する専門調査会(第16回)資料，(2004)
- 10) 中央防災会議：「東海地震に関する専門調査会」，「東海地震対策専門調査会」及び「東南海，南海地震等に関する専門調査会」において検討された想定東海地震，東南海・南海地震に係る公開データ，(2005)
- 11) 中村洋光，他：断層強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式，地震第2輯，第53巻，pp. 1-9，(2000)
- 12) 佐藤智美，他：表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性：仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析，日本建築学会構造系論文集，No. 462，pp. 79-89，(1994)
- 13) 佐藤智美，他：強震動の高周波フーリエスペクトル特性— f_{max} と応力降下量—，日本建築学会構造系論文集，No. 527，pp. 79-87，(2000)
- 14) 堀川晴央，他：断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル，活断層・古地震研究報告，No. 3，pp. 225-259，(2003)
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会：南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について(中間報告)，平成13年12月，(2001)
- 16) 八木勇治：2004年9月5日紀伊半島南東沖で発生した地震について，http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi/eq/Japan20040905/Japan20040905_1-j.html，(2004)