

首都圏における長周期地震動シミュレーション

田中 清和 野畑 有秀

Simulation of Long-Period Ground Motion in the Metropolitan Area of Japan

Kiyokazu Tanaka Arihide Nobata

Abstract

Long-period ground motion caused by huge earthquakes along the Nankai Trough and along the Sagami Trough is anticipated to cause severe damage to high-rise buildings in the Metropolitan area of Japan. To study how the deep underground structure model of the Kanto Plain affects amplification characteristics of long-period ground motion, we performed simulation analyses of the long-period ground motion of several earthquakes with different arrival directions for each of 4 deep ground structure models. The results obtained from all 4 ground structure models show relatively low reproducibility of amplification characteristics for those earthquakes arriving from a southwesterly direction. We also performed a simulation to predict long-period ground motion due to the Great Kanto earthquake. In comparison with empirical prediction, the experimental results of the simulation overestimated long-period ground motion.

概要

首都圏では、将来の南海トラフ沿いの巨大地震や相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動によって超高層建物等の長周期構造物での被害発生が懸念されており、耐震対策のための長周期地震動評価の重要性が高まっている。そこで、首都圏が位置する関東平野を対象に、深部地盤構造モデルの違いが長周期地震動の増幅特性に与える影響を地震動シミュレーションによって検討した。既往の4つの深部地盤構造モデルを対象に、到来方向が異なる複数の地震の地震動シミュレーションを実施し、南西方向の地震から到来する長周期地震動について各モデルとも地震動増幅特性の再現性が相対的に低いとの結果を得た。また、策定した深部地盤構造に基づき、元禄型関東地震による長周期地震動の予測試算を実施した。試算結果は経験的手法による評価結果に比べてやや過大評価となることがわかった。

1. はじめに

首都圏は数kmの厚い堆積層を持つ関東平野に位置していることから、周期2秒以上の長周期の地震動が増幅されやすい地盤特性をもっている。このため、従来から超高層建物や免震建物等の長周期構造物の耐震設計においては、建設地点に固有の地盤増幅特性や地震動特性をもつ地震波(サイト波)として長周期地震動の影響が必要に応じて考慮されてきた。しかし、2011年東日本太平洋沖地震(Mj9.0)において震源から遠く離れた東京や大阪で実際に超高層建物が大きく揺れる現象が認められ一部建物に実被害が発生したことで、改めて長周期地震動による被害発生の懸念が高まっている。特に、近い将来の発生が懸念される南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動が東京・大阪等の堆積平野地域に立地する超高層建物や免震建物等の構造物に与える影響が注目されている。加えて、首都圏では相模トラフ沿いの巨大地震すなわち関東地震による長周期地震動についても懸念されており、内閣府や国土交通省等で検討が実施されている等、耐震対策のための長周期地震動評価の重要性が高まっている。

長周期地震動の評価では、深部地盤の三次元構造がその増幅特性や位相特性に影響を与える。このため、長周期地震動が超高層建物や免震建物等の構造物に与える影

響を検討することを目的として三次元有限差分法等の地震動シミュレーションによって長周期地震動を評価しようとする場合には、適用する三次元深部地盤モデルの長周期地震動増幅特性を把握しておくことが重要である。一方で、近年では、国等により複数の深部地盤構造が構築・公開されており、長周期地震動評価に利用が可能となっているが、適用に当たって評価結果への影響因子として長周期地震動増幅特性にどの程度の差違があるかを把握しておくことは有用であると思われる。

そこで本論では、首都圏が位置する関東平野を対象に、深部地盤構造モデルの違いが長周期地震動の増幅特性に与える影響を、地震動シミュレーションによって検討した結果を示す。具体的には、関東平野周辺の既往の複数の深部地盤構造モデルに対して、過去に発生したM6~7クラス地震の地震動シミュレーションを実施して、長周期帯域での観測記録の再現性について比較検討を行った。検討に当たっては、堆積盆地構造を有する平野内では地震波の到来方向による卓越周期等の増幅特性の相違が指摘されていることから、到来方向が異なる複数の地震を対象とした。さらに、長周期地震動増幅特性の再現性の比較結果から長周期構造物で重要な周期3~5秒に着目して策定した深部地盤構造に基づき、首都圏で懸念される相模トラフ沿いの巨大地震を対象として三次元有限差分

法による長周期地震動の試算を実施した。試算結果については、国土交通省(2016)¹⁾の長周期地震動対策通知に示された経験的手法による算定結果と比較した。

2. 関東平野の深部地盤構造モデルの長周期地震動増幅特性の検討

2.1 解析条件

地殻から工学的基盤(地盤せん断波速度Vs500m/s)までの深部地盤の三次元不整形構造を三次元有限差分法^{2), 3)}でモデル化して、長周期地震動のシミュレーション解析を実施した。解析範囲は、関東から以西の西日本地域を対象とした場合と関東平野とその周辺地域(以降関東広域と呼称)のみを対象とした場合との2通りである。

西日本地域を対象とする場合について、解析モデル化範囲は東西993km×南北600km×深さ61kmの領域とし、解析時間刻みを0.011秒、差分メッシュ間隔を水平0.2km, 上下0.2km~0.6kmとした。関東広域を対象とする場合については、解析モデル化範囲は東西374km×南北415km×深さ56kmの領域とし、解析時間刻みを0.006秒、差分メッシュ間隔を水平0.2km, 上下0.1km~0.3kmとした。Fig. 1 に解析モデル化範囲を示す。各場合共に、Vs500m/s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

るようにし、地盤の減衰の考慮についてはGraves³⁾による手法を適用し、リファレンス周期 $T_0=5$ 秒で所定の減衰となるようにした。

2.2 地盤構造モデル

地盤構造モデルとして、地震調査研究推進本部による長周期地震動予測地図2012年試作版⁴⁾の地下構造モデル(以下、LPモデルと呼称)、内閣府⁵⁾が「南海トラフの巨大地震モデル検討会」にて構築した深い地盤構造のモデル(以下、NKモデルと呼称)、防災科学技術研究所が地震動予測地図のために構築した深部地盤モデルV2 (JSHIS-V2)^{6), 7)}(以下、JSモデルと呼称)と、山中・山田⁸⁾が微動アレイ探査結果をベースに構築した関東平野の速度構造モデル(以下、YMモデルと呼称)の合計4種類を対象とした。なお、NK, JS, YMモデルでは地殻以深のプレート構造等が含まれないため、不足する地盤構造はLPモデルをベースに補足・合成して構築した。このため、プレート構造が長周期地震動に与える影響については各モデルで共通となっている。YMモデルは関東平野のみで規定され周辺部が存在しないため、不足する関東平野周辺部の地殻以浅の地盤構造もLPモデルで与えて合成した。表層にVs500m/s未満の層がある場合には該当層の地盤定数をVs500m/s層の値へ置換して用いた。各モデル

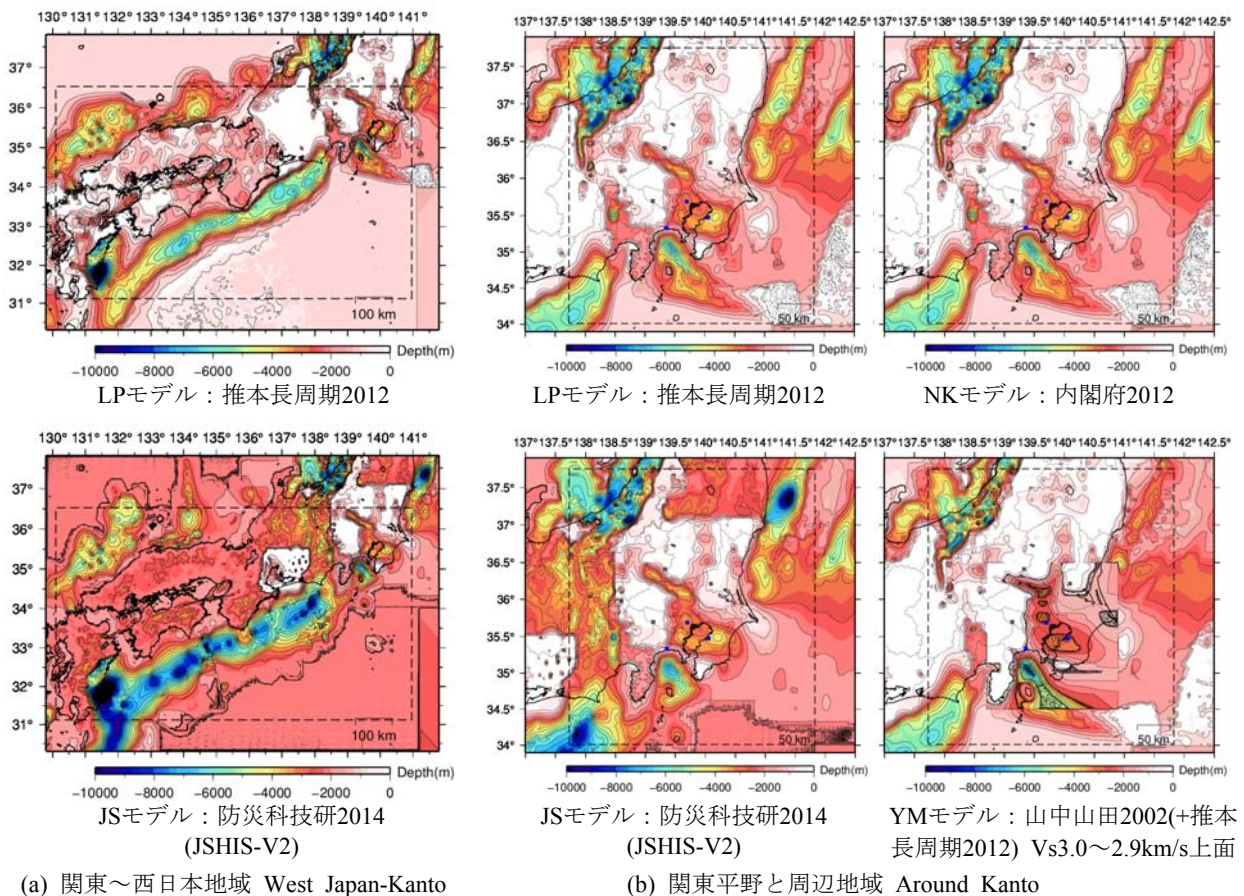


Fig. 1 差分モデル化範囲(点線)と地震基盤構造の等深度線図(Vs3.2km/s上面)
Region of Finite-Difference Modeling (Dotted Line) and Depth Contours for the Sediment-Bedrock Interface

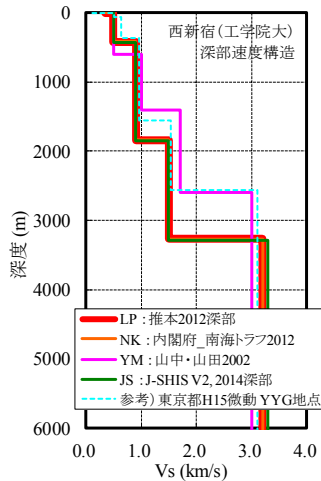


Fig. 2 西新宿地点でのS波速度構造
S-wave Velocity Profile at Nishi-Shinjuku (SJK) Site

の関東平野内でのVs500m/s未満の層厚は0mでモデル化されていないため、置換の影響はほぼ皆無と考えられる。Fig. 1 に地下構造モデルの地震基盤(Vs3.2km/s層上面)の深度分布を示す。内閣府⁵⁾の説明書きによれば、LPモデルとNKモデルの関東平野地域の地盤構造は基本的に同一であるとされている。参考のため、各地盤構造モデルの工学院大学・西新宿(SJK)地点位置での地盤S波速度構造(Fig. 2)による一次元弾性地盤増幅特性を算定して示す(Fig. 3)。

2.3 対象地震と震源モデル

計算対象の実地震ケースとして、関東～西日本地域を解析範囲とする2地震(2004.9.5紀伊半島沖地震の23:57本震Mj7.4, 19:07前震Mj7.1)および関東広域を解析範囲とする3地震(2009.8.11駿河湾Mj6.5, 2004.10.23新潟県中越Mj6.8, 2011.3.19茨城県北部Mj6.1)の合計5地震ケースについて示す。対象地震は、地震波の到来方向の差違を検討するために選定した東京都心部からの方向が異なる3地震と、南海トラフ沿いで発生しかつ長周期が卓越した紀伊半島沖の2地震である。Fig. 4 に震源位置を示す。なお、対象地震の観測記録波形の振幅レベル(新宿での値)は、紀伊半島沖本震と中越地震で最大速度4cm/s程度、その他の地震で1cm/s弱程度である。

震源は点震源でモデル化し、紀伊半島沖19:07前震については吉村他⁹⁾が山中¹⁰⁾による震源インバージョン結果に基づき設定した震源パラメータと震源時間関数を与えた。紀伊半島沖23:57本震については、八木¹¹⁾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設定して与えた。駿河湾地震については、港湾空港技術研究所¹²⁾による震源インバージョン結果から算定したモーメントレート関数を複数のCosine型関数で近似して設定した。中越地震については、野津¹³⁾による震源インバージョン結果から算定したモーメントレート関数を複数のCosine

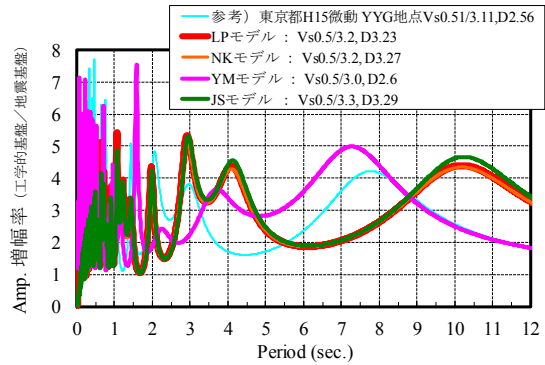


Fig. 3 西新宿地点でのS波速度構造による一次元弾性地盤の理論増幅特性
1-D Amplification Characteristics of S-Wave at Nishi-Shinjuku Site

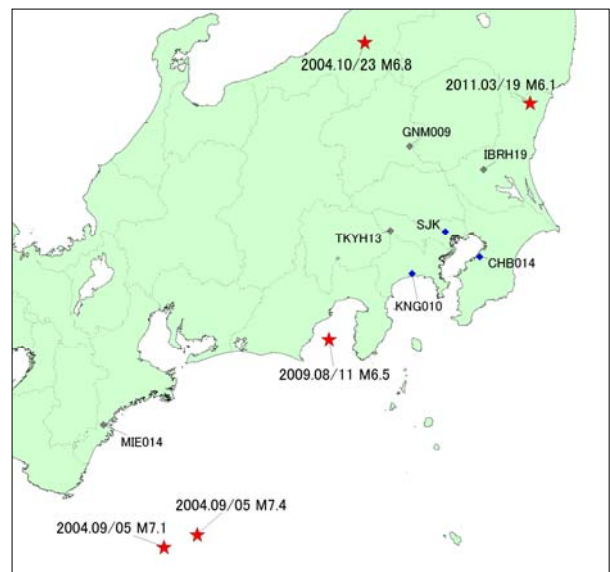


Fig. 4 対象地震の震源と地震観測点の位置
Epicenter of Earthquakes and Observation Sites

Table 1 対象地震の震源諸元
Fault Parameters

地震発生時刻／震央地名	地震規模 Mj	深さ (気象庁) (km)	深さ (km)	走向 strike (deg.)	傾斜角 dip (deg.)	すべり角 rake (deg.)	地震モーメント M0 (Nm)
2004.09.05 19:07 紀伊半島沖前震	7.1	37.6	15.0	71	56	75	9.80e+19
2004.09.05 23:57 紀伊半島沖本震	7.4	43.5	10.6	315	90	150	7.45e+19
2009.08.11 05:07 駿河湾	6.5	23.3	23.0	63	59	-25	2.57e+18
			23.0	307	47	135	2.09e+18
2004.10.23 17:56 新潟県中越	6.8	13.1	13.0	212	47	93	2.21e+19
2011.03.19 18:56 茨城県北部	6.1	5.4	5.0	141	48	-94	6.35e+17

※紀伊半島沖本震と駿河湾地震は2つの断層面で構成

型関数で近似して設定した。茨城県北部地震については、走向等をF-netメカニズム解で与え、震源時間関数をライズタイム1.5秒のCosine型関数で与えた。Table 1 に各モデルの震源パラメータを示す。

2.4 計算結果

関東平野の堆積盆地内に位置する地震観測サイト3地点(工学院大学・西新宿(SJK)地点, K-NET姉崎(CHB014)地点, K-NET平塚(KNG010)地点)について、三次元有限差分法により計算した長周期地震動と観測記録を比較する。

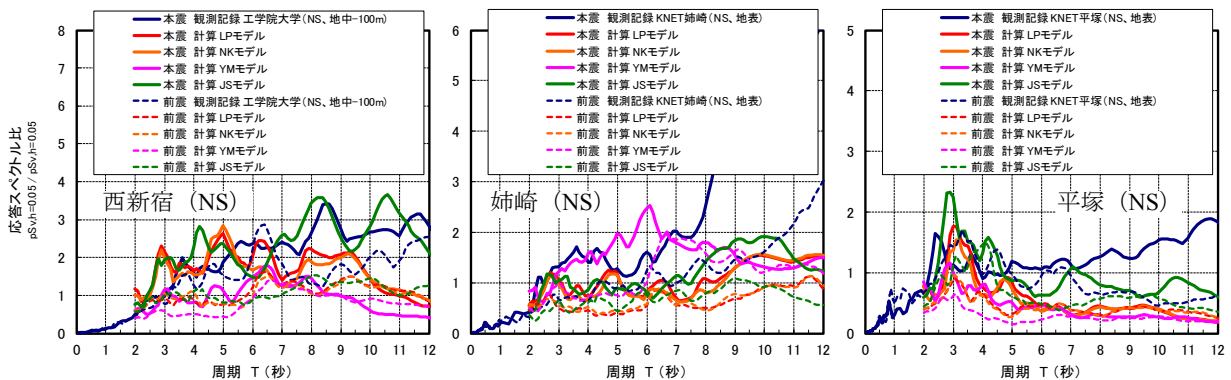
計算波形と観測記録波形の応答スペクトル(減衰5%)により長周期地震動の増幅特性を検討することとし、比較検討に当たっては、近似的に震源モデルの周波数特性の影響を除去するため、硬質地盤地点を基準点として除算した応答スペクトル比(擬似速度応答スペクトルの比)を用いた。以下に、各シミュレーション結果についての考察を述べる。

2.4.1 紀伊半島沖の地震(2004.9.5)本震・前震 紀伊半島沖の地震について、Fig. 5 に本震(実線)と前震(点線)の応答スペクトル比を示す。NS, EW成分で概ね同傾向のため、NS成分のみを対象として示した。

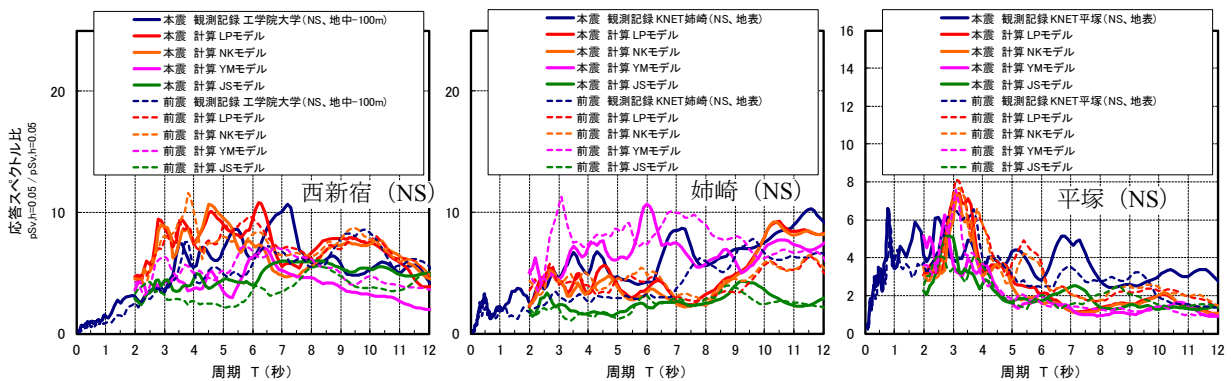
まず、震源から観測地点までの伝播経路特性と関東平

野の堆積盆地構造による増幅特性を含んだ特性を検討するため、震源に近い硬質地盤観測点としてK-NET尾鷲(MIE014)を基準点として応答スペクトル比を算定した(Fig. 5 (a))。西新宿地点では、JSモデルの計算結果が周期7~10秒の範囲で観測記録(青太線)を良好に模擬している。周期3~5秒の範囲ではLP, NK, JSモデルはやや過大評価であり、YMモデルは全体的に過小評価となっている。姉崎地点では周期2~4.5秒の範囲でYMモデルが観測記録を良く模擬しているが、他3モデルは過小評価である。平塚地点では、周期2~4秒付近のピークを各モデル共に大まかに模擬しているがピークの大きさや周期はややずれている。周期5秒以上については各モデル共に過小評価となっている。

次に、関東平野の堆積盆地構造による増幅特性を検討するため、概ね地震波到来方向となる西側の堆積盆地構造外に位置するKiK-net檜原南(TKYH13)地点を基準点とする応答スペクトル比を算定した(Fig. 5 (b))。西新宿地点では、K-NET尾鷲を基準点とした場合と同様にLP, NKモデルが観測記録と同様の複数のピークを表現しているもののやや過大で周期にずれがある。その一方で、JSモデルはピークを模擬せずやや過小となっており傾向が異なる。周期9~10秒の範囲では観測記録の傾向が異なるが、本震・前震によらず、LP, NKモデルは前震記録に近い



(a) 基準点をK-NET尾鷲観測点とした場合



(b) 基準点をKiK-net檜原南観測点とした場合

Fig. 5 長周期地震動シミュレーション波および観測記録の応答スペクトル比 [2004年紀伊半島沖の地震 本震(実線)と前震(点線)]

Response Spectrum Ratio of Calculated Ground Motions and Seismic Observation Records [2004 Kii-Hanto-Oki Earthquakes]

振幅に、YM、JSモデルは本震記録に近い振幅になっており、本震と前震で振幅が異なる現象を模擬できていない。姉崎地点では、YMモデルが周期2~4.5秒と6.5~9秒付近で本震の記録を比較的良く模擬しているが、前震に対しては過大となってしまう。周期2~5秒でLP、NKモデルがピーク位置をある程度再現しているが、振幅はやや小さい。JSモデルは全体的に過小である。平塚地点では、周期2~4秒付近のピークについて、LP、NKモデルは前震の、YM、JSモデルは本震のピーク形状を模擬する傾向が見られる。また、3地点に共通して観測記録には本震で周期7秒付近にピークが見られるが、各モデル共に再現性は低い。

西新宿地点のLP、NKモデルの計算波に着目すると、応答スペクトル比やスペクトルでは周期5~7秒の範囲に卓越が見られるが一次元理論増幅特性(Fig. 3)では同周期範囲に卓越はないことから、計算波における卓越は実体波のS波重複反射というよりは表面波の伝播・増幅によるものと推察される。従って、地盤構造の改良に当たっては、対象サイト直下の速度構造だけでなく周辺地盤の不整形形状や堆積盆地の端部形状までも含めた、ある程度の拡がりをもった地域の地盤を考慮することが必要と考えられる。

2.4.2 駿河湾の地震(2009. 8. 11) 駿河湾の地震のNS、EW成分について、Fig. 6(a)に応答スペクトル比を示す。応答スペクトル比の基準点はKiK-net檜原南とした。駿河湾の地震は、紀伊半島沖地震と到来方法が概ね同じだが、発生位置がより関東平野に近い点が異なる。

西新宿地点では、JSモデルがNS成分で観測を良く模擬しているが、EW成分では過大となっている。YMモデルも周期3.5秒以上で同傾向である。LP、NKモデルはNS成分の周期3~7秒で過大なピークとなっている。EW成分の周期5秒以上については各モデル共にやや過大傾向である。姉崎地点では、観測記録のNS成分に見られる周期3~4.5秒と8秒の大きなピークを各モデルとも再現できていない。NS成分については、YMモデルの周期4~6秒のピークとLP、NK、YM、JSモデルの周期9~10秒のピークは、対応する観測記録のピークに対して周期がずれているようにも見える。EW成分については、YMモデルを除く3モデルで良好に模擬している。平塚地点でも、観測記録NS成分の周期3~4秒と8秒のピークを再現できていない傾向は姉崎地点と同様である。EW成分については、LP、NK、YMモデルで模擬しない過大なピークがあるのを除けば、概ね良く再現されている。全体的に、観測記録と計算波の対応について、紀伊半島沖地震の場合と共通の傾向が所々に認められる。

2.4.3 新潟県中越地震(2004. 10. 23) 中越地震のNS、EW成分について、Fig. 6(b)に応答スペクトル比を示す。応答スペクトル比の基準点は概ね地震波到来方向となる関東平野の北北西の堆積盆地端部に位置するK-NET桐生(GMN009)とした。

西新宿地点では、観測記録のEW成分に周期7~8秒を

中心とする大振幅のピークが見られる。LP、NK、YMモデルではやや周期が異なるが同周期帯にピークが見られるものの、観測記録に対してピークの振幅は大幅に小さくなっている。一方、JSモデルではピークを再現できていない。NS成分についても同様に、観測記録にピークがあり各モデルで模擬しているが振幅は過小である。EW成分の大振幅ピークについては、早川・古村¹⁴⁾が観測記録の後続波形に見られる周期6~7秒の長周期大振幅パルス波は数100mの深さを持つ溝状地盤構造で説明可能としており、本論で用いた地盤構造にこのような構造が含まれないことが過小評価の原因である可能性がある。周期2~4秒において各モデルで計算波がピークとなっているが、観測記録ではピークは認められない。その他については良く模擬している。姉崎地点では、観測記録EW成分の周期5秒のピークが各モデルで模擬されていない。周期6~8秒のなだらかなピークについてはLP、NK、YMモデルで模擬しているが、YMモデルでは振幅が大幅に過大となっている。姉崎地点と平塚地点でも、周期2~4秒において観測記録には認められないピークが、各モデルで生じている。

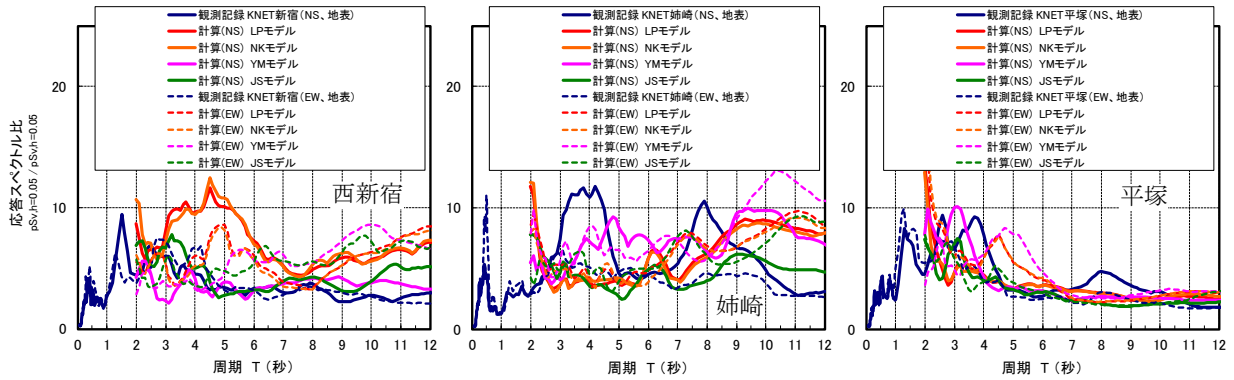
2.4.4 茨城県北部の地震(2011. 3. 19) 茨城県北部の地震のNS、EW成分について、Fig. 6(c)に応答スペクトル比を示す。応答スペクトル比の基準点は概ね地震波到来方向となる関東平野の北東側の比較的硬質地盤からKiK-netつくば(IBRH19)とした。

西新宿地点では、やや過大評価の周期帯があるものの、各モデルとも観測記録のピーク位置を良好に模擬できている。姉崎地点では、観測記録NS成分の周期6秒を中心とするピークについて、各モデルの計算波では周期5.5~6秒のピークとなっていて比較的良く模擬できているが、振幅については過大評価である。同じく観測記録NS成分の周期4秒付近の小ピークについても同傾向である。EW成分については、観測記録がフラットな形状であるのに対して、LP、NK、YMモデルではNS成分と同様に周期4秒や5.5~6秒にピークがあり過大評価となっている。YMモデルでは周期7秒以上で全体的に過大である。平塚地点では、YMモデルのNS成分が周期3~4秒で過大なピークとなっている点を除けば、各モデル共通して観測記録を良く模擬できている。

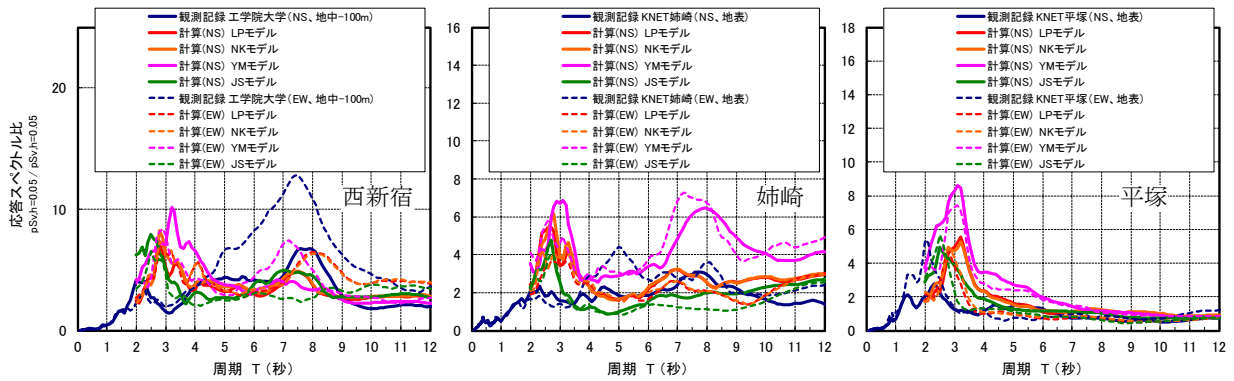
2.5 検討結果のまとめ

到来方向が異なる複数の地震を対象に地震動シミュレーションを実施して、関東平野周辺の4つの深部地盤構造モデルによる長周期地震動増幅特性の再現性を比較した。その結果をまとめると以下となる。

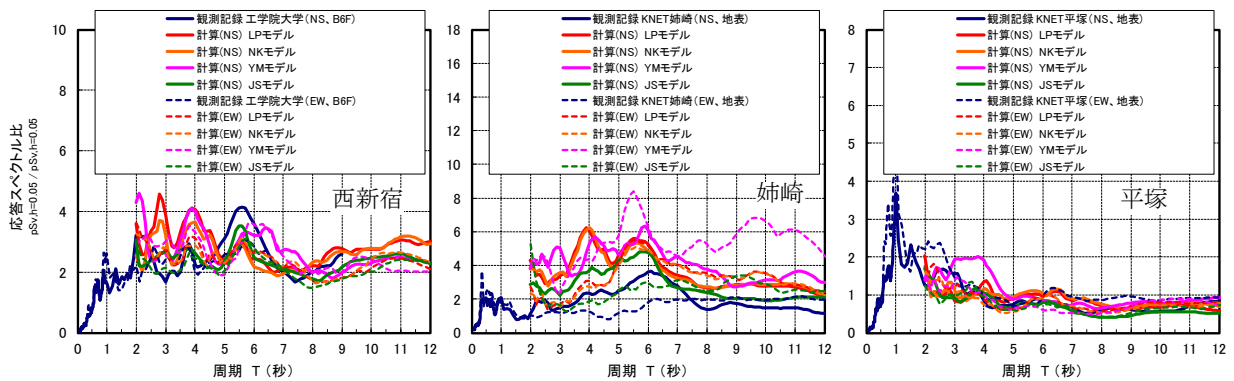
- 1) 南西方向から到来する地震(紀伊半島沖地震、駿河湾地震)では、評価地点や周期帯、地震別、方向成分により、観測記録の再現性が各モデル間で大きく異なっており、モデルに優劣は付けられない。周期3~5秒の範囲では、LPモデルとNKモデルは観測に対してやや過大評価であり、JSモデルとYMモ



(a) 2009年駿河湾の地震 (基準点: KiK-net檜原南観測点)



(b) 2004年新潟県中越地震 (基準点: K-NET桐生観測点)



(c) 2011年茨城県北部の地震 (基準点: KiK-netつくば観測点)

Fig. 6 長周期地震動シミュレーション波および観測記録の応答スペクトル比
[NS成分(実線), EW成分(点線)]

Response Spectrum Ratio of Calculated Ground Motions and Seismic Observation Records

デルは紀伊半島沖地震でやや過小評価、駿河湾地震で概ね良い再現を示す。

- 2) 北北西方向から到来する地震(新潟県中越地震)では、周期6~8秒のピークの大きさの再現性が悪いこと、および周期2~4秒で観測記録にはないピークが計算波に生じることを除けば、各モデル共に概ね良好に観測記録を模擬している。周期6~8秒のピークについては、早川・古村¹⁴⁾が指摘する溝状地盤構造を導入するといった地盤構造の改良が必要な可能性がある。
- 3) 北東方向から到来する地震(茨城県北部地震)では、

西新宿地点と平塚地点で各モデル共に観測記録を概ね良く模擬している。姉崎地点については、概ね模擬できている部分もあるが、全体として各モデル共に振幅が大きい傾向がある。

- 4) 地震波の到来方向による卓越周期等の増幅特性の相違については、各モデル共に大局的には特徴を模擬できている。地震動増幅特性の再現性は、北東方向が相対的に高く、南西方向は低い。平野の堆積盆地地盤構造の北東側の形状が比較的単純で傾斜が緩やかであるのに対し、南西方向では形状が複雑であることで、表面波の伝播・増幅の再現

性が相対的に異なることがこの要因と推測される。

以上から、長周期地震動評価の精度の向上を計るためには深部地盤構造モデルを改良していく必要があるが、特に、南西方向から到来する地震について、長周期地震動増幅特性の再現性が相対的に低いことから、この方向からの表面波入射に影響する堆積盆地端部領域の不整形形状や速度構造の改良が重要である。具体的方策としては、地盤探査による一次元構造把握と地震シミュレーションによる地盤構造逆解析の併用が有用と思われる。

3. 相模トラフ沿い巨大地震の長周期地震動予測シミュレーション

3.1 検討概要(三次元有限差分法による評価)

2章の地盤構造モデルの増幅特性検討に基づき、首都圏における相模トラフ沿いの巨大地震すなわち関東地震による長周期地震動評価の試算として、三次元有限差分法による長周期地震動シミュレーションを実施した。

3.1.1 解析条件 解析手法に三次元有限差分法^{2), 3)}を用いて、地殻から工学的基盤($V_s500\text{m/s}$)までの深部地盤の三次元不整形構造をモデル化した。解析モデル化範囲は東西275km×南北240km×深さ50kmの領域とし、解析時間刻みを0.006秒、差分メッシュ間隔を水平0.125km, 上下0.1km~0.3kmとして、S波速度 $V_s500\text{m/s}$ の層において周期1.25秒以上の帯域で計算精度が確保されるように設定した。Fig. 7 にモデル化範囲を示す。地盤の減衰³⁾は周期5秒で所定の減衰となるようにした。

3.1.2 地盤構造モデル 地盤構造については、2章にて述べた長周期地震動増幅特性の再現性の比較検討結果を参考にして、超高層建物や免震建物等の長周期構造物で重要な周期3~5秒の帯域での過小評価を避けて安全側評価となるように、地震調査研究推進本部による長周期地震動予測地図2012年試作版⁴⁾の地下構造モデル(LPモ

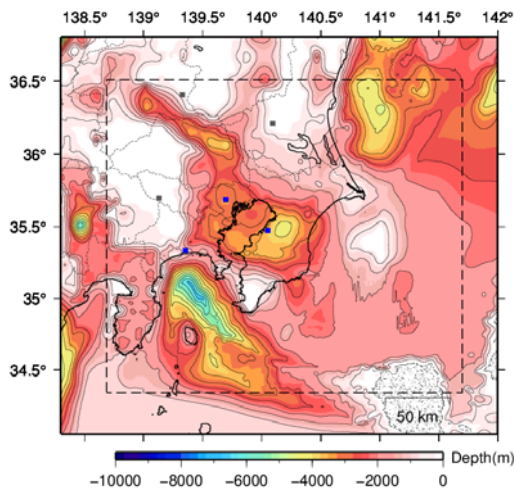


Fig. 7 元禄型関東地震のための差分モデル化範囲と地震基盤構造の等深度線図($V_s3.2\text{km/s}$ 層上面)
Region of Finite-Difference Modeling for Simulation of the Great Kanto Earthquake

デル)を採用した。地盤定数については、2章での検討と同様に、表層に $V_s500\text{m/s}$ 未満の層がある場合には該当層の値を $V_s500\text{m/s}$ 層の値へ置換して用いた。設定した地下構造モデルの地震基盤($V_s3.2\text{km/s}$ 層上面)の深度分布をFig. 7に示す。

3.1.3 震源モデル 想定震源モデルには、東京都¹⁵⁾が地震被害想定のために1703年元禄関東地震の再来を想

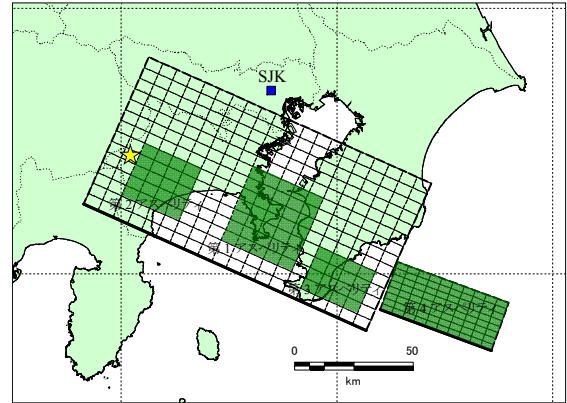


Fig. 8 元禄型関東地震の断層面位置
(東京都2012想定モデル, M8.2)
Fault Model of the Great Kanto Earthquake (Genroku-Type, Tokyo Metropolitan Government 2012 Model)

Table 2 元禄型関東地震の震源パラメータ
(東京都 2012 想定モデル, M8.2)
Fault Parameters of the Great Kanto Earthquake

		パラメータ	設定値
巨視的震源特性		総地震モーメント M_0	$2.12\text{E}+21 \text{ Nm}$
		モーメント マグニチュード M_w	8.2
		断層面積 S	10600 km^2
		平均すべり量 D	6.67 m
微視的震源特性	第1 アスペリティ	地震モーメント M_{0a}	$4.39\text{E}+20 \text{ Nm}$
		面積 S_a	1137.5 km^2
		平均すべり量 D_a	12.87 m
		応力降下量 $\Delta\sigma_a$	27.9 MPa
	第2 アスペリティ	地震モーメント M_{0a}	$1.90\text{E}+20 \text{ Nm}$
		面積 S_a	650 km^2
		平均すべり量 D_a	9.73 m
		応力降下量 $\Delta\sigma_a$	27.9 MPa
	第3 アスペリティ	地震モーメント M_{0a}	$1.36\text{E}+20 \text{ Nm}$
		面積 S_a	520 km^2
		平均すべり量 D_a	8.7 m
		応力降下量 $\Delta\sigma_a$	27.9 MPa
第4 アスペリティ	地震モーメント M_{0a}	$6.20\text{E}+20 \text{ Nm}$	
	面積 S_a	1500 km^2	
	平均すべり量 D_a	12 m	
	応力降下量 $\Delta\sigma_a$	26.0 MPa	
背景領域	地震モーメント M_{0b}	$7.35\text{E}+20 \text{ Nm}$	
	面積 S_b	6792.5 km^2	
	平均すべり量 D_b	3.61 m	
	応力降下量 $\Delta\sigma_b$	3.2 MPa	
その他の震源特性	剛性率 μ	$3.0\text{E}+10 \text{ N/m}^2$	
	平均 S 波速度 V_s	3.7 km/s	
	破壊伝播速度 V_r	2.6 km/s	

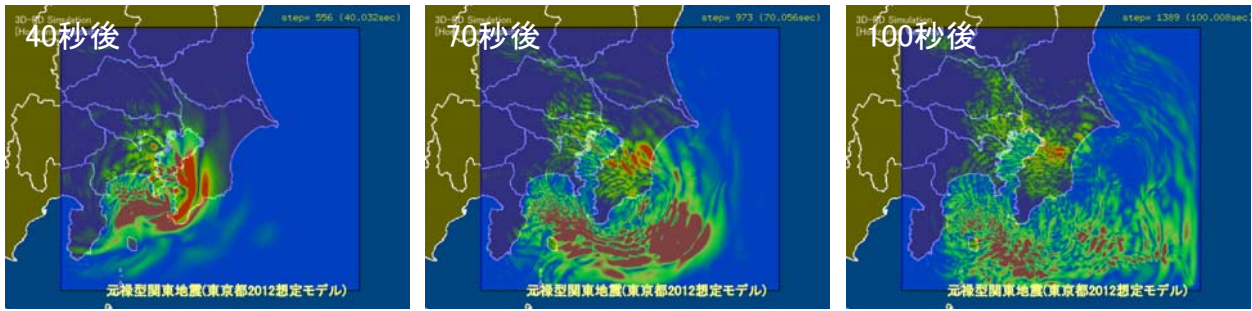


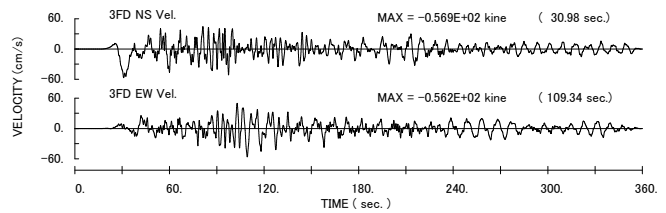
Fig. 9 元禄型関東地震による長周期地震動の波動伝播 (速度振幅, 水平方向成分絶対値, BPF 2.2~30 sec)
Synthetic Long Period Ground Motion of the Great Kanto Earthquake (Absolute Value of Horizontal Velocity Component)

定して設定した元禄型関東地震(モーメントマグニチュードMw8.2)の震源モデルを採用した。東京都の震源モデルは、神奈川県から房総半島にかけて位置する1923年大正関東地震の推定震源断層にアスペリティ(断層面の中で強い地震動を出す領域)を追加し、さらに房総沖に1703年元禄関東地震での外房の津波を説明するための推定断層(小断層)を加えて構成されたものである。Fig. 8 に想定地震の断層面位置を、Table 2 に震源パラメータを示す。想定震源モデルの各要素断層を点震源でモデル化し、各点震源の震源時間関数については、すべり速度時間関数に要素断層内でのユニラテラル破壊仮定時の破壊伝播効果を加味した震源時間関数を作成し、これを複数のCosine型関数で近似して設定した。すべり速度時間関数はHisada¹⁶⁾の方法により設定した。要素震源深さは適用している地盤構造モデル(長周期地震動予測地図2012年試作版⁴⁾)のフィリピン海プレート上面(海洋性地殻第2層Vs2.9km/s層上端)の深さに一致させるようにした。

3.2 国交省長周期対策「基整促波の方法」による地震動評価

三次元有限差分法による相模トラフ地震の長周期地震動予測結果を経験的手法による予測結果と比較するため、国土交通省の通知「国住指第1111号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言)」¹⁾にて規定された設計用長周期地震動作成手法「基整促波の方法¹⁷⁾」を適用し、元禄型関東地震(東京都2012想定モデル)による地表面での地震動スペクトルを求めた。基整促波の方法は観測記録の統計処理から求められた応答スペクトルの距離減衰式やサイト増幅特性、位相特性に基づく経験的かつ簡易的な評価手法であり、詳細な地震動特性の評価はできないが、概略の地震動レベルの確認には有用と考えられる。

計算に当たっては東京都想定震源モデルの断層面をそのまま矩形断層2枚としてモデル化し(Fig. 8), 2枚の断層全体を1セグメントとして計算した場合の応答スペクトルを求めた。なお、基整促波の方法は本来は太平洋プレートの地震とフィリピン海プレート(南海トラフ)の地震を適用範囲としており、相模トラフ沿いの地震は適用範囲外となっているが、ここではフィリピン海プレートの地



西新宿 Nishi-Shinjuku

Fig. 10 元禄型関東地震の長周期地震動予測波形 (水平方向, 速度波形)
Calculated Long-Period Ground Motion Waveforms of the Great Kanto Earthquake (Horizontal, Velocity Component)

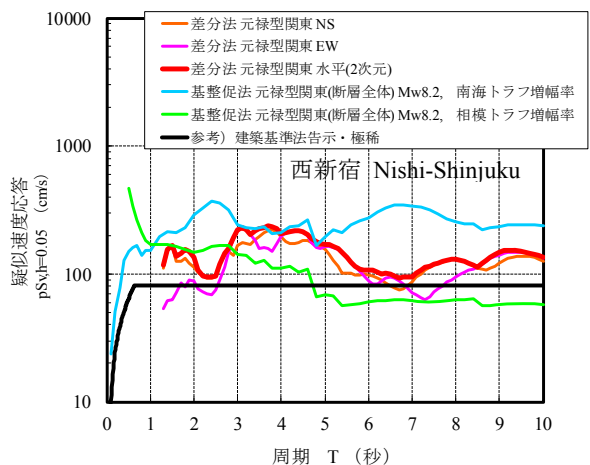


Fig. 11 元禄型関東地震の長周期地震動予測波の擬似速度応答スペクトル(減衰 5%, 水平成分)
Pseudo-Velocity Response Spectra of Calculated Long-Period Ground Motion of the Great Kanto Earthquake

震のパラメータを適用して計算した。加えて、サイト地盤増幅率について、平成28年度建築基準整備促進事業¹⁸⁾にて検討された相模トラフ沿いの地震のための地盤増幅係数(新宿TKY007での値)を公表資料の図から読み取って適用したケースについても併せて計算した。

3.3 計算結果

差分法計算による元禄型関東地震の長周期地震動の波動伝播(水平成分, 速度振幅, 周期2.2秒以上)の様子を

Fig. 9 に示す。図から断層破壊に伴う大きな揺れが通過した後の発震約70秒後や100秒後でも堆積層が厚い東京都区部から埼玉県東部、千葉県中央部では比較的大きな振幅の揺れが継続していることが認められる。

東京都区部の代表地点として西新宿地点における差分法長周期地震動予測波形をFig. 10 に、擬似速度応答スペクトル(減衰5%)をFig. 11 に示す。応答スペクトル図には、国土交通省¹⁾の長周期地震動対策の基整促波の方法によって求めた元禄型関東地震の地表面波のスペクトルを併せて示した。Fig. 12 には、差分法長周期地震動予測波の東京都区部から東京湾周辺にかけての地域における周期別の擬似速度応答スペクトル(減衰5%)の分布図を、周期3秒と5秒の場合について示す。図中には震源断層とアスペリティの形状を緑色線にて示した。

周期別スペクトル分布からは、周期3秒・5秒ともに震源域のアスペリティ直上の地域で大きな応答振幅となっていること、周期3秒では東京都区部周辺でも大きな振幅になっているのに対して周期5秒ではそれよりもやや小さい振幅となっていること等の傾向が読み取れる。

西新宿地点の応答スペクトルを見ると、3~6秒付近に応答振幅200cm/s前後の卓越があり、大きな応答振幅値となっている。同規模の2003年十勝沖地震(M8.0)の際に震源距離が約100kmの堆積地盤上(K-NET大樹)で周期2~4秒の応答スペクトル振幅が200cm/s程度となる観測記録もあり、必ずしも過大なレベルとは言えないが、既往の評価^{例えば19)}と比べると大きめの評価値である。国交省基整促波の方法による応答スペクトルとの比較では、フィリピン海プレート(南海トラフ)地震の地盤増幅率を適用した場合の基整促波の結果と差分法予測結果のレベルは卓越周期の違いはあるものの周期2~5秒の帯域で概ね同程度となっている。また、相模トラフ地震の地盤増幅率を適用した場合の基整促波結果に対しては、周期3秒以上の全域で差分法結果の方が大きい値となっている。

このうち、周期3~5秒付近での予測結果の大きな卓越については、2章での検討結果に見られたように、使用した深部地盤構造LPモデルが南西方向から到来する地震に対して周期3~5秒で過大評価となる特性を反映したものと推測される。予測精度の向上のためにはこの点について深部地盤構造モデルの改良が必要である。一方、海溝型地震のすべり挙動については未だ説明が十分でない部分があるとされており¹⁹⁾、震源時間関数等の設定法の妥当性の検証や改良を進めることも予測精度の向上のための課題である。

4. まとめ

首都圏での長周期地震動シミュレーションを実施した。検討により得られた結果を以下に示す。

- 1) 深部地盤構造モデルの違いが長周期地震動の増幅特性に与える影響を検討した。関東平野周辺の4つの深部地盤構造モデルを対象に、到来方向の異なる

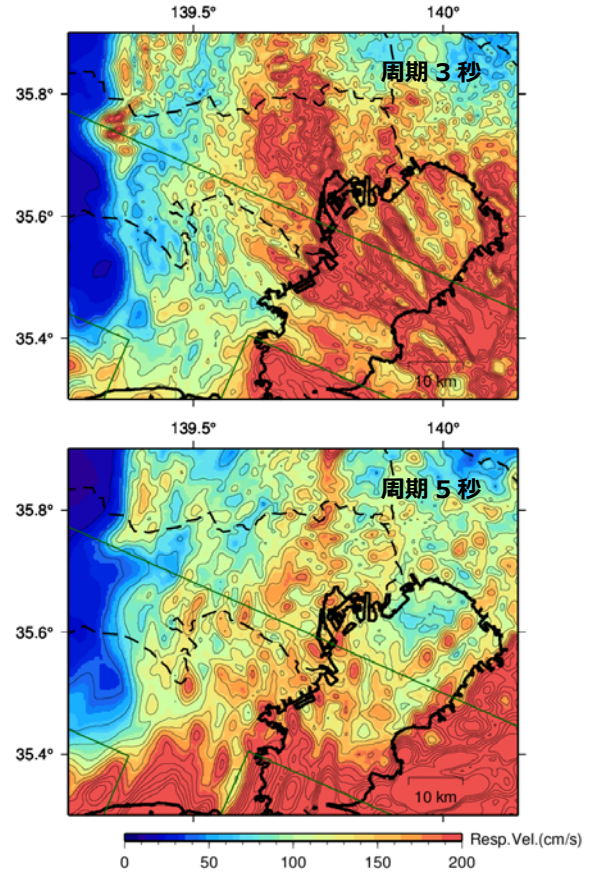


Fig. 12 元禄型関東地震の長周期地震動予測波の周期別の擬似速度応答スペクトル分布(減衰5%, 水平成分, 2次元応答)
Distribution Map of Pseudo-Velocity Response of Calculated Long-Period Ground Motion of the Great Kanto Earthquake

る複数の地震に対する長周期地震動増幅特性の観測記録の再現性について比較検討したところ、特に、南西方向から到来する地震について各モデルとも長周期地震動増幅特性の再現性が相対的に低いとの結果を得た。

- 2) 長周期地震動増幅特性の検討結果に基づいて周期3~5秒の帯域で安全側評価となる地震調査研究推進本部の深部地盤構造モデルを採用し、相模トラフ沿いの巨大地震である元禄型関東地震を対象として長周期地震動の予测试算を実施した。その結果、元禄型関東地震の長周期地震動による周期別の応答スペクトル分布や応答スペクトルは、経験的手法(国交省基整促波)による評価結果に比べてやや過大となる結果であった。

長周期地震動評価に関して、本検討では地盤構造モデルの長周期地震動増幅特性の再現性に着目したが、その他にも震源設定等いろいろな要因がある。地震動シミュレーションによる長周期地震動評価手法によれば到来方向による増幅特性の相違を表現でき、大局的な地震動の特徴を評価できるという有用性を確認できたことから、

今後、これらの要因に関する課題点を改良・解決し、長周期地震動の予測評価精度を向上させていく予定である。

謝辞

防災科学技術研究所K-NET, KiK-netと気象庁・工学院大学建築学部久田研究室による地震観測記録データ、防災科技研F-netのメカニズム解、気象庁の震源情報、長周期地震動予測地図2012年試作版・内閣府・防災科技研J-SHISの公開地盤構造データおよび東工大大学院山中浩明先生から頂いた地盤構造データを使用させて頂きました。一部の図の作成にはGMTを使用しています。また、地震動計算を実施するに当たり、大阪大学大学院(元京大原子炉実験所)川辺秀憲先生からご提供頂いた差分法プログラムを改良して使用しています。本研究(2章)の数値計算はHPCIシステム利用研究課題の成果によるものです(課題番号: hp140202)。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 国土交通省住宅局建築指導課長：国住指第1111号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言), 平成28年6月24日, (<http://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>), 2016.6
- 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, 1999.2
- 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, 1996.8
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2012年試作版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm, 2012.1
- 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による震度分布・津波高について(第一次報告), 2012.3
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:4.4.2節 深い地盤構造のモデル, 4章 震源断層を特定した地震動予測地図, 「全国地震動予測地図一地図を見て 私の街の揺れを知る」技術報告書(2009), インターネットhttp://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/index.htm, 2009.7
- 防災科学技術研究所:深部地盤モデルデータV2, 地震動予測地図データ, 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2014.3
- 山中浩明, 山田伸之:微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築, 物理探査, Vol.55, No.1, pp.53-65., 2002.2
- 吉村智昭, 山本優, 七井慎一:関東・濃尾・大阪平野での長周期地震動シミュレーション 2004年紀伊半島南東沖地震による検証と想定東海・東南海連動地震の予測, 大成建設技術センター報, 第42号, 2009.12
- 山中佳子: EIC 地震学ノート No.152, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC152.html, 2004.9
- 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, 2004.10
- 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:2009年8月11日駿河湾の地震(M6.5)の震源モデル(第二版)一2枚の断層面を考慮した場合一, 研究ノート, http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2009/japanese_research_36.html, 2017.9参照
- 野津厚:2004年新潟県中越地震の震源モデル一経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン一, 地震第2輯, Vol.58, No.3, pp.329-343., 2005.12
- 早川俊彦, 古村孝志:新宿周辺で見られる長周期パルス波の成因と伝播, 第37回地盤震動シンポジウム「地盤震動研究から見た長周期地震動一どこまで説明されて何が課題か?一」, 日本建築学会 地盤震動小委員会, pp.51-60., 2009.11
- 東京都防災会議:首都直下地震等による東京の被害想定 報告書, 第2部 震源モデル等, <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>, 2012.4
- Hisada, Y. : A Theoretical Omega-Square Model Considering Spatial Variation in Slip and Rupture Velocity. Part 2: Case for a Two-Dimensional Source Model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, No.2, pp.387-400, 2001.8
- 大川出・他:超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討 一長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ3連動地震による超高層・免震建築物の応答解析一, 建築研究所 建築研究資料No.144, <http://www.kenken.go.jp/japanese/content/publications/data/144/index.html>, 2013.8
- 大崎総合研究所:S23 相模トラフ沿いの巨大地震等による設計用長周期地震動の作成手法に関する検討, 国土交通省 平成28年度建築基準整備促進事業報告会資料, (<http://www.mlit.go.jp/common/001183677.pdf>), 2017.4
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会:長周期地震動評価 2016年試作版 一相模トラフ巨大地震の検討一, http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/, 2016.10