

三次元地盤構造を考慮した関東地方の 地震動シミュレーション

栗田 哲史¹・董 勤喜²・佐藤 慶治³

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)

E-mail: kurita@tepsco.co.jp

²正会員 株式会社エデュサイエンス総合研究所 (〒214-0033 神奈川県川崎市多摩区東三田3-10-1)

E-mail: kinki.dong@eduscience-ri.com

³正会員 株式会社計算力学研究センター (〒142-0041 東京都品川区戸越1-7-1戸越NIビル)

E-mail: k-satoh@rccm.co.jp

空間的に広く分布する地震観測地点で得られた観測記録の分析により、関東地方の工学的基盤上の地震動が地域特性を有していることが分かってきている。即ち、設計用の入力地震動を設定する工学的基盤面における地震動の揺れやすさ特性が場所によって異なっているということである。しかし、このような性質は現象面として観測記録から捉えられたものであり、地域特性を生む要因については未だ不明な点が多い。関東地方は厚い堆積地盤の周囲を山地が取り囲むように構成されている。地震動の地域特性には、このような深い地盤構造が影響しているものと考えられる。本研究では3次元の地盤構造を有限要素でモデル化した。シミュレーション結果を分析することによって、関東地方の工学的基盤上における地震動が地域特性を生じるメカニズムの解明を試みた。

Key Words : *ground motion, site characteristic, deep ground structure, 3D FEM simulation, amplification characteristics*

1. はじめに

土木構造物の耐震設計に用いられる設計用入力地震動は、一般的に工学的基盤面において設定することを原則としている¹⁾。従って、工学的基盤上の地震動が有する特徴について良く理解しておくことが重要となる。

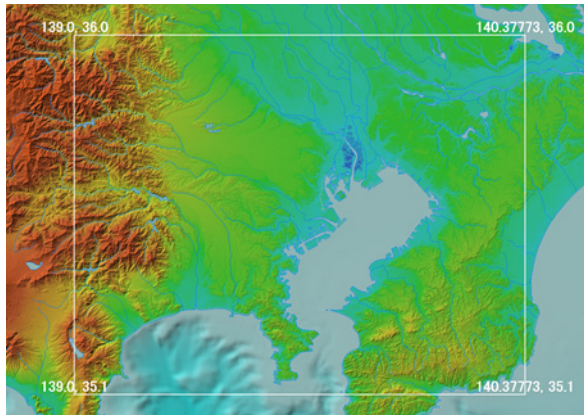
関東地方の工学的基盤上の地震動が地域特性を有しており、地域によって揺れやすさが異なることが観測記録の分析結果から分かってきている^{2), 3)}。地震観測記録に基づく検討からは、現象面としての揺れやすさ特性は捉えられたが、そのような地域特性を生じるメカニズムについては未だ不明な点が多い。関東地方の中心である関東平野は周囲を丹沢山地、関東山地、足尾山地、八溝山地、阿武隈山地などに囲まれた堆積盆地構造を成している。東京湾付近の最深部では地震基盤までの深さが4kmほどに達し、非常に厚い堆積層であることが分かっている。関東地方は3つのプレートが複雑に入り組んで存在しており、このテクトニックな環境に起因して、この特徴的な地形が形成されたものと思われる。

著者らはこのような深い地盤の構造が、先に述べた工

学的基盤上における地震動の地域特性と深い関係にあるものと考えている。そこで、本研究では関東地方の平野部を中心として数値シミュレーションを行うことによって、そのようなメカニズムの解明を目的としている。

複雑な形状をした堆積盆地形状をモデル化して地震動シミュレーションを行うための解析手法として、本研究では3次元有限要素法を用いることとした。不整形地盤における地震動シミュレーション手法には幾つかの方法が有るが^{例えば4)}、有限要素法は地表面の形状や地中の地盤構造を取り入れやすいという特徴がある。このような特徴を活かして、複雑な3次元の地盤モデルを作成することが容易である。

関東地方を対象とした3次元の地盤モデルを用いた地震動シミュレーションに関する既往の検討としては以下の通り幾つかの事例が有る。はじめに、佐藤等⁵⁾は有限差分法で関東地方の深部までの地盤をモデル化して1923年関東地震における東京の観測記録を再現するために長周期帯域でのシミュレーションを行っている。また、Iwaki *et al.*⁶⁾は関東地方を中心とした更に広範な領域をモデル化して、相模トラフで発生する巨大地震を対象とし



(国土地理院ウェブサイト(地理院地図)を加工して作成)

図-1 関東地方の解析対象の領域(白枠線内)

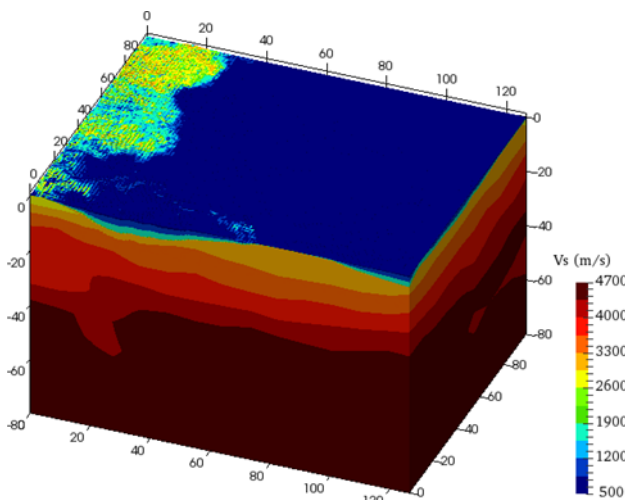


図-2 解析モデルの Vs 分布

たシミュレーションを有限差分法によって行っている。更に、古村⁷⁾は関東地方の3次元盆地構造をモデル化した有限差分法で、特に長周期地震動の発生について検討している。これらは、いずれも深い地盤構造の影響を受けた地表地震動を評価したものであり、深部地盤構造内での地震波の伝播過程にまで着目したものは見当たらない。

本研究では、3次元の地盤構造を考慮した解析モデルを用いて、関東地方の地震動シミュレーションを行った。シミュレーション結果を分析し地盤構造との関係を調べることで、関東地方における工学的基盤上の地震動の地域特性を生じるメカニズムがどのようなものであるのかについて明らかにすることを試みる。

2. 解析モデルと計算条件

数値シミュレーションは3次元有限要素法⁸⁾によって行

表-1 解析領域のメッシュ分割層構成

層区分番号	層厚 (km)	深度方向の分割数
1	3.5	28
2	6.5	26
3	20.0	40
4	50.0	50
モデル諸元		数量
総節点数		30,752,265
総要素数		6 面体 : 29,598,156 / 4 面体 : 3,630,312

い、震源域から工学的基盤 ($V_s=500\text{m/s}$) までをモデル化した。図-1に今回の解析で対象とした領域を示す。一部に丹沢山地から関東山地を含むが、東京湾付近の関東平野中心部の領域をモデル化した。P波速度、S波速度、密度などの地盤物性値および標高は、防災科学技術研究所から公開されているJ-SHISの深度方向に32分割された深部地盤データ(ダウンロード:2013年1月11日)を使用した。地震基盤($V_s=3300\text{m/s}$)以深の地盤データはMatsubara and Obara⁹⁾による「日本列島下の三次元地震波速度構造 海域拡大版」の標準的構造モデル(ダウンロード:2011年8月22日)を用いた。解析モデルのVs分布を図-2に示す。丹沢山地や関東山地では硬質岩が露頭している。

解析領域のメッシュ分割層構成を表-1に示す。本研究では、1秒程度以上の長周期地震動に着目することから、この周期帯の波動の伝達を考慮してメッシュサイズを決定している。地盤は6面体のソリッド要素でモデル化し、メッシュ分割層の境界部には4面体の要素を配置した。

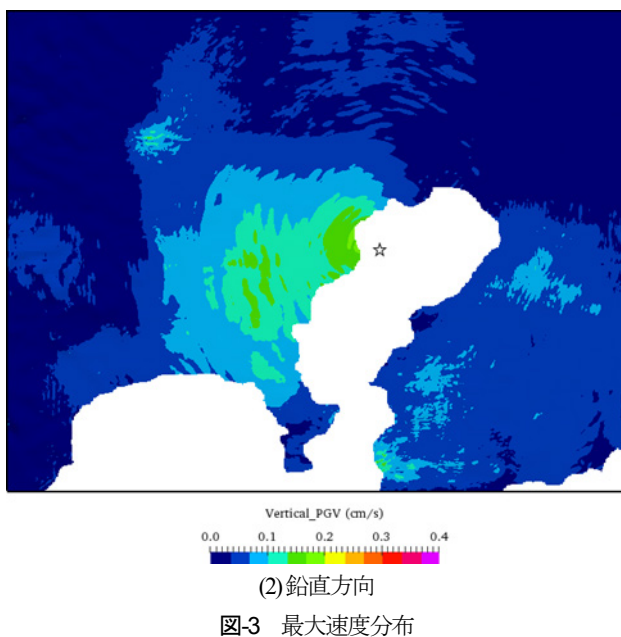
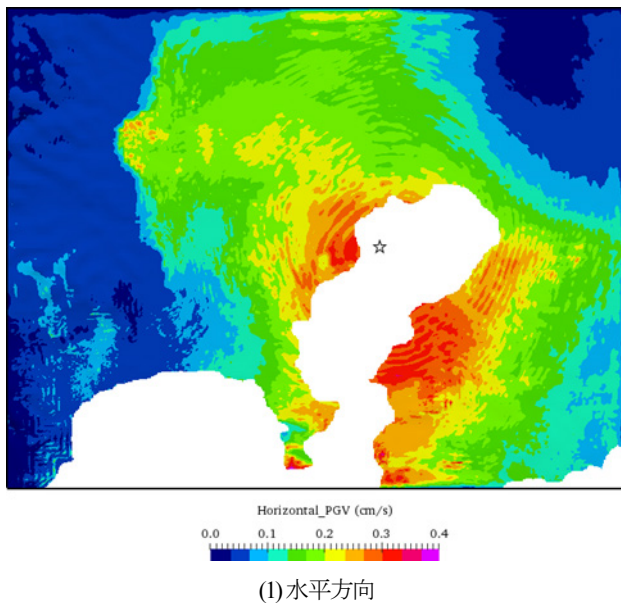
媒質の Q 値については、佐藤・巽¹⁰⁾の $Q=114f^{0.92}$ と適合するようにRayleigh減衰を設定した。また、震源時間関数には中村・宮武¹¹⁾のモデルを用いた。

境界条件は底面・側面共にダッシュポットによる粘性境界を設けた。解析は時間領域で数値積分を行い、時間刻みは0.005秒とした。

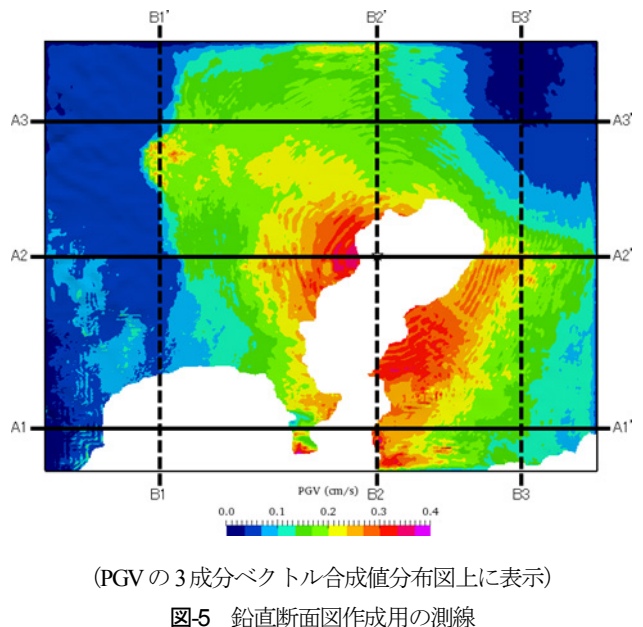
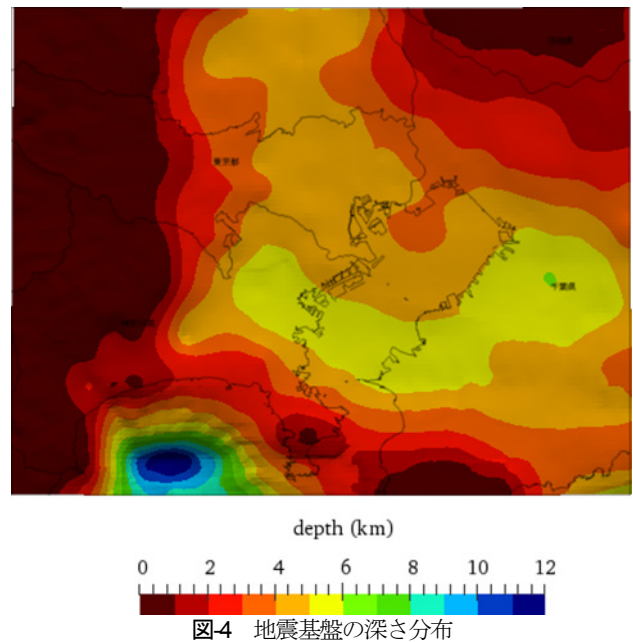
3. 数値シミュレーション

(1) 工学的基盤面での地震動分布

数値シミュレーションの対象とした地震は、2015年9月12日5時49分に発生した東京湾の地震($M_j=5.2$)である。震源深さ56.6kmのフィリピン海プレート内部で発生し、北西-南東方向に張力軸を持つ正断層型の地震である¹²⁾。図-3に震央位置を星印で示す。なお、震源情報は気象庁一元化震源情報による。震央位置の座標は原点から東へ75.2km、北へ50.4kmとなる。



シミュレーション結果の工学的基盤上の最大速度 (PGV) 分布を図-3に示す。震源に近い東京湾の沿岸部で地震動の強い領域が見られる。また、平野部と山地とでは地震動の強さに明確な差異が認められる。図-3のコンターより、工学的基盤上の地震動強さの分布は、震央を中心とした同心円状の分布にはならず複雑なパターンを形成しており、均一的でないことが確認できる。図-4に示す地震基盤面の深さ分布図との対比より、このような現象が生じる原因としては、地震基盤から工学的基盤までの地盤構造が影響しているものと考えられる。地震基盤が浅い地域では地震動の振幅は小さく、逆に地震基盤の深い地域では増幅している現象が見られる。この傾向は水平成分において顕著である。また、地震動分布のコンター境界部の形状が地震基盤の深さの分布形状と良く

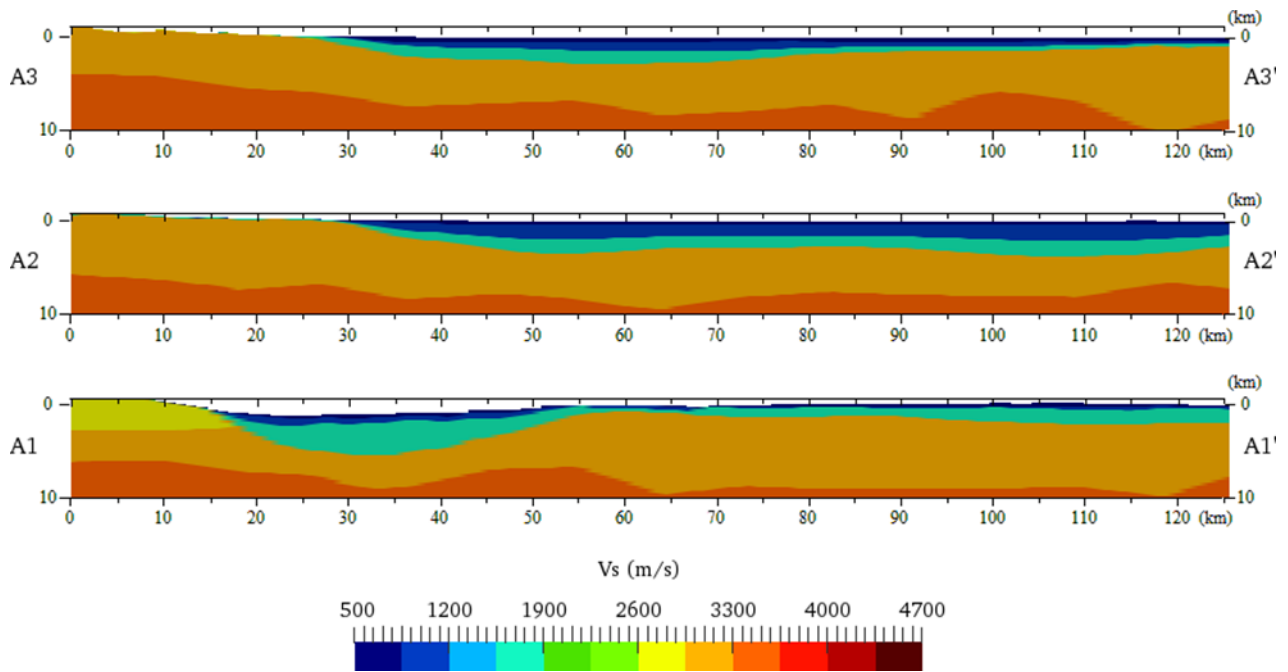


対応していることから、地震基盤の深さと工学基盤における地震動の揺れ特性との関連性を示していると思われる。

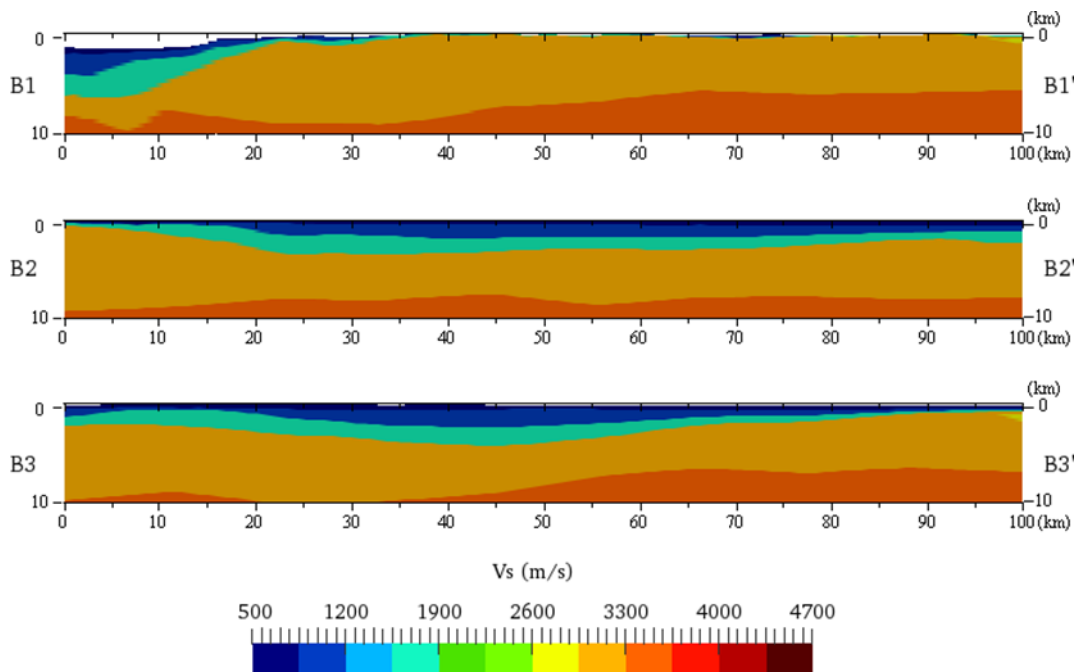
一方、山地と平野部の境界に見られるような大きな分布形状とは別に、コンターで概ね同値となる領域内でも地震動の強さは均一的でなく斑な模様を呈していることが分かる。このような現象は、地震基盤の深さとの対応だけでは説明できない。これは次節で述べる深い地盤構造と関係しているものと考えられる。

(2) 深い構造内での地震動分布

深い構造内での地震波の伝播状況を把握するために、図-5に示す6つの測線に沿った鉛直断面での地震動分布



(1) A-A'断面



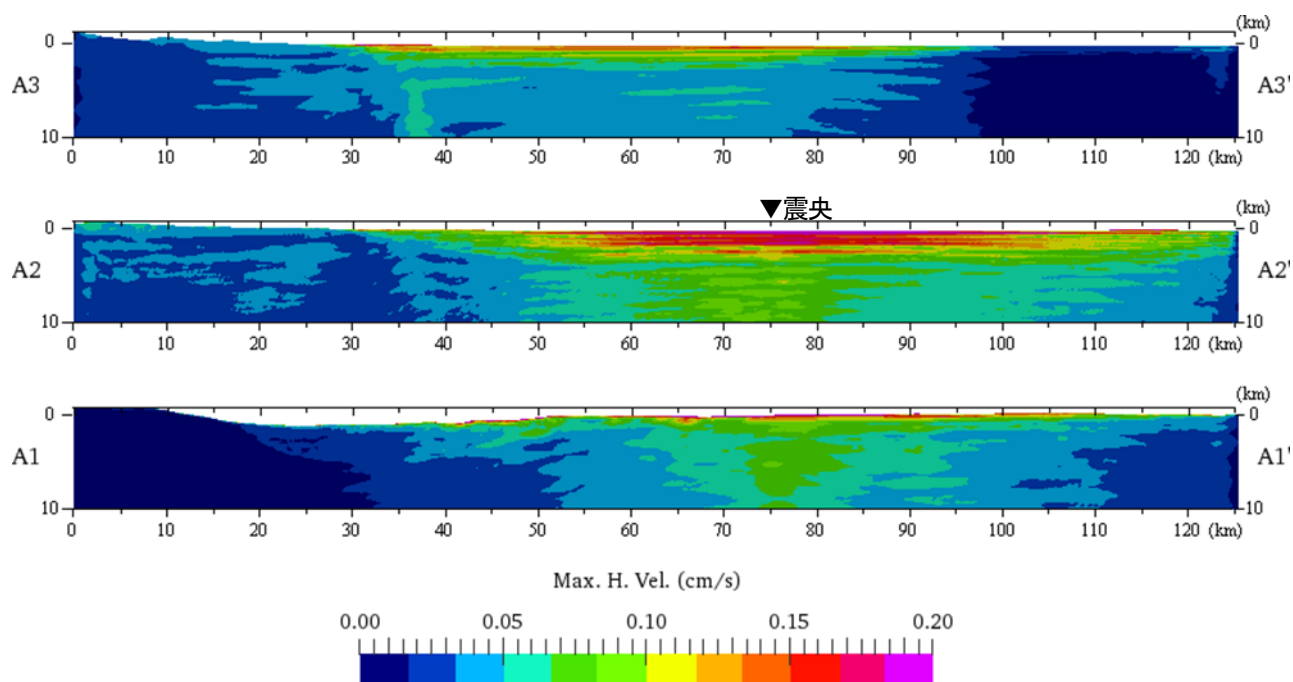
(2) B-B'断面

図-6 各鉛直断面の Vs 分布

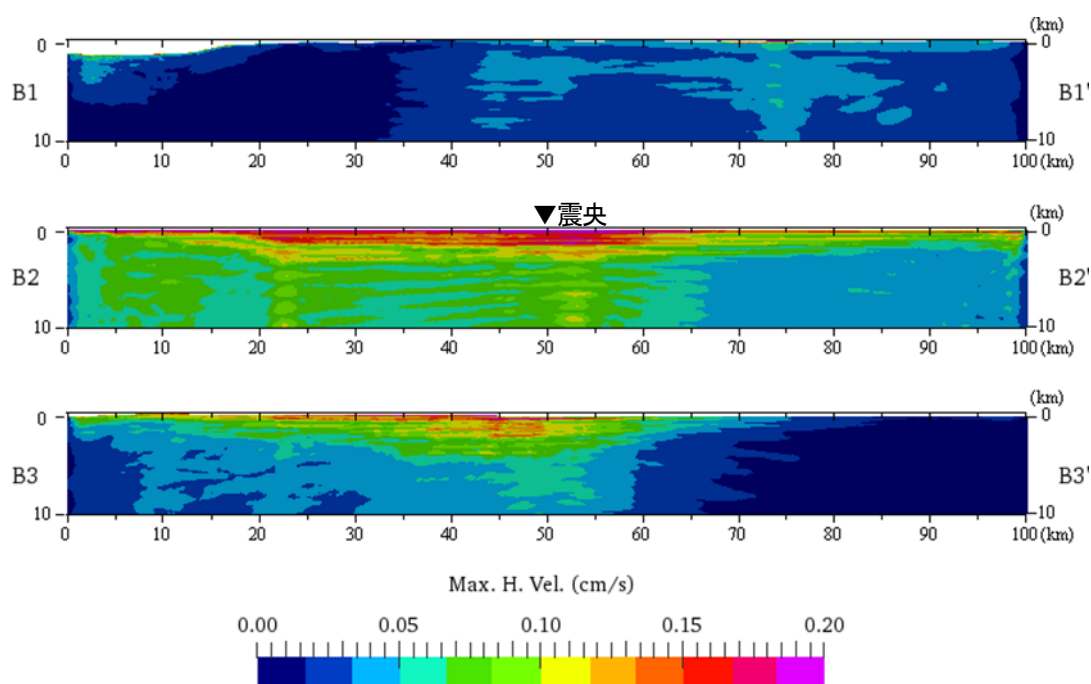
を取り出して観察した。各断面でのVsの分布は図-6に示す通りである。各断面図共に $V_s=3300\text{m/s}$ の地震基盤層が表れるように深さ10kmまでを表示している。図より、各断面での堆積層の形状が確認できる。特に相模湾と東京湾で堆積層が厚いことが分かる。

先の東京湾の地震のシミュレーション結果について、

各断面での最大水平速度分布を図-7に示す。図-6と図-7との比較より、堆積層に該当する箇所で振幅が大きく増幅している様子が分かる。ただし、相模湾内の堆積層については、震源からの距離が遠いため増幅の現象は不明瞭である。また、地中における最大値分布に着目すると、水平方向に延びた縞状になっていることが分かる。



(1) A-A'断面

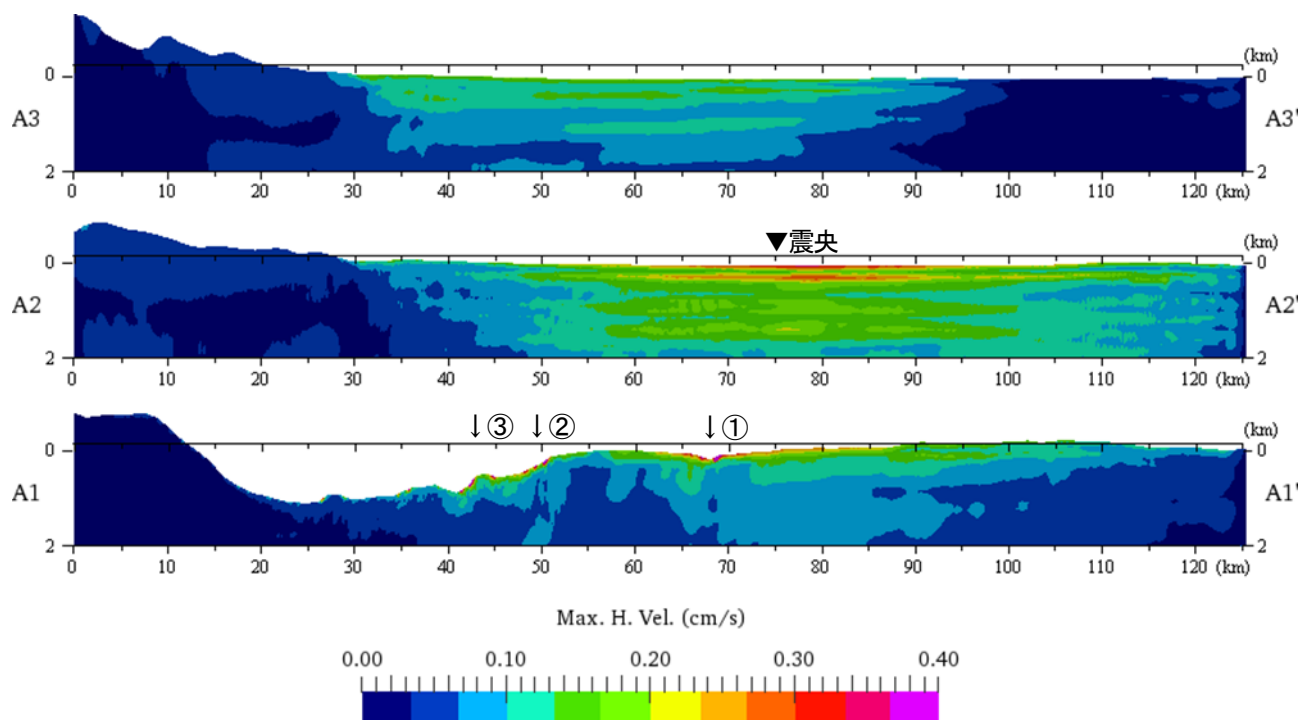


(2) B-B'断面

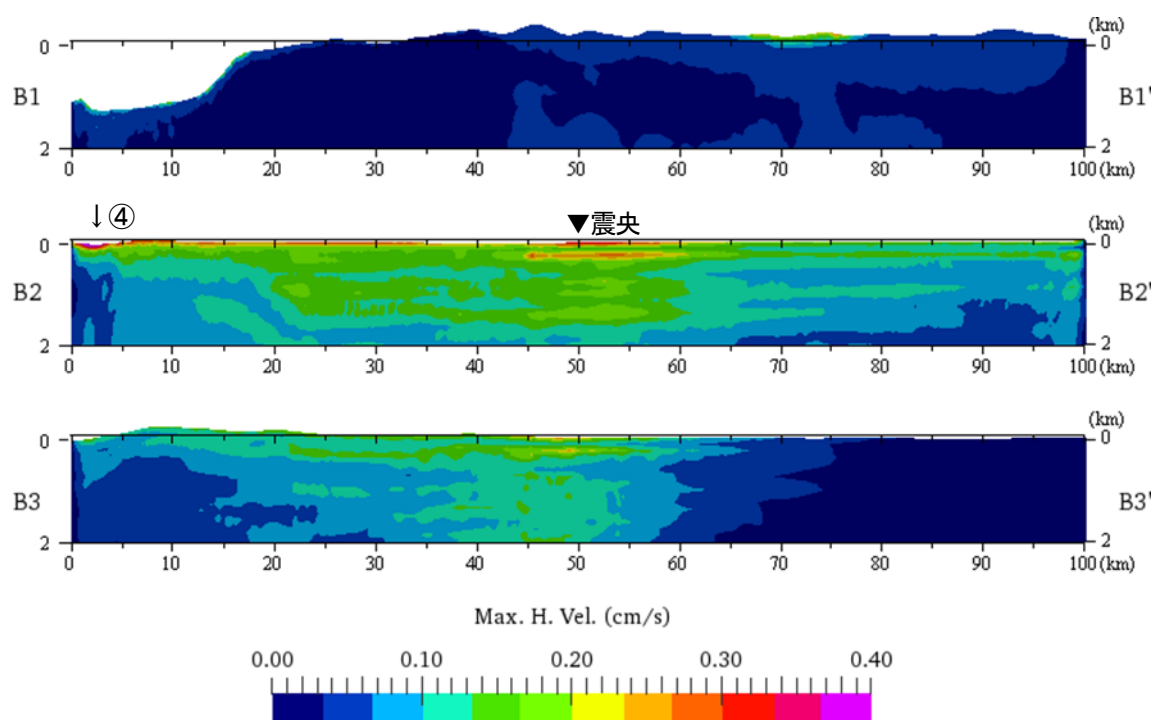
図-7 深さ 0～10km までの鉛直断面の最大水平速度分布

次に、堆積地盤における増幅特性に着目し、図-7の断面図の深さ2kmまでの堆積層部分を拡大したものを図-8に示す。図より、震央付近で振幅が大きくなっているのは当然であるが、震央からある程度距離が離れた位置で、表層付近の振幅が大きくなっている箇所が幾つか見られる。図中のA1-A1'断面内の①の地点では、表層付近の形

状が谷地形になっており、ここでの振幅が大きくなっている。同図内の②および③地点では、傾斜地形で振幅が大きくなっている。更に、B2-B2'断面の④地点も谷地形であり振幅が大きくなっている。以上の結果より、表層付近の地形が谷地形や傾斜地形になっている箇所では、増幅現象が認められた。



(1) A-A'断面

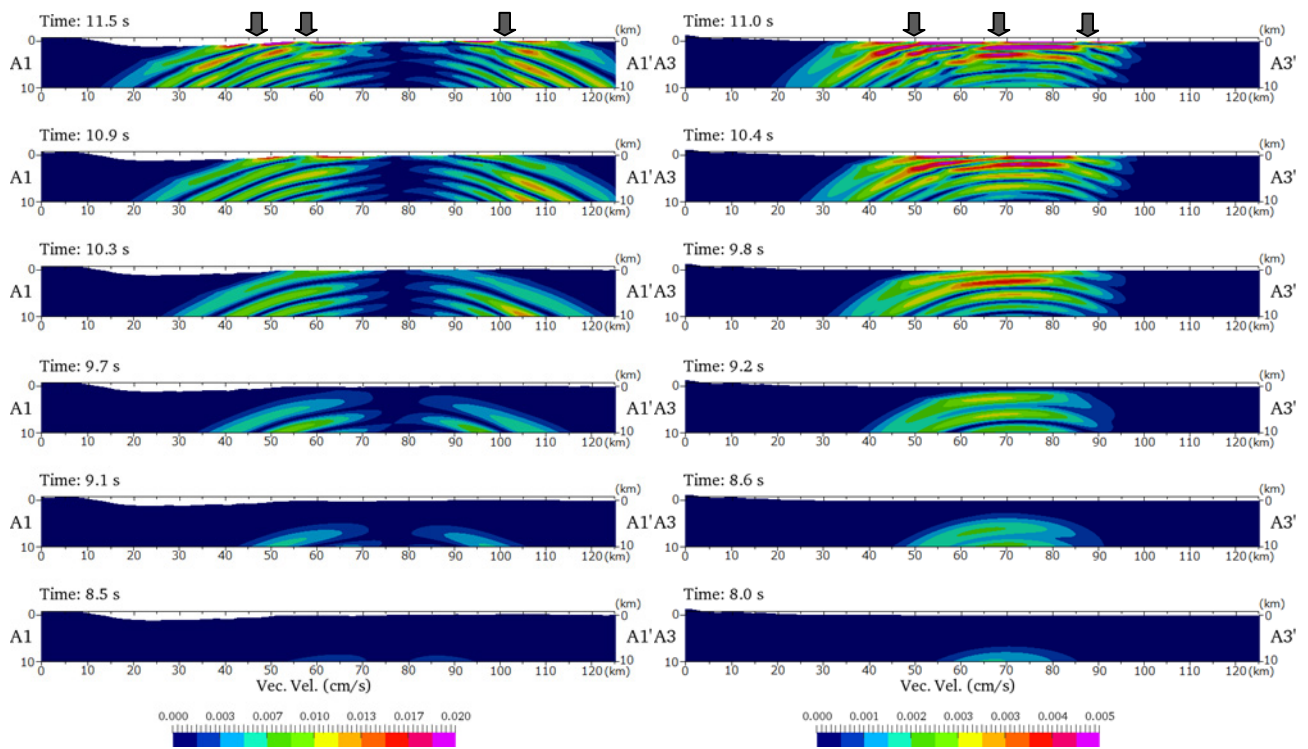


(2) B-B'断面

図-8 深さ 0~2km までの鉛直断面の最大水平速度分布

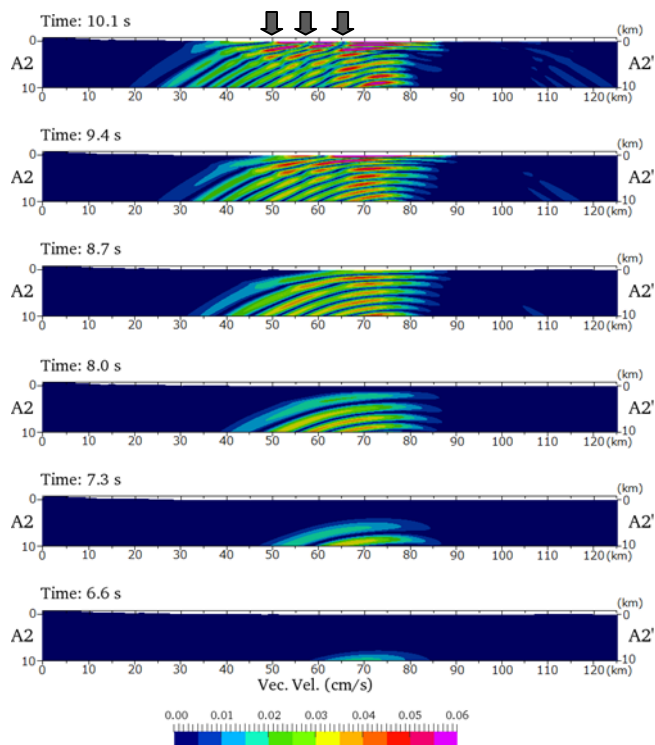
A1-A1' 断面からA3-A3' 断面までの3成分ベクトル合成速度分布の時間断面を図-9に示す。また、B1-B1' 断面からB3-B3' 断面までの3成分ベクトル合成速度分布の時間断面を図-10に示す。図-9および図-10より、対象と

した地震の断層が小さいため、震源で生じた地震波がほぼ球面状に地盤内を伝播している様子が窺える。また、伝播している地震は振幅の大きい部分と小さい部分とが交互に表れ、縞状になっていることが分かる。



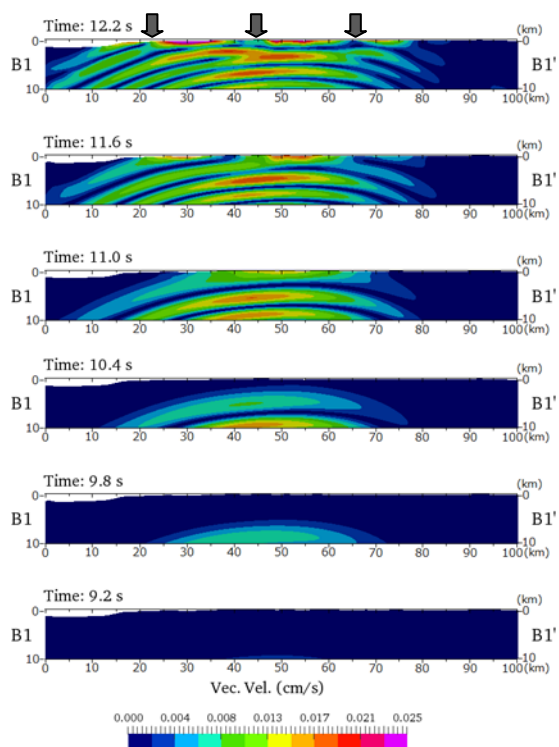
(1) A1-A1'断面

(3) A3-A3'断面

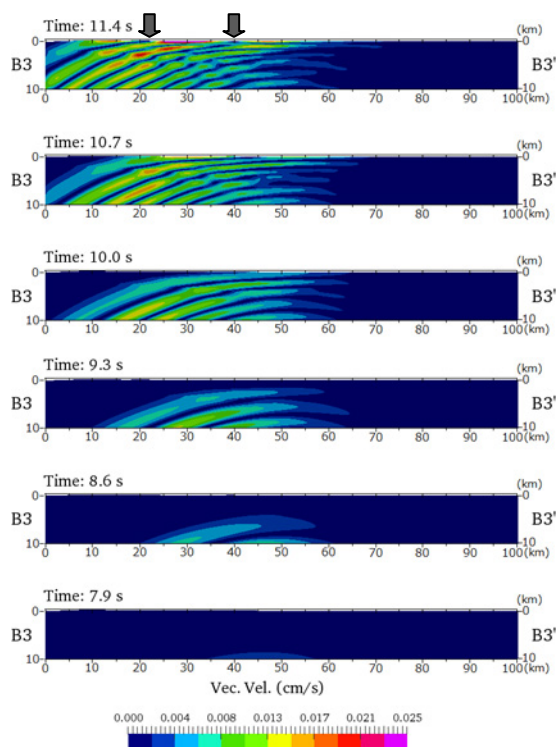


(2) A2-A2'断面

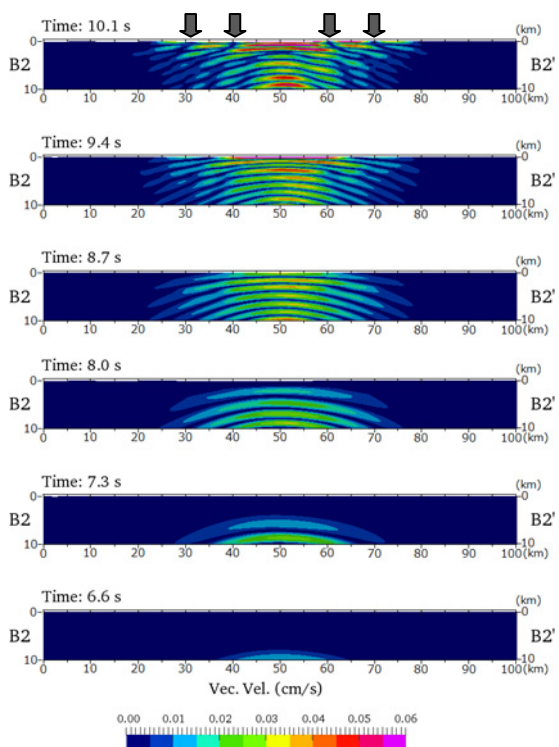
図-9 A-A'断面での3成分ベクトル合成速度分布の時間断面



(1) B1-B'断面



(3) B3-B3'断面



(2) B2-B2'断面

図-10 B-B'断面での3成分ベクトル合成速度分布の時間断面

図-9より、断面ごとに地震波の伝播の様子が異なっている。また、地表付近の堆積地盤内に波が到達すると振幅が大きくなっている様子も観察される。A1-A1' 断面では、東西方向にはほぼ均等に波が伝播している。しかし、A2-A2' およびA3-A3' 断面では、共に西方向に振幅が大きい波の伝播が偏っている。A2-A2' 断面については、これより若干遅れたタイミングで東方向の波が到達するため、最終的な最大値分布では非対称性は生じていない。

B1-B1' 断面からB3-B3' 断面では、東西に位置する両測線の断面で、南方向に振幅の大きい波が偏っている。一方、中心の測線B2-B2' 断面では、ほぼ南北対称に波が伝播している。B1-B1' 断面については、この後に遅れて北方向の波が到達している。

以上より、今回のシミュレーションでは北東方向の地震波が伝播過程で抑制されていることが分かった。この原因として、千葉県北部から茨城県南部のこの領域は平野内に位置しているものの、地震基盤が比較的浅い位置まで隆起していることが影響しているものと思われる。

図-9および図-10より、地震基盤より深い位置で波面はほぼ同心円状に整然と分布しているが、堆積層に入ると波面に乱れが生じて複雑な形状になっていく様子が確認できる。また、このような現象に起因するものか、地表付近では波面を構成する振幅の等値線が破断している箇所（図中の矢印で表示）が複数見られる。これは、主として地表からの反射波との干渉によって引き起こされ、地表付近で地震動が大きくなる部分と打ち消されて小さくなる部分が点在することを意味している。これらが、図-3に示した最大値分布図に見られる斑模様の一因になっているものと考えられる。

5. まとめ

関東地方の工学的基盤上の地震動が地域特性を有する現象のメカニズムを解明することを目的として、3次元の有限要素法によるシミュレーションを実施した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・ 工学的基盤上の地震動の面的分布は複雑な形状を呈することが分かった。
- ・ 工学的基盤の水平面での最大値分布より、地震基盤の深い地域では地震波が大きく増幅しており、浅い地域では増幅が小さいことが分かった。このような地震基盤の深さ分布との対応は、水平成分において顕著である。
- ・ シミュレーション結果の鉛直断面図より、地震波が堆積層内で増幅している様子が観察された。
- ・ 表層付近の地形が谷地形や傾斜地形のところでは、周

辺部よりも増幅作用が大きくなることが分かった。

- ・ 鉛直断面内の地震波伝播過程より、堆積層に地震波が到達すると振幅が大きくなる様子が見られた。
- ・ 鉛直断面内の時間断面図より、東京湾の中心部の震源を発した波が地表に向かって伝播していく過程で、北東方向における地震波が抑制されている傾向が見られた。これは、千葉県北部から茨城県南部の領域で地震基盤が比較的浅い位置まで隆起していることが影響しているものと思われる。
- ・ 工学的基盤上の地震動分布に見られる非均一性は、堆積地盤内での増幅特性に起因することが確認できた。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所のJ-SHISの深部地盤データを使用させて頂きました。また、震源情報には気象庁一元化震源情報を使用させて頂きました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 地震工学委員会 レベル 2 地震動研究小委員会：3.3.2 基準面、レベル 2 地震動研究小委員会の活動成果報告書、p.18, 2000 年。
- 2) 新垣芳一・栗田哲史・安中正・岡田浩士：関東平野周辺の工学的基盤面における揺れやすさ特性のゾーニングに関する一検討、日本地震工学会論文集、第 15 巻、第 7 号、pp.242-252, 2015 年。
- 3) 栗田哲史・新垣芳一：関東地方における地震動地域特性のばらつきに関する基礎的検討、土木学会論文集 A1（構造・地震工学）、Vol.72, No.4, I_1-I_11, 2016 年。
- 4) 額田一：不整形地盤における地震動、土木学会論文集、No.437/I-17, pp.1-18, 1991 年。
- 5) 佐藤俊明・壇一男・Robert W. Grave・Paul G. Somervil：1923 年関東大地震（Ms8.2）の断層の非一様すべり破壊を考慮した 3 次元有限差分法と半経験的方法のハイブリッドによる東京の広域地震動シミュレーション、第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.679-684, 1998 年。
- 6) Iwaki, A., Morikawa, N., Maeda, T., Aoi, S. and Fujiwara, H. : Finite-Difference Simulation of Long-Period Ground Motion for the Sagami Trough Megathrust Earthquakes, Journal of Disaster Research, Vol. 8, No. 5, pp.926-940, 2013.
- 7) 古村孝志：関東平野の深部基盤構造と長周期地震動リスク、地学雑誌、Vol.123, No.4, pp.434-450, 2014 年。
- 8) 董勤喜・柴山恭・吉見顕一郎・坂井公俊・田中浩平・室野剛隆：減衰の設定方法が長周期地震動評価に与える影響：土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、I-433, pp.865-866, 2014 年。
- 9) Matsubara, M. and Obara, K. : The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku earthquake Related to a Strong Velocity

Gradient with the Pacific Plate, Earth Planets Space, 63, pp.663-667, 2011.

- 10) 佐藤智美・巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.15-24, 2002 年.
- 11) 中村洋光・宮武隆：断層近傍強震動シミュレーション

ンのための滑り速度関数の近似式, 地震, 第 53 巻, 第 1 号, pp.1-11, 2000 年.

- 12) 気象庁：平成 27 年 9 月 12 日 05 時 49 分頃の東京湾の地震について, 気象庁報道発表資料, 2015 年.

GROUND MOTION SIMULATION OF KANTO REGION CONSIDERING 3D GROUND STRUCTURE

Tetsushi KURITA, Qinxi DONG and Keiji SATO

It has been thought to exist the site characteristics of strong motions at engineering base layer in Kanto region based on the analysis of seismic observation records obtained from the seismograph stations distributed in the widespread area. That is to say that the feature of seismic ground motions at engineering base layer varies considerably according to location. However, it was just identified from the observation data phenomenologically. The factor affecting site characteristics is still poorly understood. Kanto region is consists of deep soil deposit and surrounding mountains. We think that the site characteristics of strong motion are influenced mainly by the deep ground structure in this region. In this study, numerical simulation of seismic ground motions by using the 3-dimensional finite element method is carried out in order to figure out the mechanism to work with the site characteristics of strong motions at engineering base layer in Kanto region.