関東地方の深部地盤構造が工学的基盤上の 地震動に及ぼす影響

栗田 哲史1·董 勤喜2·吉見 顕一郎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: yoshimi@rccm.co.jp

地震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することが分かってきており, 著者等はこの原因が深部地盤構造と関係があるものと考えて,3次元有限要素法を用いた数値シミュレー ションによる検討を行っている.本研究では観測記録との比較によって数値シミュレーション結果の妥当 性について検討した.ここで,観測記録の再現性向上のために,パラメータ・スタディによる最適な震源 モデルについて検討した.次に,地震動シミュレーション結果に距離減衰補正を行い,空間的な特性を分 析した.このために,対象領域で得られた観測記録を用いて工学的基盤上の地震動の距離減衰特性をモデ ル化して評価に用いた.このような手順によって,関東地方の工学的基盤上の地震動が地域性を生じるメ カニズムについて定量的な検討を行った.

Key Words: ground motion, regional site effect, deep ground structure, 3D FEM simulation, attenuation relation

1. はじめに

関東地方の工学的基盤における地震動が地域性を有し ていることから,著者等¹³はこの原因が深部地盤構造 と関係があるものと考え,数値シミュレーションによる 検討を行ってきている.これまでの検討から,3次元有 限要素法による深部地盤構造のモデル化および数値シミ ュレーションによる解析が可能であることを示してきた. しかし,シミュレーション結果の妥当性検証および深部 地盤構造によって地震動の地域性が生じるメカニズムの 定量的評価が課題であった.

そこで本研究では、はじめに観測記録との比較によっ て数値シミュレーション結果の妥当性について検討した. ここで、観測記録の再現性が向上するように、パラメー タ・スタディを実施して、最適な震源断層モデルについ て検討した.次に、シミュレーション結果の空間的な特 性を定量的に把握するために、距離減衰の補正を行った. 距離減衰の補正を行うために、対象領域で得られた観測 記録を用いて工学的基盤上の地震動の距離減衰特性をモ デル化した. 本論では、上述のような手順によって、関東地方の 工学的基盤上の地震動が地域性を生じるメカニズムにつ いて定量的な検討を行った結果について示す.



2. 解析モデルと計算条件

数値シミュレーションは3次元有限要素法によって行い、震源域から工学的基盤(Vs=500m/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.南 関東の沿岸部から北関東の山地付近までの範囲内で、丹 沢山地、関東山地、足尾山地、筑波山地(八溝山地の南 端)と、それらの山地に囲まれた関東平野をモデル化した.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(Vs=3300m/s) 以深の地盤データはMatsubara and Obara⁴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. 図-2に解析モデルのVs分布図を示す.山地では硬質岩が 露頭している.



図-2 解析モデルの Vs 分布図



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. なお、図-1に示す解析領域の南西端が座標原点である.

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 | 70.0 | 140 | |
| モデル諸元 | | 数量 | |
| 総節点数 | 74,925,547 | | |
| 総要素数 | 6面体:72.508.728/4面体:7.388.080 | | |













走向

傾斜角

すべり角

地震モーメント

| (Nm) | (°) | (°) | (°) |
|-----------------------|-----|-----|------|
| 3.82×10^{16} | 202 | 68 | -137 |

| 地震モーメント | 走向 | 傾斜角 | すべり角 |
|------------------------------------|------------|------------------|------|
| (Nm) | (°) | ([°]) | (゜) |
| (3.82×10 ¹⁶) ×3 | <u>182</u> | 68 | -137 |

表-3 調整後の震源パラメータ



媒質のQ値については、佐藤・巽⁵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⁶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. 深部地盤構造の影響評価

(1) 2015年9月12日東京湾の地震の再現計算

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(Mj52)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⁷⁾. 震源位置情報は気象庁一元化震源情報の値を使用した.

観測記録の再現性を確認した観測地点は、図-3 に示す K-NET の 4 地点である. 震央を中心にして東京側と千葉 側にそれぞれ2地点を選択した.

2015 年 9 月 12 日東京湾の地震の震源メカニズム解は F-net より表-2 のように得られている.対象地震の観測 記録は、図-4 に示す通り既往の検討⁸で得られている平 均的な加速度応答スペクトル比(観測記録/距離減衰式

の推定値)と比較すると大幅に上回っていることが分か る. 各観測地点の応答スペクトル比は、周期1秒付近で 平均値の 2~3 倍程度になっている. これは、当該地震 の震源位置が 56.6km と深いことから、応力降下量が平 均的な地震よりも大きいことが原因と推察される.表-2の地震モーメントをそのまま用いてシミュレーション を行った結果、各観測点で解析値が過小評価になること が分かった.更に、震央である東京湾を挟んだ東京側と 千葉側で、解析値と観測値との振幅の整合性に不均衡が 生じた. そこで, 震源パラメータに関するパラメータ・ スタディを実施して、観測記録が最も良く再現されるよ うな震源パラメータを探索した. ここで、先述の応力降 下量を大きくする効果は、断層面積を一定として地震モ ーメントを増加させて表現した. 各パラメータの探索範 囲は、地震モーメントは F-net の値の 1~3 倍、走向は 182°~222°, 傾斜角は 68°~75°, すべり角は-127°~-147°, とした.

パラメータ・スタディの結果, 表-3 の震源パラメー タを用いた場合に観測記録を最も良く再現できることが 分かった. 各観測地点の工学的基盤における加速度時刻 歴の比較を図-5 に示す. なお,計算値および観測記録 には IHz のローパス・フィルター処理を施している. 両者は良く対応しており,解析モデルおよびシミュレー ション結果の妥当性が確認できた.

(2) 対象地震の距離減衰特性

本研究では、3次元有限要素法による数値シミュレーションによって得られる関東地方の深部地盤構造内における地震動の分布特性を調べるために、シミュレーション結果の地震動に対して距離減衰の補正を行った。そのために、本研究で対象とした2015年9月12日東京湾の地震の距離減衰特性を距離減衰式によってモデル化した.

工学的基盤上の水平2成分の加速度記録を用いて,加速度応答スペクトル(5%減衰)の距離減衰特性の回帰分析を行った.回帰分析では,図-3に示す100地点のK-NETおよびKiK-netの観測地点のデータを使用した.地表の観測記録から工学的基盤波を求める引き戻し計算は,既往の検討[®]で作成した表層地盤モデルを用いて1次元波動伝播理論に基づいて行った.なお,目標として使用した各観測地点の加速度応答スペクトルは,水平2成分の幾何平均値とした.





図-7 工学的基盤波の 5%減衰加速度応答スペクトルの周期別距離減衰特性(2015年9月12日の地震, Mj5.2)



Joyner and Boor⁹を参考に、加速度応答スペクトルの距 離減衰式として、距離減衰項、内部減衰項、定数項から なる次式を考えた.

 $\log Sa(T) = -\log\{r + D(T)\} - B(T) \cdot r + C(T) \pm \sigma(T) \quad (1)$ $\subset \subset \mathcal{C},$

> Sa(T): 5%減衰加速度応答スペクトル (cm/s²)<math>r: 断層最短距離 (km) T: 周期 (s)B(T), C(T), D(T): 回帰係数

$\sigma(T)$:常用対数標準偏差

回帰分析によって得られた回帰係数及び常用対数標 準偏差を図-6 に示す.対象地震は震源が深いため,式 (1)の中の震源近傍での頭打ち項*D*(*T*)は全周期帯で 0.0 となっている.常用対数標準偏差の値は全周期帯で 0.3 以下となっており,十分なばらつきの範囲内に収まって いると言える.

地表で得られた観測記録より算定した工学的基盤波の 加速度応答スペクトルと回帰式による計算値との周期別 比較を図-7に示す.ここで,点は観測値,実線は回帰式 の平均値,破線は回帰式の平均値±標準偏差を表してい る.回帰分析で得られた回帰式による推定値は観測値と 良く対応していることが確認できる.

全観測地点の工学的基盤波の加速度応答スペクトル 比(観測値/計算値)を図-8に示す.特に短周期側では, 地点ごとの加速度応答スペクトル比には大きなばらつき が見られ,工学的基盤上の地震動特性が地域によって大 きく異なることを表している.一方,周期1秒以上では, ばらつきが比較的抑制的である.

(3) 深部地盤における地震動特性評価

前述の検討によって得られた対象地震の距離減衰モデルを用いて,関東地方の深部地盤構造の深さ方向に存在 する各速度境界面における地震動分布を評価した.



図-9 地盤モデルの速度境界における平均応答スペクトル比(FEMシミュレーション結果/距離減衰式推定値) (2015年9月12日の地震,Mi5.2)

評価方法としては、地盤モデルの各S波速度境界面内 の水平2成分の地震動を抽出し、その5%減衰加速度応 答スペクトルを距離減衰式による推定値で除して、距離 減衰補正を施した地震動特性値(応答スペクトル比)を 求めた.

図-9 に地盤モデルの各速度境界における幾何平均応 答スペクトル比を示す. ここで各応答スペクトル比は, FEM によるシミュレーション結果を距離減衰式による 推定値で除した値である. なお、本研究では1秒以上の 長周期成分に着目していることから、応答スペクトル比 を算定した周期帯は1秒~4秒の区間とした、図より、 工学的基盤である Vs が 500m/s の層上面での加速度応答 スペクトル比の幾何平均値は、全周期帯でほぼ1となっ ている.従って、解析領域全域ではシミュレーション結 果の地震動が観測値と平均的に整合していることが確認 できた.次に,S波速度の異なる深部地盤内の地震動に ついては、いずれの速度境界でも全周期帯で平坦な応答 スペクトル比となっており、周期による偏り等は生じて いない.しかし、応答スペクトル比のレベルはS波速度 が大きくなるに従って小さくなっている. これは、各速 度境界面で地震動が増幅していることを示している.本 検討では各速度境界での地震動の増幅については補正を

行っていないため、このような現象が生じている.従っ て、各速度境界面間の比較を行う場合には、地盤の増幅 作用の影響について注意が必要である.

深部地盤モデルの速度境界における応答スペクトル 比の空間分布を図-10 に示す.ここで示している応答ス ペクトル比の値は,周期1秒~4秒までの幾何平均値で ある.各速度境界面で水平方向1km×1km刻みに加速度 時刻歴を出力した.各速度境界面における出力点数は 26,712点である.図中には,各速度境界面の全出力点に 対する幾何平均値も表示している.これらの値は,図-9 の平均値の線の周期軸方向の平均に対応している.図-10の各出力点の値とこの平均値との比較により,着目 する地点の地震動の相対的な大小関係を判断することが できる.

図-9 で述べた通り,図-10 の分布図でも地盤の増幅の 影響から,高速度層の上面ほど応答スペクトル比の値が 小さくなっている様子が見られる.しかし,硬質岩が露 頭している丹沢山地および関東山地では,地震基盤でも 応答スペクトル比の値がほぼ1となっており,低速度層 の上面でも変化していないことが分かる.これは,低速 度層が薄く,地震基盤における地震動がほぼ増幅するこ となく工学的基盤層にまで達していることを表している.



(3) Vs:1500m/sの層上面

(4) Vs:3300m/sの層上面



地震基盤面での地震動の分布特性としては、北東方 向から南西方向にかけての帯状の領域で地震動が相対的 に小さい.この傾向は上部の低速度層でも、その名残が 確認できる.最終的に工学的基盤面では筑波山地の南前 面の常陸台地付近と相模湾岸の江の島付近に殆ど増幅す ることなく凹状の小さい領域が存在している.これらの 領域の応答スペクトル比は 02 以下であり、周辺部と比 較して有意に小さいと言える.これらの領域が震央を中 心とした点対称の位置関係となっていることは興味深い. 工学的基盤上で相対的に地震動が大きくなっている 地域は、①関東山地と足尾山地に挟まれた領域、②足尾 山地と筑波山地に挟まれた領域、③足柄平野、④関東山 地の東側に位置する武蔵野台地付近、⑤房総半島南部の 房総丘陵付近、の5か所である.これらの領域では応答 スペクトル比が1.7以上となっている.これらの地域を 地形と比較すると、①~③は周囲を山地に囲まれた平野 部であり、④~⑤は台地もしくは丘陵地である.

この中で、①関東山地と足尾山地に挟まれた領域につ



図-11 地盤モデルの速度境界の深度分布

いて、地震基盤面では他地域より比較的地震動が小さい 領域であるにも関わらず、工学的基盤面では相対的に地 震動が大きな地域となっている.この特性は、Vs が 1500m/sの層から 900m/sの層への過程で明瞭に表れてい る.図-11 に示す通り、この領域の地下構造は 2 つの山 地に挟まれた谷状であり、その谷状の地形が堆積地盤で 満たされている.この谷形状内に捉えられた地震波が干 渉の繰返しによって増幅されているものと思われる.② 足尾山地と筑波山地に挟まれた領域は、①と同様のメカ ニズムで地震動が大きくなっているものと思われる.し かし、①の方が②よりも地下の谷形状が深いため、明瞭 に現象が表れていると思われる.③足柄平野についても、 前2者と比較すると小規模であるものの地下の谷形状が 影響していると考えられる.④武蔵野台地と⑤房総丘陵 については、共に地下の盆地構造の縁にあたる場所であ る.従って、実体波と盆地生成表面波とが干渉して地震 動が増幅された可能性が考えられる.しかし、同様の盆 地構造の縁はこれら2地域以外にも存在しているにもか かわらず、それらの地域では地震動が大きくなる傾向が 見られない.以上より、④と⑤の地域については、原因 が明確に特定できないが、震源との位置関係や盆地端部 の形状などが影響していることが可能性として考えられ る.

4. 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数値シミュレーションの分析を実施 した.本論では2015年9月12日に発生した東京湾の地 震(Mj52)を対象として、深部地盤構造に着目した検 討を行った.本研究で得られた結論を以下にまとめる.

- 2015年9月12日東京湾の地震の観測記録の分析より、当該地震が関東地方の平均的な地震動と比較して振幅が大幅に大きくなることが分かった。これは、同地震の震源位置が深いことにより、応力降下量が平均的な地震よりも大きいことが原因と考えられる。
- 数値シミュレーションにおいて、震源パラメータに
 関するパラメータ・スタディを実施して、観測記録
 を良く再現する最適な震源モデルを設定した.
- 数値シミュレーション結果の距離減衰特性を補正するために、対象地震の観測記録を用いて、工学的基盤上の地震動の距離減衰モデルを構築した。
- シミュレーション結果の距離減衰特性の補正により、
 深部地盤構造による増幅特性が確認できた.
- 工学的基盤上で特に明瞭な地震動の増幅が表れるのは、関東平野内の5ヶ所である.このうち、3ヶ所は山地に挟まれた領域で地下構造が硬質地盤に挟まれた谷地形になっているところである.残り2ヶ所は台地と丘陵地であり、地下構造が盆地形状の端部に位置するところである.
- 地下構造が谷地形の場所では、その谷形状内に捉えられた地震波が干渉の繰返しによって増幅されているものと思われる。
- 地下構造が盆地構造の縁にあたる場所では、実体波 と盆地生成表面波とが干渉して地震動が増幅された 可能性が考えられる.しかし、同様の盆地構造端部 はこれら2地域以外にも存在しているにもかかわら ず、他地域では地震動が大きくなる傾向が見られな

い.従って、これらの地域については原因が明確に 特定できないが、震源との位置関係や盆地端部の形 状などが影響していることが可能性として考えられ る.

丹沢山地と関東山地については硬質岩が露頭しているため、地震基盤における地震動が増幅することなく工学基盤に伝達してい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 地盤データおよびF-netの地震メカニズム情報を使用させ 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

- 栗田哲史,董勤喜,佐藤慶治:関東地方の工学的基 盤における地震動シミュレーション,pp.325-326, 土木学会 第 71 回年次学術講演会講演概要集,I-163, 2016.
- 2) 栗田哲史,董勤喜,佐藤慶治: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, No.901,第36回地震工学研究発表会講演論文集,土木学会,2016.
- 第田哲史,董勤喜,吉見顕一郎:3次元有限要素法 による関東地方における工学的基盤波の再現計算, pp.893-894,土木学会第72回年次学術講演会講演概 要集,I-447,2017.
- 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.
- 5) 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.
- 6) 中村洋光,宮武隆:断層近傍強震動シミュレーショ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.
- 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
- 8) 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.
- 9) Joyner, W. B. and Boore D. M. : Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 imperial valley, California, earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, No. 6, pp.2011-2038, 1981.

EFFECTS OF DEEP GROUND STRUCTURES ON SEISMIC GROUND MOTIONS AT ENGINEERING BASE LAYER IN KANTO REGION

Tetsushi KURITA, Qinxi DONG and Kenichiro YOSHIMI

According to the analysis of seismic observation records, the site characteristics of strong motions at engineering base layer in Kanto region show the regionality. We have been conducted numerical simulation analyses to understand the reason of this phenomenon. Our tentative view of the reason is due to the amplification effects generated by the deep ground structure. In this study, the validity of 3D FEM numerical simulation was investigated with comparing the calculated results to the observation record. At the same time, parametric study was carried out in order to obtain the optimum source model. Then, the correction of calculated ground motion with respect to distance attenuation was performed to examine the quantitative spatial characteristic of simulation results. The attenuation relation model of ground motions at engineering base layer was developed by using the observation records in the target area. Quantitative investigation with respect to the mechanism to produce the regional site effects on seismic ground motion at engineering base layer in Kanto region was implemented by the process mentioned above.