

広域地盤モデルの評価に向けた 高密度地震観測情報に基づく表層地盤増幅特性の推定

Estimation of site amplification characteristics based on dense ground motion records

15TM0352 東野 晋也
Higashino Shinya

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

The site amplification characteristics are investigated using the ground motion records observed by a real-time earthquake monitoring system, SUPREME (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake). The SUPREME was developed by Tokyo Gas Co., Ltd., and approximately 4,000 spectrum intensity (SI) sensors are deployed in their service area. Tokyo Gas Co., Ltd. gathered borehole information at approximately 60,000 sites, and the amplification factors of SI are estimated. This study evaluates site amplification characteristics using the ground motion records obtained by SUPREME during the 2005 Chiba northwestern earthquake and the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake. Then, the accuracy of geospatial data compiled by Tokyo Gas is discussed.

1. 研究背景と目的

地震動に影響を及ぼす要因の一つである表層地盤の増幅特性は、広域に整備された地盤モデルを用いて表されることもある。その例として、東京ガスでは 2001 年から SUPREME (Super-Dense Real-time Monitoring of Earthquake) と呼ばれるリアルタイム地震防災システムを導入している。これは、高密度に配備された地震計 (SI センサー) により観測された地震記録をもとに、被害の大きい地区の都市ガス供給を停止する仕組みを構築している^{1),2)}。また、センサーのない地域については地震動強さの補間を行い、地震動強さの空間分布を把握する機能を有している。地震動の補間の際には、約 6 万本のボーリングデータと地質分類図をもとに作成された 50m メッシュの広域な地盤データが用いられている。この広域地盤データでは、50m メッシュ単位で地形区分、深さ 20m までの平均 S 波速度 (AVS20)、地盤増幅率、N 値 50 相当の工学的基盤までの深度が整備されている。

首都圏に影響を及ぼすとされる今後発生が危惧されている地震には、首都直下地震や南海トラフを震源とする巨大地震など、主に 2 つの異なるタイプの地震が想定されている。これを踏まえ、本研究では、2005 年千葉県北西部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震を対象に異なるタイプの地震別に表層地盤の増幅特性を推定することで、広域地盤モデルの適用性を多角的に検証することを目的とした。増幅特性を推定するにあたって、2005 年に発生した千葉県北西部地震を対象とした分析では、SUPREME が高密度に観測した地表面地震記録と、強震動計算により求めた露頭工学的基盤波を用いて、表層地盤の増幅特性を推定した。一方、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、首都圏地震観測網 MeSO-net により観測された地中 20m の観測波を水平成層地盤解析プログラム SHAKE によって露頭工学的基盤波へと変換し、SUPREME により観測された地表波と合わせて増幅特性を推定した。

2. 強震動評価手法の概要と K-NET 観測点を対象とした精度の確認

(1) 強震動評価手法について

本研究で用いる強震動計算には、長周期成分は久田の手法^{3),4)}、短周期成分は統計的グリーン関数法^{5),6)}を用いる。計算を行う上では、地震動の短周期成分、長周期成分を別々の手法で計算し、最終的にそれら双方の結果を足し合わせるハイブリッド合成により行う。短周期成分の計算に関しては、統計的震源モデルを用いた統計的グリーン関数法に基づく⁷⁾。長周期成分の計算に関しては、運動力学的モデルにより平行成層地盤を仮定した理論グリーン関数を計算する理論的手法により行う。式(1)に運動力学的モデルの基礎式となる表現定理⁷⁾を示す。

$$U_k(Y; \omega) = \int_{\Sigma} \{ \mu D(e_i n_j + e_j n_i) G_{ik,j}(X, Y; \omega) e^{i\alpha t_r} \} d\Sigma$$
$$(k = x, y, z) \quad (1)$$

ここで、 k, i, j は直交座標系の x, y または z 成分を表し、「 j 」は j 方向の偏微分を意味する。また、 ω は円振動数、指数関数の i は虚数単位、 X は断層面上の点、 Y は観測点、 D は X 点における断層すべり、 Σ は断層面積、 μ はせん断剛性、 e_i はすべりベクトル、 n_j は断層面の単位法線ベクトル、 t_r は破壊開始時間を表し、 $G_{ik,j}$ がグリーン関数と呼ばれる。

統計的グリーン関数法は、主として短周期の強震動に適した手法であり、S 波の遠方近似解と震源モデルに統計的震源モデル (ω^2 モデル) (文献 10, 11) を用いる。一般に、この手法では地震基盤での地震動を求め、1 次元重複反射理論による増幅率を用いて工学的基盤までの地震動を計算する。

(2) K-NET 観測点を対象とした精度の確認

本章では、2005 年千葉県北西部地震を対象に行う。強震

動計算を行うにあたり、精度を確認する際の計算地点と震央の位置を図-1に示す。強震動評価に用いた地盤データは、表層地盤は分析対象とした K-NET 観測点のボーリングデータを、工学的基盤以深の地盤モデルについては地震調査研究推進本部による長周期地震動予測地図 2009 年度試作版を用いた。これらはすべてベンチマークテストを参考に、その基本モデルに準拠している⁴⁾。

本研究の強震動計算の精度を評価するために、加速度波形と減衰定数 5%の加速度応答スペクトルを用いて、観測波形と計算結果の比較を行った。ここで地表面の地震動を計算する際には、既往研究⁴⁾に従い工学的基盤以深の地盤モデルに K-NET のボーリングデータを接続して、表層地盤の増幅特性を考慮した。図-2に計算地点全 11 地点のうちの 1 点 (KNG002) における加速度波形と減衰定数 5%の加速度応答スペクトル (水平 2 成分の合成値) を示す。これらより、観測波形に比べ計算結果は、EW 成分に比べて NS 成分がとくに過小であるが、加速度応答スペクトルを比較すると、全体的な周期特性は概ね捉えられていることが確認できた。

3. SUPREME 地表観測記録と強震動評価結果を用いた地盤増幅特性の評価

(1) フーリエ振幅比を用いた増幅特性の推定

本研究は、SUPREMEが搭載する広域地盤データの評価を目的としている。そこで、SUPREMEの地震観測点に点について、強震動評価手法によって千葉県西北部地震の際の工学的基盤における地震動 (露頭波) を推定し、これと SUPREMEにより観測された地表面地震観測記録を比較することで、表層地盤の増幅特性を評価する。

SUPREME の地表面観測記録と強震動評価手法によって得られた工学的基盤における加速度記録を用いて、バンド幅 0.2Hz の Parzen ウィンドウ⁸⁾で平滑化したフーリエスペクトル (水平 2 成分の合成値) を算出し、その振幅比を計

算した。ここで、強震動評価の際の工学的基盤は、S 波速度が 500m/s の地層とした。

(2) 1 次元地盤震動解析を用いた増幅特性の検討

SUPREME の地表観測記録と強震動計算により推定された工学的基盤における加速度波形のフーリエ振幅比を、広域地盤データをもとに算出される伝達関数と比較する。SUPREME に搭載されている広域地盤データには、AVS20 のほかに表層地盤の卓越周期に相当する特性値 (T_g)、および N 値 50 相当の工学的基盤までの深さ (H_{Tg}) がある。これを用いて、図-3に示すような 1 次元地盤モデルを作成し、地盤震動解析によって伝達関数を推定した。仮定した地盤モデルは、 H_{Tg} が 20m より浅いか深いかによって 2 つのパターンを仮定した。また、減衰定数については、理論伝達関数のピーク値が観測スペクトル比のピーク値に一致するように、10%から補正し定めた⁹⁾。

(3) SI 値増幅度による評価

SUPREME の広域地盤データには、約 6 万本のボーリングデータを用いて評価した深さ 20m までの地盤の平均 S 波速度 (AVS20) が 50m メッシュごとに搭載されている。また、これより式 (2) を用いて SI 値の地盤増幅率 (AF_{SI}) が推定される¹⁰⁾。

$$\log AF_{SI} = 2.18 - 0.785 \log AVS_{20} \quad (2)$$

なお、この式 (2) による東京ガスの地盤増幅率は、AVS20 が 600m/s のときに地盤増幅率が 1.0 となるように定められている。本研究において強震動計算を行った際、増幅率の基準点となる工学的基盤の最上層は S 波速度が 500m/s の地層としている。よって、式 (2) の切片を調整した式 (3) を用いて、両者の基準を揃えることとした。

$$\log AF_{SI} = 2.12 - 0.785 \log AVS_{20} \quad (3)$$

また、SUPREME の地表観測波と強震動計算より推定した露頭工学的基盤波より SI 値を求める際は、式 (4) を用いる。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv \cdot dT \quad (h=0.2) \quad T: \text{固有周期(s)} \quad (4)$$

h : 減衰定数

よって、地表観測波と強震動計算より推定された工学的基盤 (露頭) 波の SI 値の比をこの分析において推定された SI 値増幅度とし、式 (3) から推定される値と比較する。また、系統を立てて整理するため、東京都地域危険度測定調査で用いられている地盤種別¹¹⁾を考慮し結果をまとめた。



図-1 計算対象の K-NET 観測点と震央位置

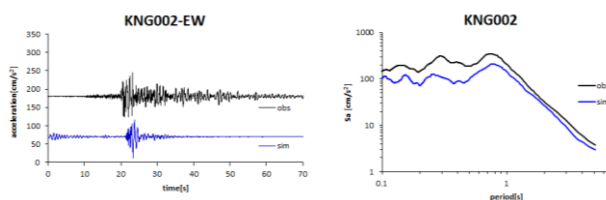


図-2 K-NET 観測点を対象とした加速度波形と加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) の比較 (黒線: 観測波形, 青線: 計算結果)

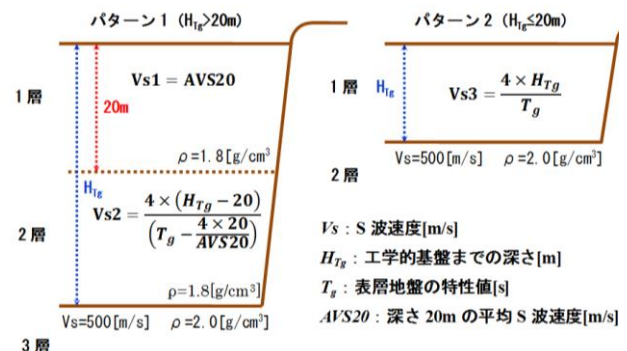
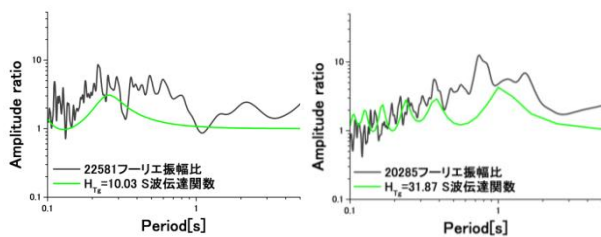
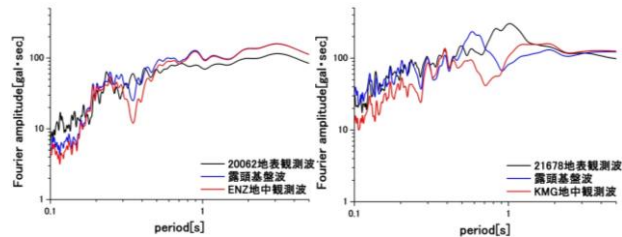


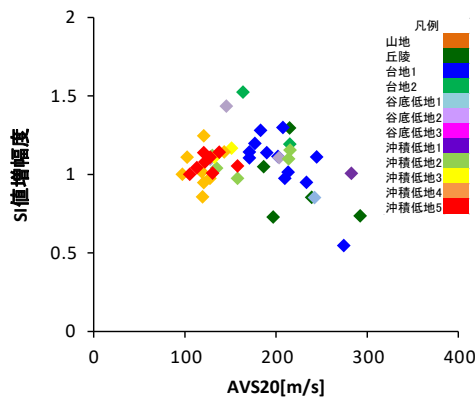
図-3 仮定した 1 次元地盤モデル



(a) フーリエ振幅比と伝達関数の比較



(a) フーリエスペクトルの比較



(b) AVS20 と SI 値増幅度の比較

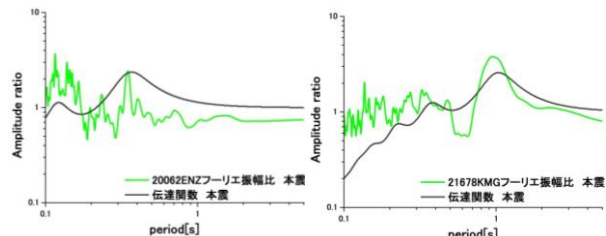
図-4 千葉県北西部地震を対象とした分析結果

図-4 (a) にフーリエ振幅比と伝達関数を比較したもの、図-4 (b) に AVS20 と本分析で推定された SI 値増幅度の関係を示す。本分析で得られた結果では、丘陵と台地の分析地点の多くで、既往の SI 値増幅度と近い値を示した。一方、沖積低地では多くの地点において推定された増幅度は過小なものとなった。図-4 (b) を見ると、沖積低地 3~5 を除いた地点では、おおよそ負の相関が確認できる。図-4 (a) の伝達関数とフーリエ振幅比の比較を見ると、台地 1 の観測点ではフーリエ振幅比と伝達関数の形状はよく一致した。一方、沖積低地 4 の観測点では、高次ピークに差が見られた。これより、深さ 20m の平均 S 波速度では高次モードの周期特性を捉えることは難しいが、マクロに震動特性を把握するには有用であると考えられる。

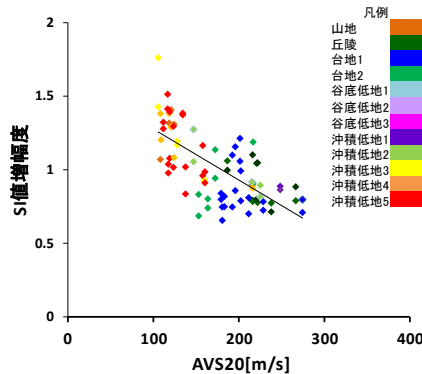
4. MeSO-net 地中観測記録を用いた地盤増幅特性の検討

(1) MeSO-net による地中観測波を用いた工学的基盤（露頭）波の推定

異なる地震タイプのときの地盤増幅特性を評価するため、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震の本震および最大余震について、首都圏地震観測網（MeSO-net）¹²⁾ で得られた地中観測記録（深さ 20m）を用いて、露頭工学的基盤波の推定を行った。MeSO-net と SUPREME の観測記録を用いた同様の研究として、猪股ら（2013）¹³⁾ によるものが挙げられる。しかし、地中で観測される地震波は、上昇波と地表面で反射した下降波が打ち消し合い小さくなる¹⁴⁾。このため、地中波を基準としたフーリエ振幅比は、露頭を基準とした場合と比べて大きくなる。そこでこの分析では、MeSO-net により観測された地中波を、水平成層地盤解析プログラム microSHAKE/3D（以下 SHAKE）を用いた線形地盤応答解析により、露頭工学的基盤波に変換する。これによって、地表面における地震動の反射波の影響を取り除くとともに、深さ 20m での実測値をもとに工学的基盤におけ



(b) フーリエ振幅比と伝達関数の比較



(c) AVS20 と SI 値増幅度の関係

図-5 東北地方太平洋沖地震を対象とした分析結果

る地震動として推定することで、増幅度をより高度に評価することを目指した。

線形解析を行うにあたっては、3 章にて伝達関数を算出した時と同様に、SUPREME に搭載されている広域地盤データを用いて 1 次元地盤モデルを仮定した。推定された工学的基盤（露頭）波と入力動とした MeSO-net の地中観測波及び SUPREME の地表観測波のフーリエスペクトルを図-5 (a) に示す。

(2) 東北地方太平洋沖地震を対象とした表層地盤増幅特性の推定

東北地方太平洋沖地震を対象として表層地盤の増幅特性を推定するために、既往研究¹³⁾を参考に分析地点を選定した。この地点は、SUPREME の地表観測点と MeSO-net の地中観測点それぞれについて、東京都地域危険度測定調査で用いられている地盤種別¹¹⁾と距離を考慮し、ペアとして 1 つの分析地点と選定されている。そして、SHAKE によって推定された工学的基盤（露頭）波を用いて、SI 値増幅度と PGV 増幅度、フーリエ振幅比を算出する。さらに、SUPREME に搭載されている広域地盤モデルより算出される伝達関数の形状と AVS20 より推定される SI 値増幅度を併せて比較することで、広域地盤モデルの妥当性を評価する。なお、SUPREME の広域地盤データである AVS20 から

推定される SI 値増幅度については、3 章において記したとおりであるが、この地震を対象とした分析では、工学的基盤の S 波速度を 600m/s と仮定したため、式 (2) のまま用いることとした。

(3) SI 値増幅度および伝達関数とフーリエ振幅比との比較

図-5 (b) は、東北地方太平洋沖地震本震時における台地 1 及び沖積低地 5 に設置されている SUPREME 観測点の S 波伝達関数と、本研究で得られた露頭工学的基盤波と SUPREME の地表観測波とのフーリエ振幅比を比較したものである。また、図-5 (c) は推定された SI 値増幅度と AVS20 の関係を表したものである。

結果について、図-5 (a) のフーリエスペクトルと併せて考察する。丘陵、台地における結果では、多くの地点で伝達関数とフーリエ振幅比の周期特性は概ね一致しているものの、SI 値増幅度は、AVS20 より推定される値と比べて、本研究の推定結果は過小なものとなった。この原因について 20062/ENZ を例に考察すると、地表観測波と工学的基盤波のフーリエスペクトルの卓越周期がどちらも 1.0s よりも長いことが分かる。また、その卓越周期も含め長周期帯域で地表観測波を工学的基盤波が上回っていることが共通している。

沖積低地における結果については、沖積低地 3 から沖積低地 5 の多くの分析地点で、周期に対し広帯域にわたってフーリエ振幅比と伝達関数は良好に一致していた。また、SI 値増幅度については、多くの地点で SUPREME の広域地盤データより得られる増幅度と近い値を示した。

4. 結論

本研究では、SUPREME に搭載されている広域地盤データの妥当性について、首都圏で高密度に観測された地震記録を用いて検討した。この際、首都直下地震と南海トラフを震源とする巨大地震のようなタイプの異なる地震を想定して、これに近い実地震記録を対象に分析を行った。

2005 年千葉県北西部地震を対象とした分析では、地表面地震記録が得られている地点について、強震動計算を用いてその直下の工学的基盤（露頭）波を推定した。さらに、これに基づき表層地盤の増幅特性を推定し検討を行った。推定された SI 値増幅度を SUPREME の広域地盤データより推定されるものと比較すると、丘陵、台地の多くの分析地点で、これに近い増幅度を得ることができた。一方、沖積低地については、推定された SI 値増幅度は過小なものとなったが、フーリエ振幅比と SUPREME の広域地盤データに基づく伝達関数を比較したところ、広域についてマクロに震動特性を把握するには有用なデータであることが確認できた。また、この分析で得られた増幅度は強震動計算の精度に依存するものとなった。他の手法を用いることにより、より高度な評価をすることが期待できると考えられる。

2011 年東北地方太平洋沖地震を対象とした分析では、首都圏地震観測網（MeSO-net）による地中地震動記録と SHAKE による地盤震動解析を用いて同様の評価を行った。その結果、沖積低地の多くの地点で SUPREME の広域地盤データより得られる増幅度と近い値を得ることができ、フーリエ振幅比の形状は伝達関数とよく一致した。これより、SUPREME の広域地盤データは、広帯域にわたって地盤の増幅特性を把握するのに有用なものであることが確認できた。一方、丘陵や台地の地点では、その多くで推定された SI 値増幅度は過小なものとなり、地表波と工学的基盤波の

フーリエスペクトルを比較したところ、4.0s 程度の長周期帯で卓越していることが確認できた。このことから、東北地方太平洋沖地震のようなマグニチュードが大きく、長周期成分が卓越した地震動において、増幅特性を十分に説明できない場合があると考えられる。

この両結果を踏まえ、本研究では、増幅特性を評価する地盤の性質ごとに分析対象に用いる震源タイプを考慮することで、高度かつ多角的な評価が可能であることを示せた。

参考文献

- 1) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Isoyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K., and Nakayama, W.: Development of real-time control system for urban gas supply network, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 2) 猪股渉, 乗藤雄基, 石田栄介, 塚本博之, 山崎文雄: 東日本大震災における東京ガスの設備被害の概況と超高密度観測情報に基づく低圧ガス導管被害推定の精度検証, 日本地震工学会論文集, Vol. 13, No. 2, pp. 37-44, 2013.
- 3) 久田嘉章: 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, No. 501, pp. 49-56, 1997.
- 4) 石川理人, 久田嘉章, 永野正行, 中川博人, 早川崇, 河路薫, 野畑有秀, 眞鍋俊平, 長坂陽介, 山本優: 首都直下地震を対象とした強震動予測手法に関するベンチマークテスト その 1 千葉県北西部地震を対象とした観測記録との比較, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1931-1940, 2014.
- 5) Boore, D.M.: Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions based on Seismological Models of Radiated Spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
- 6) 釜江克弘, 入倉孝次郎, 福知保長: 地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 430 号, pp.1-9, 1991.
- 7) 西川孝夫, 荒川利治, 久田嘉章, 曾田五月也, 藤堂正喜, 山村一繁: 建築の振動 応用編, 朝倉書店, 2008.
- 8) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 9) 國生剛治, 佐藤克晴, 長尾晋悟: KiK-net 地震記録を用いた基盤から地表への震動増幅評価法, 日本地震工学会論文集, Vol. 8, No. 2, pp. 16-31, 2008.
- 10) 丸山喜久, 伏岡里志, 山崎文雄: 東京都地域危険度測定調査における地盤増幅率の再評価, 地域安全学会論文集, No. 16, pp. 21-29, 2012.
- 11) 東京都都市整備局: 地震に関する地域危険度測定調査 (第 7 回), 2013.
- 12) 笠原敬司, 酒井慎一, 森田裕一, 平田直, 鶴岡弘, 中川茂樹, 楠城一嘉, 小原一成: 首都圏地震観測網 (MeSO-net) の展開, 東京大学地震研究所彙報, Vol. 84, pp. 71-88, 2009.
- 13) 猪股渉, 乗藤雄基, 大田肇士, 丸山喜久: 超高密度地震観測情報に基づく地盤震動特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 70, No. 4, pp. I_187-I_198, 2014.
- 14) 日本建築学会: 地盤震動-現象と理論-, 丸善株式会社, 2005.