

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

Evaluation of Site Amplifications in the Survey of District-based Vulnerability to Earthquake Disaster Performed by Tokyo Metropolitan Government

丸山 喜久¹, 伏岡 里志², 山崎 文雄¹Yoshihisa MARUYAMA¹, Satoshi FUSHIOKA² and Fumio YAMAZAKI¹

¹ 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻
Department of Urban Environment Systems, Chiba University

² 東京消防庁 (元 千葉大学学生)
Tokyo Fire Department (Former Student, Chiba University)

In the survey of district-based vulnerability to earthquake disaster performed by the bureau of urban development, Tokyo Metropolitan Government in 2008, the site amplifications were defined for 10 soil classes. The bureau of urban development revised the soil classes in 2011 and the number of soil classes is 12 at this moment. Therefore, the site amplifications with respect to the soil classes are also reevaluated in Tokyo Metropolis. In this study, the site amplification characteristics in Tokyo Metropolis are evaluated using the recent seismic records observed in SUPREME network and the spatial geomorphologic dataset developed by Wakamatsu et al. and that by Tokyo Gas Co., Ltd.

Keywords: site amplifications, district-based vulnerability to earthquake disaster, SUPREME, spatial geomorphologic dataset

1. はじめに

東京都では、東京都震災対策条例の規定に基づき、地域危険度測定調査を概ね5年ごとに行い、その結果を公表している。2008年2月に公表した第6回調査の内容は、建物倒壊危険度、火災危険度、および総合危険度を町丁目ごとに評価している¹⁾。この調査は、地震に強い都市づくりの指標にする、震災対策事業を実施する地域を選択する際の参考にする、地震災害に対する都民の認識を深め防災意識の高揚に役立てることを目的としている。

建物倒壊危険度は、地震動に起因する建物被害の発生による危険性を評価する指標値で、地震発生時の建物被害量を地域間で相対評価するものである¹⁾。建物倒壊危険度は、地盤特性と建物属性のそれぞれの組み合わせを考慮して算出されている。地盤特性は、地震工学的基盤に入射する地震動の最大速度の増幅率を用いて考慮されている。2002年12月公表の第5回調査²⁾では、地盤の増幅率は大西らの国土数値情報をもとにした地形・地質11分類の地盤増幅率³⁾と東京都内の最大震度が2~4の8地震の記録を参考にして求められているが、強震時の地盤増幅特性を適切に示しているかは疑問が残る。

丸山・山崎⁴⁾は、東京ガス(株)のリアルタイム地震防災システムSUPREMEの観測記録を用いて、東京都の地盤分類ごとの増幅特性を検討しているが、ここでは揺れやすさの相対的な評価にとどまっている。SUPREMEでは、東京ガスの供給エリアで約4000のSIセンサーを地区ガバナ等に配備し、モニタリングしているので、東京都で高密度に地震記録を得ることが期待できる。さらに、地震防災対策を目的とした広域地盤データの整備も進んでいる。若松ら⁵⁾は、1995年の兵庫県南部地震をきっかけとして、大規模災害等の広域ハザード・リスク評価には、

全国を統一基準で作成した地盤特性データベースの構築が急務であると考え、我が国初の統一的な地形・地盤特性のGISデータベースを基準地域メッシュ(約1km四方)単位で作成した。その後、空間解像度のより高い1/4地域メッシュ(約250m四方)ごとの地形・地盤特性データベースを構築してきた⁶⁾。このGISデータベースを用いて、松岡ら⁷⁾は、深さ30mまでの地盤の平均S波速度(AVS_{30})と微地形区分の関係を評価し、広域の AVS_{30} 分布マップを作成しており、地震ハザードステーション(J-SHIS)⁸⁾にて公開されている。東京ガスのSUPREMEでは、供給エリア内の6万本のボーリングデータを整理し、N値から換算したS波速度をもとに深さ20mまでの地盤の平均S波速度(AVS_{20})およびそれから推定される地盤増幅率を50mメッシュ単位で搭載している^{9), 10)}。これらの地盤増幅率は、東京都が地盤増幅率を規定する際に用いている地震動記録のデータセットと比べて、多数かつ規模の大きな地震の震動記録から推定されている。したがって、このような広域地盤データから推定される地盤増幅率も、東京都全域を均質なデータで評価できるという点で有用と考えられる。

そこで、本研究では、J-SHISとSUPREMEに搭載されている広域地盤データとSUPREMEによって観測された高密度な地震記録を用いて、東京都地域危険度測定調査で用いられる地盤増幅率の再評価を試みる。東京ガスのSUPREMEは2001年から稼働しているが、SUPREMEで観測されているマグニチュード(M)6.0以上の地震は2004年新潟県中越地震、2005年千葉県北西部地震などそれほど多くはない。本研究では、2010年までにSUPREMEで観測されているM6.0以上の地震のSI値を強震動記録とし

表 1 東京都地域危険度測定調査（第 6 回）の地盤分類と地盤増幅率

| No. | 分類 | 地形・地質の特徴 | 増幅率 |
|-----|--------|---|-----|
| 1 | 山地・丘陵 | おもに丘陵地・一部に山地を含む | 1.2 |
| 2 | 台地 1 | 河成礫層の上に関東ローム層をのせる台地（武蔵野・山の手台地の西側にあたる） | 1.6 |
| 3 | 台地 2 | 海や河口付近に堆積した粘土・砂層の上に関東ローム層をのせる台地（山の手台地の東縁にあたる） | 1.7 |
| 4 | 谷底低地 1 | 軟弱な沖積層の厚さが 10m 程度以上 | 2.9 |
| 5 | 谷底低地 2 | 軟弱な堆積層の厚さが 10m 程度未満 | 2.5 |
| 6 | 沖積低地 1 | 沖積層が主に河成礫からなるところ（多摩川の中流域） | 1.5 |
| 7 | 沖積低地 2 | 軟弱な沖積層の厚さが 10m 未満 | 2.3 |
| 8 | 沖積低地 3 | 軟弱な堆積層の厚さが 10m 以上 25m 未満 | 2.6 |
| 9 | 沖積低地 4 | 軟弱な堆積層の厚さが 25m 以上 40m 未満 | 2.9 |
| 10 | 沖積低地 5 | 軟弱な堆積層の厚さが 40m 以上 | 2.9 |

て分析に用いる。これらの地震の観測値のいくつかは、東京都地域危険度測定調査が前提とするような強震動とは言い難い場合もあるが、広域地盤データから推定される地盤増幅率を併せて分析することでこの点を補完する。東京都が現在進めている第7回地域危険度測定調査は、2010年までの地盤増幅率の検討結果を受けて、建物倒壊危険度等の評価へと進んでいる。そのため、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震はSUPREMEによって強震動を高密度に観測することができたが、その影響を加味することはできなかった。そのため本研究では、東北地方太平洋沖地震のSI値についても同様に分析し、提案した地盤増幅率と比較する。さらに、今回の地震記録の分析結果をふまえて、東京都の地盤増幅率を定める際の今後の検討すべき課題を提示する。

2. 東京都の地盤分類と地盤増幅率の基準点

2008 年にとりまとめられた地震に関する地域危険度測定調査（第 6 回）では、地形・地質の特徴に基づき、10 種類の地盤分類が定義されている¹⁾。地盤分類の定義を表 1 に示す。また第 6 回調査で用いられた最大速度 (PGV) の地盤増幅率を表 1 に併記する。東京都全域の町丁目ごとに 10 種類の地盤分類が割り当てられている。

第 6 回測定調査で使用された地盤増幅率は、第 5 回測定調査²⁾時の増幅率をもとに、2004 年新潟県中越地震での観測値等を考慮して定められている¹⁾。第 5 回測定調査報告書²⁾によると、もともとの東京都の地盤増幅率は、東京都内の最大震度が 2~4 の 8 地震の記録に関して

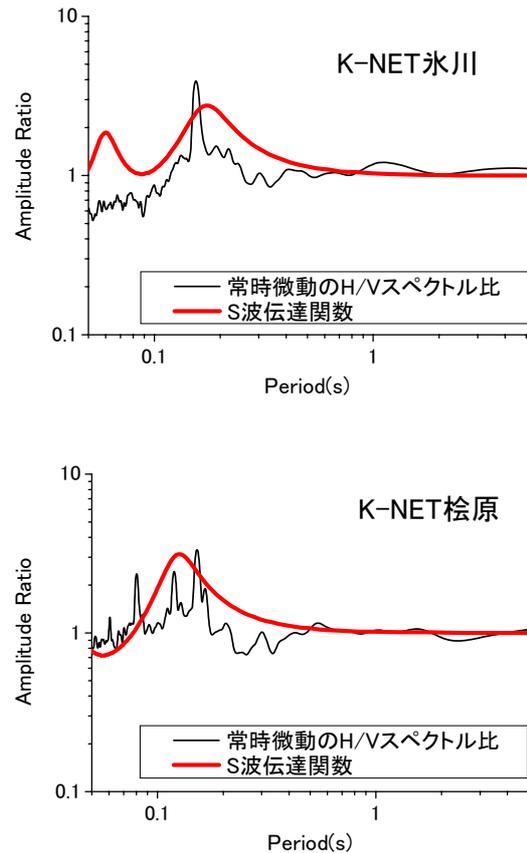


図 1 K-NET 氷川, K-NET 検原における常時微動の H/V スペクトル比と S 波伝達関数の比較

表 2 K-NET 氷川, K-NET 検原における AVS₂₀ と AVS₃₀

| 地点 | AVS ₂₀ (m/s) | AVS ₃₀ (m/s) |
|----------|-------------------------|-------------------------|
| K-NET 氷川 | 402 | 471 |
| K-NET 検原 | 402 | 457 |

PGV の距離減衰式¹¹⁾を構築し、そこから得られる地震観測点の地点係数を用いて推定している。その際に、地盤増幅率の基準点 (増幅率 1.0) は、地点係数が比較的小さかった K-NET 氷川 (TKY001) と K-NET 検原 (TKY002) としている。

そこで、K-NET 氷川, K-NET 検原の両地点において、常時微動観測を実施し、H/V スペクトル比¹²⁾を算出した。30 秒間の 3 成分 (EW, NS, UD) の速度波形 10 区間について、バンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウ¹³⁾で平滑化したフーリエ振幅 $F(f)$ を求め、H/V スペクトル比 $R(f)$ を算出した。図 1 には、両地点の常時微動の H/V スペクトル比の平均値を示す。なお、水平 2 成分は、式[1]のように合成した。

$$R(f) = \sqrt{F_{EW}(f)F_{NS}(f)} / F_{UD}(f) \quad [1]$$

公開されている S 波速度、密度などの地盤データ¹⁴⁾を用いて 1 次元地盤震動解析を行い、露頭基盤に対する S 波伝達関数を算出した。なお、ここでは公開されている地盤データの最下層が半無限に続いているものと仮定して解析を行っている。工学基盤の減衰定数は 1%、その他の層は 2% と仮定した。図 1 に、常時微動の H/V スペ

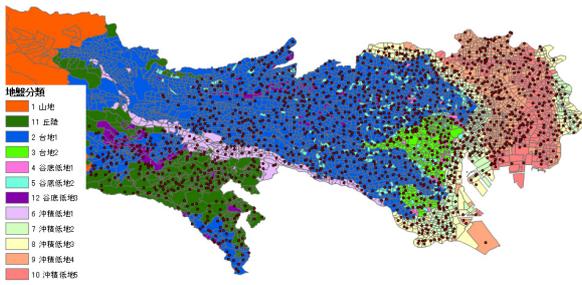


図2 第7回地域危険度測定調査に用いる地盤種別と東京ガスSIセンサーの配置図

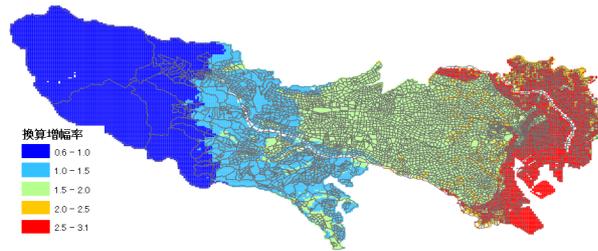


図3 J-SHISのAVS₃₀分布から推定したS波速度500m/sの地層を基準とする地盤増幅率

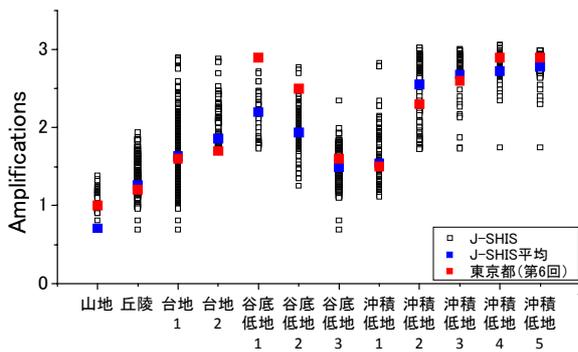


図4 東京都地盤増幅率(第6回)とJ-SHISより推定される増幅率の比較

クトル比とS波伝達関数を比較する。これによると、既往の研究で指摘されているように、S波伝達関数のピーク周期と常時微動のH/Vスペクトル比のピーク周期がほぼ一致していることから、本研究で用いた地盤モデルは概ね妥当であると考えられる。そこで、K-NET氷川、K-NET桜原について、式[2]、[3]のようにAVS₃₀、AVS₂₀を算出した。ただし、H_iは第i層の層厚、V_{si}は第i層のS波速度、nは層数を表す。

$$AVS_{30} = 30 / \sum_{i=1}^n (H_i / V_{si}) \quad [2]$$

$$AVS_{20} = 20 / \sum_{i=1}^n (H_i / V_{si}) \quad [3]$$

表2に、K-NET氷川、K-NET桜原で推定されたAVS₂₀とAVS₃₀を示す。この結果、東京都の地域危険度測定調査で増幅率の基準点のAVS₃₀は約500m/s、AVS₂₀は約400m/sと推定される。

東京都では、第7回地域危険度測定調査を実施するにあたり、地盤分類の区分を見直している。第6回測定調

査で山地・丘陵に分類された町丁目を山地と丘陵に分離する。台地1と台地2の区分を見直し、とくに本郷台の部分は地質年代的にも地盤物的にも台地1が妥当と考えられるため、台地2から台地1に変更する。谷底地形の分布が十分に現されていないため、谷底低地1と谷底低地2の分布を見直す。さらに、ボーリングデータや土地条件図の微地形区分などから軟弱層厚をもとに谷底低地を3分類とし、谷底低地1は、軟弱層の厚さが8m以上、谷底低地2は3m以上8m未満、谷底低地3は3m未満とする。第7回地域危険度測定調査で使用される東京都の地盤分類を図2に示す。また、図2には、後述の検討で用いる東京都における東京ガス(株)のSIセンサーの位置も併せて示す。

3. 広域地盤データを用いた地盤増幅率の評価

(1) J-SHISのデータとの比較

地震ハザードステーション(J-SHIS)は、地震調査研究推進本部地震調査委員会により公表された「全国地震動予測地図」を、よりわかりやすくウェブ上で閲覧することができるシステムとして運用されている⁸⁾。さらに、地震動予測に用いられた表層地盤データや深部地盤モデル等も併せて公開されている。

J-SHISで公開されている表層地盤の増幅率は、250mメッシュごとに日本全国について評価されている。松岡ら⁷⁾が作成したAVS₃₀の分布と藤本・翠川¹⁵⁾の構築したAVS₃₀とPGVの増幅率(AF_{PGV})の関係式によって推定される地盤増幅率がダウンロード可能である。この地盤増幅率の基準(AF_{PGV} = 1.0)は、S波速度400m/sの地層としている。前章で述べたとおり、東京都の地盤増幅率の基準点におけるAVS₃₀は約500m/sと推定されるため、両者を比較するためには、増幅率の基準を揃える必要がある。そこで、藤本・翠川¹⁵⁾のAVS₃₀とAF_{PGV}の関係式の切片を調整し、AVS₃₀が500m/sのときにAF_{PGV}が1.0となる式[4]を用いてJ-SHISの地盤増幅率を換算した。なお、藤本・翠川¹⁵⁾はAVS₃₀とAF_{PGV}の関係式を構築する際に、2000年から2003年に発生したモーメントマグニチュード(Mw)6.1~7.9の5地震の観測記録を使用している。第5回調査時に使用された地震記録²⁾よりも地震動強さの大きな記録を多数含んでいることから、地盤増幅率の見直しの際の比較対象として妥当なものと考えられる。

$$\log AF_{PGV} = 2.30 - 0.852 \log AVS_{30} \quad [4]$$

図3にJ-SHISのAVS₃₀分布から換算した地盤増幅率を示す。この結果を、図2に示した東京都の地盤分類ごとに整理すると図4のようになる。図4は、第7回地域危険度測定調査の地盤分類ごとにJ-SHISのAVS₃₀から換算した地盤増幅度をまとめたものである。なお、図中には、第6回地域危険度測定調査時に使用した東京都の地盤増幅率も示している。ここでは、新設された谷底低地3の多くは台地1から分離されたものであるため、谷底低地3の増幅率は台地1と同じ1.6としている。また、山地・丘陵から分離された山地の増幅率を1.0、丘陵の増幅率を1.2とした。丸山・山崎⁴⁾による近年の地震記録を用いた検討のように、同一地盤分類であっても推定される地盤増幅率のパラッキは見られるが、東京都の大部分を占める台地1の結果を見ると、東京都が規定している増幅率(1.6)はJ-SHISの平均値にほぼ一致していることが分かる。また、谷底低地1の増幅率(2.9)と谷底低地2の

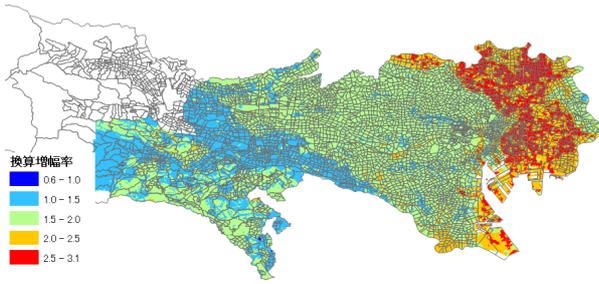


図5 東京ガス地盤データの AVS₂₀ 分布から推定した S 波速度 400m/s の地層を基準とする地盤増幅率

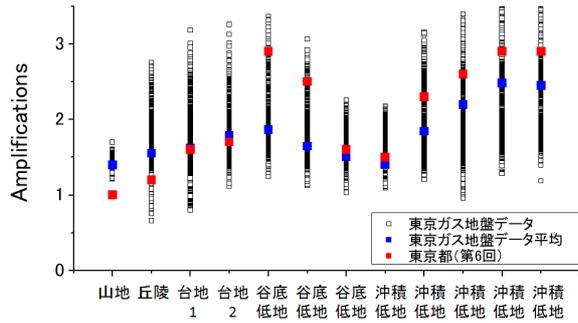


図6 東京都地盤増幅率（第6回）と東京ガス地盤データより推定される増幅率の比較

増幅率（2.5）については、J-SHIS のデータから推定される増幅率と比べるとやや過大評価のように見える。

(2) 東京ガスの地盤データとの比較

東京ガスのリアルタイム地震防災システム SUPREME⁹⁾ は、供給エリア内の約 4000 箇所の SI センサーにより地震動モニタリングを行うとともに、迅速な緊急対応を行うためのシステムである。SUPREME の観測密度は極めて高いが、センサーのない地域については約 6 万本のボーリングデータと地質分類図をもとにして 50m メッシュの表層地盤データを作成し、地震動補間を GIS 上で行っている。

SUPREME の GIS では、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 SI 値の地盤増幅率 (AF_{SI}) は式[5]¹⁶⁾によって推定される。なお、式[5]は 1996 年 5 月～1998 年 12 月の間に K-NET が観測した M5.0～6.6 の 94 地震の記録¹⁷⁾をもとに構築されている。第 5 回調査時に使用された地震記録²⁾よりも地震動強さの大きな記録を多数含んでいることから、地盤増幅率の見直しの際の比較対象として妥当なものと考えられる。

$$\log AF_{SI} = 2.18 - 0.785 \log AVS_{20} \quad [5]$$

SI 値は、平均的には PGV の 1.18 倍を示す¹⁸⁾とされているので、本研究では SI 値の増幅率と PGV の増幅率はほぼ等しいものとして検討を進める。式[5]によると、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。東京都の地盤増幅率の基準点の AVS₂₀ は約 400m/s と推定されるため、前項と同様に式[5]の切片を調整した式[6]を用いて、両者の基準を揃えることとした。

$$\log AF_{SI} = 2.04 - 0.785 \log AVS_{20} \quad [6]$$

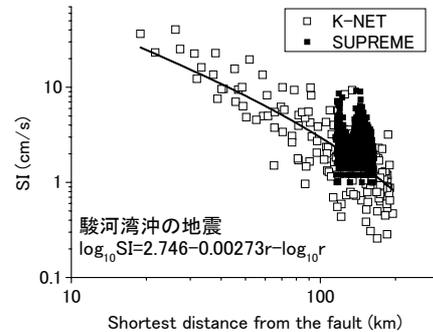
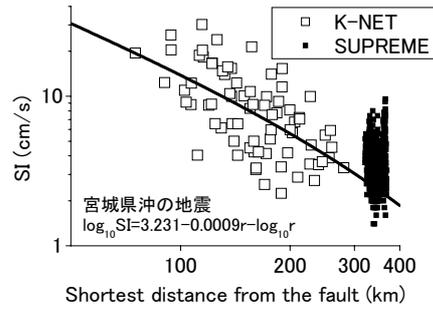
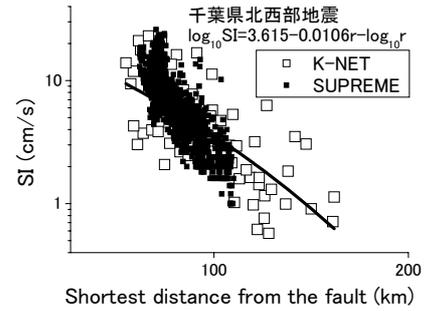
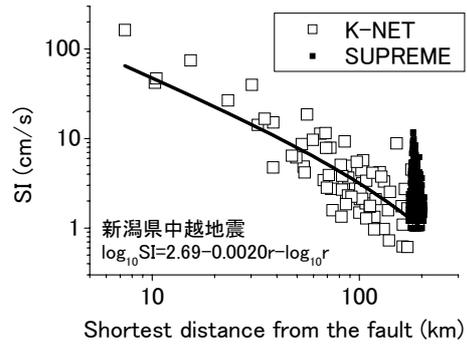


図7 解析対象とした 4 地震の地表面 SI 値の距離減衰式と SUPREME 観測値

図 5 に東京ガスの地盤データから換算した地盤増幅率を示す。また、これを東京都の地盤分類ごとに整理した結果を図 6 に示す。なお、図 4 と同様に第 6 回地域危険度測定調査において東京都が規定した地盤増幅率と比較する。前項の J-SHIS 地盤データから推定される増幅率との比較結果と同じように、東京都の大部分を占める台地 1 の増幅率 (1.6) は、東京ガスの地盤データから推定される増幅率の平均値にほぼ等しいことが分かる。さらに、東京都が規定する谷底低地 1、谷底低地 2 の増幅率は、やや過大であるように見える。また、沖積低地 2～5 の東京都の地盤増幅率は、東京ガスの地盤データから推定さ

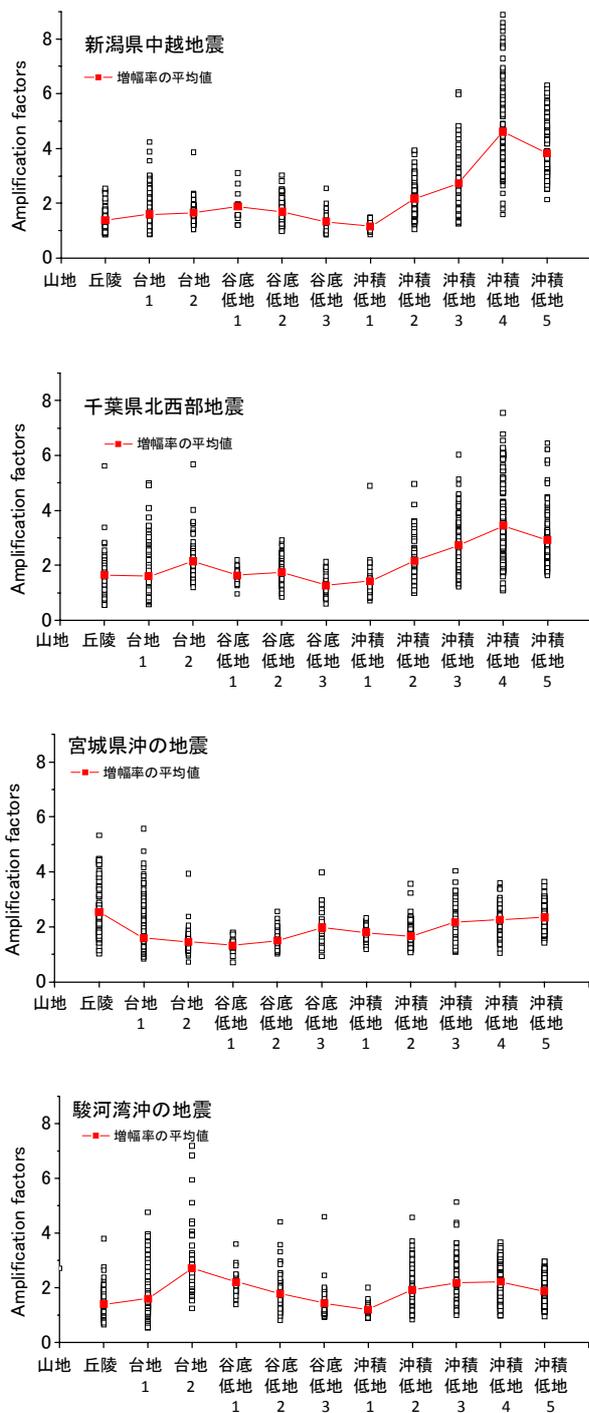


図8 SUPREME が観測した SI 値から推定される 4 地震の地盤増幅率

れる増幅率の平均値よりもやや大きな値を示している。

4. 地震観測記録を用いた地盤増幅率の評価

(1) SUPREME 観測値を用いた地盤増幅率の推定

丸山・山崎⁴⁾は、東京ガスのリアルタイム地震防災システム SUPREME による観測値を用いて、東京都が規定する地盤分類ごとの揺れやすさを相対評価している。ここでは、2004 年と 2005 年に発生した 5 地震を対象としている。図 2 には東京都における SUPREME 観測点の位

表 3 地盤種別ごとの地震観測記録数

| 地盤種別 | 新潟県中越地震 | 千葉県北西部地震 | 宮城県沖の地震 | 駿河湾沖の地震 |
|--------|---------|----------|---------|---------|
| 山地 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 丘陵 | 58 | 75 | 74 | 162 |
| 台地 1 | 624 | 648 | 669 | 684 |
| 台地 2 | 92 | 98 | 96 | 96 |
| 谷底低地 1 | 11 | 15 | 14 | 17 |
| 谷底低地 2 | 71 | 70 | 73 | 74 |
| 谷底低地 3 | 21 | 24 | 25 | 38 |
| 沖積低地 1 | 33 | 36 | 35 | 44 |
| 沖積低地 2 | 84 | 122 | 125 | 123 |
| 沖積低地 3 | 99 | 111 | 113 | 115 |
| 沖積低地 4 | 141 | 154 | 153 | 175 |
| 沖積低地 5 | 113 | 127 | 128 | 131 |

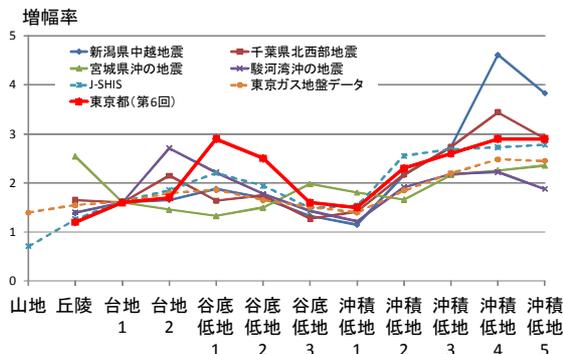


図 9 広域地盤データと地震記録から推定される地盤増幅率と東京都地盤増幅率(第 6 回)の比較

置を示している。現在では、約 1600 箇所の地区ガバナ等に SI センサーが設置されている。このことから、東京都の広い範囲を均質に地震記録を用いて揺れやすさを評価できるものと考えられる。前章の広域地盤データを用いた検討結果によると、東京都の大部分を占める台地 1 については、今までの地域危険度測定調査で行われてきたとおり、増幅率を 1.6 とすることが妥当であると考えられる。そこで、本研究では、地震記録から推定される台地 1 の地盤増幅率の平均値が 1.6 となるように基準化することによって、東京都の地盤分類ごとの地盤増幅率を推定する。

まず、地震動強さの距離による減衰特性を評価するため、地震ごとに SI 値の距離減衰式を構築する。この際には、日本全国を一樣な密度で強震観測している K-NET の地震記録を用いる。また、断層モデルは国土地理院によって作成されたもの¹⁹⁾を使用する。距離減衰式の関数形には式[7]を使用する。

$$\log SI = c_1 + c_2 r - \log r \quad [7]$$

ここで、 r は断層最短距離(km), c_1, c_2 は回帰定数を表す。

本研究で検討対象とする地震は、近年 SUPREME が観測した新潟県中越地震 (2004/10/23, M6.8), 千葉県北西部地震 (2005/7/23, M6.0), 宮城県沖の地震

表 4 本研究による地盤増幅率の検討結果のまとめ

| 地盤種別 | 新潟県中越地震 | 千葉県北西部地震 | 宮城県沖の地震 | 駿河湾沖の地震 | J-SHIS地盤データ | 東京ガス地盤データ | 第6回測定調査 | 提案値 |
|-------|---------|----------|---------|---------|-------------|-----------|---------|-----|
| 山地 | - | - | - | - | 0.71 | 1.40 | - | 1.0 |
| 丘陵 | 1.39 | 1.65 | 2.54 | 1.40 | 1.26 | 1.55 | 1.2 | 1.4 |
| 台地1 | 1.6* | 1.6* | 1.6* | 1.6* | 1.63 | 1.62 | 1.6 | 1.6 |
| 台地2 | 1.65 | 2.15 | 1.46 | 2.71 | 1.86 | 1.79 | 1.7 | 1.7 |
| 谷底低地1 | 1.88 | 1.64 | 1.33 | 2.21 | 2.20 | 1.86 | 2.9 | 2.0 |
| 谷底低地2 | 1.69 | 1.75 | 1.50 | 1.78 | 1.94 | 1.65 | 2.5 | 1.8 |
| 谷底低地3 | 1.33 | 1.27 | 1.98 | 1.43 | 1.49 | 1.51 | 1.6** | 1.5 |
| 沖積低地1 | 1.15 | 1.42 | 1.80 | 1.21 | 1.54 | 1.40 | 1.5 | 1.5 |
| 沖積低地2 | 2.17 | 2.17 | 1.66 | 1.92 | 2.55 | 1.84 | 2.3 | 2.3 |
| 沖積低地3 | 2.73 | 2.73 | 2.17 | 2.18 | 2.68 | 2.20 | 2.6 | 2.6 |
| 沖積低地4 | 4.61 | 3.44 | 2.26 | 2.22 | 2.73 | 2.48 | 2.9 | 2.9 |
| 沖積低地5 | 3.83 | 2.91 | 2.35 | 1.87 | 2.78 | 2.45 | 2.9 | 2.9 |

* 台地1の増幅率が1.6となるように基準化

** 台地1と同じ1.6と仮定

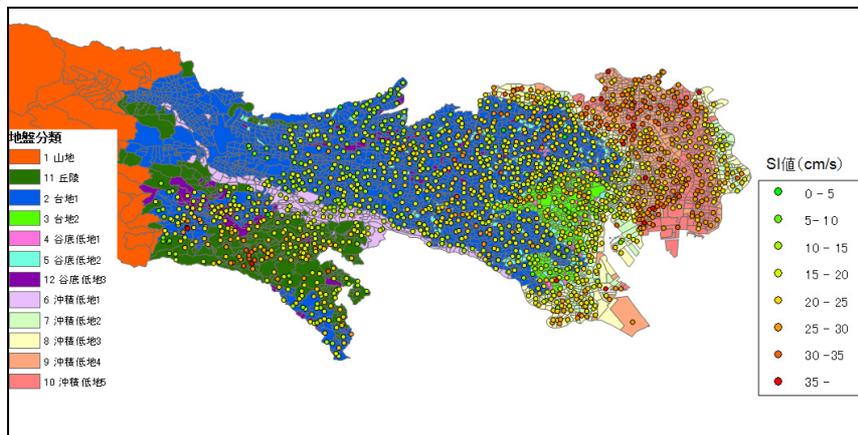


図 10 SUPREME が観測した東京都における東北地方太平洋沖地震の SI 値の分布

(2005/8/16, M7.2), 駿河湾沖の地震(2009/8/11, M6.5)とする。なお、千葉県北西部地震に関しては、断層モデルが発表されていないため、マグニチュードがあまり大きくないことと震源が深いことを考慮し、点震源を仮定する。図 7 に、これら 4 地震について、K-NET が観測した地表面 SI 値をもとに構築した距離減衰式を示す。なお、図中には SUPREME による観測値も併せて示している。なお、ここで用いている地震は、千葉県北西部地震を除いて震源を関東地方外に有しているため、トリガーレベル(1.0cm/s)以上の SI 値を記録していない観測点もいくつか存在する。しかしながら、後述の表 3 に示すように、地盤種別ごとの観測記録数は 2004 年新潟県中越地震の丘陵地、沖積低地 2、沖積低地 3 で千葉県北西部地震のときよりも少なくなっている以外はほぼ同程度である。このことから、本研究では 1.0cm/s 以下の SI 値を記録している観測点を考慮できないものの、推定される地盤増幅率に与える影響は小さいものと考えられる。

構築された距離減衰式と SUPREME が観測した SI 値の比をとることで地盤増幅率を推定する。それらを第 7 回地域危険度測定調査で使用される東京都の地盤分類ごと

に集計し、台地 1 の増幅率の平均が 1.6 となるように基準化する。図 8 に、これら 4 地震について推定された地盤増幅率を示す。なお、山地については、東京ガスの SUPREME 観測点が 0~1 点しか設置されていないため、ここでは検討から除外する。広域地盤データを用いた検討の際と同様に、同一の地盤分類でも多数の地震記録から推定される増幅率にはばらつきが見られる。このことから、地盤分類のみが地点特性の支配要因ではないことが分かる。地震計の設置状況などが影響を与えていることも否定はできないが、最も大きな要因は同一の地盤分類であっても地盤条件に何らかの差異があるためであると思われる²⁰⁾。

一方で、本検討では超高密度に地震計を配備している東京ガス SUPREME によるデータを用いているため、各地盤分類に該当する地震観測記録の数は多い(表 3)。さらに、本研究で検討している地盤増幅率は、東京都全域を町丁目単位で 12 区分の地盤分類ごとに定義されるものである。このような大局的な増幅率の評価を目的とするのであれば、図 4、図 6、図 8 に示したような増幅率の平均値を標準的な地盤増幅率とみなすことは実用上問題

表 5 東北地方太平洋沖地震における地盤種別ごとの SUPREME 観測点数

| 地盤種別 | 観測点数 | 地盤種別 | 観測点数 |
|--------|------|--------|------|
| 山地 | 1 | 谷底低地 3 | 33 |
| 丘陵 | 159 | 沖積低地 1 | 45 |
| 台地 1 | 683 | 沖積低地 2 | 131 |
| 台地 2 | 99 | 沖積低地 3 | 116 |
| 谷底低地 1 | 19 | 沖積低地 4 | 182 |
| 谷底低地 2 | 76 | 沖積低地 5 | 129 |

はないものと考えられる。

図 9 に、広域地盤データと地震記録から推定された地盤増幅率を第 6 回地域危険度測定調査で使用された地盤増幅率と比較する。なお、ここでも新設された谷底低地 3 の増幅率を 1.6、山地・丘陵から分離された山地の増幅率を 1.0、丘陵の増幅率を 1.2 と仮定した。これによると、前章の広域地盤データを用いた検討結果と同じように、地震記録から推定される地盤増幅率については地震ごとに多少のバラツキがあるが、谷底低地 1 と谷底低地 2 の東京都が規定する地盤増幅率はやや過大であるように見える。また、地震によっては、沖積低地 4 の増幅率の方が沖積低地 5 の増幅率よりも大きい場合がある。さらにわずかではあるが、丘陵の増幅率 (1.2) は過小、谷底低地 3 の増幅率 (1.6) は過大のように見える。

以上の結果をまとめ、第 7 回地域危険度測定調査における地盤増幅率を表 4 のように提案する。今回の地盤増幅率の規定に当たっては、地盤種別の見直しが行われた丘陵、谷底低地 1~3 について主として検討し、増幅率の地盤種別ごとの大小関係が著しく変更されないことを前提とし、抜本的な見直しは行わなかった。本研究では、東京都の地盤分類ごとの増幅率を J-SHIS の地盤データ、東京ガスの地盤データ、SUPREME が観測した地震記録によって検討したが、いずれの結果からも谷底低地 1 と谷底低地 2 の地盤増幅率は過大であることが分かった。そこで、谷底低地 1 の増幅率を 2.9 から 2.0、谷底低地 2 の増幅率を 2.5 から 1.8 とする。丘陵についてはやや過小評価しているような結果が得られているため、1.2 から 1.4 へと変更する。新設された谷底低地 3 には、第 6 回地域危険度測定調査では台地 1 に分類されていた一部の町丁目が該当するが、本研究の結果では台地 1 よりもやや揺れにくい傾向が見られた。このため、増幅率は 1.5 とするのが適切と考えられる。沖積低地 4 と沖積低地 5 の地盤増幅率は、地震記録によっては沖積低地 4 の方が大きいという結果が得られているが、第 6 回と同様にどちらも 2.9 とする。

(2) 東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた検討

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) では、東日本の広い範囲で震度 5 弱以上の揺れが観測された。SUPREME では、東京ガスの供給エリアのほぼ全域で地震動を観測した。図 10 に、東京都の SUPREME 観測点における SI 値の分布を示す。表 5 に、地盤種別ごとの観測点数を示す。東京都の SUPREME 観測点で大きな SI 値を観測したのは、江東区東雲 1 丁目、八王子市めじろ台 2 丁目、大田区南馬込 5 丁目などで 40cm/s 以上を記録している。これらの観測点を含めて 30cm/s 以上の SI 値が 106 地点で観測されており、その多

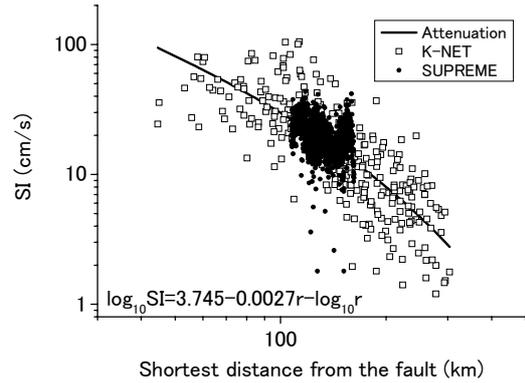


図 11 東北地方太平洋沖地震の地表面 SI 値の距離減衰式と SUPREME 観測値

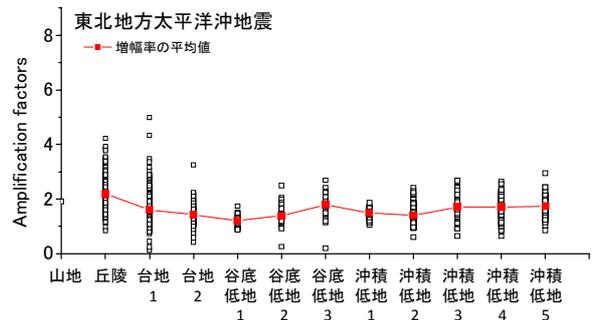


図 12 東北地方太平洋沖地震の観測値より推定される地盤増幅率

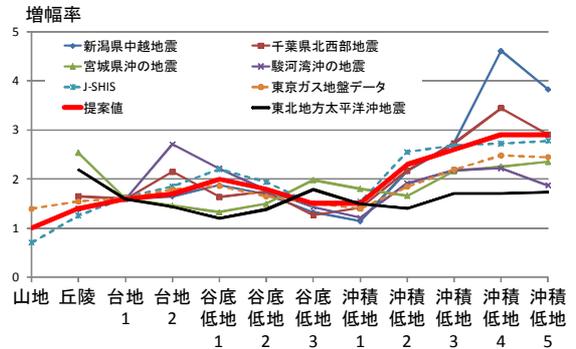


図 13 東北地方太平洋沖地震の観測値より推定された地盤増幅率と本研究の検討結果の比較

くは沖積低地 3~5 および丘陵に位置している。

そこで、前項で提案した東京都地域危険度測定調査における地盤増幅率と東北地方太平洋沖地震の観測値から推定される地盤増幅率を比較する。まず、K-NET の加速度波形から SI 値を算出し、地表面距離減衰式を構築した (図 11)。断層モデルは、国土地理院が作成したもの²⁰⁾を使用した。SUPREME の観測値は、K-NET 観測値によって構築された地表面距離減衰式と概ね調和的であることが分かる。

SUPREME 観測値と距離減衰式の比をとり、地盤増幅率を推定する (図 12)。なお、前項での検討と同様に台地 1 の地盤増幅率の平均値が 1.6 となるように基準化する。図 13 に、本研究で提案した地盤増幅率、広域地盤データおよび他の 4 地震から推定される地盤増幅率、東北

地方太平洋沖地震から推定される地盤増幅率を比較する。東北地方太平洋沖地震から推定される地盤分類ごとの増幅率の傾向は、他の地震の傾向とはやや異なり、地盤の固い（固有周期が短い）と考えられる丘陵や台地と、地盤が軟らかい（固有周期が長い）と考えられる沖積低地や谷底低地の間でほとんど差異が見られない。このような傾向は、東北地方太平洋沖地震と震源域に近い2005年宮城県沖の地震でも見られている。現時点では東北地方の太平洋沖を震源とするマグニチュードの大きな地震時に東京都で観測される特徴のように思われるが、結論づけるには3次元地下構造をふまえた数値シミュレーションなどによって詳細に検討する必要がある。また、すでに指摘されているように、この地震はMが巨大であるにも関わらず、震源に近い東北地方の地震記録では、周期0.5秒程度以下の短周期成分が卓越し、周期1秒程度のやや周期の長い成分が小さいことと関係するとも考えられる²²⁾。すなわち、少なくとも震源に近い地域では軟弱地盤で増幅するようなスペクトル成分をあまり含まないため、東京における軟弱な表層地盤の分布特性が影響し、地盤増幅率が比較的均一な結果になったと思われる。

この地震は、我が国の地震計で初めて観測されたM9の巨大地震であり、図7と図11を比較しても東京都の全域で近年の地震の中では最も大きな地震動が観測されていることが分かる。また、この地震と2005年宮城県沖の地震から推定される地盤増幅率については、ほかの地震と異なり沖積低地における地震動の増幅が顕著には見られず、丘陵地の増幅が比較的大きい。東京都の地域危険度測定調査においては、とくに検討対象とする地震像を定めておらず、これは第7回調査時においても同様であった。首都圏では、比較的マグニチュードの大きな地震記録が高密度に観測されつつある。例えば東京に比較的近い直下型地震が起こった場合や、今回のように東京から遠い震源であるものの強い揺れに見舞われる場合などいくつか地震像を想定し、それぞれのパターン別の地盤増幅率を規定することは今後の検討課題の一つとして挙げられる。さらに、複数の地盤種別を予め定めて平均的な地盤増幅率を規定するのではなく、高密度に地震記録が取得できている利点をふまえて各町丁目の増幅率を地盤種別にとらわれず規定することも今後の課題と考えられる。

また、強震時には地盤の応答が非線形性状を示すようになり、地盤増幅率が変化する¹⁵⁾。さらに、地盤増幅率に周期依存性があることも考慮されており、例えば内山・翠川²³⁾は、NEHRP (National Hazards Reduction Program) の基準を参考に地盤増幅率を周期の関数としてモデル化している。地盤増幅率の周期特性を検討することは、地域危険度測定調査の高度化へつながるものと考えられる。

5. 結論

本研究は、東京都が概ね5年ごとに実施する地域危険度測定調査で用いられる地盤増幅率を再評価することを目的として、J-SHIS が公開している広域地盤データ、東京ガスのリアルタイム地震防災システム SUPREME が搭載している広域地盤データ、SUPREME が観測した近年の4地震記録を用いて地盤分類ごとに増幅率を推定した。推定された地盤増幅率を東京都が規定している地盤増幅

率と比較し、第7回地域危険度測定調査で使用される増幅率を提案した。

東京都が実施した第6回地域危険度測定調査で用いられた東京都の大部分を占める台地1の地盤増幅率(1.6)は、本研究の検討結果でも妥当であるものと判断できた。一方、谷底低地1や谷底低地2の地盤増幅率は、広域地盤データから推定された増幅率、地震記録から推定された増幅率のいずれと比べても過大であったことが分かった。また、第6回測定調査では、山地丘陵としてまとめられていた町丁目を、第7回測定調査の地盤分類では山地と丘陵に分離したため、第6回測定調査の増幅率1.2を丘陵にそのまま当てはめるとやや過小評価であることが分かった。

以上のような検討結果に基づき、第7回地域危険度測定調査で使用する地盤増幅率を提案した。今回の地盤増幅率の規定に当たっては、地盤種別の見直しが行われた丘陵、谷底低地1~3について主として検討し、増幅率の地盤種別ごとの大小関係が著しく変更されないことを前提とした。この提案値を2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震における観測値から推定される地盤増幅率と比較したところ、やや異なる傾向が見られた。東京都の地域危険度測定調査においては、とくに検討対象とする地震像を定めていない。直下型地震が起こった場合や、この地震のように東京から遠い震源であるものの強い揺れに見舞われる場合などいくつかの地震像を想定し、それぞれのパターン別の地盤増幅率を規定することは今後の検討課題の一つとして挙げられる。さらに、入力地震動のスペクトル特性も考慮した地盤増幅率の評価することは、地域危険度測定調査の高度化へつながるものと考えられる。

参考文献

- 1) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第6回），2008。
- 2) 東京都都市計画局：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第5回），2002。
- 3) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係，土木学会論文集，No. 626/I-48，pp. 79-91，1999。
- 4) 丸山喜久，山崎文雄：近年の地震観測記録に基づく東京都地盤分類ごとの増幅特性の評価，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 1258-1261，2006。
- 5) 若松加寿江，松岡昌志，久保純子，長谷川浩一，杉浦正美：日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築，土木学会論文集，No. 759/I-67，pp. 213-232，2004。
- 6) 若松加寿江，松岡昌志：地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版の構築，日本地震工学学会大会-2008 梗概集，pp. 222-223，2008。
- 7) 松岡昌志，若松加寿江，藤本一雄，翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定，土木学会論文集，No. 794/I-72，pp. 239-251，2005。
- 8) 地震ハザードステーション：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 9) 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.
- 10) 中山涉, 清水善久, 末富岩雄, 山崎文雄, 石田栄介: 超高密度地震観測に基づく地点の揺れ易さ評価, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 407-412, 2002.
 - 11) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion in japan including deep focus events, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, No. 5, pp. 1343-1358, 1995.
 - 12) 中村豊: 常時微動に基づく地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, pp.18-27, 1988.
 - 13) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
 - 14) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク: <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
 - 15) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
 - 16) 田村勇, 山崎文雄, Shabestari, K.T.: K-NET 地震記録を用いた平均 S 波速度による地盤増幅度の推定, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 1-B357, 2000.
 - 17) Shabestari, K.T., and Yamazaki, F.: Attenuation Relation of response spectra in Japan considering site-specific term, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, ref. No. 1432, 2000.
 - 18) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 2, pp. 2299-2304, 1994.
 - 19) 国土地理院: <http://www.gsi.go.jp/bousai.html>
 - 20) 福和伸夫, 荒川政和, 西阪理永: 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定, 構造工学論文集, 建築学会, Vol. 44B, pp. 77-93, 1998.
 - 21) 国土地理院: <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html>
 - 22) 土木学会東日本大震災被害調査団(地震工学委員会): 緊急地震被害調査報告書(暫定版), <http://committees.jsce.or.jp/report/node/40>, 2011.
 - 23) 内山泰生, 翠川三郎: 地盤分類別の地盤増幅率を用いた基盤地震動スペクトルの簡便な評価法, 日本建築学会構造系論文集, No.582, pp. 39-46, 2004.

(原稿受付 2011.6.5)
(登載決定 2012.1.7)