

## 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

Evaluation of Site Amplification with Respect to Soil Classification by Tokyo Metropolitan Government using Recent Earthquake Records

丸山喜久<sup>1</sup>, 山崎文雄<sup>1</sup>

Yoshihisa MARUYAMA<sup>1</sup> and Fumio YAMAZAKI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学 工学部 都市環境システム学科, Department of Urban Environment Systems, Chiba University

**SUMMARY:** In the earthquake risk analysis conducted by the bureau of urban development, Tokyo Metropolitan Government in 2002, the site amplification was defined for 10 soil classes, and they were determined based on empirical relations and small amount of seismic records. Recently, earthquake events with rather large magnitude occurred and some strong motions were observed in Tokyo area. In addition that, some denser seismic observation networks are currently under operation. In this study, site amplification characteristics in Tokyo Metropolis were evaluated using the recent seismic records observed in SUPREME network deployed by Tokyo Gas Co., Ltd. The site amplification factors were compared with those used for earthquake risk analysis in Tokyo Metropolis.

### 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結果を昭和 50 年 11 月に第 1 回を公表して以来 5 年おきに公表している。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。平成 14 年の第 5 回の調査内容は、建物倒壊危険度、火災危険度、避難危険度の 3 つである。第 4 回調査まで評価されていた人的危険度は、地震動によって人間が死傷する危険度を都市作りの施策に反映することが難しいため、第 5 回調査では検討されていない。また、それまで火災危険度、避難危険度はメッシュごとに評価されていたが、建物倒壊危険度も含め 3 つの危険度すべてを町丁目ごとで評価することに改めている[1]。

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]。平成 14 年の調査では、建物倒壊危険度は地盤と建物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。地盤の増幅度は、大西らの国土数値情報をもとにした地形・地質 11 分類の地盤増幅度[2]と幾つかの地震記録を参考にして求められている[1]。平成 14 年の調査時には、東京都内の最大震度が 2~4 の 8 地震の記録を使用しているが、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。また、それらの記録は東京都内の防災科学技術研究所の K-NET 及び東京消防庁の地震計で観測されたもので、地震記録の数も充分とは言い難い。

東京ガスでは、地震発生後早期に被害状況の把握とガスの供給停止の判断を行う目的で、リアルタイム地震防災システム SUPREME を構築し、2001 年に運用を開始している[3]。SUPREME では、東京ガスがサービスを提供してい

る地域で約 3900 箇所の SI センサーを地区ガバナーに配備している。東京都内に超高密度に SI センサーが設置され、地震モニタリングが行われていることから、この観測記録を用いれば、東京都内の地盤種別ごとの増幅特性を再評価することが可能になると考えられる。

そこで、本研究では東京ガスの SUPREME で観測された近年の地震記録を用いて、東京都が建物倒壊危険度を算出する際に用いている地盤増幅度について再評価を行った。

### 2 東京都の用いている地盤増幅度

東京都の地盤区分には、地盤区分図、地盤地質図などから地形・地質の特徴を分析した結果、Table 1 の 10 分類が採用されている。地盤種別ごとの増幅度を定めるときには、まず、大西ら[2]の地形・地質 11 分類の増幅度を Table 1 のように対応させる。

次に、東京都内で実際に観測された地震記録を用いて、各地盤種別に対応する増幅度を推定する。東京都内の最大震度が 2~4 の 8 地震の記録に関して、Molas and Yamazaki [4]による最大速度 (PGV (cm/s)) の距離減衰式 (式(1)) から地震観測点ごとに地点係数  $C_i$  を求める。

$$\log PGV = -1.769 + 0.628M - 0.00130R - \log R + 0.00222h + C_i \quad (1)$$

ここで、 $M$  は気象庁マグニチュード、 $R$  は震源距離 (km)、 $h$  は震源深さ (km) である。

各地震観測点の地盤増幅度は、検討に使用した地震観測点のうち、分類 1 「山地丘陵」の「山地」に位置している K-NET 桜原、K-NET 氷川の地点係数を基準として算出されている (Table 1)。

これら 2 種類の増幅度をもとに、東京都では建物倒壊危険度を算出する際に用いる地盤増幅度を定めている (Table 1)。

Table 1 Soil classification and soil amplification factors defined in Tokyo Metropolis.

No.	分類	地形・地質の特徴	東京都 [1]	地震記録 [1]	大西ら [2]	SI センサ ー数*
1	山地・丘陵	山地及び丘陵地	1.2	1.24	1.71	75
2	台地 1	河成礫層の上に関東ローム層をのせる台地（主に山の手台地の西側）	1.6	1.45	1.62	602
3	台地 2	海成粘土砂層の上に関東ローム層をのせる台地	2.5	1.53	2.5	143
4	谷底低地 1	軟弱な堆積層の厚さが 10m 程度以上	2.9	-	2.92	10
5	谷底低地 2	軟弱な堆積層の厚さが 10m 程度未満	2.5	2.05	2.5	101
6	沖積低地 1	沖積層が主に河成礫からなるところ（主に多摩川の上流部）	1.5	-	1.48	38
7	沖積低地 2	軟弱な堆積層の厚さが 10m 未満	2.3	1.48	2.39	122
8	沖積低地 3	軟弱な堆積層の厚さが 10m~25m	2.6	1.63	2.92	111
9	沖積低地 4	軟弱な堆積層の厚さが 25m~40m	2.9	1.60	2.92	157
10	沖積低地 5	軟弱な堆積層の厚さが 40m 以上	3.2	2.03	2.92	125

\* SI センサー数は、千葉県北西部地震を観測した SI センサーの個数

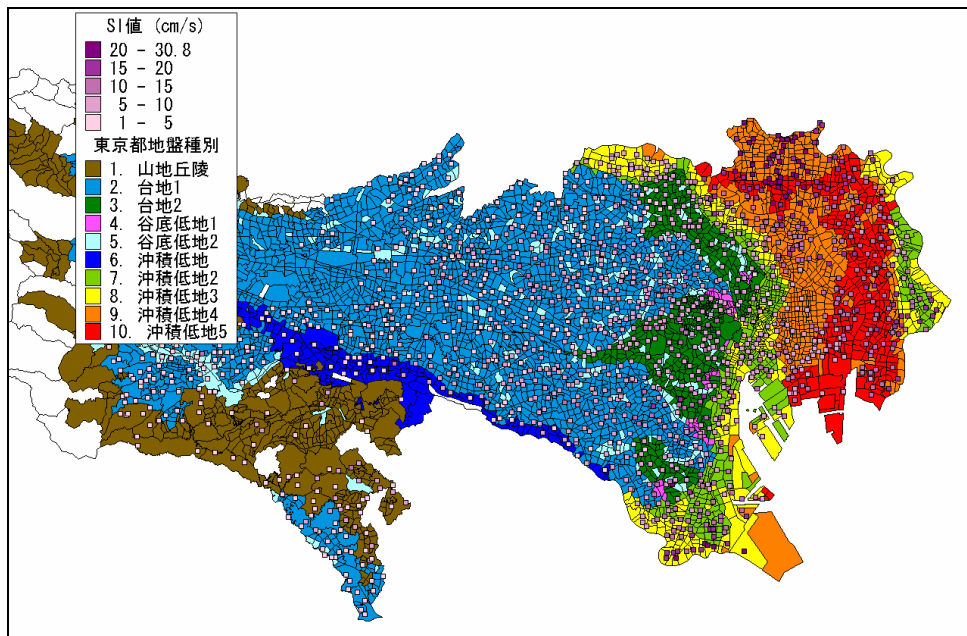


Fig. 1 Location of SI-sensors deployed by Tokyo Gas Co., Ltd. and recorded SI values in the 2005 North-western Chiba earthquake.

### 3 近年の地震記録を用いた地盤増幅度の評価

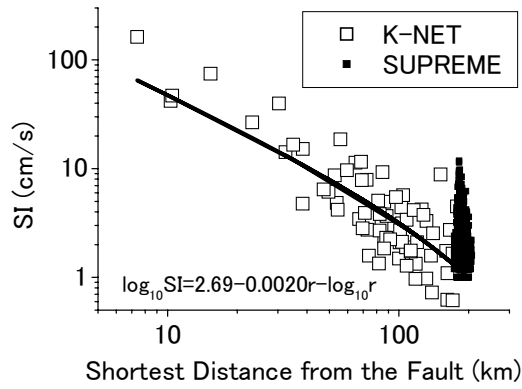
本章では東京ガスのリアルタイム地震防災システム SUPREME で配備されている SI センサーの地震記録を用いて、東京都地盤種別ごとの地盤増幅度を評価した。

検討に用いた地震は、2004年10月23日の新潟県中越地震 (M6.8), 2005年2月16日の茨城県南部を震源とする地震 (M5.4), 2005年7月23日千葉県北西部地震 (M6.0), 2005年8月16日の宮城県沖の地震 (M7.2), 2005年10月16日の茨城県南部を震源とする地震 (M5.1) の5地震である。近年、東京都をはじめ関東地方では、マグニチュードの比較的大きな地震による大震度の記録が観測されているが、とくに千葉県北西部地震では、東京都足立区で震度5強、東京都江戸川区、大田区、埼玉県草加市、鳩ヶ谷市、三郷市、八潮市、千葉県市川市、船橋市、浦安市、

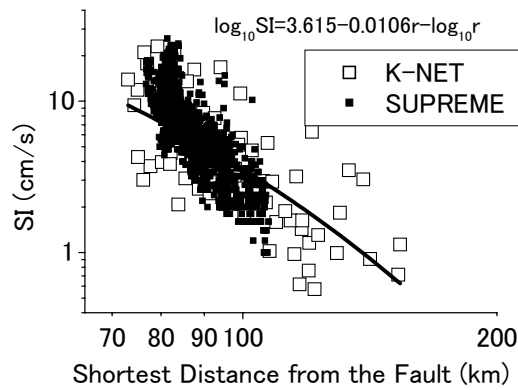
木更津市、神奈川県川崎市川崎区、幸区、横浜市神奈川区などで震度5弱が気象庁管轄の地震計で記録されている。そこで、検討対象にこれら5地震を選んだ。

Fig. 1に千葉県北西部地震で地震を記録した東京ガス SI センサーの位置と東京都の地盤種別の関係を示す。東京都の規定している地盤分類のうち、最も揺れやすいとされている「沖積低地5」は東京都の東側に位置している。東京ガスの配備している SI センサーのうち、今回対象としている地震のいずれかを記録したものは1711個である。千葉県北西部地震を観測した SI センサーの個数は Table 1 に示す通りである。SUPREME では、SI センサーの記録する SI 値がオンラインで地震直後に取得される。SI 値は、平均的には PGV の 1.18 倍を示す[5]とされているので、本研究では SI 値の増幅度が PGV の増幅度とほぼ等しいものとして検討を進める。

まず、検討対象としている5地震に関して K-NET の地



(a) The 2004 Mid Niigata earthquake



(b) The 2005 North-western Chiba earthquake

Fig. 2 Attenuation relationships of SI values recorded at K-NET stations.

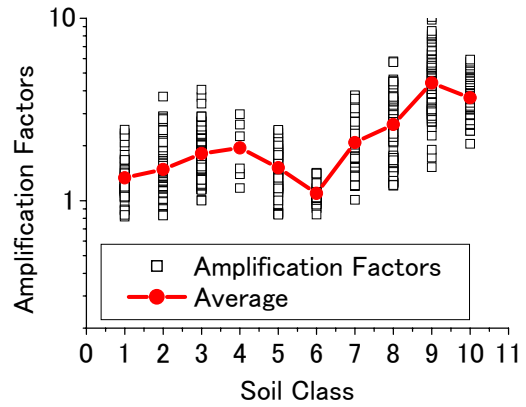
震観測記録を用いて SI 値 (cm/s) の距離減衰式を構築する。回帰に用いた関数形を式(2)に示す。

$$\log_{10} SI = c_1 + c_2 r - \log_{10} r \quad (2)$$

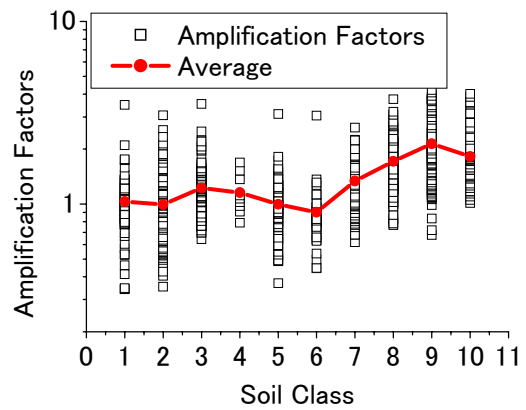
新潟県中越地震と宮城沖の地震の距離減衰式は、国土地理院によって作成された断層モデルから得られる断層最短距離  $r$  (km) を用いて構築した。断層モデルの発表されていない他の3地震に関しては、マグニチュードも小さいことから点震源を仮定して距離減衰式を求めた。

SI 値は、減衰定数 20% の速度応答スペクトルを周期 0.1 秒から 2.5 秒の範囲で積分し、2.4 で除することによって求められる。東京ガスでは、水平 2 成分を 180° 回転し各角度で SI 値を求め、その最大値をその地点の SI 値と定めている[6]。したがって、K-NET の地震記録も同様のアルゴリズムで算出した。Fig. 2 に、新潟県中越地震と千葉県北西部地震での SI 値の距離減衰特性を示す。なお、Fig. 2 では、東京ガス SUPREME での 1.0 cm/s 以上の観測 SI 値も併せて示す。これらの観測値は距離減衰式の算出には使用していない。

以上のように算出された距離減衰式と SUPREME によって観測された SI 値の比を算出した。これは、K-NET 地震計が設置されている平均的な地盤に対する各 SUPREME 観測点の増幅度を表すものであり、東京都の用いている増幅度と直接比較できるものではない。Fig. 3 に、新潟県中越地震と千葉県北西部地震における増幅度を東



(a) The 2004 Mid Niigata earthquake



(b) The 2005 North-western Chiba earthquake

Fig. 3 Amplification factors of SI values with respect to the soil classification of Tokyo Metropolis.

京都の地盤種別ごとに整理した結果を示す。図中では、本研究で得られた各地盤種別ごとの平均増幅度を併せて示す。既往の研究で指摘されているように、同一の地盤種別でも、多数の地震記録による平均増幅度にはばらつきが見られる[2]。このようなばらつきは、他の3地震についても確認された。このことから、地盤分類のみが地点係数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。この差異を具体的に評価するには、SUPREME 観測点の地盤データを用いた詳細な検討が必要である。

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、各地盤種別に該当する地震観測記録の数は多い (Table 1)。地盤種別 4 「谷底低地 1」に該当する地震計の数は、他の地盤種別と比べて少ないが、これは東京都の地盤種別 (Fig. 1) で谷底低地 1 として分類されている町丁目が少ないためである。このように地盤種別ごとに割り当てられている地震計の数が多く、各地盤種別の平均増幅度はその地盤種別の標準的な地盤増幅度とみなしても良いものと思われる。

Fig. 4 に、検討に用いた 5 地震の東京都地盤種別に対する平均増幅度を示す。また、東京都の規定している地盤増幅度と大西らの増幅度[2]も併せて示す。本検討で算出した地盤増幅度は、K-NET 観測記録をもとに構築された距

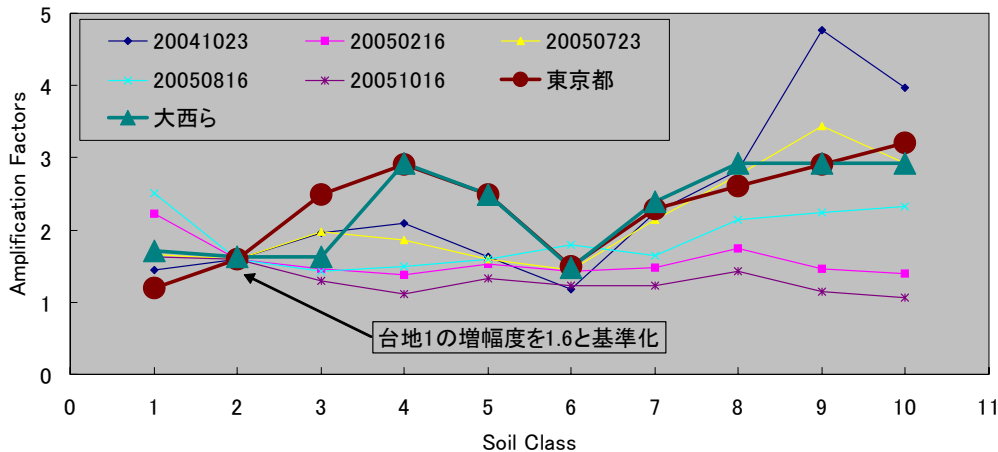


Fig. 4 Site amplification factors obtained from the records from SUPREME with respect to the soil classification of Tokyo Metropolis.

離減衰式に対する比としているので、地盤種別1「山地丘陵」のうち山地に位置する地震観測点で基準化されている東京都の地盤増幅度とは基準が異なる。東京都で山地と分類される地域には SUPREME の SI センサーが設置されていないことから、本研究の結果を東京都の方法と同じように基準化することは難しい。そこで、最も SI センサーの数が多い「台地1」の増幅度を1.6と基準化することで本研究の増幅度と東京都の定める増幅度を比較する。

新潟県中越地震と千葉県北西部地震から得られる増幅度と地盤種別の関係は、概ね東京都の規定するものと調和的である。宮城県沖の地震に関しては、地盤種別6~10に関して東京都の増幅度とある程度一致している。茨城県南部を震源とする2地震に関しては、沖積低地4と沖積低地5の増幅度が小さくなっている。これは地震マグニチュードが5.0程度のため、入力に長周期成分があまり含まれていないことが影響していると考えられ、入力地震動のスペクトル特性も考慮した検討が今後必要である。台地1と台地2（地盤種別2と3）の増幅度は、東京都の規定する増幅度では1.6と2.5と大きな差が設定されているが、本研究の結果からはそれほど大きな違いはないものと思われる。沖積低地4と沖積低地5（地盤種別9と10）に関しても、東京都の増幅度は2.9、3.2と定められているが、本研究の結果からはこれらの増幅度に大きな差がないことが示唆される。

#### 4 結論

本研究では東京ガスの SUPREME で観測された近年の地震記録を用いて、東京都が建物倒壊危険度を算出する際に用いている地盤増幅度について再評価を行った。

マグニチュードの比較的大きな新潟県中越地震、千葉県北西部地震、宮城県沖の地震から得られる地盤増幅度と地盤種別の関係は、概ね東京都の規定するものと調和的であったが、一部の地盤区分の増幅度に関しては、東京都の規定するものと異なる傾向が見られた。

東京都の地盤増幅度は山地丘陵のうち、山地に位置している地震計の地点係数をもとに定められている。今後は、SUPREME データから基準となるべき SI センサーを定め、適切な地盤種別ごとの増幅度を検討する必要がある。また、地盤データを用いてより詳細な検討を行うことで、地盤種別ごとの増幅特性についてさらに信頼性の高い推定結果が導かれるものと思われる。

#### 謝辞

東京ガス（株）より、SUPREME 観測地震データをご提供頂いた。記して、謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 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，2002.
- [2] 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.
- [3] Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Ioyama, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Karim, K.R. and Yamazaki, F.: Correlation of the JMA Instrumental Seismic Intensity with Strong Motion Parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1191-1212, 2002.