

超高密度地震観測記録に基づく観測地点の揺れ易さ評価
AMPLIFICATION FACTOR ESTIMATION USING THE RECORDS FROM
SUPER-DENSE EARTHQUAKE OBSERVATION SYSTEM

中山渉¹, 清水善久², 末富岩雄³, 山崎文雄⁴, 石田栄介⁵

¹東京ガス(株)防災供給センター

Wataru Nakayama, Center for Supply Control and Disaster Management, Tokyo Gas Co. Ltd., wataru@tokyo-gas.co.jp

²東京ガス(株)防災供給センター, 博士(工学)

Yoshihisa Shimizu, Center for Supply Control and Disaster Management, Tokyo Gas Co. Ltd., yshimizu@tokyo-gas.co.jp

³佐藤工業(株)中央技術研究所, 博士(工学)

Iwao Suetomi, Research Institute, Sato Kogyo Co. Ltd., suetomi@satokogyo.co.jp

⁴東京大学生産技術研究所, 工博

Fumio Yamazaki, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, yamazaki@iis.u-tokyo.ac.jp

⁵日本技術開発(株)環境防災事業部地震防災部, 博士(工学)

Eisuke Ishida, Japan Engineering Consultants Co. Ltd., isidae@jecc.co.jp

SUMMARY

A new realtime monitoring system 'SUPREME' by Tokyo Gas has about 3,700 earthquake observation sites. A map of SI-value during a large earthquake is estimated by interpolating observed values. It needs the site amplification factor at each observation site and at each 50m*50m grid point. In this paper, the amplification factors are estimated using the observed records of the new SI sensors, taking the ratio with the attenuation relationship obtained for each earthquake event using K-NET observation records. It is shown that the amplification factors of SI-value estimated by the mean S-wave velocity (AVS(20)) are in good agreement with the observation records, however, a map of observed amplification factor gives more detail information on the site effects.

キーワード: 地盤増幅度, 地震観測, SI値, リアルタイム地震動モニタリング

Key words: Site amplification, Earthquake observation, SI-value, Realtime seismic monitoring

1 はじめに

東京ガスでは、1995年兵庫県南部地震における教訓を活かし都市ガス供給網の地震時安全性を向上するために、2001年7月より新防災システム「SUPREME」の運用を開始している。このシステムは、大地震発生時にほぼリアルタイムに地震動強度(SI値・最大加速度)や液状化発生に関するデータを収集し、地盤や導管のデータベースと組み合わせる被害推定を実施するとともに、地区ガバナの遠隔監視・遮断を行うものである。地震動については、1994年より運用してきた従来の「SIGNAL」では331点での観測SI値をもとにSI値分布を推定していたが、「SUPREME」では、約6万点のボーリング情報が登録された防災GIS及び従来より高性能で安価な新SIセンサーの開発等により、約3700点の観測SI値から50mメッシュのSI値分布

を推定する¹⁾。大地震時における電話の輻輳を考えると全点での収集には時間を要するであろうし、変化がめざましい通信技術においては予期しないトラブルも考えられる。また地形が複雑に変化している地域では平均0.9km²の高密度観測といえども充分とは言えず、観測値の補間により任意地点でのSI値を予測することが必要となる。空間分布の推定においては、表層地盤の増幅特性の影響を考慮することが重要であるので、観測SI値を観測点のSI値増幅度で除して工学的基盤に引き戻して、50mメッシュに対し空間補間を行い、メッシュごとの増幅度を乗じて地表面SI値を推定する。したがって、SI値分布を精度良く推定するためには、地盤の増幅度評価が重要である。

現在、「SUPREME」では、防災GISに登録されたボーリング情報を用いて評価した深度20mまでの平均S波速度AVS(20)からSI値増幅度を評価している。これは、全国の

平均的な関係式であり、実際は観測点の深部構造、周辺の地震域の震源特性などに大きく依存する。そこで、新 SI センサーで得られた実際の観測値に基づいて SI 値増幅度を評価することにより、高精度の SI 値分布推定を行う予定である。新 SI センサーの設置は更新に合わせて行っているため、まだ 3700 点の内、1/2 程度の設置であり、かつ地震記録を蓄積するには数年を要する。

本論文では、1998 年より地震観測を開始して比較的記録が蓄積されている湘南地区を主に対象として増幅度評価を行いその妥当性を検証するとともに、地盤情報から得られる増幅度との関係について検討を行う。

2 距離減衰式に基づく増幅度評価

東京ガス供給エリアの径は数十 km に及ぶので、工学的基盤上における SI 値の距離減衰式に対する比として各観測点における SI 値増幅度を評価する。首都圏周辺の地震環境は複雑であり、地震発生域により震源特性・伝播経路特性は大きく異なる。そこで、地震ごとに距離減衰式を評価する。適切な距離減衰式を得るために、広域の観測網であり、既に地点の SI 値増幅度が評価されている K-NET 観測値を用いて評価する。以下に手順を示す (Fig.1)。

1996 年以後、全国に K-NET が展開されており²⁾、関東地区にも多くの地震計が設置されている。Shabestari & Yamazaki³⁾は、全国の K-NET 観測記録を用いて、ダミー変数を用いた回帰分析を行い、距離減衰式の作成と地点係数の評価を行っている。これを式(1)に示す。

$$\log_{10} SI = -0.784515 + 0.491318M - 0.001463r - \log_{10} r + 0.003591h + c_i \quad (1)$$

ここで、 M : マグニチュード、 r : 断層からの最短距離(km)、 h : 震源深さ(km)、 c_i : 地点係数である。

この地点係数 c_i を用いて、地表での K-NET 観測値を基盤上に引き戻す (Fig.1 における $\circ \rightarrow \bullet$)。関東地方の K-NET 観測記録を用いることにより、SUPREME 観測網を取り囲むことができるので、地震ごとに震源距離 r のみをパラメータとして回帰分析を行って基盤上の距離減衰式を作成することができる。なお、Shabestari & Yamazaki³⁾の論文では、地点係数をその平均値が 0 となるように定めている。しかしながら、首都圏の揺れ易さを評価する際に、全国の平均に対する増幅度では意味づけが困難であるので、深度 20m までの平均 S 波速度 AVS(20)が 600m/s の層に対する増幅度に換算する。600m/s とする理由は、横浜市のデータを用いた末富ら⁴⁾の検討で基準点とした iz02 において AVS(20)が約 600m/s であること等による。

田村・山崎・Shabestari⁵⁾は、式(1)で得られた K-NET 各点の地点係数 c_i と観測点の AVS(20)との関係を次式で与えている。

$$\log_{10} c_i = -0.785 * \log_{10} AVS(20) + 1.93 \quad (2)$$

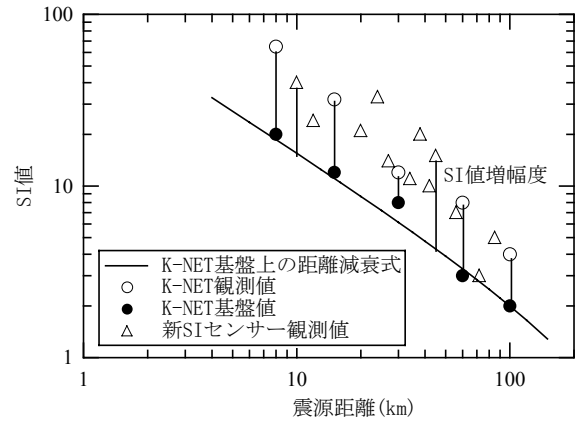


Fig.1 Procedure to estimate the amplification factor of SI-value at observation sites using K-NET data

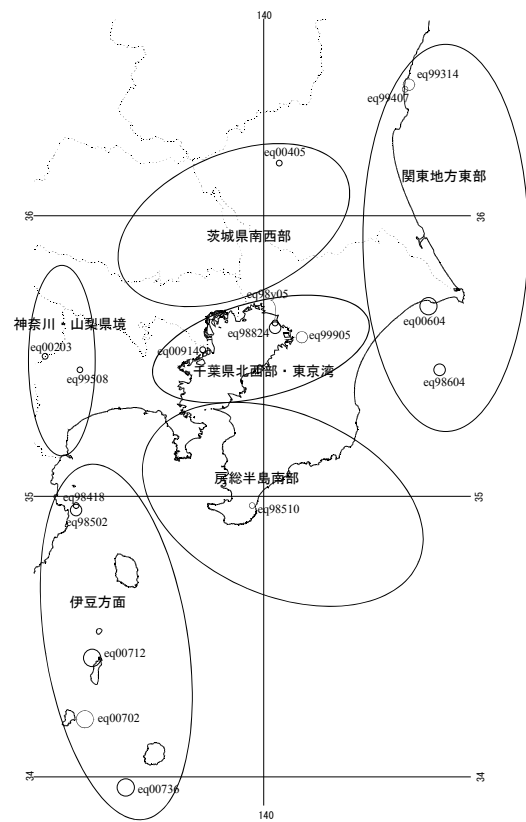


Fig.2 Location of the epicenters of earthquakes

AVS(20)=600m/s の時に、SI 値増幅度が 1 (地点係数が 0) となるためには、定数項を 2.18 とすればよい。したがって、各観測点の地点係数に式(2)との差である 0.25 を加えることにより、AVS(20)=600m/s の地点に対する地点係数を得ることができる。本検討では、この地点係数を用いて、K-NET 観測記録の距離減衰式を作成する。

得られた基盤上の観測値に対し、地震ごとに距離減衰式を作成する (Fig. 1 の \bullet を用いて、実線を作成することに対応する)。そして、距離減衰式に対する新 SI センサー観測値 (Fig.1 の Δ) の増幅度を求める。関数形については、5 種類について検討した。

Table 1 List of the observed earthquakes by SUPREME

地震番号	発生年月日	震央地名	緯度	経度	深さ (km)	M
eq98418	1998. 4. 26 7:37	伊豆半島東方沖	34° 58'	139° 11'	5	4.7
eq98502	1998. 5. 3 11:09	伊豆半島東方沖	34° 57'	139° 11'	3	5.7
eq98510	1998. 5. 16 3:45	千葉県南部	34° 58'	139° 57'	74	4.8
eq98604	1998. 6. 14 22:17	千葉県東方沖	35° 27'	140° 46'	51	5.6
eq98824	1998. 8. 29 8:46	東京湾	35° 36'	140° 03'	67	5.1
eq98y05	1998. 11. 8 21:40	千葉県北西部	35° 37'	140° 03'	78	4.6
eq98y17	1998. 11. 28 0:22	千葉県北西部	35° 38'	140° 06'	67	4.3
eq99314	1999. 3. 26 8:31	茨城県北部	36° 27'	140° 37'	58	4.9
eq99407	1999. 4. 25 21:27	茨城県北部	36° 28'	140° 38'	58	5.1
eq99508	1999. 5. 22 9:48	神奈川県西部	35° 27'	139° 12'	23	4.1
eq99905	1999. 9. 13 7:56	千葉県北西部	35° 34'	140° 10'	80	5.1
eq00203	2000. 2. 11 20:57	山梨県東部	35° 29.9'	139° 02.9'	18	4.2
eq00405	2000. 4. 10 6:30	茨城県南部	36° 11.2'	140° 04.1'	55	4.6
eq00604	2000. 6. 3 17:54	千葉県北東部	35° 40.6'	140° 43.1'	48	6.0
eq00702	2000. 7. 1 16:01	新島・神津島近海	34° 12.3'	139° 13.3'	15	6.4
eq00712	2000. 7. 15 10:30	新島・神津島近海	34° 25.4'	139° 15.2'	5	6.3
eq00722	2000. 7. 21 3:39	茨城県沖	36° 31.3'	141° 05.8'	49	6.0
eq00914	2000. 9. 29 8:56	神奈川県東部	35° 31.3'	139° 44.1'	86	4.5

$$\log_{10} SI_B = b_0 + b_1 r - \log_{10} r \quad (3)$$

$$\log_{10} SI_B = b_0 + b_1 \log_{10} r \quad (4)$$

$$\log_{10} SI_B = b_0 + b_1 \log_{10} \Delta \quad (5)$$

$$\log_{10} SI_B = b_0 + b_1 \log_{10} (\Delta + 30) \quad (6)$$

$$\log_{10} SI_B = b_0 + b_1 \log_{10} (\Delta + h) \quad (7)$$

ここで、 SI_B は基盤上のSI値(cm/s), r は震源距離(km), Δ は震央距離(km), h は震源深さ(km)であり、 b_0 , b_1 は回帰係数である。

検討対象とした18地震の諸元をTable 1に、震央分布をFig.2に示す。関東地方では、東から太平洋プレート、南からフィリピン海プレートが沈み込んでおり、複雑な地震環境が形成されている。伊豆方面での地震は浅く、東京湾周辺での地震は70km前後のやや深いところで発生している。これまでに様々な地震域での観測記録が得られており、今後も蓄積し、地震域の特性を把握していく予定である。

重相関係数をFig.3に示す。式による違いよりも、地震による違いの方が顕著である。式(5)、(6)は他の式よりも小さい傾向にある。

回帰係数 b_0 , b_1 をFig.4, 5に示す。全体に式(4)、式(7)の値が上で、式(3)、式(5)の値が下になる傾向にある。また、地震による違いも顕著に見られる。 b_0 の値が3を越えるのは大きすぎるし、負の値は適切でない。 b_1 の値としては-1~-1.5程度が妥当と思われる(式(3)を除く)。その意味では、式(4)、(7)は好ましくない。以上の検討に基づき、式(1)と同じ関数形である式(3)を用いて算出した回帰式を用いてSI値増幅度の評価をする。なお、実際にはデータが多く分布する範囲では式による違いはほとんどなく、データが少ない震源距離で式による差が現れるので、各点での増幅度評価には式の選択は大きな影響を与えない。

K-NETの距離減衰式に対するSI値の比として得られた地震ごとのSI値増幅度を、比較的記録が蓄積されているLブロックについてFig.6に示す。K1, K2ではeq00604(▲),

eq00702(▲)で小さく、eq99905(△), eq98y15(●)で揺れ易いという地震により全体に増幅度の大きさが変動する傾向が見られる。K6ブロックについても、同様にeq98824(●), eq98510(●)で揺れ易く、eq98502(●), eq99508(●)で揺れにくいという傾向が見られる。とくに、K6の場合、増幅度が大きいのは東側の東京湾周辺での地震、小さいのは西側の伊豆方面での地震であり、震源特性や伝播経路特性に関連する入力地震動特性の差異が起因していると考えられる。短周期成分が卓越する場合、増幅度は大きく、やや長周期成分が卓越する場合、増幅度は小さい。K1, K2ブロックの観測点では、観測SI値による増幅度が常にAVS(20)による増幅度より小さい場合が見られる。高層ビルなど建物の影響を受けている可能性も考えられ、今後観測条件の確認も行っていく予定である。

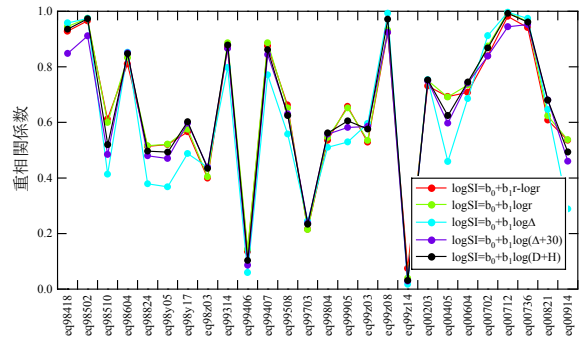


Fig.3 Comparison of the correlation coefficient

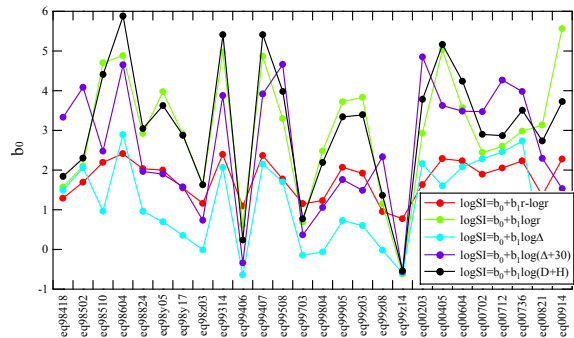


Fig.4 Comparison of regression coefficient b_0

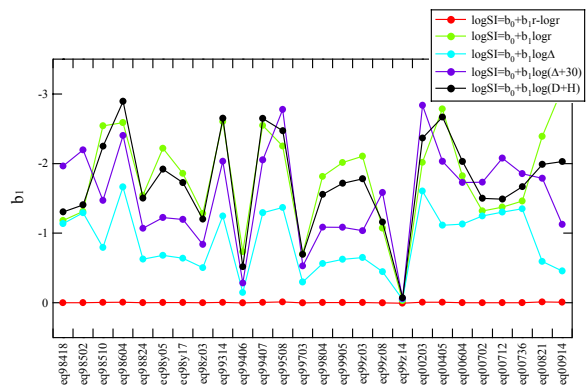


Fig.5 Comparison of regression coefficient b_1

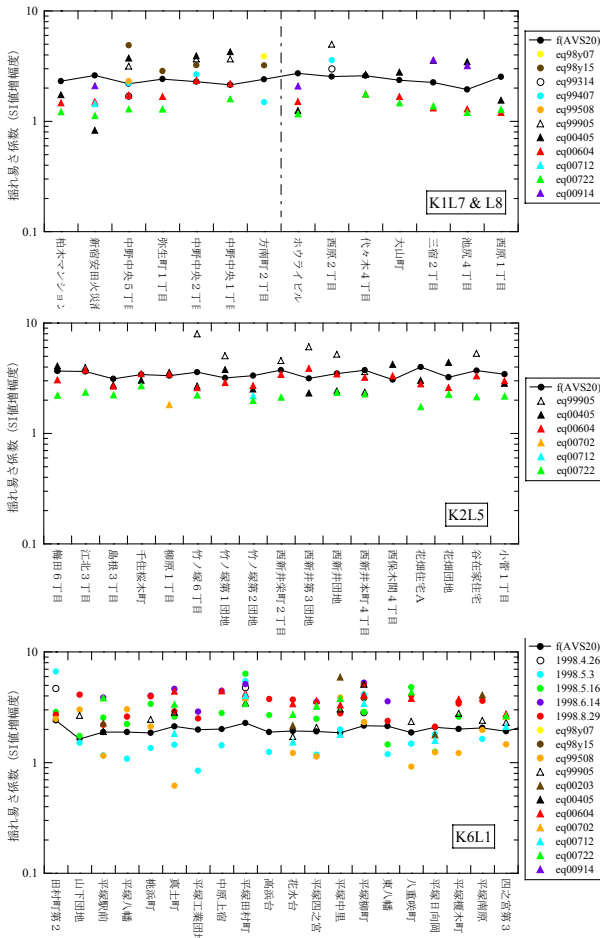


Fig.6 Amplification factor of SI-value

3 ボーリング情報に基づく増幅度評価

東京ガスでは供給エリア内の約 6 万のボーリングデータを GIS で整備している⁶⁾。これを用いた N 値から道路橋示方書の式⁷⁾を用いて S 波速度に換算し、SI 値増幅度と相関の高い地盤パラメータを評価する。横浜市の強震観測ネットワーク 150 地点のデータを用いた分析結果⁴⁾に基づき、平均 S 波速度 AVS(20)を用いた式(2)により (ただし、基準となる岩盤の固さが平均 S 波速度 600m/s となるように定数項は 2.18 とする) SI 値増幅度を評価する⁵⁾。Fig.6 に実線で AVS(20)による増幅度を示している。観測地震による増幅度の平均的な値となっているものの、観測値の方が地点による変動が大きく、サイト特性をより反映しているものと考えられる。

Fig.7 に湘南地区における地形・地質分布 (東京ガス分類)、Fig.8 にボーリングデータを利用して AVS20 により評価した SI 値増幅度の分布を示す。ボーリング地点での SI 値増幅度を距離による重みを用いて補間を行い、50m メッシュに対して評価している⁶⁾。砂丘・砂州の地域を増幅度は大きくなく、氾濫平野・谷底平野での増幅度が大きくなっていることがわかる。

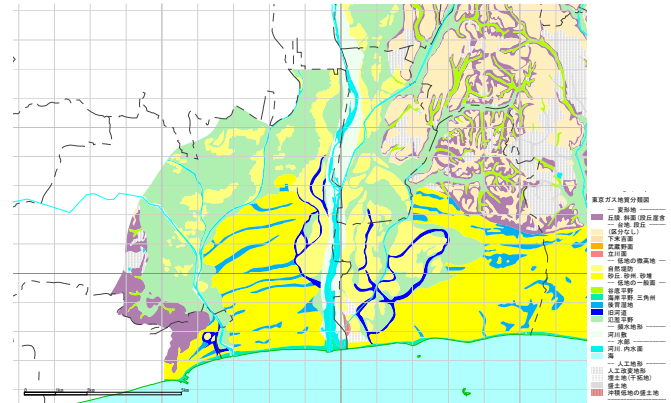


Fig.7 Topography and surface geology map in Syonan area

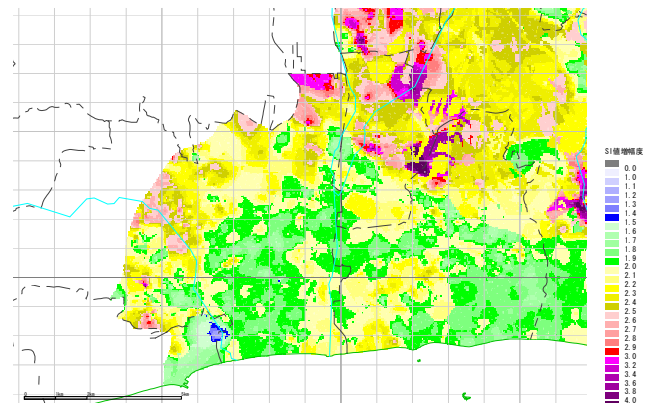


Fig.8 Map of the amplification factor for SI-value in Syonan area

4 湘南地区における観測から得られた増幅度と地盤情報から得られた増幅度の関係

現在の SUPREME ではボーリングデータを用いて SI 値増幅度を評価しているが、今後地震観測記録に基づいて評価した SI 値増幅度に置き換える予定である。ここでは、現状の精度を確認するとともに、地盤パラメータから得られる SI 値増幅度と地震観測記録から得られる SI 値増幅度の関係性を明らかにするために、両者の比較を行う。

湘南地区では 1998 年 4 月の新 SI センサー設置開始当初より地震観測を行っているため、他の地域よりも地震観測記録が蓄積されており、この地域を対象として検討する。これまでに 3 回以上の地震観測記録が得られている地点での平均増幅度を Fig.9 に示す。Fig.8 で大きな SI 値増幅度となる地域 (赤の地域) で地震記録が得られていないので、詳細な比較は困難であるものの、相模川河口付近で増幅度は大きくなく、平野周辺部で大きくなるという傾向は共通している。しかし、Fig.9 で東部に増幅度が大きい地域が見られることは、Fig.8 では現れていない。

地震観測記録の H/V スペクトル (水平成分は 2 成分合成) の卓越周期とピーク値の分布を Fig.10 に示す (観測地震数が 2 回の地震も評価している)。(a)の卓越周期は相模川西岸で大きくなり、Fig.9 の SI 値増幅度と対応しないのに対し、(b)のピーク値は東部の地域で大きい値となる SI

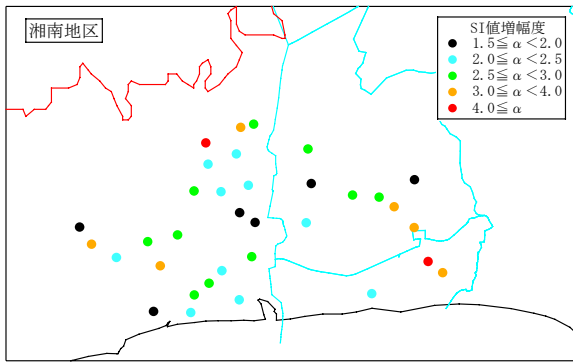
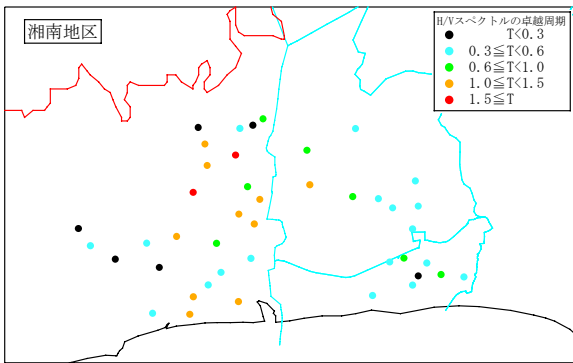
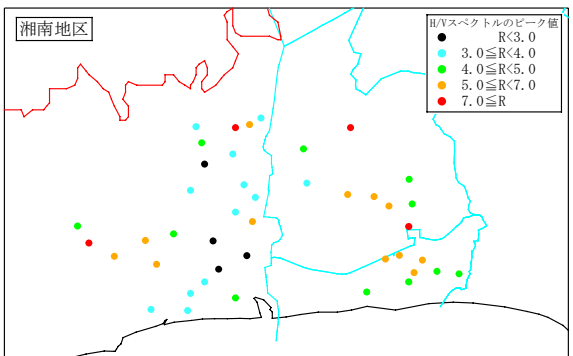


Fig.9 Amplification factor of SI-value estimated from the observation records



(a) Predominant period of the H/V spectrum



(b) The peak value of the H/V spectrum

Fig.10 Maps of the parameters of H/V spectrum in Syonan area

値増幅度と比較的良好な対応を示している。

増幅関数の卓越周期よりも増幅率の方が SI 値増幅度と対応が良いということは、基盤が共通であれば表層が軟かいほど SI 値増幅度が大きいということであり、SI 値増幅度を評価するための地盤パラメータとして平均 S 波速度を用いることが妥当であるということがわかる。また、深度 20~30m の平均 S 波速度を用いるのは、SI 値への影響が大きい周期帯での増幅率を評価するためである。

比較的記録が蓄積されている K6L1 ブロックについて、供給停止条件での地震動分布推定を、観測増幅度の平均値を用いて行う。東京ガスでは、各 L ブロックに 3 点の情

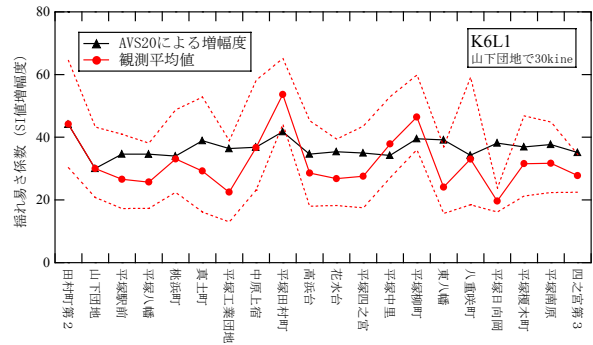


Fig.11 Comparison of distribution of SI-values estimated by AVS20 and observed records

報局を設置し、1)3 点とも 30cm/s (または 40cm/s) 以上、2)3 点の最大が 60cm/s 以上、のいずれかの条件に達した際には遠隔遮断を行い、L ブロックへの供給を停止する。Fig.11 は、L ブロック情報局の内、揺れにくい山下団地で 30cm/s の時の SI 値分布を 2 つの SI 値増幅度 (AVS20) に基づくものと地震観測に基づくもの (観測値) を乗じて推定したものである。AVS(20)による推定では 30~40cm/s にほぼ収まっているのに対し、観測値による推定では 20~50cm/s と地点による違いが大きく、観測記録に基づく評価結果の方が、明らかに地点による変動が大きい。地点の局所的な観測条件の影響を観測地震記録は反映しているものと考えられる。点線で観測増幅度の $\pm\sigma$ (標準偏差) の範囲を示している。ほとんどの地点では、AVS20 による評価値もその範囲内に含まれており、このブロックについては現行の値でも著しい誤差は生じないと思われる。

新防災システム SUPREME は 2001 年 7 月に稼働し、7 月 20 日に初めて防災システムとしての観測記録が得られた。地震の概要は以下の通りである。

発生時刻： 2001.7.20 6:02

震源：茨城県南部 (東経 139° 49.5' , 北緯 36° 10.0')

M : 4.8

震源深さ：56km

震度：栃木県佐野市・石橋町、群馬県宮城村・大泉町で 4.0 以上、埼玉県の一部で震度 4、千葉県の一部で震度 3、東京都、神奈川県は震度 2

1163 地点で SI 値が得られており、最大値は 4.0cm/s である。SI 値の分布を Fig.12 に示す。震源に近い埼玉県 (K7) で大きな SI 値が観測されている。震源から離れたところでも、横浜市南部など SI 値が大きい地点が数カ所見られる。高密度観測の体制が整ったので、今後、蓄積される記録を用いて同様の検討を行い、SI 値増幅度と地盤パラメータとの関係を明らかにし、高精度の地震動分布推定を行う予定である。

5 まとめ

本研究では、新 SI センサー観測記録を用いて各点での揺れ易さ係数 (SI 値増幅度) を評価する方法を提案し、これまでに得られている観測記録を用いてその妥当性を

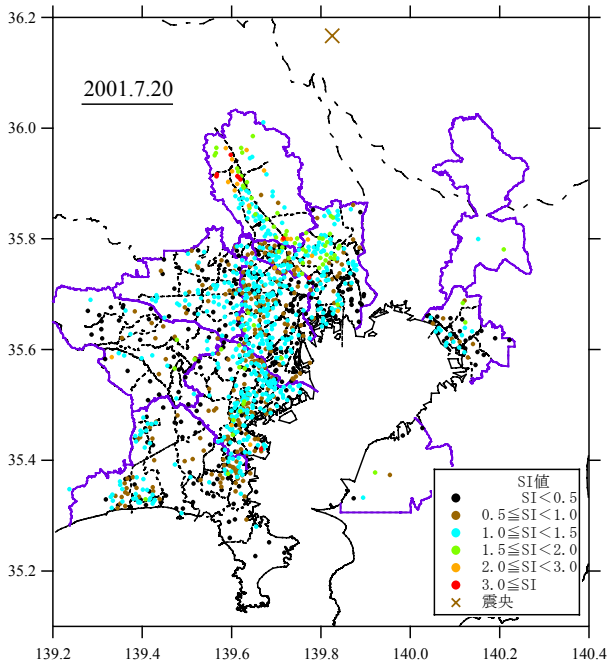


Fig.12 Map of SI values observed during the earthquake on July 20, 2001

検証した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) K-NET 観測値を用いて評価する基盤上の距離減衰式の関数形としては、5つの関数形を比較した結果、Shabestari & Yamazaki による回帰式と同じ関数形が、相関係数が高く回帰係数も物理的に妥当であるので、最も東京ガス供給エリアにおける SI 値の距離減衰特性を表すのに適している。
- 2) 1998年4月から2000年9月まで得られている18地震の記録を対象として、3回以上記録が得られている256地点について平均増幅度を評価した。
- 3) SI 値増幅度と H/V スペクトルの対応は、その卓越周期よりもピーク値の方がよく、表層の軟かさが、増幅度の重要な因子である。
- 4) AVS(20)による増幅度は観測増幅度の $\pm\sigma$ の範囲にほとんど含まれている。観測記録に基づく評価結果の方が、地点による変動が大きく、地点の局所的な観測条件の影響を観測地震記録の方がより反映している。

今後、さらに地震観測記録を蓄積し、首都圏のほかの地区でも同様の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 清水善久, 小金丸健一, 中山渉: 超高密度地震防災システム(SUPREME)の開発, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1285-1288, 2001.
- 2) 独立行政法人・防災科学技術研究所ホームページ: <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 3) Shabestari, K. T. and Yamazaki, F.: Attenuation relation of strong ground motion indices using K-NET records, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.137-140, 1999.
- 4) 末富岩雄, 吉田望, 清水善久, 中山渉, 山崎文雄, 阿部進, 鈴木誠: 横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討—卓越周期との関係—, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.157-160, 1999.
- 5) 田村勇, 山崎文雄, K.T.Shabestari: 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回年次学術講演会講演概要集, I-B, pp.714-715, 2000.
- 6) 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 清水善久, 中山渉: 防災 GIS を用いた地盤増幅度の面的整備と地震動面的分布推定に関する検討, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.421-425, 2001.
- 7) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996.