

横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討 —地形・地盤分類との比較—

山崎 文雄¹・山内 洋志²・清水 善久³・中山 渉³・阿部 進⁴・鈴木 誠⁴

¹正会員 東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

²正会員 建設省中部地方建設局豊橋工事事務所 (〒441-8149 愛知県豊橋市中野町字平西1-6)

³正会員 東京ガス(株)防災・供給センター (〒105-8627 東京都港区海岸1-5-20)

⁴横浜市 総務局災害対策室 (〒231-0017 横浜市中区港町1-1)

東京ガスが設置を進めている高密度地震計ネットワーク SUPREME が完成すると、3,600 箇所の新 SI センサーから SI 値と最大加速度が得られるようになる。このようなモニタリングに基づいて地震動の空間分布を推定するには、地形・地盤ごとの適切な揺れ易さの評価手法の確立が必要である。このため、横浜市の強震ネットワークで観測された強震記録を用いて、その地点の揺れ易さと地形・地盤条件との比較検討を行っている。本論文では、関東地域の K-NET 地震観測記録に基づいて構築した距離減衰式との比較を通して、横浜市の地震観測地点の最大加速度、SI 値および応答スペクトルの揺れ易さの評価を行った。

Key Words : site amplification, soil type, geomorphological land classification, Yokohama array, earthquake ground motion

1. はじめに

最近、高密度地震計ネットワークの配備が、わが国のライフライン事業者や自治体で進められており¹⁾、その代表的な機関として、東京ガスと横浜市が挙げられる。横浜市は、150観測点と3センターからなる高密度強震計ネットワークを1997年に完成させた²⁾。強震計は市内をほぼ2km間隔でカバーし、地震発生後3分以内に、震度などの情報をNTTのISDN専用回線で収集し、初動対応の判断材料とするとともに、関係機関へ震度データを素早く伝達する。また最近、震度情報を用いて建物被害などを即座に推定するシステムの構築も行った。

東京ガスは、地震時緊急措置のため、首都圏の都市ガス供給区域に331箇所の地震計(SIセンサー)からなる観測網を1994年に構築した。このネットワークから専用無線で送信される地震情報と、地理情報システム(GIS)上に整備した地盤、埋設管、需要家建物などの情報を用いた早期地震被害推定システム SIGNALを完成させた³⁾。その後、新SIセンサーや通信設備の技術開発を進めた結果、従来、地震時にガス導管の自動遮断を行っていた地区ガバナ(ガスの圧力を下げる設備)においても、揺れの強さやガス圧力の遠隔監視が可能になった⁴⁾。21世紀初頭にこの監視システム(SUPREME)が全て完成すると、首都圏で約3,600箇所の地区ガバナにおける地震動がモニタリングできるようになる。

このような高密度の地震計ネットワークからの情報に基づいて、高精度の被害推定を行うには、地震動分布推定の精度を高める必要がある。そのため、

ここでは、観測点での地盤特性情報が整備されている横浜市の強震ネットワークによる地震動記録を用いて、地震動分布に最も影響が大きいと考えられる地盤増幅度に関する検討を、横浜市と東京ガスの共同研究^{5),6)}として実施した。

2. 使用した地震と地震記録

横浜市の地震記録としては、表-1に示す10地震の加速度波形を使用した。地震計ネットワークの特性を評価するために、同じ10地震におけるK-NETおよびSIGNALの記録も合わせて解析を行った。また、湘南地区には新SIセンサーが既に設置されており、いくつかの地震における記録があるので、それらも用いた。解析に使用した関東地区のK-NET、横浜市、SIGNAL 31箇所(波形の記録される地点)、新SIセンサー76箇所の分布を図-1に示す。なお、距離減衰式を求める際の信頼性を保つために、K-NET観測点に関しては、1地震しか記録が取れていない地点の記録は解析から除外した。

これらの観測記録を用いて、まず SI 値と最大加速度(PGA)を計算した。SI 値は、新 SI センサーの計算アルゴリズムに合わせて、水平面を 16 等分(22.5 度)して各成分ごと減衰比 20%の速度応答スペクトルを計算し、その中で周期 0.1 秒から 2.5 秒の間の平均値の最大値を用いた。PGA は水平二成分の時刻歴での合成最大値を計算した。

これらの 10 地震のデータを用いて、K-NET および横浜市地震計ネットワークに関する距離減衰式を以下のように構築した。

関東地域 K-NET の距離減衰式 (161 地点, 945 波形)

$$\log_{10} PGA = 1.75 + 0.26 M - 0.0041 r - \log r + 0.0076 h + C_i \quad (1)$$

$$\log_{10} SI = -0.787 + 0.50 M - 0.0036 r - \log r + 0.0073 h + C_i \quad (2)$$

横浜市地震計の距離減衰式 (150 地点, 1442 波形)

$$\log_{10} PGA = 1.54 + 0.30 M - 0.0071 r - \log r + 0.0102 h + C_i \quad (3)$$

$$\log_{10} SI = -1.02 + 0.59 M - 0.0087 r - \log r + 0.0109 h + C_i \quad (4)$$

ここで、 M はマグニチュード、 r は断層面への最短距離、 h は震源深さ、 C_i は地点の揺れ易さを表す係数で、地盤条件など観測点の全ての条件により決まる。

解析結果として得られた SI 値の距離減衰特性の例を図-2 に示す。図中には、距離減衰式に加えて、

K-NET、横浜市、SIGNAL31 地点、新 SI センサーの観測データも示している。距離減衰のプロットからは、PGA や SI 値の分布は、どの地震においても、どの機関の地震計も顕著な大きさの違いは見られない。横浜市の地震計については、狭い範囲に密に設置されているため、観測点による震源距離の違いがほとんど現れず、地盤等の違いによる揺れの差が顕著である。したがって、横浜市について求めた距離減衰式は、距離に関する係数の信頼性が低く、一般に適用することには問題があろう。しかし結果的には、横浜市地震計による距離減衰式と K-NET による距離減衰式に大差は見られなかった。なお、ここで構築した距離減衰式は、マグニチュードの範囲が狭く、汎用的に利用することは避けるべきである。

表-1 解析に使用した観測地震の諸元 (地震・火山月報 (防災編) より)

地震	発生年月日 時間	震央地名	緯度	経度	震源深さ (km)	M	横浜市観測点	K-NET観測点	SIGNAL観測点	新 SI観測点	観測点合計
Eq01	1997.7.9 18:36	千葉県北西部	35° 33'	140° 08'	77	4.8	145	94			239
Eq02	1997.8.9 5:35	埼玉県南部	35° 50'	139° 30'	68	4.7	137	139			276
Eq03	1997.9.8 8:41	東京湾	35° 33'	140° 00'	108	5.1	144	144	1		290
Eq04	1998.1.14 2:17	千葉県北西部	35° 35'	140° 14'	76	4.9	149	108	19		276
Eq05	1998.1.16 10:57	千葉県南部	35° 12'	140° 18'	57	4.6	148	77	7		232
Eq06	1998.5.3 11:09	伊豆半島東方沖	34° 57'	139° 11'	3	5.7	150	71	6	53	280
Eq07	1998.5.16 3:45	千葉県南部	34° 58'	139° 57'	74	4.8	150	93	16	46	305
Eq08	1998.6.14 22:17	千葉県東方沖	35° 27'	140° 46'	51	5.6	147	53	14	26	240
Eq09	1998.7.20 10:43	神奈川県東部	35° 38'	139° 33'	27	3.6	122	21	5		148
Eq10	1998.8.29 8:46	東京湾	35° 36'	140° 03'	67	5.1	149	145	30	71	395
合計							1442	945	98	196	2681

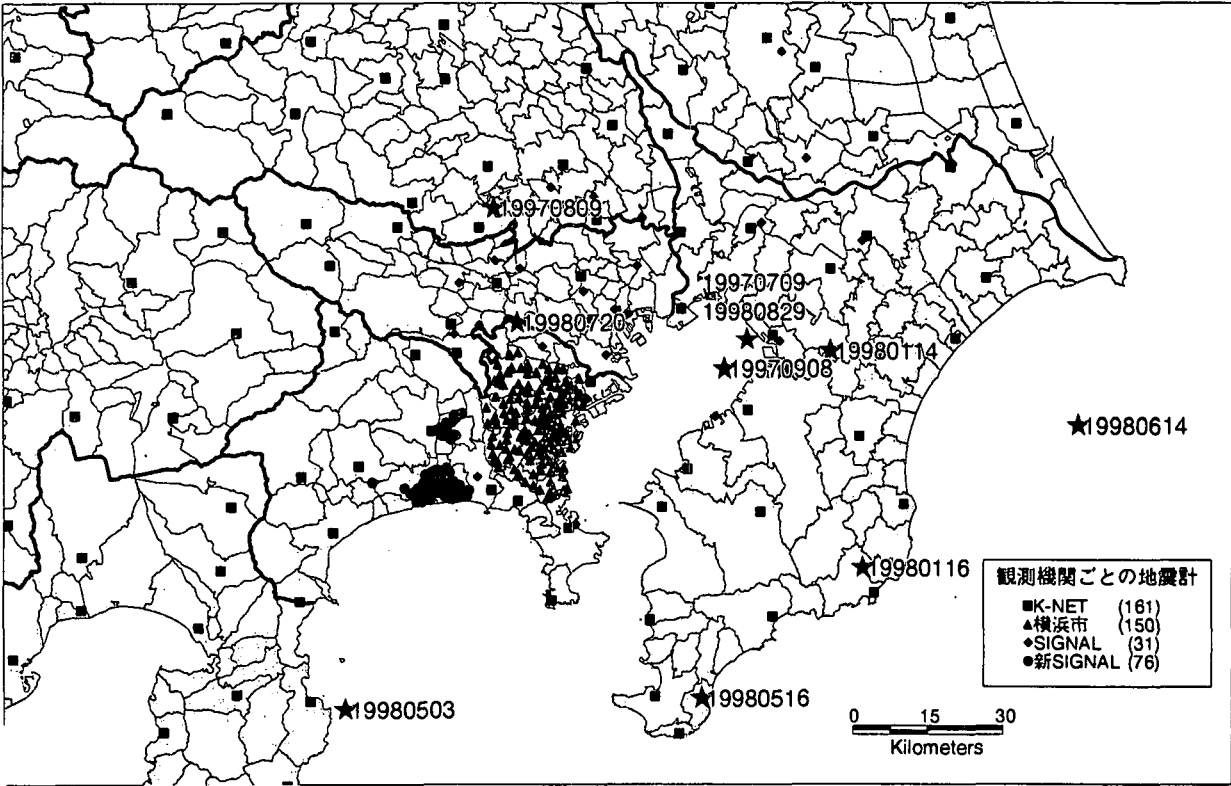


図-1 解析に使用した関東地区 K-NET、横浜市、SIGNAL(31箇所)、新 SI センサーの地震計配置と震源位置

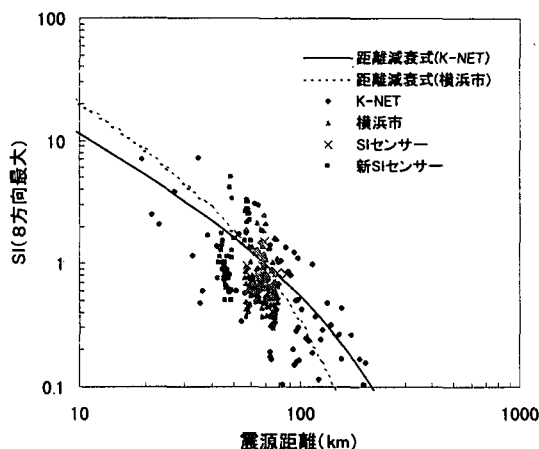


図-2 観測されたSI値の距離減衰特性 (Eq06)

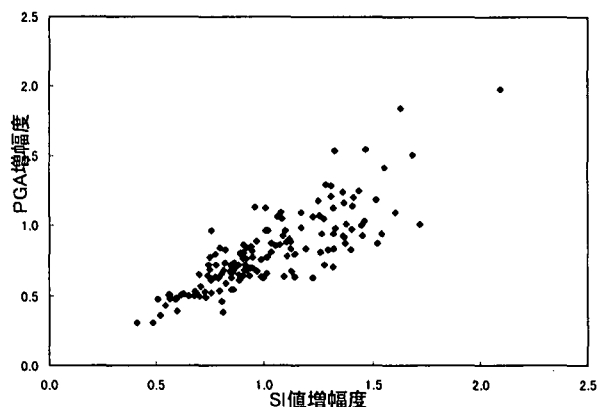


図-3 150地点の最大加速度とSI値の地盤増幅度の関係

このような地震ごとの距離減衰プロットから目につくことは、地震ごとに、平均的な距離減衰式より大きい値の点が多いものと(例えば Eq10)、小さい値の点が多いもの(例えば Eq06)があることである。このことは、観測地震動の Kriging 法による空間補間⁷⁾で用いる距離減衰式のトレンド成分は、地震ごとに観測値から作るべきであることを示している。震源メカニズムや震源位置、伝播経路などにより、マグニチュードと距離のみでは表現できない揺れの差が現れることに注意が必要である。

3. 横浜市観測地点の揺れ易さと地盤分類

前節の結果をもとに、横浜市の地震観測地点におけるSI値と最大加速度(PGA)の揺れ易さを求め、地盤条件との比較を行う。各観測点での揺れ易さの求め方は、K-NETが広域の地震動分布を良く表すという観点から、10地震に対するK-NETの距離減衰式を基準とする。この距離減衰式との比を取ることで、横浜市観測地点の平均地盤に対する相対的な揺れ易さを求める。各地点での全観測地震に対するPGAとSI値の地盤増幅度の関係を図-3に示すが、PGAとSI値の増幅度はかなりの相関が見られる。

以上の解析で求めた横浜市の150観測地点の増幅度をもとに、地盤条件とSI値と最大加速度の揺れ

易さとの関係について考察する。地盤条件のデータベースは3種類用いる。1つは国土数値情報で、1メッシュの大きさは1km x 1kmであり、地盤分類は地形と表層地質を組み合わせで分類した11種類である⁸⁾。もう一つは、現在のSIGNALにおいて用いられるゾーニングであり、1メッシュの大きさは175m x 250mで国土数値情報よりもかなり細かく、地盤分類は4種類で推定固有周期をもとに分類されている。さらに、東京ガスでは、地形分類に基づいた詳細地盤ゾーニング⁹⁾も行っており、この分類と揺れ易さの関係についても検討する。

国土数値情報の地盤条件と横浜市の各観測点における揺れ易さとの関係を図-4(a)に、SIGNALメッシュによる地盤分類と横浜市各観測点の揺れやすさの関係を図-4(b)に示す。これらはいずれも、気象庁87型地震計の観測点で得られたような比較的明瞭な相関⁸⁾を示していない。この理由としては、国土数値情報に関しては、地震計の密度の細かさに対して1km四方とメッシュが粗いため、メッシュ内の地盤条件の変動を追従できないことが考えられる。SIGNAL地盤分類に関しては、メッシュは充分に細かいと思われるだが(横浜市の行っている地盤ゾーニングは50mメッシュと更に細かいが)、地盤分類が4種類と少なく、地盤増幅度の地域分布を詳細に説明するにはやや不十分であると考えられる。

最近東京ガスが作成した詳細地盤ゾーニングは、土地条件図等をもとに、ほぼ連続的に地域分けを行っており、地盤分類の数も豊富である。詳細地盤ゾーニングと横浜市観測点における揺れ易さとの関係を図-4(c)に示す。しかしこれを用いても、観測地点の揺れ易さを明確に説明できないことが分かる。地表面の揺れは、地盤の伝達特性と入力地震動のスペクトル特性の影響を受ける。そこでスペクトル特性を考慮に入れた検討を以下で行う。

なお、横浜市観測点の揺れやすさについては、岩盤上の基準点に対する比を取る方法を末富ら⁵⁾が示し、K-NET距離減衰式に対する比を取る方法を本文で示した。この2つの方法による結果を比べると、基準値は異なるがほぼ同じ増幅率を表している。

4. 応答スペクトルの地盤増幅特性

横浜市の地震観測データを用いて、速度応答スペクトルについても同様に距離減衰式を構築し、求めた地点係数スペクトルと地盤条件との比較を行った。図-5にその例を示すが、SIGNALゾーニングの同じ地形分類でも卓越周期や周期ごとの地点係数スペクトルに大きなばらつきが見られる。横浜市の地震観測点では、同じ台地でも平均地盤より揺れやすいものから揺れにくいものまで幅広く分布している。したがって、SIGNAL地盤分類は、もう少し区分を細かくしないと、地点ごとの揺れやすさを表現できないと思われる。

また、国土数値情報の地形・地盤分類、さらには詳細地盤ゾーニングと地点係数スペクトルとの比較

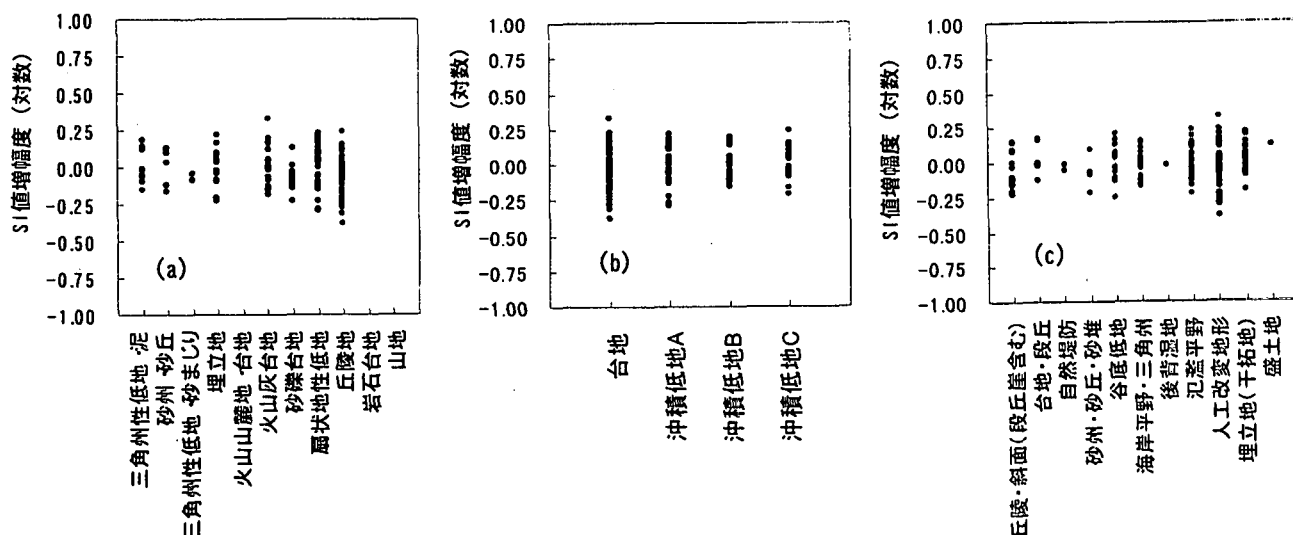


図-4 横浜市観測点のSI値平均増幅度と地盤分類の関係 (a) 国土数値情報, (b) SIGNAL分類, (c) 詳細ゾーニング

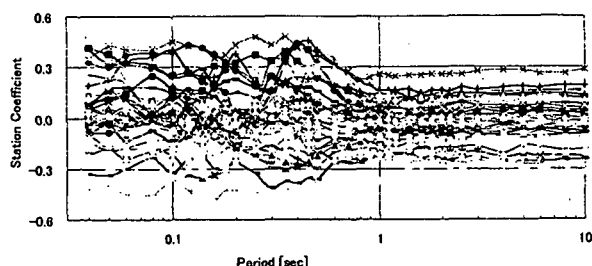


図-5 横浜市観測点のSI値のスペクトル地点係数(台地)

も行った。しかしこれらについても、残念ながら、さほど良い揺れ易さの分類はできなかった。気象庁の観測点では、地形分類により地点係数スペクトルをグループ化できたが⁹⁾、横浜市でこれが困難であった理由は、横浜市の地形が複雑で、同じ人工改変地や埋立地でも、基盤深度や埋立て層厚に地域的に差異が大きいことが考えられる。したがって、SUPREMEで用いる地盤ゾーニングとしては、地形分類に加えて、推定卓越周期やボーリング柱状図などの情報を考慮したものが必要となろう。

5. まとめ

東京ガスが設置を進めている高密度地震計ネットワークSUPREMEへの利用を考えて、横浜市の地震計ネットワークで観測された強震記録を用いて、SI値、最大加速度、応答スペクトルなどの地盤増幅度と地形・地盤分類との関係を検討した。関東地域のK-NET地震観測記録に基づいて構築した距離減衰式との比較を通して、横浜市地震観測点の最大加速度、SI値の揺れ易さを求め、国土数値情報の地形・地質分類、SIGNALゾーニング、さらには東京ガスの詳細地盤ゾーニングなどと比較した。その結果、横浜市の地震観測地点においては、このような地形分類に基づいた地盤分類のみでは、地点の揺れ易さを充

分は区分できないことが分かった。また、同様の結論が、速度応答スペクトルの地盤増幅度についても得られた。したがって、地盤増幅度を適切に評価するには、地形分類に加えて、地盤固有周期やボーリング柱状図などの深さ方向の情報を考慮したゾーニング法を導入することが必要と思われる。

参考文献

- 1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展望，土木学会論文集，No.577，1-15，1997。
- 2) 鳥居盛男，阿部進，新保康裕，岸本健二：横浜市のリアルタイム地震防災システム，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，3451-3456，1998。
- 3) 山崎文雄，片山恒雄，野田茂，吉川洋一，大谷泰昭：大規模都市ガス導管網の地震時警報システムの開発，土木学会論文集，No.525，331-340，1995。
- 4) 清水善久：東京ガスの新リアルタイム防災システム-SUPREME-と今後の展望，第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，13-18，土木学会，1999。
- 5) 末富岩雄他：横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討ー卓越周期との関係ー，第25回地震工学研究発表会講演論文集，1999。
- 6) 石田栄介他：横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討ーボーリングデータに基づく地盤ゾーニングの試みー，第25回地震工学研究発表会講演論文集，1999。
- 7) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 3，3491-3496，1998。
- 8) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁地震記録に基づく地盤増幅度と地形分類との関係，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 1，pp. 909-1004，1998。
- 9) 山内洋志，山崎文雄，若松加寿江，Shabestari, K. T.：応答スペクトルの距離減衰式における地点係数と地形分類との関係，第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp. 97-100，1998。