

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—

末富岩雄¹・吉田望¹・清水善久²・中山渉²・山崎文雄³・阿部進⁴・鈴木誠⁴

¹正会員 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

²正会員 東京ガス(株)防災・供給センター (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)

³正会員 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

⁴正会員 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 において、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とその地点の地形・地盤条件との比較検討を行っている。本論文では、横浜市観測点の基準点に対する SI 値の増幅度を評価し、入力地震動の周波数特性が増幅度に大きく影響すること、卓越周期・平均 S 波速度と増幅度に相関性があることを示した。また、1995 年兵庫県南部地震観測記録を用いて、中小地震記録で得られた SI 値増幅度の強震時への適用性について検討を行った。

Key Words : SUPREME, amplification factor, predominant period, SI value, real-time monitoring

1. はじめに

東京ガスでは、新 SI センサー約 3,600 基を配した新防災システム (SUPREME) の構築を行っている¹⁾。高精度被害推定および個々の地区ガバナ地点の揺れ易さの把握を目的として、蓄積される中小地震の地震波形データの分析による地点の揺れ易さ評価を順次開始している。きめ細かい被害推定を行うためには、地震計が設置されていない地点についても、地盤情報に基づいた揺れ易さ評価が必要である。横浜市の強震ネットワークでは全観測点 (150 点) で PS 検層が実施されており、地震観測記録とその地点の地形・地盤条件との関係を詳細に検討することが可能である。本論文では地盤情報や地震記録から得られる表層地盤の卓越周期と地点の揺れ易さの関係に着目して検討を行う。

一方、1995 年兵庫県南部地震では地盤の顕著な非線形挙動により、地震動増幅特性が変化したことが知られている²⁾。ガス供給停止の判断を行う SI 値が 30~60 カイン程度での揺れ易さが防災システムにとって最も重要であるので、中小地震観測記録から得られる SI 値等の地震動代表値の基盤に対する増幅度の防災システムへの適用性についても、既往強震観測記録を用いて検討を行う。

2. 観測点の卓越周期の評価

横浜市では 150 観測点全点で PS 検層が実施されている。Toshinawa et al.³⁾は、全観測点で常時微動観測を行い、露頭岩盤に対するフーリエスペクトル比、常時微動の水平/鉛直振幅比スペクトル、PS 検層データから得られる理論伝達関数の 3 種の伝達関数の卓越周期を比較し、多くの地点で良く一致することを示している。ここでは S 波速度が最も大きい 610m/s の層が現れている iz02 地点での記録を用いて、地震観測記録のフーリエスペクトル比から地盤の卓越周期 T_{obs} を評価する。東京ガス地質分類⁴⁾と T_{obs} の関係を図-1 に示す。丘陵や台地で T_{obs} が 0.5 秒を越える地点は見られないのは妥当であるが、一般的には卓越周期が長いと考えられる埋立地や平野

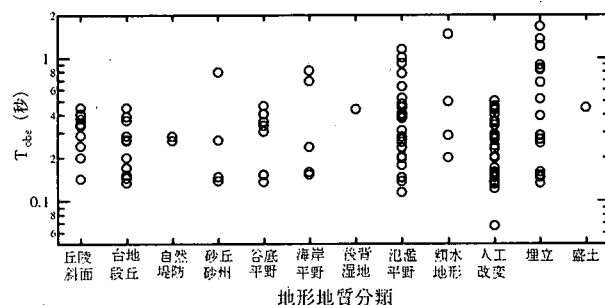


図-1 東京ガス地質分類と基準点に対するフーリエ・スペクトル比の卓越周期 T_{obs} の関係

部で卓越周期が 0.2 秒前後しかない場合も多く、横浜市では地形地質と卓越周期の間に明瞭な関係が見られないことがわかる。

3. 観測記録から得られる揺れ易さ係数

岩盤点 iz02 に対する SI 値の比を揺れ易さ係数 λ とする。

$$\lambda_j^{SI} = \exp \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{SI_{ij}}{SI_{i0}} \right) \right\} \quad (1)$$

SI_{ij} は i 番目の地震における j 番目の観測点における SI 値、 SI_{i0} は岩盤点での SI 値であり、水平面で 10° 刻みに方向軸を変えて求めた内の最大値を用いる。岩盤点に対するスペクトル比（伝達関数）は一定と見なすことができる（非線形の問題を除く）が、SI 値等の地震動代表値の比は入力地震動の特性の影響を免れない。その影響を評価するためには、岩盤点における地震動特性（入力地震動特性）を把握する必要がある。

iz02 において 9 地震の記録が得られており⁵⁾、これらの加速度応答スペクトル（減衰 5%）の比較を図-2 に示す。eq6 と eq8 は明らかに他の地震記録と形状が異なっており、周期 1 秒以上のやや長周期成分が卓越している。特に eq8 の短周期成分は他の地震に比べて小さい。伊豆方面で発生する地震は震源が浅いので表面波が卓越する。この 2 地震は、文献 5) で示した揺れ易さ係数が小さい地震であり、入力地震動特性と揺れ易さ係数が密接に関連していることがわかる。

そこで、各点の揺れ易さ係数の評価を、全地震の対数平均値、短周期型の対数平均値、長周期型 (eq6, eq8) の対数平均値の 3 種類について行う。短周期型地震を対象とした λ_j^{SI} と長周期型地震を対象とした λ_j^{SI} の比較を図-3 に、対数標準偏差の比較を図-4 に示す。明らかに短周期型と長周期型で増幅度の大きさが異なっており、長周期型では短周期型の 1/2 程度である。したがって、増幅度評価の精度を高めるためには、入力地震動の周波数特性を考慮することが必要である。ばらつきも 2 タイプに分類することで全体的には小さくなっている。しかしながら、長周期型はまだ 2 地震しか観測されていないので、ばらつきに関しての詳細な議論は現段階では困難である。

図-5 に全地震を対象とした揺れ易さ係数と地盤パラメータの関係を示す。地形地質分類との間に明瞭な関係は見られない。深度 10m までの平均 S 波速度と卓越周期 $T_{0.5}$ とは相関が見られる。翠川ら⁶⁾で

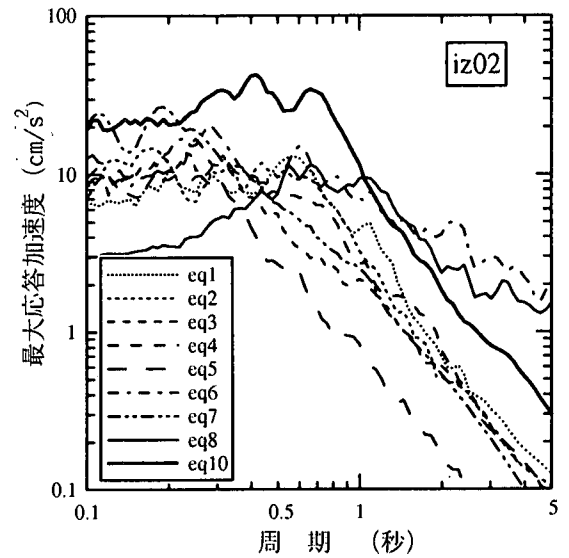


図-2 岩盤点における加速度応答スペクトル

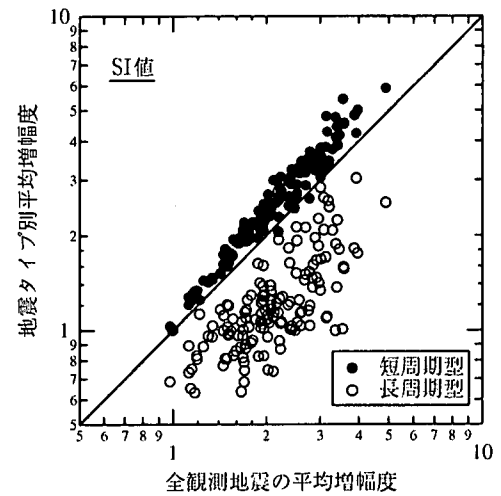


図-3 地震タイプ別平均増幅度

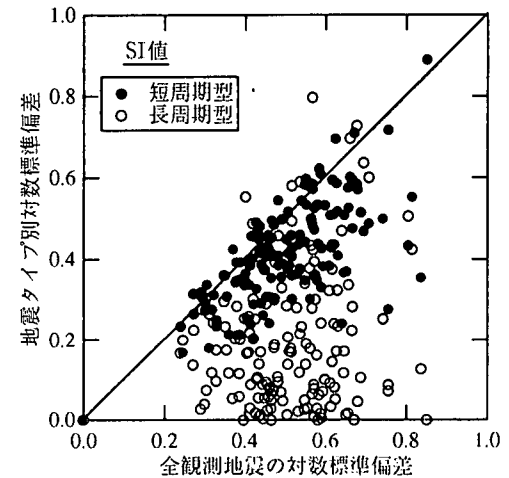


図-4 地震タイプ別対数標準偏差

は深度 30m までの平均 S 波速度と最大速度増幅度の相関が高かったが、本検討では 10m の場合が最も高い相関係数が得られた。本検討でも長周期型地震での増幅度では深度 20m までの平均 S 波速度との相関が高かった。本検討では、最大速度増幅度と SI 値増幅度の間には、

$$\log(\lambda^{VEL}) = 0.96 \log(\lambda^{SI}) \quad (2)$$

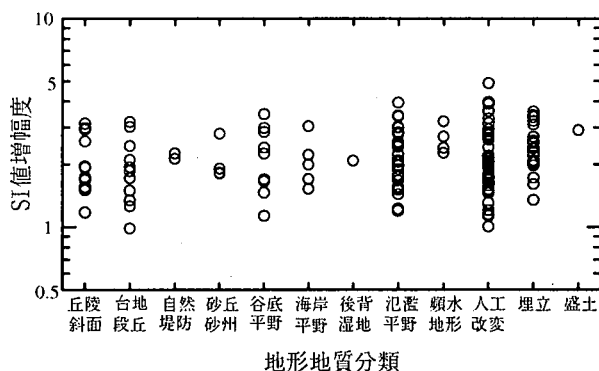
の関係（相関係数 $R=0.99$ ）がある。翠川らとやや異なる結果となったのは、地震規模の違いや観測点の地盤特性の違いによるものと考えられる。地形地質による増幅度の違いが見られないのは、図-1 で示したように地形地質による卓越周期の違いが見られないためと考えられる。

4. 地盤の非線形化の影響

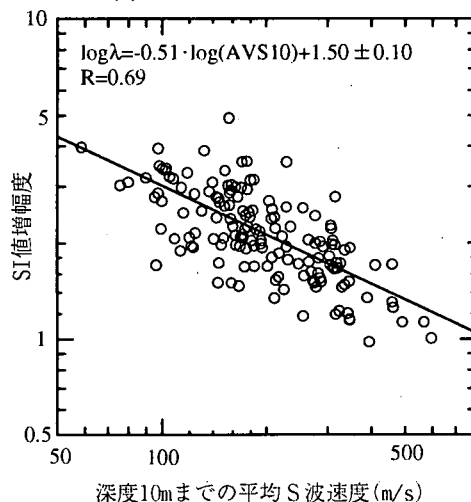
以上は弱震記録を用いて得られた揺れ易さ係数である。防災システムでは 30 カインを越えるレベルでの増幅度が重要であり、弱震時増幅度と強震時増幅度の関係を把握する必要がある。Suetomi & Yoshida²⁾ は 1995 年兵庫県南部地震の観測記録を分析し、最大加速度については埋立地で増幅度が 1 を下回るなど顕著な影響を受けているが、最大速度については影響が小さいことを示している。文献 2) では最大加速度、最大速度のみを扱っており、また増幅度での表現となっていない。そこで、SI 値、計測震度の関係を加え、増幅度での表現として、図-6 に示す。基盤の扱いが同等でない（岩盤点と鉛直アレー地中記録では大きく条件は異なる）ので、厳密な議論は難しいが、地震動代表値による特性の違いから SI 値における特性を把握できると考えられる。

最大速度に関しては 10cm/s 以上では増幅度の変化は見られない。地震動が小さいところで大きな増幅度を示しているのは、基盤とした地中記録が堅い岩盤中にあるために特に増幅度が大きくなっているものであり、他の代表値でも見られる。最大速度増幅度に関しては、地盤の非線形化の影響は現れないと考えられる。SI 値の場合もほとんど変化は見られない。計測震度については、計測震度 5.0 を越えると軟弱地盤で増幅度の低下が見られる。最大加速度の場合、増幅度は明らかに右肩下がりであり、また最大加速度が小さい時は硬質地盤の増幅度が相対的に小さいのに対し、最大加速度が大きくなると硬質地盤での増幅度が相対的に大きくなっており、最大加速度は地盤の非線形化の影響を強く受けている。

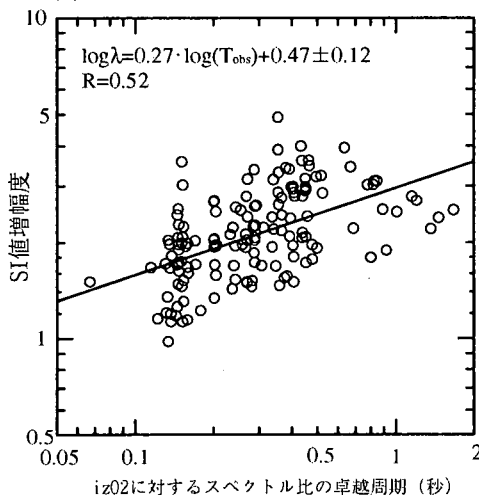
次に鉛直アレーでの弱震記録と強震記録を用いた検討を行う。ポートアイランド、関西電力（株）総合技術研究所、大阪ガス（株）葺合供給所、東京電力（株）新富士変電所（ただし葺合供給所についてはポートアイランドを地中観測点と見なす）の 4 地点について、等価線形解析により地中記録から入射波を抽出し、開放基盤（2E）波に対する増幅度として



(a)東京ガス地質分類図



(b)深度 10m までの平均 S 波速度



(c)基準点に対するスペクトル比の卓越周期

図-5 揺れ易さ係数と地盤パラメータの関係

評価する。

図-7 に 4 地点における増幅度の比較を示す。図-6 と同様、最大速度では非線形化の影響は見られない。顕著な液状化を生じたポートアイランドでは、SI 値の増幅度はやや小さくなっているが、標準地盤である他の地点については増幅度の低下は見られない。したがって、100 カイン近くまでは、非線形化の影響を無視できる、すなわち中規模地震観測記録から

得られた揺れ易さ係数を用いることができると考えられる。計測震度、最大加速度については、ポートアイランドでは明瞭に影響が現れており、関電技研でも影響が見られる。葺合、新富士における計測震度は、卓越周期が伸びる影響で逆に大きくなっている。浅層地盤が薄い地点の計測震度の増幅度評価には注意を要する。

5. まとめ

横浜市高密度観測記録および 1995 年兵庫県南部地震観測記録を用いて揺れ易さ係数について検討を行った。本研究により、以下に示す結論が得られた。

- 1) 揺れ易さ係数の大きさは、入力地震動特性により異なる。
- 2) 横浜市では揺れ易さと表層の卓越周期・平均 S 波速度の間には相関性が見られるが、地形地質分類は卓越周期や揺れ易さ係数と明瞭な関係が見られない。
- 3) 弱震記録を用いて得られた揺れ易さ係数は、ガスの供給停止判断を行う範囲まで適用可能である。

本研究では、神戸市開発局によるポートアイランド、関西電力（株）総合技術研究所、大阪ガス（株）葺合供給所での 1995 年兵庫県南部地震観測記録と余震記録を、また東京電力（株）新富士変電所の記録を（財）震災予防協会によるアレー観測記録デー

タベースより使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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 - リアルタイム地震防災の現状と今後 -，土木学会，pp.13-18，1999。
- 2) Suetomi, I. and N. Yoshida: Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, *Soils and Foundations, special issue on geotechnical aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake*, No.2, pp.11-22, 1998.
- 3) T. Toshinawa, H. Nishida, S. Midorikawa and S. Abe: Comparison of spectral characteristics of strong motions and microtremors at the dense strong-motion network sites in Yokohama, *Second International Symposium "The Effect of Surface Geology on Seismic Motion"*, ESG1998, Yokohama, pp.399-406, 1998.
- 4) 石田栄介，磯山龍二，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 - ボーリングデータに基づく地盤ゾーニングの試み -，第 25 回地震工学研究発表会（投稿中）
- 5) 山崎文雄，山内洋志，清水善久，中山渉，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 - 地形・地盤分類との比較 -，第 25 回地震工学研究発表会（投稿中）
- 6) 翠川三郎，松岡昌志，作川孝一：1987 年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価，日本建築学会構造系論文報告集，第 442 号，pp.71-78，1992。

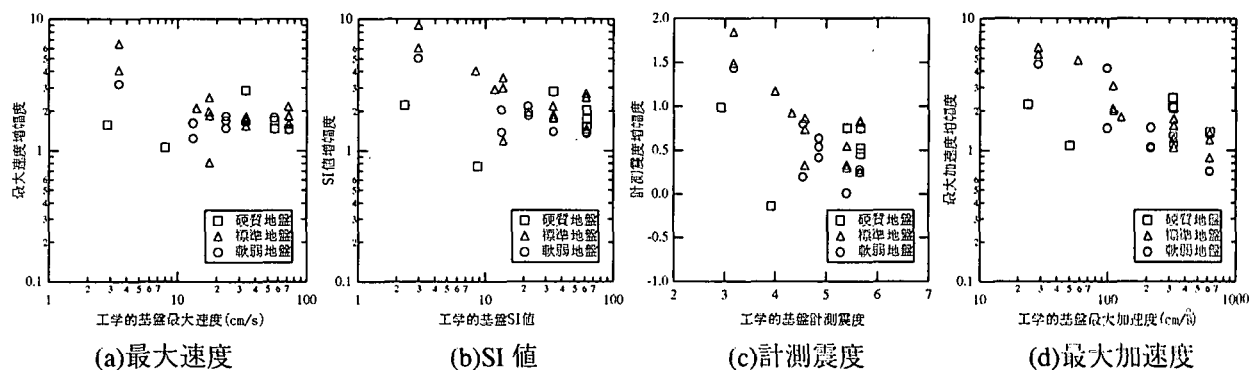


図-6 1995 年兵庫県南部地震における地震動代表値の増幅度

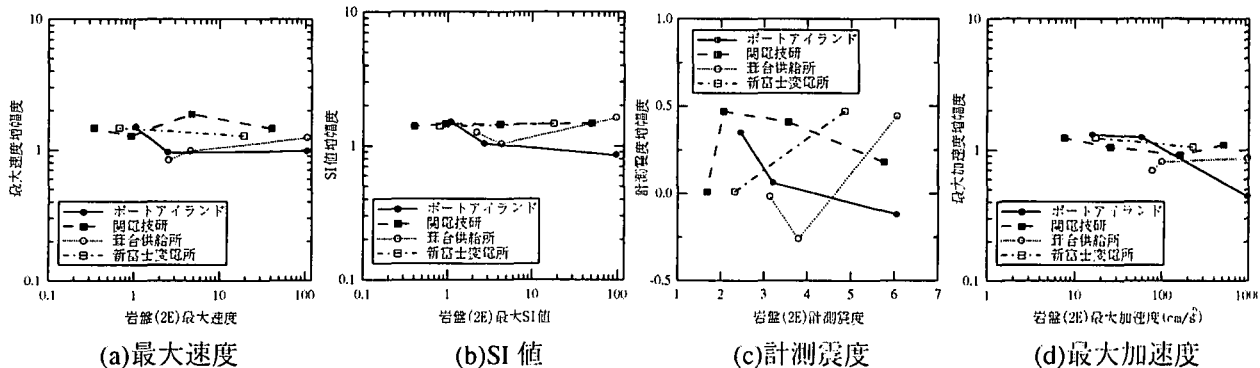


図-7 鉛直アレーにおける弱震時と強震時の増幅度