

地震動代表値の増幅度特性に及ぼす影響因子

末富岩雄¹・清水善久²・小金丸健一²・中山渉²・山崎文雄³

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)

リアルタイム地震防災システムにおいては、サイト増幅特性を適切に評価することが重要となる。地震動の大きさを最大加速度等の代表値で表せば、その増幅度は入力地震動特性により変動するので、入力地震動特性の影響を考慮することが必要になる。入力地震動特性は多くの因子の影響を受けるので、首都圏における鉛直アレー観測記録を用いて、震源特性、伝播経路特性等の様々な要因を含む震源域との関係を把握した。また、地盤の非線形化も大きな要因であるので、非線形解析を行い、地震動代表値および地盤特性による地盤の非線形化の影響の度合いを明らかにし、地震動代表値の特性に応じて中小地震観測記録から得られる増幅度の適用範囲を把握した。

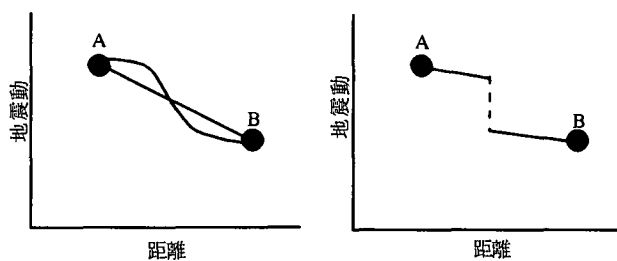
Key Words : amplification factor, realtime estimation, nonlinear behavior, seismic zone, Kanto area

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以後、多くの防災機関によりリアルタイム地震防災システムが構築されている。そのシステムは、多点に配置した地震計から地震観測情報を収集し、これに基づく推定地震動分布から推定されるメッシュ毎の被害を初動対応等に利用するものである。

観測値を用いて等高線を描くように何らかの補間を行えば、簡単に地動分布を求めることができる。しかしながら、実際には地動分布の変化は滑らかでなく、地層・地形の境界等で地震動は急激に変化する(図-1)。したがって、表層地盤の増幅特性の影響を除いて、基盤に引き戻し、基盤上で補間を行うことが重要である(図-2)。

地動分布推定を精度良く行うためには、この境界をどのように決定するかということと、増幅度をどのように定めるかということが問題となる。さらに、最大加速度等の地震動代表値の増幅度は、入力地震動特性の影響を受けるので、当該地域直下で地震が発生した場合の地震動特性を予測した上での増幅度評価を行う必要があり、表層地盤の増幅特性は地盤の非線形化の影響を強く受ける。また日頃から観測される中小地震観測記録を利用して、揺れやすい地域の把握、地盤モデルの検証等を行っていく必要があり、そのためには弱震から強震まで適用可能な増幅度関数が必要である。



(a)地盤条件が変化しない (b)地盤条件が変化する
図-1 2点の観測値の補間

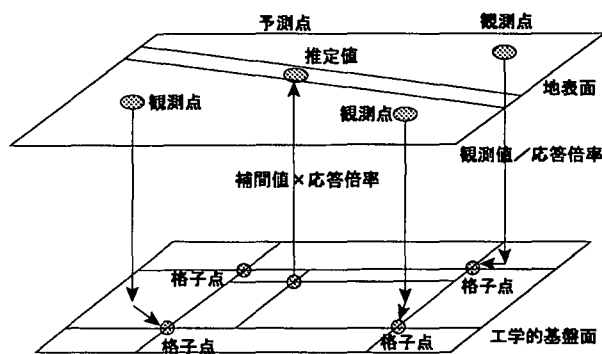


図-2 地盤増幅を考慮した補間¹⁾

ここでは、既往の増幅度評価法を概観した後、首都圏での鉛直アレー観測記録を分析し、震源特性、伝播経路特性等の様々な要因を含む震源域と増幅度との関係について検討する。また、地盤の非線形化も大きな要因であるので、非線形解析を行い、地震動代表値の特性および地盤特性による地盤の非線形化の影響の度合いについて検討する。さらに、増幅

度評価において留意すべき課題について考察を加える。

2. 地震動代表値の地盤増幅度の評価手法

増幅度評価においては、まず地盤分類法（ゾーニング）が重要である。地盤分類としては、1)地形地質分類、2)卓越周期、3)ある深度までの平均S波速度、4)地盤の軟弱さを表す指標 S_n ²⁾、等が挙げられる。国土数値情報は日本全国を対象としていることから、消防庁や国土庁のシステムでは国土数値情報による地形分類を行う松岡・翠川の方法³⁾を用いている。同様に国土数値情報に基づく地形分類により増幅度を与える方法として、西阪・福和ら⁴⁾、大西・山崎・若松⁵⁾の方法がある。松岡・翠川の方法は1987年千葉県東方沖地震における観測記録、西阪・福和らの方法は地震応答解析、大西・山崎・若松の方法は気象庁87型強震計記録の統計解析によるもので、3つの方法の増幅度評価手法は全く異なるし、地盤分類も若干異なるが、得られた結果に大きな違いはない⁵⁾。国土数値情報は地盤調査が行われていないような山間部も含めて日本全国どこでも適用でき、かつ数値化されているということから便利ではあるが、逆に沖積平野に広がる都市部の分類が粗い。また1kmメッシュであるので、観測点は国土数値情報による地形分類とは異なる地形上に位置している場合もある。特定地域においては、東京ガスのSIGNALや川崎市のシステムのように地質に基づく分類がよく行われる。

都市部では、ボーリングデータは豊富であるので、N値とS波速度との経験的關係を用いて卓越周期を評価することが可能である。道路橋示方書等でも卓越周期に基づく地盤分類が行われている。しかしながら、N値50の層は地震動増幅特性を表すための工学的基盤としては不適切な場合も少なくない。常時微動を用いて、地点の地盤震動特性を表す卓越周期を評価することも可能である。

翠川・松岡ら⁶⁾は1987年千葉県東方沖地震における観測記録を用いて、深度10mまでの平均S波速度と最大加速度増幅度、深度30mまでの平均S波速度と最大速度増幅度との相関が最も良いことを示している。横浜市の記録を用いた検討⁷⁾でも、平均S波速度は増幅度と良い対応を示している。ある深度までの平均S波速度は、基盤の選定や卓越周期の読みとり等の判断を要しないので簡便であるし、大きな誤りが起きないという利点がある。基盤のS波速度に大差がなければ、平均S波速度が小さいことは、インピーダンスのコントラストが明瞭で増幅度が

大きいことを意味し、深度は着目する周波数帯と関連していると考えられる。紺野・片岡⁸⁾が提案しているように、短周期微動アレーは、深度30m程度までの平均S波速度を求めるのに大変有効である。

Sugito et al.²⁾は地盤の軟弱さを表す指標としてN値を用いて与えられる S_n を提案している。以上の指標の内、地形分類以外は連続量として与えられるので、詳細な地盤情報を有している場合には、対象メッシュ毎に増幅度評価を行うことも可能である。

次に、地盤分類（ゾーニング）に基づき、それぞれの増幅度を如何に定めるかが問題となる。地盤の増幅度は、最大加速度を例にとると、地表面における最大加速度を A_s 、基盤での最大加速度を A_r として、その関係を、 $A_s = \lambda \cdot A_r$ 、として表す係数 λ として表される。

地盤増幅度評価法は以下の3つに大別される。

- 1)大地震の観測値に基づく方法
- 2)中小地震の観測記録を用いる方法
- 3)地震応答解析に基づく方法

1)の既往の強震観測記録に基づく場合^{例えば3)9)}、観測事実は何よりも重要であるものの、震源近傍の記録が充分でなく、基盤条件を統一することが難しい等の問題がある。観測波の振幅調整でシミュレーションを行うことも多いが、極端な振幅調整をすると物理的な矛盾が大きくなる。2)の中小地震の観測記録を用いる方法では、ダミー変数を用いて距離減衰式を作成する際に得られる各観測点の地点係数を用いる^{例えば4)}。狭い地域内であれば、基準点に対する比の平均値を用いることもできる。この方法は当該地点の観測事実に基づいて地点特性を反映できるものの、地盤の非線形特性が考慮されないこと、中小地震と強震時の入力地震動特性の違いを考慮することが課題である。3)のシミュレーションによる方法^{例えば2)10)}は、南関東地震など被害想定に用いられている。その結果をリアルタイム地震防災システムにも使うことで、被害想定での初動体制計画と関連づけられるという利点がある。地震動代表値の増幅度を適切に評価するためには、入力地震動特性を適切に予測することが重要であり、そのためには震源近傍における地震動特性（アスペリティやディレクティビティの影響）を考慮する必要があることから、末富ら¹¹⁾は統計的グリーン関数法を用いて入力地震動を作成している。また、シミュレーションにおいては、地震応答解析法の精度、設定したパラメータの妥当性にも留意を要する。いずれも一長一短であるので、実際にシステムを構築する際には、複数のアプローチから検討する必要があると考えられる。

3. 震源域特性が増幅度特性に及ぼす影響

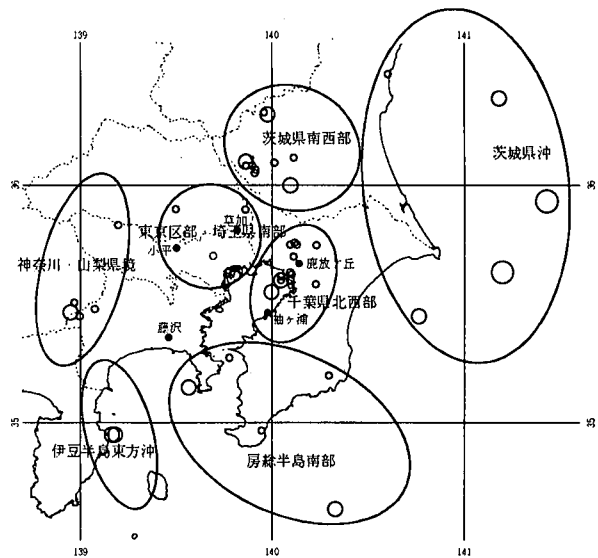
東京ガスでは、1994年より5地点で基盤地震観測を実施しており、多くの記録が蓄積されている。また、東京大学生産技術研究所千葉実験所では、1982年より高密度三次元アレー観測が実施されており、1987年千葉県東方沖地震を含む多くの記録が公開されている¹²⁾。ここでは、計6点の鉛直アレー観測記録を用いて、震源域毎の揺れ易さ係数の特性を明らかにする。

1994年～1998年まで69地震の記録が得られている。振幅が小さ過ぎる記録、北海道東方沖地震等の遠方の記録を除いた44地震を対象地震とする。震央位置を図-3(a)に示す。東大千葉アレーの場合、鳥島等、遠方での記録を除き、図(b)に示す38地震を検討対象とする。いずれも、関東南部の地震域をよくカバーしている。ただし、半数以上が、SI値が1以下の小さな揺れである。最大加速度、最大速度等の地震動代表値は、SI値と良い相関を示しているため、ここではSI値の増幅度を扱う。

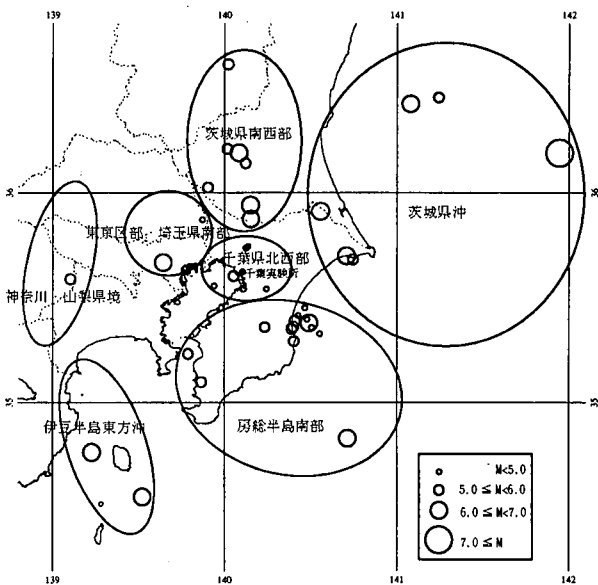
基盤観測点5局と東大生研千葉アレーの6点について、一次元重複反射理論により地中記録から基盤入射波を算出する。その際、地中と地表のスペクトル比に伝達関数をフィッティングさせる逆解析手法により、S波速度と減衰 ($Q=\alpha f^\beta$ として減衰の周波数依存性を考慮)の最適値を求めて、これを用いている。6点のS波速度構造を図-4に、平均スペクトル比と最適化した伝達関数を図-5に示す。

地点による著しい差はないが、草加、袖ヶ浦の2点で卓越周波数が2Hz以下であり、他の地点より地盤条件が軟らかい特性を示しており、一方藤沢での卓越周波数は3Hzと他よりやや高く、他の地点より硬い特性を示している。いずれの地点も観測スペクトル比と最適化による伝達関数はよく対応している。減衰の周波数依存性を表す β は既往の研究と同様に0.5～1.0の値となっている。

得られた基盤入射波を用いて、解放基盤(2E)にお



(a)基盤地震計データ



(b)東大千葉アレーデータ

図-3 観測地震の震央位置と地震発生域の区分

けるSI値に対する地表面におけるSI値の比を揺れ易さ係数として評価する。ここでは、図-3に示すように7つの地域に分割して、それぞれの地域での平均揺れ易さ係数を求める(平均値、標準偏差を自然

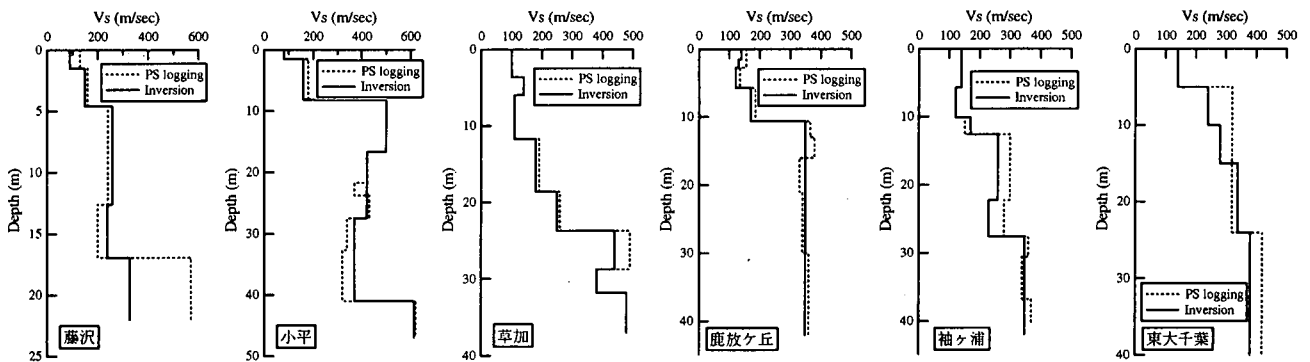


図-4 観測地点のS波速度構造

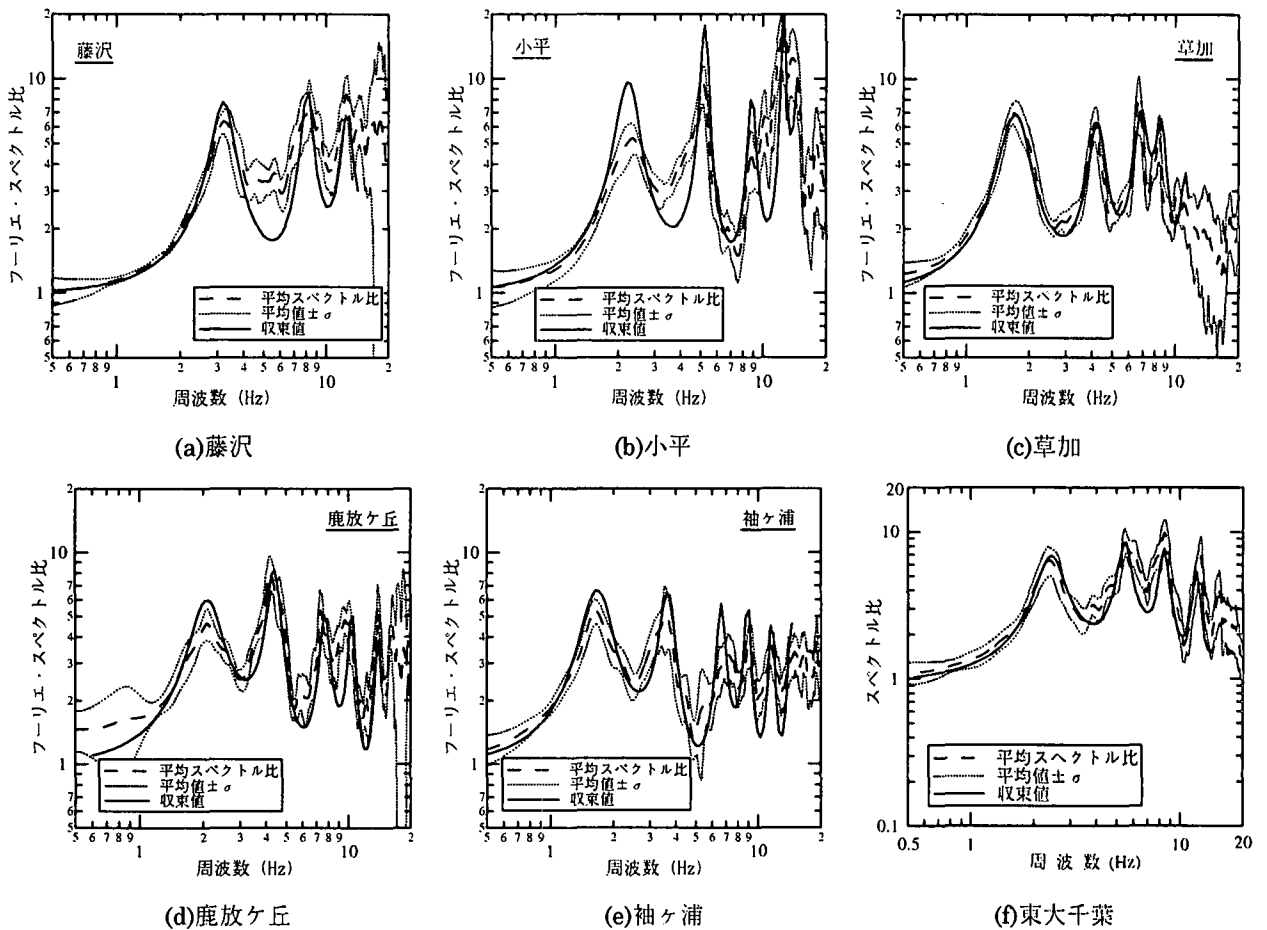


図-5 観測記録の平均スペクトル比と伝達関数

対数軸で算出)。ただし、鹿放ヶ丘に関しては、揺れ易さ係数を評価できる地震の数が少ないので、以後の詳細検討の対象としていない。

震源域毎に得られた揺れ易さ係数を図-6に示す。いずれの観測点についても、震源域による揺れ易さ係数の違いが見られる。ばらつきに関しては、震源域毎に揺れ易さ係数を求める方がやや小さくなる傾向は見られるが、その効果は小さい。観測地震数が他より多い茨城県南西部と千葉県北西部においても、地域毎に求めた時のばらつきは全体のばらつきとほとんど変わらない。震源域が同一でも、地震規模が異なると入力地震動特性が異なるためと考えられる。全体に小平および東大千葉でのばらつきが大きい。

図-7に5地点の揺れ易さ係数の比較を示す。伊豆半島東方沖と茨城県沖の地震は、いずれの観測点に関しても、揺れ易さ係数は小さい。グラフの形状は、藤沢と小平、草加と袖ヶ浦が類似しており、藤沢・小平では房総半島南部、草加・袖ヶ浦では東京区部・埼玉県南部の地震で揺れ易さ係数が大きい。藤沢・小平は地盤の一次の卓越周波数が2~3Hzで高振動数域での増幅度が大きいのにに対し、草加・袖ヶ浦は地盤の一次の卓越振動数が1.5~2Hzで高振動数域

での増幅度は大きくない。したがって、藤沢・小平では高振動数成分が増幅され、草加、袖ヶ浦ではそれより低振動数側の比重が大きいということによると考えられ、藤沢・小平と草加・袖ヶ浦の差異は地盤増幅特性の差異を反映したものと考えられる。東大千葉の場合、山梨県東部での値が最も大きい、1地震しか得られていない。この次に増幅度が大きいのは、房総半島南部であり、卓越周波数が対応する藤沢・小平と同タイプと考えられる。

以上より、首都圏周辺での増幅度は、伊豆半島沖、茨城県沖で起こる地震の場合小さくなり、一方茨城県南西部や房総半島等、他の地域での増幅度に大きな違いは見られないものの、地盤の卓越周波数に応じて、揺れ易さ係数が大きい震源域は異なっていることがわかった。伊豆周辺で発生する地震での増幅度が小さいことは、横浜市での記録を用いた検討結果⁷⁾と一致している。また、年繩ら¹³⁾は首都圏南西部での工学的基盤における観測記録を用いて、同様に震源域の特性について検討しており、伊豆周辺で発生する地震では、短周期成分が小さく、震源域の特性を考慮することの重要性を指摘している。今回の分析には、SI値が0.1カイン以下の記録も含まれ

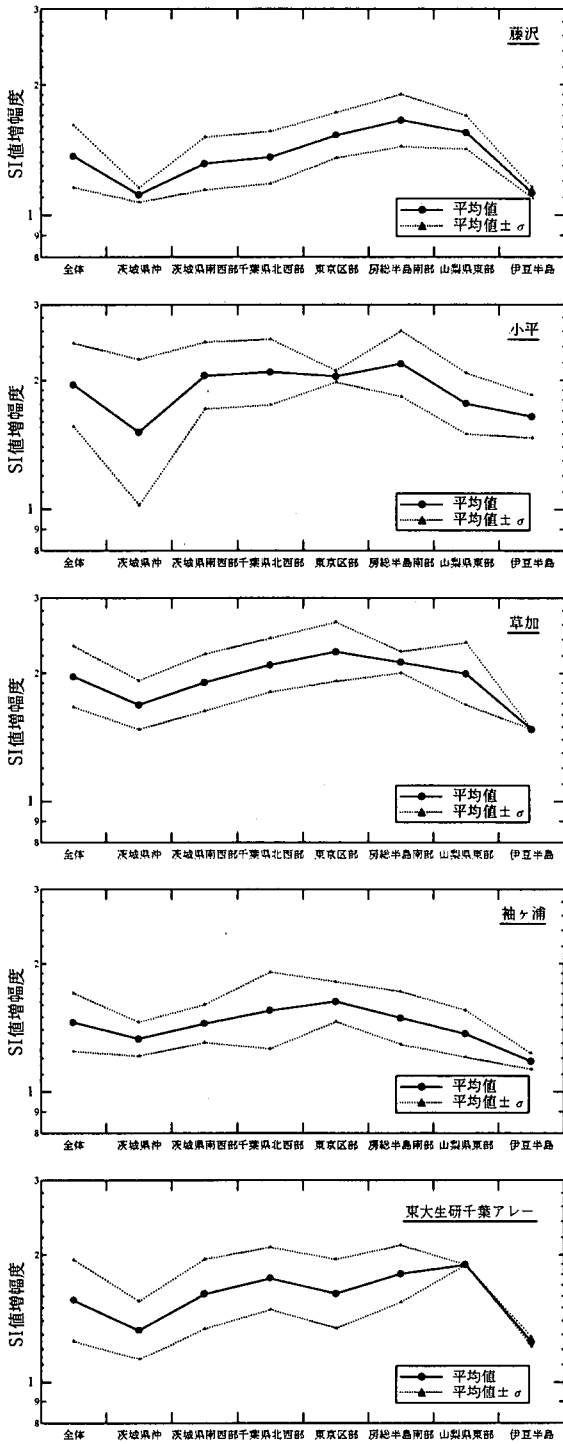


図-6 震央域毎の揺れ易さ係数の比較

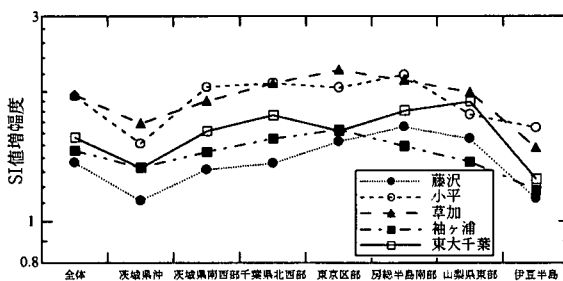


図-7 各点の揺れ易さ係数の比較

ており、信頼性が高い振幅の大きい記録を蓄積して確認を行い、また千葉県北西部や東京区部で今回観測されている地震の震源は深く、首都圏直下に影響を及ぼす可能性が高い浅い場所で発生する地震を観測して、その特性を把握する必要がある。

4. 地盤の非線形化が増幅度に及ぼす影響

上述の6点の鉛直アレーでは、最大せん断ひずみが1%に近くなるような強震は観測されていない¹⁴⁾。東京ガス供給エリアにおいては、強震時への適用性を観測記録からは検証できないので、非線形解析により検討を行う。

場所によっては、液状化を生じる可能性が高い地点もあるが、地盤情報が充分でなく、地震動代表値を評価する上では解析手法の差異よりも地盤のモデル化の精度の方が影響が多い。それ故、解析手法として、全応力非線形解析法を用いる。

応力-ひずみ関係として、R-O (Ramberg-Osgood) モデルを用いる。R-Oモデルの骨格曲線は、式(1)で表される。履歴曲線は Masing 則を用いて作成する。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{max}} \left[1 + \alpha \left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^{\beta-1} \right] \quad (1)$$

ここで、 γ はせん断ひずみ、 τ はせん断応力、 G_{max} は初期せん断弾性定数である。 α 、 β 、 τ_f を与えることで、モデルを表現できる。対象地点の G - γ 、 h - γ 関係が得られていないので、最大減衰比 h_{max} と基準ひずみ γ_f から与えることとする¹⁵⁾。式(2)により、 β を決定する。

$$h_{max} = \frac{2\beta-1}{\pi\beta+1} \quad (2)$$

$G/G_{max}=0.5$ のひずみを基準ひずみとして、 α 、 τ_f を与える。レイリー減衰については、質量比例減衰を0、剛性比例減衰を一次の卓越周期で0.5%となるようにパラメータを定める。

入力地震波として、1995年兵庫県南部地震の際にポートアイランドGL-83mで観測された波の基盤入射波¹⁶⁾を 50cm/s^2 から 1000cm/s^2 まで振幅調整して用いる (50, 100, 200, 300, 500, 685, 1000)。観測波から得られる最大加速度振幅は 685cm/s^2 である。すなわち、1995年兵庫県南部地震より1.5倍近く大きな地震動まで想定して、地盤の非線形化の影響について検討を行う。

得られた地震動代表値の増幅度と入力地震動の関係を図-8, 9に示す。最大加速度の場合、入力加速度が $200\sim 300\text{cm/s}^2$ を越えると、非線形化の影響が顕

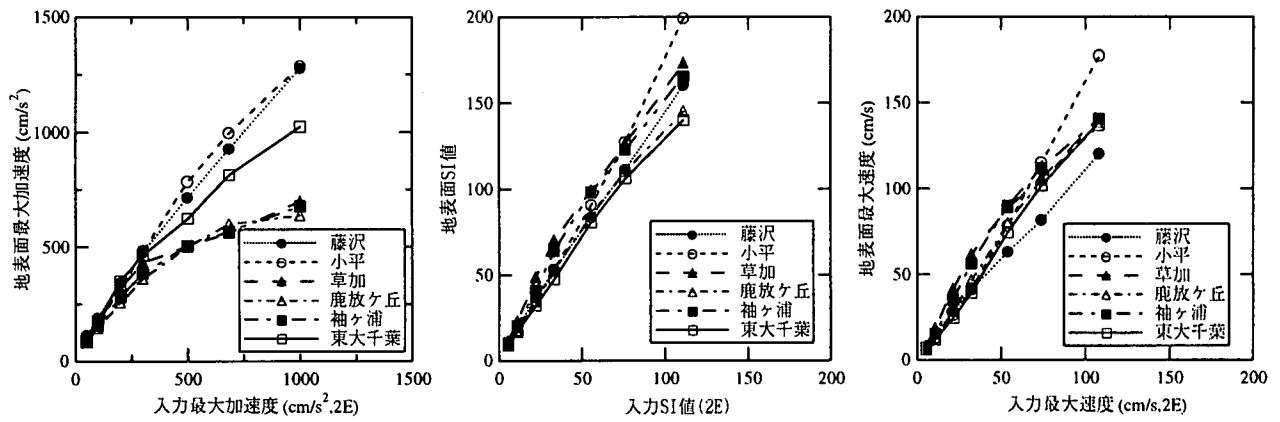


図-8 入力地震動と地表面応答の関係

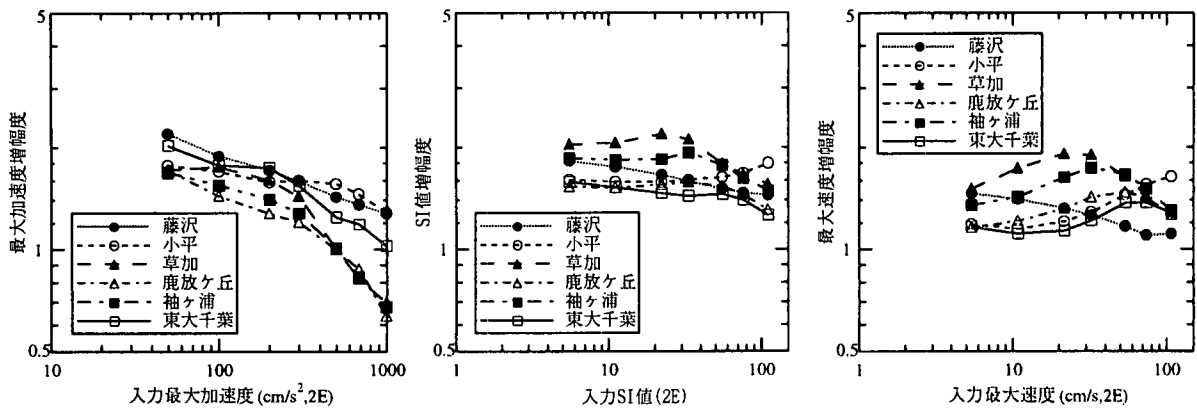


図-9 入力地震動と増幅度の関係

著になり増幅度が小さくなる。SI 値の場合、小平、鹿放ヶ丘、東大千葉では変化は小さい。小平ではむしろ 50 カインを越えてからやや大きくなっている。藤沢は小振幅から徐々に小さくなっている。比較的軟弱な草加と袖ヶ浦では 30 カインを越えてから非線形化の影響で増幅度が小さくなっている。5 カインでの値と比べると、20~30 カインでやや大きくなっている。60 カインまでは適用可能と考えられる。最大速度増幅度も、概ね SI 値増幅度とどの地盤モデルについても同様の傾向を示している。以上より、中小地震記録から得られる揺れ易さ係数を、供給停止の判断を行う 30~60 カイン程度まで適用可能と考えられる。

最大加速度、最大せん断ひずみ、最大せん断応力の鉛直分布を、小平と草加について図-10 に示す。地盤が軟らかい草加(袖ヶ浦も同様)では、深度 10m 付近で大きなせん断ひずみが発生し、入力加速度が大きくなっても、それより浅い部分での最大加速度の増加は小さいことがわかる。これは、地盤がそのせん断強度以上のせん断力を上層に伝えることができないということによるものであり、草加については、せん断強度により決まる最大加速度の上限値¹⁷⁾に近い値となっていると考えられる。比較的地盤が

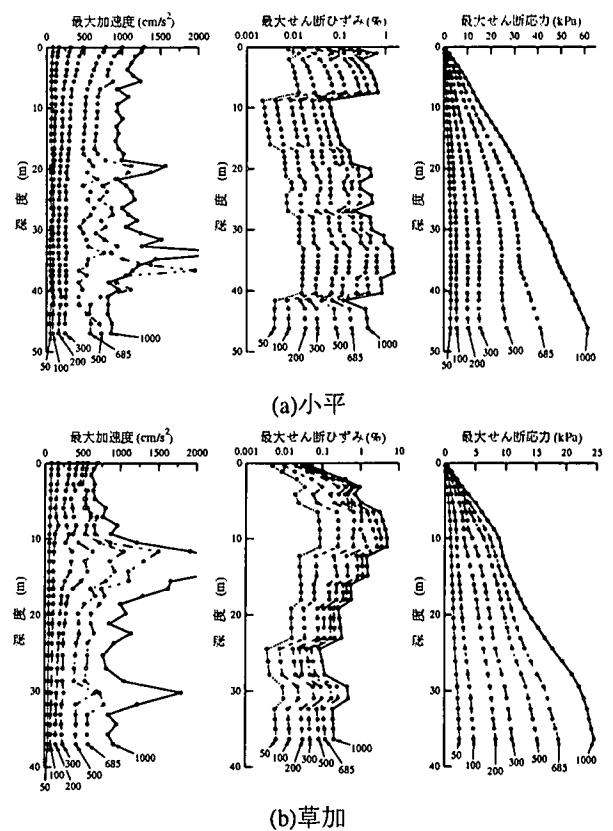


図-10 最大加速度等の鉛直分布

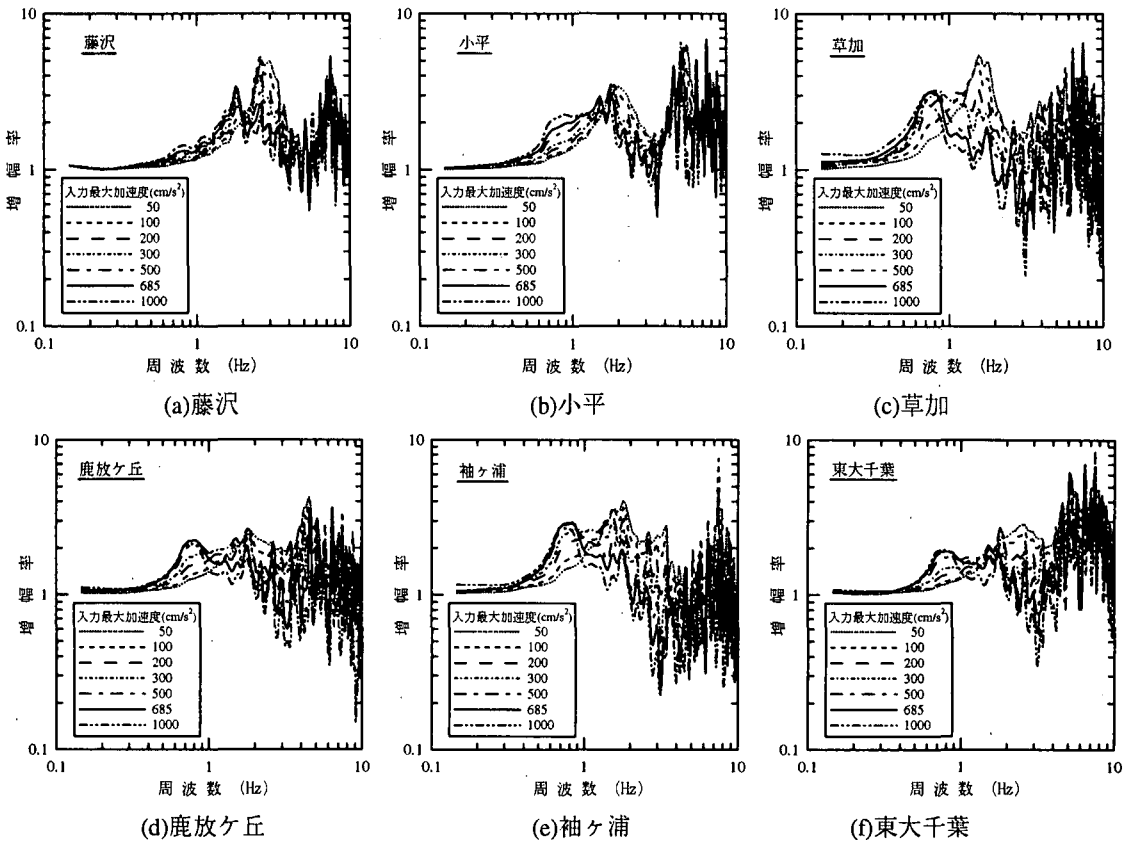


図-11 地盤の非線形化による伝達関数の変化

硬い小平では、地表での最大加速度は $1g$ を越え、最大せん断ひずみは 1% を越えていない。

入力地震動が大きくなるに伴い、地盤の非線形化により地盤の剛性、減衰定数が変化し、伝達関数も変化する。6地点について、図-11に伝達関数が変化する様子を示す。最も卓越周波数が高い藤沢では、伝達関数の変化の度合いは小さい。小平も顕著ではない。地盤が軟らかい草加、袖ヶ浦では卓越周波数が明瞭に低下し 0.8Hz となっている。鹿放ヶ丘、東大千葉でも 0.8Hz 程度に卓越周波数は低下しているが、草加、袖ヶ浦のように明瞭なピークとはなっていない。このような伝達関数の変化が、図-9における揺れ易さ係数の変化とよく対応していることがわかる。

5. 考察

鉛直アレーの増幅度評価としては、上述のように中小地震観測記録で得られる増幅度と地震応答解析から得られる弱震時増幅度が整合していれば、地震応答解析により弱震から強震までの増幅度を評価することができる。実際、図-7と図-9でのSI値増幅度は両者とも $1.5\sim 2.0$ とよく対応している。しかしながら、リアルタイム地震防災システムで必要となるのは、空間分布の差異を補正するための増幅度である。

図-12に示すA点とB点の地震動の違いを表すためには、本研究で扱った $H_1(f)$ ではなく、浅層地盤の影響に加え、深層地盤の差異の影響をも考慮した $H_4(f)=H_1(f)*H_2(f)/H_3(f)$ が必要である。実際、横浜市の記録を用いた検討例⁷⁾では、露頭岩盤Aに対する増幅度 ($H_4(f)$ に相当) を評価しており、図-7で示したものより増幅度の値が大きく、また地点の増幅度の違いも大きい。深層構造の情報は不十分であるので、シミュレーションでの精度は期待できず、観測記録から得られる ACC_B/ACC_A を用いるのが現状では最も理にかなうであろう。

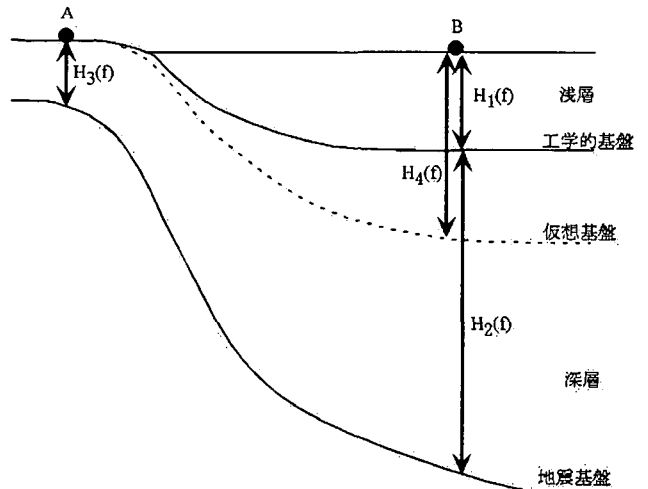


図-12 基盤からの増幅度の概念

東京ガスの新防災システム“SUPREME”では、遮断設定値レベルまでは中小地震記録によるSI値増幅度を適用できるという知見に基づき、 $H_4(f)$ に相当する増幅度を評価しているところである。一方、建物等の被害分布を予測するための強震時増幅度はシミュレーションから評価せざるを得ず、 $H_1(f)$ と $H_4(f)$ の摺り合わせの行い方が実際のシステムで用いるためには課題であり、そのためには深層地盤構造の増幅を明らかにする必要がある。

6. まとめ

リアルタイム地震防災システムにおける地動分布の即時評価を行うための地盤増幅度評価法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) 地震動代表値の増幅度は入力地震動特性の影響を受けるので、それを予測することが重要である。首都圏では震源域毎に評価することで精度が向上する。
- 2) 最大加速度は $100\sim 200\text{cm/s}^2$ 、SI 値および最大速度は $30\sim 60\text{cm/s}$ までは地盤の非線形化の影響は小さく、中小地震観測記録から得られる増幅度を適用することが可能である。

参考文献

- 1) 濱田禎, 杉田秀樹, 金子正洋: 地震時特性値分布の即時予測手法に関する研究, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.193-196, 1997.
- 2) Sugito, M., H. Goto and S. Takayama: Conversion factor between earthquake motion on soil surface and rock surface with nonlinear soil amplification effect, 第 7 回日本地震工学シンポジウム, pp.571-576, 1986.
- 3) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第 22 回地盤震動シンポジウム, pp.23-34, 1994.
- 4) 西阪理永, 福和伸夫, 荒川政和, 銭傑: 国土数値情報を活用した地盤増幅度と地震動の予測, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp.341-344, 1997.
- 5) 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.
- 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.
- 7) 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, pp.157-160, 1999.
- 8) 紺野克昭, 片岡俊一: レイリー波の位相速度と地盤の平均 S 波速度の関係, 第 4 回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp.147-148, 1999.
 - 9) Borchardt, R.D.: Preliminary amplification estimates inferred from strong ground-motion recordings of the Northridge earthquake of January 17, 1994, *Proceedings of the international workshop on site response -subjected to strong earthquake motions-*, Vol.2, pp.22-46, 1996.
 - 10) 翠川三郎, 小林啓美: 震源域及びその周辺での地表面最大加速度分布の推定, 日本建築学会論文報告集, 第 290 号, pp.83-93, 1980.
 - 11) 末富岩雄, 吉田望, 阿部一郎, 蛭沢勝三: 断層モデルによる地震波を用いた表層地盤地震応答解析に基づく各種地震動代表値の増幅度評価, 第 25 回地震工学研究発表会, pp.89-92, 1999.
 - 12) 片山恒雄, 山崎文雄, 永田茂, 佐藤暢彦: 高密度三次元アレーによる地震観測と記録のデータベース化, 土木学会論文集, 第 422 号/I-14, pp.361-369, 1990.
 - 13) 年繩巧, 渡部義之, 小林孝至, 内山泰生: 震源域区分による首都圏南西部での工学的基盤における強震動特性の予測, 土木学会第 53 回年次学術講演会, 第 1 部門, pp.474-475, 1998.
 - 14) 鹿林, 山崎文雄, 片山恒雄: 千葉実験所における地震観測 —その 5 自由地盤の伝達特性について—, 第 20 回地震工学研究発表会, pp.93-96, 1989.
 - 15) 吉田望: 地盤物性の動特性モデル, 地盤の液状化, 入門・建物と地盤との動的相互作用, 日本建築学会, pp.281-288, 1996.
 - 16) 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.
 - 17) 末富岩雄, 澤田純男, 吉田望: 地震動上限値と地盤のせん断強度の関係に関する一検討, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.1963-1964, 1999.