

強震記録に基づくサイト増幅特性の評価と地盤構造との対応に関する研究

松尾 秀典

1. 序論

地殻岩盤で生じた破壊に伴って発生した地震波動は、地殻内を地表へと伝播して構造物などに影響を与える。このとき、震源断層においてどのような破壊が起こったか(震源特性)、生じた波動がどのように伝播したか(伝播経路特性)、地盤構造によって地震波動がどのような影響を受けたか(サイト増幅特性)が、強震動に大きく影響する。特に地盤構造が地震動の特性に大きな影響を及ぼすことは従来より広く認識されており、強震動特性の評価にはサイト増幅特性の適切な分離が不可欠である。また震源特性の分析や理論的強震動予測にはサイト増幅特性情報に対応した地下構造情報、特に深部地盤構造が必要となる。そこで日本全国で観測された K-NET、KiK-net、JMA 強震観測データに基づき、まずそのサイト増幅特性を抽出し、さらにそのサイト増幅特性に適合する地下構造を同定する。次に加速度、速度、計測震度にもっとも影響を与えると思われる振動数帯域を見出し地盤構造との対応関係を示す。これによりどのような地盤構造が被害と結びつくか客観的に想定することができる。

2. 地中地表記録を用いた地盤構造の推定

統計的地震動特性を抽出するときに震源もしくはサイト(観測点)のどちらかについて拘束条件が必要となる。そこで本節では基準観測点における地震波の増幅の影響を極力減らすため、GL_200m のボアホール観測データを利用して地盤の影響を剥ぎ取る。基準観測点は KiK-net 観測点の YMGH01 (防府)とした。この観測点は PS 検層により表層の S 波速度が 1000m/s で、すぐ下に 2100m/s の層、さらにその下には 3100m/s の層があることが分かっており、地盤としては硬質である。ただし PS 検層により得られた値と実際の値は必ずしも一致しないことが多いので、地中地表記録のスペクトル比より理論から正確な地盤構造を同定してみる。振幅がほとんど同レベルかつ線形を仮定できるほど小さい加速度の地震波から、S 波の初動以降を 5 秒、前後に 2 秒のコサインテーパを付けエネルギースペクトルを計算し平均を取り、地表・地中のスペクトル比を求めた、位相はクロススペクトルの位相を用いた。目的関数としての振幅と位相の両方の残差の和が最小となるようにした。図 1、2 に示した理論と観測はよく一致しており、図 4 の同定した地盤構造は、最下層

で S 波速度約 3400m/s となり地震基盤とみなせる値が得られた。また得られた減衰定数の振動数依存性は小さかった。(図 3)

3. 強震記録を用いた統計的地震動特性

1996 年 8 月から 2002 年 6 月までの間の $M_j \geq 4.5$ 、震源深さ ≤ 60 km、震源距離 ≤ 200 km、最大加速度 ≤ 200 gal、3 地点以上でトリガーの条件にあう K-NET 観測点 (913 点)、KiK-net 観測点 (468 点)、JMA 観測点 (319 点) のいずれかの地点で観測された地震波 (約 15800 波) のフーリエスペクトル、最大加速度 (以下 PGA)、最大速度 (以下 PGV)、計測震度を求めるための A0 を用いて統計的地震動特性を抽出した。データはまず、日本付近の平均的な S 波の走時 (1997 年 10 月以前は 83A 走時表、それ以降は JMA2001 走時表) を用いて、S 波初動以降を気象庁マグニチュードに応じた時間区間で切り出し、前後に 2 秒のコサインテーパをつけた。S 波初動以降がうまく切り出されていない場合は、データセットから取り除いた。フーリエスペクトル、PGA、PGV、A0 を次のようにモデル化した。

$$\log F_{ij} = \log S_i - n_{l(i)} \log X_{ij} + \sum_k b_{l(i)k} X_{ijk} + \log G_j$$

$$X_{ij} = \sum_k X_{ijk}$$

i : 地震 j : 観測点

k : 地域 $l(i)$: 地震のタイプ

F_{ij} はフーリエスペクトル、PGA、PGV、A0 のいずれかで、 S_i は震源特性、 G_j はサイト増幅特性、 X_{ij} は震源距離、 n は幾何減衰を表しており、(理論的には実体波の場合は 1、表面波の場合は 0.5)、そして b は内部減衰と散乱減衰を合わせたものを表している。地震のタイプにより伝播してくる経路が異なっているため、図 5~7 のように海溝性 (プレート間)、海溝性 (プレート内)、内陸地震の 3 タイプに分類した。そのときの分類の基準として内陸地震では震源深さが 25km 以下で震源が内陸部であること、プレート内地震は震源深さが 25km 以下であることとフィリピン海プレートや太平洋プレートのもぐりこみ位置から、またプレート間地震は 1997 年以前については Harvard、それ以降は Freesia の発震機構解

などから低角逆断層であることを確認したこととプレートのもぐりこみ位置で判断した。またデータセットが全国に及んでいるので図8のように地震波の減衰が大きいと言われていた火山地帯や、地域を細分化するため糸魚川・静岡構造線などで6地域に分割した。統計的地震動特性の抽出にはフーリエスペクトルの場合はノイズレベルを考慮して0.3から20Hzの範囲で行い、地震波動の放射特性の影響を小さくするためNS, EW成分のrms値を用いた。なおフーリエスペクトルは0.1HzのParzen windowにより平滑化している。またPGA, PGVについてはNS, EW成分のベクトル和の時刻歴最大値を用いた。A0については気象庁告示に基づいて計算した。統計的地震動特性の抽出には何らかの拘束条件が必要になるため、YMGH01(防府)を基準観測点とし、前節で求めた地盤構造より1次元重複反射理論で求めた入波射の2倍に対する地表面の増幅特性を拘束条件として与えた。よって他地点のサイト増幅特性は基準観測点の露頭基盤波に対する比として求まるが、YMGH01の基盤はS波速度が3400m/sであり地震基盤と考えてもよい。よって、得られた個々のサイト増幅特性は絶対的な値と考えられる。

4. 抽出されたサイト増幅特性と地盤構造との対応について

K-NET観測点では約20m以下、KiK-net観測点では約100~200m以下のPS検層が実施されている地盤構造より深い構造を層厚とS波速度を未知数に、フーリエスペクトルのサイト増幅特性と1次元重複反射理論よりもとまる増幅特性が適合するように遺伝的アルゴリズムで同定した。JMA観測点ではPS検層のデータがないため同定の対象からはずした。得られた構造は多くの観測点でよく説明できた。その適合度を評価するために観測に対する理論のlog(残差)である σ と周波数軸上での相関係数を求め全1300点を図9にプロットした。この図から $\sigma < 0.4$ 、 $\rho > 0.5$ のサイトをよく説明できたサイトとして抽出した。

$$\rho = \text{cov}(\log(G_o), \log(G_T)) / (\sigma_{\log(G_o)} \cdot \sigma_{\log(G_T)})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=f_1}^{f_2} (\log(G_o) - \log(G_T))^2}$$

ここで f_1, f_2 はそれぞれ0.3Hz, 20Hzとし、 N はデータ数、 G_o はフーリエスペクトルのサイト増幅特性、 G_T は理論によるサイト増幅特性を表す。Hartzelら¹⁾はフーリエスペクトルのサイト特性の高い増幅率と浅い層の低いせん断波速度との間に高い相関があることを見出しており、翠川ら²⁾はPGVに対するサイト増幅特性と地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度との関係を示している。そこでフーリエスペクトル・PGA・PGV・A0から抽出されたサイト増幅特性をまず比較することによりそれぞれ相関があると思われる振動数帯域を見つけ、その振動数に増幅のピークがある地盤構造とサイ

ト増幅特性の相関について検討してみる。フーリエスペクトルのサイト増幅特性はそのままではギザギザしているので1/3オクターブバンドで平均化しその振動数帯域の平均的なサイト増幅特性を求め、PGA・PGV・A0のサイト増幅特性と比較してみる。その結果を図10に示す。PGAは5Hz付近、PGVは2~2.5Hz付近、そしてA0は3.15Hz付近で相関がもっとも高くなることがわかった。つまりそれぞれ影響があると思われる振動数帯域が異なることがわかる。次にPGVのサイト増幅特性を表すのに既往の研究で用いられている表層 N_m の平均S波速度(以下 VS_{Nm})と、各振動数帯域以下に基本振動数があり最もインピーダンスコントラストが大きい層までの平均S波速度(以下 VS_{Ndb})とPGA・PGV・A0のサイト増幅特性とを比較してみる。図11にそれぞれの指標の概念を示した。図12に平均S波速度の各種指標とフーリエスペクトルのサイト増幅特性との相関を示す。平均を取る深さが深くなればなるほど、振動数が小さくなればなるほど、フーリエスペクトルのサイト増幅特性と相関がよくなる振動数が小さくなる。またある振動数の値以下となる基本振動数の平均とフーリエスペクトルのサイト増幅特性と相関がよくなる振動数がほぼ一致する。図13に各種指標とPGA, PGV, A0のサイト増幅特性との相関を示す。 VS_{10m} や VS_{20m} との比較的浅い層を反映した指標と相関が良い事がわかる。PGAの場合は VS_{8Hz} (平均振動数5.13Hz)、A0の場合は $VS_{6.3Hz}$ (平均振動数4.03Hz)、PGVの場合は $VS_{3.15Hz}$ (平均振動数1.95Hz)と言うように、先に示したフーリエスペクトルのサイト増幅特性と相関が良い振動数帯域とここで得られた最も相関の良い場合の平均振動数はおおむね一致している。

5. 結論

各種のサイト増幅特性と地盤構造との関係を調べた結果、PGAのサイト増幅特性は今回用いた指標とはあまり相関がよくなかった。このことはPGAのサイト増幅特性は地盤構造の平均的な特性では表せないことを示唆しているのかもしれない。PGVやA0のサイト増幅特性は VS_{10m} や VS_{20m} がよいことが分かった。物理的な考察からは基本振動数がある値となる層までのS波速度を平均したもののほうが良いと思われるのに現実には浅い層の平均値でほぼ同等の相関が得られるということは今回の研究の新しい知見である。

参考文献

- 1) Stephen Hartzell, David Carver, and Robert A. Williams, 2001, Site Response, Shallow Shear-Wave Velocity, and Damage in Los Gatos, California, from the 1998 Loma Prieta Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 3, 468-478
- 2) 翠川三郎, 松岡昌志, 1995, 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価、物理探査, Vol148, No9, 519-52

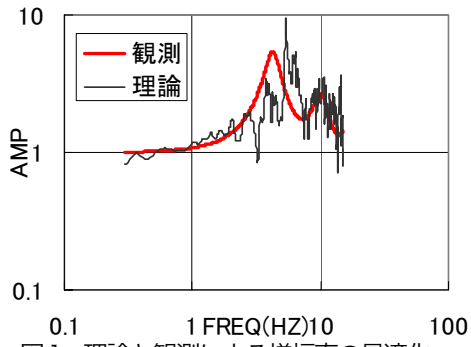


図1 理論と観測による増幅率の最適化

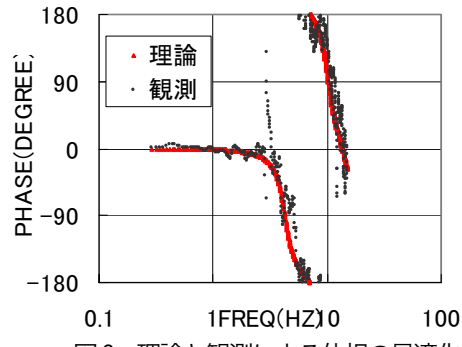


図2 理論と観測による位相の最適化

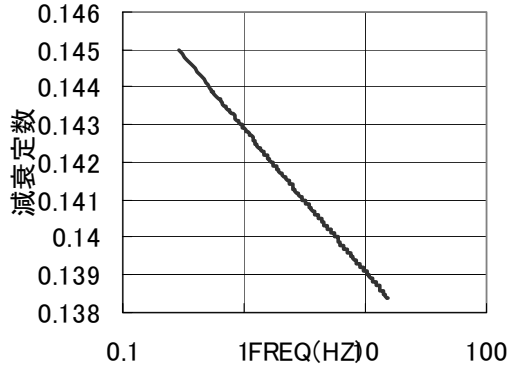


図3 同定された減衰定数

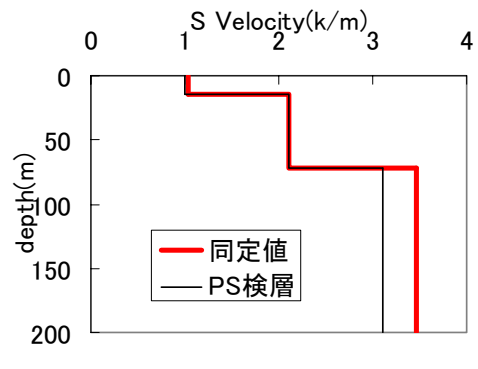


図4 同定されたS波速度構造

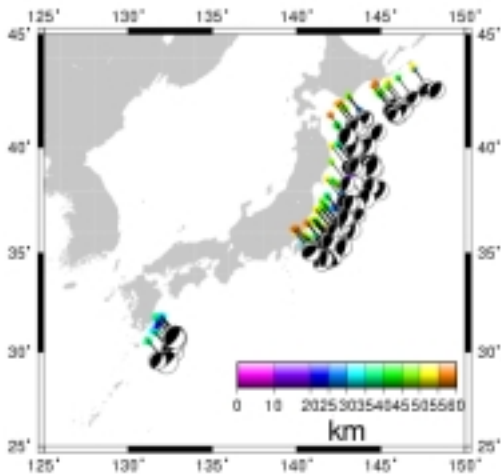


図5 プレート間地震の位置

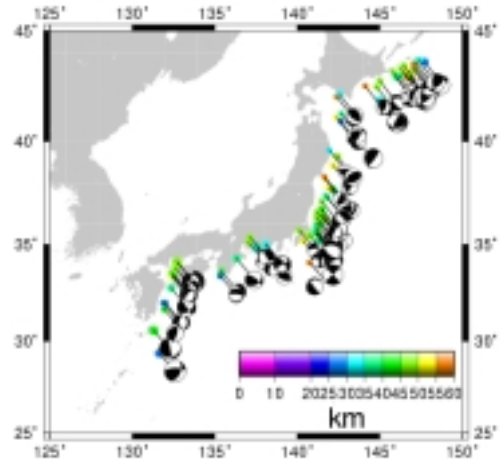


図6 プレート内地震の位置

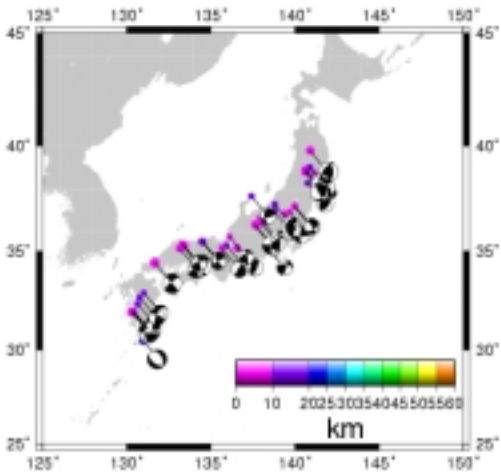


図7 内陸地震の位置

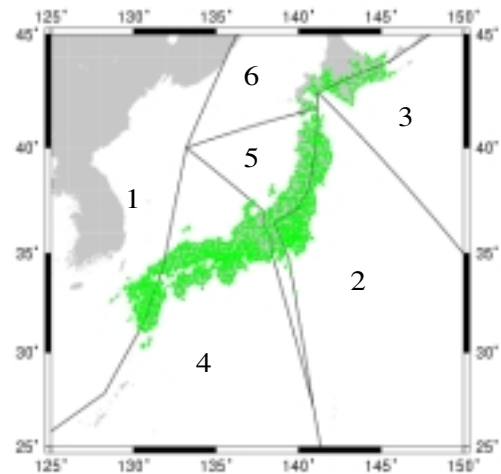


図8 観測点位置と地域区分

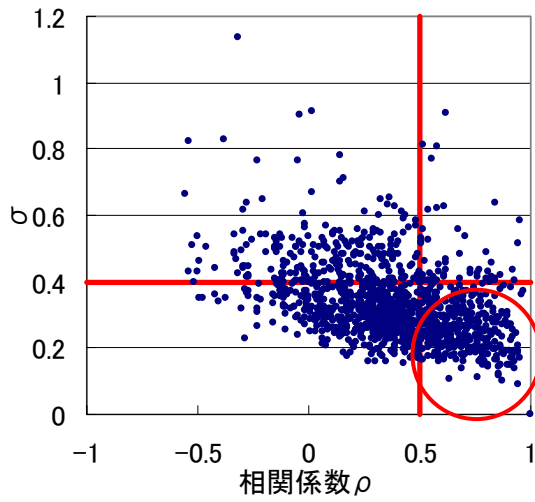


図9 推定した地盤によるサイト増幅特性とフーリエスペクトルのサイト増幅特性の適合度による選別

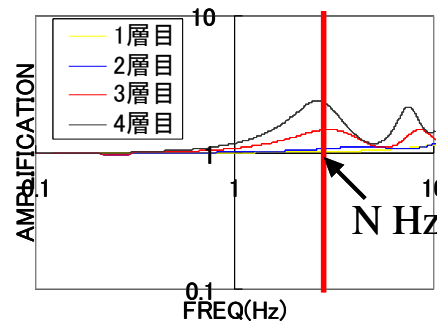
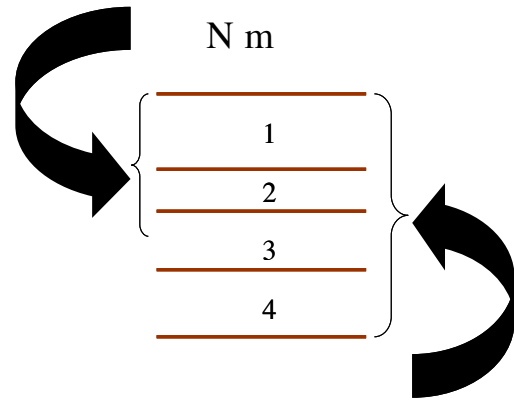


図11 VS_{Nm} と VS_{NHz} の概念図

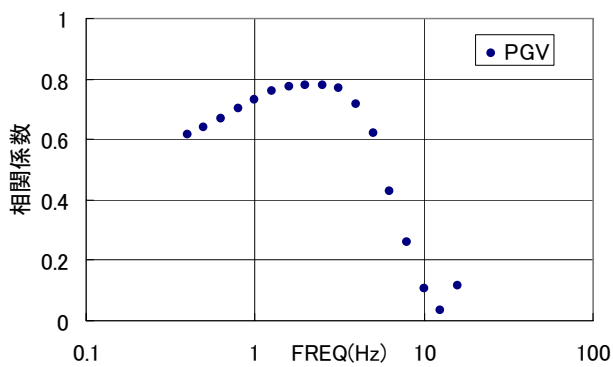
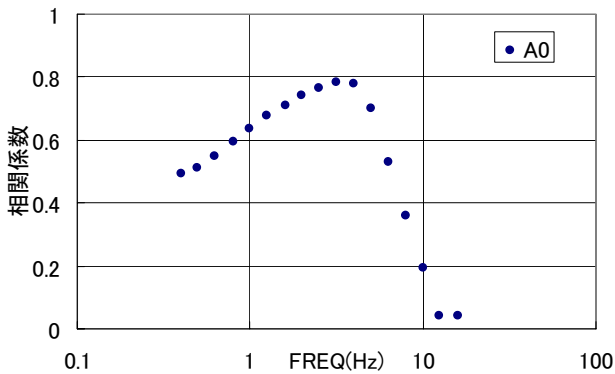
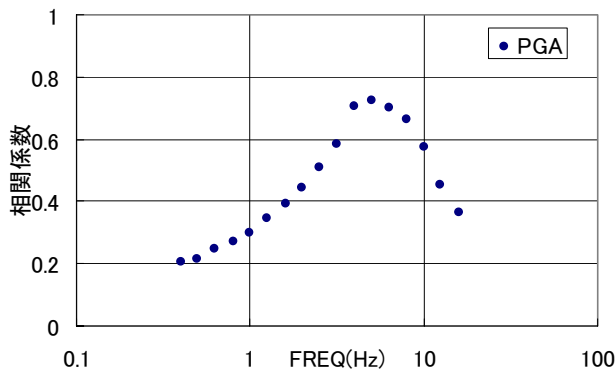


図10 PGA(上段) A0(中段) PGV(下段)のサイト増幅特性とフーリエスペクトルのサイト増幅特性との相関

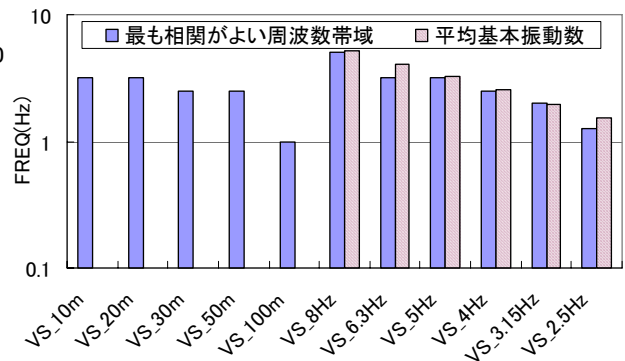


図12 各種指標とフーリエスペクトルのサイト増幅特性との相関

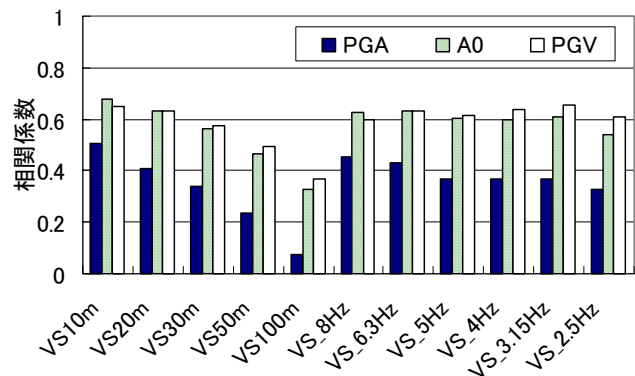


図13 各種指標とPGA, PGV, A0のサイト増幅特性との相関