

Ⅲ-A121

位相スペクトルを考慮した地震計アレー観測結果の逆解析

岐阜大学大学院 学生員 鈴木 良典

岐阜大学 正員 本城 勇介

石田組 澤木 信也

竹中工務店技術研究所 鬼丸 貞友

竹中工務店技術研究所 正員 吉澤 睦博

1 研究の目的

構造物の地震時の安全性や地盤の液状化予測のためには、深い基盤から入力する地震波が、それぞれのサイトでどのように増幅され伝播するかを知ることが極めて重要である。1981年から92年まで、東京都江東区のあるサイトで得られた観測結果の逆解析を行い、地盤を構成する各土層のせん断剛性と減衰比を推定する研究を行っている。この研究の特徴は、逆解析において、振幅スペクトルの情報ばかりでなく、位相スペクトルの情報も取り入れることである²⁾。今回は、まず、地震の観測結果を用い、設置誤差の方位補正を行った。そして、位相を考慮した3つの評価関数を用い、事前情報を導入した拡張ベイズ法によりパラメータを推定し、その推定精度の信頼性を評価した。

2 逆解析

2.1 地盤の動的特性と応答解析

地震動解析に必要な地盤の主な動特性は、密度 ρ 、せん断剛性 $G(kN/m^2)$ 、減衰定数 h の3つがあげられる。

また、地盤はもともと非線形材料であって、せん断弾性係数も減衰定数も、ひずみ依存性が顕著である。これを弾性モデルで表現し、等価線形解析法を用いることが多い。これについては、電算プログラム“SHAKE”が開発され、すでに広く利用されている。本研究も、SHAKEを基本とし、これを用いて解析するときの等価せん断剛性と等価減衰比を推定することを目的としている。

2.2 拡張ベイズ法

本研究で用いる動解析手法は、重複反射理論を用いる。¹⁾

任意の2地点(A,B)の加速度記録のフーリエ変換は、

$$A(\omega i) = Ar(\omega) + i \cdot Ai(\omega) \quad (1)$$

$$B(\omega i) = Br(\omega) + i \cdot Bi(\omega) \quad (2)$$

($Ar(\omega), Br(\omega)$: 実部, $Ai(\omega), Bi(\omega)$: 虚部)

これを用いて、伝達関数の振幅スペクトル $T(\omega)$ は、

$$T(\omega) = \sqrt{\frac{Br^2 + Bi^2}{Ar^2 + Ai^2}} \quad (3)$$

また、位相スペクトル $\phi(\omega)$ は、

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{AiBr + ArBi}{ArBr + AiBi} \right] \quad (4)$$

そして、事前情報を考慮して、拡張ベイズ法により定式化を行った3つの目的関数を、以下に示す。

$$\min J_1 \left\{ \nu_s, h \middle| d_1^2, d_2^2 \right\} = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{1}{\sigma_g^2} \left\{ T_{ij}(\omega_k | \nu_s, h) - T_{ij}^*(\omega_k) \right\}^2 + d_1^2 (\nu_s - \nu_s^*)^T \nu_{s_s}^{-1} (\nu_s - \nu_s^*) + d_2^2 (h - h^*)^T \nu_h^{-1} (h - h^*) \quad (5)$$

$$\min J_2 \left\{ \nu_s, h \middle| d_1^2, d_2^2 \right\} = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{1}{\sigma_g^2} \left\{ \left[G_{ij}(\omega_k | \nu_s, h) - G_{ij}^*(\omega_k) \right]^2 + \left[G_{ij}(\omega_k | \nu_s, h) - G_{ij}^*(\omega_k) \right]^2 \right\} + d_1^2 (\nu_s - \nu_s^*)^T \nu_{s_s}^{-1} (\nu_s - \nu_s^*) + d_2^2 (h - h^*)^T \nu_h^{-1} (h - h^*) \quad (6)$$

$$\min J_3 \left\{ \nu_s, h \middle| d_1^2, d_2^2 \right\} = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \frac{1}{\sigma_g^2} \left\{ \left[T_{ij}(\omega_k | \nu_s, h) - T_{ij}^*(\omega_k) \right]^2 + \left[T_{ij}(\omega_k | \nu_s, h) - T_{ij}^*(\omega_k) \right]^2 \right\} + d_1^2 (\nu_s - \nu_s^*)^T \nu_{s_s}^{-1} (\nu_s - \nu_s^*) + d_2^2 (h - h^*)^T \nu_h^{-1} (h - h^*) \quad (7)$$

(5),(6),(7)式は、伝達関数の振幅スペクトル及び、位相スペクトルの残差2乗和と、事前平均と推定値の重み(d1, d2)付き2乗和の合計の最少化をはかったものである。なお、拡張ベイズ法を用いるのは、この逆問題が不適切であるため、これを正規化するため事前情報を加える。この時、観測情報と事前情報は、全く質の異なる情報であるため、このマッチングをスカラー量 d_1^2, d_2^2 によりはかる。また、この最適化にはABICを用いている。(Honjo et.al 1997 参照)

2.3 推定パラメータの信頼性

逆解析で得られたモデルパラメータに関する情報の不確実性の度合は、エントロピーによりみる。エントロピー $H(G, h)$ は、

$$H(G, h) = \frac{m}{2} (1 + \log 2\pi) + \frac{1}{2} \ln(\nu_{G,h}) \quad (8)$$

($\nu_{G,h}$: 推定された G, h に関する事後分散行列)

となる。3つの目的関数の情報エントロピーを求め、モデルパラメータの信頼性を検討する。

3 ケース・スタディー

3.1 実観測地震概要及び解析地盤モデル

東京都、東陽町の(株)竹中工務店における地震観測データを用いる。設置地震計は、G1(GL-3.5m)、G2(GL-11.2m)、G3(GL-44.4m)の3個所に設置されており、観測データは、9個のデータを用いた。観測地点の地盤は、典型的な軟弱地盤であり、地盤調査がGL-150mまで詳細に行われている。^{2),3)}

3.2 方位補正

鉛直アレーで観測された3つの記録の水平面内での軌跡を調べ、設置時の方向誤差の補正を行った。本研究では、EW, NSの各加速度成分を0.1Hz~0.2Hzのバンドパス・フィルターに通したものをを用いた。また、

図 1 に、G1 を基準とし、 -180° ~ 180° まで変動させた時の No.173 の G1 と G2、G1 と G3 の残差 2 乗和を示す。なお、一般に、地表近くの地震計の方が、正確に設置されていると仮定して G1 を基準とした。

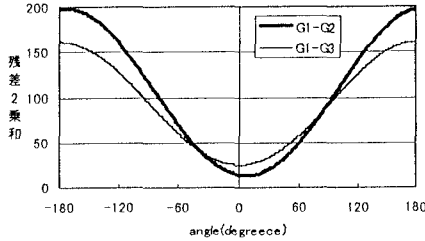


図 1 No.173 の方位による残差変化

(G1-G2) 間の比較では、N11~N239 の 9 個のデータにそれぞれ重みをつけることによって、以下の (9) 式を用いて計算し、G2(約 7.2°)、G3(約 -2.0°) の設置誤差があることが推定され、座標変換式により補正した。

$$\alpha = \frac{\alpha_1 (W_{\max} - W_{\min}) + \alpha_2 (W_{\max} - W_{\min}) + \dots + \alpha_N (W_{\max} - W_{\min})}{(W_{\max} - W_{\min}) + (W_{\max} - W_{\min}) + \dots + (W_{\max} - W_{\min})} \quad (9)$$

$W_{N \max}$; 残差二乗和の最大値
 $W_{N \min}$; 残差二乗和の最小値

3.3 逆解析結果の考察

3.2 で方位補正を行なった観測データについて観測・解析伝達関数を用いて、逆解析を行い地盤定数の推定を行なった。

No.173 の地震波について、3つの評価関数 J1,J2,J3 において EW,NS 成分それぞれの推定パラメータと、初期せん断剛性と推定せん断波速度から求めた推定せん断剛性の比較図と、初期減衰比と推定減衰比の比較図を図 3 (a)~(c)に示す。

また、情報エントロピーを表 1 に示す。

これらの図より、以下のことが考察される。

- (1) 評価関数 J2(EW)は、良い結果を与えない。これは、最小 2 乗化される項が物理的な評価の対象となっている振幅や位相を直接的に表現する項ではないためと思われる。このことは、情報エントロピーが大きいことからいえる。
- (2) 評価関数 J1,J3 は、ほとんど類似の結果を与え、優劣をつけることが難しかった。ただし、いくつかの場合、J3 は G の変化より、 h の変化によりパラメータを推定する傾向があり、これは好ましい性質である。
- (3) 3つの評価関数は、共にせん断波速度の方が減衰比より事前情報値に信頼性があるといえる。これは、せん断波速度の事前情報値は、PS 陰層により得られたせん断波速度を用いるのに対して、減衰比の事前情報値は、一般に予測される値を設定したためだと思われる。

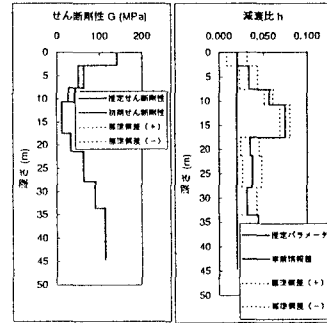


図 3 (a).推定せん断剛性と推定減衰比(No.173-G1-EW)

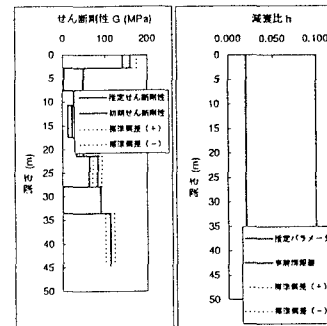


図 3 (b).推定せん断剛性と推定減衰比(No.173-G2-EW)

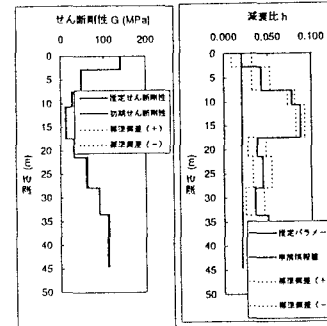


図 3 (c).推定せん断剛性と推定減衰比(No.173-G3-EW)

表 1 No.173 における情報エントロピー

No.173	情報エントロピー
No.173.EW J1	44.31
No.173.EW J2	62.01
No.173.EW J3	48.87
No.173.NS J1	50.65
No.173.NS J2	51.15
No.173.NS J3	45.79

参考文献

- 1) 大崎順彦(1994)：新・地震動のスペクトル解析入門／鹿島出版会
- 2) 本城・西川原 (1997)：委員会主催シンポジウム No.105, pp79 ~86
- 3) Honjo et.al(1997): Soils and Foundations, Vol.38,No.1