

スペクトルインバージョン解析に基づく時間領域における経験的地盤特性の抽出  
Extraction of Empirical Site Effects in the Time Domain Based on Spectral Inversion Analysis

○赤澤隆士  
○Takashi AKAZAWA

Akazawa et al. (2009) proposed a method for extracting empirical site effects containing both amplitude and phase information by removing source and propagation-path effects from the wavelet coefficients of ground motion records, then averaging the amplitude and phase terms across multiple events. The accuracy of the site effects depends strongly on the accuracy of the source and path effects used in the calculation. In this study, the site effects were extracted based on source and path effects estimated through spectral inversion analysis. To verify the method, ground motions from small-to-moderate events were simulated using these effects. The simulated records closely matched the observed ones in terms of both waveforms and Fourier spectra.

### 1. はじめに

統計的グリーン関数法で高精度な強震動予測を行うためには、震源・伝播経路・地盤特性を適切に設定することが極めて重要である。特に地盤特性は振幅や継続時間に大きく影響するため、その振幅特性と位相特性を定量的に評価する必要がある。Birgören and Irikura (2005)は、地震記録のウェーブレット係数から震源および伝播経路の影響を除去し、複数記録を平均することで地盤特性の時刻歴特性（以下、非定常地盤特性）を経験的に抽出する手法を提案したが、振幅を過小評価する問題を有していた。赤澤・他(2009)は振幅項と位相項を分離して平均化することでこの問題を改善し、実地震への適用により再現性を確認した。非定常地盤特性の精度は、用いる震源・伝播経路特性の精度に大きく依存する。本研究では、スペクトルインバージョン手法（岩田・入倉, 1986）により両特性を評価し、赤澤・他(2009)の方法により非定常地盤特性を抽出する。さらに、中小地震の地震動シミュレーションを行い、関西地震観測研究協議会（関震協）のFKS観測点で検証を実施する。

### 2. 非定常地盤特性評価手法

Birgören and Irikura(2005)や赤澤・他(2009)の方法では、まず、Meyer-Yamada のウェーブレット(1989, 1991)を利用して得られた地震  $i$  の観測記録の離散ウェーブレット係数  $\alpha_{j,k,i}^0$  を、各ウェーブレットレベル  $j$  において震源特性および伝播経路特性を示す振幅スペクトル ( $S(f)_{j,i}$ ,  $P(f)_{j,i}$ ) で除することで、 $\alpha_{j,k,i}^G$  を求める ((1)式)。

$$\alpha_{j,k,i}^G = \frac{\alpha_{j,k,i}^0}{S(f)_{j,i}P(f)_{j,i}} \quad (1)$$

ここで、 $k$  は位置（時間遅れ）を示す整数、 $f$  は周波数  $2^j/(3T_d)$  から  $2^{j+2}/(3T_d)$  までの区間の代表周波数  $2^{j+1}/(3T_d)$ 、 $T_d$  は時間長（秒）である。 $S(f)_{j,i}P(f)_{j,i}$  は、対象地点直下の地震基盤での地震動に相当する。Birgören and Irikura(2005)は、 $\alpha_{j,k,i}^G$  を複数の地震記録で算術平均して非定常地盤特性を抽出したが、この方法では、多くの地震記録を用いるほど本来必要な値より過小評価される。赤澤・他(2009)は、振幅項と位相項に分けてウェーブレット係数を平均化して  $\bar{\alpha}_{j,k}^{AI}$  を求める

((2)式) ことで、この問題を改善した。

$$\bar{\alpha}_{j,k}^{AI} = sgn(\sum_{i=1}^N \alpha_{j,k,i}^G) \cdot |\bar{\alpha}_{j,k}^G| \quad (2)$$

$$|\bar{\alpha}_{j,k}^G| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\alpha_{j,k,i}^G|^2} \quad (3)$$

ここで、 $N$  は地震記録数である。これにより、振幅は周波数に依存した平均的な経時特性（包絡形状）が、位相は利用地震記録に共通したコヒーレントな特性が、それぞれ与えられる（詳細は、赤澤・他(2009)を参照）。非定常地盤特性は、 $\bar{\alpha}_{j,k}^{AI}$  をウェーブレット逆変換することで抽出される。

### 3. スペクトルインバージョン手法による震源・伝播経路特性の評価と非定常地盤特性の抽出

本研究では、スペクトルインバージョン手法で震源・伝播経路特性を評価し、その結果を基に、赤澤・他(2009)の方法により非定常地盤特性を抽出する。本検討では、関西地方を対象に、2023年3月までに観測された深さ 20 km 以浅、Mj4~5.5、

震源距離 80 km 以内を条件に、25 地震 88 観測点を選定した。解析は、S 波初動の 0.5 秒前から 10.24 秒間の波形を用い、0.4~10 Hz の周波数帯域で実施する。震源域から地震基盤までの媒質の平均的な S 波速度は 3.4 km/s とする。基準観測点は、関震協 DIG 観測点とする。図 1 に、分離された  $Q_s$  値および震源スペクトルの例を示す。図中の赤色線は理論式でフィッティングした結果である。理論震源スペクトルの地震モーメントには、防災科研の F-net による値を用いている。

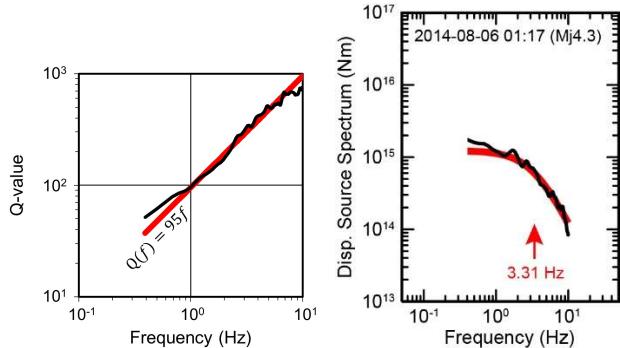


図 1 分離された  $Q_s$  値および震源スペクトルの例

次に、関震協 FKS 観測点の非定常地盤特性を抽出する。地震は、スペクトルインバージョンで使用した地震のうち、震源距離 40 km 以内、F-net で地震モーメントが求められているものを対象とする。その結果、選定地震数は 10 個となった。図 2 に、抽出された FKS 観測点の非定常地盤特性とそのフーリエスペクトルを示す。非定常地盤特性に

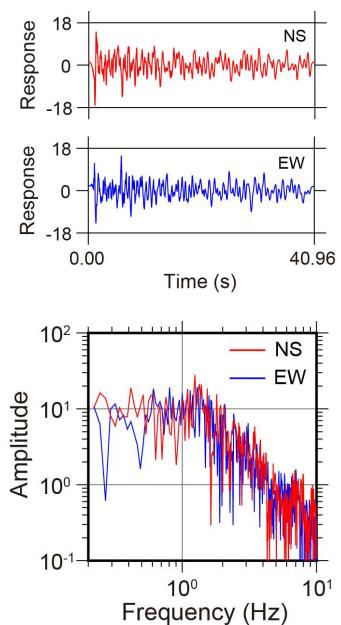


図 2 抽出された FKS 観測点の非定常地盤特性とそのフーリエスペクトル

は、0.2~10 Hz の BPF を適用している。

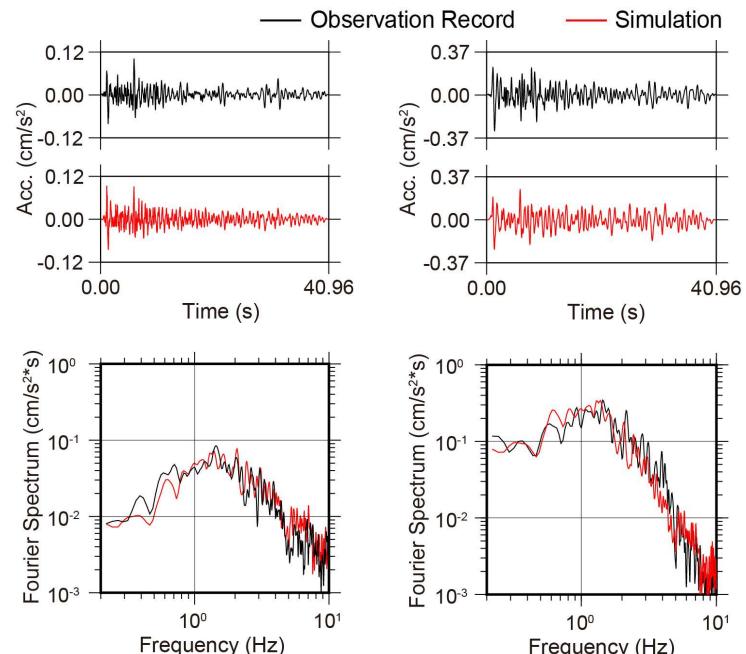
#### 4. 中小地震記録の再現性

FKS 観測点の非定常地盤特性を用い、中小地震記録の再現性を検証する。抽出した地盤特性に震源・伝播経路特性の振幅スペクトルを乗じて逆変換し再現波形を求める。図 3 に、例として、(a) 非定常地盤特性の抽出に利用した地震と、(b) FKS 観測点からの震源距離が 40 km を超える(約 78 km)ために利用しなかった地震の再現波の加速度波形と加速度フーリエスペクトルを地震記録と比較して示す。いずれの地震も、波形・フーリエスペクトル共に地震記録と良い対応を示している。

#### 5. まとめ

本研究では、スペクトルインバージョンを用いて震源・伝播経路特性を評価し、その結果に基づいて非定常地盤特性を抽出した。さらに、抽出された非定常地盤特性を用いて、いくつかの中小地震の地震動記録の再現を試みた。その結果、再現波の波形およびフーリエスペクトルは、いずれも地震観測記録と良い対応を示した。

参考文献 Birgören, G. and Irikura, K. (2005), Bull. Seism. Soc. Am. 95, 1447-1456. 赤澤・他(2009), 日本建築学会構造系論文集, 638, 611-618. 岩田・入倉(1986), 地震 2, 39, 579-593. Meyer, Y. (1989), in Wavelets, Springer, 21-37. Yamada, M. and Ohkitani, K. (1991), Fluid Dyn. Res. 8, 101-115.



(a) 2007 年 11 月 6 日(Mj4.1)

(b) 1999 年 3 月 16 日(Mj5.2)

図 3 中小地震の再現波の加速度波形と加速度フーリエスペクトル (いずれも東西成分)