

京都大学工学部	学 生 員	○木村紗也佳
京都大学防災研究所	正 会 員	後藤 浩之
東京工業大学	正 会 員	盛川 仁
京都大学防災研究所	正 会 員	澤田 純男

1. はじめに

長大構造物や線形構造物の地震時応答は地震動の強さだけではなく、空間的にどの程度ばらつくのかが大きく影響する。このため、コヒーレンスモデルに代表されるように、地震動の空間相関に関する確率論的な研究が数多くなされている。しかし、空間相関の研究はほとんどの場合、地盤震動特性が変化していないと仮定できるサイトで実施されたアレー観測記録に基づいたものであるため、実際の地盤震動特性が一定と仮定できないようなサイトにはモデルを適用できなかった。そこで、本研究では、地表で観測される地震動のコヒーレンスを地点間特性と入力特性に分けて同定する方法を提案する。

2. 地震動のコヒーレンス

観測点 j と k における地震動のコヒーレンス $|\gamma_{jk}(\omega)|$ は以下の式で表される。

$$|\gamma_{jk}(\omega)| = \frac{|S_{jk}(\omega)|}{\sqrt{S_{jj}(\omega)}\sqrt{S_{kk}(\omega)}} \quad (1)$$

ここに、 $S_{jk}(\omega)$ はクロススペクトルを、 $S_{jj}(\omega)$, $S_{kk}(\omega)$ はパワースペクトルを表す。コヒーレンスは、地震動の空間相関を生む要因の 1 つであり、地震波形の類似性に相当する。このため、コヒーレンスは 1 に近いほど波形が似ていて、0 に近いほど似ていない。低周波数または距離が近いほど、コヒーレンスは 1 に近くなる。高周波数または距離が遠くなるほど 0 に近づく特徴が経験的に知られている。

3. コヒーレンスにおける地盤増幅特性の影響

地表の地震動 $Y(\omega)$ を表層地盤に入射する入射波

$X(\omega)$ と地盤増幅特性 $H(\omega)$ とで表すと以下の式で表される。

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega) \quad (2)$$

地盤増幅特性が確定変数である場合、地点 1, 2 における地表のコヒーレンスを計算すると、入力のコヒーレンスに一致する。

$$|\gamma_{Y12}(\omega)| = \frac{|S_{X12}(\omega)|}{\sqrt{S_{X11}(\omega)}\sqrt{S_{X22}(\omega)}} = |\gamma_{X12}(\omega)| \quad (3)$$

しかし、観測記録から求まるコヒーレンスは、空間的に一様に見えないことから、何らかの地盤増幅特性の影響を受けているのではないかと考えられる。そこで地盤増幅特性が確率変数であると考え、このとき、地表のコヒーレンスは以下の式ようになる。

$$\begin{aligned} \gamma_{Y12}(\omega) &= \frac{E[H_1^*(\omega)H_2(\omega)]}{\sqrt{E[|H_1(\omega)|^2]}\sqrt{E[|H_2(\omega)|^2]}} \gamma_{X12}(\omega) \\ &= C_{12}(\omega) \gamma_{X12}(\omega) \end{aligned} \quad (4)$$

確定変数の場合と違い、 C_{12} で定義される係数分だけ地表と入力のコヒーレンスは異なる。つまり、地盤増幅特性を確率変数とみなすことで、その影響を C_{12} として取り込むことができたと考えることができる。

4. 地点間特性と入力特性の同定手法

コヒーレンスに含まれる地点間特性と入力特性を分離するため、以下の 2 つの仮定を与える。

- 入力地震毎に異なる確率的性質を持つが、1 つの地震では、どの観測点でも同じ確率的性質、すなわち空間的に均質であるとする。
- 地盤増幅特性は観測点毎に異なる確率的性質を持つが、どの地震でも同じ確率的性質を持つ

のとする。

また、安定して同定するためにさらに3つ目の仮定を与える。既往の研究ではコヒーレンスモデルとして、指数関数型のモデルが提案されてきた¹⁾。そこで、ここでも入力のコヒーレンスモデルとして指数関数型のものを採用することにした。地震毎に異なるパラメータを $\alpha^e(\omega)$ 、観測点間距離を r_{ij} とすると、地表のコヒーレンスは以下の式のように表す。

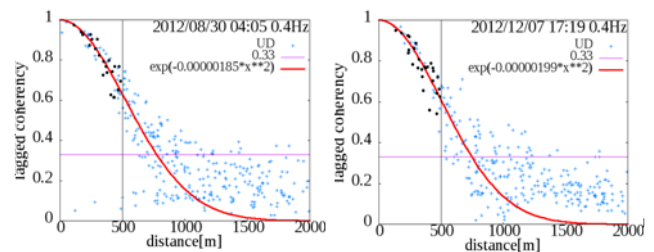
$$|\gamma_{Y_{ij}}^e(\omega)| = |C_{ij}(\omega)| e^{\alpha^e(\omega) r_{ij}^2} \quad (5)$$

地表のコヒーレンスをモデル化するためには、地点間特性を表す $|C_{ij}|$ と入力特性を表す $\alpha^e(\omega)$ を求める必要があるため、ここでは2段階回帰によってそれぞれ同定した。1段階目では1つの地震についてその平均値として入力特性を同定し、2段階目では入力特性からの残差の平均値として地点間特性を同定する。

本手法を古川超高密度地震観測²⁾のデータに適用し、古川地区のコヒーレンス特性をモデル化する。使用したデータはコヒーレンスが0.33より大きいものの、地点間距離500m以内、同じ地震を3つ以上観測している組み合わせである。図1は、2012年8月30日、および2012年12月7日の地震について求めた入力特性を示しており、地震毎に α^e の値が異なることがわかる。

地点間特性を同定した結果を図2に示す。 $|C_{ij}|$ の値は、分子が2点間の地盤増幅特性の共分散を含み、分母がそれぞれの分散を含む。 $|C_{ij}|$ の値が大きい場合は、2点間の共分散が大きいのか、それぞれの分散が小さい場合に相当し、 $|C_{ij}|$ の値が小さい場合は、2点間の共分散が小さいのか、それぞれの分散が大き

い場合に相当する。すなわち、周りの観測点と小さな地点間特性(青線)で結ばれている場合、その観測点の増幅特性の分散が大きいと考えるのが自然である。これは、地盤が傾いているなど、地盤の不整形性による影響が考えられる。つまり、青線で結ばれている地点の近くは地盤が急激に変わる部分に対応する可能性がある。既往の研究により構築されている支持基盤深さ分布³⁾と比べてみると、青線で結ばれている部分は急激に基盤深さが変化するところに相当する。



(a) 2012/8/30 の地震

(b) 2012/12/7 の地震

図1 観測記録のコヒーレンスと入力のコヒーレンスモデル (0.4Hz, UD 成分)

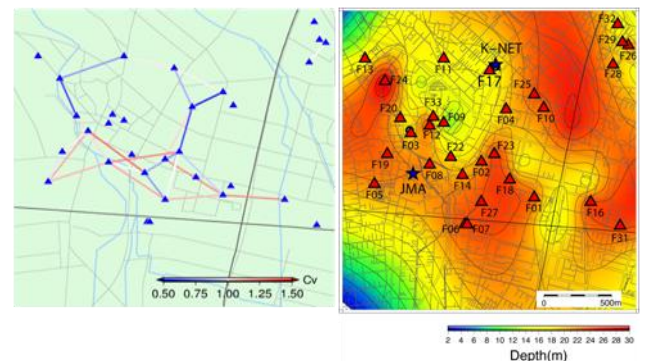


図2 地点間特性の分布 (0.4Hz,EW 成分)

図3 支持基盤深さ分布³⁾

参考文献

- 1) Luco, J.E. and Wong, H.L.: Responce of a rigid foundation to a spatially random ground motion, *Earthquake. Engng. Struct. Dyn.*, **14**, 891-908, 1986.
- 2) Goto, H, Morikawa, H, Inatani, M, Ogura, Y, Tokue, S, Zhang, X, Iwasaki, M, Araki, M, Sawada, S and Zerva, A: Very dense seismic array observations in Furukawa district, Japan, *Seismological Research Letters*, **83**, 765-774, 2012.
- 3) 稲谷昌之, 後藤浩之, 盛川仁, 小倉祐美子, 徳江聡, Zhang, X, 岩崎政浩, 荒木正之, 澤田純男, Zerva, A: 大崎市古川高密度観測を利用した表層地盤構造の推定, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), **69**, I 758-I 766, 2013.