

I-445

多次元地震動の非定常な位相差に関する一考察
—マルチフィルタによる非定常相互スペクトルの位相特性—

徳島大学工学部 正員 沢田 勉 京都大学防災研究所 正員 亀田弘行
東急建設 正員 亀井紀幸

1. まえがき 著者らは、多次元地震動の非定常な相互相関性を解析するために、マルチフィルタによる非定常相互スペクトル解析法を定式化し、非定常コヒーレンス等により多次元地震動の相互相関性について検討を加えてきた。^{1), 2)} 本報告では、これまで検討しなかった非定常相互スペクトルの位相特性、すなわち2つの地震動に含まれる同一振動数成分の時間ずれに関係する位相差に注目して、その物理的意味について述べるとともに、SMART-1 アレーデータを用いて数値計算を行い、若干の考察を加えた。

2. マルチフィルタによる非定常相互スペクトルとその物理的意味 2つの地震動 $x_j(t), x_k(t)$ の非定常相互スペクトル $G_{jk}(t, \omega)$ をマルチフィルタの手法を用いて定式化すると以下ようになる。いま、 $x_j(t), x_k(t)$ を入力とする線形1自由度系(固有振動数 ω , 減衰定数 h)の相対変位応答を $y_j(t), y_k(t)$ とすると、 $G_{jk}(t, \omega)$ は次のようになる。

$$G_{jk}(t, \omega) = |G_{jk}(t, \omega)| \cdot \exp[i\theta_{jk}(t, \omega)] = C_{jk}(t, \omega) + iQ_{jk}(t, \omega) \quad (1)$$

ここで、 $C_{jk}(t, \omega)$ と $Q_{jk}(t, \omega)$ はそれぞれ非定常なco-spectrum およびquad-spectrum であり、

$$C_{jk}(t, \omega) = 2h\omega^3 [y_j(t)y_k(t) + \dot{y}_j(t)\dot{y}_k(t)/\omega^2]/\pi \quad (2)$$

$$Q_{jk}(t, \omega) = 2h\omega^3 [\dot{y}_j(t)y_k(t) - y_j(t)\dot{y}_k(t)/\omega]/\pi \quad (3)$$

ただし、上付の線は時刻 t における時間平均を意味する。式(1)の非定常相互スペクトルの絶対値 $|G_{jk}(t, \omega)|$ は、次式の非定常コヒーレンス $\gamma_{jk}^2(t, \omega)$ の算定に用いられ、2つの地震動の ω 成分の時刻 t における相関の程度、すなわち波形のゆがみの程度を定量的に表す。

$$\gamma_{jk}^2(t, \omega) = |G_{jk}(t, \omega)|^2 / [G_j(t, \omega) \cdot G_k(t, \omega)] \quad (4)$$

ここで、 $G_j(t, \omega)$ および $G_k(t, \omega)$ は $x_j(t), x_k(t)$ の ω 成分の非定常パワースペクトルである。つぎに、 $G_{jk}(t, \omega)$ の位相、すなわち $y_j(t)$ と $y_k(t)$ の位相差 $\theta_{jk}(t, \omega)$ について考える。いま、 $y_j(t)$ と $y_k(t)$ を包絡線 $a(t, \omega)$ と位相角 $\phi(t, \omega)$ を用いて表すと次のようになる。

$$y_l(t) = a_l(t, \omega) \cdot \cos[\omega t + \phi_l(t, \omega)], \quad l = j \text{ and } k \quad (5)$$

定常理論による遅れ時間の概念を非定常に拡張すると、 $y_j(t)$ および $y_k(t)$ の位相遅れ時間 $t_{p_l}(t, \omega)$ と群遅れ時間 $t_{g_l}(t, \omega)$ が次のように定義できる。

$$t_{p_l}(t, \omega) = -\phi_l(t, \omega)/\omega, \quad t_{g_l}(t, \omega) = -\partial\phi_l(t, \omega)/\partial\omega, \quad l = j \text{ and } k \quad (6)$$

さらに、位相差 $\theta_{jk}(t, \omega)$ が $\theta_{jk}(t, \omega) = \phi_k(t, \omega) - \phi_j(t, \omega)$ であることを考慮すると、 $y_j(t)$ と $y_k(t)$ の間の位相遅れ時間と群遅れ時間が次のように得られる。

$$t_{p_{jk}}(t, \omega) = -\theta_{jk}(t, \omega)/\omega, \quad t_{g_{jk}}(t, \omega) = -\partial\theta_{jk}(t, \omega)/\partial\omega \quad (7)$$

上式より、非定常相互スペクトルの位相角 $\theta_{jk}(t, \omega)$ は、 $x_j(t)$ と $x_k(t)$ に含まれる ω 成分の時刻 t における時間ずれに関係することがわかる。

3. 数値計算結果および考察 SMART-1 のevent-5 のデータについて非定常相互スペクトルを算出し、絶対値と位相および群遅れ時間を求めた。SMART-1 は3つの同心円(O, M, I)と中心からなるアレーであり、合計37個の地震計を有しているが、数値計算では、これらのうち006, M06, I06, およびC00のNS成分を用いた。なお、予備計算において通常の相互相関解析を行い、波形全体の遅れ時間として、0.74sec(006-C00), 0.31sec(M06-C00), および0.03sec(I06-C00)の値を得た。また、非定常相互スペクトルの計算においては、予め定常理論による相互スペクトルを求め、そのスペクトル振幅がピークとトラフをとる振動数(1.2,

2.0, 3.6, 4.0Hz) および1Hz 以下の低振動数域の点数 (0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0Hz)について解析を行った。以下では、紙面の都合上、代表的な2、3の結果について述べる。Fig.1 は、006 とC00 の0.5Hz 成分の時刻歴 (変位波)、および非定常相互スペクトルの振幅 (絶対値) と位相を示したものであり、横軸は時間である。図のスペクトル振幅より、この成分波が強震部 (8 ~ 14sec)以降においてもかなりの相関性を有することがわかる。また、強震部に対応する位相差がほぼ一定値 (-2.6rad)であることから、強震部の位相遅れ時間は、 $2.6/2\pi/0.5 \div 0.83\text{sec}$ となり、定常解析の結果 (0.74sec) と大差ないことがわかる。しかし、14sec 以降の位相差は時間によってかなり変動しており、この図から14sec 以降の位相遅れ時間を求めることには無理がある。他方、群遅れ時間は近傍の位相差の変化のみに関係するから、位相遅れ時間とは異なる情報が得られる。Fig.2 には、Fig.1 と同じ成分の群遅れ時間を非定常相互スペクトル振幅とともに示した。この図より、相互スペクトル振幅が大きい時間で群遅れ時間が比較的安定した値をとること、14sec 以降で群遅れ時間がかかなり大きな値 (約7sec) をとること等がわかる。したがって、0.5Hz 成分の14sec 以降に到着する波の伝播速度が強震部より遅いことより、この波が表面波である可能性を指摘できる。なお、この0.5Hz 成分の相互スペクトル振幅は、次の1.2Hz 成分 (定常な相互スペクトルがピークをとる振動数) の1/8 程度である。Fig.3、およびFig.4 には、006 とC00 の1.2Hz 成分の相互スペクトル振幅、位相差、および群遅れ時間を示した。これらの図より、1.2Hz 成分の非定常相互スペクトルが強震部に集中すること、強震部の位相遅れ時間および群遅れ時間がともに約0.7secになること等がわかる。006 とC00, 106 とC00 についても同様な結果が得られたので、ここでは省略する。

4. おわりに

マルチフィルターによる非定常相互スペクトルの位相特性の物理的意味、すなわち2つの地震動に含まれる同一振動数成分の遅れ時間について述べ、数値計算よりその妥当性を検討した。

謝辞 本研究で使用したSMART-1 アレーデータを提供していただいた台湾national central 大学のDr. Lohに謝意を表します。

参考文献 1) Kameda, Sawada; 7th Japan Earthq. Engr. symp, 2) 亀田・沢田・亀井; 土木学会関西支部講演会、昭和62年。

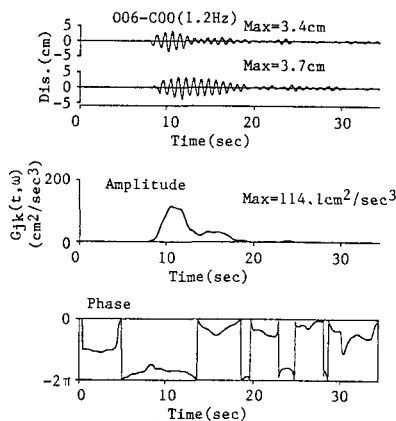


Fig.3 Time History, Amplitude and Phase of Nonstationary Cross Spectrum (1.2Hz Component of 006-C00)

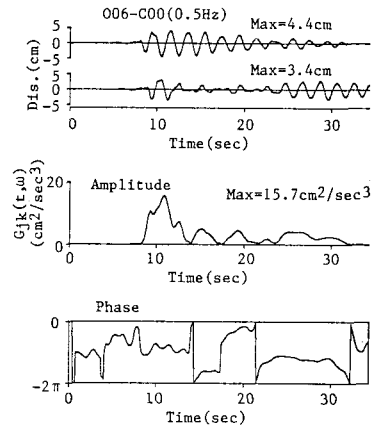


Fig.1 Time History, Amplitude and Phase of Nonstationary Cross Spectrum (0.5Hz Component of 006-C00)

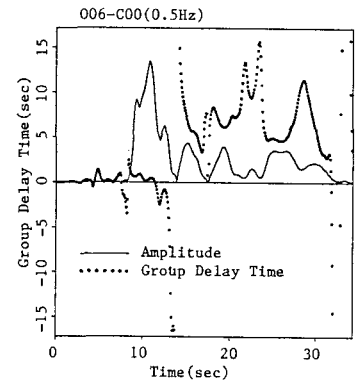


Fig.2 Group Delay Time and Amplitude of Nonstationary Cross Spectrum (0.5Hz Component of 006-C00)

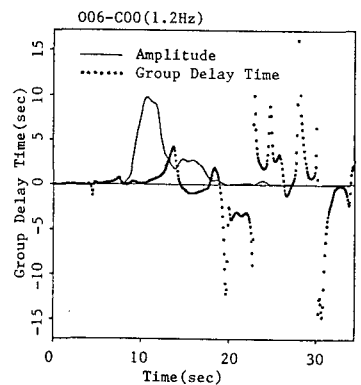


Fig.4 Group Delay Time and Amplitude of Nonstationary Cross Spectrum (1.2Hz Component of 006-C00)