

I-458 非定常相互相関性を有する多地点地震動のシミュレーション

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
 徳島大学大学院 学生員○青井英幸

1. はじめに 多点入力をうける長大構造物の耐震設計を行うためには、多地点地震動の非定常な相互相関性を簡単な形でモデル化するとともに、モデルを用いて作成した模擬地震動が実地震動の諸特性をどの程度反映するかを検討しておくことが必要である。本報告では、非定常相互相関性を表すモデル関数¹⁾を用いて多地点地震動をシミュレートし、観測記録と比較することにより、その妥当性を検討する。多地点地震動のシミュレーションにあたっては、とくに、物理的意味が明確な形の定式化を行っている。

2. 非定常パワースペクトルと相互スペクトルのモデル関数 多地点地震動をシミュレートするためには、非定常パワースペクトルと相互スペクトルのモデル関数が必要である。地点jの地震動 $x_j(t)$ の非定常パワースペクトルのモデル関数は、次式で表現できる²⁾。

$$\sqrt{G_{jj}(t, 2\pi f)} = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq t \leq t_s \\ \alpha_m(f) \{t - t_s(f)\} / t_p(f) * \exp [1 - \{t - t_s(f)\} / t_p(f)] & ; t_s \leq t \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 α_m は強度パラメータ、 t_s および t_p は時間パラメータである。一方、地点jとkの地震動 $x_j(t)$ と $x_k(t)$ の非定常相互スペクトルのモデル関数は複素関数であり、その極座標表示は次式で与えられる。

$$\hat{G}_{jk}(t, \omega) = |\hat{G}_{jk}(t, \omega)| \exp [i\hat{\theta}_{jk}(t, \omega)] \quad (2)$$

ここで、 $|\hat{G}_{jk}(t, \omega)|$ は非定常相互スペクトル振幅、 $\hat{\theta}_{jk}(t, \omega)$ は非定常な位相差であり、それらの関数形はそれぞれ次式で与えられる¹⁾。

$$|\hat{G}_{jk}(t, \omega)| = \gamma_{jk}(\omega) \sqrt{G_{jj}(t, \omega) G_{kk}(t, \omega)} : \hat{\theta}_{jk}(t, \omega) = -\omega_0 t_{p,jk}(t, \omega_0) - (\omega - \omega_0) t_{g,jk}(t, \omega_0) \quad (3)$$

ここで、 γ_{jk} は重み付コヒーレンスのモデル関数、 $t_{p,jk}$ および $t_{g,jk}$ は位相遅れ時間と群遅れ時間である³⁾。

3. シミュレーション理論の概要 前節の非定常パワースペクトルおよび相互スペクトルのモデル関数を用いて、非定常な相互相関性を有する多地点地震動をシミュレートする方法について述べる。以下では、式の表現を簡単にするため、引数 (t, ω) とモデルを表す記号 $\wedge$ を適宜省略する。多次元非定常確率過程 $x_j(t)$ 、 $j=1 \sim n$ は、非定常パワースペクトル G_{jj} および相互スペクトル G_{jk} を要素とする相互スペクトル行列 $\mathbf{G}(t, \omega)$ を用いて、次式によりシミュレートできる⁴⁾。

$$x_j(t) = \sum_{l=1}^N \sum_{p=1}^j \sqrt{2\Delta\omega} |B_{jp}| \cos(\omega_l t + \beta_{jp} + \phi_{pl}) \quad (4)$$

ここで、 $B_{jp} = |B_{jp}| \exp(i\beta_{jp})$ は、相互スペクトル行列 $\mathbf{G}(t, \omega)$ を三角行列の積に分解したときの (j, p) 要素であり、複素関数である。また、 ϕ_{pl} は $0 \sim 2\pi$ の一様乱数であり、 $p=q$ かつ $l=m$ のとき以外は、 ϕ_{pl} と ϕ_{qm} は互いに独立である。上式の物理的意味を明確にするため、次の2つの係数 b_{jp} および g_{jp} を導入する。

$$b_{jp} = B_{jp} / \sqrt{G_{jj}} : g_{jp} = G_{jp} / \sqrt{G_{jj} G_{pp}} \quad (5)$$

式(4)を、式(5)の係数を用いて変形すると、次式が得られる。

$$x_j(t) = \sum_{l=1}^N \sqrt{2G_{jj}\Delta\omega} \sum_{p=1}^j |b_{jp}| \cos(\omega_l t + \beta_{jp} + \phi_{pl}) : b_{jp} = (g_{jp} - \sum_{m=1}^{p-j} b_{jm} b_{pm}^*) / b_{pp} : \sum_{p=1}^j b_{jp}^2 = 1 \quad (6)$$

式(6)の第2式は漸化式であり、式(5)より g_{jp} が得られると、 b_{jp} は順次計算できる。また、この式より、係数 b_{jp} が $x_j(t)$ と $x_p(t)$ に共通に含まれる要素波の条件付複素コヒーレンスになることが分かる。これらのことより、式(6)よりシミュレートされる多次元非定常確率過程の物理的意味が明確となる。すなわち、① $x_j(t)$ の非定常パワースペクトルは $G_{jj}(t, \omega)$ であり、② $x_j(t)$ には種類の独立な要素波(余弦波)が $|b_{jp}|$ の割合で含まれ、③ $x_j(t)$ と $x_k(t)$ に共通に含まれる要素波は $|b_{jk}|$ なる相関をもち、それらの位相差は β_{jk} で表さ

れる。式(6)を2次元の場合について書くと次のようになり、それらの物理的意味がさらに明確になる。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \sum \sqrt{2G_{11}} \Delta \omega \cos(\omega_i t + \phi_{1i}) \\ x_2(t) &= \sum \sqrt{2G_{22}} \Delta \omega \sum [|g_{21}| \cos(\omega_i t + \beta_{21} + \phi_{1i}) \\ &\quad + \sqrt{1 - g_{21}^2} \cos(\omega_i t + \phi_{2i})] \end{aligned} \quad (7)$$

4. 数値計算結果および考察 数値計算では、台湾のSMART-1アレー観測記録⁵⁾ (Fig. 1参照)より得られたevent5の地震記録を用い、模擬地震動と観測記録の波形特性、スペクトル特性、および相互相関性(コヒーレンス)を比較することにより、提示したシミュレーション波の妥当性を検討する。

ここでは、震央方向に位置する006, M06, I06および000で得られた観測記録による解析結果を示す。Fig. 2には、式(1)~(7)を用いてシミュレートされた加速度波形を観測記録と対比して示した。Fig. 3は、Fig. 2の波形より得られるフーリエスペクトルを示したものであり、図中の実線は模擬地震動のフーリエスペクトルを、また破線は観測記録のそれを示している。これらの図より、模擬波形と観測記録の非定常特性およびスペクトル特性にはよい一致が見られる。Fig. 4には、模擬波形および観測記録の重み付平均コヒーレンスを示した。太線は模擬波形に、細線は観測記録に対応する。また図中には、重み付平均コヒーレンスのモデル関数も示した。図より、模擬地震動と観測記録の重み付平均コヒーレンスにもよい一致が見られる。これらのことより、本報告で提案したシミュレーション法より得られる模擬地震動が実地震動の非定常な相互相関性をよく再現することが確かめられた。

5. おわりに 従来の周波数強度型シミュレーション法を拡張し、数値解析によりその妥当性を検討した。その結果、模擬波形が地震動の非定常性、相互相関性などの工学的特性を再現することがわかった。

謝辞；解析に使用したアレー観測記録は台湾National Central大学のDr. Lohに提供していただいた。また京都大学工学部 杉戸真太助手には、データ処理についてお世話になりました。記して謝意を表します。

【参考文献】 1) 亀田・沢田；土木学会43回年報, 1988. 2) 後藤・亀田・杉戸；土木学会論文集第286号、1979. 3) 亀田・沢田・亀井；京都大学防災研究所年報30号、1987. 4) 星谷；土木学会論文集第253号、1976. 5) Loh, C-H ; Earthq. Engr. Struct. Dyn., 1985.

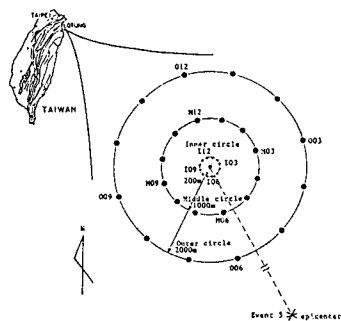


Fig. 1 SMART-1 Array

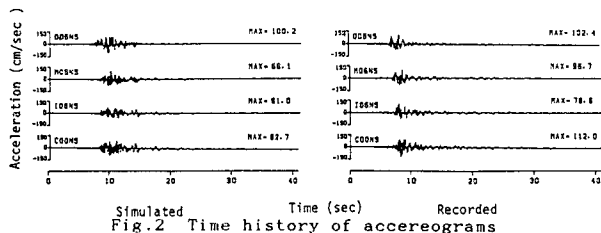


Fig. 2 Time history of accelerograms

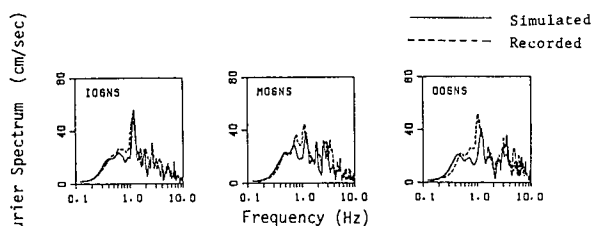


Fig. 3 Fourier Spectrum

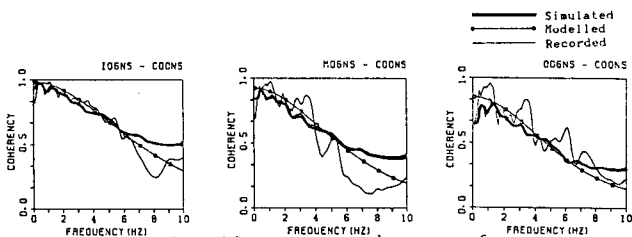


Fig. 4 Ensemble average coherency of weighted average coherency