

非定常な相互相関性を有する多地点地震動のシミュレーション

徳島大学大学院 学生員○青井 英幸
 徳島大学工学部 正会員 沢田 勉

1. まえがき 原子力施設などの重要構造物や長大橋梁、パイプライン系のように空間的広がりを持つ構造物の耐震設計を行うにあたっては、地震動の多次元性を考慮しなければならない。そのため、地震動の非定常性を考慮して多次元成分間の相関性を評価することが必要となってくる。亀田ら¹⁾はマルチフィルタによる非定常相互スペクトル解析法を開発し、アレー観測記録の解析より地震動の空間相関性について有用な情報を得た。これら解析結果を耐震設計に役立てるためには、地震動の空間相関性を簡単な形でモデル化しなければならない。本研究では、地震動の空間相関性に関する情報を使いやすい形でモデル化するとともに、多地点地震動をシミュレートする方法を物理的に明確な形で定式化し、その妥当性を検討する。

2. 非定常な多地点地震動モデルの定式化

(1) コヒーレンスのモデル化 長大構造物の耐震設計の入力として非定常な相関性を有する地震動を考慮するためには、コヒーレンスを何らかの形でモデル化する必要がある。ここでは、亀田らによる重み付平均コヒーレンスでモデル化する¹⁾。この方法は、非定常コヒーレンスを非定常相互スペクトル振幅で重み付けして得られる値をコヒーレンスの代表値とするものであるが、実際にシミュレーション波の作成に用いるためには、これを簡単な形でモデル化することが必要である。ここでは、重み付平均コヒーレンスを次式でモデル化した。

$$\text{coh}^2_{jk}(2\pi f) = 1 / (aD^\alpha f^2 + 1)^2 * \exp[-\beta X] \quad (1)$$

ここで、 f =振動数、 D =地点間距離、 X =波動伝播距離、 a, α, β =係数で実地震動記録から最小自乗法により求める。上式は、振動数の有理関数であること、地点間距離 D が0のときコヒーレンスは振動数によらず常に1になること、震源と観測点の相対的位置関係によるコヒーレンスの異方性が表現できることなどの特徴をもつ。

(2) 非定常パワースペクトルのモデル化 多地点地震動をシミュレートするには、非定常パワースペクトルを簡単な関数形で表すことが必要である。 ω 成分の非定常パワースペクトルは、3つのパラメータ、すなわち最大値を与える強度パラメータ $\alpha_m(\omega)$ 、立ち上がり時刻を与える時間パラメータ $t_s(\omega)$ 、および $t_s(\omega)$ から最大値までの時間パラメータ $t_p(\omega)$ を用いて次式のように表される²⁾。

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

(3) 非定常な相互相関性を有する多地点地震動のシミュレーション法 (1)、(2)で定式化したモデルを用いると、 n 次元の模擬地震動が次式によりシミュレートできる。

$$x_j(t) = \sum_{p=1}^N \sqrt{2G_{jj}} \Delta\omega \sum_{p=1}^j |b_{jp}| \cos(\omega_1 t + \beta_{jp} + \phi_{p1}) \quad (3)$$

$$\sum_{p=1}^j |b_{jp}|^2 = 1 \quad (4)$$

ここで、 G_{jj} は $x_j(t)$ の非定常パワースペクトル、 $|b_{jp}|$ および β_{jp} は $x_j(t)$ と $x_p(t)$ に共通に含まれる要素波の条件付コヒーレンスと位相差、 ϕ_{p1} は $0 \sim 2\pi$ の独立性を有する一様乱数、 ω_1 は円振動数の上・下限間を十分大きな正整数 N で分解したときの各円振動数成分である。この式(3)を用いて作成される多次元確率過程 $x_j(t)$ は、その物理的意味が明確である。すなわち、 $x_j(t)$ は非定常相互スペクトルが $G_{jj}(t, \omega)$ であり、互いに独立な j 個の要素波(余弦波) $\cos(\omega_1 t + \beta_{jp} + \phi_{p1})$ の重ね合わせからなる。また、 $x_j(t)$ と $p \leq j$ なる $x_p(t)$ に含まれる同じ要素波の相関性は $|b_{jp}|$ で表され、それらは β_{jp} なる位相差をもつ。

3. 数値計算結果および考察

前節で提案したシミュレーション法の妥当性を検討する。本研究の解

析では、台湾のSMART-1アレー観測³⁾(Fig. 1)より得られたevent5の地震記録を用いた。ここでは、震央方向に位置する006、006、106および000観測記録を用いた結果を示す。Fig. 2には、式(1)~(4)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

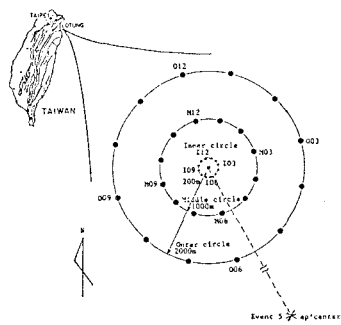


Fig.1 SMART-1 Array

録に対応する。また図中には、式(1)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。これらることより、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。

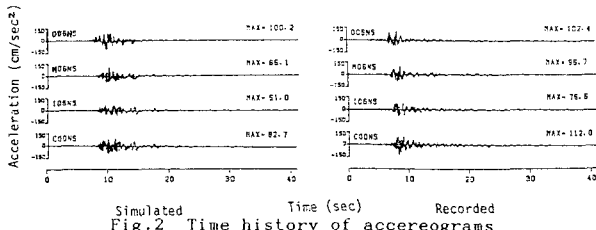


Fig.2 Time history of accelerograms

4. 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、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。

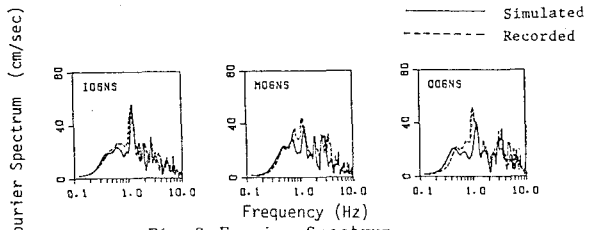


Fig.3 Fourier Spectrum

謝辞；本研究を進めるにあたり貴重な御助言をいただいた京都大学防災研究所・亀田弘行教授に謝意を表します。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。

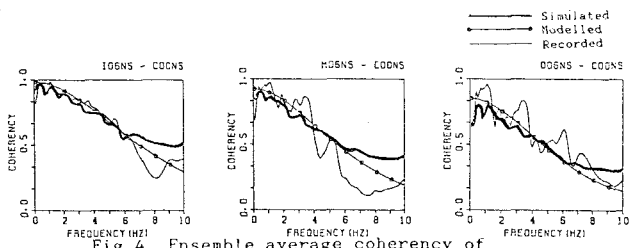


Fig.4 Ensemble average coherency of weighted average coherency

【参考文献】

- 1) 亀田、沢田、亀井；京都大学防災研究所年報30号、1987, 10
- 2) 後藤、亀田、杉戸；土木学会論文報告集第286号、1979, 6
- 3) Loh, C-H ; Earthq. Engr. Struct. Dyn., 1985