

1. はしがき

地震動波形の振幅成分および周波数成分は時間的に不規則に変動する。この不規則性に着目して、地震動を確率過程でモデル化した人工地震波を入力とし、構造物の応答解析や安全性評価を行なう耐震設計法が盛んになってきた。ここで、地震動を確率過程でモデル化する場合、地震動の振幅特性および周波数特性はきわめて複雑であることから、それら2つの特性を十分に反映できるモデル、すなわち、非定常確率過程を用いる方が妥当性が高い。特に、長大構造物あるいは地中構造物では、地震動入力の非定常性の重要さが指摘されている。さらに、長大構造物あるいは地中構造物に対しては、地震動の位相差を持って入力して考える方が妥当であろう。

このような観点から、本研究では、異なる2地点において相互に相関を有する地震動の解析方法を検討し、そのシミュレーションを試みた。

2. シミュレーション・モデル

相互に相関を有する非定常確率過程 $x(t)$ および $y(t)$ を次式でモデル化し、地震動の非定常性をとらえる。

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a(\omega_k, t) \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

$$y(t) = \sum_{k=1}^N b(\omega_k, t) \cos(\omega_k t + \phi_k - \alpha_k(t)) \quad (2)$$

(1), (2) 式は調和関数型地震動モデルであり、振幅および周波数特性が非定常性を示す確率過程である。各周波数 ω_k の強度 $a(\omega_k, t)$ 、 $b(\omega_k, t)$ は時間により変動し、各周波数成分を合成することによって、 $x(t)$ 、 $y(t)$ は振幅および周波数特性の非定常性を示す。また、位相角としては、各周波数成分における $x(t)$ および $y(t)$ 間の位相ずれを示す確定関数 $-\alpha_k(t)$ が考慮されている。 ϕ_k は(1), (2) 式に共通な確率変数 $U(-\pi, \pi)$ である。 $a(\omega_k, t)$ 、 $b(\omega_k, t)$ および $\alpha_k(t)$ は物理スペクトル、(3) 式の定義を拡張し使用することにより理論的に導かれる。

$$\text{物理スペクトルの定義: } S_x(\omega, t; W) = E \left[\frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} W(t-u) x(u) e^{-i\omega u} du \right|^2 \right] \quad -\infty < \omega < \infty \quad (3)$$

$$W(t) = \left(\frac{\sqrt{2}}{T} \right)^{1/2} e^{-\pi t^2 / T^2} \quad (4)$$

物理スペクトルは(3)式で定義されるように、時間 t の近傍における $x(t)$ のパワー（自乗和）の周波数分解の期待値で与えられる。また、 $W(t)$ は $x(t)$ から時間 t の近傍をとり出すためのガウス型ウィンドウ関数である。 T はフィルター時間である。本研究では、相互相関を扱うことから、(3) 式を拡張して、次式で定められる重み付き非定常スペクトル密度関数 $S_{xy}(\omega_1', \omega_2', t_1, t_2; W)$ を定義する。

$$\begin{aligned} S_{xy}(\omega_1', \omega_2', t_1, t_2; W) &= C_{xy}(\omega_1', \omega_2', t_1, t_2; W) + i Q_{xy}(\omega_1', \omega_2', t_1, t_2; W) \\ &= E \left[\left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} W(t_1-u_1) W(t_2-u_2) x(u_1) y(u_2) e^{i(\omega_1' u_1 - \omega_2' u_2)} du_1 du_2 \right] \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 C_{xy} 、 Q_{xy} はそれぞれ S_{xy} の実数部、虚数部である。 $S_{xy}(\omega_1', \omega_2', t_1, t_2; W)$ は時間 t_1 の近傍における $x(t)$ と時間 t_2 の近傍の $y(t)$ の2重フーリエスペクトルとして与えられる。

$a(\omega_k, t)$ 、 $b(\omega_k, t)$ および $\alpha_k(t)$ は(3)~(5)式を用いて以下のように与えられる。

$$a(\omega_k, t) = \sqrt{4 S_x(\omega_k, t; W)} \Delta \omega \quad (6)$$

$$t(\omega_*, t_2) = 8\pi\omega_* \sqrt{C_{xy}(\omega_*, \omega_*, t_1, t_2; W) + Q_{xy}^2(\omega_*, \omega_*, t_1, t_2; W) / a(\omega_*, t)} \quad (7)$$

$$\alpha_*(t_2) = -\tan^{-1} \{ Q_{xy}(\omega_*, \omega_*, t_1, t_2; W) / C_{xy}(\omega_*, \omega_*, t_1, t_2; W) \} \quad (8)$$

(7), (8) 式の右辺は t_1 および t_2 の関数となっているが、実際の地震記録からは $t_2 - t_1 < 3 \text{ sec}$ では値の変動は少ない。このことから、本研究では $t_2 = t_1$ と計算する。

3. 実際の地震加速度記録による解析

実際の加速度波形を解析し、シュミレートし、原波形とシュミレーション波を比較検討する。

使用した地震加速度波形は1971年サンフェルナンド地震のVO (J195) 地震、VT (I137) 地震の記録である。(図1)、両地震間の距離は4.5km。両地震のデータは方向修正、時間軸の補正(VT記録-1.5sec)が行われている。図2にシュミレーションの結果である1組のサンプル間数を示す。モデルでは周波数 ω の上下限値を $\omega_u = 20\pi$, $\omega_L = 0 \text{ rad/sec}$ 、分割数 $N=40$ とした。また、フィルター時間 T は6.0secである。原波形とサンプル間数の波形はよく似ていることがわかる。図3および図4には、原波形とサンプル間数の物理スペクトルおよび位相角 $\alpha_*(t)$ を示す。これらの結果もよく一致しており、本研究のモデルの妥当性および实用性が理解できたにけよう。

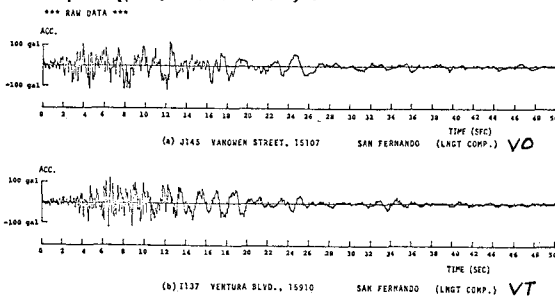


図1 原波形 (LNGT. COMP.)

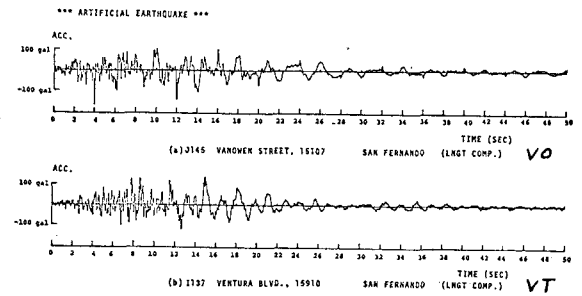


図2 サンプル間数

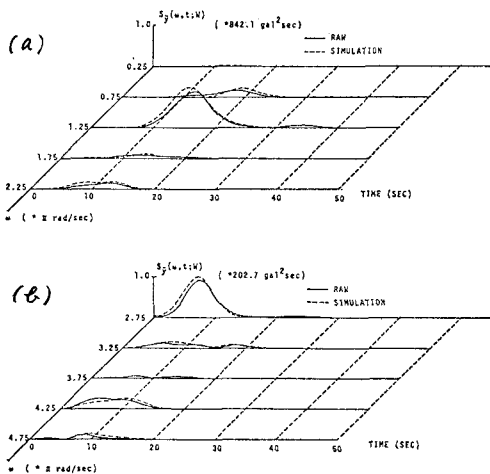


図3 VTの物理スペクトル

(a) $\omega = 0.25\pi \sim 2.25\pi \text{ rad/sec}$

(b) $\omega = 2.75\pi \sim 4.75\pi \text{ rad/sec}$

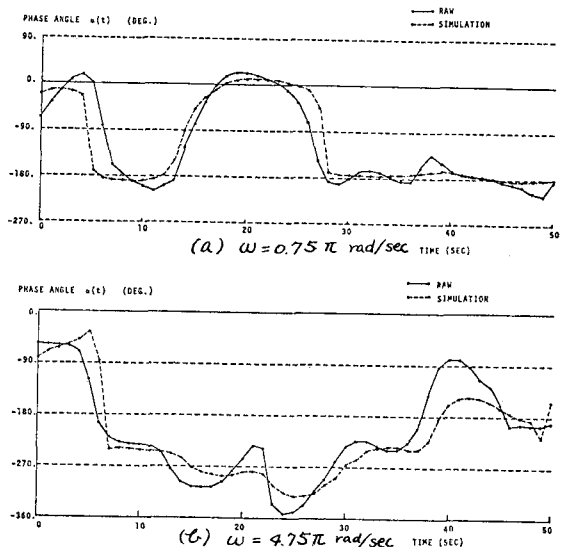


図4 位相角 $\alpha_*(t)$

参考文献 1) 星谷, 千葉, 草野; 地震加速度波の非定常性とそのシュミレーション, JSCE, No.295,

2) EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH LABORATORY; STRONG MOTION EARTHQUAKE ACCELEROGRAMS., REPORT No. EERL 79-51, 79-52, CIT, 1979