

非定常スペクトル理論に基づく新たな地震動シミュレーション法の開発

計測リサーチコンサルタント 正会員 ○松前 芳寿
 広島工業大学工学部 正会員 中山 隆弘
 梶谷エンジニア中国支店 正会員 藤原 豪紀

1. はじめに 従来の非定常確率過程論に基づく地震動シミュレーション法の研究は、定常確率過程論より誘導されたシミュレーション式を準用したものがほとんどであった。これらの研究では、主に工学的応用面に主眼がおかれ、シミュレーション波のスペクトル特性と原スペクトルモデルとの違いについて着目されることはほとんどなかった。本研究では、まず非定常確率過程論から誘導されたシミュレーション式と従来式を用いて地震波を作成した。次に、それらの地震波のスペクトル特性について原スペクトルモデルと比較・検討した。

2. シミュレーション式の誘導 文献1)に従い、本提案式を簡単に示す。まず、実関数である非定常確率過程 $X(t)$ は一般に次式で定義される。

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dF(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} A(t, \omega) dZ(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $A(t, \omega)$ 、 $Z(\omega)$ はそれぞれ変調関数、直交過程であり、ふたつの変数は一般的に複素関数で表わされる。したがって、非定常確率過程の標本関数 $x(t)$ は非定常スペクトルを用いて次式のように表わすことができる。

$$x(t) \equiv \sum_{i=1}^N \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \phi(t, \omega_i)) \quad (2)$$

ここに、 $f(t, \omega)$ は非定常スペクトル、 $\phi(t, \omega)$ は次式で定義される時間位相である。なお、添字 R 、 I はそれぞれ実部、虚部を表わし、 $-\pi \leq \phi(t, \omega) \leq \pi$ とする。

$$\phi(t, \omega) = \tan^{-1} \frac{dF_I(t, \omega)}{dF_R(t, \omega)} \quad (3)$$

変調関数 $A(t, \omega)$ 、直交過程 $Z(\omega)$ を用いると式(3)は次式のように変形される。

$$\tan \phi(t, \omega) = \frac{A_R dZ_I + A_I dZ_R}{A_R dZ_R - A_I dZ_I} = \frac{\tan \beta(t, \omega) + \tan \theta(\omega)}{1 - \tan \beta(t, \omega) \tan \theta(\omega)} = \tan(\beta(t, \omega) + \theta(\omega)) \quad (4)$$

よって、式(4)の $\phi(t, \omega)$ は一般的に次の関係式で表わされる。

$$\phi(t, \omega) = \beta(t, \omega) + \theta(\omega) + 2m\pi \quad m: \text{整数} \quad (5)$$

したがって、シミュレーション式は次のように表わされる。

$$x(t) \equiv \sum_{i=1}^N \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \beta(t, \omega_i) + \theta(\omega_i)) \quad (6)$$

ここで、 $\theta(\omega)$ は確率変数である。式(6)が本提案法におけるシミュレーション式となるが、式中の $\beta(t, \omega)$ と $\theta(\omega)$ 、すなわち変調関数 $A(t, \omega)$ と直交過程 $Z(\omega)$ は一意的に決定することができない。いま、直交過程 $Z(\omega)$ が、 $x(t)$ の複素フーリエ係数をもつと仮定すると、 $\beta(t, \omega)$ は次式で表わされる。

$$\beta(t, \omega) = \phi(t, \omega) - \theta_x(\omega) \quad (7)$$

したがって、標本関数 $x(t)$ のフーリエ位相 $\theta_x(\omega)$ を用いて次式のシミュレーション式が得られる。

$$x(t) \equiv \sum_{i=1}^N \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \phi(t, \omega_i) - \theta_x(\omega_i) + \theta(\omega_i)) \quad (8)$$

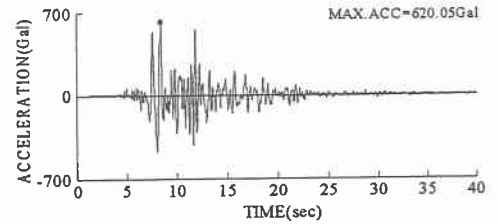


図1 加速度記録(神戸海洋気象台)

3. 解析結果と考察 本研究では、式(8)の提案式と従来のシミュレーション式³⁾を用いて地震波をそれぞれ50波作成し、各々の非定常スペクトルの平均を求めて両式の比較を行った。原スペクトルモデルは、図1に示す兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の加速度記録(時間間隔 0.02 秒, 記録時間 150 秒)に非定常スペクトル解析を行い設定した。非定常スペクトル解析は文献²⁾で提案された Complex demodulation 法により行った。

図2, 図3にそれぞれ従来法と本提案法で求めたシミュレーション波の加速度応答スペクトルの平均応答値 μ と標準偏差 σ_{n-1} から求めた $\mu \pm \sigma_{n-1}$ を示す。従来法では、原波形(ORIGINAL)の応答値に比べ、0.3~1.0secの区間でかなりのばらつきが現われている。

一方、図3によると、平均応答値 μ は原波形の応答値にほぼ一致しており、ばらつきも従来法と比較して小さいことがわかる。

図4に加速度応答スペクトルの変動係数を示す。本提案法のばらつきは、全周期において従来法のそれより小さくなっている。

図5, 図6にそれぞれ従来法, 本提案法で求めたシミュレーション波の非定常スペクトルを示す。従来法では、図6のようにピークをひとつもつようなケースでは、比較的原スペクトルモデルと一致する。しかし、図5のように複数のピークをもつケースでは原スペクトルモデルと一致しない。本提案法では、いずれのケースにおいても原スペクトルモデルによく一致する。また、両者の変動係数をみると、たとえば、時刻約1.2秒と約1.6秒では、本提案法の値がおよそ20%, 従来法の値がおよそ90%と、両者には約4.5倍もの差がある。

なお、本提案法における変動係数がスペクトルの谷の部分で約90%と大きな値となっているが、これはスペクトルの平均値の絶対値そのものが小さいことによる。

4. おわりに 本研究は、時間位相を考慮したシミュレーション波のスペクトル特性について検討した。その結果、本提案法が従来法に比較してより原非定常スペクトルモデルに忠実な特性を有するシミュレーション波の作成に有効であることを示した。

参考文献

- 1) T.Nakayama, H.Fujiwara: A Simulation Method of Earthquake Ground Motion in Consideration of Time-varying Phase Based on Nonstationary Spectrum Theory, ICOSAR, 1997.11.
- 2) 小松定夫・藤原豪紀・中山隆弘: コンプレックス・デモデュレーション法による地震動の非定常スペクトル解析, 土木学会論文報告集, 第368号, 1986.4.
- 3) 亀田弘行: 強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第235号, pp.55-62, 1975.3.

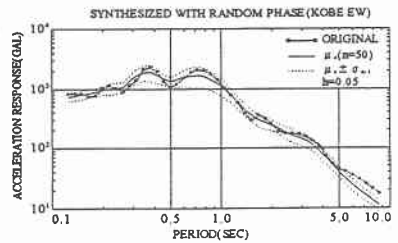


図2 加速度応答スペクトル(従来法)

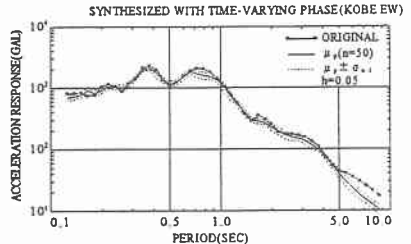


図3 加速度応答スペクトル(本提案法)

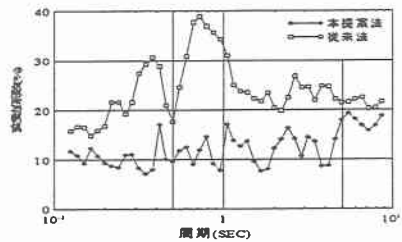


図4 加速度応答スペクトルの変動係数

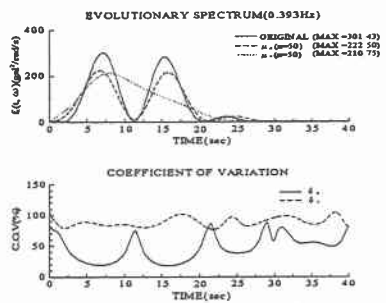


図5 非定常スペクトルと変動係数(Case1)

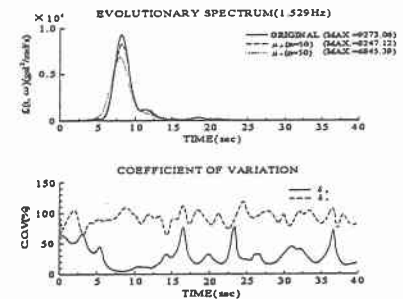


図6 非定常スペクトルと変動係数(Case2)