

非定常スペクトルによる模擬地震動の特性のフーリエ解析による検討

梶谷エンジニア(株)中国支店 正員 ○藤原 豪紀

広島工業大学工学部 正員 中山 隆弘

1. はじめに 和泉ら¹⁾の対称的フーリエ解析法の枠組みでマルチフィルタによる非定常スペクトルの算出法を捉え、同算出法は、狭帯域フィルタの出力の complex envelope により地震動の非定常性を評価する手法と理解することができる²⁾。特に、狭帯域波に関しては著者が非定常スペクトル解析に用いた CD 法は complex envelope と同種の手法であり、同法による包絡線と時間に依存する位相が complex envelope によるそれらと一致する。本報告では、非定常スペクトルと時間に依存する位相 (時間位相) を用いた地震動のシミュレーション法 (本法) と従来から行われている非定常スペクトルと一様乱数を用いた方法 (従来法) による模擬地震動の波形の包絡線やフーリエスペクトル、群遅延時間を示し、両法による模擬地震動の特性をフーリエ解析の枠組みの中で検討する。

2. 本法と従来法のシミュレーション式 本法と従来法による地震動のシミュレーション式はそれぞれ式(1)と式(2)で与えられる。

$$x_s(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \varphi(t, \omega_i) - \theta x(\omega_i) + \theta(\omega_i)) \quad (1)$$

$$x_s(t) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos(\omega_i t + \theta(\omega_i)) \quad (2)$$

ここで、 $f(t, \omega)$ 、 $\varphi(t, \omega)$ がそれぞれ非定常スペクトルと時間位相であり、 $\theta(\omega)$ は $[-\pi, \pi]$ の一様乱数である。また、 $\Delta \omega$ は帯域フィルタの帯域幅であり、 $\theta x(\omega)$ は原波形 $x(t)$ のフーリエ位相である。

3. $|\bar{x}(t)|^2$ の 1 次と 2 次のモーメント $x(t)$ の complex envelope を $\bar{x}(t)$ とする。 $x(t)$ の包絡線 $|\bar{x}(t)|$ と瞬時周波数 $fgr(t)$ について次式が成立する³⁾。

$$t_0 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t |\bar{x}(t)|^2 dt \quad \sigma_{t^2} = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (t - t_0)^2 |\bar{x}(t)|^2 dt \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} |\bar{x}(t)|^2 fgr(t) dt \quad \sigma_{f^2} = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(\frac{d|\bar{x}(t)|}{dt} \right)^2 + |\bar{x}(t)|^2 \{fgr(t) - f_0\}^2 \right] dt \quad (4)$$

ここで、 $E = \int_{-\infty}^{\infty} |\bar{x}(t)|^2 dt$ である。なお、非定常スペクトルと時間位相については、それぞれ

$$|\bar{x}_i(t)| = \sqrt{2f(t, \omega_i) \Delta \omega_i}, \quad 2\pi fgr_i(t) = \omega_i + \frac{\partial \varphi(t, \omega_i)}{\partial t} \quad (5)$$

が成立する。添え字 i は i 番目の帯域波を示す。

4. 数値計算と考察 図-1 に El Centro NS の波形の包絡線と同地震動記録を原モデルとして本法と従来法によってそれぞれシミュレートした模擬地震動 (周波数帯域 0.1Hz~9.5Hz で作成)、各 20 波の包絡線の平均値を示す。波形の包絡線については両シミュレーション法による差は小さいことがわかる。図-2 には同記録のフーリエスペクトルと両法による模擬地震動、各 20 波の同スペクトルの平均値を示す。図-3 には同記録と模擬地震動の群遅延時間の一例を示す。両図から非定常スペクトルと時間位相を考慮した本法では、フーリエスペクトル、群遅延時間とも原波形のそれらとよく一致していることがわかる。さらに、表-1 に式(3)と(4)によって求めた同記録 (0.1Hz~9.5Hz に帯域制限) の t_0 、 σ_{t^2} 、 f_0 、 σ_{f^2} と、両法による模擬地震動、各 20 波のそれらの

平均値と変動係数を示す。同表も図-1～3と同様の結果を示している。本法では式(5)からわかるように、原波形の包絡線と瞬時周波数の情報がそれぞれ非定常スペクトルと時間位相によって模擬地震動に反映される。式(3)から t_0 、 σ_{t^2} には包絡線のみが関与するが、 f_0 、 σ_{f^2} には、式(4)から包絡線と瞬時周波数の両者が関与する。これが本法において t_0 、 σ_{t^2} の経時特性よりも f_0 、 σ_{f^2} 、すなわちフーリエスペクトルや群遅延時間の周波数特性がより原波形のそれらに一致する理由と考えられる。

5. おわりに 本法による模擬地震動の周波数特性、すなわちフーリエスペクトルや群遅延時間が原モデルとした地震動記録のそれらとよく一致することを示した。これらの結果は本法において非定常スペクトルに加え、時間位相を考慮したことによると考えられる。

参考文献 1) 理論地震動研究会：地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994。2) 非定常スペクトルの算出法と同スペクトルによる模擬地震動のフーリエ解析による検討，土木学会論文集投稿予定。3) 和泉正哲，勝倉裕：地震動の位相情報に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，第327号，1983.5。

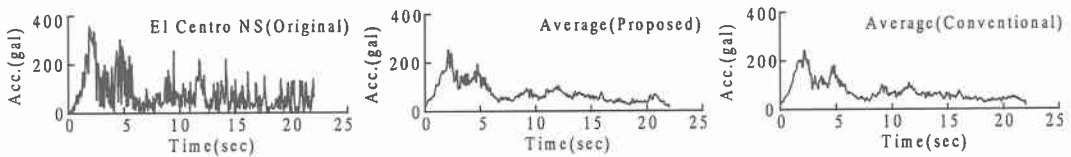


図-1 El Centro NSの包絡線；本法と従来法による模擬地震動各20波の包絡線の平均値

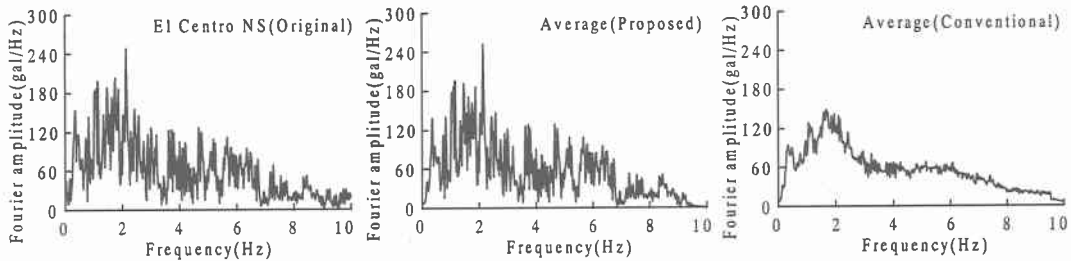


図-2 EL Centro NSのフーリエスペクトル；本法と従来法による模擬地震動各20波の同スペクトルの平均値

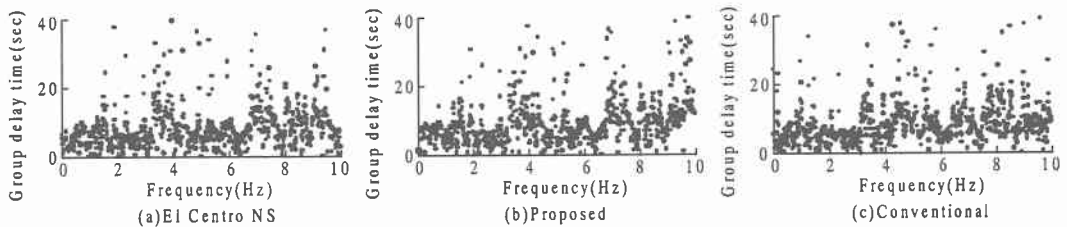


図-3 El Centro NSと模擬地震動（本法と従来法による）の群遅延時間

表-1 原波形と模擬地震動（本法と従来法各20波）の式(3)と(4)による平均値と分散

項目		t_0 (sec)	σ_{t^2} (sec ²)	f_0 (Hz)	σ_{f^2} (Hz ²)
原波形(0.1Hz~9.5Hz)		6.19	27.17	2.83	3.82
本法(20波)	平均値	6.29	26.88	2.86	3.84
	変動係数(%)	2.02	1.81	1.04	2.06
従来法(20波)	平均値	6.26	27.12	2.88	4.01
	変動係数(%)	10.81	9.53	6.11	10.02