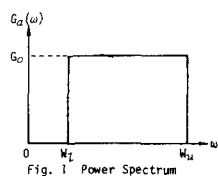


有帯域ホワイトノイズによる模擬地震動の作成

徳島大学工学部 正員 沢田 勉
 兵庫労働基準局 正員 松木 浩幸

1. まえがき 地震動をうける構造物の信頼性を解析するためには、地震動を何らかの方法でモデル化しなければならぬ。従来より多くの地震動モデルが提案されてきたが、定常モデルおよび振中非定常モデルでは実地震動の特性が十分に反映できないし、周波数非定常モデル¹⁾は複雑すぎて不規則振動論の適用が困難であるという欠点がある。不規則振動論による信頼性解析に用いる地震動モデルは、なるべく簡潔かつ実地震動の基本的な特性が反映されたものであることが望ましい。このような観点から、本報告では、実地震動を有帯域ホワイトノイズでモデル化する手法について述べるとともに、その適合性について検討を加えた。

2. 有帯域ホワイトノイズによる実地震動のモデル化 Fig. 1 に示すようなパワースペクトルを有する有帯域ホワイトノイズにより地震動加速度波をモデル化する。ここで、 ω_L , ω_U は下限および上限の角振動数、 G_0 はスペクトル振幅である。これらのパラメーターにより規定される有帯域ホワイトノイズは定常確率過程であるから、その継続時間 τ もパラメーターに加える必要はない。これら4個のモデルパラメーターは、実地震動の最大加速度 A_{max} 、最大速度 V_{max} 、最大変位 D_{max} 、および全パワー P_w がモデル地震動のそれらと一致するように決定する。 A_{max} , V_{max} , D_{max} , P_w は地震動の強度特性を表すが、それらが地震動の短周期、中周期、長周期成分、および継続時間と密接に関係することを考えると、本モデルは、間接的にスペクトル特性および時間特性も考慮していることになる。以下では、実地震動の A_{max} , V_{max} , D_{max} および P_w よりモデルパラメーター G_0 , ω_L , ω_U , τ を決定する方法について述べる。Kiureghian²⁾ によると、継続時間 τ の定常過程 $s(t)$ の絶対最大値の期待値は次式で与えられる。



$$\mu_s = \left\{ \sqrt{2 \ln V_e \tau} + 0.5772 / \sqrt{2 \ln V_e \tau} \right\} \sigma_s \quad (1)$$

ここで、 V_e = 修正ゼロフロッシング数、 $V = S(t)$ のゼロフロッシング数、 $\sigma_s = S(t)$ の自乗平均値、 $\eta =$ 不規則指数、 $\lambda_m =$ パワースペクトル $G_s(\omega)$ の m 次モーメント、である。いま、 $S(t)$ を有帯域ホワイトノイズとして、その加速度、速度、変位波形をそれぞれ $a(t)$, $v(t)$, $d(t)$ で表す。式(1)より $a(t)$, $v(t)$, $d(t)$ それぞれの最大値の期待値を求め、実地震動の A_{max} , V_{max} , D_{max} と等置すると、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} V_e &= \begin{cases} (1.63 \eta^{0.45} - 0.38) \nu, & \eta < 0.69 \\ \nu, & \eta \geq 0.69 \end{cases} \\ \sigma_s &= \lambda_0, \quad \nu = \sqrt{\lambda_2 / \lambda_0} / \pi, \\ \eta &= \sqrt{1 - \lambda_1^2 / \lambda_0 \lambda_2} \\ \lambda_m &= \int_0^\infty \omega^m G_s(\omega) d\omega \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left\{ \sqrt{2 \ln V_e \tau} + 0.5772 / \sqrt{2 \ln V_e \tau} \right\} \sigma_a = A_{max}, \quad \left\{ \sqrt{2 \ln V_e \tau} + 0.5772 / \sqrt{2 \ln V_e \tau} \right\} \sigma_v = V_{max}$$

$$\left\{ \sqrt{2 \ln V_e \tau} + 0.5772 / \sqrt{2 \ln V_e \tau} \right\} \sigma_d = D_{max} \quad (3)$$

また、モデルの全パワーは $\sigma_a^2 \tau$ であるから、これと実地震動の全パワー P_w を等置することにより次式が得られる。

$$\sigma_a^2 \tau = P_w \quad (4) \quad \text{以上の式(3), (4)を連立して解くことにより、モデルパラメーター } G_0, \omega_L, \omega_U, \tau \text{ が決定できる。}$$

以上の式における各係数は式(2)により算出できるが、それらに用いる加速度、速度、変位のパワースペクトルは次式で表される。

$$G_a(\omega) = G_0, \quad (\omega_L \leq \omega \leq \omega_U) \quad (5)$$

$$G_v(\omega) = G_0 / \omega^2 \quad (6), \quad G_d(\omega) = G_0 / \omega^4 \quad (7) \quad \text{ところで、式(3), (4)}$$

は非線形連立方程式であるから、以下ではこれの解法について述べる。まず、式(3)を次のように変形する。

$$(\ln V_e \tau)^2 + (0.5772 - S_{imax}^2 / 2 \sigma_i^2) \ln V_e \tau + 0.2886^2 = 0 \quad (8) \quad \text{ここで、}$$

添字 $i = 1, 2, 3$ はそれぞれ a, v, d に、 $S_{imax}, i = 1, 2, 3$ は $A_{max}, V_{max}, D_{max}$ に対応する。

式の簡化のために、 $Y_i = \ln V_e \tau$, $Z_i = (0.5772 - S_{imax}^2 / 2 \sigma_i^2)$, $X_1 = \omega_L$, $X_2 = \omega_U$, $X_3 = G_0$, $X_4 = \tau$

と置き、式(8)を初期値 x_0 のまわりにテーラー展開して2次以上の高次項を省略すると次式が得られる。ただし、次式において添字0は初期値を表し、 Δx_j は x_j の増分を表す。

$$\sum_{j=1}^3 (2Y_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + Y_i \frac{\partial Z_i}{\partial x_j} + Z_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j})_0 \Delta x_j = -(Y_i^2 - Y_i Z_i + 0.2886^2)_0, \quad i=1, 2, 3 \quad (9)$$

同様に、式(4)も次のように線形式される。 $\sum_{j=1}^3 [\partial(\sigma^2 \tau) / \partial x_j]_0 \Delta x_j = P_w - (\sigma^2 \tau)_0$ (10)
 式(9), (10) は増分量 Δx_j に関する連立1次方程式であるから、これらは容易に求められる。次の段階では、 $x_i = x_0 + \Delta x$ を初期値として以上の計算を繰返し、最終的な解として $x_i, i=1 \sim 4$ を得る。このようにして得られたパラメーター W_0, W_u, G_0, τ よりパワースペクトルを求め、それをフーリエ逆変換すると模擬地震動が得られる。

3. 応答スペクトルによるモデルの適用性の検討 前節で述べた方法により、実地震動を有帯域ホワイトノイズでモデル化し、それより模擬地震動を作成し、モデルの適用性を検討した。用いた記録は、米国西海岸で得られた記録8成分である (Table 1)。Table 2, および3には、これらの記録の $A_{max}, V_{max}, D_{max}, Power$ と模擬地震動(10波の平均)のそれらを示した。これらの表より、模擬地震動には、実地震動の所期の特性が反映されていることがわかる。また、Fig. 2~5には、実記録の加速度応答スペクトルと模擬地震動の10波の平均応答スペクトルおよび $\mu \pm \sigma$ (μ ; 平均, σ ; 標準偏差) を図示した。これらの図より、模擬地震動の応答スペクトルは実地震動の応答スペクトルの平均的な傾向をよく反映していることがわかる。しかしながら、No. 3の地震動のように、応答スペクトルがやや長周期側にもピークをもつ場合には適合性が悪い。紙面の都合で割愛したが、この地震動の波形を見ると、長周期成分が卓越していることがわかり、このことによりこの記録は軟弱地盤上で得られたものである。以上のように、本報告で提示した有帯域ホワイトノイズのモデルは、比較的硬い地盤上の地震動に対しては適合性は良いが、軟弱地盤上の地震動に対しては良いモデルとはならない。

Table 1 Records used in this study

No.	Earthquake Name	Site	Date	Comp.	Duration
1	IMPERIAL VALLEY	EL CENTRO	1940. 5.18	S00E	53.76
			1940. 5.18	S90W	53.48
2	EUREKA	EUREKA FEDERAL BLDG	1954.12.12	N11W	79.98
			1954.12.12	N79E	79.58
3	EUREKA	FERDALE CITY HALL	1954.12.12	N44E	42.32
			1954.12.12	N46W	42.40
4	SAN FERNANDO	LOS ANGELES	1971. 2. 9	N36E	52.34
			1971. 2. 9	N54W	52.30

Table 2 Intensity parameters of original waves

No.	Comp.	ORIGINAL WAVE			
		A_{max}	V_{max}	D_{max}	Power
1	S00E	341.39	36.05	11.28	114325
	S90W	209.97	40.59	22.02	80650
2	N11W	164.38	31.05	13.07	21086
	N79E	252.88	29.78	14.76	44146
3	N44E	155.69	35.72	14.10	34140
	N46W	197.34	26.05	9.87	23550
4	N36E	97.72	17.09	9.13	13264
	N54W	122.91	21.72	11.59	13124

Table 3 Intensity parameters of simulated waves

No.	Comp.	SIMULATIVE WAVE			
		A_{max}	V_{max}	D_{max}	Power
1	S00E	340.81	33.09	10.72	112305
	S90W	213.67	38.02	21.88	80015
2	N11W	160.06	30.17	12.98	20782
	N79E	247.77	27.08	15.43	43585
3	N44E	161.63	34.04	13.47	33665
	N46W	200.28	23.95	9.86	23204
4	N36E	94.13	15.18	8.76	13156
	N54W	120.81	9.79	11.12	12850

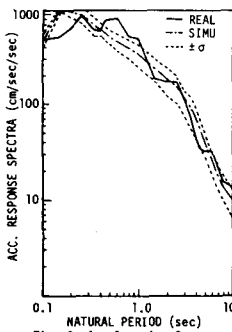


Fig. 2 Acceleration Response Spectra of No.1 (S00E)

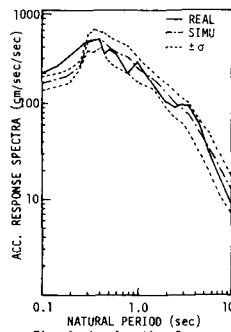


Fig. 3 Acceleration Response Spectra of No.2 (N11W)

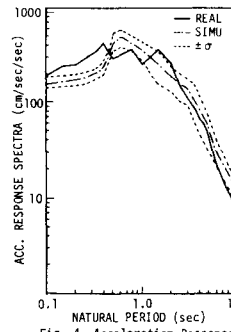


Fig. 4 Acceleration Response Spectra of No.3 (N44W)

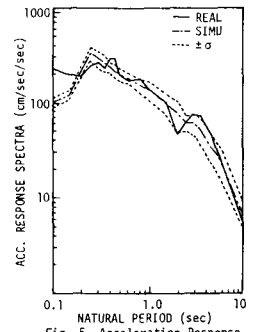


Fig. 5 Acceleration Response Spectra of No.4 (N36E)

4. おわりに 実地震動を有帯域ホワイトノイズでモデル化する手法について述べ、その適用性について検討した。その結果、本モデルは、比較的硬い地盤上の地震動に対してはその適合性が良いことがわかった。このことにより、硬岩盤上の地震動を有帯域ホワイトノイズでモデル化することは有効であると考える。

参考文献 1) 後藤, 亀田, 杉戸; 土木学会論文集, 才286号, 1979, 6. 2) Kiureghian; Rep. No. UCB/EERC, 79/32, EERC, 1979.