

京都大学 正会員 工博 山田善一

京都大学 正会員 工修 O竹宮宏和

1. まえがき 構造物の長大化・超高層化に伴い、長周期構造物の耐震設計法の開発が要望される。これまでに、多くの人々により、かかる構造物の動的解析が発表されている。今回の発表もその方向のものであるが、外力である地震現象を非定常確率過程の地震動とポアソン分布をなす生起過程より成る不規則現象として捉え、構造物の耐震安全性と First-excursion failure の問題から解析している。最終的には、将来のある期間後の安全性評価とスファトル表示して、動的耐震安全性に関する一つの応答規準量を提案している。

2. 地震動のシミュレーション 単一地震による地震動は、数多くの確率パラメータ及び、ある地震において確定的となるパラメータを含み、不規則性を呈する。解析上の都合から、これらのパラメータを最小限に留め、地震加速度に次の数式的表現を仮定している。

$$f(t) = \psi(\alpha_1, \alpha_2; t) g(\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5; t) \quad (1)$$

このにおいて、 $g(\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5; t)$ は定常確率過程を表わし、その自己相関関数を

$$E\{g(t)g(t+\tau)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_g(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

$S_g(\omega)$ は $g(t)$ のパワー・スペクトル密度で Fig. 1 に示す地盤系運動方程式

$$\ddot{X}_g(t) + 2\omega_g \dot{X}_g(t) + (\omega_g^2 + \omega_b^2) X_g(t) = \eta(t) \quad (3)$$

より算出される応答量を用いている。 ω_g, ω_b は、(1) 式の α_3, α_4 に相当するもので、 $\eta(t)$ は基盤からの入力、ホワイトノイズを表わし、その強度レベルを D (or α_5) とする。一方、 $\psi(t)$ は定常不規則関数 $g(t)$ と非定常に作る確関数で次式と仮定している。

$$\psi(\alpha_1, \alpha_2; t) = (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) H(t) \quad (4)$$

以上のよりして模擬される地震動は、共分散として、

$$E\{f(t_1)f(t_2)\} = \psi(t_1)\psi(t_2) e^{-\omega_g(t_2-t_1)} \{ \omega_g(\omega_g^2 - 3\omega_b^2) \sin \omega_g(t_2-t_1) + \omega_b(\omega_g^2 + 5\omega_b^2) \cos \omega_g(t_2-t_1) \} D / 4\omega_g\omega_b \quad (5)$$

シミュレーションに使用したパラメータを Table 1 に示す、また、 $g(t)$ の自己相関関数を Fig. 2 に、擬似地震動の分散を Fig. 3 に示す。

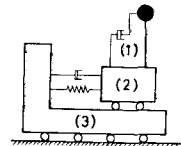


Fig. 1 Idealized system of foundation layer and structure

- (1) STRUCTURE
- (2) FOUNDATION LAYER
- (3) BASE ROCK

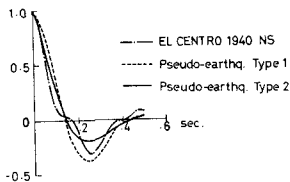


Fig. 2 Auto-correlation function of $g(t)$

Table 1 Values used for the simulation of earthquake motion				
Values for parameters	α_1	α_2	α_3 (ω_g)	α_4 (ω_b)
Pseudo-earth. motion				
Type 1	0.25	0.50	12.3	3.86
Type 2	0.25	0.50	10.9	6.26

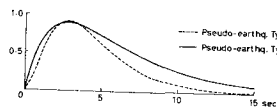


Fig. 3 Standard deviation of input acceleration

* Y. Yamada & H. Takemiya: Studies on the statistical safety evaluation of long-period structures against earthquakes (土木学会論文報告集投稿中)

3. 擬似地震動による構造物応答 構造物の応答解析は、一般には、多自由度系に対しては減衰項にある仮定を設けてモード分解し、各モード効果を重ね合せて応答評価をする。そこで各モードに相当する1自由度系について応答解析を行なっている。

$$\ddot{q}(t) + 2\zeta\dot{q}(t) + \omega_0^2 q(t) = -f(t) \quad (6)$$

従って、応答値 $q(t)$ は、以下に示す積分で

$$q(t) = \int_0^t h(t-\tau) f(\tau) d\tau \quad (7) \quad \text{但し} \quad h(t) = \frac{1}{\omega_d} e^{-\zeta\omega_0 t} \sin \omega_d t$$

(7)式においては、外力 f が確率的にのみ定義されているので、応答値も分散あるいは共分散として評価され得る。これらを1つの式で表現すれば

$$\alpha^2(t; l, m) = \int_0^t \int_0^t \frac{\partial}{\partial \tau_1} h(t-\tau_1) \frac{\partial}{\partial \tau_2} h(t-\tau_2) E\{f(\tau_1)f(\tau_2)\} d\tau_1 d\tau_2 \quad (8)$$

ここで、 l, m は 0 または 1 を取るものとする。

4. 構造物の耐震安全性評価 地震外力に対する構造物の破壊を first-exursion failure と定義するならば、先づ、地震動に関しては規準 Barrier, B の応答超過確率を threshold crossing の理論より

$$E[N_+(B, t)] = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha(t; 1, 1)}{\alpha(t; 0, 0)} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{B}{\alpha(t; 0, 0)}\right)^2\right\} \left[\sqrt{1-\rho^2} \exp\left\{-\frac{\rho^2}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{B}{\alpha(t; 0, 0)}\right)^2\right\} + \frac{\pi}{2} \rho \frac{B}{\alpha(t; 0, 0)} \left(1 + \exp\left\{-\frac{\rho}{\sqrt{1-\rho^2}} \frac{B}{\alpha(t; 0, 0)}\right\}\right) \right] \quad (9)$$

$$\Rightarrow \rho = \alpha^2(t; 0, 1) / \alpha(t; 0, 0) \alpha(t; 1, 1)$$

(9)式と等しくって変位・速度の2次元ガウス分布を仮定している、

とすると、Barrier が大きく、応答超過確率が非常に小さい場合は、one duration の地震動に対する構造物の破壊確率は

$$P_f(B, t_f) = 2 \left[1 - \exp\left\{-\int_0^{t_f} E[N_+(B, t)] dt\right\} \right] \quad (10)$$

ここで、 t_f は地震動の継続時間と表わす。

構造物の耐用年数算定のためには、(10)式と更に、地震の生起過程に仮定せねばならない。この分布に Poisson 分布を採用して信頼性関数なるものを求める

$$L(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (\lambda t)^k e^{-\lambda t} \frac{(1-P_f)^k}{k!} = e^{-\lambda t P_f} \quad (11)$$

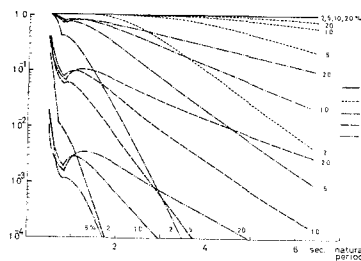
λ は対象規模の地震の再現期間の逆数である。従って、使用期間を通じての構造物の破壊は

$$F(t) = 1 - L(t) \quad (12)$$

計算結果を Fig. 4 に P_f を、Fig. 5 に $F(t)$ を示す。後者は、東京近郊の過去の地震記録 JMA 5 以上のもつて JMA 7 以上のものについて描いた。結論として長周期構造物の規準応答量として次の値を選んておけば十分であろう。

$B = \gamma \times (\text{stationary asymptote})$

$$\gamma = \begin{cases} 1.0 \sim 4/3 & \text{for } T_0 = 1.0 \sim 4.0 \text{ sec} \\ 2/3 \sim 1.0 & \text{for } T_0 = 4.0 \sim 6.0 \text{ sec} \end{cases}$$



(a) $1/T_f = 0.0769$

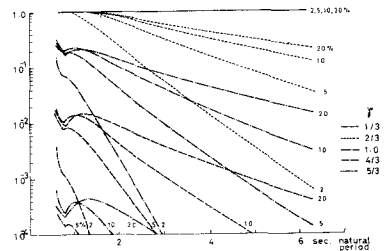
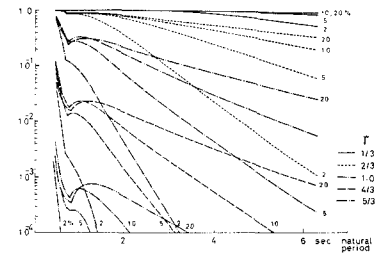


Fig. 4 Probability of failure during earthquake motion Pseudo-earth. Type 2



(b) $1/T_f = 0.0169$

Fig. 5 Probability of failure after 100 years, Pseudo-earth. Type 2