

2方向を考慮した地震動のシミュレーション法

金沢大学工学部 正員 小堀 為雄

学生員 久保 雅邦

1) まえがき

構造物の耐震設計を行う場合の動的解析の手法として、代表的な実地震記録が入力として、しばしば用いられるが、最近計算機の進歩とともに、人工的に作成した地震動を用いることも行われるようになって来た。本研究は、このような人工地震動を用いる場合に、その作成方法として、地震動本来の2方向性を考慮してシミュレーションを行うものがある。基本的には定常波形について行う。

2) 実地震動の2方向性特性の解析

我が国で得られた代表的な強震記録のうち、特に地盤上を記録されたものに限定して選択し、その直角2方向の相関性を調べた。用いた記録をTable-1に示す。全継続時間中、計算に用いたのは定常的と考えられる最大加速度を含む10秒間について行った。止むを得ない場合、5~8秒間について行った。原加速度記録を $X(t)$, $Y(t)$ とし、Fig-1のように座標軸の平行-回転変換により、(1)式となる。

$$X(t) = \{X(t) - \bar{x}\} \cos \theta + \{Y(t) - \bar{y}\} \sin \theta \quad \text{----- (1)}$$

$$Y(t) = -\{X(t) - \bar{x}\} \sin \theta + \{Y(t) - \bar{y}\} \cos \theta$$

従って、 $X(t)$, $Y(t)$ の分散 σ_x^2 , σ_y^2 相関係数 ρ_{xy} とすると、 $X(t)$, $Y(t)$ の分散 σ_x^2 , σ_y^2 は回転角 θ の関数となる。ここで、 $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 =$

σ_0^2 となるような回転角 θ_0 は存在し、その時 $X(t)$, $Y(t)$ の相関係数 ρ_{xy} は(2)式で与えられる。また、

相関係数 $\rho_{xy} = 0$ となるような回転角 θ_0 のとき、

σ_x^2 , σ_y^2 は一方が最大値、他方が最小値となり、その間の間には(3), (4)式の関係がある。

Table-1の各記録について、 ρ_{xy} を計算し、最大値と最小値の比 $m = \sigma_{\max}^2 / \sigma_{\min}^2$ を θ_0 の変数にしてプロットしたのが、巻頭ページのFig-2である。

各記録はA-groupとB-groupとに分けられる傾向にあることが示されるが、耐震設計上必要とされる大きい地震動(例えば $\sigma_0 \geq 30 \text{ gal}$) についてのみ考えると、(5)式が近似できる。

$$m = -0.0029 \sigma_0 + 1.70 \quad \text{----- (5)}$$

(A-groupのみ最小二乗法を用いる。)

Table-1

No.	Record Date	X(t) Y(t)	Acc. Max.	Dur.
1	ITAJIMA-A 43.4.1	Lg Tr	169.88 186.26	40.0
2	ISHIKARI-A 43.5.16	N-S E-W	181.25 174.88	50.0
3	ITAJIMA-B 43.8.6	Lg Tr	360.88 437.50	15.0
4	ISHIKARI-B 43.5.16	N-S E-W	96.88 170.88	50.0
5	HAMAMATSU 40.4.20	Tr Lg	41.50 100.40	20.0
6	ITAJIMA-C 43.4.1	Lg Tr	34.00 36.00	14.0
7	AMAGASAKI 38.3.27	Lg Tr	27.63 35.50	32.0
8	HOROMAN-A 43.5.16	Lg Tr	77.50 52.25	30.0
9	CHIYODA-B 43.5.16	Tr Lg	44.50 31.5	30.0
10	HOROMAN-B 43.5.16	Tr Lg	42.85 51.79	30.0
11	HIRAI 43.7.1	Tr Lg	48.75 58.13	25.0
12	MATUSTIRO-A 41.4.17	N-S E-W	126.50 59.38	18.0
13	MATUSTIRO-B 41.5.20	N-S E-W	95.00 97.75	20.5
14	MATUSTIRO-C 41.4.5	Tr Lg	133.88 189.00	20.0
15	MATUSTIRO-D 41.4.5	N-S E-W	230.37 139.38	25.0
16	CHIYODA-A 43.5.16	Tr Lg	83.50 90.75	30.0
17	ISHISETO 43.4.1	Tr Lg	24.64 25.88	10.0
18	OTANOSHIGE 43.5.16	Tr Lg	24.40 47.00	50.0
19	NISHIARAI 40.5.31	Tr Lg	16.90 21.30	20.0

$$|\rho_{xy}| = \frac{\sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\rho_{xy}^2 \sigma_x^2 \sigma_y^2}}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad \text{----- (2)}$$

$$\sigma_{\max}^2 = (1 + |\rho_{xy}|) \sigma_0^2 \quad \text{----- (3)}$$

$$\sigma_{\min}^2 = (1 - |\rho_{xy}|) \sigma_0^2$$

$$2\sigma_0^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2, \quad |\theta - \theta_0| = \pi/4 \quad \text{--- (4)}$$

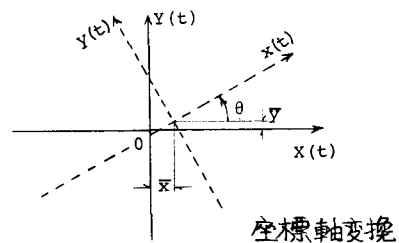


Fig.-1

回転角 $\theta = \theta_1 \alpha$ とし、即ち $\rho_{xy} = 0$ とするとき $x(t)$, $y(t)$ についてパワースペクトル密度関数を求め、傾向を調べた。一例が Fig-3 である。

これらの結果、 $x(t)$, $y(t)$ の間には全体として、卓越周波数は殆んど一致し、ピークの鋭さが幾分異なるという共通した傾向が見られた。

3) 2方向地震動のシミュレーション

2) の実地震動の解析結果を参考にして、ここでは相関係数 $\rho_{xy} = 0$ 、即ち $\sigma_x = \sigma_{max}$, $\sigma_y = \sigma_{min}$ となるように波形を作成する。基本式としては、Shinozuka 氏による (b) 式を用いる。ダッシュはシミュレーションされた波形という意味である。

$$\begin{aligned} x(t) &= \sigma_{max} \sqrt{2/N} \sum_{k=1}^N \cos(\omega_k t + \theta_k) \\ y(t) &= \sigma_{min} \sqrt{2/N} \sum_{k=1}^N \cos(\omega_k t + \tilde{\theta}_k) \end{aligned} \quad \text{----- (b)}$$

ここに、 ω_k , θ_k はそれぞれ $x(t)$, $y(t)$ のパワースペクトル密度関数と相対的な確率分布特性を持つ乱数であり、 $\theta_k, \tilde{\theta}_k$ は、お互い独立な、 $[0, 2\pi]$ の一様乱数であり、 ω_k と $\tilde{\omega}_k$ は、それぞれ ω_k , θ_k に対し独立である。パワースペクトル密度関数としては、卓越周波数を一致させ、ピークの鋭さの差をなす

(c) 式を用いる。 ω_g , h_x , h_y はパラメータ

である。以上の方法により、必要とする地震動の分散 σ^2 の大きさを決定すれば、(5), (3) 式から σ_{max} , σ_{min} が決定され、加速度波形 $x(t)$, $y(t)$ が作成できることになる。即ち理論的には $x(t)$, $y(t)$ は平均値 = 0, 分散 = σ_{max}^2 , σ_{min}^2 の独立な定常ガウス過程であり、従って相関係数 $\rho = 0$ となる。さらに、所定の相関係数の大きさを決め、 $x(t)$, $y(t)$ を座標軸変換すれば一組の2方向地震動が得られたことになる。また、非定常化は形変換を必要とするところによって行える。

4) 考察

2方向地震動の相関係数は、厳密には、時間遅れ τ を持つ相互相関係数について考える必要があるが、2方向入力の場合構造物に作用するのは同時刻であるという意味から、ここでは同一時刻における相関係数のみについて考えた。Fig-2 にある2, 各記録が明確に A-group, B-group に分けられるのは地盤条件や震央距離の影響かと思われる。また、近似式についても、ある程度の幅(バラツキ)を許して考えるべきであるが代表的な場合として直線化した。さらに新しい記録を得て考察する必要がある。計算業務は学部生の石田修君にお願した。謝意を表す。

(文 献) 1. 山田, 菊田: 「関西支部年次研究発表要覧」, 昭49

2. 星谷: 「確率論手法による振動解析」, 鹿島出版会。

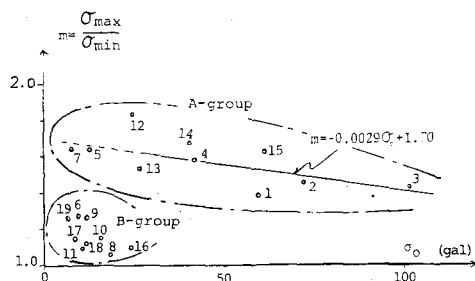


Fig.-2

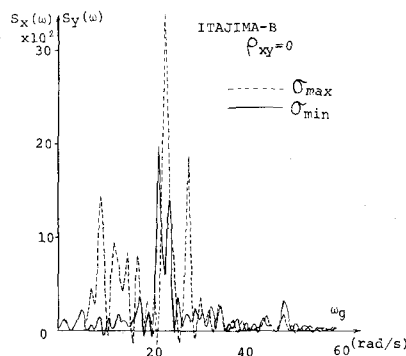


Fig.-3

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \frac{\sigma_{max}^2}{\pi \omega_g} \frac{4 h_x (\omega/\omega_g)^2}{\{1 - (\omega/\omega_g)^2\}^2 + 4 h_x^2 (\omega/\omega_g)^2} \\ S_y(\omega) &= \frac{\sigma_{min}^2}{\pi \omega_g} \frac{4 h_y (\omega/\omega_g)^2}{\{1 - (\omega/\omega_g)^2\}^2 + 4 h_y^2 (\omega/\omega_g)^2} \end{aligned} \quad \text{----- (c)}$$