

地震応答スペクトルの確率論的評価

鳥取大学工学部 正員 高岡宣善, 三重県庁 正員 堀江俊光
鳥取大学工学部 正員 白木 渡, 香川県庁 正員 小西敏夫

1. まえがき 地震応答スペクトルの概念は、耐震設計用荷重の根拠付けの際に現在広く使用されているが、この地震応答スペクトルにはかなりのばらつきが認められる⁽¹⁾⁽²⁾。本研究は、マグニチュード、震央距離が同じであるような《同一の強さ》の地震が発生した場合、地震応答スペクトルがどのようにばらつきを確率論的に評価するものである。解析例としては、1自由度構造物に正規定常不規則過程でモデル化した地動加速度過程が作用した場合を考える。

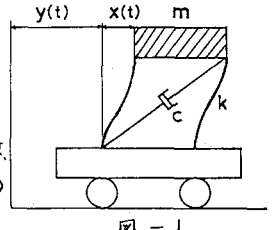


図 - 1

2. 地震応答スペクトルの確率論的評価 解析に用いた1自由度構造物モデルを図-1

に示す。ここに、 m, c, k : 質点の質量、減衰定数、ばね定数; $x(t)$: 応答変位; $y(t)$: 地動変位。このモデルに地動加速度 $a(t) = \ddot{y}(t)$ が作用した場合の運動方程式は、モデルの減衰定数 c および非減衰の固有円振動数 ω_0 を用いて式(1)となる。ここで $a(t)$ が不規則過程であると考えれば、地震応答振加速度スペクトル $\hat{\alpha}$ は不規則変数となり、

$$\ddot{x}(t) + 2\gamma\omega_0\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = -a(t) \quad (1)$$

$$F(\hat{\alpha}) = P\left[\max_{T_a} |\omega_0^2 x(x)| < \hat{\alpha}\right] \quad (2)$$

[\cdot] が生起する確率。式(2)の右辺は、 T_a 中に不規則過程が与えられたレベル $\hat{\alpha}$ を超過しない確率と解釈できる。このようにして、不規則変数である地震応答スペクトルを求める問題は、不規則過程の超過の問題になる。次に地動加速度 $a(t)$ のモデルについて考える。本研究では、式(3)で表わされる線形2次フィルタで濾波された定常白色雑音 $w(t)$ (スペクトル密度は S_w とする) を用いて、次の3つの場合を考える。

- (I) 1個のフィルタで濾波する場合 [Case I]
- (II) 多数のフィルタを直列 (Series) に並べて濾波する場合 [Case II: 図-2 参照]
- (III) 多数のフィルタを並列 (Parallel) に並べて濾波する場合 [Case III: 図-3 参照]

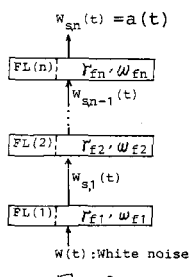


図 - 2

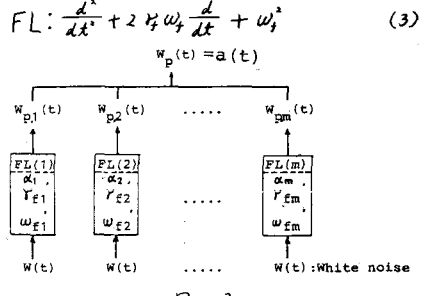


図 - 3

ここに、 γ, ω_0, α : フィルタの減衰定数、非減衰の固有円振動数、影響係数。Case I は、単一の卓越周期を有する地動加速度モデル、

$$K_a(\tau) = D_a e^{-\gamma\omega_0|\tau|} (\cos \omega_0 \tau + \frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \sin \omega_0 |\tau|) \quad (4)$$

$$S_a(\omega) = \frac{2D_a}{\pi} \frac{\gamma\omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\gamma^2\omega_0^2\omega^2} \quad (5)$$

Case II による地動加速度モデルを用いた場合についての示す。 $a(t)$ の自己相関関数 $K_a(t)$ およびスペクトル密度 $S_a(\omega)$ は、式(4), (5)となる。ここに、 D_a : 地動加速度の分散 ($= \frac{\pi S_w}{2\gamma\omega_0^2}$); $\omega_0 = \omega_0 \sqrt{1-\gamma^2}$ 。最後に、式(4), (5)の確率特性を持つ地動加速度モデルを用いて、式(2)の評価を行なう。ここで、 $x(t)$ は狭帯域不規則過程であり、図-4のような振動運動を呈する。そこでレベル超過は、原過程 $x(t)$ によるレベル超過と包絡線過程 $\phi(t)$ によるレベル超過が考えられる。

$$F_0(\hat{\alpha}) = \exp\left\{-\frac{\omega_0 T_a}{\pi} \exp\left(-\frac{\hat{\alpha}^2}{2\omega_0^2 \sigma_x^2}\right)\right\} \quad (6)$$

$$F_{\phi}(\hat{\alpha}) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\hat{\alpha}^2}{2\omega_0^2 \sigma_x^2}\right)\right]^2 \exp\left\{-\frac{2\hat{\alpha} \sigma_x T_a}{\sqrt{2\pi} \omega_0 \sigma_x^2} \exp\left(-\frac{\hat{\alpha}^2}{2\omega_0^2 \sigma_x^2}\right)\right\} \quad (7)$$

今、 $x(t)$ を正規定常過程と仮定し、超過の現象をポアソン分布で近似すると、式(2)は式(6), (7)となる。ここに、 $F_0(\hat{\alpha})$: 原過程のレベル超過を用いる非超過

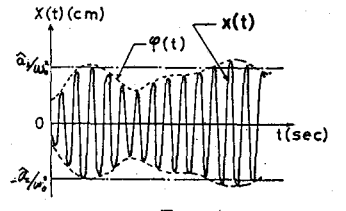


図 - 4

確率; $F_{op}(\alpha)$: 包絡線過程のレベル超過を用いる非超過確率; $\delta_x^* = \frac{\pi S_x(\omega_0)}{2r_x \omega_0^2}$; $\delta_1^* = \frac{\pi^2 r_1 S_x(\omega_0)}{2 + \omega_0}$.

3. パラメータの決定および数値計算例 式(6)および式(7)を用いて地震応答ベクトルを評価する際に必要のパラメータ、 D_a : 地動加速度の分散; T_a : 強震部分の継続時間; γ_f, ω_f : フィルターの減衰定数および非減衰の固有円振動数; γ_1 : 自由度構造モデルの減衰定数、の値を決定する。まず、 D_a は地動加速度 $a(t)$ を正規定常不規則過程と仮定して、Riceの公式を用いて式(6)から決定する。ここに、 Q_{max} は当該地域に於ける絶対最大地動加速度であり、 Q_{max} と T_a は道路橋示方書の回帰式(表-1参照)から求める。表-1中、M: マグニチュード; Δ : 震央距離; G.C.: 地盤種である。次に、 γ_f は式(4)で表わされる $K_d(\omega)$ を規準化(= $K_d(\omega)/D_a$)し、El Centro地震、 T_{eff} 地震の自己相関関数と比較した結果から、 $\gamma_f = 0.4$ とした(表-2参照)。また $\omega_f (= 2\pi/T_f)$; T_f : フィルターの固有周期)は、表層地盤において最も大きな地震動の増幅を示す周期 T_0 と密接な関係があると考え、 T_f を用いて地盤種別ごとに表-2のように分類し、数値計算にはカッコ内の Central Value を用いた。最後に $D_a = a_{max}^* / (2 L_n \omega_f T_a / \pi)$ (8)

表-1

Ground Condition	Regression Equation
G.C.1	$\hat{a}_{max} = 46.0 \times 10^{-0.208M} \times (\Delta + 10)^{-0.686}$
G.C.2	$\hat{a}_{max} = 24.5 \times 10^{-0.333M} \times (\Delta + 10)^{-0.924}$
G.C.3	$\hat{a}_{max} = 59.0 \times 10^{-0.261M} \times (\Delta + 10)^{-0.886}$
G.C.4	$\hat{a}_{max} = 12.8 \times 10^{-0.432M} \times (\Delta + 10)^{-1.112}$
G.C.1	$T_a = 3.89 \times 10^{-4} \times 10^{0.466M} \times d^{0.589}$
G.C.2	$T_a = 1.37 \times 10^{-2} \times 10^{0.262M} \times d^{0.485}$
G.C.3	$T_a = 2.75 \times 10^{-2} \times 10^{0.291M} \times d^{0.265}$
G.C.4	$T_a = 2.28 \times 10^{-1} \times 10^{0.199M} \times d^{0.233}$

表-2

Ground Condition	Tf (sec)	Central Value	γ_f
G.C.1	$T_f < 0.25$	(0.15)	0.4
G.C.2	$0.25 \leq T_f < 0.5$	(0.40)	0.4
G.C.3	$0.50 \leq T_f < 0.75$	(0.65)	0.4
G.C.4	$0.75 \leq T_f$	(0.90)	0.4

は、0.05とした。以上示したパラメータを用いて、地震応答ベクトルの計算を行なった。その一例を、図-5および図-6に示す。図-5は、1種地盤でマグニチュード6.3、震央距離82.9kmとした場合であり、図-6はマグニチュード、震央距離を変え3種地盤とした場合である。ただし、これは式(7)を用いて地震応答ベクトルを評価した結果であり、超過確率 $Q (= 1 - F_{op}(\hat{a}_x))$ をパラメータとして用いた。また参考のため、片山³⁾による地震応答スペクトル(統計解析による地震応答スペクトルの超過確率 $P = 0.05$ および $P = 0.5$)と、破線を示した。

図-5および図-6から、次のことが考察される: i)《同一の強さ》の地震であってもその地震応答スペクトルにはばらつきがあり、本研究で用いた方法を用いれば、超過確率 Q をパラメータとして確率論的に、地震応答スペクトルを評価することができる。ii) 3種地盤のようにいくつかの卓越周期を持つていると考えられる地盤に対して、Case Iの地動加速度モデルを用いると、図-6に示されるように地震応答スペクトルは単一ピークを持ち、片山³⁾による地震応答スペクトルと矛盾が生じる。そのため、いくつかの卓越周期を持つてい地盤に対しては、Case II, IIIの地動加速度モデルを用いなければならぬ。

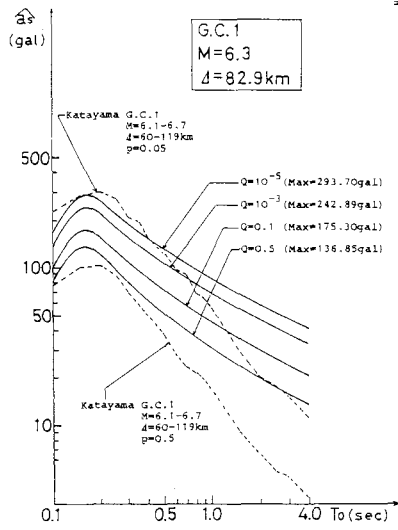


図-5

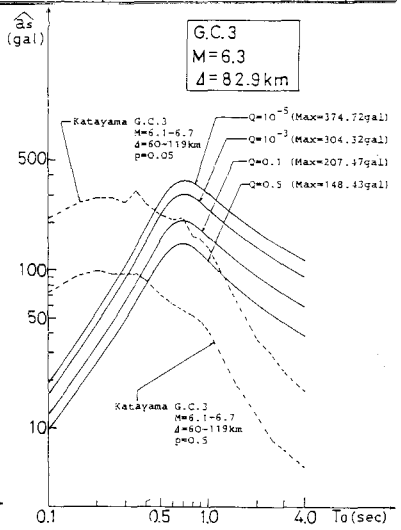


図-6

1) M. N. СИНЯШЕК: 地震応答ベクトルの確率統計的理論, СМРС, 1982, NO.2, PP. 62-65.
 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, (昭和55年5月), 丸善, 1980.
 3) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭: 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, 1978.
 4) Hirokazu TAKEMIYA: STUDIES ON THE APPLICATION OF RANDOM VIBRATION THEORY TO EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES, Dissertation Presented to Department of Civil Engineering Kyoto University, Kyoto, Japan, December, 1972.