

東電設計(株) 正員 ○松島 学
東京電機大学 理工学部 正員 松井邦人
東京電機大学 大学院 学生員 井出周治

1. はじめに

地震時に構造物の応力レベルを弾塑性範囲内にする弾性設計法が数多く採用されてきた。しかし、既往の観測記録では、設計震度以上の最大加速度を受けても構造物の被害はそれほどでもないことがわかってきた。本研究は、耐用期間内に発生する最大加速度を確率量としてとらえ、その最大加速度が生じたときの構造物の損傷度評価を行い、最適設計震度を費用～便益問題として求めたものである。

2. 解析モデルの定式化と解析結果

本研究の解析のフローを図1に示す。まず始めに対象とする地域の構造物の耐用期間での最大加速度の発生確率を求める。対象とする地域は東京とし、既往の地震記録の文献から東京での被害を受けた地震動のマグニチュードMと震央距離 ℓ を調査した。この結果から、対象とする地盤を道路橋の2種地盤として東京での最大加速度を建設省土木研究所のアテニュエーション式を用いて推定した。その結果を図2に加速度を50 gal刻みのヒストグラムで示す。

次に、再現期間 T_d 年での発生する確率を求める。地震などの発生する確率は、一般にポアソン過程とみなせることが多い。本研究でもこの考えに沿って、最大加速度 A_{max} が $a_{i-1} < A_{max} < a_i$ の時の再現期間 T_d 年での発生回数 $f_N(a_i)$ は次式で表される。

$$f_N(a_i) = f_N [a_{i-1} < A_{max} < a_i] \quad (1)$$

式(1)を用いて、 $T_d=50$ 年での離散化した最大加速度の発生確率を図3に示す。同図には、この発生確率を指数関数に近似した式も示す。最大加速度の発生確率が決定されたので、次に各最大加速度での模擬地震動を作成する。模擬地震動は、金井・多治見のパワースペクトルに基づく次式を用いて作成した。

$$S(\omega) = \frac{1 + 4h_s^2 C_\omega^2}{(1 - C_\omega)^2 + 4h_s^2 C_\omega^2} S_0, C_\omega^2 = \frac{\omega}{\omega_s}, \omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \quad (2)$$

また、地震動の包絡線はJenningsが提案した強度変化を表す関数を用いた。ここで、 T_g は地盤の固有周期、

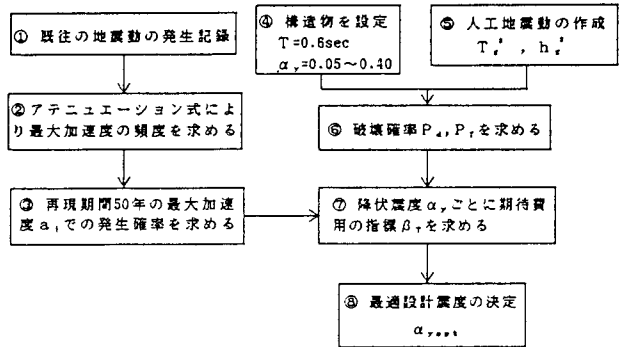


図1 最適設計震度を求めるフロー

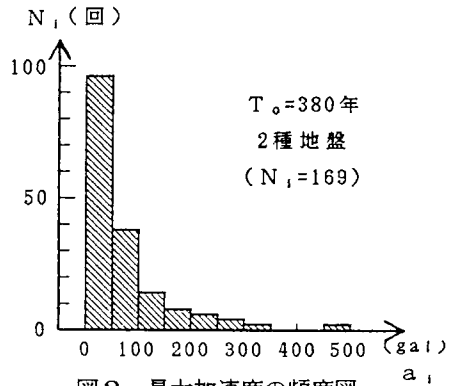


図2 最大加速度の頻度図

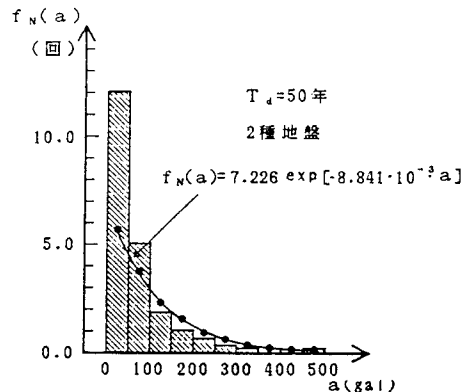


図3 再現期間50年での発生回数

$h g^*$ は地盤の減衰定数で、図4で示されるように区間を限定された一様分布として取り扱い、 $T_g^* = 0.2 \sim 0.4 \text{ sec}$ 、 $h g^* = 0.3 \sim 0.5$ とした。このようにモデル化された模擬地震動を各最大加速度ごとに 1000 波作成した。次に、対象構造物のパラメータを決める。本研究では、設計震度 α_y を求めることを目的としているので、 $\alpha_y = 0.05 \sim 0.40$ まで 0.05 きざみで設定し、構造物の固有周期を $T_s = 0.6 \text{ sec}$ とし、復元力特性を Bi-linear モデルと設定した。なお二次剛性は、弾性剛性の 0.05 倍とし、減衰定数 $h = 0.05$ とした。次に各破壊確率を求める。新しく制定されたコンクリート示方書では、

- ① 構造物が損傷を受ける。 $\mu > 2.0$
- ② 構造物が崩壊する。 $\mu > 4.0$

と定義している。ここで、 μ は塑性率である。本研究でもこの考え方を踏襲すると、最大加速度 $a_{i-1} < A_{\max} < a_i$ が生じた時の損傷および崩壊の破壊確率 $P_{di}(a_i)$ 、 $P_{fi}(a_i)$ は式(3)で表される。

$$P_{di}(a_i) = P_i(\mu > 2.0 | a_i) - P_i(\mu > 4.0 | a_i)$$

$$P_{fi}(a_i) = P_i(\mu > 4.0 | a_i) \quad (3)$$

図6に塑性率の分布の例を示す。式(3)より耐用期間 T_d 年間で各最大加速度区分での破壊確率は、式(4)で表される。

$$P_{dT_i}(a_i) = 1 - \{1 - P_{di}(a_i)\}^{f_n(a_i)}$$

$$P_{fT_i}(a_i) = 1 - \{1 - P_{fi}(a_i)\}^{f_n(a_i)} \quad (4)$$

図7に各最大加速度ごとの破壊確率の例を示す。次に、最適設計震度 α_{yopt} を求める。最適設計震度 α_{yopt} は、できるだけ経済的にするということと、できるだけ安全性を持たせるという相反する命題の中での意志決定の問題である。これらの問題を式(5)に示す期待費用最小の手法に置き換えて求めるものとする。

$$C_T = C_0 + \int_i C_d \cdot P_{dT_i}(a_i) di + \int_i C_f \cdot P_{fT_i}(a_i) di \quad (5)$$

ここで、 C_0 は初期建設費、 C_d 、 C_f は損傷時および崩壊時の費用である。この値を初期建設費との比 $C_T = \beta_T C_0$ 、 $C_d = \alpha_1 C_0$ 、 $C_f = \alpha_2 C_0$ と置くと、式(6)が導かれる。

$$\beta_T = 1.0 + \alpha_1 \cdot \int_i P_{dT_i}(a_i) di + \alpha_2 \cdot \int_i P_{fT_i}(a_i) di \quad (6)$$

式(6)から、 $\alpha_1 = 0.6$ 、 $\alpha_2 = 2.0$ とした場合の各降伏震度ごとに β_T を求めたものを図8に示す。最適設計震度は、 $\alpha_y - \beta_T$ 曲線の最大勾配値、すなわち $\partial \beta_T / \partial \alpha_y$ の値が最大となる降伏震度と定義すると、図8より $\alpha_{yopt} = 0.15 \sim 0.25$ 前後の値となるが安全側に 0.25 を採用する。

（謝辞）本研究を遂行するに当たり、奥村敏恵 東京大学名誉教授から常に適切な助言をいただきました。また、数値解析及び原稿の準備は、元東京電機大学卒 小泉昌史氏（現 石川建設工業）の助力によるものである。ここに謝意を表する。

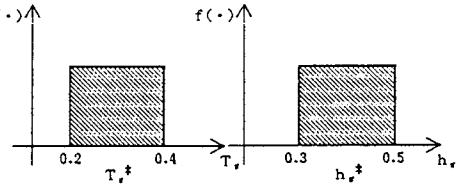
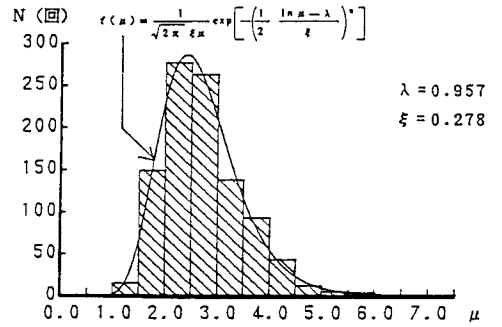
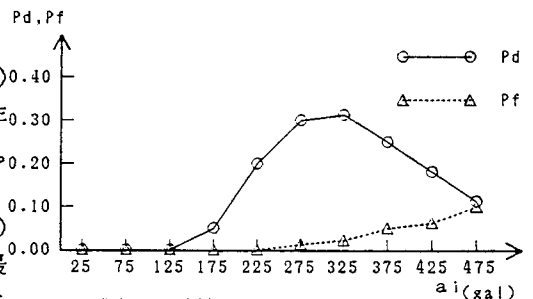
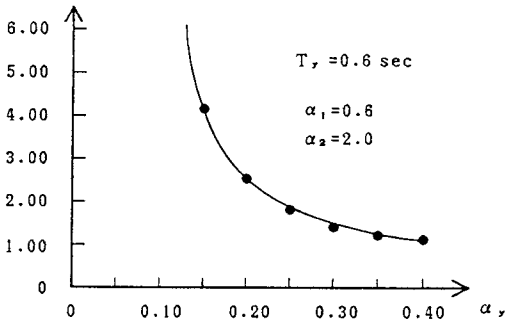


図4 地盤の不確実性


 図5 塑性率の分布 $A_{\max} = 325 \text{ gal}$ $\alpha_y = 0.20$

 図6 破壊確率 ($\alpha_y = 0.20$)

 図7 最適設計震度 α_{yopt}