

武蔵工業大学大学院土木工学専攻 ○学生会員 遠藤昭彦

武蔵工業大学工学部土木工学科 正会員 吉川弘道

1. はじめに

耐震設計された構造物の安全性は、設計地震動に対する損傷程度により照査されている。しかし、これは地震動強度や被害の不確定性を十分に考慮した評価方法とは言い難い。よって本論では、リスクマネジメントの一評価手法であるリスクカーブ法により、不確定性を合理的に考慮した地震リスク評価を行った。また、被害の大きさと超過確率で表現されるリスク領域において、RC 橋脚で容認されるリスク領域の提案を行った。

2. 地震リスクカーブ作成手法

・**地震ハザード曲線**: 地震ハザード曲線は、建設地点における地震危険度を地震動強度 α_m の年超過確率 $P(\alpha_m)$ で表現したものである。地震動の不確実性は対数正規分布に近似することが適当¹⁾とされており(図1)、本論では、 $\ln\alpha$ の平均値 λ_α と標準偏差 ζ_α をパラメータとする α の確率密度関数を $h(\alpha; \lambda_\alpha, \zeta_\alpha)$ と表記する。また $P(\alpha_m)$ を α_m で微分することで確率密度関数 $p(\alpha_m)$ に変換することができる(式(1))。

$$p(\alpha_m) = -\frac{dP(\alpha_m)}{d\alpha_m} \quad (1)$$

・**損失関数の不確実性**: RC 橋脚の地震時損傷イベントを橋脚基部の曲げ破壊のみに限定すると、限界状態は主鉄筋の降伏時 δ_y 、最大耐力時 δ_m 、降伏荷重維持時 δ_n の変位で表現できる(図2)。地震損傷度曲線²⁾は、応答変位の平均値 δ_{resp} が与えられた時の条件付限界状態発生確率 $F_k(\delta_{resp})$ を表わす(式(2))。 ζ_z は z の標準偏差、 δ_k は各限界状態 k 時の変位の平均値である。以降、式(2)の応答変位 δ_{resp} を加速度 α に変数変換して $F_k(\alpha)$ と表現する。

$$F_k(\delta_{resp}) = \int_0^{\delta_{resp}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_z z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \ln \delta_k}{\zeta_z}\right)^2\right] dz \quad (2)$$

地震損傷度曲線の限界状態発生確率 $F_k(\alpha)$ から、損傷レベル i の損失額発生確率 $\text{Prob.}(c_i|\alpha)$ を算出し、損失率 c_i との関係から、損失額の平均値 c_m と分散 σ_c^2 を算定する(式(3)、(4))。なお、損傷レベルの発生確率は、互いに排反事象であるため、その総和は1となる

$$c_m = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \text{Prob.}(c_i|\alpha) \quad (3)$$

$$\sigma_c^2 = \sum_{i=1}^n (c_i - c_m)^2 \cdot \text{Prob.}(c_i|\alpha) \quad (4)$$

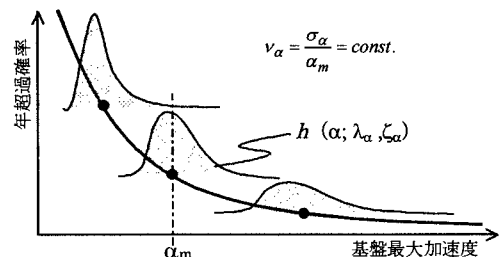


図1 地震動の不確実性

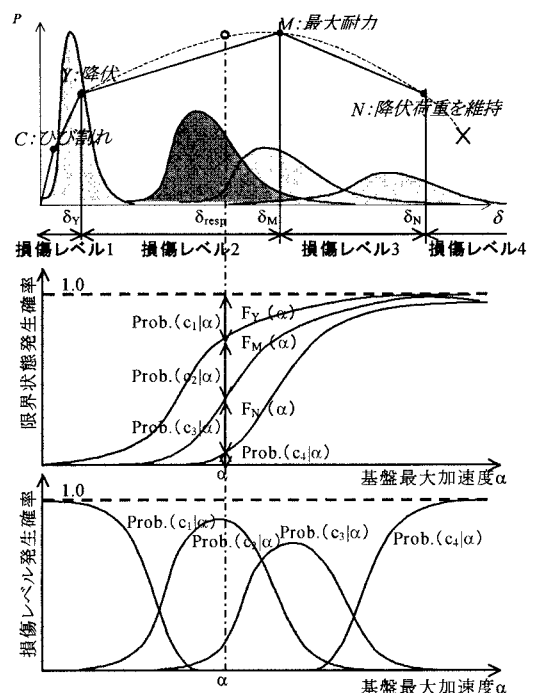


図2 損傷レベル発生確率

Key words: RC 橋脚, 地震リスクマネジメント, 地震リスクカーブ, 耐震性能

連絡先: 東京都世田谷区玉堤 1 丁目 28 番 1 号 TEL: 03-3703-3111 内線(3241) FAX: 03-5707-1165

損失額 c_i と発生確率 $\text{Prob.}(c_i|\alpha)$ の関係を PMF で表現した後、上下限 a, b を有する β 分布 (式 (5)) に適応させる³⁾。母数 q, r は、平均値 c_m と分散 σ_c^2 から算出される (式 (6), (7))。 $B(q, r)$ はベータ関数、 $X(c_i|\alpha)$ は、 β 分布の超過確率である。下限値 a を 0、上限値 b を $c_{\max}$ と設定している (図 3)。

$$f(c; q, r|\alpha) = \frac{1}{B(q, r)} \cdot \frac{(c-a)^{q-1} (b-c)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}} \quad (5)$$

$$q = \frac{c_m(c_m - c_m^2 - \sigma_c^2)}{\sigma_c^2}, \quad r = \frac{(1 - c_m)(c_m - c_m^2 - \sigma_c^2)}{\sigma_c^2} \quad (6), (7)$$

$$X(c|\alpha) = \int_c^{c_{\max}} f(x; r, q|\alpha) dx \quad (8)$$

・**地震リスクカーブ**: 損失率 c と年超過確率 $G(c)$ 関係を表わした地震リスクカーブにより、地震による損失の危険度を定量的に評価することができる。まず、基盤最大加速度 α_m が与えられた場合、損失額の超過確率 $\Omega(c|\alpha_m)$ を算出する (式 (9))。次にすべての基盤最大加速度の発生を考慮するため、 $\Omega(c|\alpha_m)$ に α_m の発生確率 $p(\alpha_m) d\alpha_m$ を乗じて損失額 c の超過確率 $G(c)$ を求める³⁾ (式 (10))。

$$\Omega(c|\alpha_m) = \int_0^{\infty} h(\alpha; \lambda_m, \zeta_\alpha) \cdot X(c|\alpha) d\alpha \quad (9)$$

$$G(c) = \int_0^{\infty} p(\alpha_m) \cdot \Omega(c|\alpha_m) d\alpha_m \quad (10)$$

3. RC 橋脚に対する地震リスク評価適用例

対象地点を東京都新宿区、対象橋脚を RC 単柱式橋脚⁴⁾ (図 4、表 1) とした。地震リスクカーブを図 5 に示す。損失額が低い領域では、橋脚の耐震性能を反映して TYPE1 橋脚のリスクが最も大きく、TYPE3 橋脚のリスクが最も低くなっている。しかし、損失額 80 万円付近でのリスクカーブが交差している。非常に低い確率ではあるが、高い損失額を生じる可能性が生じてしまうことに注意が必要である。よって、本設定条件では、耐震性能を向上させるとともに、高い損失額のリスクはリスクファイナンス手法を用いて転嫁することも有効であるといえる。

4. 容認リスク領域の設定

超過確率と被害の大きさを表現される領域を、保有領域、マネジメント削減領域、被害防止領域に大別する。容認されるリスク領域は、図 6 の性能水準に準じた領域となる。設計者にはリスクを適切にコントロールし、容認される領域にリスクカーブを設定することが望まれる。

【参考文献】

1) Campbell, K.W.: Near-source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration, Earthquake Spectra, Vol.1, pp.2039-2070, 1981, 2) 水谷守, 中村孝明, 下野正人, 亀村勝美: 確率論的アプローチによる地震リスクマネジメント (SRM) 手法の提案, 土木学会第 51 回年次学術講演会 I-B369, 1996.9, 3) 中村孝明, 中村敏治: ポートフォリオ地震予想最大損失額 (PML) 評価, 日本リスク研究学会誌 12(2), pp69-76, 2000, 4) 玉井真一, 笹谷輝勝, 渡辺忠朋: コンクリート構造物の耐震性能とライフサイクルコスト, コンクリート技術シリーズ コンクリート構造物の耐震性能照査, 社団法人土木学会, pp179-202, 2000.4

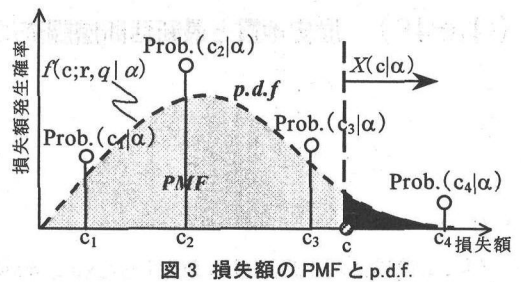


図 3 損失額の PMF と p.d.f.

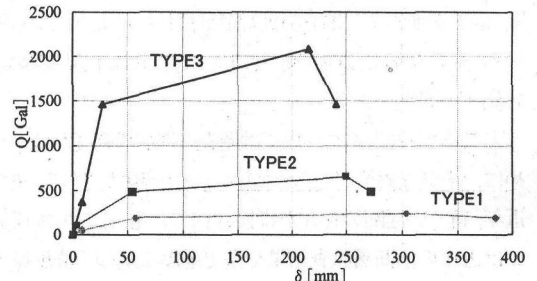


図 4 荷重変位関係

表 1 設定条件

	補修費(万円)		
	TYPE1	TYPE2	TYPE3
損傷レベル1	—	—	—
損傷レベル2	45.8	60.7	86.4
損傷レベル3,4	84.4	108.2	141.2
VR=0.3, VS=0.3, VA=0.5			
VR, VS, VA は、耐力 R, 応答 S, 加速度 alpha の変動係数			

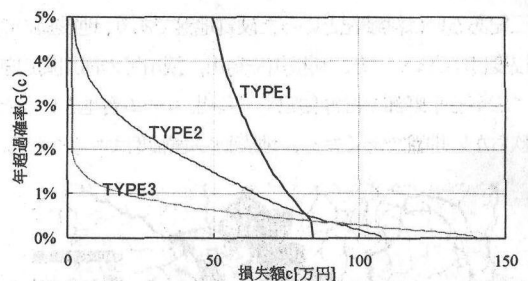


図 5 地震リスクカーブ

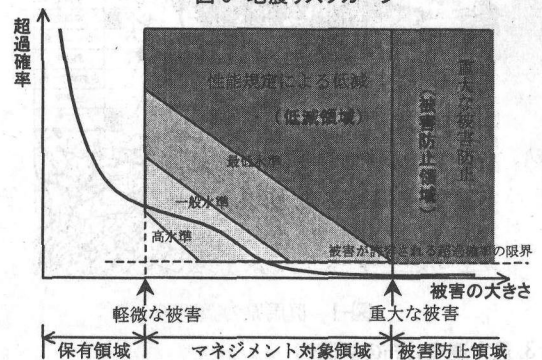


図 6 容認リスク領域