

耐震ライフサイクルコストの確率論的算定法

武蔵工業大学大学院 学生会員 遠藤昭彦
武蔵工業大学工学部 正会員 吉川弘道

1. はじめに

初期建設コストだけでなくライフサイクルコスト（以下、LCC）で経済性を評価する動きが橋梁を含む土木分野全般で活発化している¹⁾。本研究では RC 橋脚を解析対象とし、供用期間中に被る地震被害を期待損失額を用いて表現した。さらに初期建設費によるライフサイクルコストの低減効果を把握することで、最小の LCC となる設計案を見出した。

2. ライフサイクルコストの算出フロー

LCC は、以下の 3 ステップより作成する（図 1）。

地震危険度：地震ハザード曲線は、震源距離分布、推定加速度推定式の情報を集積して建設地点における地震動の年超過確率を表したものである。年超過確率 P_1 を式（1）により供用期間内超過確率 P_t に変換し、基盤最大加速度 α で微分することにより確率密度関数 p_t に換算できる（式（2））。

$$P_t = 1 - (1 - P_1)^t \quad (1)$$

$$p_t(\alpha) = \frac{d}{d\alpha}(1 - P_t) \quad (2)$$

構造物の損傷度予測：弾性応答加速度 α_c は、建築センター波（最大加速度 α ）を工学基盤より入力し、種地盤における平均加速度応答スペクトルとの回帰式²⁾式（3）から算出した。

$$\alpha_c = 19.44\alpha^{0.6523} \quad (3)$$

弾塑性応答の推定には、エネルギー一定則を用いた。

・**フラジリティカーブ：**限界状態 k を応答変位 $d_{resp.}$ が主鉄筋の降伏時 d_y 、最大耐力時 d_m 、降伏荷重維持 d_k とした（図 2）。性能関数 $Z=R/S$ (R : 耐力, S : 応答) を前提として、 Z が対数正規分布に従うと仮定する。フラジリティカーブは、ある応答変位 $d_{resp.}$ が与えられた時の条件付限界状態発生確率 $F_k(d_{resp.})$ を表わす（図 3）。なお、 ζ は z の標準偏差、 d_k は各限界状態 k 時の変位である。

$$F_k(d_{resp.}) = \int_0^{d_{resp.}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}Vz} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \ln d_k}{V}\right)^2\right] dz \quad (4)$$

・**地震ロス関数：**各損傷レベル i の発生確率 F_i に対応した予想損失額 $Loss_{ij}$ を乗じて加速度 α が生じた時の平均的予想損失額 $SELoss$ を推定する（図 4）。 $Loss_{ij}$ は、直接復旧工事費（補修費）の他にユーザー損失などを加算した額になる。

$$SELoss = \sum_i^n \sum_j^m F_i \cdot Loss_{ij} \quad (5)$$

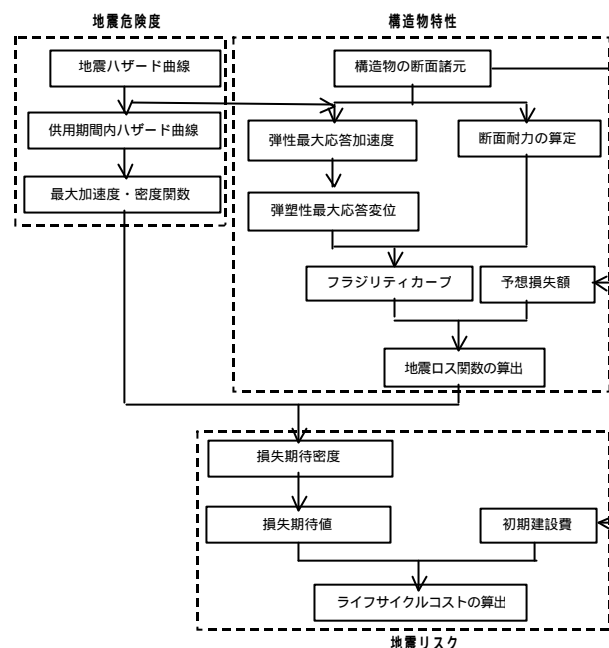


図 1 ライフサイクルコストの算出フロー

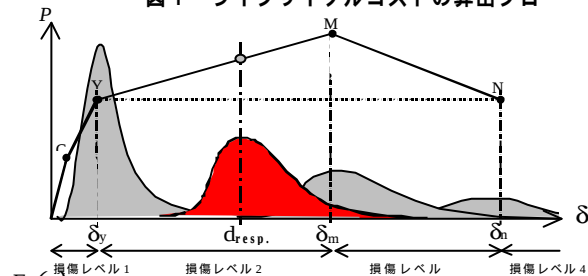


図 2 RC 橋脚の限界状態

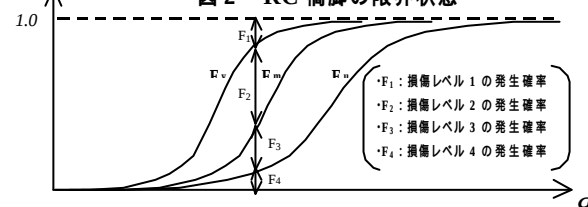


図 3 フラジリティカーブ

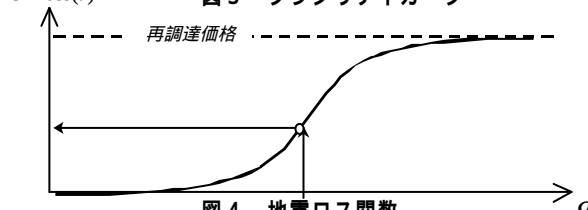


図 4 地震ロス関数

Key words : ライフサイクルコスト, フラジリティカーブ, 地震ロス関数, 期待損失額

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

地震リスク：地震の発生確率 $p_t(\alpha) d\alpha$ と平均予想損失額 $SELoss$ の乗算より損失確率密度 el を算出する． el を積分することで，構造物が供用期間内に被る期待損失額 C_E を求めることができる（式（6））．リスクマネジメントの観点から，過大な加速度により生じる莫大な損失を自家保有するのは，所有者の経済活動にとって致命的な損失になりかねない．予想最大損失 PML 発生時の加速度 α_{PML} までを保有し，それ以上は保険や証券化により転嫁するのが有効である（図 5）．

$$C_E = \int_0^{\alpha_{PML}} el(a) da = \int_0^{\alpha_{PML}} SELoss(a) \cdot p(a) da \quad (6)$$

構造物の性能評価にライフサイクルコストを導入する場合，維持管理費の推定が重要な要素となる．しかし，地震の影響以外による劣化に対する維持管理費は無視し³⁾，構造物の初期建設費 C_I と期待損失額 C_E の合計金額をライフサイクルコスト LCC と定義した（式（7））．

$$LCC = C_I + C_E \quad (7)$$

4．対象橋脚のライフサイクルコストの算出

・対象橋脚：異なる耐震性能を有する 3 橋脚³⁾を解析対象とする．各橋脚の配筋図を図 6 に示す．応答および耐力の変動係数は $n_R=0.3$, $n_S=0.3$ とした．初期建設費，補修費を表 1 に示す．ユーザー損失は，比較的交通量の少ない場合の 50 万円/日³⁾として損傷レベル 2,3・4 でそれぞれ 7 日，31 日通行止めとした³⁾．

・ライフサイクルコスト：神戸市市庁舎付近の地震ハザード曲線⁴⁾から供用期間 50 年の損失確率密度関数 el を算出した（図 7）．橋脚の耐震性能に応じて el の様相は異なっており，性能に優れる TYPE1,2,3 橋脚の順に減少している．

一般に，初期建設費 C_I の増加に伴い耐力が増加するので期待損失額 C_E は減少する．しかし，期待損失額が十分に減少した領域で初期建設費を過剰投資すると，逆に LCC は増加してしまう．本例では最小の LCC が見込める設計案は TYPE2 橋脚であるとの結論に達した．

5．まとめ

建設地点の地震危険度と構造物の耐震性能から，供用期間内に被る期待損失額を算定した．さらに初期建設費と期待損失額との和から，最小の LCC となる設計案を見出した．

謝辞：貴重な御意見を頂きました星谷勝教授（武蔵工業大学）に謝意を表します．

【参考文献】

- 1) 廣松新ら：コンクリート橋のライフサイクルコスト算出手法の検討，土木学会第 55 回年次学術講演会，2000.9
- 2) 佐藤 一郎，平川 倫生，神田 順：活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.145-160,1998
- 3) 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
- 4) 石川裕，奥村俊彦，亀田弘行：活断層を考慮した神戸における地震危険度評価，阪神/淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp61-68，1996.1

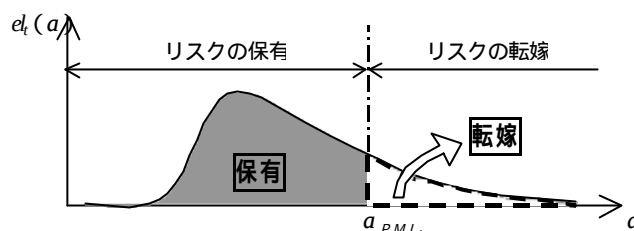


図 5 損失確率密度

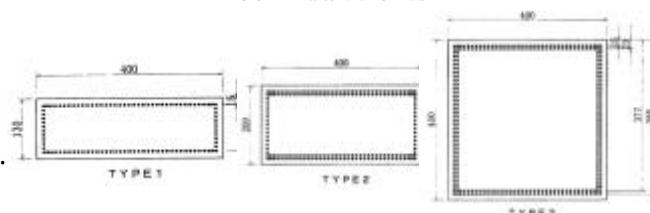


図 6 対象橋脚の配筋図

表 1 初期建設費，補修費，ユーザー損失

	初期建設費(百万円)			ユーザー損失(百万円)
	TYPE1	TYPE2	TYPE3	
	16	23	49	
	補修費(百万円)			ユーザー損失(百万円)
	TYPE1	TYPE2	TYPE3	
損傷レベル1	-	-	-	-
損傷レベル2	0.458	0.607	0.864	3.5
損傷レベル3,4	0.844	1.082	1.412	15.0

VR=0.3, VS=0.3 VR,VSは，耐力R,応答Sの変動係数

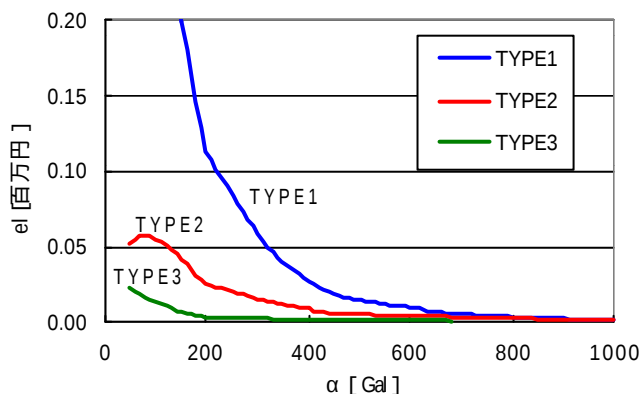


図 7 対象橋脚の損失確率密度

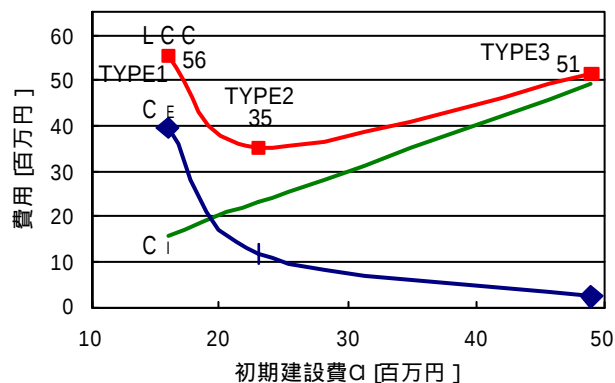


図 8 最小ライフサイクルコスト設計案