

I-172

信頼性最適化理論を用いた構造物の限界状態設計法に関する基礎的研究

鳥取大学工学部 正会員 高岡 宜善

本州四国連絡橋公団 正会員○山口 和範

鳥取大学工学部 正会員 白木 渡

鳥取県庁

正会員 西村 清

鳥取大学工学部 正会員 松保 重之

1. まえがき 諸外国において道路橋の設計は限界状態設計法を導入しており、我国においても許容応力設計法から限界状態設計法への移行が検討されている。しかしながら、多くの考慮すべき限界状態があり、それらの間のバランスのとれた設計規準の確立にはまだ至っていない。そこで本研究では、複数の限界状態を有する構造物について、信頼性最適化理論を用いることにより建設コスト(材料体積)と各限界状態の関係を明確にし、その関係をもとに最適信頼性設計を行う方法について検討する。また本研究では、複数の限界状態を有する構造物の信頼度の評価において、精度の向上と計算時間短縮化のために繰返し高速化モンテカルロシミュレーション(IFM¹⁾)を用いることを提案している。

2. 信頼性最適化理論の限界状態設計法への適用とその定式化 限界状態設計の特徴は照査しなければならない限界状態を明確に定義し、構造物がそれらの限界状態に達する確率 P_f が許容応力レベル(目標破損確率 P_f^t)以下にすることである。この点に留意するなら、限界状態設計法は式(1)で表わされる多拘束条件、単一目的関数の最適化問題²⁾として扱うことができる。

$$\begin{aligned} \text{Find } \underline{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)^T \text{ such that} \\ P_f(\underline{x}) \leq P_f^t \\ V(\underline{x}) \longrightarrow \min \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 x_i は設計変数、 $\underline{P}_f = (P_{f1}(\underline{x}), P_{f2}(\underline{x}), \dots, P_{fm}(\underline{x}))^T$ は各限界状態に対する破損確率の組、 $\underline{P}_f^t = (P_{f1}^t, P_{f2}^t, \dots, P_{fm}^t)^T$ は各限界状態に対する目標破損確率の組、そして $V(\underline{x})$ は構造物の材料体積もしくは重量である。理論的根拠に基づいて目標破損確率 P_f^t を定めるのは困難であるが、種々検討がなされている。本研究においては参考文献3)を参考にして目標破損確率 P_f^t を定めた。

3. 設計例 Fig.1に示す垂直と水平の荷重の作用する一層ラーメンの設計について考える。この図における A_c, A_b はそれぞれ柱部、梁部の断面積であり、設計変数として扱う。また、これらの断面は柱部、梁部の塑性曲げモーメントがそれぞれ $M_c = 1.670A_c^{3/2}\sigma_y$ (ton·m)、 $M_b = 1.670A_b^{3/2}\sigma_y$ (ton·m)で表わされる中実弾面とする。材料特性として、降伏応力 $\sigma_y = 3600$ (kgf/cm²)またヤング係数 $E = 2.1 \times 10^7$ (tf/m²)と仮定した。

また、Fig.1の R_c, R_L そして R_E はそれぞれ死荷重、活荷重そして地震荷重に対応しており、確率特性はTable.1で表わされている。ここに、 μ, σ, ν そして μ_d は、それぞれ平均値、標準偏差、平均発生率そして平均継続時間である。この設計例において、3つの限界状態すなわち塑性崩壊(Plastic collapse)、断面降伏(First yield)そして過大変形(Excessive deformation)を考慮する。これら3つの限界状態に対する破損確率の評価は以下の仮定に基づいて行った。

- (1) Plastic collapse: 荷重状態はFig.2で表わされ、Fig.3で表わされる12の崩壊モードのどれか1つが形成された時破損したものとす。50年の間に破損する確率 $P_{f(COL)}$ をLC法およびIFMを用いて評価した。また目標破損確率 $P_f^t(COL)$ を 10^{-5} とした。
- (2) First yield: 荷重状態はFig.2で表わされ、Fig.2の照査点A, B, CそしてDのうちどれか1つが降伏した時破損するものとす。50年の間に破損する確率 $P_{f(YLD)}$ をLC法およびIFMを用いて評価した。また目標破損確率 $P_f^t(YLD)$ を 10^{-3} とした。
- (3) Excessive deformation: 荷重状態はFig.4で表わされ、Fig.5において $\Delta_1 > \ell/1000 = 3.0$ cmの時破損するものとす。破損する確率 $P_{f(DEF)}$ をIFMを用いて評価した。また目標破損確率を 10^{-3} とした。

この計算例において、式(1)は式(2)のように表わされる。

Find A_c and A_b such that

$$P_f(\text{COL}) \leq P_f^t(\text{COL})$$

$$P_f(\text{YLD}) \leq P_f^t(\text{YLD})$$

$$P_f(\text{DEF}) \leq P_f^t(\text{DEF})$$

(2)

$$V = 2 \times 20.0 \times A_c + 30.0 \times A_b \rightarrow \min(\text{unit: m}^3)$$

ここに、 V は構造物の材料体積である。上述の仮定に基づいた計算結果をFig.6に示した。この図において、実線はそれぞれ $P_f(\text{DEF})=10^{-3}$, $P_f(\text{COL})=10^{-5}$ そして $P_f(\text{YLD})=10^{-3}$ の等破損確率線であり、破線は等体積線である。この図より、最適解は $A_b=0.23\text{m}^2$, $A_c=0.24\text{m}^2$ そして $V=16.51\text{m}^3$ であることが示された。

またFirst yieldがクリティカルな限界状態であることを示しており、設計者はFirst yieldに対して有利な断面を選定すべきであることを示している。

4. あとがき ここで紹介した多拘束条件、単一目的関数の最適化手法は容易に限界状態設計法に取り入れられ、各限界状態の破損確率 P_f と材料体積との関係を明確にできることを示した。また、このことによりクリティカルな限界状態を合理的に示すことができた。

実際の問題において、等破損確率線(面)を求めるのに多大な計算時間が必要となるということや、設計変数の数が増えるに従い問題が複雑になるという難点があり、現段階では一般的な設計問題に直接利用することは難しいと考えられる。しかしながら、この手法は合理的な限界状態設計の規準作成に際して有効な基礎的データを得るための一つの手法にな

り得るものと考えられる。

参考文献: 1) 白木 渡, G.I.Suhüller: 条件付き破壊確率を用いた

繰り返し高速モンテカルロ法とその構造物の動的信頼度評価への応用, 構造工学論文集, Vol 35A, 1989.

2) Frongopol, D.H. Multicriteria Reliability-Based Structural Optimization, Structural Safety, Vol3, pp. 23-28, 1985.

3) M-Shiraishi, Lifetime Risk Assessment of Structures, Structural Engineering Series 2, pp.22-25, 1988-12(in Japanese)

Table.1 荷重の確率特性値

Variable	Type	Lower bound	μ	σ	ν	μ_a
$2R_L$	Weibull	0.0	80 ton	30 ton	1035/yr	5.85×10^{-4} yr
R_E	Weibull	0.0	150 ton	40 ton	0.5/yr	0.0 yr
R_D	—	—	500 ton	—	—	—

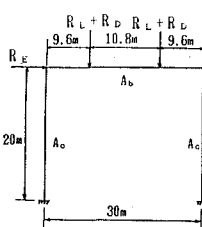


Fig.1 設計モデル

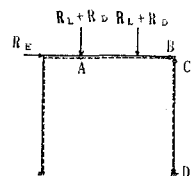
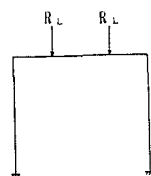


Fig.2 荷重状態および

照査点



り得るものと考えられる。

参考文献: 1) 白木 渡, G.I.Suhüller: 条件付き破壊確率を用いた

繰り返し高速モンテカルロ法とその構造物の動的信頼度評価への応用, 構造工学論文集, Vol 35A, 1989.

2) Frongopol, D.H. Multicriteria Reliability-Based Structural Optimization, Structural Safety, Vol3, pp. 23-28, 1985.

3) M-Shiraishi, Lifetime Risk Assessment of Structures, Structural Engineering Series 2, pp.22-25, 1988-12(in Japanese)

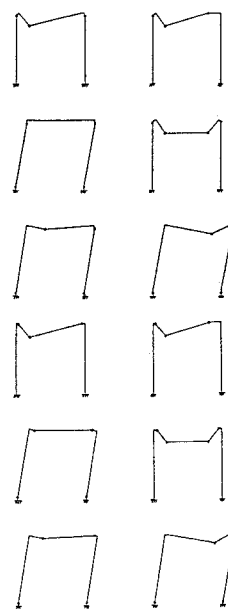


Fig.3 塑性崩壊モード

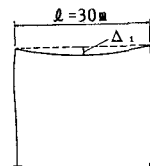


Fig.5 たわみに対する照査点

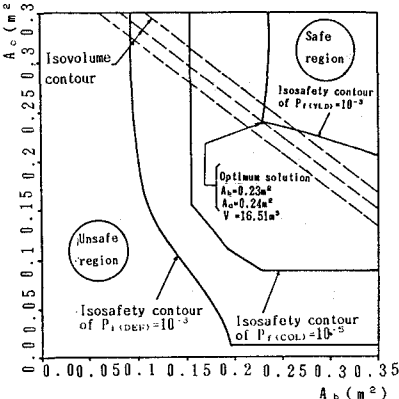


Fig.6 3つの拘束条件に対する
決定空間