

システム信頼性を考慮した部分安全係数最適化法

東北大学大学院 正会員 ○秋山 充良 東北大学大学院 フェロー 鈴木 基行
日本鉄道建設公団 正会員 土井 充 東北大学大学院 学生員 丸山 大輔

1. はじめに

著者らは、既に複数の限界状態より構成される破壊事象から構造系としての破壊確率を算定する構造系信頼性評価法と逐次2次計画法(SQP法)に基づく構造最適化手法を組み合わせることで、設計対象構造系が目標破壊確率を満足し、かつ特定の目的関数を最小化(最大化)する中で構造設計を行う構造系信頼性設計手法を提案している¹⁾。しかしながら、直接破壊確率を計算して設計を行うことは、信頼性解析に馴染みがない技術者には煩雑となるため、構造系信頼性設計手法を用いて得られる断面に近い設計が可能となる部分安全係数の設定を行うなどの単純化が必要となる。

そこで、構造系信頼性設計手法をISO 2394²⁾にも引用されているキャリブレーションに基づく部分安全係数の算定法へと適用することで、検討対象構造物群が平均して目標安全性レベルを保有することが可能となる部分安全係数の算定手法を示す。

2. システム信頼性を考慮した部分安全係数最適化法の定式化

構造系信頼性評価法と構造最適化手法を組合せた部分安全係数最適化法は、以下のように定式化される。

$$\text{find } \{\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)\} \quad (1) \quad \text{and } \gamma_i^l \leq \gamma_i \leq \gamma_i^u \quad (3)$$

$$\text{such that } W = \sum_{k=1}^n [\beta_k(\gamma) - \beta_t]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

ここに、 β_k : 部分安全係数 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)$ を用いて設計される構造物から構造系信頼性評価法により算定される構造系の安全性指標であり、例えば設計対象構造物に対して3つの限界状態を想定する場合、その安全性指標は、式(4)により算定される³⁾、 β_t : 目標安全性指標、 n : 部分安全係数の適用を考える設計対象構造物の総数、 γ_i^l, γ_i^u : 部分安全係数の上下限值

$$\beta_k(\gamma) \cong -\Phi^{-1}(P(E_{\text{sys}})), \quad P(E_{\text{sys}}) = P(E_1) + P(E_2) + P(E_3) - P(E_2 E_1) - P(E_3 E_1) - P(E_3 E_2) + P(E_3 E_1 \cap E_3 E_2) \quad (4)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$: 標準正規分布の累積分布関数、 $P(E_k)$: 各限界状態の生起確率($k=1\sim 3$)、 $P(E_k E_m)$: 破壊事象 E_k と E_m の結合確率($k=2,3, m < k$)、 $P(E_3 E_1 \cap E_3 E_2)$: 破壊事象 $E_3 E_1$ と $E_3 E_2$ の結合確率

式(1)~(3)により、部分安全係数を算定するフローを以下に示す。

Step 1. 部分安全係数を用いた設計規準式、目的関数 W 、制約条件および目標安全性指標 β_t の定義。

Step 2. 部分安全係数を試算する検討対象構造物群の選定。

Step 3. 部分安全係数の初期値 γ_0 や信頼性解析に必要な確率変数の分布系およびパラメータの設定。

Step 4. 定義した設計規準式を満足する検討対象構造物群の再設計。

Step 5. 目的関数と制約条件に対する部分安全係数 γ の1次の微係数を求める(感度解析)ため構造解析を行う。

Step 6. 構造解析から算定される耐力および外力(応答値)を用いて、構造系の安全性指標を構造系信頼性評価法より算定し、目的関数 W に対する部分安全係数 γ の1次の微係数を求める。なお、構造系信頼性評価法から算定される安全性指標は、設計変数に関し、陽な数式で表現されないので次式の差分近似の形で算定する。

$$\frac{\partial W}{\partial \gamma_i} = \frac{W(\gamma_i + \Delta(\gamma_i)) - W(\gamma_i - \Delta(\gamma_i))}{2 \times \Delta(\gamma_i)} \quad (\Delta(\gamma_i) \text{ は、個々の設計変数毎に設定}) \quad (5)$$

Step 7. 構造最適化手法(SQP法)に基づき、収束判定と次ステップの部分安全係数 γ' を算定する。収束判定を満足しない場合には、 $\gamma \leftarrow \gamma'$ としてStep 4.に戻る。

Key Words : 構造系信頼性理論, 部分安全係数, 構造最適化手法, 安全性指標

連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 06 Tel : 022(217)7447 Fax : 022(217)7448

斜材：141cm
水平材：100cm
鉛直材：100cm

圧縮強度：27.6kN/cm²(変動係数 10%) 単位重量：2.65×10⁻²kN/cm³
引張強度：27.6kN/cm²(変動係数 10%) 荷重 P：30kN(変動係数 30%)
ヤング率：7.06×10³ kN/cm²

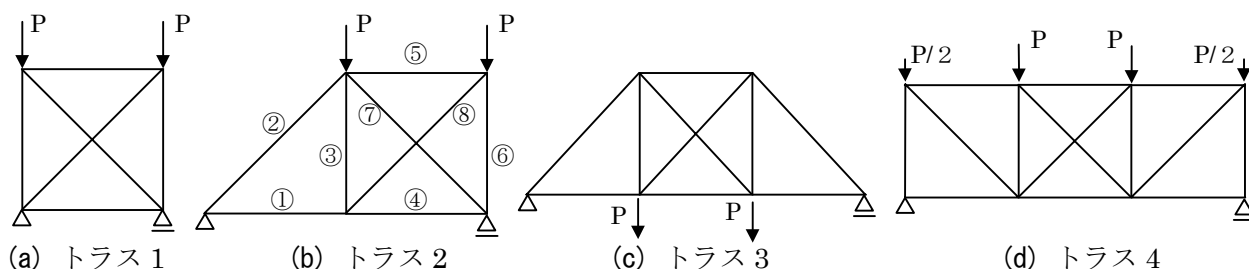


図-1 解析対象 1 次不静定トラス

3. 1 次不静定トラスを対象とした部分安全係数試算例

システム信頼性を考慮した部分安全係数最適化法の適用例として、図-1 に示す 4 つの 1 次不静定トラスを取り上げる。ここでは、トラスを構成する部材のいずれかが降伏するときを、そのトラスの破壊と考え安全性指標を算定する。そして、各部材が式(6)の設計規準式に基づき設計されているトラスの構造系としての安全性指標が、目標安全性指標を確保することが可能となる荷重係数 γ_s を試算する。

$$\gamma_s \cdot (\sigma_{act} / \sigma_y) \leq 1.0 \quad (6)$$

ここに、 γ_s ：システム信頼性を考慮して算定される荷重係数、 σ_y ：部材の降伏強度、 σ_{act} ：作用応力

目標安全性指標を 1.0、2.0、および 3.0 と設定し、前記したフローに従い算定した荷重係数とその荷重係数を用いて設計された各トラスの構造系としての安全性指標 $\beta_k(\gamma_s)$ を算定した結果を図-2 に示す。目標安全性指標に対して、目的関数式(2)を最小化する荷重係数 γ_s を用いて設計されたトラスの構造系としての安全性指標 $\beta_k(\gamma_s)$ は、その目標安全性指標を中心に分布していることが確認できる。

目標安全性指標 2.0 であり、荷重係数 2.1 を用いて設計したトラス 2 の各部材の安全性指標の大きさを図-3 に示す。横軸の部材番号とは、図-1 (b) に示す各部材に付した番号に対応している。このように、システム信頼性を考慮することにより、各部材が保有する安全性指標を適切に確保した上で、構造系として算定される安全性指標が目標安全性指標に漸近するような設計を可能とする荷重係数が算定されている。

4. まとめ

構造系信頼性設計手法の部分安全係数最適化法への応用を図ることにより、確率・統計の計算および構造最適化問題を解くことなく、設計対象構造物群に対して、所定の目標安全性を付与した構造設計を行うことが可能となる部分安全係数の算定フローを提示した。

参考文献 1) 秋山充良, 松中亮治, 土井充, 鈴木基行: 信頼性理論を用いた構造最適化手法の提案および RC 橋脚の耐震安全性評価への適用, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.185-204, 2000. 2) ISO: International Standard ISO/DIN 2394, General Principles on Reliability for Structures, 1998. 3) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀: 構造系の信頼性評価法および RC 橋脚の耐震設計への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.71-87, 1997. 4) ASNOP 研究会編: 非線形最適化プログラミング, 日刊工業新聞社, 1991.

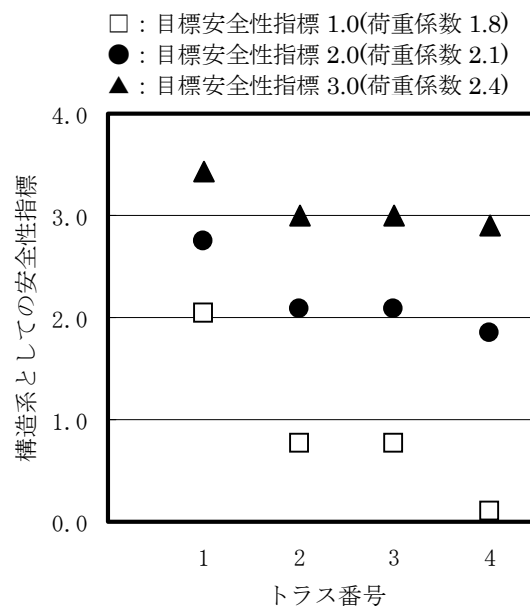


図-2 構造系としての安全性指標

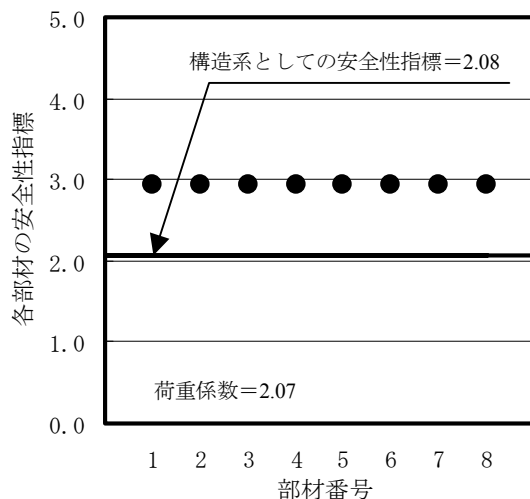


図-3 部材毎の安全性指標(トラス 2)