

I-A 460

骨組構造物の最適補強設計に関する研究

東洋大学大学院 学生員 ○水上 博
東洋大学 正会員 新延 泰生
大東設計コンサルタント 正会員 榎本 覚雄

1 はじめに

本研究ではトラス構造物を取り上げ、死荷重を考慮に入れた部材の劣化に対する有効な補強方法（部材断面の最適な分配法）について数値解析を行ったものである。ここでの最適値は最小重量設計、最大剛性設計によって決定している。これは、感度係数特性を用いて制約条件及び目的関数式を線形化した線形計画法である。また解析における仮定として部材の補強・劣化（欠損）は部材断面面積の一様な増減として表現することとしている。

2 感度係数特性を用いた最適化問題の定式化

(I) 最小重量設計（初期設計）

ある形状のトラス構造物においてその重量を W とし、各部材力および変位を許容値の満足する範囲で最小化するように各断面面積 A_i を定める設計である。定式化を以下に示す。

$$W = \sum_{i=1}^n l_i \rho_i A_i \quad \rightarrow \min$$

subject to

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \sigma_j}{\partial A_i} \right]^k A_i^{k+1} \leq \sigma_a - 2\sigma_j^k \quad (j=1,2,\dots,n)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial r_j}{\partial A_i} \right]^k A_i^{k+1} \leq r_a - 2r_j^k \quad (j=1,2,\dots,m)$$

(II) 最大剛性設計（補強設計）

ある形状の構造物において、与えられた重量のもとでその剛性を最大にするというものである。全ひずみエネルギーが荷重による外力仕事に等しいことに着目し、これを最大にする式を目的関数として剛性の最大化を図る設計である。次のように定式化する。

$$U = -\sum_{j=1}^m \frac{P_j}{2} \left\{ \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial r_j}{\partial A_i} \right]^k A_i^{k+1} \right\} \quad \rightarrow \max$$

subject to

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \sigma_j}{\partial A_i} \right]^k A_i^{k+1} \leq \sigma_a - 2\sigma_j^k \quad (j=1,2,\dots,n)$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial r_j}{\partial A_i} \right]^k A_i^{k+1} \leq r_a - 2r_j^k \quad (j=1,2,\dots,m)$$

$$W = \sum_{i=1}^n l_i \rho_i A_i$$

以上の定式化により LP で断面面積を求め、その断面面積で感度係数を求め、再び LP を行うといった繰り返し計算を解が収束するまで行う。また収束途中に最適解が存在する事があるので、この場合は目的関数の変化によって最適解を決定する。

3 解析の流れ

図1に示すように、初めに初期設計として最小重量設計を行い最適な部材断面面積 A_i と総重量 W を求めて基準モデルを決定する。次に部材の劣化を想定してその部材の断面面積を減少させて補強設計を行う。ここでは荷重 P を活荷重 P_L と死荷重 P_D に分けて考える。それは P_D による応答に対しては補強効果がないため P_L による応答を減少させることで許容値まで回復させるような補強を行うためである。よって部材欠損後の断面面積 A'_i に対する P_D の応答値 σ'_D, r'_D を全体の許容値から差し引いて σ'_L, r'_L を算出する。この値と P_L 、補強重量 $W(1+\alpha)$ (α は添加重量分の基準モデル総重量に対する比) を用いた最大剛性設計によって得られる値が最適補強設計となる。また補強設計の下限值制約として、基準モデルの設計断面面積と欠損後の断面面積を与えている。

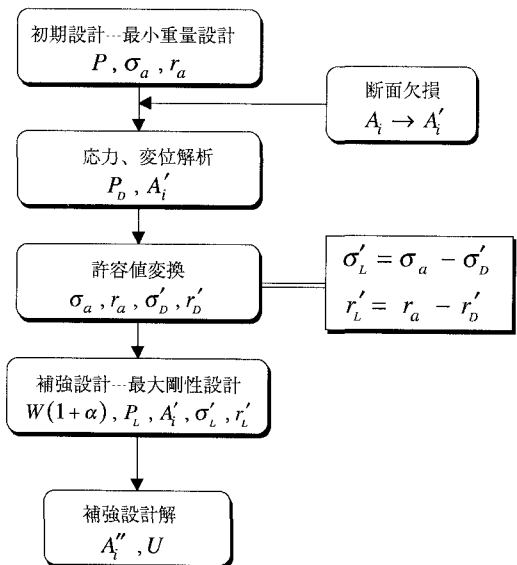
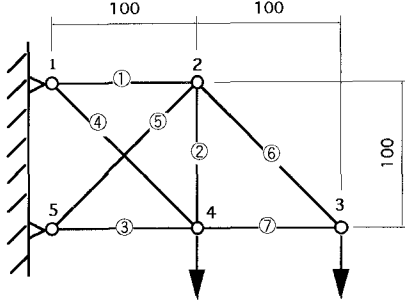


図1 解析の流れ

4 数値解析

a) モデル設計条件

以下の条件で初期設計を行う。制約条件が応力のみ場合をCase I、応力制約と変位制約 $\pm 0.1\text{cm}$ とする場合をCase IIとする。両ケースとも第5部材の断面積に30%の欠損を想定する。



$$\begin{aligned} \sigma_a &= \pm 2500 \text{ kgf/cm}^2 & P_t &= 9 \text{ kgf} & P_t &= 6 \text{ kgf} \\ E &= 3.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 & P_o &= 6 \text{ kgf} & P_o &= 4 \text{ kgf} \\ \rho &= 0.00786 \text{ kgf/cm}^3 \end{aligned}$$

b) 初期設計（最小重量設計）

部材	Case I	Case II
A1	8.000 cm^2	60.627 cm^2
A2	1.000	1.000
A3	10.000	46.762
A4	8.485	14.814
A5	5.657	44.082
A6	5.657	41.523
A7	4.000	29.361
Wmin	40.086 kgf	219.895 kgf

表1 基準モデル

c) 設計可能最小補強量の算定

死荷重が常に載荷された状態における部材の欠損により、すべての制約を満たすためには欠損体積分以上の断面補強が必要である。そこで最小重量設計と最大剛性設計に等価性が認められていることから、死荷重により変換された許容値を用いた最小重量設計を行えば設計可能な最小限必要である重量（体積）を得ることができると言える。結果を表2に示す。

部材	Case I	Case II
A1	8.000 cm^2	65.252 cm^2
A2	1.000	1.000
A3	10.000	49.381
A4	8.485	14.814
A5	7.477	47.449
A6	5.657	44.678
A7	4.000	31.592
Wmin	42.109 kgf	234.592 kgf
補強量	5.05 %	6.68 %

表2 設計可能最小補強量と設計値

d) 補強設計（最大剛性設計）

図2は補強量 α を設計可能最小補強量から40%まで変化させて補強設計を行った結果である。図から明らかに、設計断面は比例配分ではない。

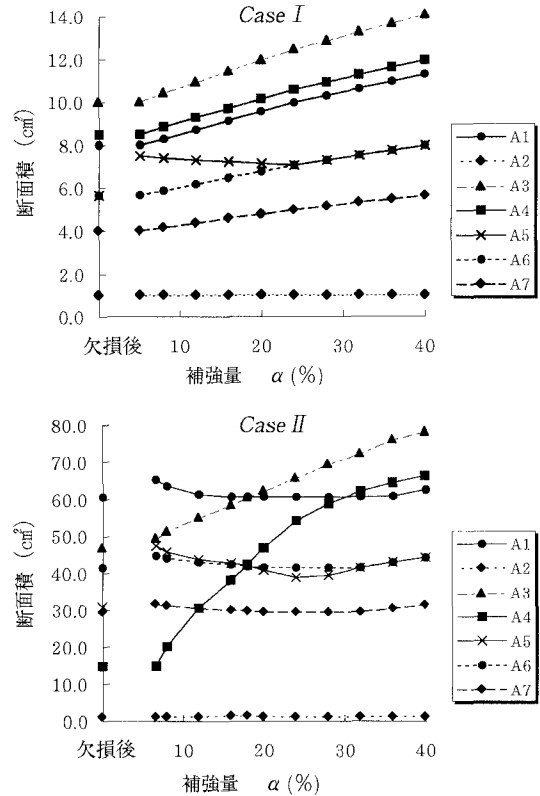


図2 補強量による最適断面積の変化

5 おわりに

今回解析した2つのCaseの相違点は変位制約の有無である。応力制約のみの場合は比較的全体的に断面積の増加が見られ、これに変位制約が加わると節点4の変位を減少させることがより効率的な補強という結果になった。最適な補強方法は制約条件の種類で異なり、これは他のモデルに関しても同様の結果が得られている。

欠損部材に関する変化についてはその部材がどの程度死荷重の影響を受けるかによって決定されている。

これらには経験的な判断が必要となるため、今回提案する設計方法は有効であると考えられる。

（参考文献）

- 1) 新延、松井、菊田：骨組構造物の応答感度係数特性
土木学会論文集 No.450/120, pp.75-83, 1992.7
- 2) Uri Kirsch、山田ほか監修：最適構造物設計
丸善 1983.10
- 3) 内海、新延：トラス構造物の最小重量設計と最大剛性設計
第48回年次学術講演会講演概要集