

愛媛大学工学部 正会員 ○谷脇 一弘

愛媛大学工学部 正会員 大久保 慎二

1. まえがき

著者らは、これまでトラス構造物を対象として、応力度および節点変位の制約条件のもとで、各部材要素の最適断面寸法、構造形状および使用材種を同時に最適化することができる総合的最適設計法に関する研究を長年行い、その研究成果を発表してきているが、本研究では、既に開発している最適設計法を拡張し、静荷重による挙動のみならず応答スペクトル解析により得られた地震荷重による構造物の動的な挙動をも考慮し、道路橋示方書に規定されている応力度および変位の制約条件のもとで構造物を総合的に最適化する方法について研究を行い、大規模な不静定トラス構造物の最適設計を行った結果について述べるものである。

2. 静荷重および地震荷重を考慮したトラス構造物の総合的最適設計法

(1) 原設計問題 本研究では、トラス構造物の各部材の断面形状として図1に示す円管を考慮している。断面寸法に関する設計変数として円管の直径 D および板厚 t が考えられるが、本研究では問題を簡略化するため円管の断面積 A を設計変数として考慮し、 D および t は断面積 A が一定の条件のもとで道路橋示方書に規定されている許容圧縮応力度を最大とするように決定している。実際の設計の観点から、 t は離散変数として取り扱われる各部材の使用材

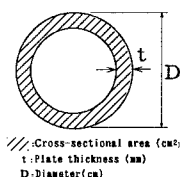


図1 円管の断面図

種 M はSS400(材種1), SM490(材種2), SM490Y(材種3)およびSM570(材種4)の4種類の鋼材から選択するものとしている。

なお、上記の4種類の鋼材の設計に用いた許容引張応力度 σ_w 、弾性係数 E 、単位体積当たりのコスト ρ_c および重量密度 ρ_w をそれぞれ表1に示す。さらに、構造物の幾何形状に関する設計変数として各節点の水平および垂直座標 S を考慮している。

制約条件 g_j として道路橋示方書に規定されている全部材の静荷重および地震荷重による応力度および節点変位の制約を考慮するものとする。応力度の制約条件 g_j ($j=1, \dots, n$)として以下に示す j 部材に関する3つの制約の中で最も支配的な制約条件を考慮している。

$$g_{\sigma 1j}(A, S, M) = |N_{sj}(A, S, M)/A_j| - |\sigma_{aj}(M, t_j)| \leq 0 \quad (1)$$

$$g_{\sigma 2j}(A, S, M) = |N_{sj}(A, S, M)/A_j + N_{ej}(A, S, M)/A_j| - 1.5 |\sigma_{aj}(M, t_j)| \leq 0 \quad (2)$$

$$g_{\sigma 3j}(A, S, M) = |N_{sj}(A, S, M)/A_j - N_{ej}(A, S, M)/A_j| - 1.5 |\sigma_{aj}(M, t_j)| \leq 0 \quad (3)$$

ここに、 N_{sj} および N_{ej} は静荷重および地震荷重による軸力、 σ_{aj} は許容引張応力度もしくは許容圧縮応力度を示す。

変位の制約条件は次式で与えられる。

$$g_{\delta d}(A, S, M) = |\delta_{sd}(A, S, M)| + |\delta_{ed}(A, S, M)| - |\delta_{ad}| \leq 0 \quad (d=1, \dots, r) \quad (4)$$

ここに、 δ_{sd} および δ_{ed} は静荷重および地震荷重によるたわみ、また δ_{ad} は許容たわみを示す。

応答スペクトル解析に用いた応答スペクトルは、構造物の減衰定数等を考慮し、道路橋示方書に規定されているI種地盤の標準加速度応答スペクトルの1.5倍とした。さらに、細長比の制約条件により決定される必要最小断面積を断面積の下限制約として考慮している。

上記の設計変数および制約条件を考慮し、トラス構造物の総製作費 $W(A, S, M)$ を最小にする最適設計問題を考える。

(2) 2段階最適化による最適設計法 上記の最適設計問題を解くために、設計変数 A, S, M に関する1次の偏微分係数の符号により順変数もしくは逆変数を用い、変数分離型の凸近似設計問題を導入する。この場合、目的関数として $W(A, S, M)$ の変化量 $\Delta W(A, S, M^0 + \Delta M)$ を考慮し、 M については変化量 ΔM を新たな設計変数として考慮している。

地震荷重による r 次モードの変位の感度係数は、振動方程式から導入される r 次モードに関する固有値問題の基礎式を A, S, M に関して偏微分することにより得られる固有値および固有ベクトルの感度係数を用いて解析的に計算している。地震荷重による r 次モードの部材力の A, S, M に関する感度係数の計算は、変位の感度係数を用いて解析的に行うことができる。最大応答変位および部材力の感度係数は、 r 次モードの変位および部材力の感度係数を用い、各モードの応答値の2乗和平方根の計算式を A, S, M に関して偏微分することにより容易に得ることができる。

上記の凸近似設計問題を双対法により解く過程において、まず第1段階の最小化として、 $\mathbf{M}$ を定数すなわち $\Delta \mathbf{M} = \mathbf{0}$ とし $\mathbf{EA}$ を1つの変数 $\mathbf{A}$ と考え、 $\mathbf{S}$ とともに連続変数として取り扱いその最適解 $\mathbf{A}^*$ および $\mathbf{S}^*$ を求める。次に第2段階の最適化として、 $\mathbf{S}$ を一定値とし、第1段階最適化において決定されたアクティブな制約条件群を満足し、さらにラグランジュ関数を最小とする $\mathbf{A}$ および $\Delta \mathbf{M}$ の値を各 $\Delta \mathbf{M}_i$ について比較することにより、最も経済的となる $\mathbf{A}$ の値を決定することができる。上記の第2段階の最適化において、応力度の制約条件のみがアクティブとなる場合、材種 $\mathbf{M}_i^0 + \Delta \mathbf{M}_i$ に対しても応力度の制約条件がアクティブとなる必要条件是次式により与えられる。

$$g_{\sigma_i}(\bar{\mathbf{A}}_i^{\sigma}, \Delta \mathbf{M}_i) = \frac{\sigma_i \mathbf{A}_i^*(\mathbf{M}_i^0)}{\bar{\mathbf{A}}_i^{\sigma}(\mathbf{M}_i^0 + \Delta \mathbf{M}_i)} - \sigma_{\text{amax}i}(\mathbf{M}_i^0 + \Delta \mathbf{M}_i, \bar{\mathbf{A}}_i^{\sigma}) = 0 \quad (5)$$

ここに、 σ_i および σ_{amaxi} はそれぞれ実応力度および最大許容応力度を示す。

上式において最大許容応力度 σ_{amax} は、 $\bar{A}_i^0$ もしくは板厚の変化により変化するため、上式を満足する正確な $\bar{A}_i^0$ および板厚を求めるためにはくり返し計算が必要となる。そのため本研究では、つぎの近似式をくり返し解くことにより材種 $M_i^0 + \Delta M_i$ に対する $\bar{A}_i^0$ および板厚を決定している。

$$\bar{g}_{\sigma i}(\bar{A}_i^\sigma, \Delta M_i) = g_{\sigma i}(\bar{A}_{i0}^\sigma, \Delta M_i) + \frac{\partial g_{\sigma i}}{\partial \bar{A}_i^\sigma}(\bar{A}_i^\sigma - \bar{A}_{i0}^\sigma) = 0 \quad (6)$$

ただし、 $A_i^l(M_i^0 + \Delta M_i) \leq \bar{A}_i^0 \leq A_i^u(M_i^0 + \Delta M_i)$

変位の制約条件がアクティブとなる場合には、 $E_i A_i$ の値を一定に保つことにより、すなわち、次式により材種 $M_i^0 + \Delta M_i$ に対する $\bar{A}_i^{\delta}$ を決定することができる。

$$\bar{A}_i^{\delta}(M^0 + \Delta M) = E(M^0) A_i^*(M^0) / E(M^0 + \Delta M) \quad (7)$$

$$\bar{A}_i^{\delta}(M_i^0 + \Delta M_i) = E_i(M_i^0) A_i^*(M_i^0) / E_i(M_i^0 + \Delta M_i) \quad (7)$$

上記の2段階最適化過程を繰り返すことにより最終的な最適解を決定することができる。

3. 設計例および考察

上で述べた最適設計法を種々のトラス構造物に適用し最適化を行ったが、ここでは図2に示す163部材トラスの設計例について述べる。この設計例において、構造物はセンターラインに対して対称となるものと仮定し、163部材のうち85部材の部材断面積 A および使用材種 M を設計変数として考慮し、形状変数 S として X_1, X_2, Y_1, Y_2 および Y_3 を考慮している。また、図2に示したごとく、構造物には鉛直荷重による一定の集中質量 $m_{n1} \sim m_{n7}$ および設計変数の変化とともに変化する集中質量 $m_i (i=1, \dots, 78)$ が各節点に載荷されている。

たわみ制限を30cm、すべての部材の初期部材断面積および初期材種をそれぞれ100cm²および材種1と設定した場合の最適解を図3に示す。最適解は23回の反復改良により能率的に得られており、最適解におけるアクティブな制約条件は応力度およびたわみの制約条件であった。主要な部材の使用材種は4、3、1が選択され、応力度およびたわみの制約条件がアクティブとなる場合のきわめて妥当な最適解が得られている。また、小さな断面積を有する部材は、細長比の制約条件から決定される最小断面積となっており、最も安価な材種1が選択されている。

その他種々の計算例により、静荷重および地震荷重を考慮し、設計示方書に規定されている応力度および変位の制約条件のもとでトラス構造物の最適断面寸法・構造形状・使用材種を能率的に決定できることが明らかとなった。

表 1 使用材種群

Material kind	σ_w (kg/cm ²)	E (kgf/cm ²)	ρ_e (yen/cm ³)	ρ_w (kg/cm ³)
1 (SS400)	1400	2.1×10^6	1.6	0.00785
2 (SM490)	1900	2.1×10^6	2.0	0.00785
3(SM490Y)	2100	2.1×10^6	2.1	0.00785
4 (SM570)	2600	2.1×10^6	2.5	0.00785

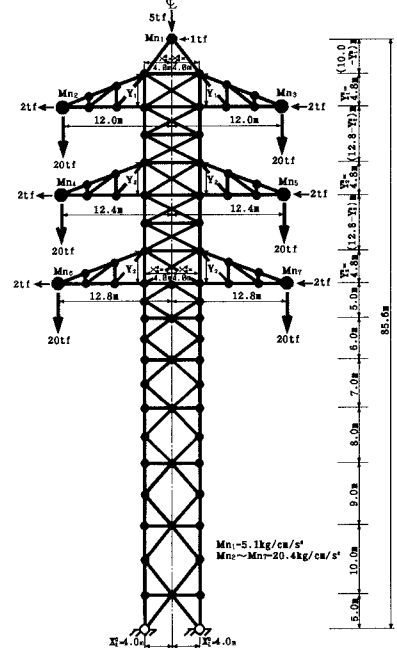


図2 初期163部材トラス

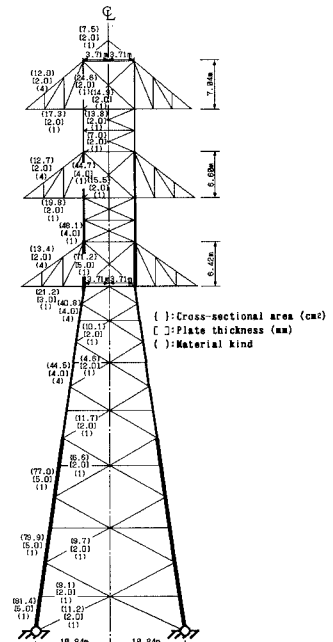


図3 163部材トラスの最適解