

材料コスト最小化に基づくアルミニウム合金製張弦桁の最適形態

信州大学 学生会員 ○水野 翔太
信州大学 正会員 近広 雄希

1. 背景及び目的

橋梁分野においてアルミニウム合金材料は、軽量で耐腐食性に優れるため、施工性や維持管理性の向上が見込まれる。一方で、鋼材よりも剛性は低く、単位質量あたりの材料コストも高いため、道路橋への適用例は少なく、歩道橋への適用が多い。本研究では、アルミニウム合金桁の剛性向上とコスト低減を両立するために、ケーブル材と束材を組み合わせた張弦構造の適用を試みる。ここでは、グランドストラクチャ法に基づくトラス・トポロジー最適化と材料コスト最小化を考慮した2段階の最適化問題を通じ、材料コストを安くするアルミニウム合金桁の形態を検討する。

2. ESO法を併用したトラス・トポロジー最適化

2.1 トラス・トポロジー最適化問題の定式化

本研究では、部材総体積とコンプライアンスを目的関数としたトラス・トポロジー最適化問題¹⁾を用いた。この最適化問題における一定外力下のパレート最適解は、部材軸力を設計変数、力の釣り合いを制約条件とした式(1)に示す線形計画問題に帰着できるとされる。よって、本研究では式(1)を内点法により解く。

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad & f = \mathbf{l}^T \mathbf{N}_t + \mathbf{l}^T \mathbf{N}_c \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{P} = \mathbf{B} \mathbf{N}_t - \mathbf{B} \mathbf{N}_c \end{aligned} \quad (1)$$

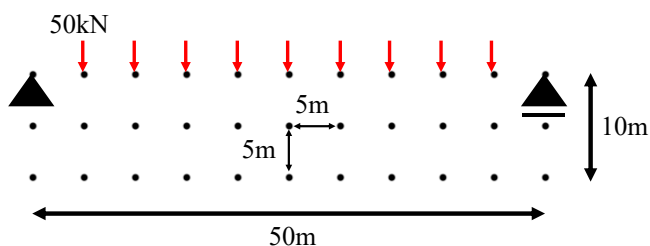


図-1 設計条件

ここで、 \mathbf{l} は部材長ベクトル、 $\mathbf{N}_t, \mathbf{N}_c$ はそれぞれ引張、圧縮の部材軸方向力ベクトル、 \mathbf{P} は節点荷重ベクトル、 \mathbf{B} は釣合行列を表す。なお、初期計算により求めた最適位相には軸力の小さな細長い部材が多く混在するため、グランドストラクチャ法にESO法²⁾を併用することで形態をより単純なものにした。

2.2 設計条件

節点配置と荷重位置、境界条件を図-1に示す。歩道橋に対する群衆荷重、ならびにRC床版と高欄の死荷重を加味し、図中の上部の各節点に50kNを載荷した。また、最適形態はグランドストラクチャの初期位相に依存するため、節点同士の結び方の異なるグランドストラクチャ(図-2(a)~図-4(a))を設定した。

3. 材料コスト最小化に基づく最適形態とその考察

3.1 構造モデル

トラス・トポロジー最適化により、格子形モデル(図-2(b))、ダブルワーレントラス形モデル(図-3(b))、 π 形モデル(図-4(b))、アーチ形モデル(図-5(b))の構造形態が得られた。これらの構造モデルに対して、図の青色で示した部材にはケーブル材(SWPR7B)を、その他の灰色の部材にはアルミニウム合金材(A6061-T6)を用いた。また、張弦化の影響を調べるために、すべての部材にアルミニウム合金材を用いたアルミニウム合金製トラス桁についても検討した。コスト指数は単位質量あたりの相対的なコストから評価し、鋼材を1とした場合に、アルミニウム合金材のコスト指数を6.5、ケーブル材のコスト指数を3とした。

3.2 材料コスト最小化問題の定式化

目的関数は、部材の質量 m_i に対する単位質量当た

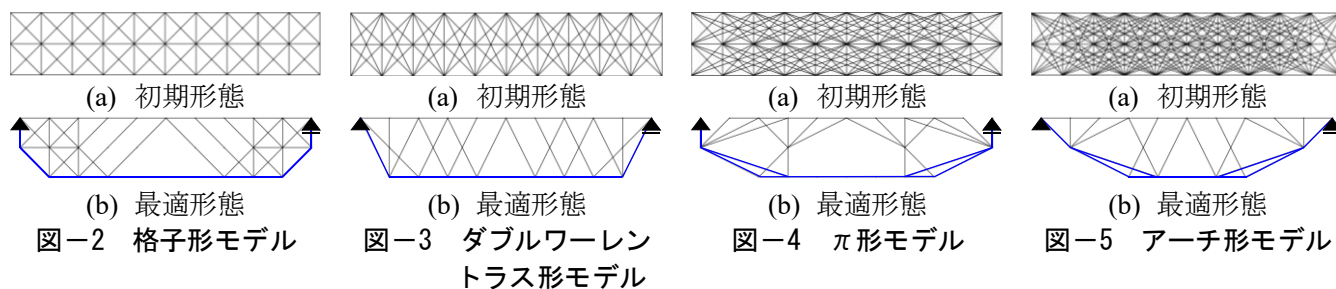


図-2 格子形モデル

図-3 ダブルワーレントラス形モデル

図-4 π 形モデル

図-5 アーチ形モデル

キーワード アルミニウム合金桁、張弦構造、トポロジー最適化問題、コスト最小化問題

連絡先 〒380-8553 長野県長野市若里4-17-1 TEL 026-269-5281

りのコスト指数 C_i の積より、次式のように表すことができる。ここで、 $i(=1,2,3 \dots i_{\max})$ は部材番号を示す。

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} C_i m_i \quad (2)$$

また、アルミニウム合金部材が中空正方形断面、ケーブル材が円形断面で構成されるとし、設計変数 \mathbf{x} を以下のように定義した。

$$\mathbf{x} = \{A_i, A_{\text{Cable}_i}\} \quad (3)$$

ここで、 A_i はアルミニウム合金部材の断面積、 A_{Cable_i} はケーブル材の断面積をそれぞれ示す。

コスト最小化問題は式(2)で計算される目的関数 $f(\mathbf{x})$ に対して、部材に作用する応力とたわみに関する制約条件を用いて次式のように定式化される。

$$\begin{aligned} \text{Min.} & \quad f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} & \quad \begin{cases} |\sigma_{c_i}| \leq \text{Min.}(\sigma_{cr_i}, \sigma_{a_i}) \\ \sigma_{t_i} \leq \sigma_{a_i} \\ \delta_{\max} \leq 83.3\text{cm} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{x} は設計変数を示し、次式を満足する。

$$\begin{cases} 122.9\text{cm}^2 \leq A_i \leq 799.0\text{cm}^2 \\ 54.8\text{cm}^2 \leq A_{\text{Cable}_i} \end{cases} \quad (5)$$

制約条件の左辺にある $\sigma_{c_i}, \sigma_{t_i}$ は、第2章から得られた部材軸力を考慮した圧縮応力、引張応力を、 δ_{\max} は活荷重による最大たわみをそれぞれ示す。最大たわみはFEMの骨組解析で算出し、全節点のたわみのうち最大値を参照した。制約条件の右辺にある σ_{cr_i} は Bernoulli-Euler 梁から算出した許容座屈応力、 σ_{a_i} は材料の許容応力をそれぞれ示す。たわみの制限値は立体横断施設基準・同解説を、部材の最小断面積及び最大断面積は道路橋示方書をそれぞれ参考とした。なお、最適化アルゴリズムには差分進化法を用いた。

3.3 材料コストと最大たわみの関係

図-6 は構造モデルが格子形モデル、ダブルワーレントラス形モデル、 π 形モデル、アーチ形モデルにおける材料コストと最大たわみの関係を示す。図中の灰色で示す印はトラス桁を、灰色と青色で示す印は張弦桁を示す。

結果図より、トラス桁において、格子形モデルが最もたわみを抑制し、最もたわみを大きくしたアーチ形

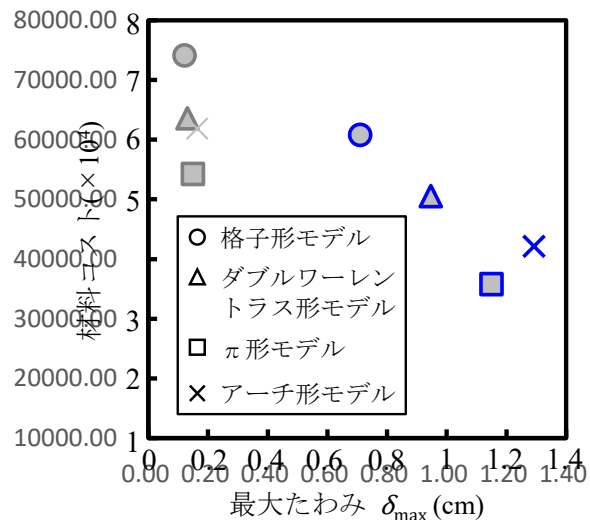


図-6 材料コストと最大たわみの関係

モデルより 43%抑制した。また、格子形モデルは材料コストも最大にし、材料コストが高いモデルほどたわみを抑制できる傾向がみられた。同じ構造モデルにおいて、張弦桁の材料コストはトラス桁の材料コストよりも 18%~34%程度減少した。そして、最も材料コストを抑えた構造モデルはアーチ形モデルであった。一方で、張弦桁のたわみはトラス桁のたわみの 6.0 倍から 7.6 倍であった。しかしながら、たわみは 0.71cm~1.29cm であり、たわみの制限値の 1/80 程度であるため、特別な配慮は必要ないと考えられる。

以上より、トポロジー最適化問題と材料コスト最小化問題の併用により、目的や用途に応じた低コストなアルミニウム橋の実現可能性を示すことができた。

4. 結論

- ・材料コスト最小化問題より、張弦化することで材料コストは減少したがたわみは増加した。また、材料コストを最小にした形態は張弦桁のアーチ形モデル、たわみを最小にした形態はトラス桁の格子形モデルであることが分かった。

謝辞

当研究は、(一財)長野県科学振興会の助成を受け実施したものである。ここに記して、深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高田豊文, 松岡貴士: 体積とコンプライアンスを目的関数としたトラス・トポロジー最適化問題への線計画法の適用, 日本建築学会構造系論文集, No. 598, pp.87-91, 2005.
- 2) 高坂憲治, 松本慎也, 藤井大地: ESO 法とグラウンドストラクチャ法を用いた骨組構造物の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No. 721, pp.547-553, 2016.