

張弦構造によるアルミニウム合金桁の材料コスト最小化に関する一検討

信州大学大学院 学生会員 ○水野 翔太
 信州大学 正会員 近広 雄希
 信州大学 正会員 小山 茂

1. 背景及び目的

アルミニウム合金材料は、軽量で耐腐食性に優れる一方で、鋼材よりも剛性は低い。また、単位重量あたりの材料コストも鋼材と比べて高いため、道路橋への適用例は少なく、歩道橋への適用がこれまでに多かった。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、ケーブルと束材を組合わせた張弦構造の適用を試みる。ここでは、最適化手法を用いた材料コスト最小化問題を通じ、アルミニウム合金製張弦桁の優位性を明らかにする。

2. コスト最小化問題の定式化

2.1 最適化アルゴリズム

コスト最小化問題を解くにあたり、進化的アルゴリズムの1つである差分進化 (DE) 法を用いた。 n 個の設計変数からなる場合、このアルゴリズムは $m (> n)$ 個の探索点を形成する。この母集団に対して突然変異、交叉、適者生存を繰り返し行うことで解を探索し、目的関数値を収束させる特徴を持つ。

2.2 材料特性とコスト指数

張弦梁構造の桁と束材には、アルミニウム合金材 A6061-T6 と溶接構造用圧延鋼材 SM490 を仮定した。ケーブル材には、ケーブル径が 14, 20, 28mm の 3 種類の構造用ステンレスワイヤーロープ (JIS G 3550) を仮定した。コスト指数は、単位質量あたりの相対

的なコストを表したものであり、鋼材の価格を 1 とした場合、アルミニウム合金材は 6.5 倍の、ステンレス材は 6.0 倍の価格を仮定した。

2.3 定式化

分布荷重 $Q = 350\text{N/mm}^2$ が作用する束材の本数が一本および二本の張弦構造の力学モデルをそれぞれ図-1, 図-2 に示す。また、それらの断面力やたわみ、ケーブル材の張力などを束材に生じる軸力を不静定力 X とした単位荷重法により導出した。束材が一本の場合の不静定力 X は次式で与えられる。

$$X = - \frac{5QL^4}{384E_1I_1} \frac{1}{\frac{L^3}{48E_1I_1} + \frac{f}{2E_1A_1} (2\alpha + \beta\sqrt{\gamma^2 + 1} + \gamma^3)} \quad (1)$$

ここで、 L は張弦桁の支間長、 E_1A_1 は桁の伸び剛性、 E_1I_1 は桁の曲げ剛性、 f は束材の高さ、 $\alpha = E_1A_1/E_2A_2$ 、 $\beta = E_1A_1/E_3A_3$ 、 $\gamma = L/2f$ であり、 E_2A_2 と E_3A_3 は束材とケーブル材の伸び剛性をそれぞれ示す。また、コスト最小化問題は次式のように定式化した。

$$\begin{aligned} \text{Min.} \quad & f(\mathbf{x}) = \alpha_i W_i \\ \text{s.t.} \quad & g_k(\mathbf{x}) < b \quad (k = 1, \dots, n) \\ & \mathbf{x} \in \mathbf{X} \in \mathbf{R}^n \end{aligned} \quad (2)$$

目的関数 $f(\mathbf{x})$ は、桁、束材、ケーブルの各コストであり、 $\alpha_i W_i$ の総和で表現できる。なお、 α_i は各部材のコスト指数張弦構造の部材質量 W_i は、密度 ρ_i 、

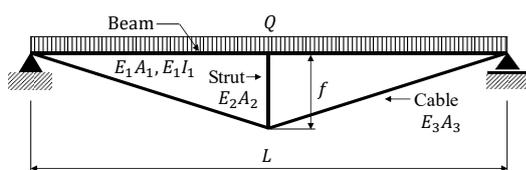


図-1 束材が一本の張弦桁モデル

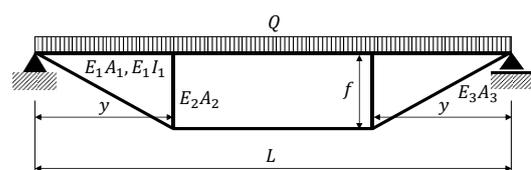


図-2 束材が二本の張弦桁モデル

キーワード アルミニウム合金桁、張弦構造、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

断面積 A_i , 部材長 l_i を用いて示せる. $g_k(\mathbf{x})$ は次に示す応力, たわみに関する制約条件を並べたものである.

$$\begin{cases} |\sigma_B| < \text{Min.}(\sigma_{crE}, \sigma_y) \\ |\sigma_T| < \text{Min.}(\sigma_{crT}, \sigma_y) \\ \sigma_C < \sigma_y \\ \delta_{\max} < \frac{L}{600} \end{cases} \quad (3)$$

ここで, $\sigma_B, \sigma_T, \sigma_C$ は桁, 束材, ケーブル材の最大, もしくは最小応力を, $\sigma_{crE}, \sigma_{crT}$ は座屈応力, σ_y は材料の許容応力, δ_{\max} は張弦構造の最大たわみをそれぞれ示す. 桁は I 型断面を仮定し, 桁の支間長 L , フランジ厚さ t_f , 幅 b_f , ウェブ高さ b_w , 厚さ t_w とした. 束材は中空正方形断面を想定し, 厚さ t_s , 幅 b_s , 高さ f , 支点から束材までの距離 y とした. また, ケーブル材は円形断面を有し, 直径 D とした. これらの設計変数は, それぞれ以下のように仮定した.

$$\begin{cases} 8 \leq t_f, t_s < 40 \\ 8 \leq t_w \leq 15 \\ 150 \leq b_s \leq b_f \leq 300 \\ b_w \leq 1500 \\ 0.05L \leq f \leq 0.5L \\ y \leq 0.5L \end{cases} \quad (4)$$

数値最適化では, 10m ごとに材料コストを評価し, 最大支間長 L_{\max} を得るまで検討を行った.

3. 数値最適化の結果

束材が一本の場合のアルミニウム合金製張弦桁のコスト最小化問題の結果を図-3 に示す. 図中の縦軸は目的関数である材料コストを, 横軸は支間長を示す. 黒線は鋼単純桁の, 赤線はアルミニウム合金製単純桁の, 青い点線, 破線, 実線は, ケーブル径を $D = 14, 20, 28\text{mm}$ とした場合の結果をそれぞれ示す. 図-3 より, アルミニウム合金製単純桁を張弦化することで, 全てのケーブル径に対して材料コストが低減し, 最大支間長が増加した. 例えば $L = 50\text{m}$ では, アルミニウム合金製単純桁の材料コストが $C = 17936$ であるのに対して, ケーブル径 D が $14, 20, 28\text{mm}$ のとき, 材料コスト $C = 8481$ (52%減), 7149 (60%減), 7159 (60%減) と減少し, 鋼製単純桁の結果に近づいた. また $D = 28\text{mm}$ の張弦桁の最大支間長は $L_{\max} = 140.5\text{m}$ と鋼単純桁よりも 1.7 倍ほど長くなり, 材料コストと支間長の両面に対する張弦化の有用性が確認された.

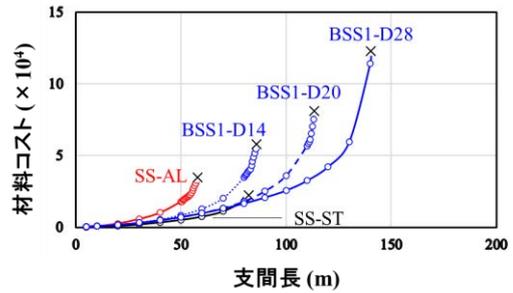


図-3 束材が一本の張弦梁における材料コストと支間長の関係

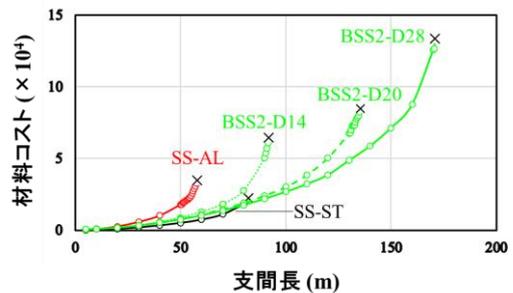


図-4 束材が二本の張弦梁における材料コストと支間長の関係

束材が二本の場合のコスト最小化問題の結果を図-4 に示す. 図中の縦軸と横軸, ならびに黒線と赤線は図-3 に従う. また, 緑色の点線, 破線, 実線は, ケーブル径を $D = 14, 20, 28\text{mm}$ とした場合の最適解をそれぞれ示す. 図-4 より, 束材が一本の場合と同様に, アルミニウム合金製単純桁に対する材料コストの低減と最大支間長の増加が確認された. また $D = 28\text{mm}$ の張弦桁の最大支間長は $L_{\max} = 171\text{m}$ と鋼単純梁よりも 2.0 倍ほど長くなった.

図-3, 図-4 の両図を比較すると, 束材の本数が二本の場合の方が, どのケーブル径に対しても低コストかつ長支間にできる傾向にあり, ケーブル径が太くなるほど, この傾向は強くなった.

4. 結論

- (1) アルミニウム合金製単純桁モデルの材料コストは, 鋼製単純桁モデルの材料コストより約 3.5 倍高かった. しかしながら, これを張弦構造とすることで鋼製単純桁よりも長スパンで同程度の材料コストにすることが可能となり, 張弦化の有用性を示すことができた.
- (2) 張弦構造の束材数が多い場合の方が最大支間長は長かった. また束材に関わらず, ケーブル径が大きくなると材料コストは減少することが分かった.