

## 張弦構造によるアルミニウム合金梁の材料コスト最小化に関する一検討

信州大学 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、歩道橋への適用が多い。本研究では、アルミニウム合金梁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コスト最小化問題を通じ、アルミニウム合金製張弦梁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、直接探索法である Nelder-Mead 法を用いた。Nelder-Mead 法は、 $n$  個の設計変数からなる場合、このアルゴリズムは  $n$  次元空間上に  $n+1$  個の点  $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_{n+1}\}$  を持つ多角形(単体)を形成する。与えられた単体に対して、各頂点の目的関数  $f$  の値を求め、鏡像、拡大、収縮、縮小の操作を行うことにより、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

張弦梁構造の梁と束材には、アルミニウム合金材 A6005c と一般構造用圧延鋼材 SS400 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梁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。

$$X = - \frac{\frac{5QL^4}{384E_1I_1}}{L^3 + \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + f^2}}{2f^2E_3A_3} + \frac{f}{E_2A_2} + \frac{L^3}{16f^2E_1A_1}} \quad (1)$$

ここで、 $L$  は張弦梁の支間長、 $E_1A_1$  は梁の伸び剛性、 $E_1I_1$  は梁の曲げ剛性、 $f$  は束材の高さ、 $E_2A_2$  は束材の伸び剛性、 $E_3A_3$  はケーブル材の軸剛性である。また、コスト最小化問題は次式のように定式化した。

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

目的関数  $f(\mathbf{x})$  は、梁、束材、ケーブルの各コスト  $\alpha_i W_i$  の総和で表現できる。なお張弦梁構造の部材重量  $W_i$  は、密度  $\rho_i$ 、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。

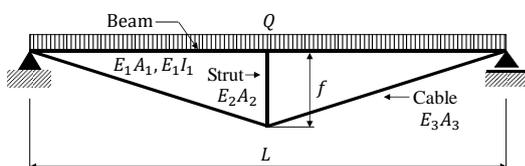


図-1 束材が一本の張弦梁モデル

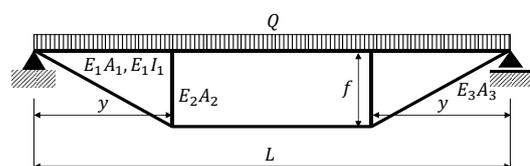


図-2 束材が二本の張弦梁モデル

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

ここで、 $\sigma_B, \sigma_T, \sigma_C$  は梁、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、 $\sigma_y$  は材料の降伏応力、 $\delta_{\max}$  は張弦梁構造の最大たわみをそれぞれ示す。さらに、 $X$  は設計変数であり、梁の支間長 $L$ 、梁の高さ $b_B$ 、束材の厚さ $b_T$ 、束材の高さ $f$ 、支点から束材までの距離 $y$ 、ケーブル材の直径 $D$ とした。 $x$  は実行可能領域を示し、以下を仮定した。

$$\begin{cases} b_B < 200 \\ b_T < 200 \\ 0.05L < f < 0.5L \\ y < 0.5L \end{cases} \quad (4)$$

梁と束材が矩形断面、ケーブル材が円形断面を持つとしている。最適化では、 $L$ を5000mmごとで評価し、最大支間長 $L_{\max}$ までのコスト指数を検討した。また梁と束材の幅 $b_B, h_T$ は一律1500mmを与えた。

### 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梁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コストを、横軸は支間長を示す。黒線は鋼単純梁の、赤線はアルミニウム合金製単純梁の、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梁を張弦化することで、全てのケーブル径に対してコストが低減し、最大支間長が増加した。例えば $L = 10\text{m}$ の場合には、アルミニウム合金製単純梁のコストが $C = 44057$ であるのに対して、ケーブル径 $D$ が14, 20, 28mmと変わることによってコスト指数 $C = 33248$  (25%減), 16508 (63%減), 12987 (71%減)と減少していき、鋼単純梁の結果に近づいていった。また $D = 28\text{mm}$ の張弦梁の最大支間長は $L_{\max} = 25.5\text{m}$ と鋼単純梁よりも1.5倍ほど長くなった。

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

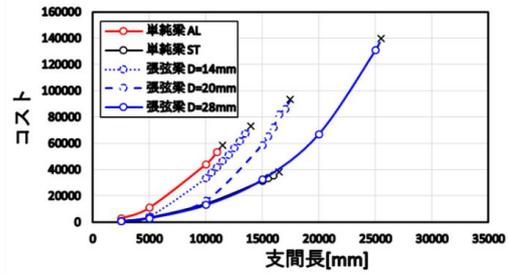


図-3 束材が一本の張弦梁におけるコストと支間長の関係

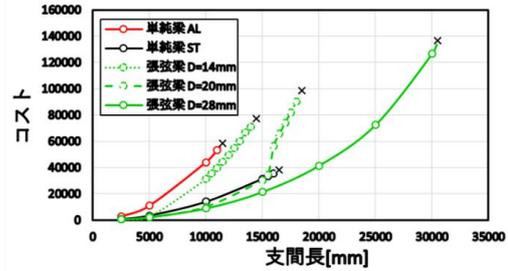


図-4 束材が二本の張弦梁におけるコストと支間長の関係

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梁に対するコストの低減と最大支間長の増加が確認された。また $D = 28\text{mm}$ の張弦梁の最大支間長は $L_{\max} = 30.5\text{m}$ と鋼単純梁よりも1.8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

本研究では、アルミニウム合金材を張弦構造化する利点と優位性についてコスト最小化問題から検討した。本研究で明らかになったことを以下に示す。

- (1) アルミニウム合金製単純梁モデルのコストは、鋼製単純梁モデルのコストより約42%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梁よりも長スパンで低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ほう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コストは減少することが分かった。