

ハイブリッド・ケーブル構造の最適化に関する研究

-張力・位相同時最適化の提案と検証-

Study on Optimization in Hybrid Cable Structures

-Proposal and Verification of Simultaneous Optimization of Tension and Phase-

○小針匠³, 岡田章¹, 宮里直也¹, 廣石秀造²*Takumi Kohari³, Akira Okada¹, Naoya Miyasato¹, Shuzo Hiroishi²

Abstract: Hybrid cable structures such as Beam String Structure(BSS) and SKELSION structures have a potential to be sufficient stiffness against external forces by proper arrangement of cables. Furthermore, by introducing an initial tension to the cable, it is possible to control the shape and the stresses generated in the member of framework. Therefore, it is important to determine the appropriate cable arrangement and initial tension against external forces in designing a cable reinforced framework structure. In this paper, the simultaneous optimization of the cable arrangement and tension of the hybrid cable structures is performed using the nonlinear programming method.

1. 研究背景

張弦梁構造やSKELSION構造といったハイブリッド・ケーブル構造は、ケーブルを適切に配置することにより外力に対して剛性と応力が制御可能である。さらに、ケーブルに初期張力を導入することで、形状と共に、部材に生じる応力の制御を行うことが可能である。従って、本構造を設計する際には、外力に対して適切なケーブル配置と初期張力を決定することが重要である。

ハイブリッド・ケーブル構造の最適化に関する研究では、大崎らによりケーブル張力を変数として、最適な初期張力分布を求める手法が報告されている。この手法では、最適化を行う前に予め形状を指定する必要があり、位相の最適化は行っていない。また、位相の最適化を行った研究は数多く報告されているものの、本構造を対象とした研究は報告されていない。しかし、先述したように本構造は、適切なケーブル配置を決定することが重要な構造であり、張力の最適化だけでは不十分である。以上を踏まえ、本報ではハイブリッド・ケーブル構造の張力・位相同時最適化手法の提案及びその妥当性の検証を行う。

2. 張力・位相同時最適化手法の提案

ハイブリッド・ケーブル構造を対象として、張力・位相同時最適化手法の提案を行う。最適化の手順をFig.1に示す。まず、ケーブルによって構成されたグランドストラクチャを骨組に配置する。ケーブルは、付加重重時のケーブル張力と等価な節点外力としてモデル化する。この節点外力を設計変数として最適化を行い、得られた解を新たな初期解とする。また、この時の張力の総和を lim とする。次に新たな初期解に対し

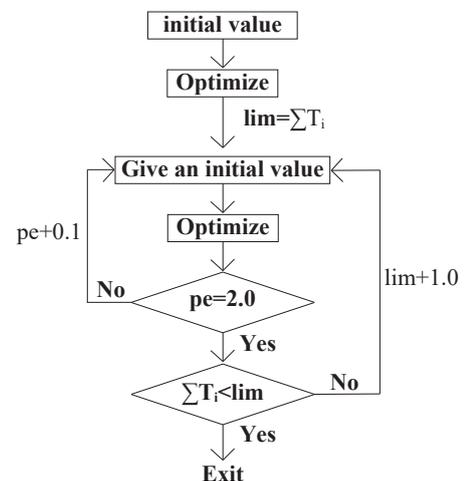


Figure 1. Optimization flow

て最適化を行う。解の収束を目的として、得られた解を次の初期解として複数回最適化を繰り返す。この際、複雑な位相となることを抑制するため、次式によって張力の小さい部材にペナルティを設けた。

$$T_i = std \cdot t_i^{pe} \quad (pe = 1.0 + 0.1 \cdot n) \quad (1)$$

subject to

$$lim > \sum T_i \quad (T_i = std \cdot t_i) \quad (2)$$

ただし、 T_i : 部材 i の張力, n : 繰り返し回数, t_i : 部材 i に関する設計変数, std : 張力の基準値。

目的関数の算出には(1)式を用いる。(2)式は総張力量の制約条件である。(1)式は t_i がべき乗されているのに対して(2)式はべき乗されていない。これにより、 pe が1より大きいかつ t_i が1未満であるとき、(1)式の算出値

が(2)式の T_i よりも小さく評価される. このように, (1)式と(2)式で張力を算出する際に異なる式を用いることによって, 張力がstd未満の部材にペナルティが発生する. これにより t_i が1未満であると, 目的関数が過小評価されるため, 小さな張力の部材が複数発生し, 複雑な位相となることを抑制できる. さらに, 最適化を繰り返すごとに pe を増加させることで, 段階的に強いペナルティを与える. この時, ペナルティが過剰となるのを防ぐため, pe の上限を 2.0 とする. また, (2)式の制約条件がアクティブになるのを防ぐため, 最適化を繰り返すたびに制約条件を緩和し, (2)式の制約条件が非アクティブになるまで最適化を繰り返す.

3. 数値解析による最適化の検討

本手法の妥当性及びペナルティによる影響の把握を目的として, 数値解析を行った. Fig. 2 に最適化の概要を示す. 目的関数はモーメントの最大値 M_{max} , と平均値 M_{ave} の2ケースとする. 制約条件は東下の水平変位 sd_{hi} が 0, 検定比が 1 未満とした. 荷重条件は固定荷重を模擬して梁への等分布载荷(10kN/m)とした. 張力の基準値stdは, ペナルティの強さが及ぼす影響の把握を目的に, 20, 40, 80 の3ケースとした. なお, 検討ケースの呼称は, 目的関数, stdの順で M_{ave_20} のように称す.

最適化結果を Fig. 3, 4 に示す. Fig. 3 より, M_{max_20} , M_{ave_20} , M_{max_40} では非常に小さな張力の発生している部材が確認できる. 一方, M_{ave_40} , M_{max_80} , M_{ave_80} では部材数が少なく単純な位相となった. 以上より, 強いペナルティを与えることで, 張力の小さな部材の発生を抑制し, 単純な位相を得ることが可能であることが確認された.

Fig. 4 より, M_{max} の場合, 発生モーメントが均一に小さくなっている. これは, モーメントの極値が全て同一となる時に, 目的関数が最小となるためである. 一方 M_{ave} では局所的にモーメントが小さくなる傾向にある. これは, 局所的にモーメントが小さくなることで, 平均値が大きく低減されるためである. 以上より, 目的関数に対応した位相が得られており, 本手法の妥当性が示唆された. また, M_{ave} の方が全体的に部材数の少ない位相となっている. これは, 前述したように M_{max} を目的関数とすると, モーメントが均一に小さくなるため, 複雑な位相になりやすいためと考えられる.

4. まとめ

本報ではハイブリッド・ケーブル構造の張力・位相同時最適化の手法の提案と妥当性の検証を行った. その結果, 本手法にて得られる解がおおむね妥当であることを確認した.

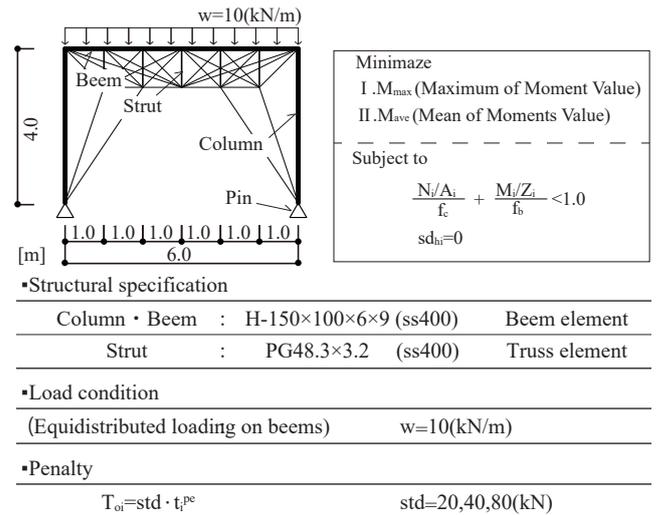


Figure 2. Optimization Overview

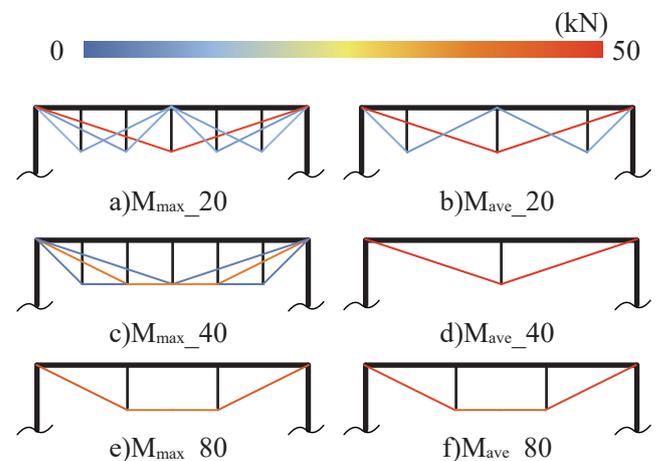


Figure 3. Optimization results (Axial force)

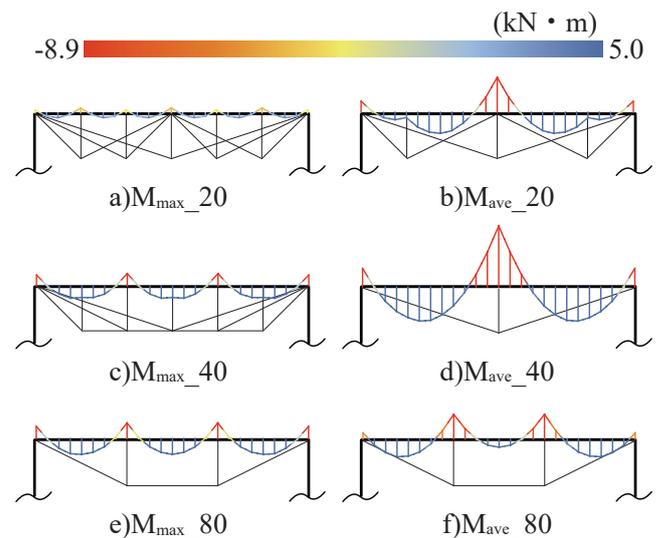


Figure 4. Optimization results (Moment)

5. 参考文献

[1]北折智規, 大崎純ら:「ケーブル補強骨組構造物の張力導入法(その1) 完成時張力最適化問題」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 1017-1018, 2000. 09