

ハイブリッド平板構造の位相と張力の最適化

(その1) 束の突上力と位置の同時最適化

Shape and Tension Optimization for Hybrid Flat Structure (Part 1) Optimization of Both Push-Up Force and Position of Struts

○多田このみ³, 宮里直也¹, 岡田章², 廣石秀造¹, 鴛海昂¹, 奥平康祐³

*Konomi Tada³, Naoya Miyasato¹, Akira Okada², Shuzo Hiroishi¹, Akira Oshiumi¹, Kosuke Okudaira³

Abstract: Hybrid Cable Structure is the structure in which stresses and deformations can be controlled by adding struts and strings to the beam and introducing initial tension to the strings. When designing a Hybrid Cable Structure, proper struts and strings placement and initial tension settings are important. Kohari^[1] has reported an optimal method of string placement for hybrid cable structures, considering non-compression resistance. However, this report is limited to two-dimensional structures and the position of struts is fixed. However, recently, when building structures are becoming more complex in form, more freedom in the geometry of the structure is required. Therefore, this report focuses on hybrid flat plate structures, where flat plates are reinforced with struts and strings, and proposes a method for optimizing strut and string placement and tension distribution, and verifies the effectiveness of the method.

1. はじめに

ハイブリッド・ケーブル構造は、架構にストリングを付加し、張力を導入することで応力や変形を制御することができる。合理的な架構の設計には、適切なストリング配置および初期張力量の設定が重要である。

ハイブリッド・ケーブル構造の最適化に関する研究として、小針ら^[1]はグランドストラクチャ法を用いて、非抗圧性を考慮したストリングの最適配置手法を報告している。一方、既報は二次元架構の検討に限られており、節点の位置も固定されている。しかし近年、建築構造物の形態は複雑化しており、より自由な架構形状が求められている。このため、本報ではストリングで平板を補強した「ハイブリッド平板構造」を対象にして、束およびストリングの配置、初期張力量の最適化手法を提案し、その妥当性の検証を行う。

ここでは、計算量を抑えるため、①束の突上力と位置の最適化、②ストリングの張力と位相の最適化、の2ステップで検討を行う。本報(その1)では、前者①について報告する。

2. 提案手法

束の突上力の最適化は、平板上面のミーゼス応力の最大値 σ_{max} の最小化を目的とする。まず、固定荷重を模擬した等分布荷重 W と、各束の突上力を模擬した単位節点外力 $P_{0,i}$ を仮定した束位置に与えて、荷重ごとの応力分布を求める。また、 $P_{0,i}$ による応力をそれぞれ係数倍し、 W による応力と加算することにより、任意の束突上力時の平板の応力を算出する。この時の σ_{max} が最小となる係数の組み合わせを記憶制限BFGS法を用い

て求め、最適な束突上力 P_i を算出する。

束位置の最適化においても同様に σ_{max} の最小化を目的とする。平板上面の応力は、束周辺では引張応力が卓越し、束から離れた位置では圧縮応力が卓越する。このため、束位置の最適化では、圧縮応力の大きい方向に束を移動させることで、 σ_{max} を最小化させた。

一連の検討手法をFig.1に示す。まず、束位置を仮定し、各束を中心とした輪状に平板を要素分割して、前述の手法を用いて P_i の最適化を行う。次に、各束位置から分割した各要素の中央までの方向ベクトルに、各要素の応力値 σ_i を乗じてベクトル V_i を算出する。応力値はミーゼス応力とし、主応力から判別して引張応力が卓越する場合は-1を乗じる。これらの V_i を足し合わせ、圧縮力が大きい方向のベクトル V を求める。

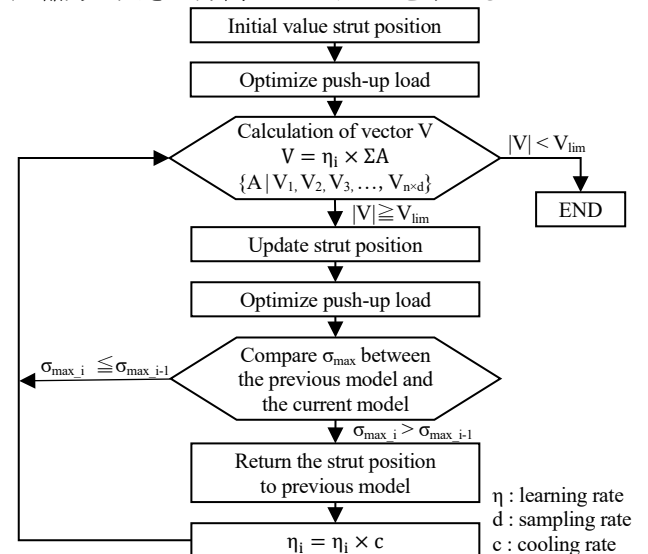


Figure 1. Optimization flow

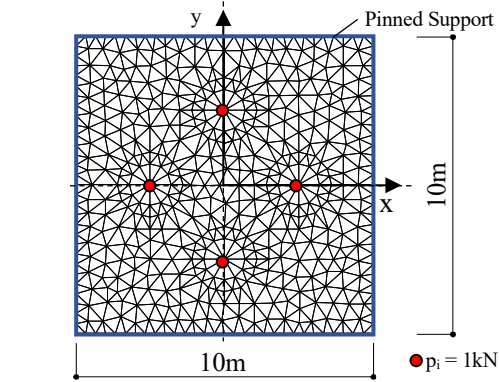
1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大理工・上席研究員 3 : 日大理工・院(前)・建築

ここで、Vの算出の際、束を中心に応力分布が対称な場合、最適解でなくともVの大きさが0となることがある。これを防ぐため、Grasshopperのrandomコンポーネントを利用して、要素数に「採用率d (≤1)」を乗じた個数分のV_iを無作為に抽出して足し合わせ、「学習率η (>0)」を乗じてVを求めた。このVだけ各束を移動させた新たな配置でも同様の検討を行い、Vの大きさが制約値V_{lim}を下回るまで検討を繰り返す。また、収束性を向上させるため、束位置の移動前後のσ_{max}を比較し、減少した場合は次のステップに移り、増加した場合は束位置を前回の位置に戻し、「学習率η」に「冷却率c」を乗じたうえで次のステップに移ることとした。

3. 数値解析例

本手法で得られる解の妥当性の検証を目的として、数値解析を行った。Fig.2に最適化の概要を示す。平板はコンクリートを想定した10m四方とした。束は4本とし、初期配置はxy軸上を4分割した位置とした。なお、束配置は架構中央を起点とした4方向回転対称となるように制限を設けた。境界条件は4辺ピン支持とした。固定荷重は全面等分布荷重W=1kN/m²とし、束突上力は上向き単位節点荷重P_{0,i}=1kNとした。収束計算における学習率ηは10とし、収束判定となるV_{lim}は0.005とした。パラメータは採用率dと冷却率cの組み合わせd/c=1.0/1.0, 0.9/1.0, 0.9/0.9の3ケースとした。

最適化後の平板上面のミーゼス応力図をFig.3に示す。なお、束を未配置の場合のσ_{max}は5.80N/mm²である。



【Numerical Analysis Specifications】

Structural specification	
Young's Modulus	: 2.27 × 10 ⁴ N/mm ²
Poisson's Ratio	: 0.2
Thickness	: t=100 mm
Load Condition	
Distributed Load	: W=1 kN/m ²
Concentrated Load	: P _{0,i} =1 kN (z direction)
Outline of Optimization	
η = 10, V _{lim} = 0.005	
Parameter	
d/c = 1.0/1.0, 0.9/1.0, 0.9/0.9 / N = 4, 5, 9	

Figure 2. Optimization Overview

Fig.3より、全ケースでσ_{max}が低減された。d/c= 1.0/1.0では束の移動量が小さく、束はXY軸上に位置している。これに対して、d/c=0.9/1.0および0.9/0.9では束位置は平板対角上に移動し、σ_{max}も減少した。以上より、本検討においては、採用率dを1未満とすることで最適解へと近づくことが示唆された。また、d/c=0.9/1.0に比べ、d/c=0.9/0.9の方がP₁が若干大きくなったものの、σ_{max}と計算試行回数が抑えられたため、冷却率cにより収束性が向上することが示された。

次に、束本数Nが5本と9本 (d/c=0.9/0.9) を対象として数値解析を行った。初期形状と最適化後の平板上面のミーゼス応力図をFig.4に示す。束の本数が多いほどσ_{max}が小さく、束の突上力も小さくなっているため、束本数によらず、本手法が適用可能であると考えられる。

4. まとめ

本報では、ハイブリッド平板構造を対象として、束位置と突上力の最適化手法を提案した。束の移動ベクトルの算出時に採用率dを1未満とすることで最適解へと近づき、冷却率cにより収束性が向上することを確認した。また、束本数をパラメータとした検討で束本数によらず本手法が適用できることが示唆された。

5. 参考文献

[1] 小針匠, 他: 「グランドストラクチャ法によるハイブリッド・ケーブル構造の位相最適化 (その1) ケーブル張力を変数にした最適化手法の提案」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.911-912, 2022.07

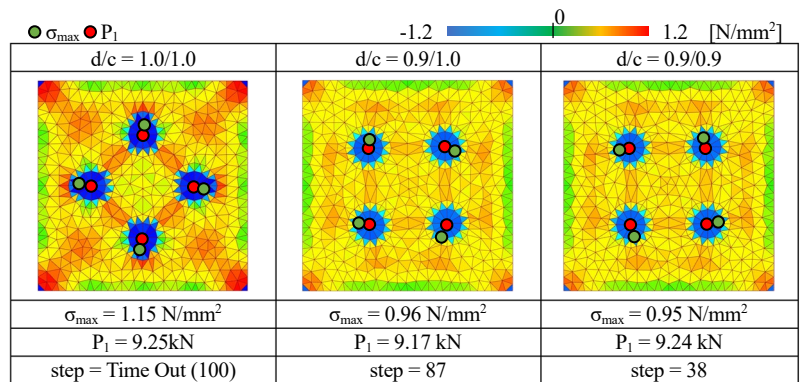


Figure 3. Stress Diagram at d/c

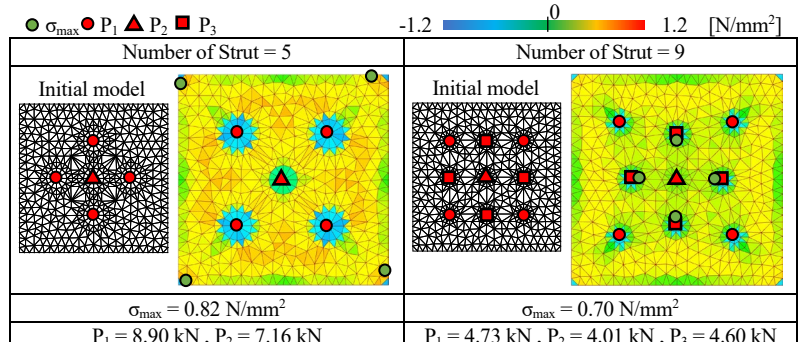


Figure 4. Stress Diagram at number of strut