

構造用ケーブルの素線応力に関する数値解析的研究  
Numerical Study on Stresses of Wire in Structural Cables

○鮎沢康太<sup>3</sup>, 宮里直也<sup>1</sup>, 廣石秀造<sup>1</sup>, 鴛海昂<sup>1</sup>, 岡田章<sup>2</sup>  
\*Kota Ayusawa<sup>3</sup>, Naoya Miyasato<sup>1</sup>, Shuzo Hiroishi<sup>1</sup>, Akira Oshiumi<sup>1</sup>, Akira Okada<sup>2</sup>

Abstract: Cables in cable structures are generally designed using an allowable tensile force based on the breaking load. However, the basis for this safety factor is unclear and relies on simple tensile tests of straight cables. The purpose of this report is to understand the stress state of the wires in the cable and to accumulate data for setting the allowable tensile force. Specifically, in this report, the authors construct a detailed cable model that takes into account the wire configuration, and perform simple tensile analysis and local bending analysis. Furthermore, the authors will verify the validity of the numerical analysis by comparing it with a simple tensile test, and attempt to understand the stress of wires in simple tension and local bending.

1. はじめに

ケーブル構造におけるケーブルの設計は、一般に破断荷重を基準とした許容引張力を用いて検討する。この許容引張力の設定の際には、ケーブルの破断荷重に対する安全率が用いられている。一方、ケーブルは素線をより合わせて構成されているが、素線の応力状態の詳細は把握されておらず、また、ケーブルが局部的に曲げられた時の素線の応力状態は単純引張とは異なると想定される。

以上のことから、本報ではケーブルを構成する素線の応力状態の把握、および許容引張力の設定に対するデータの蓄積を目的とする。具体的には、素線構成を表現したケーブルの解析モデルを構築し、単純引張の数値解析および局部曲げの数値解析を行う。さらに単純引張試験との比較により数値解析の妥当性を検証すると共に、単純引張および局部曲げの素線の応力状態の把握を試みる。

2. 数値解析概要

検討モデルをFig.1, 数値解析概要をTable 1に示す。検討モデルは、素線(wire)を3D-Solid要素で構成した精密モデルであり、素線相互および金具との接触を考慮している。検討対象は、構造用スパイラルロープ(1×19), φ16(素線径φ3.2)とした。検討モデルの素線間の間隙は0.01mmと限りなく少なくし、プレストレッチング処理直後のケーブルを模擬した。また、心線(中央の素線)の長さを160mmとし、最外層の素線のより長さ(一周するのに要する材軸方向の長さ)は10D(160mm)とした。また、金具とケーブル端末部は剛体とした。金具の長さは10mm, 溝形状はケーブルと溝が接触する角度を120°と設定し、摩擦係数μ=0.15とした。

素線の材料諸元はST1570を想定し、弾性係数E=2.05×

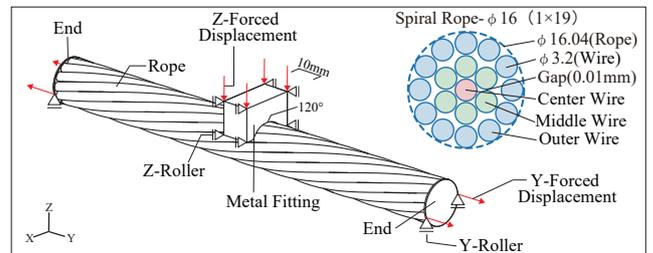


Figure 1. Outline of Analysis Model  
Table 1 Outline of Numerical Analysis

|  | Wire                 | End                                | Metal Fittings |
|--|----------------------|------------------------------------|----------------|
| Modulus of Elasticity [N/mm <sup>2</sup> ] | 2.05×10 <sup>5</sup> | ∞                                  | ∞              |
| Poisson Ratio                              | 0.3                  | —                                  | —              |
| Friction Coefficient                       | 0.15                 | —                                  | 0.15           |
| Boundary Condition                         | Free                 | Y-Roller and Y-Forced Displacement | Top:Z-Roller   |

| Stress-Strain Curve of Wire  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>--- Elastic Modulus</li> <li>— Stress-Strain Curve [1570]</li> <li>— Stress-Strain Curve [1810]</li> <li>Standard Breaking Stress Range</li> <li>Standard Yield Stress Range</li> </ul> |  |

|  |  |
|--|--|
| Initial Tensile Force T <sub>0</sub> [%] | 33(73.92kN)<br>(Percentage of Breaking Load)         |
| Metal Fitting Deformation[%]             | δ-5(8mm), δ-10(16mm)<br>(Percentage of Model length) |

10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>, ポアソン比0.3, 摩擦係数μ=0.15のトリリニアでモデル化した。単純引張の数値解析ではST1570の引張強さの下限值(1570N/mm<sup>2</sup>)と上限値(1810N/mm<sup>2</sup>), ひずみ0.02を第2折れ点とする2ケースを設定した。なお、引張強さ以降の応力勾配は限りなく0とし、破断による耐力低下は起こらないものとした。局部曲げの数値解析では、素線の引張強さを1570N/mm<sup>2</sup>とした。また、第1折れ点とする降伏応力度は既報<sup>[2]</sup>の結果より破断応力度の2/3とした。

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

ケーブル両端末部は、Fig.1に示すケーブルの中央2点をローラー支持とし、ケーブル軸方向へ強制変位させることにより張力導入を行った。また、金具はZ方向ローラー支持とし、金具をZ方向下向きに強制変位させることにより、ケーブルに局部曲げを与えた。

単純引張の数値解析では、心線の材軸方向のひずみが0.05になるまで張力を導入した。また、局部曲げの数値解析では、初期張力として規格破断荷重の33% (73.92kN)を導入後、金具を強制変位させケーブルに局部曲げを与えた後、心線の材軸方向のひずみが0.05になるまで再度張力を追加導入した。変位量はケーブル長の5%と10%(以下「 $\delta-5$ 」, 「 $\delta-10$ 」と示す)の2ケースとした。なお、数値解析は汎用解析プログラムADINA (ver.9.8)を用いた。

### 3. 数値解析結果

#### 3-1. 単純引張の数値解析結果

単純引張解析の応力度( $\sigma_1$ )-ひずみ曲線および軸力-ひずみ曲線を、既報<sup>[2]</sup>の実験結果と併せてFig.2に示す。なお、 $\sigma_1$ はケーブル全体の軸力を公称断面積で除した値である。Fig.2より、 $\sigma_1$ は既報<sup>[2]</sup>の実験値と概ね同様の傾向を示しており、特に引張強さ1810N/mm<sup>2</sup>のケースは、降伏応力度および破断応力度が実験値と近似した性状を示した。また、軸力は、引張強さ1570N/mm<sup>2</sup>, 1810N/mm<sup>2</sup>の両ケース共、規格降伏荷重および規格破断荷重を概ね満足していることを確認した。以上より、提案した解析モデルは妥当性を有していると考えられる。

降伏軸力(149.3kN)時の単純引張時の各位置(端部, 四半部, 中央部)の最大主応力図( $\sigma_2$ )をFig.3に示す。単純引張時に心線の応力負担割合は比較的大きいことが示されている。また、素線同士の接触により、外線および中線における素線内の応力が小さくなることを把握した。

#### 3-2. 局部曲げによる応力の変化と降伏点への影響

局部曲げの数値解析で得られた応力度( $\sigma_1$ )-ひずみ曲線および軸力-ひずみ曲線をFig.4に示す。なお、図中の $\Delta$ 印は初期張力導入終了時点,  $\circ$ 印は局部曲げ終了時点を示す。Fig.4より、 $\delta-5$ では局部曲げ終了時に単純引張の応力に達しており、また張力導入により単純引張より剛性低下が顕著に表れた。一方で、 $\delta-10$ では局部曲げの载荷中に降伏応力度に達しており、追加張力導入前は単純引張より応力が大きくなることを確認した。また、ひずみ0.05時の応力および軸力は、局部曲げを与えた場合の方が小さいものの、その差は小さいことを確認した。

$\delta-5$ における降伏軸力(149.3kN)時の各位置(端部, 四半部, 中央部)の最大主応力図( $\sigma_2$ )をFig.5に示す。ケー

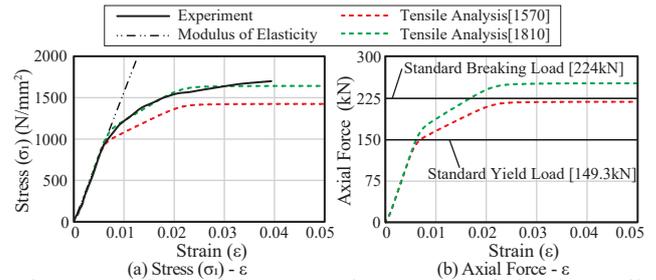


Figure 2. Cable Axial Force and Stress -  $\sigma_1$  of Simple Tensile

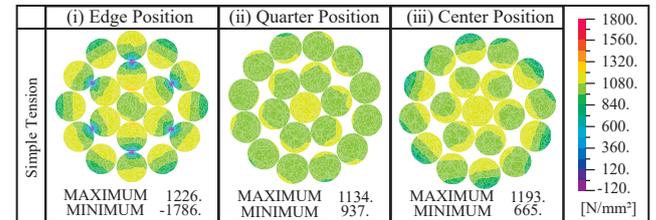


Figure 3. Stress Diagram at Yield Axial Force of Tensile Analysis[1570]

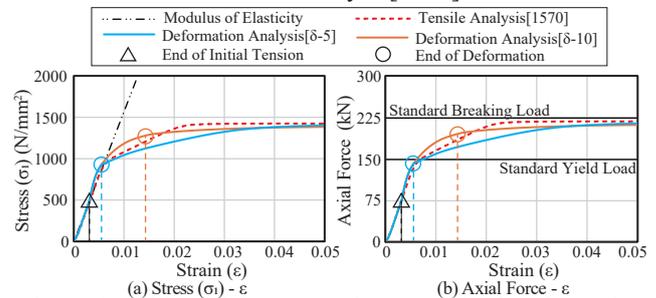


Figure 4. Cable Axial Force and Stress ( $\sigma_1$ ) of Deformation

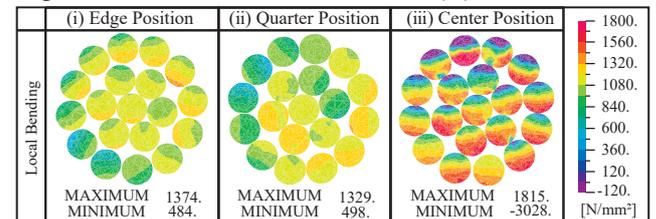


Figure 5. Stress Diagram at Yield Axial Force of Deformation Analysis[ $\delta-5$ ]

ブル中央部(金具接触部)は、局部的に応力が增大している。しかし、Fig.4より、ケーブル軸力の降伏応力度は単純引張時と比べて大きな変化がないことから、局部変形により応力の増大が発生する場合においても降伏応力度の低下はなく、安全率の割り増し等の必要性は低いと考えられる。

### 3. まとめ

本報では、ケーブルの素線をモデル化した解析モデルの妥当性を検証すると共に、ケーブルに局部曲げが発生した際の降伏応力度への影響に関して数値解析を用いて検討を行い、その性状を把握した。

### 4. 参考文献

- [1]日本建築学会：「ケーブル構造設計指針・同解説」, pp.140-143, 2019.12
- [2]中島肇,他：「構造用ケーブルの応力-ひずみ関係に関する実験的研究」, 日本建築学会技術報告集, 第24巻,第56号, pp.105-110, 2018.2