

トラス軸力線構造系によるテンセグリティ構造の形態解析

佐賀大学大学院 学生員○坂井孝成

佐賀大学 正会員 帯屋洋之

佐賀大学大学院 非会員 石橋靖亨

佐賀大学 正会員 井嶋克志

1. はじめに

テンセグリティ構造とは、tensile（張力）と integrity（完全無欠）を合成した造語で、圧縮力と引張力の均整な配置によって安定化する自己釣合系である。この構造系に対して、仮想剛性要素を用いた形態解析を行おうとすれば、静定な支点条件下では自己安定するために反力がなくなり、剛性マトリクスが特異となることによって計算不安定になることがあるという特徴を持つ。

本研究では、テンセグリティ構造に対し、様々な支点条件、荷重条件での形態解析を実施し、自己釣合でない場合も含めた広義のテンセグリティ構造の力学的特性を明らかにする。

2. 解析手法

圧縮材をトラス要素、引張材を仮要素である軸力線モデルとした構造系において、トラス要素により部材長を規定し、軸力線要素長を接線剛性法による幾何学的非線形解析によって計算することにより、釣合位置を決定する形態解析のアルゴリズムを採用した。接線剛性法とは、厳密な定式化の不可能な非線形剛性方程式を用いる必要がなく、接線剛性方程式、厳密な適合条件式、要素端力式および、平衡条件式で構成された反復ループにより、不平衡力を収束させる手法である。本研究で用いる軸力線要素の定義について述べる。今、節点1と節点2を結ぶ線材要素の要素ポテンシャルが線長 l のべき乗に比例するとし、この比例定数を要素端力係数 C として定義すれば、要素ポテンシャルを要素端力方向の寸法である線長で1階微分すれば、軸方向の要素端力が得られることになる。例えば、

$$P = Cl^n \quad (n: \text{要素力乗数}, C: \text{要素力係数}) \quad (3)$$

となり、この要素の要素力は、

$$N = \frac{\partial P}{\partial l} = nCl^{n-1} \quad (4)$$

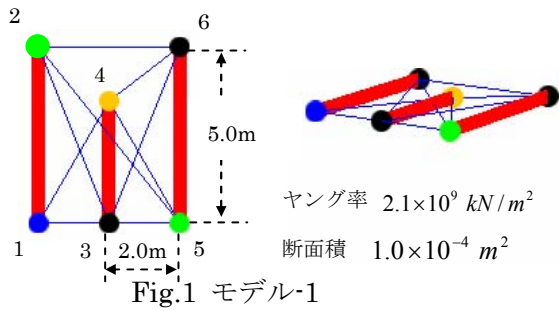
のように、要素力式が得られる。節点力ベクトルを $\mathbf{U}$ とし、軸力線要素の接線剛性方程式を以下のように得る。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha \\ \alpha \end{bmatrix} N, \quad \delta \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_T^L \delta \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad (\alpha: \text{方向余弦ベクトル}) \quad (5), (6)$$

$$\mathbf{K}_T^L = nCl^{n-2} \begin{bmatrix} \mathbf{e} + (n-2)\alpha\alpha^T & -\mathbf{e} - (n-2)\alpha\alpha^T \\ -\mathbf{e} - (n-2)\alpha\alpha^T & \mathbf{e} + (n-2)\alpha\alpha^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. 解析結果

- (1) Fig.1 に示した通り、節点数 6、要素数 12（圧縮要素 3、引張要素 9）の構造系に、はじめ 1、4、5 番節点に静定な拘束条件を与え解析を行った。軸力線要素の要素力係数 C の値は 5.0×10^{-6} と 1.0×10^{-6} とし、要素力乗数 n を 3 とする。解析の結果、不平衡力は収束したが、その過程は不安定なもので、解の形状も同一平面上に要素が配置され、テンセグリティ構造を成し得なかった。そこで、不静定次数を増やし、再び解析を行った。解析の結果、解は安定して収束したが、やはり同一平面に要素が配置された。そこで、2、5 番節点に自重をかけ、再び解析を行った。解析の結果、Fig.2 のような解形状を得ることができた。



● 完全固定 ● 一方向固定 ● 面内二方向固定
支点条件

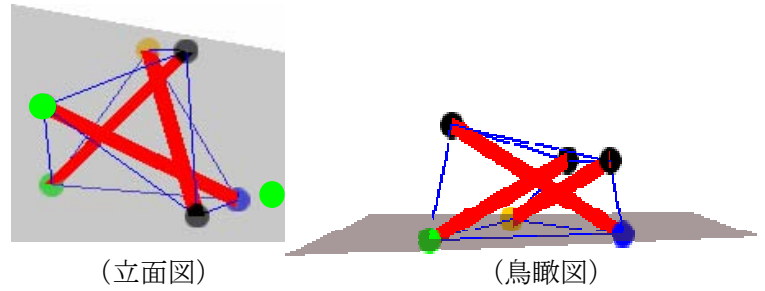


Fig.2 モデル-1 の決定形状

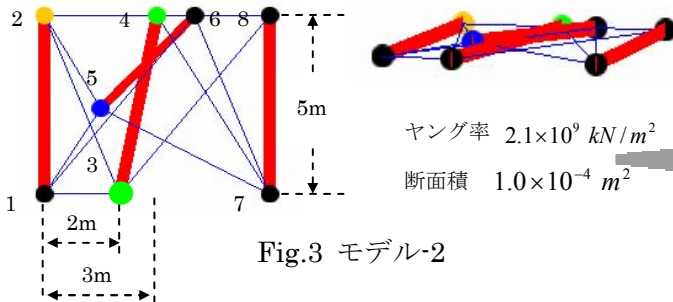


Fig.4 モデル-2 の決定形状

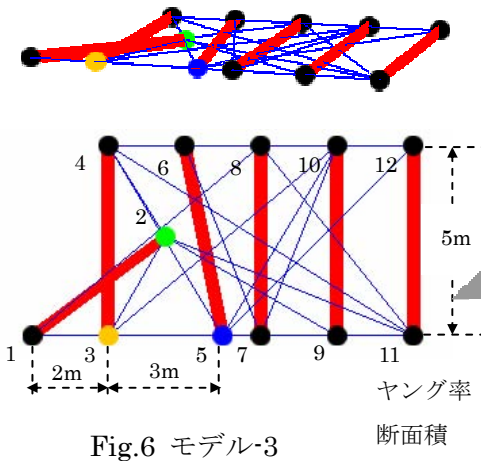


Fig.7 モデル-3 の決定形状

- (2) Fig.4 に示した通り、節点数 8、要素数 16 (圧縮要素 4、張力要素 12) の構造系の 2、4、5 番節点で正三角形を構成し、不静定な拘束条件を与え解析を行った。軸力線要素 (張力要素) の要素力係数 C の値を 1.0×10^{-6} とし、要素力乗数 n を 3 とする。4 番節点に自重を载荷したところ、解は安定に収束し、Fig.5 の形状を得ることができた。
- (3) Fig.6 に示した通り、節点数 12、要素数 30 (圧縮要素 6、張力要素 24) の構造系の 2、3、4、5 番節点で不静定な拘束条件を与え、2 番節点に自重をかけることにより解析を行った。軸力線要素 (張力要素) の要素力係数 C の値を 2.0×10^{-6} とし、要素力乗数 n を 3 とする。解析結果として、Fig.7 が得られた。

4. まとめ

本研究では、テンセグリティ構造の計画・設計のプロセスで不可欠な形状決定に接線剛性法を用い、線長関数軸力線要素とトラス要素の組み合わせたモデルにより、形態解析を行った。初期形状の設定で、静定な拘束条件を与えても有意義な解が得られないため、不静定次数を増やし、自重を载荷させたところ、様々なテンセグリティ構造の釣合形状が得ることができた。