

大規模テンセグリティ構造の形態解析

佐賀大学大学院 学生会員○石橋靖亨

佐賀大学 正会員 帯屋洋之

佐賀大学 正会員 井嶋克志

前田建設工業株式会社 正会員 坂井孝成

1.はじめに

テンセグリティ構造 (tensile と integrity を合成した造語) は、ケーブルなどの引張材の中にちょうど圧縮材が浮いているような部材構成により、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。この構造系の初期釣合形状を求める形態解析を行なう際には、軸力線要素とトラス要素または剛棒要素を組み合わせる用いるのが合理的である。本研究では、多数の軸力線要素とトラス要素を複雑に組み合わせ、これに高次不穩定の場合も含めた様々な支点条件を付与し、要素自重などの荷重条件下での形態解析を行なった。その結果得られた釣合形状は、自己釣合でない場合もあるが、これらを広義のテンセグリティ釣合系と定義して、新たなカタチの創造を試みた。

2.解析手法

圧縮材をトラス要素、引張材を軸力線要素モデルとした仮要素と実要素の複合構造系に対して、接線剛性法による幾何学的非線形解析を行うことにより、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。これにより、硬いトラス要素で圧縮材の要素長を制御できるため、圧縮材の寸法を入力条件とする形態解析が可能となった。以下に、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。

$$P = Cl^n \quad (n: \text{要素力次数}) \quad (1)$$

となり、この要素力は、

$$N = \frac{\partial P}{\partial l} = nCl^{n-1} \quad (2)$$

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。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{a} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} N \quad \delta \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \mathbf{K}_T^L \delta \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3), (4)$$

$\mathbf{a}$: 方向余弦ベクトル

$$\mathbf{K}_T^L = nCl^{n-2} \begin{bmatrix} \mathbf{e} + (n-2)\mathbf{a}\mathbf{a}^T & -\mathbf{e} - (n-2)\mathbf{a}\mathbf{a}^T \\ -\mathbf{e} - (n-2)\mathbf{a}\mathbf{a}^T & \mathbf{e} + (n-2)\mathbf{a}\mathbf{a}^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\mathbf{e}$: 3×3 の単位ベクトル

3.数値計算例

Fig.1 のようにトラスを同一平面内に並べたものを基本初期形状として、解析例ごとにこの基本系に拘束条件や荷重条件を追加し形態解析を行う。トラス要素長を H 、トラスの要素数を m 、節点数を s とするが、トラス要素間の初期位置は任意に定めても得られる決定形状に影響はない。トラス要素はヤング率を $2.1 \times 10^8 (\text{kN/m}^2)$ 断面積を $2.0 \times 10^{-2} (\text{m}^2)$ として計算した。

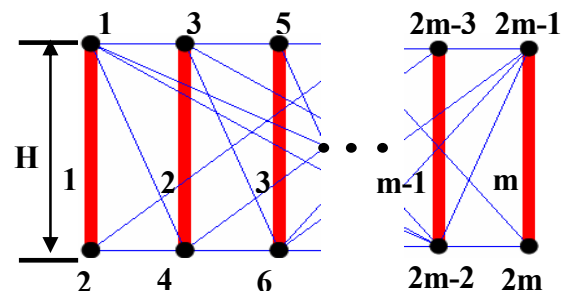


Fig.1 初期形状の基本系

キーワード テンセグリティ構造、軸力線要素、形態解析

連絡先 〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地 国立法人佐賀大学 工学系研究科都市工学専攻

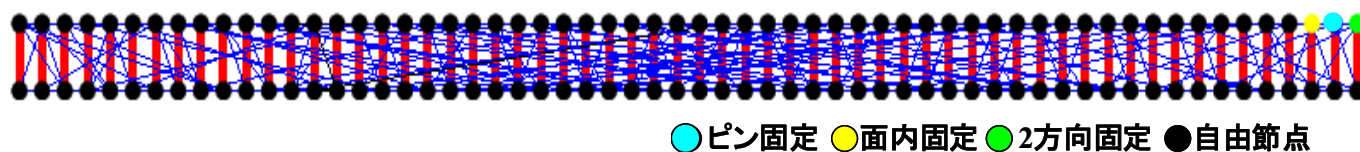


Fig.2 球状の大型テンセグリティの初期形状

(1) 計算例1：球状の大型テンセグリティ

Fig.2のように $m=60, s=24, H=5m$ の初期形状の115番節点を面内固定、117番節点をピン固定、119番節点を2方向固定とし、節点自重 $1.0 \times 10^6 (kN)$ を載荷させ、要素力係数を 1.0×10^2 、要素力次数を3として解析を行った。Fig.3は反復計算の後に得られた解の形状であり、静定な支点条件であるにも関わらず、幾何学的にバランスのとれた均整な要素配置の大規模なテンセグリティ釣合系の形状を得ることができた。

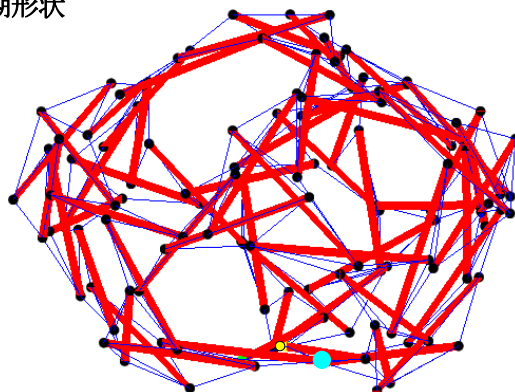


Fig.3 球状の大型テンセグリティの決定形状

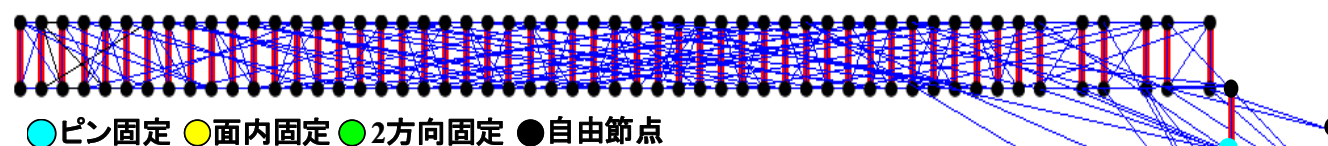


Fig.4 ドーム状のテンセグリティの初期形状



Fig.5 ドーム状の大型テンセグリティの決定形状

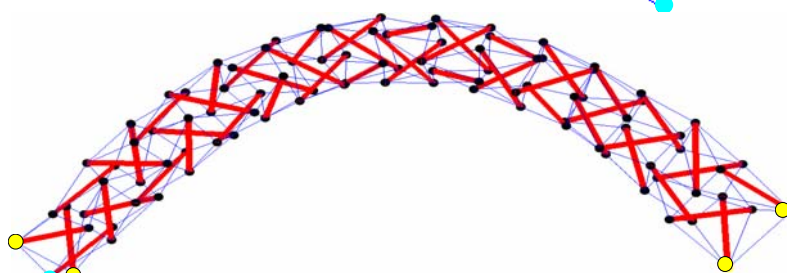


Fig.6 アーチ状の大型テンセグリティの決定形状

(2) 計算例2：ドーム状の大型テンセグリティ

Fig.4のように $m=57, s=222, H=5m$ の初期形状に図中に示したように3つの節点をピン固定とする支点条件を与え、要素力係数を 1.0×10^2 、要素力次数を3として、節点自重 $1.0 \times 10^6 (kN)$ を載荷させて解析を行った。Fig.5は釣合形状であり、拘束を与えた支点から構造全体が浮き上がったドーム状のテンセグリティ釣合系となった。

(3) 計算例3：アーチ状の大型テンセグリティ

$m=48, s=144, H=6m$ の初期形状の要素力係数を -1.0×10^6 、要素力次数を3として、節点自重 $7.0 \times 10^6 (kN)$ を載荷させて解析を行った結果、Fig.6のような釣合形状を得ることができた。支点条件は図中に示したとおりである。負の軸力線係数を与えることによって、トラス要素が引張材、軸力線要素が圧縮材と通常のテンセグリティとは逆転した釣合系となる。しかしながら、形状決定後、軸力線要素もトラス材に置換することを前提とすれば、立体トラスドアーチの初期釣合形状として用いることが出来る。

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を、軸力線要素とトラス要素を組み合わせたモデルにより、様々な支点条件下、荷重条件下で、大規模テンセグリティ構造の釣合形状を得ることができた。なお講演当日は、圧縮材を剛棒要素に置換した釣合系についても発表する予定である。