

滑節点を用いたケーブルの接触大変位解析による あやとりシミュレーション

佐賀大学大学院 学生会員 日高 功裕

青木あすなろ建設株式会社 非会員 村山 緑

佐賀大学大学院 正会員 帯屋 洋之

佐賀大学大学院 正会員 井嶋 克志

1.研究背景および目的

曲げと圧縮軸力が作用しないケーブル構造の解析手法としては、これまでもカタナリーの平衡解を用いたものや有限要素法によるものなどが提案されており、既に多くの研究が発表されている。しかし、幾何学的非線形問題と接触問題を同時に取り扱う必要がある場合には、接触および接触解除の判定、接触に伴った滑節点の生成、要素間すべりなどを総合的に評価できる合理的なアルゴリズムの開発が必要となる。そこで、本研究ではケーブル要素間の接触を伴う幾何学的非線形解析のために開発した、中間滑節点を有する要素を用いて、接触と滑りを伴う非常に複雑な手続を要するあやとりの過程をシミュレーションすることにより、その適用範囲、ロバスト性などについて検討する。

2.解析手法

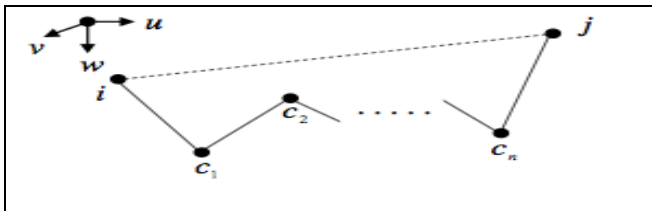


図-1 無摩擦接触点を考慮した三次元軸力部材

複数の滑節点を有する三次元軸力要素の接線剛性方程式を用いて、接線剛性法による幾何学的非線形解析を行う。図-1のように、要素両端の節点を i, j 、要素が有する無摩擦接触点を $c_1 \sim c_n$ とすると、節点力ベクトル $\mathbf{U}$ と平衡条件ベクトル $\mathbf{S}$ はそれぞれ、

$$\mathbf{U}_{icj} = \begin{bmatrix} U_i \\ U_{c_1} \\ U_{c_2} \\ \vdots \\ U_{c_{n-1}} \\ U_{c_n} \\ U_j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{icj} = \begin{bmatrix} -\alpha_{ic_1} \\ \alpha_{c_1c_2} - \alpha_{c_2c_3} \\ \alpha_{c_2c_3} - \alpha_{c_3c_4} \\ \vdots \\ \alpha_{c_{n-2}c_{n-1}} - \alpha_{c_{n-1}c_n} \\ \alpha_{c_{n-1}c_n} - \alpha_{c_nj} \\ \alpha_{c_nj} \end{bmatrix} \quad (1),(2)$$

と表すことができる。無摩擦接触であることから節点間 $i c_1, c_1 c_2, c_2 c_3, \dots, c_{(n-1)} c_n, c_n j$ それぞれの軸ひずみは一定であるため、軸力を N とすると、

$$\mathbf{U}_{icj} = \mathbf{S}_{icj} N \quad (3)$$

と表すことができる。接線剛性方程式は式(3)を微分したものであるので、

$$\delta \mathbf{U}_{icj} = \delta \mathbf{S}_{icj} N + \mathbf{S}_{icj} \delta N = (K_0 + K_G) \delta d \quad (4)$$

と表すことができ、節点変位ベクトル δd の一次関数として表現できる。このとき、 K_0 は要素固有の剛性に起因する要素剛性マトリックスであり、 K_G は剛体変位に起因する接線幾何剛性である。また、本研究では非抗圧縮性を考慮するため双曲線近似剛性を用いている。接触判定は、部材間ですり抜けが発生したときに、接触が起こったものとみなし、すり抜けは内積とスカラー三重積を用いて判定を行う。接触が発生したら新たに滑節点を生成し、再度接線剛性法を用いて接触後の釣合位置を定める。

3.解析結果及び考察

解析条件はすべての解析例で、要素断面積: $1.0 \times 10^{-4} [\text{cm}^2]$ 、引張剛性: $3.0 [\text{GPa}]$ 、圧縮剛性: $1.0 \times 10^{-9} [\text{GPa}]$ とする。

(1)解析例1: 図-2のように、各節点間の長さ $\sqrt{2} [\text{cm}]$ の間隔でフェンス状に編まれた軸力要素の赤いドットで示す点で接触が起こっている。青いドットを固定節点、赤いドットを自由節点という支点条件のもと、黄色でマークしている節点と緑色でマークしている節点に対して矢印で示す方向に $5 [\text{cm}]$ の強制変位を一度に与える。図-3に釣合形状、図-4に最大不平衡力の収束過程を示している。最大不平衡力は7回の反復計算での収束が確認でき、一度に大きな変位を与えても安定した計算過程により釣合解を得ることができる。

キーワード: 接触、幾何学的非線形、有限要素法、接線剛性法、非抗圧縮性、双曲線近似剛性

連絡先: 佐賀県佐賀市本庄町 1

電話番号: 090-3666-2385

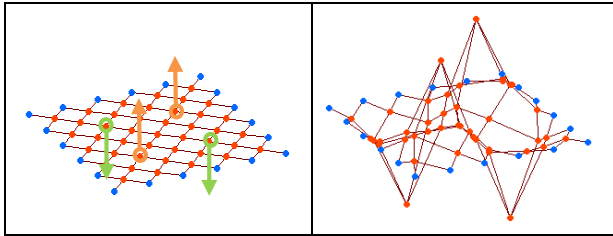


図-2 初期形状

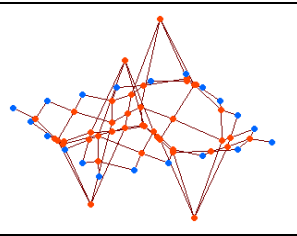


図-3 釣合形状

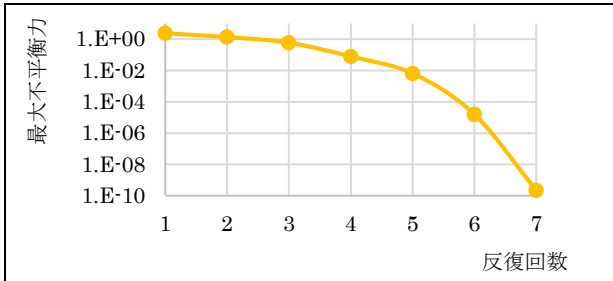


図-4 反復回数

(2)解析例 2: 図-5-[A]のように1本の要素に節点1、2、3、4、5の中間節点を設け、また節点2、3には点I、IIとの間にそれぞれバネをつけて解析を行うことで、あやとりの基本的な操作をシミュレーションする。このときの変形の推移を図-5に示す。強制変位の手順は、図-5-[A]の節点4に対して、最初に鉛直上向きに1ステップあたり0.5[cm]の強制変位を2ステップ与え解析を行う(A)。次に、水平方向に1ステップあたり0.5[cm]の強制変位を21ステップ与え解析を行う(B,C)。さらに、鉛直下向きに1ステップあたり0.3[cm]の強制変位を5ステップ与え解析を行う(D)。このとき、節点間1-2と節点間3-4および節点1-2と節点4-5でそれぞれ部材のすり抜けが起こり、接触を確認するため、新たに接触点である滑節点が生成される。ここで、図-5-[D]の節点間6-7の中間に新しく滑節点8を設ける(E)。節点8に対して、水平方向に1ステップあたり0.4[cm]の強制変位を13ステップ与え解析を行う(F,G)。さらに、節点8に対して、鉛直上向きに1ステップあたり0.5[cm]の強制変位を17ステップ与え解析を行う(H,I)。すべての段階で、不平衡力収束に至るまで反復計算の回数は、3~10回で接触点生成後の挙動も安定した計算結果で追跡でき、精度よくシミュレーションすることができた。

4.まとめ

滑節点を有するケーブル要素を使用すれば、複数の滑節点を持つ要素の場合でも陽な形で幾何剛性を表現でき、安定した収束過程により厳密な釣合解を得ることが出来る。数値計算結果をみると、一度に非常

に大きな強制変位を与えた場合でも確実に収束し、一つの要素に多数の滑節点を有する場合でも安定した計算過程のもとに釣合解を得ることが分かった。また、あやとりシミュレーションのように一要素内で接触判定、接触に伴った節点の生成、滑り挙動などが複雑に組み合わさったものでも安定した計算結果を得ることができ、実際のあやとりの過程に整合する挙動の追跡が可能であることが分かった。

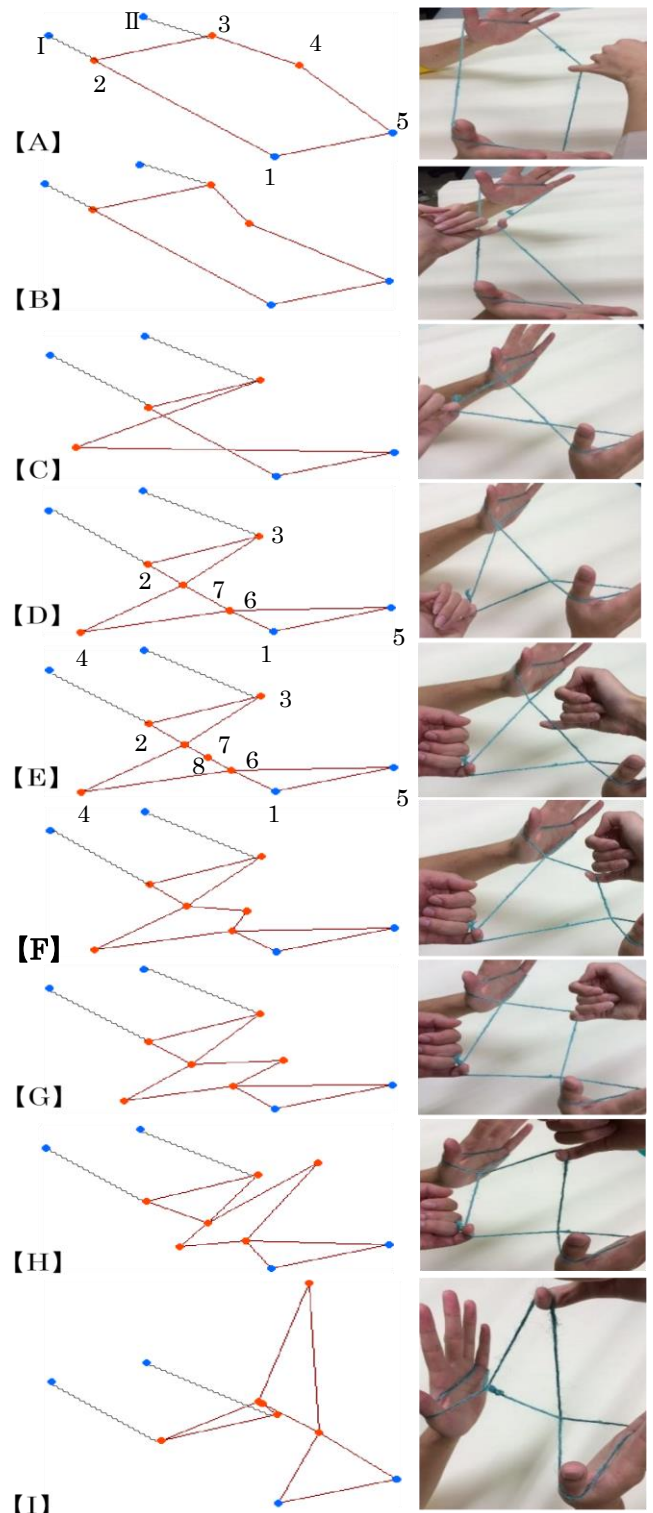


図-5 変形の推移