

ケーブル間の無摩擦接触を考慮した幾何学的非線形解析

佐賀大学大学院 学生会員 村山 緑
 正会員 帯屋 洋之
 正会員 井嶋 克志
 正会員 川崎 徳明
 学生会員 Z.M. Nizam

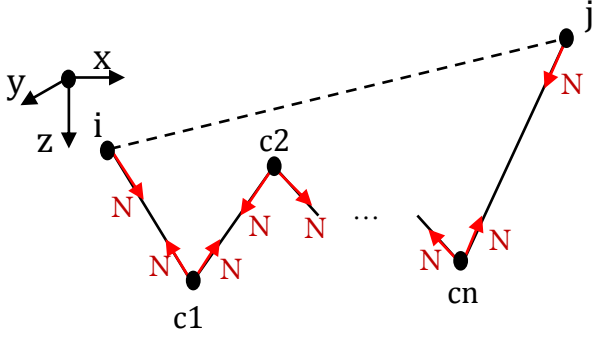
1. 研究目的

幾何学的非線形を伴う接触問題では、接触および接触解除の判定、接触に伴った節点の生成、要素間すべり、などを考慮する必要があり、これらを総合的に評価できる解析法の開発が求められている。本研究では、非抗圧縮性を考慮した三次元ケーブルの要素間の無摩擦接触に注目して、アルゴリズムの開発を試みた。これにより、多くの接触点を有するむすび目のないネットの様な構造系の変形挙動もシミュレーションできるようになる。

2. 解析手順

接線剛性法による幾何学的非線形解析アルゴリズムにおいて、無摩擦接触点を複数有する三次元軸力部材の接線剛性方程式を用いて解析を行う。また、ケーブル要素は引張には抵抗するが、圧縮にはほとんど抵抗しないため、本研究では、双曲線近似の剛性を用いて、非抗圧縮性を考慮している。接触に関しては、内積とスカラー三重積を用いて、要素間でのすり抜けの有無を判定し、すり抜けが発生すればそこに接触点を生成する。また、接触点における接触力の符号が反転したら部材間の接触は解除される。

ここに、無摩擦接触点を有する三次元軸力部材の接線剛性方程式を示す。まず、要素両端の節点を ij 、要素が有する無摩擦接触点を $c1 \sim cn$ 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、

$$\mathbf{U}_{icj} = \begin{bmatrix} U_i \\ U_{c1} \\ U_{c2} \\ \vdots \\ U_{c(n-1)} \\ U_{cn} \\ U_j \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_{icj} = \begin{bmatrix} -\alpha_{ic1} \\ -\beta_{ic1} \\ -\gamma_{ic1} \\ \alpha_{ic1} - \alpha_{c1c2} \\ \beta_{ic1} - \beta_{c1c2} \\ \gamma_{ic1} - \gamma_{c1c2} \\ \vdots \\ \alpha_{c(n-1)cn} - \alpha_{cnj} \\ \beta_{c(n-1)cn} - \beta_{cnj} \\ \gamma_{c(n-1)cn} - \gamma_{cnj} \\ \alpha_{cnj} \\ \beta_{cnj} \\ \gamma_{cnj} \end{bmatrix}$$


と表すことが出来る。無摩擦接触であることから、部材 $i-c1$ 、 $c1-c2$ 、 $\dots c(n-1)-cn$ 、 $cn-j$ それぞれに働く軸力は等しいため、この軸力を N とすると、

$$\mathbf{U}_{icj} = \mathbf{S}_{icj} \cdot N$$

と表すことができ、接線剛性方程式は、

$$\delta \mathbf{U}_{icj} = \delta \mathbf{S}_{icj} \cdot N + \mathbf{S}_{icj} \cdot \delta N$$

と表すことが出来る。

3. 解析結果及び考察

解析例 1：図-1 のケーブル A の両端の節点に鉛直下向きに、1 ステップあたり 0.3(m) の強制変位を与え、接触が確認されれば新たに滑節点を生成し、10 ステップまで解析を行った。図-2 にそのときの変形の推移を示す。接触が確認され、接触点が生成されたのち、強制変位に伴って接触点が部材 B を滑っている様子が得られた。

解析例 2：このモデルでは接触点における接触力の符号が反転すれば、接触を解除する処理も行っている。図-3 のようにケーブル A、B の両端の節点に矢印方向に 1 ステップあたり 0.3(m) の強制変位を与え、15 ステップまで解析を行った。さらに、ケーブル C、D と接触した後にケーブル B に鉛直上向きに 1 ステップあたり 0.3(m) の強制変位を与え、10 ステップまで解析を行った。

【2-1】：ケーブル A がケーブル C、D をすり抜け、接触が発生。無摩擦接触点を生成。【2-2】：引き続き強制変位を与える。続いて、ケーブル B に強制変位を与える。【2-3】ケーブル B がケーブル C、D をすり抜け、接触が発生。無摩擦接触点を生成。【2-4】引き続き強制変位を与える。続いて、ケーブル B に強制変位を与える。【2-5】ケーブル B とケーブル D の接触点反力の符号が反転し、接触を解除。無摩擦接触点を消去。【2-7】引き続き強制変位を与える。結び目のないネット状の構造であるため、【2-5】のように接触をする方向で解除される接触点と解除されない接触点がある。

解析例 3：図-5 は、接触解除の設定を外した(接触力の向きは反転しても接触が解除されない)モデルである。図-5 の要素両端の節点(青くマークした節点)をピン固定、その他の節点(赤くマークした節点)を無摩擦接触点としている。図-5 の固定点のうち、丸印でマークした点に対して鉛直上向きの強制変位を与えた。また、その他の固定点に対して鉛直下向きの強制変位を与えた。1 ステップあたり 0.2(m) の強制変位を与え、16 ステップまで解析を行った。図-2 にそのときの変形の推移を示す。強制変位に伴って、無摩擦接触点を中心によっていく様子が得られた。

4. まとめ

双曲線近似の剛性を用いることにより、ケーブルの特徴である非抗圧縮性を考慮したアルゴリズムの開発を行うことが出来た。無摩多節点接触要素を用いることで、ケーブル間の無摩擦接触のシミュレーションを精度よく行うことが出来たといえる。

参考文献

後藤茂夫：柔ケーブル材の接線剛性方程式について、土木学会論文報告集, No. 270, 1978.

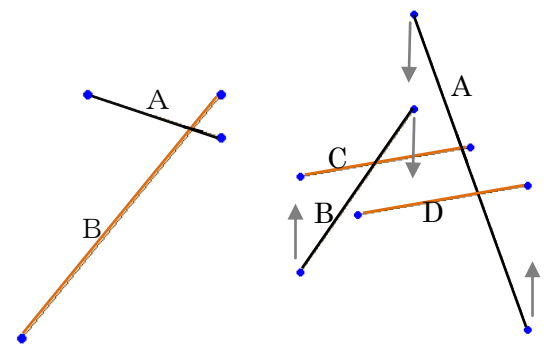
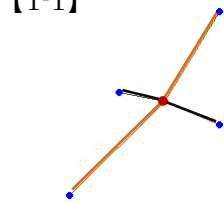
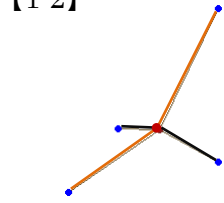


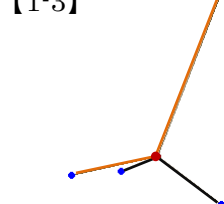
図-1 強制変位前
【1-1】



【1-2】



【1-3】



【1-4】

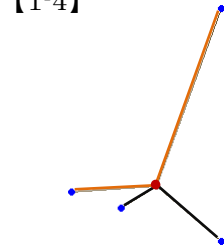
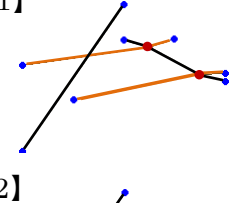
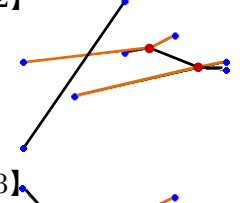


図-2 変形の推移

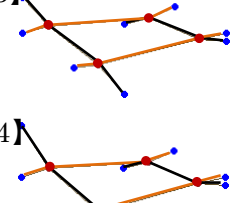
図-3 強制変位前
【2-1】



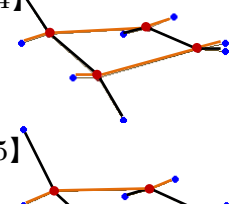
【2-2】



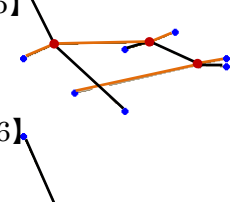
【2-3】



【2-4】



【2-5】



【2-6】

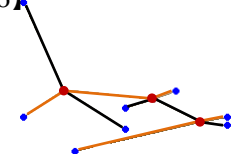


図-4 変形の推移

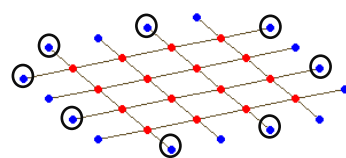
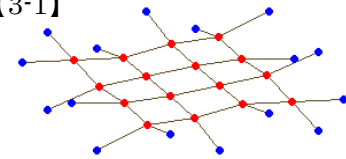
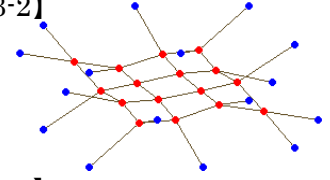


図-5 強制変位前

【3-1】



【3-2】



【3-3】

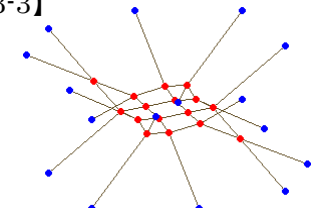


図-6 変形の推移