

佐賀大学大学院 学生会員 岡崎 祐希
 学生会員 日高 功裕
 正会員 帯屋 洋之
 正会員 井嶋 克志
 正会員 川崎 徳明

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、接触を伴った節点の生成、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。緊張状態のケーブルの接触問題については既にいくつかの研究があるが、弛緩を伴った要素の接触については、遅れ接触に伴う諸問題への合理的な対応が必要となる。そこで本研究では、非抗圧縮性を考慮した要素式により弛緩をモデル化した三次元ケーブル要素間の無摩擦接触のシミュレーションを目的として、アルゴリズムの開発を行った。

2. 研究手順

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、滑節点を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。また本研究では、双曲線近似剛性を用いて、ケーブルの非抗圧縮性を考慮している。

弛緩を伴う要素の接触に際しては、要素両端を結ぶ線分が互いに通過した後に、接触に伴う軸力挿入が遅れて発生することを考慮して、弛緩した要素の要素可動域を図 - 1 に示した楕円回転体で表示し、接触点が要素可動域外に出た時を以って接触と判定する。すなわち、図 - 2 に示すように接触する二つの要素をそれぞれ A、B とし、要素 A の楕円回転体上の任意の点を X としたとき、要素 B の両要素端 1 および 2 から点 X までの距離の和 L の最小値が、要素 B の無応力長 L_0 よりも小さい場合、両可動域が重複していると判断でき、逆に L が L_0 以上のとき重複がなくなったと判断できる。また、変位に伴って接触点における接触力の符号が反転した時、要素間での接触は解除されたものとする。

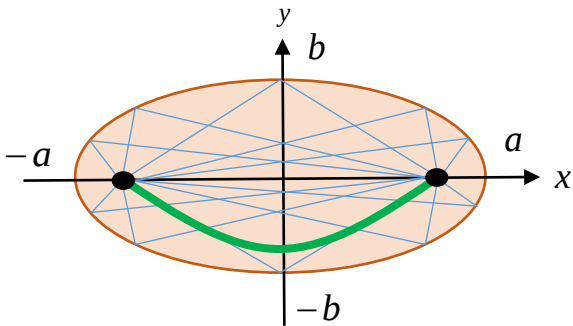


図 - 1 楕円回転体

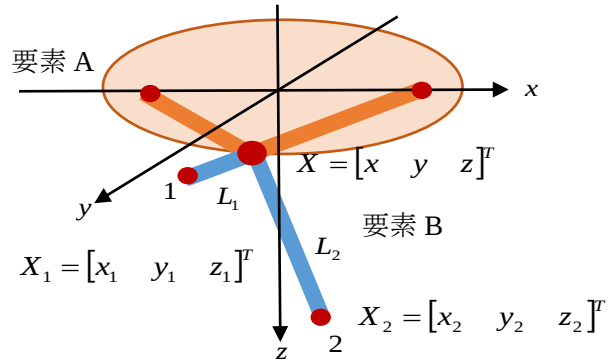


図 - 2 接触判定時

楕円回転体の座標値を $X = [x \ y \ z]^T = [a \cos \theta \ b \sin \theta \cos \phi \ b \sin \theta \sin \phi]^T$ としたとき、

$$f(\theta, \phi) = (b^2 - a^2) L \cos \theta \sin \theta - (L_1 X_2^T + L_2 X_1^T) \frac{\partial X}{\partial \theta} = 0 \quad \dots (1)$$

$$g(\theta, \phi) = -(L_2 X_1^T + L_1 X_2^T) \frac{\partial X}{\partial \phi} = 0 \quad \dots (2)$$

この非線形連立方程式をニュートンラプソン法で解くことで、 L の最小値を与える $\hat{\theta}, \hat{\phi}$ が得られる。

3. 解析結果

解析例 1: 図 - 3 のように弛緩した要素 A の両端の節点に、鉛直下向きに強制変位を与え、弛緩した要素 B との接触が発生した場合に新たな接触点を生成し、接触によって緊張状態になった後までの解析を行った。図 - 4 がそのときの変位の推移を示している。

解析例 2: 図 - 5 のような 1 つの要素に対して複数の要素が接触するケースについて、要素 A に対して鉛直上向きに強制変位を与え解析を行った。強制変位により、【2-1】のように要素 A と要素 B との間に最初の接触が発生し、無摩擦接触点を生成する。引き続き鉛直上向きの強制変位を与えていくと、【2-2】で示すように、要素 A と要素 C が接触する。このとき要素 A は要素 B との接触により緊張状態となっているため、緊張ケーブルと弛緩ケーブルとの接触となり、要素 C との間に無摩擦接触点を生成する。その後【2-3】のように、要素 A と要素 D の間に 3 回目の接触が発生する。この接触は【2-2】と同じ状態であり、無摩擦接触点を生成する。【2-4】と【2-5】は、接触により緊張状態になった後の変位の推移を示している。

4. まとめ・考察

- ・弛緩した要素の要素可動域を楕円回転体として接触判定に用いることで、弛緩を伴うケーブルの接触問題を考慮したアルゴリズムを開発することができた。
- ・複数の要素が接触するタイミングが全く同時の場合、単純な楕円回転体で要素可動域を定義することができないため、現在のアルゴリズムでは解析が難しい。これを考慮することにより、より複雑なケースについても解析が可能となるアルゴリズムの開発を今後の課題とする。

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, pp.41-49, 1978.

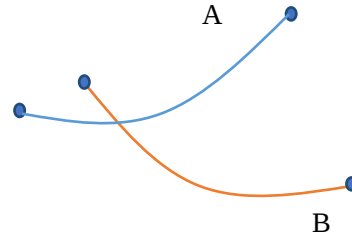


図 - 3 強制変位前

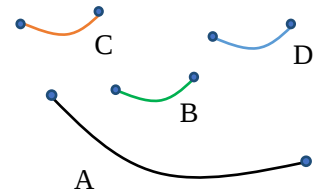
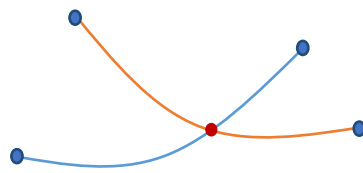
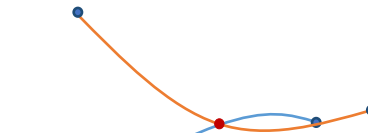


図 - 5 強制変位前

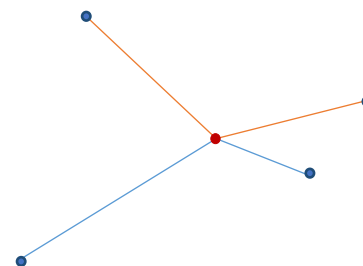
【1-1】



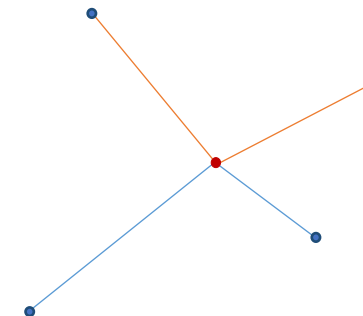
【1-2】



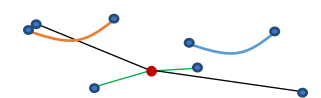
【1-3】



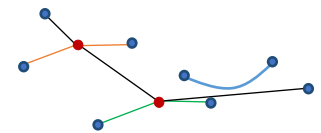
【1-4】



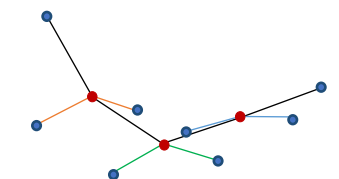
【2-1】



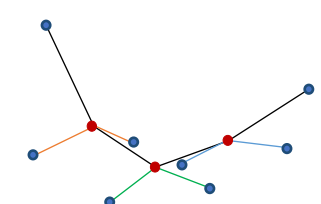
【2-2】



【2-3】



【2-4】



【2-5】

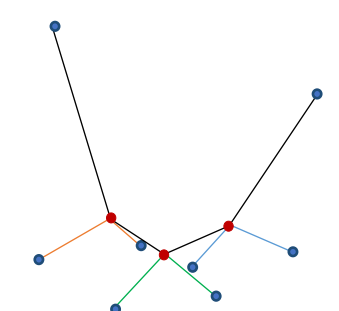


図 - 4 変位の推移

図 - 6 変位の推移