

複合構造の有限要素接触解析のための 界面モデル生成アルゴリズムの構築

宇都宮大学 学生員 齋藤誠
宇都宮大学 正会員 斉木功
宇都宮大学 正会員 中島章典

1. はじめに

コンクリートは粗骨材，細骨材，モルタルなどから構成される複合材料であり，不均質な材料といえる．このようなコンクリートの特性を，従来は実験により平均的に評価してきた．しかし近年では，コンクリートを構成する材料を，剛体ばねモデルなどによりモデル化し，ミクロな視点によりコンクリートの材料特性を評価しようという試みが行われている¹⁾．しかし，このような場合，骨材とモルタルの界面のモデル化にはまだ解決すべき課題が残っている．また，鋼とコンクリートとを組み合わせた複合構造は，異種材料の一体化により，単一材料では発揮されない優れた性能を得る．よって，鋼とコンクリートの付着性状は，複合構造の挙動に大きく影響し，界面の挙動を明確にする必要がある．このように，数値解析によりコンクリート構造物の挙動を評価するには，ミクロスケールとマクロスケールで接触解析における界面を考え，異種材料間の界面の特性を明確にすることが重要である．

コンクリート構造物を対象として有限要素接触解析を行う場合，複雑な形状をしている異種材料間の界面のモデル化が問題となる．界面の扱いは，不連続現象を直接表現できる剛体ばねモデルなどの離散モデルが適しているが，界面以外は連続体としてのモデル化としたい点や，汎用性といった観点から，有限要素法を用いる利点も捨てがたい．しかし，接触解析用モデルを有限要素法で解析する場合，接触する要素の設定や，接触節点ペアと外向き法線ベクトルが必要になる²⁾など，モデル作成時の負担が大きい．そこで小川ら³⁾は，有限要素法をベースにした解析方法を用いて，2次元モデルにより複合構造の接触解析を簡便に行う手法を提案した．本研究では，この手法を3次元に拡張し，界面を含まない通常の有限要素モデルから，節点間接触解析に必要な界面のモデルを自動的に作成するアルゴリズムの構築を行う．

2. アルゴリズム構築の前提となる接触解析

本研究の解析対象は，接触解析の中でも複合構造の異種材料間の界面挙動である．そこで，大きな変位や接触節点探査は対象外である．異種材料の界面は初めから接触していることを前提とする．したがって，接触する節点は自明となり，節点間接触²⁾の概念を利用できる．離散モデルである剛体ばねモデルの概念をベースに取り入れた解析手法では，全ての要素が初めから個別に分離しているため，全ての要素間にばねを設けることになる．一方，本手法においては，有限要素法をベースにしてい

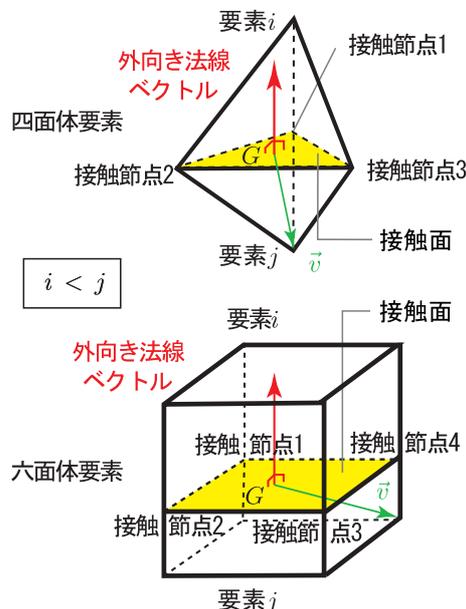


図-1 外向き法線ベクトルの向き

るため，接触面以外の要素は結合している．これより，有限要素モデルに節点間接触の概念を取り入れた最も基本的な接触解析法により，目的を達成できる．

3. モデル作成方法

(1) 有限要素モデルの前処理

まず材料の種類に関することなく，全ての要素を一旦個別に分離する．次に界面を考える必要のない，複合構造における鋼などのような同質要素間について，2要素間で面を共有している，つまり，同位置にある節点を3組以上共有するのであれば，その2要素に属する節点を結合させる．

(2) 接触解析のための界面モデル生成

節点間接触解析を行うために，接触する節点の組(接触節点ペア)と接触面の方向を示すベクトル(外向き法線ベクトル)，接触面に平行な2つの接線ベクトル(これら3つのベクトルは互いに直交)，および1接触節点あたりの接触面積を算出する必要がある．

本手法では，通常の有限要素モデルから，接触解析のために必要なモデルを，界面を考慮する要素間(異種材料間)において，master要素を基準に自動的に作成する(ただし，要素番号の小さい要素*i*をslave要素，要素番号の大きい要素*j*をmaster要素と定義する)．よって，接触面の方向を示す外向き法線ベクトルは，図-1

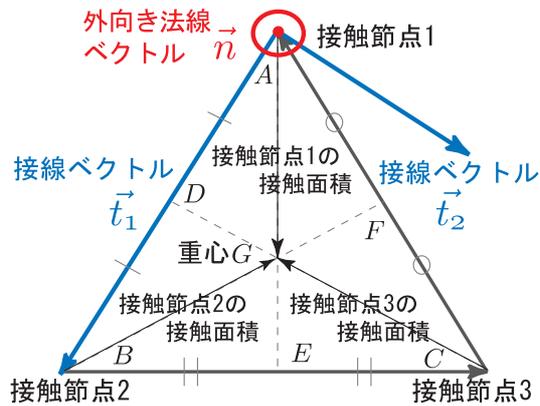


図-2 三角形の接触面

に示すように，master 要素 j から slave 要素 i へ向かうベクトルと定義する．

以下，接触面が三角形と四角形の場合について，モデル生成の方法を述べる．

a) 接触面が三角形の場合

接触節点ペアについては，有限要素モデルの前処理の後，界面を考慮する要素間（異種材料要素間）において，先に述べた節点を結合する手法と同様に，節点間の距離が十分小さい（要素間で節点を共有している）節点ペアを3組以上有するのであれば，2要素間に面が1つ決定されるので，その面を接触面と定義し，またその接触面を形成している節点ペアを接触節点ペアと定義する．

外向き法線ベクトルについては図-2に示すように，まず，接触面を形成している master 要素側の接触節点ペアを結ぶベクトル \vec{AB} , \vec{BC} , \vec{CA} を考える．この中でベクトル \vec{AB} , \vec{CA} の外積により，外向き法線ベクトル \vec{n} を

$$\vec{n} = \vec{AB} \times \vec{CA}$$

と定義する．求めた法線ベクトルが，先に述べた定義に沿うように，条件

$$\vec{n} \cdot \vec{v} < 0$$

を満足する \vec{n} を算出する．ここで， \vec{n} と \vec{v} は，図-1に示すように，それぞれ，外向き法線ベクトルと接触面の重心から接触面を形成していない節点へのベクトルである．

接線ベクトルについては，1つは接触節点ペアを結ぶベクトル

$$\vec{t}_1 = \vec{AB}$$

であり，もう1つはその接線ベクトル \vec{t}_1 と，求められた外向き法線ベクトル \vec{n} の外積

$$\vec{t}_2 = \vec{t}_1 \times \vec{n}$$

と定義する．

各接触節点ペアに属する接触面積については，

- 接触節点1の接触面積は $\triangle ADG$ と $\triangle AFG$ の和
- 接触節点2の接触面積は $\triangle BDG$ と $\triangle BEG$ の和

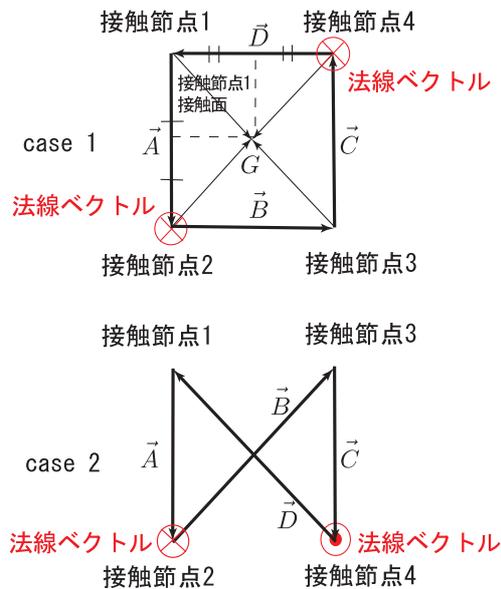


図-3 四角形の接触面

- 接触節点3の接触面積は $\triangle CEG$ と $\triangle CFG$ の和とする．

b) 接触面が四角形である場合

本手法において，接触面を形成するベクトルは，接触節点が探索された順に依存する．よって，接触節点を結ぶベクトルが，図-3の case 2のように接触面を形成するベクトル（四角形の4辺）にならない場合がある．そのとき，接触解析のための適切なモデルが生成されない．そこで，条件

$$(\vec{A} \times \vec{B}) \cdot (\vec{C} \times \vec{D}) > 0$$

を与える．この条件を満足したとき，法線ベクトルは接触面に対し，直角方向に一意的ベクトルである．一方，不満足の場合は，case 2のように2つの法線ベクトルが逆向きであることを示す．つまり，接触節点を結ぶベクトルが接触面を正しく形成していないことになる．よって，探索された接触節点3, 4の節点情報を入れ換えることで，接触節点を結ぶベクトルを修正し，case 1のような接触面に定義し直すものとした．

2つの接線ベクトルや1接触節点ペアに属する接触面の算出は，接触面が三角形の場合と同様に行う．

4. おわりに

3次元有限要素接触解析で用いる界面モデル生成アルゴリズムの手法について述べた．本手法によりモデル化の負担を軽減できる．

参考文献

- 1) Nagai, K, Sato, Y, Ueda, T, Kakuta, Y: Numerical simulation of fracture process of concrete model by rigid body spring method, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.163-168, 2002
- 2) Wrigers, P: *Computational Contact Mechanics*, Wiley, 2002.
- 3) 小川 大介: 複合構造の解析に適した簡便な接触解析手法の基礎的検討, 第31回関東支部技術発表会講演概要集, 2004.3.