

# 複合構造の解析のための界面を有する有限要素モデル生成 アルゴリズムの構築

宇都宮大学大学院 学生員 齋藤誠，東北大学大学院 正会員 斉木功  
宇都宮大学大学院 正会員 中島章典

## 1. はじめに

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発揮する。また複合構造は、異種材料が複雑に組み込んだ構造となるが、実際の設計では、複雑な構造をそのままモデル化することは困難である。そのため、要素試験を行うことで複合構造の材料特性を求め、その平均的な特性が解析・設計に用いられている。しかし、複合構造の形状や寸法により特性が異なるため、要素試験を行う負担が大きいことや、様々な境界条件が考えられる実構造物に対応する要素試験の境界条件は不明確である。そこで、異種材料間（鋼とコンクリート）における接触問題を考える。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するので、異種材料間の界面をモデル化して付着を考える。このことで、要素試験による特性を用いることの欠点が解消されると考えられる。

実際に鋼・コンクリート複合構造物を対象として有限要素接触解析を行う場合、複雑な形状を有している異種材料間の界面のモデル化に大きな負担が生じる。界面の扱いは、亀裂などの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モデル化したい点や、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、接触節点ペアや外向き法線ベクトルが必要であり<sup>1)</sup>、汎用ソフトを用いた場合、これらを手動入力しなければならないなど、モデル作成時の負担が大きい。そこで小川ら<sup>2)</sup>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とする。また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<sup>1)</sup>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るため、接触面以外の要素は結合している。これ

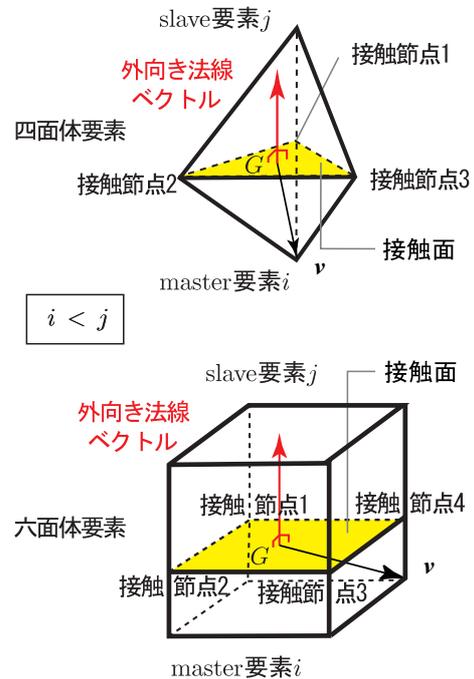


図-1 外向き法線ベクトルの向き

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、複合構造における接触解析ができる。

## 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係なく、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連続体と考える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、2要素間で接触する節点の組である接触節点ペアと接触面の方向を示す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、界面を考慮する異種材料の要素間において、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master要素、要素番号の大きい要素*j*をslave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-

Key Words: 複合構造, 接触解析, 有限要素法, 界面, モデル生成

〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2 宇都宮大学大学院情報制御システム科学専攻 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210

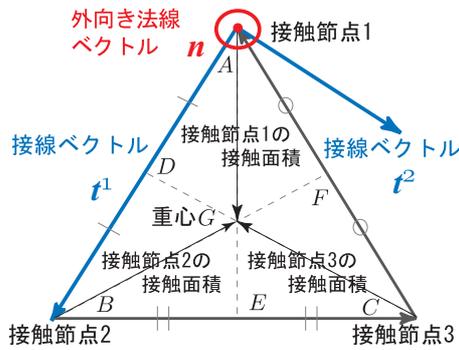


図-2 三角形の接触面

1 に示すように，master 要素  $i$  から slave 要素  $j$  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

接触節点ペアの定義は，有限要素モデルの前処理の後，界面を考慮する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の手法にて行う．つまり，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  $n$  を

$$n = \vec{AB} \times \vec{CA} \tag{1}$$

と定義する．求めた外向き法線ベクトルが master 要素から slave 要素に向かう定義に整合するように，条件

$$n \cdot v < 0 \tag{2}$$

を考え，これを満足するように  $n$  を定義し直す．ここで， $n$  と  $v$  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．

接触面に平行な2つの接線ベクトルのうち，1つの接線ベクトルは接触節点ペアを結ぶベクトル

$$t_1 = \vec{AB} \tag{3}$$

と定義し，もう1つはその接線ベクトル  $t_1$  と，外向き法線ベクトル  $n$  の外積

$$t_2 = t_1 \times n \tag{4}$$

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

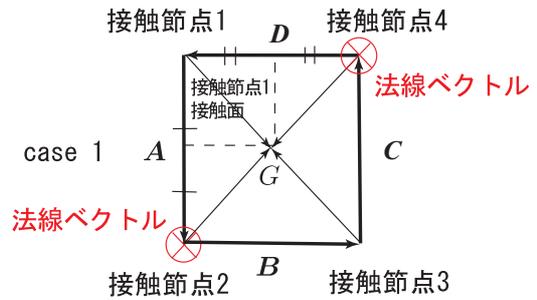
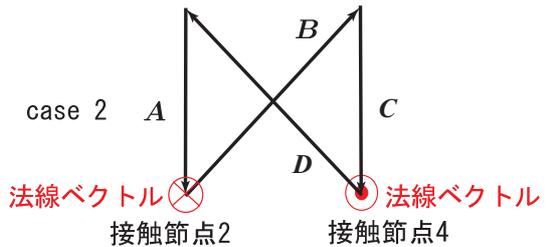


図-3 四角形の接触面



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

$$(\vec{A} \times \vec{B}) \cdot (\vec{C} \times \vec{D}) > 0 \tag{5}$$

を考える．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こととした．

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．本手法により接触解析を行うためのモデル化の負担を軽減できる．

参考文献

- 1) Wrigers, P : *Computational Contact Mechanics*, Wiley, 2002.
- 2) 小川ら：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回土木学会関東支部技術発表会講演概要集，2004.3.