

FrontISTR v5.0 における 接触解析機能の改良

FrontISTR commons

2019/10/18

新機能

- 接触を含むモデルのリファインに対応

機能改良

- 接触反復の収束性の改善、計算の安定化
- 接触探索の大幅な高速化
- 接触解析における計算精度の向上

v5.0における接触解析機能の新機能

対応内容

- 接触定義の拡張：マスター面、スレーブ面ともに面グループとして定義可能とした
 - 入力部分は実装されていた
 - 内部的にスレーブの面グループから節点グループを自動生成するようにした
 - 内部で自動生成される節点グループの名前は FSTR_S2N_面グループ名となる
 - 内部の接触アルゴリズムは、従来通り、面対点による接触アルゴリズムを使用
- 新たな要素タイプとして、パッチ要素（表面要素、1000番台）を追加
 - 内部的にスレーブ面の面グループをパッチ要素のグループに変換
 - パーティションにおいてスレーブ面の全要素・節点を、対応するマスター面の存在する全領域に持たせる

利用方法

- マスター面だけでなく、スレーブ面も面グループとして定義しておく
- メッシュファイルにおける接触面ペアの定義で **TYPE=SURF-SURF** として、スレーブとマスターの面グループを指定する
ex.)
!CONTACT PAIR, NAME=CP1, TYPE=SURF-SURF
SLAVE, MASTER
- 他はこれまでと同様に、全体制御ファイル hecmw_ctrl.dat にてリファイン回数の指定を行う
ex.)
!MESH, NAME=fstrMSH, TYPE=HECMW-DIST, REFINE=1
../P1/FistrModel.dist

v5.0bまでの接触解析機能の問題点

マジックナンバー問題 (MN)

- 接触判定において、いわゆるマジックナンバー（ハードコーディングされた定数）が用いられている箇所が複数あり、それらの意味が不明確である。また、それらの値が適切でないために、計算が不安定になる場合がある。

無次元化すべきところが無次元化されていない問題 (ND)

- マジックナンバーのいくつかは、解析中で有次元量（長さや力などの単位を持った値）との比較（大小判定）に用いられている。有次元量は、モデルの定義に用いられる単位系や、メッシュの粗密によって数値が変わるため、有次元量の大小判定にマジックナンバーを用いるのは不適切である。

領域分割方法の問題 (DD)

- 現状の並列接触解析の実装は、マスター面を分割し、マスター面を持つ領域には対応するスレーブ点を全て持たせる、という実装がされている。これを、逆にスレーブ面を分割し、マスター面を共有するように変更することで解決が容易になる問題点が複数ある。

その他の問題 (Other)

- 検索アルゴリズムが遅い、あるいは、頂点上での接触では法線ベクトル方向を平均するが辺上では平均しない、等の問題がある。

垂直方向クリアランスが有次元 (ND)

- モデルの単位系やメッシュの粗密によって不適切な判定となる場合がある。

非接触から接触判定する際の垂直方向クリアランス (MN)

- 正の値を用いているため、貫入していない節点が接触と判定される場合がある。この場合、引張力が発生して再び非接触と判定される、といった接触-非接触の振動が起こる可能性がある。

もともと接触していたマスター面との接触判定に用いる面内方向クリアランス (MN)

- 接触相手の面が簡単に変わりすぎると計算が不安定になる場合があるが、この場合のクリアランスとして、通常のクリアランス(1.d-4)よりも小さい1.d-6が用いられている。

頂点判定に用いる面内方向クリアランス (MN)

- 法線ベクトル方向を計算する際に、接触点がマスター面の頂点上にあるか否かの判定に用いる面内方向クリアランスとして、通常のクリアランス(1.d-4)よりも小さい1.d-6が用いられているが、この値が小さすぎると要素間での接触の振動を引き起こす可能性がある。

接触から非接触と判定する際の引張力が有次元 (ND)

- 本来は解析中で発生する何らかの力の値やその時間平均値などによって無次元化した上で判定を行うべきである。(v5.0では未解決)

隣接マスター面リスト作成 (Other)

- 各マスター面について、隣接マスター面のリストを生成しているが、そのアルゴリズムが全対全の検索であり、 $O(N^2)$ となっている。

マスター面絞り込み (ND)

- 詳細な接触判定を行うマスター面を絞り込む際、4.0という長さを用いているが、単位系によって異なる長さになる上、メッシュの大きさによって絞り込みが不十分となる。

全マスター面探索 (Other)

- 元の接触先とその隣接マスター面に接触先が見付からない場合、その他の全てのマスター面に対して詳細な接触判定を行うような実装となっている。

辺上の法線方向が平均されない (Other)

- 接触点がマスター面の頂点付近の場合は、各マスター面（ただし領域内）で計算した法線方向を平均しているが、辺付近の場合には平均していない。

領域境界の頂点・辺上での接触時の法線方向の計算 (DD)

- 領域境界の頂点や辺上で接触している場合、隣接領域に属するマスター面は考慮されないため、法線ベクトル方向の平均が一切行われぬ。このため、並列数を変えることで接触反復の収束状況が変わる可能性がある。（v5.0では未解決）

領域境界を越えて接触点が移動する場合の接触状態の引き継ぎ (DD)

- 接触点が隣接要素に移動する場合、元の接触状態によって固着または滑りの判定を行っているが、領域境界を越えて接触点が移動する場合には常に新たな接触と見做されるため、本来滑りと判定されるべき場合でも必ず固着と判定されてしまう。（v5.0では未解決）

v5.0における接触解析機能の改良点

v5.0における改良点：マジックナンバーの整理と名前付け

定数名	値	意味
CLEARANCE	1.d-4	要素の面内方向の内外判定に通常用いるクリアランス。接触点のマスター面内のローカル座標が頂点や辺からこの値以内の誤差であれば、頂点や辺上にあるものと見做す。
CLR_SAME_ELEM	5.d-3	既に接触しているマスター面との接触判定に用いる面内方向のクリアランス。この値を大きくすることで隣接する要素間で接触が振動することを回避できる場合がある。
CLR_DIFFLPOS	1.d-2	同じマスター面内で異なる点として認識されるローカル座標値の違い。この値を大きくすることで接触判定の振動を回避できる場合がある。
CLR_CAL_NORM	1.d-4	接触点の法線方向を計算する際に、マスター面の頂点や辺上と判定されるローカル座標系における幅。
DISTCLR_INIT	1.d-6	解析初期の接触スキャンで用いるマスター面に垂直方向のクリアランス。マスター面の基準長さにこの値をかけた距離より近いスレーブ点を接触点と見做す。
DISTCLR_FREE	-1.d-6	接触していない節点の接触判定に用いるマスター面に垂直方向のクリアランス。負の値はわずかな貫入を待って接触と判定することを意味する。
DISTCLR_NOCHECK	1.d0	既に接触している節点の接触判定に用いるマスター面に垂直方向のクリアランス。接触から非接触への判定は引張力によってされるため、大きな値によって垂直方向の判定を事実上スキップするようにしている。
BOX_EXP_RATE	1.05d0	マスター面を完全に含む、座標軸にそった最小の立方体を、この値だけ拡大して、その中に含まれるスレーブ点のみ詳細な接触判定を実施する。1より大きい必要があり、小さいほど計算は速くなるが、大きいほど計算上は安全となる。
TENSILE_FORCE	-1.d-8	接触しているスレーブ点を非接触と判定する際の引張力の大きさ。この値は有次元量との比較に用いられることに注意。

垂直方向クリアランス(distclr)の無次元化

- マスター面の大きさに基づく**参照長さ**を計算し、垂直方向距離をその値で無次元化してから適切なクリアランス値で判定するよう、変更した。
- 参照長さは**解析初期**における**マスター面中心**での $\det J$ の平方根とした。

垂直方向クリアランスの使い分け

- **非接触の節点**：小さな負の値とし、わずかな貫入を待って接触と判定する。
- **既に接触している節点**：大きな値(1.0など)を用い、必ず接触しているものとして計算する。
(接触から非接触への判定は、垂直方向距離ではなく、引張力によってされるため)
- **解析の最初**：負の値としてしまうと、接触点が少なすぎるにより解析が不安定となる場合があるため、敢えて正の値として、接触が多めに生じるようにする。

面内方向クリアランスの使い分け

- **非接触の節点**：接触点のマスター面内のローカル座標が頂点あるいは辺から $1.d-4$ 以内の誤差であれば、頂点あるいは辺上にあるものと見做す。
- **既に接触している節点**：接触相手の面が簡単に変わりすぎると計算が不安定になる場合があるため、通常よりも大きめの $5.d-3$ を用いる。
- **同じマスター面の中で接触点の移動**：新たな接触点が元の接触点と異なる点として認識されるローカル座標値の差異として、従来 $1.d-3$ が用いられていたが、同一マスター面内での接触点の振動が発生する場合があります、これを回避するために、より大きな値 ($1.d-2$) を設定した。
- **法線ベクトル方向を計算する際**：従来は通常のカリアランスよりも小さい $1.d-6$ が用いられていたが、この値が小さすぎると要素間での接触の振動を引き起こす可能性が考えられる。一方、領域境界の頂点や辺上で接触している場合、隣接領域に属するマスター面は考慮されないため、法線ベクトル方向の平均が行われなない。このため、並列数を変えることで接触反復の収束状況が変わる可能性がある。そこで、経過措置として、今回は通常のカリアランスと同じ値 ($1.d-4$) を設定することとした。

マスター面の絞り込みの改良（無次元化、高速化）

- マスター面の大きさにもとづく絞り込み方法に変更
- バケットサーチを導入
 - 接触探索の都度、現配置に基づきバケット情報を更新
 - バケットの格子サイズを最も大きいマスター面の大きさによって決める
 - 探索対象となるマスター面の数が一定のオーダーとなるため、**計算量が $O(N)$** となる

隣接マスター面リスト作成の高速化

- 上記絞り込みを導入することで高速化

全マスター面検索の高速化

- 上記絞り込みを導入することで高速化

大幅な高速化を実現！

辺上の法線平均の計算追加

- v5.0b以前：接触点がマスター一面の頂点上にある時のみ、頂点を共有するマスター一面で法線方向を計算し、平均していた。
- v5.0：接触点がマスター一面の辺上にある時も、辺を共有するマスター一面で法線方向を計算し、平均するようにした。

未解決の問題

- 接触から非接触と判定する際の引張力が有次元
 - 解析中で発生する何らかの力の値やその時間平均値などで無次元化すべきであるが、未実施である。
- 領域境界の頂点・辺上での接触時の法線方向の計算
 - 隣接領域のマスタ一面情報を持たないため、現状では解決困難。
 - 領域分割方法の変更によって容易に解決可能である。
- 領域境界を越えて接触点が移動する場合の接触状態の引き継ぎ
 - スレーブ節点の接触状態を通信する必要があるが、実装が煩雑である。
 - 領域分割方法の変更によって容易に解決可能である。

今後の改良予定

引張力の無次元化

- 解析中で発生する何らかの力の値やその時間平均値などにより無次元化する。

領域分割方法の変更

- マスター面を分割する方法から、スレーブ面を分割する方法に変更する。
- これによって、以下の問題を解決する：
 - 法線方向の計算が領域境界の頂点・辺上での接触時と領域内部での接触時で異なる問題
 - 領域境界を越えて接触点が移動する場合に接触状態が引き継がれない問題
 - 各スレーブ点の接触状態を一元管理することで、接触状態の振動を検出し計算を安定化

参照長さの計算タイミングの選択

- 現在は解析初期のみ、各マスター面中心で計算している。
- 大変形・大ひずみ問題向けに、接触判定ごとに、接触点近傍で計算する等のオプションを設ける。

定数値（クリアランス等）の解析制御ファイルからの指定

- 収束性の悪い問題に対して、ユーザー側で試行錯誤できるようにする。

