

標準的 4 面体 2 次要素を使った静的および動的接触解析の手法

Method of Static and Dynamic Contact Analysis Using Standard Quadratic Tetrahedral Elements

正 秋葉博(アライドエンジニアリング), 柴田良教(同), 正 大山知信(同), 松野純一(同),

正 大森隆広(東芝), 正 岡山瞬(同), 正 小林隆二(東芝インフォメーションシステムズ), 馬場圭佑(同)

Hiroshi AKIBA, Allied Engineering Corp. (AE), 1-14-4 Shiba, Minato-ku, Tokyo

Yoshinori SHIBATA (AE), Tomonobu OHYAMA (AE), Jun'ichi MATSUNO (AE),

Takahiro OMORI (Toshiba Corp., TSB), Shun OKAYAMA (TSB)

Takaji KOBAYASHI (Toshiba I.S. Corp., TSIS), Keisuke BABA (TSIS),

Key Words : FEM, Quadratic Tetrahedral Elements, Contact Analysis

1. はじめに

有限要素法構造解析における, 標準的 4 面体 2 次要素の接触解析時の挙動について述べる。コードは ADVENTURECluster (ADVC) を用いる。

一般に, 標準的 4 面体 2 次要素 (ADVC の要素として Tet10 と呼ぶことにする) において, 接触解析の性質は, 4 面体を 4 個の 6 面体 1 次要素に分割した要素 (ABAQUS の C3D10M 要素, ADVC の修正 4 面体 2 次要素, Tet10m と呼ぶことにする) と比べて使いにくいとされている。標準的 4 面体 2 次要素では, 一様面圧をかけた際の, 4 面体表面に現れる 1 次節点 (主節点) と 2 次節点 (中間節点) における等価節点力が異なり, 接触状態の安定解に至るまでにはやや不自然な動きが現れるためである。しかし, 適正な使い方によりこの不自然さは克服できる。

2. 4 面体 2 次要素における面圧の等価節点力への振分け

有限要素法による構造解析では, 4 面体 2 次要素のある面に均等な面荷重に対応して, その面の 2 次節点 (中間節点) には正の等価節点力が現れるが, 1 次節点 (主節点) の等価節点力はゼロまたはゼロに近い値が現れる (面積分の方法に依存)。図 1 のような節点番号を取る。面積座標 L_1, L_2, L_3 を用いると, 各節点に対応する内挿関数は

$$N_1 = L_1(2L_1 - 1), N_2 = L_2(2L_2 - 1), N_3 = L_3(2L_3 - 1)$$

$$N_4 = 4L_1L_2, N_5 = 4L_2L_3, N_6 = 4L_3L_1$$

となる。この面に一様な面圧 p をかけたとき, 1 次節点, 2 次節点における等価節点力はそれぞれつぎようになる。

$$F_1 = p \iint_{\Delta} L_1(2L_1 - 1) |J| dS$$

$$= p \cdot 2S \left(\iint_{\Delta} (2L_1^2 - L_1) dL_1 dL_2 \right)$$

$$= 2pS(2 \cdot 1/12 - 1/6) = 0$$

$$F_4 = p \iint_{\Delta} 4L_1L_2 |J| dS = p \cdot 2S \cdot 4 \cdot 1/24 = pS/3$$

ここで, S は 3 角形の面積, $|J|$ は要素座標から面積座標への変換のヤコビ行列の行列式で, $|J| = 2S$ である。つまり, 解析的な積分を行うと, 一様な面圧下では, 上のように等価節点力は 2 次節点だけで釣り合い, 1 次節点ではゼロとなる。通常行われる数値積分 (ガウス積分) でもほぼ同様なことがおこる。

しかし, 以上は等分布圧力を与えた場合の等価節点力と, それに近い事象で接触反力がどう生じるかの説明であり, 一般的な応力・ひずみ状況下では 1 次節点にもゼロでない反力が現れる。

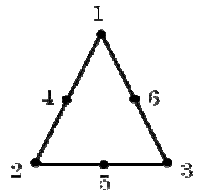


図 1 4 面体 2 次要素の面と節点番号

3. 4 面体 2 次要素を用いた接触解析

普通行われる接触解析アルゴリズムは以下のようなものである: 「接触対をマスタ面とスレーブ面とで作る。スレーブ節点に引っ張り力が発生したら接触拘束を外し, スレーブ節点のマスタ面を貫通したら接触拘束を作成する」

ADVC もこのアルゴリズムによっている。

静解析における接触の様子を調べる。図 2 のような 2 枚の板が接触しているものとする。上の板は 4 面体 2 次要素で分割され, 下の板は 1 個の 6 面体 1 次要素からなる。上側の要素の下側面の節点はスレーブ, 下側の板の上側面はマスタ面に取られている。下側の板は完全拘束されており, 上側の板の上側面の全節点を強制変位により引っ張る。この状況は, 上側の板の下側面を一様な面圧で押し上げたこと, つまり前節で述べた面圧と等価節点力の関係をほぼ再現している。

図 3 は, 2 回目の接触反復の後, 接触拘束が外れた様子を示している。2 次節点には 1 次節点に比べて大きな引っ張り力が現れるので, 本例では 2 次節点はすべての接触拘束が外れ, 1 次節点の大部分がマスタ面上に張り付いたまま残っている。しかし, もう一度静解析を行うと, 1 次節点にも正の引っ張り力が現れ, 図 4 のように 2 枚の板は完全に離れる。修正 4 面体 2 次要素では図 4 の結果は 1 回の反復で得られる。

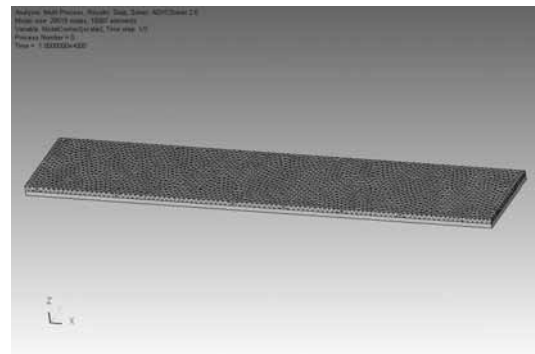


図 2 接触解析用簡易モデル

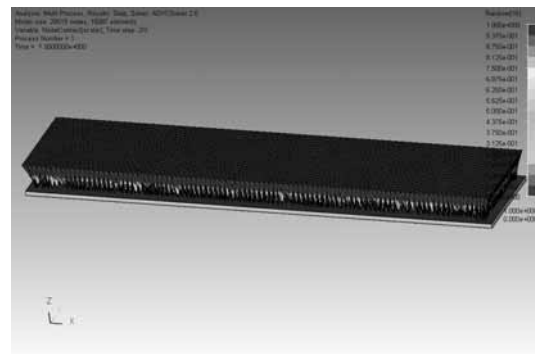


図 3 接触反復 1 回目の様子 (Tet10)

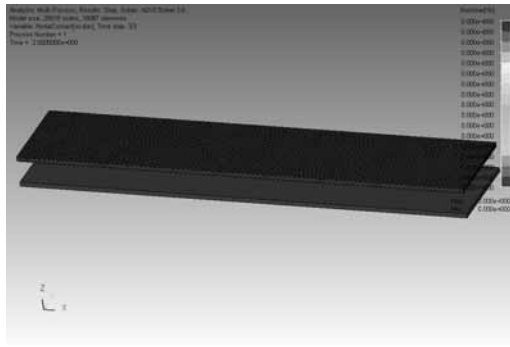


図4 接触反復2回目の収束解 (Tet10)

4. 静解析における4面体2次要素と修正4面体2次要素の応力分布

Tet10, Tet10m 要素の良し悪しは即断できないが、両要素から得られる接触面の応力を、図5に示す簡易モデルと比較してみる。大小2枚の鋼板を固着接触させ、大きな鋼板の両端を治具で止める。重なった板の中央をもう1つの治具を用いて小さな強制変位により押し下げる。図6, 図7は、それぞれ Tet10, Tet10m の主応力の分布図である。図7からは、Tet10m の結果に不自然なまだら模様が見られる。これは、6面体1次要素で構成される Tet10m の性質によるものと思われる。

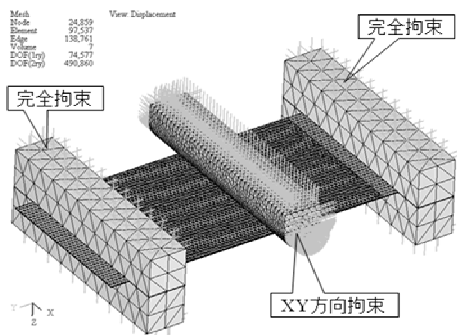


図5 押圧解析の簡易モデル

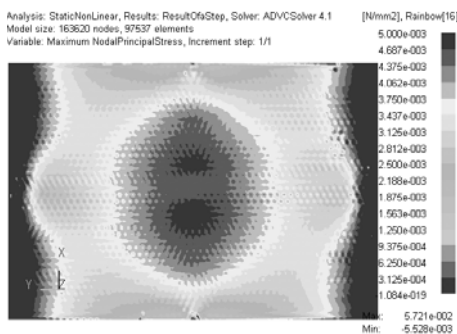


図6 上側鋼板の最大主応力 (Tet10)

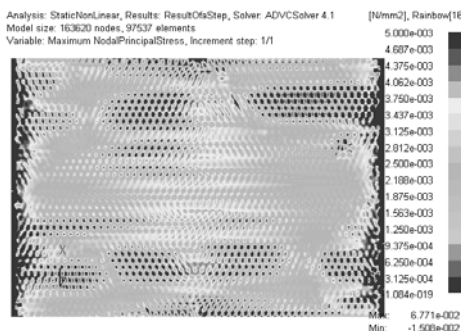


図7 上側鋼板の最大主応力 (Tet10m)

5. 動解析における接触解析

ADVCの動解析においては、現バージョンでは接触は静解析のような反復は行わない(陽的な扱い)。要素は Tet10 と Tet10m いずれでもよい。時間刻みが小さければ問題はないが、時間刻みを大きく取ると、接触面の貫通およびスレーブ節点のマスター面への張り付き(スレーブ面がマスター面に貫通し、つぎの時間ステップで離れるべきスレーブ節点が離れない)が生じ、特に Tet10 で目立つようになる(図9(a)参照)。これは静解析で見た張り付き(図3参照)と同じものであり、Tet10m ではこの現象は起こりにくい(時間刻みの取り方に依存)。

応力評価上は標準的4面体2次要素(Tet10)を使用したい。このため、動解析における接触アルゴリズムでは、静解析と同様の接触反復を行う(陰的な扱い。反復回数はオプション)ことが考えられる。図8に、衝突解析における接触アルゴリズムとその結果を模式的に示す。理想的には太線のように推移すべきだが、時間評価点が t と $t+\Delta t$ しかないので、陽的な扱いの場合は $t+\Delta t$ で直線状に貫通する。陰的な扱いでは貫通はしにくいので、「張り付き」は起こりにくい(陰的な扱いの許容誤差に依存)。図中に描いた衝突以降、 $t+\Delta t$ までの直線および円弧状のパスは仮想的なものである。

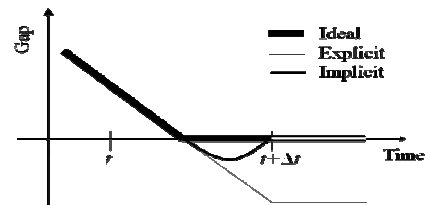
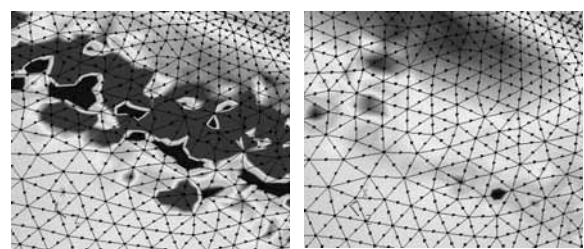


図8 衝突解析における接触アルゴリズム

図9は、内部に接触面を有する簡易モデルの落下解析を、Tet10を用いて行い、その接触スレーブ面の相当応力の分布と変形(20倍に強調)を、陽的な扱いと陰的な扱いの結果を示したものである。陰的な扱いにおける接触反復は本解析では2回と設定してある。本図により、陽的な扱いにおける節点の「張り付き」が、陰的なアルゴリズムによってほぼ解消されていることがわかる。



(a) 陽的な扱い (b) 陰的な扱い

図9 動解析における接触状況

6. まとめ

標準的4面体2次要素によって得られる応力分布は、修正4面体2次要素のそれに比べ自然な結果が得られることがある。しかし、標準的4面体2次要素には面圧に対する等価節点力にばらつきがあるため、接触解析においては不自然な振る舞いが見えることがある。これは静解析、動解析とも接触反復を行うことによって解消される。

参考文献

- [1] ABAQUS Analysis User's Manual, V6.8
- [2] ADVENTUREcluster ソルバ取扱説明書, 2009.7