

九州連携 CAE 研究会における解析事例の検証 (第 2 報)

—2次元解析の誤差, 及びボルト締結時の応力解析の簡易化に関する調査—

清水慎吾*・橋口智和*

*機械・金属担当

Verification of the CAE example in CAE study group of Kyushu(2nd Report)

—Research of error in 2D analysis and simplification of stress analysis of bolting—

Shingo SHIMIZU*・Tomokazu HASHIGUCHI*

*Machinery and Metallurgy Section

要 旨

前年度に引続き、「九州連携 CAE 研究会」の下、新たな共通解析課題「有限要素法における要素の影響」を行い、要素形状ならびに分割数、中間節点の差による構造解析の誤差について知見を得た。また、2次元構造解析における誤差発生要因について調査を行った結果、一般化平面ひずみ計算モデルの場合には、独立した複数のボディを同時に解析対象とした場合、結果に誤差が生じることがわかった。さらに前年度行ったボルト締結時の応力分布解析について、新たな境界条件を簡易化した解析を行った結果、実験値と似た傾向の応力分布が得られた。

1. はじめに

近年、ものづくりの中でCAE解析の需要は拡大しており、公設試においても県内企業からのCAE解析に関する技術支援のニーズは高まっている。このような状況において、九州・沖縄及び周辺の各公設試は、九州地方知事会の下「九州連携 CAE 研究会」としてこれまでに構造・伝熱・流体・固有値等の様々な解析課題について、各公設試の有するCAE解析ソフトによる解析を実施し、その結果の比較検討を行ってきた。本年度は共通課題「有限要素法における要素の影響」、ならびに2次元解析における誤差発生要因とその対策の調査、前年度に続きボルト締結時の応力分布計算における解析条件の簡易化について取り組んだ。

2. 有限要素法における要素の影響

有限要素法を用いたCAE解析においては、解析モデルを分割する要素の種類・形状・分割数によって結果は異なる。今回は共通課題として片持ち梁の構造解析結果におけるそれらの影響について調査した。

2.1 解析条件

解析モデルをFig.1に示す。梁は長さ100mm、高さ10mm、厚さ10mmの角柱とした。境界条件は片側端を固定し、自由端頂点に100Nの荷重を与えた時の下方向変位量を結果として求めた。なお材料物性値については、ヤング率206GPa、ポアソン比を0.3とした。

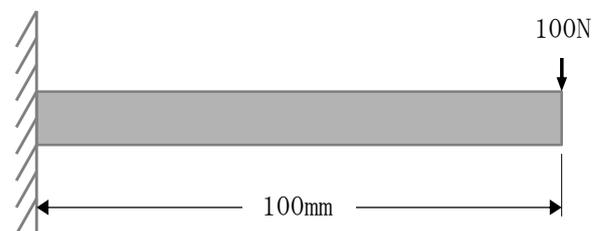


Fig.1 要素影響の解析モデル

2.2 要素分割条件

解析には、三角形要素、四角形要素、四面体要素のそれぞれ一次要素、二次要素を用いた。さらに要素分割数を長さ方向×高さ方向について指定し、それぞれの公設試で分担して解析を実施した。また三角形要素および四角形要素については断面の2次元解析となる平面要素であり、平面応力モデルと平面ひずみモデルでの解析を行った。なお解析ソフト ANSYS においては、有限の厚さを持つ形状のモデルの2次元解析については平面ひずみモデルではなく一般化平面ひずみを用いることが望ましいため、一般化平面ひずみモデルでの解析を行った。なお一般化平面ひずみにおける、有限の厚さを示すパラメータである繊維長さについては、10mmとした。さらに四面体要素を用いる場合は、幅方向は高さ方向の分割数に合わせて計算を行った。各県公設試の使用する解析ソフトをTable 1、解析条件の分担をTable 2の(a), (b)に示す。

Table 1 各県の使用解析ソフト一覧

機 関	メッシュャー	ソルバー
熊本県	ANSYS V14.5	
山口県	Mentat 2003	Marc 2003
佐賀県	Mentat 2010	Marc 2010
大分県	ANSYS V11	
沖縄県	NX-IDEAS 6 m2	
長崎県	SolidWorks Simulation 2014 SP3.0	
鹿児島県	SolidWorks Simulation 2014	
鳥取県	ANSYS Mechanical R15	ANSYS R15
島根県	ANSYS R15	

Table 2 解析条件分担

(a) 平面要素

長さ×高さ の分割数	三角形 一次	三角形 二次	四角形 一次	四角形 二次
2×2	佐賀県	島根県	山口県	大分県
10×5	熊本県	鳥取県	沖縄県	山口県
5×10	大分県	佐賀県	島根県	沖縄県
10×10	山口県	熊本県	鳥取県	島根県
50×10	沖縄県	大分県	熊本県	鳥取県

(b) 四面体要素

長さ×高さ の分割数	四面体 一次	四面体 二次
2×2	佐賀県	鹿児島県
10×5	長崎県	長崎県
5×10	鹿児島県	長崎県
10×10	鹿児島県	鹿児島県

2.3 解析結果

梁の変位量を δ としたとき、材料力学における理論式を(1)に示す。

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \left(1 - \frac{3x}{2L} + \frac{x^3}{2L^3} \right) \quad \dots (1)$$

ここで、F は作用荷重、L は梁の長さ、E は材料の弾性係数、I は梁の断面二次モーメントであり、x は荷重作用点から固定端に向かう距離である。式(1)より、今回の解析モデルにおける最大変位量の理論値は $x=0$ のとき $\delta = 0.195$ [mm] となる。

平面要素（平面ひずみモデル、平面応力モデル）で得られた最大変位量の結果を Table 3 および Table 4 に示す。また四面体要素を用いた解析で得られた最大変位量の結果を Table 5 に示す。それぞれ表中の括弧内の数値は、理

論値との誤差である。

平面要素（平面ひずみ、平面応力）と四面体要素のいずれの結果でも、一次要素に比べて二次要素の方が理論値との誤差は小さくなっている。

また、今回の平面要素において平面ひずみと平面応力の解析結果を比較すると、平面ひずみに比べ平面応力の方が、理論値との誤差は要素分割数による影響が少なくなっていることから、このモデルは平面応力で解析することが妥当であると考えられる。

Table 3 平面ひずみモデルの解析結果（単位：mm）

分割数	三角形 一次	三角形 二次	四角形 一次	四角形 二次
2×2	0.007 (96.4%)	0.177 (9.2%)	0.018 (90.8%)	0.188 (3.6%)
10×5	0.085 (56.4%)	0.190 (2.6%)	0.175 (10.3%)	0.179 (8.2%)
5×10	0.035 (82.1%)	0.176 (9.7%)	0.185 (5.1%)	0.176 (9.7%)
10×10	0.085 (56.4%)	0.190 (2.6%)	0.189 (3.1%)	0.191 (2.1%)
50×10	0.166 (14.9%)	0.191 (2.1%)	0.191 (2.1%)	0.192 (1.5%)

Table 4 平面応力モデルの解析結果（単位：mm）

分割数	三角形 一次	三角形 二次	四角形 一次	四角形 二次
2×2	0.007 (96.4%)	0.182 (6.7%)	0.018 (90.8%)	0.193 (1.0%)
10×5	0.087 (55.4%)	0.195 (0.0%)	0.194 (0.5%)	0.197 (1.0%)
5×10	0.035 (82.1%)	0.195 (0.0%)	0.191 (2.1%)	0.194 (0.5%)
10×10	— (—%)	0.195 (0.0%)	0.194 (0.5%)	0.196 (0.5%)
50×10	0.183 (6.2%)	0.196 (0.5%)	0.196 (0.5%)	0.196 (0.5%)

Table 5 四面体要素の解析結果 (単位: mm)

分割数	四面体一次	四面体二次
2×2	0.007 (96.4%)	0.177 (9.2%)
10×5	0.090 (53.8%)	0.194 (0.5%)
5×10	0.034 (82.6%)	0.192 (1.5%)
10×10	0.093 (52.3%)	0.194 (0.5%)

3. 2次元解析の誤差に関する調査

共通課題「有限要素法における要素の影響」で取り組んだ片持ち梁構造解析において、ANSYS Multiphysics Ver11.0を用いた解析では、当初一般化平面ひずみモデルでの変位量が他県の結果に比べて誤差が大きくなることが確認された。またその傾向は他県のANSYSによる解析結果との比較においても変わらなかった。原因を調査したところ、独立した複数のボディが存在するモデルを同時に解析した結果、誤差が生じる現象が確認された。しかし構造解析においては形状を変更した際の剛性や応力分布を比較検討する際、解析作業・データ整理の利便性のために一つの解析用ファイル内に複数のモデルを準備し、同時に解析を行うケースが多い。

そこで2次元解析での複数モデルの同時計算における誤差の発生について、様々な条件下での影響の有無、大きさを調査した。

3.1 解析条件

基本の解析モデルはFig.2に示す長さ100mm、高さ10mmの2次元モデルを用い、要素分割数については全ての条件で長さ方向50、高さ方向10で統一した。モデルは片側端を固定し、自由端頂点に荷重を与えた時の下方向変位量をANSYS Multiphysics Ver11.0を用いて解析し、理論値との誤差を求めた。なお材料物性値については、ヤング率206GPa、ポアソン比を0.3とした。

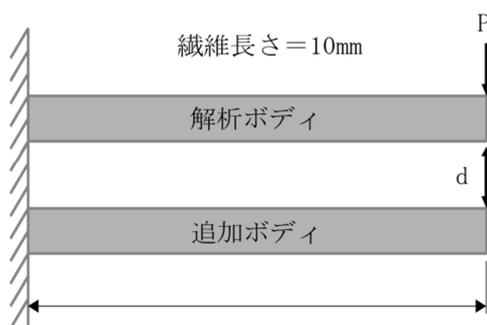


Fig. 2 2次元解析調査モデル

3.1.1 ボディ間距離の影響

ボディ間距離の影響について調査するため、荷重Pを100N、繊維長さ10mmで固定し、解析対象ボディ(以下「解析ボディ」)の下にTable 6に示す距離dの位置で同形状のボディ(以下「追加ボディ」)を配置した条件での解析を行った。要素の種類については三角形一次要素、三角形二次要素、四角形一次要素、四角形二次要素の4つの要素を用いた。

Table 6 ボディ間距離の解析条件

距離 d (mm)						
0.5	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	100	1000	-

ボディ間距離影響についての解析結果をFig.3に示す。ボディ間距離が大きくなるにつれ誤差は大きくなり、一定以上離れた場合には漸近していく様子が確認された。ここから、誤差を防ぐためにモデル内のボディを遠ざけることは効果が無いと考えられる。解析に用いた要素の種類においては、どれにおいても同様の傾向が見られ、要素種類の影響はほぼ無く、要素種類を変更することで誤差の発生を防ぐことは出来ないと考えられる。

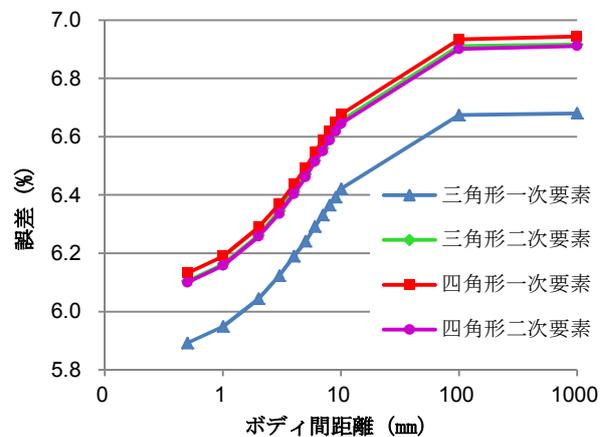


Fig. 3 ボディ間距離による誤差の影響

3.1.2 荷重の影響

荷重の影響について調査するため、四角形二次要素において、ボディ間距離dを10mm、繊維長さ10mmで固定し、荷重Pを10Nから100Nまで10Nごとに変更した条件での解析を行った。

荷重の影響についての解析結果をFig.4に示す。モデルに付加する荷重量は誤差にさほど影響を及ぼしておらず、

荷重量の増加に追従して増減するような傾向もないことが確認された。Fig. 3 の結果と合わせると、誤差の有無と大きさは解析を実行する前段階で決定され、解析後の変形によりボディ間距離が接近しても影響は少ないと考えられる。

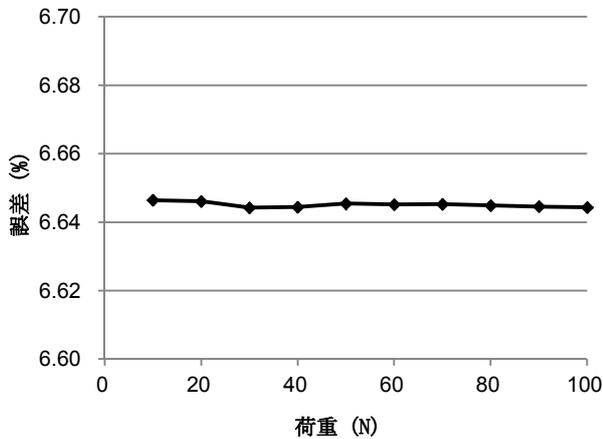


Fig. 4 荷重による誤差の影響

3.1.3 繊維長さの影響

繊維長さの影響について調査するため、四角形二次要素において、ボディ間距離 d を 10mm、荷重 P を 100N に固定し、繊維長さを 1mm から 10mm まで 1mm ごとに変更した条件での解析を行った。その結果、繊維長さは誤差に影響を及ぼさないことが確認された。

3.1.4 追加ボディ位置の影響

Fig. 5 に示す位置関係における追加ボディ位置の影響について調査するため、四角形二次要素において、ボディ間距離 d を 10mm、荷重 P を 100N、繊維長さ 10mm で固定し、Table 7 に示す追加ボディ配置箇所での解析を行った。

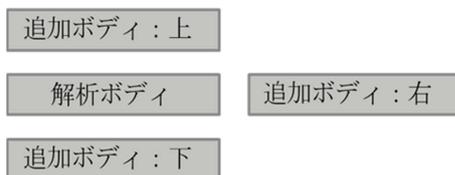


Fig. 5 追加ボディの位置関係

Table 7 追加ボディ位置の解析条件

追加ボディ配置箇所			
上	下	上+下	右
上+右	下+右	上+下+右	無し

追加ボディ位置についての解析結果を Table 8 に示す。解析ボディの上下に追加ボディを配置した場合、同じ誤差が生じることが確認された。ここから解析ボディの変形する方向軸上に追加ボディが存在する場合、その誤差に荷重方向の正負は問わないと考えられる。また解析ボディの横方向については、単独で追加された状態でも誤差は生じるが、既に変形方向軸上にほかの追加ボディが存在する場合、その影響は小さいと考えられる。

Table 8 追加ボディ位置による誤差の影響

追加ボディ配置箇所			
上	下	上+下	右
6.87%	6.87%	6.87%	3.21%
上+右 6.87%	下+右 6.87%	上+下+右 6.87%	無し 0.00%

3.2 小括

以上から、今回の様なケースについては、解析対象と独立した別のボディが存在するだけでいくらかの誤差が生じてしまうことが考えられる。よって対策として以下のような方法があると考えられる。

- ・一般化平面ひずみモデルではなく平面応力モデルを用いて解析可能なモデルであれば、平面応力モデルを使って解析を行う。
- ・一般化平面ひずみモデルで解析を行う場合、解析ボディ以外のボディは「抑制(その解析実行時においてのみ、存在しないものとして取扱う機能)」状態に設定を行う。

なお、同一形状での 3 次元モデルでの解析については同様の現象は見られないため、特に要素数を節約する必要の無い簡単なモデルで有れば 3 次元解析を行うのも一つの手段となる。

4. 鋼材のボルト締結時の応力分布解析

複雑なモデルでの接触・時系列解析のような困難な課題では、非常に長い計算時間や著しく高いコンピュータスペックが必要とされる。しかしその様な課題について、限られたマシンリソースと納期で結果を求められることは多い。その場合、実際の形状や現象をある程度簡易化した解析を行う必要がある。前年度はその一例として、鋼材にボルトを一定のトルクで締結した際の応力状態について、簡易化した境界条件での解析結果と、実験結果の比較検証を行ったが、応力分布の解析値と実験結果の傾向が一致しない部分があった¹⁾。今年度も引続き、簡易化した条件下で

の解析について検証を行う。

4.1 解析条件

Fig. 6 に鋼材形状を示す。300mm×50mm×20mm の板材の上面に、60mm ピッチで呼び径 M6、深さ 20mm のねじ穴が設けられており、ボルト 1 から 3 まで順に 10N・m のトルクを加えて締結されている。丸字で示す点 A は上面のボルト 2 と 3 の中間の位置、B は側面中央の上面から 10mm の位置である。

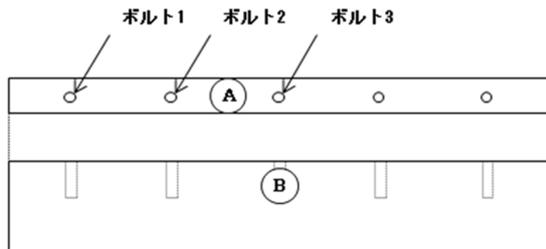


Fig. 6 ボルト締結鋼材形状

ボルト締結時の締付けトルクは、座部とねじ部の摩擦、及び軸力に消費され、一般にボルトに作用する軸力と締付けトルクの間には(2)式の関係が存在する。

$$T = K \cdot d \cdot F_f \quad \dots (2)$$

ここで T は締付けトルク (N・mm), d はねじの呼び径 (mm), K はトルク係数, F_f は軸力 (N) である。トルク係数は潤滑油や材料の表面状態による摩擦状態で、通常 0.14 から 0.26 程度の範囲内で変化する。(2) 式より今回の最大軸力値 F_{fmax} は 11905N, 最小軸力値 F_{fmin} は 6410.4N となった。

境界条件の簡易化として、ボルトを締結した際に生じる軸力がねじ部面に対して圧縮荷重として働き、ボルト座部が接する面を固定されていると仮定して、Fig. 5 中の点 A, B においての最大・最小主応力について解析を行った。なお、ヤング率は 200GPa, ポアソン比は 0.3 とした。Fig. 7 に解析条件モデル図を示す。

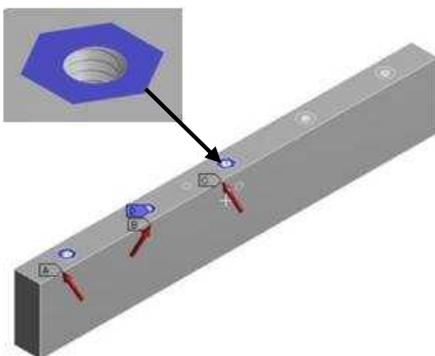


Fig. 7 ボルト締結の簡易化解析モデル

4.2 解析結果

Fig. 8 に最大主応力での解析結果, Fig. 9 に最小主応力での解析結果を示す。図中の実線は実験値, 破線は解析値ならびに最大・最小軸力による結果の範囲である。これより、最大主応力, 最小主応力のいずれも、締結状態の段階に伴う応力の発生は実験と解析でほとんど同じであることが確認された。応力の絶対値については数倍の開きが存在するために注意を要するが、部材の変形が課題となる際に、変形形状の傾向からボルト締結がその要因であるか判断する上ではこの簡易化条件が使用できると考えられる。

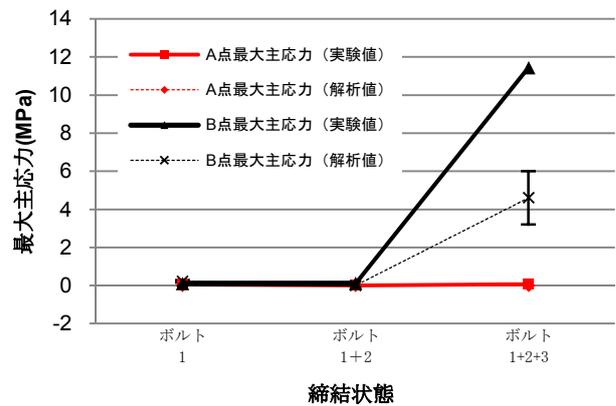


Fig. 8 最大主応力解析結果

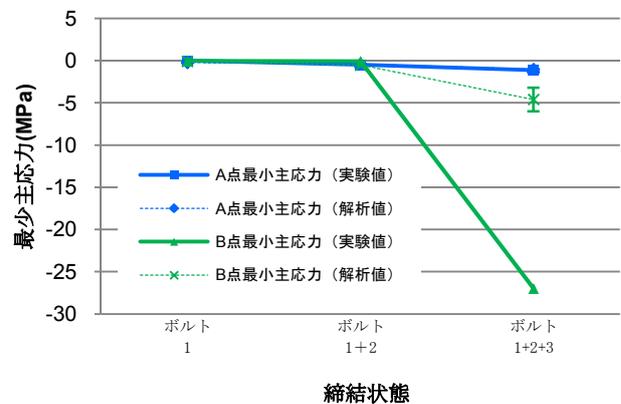


Fig. 9 最小主応力解析結果

5. まとめ

九州 CAE 研究会における共通課題「有限要素法の要素に影響」、「2次元解析に関する調査」、「鋼材のボルト締結時における応力分布解析」を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 平面要素, 四面体要素ともに、一次要素に比較して二次要素の方が理論値との誤差が少なくなっている。
- 2) ANSYS の一般化平面ひずみ要素では、独立した複数のボディからなる解析モデルにおいて、変位量に誤差を生じる。影響の大きさは主にボディ間の距離に左右され

るが、ボディを抑制しない限り無くすことは出来ない。

- 3) ボルト締結時の応力解析の簡易化において、めねじ部面に軸力を加えることで実際に近い傾向の応力分布が得られた。

参考文献

- (1) 清水慎吾，橋口智和：九州連携 CAE 研究会における解析事例の検証：平成 25 年度大分県産業科学技術センター研究報告