

ボルト締結体の構造解析精度向上に関する研究

－ プラスチック部品のセルフタップネジによる締結 －

山田博之・坂本智明*¹・萩原義人*¹・鈴木大介*¹・串田賢一*¹

Accuracy Improvement of Structural Analysis for Bolted Joints

- Tightening of Plastics Parts by Tapping Screws -

Hiroyuki YAMADA, Chiaki SAKAMOTO*¹, Yoshihito HAGIHARA*¹, Daisuke SUZUKI*¹ and Kenichi KUSHIDA*¹

要 約

本研究では、汎用性を考えて比較的単純な形状で締結体を有する試験片を対象とし、各種の構造解析(有限要素解析)および材料試験を行い、試験片における解析誤差の把握、解析精度向上、設計・開発効率向上のためのモデル化や境界条件設定の最適化を目的とした。電化製品や精密製品で用いられるセルフタップネジによってポリカーボネート部品を締結した場合について、数種類の解析条件における構造解析を行い、それぞれを比較評価し、さらに引張試験結果と解析結果とを比較した。その結果、本報における解析対象のようなネジ締結体の場合、ネジ頭部分のモデル化や接触部などの接触解析条件が、解析精度を考える上で重要な要素であった。また、効率向上のためには、ねじ山を円柱形状に簡略化して摩擦係数を 0 に設定する手法も有効であると考えられる。一方、不具合の原因究明などをはじめ高い解析精度が求められる場合は、接触条件やネジ軸力や摩擦係数などを全て考慮することが必要であると考えられる。

1. 緒 言

構造物の締結には各種の方法があるが、ボルト・ナットを用いた締結法は脱着が容易で安価であり、多くの機械・精密機器、構造物に使用されている。機器や構造物の変形などの強度は、ボルト締結部に依存することが大きい。近年、コスト低減や設計開発の時間短縮や効率化によって、十分な安全率が確保できないことなどの要因によって、締結部分から破損する事例もみられる。しかし、この締結方法はボルト・ナットと被締結体との力学的なつり合いによって荷重を分担する複雑な構造体であり、単純に強度を評価することは難しい。

一方、設計・開発などにおける機器や構造物の強度評価には、有限要素法を用いた数値解析が利用されることがある。最近では、コンピュータの性能向上によって詳細モデルで複雑な解析も可能になりつつある。しかし、ボルト締結部を詳細に解析しながら構造体全体をモデル化し精度良く解析することは、計算負荷が膨大になってしまう場合が多い。また、単純にボルト締結部や解析条件の簡略化を行った解析では、解析精度への影響が懸念される。そこで、ボルト締結部のモデル化や境界条件を簡易化して計算負荷を軽減し、かつ解析精度を確保して、解析結果から締結部分の強度を評価できる方法が必要であると考えられる。

本研究では、汎用性を考えて比較的単純な形状で締結体を有する試験片を対象とし、各種の構造解析(有限要素解析)および材料試験を行い、試験片における解析誤差の把握、解析精度向上、設計・開発効率向上のためのモデル化や境界条件設定の最適化を目的とした。共同研究機関である山梨県工業技術センターでは、金属製部品をボルト・ナットで締結した場合について検討を行った。一方、当機関では電化製品や精密製品で多用されているセルフタップネジによってプラスチック製部品を締結した場合について検討を行った。なお、本報では山梨県富士工業技術センターで得られた結果のみを報告する。

2. 実験方法

2-1 試験片形状およびモデル形状

電化製品や精密製品で用いられるセルフタップネジによる締結について検討した。また、被締結体の材料には、プラスチック製の外装部品に多く使用されるポリカーボネートを用いる場合を検討した。図1に試験片形状の概略を示す。厚さ 1mm と 2mm の2枚のポリカーボネート板をφ 2mm のセルフタップネジによって締結する構成である。厚さ 1mm の板にはネジを通す穴を加工し、厚さ 2mm の板にはセルフタップネジ用の下穴を加工した。本研究では、ネジがセルフタップによって締め込まれる側の長さは十分

*1 山梨県工業技術センター

あり、ネジを通す穴を有する部品側が破損する場合を検討することとした。したがって、金属製のネジ自身が破損する場合や、外力によって部品側のねじ山が破損してネジが抜けてしまうような場合は少ないと考え、検討の対象としていない。

試験片の形状は中央断面に対して対称形状であるため、半分の形状をモデル化し、要素分割した。要素の分割および有限要素解析には汎用構造解析ソフトウェア ANSYS ver12.1 を使用した。図 2 に全体の要素分割図を、図 3 にネジ周辺の要素分割図の例をそれぞれ示す。要素の種類としては、中間節点を有する六面体高次要素を用いた。また、図 2 に示すように、強制変位すなわち引っ張りに対する強度について検討を行った。

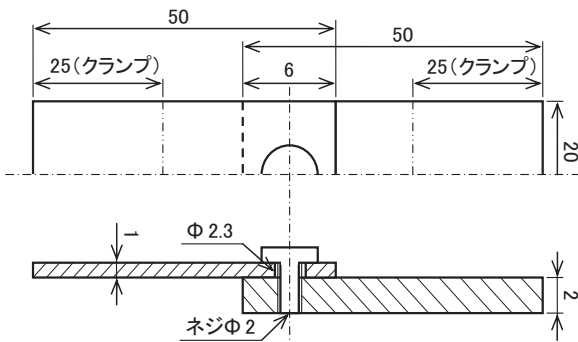


図 1 試験片形状の概略図

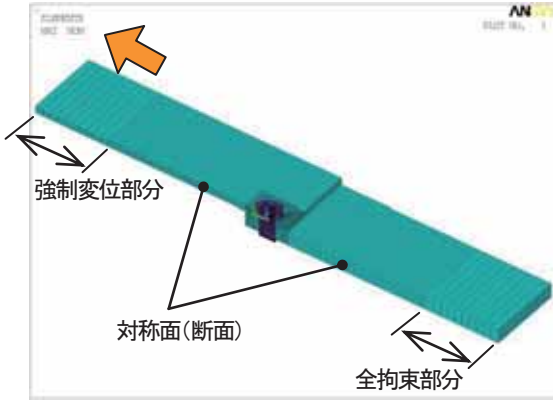


図 2 要素分割の例 (1/2 対称モデル)

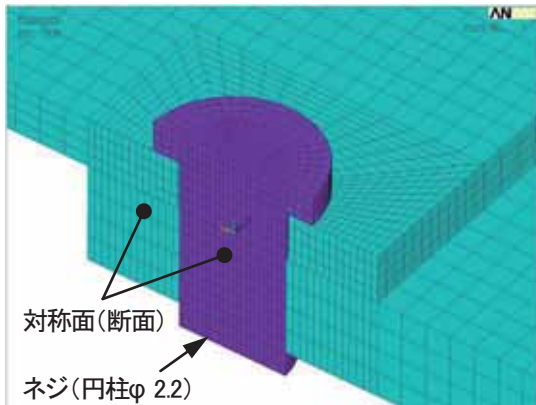


図 3 要素分割の例 (ネジ周辺部)

2-2 構造解析の解析条件

セルフタップネジによる締結部分に対するモデル化や境界条件の設定方法を検討することを目的として、図 4①～⑤に示す模式図のような 5 種類のパターンを解析した。図 4①に示す解析方法は、ネジ部を簡略化するために円柱形状のみでネジをモデル化し、ネジと板とが固着している解析条件とした。解析結果と実現象とが大きく相違しすぎないために、2枚の板とが接触する面は接触解析を行うが、図 4①が最も簡易な計算条件である。図 4②に示す解析方法では、さらに、ネジ頭を円柱形状でモデル化し、ネジ頭と板が固着している解析条件とした。図 4③に示す解析方法は、さらに、厚さ 1mm の板にネジを通す穴を設け、円柱形状でモデル化したネジ外周部と穴内面との間で接触解析を行う解析条件とした。図 4④に示す解析方法は、さらに、ネジ頭の座面とそれに対応する板表面との間で接触解析を行う解析条件とした。図 4⑤に示す解析方法は、さらに、円柱形状の軸方向寸法を調節することによってネジの軸力を考慮した解析条件とした。ねじ山部の摩擦係数 μ を 0.27 と仮定し、締め付けトルク $2\text{kgf}\cdot\text{cm}$ の場合に発生する軸力と同等になるように解析条件を設定した。

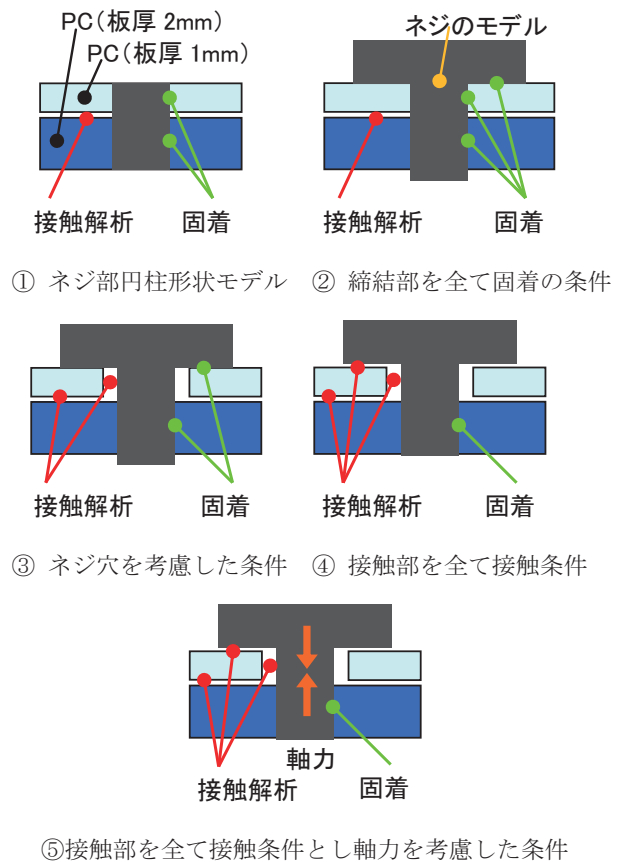


図 4 ネジ締結部分の境界条件の設定パターン

プラスチック材料の場合、正確に塑性範囲を含めた材料特性値(応力-ひずみ線図など)を得ることが容易ではない場合が多いため、本研究では材料線形の解析とし、材料特性値はヤング率を 2.25GPa とし、ポアソン比を 0.35 とした。金属製ネジの材料特性値はヤング率を 197GPa とし、ポアソン比を 0.3 とした。ただし、実現象で変位量が多い場合も予想されるため、大変形を考慮した非線形構造解析を行った。また、引張試験の状態を予測するため、厚さ 2mm の板の端部から 25mm 部分を全拘束とし、厚さ 1mm の板の端部から 25mm 部分に長手方向の強制変位を与えた。

2-3 引張試験

材料試験機は(株)島津製作所製オートグラフ AG-50kNIS を使用した。作製した試験片とそのクランプ状態の概略写真を図 5 に示す。板の端部から 25mm 部分をクランプ範囲とし、引張速度は 0.5mm/min とした。引張方向の荷重値とストローク(変位量)を測定した。

また、光弾性を利用した歪み検査器(株)溝尻光学工業所製 PE-P200)を用いて、引張試験後の試験片における内部歪みの状態を測定した。

3. 結果

3-1 構造解析における解析条件の影響

図 4 に示す 5 種類の解析条件のパターンについて強制変位 0.2mm を加えた場合の構造解析を行った。対称面(中央断面)方向からの視野および正面方向からの視野の相当応力分布図を図 6 に示す。ここで、摩擦係数 μ は 0 とした。また、板に発生する相当応力の最大値を比較したグラフを図 7 に示す。変形が比較的大きいため、固着解析と接触解析とでは板に発生する応力状態が異なり、またネジ頭部分の接触条件が重要であることがわかった。

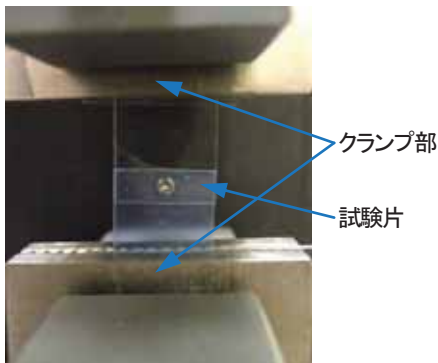
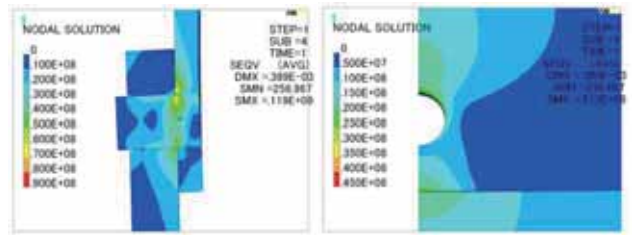
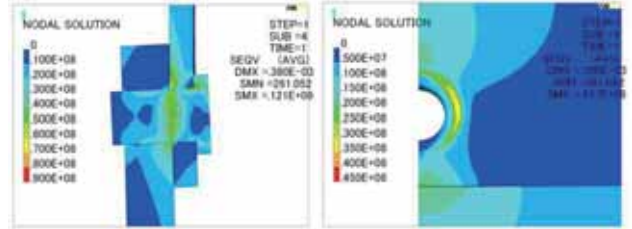


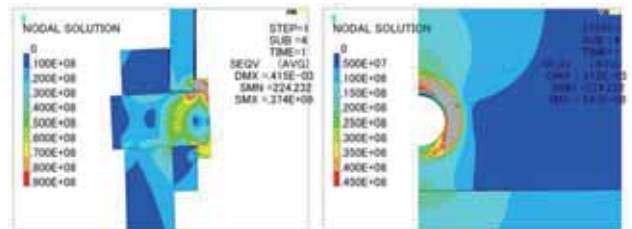
図 5 引張試験の概略写真



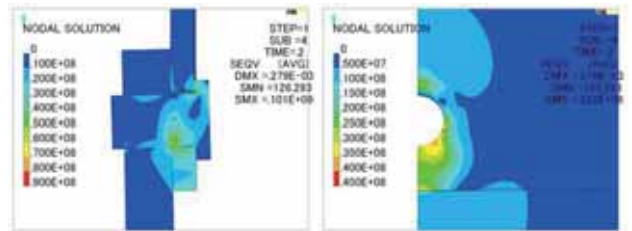
① ネジ部円柱形状モデル



② 締結部を全て固着の条件



③ ネジ穴を考慮した条件



④ 接触部を全て接触条件



⑤ 接触部を全て接触条件とし軸力を考慮した条件

図 6 相当応力分布図(視点:断面方向,正面方向)

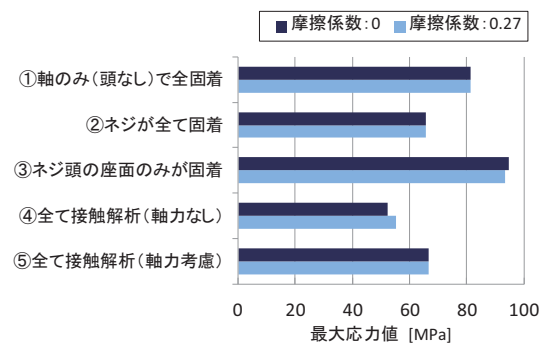
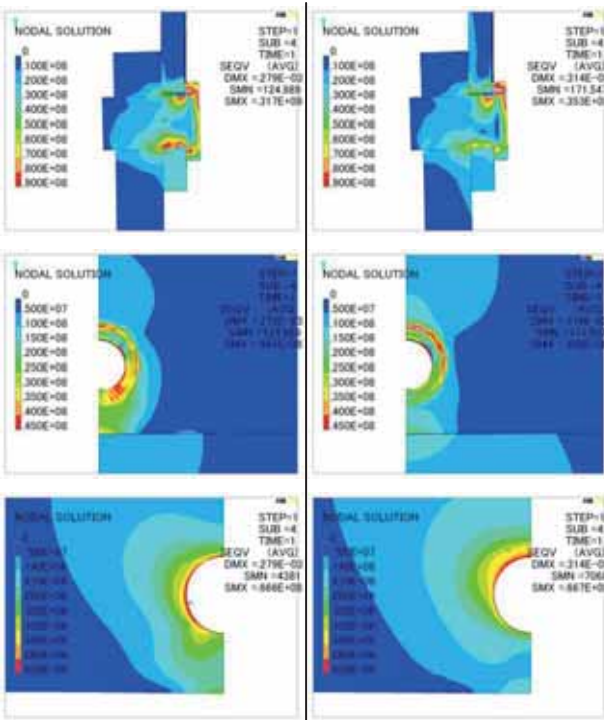


図 7 厚さ 1mm の板に発生する相当応力の最大値



(a) 摩擦係数 $\mu : 0$ (b) 摩擦係数 $\mu : 0.27$

図 8 摩擦係数が異なる場合の相当応力分布図

(視点：断面方向，正面方向，厚さ 1mm 板の裏面側)

次に，ネジの軸力を考慮した解析において，摩擦の有無の影響を調べた。摩擦係数 μ を 0 と 0.27 に設定し構造解析を行った結果の相当応力分布図を図 8 に示す。ネジ座面における応力集中が異なり，また，ネジと板との間の滑り状態も異なっている。それによって，板の穴周辺に発生する応力や歪みの分布状態も異なることがわかった。ただし，応力の最大値は同程度であった。

3-2 引張試験結果と解析結果との比較

引張方向の荷重値と強制変位量との関係について，引張試験結果と構造解析結果とを比較した結果を図 9 に示す。弾性範囲内では接触部を全て接触条件で解析することによって，変形特性等に関して試験結果に近い結果が得られることがわかった。ただし，接触解析で摩擦を考慮しない場合には，厚さ 1mm の板の穴内径とネジの外径との隙間だけ容易に滑り変位するため，変位量が小さい領域での相違があった。摩擦を考慮した場合も，強制変位 0.15mm で上記隙間だけ滑りが発生するが，実際の試験では 2 枚の板間での滑りは確認できなかった。解析条件で仮定した摩擦係数が実際の値と異なることや，ネジが小さいためネジ頭部分が実際の形状とモデル形状とで厳密には異なっていることなどが主な原因であると考えられる。

また，強制変位 0.75mm を加えた引張試験を行った後，厚さ 1mm の試験片における内部歪みの状態を観察した結

果を図 10 に示す。引張試験中に加わった応力によって歪みが発生し，除荷後も残留した歪みの状態を観察した結果であるため，構造解析結果の応力分布と比較評価した。強制変位 0.5mm を加え，ネジ軸力と摩擦係数を考慮した接触解析を行った場合の相当応力分布図を図 11 に，主応力

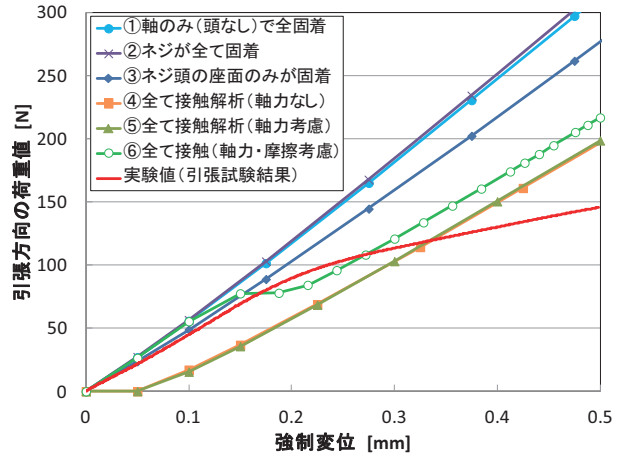


図 9 引張方向の荷重値と強制変位との関係

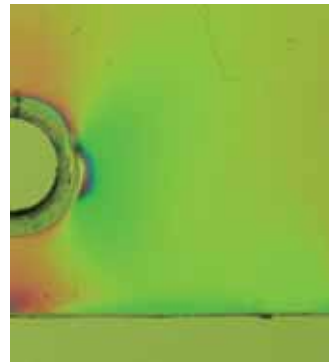


図 10 光弾性を利用した内部歪み状態の観察結果

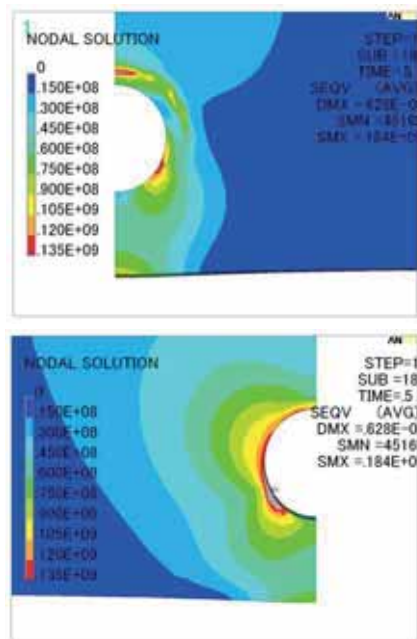


図 11 強制変位 0.5mm の時の相当応力分布図
(視点：厚さ 1mm 板のネジ座面側，裏面側)

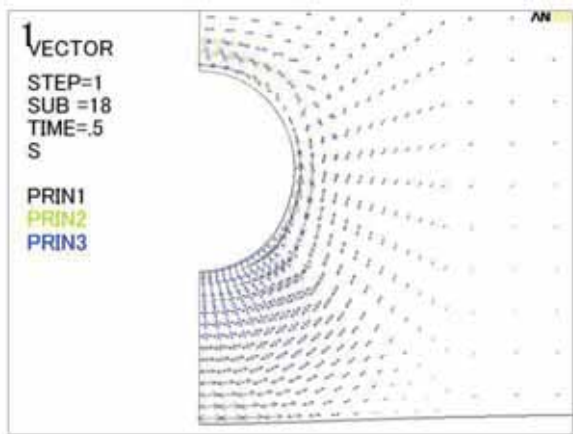


図 12 強制変位 0.5mm の時の主応力ベクトル図

ベクトル図を図 12 に示す。ねじ山をモデル化していない影響で穴近傍における応力集中位置が少し異なることを考慮すると、試験結果と解析結果とを比較した場合、類似した傾向が得られていると考えられる。また、接触部を全て接触条件で解析することや、ネジ軸力や摩擦係数を考慮することによって、実際の分布状態に類似してくる結果となった。

3-3 数値計算時間

計算に使用したコンピュータの主な仕様を表 1 に示す。

図 4 に示す 5 種類の解析条件のパターンについて、強制変位 0.2mm を加え、摩擦係数 μ を 0 と 0.27 に設定し非線形構造解析を行った場合の数値計算時間を表 2 に示す。境界条件の数や接触条件などによる計算負荷と、計算時間との間で明確な相関関係はみられない。しかし、摩擦係数を 0 とするよりも 0.27 とした場合の方が長い計算時間が必要になる傾向であった。

表 1 コンピュータの主な仕様

プロセッサ	Intel(R) Xeon(R) CPU X5677 @ 3.47GHz (2processors)
メモリ (RAM)	24GB
OS	Windows 7 Professional (64bit OS)

表 2 各解析条件における数値計算時間

解析条件	摩擦係数：0	摩擦係数：0.27
図4①	21 min	31 min
図4②	24 min	32 min
図4③	18 min	34 min
図4④	17 min	74 min
図4⑤	24 min	42 min

4. 考 察

本報で検討した解析の場合では、解析条件の違いによって 4 倍以上の計算時間の差が生じた。また、モデル化や解析条件の違いによって入力作業などの解析設定の時間も異なる。したがって、設計・開発等の効率向上のためには、解析時間と解析精度とを考慮して解析条件を選択すべきである。また、ネジ締結部を詳細に解析しながら構造体全体をモデル化し精度良く解析するためには、締結部の簡略化などと解析精度とを考慮してモデルや解析条件を選択すべきである。

本報における解析対象のようなネジ締結体の場合、摩擦係数を与えた解析では計算時間が非常に長くなる場合が多く、また実際の摩擦係数値を正確に測定することが困難であるため、高い解析精度が必要でない場合は効率向上のために摩擦係数を 0 に設定する手法も有効であると考えられる。また、ねじ山の形状を詳細にモデル化せずに円柱形状にモデル化した場合でも、実現象に類似した結果が得られたため、ねじ山部分を円柱形状に簡略化させる手法も有効であると考えられる。例えば、ネジ頭部分を考慮することと、座面の接触部などを全て接触条件で解析することが、解析精度を考える上では重要であるが、計算負荷が増加するため、ねじ山は円柱形状に簡略化し、摩擦係数を 0 に設定して効率向上を図る方法も考えられる。

一方、不具合の原因究明などを目的として解析を行うような場合や高い解析精度が求められる場合は、応力分布や変形特性等について実現象に類似した結果を得るために、接触条件やネジ軸力や摩擦係数などを全て考慮することが必要であると考えられる。

ただし、最大応力値をはじめとする解析結果の絶対値については、要素分割などの要因も大きく影響するため、本研究で検討した以外の他の要因も考慮すべきであることに注意したい。なお、セルフタップによって締め込まれたねじ山部分の強度や破壊については、塑性領域の影響が大きいため本報では検討していないが、ねじ勘合長が短い場合などは考慮する必要があると考えられる。また、本報では比較的小さな構造体を対象としているため、モデルと実際の形状・寸法との違いや、ウェルドラインなど加工による材料強度への影響なども留意しておきたい。

5. 結 言

電化製品や精密製品で多用されているセルフタップネジによってポリカーボネート部品を締結した場合について、締結体の解析誤差の把握、解析精度、設計・開発効率などについて検討した。締結部分に対するモデル化や境界条件の設定方法について数種類のパターンの構造解析を行って比較し、さらに、引張試験結果と解析結果とを比較した。

本報における解析対象のようなネジ締結体の引張強度の場合については、以下の結果が得られた。

- (1) ネジ頭部分をモデル化することと、座面の接触部などを全て接触条件で解析することが、解析精度を考える上では重要である。
- (2) 効率向上のためには、ねじ山部分を円柱形状に簡略化し、摩擦係数を 0 に設定する手法も有効であると考えられる。
- (3) 不具合の原因究明などを目的として解析を行うような場合や高い解析精度が求められる場合は、接触条件やネジ軸力や摩擦係数などを全て考慮することが必要であると考えられる。

ただし、解析結果の絶対値の評価や、セルフタップによって締め込まれたねじ山部分の破壊や、モデルと実際の形状・寸法との違いや、ウェルドラインなど加工による材料強度への影響などについては、上記以外の要因も重要であることを留意しておきたい。