

めねじの引張試験および強度解析

長田海斗 (神奈川大・学), 高野敦, 喜多村竜太 (神奈川大)
Kaito Osada, Atsushi Takano, Ryuta Kitamura (Kanagawa University)

1. はじめに

ねじはさまざまな機械構造物や機器類の締結に最も広く使用されている機械要素である。その一方、破壊・破損事故の多くはねじ部から発生し、大事故につながることもある。また、コンピュータ解析によるねじの研究は多く取り扱われている。⁽¹⁾しかし、複雑な接触問題であるねじの力学問題は、高度な構造解析用ソフトウェアを使用しても解明が困難な場合がある。弾性計算によれば応力は入り口付近に集中するため、めねじ強度ははめあい長さに比例しない。⁽³⁾しかし、めねじの塑性変形まで考えれば、材料の降伏により応力の均一化が起こり、めねじ強度ははめあい長さに比例する可能性がある。⁽³⁾

当研究室では2014, 2017年度にアルミニウムおよびベークライト製のねじの引張試験を行い、めねじ強度ははめあい長さに比例することを明らかにした。⁽²⁾⁽³⁾また、2017年度には有限要素法によるめねじの塑性解析を行ったが、最大荷重が試験結果よりも高くなる結果となった。⁽³⁾さらに、2018年度にはめねじの破壊解析を行ったが、すべての解析モデルで破壊を表現することはできず、精度の良い結果を得ることはできなかった。⁽⁴⁾

そこで、本研究では従来の解析方法を改善し、過去の引張試験の再現を試みた。解析精度を上げることで今後めねじ引張試験を行わなくても、材料特性を考慮した破壊解析によってめねじ強度を推定することを目的とした。また、実際に引張試験を行い、荷重-変位線図

を取得するとともに、レーザー変位計によるねじ山変位量の計測を行った。

2. めねじの破壊解析

2.1 解析モデル

解析対象は2014年度、2017年度に引張試験を行ったものと同様のアルミニウム (A5052) およびベークライト製のめねじであり、寸法はM4, M6, M8 はめあい長さは1d, 2d, 4d(dは呼び径)とした。めねじ、おねじ締結体の解析モデルを作成する際に、めねじを弾塑性体、おねじを剛体とした。また、実際のねじは不完全ねじ部があったが、解析モデルは完全ねじとしており、ねじ谷底Rは表現しなかった。要素は軸対称四角形要素を使用した。おねじとめねじは接触条件を用い、荷重方向の斜面のみ接触させることとした。接触部の摩擦は考慮せず、摩擦係数は0とした。A5052 およびベークライトの材料特性に関しては表のように設定した。また、解析に用いた材料の応力ひずみ線図については、ベークライトは2017年度の丸棒引張試験結果、⁽³⁾A5052 H34 はアルミニウムハンドブック (第8版)⁽⁵⁾を参考にした。

表1 材料特性

	A5052	ベークライト
ヤング率[GPa]	700	91
ポアソン比	0.3	0.37
降伏応力[MPa]	140	40
引張強度[MPa]	219	130
圧縮応力[MPa]	1000	1000
せん断強度[MPa]	126	75

2.2 破壊条件

破壊の表現をするために、要素が破壊条件を超えた場合その要素を削除することで破壊を表現する手法を採用した。材料の降伏条件は von Mises とした。破壊条件に下記の最大応力説を用いた。⁽⁴⁾

$$-\sigma'_u < \sigma < \sigma_u, \quad -\tau_u < \tau < \tau_u$$

圧縮強度は一般に引張強度より十分高いことが知られているため、 $\sigma'_u = 1000[\text{MPa}]$ と設定した。

2.3 要素分割

2017年度、2018年度の研究⁽³⁾⁽⁴⁾ではモデル外形を作成した後、軸対称4節点四角形要素で自動分割していたが、自動分割では要素分割が望ましくない形状・寸法になることがあった。そこで、要素分割を手動で行うこととし、応力集中部であるねじ山部の要素を細かくし、そこから離れた部分を粗くする方法に変更した。

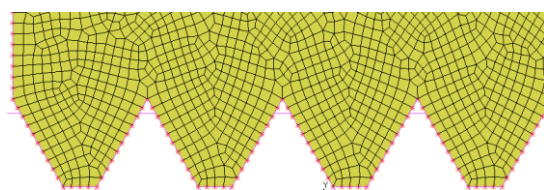


図1 変更前の要素分割

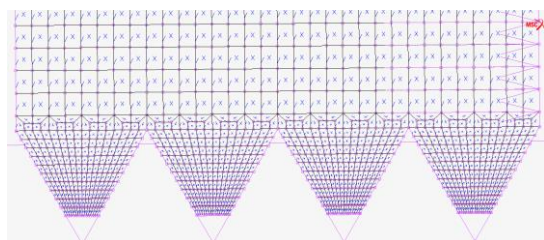


図2 変更後の要素分割

2.4 境界条件

実際の試験条件と同じにするため、治具によって固定される面(=モデル右部)をX方向に変位拘束し、右方向に荷重を負荷して解析

を行った(図3)。

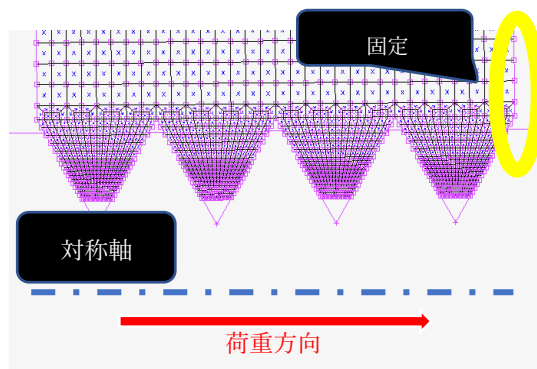


図3 解析モデル

2.5 解析結果

表1に示すように、A5052ではモデルが破壊するのに対し、ベークライトでは破壊に至らなかった。また、はめあい長さに対しては、試験結果と同様にはめあい長さが長いほど引張強度は高かった。解析精度ははめあい長さが短いほど試験結果に近い結果を得ることができた。ねじ径に対してA5052、ベークライトともにM4の解析精度が試験結果を大きく下回る結果となった。今回の解析ではベークライトM8 4dの最大荷重だけ、解析結果が試験結果を上回った。

また、解が収束しない(エラー1)、剛性マトリクスがゼロ(エラー4)、出力ファイル読み込みエラー(エラー5)などのエラーが発生し、解析が途中で停止しており、本来の解析による最大荷重は表1, 2よりもおおきくなると予想される。例えばエラー4に関しては、一部の要素が変形し破壊することで、要素が宙に浮いてしまうため剛性マトリクスの行列式がゼロまたは負になってしまいエラーが出てしまうと考えられる。しかし、モデルが破壊されない場合でもエラーが出てしまうものもあり原因が解消できていない。

表1 A5052 解析結果

A5052	M4 1d	M6 1d	M8 1d
実験値[N]	4295	10115	18155
解析値[N]	2989	9700	18336
解析後	エラー4	エラー1	エラー5
A5052	M4 2d	M6 2d	M8 2d
実験値[N]	9265	21825	36310
解析値[N]	5929	20297	29011
解析後	エラー4	エラー4	エラー4

表2 ベークライト解析結果

ベークラ イト	M4 1d	M6 1d	M8 1d
実験値[N]	1958	5866	9041
解析値[N]	1290	4610	8000
解析後	エラー4	エラー4	エラー4
ベークラ イト	M4 2d	M6 2d	M8 2d
実験値[N]	4921	11845	18576
解析値[N]	2430	8570	11500
解析後	エラー4	エラー4	エラー4
ベークラ イト	M4 4d	M6 4d	M8 4d
実験値[N]	9800	20864	35029
解析値[N]	4160	11700	44700
解析後	エラー4	エラー4	エラー4

次に代表例として A5052 H34 M4 1d の破壊直前および破壊直後の様子を図 4, 5 に示す。

めねじ谷底部付近に応力が集中していることがわかる (図 4)。ねじ治具で固定されているモデル右部の応力が大きいことも読み取れる。はめあい長さが長いほど、ねじ治具側から離れるにつれてねじ谷底付近に加わる応力は小さくなった。破壊後のモデルはねじ山が

完全に破断されているが、応力が加わっていることがわかる。モデルの破壊は、ねじ山が完全に破断されるものとねじ山の一部分が破壊されるものがあった。

しかし、これ以外のケースにおいて破壊はされるものと破壊されないもの、最大荷重の比率の精度が高いものとそうでないものと結果にばらつきが出た。

最大荷重が試験結果に近い値を示し、破壊されているモデルがあるが、解析エラーが解消できていないため、原因究明が必要である。

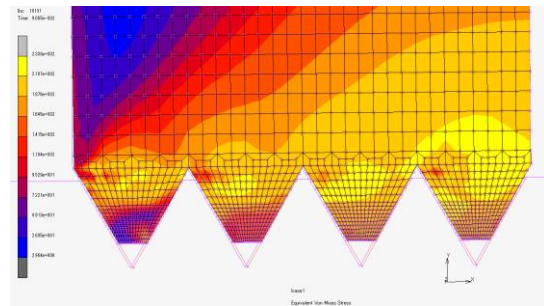


図 4 破壊直前の様子

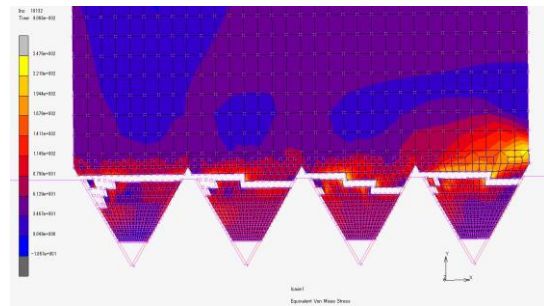


図 5 破壊直後の様子

3. ねじ谷底部を考慮した破壊解析

3.1 解析モデル

先の解析モデルでは、ねじ谷底 R を表現していなかった。そこで、図 6 に示すように、ねじ谷底部に三角形要素を加えることによりエラーで中断されてしまう解析が継続されるのではないかと考えた。

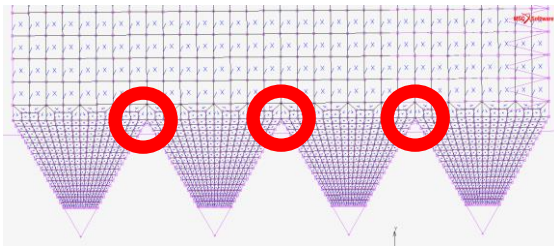


図6 三角形要素を加えたモデル

3.2 解析結果

解析結果を表3、4に示す。三角形要素を加えたことにより、解析上の最大荷重が上がる傾向になることがわかった。比率(解析/試験)は10%高くなる結果となった。解析後のモデルは三角形要素なし・ありの場合で異なる結果になるものもあった。第2章のA5052 M4 1dの解析モデルは破壊されたが、三角形要素を加えたA5052 M4 1dのモデルでは破壊に至らなかった。これは、サイズ形状の違う要素を加えたことで変形が変わってしまったことが考えられる。

表3 A5052 解析結果

A5052	M4 1d	M4 2d
実験値[N]	4295	9265
解析値[N] (なし)	2989	5929
解析値[N] (あり)	3080	6760
解析後	破壊なし	破壊
A5052	M6 1d	M6 2d
実験値[N]	10115	21825
解析値[N] (なし)	9700	20297
解析値[N] (あり)	10100	18200
解析後	破壊なし	破壊
A5052	M8 1d	M8 2d
実験値[N]	18155	36310
解析値[N] (なし)	18336	29011
解析値[N] (あり)	17500	33900
解析後	破壊なし	破壊

表4 ベークライト解析結果

ベークライト	M4 1d	M4 2d	M4 4d
実験値[N]	1958	4921	9800
解析値[N] (なし)	1290	2430	4184
解析値[N] (あり)	1310	2960	4680
解析後	破壊なし	破壊なし	破壊なし
ベークライト	M6 1d	M6 2d	M6 4d
実験値[N]	5866	11845	20864
解析値[N] (なし)	4610	8570	11700
解析値[N] (あり)	4680	8690	11700
解析後	破壊なし	破壊なし	破壊なし
ベークライト	M8 1d	M8 2d	M8 4d
実験値[N]	9041	18576	35029
解析値[N] (なし)	8000	11500	44700
解析値[N] (あり)	8460	12800	47300
解析後	破壊なし	破壊なし	破壊なし

次に、図7、8にねじ谷底部に三角形要素を加えた場合となしの場合での荷重変位線図の代表例として、A5052 M8 2d, A5052 M4 1dの結果を示す。同図より、三角形要素を加えることで最大荷重が上がっていることがわかる。三角形要素なし・ありでグラフの傾きはほぼ一致すると推測されたが、いくつかの解析結果では傾きが一致しないものもあった。応力が集中するねじ谷底部に三角形要素を加えたことで数値計算に誤差が生じ剛性が変わってしまったと考えられる。

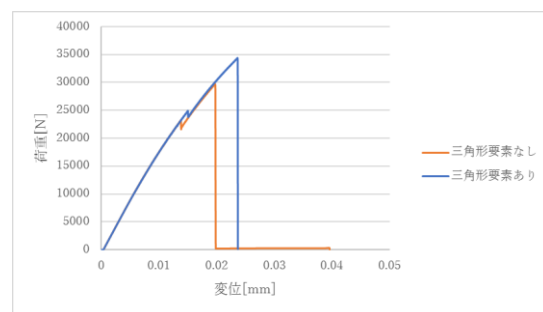


図7 荷重-変位線図 (A5052 M8 2d)

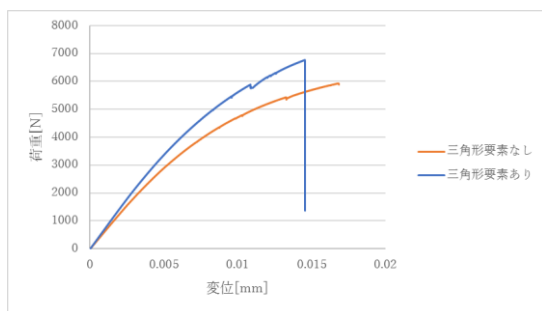


図 8 荷重-変位線図 (A5052 M4 2d)

4. A5052 めねじ引張試験

4.1 概要

2014 年度の研究では、A5052 の引張試験の変位はクロスヘッド変位で取得していた。⁽³⁾ クロスヘッド変位ではクロスヘッドを含めた引張試験機の変形やあそびなどが測定されてしまうため、実際のねじ山変位量ではなかった。そこで、実際のねじ山変位量を測るために 2017 年度にはベークライトめねじに対してレーザー変位計測が行われている。本年度はこの計測を A5052 めねじに対して行い、得られた荷重変位線図を解析結果と比較・検討した。

4.2 実験方法

試験を行うめねじは A5052 のねじ径 M4、M8、はめあい長さ 1d, 2d のものを使用し、おねじはクロモリボルトを用いた。

図 9 に示すように、治具下部にアクリル板を取り付け、レーザーが当たる位置を確認し、治具上部にレーザー変位計を取り付けた。レーザー変位計とアクリル板の隙間は、レーザー変位計の測定範囲に収まるようにした。治具上部に試験片を取り付け、治具下部からクロモリボルトで締め付けた。試験速度は 0.5mm/min に設定した。

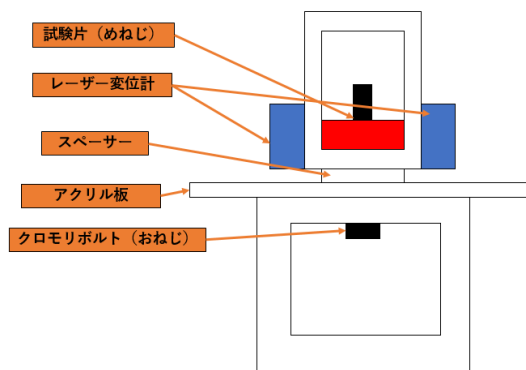


図 9 引張試験概略図

4.3 試験結果

代表例としてベークライト M4 1d の荷重変位線図を図 10, 11 に示す。試験結果と解析結果では、変位は一致しなかった、試験結果と解析結果の変位は M4 の場合 25 倍、M8 の場合 6 倍ほどの差があった。ねじ山の変位にボルト自体の伸びや引張試験機のおそびなどが測定されてしまっているため、変位が一致しないと考えられる。

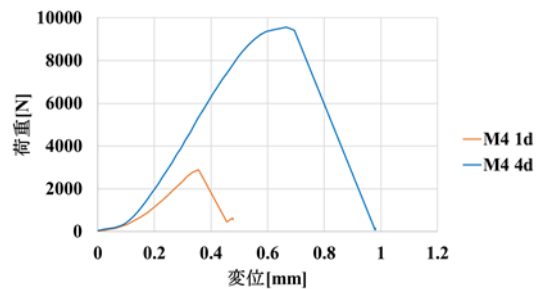


図 10 ベークライト M4 試験結果

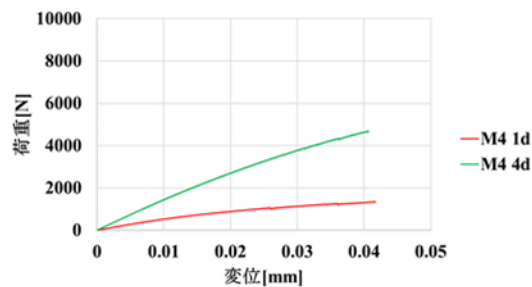


図 11 ベークライト M4 解析結果

5. 結論

自動分割から手動分割に変更することで、破壊が表現できる割合が増えた。また、最大荷重も大きくなる傾向になることがわかった。手動分割に変更したことで、要素のアスペクト比が 1:1 に近づき精度向上につながったと考えられる。

ねじ谷底部に三角形要素を加えることで最大荷重が大きくなる傾向にあることがわかった。三角形要素ありの解析結果では、剛性が高くなるものがあった。応力が集中するねじ谷底部に三角形要素を加えたことで数値計算に誤差が生じ剛性が変わってしまったと考えられる。ねじ谷底部 R を解析モデルで表現することにより、更なる解析精度向上につながると考えられる。

はめあい長さが長くなるほど要素数も多くなり、計算量が膨大になるため解析精度が低くなると考えられる。

参考文献

- (1) 福岡俊道, 技術者のためのねじの力学, コロナ社, 2015 年
- (2) 日高暢大・長井隆博, 低強度めねじ/高強度ボルト締結体の強度と軸力低下, 神奈川大学卒業論文, 2014 年
- (3) 山内廉・山本賢太, 塑性・脆性めねじ強度の試験/解析, 神奈川大学卒業論文, 2017 年
- (4) 野田安亮・近藤和人, 塑性・脆性めねじ強度の予測, 神奈川大学卒業論文, 2018 年
- (5) 日本アルミニウム協会, アルミニウムハンドブック (第 8 版)
- (6) MSC. Marc 2003 Vol.C プログラムメッセージ