

塑性・脆性めねじ強度予測

野田安亮 (神奈川大・学), 近藤和人 (神奈川大・学), 高野敦 (神奈川大)

Yasuaki Noda, Kazuto Kondou, Atsushi Takano (Kanagawa University)

1. はじめに

私たちの身の回りには、建物、家具、電化製品にボルトによる締結体がさまざまなところで使われている。衛星構造ではアルミ合金などの低強度めねじに高強度ボルトを組み合わせている例がある。しかし、ボルト締結体は力学的挙動が複雑であり、設計に必要な資料は十分とは言えない。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結果となるが、めねじ材料の塑性変形まで考えれば降伏応力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と考えられる。

これを受けて当研究室の 2014 年度の研究⁽¹⁾, 2017 年度の研究⁽²⁾でアルミニウム、ベークライトのめねじ強度ははめあい長さに比例することを引張試験により明らかにした。

上記の試験を踏まえ、引張試験と破壊解析の結果を近づけることで今後めねじ試験を行わなくても、材料特性を用いた解析によってめねじ強度を予測できるのではと考え、解析を行うこととした。

当研究室 2014 年度の研究⁽¹⁾において A5052-H112 の最大荷重を取得した、2017 年度の研究⁽²⁾行ったベークライトめねじ引張破壊試験、丸棒引張試験において、最大荷重、材料特性を取得する事ができた。そして 2017 年度の研究で取得した材料特性を用いて非線形有限要素法解析ソフト Marc で塑性解析を行い、解析上の最大荷重と試験で得た最大荷重を比較し

た。比較したところ解析結果が試験結果よりも大きくなった。これは塑性解析において破断が表現できていないことが原因と考えられる。

2017 年度の研究⁽²⁾を踏まえて解析方法を改善し破断を表現する。解析の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、材料強度を用いた解析によってめねじ強度を推定することを目的としている。

2. 解析

2.1 解析材料

2014 年度の研究⁽¹⁾と 2017 年度の研究⁽²⁾で得た材料特性を用いてアルミニウムとベークライトの破壊解析を行う。

2.2 解析方法

2014 年度の研究と同じく MSC Marc を使用した。Marc とは有限要素法を用いて塑性解析を行うことができる非線形構造プログラムである。静的や動的の応答を高い精度でシミュレートすることができる。

2.3 破壊解析

当研究室 2014 年度の研究⁽¹⁾と 2017 年度の研究⁽²⁾では塑性解析を行ったが、解析結果の破壊荷重が試験結果より大きくなった。つまり常に危険側の予測となっている。原因として考えられるのは、塑性変形が表現できているが、破壊が表現できていない事である。そこで、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て解析を行った。

2.3-1 解析手順

めねじおねじのネジサイズは M4, M6, M8 を、はめあい長さ(ねじ径と) を作成した。これらは実験結果に対応させた寸法である。めねじ、おねじ締結体のモデルを作成する際にめねじを弾塑性体、おねじを剛体とし要素は軸対称要素を使用した。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。応力-ひずみ線図は、ベークライトについては丸棒引張試験により取得したもの⁽²⁾、A5052 応力-ひずみ線図はアルミニウムハンドブック(第 8 版)を参考にした。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いる。ねじの谷底の R は表現していない。図 1 に荷重方向と固定位置を示す。図 2 に解析に用いた応力ひずみ線図を示す。

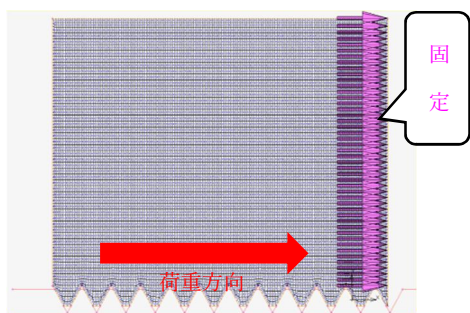


図1 荷重方向と 固定位置

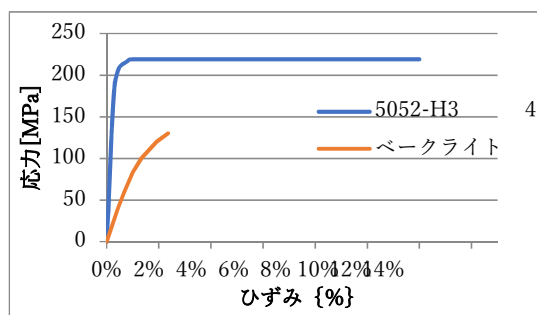


図2 応力ひずみ 線図

2.3-2 破壊条件

破壊条件に下記の最大応力説を用いた。

$$-\sigma'_u < \sigma < \sigma_w, -\tau_u < \tau < \tau_u$$

A5052 場合(アルミニウムハンドブック第 8 版より³⁾)

$$\sigma_u = 219[\text{MPa}], \sigma'_u = 1000[\text{MPa}]$$

vonMises の降伏条件により

$$\tau_u = \sigma_u / \sqrt{3} = 126.43[\text{MPa}]$$

ベークライトの場合

$$\sigma_u = 130[\text{MPa}], \sigma'_u = 1000[\text{MPa}],$$

$$\tau_u = \sigma_u / \sqrt{3} = 75.06[\text{MPa}]$$

圧縮強度は実測や文献値がなかったが、一般に引張強度より十分高いことが知られている。また実際の試験においても固定側の圧縮応力で破損するような現象は見られなかったため、 $\sigma'_u = 1000[\text{MPa}]$ と設定した。

2.4-1 解析後モデル

解析の結果、破壊が生じるまで完了したものと途中でエラーにより解析がストップしたものがあつた。途中でストップしたものもそこまでの荷重は出力されたので、その結果を用いて荷重変位線図を出力した。

代表例として A5052-H34 M6 2d の破壊された様子を図 3 に A5052-H34 M6 2d の塑性変形の様子を図 4 に示す。

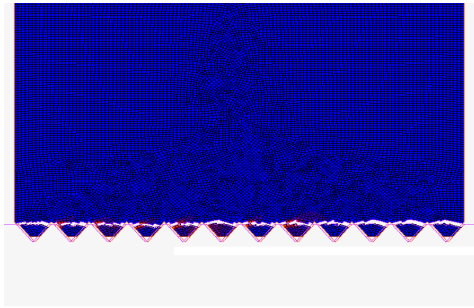


図 3 A 5052-H34 破壊解析後

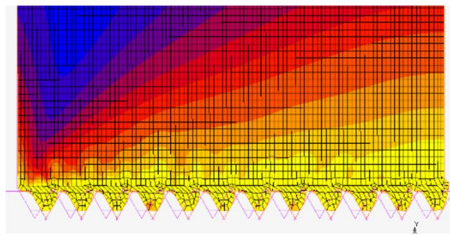


図 4 A 5052-H34 塑性解析後

図 3 と図 4 を比較すると、図 3 にはねじ山に白いところがあるが、それが破壊された場所である。つまり、解析モデルを破壊させることに成功した。

しかし、これ以外のケースにおいては破壊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。

2.4-2 試験 結果と解析結果の比率

各モデルの試験結果と解析結果の最大荷重の比率（解析/試験を比較した）。

表 1, 表 2 に A5052-H34 とベークライトの比率を示す。またその時の解析上のエラーも示す。

表 1 A5052-H34 比率(解析/試験)

| A5052 | M4 | M6 | M8 |
|-------|---------|---------|--------|
| 1 d | 76.3% | 101.8% | 106.9% |
| | error 1 | なし | なし |
| 2 d | 61.8% | 68.7% | 54.5% |
| | なし | error 2 | なし |

表 2 ベークライト 比率(解析/試験)

| ベークライト | M4 | M6 | M8 |
|--------|---------|--------|---------|
| 1 d | 92.4% | 102.6% | 104.1% |
| | なし | なし | なし |
| 2 d | 59.9% | 68.9% | 78.6% |
| | error 3 | なし | なし |
| 4 d | 53.8% | 77.6% | 64.5% |
| | なし | なし | error 1 |

error1 収束していない

error2 解析時間刻みエラー

error3 応力リカバリーエラー

1dの比率(解析/試験)は 76.3%と106.9%と精度が高い結果となった。2d,4dについては、比率は 50%程度のものや 80%近いものもあった。はめあい長さが短いほど精度が高く解析上のエラーが起こりにくい結果となった。解析上のエラーは現在のところ解消できていない。

2.4-3 最大応力

いくつかのモデルの最大応力と解析後モデルを下記に示す。

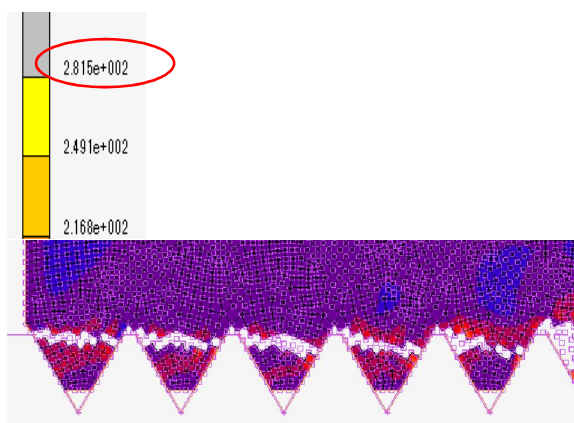


図5 A5052-H34 (M6 1d 解析 /試験=101.8%)

全山破壊はみられたが、破壊後の最大応力が引張強さよりも大きくなった。

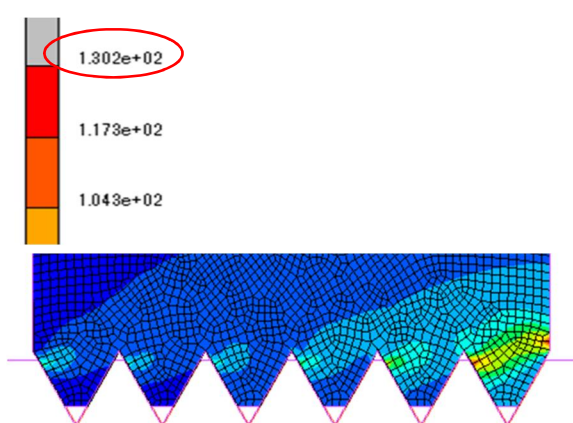


図7 ベークライト (M6 1d 解析/試験=102.6%)

解析後の最大応力が引張強さと一致した。しかし破壊されなかった。また、脆性材料だが応力集中が緩和されている。

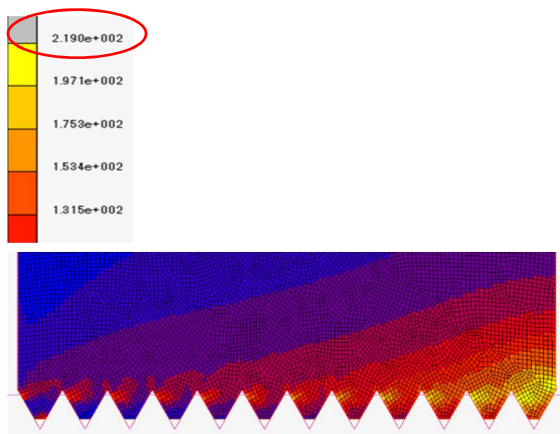


図6 A 5052-H34 (M6 2d 解析 /試験=68.7%)

破壊はみられなかったが、解析後の最大応力が引張強さに一致し応力集中が緩和されている。



図8 ベークライト (M6 4d 解析/試験=77.6%)

解析後の最大応力が引張強さと一致した。しかし破壊されなかった。また、脆性材料だが応力集中が緩和されている。

2.4-4 荷重変位線図

いくつかのモデルの解析結果と試験結果の荷重変位線図を下記に示す。

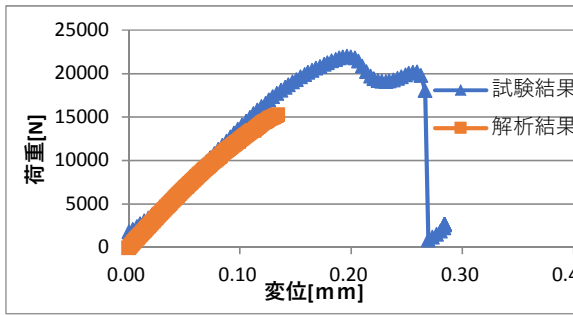


図9 A 5052-H34 M6 2d 解析結果と試験結果

試験結果の傾きとほぼ一致したが、最大荷重は低く比率は68.7%となった。

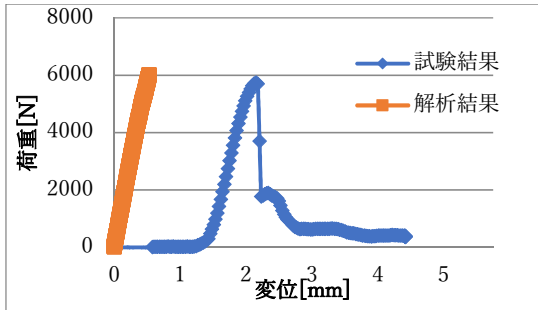


図10 ベークライト M6 1d 解析結果と試験結果

試験結果の傾きとほぼ一致し、最大荷重の比率が102.6%となった。

3.延性破壊条件

3.1-1 延性破壊条件の適用の試み

破壊条件を加えて解析をしたところ、モデルは破壊されず、最大荷重の比率が低いものもあった。そこで解析条件を見直す必要があると考えた。延性破壊条件を有限要素法に組み込みその解析結果から薄板の剪断打ち抜き加工において割れの発生を予測する方法が行われている。(4) この条件を用いて解析を試みた。

3.1-2 延性破壊条件式

延性破壊条件式の最も基本的な Principal-tension Damage Indicator⁽⁵⁾を用いた。

$$\int \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} dt \geq C$$

σ_{max} = 最大主応力

$\bar{\sigma}$ = von Mises stress

C = 延性破壊臨界値

延性破壊臨界値 C は材料特有の値であるため、丸棒の破壊解析を行い試験結果と合わせこむことで同定した。

3.2-1 丸棒破壊解析結果

ベークライトと A5052-H34 の丸棒破壊解析結果を図11および図12に示す。

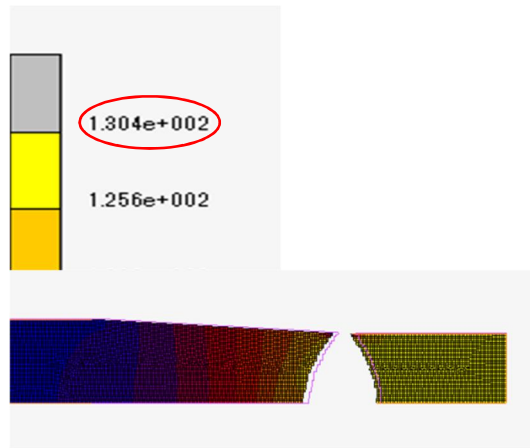


図11 ベークライト丸棒 解析後モデル

ベークライトにおいては $C=0.6697$ の時に、解析後の最大応力が引張強さと一致し、破壊されたことを確認した。

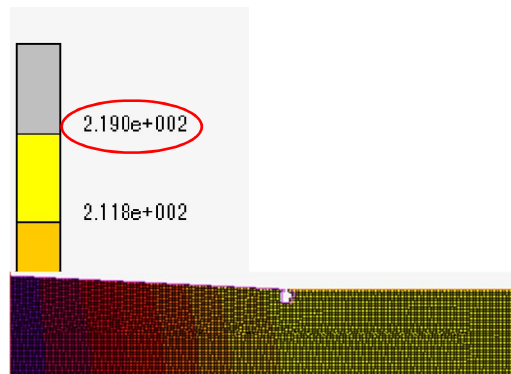


図12 A5052-H34 丸棒 解析後モデル

A5052-H34 においては $C=0.6947$ の時に、

解析後の最大応力が引張強さと一致し、破壊はされなかったが、欠けることを確認した。

3.2-2 めねじ破壊解析結果

上記の延性破壊条件をめねじに反映し解析を行った。

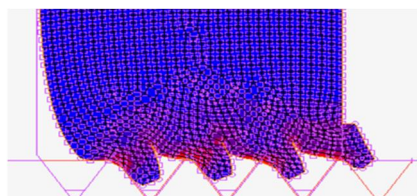
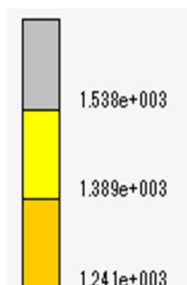


図 13 延性破壊条件ベークライトめねじ解析後モデル

引張強さ 130[MPa]に比べ最大応力が 10 倍以上高くなり、破壊もされなかった。

4. 結論

文献(2)における解析では破壊の表現をすることができなかったが破壊条件を加えたことで破壊を表現することができた。破壊が見られないモデルでも、解析後の最大応力が引張強さに一致し全山がほぼ均一な応力になっていることを確認した。昨年度行った塑性解析では、解析結果が試験結果に比べて荷重は大きくなっていた。一方で今回行った破壊解析による解析結果は、比率の精度は高くないが、試験結果を下回っている。その為、実用上は安全側の予測となっている。解決できていない解析上のエラーがあるため、更なる精度向上の為にはこれらを解決する必要がある。

参考文献

- (1) 日高暢大・長井隆博, 平成 26 年度卒業論文 低強度めねじ/高強度ボルト締結体の強度と軸力低下
- (2) 山内廉・山本賢太, 平成 29 年度卒業論文 塑性・脆性めねじ強度の試験/解析
- (3) アルミニウムハンドブック第 8 版
- (4) 萩原世也 延性破壊条件を用いた打ち抜き加工断面の剪断限界点予測 2014 年
- (5) Marc version 2018.0.0 ヘルプ Volume A : Theory and User Information p667