

## A02 塑性・脆性めねじ強度の試験/解析

山内 廉 (神奈川大・学), 山本賢太 (神奈川大・学), 高野敦 (神奈川大)  
Ren Yamauchi, Kenta Yamamoto, Atsushi Takano (Kanagawa University)

### 1. はじめに

ボルトによる締結体は多くのところで使われており、衛星構造では軽量化のために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、ボルト締結体は単純な構成ながらその力学的挙動は複雑であり、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 2014 年度の研究<sup>1)</sup>では、アルミニウム合金めねじ強度ははめあい長さに比例する事を明らかにした。これはめねじ材料の塑性変形により、おねじとめねじのはめあいの応力集中が均一化したためだと考えられる。これを踏まえ、当研究室 2016 年度の研究<sup>2)</sup>では塑性変形が少ない脆性材料においても、めねじ強度ははめあい長さに比例するのかを確かめるため、安価かつ加工が容易なベークライトを用いてめねじ引張破壊試験を行ったが、正確なデータが得られなかった。

そこで私たちはベークライトめねじ引張破壊試験を再度行い、塑性変形が少ない脆性材料においてもめねじ強度ははめあい長さに比例するのかを確かめる事とした。さらに塑性解析の結果と比較する事で、今後めねじ強度の予測に繋げていく事ができるのではないかと考え、試験と解析を行った。

### 2. 試験

#### 2.1 ベークライト丸棒の引張試験

当研究室 2016 年度の研究<sup>2)</sup>でベークライト丸棒を 2 本作成して引張試験を行った。しかし、1 本目は  $R=6.5[\text{mm}]$  のフィレット部で破断し、2 本目はつかみ部で試験機のチャックが食い込み破断してしまったことから、正確な試験結果を得ることができなかった。

そこで私たちはフィレット部  $R$  の寸法を JIS 規格に則り変更した新試験片を作成し、解析で用いる材料特性を取得するために再度丸棒引張試験を行った。

##### 2.1.1 試験条件

丸棒試験片を図 1 に示す。



- ・紙ベークライト(黒)を使用する。
- ・JIS 規格に則りフィレット部  $R=15[\text{mm}]$  に変更する。
- ・しかし、フィレット部に応力集中が生じて破断してしまったため、中央部で破断させるために紙やすりで滑らかな曲線ができるように削り、中央部直径を小さくする。
- ・つかみ部での破断を防ぐため、つかみ部にエポキシ樹脂を塗布する。

#### 2-1-2 試験結果

試験片破断後の様子を図 2 に、試験により取得した応力-ひずみ線図を図 3 に示す。



図 2 試験片破断後の様子

表 1 丸棒引張試験結果

	最大荷重[N]	断面積[mm <sup>2</sup> ]	最大応力[N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	ヤング率
1本目	12189	102.1	119.4	0.35	9168
2本目	13046	100.3	130.1	0.37	9507

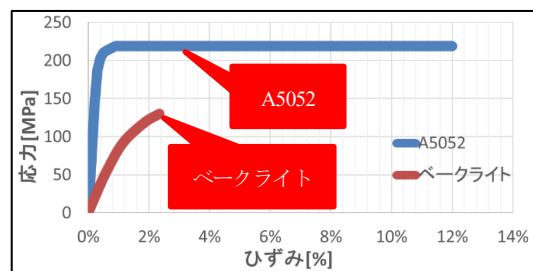


図 3 取得した応力-ひずみ線図

図 2, 3 を見てわかるように試験片を加工したことで中央部で破断させることができ、正確な応力-ひずみ線図、ポアソン比、ヤング率を取得する事ができた。また A5052-H34 はひずみ 12%<sup>3)</sup>、ベークライトはひずみ 2.4%で破断した。ベークライトにおいては完全な脆性挙動はしておらず、多少の塑性変形を示していることがわかる。

## 2-2 ベークライトめねじの引張破壊試験

当研究室 2014 年度の研究<sup>1)</sup>で、アルミめねじでは破壊荷重がはめあい長さに比例する事が明らかになった。これはめねじ材料の塑性変形により、おねじとめねじのはめあいの応力集中が均一化したためであると考えられる。

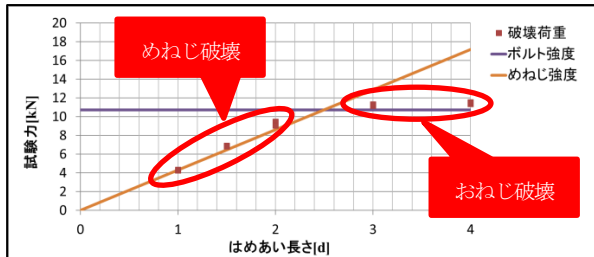


図4 A5052-H112\_M4 破壊荷重(2014年度)

図4でわかるように、はめあい長さ2dまでは破壊荷重がはめあい長さに比例しているが、3d以降はおねじ破壊を起こし、ボルト強度の直線に沿う結果となっている。尚、この試験時はA5052-H112を使用して試験を行っていた。

そこで当研究室 2016 年度の研究<sup>2)</sup>において、塑性変形が少ないベークライトでめねじを作成し、めねじ強度がはめあい長さに比例しないことを確かめるために引張破壊試験を行った。ところがM4, M6めねじはヒビや割れが生じ、破壊荷重がはめあい長さに比例しているか確認できず、M8めねじは破壊荷重がはめあい長さに比例してしまっていた。

以上の結果を踏まえ、我々はM4, M6, M8のベークライトめねじを製作し、めねじ強度とはめあい長さの関係を明らかにするために、めねじ引張破壊試験を行う事とした。

2016年度<sup>2)</sup>はめねじの平面度やねじ穴の直角度が良くなく、ねじ穴がきついものもあったため、今年度はめねじ製作の際の加工機械や加工方法を見直し、精度を上げた。

### 2-2-1 試験装置

めねじ引張破壊試験に使用する治具の構成を図5に示す。治具にめねじとクロモリボルトを組み合わせ、引張試験機に取り付けた。

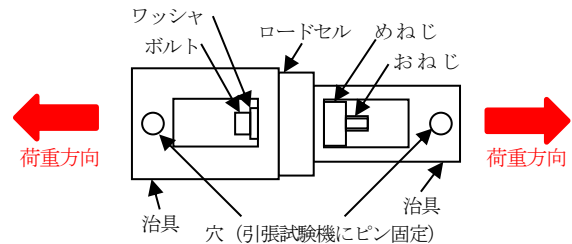


図5 治具構成

### 2-2-2 めねじ強度の評価方法

2014年度の研究<sup>1)</sup>より求められた下式を用いた。

$$K_s = F / (\pi \times d \times l \times \tau_u)$$

$F$ : めねじ破断強度  $d$ : 呼び径  $l$ : はめあい長さ

$\tau_u$ : めねじ素材せん断強度

$K_s$ : めねじのねじ山強度に関する係数

アルミめねじでは  $K_s$  で評価を行ったのでベークライトめねじでも  $K_s$  で評価を行おうとしたが、ベークライトは  $\tau_u$  が不明であったので、最大主応力説に基づいて  $\tau_u = \sigma_u / 2$  とみなし、 $K_s$  で評価を行った。また、A5052-H112では  $K_s = 0.697 \sim 0.757$  (平均 0.729) だった。

### 2-2-3 試験結果

表2 ベークライトめねじの引張破壊試験結果

	はめあい長さ [mm]	No.	最大荷重 F [N]	平均 [N]	$K_s$	備考
M4	1d	1	1958	1958	0.599	めねじ破壊、ひびが入った
		2	5091	4921	0.778	めねじ破壊、ひびが入った
	2d	1	4750		0.727	めねじ破壊、ひびが入った
		2	10146	9800	0.776	めねじ破壊
M6	1d	1	5734		0.780	めねじ破壊、ひびが入った
		2	6038	5886	0.821	めねじ破壊
	2d	1	11805		0.803	めねじ破壊
		2	11884	11845	0.808	めねじ破壊
	4d	1	21144		0.719	めねじ破壊
		2	20584	20864	0.700	めねじ破壊
M8	1d	1	9530		0.729	めねじ破壊、ひびが入った
		2	8551	9041	0.654	めねじ破壊、ふたつに割れた
	2d	1	18349		0.702	めねじ破壊、ひびが入った
		2	18803	18576	0.719	めねじ破壊、ひびが入った
	4d	1	36176		0.692	めねじ破壊
		2	33882	35029	0.648	めねじ破壊

ベークライトめねじの引張破壊試験結果を表2に示す。見てわかるように  $K_s = 0.599 \sim 0.821$  (平均 0.728) の範囲で多少のばらつきはあるもののめねじ長さやねじサイズによらないことから、ベークライトめねじ強度ははめあい長さに比例するのではないかと考えられる。

ベークライトめねじ引張破壊試験結果をグラフ化したものを図6に示す。

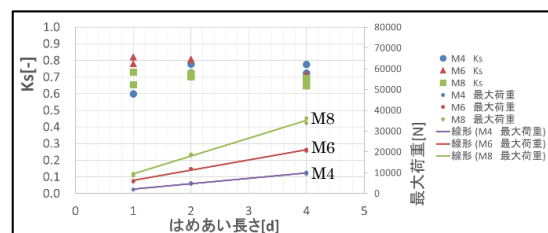


図6 めねじ引張破壊試験結果グラフ

$K_s=0.599\sim 0.821$ (平均 0.728)の範囲に収まっていること、また多少のばらつきはあるが破壊荷重がはめあい長さに比例していることがわかる。

### 3. 塑性解析と試験結果との比較

前述したように、当研究室 2014 年度の研究<sup>(1)</sup>において A5052-H112 の破壊荷重が取得できた。また今年度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、破壊荷重、材料特性を取得する事ができた。

上記試験で得た材料特性・寸法を用いて、Marc で塑性解析を行い、解析上の破壊荷重と試験で得た破壊荷重を比較する。試験結果と解析結果の破壊荷重が一致するようであれば、今後めねじ試験を行わなくても、応力-ひずみ線図を用いた解析によってめねじ強度を推定する事ができると考えられる。

#### 3-1 塑性解析

おねじ・めねじ締結体解析モデルを図 7 に示す。

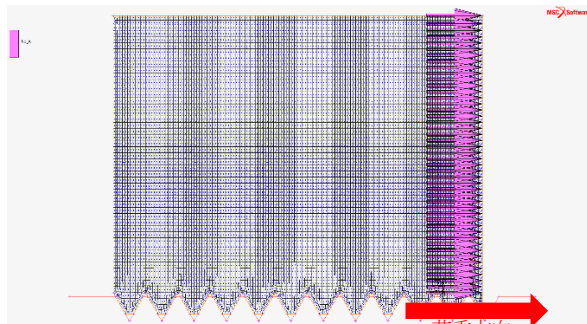


図 7 おねじ・めねじ締結体解析モデル

モデル作成の際に、めねじを弾塑性体、おねじを剛体として作成する。その後ヤング率、ポアソン比、応力-ひずみ線図、境界条件(図 7 のモデルに沿って多数分布している矢印)を入力し、解析を行い最大荷重を算出する。境界条件を設定する際は、試験時同様に上面のみを抑えた。

解析時の注意点を以下に示す。

- ・軸対称要素を使用した。
- ・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って取得したもの。A5052-H112 についてはデータが無かったので、A5052-H34 の応力-ひずみ線図で代用した。
- ・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 R は表現していない。

## 3-2 解析結果

### 3-2-1 A5052-H34 試験結果と解析結果の比較

表 3 A5052-H34 試験結果と解析結果の比較

A5052	はめあい長さ [mm]	破壊荷重 [N]		比率 [%] (試験/解析)	試験結果 $K_s$	解析結果 $K_s$
		試験データ	解析結果			
M4	1d	4295	5960	72%	0.662	0.938
	2d	9265	11700	79%	0.714	0.920
	4d	18530	23800	78%	0.714	0.936
M6	1d	10115	11900	85%	0.693	0.832
	2d	21825	25900	84%	0.748	0.906
	4d	43650	51700	84%	0.748	0.904
M8	1d	18155	23200	78%	0.700	0.913
	2d	36310	48100	75%	0.700	0.946
	4d	72620	91400	79%	0.700	0.899

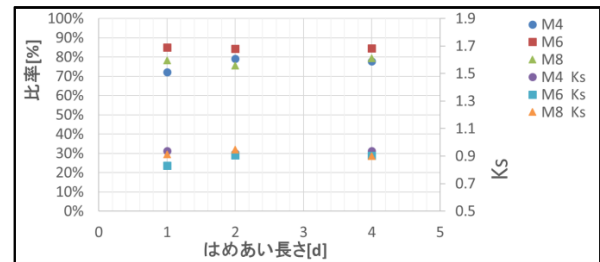


図 8 A5052-H34 比率と  $K_s$ (解析結果)

A5052-H34 試験結果と解析結果の比較を表 3 と図 8 に、M6\_2d 荷重-変位線図の比較を図 9 に示す。

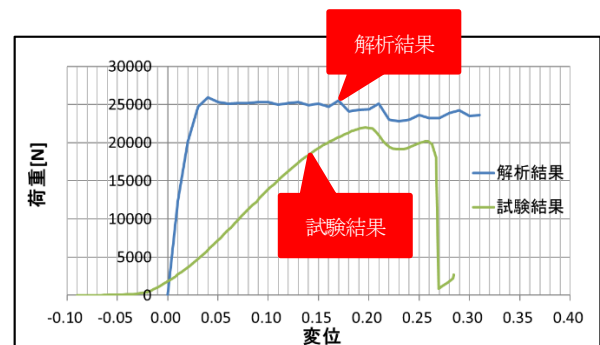


図 9 A5052-H34 M6\_2d 試験結果と解析結果  
荷重-変位線図

試験結果と解析結果の比率は 72%~85%と多少のばらつきを示している。また解析結果の  $K_s$  は 0.832~0.946 とばらつきは小さい。さらに破壊荷重を見てみると解析結果が試験結果よりも大きくなっていることが図 9 より読み取れる。試験結果の変位は引張試験機のクロスヘッド変位であり、実際のねじ山の変位ではないため、試験結果の変位を 0.15 倍して両者のグラフが見やすい範囲に収まるようにした。

### 3-2-2 ベークライト 試験結果と解析結果の比較

ベークライト 試験結果と解析結果の比較を表 4 と図 10 に、荷重-変位線図を図 11 に示す。

表4 ベークライト 試験結果と解析結果の比較

ベークライト	はめあい長さ [mm]	破壊荷重[N]		比率[%] (試験/解析)	試験結果 K <sub>s</sub>	解析結果 K <sub>s</sub>
		試験データ	解析結果			
M4	1d	1958	3310	59%	0.599	1.013
	2d	4921	6440	76%	0.753	0.986
	4d	9800	12800	77%	0.750	0.979
M6	1d	5866	7180	82%	0.798	0.977
	2d	11845	14100	84%	0.806	0.959
	4d	20864	27800	75%	0.710	0.945
M8	1d	9041	12800	71%	0.692	0.979
	2d	18576	25200	74%	0.711	0.964
	4d	35029	49300	71%	0.670	0.943

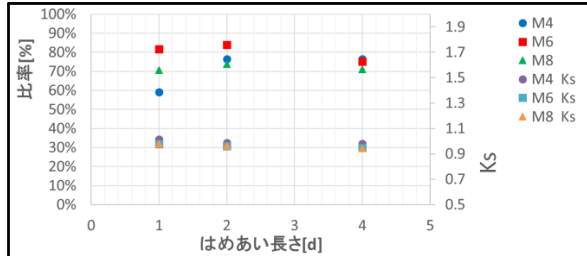


図10 ベークライト 比率と K<sub>s</sub>(解析結果)

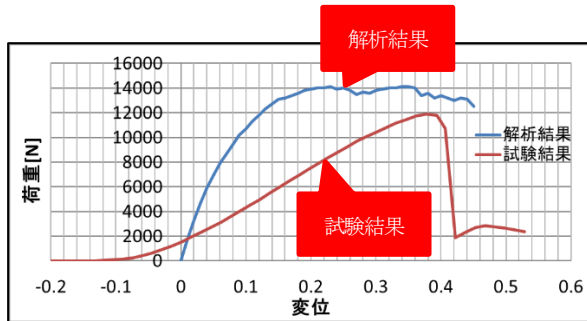


図11 ベークライト\_M6\_2d 試験結果と解析結果  
荷重-変位線図

試験結果と解析結果の比率は 60%~84%と多少のばらつきを示している。解析結果の K<sub>s</sub>は 0.943~1.013 とばらつきは小さく、破壊荷重は解析結果が試験結果よりも大きくなっていることが図 11 よりわかる。図 11 の荷重-変位線図は変位を 0.65 倍してある。

### 3-2-3 考察

3-2-1, 3-2-2 において解析結果が試験結果よりも大きかった原因として、解析時に破壊が表現できていないことが考えられる。

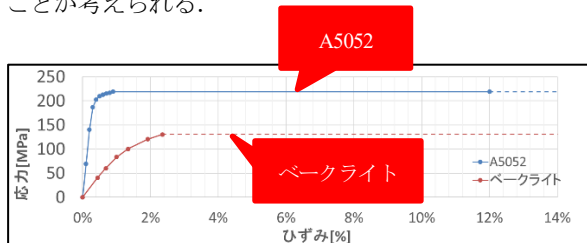


図12 解析に用いた応力-ひずみ線図

解析に用いた A5052-H34 とベークライトの応力-ひずみ線図を図 12 に示す。Marc による塑性解析で破断を表現したかったが、解析ができなかったので、やむを得

ず破断点以降を水平に延長したところ解析を回すことができたが、破断の表現はできていない。これが原因で解析結果の破壊荷重が試験結果に比べて大きくなっていると考えられる。

図 13 に A5052-H34 とベークライトの M6\_1d,4d の解析時応力分布図を示す。

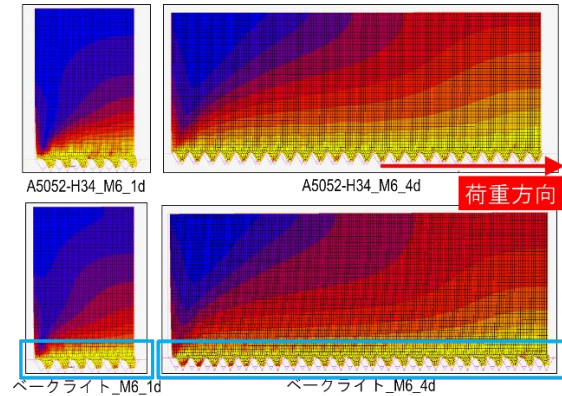


図13 A5052-H34, ベークライト M6 解析時応力分布

下図のベークライトを見てわかるように、脆性挙動を示すはずが、応力の均一化が起きていることに加え、破壊していない。この結果から解析方法の改善が必要であると考えた。

## 4. 結論

ベークライトめねじ引張破壊試験を行った結果 3-2-2 節より、実験結果の K<sub>s</sub>が A5052-H34 とベークライトでほとんど同じ値が得られた。したがって K<sub>s</sub>がはめあい長さやねじサイズによらないことから、ベークライトめねじ強度ははめあい長さに比例する結果となった。これはめねじが完全な脆性挙動を示さずわかたに塑性変形を起こし、おねじとめねじのはめあいの応力集中が均一化したためだと考えられる。

塑性解析を行い破断荷重を算出した結果、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考えられる。解析方法を改善し破断を表現することができれば、今後は解析予測が可能になると考えられる。

## 5. 参考文献

- (1)日高・長井, 低強度めねじ/高強度ボルト締結体の強度と軸力低下, 神奈川大学論文, 2014 年.
- (2)佐々木, めねじ強度と軸力低下神奈川大学論文, 2016 年.
- (3)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), p.43