

スレッドローリングねじ接合部引張破壊性状の解析による検討

正会員 ○太田紘恵* 同 川邊裕一***
同 桑原 進** 同 中島一浩***

スレッドローリングねじ 引張接合 塑性解析
有限要素解析

1. はじめに

本研究は、非構造部材において使用されてきたスレッドローリングねじ（以下、ボルトと称する）を高強度化および太径化することにより、建築構造部材へ適用を目的とする。本報では、ねじ形状・寸法や締結条件がねじ締結部の破壊性状や強度に及ぼす影響について塑性解析および有限要素解析を用いて検討する。

2. 塑性解析

2.1 解析条件

引張破壊強度を算定するねじ締結部の詳細ならびに記号の定義を図1に示す。本来、ねじ形状は螺旋状であるが、本報は計算を単純にするため、軸対象の形状を仮定する。本計算では図1中破線で示すせん断破壊とボルト軸部の引張破壊の2種の破壊モードと想定する。

ねじ部の長さは被締結材の板厚 t_p 以上とし、板厚方向にすべてのねじ山がかかっている状態を想定する。ねじ部近傍は熱処理による硬度の上昇が確認されており、ボルト軸部の引張強さの 2.95 倍の引張強さを仮定する。被締結材に形成されたためねじ近傍も塑性加工に伴う強度上昇が考えられるが、せん断破壊断面全体の強度に及ぼす影響は小さいとして本計算では考慮しない。

ボルトの引張強さはビッカース硬さ H_v を用いて(1)式より近似換算する。

$${}_b\sigma_u = 3.12 \times H_v + 16 \quad (1)$$

2.2 破壊強度算定式

ねじ締結部の引張破断時における破壊強度の算定を行う。ボルト軸部の引張破壊強度 P_1 を(2)式、ボルトのおねじ山せん断破壊強度 P_{2b} を(3)式、被締結材におけるめねじ山せん断破壊強度 P_{2p} を(4)式により求める。

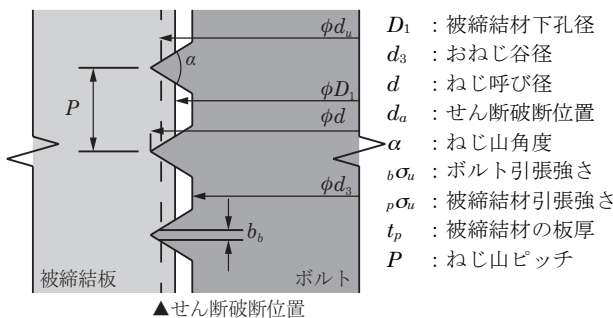


図1 ねじ締結部詳細図

$$P_1 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} {}_b\sigma_u \quad (2)$$

$$P_{2b} = \frac{t_p}{P} \pi \cdot d_u \cdot b_b \cdot 2.95 \frac{{}_b\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

$$P_{2p} = \frac{t_p}{P} \pi \cdot d_u \cdot (P - b_b) \frac{{}_p\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

ただし、せん断破壊位置 d_u が $D_1 < d_u \leq d$ の場合、ねじ部のせん断破壊強度 P_2 は(3)、(4)式を足し合わせた(5)式で得られる。また、被締結材の端で破断する $d_u = D_1$ の場合、おねじのせん断破壊強度 P_3 は(6)式で得られる。

$$P_2 = \frac{t_p}{P} \pi \cdot \frac{d_u}{\sqrt{3}} \left\{ P \cdot {}_p\sigma_u + (d - d_u) \tan \frac{\alpha}{2} (2.95 {}_b\sigma_u - {}_p\sigma_u) \right\} \quad (5)$$

$$P_3 = \frac{t_p}{P} \pi \cdot D_1 \left\{ P - (d - D_1) \tan \frac{\alpha}{2} \right\} \frac{{}_p\sigma_u}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

塑性解析における変数は被締結材の板厚 t_p 、ねじの呼び径 d 、被締結材の下孔径 D_1 、ねじ山ピッチ P 、ねじ山角度 α とする。それぞれのパラメータの代入値を表1に示す。また、既定値を下線で示す。

2.3 算定結果

破壊強度算定式により得られた破壊強度 P_1, P_2, P_3 のうち最小値を破壊強度 P_f とする。破壊強度 P_f と板厚 t_p の関係をねじ呼び径をパラメータとして図2に示す。図の(a)は基本形状、(b)は下孔径が大きい場合、(c)はねじ山角度が小さい場合を示す。また、ねじ呼び径を記号で、破壊モードを線種で示す。

図2(a)より板厚 t_p が大きくなるにしたがい、破壊部位がねじ部せん断破壊から軸部破壊へと移行、ねじ呼び径

表1 算定パラメータ

パラメータ	代入値(既定値)
被締結材板厚 t_p [mm]	3.2, 4.5, 6.0, 9.0, 12.0, 16.0, 19.0, 22.0
ねじ呼び径 d [mm]	8, 10, 12, 16, 20, 22
被締結材下孔径 D_1 [mm]	$d-0.25$, <u>$d-0.50$</u> , $d-0.75$
ねじ山ピッチ P [mm]	1.2, <u>1.6</u>
ねじ山角度 α [°]	45, <u>60</u> , 90

$H_v = 200$ [HV], ${}_b\sigma_u = 640$ [N/mm²], ${}_p\sigma_u = 400$ [N/mm²],
 $d_3 = d-0.85$ [mm]

が大きくなるにしたがい、ねじ部せん断破壊しやすくなることわかる。ボルト軸部の強度を有効に利用（ねじ抜けを起こさないよう）するためには、被締結材の板厚に応じた呼び径のボルトが必要となる。

また、図 2(b)より下孔径が大きくなると軸部破断する板厚の範囲は大きくなる。ねじ山のかかりが減り、ねじ山のせん断破壊強度が低くなるためである。同様に、図 2(c)よりねじ山角度が小さくなるとねじ部破断が生じやすくなる。これらの傾向から、今回のパラメータの中で最も軸部破断になりやすい組み合わせを図 2(d)に示す。

被締結材ならびにボルトねじ部の材料強度を有効に活用するためには、軸部破断、ねじ部せん断破壊（おねじでの破断とめねじでの破断）がほぼ同時に生じる形状を設定することが望ましい。追加解析の結果、この形状は以下ようになる。ただし、各値はその他のパラメータを既定値とした場合に得られる値である。

- ・下孔径 D_1 : $(d - 0.64) \sim (d - 0.60)$ mm
- ・ねじ山ピッチ P : 1.26 ~ 1.33 mm
- ・ねじ山角度 α : $69 \sim 72^\circ$

今回の解析結果に限れば、現在のねじ締結部の形状・寸法は適正值に近い値であるといえる。

3. 有限要素解析

塑性解析では弾性変形を考慮していないため、実験で観察されたおねじとめねじが同時に破壊するモードを

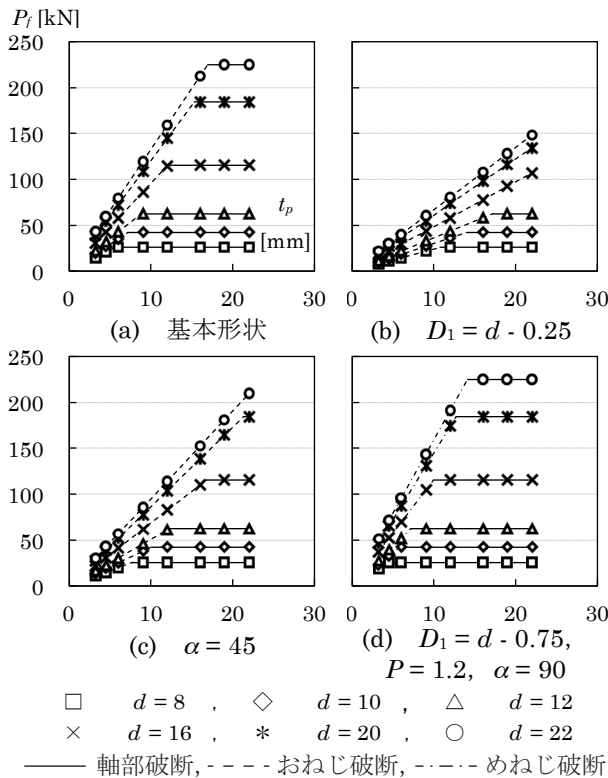


図 2 破壊強度 P_f - 板厚 t_p 関係

現することができない。そのため、有限要素法解析を行い、実験での破壊モードとの対応を検討する。解析には汎用非線形解析プログラム MSC. Marc mentat 2015 を用いる。

解析対象のねじ呼び径を 16mm とし、板厚 19mm の被締結材に締結する。図 3 に実験での载荷状況を示す。解析モデルは図の破線部内を軸対称平面モデルとして、図 4 に示す境界条件を与える。ボルト軸部に軸方向に強制変位を与える。被締結材の端部は固定端とする。

ねじ部の材料特性はねじ部素材の圧縮試験より得られた公称応力度-公称ひずみ度関係をもとに、真応力度-塑性ひずみ度関係に変換して用いる。おねじとめねじの接触面要素は接触体を適用し、摩擦係数は 0.25 を導入する。

図 5 に強制変位 0.1mm のときのねじ山周辺の相当応力度を降伏応力度で除した分布を示す。なお、変形図は実際の変位量を 5 倍に拡大している。降伏応力度に対する相当応力度の比が 1.0 を超える白色の部分はずでに降伏している。ボルト軸方向に応力分布が異なり、引抜き力が大きく作用する上側のねじ山周辺ではめねじ全体が降伏している。一方、下側ではめねじの一部は降伏にまで至らずおねじ部分に大きな応力が作用している。この状況は、実際のねじの引き抜き試験においても観察されたボルト頭に近い部分がめねじ破壊、ボルト先端がおねじ破壊するモードと一致する。

参考文献

- 1) 藤井勝義ら：独自のねじ形状を有するスレッドローリングねじの締結特性，日本建築学会学術講演梗概集，2017.8（投稿中）

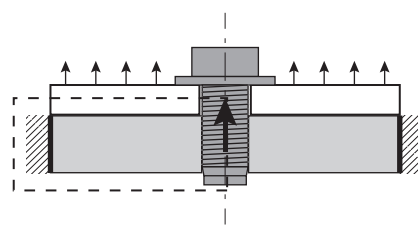


図 3 载荷状況

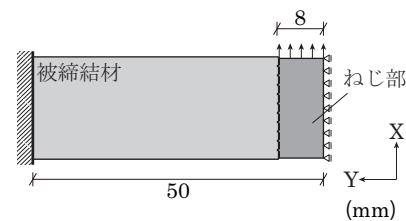


図 4 境界条件

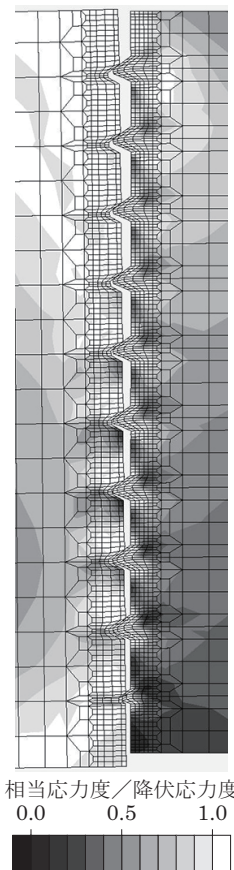


図 5 ねじ部周辺応力分布 (強制変位 0.1mm)

*大阪大学大学院 地球総合工学専攻 大学院生
 **大阪大学大学院 地球総合工学専攻 准教授・博士(工学)
 ***ロブテックスファスニングシステム

*Graduate Student, Graduate School of Eng., Osaka Univ.
 **Associate Prof., Osaka Univ., Dr. Eng.
 ***Lobtex Fastening System Co., Ltd.