

耐遅れ破壊性能向上を目指した高力ボルト新ねじ形状の検討 (FEM 解析による検討)

正会員 ○下山晃希* 同 武田淳***
同 桑原進** 同 中島一浩***

高力ボルト	高強度化	ねじ形状
FEM 解析	応力集中	遅れ破壊

1. 序

高力ボルトの高強度化に対する最大の課題は遅れ破壊の発生であり、遅れ破壊が生じる箇所としてボルトのねじ部、不完全ねじ部、ボルト頭下などが考えられる。本報では M16 高力ボルトの遊びねじ部及びナットかかりねじ部(図 1 参照)を対象に FEM 解析を行うことにより、遅れ破壊に有効なボルトのねじ形状の検討を行う。解析には汎用非線形解析プログラム MSC.Marc2024 を用いる。

2. ねじ形状

図 2 に M16 高力ボルトのねじ基準寸法¹⁾を、図 3 にねじ形状と寸法を示す。ねじ形状は JIS B 0205-1~4 で規定されているメートル並目ねじ(以下 JIS)、R-r、中央曲率、ボルト頭側(右)及び先端側(左)の曲率とフランク面への入射角の 3 種類をパラメータとする 2 種類の新形状を考える。R-r は文献²⁾で検討されているねじ形状の中で最適な形状であり、現在の超高力ボルトのねじ形状の元になっている形状である。ねじの記号は、「中央曲率」-「曲率」ht 「フランク面の入射角」と表現する。ねじ形状の特徴はざぐりの有無(有: No.3 無: No.1, 2, 4)である。ここで、ざぐりとはフランク面へ 0°で入射したボルト谷の形状のことを指す。さらに、おねじとめねじの隙間 e を最小・最大にしたモデルを作成する。隙間 e は JIS で規定された公

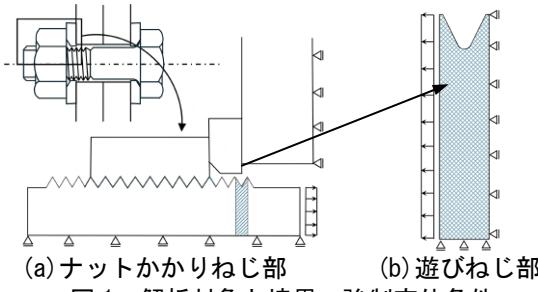


図 1 解析対象と境界・強制変位条件

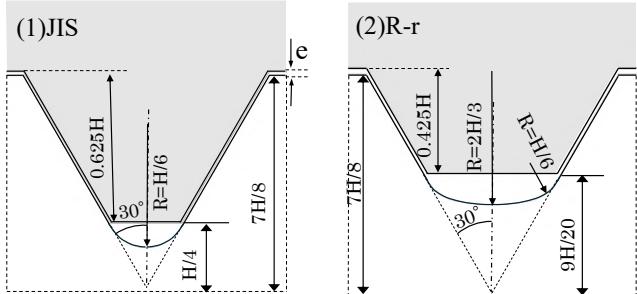


図 3 ねじ形状と寸法

差より求めており、最小はめねじの内径 $D_l=14.210\text{mm}$ 、おねじの外径 $d=15.682\text{mm}$ の場合であり、 $e=0.019\text{mm}$ である。一方、 e が最大となるのはめねじの内径 $D_l=13.835\text{mm}$ 、おねじの外径 $d=15.962\text{mm}$ の場合であり、 $e=0.347\text{mm}$ である。ナットのめねじ高さは各形状によって異なる。ざぐりのない形状(No.1, 2, 4)では図 3 に示すようにフランクの垂直方向の高さとナットかかり高さが等しく、ざぐりを持つ形状(No.3)ではざぐりによりボルト谷部に十分な空間を確保できるため、ナットのかかり高さをより大きく設計することが可能となる。

3. 遊びねじ部の単純引張解析

ナットがかかっていないボルトの遊びねじ部の単純引張を想定し、解析を行う。解析対象は図 1 の(b)に示すねじ 1 山分とする軸対称問題として扱い、一様な強制変位を与える。解析は 8 節点 4 辺形要素を用い、図 4 に JIS を例としたメッシュ割を示す。ボルトの等級は F10T、標準ボルト張力は 117kN とし、解析ではこれを導入した状態を対象とする。また、図 6 に解析モデルの材料特性で用いる相当応力度—相当塑性歪度関係³⁾を示す。

<解析結果概要> 表 1 にねじ谷底に生じる最大相当応力度(以下 σ_{max})と最大相当塑性歪度(以下 ϵ_{max})を、図 5 では ϵ_{max} を棒グラフで表す。ここで、図中の $\bar{\sigma}$ は標準ボルト張力を各ねじ形状のボルト中心からボルト谷最深部までの距離(以下おねじ谷径)を半径とする円の面積で除した応力

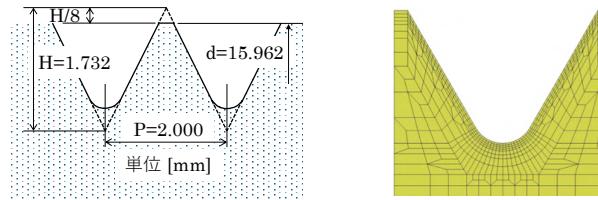


図 4 解析対象のメッシュ割例

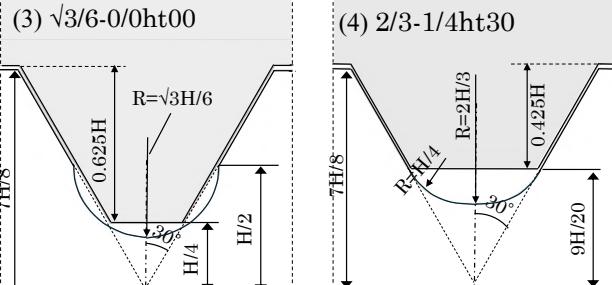


表 1 最大相当応力度 σ_{\max} ・最大相当塑性歪度 ϵ_{\max}

No.	記号	遊びねじ部				ナットかかり部					
						e最小		e最大			
		σ_{\max} [N/mm ²]	$\sigma_{\max}/\bar{\sigma}$	ϵ_{\max} [μ]	$\epsilon_{\max}/\epsilon_{R-r}$	σ_{\max} [N/mm ²]	ϵ_{\max} [μ]	$\epsilon_{\max}/\epsilon_{R-r}$	σ_{\max} [N/mm ²]	ϵ_{\max} [μ]	$\epsilon_{\max}/\epsilon_{R-r}$
1	JIS	1008.0	1.234	11541	5.05	1023	27029	1.53	1026	29692	1.55
2	R-r	888.6	1.194	2284	1.00	1014	17648	1.00	1015	19203	1.00
3	$\sqrt{3}/6-0/0ht00$	977.3	1.224	6698	2.93	1012.4	16340	0.93	1014	18067	0.94
4	$2/3-1/4ht30$	909.9	1.193	2960	1.00	1011.2	15147	0.86	1012	14301	0.74

$<\epsilon_{\min}>$

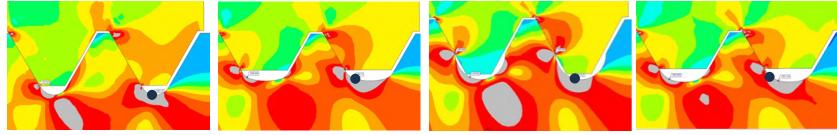


図 8 相当応力度分布 (上段 : e_{\min} , 下段 : e_{\max})

を、 $\epsilon_{\max}/\epsilon_{R-r}$ は各ねじ形状の ϵ_{\max} を R-r の ϵ_{\max} で除した値を示す。表 1、図 5 より JIS 形状の ϵ_{\max} を基準にすると、全ての形状において ϵ_{\max} は減少している。

4. ナットはめあい部の接触問題解析

ナットはめあい部を対象とし、ボルト、ナット、座金、被締付け材の 4 体の接触問題として解析を行う。モデルはボルトの中心軸周りに回転させた回転体とみなし軸対称問題として扱う。図 1 の(a)に解析モデルの境界条件及び強制変位条件を示す。高力ボルトの材料特性及び標準ボルト張力は 3. と同様とし、ナット、座金、被締付け材の材料特性は降伏応力度 900N/mm² の完全弾塑性型とする。解析対象の各構成部品の接触面での摩擦係数はねじ面 0.15、ナット座面 0.2、座金座面 0.3 とする。

<解析結果概要> 表 1 に解析結果、図 5 に ϵ_{\max} をグラフに示す。また、図 8 に No.3 の標準ボルト張力導入時の相当応力度分布を示す。図 7 より、ねじ山にかかる応力は第 1 ねじ山が最も大きく、加力方向から離れるにしたがい応力も小さくなる。図 8 には標準ボルト張力導入時の第 1・第 2 ねじ山における e 最大時・最小時の相当応力度分布を示す。ここで、図中の黒丸は σ_{\max} の発生位置を表す。図 8 より、 σ_{\max} 発生位置は 3. の単純引張時とは異なりねじ谷底の最深部ではなくボルトとナット接触側に移動する。これにより、複数の円弧を持つねじ形状では σ_{\max} 発生位置での曲率半径は 3. とは異なる場合がある。表 1 と図 5 より、JIS 形状の σ_{\max} 、 ϵ_{\max} を基準にすると、その他の全ての形状の σ_{\max} 、 ϵ_{\max} は 3. と同様 JIS 形状よりも低い数値を示している。R-r の ϵ_{\max} を基準とした場合では、No.3、No.4 の ϵ_{\max} はそれぞれ 7.4%、14.2% 緩和している。また、応力集中位置での曲率半径は No.3 で $\sqrt{3}H/6$ 、

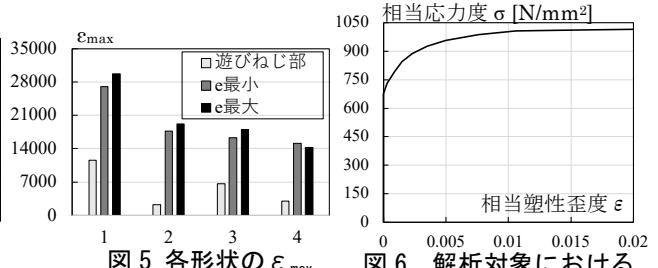


図 5 各形状の ϵ_{\max}

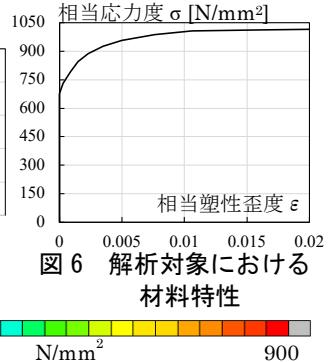


図 6 解析対象における
材料特性

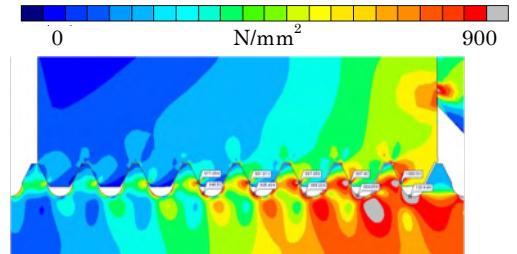


図 7 はめあい全体における相当応力度分布 (JIS)

No.4 で H/4 であり、どちらも R-r の曲率半径 H/6 よりも大きい。ナット接触時の ϵ_{\max} の抑制には曲率半径の大きさが寄与していると考えられる。e 最大時の ϵ_{\max} は R-r の ϵ_{\max} を基準に No.3 で -5.9%、No.4 で -25.5% 減少し、No.3 と No.4 は耐遅れ破壊性能は高いと考えられる。ここで、図 8 より、ざぐり形状を持たない R-r 及び No.4 では、e 最大時にナットとボルトのはめあい長さが短くなり、ナット接触位置に応力が集中しているため、ねじ山のせん断破壊が発生する可能性がある。No.4 の e 最大時の ϵ_{\max} が e 最小時よりも低下している要因についても、No.4 が最もねじ山のせん断方向の塑性化が進行しており、ねじ山の変形にエネルギーが分散したためだと考えられる。一方で、No.3 ではざぐりによりナット山高さを JIS 形状と同一である 0.625H まで大きくすることができるため、e 最大時でも十分なはめあい長さを維持し、ナット接触位置の応力集中が緩和されるため、ねじ山のせん断破壊が起こりにくいと考えられる。

5. 結論

本論ではボルトねじ山形状が応力・塑性歪集中の緩和に与える影響を検討し、有望なねじ形状が No.3 であることを示した。

謝辞: この本研究を進めるにあたり同研究室の東口流空氏、神鋼ボルトの関係各位には多大なるご協力をいただきました。

参考文献

- 日本規格協会: JISハンドブック、ねじ I, 2015.07
- 脇山広三、金振鎬、多田元英、桑原進、宇野暢芳: 高力ボルトのねじ形状に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第452号、1993.1
- 桑原進、安原慎吾、加藤あゆみ: スロット孔を使用した高力ボルト摩擦接合部のすべり係数に及ぼす諸変数の影響 その1 概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III, pp. 699-700, 2020.09

* 大阪大学大学院工学研究科 大学院生

** 大阪大学大学院工学研究科 教授・博士

*** 株式会社ロブテックス

* Graduate Student, Graduate School of Eng, Osaka Univ

** Prof, Graduate School of Eng, Osaka Univ. Dr. Eng

*** Lobtex Co.,Ltd