腐食耐久性を向上した新形状高力ナットの開発に関する基礎的研究

大阪市立大学大学院　学生会員　○郎　宇　　大阪市立大学大学院　学生会員　森山　仁志
大阪市立大学大学院　正会員　山口　隆司　　阪神高速道路株式会社　正会員　杉山　裕樹

1. 研究背景および研究目的

鋼橋摩擦接合部の腐食は，ボルト頭部，ナットなどの突出箇所に起因する塗膜厚不足や雨水滞留が原因である．

ボルト締付け時に六角ナット（以下，ナット）に作用する応力は，座金側ねじ部に集中し，余長側のナット外周では小さい[1,2]．本研究では，このような力学的特性に着目し，FEM 解析により，締付け時にナットが破壊しない範囲で腐食耐久性を向上させた新形状のナット（**図-1**）の開発を試みた．また，ボルトの製品引張試験，部材締付け試験によって，新形状ナットの力学的性能を確認した．

2. FEM 解析によるナット形状の決定

ナットの腐食耐久性は，応力が小さく，かつ，塗膜厚が薄くなりがちな角部の形状を変更することで改善される．本解析では，呼び径が M22 のナットを対象とし，余長側の角部を落とす h_1（以下，非六角部）を決定した．

解析モデルを**図-1**，各ケースの構造寸法を**表-1** にそれぞれ示す．六角部の 2 面幅 B は現状のソケットで締付け可能とするため，現状通り 36 mm とした．ナットの全高さ H は現状通りの 22mm とし，パラメータである非六角部の高さ h_1 を 0, 6, 8, 10 mm と変化させた．$h_1 = 0$ mm のケース Base は現状のナット形状（以下，従来形状）となる．ソケット形状は六角とし，寸法は市販の M22 高力ボルト用ソケットを参考に決定した．

ナットとソケットの材料特性を**図-2 (a)** に示す．ナットは加工硬化係数 $E/100$ のバイリニア則，ソケットは完全弾性とした．境界条件は，**図-2 (b)** に示すように，ソケットの外周において全方向の並進および回転を拘束した．

ナットとソケットの接線方向の摩擦係数は，ナット表面に潤滑処理が施されていることから，通常の鋼の摩擦係数よりも小さい 0.15 とした[1]．解析上のナットの締付け方法は，ナット内面とソケット重心に設けた参照点を剛体要素で連結し，参照点を中心に強制回転を与えることで，締付けを模擬した．なお，ナット座面が座金から受ける接触圧の影響については考慮していない．

非六角部の高さ h_1 とナットに作用するミーゼス応力

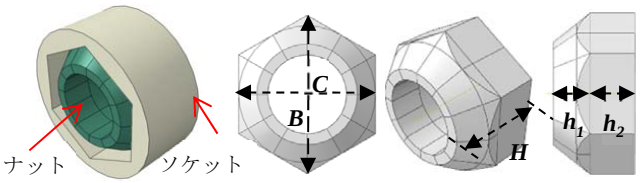
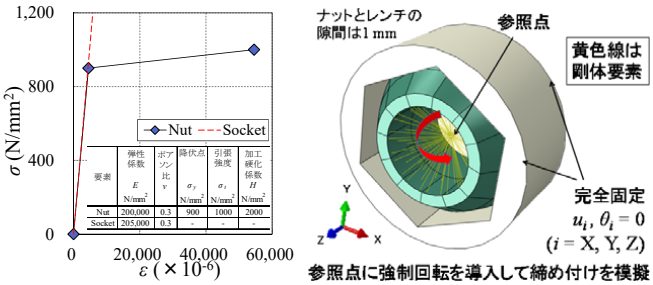


図-1　非六角部の高さ h_1 の決定用の解析モデル

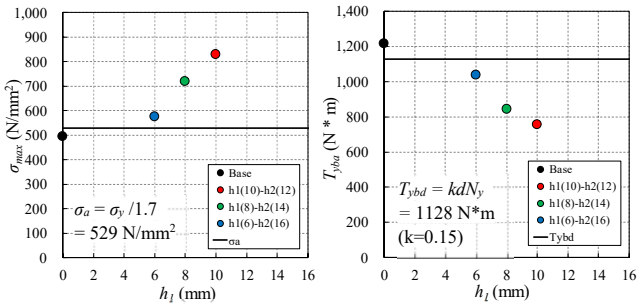
表-1　各ケースの構造寸法

解析ケース	非六角部の高さ h_1 (mm)	六角部の高さ h_2 (mm)	二面幅 B (mm)	外径 C (mm)	ナット全高さ H (mm)	体積 V (mm^3)	$\Delta V = 1 - V_i / V_{base}$ (%)	表面積 S (mm^2)	$\Delta S = 1 - S_i / S_{base}$ (%)
Base	-	22	36.0	41.6	22	16,366	0.0	4,233	0.0
h1(10)-h2(12)	10	12	36.0	41.6	22	14,377	12.1	3,717	12.2
h1(8)-h2(14)	8	14	36.0	41.6	22	14,775	9.7	3,780	10.7
h1(6)-h2(16)	6	16	36.0	41.6	22	15,169	7.3	3,855	8.9



(a)　材料特性　　(b)　境界条件

図-2　解析条件



(a)　ミーゼス応力の最大値　　(b)　初期降伏トルク

図-3　非六角部の高さ h_1 が耐力に及ぼす影響

σ_{max} の最大値の関係を**図-3 (a)**，h_1 と初期降伏トルク T_{yba} の関係を**図-3 (b)** にそれぞれ示す．初期降伏トルク T_{yba} とは，ナットの一要素が初めて降伏したときのトルクである．また，**図-3 (a)** にはボルトの許容応力度 $\sigma_a (= \sigma_y / 1.7)$，**図-3 (b)** には式(1)の設計降伏トルク T_{ybd} を直線で示した．

$$T_{ybd} = kdN_y = \frac{\sigma_y \times k\pi d^3}{4} \tag{1}$$

ここに，k：トルク係数(=0.15)，d：ボルト軸径，σ_y：ボルトの降伏点である．

キーワード：高力ボルト摩擦接合継手，FEM解析，新形状ナット，部材締付け試験，引張試験
連絡先　〒558-8585　大阪市住吉区杉本3-3-138　大阪市立大学大学院　工学研究科　都市系専攻　橋梁工学分野　TEL＆FAX 06-6605-2765

ミーゼス応力の最大値 σ_{max} は，図-3(a)に示すように，非六角部の範囲 h_1 が増加するほど大きくなった．h_1 = 6 mm の最大応力 σ_{max} は許容応力度 σ_a の 1.08 倍である 575 N / mm^2 となり，また，Base の 1.16 倍となった．

初期降伏トルク T_{yba} が設計降伏トルク T_{ybd} より大きいケースは，図-3(b)に示すように，従来形状である Base のみであった．h_1 = 6 mm の T_{yba} は，T_{ybd} の 0.91 倍である 1037 N*m となり，Base の 0.85 倍となった．したがって，h_1= 6 mm 程度であれば，締付け時の降伏範囲はわずかと考えられ，使用性・安全性に支障はないと考えられる．

h1(6)-h2(16)を参考に試作した新形状ナットの寸法を図-4 に示す．h1(6)-h2(16)は，表-1 に示すように，Base より体積が 7.3%，表面積が 8.9%減少している．

3. 新形状ナットの性能確認試験

従来形状と新形状のナットを用いたボルトの単純引張試験を行い，ナット形状の違いが荷重 P-軸ひずみ ε 関係，ボルトの破断位置に及ぼす影響を確認した．試験体数は，ナット形状によらず 3 本とした．

ボルトの破断位置を図-5(a)，P - ε 関係を図-5(b)にそれぞれ示す．P - ε 関係はナット形状により変化せず，最大荷重もすべての試験体で約 335 kN であった．また，すべての試験体の破断位置は遊びねじ部であり，ナット形状の違いによる破断状況に差はなかった．

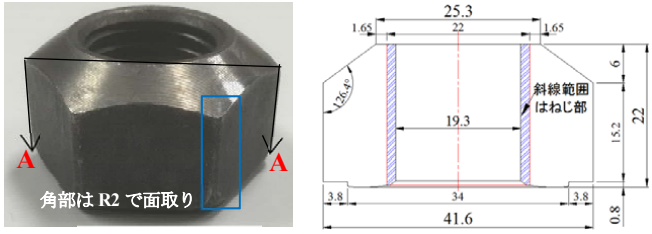
次に，従来形状と新形状のナットを用いた部材の締付け試験を行い，ナット形状の違いがナットの締付け性能（ねじり耐力）に及ぼす影響を確認した．試験体の形状および寸法は図-6(a)に示すとおりであり，ナット形状ごとに別々の試験体を用意した．接合面はブラスト処理後，無機ジンクリッチペイントを 75μm を目標に塗布した．

軸力計測用のひずみゲージ貼り付け位置は，ボルトの引張試験でのゲージ位置と同じであり，導入軸力 N は図-5(b)の P-ε 関係を用いて算出した．1 次締めは，手動レンチを用い 50kN（締付けトルク 150 N*m）を目標として導入した．本締めはトルクメータ付きの電動レンチを用いて行い，軸力とトルクの関係を確認しつつ，導入軸力が 300kN 程度になるまで締め付けた．

軸力 N-回転角 θ 関係を図-6(b)に示す．N - θ 関係は，ナット形状によらずほとんど変化しなかった．したがって，新形状ナットは，従来形状のナットと同じ締付け性能を有することが確認された．

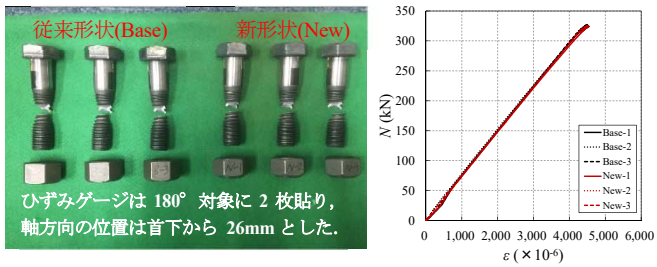
4. まとめ

本研究では，M22 高力六角ナットを対象とし，ナット



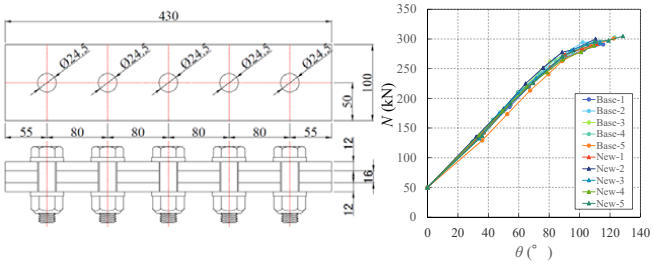
(a) 実物写真　(b) A-A 断面の寸法

図-4 試作した新形状ナット（単位：mm）



(a) ボルトの破断位置　(b) P - ε 関係

図-5 ボルトの製品引張試験



(a) 試験体の形状（単位：mm）　(b) N - θ 関係

図-6 部材締付け試験

の力学的特性に着目してボルト締付けに支障がない箇所を山形にすることで，腐食耐久性を向上させた新形状のナットの開発を試みた．以下に得られた結果をまとめる．

1) 山形形状にする非六角部の高さ h_1 を 6 mm 程度とすれば，締付け時の降伏範囲はわずかとなり，使用性・安全性に支障がないことがわかった．
2) 新形状ナットは従来形状に対して体積が 7.3%，表面積が 8.9%それぞれ低減した．
3) ボルトの製品引張試験および部材締付け試験を実施し，新形状ナットが従来形状と同じ力学的性能（P - ε，N - θ 関係）を有することを実験的に確認した．

今後は，乾湿繰り返し試験と屋外暴露試験により，新形状ナットの腐食耐久性が従来形状のそれよりも，実際に向上していることを実験的に確認する．

参考文献

1) 脇山広三，金　振鎬，多田元英：高力ボルトはめあい部での荷重分担および応力集中に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 459，pp. 163-168，1994.5.
2) 福岡俊道，野村昌考，森本雄哉：ねじ山らせん形状の高精度なモデリングと有限要素解析，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 72，No. 723，2006.11.