

531 ねじ締結体におけるナットの荷重分布解析

Analysis of Load Distribution of Nut in the Bolted joints

○正 久保田 義弘(第一工業), 正 小林 光男(工学院大学), 海野 仁史(工学院大学)
 正 福田 勝己(東京大学), 正 田中 道彦(信州大学), 正 田中 稔(岩手大学)
 正 中村 保(静岡大学)

Kubota YOSHIHIRO, Daiichikogyo Co.LTD., 955-9, Oshima-cho, Hamamatsu-city, Shizuoka.
 Mitsuo KOBAYASHI, Kogakuin University, 2665, Nakano-cho, Hachioji-city, Tokyo.
 Umino Masashi, Kogakuin University, 2665, Nakano-cho, Hachioji-city, Tokyo.
 Fukuda KATSUMI, The Univ. of Tokyo, 1220, Kunugida, Hachioji-city, Tokyo.
 Tanaka MICHHIKO, Shinsyu Univ., 4-17-1, Wakasato, Nagano-city, Nagano.
 Tanaka MINORU, Iwate Univ., 18-8, Ueda, Morioka-city, Iwate.
 Tamotsu NAKAMURA Shizuoka Univ, 3-4-1, Johoku, Hamamatsu-city, Shizuoka

Key Words: Bolted Joint, Nut, Triangle Thread, Load Distribution, Mdfied Sopwith's fomula, FEM analysis, Experiment Analysis

1. 緒言

機械の締結には、ボルト・ナットからなるねじ締結体が広く用いられている。工業技術の発展において、高い静的および疲労強度を持ち、耐ゆるみ性の高いボルト・ナットの開発・信頼性に関する研究が必要である。これらの研究を進展させるためには、かみ合った各ねじ山の荷重分布状態を正しく知る必要がある。また、ねじ締結体の設計において、ナットはボルトの締付け力や外力を支持するため、強度に関して高い信頼性が要求されているにも拘らず、有効ねじ山数の理論的根拠も不明確である。本報告は、ねじ締結体におけるナットの荷重分布について、実験、理論およびFEM解析を行い、比較検討した。

2. 実験方法

2.1 ねじ山の形状

本実験のナット試験片は、呼び径 M24, P3, 強度区分 8 の切削ねじで、リード角 $\beta = 27.5\text{deg}$ であり、その他の寸法は JIS B 1181 スタイル 1 に基づいた。

2.2 実験方法

ナットねじ山の軸方向に溝を設け、各ねじ山の中心とナット外周表面に対し、軸方向と円周方向にひずみゲージを貼付け、軸力を負荷したときの各ゲージのひずみを測定し、各ねじ山が負担する荷重を求める。軸方向荷重は、ナットねじ山と外周表面のひずみの平均から求めた。軸力の負荷速度は 15mm/min(無負荷クロスヘッド速度)、20kN 毎に 100kN まで負荷する。

3. 実験結果および考察

3.1 三角ねじ山のひずみ分布

図 1 は軸力 100kN 時のナット上端面を原点とし、ナット下端面方向に座標 Z をとった場合の軸方向および円周方向ひずみの分布を示す。軸方向ひずみはナット上端面から $Z=5\text{mm}$ まで引張り方向のひずみが発生し、ナット下端面に向かって単調に増加し、 $Z=14\text{mm}$ で最大ひずみとなり、その後、減少を呈する所謂 1 山分布を示した。この傾向は軸力が大きくなる程顕著であった。また、円周方向ひずみ分布は、ナット先端から $Z=4\text{mm}$ まで圧縮方向のひずみが発生し、以後、ナット下端面に向かって指数関数的に増加を示した。この増加傾向も軸力の負荷が大きくなる程顕著であった。

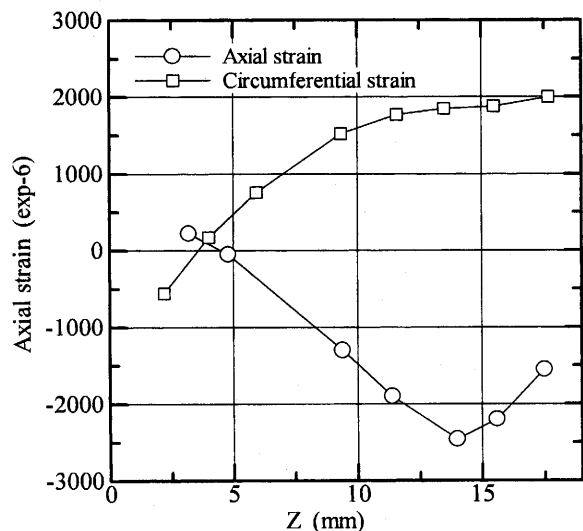


図 1 ひずみゲージ計測によるナットねじ山の軸方向および円周方向ひずみ分布 (軸力 $F=100\text{kN}$)

3.2 荷重分布の理論値

荷重分布の理論として Sopwith の式を修正した所謂修正 Sopwith の(1)式によって求める。ボルトとナットを結合し、ボルトに軸力 P が作用した場合、ナットにおける荷重分布は、任意の点 Z において、ねじのかみ合い長さ $L=19\text{mm}$ に対するナット上端面から Z 点までの距離の比を X とすると、分布荷重 P_x は次式となる。

$$p_x = p \sinh(X\theta_1) / \sinh(\theta_1) \dots \dots (1)$$

4. FEM 解析

4.1 軸対称弾塑性有限要素法解析

弾塑性有限要素法を用いて、ナットねじ山の荷重分布を求める。解析は従来からよく行われている軸対称モデル、および 3 次元モデル(軸方向引張りによる荷重負荷とねじの締付けによる荷重負荷)に対して行った。図 2 は軸対称有限要素法に用いたボルト締結体の 4 接点有限要素メッシュモデルである。ボルト・ナット・座面の 3 体の接触問題として、ボルト底面に位置する Nodes を速度拘束し、座面底部の

nodes の Z 軸方向に速度 $v=1 \text{ mm/sec}$ の境界条件を与え、ナットねじ山に軸力を付加する。ナット・ボルト間、およびナット・座面間の摩擦係数をそれぞれ $\mu=0.15$, $\mu=0.2$ とし、接触判定はペナルティ法を用いた。ナット・ボルトは弾塑性体、座面は弾性体とし、応力-ひずみ関係式に n 乗硬化弾塑性体 $\sigma = F \varepsilon^n + \sigma_y$ を用い、弾性係数 $E=205 \text{ MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、加工硬化指数 $n=0.12$ 、塑性係数 $F=120 \text{ MPa}$ 、降伏応力 $\sigma_y=800 \text{ MPa}$ とした。時間増分 0.01 mm/step とし、軸力 20 kN 毎、 100 kN まで計算した。各ねじ山に作用する軸方向荷重成分は、ねじ山フランク面の各 nodes に作用する軸方向荷重を足し合わせることで計算した。また、各ねじ山に作用する軸方向荷重は、ねじ山の有効径の位置に作用するものとした。

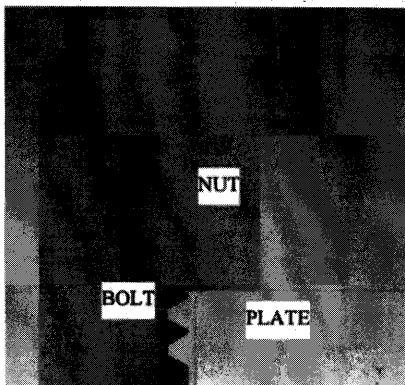


図2 ボルト締結体の軸対称4角形要素モデル

4.2 3次元弾塑性有限要素法解析

図3は、3次元弾塑性有限要素法に用いた4接点4面体要素で構成されたボルト締結体の解析モデルである。3次元モデルを用いることによって、軸対称モデルでは考慮できないねじのリード角の影響を含めた解析が可能である。3次元解析は荷重負荷方式として、軸方向引張り荷重負荷とねじの締付けによる荷重負荷の2種類とした。

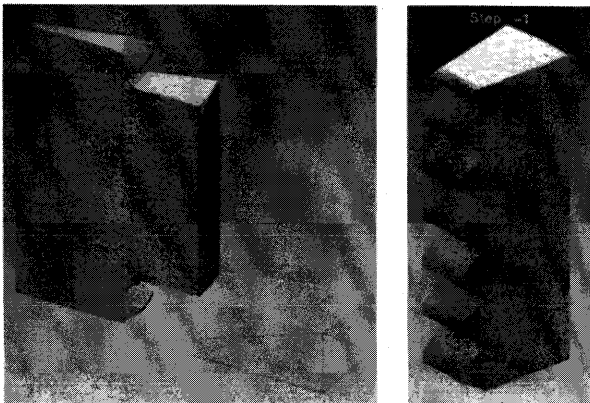


図3 ボルト締結体の24分割4面体ソリッド要素モデル

4.3 解析結果

図4は、軸力 100 kN の場合の軸対称および3次元弾塑性有限要素法によって求めたナットねじ山が負担する荷重分布を示している。軸対称モデル(図中の2D-FEM)の場合、荷重負担率は、ナット下端面に向かって増加し、最小荷重はナット上端面側、最大荷重はナット下端面側に隣接するねじ山に集中している。また、3次元モデルの単軸引張りによる軸力負荷の場合、ナットねじ山の荷重分布は軸対称モデル

と同様に、ナット下端面側に向かって増加傾向を示すが、ナット上端面側隣接のねじ山の荷重負担がやや高めであり、U字型分布を示す結果となった。締付けによる軸力負荷の場合は、単軸引張りによる軸力負荷の場合より、さらにU字型傾向が強くなり、ナット上端面側隣接のねじ山の荷重負担が高くなって、軸力はナット上下端面に隣接するねじ山を中心に荷重負担している。これは、締付けによるねじのリード角に沿ったねじ面摩擦係数 μ_s による摩擦抵抗が影響していると考えられる。

また、同図中にはひずみゲージ計測による実験値および Sopwith による理論値が示されているが、両者の傾向はほぼ同じ傾向を示した。しかし、有限要素法による荷重分布が、ナット上端面側のねじ山において、実験値および理論値と異なったのは、Sopwith の理論が弾性論に基づいていて、ねじ山の応力集中やそれによる局所的な塑性変形、および軸力によるナット全体の変形を考慮していないことが原因していると考えられる。

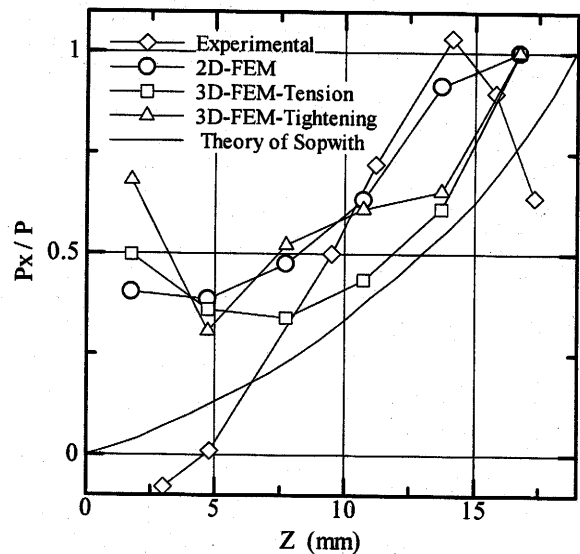


図4 ナットねじ山の軸方向荷重分布(軸力 $F=100 \text{ kN}$)

5. 結論

ねじ締結体におけるナットの荷重分布において、実験、理論および FEM 解析を行い、以下の結論を得た。

- 1) ナットねじ山の荷重分布において、実験値と理論値はほぼ同じ傾向を示した。
- 2) 軸対称モデルおよび3次元モデルによって解析したナットねじ山の荷重分布は、理論値、実験値と同様に、ナット下端面に向かって増加傾向を示すが、ナット上端面隣接のねじ山の荷重負担がやや高めであり、U字型の荷重分布を示す結果となった。
- 3) Sopwith の理論は、比較的低い軸力に対して成立するが、高い軸力に対しては、ねじ山谷底の応力集中や局所的な塑性変形、およびナット全体の変形が生じるため、U字型の荷重分布を呈する。

6. 参考文献

- 1) 小林、田中、久保田、北郷：圧力円筒ねじ端の荷重分の解析 (修正 Sopwith の式の適合性) 日本機械学会 M&M-98, Vol.A, No.98-5, pp.103-104.
- 2) 小林、田中、久保田、北郷：ねじ締結体におけるナットの荷重分布解析 (のこ歯ねじ山の場合) 日本機械学会第48期総会講演会 No.993-1, pp.383-384.