ゆるみ防止機能を有するハイパーロックナットの開発*
(第1報, 三次元有限要素法による弾塑性解析)西山修二^{*1}, 右田博章^{*2}, 片岡光正^{*2}
中崎信行^{*3}, 村野功史^{*4}Development of Anti-Loosening Performance of Hyper Lock Nut
(1st Report, Elasto-Plastic Analysis by
Three-dimensional Finite Element Method)Shuji NISHIYAMA^{*5}, Hiroaki MIGITA, Mitumasa KATAOKA,
Nobuyuki NAKASAKI and Kohshi MURANO^{*5} Department of Systems Engineering for Sports, Faculty of Computer Science and System Engineering,
Okayama Prefectural University, 111 Kuboki, Soja-shi, Okayama, 719-1197 Japan

Bolted joints are widely used in mechanical structures since the disassembly for maintenance is easy without high cost. However, vibration induced loosening due to dynamic loading has been unsolved subject for a long time. We have developed a new type of nut named 'hyper lock nut (HLN)', which realizes anti-loosening performance without complicated tightening process and tool. In this study, we have investigated the mechanisms of bolted joint with HLN, and tightening behavior are analyzed by mean of three-dimensional finite element method. Results are compared with the experimental results for HLN. Good qualitative agreement is observed between analytical results and experiments with respect to displacement, tightening force and tightening torque. We found some new aspects and superior points for bolted-joint with HLN than that of standard nuts. It is found that tightening torque of HLN is higher than that of standard. It is also found that the anti-loosening performance can be realized by the thread contact force at the slit region and angular facing on bearing surface. Moreover, by mean of tensile and fatigue experiments, it is concluded that HLN involves sufficient strength in practical use.

Key Words: Finite Element Method, Machine Element, Bolted Joint, Fracture Mechanics, Elasto-Plastic Analysis

1. 緒 言

機械や構造物を組み立てる際に使用される結合法の一つにボルト締結がある。取り付けや取り外しの容易さ、価格の安さなどの面から幅広く使用されている^①。しかし、ボルト締結体に衝撃や振動、あるいは熱負荷などの動的な外力が作用すると、ナットはしばしば戻り回転を開始し、締結力を失い、締結部はその機能を果たさなくなる^②。

現在に至っても産業界において、ボルト・ナットのゆるみに起因する事故が多発している。ボルト・ナットによる締結体のゆるみの問題は工学分野において解決すべき重要な課題の一つである^③。

ナットがゆるむ現象は、ボルトとナットの両座面間

の距離が締結初期の距離より変化してボルト軸の弾性力が減少することを示す。締結間距離の弾性力の減少は、被締結物が熱収縮などで収縮する場合やナットが回転して締結間距離が大きくなる場合などに生じる。

ボルト締結体のゆるみの問題を解決する一つの方法として、著者らは、新しいゆるみ止め機構を備えたハイパーロックナット(Hyper Lock Nut:以下 HLN と略記する)を開発した^{④⑤}。HLNは、六角ナットにスリットとナット座面に傾斜面が加工してある。ゆるみ止めねじ部品として HLN を選択する際の明確な指標を提供するためには、そのメカニズムを解明し、かつ強度や力学的特性に及ぼす影響の評価が必要である^{⑥⑦}。

そこで、本研究では、三次元有限要素法を適用して、弾塑性解析をおこない HLN を使用したボルト締結体の性能を解析的に評価する。評価する性能として、締付時のトルク管理に不可欠な締付け回転角と締付け軸

* 原稿受付 2006 年 4 月 6 日。

^{*1} 正員, 岡山県立大学情報工学部(☎ 719-1197 総社市窪木 111)。^{*2} (株)エコーワールド(☎ 733-0003 広島市西区三篠町 6-9)。^{*3} エヌ・テクニカ(☎ 737-0046 呉市中通 1-5-26-603)。^{*4} 正員, 広島市産業振興センター(☎ 730-0052 広島市中区千田町 3-8-24)。

E-mail: nishiyama@ss.oka-pu.ac.jp

力の関係、締付け回転角と締付けトルクの関係、締付け軸力と締付けトルクの関係およびねじ各部の強度解析を行う。

2. HLN の仕様

図1は、HLNを示す。図1(a)は、HLN(M16)の実物写真を示す。図1(b)は、HLNの正面図および側面図を示す。HLNは、ゆるみ止め性能を有するナットである。HLNは六角ナットに図のような平行なスリットと傾斜座面を加工して作成する。スリットの位置はナット座面とは反対側のナット上面に近い位置に設けられている。さらに、ナット座面は 1° の傾斜面に加工してある。

(a) Photograph of Hyper Lock Nut

(b) Schematics of top and side views

Fig.1 Hyper Lock Nut (HLN)

解析に用いる HLN は M16 とし、各部の寸法は、 $e=27.7\text{ mm}$ 、 $s=24.0\text{ mm}$ 、 $P=2.0\text{ mm}$ 、 $W=36.0\text{ g}$ 、 $D=16.0\text{ mm}$ 、 $G=1.2\text{ mm}$ 、 $H=10.0\text{ mm}$ 、 $I=18.7\text{ mm}$ 、 $E=15.6\text{ mm}$ 、 $K=4.4\text{ mm}$ である。HLN は、M10 から M42 まで対応している。スリット幅(G)は M10 で 0.8 mm、M12 で 1.0 mm、M16、M20 で 1.2 mm、M24 で 1.5 mm、M30~42 で 2.0 mm である。HLN は、傾斜座面とスリットにより、はめあいねじ部に大きな接触力を発生させ、ゆるみ防止効果を発揮することが期待される。

3. 解析手法

3-1 HLN のモデル化および境界条件 図2に HLN を使用したボルト締結体の解析モデルを示す。図2は、ねじのつる巻き線を忠実にモデル化した三次元有限要素モデルである。

ボルト締結体の力学特性に巻き線が及ぼす影響を示す例として、ねじを切った棒が単純な引張荷重を受けると、軸方向の伸びだけでなく円周方向にわずかに回転することが報告されている⁹⁾。ねじのつる巻き線は、ねじの本質的な幾何学形状であると同時に強度評価を複雑かつ難解にする。しかし、本研究では、高精度かつモデルを忠実に再現するために、ねじのつる巻き線まで考慮したモデル化を行う。モデル化にあたり、ボルトの遊びねじ部は5山、グリップ長さを80 mm、被締結物は剛体と仮定する。ねじ寸法は 6H/6g の公差域内の呼び径 M16 のメートル並目ねじとする。要素は一次元四面体要素を用い、ねじ面の接触部およびナット座面の部分は締付けトルクを精度よく解析するために要素を密に分割する。ナット座面、ねじ面、および被締結物接触面には接触面要素を設定する。

解析ソフトとして ADINA 8.0 を使用する。解析はボルトを回転する弾塑性締付けをモデル化し実施する。HLN の特徴であるスリットや傾斜座面が締付けトルクなどのねじ特性に及ぼす影響を検討するために、HLN(model-1)、傾斜座面付きナット(HLN のスリット

Fig. 2 Three-dimensional finite element model for HLN

(1/4 of nut is visually removed in this figure)

を除いたモデル：model-2)、スリット付きナット(HLN の傾斜座面を除いたモデル：model-3)、JIS 標準ナット(model-4)の4種類のモデルについて検討する。四つのモデルの概略図を図3に示す。

解析に用いた材料物性値として、ボルト・ナットの縦弾性係数は200 GPaとする。また、ボルト・ナットのポアソン比は0.3とする。ボルトの強度区分は10.9、ナットを8とする。初期降伏応力はボルトを790 MPa、ナットを790 MPaとする。塑性則は線形硬化弾塑性体とし、塑性の接線係数はボルト・ナット共に2700 MPaとする。

Fig.3 Physical models for analysis

解析は材料非線形および幾何学的非線形を考慮した弾塑性解析とする。接触面における摩擦係数は0.15とし、締付け過程において摩擦係数は一定と仮定する。

3・2 HLNの解析条件 HLNの三次元有限要素モデルの節点数は18014、また要素数は71669である。解析は締付け回転角を 0° からスタートし、 0.1° 毎に計算を進めていき、 150° くらいまで進める。解析結果は 1° 毎に出力する。解析に用いたCPUはPentium 4, 2.4GHzのコンピュータを使用する。1 Runの計算時間は約40時間である。

4. 解析結果

4・1 解析結果の妥当性 図4は、解析結果の妥当性を検証するために図3に示すModel-1(HLN)のA, B, C点のx, y方向の変位量の解析結果を示す。各点のxおよびy方向の変位量は、締付け回転角の増加とともに、徐々に増加する。締付け回転角が 50° 近傍に達するとA, B, C点のx, y方向の変位量はピークに達する。その後はA, B, C点のy方向変位は一定値(0.4 mm)を維持する。

Fig.4 Effect of deflection on tightening angle

図3において、DからEを差し引いた値が0.4 mmとなりこの寸法に一致する。しかし、C点のy方向変位は

さらに増加していく。締付け回転角が 50° 近傍において、HLNの傾斜座面が完全に密着し、A, B点のy方向変位はこれ以上変位しなくなる。しかし、C点のy方向変位はスリット幅の減少によりさらに変位する。

一方、A, B, C点のx方向の変位は、締付け回転角が増加すると、傾斜座面が着座するまでは一様に増加し、着座後は、減少し、一定値に落ち着く。以上の検討は、ナット各部の変位量に着目した検討であるが、解析結果の妥当性を示すものである。

次に、図5から図7は、Model-1(HLN)の解析結果の妥当性を検証するために解析結果と実測結果の比較を示す。実測試験にあたっては、ナットの締付け試験装置を開発した。各種ナットの締付け回転角、締付け軸力および締付けトルクの関係が実測できる。開発した装置は、駆動用モータ、変速機、角度検出センサ、トルク変換器、ワッシャー型ロードセル、センサインターフェース、およびコンピュータから構成されている。

Fig.5 Comparison of the numerical results with experimental results of the relationships between tightening angle and tightening force

図5は、締付け回転角と締付け軸力の解析結果と実測結果の比較を示す。図の横軸は締付け回転角、縦軸は締付け軸力を示す。解析結果においては、締付け回転角が 9° 近傍から締付け軸力が立ち上がる。 43° 近傍まではゆるやかに増加する。この区間の増加率は 0.29 kN/deg である。 50° から 100° の間は、 1.8 kN/deg の増加率で変化する。 50° でナットの傾斜座面が被締結物に完全に密着し、軸力の増加率が高くなる。締付け回転角が 100° を越えると、ボルト・ナットが塑性域に入り、回転角の増加とともに変形が発生し、締付け軸力の増加率が緩やかになる。実測結果においても同様な傾向を示す。両者の特性および値はよく一致している。

図6は、締付け回転角と締付けトルクの解析結果と実測結果の比較を示す。図の横軸は締付け回転角、縦

Fig.6 Comparison of the numerical results with experimental results of the relationships between tightening angle and tightening torque

軸は締付けトルクを示す。締付け角度が9°近傍から締付けトルクが立ち上がる。43°近傍まではゆるやかに増加する。この区間の増加率は1.0 Nm/degである。50°で傾斜座面が完全に密着し、軸力が発生する。50°から100°の間は、4.55 Nm/degの増加率で締付けトルクが増加する。締付け回転角が100°を越えると、ボルト・ナットが塑性域に入り、回転角の増加とともに変形が発生し、トルクの増加が緩やかになる。実測結果も同様な傾向を示し、両者の特性および値はよく一致している。

図7は、締付け軸力と締付けトルクの関係について、解析結果と実測結果の比較を示す。締付け軸力が全ての帯域において、両者の値はよく一致している。解析結果において、締付けトルクの増加率は2.90 Nm/kNである。以上より、本研究のボルト・ナットのモデル化および解析結果は妥当性があるものと考えられる。解析結果の信頼性を示すものである。

Fig.7 Comparison of the numerical results with experimental results of the relationships between tightening force and tightening torque

4.2 回転角と軸力の関係 図8は、Model-1からModel-4に対して、締付け回転角と締付け軸力の解析結果を示す。図において、横軸は締付け回転角、縦軸

は締付け軸力を示す。Model-3,4は締付け回転角が7°近傍から締付け軸力が一様に増加する。Model-4は締付け回転角が67°近傍まで、Model-3は47°近傍までは締付け軸力は一様に増加する傾向を示す。この間の増加率は2.05 kN/degである。

一方、Model-1,2は、締付け回転角が11°近傍までは締付け軸力は発生しない。これは、ナットの座面に1°の傾斜面がつけてあることによるものと思われる。ボルトが回転して締付け回転角が12°近傍から47°近傍までは、ゆるやかではあるが、締付け軸力が発生する。この区間の増加率は0.25 kN/degである。回転角が50°以上になると勾配が急に大きくなる。これは、Model-1、Model-2の傾斜座面が、締付け回転角が50°に達すると、ナットの座面が完全に被締結物に着座することによるものと思われる。

Model-1は締付け回転角が47°近傍から84°近傍の間、またModel-2は締付け回転角が47°近傍から100°近傍まで、軸力の増加率は、1.95 kN/degとなる。両モデルともに、それ以降の締付け回転角では増加率はゆるやかになる。ボルト・ナットが塑性域に達したと思われる。また、Model-1とModel-4を比較すると、Model-4は締付け軸力が120 kNを超えると増加率が小さくなる。Model-1では、締付け軸力が80 kNを超えるくらいから増加率が小さくなる。勾配が小さくなる点の締付け軸力を比較すると、Model-4よりも

Fig.8 Relationships between tightening angle and tightening force

Model-1の方が40 kN程度小さくなっている。これは、Model-1は傾斜座面を有することにより、被締結物に着座することによりボルト・ナットが変形し、低い軸力で塑性変形が発生しているものと思われる。

4.3 回転角と締付けトルクの関係 図9は、Model-1の解析結果を示す。横軸は締付け回転角、縦軸は締付けトルクを示す。図で T_1 は、締付けトルク、 T_2 は座面トルク、 T_3 はねじ面トルクとリード角トルクを示す。 T_1 は T_2 と T_3 の和となる。

Fig.9 Relationships between tightening angle and tightening torque

Model-1は回転角 11° を過ぎたくらいからトルクが発生する。これはナットに傾斜座面が付いているためである。

図10は、Model-1からModel-4の締付け回転角と締付けトルクの関係を示す。図において、横軸はナットの回転角、縦軸はボルト締結体の締付けトルクを示す。Model-4は、締付け回転角が 7° 近傍から締付けトルクが一樣に増加する。締付け回転角が 67° 近傍までは締付けトルクは一樣に増加する傾向を示す。この区間の増加率は 5.20 Nm/deg である。Model-3も締付け回転角が 46° 近傍までは増加率が 5.20 Nm/deg であるがそれ以降は増加率が緩やかになる。一方、Model-1とModel-2は、締付け回転角が 13° 近傍までは締付けトルクは発生しない。これは、ナットの座面に 1° の傾斜面がつけてあることによるものと思われる。締付け回転角が 13° をすぎるくらいから 48° 近傍までは、ゆるやかではあるが、締付けトルクが発生する。この区間の増加率は 0.914 Nm/deg である。締付け回転角が 50° 以上になると勾配が急に大きくなる。これは、Model-1の傾斜座面が、締付け回転角が 50° 近傍に達すると、ナットの座面が完全に被締結物に着座することによるものと思われる。Model-1は 83° 近傍、Model-2は 100° 近傍までは直線的に増加し、増加率は 4.65 Nm/deg である。また、Model-4とModel-1を比較すると、Model-4は締付けトルクが 300 Nm を超えると増加率が小さくなる。

Model-1では、締付けトルクが 250 Nm を超えるくらいから増加率が小さくなる。勾配が小さくなる点の締付けトルクを比較すると、Model-4よりもModel-1の方が 50 Nm 程度小さくなっている。これは、Model-1は傾斜座面を有することにより、ナットが被締結物に着座することによりボルトに曲げモーメントが発生し、塑性変形が発生しているものと思われる。

Fig.10 Relationships between tightening angle and tightening torque

4・4 軸力と締付けトルクの関係 図11から14は締付け軸力と締付けトルクに関する解析結果を示す。図において、横軸は締付け軸力、縦軸は締付けトルクをそれぞれ示す。

図11は、Model-3とModel-4の解析結果を示す。締付け軸力が 80 kN を過ぎるくらいから、締付けトルクはModel-4より大きくなる傾向を示す。締付け軸力が大きくなると、スリットの影響が表れるものと考えられる。HLNのスリットは締付け軸力が大きくなると締付けトルクを大きくすることに寄与する。

締付け軸力が 113 kN において、締付けトルクはModel-3では 311 Nm 、Model-4では 278 Nm である。締付けトルクは、締付け軸力が最大値の 113 kN において、Model-3がModel-4より 11.8% 大きい。

Fig.11 Comparison of model-3 with model-4 of the relationships between tightening force and tightening torque

図12は、Model-2とModel-4についての解析結果である。傾斜座面を有するナットは締付け軸力が全ての帯域において、締付けトルクが $5 \sim 9 \text{ Nm}$ 、Model-4より大きい傾向を示す。

図13は、Model-1とModel-4についての解析結果である。締付け軸力が全ての帯域において、締付けトルク

クが Model-4 より大きい傾向を示す。特に締付け軸力が大きい帯域では締付けトルクが大きくなる。締付け軸力が大きくなると、スリットの効果がさらに加わるものと思われる。

Fig.12 Comparison of model-2 with model-4 of the relationships between tightening force and tightening torque

例えば、締付け軸力が 60 kN において、締付けトルクは Model-1 では 157 Nm, Model-4 では 147 Nm である。また、締付け軸力が 80 kN において、締付けトルクは Model-1 では 207 Nm, Model-4 では 195 Nm である。締付け軸力が 100 kN では、締付けトルクは Model-1 では 263 Nm, Model-4 では 244 Nm である。締付け軸力が 112 kN において、締付けトルクは Model-1 では 308 Nm, Model-4 では 274 Nm である。Model-1 は締付けトルクが 10~34 Nm 程度大きい特性を有している。

Fig.13 Comparison of model-1 with model-4 of the relationships between tightening force and tightening torque

Model-3 と Model-4 は、締付け軸力が全ての帯域において同程度の勾配を有する特性を示す。一方、Model-1 と Model-2 は締付け開始から締付けトルクが 25 Nm 程度、前者よりも大きくなっている。これは、傾斜座面を有するナットに共通しており、図 9 における締付け回転角が 40° における締付けトルクが 25 Nm

と値が一致している。また、締付け軸力が 60 kN 以上において、Model-1 と Model-3 は締付けトルクが徐々に増大する傾向を示す。これは、ナットにスリットが入っているモデルに共通した特徴である。解析結果において、軸力の上限值が存在した理由は有限要素モデルの局所的部分のメッシュが大きく変形し、計算が収束しなくなったことによるものと思われる。

4.5 ボルト軸心とスリット幅の変位 締付け回転角が増していくと、HLN の傾斜座面とスリットの影響によりボルトに曲げモーメントが発生し、ボルト軸心とスリット幅が変位する。ボルトの軸心に発生する曲げモーメントは次のように求めることができる。ナット座面に傾斜角 ϕ がある場合、ボルトには軸力と同時に次式で表される曲げモーメント M_b が作用する⁹⁾。

$$M_b = \int_{r_b}^{r_w} \int_0^{2\pi} p r^2 \cos \theta d\theta dr \quad (1)$$

ここで、 r_b , r_w は各々ボルト穴の半径および座面の半径である。また、 p は面圧を示す。

ボルト軸に生じる M_b による曲げ応力は追加応力となり、その最大値 σ_b はボルト軸直径を d とすれば次式で表される。

$$\sigma_b = \frac{32M_b}{\pi d^3} \quad (2)$$

ボルトの強度を考慮する場合、この σ_b を検討しておく必要がある。一方、はりの理論より、ボルトの曲げの半径を ρ 、曲げ剛性を EI とすると、

$1/\rho = M_b/EI$ が成り立つので、 $\phi = l/\rho = lM_b/EI$ が成立する。従って曲げモーメント M_b は次式となる。

$$M_b = \frac{\phi}{l} EI = \frac{\pi d^4 E}{64l} \phi \quad (3)$$

Fig.14 Horizontal deflection of axis of bolt

図 14 は、HLN のボルト軸心の変位量に関する解析結果を示す。横軸は軸力、縦軸はボルト軸心の変位量をそれぞれ示す。ボルト軸力の増加とともに、ボルト

軸心は一樣に変位し、最大変位が0.65 mmくらいに達する。その後は、軸力の増加とともに、この変位を維持し、軸力が98 kNくらいから変位がもどり、118 kNくらいで0.45 mmくらいまで回復する。このように軸力が増加すると、ボルト軸心の変位がもどる現象は、軸力が増加すると、スリット幅が変形し、ボルト変位を減少させているものと考えられる。図 14 において、締付け軸力が7.3 kNまでは、線形域であり、締付け軸力とたわみは直線的に変位している。締付け軸力を F_b kN、ボルト軸心のたわみを Δ mm、ばね定数を k kN/mmとおくと、次式が成立する。

$$\Delta = \frac{1}{k} F_b \quad (0 \leq F_b \leq 7.3) \quad (4)$$

解析結果より、ばね定数 k は18.25 kN/mm となる。

Fig. 15 Vertical deflection of space of slit

図 15 は、HLN のスリット幅の変位量の解析結果を示す。横軸は締付け軸力、縦軸はスリット幅の変位量をそれぞれ示す。締付け軸力の増加とともに、スリット幅は変形することなく 78 kN くらいまで 1.2 mm の寸法を維持する。その後は微少ではあるが、軸力の増加とともに、幅が多少狭くなる。118 kN くらいで、スリット幅は 0.9 mm くらいに変位する。スリット幅が約 25% 減少し、ナットが変形することにより、ボルトに作用する曲げモーメントを多少開放し、同時にねじの締付けトルクの増加に作用しているものと考えられる。

5. 考 察

ボルトとナットはその構造にゆるみ防止構造も持っている。ボルトもナットも締結座面と、おねじとめねじの接合面との二つの面がゆるみ防止構造である。ゆるみ防止能力は二つの面の摩擦力と摩擦中心の半径との積である。座面の摩擦力は軸力と摩擦係数の積であり、ねじ面の摩擦力は軸力のねじ面垂直分力とねじ面

摩擦係数との積である。従って、摩擦係数の大きいボルト・ナットや座面半径の大きいボルト・ナットはゆるみにくい。HLN の傾斜座面およびスリットのゆるみ止め機構について考察する。

5・1 HLN の傾斜座面によるゆるみ止め機構 HLN の傾斜座面はおねじ山の嵌合がおねじとめねじのフランク面での接合だけでなく、おねじ山頂部とめねじ谷底の接合をももたらす特徴がある。HLN とボルトの締結初期はナットの回転によって傾斜座面の一部が着座すると、ボルト軸力が生じ、ナットの回転角の増加に比例して軸力も増加すると共に着座面積が増加する。この時、傾斜座面が密着する課程で座面傾斜角があるために HLN は回転中心線がボルトの中心線から変位しながら回転し、かつボルトを曲げる。HLN ではナット中心が偏心してくるので、傾斜側のおねじ山頂とめねじ谷が噛合いながら、フランク面が接合している。この現象をトルクの値で考えると、HLN のフランク面接触での摩擦力は JIS 標準ナットでのフランク面の摩擦力にほぼ等しいが、これに加えて、おねじの半周側において、おねじ山頂での接触はおねじのねじ山が楔の形でめねじの谷に食い込むので、山頂の楔接合の摩擦力とおねじ半径の積としてのトルクが発生する。このため傾斜座面を有するナットは JIS 標準ナットよりも高いトルクをもたらす。傾斜座面が全面密着した後も、軸力の増加によりボルトの傾きは増加するので楔接合は強くなる。傾斜座面は、ねじ山の干渉を増し、摩擦力を増加させる機能を有する。

5・2 HLN のスリットによるゆるみ止め機構 スリットの機能はスリットが狭小になるとき、めねじの総合ねじピッチが崩れてくることにより、正常なフランク面接合のみならず、背面での接合が生じる事である。ナットの各ねじ山に生じる軸力の負担は座面から近いねじ山が大きく、ナット高さ方向に移るほど軽減する。スリットより上側のナットねじ山が負担する軸力で、スリットの幅は弾性的に狭小に変位する。傾斜座面があるのでナットの中心線はスリット側に変位するから、おねじとめねじの嵌合はスリット側で楔形に食い込み、スリットの反対側ではフランク面のおねじとめねじ間の隙間が増加する。この時にスリットが狭小になれば背面側フランク面のおねじとめねじの隙間が減少し、更に狭小になればスリットの上のめねじ山はボルトおねじの上面と接触し、おねじ山を挟みつける事になる。この挟みつけ力による摩擦力がトルクの増加になる。

5・3 HLN のゆるみ止め効果 同じ軸力では、締付けトルクが大きい方がゆるみ防止効果は大きいものと考えられる。ボルト軸力が 20 kN 以下においても、締

付け軸力が発生してから HLN は JIS 標準ナットに比較して、締付け効果が大きい特性を有している。ナットの傾斜座面は締付け軸力が発生し始めると締付けトルクを大きくする効果がある。さらに、スリットは締付け軸力が 60 kN 以上で締付けトルクを大きくする効果が見受けられる。締付け軸力が 60 kN において、締付けトルクは JIS 標準ナットより 6.8 % 大きい。さらに、軸力が増加して 80 kN では 6.2 %, 100 kN では 7.8 %, 112 kN では 12.4 % 締付けトルクが大きい特性を有する。

6. 結 言

本研究により得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) ハイパーロックナットは締付け回転角が 11° 近傍までは、締付けトルクが発生しない。 12° 近傍を過ぎたくらいから徐々に締付けトルクが発生し、 50° 近傍まで同じ勾配で増加する。 50° を過ぎたくらいから、JIS 標準ナットと同様に急激に増加する特性を示す。
- (2) 軸力が低い領域では、座面の傾斜面の影響が大きい。締付け軸力が 10 kN では、ハイパーロックナットおよび座面付きナットは締付けトルクが 10 Nm 程度大きい。さらに、締付け軸力が大きくなると、スリットの影響が表れる。ハイパーロックナットは JIS 標準ナットに比較して締付け軸力の全帯域において 10 から 20 Nm 程度の高い締付けトルクを有している。
- (3) ハイパーロックナットのゆるみ止め機能は、傾斜座面部の役割が大きく、締付け軸力が大きくなると、スリット部が変形してねじ山の接触力を増大させる効果があるものと考えられる。
- (4) ハイパーロックナットは締付け軸力が大きくなると、ボルトに曲げモーメントが発生する。ボルトに発生する曲げ応力を定式化した。
- (5) ハイパーロックナットは締付け軸力が大きくなると、スリット幅が減少する。スリット幅の減少はボルト軸心の変位量を小さくする効果が見受けられた。

スリット幅の減少はナットの構造強度に悪影響を及ぼすものではない。

さらに、今後の課題として、ハイパーロックナットを使用したねじ締結体の強度解析および応力評価、振動試験によるゆるみ試験、保証荷重試験、繰り返し疲労試験、耐候性試験などによる各種試験を実施し、工業的実用性の検証を行うことが必要である。これらについては、続報で報告する。

終わりに、本研究は平成 17 年度経済産業省中小企業ベンチャー挑戦支援事業(実用化研究開発事業)補助によるものである。ここに付記し、関係各位に感謝の意を表する。

文 献

- (1) Yoshimoto, I., *Points of Design of Jointed Bolt*, 2002, pp. 25-26, Japanese Standards Association.
- (2) Yamamoto, A., *Theory and Calculation of Bolted Joints*, 1992, pp. 39-53, Yokendo.
- (3) Yamamoto, A., *Principle and Design of Bolted Joints*, 2004, pp. 30-140, Yokendo.
- (4) Migita, H., Anti-loosening Nut, *Patent*, 2005-010412.
- (5) Migita, H., Anti-loosening Nut, *Patent*, 2003-319985, 2004-156637.
- (6) Izumi, S. et al., Three-dimensional Finite Element Analysis on Tightening and Loosening Mechanism of Bolted Joint, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 702 (2005), pp. 204-212.
- (7) Izumi, S. et al., Verification of Anti-Loosening Performance of Super Slit Nut by Finite Element Method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 703 (2005), pp. 380-386.
- (8) Fukuoka, T., Mechanism and Tightening (1), *SCIENCE OF MACHINE*, Vol. 54, No. 2 (2002), pp. 289-295.
- (9) Okada, M. et al., A study on Bearing Surface Pressure Distribution of Bolted Joints (Influence of Angular Deviation of Bearing Surface) *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 70, No. 699 (2004), pp. 3324-3330.