有限要素法によるボルト・ナット締結体の ゆるみ機構の解明と ゆるみ止め部品の性能評価

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 〇泉 聡志·木村正竹·酒井信介 2005年7月27日 自動車技術会 第2回疲労信頼性部門委員会

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 酒井·泉研究室

- 強度•信頼性工学
 - リスクベースメンテナンス
 - 余寿命評価(高温硬さ試験・ランダム荷重疲労)
 - MEMSの微小荷重強度試験
- 分子スケールから連続体のCAE
 - 量子/古典分子動力学
 - 転位動力学
 - 有限要素法
 - ボルト・ナット締結体
 - 他

本日の発表内容

- 1. ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法による締め付け解析
- 2. ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法によるゆるみ解析
 - 1. 座面すべりの解析
 - 2. 微小座面すべり解析
- 3. ゆるみ止め部品の性能評価
 - 1. スーパースリットナット
 - 2. 座金、フランジナット
 - 3. ダブルナット
 - 4. ばね座金

ボルト・ナット締結体はゆるむ!



ボルト脱落事例(鉄道) ゆるみのメカニズムは未だ未解明な点が多い

「はやて」ボルト脱落 一斉点検で判明 3個にはゆるみも-読売新聞 (2003.11)

新幹線ボルト脱落 JR西日本発表 31本中5本も-山陽新聞 (2003.11)

<上越新幹線>「Maxとき」のボルト3個外れる – 毎日新聞 (2003.11)

特急「サンダーバード」台車ボルト脱落 乗客乗せかえ – 読売新聞 (2003.4)

走行電車から部品落下 踏み切り待ちの車に衝突 JR九州 – 熊本日日新聞 (2003.1)

研究の背景

最近のねじ締結体ゆるみ関連事故事例

ポンプのボルト脱落 美浜1号あわや冷却水漏れ Y	ahooニュース2005/3/22
日航機、エンジン取り付けボルトが脱落 高松空港で判明	朝日新聞 2005/4/8
山陽新幹線、軌道ボルトに緩み	朝日新聞 2005/4/28
ポイントの固定ボルト7本にゆるみ 静岡の東海道新幹線	gooニュース 2005/5/6

ねじ締結体は様々な分野で用いられているが、メンテナンスの容易さの反面、ゆるみの問題を抱えている。



ゆるみ防止のために様々なゆるみ止め部品 が使用されている。



ゆるみ止め性能についての評価はあまり行われていない。

本研究の目的

- 1. ボルト・ナット締結体の締付け・ゆるみ過程のメカニズム を三次元有限要素法解析により明らかにする
- 2. 締付け・ゆるみ過程に対する従来理論(材料力学・実験) の検証及び修正
- 3. ゆるみ止め部品の性能評価による従来理論の修正、導入の考え方提示

1. ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法による締め付け解析

ボルト・ナット締結体の締付けの解析

ー組のM16ボルト・ナットと円筒形の被締結物で構成される締結体

用)

応力解析ではないため、ボルト頭付け根やねじ谷底の詳細な形状は省略.



接触のモデル化



ナットの締付けによるボルト軸方向応力変化



ナットの回転に伴い、応力が増大していく様子を観察できる.

締結カと締付けトルクの関係



本解析結果は従来の簡便式とよく一致しているものの, 要する締付けトルクが若干小さい

ナット座面の圧力分布

解析結果の締付けトルクが小さいのは、ナット座面における圧力分布が原因である と考えられる.



2. ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法 によるゆるみ解析

2-1. 座面すべりの解析

ボルト・ナット締結体のゆるみ解析

山本ら*による被締結物に軸直角方向外力が作用するゆるみ試験をモデル化



節点数:22406 要素数:9362 ヤング率205GPa, ポアソン比0.3, 摩擦係数0.17

ボルトゆるみ回転の様子

並進方向変位コンター図(変位は5倍に拡大)



周期が進むにつれて、ボルト頭の手前と奥とで並進変位に差が生じる.

可動板に作用する並進力と並進変位の関係



ボルト回転角の推移



山本らの実験との比較



山本らの実験との比較 ~ゆるみ角~



非常に良い一致を示す。

ゆるみの開始点



※賀勢晋司,吉田諭,石橋久典、岡田学"ねじの座面滑りとゆるみ(微小滑り時に関す る考察)",日本機械学会2004年度年次大会講演論文集(4),233,3225

2. ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法によるゆるみ解析

2-2. 微小座面すべりの解析

~座面すべり以前に生じる微小なゆるみの解析 <u>信州大学 賀勢晋司先生との共同研究</u>

微小座面すべりによるゆるみ



微小座面すべりによるゆるみ

近年、座面すべりが生じなくてもわずか なゆるみが生じ、繰り返しにより徐々に 進行することが注目されている。



座面の固着部が移り変わることで少しずつ ゆるむと考えられている。軸力の低下は微 小ずつだが、この繰り返しにより確実に軸 力低下が進行すると考えられる。





解析モデルと手法









実験結果(ナット回転角)との比較



定速度で進行 (座面すべり1000N)

相対回転角とゆるみ



軸力変化=相対回転角 ゆるみはナットの回転角でなく、 ボルトとナットの相対回転角で評価すべき

締付時のねじれによるボルトーナットの同時回転

300N, 500Nにおけるナット回転について







ボルト軸に時計回りの ねじれ発生



ボルト軸ねじれが解消する際、 ボルト - ナットねじ山が接触した まま一体となった状態での回転

ボルトーナットねじ山での相対的な回 転ではないため軸力の低下はない。





ここまでの結論

- 締め付けの従来理論の精度は高い
- ・ 座面すべり・微小座面すべりのゆるみ、共に実験
 結果を精度良く再現した。
- 新たに微小座面すべりによるゆるみのメカニズ ムを明らかにした。
- ・ <u>従来のゆるみの理論は座面すべり中心の議論</u>
 <u>であり、微小座面すべりも考慮するように修正し</u>
 なければならない。

→ 設計に反映

3. ゆるみ止め部品の性能評価

3-1. スーパースリットナット 3-2. 座金、フランジナット 3-3.ダブルナット 3-4. ばね座金

3-2 座金・フランジナット

①通常ナット ②フランジナット ③平座金+ナット





・<u>平座金は若干ゆるみの進行が早いが、大きな差はない。</u> ・<u>フランジナットは通常ナットと同じ(効果なし)</u>

ゆるみ止め部品の性能評価(微小座面すべり)



・平座金はゆるむ→剛性低下から来る接触状態の偏り

・フランジナット(固着平座金)はゆるみ止め効果がある
 → 摩擦トルクの等価直径が大きくなるため?
 (通常13.7mm,フランジ14.4mm)



座金の厚み分のグリップ長さ増大による締結体の剛性低 下からくる座面の接触状態の偏り



従来の理論~限界すべり量Sgrによる評価

表4.3 六角ナット,各種緩み止めねじ部品および緩み止め装置の緩みを生じない 限界の軸直角振動全振幅 Ser とその傾向

	名	称	歯付き座金 (外歯形)	ば ね 座 金	皿ばね 座 金	六 角 ナット	フランジ付き 六角ナット	ታላロンリンダ 入りナット	ダブル ナット	嫌気性 接着剤
	略	1		0		ф	ф			
	規	格	JISB 1255 外歯形 呼び:10	JISB 1251 本書の表 1・8 呼び:10	JISB 1252 1種,軽荷重 呼び:10	JISB 1181 本書の表 1・6 スタイル1,M10	JISB 1190 M10	JASOF106 1 種,並形 M10	JISB 1181 スタイル 1 および低ナット	-
	跱	号	*	×	ø	ø	¢ /	Ø	4	•
	ゆる: 限界の 振動: S _{cr} ,	まない 軸直角 全振幅 mm	0.30	0.42	0.43	0.65	0.85	0.87	0.83	1.18
-	傾向 緩みやすい		基準	━━ 緩みにくい						

<u>※山本晃, "ねじ締結の原理と設</u> <u>計",133 (1995) 養賢堂</u>

従来理論ではゆるみ止 め効果を限界すべり量 で整理!

○本解析の限界すべり量 座金(0.38mm)<通常ナット(0.33mm)=フランジナット 〇有限要素法による微小ゆるみ 座金>通常ナット>フランジナット

座金の限界すべり量

座面すべりの生じない最大限界のすべり幅の反幅の拡大



ゆるみ止め部品の理論の修正



表 4.3 六角ナット,各種緩み止めねじ部品および緩み止め装置の緩みを生じない 限界の軸直角振動全振幅 Ser とその傾向

1. <u>限界すべり量をゆるみ止め部品の評価の指標とし</u> <u>て用いるべきではない!!(ボルトの長さ・太さを</u> <u>変える場合は有効な指標)</u>

2. <u>ゆるみ止めの指標として、座面すべりと微小座面</u> <u>すべりへの効果を区別すべき!</u>

3-3 ダブルナット



ダブルナットの締付ロッキング解析





締結力を与えた状態から、 ロッキング完了まで下ナット をゆるめ方向に閉めていく 解析

締結力とロッキングカのナット締付角に伴う変化



軸力、ロッキングカともほぼ線形に推移する。 将来的には締付指針を提供可能

ダブルナットゆるみ解析手法



•接触 ①ボルト・ナットねじ山間 ②上下ナット間 ③下ナット座面・被締結体間 初期締結力 10kN 摩擦係数0.10 ヤング率205GPa、 ポアソン比0.3

可動板変位 ±0.3mm

Movable plate

Bottom surface nodes constrained in y and z direction

Coupling side surface nodes displacement in x direction and adding vibrational force or displacement

並進変位―荷重曲線(座面すべり)



ナット回転角



締結力9682N

高ロッキング力8810N





締結力10171N 低ロッキング力1117N



締結力10171N

ロッキングなし

ダブルナットのゆるみ止め効果

<u>ロッキングカが発生していれば(下ナットが逆</u>)
 <u>の面で接して、ねじのすべり隙間がなくなれば)</u>
 座面すべりが起こっても全くゆるまない。

・ ゆるみ止め効果はロッキングカに依存しない。



→ しかし! ゆるまなくとも、ロッキングカの ため軸力が低下し、座面すべりが起こると実 際には問題になると考えられる。

3-4 ばね座金(途中)



ばね座金の解析での回転角の振動



1サイクルでナットが ゆるみ回転 ➡ 戻り回転 座金の角が特異点になっているため →フレッチングの原因

結

言

	スーパース リットナット	座金	フランジナッ ト	ダブルナット	ばね座金
座面すべりに対する効 里	Ø	×	Δ	Ø	_
微小座面すべりに対す る効果	0	×	0	0	0
備考	プレベイリング トルク型		等価摩擦直 径が少し大 きい	軸力低下に より座面すべ りが生じる (全くゆるまな い)	フレッチング を起こす可 能性あり

展

望

〇他のゆるみ止め部品への展開 ·接着剤 ・ナイロンナット等 ○衝撃ゆるみの問題 〇ゆるみ以外の要素の取り扱い →機械要素としてのボルト・ナット締結体設計へのフィードバック 研究室では、企業との気軽な議論(悩み相談)・ 共同研究を歓迎します。 <u>詳細はhttp://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/~izumi/Bolt/</u> <u>もしくはgoogleで"ゆるみ""有限要素法"など</u>

ご清聴ありがとうございました。



締結力0の状態でも、ねじ面には接触力が存在する.

> スーパースリットナットの回転にはトルクを要する.

被締結物を削除してスーパースリットナットを回転させる解析を実施.



ゆるみ試験方法

NS式高速ねじゆるみ試験



•30Hzで締結体に軸直角方向振動を 加える.

•17分間試験を行い, ジグワッシャが 手で回せるかどうかでゆるみの判定 を行う.

・(財)日本品質保証機構において採 用されている. Paiらによるゆるみ試験



・偏心器を用いて,可動板に軸直角 方向振動を作用させる。

・摩擦を抑え、焼付きを防ぐために、 可動板と固定板の間にはローラーベ アリングを挿入する.

・ゆるみの研究の際にしばしば使用される.

限界すべり量*Scr*



スーパースリットナットの並進変位一荷重関係



transverse displacement [mm]

六角ナット

transverse displacement [mm]

SSN

微小並進すべりが発生する荷重がSSNのほうが大きい!