

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560132
 研究課題名 (和文) 計算力学的手法による健全な締結部設計と包括的なリスクアナリシス
 手法の確立
 研究課題名 (英文) Establishment of Design Procedure for Safe Joint and Its
 Risk Analysis Method by Computational Mechanics
 研究代表者
 福岡 俊道 (FUKUOKA TOSHIMICHI)
 神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
 研究者番号：00116279

研究成果の概要 (和文)：

ねじ部品が疲労破壊に至るメカニズムをねじ山のらせん形状を忠実に再現したモデルを用いて定量的に明らかにした。異材界面における接触熱抵抗の式を導き、締結部が熱負荷を受けた時の熱および力学挙動を明らかにした。また、接触面剛性を考慮した固有振動解析の一解析手法を提案した。多数ボルト締結体については、締め付け時の軸力のばらつきと外力を受けた時のせん断荷重分担率等の力学挙動を定量的に明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

It is quantitatively clarified by FE models with helical thread geometry how fatigue failures occur in bolted joints. Driving an empirical equation for estimating thermal contact resistance composed of dissimilar materials, thermal and mechanical behaviors of bolted joints are comprehensively studied. As for vibration problems of bolted joints, a numerical procedure is proposed to evaluate its natural frequencies by taking account of interface stiffness. Fundamental characteristics of multi-bolted joints, such as bolt preload scatter and shear load capacity when subjected to shearing force, are quantitatively examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,390,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：材料力学・機械要素・計算力学

科研費の分科・細目：機械工学・<設計工学・機械機能要素・トライボロジー>

キーワード：機械要素, ねじ, 有限要素法, 接触熱抵抗, 接触面剛性

1. 研究開始当初の背景

機械構造物は多くの部品から構成されており、それらの締結部にはねじ部品が広く使用されている。その結果、設計上の問題や不十分な点検整備によってねじ部品が破損すると構造物全体の破壊につながることもある。締結部の破損を引き起こす最大の原因は疲労破壊であり、破断箇所はナット座面に最も近いボルト第1ねじ谷底周辺であること

が多い。一方従来の設計方法では、ボルトねじ部の平均応力振幅を基準とする考え方が一般的である。したがって、締結部の疲労強度をより精度よく評価するためには、ねじ谷底に沿った応力分布と応力振幅を基準した評価方法の確立が望まれる。また締結部では、界面の“接触面剛性”により締結部全体の剛性が低下する。熱負荷を受ける構造物の場合は“接触熱抵抗”によって温度場を高い精度

で解析することが困難となり、ボルト軸応力の変化を正確に評価することができない。さらに、多数ボルトで締め付けられた構造物ではボルト間の軸力のばらつきが問題となる。そこで本研究では、有限要素法をベースとした計算力学的手法により、ねじ部のらせん形状と塑性変形、接触面剛性と接触熱抵抗の影響を考慮し、多数ボルト締め付けにおいて発生する軸力のばらつきを数値解析により予測できる締結部の包括的な設計方法の確立を目指し、同時に締結部における破損・破壊の起こりやすさ、破断に至る外力条件を求めるリスクアナリシス手法の提案を目的としている。

2. 研究の目的

- (1) ねじ山らせんモデルによる疲労強度の評価
ねじ山形状を忠実に再現したボルト締結体モデルを作成し、外力を受けた場合についてねじ谷底の応力振幅のらせんに沿った変化を求め、ねじ部平均応力を基準とした従来の評価方法と比較する。
- (2) ねじ部の塑性変形を考慮した疲労強度評価
トルク法による締め付けによってねじ谷底が局部降伏したボルト締結体を対象として、外力を受けた場合のねじ谷底の応力振幅を求め、弾性変形を基本とした従来の疲労強度の評価方法と比較する。
- (3) 接触熱抵抗を考慮した締結部の熱及び力学挙動の評価
炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金等で構成される異材界面における接触熱抵抗の評価式を実験により求め、熱負荷を受ける締結部の熱及び力学挙動を体系的に評価できる手法を確立する。
- (4) 接触面剛性を考慮したボルト締結体の固有振動特性の評価
表面あらさに起因する接触面剛性を、法線方向とせん断方向の2種類の二次元非線形ばねで表すことにより、有限要素法による締結部界面の剛性を考慮した固有振動解析手法を確立する。
- (5) 多数ボルト締結体の効率的で安全な締め付け手順の検討
多数ボルトで締め付けられたボルト締結体を対象として、ボルトを逐次締め付けたときに発生する軸力のばらつきと最終的に様なボルト軸力が得られる締め付け手順を汎用構造解析コードで求めることができる手法を提案する。
- (6) 締結部の包括的なリスクアナリシス手法の確立
ねじ谷底の応力振幅、ねじ谷底まわりの局部降伏、接触面の熱抵抗と剛性、ボルト間の軸力のばらつきを考慮した有限要素解析手法を用いて、締結部で起こりうる破損・破壊の発生条件とメカニズムを予測する。

3. 研究の方法

- (1) ねじ山らせんモデルによる疲労強度の評価
従来から提案しているねじ山のら

せん形状を完全に再現できる有限要素モデルの作成手法を応用して、ボルトねじ谷底に発生する応力振幅を基準とした疲労強度評価手法を提案する。

- (2) ねじ部の塑性変形を考慮した疲労強度評価
ボルトの締め付け時に、高い応力集中によりねじ谷底周辺で発生する局所的な塑性変形を考慮した疲労強度の評価方法を提案する。

- (3) 接触熱抵抗を考慮した締結部の熱及び力学挙動の評価
ボルト締結体の熱及び力学挙動が界面の熱抵抗に大きく影響される点を考慮して、接触熱抵抗を考慮できる高精度でかつ汎用性の高い解析手法を提案する。

- (4) 接触面剛性を考慮したボルト締結体の固有振動解析特性の評価
締結部疲労破壊の主要な原因である振動外力によるゆらみを避けることを目的として、界面の表面あらさに起因する接触面剛性を二次元非線形ばねで表し、ボルト軸力の増加に伴って表面突起がつぶれ、接触面剛性が増加する現象を考慮できる固有振動解析手法を確立する。

- (5) 多数ボルト締結体の効率的で安全な締め付け手順の検討
管フランジのボルト締め付け過程の解析に対して提案した手法に基づき、ボルトを逐次締め付けたときに発生する軸力のばらつき、及び最終的に様なボルト軸力が得られる締め付け手順を汎用構造解析コードで求めることができる手法を体系化する。

- (6) 締結部の包括的なリスクアナリシス手法の確立
上記の解析手法を適用して、ねじ谷底の応力振幅とねじ谷底の局部降伏、接触面の熱抵抗と剛性を考慮した体系的な解析を実施することにより破損・破壊が発生する条件とメカニズムを予測し、ねじ締結部の破損・破壊に対する包括的なリスクアナリシス手法の確立する。

4. 研究成果

- (1) ねじ山らせんモデルによる疲労強度の評価

- ① ねじの疲労破壊がボルト第1ねじ谷底でもっとも発生しやすく、それに続いてねじの切り上げ部で発生しやすいことを定量的に明らかにした。図1は解析に使用した有限要素モデル、図2はボルト締結体が繰り返し外力を受けた場合にねじ谷底に沿って発生する応力振幅の解析結果の一例である。

- ② 従来の設計方法で使用されているボルト軸部の平均応力振幅とねじ谷底の応力振幅は、外力の変化に対して必ずしも定性的な傾向が一致せず、ボルト締結体の疲労強度評価に広く使用されている“ボルト締め付け線図”を根本的に見直す必要があることを明らかにした。

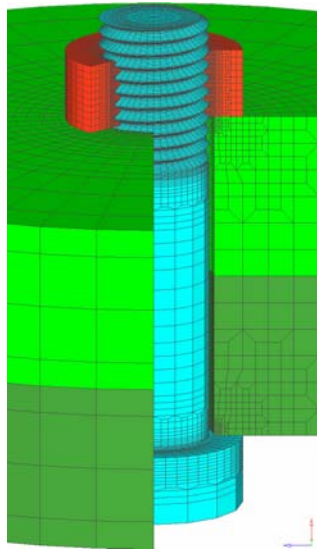


図1 ねじ山らせんモデル

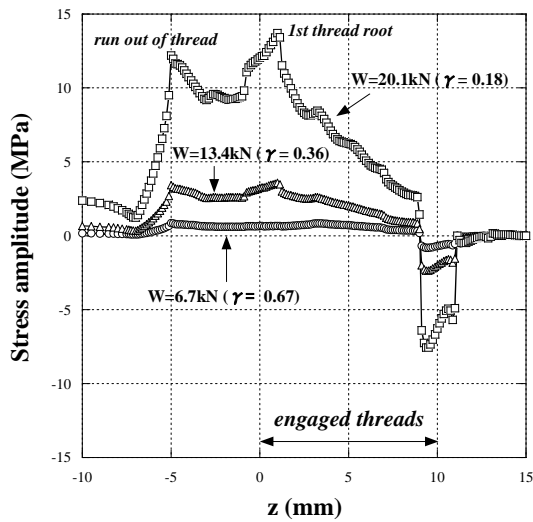


図2 ねじ谷底に沿った応力振幅

(2) ねじ部の塑性変形を考慮した疲労強度評価 ボルト締結体のねじ谷底が局所的に塑性変形した場合、その後の繰り返し外力により発生する応力振幅は、ねじ部が弾性変形する場合と比較して大きく変化しないことを明らかにした。

(3) ボルト締結体が熱負荷を受けた時の熱・力学挙動の解明

① ボルト締結体が熱負荷を受けた場合、ねじ部、ボルト頭部、軸部および被締結体内部を流れる熱の割合を定量的に明らかにし、ボルト軸力の時間変化が材料の熱伝導率と線膨張係数によって大きく変化することを明らかにした。図3はボルト締結体の各部を流れる熱量の割合の時間変化、図4はボルトの締め付け力の時間変化に対する締結部材料の影響を示している。

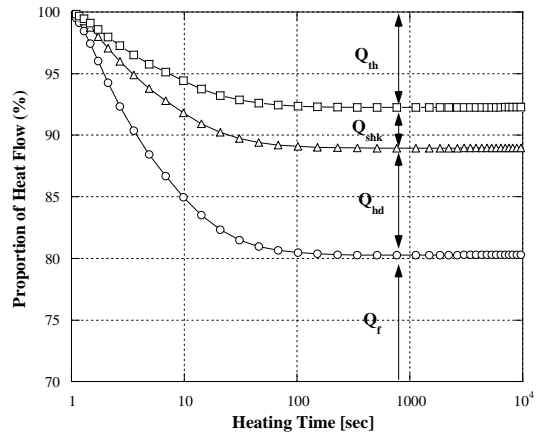


図3 締結体の各部を流れる熱量の割合

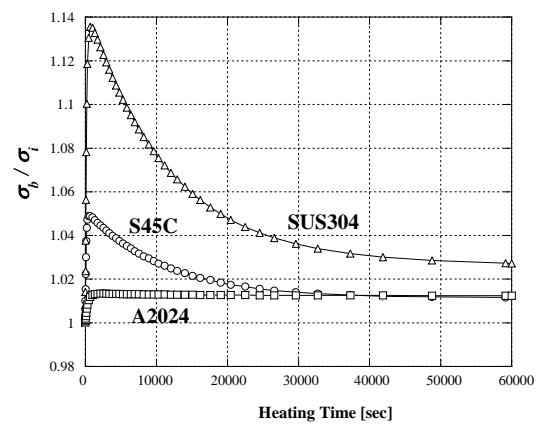


図4 ボルト締め付け力の時間変化

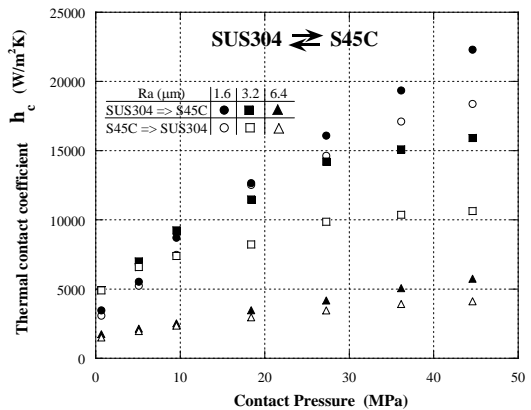


図5 異材界面における接触熱伝達率

② 広く使用されている一般工業材料である炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金から構成される異材界面における接触熱抵抗を定量的に求めることができる評価式を導いた。図5は炭素鋼とステンレス鋼から構成される異材界面における接触熱伝達率（接触熱伝達率の逆数）と面圧の関係を示している。

③ 船用プロペラ軸など大きなトルクを伝達する軸継手の締結に使用されているリーマボルトの締結方法である“冷やしばめ”のメ

カニズムを明らかにし、現場作業に有効な締め付け手順を提案した。図6はリーマボルトの温度が1度上昇した時に発生するボルト軸応力の低下と被締結体の締め付け長さの関係を示している。

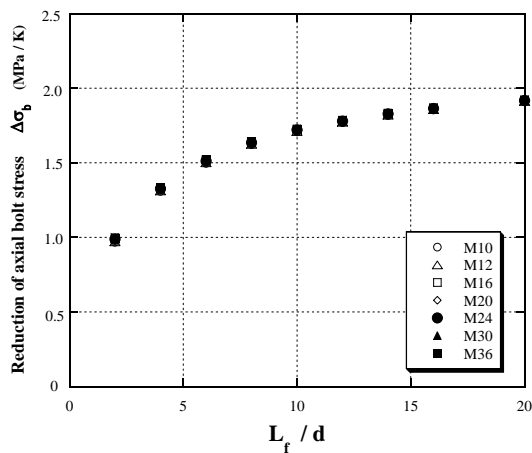


図6 ボルト温度上昇による軸応力の低下

(4) 接触面剛性を考慮したボルト締結体の固有振動特性の評価 接触面の近寄り量と面圧の関係を示す Ostrovskii の式と Kirsanova と Back により提案された垂直方向とせん断方向の剛性を表す式を応用して、接触面剛性を考慮した固有振動解析の一解析手法を提案し、その妥当性を簡単な構造のボルト締結体の振動実験により確認した。

(5) 多数ボルト締結体の効率的で安全な締め付け手順の検討

① 多数のボルト逐次締め付けた時に発生する“弾性相互作用”を汎用構造解析コードを用いて求める手法を確立した。

② 多数のボルトで締め付けられた締結部を対象として、一回の締め付けにより一様なボルト軸力が得られる締め付け手順を汎用構造解析コードで求める手法を確立した。

③ ボルトを逐次締め付けた時に発生する弾性相互作用は、被締結体の中にガスケットのように剛性の低い材料を含み、高圧用の平面座フランジの場合に顕著に表れることを明らかにした。

④ プロペラ軸に使用されているリーマボルトを対象として、せん断荷重を受けた時に発生する曲げ応力の解析結果より、ボルトの破断がフランジ界面からボルト頭部寄りに発生するという実機における事故のメカニズムを明らかにした。図7はボルト軸方向に沿った曲げ応力の分布を示している。

(6) 締結部の包括的なリスクアナリシス手法の確立 (1)～(5)の研究成果により、機械構造物の締結部に発生する破壊・破損現象のリスクアナリシスに対して有効な一手法を提案した。

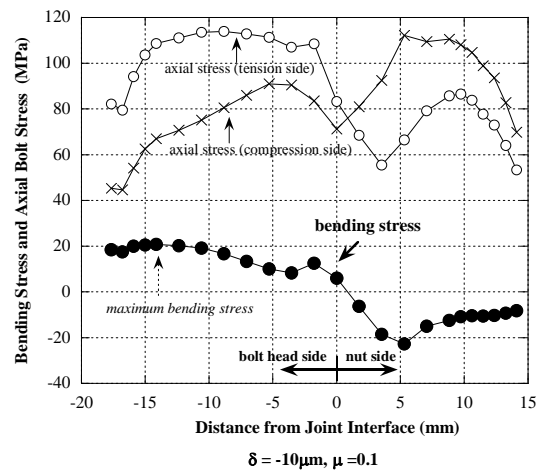


図7 ボルト軸方向曲げ応力分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計11件)

① 福岡, 野村, 蓑田, せん断荷重を受ける多数ボルト締結体の力学特性の評価, 日本機械学会論文集 (A編), 第76巻 768号 pp.1032-1039, 2010.8

② 福岡, 野村, 山田, 異材界面における接触熱抵抗の評価, 日本機械学会論文集 (A編), 第76巻 763号 pp.344-350, 2010.3

③ 福岡, 野村, 西川, ガスケットの高温圧縮特性を考慮した管フランジ締結体の有限要素解析, 日本機械学会論文集 (C編), 第75巻 759号 pp.3069-3075, 2009.11

④ 福岡, 野村, 淵上, ねじ山らせんモデルによるボルト締結体の疲労強度評価, 日本機械学会論文集 (A編), 第75巻 759号 pp.1570-1576, 2009.11

⑤ T.Fukuoka, M.Nomura and K.Shino, Analysis of Heat Flow Around Bolted Joints and Variations of Axial Bolt Force, Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.131, No.6, Paper No. 061203 (7 pages), 2009.12

⑥ T.Fukuoka, M.Nomura and N.Sugano, Experimental Investigation and Finite Element Analysis of the Free Vibration Problem of Bolted Joint by taking Account of Interface Stiffness, Journal of Environment and Engineering, JSME, Vol.4, No.1, pp.101-111, 2009.3

⑦ T.Fukuoka and M.Nomura, True Cross Sectional Area of Screw Threads With Helix and Root Radius Geometries Taken Into Consideration, Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.131, No.2, Paper No. 024501 (5 pages), 2009.4

⑧福岡, 野村, 西川, 朝比奈, 高温環境下におけるシートガスケット圧縮試験装置の開発, 圧力技術, 第 46 巻 6 号 pp.363-369, 2008.11

⑨福岡, 野村, 山下, 数値解析によるリーマボルトの負荷性能と強度の評価, 日本機械学会論文集 (A 編), 第 74 巻 745 号 pp.1212-1218, 2009.9

⑩福岡, 野村, 坂元, 冷やしばめによるリーマボルトの締め付け過程の評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 43 巻 5 号 pp.773-779, 2008.9

⑪福岡, 野村, 菅野, 電磁加振法によるボルト軸力測定の適用性評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 43 巻 4 号 pp.591-597, 2008.7

[図書] (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福岡 俊道 (FUKUOKA TOSHIMICHI)
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授
研究者番号：00116279

(2) 研究分担者

野村 昌孝 (NOMURA MASATAKA)
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授
研究者番号：70252608