

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：13701
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008 ～ 2011
 課題番号：20560072
 研究課題名（和文） 締結・接合部の力学挙動解析とそれに基づく信頼性設計技術の開発
 研究課題名（英文） Mechanical Analysis and Reliability Evaluation of Joint Structures
 研究代表者
 服部 敏雄（HATTORI TOSHIO）
 岐阜大学・工学部・教授
 研究者番号：20377683

研究成果の概要（和文）：

- ① ねじ締結体変形・ゆるみ評価；ねじ軸直角方向の負荷に対する相対すべりの予測方法を確立し、この値からゆるみを評価する方法を提案した。
- ② フレッシング疲労強度・寿命評価；接触端応力特異場パラメータを用いたき裂発生評価、破壊力学を用いたき裂進展評価、特定位置応力を用いた低サイクル疲労寿命評価法を確立した。
- ③ 上記両成果の集大成として「締結・接合構造体のCAEモデリング・解析・評価システム」をまとめ、日本機械学会での分科会「RC-D6「締結・接合・接着部のCAEデータベース構築研究分科会」に持ち込み産業界での普及を進めている。

研究成果の概要（英文）：

- ① Deformation and loosening behavior of bolted joints; Clarify the slipping behavior of bolted joints under transverse loading, and present the evaluation methods of loosening criteria.
- ② Evaluation of fretting fatigue strength and fatigue life; Present the fretting fatigue crack initiation criteria using stress singularity parameters, crack propagation behavior using fracture mechanics and low cycle fretting fatigue life using critical distance stress theory.
- ③ Compiling above two results “CAE modeling , analyzing and evaluation systems for jointing structures” were presented and pushing forward the spread of these systems in industrial fields.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
21 年度	900,000	270,000	1,170,000
22 年度	600,000	180,000	780,000
23 年度	200,000	60,000	260,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：機械工学、材料力学、応力解析

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：ねじ締結、接着強度、フレッシング疲労、応力特異場

1. 研究開始当初の背景

締結・接合・接着部は古くから機械・機器のトラブル源となってきた。例えば浜岡原発タービン翼取付け部フレッシング疲労、ボンバルディア機脚収納扉ボルト脱落、チャイナ航空機スラットボルト突抜け、エレベータブレーキ固定ねじゆるみ、瞬間湯沸し器電子回路基板はんだ部熱疲労、トレーラハブねじ締結部ゆるみ・疲労、米国スペースシャトル断熱タイルはくり、H2ロケットエンジンLE7の配管溶接部割れ爆発、日航ジャンボ機リベット締結部マルチサイトクラック疲労、新幹線モータ取付けボルトゆるみ・落下、古くは大型タンカー溶接部脆性破壊、鉄道車両車軸フレッシング疲労など数多い。これは「安全が誇りとなる国」を作るといふ立派なわが国の科学技術基本計画に充分対応しているか疑問のあるところである。これらの原因としてはそもそもこれら締結・接合部は力の流れが複雑で応力解析が困難であること、作業プロセス等人的的ファクターが入り込みばらつきが大きいなど致し方ない点もあるが、最近のIT活用設計技術の目覚ましい進展の中にあつて構造設計は立派なソルバー（FEM解析ソフト）があれば好いんだという安易な納得に起因している。確かに最近非線形、接触、衝撃等ほとんどの問題に対応できるソルバの開発は目覚ましいが、それよりもっと重要なことは、これらソルバの使い方であり、そのため以下の基礎技術の早期確立が求められている。

- i. 詳細力学解明に基づいた正しい締結・接合部モデルの作成法
- ii. 解析結果に基づいた汎用性のある強度評価法

2. 研究の目的

本研究では、締結・接合部の詳細な力学解析・検証に基づいたモデル作成・強度評価の両基盤技術の確立と、これらを下記の如く結びつけた一貫通貫 CAE 設計システムの構築を行う。

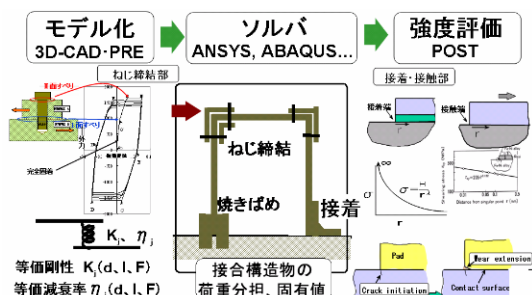


図1 一貫通貫 CAE 設計システム

- i. 締結・接合部のモデル化（等価剛性、等価減衰率）

ほとんどの構造物が材料力学で言う“不静定問題”であり、例えば図1中央に示す3本の梁を4種類の締結方法で組み立てたとすると、この構造物に外力が加わった場合の各梁の荷重分担は、この4種類の締結部の等価剛性が分からないと正確に構造解析できない。動解析では同様に締結部の正確な等価減衰率が必要となる。本研究では、個々の締結・接合部の詳細解析・モデル実験検証に基づいてこれら等価剛性、等価減衰率をデータベースとしてまとめる（図1左部参照）。

- ii. 解析結果の表示と強度評価

・応力特異場；通常 FEM 解析の結果表示は応力分布の円等高線表示が主で、強度評価は単純にこの等高線の最大応力を使って疲労強度評価等を行っているのが現状である。しかし一般に最大応力が発生する複雑形状の表面の節点応力は積分点応力からの外挿が一番難しいところであり、結果的に多くの費用と労力を使いながら一番誤差の大きい応力値を用いて強度評価している事になる。従って本研究では応力分布を等高線表示のみでなく最大応力勾配線に沿っての応力分布グラフ表示を自動化し、これを用いて強度評価する設計システムを構築する。この最も象徴的な例が接着端、接触端部（焼嵌め端部）の応力特異場領域の解析結果表示、強度評価である。この場合には前図右部に示すごとく端部で応力は無限大となる応力分布をしており FEM の最小要素寸法を小さくすればするほど最大応力は大きくなり従来の方法では汎用的な強度評価が出来ない。そこでこの応力分布が2つの応力特異場パラメータつまり、応力特異場の強さ H と、特異性の指数 λ で表示できる事に着目し、この2つのパラメータを応力分布からベストフィット自動算出して強度評価する方法を開発する。

・摩耗の考慮；締結部の接触端は長い稼働履歴の中でマイクロなフレッシング摩耗が進行し、接触端部製作当初と異なる力学条件となるため、締結部の正確な強度・寿命設計にはこの摩耗の進行を考慮した力学解析が不可欠である。本研究では接触解析と試験片実験検証に基づいて、この摩耗・破壊力学を用いたフレッシング疲労寿命評価法を確立する（図1右下部参照）。

3. 研究の方法

上記2つの要素技術の確立は、図2に示すように、試験と解析を並行して進めた。ねじ締結体の実験については軸直角方向負荷下で

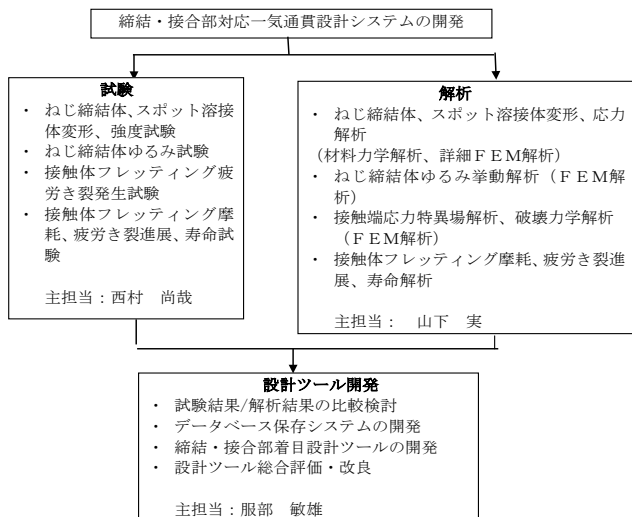


図2 研究遂行のフロー

のすべり、ゆるみ挙動を、フレット試験では、疲労試験下での、き裂の発生、進展、破断を調べた。これらの実測値をすべて、それぞれの接触問題FEM応力解析結果と比較し、解析上の種々のデータベース（摩擦係数、等価剛性等）を構築した。最後にこれらの成果の集大成として、同じく図2に示すような、CAE設計ツールにまとめた。

4. 研究成果

①ねじ締結部の力学挙動

軸直角方向往復すべりにおける締結を保持できる限界相対すべり量 Scr 評価式の提案式を、現在産業界で用いられている種々のボルト、ナット締結構造、例えば、伸びボルト、スプリングワッシャ、テーパねじに適用し、実験結果との比較を行い比較的良好一致を確認し、上記評価式が汎用的な構造にてきようであることを確認した。

また、これらの結果として、スプリングワッシャは、これの使用によって面圧のアンバランスが下で、限界すべり量 Scr が、70~80%に低下すること、また伸びボルトを使うことによって、そのボルト胴部の曲げ剛性低下により、限界すべり量 Scr が、20~30%増大することが分かった。

②フレット疲労強度

まずは、フレット疲労事故の解明のネックになっていた超高サイクル領域のフレット疲労強度、疲労寿命予測については、これらの解析が全て初期状態の形状を対象としており、フレット負荷中に接触面に発生する摩耗の進行を無視していたことであると考え、本研究では、この接触面での摩耗の進行をArchardの式で予測し、摩耗実験との比較から摩耗係数をデータベース

として明確化した。さらにこの摩耗を考慮に入れた応力解析、破壊力学解析を行い、超高サイクル領域も含めたフレット疲労S-N曲線を提示した。これらの結果は、過去の研究者の実験データをもうまく説明できることも確認した。

次に低サイクルフレット疲労強度・寿命の予測法、については、特定位置応力法 (Point Method 及び Line Method) を展開適用した。妥当性の確認は、一般の応力集中部を有する試験体の低サイクル疲労強度・寿命予測に用い、一般の構造体の評価法との一貫性をも確認した。

④ CAE 設計ツール

上記個別技術の成果、特にモデリング、評価式が一般のものづくりの設計現場で使いやすいような、CAE設計ツールを開発した。代表例を図3に示す。これは接触端部の応力分布の自動結果表示と最2乗法を用いた特定位置応力自動抽出を含めた、接触端部疲労強度解析用CAE設計ツールであり、たとえば接触端、接着端を(a)図のごとく放射状のメッシュを自動作成し、応力解析後(b)図のごとく各方向の応力分布を自動表示させ、最も厳しい方向の応力分布(c)図から応力特異場パラメータあるいは特定位置応力を自動算出し、強度、寿命を一気通貫で評価できるシステムを完成させた。現在機械学会を通して普及している。

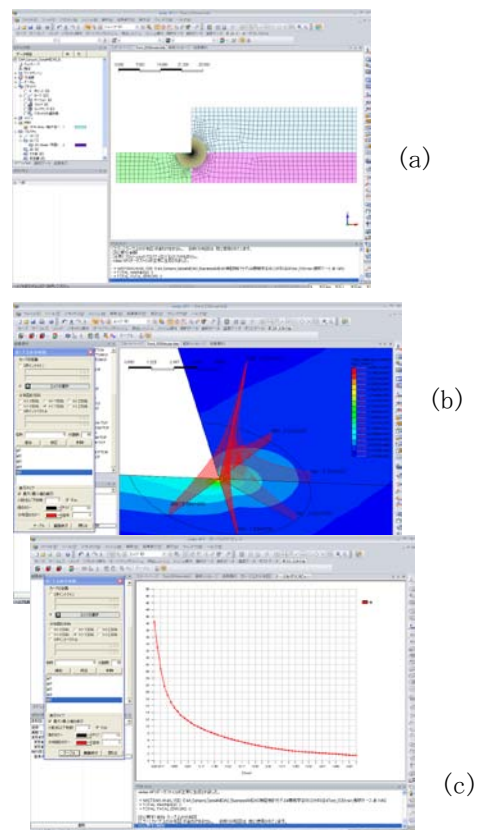


図3 応力特異場CAE設計ツール

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 9 件)

1) Fretting fatigue life estimations based on the fretting mechanisms、(T.Hattori Vu Trung Kien and M.Yamashita)、Tribology International, 44, pp1389-1393, (2011) 査読あり

2) Fatigue Strength Evaluation Methods Using Stress Distributions、(F. Nakamura, T. Abe, T. Hattori and M. Yamashita)、Key Engineering Materials, 417-418, pp. 409-412, (2010) 査読あり

3) 軸直角方向負荷下でのボルトーナット締結体のすべり・ゆるみ挙動 (第 2 報、限界すべり量及びボルト頭部の傾き係数の評価) (西村尚哉、服部敏雄、森智志、佐合一馬、山下実、成瀬友博)、日本機械学会論文集 (A 編)、75-756, pp.967-973、(2009). 査読あり

4) 軸直角方向負荷下でのボルトーナット締結体のすべり・ゆるみ挙動 (第 1 報、ナットによる限界拘束モーメント評価式の検討及び修正) (西村尚哉、服部敏雄、森智志、佐合一馬、山下実、成瀬友博)、日本機械学会論文集 (A 編)、75-756, pp.958-966、(2009). 査読あり

[学会発表] (計 14 件)

1) T. Hattori, Muhammad Amiruddin Bin Ab Wahab, T. Ishida and M. Yamashita, Fretting Fatigue Life Estimations Based on Critical Distance Theory, ICM11, 2011 年 6 月 6 日、イタリア、Como

2) 服部敏雄、宮下幸雄、泉聡志、佐藤千明、久保田祐信 RC-D6「締結・接合・接着部の CAE モデリング・解析・評価システム構築研究分科会」中間報告、機械学会機械材料・材料加工技術講演会、2010 年 11 月 27 日、東京大学

3) Toshio Hattori, Minoru Yamashita, T. Naruse Loosening and Sliding Behavior of Bolt-Nut Fastener under Transverse Loading, ICEM 14, 2010 年 7 月 4 日、フランス、Poitiers

[図書] (計 4 件)

1) 破壊力学大系 壊れない製品設計へ向けて、(服部敏雄)、NTS、(2012)

2) 界面強度評価ハンドブック (INTERFACIAL STRENGTH

EVALUATION HANDBOOK)、(中佐啓治郎、服部敏雄、他)、日本材料学会、(2011)

3) 最新フラクトグラフィー 各種材料の破面解析とその事例、(塩谷義、松尾陽太郎、服部敏雄、川田宏之)、テクノシステム (2010)

4) 製品開発のための材料力学と疲労設計入門 (鯉淵、小久保、服部、初田)、pp.81-106、日刊工業新聞社 (2009).

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：防護柵および防護柵用連結具

発明者：岐阜大学、廣瀬工務店

権利者：岐阜大学、廣瀬工務店

種類：実用新案

番号：岐阜大学整理番号：G1-H23-7

出願年月日：平成 23 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

名称：防護柵

発明者：岐阜大学、廣瀬工務店

権利者：岐阜大学、廣瀬工務店

種類：実用新案

番号：岐阜大学整理番号：G1-H22-37

出願年月日：平成 22 年 10 月 18 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：床ピタ

発明者：岐阜大学、廣瀬工務店

権利者：岐阜大学、廣瀬工務店

種類：商標登録

番号：登録第 5362657 号

取得年月日：平成 22 年 10 月 22 日

国内外の別：国内

[その他]

1) ためしてガッテン「ねじの不思議」、NHK、(2010, 05)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 敏雄 (HATTORI TOSHIO)

岐阜大学 工学部 教授

研究者番号：20377683

(2) 研究分担者

山下 実 (YAMASHITA MINORU)

岐阜大学 工学部 准教授

研究者番号：50239985