

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560110

研究課題名(和文) 局所疲労強度特性評価に基づく接合部の破壊シミュレーション

研究課題名(英文) Fracture simulation of joints based on the evaluation of local fatigue strength

研究代表者

小川 武史(Ogawa, Takeshi)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：50167318

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、リベット接合部に2つの圧子を用いるインデンテーション試験を適用し、局所的な弾塑性力学特性評価法を確立した。真応力と真ひずみの関係が、セルフピアスリベット(SPR)および母材に対して、2圧子法によって推定された。そして、それらの結果から、予ひずみレベルがそれぞれ推定された。予ひずみを付与されたSPR試験片が準備され、疲労試験が行われた。この結果によって、局所疲労特性が評価された。SPR試験片とSPR接合部の応力分布が有限要素法解析によって求められ、SPR単体の疲労強度とSPR接合部の疲労強度が関係づけられた。

研究成果の概要(英文)：The present study established a method to estimate local elastic-plastic properties of rivet joints in terms of indentation tests using two indenters. True stress-strain curves of self-piercing rivet (SPR) and base materials were estimated by the dual indenter method, and pre-strain levels of SPR and base materials were determined by the estimated stress-strain curves. Pre-strained SPR specimens were prepared and conducted fatigue tests, by which local fatigue strength was evaluated. Stress distribution of the SPR specimen and SPR joints were analyzed by finite element method (FEM), and fatigue strengths of SPR itself and SPR joints were correlated.

研究分野：材料強度学

キーワード：構造・機能材料 材料強度 信頼性評価 接合技術 インデンテーション法

1. 研究開始当初の背景

溶接・ろう接・接着等の接合技術は工業製品の製造過程に不可欠な技術である。例えば、大型鉄鋼構造物では溶接が、高密度半導体パッケージでははんだ接合が使用されている。また、接着剤を使用した接着接合は、輸送機械、建築関連製品等に広く使用されている。しかし、異種材料が接合されることによる応力集中や、接合プロセスにおける材料の力学的性質の変化は、接合技術を用いる上で避けられない問題である。したがって、図1に示すように、製品の安全性、信頼性評価を行うには、接合部周辺の力学特性がきわめて重要である。

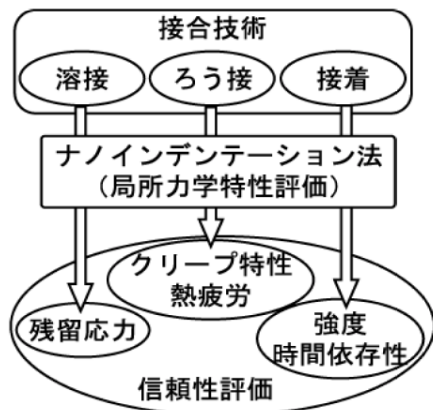


図1 ナノインデンテーション法による接合部の局所力学特性評価

溶接による接合が用いられる大型鉄鋼構造物や輸送機器では、残留応力が発生するだけでなく、溶接熱影響部 (HAZ) に微視組織変化が発生する。また、加工などの製造履歴によっても微視組織変化が発生し、局所的な力学特性が変化する。これらは、金属疲労や応力腐食割れの原因となることから、接合された製品の安全性を評価するためには、残留応力に加えて、微視組織変化に基づく局所的な力学的性質を詳細に調査し、製品の破壊挙動をシミュレーションする必要がある。残留応力に関しては、これまでに多くの研究が行われてきた。より高度な強度信頼性設計には、接合部の局所的な力学特性の分布を正確に把握する必要があるが、十分な研究は行われておらず、未知の問題も多い。また、ろう接が用いられる電子機器では、電子パッケージ内部に生じる繰返し熱変形やクリープ変形により、薄膜、極細線および微細はんだ接合部などの破壊が報告されている。電子パッケージの信頼性評価には、極めて微小な領域の力学特性評価が必要であるが、極小材料 (マイクロマテリアル) の力学特性は寸法効果のためにバルク材から得ることが不可能であり、サブマイクロスケールの材料から力学特性を取得する必要がある。

一方、近年、輸送機械等では生産の効率化と軽量化のために、接着剤による接合が多く使用されており、接着剤自身の力学特性評価が重要になっている。しかしながら、被着体

間に接着剤が挟まれている状態での接着剤の力学特性の取得が困難であること、樹脂系接着剤では粘弾性特性を有することから力学特性の時間依存性を評価する必要があることから、これまで行われてきた多くの方法では接着剤の力学特性が十分に理解されているとはいえない。このような現象を実測し、数値シミュレーションを行えば、高度な破壊評価が期待される。その実現のためには、局所的力学特性の時間依存性を正確に評価する必要がある。

2. 研究の目的

近年、機械構造物に高度の強度安全性が求められるようになった。多くの場合、接合部が最大の弱点となっている。接合技術の種類によらず接合部周辺では、異なる力学的性質の材料が組み合わせられることになり、高度な健全性評価を行うためには局所的な力学特性評価に基づく破壊のシミュレーションが必要である。研究代表者は、局所力学特性評価の試験技術としてインデンテーション法に着目し、弾塑性特性、クリープ特性および粘弾性特性の評価法を開発してきた。本研究では、この局所力学特性評価を実構造物および製品の健全性評価に適用し、接合部の破壊シミュレーション技術の確立を目指すものである。

3. 研究の方法

研究計画の段階では、評価対象の力学特性として、クリープ特性および粘弾性特性も挙げていたが、最近の社会情勢を反映して、自動車用の薄板鋼板の接合技術およびその疲労強度が極めて重要な研究課題となった。そこで本研究では、弾塑性特性に焦点を当てた局所力学特性評価と実構造物および製品の健全性評価の研究を進めることとした。弾塑性特性の問題は、自動車分野だけでなく、高圧ガス分野などでも重要な問題となりつつあり、今後はこれらの分野への研究展開も考えられる。本研究では、自動車用リベット継手の予ひずみ量の推定および疲労強度評価を対象を絞り、局所力学特性法の検討を行った。

具体的には、高強度鋼の評価を可能にする 115° と 118° の圧子を用いたインデンテーション法を提案し、様々な熱処理を施した高強度鋼の試験片に対して、引張試験の結果とほぼ同等な応力-ひずみ曲線を得ることができた。この成果が雑誌論文の2である。また、局所疲労強度の考え方にに基づき、セルフピアスリベット (SPR) 接合時の予ひずみ量をインデンテーション試験により明らかにするとともに、SPR 本体および板材に予ひずみを与えて単体での疲労試験を行うことにより、それぞれの疲労強度に及ぼす予ひずみの影響を明らかにした。また、この結果に基づき、SPR 接合材の疲労強度に及ぼす接合鋼板強度の影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 局所弾塑性特性の評価に基づく予ひずみの予測

インデンテーション試験から力学特性を予測できる2圧子法により、270材および590材に打ち込まれたSPRおよび母材の真応力 σ_t -真ひずみ ε_t 関係を推定した。2圧子法とは、稜間角 ϕ が異なる2種類の三角錐圧子を用い、インデンテーション試験によって得られる押し込み力 F と押し込み深さ h の関係(F - h 曲線)から、べき乗硬化則($\sigma_t = K\varepsilon_t^n$)による塑性変形特性を求めるものである。圧子は $\phi = 115^\circ$ および 118° の三角錐圧子を用いた。

590材に打ち込まれたSPRの台座部、外側および内側からそれぞれ推定した σ_t - ε_t 関係を図2に示す。また、590材の母材で推定した σ_t - ε_t 関係を図3に示す。図3には自動車技術会で行われた引張り試験結果を併記しているが、予ひずみを与えていない σ_t - ε_t 関係の推定結果とよく一致している。これらの推定した σ_t - ε_t 関係を用いて板材に打ち込まれたSPRの内側と外側の予ひずみ量の推定を行った。SPR接合後の σ_t - ε_t 曲線を、予ひずみを与えていない σ_t - ε_t 関係と一致するまで ε_t 軸方向に平行移動させ、その際の平行移動量から予ひずみ量を求めた。270材についても同様の実験を行った。その結果、270材に打ち込まれたSPRでは7.2~10.2%、590材に打ち込まれたSPRでは10.7~12.7%の予ひずみ量が推定された。また、母材に

ついては、270材では30~35%、590材では15~20%の予ひずみ量が推定された。

(2) セルフピアスリベットSPRの疲労強度評価

SPR接合施工時に与えられる予ひずみを模擬するため、SPRにくさびを押し込み塑性変形させた試験片を作成した。予ひずみ量を変化させるために、頂角が 60° と 30° の角度を持つ2種類のくさびを用い、SPRの開口端部直径を6.6mmおよび7.2mmの2種類とした。また、これらのリベットは、図4(a)に示すような幅1mmのスリットを荷重負荷方向に対し垂直に加工し、破壊起点をSPR接合材の本体破断部と一致させた。試験機は島津10kNサーボパルサーである。疲労試験は、荷重制御、圧縮の荷重比10、繰返し速度1Hzとした。試験力は図4(b)に示すように開いたSPR開口端部に負荷した。

疲労試験結果を荷重範囲 ΔP と破断繰返し数 N_f の関係として図5に示す。この結果より、予ひずみ量はSPR本体の疲労強度に影響をほとんど及ぼさないことがわかる。また、破断部は図6に示すようにSPR接合材と同様に、SPRの円筒部付け根である。

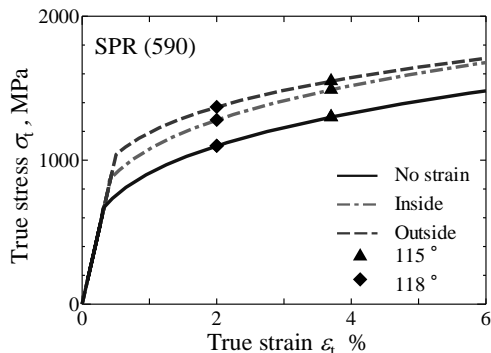


図2 2圧子法により予測された590材に打ち込んだSPRの真応力-真ひずみ関係

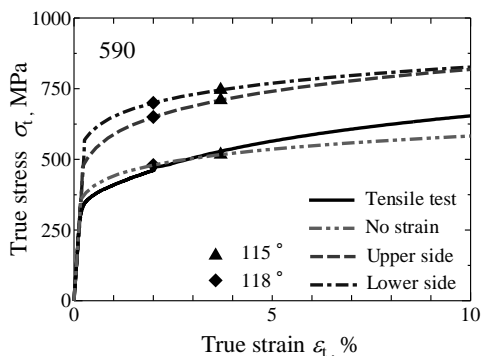


図3 2圧子法により予測された590材の真応力-真ひずみ関係

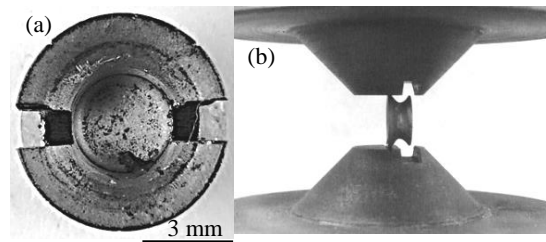


図4 予ひずみを与えられたSPR試験片形状(a)および試験治具への取り付け状況(b).

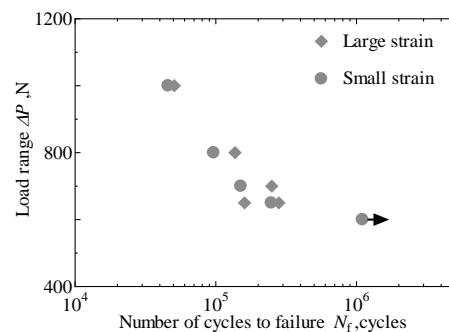


図5 予ひずみを与えられたSPR試験片の疲労試験結果。

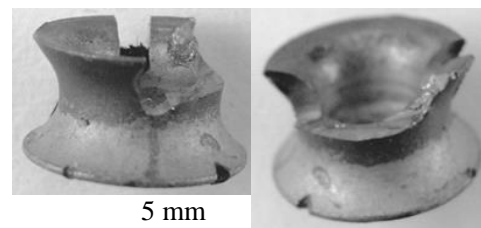


図6 疲労試験で破断した試験片

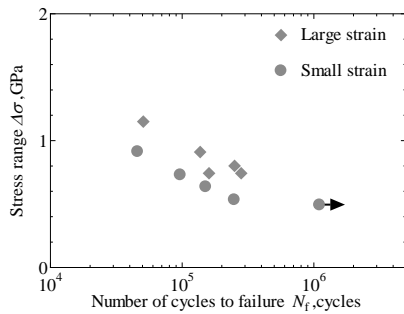


図7 予ひずみの異なる SPR 試験片の $S - N$ 曲線

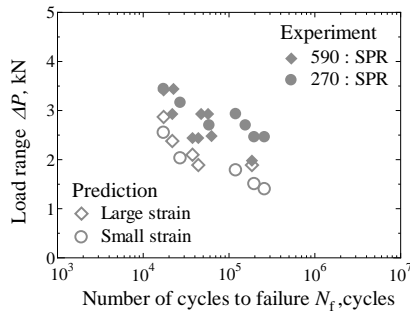


図8 SPR 接合部の疲労強度 (実験結果と SPR 単体の実験に基づく予測結果の比較)。

有限要素法 (FEM) 解析によって、荷重 P と最大応力部の応力 σ の比例関係求め、図 5 における ΔP を $\Delta \sigma$ に変換した。 $\Delta \sigma$ と N_f の関係 ($S - N$ 曲線) を図 7 に示す。予ひずみの影響により、疲労強度に差異が認められる。図 5 の $\Delta P - N_f$ 関係は、予ひずみに関わらず、ほぼ一致する結果となっていたが、予ひずみの大きい SPR の応力集中は予ひずみの小さいものより大きく、本来の疲労強度は上昇していたことを示している。これらの結果が予ひずみを受けた SPR の局所疲労特性を意味している。

実際の SPR 接合材を模擬した FEM 解析結果においても、せん断疲労試験における P と σ の関係を求め、図 7 の $S - N$ 関係から $\Delta P - N_f$ 関係を予測して図 8 に示す。図には、自動車技術会で行われた SPR 接合材の実験結果も併せて示す。本研究で行った SPR 単体の疲労試験から SPR 接合部の疲労強度を予測した結果には、せん断疲労試験結果に見られた疲労強度の逆転現象は認められず、予ひずみの影響で実験結果を説明することはできなかった。しかし、予測結果と 590 材の実験結果はほぼ一致しており、SPR 単体の疲労試験から求めた局所疲労特性の結果を用いて、SPR 接合部の疲労強度予測が可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

1. 大関裕明, 野呂亮太, 蓮沼将太, 小川武史, 中丸敏明, 自動車用リベット継ぎ手の予ひずみ量の推定および疲労強度評価, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol. 45, No. 3 (2014), pp. 589-595.

2. 小森貴史, 金田 忍, 小川武史, 坂中則暁, 松原幸生, 高強度鋼のインデンテーション法による局所力学特性評価, 日本機械学会論文集 A 編, 査読有, Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 646-650.

〔学会発表〕 (計 4 件)

1. 野呂亮太, 上 祐貴, 蓮沼将太, 小川武史, 中丸敏明, 自動車用 SPR 継ぎ手の疲労強度に及ぼす塑性予ひずみの影響, 自動車技術会 2014 年春季大会学術講演会前刷集 No.76-14, pp. 9-12, 2014 年 5 月.
2. 大関裕明, 野呂亮太, 蓮沼将太, 小川武史, 中丸敏明, 自動車用リベット継ぎ手の予ひずみ量の推定および疲労強度評価, JSAE SYMPOSIUM 講演論文集, pp. 35-40, 2013 年 11 月.
3. 野呂亮太, 大関裕明, 蓮沼将太, 小川武史, 中丸敏明, セルフピアスリベット継ぎ手部の塑性ひずみ量の推定と疲労強度の検討, M&M2013 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, ¥data¥pdf ¥PS14. PDF, p. 3, 2013 年 10 月.
4. 齋藤裕樹, 小森貴史, 蓮沼将太, 小川武史, 三角錐圧子を用いた硬さ試験による弾塑性応力ひずみ関係の推定法, M&M2013 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, ¥data¥pdf ¥PS01. PDF, p. 3, 2013 年 10 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 武史 (OGAWA TAKESHI)
 青山学院大学・理工学部・教授
 研究者番号: 50167318