Study on fatigue life assessment and prediction of welded steel sheet joints for automobiles

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/38968

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学　位　論　文　要　旨

自動車用薄鋼板溶接部材の疲労寿命評価と疲労寿命予測手法に関する研究

Study on fatigue life assessment and prediction of welded steel sheet joints for automobiles

金沢大学大学院自然科学研究科
システム創成科学　専攻
次世代鉄鋼総合科学　講座
吉　田　裕　一

Abstract

High-strength steel (HSS) sheets are going to be applied to automobile parts for weight reduction and improvement of safety in crashing. Therefore, it is very important to evaluate the fatigue properties of welded HSS sheet joints for automobiles appropriately. This study examined the fatigue life assessment and prediction of welded steel sheet joints for automobiles.

First, the fatigue life of welded steel sheet structures was predicted by using a fatigue analysis software tool, and these predicted results were evaluated by reference to corresponding experimental results. It was confirmed that fatigue life predictions were in good agreement with corresponding experimental results in cases where the *SN* curve database was modified appropriately.

Second, fatigue tests were conducted under cyclic torsion loads using spot-welded rectangular section members made of 590MPa grade HSS to investigate the springback effect on fatigue properties. The prediction of the fatigue life of these members was attempted through springback analysis, an elastic analysis together with a method of fatigue life prediction for spot welds using nominal structural stress. The predicted results were generally in agreement with the experimental results in terms of the effect of springback.

Third, fatigue tests and fatigue life predictions were conducted on arc-welded joints made of HSS sheet under variable amplitude loading based on the standard uneven road profile data. Fatigue lives predicted exploiting the elastic FEM analysis together with the rain-flow cycle counting and the modified Miner rule were slightly longer than the experimental ones. The modification of the *SN* master curve using the Corten-Dolan method improved the agreement between the predictions and experiments on the T-shape-type arc welded joints.

Finally, fatigue tests were conducted on arc-welded lap joints made of 440MPa grade HSS sheets under a repeated two-step variable amplitude loading condition. The cumulative damage (*D*) decreased when increasing the difference in the loading amplitude between the high- and the low-level loadings. Moreover, *D* increased with the increase in the number of cycles at the low-level loading amplitude, under the condition that the low-level loading was below the fatigue limit. Furthermore, the EBSD observation nearby cracks was conducted and revealed that *D* might be in correlation with the amount of concentrated strain at the crack tip.

The above-mentioned results contribute to efficient fatigue design and improvement of fatigue properties for automobile parts made of HSS.

論文要旨

自動車産業には，温暖化対策に代表される地球環境保護，車両の安全性向上に関する対策がとくに強く求められている．その社会的要請から，自動車用車両開発においては，車体軽量化による燃費向上，衝突安全性向上を両立させるため，骨格部材や衝突部材に高強度鋼板を活用し，鋼板を薄肉化して軽量化しつつ，衝突エネルギー吸収特性を向上させる車体設計が主流となっている．一方，自動車の重要な車体性能として，前に述べた衝突安全性能以外に疲労耐久性，曲げ・ねじり剛性，振動騒音特性，操縦安定性などがあり，これらの諸特性を満足させつつ，軽量化，衝突安全性能の向上を図らなければならない．とくに，自動車の信頼性を確保する観点から，疲労耐久性は極めて重要な性能の一つであり，高強度鋼板を車体へ適用拡大する際に車体の疲労耐久性を確保することは必須である．

本研究では，車体の軽量化，衝突安全性向上に加え，車体の疲労耐久性の維持向上を両立させるとともに，車体の疲労耐久性設計技術を進化させることを目的に，自動車用薄鋼板溶接部材の疲労寿命評価と疲労寿命予測手法の研究開発を推進した．具体的には，当該分野の疲労寿命評価と疲労寿命予測手法に関して，実用性，拡張性を高め，また，高強度鋼板の適用拡大に対応するため，薄鋼板スポット溶接部材については，部材の成形性と疲労特性に着目した疲労寿命評価手法を検討し，提案した．薄鋼板アーク溶接部材については，市場での実働荷重条件を想定し，変動荷重下での疲労特性と疲労寿命評価手法の検討を行い，荷重相互作用が疲労寿命に影響することを明らかにするとともに変動荷重下での累積損傷値と微細組織構造との間に密接な関係があることを見出した．以下に本研究で得られた主な知見を述べる．

第 2 章の「薄板溶接構造部材の疲労寿命予測手法に関する検討」では，疲労実験を行って取得したスポット，アーク薄板溶接部材の疲労試験データ，および過去の文献の溶接部材疲労試験データを用いて，市販の疲労解析プログラムの一つである nCode 社の FE-Fatigue の寿命予測精度を詳しく評価，検討した．スポット溶接部材の寿命予測においては，FE-Fatigue による寿命予測結果と試験結果はよく一致し，公称構造応力は有効な疲労評価パラメータであることがわかった．アーク溶接部材の寿命予測においては，FE-Fatigue による寿命予測結果と疲労試験結果は一致しなかったが，実部品の溶接条件，板厚，応力状態等を反映させた適正な基準の *SN* 曲線を設定すれば，実部品の疲労寿命を精度よく予測でき，構造応力は寿命予測において有効な疲労評価パラメータであることを確認した．

第 3 章の「スプリングバックの影響を考慮したスポット溶接箱型断面部材の疲労寿命評価」で

は，車体骨格材を模擬した 590MPa 級高強度薄鋼板製スポット溶接箱型断面部材を用い，疲労寿命評価手法について基礎的な検討を行うことを特徴とした．疲労実験に関しては，高強度鋼板をプレス成形し，スポット溶接で箱型断面部材を製作した後，繰返しねじり荷重下での試験を行った．Fig.1 に供試部材の形状を示す．スポット溶接箱型断面部材の疲労寿命計算においては，スプリングバックによる残留応力を平均応力と仮定し，公称構造応力を疲労評価パラメータとする予測手法を提案した．供試部材のスプリングバック解析では，成形解析で求めた成形下死点での応力成分値を駆動力としてスポット溶接部に発生する残留応力を算出した．本提案手法を用いて，スプリングバック量が異なるスポット溶接箱型断面部材の疲労寿命評価を行い，試験結果との比較検証を行った結果，Fig.2 に示すように寿命予測値はやや安全側の評価値となったが，おおむね実験結果と一致し，疲労試験結果の傾向を再現する妥当な計算結果を得た．

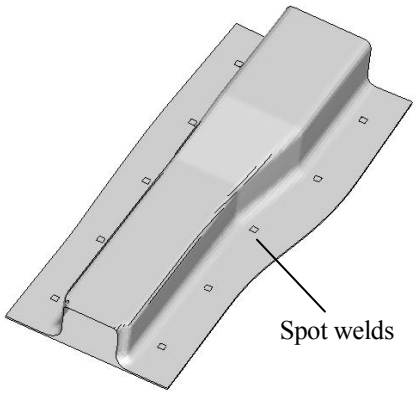


Fig.1　Model of spot welded rectangular-shaped section member

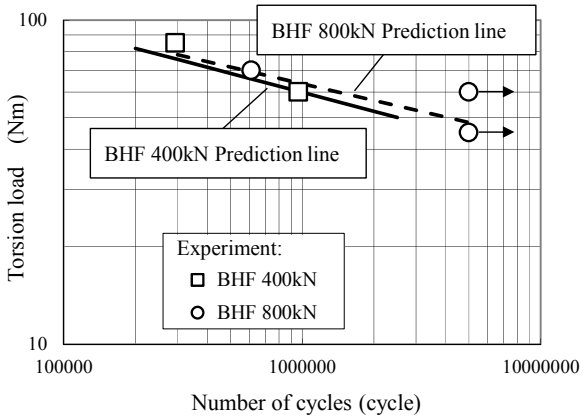


Fig.2　Experimental and predicted fatigue life

第 4 章の「変動荷重下での薄板アーク溶接部材の疲労寿命評価」では，高強度熱延薄鋼板をアーク溶接で接合した継手試験部材を用い，変動振幅荷重下での疲労試験を実施し，その疲労挙動を調べるとともに，有限要素解析により溶接部の発生応力を算出し，レインフロー法による応力履歴サイクルカウントと修正マイナー（Miner）則に基づいて，当該継手部材の疲労寿命評価を行い，実験結果と比較考察した．疲労試験に用いた変動振幅入力荷重については，自動車技術会疲労信頼性部門委員会で公開，提供された日本自動車研究所の基準凹凸路での仮想路面変位データに基づいて設定した．また，試験部材には 590MPa 級および 440MPa 級熱延薄鋼板製重ね隅肉溶接継手と，Fig.3 に示す 440MPa 級熱延薄鋼板製

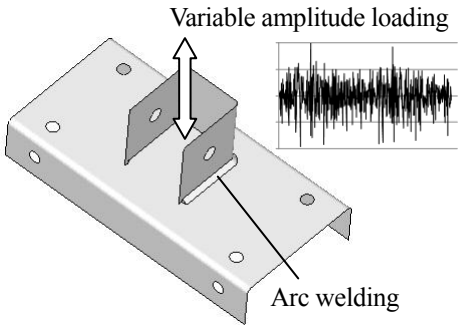


Fig.3　T-shape-type arc welded joint

T 字型溶接継手を用いた．Fig.4,5 に各試験部材における変動振幅荷重下での疲労試験結果と寿命推定結果を比較したグラフを示す．修正マイナー（Miner）則に基づく寿命推定値は試験結果に対してやや過大評価となった．さらに，コーテン（Corten）-ドラン（Dolan）の方法により基準 *SN* 曲線を修正して，修正マイナー（Miner）則に基づき，再度寿命推定した結果，重ね隅肉溶接継手では過小評価となり，T 字型溶接継手では寿命推定値と実験値はほぼ一致した．修正効果の差異は継手形状に起因した荷重相互作用の影響であると推察した．

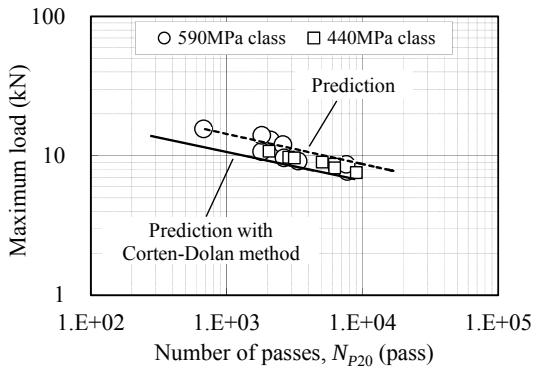


Fig.4 Comparison between predicted and experimental results on lap joint under variable amplitude loading

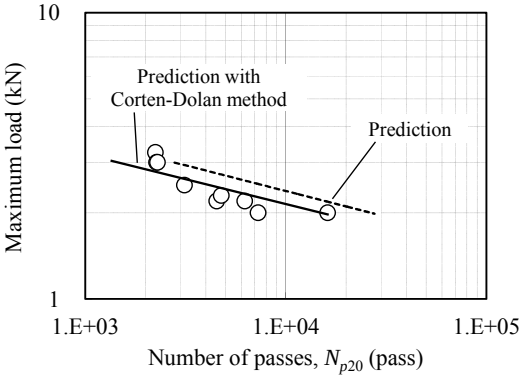


Fig.5 Comparison between predicted and experimental results on T-joint under variable amplitude loading

第 5 章の「変動荷重下での薄板重ね隅肉アーク溶接継手の疲労寿命に及ぼす荷重相互作用の影響」では，440MPa 級熱延薄鋼板製重ね隅肉アーク溶接継手を用いて，Fig.6 に示す二段繰返し変動荷重における疲労試験を行い，荷重相互作用を累積損傷値 *D* により系統的に定量化するとともにき裂発生部近傍の損傷状態を SEM-EBSD により詳しく観察した．低レベル荷重の繰返し数 n_L を 50 および 100 サイクルとし，低レベル荷重振幅を変更した疲労試験を行った結果，低レベル荷重振幅が小さく，高レベル荷重との差が大きいほど *D* 値は低く，荷重相互作用の影響が顕著となった．

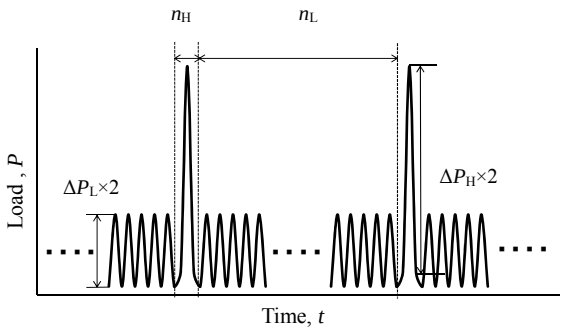


Fig.6 Repeated two-step variable amplitude loading pattern

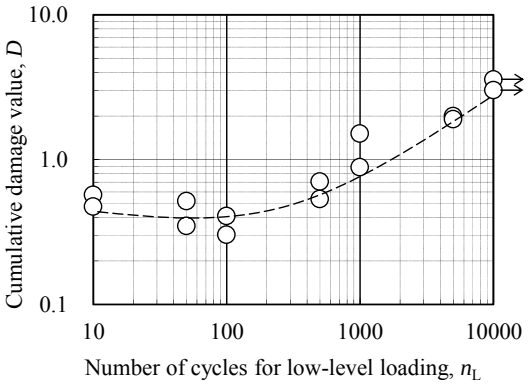
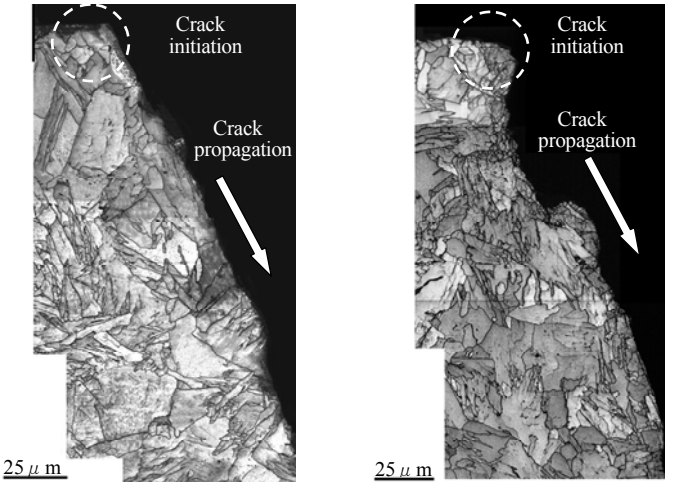


Fig.7 Relationship between number of cycles n_L and cumulative damage value *D* with ΔP_H = 5.0kN,ΔP_L= 1.75kN

低レベル荷重振幅を疲労限度以下とし，その繰返し数を変更した疲労試験を行った結果, Fig.7 に示すように低レベル荷重の繰返し数 n_L が増加し，その損傷度割合が大きいほど，D 値は上昇することが確認された. Fig.8 に, EBSD 測定により求めた各疲労荷重条件における破面断面の IQ 図を示す． D 値が高い場合（Fig.8(a), D=1.996）は，き裂発生点近傍のサブグレインサイズは比較的大きく凹凸が少ない破面であり，高サイクル疲労と同様な損傷状態であった．一方，D 値が低い場合（Fig.8(b), D=0.517）は，き裂発生点近傍に細かいサブグレインが存在し，凹凸が多い破面を呈しており，低サイクル疲労と同様な損傷状態であった. これらの結果から D 値と微小き裂先端におけるひずみ集中，言いかえると下部組織の発達に相関があると推察した.



(a) Variable amplitude loading with ΔP_H = 5.0kN,ΔP_L = 1.75kN and n_L = 5000

(b) Variable amplitude loading with ΔP_H = 5.0kN,ΔP_L = 1.75kN and n_L = 50

Fig.8 IQ maps under repeated two-step variable amplitude loading

本研究により，自動車用薄鋼板溶接部材の疲労寿命を簡便かつ的確に評価することができ，部材疲労特性を改善，向上させた構造，施工法などを車体設計段階で効率よく総合的に検討することが可能となった．これは，地球環境保護，車両の安全性向上に資する研究成果であり，今後，車体軽量化, 衝突安全性能の向上を目的とした高強度鋼板の適用拡大に本研究成果を応用展開し，高強度化がさらに加速することを期待したい.

学位論文審査報告書（甲）

1．学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

自動車用薄鋼板溶接部材の疲労寿命評価と疲労寿命予測手法に関する研究

2．論文提出者　(1) 所　　属　システム創成科学専攻　次世代鉄鋼総合科学講座

(2) 氏（ふり）　名（がな）　吉田（よしだ）　裕一（ゆういち）

3．審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し，平成２６年２月３日に第１回学位論文審査委員会を開催し，提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した．同日に口頭発表の後，第２回学位審査委員会を開催し，慎重に協議の結果、以下の通り合格と判定した．

本論文は，プレス成形品を溶接した部材で構成される自動車車両の疲労耐久性を維持向上することを目的に取り組んだものであり，疲労寿命の評価と予測手法に関して新知見を得た．すなわち，成形時のスプリングバックを考慮したスポット溶接部材の疲労寿命を，公称構造応力を評価パラメータとして予測する手法を確立した．また，変動荷重下でのアーク溶接部材の疲労寿命について，修正 Miner 則に基づいて実験と理論の両面から評価し，高精度化には荷重相互作用の考慮が重要であることを指摘した．荷重相互作用について，二段荷重疲労試験を行い，累積損傷値 D を用いて系統的に検討した．その結果，変動荷重の振幅差が大きいほど累積損傷は大きく，また低レベル荷重の繰り返し数が増加すると累積損傷が回復する新知見を得た．SEM-EBSD を用いて荷重相互作用を解析し，累積損傷と下部組織との間に密接な関係があることを初めて明確にした．

以上のように，本論文は溶接構造体である車両の疲労寿命の評価と予測に大きく貢献しており，学術的にも工業的にも価値が高く，博士（工学）の学位に値すると判定した．

4．審査結果　(1) 判　　定（いずれかに○印）　（合　格）・　不合格

(2) 授与学位　　博　士（　工　学　）