

Local Mechanical Characterization and Fracture Prediction Modeling for Resistance Spot-Welded Joints of Advanced High-Strength Steel Sheets

January 2025

Zhenduo YAO

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲	第	号	氏 名	么 振鐸
主 論 文 題 名 : Local Mechanical Characterization and Fracture Prediction Modeling for Resistance Spot-Welded Joints of Advanced High-Strength Steel Sheets (高張力鋼板の抵抗スポット溶接部における局所力学特性評価と破壊予測手法の構築)					
(内容の要旨) 自動車車体構造に用いられている高張力鋼板は、スポット溶接部周辺の熱影響部に焼きなまし軟化が生じる。そのため、軟化部を考慮した強度予測が重要であるが、局所的な力学的特性が明確にはなっていなかった。本研究では、微小引張・せん断試験および硬さ試験から、高張力鋼板におけるスポット溶接部の局所的な力学的特性を求め、さらに、それらの相関関係を導出した。また、応力三軸度依存の破断クライテリアの推定手法を構築し、種々の応力状態下におけるスポット溶接部の破壊挙動を高精度に予測する手法を提案した。 第1章は序論であり、本研究の背景と先行研究を概説し、本研究の目的や概要を明示した。 第2章では、微小圧子押し込み試験および微小引張試験を通じて、ビッカース硬さと引張強度および最大応力時のひずみとの関係式を導出した。そして、スポット溶接部周囲の熱影響部における局所力学特性および応力三軸度依存型破壊クライテリアを同定し、有限要素解析に組み込むことで、スポット溶接された3種類の鋼板に対して、き裂発生および進展挙動を再現することができ、最大応力を6.3%以内、破断ひずみを17.2%以内で予測できることを示した。 第3章では、スポット溶接部周囲の熱影響部におけるせん断破壊挙動に着目し、せん断破壊を再現するような試験片形状および試験方法を提案した。そして、スポット溶接部から採取した微小試験片によるせん断試験を実施し、せん断負荷下における局所的な力学特性を明らかにした。さらに、第2章で提案した手法をもとに、材料の硬さから、加工強度係数および加工硬化指数を推定する実験式を導出し、有限要素解析に組み込むことで、スポット溶接された3種類の鋼板に対して、最大応力を5.4%～13.5%以内の精度で予測できることを示した。 第4章では、新たに多軸引張応力下での微小引張試験を行い、高応力三軸度下でのスポット溶接部周囲の熱影響部の破壊クライテリアを明らかにした。そして、せん断状態、単軸引張状態および多軸引張状態の微小引張・せん断試験をもとに、広範囲の応力三軸度に適用可能な応力三軸度依存型破壊クライテリアを決定した。そして、スポット溶接された3種類の鋼板に対して、せん断引張試験および十字引張試験を実施し、最大応力が7.2%、および最大荷重10.2%以内で予測できることを示した。 第5章では、各章で得られた結果と結論を総括し、本研究の結論と今後の展望についてまとめた。					

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	YAO, Zhenduo
Thesis Title Local Mechanical Characterization and Fracture Prediction Modeling for Resistance Spot-Welded Joints of Advanced High-Strength Steel Sheets			
Thesis Summary Resistance spot welding of advanced high-strength steel (AHSS) significantly alters the mechanical properties of the heat-affected zones (HAZs), impacting the prediction of joint fracture and failure. This study clarifies the local mechanical properties of HAZs in various spot-welded AHSSs, establishing correlations between hardness, strength, and ductility, and develops a finite element modeling (FEM) approach to predict fracture behavior under diverse stress triaxiality conditions. The main objectives and content of each chapter are as follows. Chapter 1 introduces the background and previous research, summarizes the aim of this study. Chapter 2 describes the nano-hardness measurements and miniature tensile tests that were conducted to correlate Vickers hardness with tensile strength and strain. These analyses enabled the development of an assumed shift formula for the MMC (modified Mohr–Coulomb model) fracture criterion under uniaxial tension. FEM analysis results show that the above methodology offered reliable predictions of ductile fracture strain and tensile strength within a range of 3.3% ~ 17.2% and 1.4% ~ 6.3% across three different AHSS grades. Chapter 3 focuses on the shear fracture behavior of HAZs for spot-welded AHSS, advancing beyond uniaxial tension, a novel miniature shear test (MST) was designed and performed, revealing distinct shear mechanical properties across HAZs in AHSSs. Building on the theoretical foundations established in Chapter 2, an empirical hardness-based model for the strength coefficient and work hardening exponent in Hollomon’s law was created and integrated into FEM calculations, with precision confirmed by a maximum strength deviation of 5.4% to 13.5%. As a result, the establishment of MST enhances the understanding of local shear fracture behavior in spot-welded AHSS and refines triaxiality-based fracture criteria, broadening their applicability. Chapter 4 extends the MMC fracture criterion using a series of miniaturized tests, including shear, uniaxial, and multiaxial tension, to refine fracture predictability across a range of stress triaxialities. Furthermore, the methodology in Chapter 3 was refined, addressing the challenges of material dependency and complex calibration in fracture prediction modeling for spot-welded AHSS. The results indicated satisfactory accuracy in predicting fracture behavior compared with cross-tension and shear-tension testing, with strength errors within 7.2% and peak load within 1.16 kN, and strain within 0.02 validating the adaptability of this fracture predicting approach. Chapter 5 summarizes the results and conclusions of each chapter, as well as the future challenges of this study.			