OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Multi-physics Simulation-based Fatigue Assessment of Welded Joint Improved by High Frequency Mechanical Impact Treatment
Author(s)	Chen, Xipeng
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/107147
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name (CHEN XIPENG)	
Title	Multi-physics Simulation-based Fatigue Assessment of Welded Joint Improved by High Frequency Mechanical Impact Treatment (マルチフィジクスシミュレーションに基づく高周波ピーニング処理を施した溶接継手の疲労強度評価)

Abstract of Thesis

This study proposes a unified multi-physics simulation system on the life events of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints, including welding, HFMI, crack initiation, and crack propagation. To achieve a more practical simulation, modelling techniques of multi-pass peening process and peening parameter determination are developed. The fatigue crack propagation (FCP) simulation of peening-treated joints, considering groove shape and as-peened (AP) residual stresses, is integrated to the framework, which serves for the prediction of crack propagation life. Based on the local equivalent stress (ES)-based (SWT and LMES methods) fatigue assessment, the master SN curves for as-welded (AW) and AP joints are proposed considering the effects of material plasticity, geometry, residual stress and its relaxation, and loading, which helps to simplify the fatigue assessment procedure and reduce the resource cost for peening treatment and fatigue tests. The content of this work is outlined into six parts as follows:

Chapter 1 reviews the background of this work, including the studies of HFMI on experimental efforts, numerical modelling developments, local fatigue assessment approaches, and crack propagation investigation.

Chapter 2 presents experimental investigation of welded joints. Gusset joints with main plate thickness of 9 mm (T9) and 16 mm (T16), and heavy-thick T (HTT) joints with main plate thickness of 50 mm (T50) and 80 mm (T80) are manufactured and treated by portable pneumatic needle-peening (PPP). Fatigue tests of T9 are performed under high stress ratio with overloads prior to cyclic loading. T16 are tested with stress ratio of 0 under uniaxial cyclic tension. HTT joints are loaded in form of four-point bending (FPB). The profile shapes, residual stress, and failure behaviors are then discussed. The nominal stress-based fatigue assessment is carried out to evaluate the effectiveness of PPP treatment and validate the conservatism of IIW HFMI guidelines.

Chapter 3 presents simulation modelling of PPP-treated joints on the welding process, peening treatment, overloading, and fatigue cyclic loading. The FE configurations such as mesh refinement and symmetric conditions are carefully verified. The accuracy of the established framework is validated by the experimental measurement in chapter 2, comparing the temperature history, residual stress, and groove profile. Then, the residual stress relaxations under overload and cyclic loading are numerically evaluated. The influence of multi-pass treatment is discussed based on the results of sensitivity analysis.

Chapter 4 presents ES-based local fatigue assessment of PPP-treated welded joints based on the local stress histories obtained by the simulation framework developed in chapter 3. The concepts of tangential stress and stress averaging manner are introduced. The LMES and SWT methods are employed, serving for the local stress correction. Based on the local fatigue assessment results, the effectiveness and robustness of LMES and SWT methods are validated on the PPP-treated joints. The master curves accounting for joint type, peening process parameter, heavy thickness, high stress ratio, and compressive overload, are proposed for AW and AP joints.

Chapter 5 presents crack propagation investigations of single-edge notch tension (SENT) specimen and PPP-treated welded joint. The FCP analysis of SENT specimen is performed based on the node releasing techniques. The effect of cyclic softening on crack closure is then numerically studied. The FCP analysis of welded joints is integrated into the simulation framework developed in chapter 3 which provides the AP residual stresses and groove shapes. Fatigue lives of AW and AP joints are then predicted based on the Paris-Elber model. The effects of AP groove and residual stress on the crack propagation life are then evaluated.

Chapter 6 presents the overall summary of the dissertation. Recommendations for future research of fatigue assessment of welded structures improved by HFMI are also concluded.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（CHEN XIPENG）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主査　教授	堤　成一郎
	副査　教授	飯島　一博
	副査　准教授	辰巳　晃

論文審査の結果の要旨

本研究では、High Frequency Mechanical Impact（HFMI）処理を施した溶接継手（以下ではHFMI継手と呼ぶ）の疲労寿命に関わる溶接、HFMI 処理、き裂発生、き裂進展の各事象を対象とした統合マルチフィジックス・シミュレーションシステムを開発している。この開発では多パスHFMI処理の簡略化モデルが提案されている。開発システムで計算したHFMI処理に伴う止端形状および残留応力の変化を考慮した疲労き裂進展シミュレーションが実施され、HFMI継手に生じた疲労き裂の進展寿命予測が行われている。そして、開発システムで計算する局所弾塑性応力サイクルと、SWT法およびLMES法による平均応力補正により決定する等価応力範囲を用いると、種々の荷重履歴を受ける多様な形状および寸法の溶接まま継手（AW）およびHFMI継手（AP）の疲労寿命が、単一のマスターSN曲線で近似できることを示している。これにより、多大な時間と費用を要するHFMI継手に対する疲労試験を実施することなく、数値シミュレーションのみによってHFMI疲労強度改善効果を評価できることを示している。本論文の内容は、以下の6章から構成されている。

第1章では、実験的研究、数値モデリング、局所疲労評価手法、疲労き裂進展に関する研究を含め、本研究の背景としてHFMI処理に関する既往研究を概説している。

第2章では、AWおよびAPに対する疲労試験結果を示している。主板厚9 mm（T9）および16 mm（T16）のガセット継手、ならびに主板厚50 mm（T50）および80 mm（T80）の極厚T継手を製作し、Portable Pneumatic Needle-peening（以下ではPPPと呼ぶ）によるHFMI処理を施している。各試験体の製作時に、溶接熱サイクル、AW止端形状、残留応力分布を計測している。T9については、圧縮過大荷重を負荷する場合に加えて、高応力比条件でも試験を実施し、疲労性能を取得している。T16については、応力比零の一軸繰返し引張試験を行っている。極厚T継手については、4点曲げ疲労試験を実施している。全ての疲労試験結果を対象に公称応力に基づく疲労強度評価が行われ、その結果を国際溶接協会による疲労設計指針と比較して、HFMI処理としてのPPPの有効性を確認している。

第3章では、溶接、HFMI処理、過大荷重および疲労繰返し荷重の負荷を対象とする、マルチフィジクス・シミュレーション手法を開発している。メッシュ寸法、境界条件、多パス打撃ツール運棒の近似など、各種有限要素法解析条件の感度解析がなされ、推奨計算仕様が示されている。推奨仕様に従って計算した溶接熱サイクル、AWおよびAPの残留応力分布、HFMI止端部形状が第2章の実験結果と良好に一致していることを示し、提案シミュレーション手法の有効性を実証している。さらに、単一の過大荷重および繰返し荷重下における残留応力緩和挙動を数値的に評価している。

第4章では、局所弾塑性応力履歴に基づくHFMI継手の疲労強度評価手法を提案している。第3章で開発した解析システムで計算した局所応力履歴に接線応力および応力平均化手法に基づく等価応力範囲を導入し、LMES法およびSWT法による等価応力範囲によって疲労強度を評価する手法を提案している。そして、この等価応力範囲を用いると、第2章で実施した多様な継手形式、板厚、応力比、単一過大荷重を含む荷重履歴のAWおよびAPの疲労寿命が単一のマスターSN曲線で近似できることを示している。

第 5 章では、片側切欠き引張試験片および HFMI 処理継手のき裂進展寿命に関して検討している。片側切欠き引張試験片の疲労き裂進展解析では、材料の繰返し軟化特性がき裂の閉口挙動に及ぼす影響を数値的に検討している。AW および AP に対する疲労き裂進展解析では、第 3 章で開発した解析システムで計算した HFMI 処理による残留応力分布および止端形状を用いて、Paris-Elber 則によって疲労き裂進展寿命を予測し、HFMI 処理が疲労寿命に及ぼす影響を評価している。

第 6 章では、本論文全体の総括を示すとともに、HFMI 処理を活用する疲労強度改善効果評価手法に関する今後の研究課題および提言を述べている。

以上のように、本論文は HFMI 継手の疲労寿命に関わるマルチフィジックス・シミュレーションシステムを提案するものであり、溶接構造物の疲労性能評価について新たな指針を与える。本工学分野に裨益するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。