

Title	繰返し弾塑性応答の異なる構造用鋼の局所ひずみに基づく疲労性能評価手法の確立
Author(s)	米澤, 隆行
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96088
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (米澤 隆行)

論文題名 繰返し弾塑性応答の異なる構造用鋼の局所ひずみに基づく疲労性能評価手法の確立

論文内容の要旨

既存のインフラ鋼構造物では、老朽化が進んでおり、合理的な補修・補強計画の策定や新たな長寿命化技術の開発が急務となっている。加えて、新設の鋼構造物に対しても維持管理コストを低減可能な新構造や新材料の提案が期待されており、これらを実現可能とする合理的かつ高精度な疲労性能評価手法の確立が求められている。近年、鋼構造物の地震時応答など、繰返し大変形挙動に留まらず、疲労亀裂の発生から進展までを統一して評価することを目的として、応力集中部や疲労亀裂先端の局所ひずみ応答に基づく疲労性能評価手法が提案されている。本手法は、材料の繰返し弾塑性変形挙動を精緻に再現可能な材料モデルを採用した弾塑性FEMシミュレーションを援用しており、これまでに材料試験片や溶接継手に対する評価が行われている。しかし、所定の亀裂長さに至るまでの寿命など、マクロな疲労試験結果を対象とした解析的検討が主であり、局所ひずみ分布の定量化や亀裂発生寿命・進展特性の予測精度など、実験に基づく検証が十分に行われているとは言えない。また、適用鋼種も極めて限定されており、高度に制御された金属組織により特異な弾塑性応答を示す耐疲労鋼の疲労亀裂発生・進展挙動への適用性は不明であり、さらに材料の弾塑性応答の違いが疲労性能に及ぼす影響についても明らかにされていない。

そこで本論文では、材料組織や加工履歴が異なる鋼材を対象として、静的および動的な力学特性を実験的に明らかにするとともに、応力集中を有する試験体の疲労亀裂発生・進展性能を統一的に評価可能な手法の確立を目的とした。まず、デジタル画像相関法 (DIC) を活用した局所ひずみの計測技術を検討し、局所ひずみに基づく疲労性能推定手法の有効性を実験的に検証した。次に、弾塑性応答が異なる鋼材を対象として、実測した局所ひずみや変形挙動に基づき、疲労亀裂発生・進展特性に及ぼす影響因子を実験的に明らかにした。さらに、本推定手法の実構造体へ適用を念頭に、巨視的弾性域を含む広範な繰返し弾塑性応答を再現可能な材料モデルを提案し、それらを用いた弾塑性FEMシミュレーションによる疲労性能推定を試みた。各章における記述内容の概要を以下に示す。

第1章は序論であり、鋼構造分野の疲労問題の現状について考察し、本論文の研究目的とその構成を示した。

第2章では、本研究で対象とする溶接構造用鋼 (3鋼種) ならびに冷間圧延を施したモデル鋼 (12鋼種) のマイクロ組織ならびに静的強度、繰返し弾塑性応答などの力学特性を明らかにし、その考察を述べた。

第3章では、本研究で適用するDICの原理を述べるとともに、解析パラメータであるサブセットサイズ、ステップサイズ、フィルターサイズが解析結果に及ぼす影響を調査し、局所ひずみの計測結果がステップサイズとフィルターサイズの積から求まる仮想ゲージ長に依存することを示した。さらに、分解能と計測ノイズのトレードオフ関係から本論文の試験内容に最適な解析パラメータを明らかにした。

第4章では、板厚の異なるSENT試験片を用いた疲労試験を実施し、板厚が疲労性能ならびにDICで計測されるひずみ分布に与える影響を明らかにした。また、提案する局所ひずみに基づく疲労亀裂発生寿命および進展速度の推定手法にDIC計測結果を適用し、試験結果と比較することで本推定手法の妥当性を実験的に検証した。

第5章では、モデル鋼 (12鋼種) を対象に、疲労亀裂進展挙動に及ぼす繰返し弾塑性応答、特に繰返し軟化の影響を評価し、繰返し载荷により軟化する鋼材は疲労亀裂進展速度が低下すること、またその主因が亀裂閉口の促進によるものであることを明らかにした。

第6章では、溶接構造用鋼 (3鋼種) を対象に疲労亀裂発生・進展性能を評価し、亀裂開閉口および局所ひずみ応答の観点から、各種影響因子について考察した。さらに、局所ひずみに基づく疲労性能の推定手法がこれら溶接構造用鋼にも適用可能なことを示した。

第7章では、本推定手法の一般化、すなわち数値解析による疲労性能推定を可能とするため、広範な繰返し弾塑性応答を再現するよう改良した材料モデルを提案した。さらに、第2章の結果をベースに溶接構造用鋼 (3鋼種) の材料定数を同定するとともに、繰返し弾塑性解析により第6章の疲労試験結果を推定し、本モデルの有効性を実証した。

第8章では、本研究で得られた各章における成果を総括するとともに、今後の検討課題を提示し、結論とした。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (米 澤 隆 行)			
	(職)		氏 名
論文審査担当者	主 査	准教授	堤 成一郎
	副 査	教授	鎌田 敏郎
	副 査	教授	乾 徹
	副 査	教授	大沢 直樹

論文審査の結果の要旨

既存のインフラ鋼構造物では、老朽化が進んでおり、合理的な補修・補強計画の策定や新たな長寿命化技術の開発が急務となっている。加えて、新設の鋼構造物に対しても維持管理コストを低減可能な新構造や新材料の提案が期待されており、これらを実現可能とする合理的かつ高精度な疲労性能評価手法の確立が求められている。近年、鋼構造物の地震時応答など、繰返し大変形挙動に留まらず、疲労亀裂の発生から進展までを統一して評価することを目的とした疲労性能評価手法が提案されている。本手法は、材料の繰返し弾塑性変形挙動を精緻に再現可能な材料モデルを採用した弾塑性 FEM シミュレーションを援用しており、これまでに材料試験片や溶接継手に対する評価が行われている。しかし、局所ひずみ分布の定量化や亀裂発生寿命・進展特性の予測精度など、実験に基づく検証が十分に行われているとは言えない。また、適用鋼種も極めて限定されており、高度に制御された金属組織により特異な弾塑性応答を示す耐疲労鋼の疲労亀裂発生・進展挙動への適用性は不明であり、さらに材料の弾塑性応答の違いが疲労性能に及ぼす影響についても明らかにされていない。

そこで本論文では、材料組織や加工履歴が異なる鋼材を対象として、静的および動的な力学特性を実験的に明らかにするとともに、応力集中を有する試験体の疲労亀裂発生・進展性能を統一的に評価可能な手法の確立を目的としている。まず、デジタル画像相関法 (DIC) を活用した局所ひずみの計測技術を検討し、局所ひずみに基づく疲労性能推定手法の有効性を実験的に検証している。次に、弾塑性応答が異なる鋼材を対象として、実測した局所ひずみや変形挙動に基づき、疲労亀裂発生・進展特性に及ぼす影響因子を実験的に明らかにしている。さらに、本推定手法の実構造体へ適用を念頭に、巨視的弾性域を含む広範な繰返し弾塑性応答を再現可能な材料モデルを提案し、それらを用いた弾塑性 FEM シミュレーションによる疲労性能推定を試みている。各章における記述内容の概要を以下に示す。

第 1 章は序論であり、鋼構造分野の疲労問題の現状について考察し、本論文の研究目的とその構成を示している。

第 2 章では、本研究で対象とする溶接構造用鋼 (3 鋼種) ならびに冷間圧延を施したモデル鋼 (12 鋼種) のマイクロ組織ならびに静的強度、繰返し弾塑性応答などの力学特性を明らかにし、その考察を述べている。

第 3 章では、本研究で適用する DIC の原理を述べるとともに、解析パラメータであるサブセットサイズ、ステップサイズ、フィルターサイズが解析結果に及ぼす影響を評価し、局所ひずみの計測結果がステップサイズとフィルターサイズの積から求まる仮想ゲージ長に依存することを示している。さらに、分解能と計測ノイズのトレードオフ関係から本論文の試験内容に最適な解析パラメータを明らかにしている。

第4章では、板厚の異なる SENT 試験片を用いた疲労試験を実施し、板厚が疲労性能ならびに DIC で計測されるひずみ分布に与える影響を明らかにしている。また、提案する局所ひずみに基づく疲労亀裂発生寿命および進展速度の推定手法に DIC 計測結果を適用し、試験結果と比較することで本推定手法の妥当性を実験的に検証している。

第5章では、モデル鋼（12 鋼種）を対象に、疲労亀裂進展挙動に及ぼす繰返し弾塑性応答、特に繰返し軟化の影響を評価し、繰返し载荷により軟化する鋼材は疲労亀裂進展速度が低下すること、またその主因が亀裂開口の促進によるものであることを明らかにしている。

第6章では、溶接構造用鋼（3 鋼種）を対象に疲労亀裂発生・進展性能を評価し、亀裂開閉口および局所ひずみ応答の観点から、各種影響因子について考察している。さらに、局所ひずみに基づく疲労性能の推定手法がこれら溶接構造用鋼にも適用可能なことを示している。

第7章では、本推定手法の一般化、すなわち数値解析による疲労性能推定を可能とするため、広範な繰返し弾塑性応答を再現するよう改良した材料モデルを提案している。さらに、第2章の結果をベースに溶接構造用鋼（3 鋼種）の材料定数を同定するとともに、繰返し弾塑性解析により第6章の疲労試験結果を推定し、本モデルの有効性を実証している。

第8章では、本研究で得られた各章における成果を総括するとともに、今後の検討課題を提示し、結論としている。

以上のように、本論文は、構造用鋼を対象に、繰返し载荷に伴う硬・軟化挙動を詳細に明らかにするとともに、局所ひずみ応答と疲労亀裂発生・進展特性との照査に基づき、種々の因子が疲労性能に与える影響を包括的に精度良く評価する手法を構築している。さらに、繰返し弾塑性変形を精度高く予測可能な構成モデルを提案するとともに、それを実装した FEM シミュレーションによる予測手法を構築することで、疲労試験結果を高い精度で再現できることを示している。これらは、新規鋼構造物の合理的な設計にとどまらず、損傷部材の高精度な予寿命評価を通じた補修・補強の合理化など、鋼構造物の疲労性能設計手法の高度化に大きく寄与する成果である。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。