



Title	亀裂面腐食を活用した疲労寿命延伸技術のメカニズム 解明と弾塑性疲労性能評価手法の提案
Author(s)	柴田, 誉
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98787
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (柴田 誉)

論文題名

亀裂面腐食を活用した疲労寿命延伸技術のメカニズム解明と弾塑性疲労性能評価手法の提案

論文内容の要旨

機械・鋼構造物の損傷の多くが疲労に起因していると言われる中、高い疲労性能確保に対する社会的要求が高まっており、新設構造物の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。また、既設構造物における疲労損傷事案の増加と維持管理コスト削減要請の両面から、疲労亀裂の発生・進展を簡便に抑制可能な補修・補強技術の開発も喫緊の課題と言える。疲労亀裂面内に物質を注入することで、疲労亀裂閉口を促進させ、亀裂進展を抑制・停止させる、いわゆる“くさび効果”を活用する手法は、その一つの候補である。中でも、腐食促進剤を亀裂面内に注入し、鋼材自身から生成される腐食生成物を活用する手法は、液体としての浸潤性の良さから、施工性に対する期待も大きい。ただし、既存研究では、亀裂の諸元や荷重条件が極めて限定されている上、寿命延伸効果の主要因と考えられる腐食生成物堆積量の定量化を通じた詳細なメカニズム解明もなされていない。加えて、寿命延伸性能を高精度に予測可能な評価手法の提案も行われておらず、本手法の適用拡大に向けた課題となっている。

そこで本研究では、腐食生成物による疲労寿命延伸効果のメカニズムを実験的に明らかにするとともに、弾塑性疲労亀裂進展解析手法を高精度化させ、さらに亀裂面腐食の影響を考慮可能な手法へと拡張することにより、疲労寿命延伸効果を合理的に予測可能な手法の確立を目的とした。各章における記述内容を以下に示す。

第1章は序論であり、鋼構造分野の疲労問題に対する現状や課題、疲労寿命延伸を目的とした既存の各種技術提案やその問題点について述べ、本論文の研究目的とその構成を示した。

第2章では、評価対象とした溶接構造用圧延鋼のミクロ組織及び静的引張強度を示すとともに、SENT試験片を対象として、応力比 R および最大荷重の異なる荷重条件下で疲労亀裂成長曲線を取得し、その考察を述べた。

第3章では、無荷重状態において、環境因子によって進行した腐食が疲労亀裂発生及び疲労予亀裂の進展挙動に及ぼす影響を明確化することを目的として、腐食促進試験および疲労試験を実施した。まず、疲労予亀裂を導入したSENT試験体に対して、乾湿繰返し腐食促進試験 (SAE J2334) を行った後に、疲労試験を再度実施し、亀裂進展特性を取得した。その結果、無荷重状態における環境腐食が疲労予亀裂の破面および疲労亀裂進展特性に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。一方、疲労予亀裂の無い試験体では、環境腐食によって亀裂発生寿命が延伸することを確認し、その主要なメカニズムが腐食に伴う切欠形状の鈍化、すなわち応力集中の緩和であることを示した。

第4章では、SENT試験体を導入した疲労予亀裂面を硝酸によって強制的に腐食させた場合の疲労亀裂進展性能の検証とそのメカニズムの解明を目的とした検討を行った。応力比 $R=0.1$ の条件下では、腐食時の亀裂長さによらず、寿命延伸効果が得られ、さらに腐食生成物堆積量と正の相関があることを明らかにした。また、腐食生成物の堆積量分布と亀裂開口形状の類似性を指摘するとともに、腐食生成物が亀裂閉口促進に寄与していることを示した。さらに、応力比 $R=-1$ の条件においても、亀裂停留を含む大幅な寿命延伸効果が得られることを明らかにした。

第5章では、疲労性能評価手法の精緻化を目的として、線形累積損傷則を援用した評価手法を提案するとともに、第2章に示した疲労試験結果に対して、予測精度の検証を行った。これより、応力比 R および最大応力の組み合わせが異なる4種の試験条件下で取得した疲労亀裂進展特性を、同一のパラメータを用いて、精度良く再現可能であることが示され、弾塑性変形履歴と累積損傷を考慮する提案手法の適用性の高さを確認した。

第6章では、亀裂面腐食によるくさび効果を考慮した疲労性能評価手法の提案を行った。第5章の手法を拡張する提案手法は、腐食による亀裂面の膨張を、亀裂面要素の体積膨張により再現し、亀裂面同士の接触・亀裂閉口の促進を模擬している。CT試験片を対象として、異なる3条件で取得された腐食疲労試験を模擬した解析により、疲労亀裂進展の停止のみならず、進展速度の低下やその後の速度回復挙動を精度良く再現可能であることを示した。

第7章では、第4章に示した腐食疲労試験結果に対して、提案手法による再現解析を行った。その結果、荷重条件や腐食時の亀裂長さに応じて変化する亀裂停留挙動や微小亀裂の再進展挙動を、同一のパラメータを用いて、精度良く再現可能であることが示され、硝酸を活用した疲労寿命延伸効果を合理的に評価可能であることを示した。

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 (柴 田 誉)			
	(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

機械・鋼構造物の損傷の多くが疲労に起因していると言われる中、高い疲労性能確保に対する社会的要求が高まっており、新設構造物の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。また、既設構造物における疲労損傷事案の増加と維持管理コスト削減要請の両面から、疲労亀裂の発生・進展を簡便に抑制可能な補修・補強技術の開発も喫緊の課題と言える。疲労亀裂面内に物質を注入することで、疲労亀裂開口を促進させ、亀裂進展を抑制・停止させる、いわゆる“くさび効果”を活用する手法は、その一つの候補である。中でも、腐食促進剤を亀裂面内に注入し、鋼材自身から生成される腐食生成物を活用する手法は、液体としての浸潤性の良さから、施工性に対する期待も大きい。ただし、既存研究では、亀裂の諸元や荷重条件が極めて限定されている上、寿命延伸効果の主要因と考えられる腐食生成物の定量化や詳細なメカニズム解明もなされていない。加えて、寿命延伸性能を高精度に予測可能な評価手法の提案も行われておらず、本手法の適用拡大に向けた課題となっている。

そこで本研究では、腐食生成物による疲労寿命延伸技術のメカニズムを実験的に明らかにするとともに、弾塑性疲労亀裂進展解析手法を高精度化させ、さらに亀裂面腐食の影響を考慮可能な手法へと拡張することにより、疲労寿命延伸効果を合理的に予測可能な手法の確立を目的としている。各章における記述内容を以下に示す。

第 1 章は序論であり、鋼構造分野の疲労問題に対する現状や課題、疲労寿命延伸を目的とした既存の各種技術提案やその問題点について述べ、本論文の研究目的とその構成を示している。

第 2 章では、評価対象とした溶接構造用圧延鋼のミクロ組織及び静的引張強度を示すとともに、SENT 試験片を対象として、応力比 R および最大荷重の異なる荷重条件下で疲労亀裂成長曲線を取得し、その考察を述べている。

第 3 章では、無荷重状態において、環境因子によって進行した腐食が疲労亀裂発生及び疲労予亀裂の進展挙動に及ぼす影響を明確化することを目的として、腐食促進試験および疲労試験を実施している。まず、疲労予亀裂を導入した SENT 試験体に対して、乾湿繰返し腐食促進試験 (SAE J2334) を行った後に、疲労試験を再度実施し、亀裂進展特性を取得している。その結果、無荷重状態における環境腐食が疲労予亀裂の破面および疲労亀裂進展特性に及ぼす影響は小さいことを明らかにしている。一方、疲労予亀裂の無い試験体では、環境腐食によって亀裂発生寿命が延伸することを確認し、その主要なメカニズムが腐食に伴う切欠き形状の鈍化、すなわち応力集中の緩和であることを示している。

第 4 章では、SENT 試験体を導入した疲労予亀裂面を硝酸によって強制的に腐食させた場合の疲労亀裂進展性能の検証とそのメカニズム解明を目的とした検討を行っている。応力比 $R=0.1$ の条件下では、腐食時の亀裂長さに依らず、寿命延伸効果が得られ、さらに腐食生成物堆積量と正の相関があることを明らかにしている。また、腐食生成物の堆積量分布と亀裂開口形状の類似性を指摘するとともに、腐食生成物が亀裂開口促進に寄与していることを示している。さらに、応力比 $R=-1$ の条件においても、亀裂停留を含む大幅な寿命延伸効果が得られることを明らかにしている。

第5章では、疲労性能評価手法の精緻化を目的として、線形累積損傷則を援用した評価手法を提案するとともに、第2章に示した疲労試験結果に対して、予測精度の検証を行っている。これより、応力比 R および最大応力の組み合わせが異なる4種の試験条件下で取得した疲労亀裂進展特性を、同一のパラメータを用いて精度良く再現可能であることを示し、弾塑性変形履歴と累積損傷を考慮する提案手法の適用性の高さを確認している。

第6章では、亀裂面腐食によるくさび効果を考慮した疲労性能評価手法の提案を行っている。第5章の手法を拡張する提案手法は、腐食による亀裂面の膨張を、亀裂面要素の体積膨張により再現し、亀裂面同士の接触・亀裂閉口の促進を模擬している。CT試験片を対象として、異なる3条件で取得された腐食疲労試験を模擬した解析により、疲労亀裂進展の停止のみならず、進展速度の低下やその後の速度回復挙動を精度良く再現可能であることを示している。

第7章では、第4章に示した腐食疲労試験結果に対して、提案手法による再現解析を行っている。その結果、荷重条件や腐食時の亀裂長さに応じて変化する亀裂停留挙動や微小亀裂の再進展挙動を、同一のパラメータを用いて、精度良く再現可能であり、硝酸を活用した疲労寿命延伸効果を合理的に評価可能であることを明らかにしている。

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、硝酸による亀裂面腐食を活用した疲労寿命延伸効果のメカニズムを実験的に明らかにしている。また、繰返し载荷に伴う材料の弾塑性変形履歴と累積損傷の影響を考慮可能な弾塑性疲労亀裂進展解析手法を開発し、さらに亀裂面腐食の影響を考慮可能な手法へと拡張することにより、疲労亀裂停留や再進展を含む各種実験結果を精度良く予測可能な手法を確立している。これらは、疲労寿命の高精度予測に基づく新設鋼構造物の合理的な設計にとどまらず、疲労損傷を有する既設構造物の予寿命診断の高度化や亀裂面腐食を活用する補修技術による長寿命化・維持管理コスト削減にも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。