

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高垣昌和

本論文は「異方性損傷理論による複数分布する疲労き裂の進展挙動シミュレーション」と題し、9章よりなる。高温機器の熱疲労や応力腐食割れでは多数のき裂がランダムな方向に分布発生することがあるが、このような劣化構造の耐震性や余寿命など、構造健全性を評価するためには、き裂伝播や劣化による剛性低下を同時に考慮した解析、すなわち、応力ひずみと損傷進展の統合的評価が必要である。本研究は、損傷力学の概念を用いて、き裂の存在に起因する力学的異方性と剛性低下を損傷変数で表現するとともに、弾塑性構成方程式への導入、ならびに、低サイクル疲労における損傷発展式を提案し、複数のき裂を含むような複雑な損傷を受けた構造の低サイクル疲労き裂伝播とそれを伴う弾塑性応力解析を統合的に行う手法を開発したものである。開発された手法によるシミュレーション結果は実際のき裂伝播試験結果とよく一致し、本手法の妥当性が示されている。

第1章は「序論」であり、損傷評価法の現状についての調査結果を述べるとともに本研究の必要性、目的、および、論文の構成について述べている。

第2章は「連続体損傷力学」と題し、本研究の基礎となる損傷力学の基本概念と応用例について説明している。特に、本研究に直接関連する、疲労損傷に対する損傷力学の適用例について詳述している。微小空隙の発生成長という、等方的なクリープ損傷に対する損傷力学の適用例は多いが、力学的に異方性を考慮しなければならぬき裂状の損傷、特に、疲労損傷に対する適用例は少ないこと、また、それらにおいてもき裂の存在による異方性は十分考慮されていないことを指摘している。

第3章「異方性弾塑性損傷構成則」では、き裂状損傷を考慮した弾塑性損傷構成則について記述している。はじめに、第2章で説明された損傷力学の基本概念に基づいて、巨視き裂に対する、力学的異方性を考慮した損傷変数を定義している。この損傷変数は異方性を表現するために2階のテンソルとして与えられる。すなわち、その主軸はき裂面とその法線で定義され、また、主値はき裂面における断面減少率を表している。次に、本研究では低サイクル疲労破壊のシミュレーションが目的であるため、き裂の開閉口挙動についての検討を行い、き裂面法線方向のひずみと応力に着目した、き裂開閉口の判定方法を提案している。一方、降伏関数としては、欠陥を含む材料について提案された Gurson の降伏関数に対して損傷力学の実応力概念を導入することにより、き裂の存在による力学的異方性を表現した。以上の理論のもとに通常の塑性力学の手順に従い、弾塑性損傷構成方程式を導出している。なお、本弾塑性構成方程式では等方硬化、移動硬化ともに非線形硬化則が用いられている。また、最大主応力に直交する方向にき裂が成長するという仮定を設けることに

より、一般の多軸応力場において計算可能な疲労損傷に関する発展方程式を提案している。

第4章は「単一き裂を有したモデルの弾性応力解析」と題し、第3章において導入した損傷変数による巨視き裂の表現が妥当なものであるかを検証するため、単一き裂を有したモデルの弾性応力解析を行っている。すなわち、汎用有限要素コードを用い、標準の弾性構成則を用いたき裂材の解析、および、き裂を損傷変数で表現した弾性解析が行われた。このようにして得られた解析結果より各応力成分を比較したところ十分な一致が見られ、本論文で導入した損傷変数によりき裂はよく模擬されることが示されている。

第5章「低サイクル疲労き裂伝播試験」では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の低サイクル疲労き裂伝播試験について述べている。すなわち、提案する解析法の妥当性を検討するための検証データを得ることを目的として試験を実施した。この試験において使用した試験片には、適当な間隔で振り分けた有孔部を2箇所設けている。なお、本試験を実施するため、CCDカメラとパーソナルコンピュータによる画像解析を組み合わせたき裂長測定システムを独自に開発している。本章ではこれら実験装置と実験結果について述べている。

第6章「単一き裂における疲労き裂進展シミュレーション」では、提案したモデルの材料定数が決定されている。すなわち、単一き裂モデルのシミュレーション結果と、過去に行われた同条件のき裂伝播試験結果を比較することによって、材料定数が決定されている。同時に、限定された条件下ではあるが、本研究で仮定された疲労損傷発展式が妥当であることも示されている。

第7章「複数き裂における疲労き裂進展シミュレーション」では、複数き裂モデルの低サイクル疲労破壊シミュレーションが行われた。ここでは、第5章で説明された複数き裂の低サイクル疲労き裂伝播試験がシミュレーションの対象とされている。有孔部から生じたき裂を損傷要素により初期損傷として与え、実験と同じ負荷に対する、損傷発展を伴う応力解析を行った。シミュレーション結果は低サイクル疲労き裂伝播試験の結果と比較されて、本モデルの妥当性が検討されている。その結果、二つのき裂の干渉による複雑な応力場におけるき裂伝播挙動、ならびに、応力応答について、いずれも実験結果と計算結果はよく一致し、提案する手法の妥当性と有効性が確認されている。

第8章「異方性損傷理論の適用について」では、初期き裂の方向および配置を不規則に設定した平板モデルの低サイクル疲労シミュレーションが行われた。そして、熱疲労など実際の複雑な損傷形態に対して本手法が適用可能であることを示している。

第9章「結論」では、以上の成果がまとめられている。

以上要するに、本論文は、損傷力学の概念を用いて、き裂の存在に起因する力学的異方性と剛性低下を損傷変数で表現するとともに、弾塑性構成方程式への導入、低サイクル疲労に対する損傷発展式を提案し、複数のき裂を含む複雑な損傷を受けた構造の低サイクル疲労き裂伝播とそれを伴う弾塑性応力解析を統合的に行う手法を開発したものであり、機械工学、材料力学の発展に貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。