

高強度金属材料の超高サイクル疲労における 内部起点型破壊機構に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、機械構造物の小型化・軽量化が進み高強度鋼を始めとする高強度金属材料の使用が増加している。また、機器の高速化によって、これらの材料が 10^7 回を超える繰返し負荷を受けることも珍しくなくなっている。このため、高強度金属材料の 10^7 回以上の疲労特性を明らかにすることは機械構造物の長期信頼性を保証する上で重要な課題である。一般に、低・中強度鋼では、S-N 曲線に $10^6 \sim 10^7$ 回程度の繰返し数で水平部、すなわち疲労限度が現れる。しかし、最近、高強度鋼を始めとする高強度金属材料において、 10^7 回以上の超高サイクル域でも疲労強度が低下し続け、疲労限度が認められない挙動が報告されるようになってきた。この現象は超高サイクル疲労と呼ばれる。超高サイクル疲労における疲労限度消失の原因は、超高サイクル域で材料内部を起点とした疲労破壊（内部破壊）を生じるためである。この内部破壊は材料表面を起点とした疲労破壊（表面破壊）に比べ、低応力・長寿命域でも生じる特異性を持つため、従来の疲労限度設計基準が適応できない恐れがある。高強度金属材料を使用した機器の信頼性を保証するには、内部破壊の特異性の原因を明らかにし、超高サイクル疲労に則した強度評価法を確立する必要がある。

本論文の目的は、内部破壊の疲労強度低下の原因を明らかにすることにある。しかし、従来の試験機で超高サイクル疲労試験を行うには、データの信頼性および取得の効率の点で多くの困難が伴う。そこでまず、超高サイクル疲労に特化した疲労試験機の開発を行った。次にこの試験機を用いて高強度鋼およびチタン合金の疲労試験データを系統的に取得し、フラクトグラフィーおよび破壊力学に基づく検討から、内部破壊特性および内部き裂の伝ば過程に及ぼす、(1)応力比の影響、(2)内部き裂の曝される環境（材料内部環境）の影響、を明らかにした。そして、これらの結果に基づき、内部破壊の疲労強度低下の原因を考察し、高強度金属材料全般に適応可能な超高サイクル疲労強度評価法への展開を試みた。

本論文は 8 章からなり、得られた結果は以下のように要約される。

第 1 章では、これまで報告されている超高サイクル疲労および内部破壊の特徴について述べた。これらを概観し、超高サイクル疲労研究の問題点を明らかにしたうえで、本研究の目的を示した。

第 2 章では、既存の試験機とは異なる特徴を有する超高サイクル用小型軸荷重疲労試験機の開発を行った。この試験機では、信頼性の高いデータを効率よく取得するために、荷重安定性、アライメント性、耐久性、柔軟性、操作性のバランスを重視したうえで、可能な限り応答性を高める設計を行った。性能試験の結果、本試験機は以下の性能を有していることが明らかになった。(1)誤差 $\pm 0.1\%$ の荷重精度、(2)試験片に負荷される曲げ応力 3% 以内のアライメント性、(3)試験条件の設定、変更を簡略に行えるユーザーズインターフェース、(4) $\pm 9.8\text{kN}$ の荷重を 150Hz で負荷できる応答性。これらの結果は、本試験機が超高サイクル用疲労試験機として十分な性能を有していることを示している。

第3章では、第2章において開発した試験機を用いて、高強度鋼 (SNCM439) の種々の応力比の疲労試験を行ない、超高サイクル域の基礎データを取得した。さらに、内部破壊の疲労強度および内部き裂の伝ば過程に与える応力比の影響を調べた。その結果、応力比の効果を予測するために用いる修正 Goodman 線では、破壊形態が内部破壊となる 10^7 回および 10^8 回時間強度を危険側に見積もる場合があることが示された。したがって、高強度鋼の超高サイクル強度評価に従来の修正 Goodman 線を適応する場合にはこの点に十分な注意が必要である。また、破面観察の結果、表面破壊の初期き裂伝ば領域の破面様相は応力比によってほとんど変化しなかったのに対し、内部破壊のそれは応力比によって明らかに変化していた。特に、内部破壊の初期き裂伝ば領域の特徴である微細な凹凸模様 (ODA) の形成は圧縮荷重によって大きく促進されることがわかった。

第4章では、材料内部環境を模擬する目的で高真空中において高強度鋼の疲労試験を行ない、大気中表面破壊および内部破壊とそれを詳しく比較した。その結果、内部破壊と高真空中表面破壊は大気中表面破壊に比べ、疲労寿命の増加、疲労強度の低下という点で同様の傾向を示した。また、内部破壊の破面様相は大気中よりも高真空中表面破壊のそれと類似していた。これらのことから、材料内部環境が疲労特性に与える影響は大気よりも高真空環境に類似していることがわかった。すなわち、内部破壊の特異性の原因は高真空環境に類似した材料内部環境にあると推定された。

第5章では、高強度鋼の内部起点周囲にのみ形成される特殊なき裂伝ば領域である ODA の形成機構を考察した。第4章において、内部破壊の特異性の原因は材料内部環境にあることを示した。このことから、ODA の形成機構には材料内部環境が何らかの影響を与えていると考えられた。そこで、この点を踏まえた上で破面観察および応力拡大係数範囲を用いた整理から、ODA の形成機構について調べた。その結果、ODA はマルテンサイトブロックに依存した伝ば領域であることが示唆された。また、ODA の特徴である微細な凹凸模様は材料内部環境下でき裂面同士が繰返し接触することにより形成されることを示した。

第6章では、チタン合金 (Ti-6Al-4V) を用いて、第4章と同様の検討を行った。すなわち、高真空中表面破壊を大気中表面破壊および内部破壊と詳しく比較した。疲労試験の結果、内部破壊と高真空中表面破壊は大気中表面破壊に比べ、疲労寿命の増加の点で同様の傾向を示した。破面観察の結果、内部破壊の破面には高強度鋼の ODA と同様の特徴を示す破面領域が形成されていた。内部破壊の破面様相は大気中よりも高真空中表面破壊のそれと類似していた。これらのことから、チタン合金における材料内部環境は大気よりもむしろ高真空環境に類似していることが明らかになった。また、一般に大気中では下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は欠陥寸法依存性を示すことが知られているが、高真空中においても ΔK_{th} の欠陥寸法依存性が存在すること、その依存性は大気中よりも大きいことが示された。

第7章では、第6章までの結果を基に、高強度金属材料全般に共通する因子として、内部破壊に及ぼす材料内部環境の影響および内部破壊の疲労強度低下の原因について述べた。高強度鋼およびチタン合金における共通点を描出し、高強度金属材料全般において、材料内部環境は高真空環境に類似していること、材料内部環境が内部き裂伝ばに与える影響は共通であること、を指摘した。また、高真空環境下における ΔK_{th} の欠陥寸法依存性および材料内部環境と高真空環境の類似性から、内部破壊の強度低下の原因として、大気中と材料内部環境中での ΔK_{th} の欠陥寸法依存性の差異、すなわち ΔK_{th} の欠陥寸法依存性の環境依存性が挙げられることを示した。さらに、高強度金属材料の超高サイクル疲労強度を評価する新たな方法として、真空中の疲労特性から内部き裂の ΔK_{th} を予測する手法を提案した。

第8章では、本研究で得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査	助 教 授	中 村	孝
副 査	教 授	野 口	徹
副 査	教 授	但 野	茂
副 査	教 授	毛 利	哲 夫

学 位 論 文 題 名

高強度金属材料の超高サイクル疲労における 内部起点型破壊機構に関する研究

近年、高強度鋼を始めとする高強度金属材料において、 10^7 回以上の超高サイクル域でも疲労強度が低下し続け、疲労限度が認められない現象、いわゆる超高サイクル疲労の問題が報告されるようになってきた。超高サイクル疲労における疲労限度消失の原因は材料内部を起点とした疲労破壊（内部破壊）を生じることにある。内部破壊は従来から認識されている材料表面を起点とした疲労破壊に比べ、低応力・長寿命域でも生じる特異性を持つため、これまでの疲労限度設計基準では評価できない恐れがある。高強度金属材料を使用した機器の長期信頼性を保証するには、内部破壊の特異性の理由を明らかにし、超高サイクル疲労に則した新たな強度評価法を確立する必要がある。本論文は、内部破壊への影響因子として、内部き裂の曝される環境（材料内部環境）に着目し、これが内部疲労特性および内部き裂伝播機構に与える影響を明らかにすることによって、高強度金属全般に適用可能な超高サイクル疲労強度評価法への展開を試みたものである。

第1章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成を述べている。

第2章では、信頼性の高いデータを効率よく取得することを目的として、超高サイクル疲労専用の小型軸荷重疲労試験機の開発を行っている。性能試験によって、本試験機が (1)誤差 $\pm 0.1\%$ 以内の荷重安定性、(2)試験片への曲げ応力 3% 以内のアライメント性、(3)試験条件の設定、変更を簡略に行えるユーザーインターフェース、(4) $\pm 9.8\text{kN}$ の荷重を 150Hz で負荷できる応答性、を備え、超高サイクル疲労研究を行うにあたり十分な性能を有することを示している。

第3章では、第2章で開発した試験機を用いて、高強度鋼（SNCM439）の種々の応力比における超高サイクル疲労試験を行っている。その結果、応力比の効果を予測するために従来から用いられている修正 Goodman 線では、内部破壊の時間強度を危険側に見積もる場合があることを指摘している。

第4章では、材料内部環境を模擬する目的で高真空中において高強度鋼の疲労試験を行ない、これと大気中表面破壊および内部破壊の疲労特性とを詳しく比較している。内部破壊と高真空中表面破壊は大気中表面破壊に比べ、疲労寿命の増加、疲労強度の低下という点で同様の傾向を示すこと、また、内部破壊の破面様相は大気中よりも高真空中表面破壊のそれに類似していることを見出し、材料内部環境が疲労特性に与える影響は大気よりも高真空環境に近いことを明らかにしている。この知見に基づき、内部破壊の特異性の理由は高真空環境に類似した材料内部環境にあると推測している。

第5章では、高強度鋼の内部起点周囲にのみ形成される特殊なき裂伝ば領域（ODA）の形成機構について検討している。フラクトグラフィおよび応力拡大係数範囲を用いた考察によって、ODAはマルテンサイトブロックに依存したなき裂伝ば領域であると判断し、その特徴である微細な凹凸模様は材料内部環境下でき裂面同士が繰返し接触することにより形成されることを示している。

第6章では、チタン合金（Ti-6Al-4V）を用いた高真空中での疲労試験によって、第4章と同様の検討を行っている。チタン合金における材料内部環境も、高強度鋼と同様に、大気よりも高真空環境に類似することを明らかにするとともに、内部破壊および高真空中表面破壊の破面に高強度鋼におけるODAと同様の特徴をもつ領域が形成されることを見出している。さらに、一般に大気中で認められる下限界応力拡大係数範囲（ ΔK_{th} ）の欠陥寸法依存性が高真空中においても存在すること、その依存性が大気中よりも大きくなることを明らかにしている。

第7章では、第6章までの結果に基づき、材料内部環境と高真空環境との類似性、および内部なき裂伝播に与える材料内部環境の影響が、高強度金属材料全般に共通することを指摘している。これを基に高真空環境で認められた ΔK_{th} の欠陥寸法依存性が材料内部なき裂でも生じることを示している。さらに、内部破壊の疲労強度低下の理由は、材料内部環境における ΔK_{th} の欠陥寸法依存性が大気中とは異なるとするモデルで説明できることを明らかにしている。以上の検討に基づき、高強度金属材料の超高サイクル疲労強度を評価する新たな方法として、真空中の疲労特性から内部なき裂の ΔK_{th} を予測する手法を提案している。

第8章は総括であり、本研究で得られた主な成果をまとめている。

以上のように本論文は、高強度金属材料の超高サイクル疲労における内部起点型破壊の疲労強度低下理由を明らかにし、高強度金属材料全般に適用可能な超高サイクル疲労強度評価法を提案したものであって、材料強度学ならびに機械材料学の分野に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。