

パ ク ジ ヌ

氏 名 朴 鎮 佑

授 与 学 位 博士(工学)

学位授与年月日 平成 12 年 9 月 13 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 4 条第 1 項

研究科、専攻の名称 東北大学大学院工学研究科(博士課程) 機械知能工学専攻

学 位 論 文 題 目 集中誘導型交流電位差法による疲労損傷評価に関する研究

指 導 教 官 東北大学教授 庄子 哲雄

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 坂 真澄

東北大学教授 高木 敏行 東北大学客員教授 近藤 達男

論 文 内 容 要 旨

本論文は、電流誘導現象を利用した新しい交流電位差法である、集中誘導型交流電位差法(以下 ICFPD 法とする)による、破壊損傷の非破壊評価法の開発を目的として、溶接構造用圧延鋼(SM490)、原子力用ステンレス鋼(SUS316NG)、機械構造用鋼(SCM420)について室温での疲労試験(曲げ疲労、転がり疲労)を実施し、疲労き裂の発生・進展特性を観察し、各損傷段階毎に ICFPD 法計測を行い、得られた電位差分布の疲労損傷の進行に伴う変化を詳細に検討したものである。その結果、疲労の累積段階では透磁率と硬さの変化により、き裂発生・進展段階では電気抵抗と電流密度の変化により電位差の変化が見られ、その変化量は疲労損傷度を効果的に反影していた。このことから ICFPD 法を用いた疲労損傷評価は疲労の累積段階から、き裂の発生・進展段階までの全ての段階を評価することができ、極めて有用な方法と考えられる。以下、得られた各章の結果について列記する。

第 1 章では本論文の背景及び目的についてを述べている。第 2 章では 溶接構造用圧延鋼 SM490 と原子力設備の配管に用いられるオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG に対して、板状 4 点曲げ疲労試験を行い S-N 曲線を得、両材料の疲労挙動を考察した結果、以下の知見を得た。

- 1) SM490 及び SUS316NG 材ともに疲労損傷に伴いゲージ全面にかけて微小き裂の発生が見られ負荷の増加とともに主き裂はゲージ部中央部に発生し幅方向の端部から中央方向に進展した。
- 2) SM490 材の疲労寿命評価を Manson-Coffin 則で整理した結果、 $C = -0.517$ 、 $\varepsilon'_f = 0.59$ が得られた。また、SUS316NG 材は $C = -0.32$ 、 $\varepsilon'_f = 1.07$ が得られた。
- 3) 極値予測法により中断材に対して試験片ゲージ部の最大き裂が予想でき電位差計測の結果と

の対応が可能となった。

第3章では単一試験片について4点曲げ疲労損傷を与え、各損傷段階毎に連続して同一地点において集中誘導型交流電位差法による電位差測定を行い、電位差分布及び疲労き裂との対応などを検討し、以下の結果を得た。

疲労損傷に伴う電位差挙動を累積、き裂発生・成長に分けて記述する。

- 1) SM490 は累積段階では透磁率の増加と電気抵抗により電位差が増加した。その後き裂が発生・進展すると電位差は急激に増加する。累積段階での透磁率挙動はSA533B-1(ペーナイト鋼)と比較して逆の挙動を見られ、これは、材料の熱処理と材質の違い、また疲労により発生した転位、欠陥などが磁区回転にどのように役割するのかによって透磁率挙動が変化すると考えられる。
- 2) SUS316NG は転位密度(硬さ)の増加により疲労の初期段階で電位差が増加し、その後き裂が発生・進展すると電位差は急激に増加する。
- 3) ICFPD 法による高速化、高信頼性確保のための手段として統計的な手法で整理した結果、微小面積を計測することにより全面積の欠陥検出を確率的に表すことができると考えられる。

第4章では応力集中部用探触子を開発し、ICFPD法を用い、不連続形状を有する構造物へのICFPD法の適用を目的として、同一試験片において応力集中部近傍の疲労損傷の初期段階からき裂発生までの損傷過程をICFPD法により連続計測・評価した。SUS316NG 段付き3点曲げ試験において集中誘導型交流電位差法による疲労損傷度の検出を行い、以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 疲労の累積段階(き裂発生前段階、 $N/N_f=0.05$)では転位密度とすべり帯の増加に伴う電気抵抗増加により電位差が増加する。
- 2) 微小き裂の発生・成長段階($N/N_f=0.05$)からはき裂の影響によって電位差が急激に増加する。
- 3) 板幅方向にき裂が貫通すると電位差は急激に低下し、これは誘導電流の変化によるものと考えられる。

第5章では第3章において示した、強磁性体と常磁性体とで異なる、試験片端部における電位差分布の挙動に関して、また第4章において示した、応力集中部に発生した巨視き裂の成長に伴う電位差の低下の原因に関して検討を行い、き裂発生・進展に伴う電流密度の解析により電位差の変化を明らかにした。以下結果をまとめる。

- 1) 平板材の場合、中央部と側面部での電位差の違いは電流密度とローレンツ力を考慮することにより説明が可能である。
- 2) 平板材において、き裂発生・進展による材料表面、内部、き裂先端部での電流密度変化が、電位差変化を助長しているものと考えられる。

- 3) 段付き平板材において、き裂貫通後電位差の急激な変化は電流経路長さ(l)の増加による電気抵抗の増加よりも電流密度(j)の低下が支配的であると考えられる。

第6章ではICFPD法の実機に適用性を検討するため、エンジン部品で実使用されているSCM420ピン部材に対して転がり疲労損傷を与え、集中誘導型交流電位差法により損傷度を評価した結果、以下の知見を得た。

- 1) 転がり疲労を受けた浸炭したピン型のSCM420に対して電位差変化によりき裂、キズ、剥離の検出が出来る。
- 2) 電位差は、転がり疲労の初期段階(2.4H)では表面の透磁率低下により低下し、その後き裂、キズ、剥離に伴う電気抵抗増加により電位差が増加する。
- 3) ICFPD法は実機部材の疲労初期段階からき裂の発生・成長段階まで一連の疲労損傷を検出できる有用な非破壊手法と考えられる。

論文審査結果の要旨

最近の H-II ロケット等の事例からもわかるように、疲労損傷に起因する破壊事故は現在も多発しており、その予知保全策が強く要請されてきている。しかしながら疲労破壊は累積損傷、き裂発生そして進展といくつかの段階を示し、それぞれの損傷機構が異なるためその定量的評価が困難であった。本論文は、電磁誘導現象を利用した新しい交流電位差法である集中誘導型交流電位差法(以下 ICFPD 法と称する)による疲労損傷の非破壊評価法の開発を目的として、室温疲労試験(曲げ疲労、転がり疲労)を実施し、ICFPD 法により疲労損傷の累積段階からき裂の発生・進展段階を詳細に解析し、疲労損傷の非破壊計測・評価が可能であることを明らかにしたものであり、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、溶接構造用圧延鋼 SM490 及び原子力配管に広く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316NG に対して板状4点曲げ疲労試験を行い、材料の基本的疲労特性を調査している。さらに極値統計的手法により疲労中断材に対して限定された表面積から試験片ゲージ部の最大き裂を推定する方法を提案し、その値を用いて計測された電位差との対応を明らかにしている。

第3章では、同一試験片について4点曲げ疲労損傷を付与し、各損傷段階毎に連続して ICFPD 法による同一地点の電位差測定を行い、電位差分布及び疲労き裂との対応を明らかにしている。具体的には、強磁性体と常磁性体のそれぞれについて疲労損傷に伴う電位差挙動は累積、き裂発生・成長に対応することを明らかにし、SM490 材及び SUS316NG 材それぞれについて疲労損傷挙動を明らかにしている。工学的に有用な知見である。

第4章では、応力集中部用探触子を新たに開発し、ICFPD 法により初めて不連続形状を有する構造物疲労損傷の初期段階からき裂発生までの損傷過程の連続計測に成功している。その結果、SUS316NG 材段付き3点曲げ試験において ICFPD 法による疲労損傷度の定量的検出が可能であることを明らかにし、その有用性を検証している。

第5章では、第3章において示した強磁性体と常磁性体における異なる試験片端部における電位差分布の挙動に関して、また第4章において示した応力集中部に発生した巨視き裂の成長に伴う電位差の特異な低下の原因に関して検討を行い、き裂発生・進展に伴う電流密度の解析により電位差分布の変化を明らかにした。この新たな知見は電位差法の新たな展開を示唆するものである。

第6章では、ICFPD 法の実機適用性を検討するためエンジン部品で実使用されている SCM420 材製ピン部材に対して転がり疲労損傷を与え、ICFPD 法により損傷度を計測した。その結果、転がり疲労を受けた部材に対して電位差変化により、き裂、キズ、剥離の早期検出が可能であることを初めて明らかにしており、実用上有益な知見を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、集中誘導型交流電位差法による疲労損傷の非破壊評価法を開発し、その有用性を検証したものであり、非破壊検査工学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。