

## 論文の内容の要旨

論文題目 構造物ヘルスマモニタリングのための損傷記憶スマートパッチ

氏 名 南部 将一

構造物の信頼性確保は様々な意味での生活の安全性を保障するための重要な課題であり、信頼性確保のための研究として、これまで 2 つのアプローチがあった。ひとつは材料特性の優れた材料を開発し、使用する力学的環境に耐えうる構造物を製造することであり、もうひとつは定期的に検査を行い、損傷が発見された場合に補修などを施すことである。材料開発の研究が行われ、優れた力学特性を持つ材料が得られてはいるが、設計外の応力の発生により損傷が生じることもある。また、もうすでに多くの構造物が存在しており、これら既存の構造物の信頼性確保が直面している重要な課題であり、最適な検査手法が望まれている。橋梁や船舶といった構造物における疲労損傷のモニタリング手法として、貼付型疲労センサが開発されている。オフラインでモニタリングができ、なおかつ安価、簡易な手法として提案されているが、使用範囲が限定されるなど問題点が残る。そこで本論文では、まず新たなセンシング手法として、損傷記憶スマートパッチの提案を行う。このパッチは疲労センサ同様、配線を使用しないため、オフラインで長期間にわたってモニタリングが可能である。また、これまでの疲労センサは疲労損傷度を直接推定するものであったが、このパッチでは、最大応力、繰返し回数、応力振幅について推定を試みる。最大応力は AE 法のカイザー効果を利用し、繰返し回数および応力振幅は破壊力学的考察に基づき、き裂長さから推定することができると考えられる。この損傷記憶スマートパッチを提案するにあたり、使用する材料の特性を把握することは非常に重要である。しかしながら、薄板の試験片の AE 発生挙動や疲労き裂進展挙動についての研究はあまりないのが現状である。そこで、本論文ではパッチに使用するような小型で薄板の試験片に対して、AE 測定および疲労試験を行い、それぞれの特性を明らかにすることを目的とした。

第二章では、本論文で提案した損傷記憶スマートパッチについてその概要について詳述した。最大応力の推定するための AE 法およびそのカイザー効果について原理を述べた。繰返し回数および応力振幅を推定するため、き裂進展における Paris 則を利用し、さらに特性の異なる 2 つのセンサを利用することで、き裂進展挙動において未知数であった繰返し回数と応力振幅がき裂長さの関数としてあらわすことができる。パッチの設計については、材料・形状・接着について検討した。まず材料は安定き裂成長すること、耐食性に優れていること、AE が発生しやすいことなどから純銅、純 Ti、純 Ni そして SUS304 を用意した。それぞれの材料について、き裂が発生する応力、き裂長さの観察しやすさ、同じ応力拡大係数におけるき裂進展速度を比較した結果、純銅が最も低い応力でき裂が発生し、またき裂長さも観察しやすかった。よって、本パッチでは純銅を使用することに決定した。つぎに形

状については、初期き裂長さにおいて最も応力拡大係数の大きい SECT 試験片をセンサの形状とした。接着方法についてはパッチを着脱可能にするために、低融点のワックスで接着する方法と対象物に土台を固定し、ねじ止めする方法について検討した。接着力や接着面積を考慮した結果、土台を構造物に固定し、ねじ止めする方法を採用した。

第三章では、純銅の薄板試験片における AE 挙動について調べた。本パッチに使用する試験片が小さいため AE の活動度は非常に小さい。また純銅の AE 挙動についてはこれまでに多くの報告があるが、そのほとんどが粒径の大きいもの（数十マイクロン以上）であり、本論文で扱う電着銅の粒径（数マイクロン）での AE 挙動については明らかにされていない。そこで、センサに使用する純銅の薄板試験片の AE 特性として、まず波形および AE パラメータについて検討した。電着銅の AE 波形は連続型であり従来の純銅の AE と同様な波形であったが、AE 信号は非常に小さい。また fcc 金属の AE 挙動は引張負荷されるとともに AE エネルギーは増加するが、電着銅試験片の場合、ある程度引張負荷を受けてから AE のエネルギーが変化した。このように電着銅の場合では AE が発生する応力が存在するため、その AE 開始応力の降伏応力およびノッチ長さ依存性について調べた。それぞれの AE 挙動を調べたところ、降伏応力に相当する AE ピーク応力が低下するにつれ、AE 開始応力は低下し、ある程度 AE ピーク応力が低下すると AE 開始応力はほぼゼロになった。これは転位運動と関連しており、ある程度降伏応力が低下する、つまり粒径が大きい、初期転位密度が低いことは転位運動を容易にする。検出される AE は転位の移動と密接に関連しているため、AE の活動度が上昇し、AE 開始応力がゼロになったと思われる。実際、超微細粒の純銅試験片においては、その粒径の大きさ（200nm）から転位運動がほとんど起きないため、AE が検出されないことが報告されている。また、ノッチ長さ依存性を調べた結果、ノッチ長さによって AE 開始応力を制御できることがわかった。そこで、本パッチで測定する応力範囲と思われる 30MPa から 50MPa よりも低い AE 開始応力の試験片を用いてカイザー効果が成立するかを確かめたところ、圧延銅のように AE 開始応力がほぼゼロの場合ではカイザー効果が見られなかった。一方、熱処理した電着銅の場合ではカイザー効果が成立し、あらかじめ与えた応力を推定することができた。さらにカイザー効果が成立した条件の試験片に対して、あらかじめ疲労負荷を与え、その最大応力を推定することを試みた。その結果、RMS 電圧が変化しはじめた AE 開始応力ではなく、RMS 電圧曲線におけるノイズ部分と勾配部分の交差するときの応力によって最大応力を推定できることがわかった。

第四章では、まず純銅の薄板試験片における疲労き裂進展挙動について調べた。本パッチのように板厚が数百マイクロン、幅が数ミリという形状の疲労き裂進展挙動についての研究はあまり見られない。そこで、疲労き裂進展に対する板厚、粒径、最大応力、応力比の影響について検討した。用意した材料は大きな粒径をもつ圧延銅および小さな粒径を持つ電着銅である。電着銅は熱処理条件を変えることで、さらに粒径を変化させた。疲労き裂進展挙動を調べた結果、それぞれの条件において Paris 則に従うが、最大応力、応力比によってき裂進展速度は大きく異なった。このようにき裂進展挙動は最大応力および応力比の影響

響を受けるが、従来使用されているき裂閉口を考慮した有効応力拡大係数を用いて補正することを試みた。ここでは、き裂閉口のモデルのなかでも応力比だけでなく最大応力の影響を含んだ Newman のモデルにおける有効応力拡大係数を用いた。しかし、このき裂閉口の効果を補正しても、最大応力および応力比の影響を取り除くことはできなかった。また Paris 則の傾きがバルク材と比較して小さいという結果が得られたが、これはき裂進展量の割合に対してき裂進展速度が増加していないことを示している。さらにこれまで用いた応力拡大係数は線形弾性破壊力学に基づいているが、使用した試験片は十分小さく、小規模降伏条件を満たしていない。そこで、本パッチに適用できる修正応力拡大係数を導入した。これは応力拡大係数を求める際に使用する形状係数を補正したパラメータである。この修正応力拡大係数を用いたき裂進展挙動は、最大応力や応力比によらず一本の直線で近似できることがわかった。このマスターカーブにおいて、き裂進展特性である Paris 則の  $m$  と  $\log C$  が決定される。これら値を用いることで繰返し回数と応力振幅を推定することができる。また、この  $m$  と  $\log C$  の関係は線形であった。さらに  $m$  と降伏応力の関係を調べたところ  $m$  は降伏応力によって決定できることがわかった。以上より、降伏応力を制御することによってき裂進展特性を決定できることが示唆された。

第五章では、損傷記憶スマートパッチの測定精度について調べた。まずき裂進展において避けられない問題であるばらつきを統計的に評価した。確率過程論を用いた解析の結果、本パッチのように十分薄い試験片におけるき裂進展挙動のばらつきは板厚ではなく粒径に強く依存することがわかった。この結果より、測定誤差の小さいセンサを作製するためには粒径の小さい材料を使用すればよいことが示された。次に実際の使用において受けるであろう変動振幅荷重の影響について検討した。応力頻度分布が対数正規分布に従う場合、一定振幅応力による疲労試験結果より求めた  $a \cdot N$  曲線を適用できることがわかった。さらに温度や湿度といった環境による影響について検討した。非常に低い温度ではき裂進展速度が遅くなることが報告されており、また湿度が非常に高くなると若干ではあるがき裂進展速度が上昇した。そのため、そのような環境において使用する際にはこれらの影響を考慮する必要がある。

本論文では、以上のように構造物の疲労損傷を測定するための新たなセンシング手法である損傷記憶スマートパッチを提案し、そのセンサとして使用する材料の特性について研究した。得られた結果から本パッチを用いることで最大応力、繰返し回数、応力振幅を推定可能であることが示された。また使用するセンサの材料についても選択の指針を示した。このスマートパッチの概念と薄板試験片の特性を利用することで、構造物の信頼性を確保する新たな手段として利用されることが期待される。