

損傷記憶センサを利用した構造物の安全評価

日大生産工(院) ○中村 嘉顕 日大生産工 小幡 義彦 日大生産工 高橋 清造
東京大・工 榎 学 東京大・工(院) 白岩 隆行

1. 緒言

私たちの身近にある高速道路等の大型建造物や鉄道、航空機といった社会インフラにおいて事故が発生すれば、社会には甚大な損害を与えるため、厳密な疲労損傷の評価が絶対的な命題となる。また、測定範囲も広範囲に及ぶため損傷評価方法は簡易性と信頼性を兼ね備えた非破壊検査方法が求められる。

「損傷記憶センサ」とは、構造物が受けた応力履歴を記憶し、その情報を利用し、破壊の起点となる損傷などを診断する犠牲試験片の役割を果たすセンサのことである。この損傷記憶センサにより、損傷、き裂進展の検出を簡易化することができ、実用化されれば、簡易性によるコストパフォーマンスと信頼性による安全を両立させた非常に有効な非破壊検査方法になると考えられる。本研究では、この損傷記憶センサに極めて薄い銅板からなる「スマートパッチ」を用い、性能向上及び実際の現場への応用性について研究を行った。

2. 実験方法

き裂進展の観察に用いるスマートパッチには電着銅、スマートパッチを固定させる試験片(以降、試験片)にはSS400を使用した。スマートパッチに銅を使用した理由としては、金属材料の中で比較的き裂進展が容易であるからである。また、電着銅を使用した理由としては、電着銅は圧延銅と比較して粒径が小さいため、き裂の観察に適してい

るからである。スマートパッチの形状は、長さ 40 mm、幅 5 mm、厚さ 0.1 mm とし、中心部に 2.5 mm のノッチを施し、ノッチ先端部から 0.2 mm の予き裂を導入させた。予き裂導入には小型疲労試験機を使用し、最大応力 56 MPa、負荷速度 20 Hz、試験時間 2~3 h とした。また、このとき予き裂の導入および進展を容易にするため、市販のカミソリでノッチ先端部に長さ約 30 μ m のナイフエッジ切欠きを施した。

Fig. 1 にスマートパッチを貼りつける試験片、Fig. 2 にスマートパッチを示す。疲労試験では、試験片平行部の中心にスマートパッチを貼り付け、スマートパッチに導入されるき裂を観察した。スマートパッチの貼り付けには、実際の検査現場での簡易性や低コスト性を考慮し、市販の液体瞬間接着剤を使用した。き裂の観察には、測微鏡を用いてスマートパッチをモニタリングし、その様子をビデオカメラにより記録した。試験条件は、最大応力 125, 146, 167, 188 MPa とし、負荷速度を 1 Hz、応力比を 0.1 とした。

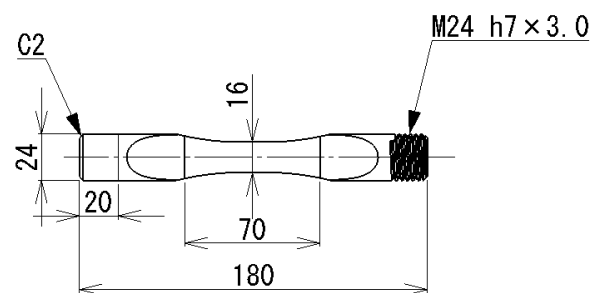


Fig. 1 Shapes of specimen.

Safety evaluation of structure by smart stress memory patch

Yoshiaki NAKAMURA, Yoshihiko OBATA, Seizou TAKAHASHI
Manabu ENOKI, Takayuki SHIRAIWA

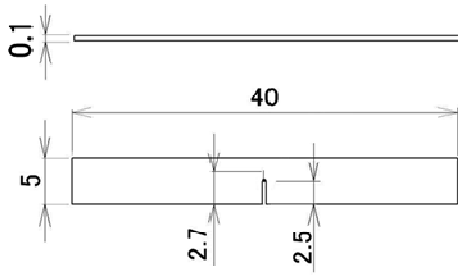


Fig. 2 Shapes of smartpatch.

3. 実験結果および考察

き裂進展が顕著であった最大応力 146 MPa および 167 MPa で疲労試験を行ったときのスマートパッチのき裂進展の様子をFig. 3およびFig. 4 に示し、サイクル数 0 cycle から 1800 cycle ごとに(a), (b), (c), (d)とした。Fig. 3 および Fig. 4 より、サイクル数の増加に伴い、ほぼ等量でき裂が成長している様子が見られた。また、発生したき裂はある程度の長さまでは予き裂と等角度で進展し、さらなるき裂の成長に伴いやがては負荷応力方向に対して垂直に進展していった。このようなき裂進展挙動は、全ての試験条件においてほぼ同様の結果となった。

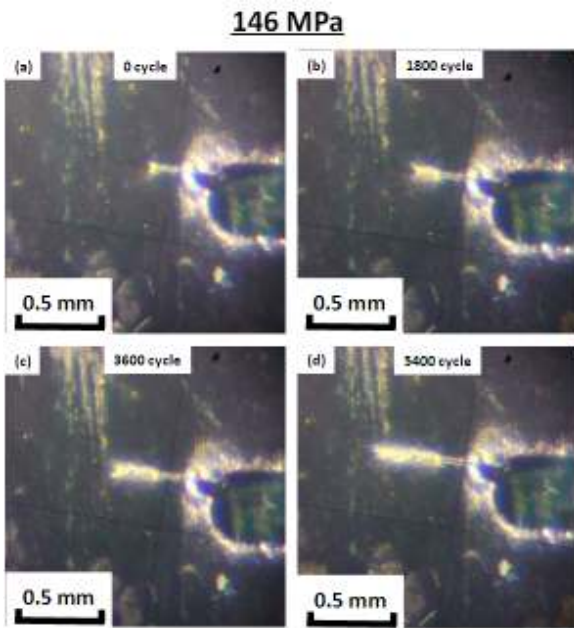


Fig.3 Photographs of fatigue crack of 146MPa.

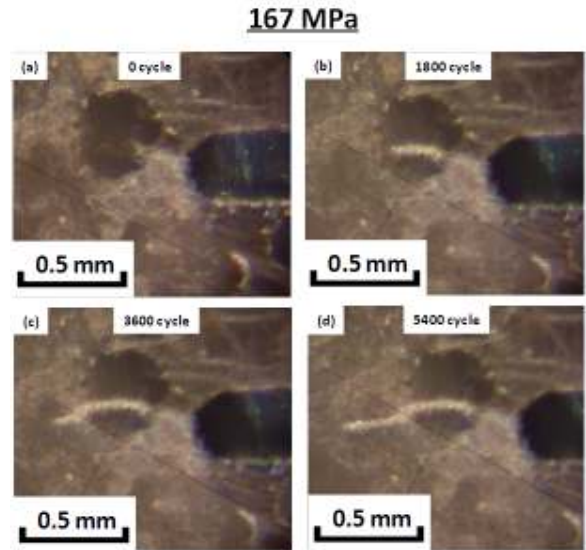


Fig.4 Photographs of fatigue crack of 167MPa.

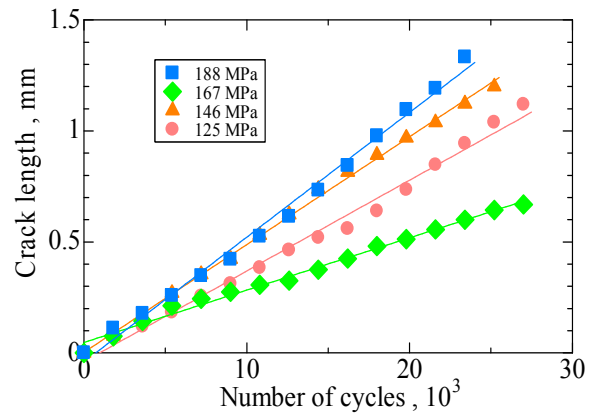


Fig.5 Relationship of cycles and length of fatigue crack.

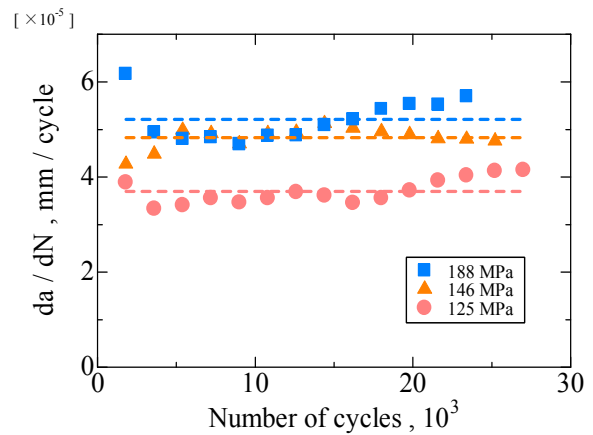


Fig.6 Relationship of cycles and ratio of fatigue crack growth.

次に疲労試験の結果におけるサイクル数とき裂進展長さの関係を Fig. 5 に、サイクル数とき裂進展速度の関係を Fig. 6、応力拡大係数 ΔK とき裂

進展速度の関係を Fig. 7 に示す。

Fig. 5 より、全てのにおいてサイクル数の増加に伴ってき裂がほぼ一次関数的に進展していることがわかる。また、最大応力 167 MPa におけるき裂進展長さは、他の 3 条件と比較して著しく低くなっており、これ以降の考察では 167 MPa の実験結果は割愛し、最大応力 125, 146, 188 MPa の実験結果で考察を進めていくものとする。最大応力 167 MPa のき裂進展長さが他の条件と比較して低くなった原因としては、スマートパッチを試験片に貼り付ける際、実験者による誤差が大きく影響してしまうことが考えられる。最大応力 125, 146, 188 MPa の実験結果より、サイクル数の増加に伴いき裂進展長さの差は顕著になることがわかった。

Fig. 6 より、最大応力の増加に伴いき裂進展速度も大きくなることがわかった。また、多少のばらつきはあるものの、き裂進展速度はサイクル数が増加してもほぼ一定であった。

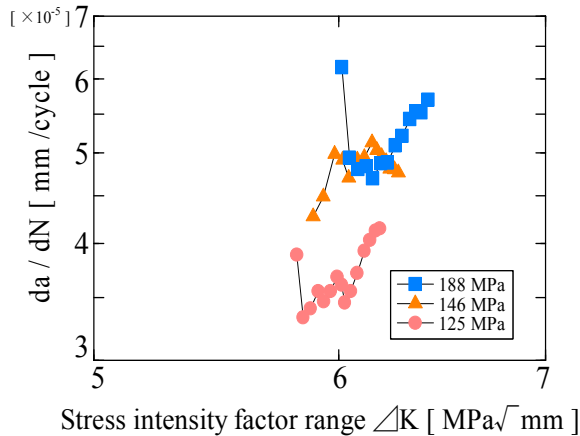


Fig.7 Relationship of stress intensity range and ratio of fatigue crack growth.

4. 履歴応力の推定

以上の実験結果を踏まえ、履歴応力の推定を行った。1 MPa あたりのき裂進展速度とサイクル数の関係を Fig. 8 に示す。ここで、1 MPa あたりのき裂進展速度とは、き裂進展速度を最大応力で除いたものと定義する。Fig. 8 からわかるように、全ての試験条件において多少のばらつきはあるものの、

ほぼ $3.01 \times 10^{-7} ((\text{mm}/\text{cycle})/\text{MPa})$ 付近に分布しており、履歴応力の推定には、この数値を用いることとする。また、履歴応力 σ を算出する際には、実験結果より導出された式(4. 1)によって求められる。

Fig. 9 に実験結果より算出された履歴応力とサイクル数の関係、Fig. 10 に実験結果より算出された履歴応力とき裂進展長さの関係を示す。Fig. 9 および Fig. 10 のどちらも、多少のばらつきはあるものの、実際に負荷された応力の付近に分布していることがわかる。したがって、今回の実験結果から導出された式を用いることで、スマートパッチに導入されたき裂長さおよびサイクル数から履歴応力を推定することに成功したといえる。

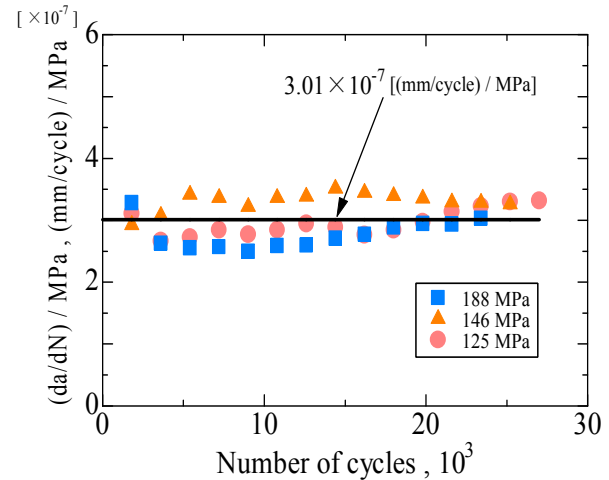


Fig. 8 Relationship of cycles and ratio of fatigue crack growth per 1MPa.

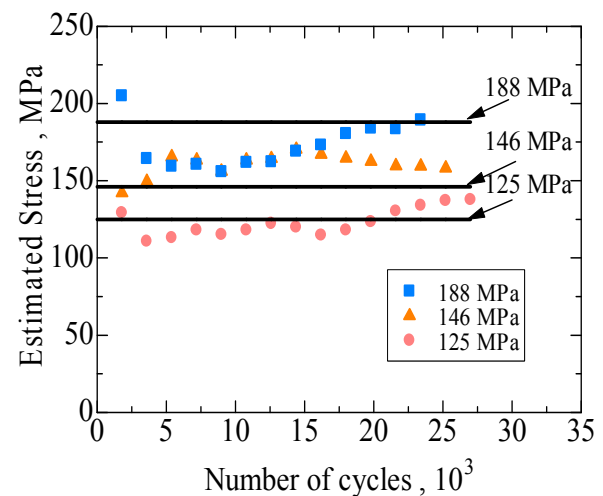


Fig.9 Relationship of cycles and Estimated stress.

$$\sigma = \frac{a}{3.01 \times 10^{-7} \times N} \quad (4.1)$$

σ : 履歴応力 (MPa) a : き裂長さ (mm) N : サイクル数

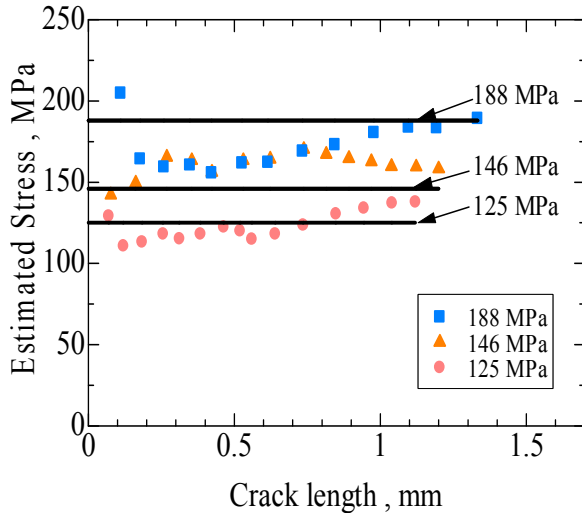


Fig.10 Relationship of length of fatigue crack and Estimated stress.

5. 実用化への課題

実験結果より、スマートパッチを利用した損傷記憶センサの実用化を考えた時、主な課題点として以下の(1)~(3)が挙げられる。

- (1)試験片に固定されたスマートパッチの取り外しについて。
- (2)スマートパッチを試験片に貼り付ける際に実験者による誤差について。
- (3)検査対象が広範囲にわたる大型建造物等の評価に対応させるためのスマートパッチの工夫について。

(1)については、本研究ではシアノアクリレート系接着剤を使用しており、これはアセトンを主成分としたケトン系有機溶剤の専用剥離液を使用することで、スマートパッチを傷つけることなく、導入されたき裂長さ等の測定データに影響を与えることなく取り外すことが可能であることがわかった。

(2)については、Fig. 5 に示した実験結果からもわ

かるように測定データに大きな影響を与える要因となっており、適切な固定方法の検討が強く求められる。この点に関しては、スマートパッチの固定方法を変えたときの影響について、現在研究を遂行している。また、(3)についてもスマートパッチの形状や材質を変化させたときの影響について現在研究を遂行している。

6. 結言

1. 全ての試験条件において、負荷応力の増加に伴いスマートパッチのき裂進展速度も増加した。
2. スマートパッチのき裂進展速度は一部の試験条件を除きサイクル数が増加してもほぼ一定であった。
3. 実験結果から、1MPa あたりのき裂進展速度を求め、それをもとに履歴応力を推定することに成功した。
4. 今回の実験結果より、スマートパッチ実用化への改善点を特定することができたので、センサの信頼性のさらなる向上を目指し、改善点の早急な克服が必要である。

「参考文献」

- 1)板野 正弘, 宋 智浩, 疲労き裂, 大阪大学出版会, (2005), p63.
- 2)藤吉 敏生, 新 非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, pp.3-12
- 3)T. Shiraiwa and M. Enoki, ISIJ international, 51 (2011), 250.
- 4)T. Shiraiwa and M. Enoki, ISIJ international, 51 (2011), 1480.