

疲労き裂先端の応力解析と圧電アクチュエータを用いた破壊制御実験

東京都立産業技術高等専門学校 学生会員 ○吉田 和将
 東京都立産業技術高等専門学校 正会員 宮川 睦巳
 首都大学東京 正会員 中村 一史
 東京工業高等専門学校 志村 穰

1. 緒言

高度経済成長期以降に建設された鋼橋の高齢化が進み、建設当時の鋼材品質の低さや施工技術の低さ、および設計時に考慮されていなかった大型車両の交通量増大による高負荷などを要因に、腐食や疲労に起因する様々な損傷が発見されている。首都への人口集中により交通インフラの需要が増加する一方で、平成 17 年度には高速道路の管理費が約 30%削減され、平成 21 年度の事業仕分けにより直轄国道の維持管理費が約 10~20%削減されている。国内の橋梁においてはそのほとんどが各市区町村の管轄になっており、修繕費が追い付かず毎年約 2,000 か所の道路橋で通行規制などの措置を取っている⁽¹⁾⁽²⁾。このため、現在では継続的に疲労き裂の成長をモニタリングする技術が注目されている。鋼橋の施工時、完全溶け込み溶接は隅角部の接合や主桁ウェブと横リブ接合など多くの箇所でも適用できるが、溶接による欠陥が生じやすい⁽³⁾。しかし、一度発生した疲労き裂でも成長していない、もしくは成長が安定している状態であれば、き裂の成長を管理することが可能であり、これは構造物の安全性を保つうえで重要である。

本研究では、疲労き裂先端近傍の応力状態を解析し、J 積分を用いてき裂の成長の予測を行う。既往の研究において、楕円孔を有する弾性体内の応力状態を導くために二次元弾性論⁽⁴⁾による一般解の導出が行われており、疲労き裂を楕円孔に近似することで応力解析を行う。さらに、き裂先端近傍において、応力が緩和する方向に圧電素子を設置する。この発生力で応力集中が緩和できると考え、き裂成長の抑制と余寿命の予測を目的とした破壊制御実験を行う。

近年では、電気・力学変換デバイスとして有用な圧電材料を機械・構造物の表面に貼付し、振動制御、破

壊制御、およびひずみモニタリングに用いる試みが行われている。本研究では圧電素子の中でも高い発生力と優れた応答性を持つ積層型圧電アクチュエータを用いて応力集中部の応力緩和をはかる。これは、二次元弾性論における面内に一様引張の無限遠荷重が作用する問題と、圧電アクチュエータの発生力を集中荷重が作用する問題に近似し、重ね合わせの原理を用いる。

2. 二次元弾性論を用いた応力解析

圧電アクチュエータ発生力により、き裂先端近傍の応力緩和を検討する。本研究に用いる理論解析モデルを図 1 に示す。

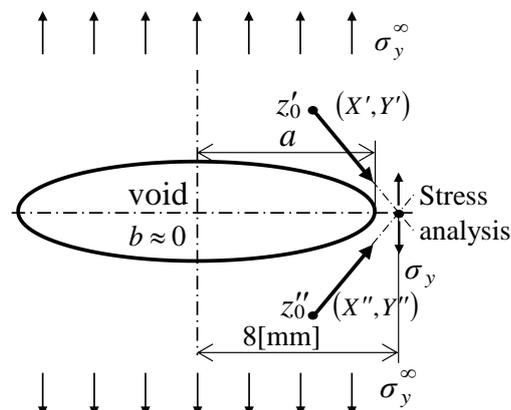


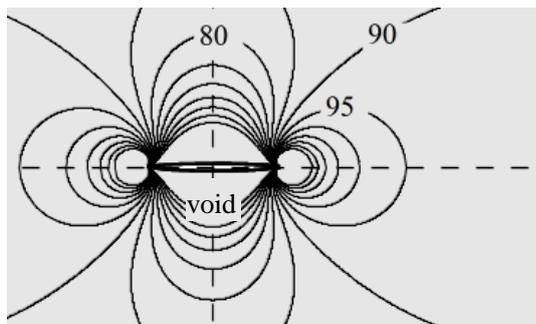
Fig.1 Geometry of infinite elastic medium under the infinity stress σ_y^∞ and concentrated force $Z'=(X', Y')$ and $Z''=(X'', Y'')$

長径 a 、短径 $b \approx 0$ の楕円孔を有する弾性体に無限遠方より一様な引張応力 σ_y^∞ を作用させる。弾性体内に 2 つの面内集中荷重 $Z'=(X', Y')$ 、 $Z''=(X'', Y'')$ を設け、き裂直線上で交差するように配置する。このときの集中荷重は圧電アクチュエータによるものとし、 $a=5\text{[mm]}$ 、 $\sigma_y^\infty=90\text{[MPa]}$ 、 $Z'=Z''=700\text{[N]}$ とした場合の垂直方向の応力 σ_y 分布図を図 2 に示す。圧電アクチュエータを設置することでき裂先端から 8[mm] の位置において 50[MPa] の応力緩和が期待できる。

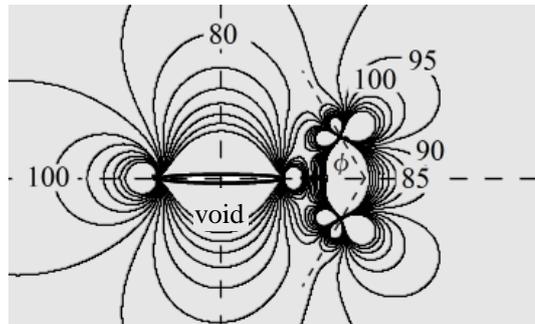
キーワード 二次元弾性論、線形破壊力学、疲労、圧電素子

連絡先 〒116-8523 東京都荒川区南千住 8-17-1 東京都立産業技術高等専門学校

TEL: 03-3801-0145 E-mail: miyagawa@metro-cit.ac.jp



(a) Uniform stress σ_y^∞ and none piezoelectric actuator



(b) Uniform stress σ_y^∞ and concentrated force Z', Z'' that are 2 piezoelectric actuators

Fig.2 Stress analysis

3. 破壊制御実験方法

破壊制御実験と余寿命診断を行う。線形破壊力学の J 積分により、き裂成長に伴う解放エネルギーから繰り返し数を逆解析し、余寿命診断としてき裂の成長速度を予測する。疲労試験機により実験し、応力振幅 S は 0-引張とし、 $S = 140[\text{MPa}]$ 、試験周波数は $10[\text{Hz}]$ にて荷重制御のもと実験を行った。実験におけるデータ収集は、マイコンを用いてひずみゲージの値を計測し、デジタルカメラを用いてき裂成長量を測定する。なお、圧電アクチュエータの制御は電源装置から行い、予備き裂から疲労き裂が $1[\text{mm}]$ 進展したところをトリガーとして圧電アクチュエータに電圧を印加する。

4. 破壊制御実験結果と考察

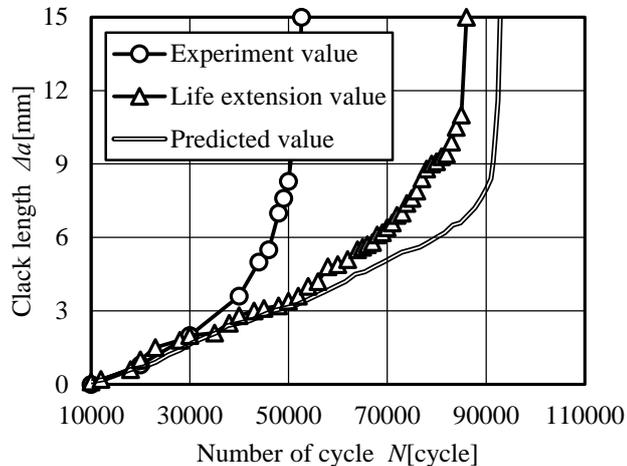


Fig.3 Experiments of fracture control using piezoelectric actuator

図 3 に余寿命診断および破壊制御実験の結果を示す。J 積分を用いた余寿命診断によってき裂の成長を推測した。先行研究⁽⁶⁾において、き裂長さが $6[\text{mm}]$ に達するまでは安定破壊状態であるため、この状態においては余寿命診断が概ね一致している。ここで、疲労き裂発生から不安定破壊状態に至るまでのサイクル数は約 $160[\%]$ と確認できた。しかし、理論値と比べ実験値の方が寿命は短くなった。この原因としては、き裂成長に伴い断面積が減少し、一様引張応力が増大したことによる計算上の相違が挙げられる。

5. 結言

本研究では、無限遠方より一様な応力が作用する問題と面内の任意点に集中荷重が作用する問題とを重ね合わせ、二次元弾性論の理論からき裂先端近傍の応力解析、および J 積分を用いた余寿命診断プログラムを作成した。発生する応力と反対方向の荷重を発生させるために高出力の圧電アクチュエータを設置し、繰り返し荷重下における疲労き裂成長の予測を行った。繰り返し荷重下におけるき裂先端近傍における応力緩和実験の結果として、疲労き裂の成長量が安定破壊状態である場合において、き裂成長の予測および応力緩和の効果が確認でき、およそ $160[\%]$ の延命効果を確認した。

鋼橋の補修施工として当て板補修や TIG 溶接などが挙げられるが、どれも施工が困難という問題がある。新たな補修施工の提案として圧電アクチュエータの“高応答性”および“高出力”の特性に着目し延命化実験を行った。また、実際には面内のみならず面外方向など様々な荷重が作用しているため、圧電アクチュエータの貼付位置や方向、印加電圧を工夫することで、圧電アクチュエータの利用の適用範囲が広がると考えられる。

参考文献

- 1)国土交通省：道路構造物の現状（橋梁），<http://www.mlit.go.jp>
- 2)国土交通省：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，<http://www.mlit.go.jp>
- 3)国立研究開発法人土木研究所：鋼製橋脚隅角部の疲労損傷臨時点検要領，国土交通省道路局国道課，2002
- 4)森口 繁一：2次元弾性論，岩波書店，1957
- 5)吉田 和将，宮川 睦巳，中村 一史，志村 穰：圧電アクチュエータを用いた疲労き裂先端の応力解析と破壊制御実験，日本交通科学学会誌，Vol.16, pp.104-105, 2016