

令和元年6月13日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04396

研究課題名(和文) 面外曲げ応力を受ける疲労き裂を対象とした疲労損傷対策技術

研究課題名(英文) Repairing Method for Fatigue Cracks Generated by Out-of-plane Bending Stresses

研究代表者

館石 和雄 (TATEISHI, KAZUO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：80227107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、繰返し面外曲げおよびせん断力を受ける鋼板から発生した表面き裂に対して、き裂の進展挙動を推定する手法を検討した。試験体の板曲げ疲労試験を行い、得られた破面から3次元的なき裂の進展経路を確認した後、有限要素解析を用いて、き裂最深部の残存板厚内に生じる応力成分の推定方法を構築した。各き裂形状に対して、残存板厚内に作用する板曲げ応力、膜応力および平均せん断応力を用いて2次元のき裂進展解析を実施し、表面き裂最深部のき裂進展経路を推定できることを示した。また、疲労き裂の上 にCFRPシートを貼ることにより、疲労き裂の進展を抑制できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

面外曲げ応力によって発生する疲労き裂は、これまでに事例の多い損傷であるにも関わらず、その進展挙動は複雑であり、未解明な点が多い。本研究において、実際の3次元的なき裂の進展挙動を2次元解析で再現することに成功した。これにより、き裂進展シミュレーションが格段に容易に行うことができるようになり、さまざまな要因に支配されるき裂の進展挙動を解析的に予測するための道具が整った。

研究成果の概要(英文)：This study investigated a prediction method of fatigue crack growth behavior generated by cyclic out-of-plane bending stresses and shear stresses. First, the crack fracture surface was obtained in bending fatigue tests for bead-on-plate specimens. Then, finite element analyses were conducted in order to obtain the stress conditions around the crack front. Bending stress, membrane stress and shear stress obtained by the FEA were used for parametric studies with 2D model. Consequently, the crack growth behavior under plate bending can be simulated by simple 2D analysis. Besides, it is demonstrated fatigue crack growth can be drastically reduced by attaching CFRP sheets on the crack surface.

研究分野：鋼構造学

キーワード：疲労 面外曲げ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

一般的な鋼橋の設計において、面外曲げ応力を直接算定して照査が行われることはなく、設計上これを防止することは困難である。そのため、面外曲げによる疲労損傷に対しては、疲労強度の高い構造ディテールを明らかにし、それを採用するのが現実的な対策となる。しかし実際には、特に疲労設計が導入された H14 年以前の鋼橋において、疲労に対する配慮がされていない継手を使用されており、面外曲げ応力に起因する疲労き裂が数多く発生している。このようなき裂に対する効果的な補修・補強方法については、未だに決定だがない状況にある。

2. 研究の目的

鋼橋に生じる疲労き裂は、設計で考慮していない二次応力に起因するものが多い。二次応力には様々なものがあるが、断面内の応力分布に着目すると、面内応力（膜応力）と、面外曲げ応力（板曲げ応力）とに分類することができる。実橋に生じる疲労き裂の多くは、後者の面外曲げ応力の影響を受けているという認識のもと、本研究では、面外曲げによって生じる疲労き裂を対象として、1) き裂進展挙動の詳細な現象説明、2) FRP 接着による簡易な補修・補強方法の適用範囲の明確化、を目的として研究を実施する。

3. 研究の方法

(1) 疲労試験

① 試験体：試験体を図-1 に示す。平板の幅方向中央に V 字の開先加工を施し、溶接ビードを設けた。余盛りをグラインダーで平らに仕上げたのち、半円型のノッチを機械加工で設けた。以降、ノッチを設けた側をおもて面、反対側の面を背面とする。ノッチの形状は幅 8mm、深さ 4mm、厚さ 0.5mm と、幅 4mm、深さ 2mm、厚さ 0.5mm の 2 通りとした。供試鋼材は SM490A である。

② 試験方法： 载荷には板曲げ振動疲労試験機エラー! 参照元が見つかりません。を用いた。試験条件を表-1 に示す。応力比はおもて面での値である。

(2) き裂進展挙動の推定

本研究では、3 次元の形状を有する表面き裂に対して、き裂最深部である試験体幅方向中央の縦断面を 2 次元でモデル化し、2 次元のき裂進展解析ソフトを援用することでき裂進展経路を推定することを試みた。まず、表面き裂を有する鋼板の 3 次元有限要素解析を行い、様々なき裂サイズにおけるき裂最深部の応力分布を求める。次に、き裂最深部の縦断面を 2 次元でモデル化し、残存板厚内の応力分布が 3 次元有限要素解析のそれと同じになるように外力を与えてき裂進展解析を行う。き裂の成長に伴って残存板厚内の応力分布は変化するため、2 次元き裂進展解析ではき裂が進展するごとに外力の大きさや位置を更新する。これを繰り返して実行することでき裂の進展経路をシミュレートする。き裂の板厚方向に対する進展角度 θ が 90° を超えた場合にはき裂が停留すると判断し解析を終了する。また、背面のひずみ範囲が降伏ひずみ以上となるか、主き裂が背面に到達した場合にはき裂が貫通すると判断する。

汎用の有限要素解析ソフト Abaqus-6.14 ver.5 を用いて、表面き裂を有する鋼板の線形解析を行った。寸法は疲労試験に用いた試験体と同じとし、実験で観察されたき裂幅およびき裂深さを有する解析モデルをそれぞれ作成した。解析モデルの一例を図-2 に示す。境界条件は疲労試験と同じになるよう、片側

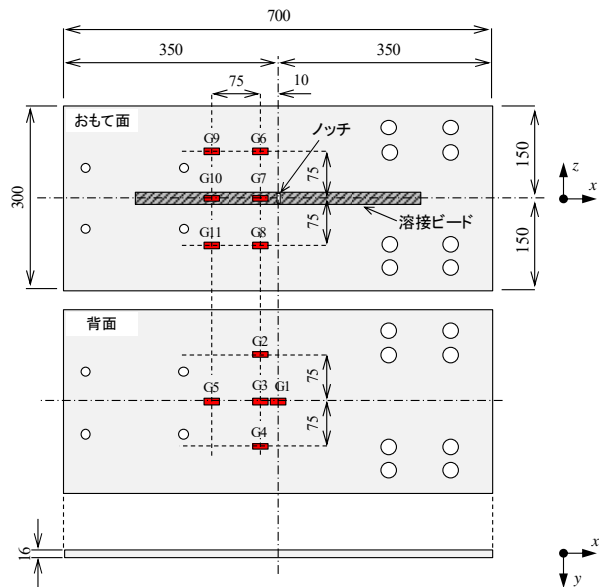


図-1 試験体（単位：mm）

表-1 試験条件

試験体	ノッチサイズ	公称応力範囲 N/mm ²	応力比 R	破壊形態
S-T	幅 4mm	149.4	0	主き裂貫通
S-C	深さ	150.1	-inf.	背面き裂
S-B	2mm	151.8	-1	背面き裂
L-T	幅 8mm	101.8	0	主き裂貫通
L-C-1	深さ	97.7	-inf.	主き裂停留
L-C-2	4mm	140.0	-inf.	主き裂停留
L-B		99.0	-1	主き裂停留

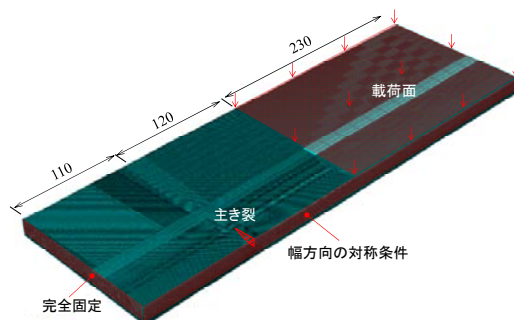
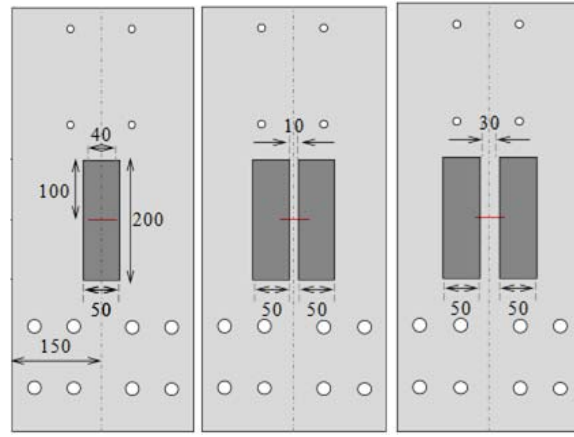


図-2 有限要素解析モデル

を完全固定とし、起振器の設置面上向きあるいは下向きの等分布荷重を載荷した。等分布荷重の大きさはき裂位置における公称応力が疲労試験と一致するように決定した。要素は8節点一次のソリッド要素とし、き裂周辺はおおよそ0.5mmの立方体となるように分割した。鋼板の材料定数は200kN/mm²、ポアソン比は0.3とした。

(3) CFRP 補修効果の検討

(1)で用いた試験体に疲労き裂を導入した後、CFRP板を貼り付け、疲労試験を継続した。その際の疲労き裂の進展挙動を確認することで、CFRP板の補修効果について検討した。また、有限要素解析により補修前後の応力拡大係数を求めることにより、補修効果について検討した。CFRP板の配置は図-3に示す3通りとした。いずれもCFRP板の幅は50mmであり、S-1はき裂の真上に1枚貼るもの、S-2は10mmの間隔を空けて2枚貼るもの、S-3は30mm空けて2枚貼るものである。



(a) S-1 (b)S-2 (c)S-3

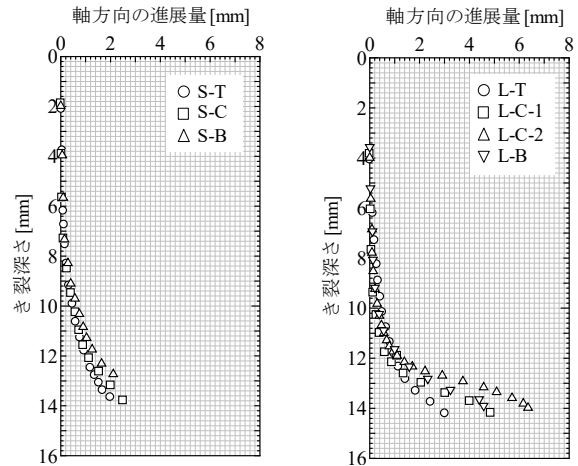
図-3 CFRP 板の配置方法

4. 研究成果

各試験体の破壊形態を表-1の最右列にまとめて示す。主き裂の最深部における縦断面(図-1のx-y平面)の画像計測を行うことにより、き裂深さとき裂の軸方向への進展量の関係を求めた。図-4に計測結果を示す。同図の横軸が0の位置がノッチの位置であり、横軸が正の方向が固定端側である。主き裂は板厚方向のみでなく、固定端側に向かって潜り込むように進展している。主き裂が停留したL-C-1、L-C-2、L-Bでは板厚方向への進展量に対する軸方向の進展量が大きくなっている。

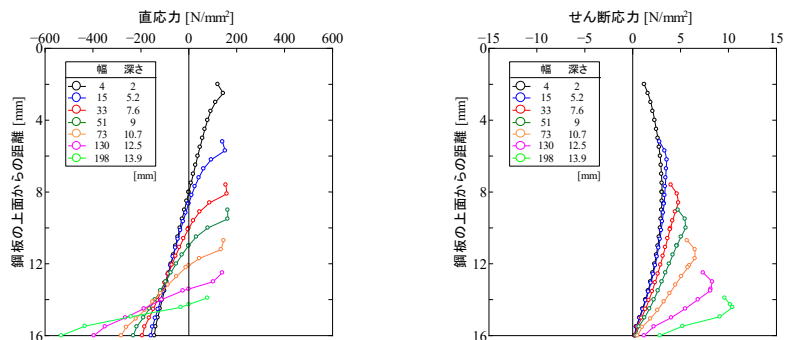
解析により求めたき裂最深部の残存板厚内における直応力とせん断応力の板厚方向分布の一例を図-5に示す。き裂先端では応力の特異性があることから、き裂から軸方向に±0.5mm離れた断面の直応力およびせん断応力を出力し、それらの平均値をプロットしている。き裂寸法が小さい場合は直応力およびせん断応力はそれぞれほぼ直線分布および放物線分布となっているが、き裂が大きくなるにつれて形状が変化している。

図-5で示したき裂最深部の直応力およびせん断応力から、き裂最深部を単位幅の矩形断面と仮定し、残存断面に作用する曲げモーメント、軸力、せん断力を求め、断面積および断面係数でそれぞれ除すことで、板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力を求めた。図-6に平均せん断応力と板曲げ応力の比および、膜応力と板曲げ応力の比を示す。同図より、き裂深さが大きくなるほど板曲げ応力に対する平均せん断応力の割合や膜応力の割合が大きくなっていることがわかる。平均せん断応力の割合が大きくと最大主応力の向きが回転するため、き裂の進展方向が軸方向へと変化する要因となっていると考えられる。また、残存板厚部に生じる膜応力は



(a) S シリーズ (b) L シリーズ

図-4 き裂深さと水平方向の進展量の関係



(a) 直応力 (b) せん断応力

図-5 き裂最深部残存板厚内の応力分布(S-T)

圧縮であり、膜応力の割合が大きくなることで主き裂の板厚方向への進展は遅延すると考えられる。

これらの結果を基に、汎用の2次元き裂進展解析コードFRANC2Dを用いてき裂の進展経路を推定した。図-7(a)に示す通り、試験体幅方向中央の縦断面の2次元モデルを作成し、ノッチの最深部にき裂長0.1mmの初期き裂を導入した。残存板厚部の板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力が前述の有限要素解析から求めたそれらと一致するように、外力として鉛直荷重および水平方向への圧力を与える。き裂が進展すると残存板厚内の板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力が変化するため、き裂が1mm進展するごとに鉛直荷重の大きさや位置および、水平方向の圧力の大きさを更新して解析を実行する。任意のき裂深さにおける鉛直荷重 P 、き裂から荷重位置までの距離 l 、水平方向の圧力 p はそれぞれ次式により決定する。

$$P = -\tau_m \cdot t_r \quad (1)$$

$$l = \frac{t_r}{6} \cdot \frac{\sigma_b}{\tau_m} + \frac{(t-t_r)}{2} \cdot \frac{\sigma_m}{\tau_m} \quad (2)$$

$$p = \sigma_m \cdot \frac{t_r}{t} \quad (3)$$

ここに、 t :板厚、 σ_b :板曲げ応力、 σ_m :膜応力、 τ_m :平均せん断応力である。鉛直荷重 P は上向きを正、水平方向の圧力 p は引張を正とする。2次元の解析モデルでは、き裂の有る断面とき裂の無い断面の中立軸の違いから、水平方向の圧力 p による付加曲げモーメントが発生する。式(3)ではこの付加曲げモーメントも考慮したうえで残存板厚部の板曲げ応力が有限要素解析から得たそれと同じになるようにアーム長を決定している。き裂の進展方向 θ が 90° 以上となった場合に解析を終了した。

き裂の進展解析により得られたき裂深さと軸方向の進展量の関係を図-8に示す。また、同図には背面のひずみの最大値が降伏ひずみ以上となった点もプロットしている。全てのケースに対して、進展解析より得られたき裂の進展経路は実験結果を概ね再現できているといえる。疲労試験において主き裂が停留したL-C-1、L-C-2、L-Bでは、解析においても主き裂が停留し、背面のひずみ範囲も降伏ひずみに達していない。一方、主き裂の貫通や背面き裂の発生により破断に至ったS-T、S-C、S-B、L-Tでは背面のひずみ範囲が降伏に達している。このことから本手法では、主き裂の貫通と背面き裂の発生を判別することは困難であるが、き裂進展解析において背面のひずみ範囲が降伏ひずみ以上となる場合にはき裂が貫通すると判断することができる。

ここまでの成果により、表面き裂の3次元挙動を2次元解析で予測する手法を確立することができた。ただし、そのためには、き裂最深部の残存板厚内の板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力を知る必要がある。そこで、板厚、き裂幅、き裂深さをパラメータとして、き裂や

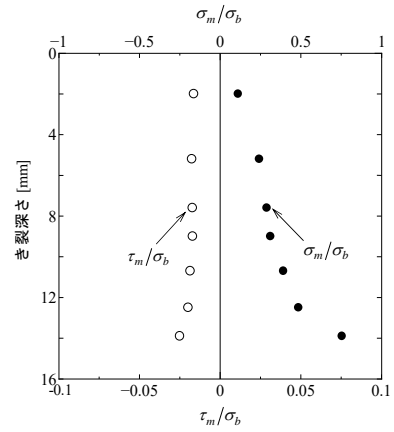
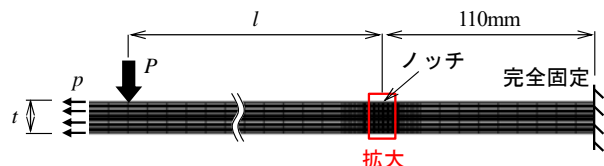
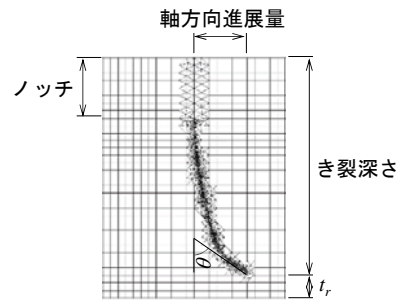


図-6 応力成分の比(S-T)



(a) 解析モデル



(b) き裂周辺拡大図

図-7 き裂進展解析のモデル

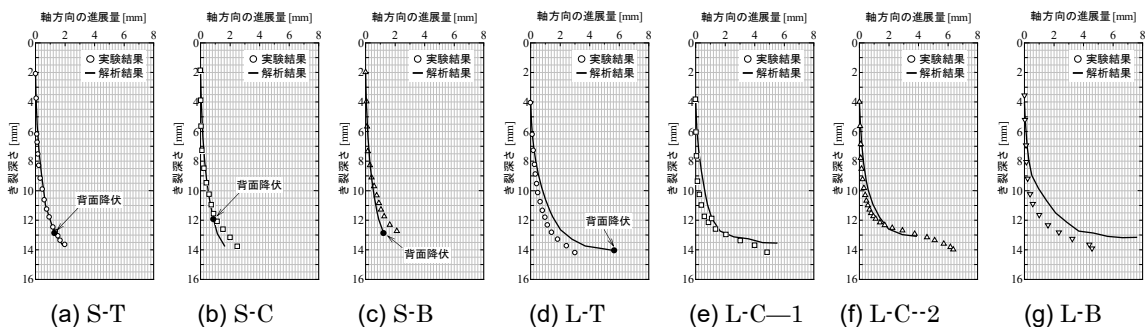


図-8 き裂進展経路の実験結果と解析結果の比較

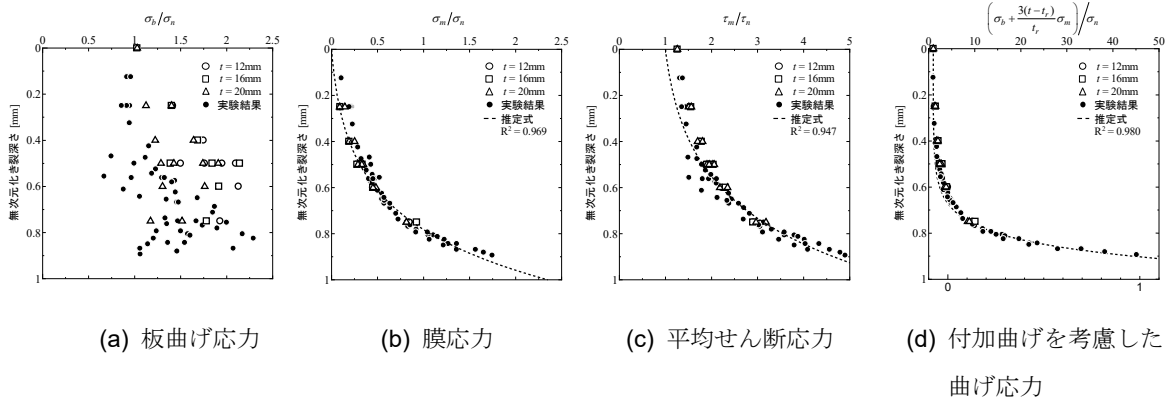


図-9 無次元化した各応力成分とき裂深さの関係

鋼板の寸法と残存板厚内の各応力成分の関係式を構築することとした。

き裂の幅と深さ、鋼板の幅と板厚を変化させて3次元解析を行い、き裂最深部残存板厚内の板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力を算出した。各応力成分と無次元化き裂長の関係を図-9(a)～(c)に示す。同図の縦軸はき裂位置における初期の公称曲げ応力あるいは公称せん断応力で無次元化している。図-9(b)(c)より、膜応力および平均せん断応力は無次元化き裂深さと高い相関があるが、板曲げ応力については図-9(a)に示すように相関が低い。一方、前述したように、き裂進展解析では水平方向の圧力による付加曲げを考慮した板曲げ応力を用いる必要がある。付加曲げを考慮した曲げ応力は次式で表せる。

$$-\frac{6}{t_r^2} \cdot Pl = \sigma_b + 3 \cdot \frac{t-t_r}{t_r} \cdot \sigma_m \quad (4)$$

付加曲げを考慮した曲げ応力とき裂深さの関係を図-9(d)に示す。同図より、付加曲げを考慮した曲げ応力は無次元化き裂深さと高い相関があることがわかる。本節ではき裂幅や板厚も様々に変化させたが、それらが各応力成分に与える影響は小さかった。これらのことから、無次元化き裂深さの関数として、回帰分析を用いて各応力成分の推定式を次式の通り与えた。

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_n} = 0.0548 \left\{ e^{3.78(a/t)} - 1 \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\tau_m}{\tau_n} = 0.185 \cdot e^{3.37(a/t)} + 0.815 \quad (6)$$

$$\left(\sigma_b + 3 \cdot \frac{t-t_r}{t_r} \cdot \sigma_m \right) / \sigma_n = 0.00149 \cdot e^{11.4(a/t)} + 0.999 \quad (7)$$

ここに、 σ_n ：き裂位置の初期の公称応力、 τ_n ：き裂位置の初期の公称せん断応力、 a ：き裂深さである。図-9には式(5)～式(7)の推定式も合わせて示している。 R^2 値は0.947以上となっている。このように、各応力成分はき裂幅等の影響によってある程度のばらつきはあるものの、無次元化き裂深さの影響が支配的となる。そのため、き裂進展経路もき裂幅によらず一意に定まるといえる。但し、残留応力の消失やき裂面の接触等によりき裂の開閉口がある場合には残存板厚内の板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力が異なるため、き裂の進展経路も変化する可能性がある。

最後に、CFRPによるき裂の補修効果について述べる。図-10は载荷回数とき裂長さおよびき裂深さとの関係である。実線はCFRPシートを貼らない場合のき裂進展曲線である。CFRPシートを貼ることにより、き裂の進展が大きく抑制されていることがわかる。また、CFRPシートの貼り方によ

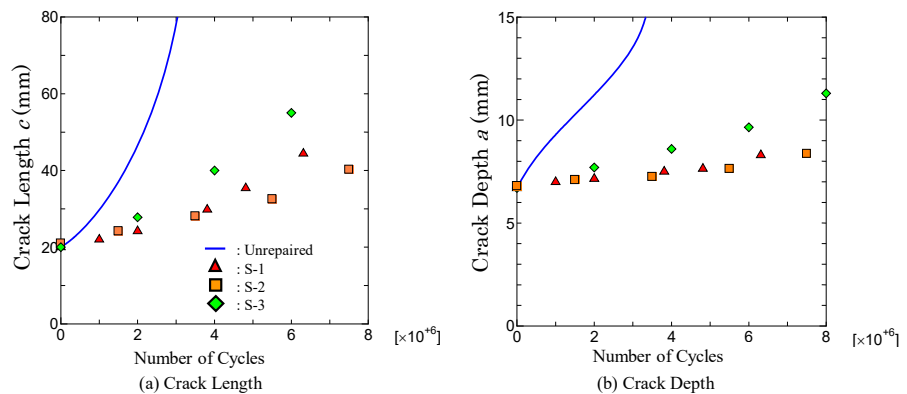


図-10 CFRP 板による補修効果

ってその効果に差があり、S-3の配置ではやや効果が低下する傾向が見られる。

以下に本研究で得られた成果のまとめを示す。

- 1) 引張片振りの疲労試験では主き裂が背面へと貫通し、圧縮片振りおよび両振りの疲労試験では背面き裂が発生あるいは主き裂が停留した。
- 2) 主き裂の進展は幅方向、板厚方向のみでなく、軸方向にも進展した。背面き裂が発生したケースおよびき裂が停留したケースでは軸方向への進展量が大きかった。
- 3) 主き裂が貫通したケースおよび背面き裂が発生したケースでは背面のひずみ範囲が降伏ひずみに達していた。
- 4) き裂が大きくなるほど、き裂最深部の残存板厚内では板曲げ応力に対する平均せん断応力や膜応力の割合が大きくなる。
- 5) 有限要素解析から得た残存板厚内の板曲げ応力、膜応力、平均せん断応力を用いて2次元のき裂進展解析を行うことで、き裂進展経路を再現できることがわかった。
- 6) き裂進展解析に用いる膜応力、平均せん断応力、曲げ応力はき裂深さと高い相関がある。
- 7) CFRPシートを貼付けることにより、面外曲げにより発生した疲労き裂の進展を遅延させることができた。ただし、CFRP板では剥離を起こしやすいことがわかった。
- 8) き裂進展解析により、CFRP補修を施した場合のき裂の幅方向の応力拡大係数の低減は有限要素解析で予測できた。一報で、深さ方向の応力拡大係数の低減効果は再現できなかった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計1件)

堀尾 健太郎・鎗石 和雄・判治 剛：面外曲げを受ける鋼板の疲労き裂進展挙動に関する研究，土木学会年次学術講演会，2018年

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。