

## (62) 疲労き裂補修へのGFRPの適用に関する基礎的研究

鈴木 博之

正会員 明星大学教授 理工学部建築学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保2-1-1)  
E-mail:suzukihi@ar.meisei-u.ac.jp

FRPの一種であるGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）は、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）に比べて弾性係数は低いが、安価である。また、GFRPは半透明であり、施工において、プライマーに残った気泡を処理しやすいという利点を有している。このような特徴を持つGFRPが鋼構造の補修・補強に利用可能であれば、そのメリットは少なくない。

本研究では、GFRPを疲労き裂を有する鋼部材の補修に適用することの可能性について実験的に検討している。また、GFRPの補修効果について考察するため有限要素法による解析を行い、GFRPの幅および層数が疲労き裂の補修に与える影響について検討し、疲労き裂を有する鋼部材の補修にGFRPが適用可能な場合の設計、施工上の留意点について調査している。

**Key Words :** GFRP, fatigue crack, repair, steel member

### 1. はじめに

FRPの一種であるGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）は、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）に比べて弾性係数は低いが、安価である。また、GFRPは半透明であり、施工において、プライマーに残った気泡を処理しやすいという利点を有している。このような特徴を持つGFRPが鋼構造の補修・補強に利用可能であれば、そのメリットは少なくない。

ところで、GFRPの鋼構造への適用に関する研究には、標識柱や照明柱といったパイプ構造基部の補剛リブ取り付け溶接部の補強にGFRPを適用するための研究、対傾構取付け部、ソールプレート取付け部のGFRPによる補強に関する研究、リブ十字溶接継手の疲労強度の改善を目的としたGFRP補強に関する研究などが報告されている<sup>1-4)</sup>。

しかしながら、鋼部材に発生した疲労き裂の補修にGFRPを適用することを目的とした研究は、著者の知る範囲においては、未だ行われていないように思われる。参考文献1-4)からも理解されるように、GFRPは柔軟性に富んでおり、溶接継手などの複雑な構造にも対応可能で、施工も容易であるので、GFRPが疲労き裂が発生した溶接継手の補修に効果があれば、応急補修として有用であると考えられる。

本研究では、GFRPを疲労き裂を有する鋼部材の補修

に適用することの可能性について実験的に検討する。また、GFRPの補修効果について考察するため有限要素法による解析を行い、GFRPの幅および層数が疲労き裂の補修に与える影響について検討し、疲労き裂を有する鋼部材の補修にGFRPが適用可能な場合の設計、施工上の留意点について調査する。

### 2. GFRPにより補修されたき裂を有する鋼板の疲労試験

#### (1) 実験方法

図-1 に試験片形状を示す。最終的には溶接継手試験片を用いて検討する必要があるが、今回は基礎的研究ということで図-1 に示す試験片を用いることとした。本実験では、実際に鋼部材に発生した疲労き裂を対象とす

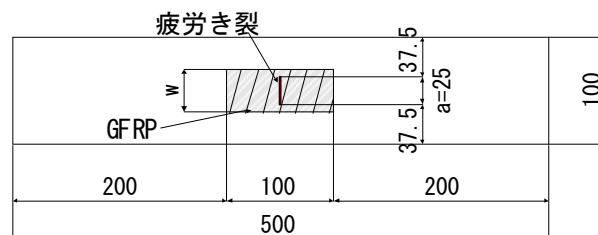


図-1 試験片形状

表-1 実験シリーズ

| シリーズ  | GFRPの幅 $w$ (mm) | GFRPの幅とき裂部の長さの比 $w/a$ |
|-------|-----------------|-----------------------|
| C-0.0 | 0               | 0.0                   |
| C-1.0 | 25              | 1.0                   |
| C-2.0 | 50              | 2.0                   |

表-2 機械的性質

|            | 降伏点 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 弾性係数 (MPa)        | 伸び (%) |
|------------|-----------|------------|-------------------|--------|
| 鋼板 (SS400) | 269       | 426        | $2.1 \times 10^5$ | 31     |
| GFRP       | —         | 201        | $1.4 \times 10^5$ | —      |
| プライマー      | —         | 52         | $4.6 \times 10^3$ | —      |

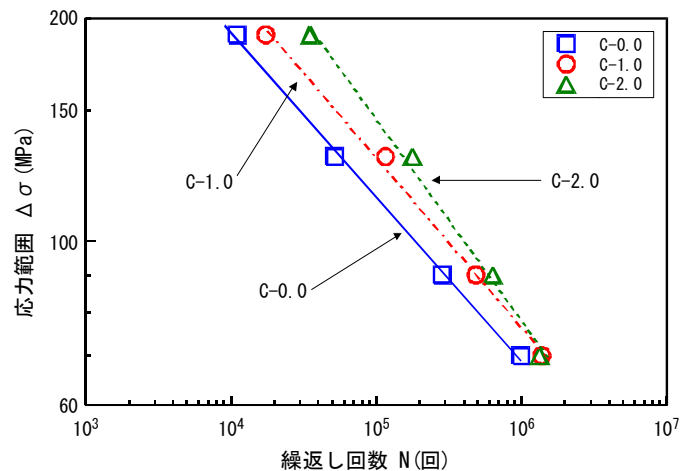


図-2 S-N線図

るため、試験片中央に長さ 10mm のソーカットを設け、繰返し荷重を作用させ、ソーカットから疲労き裂を発生させた。ソーカットと疲労き裂の長さの合計が約 25mm に達したときに载荷を止め、これを無補修試験片（C-0.0 シリーズ）とした。無補修試験片に GFRP を貼付した試験片を補修試験片とした。なお、鋼板および GFRP の板厚は各々 6.0mm と 0.6mm である。貼付した GFRP の長さは、100mm である。また、幅  $w$  は 25mm（C-1.0 シリーズ）と 50mm（C-2.0 シリーズ）の 2 種類とし、各々 2 層貼付した。GFRP は、き裂部の表面と裏面の両面にエポキシアクリレート系の常温硬化型 2 液性プライマーを用いて貼付した。接着作業は、試験片を試験機から取り外し、下向きで行った。実験シリーズ名と GFRP の幅  $w$ 、および GFRP の幅  $w$  とき裂部の長さ  $a$  の比  $w/a$  を表-1 に示す。また、実験に用いた鋼板、GFRP およびプライマーの機械的性質を表-2 に示す。なお、使用した GFRP はガラス繊維が長手方向にだけ配置されている一方向材である。疲労試験にあたっては、最小応力は 10MPa とし、最大応力を変化させた。応力範囲の形状は正弦波とした。実験には容量 200kN の電気油圧式サーボパルサーを使用

した。疲労き裂進展速度を調べるためにクラックゲージを疲労き裂先端に貼付し、疲労き裂を有する断面の荷重軸方向の応力分布を把握するために歪ゲージも疲労き裂を有する断面上に貼付した。

## (2) 実験結果および考察

### a) 疲労試験結果

図-2に疲労試験結果を示す。図には、各シリーズの疲労試験結果の回帰線も示した。図の縦軸は試験片平行部の応力範囲であり、横軸は繰返し回数である。

C-0.0とC-1.0の回帰線に着目すると、GFRPを貼付することによる補修効果が認められる。C-2.0は、応力範囲が低い領域では、C-1.0と同程度の疲労寿命の改善となっているものの、応力範囲が高くなるにつれて、補修効果が高くなっており、C-1.0よりさらに疲労寿命が改善されていることがわかる。従って、GFRPの幅が大きい方が、より疲労寿命の改善効果が大きいと言える。

本実験の範囲内で、応力範囲の最も低い  $\Delta\sigma=70\text{MPa}$  におけるC-0.0、C-1.0およびC-2.0の疲労寿命は各々、99万回、138万回、133万回であり、疲労限が得られなかった。

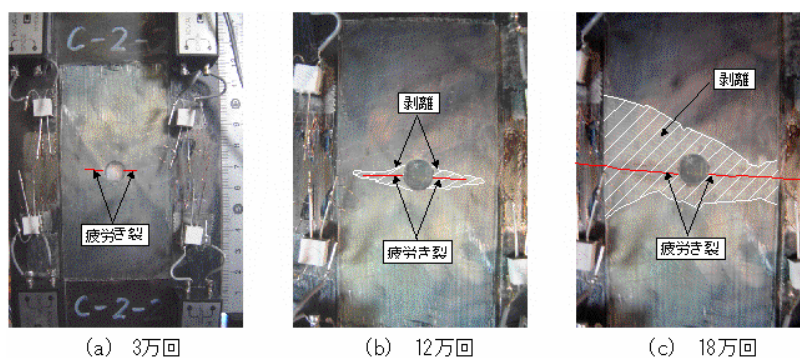


写真-1 GFRP剥離状況(C-2.0)

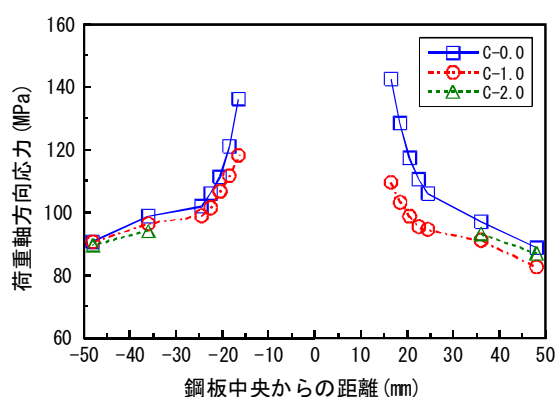


図-3 応力分布(公称応力100MPa)

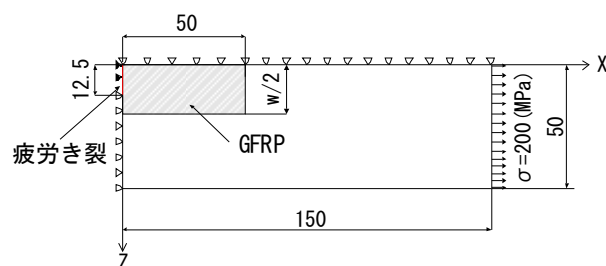


図-4 解析モデル

表-3 解析に用いた材料の機械的性質

|            | 降伏点 (MPa) | 弾性係数 (MPa)        | ポアソン比 |
|------------|-----------|-------------------|-------|
| 鋼板 (SS400) | 269       | $2.1 \times 10^5$ | 0.3   |
| GFRP       | —         | $1.4 \times 10^5$ | 0.34  |
| プライマー      | —         | $4.6 \times 10^3$ | 0.3   |

従って、GFRPを疲労き裂の補修に適用する場合、疲労き裂の進展を完全に止めることはできないが、疲労寿命の延命化には十分な効果があり、応急処置として実用の可能性があると考えられる。

C-1.0およびC-2.0の破断状況は、つぎの通りであった。GFRPを貼付したことにより、き裂の進展は遅くなったがき裂は停止することはなかった。き裂の進展に伴ってき裂進展速度がしだいに速くなり、GFRPが剥離して、試験片は破断に至った。写真-1にC-2.0のGFRPの剥離状況を示す。写真から、GFRPを貼付して補修した後でも、き裂先端の観察は可能であり、き裂の進展に伴ってGFRPが剥離していることがわかる。また、き裂近傍以外は剥離することなく、接着していることが認められる。なお、

GFRPは試験片が破断する直前に剥離し、破断後においてもGFRPに損傷は何ら認められなかった。

#### b) 応力分布

図-3にC-0.0、C-1.0およびC-2.0の公称応力100MPaにおけるき裂を有する断面の荷重軸方向の応力分布を示す。

図-3より、GFRPを貼付することにより、き裂先端の応力集中が低減されていることがわかる。また、応力の低減効果は、GFRPの貼付域の近傍のみであると判断される。従って、GFRPをき裂部に貼付することにより疲労寿命が延びたのは、GFRPが荷重を分担し、き裂先端の応力集中が低減されたためであると理解される。

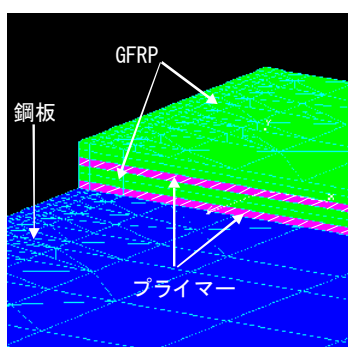


図-5 有限要素分割の一例

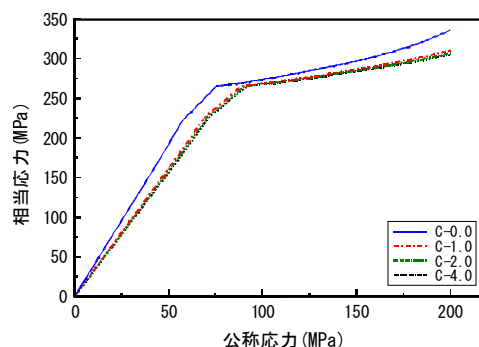


図-6 相当応力-公称応力関係

表-4 解析シリーズ1

| モデル名  | GFRPの幅 $w$ (mm) | GFRPの幅とき裂部の長さの比 $w/a$ |
|-------|-----------------|-----------------------|
| C-0.0 | 0               | 0.0                   |
| C-1.0 | 25              | 1.0                   |
| C-2.0 | 50              | 2.0                   |
| C-4.0 | 100             | 4.0                   |

表-5 解析シリーズ2

| モデル名     | GFRPの層数 |
|----------|---------|
| C-1.0-1  | 1層      |
| C-1.0-2  | 2層      |
| C-1.0-3  | 3層      |
| C-1.0-5  | 5層      |
| C-1.0-10 | 10層     |

### 3. GFRPにより補修されたき裂を有する鋼板の応力解析

#### (1) 解析方法

疲労き裂を有する鋼板のき裂部にGFRPを貼付することにより、疲労寿命が延びたことを検証するために解析を実施した。

解析は8節点ソリッド要素を用いた弾塑性FEM解析である。解析モデルを図-4に示す。解析モデルは図-1に示した試験片を解析対象とし、対称性を考慮して1/8モデルとした。しかし、解析モデルの長さが解析結果に及ぼす影響は少ないので、解析モデルの長さは試験片長500mmの1/2の250mmではなく、150mmとした。また、解析モデルの疲労き裂は、GFRPだけを拘束し、疲労き裂に相当する範囲の鋼板は荷重軸方向に拘束しないことで表現することとした。GFRPと鋼板の間に塗布したプライマーの厚さは0.3mmとした。表-3に解析に使用した各材料の機械的性質を示す。GFRPとプライマーは弾性体として扱い、鋼板の降伏後の弾性係数は表-3に示したその1/20とした。

荷重は、図-4に示すように、解析モデル端部の応力が200MPaとなるまで載荷した。なお、実験には一方向材のGFRPを用いたが、本解析は市販の汎用解析ソフトを用いたため、弾塑性解析に異方性を取り入れることができなかったため、やむを得ず、等方性と見なして解析することとした。

図-5に有限要素分割の一例を示す。

解析シリーズを表-4, 5に示す。2章の実験では、表-1に示すように、GFRPの幅 $w$ が25mmと50mmの2種類を用いたが、解析では試験片幅方向すべてをGFRPで覆った $w=100$ mm (C-4.0)を加えて検討した。また、表-5に示すように、表-4におけるC-1.0のGFRPの層数を1層、3層、5層および10層と変化させ、GFRPの層数についても検討することとした。なお、表-5のC-1.0-2は表-4のC-1.0と同じモデルである。

#### (2) 解析結果および考察

ここでは、解析結果を用いてGFRPの幅および層数の効果について考察することとする。

##### a) GFRPの幅 $w$ に関する検討

実験においては補修後も疲労き裂は進展していたことから、解析における着目点は、疲労き裂先端の鋼板の要素とした。

図-6に解析シリーズ1の各モデルの疲労き裂先端の鋼板の要素の相当応力-公称応力関係を示す。図より、無補修のC-0.0は、すべてのモデルの中で最も低い公称応力で降伏していることがわかる。GFRPを貼付したC-1.0～C-4.0においては同一の公称応力に対して相当応力がC-0.0より低くなっている。従って、GFRPが荷重を分担していることが理解される。また、C-0.0では降伏後、公称応力が大きくなるにつれて相当応力がC-1.0～C-4.0に比べて急激に増えている。一方、GFRPを貼付したモデルの相当応力の増加は、C-0.0よりゆるやかになっている。従って、GFRPは、疲労き裂先端が降伏した後も荷重

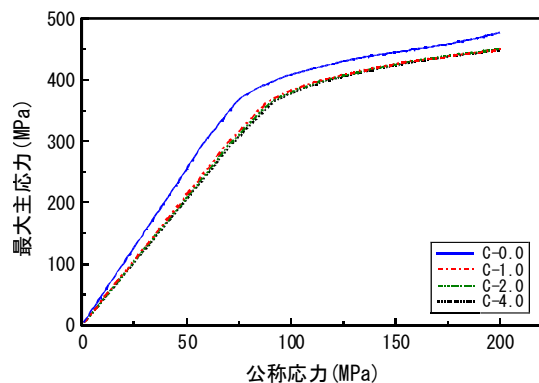


図-7 最大主応力-公称応力関係

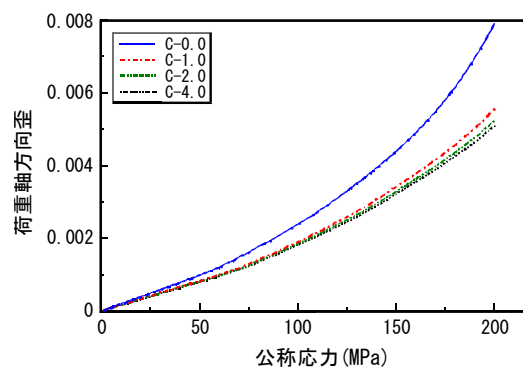


図-8 荷重軸方向歪 - 公称応力関係

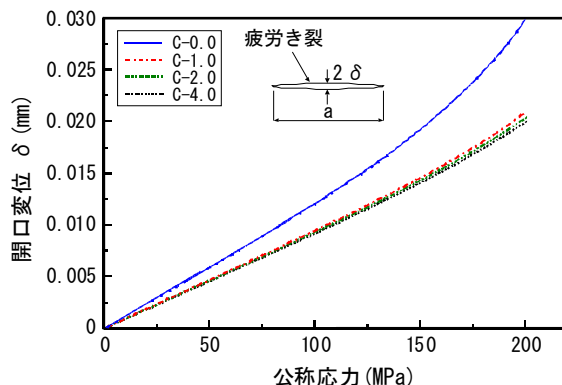


図-9 開口変位-公称応力関係

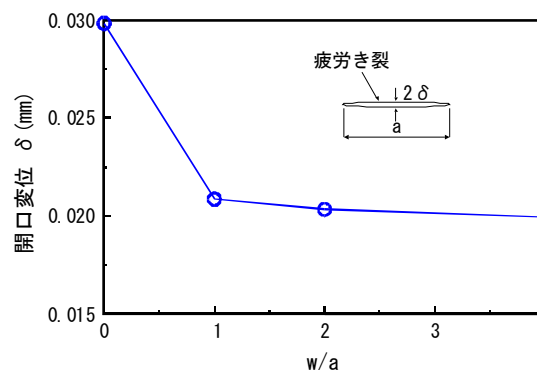


図-10 開口変位-w/a関係

を負担しており、相当応力の増加を抑制していることがわかる。

図-7に最大主応力-公称応力関係を示す。図-7より、降伏前の同一の公称応力に対してGFRPを貼付したC-1.0, 2.0, 4.0は、主応力の増加がC-0.0より抑制されていることがわかる。その程度に、GFRPの幅の違いによる影響は認められない。

図-8に荷重軸方向歪-公称応力関係を示す。図-8より、無補修のC-0.0はGFRPを貼付したモデルと比べると同一の公称応力における歪が著しく大きくなっていることがわかる。また、C-1.0～C-4.0においてはGFRPを貼付することにより、荷重軸方向歪の増加を低減できているので、き裂先端の塑性域の拡がりも抑制されているものと思われる。

図-9に各モデルのき裂部の荷重軸方向の開口変位-公称応力関係を示す。図-9の開口変位 $\delta$ はき裂中央の鋼板表面の節点の荷重軸方向変位である。C-0.0は他のモデルに比べて同一の公称応力のときの開口変位が最も大きく、GFRPを貼付することにより、き裂部の開口変位が抑制されていることがわかる。その抑制の程度は、GFRPの幅が大きいほど開口変位は小さくなっているが、有意な差とは言えない。そこで、公称応力200MPaにおける、き裂部の開口変位 $\delta$ を $w/a$ との関係で整理した。図-10に結果を示す。図-10より、き裂部にGFRPを貼付することにより、開口変位が著しく減少しているが、 $w/a=1.0$ 以上貼付することによる効果は小さいように思われる。従

って、き裂部すべてをGFRPで覆えば十分であると判断される。

つぎに、塑性域の拡がりを調査した。図-11は、公称応力が80MPaおよび200MPaにおける解析シリーズ1のC-0.0, C-1.0およびC-2.0の塑性域の変化を比較したものである。図-11より、80MPaでは明らかではないが、200MPaではGFRPを貼付することにより、塑性域の拡がりが抑制されていることがよくわかる。

ここで、疲労試験において応力範囲が高くなるにつれて補修効果が大きかったことについて考察する。図-11より、公称応力が大きくなるにつれて、各シリーズの塑性域は拡大していることがわかる。それにもかかわらず応力範囲が高くなるほど補修効果が現れたのは、過大応力によるものと思われる。一度大きな応力を受けると、その応力によって生じた塑性域をき裂先端が通過するまでは、き裂進展速度がこの過大応力の影響を受け、遅延すると言われている。図-11の200MPa時においては、C-0.0の塑性域は(a)に示す範囲であり、GFRPを貼付したC-1.0およびC-2.0では、各々(b), (c)の範囲が塑性域となっている。2章の実験の場合は、実際に疲労き裂を発生させ、そこにGFRPを貼付したので、無補修試験体を作成したときには、すでに(a)に示す範囲が塑性化していることとなる。その状態でGFRPを貼付したため補修後の繰返し载荷では、(b)および(c)の範囲が塑性域に相当することになるので、無補修時の繰返し载荷が過大応力の役割となり、(a)の塑性域をき裂先端が通

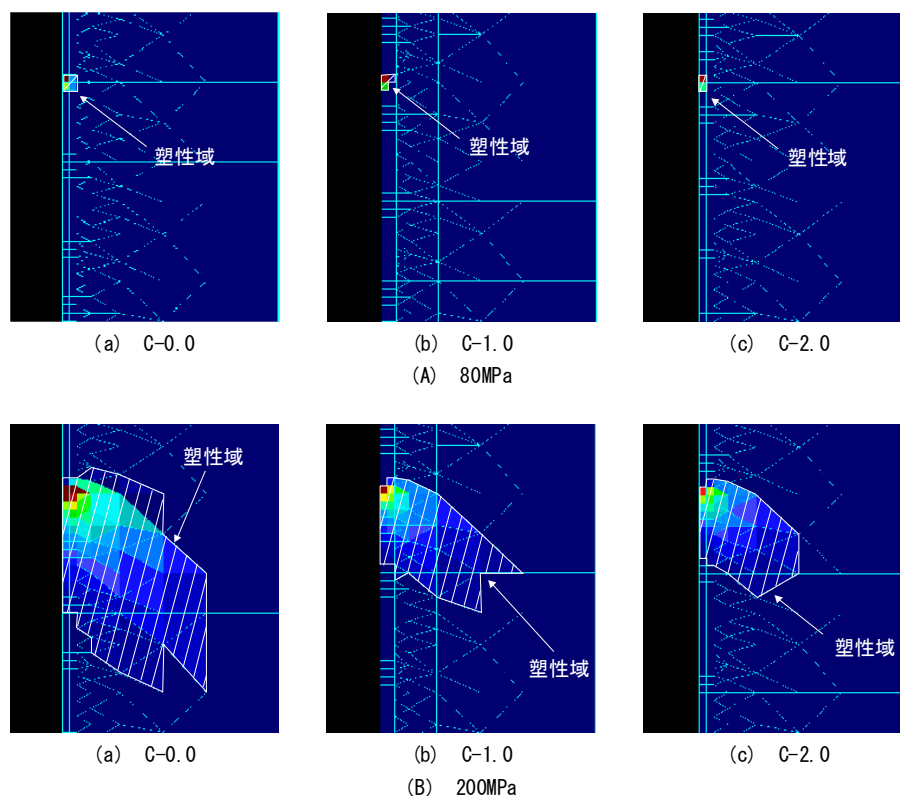


図-11 塑性域変化

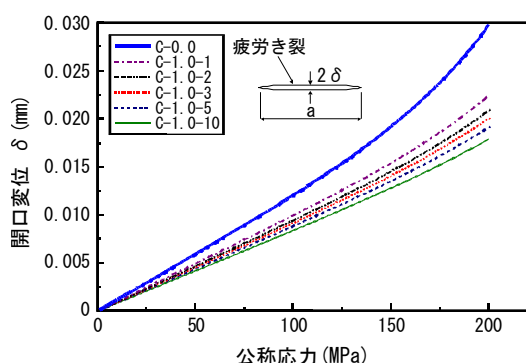


図-12 開口変位-公称応力関係

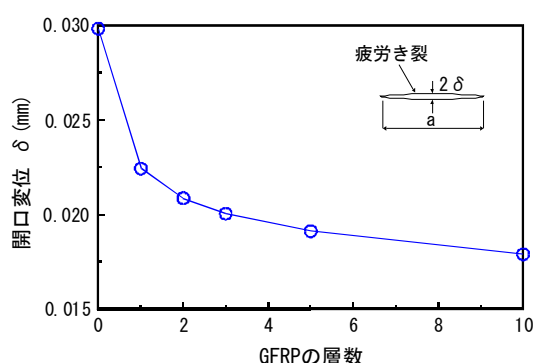


図-13 開口変位と GFRP の層数の関係

過するまでき裂進展は遅延したと考えられる。一方、80MPa時では、図-11に示すように、GFRP貼付の前後において、塑性域に有意な差が認められないため、き裂の進展が遅延されなかったものと考えられる。

以上より、実験においてGFRPを貼付することにより疲労寿命が延びたのは、GFRPによりき裂部の開口変位が抑制されたため、疲労き裂先端の応力集中が緩和されたこと、および過大応力によるものと推察される。

#### b) GFRPの層数に関する検討

本検討では、解析シリーズ1のC-1.0を用いて、GFRPの層数を変化させ、層数が補修効果に与える影響について調査した。

図-12に解析シリーズ2の疲労き裂部の荷重軸方向の開口変位-公称応力関係を示す。図より、き裂部の開口変位は、GFRPの貼付により、同一の公称応力に対して急激に低下していることがわかる。その程度は、GFRPの層数が多いほうが大きいことがわかる。公称応力200MPaにおけるき裂部の開口変位とGFRPの層数の関係を調査した。結果を図-13に示す。図からもGFRPの層数が多いほうが効果は大きいと言えるが、GFRPを1層貼付した場合でも開口変位を約25%抑制していることがわかる。また、図より実用上は、GFRPは2, 3層貼付すれば十分であると思われる。

## 5. まとめ

本研究では、疲労き裂を有する鋼板 ( $t=6.0\text{mm}$ ) を GFRP で補修した試験片を用いた疲労試験および弾塑性解析を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) GFRP を疲労き裂の補修に適用する場合、き裂の進展を完全に止めることはできなかった。しかし、延命化には十分な効果があった。
- 2) き裂部に対して GFRP の幅が大きい方が補修効果は高くなった。しかし、 $w/a=1.0$  の場合でも疲労寿命の十分な延命効果が得られた。
- 3) 応力範囲が高い方が GFRP の補修効果は高くなった。
- 4) 実験において疲労き裂に GFRP を貼付することにより疲労寿命が延びたのは、GFRP によりき裂部の開口が抑制されたことおよび過大応力によるものと説明された。
- 5) 疲労き裂の補修に  $w/a=1.0$  の GFRP を用いる場合、GFRP の層数は多いほうが補修効果が高くなったが、実用上は 2, 3 層で十分であると判断された。

## 参考文献

- 1) 連, 平野, 佐藤, 青木: 紫外線硬化型樹脂による補強対策を施した長柱の疲労実験, 第 57 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), I-299, 2002. 9.
- 2) 鈴木博之、穂山勇太、中山正希: 対傾構取付け部の GFRP による補強, 第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-006, 2006.
- 3) 鈴木博之、福元弘幸、福治基樹: ソールプレート取付け部の GFRP による補強, 第 33 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-007, 2006.
- 4) 稲葉尚文、富田芳男、紫桃孝一郎、鈴木博之、岡本陽介: GFRP シート貼付によるリブ十字溶接継手の補強に関する一提案, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.89-99. 2005.

## FUNDAMENTAL STUDY ON APPLYING A GFRP SHEET TO REPAIR OF A FATIGUE CRACK

Hiroyuki SUZUKI

In this paper, application of a GFRP to repair of a steel member having a fatigue crack examines experimentally. In addition, analyses using finite element method are also done.

As a result of the experiments, it is shown that the GFRP has an effect on repair of the cracked steel member. Moreover, width of the GFRP and a number of layers of the GFRP is discussed on the basis of a result of the analyses for design and/or construction when the GFRP is applied to repair of the cracked steel member.