

溶接継手に発生した疲労き裂の積層 CFRP 板による補修効果

Repair of Fatigue Cracks in Out-of-Plane Welded Gusset Joints Using Laminated CFRP Strips

○中村 一史* 諸井 敬嘉** 鈴木 博之*** 前田 研一**** 入部 孝夫*****
Hitoshi NAKAMURA Takayoshi MOROI Hiroyuki SUZUKI Ken-ichi MAEDA Takao IRUBE

ABSTRACT A Carbon Fiber Reinforced Polymer strip (it is hereafter called a CFRP strip) is expected as a new material of repair and strengthening for steel structures, since the CFRP strip is light weight, high strength and high-corrosion resistance. In this paper, using CFRP strips, the repair method of fatigue cracks in the out-of-plane welded gusset joints is investigated experimentally. The fatigue tests are carried out varying the layers of laminated CFRP strips. As a result, it is found that the fatigue life is drastically improved, as the layers of laminated CFRP strips increases and that the sufficient repair effect is obtained in the laminated CFRP strips of 5 layers. Moreover, it is confirmed that the laminating of CFRP strips is effective for peeling prevention and sharing axial force.

Keywords: CFRP 板, 補修, 疲労, 溶接継手, 積層
Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips, Repair, Fatigue, Welded Joint, Lamination

1. はじめに

近年、鋼橋では、交通量の増加や大型車両の通行による疲労損傷が数多く報告されている¹⁾。このような疲労き裂の発生部位は、部材の取り合いが複雑な狭隘部であることが多く、補修・補強の際には作業性が悪いため、簡便かつ効率的な補修方法が望まれている。

このような課題に対して、著者らは、補修・補強のための新材料として期待されている炭素繊維強化樹脂板（以下、CFRP と呼ぶ）を、エポキシ樹脂接着剤を用いて貼付することにより補修を行う方法を提案し、検討を行ってきた²⁾。

具体的には、面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂を補修の対象として、CFRP 板の貼付位置や、接着剤の物性値が補修効果に及ぼす影響を検討した結果、面外ガセットの溶接ビードに密着するように、CFRP 板の中央部に矩形の切り込みを入れて、積層して接着すれば、無補修に対

して補修後の余寿命が十数倍になるなど、十分な延命効果が得られることが解った。このように、補修効果が確かめられたものの、今後、補修工法として確立するためには、CFRP 板の必要な積層数など、施工のための設計条件を明確にしておく必要がある。

そこで、本研究では、これまでの検討結果を踏まえ、より適切な補修方法を検討するために、CFRP 板の積層数を変化させ、補修後におけるき裂進展の抑制効果に着目し、実験的な検討を行った。なお、研究の継続性の観点から、補修対象は、既往の研究と同様に、面外ガセット溶接継手部から発生した疲労き裂とした。

2. 実験方法

2.1 試験片と材料特性

疲労試験に用いた試験片を図-1 に示す。鋼板 (250×9×1040) の中央部の両面にガセット (100×9×

* 修(工) 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 助手 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

** 修(工) 戸田市 都市整備部 (〒335-0021 戸田市大字新曾 1603-1)

*** 工博 明星大学 理工学部 建築学科 教授 (〒191-8506 日野市程久保 2-1-1)

**** 工博 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境コース 教授 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1)

***** 工修 (株)東京鐵骨橋梁 技術本部 技術開発部 (〒108-0023 港区芝浦 4-18-32)

本論文の一部は土木学会第 60 回年次学術講演会にて発表。

140)を回し溶接して試験片を作製した。鋼板, CFRP板およびエポキシ樹脂接着剤の機械的性質を表-1に示す。今回使用したCFRP板は, 炭素繊維が長手方向にのみ配置され, 樹脂で硬化させた厚さ1.2mmの一方向強化材である。

2.2 荷重方法と補修時のき裂長さ

図-2に示すI形断面の荷重桁に試験片を高力ボルトで接合し, 4点曲げにより荷重を行った。長さ1,600mmの等曲げ区間を利用して, 試験片に引張応力を作用させることとした。また, 荷重の波形は正弦波とし, 最小応力を約20MPaの一定値として, 最大応力を変化させることで, 応力範囲を64~114MPaとした。荷重には容量1,000kNの電気油圧式サーボアクチュエータを使用し, 荷重速度は2Hzとした。

本研究では, き裂が発生した後の補修を目的としていることから, き裂を発生させるために, まず繰返し荷重を行った。試験片の中心から幅方向へのき

裂長さ a が約15mmまで達した時に荷重を止め, 荷重桁から試験片を一旦取り外して後述する方法で補修を行った。このき裂長さについても補修に対して重要なパラメータとなるが, き裂発生を検出精度, ビード形状のバラツキ, および, 試験片の全幅に対するき裂長さの関係等を考慮して, ここでは, 片側あたりのき裂長さ a を15mm(試験片の全幅250mmに対して12%のき裂に相当)と設定した。

なお, 試験開始前にあらかじめ, 試験片の片側の回し溶接止端部をグラインダーで仕上げ, 応力集中を緩和させ, き裂の発生を片側のみから生じるようにしている。

2.3 CFRP板の接着方法

検討した2つのシリーズにおけるCFRP板の貼付位置を図-3に示す。前述の通り, 図-3では, 溶接止端部から発生したき裂が両側に進展し, 片側あたりのき裂長さが約15mmに達した時に補修を行うこと

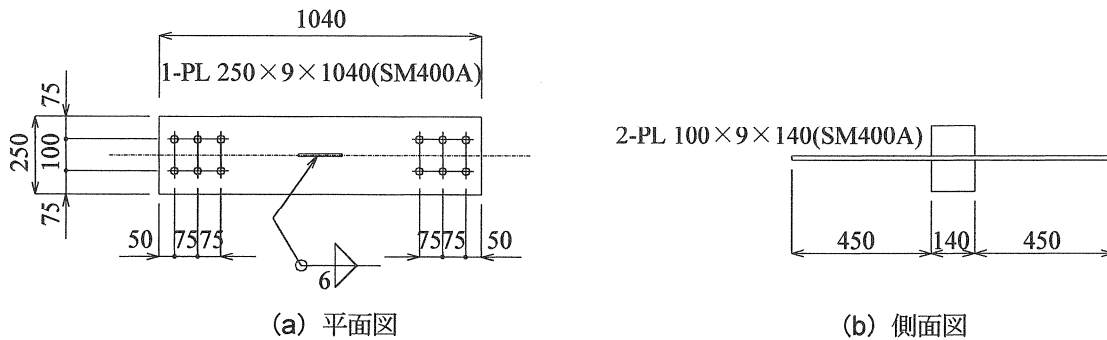


図-1 試験片形状

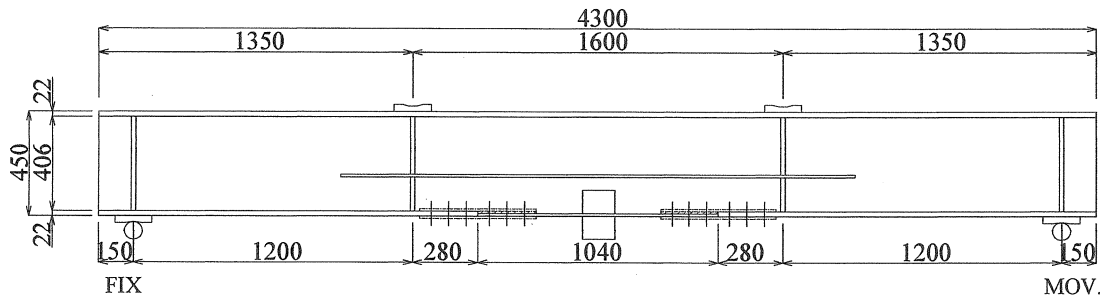


図-2 荷重桁

表-1 鋼板, CFRP板およびエポキシ樹脂接着剤の機械的性質

	鋼板 (SM400A)	CFRP板	エポキシ 樹脂接着剤
降伏点 (MPa)	293	—	—
引張強度 (MPa)	453	2664	30
破断伸び (%)	23	1.9	—
弾性係数 (GPa)	204.5	188.0	1.5

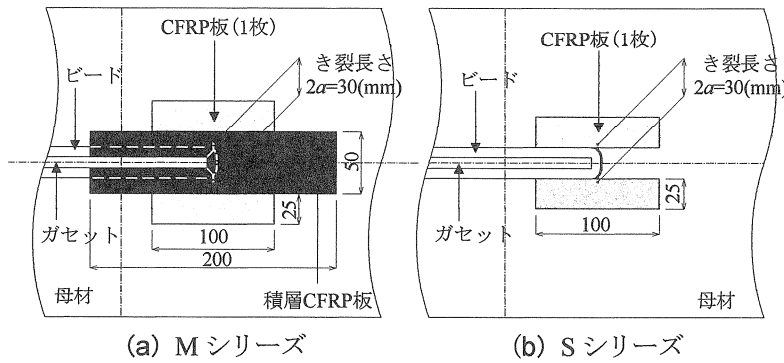


図-3 CFRP 板の貼付位置

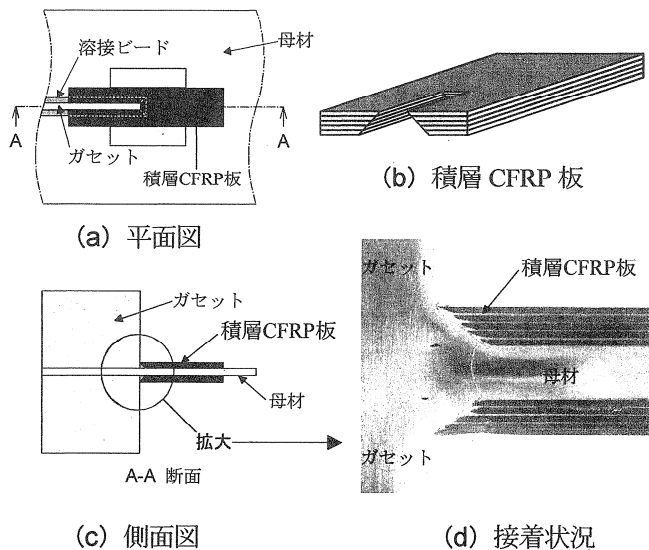


図-4 M5 シリーズにおける CFRP 板層部の貼付方法

表-2 実験シリーズ

シリーズ	補修方法
N	無補修
S	図-3 (b) CFRP板両側1枚
M1	図-3 (a) 積層CFRP板1枚
M3	図-3 (a) 積層CFRP板3枚
M5	図-3 (a) 積層CFRP板5枚

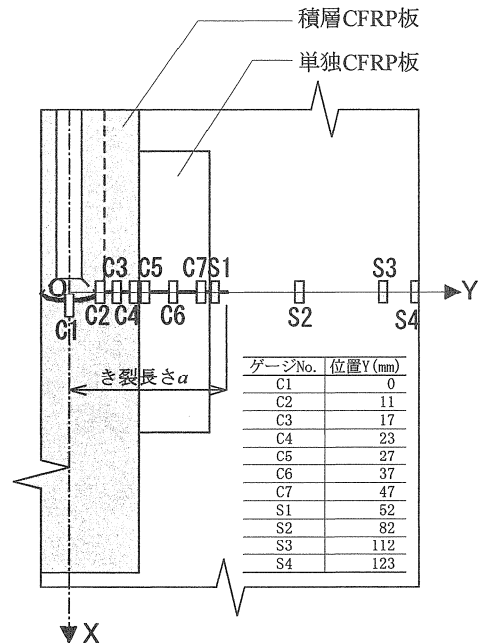


図-5 M シリーズにおけるひずみゲージ位置

をそれぞれ示している。

まず、Mシリーズの補修方法を図-3 (a) および図-4 に示す。具体的な補修の手順は以下の通りである。

- ①接着性を向上させるため、溶接ビードの断面形状を、8mm程度の等脚にペンシルグラインダーで仕上げる。
- ②図-4 (b) に示すように、CFRP板(50×1.2×200)に、矩形の切り込みを入れ、切り込み部が溶接ビードに密着するように、段階的にCFRP板を積層して接着する。
- ③さらに、幅方向の両側に隣接して、1層の単独CFRP板(25×1.2×100)を貼付する。

本研究では、CFRP板の積層数が補修効果に及ぼす影響を把握するため、中央部のCFRP板の積層数を1, 3, 5層と変化させて補修を行った。このMシリーズでは、積層したCFRP板を溶接ビードに密着して、き裂の開口部を完全に覆い、開口量を抑制することにより、補修効果をより高めることを想定し

ている。ガセット取り付け位置の溶接止端部は、き裂開口部の中心であり、この位置で開口量が最大となるためである。Mシリーズでは、CFRP板や鋼板の応力状態を把握するため、図-5に示すように、き裂進展上に、または、き裂の進展が予測される位置にひずみゲージを取り付けた。

さらに、Mシリーズとの比較のためにSシリーズを設定した。図-3 (b) に示すように、CFRP板(25×1.2×100)をガセットの両側に、エポキシ樹脂接着剤で1枚ずつ貼付して補修を行う。このシリーズでは、応力集中が最も高くなるき裂の先端にCFRP板がちょうどかかる位置で補修を行い、き裂先端の過大な応力集中を緩和することを想定している。

なお、全シリーズで、CFRP板の貼付による補修は、例えば図-4 (c) に示すように、試験片の両面に対して行っている。

また、今回用いた接着剤は常温硬化型であり、実施工においても養生のための特別な機器を必要とせ

ず、一日で所要の強度が得られるが³⁾、接着剤の養生条件によるバラツキをなくすため、CFRP板の貼付後は無負荷の条件下で、一週間、保温養生を行っている。

実験シリーズを表-2に示す。無補修を含め、合計5つのシリーズで疲労試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労試験結果

得られた疲労試験結果を、補修後から破断までの疲労寿命で整理するために、各指標をここでは以下のように定義する。

N_f : 試験開始から破断までの繰返し回数 (以下、全寿命と呼ぶ)

N_i : 試験開始からき裂長さ a が約 15mm まで進化したときの繰返し回数 (以下、初期き裂発生寿命と呼ぶ)

N_p : き裂長さ a が 15mm (補修後) から 125mm に到達 (破断時) するまでの繰返し回数 (以下、余寿命と呼ぶ)

また、 N_f , N_i および N_p の関係は次式で表せる。

$$N_f = N_i + N_p \dots \dots \dots (1)$$

一般に、初期き裂発生寿命 N_i は、残留応力や溶接ビード形状等の初期条件のバラツキに大きく依存する。今回の実験において N_i は 40 万~420 万回の範囲であった。したがって、き裂が約 15mm に達した後

の補修効果を評価するために、余寿命 N_p を用いて試験結果を整理することとした。

各シリーズの疲労試験結果を図-6に示す。図中に回帰線を併記したが、式で表せば以下の通りである。

$$N : \Delta\sigma_n = 5970(N)^{-0.34} \quad (10 \text{ 万回} \leq N \leq 55 \text{ 万回})$$

$$S : \Delta\sigma_n = 2727(N)^{-0.26} \quad (25 \text{ 万回} \leq N \leq 225 \text{ 万回})$$

$$M1 : \Delta\sigma_n = 3147(N)^{-0.26} \quad (29 \text{ 万回} \leq N \leq 240 \text{ 万回})$$

$$M3 : \Delta\sigma_n = 2499(N)^{-0.23} \quad (47 \text{ 万回} \leq N \leq 172 \text{ 万回})$$

$$M5 : \Delta\sigma_n = 7311(N)^{-0.29} \quad (169 \text{ 万回} \leq N \leq 1227 \text{ 万回})$$

... (2)~(6)

まず、無補修の N と比較して、いずれのシリーズにおいても有意な疲労寿命の増加が認められる。特に、 M シリーズでは、CFRP板の積層数が増えるほど、余寿命が延びる傾向を示すことが解る。これは、き裂中心の開口部が積層されたCFRP板により、高い剛性で補修され、き裂の開口変位が十分に抑制されたためと考えられる。

また、積層数が1層の $M1$ と、溶接ビードの両側に1枚ずつ貼付した S を比較すると、回帰線から判断される疲労強度は、 $M1$ の方が若干高くなっているが、実験データのバラツキを考慮すれば、 $M1$ と S の補修効果は同程度であるといえる。なお、後述するように、 S における $\Delta\sigma_n = 84$ (MPa) のケースでは、検出精度の関係から補修時のき裂長さが 21.8mm であった。このため、余寿命 N_p が回帰線から大きく離れたと判断される。

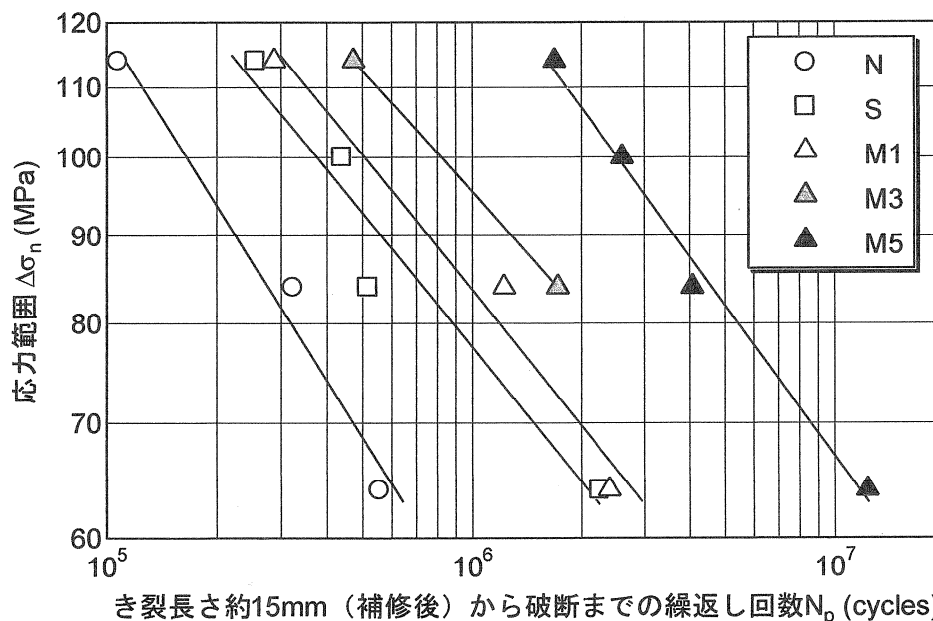


図-6 S- N_p 線図

さらに、最も補修効果の高かった M5 では、 $\Delta\sigma_n=64$ (MPa) 時の余寿命 N_p が 1,200 万回を超えるものの、今回の実験の応力範囲 (64~114MPa) では、疲労限は得られなかった。したがって、余寿命の延命化に対しては効果的であるが、今回の補修方法では疲労き裂の再発生を防止するまでには至らないといえる。

3.2 疲労き裂の進展特性

疲労き裂の進展特性として、各応力範囲におけるき裂長さ a と繰返し回数の関係を図-7 に示す。ここで、繰返し回数は、前節と同様に、き裂長さ a が約 15mm に到達した時 (補修後) を基準として整理した。また、補修を行ったシリーズでは、CFRP 板の横に取り付けたクラックゲージを用いて、約 50~80mm の範囲でき裂長さ a を計測している。なお、CFRP 板を貼付した領域では、き裂の進展を計測することができないため、図中では点線で示している。

図より、応力範囲に関わらず、全てのシリーズで同様の傾向を示し、M シリーズでは、CFRP 板の積層数が増えるほど、き裂進展が遅延することが解る。

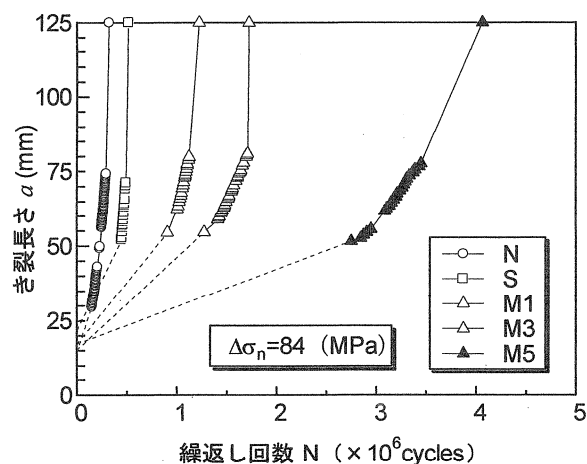
積層数が同じ S と M1 で比較した場合、前節で示した通り、応力範囲が 64, 114MPa では、き裂進展の差異は小さいことが解る。また、応力範囲が 84MPa では、両者でき裂の進展に差異が認められるが、S では補修時の初期き裂が 21.8mm と長かったため、き裂の進展が早まったと考えられる。

また、点線で示した補修後からき裂が再検出されるまでの範囲、および、き裂の進展が計測された 50~80mm の範囲における疲労寿命は、積層数が増えるほど延びる傾向を示すが、計測の範囲を超える

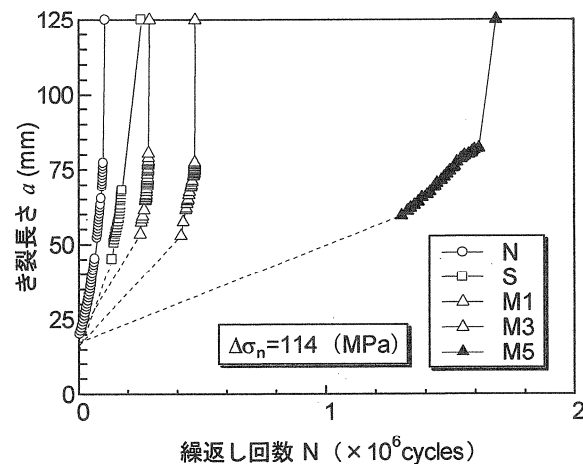
80mm 以上で、M5 以外は、き裂の進展が急激に進み、間もなく破断に至っていることが解る。これは、M5 では、破断の直前まで CFRP 板が剥離しなかったのに対し、M5 以外では、き裂長さが試験片の全幅に対して 60~65% 程度まで進展すると剥離が生じたためであった。 $\Delta\sigma_n=64$ (MPa) 時の M5 では、破断近くまでき裂の進展を計測しているが、CFRP 板は剥離しなくても、き裂長さが 95mm (試験片の全幅に対して約 75% のき裂に相当) 以上に達するとき裂の進展が急激に進むことが解った。

3.3 き裂進展に伴う CFRP 板と鋼板の力学的特性

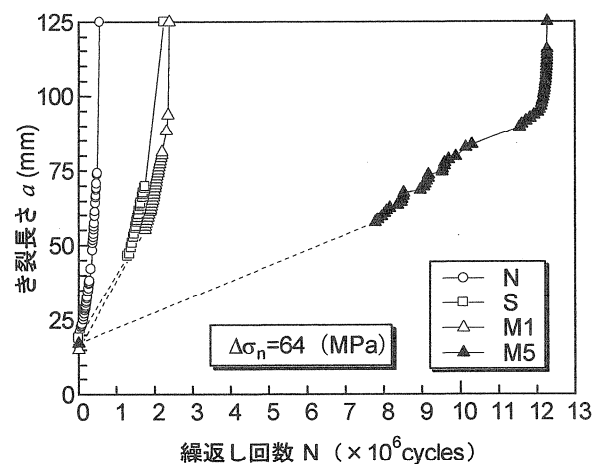
以上のことから、CFRP 板を積層すれば補修効果がより高められることが確かめられたが、その効果をより具体的に示すために、CFRP 板に作用する応力性状と積層数の関係や、き裂進展に伴う各部の応



(b) $\Delta\sigma_n=84$ (MPa)



(a) $\Delta\sigma_n=114$ (MPa)



(c) $\Delta\sigma_n=64$ (MPa)

図-7 き裂長さ a と繰返し回数の関係

力の変化について考察する。

応力の着目点は、図-5 に示した通りであり、補修後に再開した疲労試験中 ($\Delta\sigma_n=64\text{MPa}$) に、静的載荷試験を M1 で 5 回、M5 で 11 回それぞれ実施して計測を行った。試験片の作用応力 σ_n は、応力範囲 64MPa における最大応力の 82MPa とした。

3.3.1 CFRP 板および鋼板の応力分布

図-8 に、M1 および M5 における CFRP 板と鋼板の長手方向の応力分布を示す。き裂が進展し、CFRP 板の貼付域を貫通してき裂の存在が確認された時を、「き裂再検出時」と表示している。

まず、図-8 (a) に示した M1 については、補修時には試験片中央部に近づくほど応力が高くなる分布を示している。積層 CFRP 板 (M1 の場合、1 層) では、繰返し回数の増加に伴って、ガセット中心部の C1 で接着が切れるため応力が伝達されなくなること、また、C2~C4 で応力が増加し、C3 で最大とな

り 300MPa 以上の高い応力となることが解る。さらに、単独 CFRP 板では、き裂の進展に伴って応力が高くなり、CFRP 板の貼付域を貫通すると、250~300MPa 程度の高い応力を負担することが解る。

一方、図-8 (b) に示した、M5 については、応力分布の傾向は M1 とほぼ同じといえるが、積層 CFRP 板における C2~C4 の応力がかなり小さくなる点が M1 と大きく異なる。また、C1 でも小さな応力ではあるが、約 35MPa 程度の応力を伝達していることが解る。なお、下層部の CFRP 板の応力分布については、実験では直接把握することができないため、FEM 解析による検討が待たれるが、解析的な検討を行った既往の研究⁴⁾からは、上層部の CFRP 板は、応力伝達に関しては有効に機能しないとの結果が得られている。したがって、下層部の CFRP 板の応力分布は、図-8 (b) に示した値よりもより高くなると予想される。

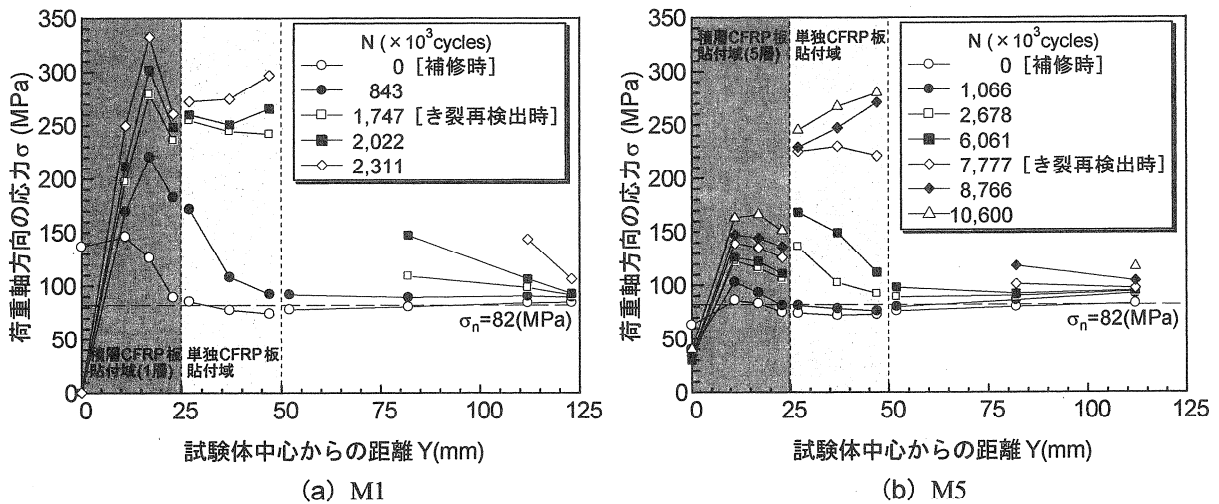


図-8 CFRP 板および鋼板の応力分布

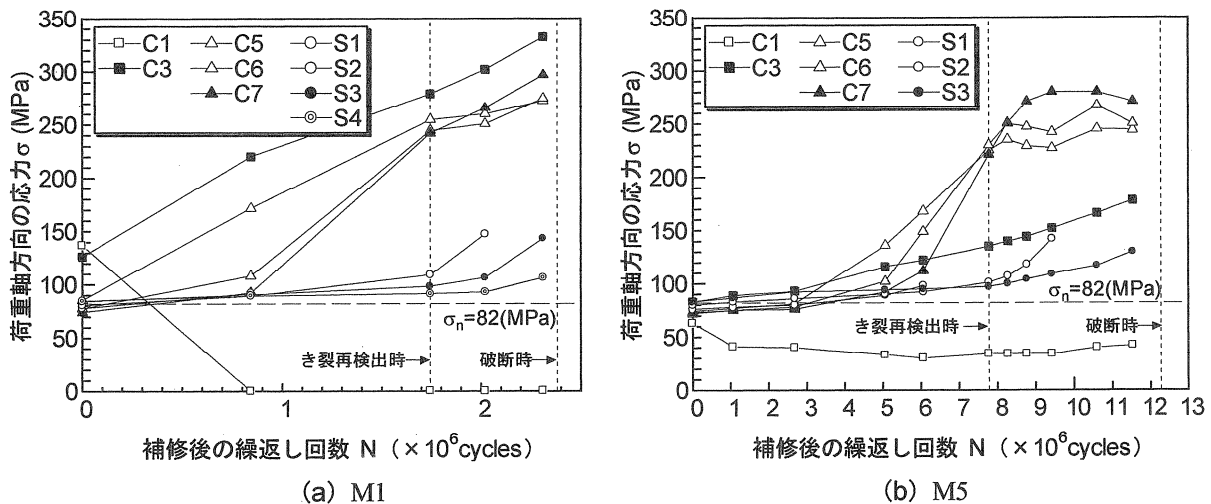


図-9 繰返し回数と CFRP 板および鋼板の応力の関係

3.3.2 き裂進展に伴う各部の応力性状

図-9 に、M1 および M5 における補修後の繰返し回数と CFRP 板および鋼板の応力の関係をそれぞれ示す。図より、繰返し回数の増加に伴って、き裂が進展するため、全体的に応力が増加する傾向を示すことが解る。一般に、き裂の進展とともに開口量は増大するが、CFRP 板で開口部を補修した場合、CFRP 板が応力を負担し、開口量を抑制する。今回の補修方法では、き裂の再発生を防止するまでには至らないため、き裂の進展に伴って CFRP 板が負担する応力が高くなると考えられる。

このような観点から、補修時の初期き裂長さ約 15mm に最も近い C3 に着目すると、M1 では、ほぼ直線的に応力が増加すること、また、M5 では、M1 よりかなり緩やかではあるが、補修後から微増していることが解る。したがって、疲労き裂は補修の直後から進展していたと判断される。

また、単独 CFRP 板上の C5~C7 に着目すると、M1 では計測データが少ないため判断し難いが、M5 では、繰返し回数の増加に伴って C5~C7 の順に応力の立ち上がりが見られる。したがって、単独 CFRP 板の貼付域におけるき裂 ($a=25\sim50$ (mm)) は、繰返し回数が 300~750 万回の範囲で進展したものと予測される。

さらに、積層数による補修効果を検討するために、き裂長さと各着目点の応力の関係について、シリーズごとに示したものを図-10 に、また、M1 と M5 を比較するために代表点を抜粋して示したものを図-11 にそれぞれ示す。

図-11 より、積層 CFRP 板上の C3 では、M5 の方がかなり小さくなること、また、単独 CFRP 板上の C6 では、ほぼ同程度であることが解る。さらに、鋼板上の S2, S3 に着目すると、いずれの点においても M5 の方が小さくなり、き裂の先端に近い S2 ほどよ

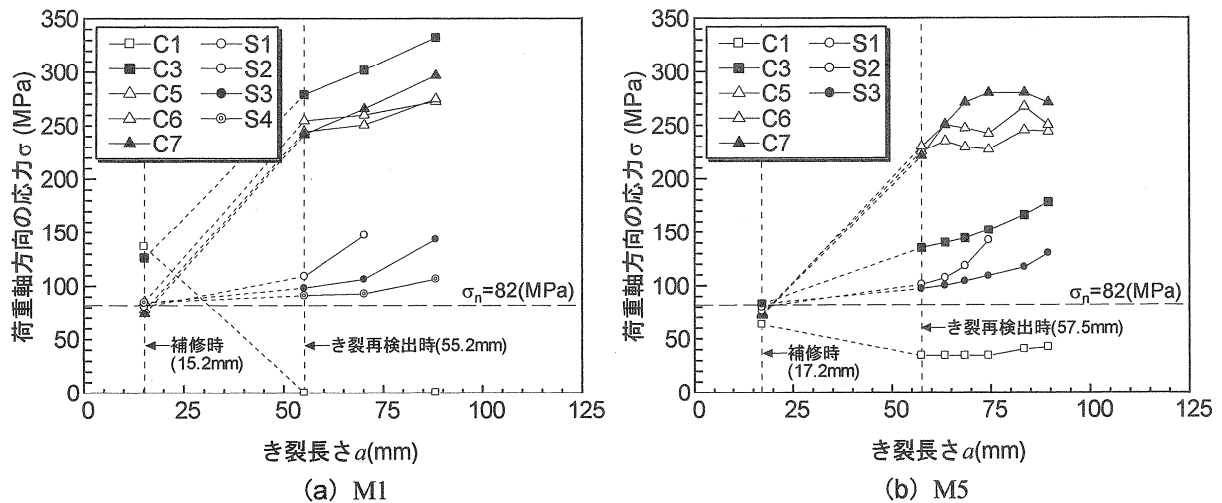


図-10 き裂長さと CFRP 板および鋼板の応力の関係

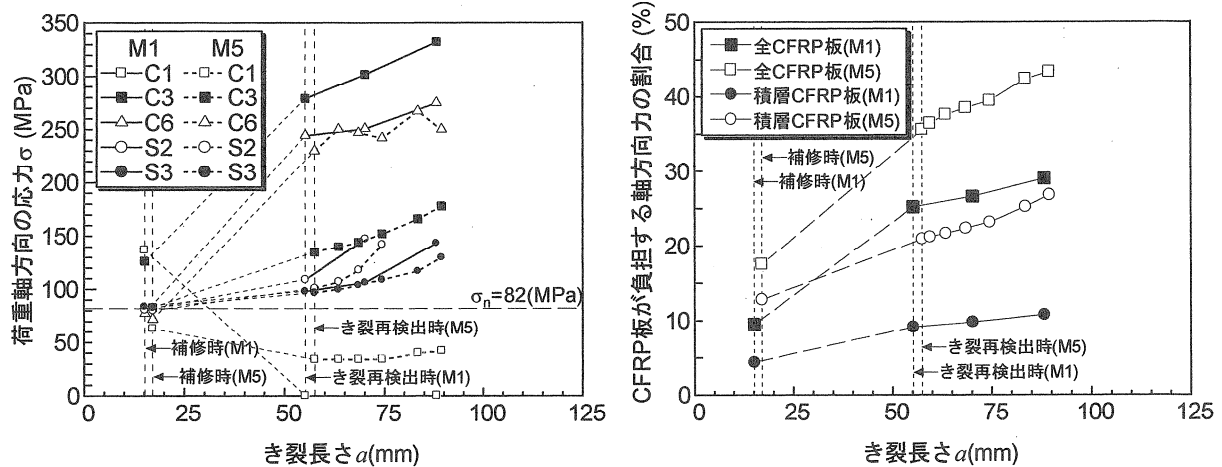


図-11 主要な着目点における M1 と M5 の比較

図-12 CFRP 板が負担する軸方向力の割合

り低下する傾向が見られる。したがって、積層 CFRP 板がより多くの作用応力を負担するため、鋼板の応力が低減されて、補修効果が高まったと考えられる。

3.3.3 CFRP 板が負担する軸方向力

CFRP 板は一方向強化材であり、繊維方向をき裂の進展に対して直角に配置すれば有効に機能する。ここでは、CFRP 板が負担する軸方向力（引張力）を概略的に把握するため、図-8 に示した CFRP 板の軸方向の応力分布に基づいて算定する。算定条件として、試験片中心からの距離が 11mm 以下では応力の負担が小さいため、有効な断面積からは除外する。また、計測された応力が厚さ方向に均等に分布するものと仮定する。この条件の下で算定される結果は、既往の研究結果⁴⁾から判断すると、CFRP 板が負担する軸方向力を小さめに評価することになる。さらに、試験片の断面に作用する軸方向力は、作用応力 ($\sigma_n=82\text{MPa}$) と試験片断面積の積から 184.5kN となる。ここでは、計算結果を、本実験の範囲において相対的な比較を行うために、試験片断面の軸方向力に占める CFRP 板の軸方向力の割合として整理する。

図-12 に算定結果を示す。図中には、全 CFRP 板が負担する割合だけでなく、積層 CFRP が負担する割合も併記している。図より、CFRP 板の断面積が大きい M5 の方が補修時から軸方向力を負担する割合は高いことが解る。また、き裂再検出時において全 CFRP 板が負担する割合は、M1, M5 でそれぞれ約 25, 35%であった。さらに、以降のき裂進展においても M5 の方が負担率がより増加することが解る。また、負担率の内訳に着目すると、CFRP 板の断面積に強く依存するため、M5 では積層 CFRP 板で、M1 では単独 CFRP 板で、負担率が大きくなっていることが解る。以上のことから、き裂の中央部付近を積層 CFRP 板で補修する方法は、試験片に作用する軸方向力を多く負担していることが示された。

4. まとめ

面外ガセット溶接継手から発生した疲労き裂に対して、CFRP 板をエポキシ樹脂接着剤で貼付することにより補修を行い、CFRP 板の積層数が補修効果に及ぼす影響を実験的に検討した結果からは、次のことがいえた。

- (1) CFRP 板の積層数が増えるほど、余寿命が大幅に改善され、積層数を 5 層とすれば十分な補修効果が得られることが確かめられた。
- (2) CFRP 板の積層化は、剥離防止に対しても有効であること、また、き裂開口部の中心付近で荷重が伝達されるため、軸方向力の負担に対しても効果的であることが解った。
- (3) 対象とした応力範囲からは疲労限は得られなかった。したがって、き裂の再発生を防止するまでには至らないため、提案した補修方法は延命化のための応急的な対策として位置づけられる。

さらに、今回提案した補修方法を実用的な工法として確立するためには、溶接ビードの仕上げの必要性や、負荷状態での CFRP 板の接着性などに対する検討が挙げられる。これらについては今後の課題としたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、新日本石油(株)およびコニシ(株)より実験材料を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。また、本研究の一部は、平成 17 年度文部科学省科学研究費 若手研究(B) (研究代表者：中村一史, No.17760377) の助成を受けた。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.
- 2) 中村一史，諸井敬嘉，鈴木博之，前田研一，入部孝夫：溶接継手に発生した疲労き裂の CFRP 板による補修，鋼構造年次論文報告集，第 12 巻，日本鋼構造協会，pp.425-430，2004.11.
- 3) 板垣一也，渡邊憲市，鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板（カーボン板）による鋼橋補強の事例，第 8 回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集，日本鋼構造協会，pp.49-54，2002.6.
- 4) 鈴木博之，岡本陽介：炭素繊維強化プラスチック板を用いた疲労き裂の補修，鋼構造年次論文報告集，第 11 巻，日本鋼構造協会，pp.465-482，2004.11.