

ガラス繊維強化プラスチックの貼付による疲労耐久性向上に関する研究

— 実構造ディテールを反映した継手の疲労試験 —

Experimental study on application of glass fiber reinforced plastic for improvement of fatigue strength of welded joints

— Fatigue tests of welded joints considered details of real structures —

稲葉 尚文*, 富田 芳男**, 紫桃 孝一郎***, 鈴木 博之****, 小池 洋平*****

Naofumi Inaba, Yoshio Tomita, Koichiro Shito, Hiroyuki Suzuki and Yohei Koike

*工修, (株)高速道路総合技術研究所, 道路研究部橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

**工修, 国際協力銀行, 開発セクター部 (〒100-8144 東京都千代田区大手町 1-4-1)

***東日本高速道路(株), 関東支社三郷管理事務所 (〒341-0056 埼玉県三郷市番匠免 2-101-1)

****工博, 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)

*****工修, (株)横河ブリッジ, 技術本部技術研究所 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

A new method using glass fiber reinforced plastic (hereinafter called GFRP) to improve the fatigue strength of welded joints has been proposed, and the effect has been estimated analytically and experimentally for simple welded joints. However, the performance of GFRP was not confirmed for welded joints simulated real structure details. Therefore a series of fatigue tests and FEM analyses for the specimens reflected the details of ready-made bridges were carried out to inspect the applicability to bridges. As results, an equal effect of GFRP was identified as simple welded joints and the mechanism how GFRP improved the fatigue strength was clarified.

Key Words: glass fiber reinforced plastic, fatigue test, preventive maintenance

キーワード: ガラス繊維補強強化プラスチック, 疲労試験, 予防保全

1. はじめに

鋼橋においては、老朽化とともに、法規改定による交通荷重の増大および大型車交通量の増加などに起因した溶接部の疲労損傷が鋼上部工または鋼製橋脚に発見され、その対策が急務となっている。また、道路橋に疲労設計が適用される以前に建設された橋梁については、建設時に明確な疲労設計がされていないため、適切な補修・補強により延命化することで、合理的に維持管理を進めていく必要がある。

一方、将来にわたる維持管理の負担低減のため、従来のようにき裂が発生してから補修するのではなく、今後損傷が予想される部位は、塗装塗り替え時などに事前に補強する予防保全の必要性が指摘されている。

既設鋼橋の補強方法としては、溶接あるいは高力ボルトによる補強部材の取付が一般的であるが、溶接については、現地の環境から品質の確保が困難な場合もあり、高力ボルトについては、母材に断面欠損が生じることや、ボルト設置空間が必要なことから狭隘な部位への適用が難しいなどの問題がある。また、疲労き裂に対する応

急処置的な補修方法としてはストップホールが一般的であるが、この方法はドリルによりき裂先端に孔をあけるため、溶接線上のき裂や部材が輻輳した部位などでは適用できない場合がある。

以上のような背景から、筆者らはより適用範囲が広く、予防保全方法と応急処置方法とを兼ねた簡便な疲労損傷対策として、疲労き裂発生が予想される部位に紫外線硬化型のガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRPと称す）を貼付する方法に着目し、検討を行ってきた。GFRPの貼付は、上記の一般的な補修・補強方法と比較し、母材にほとんど手を加えないことから、既設橋梁の延命策として、有効な方法になり得るものと考えられる。これまで、リブ十字継手や面外ガセット継手を模擬した小型試験体において、GFRP貼付の有無をパラメータとした疲労試験およびFEM解析を実施し、GFRPの疲労耐久性向上効果およびそのメカニズムについて実験的および解析的検討を行ってきた。その結果、GFRPを溶接部に貼付することにより疲労寿命は向上し、そのメカニズムは、GFRPが荷重を分担し応力を低減させる効果、プライマーが溶接部を仕上げることに類似した効果、き

裂開口変位を抑制する効果など複合的な要因があると推測している^{1)~3)}。

現在までの検討は、リブ十字継手や面外ガセット継手など小型試験体を対象としたものであった。実橋で疲労損傷の発生事例の多い対傾構取合部、ソールプレートのみわし溶接部および鋼道路橋の疲労設計指針⁴⁾において主桁1次応力による疲労損傷に注意が必要とされた主桁ウェブとガセットプレートの溶接部の3種類の溶接継手を対象とし、実構造を反映した試験体（以下、中型試験体と称す）を用いた疲労試験を実施し、小型試験で得られた疲労耐久性向上効果が、実構造のディテールにおいても得られることを確認した。

なお、本研究は実構造ディテールでのGFRPの効果の検証を目的としており、疲労耐久性向上のメカニズムについては、文献2)に譲ることとする。

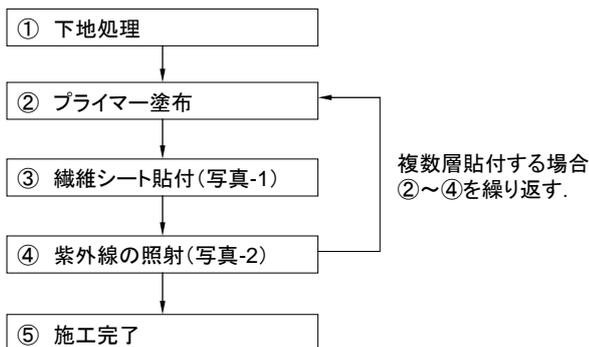
2. GFRP の施工

2.1 GFRP の概要

本試験では、疲労き裂の発生起点となる部位にGFRPを貼付し、当該部の疲労耐久性の向上させることを目的とする。使用したGFRPは、紫外線硬化型エポキシアクリレート樹脂をガラス繊維で強化したものである。紫外線を照射すると速やかに硬化する特性（紫外線強度1,000~2,000 μW/cm²で20~40分で硬化）を有しており、本試験では、2層接着させた。使用したGFRPの材料特性

表一 1 GFRP の材料特性

GFRP層厚 (mm)	一方向材		チョップ材	
	1.0		1.5	
静弾性係数 (N/mm ²)	GFRP	1.4×10 ⁴	GFRP	8.1×10 ³
	ガラス繊維	9.6×10 ⁴	ガラス繊維	9.6×10 ⁴
	樹脂	4.6×10 ³	樹脂	4.6×10 ³
引張強度 (N/mm ²)	GFRP	200	GFRP	114
	ガラス繊維	1400	ガラス繊維	1400
	樹脂	52	樹脂	52
繊維含有量 (w/w %)	22~36		25~31	



図一 1 GFRP の施工手順

を表一 1に示す。表中の一方向材とは、ガラス繊維が一方向に配置されたGFRPであり、主応力の方向が明確な部位に適用する。また、チョップ材とは、ガラス短繊維がランダムに配置されたGFRPであり、一方向材と異なり、主応力方向が不明確な部位に適用する。

GFRPの静弾性係数は、鋼の1/25~1/15程度であり、引張強度も114, 200 (N/mm²)とSS400材の公称値の1/4~1/2程度である。

また、経年劣化や温度依存性などの耐久性に関しては、補修・補強材料として使用する限り、実用上許容できる範囲であることが確認されている⁵⁾⁶⁾。

2.2 GFRP の施工方法

GFRPの貼付施工の流れを図一 1に、各工程の写真を写真一 1、写真一 2に示す。GFRPは柔軟性に富み、溶接継手のような複雑な部位にも適用が可能であり、施工はプライマーで鋼部材に貼付するのみで専門的な技術は必要としないという長所を有している。各工程の概要は以下のとおりである。

① 下地処理

GFRPを貼付する鋼材面をディスクグラインダー等でケレンし、貼付面の異物を除去し、付着性を向上させる。本試験では120番のベルトサンダーおよび100番の研磨



写真一 1 GFRP の貼付状況



写真一 2 紫外線照射状況

紙でケレンし、GFRPによる疲労耐久性向上効果を確認するため、溶接ビードや溶接止端は削らないように留意した。

② プライマー塗布

下地処理後、GFRP貼付面に常温硬化型のプライマーパテ（以下、プライマーと称す）を塗布する。このプライマーは、エポキシアクリレート樹脂であり、GFRPに含まれているものと同様である。

③ GFRP貼付

GFRPを貼付面積に合わせてカッター等で成形し、プライマーを介して鋼材面に接着させ、へらを使用してGFRP中央から外に向かって空気を逃がし、十分に密着させる。

④ 紫外線の照射

GFRP貼付部をアルミ箔等で覆い、反射板を取り付けた紫外線蛍光灯を照射する。照射時間は20～30分程度である。

GFRPを積層する場合は、②～④の作業を繰り返し実施する。

3. 対傾構取合部の疲労試験

3.1 試験概要

対傾構取合部を対象とした疲労試験体（以下、対傾構モデルと称す）の全体図を図-2に、対傾構取合部詳細

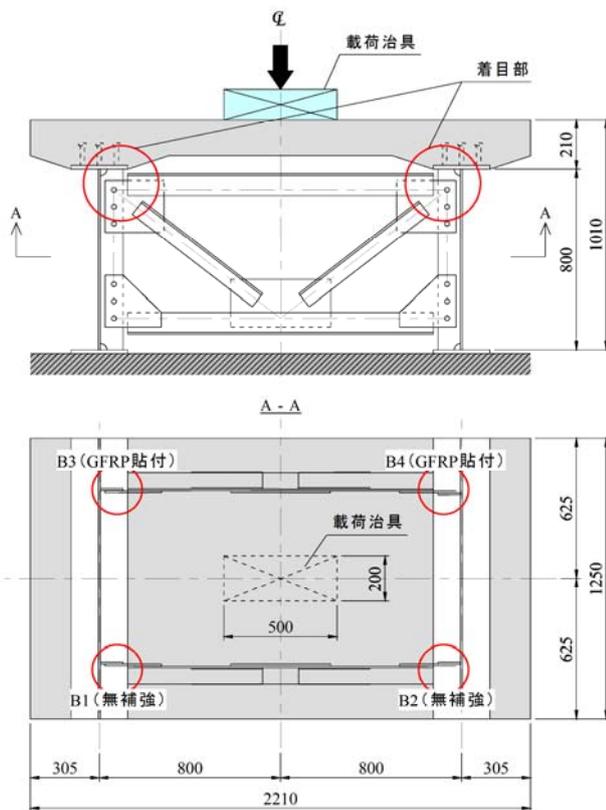


図-2 対傾構モデルの全体図

を図-3に示す。対傾構取合部の疲労損傷は、床版支間が大きく、床版厚が薄い橋梁において多数発見され、輪荷重載荷により発生するRC床版のたわみに起因する主桁上フランジの首振り変形と隣接する主桁間の相対たわみ差が主な発生原因である⁷⁻⁹⁾。本試験では、特に前者の発生原因を考慮した試験体形状とした。

試験体は、実橋の1/2程度の縮小モデルであり、主桁間隔1.6mとした。橋軸方向に対傾構を2組設けることにより、1体の試験体に4箇所に着目部を設けることとした。主な着目部は、①上フランジおよびウェブと垂直補剛材の溶接部、②ガセットプレートと上弦材の溶接部であり、これらの部位については、既設橋梁と同じ構造詳細とした。コンクリート床版と鋼主桁はスタッドによる接合とし、コンクリート床版の疲労損傷を防止するため、コンクリートは早強コンクリートで目標強度を40N/mm²とした。また、床版の押抜き破壊を防ぐため、主方向鉄筋は、上側でD22を150ピッチ、下側でD22を125ピッチで配置し、配力方向鉄筋は、上下ともD19を150ピッチで配置した。スタッドはφ19高さ100mmを用いた。

試験体は2体とし、表-2に示すように、それぞれの試験体で応力振幅を変化させた。表-2中のSB-1rについては、SB-1で1,000万回載荷しても疲労き裂が発生しなかったため、同一試験体で応力振幅を上げて再試験したケースである。また、図-2に示すように、計4箇所に着目部のうち、半数を無補強 (B1, B2)、残り半数にGFRP

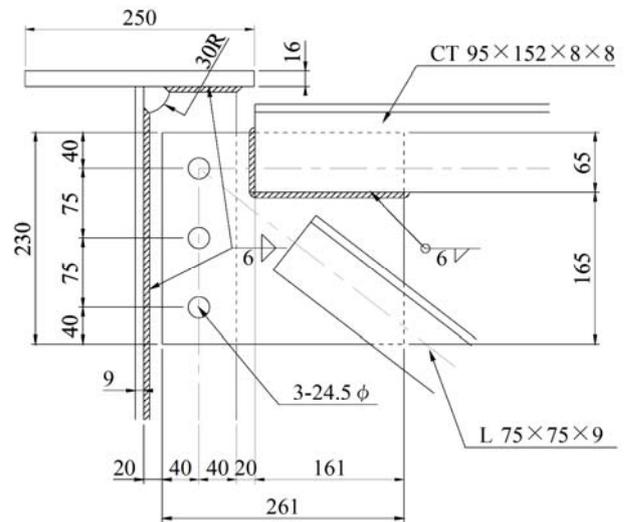


図-3 対傾構モデルの着目部詳細

表-2 対傾構モデル各ケースの応力振幅

試験ケース	最小主応力範囲 $\Delta\sigma$ (N/mm ²)	最小荷重 P_{min} (kN)	最大荷重 P_{max} (kN)
SB-1	125	10	140
SB-1r	155	10	163
SB-2	190	10	204

の貼付 (B3, B4) を行った。なお、着目部における主応力の方向は明確ではなく、各溶接部位によって異なるため、GFRPは繊維に方向性の無いチョップ材を2層貼付した。GFRP貼付位置を図-4に示す。なお、ひずみゲージの貼付によって、GFRPの剥離が誘発されないように、全てのモデルにおいて、後述の写真-3に示すようにGFRP貼付面はひずみゲージのゲージリードを被覆しないこととした。

荷重方法は、床版支間および対傾構間隔中央に200mm×500mmの治具を介して、垂直補剛材回し溶接部4箇所(図-4参照、図-5中の④ゲージ)の最小主応力範囲(P_{max} と P_{min} 荷重時における最小主応力の差)の平均値が、表-2に示す応力振幅となるように荷重制御により荷重した。

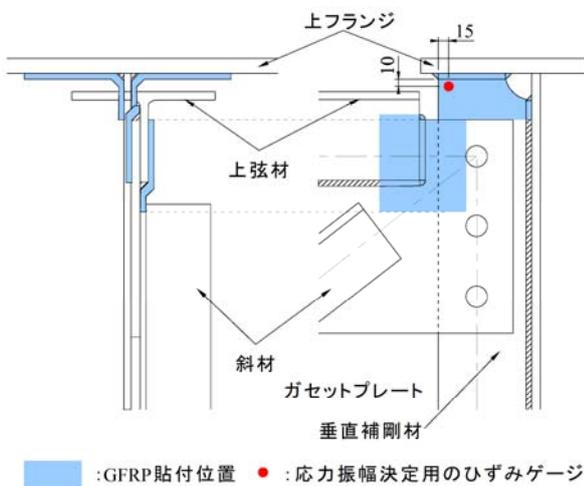


図-4 対傾構モデルのGFRP貼付位置

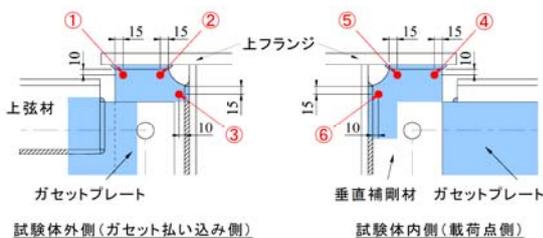
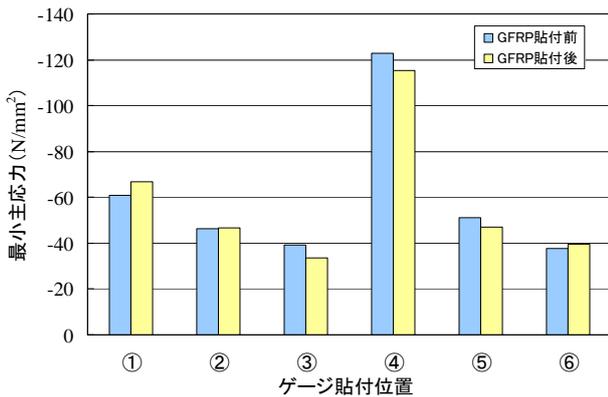


図-5 対傾構モデルのGFRP貼付前後の主応力比較

3.2 静的荷重試験

疲労試験に先立ち、GFRP貼付前後で静的荷重試験を実施した。SB-1におけるGFRP貼付前後における各溶接部の最小主応力の比較を図-5に示す。図中の主応力は、表-2に示す最大荷重載荷時から最小荷重載荷時の応力を引いた値である。

図-5より、GFRP貼付前後で、ひずみゲージを貼付した溶接止端から10mmの範囲では、応力低減効果は見られなかった。これは、GFRPの静弾性係数が鋼材の1/25程度と小さく、溶接止端から10mmの位置では、GFRPがほとんど荷重を分担していないためである。

3.3 疲労試験

疲労試験は、繰返し回数20万回ごとに静的荷重試験を実施し、目視により疲労き裂およびGFRP剥離の有無を確認した。図-6に応力範囲と繰返し回数の関係を示す。対傾構モデルでは、溶接止端から10mmの位置にひずみゲージを貼付したが、き裂の発生、進展とともに直近に貼付したひずみが変化しなかった。そのため、繰返し回数は、無補強側は目視によるき裂発生回数、補強側はGFRPの剥離を確認した回数を繰返し回数とし、図中に

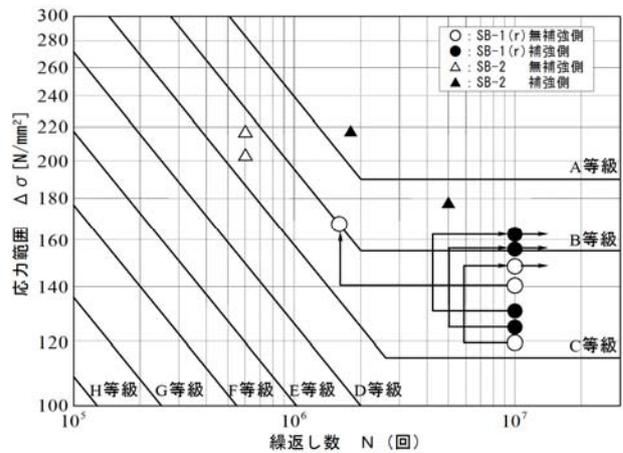


図-6 対傾構モデルの応力範囲と繰返し回数の関係



写真-3 対傾構モデルにおけるGFRPの剥離状況

は鋼道路橋の疲労設計指針⁴⁾における疲労強度等級も併せて示した。

SB-1を再試験したSB-1rでは、繰返し回数160万回でB1部に疲労き裂の発生が目視により確認された。補強側(B3, B4)については、繰返し回数1,000万回においてもGFRPの剥離は見られなかった。

SB-2では、繰返し回数60万回でB1, B2ともに目視により疲労き裂の発生が確認され、繰返し回数180万回でB4のGFRPの剥離が確認された。B3は繰返し回数500万回では、GFRPの剥離は確認されなかった。写真-3にSB-2, B4の繰返し回数500万回におけるGFRPの剥離状況を示す。実験終了後にGFRPを剥がして、疲労き裂を調査したところ、垂直補剛材のまわし溶接部にB4では長さ約25mm, B3では長さ約16.5mmの止端き裂が確認された。B3で疲労き裂発生後もGFRPが剥離しなかったのは、疲労き裂が小さいために、GFRPを剥離させるまでに至らなかったためと考えられる。

以上より、対傾構モデルでは、GFRPの剥離による回数で疲労耐久性を評価したが、本試験で実施した応力振幅の範囲では、2ケースともに補強側の繰返し回数が大きかったことから、GFRPを貼付することにより疲労寿命を延伸する効果があると考えられる。

4. ソールプレート取付け溶接部の疲労試験

表-3 ソールプレートモデル各ケースの応力振幅

試験ケース	最小主応力範囲 $\Delta\sigma$ (N/mm ²)	最小荷重 P_{min} (kN)	最大荷重 P_{max} (kN)
SP-1	155	30	360
SP-2	125	30	315

4.1 試験概要

ソールプレート取付け溶接部を対象とした疲労試験体(以下、ソールプレートモデルと称す)の試験体を図-7に示す。ソールプレート取付け溶接部の疲労損傷は、ウェブと下フランジ溶接部のせん断遅れ、ソールプレート端部における断面急変による応力集中、支承機能の劣化に伴う桁端部の回転や水平移動の拘束などが挙げられる^{10)~13)}。本試験では、これらの発生原因を考慮した試験体形状とした。

試験体は、回転変位が拘束された荷重板をソールプレートと見立て、荷重板溶接部を着目部とした。実橋では、フランジとウェブの首溶接部からの疲労損傷事例もあるが、本試験では対象外とし、主桁には溶接部の無いH形鋼を使用した。また、ソールプレート厚および溶接部は実橋と同程度の寸法とし、荷重点直下の垂直補剛材からの疲労き裂を防止するため、溶接接合ではなく、L形鋼を用いた高力ボルト接合とした(上フランジと垂直補

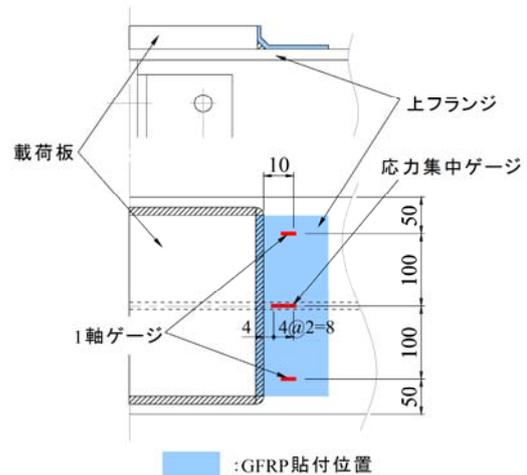


図-8 ソールプレートモデルのGFRP貼付位置

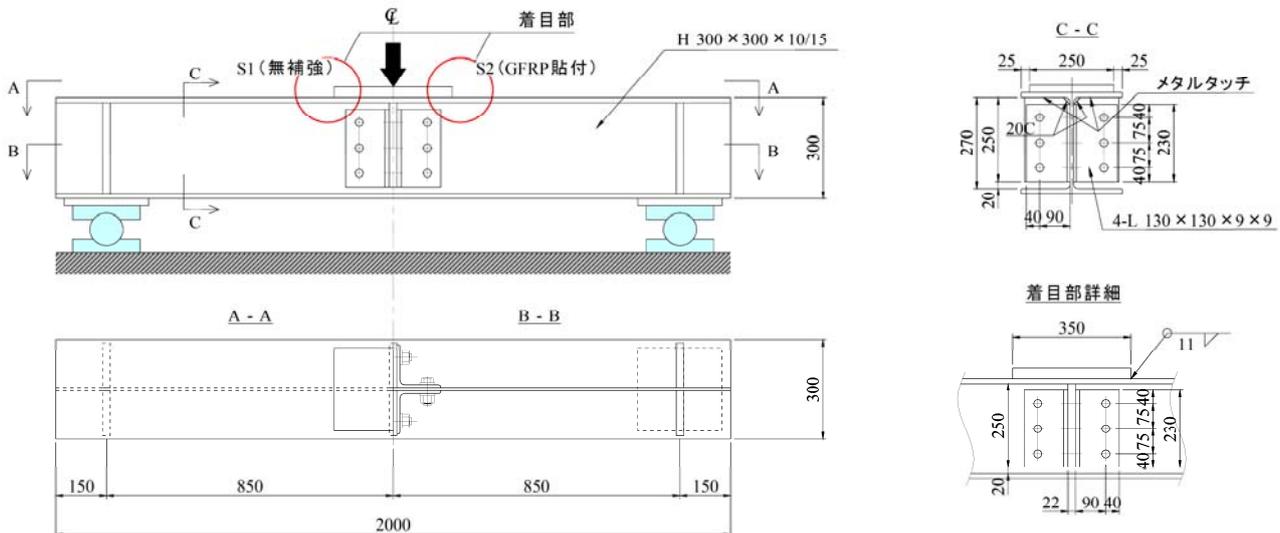


図-7 ソールプレートモデル

剛材はメタルタッチとした)。

試験体は2体とし、表-3に示すように、それぞれの試験体で応力振幅を変化させた。また、図-7に示すように、計2箇所の着目部のうち、1箇所を無補強(S1)、残り1箇所にGFRPの貼付(S2)を行った。なお、着目部であるソールプレート溶接部の下フランジの主応力方向は、橋軸方向と明確であるため、GFRPは橋軸方向に繊維を配置した一方向材を2層貼付した。GFRP貼付位置を図-8に示す。

荷重方法は、ソールプレート前面溶接部のウェブ直上(止端から10mm位置、図-8参照)の応力範囲の平均値が、表-3に示す応力振幅となるように荷重制御により荷重した。

4.2 静的荷重試験

疲労試験に先立ち、GFRP貼付前後で静的荷重試験を実施した。ソールプレートモデルでは、溶接止端から4mmの位置にもひずみゲージを貼付したが、図-8に示す全てのゲージで、対傾構モデルと同様にGFRP貼付前

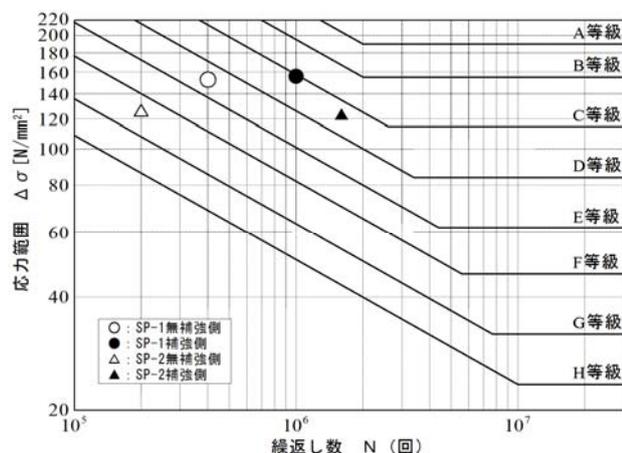


図-9 ソールプレートモデルの応力範囲と繰返し回数の関係

後で、応力低減効果は確認できなかった。

4.3 疲労試験

静的荷重およびき裂調査を含めた試験方法は、対傾構モデルと同様である。図-9に応力範囲と繰返し回数の関係を示す。ソールプレートモデルでは、き裂の発生とともに直近のひずみが減少する傾向にあり、ある程度深さのあるき裂の発生を表現するため、繰返し回数はひずみが急変する回数とした。SP-1、SP-2両方の試験体で、荷重板中央のフランジ側の溶接止端から疲労き裂が発生した。SP-1で応力振幅に変化が生じたのは、無補強側(S1)が繰返し回数40万回であったのに対し、補強側(S2)では100万回であった。SP-2においても、無補強側では繰返し回数20万回に対し、補強側では180万回まで応力振幅に変化が生じなかった。

以上より、対傾構モデルと同様に、本試験で実施した応力振幅の範囲では、2ケースともに補強側の繰返し回数が大きく、GFRPを貼付することにより疲労寿命を延伸する効果があると考えられる。

なお、GFRPの剥離については、SP-1では繰返し回数180万回で確認されたが、SP-2については、200万回でも確認されなかった。ソールプレートモデルにおいても、対傾構モデルと同様に、GFRPの剥離はき裂の発生と同時にではなく、き裂がある程度進展した段階で生じていた。

5. 面外ガセット取付け溶接部の疲労試験

5.1 試験概要

面外ガセット取付け溶接部を対象とした疲労試験体(以下、ガセットモデルと称す)を図-10に示す。試験体は、両端単純支持した支間長5.6mの上下対称鋼桁のウェブ片面に面外ガセット継手を設けたものである。試験は4点曲げ方式で行い、等曲げ区間に面外ガセット継手を3箇所配置し、ガセットプレートのまわし溶接部(計

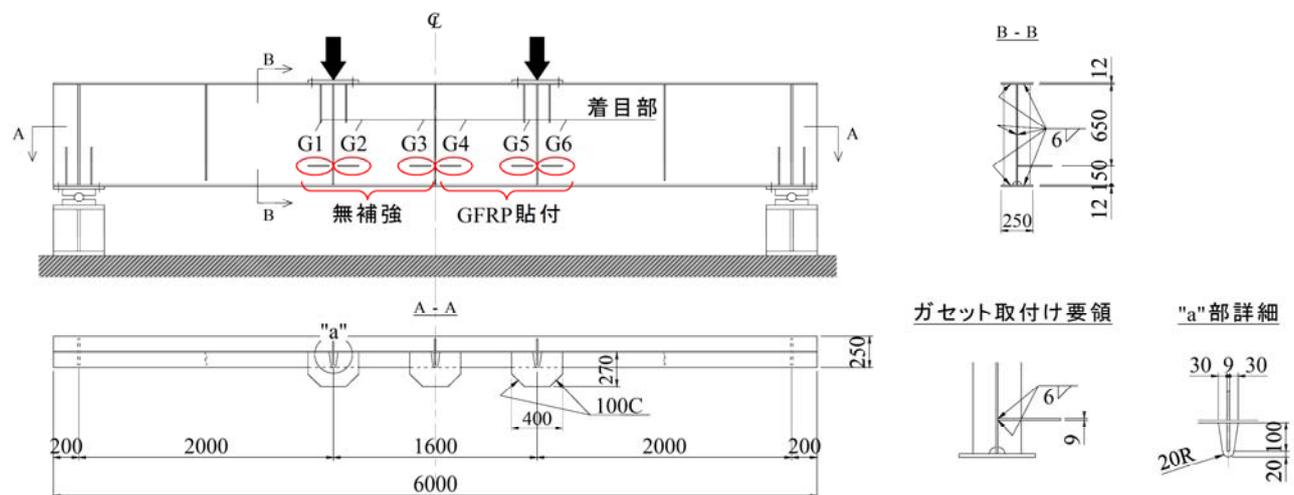


図-10 ガセットモデル

6箇所)を着目部とした。

試験体は1体で、図-10に示すように、計6箇所の着目部のうち、3箇所を無補強(G1, G2, G3)、残り3箇所にGFRPの貼付(G4, G5, G6)を行った。着目部であるガセットプレートまわし溶接部の主応力方向は、本試験体では橋軸方向と明確であるが、実構造においてはせん断力も作用し、複雑になることが想定されるため、繊維に方向性の無いチョップ材を2層貼付した。GFRP貼付位置を図-11に示す。

载荷荷重は、ガセットプレートまわし溶接部(止端から10mm位置、図-11参照)6箇所の応力範囲の平均値が、100N/mm²程度となるように決定した。

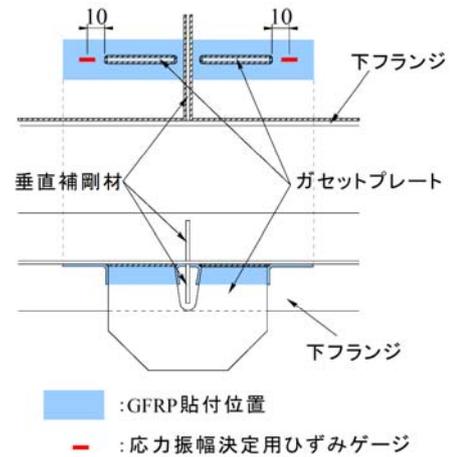


図-11 ガセットモデルのGFRP貼付位置

5.2 静的载荷試験

疲労試験に先立ち、GFRP貼付前後で静的载荷試験を実施した。対傾構モデルおよびソールプレートモデルと同様にGFRP貼付前後で、ひずみゲージ貼付位置での応力低減効果は確認できなかった。

5.3 疲労試験

静的载荷およびき裂調査を含めた試験方法は、対傾構モデルおよびソールプレートモデルと同様である。表-4に各着目部位の疲労き裂発生回数一覧を示す。繰返し回数40~54.6万回で無補強側のガセットまわし溶接部で疲労き裂の発生が確認された。き裂の発生位置は、G1(外側)、G1(内側;垂直補剛材側)、G2(内側)、G3(内側)の4箇所でき裂長さは15~20mm程度であった。疲労き裂はいずれもウェブ側の溶接止端に発生しており、き裂近傍の測点では、N=54.6万回の静的载荷時に応力振幅が減少した。

また、繰返し回数67.4万回で新たにG2(外側)においても疲労き裂の発生が確認された。疲労き裂は载荷回数とともに徐々に進展し、N=79.6万回の計測時には、ガセット溶接部の裏側ウェブ面において、貫通き裂が2箇所を確認された。貫通き裂は、G3(内側)が30mm、G2(内側)が10mm程度であった。疲労き裂の発生・進展に伴い、き裂近傍の測点位置における応力振幅も減少傾向を示した。貫通き裂の発生が認められ、き裂の進展が速く試験の継続が困難であったため、この時点で疲労試験を終了した。

疲労試験終了時(N=79.6万回)まで、補強側(G4, G5, G6)において、GFRPの剥離、割れや着目部の応力振幅の減少は見られなかった。

無補強側3箇所全てに疲労き裂が発生したのに対し、GFRP貼付側3箇所では、疲労き裂の発生が確認されなかった。無補強側のき裂進展が進み、79.6万回で疲労試験の続行が不可能となったため、GFRPの効果を定量的に確認することはできなかったが、対傾構モデルおよびソールプレートモデルと同様に、GFRPを貼付することに

表-4 ガセットモデルの疲労き裂発生および貫通回数

着目部		GFRPの貼付	疲労き裂発生回数(回)	疲労き裂貫通回数(回)
G1	外側	無し	546,000	-
	内側		546,000	-
G2	外側	無し	674,000	-
	内側		546,000	796,000
G3	外側	無し	-	-
	内側		546,000	796,000
G4	内, 外側	有り	-	-
G5	内, 外側	有り	-	-
G6	内, 外側	有り	-	-

より疲労寿命を延伸する効果があると考えられる。

以上、実構造のディテールを反映した3種類、計5体の中型試験体で疲労試験を実施し、GFRPを貼付することによる疲労寿命の延伸効果を定性的に確認した。そのメカニズムについては、文献2)に示されているように、主にGFRPが目視やひずみゲージの変化では確認できない発生初期の微細なき裂の開口を抑制し、き裂の進展を遅延させることによるものと考えられる。

6. おわりに

実橋で疲労損傷の発生事例の多い対傾構取合部、ソールプレートのまわし溶接部や主桁1次応力による疲労損傷に注意が必要とされた主桁ウェブとガセットプレートの溶接部の3種類の溶接部を対象に、実構造を反映した試験体を用いた疲労試験を実施しGFRP貼付による疲労耐久性向上に関する検討を行った。

その結果、疲労試験に先立って実施した静的载荷試験結果から、3種類の試験モデルともに、ひずみゲージ貼付位置(溶接止端から4mm以上離れた位置)では、GFRP

貼付前後で応力の低減はほとんど確認されなかった。しかし、3種類、計5体の疲労試験を実施した結果、全ての試験ケースにおいて、GFRPを貼付することにより、疲労寿命が延伸した。

本試験では、定性的な評価に留まったが、文献1)~3)で検討された小型試験体と同様に、実構造を反映した試験体においても、GFRPの補強効果を確認することができた。

今後の課題として、実橋への適用にあたり、GFRPの貼付による疲労耐久性向上に関する定量的評価方法やGFRPの貼付およびプライマーの塗布などに関する施工管理方法について検討が必要である。

謝辞：本実験に使用したGFRPはサンコーテクノ株式会社提供して頂いた。ここに記して謝意とする。

参考文献

- 1) 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, 2005.9.
- 2) 鈴木博之, 稲葉尚文, 富田芳男, 紫桃孝一郎, 岡本陽介 : ガラス繊維強化プラスチックの貼付による疲労強度改善に関する研究—面外ガセット溶接継手の疲労試験およびFEM解析検討—, 構造工学論文集 No.54A (投稿中), 2008.3.
- 3) 鈴木博之, 岡本陽介, 西村拓郎 : GFRPにより補強された面外ガセット溶接継手の疲労強度, 第59回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 2004.9.
- 4) (社)日本鋼構造協会 : 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.

- 5) 西崎到 : FRPの土木鋼構造用途における劣化と耐久性, 非破壊検査, 第54巻1号, pp.20-25, 2005.1.
- 6) 野中眞一, 井田剛史, 丸田光政, 連重俊, 平野廣和, 佐藤武司 : 橋梁付属物の補強・補修に用いる紫外線硬化樹脂の材料特性, 橋梁と基礎, pp.39-44, 2003.3.
- 7) 日本道路公団東京第一管理局, (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 : 東名高速道路 橋梁床版補強対策工検討 (対傾構取付け部のき裂対策検討) 報告書, 1990.3.
- 8) 三木千寿, 竹之内博行, 森猛, 大川征治 : 主桁と対傾構取合部の疲労損傷に対する補修方法の提案, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.543-550, 1997.3.
- 9) 貝沼重信, 山田健太郎, 西岡敬治, 中村一平, 石井博典 : 鋼I桁橋の主桁上フランジと横桁の取合部の応力緩和による疲労強度向上法, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1025-1032, 1997.3.
- 10) 館石和雄, 名取暢, 三木千寿 : プレートガーダー支承部の疲労損傷とそのディテール改良に関する研究, 土木学会論文集 No.489/I-27, pp.167-176, 1994.4.
- 11) 嶋拓, 青山高司, 坂元義一, 小林潔, 須藤典助, 曾我明 : 鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷 (上) 一点検・調査一, 橋梁と基礎, pp.27-34, 1991.5.
- 12) 一樹久允, 青山高司, 木暮深, 鹿野顕一, 松本巧 : 鋼I桁橋支承部の疲労亀裂損傷 (下) 一疲労試験, 補修・補強設計一, 橋梁と基礎, pp.31-37, 1991.9.
- 13) 三木千寿, 妹尾賢一郎, 森猛 : 鋼橋支承部ソールプレート端に生じた疲労損傷と局部応力についての考察, 構造工学論文集 Vol.36A, pp.949-958, 1990.3.

(2007年9月18日受付)