

長尺リサイクル CFRP 板を接着と TRS で接合した 鋼桁の補強効果の検証

VERIFICATION OF THE REINFORCING EFFECT OF TRS ON STEEL GIRDERS BONDED WITH RECYCLED LONG CFRP PLATES

○並木 宏徳^{*1} 公門 和樹^{*1} 山村 明彦^{*1} グエンキム クオン^{*1} 坂野 昌弘^{*2}

Hironori NAMIKI^{*1} Kazuki KOMON^{*1} Akihiko YAMAMURA^{*1} Nguyen KIM Cuong^{*1}
Masahiro SAKANO^{*2}

ABSTRACT In the previous research, the effect of the steel girder reinforcement method with a new CFRP plate bonded was verified. The purpose of this study is to verify the effect of the steel girder reinforcement method with long recycled CFRP bonded, and in order to suppress the end peeling that is a problem in CFRP plate bonding, a test piece using a thread rolling screw (TRS) was used together. We report on static and fatigue test results.

Keywords: CFRP, リサイクル, TRS, 補強, 鋼橋
CFRP, recycle, TRS, reinforcement, steel bridge

1. はじめに

我が国では木曾川大橋や本荘大橋での疲労や腐食による部材の破断を受け、鋼橋の維持管理の重要性が見直されている。鋼橋の維持管理で当て板補強を行う場合、鋼板を高力ボルト接合する方法が一般的である。しかし、鋼材の当て板は比較的小さな部材であっても人力だけで取り扱うことが難しい重量となる場合が多く、ジャッキやクレーン等の大小の機材を用いて施工される。そのため、交通や環境だけでなく人工や機材等のコストが施工費用に大きく影響している。そこで、鋼材と比べ軽量の CFRP 板を接着する方法が提案されている[1,2]。近年は資源の有効活用の観点からリサイクル材が注目されており、リサイクル CFRP 板を用いた鋼橋の補修・補強は、新品の CFRP 板を用いるよりコスト削減や環境負荷低減に繋がると考えられる[3]。リサイクル CFRP 板を当て板補修に用いるためには、実物大の試験体を用いた荷重実験等でその実用性を検証する必要があるが、実橋での適用を想定した長尺のリサイクル CFRP 板を用いた補強実験の事例はまだ見当たらない。

い。

本研究は、中小企業庁の令和 1~3 年度戦略的基盤技術高度化支援事業の一環として、橋梁の補強用に開発された長尺リサイクル CFRP 板の補強効果の検証を目的に、大型の鋼桁試験体を用いて静的荷重試験と疲労試験を行った。なお、長尺板の接着では接着端部の剥離が問題となるが、本研究では接着端部に剥離防止を目的としてスレッドローリングねじ (TRS: Thread Rolling Screw 以下、TRS と呼ぶ) を併用した補強方法の効果について検討した。

2. 試験方法

2.1 試験体および補強工法

写真 1 は試験に用いた長尺リサイクル CFRP 板の外観である。今回使用するリサイクル CFRP 板は前述の事業で開発した新技術を用いて試作されたものである。カーボンファイバーの繊維長さは 9mm で、これにナイロン繊維を配合して繊維方向を一方化し、加熱加圧して成型している。**表 1** にリサイクル CFRP 板の物性を示す。表中には製品として市販されている CFRP 板の物性もあわせて示している。なお長尺リサイクル CFRP 板の引張強度は、同製法の短尺 CFRP 板の測定値である。

CFRP 板は、当て板補強に用いられる鋼材からの置き換えに十分なサイズとして長さ 2m を試作目標とし、まず 1m の CFRP 板を試作して製作条件の検

^{*1} 京橋ブリッジ株式会社
(〒536-0014 大阪市城東区鳴野西 2-2-21)

^{*2} 第 2 種正会員
工博 橋守支援センター (研究当時: 関西大学)
(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

表1 リサイクルCFRP板の物性値

	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)
リサイクル 1m	1000	200	10.6	60	700
	1000	200	10.2	63	
リサイクル 2m	2000	200	8.1	65	
	2000	200	7.9	68	
参考：市販CFRP板	>2000	50	2.0	167	

表2 接着剤の物性値

製品名	FB-E9S
圧縮弾性率	2GPa
引張せん断強度	9.8MPa以上



写真1 長尺リサイクルCFRP板の外観

討を行い、その成果から2mのCFRP板を作製した。なお2mのCFRP板は薄板(約2mm)成型までの開発段階であったため、薄板を積層し接着することで当て板に適した板厚にしている。CFRP板の長さと同様に、板厚についても当て板として多く用いられる鋼材(最小板厚9mm)を意識している。つまり、リサイクルCFRP板による補強は、鋼材を用いた補強と同等の寸法で、リサイクルCFRP板と鋼材の弾性率の比率分(1/3程度)の補強効果を見込んでいる。写真2はCFRP板の繊維配向直角方向断面の顕微鏡

写真で、左は開発初期段階のCFRP板、中央は試験に用いたCFRP板と同仕様のもの、右は参考を示す市販のCFRP板の写真である。今回は開発中の試作品のため、目視によるほか、光学顕微鏡、電子顕微鏡、CTスキャナ等を用いて繊維の配向や体積含有率といった品質を個別に確認している。

表2は接着剤の物性で、2mCFRP板積層及び、後述する桁との接着に用いている。CFRP板の接着にあたっては、鋼材及びCFRP板の接着面を#320の研磨紙でケレンし、アセトンで脱脂し、鋼材表面には



写真2 CFRP 板断面の顕微鏡写真（繊維配向の直角方向断面）

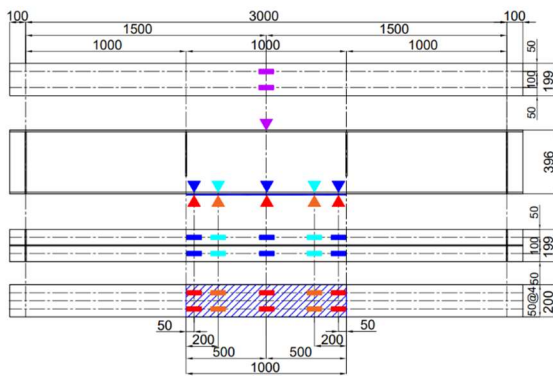


図1 1m リサイクル CFRP 板接着接合試験体

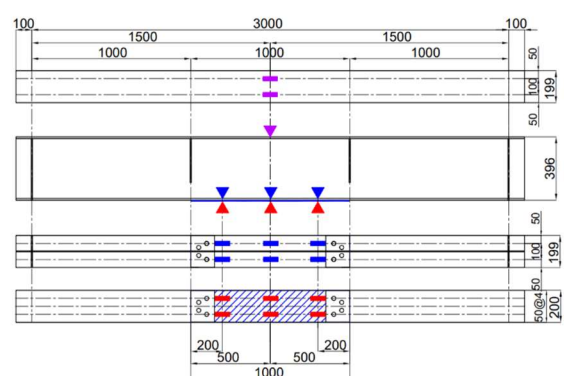


図2 1m リサイクル CFRP 板接着+TRS 接合試験体

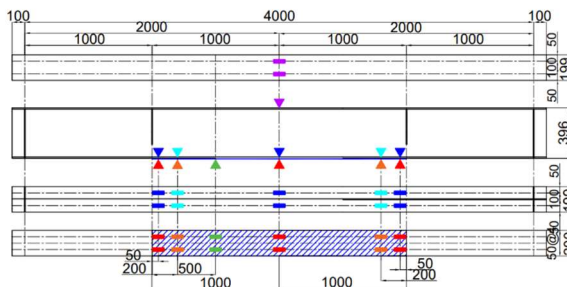


図3 2m リサイクル CFRP 板接着接合試験体

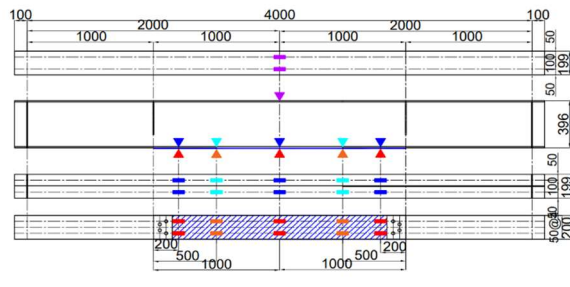


図4 2m リサイクル CFRP 板接着+TRS 接合試験体

事前にプライマーを塗布して接着している。接着剤は、接着剤厚さを約0.4mmにコントロールするため、粒度#50のガラスビーズを1w%練混している。

図1～4は試験体の形状と寸法である。図5はTRS 端部補強詳細図で写真3はその様子である。TRS 補強した試験体では、CFRP 板端部に座金板(200mm×150mm×6mm)を接着後、座金板、CFRP 板、鋼材を貫通するφ15.5mmの孔をあけ、φ16のTRSをインパクトレンチで締め込んだ。TRSの配置

は2列4本である。端部剥離補強のためにTRSを用いた主な理由は、通常用いられる高力ボルトによる摩擦接合はCFRP板に対しては適用できないので、CFRP板に接着した座金板と鋼桁下フランジをTRSによって支圧接合させることにより、CFRP板端部に作用する力をTRSで伝達させるためであり、補強用接合材料として近年実績が蓄積されてきていることもある。なお、TRSの場合には、ボルト-ナット接合と比較してナットが不要なため片面施工が可能で、

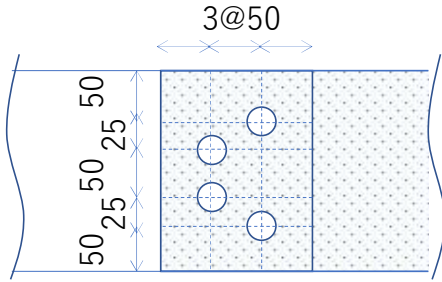


図5 TRS 端部補強詳細図

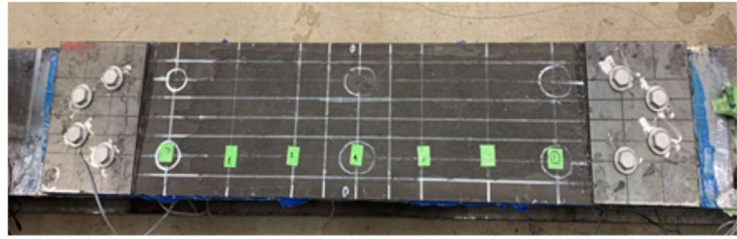


写真3 TRS 端部補強状況 (1mCFRP 板試験体)



写真4 載荷試験状況 (CFRP 板2m 接着+TRS 補強試験体)



写真5 端部剥離状況 (2m・接着のみ)

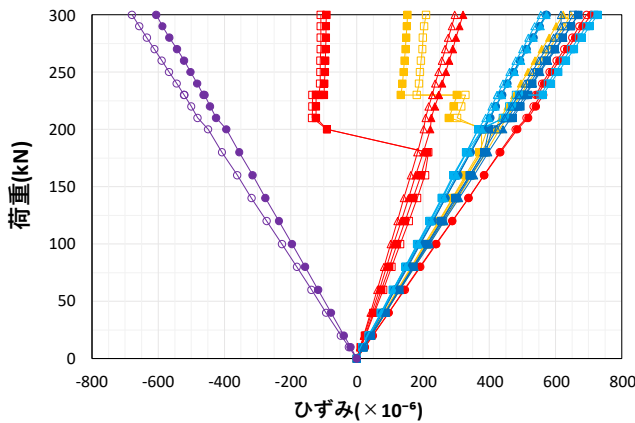
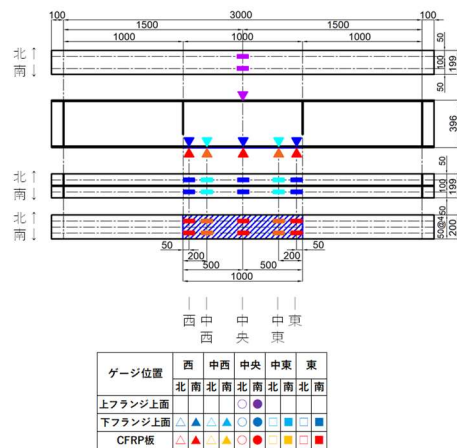


図6 荷重とひずみの関係 (1m・接着のみ)



ボックス桁のような閉断面でも容易に施工ができるという利点もある。

2.2 載荷方法

載荷試験は、CFRP 板補強部に一様な曲げモーメントが作用するよう、載荷点間隔を接着する CFRP 長さとした。静的載荷試験では、鋼桁の上下フランジの最大ひずみを、鋼材(SS400)の許容応力(140MPa)相当までとした。疲労試験では、荷重繰り返し速度を2~3Hzとした。写真4に載荷状況を示す。

3. 試験結果

3.1 静的載荷試験結果

図6~9に、各試験体の荷重とひずみの関係を示す。接着のみの試験体では、端部のひずみが1mCFRP 板で200 μ (中央部では400 μ)、2mCFRP 板では100~200 μ (中央部では500 μ)を超えたあたりで剥離が生じ、荷重の増加とともにCFRP 板の中央に向かって剥離が進行した。写真5は剥離状況例である。剥離開始荷重が1mCFRP 板では200kNであったのに対して2mCFRP 板では240kNと高いのは、CFRP

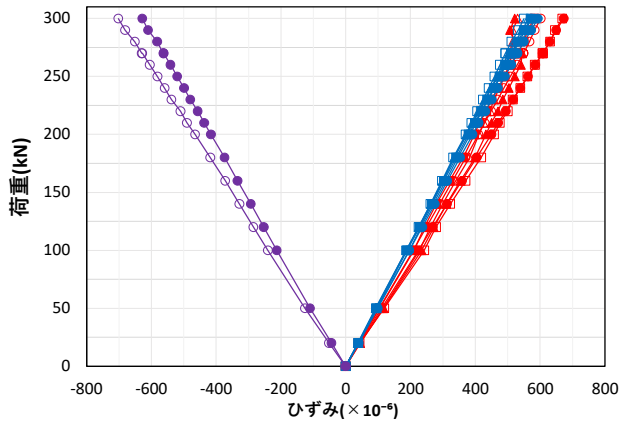


図7 荷重とひずみの関係 (1m・接着+TRS 併用)

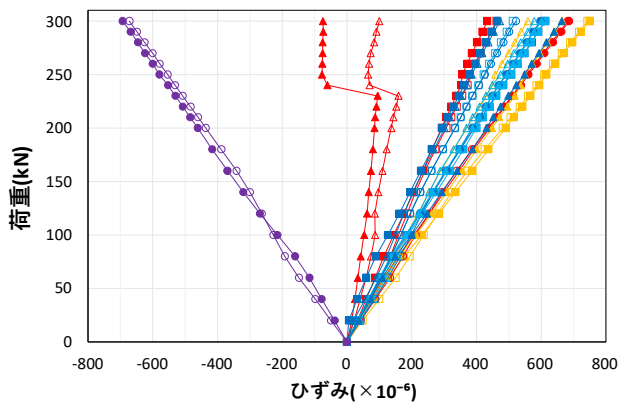
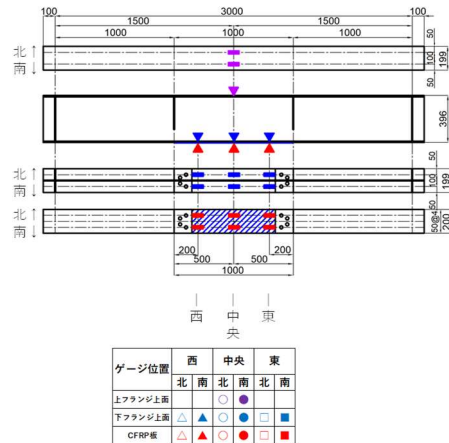


図8 荷重とひずみの関係 (2m・接着のみ)

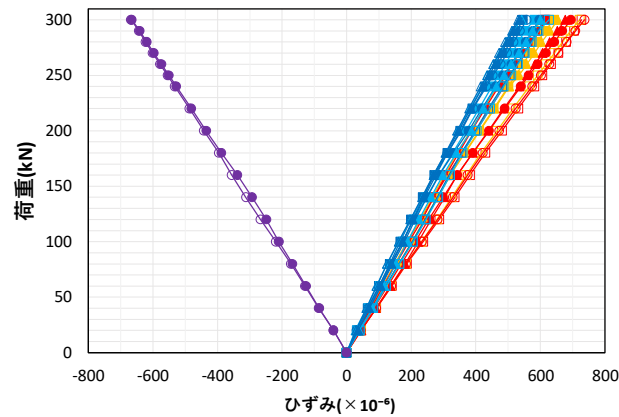
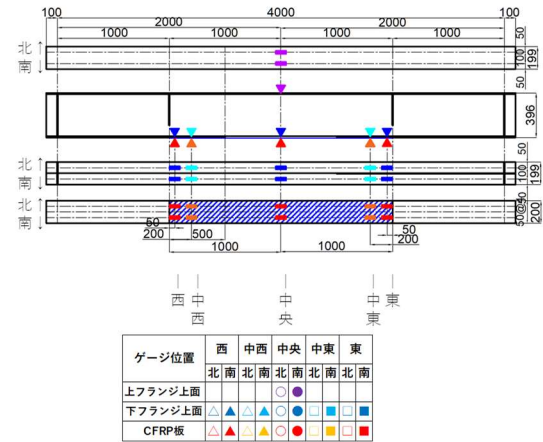
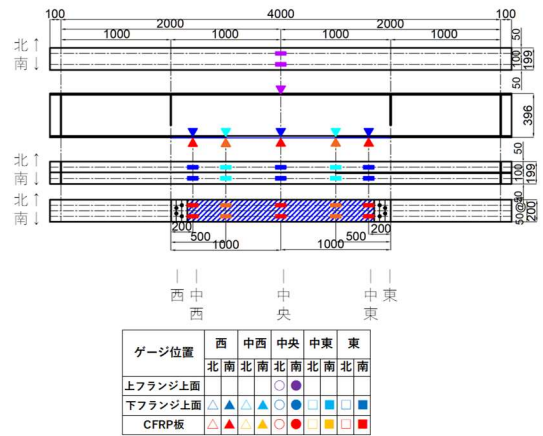


図9 荷重とひずみの関係 (2m・接着+TRS 併用)



板の厚さの違い (10mm と 7.5mm) により, 2m の CFRP 板が分担する力が小さいことによるものと考えられる。

一方, CFRP 板の端部を TRS で接合した試験体では, 1mCFRP 板端部で 500 μ 程度のひずみで一時的な低下がみられたが, それ以外ではほぼ線形挙動を示しており, CFRP 板と鋼桁の十分な合成効果が確認された。

3.2 疲労試験結果

図10に, 疲労試験を行った TRS 併用試験体について, TRS の孔引きを考慮した鋼桁下フランジの純断面に対する応力範囲と, 亀裂発生寿命および破断寿命の関係を示す。図中には鋼道路橋の疲労設計曲線もあわせて示している。1mCFRP 板試験体では G 等級相当で 200 万回の繰返し載荷後も各部のひずみ変化や変状が認められなかったため E 等級相当に荷

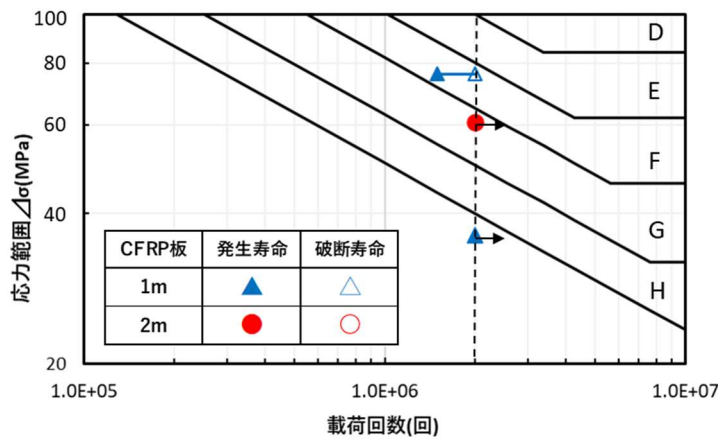


図10 TRS孔のSN線図(純断面応力)

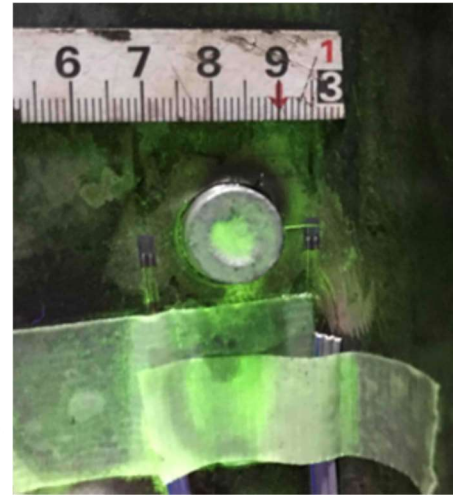


写真6 TRS孔から発生した疲労亀裂

重を上げて再試験したところ、150万回で鋼桁下フランジのTRS孔縁に亀裂が生じ、200万回で下フランジが破断した。写真6はTRS孔から発生した亀裂の状況例である。円孔の疲労強度等級はC等級として分類されるが、それよりも小さな応力範囲でTRS孔から亀裂が生じている。CFRP板端部では接着剤のみでは剥離してしまい伝達できない荷重をTRSが負担することにより、TRS孔に大きな応力集中が生じたことが原因と考えられる。この試験結果を踏まえ、2mCFRP板試験体はEとGの中間のF等級相当の応力範囲で疲労試験を行った。その結果、200万回の繰り返し荷重を受けてもTRS孔縁に亀裂は発生せず、リサイクルCFRP板や接合部等にも変状は認められなかった。

なお、接着のみの試験体では、静的荷重試験時に剥離してしまったため疲労試験を実施できなかった。接着のみの場合には、疲労強度以前に静的強度の確保が課題である。

4. まとめ

以上より、長尺のリサイクルCFRP板を接着とTRSを併用して下フランジに接合した鋼桁の補強効果を確認した。静的荷重試験と疲労試験でTRSを併用することによりCFRP板端部の剥離が防止できたことから、静的荷重試験時にCFRP板端部から剥離が生じた接着のみの場合と比較して十分な強度向上が確認できた。また、疲労試験では、TRS孔縁から疲労亀裂が発生し、疲労強度等級はF等級程度となったが、TRS孔以外のCFRP板や接合部等に変状が認められないことから十分な疲労耐久性を有することが確認できた。

なお、道路橋では、G等級程度の疲労強度等級の溶接継手が用いられる場合が多く、F等級程度であれば、疲労強度としては実用上十分と考えられる。

謝辞

本研究は、中小企業庁の令和1～3年度戦略的基盤技術高度化支援事業の一環として行った。本研究を行う際に白石祐一氏と西村拓也氏(当時関西大学学生)には多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 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)による鋼橋補強事例, 第8回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集, 土木学会, pp. 49-54, 2002.
- [2] 石川敏之: 鋼橋のCFRP板接着補修・補強の現状と課題, 日本接着学会誌, 45巻4号, pp. 139-144, 2009.
- [3] 守富寛: 炭素繊維強化複合材料のリサイクル/CFRP廃棄物の再資源化, 成形加工, 30巻2号, pp. 59-63, 2018.
- [4] 平井隆嗣, 坂野昌弘, 藤井善通: 鋼桁に接着補強したCFRP板の剥離挙動, 第16回フラクトグラフィシンポジウム, 材料学会, pp. 1-5, 2020.
- [5] 平井隆嗣, 坂野昌弘, 藤井善通: CFRP板端部が剥離した鋼桁に対するTRSを用いた補修の試み, 土木学会全国大会第76回年次学術講演会, I-330, 2021.
- [6] 白石祐一, 坂野昌弘, 藤井善通: 接着とTRSを併用した鋼桁のCFRP板補強, 土木学会全国大会第76回年次学術講演会, I-329, 2021.