

(64) GFRP製検査路の補修工法に関する実験検討

三宅 央真¹・秀熊 佑哉²・齊藤 駿将³

¹ 正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 社会資本材料部
(〒103-0027 東京都中央区日本橋一丁目 13 番 1 号 日鉄日本橋ビル)

E-mail: miyake.3gf.hiromasa@nscm.nipponsteel.com

² 正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 社会資本材料部
(〒103-0027 東京都中央区日本橋一丁目 13 番 1 号 日鉄日本橋ビル)

E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

³ コスモシステム株式会社 生産技術事業本部 開発グループ
(〒981-1227 宮城県名取市杜せきのした二丁目 4 番 2 号)

E-mail: shunsuke-saito@cosmo-sys.co.jp

平成 26 年より橋梁及びトンネルは 5 年に 1 度の近接目視による定期点検が必要となり、橋梁点検用の検査路の需要が大きくなっている。GFRP 検査路は軽量で耐腐食性、電気絶縁性、断熱性、衝撃吸収性に優れ、錆びの発生もないことから、重機の搬入が困難な狭小な山間部や塩害地域において幅広く用いられている。一方で、GFRP の検査路の一部が損傷した場合、繊維の連続性を確保するために長いスパンの部材取り換えが必要になる。そこで、本研究では損傷した GFRP 検査路の手すりをアラミド FRP の接着による補修効果の検討を行った。検討の結果、アラミド FRP を軸方向及び周方向に接着させることで、損傷前以上の曲げ強度、衝撃強度を得ることができた。

Key Words : handrail, repair, Fiber Reinforced Polymer, bending test, impact test

1. はじめに

(1) 研究の背景

国土交通省より、平成 26 年から橋梁（約 73 万橋）及びトンネル（約 1 万本）は 5 年に 1 度の近接目視による定期点検が必要となり^{1,2}、それに伴い近接目視のための検査路を設置する需要が増えている。鋼製の検査路の場合、山間部では重機の侵入が困難であったり、塩害や融雪剤の散布による腐食劣化が問題となる。一方で、GFRP 製検査路は軽量で耐腐食性、電気絶縁性、断熱性、衝撃吸収性に優れることから、重機の搬入が困難な狭小な山間部や塩害地域において幅広く用いられている。しかし、GFRP の検査路が一部損傷した場合、繊維の連続性を確保するために長いスパンの部材取り換えが必要になる。

近年、構造物の補修・補強技術として FRP シート接着工法の適応性が注目されている。図-1 で示す FRP シートは軽量で高剛性・高強度であるため補強による死荷重増加が少なく、当て板工法に比べ母材に与えるダメージが少ないことや、施工後に腐食しないメリットがあり、常に雨風にさらされ続ける検査路には適した工法である。

また、図-2 で示す繊維束をすだれ状に含浸硬化したストランドシートを用いることで、施工現場での含浸作業が不要になり、より簡便に FRP シート接着が行える。



図-1 FRPシート

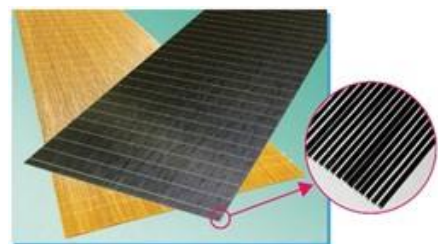


図-2 FRPストランドシート

(2) 研究の目的

本研究では、GFRP製検査路が損傷した場合のFRPシート接着工法による補修効果について検討を行う。検査路の手摺りとして使用されるGFRP製のパイプを準備し、GFRP製検査路の損傷を模擬するために軸直行方向にディスクサンダーを用いて切断した。切断部に対してFRPシート接着工法によって接合補修を行った供試体に対し、接合部を載荷点とする3点曲げ試験と衝撃載荷試験を実施した。3点曲げ試験は初期剛性及び耐荷力の確認し、さらに引張側の支点間の中心とGFRPパイプと補修に用いたFRPシートが接着されている箇所のひずみを確認し、応力伝達の状態を確認した。また、一部水準において、NEXCO試験方法に準拠したダミーウェイトの落下による衝撃試験³⁾を行った。

補修に用いるFRPシートの基材は衝撃吸収性に優れているアラミド繊維⁴⁾を採用した。

表-1 GFRPパイプの材料特性

GFRP パイプ	
寸法 [mm]	内径 40, 外径 50
材質	GFRP
弾性係数 [GPa]	32.7
引張強度 [MPa]	477

表-2 アラミド FPR シートの材料特性

アラミド FPR シート		
種類	アラミド FPR シート	
品名	FTS-AK-40	FTS-AK-60
繊維目付 [g/m ²]	290	429
設計厚 [mm]	0.193	0.286
弾性係数 [GPa]	122	125
引張強度 [MPa]	3,110	3,141

表-3 アラミドストランドシートの材料特性

アラミドストランドシート		
種類	アラミドストランドシート	
品名	FSS-AK-90	FSS-AK-120
繊維目付 [g/m ²]	684	850
設計厚 [mm]	0.429	0.572
弾性係数 [GPa]	126	122
引張強度 [MPa]	2,960	2,480

表-4 試験ケース

Case No.	軸方向	周方向
1	—	—
2	FSS-AK-90	—
3	FSS-AK-90	FTS-AK-40
4	FTS-AK-60×2	FTS-AK-60
5	FSS-AK-120	—
6	FSS-AK-120	FTS-AK-40
7	FSS-AK-120	FTS-AK-60

2. 実験概要

(1) 使用材料

本実験に使用したGFRPパイプはガラスロービングの配分比率は約42%、ガラスマットは約10%であり、物性を表-1に、補修に用いたアラミドFRPシートの物性を表-2、表-3に示す。GFRPパイプは内径40 mm、外形50 mmのものを用いて、一度切断したものを仮固定し、アラミドFRPシート接着工法にて接合補修を行った。

(2) 曲げ試験

供試体図を図-3に示す。GFRPの切断部からそれぞれ200 mmの定着長を取るように、アラミドFRPシート接着工法にて補修した。試験ケースを表-4に基づいて説明する。切断前の健全状態をCase 1とした。Case 2, Case 5は繊維目付の異なるアラミドストランドシートをGFRPパイプの軸方向に補修を行った。Case 3, Case 6, Case 7はアラミドストランドシートによる軸方向の補修を行ったのちに、繊維目付の異なるアラミドFRPシートを周方向に巻きたてて補強を行った。Case 4は軸方向の補修及び周方向の補強にアラミドFRPシートを用いた。

試験状況を図-4に示す。試験はスパン1,200 mmの3点曲げとし、5 mm/minの変位制御で荷重が低下するまで単調載荷とした。試験時には鉛直変位を測定し、Case 1, Case 4, Case 6に関して引張側のひずみの計測を行った。

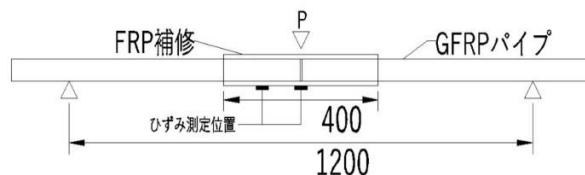


図-3 3点曲げ供試体図



図-4 3点曲げ試験状況

(3) 衝撃試験

3点曲げ試験の結果から、手摺りの耐衝撃性能を確認するため、Case 3, Case 6, Case 7について衝撃载荷試験を実施した。支持台へ検査路を固定し、手摺り上段を軸直行方向にディスクサンダーを用いて切断後にアラミドFRPシート接着工法にて補修をし、安全帯とダミーウェイトを設置し、図-5に示すように衝撃载荷試験を行い、試験後の状態を観察した。ダミーウェイトの重さは85 kg、ランヤードの長さは1700 mmとした。

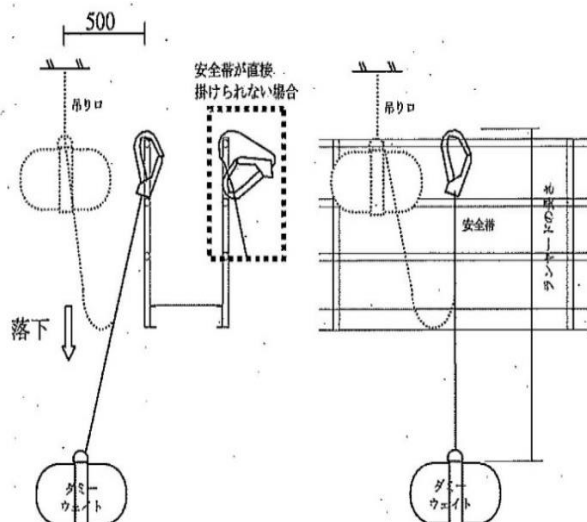


図-5 上段手摺りの衝撃载荷試験

3. 実験結果

(1) 3点曲げ試験の荷重変位関係

図-6に、各供試体の荷重と供試体中央の鉛直変位の関係を示す。図-7に曲げ試験後の状況を示す。終局状態は全て载荷点の圧縮破壊であった。補修したCase 2～Case 8について、健全状態であるCase 1の曲げ剛性及び耐荷重を上回る補修効果を得られた。Case 3とCase 5を比較すると、補修に使われる軸方向の繊維目付が高いほど、初期剛性及び最大荷重が大きくなることがわかった。



図-7 3点曲げ試験後状況

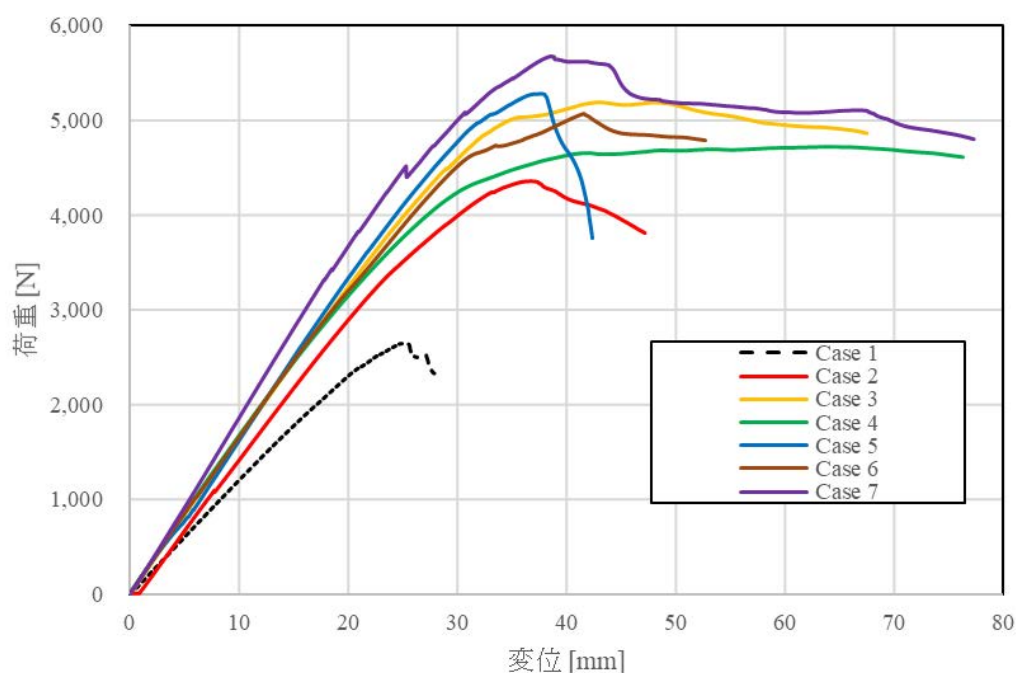


図-6 荷重変位関係

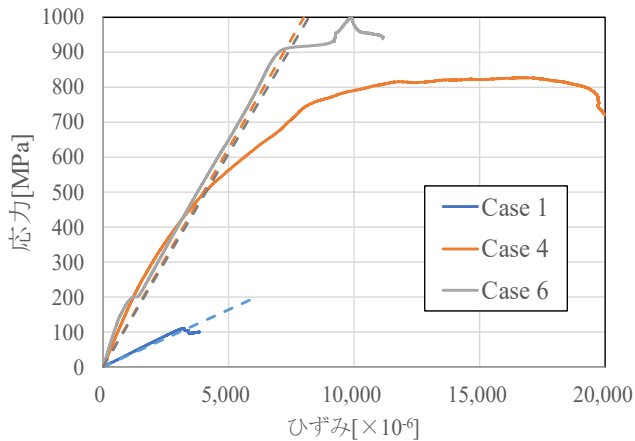


図-8 荷点直下の応力ひずみ関係

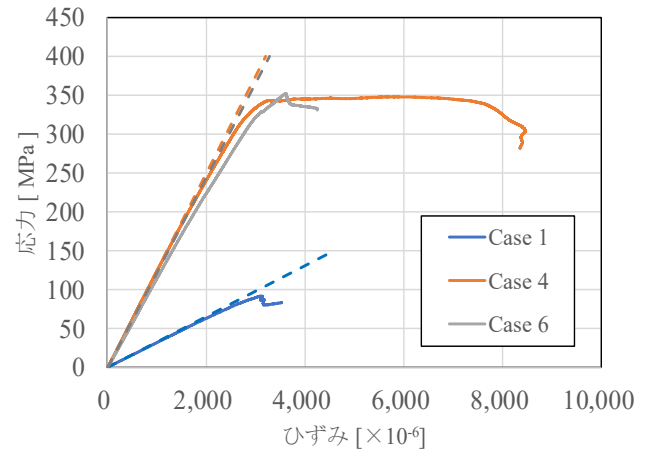


図-9 補強部の応力ひずみ関係

Case 2, Case 3, Case 5, Case 6, Case 7を比較すると、アラミドFRPシートによる周方向の補強を行っていないCase 2, Case 5に比べて、周方向の補強を行ったCase 3, Case 6, Case 7は最大荷重に達した後の荷重低下が緩和されている。これは周方向にも繊維補強を行うことで、軸方向の補修層を拘束して接着樹脂の割れを抑制したためだと考えられる。

軸方向、周方向ともに同等の目付量で補修と補強を行っているCase 4とCase 7を比較すると、ストランドシートで補修をしているCase 7の方が曲げ剛性、最大荷重ともに高い。軸方向に未含浸のアラミドFRPシートを含浸接着する場合は、脱泡ローラーで含浸させる際に、パイプの曲面に直線にローラーを当てるので含浸効率が著しく低下する。一方で繊維束をすだれ状に含浸硬化したストランドシートを接着する場合は、ストランドシートを補修箇所に塗布したパテ状の樹脂に埋め込むことで接着作業が完了するため、含浸不足が発生しない。この含浸効率の違いがCase 4とCase 7の曲げ剛性と最大荷重の差に表れたと考えられる。

(2) 3点曲げ試験の応力ひずみ関係

Case 1, Case 4, Case 6の荷点直下の応力とひずみの関係を図-8に、荷点から100 mm支点側にずらした箇所の補強部の応力とひずみの関係を図-9に示す。測定値を実線で示し、ひずみの計算値を点線で示した。

一般部のひずみの計算値は、下記の(1)～(5)式を用いて導出した。補強部のひずみの計算値は、断面二次モーメントは(6)を用い、GFRPの断面二次モーメントをアラミドFRPシートに剛性換算し、それぞれの断面二次モーメントを足し合わせることで求め、一般部のひずみ同様にIを I_{G+A} に置き換えて算出した。

$$\sigma = \varepsilon E \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3)$$

$$Z = \frac{2}{D} I \quad (4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (5)$$

$$I_{G+A} = I_G \frac{E_G}{E_A} + I_A \quad (6)$$

ここで、

σ	: 応力
ε	: ひずみ
E	: 弾性係数
M	: 曲げモーメント
Z	: 断面係数
P	: 荷重
L	: 支点間距離
D	: 外径
d	: 内径
I	: 断面二次モーメント
I_{G+A}	: GFRPパイプとアラミドFRPシートの断面二次モーメントの合成
I_G	: GFRPパイプ断面二次モーメント
I_A	: アラミドFRPシートの断面二次モーメント
E_G	: GFRPパイプの弾性係数
E_A	: アラミドFRPシートの弾性係数

とする。

図-8について、Case 1とCase 6は概ね計算値と一致した挙動を示しているがCase 4はひずみ $4,000 \times 10^{-4}$ 付近から計算値よりひずみが大きくなった。これは載荷していくにつれて、荷点直下のアラミド繊維の圧縮破壊が始まるためと考えられる。図-9については、応力—ひずみの傾きがどのケースとも計算値と実験値が概ね一致していることから、アラミドFRPシート接着工法による補修で、切断されたGFRPパイプ間に曲げ応力及びせん断応力が、十分に伝達できていることが確認できた。

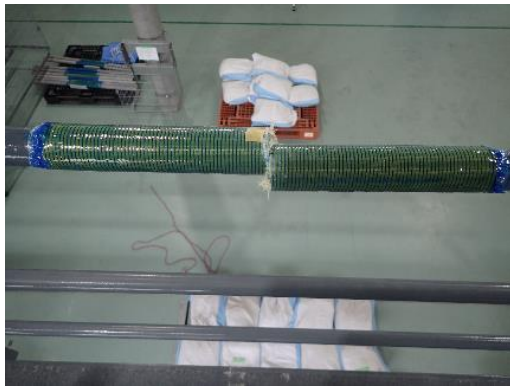


図-10 Case 3 衝撃試験後

表-5 衝撃試験結果

Case	終局状態
Case 3	ダミーウェイト墜落（手摺りの破断）
Case 6	ダミーウェイトの墜落なし
Case 7	ダミーウェイトの墜落なし

(3) 衝撃試験

衝撃試験の結果を表-5に、試験状況を図-10～図-11に示す。Case 6, Case 7の衝撃試験の結果から、破損したGFRPパイプをアラミドストランドシートとアラミドFRPシートによって補修することで衝撃試験でダミーウェイトの墜落がなく、手摺りとしての性能が回復したことを確認した。GFRPパイプが健全状態ならば、衝撃試験で破壊が生じないこと、およびCase 3の衝撃試験の結果から、切断されたGFRPパイプをFRPシート接着工法により補修した場合、静的載荷による確認では健全以上の剛性及び耐荷重に補修できていたとしても、衝撃試験のような瞬間的な衝撃には耐えられないことが確認された。また、Case 6, Case 7の結果より、より補強量の低く経済的な補強構成であるCase 6が、今回の最適な補強構成であることが確認された。

4. まとめ

本研究では、GFRP製検査路が損傷した場合のFRPシート接着工法による補修効果について検討した。切断部に対してFRPシート接着工法によって接合補修を行った供試体に対し、接合部を載荷点とする3点曲げ試験と衝撃載荷試験を実施した結果、下記の結論を得た。



図-11 Case 6 衝撃試験状況

- 1) 切断されたGFRPパイプをアラミドストランドシートとアラミドFRPシートによって補修することで、健全以上の剛性と耐荷重が得られたことを確認した。
- 2) 軸方向に施工性の良好なアラミドストランドシートを用いて補修したうえで、周方向にアラミドFRPシートを含浸接着することで、拘束効果によって軸方向の補修層の接着樹脂の割れを抑制し、降伏後の荷重低下を抑制できることを確認した。
- 3) 衝撃試験により、軸方向：FSS-AK-120、周方向：FTS-AK-40の補修を行うことで、ダミーウェイトの墜落もなく、手摺りを支持している桁の破損もない補修構成を確認できた。

ことから、破損したGFRPパイプに関する最適な補修構成が確認できた。今回の試験では定着長を20cmで試験を実施していたが、より短い定着長で補修効果が得られるのか、定着長の最適化が今後の課題である。

5. 参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁定期点検要領，pp.5-20，2019。
- 2) 国土交通省：トンネル定期点検要領，pp.6-21，2019。
- 3) ㈱高速道路総合研究所：NEXCO 試験方法 第4編 構造関係試験方法，pp84-87，2015
- 4) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案），pp.4，2021

(Received September 10, 2021)

REPAIR METHOD FOR GFRP INSPECTION PASSAGE

Hiromasa MIYAKE, Yuya HIDEKUMA and Shunsuke SAITO

Since 2014, bridges and tunnels have been required to be inspected regularly by close visual inspection

once every five years, and the demand for inspection roads for bridge inspection is increasing. The GFRP inspection path is lightweight, has excellent electrical insulation, heat insulation, and shock absorption, and does not rust. Therefore, it is widely used in narrow mountainous areas and salt-damaged areas where it is difficult to carry heavy machinery. On the other hand, if a part of the GFRP inspection path is damaged, it is necessary to replace the long-span member to ensure fiber continuity. Therefore, in this study, we verified the repair effect of aramid FRP adhesion on the handrail of the damaged GFRP inspection path. As a result of the examination, it was possible to obtain higher bending strength than before the damage by adhering the aramid FRP in the axial and circumferential directions.