

コンクリート橋の再劣化防止に向けた効果的な補修補強設計法の構築に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 5～令 7

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：松實崇博、吉田英二、中村浩士
伊須田遼、中井満輝

【要旨】

FRP シート接着工法は、既設構造物に対する補修・補強工法として広く普及している。一方、実構造物では補強効果や耐久性の低下を招く恐れのあるうきや剥離などの変状が報告されている。本研究では、本工法の性能を長期的に維持することを目的に変状事例や維持管理の実態を調査し、劣化メカニズム及び設計・維持管理の留意点を整理した。また、H29 道路橋示方書における限界状態設計への移行を踏まえ、補強条件が床版の疲労耐久性に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、格子接着した場合には、補強量の増加が疲労寿命の向上に必ずしも直結せず、配力筋方向シートの補強割合の設定が疲労耐久性を確保するうえで重要であることを明らかにした。
キーワード：FRP シート接着工法、炭素繊維シート、アラミド繊維シート、耐久性確保、疲労耐久性

1. はじめに

FRP は高強度、耐腐食性および軽量性に優れることから、FRP シート接着工法はコンクリート床版や桁の補修・補強に広く適用されている。一方で、本工法を適用した構造物において、FRP シートと母材の界面に起因するうきや剥離などの変状事例が報告されており、補強効果の低下だけでなく、耐久性の確保の観点からも重要な課題となっている。こうした変状を防止し、FRP シート接着工法の効果を長期的に維持するためには、変状事例や劣化メカニズムを把握した上で、施工品質の確保、維持管理手法の改善、耐久性確保の方法を整理する必要がある。

また、2017 年の道路橋示方書¹⁾における限界状態設計への移行を踏まえ、補強設計についても性能規定体系に基づく評価手法の整備が求められている。このため、土木研究所では共同研究を通じて、これに対応した FRP シート接着工法の設計・施工マニュアル（以下「既存マニュアル」）²⁾の改訂を進めている。特に、床版の耐久性照査においては、輪荷重走行試験機による実物大試験に代わる評価方法として、疲労寿命予測に基づく疲労耐久性評価手法の構築に向けた検討を進めている。

本研究では、FRP シート接着工法に関する実態調査、耐久性確保に向けた劣化メカニズムの分析と対応方針、ならびに輪荷重走行試験結果に基づく疲労耐久性評価手法の検討結果について報告する。

2. FRP シート接着工法に関わる実態調査

2.1 FRP シート接着工法の利用実態調査

FRP シート接着工法の利用実態は、国土交通省が管理する道路橋のうち、コンクリート床版およびコンクリート桁に FRP シート接着工法の適用が確認された全 138 橋を対象とし、定期点検調書及び過去の補修補強履歴を用いて調査を実施した。結果を以下に示す。

調査の結果、全 138 橋のうち約 8 割は 1960～1980 年竣工であり、供用後約 40 年～60 年経過した 2000 年～2020 年の間に、全体の約 8 割において FRP シート接着工法が用いられていた。加えて、FRP シート接着工法の適用先構造物としてはその約 8 割がコンクリート床版であり、材料としても約 8 割が炭素繊維、残りがアラミド繊維、ガラス繊維等であった。特にコンクリート床版に対する設置・配置仕様としては、全面貼りに加え格子張りも半数程度確認された。

2.2 FRP シート接着工法の変状実態調査

FRP シート接着工法の変状要因としては浮きが最も多く、次いで剥離が多く発生していたが、FRP シートの破断等の耐力低下へ直結する損傷は確認されなかった。その一方で、定期点検調書に FRP シートの設置有無や損傷状況などの記録がされていない橋梁も多く見られた。これは、補修補強部材に対する点検・記録方法が明確にされていないことにより、点検や管理者ごとに点検・記録の偏りが生じていることが示唆される。

素繊維シート(以下 CF)およびアラミド繊維シート(以下 AF)を床版下面に格子状に接着した(図-3)計4 ケースとした。具体的には、既存マニュアル²⁾で実施された全面貼り仕様と同等の補強量となる仕様(CF1、AF1)に加え、主筋方向と配力筋方向の補強比が異なるよう補強量を変化させた仕様(CF2、AF2)を設定した。各供試体の仕様を表-1 に示す。载荷は土木研究所所有の輪荷重走行試験機を用い、道路橋示方書に示される階段载荷⁴⁾により実施した。

4.2 実験結果

図-4 に示す本研究及び過年度に実施された载荷実験結果より、格子接着した本研究の供試体は全面貼りした過年度実施の供試体よりも疲労寿命の向上が認められた。また、今回の4 体を比較すると、CF2 はCF1 に対して配力筋方向の補強量を1.5 倍に増加させたが疲労寿命の向上は認められず、むしろ低下した。一方で、AF2 はAF1 に対して主筋方向の補強量を半減させたが疲労寿命はわずかに向上した。また、図-5 に代表例としてCF1 のシートのはく離状況を示す。CF1 は走行回数約20 万回時のシートのはく離が顕著となり、その後、配力筋方向のシートを起点として剥離が進行した。いずれの供試体も同様の傾向が認められたことから、疲労損傷の進展は配力筋方向シートのはく離に依存する可能性がある。

4.3 実験結果の分析

4.3.1 配力筋方向における補強材比と疲労寿命

図-6 に配力筋方向のシート剛性を用いて整理した補強材比 ρ_f ⁵⁾と疲労寿命との関係を示す。その結果、 ρ_f が0.3 付近を境に疲労寿命は単調には増加しない傾向が認められ、過年度実験結果と同様な傾向がみられた。これより、格子接着補強の疲労耐久性を評価する際には、配力筋方向シートの引張剛性に着目した整理が有効であると考えられる。

4.3.2 補強比(剛性)の違いと引張力分担割合

FRP シートと鉄筋の弾性係数の差と位置(有効高さ)の差を考慮し定義した等価補強筋比(式(1)、(2))を用いて、引張力分担割合との関係を図-7 に整理した。

$$p_{eq} = \left(\frac{A_s}{S_s} + \frac{A_f}{S_f} \cdot \frac{E_f}{E_s} \right) / d_{eq} \quad \cdots \text{式(1)}$$

$$d_{eq} = \left(A_s d_s + \frac{E_f}{E_s} A_f h \right) / \left(A_s + \frac{E_f}{E_s} A_f \right) \quad \cdots \text{式(2)}$$

ここで、 p_{eq} : 等価補強筋比、 d_{eq} : 等価有効高、 A_s : 単位幅あたりの鉄筋断面積、 A_f : 単位幅あたりの FRP シート断面積、 S_f : FRP シート設置間隔、 S_s : 鉄筋間隔、 d_s : 鉄筋有効高、 h : 床版全高、 E_s : 鉄筋の弾性係

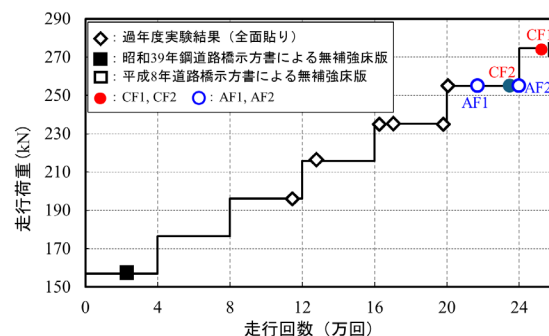


図-4 破壊時の走行回数

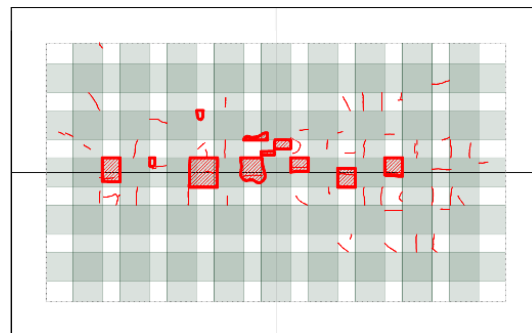


図-5 CF1 シートのはく離状況(走行回数約20 万回時)

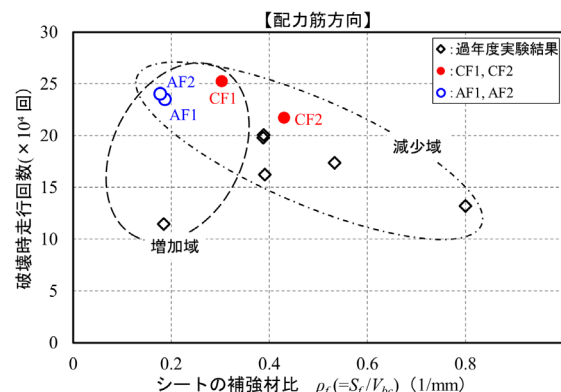


図-6 シートの補強材比と破壊時走行回数の関係

数、 E_f : FRP シートの弾性係数

鉄筋量が比較的多い主筋方向と、その2~3 割程度にとどまる配力筋方向とでは、FRP シートの引張力分担の寄与の現れ方が異なり、主筋方向ではFRP シートの分担割合が約3 割に対し、配力筋方向では約5 割以上であった。また、いずれの方向においても等価補強筋比の増加に伴ってFRP シートの引張力分担割合が増加する傾向が見られた。

4.3.3 引張力分担割合と疲労寿命

図-8 に引張力分担割合と疲労寿命との関係を示す。主筋方向では、鉄筋及びFRP シートの引張力分担割合と疲労寿命との間に明瞭な関係は認められなかった。一方、配力筋方向では、疲労寿命が高いほど鉄筋の引

張力分担割合が増加し、FRP シートの引張力分担割合は低下する傾向が認められた。すなわち、疲労寿命を考える上では、配力筋方向の引張力分担割合の力学的な意味を把握することが重要であると考えられる。

5. まとめ

本研究により、得られた知見を下記に示す。

- 1) 確認された変状の多くは、水や劣化因子の浸入による FRP シートとコンクリート部材との界面の劣化、既設コンクリートの劣化に起因する浮き、および施工時の付着不良に起因する浮きや剥離であった。特に、事前補修が不十分な事例では早期に変状が生じていた。また、点検調書では、FRP シートの劣化や損傷に関する記録が不十分な事例が多い傾向にあった。
- 2) FRP シート接着工法における耐久性能を確保するためには、設計段階において、水供給経路を把握するとともに、既設のコンクリート部材からの劣化因子除去が重要である。また、紫外線や水等の FRP シート表面および側面部からの劣化因子の抑制のため、表面塗装材の設置を基本とする。排水性及び点検性の観点から、格子貼りの適用が有効である。維持管理段階では、点検項目、評価方法および記録方法を明確にする必要がある。加えてさらに、シートに劣化が生じ、再補修・再補強を行う場合には、応力伝達方向における繊維の連続性や既設部材との一体性など、所要の性能が損なわれないように留意する必要がある。
- 3) CF では、配力筋方向の補強比を 1.5 倍に増加させた場合、疲労寿命はわずかに低下した。また、AF では、主鉄筋方向の補強比を半減させた場合、疲労寿命はわずかに向上した。また、シートのはく離は、配力筋方向から先行して進行しており、疲労損傷の進展は配力筋方向シートのはく離に依存する可能性が示された。
- 4) 等価補強筋比を指標として整理した結果、主筋方向・配力筋方向ともに、等価補強筋比の増加に伴い FRP シートの引張力分担割合が増加する傾向が認められた。
- 5) 疲労寿命と引張力分担割合との間に明瞭な関係は認められなかった。ただし、配力筋方向では、鉄筋と FRP シートとの引張力分担割合が均等に近いうちに、疲労寿命が向上する傾向があることがわかった。

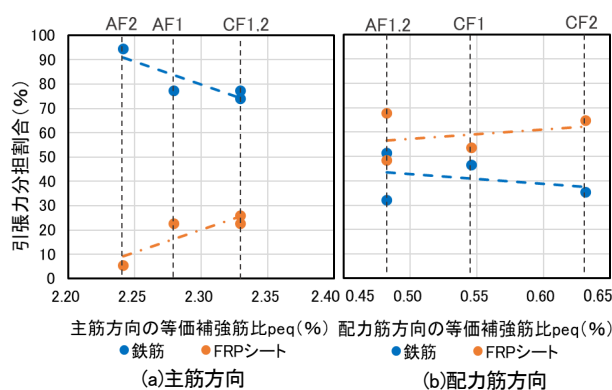


図-7 引張力分担割合と等価補強筋比

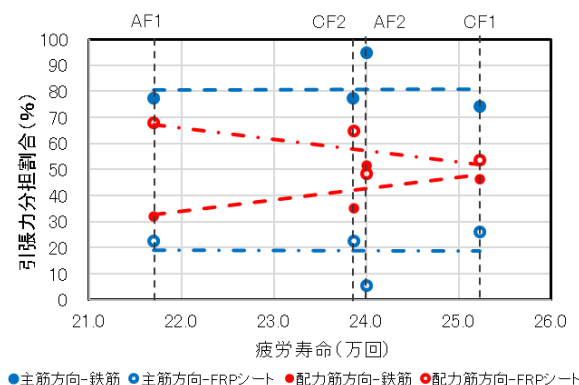


図-8 引張力分担割合と疲労寿命の関係

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート部材・コンクリート上部構造編、2017.11
- 2) 建設省土木研究所、炭素繊維補修・補強工法技術研究会：コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書（Ⅲ）－炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針（案）一、共同研究報告書 第 235 号、1999.12
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書、1964.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート部材・コンクリート上部構造編、2025.10
- 5) 小林朗、蔡華堅、下西勝、松井繁之：炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.2、pp.1513-1518、2005

謝辞

本研究は、土木研究所、繊維補修補強協会、早稲田大学、弘前大学による「FRP によるコンクリート橋の合理的な補修補強設計法に関する共同研究」の成果の一部である。本研究に際し、ご協力頂いた関係各位に感謝の意を表する。

STUDY ON THE DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE REPAIR AND STRENGTHENING DESIGN METHOD FOR PREVENTING RE-DETERIORATION OF CONCRETE BRIDGES

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Bridge Structure Research Group

Author: MATSUMI Takahiro

YOSHIDA Eiji

NAKAMURA Hiroshi

ISUDA Ryo

NAKAI Mitsuki

Abstract: The FRP sheet bonding method has been widely used as a repair and strengthening technique for existing structures. However, in actual structures, defects such as debonding and delamination have been reported, which may lead to a reduction in strengthening effectiveness and durability. In this study, with the aim of maintaining the long-term performance of this method, cases of deterioration and current maintenance practices were investigated. Based on the results, deterioration mechanisms and key considerations for design and maintenance to ensure durability were summarized. In addition, considering the transition to limit state design introduced in the 2017 Specifications for Highway Bridges, experimental investigations were conducted to evaluate the effects of strengthening conditions on the fatigue durability of RC slabs strengthened by bonded FRP sheets. The results showed that, in grid-type FRP sheet strengthening, an increase in the amount of strengthening material does not necessarily lead to an improvement in fatigue life. The results also clarified that the strengthening ratio of FRP sheets arranged in the transverse reinforcement direction is important for ensuring fatigue durability.

Keywords: FRP sheet bonding method, Carbon fiber sheet, Aramid fiber sheet, Durability assurance, Fatigue design method

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

査読無し論文・国内（計3本）

- e-1) 木原三四郎、吉田英二、山下翔真、中村英祐、松井孝洋、櫻井俊太、大久保誠、井之上賢一：道路橋のFRPシート接着工法による補強実態の調査、土木学会年次学術講演会、2025.9
- e-2) 伊須田遼、吉田英二、中井満輝、松實崇博、佐藤靖彦、長谷川泰聡、篠崎裕生：FRPシートによる配力筋方向の補強量の違いがRC床版の疲労耐久性に及ぼす影響、土木学会年次学術講演会、2026.9、投稿中
- e-3) 中井満輝、吉田英二、伊須田遼、松實崇博、佐藤靖彦、長谷川泰聡、篠崎裕生：FRPシートにより格子接着補強したRC床版における補強材引張力の分担特性、土木学会年次学術講演会、2026.9、投稿中