

連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価

に関する共同研究報告書(III)

—既設橋における連続繊維シートの挙動と損傷事例—

令和 4 年 7 月

国立研究開発法人土木研究所
一般社団法人繊維補修補強協会
積水化学工業株式会社

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価 に関する共同研究報告書(III)

— 既設橋における連続繊維シートの挙動と損傷事例 —

国立研究開発法人土木研究所
一般社団法人繊維補修補強協会
積水化学工業株式会社

要旨

本共同研究では、連続繊維シートで補強された RC 床版の耐荷機構について室内試験を中心とした検討を行う一方で、実橋における連続繊維シートの挙動や損傷事例の調査を並行して実施した。本報告では、既往の調査研究、定期点検、現地調査におけるコンクリート部材に接着された連続繊維シートの挙動と損傷事例、及び実橋 RC 床版下面に接着された連続繊維シートの応力測定の結果について報告するとともに、これらの結果を踏まえて、室内試験と実橋での連続繊維シートの損傷の相違点についてとりまとめた。

キーワード：連続繊維シート，剥離，応力測定，走行載荷試験，疲労，施工品質

共同研究者名簿（平成29年度～30年度）

国立研究開発法人土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員	玉越 隆史	(平成30年7月まで)
上席研究員	上仙 靖	(平成30年7月より)
主任研究員	田中 良樹	
研究員	佐藤 歩	(平成29年6月まで)
研究員	村井 啓太	(平成29年7月から)
交流研究員	澁谷 敦	
交流研究員	藤本 圭太郎	(平成29年5月より30年4月まで)
交流研究員	山本 健太郎	(平成30年5月より)
交流研究員	樋口 祐治	(平成30年4月より)

一般社団法人 繊維補修補強協会

RC床版共同研究委員会

委員長 野村 敏雄 株式会社大林組

委員長補佐 佐々木 一成 株式会社大林組

副委員長・炭素繊維シートグループ責任者

新藤 竹文 大成建設株式会社

副委員長・アラミド繊維シートグループ責任者

藤原 保久 三井住友建設株式会社

炭素繊維シートグループ委員

早川 智浩 株式会社大林組

太田 弘次 株式会社オリエンタルコンサルタンツ

新井 崇裕 鹿島建設株式会社

久保 昌史 清水建設株式会社

滝本 和志 清水建設株式会社

小倉 浩則 ショーボンド建設株式会社

並木 渉 株式会社 長大

小林 雅明 株式会社 長大

松井 孝洋 東レ株式会社

近藤 富士夫 東レ株式会社 (平成29年7月より)

小林 朗 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

立石 晶洋	日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
久部 修弘	三菱ケミカルインフラテック株式会社
	(平成 30 年 3 月まで)
山内 征一郎	三菱ケミカルインフラテック株式会社
	(平成 30 年 4 月より)
長谷川 泰聰	三菱ケミカルインフラテック株式会社
青柳 聖	八千代エンジニアリング株式会社

アラミド繊維シートグループ委員

篠崎 裕生	三井住友建設株式会社
三上 浩	三井住友建設株式会社
中井 裕司	前田工織株式会社
大久保 誠	前田工織株式会社
岡村 脩平	帝人株式会社
吉本 大士	帝人株式会社 (平成 30 年 3 月まで)
梶原 大資	帝人株式会社 (平成 30 年 4 月より)
倉方 裕史	帝人株式会社
宮内 理治	東レ・デュポン株式会社
	(平成 30 年 3 月まで)
岡田 泰一	東レ・デュポン株式会社
	(平成 30 年 4 月より)
菊池 美穂	東レ・デュポン株式会社
	(平成 30 年 3 月まで)
廣瀬 めぐみ	東レ・デュポン株式会社
	(平成 30 年 4 月より)
近藤 真一	ファイベックス株式会社
石井 裕二	ファイベックス株式会社
井之上 賢一	ファイベックス株式会社

事務局長

井部 博

積水化学工業株式会社

刈茅 孝一
吉田 博次
中尾 亮介

共同研究者名簿（令和元年度～令和2年度）

国立研究開発法人 土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員 上仙 靖

総括主任研究員 田中 良樹

研究員 村井 啓太 (令和元年6月まで)

交流研究員 山本 健太郎 (平成31年4月まで)

一般社団法人 繊維補修補強協会

RC床版共同研究委員会

委員長 野村 敏雄 株式会社大林組

委員長補佐 佐々木 一成 株式会社大林組

副委員長・炭素繊維シートグループ責任者

新藤 竹文 大成建設株式会社

副委員長・アラミド繊維シートグループ責任者

藤原 保久 三井住友建設株式会社

炭素繊維シートグループ委員

早川 智浩 株式会社大林組

太田 弘次 株式会社オリエンタルコンサルタンツ

新井 崇裕 鹿島建設株式会社

久保 昌史 清水建設株式会社

滝本 和志 清水建設株式会社

小倉 浩則 ショーボンド建設株式会社

並木 渉 株式会社 長大

川原 将 株式会社 長大

松井 孝洋 東レ株式会社

村井 彰児 東レ株式会社

角倉 浩平 東レ株式会社 (令和元年9月より)

立石 晶洋 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

櫻井 俊太 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

(令和元年7月より)

山内 征一郎 三菱ケミカルインフラテック株式会社

長谷川 泰聰	三菱ケミカルインフラテック株式会社
齋藤 信人	三菱ケミカルインフラテック株式会社
	(令和元年9月より)
青柳 聖	八千代エンジニアリング株式会社
	(令和元年7月まで)
渡辺 遼	八千代エンジニアリング株式会社
	(令和元年8月より)

アラミド繊維シートグループ委員

篠崎 裕生	三井住友建設株式会社
三上 浩	三井住友建設株式会社
野並 優二	三井住友建設株式会社 (令和元年9月より)
中井 裕司	前田工織株式会社
大久保 誠	前田工織株式会社
岡村 脩平	帝人株式会社
倉方 裕史	帝人株式会社
川口 武	帝人株式会社
山田 洋輔	東レ・デュポン株式会社
齋藤 祐亮	東レ・デュポン株式会社
	(令和2年3月まで)
松井 宏之	東レ・デュポン株式会社
	(令和2年4月より)
石井 裕二	ファイベックス株式会社
茄子川 治	ファイベックス株式会社
井之上 賢一	ファイベックス株式会社

事務局長

井部 博

連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価 に関する共同研究報告書(III)

— 既設橋における連続繊維シートの挙動と損傷事例 —

国立研究開発法人土木研究所
一般社団法人繊維補修補強協会
積水化学工業株式会社

要旨

本共同研究では、連続繊維シートで補強された RC 床版の耐荷機構について室内試験を中心とした検討を行う一方で、実橋における連続繊維シートの挙動や損傷事例の調査を並行して実施した。本報告では、既往の調査研究、定期点検、現地調査におけるコンクリート部材に接着された連続繊維シートの挙動と損傷事例、及び実橋 RC 床版下面に接着された連続繊維シートの応力測定の結果について報告するとともに、これらの結果を踏まえて、室内試験と実橋での連続繊維シートの損傷の相違点についてとりまとめた。

キーワード：連続繊維シート，剥離，応力測定，走行載荷試験，疲労，施工品質

共同研究者名簿（平成29年度～30年度）

国立研究開発法人土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員	玉越 隆史	(平成30年7月まで)
上席研究員	上仙 靖	(平成30年7月より)
主任研究員	田中 良樹	
研究員	佐藤 歩	(平成29年6月まで)
研究員	村井 啓太	(平成29年7月から)
交流研究員	澁谷 敦	
交流研究員	藤本 圭太郎	(平成29年5月より30年4月まで)
交流研究員	山本 健太郎	(平成30年5月より)
交流研究員	樋口 祐治	(平成30年4月より)

一般社団法人 繊維補修補強協会

RC床版共同研究委員会

委員長 野村 敏雄 株式会社大林組

委員長補佐 佐々木 一成 株式会社大林組

副委員長・炭素繊維シートグループ責任者

新藤 竹文 大成建設株式会社

副委員長・アラミド繊維シートグループ責任者

藤原 保久 三井住友建設株式会社

炭素繊維シートグループ委員

早川 智浩 株式会社大林組

太田 弘次 株式会社オリエンタルコンサルタンツ

新井 崇裕 鹿島建設株式会社

久保 昌史 清水建設株式会社

滝本 和志 清水建設株式会社

小倉 浩則 ショーボンド建設株式会社

並木 渉 株式会社 長大

小林 雅明 株式会社 長大

松井 孝洋 東レ株式会社

近藤 富士夫 東レ株式会社 (平成29年7月より)

小林 朗 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

立石 晶洋	日鉄ケミカル&マテリアル株式会社
久部 修弘	三菱ケミカルインフラテック株式会社
	(平成30年3月まで)
山内 征一郎	三菱ケミカルインフラテック株式会社
	(平成30年4月より)
長谷川 泰聰	三菱ケミカルインフラテック株式会社
青柳 聖	八千代エンジニアリング株式会社

アラミド繊維シートグループ委員

篠崎 裕生	三井住友建設株式会社
三上 浩	三井住友建設株式会社
中井 裕司	前田工織株式会社
大久保 誠	前田工織株式会社
岡村 脩平	帝人株式会社
吉本 大士	帝人株式会社 (平成30年3月まで)
梶原 大資	帝人株式会社 (平成30年4月より)
倉方 裕史	帝人株式会社
宮内 理治	東レ・デュポン株式会社
	(平成30年3月まで)
岡田 泰一	東レ・デュポン株式会社
	(平成30年4月より)
菊池 美穂	東レ・デュポン株式会社
	(平成30年3月まで)
廣瀬 めぐみ	東レ・デュポン株式会社
	(平成30年4月より)
近藤 真一	ファイベックス株式会社
石井 裕二	ファイベックス株式会社
井之上 賢一	ファイベックス株式会社

事務局長

井部 博

積水化学工業株式会社

刈茅 孝一
吉田 博次
中尾 亮介

共同研究者名簿（令和元年度～令和2年度）

国立研究開発法人 土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員 上仙 靖

総括主任研究員 田中 良樹

研究員 村井 啓太 (令和元年6月まで)

交流研究員 山本 健太郎 (平成31年4月まで)

一般社団法人 繊維補修補強協会

RC床版共同研究委員会

委員長 野村 敏雄 株式会社大林組

委員長補佐 佐々木 一成 株式会社大林組

副委員長・炭素繊維シートグループ責任者

新藤 竹文 大成建設株式会社

副委員長・アラミド繊維シートグループ責任者

藤原 保久 三井住友建設株式会社

炭素繊維シートグループ委員

早川 智浩 株式会社大林組

太田 弘次 株式会社オリエンタルコンサルタンツ

新井 崇裕 鹿島建設株式会社

久保 昌史 清水建設株式会社

滝本 和志 清水建設株式会社

小倉 浩則 ショーボンド建設株式会社

並木 渉 株式会社 長大

川原 将 株式会社 長大

松井 孝洋 東レ株式会社

村井 彰児 東レ株式会社

角倉 浩平 東レ株式会社 (令和元年9月より)

立石 晶洋 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

櫻井 俊太 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

(令和元年7月より)

山内 征一郎 三菱ケミカルインフラテック株式会社

長谷川 泰聰	三菱ケミカルインフラテック株式会社
齋藤 信人	三菱ケミカルインフラテック株式会社
	(令和元年9月より)
青柳 聖	八千代エンジニアリング株式会社
	(令和元年7月まで)
渡辺 遼	八千代エンジニアリング株式会社
	(令和元年8月より)

アラミド繊維シートグループ委員

篠崎 裕生	三井住友建設株式会社
三上 浩	三井住友建設株式会社
野並 優二	三井住友建設株式会社 (令和元年9月より)
中井 裕司	前田工織株式会社
大久保 誠	前田工織株式会社
岡村 脩平	帝人株式会社
倉方 裕史	帝人株式会社
川口 武	帝人株式会社
山田 洋輔	東レ・デュポン株式会社
齋藤 祐亮	東レ・デュポン株式会社
	(令和2年3月まで)
松井 宏之	東レ・デュポン株式会社
	(令和2年4月より)
石井 裕二	ファイベックス株式会社
茄子川 治	ファイベックス株式会社
井之上 賢一	ファイベックス株式会社

事務局長

井部 博

目 次

1. はじめに	1
2. RC 部材に接着された連続繊維シートの挙動と損傷事例	2
2.1 RC 部材に接着された連続繊維シートの挙動	2
2.2 連続繊維シートの変状事例	15
2.3 施工の影響による不具合事例	31
2.4 連続繊維補修補強工事の施工品質確保のための施工技術者の資質について	33
3. 実橋床版下面に接着された連続繊維シートの応力測定	36
3.1 概要	36
3.2 対象橋	36
3.3 調査方法	39
3.4 走行試験結果	45
3.5 24 時間測定結果	54
4. 室内試験と実橋での損傷の相違点	55
5. まとめ	56
謝辞	57
参考文献	58

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）床版の疲労損傷は、国内の厳しい交通実態や環境条件を反映して道路橋の主たる損傷要因の一つである。疲労損傷に対する補強法として、連続繊維シートを RC 床版下面に接着することによる工法がある。同工法は、床版に限らず、コンクリート構造物の補修・補強において、軽さや施工性で有利な点から既に多く利用され、主要な工法の一つになっている。しかし、RC 床版に適用する同工法は、複数の設計方法が用いられているため、概ね同じ条件の床版であっても使用する繊維や樹脂の種類、及び補強量に大きな相違が生じる場合がある。また、連続繊維シートに使用される材料、断面構成等の仕様は多種多様なものが提案されているが、いずれも JIS の材料規格がなく、また信頼性を確保するための適切な品質管理方法や補強効果の評価法が必ずしも明確でない。本共同研究では、国内外の研究や土木研究所のこれまでの検討結果を含めた既往の知見に基づき、連続繊維シートで補強された RC 床版の耐荷機構について検討するとともに、個々の補強材の機械的性質について調査検討を行う。

連続繊維シートで補強された RC 部材の載荷試験をはじめ、これまで同補強工法に関する多くの研究が行われ、連続繊維シートとコンクリートの付着の評価法、設計法も既に提案されている^{例え1)}。しかし、その付着に関する繊維や樹脂の物性あるいはそれらの組合せの下での物性の評価法はまだ必ずしも明確にされていない。これらの点を踏まえて、本共同研究では床版補強の限界状態設計法確立に向けて、繊維や樹脂の物性の影響を含めた、連続繊維シートとコンクリートの付着特性とその評価法について検討を行った。これまでに、同報告書（Ⅰ）で連続繊維シート及びそれを構成するエポキシ樹脂のせん断弾性係数について、また同報告書（Ⅱ）では、連続繊維シート付着挙動への汎用 FEM 解析の適用性について報告した^{2),3)}。

本共同研究では、これらの室内試験を中心とした検討を行う一方、実橋における連続繊維シートの挙動や損傷事例の調査を並行して実施した。2 章では、既往の調査研究、実橋の定期点検、及び本共同研究における実橋調査に基づき、RC 部材に接着された連続繊維シートの挙動と損傷事例について報告する。3 章では、実橋床版下面に接着された連続繊維シートの応力測定の結果について報告する。これらの結果を踏まえて、4 章で、室内試験と実橋での連続繊維シートの損傷の相違点について考察する。

2. RC 部材に接着された連続繊維シートの挙動と損傷事例

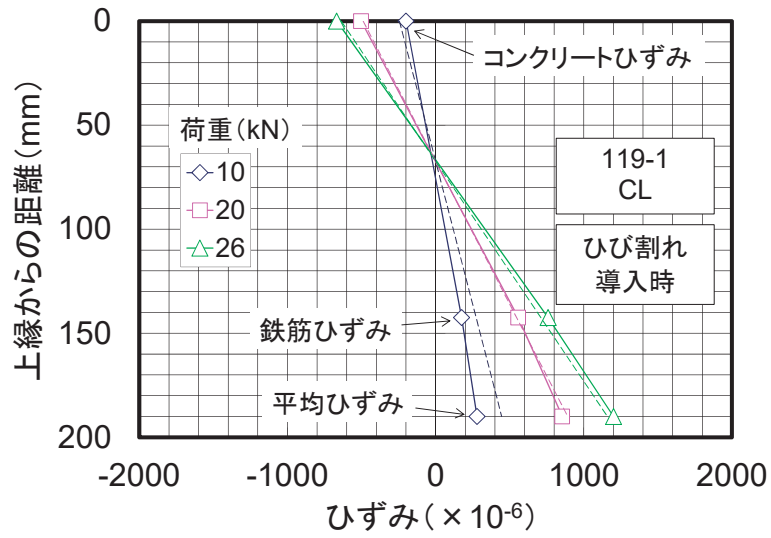
2.1 RC 部材に接着された連続繊維シートの挙動

2.1.1 曲げにおける平面保持の仮定

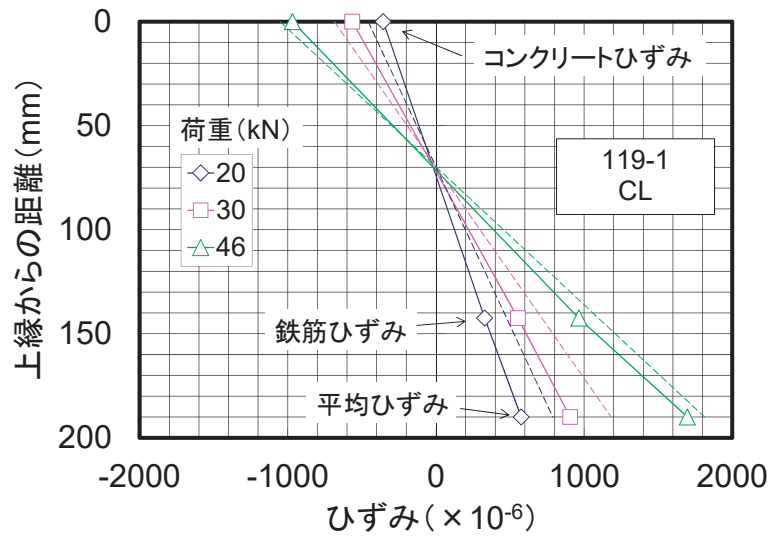
連続繊維シートによる補強技術について検討され始めた頃は、連続繊維シートを下面に接着した RC 部材が曲げを受けた際に、平面保持の仮定が必ずしも成立しないとするものも見られたが、その後の設計資料等では、平面保持の仮定がある程度成立することが前提とされている¹⁾³⁾。ただし、連続繊維シートは、鋼板接着や FRP 板と比べて薄いことから、RC 部材下面付近の粗骨材の影響を受けて、局所的にひずみの値が異なる場合があると考えられる。連続繊維シートの付着挙動を把握するため、鋼板と同様にひずみの測定に 5mm 程度のひずみゲージが用いられることがあるが、単に平均ひずみを把握するためだけであれば、コンクリート用の基長 60 mm の比較的長いひずみゲージを用いるか、パイ型変位計から得られた変位を基長で除して平均ひずみを求めるのがよいと考えられる。

図-2.1.1 に、連続繊維シートを下面に接着した RC はりの曲げ試験における、支間中央における鉛直方向ひずみ分布を測定した例を示す⁴⁾。この例では、下縁の連続繊維シートのひずみは基長 150 mm で設置したパイ型変位計で測定した。図中には各荷重段階での実測値とともに、各荷重での計算値も破線で示す。計算値は、いずれも曲げひび割れ発生後、引張力に対するコンクリートの貢献を無視した計算 (RC 計算) による。参考として、連続繊維シート接着前の RC 単体のときの測定結果も同図(a)に示す。連続繊維シート接着後の静的載荷試験では、実測値が計算値よりも小さい傾向が見られ、荷重が増加するにしたがって計算値に近づく傾向が見られた。コンクリート上縁のひずみ、鉄筋ひずみ、下縁のパイ型変位計による平均ひずみが概ね直線上にあり、平面保持の仮定が成立する範囲にあった。

また、図-2.1.2 に、同文献の静的載荷試験における中立軸位置を荷重との関係で示す⁴⁾。試験結果による中立軸位置は、コンクリート上縁のひずみ、鉄筋ひずみ、下縁のパイ型変位計による平均ひずみの 3 点のデータを用いた回帰分析により算定した。図中には、連続繊維シート接着のない RC はりの全断面有効としたときの中立軸位置、ひび割れ後の引張域を無視したときの中立軸位置 (図中の RC) 及び連続繊維シート接着後のはりについてコンクリートの引張域を無視したときの中立軸位置、それぞれの計算値を示す。また、それぞれ同一の断面性能を有する RC はりの初期ひび割れ導入時の測定結果を併せて示す。初期ひび割れ導入時は目標とする幅のひび割れが概ね発生した時点で載荷を終了したため、大きい荷重での結果がないが、D13、D19 いずれの場合も、載荷を終了した時点で、実測による中立軸位置が引張無視で計算した中立軸位置と概ね一致していた。連続繊維シート接着後の静的載荷試験における中立軸位置についても、ある程度以上の荷重が負荷されている状態での実測による中立軸位置は概ね計算値とよく一致する傾向が見られた。



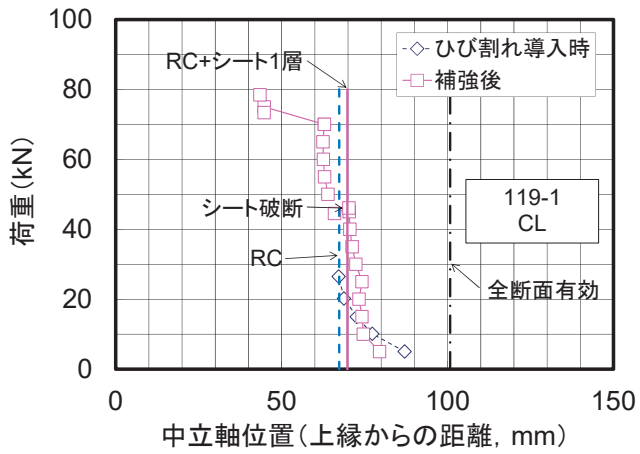
(a) 連続繊維シート接着前，ひび割れ導入時



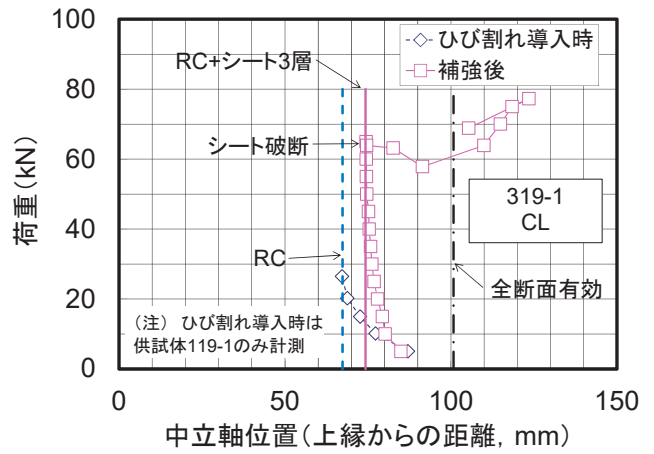
(b) 連続繊維シート接着後，静的載荷試験

(CLは支間中央の意)

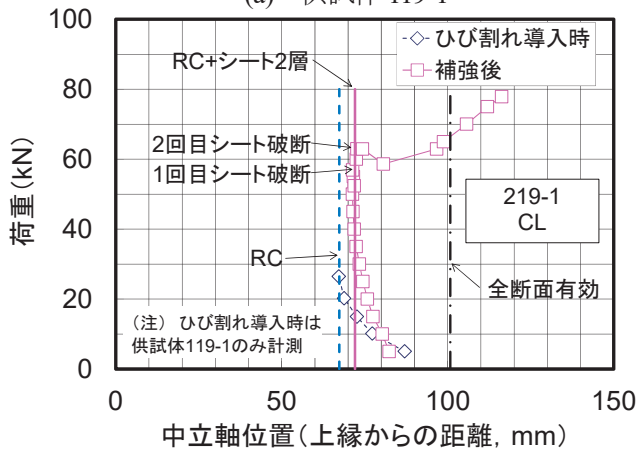
図-2.1.1 支間中央における鉛直方向ひずみ分布の例⁴⁾



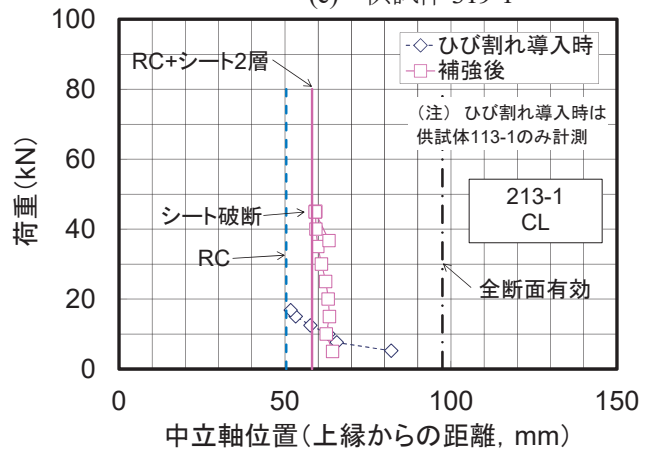
(a) 供試体 119-1



(c) 供試体 319-1



(b) 供試体 219-1



(d) 供試体 213-1

図-2.1.2 静的載荷試験における中立軸位置の変化の例⁴⁾

2.1.2 繰返しの影響

(1) 下面接着補強された RC 部材の主な破壊形態と疲労

既往の試験における FRP 材で補強された RC はりの破壊形態は、FRP 材の端部からの剥離（端部剥離）や、コンクリートの曲げひび割れや斜めひび割れからの FRP 材の剥離が先行する場合^{例えは 5),6)}（中間剥離）、あるいは FRP 材の破断が先行する場合^{例えは 4),6),7)}が見られる。

FRP 材で補強された RC はりの疲労試験では、FRP 材の剥離や破断といった変状が生じる前に鉄筋が疲労破断する事例が多く、FRP 材で補強された RC はりの疲労寿命は従来の鉄筋の疲労寿命推定式で予測できるとされている⁸⁾。連続繊維シートの中間剥離については、主鉄筋が降伏した後に発生する傾向が見られる⁹⁾ ことと関係すると考えられる。

(2) 付着の疲労

本共同研究で実施した軸引張載荷試験において、連続繊維シートが剥離する際のせん断付着応力度は 3~4 N/mm² 程度であった^{10),11)}。剥離の際は、連続繊維シートが接着しているコンクリート界面付近のコンクリートがひび割れて剥離する傾向があることから、付着の疲労はコンクリートの疲労に依存する傾向にあると考えられる。

図-2.1.3 に、既往の調査研究における気中におけるコンクリートの圧縮疲労試験の結果を示す¹²⁾⁻¹⁶⁾。コンクリートの圧縮疲労において、水が介在しない場合、 $10^6 \sim 10^7$ 回における応力比 S は 0.6~0.7 程度である。また、同図には、直接引張載荷によるコンクリートの疲労試験結果の例を併せて示す¹⁷⁾。この例では、引張の方がやや高い傾向であったが、概して見れば、コンクリートの疲労強度は、圧縮、引張にかかわらず概ね同様の傾向にあることがわかる。このことから、コンクリート界面付近のコンクリートの付着に関する疲労も、同様の傾きに基づきコンクリートの負担の程度に応じて評価できる可能性がある^{と推察される}。

(3) 連続繊維シート単体の破断と引張疲労

曲げ試験で連続繊維シートの破断が生じた事例には、連続繊維シートの破断が生じたときに作用していたシートのひずみが、シートの材料引張試験で得られる破断時の限界ひずみ（以下、破断時のシートに生じていた軸方向ひずみを引張限界ひずみという）よりも小さかった事例^{4),18)}と同等であった事例^{例えは 6)}がある。前者の場合、曲げ試験における引張限界ひずみが小さかった理由として、連続繊維シートの施工の影響や連続繊維複合材料の微小な欠陥の分布に依存する寸法効果の影響^{4),18)}が挙げられている。また、一般に FRP 材の引張強度は、繰返し荷重の影響を受けることが知られており、CFRP の場合、 10^7 回時で静的引張強度の 80% 程度となることが知られている¹⁹⁾⁻²¹⁾。図-2.1.4 に、炭素繊維シートの疲労試験結果の例を示す⁴⁾。炭素繊維シートの場合、明確な S-N 関係を得るには至っていないが、この事例では、既往の CFRP 材の疲労試験結果と同様の傾向が見られた⁴⁾。また、曲げを受けるコンクリート部材に接着された連続繊維シートの破断は繰返し荷重の影響を受けることが確認された⁴⁾。

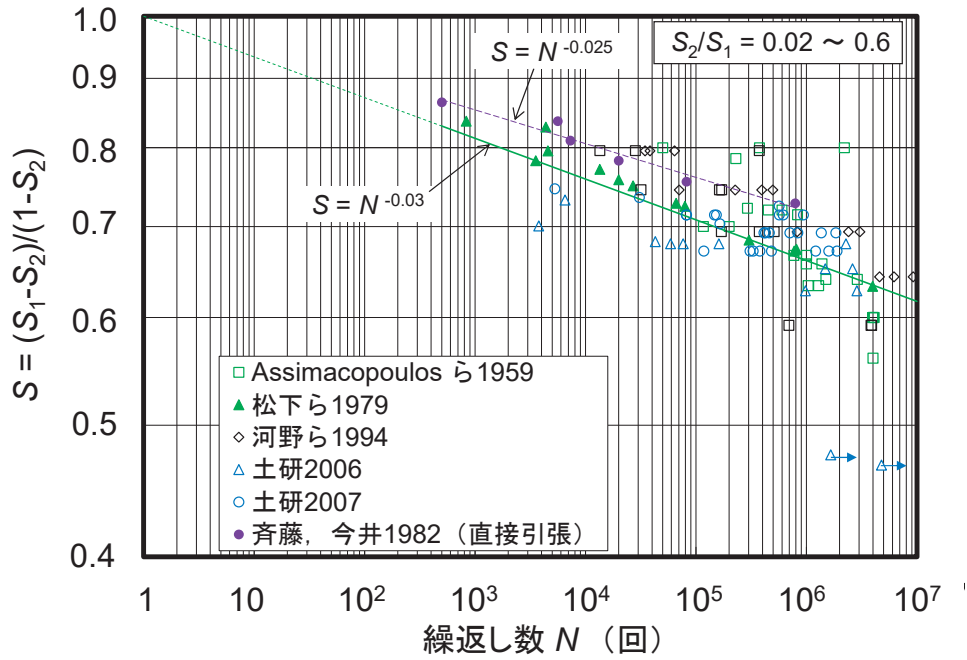
(4) 輪荷重走行下における連続繊維シートが下面に接着された RC 床版の破壊形態

旧建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会が実施した共同研究（以下、旧共研という）の中で、層数の異なる炭素繊維シートを下面に接着した RC 床版の輪荷重走行試験が実施された²²⁾⁻²⁴⁾。その試験後の切断面の例を図-2.1.5 に示す。同図(a)には、補強量を 1 層当り 300g/m² 目付として、主鉄筋方向 2 層と

配力鉄筋方向2層（以下、2層×2層と記す）とした供試体を、図(b)には4層×4層とした供試体をそれぞれ示す。また、図-2.1.6に、比較のため、鋼板接着の場合についても輪荷重走行試験後の切断面を示す²⁵⁾。補強材の剛性が高い板厚4.5mmの鋼板が床版下面に接着された場合、図-2.1.6の例に見られるように、補強材の端部から斜めひび割れが発生して、広範囲に抜け落ちが生じることがある²⁵⁾。一方、連続繊維シートが床版下面に接着された場合には、4層×4層であっても、補強のないRC床版と同様に、輪荷重(500mm×200mmの載荷ブロック)の近くで斜めひび割れが発生して抜け落ちが生じていた。

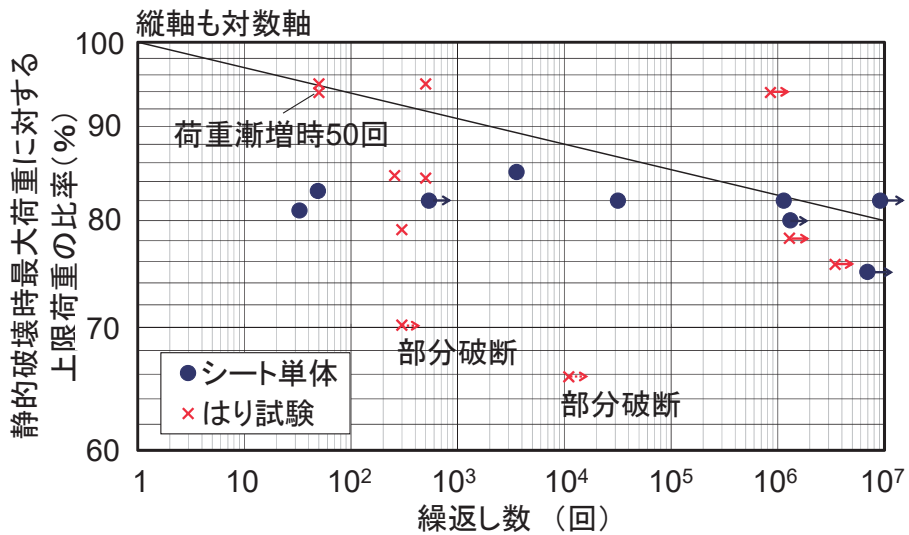
残されている写真が限られているが、図-2.1.7～2.1.11に同試験シリーズにおける試験後の床版上面、下面の写真と、走行試験中における床版下面の写真を示す。残されているのは写真のみで、それぞれの解説はほとんどない。図-2.1.7(b)、2.1.8(b)、2.1.10(b)の床版下面に記された白線は、試験終了後に連続繊維シートが浮いている箇所を示したものと考えられる。内側の白線は押抜かれたコンクリート塊に接着している部分、外側の白線と内側の白線の間は、連続繊維シートが押抜き破壊に伴って浮いていた（剥離していた）箇所と考えられる。その浮きが認められた範囲は、連続繊維シートの層数が増加するに従って、広くなる傾向が見られる。また、4層×4層の場合は、連続繊維シートの端部まで剥離範囲が到達して、端部にコンクリートと連続繊維シートとの間に隙間が見られる状況に至っていたと考えられる。図-2.1.9(c)は、その状況を側面から撮影したと考えられる。また、図-2.1.7(c)より2層×2層のときの連続繊維シートの面外方向の変形の様子が分かるが、図-2.1.9(b)の4層×4層の場合は、連続繊維シートの剛性が高いため、面外方向の局所的な変形がほとんど分からない。それぞれの撮影の範囲、角度、光の加減などの影響もあって比較しにくいだが、概して、4層×4層の場合は、連続繊維シート単体での曲げ剛性が相対的に高いため、局所的な変形が生じにくい傾向にあったと推察される。

図-2.1.11に示した2層×2層の供試体では、試験中に連続繊維シートの浮きを観察するようになり、浮きの経過がある程度記録されている。この供試体は、階段載荷で235kN、163000回で抜け落ちに至ったとされる²³⁾。図-2.1.11(c)より、140000回（床版下面に記されたKは×1000の意）から浮きが確認され始め、その範囲が走行繰返しとともに徐々に広がったことが分かる。しかし、被補強RC部材の劣化伸展との関係が明確でないので、a) RC部材の劣化が走行繰返し載荷によって先行して連続繊維シートの剥離が見られ始めたのか、逆にb) 連続繊維シートの剥離が生じ始めたために、RC部材の劣化が早まったのか、明確には確認できない。同試験シリーズでは、1層×1層から4層×4層まで層数をパラメータとして輪荷重走行試験を実施して、補強量が2層×2層の場合に最も疲労耐久性が高かったと報告されている²²⁾。このことから、2層×2層の場合は、試験の途中で既に連続繊維シートの剥離が認められたが、主としてa)のパターンで剥離が生じ始めた可能性が高いと考えられる。旧共研の報告書では、3層×3層以上の層数の場合に付着疲労の影響が強くなった可能性がある旨が記されており、ここでいうb)に近いパターンで連続繊維シートの剥離が先行して抜け落ちに至ったと考えられる。



- 注 1) 応力比 $S_i = P_i / P_u$, ただし, P_1 は上限荷重, P_2 は下限荷重, P_u は静的載荷時の最大荷重
 2) S-N 線は松下の結果をもとに(1,1)を通るように回帰した結果を丸めた.
 3) Assimacopoulos らの結果¹²⁾は, S_2 が 70%, 90%のデータを除く.
 4) 河野らの結果¹⁴⁾は, 水中施工した供試体のデータを除く.

図-2.1.3 気中におけるコンクリートの圧縮疲労試験及び引張疲労試験の結果¹²⁾⁻¹⁷⁾

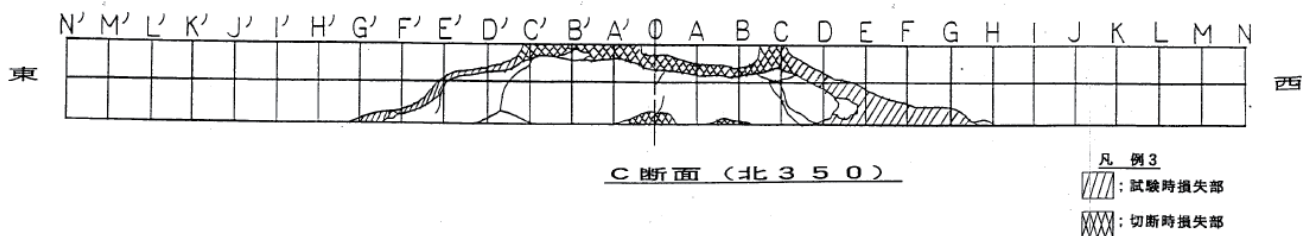


注) 静的破断時のひずみは 2010×10^{-6}

図-2.1.4 炭素繊維シートの疲労試験結果の例⁴⁾



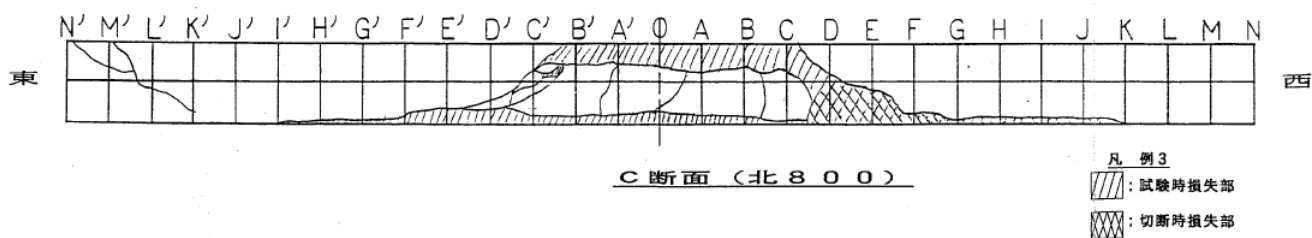
i) 走行直角方向切断面 (B断面)



ii) 走行直角方向切断面 (C断面)

(a) 炭素繊維シート全面2層貼りの場合 (S39+2×2S-D2)

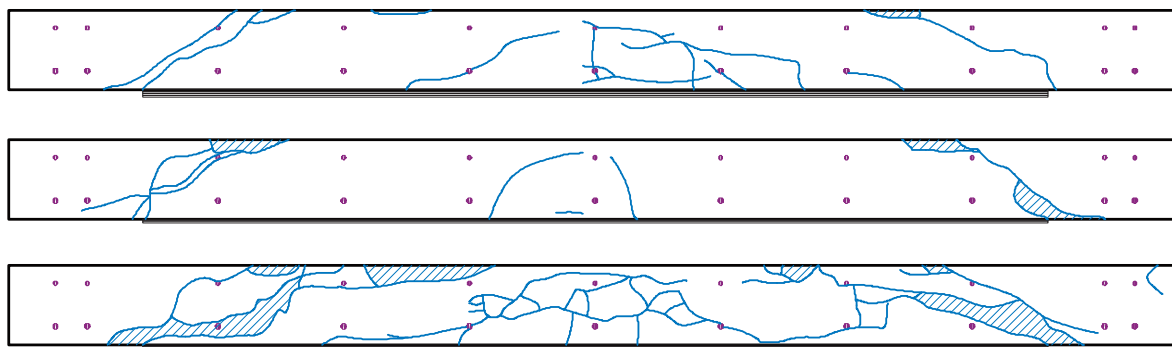
図-2.1.5 下面接着補強されたRC床版の破壊後の断面観察



(b) 炭素繊維シート全面4層貼りの場合

(S39+4×4S-D2, 走行直角方向切断面, C断面)

図-2.1.5 下面接着補強されたRC床版の破壊後の断面観察 (続き)

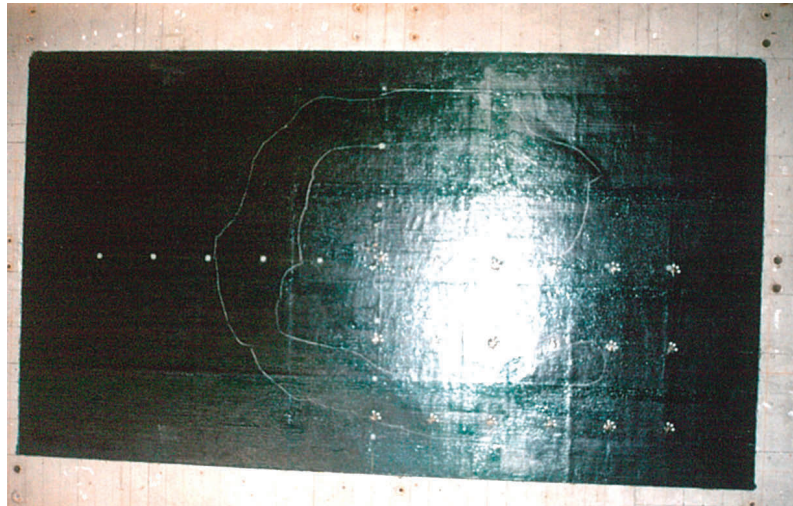


(走行直角方向切断面, 上から CL+600, CL, CL-600mm)

図-2.1.6 鋼板で下面接着補強されたRC床版の破壊後の断面観察²⁵⁾



(a) 試験後の上面

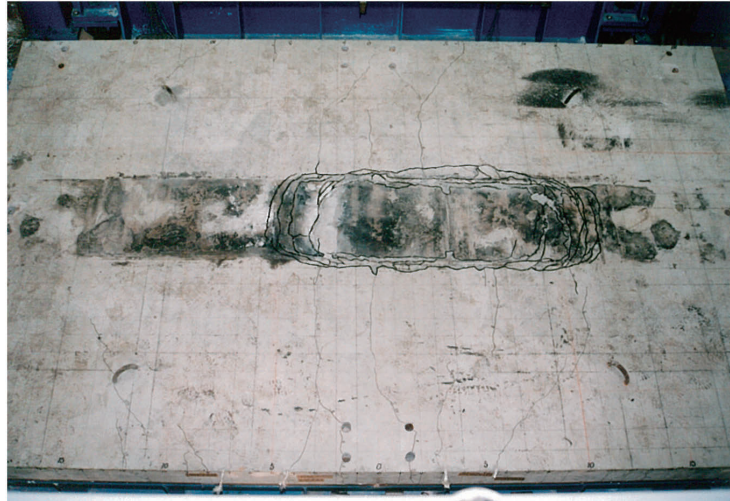


(b) 試験後の下面

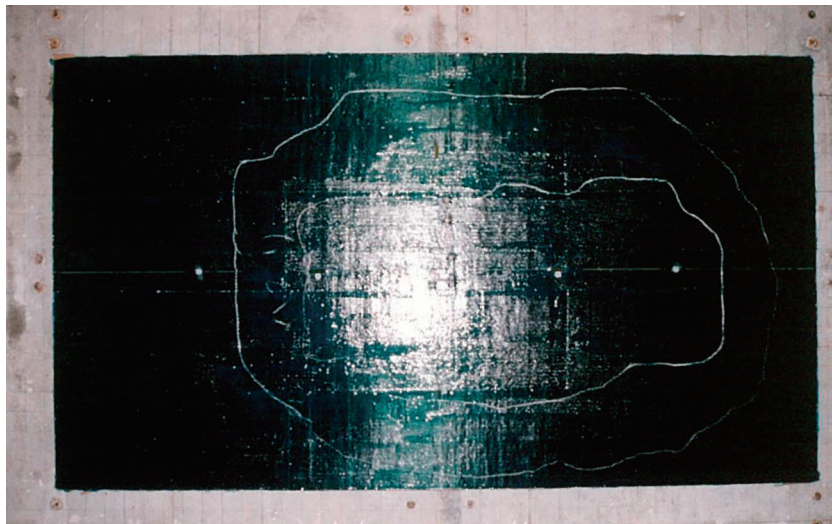


(c) 連続繊維シートの変形

図-2.1.7 輪荷重走行試験による炭素繊維シート全面貼りの破壊状況
(高強度型, 2層×2層, FWC-2×2S-D2)

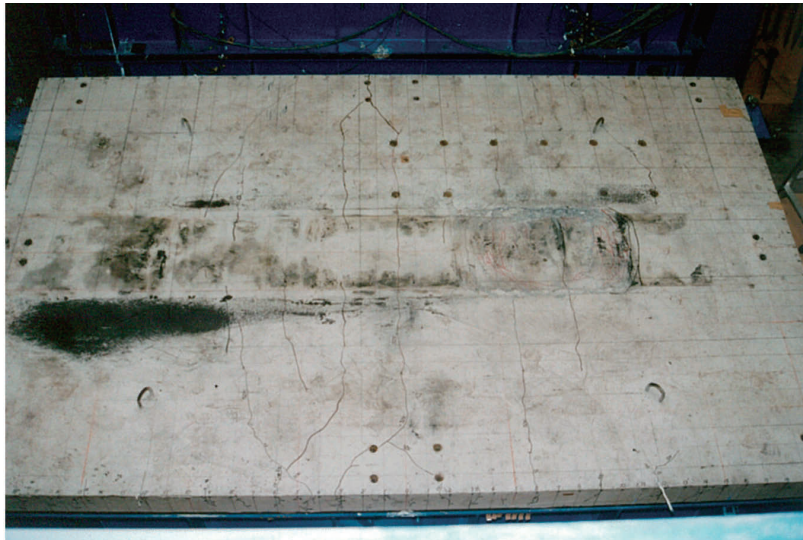


(a) 試験後の上面



(b) 試験後の下面

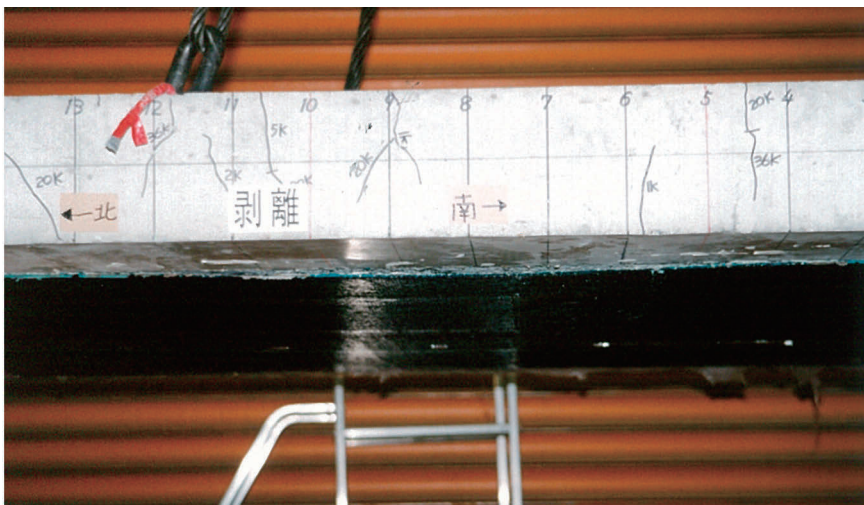
図-2.1.8 輪荷重走行試験による炭素繊維シート全面貼りの破壊状況
(高強度型, 3層×3層, FWC-3×3S-D2)



(a) 試験後の上面

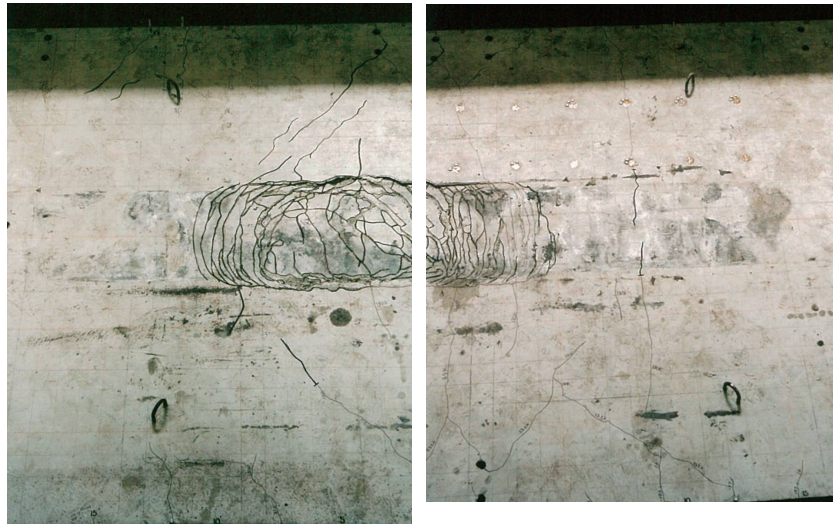


(b) 試験後の下面

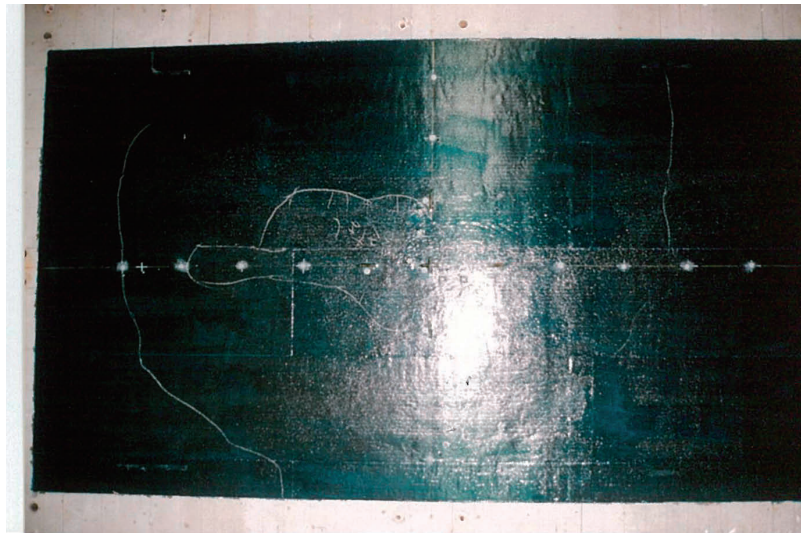


(c) 連続繊維シート端部の剥離

図-2.1.9 輪荷重走行試験による炭素繊維シート全面貼りの破壊状況
(高強度型, 4層×4層, FWC-4×4S-D2)



(a) 試験後の上面

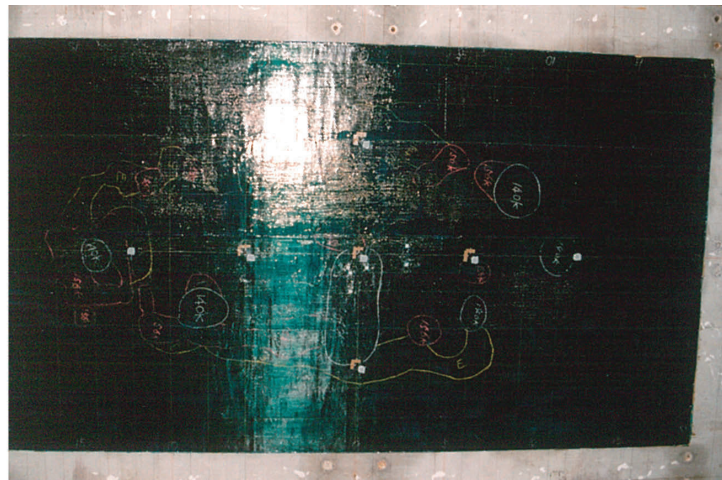


(b) 試験後の下面

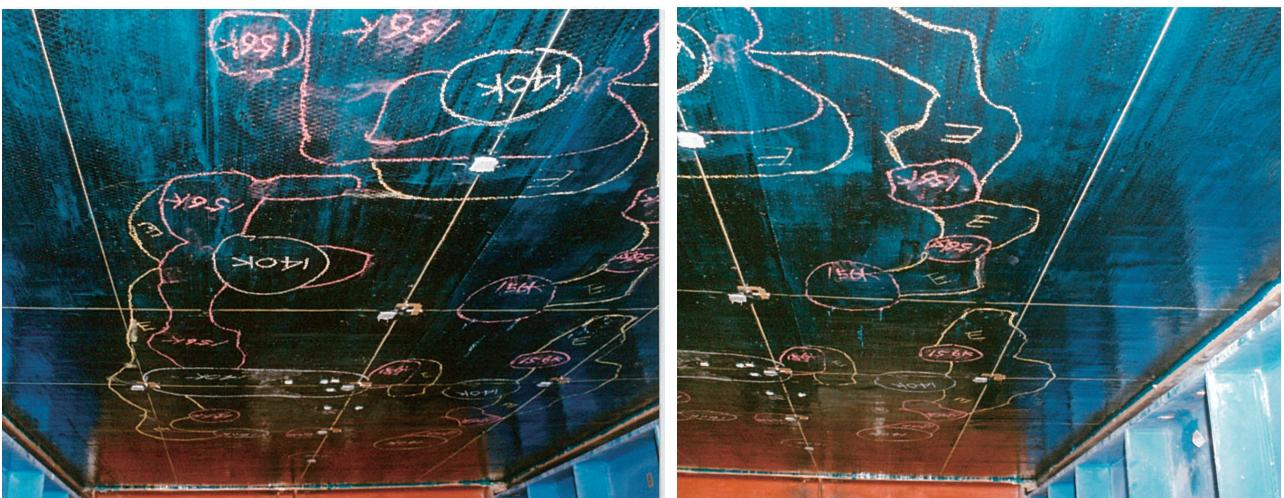
図-2.1.10 輪荷重走行試験による炭素繊維シート全面貼りの破壊状況
(高強度型, 4層×4層, FWC-4×4S-D2-2)



(a) 試験後の上面



(b) 試験後の下面



(c) 連続繊維シートの子き

図-2.1.11 輪荷重走行試験による炭素繊維シート全面貼りの破壊状況
(高強度型, 2層×2層, FWC-2×2S-D3-2)

2.2 連続繊維シートの変状事例

(1) 既往の文献における事例

表-2.2.1 に、実橋の補修現場における連続繊維シートの変状事例、及び既往の研究^{4),8),9),22)-24),26)-31)}における連続繊維シートの破壊事例の種類を示す。ここでは、数量を問わず、どのような種類の変状がこれまでに見られたかという観点で事例を集めて整理した。浮きは、剥離過程の中の一状態であるかもしれないが、ここでは分けて整理した。床版下面の連続繊維シートの浮きは、実験だけでなく、実橋でも見られた。しかし、撤去部材の載荷試験を除くと、実橋での連続繊維シートの破断は報告されていない。また、押し抜きせん断破壊のように、実験における厳しい荷重条件下で見られる症状は、連続繊維シートで補強された実橋 RC 床版の事例として報告されていない。はり試験で見られる連続繊維シートの端部剥離や中間剥離は、これまでのところ、実橋の主桁補強での事例で報告されていない。ただし、床版については、次項に示すとおり端部剥離の事例が実橋で見られた。

表-2.2.1 のうち、連続繊維シートの傷は、図-2.2.1 に示すとおり、既設コンクリート橋の桁下面に接着された連続繊維シートが、供用後に何らかの硬い物の接触により引っかき傷になってしまったと考えられる事例である。また、同表のうち、母材の水平ひび割れは、図-2.2.2 に示すように、連続繊維シートが下面に接着された RC 床版を撤去したところ、切断面にコンクリートの水平ひび割れが見られた事例である。

表-2.2.2 に、野々村らの実橋調査による、連続繊維シートによる床版補強後の変状事例を示す³²⁾。対象とした 9 橋すべてに浮きが見られ、そのうち 6 橋で浮きの拡大が認められた。浮きの拡大の要因について直接的な調査はされていないが、推定される要因として輪荷重や浸透水の影響が挙げられている。50mm 以下の比較的小さい浮きは 9 橋すべてで見られたが、経年による拡大が見られず、施工初期から発生していた可能性が疑われるとされる。また、施工時の下地処理の影響が生じている事例も見られた。さらに、この調査の範囲では、全面貼りの方が格子貼りに比べて浮きの範囲が大きく、経年的に拡大する事例が多いと報告されている。

(2) 2014～2016 年の定期点検結果で見られた事例

図-2.2.3 に、道路橋 RC 床版の下面に接着された連続繊維シートの外観を示す。近年、一般道においても格子貼りの事例が多く見られ、連続繊維シートの幅や間隔、ハンチ部の処理といったレイアウトは橋によって異なる場合が見られた。

図-2.2.4 に、全面貼りで浮きが見られた事例を示す。また、図-2.2.5 に、格子貼りで浮きが見られた事例を示す。図-2.2.5(a), (b)は、床版下面の広範囲に浮きが見られた事例を示す。同図(a)は、床版からの漏水が著しく、格子窓や連続繊維シートの端部に漏水または漏水痕が見られる。同図(c), (d)は、図(b)と同じ橋で撮影されたもので、連続繊維シートの交差部や同交差部と一般部の境目で、連続繊維シートの浮きが認められた。図-2.2.5(e)は、鋭角部への連続繊維シートの接着事例であり、端対傾構に近い側に連続繊維シートの浮きが見られた。この事例も、床版からの漏水痕が認められた。図-2.2.5(f)は、同図(a)と同じ橋の事例で、その一部に連続繊維シートの剥離が見られた。図-2.2.5(g)～(j)は、ハンチ部付近の浮き、剥離の事例を示す。いずれも床版からの漏水痕が見られた。

定期点検結果の事例では、格子貼りの場合でも浮きが見られる事例があり、多くの場合、漏水痕を伴って

いたことから、床版からの漏水の影響または連続繊維シートの施工前に生じていた漏水の影響により、浮きや剥離が生じた可能性が高いと考えられる。漏水がなく、浮きが認められた事例は、前掲表-2.2.2 に示した要因のほか、コンクリート表面付近の水分や下層（複数層のうち床版に近い層）の連続繊維シート表面の水分の影響、湿度管理の影響などを含めて、施工時の何らかの影響によると考えられる。

(3) 現地調査における事例

2017年に、表-2.2.2 に示した野々村ら³²⁾の調査対象橋梁のうちC橋、F橋の2橋、及び床版橋J橋を対象に、連続繊維シートの状況について現地調査を行った。表-2.2.3 に、そのときの概要を示す。C橋、F橋は、部分的に限られた範囲で連続繊維シートの浮きが認められた。J橋は、曲げひび割れから漏水が認められ、その周囲に連続繊維シートの浮きが生じている箇所があった。調査時点で車道部には既に防水層が敷設されていたが、両側の歩道部には防水層が設置されていなかった。このことから、歩道部や歩車道境界部から、路面水が浸入した可能性があると考えられる。

表-2.2.4 に、2018年に行った2橋の連続繊維シートで補強されたRC床版の現地調査結果の概要を示す。このうち、K橋は、前項(2)で述べた定期点検結果で、1部の径間の床版下面に接着された連続繊維シートに全面的な浮きが見られた橋である(図-2.2.5(b)~(d))。K橋は、1963年竣工の17径間単純鋼合成鈹桁であり、4車線、有効幅員14.5m、5主桁、床版支間3.2m、床版厚180mmの断面構成であった。片側に側道橋があり、対象橋に歩道部はない。大型車交通量は、2010年時点で約4700台/12hと厳しい交通条件であり、調査時には全径間のRC床版下面に炭素繊維シートが施工されていた。また、この時点では、全径間に防水層が施工されていた。現地調査では、全面剥離とされる第15径間と、全面剥離が報告されていない第4径間を対象に、近接目視による調査を行った。その結果、第15径間では、前掲のとおり連続繊維シートの浮きが広範囲に認められた。ところどころで浮きが生じており、たたきを開始してほどなく浮きを確認できるほど多くの箇所で生じていた。前掲の図-2.2.5(c)、(d)に示した定期点検から抜粋した写真では、格子貼りの連続繊維シートの交差部や同交差部と一般部の境目で浮きが認められた。現地調査では、それらの他に、交差のない一般部での浮きや剥離も近接目視とたたきにより確認できた。連続繊維シートの交差部の打音は比較的高い音であったことから、連続繊維シート間で浮きが生じていたと考えられる。一方、第4径間ではそのような広範囲に浮きが認められることはなかった。一部のハンチ入隅部付近でR処理のためのパテ材と連続繊維シートの浮きが認められた。また、表-2.2.4や図-2.2.6に示すとおり、P4付近の桁端部でコンクリートの含水率が高い範囲があった(水分計K社HI-520で確認)。

L橋は、1962年竣工の単径間の単純鋼合成鈹桁である。3主桁の橋に桁高の小さい桁を追加した変則的な断面構成で、2車線、有効幅員8m、床版支間2.4m(拡幅部は1.65m)、床版厚160mmの断面構成であった。さらに側道橋がある。大型車交通量は約660台/12hであるが、1995年に、B活荷重対応のため、RC床版の下面の床版支間方向に3層、橋軸方向に2層で、高弾性型炭素繊維シート(現在の中弾性型に相当)が全面貼りで施工された³³⁾。また、張り出し部の補強のため、床版上面の床版支間方向に5層の高弾性型炭素繊維シート(同)が施工された³³⁾。炭素繊維シートによる床版補強として、初期の頃の施工事例である²⁾。防水層は2006年に施工されたと記録されている。調査の数年前に床版上面の土砂化が発生していたことが報告された³⁴⁾。調査時には床版コンクリートの一部が打ち換えられ、その範囲の下面の炭素繊維シートは除去され

た状態であった。定期点検結果において床版下面の連続繊維シートの一部に、部分的な浮きが報告された。しかし、調査は遠望のみであったことから、連続繊維シートの浮きの状況は確認できなかった。

表-2.2.1 連続繊維シートの変状事例，破壊形態

変状事例,			No	現場の事例		実験での事例		備考		
				主桁	床版	はり	床版			
全面 貼り	剥離	浮き	一般部	1	—	○	—	○ ⁽²²⁾⁻²⁴⁾		
			端部	2	—	—	—	—		
格子 貼り	剥離	浮き	一般部	3	—	○	—	—		
			交差部重なり部	4	—	○	—	—		
			交差部重なり端部	5	—	○	—	—		
			シート端部+ハンチ部	6	—	○	—	—		
				シート端部のみ	7	—	—	—	—	
				ハンチのみ	8	—	—	—	—	
			全面 (広範囲)	9	—	△ ³¹⁾	—	—		
			交差部重なり端部	10	—	○	—	—		
	シート端部+ハンチ部	11	—	○*	—	—	*漏水あり			
		シート端部のみ	12	—	○*	—	—	*漏水あり		
		ハンチのみ	13	—	—	—	—			
	破断		ひび割れ部	14	—	—	○ ²⁶⁾	—		
			一般部	15	○ ³⁰⁾	—	—	—	撤去後の載荷試験	
			ひび割れ部	16	—	—	○ ⁴⁾	○ ⁽²⁷⁾⁻²⁹⁾		
連続繊維シートの傷			17	○* ¹⁾	—	—	—	* ¹⁾ 図-2.2.1		
母材損傷		押抜きせん断	18	—	—	—	—	○ ^(22)-24),27)-29)	剥離・破断を伴う	
		圧壊	19	—	—	△ ⁹⁾	—	—		
		水平ひび割れ	20	—	—	○* ²⁾	—	—	* ²⁾ 図-2.2.2	
		せん断破壊	21	—	—	—	—	—		
		鉄筋破断	22	—	—	—	△ ⁸⁾	—	—	鉄筋の疲労

変状事例：貼ったときと比べて変化が生じている事例

凡例 ○：事例あり（写真あり） △：事例あり（写真なし）

剥離：剥がれている断面が確認できるもの

浮き：部分的に剥がれているが周囲はコンクリートと付着しているため、剥がれている断面が確認できないもの



(a) 橋梁外観

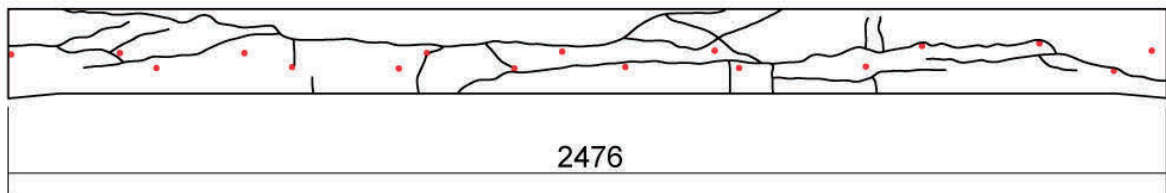


(b) 連続繊維シートの供用後の引っかき傷

図-2.2.1 既設コンクリート橋の桁下面に接着された連続繊維シートの供用後の傷



(a) 床版下面に接着された連続繊維シート



(b) 撤去後の床版切断面

図-2.2.2 連続繊維シートが接着されたRC床版の撤去後の母材損傷，水平ひび割れ

表-2.2.2 床版下面に接着された連続繊維シートの変状事例³²⁾

(a) 各橋の状況

橋*1	貼り方	浮き面積率*2 (%)	浮き範囲の経年変化	浮きの形状			舗装面*4 補修痕	備考
				円形*3	多角形	すじ状		
A	格子 貼り	0.0	あり	○	○	—	—	
B		0.1	なし	○	—	—	あり	
C		0.3	なし	○	—	—	—	
D		0.9	なし	○	—	—	あり	
E		4.3	あり	○	○	—	あり	ASRの疑い
F	全面 貼り	1.7	あり	○	○	—	あり	主にハンチ部
G		2.7	あり	○	○	—	あり	
H		6.3	あり	○	○	○	あり	
I		13.0	あり	○	○	○	—	エフロ発生

注) *1 3橋の適用示方書は昭和31年版, 6橋は同39年版。

2007~2010年に連続繊維シートが施工された。

*2 浮き面積率は浮きの面積を調査面積で除した値。打音調査による。

*3 φ50mm以下。

*4 いずれの床版においても下面接着施工時に床版防水が施工されていた。

(b) 主な変状と推定される要因

主な変状やその特徴	推定される要因
円形または楕円形の浮き	50mm以下の比較的小さい浮きは, その9割以上に経年変化が見られないので, 施工時の樹脂不足や空気溜まりの除去不足など, 施工初期から発生していた可能性が疑われる。
角張った浮き (多角形)	多くは一辺が100mm以上。経年で拡大している。拡大した要因は, 輪荷重や浸透水の影響, コンクリートや断面補修材のひび割れ・浮きなどが考えられる。
すじ状の浮き	長いものでは1m以上。経年で拡大している。コンクリート下面の型枠痕の間隔と浮きの間隔が一致していた。不陸調整はされていたが, わずかに残った段差部が弱点となり, 輪荷重や浸透水等の影響によって浮きが拡大していった可能性が考えられる。
全面貼りの方が浮き面積率が大きく, 経年による浮きの拡大が見られる事例が多い	全面貼りは格子貼りに比べて, コンクリートに浸透した水の逃げ場が無く, 連続繊維シートとの界面に滞水しやすいと推測される。
水の浸入	水の浸入経路は, 地覆等の防水層の未施工面が考えられる。また, 舗装の再補修が行われていた事例では, 防水層の劣化・損傷の可能性もある。

注) 文献³²⁾の本文による。



(a) 全面貼り



隙間：大



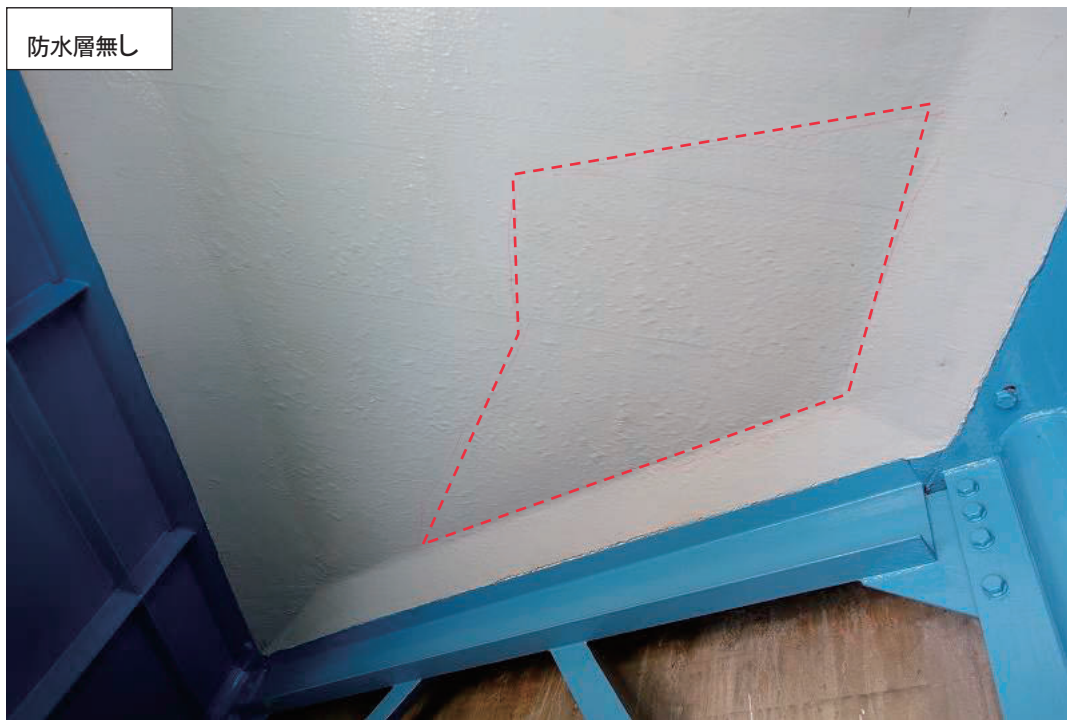
隙間：中



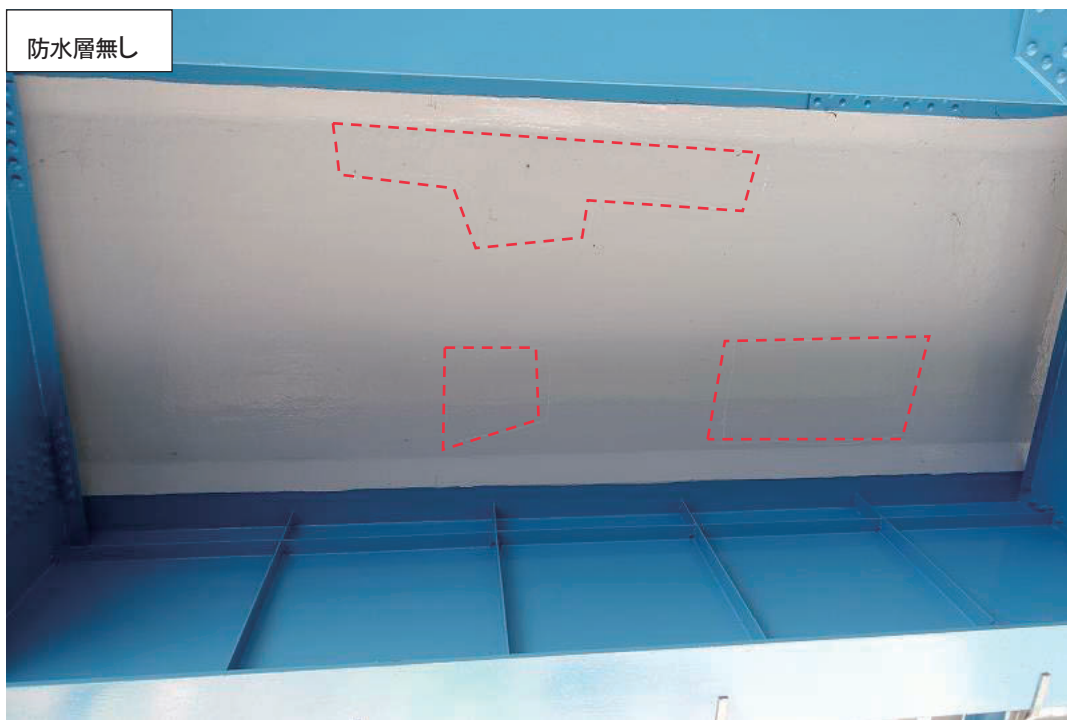
隙間：小

(b) 格子貼り

図-2.2.3 連続繊維シートによる補強事例



(a) ハンチの入隅を境にした浮き



(b) 点在した浮き

注) 写真ではチョークの位置が分かりにくいため、破線で補足した。

図-2.2.4 連続繊維シートの変状事例 (全面貼り)



(a) 広範囲に見られた浮き



(b) 全面的に見られた浮き *2009年に防水工
 図-2.2.5 連続繊維シートの変状事例 (格子貼り)



(c) 交差部（重なり部）の浮き *2009年に防水工



(d) 交差部と一般部の境目の浮き *2009年に防水工
注) チョークによる網掛けで浮きの範囲を示す。

図-2.2.5 連続繊維シートの変状事例（格子貼り，続き）

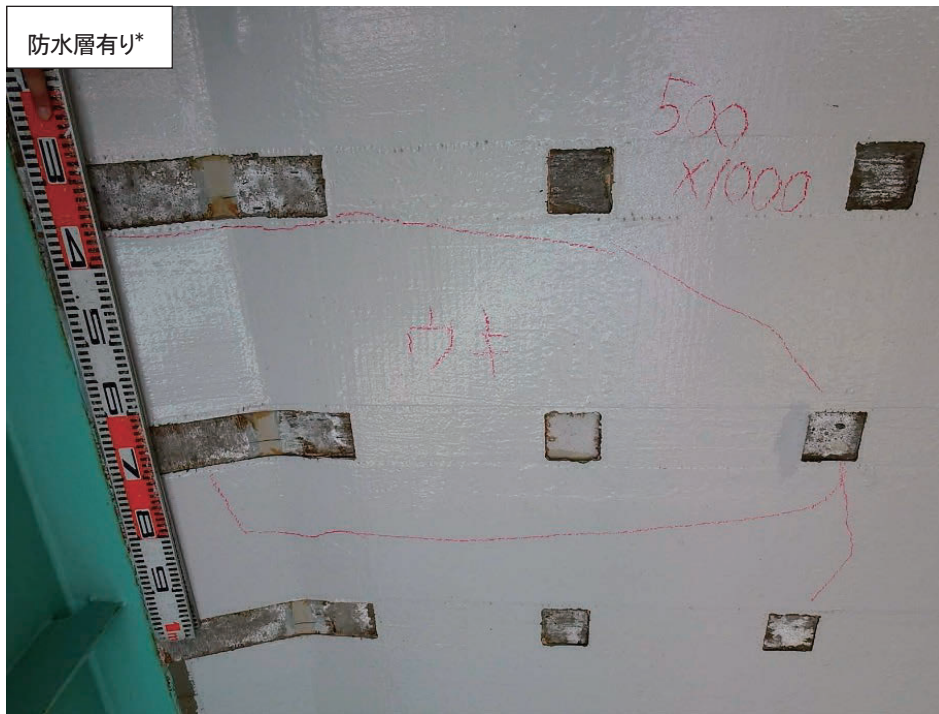


(e) 鋭角部への適用と浮き



(f) 交差部と一般部の境目の剥離

図-2.2.5 連続繊維シートの変状事例（格子貼り，続き）



(g) ハンチ部の浮き *2010年に防水工



(h) ハンチ部の剥離

図-2.2.5 連続繊維シートの変状事例（格子貼り，続き）



(i) 端部のみ剥離 (その1)



(j) 端部のみ剥離 (その2)


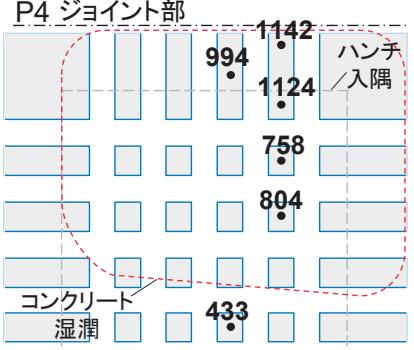

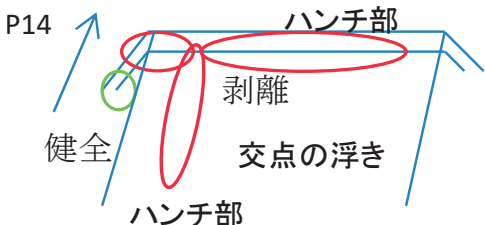

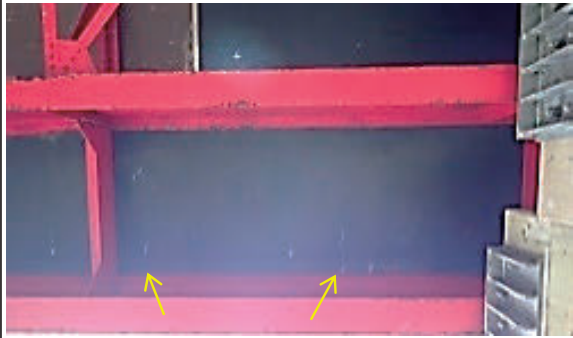
図-2.2.5 連続繊維シートの変状事例 (格子貼り, 続き)

表-2.2.3 床版補強後の変状事例の現地確認 (2017年11月17日)

施工現場	現場写真	損傷(変状)と想定原因**
<p>C橋 1971年竣工</p> <p>補強年次 2010年 施工後7年経過</p> <p>格子貼り</p> <p>防水層有り*</p> <p>構造: 鋼鈹桁橋</p>		<p>浮き</p> <p>ハンチ部 積層部</p> <p>施工初期からの変状の可能性</p> <p>浮き面積0.2m² 浮き面積率0.3%</p> <p>経年変化無し</p>
<p>J橋 1968年竣工</p> <p>補強年次 2004年 施工後13年経過</p> <p>全面貼り</p> <p>車道部のみ防水層有り*</p> <p>構造: 床版橋</p>		<p>床版コンクリートのひび割れ有り 側面より確認</p> <p>一部ひび割れ部に浮き有り</p>
<p>F橋 1968年竣工</p> <p>補強年次 2003年 施工後14年経過</p> <p>全面貼り</p> <p>防水層無し</p> <p>構造: 鋼鈹桁橋</p>		<p>桁端床版 打ち下ろし ハンチ部浮き有り</p> <p>浮き面積0.33m² 浮き面積率1.7%</p> <p>経年変化有り</p>

注 *) 防水層設置時期は未確認. **) C橋, F橋は文献³²⁾による.

表-2.2.4 連続繊維シートで補強された RC 床版の現地調査結果まとめ (2018年10月23日, 24日)

	現地写真	確認された変状
K橋 近接目視	<p>第4径間 P3 ~ P4</p>  <p>1963年竣工 2009年(A1~P6) 補強, 防水工 格子貼り</p>	<p>①ジョイント (伸縮装置) 付近の漏水</p>  <p>図中数値: 水分計D値 400~600 が通常コン クリートの 数値</p> <p>476 上方からの透視イメージ</p>
	<p>第15径間 P14 ~ P15</p>  <p>2009年 防水工 2011年(P6~P12), 2012年(P12~A2) 補強 格子貼り</p>	<p>①広範囲な浮き ・ハンチ部の浮き ・格子貼り交点部の浮き</p> <p>②ひび割れ有も剥離箇所不一致</p> 
L橋 遠望目視	 <p>1962年竣工 1995年 補強 2007年 防水工 2013年 床版補修 全面貼り (床版補修時に一部切除)</p>	<p>①一部箇所で床版の打替え ②下面遠望観察のみため, 変状把握は難しかった ・シート表面に結露確認 ③表面に橋軸直角方向の白筋 ・シート端部に鋼桁フランジのさび有り</p> 



注) 図中の数値は水分計によるD値を示す。800を超えると、水分量がかなり多いことを表す。

図-2.2.6 桁端部付近の床版下面と水分計による測定結果

2.3 施工の影響による不具合事例

以上の連続繊維シートの変状事例を踏まえて、表-2.3.1 に施工後の変状の想定される原因を示す。見られた変状には、床版からの漏水によると考えられる事例のほか、野々村らの調査やK橋のように、施工に関連すると想定されるものも見られた。表-2.3.2 に、連続繊維シートを用いた補修補強工事における、施工品質確保のための施工技術者の資質について調査した結果³⁵⁾を再整理して示す。施工環境の改善やマニュアルの順守で改善できるものと、施工者の技能に係るものがあることが分かる。その大部分は、施工計画に記載して改善することが試みられているが³⁵⁾、今後もさらなる改善に向けて引き続き検討が必要であるとともに、施工品質の確保が重要であると考えられる。

表-2.3.1 施工後の変状の想定される原因

床版防水に関連する要因	施工に関連する要因
①連続繊維シート端部，ハンチ部の漏水 ②ひび割れからの漏水	①施工環境 <ul style="list-style-type: none"> ・表面含水率 ・雰囲気湿度（85%），温度（5℃） ・防水層の施工時期，施工品質 ②樹脂硬化過程での応力，ひずみ変動 （特に冬の硬化時間が長く，温度差が大きい場合） <ul style="list-style-type: none"> ・走行による変位，振動 ・温度変化による伸縮 ③事前工 <ul style="list-style-type: none"> ・ひび割れの補修度合い（含浸工，注入工） ・断面修復 ・不陸調整度合 ・脆弱部除去

表-2.3.2 不良の種類と原因（想定含む）

N=61

不良の種類 \ 不良の原因	脱泡作業不足や作業もれ	ピンホールからのガス圧	貼付時の緊張不足	下地の凹凸	下地への水分付着	含浸樹脂の不足	その他
浮き	14	17	12	31	3	13	直射日光 低粘度 注入材 含浸不良 結露 等
膨れ	15	17	11	29	3	11	
大きな浮き	13	16	11	28	3	11	
大きな膨れ	12	16	8	26	3	8	

注) 既往のアンケート調査結果による³⁵⁾

2.4 連続繊維補修補強工事の施工品質確保のための施工技術者の資質について

連続繊維補修補強工法においては、被補強構造物の表面に構造材料を施工現場において形成させる施工法であることから、意図した補強性能を確保するためには施工品質を確保することが大変重要である。そのために下記公的指針等では、施工技術者の資質の重要性について示されている。

1. 土木学会「FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）」（2018 年）
2. 国土交通省大臣官房官庁営繕部「公共建築改修工事標準仕様書（建築工事編）」（平成 31 年版）
3. 国土交通省大臣官房官庁営繕部「建築改修工事監理指針」（令和元年版）
4. 国土交通省住宅局建築指導課監修・日本建築防災協会発行「2010 年改訂版／連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針」

参考として、各指針類の具体的記載内容を、抜粋して以下に示す。

2.4.1 FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），土木学会，2018 年³⁶⁾

■11 章. 補修・補強の施工

11.2 施工計画

- (2) 補強用 FRP による既設部材の補修・補強の施工は、施工計画に基づき使用する工法や材料の特徴、仕様および留意事項に関する十分な知識を有する技術者によって行われることを原則とする。

【解 説】

(2) について： 補強用 FRP による既設部材の補修・補強の施工は、あらかじめ工場で繊維材料をシートやプレート状にした補強用 FRP もしくは、現場で含浸接着樹脂を繊維材料に含浸・硬化させた FRP シート*を既設部材に接着または巻き立てて、一体化させることにより、必要な性能の向上を図る工法である。このため、使用される繊維材料や樹脂の取り扱いには、新設構造物とは異なる狭隘な施工環境や、各種構造物、部材、部位ごとに異なる既設部材の劣化状態や施工時の温度、湿度等の現場特有の作業環境条件のもとで、現場の状況に応じた判断が必要となる。そのため、補修・補強後の構造物の性能が、施工を担当する工事管理者および作業員の技量に比較的大きな影響を受けることから、一部で技量等に関する資格制度を設けている。したがって、工事管理者および作業員の選定については、資格の有無、経験年数等も考慮し、十分な教育を受けた熟練した技術者が行わなければならない。

注) ここでは、原文をそのまま引用した。ただし、*は原文に追記。道路橋 RC 床版の補強に用いられる FRP シート（連続繊維シート）は接着後に硬化させる場合が多い。

2.4.2 国土交通省大臣官房官庁営繕部「公共建築改修工事標準仕様書（建築工事編）」（平成 31 年版）³⁷⁾

■8 章 耐震改修工事 24 節 連続繊維補強工事

8.24.2 連続繊維補強工事における施工管理技術者

- (1) 連続繊維補強工事においては、施工管理技術者を配置する。
- (2) 連続繊維補強工事における施工管理技術者は、連続繊維補強工事の施工に係る指導及び品質管理を行う能力を有する者とする。

(3) (1) 及び (2) 以外は、1.3.2 [施工管理技術者] による。

8.24.3 連続繊維補強作業を行う技能資格者

(1) 連続繊維補強作業は、技能資格者が行う。

(2) (1) 以外は、1.6.3 [技能資格者] による。

■1章 各章共通事項 3節 工事現場管理

1.3.2 施工管理技術者

(1) 施工管理技術者は、工事に相応した能力を有する者とし、工事の施工、製作等に係る指導及び品質管理を行う。

(2) 施工管理技術者の資格等の能力を証明する資料を、監督職員に提出する。

■同6節 施工

1.6.3 技能資格者

(1) 技能資格者は、工事に相応した能力を有する者とする。

(2) 技能資格者の資格等の能力を証明する資料を、監督職員に提出する。

2.4.3 国土交通省大臣官房官庁営繕部「建築改修工事監理指針」(令和元年版)³⁸⁾

■8章 耐震補強工事 24節 連続繊維補強工事

8.24.2 連続繊維補強工事における施工管理技術者

(1) 連続繊維補強材を用いた耐震改修工事の施工に際しては、一般的な工事に関わる安全衛生管理及び品質管理に加えて、当工事に特有な材料及び施工方法に関わる管理を徹底し、安全で、かつ、適切な品質が確保されなければならない。したがって、これらの工事に精通した施工管理技術者を配置しなければならない。

(2) 連続繊維補強材を用いた耐震改修工事の施工に際しては、施工要領書の作成、技術指導、施工管理、品質検査、施工報告書の作成等の能力を有することは勿論のこと、労働安全衛生法、労働安全衛生規則等関連法規にしたがい、施工条件、作業環境を適正で、かつ、安全な状況の確保に努めることのできる能力を有する施工管理技術者を選任しなければならない。

(3) (1) 及び (2) 以外は、1.3.2 [施工管理技術者] による。

8.24.3 連続繊維補強作業を行う技能資格者

(1) 連続繊維シートによる補強工法は施工技能者の技量や施工管理者の知識や能力によって施工欠陥の量が決まる。したがって、施工に当たっては優秀な技能資格者と管理資格者が担当することが重要になる。管理資格者は材料・工法に関する基礎知識を有し、施工管理上の留意点と対処方法(概ね本項の内容程度)を自分のものとしていなければならない。技能資格者はこれらの知識を持つとともに連続繊維シートの貼付け作業に関して十分な実績を持ち、施工要領を体得している必要がある。

例えば、建設会社、材料メーカー、専門工事業者等が幅広く参加している(一社)繊維補修補強協会は連続繊維工法の施工品質の信頼性確保を目的として連続繊維の施工士及び施工管理士の認定を行っている。2019年8月末現在では施工士1,361名、施工管理士2,943名の登録者(試験合格者を含む)が

いる。また、特殊工法に関する特定の団体においても施工技能者や施工管理者の技能・技術講習が行われている。技能講習では模擬柱に連続繊維シートを実際と同様に貼り付けることも行われている。

(2) (1) 以外は、1.6.3 [技能資格者] による。

2.4.4 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針³⁹⁾

■4章 補強工事の施工

4.2 施工要領 4.2.1 総則

(2) 施工者の資格

(a) 施工管理技術者

連続繊維補強材による建築物の耐震改修工事の管理は、本指針に準拠して工事を管理する技術を有する者で、建設業法に基づいて国土交通大臣が認定した建築施工管理技士またはそれと同等の管理技術の資格を持つ者が行うことを原則とする。

(b) 施工技能者

連続繊維補強材による建築物の耐震改修工事は、所定の施工技術を有する者が行う。

[解説]

(a) 連続繊維補強材による建築物の耐震改修工事の施工に際しては、連続繊維シートへの樹脂の含浸や接着が補強効果に大きな影響を与えるため、この工事の技術を十分に理解し、なおかつ、建築施工全体についての管理技術を持つ技術者による十分な施工管理を行うことが求められる。

この場合の管理技術者は、建設業法第27条に基づく技術検定制度における「建築施工管理技士」またはそれと同等の管理技術の資格を有する技術者とするを原則とする。

(財)日本建築防災協会*の技術評価を受けた工法では使用材料以外に施工技能者・施工管理技術者を限定しており、研修等により一定以上の技術レベルを有する者としている。したがって、「建築施工管理技士」または、当該工法の技術内容を十分理解して工事管理を行うことが必要である。

その他については、現在、連続繊維補強工法全般に関する施工技能者・施工管理技術者を研修・教育する全国組織として「繊維補修補強協会（略称、FiRSt協会）」があり、同協会によって認定された資格者（「連続繊維施工管理士」）または、「建築施工管理技士」により工事を行うことが必要である。

(b) 連続繊維補強材による建築物の耐震改修工事に従事する施工技能者の資格として、繊維補修補強協会の「連続繊維施工士」の資格がある。連続繊維補強材による施工の信頼性を確保するために、同協会の自発的な教育・検定を受けた、一定レベル以上の技量を持つ「連続繊維施工士」のもとで施工することを原則とする。

注) ここでは、原文をそのまま引用した。ただし、*は原文に追記。現在は一般財団法人。

3. 実橋床版下面に接着された連続繊維シートの応力測定

3.1 概要

実橋 RC 床版の下面に接着された連続繊維シートに作用するひずみレベルを把握するため、荷重車による走行載荷試験及び 24 時間供用下における測定を実施し、補強された床版のたわみと連続繊維シートに作用するひずみを把握した¹⁾。なお、対象とした橋梁では、2012 年 12 月に別の目的で調査した際に、床版補強前の床版のたわみを測定していたことから²⁾、補強前後のたわみの比較も行った。

3.2 対象橋

図-3.2.1 に対象橋の外観を示す。対象とした道路橋は、1970 年に架設された支間長 32.1m、橋長 229.7m の鋼 7 径間単純合成鈹桁橋である。また、図-3.2.2 に、補強前の断面図を示す。4 主桁で構成され、床版支間 2.6m、床版厚 190mm である。主鉄筋は D16-125mm、配力鉄筋は D16-150mm である。

本橋は、2014 年から 2018 年にかけて、B 活荷重対応を目的とした連続繊維シートによる床版補強が行われた。補強の仕様は、目付け量 600g/m^2 の高強度型炭素繊維シートを主鉄筋方向に 2 層、配力鉄筋方向に 1 層とした格子貼りである。図-3.2.3 に床版下面の補強後の状況を示す。



図-3.2.1 対象橋梁の全景

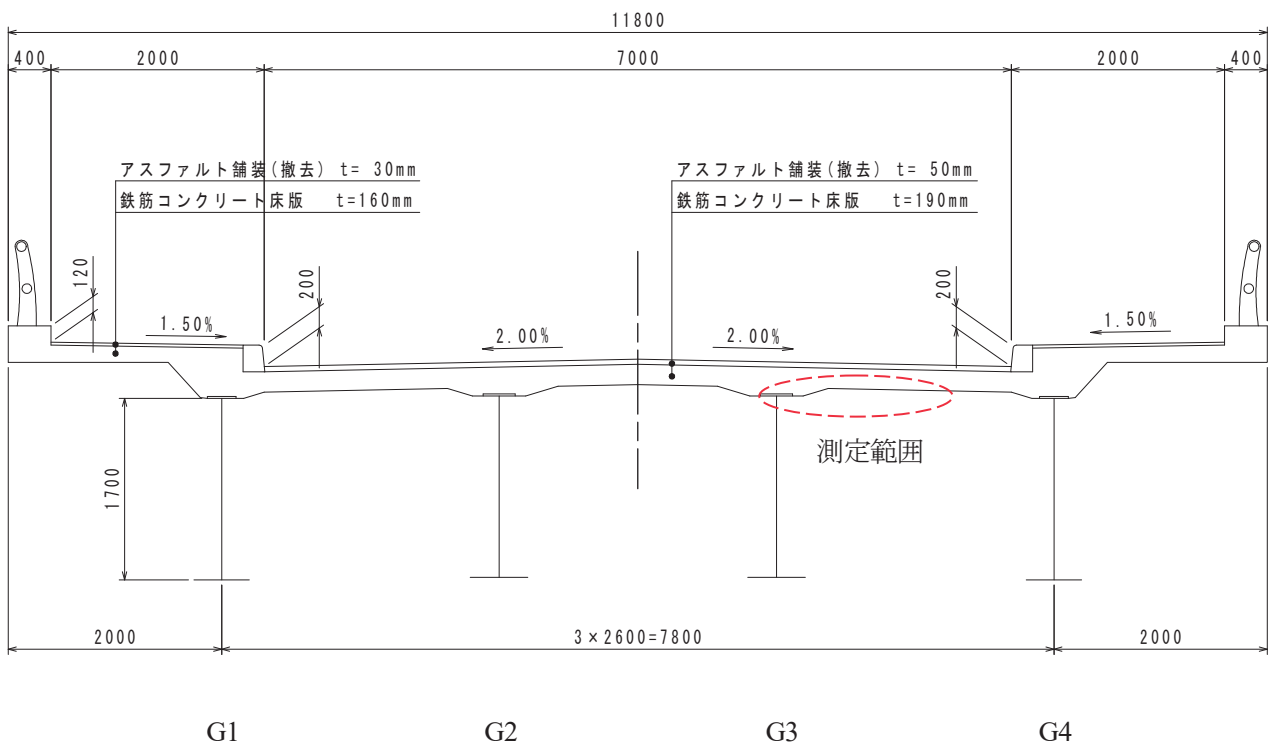


図-3.2.2 補強前断面図 (A1 側から見た図, 右が上り車線)



(a) 一般部



(b) P1 付近 (左端が G3-G4 間)

図-3.2.3 床版下面の補強状況

3.3 調査方法

走行載荷試験は、2018年12月に実施した。走行載荷試験の状況を図-3.3.1に示す。走行載荷試験で用いる荷重車には、総重量約20tの大型ダンプ（後タンDEM）を使用した。荷重車が一定速度で走行した際に生じる床版中央のたわみ及び連続繊維シートひずみの測定を行った。図-3.3.2に荷重車の寸法一覧を、表-3.3.1に、試験直前に測定した荷重車の軸重、車重を、補強前のときの値と併せて示す。荷重車の走行載荷回数は10回程度とした。

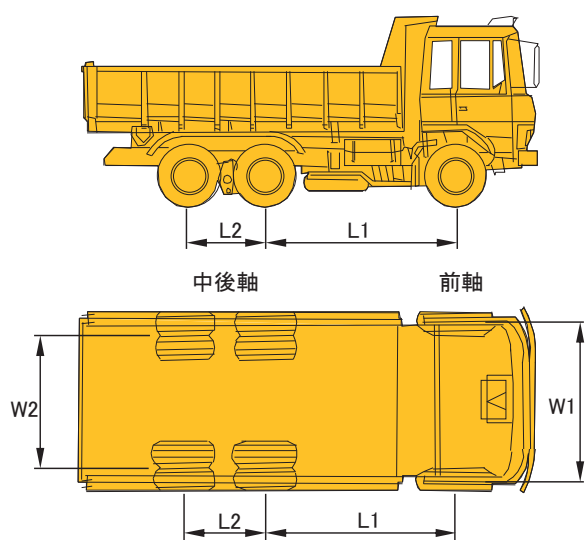
測定位置は、第2径間のP2橋脚支承線から支間の1/4の位置のG3-G4間とした。図-3.3.3に測定位置付近の状況を示す。また、図-3.3.4に床版たわみを測定する変位計と連続繊維シートひずみを測定するひずみゲージの設置状況を、図-3.3.5にそれらの測定位置を示す。荷重車の左側の輪走行位置は概ね床版支間中央であった。床版のたわみは、補強前の測定²⁾とまったく同じ位置、同じ設置方法で測定することとし、床版支間の中央部に変位計（CDP-25）1台を設置した。主鉄筋方向の連続繊維シートには、支間の1/4点における床版支間中央からハンチ部付近までの6点にひずみゲージを設置した。配力鉄筋方向の連続繊維シートには、1/4点における床版支間中央付近1点と、P1付近の橋軸方向のハンチ部付近2点にひずみゲージを設置した。いずれも連続繊維シートの幅250mmの中心にひずみゲージを配置した。ひずみゲージのゲージ長はいずれも5mm（FLA-5）とした。

表-3.3.2に、測定の対象とした第2径間上で、荷重車の上り線走行時に、荷重車の前後及び対向車線を走行していた一般車両を示す。



図-3.3.1 走行載荷試験の状況

(上：側方から撮影，下：路面で撮影，いずれも上り線走行時)



寸法 (mm)				
L1	L2	W1	W2	タイヤ
3,230	1,320	2,050	1,850	11R22.5

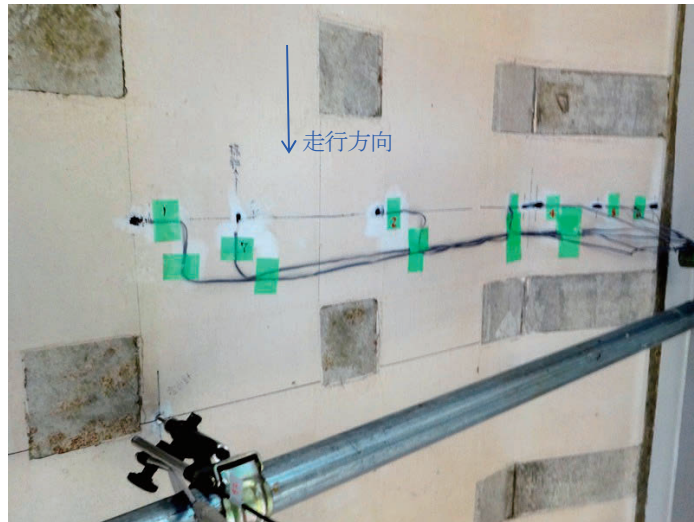
図-3.3.2 荷重車の主な寸法

表-3.3.1 荷重車の実測軸重

	前軸のみ (t)	中後軸のみ (t)	全重量 (t)
補強前	6.3	13.4	20.0
補強後	5.2	13.9	19.9

注) 補強前の値は文献²⁾による。

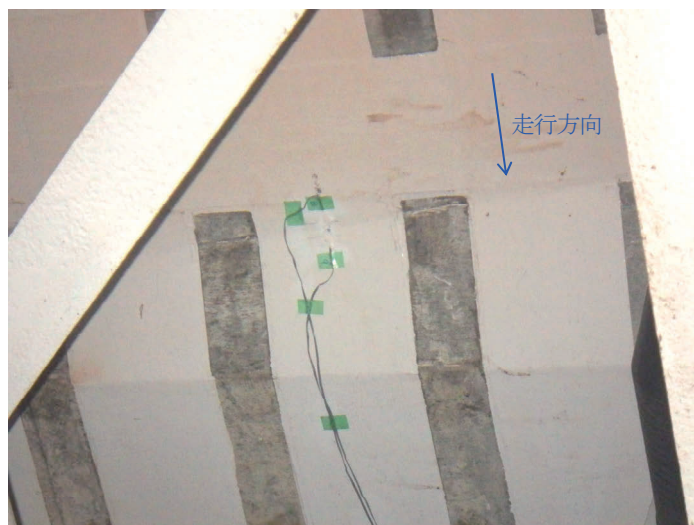
注) 輪距 W1, W2 はタイヤ設置面の中心間距離。



(a) 1/4 点



(b) 1/4 点, 変位計の支持方法



(c) P1 近傍, 橋軸方向のハンチ部付近

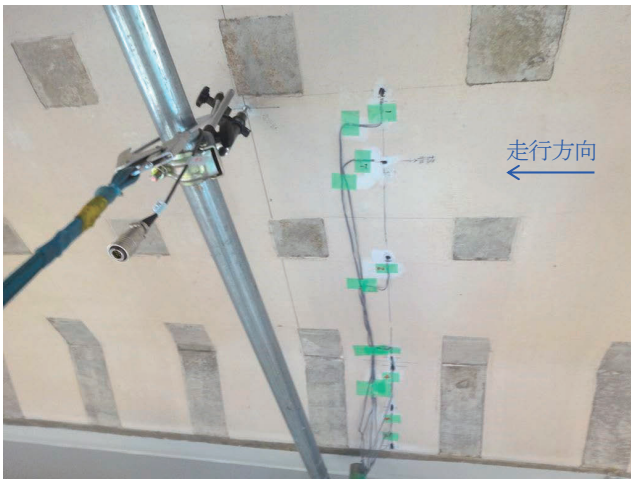
図-3.3.3 測定位置付近の状況



(a) 連続繊維シート1（橋軸直角）及び7（橋軸方向）



(b) 連続繊維シート2~6（橋軸直角）

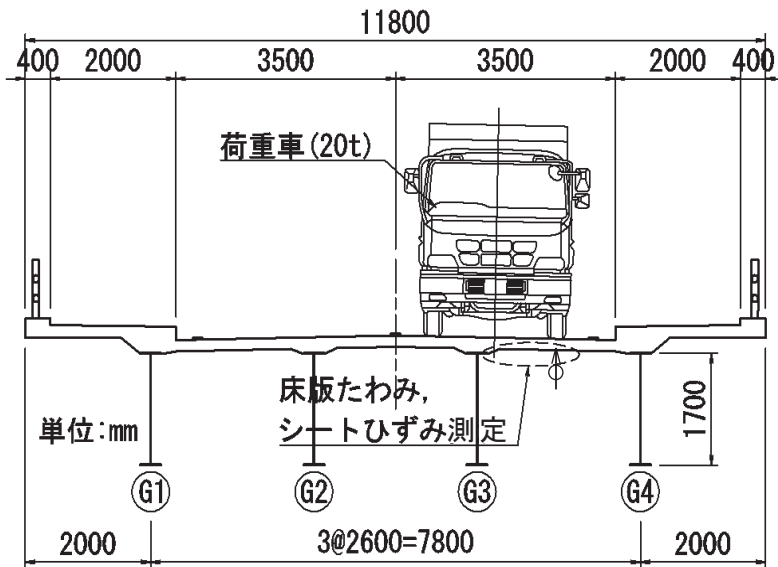


(c) 連続繊維シート1~6（橋軸直角）及び
補修材7（橋軸方向）

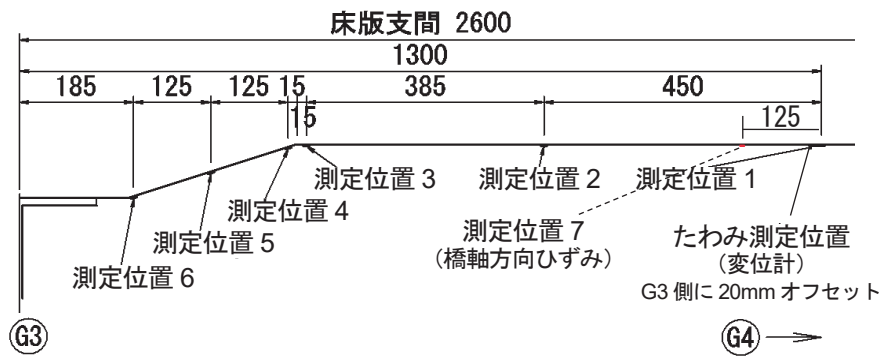


(d) 連続繊維シート8~9（橋軸方向）

図-3.3.4 連続繊維シートのひずみゲージ貼付状況

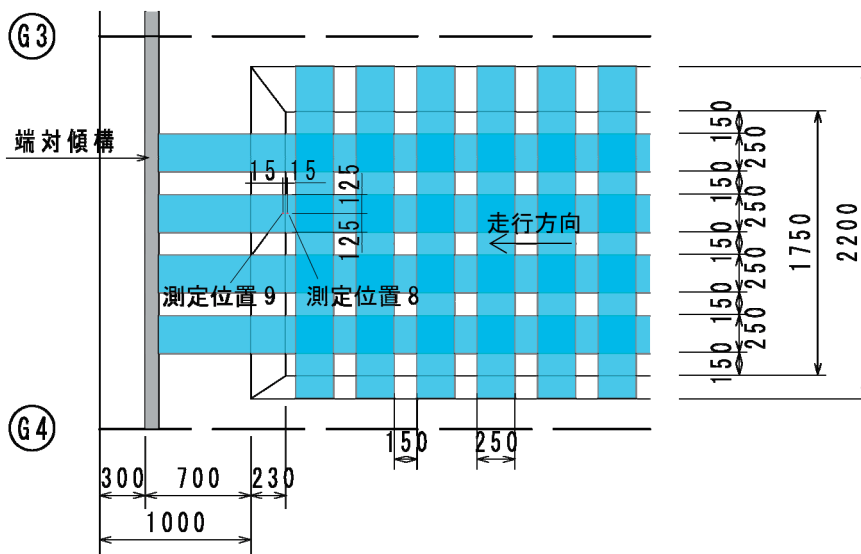


(a) 荷重車走行位置との位置関係 (断面は第2径間, P1側の支間1/4点)



注) ひずみ測定位置は, たわみ測定位置より P2 側に 270mm 離れていた.

(b) 拡大詳細図 (1/4点, 床版下面)



(c) 桁端部ハンチ付近 (上方からの透視図)

図-3.3.5 測定位置

表-3.3.2 荷重車走行試験時の状況

(a) 連続繊維シートによる補強後 (2018年12月4日)

回	走行速度 (km/h)	後続車	対向車
1	60	なし	乗用車2台
2	60	なし	タンクローリー
3*	60	なし	なし
4*	60	なし	なし
5	60	なし	乗用車
6*	60	なし	なし
7*	60	なし	なし
8	60	なし	乗用車
9	60	なし	軽乗用車
10*	60	なし	なし
11*	60	なし	なし

(b) 連続繊維シートによる補強前 (2012年12月14日)

回	走行速度 (km/h)	後続車	対向車
1	50	後に乗用車	乗用車3台
2	50	なし	軽乗用車
3*	45	なし	なし
4	40	前後に乗用車	乗用車
5*	50	なし	なし
6	45	前後に乗用車	乗用車
7	10	後に軽乗用車	軽トラック
8	40	なし	軽乗用車
9	35	後に乗用車 (渋滞)	2tトラック
10	40	前軽トラック, 後乗用車	軽乗用車

注 1) いずれも走行載荷時のビデオによる再確認後の記録を示す.

2) *は, 表-3.4.1 のたわみ比較に用いたデータを示す.

3) 表(b)は, 文献²⁾における鋼桁端部の当て板補強後の試験結果を示す.

3.4 走行試験結果

3.4.1 連続繊維シートによる補強前後の床版変位

図-3.4.1 に、補強後の荷重車走行時における床版たわみを示す。同様に、図-3.4.2 に、補強前の結果を示す。たわみの測定値は、車両走行に伴う床版の振動も含まれていたことから、ローパスフィルタ（16Hz）をかけた波形と、5 点移動平均した波形も併せて示す。これらのうち、荷重車の前後、対向車線に他の通行車両がなかった結果を用いて、ローパスフィルタ適用後の値を対象に、荷重車の通過によって生じる中後軸通過時の最大たわみを表-3.4.1 に示す。補強前、補強後、それぞれ対象とした走行回における結果を平均した。補強後の中後軸の軸重が補強前よりやや大きかったことから、軸重の違いを補正した値も示した。表-3.4.1 より、補強後の床版たわみは、補強前に比べて 1 割程度減少していた。表-3.4.2 に、対象床版のシート補強による断面二次モーメントの増加率（計算値）を示す。対象の RC 床版は目立ったひび割れが見られなかったことから、全断面有効に近いと考えられたが、補強後の実測たわみは、断面二次モーメントの増加率から推測される値（0.108 mm / 1.06）よりもやや小さい値であった。このことから、RC 床版は全断面有効に近い状態であるが、目視では分かりにくい程度の軽微なひび割れが生じていた可能性があるかと推察される。

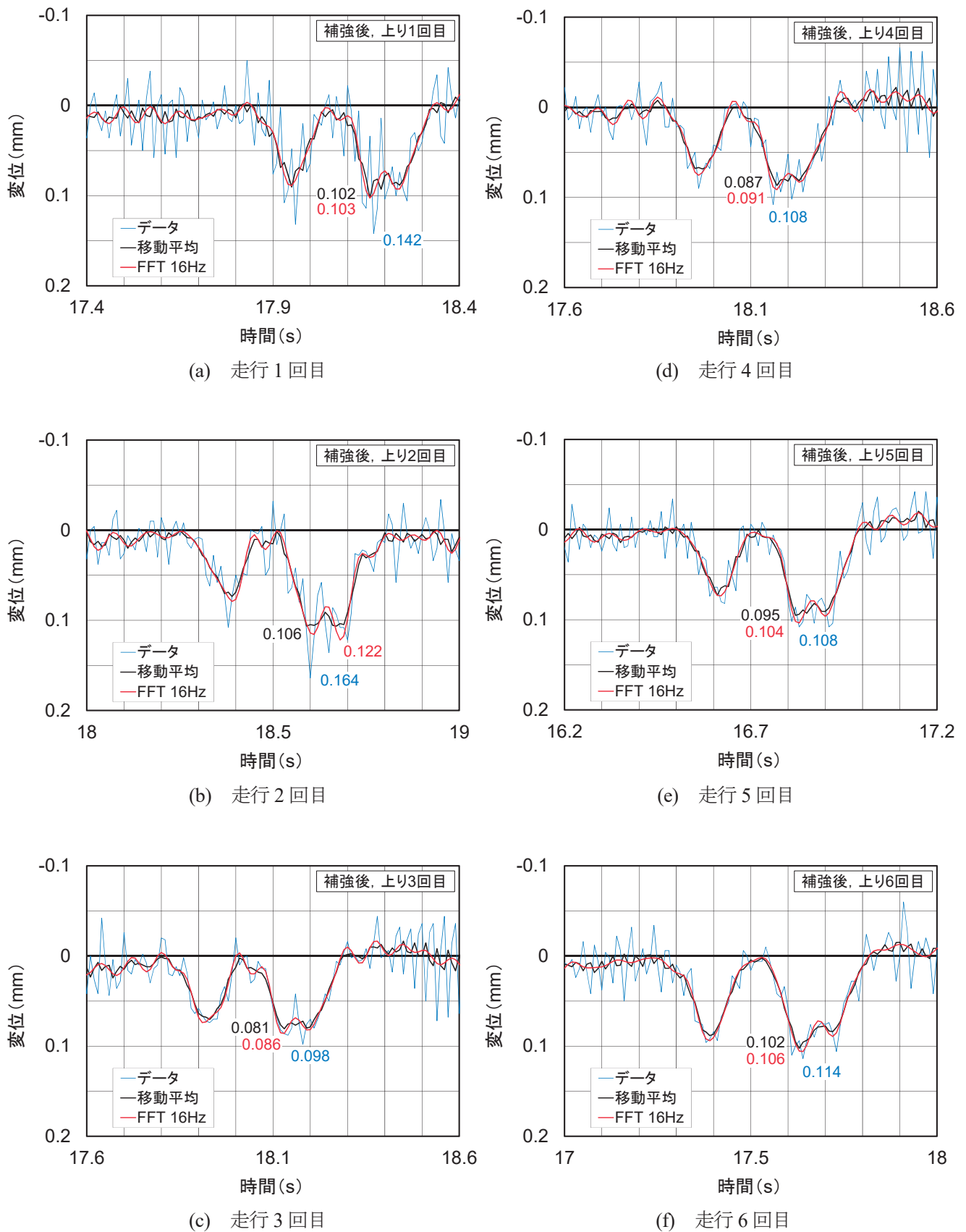
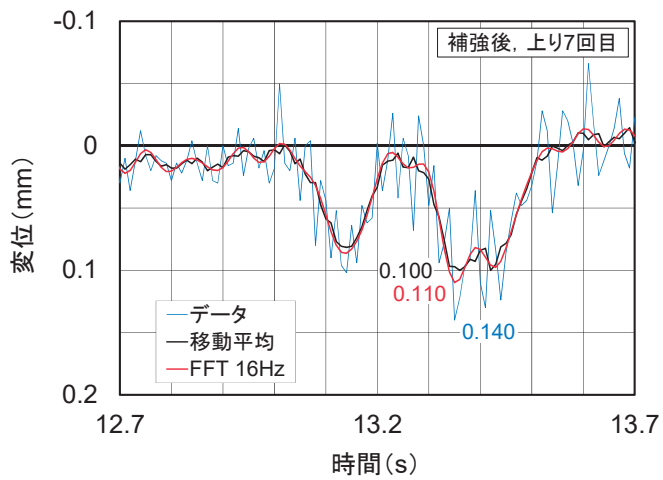
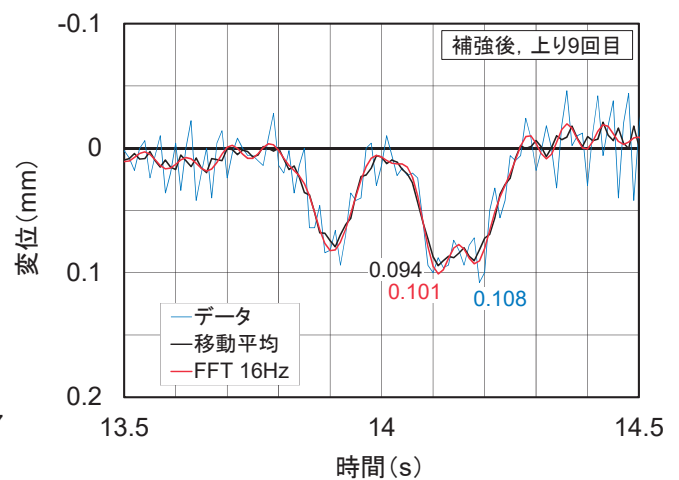


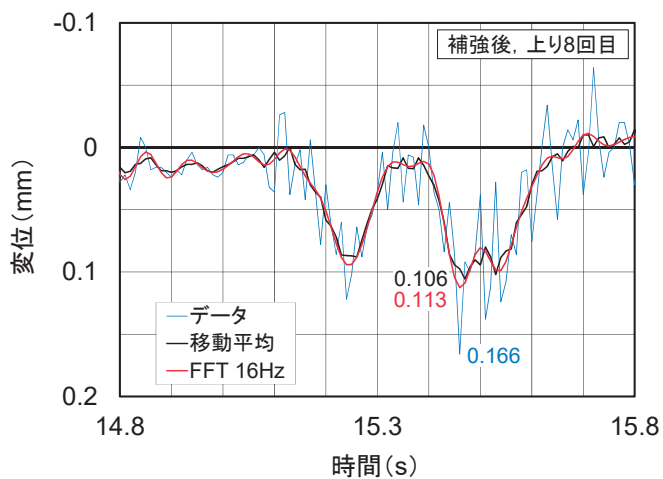
図-3.4.1 床版支間中央のたわみ測定結果 (2018年, 補強後)



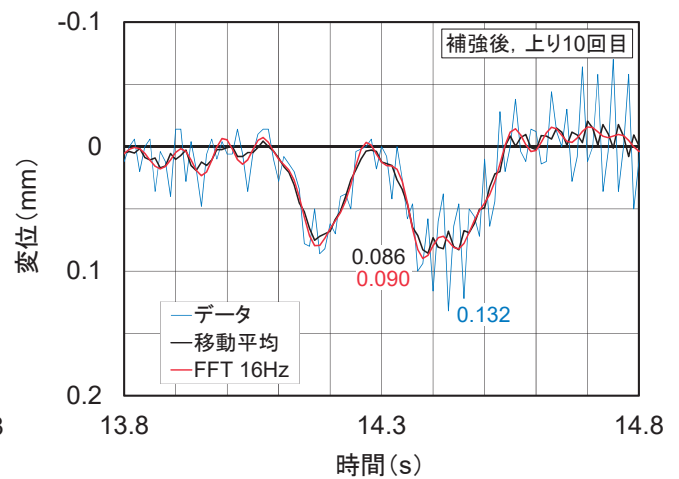
(g) 走行7回目



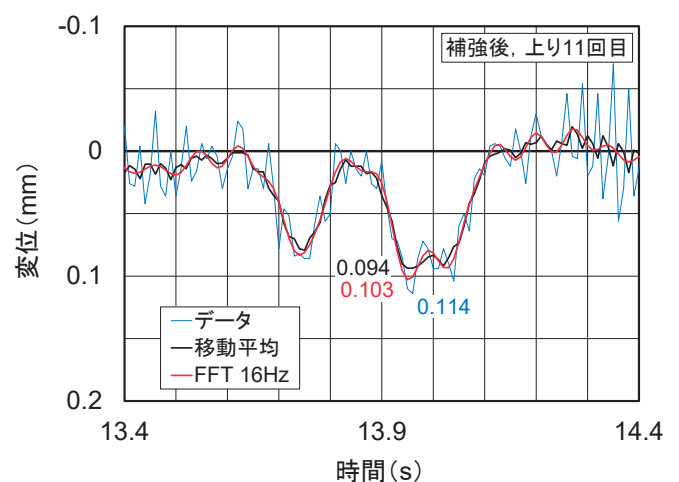
(i) 走行9回目



(h) 走行8回目



(j) 走行10回目



(k) 走行11回目

図-3.4.1 床版支間中央のたわみ測定結果 (2018年, 補強後) (続き)

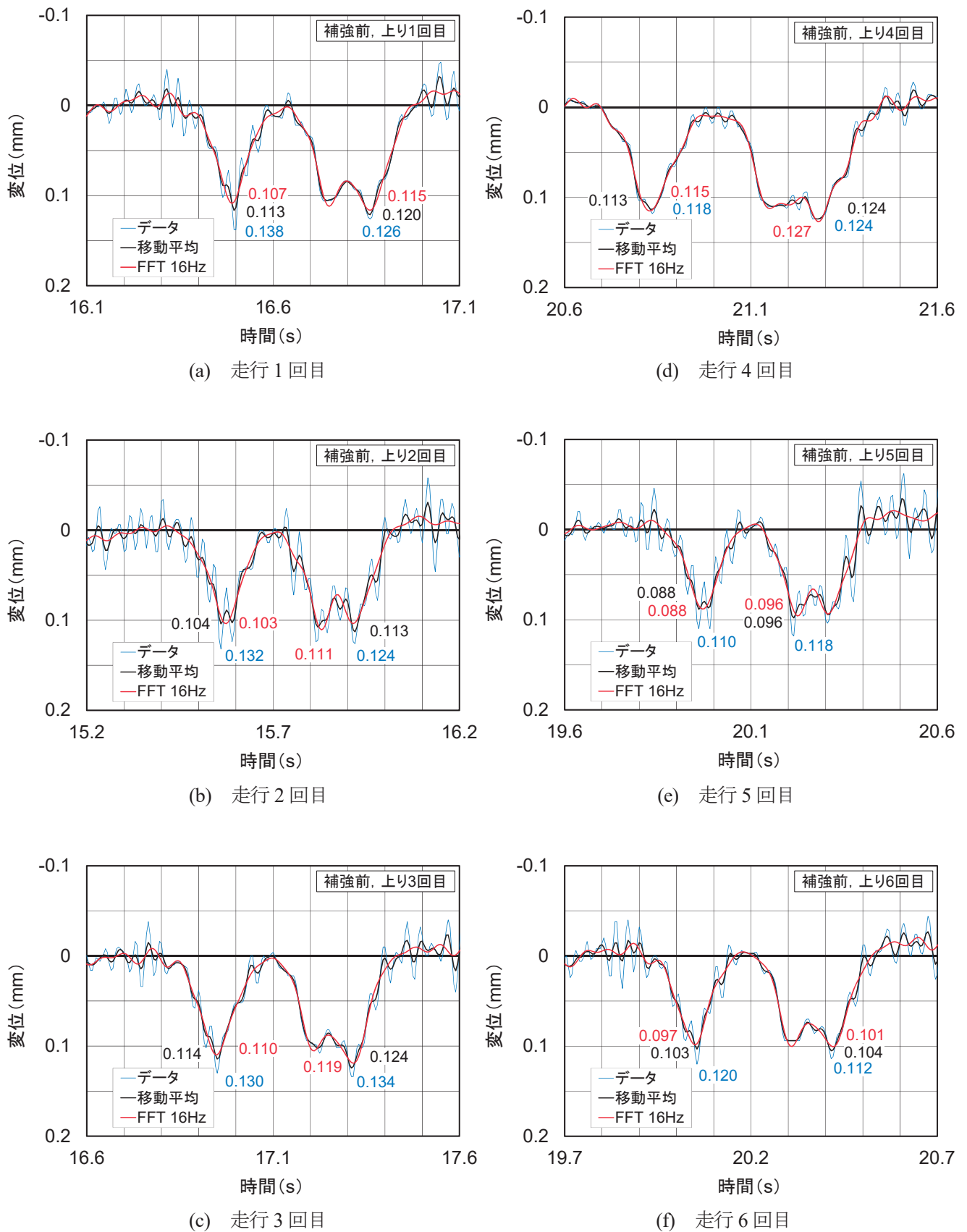
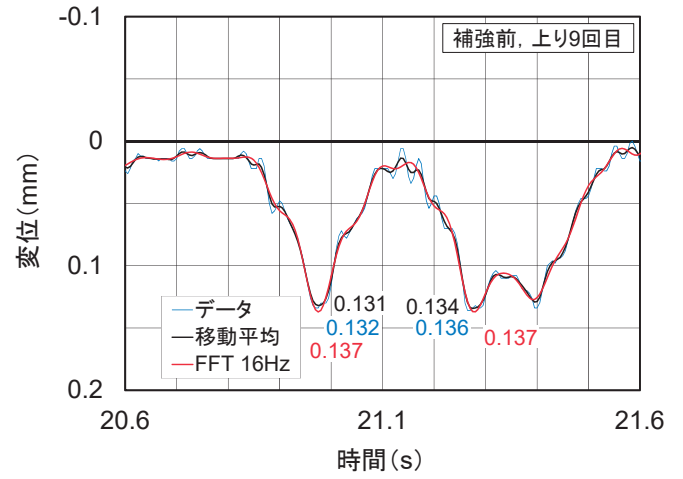


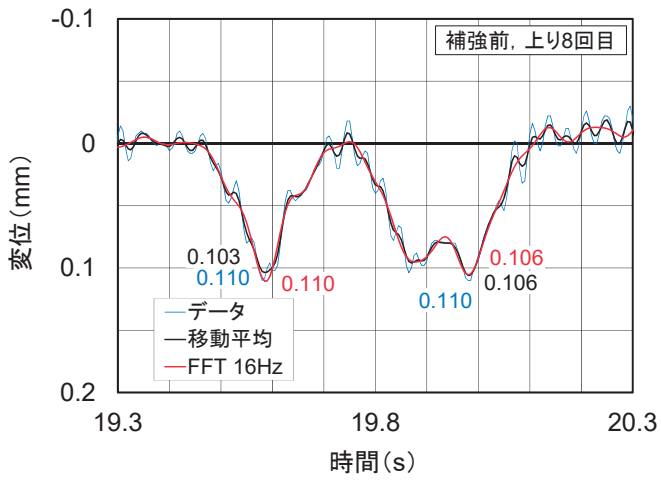
図-3.4.2 床版支間中央のたわみ測定結果 (2012年, 補強前)

データ無効

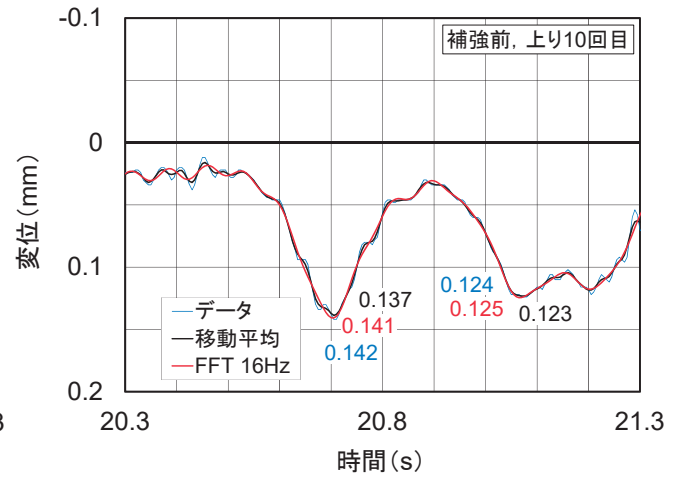
(g) 走行7回目



(i) 走行9回目



(h) 走行8回目



(j) 走行10回目

図-3.4.2 床版支間中央のたわみ測定結果 (2012年, 補強前) (続き)

表-3.4.1 補強前後の床版たわみ比較

	試験値 (mm)	荷重車軸重補正 (mm)
補強前	0.108	0.108
補強後	0.098	0.094
比率 (補強後/補強前)	0.91	0.87

注) 試験値は表-3.3.2 に*を付けた走行回の中後軸通過時の
最大たわみ (FFT) を平均した値.

表-3.4.2 補強による床版の断面二次モーメント増加率

	全断面有効	引張無視
主鉄筋方向	1.06	1.48
配力鉄筋方向	1.03	1.37

注 1) 増加率は 補強後/補強前 で算出した.

注 2) 設計図書より RC 床版の上下のかぶりはいずれも 40mm とした.

3.4.2 連続繊維シートのひずみ

図-3.4.3 に、床版支間中央の測定位置 1 とハンチ入隅部付近の測定位置 3, 4 の走行試験時における連続繊維シートひずみの例を、床版たわみと対比して示す。また図-3.4.4 に、前軸通過時の正曲げ最大時と、中後軸通過時の正・負曲げ最大時における床版支間方向の連続繊維シートのひずみ分布を示す。測定位置 1 の連続繊維シートのひずみは床版たわみと同様な正曲げの挙動であった。

ハンチに位置する主鉄筋方向連続繊維シートの端部である測定位置 6 に近付くにつれて、ひずみが小さくなる傾向が見られた。载荷位置は、必ずしも連続繊維シートの端部に不利な位置ではなかったが、この载荷条件の範囲では、連続繊維シートの端部の付着が有効に機能していたと考えられる。ハンチ入隅部の測定位置 3, 4 では、負曲げの挙動が生じていた。連続版として見た場合に、測定位置 3 と同 4 のひずみの差が大きい傾向が見られた。

測定位置の連続繊維シートの浮きは認められなかったことから、その理由には、ハンチ特有の版の挙動とハンチ特有の連続繊維シートの挙動の両者が想定されるが、現時点では不明であり、今後の課題である。測定位置 1 の連続繊維シートのひずみは前軸と中後軸で最大値に差が見られなかったが、測定位置 4 では、中後軸通過時の負曲げひずみの最大値が、前軸に比べて大きい傾向であった。これは、中後軸がダブルタイヤで、測定位置 4 により近い位置を走行しており、前軸と比べて測定位置 4 の挙動への影響が大きかったためと推察される。

図-3.4.5(a)に、荷重車走行時における連続繊維シートの橋軸直角方向ひずみの最大値と最小値を示す。図-3.4.3 で示したとおり、床版支間の中央ではほとんど正曲げひずみであるが、入隅部では、輪の走行に伴い正負交番のひずみが生じていた。同様に、図-3.4.5(b)に連続繊維シートの橋軸方向ひずみの最大値と最小値を示す。橋軸方向の連続繊維シートには、輪の走行時に支間の 1/4 点、支点付近ハンチ部ともに、正負交番のひずみが生じていた。測定した範囲において、そのひずみ振幅は $50\sim 80\times 10^{-6}$ 程度であった。

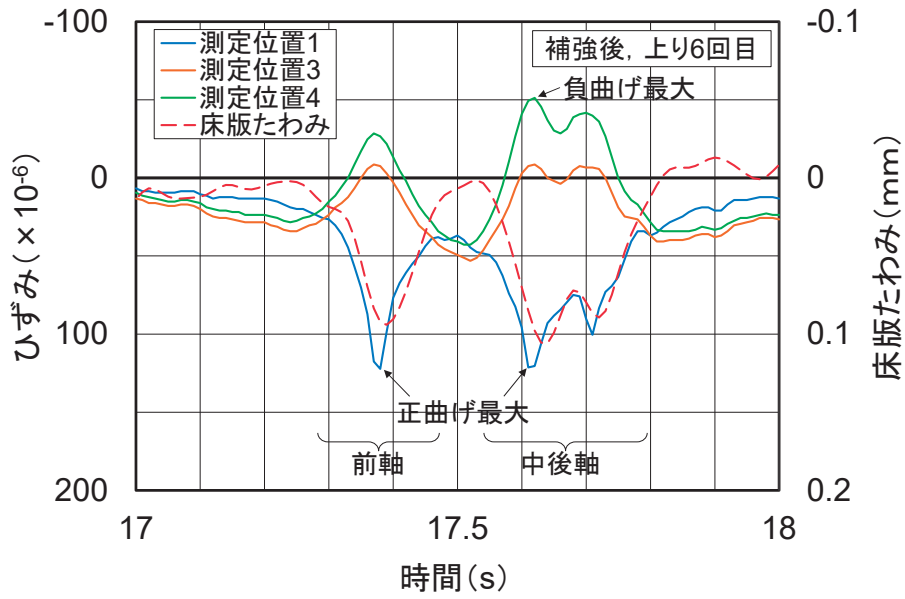


図-3.4.3 連続繊維シートのみずみ及び床版たわみ¹⁾
 (荷重車走行時, みずみは実測値)

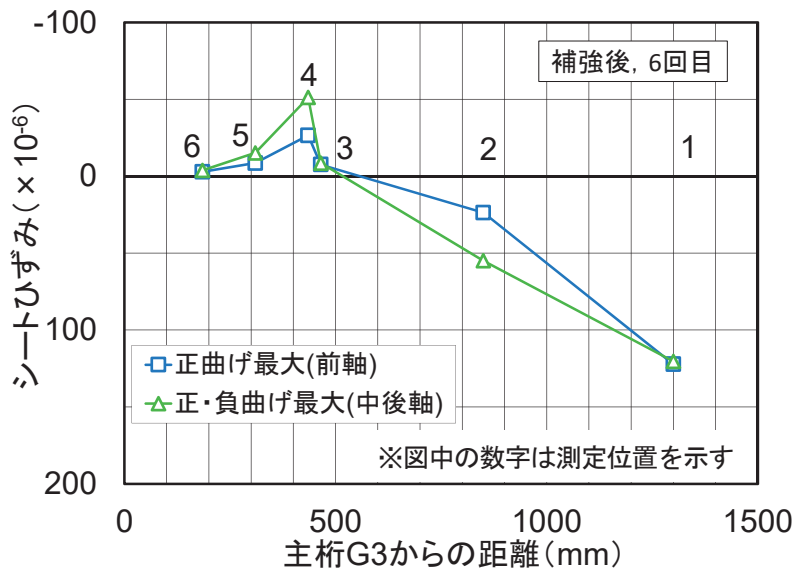
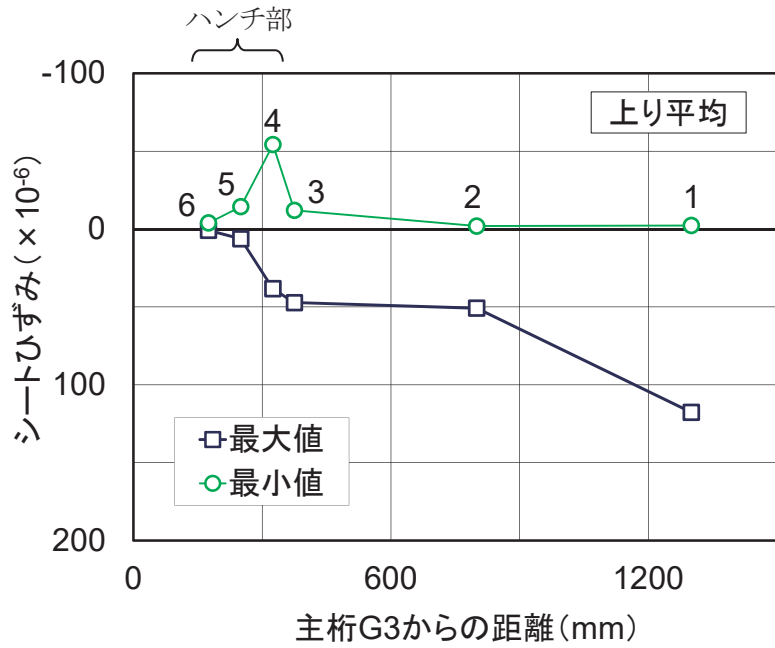
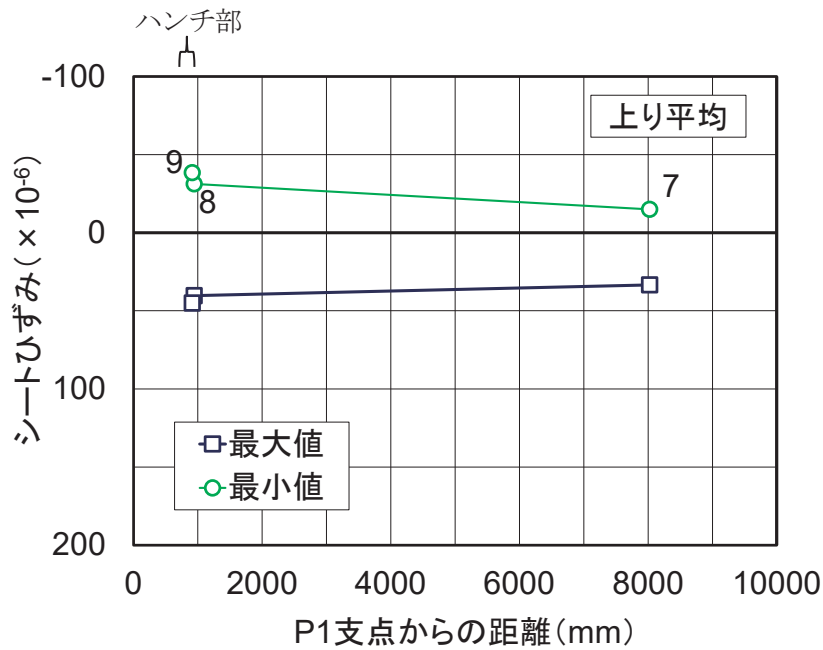


図-3.4.4 床版支間方向の連続繊維シートのみずみ分布¹⁾
 (荷重車走行時)



(a) 主鉄筋方向ひずみ



(b) 配力鉄筋方向ひずみ

図-3.4.5 連続繊維シートのひずみの最大値, 最小値
(荷重車走行時)

3.5 24 時間測定結果

表-3.5.1 に、供用下での 24 時間測定における補強後の連続繊維シートのひずみ及び床版変位を示す。表中、24 時間測定における最大値、最小値と、それらの差を示す。また、それぞれの値について走行載荷試験のときの値とそれらの比率も示す。床版支間中央で測定した主鉄筋方向のひずみ（測定位置 1）は、走行載荷時の 1.8 倍であった。荷重車では中軸または後軸の輪重 3.5t（13.9t/4）が載荷されていたので、供用中は 6.3t の輪重の車両が走行していた可能性がある。

ハンチの入隅部のひずみ（測定位置 4）は、24 時間測定で圧縮側の値の方がより大きくなる傾向が見られ、荷重車走行試験時の約 6 倍の圧縮ひずみが生じていた。一方、配力鉄筋方向のハンチ入隅部のひずみ（測定位置 8）は、24 時間測定でも床版支間中央の主鉄筋方向に比べて小さい傾向であり、圧縮ひずみと引張ひずみの絶対値は同程度であった。24 時間測定時の同圧縮ひずみは、荷重車走行試験時の 1.9 倍で、床版支間中央のひずみの比率と同程度であった。

表-3.5.1 24 時間測定における最大値、最小値、及び走行載荷試験結果との比較

測定項目と測定位置			走行載荷試験 (A)			24 時間測定 (B)			比率 (B/A)		
			最大値	最小値	振 幅	最大値	最小値	振 幅	最大値	最小値	振 幅
連続 繊維 シート ひずみ ($\times 10^{-6}$)	主鉄筋 方向	1	114	-11	125	209	-19	228	1.83	1.73	1.82
		2	51	-9	60	98	-17	115	1.91	1.89	1.91
		3	48	-32	80	82	-64	146	1.71	2.00	1.83
		4	39	-55	94	82	-317	399	2.11	5.75	4.25
		5	6	-14	21	18	-28	46	2.87	1.94	2.22
		6	1	-4	5	16	-30	46	—	—	—
	配力鉄 筋方向	7	34	-15	48	65	-24	89	1.92	1.63	1.84
		8	40	-31	71	67	-58	125	1.68	1.86	1.76
		9	44	-38	82	70	-74	144	1.59	1.93	1.75
中央変位 (mm)			0.13	-0.06	0.19	0.18	-0.20	0.38	1.46	3.42	2.08

注) 負号は圧縮側。

4. 室内試験と実橋での損傷の相違点

2.1 で述べたとおり、はり試験などの実験では、RC 部材に接着された連続繊維シートが、載荷荷重の増加に伴って剥離することが報告されている。RC 部材に接着された連続繊維シートが剥離する際の連続繊維シートの限界ひずみは、連続繊維シートの種類や断面構成によって大きく異なる。RC はりの曲げ載荷試験では、主鉄筋が降伏した後に、はり下面のコンクリートのひび割れ付近から連続繊維シートが剥離するので、少なくとも鉄筋の降伏ひずみ以上のひずみが連続繊維シートに生じる必要がある。一方、実橋の RC 床版でそのような高いひずみが作用するには、何らかの理由により RC 床版の劣化が進行して大きいひび割れが生じるなどの状態でないと生じ難いことから、荷重による連続繊維シートの剥離は起こりにくいと考えられる。また、はり試験で剥離する際は、通常、はり下面の表層付近におけるコンクリートの破壊を伴うが、実橋床版における連続繊維シートの端部の剥離事例で、(点検記録の写真のみで十分な確認はできていないが) 少なくとも剥離した連続繊維シートに明確なコンクリートの付着は認められなかった。K 橋のように、実橋における連続繊維シートの交差部における浮きは、コンクリートのひび割れとの位置関係が明確でなかった。

3 章の応力測定でも見られたように、床版のハンチの厚い位置まで連続繊維シートを接着した場合には、連続繊維シートの端部にそれほど大きいひずみがかからず、剥離は生じにくい傾向にあると考えられる。鋼板接着補強による実験でも、ハンチまで補強した場合に剥離に対して有利な結果が得られている¹⁾²⁾。実橋で入隅部に浮きが認められることがあるが、本文で示した事例の範囲ではいずれも漏水を伴っていたことから、供用中の水の影響による可能性が高い。ただし、入隅部では、構造的に連続繊維シートが剥がれる方向に力がかかる可能性があるとともに、施工品質の影響を受けやすい部分でもあることから、浮きの発生が相対的に生じやすい傾向にあると考えられる。これまで、現場によっては、入隅部の変化を緩和するための R 部をパテ等で確保することで改善が試みられている。前述の応力測定で確認された、入隅部に交番応力が作用することも含めて、この部分からの剥離の可能性について経過観察する必要がある。なお、鋼板接着のように比較的剛な補強材を用いた場合、はり試験では、補強材の端部から支点(床版の場合は入隅部または主桁)まで距離が離れているほど、補強材端部を起点とした RC はりのせん断破壊(せん断補強鉄筋がない場合)や補強材の端部からの剥離が生じやすい傾向にある³⁾。連続繊維シートは鋼板に比べて剛性がかなり低いが、床版下面の任意の位置で連続繊維シートを定着する(縁切りする)ことは避けるのがよいと考えられる。

3 章の比較的健全な RC 床版での応力測定の事例では、供用荷重下においても、連続繊維シートに作用するひずみは $200\sim 300\times 10^{-6}$ 程度であり、このような作用レベルでは、床版下面に接着された連続繊維シートの剥離は生じにくいと考えられる。ただし、ひずみが小さかったのは、ほとんど構造ひび割れが生じていない RC 床版に連続繊維シートが施工されていたことによるものであり、今後、ひび割れが生じている RC 床版においても、同様の応力測定を実施する必要がある。

5. まとめ

実橋における連続繊維シートの挙動や損傷事例を把握するため、2章では、既往の調査研究、実橋の定期点検、及び本共同研究における実橋調査に基づき、これまでに見られる RC 部材に接着された連続繊維シートの挙動と損傷事例を示した。そのうち、実橋で見られた連続繊維シートの損傷事例では、床版からの漏水を伴うものが少なからず見られた。また、それ以外に、既往の調査で報告されているように、施工時に生じたと考えられる浮きも認められた。それを踏まえて、2.4では、連続繊維シートの施工に関して、国土交通省の建築関連の指針類^{37)・39)}や土木学会の文献³⁶⁾で記されている施工技術者の資質の重要性に関する箇所を引用して列記した。

3章では、実橋床版下面に接着された連続繊維シートの応力測定の結果を報告した。ひび割れがほとんど見られない RC 床版への連続繊維シートによる補強であったことから、補強前に比べて床版たわみの変化がほとんどなく、また連続繊維シートに作用するひずみは比較的軽微であった。実橋における RC 床版下面の連続繊維シートのひずみ、特に連続繊維シートの定着部に近接するハンチ付近のシート挙動の実測例が少なく、補強設計法を検討する上での有効なデータが本調査において得られた。

これらの結果を踏まえて、4章で、室内試験と実橋での連続繊維シートの損傷の相違点をまとめた。今後、道路橋 RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計骨子案を提示する上で、これらの情報を適宜考慮する予定である。

謝辞

走行載荷試験にご協力いただいた秋田県の方々をはじめ、点検結果における事例調査や現地調査において各道路管理者の方々にご協力をいただきました。この場を借りて、ご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

参考文献

[1 章]

- 1) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，土木学会，2000.7.
- 2) 国立研究開発法人土木研究所，一般社団法人繊維補修補強協会，積水化学工業株式会社：連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書（Ⅰ）－連続繊維シートのせん断弾性係数の検討－，共同研究報告書，第 522 号，2021.3.
- 3) 国立研究開発法人土木研究所，一般社団法人繊維補修補強協会，積水化学工業株式会社：連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書（Ⅱ）－連続繊維シート付着挙動の汎用 FEM 解析による検討－，共同研究報告書，第 524 号，2021.3.

[2 章]

- 1) 森成道，松井繁之，岩下藤紀，西川和廣：炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究，橋梁と基礎，Vol. 95, No. 3, pp. 25-32, 1995.3.
- 2) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，土木学会，2000.7.（再掲）
- 3) ACI Committee 440 : *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute, 440.2R-08, 76 p., 2008.
- 4) 田中良樹，村越潤，玉越隆史，新藤竹文：曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの破断，構造工学論文集，Vol. 63A, pp. 999-1012, 2017.3.
- 5) Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. and Connelly, G. M. : External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics, *ACI Structural J.*, Vol. 88, No. 4, pp.490-500, July-Aug. 1991.
- 6) 岸徳光，三上浩，佐藤昌志，松岡健一：FRP シートを接着した RC 梁の曲げ付着性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, pp. 515 - 520, 1998.
- 7) El-Tawil, S. and Okeil, A. : *Design of Concrete Bridge Girders Strengthened with CFRP Laminates, Static Strength, Fatigue Behavior and Reliability*, Final Report, University of Central Florida, 124 pp., July 2001.
- 8) Kim, Y. J. and Heffernan, P. J. : Fatigue Behavior of Externally Strengthened Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymers: State of the Art, *J. of Composites for Construction*, Vol. 12, No. 3, pp.246-256, June 2008.
- 9) 岸徳光，三上浩，栗橋祐介：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 683, pp. 47-64, 2001.
- 10) 中井裕司，大久保誠，長谷川泰聰，田中良樹：連続繊維シートで補強した RC 部材の軸引張試験と FEM 解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, pp. 1087-1092, 2020.
- 11) 国立研究開発法人土木研究所，一般社団法人繊維補修補強協会，積水化学工業株式会社：連続繊維補強

された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書（Ⅱ）－連続繊維シート付着挙動の汎用 FEM 解析による検討－，共同研究報告書，第 524 号，2021.3.（再掲）

- 12) Assimacopoulos, B. M., Warner, R. F., and Ekberg, Jr., C. E., High Speed Fatigue Tests on Small Specimens of Plain Concrete, *PCI Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 53-70, Sep. 1959.
- 13) 松下博通，徳光善治：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，第 284 号，pp. 127-138，1979.4.
- 14) 河野広隆，高橋弘人，森濱和正：水中不分離性コンクリートの疲労特性，土木技術資料，Vol. 36, No. 2, pp. 54-58, 1994.
- 15) 田中良樹，村越潤，長屋優子：橋面アスファルト舗装の透水性が鉄筋コンクリート床版の耐久性に及ぼす影響（下）－塩水による疲労と塩害の複合劣化－，橋梁と基礎，Vol. 42, No. 12, pp. 26-31, 2008.12.
- 16) 田中良樹，村越潤，長屋優子：道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, pp.913-918, 2008.7.
- 17) 斉藤満，今井悟：純引張載荷下におけるコンクリートの疲労特性について，土木学会年次学術講演会講演概要集 V，Vol. 37, pp.295-296, 1982.
- 18) Okeil, A. M., El-Tawil, S. and Shahawy, M. : Short-Term Tensile Strength of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Flexural Strengthening of Concrete Girders, *ACI Structural J.*, Vol. 98, No. 4, pp. 470-478, July-Aug. 2001.
- 19) 新版 FRP 入門，(社)強化プラスチック協会，1987.9.
- 20) FRP 橋梁－技術とその展望－，構造工学シリーズ 14，土木学会，2004.1.
- 21) Harris, B. ed. : *Fatigue in Composites*, Woodhead Pub. Ltd., Cambridge, England, 2003.
- 22) 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（Ⅰ）－炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究－，共同研究報告書，第 220 号，1999.3.
- 23) 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（Ⅱ）－炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究－，共同研究報告書，第 230 号，1999.10.
- 24) 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）－，共同研究報告書，第 235 号，1999.12.
- 25) 田中良樹，村越潤：繰返し移動荷重を受ける鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の挙動，構造工学論文集，Vol. 59A, 土木学会，pp. 1124-1137, 2013.3.
- 26) Wu, Z. and Niu, H. : Prediction of Crack-Induced Debonding Failure in R/C Structures Flexurally Strengthened with Externally Bonded FRP Composites, 土木学会論文集 E, Vol. 63, No. 4, pp. 620-639, 2007.
- 27) 村越潤，田中良樹，吉田英二，新藤竹文，近藤富士夫：格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の輪荷重走行下における破壊性状，第 70 回土木学会年次学術講演会概要集 I，pp. 425-426, 2015.
- 28) 田中良樹，村越潤，玉越隆史，新藤竹文：格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の輪荷重走

行下における破壊性状，第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，pp. 77-82，2016.11.

- 29) 田中良樹，村越潤，玉越隆史，新藤竹文：RC床版の主鉄筋方向挙動に及ぼすCFRPシート接着補強方向の影響，第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，pp. 83-88，2016.11.
- 30) 河野広隆ほか：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(IV)—旧芦川橋の載荷試験—，土木研究所資料，第3816号，2001.3.
- 31) 木村駿：床版補強の炭素繊維シートが7カ月で剥離，日経コンストラクション，p. 17，2017.7.10.
- 32) 野々村佳哲，内藤勲，安中新太郎：連続繊維シート接着による床版補強工の変状調査，第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，pp. 151-156，2016.
- 33) 古賀秀幸，菅野春雄，菊地重徳，松本修一：RC床版の上下面に対する炭素繊維補強，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 51，V-550，pp. 1098-1099，1996.
- 34) 国土交通省道路局国道・技術課，国土技術政策総合研究所，東北地方整備局，北陸地方整備局，中部地方整備局，九州地方整備局，北海道開発局，国立研究開発法人土木研究所：道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究，土木研究所資料，第4398号，2020.3.
- 35) 炭素繊維補修・補強工法技術研究会：炭素繊維シート貼付け工事における品質管理マニュアル（案），2004.
- 36) 複合構造シリーズ09「FRP接着による構造物の補修・補強指針（案）」，土木学会，2018.
- 37) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修，公共建築改修工事標準仕様書（建築工事編）（平成31年版），一般財団法人建築保全センター，2019.
- 38) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修，建築改修工事監理指針（令和元年版），一般財団法人建築保全センター，2019.
- 39) 国土交通省住宅局建築指導課監修，2010年改訂版／連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針，一般財団法人日本建築防災協会，2010.

[3章]

- 1) 樋口祐治，田中良樹，上仙靖，刈茅孝一，野村敏雄：実橋RC床版下面に接着された連続繊維シートの挙動，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol. 74，V-138，2019.
- 2) 田中良樹，村越潤，飯塚拓英：鋼道路橋桁端部の腐食断面欠損に対する当て板補強，土木技術資料，Vol. 56，No. 4，pp. 40-45，2014.

[4章]

- 1) 飯岡豊，桧貝勇，細田和夫：鉄筋コンクリート床版の補強方法に関する試験—鋼板接着工法の検討(その3)—，日本道路公団試験所報告，pp. 143-151，1977.12.
- 2) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性，1991.12.
- 3) Roberts, T.M. and Haji-Kazemi, H. : A Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates, *Proc. Inst. Civil Engineer, Part 2*, Vol. 87, pp. 39-55, 1989.

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No. 554 July 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754