

報告

UHPFRCによる吊り橋の床版補修と載荷試験による補修効果の確認

岡村哲也*, 三田村浩**, 松本高志***, 松井繁之****

* (株) サンブリッジ (〒001-0025 札幌市北区北25条西4丁目1-26)

**博(工), (一財) 災害科学研究所 (〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋4丁目5-13)

***Ph.D., 北海道大学教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

****工博, 大阪大学名誉教授 (〒565-0824 大阪府吹田市山田西4-2-40-1006)

今回報告するのは吊橋である上吉野川橋の床版上面補修工事である。本橋は床版損傷が進んでおり一般的な床版増厚による重量超過に制限があることや全面打替えによる長期通行止めが出来ない等の課題を解決するために UHPFRC の一つである「超緻密高強度繊維補強コンクリート」を用いた補修工法が採用された。補修前後のドローンを用いた計測ではたわみが約 6% 低減しており、パネル式プレキャスト RC 床版を連続化したことによる減衰効果も確認出来た。

キーワード: UHPFRC, 超緻密高強度繊維補強コンクリート, 床版補修, 長寿命化

1. はじめに

補修対象の吊橋の既設床版は、プレキャスト RC 床版にて施工されているが、架設後から 53 年が経過し床版損傷が進んでおり、現行基準 (H29 道路橋示方書) での評価を行うと許容応力度を超過している状態にあった。また、既に橋脚耐震補強が行われており、一般的な床版増厚による重量超過に制限があることや全面打替え（鋼床版等の床版軽量化）による長期の通行止めは地域交通確保の点で難しいなどの課題があり、本橋の床版補修ではそれらの課題の解決策として超緻密高強度繊維補強コンクリート（以降 UHPFRC）が採用された。

2. 上吉野川橋諸元

上吉野川橋（管理者：高知県）は高知県土佐郡に位置する早明浦ダムの建設に伴う付け替え道路として昭和46年3月に建設された。単径間2ヒンジ補剛トラス橋、橋長316.0m（活荷重合成鉄骨 L=32.6m+単純補剛トラス桁 L=250.8m+活荷重合成鉄骨 L=32.6m）、有効幅員6mを有している（写真-1）。

3. 床版の損傷状況

林業が盛んな地域に架けられているため木材を積んだ大型車の交通量が多く、また山間部のダム湖上であり12月～翌1月にかけては最低気温が氷点下になることや、湖面上のため床版が冷えやすい等の特徴がある。こ



写真-1 上吉野川橋の全景



(a)土砂化部と鉄筋の腐食 (b)床版底地部
写真-2 床版上面の状況

れらのことから床版の損傷は、①車両の繰返し荷重による表面劣化、②防水層不施工のため水の浸入に伴うコンクリートの凍結融解と土砂化、③凍結防止剤散布による床版鉄筋の腐食、④架設用吊り金具部の補修したコンクリートの劣化、などが生じていた（写真-2 (a)）。また、特筆すべき点として、吊り橋主径間部のプレキャスト RC 床版は天然軽量骨材コンクリートを使用しており、床版パネル寸法は厚さ t=180mm、橋軸方向 6.6m、橋軸直角方向 3.0m の形状で主桁フランジに弾性締結部材で固定



写真-3 はつりとウォータージェット施工後の状況

表-1 UHPFRC の性能諸元

項目	特性値
圧縮強度（設計）	130 N/mm ²
引張強度（設計）	9 N/mm ²
ひび割れ発生強度	6 N/mm ²
曲げ強度	35 N/mm ²
ヤング係数	4.0×10^4 N/mm ²
付着強度	2.7 N/mm ² 以上※
長さ変化率（収縮低減考慮）	111×10^{-6}
塩化物イオン浸透深さ	0 mm
中性化深さ	0 mm
透気係数	0.001×10^{-16} m ² 以下

※付着強度はコンクリート母材での破壊

されており、床版本体は目地で縁切りされている。目地部（写真-2（b））は間詰めモルタルが材料劣化により損傷しており、その隙間から流出した雨水等が床版下面の補強用炭素繊維シートの浮きを発生させており、鋼部材にも腐食が生じていた。

4. 補修工法の選定

一般的な補修材料による上面増厚補修工法については、死荷重の増加となることや、施工後早期に打継ぎ界面に剥離が生じる事例が見受けられ、耐久性や耐荷性に対して信頼性の低下が懸念された。

そこで、本橋の補修工法には、①片側交通開放で施工が可能、②薄層施工（補修厚さ 20mm）で疲労耐久性が向上できる、③補修材料自体が防水層としての機能を有する、など補修効果が高く既設床版との一体性にも優れる UHPFRC を採用するに至った。

表-1 に今回使用した補修材料の性能諸元を示す。

5. 補修工法の概要

床版補修は、片側 1 車線毎に既設舗装を撤去して床版上面の補修を実施し、その後の舗装復旧までを一工程として実施した。



写真-4 UHPFRC の施工完了状況

5.1 舗装切削・床版はつり

最初にアスファルト舗装 ($t=40\text{mm}$) を切削後、床版コンクリート上面は打音検査を行い、表面劣化が生じている脆弱部は電動チッパーによりはつり取り、その後にウォータージェット（水圧 240MP、水量 380/l/min）で床版全体を 2~3mm 程度研掃し、高圧洗浄と洗浄水のバキューム処理後に鉄筋の防食処理を施した（写真-3）。脆弱部の中には鉄筋の裏側まで達する箇所もあり、はつり深さは最大 50mm であった。はつり作業は片側 1 車線を 4 日間で完了した。

5.2 UHPFRC による上面補修

本橋梁は補修による死荷重増が許容できない条件であり、既設舗装 40mm 撤去後は UHPFRC を 20mm、舗装 20mm の構成で施工した。UHPFRC は薄層でもその高い付着特性により既設部材との一体性が確保でき、上面補修による押抜きせん断耐力向上により高耐荷性・疲労耐久性が付与されることになる¹⁾。

UHPFRC の製造は現場ヤードで専用の積載型プラント車にて練混ぜを行い、専用の小型運搬車にて荷下ろしを行う。荷下ろし後は、振動レイキにより敷均し、専用フィニッシャーでの締固め、左官仕上げを行って、珪砂を散布後に散水してシート養生を行って完了となる。

施工順序としては、本線施工に先立ち先ず地覆側 0.4m および車線中央側 0.3m を人力施工で UHPFRC を先行打込みした（写真-4）。これは車道中央部の打込みに使用する専用フィニッシャーのレール用足場としての役割を担う。

プレキャスト床版間の目地部は内部の土砂等を取り除き、床版上面より 20mm の深さまで砂を突き固め充填した後、フィニッシャレール用足場と同時に UHPFRC の先行打込みを行った。UHPFRC にて目地部の充填および上面増厚部 ($t=20\text{mm}$) を連続化することで、床版下面への水や塩化物イオンなどの劣化因子の浸透遮断ならびに走行性の向上や目地部段差による衝撃の緩和が図されることになる。

上面補修も他方 1 車線を交通開放した状態で実施し、片側 1 車線を 4 日間で完了した。



写真-5 補修後載荷状況



図-1 静的載荷位置



写真-6 格子マーカー

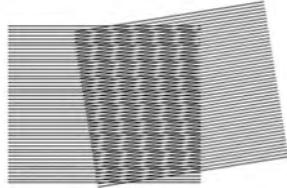


図-2 モアレの例

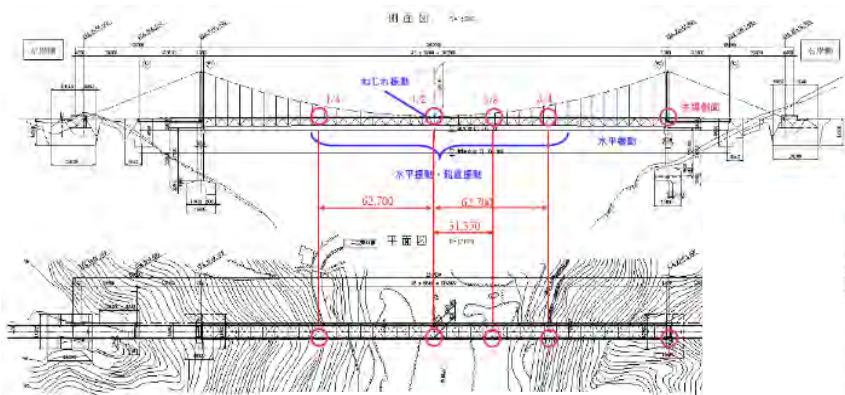


図-3 加速度センサ設置位置

6. 載荷試験による計測

6.1 載荷試験内容

載荷試験車は重量 25t のラフタークレーンを使用し、動的載荷と静的載荷の2種類を実施した。動的載荷は時速 30km/h で走行させた。また、静的載荷は3箇所で載荷している。いずれもパネル支間中央で変位計測しており、CASE1 は床版表面の変状が顕著なパネルで橋梁支間中央から 3 パネル目、CASE2 は支間中央から 1 パネル目、CASE3 はひずみゲージ設置位置と同一断面の支間中央から 4 パネル目である（写真-5、図-1）。

6.2 計測内容

床版補修前と補修後で以下に示す載荷試験を実施し、補修効果の確認を行った。

(1) たわみ計測

たわみ計測を橋梁全体（P1-P2 径間）と単床版で実施した。

橋梁全体では、動的載荷と静的載荷を実施しドローン空撮により支間中央での最大たわみを計測した。撮影距離は橋梁規模より約 300m 離れた湖面上空から、橋梁の支間中央および両主塔に設置した3箇所のマーカーを撮影記録する（写真-6）。本技術は規則正しい繰返し模様を重ね合わせた際に発生するモアレ（図-2）を活用して構造物の変形量を定量的に評価する方法であり、サンプリングモアレ法で格子パターンのマーカーを構造物に貼付けて撮影することで精度よく動的なたわみが計測できる。また、橋梁全体のドローン空撮画像の解析により載荷試験車通過過程におけるたわみの計測も実施している。

表-2 たわみ計測結果（ドローン空撮、動的載荷）

項目	時速 (km/h)	計測結果 (mm)		平均値 (mm)	補修前後のたわみ差 (mm)
		1回目	2回目		
補修前	30	72.35	73.17	72.80	
補修後	30	68.10	68.16	68.13	▲4.67

表-3 たわみ計測結果（ドローン空撮、静的載荷）

項目	計測結果 (mm)	補修前後のたわみ差 (mm)
補修前	71.85	
補修後	67.00	▲4.85

単床版では静的載荷を実施し高感度変位計によりたわみ計測を行った。

(2) 振動計測

載荷試験用の車両を用いて、動的載荷により橋梁全体の振動を加速度センサで計測し（図-3），補修前後の固有振動数の抽出および振動モードの変化を確認した。

(3) 鋼部材のひずみ計測

静的載荷を実施して、支間中央の補剛材トラス上弦材、下弦材、上フランジ、下フランジの5箇所（1断面）でひずみゲージによるひずみ計測を実施した。

6.3 計測結果

(1) たわみ計測結果

ドローン空撮による橋梁全体の動的載荷時のたわみ計測結果は、支間中央で最大たわみが補修前平均値 72.80mm、補修後平均値 68.13mm であった。補修後で 4.67mm（約 6%）のたわみが低減されており、UHPFRC による上面補修により床版剛性が向上したことや連続化したことによる効果と考えられる（表-2）。静的載荷（支間中央載荷）時のたわみ計測結果は、補修前が 71.85mm、

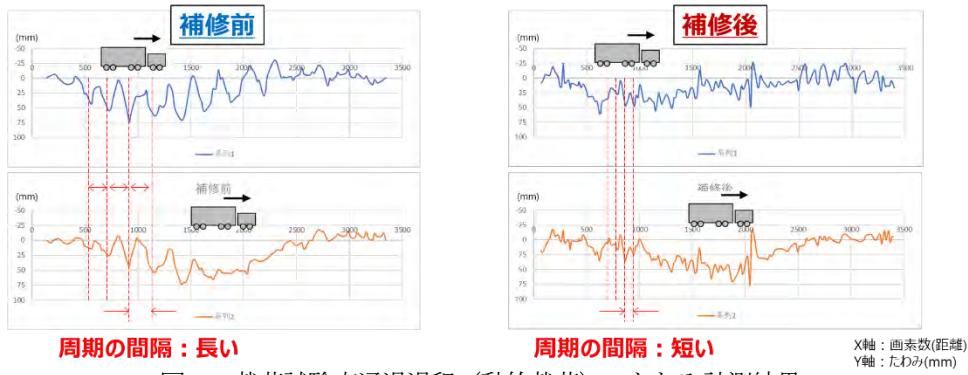


図-4 載荷試験車通過過程（動的載荷）のたわみ計測結果

表-4 たわみ計測結果（単床版、静的載荷）

	床版たわみ (mm)		補修前後のたわみ差 (mm)	
	補修前	補修後	②/①	③/②
CASE1	0.342	0.016	▲0.33	
CASE2	-0.632	-0.01	▲0.62	
CASE3	-1.194	-0.036	▲1.16	

表-5 固有振動数の計測結果

振動モード	振動数計測値 (Hz)			比率	
	①H24年度	②補修前	③補修後	②/①	③/②
鉛直方向	対称1次	0.464	0.453	0.444	0.98 0.98
	逆対称1次	0.513	0.555	0.569	1.08 1.03
	対称2次	0.891	0.922	0.790	1.03 0.86
水平方向	対称1次	0.293	0.345	0.331	1.18 0.96
	逆対称1次	0.794	0.769	0.768	0.97 1.00
ねじれ方向	対称1次	1.221	1.186	1.201	0.97 1.01
水平方向 + ねじれ方向の達成	水平(対称2次) + ねじれ(対称1次)	1.282	1.239	1.271	0.97 1.03

表-6 鋼部材のひずみ計測結果

	ひずみ (μ)					
	トラス		縦桁G3			
	上弦材	下弦材	上フランジ	下フランジ		
	1/2スパン	3/4スパン	1/2スパン	1/2スパン	1/2スパン	
CASE1	補修前	-12	-19	16	-7	-5
	補修後	-1	-9	8	-3	1
	補修前後のひずみ差	11	10	8	4	6
CASE2	補修前	-21	-33	35	-12	-9
	補修後	-10	-19	24	-1	2
	補修前後のひずみ差	11	14	11	11	11
CASE3	補修前	-65	-72	80	-45	106
	補修後	-45	-45	79	-16	106
	補修前後のひずみ差	20	27	1	29	0

補修後で 67.00mm となり、補修後で 4.85mm のたわみが低減されている（表-3）。

ドローン空撮画像による載荷試験車通過過程における橋梁全体のたわみの計測結果（図-4）は、補修前では単床版の振動による影響と思われる周期間隔が長く振幅の大きいローカルなたわみ成分が計測されているが、補修後では周期間隔が短く振幅の小さいたわみ分布性状を示しており、最大たわみも低減していることから床版を連続化したことによる減衰効果が示される結果となった。

高感度変位計による単床版の静的載荷時のたわみ計測結果は、いずれの載荷ケースにおいても補修後のたわみが減少しており、これは上面増厚による床版の曲げ剛性が向上したためと推察される（表-4）。

（2）振動計測結果

加速度センサによる橋梁全体の固有振動数の計測結

果（表-5）から、過年度および補修前後の固有振動数に大きな変化は認められず、床版の連続化が橋梁全体の振動特性に影響を与えていないことが分かった。

（3）鋼部材のひずみ計測結果

鋼部材のひずみ計測の結果、いずれの載荷ケースにおいても補修後のひずみが減少しており、上面増厚と床版の連続化による効果が表われていると言える（表-6）。

7. 補修効果のまとめ

載荷試験から確認された補修効果を以下に示す。

- 1) たわみの計測結果から、補修後の床版全体のたわみが約 6% 低減し、UHPFRC による上面補修により床版剛性が向上したことや連続化したことによる効果と考えられる。
- 2) 載荷試験車通過過程における橋梁全体のたわみの計測結果から、補修前では単床版の振動による影響と思われるローカルなたわみ成分が計測されているが、補修後では周期間隔が短く振幅の小さいたわみ分布性状を示しており、床版を連続化したことによる減衰効果が示された。
- 3) 固有振動数の計測結果から、補修前後で固有振動数に大きな変化は認められなかった。このことから、床版の連続化は橋梁全体の振動特性に影響を与えていないことが分かった。
- 4) ひずみの計測結果から、補修を行ったことで鋼部材のひずみが減少していることも確認できた。

謝辞

本橋補修に対する計測作業に際し、高知県および CORE 技術研究所様には多大なるご助言、ご協力を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 三田村浩、今野久志、松本高志、松井繁之：UHPFRC で補修した RC 床版の押抜きせん断耐荷力の評価法、コンクリート工学年次論文集、Vol.45, pp.793～798, 2023.7

（2024 年月 7 月 12 日受付）