

論文

超緻密高強度繊維補強コンクリートで上面増厚した鋼床版の疲労耐久性

三田村 浩*, 植田健介**, 青木圭一***, 松本高志****, 松井繁之*****

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

** J-ティフコム施工協会 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-11-1)

***博(工), 中日本高速道路(株)名古屋支社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 2 丁目 18-19)

****工博, 北海道大学 大学院工学研究院教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

***** 工博, 大阪大学名誉教授 (〒565-082 大阪府吹田市山田西 4-2-40-1006)

近年, 20 年程度経過した鋼床版橋において疲労損傷が多数確認されている. その対策としてデッキプレートの増厚や高剛性舗装や縦リブ補強などを行っているが, 抜本的な解決手法には至っていない. そこで, 物質移動抵抗性が高く高強度で材料分離抵抗性に優れた超緻密高強度繊維補強コンクリートを開発して, この材料とデッキプレートを合成させて合成鋼床版化した実物大の供試体による輪荷重走行試験の結果について報告する.

キーワード: 疲労損傷, 材料分離抵抗性, 合成鋼床版化, 輪荷重走行試験,

1. はじめに

鋼床版は軽量化や構造高を低く抑えることができる特徴から, 都市間高速道路や国道等の長支間橋梁の床版に採用されてきた¹⁾. 近年, 構造物の高経年化および予想を上回る交通量の増大, 走行車両の大型化に伴い, 重交通路線に位置する 20 年程度経過した橋梁の鋼床版橋において疲労損傷が確認されている. 関係道路機関では, 疲労抑制対策として, 新設ではデッキプレートの増厚, 既設橋では高剛性舗装や縦リブ補強²⁾などを行っているが, 抜本的な解決手法の確立には至っていない. 今後も経年による鋼床版の疲労損傷の発生増加が予想されるため, 合理的かつ高耐久性を有する対策工法の開発が急務となっている. 筆者らは, 鋼床版の外的劣化因子である水の遮断と, 高強度で流動性および材料分離抵抗性に優れた超緻密高強度繊維補強コンクリート (以下「本材料」とする) をデッキプレートに薄層で打設して合成鋼床版化して, 発生応力の低減を図り, 疲労耐久性を向上させる工法を開発した. 本稿では, 本材料と鋼床版との付着特性と疲労耐久性について輪荷重走行試験の結果から報告するものである.

ひずみ硬化変形性能は本材料の自己収縮範囲よりもはるかに大きくなっている (図-1). これは, ひび割れ抵抗性が極めて高いことを意味する. また, スランプフロー試験から高い流動性を有し, 高い粘性と材料分離抵抗性を保有しているものである. コンクリートとの付着試験ではコンクリートの母材破壊を呈し, 界面付着力は $2.7\text{N}/\text{mm}^2$ を有する. さらに, 本材料は $1.5\text{h}\sim 2.0\text{h}$ で $24\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度を発現可能で, 供用中の構造物の補修・補強においても, 早期に交通開放を可能とするなどの特徴を有するものである. 材料特性を表-1 に示す.

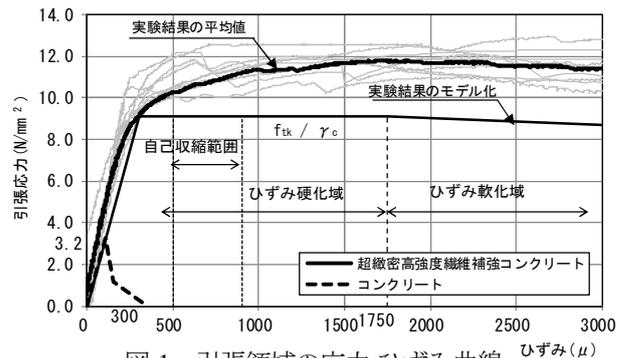


図-1 引張領域の応力-ひずみ曲線

表-1 材料特性

項目	特性値	備考
圧縮強度	$130\text{N}/\text{mm}^2$ 以上	1日で $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上
引張強度	$9\text{N}/\text{mm}^2$	ひび割れ発生強度 $8\text{N}/\text{mm}^2$
曲げ強度	$35\text{N}/\text{mm}^2$	試験JIS A 1171 (材齢28日)
ヤング係数	$3.5 \times 10^4\text{N}/\text{mm}^2$	材齢28日
フロー値	~350mm	試験JIS R 5201 モルタルフロー
付着強度 (母材破壊)	$2.7\text{N}/\text{mm}^2$	試験JIS A 1171 (材齢28日)
長さ変化率	収縮 111×10^{-6}	試験JSCE-K561-2010 (材齢28日)
塩化物イオン浸透深さ	0mm	試験JIS A 1171 (材齢28日)
中性化深さ	0mm	試験JIS A 1171 (材齢28日)
透気係数	10^{-19}m^2 以下	透気係数試験 (トレント法)

2. 超緻密高強度繊維補強コンクリートの特性

本材料の圧縮強度は材齢 1 日で $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の高強度を発現する. 引張領域の応力-ひずみ曲線は, 一般的な鉄筋コンクリートに用いられる設計基準強度 $24\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートをはるかに上回る応力ひずみ特性を示し,

3. 輪荷重走行試験

鋼床版の上面に本材料を薄層補強材として用いることで、合成鋼床版として得られる一体性と耐久性向上を輪荷重走行試験によって確認した。

3.1 試験供試体

ゴムタイヤと鉄輪を用いた輪荷重走行試験の試験体図と試験概要図を図-2 から図-4 に示す。図中、載荷ブロックは、道路橋示方書の輪荷重載荷面積を模擬している。本材料の諸元は表-1 に同じである。

3.2 試験条件

表-2 に試験条件を、図-5 に載荷プログラムを示す。試験条件は実橋をモデルとし、計画交通量 11,500 台/日、大型車交通量 40%の路線を想定し、200 年相当の疲労載荷回数を実施した。載荷プログラムでは、鋼床版製作後は溶接接合部に残留ひずみが発生しているため、本材料の打設前にこれらの残留ひずみを解放することや走行の馴染み取りなど残留応力の再分配を目的として 100kN で 1,000 回走行を行った。その後、静的載荷を行い、初期値を測定した。鋼床版の応力が高くなると想定される箇所にはひずみゲージを設置した。特に着目したゲージは図-4 に示す、既往の疲労論文³⁾から、横リブスカーラップのコバ面 (Edge) のせん断区間 a 部と、鋼床版下面 (Deck) の曲げ区間の縦リブ溶接止端から 50mm に設置した b 部のひずみゲージで確認した。

載荷は横リブ直上と横リブ間の中央位置で静的載荷試験を実施した。また、横リブをまたぐことで持ち上げがりの反転作用が発生するかを確認するため W 点載荷時の E 点ひずみに着目したが、その傾向は見られなかった。

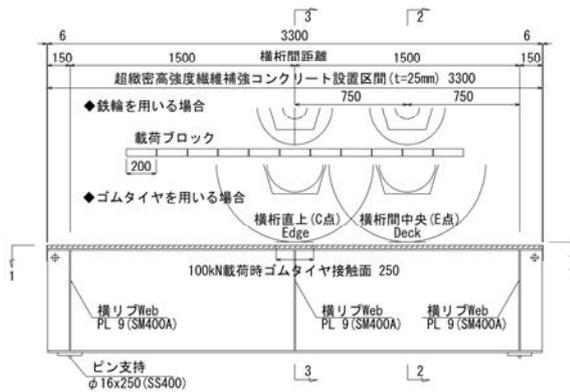


図-2 試験供試体 側面図

表-2 試験条件

走行段階	載荷荷重 (kN)	走行回数 (万回)	載荷条件	走行面
フェーズ1	100	110	ゴムタイヤ	本材料、乾燥
フェーズ2	100	6	ゴムタイヤ	本材料、水張り
フェーズ3	150 200	1 16	鉄輪	本材料、乾燥、 載荷ブロック (500mm×200mm)
フェーズ4	200	約17.6	鉄輪	鋼床版、乾燥、 載荷ブロック (500mm×200mm)

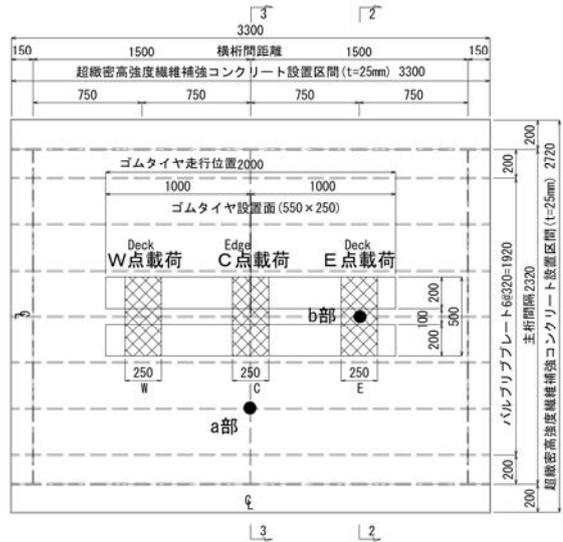


図-3 試験供試体 平面図

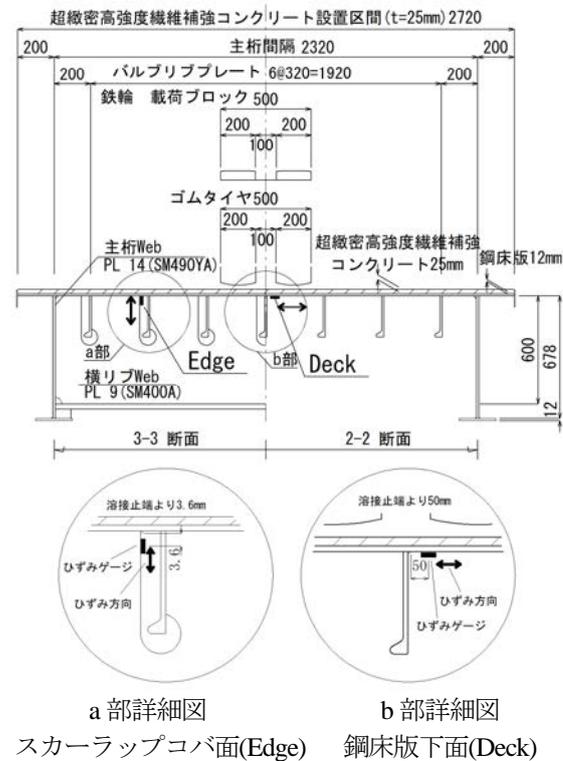


図-4 試験供試体 断面図と計測位置 (3-3, 2-2)

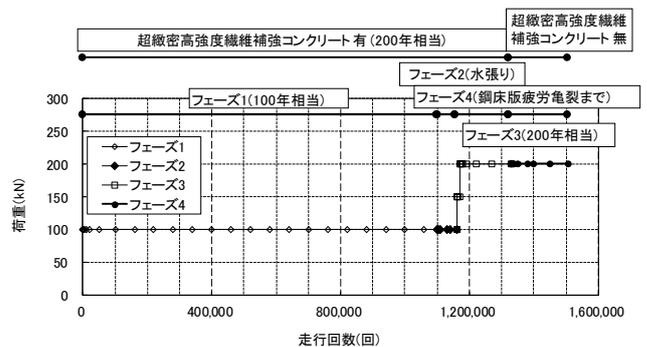


図-5 載荷プログラム

4. 試験結果

試験当初、縦リブと横リブの交差部に着目したが、実応力の増大から縦リブと鋼床版に着目した。表-3に鋼床版下面(Deck) ひずみ結果を示す。走行前の载荷試験の結果より鋼床版のみのひずみは-592 μ (1000回走行後)であった。その後、本材料補強によって-70 μ まで改善し、鋼床版下面の発生ひずみは1/9に減少した。本材料補強後のひずみ(-70 μ)を初期値として約200年(640万回程)相当の疲労を与えた後のひずみは-480 μ となった。初期値分を減じた-410 μ のひずみ増加があったが、これでも初期値の-592 μ より-180 μ 改善されているのは本材料との合成効果と考えられる。フェーズ4に入り、本材料を撤去した後の鋼床版のひずみは-627 μ (2000回走行後)と補強前の鋼床版のひずみとほぼ同等に戻ったことから、まだ疲労亀裂はないと類推し、輪荷重走行試験を続けた。

図-6、図-7にコバ面および鋼床版下面に設置したひずみゲージの経時変化を示す。コバ面(Edge)のひずみは、ほぼ一定で推移し終了時で-800 μ 程度であり、亀裂の発生はなかった。鋼床版下面(Deck)ひずみは1万回程度までは増加し、その後若干低下する傾向はあったが安定した。しかし、17万6千回で試験機が自動的に停止したので疲労亀裂の確認を行って実験を終了した。

鋼床版の上面に本材料を薄層補強材として用いることで、合成鋼床版として一体化挙動を示し、疲労耐久性が大きく向上することを一連の試験結果から確認した。

以降に4段階における試験結果の要旨を列記する。

4.1 輪荷重走行試験による疲労耐久性

① フェーズ1(補強後, 乾燥 100kN \times 110万回(100年相当))

対象橋梁路線の計画交通量を用いて推定した橋梁の耐用年数100年に相当する設計軸重換算の载荷回数は、鋼道路橋疲労設計指針に準じて算出すると320万回となる。

鋼床版の疲労損傷は片輪によるものと考え、50kN(後タンデム2輪)に床組の衝撃係数1.4を乗じた70kNが疲労の照査荷重となる。しかし、今回使用する疲労試験機では最小荷重が100kNのため、この荷重で耐用年数100年に相当する载荷回数を換算すると110万回となる。

図-7に、図-4で示したb部における鋼床版下面のひずみ経時変化を示す。70万回から90万回までにわずかにひずみは増加したが、これは表面にひび割れが生じたためである。90万回からは一定値に安定した。試験終了後は、鋼床版および本材料ともに異常は認められず、フェーズ1による補強効果を確認した。

② フェーズ2(補強後, 水張り 100kN \times 6万回)

疲労試験110万回の終了後、供試体に約5mmの水深で水張り試験を約5年に相当する6万回を実施した。目視では、水張りによるひび割れからの白濁や材料分離などは見られず、たたき調査でも本材料の浮きもなく、

表-3 鋼床版下面(Deck) 活荷重ひずみ一覧(μ)

走行段階	超緻密高強度繊維補強コンクリート補強の有無・载荷条件	荷重	走行回数	計画交通量(年)	100kN活荷重	200kN活荷重
	鋼床版のみ	100kN	初期値(1000回走行後, 3回目)		-592	
フェーズ1(100年)	超緻密高強度繊維補強コンクリートによる補強	乾燥 ゴムタイヤ	初期値		-70	
1,100,000			102	-327		
フェーズ2		水張り ゴムタイヤ	1		-220	
			60,000	6	-256	
フェーズ3(100年)	乾燥 鉄輪	150kN	1		-251	
			10,000	1	-355	
		200kN	1		-373	-541
			160,000	118	-480	-746
フェーズ4	鋼床版のみ	200kN	2,000	1	-627	-1207
			20,000	15	-717	-1324
		50,000	37	-654	-1268	
		176,454		-761	-1337	

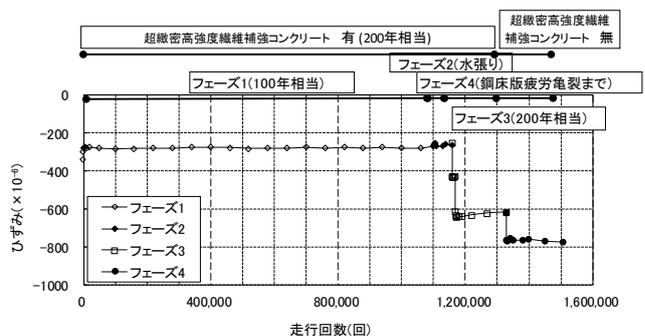


図-6 横リブコバ面(Edge) ひずみ経時変化

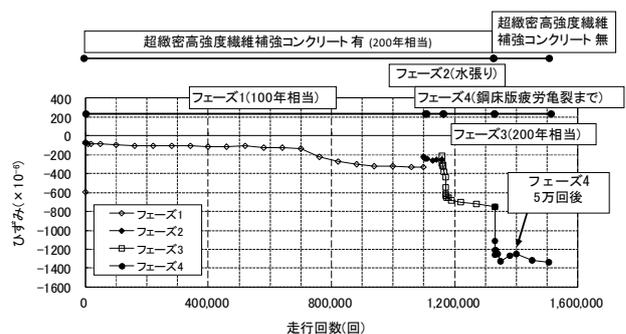


図-7 鋼床版下面(Deck) ひずみ経時変化

鋼床版本体および本材料ともに有害な変状は生じなかった。フェーズ2ではたわみは若干減少した。

③ フェーズ3(補強後, 鉄輪, 乾燥 200kN \times 16万回(118年相当))

本材料が損傷するのか、あるいは鋼床版に疲労破壊が生じるのかを調べるため、輪荷重を増大して疲労試験を続けた。ゴムタイヤを鉄輪に交換して、輪重150kNの1万回走行、輪重200kNによる16万回走行の輪荷重走行载荷を実施した。輪重200kNによる走行16万回は、計画交通量の換算载荷回数118年間に相当する(①プラスで累積200年相当以上)。結果として、鋼床版本体および本材料ともに疲労損傷は認められず、十分な疲労耐久性を発揮するものと認められた。

④ フェーズ4(鋼床版のみ, 鉄輪, 乾燥 200kN \times 17.6万回)

本材料の撤去後、鋼床版単体に対して、輪荷重走行試験を続けた。鋼床版を疲労破壊させた。

試験の結果、約1万回でひずみはピークに達し、安定した様子であったが、5万回走行の段階で、横リブ間中央の縦リブ位置において、ひずみ(図-7)が低下を示し

た。5万回走行後は、2回の磁粉探傷試験(MT)を実施した。7万回、12万回時では浸透探傷試験(PT)を併用して疲労亀裂の有無を調べたが、可視されなかった。しかし、17.6万回で試験装置が自動停止した時点で初めて疲労亀裂が認められた。磁粉探傷試験(MT)を行うと、輪荷重直下のほぼ全長にわたり疲労亀裂の発生が認められた(図-8)。内在亀裂が推察された5万回走行時は、計画交通量の37年間に相当する。本材料補強前の静載荷試験によるひずみからは、マイナー則により疲労等級から疲労発生年数は38年であり、両者はほぼ一致を示している。このことから、本材料の補強により200年相当以上の疲労を与えても、鋼床版本体は亀裂を発生しなかったことにより、この補強によって大きな耐久性が付与できたことが明確となった。

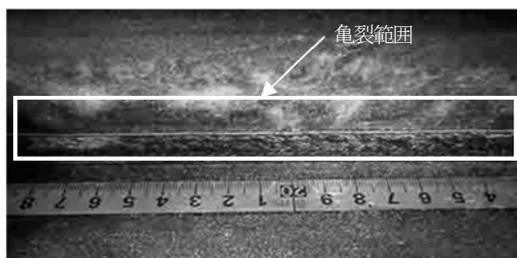


図-8 試験後の磁粉探傷試験結果
(図-4 b 部詳細付近)

4.2 ひび割れ性状、付着強度

フェーズ3の輪荷重載荷試験終了後、供試体からコア試料を採取し、疲労を受けた本材料の損傷状態を把握するため、表面のひび割れ深さ観察と付着試験を実施した。

① ひび割れ深さ観察

採取した供試体断面観察の結果、いずれの供試体とも、表面へアクラックのみで深さ方向の進展は認められなかった。水張りによる輪荷重走行試験後も鋼繊維に錆発生は見られない。これらの結果から、本材料による補強は水を浸入させない優れた防水効果を兼ね備えたものと言える。

② 付着試験

フェーズ3終了後に行った、疲労を受けた本材料の付着強度試験の結果を表-4に示した。輪荷重直下では付着強度の低下が見られたが、輪荷重載荷の影響を受けにくい部位では高い付着強度を有していた。本材料の撤去後、付着強度の低下が見られた輪荷重直下は黒く変色が認められ、分析からショットブラストの投射材である酸化マグネシウムの微細材片が固着したものであることが判明した。実施工ではブラスト後の十分な清掃が必要である。

表-4 付着試験結果

試験箇所	付着強度N/mm ²	備考
1 走行範囲外	2.77	
2 走行直下	0.00	酸化マグネシウム(投射材) 微片の付着による
3 走行直下	0.84	
4 走行範囲外	3.57	

4.3 静的載荷解析

上面増厚補強効果の評価を目的として、輪荷重供試体における本材料補強前後の静載荷試験について有限要素解析を実施した。図-9に鋼床版下面のひずみ分布の解析結果と試験結果を比較した。局所的表示ではあるが両者は良い一致が認められた。本材料を用いた補強により鋼床版の局所的な変形が抑えられたことが分かる。実験において、タイヤ直下の圧縮ひずみは、静的載荷試験による鋼床版のみの場合-590 μ が補強することで-70 μ にまで大きく改善したことが解析で証明されたとと言える。

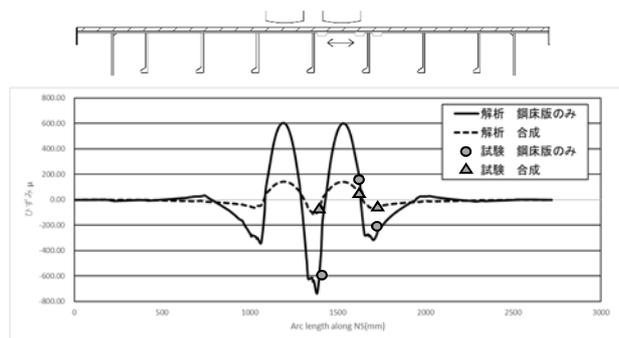


図-9 鋼床版下面 直交方向ひずみ分布

5. おわりに

輪荷重走行試験結果より、鋼床版単独の場合、計画交通量の累積37年程度で疲労損傷が生じる可能性が示唆された。一方、超緻密高強度繊維補強コンクリートを用いた補強により、計画交通量の累積200年を超えても疲労損傷は生じなかった。なお、200年相当に値する走行後、一部に本材料と鋼床版の付着切れも認められたが、その周りの付着力と本材料の面剛性によって鋼床版の局部曲げが抑制されたため、重ね梁状態でも耐荷力が持続できたものと推察される。

以上から、鋼床版へ本材料を打設することで、本材料と鋼床版は一体として挙動し、鋼床版の疲労耐久性の向上に有効な補修・補強工法であることが証明された。今後、現場における鋼床版の補強増大に対応できるよう、製造・施工機械の開発と施工体制の構築を進めていく。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版—設計・施工と維持管理—，森北出版，2007年10月。
- 2) 村越潤，梁取直樹，宇井崇：鋼床版の疲労損傷と補修・補強に関する検討，鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 Vol.10，2007年8月。
- 3) 古市亨，的場栄孝，服部雅史，大西弘志，松井繁之：特殊な既設鋼床版の疲労損傷メカニズムと合成鋼床版化による疲労耐久性向上に関する研究，構造工学論文集 Vol.56A，2010年3月。

(2020年7月17日受付)