

## 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 鋼床版の輪荷重走行試験及び FEM による数値解析

今野久志\*, 三田村浩\*\*, 松本高志\*\*\*

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

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

\*\*\* Ph.D., 北海道大学教授, 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

橋梁鋼床版の疲労損傷対策工法として, 超緻密高強度繊維補強コンクリートをデッキプレート上に薄層で増厚して合成鋼床版化し, 発生応力の低減を図る工法を提案し, 疲労耐久性向上効果を輪荷重走行試験で検証した. さらに輪荷重走行試験における上面増厚鋼床版の挙動を再現するための数値解析を実施した. その結果, 本工法は鋼床版の疲労耐久性の向上に有効な補修・補強対策であることが確認された. また, 数値解析の検討では超緻密高強度繊維補強コンクリートのひび割れにおける繊維架橋応力の変化やデッキプレートとの界面の劣化・剥離を考慮することで輪荷重走行試験結果の鋼床版ひずみの推移挙動の傾向を大略評価できることを示した.

キーワード: 鋼床版, 超緻密高強度繊維補強コンクリート, 数値解析

## 1. はじめに

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, さらには走行車両の大型化に伴い, 重交通路線に位置する 20 年程度経過した都市間高速道路等の橋梁鋼床版において疲労損傷が確認されている. 鋼床版の疲労抑制対策としては, 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りなどが行われているが, 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ことから, 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, 床版の外的劣化因子である水や塩化物イオン等の遮断と, 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) をデッキプレートに薄層で打設して合成鋼床版化し, 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, 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証結果及び FEM による試験結果の再現解析結果について報告するものである.

## 2. 超緻密高強度繊維補強コンクリート

本材料の材料特性を表-1に示す. 本材料の圧縮強度は, 材齢1日で100N/mm<sup>2</sup>以上の高強度を発現すると

表-1 材料特性

項目	特性値	備考
圧縮強度	130N/mm <sup>2</sup> 以上	1日で100N/mm <sup>2</sup> 以上
引張強度	9N/mm <sup>2</sup>	ひび割れ発生強度8N/mm <sup>2</sup>
曲げ強度	35N/mm <sup>2</sup>	試験JIS A 1171 (材齢28日)
ヤング係数	3.5 × 10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	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)	2.7N/mm <sup>2</sup>	試験JIS A 1171 (材齢28日)
長さ変化率	収縮111 × 10 <sup>-6</sup>	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 <sup>-19</sup> m <sup>2</sup> 以下	透気係数試験(トレント法)

もにひび割れ抵抗性が極めて高い. また, 高い流動性を有し, 反面, フレッシュ材料を手で持ち運びできる性状もあり, 高い粘性と材料分離抵抗性を保有している. コンクリートとの付着引張試験では, コンクリートの母材破壊を呈し, 界面付着強度は2.7N/mm<sup>2</sup>を有する. 塩化物イオン浸透深さ及び中性化深さは, JISA1171 試験においていずれも材齢 28 日において 0mm, 透気係数試験 (トレント法) による透気係数は 10<sup>-19</sup>m<sup>2</sup> 以下であり, 床版劣化因子の遮断性能に優れることから床版防水工を不要とする性能を有している. さらに, 本材料は現場打込みが可能であり打設後 1.5h~2.0h で 24N/mm<sup>2</sup> 以上の圧縮強度を発現することから, 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.

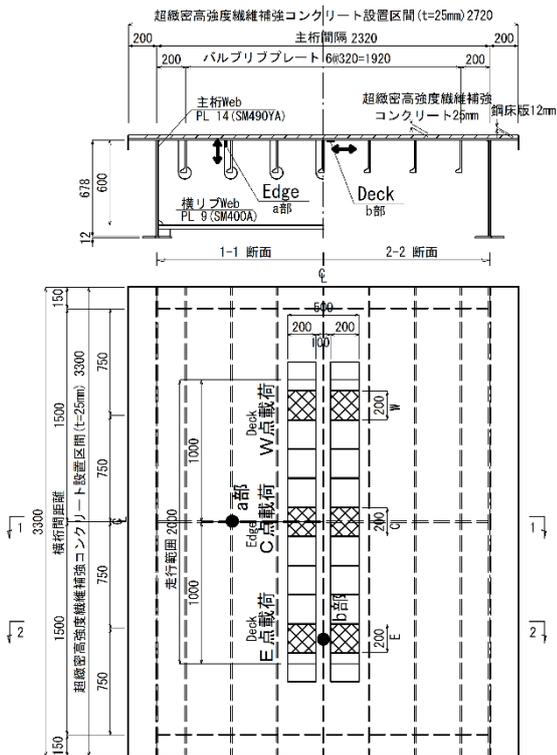


図-1 供試体の形状寸法

表-2 鋼床版の諸元

鋼床版の材質および寸法	
部材等	断面、材質
デッキプレート	t=12mm (SM490YA)
バルブリーブプレート	PL 230x11 (SM490YA)
横リブWebPL	PL 600x 9 (SM400A)
横リブFigPL	PL 200x28 (SM400A)
ヤング係数	2.0x10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>

表-3 試験条件及び試験結果

走行段階	試験条件			試験結果		
	超緻密高強度繊維補強コンクリート補強の有無、載荷条件	荷重 (kN)	走行回数	計画交通量 (年)	Deckひずみ (μ)	
予備走行	鋼床版のみ	乾燥 ゴムタイヤ	100	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	100	1,100,000	102	
フェーズ2		水張り ゴムタイヤ	100	1	-220	
フェーズ3 (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 鉄輪	150	60,000	6	-256
			200	1	1	-251
		200	10,000	1	-355	
フェーズ4	鋼床版のみ	乾燥 鉄輪	200	1	1	-373
			200	160,000	118	-480
			200	2,000	1	-627
			200	20,000	15	-717
			200	50,000	37	-654
			176,454		-761	-1337

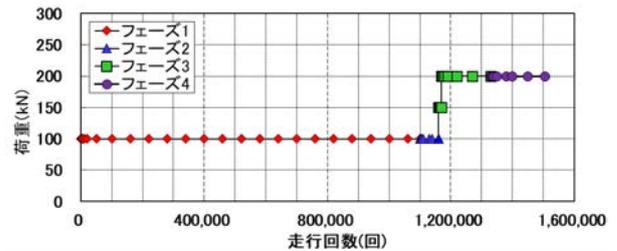


図-2 荷重プログラム



写真-1 輪荷重試験状況 (ゴムタイヤ)

### 3. 輪荷重走行試験

#### 3.1 供試体概要

供試体の形状寸法を図-1に、鋼床版の諸元を表-2に示す。供試体は、主桁間隔が2,320mm、横桁間隔が1,500mm、デッキプレートが2,720mm×3,300mm(橋軸直角方向×橋軸方向)である。本材料の打込みに先立ち、鋼床版全面をショットブラスト処理し、ボンド塗布後に硬質骨材を散布接着させた。硬質骨材定着後、本材料を厚さ25mmで鋼床版全面に打込みした。

#### 3.2 試験条件

表-3に試験条件および後述する輪荷重走行試験による鋼床版下面(Deck)のひずみ計測結果一覧を示している。試験条件は、計画交通量11,500台/日、大型車交通量40%の路線を想定し設定した。表-3の試験条件に示す通り、走行段階として予備走行と疲労耐久性検証のためのフェーズ1~4を実施している。

予備走行は、鋼床版製作後の溶接接合部の残留ひずみを解放することや走行の馴染み取りを目的としてフェーズ1で設定した100kNで1,000回の走行を行った。

フェーズ1は、輪重100kNで110万回の走行を実施した。これは想定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載荷回数は320万回であるが、鋼床版の疲労損傷は片輪によるものと考えると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、使用する輪荷重走行試験機の最小荷重が100kNであることから、この荷重で耐用年数100年に相当する載荷回数を換算すると110万回となる。

フェーズ2は、フェーズ1で110万回の疲労試験終了後に本材料に損傷がないかどうかを確認する目的で供試体を約5mmの水深で水張りを行い、約5年に相当する6万回の走行試験を実施した。

フェーズ3は、フェーズ2終了時点において鋼床版本体および本材料に損傷が認められなかったことから、輪荷重を増大して疲労試験を継続したものである。荷重を増加させるためゴムタイヤを鉄輪に交換し、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載荷を実施した。輪重200kNによる走行16万回は、計画交通量の換算載荷回数118年間に相当する(フェーズ1との累積で200年相当以上)。

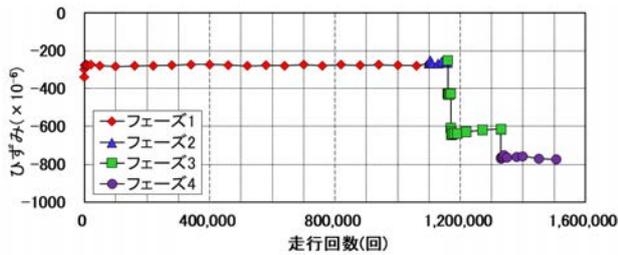


図-3 横リブコバ面 (Edge) のひずみ経時変化

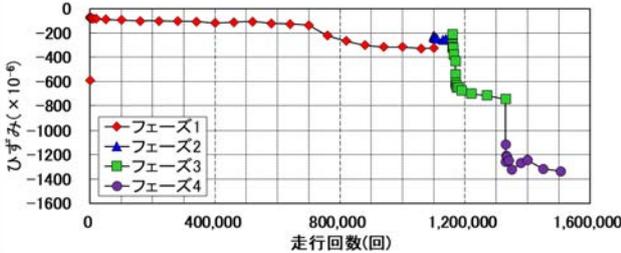


図-4 鋼床版下面 (Deck) のひずみ経時変化

フェーズ4は、本材料の撤去後、鋼床版単体に対して、輪荷重走行試験を継続し、鋼床版のみの場合の疲労耐久性を確認するために輪重200kNで疲労損傷が発生するまで実施した。

図-2にフェーズ1～4の载荷プログラムを示す。輪荷重はゴムタイヤと荷重増加後の鉄輪の2種類としている。ゴムタイヤによる载荷は直接载荷、鉄輪では道路橋示方書の輪荷重載荷面積(道路軸方向200mm×道路軸直角方向500mm)を模擬した载荷ブロックを介して载荷している(図-1参照)。なお、ゴムタイヤの輪重100kN载荷時の接地面積は約250mm×550mmであった。写真-1にゴムタイヤによる輪荷重走行試験の実施状況を示す。本材料による疲労耐久性向上効果を検証するために、鋼床版の応力が高くなると想定される箇所(ひずみゲージを設置した。特に疲労耐久性の検証箇所として着目した位置は、既往の疲労関連論文<sup>2)</sup>より図-1に示す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部のひずみである。

### 3.3 試験結果

表-3の右欄には、予備走行及びフェーズ1～4における鋼床版下面(Deck)ひずみの試験結果を示す。表より、予備走行終了後の载荷試験結果では鋼床版のみの状態におけるひずみは $-592\mu$ (1,000回走行後)であったが、本材料打設後のフェーズ1の初期载荷では $-70\mu$ (本材料打設前の約12%)まで低減していた。

図-3に横リブコバ面(Edge)のひずみ経時変化を示す。コバ面のひずみは、各フェーズの輪重の増加に対応して増加しており、各フェーズ間はほぼ一定値で推移している。本材料を撤去したフェーズ4では、フェーズ3と同一の輪重200kNであるがフェーズ3に比較して圧縮

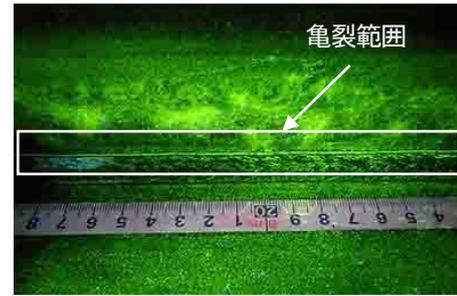


写真-2 フェーズ4試験後の磁粉探傷試験結果

ひずみで $170\mu$ 程度増加している。終了時では $-800\mu$ 程度となったが、試験体本体には亀裂の発生はなかった。

図-4に鋼床版下面(Deck)のひずみ経時変化を示す。以下、フェーズ毎に試験結果の概要を示す。

フェーズ1では、走行回数70万回において本材料の表面にひび割れが生じたことから、わずかにひずみは増加したが、90万回から一定値(約 $-330\mu$ )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、補強効果を確認した。

フェーズ2では、水張り試験を約5年に相当する6万回実施したが、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、鋼床版本体及び本材料ともに有害な変状は生じなかった。また、フェーズ2の初期载荷においてひずみがフェーズ1終了時に比較して $100\mu$ 程度減少している。これはフェーズ1で本材料表面に発生したひび割れに水が浸入し、未水とのセメントの水和によりひび割れが閉塞したためであると推察しているが、原因に関しては更なる検証が必要である。

フェーズ3では、計画交通量の換算载荷回数で118年間に相当する疲労载荷を実施したが、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。

フェーズ4では、走行回数約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、ひずみが低下を示した。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(写真-2)。

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。本材料補強前の静载荷試験によるひずみ(応力)から、マイナー則によって疲労発生年数は38年と計算でき、両者はほぼ一致している。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、本材料による合成鋼床版化によって大きな疲労耐久性が付与できたことが明確となった。

#### 4. FEMによる数値解析

輪荷重走行試験における上面増厚鋼床版の挙動を再現するために、本材料のひび割れにおける繊維架橋応力の変化と本材料とデッキプレートとの間の界面付着の劣化・剥離を考慮した有限要素モデルを作成し、繰返し輪荷重走行を与えた解析を実施した。解析は、フェーズ1, 2, 3を対象とした。輪荷重走行試験における鋼床版下面(Deck)の活荷重ひずみについて試験結果と比較検討を行う。

図-5に解析モデルを示す<sup>3)</sup>。本材料の増厚層は3層のソリッド要素、鋼部材はシェル要素で表した。ただし、輪荷重近傍のバルブリブプレートについてはソリッド要素で表している。要素数は合計47,390である。輪荷重載荷は、フェーズ1と2のゴムタイヤでは走行帯を7つに区分して、ある区分の除荷と同時に隣接区分の載荷を行うことで表している。フェーズ3の鉄輪では、走行帯の寸法を変更するとともに、11に区分して同様に輪荷重載荷を行っている。

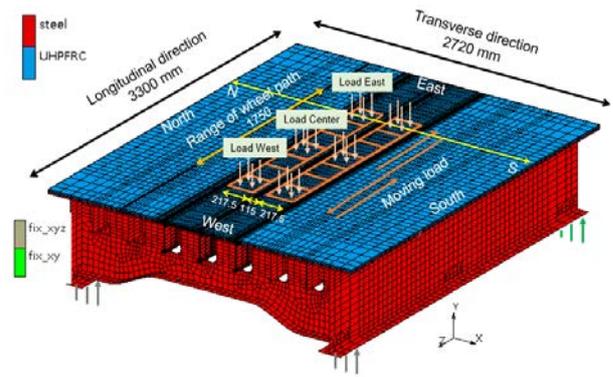


図-5 解析モデル

##### 4.1 フェーズ1 (ゴムタイヤ, 乾燥, 100kN)

フェーズ1はゴムタイヤによる100kN輪荷重走行載荷である。通常、輪荷重は均等面圧として表されるが、特に中心のバルブリブ周辺のひずみ挙動再現に乖離があったため、本解析ではより忠実な不均等面圧として表した。図-6に載荷時ゴムタイヤの接触面の詳細と解析で与えた面圧分布を示す。タイヤ溝を考慮し、走行方向と幅方向の面圧分布を与えている<sup>4)</sup>。

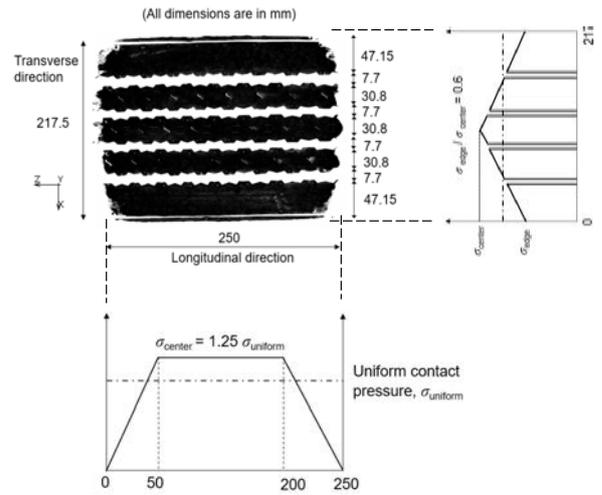


図-6 ゴムタイヤの面圧

鋼材の構成則には二直線等硬化モデルを用いた。本材料の構成則では、最大圧縮応力後の軟化、引張りひび割れ後の硬化と最大引張応力後の軟化、及び交番の除荷と再載荷を考慮している(図-7)。また、疲労載荷下のひび割れにおいては、次式により架橋応力劣化を考慮している。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = 1 - (0.015 + 5\varepsilon_{i,\max}) \log N \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_N$ : N回時架橋応力,  $\sigma_1$ : 1回時架橋応力,  $\varepsilon_{i,\max}$ : 最大引張りひずみ, である。

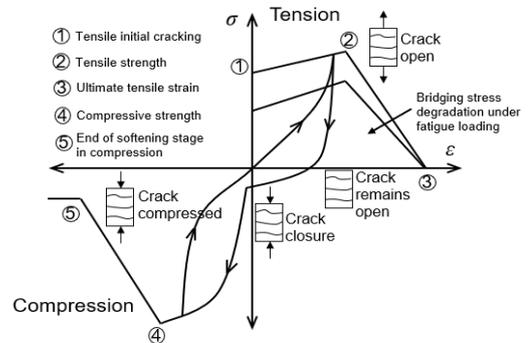


図-7 本材料の構成則

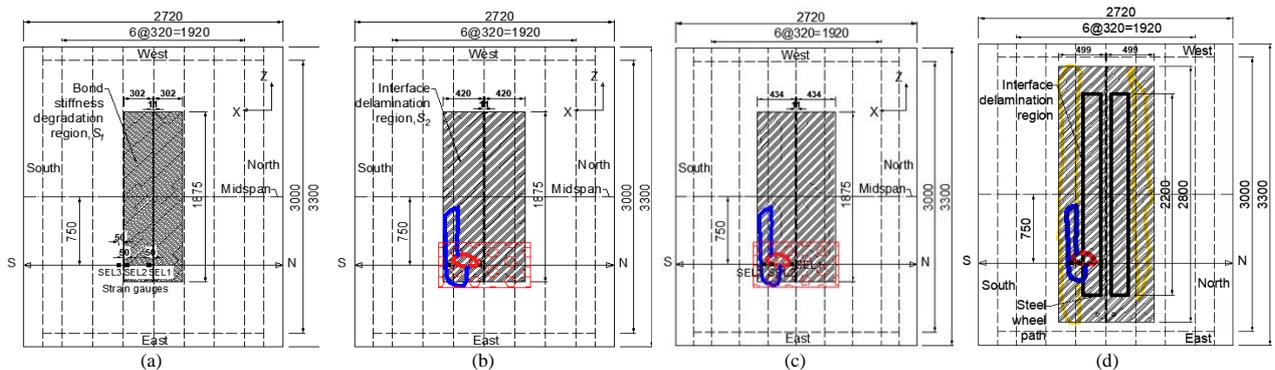


図-8 界面付着劣化・剥離 (a)1-1: 剛性劣化領域, (b)1-3, (c)2, (d)3: 剥離領域

界面付着の劣化については、フェーズ1時の挙動を考慮して3つのサブフェーズを考えた。フェーズ1-1では、図-8(a)中の領域S1において界面付着剛性の劣化を次式により与えた。

$$\frac{E_{bN}}{E_{b1}} = 1 - 0.1707 \times \log N \quad (2)$$

ここに、 $E_{bN}$  :  $N$ 回時のせん断剛性、 $E_{b1}$  : 1回時のせん断剛性、 $N$  : 载荷回数、である。

フェーズ1-2と1-3においては、図-8(b)に示すように領域S1から領域S2まで橋軸直交方向へと界面剥離領域が拡大すると仮定した。またその進行速度は打音観察に基づき表-4に示す値に設定した。

上記に説明した解析モデルにより得られたフェーズ1における鋼床版下面(Deck)の活荷重ひずみについて、試験結果と解析結果を図-9に示す。赤線は、ゴムタイヤの不均衡面圧に、架橋応力劣化と付着劣化・剥離を考慮した解析の結果であり、サブフェーズ間で示す異なる傾向を捉えている。紫線は架橋応力劣化(BSD: Bridging Stress Degradation)のみを考慮した解析結果であり、初期のひずみ増加を示すものの、以後の増加に影響を与えていない。緑線は、ゴムタイヤの面圧を均等にした場合であり、試験値との間に乖離が見られる。

#### 4.2 フェーズ2 (ゴムタイヤ, 水張り, 100kN)

フェーズ2は、水張り条件で引き続きゴムタイヤによる100kN輪荷重走行载荷である。界面付着剥離進行はフェーズ1-3の進行速度と同じとした(表-4)。

本材料の構成則においては水張りの影響として以下の2点を考慮している。まず、水張りによる一夜の間のひび割れの自己治癒効果である。ここでは未水和のセメントが水和することでひび割れが閉塞し、再载荷時の剛性と強度が除荷前より増加すると仮定している(図-10)。

次に、水張りによる架橋応力劣化速度の増大、つまり疲労強度の低下、である。これは式(1)を次式に置き換えることで表現している。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{1,100,001}} = 1 - (0.058 + 3.5\varepsilon_{t_{\max}}) \log(N - 1,100,000) \quad (3)$$

上記の2点を考慮した解析モデルにより得られた鋼床版下面(Deck)の活荷重ひずみを図-11に示す。試験において活荷重ひずみ値はフェーズ切り替え時に約100 $\mu$ 減少した後に増加を始めており、解析値も定性的に同様の傾向を示している。また、図-12は赤線が界面剥離進展を除外したケースで、黒線が界面剥離進展除外に加えて架橋応力劣化速度を式(1)のままとしたケースである。水張りによる架橋応力劣化速度の増大の影響が大きく、界面剥離進展も一定程度大きな影響があることが認められる。

表-4 界面付着剥離の進行速度

フェーズ	方向	速度
1	1-1 ~70万回	(剛性低下)
	1-2 70~94万回	直交 67 mm/10万回
	1-3 94~110万回	直交 47 mm/10万回
2	110~116万回	直交
3	3-1 116~117万回	直交 橋軸 10 mm/1万回 325 mm/1万回
	3-2 117~119万回	直交 橋軸 60 mm/2万回 300 mm/2万回
	3-3 119~133万回	直交 橋軸 60 mm/14万回 300 mm/14万回

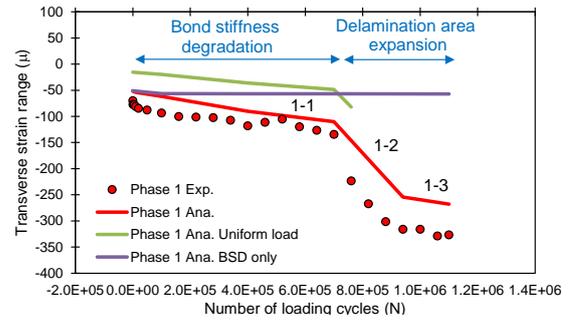


図-9 Deckの活荷重ひずみ(フェーズ1)

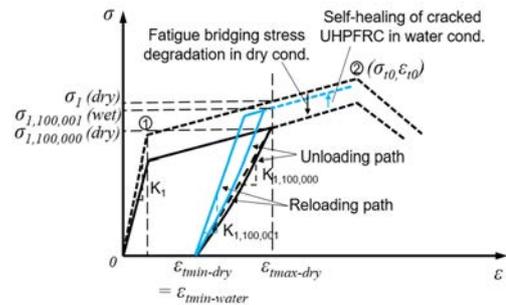


図-10 ひび割れ自己治癒を考慮した引張構成則

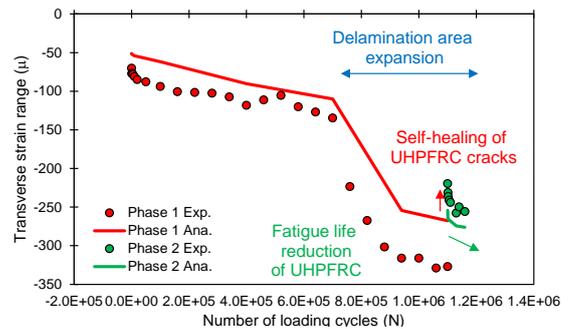


図-11 Deckの活荷重ひずみ(フェーズ1~2)

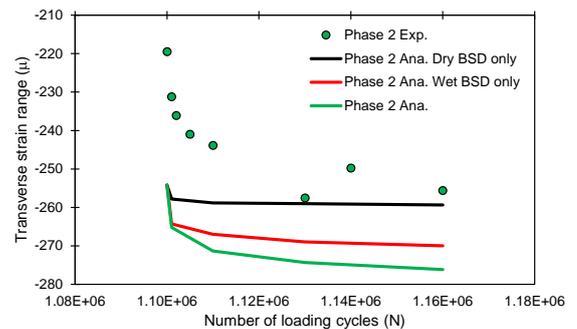


図-12 Deckの活荷重ひずみ(フェーズ2)

### 4.3 フェーズ3 (鉄輪, 乾燥, 150kN, 200kN)

フェーズ3は水張りを除いた鉄輪による载荷となる。試験同様に輪荷重は150kNと200kNに段階的に増加させた。前述した通り走行帯の区分を変更して、鉄輪による面圧は均等として与えた。

フェーズ3での界面付着剥離の進行は打音観察に基づいて直交方向に加えて橋軸方向にも仮定した。3-1, 3-2, 3-3に分けて進行速度を設定した。また、架橋応力劣化は乾燥下の式(1)と同様の式を用いている。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{1,160,001}} = 1 - (0.015 + 5\varepsilon_{t,max}) \log(N - 1,160,000) \quad (4)$$

上記説明の解析モデルにより得られた鋼床版下面 (Deck) の活荷重ひずみを図-13に示す。試験値は150kN 载荷により増加の傾きが大きくなっており、さらに200kN 载荷でも550 $\mu$ から750 $\mu$ へと増加している。解析では剥離の進行に加えて架橋応力の劣化を考慮しているが、架橋応力劣化のみではひずみの増加は説明できず、界面付着剥離の進行に支配されていることが分かる(図-14)。

## 5. まとめ

超緻密高強度繊維補強コンクリートをデッキプレートに薄層で打設して合成鋼床版化し、疲労耐久性を向上させる工法について、輪荷重走行試験による疲労耐久性の検証及びFEMによる試験結果の再現解析を実施した。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

輪荷重走行試験結果より；

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 鋼床版へ超緻密高強度繊維補強コンクリートを打込みし合成鋼床版化する工法は、鋼床版の疲労耐久性向上に有効な補修・補強工法であることが証明された。

数値解析結果より；

- 4) 超緻密高強度繊維補強コンクリートのひび割れにおける繊維架橋応力の変化やデッキプレートとの界面の劣化・剥離を考慮することで輪荷重走行試験結果の鋼床版ひずみの推移挙動の傾向を大略評価できることを示した。

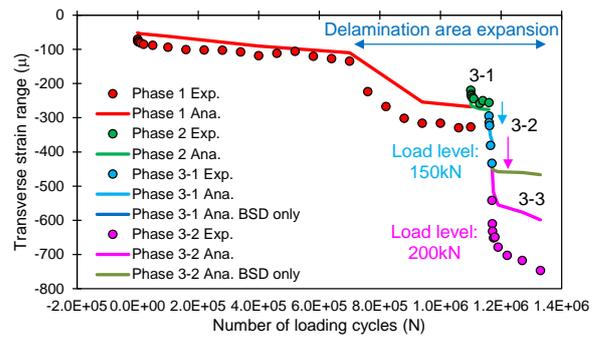


図-13 Deckの活荷重ひずみ (フェーズ1～3)

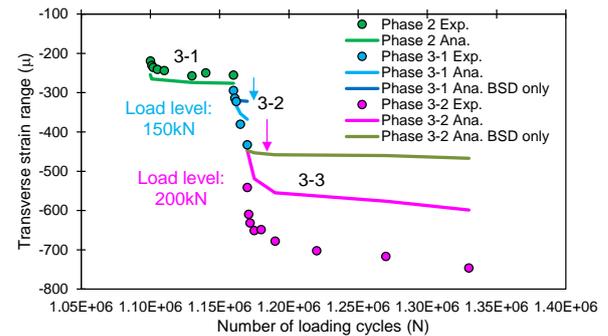


図-14 Deckの活荷重ひずみ (フェーズ3)

- 5) 数値解析精度向上のためには、超緻密高強度繊維補強コンクリートとデッキプレートとの界面付着剥離の進行状況を把握する必要がある。

## 参考文献

- 1) 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, 2007.8.
- 2) 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, 2010.3.
- 3) Ma, C. H., Deng, P., and Matsumoto, T.: Fatigue analysis of a UHPFRC-OSD composite structure considering crack bridging and interfacial bond stiffness degradations, Eng Struc, Vol. 249, pp. 113330, 2021.
- 4) Wang, W., Yan, S., and Zhao, S.: Experimental verification and finite element modeling of radial truck tire under static loading. J Reinf Plast Compos, Vol. 32, No. 7, pp. 490-498, 2013.

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)