

論文

メタルグリッド筋を全面配置した鋼床版 SFRC 補強による応力低減効果

吉岡泰邦*, 阿部忠**, 水口和彦***, 野口博之****

*日本大学大学院, 生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

**工博, 日本大学名誉教授 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***工博, 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

****工博, 日本大学助手, 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

本研究は, SFRC 舗装においてメタルグリッド筋を鋼床版上に全面配置した補強を行い, 輪荷重走行実験により補強効果を検証したものである。その結果, 補強後の等価走行回数は, 補強前に比べて約2倍となり, たわみとひずみも大きく低減し, 補強効果が明らかとなった。さらに, Uリブ上の負曲げによりメタルグリッド筋に引張応力の発生を確認したことから, メタルグリッド筋を全面に配置することは有効であると考えられる。

キーワード: 鋼床版, SFRC 舗装, メタルグリッド鉄筋, 補強効果

1. はじめに

道路橋鋼床版は, 厚さ 12mm 以上のデッキプレートを縦リブ・横リブなどの補剛材で溶接接合した構造であり, コンクリート床版と比較して軽量なため, 長大橋などに数多く採用されている¹⁾。しかし, 鋼床版は輪荷重による局所的な応力集中が生じやすく, 車輻の繰り返し走行による溶接接合部のき裂やデッキプレートの板厚方向へのき裂の発生・進展が数多く報告されており, デッキプレートの鋼床版の恒久的な予防保全対策として鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRC: Steel Fiber Reinforced Concrete とする)を用いた鋼床版補強・舗装法が既設鋼床版の維持管理策として適用されている。また, SFRC 補強・舗装法が施された鋼床版においても, 主げた直上やリブ交差部などの負曲げが発生しやすい領域では, 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)格子筋などの補強筋を配置している²⁾。

本研究では, 負曲げ領域を含めた鋼床版 SFRC 上に発生するひび割れを抑制し, 鋼床版全体の剛性を高めることを目的として, コンクリート構造物では新たに補強筋として開発されたメタルグリッド筋^{3) 4)}をデッキプレート全面に配置した鋼床版 SFRC 舗装の補強効果について検証する。

2. 疲労損傷を与える鋼床版の実験方法

実験では, 実橋梁と同様の損傷状況を再現するために輪荷重走行実験により応力損傷として, 鋼床版の溶接部

にき裂を与える。その後, き裂発生箇所の補修を行い, メタルグリッド筋を全面に配置して接着剤塗布型SFRC補強した鋼床版を用いて輪荷重走行実験を実施し, 鋼床版のデッキプレートおよびUリブに生じたたわみおよびひずみの関係から補強効果を検証した。

3. 疲労損傷を与えた鋼床版供試体の概要

3.1 供試体寸法および使用材料

(1) 供試体寸法および計測位置

本実験に用いた鋼床版供試体の寸法を図-1に示す。供試体は既設鋼床版をモデル化し, 実構造と同一板厚のデッキプレートおよびUリブを2本, 横リブを3本, 主げたを2本有する供試体を製作する。鋼床版を構成するデッキプレートについて, 板厚は疲労損傷が最も多く報告されている12mmとし, 幅1,765mm, 長さ2,500mmとする。Uリブには実橋の事例を参考にして幅320mm, 高さ250mm, 厚さ6mmの鋼板を用いる。主げたはI形断面とし, 主げた間隔を1,465mmとする。またUリブは主げたG1から208mm, 主げたG2から303mmの位置に接合する。横リブは橋軸方向のデッキプレート端部から100mmの位置から1,150mmの間隔で接合する。ここで, 無補強鋼床版の供試体名称をOSDと称する。

輪荷重走行実験および疲労実験における局所性状を計測するために図-1に示す断面A~Dの4断面を設定した。たわみの計測位置は輪荷重の走行による影響を受けやすい横リブ間中央とする。ひずみの計測位置は溶接接合による残留応力の影響を考慮して各断面の溶接止

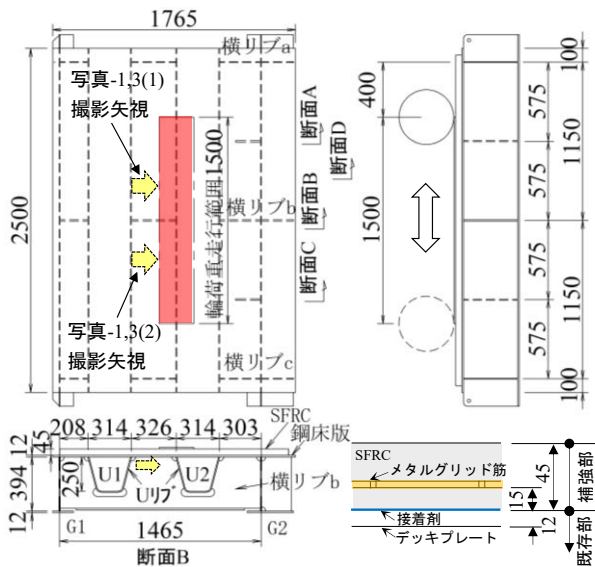


図-1 供試体寸法

端部から 5mm 離れた溶接接合部近傍のデッキプレートと U リブとする。ここで、たわみおよびひずみの計測位置を図-2 に示す。

(2) 鋼床版

本実験に用いる鋼床版供試体を構成する鋼材には SS400 を用いる。なお、デッキプレートの材料特性値はミルシートより、降伏強度が 285N/mm²、引張強度が 455N/mm²、ヤング係数が 200kN/mm²である。(表-1)

3.2 輪荷重走行実験および疲労実験

輪荷重走行実験および疲労実験の走行範囲は端部の横リブから 400mm の位置を起点とし、橋軸方向に 1,500mm 走行させる。実橋梁の疲労損傷を再現するためにモデル化した鋼床版は、荷重 100kN、120kN、140kN でそれぞれ 20,000 回走行させ、疲労損傷を与えた。また、疲労実験開始前および各荷重で 20,000 回走行後に走行範囲を荷重 100kN で 1 往復させ、走行距離 3,000mm におけるたわみおよびひずみを動的に計測した。

3.3 等価走行回数および損傷状況

供試体 OSD の等価走行回数は表-2 に示すように、基準荷重 40kN の時、1.710×10⁶回である。輪荷重走行による疲労損傷を受けた鋼床版の損傷状況を写真-1 に示す。供試体 OSD の疲労実験終了後の損傷は載荷輪直下のデッキプレートと U リブの溶接線を起点としたき裂が確認される。横リブ a・b 間では写真-1(1)に示すように支間中央の横リブ b から端部側に向かって 400mm の位置までき裂の進展が確認される。また、横リブ b から 150~200mm の位置では溶接止端部から U リブ方向へき裂が進展している。次に横リブ b・c 間では、写真-1(2)に示すように横リブ b から 100mm までと 600~750mm の位置にき裂が確認され、100~600mm の範囲で溶接部の破断ならびに U リブの変形が確認される。

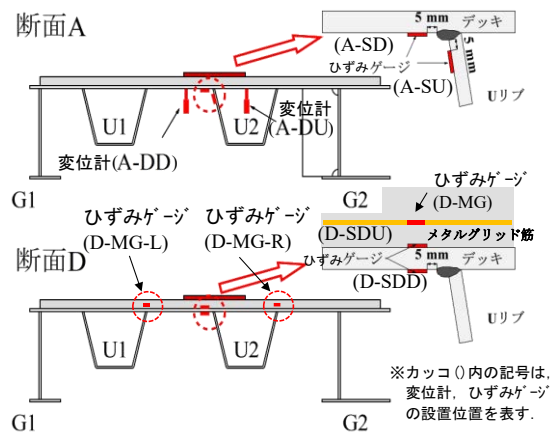


図-2 たわみ及びひずみ計測位置

表-1 鋼材の特性値

項目	板厚 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	
鋼床版	デッキプレート	12	285	1,425	455	200
	Uリブ	6	311	1,555	445	200
メタルグリッド筋	4.5	328	1,640	467	200	

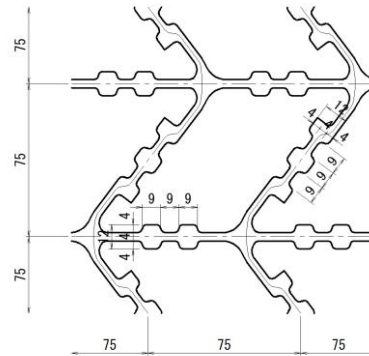


図-3 メタルグリッド筋の形状

疲労損傷を受けた鋼床版を用いてき裂箇所の補修を行い、メタルグリッド筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 補強による応力低減効果を検証する。

4. メタルグリッド筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 補強鋼床版の供試体概要および実験方法

4.1 供試体寸法および補強材料

(1) 補強した鋼床版の供試体寸法

補強した鋼床版の供試体寸法は、疲労損傷を与えた鋼床版のデッキプレート上面に厚さ 4.5mm のメタルグリッド筋をデッキプレート表面から 15mm の位置に全面配置し、SFRC を 45mm 打ち込む。ここで、補強した鋼床版供試体の寸法を図-1 に併記する。

(2) SFRC

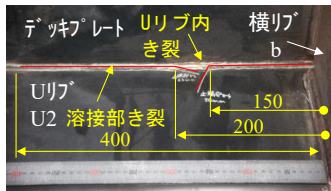
本実験に用いる補強材には SFRC を用いる。SFRC の要求性能は、実橋梁における交通規制による経済損失などを考慮し、養生 3 時間で「道路橋示方書・同解説」⁵⁾ に規定するコンクリートの圧縮強度 24N/mm² 以上を確保できる配合とする。SFRC の養生 3 時間の圧縮強度は

表-2 等価走行回数

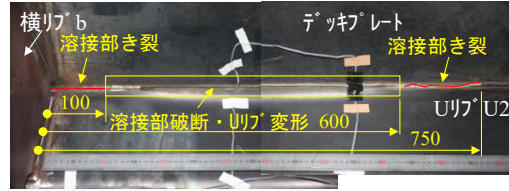
供試体	S-N曲線の傾きの 逆数の絶対値	基準 荷重	荷重					等価走行 回数	
			100kN	120kN	140kN	150kN	160kN		
鋼床版	m=3.0(両対数)	40kN ^{※1}	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	1,710,000	
	m=3.0(両対数)	50kN	160,000	276,480	439,040	—	—	875,520	
鋼床版及び SFRC舗装	鋼床版	m=3.0(両対数)	40kN	312,500	540,000	857,500	1,054,688	768,000	3,532,688
		m=3.0(両対数)	50kN	160,000	276,480	439,040	540,000	393,216	1,808,736
	SFRC	m=10.3(片対数) ^{※2}	72kN	436,163	3,920,597	35,241,625	105,659,311	190,068,819	335,326,514

※1：実験装置の輪荷重寸法(幅250mm)は、道示の車輪幅(500mm)の1/2であり、1994年改定以前の道示の活荷重80kN×1/2=40kNとした。

※2：m(=10.3)は、S-N曲線式 $S=-0.0969\log N+1.0279$ の傾きの逆数の絶対値



(1)横リブ a・b 間



(2)横リブ b・c 間

写真-1 目視による供試体 OSD のき裂の進展状況(写真撮影方向は図-1 に示す)



(1)研掃工・防錆処理



(2)接着剤塗布および
メタルグリッド筋配置



(3)SFRC の打ち込み



(4)表面仕上げ・養生

写真-2 メタルグリッド筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 補強の施工手順

24.8N/mm²、実験開始時の圧縮強度は 48.9N/mm² と材料の要求性能を確保している。

(3)メタルグリッド筋

本実験に用いるメタルグリッド筋について、材質は SS400 の一般鋼板を用いて、寸法は格子間隔が 75×75mm、幅 4mm となるようにレーザーでスリットを挿入し、専用のジャッキを用いて展張加工を施して格子状を形成する。ここで、メタルグリッド筋の材料特性値を表-1、形状および寸法を図-3 に示す。なお、表-1 に示す材料特性値はミルシートの結果である。

4.2 き裂補修および鋼床版 SFRC 補強方法

疲労損傷を与えた鋼床版のき裂補修は「鋼道路橋疲労設計便覧」⁹⁾に準拠し、メタルグリッド筋を配置した SFRC 補強法は「橋梁補修設計マニュアル」⁷⁾に準拠して供試体を製作する。

き裂補修について、まず U リブおよび溶接接合部に進展したき裂の範囲を浸透探傷検査により特定した後、棒状グラインダーを用いて U リブおよび溶接ビード部を切削し、再溶接した。なお、U リブが変形し切断した範囲のデッキプレート側について浸透探傷検査を行い、デッキプレート表面にき裂が無いことを確認した。再溶接による補修箇所について、磁粉探傷検査を行い、き裂等溶接欠陥が無いことを確認した。

次に、メタルグリッド筋を配置した鋼床版 SFRC 補強の施工手順を写真-2 に示す。まず、き裂箇所の補修後、

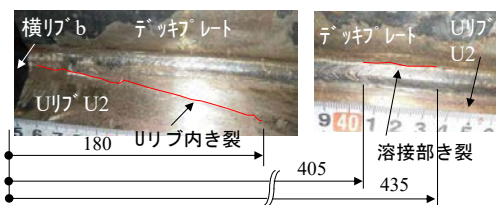
鋼床版と SFRC との付着性の向上およびデッキプレート表面の不純物を除去するためにデッキプレートを研掃する。デッキプレートを研掃後、直ちに SFRC を打ち込まないことからデッキプレート表面に発生する錆を防止するために付着用接着剤と接着相性が良い防錆剤(塗布量 0.3kg/m²)を塗布し、養生する(写真-2(1))。養生後、型枠を設置し、デッキプレートに付着用接着剤(塗布量 1.4kg/m²)を塗布し、メタルグリッド筋をデッキプレート表面から 15mm の位置に設置する(写真-2(2))。その後、直ちに SFRC を練り混ぜ、厚さ 45mm で打ち込み(写真-2(3))、表面仕上げ・養生する(写真-2(4))。ここで、疲労損傷を与えてメタルグリッド筋をデッキプレート上面に配置し、SFRC 補強した鋼床版の供試体名称を OSD-SFMG と称する。

4.3 輪荷重走行実験および疲労実験

鋼床版に疲労損傷を与えた後、メタルグリッド筋を用いて接着剤塗布型 SFRC 補強した鋼床版の荷重載荷条件は荷重 100kN、120kN、140kN、150kN でそれぞれ 20,000 回、荷重 160kN で 12,000 回走行させ、等価走行回数を得る。そして、鋼床版供試体 OSD と同様に疲労実験開始時および各荷重で 20,000 回走行後に走行範囲を荷重 100kN で 1 往復させ、たわみおよびひずみを動的に計測する。無補強鋼床版の疲労実験終了後に計測した結果を基準にメタルグリッド筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 補強によるたわみおよび応力低減効果を検証する。

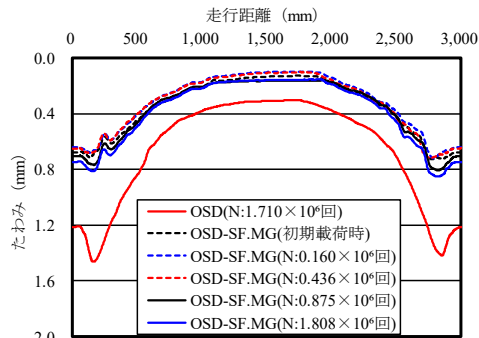


(1)横リブ a・b間

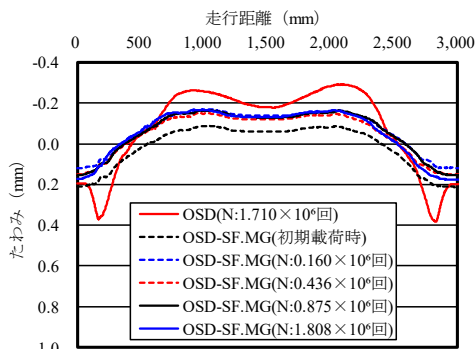


(2)横リブ b・c間

写真-3 目視による補強供試体 OSD-SF.MG のき裂の進展状況 (写真撮影方向は図-1 に示す)



(1)計測点 A-DD

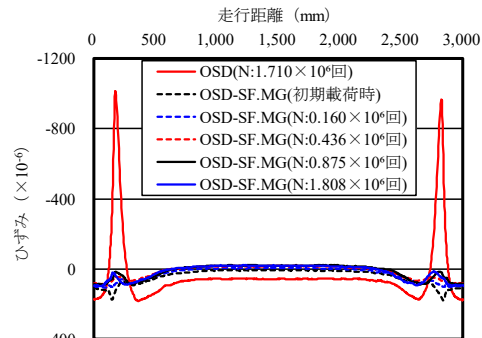


(2)計測点 A-DU

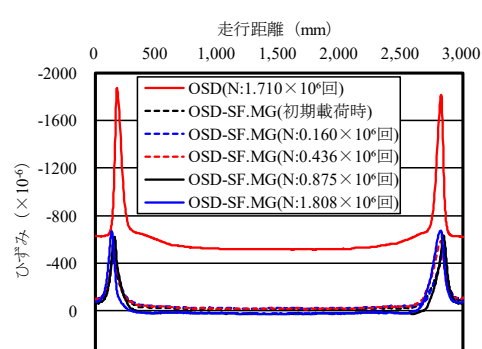
図-4 たわみと走行距離の関係(断面 A)

表-3 たわみの変動範囲(断面 A)

項目	種別	OSD		OSD-SF.MG	
		1.71×10 ⁶ 回 (mm)	初期荷重 (mm)	1.808×10 ⁶ 回 (mm)	抑制率
A-DD	最大たわみ	1.460	0.728	0.851	
	最小たわみ	0.302	0.127	0.153	
	変動範囲	1.158	0.601	0.698	-48%
A-DU	最大たわみ	0.384	0.212	0.176	
	最小たわみ	-0.292	-0.089	-0.168	
	変動範囲	0.676	0.301	0.344	-49%



(1)計測点 A-SD



(2)計測点 A-SU

図-5 ひずみと走行距離の関係(断面 A)

表-4 ひずみの変動範囲(断面 A)

項目	種別	OSD		OSD-SF.MG	
		1.71×10 ⁶ 回 (×10 ⁻⁶)	初期荷重 (×10 ⁻⁶)	1.808×10 ⁶ 回 (×10 ⁻⁶)	抑制率
A-SD	最大ひずみ	182	178	98	
	最小ひずみ	-1012	5	-22	
	変動範囲	1194	173	120	-90%
A-SU	最大ひずみ	-513	-4	30	
	最小ひずみ	-1875	-537	-672	
	変動範囲	1362	533	702	-48%

5. メタルグリッド筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 補強鋼床版の結果

5.1 等価走行回数および損傷状況

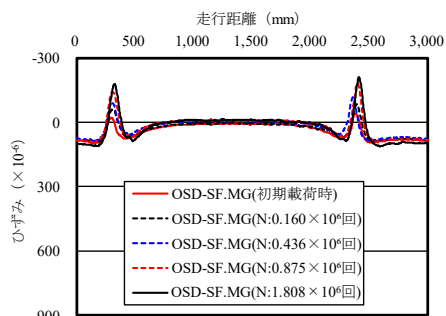
基準荷重 P を 40kN として算出したメタルグリッド筋を用いて補強した供試体 OSD-SF.MG の等価走行回数は 3.532×10^6 回である。また、B 活荷重に対応する耐疲労性の評価として基準荷重 P を 50kN として算出した供試体 OSD-SF.MG の等価走行回数は 1.808×10^6 回であり、SFRC の等価走行回数は 335.326×10^6 回である(表-2)。試験終了後の鋼床版溶接部のき裂進展状況を写真-3 に示す。

横リブ a・b 間では、写真-3(1)に示すように、U リブ

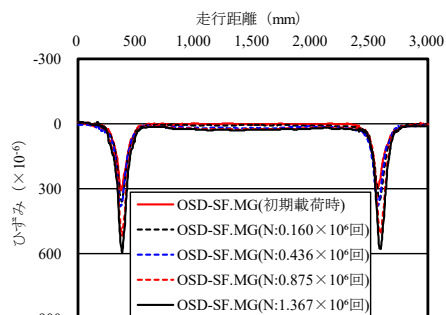
側溶接止端部に断面 A 方向に向かってき裂が進展している。横リブ b・c 間では、写真-3(2)に示すように U リブ内へのき裂の進展、溶接部が破断し U リブが変形した箇所を再溶接した付近ではデッキプレート側の溶接止端部にき裂が進展していることが確認された。また、SFRC 上面の損傷については、U リブに発生したき裂の影響によりデッキプレートと U リブとの溶接線上に沿って幅 0.05mm のひび割れの発生が一部に認められたが、SFRC 全面へのひび割れ進展には至っていない。

5.2 たわみと走行距離の関係

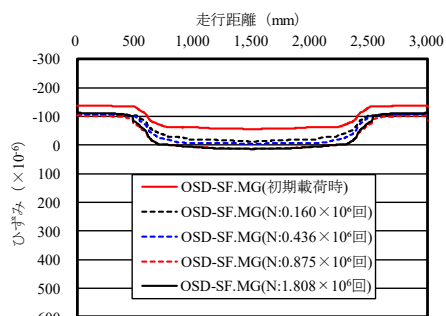
本実験におけるたわみと走行距離の関係を図-4 に示す。供試体 OSD と同様に疲労実験終了後に荷重 100kN



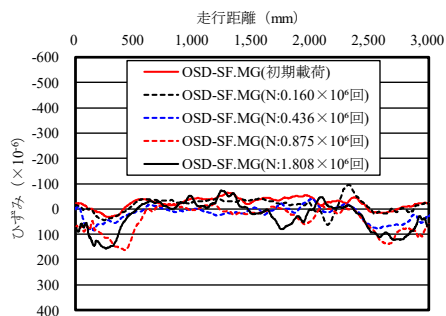
(1) 計測点 D-SDD



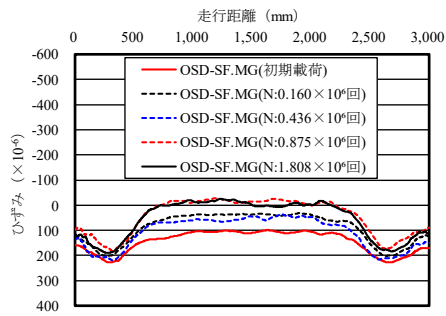
(2) 計測点 D-SDU



(3) 計測点 D-MG



(4) 計測点 D-MG-L



(5) 計測点 D-MG-R

図-6 ひずみと走行距離の関係(断面 D)

で 1 往復させて動的たわみを計測し、供試体 OSD の疲

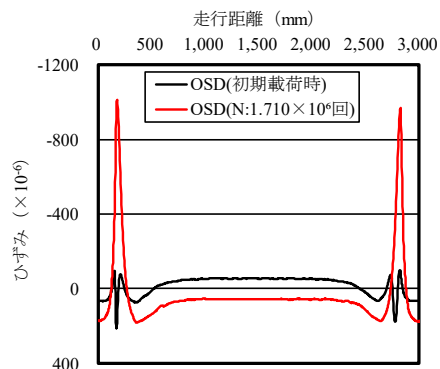


図-7 ひずみと走行距離の関係(OSD の計測点 A-SD)

表-5 ひずみの変動範囲(断面 D)

項目	種別	OSD-SF.MG		
		初期荷重 ($\times 10^{-6}$)	1.808×10^6 回 ($\times 10^{-6}$)	増加率
D-SDD	最大ひずみ	97	112	
	最小ひずみ	-41	-219	
	変動範囲	138	331	140%
D-SDU	最大ひずみ	323	596	
	最小ひずみ	-26	-23	
	変動範囲	349	619	77%
D-MG	最大ひずみ	-55	14	
	最小ひずみ	-168	-113	
	変動範囲	113	127	12%

(比較参照)

項目	種別	OSD		
		初期荷重 ($\times 10^{-6}$)	1.71×10^6 回 ($\times 10^{-6}$)	増加率
A-SD	最大ひずみ	214	182	
	最小ひずみ	-107	-1012	
	変動範囲	321	1194	272%

労実験終了後に計測した結果を基準にたわみの抑制効果を評価する。

供試体 OSD-SF.MG について、初期荷重および荷重 160kN で 12,000 回走行後(1.808 $\times 10^6$ 回)の荷重 100kN で 1 往復した際の最大・最小たわみおよび変動範囲を表-3 に示す。計測点 A-DD, A-DU について、供試体 OSD と比較して、初期荷重時の荷重 100kN で 1 往復した際のたわみの変動範囲はそれぞれ 48%, 55%, 荷重 160kN で 12,000 回走行後の荷重 100kN で 1 往復した際のたわみの変動範囲はそれぞれ 40%, 49%抑制される結果となった。計測点 A-DU については、たわみが交番するもののデッキプレートの局所的なたわみ変動が抑制され、鋼床版全体での変形挙動となった。たわみの減少は、接着剤による SFRC とデッキプレートの合成効果によるものと思われるが、数値解析による検証までは行っていない。

5.3 溶接止端部近傍及びメタルグリッド筋の応力性状

供試体 OSD-SF.MG の溶接止端部近傍のひずみと走行距離の関係を図-5 および図-6(1)~(3)に示す。そして、走行範囲近傍のUリブ上のメタルグリッド筋のひずみと走行距離の関係を図-6(4), (5)に示す。供試体 OSD と同

様に疲労実験終了後に荷重 100kN で 1 往復させて動的ひずみを計測し、断面 A では供試体 OSD の疲労実験終了後に計測した結果を基準にひずみの低減効果を評価する。なお、供試体 OSD の疲労実験終了後、溶接部および U リブに進展したき裂の補修を施したことから、き裂補修近傍の応力性状を検証するために供試体 OSD-SFMG では断面 D の輪荷重走行車輪直下のデッキプレートおよびメタルグリッド筋に新たにひずみゲージを設置した (図-2)。同時に、輪荷重走行範囲近傍の U リブ上のメタルグリッド筋にもひずみゲージを設置 (図-2) し、負曲げによる引張応力発生の有無を確認した。

(1) 計測点 A-SD, A-SU

供試体 OSD-SFMG について、初期荷重および荷重 160kN で 12,000 回走行後(1.808×10⁶回)の荷重 100kN で 1 往復した際の最大・最小ひずみおよび変動範囲を表-4 に示す。計測点 A-SD, A-SU について、供試体 OSD と比較して初期荷重時の荷重 100kN で 1 往復した際のひずみの変動範囲はそれぞれ 86%, 61%抑制される結果となった。また、荷重 160kN で 12,000 回走行後の荷重 100kN で 1 往復した際のひずみの変動範囲はそれぞれ 90%、48%抑制される結果となった。これは SFRC とデッキプレートが付着用接着剤によって一体性を有し、デッキプレートの局所的な変形から鋼床版全体での変形に移行したためである。

(2) 計測点 D-SDD, D-SDU, D-MG

計測点 D-SDD は断面 D のデッキプレートと U リブの溶接止端部から 5mm の下面側デッキプレート、計測点 D-SDU は計測点 D-SDD 直上の上面側デッキプレート、計測点 D-MG は計測点 D-SDU 直上のメタルグリッド筋の主筋である。それぞれの最大・最小ひずみおよび変動範囲を表-5 に示す。

計測点 D-SDD, D-SDU, D-MG について、供試体 OSD-SFMG の初期荷重と荷重 160kN で 12,000 回走行後のひずみの増加率は 12%~140%である。測定場所は異なるが、無補強供試体 OSD の A-SD のひずみと走行距離の関係を図-7 に示す。A-SD のひずみの増加率は 272%である。供試体 OSD-SFMG のひずみ増加率は OSD のひずみ増加率に比べて大幅に低減しており、メタルグリッド筋と SFRC 舗装による補強効果が確認できる。

(3) 計測点 D-MG-L, D-MG-R

輪荷重範囲の左右計測点 D-MG-L, D-MG-R について、最大ひずみは走行開始時に 228×10⁶、荷重 160kN で 12,000 回走行後も 189×10⁶ となっており、走行輪荷重近傍の U リブ上のメタルグリッド筋には負曲げにより引張応力が作用することが確認された。

6. まとめ

疲労損傷を与えてデッキプレートと U リブ溶接部にき裂が発生した鋼床版の補強としてメタルグリッド筋

を全面に配置し接着剤塗布型 SFRC 補強した鋼床版で輪荷重走行実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1)メタルグリッド筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 補強鋼床版においても溶接部および U リブ方向へのき裂が確認され、SFRC 上に一部 U リブ溶接線上に幅 0.05mm のひび割れが発生したものの、全面へのひび割れ進展が見られないことから全面に配置したメタルグリッド筋によりひび割れ進展の抑制が図られる。
- (2)たわみと走行距離の関係より、無補強鋼床版の載荷輪直下で計測点上を通過する際に局部的なたわみの変動が確認され、U リブ内デッキプレートでは横リブを通過する付近で負のたわみが発生していることからデッキプレートでは交番応力が発生している。メタルグリッド筋を用いた接着剤塗布型 SFRC 補強法によって、たわみの変動は生じるものの局所的な変動およびたわみの交番が大幅に抑制される結果となった。
- (3)ひずみと走行距離の関係より、無補強鋼床版は溶接止端部近傍を通過する際に局部的なひずみの変動が発生し、溶接部を起点としたき裂が発生する。メタルグリッド筋を用いた接着剤塗布型 SFRC 補強法によって、局部的なひずみの変動が大幅に抑制され、き裂の発生および進展を抑制することが可能である。
- (4)走行輪荷重近傍の U リブ上のメタルグリッド筋には、負曲げによる引張応力が作用することが確認できたので、SFRC 舗装内の全面に引張補強筋を配置することは有効であると考えられる。

参考文献

- 1) (公社)土木学会：鋼構造物シリーズ 19 鋼床版の疲労 2010 年改訂版, 2010.
- 2) (独)土木研究所, (株)横河ブリッジ, (株)NIPPO, 鹿島道路(株), 大成ロテック(株)：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究(その 2・3・4) 報告書—SFRC 舗装した既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル(案)一, 共同研究報告書, 第 395 号, 2009.
- 3) 阿部忠, 塩田啓介, 吉岡泰邦, 今野雄介：2 タイプの鋼板格子筋を用いた RC 床版の PCM 増厚補強における補強効果の検証, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.634-641, 2015.
- 4) 野口博之, 阿部忠, 塩田啓介, 吉岡泰邦：鋼板格子筋を配置した SFRC 上面増厚補強法による RC 床版の耐疲労性の評価, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1273-1281, 2017.
- 5) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2012.
- 6) (公社)日本道路協会：鋼道路橋疲労設計便覧, 2020.
- 7) (一社)建設コンサルタント協会近畿支部公共土木施設の維持管理に関する研究委員会道路分科会橋梁 WG ②(補修・補強)：2. 橋梁補修設計マニュアル(案), 2012. (2022 年 7 月 8 日受付)
(2022 年 9 月 9 日受理)