

10. 4 既設鋼床版の疲労耐久性向上技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 16～平 20

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越潤、梁取直樹、宇井崇

【要旨】

本研究では、既設鋼床版において報告されている主要な疲労損傷に対して、その損傷原因の解明と疲労性状改善効果が期待できる補修・補強工法の提案を目的としている。疲労損傷としては、これまでに報告されているデッキプレートとUリブ間の溶接部、縦リブと横リブの交差部及びUリブ突合せ溶接部のき裂を対象とした。補修・補強工法として舗装構造の改良や鋼断面補強による対策の検討を進めており、各工法に対して、損傷部位周辺の応力軽減・疲労耐久性向上の効果等について解析及び実験により検討を行った。

キーワード：鋼床版、疲労き裂、補修・補強、鋼断面補強、SFRC 舗装

1. はじめに

鋼床版は軽量であり、かつ現場工期を短縮できるため、都市内高架橋や長大橋に広く用いられているが、鋼板を溶接で集成した構造であり、活荷重を直接支持することから、疲労の影響を受けやすい構造である。近年、大型車の通行量の多い路線において輪荷重直下の溶接各部に疲労損傷が報告されている。図-1 に主要な4部位の疲労き裂を示す。このうちデッキプレートとUリブの溶接部に生じるき裂には、ルート部に発生し、デッキプレートに進展するき裂（以下、デッキ進展き裂）、及び溶接ビード方向に進展するき裂（以下ビード進展き裂）の2種類がある。デッキ進展き裂は、従来報告されていないき裂であり、進展時には目視での発見が困難である上、デッキプレートを貫通すると舗装に損傷を与えて通行車両に影響を及ぼす恐れがあることから、維持管理上早急に

対処すべきき裂である。

本研究は、デッキ進展き裂をはじめ各種疲労き裂を対象として、き裂の発生メカニズムの解明と、各種の補修・補強工法の応力軽減効果や疲労耐久性の改善効果、他の溶接部への影響、補強構造自体の疲労耐久性等の確認を目的として、解析及び実験による検討を行ったものである。

平成 20 年度は、デッキ進展き裂およびビード進展き裂に対する補強として、剛性の高い鋼繊維補強コンクリート（Steel Fiber Reinforced Concrete、以下、SFRC）舗装を用いる工法について、実大鋼床版試験体を用いて輪荷重走行試験による検討を行うとともに、これまでの検討により得られた技術的知見を踏まえ、技術資料としてまとめている。また、縦リブ・横リブ交差部の下スリット側のまわし溶接部、Uリブの突合せ溶接部に発生する疲労き裂に対する補強法について、実験的な検討を行い、提案した補修・補強工法の対策効果を確認した。

なお、本研究では、民間各社との共同研究「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1～6）」を平成 17 年度（一部、16 年度末より）から平成 20 年度まで実施した。

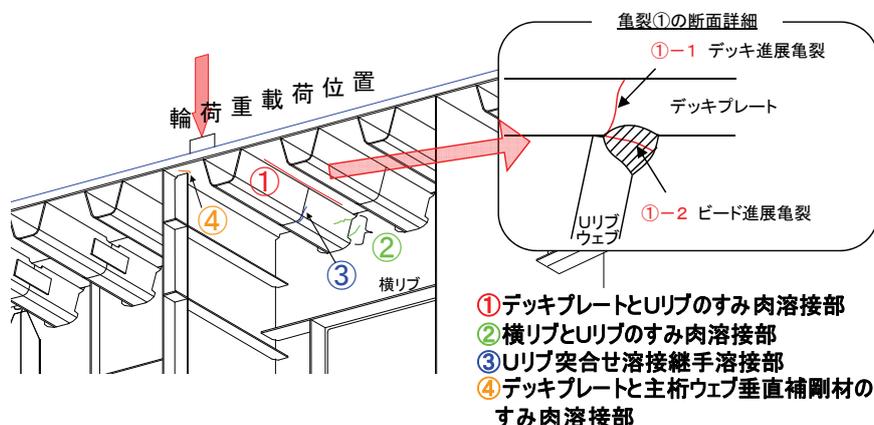


図-1 検討の対象とした鋼床版疲労き裂

2. デッキプレートとUリブの溶接部のき裂を対象とした対策技術の検討 - 鋼繊維補強コンクリート舗装による補強法¹⁾⁻¹³⁾ -

2.1 概要

本補強法は、従来のアスファルト舗装よりも剛性の高い SFRC 舗装をデッキプレートに合成させることにより面外剛性を高め、溶接部近傍の局部応力を軽減させて疲労耐久性の向上を図るものである。図-2に本補強法の構造を示す。SFRC 舗装とデッキプレートは接着材で接合するとともに、接着材が部分的に劣化するような状況が生じた場合に配慮して舗装端部にスタッドを配置する。また、負曲げを受け、SFRC 舗装にひび割れを生じることが想定される主桁ウェブの近傍には炭素繊維強化プラスチック (CFRP) グリッド等の補強材を配置する。

本補強法は実橋に適用された事例も既にあり、初期段階での応力軽減効果は確認されているが¹⁴⁾、ひび割れを生じた後の SFRC 舗装の耐久性については十分に検討されていない。このため、本研究では主に舗装構造の耐久性に着目した検討を実施しており、平成 20 年度は、正曲げ及び負曲げ状態での輪荷重走行試験を実施して、SFRC 舗装のひび割れ挙動、水浸条件下での SFRC および接着材の耐久性等について検討を実施した。

2.2 試験体

試験体を図-3に示す。これまでにUリブ溶接部からの疲労き裂発生メカニズムの検証及び補修・補強工法の検証に用いた2体を使用し、主桁上での走行ができるようブラケットを取り付けた。2 径間の試験体であり、縦リブ支間は 2750mm であるが、輪荷重走行試験機に設置できる試験体長さは 5m 程度までであることから、片側径間については支間長が 1/2 の 1375mm としている。ショットブラストによりデッキプレートを研掃した後、2 体同時期に接着材を塗布し、SFRC 舗装を舗設

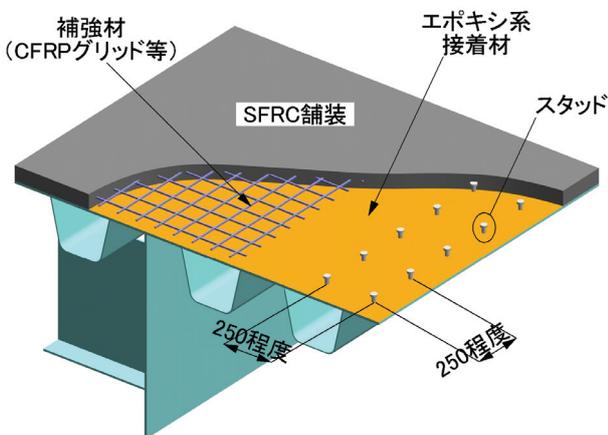


図-2 SFRC 舗装による補強構造

した。使用した SFRC の仕様を表-1に示す。粗骨材の最大寸法は 15mm、鋼繊維 (φ0.6×30、両端フック型) の混入量は 100kg/m³ とし、超速硬セメントを使用して材齢 3 時間で 24N/mm² の圧縮強度が得られる SFRC を現場用コンクリートプラントで製造した。

接着材としては、試験体 No.1 では鋼床版上の SFRC 舗装のために開発されたエポキシ系接着材 A を、試験体 No.2 ではコンクリートの打継ぎ等に使用されているエポキシ系接着材 B を使用した。いずれの接着材も鋼床版上の SFRC 舗装への使用実績がある。

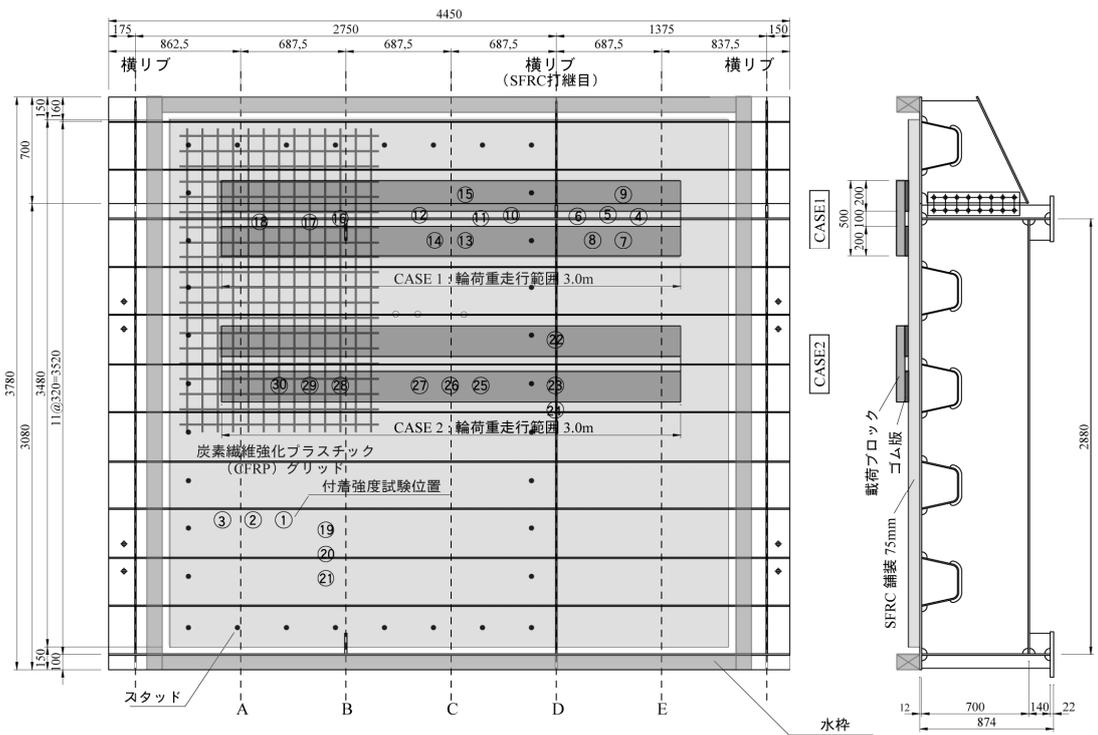
長径間側の A 断面および C 断面では、これに加えて SFRC の端部に 320mm 間隔でスタッド (φ9×40) を設置した。また、A 断面には SFRC 舗装内部に 100mm 格子の補強材を設置した。使用した補強材は、試験体 No.1 では CFRP グリッド (断面積 39.2mm²)、試験体 No.2 ではメッシュ筋 (φ6) である。短径間側 E 断面に関しては、試験体 No.1 ではスタッドも補強材も設置していないが、試験体 No.2 では補強材は設置していないものの端部にスタッドを 640mm 間隔で設置した。また、中間横リブのある D 断面に SFRC の打継ぎ目を設けており、長径間側と短径間側の SFRC の打設は 2 日に分けて実施した。打継ぎのコンクリート面にはデッキプレートと SFRC の接合に使用したのと同じ接着材を塗布した。

表-1 使用した SFRC の仕様

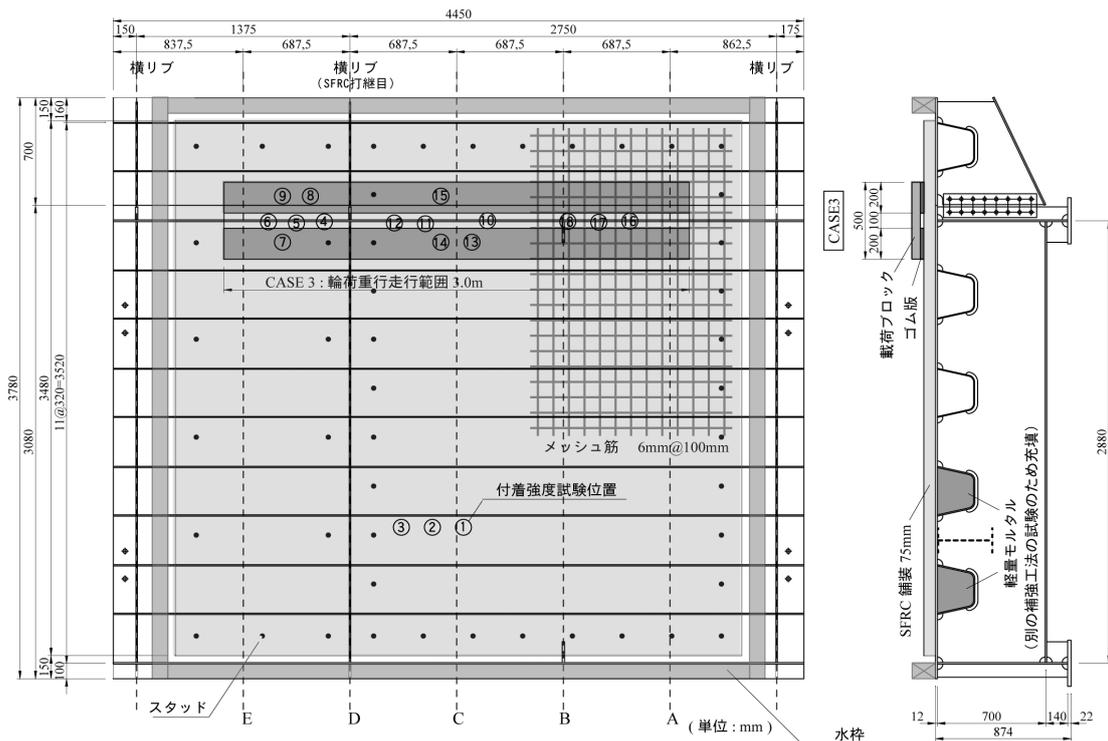
セメントの種類	超速硬セメント	
設計基準圧縮強度	24.0N/mm ² (材齢3時間)	
粗骨材の最大寸法	15mm	
鋼繊維	寸法・形状	φ 0.6×30、両端フック型
	混入量	100kg/m ³

表-2 試験ケースと各断面の構造パラメータ

試験体	試験ケース	曲げの正負	着目断面	構造パラメータ			載荷方法
				接着材	スタッド	補強材	
No.1	CASE1	負	A	エポキシ系接着材A	端部スタッド 320mm間隔	CFRP グリッド	輪荷重 150kN 水なし 100万回 ↓ 水張り 100万回
			C			なし	
			E			なし	
	CASE2	正	A	エポキシ系接着材A	端部スタッド 320mm間隔	CFRP グリッド	輪荷重 150kN 水張り 200万回
			C			なし	
			E			なし	
No.2	CASE3	負	A	エポキシ系接着材B	端部スタッド 320mm間隔	鉄筋 (メッシュ筋)	輪荷重 150kN 水なし 100万回 ↓ 水張り 100万回
			C			なし	
			E			端部スタッド 640mm間隔	



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2

図-3 SFRC 舗装を敷設した実大鋼床版試験体

2.3 試験方法

試験ケースと各断面の構造パラメータは表-2に示したとおりである。試験体 No.1 では主桁上走行の CASE1 と主桁間走行の CASE2 を、試験体 No.2 では主桁上走行の CASE3 を実施した。CASE1 と CASE3 では、事

前にA,C,Eの3断面において静的載荷試験により主桁直上のSFRC舗装にひび割れを導入した上で、水張りをしない輪走行を100万回、水張りをした輪走行を100万回行った。CASE2では、水張りした輪走行を200万回行った。平成19年度にCASE1を、平成20年度にCASE2



写真-1 付着強度試験機

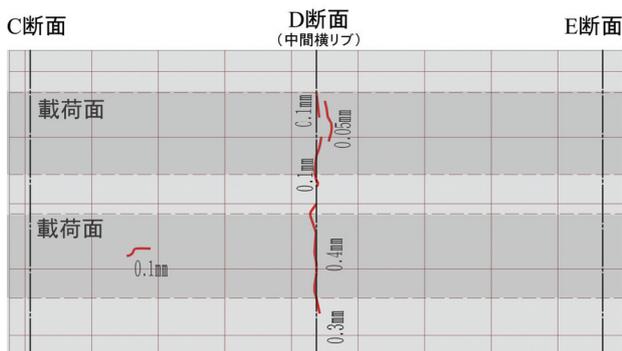
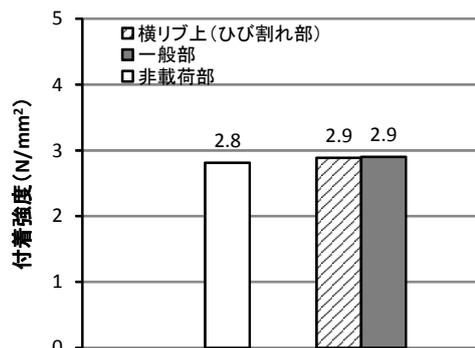


図-4 200万回走行終了後のひび割れ状況 (CASE2, 中間横リブ部を抜粋)

と CASE3 を実施した。载荷にあたっては、図-3 に示すように 2 枚のゴム板を並べてダブルタイヤが载荷される状態を模擬し、150kN の荷重を载荷しながら、15rpm で走行させた。いずれの試験ケースにおいても、ほぼ 50 万回毎に静的载荷試験を実施して試験体各部のひずみ及び変位を計測した。また、輪荷重の走行にともなう接着材の劣化を確認するため、それぞれの輪荷重走行の前後において、写真-1 に示す付着強度試験機を用いて、試験体の SFRC 舗装上に形成した $\phi 100$ のコアの付着強度を計測した。CASE2 では、走行前には非载荷部（着目部と反対の主桁側）の 3 箇所（図-3(a)の①から③）で、200 万回走行後にはひび割れを生じた横リブ上の 3 箇所（図-3(a)の②から④）と一般部の 6 箇所（図-3(a)の⑤から⑩）で付着強度を計測した。CASE3 では、走行前には着目部と反対の主桁側の 3 箇所（図-3(b)の①から③）で、100 万回走行後には輪直下のひび割れ部の 3 箇所（図-3(b)の④から⑥）と載荷面直下の 3 箇所（図-3(b)の⑦から⑨）で、200 万回走行後には輪直下のひび割れ部の 6 箇所（図-3(b)の⑩から⑮）と載荷面直下の 3 箇所（図-3(b)の⑯から⑳）で付着強度を計測した。



試験箇所	試験時期		輪荷重走行前		水張り200万回走行後		
	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)	
載荷部	横リブ上 (ひび割れ部)	22	2.64	2.81	2.89	23	2.58
		24	3.44			24	3.44
		25	3.06			25	3.06
	一般部	26	2.90			26	2.90
		27	3.20			27	3.20
		28	2.92			28	2.92
非載荷部	29	2.69	29	2.69	2.90		
	30	2.63	30	2.63			
	1	2.62	1	2.62			
	2	3.18	2	3.18			
	3	2.64	3	2.64			

図-5 付着強度試験結果 (CASE2)

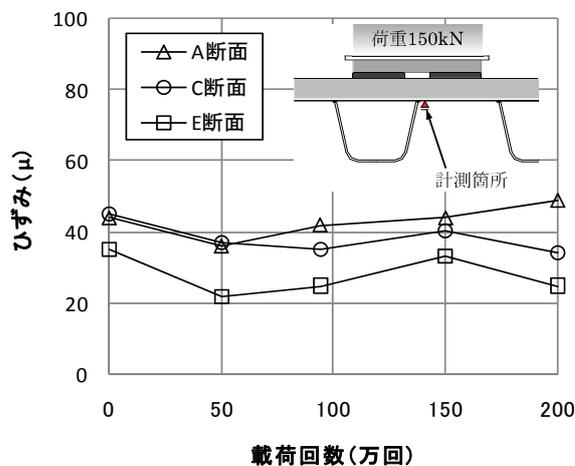


図-6 デッキプレート側の溶接止端から 5mm 離れた位置のひずみ (CASE2)

2.4 試験結果

2.4.1 正曲げ載荷試験 (CASE2)

(1) ひび割れの発生状況

200 万回の走行を終了した後に SFRC 舗装のひび割れ状況を観察したところ、図-4 に示すように SFRC の打継目のある中間横リブ位置 (D 断面) の輪直下にひび割れを生じていた。除荷時のひび割れ幅は 0.05~0.4mm 程度であった。

(2) 接着材の付着強度

図-5に、輪荷重走行の前後に計測した付着強度を示す。走行前の付着強度は2.6~3.2 N/mm²であった。200万回走行後の付着強度は、横リブ上では2.6~3.4 N/mm²、一般部では2.6~3.2 N/mm²であった。いずれの試験箇所においても破壊形態は境界部のSFRC側での材料破壊であり、SFRCの引張強度より接着材の付着強度が高かった。図-5には、各部の付着強度の平均値のグラフを併せて示しているが、200万回の輪荷重走行後においても付着強度は低下しなかった。

(3) 鋼床版のひずみ

図-6に、輪荷重直下のUリブ溶接部のデッキプレート

ト側溶接止端から5mm離れた位置の幅員方向のひずみを示す。計測箇所は、着目しているA,C,Eの3断面であり、それぞれの断面に150kNを静的に載荷したときのひずみを表している。発生ひずみは20~50μ程度である。別途試験体を用いた舗装していない状態での載荷試験では、同様の載荷状態で、Uリブウェブを支点にした局部的な負曲げにより-1200μ程度の圧縮ひずみを生じていたことから、SFRC舗装を舗装したことにより局部曲げによるひずみは大きく軽減されていると考えられる。

2. 4. 2 負曲げ載荷試験(CASE3)

(1) ひび割れの発生状況

200万回の走行を終了した後にSFRC舗装のひび割れ

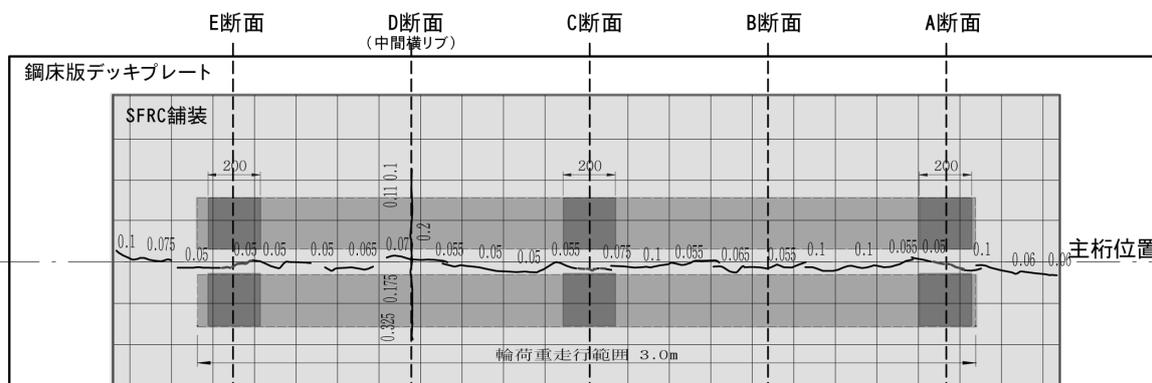
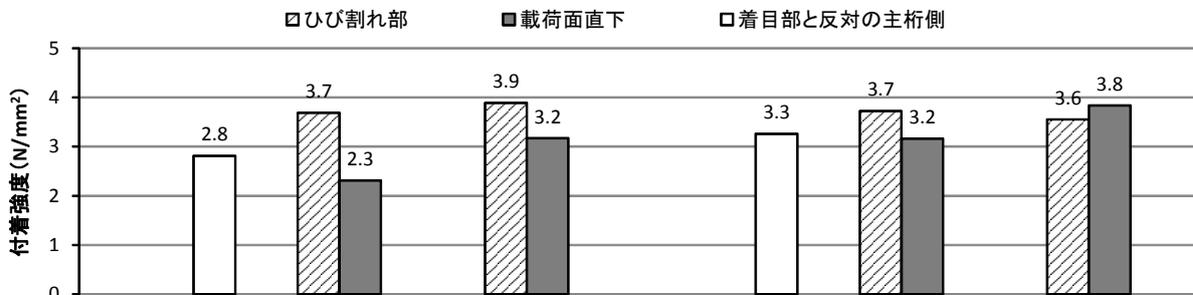


図-7 200万回走行終了後のひび割れ状況 (CASE3)



試験ケース	CASE1						CASE3					
	輪荷重走行前 (累計0万回)		水なし100万回走行後 (累計100万回)		水張り100万回走行後 (累計200万回)		輪荷重走行前 (累計0万回)		水なし100万回走行後 (累計100万回)		水張り100万回走行後 (累計200万回)	
	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)	No.	付着強度 (N/mm ²)
ひび割れ部	2.8		4	4.30	10	3.94	3.3		4	3.61	10	4.40
			5	3.18	11	3.95			5	3.54	11	3.91 ※
			6	3.58	12	4.33			6	4.02	12	3.68
					16	3.85					16	3.40
					17	3.74					17	3.00
					18	3.52					18	2.93
載荷面直下			7	2.15	13	3.12			7	3.12	13	3.80 ※
			8	2.29	14	3.18			8	3.07	14	3.64 ※
			9	2.50	15	3.22			9	3.30	15	4.07
着目部と反対の 主桁側	1	2.62					1	2.69 ※				
	2	3.18					2	3.42 ※				
	3	2.64					3	3.67 ※				

注) ※印は接着材とデッキプレートの界面で破壊した部分のある試験結果を示す。この他はすべて境界部のSFRC側で材料破壊している。

図-8 付着強度試験結果

状況を観察したところ、図-7に示すように、主桁直上に全長にわたるひび割れが生じるとともに、D断面の輪走行位置にもひび割れが生じた。主桁上での除荷時のひび割れ幅は0.05~0.1mm程度で、補強材（メッシュ筋）を配置したA断面と他の断面のひび割れ幅に有意な差はみられなかった。B、C断面間の主桁直上で接着材の付着強度を確認するにあたって採取したコアの側面を観察したところ、微細なひび割れがコア底面側まで達していることを確認した。主桁上のひび割れ発生状況やひび割れ幅については、CASE1の場合も同様の状況であった。一方、D断面（中間横リブ位置）での除荷時のひび割れ幅は0.1~0.3mm程度であった。CASE1の場合にも、中間横リブ位置にひび割れを生じたが、ひび割れ幅は0.05mm程度であり、相違がみられた。

(2)接着材の付着強度

図-8に、輪荷重走行の前、水張りなしで100万回走行した後、及び水張りで100万回走行（累計200万回走行）した後に計測した付着強度をCASE1の結果と併せて示す。走行前の付着強度は2.7~3.7 N/mm²であった。100万回走行後の付着強度は、輪直下のひび割れ部では3.5~4.0 N/mm²、載荷面直下では3.0~3.3 N/mm²であった。また、累計200万回走行後の付着強度は、ひび割れ部では2.9~4.4 N/mm²、輪直下では3.8~4.0 N/mm²であった。CASE1、CASE3ともに200万回走行後においても付着強度が低下することはなかった。破壊形態については、CASE1では全ての試験箇所において境界部のSFRC側での材料破壊であった。一方、CASE3ではSFRC側での材料破壊のものが多いが、接着材とデッキプレートの界面で破壊した部分のあるものもあった（図-3(b)の①、②、③、⑪、⑬、⑭）。ただし、破壊形態によって付着強度に有意な差はみられなかった。また、材齢によるSFRCの強度増加こともあって、走行前に比較して走行後の付着強度が高くなる傾向がみられた。

2.5 まとめ

以上の結果より、構造上負曲げ域となる主桁ウェブ直上では、ダブルタイヤがウェブを跨ぐような輪荷重の走行によってSFRC舗装にひび割れを生じるが、接着材の付着強度に関してはSFRCの引張強度と比較して有意な低下はみられなかった。一方、左右の車輪が主桁ウェブを跨ぐような状況ではより大きな負曲げを受ける。そのような状況を想定して小型の試験体を用いた疲労試験を過年度に実施している。その結果、ひび割れから浸入した水の影響により付着強度が低下する可能性があるものの、その影響はひび割れ部近傍のごく限られた範囲のみ

であることが確認されている⁴⁾。以上のことを考えあわせると、主桁ウェブ直上のSFRC舗装にひび割れを生じた場合、主桁ウェブと輪荷重との位置関係によっては、ひび割れ近傍の限られた範囲において接着材の付着強度が低下する可能性があるが、それ以外の部分ではSFRC舗装や接着材は相応の耐久性を有すると考えられる。一方、過年度の別の実験によれば、接着材の選定、施工方法によっては、付着強度が低下することが確認されており、これらに十分配慮する必要がある。

また、試験においてはSFRCの打継目を設けた横リブ上にもひび割れを生じたが、打継ぎ面に使用した接着材によりひび割れ幅に差がみられた。構造上弱点となりやすい打継ぎ目は、横リブ位置を避けて設けることが望ましいと考えられる。

本研究の成果や既存の調査研究、施工実績等の技術的知見を踏まえ、既設鋼床版の疲労対策としてSFRC舗装を適用する場合の、適用の基本的考え方、構造細目、施工手順、施工管理方法に関する技術資料をとりまとめた。

3. 縦リブ・横リブ交差部のき裂を対象とした対策技術の検討 一形状改良及び当て板の取り付けによる補強方法^{15) 16)} 一

3.1 概要

縦リブ・横リブ交差部の下スリットのまわし溶接部の疲労き裂については、スリット形状に起因する応力集中や、輪荷重による横リブやUリブの面内・面外変形の繰り返し等が主な原因であることが、過年度に実施したFEM解析による検討で明らかにされている。本研究では、これらの要因を軽減する対策として、図-9に示すようにスリット形状の改良（TYPE-A）、当て板の取付け（TYPE-B）、及びそれらの組合せ（TYPE-C）により局部的な曲げ変形を軽減する補修・補強工法（以下、改良構造）を検討している。平成20年度は、実大鋼床版試

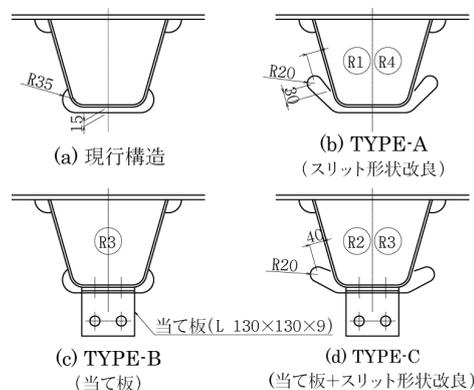


図-9 検討対象とした補修・補強工法

験体を用いて、静的載荷試験、定点疲労試験、輪荷重走行試験を実施し、下スリット部に発生する疲労き裂の発生・進展状況について検討するとともに、改良構造による応力軽減効果、き裂の進展抑制効果について検討した。

3. 2 試験体と試験方法

図-10に示す実大鋼床版試験体を用いた。縦リブ2径間の試験体であり、支間は2750mmと1375mmである。Uリブを4本配置しており、疲労き裂発生前に改良構造を施工するUリブ(R3, R4:以下、予防保全側)と、疲労き裂発生後に改良構造を施工するUリブ(R1, R2:以下、事後保全側)の2ケースで試験を実施した。また、密閉ダイヤフラムを有する現場継手部近傍の横リブ交差部に生じる応力状態を再現できるように、横リブとの交差部から238mm離れた位置にダイヤフラムを設置している。

予防保全側では、当て板やスリット形状の改良を逐次実施しながら、L2, L4, L6ラインの各所で静的載荷試験(荷重160kN)を行い、その応力軽減効果について調べた後、定点疲労試験を実施した。事後保全側では、定点疲労試験でUリブ側止端部にき裂を発生・進展させ、輪荷重走行によりき裂を進展させた上で、R1リブではTYPE-A、R2リブではTYPE-Cによる補修・補強を実施し、さらに輪荷重走行を続けて、載荷回数とき裂の進展長さの関係等を調べた。定点疲労試験の載荷位置はa点とし、荷重振幅は150kN(下限荷重10kN、上限荷重160kN)とした。また、輪荷重の

走行範囲は3mとし、荷重は150kNとした。

3. 3 試験結果

(1) 改良構造による応力軽減効果

図-11に予防保全側の静的載荷試験による改良構造施工前後の計測結果を示す。ここでは着目部の主なき裂発生要因のUリブ側止端応力に影響が大きい偏心載荷時(L4-a点)の結果を示す。図から、TYPE-B、TYPE-Cでは全ての着目点で応力軽減効果が見られた。TYPE-Aでは横リブ側止端の溶接線平行方向応力(G5-Y、G6-Y、

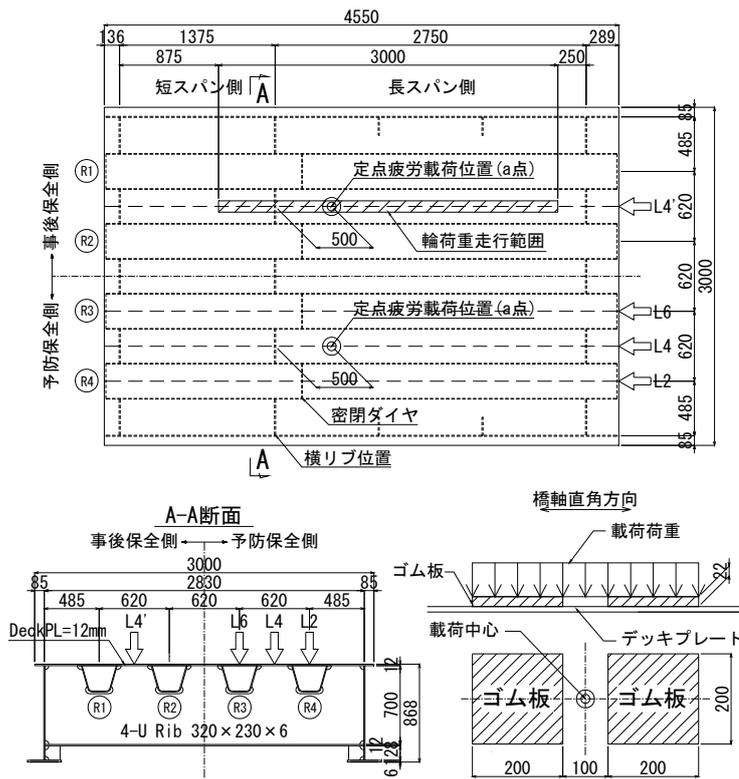


図-10 実大鋼床版試験体

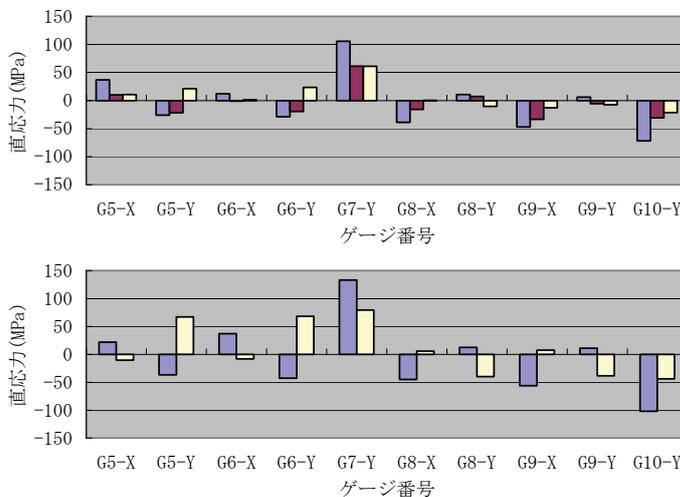
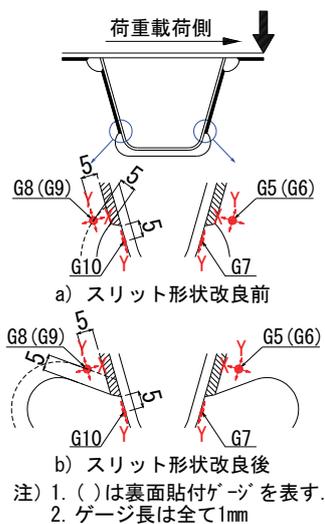
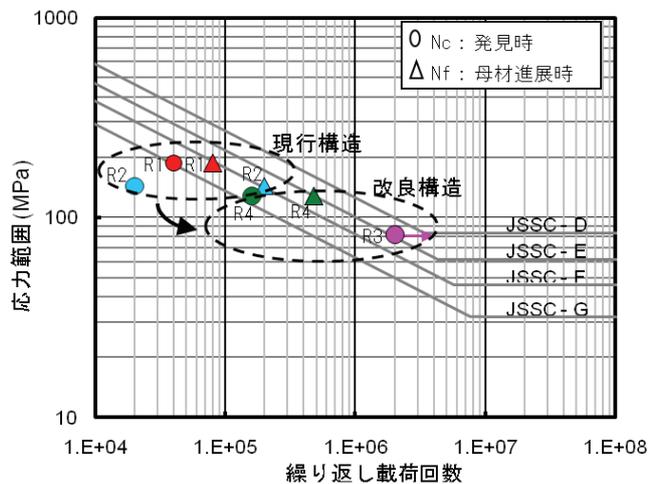


図-11 改良構造施工前後の計測結果(L4 偏心載荷時)

表一 3 疲労き裂の発生時期と作用応力範囲

	Uリブ側止端 き裂発見回数	Uリブ母材 き裂進展回数	Uリブ側止端 作用応力範囲	TYPE	比較対象
現行構造	R1リブ 4万回	8万回	188MPa	A	
	R2リブ 2万回	20万回	144MPa	C	
改良構造	R3リブ -	-	82MPa	C	
	R4リブ 16万回	48万回	128MPa	A	

注) 作用応力範囲は、き裂発生前のUリブ側止端応力である。



図一 1 2 Uリブ側止端から発生・進展するき裂に対するS-N線図

G8-Y、G9-Y)が最大で約3倍に増加したものの、Uリブ側止端応力(G7-Y、G10-Y)は4割程度に軽減した。なお、過年度に実施したFEM解析においても同様の傾向が得られている。

(2) 改良構造による疲労き裂発生の抑制効果

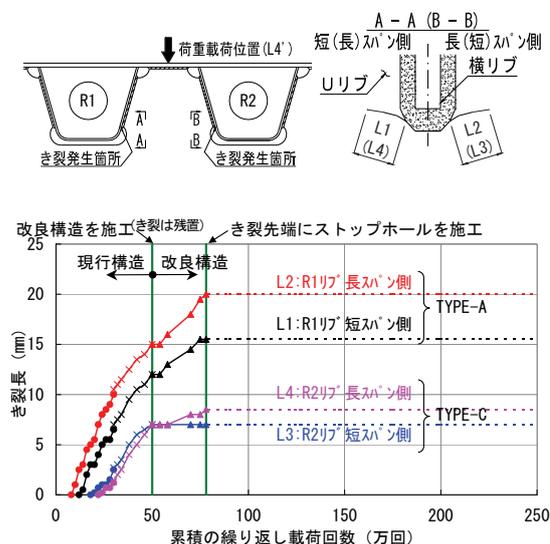
定点疲労試験の結果、き裂は予防保全側(改良構造)、事後保全側(現行構造)ともにUリブ側止端から発生し母材に進展した。表一3にき裂発見回数、母材進展回数と作用応力範囲を示す。試験中は、磁粉探傷を予防保全側では16万回毎、事後保全側では2万回毎に実施し、き裂検出時の繰返し載荷回数を発見回数(N)とした。また、Uリブ側止端から5mm離れた位置に貼付したひずみゲージにより計測した、き裂発生前の応力範囲(S)で整理した。さらに、図一12に表一3のデータをプロットしたS-N線図を示す。同表から、改良構造施工済みの予防保全側は現行構造の事後保全側に対して、き裂の発生時期が遅延できたことがわかる。また、図から改良構造では発生応力の軽減により疲労き裂発生の抑制効果が得られたと推測される。

(3) 改良構造による疲労き裂進展の遅延効果

図一13に事後保全側の輪荷重走行による繰返し載荷回数とき裂長さの関係を、表一4に改良構造施工前後のき裂進展速度を示す。この図表から、改良構造により疲労き裂の進展を遅延できたことがわかる。TYPE-A、Cともに遅延効果が見られたが、応力軽減率の差から

表一 4 改良構造施工前後のき裂進展速度

	疲労き裂進展速度		低減率 (改/現) %
	現行構造 mm/万回	改良構造 mm/万回	
R1リブ L1	0.250	0.125	50
TYPE-A L2	0.225	0.179	79
R2リブ L3	0.215	0.000	0
TYPE-C L4	0.285	0.054	19



図一 1 3 繰返し載荷回数とき裂長さ

TYPE-Cの方が確実に遅延効果が得られている。また、ストップホールを併用することにより、き裂の進展はほぼ止められるものと考えられる。なお、輪荷重走行試験の終了時点で、他部位からのき裂発生は無かった。

3. 4 まとめ

試験の結果、改良構造による応力軽減効果、疲労き裂の発生抑制効果(予防保全)および疲労き裂の進展遅延効果(事後保全)を確認した。また、全般にTYPE-Cで高い効果が得られた。

4. Uリブ突合せ溶接部のき裂を対象とした対策技術の検討 ー 当て板取付けによる補修・補強方法¹⁷⁾ ー

4. 1 概要

Uリブ突合せ部の疲労き裂に対して、図一14に示すような当て板による補修・補強工法を検討した。それぞれの当て板の寸法は、デッキプレートと当て板をあわせた部分の断面積及び断面2次モーメントが補強される鋼床版と同等以上になるように設定したものである。Uリブ1径間分を模擬した試験体を用いて、静的載荷試験、定点疲労試験を実施し、補修・補強効果について検討した。

4. 2 試験体と試験方法

試験体は、箱桁上の鋼床版を縦リブ1スパン分抜き出

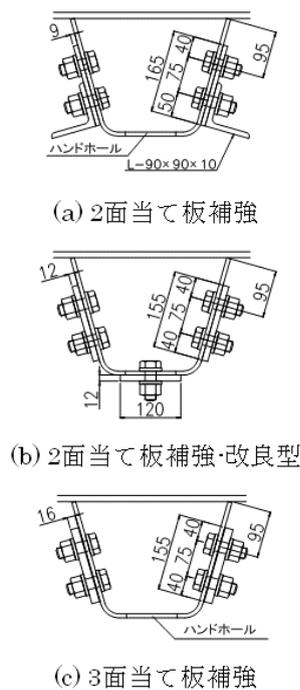


図-14 検討対象とした補修・補強工法

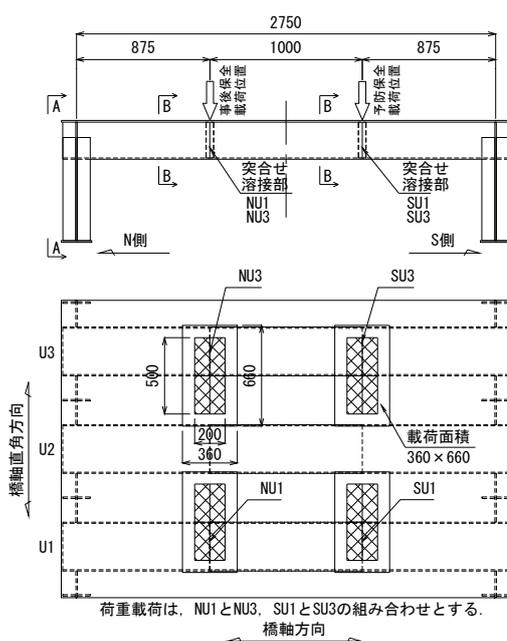
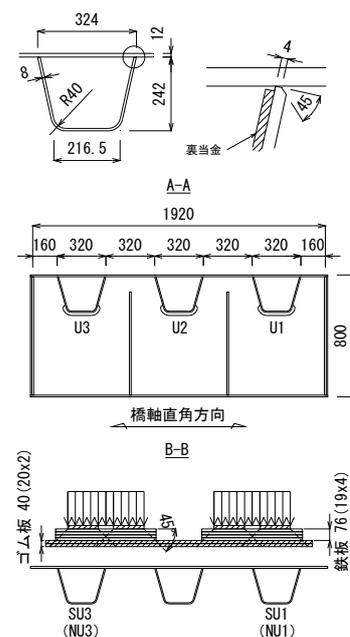


図-15 試験体及び荷重位置



した実物大試験体を用いた(図-15)。Uリブは橋軸直角方向に640mm間隔で3本配置し、各々2箇所ずつ突合せ溶接部を設けた。また、試験体への荷重は図-15のとおり、鉄板とゴム板からなる荷重板を介し、実橋におけるアスファルト舗装の厚さ80mm分の45°分布を考慮して、360mm×660mmの面積に輪荷重を作用させた。また、荷重位置はUリブに対して偏荷重とした。

実験では、疲労き裂発生前に補強を施すケース(以下、予防保全側)と、疲労き裂発生後に補強を行うケース(以下、事後保全側)について補修・補強効果を確認した。予防保全側では、あらかじめ着目溶接部に2面当て板補強(図-14(a))を施した状態で静的荷重試験および400万回の疲労試験を行い、応力状態やき裂発生状況を未補強の場合と比較した。

事後保全側では試験効率の観点から、突合せ溶接部のUリブコーナー部に丸孔を施工し、その壁面を切断した疑似き裂を導入した状態で疲労試験を行い、着目き裂を発生させた。その後、Uリブコーナー部全体に広がるまでき裂を進展させて(以下、き裂(中))図-14に示す3種の当て板補強を行い、静的荷重試験によって補強によるき裂先端の応力軽減効果や他部位への影響を確認した。さらに当て板を外して疲労試験を行い、Uリブ断面の半分以上が欠損するまでき裂を進展させた(以下、き裂(大))後、スカラップ施工後に当て板補強を実施し、静的荷重試験を行った。当て板補強は図-14に示す2

面当て板、L形鋼を設置した2面当て板改良型、および3面当て板の3種類である。そして最後に200万回の疲労試験を実施して疲労耐久性を確認した。なお、本研究では荷重荷重は軸重200kN(1箇所あたり100kN)とし、静的荷重試験では20kNを下限とし、220kNを上限として荷重した。疲労試験はジャッキ荷重20~220kN(荷重範囲:200kN)、荷重速度1Hzにより実施した。

4.3 試験結果

4.3.1 予防保全側の試験結果

図-16に予防保全側における疲労試験の結果を示す。2面当て板補強を施したSU3にのみ、ハンドホール壁面の溶接ルート部から荷重50万回時以降にき裂が生じた。き裂が発生して応力変動が生じた時点でのUリブ橋軸方向応力は、同図中に示す位置に設置した1軸ゲージから100MPa程度であった。ただし、き裂の進展速度は極めて遅く、き裂E1は360万回で進展量20mmに達し、それ以後進展は見られなかった。なお、ハンドホールは削孔作業空間の不足と機械の入手困難状況により、図中に示した形状を施工した。

4.3.2 事後保全側の試験結果

事後保全側の応力計測位置を図-17に、静的荷重試験における応力発生状況を図-18に示す。デッキプレート-Uリブ溶接部の橋直方向応力の計測用にデッキプレートおよびUリブ表面にゲージ①②を、き裂先端付近の橋軸方向応力の計測用にUリブ表面にゲージ③④を

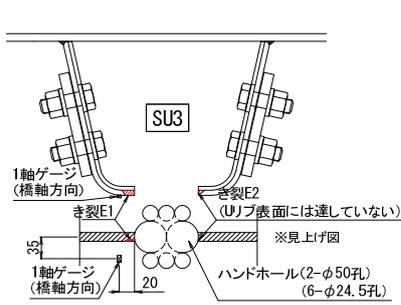


図-16 予防保全側の試験結果 (SU3)

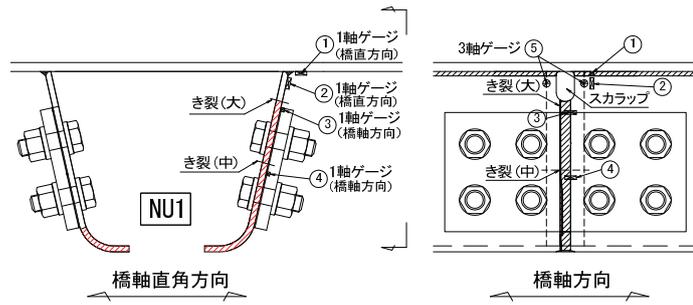


図-17 事後保全側の試験における応力計測位置 (NU1)

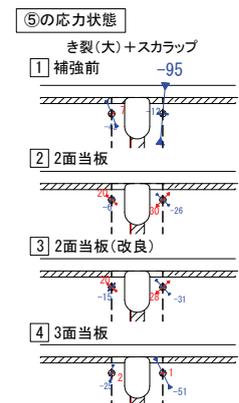
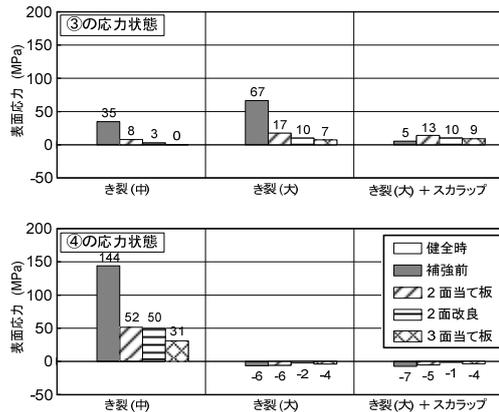
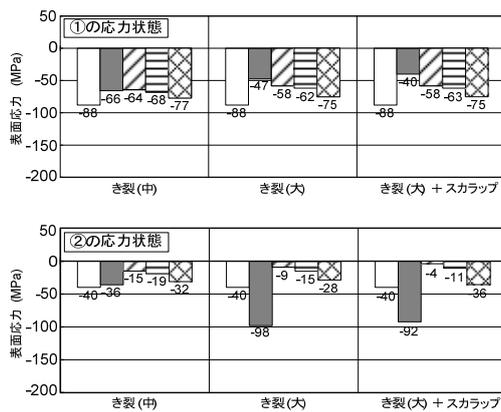


図-18 事後保全タイプの応力発生状況

図-17のとおり貼付した。図-18のゲージ①～④の応力発生状況は、き裂発生前の健全時、き裂発生後の補強前、および図-14の3種の当て板設置時における静的載荷時の応力状態を示したものである。また、ゲージ⑤の応力発生状況は、スカラップ周辺の上記条件における主応力を示したものである。

デッキプレート-Uリブ溶接部に着目したゲージ①②より、当て板補強により橋軸直角方向の応力が健全時の状態に戻る傾向にあり、特に3面当て板によるものが顕著な結果となった。また、き裂先端に着目したゲージ③④より、当て板補強によるき裂先端部の応力軽減効果が明確となっており、前記と同様に3面当て板において顕著となった。しかし、スカラップ周辺の応力状態については、3軸ゲージ⑤の計測結果から、鉛直方向応力は2面および2面改良の当て板補強により、補強前の30%程度まで軽減しているが、3面当て板では補強前の50%程度の軽減に留まった。最後に、2面当て板を設置した状態で200万回の疲労試験を実施したところ、スカラップ周辺からき裂が再発することなく、疲労耐久性を有していることを確認した。

4.4 まとめ

2面当て板による補強は、予防保全側ではハンドホー

ル開孔部の溶接ルート部からき裂が発生したが、き裂の進展は極めて遅く途中で停留していることから、十分な補強効果が得られると考えられる。3面当て板による補強は応力状態を健全時に回復させる効果が顕著な結果となった。またハンドホールを当て板で塞ぐことができるため、2面当て板で生じたハンドホールからのき裂を抑制することができる可能性がある。ただし、適用に際して2面当て板よりもスカラップ周辺の応力が高いこと、またコスト面を含めた判断が必要となることに留意が必要である。

5. おわりに

デッキプレートとUリブ溶接部のき裂を対象とした対策としては、SFRC舗装による補強工法について検討した。SFRC舗装を舗装した実大鋼床版試験体を用い、水張り状態での正曲げ載荷及び負曲げ載荷試験を行った。正曲げ載荷試験では、載荷回数200万回に至るまで、輪直下のUリブ溶接部近傍のデッキプレートのひずみは低い状態を保持しており、SFRC舗装による鋼床版応力の軽減効果は損なわれなかった。また、負曲げ載荷試験では、主桁ウェブ直上と中間横リブの直上のSFRCにひび割れを生じたが、累計200万回の走行終了後も接着材の付着強度は低下しな

かった。主桁ウェブ直上や横リブ上にひび割れを生じた後も、SFRC舗装や接着材は相応の耐久性を有するとともに、応力軽減効果が持続すると考えられる。

縦リブ・横リブ交差部の下スリット側まわし溶接部のき裂を対象とした対策としては、スリット形状の改良、当て板取付け、及びそれらの組合せによる補強方法について実大の試験体を用いて検討した。その結果、スリット形状の改良によりUリブ側止端部の応力を軽減することができ、Uリブ側に発生したき裂の進展を抑制できることが確認された。また、スリット形状の改良に当て板を組み合わせることで、Uリブ側止端部、横リブ側止端部の応力をともに軽減することができること、き裂の進展抑制効果がより高くなることが確認された。

Uリブ突合せ溶接部のき裂を対象とした対策としては、当て板による補修・補強工法について部分模型試験体を用いて検討した。その結果、検討した3種の補修・補強工法によりき裂先端部の応力が軽減されること、き裂発生後の事後保全策として2面当て板補強を行うことでき裂の進展が抑制されることが確認された。

本研究では、デッキ進展き裂をはじめとする各種疲労損傷を対象に、損傷の発生原因についてFEM解析等により検討した上で、各種の補修・補強工法を提案し、その対策効果について実験等により確認してきた。研究期間の最終年度である平成20年度には、デッキ進展き裂に対する補強としてSFRC舗装を用いる工法、縦リブ・横リブ交差部の下スリット側のまわし溶接部やUリブ突合せ溶接部に発生する疲労き裂に対する各種の補修・補強工法を対象に、その対策効果について実大試験体を用いた定点疲労試験、輪荷重走行試験等により検討し、効果を確認した。

参考文献

- 1) 西野 他：SFRC舗装による鋼床版の応力低減効果に関する実験的検討、土木学会第60回年次学術講演会講演概要集、2005.9.
- 2) 一宮、春日井、西野、村越、有馬：SFRC舗装を敷設した鋼床版の移動輪荷重試験、土木学会第61回年次学術講演会講演概要集、2006.9.
- 3) 宇井、梁取、村越、石井 他：鋼床版SFRC舗装の負曲げモーメント発生部を対象とした強度試験、土木学会第62回年次学

術講演会講演概要集、2007.9.

- 4) 石井、春日井、宇井、梁取、村越、石垣：鋼床版上SFRC舗装の負曲げモーメント発生部を対象とした疲労試験、土木学会第62回年次学術講演会講演概要集、2007.9.
- 5) 春日井、梁取、井口 他：SFRC舗装を敷設した鋼床版の移動輪荷重試験終了後の供試体調査、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 6) 宇井、村越、梁取 他：鋼床版上SFRC舗装のひび割れ挙動に着目した輪荷重走行試験、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 7) 石垣 他：鋼床版上SFRC舗装の接着品質確保に関する実験的検討、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 8) 小栗、児玉、村越 他：鋼床版上SFRC舗装に用いる接着剤のせん断強度試験、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 9) 一瀬、児玉、小栗 他：鋼床版上SFRC舗装における乾燥収縮による拘束ひずみの推定、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 10) 西島、東、児玉、大西、松井：接着接合型鋼床版上SFRC舗装における接着界面のせん断疲労抵抗性に関する研究、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 11) 小栗、児玉、村越、梁取、宇井：鋼床版SFRC舗装に用いる接着剤のせん断強度試験、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 12) 村越、梁取、宇井、石垣、尾本、根本：鋼床版上SFRC舗装の接着品質確保に関する実験的検討、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2008.9.
- 13) 宇井、村越、梁取、児玉、辻井、石垣、石井：輪荷重走行試験による鋼床版上SFRC舗装の耐久性に関する検討、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、2009.9. (投稿中)
- 14) 児玉 他：大平高架橋の鋼床版におけるSFRC舗装によるひずみ低減効果、第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集、2008.6.
- 15) 石川、溝江、江崎、村越、梁取：鋼床版のトラフリブと横リブ交差部に発生した疲労き裂に対する補修・補強検討、土木学会第62回年次学術講演会講演概要集、2007.9.
- 16) 嶋田、溝江、村越、梁取、石澤：鋼床版Uリブー横リブ交差部に発生する疲労き裂の補修・補強対策に関する試験報告、土木学会第64回年次学術講演会講演概要集、2009.9 (投稿中)
- 17) 田中、溝江、八木、村越、梁取、石澤：鋼床版のUリブ突合せ溶接部に発生する疲労き裂に対する補修・補強検討、土木学会第64回年次学術講演会講演概要集、2009.9 (投稿中)

RESEASRCH ON IMPROVEMENT OF FATIGUE DURABILITY FOR EXISTING ORTHOTROPIC STEEL DECKS

Abstract : Fatigue cracks have been reported on several welded connection details of existing orthotropic steel decks(OSD) which are vulnerable to fatigue damages due to rapid increase of traffic volume and weight. In order to improve their fatigue durability, analytical and experimental studies have been conducted since FY2004. In FY2008, experimental studies were conducted using real size specimens for fatigue-prone details such as weld between trough ribs and deck plate, weld between trough ribs and transverse ribs, and butt weld for trough rib seam. Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) pavement was examined through wheel running test under dry/wet condition in order to confirm its durability. Deterioration of tensile strength of adhesive was not observed after one million dry and one million wet condition times loadings of wheel running. At lower scallop at intersection between trough ribs and transverse ribs, curved cut-out and attachment of L-shape steel were examined through both fixed point loading and wheel running tests. The test result showed that crack growing rate were delayed after the repair/reinforcement. Butt weld for trough ribs seam were tested in fixed point loading. The results showed that two (or three) splice reinforcement reduce stress near the tip of the crack.

Key words : orthotropic steel decks, fatigue cracks, reinforcement, retrofit, reinforcement by steel attachment, SFRC pavement