

計画的な維持管理のための疲労亀裂の評価法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：上仙靖、澤田守、高橋実

村井圭太、大西孝典、篠田隆作

大西達也

【要旨】

高度経済成長期に建設された道路橋の老朽化が進む中、鋼道路橋では様々な部位に疲労損傷が顕在化しており、供用性に支障をきたす事例や対策に多大な負担がかかる事例も見られ始めている。このため、効率的かつ合理的に点検、診断、措置を行うため、損傷部位や損傷の程度に応じて、緊急性、対策の要否、対策時期についての確に判断するための評価法が求められている。また、鋼床版の疲労対策の1つである SFRC 舗装については、実橋環境条件下の耐久性に関するデータが少なく、環境作用の影響を明らかにしていく必要がある。本研究は、重大な疲労損傷に対する診断ロジックの構築および環境作用が SFRC 舗装の耐久性に及ぼす影響について検討を行うものである。

キーワード：疲労亀裂、診断ロジック、主桁-横桁接合部、SFRC 舗装、接着引張強度

1. はじめに

全国の道路橋で、建設後 50 年を経過する割合が 2033 年には 63%まで増加する¹⁾など老朽化が進む中、鋼道路橋では様々な部位に疲労損傷が顕在化しており、供用性に支障をきたす事例や対策に多大な負担がかかる事例も見られ始めている。一方で、今後生産年齢人口の減少が進む中、増加が見込まれる疲労損傷に対して効率的かつ合理的に点検、診断、措置を行うため、損傷部位や損傷の程度に応じて、緊急性、対策の要否、対策時期についての確に判断するための評価法が求められている。疲労損傷の発生及び進展のメカニズムは、部位によって異なり複雑であるため、一般に重篤性や進展性の定量的な判断は難しいものの、疲労亀裂の発生及び進展のメカニズムを整理した上で診断ロジックを構築していくことが求められている。また、鋼床版の疲労対策としてコンクリート系舗装による補強工法（以下、「SFRC」と示す）が実橋で使われてきているところであるが、実橋環境条件下の耐久性に関するデータは少なく、影響因子や耐久性の低下の程度等を明らかにしていく必要がある。

本研究は、道路橋の診断支援システム²⁾への反映を念頭に、代表的な疲労損傷に対する診断ロジックを検討するとともに、環境作用が SFRC 舗装の耐久性に及ぼす影響について検討を行うものである。

2. 疲労亀裂の診断ロジックの構築

2.1 診断ロジックの構築における技術的課題

鋼道路橋の疲労損傷に対して効率的かつ合理的に点検、診断、措置を行うためには、損傷部位や損傷の程度に応じて、緊急性、対策の要否、対策時期、対策方法等を判断するための診断ロジックを構築する必要がある。鋼桁橋では、様々な部位に疲労損傷が生じており、疲労亀裂の発生及び進展のメカニズムは、損傷の発生部位によって異なる。そのため、診断ロジックを構築するにあたっては、損傷部位ごとに何が原因でどのように損傷が進行するのかというメカニズムを整理する必要がある。診断ロジック構築の対象とした鋼桁橋の代表的な損傷を表-1に示す。

代表的な損傷の中でも、特に主桁と横桁又は対傾構の接合部である垂直補剛材やウェブギャップ板周辺の溶接部に生じるケースが多い³⁾。この部位の応力度の

表-1 代表的な疲労損傷

形式	損傷部位	損傷個所
鋼桁	支承ソールプレート	主桁下フランジとソールプレートの溶接部
	桁端切欠き部	主桁下フランジと切り欠いた腹板との溶接部
	横構ガセット接合部	主桁腹板と横構ガットとの溶接部
	対傾構及び横桁接合部	主桁と垂直補剛材の溶接部 主桁とウェブギャップ板の溶接部 横桁の端部

評価は一般に困難であり、新設設計では構造細目に配慮して設計することが求められている。また、疲労亀裂のメカニズムが複雑であり、要因を除去するための措置方法の選定が難しい。一方、対傾構が取り付く主桁垂直補剛材上端部に疲労亀裂が生じたとしても、主桁のウェブやフランジに到達していない場合、措置の緊急性は相対的に低いと考えられるため、亀裂の進展の程度や進展性に応じた診断ロジックを構築する必要がある。

2.2 疲労亀裂の対策の基本的な考え方

鋼道路橋の疲労は、各種の要因により発生するものの、これまでに報告されている事例等から、亀裂の発生部位やどのように進展するのかなど既に明らかとなっているもの⁴⁾がある。このような既知の部位に発生した疲労亀裂に対しては、既往の知見を参考にして構造物に及ぼす影響を考慮して診断を行うことが基本となると考えられる。一方、これまでに事例のほとんどない部位の疲労亀裂が確認された場合は、知見がないことを踏まえてリスクを管理することが重要となる。いずれの場合も、措置については、疲労損傷が発生した原因を特定し、その原因をできるだけ除去することが重要である。

2.3 垂直補剛材上端部の疲労損傷のメカニズム

前述したように、鋼道路橋の疲労亀裂は、鋼桁橋の主桁と横桁又は対傾構の取付部周辺に多く発生している³⁾。このため、本稿では当該部位の疲労損傷のメカニズムについて検討した結果を述べる。

垂直補剛材上端部の疲労亀裂は、**図-1(a)**に示すような床版の三次元的なたわみ挙動を、**図-1(b)**に示す主桁と横桁又は対傾構で構成される格子構造が拘束することが原因と考えられる。このメカニズムについて、検証することを目的とし、試験橋梁を用いて横部材による拘束条件を変化させた載荷実験及び解析を実施した。

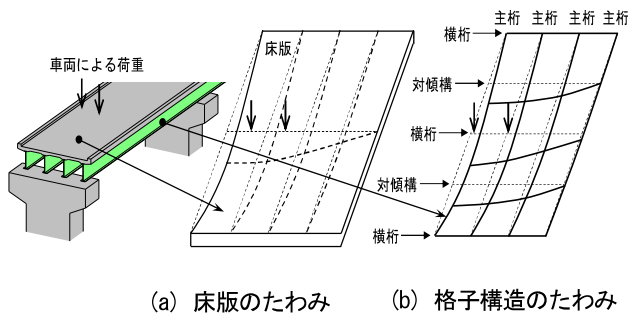


図-1 亀裂の発生メカニズム

2.3.1 載荷試験によるメカニズムの検証

(1) 試験概要

対象橋梁は、昭和 55 年道路橋示方書を適用基準として建設された支間 30m の鋼単純 4 主桁桁橋（土木研究所内の試験橋）である（**表-2**）。載荷は 20t ダンプトラックを用いることとし、その軸重は 3 軸（前軸 72.7kN、後軸 1182kN）である。**図-2**に載荷位置を示す。後輪を基準として橋軸方向に 2 箇所（**図中**載荷 1、2）、橋軸直角方向にそれぞれ 5 箇所（**図中**載荷レーン 1~5）とした。

表-3 に試験ケースを示す。CaseA は現状の構造を対象としたケースである。CaseB、C は横桁、対傾構の拘束条件を変化させたケースである。**図-3** に拘束条件の変更位置を示す。CaseB は、部分的な拘束緩和を想定したケースであり、スパン 1/2 の中間横桁において G4 桁との接続ボルトの上段 3 本のボルトを撤去し、スパン 1/3 の中間対傾構において G4 桁との接続ボルト 4 本を撤去した。CaseC は全体的に横拘束をなくすことを想定しており、横桁及び対傾構と G4 桁の接続

表-2 試験橋梁構造諸元

適用基準	昭和55年 道路橋示方書	
形式	鋼単純合成鉄桁橋	
支間長	30.0m	
有効幅員	8.5m	
主桁間隔	2.6m	
設計活荷重	T-20, L-20	
支承条件	可動	ゴム支承
	固定	鋼製支承

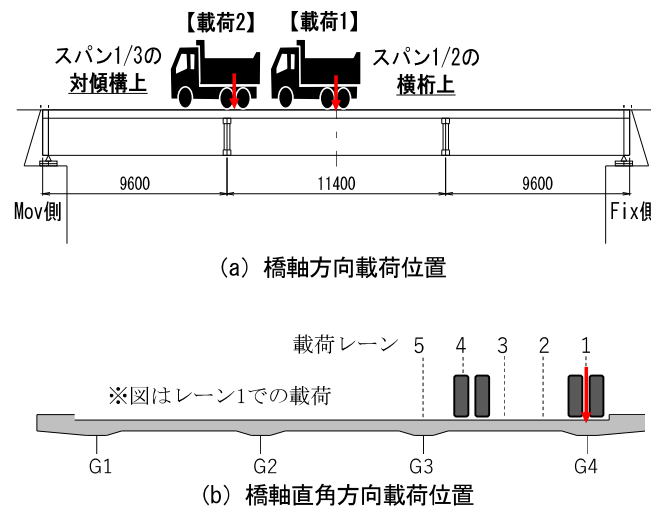


図-2 載荷位置

ボルトをすべて撤去し、また横構をすべて撤去した。計測項目及び計測位置を図-4に示す。横部材の拘束の違いによる橋全体の挙動を把握するため、主桁下フランジのひずみ及び鉛直変位、床版下面の鉛直変位、G4桁の水平変位を計測した。また、疲労亀裂の発生位置である垂直補剛材およびウェブギャップ板上端の局部応力を把握するため、垂直補剛材及びウェブギャップ板の溶接止端近傍のひずみを計測した。ひずみゲージは、ゲージ長 0.4mm、ピッチ 1mm の 5 連ゲージを溶接止端から 10mm の位置に設置した。

表-3 試験ケース

ケース名	概要
CaseA	現状の構造（拘束緩和なし）
CaseB	G4横桁（スパン1/2）の上段3本のボルト撤去 桁対傾構（スパン1/3）の上段4本のボルト撤去
CaseC	G4と横桁・対傾構の接続ボルト全撤去 全ての横構撤去

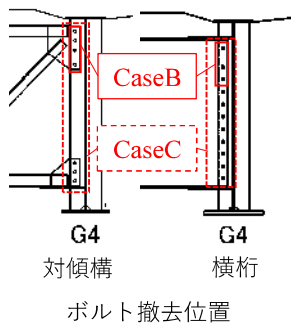
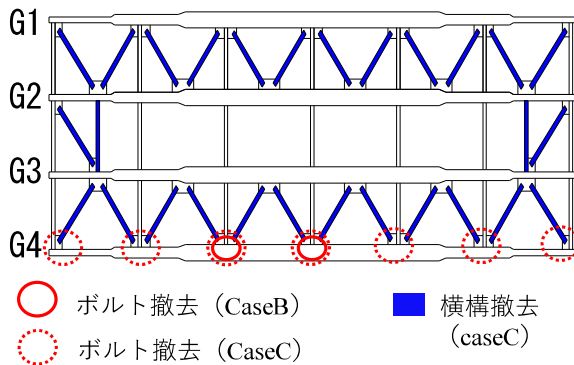


図-3 拘束条件変更位置

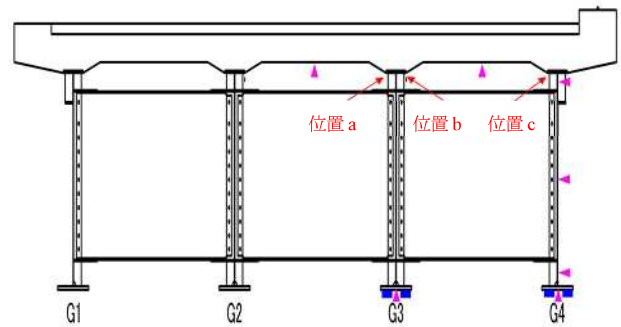
(2) 試験結果

a) 拘束条件の違いが全体挙動へ与える影響

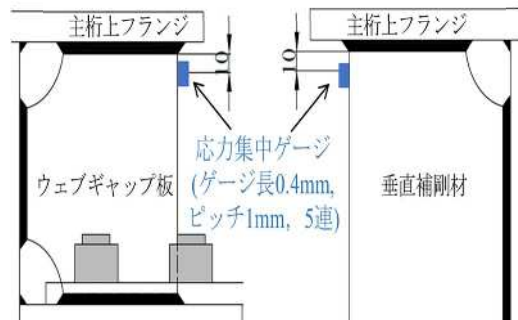
代表値として荷重 1 でのスパン 1/2 位置（横構）の計測結果を示す。図-5に G3 及び G4 下フランジの鉛直変位を示す。CaseA と CaseB では G3、G4 共にいずれの荷重レーンでもほとんど変化がない。CaseA と CaseC を比較すると、G4 の荷重レーン 1（G4 直上）において最大で約 16%増加した。これは、横部材の拘束なくなり、荷重分配効果が失われた影響が最も顕著に表れたものと考えられる。また、図-6に荷重レーン 1 の G4 桁の水平変位を示す。鉛直変位と同様に、CaseA と CaseB の水平変位は大きく変わらなかったものの CaseB の方がやや小さくなった。CaseC では、CaseA に対して主桁上段・下段ともに増加している。このことから、鉛直方向の荷重であっても主桁に回転が生じ、横部材がそれを拘束していることが確認された。

b) 拘束条件の違いが局部応力へ与える影響

図-7に、荷重レーン 1、3、5（いずれも荷重 1）における位置 a～c（図-4 参照）の垂直補剛材およびウェブギャップ板上端の鉛直方向応力分布を示す。位置 b と c での計測値は、位置 a と比べ絶対値が小さいことから、まず位置 a の計測結果（図-7 (a)）について述べる。荷重レーン 1 では、引張応力が CaseA に対して CaseB で約 35%低減し、CaseC で約 23%低減した。載



(a) 全体挙動計測項目



(b) 局部応力計測項目

図-4 計測項目及び計測位置

荷レーン5では、CaseB、Cとも圧縮応力がCaseAに対して増加しており、CaseCで約65%増加した。このように、横部材による拘束緩和の影響は、着目する位置によって異なる。CaseCでは、荷重分配効果が変わったことが局部応力にも影響していると考えられる。CaseBでは、荷重分配効果の変化がないにもかかわらず、局部応力に変化が生じた。これは、荷重位置によっては部分的な拘束の緩和であっても局部応力を低減させる効果があることを示唆している。このような傾向は位置bでも確認できるが、上述したように位置bとcの計測結果(図-7 (b) (c))は位置aの計測結果と比べ絶対値が小さく拘束緩和による変化量も相対的に小さい。そのため、本報告では参考値として示す。この原因は調査中であるが、試験後に該当部の上フランジのたたき調査を実施したところ、上フランジと床版ハンチとの間に部分的な空洞音が確認された。そのため、鉛直荷重が十分に伝達しなかった可能性があると考えている。

2.3.2 FEM 解析によるメカニズムの検証

(1) 解析モデルの条件

図-8に解析モデルを示す。橋の3次元挙動と局部的な応力を評価できるように床版および溶接ビードはソリッド要素とし、鋼部材はシェル要素で橋全体をモデル化した。垂直補剛材と横桁及び対傾構の接続部は、共有接点を面ばね要素で接続し、部材同士の偏心は無視している。要素サイズは、一般部は50mm×25mm～

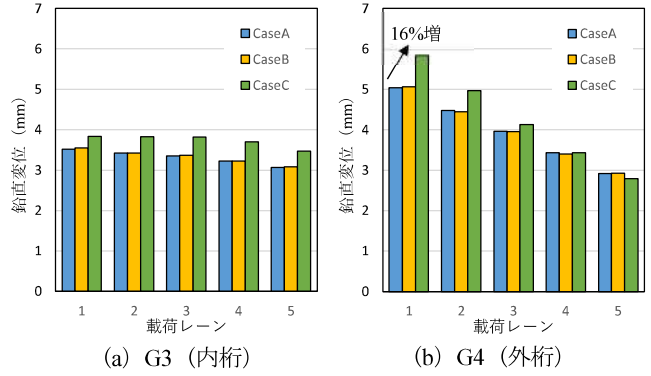


図-5 スパン 1/2 位置の主桁下フランジ鉛直変位 (G3・G4)

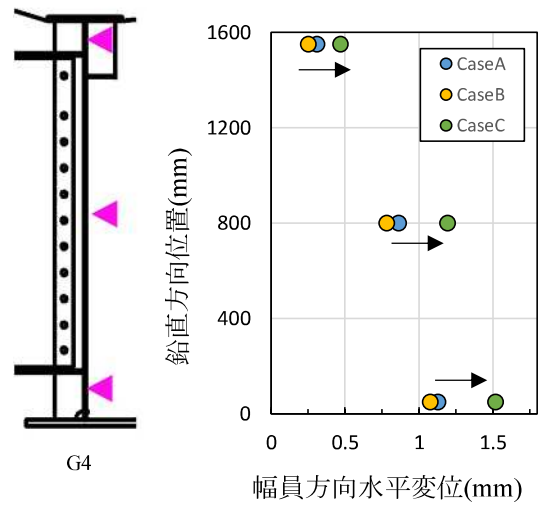


図-6 G4 桁水平変位 (レーン 1)

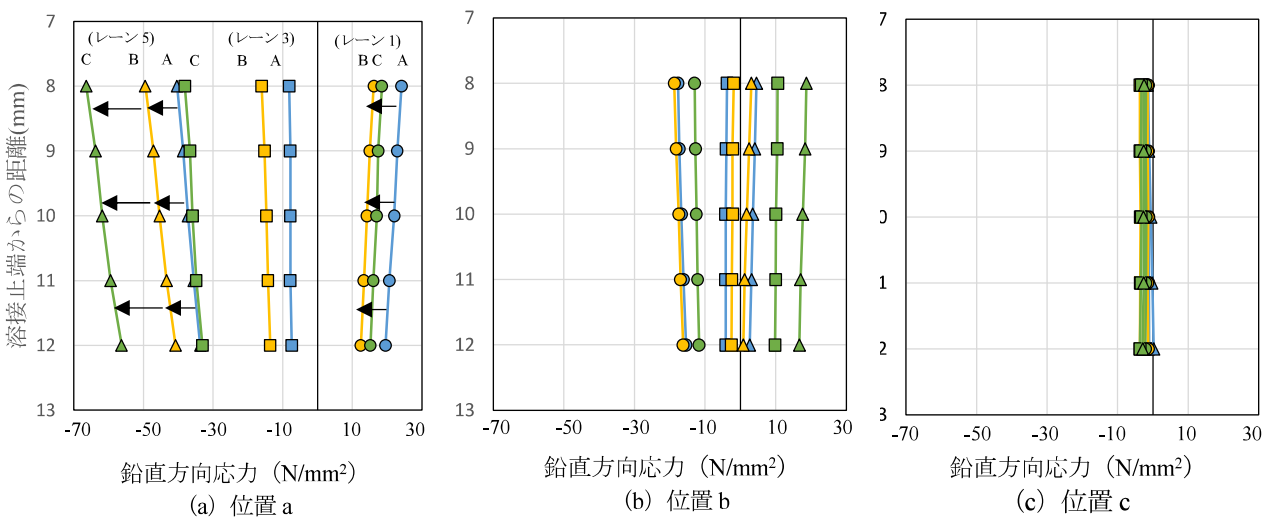
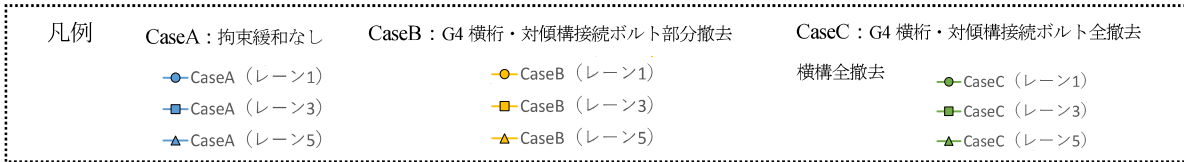


図-7 垂直補剛材及びウェブギャップ板上端の鉛直方向応力分布

100mm×100mm（幅×高さ）とし、局部応力を評価する箇所は5mm×2mmとした。

(2) 再現解析

解析モデルの妥当性を検証するため、载荷試験 CaseA の再現解析を実施した。スパン 1/2 における载荷レーン1 及び载荷レーン5 の各主桁下フランジ直応力度を図-9 に示す。本図より、解析と実験の値が概ね一致していることが確認でき、橋梁全体系の挙動を解析で再現可能であることを確認した。また、载荷レーン1~5 の位置 a（図-4 参照）におけるウェブギャップ板上端の鉛直方向応力の分布を図-10 に示す。本図より、解析値と実験値で値に若干誤差が表れているものの、全体としての傾向は概ね再現できていることがわかる。これより、全体挙動だけでなく局部応力も概ね解析で再現ができることを確認した。

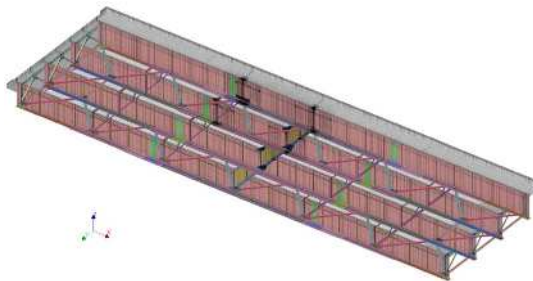


図-8 解析モデル

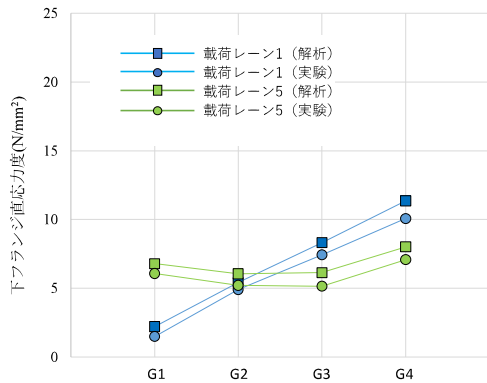


図-9 主桁下フランジ直応力度

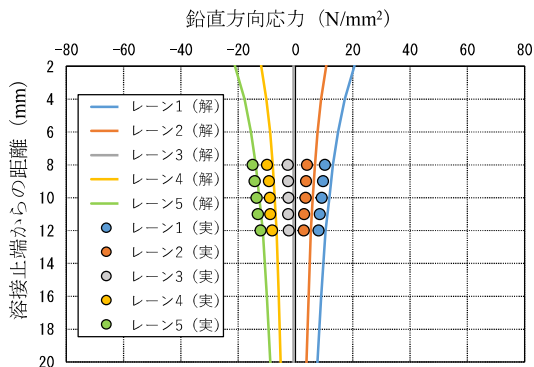
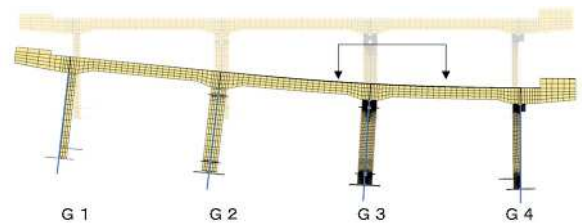


図-10 ウェブギャップ 板上端鉛直応力分布（位置 a）

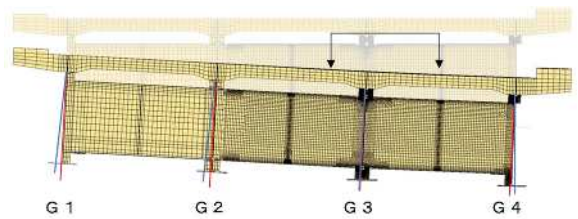
(3) 疲労損傷のメカニズム検証

拘束条件の違いが全体挙動及び局部応力へ与える影響について、より詳細なメカニズムの解明を目的として、横桁や対傾構などの横つなぎ材をすべて撤去したケースで解析を実施し、CaseA と比較を行った。図-11 に解析より得られた支間中央断面の変形図を示す。横桁や対傾構が全くないケース（図中 (a)）では、床版の三次元的なたわみ変形に対し、主桁がそれに追従するように面外に回転変形している。一方、横桁や対傾構がある場合（図中(b)）は、主桁の面外変形が拘束され、変形量が小さくなっている。図-12 は、この時の垂直補剛材上端部における鉛直方向応力の分布の一例である。本図より、横桁や対傾構が全くない場合、ほとんど応力集中が生じていないことがわかる。

以上の結果から、主桁と横桁・対傾構から構成される格子構造が床版の三次元的なたわみを拘束することにより、垂直補剛材の上端部に応力集中を発生させていることを実験及び解析により明らかにした。



(a) 横桁や対傾構が全くないケース



(b) 横桁や対傾構があるケース (CaseA)

図-11 解析により得られた変形図

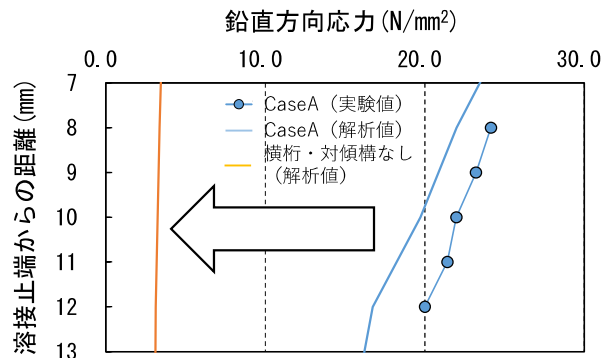


図-12 G3桁垂直補剛材上端部の応答の変化

2.4 垂直補剛材上端部の診断ロジック

各部位の損傷メカニズムを整理し、損傷の部位や程度に応じて、緊急性、対策の要否、対策時期、対策方法についての的確に判断するための診断ロジックを構築した。代表例として、鋼桁の垂直補剛材上端の疲労亀裂における進展状況の模式図を図-13 に、診断ロジックを図-14 に示す。診断ロジックは、損傷の進行過程に応じて、診断において必要な詳細調査や判断の決め手となる情報、措置の方針と工法例をまとめた。

垂直補剛材上端部の亀裂は、一般に補剛材の外側まわし溶接部を起点として発生する（状態 1、2）。点検では、亀裂の発生が疑われるような塗膜割れを発見した際に亀裂の有無や状態を確認するため磁粉探傷試験（MT）などの詳細調査を実施する。亀裂は溶接線に沿って進展する（状態 3）。この段階においては、亀裂の進展は極めて遅い場合が大半であり⁵⁾、措置の緊急性が必ずしも高くない場合がある。そのため、このような段階においては、経過観察により次回点検で進展

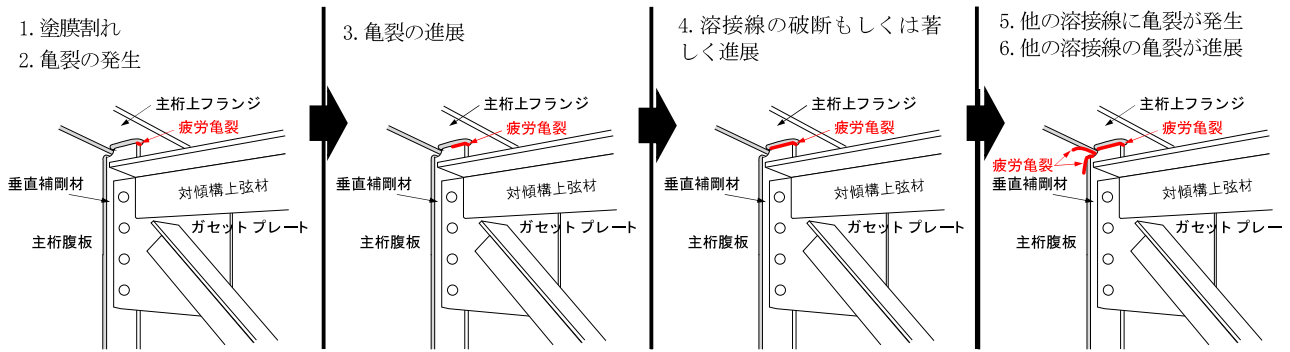


図-13 鋼桁（垂直補剛材）の疲労損傷過程

<点検の着目点の凡例>

◇初回点検時など1回だけ確認が必要な内容

*垂直補剛材（ウェブギャップ板）と上フランジとの溶接線以外の亀裂に対するもの

メカニズム	点検における着目点	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報 (措置方針の判断根拠) ※留意事項は次頁参照	追加情報	措置の方針	工法例	
外観変状 有り	1.塗膜割れ	◇亀裂が生じやすい箇所 の塗膜割れ	・非破壊検査(MT)	・亀裂の指示模様が確認されない		損傷なし	—
	2.亀裂の発生	◇溶接の不具合	・非破壊検査(MT) ・切削調査	・亀裂の進展状態(止端仕上げ程度の浅い表面切削により亀裂が除去できる)(注2) ・溶接の不具合がある ・亀裂の起点がルートである		早急な措置は不要	・表面切削に合わせて止端仕上げ
	3.亀裂の進展		・非破壊検査(MT) ・切削調査	・亀裂の進展状態(表面切削により除去できない) ・亀裂の起点がルートである		経過観察	
	4.溶接線の破断もしくは著しく進展			亀裂の進展状態(溶接線が長さの半分程度まで破断している or 破断している)	き裂の状況から、進行は緩慢 き裂の状況から、進行が急速に進展する可能性	経過観察 長寿命化	・あて板補強(注1)
	5.他の溶接線に亀裂が発生	◇*亀裂が生じやすい箇所の塗膜割れ	・非破壊検査(MT) *表面切削	*亀裂の指示模様を確認 *亀裂の進展状態(止端仕上げ程度の浅い表面切削により亀裂が除去できる)(注2)		*応急処置 長寿命化	*表面切削 ・あて板補強(注1) *あて板補強
	6.他の溶接線の亀裂が進展		*非破壊検査(MT) *表面切削	*亀裂の指示模様を確認 *亀裂の進展状態(表面切削により除去できない)		*応急処置 長寿命化	*ストップホール ・あて板補強(注1) *あて板補強

注1：同一橋梁内で多数発生している場合は、橋梁全体系のたわみ挙動に起因する大きな二次応力が要因となっている場合がある。部分的な対応では、応力集中の状況を改善できない場合は、橋梁全体構造での対応を検討する。

注2：亀裂が止端亀裂で、止端仕上げ程度の浅い表面切削により亀裂が除去でき、溶接ビードの形状から亀裂発生の原因が施工品質の影響が大きいと考えられる場合は、溶接部の仕上げ等を行い次回点検で進展性を確認する。

図-14 鋼桁（垂直補剛材）疲労亀裂の診断ロジック

状況を確認することが基本方針となる。次回点検において進展状況を確認し、著しく進展する可能性がある場合はこの段階であっても措置することが望ましい。亀裂がさらに進展すると、溶接線の破断に至る（状態4）。垂直補剛材上端のすみ肉溶接が切れると、応力集中が主桁の首溶接や垂直補剛材のまわし溶接部、スカラップ等に転じ、主桁腹板に亀裂が生じ進展する（状態5、6）。溶接部の亀裂が断面力伝達機能を担う主桁ウェブに生じると耐荷力への影響が懸念されるため、この状態に至る前の段階（状態4）で応力状態の改善を図る等の長寿命化措置を講じることが重要である。このように亀裂の状態と次回の定期点検までの期間、進展の予測を踏まえて診断することが重要である。亀裂発生部の応力状態は、交通状況や、床版剛性、主桁間隔、横桁又は対傾構の取付位置などの構造条件によって異なる。そのため、次回点検まで放置すると溶接部が破断する限界の状態を明確にすることは困難であるが、これまでの点検結果等を踏まえて、溶接部の半分程度まで亀裂が進展した状態を判断の目安とした。

措置は、亀裂の発生原因を取り除くことが基本となる。先に述べたように、亀裂の発生要因は床版の3次元的なたわみ挙動を主桁や横桁又は対傾構などの格子構造が拘束することにより生じる局所的な応力集中である。そのため、対策は応力集中の発生要因である拘束を緩和させることが有効であると考えられる。工法例は、横桁又は対傾構の取付け位置の変更などが挙げられる。また、当て板補強などで構造的に固めて変形を抑えることで発生応力を低減する対策も考えられる。これらの工法は、交通状態や構造、また同一橋梁内の亀裂の発生状況なども加味しながら選定することが重要である。

3. SFRC 舗装の耐久性に関する検討

3.1 課題

既設鋼床版の疲労対策として SFRC 舗装による補修補強工法がある。本工法については、過去に土木研究所が実施した「鋼床版橋梁の疲労耐久性向上に関する共同研究」において、各種の検討を行い、SFRC 舗装マニュアル⁹⁾をとりまとめている。SFRC 舗装は鋼床版の局部応力の低減を図ることができ、SFRC 舗装マニュアルを公表して以降、鋼床版の疲労対策の1つとして多く採用されているが、実橋環境条件下における耐久性に関する検討データは少ない。既往研究では、SFRC 舗装を敷設した実大鋼床版試験体で輪荷重走行試験を実施後に屋外暴露および室内暴露を行った結果、鋼床

版-SFRC 舗装間の引張接着強度の低下が報告されている⁷⁾。また、既往研究では、SFRC 舗装と既設鋼床版を模擬した小型要試験体における温水負荷による劣化促進試験を行った結果、引張接着強度の低下および破壊形態の傾向の変化が報告されている⁸⁾。このように、SFRC 舗装が施工された後の環境条件によっては耐久性低下のおそれがあり、データを蓄積していく必要がある。

本検討では、既往研究では考慮されていない条件として、貫通ひび割れが生じた状態での温水負荷の影響、ひび割れ注入による補修効果の影響等に注目した小型試験体を作製し、引張接着強度に影響を与える要因と強度変化の程度を把握した。また、これまでに表層にアスファルト舗装を設けない1層構造の SFRC 舗装に関する実態調査事例は確認されていないため、1層構造の SFRC 舗装を採用した実橋での引張接着強度試験等を行い、実橋の耐久性の実態を把握した。

3.2 環境負荷を作用させた接着材の引張接着強度試験

3.2.1 試験概要

鋼床版と SFRC 舗装間の接着材の引張接着強度に影響を与える要因把握等を目的に、SFRC 舗装と鋼床版を模擬した小型試験体に各種の条件で環境負荷を作用させた後に引張接着強度試験を行った。小型試験体の概要図を図-15 に示す。試験体の配合および製作は SFRC 舗装マニュアル⁵⁾を参考とした。接着材は鋼床版と SFRC 舗装の接着として実橋での使用実績のあるエポキシ系接着材を使用し、コンクリートの圧縮強度の目標値は材齢3日で29.4N/mm²とした。なお、本試験体は製作後、約3年8カ月室内保管した状態から試験を開始しており、試験時に SFRC 舗装の水和反応は完了していると考えられる。

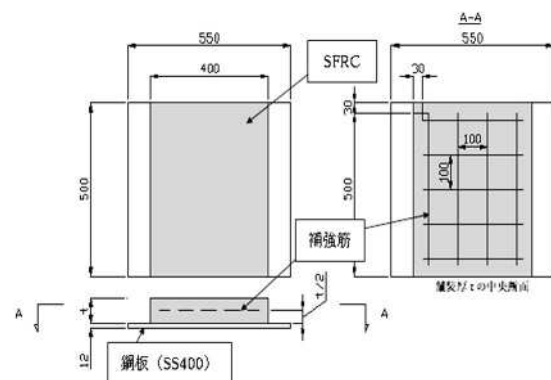


図-15 小型試験体の平面図および断面図

3.2.2 試験ケース

試験ケースの一覧を表-3に示す。STEP1～3のケース1～3において、小型試験体各3体を用いて合計27回の引張接着強度試験を行った。

(1)ケース1

ケース1は、初期状態の引張接着強度の把握と、小型試験体にひび割れが生じていない状態で温水負荷を作用した場合の引張接着強度の把握のために実施した。STEP1は、温水負荷実施前の小型試験体を対象に、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。STEP2は、保温水槽により28日間の50℃の温水を負荷させた後、気中で1日乾燥させ、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。STEP3は、温水負荷期間の影響を把握するため、STEP2の試験後に、保温水槽により168日間の50℃の温水を負荷させた後、気中で1日乾燥させ、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。

(2)ケース2

ケース2は、模擬貫通ひび割れから接着材に水分が浸透した場合の影響と、模擬貫通ひび割れから浸透した水分が乾燥した後の影響を把握するために実施した。なお、小型試験体は、温水負荷を与える前に、模擬貫通ひび割れのほかにコア切削を行うことにより、接着材への水の浸入の影響が大きくなる条件とした。STEP1は、保温水槽により28日間の50℃の温水を負荷させた後、気中で1日乾燥させ、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行う。STEP2は、STEP1で試験を行った後、保温水槽により168日間の50℃の温水を負荷させた後、気中で1日乾燥させ、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。STEP3は、温水負荷後の乾燥期間の影響を把握するため、STEP2で試験を行った後の小型試験体を、気中で7日間自然乾燥させた後、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。

(3)ケース3

ケース3は、ひび割れ注入材を施工した場合の補修効果の影響を把握するために実施した。なお、ケース2と同様、小型試験体は模擬貫通ひび割れのほかにコア切削を行い、接着材への水の浸入の影響が大きくなる条件とした。STEP1は、保温水槽により168日間の50℃の温水を負荷させた後、気中で1日乾燥させ、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。STEP2は、STEP1で試験を行った後の小型試験体を気中で7日間自然乾燥させた後、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。STEP3は、STEP2で試験を行った後の小型試験体に対して、ひび割れ注入材による補修を

行い、ひび割れ注入材が硬化したことを確認したうえで保温水槽により28日間の50℃の温水を負荷させた後、気中で1日乾燥させ、ひび割れ注入材を施工したコア切削位置に再度コア切削を行い、50℃の恒温室内で引張接着強度試験を行った。なお、ひび割れ注入材はエポキシ樹脂製のもので、施工可能な材料を選定した。

3.2.3 試験体の加工

ケース2および3における貫通ひび割れを模擬した切り込み(3mm幅)およびコア抜きについて図-16に示す。ケース3のSTEP3におけるひび割れ注入は模擬貫通ひび割れおよびコア切削を対象とし、エポキシ樹脂(中粘度)をヘラ等により充填した。

表-3 試験ケース一覧

ケース	1	2	3
試験目的	初期状態の把握	浸水期間の影響	ひび割れ注入の影響
STEP0 ひび割れ	無し	カッターで模擬	
STEP0 コア抜き	無し	φ100の切込み	
STEP1	初期	温水28日後 気中1日乾燥	温水168日後 気中1日乾燥
STEP2	温水28日後 気中1日乾燥	温水168日後 気中1日乾燥	自然乾燥(7日) ※STEP2試験後に ひび割れ注入
STEP3	温水168日後 (+ブランク期間 33日) 気中1日乾燥	自然乾燥(7日)	温水28日後 気中1日乾燥

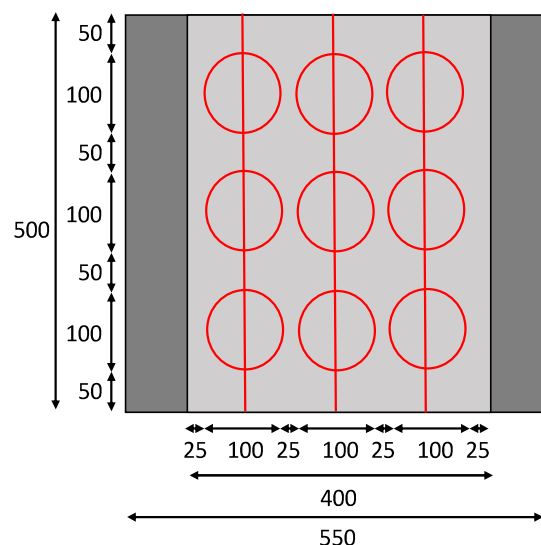


図-16 コア切削およびカッター位置(単位mm)

3.2.4 引張接着強度試験結果

試験結果を図-17、図-18に示す。全ての試験結果において、SFRC 舗装マニュアル⁶⁾の付属資料の現場における施工管理のための目安とされている引張接着強度「1.0N/mm²以上」であった。また、引張接着強度が若干の低下が認められた条件があるものの、著しい引張接着強度の低下は生じなかった。以下に、模擬貫通ひび割れの影響とひび割れ注入の影響について考察した結果を示す。

(1) 模擬貫通ひび割れの影響

模擬貫通ひび割れのない試験体(ケース 1 ステップ 1)に対して、温水負荷を与えた条件の試験体(ケース 1 ステップ 2、ケース 1 ステップ 3)では引張接着強度の低下はみられなかった。一方、模擬貫通ひび割れのある試験体に対して、温水負荷を与えた条件(ケース 2 ステップ 1)では一部で引張接着強度の低下がみられた。ケース 2 ステップ 1 は、鋼床版を模擬した鋼板上にさびは確認されなかったが界面破壊の割合が大きくなっている。またケース 2 ステップ 2 及びケース 2 ステップ 3 の試験体では鋼板上にさびの発生が確認された。SFRC 舗装に貫通ひび割れが生じると鋼床版デッキプレートからの水の浸入により、鋼床版デッキプレート上にさびが発生するなどして、引張接着強度の低下が生じる可能性があることが明らかとなった。

(2) ひび割れ注入の影響

模擬貫通ひび割れのある試験体に対して、温水負荷を与えて、その後、ひび割れ注入し、さらに温水負荷を与えた場合、引張接着強度は模擬貫通ひび割れを与えていない試験体と同等以上の強度が確認された。SFRC 舗装に貫通ひび割れが生じた場合にもひび割れを注入材により補修することで引張接着強度の低下を抑制できることを示唆していると考えられる。

3.3 実橋を対象とした引張接着強度試験

3.3.1 対象橋梁

国道 357 号線横浜ベイブリッジ (以下「YBB」という。)、国道 50 号線大平高架橋の 2 橋を対象に実橋環境条件下の引張接着強度の実態を調査した。SFRC 舗装の仕様等を表-5 に示す。この 2 橋は SFRC 舗装を採用し始めた初期の橋梁であり、それぞれ種類の異なる接着剤を使用しているため対象橋梁に選定した。

YBB は 2004 年に新設時からの疲労対策として、国内で初めて SFRC 舗装が採用されている橋である。橋梁の断面図や試験位置を図-19 に示す。今回の試験位置は、供用区間ではないために輪荷重の作用を受けていないこと、ダブルデッキ構造の下層であるために雨

水の直接的な影響は小さいと考えられることが特徴として挙げられる。

大平高架橋は 1985 年に供用されており、2007 年に疲労亀裂の対策として SFRC 舗装が施工されている。橋梁の断面図や試験位置を図-20 に示す。大平高架橋

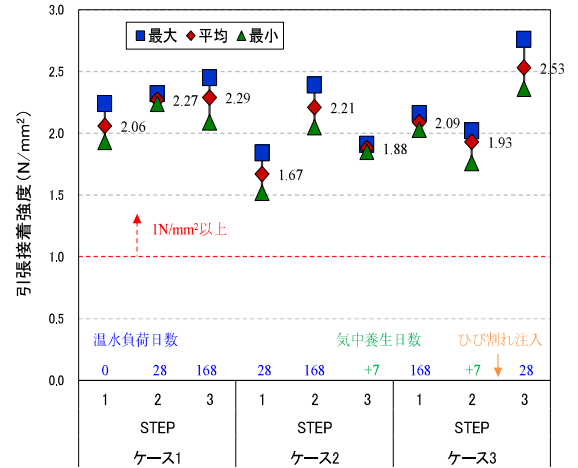


図-17 引張接着強度のまとめ

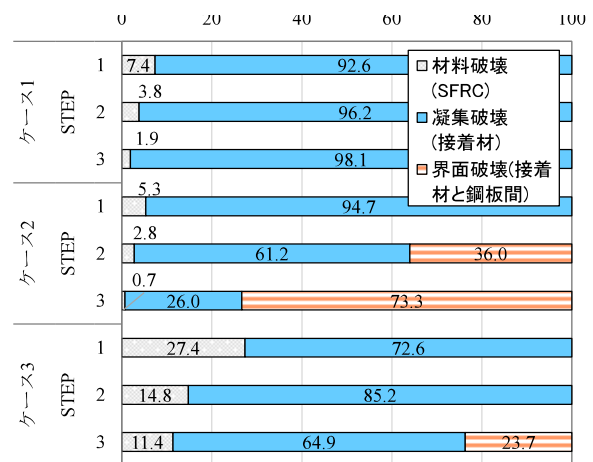


図-18 破壊形態の面積割合算出結果のまとめ

表-5 YBB と大平高架橋の SFRC 舗装の仕様等

橋梁名	YBB	大平高架橋
路線名	下層・国道 357 号線	国道 50 号線
供用時期	2004 年	1985 年
SFRC 舗装 施工時期	2004 年	2007 年
舗装厚	75mm	75mm
接着剤	エポキシ系※	エポキシ系※
プライマー	有り	無し
スタッド	φ9×40mm	φ9×30mm
補強材	なし	CFRP グリッド
経過年数	16 年	13 年

※ 種類の異なるエポキシ系接着剤を使用

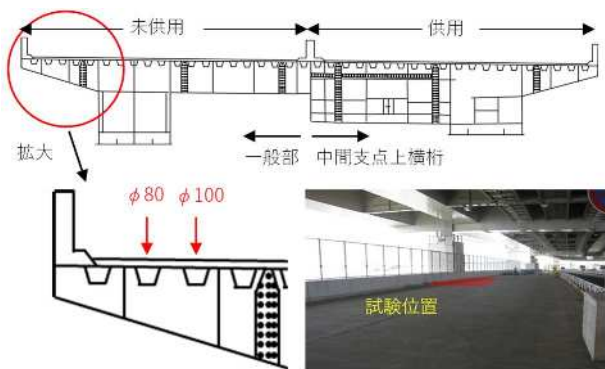


図-19 国道 357 号線 横浜ベイブリッジ 試験位置

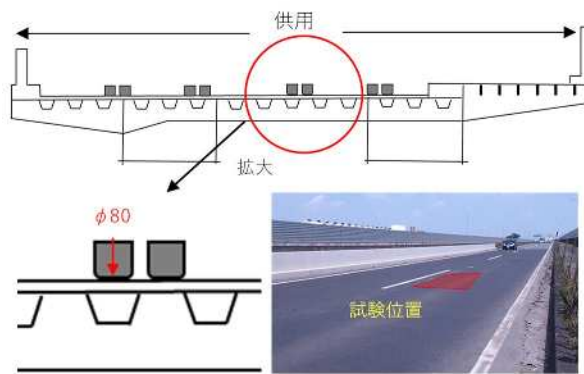


図-20 国道 50 号線 大平高架橋 試験位置

表-6 引張接着強度試験結果

調査箇所	横浜ベイブリッジ (φ100)				横浜ベイブリッジ (φ80)				大平高架橋 (φ80)			
気温(°C)	21.4				21.4				21.8			
結果	No	破壊形態	引張接着強度 (N/mm ²)	平均値	No	破壊形態	引張接着強度 (N/mm ²)	平均値	No	破壊形態	引張接着強度 (N/mm ²)	平均値
	1	SFRC	2.61	2.61	6	SFRC	2.82	3.05	11	SFRC	2.57	2.75
	2	治具接着材	2.01		7	SFRC	2.98		12	SFRC	2.65	
	3	治具接着材	2.20		8	SFRC	3.07		13	SFRC	2.78	
	4	治具接着材	2.38		9	SFRC	3.31		14	SFRC	2.85	
	5	治具接着材	2.46		10	治具接着材	2.55		-	15	SFRC	

は 2014 年に SFRC 舗装路面に凍結防止を目的とした樹脂舗装を施工されているため、2014 年度以降は SFRC 舗装への雨水の影響は小さいと考えられる。なお、交通状況は 2015 年センサスで日交通量約 29、000 台 (24 時間)、大型車混入率約 32%である。試験位置はスタッドや補強材と干渉しない位置で交通規制帯の中で安全に作業できる位置を選定した。また、接着材にとって厳しい条件とするため、局部変形が生じるために引張接着強度が低いと想定する鋼床版Uリブの内部 (図-20 参照) かつ輪荷重の直下の位置とした。

3.3.2 試験方法

試験は SFRC 舗装と既設鋼床版の接着材接合部を対象に引張接着強度試験を行う。まずコアカッターで鋼床版上面に達するまで切削 (φ80mm 又は φ100mm) し、次に切削箇所内側の SFRC 舗装の表面を研掃し、切削箇所と試験用治具を治具接着材により一体化した。試験は SFRC 舗装と鋼床版の接着材接合部が破壊するまで載荷し、破壊時の引張荷重値を計測し、コアの断面積 (実測値) で除した値を引張接着強度とした。

3.3.3 試験結果

引張接着強度試験の結果を表-6 に示す。表-6 より、破壊形態は 10 箇所が SFRC 舗装の材料破壊、5 箇所が治具接着材近傍の破壊であった。10 箇所は評価目安⁶⁾の「SFRC 舗装での破壊の面積割合が 90%以上」を満足した。表-6 より、切削径 φ100 の 4 箇所が治具接着材近傍での破壊を示した。切削径が大きいほど引張荷

重値が大きいため、切削径 φ100 では応力集中箇所と想定する治具直下の治具用接着材近傍が先に破壊されたと考えられる。

表-6 より、引張接着強度 (材料破壊) の平均値は、2.61N/mm²、3.05 N/mm²、2.75N/mm²であり、評価目安⁷⁾とする「1.0N/mm²以上」であった。なお、本試験は SFRC 舗装と鋼床版の接合部の接着材を対象としたため、治具用接着材近傍での破壊は望ましい破壊形態ではなかった。一方で、接合部の接着材の強度は治具用接着材近傍の強度と同等以上の値 (約 2.0N/mm²以上) と考えられるため、接合部接着材の強度は良否の目安である 1.0N/mm²以上の強度を有していると考えられる。

4. まとめ

重大な疲労損傷に対する診断ロジックの構築および環境作用が SFRC 舗装の耐久性に及ぼす影響について検討し、以下の結果が得られた。

- 1) 損傷メカニズムや橋の応力状態などの条件から、亀裂の進行程度・原因の推定・措置方法などを診断する上で必要な情報の整理し、診断ロジックを示した。
- 2) 主桁と横桁又は対傾構の取り付く垂直補剛材の上端部の疲労損傷を対象に、試験橋梁の載荷試験や解析的検討により、二次応力による亀裂の発生お

よび進展の力学的特性を検証した。その結果、横桁・対傾構から構成される格子構造が床版の三次元的なたわみを拘束することにより、垂直補剛材の上端部に応力集中を生じさせていることを明らかにした。

- 3) SFRC 舗装と鋼床版デッキプレートを模擬した小試験体を用いて、各種の条件で環境負荷を作用させた後に引張接着強度試験を行った結果、SFRC 舗装に貫通ひび割れが生じると鋼床版デッキプレートからの水の侵入によりさびが生じ、引張接着強度の低下が生じる可能性があることが分かった。また SFRC 舗装に貫通ひび割れが生じた場合、注入材により補修することで引張接着強度の低下を抑制できる可能性があることが分かった。
- 4) YBB 下国道 357 号線と国道 50 号大平高架橋において、引張接着強度試験を行った結果、SFRC 舗装マニュアルにおける破壊形態と引張接着強度の評価目安を満足しており、SFRC 舗装の施工から約 15 年が経過した SFRC 舗装の接着材について、明確な劣化が生じておらず、比較的健全な状態を保っていることが分かった。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書、国交省 HP、2021.7
- 2) 澤田守、江口康平、石田雅博：道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断 AI システムの研究開発、土木技術資料、第 63 巻、第 10 号、2021
- 3) 山本亨介、村越潤、上仙靖：橋梁点検データに基づく鋼 I 桁橋における主桁-横部材取合い部の疲労損傷事例の分析、鋼構造論文集、第 28 巻、第 112 号、pp.89-100、2021.12.
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋疲労設計便覧、2020
- 5) 牧山大祐、中村充：鋼 I 桁のウェブギャップ板に発生する疲労き裂の進展速度分析、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016.9
- 6) (独)土木研究所、(株)横河ブリッジ、(株)NIPPO、鹿島道路(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 舗装による既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル（案）一、共同研究報告書整理番号第 395 号、2009
- 7) 幅三四郎、村越潤、小野秀一、佐藤歩：屋外暴露した鋼床版 SFRC 舗装試験体の接着剤接合部の経年劣化傾向、第 25 回鋼構造年次論文報告集、日本鋼構造協会、Vol. 25、No.9、pp.63-70、2017.11.
- 8) 幅三四郎、村越潤、小野秀一、佐藤歩、森猛：鋼床版 SFRC

RESEARCH ON EVALUATION METHOD OF FATIGUE CRACKS FOR PLANNED MAINTENANCE

Research Period: FY2018-2021

Research Team: Bridge and Structural Engineering Research Group

Author: JYOSEN Yasushi

SAWADA Mamoru

TAKAHASHI Minoru

MURAI Keita

OONISHI Takanori

SHINODA Ryusaku

OONISHI Tatsuya

Abstract: With the aging of steel road bridges, fatigue cracks have occurred in various parts, and there are cases that affect safety and places a heavy burden on countermeasures. Therefore, in order to carry out inspections, diagnoses, and measures efficiently and rationally, there is a need for an evaluation method for countermeasures according to the damaged part and the degree of damage. Furthermore, regarding SFRC pavement, which is one of the measures against fatigue of steel decks, there are few data on the durability of actual bridges under environmental conditions, and it is necessary to clarify the impact of environmental impact. Therefore, the purpose of this study is to construct a diagnostic logic for fatigue damage and to examine the effect of environmental effects on the durability of SFRC pavement.

Keywords: fatigue crack、 diagnostic logic、 load-bearing vehicle measurement、 SFRC pavement、 adhesive tensile strength