

## 鋼橋の疲労対策技術の信頼性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 30

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越 潤、玉越隆史、上仙 靖、高橋 実  
青木康素、佐藤 歩、村井啓太

### 【要旨】

高度経済成長期に建設された道路橋の高齢化が進む中で、鋼道路橋では様々な部位に疲労損傷が顕在化しており、供用性に支障を来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、疲労対策技術については、要求性能・性能評価法が系統立てて整理されておらず、標準化に至っていないものもあり、疲労対策技術の標準化に向けた検討が必要となっている。本研究は、その検討の一環として、コンクリート系舗装による鋼床版疲労対策技術、ストップホールによる亀裂補修技術、超音波探傷試験による非破壊調査技術について、要求性能や性能評価方法等を調査研究するものである。

キーワード：鋼道路橋、疲労損傷、鋼床版、SFRC 舗装、ストップホール、超音波探傷試験

### 1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路橋の高齢化が進む中で、鋼道路橋では様々な部位に疲労損傷が顕在化しており、供用性に支障を来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。また、損傷の特徴として、これまで事例の少ない部位における疲労損傷の顕在化も懸念され、維持管理の負担軽減を図るための点検、診断、補修補強の技術開発に着実に取り組むことが必要とされている。特に対策技術については、損傷状況や現場条件に応じて、耐久性の観点から、信頼性が高く合理的な対策技術のメニューの充実を図ることが不可欠である。そこで本研究は、疲労対策技術の標準化に向けた検討の一環として、コンクリート系舗装による鋼床版疲労対策技術、ストップホールによる亀裂補修技術、超音波探傷試験による非破壊調査技術について、要求性能や性能評価方法等の調査研究を行うものである。

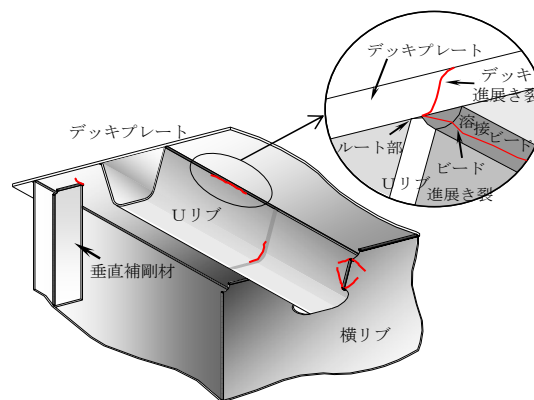


図-1 Uリブを有する鋼床版で発生している  
主な疲労亀裂

告されている。特に、デッキ進展亀裂については、通常の見視点検では発見が困難であることや、亀裂がある程度進展するとデッキが陥没し、車両通行を妨げ、第三者被害につながる恐れがあり、これまで様々な機関で検討や対策が講じられてきた。デッキ進展亀裂の発生メカニズム及び原因を究明するため、本研究所では過年度に、3次元FEM解析や実大鋼床版試験体を用いた静的載荷試験及び輪荷重走行試験を行い、デッキ進展亀裂の原因は、輪荷重により生じる溶接部近傍の局所的な板曲げ変形に伴うルート部の応力集中であることを明らかにした。

新設橋梁に対しては、より確実に耐久性向上が期待できる対策の確立を目的に、国土技術政策総合研究所が、疲労耐久性に支配的な役割を果たすと考えられるトラフリップとデッキの板厚に着目して、横桁交差部の部分供試体

## 2. コンクリート系舗装による鋼床版疲労対策技術

### 2. 1. 研究の背景・概要

交通条件の厳しい鋼床版橋では、輪荷重直下において溶接各部に疲労損傷が報告されている。図-1に閉断面リブ（以下、Uリブ）を有する鋼床版に発生している主な疲労亀裂を示す。このうち、輪荷重直下のUリブとデッキプレート（以下、デッキ）の片側すみ肉溶接のルート部には、主に板厚方向に進展しデッキ表面に至る亀裂（以下、デッキ進展亀裂）と溶接ビード内に進展しビードを貫通する亀裂（以下、ビード進展亀裂）の2種類の亀裂が報

を用いた定点載荷疲労試験と実物大供試体を用いた輪荷重走行試験を実施し、これらの組合せ条件が鋼床版の疲労耐久性に及ぼす影響を考察した<sup>2)</sup>。その結果、鋼床版の疲労損傷事例の多くがデッキ板厚12mmの場合で報告されているのに対し、デッキ板厚を16mm以上としてデッキの剛性を高めることで、デッキの局部変形が抑制され、疲労損傷の発生リスクを低減できることを明らかにした。その成果は、平成24年に改定された道路橋示方書・同解説<sup>3)</sup>に反映されており、閉断面リップを使用する場合、大型自動車の輪荷重が常時載荷される位置直下のデッキプレート板厚は16mm以上とすることを標準とすることが解説に記されている。

既設橋に対しては、同様に、既存のアスファルト舗装を、剛性が高くかつ比重のほぼ変わらない鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC）舗装に置き換え、高耐久性の接着材を用いて鋼床版と合成させることにより、デッキの剛性を高め、亀裂発生の原因と考えられているデッキの局部変形や着目部の応力を低減させる対策工法が提案されている。本研究所では、同工法の実橋への適用を進めるにあたり、耐久性に係る信頼性を確保するために、SFRC舗装の耐久性評価に関する各種の実験的・解析的検討を進めてきた。また、それらの試験結果や既往の調査研究、施工事例の技術的知見を踏まえ、同工法を適用する場合の基本的な考え方、概ね妥当と考えられる材料、構造細目、及び個別橋梁の構造・施工条件に応じた設計・施工上の留意点をマニュアルとしてとりまとめた<sup>4)</sup>。

一方で、補強効果の評価方法や閾値、補強効果を得るために舗装に求められる剛性や厚さ、耐久性等の要求性能や、その性能評価方法等については基準化されておらず、対策の標準化には至っていないのが現状である。その結果、使用する材料・仕様は現場条件により様々に改良されており、性能を評価するための解析条件や試験条件等は、機関により異なっている。中には実橋での試験施工後、間もなくコンクリート系舗装に損傷が発生した事例も存在する<sup>5)</sup>。前述の設計・施工マニュアル<sup>4)</sup>では、既設アスファルト舗装の全厚（75mm程度）をSFRC舗装に置き換える構造を適用対象としているのに対し、都市高速道路

等では騒音や路面排水に対する配慮から、厚さ50mm程度のSFRC舗装上にアスファルト混合物を敷設する二層構造が適用されており<sup>6)</sup>、近年、都市高速道路以外でも二層構造が適用され始めている。また、ゴムラテックスモルタルを使用した補強工法<sup>7)</sup>や、ビニロンやアラミド等の有機繊維を使用した有機繊維補強コンクリートを用いた補強工法<sup>8)</sup>、超高強度繊維補強コンクリートのプレキャストパネルを用いた補強工法<sup>9)</sup>等が開発されている。

したがって本研究では、コンクリート系舗装による鋼床版補強工法の標準化を図るため、同工法を適用する際の要求性能・性能評価法を提示することを目的とする。

SFRC舗装による補強工法については、適用当初より舗装のひび割れ発生後の応力低減効果や、ひび割れからの水の浸入の影響も含めた舗装体及び接着材接合面の強度や耐久性に係る懸念が課題として挙げられている。疲労対策としての同工法の適用性については、輪荷重走行試験や接合面を模擬した供試体の強度試験等により検討が行われているものの、現場における様々な条件に対して、十分な強度や耐久性を有していることを確認することは容易ではなく、実際の環境条件下で使用され続けた同工法の劣化状況を把握・分析し、適用前に実施した耐久性に関する性能確認試験結果と比較する等、耐久性に関して技術的な知見を蓄積することが重要である。

そこで本研究では、コンクリート系舗装による鋼床版補強工法の要求性能として必要な項目の選定や、性能評価法を構築する上での参考とするため、一般的に使用されているSFRC舗装を例に、実橋の舗装表面を対象とした経年変化調査及び屋外に暴露された実大鋼床版試験体上面に敷設したSFRC舗装接合面の引張強度の経年変化計測を実施した。

## 2. 2. 鋼床版 SFRC 舗装の現地調査

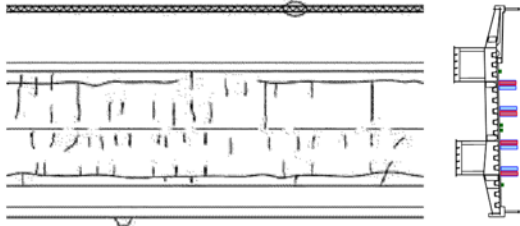
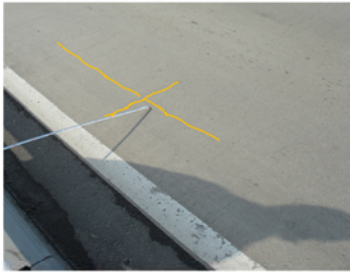
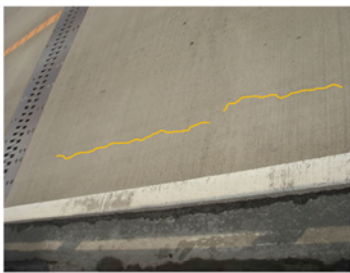

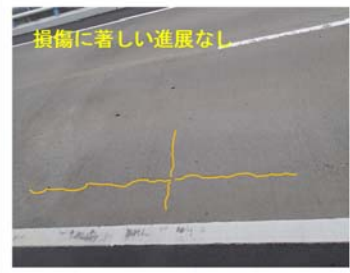


### 2. 2. 1. 調査対象橋梁及び調査方法

現地調査を実施した鋼床版橋の一覧を表-1に示す。前述のとおり、現在、SFRCの舗装構成は、既設アスファルトの全厚をSFRC舗装に置き換える一層構造と、基層がSFRC、表層がアスファルト舗装の二層構造の2種類

表-1 現地調査対象橋梁

橋梁名	施工時期	経過年数 (H27時点)	橋梁形式	SFRC 舗装厚	セメント の種類	スタッド (舗装端部及び打継目部)	接着材	負かけ域 補強筋
S橋	H17	10年	3径間連続鋼床版桁橋2連	80~90mm	超速硬	9.0φ×40 (300mm間隔)	エポキシ樹脂系 (全面塗布)	CFRP筋 (全面)
O橋	H19	8年	3径間連続鋼床版桁橋、 単純鋼床版桁橋2連	75mm	早強 (膨張材使用)	9.0φ×30 (300mm間隔)	エポキシ樹脂系 (全面塗布)	CFRP筋 (主桁直上)
T橋	H21~H22	5~6年	3径間連続鋼床版桁橋	80mm	早強 (膨張材使用)	9.0φ×40 (300mm間隔)	エポキシ樹脂系 (全面塗布)	CFRP筋 (主桁直上)
N橋	H27	1年未満	2径間連続鋼床版桁橋	75mm	超速硬	9.0φ×40 (300mm間隔)	エポキシ樹脂系 (全面塗布)	CFRP筋 (主桁直上)

表-2 橋梁点検結果のひび割れスケッチ図と主な損傷状況写真

	損傷図の抜粋		今回調査時に確認した損傷状況
H26橋梁点検時 (対策後9年経過: 2014.6)			<ul style="list-style-type: none"> <li>橋軸方向のひび割れ</li> <li>橋軸直角方向のひび割れ</li> </ul>
	主な損傷状況写真		
	ひび割れ(橋軸, 橋軸直角): 輪荷重位置付近	ひび割れ(橋軸): 輪荷重位置付近	ひび割れ(橋軸直角): 全径間にわたり発生
前回調査時 (対策後5年経過: 2010.2)			
今回調査時 (対策後10年経過: 2015.11)			

の様子が適用されている。

本研究では、外観からひび割れや摩耗等の状況を観察できる一層構造を調査対象とした。調査方法は、歩道部から可能な限り近接しての外観目視とした。

## 2. 2. 2. 調査結果

### (1) 概要

舗装施工後、約5~10年経過した橋梁では、SFRC表面に橋軸方向や橋軸直角方向のひび割れが見られた。橋軸方向のひび割れは輪荷重位置付近や主桁直上等に、橋軸直角方向のひび割れは橋や部位により異なるが横リブ直上や全長にわたって発生している状況が確認された。経年的な変化を追っていくことが重要と考えられるが、今回調査を行った4橋では、早期に供用性に影響を与えるような損傷の発生は見られなかった。

### (2) S橋の経年調査結果

既設橋の疲労対策として国内で初めてSFRC舗装が適用されたS橋について、過年度(平成22年2月)に本研究所で実施した現地調査結果との比較を踏まえて経年的

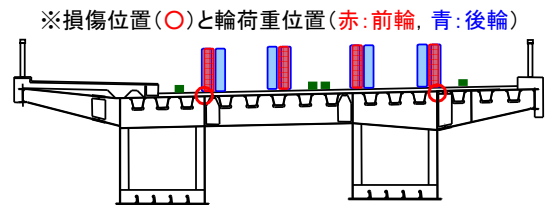


図-2 上部工断面図及び概略の輪荷重作用位置

な調査結果を報告する。図-2に上部工断面図及び概略の輪荷重作用位置を示す。S橋は、平成11年にデッキ進展亀裂が確認され、疲労対策として平成17年にSFRC舗装を敷設している。今回調査を実施した平成27年11月時点では、対策後10年が経過した状況である。

本研究所では、平成22年に対策後5年経過した状況の現地調査を実施している。その際、舗装表面に橋軸方向と橋軸直角方向のひび割れ等(橋軸方向のひび割れ発生位置:図-2中の赤丸)を確認しており、今回の調査では、その損傷状況の進展性や新たな損傷の発生確認を行った。表-2に平成26年度に道路管理者により実施された橋梁点検のひび割れ図(一部抜粋)と、前回と今回の調査時に

確認したひび割れ状況写真を示す。なお、橋梁点検は、SFRC 舗装による対策後、道路管理者により平成 22 年度と平成 26 年度に実施されているが、本研究所で点検結果を比較する限り、ひび割れ状況に大きな進展は見られていない。

前回調査時に確認したひび割れ（橋軸、橋軸直角）は、今回の調査でも同位置で確認できたが、ひび割れの顕著な進展は見られなかった。図-2 及び現地での車両走行位置の目視確認より、橋軸方向のひび割れは、主桁ウェブ直上かつ輪荷重位置の直下に位置していることを確認した。

また、今回の調査では、前回調査時から新たな損傷の発生は確認されなかった。

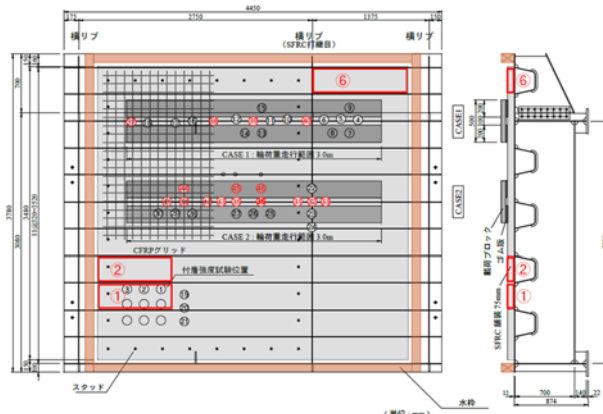


図-3 試験体 No. 1 の切り出し前の形状及びコア抜き位置<sup>10)</sup>

## 2. 3. SFRC 舗装接合面の経年変化

### 2. 3. 1. 試験体 No. 1

#### (1) 試験体の概要

対象とした既存試験体は、2008 年に輪荷重走行試験を実施したもので、試験時及び試験終了直後と、本研究所敷地内に 2 年間屋外暴露した後（2010 年）に引張試験を実施している<sup>10)</sup>。引張試験が実施された当時の試験体の形状寸法とコア抜き位置を図-3 に示す。その後、2011 年にカッターで切り出し作業を行い、写真-1 に示す切り出し試験片 3 体（全て非載荷部）が実験棟内に約 5 年間保管されている状況である。SFRC に使用したセメントは超速硬セメントであり、接着材には、主剤にエポキシ樹脂、硬化剤に脂肪族ポリアミンを使用した SFRC 舗装の接合への実績がある高耐久のエポキシ系接着材を用いている。

#### (2) 試験方法

試験状況を写真-2 に示す。試験方法は、過年度に実施した引張試験<sup>10)</sup>と同じとし、コアカッターを用いてφ100mm の切込みをデッキ上面まで入れ、毎秒約 0.1N/mm<sup>2</sup> の速度で載荷して、デッキと SFRC 舗装の接着接合面が破壊するまで試験し、破壊時荷重を計測した。

過年度のコア抜き引張試験は、輪荷重走行試験時（室温 11～28℃）と、2年間屋外暴露後（外気温 24～25℃）に実施した。今回の試験では、試験時温度をパラメータとし、恒温室で試験体が所定の温度になるまで 1 日以上保管し、常温（20℃）での引張試験を主体に行うとともに、高温（50℃）、低温（-10℃）を追加した計 3 ケースを実施した。試験体数は、各ケースにつき 6 体とした。

#### (3) 試験結果

##### ① 試験時温度による比較

試験温度毎の引張強度の関係を図-4 に示す。試験時の温度が高温になるにつれ、引張強度は低下していることが確認された。過年度に土研で実施した接合面のせん断

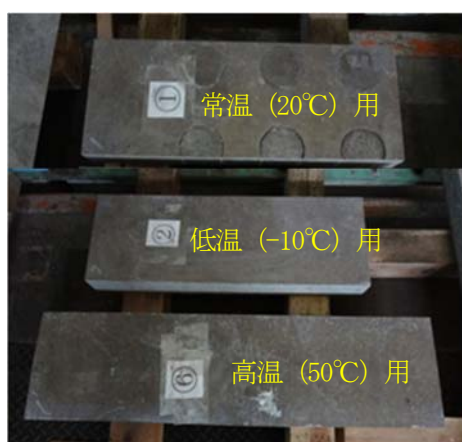


写真-1 切り出し試験体の保管状況



写真-2 試験状況

強度試験では、高温になるに従って強度が低下（-10℃に対して 50℃では約 20%低下）しており<sup>10)</sup>、本試験の結果から、引張強度についても同様の傾向が伺える。

写真-3 に試験後のコアの破断面状況の例を示す。50℃の場合、SFRC 側に接着材の点在がわずかに見られるが、温度毎の破断面の外観上の差はほとんどなく、破壊位置はほぼ全面が SFRC 側である。したがって、温度増加とともに強度は低下傾向にあるが、少なくとも接合面の強度自体は接合面近傍の SFRC 部分の強度と同等以上の強度を有していると考えられる。

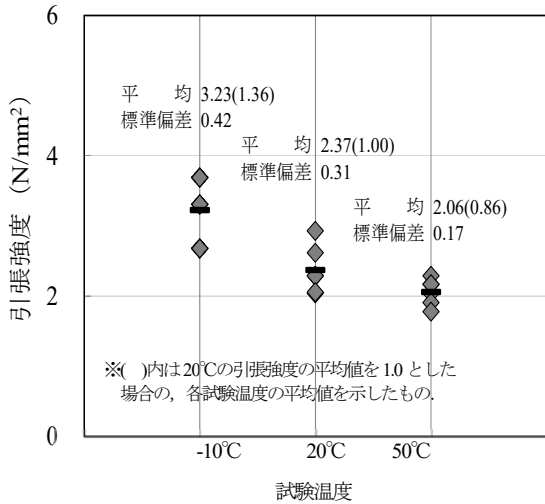


図-4 試験時温度毎の引張強度

② 経過年数による比較

図-5 に引張強度の経年変化を示す。過年度に実施した輪荷重走行試験時及び2年間暴露後の引張試験<sup>10)</sup>では、引張強度の平均値はほぼ同程度の値を示しており、有意な変化は確認されなかった。一方、今回実施した引張試験(試験温度 20°C)の引張強度の平均値(2.50N/mm<sup>2</sup>)は、輪荷重走行試験時(2008年)から約21%、2年間暴露後(2010年)から約24%低下していた。試験体は、2年間暴露後、実験棟内で約5年間保管していたため、日射や雨水の影響は屋外に比べて小さいと考えられるものの、実験棟内の温度変化等の継続的な環境作用が影響した可能性が考えられる。

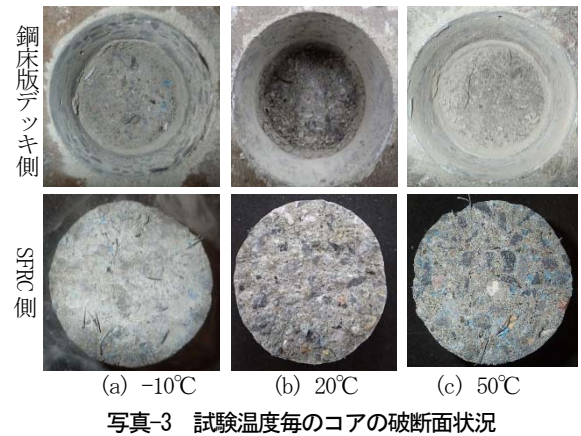


写真-3 試験温度毎のコアの破断面状況

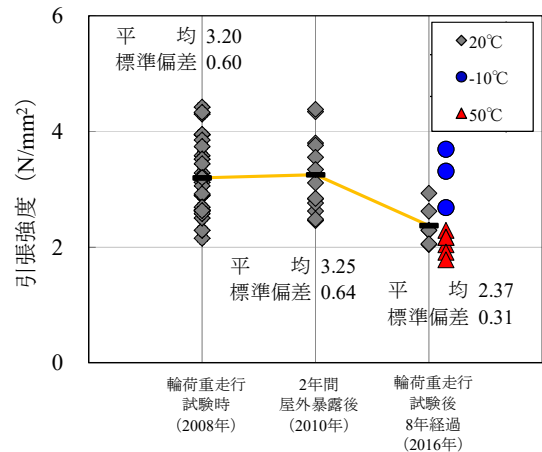


図-5 引張強度の経年変化

2. 3. 2. 試験体 No. 2

(1) 試験体の概要

対象とした既存試験体は、2008年に輪荷重走行試験を実施したもので、試験時及び試験終了直後(2008~2009年)に引張試験を実施している<sup>4)</sup>。引張試験が実施された当時の試験体の形状寸法とコア抜き位置を図-6に示す。試験終了後は、本研究所敷地内に約7年間屋外暴露された状況(写真-4)である。SFRCに使用したセメントは超速硬セメントであり、接着材には、主剤にエポキシ樹脂、硬化剤にポリチオールと脂肪族ポリアミンを使用したSFRC 舗装の接合への実績がある高耐久のエポキシ系接着材を用いている。

(2) 試験方法

試験方法は、試験体 No.1 と同じとした。過年度の引張試験は、論荷重走行試験時(室温 5~22°C)に常温下で、輪荷重直下、ひび割れ部及び非載荷部(図-6中の番号)で実施した。今回の引張試験は、屋外常温下で、輪荷重直

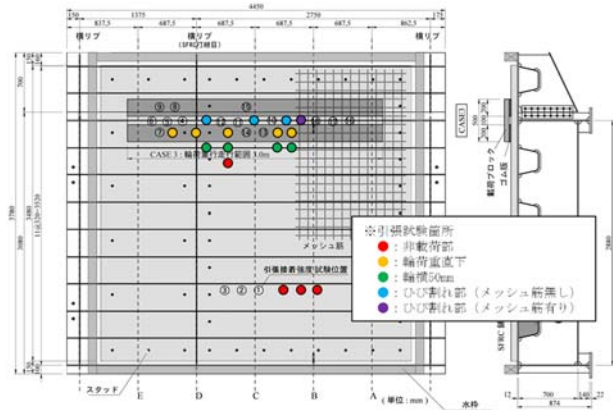


図-6 試験体 No. 2 の形状及びコア抜き位置<sup>4)</sup>



写真-4 暴露試験体の状況

下、輪横 50mm、ひび割れ部及び非載荷部（図-6 中の着色箇所）で実施し、各試験位置につき 3 体以上試験を実施した。

(3) 試験結果

① 試験位置による比較

試験位置毎の引張強度の関係を図-7 に示す。試験位置が輪荷重位置に近づくにつれ、引張強度は低下していることが確認された。過年度に実施した輪荷重走行試験にて発生したひび割れ部から、雨水等が浸入したことにより接合面が劣化したことが要因と推測される。

写真-5 に試験後のコアの破断面状況の例を示す。輪荷重直下及び輪横 50mm では、接着材界面で破壊しており、さらに鋼床版デッキ側、SFRC 側ともに錆も見られるが、非載荷部では、破壊位置は全面が SFRC 側である。

② 経過年数による比較

図-8 に引張強度の経年変化を示す。今回実施した引張試験の引張強度の平均値 (1.35N/mm<sup>2</sup>) は、輪荷重走行試験時 (2009 年) から約 62%低下していた。試験体は、約 7 年間屋外暴露していたため、日射や雨水の継続的な環境作用が影響した可能性が考えられる。

3. ストップホールによる亀裂補修技術

3.1 研究の背景・概要

鋼道路橋で発見された疲労亀裂への対策方法の代表例として、ストップホールによる補修が挙げられる。ストップホールとは、亀裂の先端部分を取り除くために設けられる円孔のことであり、円孔を設けて応力集中部を除去することにより、亀裂の進展を遅延あるいは抑制するための補修工法である<sup>1)</sup>。ストップホールは恒久的な対策を実施するまでの応急的な対策として、または他の恒久的な対策と併用して用いられる。鋼道路橋において広く一般的に用いられている補修技術であるが、補修効果を期待できない場所で施工されている事例もある (写真-6)。

適用条件を満たさない補修を行うことによる問題点として、(1)亀裂の発生部位やその挙動からは亀裂の進展抑制効果があまり期待できない場合があること、(2)施工する部位や挙動により断面欠損による応力増大や耐荷力低下のリスクが懸念される場合があることが挙げられる。また、適用条件を満たす場合であっても、削孔径や削孔方向、孔縁の仕上げ程度 (非仕上げ、平滑、曲面)、ボルト締めを併用することの必要性等様々な選択肢が考えられ、補修効果を大きく、かつ施工リスクを小さくする最適化のノウハウが未確立である。また、ストップホールによる補修が恒久対策となるか否かの判断方法も明確ではない。

これまでもストップホールやボルト締めストップホ

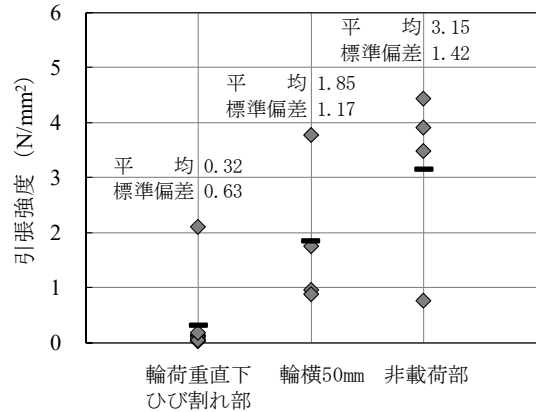


図-7 7年間暴露試験体における試験位置毎の引張強度



写真-5 試験位置毎のコアの破断面状況

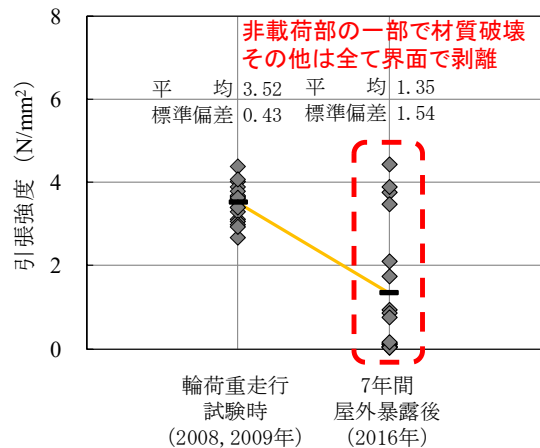


図-8 引張強度の経年変化



写真-6 ストップホールの施工事例

ール等で補修した場合の効果について、疲労試験や応力解析による一連の研究が行われており、補修部の疲労強度を評価するための経験式<sup>12)</sup>が提案されているものの、学術的な成果が実橋の補修現場においてストップホール設計に活用された事例は少ない。これは、補修方法として標準化されておらず、実務向けに適用条件や設計方法、評価方法を整理できていないためであると考えられる。

そこで本研究では、ストップホールによる補修方法の標準化に向けた検討の一環として、ストップホールの適用範囲を明確にし、各種応力状態での補修効果を検証することを目的に、疲労試験によりストップホール部の疲労強度を確認した。

### 3. 2 疲労試験の条件

#### 3. 2. 1. 試験体

疲労試験体の形状を図-9 に示す。2 枚の平板を溶接で組み立てた T 形断面（幅 100mm×高さ 159mm×延長 700mm）の小型試験体であり、支間中央に亀裂を模擬したスリット及びストップホールを模擬した円孔を設けた。使用した鋼種は SM490Y 材である。試験体の製作では、試験体主板の長手方向と鋼板の圧延方向を一致させるとともに、フランジと腹板とを溶接する際に生じるフランジの反りを低減するため、フランジ背面に厚板を添わせてクランプで試験体と固定したうえですみ肉溶接（炭酸ガスアーク溶接）を行った。また、模擬亀裂の切断についてはバンドソー（刃幅 1mm）を用い、ストップホールの削孔についてはエンドミルを用いて造作した。

各種条件がストップホール部の疲労強度に及ぼす影響を評価するため、孔径  $R=13\text{mm}$ 、母材（腹板）厚 16mm を基本ケースとして、各種パラメータを変えた試験体を各 3 体ずつ製作した。試験体のパラメータを以下に示す。

##### ① 孔径の影響確認

模擬亀裂とストップホールを足し合せた切欠き幅を 50mm で一定とし、ストップホールの半径を変化させることにより、半径の影響を比較する。ケースは、半径  $R=9\text{mm}$  と  $R=13\text{mm}$  の 2 ケースとした。（図-10）

##### ② 母材厚の影響確認

母材厚さの影響を確認するため、基本形状における板厚  $t=16\text{mm}$  に対して、 $t=9\text{mm}$ 、 $t=25\text{mm}$  の 3 ケースとした。

##### ③ 孔縁仕上げの影響確認

孔縁の仕上げ程度の影響を確認するため、基本形状における非仕上げに対して、面取り  $R=1\text{mm}$ +表面粗さ仕上げ #40、面取り  $R=1\text{mm}$ +表面粗さ仕上げ #120 の 3 ケースとした。

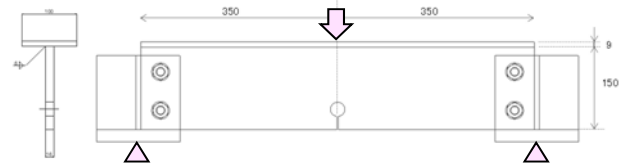


図-9 ストップホール試験体の寸法形状

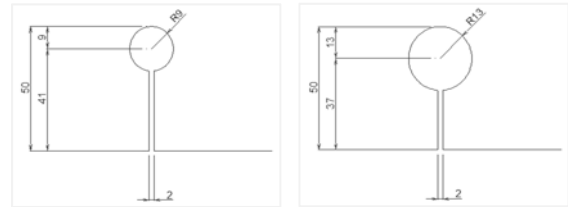
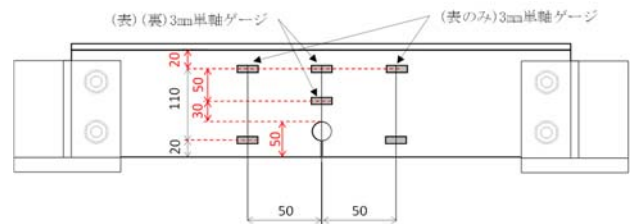
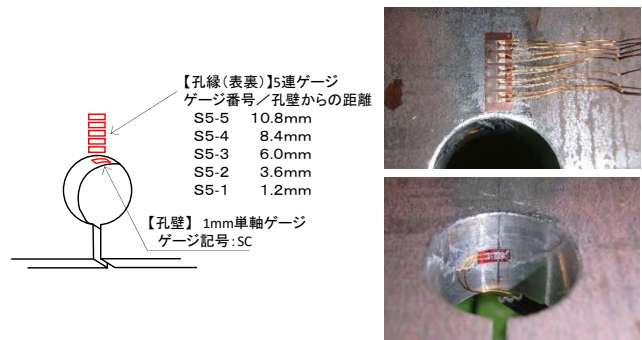


図-10 ストップホール部詳細



(a) 試験体一般部



(b) 円孔周辺部

図-11 ひずみゲージ貼付位置

ひずみゲージの貼付位置を図-11 に示す。ストップホール孔壁の応力で評価するために円孔の孔壁（円周方向）に 1mm 単軸ゲージを貼り付けし、さらに円孔近傍の応力分布を確認するために円孔直上の試験体腹板の表裏（梁の軸方向）に 5 連ゲージを貼り付けた。

#### 3. 2. 2. 試験方法

疲労試験には写真-7 に示す材料力学試験設備（油圧式、動的最大荷重 $\pm 500\text{kN}$ ）を用いた。図-9 に示すとおり、試験体両端を単純支持してスリット直上に載荷することにより面内曲げを発生させ、円孔に面内引張が作用する挙動を再現した。

制御方法は、荷重制御とした。載荷荷重は、図-12 に示すように降伏応力以下の応力範囲、かつ応力比  $R$  が部分

片振り引張 ( $0 < R < 1$ ) となるような荷重を予備载荷試験で確認し、疲労試験を行った。なお本試験では、後述するとおり、1,000 万回に達しても亀裂が発生しなかったことから、孔壁の最大応力が降伏応力に達するまで応力範囲を上げている。载荷速度は、予備载荷試験により共振しない最大速度である 5Hz とした。サンプリング周波数は、500Hz とし動的計測を行った。試験の終了は、1,000 万回、亀裂の発生時、試験体の破断時のいずれかとした。

### 3. 3 試験結果

#### 3. 3. 1 使用鋼材の機械的性質

疲労試験に先立ち、試験体に用いる鋼板について、同一工程で製造された鋼板ごとに JIS Z2241 の引張試験、及び JIS Z2242 の V ノッチシャルピー衝撃試験を行った。引張試験片は JIS Z2241 に従い 14B 号試験片とし、鋼材の圧延方向に合わせて 2 本採取し、板厚 2 種類 (9mm、16mm) の計 4 体で引張試験を行った。標点距離は、伸び計 (TYPE ST200V-25-10) 及びレーザー変位計 (IL-100) を用いて計測した。表-3 に材料強度試験結果、図-13 に荷重-変位関係の一例をそれぞれ示す。表-3 にはミルシートの値も参考に記載している。材料強度試験より得られた降伏点、引張強度、伸びは概ねミルシートと同程度の値であった。

シャルピー衝撃試験は、JIS Z2242 に定める V ノッチ試験片を用いた。板厚 16mm の鋼材に対しては標準試験片 (10mm×10mm) とし、板厚 9mm の鋼材については材料から標準試験片が採取できないため、サブサイズ試験片 (7.5mm×10mm) とした。試験片は、鋼材の圧延方向とその直角方向より各 3 本を採取した。表-4 に材料強度試験結果を示す。全ての試験片において、吸収エネルギーが 47J 以上であることが確認された。

#### 3. 3. 2 疲労試験

##### (1) 予備载荷試験

予備载荷として静的载荷した結果の一例 (試験体 2 体目) を図-14 に示す。図-14 は、図-11 に示したひずみゲ

ージで荷重 30kN を载荷した場合の円孔近傍の応力分布を計測したものである。いずれの試験体も孔壁に近づくほど非線形で応力が上昇しており、応力集中が生じていることが確認された。また、孔径で比較した場合には、

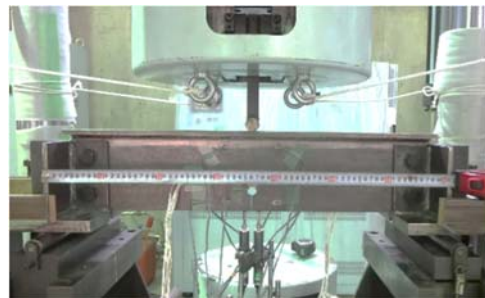


写真-7 疲労試験状況

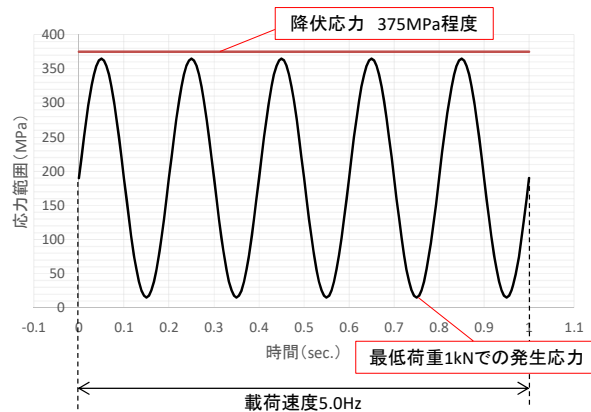


図-12 試験応力範囲の設定

表-3 材料強度試験結果

板厚 (mm)	試験体	試験荷重 (kN)			強度 (N/mm <sup>2</sup> )			標点距離 (mm)		破断伸び (%)	断面積 (mm <sup>2</sup> )		絞り (%)
		上降伏荷重	下降伏荷重	最大荷重	上降伏点	下降伏点	引張強さ	試験前	試験後		試験前	試験後	
9	t9-1	94.0	88.5	125.1	440	414	586	84.3	107.8	28	213.7	85.9	59.8
	t9-2	91.6	88.2	125.6	429	413	588	84.1	107.5	28	213.5	84.6	60.4
	ミルシート				436	-	572			23			
16	t16-1	149.6	144.8	215.6	387	375	558	112.7	149.9	33	386.3	115.9	70.0
	t16-2	149.8	146.6	216.6	388	380	561	112.9	149.5	32	385.9	116.2	69.9
	ミルシート				388	-	538			29			



孔径 9mm (No.1~No.3) の試験体の方が、孔径 13mm (No.4~No.6) の試験体よりも円孔から離れた位置 S5-5 の応力と孔壁位置 SC の応力の差が大きい、すなわち応力集中が大きいことが分かる。なお、これらの応力集中の傾向や大きさについては、別途実施した有限要素解析にて確認し、妥当であることを確認済みである。

(2) 疲労試験

表-5 に疲労試験結果の一覧を示す。表中の最大応力、最小応力及び応力範囲は、代表値として整理を行なう载荷回数における応力波形 1 分間 (载荷速度 5Hz の場合 5 波形分) の最大値と最小値、両者の差により算出した。

試験体 1 体目は 300MPa 程度で繰返し回数 1,500 万回まで疲労試験を行い、磁粉探傷試験により円孔内の亀裂の有無を確認したが、亀裂は確認されなかった。その後、試験応力範囲を 350MPa まで上げて疲労試験を続けたが、亀裂は発生しなかった。そこで、2 体目以降の試験体については、最大応力を降伏点近傍まで上昇させ、繰返し回数 1,000 万回まで疲労試験を実施したが、いずれの試験体においても亀裂は発生しなかった。

図-15 に疲労試験中の円孔孔壁の応力範囲の経時変化の一例 (試験体 2 体目) を示す。代表値として整理を行なう载荷回数については、試験開始直後及びひずみの動的挙動に変化が見られた期間を密にし、動的データが安定し変化が無い期間については適宜整理を行うものとした。いずれの試験体についても疲労試験期間中を通して応力範囲に変化が見られず、亀裂の発生の兆候が見られなかった。

疲労試験の結果を S-N 線図で表したものを図-16 に示す。横軸は試験終了時の繰返し回数、縦軸はストップホール孔壁 (図-3 におけるゲージ記号: SC) における応力範囲をプロットしている。参考として、道路橋示方書・同解説<sup>13)</sup>に規定される疲労強度等級 A 等級と B 等級も記載している。道路橋示方書・同解説<sup>13)</sup>の疲労強度等級は公称応力範囲で規定されるため、単純な比較はできない

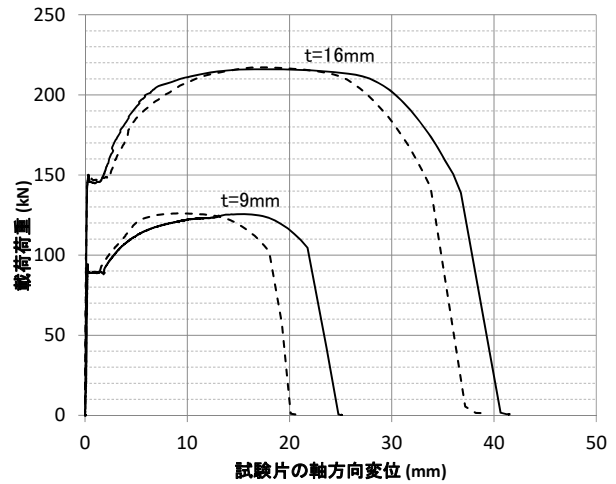


図-13 荷重-変位関係

表-4 シャルピー衝撃試験結果

鋼板の種類	試験片名	試験片採取方向	試験温度	吸収エネルギー(J)			
				1	2	3	平均
板厚9mm SM490YA	S9	圧延方向	0°C	50	49	52	50
	C9	圧延直角方向	0°C	94	107	110	104
板厚16mm SM490YA	S16	圧延方向	0°C	222	257	213	231
	C16	圧延直角方向	0°C	114	109	106	110
板厚16mm SM490YB	S25	圧延方向	0°C	265	288	299	284
	C25	圧延直角方向	0°C	200	213	246	220

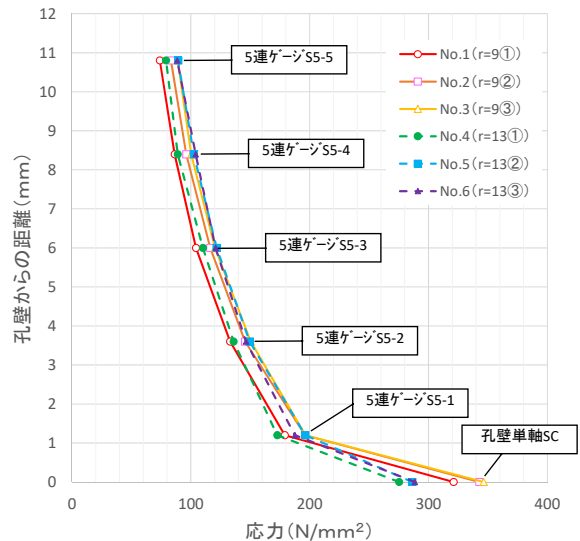


図-14 円孔近傍の応力分布の比較

表-5 疲労試験結果

連番	試験体条件 ※1			疲労試験条件			試験開始時(N=0.5万回)の応力※2				繰返し回数 n (cycle)	終了時の 状況
	孔径 r (mm)	腹板厚 t (mm)	孔壁処理 ※2	荷重範囲 (kN)	制御方法	载荷速度 (Hz)	最大応力	最小応力	応力範囲	応力比		
							$\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{min}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$		
1	r9	t16	削孔まま	1~29	荷重制御	5.0	312	5	307	0.02	15,000,000	き裂無し
				1~33	荷重制御	5.0	513	161	353	0.31	3,400,000	き裂無し
2	r9	t16	削孔まま	1~31	荷重制御	5.0	347	18	329	0.05	10,000,000	き裂無し
3	r9	t16	削孔まま	1~31	荷重制御	5.0	350	14	336	0.04	10,000,000	き裂無し
4	r13	t16	削孔まま	1~39	荷重制御	5.0	387	25	362	0.06	10,000,000	き裂無し
5	r13	t16	削孔まま	1~38	荷重制御	5.0	360	12	348	0.03	10,000,000	き裂無し

が、ストップホール部は非常に高い疲労強度を示している。また、孔径の違いで比較した場合、繰返し回数 1,000 万回までの範囲においては、半径  $R=9\text{mm}$  と  $R=13\text{mm}$  に大きな差はみられなかった。

ストップホールのみによる補修では疲労亀裂がストップホール部から早期に再発生する場合があるが、本疲労試験では疲労亀裂が生じなかった。その要因として、ストップホールを模擬した円孔を工場のエンドミルを使用して削孔したことにより、円の形状や位置、削孔の向きが正確であったことや削孔面が平滑に仕上がったこと等、加工精度が高い条件で製作できたことや面内応力のみが作用する载荷条件であったことが影響していると考えられる。

#### 4. 超音波探傷試験による非破壊調査技術

##### 4.1. 研究の背景・概要

近年、交通条件の厳しい鋼床版橋においてデッキと U リブの溶接ルート部を起点とするデッキ進展亀裂が報告されている<sup>14)</sup> (図-17 参照)。このき裂の検出法として、ある程度の深さに到達した場合に対して、既に複数の超音波探傷法が提案・実用化されている<sup>14)15)</sup>。一方、デッキ進展き裂の深さ (デッキの上下方向の長さ) の推定については、デッキ下面から一探触子パルス反射法を適用する場合、もとよりき裂の方向や傾きは様々であること、き裂の発生位置と探傷面 (主としてデッキ下面) との構造的・幾何学的な関係による制約があること等から、精度の高い推定は難しいと考えられる。本研究では、き裂の概略の深さを把握する手法を提案することを目的に、基礎的な超音波探傷試験を行った。

##### 4.2. 探傷方法の概要

対象とした探傷方法は、著者の一部が開発した臨界屈折角探傷法<sup>14)</sup>を応用して、図-18 に示すように、臨界屈折角探触子 (屈折角: 約 90 度) を前後走査し、き裂からのエコーとエコー高さを検出するものである。試験片は、U リブの溶接部を模擬した小型試験体に対して疲労試験を実施し、実き裂に近いき裂を発生・内在させ、それを加工することにより製作した。具体的には、ピーチマーク試験の結果を踏まえ、元の小型試験体の中央部分

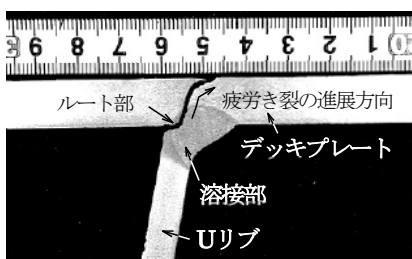


図-17 鋼床版デッキプレート進展き裂の概要

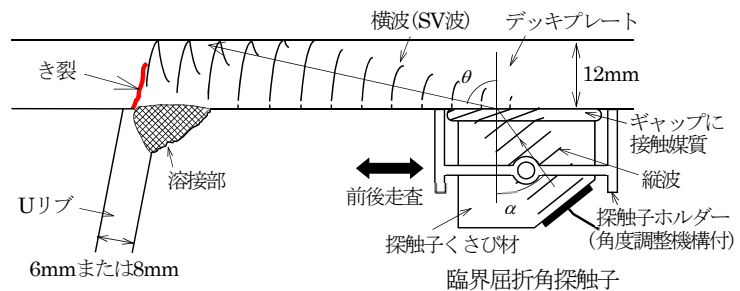


図-18 探傷試験状況 (臨界屈折角探傷法の応用)

(幅 100mm のうち中心線から $\pm 20\text{mm}$  (幅 40mm)) を切り出して探傷用の試験片とした (写真-8 参照)。き裂の深さは、試験片の側面より磁粉探傷試験により予め確認し、き裂深さは 0mm から 9.5mm まで様々である。

##### 4.3. 探傷結果

深さ約 6.3mm、約 9.5mm の試験片に関する探傷結果 (A スコープ) を図-19 に示す。縦軸は、深さ 5mm の  $\phi 3\text{mm}$  横穴を探触子前面から水平距離約 21mm の位置に配置したときに得られるエコー高さを 80% にしたときのエコー高さを示す。横軸は探触子前面からき裂までの水平距離と考えて差し支えない。図中の黒色の実線は、探触子前面からき裂までの水平距離がおよそ 55mm 付近で得られるき裂からのエコーを示し、赤色の実線

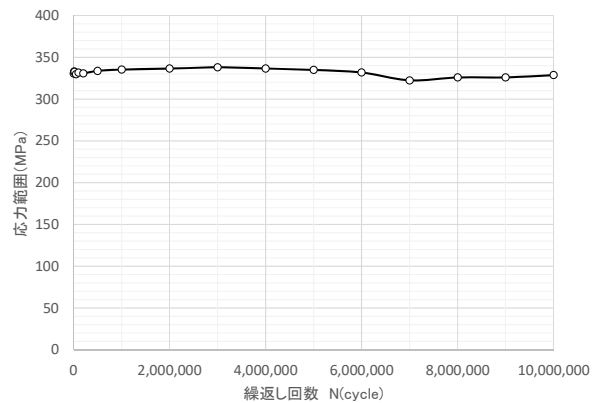


図-15 応力範囲の経時変化

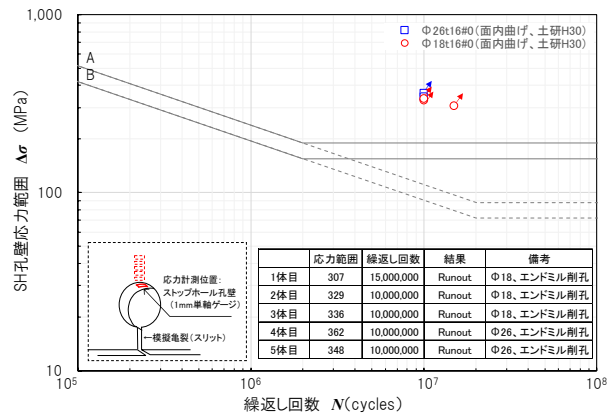


図-16 S-N線図

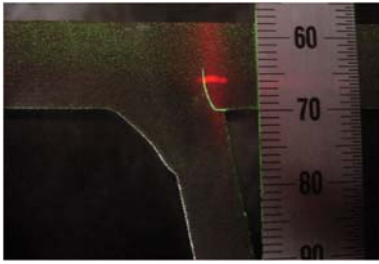


写真-8(a) デッキ進展き裂 (模擬き裂試験片による)

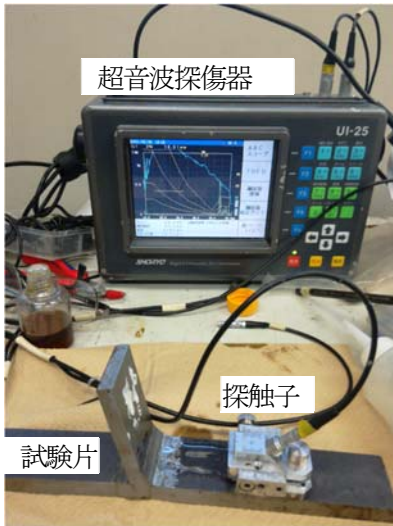


写真-8(b) 探傷試験状況 (臨界屈折角探傷法の応用)

は、探触子を前後走査することによって得られるエコー高さの包絡線 (MA スコープ) を示し、青色の実線は、 $\phi 3\text{mm}$  横穴の MA スコープを示す。図-19(a) はき裂深さ約 6.3mm、(b) はき裂深さ約 9.5mm を有する試験片に対する探傷結果である。同(a) では、エコーは 1 つ得られており、MA スコープの形状は、 $\phi 3\text{mm}$  横穴の MA スコープと比較的類似しており、水平距離が大きくなるとエコー高さが単調減する下に凸の曲線形状となっている。同(b) では、エコーは 2 つ得られており、MA スコープの形状は、水平距離が大きくなると、2 つ目の (伝搬距離が少し大きい方の) エコーのエコー高さの方が 1 つ目のエコーより大きくなり、 $\phi 3\text{mm}$  横穴の MA スコープとは異なる形状となっている。1 つ目のエコーの MA スコープの形状は、(a) と同様に、水平距離が大きくなるとエコー高さが単調減する下に凸の曲線形状となっている。

ここで、前後走査によるエコー高さの変化および疑似コーナーエコーの伝搬経路に基づくエコーの有無により、比較的深い亀裂であるか否かを概略区分する方法を考える。具体的には図-20 に概念図を示すが、疑似コーナーエコーの伝搬経路 (コーナーエコーの伝搬経路に類似した 1 回反射の伝搬経路) と、直射の伝搬経路に基づく 2 つの

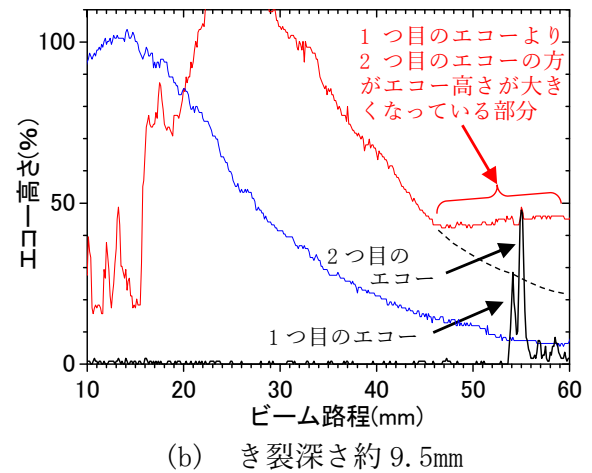
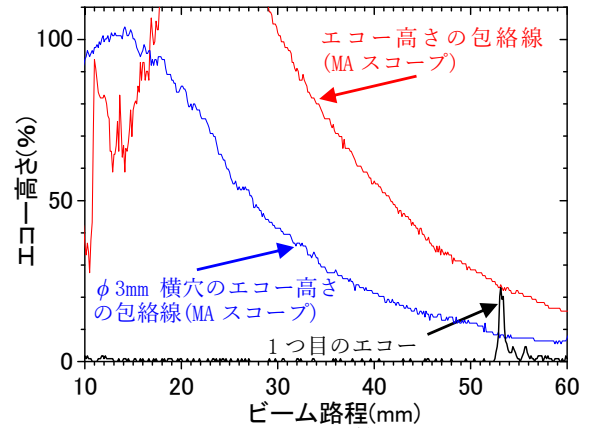


図-19 前後走査時のエコー高さの包絡線 (MA スコープ)

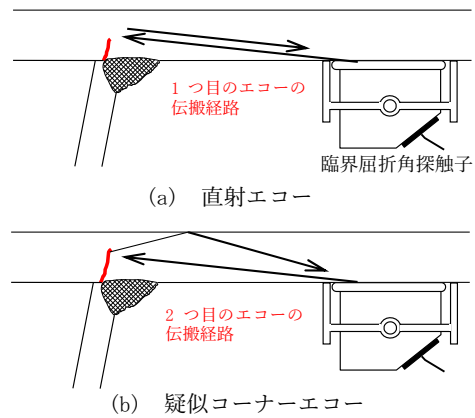


図-20 エコーの伝搬経路の概念

エコーが観測される場合には、比較的深い亀裂である可能性が高い。一方、深い亀裂ではなく、浅い亀裂の場合には直射成分のみが観測されると考えられる (同図参照)。図-19(a) のエコーは直射エコーのみ得られている。亀裂が深いのか浅いのかの判別には、この 2 経路の異なるエコーの検出による方法が考えられる。つまり、エコーが 1 つしか得られない状態では疑似コーナーエコーの伝搬経路が存在しないと考えられるため、亀裂は深くないと推定する。一

方、エコーが2つ確認される状態では、直射の経路のエコーと、疑似コーナーエコーの経路のエコーが確認されると考えられるため、亀裂は深いと推定する。

## 5. まとめ

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

### 5. 1. コンクリート系舗装による鋼床版疲労対策技術

コンクリート系舗装による鋼床版補強工法の要求性能として必要な項目の選定や、性能評価法を構築する上での参考とするため、実橋で施工されたSFRC舗装表面を対象とした経年変化調査及び屋外に暴露された実大鋼床版試験体上面に敷設したSFRC舗装接合面の引張強度の経年変化計測を実施した。本研究により得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) コンクリート舗装に生じるひび割れの発生において、直下の鋼床版の構造や輪荷重の影響を無視できない。現地調査で確認したひび割れの要因としては、車輛が通過する度に、主桁や横リブのウェブ等を支点としてデッキと接合されたSFRC舗装が負曲げ変形をすることで、舗装表面に引張応力が作用したことが考えられる。
- 2) 実環境下で約2年間暴露された履歴を持つ試験体接合面は、コア抜き引張試験での破壊形態（SFRCの材質破壊）から推定すると、SFRCの打設から約9年が経過した現在でも、SFRCと同等以上の引張強度を有している。接合面の引張強度の平均値は、過年度に計測した値と比べると20%程度の低下が見られた。一方で、過年度に実施した今回の試験体と概ね同じ仕様で製作した小型試験体接合面の環境負荷試験では、引張強度の低下は確認できていない。
- 3) 輪荷重走行試験後、約7年間屋外暴露された履歴を持つ試験体の接合面は、引張強度の平均値が輪荷重走行試験時から約62%低下していた。また、試験位置が輪荷重位置に近づくにつれ、引張強度は低下していることが確認された。強度低下の要因は、現時点で明確でないが、実橋の環境負荷は、更に厳しいことが想定されるため、今回の知見を踏まえて、性能評価試験における適切な環境負荷条件を検討する必要がある。

### 5. 2. ストップホールによる亀裂補修技術

ストップホールの適用範囲を明確にし、各種応力状態での補修効果を検証することを目的として、疲労試験によりストップホール部の疲労強度を確認した。その結果、

ストップホールの加工精度を確保し、かつ面内応力が支配的な荷重条件では、応力範囲を降伏応力以下に抑えられれば、繰り返し回数1,000万回まで達しても疲労亀裂を発生させないことができる可能性があることがわかった。

今後は、変形モードが異なる場合、例えばせん断変形が卓越するような荷重方法等の他条件下でも、本研究と同等の疲労強度が得られるかを確認する必要がある。また、実施工と同様な施工条件を模擬して加工した場合の影響についても検証する必要がある。

### 5. 3. 超音波探傷試験による非破壊調査技術

デッキ進展亀裂深さの概略の把握を目的として、臨界屈折角探傷法を応用し、臨界屈折角探触子を前後走査させた際のエコー高さの変化により、亀裂深さを検出する方法の適用性を検討した。その結果、疑似コーナーエコーの有無および前後走査によるエコーの変化に基づき、亀裂深さ7~8mm以上の亀裂か否かを識別できる可能性のあることを確認した（図-21の(a)）。なお、斜角70度の集束形斜角探触子による一般的な斜角探傷では深さ6mm程度が検出限界であること<sup>15</sup>から、この方法によりエコーが確認できる場合には、およそ6mm以上である（図-21の(b)）。臨界屈折角探傷法<sup>14</sup>に基づくと、深さ3~6mm程度の亀裂の有無を把握できる（図-21の(c)）。

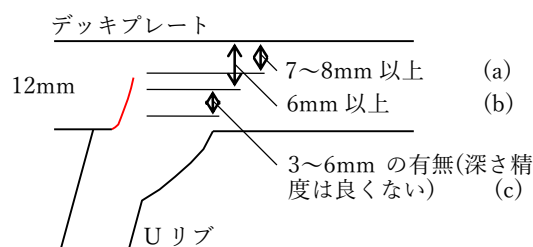


図-21 デッキプレート進展き裂のおおよその深さ値(参考)の把握の概念図

## 参考文献

- 1) 村越潤, 有馬敬育: 鋼床版における最近の疲労損傷事例と対策に関する検討ーデッキプレート内進展亀裂を対象としてー, 第5回道路橋床版に関するシンポジウム論文集, pp.13-24, 2006.7.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所, (独)土木研究所, (社)日本橋梁建設協会: 損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究, 国土技術政策総合研究所資料第-71-608号, 2010.9.
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説II鋼橋編, 2012.3.
- 4) (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) -, 共同研究報告書整理番号第 395 号, 2009.10.
- 5) 杉山裕樹, 上見範彦, 岩橋圭介, 米谷作記子, 國松俊郎: 疲労対策として実橋で試験施工したゴムラテックスモルタル舗装の損傷調査, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, pp.187-188, 2010.9.
  - 6) 平林泰明, 牛越裕幸, 木ノ本剛: 首都高速道路における鋼床版疲労損傷, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集 Vol.10, pp.39-53, 2007.8.
  - 7) 大垣賀津雄, 杉浦河, 大久保藤和, 若林伸介: ゴムラテックスモルタルの既設鋼床版への適用法に関する研究, 土木学会第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.53-1-53-6, 2007.11.
  - 8) 中村好伸, 神田信也, 岡部次美: 鋼床版有機繊維補強コンクリートの開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集, pp.919-920, 2012.9.
  - 9) 三木, 加納, 片桐, 菅沼: UFC パネル貼付による鋼床版の疲労補強, 鋼構造論文集 Vol5, No.58, pp.79-87, 2008.
  - 10) 村越潤, 木ノ本剛, 春日井俊博, 児玉孝喜, 辻井豪: 既設鋼床版の SFRC 舗装による補強工法と耐久性評価に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.416-428, 2013.
  - 11) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説、1993.4
  - 12) 添え板ボルト締めストップホール法による主桁横桁交差部の疲労き裂の補修、土木学会論文集 vol.67、No.3、pp.493-502、2011
  - 13) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編, 2017.11.
  - 14) 村越潤, 高橋実, 小池光裕, 木村友則: 臨界屈折角近傍に調整した超音波斜角探触子による鋼床版デッキ進展き裂の探傷法の検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.453-464, 2012.
  - 15) 村野益巳, 齋藤豪, 木ノ本剛: 鋼床版デッキプレート方向き裂の半自動超音波探傷方法, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008.9.

**RESEARCH FOR IMPROVING THE RELIABILITY  
OF FATIGUE COUNTERMEASURE TECHNOLOGY  
FOR STEEL HIGHWAY BRIDGES**

**Budget** : Grants for operating expenses,  
General account

**Research Period** : FY2015-2018

**Research Team** : Bridge and Structural  
Engineering Research Group

**Author** : MURAKOSHI Jun  
TAMAKOSHI Takashi  
JOSEN Yasushi  
TAKAHASHI Minoru  
AOKI Yasumoto  
SATO Ayumu  
MURAI Keita

**Abstract** : Recently, serious fatigue damages have been observed increasingly on steel highway bridges where severe traffic condition. On the other hand, performance requirements and performance evaluation method for the fatigue countermeasures technology has not been organized systematically, may not yet been standardized. In this research, we will study the performance requirements and performance evaluation methods for concrete pavement, crack repairing method and non-destructive test.

**Key words** : steel highway bridges, fatigue crack, steel decks, SFRC pavement, Stop hole, Ultrasonic Testing