

既設道路橋における鋼部材の疲労と技術開発

村越 潤・高橋 実・佐藤 歩

1. はじめに

我が国の道路橋については、その大半が高度経済成長期頃から建設されており、急速な高齢化が進む中、厳しい自然環境や交通条件によって様々な劣化損傷事例が顕在化しつつある。鋼製の道路橋（以下「鋼橋」という。）においても、主桁や主構部材の腐食破断や1mに及ぶき裂の発生など、深刻な劣化損傷や不具合の事例が報告され始めており、今後の増加が懸念される。本稿では、鋼橋の代表的な劣化形態であり、3大損傷とされている疲労による損傷の現状と課題を述べるとともに、これまでCAESARで実施してきた臨床研究等による研究開発の取組み事例を報告する。

2. 既設橋鋼部材の疲労の現状と課題

2.1 疲労の現状

道路橋の鋼部材では、溶接部や切欠き部などの応力集中が生じやすい部位に、大型車の通行等に伴って繰り返される応力変動により疲労き裂を生じることがある。特に、鋼部材の疲労耐久性には溶接継手の形式と溶接品質、応力の繰り返しの程度が大きく関わる。古い年代の基準で建設された鋼橋では疲労への設計・施工上の配慮が必ずしも十分でなかった場合があり、交通状況の厳しい路線において、様々な部位からのき裂が報告されている。ここでは、過去の技術支援の中から、他の橋でも類似の損傷が生じる可能性のある幾つかの事例を紹介するとともに課題を述べる。なお、これらの事例は、本誌「現場に学ぶメンテナンス」^{1)~3)}に紹介しており詳しくはそちらを参照頂きたい。

2.2 主桁・主構のき裂

写真-1は、鋼桁橋の主桁溶接部からき裂が発生し、ウェブに1m以上進展した状態で発見され通行止めに至った事例である。道路橋では、平成14年の道路橋示方書の改定から疲労設計が導入

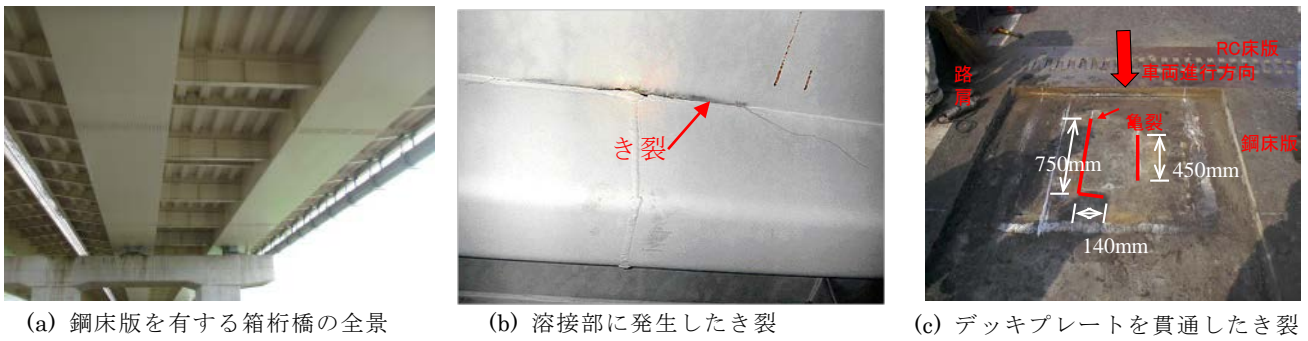


写真-1 鋼桁橋の主桁溶接部に発生したき裂

され、併せて具体の設計手法を示した「鋼道路橋の疲労設計指針」（(社)日本道路協会）が発刊された。これ以前に建設された道路橋では疲労耐久性に劣る施工品質や形式の溶接継手や構造を有する場合もあり、本事例も疲労上望ましくない溶接構造からき裂が発生した。本橋は山間部に位置し、き裂は橋下の地上や橋台部からの遠望目視では発見不可能な支間中央部で4本主桁の内側の1本に発生した。幸いに近接目視点検において見落とされずに発見・対処ができたため、落橋等の致命的な事態は防がれた。調査の結果、き裂面の一部に脆性破壊の特徴がみられる箇所があり、き裂全長のうち少なくともある範囲はき裂が一気に進展した可能性が高く、同一構造を有する鋼桁橋では注意を要する事例と考えられた。

2.3 鋼床版のき裂

鋼床版橋（写真-2(a)）は、死荷重軽減等の観点から都市内高架橋や長支間の橋の床構造に広く用いられている。昭和40年代半ば頃より、現在の一般的な構造であるU型の縦リブ（以下「Uリブ」という。）で補剛された構造が用いられるようになった。



(a) 鋼床版を有する箱桁橋の全景

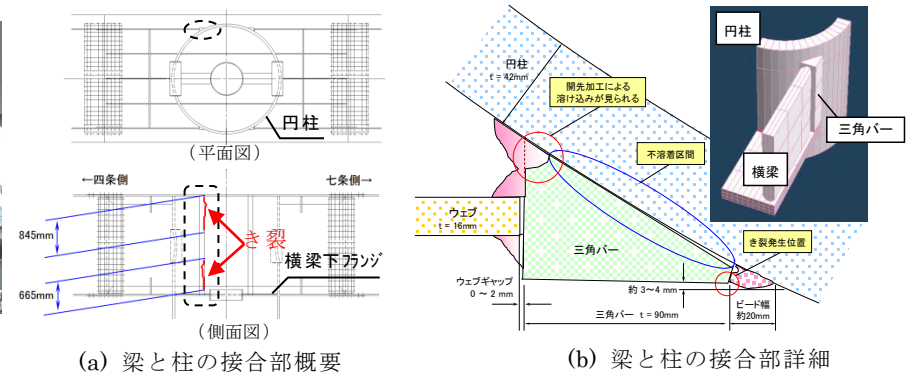
(b) 溶接部に発生したき裂

(c) デッキプレートを貫通したき裂

写真-2 鋼床版橋と溶接部に発生したき裂



写真-3 疲労損傷が確認された鋼製橋脚隅角部の全景



(a) 梁と柱の接合部概要

(b) 梁と柱の接合部詳細

図-1 き裂発生位置

近年、大型車交通量の多い路線において、輪荷重直下の様々な鋼床版溶接部からき裂が報告されている(写真-2)。このうち、写真-2(c)に示すUリブの溶接部からデッキプレートやUリブ内に進展し、供用性に影響を与えるおそれのあるき裂は、目視困難な部位に発生し、舗装の著しい損傷・変状の発生に至らないと一般には見つけられない。そのため、これまで国土技術政策総合研究所と連携して、損傷原因の解明、非破壊調査技術、耐久性を向上させるための構造、補修補強技術について検討が進められてきている。既設橋の対策については後述するが、新設の鋼床版では、平成24年の道路橋示方書の改定において、輪荷重位置のデッキ厚が従来の12mmから16mmに見直された。

2.4 鋼製橋脚隅角部のき裂

平成14年に都市内高速道路で鋼製橋脚の柱と梁の交差部(隅角部)で重大なき裂損傷が発見され、緊急点検が行われた結果、直轄では対象334基のうち125基にき裂が確認された。隅角部は、複雑に組合される鋼板の溶接線が輻輳し溶接施工時の姿勢にも制約が生じやすいなどから良好な溶接品質の確保が難しく、また、その構造の特徴から溶接部の応力状態が複雑となるだけでなく、位

置によっては応力集中を生じやすいなど疲労環境は一般に厳しい。

写真-3と図-1の事例では、横梁と柱の接合部の複数箇所縦方向に最大845mmの重大なき裂が発見された。発見直後は溶接構造の詳細や発見された以外なき裂の状態が不明であったため、梁部崩壊の危険性も考慮し仮支柱を設置して安全を確保する一方、他橋脚も含め緊急調査が行われた。

本事例の構造は特殊であるが、既設橋では現在の知見では疲労耐久性に劣る可能性の高いものを含む多様な継手構造が用いられていること、溶接内部の未溶着や欠陥に起因してき裂が発生している事例が多いことが明らかにされており、これまで個別の橋脚毎に詳細調査を実施し対策が講じられてきている。

2.5 疲労に対する主な課題

点検時に鋼部材の塗膜割れやき裂が発見された場合、詳細調査により損傷の全容や原因を把握し、橋の性能に及ぼす影響を考慮して対策方法を検討していくこととなる。ただし、鋼部材自体は塗膜で覆われているため、点検段階では、実際にき裂を見つけることや、き裂と特定することが外観目視では難しい場合も多い。また、前述の事例のよ

うに、溶接内部から発生・進展するき裂に至っては非破壊調査技術も必要とされる場合もある。さらに、橋毎に構造条件、供用条件等の条件が同じでない中、溶接部や切欠き部などの応力集中部に生じるき裂の進展状態を適切に評価することは難しい場合が多い。

一方で、外観では把握できない塗膜下や内部のき裂の状態の調査方法、実橋溶接部の疲労耐久性の評価方法、き裂の生じた橋梁の対策方法に関しては、信頼できる技術が必ずしも確立しているわけではない。このため、CAESARでは実橋等を活用した臨床研究も行いながら、橋の状態把握、診断、補修補強技術の開発に取り組んでいる。

3. 土木研究所CAESARの取組み

以下に、鋼部材の疲労損傷に対するCAESARの取組み事例を幾つか紹介する。

3.1 き裂の状態を把握するための技術

(1) 診断の質の向上のための非破壊調査技術

前章の事例のとおり、目視では直接確認が難しい構造部位に、橋の安全性や供用性に重大な影響を与えるようなき裂が発生している。診断のためには、これらの部位の状態を把握する、あるいは予防保全のための劣化の進行度に係わる情報を取得するための点検・調査技術を充実させていく必要がある。前述のUリブを有する鋼床版に発生しているデッキプレートに進展するき裂(写真-2(c))に関しては、一般に用いられる超音波探傷法ではセンサから得られるき裂の情報が限定され、かつなど精度・信頼性に課題があり、様々な探傷技術の調査研究が行われてきている。例えば、CAESARでは塗膜上から浅いき裂を誤検出することなく検出でき、かつ塗膜上からの探傷結果の信頼性を向上させることを目的として、屈折角を90度に近づけた探触子を使用した超音波自動探傷法⁴⁾を開発し実用化を図っている(写真-4)。

(2) き裂検出の合理化のための非破壊調査技術

疲労き裂の点検では、き裂及びき裂の疑いのある塗膜割れ、き裂からのさび汁等を把握し、その後、磁粉探傷法(写真-5)と呼ばれる非破壊試験法により、き裂の有無、長さを特定するのが一般的な方法であるが、損傷状況によっては確認すべき部位が膨大な数量に及ぶこともある。き裂の発生部位、状態、影響度等を踏まえつつ段階的に調

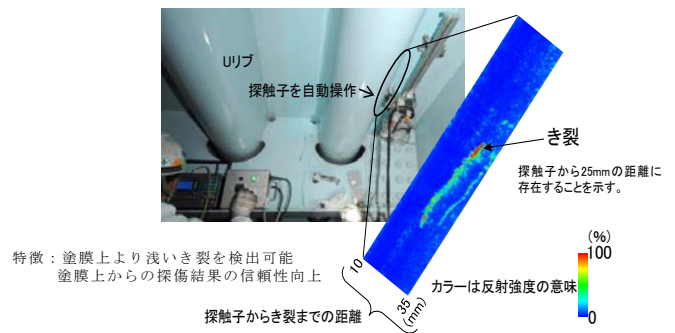


写真-4 鋼床版の目視困難なき裂への超音波探傷法の適用

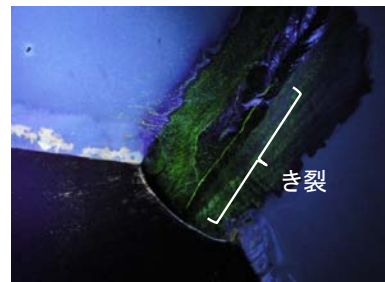


写真-5 磁粉探傷法によるスカラップ溶接部のき裂の検出

査を進めることが合理的と考えられるが、塗膜上からき裂の有無(塗膜割れとき裂の相違)を確実に検出できれば点検の効率化につながる可能性がある。例えば、塗膜上からき裂の有無を検出する方法(渦流探傷法)や、遠望からの非接触による点検技術として橋梁の各部に存在する応力集中部もしくはき裂を検出する方法(自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法⁵⁾等)の実務への適用の検討も進められている。

こうした非破壊調査技術については他の鋼構造分野も含め日々進展してきており、診断や維持管理計画に有効活用していくことが必要であるが、一方で実構造物の劣化や損傷の発生・進展性状は様々であり、精度・信頼性や、調査結果と対策との関連付けに係る知見に乏しい状況にある。実橋のき裂の進展性状を把握するとともに、得られた情報を対策の判断に活用していくために、調査時にどのような情報をどの程度の精度・信頼性で取得する必要があるのか、また、そのためにはどのような仕様の調査機器が必要なのか等、具備すべき性能や評価のための知見を蓄積し、調査技術の適用性の評価法や適用方法の検討を行っていく必要がある。

3.2 耐久性を評価するための技術

写真-1に示したとおり、鋼桁橋の主桁の溶接部に1mを超えるき裂が報告されている。このよう

にき裂が長く進展した事例は本事例以外に報告されていないが、微少なき裂は確認されている。き裂の発生時期や進展性状の予測は難しいため、定期点検で初期のき裂を確実に発見することが重要となる。一方で、交通条件や建設時の適用基準等による構造条件の違いなどから、類似の疲労損傷が発生する可能性が相対的に高い橋に共通する特徴を捉えておくことは、管理リスクを評価し、点検の信頼性を確保する上で有用な情報となるものと考えられる。特に古い年代の鋼材は材料特性の点で現在の鋼材と比較して靱性が低いものもあり、脆性破壊のリスクは相対的に高い。このような背景の下、疲労設計の導入前の古い年代の既設鋼橋を対象に、材料・構造面での、き裂の発生・進展のしやすさについて検討を行っている。

例えば、既設鋼橋から切り出した鋼材試験片を用いて、材料特性の実態調査（破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験）を行い、古い年代では材料特性や、製造技術の変遷による材料特性の変化を確認している⁶⁾⁷⁾ (図-2)。また、これらの調査を基に、すでに発生したき裂からの脆性破壊の起こりやすさを評価するために、破壊力学的手法を用いて脆性破壊に移行する可能性のあるき裂長さ（限界き裂長）について検討を行っている⁷⁾ (図-3)。

また、年代や構造毎のき裂発生のおこりやすさを評価するために、既設橋の応力計測データや、建設当時の設計基準や設計法を考慮した再現設計を基に、蓄積されるダメージの分析を行っている。図-4に主桁構成と幅員構成を同一条件として、支間中央位置（連続桁は中央径間の同位置）における疲労損傷度の比率を示す。溶接接合が道路橋に普及し始めたのは昭和30年代以降であり、損傷事例の多い昭和39年の基準（S39道示）による支間長40mの単純桁を基本ケースとして、適用基準、支間長、構造形式等の設計・構造条件の異なるケースを選定した。適用基準（同一支間長の場合）に着目すると、鋼種、床版、活荷重等の基準の変遷により、S39道示の疲労損傷度は相対的に大きい。また、S39道示に着目すると、支間長、幅員が小さくなるほど許容応力度に占める活荷重応力の比率が増加するため損傷度が大きくなる傾向が伺える。加えて、連続桁の場合には、荷重応力の比率が単純桁と比較して大きく、かつ負曲げによる応力振幅も応力範囲に考慮されるため、損傷度

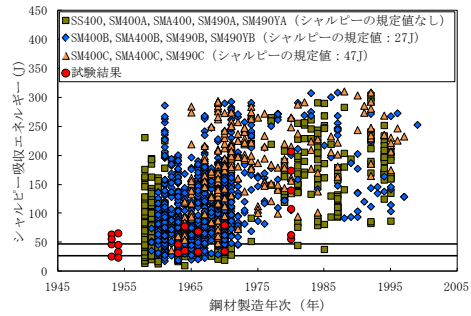


図-2 撤去された古い年代の鋼橋から切り出した鋼材による靱性値の調査結果⁶⁾⁷⁾

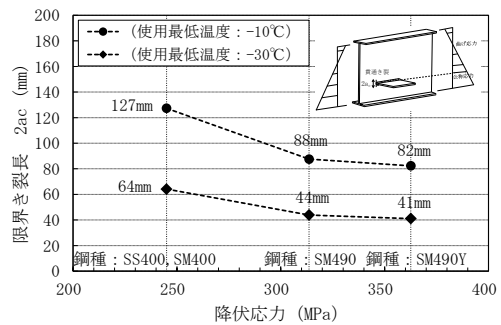


図-3 鋼桁の継手を対象とした限界き裂長の試算例⁷⁾

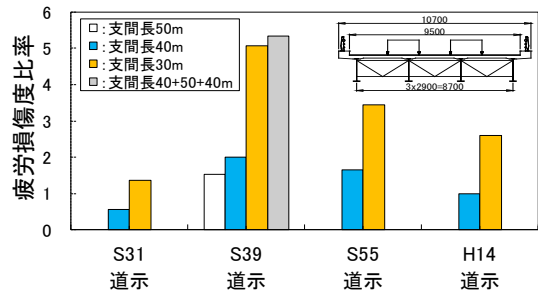


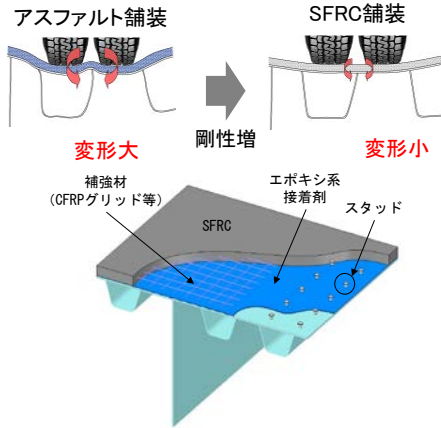
図-4 鋼桁橋の年代別の疲労耐久性の相違 (H14道示(支間長40m)を1とした場合の疲労損傷度比率)

は大きくなる傾向にある。疲労き裂の発生の不確実性を踏まえると、類似の構造条件、交通条件の橋梁での同種の主桁の疲労き裂の発生に注視するとともに、点検時に小さいき裂の段階で確実に見つけていくことが重要と考えられる。

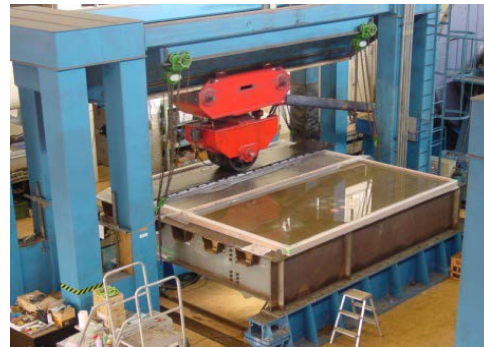
3.3 長持ちさせるための補修補強技術

疲労対策として、当て板等による断面補強が一般に採用されるが、既設部材の不陸や狭隘部での接合、接合面の処理等の新設とは異なる状況に対して、必ずしも設計・施工法が確立されているわけではない。き裂の発生原因やその状況に応じて、合理的で信頼性の高い対策が選定されるように、損傷要因を踏まえた対策技術の充実を図るとともに、新技術を対象とした対策効果の評価法（試験方法、補強構造のモデル化、応力等の解析・評価手法等）について検討していく必要がある。

写真-2に示した鋼床版の疲労対策として、既設



(a) 補強構造の概要



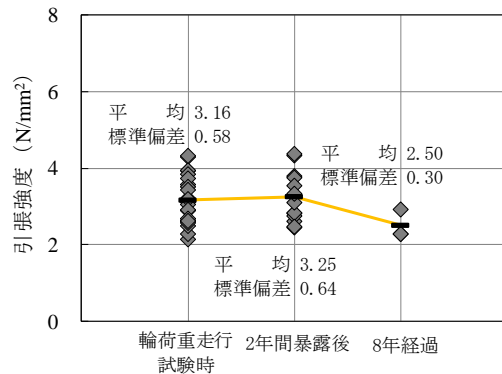
(b) 水張り状況下での輪荷重走行による検証

図-5 SFRC舗装の構造概要と耐久性の検証試験例



接合面の腐食状況

図-6 SFRC舗装の暴露試験体コア抜き試験の状況と強度特性の経年変化



のアスファルト舗装を剛性の高い鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 舗装に置き換え、鋼床版と一体化を図り、溶接部の応力を軽減させる対策が挙げられるが (図-5(a))、これまで同技術の耐久性について検証試験 (図-5(b))⁸⁾を行うとともに、材料選定、構造細目、施工管理方法など、設計・施工上の配慮事項をマニュアルの形にとりまとめている⁹⁾。

本工法は、部材の接合に高耐久性のエポキシ系接着剤を使用している点や、施工時にフレッシュなコンクリートと接着剤を硬化段階で一体化する点では極めて特殊な接合方法を採用した対策技術である。現在、既施工のSFRC舗装の対策効果 (接合部や舗装の耐久性、き裂の抑制効果等) の継続的な調査や他の新技術の性能評価も視野に耐久性の試験方法の検討を進めている。また、その検討の一環として、例えば、施工事例の現地調査や、過年度に輪荷重走行試験を実施した実大SFRC舗装鋼床版試験体を利用して接着層の付着強度の経年的な劣化状況の調査等を実施している (図-6)。

3.4 疲労耐久性の信頼性向上のための設計・施工技術

今後建設される橋に対しては、疲労の生じにくい構造とするとともに、き裂が発生したとしても点検等の維持管理負担のかからない設計・施工技術が求められる。前述の鋼製橋脚隅角部や鋼床版の例のように構造部位によっては、溶接品質の確保が難しい場合や、供用後の点検・調査が困難な場合も見られる。そのような構造の改善や、部材の重要度によっては、万一き裂が発生したとしても致命的な状態に至らないような構造設計上の配慮を施す等の方策も検討していく必要があると考えられる。また、疲労照査法に関しても課題が残されている。現状の疲労設計では、構造計算で挙動を評価できる構造部位に対しては疲労照査が行われている一方、既設橋の損傷部位の多くは構造計算での挙動の評価が難しい部位である。これまで経験・実績や実験等により、その都度疲労に配慮した構造に見直されてきているものの定量的な照査法が確立していない状況である。このため、疲労耐久性の信頼性向上の観点から、疲労リスク

のある構造部位を減らすため、より高度な構造解析による応答値算出や溶接品質に影響を受ける疲労強度の信頼性を考慮した疲労設計法の検討を進めていく予定である。

4. おわりに

鋼橋の維持管理に係る課題、研究開発ニーズや、CAESARにおける技術開発の取組みの一端を述べた。臨床研究を含む技術開発の成果や、現場の技術支援を通じて得られた損傷事例や対策に関わる知見を踏まえて、調査、診断、補修補強に至るまでの一連の技術の体系化を図ることが重要である。また、疲労損傷の懸念される構造、損傷時に点検が難しい構造、溶接品質等の課題については、新たに建設する橋の設計・施工にフィードバックし、維持管理が容易かつ確実にできる橋の実現に向けた技術開発も求められている。取り組むべき課題は多く残されており、産学官が連携し長寿命化のための技術の研究開発を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 玉越他：現場に学ぶメンテナンス（鋼部材の疲労き裂について（その1）-道路橋の主桁-）、土木技術資料、第51巻、第10号、pp.39～40、2009
- 2) 玉越他：現場に学ぶメンテナンス（鋼部材の疲労き裂について（その2）-鋼製橋脚隅角部-）、土木技術資料、第51巻、第12号、pp.41～42、2009
- 3) 玉越他：現場に学ぶメンテナンス（鋼部材の疲労き裂について（その3）-鋼床版-）、土木技術資料、第53巻、第8号、pp.54～55、2011
- 4) 村越他：鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)、土木研究所資料No.4138、2009
- 5) 阪上他：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによる鋼床版のデッキ進展き裂検出～現場計測による適用可能性の実証～、土木学会第67回年次学術講演会、I-287、2012
- 6) 一宮他：既設構造物の鋼材の年代的な特徴とその溶接性について（その2）-鋼材のシャルピー吸収エネルギーの年代変化-、土木学会第58回年次学術講演会講演概要集、I-485、2003
- 7) 村越潤、澤田守：既設鋼道路橋から切り出した鋼材片の破壊靱性値と限界き裂長に関する検討、鋼構造論文集、Vol.19、第73号、pp.53～64、2012.3
- 8) 村越他：既設鋼床版のSFRC舗装による補強工法の構造と耐久性評価に関する実験的検討、土木学会論文集A1、Vol.69、No.3、pp.416～428、2013
- 9) (独)土木研究所他：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)-、共同研究報告書、第395号、2009

村越 潤



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ上席研究員、現 公立大学法人首都大学東京 都市環境学部都市基盤環境コース、教授、博士(工学)
Dr. Jun MURAKOSHI

高橋 実



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Minoru TAKAHASHI

佐藤 歩



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
Ayumu SATO