

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：鋼床版の疲労損傷に対するコンクリート系舗装による補強技術の性能評価に関する研究
- (2) 研 究 期 間：平成 27～28 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：村越 潤（首都大学東京大学院・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：村越 潤（首都大学東京大学院・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：玉越 隆史（(国研)土木研究所・上席研究員）  
佐藤 歩（(国研)土木研究所・研究員）  
高橋 実（(国研)土木研究所・主任研究員）  
森 猛（法政大学・教授）  
小野 秀一（(一社)施工技術総合研究所・次長）
- (6) 補助金交付総額：32,000,000 円

(7) 技術研究開発の目的

鋼床版橋の溶接各部に報告されている疲労き裂に対して、既存のアスファルト舗装を、剛性舗装である鋼繊維補強コンクリート（SFRC）舗装に置き換える対策工法が提案され、既に実用化が図られている。この工法では舗装厚の範囲内という制約がある中で、舗装材料や接合方法に関しては種々の提案がなされてきており、維持管理性に配慮した、より合理的かつ耐久性の高い材料・構造の適用にも柔軟に対応していくことが重要である。一方では、舗装のひび割れ発生後の応力低減効果や残存き裂の進展抑制効果の持続性、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、耐久性に係る懸念が課題として挙げられるが、個別の補強技術に対する、現場における様々な条件を想定した、同一尺度での性能評価の方法論は確立しているわけではない。

本研究では、このように現場を抱える管理者のニーズと、開発者のシーズに対して、的確に対応していくために、新しい材料・構造を適用した補強技術も視野に入れて、同補強技術の耐久性に関する性能評価方法を検討する。具体的には、鋼床版の疲労損傷に対するコンクリート舗装による補強技術を対象として、供用中の舗装のひび割れ発生や、内在き裂の残存を前提とした上で、溶接各部の応力低減効果の持続性、舗装体そのものや舗装体の鋼床版との接合部等の耐久性、残存き裂の進展抑制効果、を確保するための同補強技術の性能評価法の開発を行う。

これにより同補強技術の検証項目・検証方法を提示し、適切な疲労対策技術の現場適用への貢献を目指す。

(8) 技術研究開発の内容と成果

本研究では、コンクリート系舗装による鋼床版の補強技術の性能評価法について検討を行うものであり、開発目標は以下の通りである（図-1）。

開発目標は以下の通りである。

- ①材料仕様・構造細目の検証試験法の提案
- ②残存き裂の進展性状の把握
- ③補強効果検証のための残存き裂の進展性状の実務的確認手法（超音波探傷法）の提案

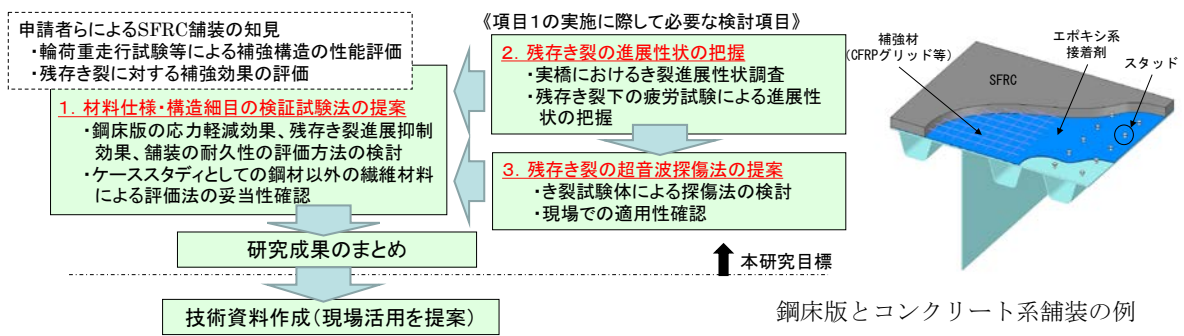


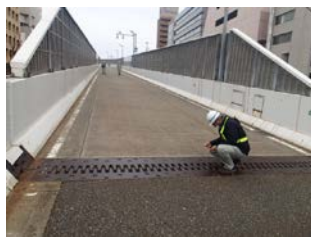
図-1 研究開発の概要

以下、上記①～③の開発目標毎に研究の内容と成果の概要を述べる。

1) 材料仕様・構造細目の検証試験法の提案

(i) SFRC 舗装の劣化・損傷状況等の現地調査

現在、提案されている各種のコンクリート系舗装による対策技術に関して、特徴、性能確認試験の方法、適用実績、技術的課題等を整理した。また、供用後、既に約10年が経過している SFRC 舗装の施工事例の現地外観目視調査（国交省、自治体等管理の計8橋）を行い（図-2）、ひび割れ等の発生状況、補強効果の劣化因子を把握するとともに、想定される劣化の進行形態を整理した。また、SFRC 舗装の施工状況の調査を行い、施工時の品質管理に関わる課題を把握した。



(a) 舗装ひび割れの現地調査



(b) 表面コンクリートの剥離事例

図-2 SFRC 舗装の現地調査

(ii) 環境負荷下の FRC 舗装接合部の強度特性の実験的検討

舗装材と鋼床版デッキ接合部を模擬した小型試験体を用いて、環境作用に対する接着剤接合部の耐久性を確認するための試験法の検討を行った。具体的には、材料仕様（接着材

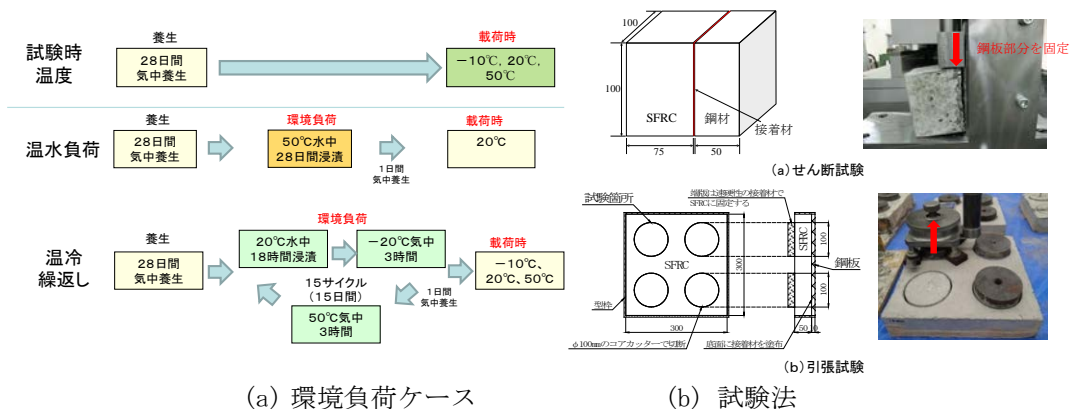
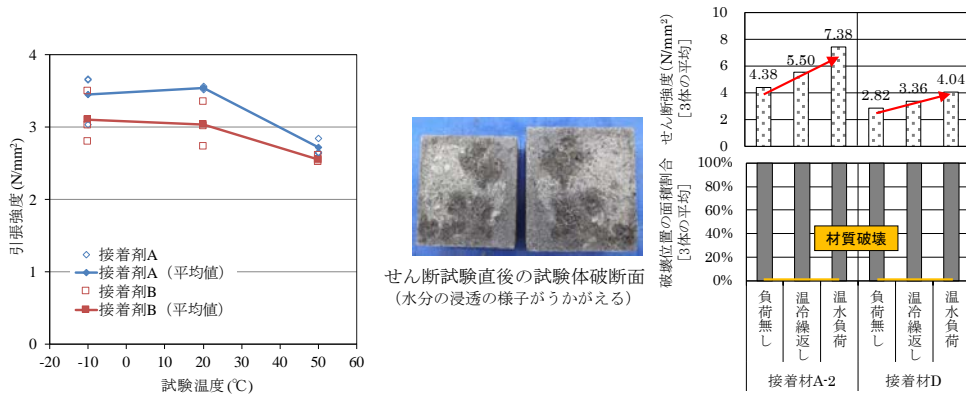
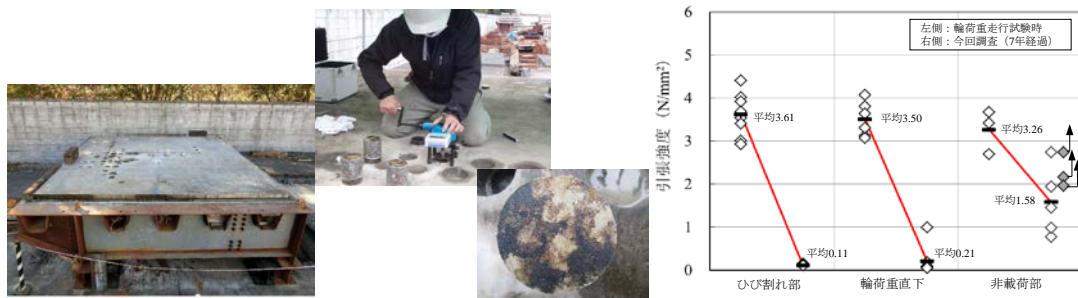


図-3 接合部を模擬した小型試験体の環境負荷下の強度特性の検証試験法



(a) 引張強度への温度影響 (50°C・28日間温水負荷後) (b) 環境負荷別のせん断強度特性

図-4 環境負荷下の2種類の接着剤接合部の強度特性の比較



(a) 試験体全景

(b) コア抜き試験の状況と強度特性の経年変化

図-5 屋外暴露した実大試験体の舗装接合部の強度特性の試験

等、舗装)とその組合せをパラメータとして、温水浸漬(1~3ヶ月間の50°C温水負荷)による環境負荷と、荷重作用時の温度変化の影響を考慮したせん断試験及び引張試験(図-3, 4)を行い、異なる材料仕様に対して、環境負荷後の強度特性の変化を把握するとともに、接合部の性能の違いを評価する観点から試験条件・方法の妥当性について評価を行った。

(iii) FRC 接合部の強度特性の経年変化の実験的検討

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3体(試験終了後に7~8年間屋外等に暴露)を利用して、コア抜き引張試験を実施し、接着層の付着強度の経年的な劣化状況を調査した(図-5)。その結果、試験直後からの強度低下や破壊面の状況を確認するとともに、接着剤の種類や輪荷重載荷・非載荷部位による強度低下の程度の相違を明らかにした。

また、2種類の接着剤について、暴露前後の強度と接合部の破壊性状(デッキ面での界面破壊割合)の変化傾向は、1)(ii)に示した、今回の試験体と同じ仕様で制作した小型試験体を用いた温水浸漬(50°C、1ヶ月間)による環境負荷前後のせん断強度試験結果の性状変化の傾向と、引張強度とせん断強度と異なるものの、概ね整合することを確認した(図-6)。以上より、小型試験体による環境負荷試験においても、FRC 接合部の耐久性能を評価できる可能性があることを確認した。一方で、同一の環境負荷前後の引張強度試験結果では、引張強度の低下は確認できていない。暴露前後の強度低下の要因は、必ずしも明確でないが、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、

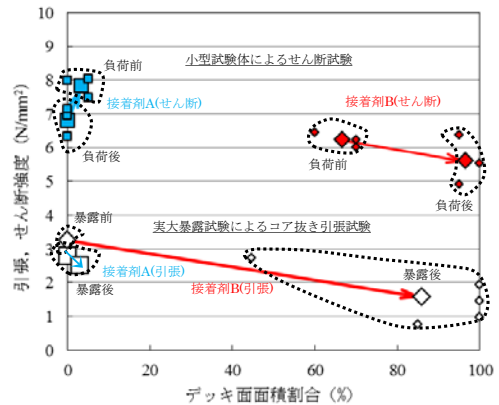
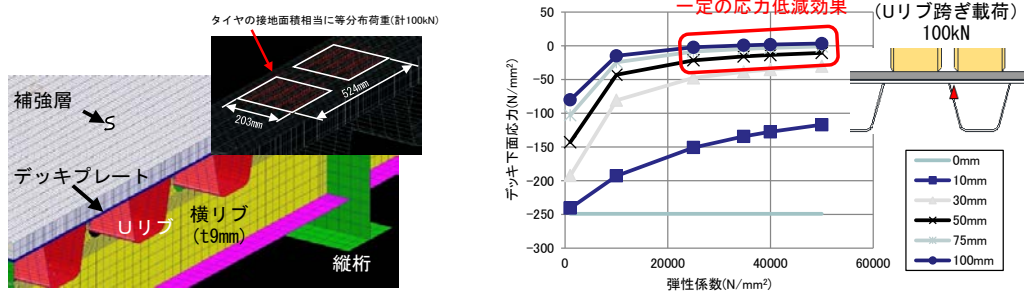


図-6 暴露試験体と小型試験体の強度特性の関係



(a) 解析モデルと荷条件 (b) 解析結果例  
 図-7 補強層の厚さと弾性係数が鋼床版デッキプレート下面の応力に与える影響

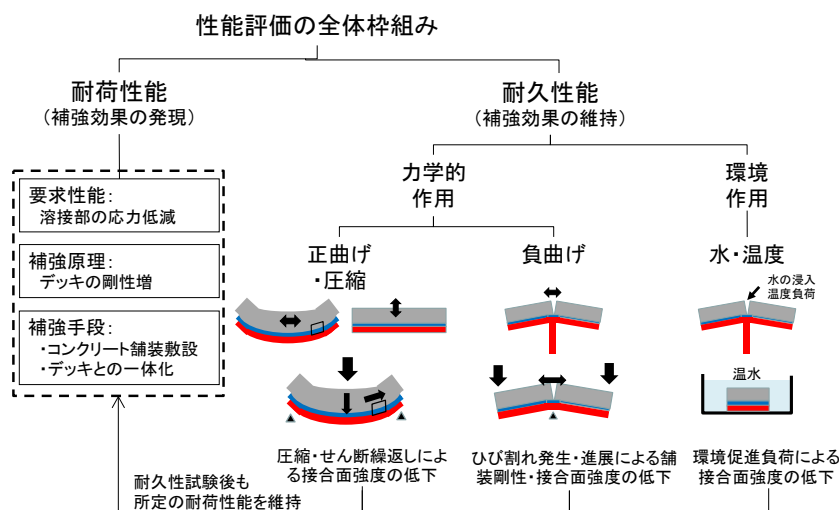


図-8 FRC 舗装の劣化因子を踏まえた性能検証メニューのイメージ

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。

#### (iv) FRC 舗装による鋼床版の補強効果に関する解析的検討

鋼床版構造を対象として、FRC 舗装の材料物性・構造仕様（舗装厚、剛性）をパラメータとした FEM 解析（図-7）を行い、これらパラメータが鋼床版の補強効果（ひずみ性状等）に及ぼす影響を把握し、50mm 程度以上の FRC 舗装では概ね同程度の応力軽減効果が得られること等を確認した。

以上の現地調査や実験的・解析的検討の結果を踏まえて、補強効果の劣化因子、想定劣化パターンを整理するとともに、性能検証メニュー（応力軽減効果、残存き裂の進展抑制効果、及び補強構造の耐久性を確認するための、劣化因子を考慮した耐久性の検証試験メニュー）を提示した（図-8）。

### 2) 残存き裂の進展性状の把握

#### (i) FRC 舗装による残存き裂の進展性状に関する実験的・解析的検討

鋼床版のき裂発生部位の構造ディテールを模擬した 5 試験体を製作し、疲労試験を行い、き裂（深さ 5.9mm～12mm の 22 パターンの半楕円き裂で、このうち 1 箇所はデッキを貫通したき裂）の進展性状に関する基礎データを取得した。

また、同き裂が内在する試験体に対して、SFRC 舗装を敷設した上で、疲労試験（シングルタイヤ 50kN、1000 万回荷重）を行い、き裂の進展抑制効果を検討した（図-9）。試験

後の破面観察より、き裂の進展した様子は観察されず、SFRC 舗装施工により全てのき裂部において残存き裂が停留したことを確認した。

さらに、き裂発生時の溶接部位を含む構造ディテールを溶接形状まで考慮した FEM 解析を行い、補強前後の応力拡大係数（き裂進展の指標）に及ぼす影響を把握した。具体的には、深さ 6～8mm 程度の残存き裂に対して、舗装厚 75mm の場合には、舗装なしの 10%以下、またアスファルト舗装と比べても 30%以下と小さくなることを確認した。



図-9 SFRC 舗装を敷設した鋼床板試験体の疲労試験

(ii) 鋼床版橋におけるデッキ進展き裂の超音波探傷法による調査

デッキ進展き裂が報告されている鋼床版橋において、き裂の発生傾向の実態を把握するため、過年度に実施された超音波自動探傷法 (AUT) による調査結果をもとに、き裂の発生部位、長さ等の傾向について分析を行った。その結果、デッキ進展き裂の発生部位や貫通き裂の発生形態について、既往調査の知見や実験・解析によるき裂起点の応力性状の傾向と概ね整合することを確認した。

3) 残存き裂の実務的確認手法(超音波探傷法)の提案

デッキ進展き裂の現地コア抜き調査及び疲労試験の結果を踏まえ、超音波探傷法によるき裂深さ計測に係る技術的課題、現場ニーズ及び期待される精度・信頼性を整理した。

鋼床版溶接部を模擬し、き裂を導入した小型試験片を用いて、一探触子パルス反射法による実用的な深さ推定方法（既開発の AUT を応用）について検討を行った（図-10）。具体的には、き裂が深くなった場合の超音波の伝搬経路の特徴を踏まえて、探触子の前後走査によるエコー高さの変化及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（ピーク数）により、補強方法の選定に配慮が必要となる、深いき裂をある程度特定できることを確認した。

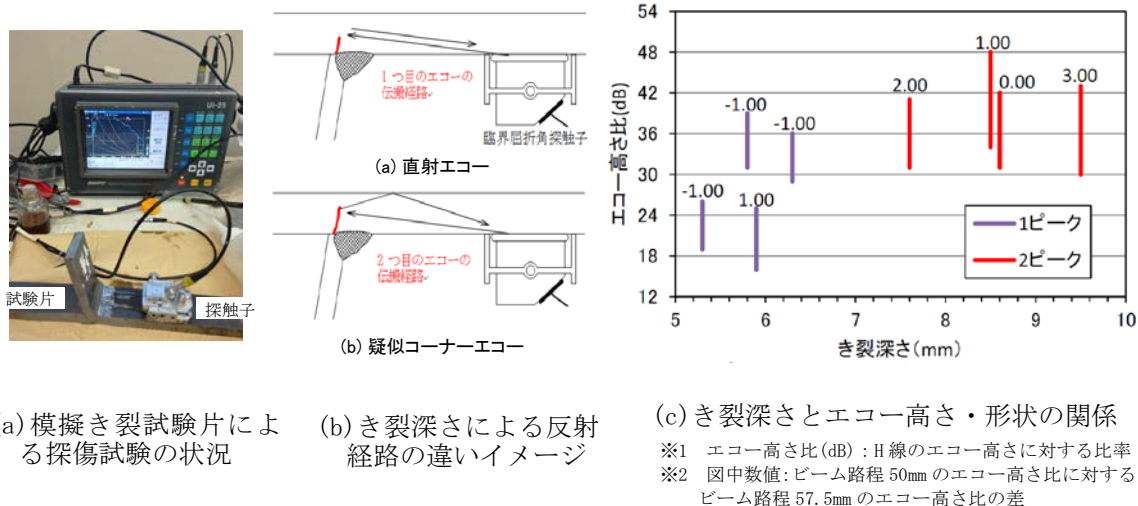


図-10 超音波探傷法によるき裂からのエコーとき裂深さの関係

## (9) 成果の刊行に関する一覧表

| 刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)  | 刊行年月日   | 刊行・発行元       | 原著者                                       |
|--|---------|--------------|---|
| 土木技術資料、既設道路橋における鋼部材の疲労と技術開発  | H28. 6  | 土木学会         | 村越潤, 高橋実, 佐藤歩                             |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、コンクリート系舗装による鋼床版の応力低減効果に関する基礎的検討               | H28. 9  | 土木学会         | 小野秀一, 村越潤, 高橋実, 佐藤歩, 青木康素, 森猛             |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、鋼床版デッキ進展き裂・疲労耐久性に対する SFRC 舗装厚の影響に関する解析的検討     | H28. 9  | 土木学会         | 金子想, 森猛, 村越潤, 高橋実, 佐藤歩, 青木康素, 佐々木寛幸, 小野秀一 |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、鋼床版デッキプレート進展き裂の深さ検出に関する超音波探傷法の適用性に関する検討       | H28. 9  | 土木学会         | 高橋実, 小池光裕, 村越潤, 森猛, 小野秀一                  |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、鋼床版実大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        | H28. 9  | 土木学会         | 佐藤歩, 佐々木寛幸, 村越潤, 小野秀一, 森猛                 |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、鋼床版 SFRC 舗装の現地調査報告                            | H28. 9  | 土木学会         | 佐々木寛幸, 佐藤歩, 村越潤, 小野秀一, 森猛                 |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、鋼床版デッキ貫通型き裂の発生・進展に関する検討                       | H28. 9  | 土木学会         | 平山繁幸, 村野益巳, 蛭川満, 谷村豊, 村越潤, 高橋実            |
| 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集、鋼床版デッキ貫通型き裂検知手法の適用性に関する検討                     | H28. 9  | 土木学会         | 村野益巳, 平山繁幸, 谷村豊, 塚本裕子, 村越潤, 高橋実, 小池光裕     |
| 第 9 回道路橋床版シンポジウム、鋼床版実大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に関する調査        | H28. 11 | 土木学会         | 佐藤歩, 佐々木寛幸, 村越潤, 小野秀一, 森猛                 |
| 第 9 回道路橋床版シンポジウム<br>小型試験体 SFRC と鋼板との接着材接合面の強度及び耐久性に関する実験的検討        | H28. 11 | 土木学会         | 佐々木寛幸, 佐藤歩, 村越潤, 小野秀一, 森猛                 |
| 平成 28 年度 国土交通省国土技術研究会論文集、鋼繊維補強コンクリート舗装を用いた鋼床版疲労対策技術の実態調査           | H28. 11 | 国土交通省        | 佐藤歩, 玉越隆史, 村越潤                            |
| 土木学会関東支部第 44 回技術研究発表会概要集、屋外暴露した SFRC 舗装敷設鋼床版試験体における接合面の引張強度の経年劣化調査 | H29. 3  | 土木学会<br>関東支部 | 幅三四郎, 村越潤, 小野秀一, 佐藤歩, 森猛, 佐々木寛幸           |
| 土木学会関東支部第 44 回技術研究発表会概要集、超音波探傷法による鋼床版デッキプレート進展き裂の深さ推定に関する検討        | H29. 3  | 土木学会<br>関東支部 | 御代川裕紀, 村越潤, 玉越隆史, 高橋実, 小池光裕               |

|   |         |                                      |  |
|---|---------|--------------------------------------|--|
| 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集、屋外暴露した SFRC 舗装敷設鋼床板試験体における接合部の引張強度の経年劣化調査（投稿中）   | H29. 9  | 土木学会                                 | 幅三四郎, 村越潤, 小野秀一, 佐藤歩, 森猛                             |
| 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集、コンクリート系舗装による鋼床板の応力低減効果に関する基本的検討（続報）（投稿中）   | H29. 9  | 土木学会                                 | 小野秀一, サンチエス・セサル, 村越潤, 高橋実, 佐藤歩, 森猛                   |
| 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集、超音波探傷法による鋼床板デッキプレート進展き裂の深さ推定に関する一検討（投稿中）   | H29. 9  | 土木学会                                 | 高橋実, 村越潤, 御代川裕紀, 小池光裕, 森猛, 小野秀一                      |
| 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集、開口合成フェーズドアレイ探傷による鋼床板デッキ貫通型き裂検知精度の検証（投稿中）   | H29. 9  | 土木学会                                 | 村野益巳, 唐沢博一, 高橋勝朗, 村越潤, 森猛                            |
| 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集、デッキ進展き裂を有する鋼床板の疲労耐久性に対する SFRC 舗装の効果（投稿中）   | H29. 9  | 土木学会                                 | 森猛, 村越潤, 佐藤歩, 小野秀一                                   |
| 9th International Symposium on Steel Structures, Tensile strength tests on adhesively bonded joint area of orthotropic steel deck with SFRC overlay exposed in outdoor environment（投稿中） | H29. 11 | Korean Society of Steel Construction | Haba, S., Murakoshi, J., Ono, S., Sato, A., Mori, T. |
| 第 25 回鋼構造年次論文報告集、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の分析（投稿中）   | H29. 11 | 日本鋼構造協会                              | 幅三四郎, 村越潤, 小野秀一, 佐藤歩                                 |

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

| 知的財産権の内容 | 知的財産権の種類・番号 | 出願年月日 | 取得年月日 | 権利者 |
|----------|-------------|-------|-------|-----|
| 該当なし     |             |       |       |     |

(11) 成果の実用化<sup>\*</sup>の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

成果については、研修、技術相談等の場を通じて技術支援に活用している。また、研究成果を実務に反映させるために、コンクリート系舗装の性能評価に関わる知見、施工上の留意点等を、論文、技術資料としてとりまとめ、実務への反映を提案していく予定である。

(12) その他  
特になし。