

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02259

研究課題名(和文) 実物モデルを用いた性能評価に基づく高耐久コンクリート床版の開発と実装

研究課題名(英文) Development and Implementation of highly durable concrete bridge deck based on performance evaluation using real-scale model

研究代表者

岩城 一郎 (IWAKI, Ichiro)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：20282113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：凍結防止剤散布下におけるRC床版の実挙動を解明するため、材料・配合・施工法の異なる6種類の実物大鋼主桁上RC床版モデルを作製し、その施工性を検証すると共に、現場計測により、コンクリートの膨張収縮挙動、表層の緻密性等を評価した。次いで、膨張収縮挙動について、マルチスケール統合解析システムを適用し、現場計測データとの照合によりモデルの検証を試みた。その後床版からコアを採取し、塩分浸透性、スケーリング抵抗性に関する耐久性評価を行った。以上の結果より、6種類のうちフライアッシュを用いた床版において、極めて優れた性能を有することが明らかとなり、東北地方の復興道路等への適用を提案し、実装へとつなげた。

研究成果の概要(英文)：In order to solve the behaviors on RC road bridge deck under deicing salt, 6 types of real scale RC deck models between two steel girders, which varied materials, mix proportions and construction methods, were constructed in a college campus. First of all, the workability of each concrete in situ was investigated. Then, the expansion/shrinkage behavior, and the properties of cover concrete during a year had been monitored. Additionally, using multi-scale modelling (DuCOM-COM3), the expansion/shrinkage behavior of RC decks was simulated. Further, sampling cores from these RC deck models after a year, the durability with chloride penetration and salt scaling was investigated. As a result, it was revealed that the RC deck model using fly ash among them showed extremely superior performance. Consequently, this type of RC deck was applied to reconstruction road in Tohoku area.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：RC床版 凍結防止剤 膨張収縮挙動 表層緻密性 フライアッシュ 塩分浸透性 凍結融解抵抗性 復興道路

1. 研究開始当初の背景

近年、高度経済成長期に集中整備された社会インフラの一斉老朽化が社会問題となっている。このうち、東北地方のような積雪寒冷地における国や高速道路会社で管理する道路橋コンクリート床版では、冬期に凍結防止剤(NaCl)が大量に散布されるため早期劣化が顕在化しつつあり、今後その維持管理に膨大な費用を投じることになる。凍結防止剤としてNaClが散布され、それが床版内部に浸透すると、塩害による鋼材腐食、凍害によるスケーリング、アルカリシリカ反応(ASR)が促進され、さらに交通作用の繰返しによる疲労との複合劣化となることが懸念され、その結果として、床版内に水平ひび割れや砂利化を誘発し(図-1)、早期劣化を引き起こすことが明らかにされつつある。その対策として適切な材料・配合の選定により、コンクリート上面の緻密性を高めつつ、ひび割れを抑制し、十分な量のエントレインドエアを連行すること、さらにはフライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用することで、床版上面からの塩分の浸透を抑制し、耐凍害性を向上させつつ、ASRを抑制することが重要であると考えられる。これに加え、現場におけるコンクリート床版の問題は鋼主桁上の拘束による乾燥収縮等のひび割れや、施工の良否に起因する床版上面の緻密性に依存することが明らかにされている。こうした問題を解決し、厳しい塩分環境下においても耐久性、耐疲労性に優れたコンクリート床版を実現するには、現場の状況を再現した実物大のモデルにより、その施工性や、実環境下における膨張収縮挙動、さらには長期耐久性や耐疲労性に関する性能評価を行い、全ての要求性能を満足する高耐久コンクリート床版を開発することが求められる。

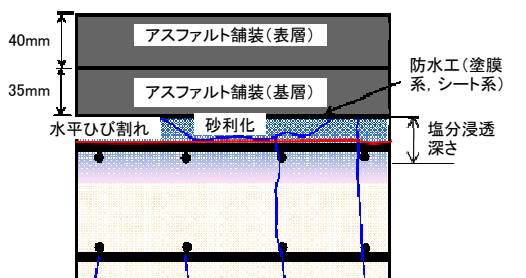


図-1 RC床版内の水平ひび割れと砂利化

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では産学連携の共同研究体制の下、我が国で初めてキャンパス内に実物大の鋼主桁上コンクリート床版を再現し(写真-1)、設計(材料・配合)、施工上の工夫を行った上で、計測・実験・解析による

性能評価を行い、要求性能を満足するものを開発すると共に、現場に実装するプロジェクトを立ち上げた。このプロジェクトは健康(Health)で持続可能(Sustainability)な床版を実現するためのものであり、「ロハスの橋プロジェクト」と名付けられた。



写真-1 ロハスの橋の全体像

3. 研究の方法

本研究では、道路橋示方書に従い設計された非合成鋼2主I桁橋を2連架設し、その上に各3種類、合計6種類のRC床版を施工した。表-1に各床版の主な仕様を記載する。要約すると、No.1:現在の規基準類に従い作製されたもの(標準)、No.2:標準に比べ、コンクリートの緻密性が劣り、空気量の少ないもの(低品質)、No.3:標準に比べ、コンクリートの緻密性に優れ、空気量の多いもの(高耐久)、No.4:高耐久(No.3)なものにフライアッシュを加え、そのポズラン反応性を生かすため3か月間湿潤/封かん養生を行い、コンクリートをさらに緻密にしたもの(最上級)、No.5:標準に対し、湿潤養生/封かん養生を3か月間継続したもの(養生対策)、No.6:標準に対し、機械仕上げを行ったもの(機械仕上げ)である。ここで、No.4、No.5の養生対策として、床版下面は脱型後に専用の養生シートを接着し、封かん養生を保つと共に、床版全面の湿潤養生をより確実にするために、水が均等に分布する特殊加工フィルムを敷設した。

表-1 ロハスの橋の主な仕様

No.	供試体名称	コンクリート品質	W/C (%)	空気量 (%)	使用技術
No.1	標準	標準	55	4.5	
No.2	低品質	低品質	65	3.0	
No.3	高耐久	高耐久	45	6.0	膨張材添加
No.4	最上級	最上級	45	6.0	膨張材添加+フライアッシュ添加+養生対策
No.5	養生対策	標準	55	4.5	養生対策
No.6	機械仕上げ	標準	55	4.5	機械仕上げ

写真-2 にクレーンによる鋼桁の架設、型枠・配筋まで、写真-3 にコンクリートポンプによる打込み、締固め、仕上げまでの様子を示す。



写真-2 鋼桁の架設から型枠・配筋まで

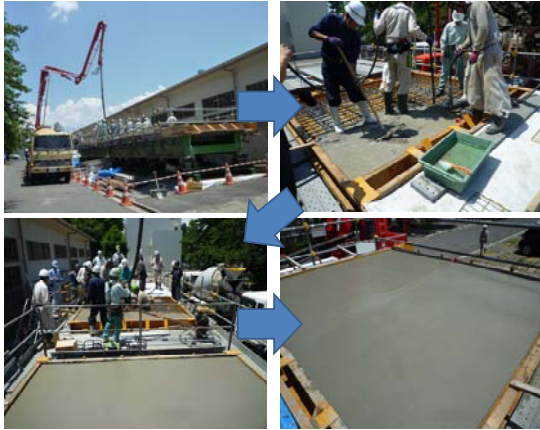


写真-3 打込み・締固め・仕上げ

#### 4. 研究成果

図-2に現場養生を行った各供試体の365日までの圧縮強度試験結果を示す。図より、最も圧縮強度が高いのは最上級であった。これは水セメント比45%に対し、フライアッシュをセメントに対して外割置換し、水結合材比が37%となっているため、当然の結果と言えるが、注目すべきは材齢7日以降の強度発現性である。本供試体では91日まで湿潤／封かん養生を継続したことにより、フライアッシュのポズラン反応が長期にわたり進行し、強度発現性が向上したと考察される。次に圧縮強度が高いのは45%まで水セメント比を下げた高耐久である。標準配合のうち最も圧縮強度が高かったのは養生対策を行った供試体であり、これも長期にわたる養生効果と考えられる。なお、標準と低品質では前者は後者に比べ水セメント比は低い一方で空気量が多いため、これらの要因が相殺され、両者の圧縮強度に顕著な差異は見られなかった。

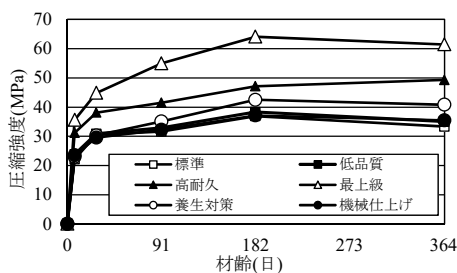


図-2 圧縮強度試験結果

図-3にトレント法による材齢91日における透気試験の測定結果を示す。図中の横軸は透気係数を表し、この値が小さいほどコンクリートの細孔組織が緻密であり、気体の透過性が低いことを意味する。一方、縦軸は電気抵抗を表し、水は電気を通し易いことから、この値が低いほど細孔中に多くの自由水が残存していることを表す。測定箇所は床版上面および下面のそれぞれ中央付近である。図より、最上級のみが他とは明らかに異なる結果となった。すなわち、透気係数が小さく、電気抵抗が高い結果となっており、レベル1または2というコンクリートの表層品質上、優れた結果を示した。この結果は、水結合材比が低く、材齢91日まで湿潤／封かん養生を継続していたことにより、フライアッシュのポズラン反応が進行し、極めて緻密な細孔組織を形成するとともに、細孔中の自由水が水和によって消費されたためと考察される。

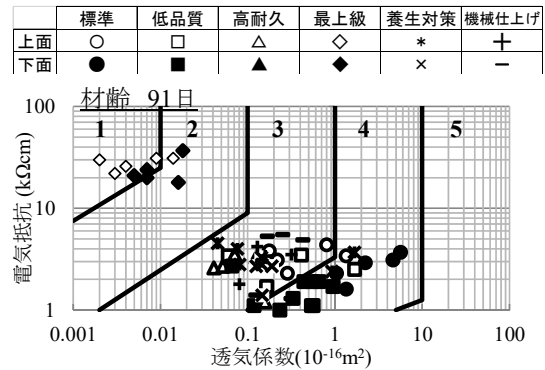


図-3 トレント法による透気試験結果

図-4に標準および最上級の床版におけるコンクリートの膨張収縮ひずみに関する測定結果を示す。図より各床版はその測定位置によって収縮量に違いはあるものの大まかな傾向は表しているものと思われる。標準は季節の変動はあるものの、養生終了後から乾燥収縮が進行している。すなわち、養生終了後の材齢7日以降収縮が進行し、材齢91日の秋以降収縮から膨張に移行し、材齢182日から273日の冬期間でピークを迎え、273日以降の春に再び収縮する傾向を示した。この傾向は秋から冬にかけての温度降下と、春の温度上昇に起因することが示唆される。一方、最上級では膨張材の作用により、365日においてもほとんど収縮側に移行しない結果となった。また、最上級では季節の変動に伴う膨張収縮挙動を示さず、91日から365日までほぼ一定のひずみ挙動を示した。

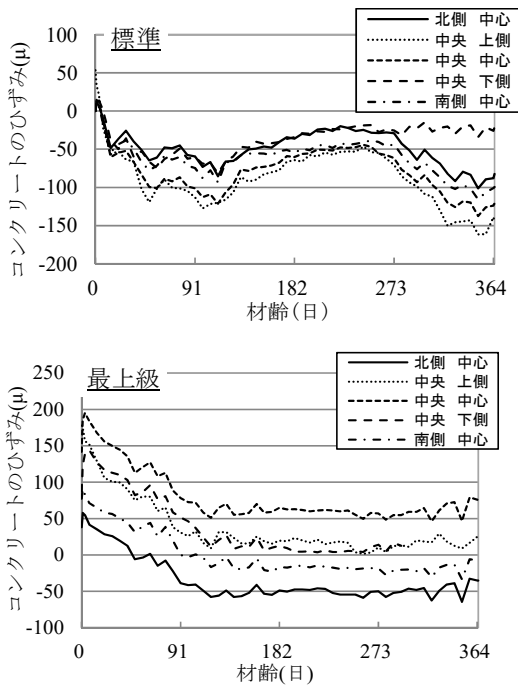


図-4 標準と最上級の膨張収縮挙動

上述した1年間の実環境下における計測を完了した後、床版からコアを採取し、各種耐久性試験(塩分浸透試験、スケーリング試験等)を実施した。

塩分浸透試験は、φ150mm×H80mmの円柱供試体を使用し、打込み面を試験面として、3%のNaCl水溶液を所定の日数まで湛水させる方法とした。促進環境は、温度40℃、相対湿度60%であり、供試体は試験装置内に静置させた。なお試験溶液の濃度管理は週に1回行った。塩分浸透の日数は、促進開始後から91日(13週)とした。所定の日数が経過した供試体からは、φ50mmのコアを2本採取し、試験面より3mm間隔で粉末試料を削り出した。塩化物イオン濃度は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、イオンクロマトグラフ分析法により測定を行った。

凍結融解試験(スケーリング試験)は、ASTM C 67217に準拠し行った。供試体形状は塩分浸透試験で用いた供試体と同様、φ150mm×H80mmであり、試験面を打込み面とした。試験溶液は、3%NaCl水溶液であり、止水テープで土手を作製した中に湛水した。凍結融解試験の測定項目は、5サイクル毎の単位面積当たりのスケーリング量である。設定温度は、融解保持時間として最高融解温度20±3℃を6時間、温度移行時間を1時間、凍結保持時間として最低凍結温度-20±3℃を16時間、温度移行時間を1時間とし、これを1サイクルとして50サイクルまで凍結融解試験を実施した。

図-5に塩分浸透試験結果を示す。一般にこの種の図は、横軸に表面からの深さ、縦軸に

塩化物イオン濃度を示すが、ここでは床版の深さ方向の塩化物イオン濃度分布を表すため、縦軸と横軸を入れ替えた。図より、最も塩分浸透抵抗性に優れていたのは最上級であった。次いで、高耐久、養生対策、標準、低品質の順となり、機械仕上げが最も低い結果となった。最上級では水セメント比が低く、フライアッシュを外割り添加し、さらに91日間湿潤養生を継続することで、極めて緻密な細孔組織となり、塩分浸透抵抗性が極めて高い結果になったと思われる。また、高耐久以下は、総じて水セメント比に依存する結果となったが、養生対策は、配合自体は標準と変わらないものの、塩分浸透抵抗性は明らかに向上しており、明確な養生効果を示したと考えられる。一方、機械仕上げについては、今回表層部の緻密化を目的に、打込み面におけるブリーディング水などの余剰水を吸水シートを用いて吸収することを試みており、表層部に水みちなどが形成されることによって塩分浸透抵抗性が低下したことも考えられる。透気試験においては、養生対策と同等の効果が確認されており、ある程度の緻密化はなされているものと考えられるが、水みちなどの水の浸透を促す欠陥部が形成される可能性があるとするれば、適用に際しては注意する必要がある。

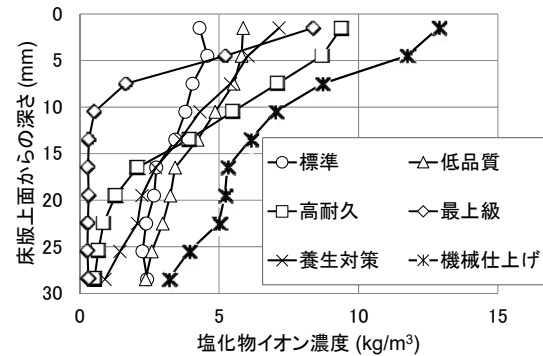


図-5 塩分浸透試験結果

図-6にスケーリング試験結果を示す。図より、ここで、本試験におけるスケーリング試験結果に対する基準値を0.3kg/m<sup>2</sup>に設定した。図より、低品質は基準値を大きく上回る結果を示したが、それ以外のコアは、基準値を下回る結果となった。そのため、水セメント比65%、空気量3%程度の低品質のものは塩分環境下におけるスケーリング抵抗性が十分であると言いが、それ以外の条件では、一定のスケーリング抵抗性を示し、空気量4.5%以上が確保されていれば塩分環境下においても優れたスケーリング抵抗性を示すことが明らかになった。

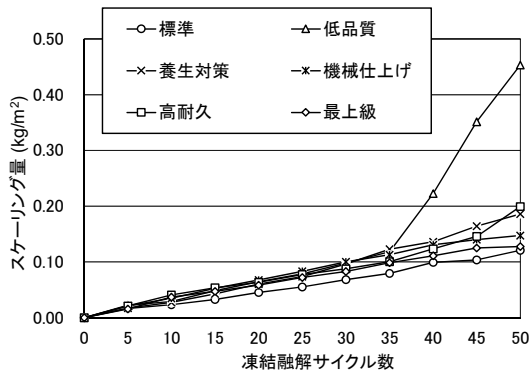


図-6 スケーリング試験結果

本研究におけるこれまでの研究成果より、最上級については、強度発現性に優れ、表層の品質が極めて緻密で、安定したひずみ挙動を示し、凍結防止剤散布下における塩分浸透抵抗性およびスケーリング抵抗性にも優れていることが明らかになったため、この配合をベースとしたフライアッシュコンクリートを国道 283 号釜石道路工事向定内橋(むかいさだないばし、仮称)の RC 床版に実装することとした。ただし、前述の通り、施工性については粘性が高すぎて仕上げがしにくいという問題が生じたため、水結合材比を 45% 程度に抑えることとした。この床版の基本コンセプトは多重防護である。すなわち積雪寒冷地のうち凍結防止剤が大量散布される道路構造物では、塩害、凍害、ASR と疲労の複合作用を受けることから、これらの劣化に対する抵抗性を付与するため、図-7 に示す複数の対策により劣化を抑制し、高耐久化を図ることとした。本床版の施工にあたっては、安定した品質を有するコンクリートの出荷と、現地における確実な施工により、所要の品質／性能が確保されることを確認している。写真-4 はコンクリート床版の施工を行っているところである。青く見えるのは鉄筋を腐食から守るため、エポキシ樹脂塗装を施しているためである。このような多重防護を施した向定内橋の初期建設コストを、従来の床版と比較した結果、約 26% の増であることが明らかになった。一方、東北地方においては凍結防止剤散布下における RC 床版が供用後わずか 30 年程度で抜け落ち、初期コストの約 4 倍をかけて架け替えを行っている事例が発生している。この事実を踏まえれば、向定内橋で採用した仕様は十分に受け入れられるものであると判断される。復興道路および復興支援道路においては、これまでに、フライアッシュを用いた RC 床版が合計 4 橋、高炉セメント B 種を用いた RC 床版が 1 橋施工されており、今後は三陸沿岸部のみならず、東北全体、ひいては他の地域にも普及させていく予定である。

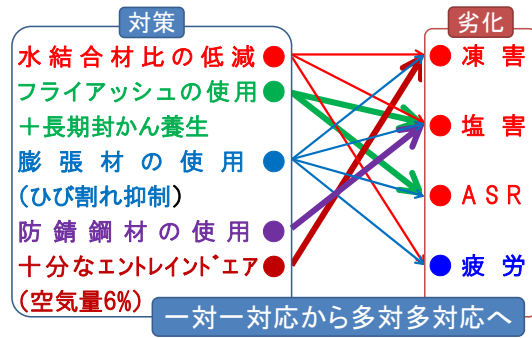


図-7 多重防護による高耐久化の概念



写真-4 向定内橋における施工状況

現在、ロハスの橋プロジェクトは 2 期の現場計測を行っており、このうち ASR を意図的に発生させた床版では極めて有用な知見が得られている。床版の膨張収縮挙動を図-8 に、床版のひび割れ発生状況を図-9 (上図は床版上面、下図は床版下面のひび割れ) に示す。これらの図より、ASR は、(1) 床版中の橋軸方向および橋軸直角方向に対しては鉄筋の拘束が大きいため膨張が抑制されるものの鉛直方向には鉄筋がほとんど入っていないため、極めて大きな膨張を示すこと、(2) ASR による膨張は明確な温度依存性を持ち、温度が 20℃ を超えると急激に膨張するが、20℃ を下回ると膨張が停滞すること、(3) ASR によるひび割れは明確な配向性を持ち、ASR の膨張による床版は上に凸の変形を示すため、床版上面では引張場となり橋軸方向に曲げひび割れが発生し、床版下面では圧縮場となり、逆に橋軸直角方向にひび割れが卓越する傾向を明らかにした。

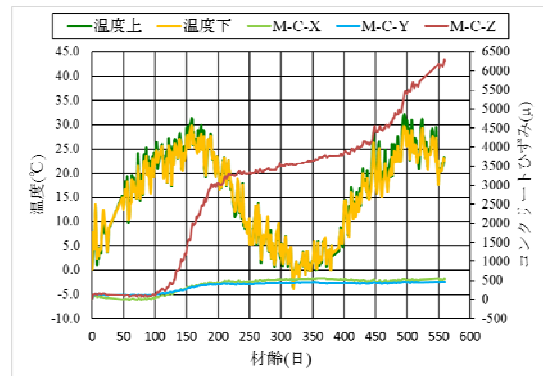


図-8 ASR 床版の膨張挙動

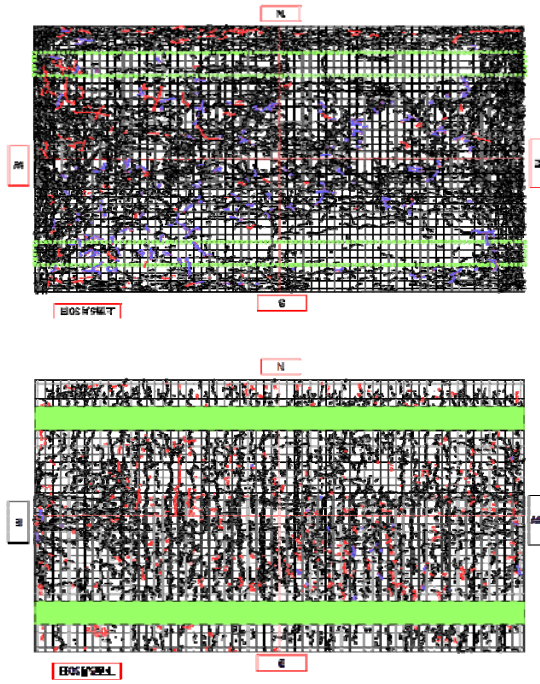


図-9 ASR床版のひび割れ状況

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- 1) 宮口克一, 本間一也, 前島拓, 岩城一郎, 膨張材と中空微小球を併用したフライアッシュコンクリートを用いた道路橋 RC床版供試体の収縮低減効果とスケーリング抵抗性, セメント・コンクリート論文集, No.71, pp.339-344, 2018
- 2) Tetsuya Ishida, Kolneath Pen, Yasushi Tanaka, Kosuke Kashimura, and Ichiro Iwaki, Numerical Simulation of Early Age Cracking of Reinforced Concrete Bridge Decks with a Full-3D Multiscale and Multi-Chemo-Physical Integrated Analysis, Applied Sciences, Vol.8, pp.1-18, 2018
- 3) Ichiro IWAKI, INTRODUCTION TO THE "LOHAS BRIDGE PROJECT" AIMING AT THE REALIZATION OF HEALTHY AND SUSTAINABLE BRIDGES, EASEC-15, pp.2-9, 2017 (Keynote)
- 4) 北村健, 趙唯堅, 細谷学, 岩城一郎, 高性能な間詰め材で一体化させた新しい鉄筋継手構造の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, pp.403-408, 2017
- 5) 大野直也, 石田哲也, 子田康弘, 岩城一郎, 異なる配合・養生を与えた小型供試体および実物大 RC床版の若材齢挙動に関するマルチスケール統合解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.38, pp.471-476, 2016
- 6) 岩城一郎, 江頭慶三, 岸良竜, 渡邊法久, 樋口正典, 阿合延明, 「ロハスの橋」プロジェクトー凍結防止剤散布下における高耐久 RC床版の実現を目指してー, 橋梁と基礎, Vol.2, pp.26-31, 2016

〔学会発表〕(計4件)

- 1) 會田理紗, 子田康弘, 岩城一郎, アルカリシリカ反応を受けた鋼主桁上実物大 RC床版供試体の長期モニタリング結果に関する検討, 土木学会東北支部技術研究発表会(日本大学), 2018年3月
- 2) 前島拓, 岸良竜, 子田康弘, 岩城一郎, 実物大鋼主桁上 RC床版モデルの膨張収縮挙動及び表層品質に関する実験的検討, 土木学期第72回年次学術講演会(九州大学), 2017年9月
- 3) 梅津政孝, 前島拓, 岩城一郎, 実物大鋼主桁床版モデルによる種々のコンクリートの耐久性評価, 土木学会東北支部技術研究発表会(東北工業大学), 2017年3月
- 4) 津田ひかる, 前島拓, 岩城一郎, 実物大鋼主桁床版モデルの膨張収縮挙動及び表層品質に関する検討, 土木学会東北支部技術研究発表会(東北工業大学), 2017年3月

〔図書〕(計1件)

岩城一郎, 石田哲也, 細田暁編著, 新設コンクリート革命, 日経BP, 2017年3月, 総ページ数296ページ

〔その他〕

ホームページ等:

[http://www.civil.ce.nihon-u.ac.jp/~concrete/lohas\\_bridge/index.html](http://www.civil.ce.nihon-u.ac.jp/~concrete/lohas_bridge/index.html)

## 6. 研究組織

- (1)研究代表者  
岩城 一郎 (IWAKI, Ichiro)  
日本大学・工学部・教授  
研究者番号: 20282113
- (2)研究分担者  
子田 康弘 (KODA, Yasuhiro)  
日本大学・工学部・准教授  
研究者番号: 40328696
- (3)研究分担者  
内藤 英樹 (NAITO, Hideki)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 50361142
- (4)研究分担者  
細田 暁 (HOSODA, Akira)  
横浜国立大学・大学院都市イノベーション  
研究員・准教授  
研究者番号: 50374153
- (5)研究分担者  
石田 哲也 (ISHIDA, Tetsuya)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 60312972
- (6)研究分担者  
藤山 知加子 (FUJIYAMA, Chikako)  
法政大学・デザイン工学部・教授  
研究者番号: 60613495