

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560566

研究課題名(和文)凍結防止剤使用環境下における既設PC道路橋の維持管理手法の検討

研究課題名(英文) Study on maintenance method of existing PC road bridges subject to anti-freezing agent

研究代表者

森川 英典(Hidenori, Morikawa)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70220043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：既設PC道路橋は、PCグラウトの充填不良などの初期欠陥を有し、PC鋼材の定着端部から凍結防止剤を含む塩水の供給によりPC鋼材の腐食・破断が懸念されており、その診断と対策は喫緊の課題となっている。本研究では、まず、局部腐食を有するPC鋼材の応力腐食割れによる破断メカニズムとその特性について明らかにした。次いで、腐食PC鋼線の補修として、亜硝酸リチウム水溶液を用いる手法に着目し、その腐食抑制について評価し、実構造物における適用性について検証した。

以上の検討結果より、既設PC道路橋の維持管理手法を示した。

研究成果の概要(英文)：The insufficient grouting defects have been detected on existing PC bridges subject to anti-freezing agents. Owing to the chloride ion invading from anchorage element, the corrosion of PC wire with the insufficient grouting occurs with pitting. And PC wire with pitting corrosion is feared to occur the brittle fracture due to stress concentration. However, the deterioration mechanism has not been clarified and the repair method has not been developed. In this study, based on Stress Corrosion Cracking (SCC) tests and Hydrogen Embrittlement Cracking tests of PC wires with pitting, the mechanism of brittle fracture was clarified. Then, this study focused on a repair method that uses a lithium nitrite (LiNO<sub>2</sub>)-containing solution and grout. The repair performance of the method including anti-macro-cell corrosion was verified. Finally, the repair method was applied to an existing bridges and the monitoring measurements were conducted and the repair effects were evaluated.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：プレストレストコンクリート 道路橋 凍結防止材 腐食 応力腐食割れ グラウト 亜硝酸リチウム  
維持管理

## 1. 研究開始当初の背景

既設 PC 道路橋においては、グラウト充填不良などの初期欠陥、PC 鋼材定着端部からの水の供給による劣化が問題となっている。さらに、凍結防止剤使用環境下においては、塩水が定着部からグラウト不良部を介して PC 鋼材に直接供給され、激しい腐食や破断が生じる事例が報告されている。また既往研究結果より、グラウト再注入によっても鋼材腐食を止めることができないことも判明している。これは、PC 鋼材の場合、ケレンによる除錆ができないため、腐食生成物内の空隙に塩化物イオンや水分、酸素などの劣化因子を残したままグラウト再注入せざるを得ないためである。また、研究代表者が実施した実橋におけるグラウト塩分濃度測定結果によると、凍結防止剤の影響を受けて塩化物イオン濃度が非常に高い場合があり、そのような場合には、局部腐食の程度も非常に大きくなっている。またこのような状況において、グラウト再注入した場合、塩分濃度の高い旧グラウトと塩分を含まない新グラウトの境界部におけるマクロセル腐食の可能性が懸念される。このような既設 PC 道路橋で今後対策が必要となる橋梁は多数存在しており、有効な補修方法の確立が求められている。

## 2. 研究の目的

このような状況を踏まえ、研究代表者らはこれまで、シース内で束ねられた鋼線にグラウトを注入し、グラウト充填不良を再現した状態で、塩水供給を行い、腐食状況の確認を行ってきた。その結果、グラウト内の鋼線であっても、鋼線と鋼線の隙間や鋼線とシース管の隙間において塩水が侵入し、鋼材が腐食することを確認した。そこで、今後、このような劣化パターンにおける要因を考慮し、その影響を評価する実験を行うとともに、腐食メカニズムの解明とその特性評価を行う必要があると考えた。また、PC 鋼線については、PC 鋼棒と異なり、その組織構造の違いから遅れ破壊の感受性は低いことが知られているが、研究代表者が行った試験では、応力腐食割れによる PC 鋼線の遅れ破壊については、孔食を模擬した切欠きを有する場合に感受性が高くなることを確認した。そこで、PC 鋼線の応力腐食割れに及ぼす各種要因の影響を検討し、その感受性を評価した上で、PC 鋼線破断のメカニズムおよびその特性について明らかにする必要がある。

一方、このような劣化に対する効果的な補修工法として、研究代表者らが検討してきた亜硝酸リチウム（防錆剤、以下、 $\text{LiNO}_2$ ）水溶液注入工法と  $\text{LiNO}_2$  混入グラウトを再注入する工法を組み合わせた新たな補修方法をこのような PC 鋼材に適用した場合の腐食抑制効果を評価し、再劣化を抑制できる補修方法として確立する必要があると考えた。従来研究においては、PC 鋼線に見立てたみがき丸鋼を試験体とした基礎的な検討を行う

に留まっていた。よって、実際の PC 鋼線における補修効果の検討と補修メカニズム解明、さらには、実橋梁への試験施工後のモニタリングによる有効性の検証が必要である。

そこで、本研究においては、まずシース内に束ねられた PC 鋼線の促進腐食を行い、孔食を含む腐食特性の評価を行った。また促進腐食した PC 鋼線の活性溶解型応力腐食試験および水素脆化割れ試験を行い、実際の橋梁において破断した PC 鋼線の破面特性と合わせて、脆性破断メカニズムの考察を行った。次に孔食を含む腐食形状・形態やその程度が応力腐食割れの感受性に及ぼす影響を評価し、遅れ破壊の可能性を推定する手法を検討した。さらに、このように腐食した PC 鋼線に対する効果的な対策の一つとして、 $\text{LiNO}_2$  水溶液注入と  $\text{LiNO}_2$  混入グラウト再注入を組み合わせた新たな補修方法を適用した場合の効果と補修メカニズムを実験的に明らかにし、具体的な適用法を把握・提示した。特に、シース内で束ねられた鋼線と鋼線の隙間や鋼線とシースの隙間における防錆効果や新旧グラウト界面におけるマクロセル腐食の防止効果を明らかにした。さらには、実橋梁において試験施工・モニタリングを行うことにより、実用化の可能性を示した。

## 3. 研究の方法

### (1) PC 鋼線の促進腐食

図-1 に示すように、シース内で 12 本束ねられた鋼線にグラウトを注入し、グラウト充填不良を再現した状態で、塩水供給による乾湿繰返し促進腐食を実施した。既往研究では、腐食状況の確認を行ってきた。その結果、グラウト不良部の鋼線が腐食することの他、グラウト内の鋼線であっても、鋼線と鋼線の隙間や鋼線とシース管の隙間において塩水が侵入し、鋼材が腐食することを確認している。

本研究においては、促進腐食した PC 鋼線を解体して、腐食状況（腐食深さ、幅、曲率半径など腐食形状）の評価、応力集中係数の推定、脆性破断特性、補修効果の評価の検討に用いた。

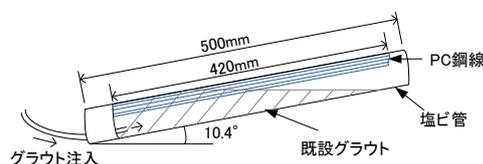


図-1 PC 鋼線束 (φ7mm 鋼線 12 本束) の促進腐食

### (2) PC 鋼線の引張試験、応力腐食割れ試験

図-2 に示す応力腐食割れ試験機を用いて、活性溶解型応力腐食割れ試験 (100℃, 20wt% 硝酸アンモニウム溶液) および水素脆化割れ試験 (50℃, 20wt% チオシアン酸アンモニウム水溶液) を、設計荷重  $P_u$  の 60% 荷重で実施し、破断時間を測定した。

さらに、PC 鋼線束内の最も腐食が著しい PC 鋼線にて脆性破断が発生した場合、残りの PC 鋼線に動的に負荷が作用することが考えられる。そこで、局部腐食を考慮した PC 鋼線の引張試験を、载荷速度を変化させて実施し、速度の違いによる破断性状および力学的特性について評価した。

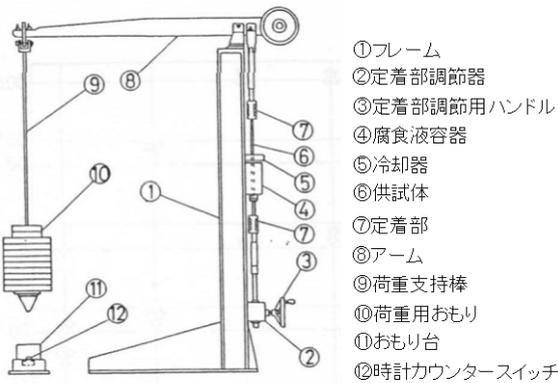


図-2 応力腐食割れ試験機

### (3) PC 鋼線の破断メカニズムと特性評価

腐食深さや幅などの腐食形状に関する指標や平均応力、最大応力などの強度指標の評価を行った。最大応力については、腐食形状を写真撮影によりデジタルデータ化した後、形状測定により曲率半径を評価し、応力集中係数を推定した。また応力集中係数の推定精度を向上するため、腐食した PC 鋼線を有限要素解析法でモデル化し、応力解析を行って応力集中係数推定手法の検討を行った。これらの腐食形状に関する指標や強度指標と破断時間との関係を検討し、その特性評価を行った。また走査型電子顕微鏡による破面解析を行うとともに、実橋梁における破断事例とも合わせて破断メカニズムの検討を行った。さらに、それらのデータを統計処理することにより、確率論的な特性評価を行った。

### (4) グラウト充填不良を有する腐食 PC 鋼材の補修方法の検討

既設部の劣化状態（グラウト、錆中の塩化物含有量や腐食程度）、補修部の劣化状態、塩化物イオン  $Cl^-$  の濃度と亜硝酸イオン  $NO_2^-$  の濃度をパラメータとした図-3 に示す試験体を作成し、図-4 に示すように補修部の電気化学特性を測定し、さらに、図-5 に示すようにマクロセル電流測定を行った。

さらに、シーす内の PC 鋼線束に対する補修効果を検討するため、図-1 で作成した腐食がかなり進行した試験体に対して、図-6 に示すように、 $LiNO_2$  を用いた補修施工を行った後、解体し、錆中の  $NO_2^-$  濃度を分析した。また、PC 鋼線間の狭隙部への  $NO_2^-$  浸透性を高めるため、図-7 に示す真空ポンプを用いたエアリフト方式による水溶液注入施工を行い、その効果を確認した。

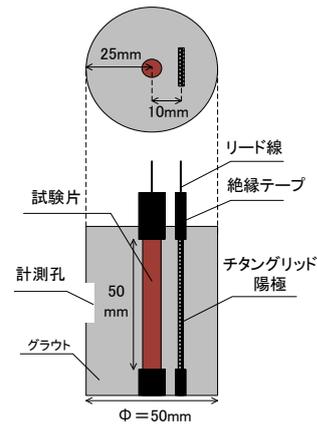


図-3 補修検討用試験体

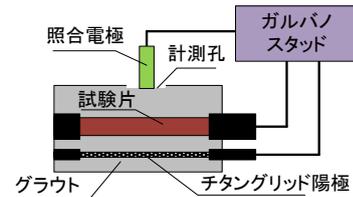


図-4 分極抵抗、自然電位測定、カソード分極曲線の測定方法

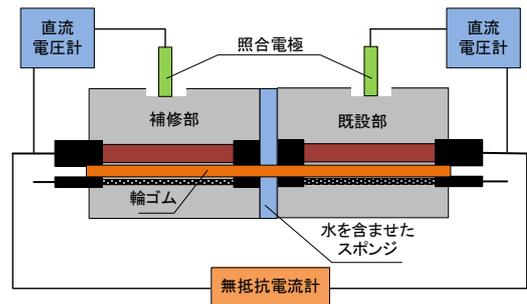


図-5 マクロセル腐食電流測定法



図-6 模擬試験体（図-1）に対する補修施工

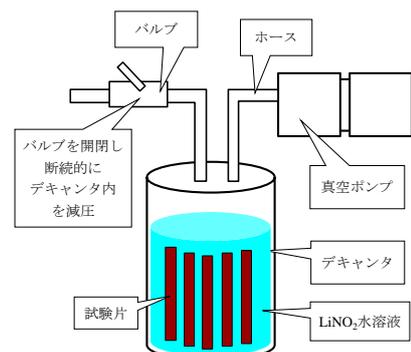


図-7 エアリフト方式による水溶液注入施工

さらに、兵庫県内山間部の凍結防止剤使用環境にある M 橋において、2014 年 4 月に、本補修工法を試験施工し、補修部、既設部、境界部での自然電位、分極抵抗のモニタリング測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 促進腐食した PC 鋼線の腐食特性

促進腐食した PC 鋼線の腐食特性を調べるために、電子ノギスを用いて、腐食深さ、腐食幅および腐食長さの測定を行った。また亀裂の発生を事前に予測するためには局部腐食の最深部箇所を評価する必要があることから、本試験においては局部腐食の最深部箇所の腐食深さを計測・評価した。曲率半径は、図-8 に示すような亀裂発生箇所のデジタル画像を画像解析することで計測した。



図-8 局部腐食状況 (鋼線 No.32)

##### (2) PC 鋼線の引張強度特性、遅れ破壊特性

腐食深さと破断時間の関係を図-9 に示す。腐食深さが 1.0mm を超過する PC 鋼線は破断時間が 20 時間程度より短く、応力腐食割れおよび水素脆化割れの感受性が高くなる傾向が確認できる。一方、腐食深さが 1.0mm 以下の PC 鋼線の破断時間は、応力腐食割れについては 20~120 時間、水素脆化割れについては 20~40 時間とばらつきが見られた。引張試験の結果の一例を図-10 に示す。

最大荷重残存率と鋼材腐食減量率の関係をみると、全ての試験結果において鋼材腐食減量率の増加以上の割合で残存率が低下する傾向が確認できた。また、高ひずみ速度引張試験を行った結果、最大荷重は、健全 PC 鋼線 (No.27-1,2) では低ひずみ速度試験結果とほぼ同じ値であった一方、腐食 PC 鋼線 (No.23~25) では低ひずみ速度試験結果と比較して相対的に低下する傾向が確認できた。さらに No.23 の試験結果については、他の PC 鋼線とは異なり脆性的に破断し、最大荷重残存率は 0.7 程度と大幅に低下した。

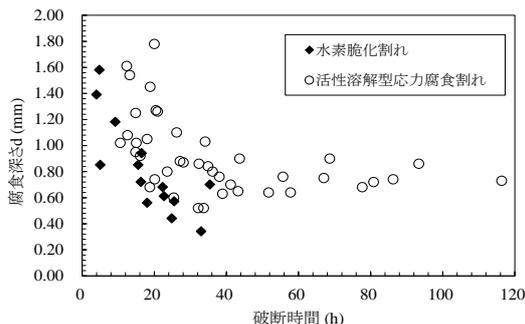


図-9 腐食深さと破断時間の関係

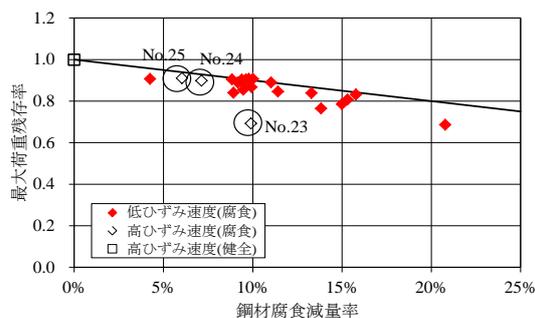


図-10 最大荷重残存率と鋼材腐食減量率の関係

##### (3) PC 鋼線の破断メカニズムと特性評価

最大応力と破断時間の関係を図-11 に示す。ここで、水素脆化割れ試験で破断した鋼線については亀裂の発生は局部腐食の端部が起点とはなっていないことから、破断起点箇所の応力集中係数の算出が困難であったため、最大応力については応力腐食割れ試験結果のみ算定している。また最大応力は局部腐食の曲率半径測定値から応力集中係数を推定した結果を用いて算定した。図から、最大応力が 2200N/mm<sup>2</sup> 程度を超過する PC 鋼線は破断時間が 20 時間程度より短く、応力腐食割れの感受性が高くなる傾向が確認できる。

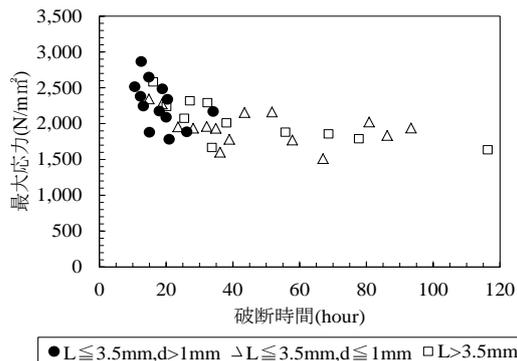


図-11 最大応力と破断時間の関係

応力腐食割れ試験および水素脆化割れ試験実施後の破断状況と走査型電子顕微鏡による破面観察結果を図-12~13 に示す。

水素脆化割れの破断は全て、ガラス棒が割れたような破断状況であり、亀裂の発生は局部腐食の端部が起点とはなっていない。

応力腐食割れの破断は全て、応力集中が生

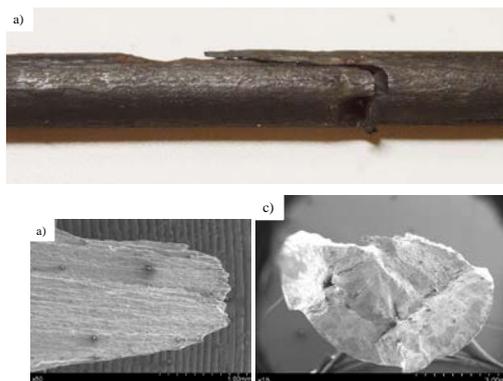


図-12 応力腐食割れ試験後の破面観察結果



図-13 水素脆化割れ試験後の破面観察結果

じていると考えられる局部腐食の端部を起点として長手方向に亀裂が進展している。これは、実橋梁における破断事例の報告における局部腐食の端部を起点とした長手方向への亀裂の進展と同じ特徴を示していることが確認できた。PC 鋼線が腐食環境におかれた場合の、考えられる破壊メカニズムを図-14に示す。PC 鋼線の破壊には、3つのメカニズム（延性破壊、活性溶解型応力腐食割れ、水素脆化割れ）が考えられるが、橋梁のPC 鋼線の脆性破断事例にて発生している長手方向への亀裂発生が応力腐食割れにおける亀裂発生の特徴と類似していること、既設 PC 道路橋では一般的な環境下で水素侵入促進剤が存在しない場合には水素脆化割れが生じる可能性は低いことなどから、一般的な環境下において生じる PC 鋼線の遅れ破壊は、応力腐食割れである可能性が高いものと推察できる。

応力腐食割れ試験結果における最大応力の分布状況を統計処理することにより、図-15に示すように、確率論的な特性評価を行った。

#### (4)腐食 PC 鋼材の補修方法の検討

図-4 に示した試験体における分極抵抗測定結果を図-16 に示す。LiNO<sub>2</sub> 水溶液に浸漬させた補修試験体（LNW シリーズ）で分極抵抗は大きい傾向にあった。また、浸漬時に真空ポンプを使用した補修試験体（LNWA）は、真空ポンプを使用していない補修試験体よりわずかに大きい傾向にあった。これは、真空ポンプを用いてLiNO<sub>2</sub>水溶液に浸漬させることで真空脱泡作用が得られて、錆層内や鋼線間に残留していた空気と水溶液が置換されやすくなり、LiNO<sub>2</sub>水溶液が空隙に浸透しやすかったと考えられる。

補修部試験体のカソード分極曲線測定結果を図-17 に示す。LiNO<sub>2</sub>水溶液に浸漬させた補修試験体（LNW シリーズ）でカソード分極しやすい傾向が確認でき、既設部をアノードとするマクロセル電流を抑制する要因であるといえる。また、真空ポンプの使用（LNWA）は、マクロセル腐食をさらに抑制する要因となることが確認できた。図-6 に示した模擬試験体の補修後に解体して錆のイオン濃度分析を行った結果を図-18 に示す。

腐食がかなり進行している場合、境界部においては、NO<sub>2</sub>濃度が低くなることが示され、このような場合に、エアリフト方式を採用する必要があることが確認できた。

さらに、M 橋で行ったモニタリング測定の結果、自然電位は一部卑な傾向があり腐食の危険性があるものの、ほとんどの測定点にお

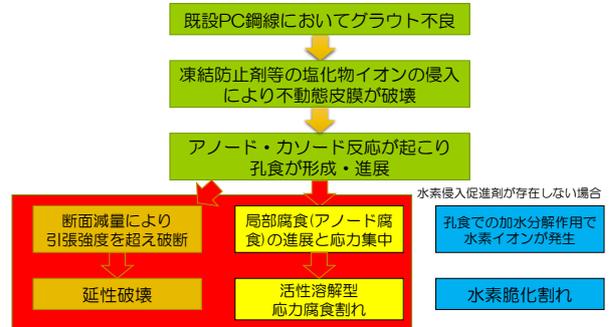


図-14 既設 PC 鋼線の破壊メカニズム

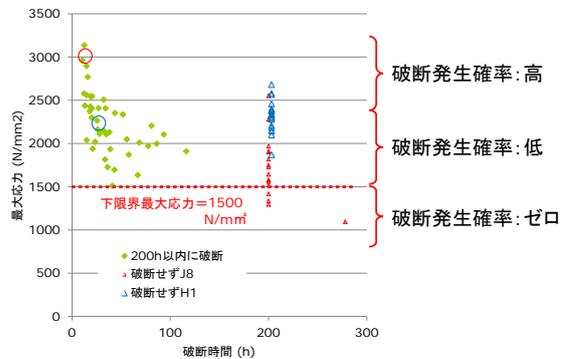


図-15 応力腐食割れ試験結果と確率論的特性評価

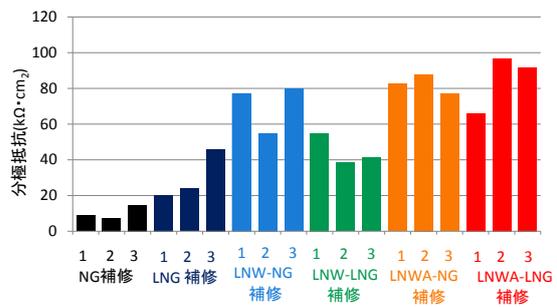


図-16 補修部試験体の分極抵抗測定結果

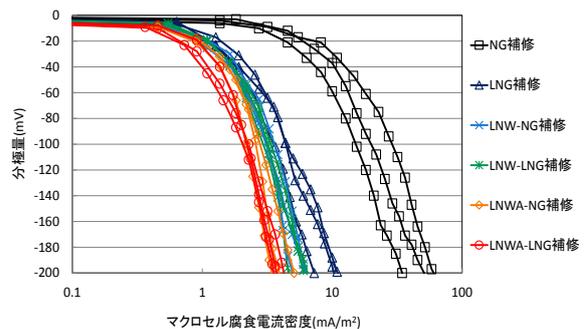


図-17 カソード分極曲線測定結果

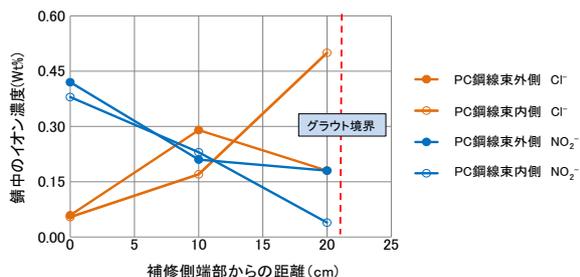


図-18 カソード分極曲線測定結果

いて腐食の危険性はないと判断されること、M 橋の分極抵抗は塩化物量が微小な測定点で大きくなっており、塩化物量が微小な方が本補修工法での補修効果が期待できること、が明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- ① 白川 祐太, 森川 英典, 福田 圭祐, 河村 睦, 局部腐食を考慮した PC 鋼線における応力腐食割れによる破断性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 1054-1059
  - ② 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, 亜硝酸リチウムを用いた PC グラウト未充てん部の補修方法の効果に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 12 巻, 2012, pp. 257-264
  - ③ 森川 英典, 白川 祐太, 凍結防止剤使用環境の既設 PC 道路橋における PC 鋼線の腐食性状, 建設工学研究所論文報告集, Vol. 54, 2012, pp. 29-41
  - ④ 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, 亜硝酸リチウム水溶液を用いたグラウト充てん不足部の PC 鋼線への補修におけるカソード分極特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, 2013, pp. 1069-1074
  - ⑤ Keisuke Fukuta, Hidenori Morikawa, Corrosion characteristics and repair of corroded PC wires with insufficient grouting on PC road bridges subjected to anti-freezing agents, Proceedings of the 38th Conference on Our World in Concrete & Structures, Vol.38, 2013, pp.161-170
  - ⑥ 福田 圭祐, 戸田 想介, 森川 英典, 川村 睦, グラウト充填不良部の局部腐食を考慮した PC 鋼線における応力腐食割れ破断性状に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, 2013, pp. 501-508
  - ⑦ 本田 悠馬, 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, 亜硝酸リチウムを用いたグラウト充てん不足部の PC 鋼線への補修におけるマクロセル腐食の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 14 巻, 2014, pp. 681-686
  - ⑧ 美濃 智広, 戸田 想介, 森川 英典, 河村 睦, 局部腐食を考慮した PC 鋼線における遅れ破壊による破断性状に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 14 巻, 2014, pp. 687-694
  - ⑨ Tomohiro Mino, Hidenori Morikawa, Chloride-induced delayed fracture of prestressing wires and structural reliability of PC bridges, Proceedings of fib symposium Copenhagen, 2015, 11pages (掲載決定)
- 〔学会発表〕(計 8 件)
- ① 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, 凍結防止剤使用環境下における PC 橋のグラウト充填不良部への補修方法に関する実験的検討, 平成 24 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2012. 6. 9, 神戸市立工業高等専門学校 (兵庫県)
  - ② 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, グラウト未充填部への亜硝酸リチウムを用いた補修方法の効果に関する実験的検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, 2012. 9. 4-6, 名古屋大学 (愛知県)
  - ③ 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, グラウト充てん不足部への亜硝酸リチウム水溶液注入による PC 鋼線のカソード分極特性の検討, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2013. 6. 8, 大阪市立大学 (大阪府)
  - ④ 福田 圭祐, 森川 英典, 鴨谷 知繁, グラウト充てん不足部への亜硝酸リチウム水溶液注入による PC 鋼線のカソード分極特性の検討, 平成 25 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2013. 6. 8, 大阪市立大学 (大阪府)
  - ⑤ 戸田 想介, 森川 英典, 福田 圭祐, 美濃 智広, 河村 睦, 腐食環境下で引張力亜が採用する PC 鋼線の応力腐食割れ特性の検討, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2014. 5. 31, 大阪産業大学 (大阪府)
  - ⑥ 本田 悠馬, 森川 英典, 福田 圭祐, 鴨谷 知繁, 亜硝酸リチウムを用いたグラウト充てん不足部の PC 鋼線への補修におけるマクロセル腐食の検討, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2014. 5. 31, 大阪産業大学 (大阪府)
  - ⑦ 美濃 智広, 森川 英典, 河村 睦, 既設 PC 鋼線の遅れ破壊メカニズムに関する考察, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, 2014. 9. 4, 大阪大学 (大阪府)
  - ⑧ 古川 篤史, 森川 英典, 戸田 想介, 美濃 智広, 河村 睦, 促進腐食させた PC 鋼線の載荷速度の違いによる力学的性能と破断性状, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, 2015. 5. 30, 摂南大学 (大阪府) (発表決定)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森川 英典 (MORIKAWA, Hidenori)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：70220043