

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03289

研究課題名(和文)塩害RC梁の点検・補修補強に関する連係統合化とそのシステム実装時の効果評価

研究課題名(英文)Connection and integration about inspection, repair and strengthening and evaluation of effect when its system is implemented

研究代表者

宮里 心一(MIYAZATO, SHINICHI)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：60302949

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,000,000円

研究成果の概要(和文)：塩害の影響を受けるRC梁に対して、これまでは劣化進展期の点検と補修補強は極めて困難であった。本科学研究費では、かぶりコンクリートに腐食ひび割れが生じる以前の劣化初期におけるRC梁を対象に、鉄筋腐食の範囲を自然電位法で把握し、次に超音波トモグラフィ法で鉄筋周囲の弾性波速度の低下を確認し、その結果から鉄筋とコンクリートの付着強度を推定する方法を構築した。また、表面含浸材の塗布による、遮塩性の経年変化や再補修の効果を明らかにした。さらに、チタンリボンメッシュによる電気防食工法と、ステンレス鉄筋の埋込補強工法により、補修と補強を同時に施工する工法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

まずは、学術的意義を述べる。1)電気と弾性波を組み合わせた非破壊検査により、腐食とそれに伴う鉄筋とコンクリート間の付着低下の範囲と程度を推定できるようになった。2)RCの劣化段階と範囲に対応した、予防保全方法(含浸工法)や事後保全方法(電気防食工法+ステンレス埋込工法)を精査し、合理的な補修補強システムが提案された。

次に、社会的意義を述べる。目標耐用年数に達する以前に性能が不満足となるリスクを低減できる策を提案した。

上記により、過大な維持管理費の支出を削減し、加えて補修補強を迅速施工できる方法を提案できた。

研究成果の概要(英文)：Any change on a surface at reinforced concrete (RC) beam doesn't appear at propagation period in chloride attack. Therefore, inspection was extremely difficult. Neither an effective repair nor reinforcement were arranged simultaneously. This research constructed method of inspection, repair and reinforcement based on the above background for RC beam where a corrosion crack was not caused at the cover concrete. The area of steel corrosion was understood by potential method in the beginning. Next, decrease in velocity of elastic wave around the steel bar was confirmed by supersonic wave tomography method. As a result, bond strength between steel bar and concrete was estimated. Moreover, it was clear that application of silane-based surface penetrant and silicate-type surface penetrant had a good effect for delay of deterioration. In addition, it was proposed that repair with titanium ribbon mesh and reinforcement with stainless was applied at the same time.

研究分野：鉄筋コンクリート工学

キーワード：鉄筋コンクリート 維持管理 点検 補修補強 体系化

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート (RC) 部材の維持管理において、老朽構造物が急増する現在、階層化・統合化された合理的な点検と補修補強が望まれる。すなわち、最初に広範囲を短時間で標準調査し、次に範囲を限定して劣化の程度を詳細調査する手順が理想的である。しかしながら、塩害に対する維持管理において核となる鉄筋腐食、およびそれに起因する鉄筋とコンクリート間の付着特性の低下を定量的に推定する方法は、国内外を問わず未だ確立されていない。

ところで最近では、RC 部材は構造体であるとの目的を鑑み、鉄筋腐食による耐荷力の低下も考慮し、安全性を評価する取組みが進められている²⁾。したがって、点検で腐食を発見し、その状態を定量評価した上で力学的な健全度を判断し、必要に応じて補修補強する必要がある。

文献 1) 土木学会編：342 委員会成果報告書、コンクリート技術シリーズ 110、2015

2) 土木学会編：331 委員会成果報告書、コンクリート技術シリーズ 85、2009

2. 研究の目的

- (1) RC 部材の構造性能を損ねる腐食と付着の程度を推定するべく、電気化学的な自然電位法と、弾性波を用いたトモグラフィ法を組み合わせた非破壊検査方法を開発する。それも含む詳細調査と、広範囲を短時間で点検する標準調査を階層化したシステムを構築する。
- (2) RC 部材の劣化状態を踏まえ、複数の工法を併用する場合も含めた延命効果の高い補修補強方法を提案する。
- (3) 点検と補修補強を連係させた維持管理システムを構築する。

3. 研究の方法

図 1 に示すとおり、3 年間に亘り、全 4 つの [工程] を推進した。すなわち、目的(1)のため、[1]非破壊検査で腐食と付着を推定する方法を開発した後、[2]標準調査と詳細調査を階層化した点検システムを提案した。また目的(2)のため、[3]腐食するあるいは腐食した RC 試験体に補修補強を適用し効果を評価した。さらに目的(3)のため、[4]点検と補修補強を連係させたシステムを構築した。なお、成果は都度、学会発表や論文投稿により社会・国民へ発信した。

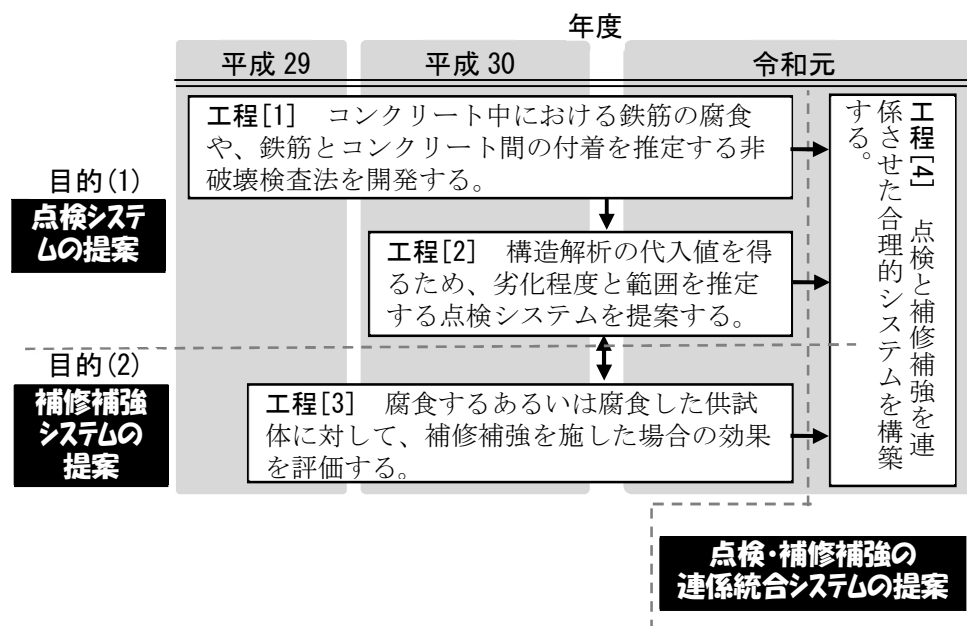


図 1 研究のフローと年度計画

4. 研究成果

(1) 進展期における非破壊検査を組み合わせた点検方法の開発

コンクリート供試体の水セメント比は 55%とし、形状は 200×200×150(mm)の直方体とし、3本の鉄筋(D13、SD345)を埋設した。この内の中央の鉄筋のみで、付着試験を行うため、800mmの突出部を設けた。実験ケースを表 1 に示す。本実験ではコンクリートの表面からでは劣化を確認できない場合に対する非破壊試験法を構築する。すなわち、コンクリート表面にひび割れが発生していない状態を主に、腐食ひび割れを設定した。また、鉄筋腐食を最も促進する方法として電食を採用した。電食の概要を図 2 に示す。ここで、電解液に 3%の塩化ナトリウム水溶液を用い、3本ある鉄筋の内の中心の鉄筋を陽極、供試体のかぶり面に置いた銅板を陰極とし、0.25Aの電流を通電させた。なお、かぶり面にひび割れを確認できた通電時間は 115 時間である。また、電

食終了後から自然電位および超音波トモグラフィ法の測定までの乾燥(20℃、RH60%)期間として、1日間あるいは30日間を設けた。なお、ケース1においては、養生終了後、かぶり面を水に浸漬し、その後に測定まで所定の乾燥(20℃、RH60%)期間を設けた。

乾燥期間終了後、コンクリート表面におけるひび割れの有無を肉眼で目視観察した。また、鉄筋腐食の可能性を把握するため、Ag/AgClを参照電極として、3本ある鉄筋の内の中央の鉄筋に対して、自然電位を測定した。なお、測定後にCSE(飽和銅硫酸銅)に対する値に換算した。これにより、鉄筋の腐食状況を確認することができ、実構造物であれば劣化範囲を把握することができる。次に、鉄筋コンクリートの腐食範囲に対して、詳細に調査するため、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリート内部のひび割れ発生の可能性を確認した。そこで、各センサ間の伝搬時間差を用いてトモグラフィ解析を行い、弾性波速度の低下を確認した。AEセンサの貼付位置を図3に示す。AEセンサは、60kHz共振型AEセンサであり、供試体断面を覆うように供試体表面に40mm間隔で15個を貼付した。なお、AEセンサの鉄筋軸方向における設置位置は供試体中央である。入力信号は、15Vのパルス信号を1つのAEセンサに与え、それによりセンサの受信面が振動し、供試体中に超音波が伝搬する。供試体中を伝搬した超音波は、他のAEセンサにて検出され、検出信号をプリアンプにて40dB増幅後、1波形をサンプリング周波数1MHz(サンプリング間隔1μs)でAD変換し、記録した。このようにして得られた信号を処理することで、コンクリート中を伝搬する弾性波情報から供試体内部の状態を推定した。最後に、電食させた鉄筋とコンクリート間の付着状態を確認するため、JSCE-G 503に準じて付着試験を行った。なお、付着状態を確認する鉄筋は、3本ある鉄筋の内の中心にある鉄筋であり、また非付着区間は設けなかった。

ここからは、30日間の乾燥後の実験結果を説明する。ケース1とケース2では、表面で腐食ひび割れは確認できなかった。一方、ケース3では、かぶりコンクリートの表面において、中心の鉄筋に沿って軸方向ひび割れが発生していることを確認できた。なお、ひび割れ幅は0.1mmであった。また、供試体断面においては、中央の鉄筋から両端の鉄筋に向けて、0.1mm幅の横方向ひび割れの発生も確認できた。

自然電位の結果を図4に示す。これによれば、ケース番号が大きいくとき、すなわち腐食ひび割れが進むと、自然電位が卑になることを確認できた。また、鉄筋腐食の可能性について、ASTMの判断基準によると、自然電位 $E > -200\text{mV}$ で90%以上の確率で腐食なし、 $-200\text{mV} < E < -350\text{mV}$ で不確定、 $E < -350\text{mV}$ で90%以上の確率で腐食ありとされている。この判断基準と測定された値を比較すると、ケース2とケース3において不確定と判断された。しかしながら、ケース1と比較すると鉄筋の腐食が進行している可能性が高いことを確認できた。

図5にコンクリート断面内の超音波トモグラフィ解析結果を示す。全ての供試体において、供試体側面部(1CH~5CHおよび11CH~15CH貼付面)において、比較的速度が低く表れており、ケース1とケース2でのかぶり部(6CH~10CH貼付面)ではその影響は小さい結果が得られている。これは、センサ間距離が40mmと短く、計測装置の波形時間分解能が1μsであることか

表1 実験ケース

Case	Conditions of Crack generation	Energization periods (hour)	n
1	No	0	1
2	Internal	96	2
3	Surface	115	1

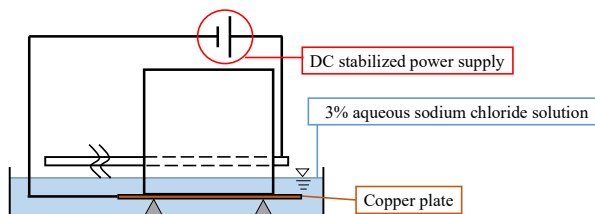


図2 電食の方法

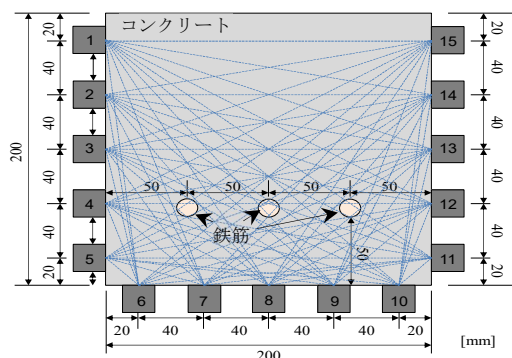


図3 AEセンサの貼付位置

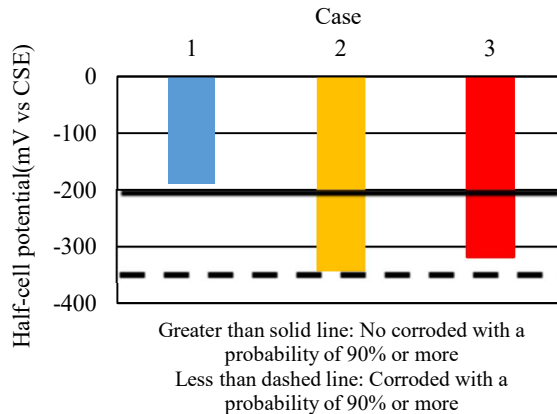


図4 自然電位の測定結果

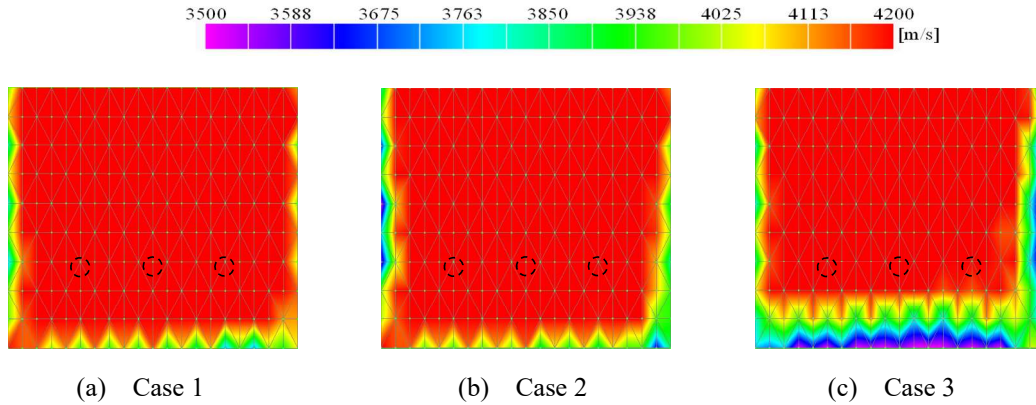


図5 超音波トモグラフィの解析結果

ら、速度が低く算出された結果であるのに加え、電食試験時にかぶり部は水中に存在し、含水率が高く保たれたことから、他の面と比較して同一表面を伝搬する速度が比較的高く算出されたことも要因と考えられる。したがって、これらの影響を除くための工夫が必要である。次に、かぶり部（6CH～10CH 貼付面）では、ケース1、ケース2において、弾性波速度の差は見受けられず、概ね同様の結果である。しかしながら、ケース3は、かぶり部分に低速度域が表れている。これは、ケース3のみで、鉄筋腐食に起因するひび割れが生じ、弾性波速度が低下したためと考えられる。ここで、腐食鉄筋近傍の要素を対象とした弾性波速度の平均値を図6に示す。これより、腐食ひび割れが大きくなるにつれて、微小ではあるが鉄筋周囲の弾性波速度が減少する傾向が確認できた。以上の結果より、超音波トモグラフィ法を用いることで、鉄筋腐食に起因するひび割れの有無が判断でき、鉄筋腐食に伴う弾性波速度の低下を可視化できる可能性が示唆される。

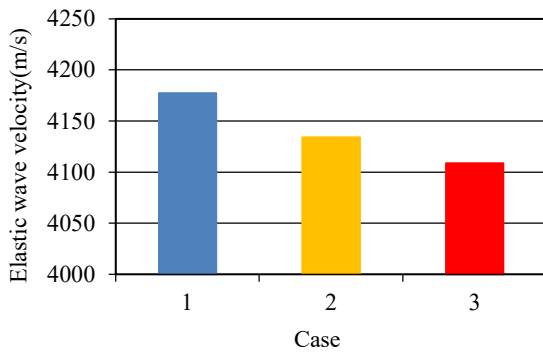


図6 鉄筋周囲の弾性波速度の解析結果

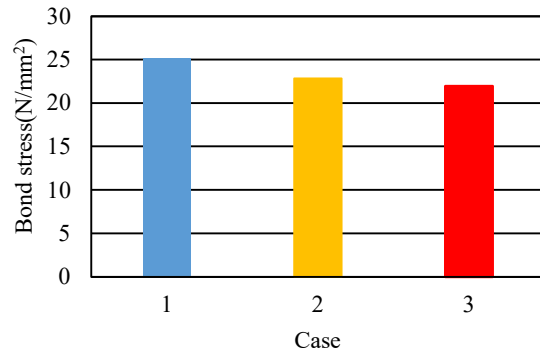


図7 付着強度の測定結果

付着強度の結果を図7に示す。いずれも最終的には付着割裂により破壊した。なお、付着強度は最大引張荷重を試験区間の鉄筋の表面積で除して求めており、鉄筋周長は健全鉄筋の公称値とした。これによれば、腐食ひび割れが進むにつれて、付着強度が低下する傾向を確認できた。また、ケース2において、コンクリート表面に腐食ひび割れは発生していないものの、付着応力が低下した。すなわち、腐食が小さい場合でも、付着強度は低下した。

乾燥期間が1日と30日の両ケースの場合における、非破壊試験と付着強度の結果を表2に示す。これによれば、腐食ひび割れが進むにつれて、自然電位、弾性波速度、および付着強度は低

表2 非破壊検査結果と付着強度

Case	Nondestructive tests				Bond stress (N/mm ²)	
	Half-cell potential (mV vs CSE)		Elastic wave velocity (m/s)			
	Drying period					
	1day	30days	1day	30days	1day	30days
1	-333	-190	4194	4178	26.22	25.15
2	-465	-342	4136	4134	20.92	22.83
3	-534	-318	4068	4109	15.31	21.95

下することが分かる。次に、鉄筋周囲の弾性波速度と付着強度の関係を図8に示す。これによれば、弾性波速度が低下するにつれて、付着強度は低下することが分かる。すなわち、コンクリート中が湿潤または乾燥状態のいずれにおいても、弾性波速度と付着強度には、比例の関係が認められる。

以上の実験結果に基づき、RC部材の塩害に対する維持管理における、鉄筋とコンクリート間の付着力を推定する方法について提案する。はじめに、比較的簡易な自然電位法を用い、広範囲を短時間で標準調査する。これにより、鉄筋腐食による腐食ひび割れが進んでいる箇所を把握する。次に、腐食が進んでいる箇所において、超音波トモグラフィ法を用い、コンクリート内部における弾性波速度の分布を可視化する。これにより、鉄筋周囲で微細な内部ひび割れの生じている可能性を確認する。さらに、図8に基づき、鉄筋とコンクリート間の付着力を推定する。本手法では、コンクリート中の含水状態が異なる場合においても同様の関係が認められたため、維持管理の面において有用性が高くなったと考えられる。

(2)効果的な補修補強方法の開発

シラン系表面含浸材を塗布したモルタル供試体に対して、2、10、20年間相当の促進耐候性試験を行い、塩分浸透深さを測定し、遮塩性について評価した。また、10年および20年相当の耐候性試験後に、シラン系表面含浸材を再塗布し、その後の遮塩性についても検討した。図9に塩分浸透深さの結果を示す。これによれば、含浸材を塗布したケースでは、無塗布のケースと比較して、塩分浸透が浅いことを確認できた。次に、50無(W/C50%、無塗布)のケースの塩分浸透深さに対する、塗布したケースの塩分浸透深さを、遮塩性として百分率で表し、その経時変化を図10に示す。この図によれば、水セメント比に拘わらず10年までの遮塩性は85%であることが認められた。しかしながら、20年が経過すると、遮塩性は10~35%に低下した。したがって、シラン系含浸材の遮塩効果は、10~20年の間で失われると判断できた。さらに、含浸材を再塗布したケースでは何れも、塩分浸透深さが0.0mmになり、完全に遮塩されることを確認できた。

また、電気防食による補修とFRP棒材の埋め込みによる補強を同時に行う工法について検討も行った。すなわち、図11に示すように被補強側の部材に対して表面に溝を掘り、この溝に電気防食工法による陽極材と耐食性の高い補強材を同時期に埋め込む工法である。実験の結果、かぶりコンクリートの打ち替えの有無が防食電流の通電状況に大きく影響を与えないこと、ならびに十分な定着長を有するステンレス鉄筋を埋め込むことによって良好な補強効果が得られることを明らかにした。

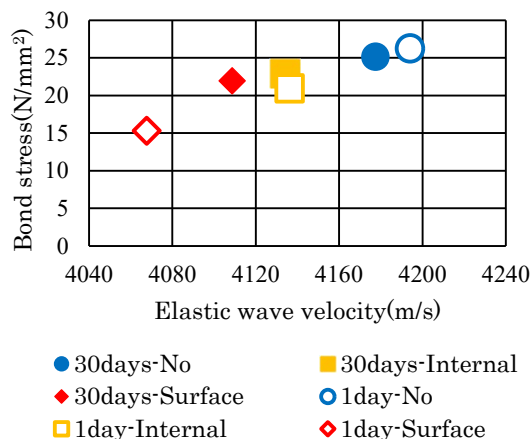


図8 鉄筋周囲の弾性波速度と付着強度の関係

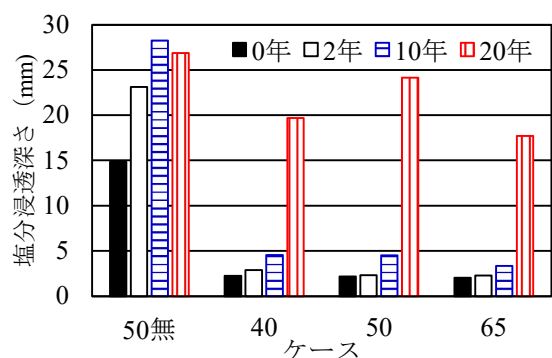


図9 含浸材塗布後の塩分浸透深さ

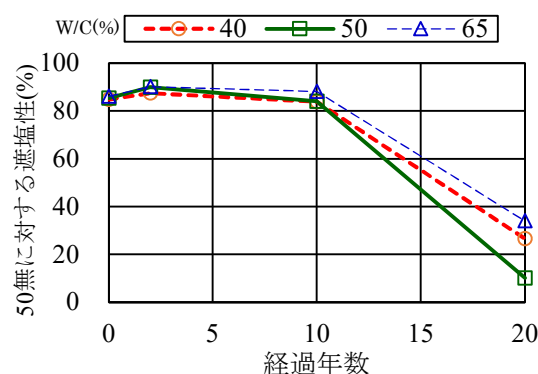


図10 遮塩性の経時変化

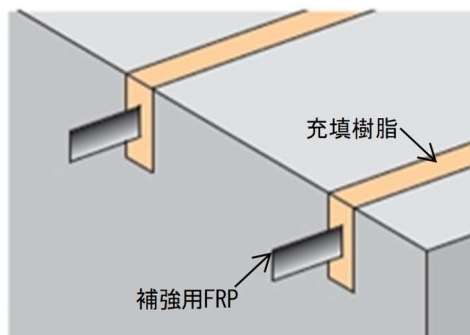


図11 表面埋込工法のイメージ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 上原子 晶久、石川 優衣、鹿島 篤志、近藤 洋介	4. 巻 1
2. 論文標題 鉄筋腐食の生じたRCはりにおける電気防食と耐食筋埋込の同時施工に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 298-303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中川 雄斗、宮里 心一、大野 健太郎	4. 巻 18
2. 論文標題 鉄筋腐食に伴うコンクリート内部ひび割れに対する非破壊試験の組合せによる付着力評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 93-98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宮崎 悠太、宮里 心一	4. 巻 18
2. 論文標題 20年相当の耐候性試験後における表面含浸材が塗布されたモルタル供試体の物質透過性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 267-270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuto Nakagawa, Shinichi Miyazato, Kentaro Ohno	4. 巻 7
2. 論文標題 Evaluation of adhesion strength in concrete with crack induced due to steel corrosion by nondestructive testing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Thailand Concrete Association	6. 最初と最後の頁 7-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://www.tci-thaijo.org/index.php/html/article/view/149532/119884	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 大嶋 俊一、黒岩 大地、西野 英哉、宮里 心一	4. 巻 41
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸材におけるけい酸ナトリウムのモル比とモルタルの改質効果に関する検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1577-1582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大嶋 俊一、大溝 尚英、宮里 心一、黒岩 大地	4. 巻 73
2. 論文標題 けい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタルの硫酸劣化に関する基礎検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 229-236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 森 拓未、大野 健太郎、宇治 公隆、宮里 心一	4. 巻 42
2. 論文標題 衝撃弾性波法によるRC部材の鉄筋付着切れ検出手法の基礎検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 掲載決定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Miyazato, Daishin Hanaoka	4. 巻 11(6)
2. 論文標題 Macrocell corrosion and its countermeasure for reinforced concrete	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Materials Letter	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5185/amlett.2020.061528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 花岡 大伸、岩本 剛
2. 発表標題 表面含浸材の塗布による鉄筋コンクリートの補修・延命化効果
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大嶋 俊一、宮里 心一、大溝 尚英、西野 英哉、黒岩 大地
2. 発表標題 けい酸塩系表面含浸材を塗布したモルタルの硫酸劣化に関する一考察
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hanaoka Daishin, Miyazato Shinichi
2. 発表標題 Fundamental Study on Repair and Life Extension Effect of Reinforced Concrete by Surface Penetrants
3. 学会等名 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nakagawa Yuto, Miyazato Shinichi, Ohno Kentaro
2. 発表標題 Development of Maintenance Method with Combination of Nondestructive Tests for Cracks in Concrete Due to Steel Corrosion
3. 学会等名 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation CSN2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakagawa Yuto, Miyazato Shinichi, Ohno Kentaro
2. 発表標題 Evaluation of Adhesion Strength in Concrete with Crack Induced Due to Steel Corrosion by Nondestructive Testing
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinichi Miyazato
2. 発表標題 Macrocell corrosion and its countermeasure for reinforced concrete
3. 学会等名 European Advanced Materials Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinichi Miyazato, Yuta Miyazaki
2. 発表標題 Permeability of Mortar with Surface Penetrant after Weathering Test for 20 Years
3. 学会等名 NACE East Asia & Pacific Area Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	上原子 晶久 (Kamiharako Akihisa) (70333713)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大野 健太郎 (Ohno Kentaro) (80571918)	首都大学東京・都市環境科学研究科・助教 (22604)	
研究分担者	大嶋 俊一 (Oshima Syunichi) (30367453)	金沢工業大学・バイオ・化学部・准教授 (33302)	
研究分担者	花岡 大伸 (Hanaoka Daishin) (90751529)	金沢工業大学・工学部・講師 (33302)	