

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02224

研究課題名（和文）複合劣化した鉄筋コンクリートに対する防食技術の開発と維持管理手順の提案

研究課題名（英文）Development of anti-corrosive technology for combined deterioration of RC structure and proposal of its maintenance

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） 11,700,000円

研究成果の概要（和文）：人は年を取ると、合併症を患うことがある。コンクリート構造物も同様に、長期供用後には、塩害、アルカリシリカ反応（ASR）や凍害の複合劣化が生じる。これまで複合劣化と物質透過性やひび割れ等の関係は評価されてきたが、鉄筋腐食との関係については未解明であった。以上の背景を踏まえて本研究では、塩害とASR、または塩害と凍害により複合劣化した鉄筋コンクリートにおける腐食メカニズムを明らかにした。その結果、水の供給が、複合劣化下の鉄筋腐食速度に影響を及ぼすことが明らかになり、遮水が重要な防食であることを検証した。また、予防保全策として、フライアッシュ（FA）の混和が効果的なことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄筋コンクリートの複合劣化は、21世紀になって実現象が顕在化し、世界的にも研究が始まったばかりの新分野である。したがって、塩害とASR、また塩害と凍害の影響を受けた鉄筋コンクリートの腐食速度を明らかにした点は、学術的意義と言える。その中で、水の供給の抑制が、複合劣化の進行を遅延させることを明らかにできた点は、インフラの老朽化が社会問題となっている現代の日本において、有効な対策を講じられる社会的意義である。さらに、FAの混和が複合劣化したコンクリートの鉄筋腐食を遅延させることを明らかにできた点は、老朽化対策と副産物の有効活用を兼ねた、時宜を得た社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：As people get older, they can get sick with multiple symptoms. Concrete structures also suffer from combined deterioration of chloride attack, alkali-silica reaction (ASR), and frost attack after long-term use. Although the relationship between combined deterioration and material permeability or cracking has been evaluated so far, steel corrosion has not been evaluated. Based on the above background, this study clarified the corrosion mechanism of reinforced concrete deteriorated with both chloride attack and ASR, or both chloride attack and frost attack. As a result, it was found that the supply of water affects the corrosion rate of rebar under combined deterioration and it was verified that the imperviousness is an important anti-corrosion. It was also clarified that mixing fly ash (FA) is effective as a preventive maintenance measure.

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 複合劣化 塩害 ASR 凍害 腐食速度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

4人のランナーが400mを進むとき、[A]リレーの様に各人が100mずつを走る、[B]二人三脚ならず四人五脚で400mを走る、策がある。ひとりで400mを走る時間に比べて、[A]は短く、[B]は長くなる。このように、単独と複数では、進行速度が異なる。また、病気や故障の原因によって、治療や修理の方法は異なる。そのため、単独要因と複合要因で、対処が異なる。

上記と同様に鉄筋コンクリート(RC)においても、単独の原因で劣化が進行する場合(単独劣化)と、それらが複合する場合(複合劣化)があり、その速度や対策は異なる可能性がある。特に老朽化が社会問題となってきた現代において、当初は単独劣化で進行していた部材においても、複合劣化に進展していることが増え、その研究が求められている。この様な背景を踏まえて、2017年4月~2019年9月に、代表者が委員長を、分担者らが幹事を務め、日本コンクリート工学会(JCI)の「鉄筋コンクリート構造物の複合劣化機構の解明とその対策に関する研究委員会(JCI複合劣化委員会)」を組織し、体系的な調査を推進した。その成果として得られた、複合劣化の種類と既往の研究成果を表1にて整理する。これによれば、「塩害とASR」あるいは「塩害と凍害」による複合劣化が生じたときの鉄筋腐食速度は未解明であった。

表1 複合劣化の種類と既往の研究成果に関する調査結果

劣化種類	調査文献	解明されている現象	未解明な課題
塩害と中性化	27件	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化による固定Cl⁻分解 ・Cl⁻浸透による中性化促進 ・鉄筋の腐食速度促進 	概ね無し
塩害とASR	22件	<ul style="list-style-type: none"> ・Cl⁻浸透でイオン組成が変化しASR促進 ・ASRのひび割れによりCl⁻浸透促進 	鉄筋の腐食速度が不明
塩害と凍害	12件	<ul style="list-style-type: none"> ・スケーリングと内部劣化の激化 ・凍害のひび割れによりCl⁻浸透促進 	

2. 研究の目的

本研究では、「塩害とアルカリシリカ反応(ASR)」および「塩害と凍害」に対する腐食メカニズムを解明し、防食技術を開発した。

3. 研究の方法

次の(1)~(3)に区分して、研究を推進した。

- (1) 「塩害とASR」の複合劣化の影響を受けたモルタル中での鉄筋腐食
- (2) 「塩害とASR」の複合劣化の影響を受けたコンクリート中での鉄筋腐食とFA混和の効果
- (3) 「塩害と凍害」の複合劣化の影響を受けたモルタル中での鉄筋腐食

4. 研究成果

- (1) 「塩害とASR」の複合劣化の影響を受けたモルタル中での鉄筋腐食

モルタル内部鉄筋の腐食速度を、「ASR」による単独劣化が生じた場合(No.1)、「塩害」による単独劣化が生じた場合(No.2)、「塩害とASR」による複合劣化が生じた場合(No.3)を模擬し、評価した。

供試体概要を図1に示す。鉄筋内部を流れる電流を測定するため、6つの要素に分割した鉄筋を用いた。モルタルのW/Cは0.60、S/Cは2.5とし、普通ポルトランドセメントを用いた。ここで、No.2とNo.3のモルタルへは、内在塩分を混和するため、混練水にCl⁻量で15kg/m³相当のNaClを混入した。またNo.2の細骨材は手取川産の陸砂のみを用い、一方No.1とNo.3の細骨材は手取川産陸砂とガラスカレットを8:2の質量比で混合させた。その結果、No.1とNo.3では顕著なひび割れが生じ、飽和NaCl溶液浸漬法(デンマーク法)により測定した膨張率(1か月目)は1.8~1.9%であった。一方、No.2ではひび割れを確認できなかった。

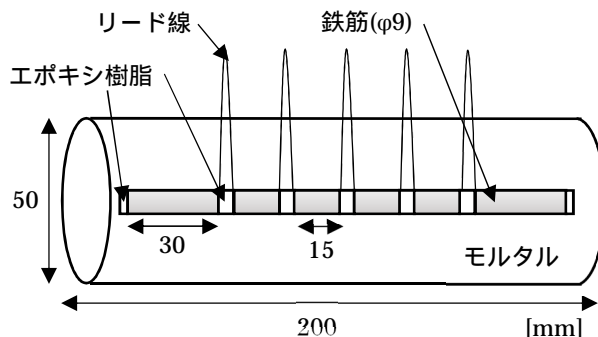


図1 モルタル供試体概要

総腐食電流密度の最大値により、腐食速度を比較した。すなわち総腐食電流密度の最大値が大きい程、腐食速度が速いと判断できる。図2によれば、No.1では塩分の供給がないため、腐食しないことを確認できる。またNo.2と比較してNo.3では、腐食速度が速いことを確認できる。

カソード反応が酸素の拡散過程に律速されている場合、カソード分極曲線には、電位を下げても電流が増加しない限界電流密度が現れることが知られており、定常状態での限界電流密度は酸素の拡散到達量に対応していると報告されている。よって、図2において腐食進行を確認できたNo.2とNo.3に対して、カソード分極曲線により、内部鉄筋への酸素供給量が腐食速度に及ぼす影響を考察した。図3によれば、No.2と比較してNo.3においてカソード分極曲線が右側にシフトしており、酸素は供給し易いと判断できる。よって、ASRによる膨張によって生じたひび割れを通じて、多くの酸素が供給され、腐食速度は速くなったと考えられる。

以上の結果、ASRが生じたモルタル内部の鉄筋腐食速度は、膨張率が大きい程、ひび割れ部から酸素が供給し易くなり、腐食速度は速くなることを明らかにできた。

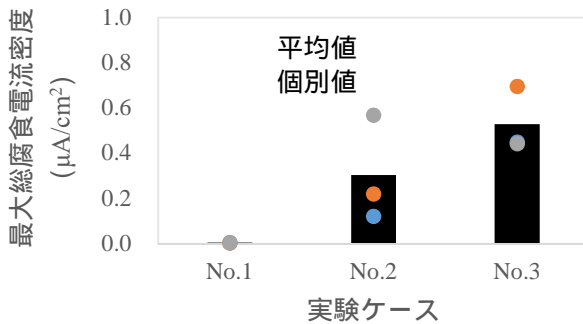


図2 各ケースの最大総腐食電流密度

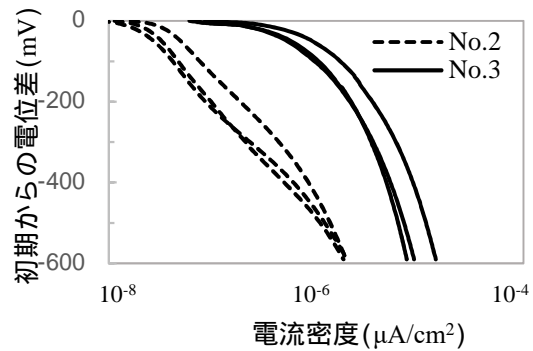


図3 カソード分極曲線

(2) 「塩害とASR」の複合劣化の影響を受けたコンクリート中での鉄筋腐食とFA混和の効果

塩害とASRの複合劣化が生じたコンクリート内部鉄筋の腐食速度を評価した。また、FA混和の効果を検証した。

実験ケースを表2に、供試体概要を図4に示す。全ケースにおいて、Cl⁻濃度が15kg/m³相当になるNaClを混練水へ添加した。また、ASR有の粗骨材には、手取川産砂利とガラスカレット(別名:珪酸ソーダ、SiO₂/Na₂Oのモル比=3.7)を7:3の質量比で混合した。さらに、FA有では、普通ポルトランドセメントの質量に対して内割で20%のFAを置換した。なお、1年後の膨張率は、図5に示すとおり、最大で0.25%であった。

表2 コンクリートの実験ケース

記号	W/B	ガラスカレット	FA
0.5C	0.5	無	無
0.5C-FA			有
0.5CA		有	無
0.5CA-FA			有
0.7CA	0.7		無
0.3CA	0.3		無

各ケースの最大総腐食電流密度を、図6に示す。これによれば、(a)ASRの影響として、0.5Cと比較して0.5CAでは最大総腐食電流密度が小さく、0.5C-FAと0.5CA-FAではほぼ等しい。既往の研究によれば、ひび割れ幅の増大による劣化因子の侵入により複合劣化の腐食速度を加速させる可能性が高い、その一方でASRゲルの緩衝作用により一旦腐食が進行しにくいとの評価もある。このように統一した見解は得られておらず、ASRが鉄

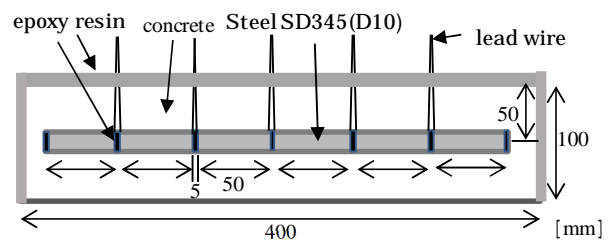


図4 コンクリート供試体概要

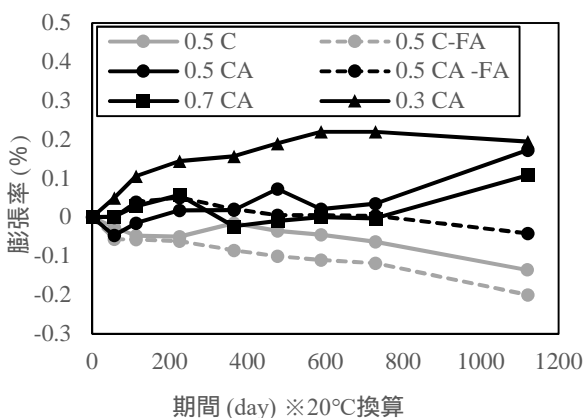


図5 膨張率

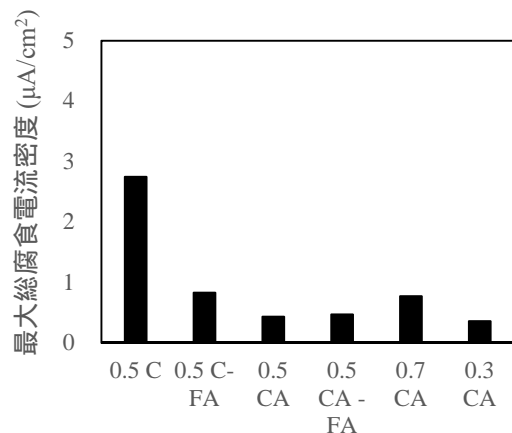


図6 最大総腐食電流密度

筋腐食に与える影響について、ここでは判断せず、後述の追加試験も含めて評価した。(b)FAの影響として、0.5Cと比較して0.5C-FAでは最大総腐食電流密度が小さく、0.5CAと0.5CA-FAではほぼ等しい。よって、FA混和による効果は塩害時には確認できたが、塩害とASRの複合劣化では確認できなかった。これも、ASRゲルの緩衝作用の影響が考えられる。(c)W/Cとして、最大総腐食電流密度は0.7CA > 0.5CA > 0.3CAとなった。

図7に膨張率と最大総腐食電流密度の関係を示す。これによれば、ASRの膨張率が高いほど、最大総腐食電流密度が低いことを確認できた。

図8に、コンクリート抵抗を示す。これによれば、(a)ASRの影響として、0.5Cと比較して0.5CAでは、および0.5C-FAと比較して0.5CA-FAではコンクリート抵抗が大きい。よってASRのひび割れによって電気回路の形成は困難となり、コンクリート抵抗が高くなったと考えられる。(b)FAの影響として、0.5Cと比較して0.5C-FAでは、および0.5CAと比較して0.5CA-FAではコンクリート抵抗が大きい。ここで、図9に細孔径分布(ポロシティー)を示す。これによれば、FA混和で200nm以下の空隙が少なく、緻密になったことが確認できた。(c)W/Cの影響として、コンクリート抵抗は0.3CA > 0.5CA > 0.7CAとなった。

図10に最大総腐食電流密度とコンクリート抵抗の関係を示す。これによれば、コンクリートの電気抵抗が高い方が、最大総腐食電流密度が低いことを確認できた。すなわち、ASRのひび割れによって電気回路の形成は困難となり、最大総腐食電流密度が小さくなった。

図11に、アノード分極曲線を示す。これに基づき、電位差が620mVの電流密度と最大総腐食電流密度との関係を図12に示す。これによれば、アノード分極曲線で得られた電流密度が増加すれば、最大総腐食電流密度が増加することが確認できた。これらから、ASRの影響として、0.5Cと比較して0.5CAではアノード電流密度が減少していることを確認できる。したがって、ASRゲルの緩衝作用により、鉄筋の不動態化が起きていると考えられる。

図13に、カソード分極曲線を示す。これに基づき、電位差が-590mVの電流密度と最大総腐食電流密度との関係を図14に示す。これによれば、カソード分極曲線で得られた電流密度が増加すれば、最大総腐食電流密度が増加することが確認できた。これらから、ASRの影響として、0.5Cと比較して0.5CAではカソード電流密度が減少していることを確認でき、ASRの膨張で細孔が緻密化され、酸素が供給されにくくなったと考えられる。またFAの影響として、0.5Cと比較して0.5C-FAでは、および0.5CAと比較して0.5CA-FAではカソード電流密度が減少していることを確認できた。これは、FAのポゾラン反

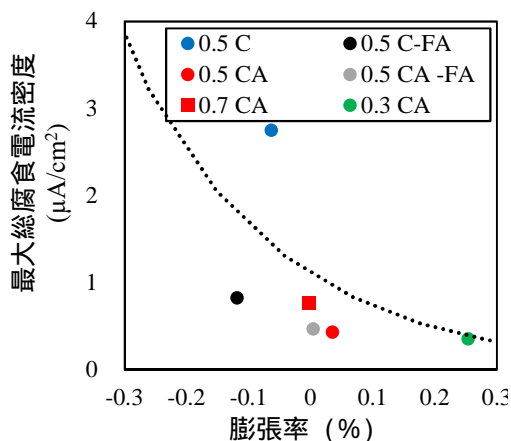


図7 膨張率と最高総腐食電流密度の関係

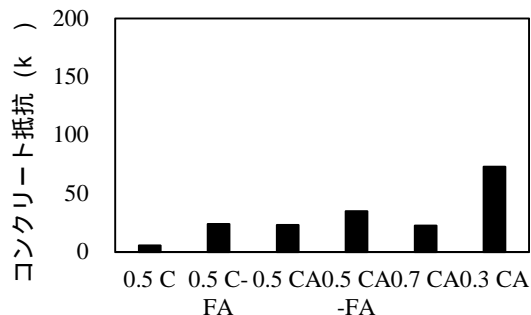


図8 コンクリート抵抗

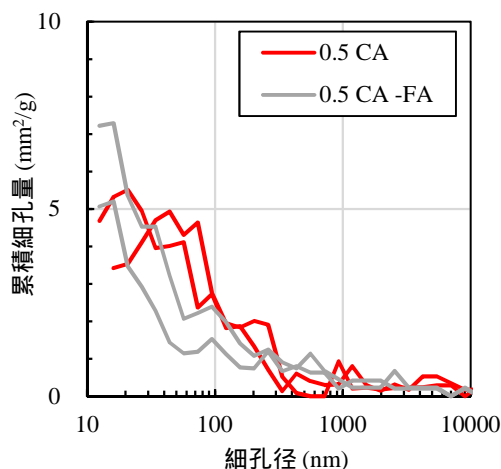


図9 ポロシティー

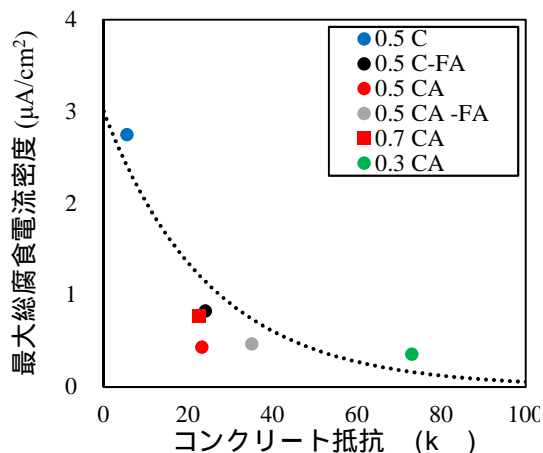


図10 コンクリート抵抗と最高総腐食電流密度の関係

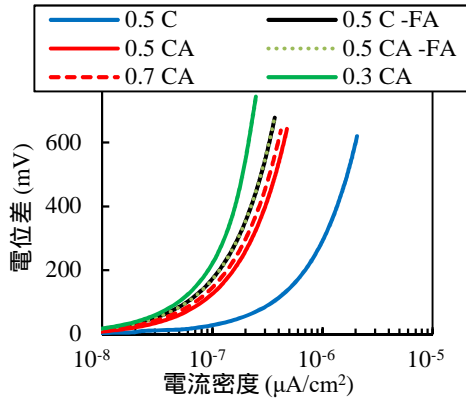


図 11 アノード分極曲線

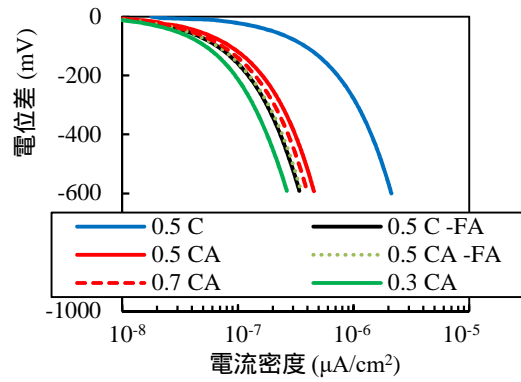


図 13 カソード分極曲線

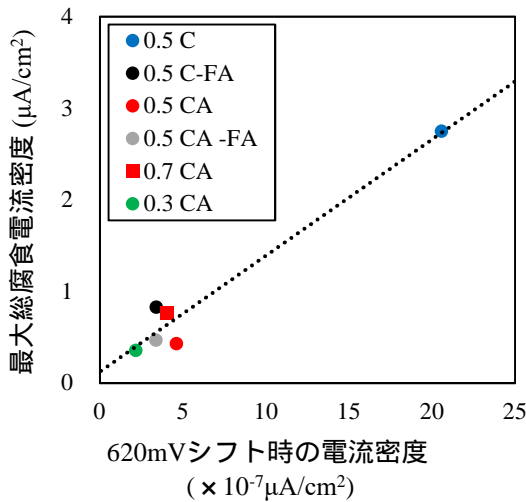


図 12 アノード分極と最大総腐食電流密度

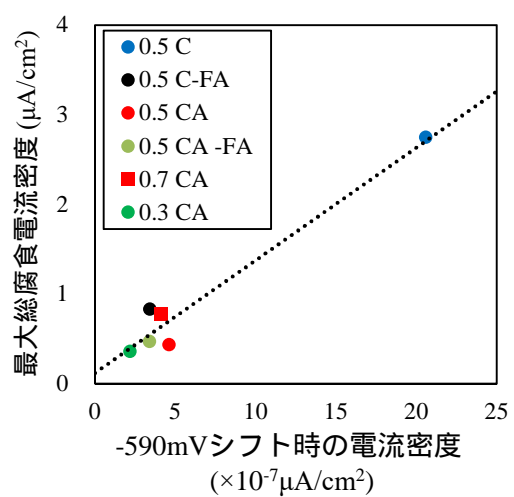


図 14 カソード分極と最大総腐食電流密度

応によって、図 9 に示すとおり組織が緻密化され、酸素が供給されにくくなったと考えられる。以上の結果から、直接に水がコンクリートへ供給されない、湿潤気中に 40 で 1 年間程度に亘り暴露されたコンクリートでは、塩害と ASR による複合劣化の鉄筋腐食速度は、塩害の単独劣化による腐食速度と比較して、ASR ゲルの影響で小さくなった。これは、ASR によってコンクリートに微細ひび割れが発生し、コンクリートの電気抵抗が高くなることに加えて、ASR ゲルによって酸素供給が阻害されることが原因と考えられた。また、コンクリートに FA を混和することで、塩害と ASR により複合劣化する鉄筋腐食速度を抑制できた。これは、FA 混和によって、緻密化し、コンクリート抵抗が上がり、腐食回路が形成されにくくなったためと考えられた。

(3) 「塩害と凍害」の複合劣化の影響を受けたモルタル中での鉄筋腐食

塩害と凍害を受けるモルタル内の鉄筋腐食性状を評価した。

供試体概要を図 15 に、35 サイクルに亘り実施したスケーリング促進暴露の温度履歴を図 16 に示す。同暴露では、3%塩化ナトリウム水溶液を密閉容器に満たしてから、試験体の全体を浸漬させた。

アノード電流密度の測定結果および供試体の外観観察によれば、若干の錆汁が供試体から湧出し、かつアノード電流が測定されたことから、塩害と凍害の複合劣化が進行したと考えられた。

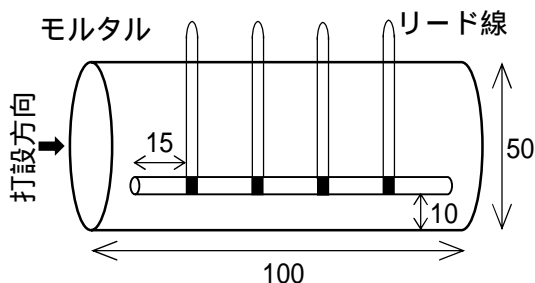


図 15 モルタル供試体概要

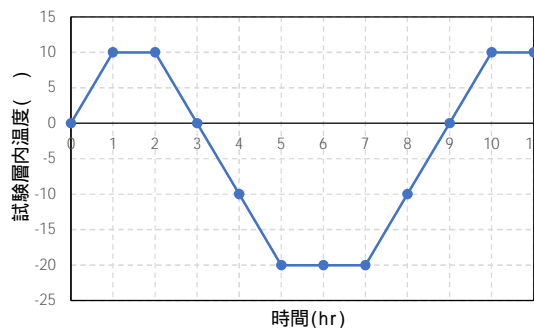


図 16 スケーリング促進暴露の条件

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 菅原典大、宮里心一	4. 巻 75
2. 論文標題 塩害と ASR の複合劣化が生じたモルタル中鉄筋の腐食速度	5. 発行年 2022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 263 ~ 269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.75.263	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 宮里心一	4. 巻 899
2. 論文標題 コンクリート構造物の複合劣化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート	6. 最初と最後の頁 8 ~ 15
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 無
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 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 菅原典大、宮里心一
2. 発表標題 塩害とASRによる複合劣化がモルタル内部の鉄筋腐食に及ぼす影響
3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上原子晶久、伊部颯
2. 発表標題 補修・補強を省力化した鉄筋腐食の生じたRC部材における電気化学的検討
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅原典大、宮里心一
2. 発表標題 塩害とASRの複合劣化が生じたモルタル内部鉄筋の腐食速度評価
3. 学会等名 第76回セメント技術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮里心一
2. 発表標題 コンクリート構造物の複合劣化
3. 学会等名 第76回セメント技術大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅原典大、宮里心一
2. 発表標題 塩害とASRの複合劣化が生じたコンクリート中鉄筋の腐食速度とFA 混和の抑制効果
3. 学会等名 第77回セメント技術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保田寿々、上原子晶久
2. 発表標題 塩害と凍害を同時に受けるモルタル内の鉄筋腐食特性とスケーリング性状
3. 学会等名 第78回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 巳野寛貴、伊藤始、遠藤雅樹、宮里心一
2. 発表標題 ASR膨張を生じたコンクリートの水分浸透性と塩分浸透性に関する検討
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021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	伊藤 始 (Ito Hajime) (10553133)	富山県立大学・工学部・教授 (23201)	
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)	
研究分担者	斎藤 豪 (Saito Tsuyoshi) (90452010)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------