

令和 2 年 6 月 27 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06512

研究課題名(和文) 環境作用と材料特性の強連成によるコンクリート性能評価

研究課題名(英文) concrete

研究代表者

李 春鶴 (LI, CHUNHE)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：80431724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート構造物の屋外での使用を想定した曝露試験を普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、早強ポルトランドセメントの3つの異なるセメントを用いた供試体で行い、環境作用と材料特性の違いがコンクリートの材料特性及び鉄筋腐食に与える影響を強度、物質移動、細孔構造、電気化学的な観点から評価した。その結果、材料特性の異なる供試体に対して、環境作用は強度増進、構造の緻密化などの効果をもたらすことが確認された。また高炉セメントB種を用いた場合は、環境作用により未水和セメントの継続水和が生じ、鉄筋の自然電位の低下を促す劣化因子の侵入が抑制されることも確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートの性能が時々刻々変化していることは一般的な認識で、コンクリートの製造段階および養生段階の各要因が性能改善に及ぼす影響を評価するのが従来の研究アプローチである。しかしながら、供用期間中においての雨水などの環境作用の影響を取り組んで、未水和セメントの追加水和とそれに伴う細孔構造の再形成、これらの変化がコンクリートの潜在的な性能に及ぼすより詳細な影響要因を抽出・評価する研究は皆無である。雨水などの環境作用による生ずるコンクリート性能変化のメカニズムを明らかにすることで、実環境の実情に基づいてプラス効果とマイナス効果の両方を精緻に評価したことは、工学的意義を有する。

研究成果の概要(英文)：An exposure test assuming outdoor use of reinforced concrete structures was carried out on specimens using three different cements: Ordinary portland cement, Blast furnace slag cement class B, and high early strength portland cement. The effects on material properties and reinforcement corrosion were evaluated from the viewpoints of strength, mass transfer, pore structure, and electrochemical. As a result, it was confirmed that the environmental action has the effect of increasing the strength and densification of the structure for the specimens with different material properties. In addition, it was also confirmed that when Blast furnace slag cement class B was used, continuous hydration of unhydrated cement occurred due to environmental effects, and the invasion of deterioration factors that promote a decrease in the self-potential of rebar was suppressed.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：雨水 鉄筋腐食 耐久性能 材料特性 水分供給 圧縮強度 細孔構造 自然電位

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の時々刻々変化する性能を評価し、寿命を精度よく推定するためには、様々な設計・施工(異なる材料特性の形成)・環境作用(長期間作用)に関わる高い質のシステムの開発が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリート構造物の作製段階および養生段階に留まらず、供用期間中における環境作用、特に雨水・気温などの環境作用がコンクリート構造物の強度特性、耐久性能、寸法変化などの性能に及ぼす影響メカニズムの解明を含めた、体系的に評価検討した。

3. 研究の方法

供試体は、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および早強ポルトランドセメントを用いて作製した。それぞれのコンクリートの配合は表 - 1 に示す。配合 D は塩害を想定した促進試験を行うため、塩化物イオン 8.24kg/m³ を打込み時に混入した。

表 - 1 コンクリート供試体の配合

配合	セメントの種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					スラブ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	Cl-		
A	普通ポルトランドセメント	67	183	274	857	960	0	18	3.9
B	高炉セメント B 種	55	183	328	834	967	0	10	2.9
C	早強ポルトランドセメント	65	190	224	967	924	0	8	2
D	早強ポルトランドセメント	65	190	224	967	924	8.24	8	2

曝露環境は、屋内の気中と屋外および水中養生の合計 3 種類であり、屋内の気中環境は、温度 15 ~ 25°C、相対湿度 50 ~ 80% の室内環境、屋外環境は、日光や雨風を遮るものがない場所を曝露場所とした。水中環境は、水温 20°C の室内の養生槽を用いた。曝露においては、実際の養生から供用の流れを想定し、所定の材齢より一部供試体の曝露環境を変更させ、異なる曝露履歴を持つ供試体を用いた。曝露履歴は、水中から屋外(以下 WO とする)、屋外から屋内の気中(以下 OD とする)、屋内の気中から屋外(以下 DO とする)、同一環境で曝露を継続する供試体(以下 WW、DD、OO とする)の 6 種類とした。各曝露履歴を表 - 2 に示す。

表 - 2 供試体の曝露環境

記号	曝露環境	
WO※1	水中	屋外
WW※1	水中	
OD※1	屋外	気中
OO※1	屋外	
DO※1,2	気中	屋外
DD※1,2	気中	

※1. 配合 A、配合 B は材齢 28 日目に曝露環境変更

※2. 配合 C、配合 D は材齢 100 日目に曝露環境変更

供試体の種類と形状寸法は、円柱供試体が φ100mm×200mm、板状供試体が 250 mm×250 mm×100mm である。板状供試体では直径が 13mm、長さが 300mm の丸鋼を供試体 1 体につき 2 本ずつ用いた。供試体の概要は図 - 2 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合 A では円柱供試体のみを作製した。打込み後 3 日で脱型し、曝露履歴は WW、WO、DD、DO、OO の 5 種類とした。高炉セメント B 種を用いた配合 B では円柱供試体および板状供試体を作製した。打込み後 3 日で脱型し、曝露履歴は円柱供試体が WW、WO、DD、DO、OO の 5 種類、板状供試体が OD、DD、DO、OO の 4 種類とした。早強ポルトランドセメントを用いた配合 C および D では板状供試体のみを作製した。打込み後 2 日で脱型し、曝露履歴は DD と DO の 2 種類とした。

本研究では、圧縮強度試験、酸素拡散試験、水銀圧入試験、自然電位測定試験の 4 つの試験を実施した。圧縮強度試験に用いた供試体は、配合 A および B である。試験は両配合共に材齢 2 ヶ月、13 ヶ月の 2 回行った。酸素拡散係数の測定には、白川らが提案した気体拡散係数測定方法 3) を採用した。酸素拡散試験に用いた供試体は、配合 A および B である。円柱供試体を、型枠面から 50mm 幅に切断した後、105°C の乾燥炉で 24 時間乾燥させて試験に供した。試験は両配合とともに材齢 2 ヶ月、13 ヶ月の 2 回行った。水銀圧入試験に用いた供試体は、配合 A および B である。円柱供試体を粉砕し、モルタル部分を 5mm 程度の立方体状にした後、アセトンに 24 時間以上浸漬させ、その試料を 48 時間、温度が 40°C の真空乾燥炉で乾燥させた後、真空状態にしたデシケーターに 1 時間以上保管したものを試験に供した。試験は両配合とともに材齢 2 ヶ月半、13 ヶ月の 2 回行った。自然電位の測定に用いた供試体は、配合 B および C、D である。計測は非破壊型鉄筋腐食診断機を用いて行い、計測間隔はおおよそ 1 週間とした。

4. 研究成果

圧縮強度試験結果を図 - 1 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合 A と高炉セメント B 種を用いた配合 B の材齢の経過による圧縮強度の増加率を比較すると、配合 B が配合 A より大きいことが確認できる。長期的な曝露を行う場合、高炉セメント B 種が圧縮

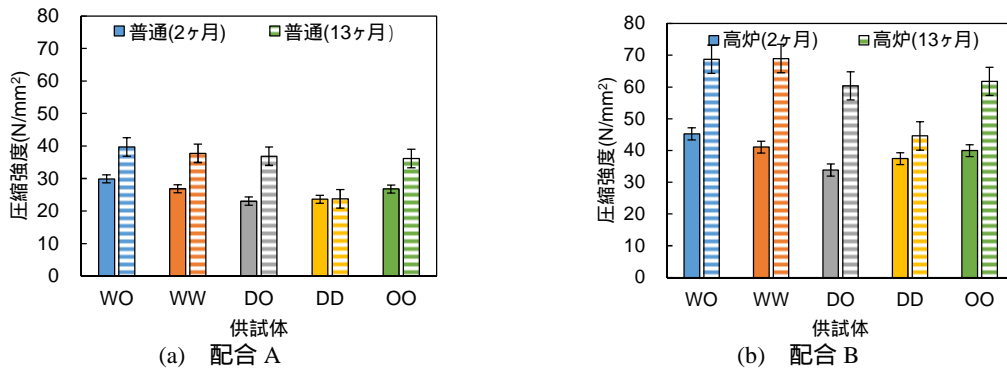


図 - 1 圧縮強度試験結果

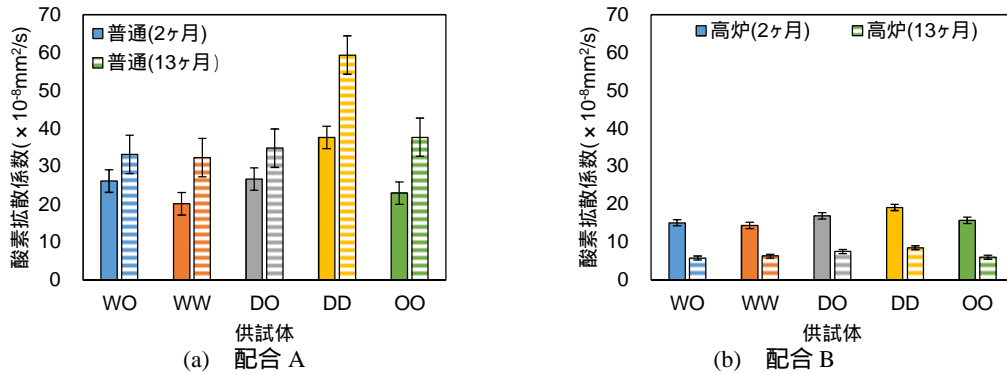


図 - 2 酸素拡散試験結果

強度において優れた材料であることが確認できた。また、両配合において最終的な曝露を屋外へ移動したものの(WO, DO, OO)と水中(WW)で継続して曝露を行った供試体の強度の伸びがほぼ同程度であった。これは、圧縮強度の増進効果に対する屋外環境における雨水等の水分供給が十分に行われた場合の影響は、水中における水分供給の影響と同程度であると推測できる。

酸素拡散試験結果を図 - 2 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合 A と高炉セメント B 種を用いた配合 B を比較すると、材齢 13 ヶ月時点において配合 A は酸素拡散係数の増加、配合 B は酸素拡散係数の減少という異なる結果となった。これより長期的な曝露を行う場合、高炉セメント B 種が優れた材料であることが確認できた。配合 A の材齢の経過に伴い酸素拡散係数が大きくなる傾向については、後述の水銀圧入試験結果を用いて説明する。また、配合 A において、最終的な曝露履歴を屋外に変更した供試体と水中曝露の供試体との間に大きな差異はないことから、屋外環境における十分な雨水の供給による物質移動を抑える効果は、水中と同程度であることが確認できた。

細孔量の試験結果を図 - 3 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合 A において、曝露材齢 2 ヶ月半の細孔分布に着目すると、初期に水中養生を行った WO, WW は細孔径が 100nm 付近で細孔量のピークを確認し、それ以外は、細孔径が 500nm 付近で細孔量のピークが確認できた。曝露材齢 13 ヶ月の細孔分布に着目すると、初期に水中養生を行った WO, WW は細孔のピーク径が小さくなるものの細孔ピーク径に対する細孔量は増加しているが、それ以外は、全体の細孔量が小さくなるもののピーク径は大きくなっていることが確認できる。また、すべてのケースにおいて 1000nm 以上の細孔量が増えていることが確認できた。

以上の結果より、配合 A では、屋外曝露における環境作用により、細孔径の小さい細孔量の増加、すなわち細孔構造の緻密化は見込めるものの、供試体の表層が粗になる懸念があることが確認できた。前述の酸素拡散試験において、酸素の拡散の方向が円周方向の直角の方向になるため、円周面近く(供試体の表層)は比較的に粗な組織になり、酸素拡散係数が増加するという結果を示したと考えられる。次に高炉セメント B 種を用いた配合 B において、曝露材齢 2 ヶ月半に着目すると、細孔径 100nm 付近で細孔量のピークが確認され、細孔量は水中曝露を受けた WW, WO が最も多く、次いで屋外曝露を受けた OO, DO、そして気中曝露を継続した DD が最も少ない細孔量を示した。曝露材齢 13 ヶ月においては、細孔量のピークは細孔径 40nm, 200nm 付近の 2 カ所で確認できた。特に細孔径 200nm 付近では、DD のみ細孔量 0.007ml/ml と高い値を示したのに対し、それ以外の供試体は 0.004ml/ml 未満であった。これより、DD を除く供試体、すなわち水中曝露および屋外曝露を受けた供試体では、細孔径の小さな細孔量が増加し、細孔構造の緻密化が生じたことが確認できた。

配合 A と配合 B を比較すると、配合 A においては屋外曝露を行った場合、水中曝露と同様に細孔構造の緻密化が期待できるが、表層が多少粗になる懸念もある。配合 B では屋外曝露は水中曝露のように粗になることなく、細孔構造の緻密化が期待できると考えられる。

本研究では、降水量、相対湿度、温度が自然電位の変化に与える影響を検討するために、自然電位そのものによる比較ではなく、目標時の自然電位とその一つ前の計測時の自然電

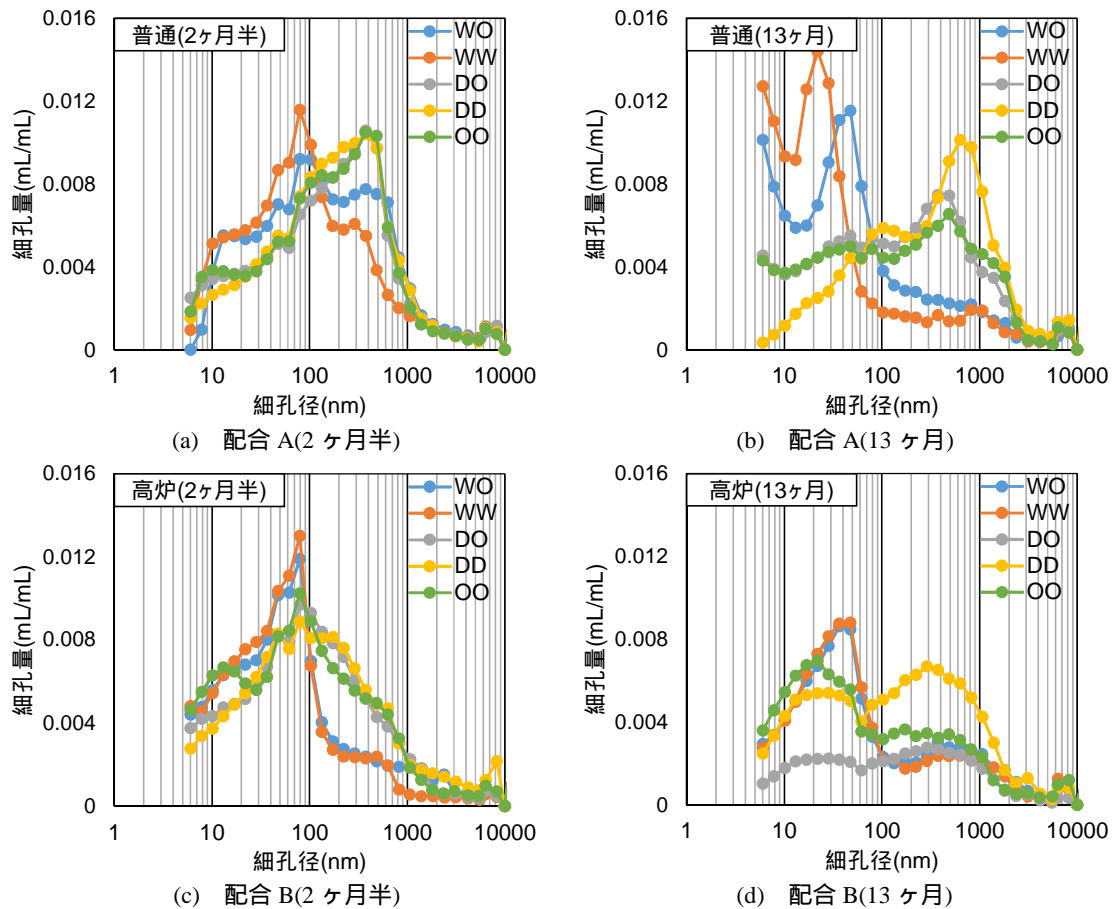


図 - 3 水銀圧入試験結果

位からその変化率を求めて、比較・検討を行った。温度、相対湿度も同様に、目標時の計測データとその一つ前にデータからの変化率を求めて、自然電位の検討に用いた。降水量は、一つ前の計測時から目標時まで降った積算降水量を算出し、降水量の増加率を求めて自然電位の検討に用いた。ゆえに温度 1 変化、相対湿度 1% 変化、降水量 1mm 増加による自然電位の変化を検討した。その結果を図 - 4 に示す。高炉セメント B 種を用いた配合 B において、初期の養生効果を比較するため、気中曝露を継続した DD と、初期に屋外養生を行い、後に気中曝露を行った OD を比較する。自然電位の変化は DD が大きく、理由として OD では初期の屋外養生効果によって緻密な表層が形成され、電位の低下因子である水や酸素の侵入を抑制したためと考えられる。また、環境作用別の比較では、湿度変化による自然電位の変化が温度変化によるものを上回ったため、自然電位の変化は、屋内曝露では相対湿度による影響が大きいことが確認できた。次に、屋外曝露を継続した OO と、初期に気中養生を行い、後に屋外曝露を行った DO を比較する。屋内同様、自然電位の変化は初期が気中養生の DO が大きく、初期から屋外曝露を継続している OO では、自然電位の変化が小さく抑えられた。また、環境作用別の比較では、温度変化による自然電位の変化が降水量増加によるものを上回ったため、自然電位の変化は、屋外曝露では温度による影響が大きいことが確認できた。早強ポルトランドセメントを用いた配合 C において長期曝露の影響を比較するために、長期的に気中曝露を継続した DD と屋外曝露を行った DO を比較すると、自然電位の変化は両環境とも同程度であった。環境作用別に比較すると、DD では高炉セメント B 種を用いた配合 B と同様、温度変化による自然電位の変化が大きく、DO では温度変化と降水量増加による自然電位の変化が同程度であった。そこで DO における高炉セメント B 種を用いた供試体の結果と比較すると、自然電位の変化そのものは早強ポルトランドセメントを用いた場合が大きくなった。理由として、曝露環境を屋外に変更した場合に生じる、雨水や温度上昇などの作用による未水和セメントの継続水和が、高炉セメント B 種と比較して早強ポルトランドセメントでは小さいためであると考えられる。また、高炉セメント B 種を用いた配合 B では、温度上昇に伴い自然電位の変化は貴へ向かう傾向が確認できたのに対し、早強ポルトランドセメントを用いた配合 C では、温度上昇に伴い自然電位の変化は卑へ向かう傾向が確認できた。

最後に、早強ポルトランドセメントに塩化物イオンを混入した配合 D において、塩害環境下における自然電位の変化を、屋内曝露を継続した DD と、初期に気中養生を行い、後に屋外曝露を行った DO を比較する。自然電位の変化は屋外曝露の DO が大きく、理由として塩害の主要因である水分侵入と、温度上昇による相乗効果が電位低下を促進させるためであると考えられる。また、同じ早強ポルトランドセメントを用いた配合においても塩化物イ

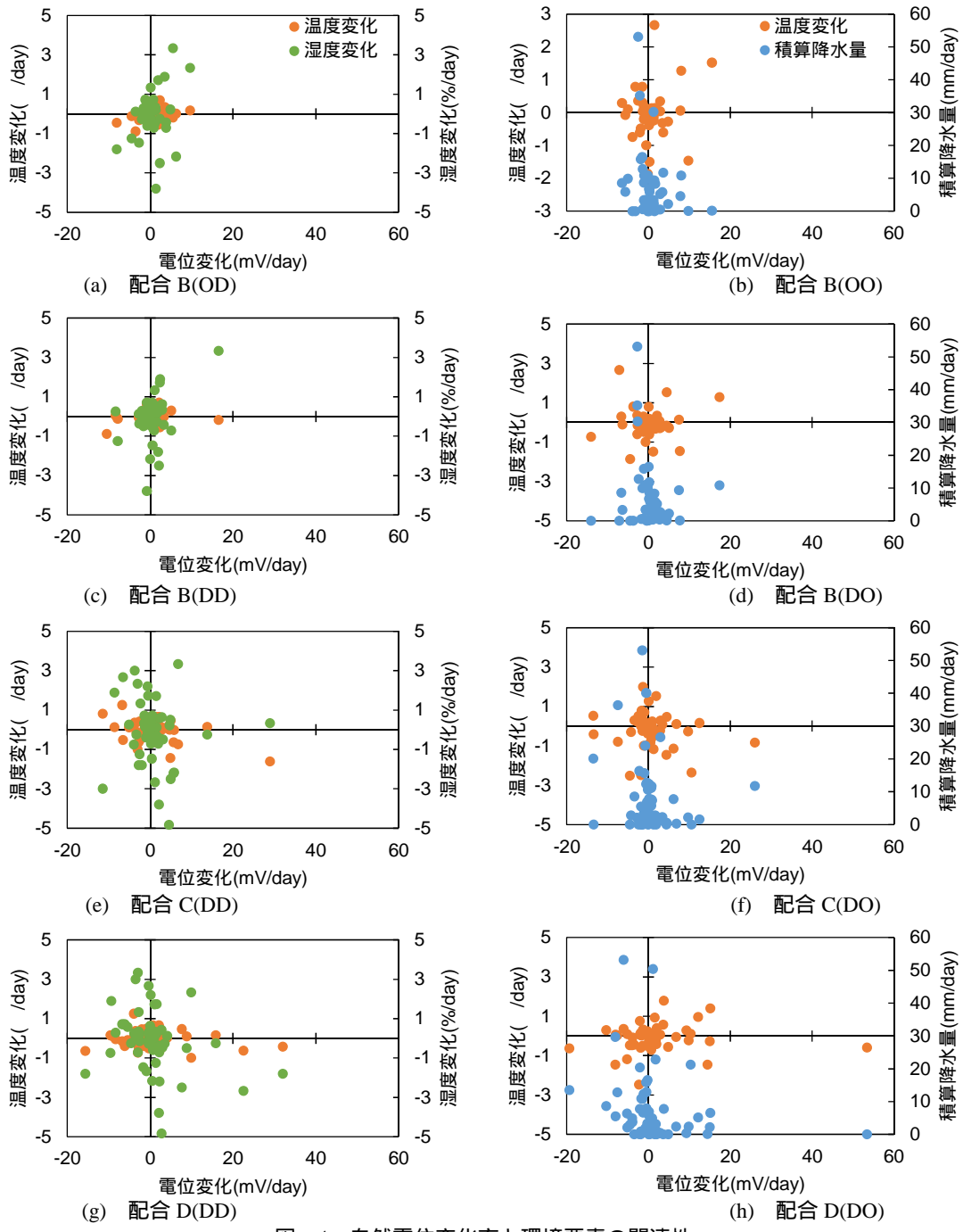


図 - 4 自然電位変化率と環境要素の関連性

オンがある場合とない場合では、塩化物イオンありの場合が自然電位の変化は大きいことも確認できた。普通ポルトランドセメントを用いた場合においては、温度、雨水等の屋外環境作用により、圧縮強度の増進および細孔構造の緻密化が期待できる。一方で、水中曝露と比較して表層が多少粗になる懸念があり、コンクリートの品質向上においては初期段階の十分な養生が必要であると考察する。高炉セメント B 種を用いた場合においては、屋外環境作用により、普通ポルトランドセメント以上の圧縮強度増進、細孔構造の緻密化が期待できる。また、実際に鉄筋を内部に配した場合、温度上昇による未水和セメントの継続水和、表層の緻密化が期待され、劣化因子を遮断し、鉄筋が健全に保たれる可能性が期待できる。

早強セメントを用いた場合においては、屋外環境において緻密化の影響が小さい。また、温度の上昇により鉄筋の自然電位は低下する懸念がある。塩化物イオンなどが入り、鉄筋腐食が進行している場合、温度上昇に加え、降水量の増加により自然電位はさらに低下する懸念があることも確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 李春鶴, 兒玉悠利	4. 巻 第34号
2. 論文標題 異なる相対湿度と亜硝酸リチウム圧入量が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木構造・材料論文集	6. 最初と最後の頁 113-119
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 李春鶴, 江良和徳, 辻幸和, 郭度連	4. 巻 39
2. 論文標題 相対湿度および亜硝酸リチウムが鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的研究	5. 発行年 2017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 973 - 978
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 兒玉悠利, 李春鶴, 江良和徳, 峯松昇司
2. 発表標題 異なる亜硝酸リチウムの量と環境条件がRC部材の鉄筋に与える影響に関する研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島直輝, 李春鶴
2. 発表標題 材料特性と屋外環境における雨水などの環境作用がRC構造物に及ぼす影響
3. 学会等名 平成30年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂元利隆, 李春鶴
2. 発表標題 屋外環境が鉄筋腐食に及ぼす影響についての基礎的研究
3. 学会等名 第71回セメント技術大会講演要旨
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 兒玉悠利, 李春鶴, 江良和徳, 峯松昇司
2. 発表標題 亜硝酸リチウムの量と異なる環境条件が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 平成29年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2017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	亀井 健史 (kamei takeshi) (30177597)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	削除：2019年4月11日