

論文 コンクリートの品質における雨水等の環境作用に関する考察

中島 直輝*1・李 春鶴*2

要旨：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。

キーワード：養生環境、供用環境、セメント、材料特性、圧縮強度、物質移動抵抗性、細孔構造、鉄筋腐食

1. はじめに

コンクリートとその環境作用は、その関係性を断つことができないほど密接な関係にあるため、構造物の長寿命化のためには、環境作用による影響の十分な理解が必要である。伊代田らの研究^{1,2)}では、供試体脱型後の養生環境を変化させた場合の強度変化を比較すると、乾燥養生環境から途中で水中養生環境に移し水分供給を行った供試体の水和率は、水中養生を継続させた供試体と同程度であるが、圧縮強度は 6 割程度までしか回復しないことが明らかになっている。このようにコンクリートと水分供給との関連性に関する研究は数多くあるが、これらは室内環境における比較であり、屋外曝露試験を行っ

た研究は数少ない。特にコンクリート構造物は、降雨や気温、相対湿度といった環境作用を直接受ける屋外での使用がほとんどであり、実構造物の養生環境、使用環境を想定した屋外曝露試験の必要性は高いと考えられる。

本研究では、屋外環境におけるコンクリート構造物が受けると考えられる雨水、気温、相対湿度といった環境要素の影響について着目し、環境要素と材料特性の違いがコンクリートに及ぼす影響の検討を行った。

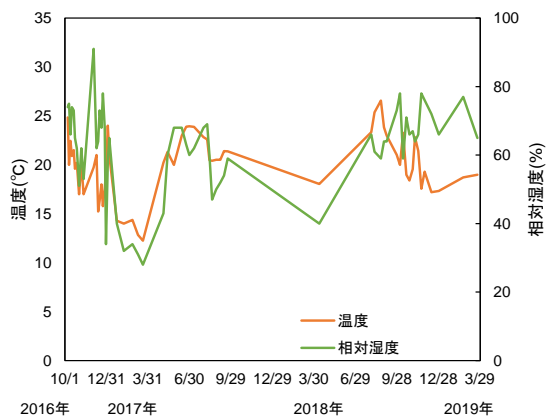
2. 実験概要

2.1 供試体の概要

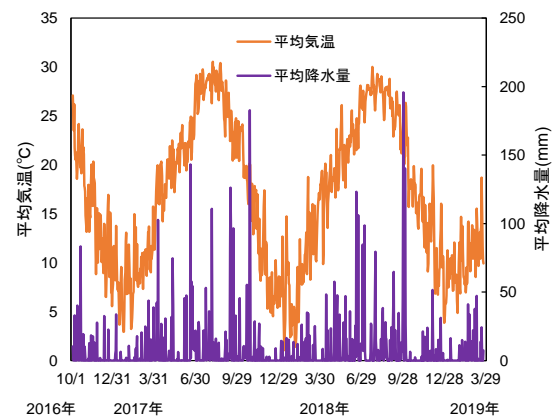
供試体は、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および早強ポルトランドセメントを用いて作製した。

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)					スランブ (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



(a) 室内環境



(b) 屋外環境

図-1 室内・屋外環境

*1 宮崎大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 宮崎大学 工学部社会環境システム工学科准教授 (正会員)

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

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。配合 A は 2016 年 3 月 1 日、配合 B は 2016 年 11 月 2 日、配合 C は 2016 年 6 月 28 日、配合 D は 2016 年 7 月 4 日に作製した。

曝露環境は、図-1 に示すような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℃、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。屋外曝露における気温、降水量のデータについては、曝露地点周辺の 3 都市(宮崎市、都城市、日南市)における気象庁のデータから平均値を算出して用いた。水中環境は、水温 20℃ 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。近年では、施工後に養生期間を長くするなど初期養生を念入りに行う場合が増えている。従って本研究では、現状を踏まえて比較的に良い初期養生を施した場合の環境作用の影響を検討するため、あえて初期の養生期間を増やし、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種では材齢 28 日目に、早強ポルトランドセメントでは材齢 100 日に曝露環境を変更した。各曝露履歴を表-2 に示す。

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 250mm×250mm×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

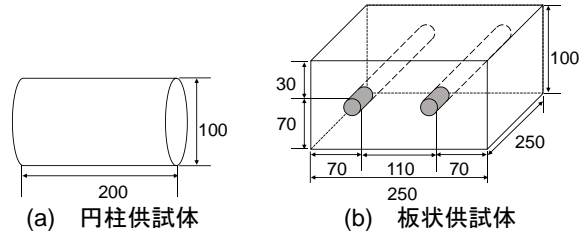


図-2 供試体概要

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。

2.2 実験項目

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℃ 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。円柱供試体を粉碎し、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℃ 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。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度試験結果および考察

圧縮強度試験結果を図-3 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合 A 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(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。

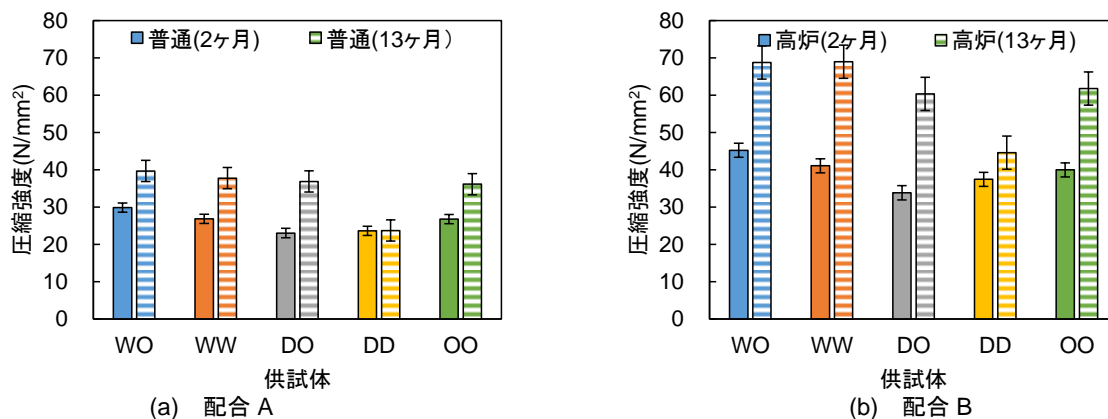


図-3 圧縮強度試験結果

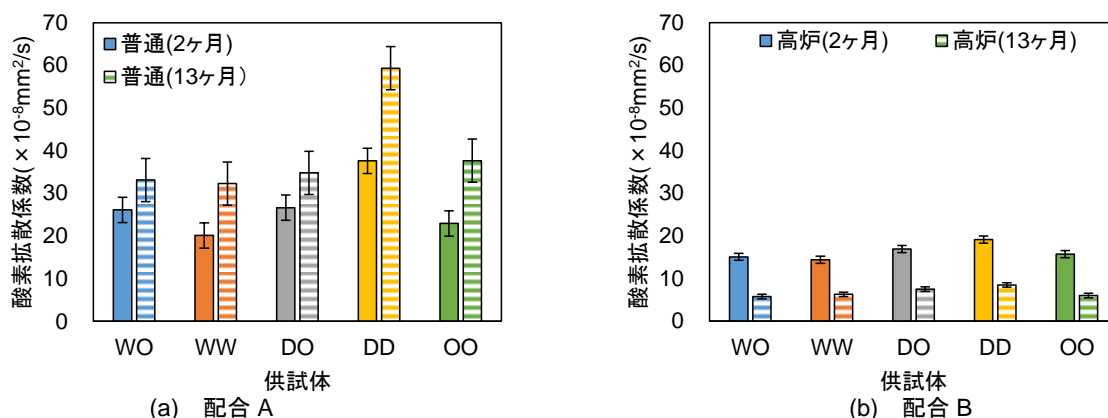


図-4 酸素拡散試験結果

3.2 酸素拡散試験結果および考察

酸素拡散試験結果を図-4 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。

3.3 水銀圧入試験結果および考察

試験結果の細孔量を図-5 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、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、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

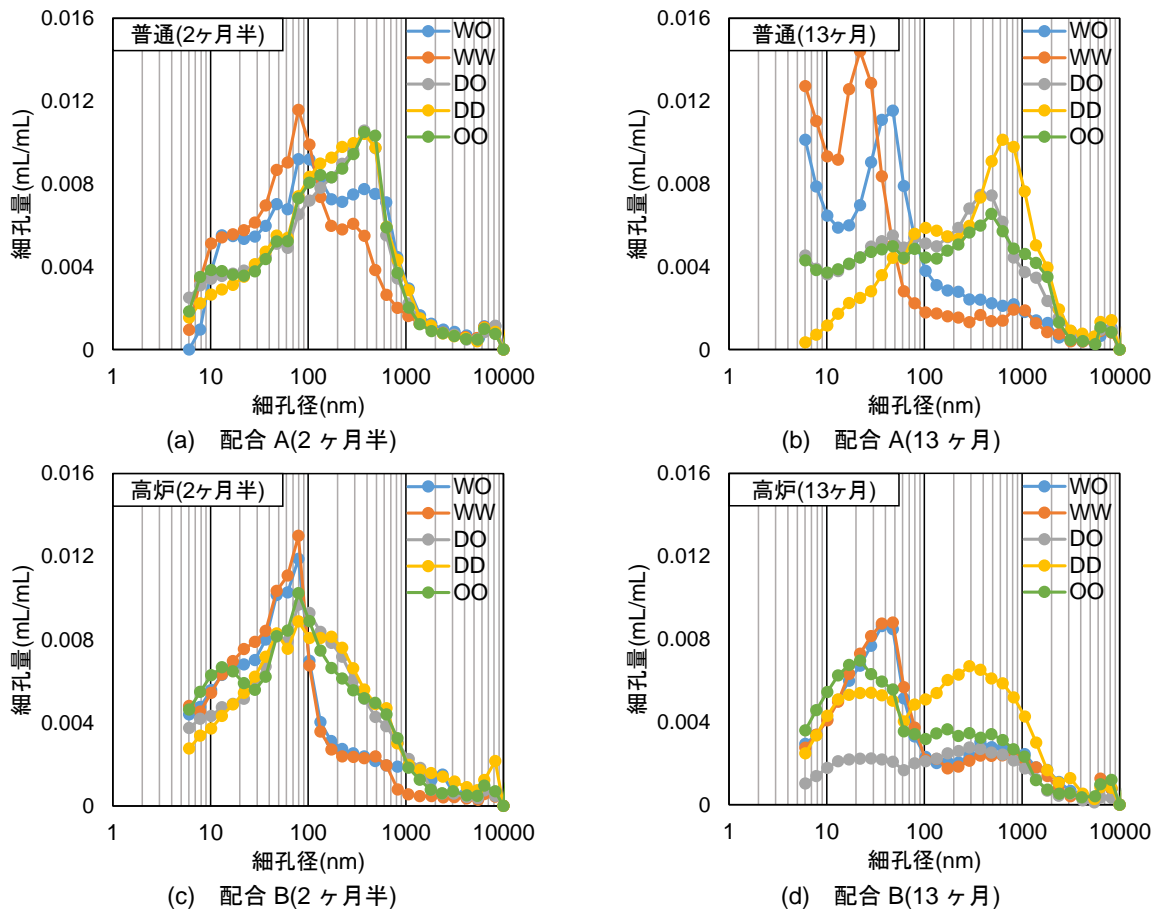


図-5 水銀圧入試験結果

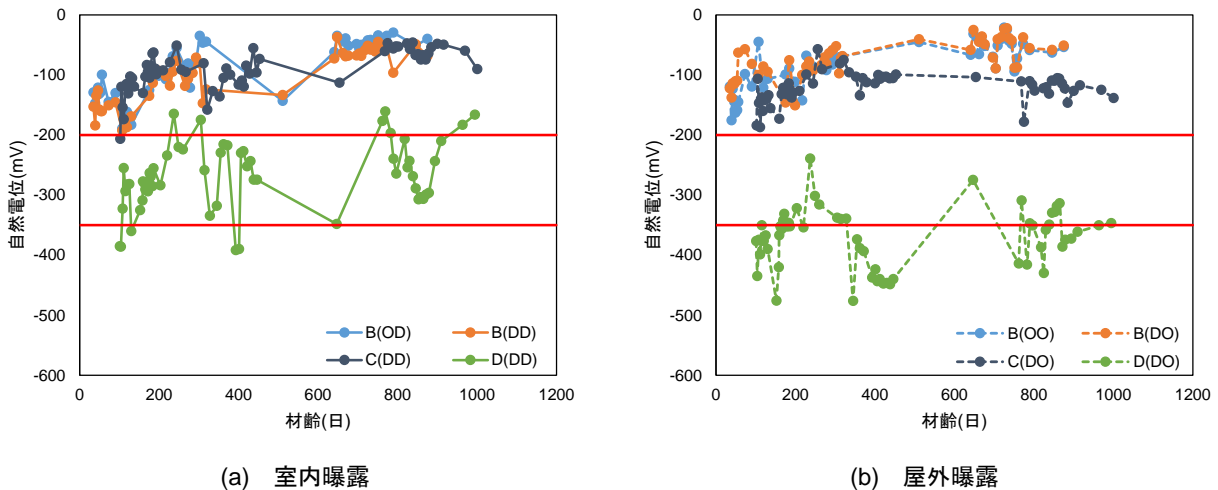


図-6 自然電位計測結果

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。

3.4 自然電位測定結果および考察

自然電位と曝露材齢との関係を図-6に示す。図-2に

示す曝露環境の影響を受けて、相対湿度が高くあるいは降水量が大きい場合は、一時期卑の傾向を示すものの、全体的には貴の傾向であることが確認できる。

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

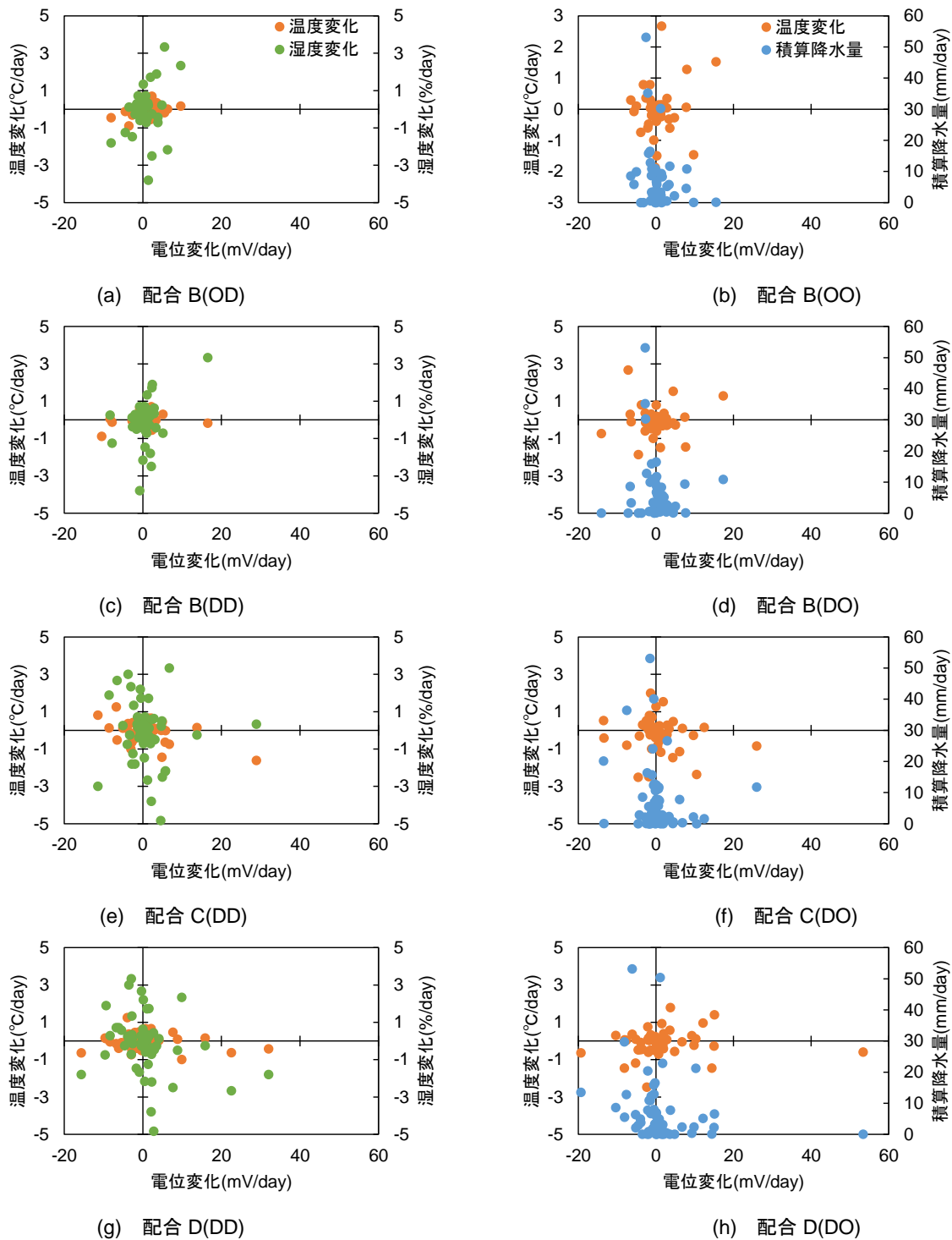


図-7 自然電位変化率と環境要素の関連性

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°C 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-7 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。

3.5 環境作用と材料特性の違いによる考察

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。

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下に示す知見が得られた。

- 1) 圧縮強度試験結果より、長期的な雨水等の水分供給の影響は、水中曝露と同程度の強度増進効果を示すことが確認できた。また高炉セメント B 種を用いた場合は普通ポルトランドセメントよりも効果が顕著であることも確認できた。
- 2) 酸素拡散試験結果より、長期的な屋外曝露を行う場合、普通ポルトランドセメントを用いた供試体は、環境作用の影響に関わらず酸素拡散係数は増加するが、高炉セメント B 種を用いた供試体は、雨水等の水分供給により潜在水硬性を発揮することで、内部構造を緻密化し、酸素拡散係数が減少し、物質移動抵抗性が高まることが確認できた。
- 3) 水銀圧入試験から、普通ポルトランドセメントを用いた供試体では長期的に曝露することで表層が粗になる懸念もあるが、高炉セメント B 種を用いた供試体では、屋外環境における環境作用によって細孔構造の緻密化が促進される。
- 4) 鉄筋の自然電位測定結果より、高炉セメント B 種を用いた供試体では降水量の増加により未水和セメントの継続水和が促進され、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推測される。

謝辞：

本研究に際し、極東興和株式会社より測定装置の支援を頂いた。また、供試体作製において坂元利隆氏よりご協力を言頂いた。心より感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 勝木太: 養生と水分 表層品質に及ぼす養生の効果と各種養生技術, セメント・コンクリート, No.812, pp.25-31, 2014
- 2) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢における乾燥がセメント硬化体の内部構造に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.17-26, 2003
- 3) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生實, 永松静也, 佐藤嘉昭: セメントペースト硬化体中への気体の拡散係数測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 515 号, pp.15-21, 1999