

論文 塩害と ASR の複合劣化環境下でのフライアッシュ含有 RC 試験体の暴露性状

齋藤 匠^{*1}・参納 千夏男^{*2}・芳賀 堯^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：反応性骨材を含有する RC 試験体を富山湾沿岸の海上大気中に暴露し，ASR によるコンクリートの膨張と鋼材の腐食状況を定期的に調べることにより，ASR と塩害によるコンクリートの複合的な劣化作用に対するフライアッシュの抑制効果について実験的に検討した。暴露後一夏が経過した時点にて，普通ポルトランドセメントと比較して，フライアッシュ添加のものは ASR 膨張が大きく抑制されたが，フライアッシュの品質によりその抑制効果に相違が現れた。また，一夏経過時に ASR 膨張によるひび割れと内在・外来の塩分の影響により，鋼材の腐食が活発になることが電気化学的モニタリングにより確認された。

キーワード：ASR，塩害，複合劣化，フライアッシュ，電気化学的モニタリング

1. はじめに

富山県の一部の地域では反応性がある川砂や川砂利が長年にわたってコンクリート用骨材に使用されてきた¹⁾。反応性骨材が使用された構造物が海水や凍結防止剤の影響を受ける場合，アルカリの浸透により ASR が促進されるとともに，ひび割れの発生により塩化物イオンによる鋼材の腐食が加速されることが懸念される。その一方で，ASR が発生した構造物では ASR ゲルの緩衝作用により鋼材の不動態皮膜が再生される可能性があり，構造物の調査では鋼材の腐食が比較的軽微であったとの報告がある²⁾。ASR 抑制対策としては，骨材のアルカリシリカ反応性の判定結果に係わらず，アルカリの総量規制値の順守とともに混合セメント(フライアッシュ B 種や高炉スラグ B 種)の使用を積極的に推進すべきであるとの提言がある。しかし，塩分環境下において ASR によるひび割れと鋼材の腐食が同時に発生する場合の劣化機構は不明であり，複合的な劣化現象に対する混合セメントの抑制効果も十分に検証されていないのが実状である³⁾。

本研究は富山県産の川砂および川砂利に対する ASR 抑制対策の確立を目的として実施したものである。このため，アルカリシリカ反応性のある川砂および川砂利を含有する RC 試験体を富山湾沿岸の海上大気中に暴露し，ASR によるコンクリートの膨張と鋼材の腐食状況を定期的に調べることにより，ASR と塩害によるコンクリートの複合的な劣化作用に対するフライアッシュの効果について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

河川水系(常願寺川および早月川)の異なる，2種類の川砂および川砂利の物理・化学的性質を

表 - 1 使用骨材の物理的性質およびアルカリシリカ反応性の有無

	常願寺川水系		早月川水系	
	川砂	川砂利	川砂	川砂利
最大寸法 (mm)	5	25	5	25
表乾密度(g/m ³)	2.62	2.64	2.63	2.68
絶乾密度(g/m ³)	2.58	2.61	2.59	2.66
吸水率(%)	1.7	1.3	1.5	0.8
ASR反応性 [*]	無害でない		無害	

^{*}化学法 (JIS A 1145)

*1 京都大学 工学研究科 (正会員)

*2 北陸電力(株) 土木部 土木計画チーム (正会員)

*3 京都大学 工学研究科 社会基盤工学専攻

*4 金沢大学 自然科学研究科 社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

表 - 2 フライアッシュの物理的性質および化学成分

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (g/cm ³)	化学成分 (Wt%)									
			Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
FA-N	2.33	3550	1.5	59.64	26.5	0.8	4.89	0.61	1.5	0.36	0.24	1.39
FA-S	2.15	2920	3.2	48.45	31.83	3.93	6.27	0.75	2.68	0.65	0.25	0.59
FA-T	2.21	3990	2.8	70.41	18.43	1.07	4.62	0.6	0.86	0.05	0.47	0.76

表 - 3 コンクリートの配合

	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	フライアッシュ	川砂	川砂利
OPC配合	20	50	40	175	350	-	749	1106
FA配合	20	50	40	175	297	53	749	1106

表 - 1 に示す。富山県の代表的な反応性骨材として、実構造物において ASR 損傷が確認されている、常願寺川産の川砂および川砂利を使用した。常願寺川産の川砂および川砂利は安山岩粒子（反応性鉱物：クリストバライトおよび火山ガラス）を約 30% 含有しており、この値はペシマム混合率の付近にある。また、非反応性の骨材として、早月川産の川砂および川砂利（花崗岩および閃緑岩を含有）を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³，比表面積：3330cm²/g，アルカリ量：0.68%）を使用した。フライアッシュは北陸地方の火力発電所（石川県七尾産（以下 FA-N），富山県新湊産（以下 FA-S），福井県敦賀産（以下 FA-T））から産出したものであり，JIS A 6201 の 種灰に相当するものである。フライアッシュの物理的性質および化学成分を表 - 2 に示す。フライアッシュの置換率は 15%（内割）とした。コンクリートの配合を表 - 3 に示す。コンクリートは添加剤を用いないプレーンコンクリートであり，アルカリ添加のものは NaCl を等価 Na₂O 量で 10kg/m³ 添加した。表 - 4 に初期塩化物イオン量および初期アルカリ量を示す。

2.2 試験方法

RC 試験体 (500 × 500 × 200 mm) の詳細を図 - 1 に示す。鉄筋 (SD295A, 鉄筋径 19mm, 横筋 16mm) のかぶり厚は 20 および 40mm に設定した。また，RC 試験体は養生 2 週間後，2004 年 9 月に飛来塩分の影響を受ける富山県新湊港

表 - 4 初期塩化物イオン量および初期アルカリ量

	NaCl 添加	初期塩化物イオン量 (kg/m ³)	初期アルカリ量 (kg/m ³ : Na ₂ O 当量)
OPC	有	11.51	12.38
	無	0.06	2.38
FA-N	有	11.50	12.63
	無	0.05	2.63
FA-S	有	11.50	12.36
	無	0.05	2.36
FA-T	有	11.50	12.53
	無	0.05	2.53

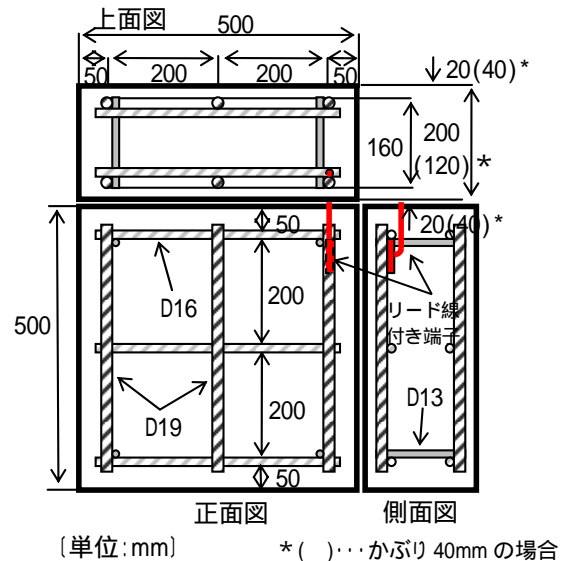


図 - 1 コンクリート試験体の概要



写真 - 1 RC 試験体の暴露状況

の岸壁上（写真 - 1 参照）に暴露し、コンクリートの膨張量測定および鉄筋の電気化学的モニタリング（自然電位、分極抵抗）を定期的を実施した。膨張の測定では、RC 試験体の海側の面を表面、その反対側を裏面とし、コンタクトゲージ（基長：100mm）にて計測した。電気化学的モニタリングは携帯型鉄筋腐食診断器（SRI-CM-，照合電極：銀/飽和塩化銀電極）による自然電位、分極抵抗の測定とミニセンサ（埋込み型チタンワイヤ使用）による自然電位の簡易計測により行った。Stern-Geary の腐食速度と分極抵抗の関係式を以下に示す。

$$I_{corr} = K/R_p$$

I_{corr} : 腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p : 分極抵抗 (Ωcm^2)
 K : 金属の種類、環境等によって決まる定数 (mV)
 なお、本研究では K 値は Andrade らが実験から求めた $K=26$ (mV) を用いた⁴⁾。

3. 試験結果および考察

3.1 ひび割れおよびポップアウト

RC 試験体（暴露後 15 ヶ月）のひび割れおよびポップアウトの状況を図 - 2 に示す。OPC 試験体（NaCl 添加、かぶり 20mm）では、暴露後 1 ヶ月にすでに直径 16mm、深さ 2mm のポップアウトが発生しており、暴露期間とともにその数が増加した。常願寺川産の川砂では、湿潤な環境下に曝される場合にポップアウトが発生しやすいことは実構造物でも確認されている¹⁾。暴露後 3 ヶ月になると、OPC 試験体および FA 試験体ともに鋼材腐食による、鉄筋に沿った微細なひび割れ（0.05～0.1mm）が発生した。これは、暴露後 3 ヶ月であるにも係らず、NaCl 添加の試験体ではコンクリートの ASR が早期に発生し、同時に鋼材の腐食が進行していることを示している。暴露後 3～6 ヶ月の期間は冬季にあたり気温が低下するので、ひび割れの進展は停滞した。さらに、暴露後 9～12 ヶ月になり、夏季に向かい気温が上昇すると、OPC 試験体では ASR の進行による亀甲状のひび割れが表面全体に発生し、鉄筋に沿ったひび割れは幅が 0.15～

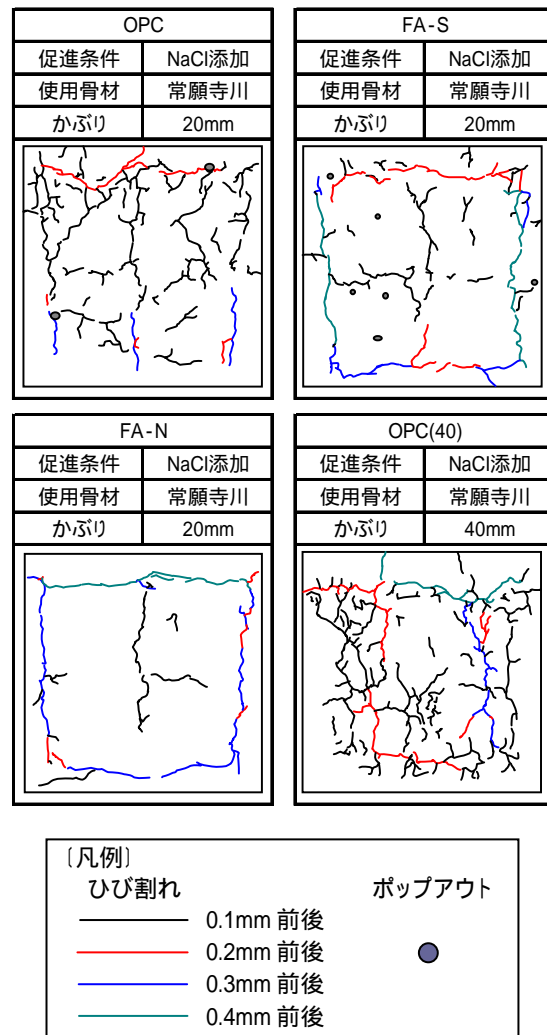


図 - 2 RC 試験体の外観（暴露後 15 ヶ月）
 0.3mm に拡大した。また、FA 試験体では暴露期間を通して ASR が抑制されており、OPC 試験体のような亀甲状のひび割れは発生しなかった。

3.2 コンクリートの膨張量

RC 試験体の膨張率は暴露面（500×500 mm）の縦方向および横方向にて測定したが、両方向の膨張傾向はほぼ同様であったので、横方向の測定値を用いた。また、非反応性の川砂および川砂利を使用した RC 試験体では乾燥収縮、凍結融解などによる劣化の兆候は暴露期間中にまったく観察されなかった。

RC 試験体（NaCl 添加および無添加、かぶり 20mm）の膨張率の経時変化を図 - 3 に示す。NaCl 添加の場合、OPC 試験体では暴露開始時より膨張が発生し、冬季間は膨張が一時停滞したが、気温の上昇する春から夏にかけて顕著な膨張が継続し、膨張率は 0.3% に達した。ASR は化

学反応であるため、温度による影響も無視できないと考えられており、コンクリート表面温度が30以上になるとASRが活発になると分析されているが⁵⁾、今回の試験においても季節変動による膨張挙動の変化が観察された。なお、温度変化によるコンクリート自体の膨張収縮量は熱膨張係数で 10×10^{-6} 程度であり、十分小さく無視した。それに対して、FA試験体はOPC試験体の半分以下に膨張率が抑制された。フライアッシュの膨張抑制効果に関しては、FA-N、FA-TはFA-Sよりも抑制効果が大きくなり、フライアッシュのポゾラン反応性が良好であったためであると考えられる。今後、暴露期間が長くなるとともに、3種類のフライアッシュの品質によりASR抑制効果に差が生じてくるものと推察される。また、NaCl無添加の場合、OPC試験体およびFA試験体ともに暴露期間中に明確な膨張は認められなかった。これは外来からの塩分による影響がまだ現れていないことを示している。

RC試験体（NaCl添加および無添加、かぶり20mmと40mmの比較）の膨張率の経時変化を図-4に示す。OPC試験体では、かぶり20mmのものは暴露直後から膨張が開始するのに対して、かぶり40mmのものはやや遅れて膨張が開始した。しかし、一夏経過後には両者はほぼ同様な膨張率となった。また、FA-N試験体ではかぶり20mmと40mmのものに相違は認められなかった。これは、ひび割れの発生状況とも一致しており、鋼材腐食によるひび割れの発生時期がかぶり厚さによって相違したためである。

RC試験体（NaCl添加、かぶり20mm、表面と裏面の比較）の膨張率の経時変化を図-5に示す。OPC試験体では、表面は海水のしぶきや日射の影響を直接に受けるために、裏面と比較すると2倍の膨張率となった。それに対して、FA-N試験体では膨張そのものが発生していないために、表面と裏面の相違が認められなかった。構造物レベルではASRおよび鋼材腐食ともに周囲の環境(micro-climate)の影響を大きく受けることが知られている。比較的小さなRC試験体レ

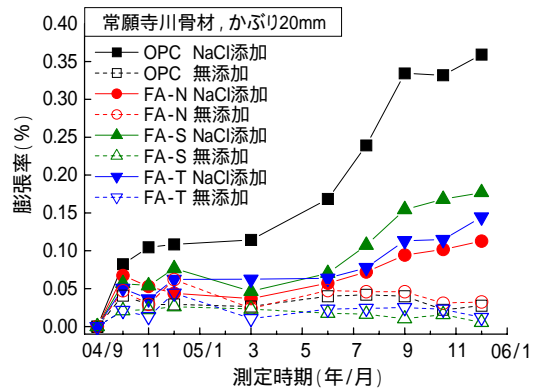


図 - 3 RC試験体の膨張率

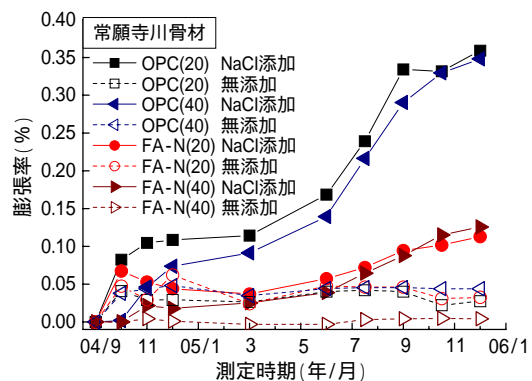


図 - 4 RC試験体の膨張率
(かぶり20mmと40mmの比較)

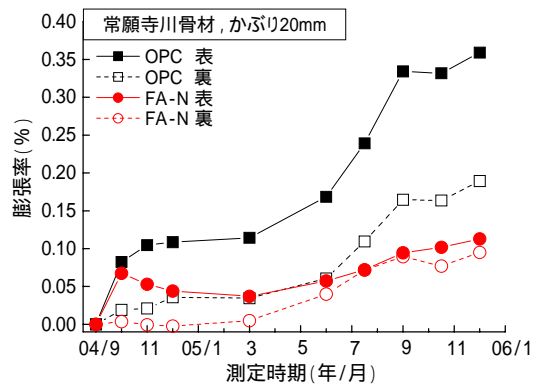


図 - 5 RC試験体の膨張率
(表面と裏面の比較)

ベルでも、表面と裏面とでは日射、水分供給および塩分浸透が相違しており、表面では裏面と比較してASRおよび鋼材腐食が活発に進行しているものと推察された。

3.3 鋼材腐食の電気化学的モニタリング

(1) 自然電位

RC試験体（かぶり20mm、早月川骨材および常願寺川骨材）の自然電位の経時変化を図-6および図-7に示す。ASTM C 876-91の判定基

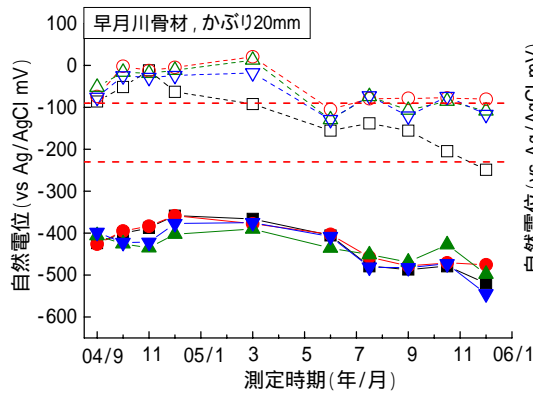


図 - 6 RC 試験体の自然電位

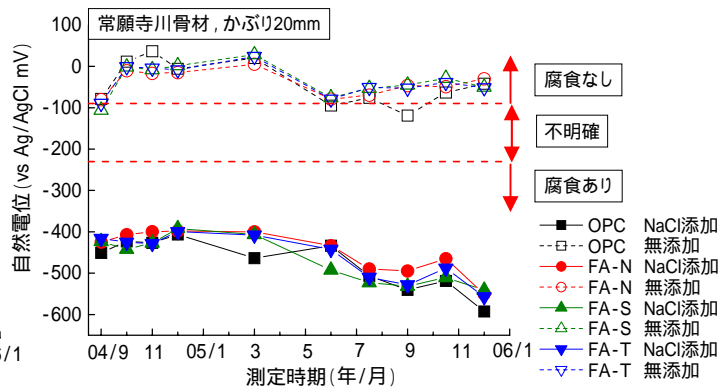


図 - 7 RC 試験体の自然電位

準に従うと、測定値の安定した暴露後 1 ヶ月において骨材の種類とは無関係に、NaCl 無添加のものは+10~-60mVで、「90%以上の確率で腐食なし」の範囲にあり、NaCl 添加のものは-400~-450mVで、「90%以上の確率で腐食あり」の範囲にあった。このことから、NaCl 添加のものは鋼材の不動態がすでに破壊されて、鋼材が不安定な状態にあることが分かる。同様に、暴露期間にともなう自然電位の経時変化に関して、NaCl 添加のものは、骨材およびフライアッシュの種類に関係なく、暴露 1 年目の夏期から自然電位が卑側に移行しており、鋼材の腐食が活発に進行していることが分かる。一方、NaCl 無添加のものは、外来塩分の浸透によって暴露 1 年目の夏期から自然電位が若干卑側に移行するが、全体に外来塩分の影響は暴露 1 年では軽微であった。それらの中で、OPC 試験体（早月川骨材使用）は気温の低下する冬季にも係らず、-230mVより卑側の「90%以上の確率で腐食あり」の範囲に移行しており、鋼材が腐食傾向を示し始めた。また、骨材の種類に関して、常願寺川の川砂および川砂利は早月川のものよりも全体に貴側の値を示した。これは塩分が存在する場合にもアルカリ性をもつ ASR ゲルの緩衝作用によって鋼材の不動態が安定に維持されているためと推察される。

RC 試験体（かぶり 20mm，常願寺川骨材）の電気化学的モニタリングとミニセンサ簡易計測による自然電位の相関を図 - 8 に示す。FA 試験

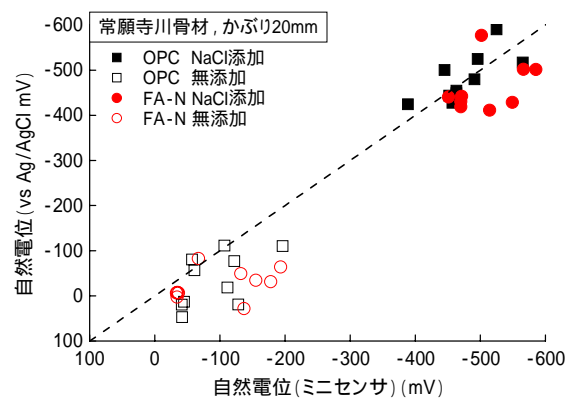


図 - 8 ミニセンサとの自然電位の相関性

体では電気化学的モニタリングによる測定値に比べてミニセンサ簡易計測による測定値は若干小さな値になったのに対して、OPC 試験体では電気化学的モニタリングとミニセンサ簡易計測による測定値はほぼ同じ値になった。これらの値は気温の変化による影響を受けていないことから、簡易なミニセンサでの計測によって自然電位のモニタリングが可能であると考えられた。

(2) 腐食速度

RC 試験体（かぶり 20mm，早月川骨材および常願寺川骨材）の腐食速度の測定結果をそれぞれ図 - 9 および図 - 10 に示す。暴露開始時点では、早月川および常願寺川骨材ともに腐食速度はかなり大きな値になった。それ以後、セメントおよびフライアッシュの水和反応が進行するとともに腐食速度は低下し、暴露後 6 ヶ月ではほぼ一定の値になった。さらに、暴露 1 年目の夏季には、自然電位の変化に対応して腐食速

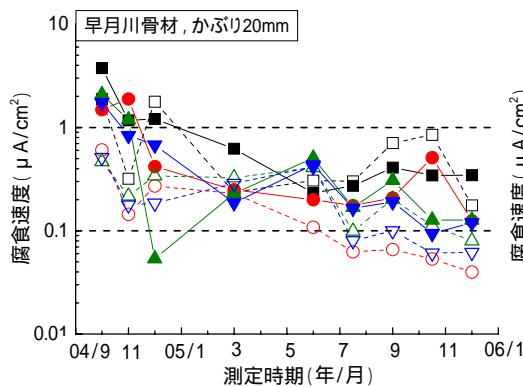


図 - 9 RC 試験体の腐食速度

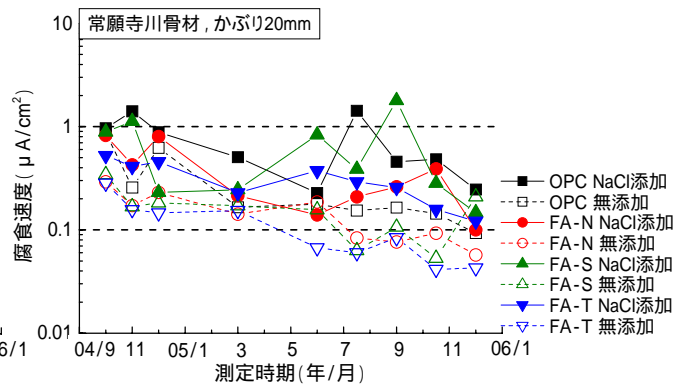


図 - 10 RC 試験体の腐食速度

度の増加が始まったが、冬季になると再び低下の傾向を示した。このことから、腐食速度は気温変動の影響を大きく受けており、1年を通して鋼材腐食が活発となる時期と停滞する時期が繰り返されていることが分かる。NaCl 添加の場合、暴露1年目の夏季には、OPC 試験体および FA-S 試験体の腐食速度が増加しており、 $1.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上の値に推移したことから判断して、鋼材腐食が活発に進行していることが分かる。一方、NaCl 無添加の場合、OPC 試験体は夏季に自然電位が卑側に移行するとともに腐食速度は増加する傾向を示した。それに対して、FA 試験体は暴露期間を通して $0.04 \sim 0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の範囲にあり、鋼材は腐食に対して安定な状態であった。

4. 結論

ASR と塩害によるコンクリートの複合的な劣化作用に対するフライアッシュの効果を検討するために実施した暴露試験の結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 反応性のある川砂および川砂利を含有した OPC 試験体では、NaCl 添加のものは暴露初期から ASR 膨張と鋼材腐食によるひび割れが進展した。それに対して、NaCl 無添加のものは一夏経過後に外来塩分による影響で鋼材腐食が開始した。
- (2) OPC 試験体では海岸に面した側面とその裏側とで ASR の進行状況が相違した。
- (3) 反応性のある川砂および川砂利を含有した OPC および FA 試験体では ASR ゲルにより

鋼材の不動態が再生される可能性があった。
(4) 埋込み型チタンワイヤによる簡易測定により鋼材腐食の可能性が十分な精度で評価できた。

謝辞：RC 試験体の作成においてご協力いただいた（株）ホクコンならびに（株）太平洋セメントに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹内勝信, 川村満紀, 鳥居和之：アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートの組織と残留膨張性の予測, 材料, Vol.43, No.491, pp.963-969, 1994.
- 2) 羽淵貴士, 鳥居和之：アルカリシリカ反応と海水との複合的な作用によるコンクリートの劣化現象とその評価手法の検討, 土木学会論文集, No.774, pp.149-161, 2004.
- 3) 羽淵貴士, 濱田洋志, 鳥居和之：海洋環境において ASR を生じたコンクリート中の鉄筋の腐食性状に関する検討, 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, Vol.5, pp.45-47, 2005.
- 4) C.Andrade and J.A.Gonzalez : Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements, Werkstoffe und Korrosion, Vol.29, pp515-519, 1978
- 5) 自然環境下のコンクリート性能評価研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.88-89, 2005