論文　富山県海岸部における反応性骨材含有 RC 試験体の長期暴露性状

平野　貴宣[*1]・参納　千夏男[*2]・橋本　徹[*3]・鳥居　和之[*4]

要旨：富山県ではアルカリシリカ反応（ASR）による劣化が顕在化しており，その対策が急がれている。本研究では，富山県産の川砂および川砂利に対する ASR 抑制対策を地域で産出するフライアッシュにより確立することを目的とし，RC 試験体を富山県内の海上大気中に暴露し，フライアッシュによる ASR および鋼材腐食の抑制効果を検討した。暴露後 3 年が経過した時点で，フライアッシュを混入した RC 試験体は，ASR による膨張が抑制されたが，フライアッシュの品質による相違が認められた。

キーワード：ASR 抑制対策，フライアッシュ，川砂・川砂利 ，塩害

1. はじめに

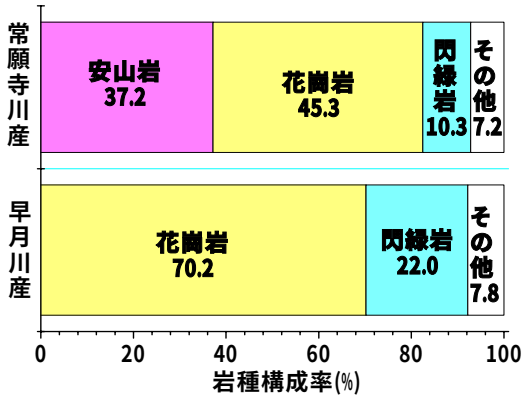
富山県のコンクリート構造物では，アルカリシリカ反応（ASR）による劣化が顕在化している。コンクリート用骨材として使用された川砂，川砂利がその原因であることが明らかとなっており，今後新設される構造物においてはその対策が重要である[1,2)]。また，富山県内の海洋環境下や凍結防止剤散布下といった塩分の影響を受ける構造物では，アルカリの浸透によりASRが促進されるとともに，ひび割れの発生により塩化物イオンによる鋼材の腐食が加速されることが懸念される。ASR抑制対策は，これら地域の骨材事情や環境条件を考慮することが必要であると考えられる。近年，ASR抑制対策としては，鉱物質混和材による対策が推奨されている。北陸地方では，高炉スラグが産出されないことから，火力発電所で産出されるフライアッシュによる対策の確立が望ましい。

本研究は，ASR抑制対策を地域の問題として捉え，富山県産の川砂および川砂利に対するASR抑制対策を地域で産出するフライアッシュにより確立することを目的として実施したものである。フライアッシュによるASR抑制効果は，これまで屋内促進試験により実証された事例は多いが，実環境において検討した事例は少ないことから[3)]，反応性骨材を含有するRC試験体を富山県内の海洋環境下に暴露し，ASRによるコンクリートの変状と鋼材の腐食状況を定期的に調べることにより，北陸地方で産出されるフライアッシュのASR抑制効果について実験的検討を行った[4,5)]。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本実験に使用した富山県の 2 河川水系（常願寺川および早月川）の川砂利の岩種構成率を**図－1** に示す。常願寺川産の川砂利　（反応性）は安山岩を 40%程度含有しているが，早月川産のもの（非反応性）は安山岩および流紋岩をほとんど含有していない。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3，比表面積：3330cm^2/g，アルカリ量：0.68%）を使用した。コンクリートの配合を**表－1** に示す。コンクリートはプレーンコンクリートであり，アルカリ添加のものは常願寺産の川砂および川砂利のASRが発生するしきい値が 5 kg/m^{3}程度であることから短期間にASRによる膨張を促進させる目的で，アルカリ（NaCl）を等価Na_2O量でしきい値の 2 倍の 10kg/m^3（塩化物イオン量：11.5 kg/m^3）添加した。フライアッシュは北陸地方の火力発電所（石川県七尾産（FA-N），富山県新港産（FA-S），福井県敦賀産（FA-T））から産出し



図－1　川砂利の岩種構成率

表－1　コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			W	C	S	G	NaCl
20	50	40	175	350	749	1106	11.5

*1 西日本旅客鉄道（株）　（正会員）
*2 北陸電力（株）　土木部　土木技術チーム　工博　（正会員）
*3 北陸電力（株）　土木部　土木技術チーム　課長
*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	比表面積	化学成分 (Wt%)									
	(g/cm³)	(cm²/g)	Ig.loss	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	SO_3	Na_2O	K_2O
FA-N	2.33	3550	1.5	59.64	26.50	0.80	4.89	0.61	1.50	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	0.60	0.86	0.05	0.47	0.76

たものであり，JIS A 6201 のⅡ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JIS A 5308 で規定されている最低値の 15%（内割）とした。

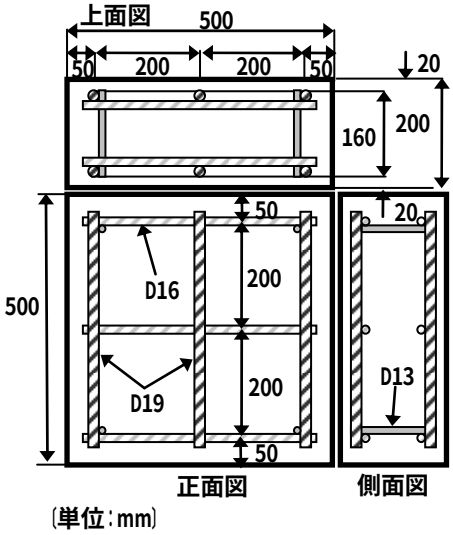
2.2 試験方法

（1）屋内促進養生試験

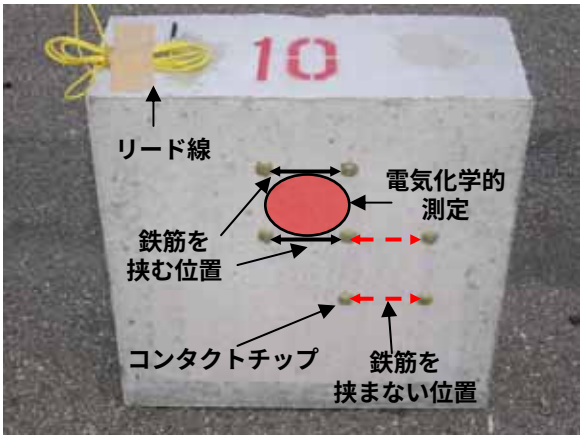
コンクリートバー法により，促進養生期間の経過にともなうコンクリートの膨張率および動弾性係数の変化を測定した。養生条件は湿気槽養生法（温度 40°C，相対湿度 100%）および飽和 NaCl 溶液浸せき法（温度 50°C の飽和 NaCl 溶液に浸せき）の 2 種類とした。湿気槽養生法では供試体にアルカリを添加し，飽和 NaCl 溶液浸せき法では供試体にアルカリを添加せず，外部からアルカリ溶液を浸透させた。供試体は 75mm×75mm×400mm の角柱体であり配合ごとに 2 本ずつ作成した。

（2）屋外暴露試験

RC 試験体（500×500×200mm）の概要を**図－2** および**写真－1** に示す。鉄筋（SD295A，鉄筋径縦筋φ19mm，横筋φ16mm）のかぶりは 20mm 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富山新港の岸壁上（**写真－2 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）を定期的に実施した。膨張量の測定では，RC 試験体にコンタクトチップを貼付け（基長：100mm），コンタクトストレインメーターにて計測した。また，電気化学的モニタリングでは，携帯型鉄筋腐食診断器（SRI-CM-Ⅲ，照合電極：銀/飽和塩化銀電極）による自然電位および分極抵抗の測定を行った。電気化学的モニタリングの測定位置は，**写真－1** に示す縦鉄筋上の位置である。さらに，暴露 3 年目が経過した時点でコアを採取し，表面から 10mm 間隔で切断し，塩化物イオン浸透量の測定（JCI-SC5）を行った。



図－2　RC 試験体の概要



写真－1　RC 試験体の概要

写真－2　RC 試験体の暴露状況

3. 試験結果および考察

3.1 屋内促進養生におけるコンクリートの膨張挙動

コンクリートバーの膨張率の経時変化を**図－3** に示す。湿気槽養生法では，常願寺川産の川砂および川砂利を用いたコンクリートは材齢とともに膨張率が増加し，コンクリートに多数のひび割れが発生した。一方，飽和NaCl

溶液浸せき法では，膨張が始まる以前に表面にポップアウトが発生し，材齢の経過により塩分が内部に浸透するとともに，急速に膨張率が増大した。常願寺川産の川砂および川砂利に含有されている安山岩はクリストバライトおよびオパールを反応性鉱物として含んでおり，ペシマム混合率が顕著であることが知られている[6]。反応性鉱物がクリストバライトおよびオパールの骨材は，NaClが内在する場合および外来する場合のいずれでも大きな膨張が発生することが判明した。一方，今回使用した早月川産の川砂および川砂利は反応性のある岩石を含有しないため，いずれの養生条件でもコンクリートはまったく膨張しなかった。また，フライアッシュ（FA-T）を 15%添加したコンクリートにおいても膨張は発生しなかった。

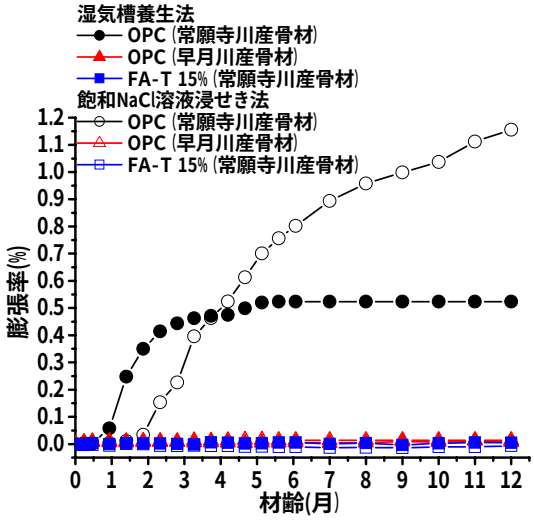
3.2 屋外暴露における RC 試験体の膨張挙動

RC 試験体の膨張率の測定において，ASR と鋼材腐食による変状を区別するために，**写真－1** に示すように測定範囲に鉄筋を挟まない位置（ASR が卓越）と挟む位置（鋼材腐食が卓越）とに測定結果を分けた。

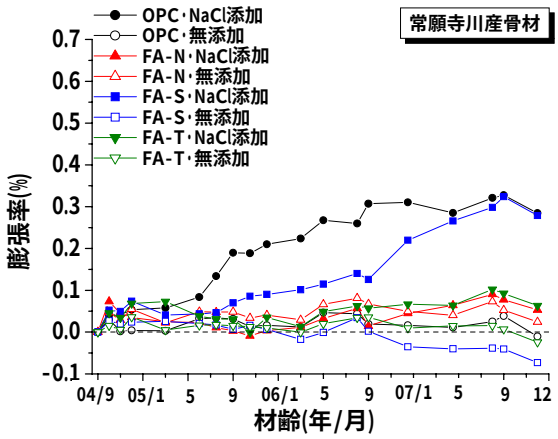
RC 試験体（鉄筋を挟まない位置）の膨張挙動を**図－4** に示す。NaCl 添加の OPC 試験体では暴露 1 年目から 2 年目にかけて，コンクリートバー試験と同様に大きな膨張を示したが，それ以後，収束する傾向にあった。従って，NaCl 添加により促進した RC 試験体に関しては，既に屋内促進試験における ASR の判定材齢に達しているものと考えられる。

一方，フライアッシュを使用したものは膨張の発生が遅くなり，膨張量を低減できた。とくに，比表面積，SiO_2量が比較的多いFA-NおよびFA-Tは 3 年経った現在でも膨張が見られず，屋外促進試験において抑制効果が確認できた。FA-N，FA-Tに比較して比表面積，SiO_2量が比較的少ないFA-Sについては 2 年目以降に膨張量が増大した。また，暴露 2 年目以降に膨張量が増大したのはNaClを添加したことにより発生した鉄筋沿いのひび割れから，水分がコンクリート中に供給されたこともASRの促進に影響したと考えられる。常願寺川の川砂および川砂利は富山県の河川産骨材の中では最も反応性が高いものとされている。したがって，富山県産の河川産骨材のASR抑制対策として，FA-NやFA-Tのような良質のフライアッシュを 15%の置換率で使用することにより，現在流通している河川産骨材のASRを効果的に抑制できるものと考えられた。この結果は，屋内促進養生でのものとほぼ同様であり，フライアッシュの品質による影響に関して，屋内促進養生試験と屋外暴露試験との関係が実証できた[7]。

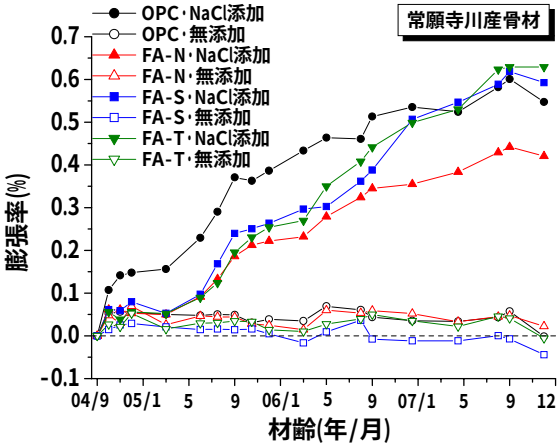
RC 試験体（鉄筋を挟む位置）の膨張率の経時変化を**図－5** に示す。鉄筋を挟む位置では ASR の膨張とともに，内在塩分による腐食の進行により，NaCl を添加したすべての RC 試験体において，鋼材に沿ったひび割れが暴露期間とともに進展している。暴露 2 年目までは，OPC 試験体とフライアッシュを添加した試験体とでは膨張率に大きな差があったが，暴露 2 年目の 9 月以降，FA-T，FA-S は急激な膨張率の伸びを示し，暴露 3 年目には，OPC と同程度の膨張率となった。この理由としては，ひ



図－3　コンクリートバーの膨張挙動



図－4　RC 試験体の膨張挙動（鉄筋を挟まない位置）



図－5　RC 試験体の膨張挙動（鉄筋を挟む位置）

び割れ幅がある程度大きくなり，腐食の進行に必要な水分や酸素が鉄筋に十分に供給されるような段階になってしまうと，フライアッシュを添加したことに関わらず，腐食ひび割れが進展したことが考えられる。また，ひび割れからの水分の供給が，ASR を促進させたことも考えられる。

暴露場所の気温およびコンクリートの表面温度を**図－6** に示す。気温とコンクリートの表面温度は同様の挙動を示しており，RC 試験体は，鉄筋の有無に関わらず，温度の上昇する夏季に大きく膨張し，低下する冬季に停滞する，という階段状の変状を示した。

3.3 ひび割れおよびポップアウト

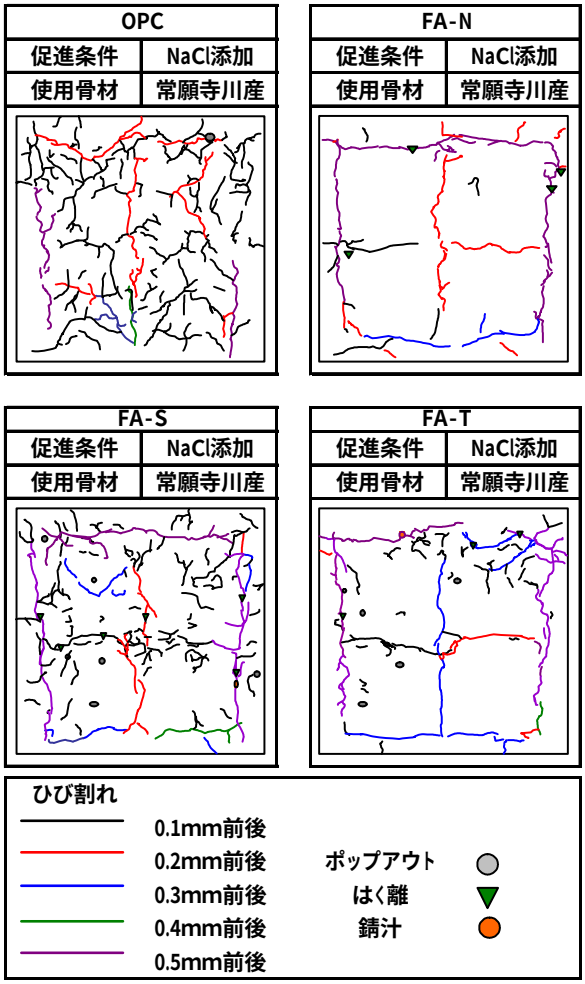
NaCl 添加の RC 試験体（暴露後 36 ヵ月，常願寺川産骨材使用）の外観観察の結果を**図－7** および**写真－3** に示す。RC 試験体では，鉄筋に沿った 0.5mm 以上のひび割れが発生し，とくに，OPC 試験体では ASR による亀甲状のひび割れも顕著に発生していた。また，FA-S 試験体は暴露後 18 ヵ月以降に亀甲状のひび割れが進展した。これは膨張率の結果とも一致しており，鉄筋腐食により一旦発生したひび割れが弱部となり，ASR が進行したことを示している。

RC 試験体の表面には，暴露 20 ヵ月目以後に，ポップアウトやはく離が発生した。それらは FA 試験体でも同様であり，促進環境下において高い反応性の骨材粒子に対しては，コンクリート表面部での ASR による変状を完全に抑制することは困難であることがわかった。

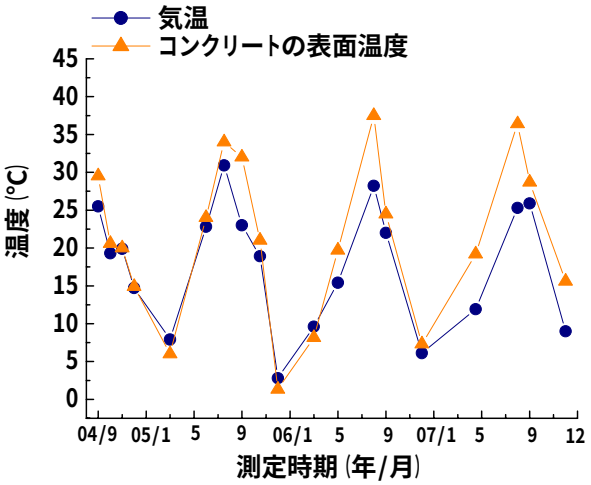
3.4 鋼材腐食の電気化学的モニタリング

（1）自然電位の測定

RC試験体（早月川産および常願寺川産骨材使用）の自然電位の経時変化を**図－8** に示す。自然電位はASTM C 876-91 の判定基準に従うと，測定値の安定した暴露後 1 ヵ月において骨材の種類とは無関係に，NaCl無添加のものは-90mV以上で，「90%以上の確率で腐食なし」の範囲にあり，NaCl添加のものは-230mV以下で，「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ったことが分かる。実際に，暴露後 36 ヵ月にて，一部のRC試験体を解体したところ，鋼材の腐食レベルⅣ（断面欠損を生じているレベル）であり，腐食減量は 3%程度であることが確認された。一方，NaCl

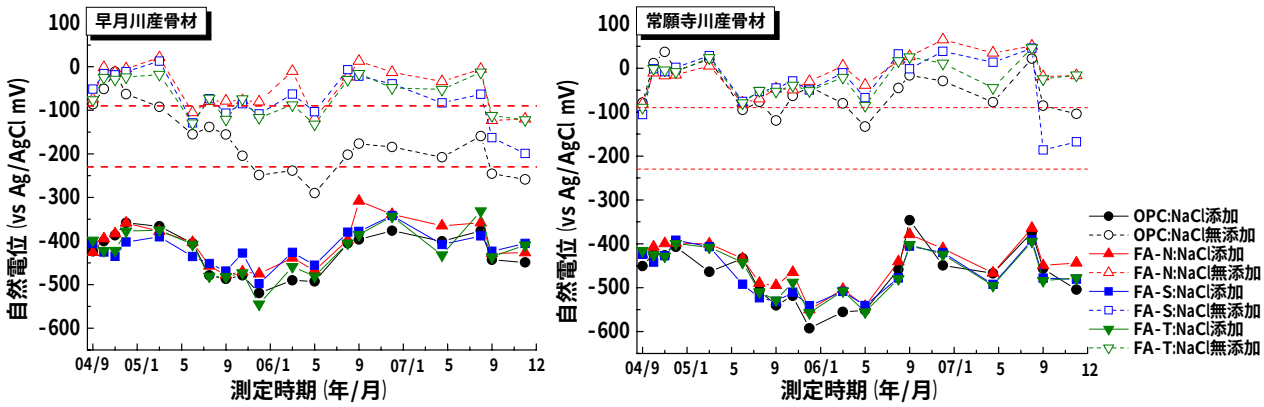


図－7　RC 試験体の外観（暴露 36 ヵ月）



図－6　暴露場所の気温およびコンクリートの表面温度

写真－3　RC 試験体のひび割れ状況（OPC 試験体）



図－8　RC 試験体の自然電位の経時変化

無添加のものは，外来塩分の浸透によって自然電位が変動するが，外来塩分の影響は暴露 3 年程度では比較的軽微であった。塩分測定の結果を**図－9** に示す。OPCおよびFA-Nともに外来塩分は鉄筋位置において 1kg/m^{3}程度であり，自然電位で得た結果と同様，鋼材の腐食は軽微であると判断された。しかし，OPC試験体（早月川産骨材使用）だけは，自然電位が卑側に移ってきており，腐食が初期段階であることが考えられた。それに比べて，OPC試験体（常願寺川骨材使用）は，自然電位が貴側にあり，これはASRゲルによる緩衝作用によるものと考えられる[8,9]。

（2）分極抵抗の測定

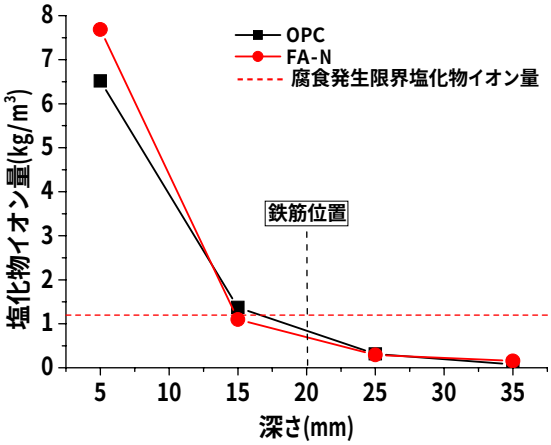
NaCl無添加および添加のRC試験体（早月川産および常願寺川産骨材使用）の分極抵抗の経時変化を**図－10** に示す。NaCl無添加では暴露時点において分極抵抗値に大きな差は見られなかったが，養生を継続することでFA試験体では分極抵抗が著しく増加した。ポゾラン反応が進行したことにより，空隙に飽和される細孔溶液中のOH^-イオンが大幅に減少し，電気伝導性が低くなったためと考えられる。一方，NaCl添加のものでは分極抵抗値は養生期間を経ても低い値を示した。鋼材の腐食が顕著に進み，早期からひび割れが進展したコンクリートにおいては分極抵抗が正確に評価できないと考えられる。

4. 結　論

本研究で得られた主要な結果は以下に示す通りである。

(1) コンクリートの促進養生試験の結果より，常願寺川産の川砂および川砂利を含有したコンクリートは NaCl が内在する場合および外来する場合のいずれにおいても高い反応性を示した。

(2) RC 試験体の膨張率の測定結果より，フライアッシュの添加により ASR 膨張を低減できたが，品質により抑制効果に相違があった。



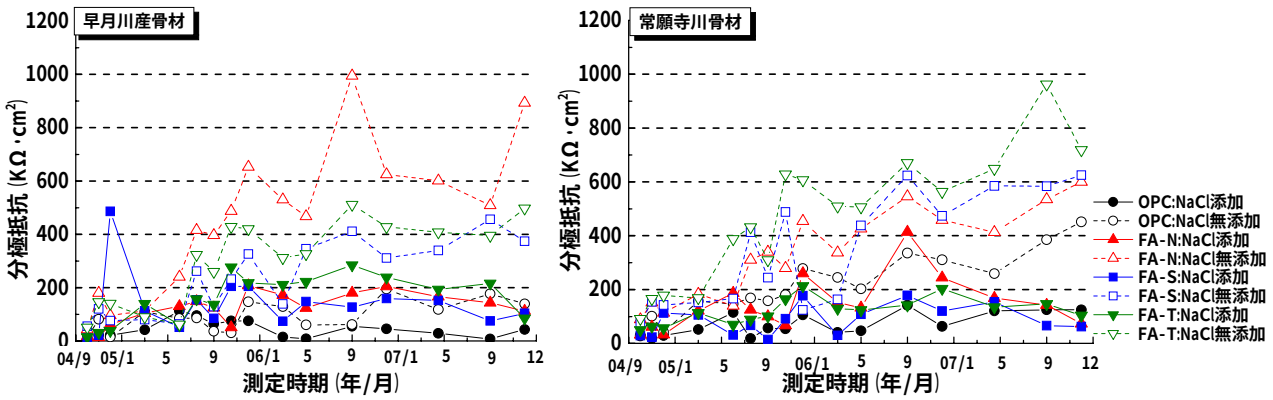
図－9　塩化物イオンの浸透量（暴露 36 ヵ月）

(3) 外観観察の結果より，NaCl を添加した RC 試験体（常願寺川産骨材使用）では多数のポップアウトやはく離が確認でき，フライアッシュを添加してもコンクリート表面部での ASR による変状を完全に抑制することは困難であった。

(4) 自然電位と塩分測定の結果より，外来塩分の影響は比較的軽微であったが，OPC 試験体（早月川産骨材使用）では自然電位が卑側に移行しており，腐食初期の段階にあった。

(5) 分極抵抗の結果より，NaCl 無添加の試験体において，フライアッシュを添加したものではポゾラン反応が進行したことにより高い分極抵抗値を示した。一方，NaCl 添加のものは早期から腐食が進みひび割れが生じたため，分極抵抗の値が適切に評価できなかった。

(6) 富山県の河川産骨材の ASR 抑制対策としては，FA-N や FA-T のような良質のフライアッシュを 15%の置換率で使用することにより，ASR を効果的に抑制できることが確認できた。



図－10　RC 試験体の分極抵抗の経時変化

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) 鳥居和之，野村昌弘，本田貴子：北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性，土木学会論文集，No.767，pp.185-197，2004.8

2) 野村昌弘，青山實伸，平　俊勝，鳥居和之：北陸地方における道路構造物の ASR 損傷事例とその評価方法，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.3，pp.105-114，2002.9

3) Okada，K.，Mizumoto，Y.，Nakano，K.，Ono，K.：Study of Alkali-Silica Reaction by Reinforced Concrete Models，Proceeding of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete，pp.709-714，Jul.1989

4) 齋藤　匠，参納千夏男，芳賀　尭，鳥居和之：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.983-988，2006.6

5) 参納千夏男，鳥居和之，齋藤　匠，平野貴宣：各種鉱物質混和材の ASR と塩害の複合劣化に対する抑制効果，セメント・コンクリート論文集，No.60，2007.2

6) 大代武志，鳥居和之，平野貴宣：川砂・川砂利を使用したコンクリートの ASR 劣化の岩石･鉱物学的調査，セメント・コンクリート論文集，No.61，2008.2

7) 参納千夏男，鳥居和之，山戸博晃，野口陽輔：北陸地方産のフライアッシュによるアルカリシリカ反応の抑制効果，セメント･コンクリート論文集，No.58，2005.2

8) Kawamura，M.，Singhal，D.，Tuji，Y.：Effect of ASR on Corrosion of Reinforcement in Concrete under Saline Environment，Proc.of East-Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar，Tottori，pp.179-190，Nov.1997

9) 羽渕貴士，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.149-161，2004.11