

論文 収縮補償コンクリートのアルカリシリカ反応とフライアッシュによる抑制効果

菊地 弘紀*1・久保 哲司*2・鈴木 雅博*3・鳥居 和之*4

要旨：高速道路の RC 床版の更新工事では、工期短縮と経費削減のために、高耐久プレキャスト PC 床版が採用されている。一方、プレキャスト PC 床版の間詰め部や端部には、収縮補償コンクリートが使用されている。そこで本研究では、北陸地方産の反応性骨材を使用した収縮補償コンクリートの ASR による膨張挙動を調べるとともに、フライアッシュの混和による ASR 抑制効果とそのメカニズムについて実験的に検討した。その結果、収縮補償コンクリートでは、膨張材によって ASR が促進されること、フライアッシュの混和で ASR が効果的に抑制されることが明らかとなった。

キーワード：収縮補償コンクリート、ASR、フライアッシュ、飽和 NaCl 溶液浸漬法、偏光顕微鏡観察

1. はじめに

北陸地方の道路橋 RC 床版は、ASR や塩害による早期劣化の問題を抱えており、複合的な劣化に対する抑制対策が求められている。このような状況下において、北陸地方では、ASR や塩害による早期劣化に対するフライアッシュコンクリートの有効性が実証され、プレキャスト PC 桁や PC 床版の実橋への適用が進んでいる¹⁾。この背景としては、同地方では、高品質なフライアッシュ（分級フライアッシュ）の地域全域での安定供給が可能になり²⁾、生コン工場やコンクリート製品工場でのフライアッシュコンクリートがこの数年間で急速に普及したことが挙げられる。実際、北陸地方でのフライアッシュコンクリートの JIS 認証取得工場数は平成 28 年度末に 60% まで達することが予想されている。

一方、プレキャスト PC 床版を接合する間詰め部や端部の場所打ちコンクリートは、海水や凍結防止剤の侵入路になる接合面の隙間やひび割れの発生を防止する目的

で、膨張材を用いた収縮補償コンクリートを使用することが規定されている。わが国の膨張材には、石灰系とカルシウムサルファアルミネート系の 2 種類があるが、更新事業では石灰系のものが多く使用されている。石灰系の膨張材は、膨張材の初期水和反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を生成し、それらがコンクリート中に残存するが、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が ASR 膨張に及ぼす影響に関しては様々な見解がある³⁾。

そこで本研究では、富山県常願寺川産の川砂および川砂利を使用した収縮補償コンクリートの ASR による膨張挙動を調べるとともに、フライアッシュの混和による ASR 抑制効果とそのメカニズムについて実験的に検討した。

2. プレキャスト PC 床版と収縮補償コンクリートの地域実装

北陸地方では、フライアッシュコンクリートを使用し



写真-1 富山新港火力発電所の LNG 船着岸棧橋工事



写真-2 日野川橋梁の床版更新工事

*1 北陸電力（株）（正会員）

*2 北陸電力（株） 志賀原子力発電所保修部 土木建築課（正会員）

*3 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 博（工）（正会員）

*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博（正会員）

表－1 常願寺川産川砂利のアルカリシリカ反応性

化学法 (JIS A 1145)				モルタルバー法 (JIS A 1146)		促進モルタルバー法 (ASTM C 1260)	
Sc	Rc	Sc/Rc	判定	膨張率	判定	膨張率	判定
242	72	3.36	無害でない	0.68	無害でない	0.72	有害

表－2 コンクリートの配(調)合

配合名	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						化学混和剤 (HC+FA+Ex)×%	
				W	HC	Ex	FA	S	G	SP*	DF**
HC	4.5	35	45	165	471	—	—	755	915	0.5	0.1
HC+Ex					449	22	—	755	915		
HC+FA+Ex					382	22	67	747	905		

SP* : ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤, DF** : 消泡剤

たプレキャスト PC 床版 (設計基準強度 : 50N/mm²) の地域実装を全国に先駆けて実施している。最初に、写真－1 に示すように、平成 28 年 6 月に北陸電力・富山新港火力発電所の LNG 船着岸棧橋の新設工事にて、ASR および塩害 (海水) 対策として適用された。次いで、写真－2 に示すように、平成 28 年 11 月に北陸自動車道日野川橋梁の RC 床版の更新工事にて、ASR および塩害 (凍結防止剤) 対策として適用された。これらのプレキャスト PC 床版は PC 専業社の軟質工場にて製造されており、軟質石炭火力発電所から産出したフライアッシュを用いている。フライアッシュは早強ポルトランドセメントの 15mass% を置換して使用した。また、プレキャスト PC 床版の間詰め部や端部に使用するフライアッシュ混入高強度収縮補償コンクリート (設計基準強度 : 50N/mm²) の現地生コンでの製造と現場打設がすでに完了している。本コンクリートの現場打設では、コンクリートの運搬時のスランプロスと少量打設での施工法改善などが課題となった。

3. 実験概要

3.1 使用材料とコンクリートの配合

収縮補償コンクリートには、PC 床版と同程度以上の強度と耐久性が要求される。そのため、早強セメント (T 社, 密度 : 3.14 g/cm³, ブレーン値 : 4410 cm²/g, 略号 HC) を使用して、コンクリートの設計基準強度を 50 N/mm² (28 日材齢) および拘束膨張量を (200±50) ×10⁻⁶ とした。膨張材 (石灰系) は低添加型汎用品 (T 社, 密度 : 3.16 g/cm³, ブレーン値 : 3400 cm²/g, 略号 Ex) を使用した。また、フライアッシュは七尾大田火力発電所産の分級品 (密度 : 2.39 g/cm³, ブレーン値 : 4650 cm²/g, Ig. Loss : 2.0%, 平均粒径 : 7 μm, 略号 FA) を使用した。常願寺川産の川砂 (密度 : 2.62 g/cm³, 吸水率 : 1.85%) および

川砂利 (密度 : 2.60 g/cm³, 吸水率 : 1.45%, Gmax : 25 mm) は、安山岩が 35 % 含まれており、安山岩の反応性鉱物はオパールとクリストバライトである。さらに、常願寺川産の川砂および川砂利の岩石構成率 (安山岩) はほぼ同じであり、いずれも顕著なアルカリシリカ反応性を示すことが知られている⁴⁾。常願寺川産川砂利の化学法 (JIS A1145), モルタルバー法 (JIS A1146) および促進モルタルバー法 (ASTM C1260) によるアルカリシリカ反応性の判定結果を表－1 に示す。この骨材は化学法およびモルタルバー法で「無害でない」、促進モルタルバー法で「有害」と判定された。

コンクリートの配(調)合を表－2 に示す。早強セメント、フライアッシュおよび膨張材をコンクリートの圧縮強度発現に寄与する結合材とした。配(調)合は HC (早強セメント単味), 収縮補償とした (HC+Ex) (早強セメントと膨張材の組み合わせ), (HC+FA+Ex) (早強セメントとフライアッシュ, 膨張材の組み合わせ) の 3 種類である。以降では、コンクリートの配(調)合を略号で示す。フライアッシュと膨張材を混和した配(調)合では、フライアッシュは結合材から単位膨張材量を差引いた量の 15mass% を置換した。単位膨張材量は 22kg/m³ とした。コンクリート試験体は 75 mm×75 mm×400 mm の直方体であり、脱枠後 2 週間の標準養生を行い、その後、2 週間の封緘養生を行った後に、飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 膨張試験に供した。なお、測定結果は試験体 2 体の平均である。

3.2 試験方法

(1) 飽和 NaCl 溶液浸漬法による ASR 膨張試験

温度 50℃ の飽和 NaCl 溶液にコンクリート試験体 (セメント以外からのアルカリ添加無し) を完全に浸漬し、浸漬材齢にともなう長さ動弾性係数の変化を測定した。なお、本試験法は凍結防止剤の浸透にともなう ASR 膨張

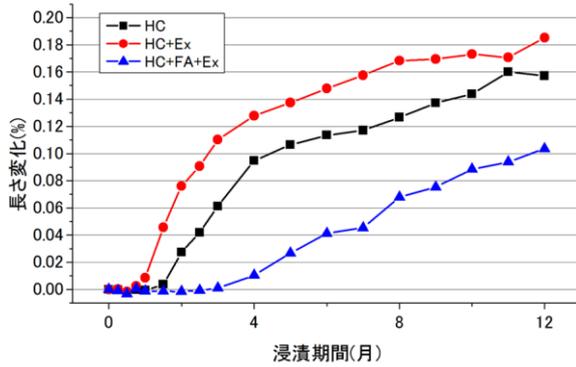


図-1 コンクリートの長さ変化

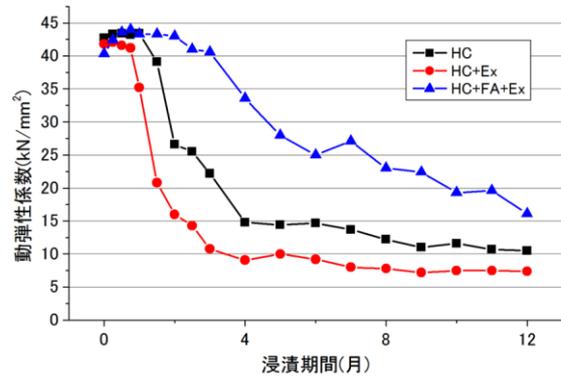


図-2 コンクリートの動弾性係数の変化

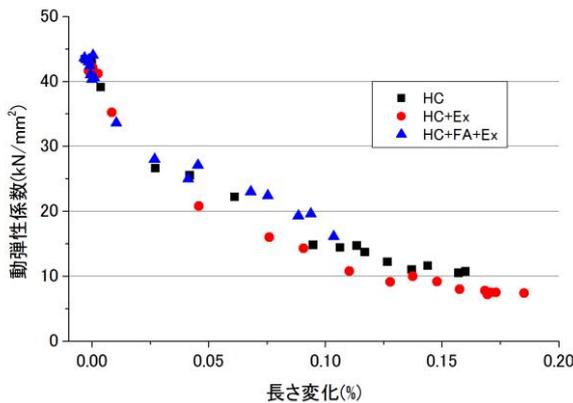


図-3 コンクリートの動弾性係数と長さ変化の関係

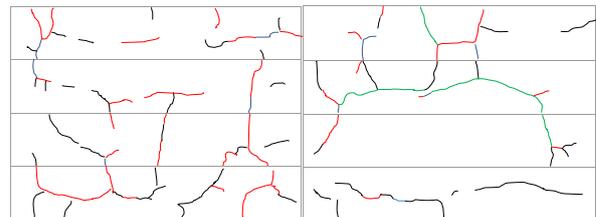


図-4 コンクリートのひび割れ発生状況 (浸漬期間1年) (左: HC, 右: HC+Ex)

の発生を模擬している。

(2) 薄片研磨試料の偏光顕微鏡観察

凍結防止剤 (NaCl) が散布される環境条件では, NaCl のコンクリートへの浸透過程でフリーデル氏塩 ($C_3ACaCl_2 \cdot 10H_2O$) が生成し, その際に解離した Na^+ イオンと水酸化カルシウム (CH) との反応により OH^- イオンが生成する³⁾。これが ASR を促進する要因の1つと考えられ, CH は OH^- イオンの供給源となる。このメカニズムを検証するために, コンクリートの薄片研磨試料 (厚さ: $20\mu m$) を偏光顕微鏡にて観察し, 膨張材起源の CH クラスターの残存形態を浸漬試験開始時に観察した。また, 浸漬期間 12 ヶ月にて, 硝酸銀溶液噴霧法 (0.1 N の硝酸銀溶液噴霧による白色域) を用いて塩分浸透深さを計測するとともに, 同断面にてゲルフルオロレスセンス法⁵⁾より ASR ゲルの生成状況 (UV 灯下での黄緑色域) を比較した。

(3) 示差走査熱量分析による水和生成物およびポゾラン反応生成物の同定

浸漬期間 6 ヶ月および 12 ヶ月にて, コンクリート断片の粉末試料 (温度 $20^\circ C$ での真空乾燥) を使用して, 示差走査熱量分析 (DSC) によりフライアッシュのポゾラン反応の進行状況と水酸化カルシウム, フリーデル氏塩の生成状況を検討した。

4. 試験結果および考察

4.1 コンクリートの ASR 膨張挙動

コンクリートの長さ変化を図-1に示す。飽和 NaCl 溶液浸漬法では, 塩水が試験体に浸透した段階で, 表面部の砂粒子から ASR の反応が順次始めると予測される。このため, 浸漬期間 1 ヶ月後に, まず (HC+Ex), 次いで HC の順番で膨張が発生することが認められた。また, コンクリートの膨張 (表面ひび割れが目で観察された段階 (膨張率: $0.04\% \sim 0.05\%$)) が一旦始めると, 表面ひび割れから NaCl 溶液が内部に浸透するので, それ以後は膨張が急速に加速している。一方, (HC+FA+Ex) は, 両試験体と比較して, 初期浸漬材齢での膨張が効果的に抑制されている。浸漬期間 12 ヶ月でのコンクリート試験体の最終膨張率は, (HC+FA+Ex), HC, (HC+Ex) の順番で増加している。以上の測定結果より, 膨張材混入による初期浸漬期間での膨張促進効果とフライアッシュ 15% 置換による初期・長期浸漬材齢での膨張抑制効果が確認できた。

コンクリートの動弾性係数の変化を図-2に示す。いずれのコンクリート試験体も膨張率の増大にともない動弾性係数が大きく低下していた。

コンクリートの動弾性係数と長さ変化の関係を図-3に示す。3種類のコンクリート試験体での両者の関係はコンクリートの種類に関係なく同一の線上にあることが明らかになった。この結果は高強度コンクリート (PC

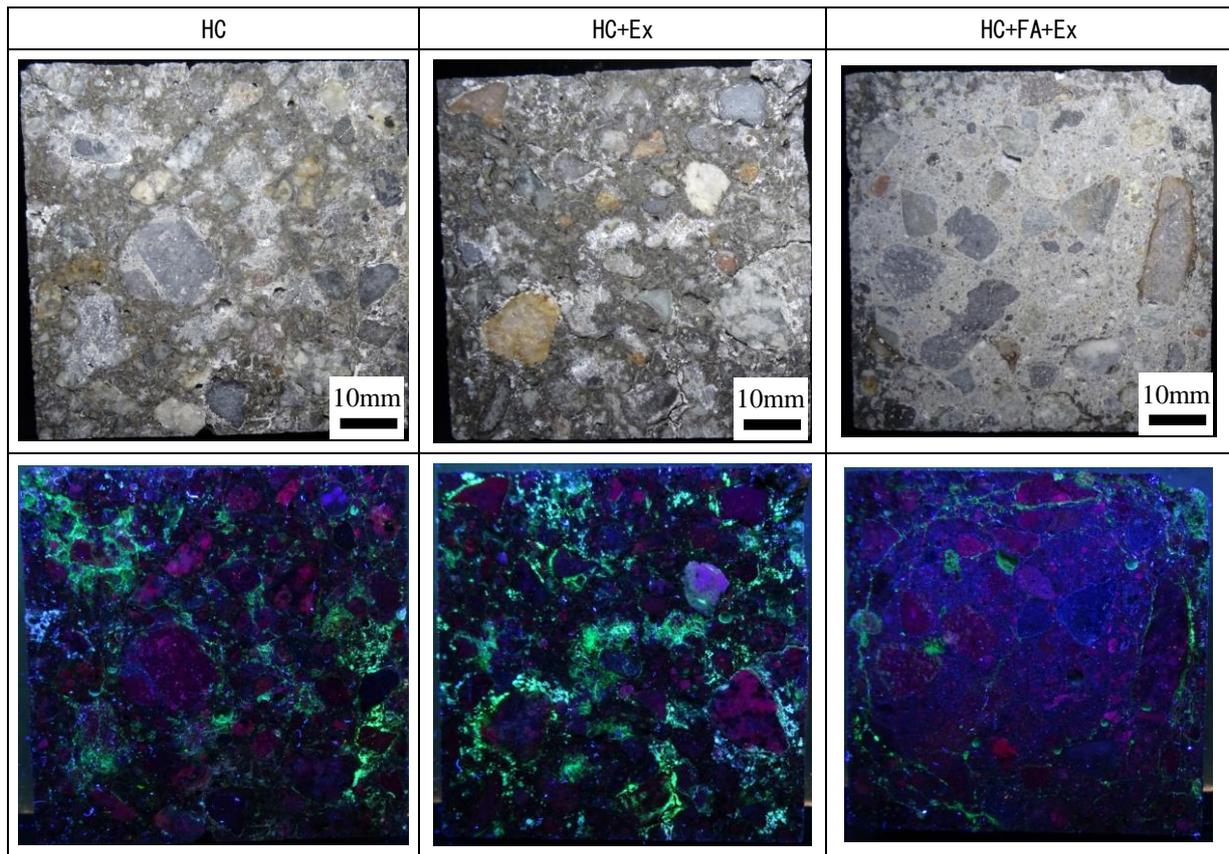


写真-3 コンクリート（切断面）のASRゲルの生成状況の観察結果（浸漬期間1年）
（上：可視光，下：UV光）

桁など)での非破壊検査などに活用できる可能性がある。

4.2 コンクリートのひび割れ発生状況

コンクリート（HCおよびHC+Ex）のひび割れ発生状況（浸漬期間1年）を図-4に示す。なお、ひび割れ幅の計測に関して、0.3mm～0.5mmを黒、0.5mm～0.7mmを赤、0.7mm～1.0mmを青、1.0mm以上を緑で示している。なお、0.3mm以下は記入していない。コンクリート試験体のひび割れは3種類のコンクリート試験体で大きく相違した。すなわち、（HC+FA+Ex）は表面に0.3mm以下の微細なひび割れが多数発生していたが、それ以上の大きなひび割れは観察されなかった。それに対して、HC試験体および（HC+Ex）は、0.3mm以上のひび割れが発生しており、とくに（HC+Ex）の長さ方向には1.0mm以上の大きなひび割れが発生していた。このようなコンクリートのひび割れ状況の相違には、ASRの発生部位（表面と内部）とASRが発生した骨材の粒径（砂と砂利）とが密接に関係しているものと推測された。

4.3 コンクリートのゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの生成状況の観察

コンクリート（浸漬期間1年）の塩分浸透深さの測定より、HCおよび（HC+Ex）は試験体全面に塩分が浸透していたのに対して、（HC+FA+Ex）は表面部（20mm程度）のみに塩分浸透が限定されていた。

コンクリート（切断面）のゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの生成状況の観察結果（浸漬期間1年）を写真-3に示す。HCは、表面および内部ともにASRゲルが生成しており、細骨材および粗骨材ともに良く反応している状況が観察された。この際に、反応している粒子は火山岩（安山岩（灰白色）と流紋岩（茶色））のみであり、深成岩（花崗岩と閃緑岩）には反応の痕跡がまったく観察されなかった。また、（HC+Ex）は、HCと同様に内部でもASRゲルの生成が観察されたが、HCと比較して、断面全体でのASRゲルの呈色反応がより鮮明であった。さらに、より大きな径の安山岩粒子の周囲にもASRゲルが生成していたのが特徴であった。これにはひび割れが内部まで貫通したことにより、内部でのアルカリ雰囲気により増大したことが寄与していた。その一方で、（HC+FA+Ex）は、塩分が浸透した表面から20mmの領域で、とくに細かい安山岩粒子の周囲にASRゲルの生成が観察された。このことが、（HC+FA+Ex）の表面部に微細なひび割れが多く発生した原因であると考えられた。以上より、フライアッシュの混和によりASRが抑制されたのは、コンクリートの緻密化による塩分浸透の抑制と、フライアッシュの周囲に生成した低Ca/Si比のCSHによるアルカリ吸着との相乗作用によるものであると考えられた⁶⁾。

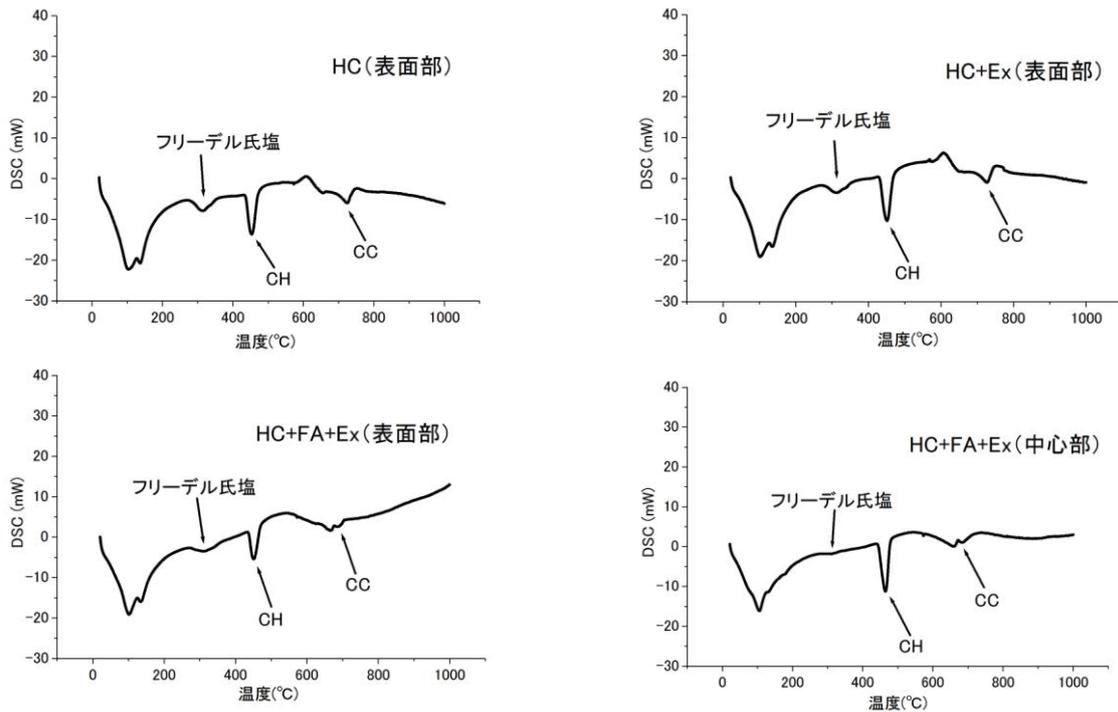


図-5 コンクリートのDSC曲線（浸漬期間6ヶ月）

4.4 コンクリートのセメントおよびフライアッシュの反応状況

コンクリートのDSC曲線（浸漬期間6ヶ月）を図-5に示す。コンクリートの水酸化カルシウム(CH)の残存量は、セメントの水和反応とフライアッシュのポゾラン反応の両者の進行度により増減する。いずれのコンクリート試験体でも、表面部（深さ0mm～15mm）は浸漬期間6ヶ月においてCHの吸熱ピーク(460°C)が大きく減少し、それにとまないフリーデル氏塩のブロードな吸熱ピーク(350°C)が増大していた。それに対して、(HC+FA+Ex)の中心部（深さ25mm～35mm）ではフリーデル氏塩のピークはまったく認められなかった。以上の分析結果は、NaClの浸透によるASR発生の主たる要因がフリーデル氏塩の生成によるアルカリ雰囲気増大によるものであることを示唆している。

4.5 コンクリートの偏光顕微鏡による安山岩粒子とASRひび割れの観察

収縮補償コンクリート（表面部（深さ0mm～15mm））の偏光顕微鏡観察結果（浸漬試験開始時および浸漬期間6ヶ月）を写真-4および写真-5に示す。写真-4に示すように、コンクリート試験体（浸漬試験開始時）には、石灰系膨張材に由来するCHクラスター（最大径0.1mm）がセメント硬化体に分散しており、その周囲にはCa(OH)₂を生成する際に発生した放射状の膨張性ひび割れが観察された。同時に、細骨材の一部にひび割れの発生が認められた。このひび割れの発生頻度と規模（進展長さ）は、(HC+Ex)と比較して(HC+FA+Ex)が効果

的に低減されていた。残存CHクラスターとひび割れの影響により、(HC+Ex)のASRによる初期膨張が加速されたものと推測する。写真-5に示すように、浸漬期間6ヶ月においては、(HC+Ex)では、川砂および川砂粒中の安山岩粒子がともに良く反応しており、安山岩粒子から進展した膨張ひび割れが多数観察された。また、安山岩粒子の界面にASRゲルが滲出するとともに、ひび割れの内部がASRゲルで充填されている様子も観察された。これらはHCにおいても同様の結果が観察された。それに対して、(HC+FA+Ex)では、表面部の川砂中の安山岩粒子は良く反応していたが、中心部はASRが完全に抑制されていた。これらの観察結果は、ゲルフルオレッセンス法による観察結果とも一致していた。

5. まとめ

本研究では、富山県常願寺川産の反応性骨材を使用した収縮補償コンクリートのASRによる膨張挙動を飽和NaCl溶液浸漬法により調べるとともに、フライアッシュによるASRの抑制効果とそのメカニズムを実験的に検討した。

本研究で得られた主要な結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 凍結防止剤(NaCl)の浸透を模擬した飽和NaCl溶液浸漬法において、コンクリートのASR膨張に及ぼすNaClの促進作用は、フリーデル氏塩の生成過程でもたらされるアルカリ雰囲気増大が主要因であった。

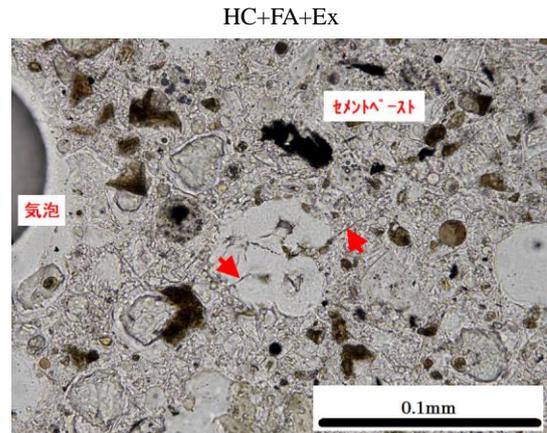
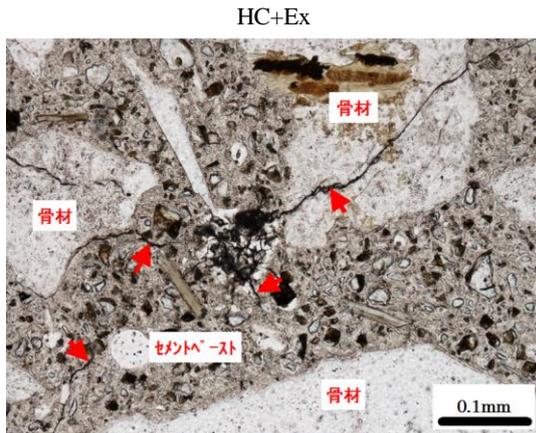


写真-4 収縮補償コンクリートの偏光顕微鏡観察結果（浸漬試験開始時）

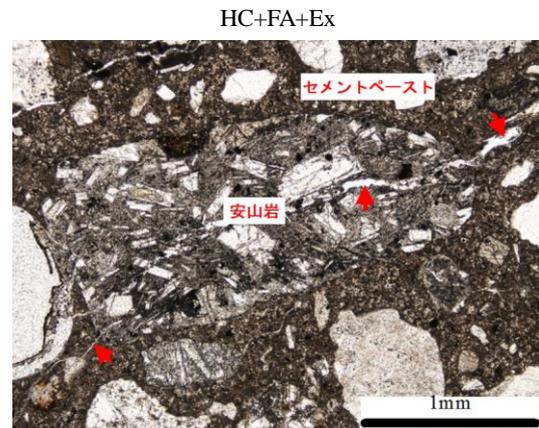
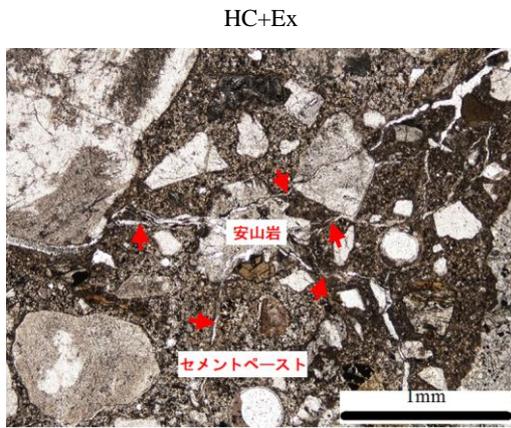


写真-5 収縮補償コンクリートの偏光顕微鏡観察結果（浸漬材齢6ヶ月）

- (2) 収縮補償コンクリートでは、石灰系膨張材に由来する CH 増加とひび割れ発生の影響により、コンクリートの初期および長期浸漬材齢での ASR 膨張が膨張材無混和のものよりも促進された。
- (3) フライアッシュを混和することにより、収縮補償コンクリートでの ASR 発生が表面部分に限定され、ASR 膨張を効果的に抑制できた。これは、フライアッシュのポゾラン反応で生成した CSH のアルカリ吸着、外部からの塩分浸透の抑制、さらに膨張材由来の CH クラスターの減少の相乗作用によるものであると考えられた。

謝辞：本研究は、内閣府・JST の SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の研究活動の一環として実施したものである。本試験の実施にあたりご協力いただいた、太平洋セメント（株）、（株）太平洋マテリアル、並びに、（株）日本ピーエスに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之：フライアッシュコンクリートの PC 橋梁への適用に関する実

用化研究, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.5, pp.46-53, 2015.

- 2) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会報告書（富山・石川・福井版），2013
- 3) 日本コンクリート工学会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書，pp.8-9, 2008
- 4) 広野真一, 鳥居和之：北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.499-506, 2013
- 5) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之：ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013
- 6) 広野真一, 安藤陽子, 大代武志, 鳥居和之：フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.441-447, 2013