

論文 地中環境下におけるコンクリートのアルカリシリカ反応の特徴とその膨張挙動に関する検討

津田 誠*1・櫛 沙季*2・野村 昌弘*3・鳥居 和之*4

要旨：詳細な点検・診断が困難な地中・水中構造物などで、反応性骨材と水が関係するアルカリシリカ反応（ASR）による深刻なリスクが知られている。一方、良質な骨材の枯渇を背景に、ASR 抑制対策として石炭火力発電所からのフライアッシュの有効利用の確立が課題となっている。そこで本研究では、地中養生下でのコンクリートの ASR 反応性試験と工学的特性に関する検討を行った。その結果、地中部の ASR 反応性の特徴として、非反応とされていた骨材においても、ASR の発生が確認された。さらに、コンクリートの動弾性係数低下の原因を顕微鏡観察による微視的な組織の変化により究明した。

キーワード：ASR, フライアッシュ, 砂中養生, 促進膨張量試験, 動弾性係数, 偏光顕微鏡

1. はじめに

北陸地方では、高度成長期の建設の増加を受け、河川産の砂利砂や砕石、砕砂、浚渫砂など様々な骨材が使用され、これらの一部の骨材により、コンクリート構造物で深刻なアルカリシリカ反応（以下、ASR と記す）による劣化が発生している。

一方、わが国の ASR 抑制対策は、アルカリ総量規制値（3kg/m³）を基本に据えているが¹⁾、骨材から溶出するアルカリや供用後の塩分（NaCl）により、ASR が長期にわたり進行する場合があることも指摘されている^{2) 3)}。

平成 25 年に道路法が改正され、原則 2m 以上の橋長を有する橋梁は 5 年に 1 回近接点検が義務付けされた。現在、義務化後 2 回目の点検が実施されている。2 回目の点検ではボックスカルバート形式など橋梁によっては点検手法が簡略化され、合理化の流れがある一方で、高い橋脚や複雑な構造などの点検についての課題も判明してきている。その中でも地中部などの不可視部の点検は未実施の場合が多く、点検および評価手法についてはほとんど検討がされていないのが現状である。

写真-1(a) (b)に示すように、アルカリ総量規制以前に建設された道路構造物において、比較的 ASR 劣化が軽微とされている地中部に位置する橋梁のフーチングにて、鉄筋破断をとまなう深刻な ASR の発生が確認されている。さらに、対象の橋脚の地上部では ASR 劣化によるひび割れは地中部よりも少なく、可視部だけの点検で地中部の劣化を推定することは多くのリスクを内在することになることも報告されている⁵⁾。

図-1 に示すように新第三紀（緑）と第四紀（黄緑）の新しい火山岩類は日本全国に分布しており、急速膨張



(a) フーチング側面のひび割れ状況

写真-1 ASR が発生したフーチングの劣化状況 (能登有料道路)

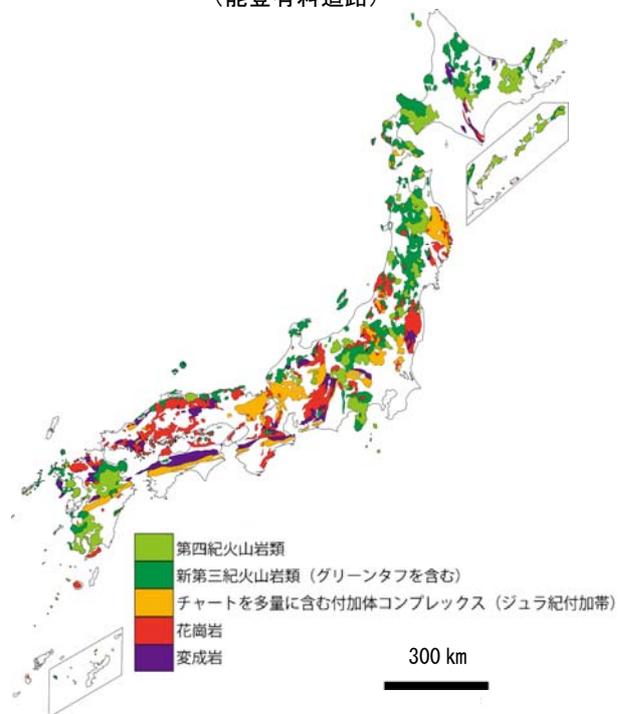


図-1 ASRに関連する地層や岩体⁴⁾

*1 石川工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 石川工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 (株) 野村昌弘の研究所 博士（工学）（正会員）

*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 工博（フェロー会員）

表-1 七尾大田火力発電所産のフライアッシュの物理的諸性質

産出箇所名	品質規格	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	45 μmふるい残分 (Wt%)	フロー 値比 (%)	活性度指数		メチレンブ ルー吸着量 (mg/g)
						材齢28日(%)	材齢91日(%)	
JIS灰規格(Ⅱ種)		>1.95	>2,500	<40	>95	>80	>90	—
七尾大田火力	JIS規格(Ⅱ種)	2.45	4770	1	111	91	105	0.34

性の反応鉱物を含む岩石が日本各地で ASR が発生している可能性がある。このため、ASR 劣化構造物の報告が少ないとされている地域でも、可視部や不可視部も含めて潜在的に ASR 劣化した構造物が多く存在している可能性があり、ASR 劣化に対するリスクマネジメントについての研究が進められている^{6) 7)}。

これら反応性骨材の使用にともなう ASR 劣化のリスク軽減を目的として、石灰石砕石や砕砂を使用するレディーミクストコンクリートプラントが増えてきている。しかし、石灰石骨材はアルカリを吸収しないため、2.0kg/m³程度のアルカリ量でも砂による ASR の発生が報告されている⁸⁾。

さらに、低反応性の遅延膨張性鉱物を含む骨材でも ASR 劣化が発生し、これら ASR 反応性が認められる鉱物が含まれている地層も日本各地に分布し、今後、慢性的な骨材不足により、将来にわたり ASR 劣化が各地でさらに発生する可能性が考えられる。

しかし、環境負荷軽減および社会情勢ならび地産地消の観点から、ASR 発生リスクのない骨材を選択することは現実的ではなく、当該地域ごとに使用する骨材に対応した ASR 抑制対策を確立することにより、地元で産出する骨材の有効利用を図ることがより重要であると考えている。

一方、今後、温暖化対策で石炭火力発電所は縮小傾向ではあるが、東日本大震災以降比較的発電コストが安価なことから、北陸地方では 50%程度の電源率が保持されており、それにともないフライアッシュ（以下、FA と記す）の地域的な利活用が課題となっている。

そこで本研究では、潜在的に ASR 劣化のリスクが高い地中構造物や塩害環境での ASR の特徴を明らかにするとともに、地方ごとの様々な骨材の ASR リスクを軽減させ、安全に使用可能にする仕様の確立を目的とした。さらに、既設構造物の耐久性向上として、5年に1回実施されている橋梁の詳細点検において、可視部から不可視部の ASR 劣化を推定できる仕組みの構築も考えている。

そのため、地上部と地中部との ASR 反応性の違いを明らかにする必要がある。今回、地中構造物の使用環境を模擬した養生条件により、ASR 抑制効果が報告されている分級 FA を用いてコンクリートの ASR 反応性試験を実施した。さらに、ASR 反応性が高い骨材を使用して、飽

表-2 モルタル試験体の種類および実験水準

ケース	使用骨材	混和材	配合	アルカリ量の調整	養生条件
1	手取川		JIS A1146 準拠	あり JIS A1146 準拠	40°C 砂中湿潤
2		FA15%			
3	常願寺川				
4		FA15%			
5	手取川				
6		FA15%			
7	常願寺川			なし	20°C 砂中湿潤
8		FA15%			
9	手取川				
10		FA15%			
11	常願寺川				
12		FA15%			
13	手取川			なし	50°C 飽和NaCl
14		FA15%			
15	常願寺川				
16		FA15%			

和塩化ナトリウム水溶液や水酸化ナトリウム溶液による養生下でのモルタルおよびコンクリートの膨張試験を行うとともに、試験後の試験体からの断片を実体および偏光顕微鏡により観察した。

2. 試験方法

2.1 供試体および試験体の概要

写真-1 に示すフーチングでは、表面には多くのひび割れが見られるものの、その多くは鉄筋が破断した箇所を除き、鉄筋かぶり部分で止まっていた。また、JIS A1146 のモルタルバー法では試験中の結露によるアルカリの溶脱の影響が示唆されている⁷⁾。このため、地中環境の影響を再現した ASR 試験として、モルタルバー試験体による砂中養生での膨張試験を行った。混和材としては表-1 に示す物理的性質の北陸電力七尾大田火力発電所産の分級 FA を用いた。FA の混合率は、北陸地方で実績が多いセメントの内割として 15%とした。試験は表-2 に示す配合にて 16 ケース実施した。ASR 非反応性骨材として石川県手取川産の川砂、ASR 反応性骨材として富山県常願寺川産の川砂を使用した。使用した骨材の ASR 判定結果を表-3 に示す。両骨材の反応性の相違は反応性岩石（安山岩、流紋岩）と非反応岩石（花崗岩、閃緑岩）の構成率によっている。なお、試験体寸法および骨材の粒度調整は JIS A1146 のモルタルバー法に準拠した。

2.2 試験方法

ASR 劣化している地中構造物周辺（砂質地盤）を模擬して豊浦珪砂（旧 JIS Z 8801 豊浦標準砂）を用い、写真-2 の耐熱プラスチック容器に砂の表面に水分が浮いてくるまで水道水により飽和状態にした。

また、ASR が発生しているフーチングにてモニタリング時に観測した夏季での温度の 20℃、冬季での温度 -5℃のうち、ASR 反応性に関係性が高いと考えられる夏季の 20℃を試験温度とし、JIS A1146 のモルタルバー法の養生温度である 40℃、飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法は 50℃とした。さらに、構内の芝生が敷設してあり、雨水の影響が考えられ、地下水が滞水しない箇所を選定し、写真-3 に示す深さ 30 cm 程度の穴をケースごとに 3 箇所掘り、試験体を埋設し養生する屋外暴露試験を行った。また、塩分環境での ASR 試験として飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法を行った。試験体作製時にアルカリ総量の調整を実施していない。測定は、試験体を前日に室温 20℃の恒温室に移し、翌日に同部屋にて計測した。試験体は 1 ケースあたり 3 本とした。

飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法における ASR 判定は、材齢 91 日の膨張率が 0.1%未満のものを「無害」、0.1%以上 0.4%未満のものは無害と有害が混在しているとして「不明確」、0.4%以上は「有害」と判定する⁹⁾。

ASR 劣化度の岩石学的評価は、蛍光塗料含有エポキシ樹脂を含浸させ作製した断片試料および薄片試料にて実体顕微鏡、蛍光顕微鏡および偏光顕微鏡を用いて観察した。また、ASR 劣化度と膨張率との関係を、JIS A1127 の共鳴振動¹⁰⁾により動弾性係数の変化により調査した。

3. 試験結果および考察

3.1 骨材の種類と FA による ASR 抑制効果

図-2 にモルタルバーの飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法による試験結果を示す。表-3 に示す判定試験結果にて「無害でない」と判定された常願寺川産骨材は判定日数である養生日数 91 日で「有害」と判定される膨張率 0.4%の 2 倍を超える大きな膨張率を示した。さらに判定日数の 2 倍以上 266 日においても膨張が継続し、1.5%とさらに大きい膨張率を示した。一方、「無害」と判断された手取川産骨材でも飽和塩化ナトリウム溶液中にて膨張が継続し、長期において大きな膨張を示した。実際に、手取川産の骨材を使用した橋脚において、フィンガー型の伸縮装置からの漏水により凍結防止剤由来による塩分 (NaCl) が濃縮する傾向にある上面において¹¹⁾、ASR による劣化が生じていることが報告されている。塩分 (NaCl) の影響がある実構造物の ASR による現象と実験の結果と概ね一致した。

さらに、図-2 より FA を混和したケースは、養生初期

表-3 使用骨材の ASR 判定結果

骨材産地	化学法 (JIS A1145)				モルタルバー法 (JIS A 1146)	
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	膨張量 (6ヶ月) (%)	判定
手取川※	66	84	0.79	無害	0.03	無害
常願寺川※※	215	84	2.56	無害でない	0.25	無害でない

※手取川の下流域の骨材は安山岩および流紋岩の含有が少ない
 ※※常願寺川の骨材は反応性の高い安山岩を30%程度含有する



写真-2 試験体の養生方法



写真-3 屋外暴露試験体養生状況

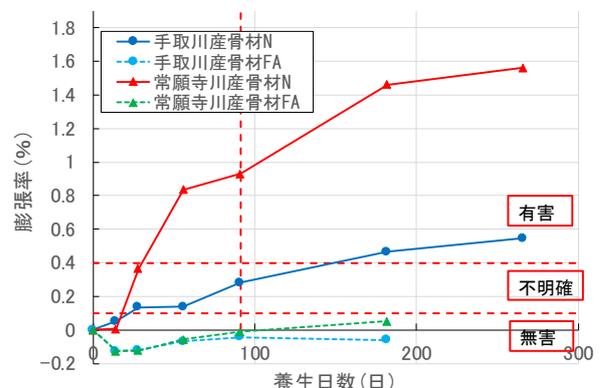


図-2 モルタルバーの膨張試験結果
(飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法)

で比較的大きな収縮を示した。その原因として水和反応初期のポーラスな状況において、飽和塩化ナトリウム溶液の浸透による影響が予測されたが、明確な理由は不明であった。また、養生日数が 182 日の測定において、FA 無混和にて大きな膨張を示した常願寺川産および手取川産の両方のケースとも膨張挙動はまったく見られず、塩分 (NaCl) の影響がある環境においても FA による ASR 抑制効果が確認された。

3.2 温度および水分供給による ASR の膨張挙動

図-3～図-5 に地中構造物を想定した膨張試験の結果を示す。図-3 は養生温度 40℃での膨張率を示す。養生槽は湿度 95%を超える状態が保たれている。セメント単味のケースでの膨張率の推移は常願寺川産と手取川産

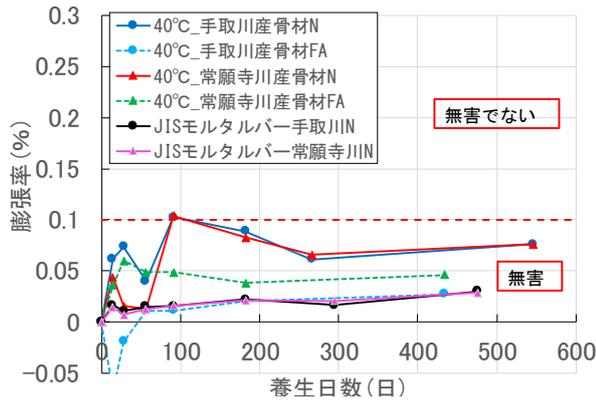


図-3 モルタルバーの膨張試験結果（試験温度 40°C）

とも養生日数 546 日間で 0.07% を超える膨張率があり、さらに、ほぼ同様の膨張挙動であった。また、同じ 40°C の試験温度である JIS A1146 のモルタルバー法よりも、砂質土中にて大きい膨張率を示した理由としては、試験体からのアルカリの溶出の違いが関係していると推測された⁵⁾。また、FA を混和したケースでは、セメント単味と比較して小さな膨張率となり、膨張が抑制された。

図-4 に試験温度 20°C の結果を示す。養生日数 546 日において常願寺川産および手取川産とも試験温度 40°C のケースと比較して、セメント単味のケースの場合、膨張率 0.05% 未満であった。一方、FA を混和したケースでは常願寺川産と手取川産の両方とも養生日数 182 日間にてセメント単味を若干上回る膨張率を示した。

実際の地中構造物は温度や雨水、地下水などが変化する状況にある。図-5 に屋外養生の試験結果を示す。セメント単味のケースは 7 月、FA 混和のケースはセメント単味の途中結果より、追加で実施したため常願寺川産は 9 月、手取川産は 10 月から養生開始した。セメント単味のケースでは常願寺川産の膨張率は養生 182 日で 0.04%、546 日で 0.03% と収縮傾向が見られた。本箇所は ASR による膨張が継続する環境⁵⁾ と推察されるが異なる結果となった。この理由として、砂質土で雨水が滞留しにくい箇所では試験体が乾燥し、ASR による反応性が低下したものと考えられた。この傾向として、地中部のかぶり部において地下水が滞留しない箇所については乾燥による収縮が、ASR 反応に伴う膨張を上回り、表面膨張量の差により網の目状のひび割れが生じたものと考えられた。

図-6 にケース 3 の養生日数が 546 日での試験体のひび割れ状況を示す。反応性骨材を使用しているケース 3 の 3 本のすべての試験体にて図-6 に示すような、内部の膨張量が表面より大きいことが理由と考えられる 1 方向のひび割れが生じていたのに対し、同じ膨張率のケース 1 の試験体は 3 本ともひび割れの発生が確認できなかった。この理由として、試験体内での膨張量に差が少ないことが推察された。これより試験体内部での ASR にともなう膨張の分布に違いがあるものと考えられた。

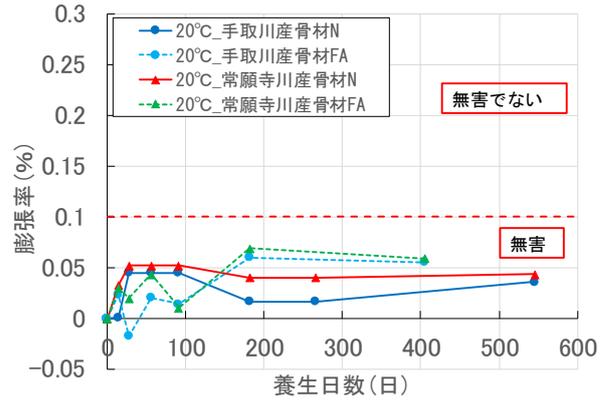


図-4 モルタルバーの膨張試験結果（試験温度 20°C）

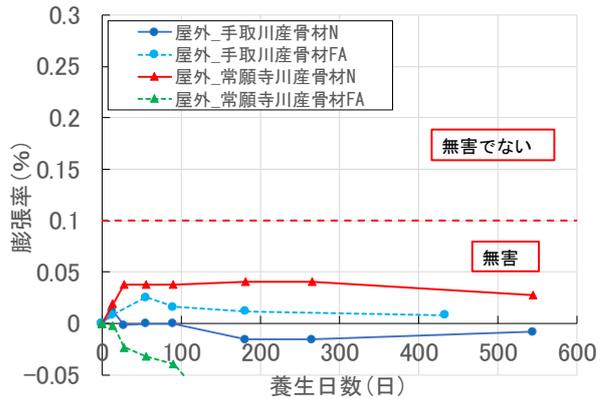
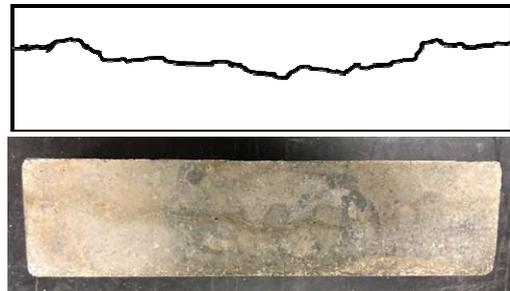


図-5 モルタルバーの膨張試験結果（屋外養生）



ケース 3 試験温度 40°C : 養生日数 : 546 日
図-6 モルタルバーの表面状況

表-4 モルタルバーの動弾性係数試験の結果

ケース	使用骨材	混和材	養生条件	養生日数	動弾性係数 E _D (kN/mm ²)	養生日数	動弾性係数 E _D (kN/mm ²)
1	手取川		40°C	182	30.3	546	35.8
2		FA15%	砂中湿潤		35.3	434	30.6
3	常願寺川		砂中湿潤	182	35.0	546	36.4
4		FA15%			37.9	434	38.5
5	手取川		20°C	182	31.9	546	33.0
6		FA15%	砂中湿潤		34.4	406	35.6
7	常願寺川		砂中湿潤	182	35.8	546	35.8
8		FA15%			37.3	406	39.3
9	手取川		屋外	182	32.1	546	33.2
10		FA15%	地中内		33.2	434	34.7
11	常願寺川		雨がかり	182	36.5	546	36.6
12		FA15%	あり		33.8	462	35.2
13	手取川		50°C	182	17.0		
14		FA15%	飽和		33.1		
15	常願寺川		飽和	182	12.9		
16		FA15%	NaCl		13.4		
A	手取川		80°Cアルカリ溶液	28	29.1		
B		FA15%	ASTM		31.1		
C	常願寺川		C1260		16.3		
D		FA15%			30.0		

3.3 動弾性係数による供試体の劣化予測

表-4 に各養生日数時点での動弾性係数を示す。動弾性係数は同一条件の3本の供試体の平均値としている。また、以前に実施した ASTM C1260 の供試体の結果も合わせて記載した。一部のケースを除き FA を混和した方が動弾性係数は大きくなる傾向になった。さらに、養生日数の増加とともに動弾性係数は増加するケースが多くなり、これは ASR の進行に伴う動弾性係数の減少よりもセメントの水和反応やフライアッシュのポズラン反応の進行による密実化の影響が大きいと考えられた。

また、飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法や ASTM C1260 での供試体の動弾性係数は 20kN/mm²を下回るケースが多くなり、さらに、飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法による供試体の動弾性係数の減少がより顕著であった。また、常願寺川産では FA を混和したケースにおいてもセメント単味のケースと同様に動弾性係数が減少した。

図-7 はモルタルバーの膨張率と動弾性係数の関係について、すべての供試体の結果をプロットしたものである。飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法以外の供試体では、膨張率が 0.2%以下のケースでは動弾性係数の低下が少なく、ASR による劣化の影響が小さいと考えられた。

図-8 にケース 1~12 の各種砂中養生および屋外養生試験での動弾性係数と膨張率の直近養生1年間での変化量との関係を示す。両者にはほとんど明確な関係が見られなかった。これは膨張率が 0.1%以下の範囲では ASR による動弾性係数への影響が軽微と考えられた。

3.4 顕微鏡観察による岩石学的評価

写真-4 に蛍光顕微鏡観察による切断面の画像を示す。切断面の画像より ASTM C1260 でのひび割れの特徴はひび割れ幅が大きく密度が小さいのに対し、飽和塩化ナ

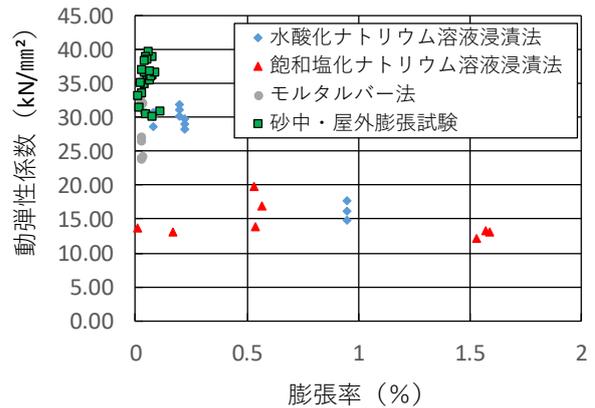


図-7 膨張率と動弾性係数との相関

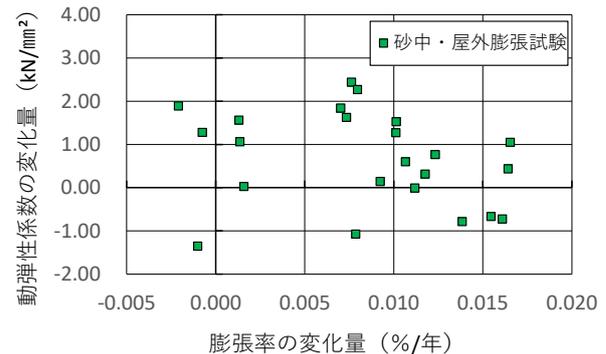
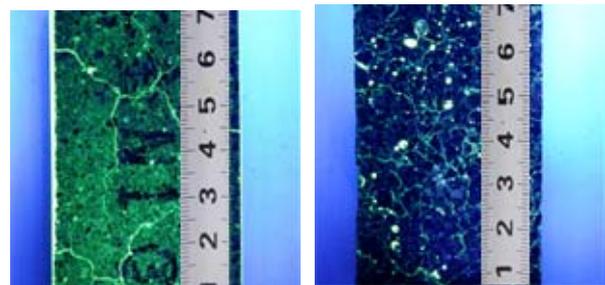


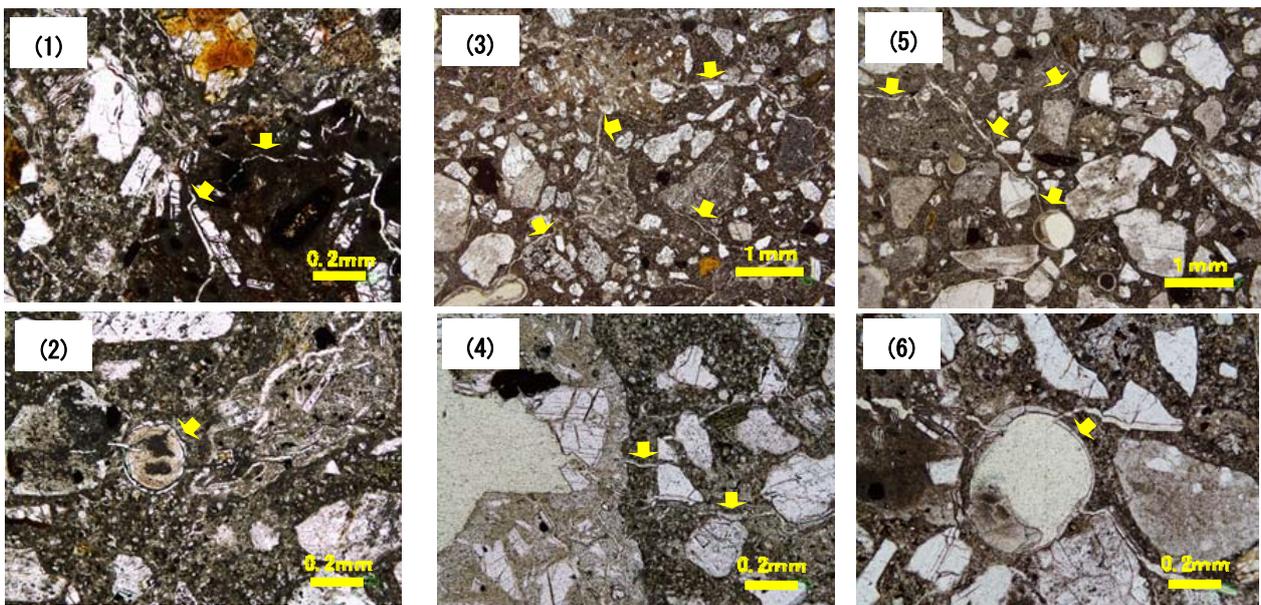
図-8 動弾性係数と膨張率の各変化量との相関



ケース C ASTM C1260 (養生日数 28 日)

ケース 15 飽和 NaCl (養生日数 266 日)

写真-4 蛍光顕微鏡による観察結果



(1), (2) ケース C ASTM C1260(養生日数 28 日), (3)~(6) ケース 15 飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法(養生日数 266 日) □: ASR ゲル

写真-5 偏光顕微鏡による観察結果 (単ニコル)

リウム溶液浸漬法では幅の小さい網の目状のひび割れが高密度で多数生じていた。

写真-5に ASTM C1260 と飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法による試験後の試験体から採取した薄片試料による偏光顕微鏡観察画像を示す。写真-5(1), (2)は ASTM C1260 の試料による観察画像で写真-5(1)は安山岩および溶結凝灰岩から発生した膨張性のひび割れが見られた。また、一部で未反応の安山岩も存在していた。また写真-5(2)では安山岩からの ASR ゲルが気泡内に充填している状況が確認された。蛍光顕微鏡観察と偏光顕微鏡観察の結果より、今回実施した ASTM C1260 では骨材の ASR 反応にばらつきが大きいと考えられ、局部的な膨張により、試験体の拘束に起因した方向性のある比較的幅の広いひび割れが生じたものと考えられた。

写真-5(3)～(6)は飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法の試料による観察画像で写真-5(3)に示すとおり網の目状にひび割れが発達している状況が確認でき、ほとんどの反応性岩石が ASR により反応していると考えられた。また、写真-5(4)では安山岩粒からの放射状のひび割れの進展が確認され、さらに写真-5(5), (6)より網の目状のひび割れが多数発達し、ひび割れ部の ASR ゲルの移動にともなう気泡内への ASR ゲルの充填が見られた。

偏光顕微鏡観察結果より飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法の方が ASTM C1260 の試料に比べて全体的に ASR により骨材の反応が促進されていた。このため、一定の方向性の持たない網の目状ひび割れが生じたと考えられた。ASR による膨張により微細なひび割れ網が試験体内部に形成されることにより、図-7 に示すように、小さい膨張量でも動弾性係数の低下が大きくなった可能性が考えられた。

4. まとめ

本研究より得られた主な結果を次にまとめた。

- (1) 飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法による試験結果、FA を混和したケースでは膨張挙動はなく、塩分 (NaCl) 環境でも FA による ASR 抑制効果が確認された。
- (2) 砂中養生 (40°C) の膨張試験の結果、セメント単味のケースでの膨張率の推移は使用した骨材の ASR 反応性に関係なく、ほぼ同様の膨張挙動であった。
- (3) 地中外気温での暴露試験より地中部のかぶり部では地下水が滞留しない場合、乾燥による収縮が、ASR 反応に伴う膨張を上回り、表面膨張量の差によりひび割れが生じたものと考えられた。
- (4) 膨張率が 0.2%以下では動弾性係数の低下が少なく、ASR による劣化の影響が小さいと考えられた。
- (5) 蛍光顕微鏡観察により ASTM C1260 でのひび割れの特徴はひび割れ幅が大きく密度が小さいのに対し、

飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法では幅の小さい網の目状のひび割れが高密度で多数生じていた。

- (6) 偏光顕微鏡観察結果より飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法の方が ASTM C1260 に比べて全体的に ASR により骨材の反応が促進され、一定の方向性の持たない微細なひび割れ網が試験体内部に形成されることにより、小さい膨張量でも動弾性係数の低下が大きくなった可能性が考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策（土木構造物）実施要領，2002
- 2) 鳥居和之，野村昌弘，南善導：北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.390-395，2006
- 3) 津田 誠，麻田正弘，参納千夏男，鳥居和之：富山産河川砂利のアルカリシリカ反応性と外来塩分環境下での ASR 劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.1363-1368，2015
- 4) 広野真一，山田一夫，佐藤友美，鳥居和之：わが国の代表的な反応性骨材と ASR の発生に関するデータ整理，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1035-1040，2016
- 5) 津田 誠，相良明日香，加賀谷将伍，鳥居和之：地中環境下における ASR 反応性と抑制対策の検証，コンクリート構造物の補強，補修，アップグレード論文報告集，Vol.20，pp.185-190，2020
- 6) 鳥居和之，橋本徹：今，何故，北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか，セメント・コンクリート，No.810，pp.18-23，2014
- 7) 日本コンクリート工学会：性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関するシンポジウム委員会報告書・論文集，2017
- 8) 菊池弘紀，山戸博晃，広野真一，鳥居和之：細・粗骨材の組み合わせのペシマム現象による ASR 劣化事例の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1041-1046，2016
- 9) 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
- 10) JIS A1127-2010:共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法
- 11) 青山實伸：北陸地方のコンクリート構造物の塩害に対する耐久性確保に関する研究，金沢大学学位請求論文，2004