

論文 ASR ゲルの化学組成分析による河川産骨材の ASR 劣化の実態調査

藤村 友城^{*1}・畔柳 昌己^{*2}・野村 昌弘^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨: コンクリートの残存膨張性の有無を判断するにあたり, ASR ゲルの化学組成を EPMA により検討する手法が提案されている。本研究では, 北陸地方の河川産骨材を使用した ASR 劣化構造物からコンクリートコアを採取し, コンクリート中の ASR ゲルの化学組成分析を実施した。その結果, 川砂利中の粒径 5-13mm 程度の安山岩粒子のひび割れを充填する ASR ゲルの化学組成は低 Ca/Si 原子数比のものであり, 供用後 30 年以上経過しているにも係らず吸水膨張性が残っていた。それに対して, 川砂中の粒径 1-2mm 程度の安山岩粒子は, 早期に ASR ゲルのアルカリがカルシウムにより置換されており, 吸水膨張性が消失していた。

キーワード: ASR ゲル, EPMA, 偏光顕微鏡観察, 河川産骨材, 実態調査

1. はじめに

北陸地方では, アルカリシリカ反応(以下, ASR と略記)が発生したコンクリート構造物に対して, 表面被覆材による塗装やエポキシ樹脂によるひび割れの注入を実施してきた。しかし, 橋台や橋脚, 擁壁などの土木構造物に実施した補修の多くは比較的早期に再劣化が発生している¹⁾。従来, ASR 劣化構造物の補修・補強の適否を判断する際には, コアによる残存膨張性の有無を基準にしており, この目的でコアの促進養生試験(JCI-DD2 法, カナダ法, デンマーク法)が実施されてきた経緯がある。しかし, コアの残存膨張性の有無を判定する基準は骨材のアルカリ反応性のもが適用されており, 供用後 20 年, 30 年が経過した構造物に対して誤った評価がなされた調査事例があるのも事実である。一方, コンクリートの残存膨張性の有無を判断する新たな評価法として, 反応性骨材の周囲に生成した ASR ゲルの化学組成を EPMA により検討する手法が提案されている²⁾。これは ASR ゲルの吸水膨張性とその化学組成によって大きく相違することに着目したものである。

そこで本研究では, 河川産骨材が使用された ASR 劣化構造物(橋梁およびボックスカルバート)の使用骨材の岩種構成率を調べるとともに, コアの薄片研磨試料を使用して, 偏光顕微鏡による観察と EPMA による ASR ゲルの化学組成分析を実施した。それらの分析結果と既往の研究を参照することにより, 河川産骨材による ASR 劣化の特徴と ASR ゲルの化学組成分析によるコンクリートの膨張予測の可能性について 2, 3 の考察を行った。

2. 調査対象構造物の概要

調査対象構造物の概要を表-1 に示す。橋梁(事例 1, 3

および 4) およびボックスカルバート(事例 2)は, 1986 年のアルカリ骨材反応暫定対策の以前に建設されたものであり, 北陸地方にいずれも位置している。事例 1, 2 および 3 は, 凍結防止剤の散布により外部アルカリや塩分の影響を受ける道路構造物である。構造物の各部位から採取したコアより得られたコンクリートの力学的性質(圧縮強度および静弾性係数)に関して, 事例 1 および 3 は設計基準強度を若干下回り, 事例 2 および 4 は設計基準強度を上回っている。一方, 図-1 に示すように, 圧縮強度に対する静弾性係数の低下はいずれも顕著であり, ASR が発生したコンクリートの特徴が現れている。

以下に富山県および石川県に位置する 4 件の調査対象構造物の概要を示す。なお, 対象構造物の地域区分は金沢大学での研究¹⁾を参照している。また, 対象構造物の外観調査による ASR 劣化度(4 段階)は表-1 に示すとおりである。

2.1 事例 1(橋梁・橋脚)

富山県東部に位置する橋梁の下部工(橋脚)である。橋脚の梁側面は, コンクリート表面に大きなひび割れが観察されており, はつり出しの調査により鉄筋の破断が確認されている。外観調査における ASR 劣化度は「状態 IV」と判定した。

2.2 事例 2(ボックスカルバート・側壁)

富山県中央部に位置するボックスカルバートの側壁である。凍結防止剤の影響によりひび割れと錆汁が多数観察されるとともに, 側壁の前面には 10mm 以上の大きな割れが発生している。外観調査における ASR 劣化度は「状態 IV」と判定した。なお, 本構造物はひび割れ注入と防水ライニングが実施されたが, その後数年で再劣化が生じている。

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 中日本高速道路(株) 品質検査チーム サブリーダー

*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 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 調査対象構造物の概要

劣化事例	構造種別	建設年	セメント量 (kg/m ³)	設計基準強度 (N/mm ²)	凍結防止剤 散布の有無	ASR 劣化度 (外観調査)*1	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
事例 1	橋脚	1980	300	24	有	IV	22.7	13.2
事例 2	ボックスカルバート	1975	290	24	有	IV	24.5	12.9
事例 3	橋台	1973	290	24	有	III	20.6	11.0
事例 4	PC ホロー桁	1974	不明	40	無	III	63.5	28.7

- * 1 I: ASR のひび割れが発生していないもの
 II: 構造物の隅角部などに ASR のひび割れがごく一部発生しているもの
 III: ASR のひび割れが構造物の約 1/3 以上の面積で発生しているもの
 IV: ASR のひび割れが広範囲に多数発生し、段差やずれも認められるもの

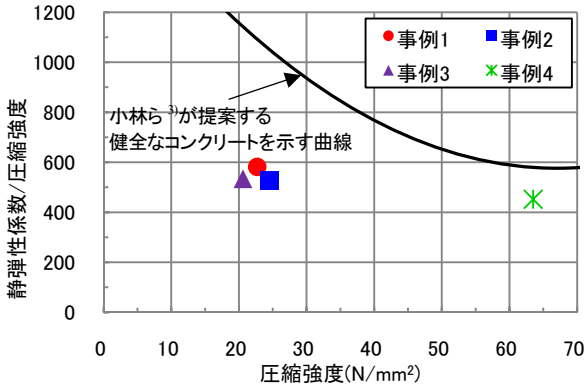


図-1 コアの静弾性係数/圧縮強度と圧縮強度の関係



写真-1 コンクリート舗装のひび割れ状況(事例 4)

2.3 事例 3(橋梁・橋台)

富山県西部に位置する橋梁の下部工(橋台)である。ひび割れ注入と防水ライニングを実施しており、補修対策後から約 10 年が経過した現在までにライニング材の再劣化は確認されていない。外観調査における ASR 劣化度は「状態 III」と判定した。

2.4 事例 4(橋梁・PC ホロー桁)

石川県能登地方に位置する橋梁の上部工(PC ホロー桁, JIS 認定工場製造品)である。主桁の下フランジ部の長さ方向に 0.6mm 程度の連続的なひび割れが観察された。また、主桁の下フランジ下面の削孔により、ホロー桁の内部に路面排水が浸透し、滞留していることが確認された。なお、PC ホロー桁の ASR 膨張によって、写真-1 に示すように、アスファルト舗装の表面にはリフレクションクラックが発生している。外観調査における ASR 劣化度は「状態 III」と判定した。

3. 試験概要

3.1 構造物からのコアの採取状況

コンクリート構造物より φ=55mm のコアを多数採取し、以下に示す一連の ASR 試験を実施した。事例 1, 2 および 3 においては地上から 1.5m 付近よりコアを採取している。それに対して、事例 4 においては PC ホロー桁の側面中央よりコアを採取している。採取したコアの外観上の特徴として、事例 1, 2 および 3 のものはコアの断裂やひび割れ、ASR ゲルの滲出などが観察された。

3.2 川砂利の岩種構成率の算出

各構造物より採取したコアを使用して、川砂利中の岩種構成とその比率(%)を求めた。これは、粗骨材の岩種は展開写真を目視により識別するとともに、一部の岩種の確認は薄片の偏光顕微鏡観察でも実施した。また、展開写真から求めた粗骨材(粒子径 5mm 以上)の総面積に対する各岩種の面積率を算出した。なお、粗骨材中の反応性骨材は安山岩、流紋岩・デイサイト、流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩、流紋岩～デイサイト質凝灰岩、珪質頁岩として分類している。

3.3 コアの力学的性質の検出

採取したコアを試験用に切断整形し、JIS A 1107「コンクリートからのコアおよびはりの切り取り方法並びに強度試験方法」、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JSCE-G502「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従い実施した。

3.4 偏光顕微鏡による薄片観察

コアから研磨薄片(20mm×30mm, 厚さ 20μm)を粗骨材周囲とモルタル部よりそれぞれ 1 枚ずつ作製し、骨材周囲やセメントペースト相のひび割れの ASR ゲルの生成状況を偏光顕微鏡により観察した。

3.5 ASR ゲルの化学組成分析

コアから作製した研磨薄片(乾式切断, オイル研磨)に炭素蒸着の後、エネルギー分散型(EDS)を備えた EPMA(日本電子社製, JXA-8200)を用いて、ASR ゲルの

化学組成を ZAF 補正計算法による定量分析を行った。なお、分析条件は以下に示すとおりである。

蒸着：炭素蒸着

測定元素：Si, Al, Mg, Ca, Na, K, S, P

加速電圧：15kV, 照射電流：4.0×10⁻⁹A

測定モード：EDS, 測定時間：100sec

4. 試験結果および考察

4.1 川砂利の岩種構成率と構造物の ASR 劣化度

調査対象構造物に使用された川砂利の岩種構成の結果を表-2に示す。構造物の ASR 劣化度に関しては、事例1および2が状態IV、事例3および4が状態IIIと判定された。それに対して、一般に反応性をもつと考えられる骨材の含有量(全体)に関しては、事例1(47.6%)>事例4(41.6%)>事例3(34.0%)>事例2(29.2%)と必ずしも構造物の ASR 劣化度とは一致していなかった。一方、安山岩の含有量のみに着目すると、事例1(17.8%)>事例2(14.9%)>事例3(5.9%)>事例4(0.1%)となり、構造物の ASR 劣化度との間に正の相関が認められた。これまでの研究でも、北陸地方の河川産骨材を用いた ASR 構造物においては、骨材中の安山岩粒子の含有量が多いものほど ASR による劣化度が著しいことが知られている⁴⁾。また、同地域のコンクリート構造物にて ASR による劣化が著しくなる原因として、常願寺川や神通川水系のように、川砂や川砂利中の安山岩粒子の含有率がベシマム混合率付近に存在することが指摘できる⁵⁾。一方、事例4においては川砂利中の安山岩の含有量は少ないにも係らず ASR が発生しているのが特徴である。事例4は石川県内

表-2 調査対象構造物の粗骨材の岩種判定結果

劣化事例	事例1	事例2	事例3	事例4
ASR 劣化度(外観調査)	IV	IV	III	III
岩種	比率(%)			
安山岩	17.8	14.9	5.9	0.1
流紋岩・デイサイト	10.1	6.5	12.8	1.8
花崗岩	4.6	14.4	4.6	15.2
閃緑岩	29.5	18.5	11.3	15.8
石英斑岩・花崗斑岩		2.8		
片岩・片麻岩	5.5	20.7	42.4	12.4
流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩	19.2	7.0	14.3	34.5
流紋岩～デイサイト質凝灰岩	0.6	0.7	0.6	2.0
砂岩	12.1	14.4	7.7	15.0
珪質頁岩		0.1	0.5	3.2
石灰岩	0.7			
蛇紋岩				
計	100.0	100.0	100.0	100.0
反応性骨材含有量 ^{*1}	47.6	29.2	34.0	41.6

*1: 反応性骨材含有量=安山岩+流紋岩・デイサイト+流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩+流紋岩～デイサイト質凝灰岩+珪質頁岩

の工場で製造されたものであるが、その後の調査により流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩を多く含む庄川水系の骨材が使用された可能性が高いことが明らかになった。

4.2 偏光顕微鏡によるコアの研磨薄片の観察

偏光顕微鏡によるコア薄片の観察結果の一例を写真-2および写真-3に示す。事例1, 2および3では、反応性骨材として流紋岩・デイサイトや流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩といった火山岩も含有していた。しかし、ASR ゲルの生成や骨材中の貫通ひび割れといった激しい反応は、川砂および川砂利中の安山岩粒子のみに発生しているのが特徴であった。一方、安山岩含有量の少ない事例4では、流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩からシルト岩、砂岩といった堆積岩系の岩種が混在しており、

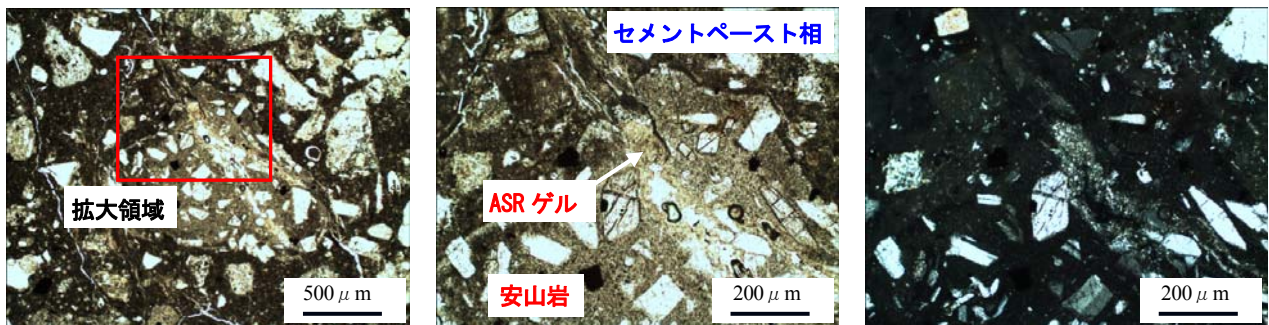


写真-2 偏光顕微鏡によるコア薄片の観察結果(事例2) (左: 単ニコル 右: 直交ニコル)

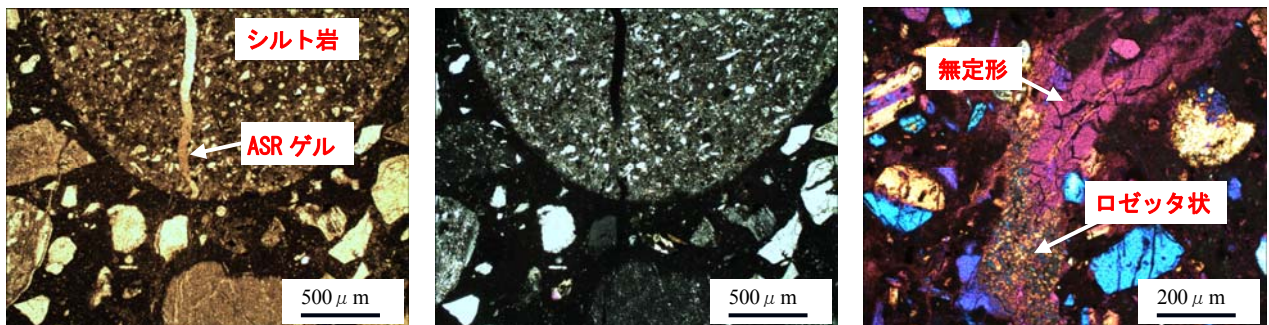


写真-3 偏光顕微鏡によるコア薄片の観察結果(事例4) (左: 単ニコル 右: 直交ニコル)

写真-4 ASR ゲルの形態変化(事例3) (直交ニコル(鋭敏色検板使用))

表-3 EPMA 分析によるアルカリシリカゲルの化学組成 (%)

試料名 分析位置	事例 1(橋脚)				事例 2(擁壁)					事例 3(橋台)					事例 4(PC ホロ一桁)			
	A*1	B*2	D*4	E*5	A*1	B*2	C*3	D*4	E*5	A*1	B*2	C*3	D*4	E*5	A*1	B*2	D*4	E*5
SiO ₂	50.40	45.80	36.89	38.94	50.37	48.04	35.41	40.09	37.29	46.61	41.12	31.14	39.03	34.50	52.44	45.21	43.16	40.15
Al ₂ O ₃	13.66	7.71	7.44	6.20	11.25	11.32	7.70	8.53	6.77	9.79	9.37	6.37	8.68	6.79	8.77	7.85	6.74	7.02
MgO	1.98	1.80	1.33	1.55	2.11	1.60	1.43	1.55	1.12	1.58	1.37	1.79	1.31	1.15	0.91	1.40	1.21	1.33
CaO	5.08	10.63	12.21	13.92	5.96	9.57	14.68	13.41	14.51	6.12	11.07	15.21	13.31	14.79	9.28	13.88	17.07	15.48
Na ₂ O	7.17	5.07	3.94	4.32	5.82	6.17	3.89	4.40	4.30	5.95	5.03	3.47	4.40	3.71	4.85	4.87	3.83	4.83
K ₂ O	2.94	2.60	1.70	1.55	2.54	2.32	1.78	1.99	1.50	2.97	2.48	1.43	1.68	1.26	2.06	1.63	1.32	1.44
SO ₃	0.04	0.14	0.14	0.30	0.06	0.14	0.28	0.22	0.21	0.03	0.09	0.16	0.14	0.16	0.21	0.40	0.49	0.32
P ₂ O ₅	0.19	0.07	0.11	0.12	0.27	0.15	0.07	0.08	0.10	0.18	0.15	0.12	0.15	0.10	0.03	0.06	0.04	0.01
Total	81.47	73.82	63.76	66.90	78.40	79.31	65.24	70.27	65.80	73.24	70.68	59.68	68.71	62.48	78.54	75.29	73.86	70.59
Si	21.40	21.92	20.69	20.73	22.44	21.25	19.60	20.40	20.28	22.15	20.68	19.01	20.30	19.95	23.26	21.39	21.03	20.47
Ca	2.31	5.47	7.65	8.17	2.88	4.56	8.80	7.37	8.73	3.22	5.98	9.95	7.52	9.19	4.47	7.04	8.96	8.46
Na	5.89	4.71	4.15	4.51	4.94	5.27	4.15	4.33	4.56	5.54	4.91	4.11	4.43	4.17	4.19	4.48	3.63	4.78
K	1.60	1.59	1.25	1.05	1.46	1.30	1.25	1.29	1.01	1.82	1.60	1.11	1.11	0.94	1.19	0.98	0.82	0.94
Ca/Si	0.11	0.25	0.37	0.39	0.13	0.21	0.45	0.36	0.43	0.15	0.29	0.52	0.37	0.46	0.19	0.33	0.43	0.41
Ca/(Na+K)	0.31	0.87	1.42	1.47	0.45	0.69	1.63	1.31	1.57	0.44	0.92	1.91	1.36	1.80	0.83	1.29	2.01	1.48

* 1:粗骨材内 * 2:粗骨材界面 * 3:細骨材内 * 4:ひび割れ中 * 5:気泡中 * 6:重量% * 7:原子数

特定の岩種のみならず ASR の発生が限定されていないのが特徴であった。また、すべての事例において、骨材内部からセメントペースト相へのひび割れの進展や気泡中への ASR ゲルの滞留が観察された。

ASR ゲルの形態変化の一例を写真-4 に示す。事例 1, 2 および 3 における ASR ゲルの形態は、川砂および川砂利中の安山岩粒子中とセメントペースト相とで相違が認められた。これは、骨材内部のひび割れ内においてロゼッタ状(結晶性)を成す傾向が認められた一方で、セメントペースト相のひび割れや気泡中のものは無定形(非結晶性)の ASR ゲルが多く観察された。

4.3 EPMA による ASR ゲルの化学組成分析

EPMA による ASR ゲルの化学組成分析の結果を表-3 に、ASR ゲルの Ca/Si 原子数比(以下、Ca/Si)と Ca/(Na+K) 原子数比(以下、Ca/(Na+K)) (対数)の関係を図-2 から図-6 に示す。なお、表-3 の数値は平均値で表記している。図-2 から図-6 に示すように、ASR ゲルの Ca/Si と Ca/(Na+K) (対数)の関係はほぼ直線上に分布していることが理解できる。

事例 1, 2 および 3 に関しては、粗骨材中の安山岩粒子のひび割れ内の ASR ゲルはアルカリ(Na, K)やシリコン(Si)が多く、カルシウム(Ca)が少ないのが特徴である。一方、安山岩粒子の界面から離れて、セメントペースト相のひび割れや気泡中へと向かうにつれて、アルカリとシリコンが相対的に減少し、カルシウムが増加している。また、細骨材中の安山岩粒子の ASR ゲルに関しては、安山岩粒子の内部と界面の化学組成に相違がなくなり、セメントペースト相のひび割れ中や気泡中の ASR ゲルの化学組成と同程度となっている。EPMA による安山岩起

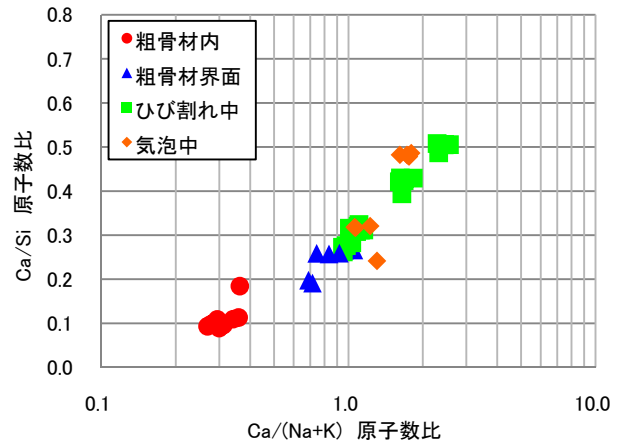


図-2 アルカリシリカゲルの化学組成(事例 1)

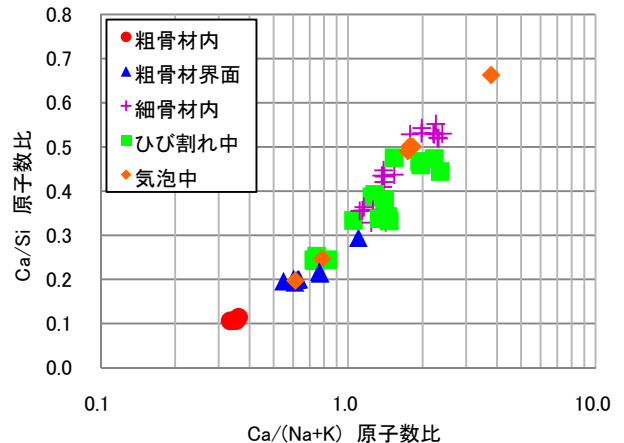


図-3 アルカリシリカゲルの化学組成(事例 2)

源の ASR ゲルの化学組成から算出される Ca/Si および Ca/(Na+K) の範囲を以下に示す。

粗骨材内 : Ca/Si=0.06~0.23, Ca/(Na+K)=0.19~0.87

粗骨材界面 : Ca/Si=0.19~0.35, Ca/(Na+K)=0.55~1.15

ひび割れ中：Ca/Si=0.22~0.57, Ca/(Na+K)=0.73~2.56

気泡中：Ca/Si=0.20~0.66, Ca/(Na+K)=0.61~3.78

細骨材内：Ca/Si=0.33~0.55, Ca/(Na+K)=1.11~2.40

事例4に関しては、事例1, 2および3と比較して粗骨材の粒子内部のひび割れおよび粒子界面のASRゲルの化学組成は、高カルシウムで低アルカリ型のASRゲルの化学組成を呈していた(図-6参照)。以下に分析結果の化学組成範囲を示す。

粗骨材内：Ca/Si=0.13~0.28, Ca/(Na+K)=0.66~0.96

粗骨材界面：Ca/Si=0.21~0.38, Ca/(Na+K)=0.90~2.24

ひび割れ中：Ca/Si=0.36~0.73, Ca/(Na+K)=1.38~3.96

気泡中：Ca/Si=0.40~0.42, Ca/(Na+K)=1.39~1.68

約30年経過したコンクリートのASRゲルの化学組成の分析結果より、粗骨材の粒子内部のひび割れ>粗骨材の粒子界面>細骨材の粒子内部のひび割れ、セメントペーストのひび割れ、気泡となるにつれて、高いシリコンおよびアルカリ量と低いカルシウム量の化学組成で表現されるASRゲルに変化しているのが明らかになった。これは粗骨材中の安山岩粒子(5-13mm)の骨材内部やその界面で生成したASRゲルがセメントペースト相からのカルシウムの取り込みとASRゲルのセメントペーストのひび割れへの移動する過程で、アルカリがカルシウムにより置換されることによるものであると考えられる²⁾。一方、細骨材中の安山岩粒子(1-2mm)はその比表面積がかなり大きくなるので、早期にASRゲルのアルカリがカルシウムにより置換されるとともに、骨材全体での反応も早期に終了しているものと考えられる。また、骨材のひび割れ内においてASRゲルの形態がロゼッタ状を呈していたこともASRゲルの化学組成が同様に影響していると考えられる。Katayamaら⁶⁾や林ら⁷⁾は高アルカリのASRゲルほどロゼッタ状の形態になることを報告している。これらの報告は、カルシウムイオンの拡散が少ない、粒径の大きい安山岩粒子の内部ほどロゼッタ状のASRゲルが多く観察されたとする本研究の結果とも一致するものである。

5. ASRゲルの化学組成とコンクリートの残存膨張性

ASRゲルの化学組成分析をコンクリートの残存膨張性の有無の評価との関連で整理すると以下のようである。

(1) 骨材内や界面で生成するASRゲルがセメントペースト中のひび割れや気泡中に移動する過程で、ASRゲルにカルシウムが多量に取り込まれ、ASRゲルの吸水膨張性が急速に低下する⁸⁾。従って、材齢を経過するほど、反応性骨材の粒径が小さいものほど、ASRゲルはカルシウムに富んだものとなり、最終的にはCSHに類似した、安定な性状を呈するものに変化する。

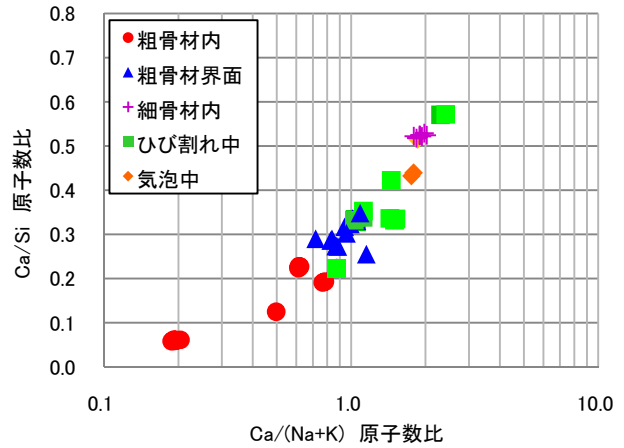


図-4 アルカリシリカゲルの化学組成(事例3)

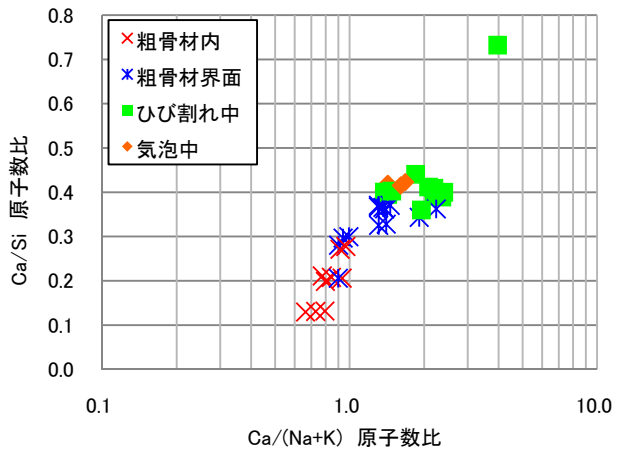


図-5 アルカリシリカゲルの化学組成(事例4)

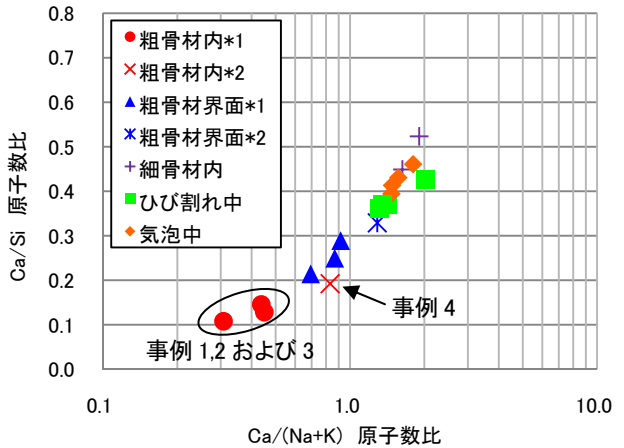


図-6 アルカリシリカゲルの化学組成 (*1:安山岩 *2:安山岩を除く反応性骨材)

(2) 流動性があり、かつ大きな吸水膨張性をもつASRゲルの化学組成はCa/Siが0.1以下のもの^{9), 10)}であり、Ca/Siが0.25を超えるとASRゲルの吸水膨張性が低下する¹¹⁾。

以上の知見を総合すると、川砂利や川砂中の安山岩粒子に関しては、「ASRゲルのCa/Siが0.25以上の場合にはコンクリートの残存膨張性が小さくなる」と判断できる。この判定基準に基づくと、事例1, 2および3に関しては

30年以上経過しているが、粗骨材中の安山岩粒子のひび割れ内にある ASR ゲルは吸水膨張性がいまだ残っていると推察できる(事例 1:Ca/Si=0.11, 事例 2:Ca/Si=0.13, 事例 3:Ca/Si=0.15)。それに対して、事例 4 に関しては、流紋岩粒子や凝灰岩粒子周囲の ASR ゲルの Ca/Si は比較的大きいもの(事例 4: Ca/Si=0.19)が多くあり、ASR ゲルの吸水膨張性は小さいと推察できる。ASR ゲルの化学組成は、事例 4 のように、凍結防止剤の影響や反応性骨材の岩種によっても相違すると考えられるので、凍結防止剤の影響および堆積岩系や変成岩系の反応性骨材に関する事例を今後検討したいと考えている。

6. まとめ

北陸地方の供用後 30 年以上が経過した ASR 劣化構造物を対象にして、コアによる各種調査分析を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 構造物の ASR 劣化度は、川砂利中の安山岩含有量との間に良い相関性が認められた。ただし、流紋岩～デイサイト質溶結凝灰岩などを含み、安山岩含有量の少ない場合においても、ASR 劣化が生じていた。
- (2) ASR ゲルの化学組成とその形態に相関関係が認められた。すなわち、カルシウムイオンが粒子内部に拡散しにくい大きな粒径の安山岩粒子のひび割れ内部にはロゼッタ状の ASR ゲルが観察された。
- (3) 粗骨材の安山岩粒子中の ASR ゲルの化学組成は、供用後 30 年以上経過しているにも係らず、低 Ca/Si で、かつ低 Ca/(Na+K)であった。それに対して、細骨材の安山岩粒子中の ASR ゲルの化学組成はセメントペースト相や気泡中と同程度であった。
- (4) ASR ゲルの化学組成は、骨材粒子の界面からセメントペースト相のひび割れへ移動する過程で大きく変化した。これはセメントペースト相からのカルシウムの取り込みにより ASR ゲルのアルカリがカルシウムにより置換されることによるものであった。
- (5) 分析結果を整理することにより、EPMA による ASR ゲルの膨張予測に関する判定基準を提案した。その結果、安山岩粒子を含有する川砂および川砂利を使用した構造物は、供用 30 年以上経過後も粗骨材中の安山岩粒子のひび割れ内の ASR ゲルには吸水膨張性が残っていた。

謝辞：EPMA の測定を実施するにあたり、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大代武志, 原田政彦, 中野政信, 中挟靖: コンクリ

- ート橋脚の ASR による再劣化と対策工法の選定, コンクリート工学, Vo.44, No.12, pp.31-38, 2006
- 2) Katayama.T : Petrographic diagnosis of alkali-aggregate reaction in concrete based on quantitative EPMA analysis, Proceedings of the 4th CANMET/ACI/JCI International Conference on Recent advances in Concrete Tecnology, Tokushima, Japan, ACI SP-179, pp.539-560, 1998
- 3) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二: 圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, Vol.18, No.460, pp.151-154, 1993
- 4) Katayama.T, Tagami.M, Sarai.Y, Izumi.S, Hira.T : Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122, 2004
- 5) 富山県生コンクリート工業組合・コンクリート耐久性向上委員会: 富山県内における反応性岩石(輝石安山岩)のペシマムについて, 第 8 回生コン技術大会研究発表論文集, pp.13-18, 1995
- 6) Katayama.T, Oshiro.T, Sarai.Y, Zaha.K, Yamato.T : Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 7) 林建佑, 河野克哉, 山田一夫, 原健悟: 石灰岩碎石と海砂を使用したコンクリート構造物のアルカリ骨材反応による劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1249-1254, 2009
- 8) Katayama.T, Bragg,D.J. : Alkali-aggregate reaction combined with freeze/thaw in Newfoundland, Canada-petrography using EPMA, Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, pp.243-250, 1996
- 9) Meissner,H.S. : Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam, ACL journal, Vol.12, pp.549-568, 1941
- 10) Coombs,H.A. : Expansion of concrete due to reacion between andesite aggregate and cement, American Journal of Science, Vol.240, pp.288-297, 1942
- 11) Regourd,M., Hornain,H., Poitevin,P. : The alkali aggregate reaction concrete microstructural avolution, Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, S252/35, pp.1-11, 1981