

プレストレストコンクリート橋で生じた ASR の劣化診断

太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 ○林 建佑 山田 一夫 河野 克哉
東日本旅客鉄道(株) フェロー会員 大庭 光商

1. はじめに

1986 年以降に建設されたコンクリートについてはアルカリシリカ反応(以下、ASR)の抑制のために①コンクリート中のアルカリ総量の規制(全アルカリ量 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} < 3.0\text{kg/m}^3$) ②抑制効果のある混合セメント等の使用、③安全と認められる骨材の使用、のうちいずれかの対策をとることとなっている。しかし、その対策方法では十分ではない例も報告されており^{1,2)}、その劣化原因を解明することは、今後の ASR 抑制にとって重要な知見を与えるものと考えられる。そこで、本研究では抑制対策後に施工され上記抑制対策のうち①アルカリ量規制および③無害骨材の規制、の 2 点から対策がなされていたものの、施工後 5 年ほどで ASR に起因すると考えられるひび割れを生じた構造物の劣化原因を解明することを目的とし、岩石・鉱物学的な観点から検討を行った。

2. 分析対象とした構造物と実験用試料

本研究で分析対象としたのは、上記抑制対策実施後の 1994 年に施工された、PC 橋における上部構造のコンクリートである。表 1 にコンクリートの配合を示す。使用されたセメントは普通ポルトランドセメント($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=0.63\%$)であり、アルカリ総量は 2.6kg/m^3 程度でアルカリ総量規制の基準値である 3.0kg/m^3 以下と推定された。また、細骨材、粗骨材は JIS モルタルバー法で 6 か月の膨張率がそれぞれ 0.028%、0.070%であり、判定基準である 0.100%以下であり、無害と判定されたものを使用していた。しかし、写真 1 に示すように劣化がはげしく、幅 0.8mm 程度のひび割れが多数生じており、剥離・剥落も認められた。分析には、補修のためには取り取ったコンクリート片を用いた。また、この PC 橋は、現在、補修工事を実施している。

3. 実験概要

3.1 肉眼および実体顕微鏡による観察

コンクリート片の破断面や切断面を肉眼および実体顕微鏡を用いて観察した。この際の観察項目は、ASR によるコンクリートの変状(ゲルの滲出状況など)、粗骨材を構成する岩石種の構成割合とした。岩石種の構成割合は、コンクリートの切断面に 10mm 間隔の直線を引き、岩石種ごとにこの線と交わる長さを積算し、積算長さを積算総延長で除すことにより求めた(線積分法)。

3.2 偏光顕微鏡による薄片観察

コンクリート片を切断・研磨し、厚さ $20\mu\text{m}$ 程度の研磨薄片試料を作製した。これを偏光顕微鏡下で観察することにより、粗骨材および細骨材を構成する岩石種や構成鉱物の観察記載ならびに細骨材の構成粒子の割合を求めた。また、各々の粒子についての ASR 発生状況ならびに反応生成物の性状を観察した。

3.3 EPMA による分析

偏光顕微鏡観察に供した研磨薄片に炭素蒸着を行い、



写真1 劣化構造物外観

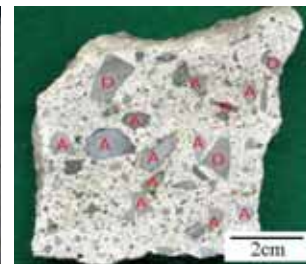


写真2 試料切断面

表1 分析対象としたコンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
40	46.8	165	413	788	948	5.99

表2 粗骨材の構成鉱物

構成鉱物 岩石名	鉱物名						
	ASR 反応性鉱物		石英	斜長石	単斜輝石	方解石	粘土鉱物
	オパール	カルセドニー					
安山岩	○	△	△	◎	—	△	△
ドレライト	—	—	—	◎	○	tr	△

◎:多量 ○:中量 △:少量 tr:微量 —:含まれない

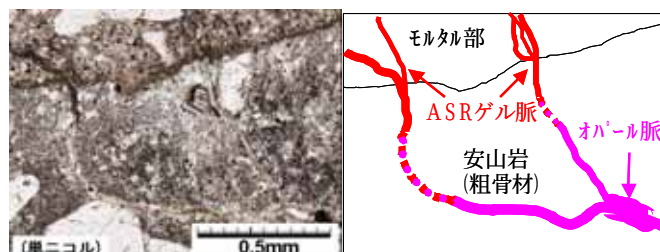


写真3 ゲルの生成状況

(左:偏光顕微鏡写真単ニコル、右:概略図)

反応生成物が認められた箇所について EPMA にて面分析を行った。分析条件は以下の通りである。

加速電圧: 15kV, 試料電流: $5.0 \times 10^{-8}\text{A}$,
測定時間: 30msec/ピクセル
分析元素: Si, Ca, Na および K
ピクセルサイズ: $2\mu\text{m}$,
ピクセル数: 縦 600 × 横 600 ($1.2 \times 1.2\text{mm}$)

3.4 水溶性アルカリ量の推定

コンクリート片を微粉碎し分析用試料とした。分析用試料を温水に入れて攪拌し、ろ過後のろ液を原子吸光度計で分析することにより、コンクリート中の水溶性アルカリ量を推定した(総プロ法)。

4. 結果および考察

4.1 肉眼および実体顕微鏡による観察結果

切断面の様子を写真 2 に示す。粗骨材には安山岩(写真

キーワード: アルカリシリカ反応、反応性骨材、熱水変質作用、オパール、偏光顕微鏡

連絡先: 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株)中央研究所 TEL.043-498-3909

中：A）ならびにドレライト（D）の二種類の碎石が認められ、およそ A:D=7:3 の割合で存在していた。コンクリートの破断面や切断面において、安山岩を中心に、ASR ゲルの生成、反応リムおよびひび割れが認められた。ASR ゲルは、安山岩粒子周囲のモルタル部断面やコンクリートの気泡中にも見られるなど、その生成は顕著であった。一方、ドレライトには反応の痕跡は認められなかった。

4.2 偏光顕微鏡による観察結果

粗骨材として認められた安山岩ならびにドレライトの偏光顕微鏡による観察結果を示す。また、それぞれに認められた構成鉱物を表2に示す。ASR は極めて顕著であり、安山岩粒子内部を貫きモルタル部へ連続する高密度な ASR ゲル脈のネットワークが認められた。この安山岩は、熱水変質作用により生成したと考えられるオパール、クリストバライトおよびカルセドニーを含むものであった。特にオパールやカルセドニー（主にオパール）は岩石中に脈状の分布が多く認められ、写真3に示すように ASR ゲル脈の多くは、これを置換して、さらにモルタル部へ流出している様子が観察された。一方、細骨材は粒径 0.1~2mm 程度の円磨された結晶片や岩片からなり、少量の貝殻片を伴う陸砂であった。一部の安山岩片に生じた反応リムおよび火山ガラス周縁部の反応が認められたが、ASR ゲル脈を伴うひび割れは認められず、現段階では細骨材による有害な反応は確認されなかった。その他にも、少量ではあるが、高反応性と考えられる流紋岩溶結凝灰岩粒子などが含まれており、今後、反応する可能性が懸念された。

4.3 EPMA 分析結果

EPMA 分析の結果を図1に示す。ASR の進行メカニズムを考えると、ゲルの組成のうちアルカリとカルシウムの比より ASR の進行程度を推定できる。Ca の置換が進行するに従い $Ca/(Na+K)$ は 0.5 程度から 100 程度まで変化し、図2に示すように反応の収束点でゲルの組成は C-S-H と類似した値となる。本検討で分析した ASR ゲルの $Ca/(Na+K)$ は、骨材とモルタルマトリクス付近で比較的高い箇所が認められるものの 0.96~3.68 程度であり、それほど Ca の置換が進んでいなかった。

4.4 水溶性アルカリ量の推定結果

分析した水溶性アルカリ量の結果を表3に示す。水溶性アルカリ量は、

$Na_2O_{eq} = 0.90mg/g \times 2.3g/cm^3 = 2.1kg/m^3$ と、それほど高くはなく、例えば外来アルカリなどによる経時的なアルカリ量の増加などは無いものと考えた。つまり、分析対象としたコンクリート中の総アルカリ量は施工当時に約 $2.6kg/m^3$ で、現在は約 $2.1kg/m^3$ と比較的低濃度であるにもかかわらず ASR 反応は進行しており、その原因は変質によりオパール脈を生じた安山岩であるということが分かった。

5. まとめ

PC 橋に生じた ASR 劣化を岩石・鉱物学的な観点を中心に検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 反応性骨材として、高反応性のオパール脈を有する変質安山岩が認められた。

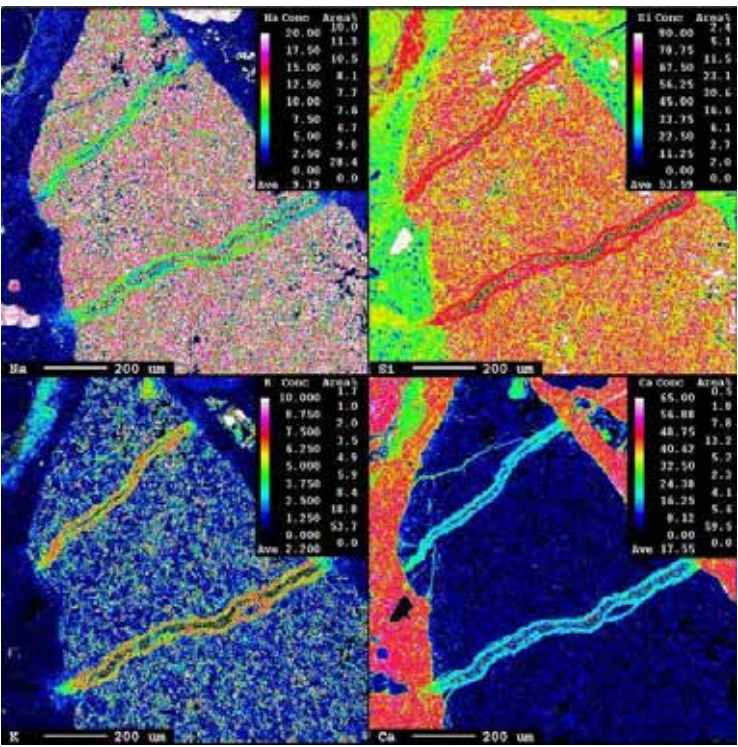


図1 EPMA 分析結果

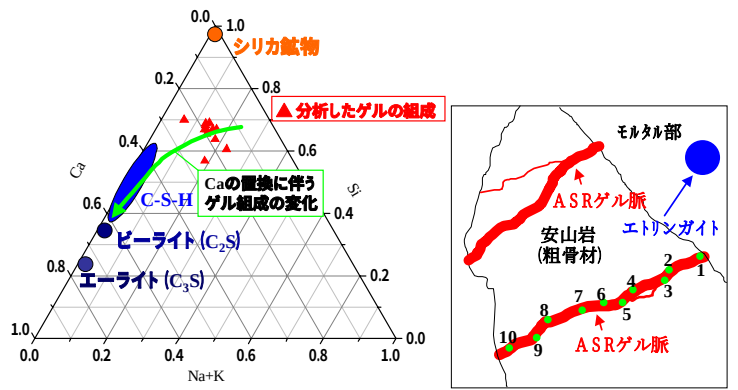


図2 ゲル組成の推移

表3 コンクリート中のアルカリ濃度推定

Na ₂ O		K ₂ O		Na ₂ O _{eq}	
(mg/g)	(mass%)	(mg/g)	(mass%)	(mg/g)	(mass%)
0.49	0.05	0.63	0.06	0.9	0.09

- (2) オパールのような高反応性鉱物を含有する骨材では、コンクリート中のアルカリ量規制は $2.6kg/m^3$ でも十分ではなく、水溶性アルカリが $2.1kg/m^3$ であっても ASR が継続する危険性があることを示唆した。

【参考文献】

- 1) 上田洋、松田芳範、石橋忠良：アルカリ反応性の観点からみた骨材の現状、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.607-612、2001
- 2) 尾花祥隆、鳥居和之：プレストレスト・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、2008