

能登半島地域の橋脚コンクリートに生じた ASR の岩石・鉱物学的考察

太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 ○林 建佑 河野 克哉 山田 一夫

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下、ASR)を生じたコンクリート構造物は、単に表面的にひび割れが生じるだけでなく内部鉄筋の破断が生じることも顕在化し、ASR 劣化に対する社会的関心が集まっている。実際に劣化したコンクリート構造物において ASR が発生していることを判定するためには、岩石・鉱物学的観点から調査・分析することが必要となる。

本研究では、橋梁の基礎構造部で実際に生じた劣化に対して偏光顕微鏡観察ならびに EPMA 分析を適用することで、反応骨材の特定・反応生成物の組成分析を行い、ASR の発生機構について考察した。

2. 実験概要

2.1 コンクリート試料

本実験のコンクリート試料は、建設後 25~30 年経過した能登半島地域の橋脚フーチング(鉄筋破断に至る ASR 劣化あり¹⁾)から採取された数 cm 角程度のものである。

2.2 偏光顕微鏡による薄片観察

コンクリート試料から 30×24mm、厚さ 20 μ m 程度の研磨薄片を作製し、偏光顕微鏡にて観察した。

2.3 EPMA 分析

上記の研磨薄片を EPMA にて面分析した。骨材内部に生じた反応生成物の組成を調べるため、Si、Ca、Na および K の 4 元素を分析の対象とした。

3. 結果および考察

3.1 使用骨材に関する記載岩石学的情報

試料中の粗骨材は両輝石安山岩碎石で、斑状組織(比較的大きな鉱物の斑晶とより微細な鉱物とガラスの集合体である石基からなる組織)を示す。斑晶のほとんどが斜長石で、若干の輝石が認められた。石基率は 70%程度で、微細な長柱状斜長石や粒状輝石類、磁鉄鉱などの粒間を火山ガラスが充填している(インターサタル組織)。試料片が小さいため、観察の範囲内ではクリストバライトとトリディマイトを同定できなかった。細骨材には石英や斜長石および黒雲母などのアルカリ反応性が無いとされる花崗岩起源の鉱物片が多数認められた。安山岩碎石の一部には、細骨材寸法となる骨材も含まれていた。

3.2 反応生成物の観察および反応骨材の特定

写真 1 に偏光顕微鏡による安山岩中の ASR 生成物(ASR ゲル)を示す。ASR ゲルは下方ポーラーのみでは無色透明、直交ポーラーでは黒色を示す。写真中心部ではモルタルマトリクスと安山岩の境界から安山岩内部に向かって幅 30 μ m 程度のゲルの生成が確認された。また写真 1 の右端では安山岩に近接し

たモルタルマトリクス中のひび割れを充填した幅 120 μ m 程度のゲルの存在が確認された。以上のことから、反応性骨材は粗骨材として使用された両輝石安山岩碎石と特定され、主たる反応性物質は安山岩中の火山ガラスであると推定できる。

3.3 ASR ゲルの EPMA 分析

偏光顕微鏡観察で認められた ASR ゲルを含む領域の EPMA による面分析を行った(図 1、写真 1 と同範囲)。モルタルマトリクスでは Ca に富み(本試料では炭酸化している)、骨材で Si に富むことが視覚的に把握できる。また、それらの元素濃度の組合せは、骨材の構成相の推定に役立つ。例えば、Si 濃度が 100 mass%程度で他の元素を含まない場合はシリカ鉱物、Si 濃度が高く Al を含み Na と Ca が混在する場合は斜長石類、長石類と元素の組合せは類似するがより Si 濃度が高く Al 濃度が低い場合はガラス相などである。

ASR ゲルの化学組成は、マトリクス境界から骨材内

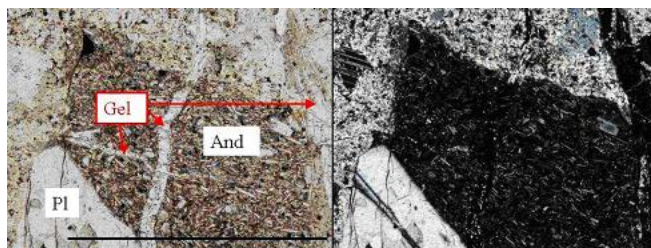


写真 1 安山岩中におけるゲル性状の偏光顕微鏡写真(左: 下方ポーラーのみ、右: 直交ポーラー、バー: 1mm)

And: 安山岩、Pl: And 中の斜長石斑晶、Gel: ASR ゲル

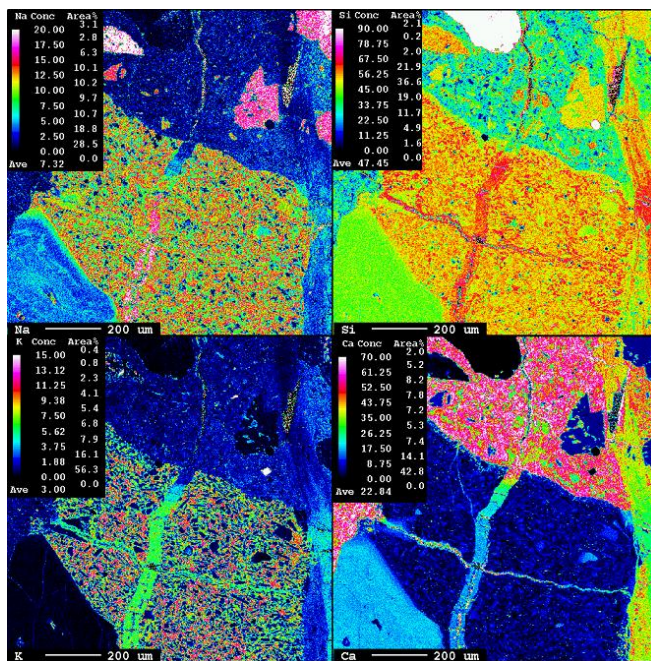


図 1 EPMA による面分析(写真 1 と同範囲)

キーワード アルカリシリカ反応 岩石学 鉱物学 EPMA 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

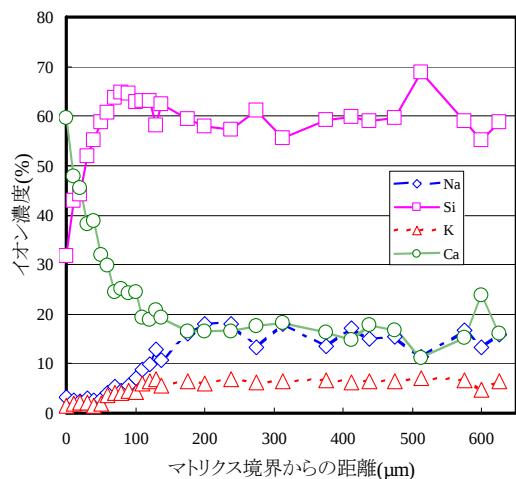
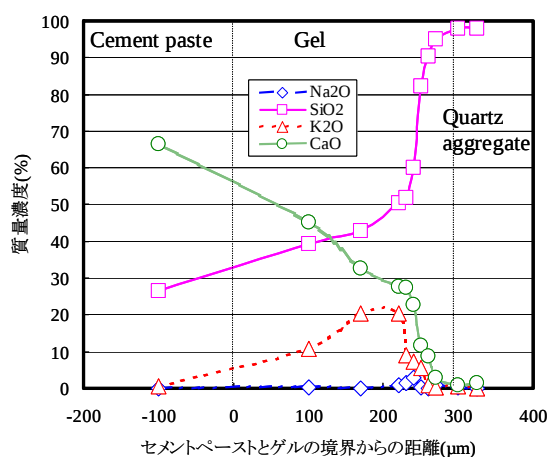


図2 ASR ゲル組成の分析結果

図3 実構造物における ASR ゲル組成変化の一例³⁾

部に向かって Ca 濃度が減少するのに対して Na, K および Si 濃度は増加するといった傾向が認められる。マトリクス境界からの距離による ASR ゲル中の 4 元素の濃度変化を図 2 に示す。この図から、Si 濃度はマトリクス境界から距離 25 μm の範囲で急激に高くなり、それ以降の内部では一定となる傾向を示した。また、Ca 濃度は同範囲で急激に低下し、それより内部の距離 25~200 μm の範囲では徐々に減少する傾向を示した。一方、Na および K 濃度は距離 200 μm まで徐々に増加する傾向を示している。

ASR ゲルの組成に関して、Wang ら²⁾や Brouxel³⁾の ASR 機構を考えると、(a)骨材表面の反応性シリカが OH⁻の影響で活性度が高くなり、(b)骨材とマトリクスとの境界でセメント由来のアルカリにより骨材中の反応性シリカが反応し、(c)そのアルカリが内部のシロキサン結合を分裂して吸着することによりゲル化し、(d)その後セメント由来の Ca²⁺がゲル中のアルカリに置換するというものである。さらに、(e)Ca²⁺が置換し放出されるアルカリがより内部の反応に寄与できるように骨材内部へ徐々に反応が進んで行くのではないかと考える。

図 3 は Brouxel³⁾が実施した実構造物における ASR ゲル組成変化の一例を示したものである。図 3 にお

ける Si および Ca 濃度の分布は、本研究で対象とした ASR ゲルとほとんど同様の傾向を示したが、アルカリ濃度の分布は異なる傾向となった。これは、Brouxel の例において、i) 分析した ASR ゲルがリム生成物で、ii) 反応性物質が石英であるのに対して、本研究で対象とした試料では、i) 骨材内部に生成した ASR ゲルで、ii) 反応性物質が火山ガラスであるといった違いがあるためと考える。また、本分析に供した試料中の反応性物質である火山ガラスはアルカリを含有するため、ASR によってシリカが溶解する以外にも火山ガラス中のアルカリが溶出して、新たなアルカリ供給源になることが指摘されている⁴⁾。このことから、本分析に供したコンクリートにおいても、火山ガラスからのアルカリ溶出が ASR 進行に関与した可能性も考えられる。

一方で、写真 1 の右端に見える骨材とモルタルを貫く ASR ゲルは比較的均一で、Ca 濃度が高い組成である。このことから考えると、骨材中の ASR ゲルは骨材内部で初生したものであり、これが膨張に寄与したものと推定できる。この ASR ゲルがモルタル部分と接すると、セメントペースト中の Ca と相互に作用し、低アルカリ濃度で高 Ca 濃度となると考えられる。写真 1 の右端の ASR ゲルは開口ひび割れを充填した ASR ゲルが高 Ca 濃度に変化したものと推定できる。

4. まとめ

本研究において、能登半島地域の橋脚コンクリートに生じた ASR を岩石・鉱物学的観点から分析した結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 粗骨材として使用された両輝石安山岩砕石が ASR ゲルを生成している。
- (2) 安山岩中に生成した ASR ゲル組成はマトリクスとの境界から骨材内部に向かって Ca 濃度が減少するのに対して Na, K および Si 濃度は増加した。
- (3) ASR ゲル組成の変化は、Wang らが提案した既往の ASR メカニズムと整合性が認められた。
- (4) 既往の ASR メカニズムに加えて、火山ガラスからのアルカリ溶出が ASR 進行に関与した可能性が示唆される。

謝辞：本研究のサンプルは金沢大学鳥居和之教授から提供頂いたものであり、記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 鳥居和之ら：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策、コンクリート工学、Vol.46、No.4、pp.27-33 (2008)
- 2) H.Wang et al : Mechanism of Alkali-silica Reaction and The Significance of Calcium Hydroxide, Cement and Concrete Research, Vol.21、pp.647-654 (1991)
- 3) M.Brouxel : The Alkali-aggregate Reaction Rim : Na₂O, SiO₂, K₂O and CaO Chemical Distribution, Cement and Concrete Research, Vol.23、pp.309-320 (1993)
- 4) M.A. Berube et al : Alkalies releasable by aggregates in concrete - Significance and test methods, 12th ICCI, pp.17-30 (2004)