

論文 堆積岩を粗骨材として用いたコンクリート構造物の ASR による劣化事例

濱田 秀則*1・佐川 康貴*2・井上 祐一郎*3・林 建佑*4

要旨: 現在, 我が国において ASR 抑制対策後に施工された構造物においても ASR 劣化を生じた例が報告されており, 実構造物における ASR 劣化の原因を調査し, ASR 抑制対策にフィードバックすることが必要である。本研究では, ASR に起因すると考えられるひび割れを生じている実構造物を調査し, 劣化原因の推定を行った。その結果, 粗骨材である堆積岩の骨材に含まれる隠微晶質石英による遅延膨張性の ASR である可能性が考えられた。我が国において遅延膨張性骨材による ASR の報告事例はこれまで少ないが, 今後, 堆積岩骨材に対する新たな抑制対策が必要であると考えられた。

キーワード: ASR, 堆積岩, 遅延膨張性の ASR, 隠微晶質石英, 変成作用

1. はじめに

我が国では, 1986 年以降アルカリシリカ反応 (ASR) に対する抑制対策として, (1)コンクリート中のアルカリ総量規制 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}=3\text{kg/m}^3$ 以下), (2)抑制効果のある混和材の使用, (3)無害と判定された骨材の使用の 3 つが定められ, これらのうち 1 つを満足すれば良いとしている。しかし, この抑制対策後に施工された構造物においても, 劣化が生じた例が報告されており¹⁾, 近年では抑制対策の改善に関する研究が多く行われている。

海外では実構造物における ASR 劣化事例を詳細に調査し, 抑制対策にフィードバックしているため, 新たな抑制対策を制定することが可能となっている。ASR による劣化は, 産出する骨材の種類や, 構造物が供用される環境など, 地域性が大きく影響する現象である²⁾。そのため, 海外において実施されている抑制対策を我が国において単純に運用することはできない。したがって, 我が国においても ASR により劣化した構造物を詳細に調査することが重要であると言える。しかし, 我が国においては, 劣化が生じている構造物に対し, ひび割れの原因が ASR であると特定する調査は行われるものの, その ASR の原因の特定まで調査された例は少ない。

そこで, 本研究では, ひび割れパターンから ASR に起因すると思われる劣化を生じていた構造物からコアを採取し, 詳細調査によって劣化原因の推定を行った。対象は北部九州地区にある近接する 3 つのコンクリート構造物である。その結果, これらの構造物は堆積岩による ASR が生じていた可能性が考えられた。そこで, 堆積岩骨材を使用した場合のケーススタディーの一つとして, 堆積岩骨材の使用に対する抑制対策手法について考

察を行った。

2. 調査概要

2.1 対象構造物の概要

対象とした構造物は, 北部九州地区に位置し, これらの構造物は約 10km の範囲内にある。表-1 に対象とした構造物およびコア採取位置の概要を示す。なお, 表中の劣化の程度とは, 構造物に生じているひび割れの目視観察により大まかに分類したものである。本研究で対象とした構造物は全部で 3 つ (事例 A, B, C) であり, それぞれの構造物より劣化の程度に応じて, 3 箇所ないし 2 箇所よりコアを採取した。写真-1~写真-3 に事例 A~C の構造物の外観とコア採取位置を示す。

事例 A は, 海洋に面する護岸であり, 建設年代は不明である。構造物の変状としては, 護岸全体に亀甲状のひび割れが認められ, ひび割れからは白色の析出物が観察された。コア A-1 および A-3 は劣化の程度が大きい部分より採取し, コア A-2 は劣化の程度が小さい部分より採

表-1 対象構造物およびコア採取位置の概要

	構造物種類	海岸からの距離(km)	コア名称	採取位置	劣化の程度
事例A	護岸	0	A-1	飛沫帯	大
			A-2	干満帯	小
			A-3	干満帯	大
事例B	橋梁	0.5	B-1	橋台	大
			B-2	擁壁	なし
事例C	橋梁	2	C-1	上流側	大
			C-2	下流側	なし

*1 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 博士 (工学) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 (正会員)

*4 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 修士 (理工学) (正会員)

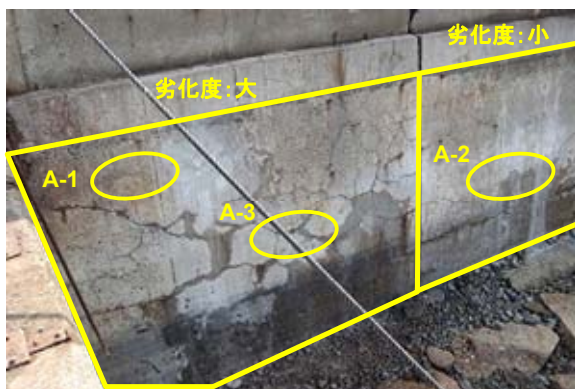


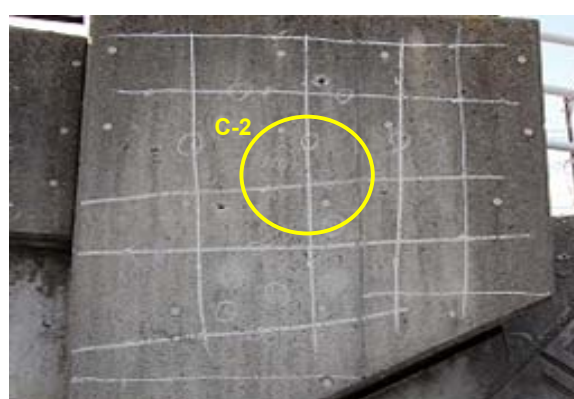
写真-1 事例 A の劣化状況およびコア採取位置



写真-2 事例 B の劣化状況およびコア採取位置



写真-3 事例 C の劣化状況およびコア採取位置（左：左岸上流側，右：左岸下流側）



取した。

事例 B は、河川に架かるコンクリート橋であり、1972 年竣工である。この構造物は海岸から約 500m に位置している。橋台部に鉄筋に沿ったひび割れが見られ、橋脚には白色の析出物が観察された。コア B-1 は、劣化の顕著であった左岸橋台より採取し、同じ環境下における劣化の程度の違いを比較するため、付近の劣化の生じていない擁壁よりコア B-2 を採取した。

事例 C は、河川に架かるコンクリート橋であり、竣工は 1981 年である。この構造物は海岸より約 2km 離れた場所に位置している。この橋梁は、上流側 2 車線、下流側 2 車線ずつに分割施工されたものであり、上流側と下流側でコンクリートのひび割れ発生状況が異なっていた。上流側では、橋台全体に ASR に起因すると考えられる亀甲状のひび割れや白色の析出物が確認された。一方、下流側ではパラペットの一部に若干のひび割れが発生しているものの、その他に ASR の変状は認められなかった。コアは劣化の程度の違いが顕著であった左岸の親柱台座より採取した。コア C-1 は劣化度の程度の大きかった上流側より採取し、コア C-2 は下流側より採取した。

2.2 調査項目

(1) 偏光顕微鏡観察

構造物からコアを採取後、ただちに封緘し、1~2 日後

に目視観察により、ゲルの滲出しやモルタル部のひび割れ等の確認を行った。その後、ASR が生じていると考えられる部分を中心に 20×30mm、厚さ 20μm 程度の研磨薄片を作製し、偏光顕微鏡観察を行った。

(2) アルカリ量の推定および塩化物イオン量の測定

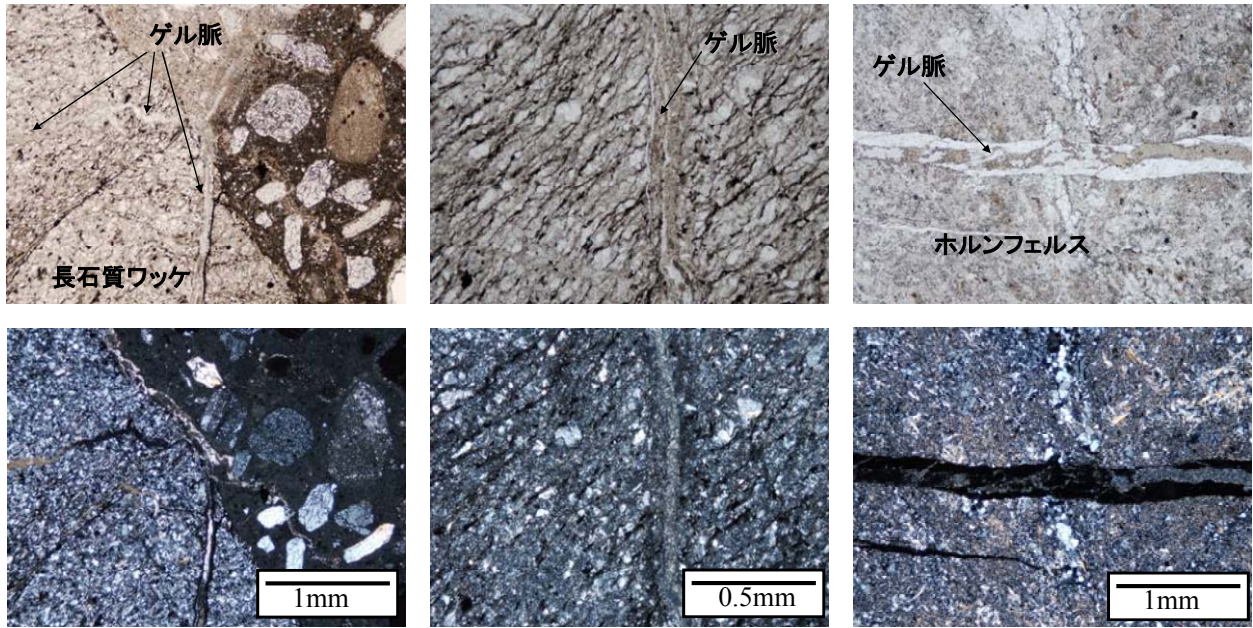
「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発」（総プロ法）に従い、アルカリ量を推定した。採取したコアの両端より 10mm ずつ切り出し、粉砕したものを試料とした。以下、構造物の表面付近の試料を表層部、もう一方を深部と称する。なお、採取したコアの長さは約 100~250mm であった。

また、塩化物イオン量の測定は、JCI-SC4「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」に基づいて行った。

3. 調査結果

3.1 偏光顕微鏡による薄片観察の結果

本研究においては、事例 A~C のすべての場合で、細骨材の一部に貝殻が混入しており、細骨材には海砂もしくは、海底において堆積した陸源砕屑物を起源とする山砂などから生産されたものが使用されていたと考えられた。細骨材には反応の形跡が認められなかった。以下には、使用された粗骨材に着目し、それぞれ特徴的であ



(a)コア A-1

(b)コア A-2

(c)コア A-3

写真-4 事例 A の偏光顕微鏡写真（上段：下方ポーラーのみ 下段：直交ポーラー）

った部分について記述する。写真-4、写真-5にそれぞれ事例 A、事例 B および事例 C における粗骨材周辺の偏光顕微鏡写真を示す。

(1) 事例 A

コア A-1 は、粗骨材として石質アレナイト（粒径 0.03mm 以下の粒子が 15% 以下の砂岩）、長石質ワッケ（粒径 0.03mm 以下の粒子が 15% 以上の砂岩）、頁岩やチャートなどの様々な岩種が含まれていることが分かった。また、写真-4(a)において、粗骨材である長石質ワッケからひび割れが発生しており、ASR ゲルが骨材内部で結晶化している様子が観察された。また、長石質ワッケ同様にチャートからもひび割れが発生し、ひび割れを ASR ゲルが充填していた。いずれの骨材も、ASR ゲル周辺に隠微晶質石英ないし微晶質石英が分布しており、これらが反応性鉱物と推測された。

コア A-2 に用いられた粗骨材は、コア A-1 と同様の岩種構成であり、写真-4(b)に示す頁岩の例のように、粗骨材にひび割れが発生し、ASR ゲルが充填している様子が観察された。

コア A-3 は粗骨材にホルンフェルス（貫入岩などの熱による接触変成作用を受けた変成岩）を含んでいる点で特徴的であり、写真-4(c)よりホルンフェルスに生じたひび割れに ASR ゲルが充填しており、骨材内部で再結晶化したゲルが観察された。このホルンフェルスは、泥岩や頁岩を原岩とする黒雲母ホルンフェルスと火成岩を原岩とする角閃石ホルンフェルスが混ざったような組織をしており、ホルンフェルス化した際に、原岩中の石英が隠微晶質化したと考えられ、これが反応性鉱物であ

ると推測された。

(2) 事例 B

写真-5(a)より、コア B-1 は粗骨材として黒雲母ホルンフェルスが含まれており、骨材のひび割れに ASR ゲルが発生している様子が観察された。このホルンフェルスには、隠微晶質ないし微晶質の石英を含んでおり、これらが反応性鉱物であると推測された。

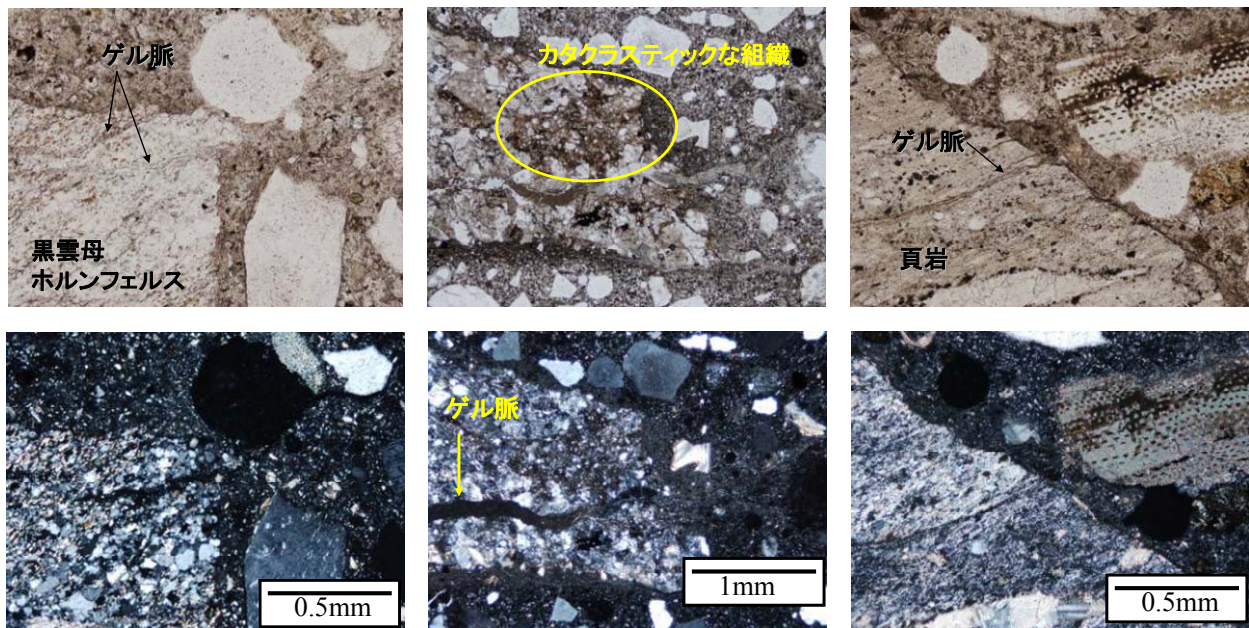
コア B-2 においては粗骨材に隠微晶質石英を含む砂岩および珪質片岩が使用されており、粗骨材の一部に ASR ゲルが充填した微細なひび割れを確認した。しかし、外観観察の結果、この構造物にひび割れ等の劣化は確認されなかった。

(3) 事例 C

写真-5(b)より、コア C-1 の粗骨材である石質アレナイトにひび割れが生じており、ひび割れに ASR ゲルが充填している様子が確認された。また、石質アレナイトの一部にカタクラスティックな組織（変成作用によって鉱物が破碎・粒状化した組織）が認められ、その部分に微細なゲル脈が確認された。この粗骨材は破碎作用を受けた岩石の脈より採取されたものと考えられ、破碎作用を受けた際に石英が隠微晶質化し、ASR 反応性が高まったものと考えられる。

写真-5(c)より、コア C-2 の粗骨材である頁岩の一部から微細なひび割れ発生し、ASR ゲルが充填していることが確認された。しかし、写真-5(b)に見られるような破碎作用を受けた形跡は認められなかった。

以上より、本研究で対象とした事例 A~C の構造物は、粗骨材として主に堆積岩が使用されており、一部に変成



(a)コア B-1 (b)コア C-1 (c)コア C-2
 写真-5 事例 B および事例 C の偏光顕微鏡写真 (上段：下方ポーラーのみ 下段：直交ポーラー)

岩であるホルンフェルスが確認された。また、劣化の程度の大きかった箇所より採取されたコア A-3, B-1, C-1 はいずれも、堆積岩が変成作用を受けたことによって、隠微晶質石英ないし微晶質石英が生成したために ASR 反応性が高まったものと推測された。このような堆積岩は、遅延膨張性の ASR を生じることが報告されており³⁾、本研究で対象とした構造物においても遅延膨張性の ASR が生じていた可能性が考えられた。

3.2 アルカリ量推定および塩化物イオン量測定結果

図-1 および図-2 にアルカリ量の推定および塩化物イオン量の測定結果を示す。なお、図-1 におけるアルカリ量の推定値は総プロ法の補正式によって補正した値である。

図-1 より全てのコアにおいて 4~9kg/m³ 程度のアルカリ量が推定された。また、図-2 より、事例 A はいずれも表面付近で 10kg/m³ 以上と高い塩化物イオン量が測定され、内部まで塩化物イオンの浸透が認められた。そのため、海水による外来アルカリ影響が考えられた。事例 B, C については、いずれも大きな外来アルカリの影響は認められなかった。しかし、両者とも深部において約 0.9kg/m³ の塩化物イオン量が測定され、表層部から深部にかけて塩化物イオン量に大きな差は認められなかった。細骨材が海砂である可能性があったことを考慮すると、十分に除塩されていない海砂が使用された可能性があると考えられた。

以上より、本研究の範囲内では海水影響や十分に除塩されていない海砂の使用により、コンクリート中のアルカリ量が多くなったと推測された。しかし、高いアルカ

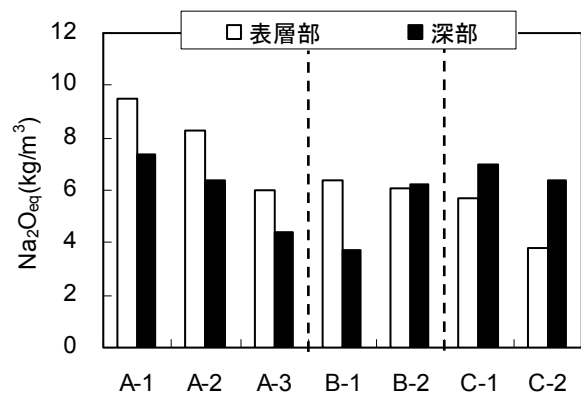


図-1 アルカリ量推定結果

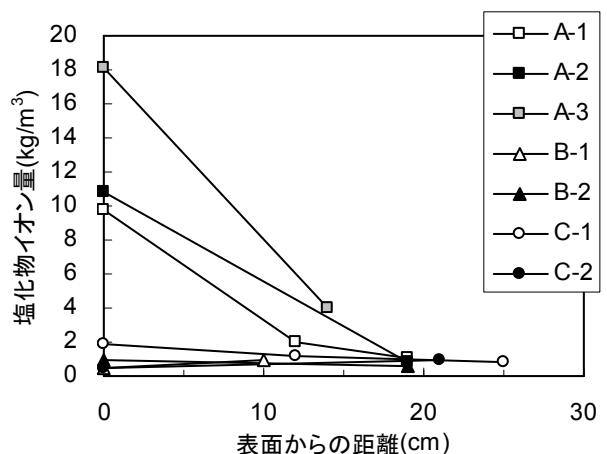


図-2 塩化物イオン量の測定結果

リ濃度となった原因の全て海水や海砂の影響であるとは考えにくく、アルカリ濃度が高くなった原因については、今後更なる検討が必要である。

また、同一構造物では、アルカリ環境はほぼ一定であると考えられるため、事例B、事例Cにおける劣化の程度の違いは、アルカリ環境の違いの影響ではないものと考えられた。

3.3 残存膨張率測定

偏光顕微鏡観察の結果より、本研究で対象とした構造物は、全て粗骨材である堆積岩の骨材による遅延膨張性ASRを生じていたと考えられた。そこで、対象構造物のASR劣化が今後進行する可能性を評価するため、残存膨張率試験を行った。試験方法は遅延膨張性骨材の反応性評価に有効とされているカナダ法（ASTM C 1260）に準拠し、構造物コアを80℃の1N NaOHに浸漬した。なお、コア径が大きい場合には内部にアルカリが浸透しにくく、残存膨張量を過小評価してしまう可能性があるため、本実験ではコア径は50mmとし、基長は50mmとした。

図-3に残存膨張率の経時変化を示す。全てのコアにおいても判定期間の14日において、膨張率0.1%を下回っており、今後、劣化が進行する可能性は低いと考えられた。しかし、Katayama et al.は遅延膨張性のASRに関しては、判定基準を21日で0.1%にする必要があることを提案している⁴⁾。促進開始より21日において判定すると、コアC-1は0.1%を超える膨張率となっており、今後もASRが進行する可能性が考えられた。また、劣化を生じていなかった部分より採取したコアB-2は、促進開始より約40日においても0.1%以下の膨張率となっており、コアB-2に使用された骨材は、もともと「無害」であったと考えられた。

4. 本研究の対象構造物の劣化原因に対する考察

表-2に本研究で対象とした構造物の調査結果の一覧を示す。本研究では、主に粗骨材に堆積岩が使用されていた。事例Bおよび事例Cにおいて劣化の程度の違いは、同一の構造物においてアルカリ環境に大きな差は見られなかったことを考慮すると、使用された骨材の反応性の違いであると考えられた。劣化の程度の大きかったコアB-1、コアC-1は粗骨材である堆積岩が変成作用を受

けている様子が確認され、劣化していなかったコアB-2、C-2には変成作用を受けた骨材は認められなかった。このように、堆積岩であっても、変成作用の有無等の違いによって、ASR劣化の程度が大きく異なっていた。

以上より、本研究で対象とした構造物は、変成作用を受けてASR反応性が高まった堆積岩に多くのアルカリが作用し、ASR劣化に至ったと推測された。本研究の範囲内では、アルカリ量が多い状態であったため、アルカリ総量規制値の3kg/m³以下において、対象構造物の骨材が反応性であるかは、評価できない。しかし、Hootonの研究成果によると、アルカリ総量が1.9kg/m³であっても遅延膨張性のASRが生じることが報告されている⁴⁾。

5. 本調査を踏まえた抑制対策の検討

本研究の対象構造物では、遅延膨張性のASRが生じていると考えられた。遅延膨張性のASRを生じる骨材は、従来の化学法（JIS A 1145）およびモルタルバー法（JIS A 1146）では、その反応性を検出できないことが報告されている⁵⁾。我が国においても遅延膨張性のASRによる劣化事例が報告されている^{6), 7)}。しかし、その存在は十分に認識されておらず、未だに適切な対策が取られていない。海外においては遅延膨張性の骨材のASR反応性の検出に対してASTM C 1260（80℃，1N，NaOH浸漬モルタルバー法）が有効であるとされている。

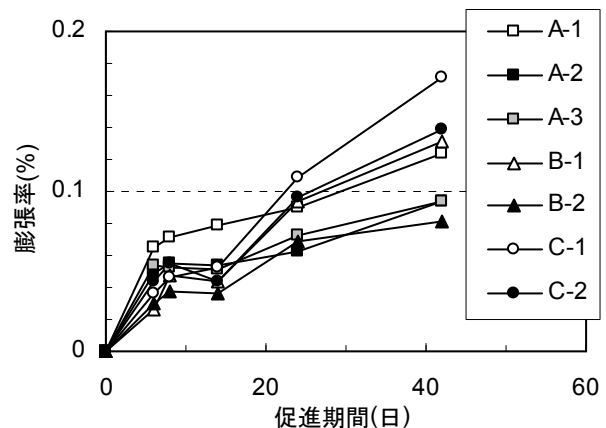


図-3 残存膨張率の経時変化

表-2 対象構造物の調査結果の一覧

	海岸からの距離(km)	コア名称	劣化の程度	反応性鉱物	変成作用を受けた骨材の有無
事例A	0	A-1	大	砂岩, チャートに含まれる隠微晶質～微晶質石英	無し
		A-2	小	砂岩に含まれる隠微晶質石英	無し
		A-3	大	黒雲母ホルンフェルスに含まれる隠微晶質石英	有り
事例B	0.5	B-1	大	黒雲母ホルンフェルスに含まれる隠微晶質石英	有り
		B-2	なし	砂岩に含まれる隠微晶質石英	無し
事例C	2	C-1	大	砂岩が破砕作用を受けた際に生成した隠微晶質石英	有り
		C-2	なし	砂岩に含まれる隠微晶質石英	無し

また、本研究の対象構造物では変成作用の有無により劣化度が異なっていた。このように、堆積岩であっても、岩石学的特徴により ASR 反応性が異なるため、使用骨材には岩石学的評価を行うことが重要であると言える。

以上より、堆積岩を骨材として使用する場合は岩石学的評価を行い、変成作用等により ASR を生じる可能性が考えられた場合、化学法やモルタルバー法のみではなく、ASTM C 1260 により骨材の ASR 反応性を評価することで遅延膨張による劣化の可能性を低減することができると言える。

さらに、本研究で対象とした構造物のように、外来アルカリ環境にあるものは、さらに ASR が促進されると考えられるため、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の抑制効果のある混和材による抑制対策を合わせて行う必要があると言える。

6. まとめ

本研究では、北部九州地域において ASR 劣化を生じていた海洋コンクリート護岸とコンクリート橋 2 橋を対象にその劣化原因について調査を行った。以下に、調査結果を示す。

- (1) 本研究で対象とした構造物は、いずれも細骨材には海砂もしくは、海底に堆積した陸源砕屑物を起源とする山砂などから生産されたものが使用されたと考えられ、細骨材に ASR の反応の形跡は認められなかった。
- (2) 偏光顕微鏡観察の結果より、本研究の対象構造物は粗骨材として主に堆積岩が使用されており、一部に変成岩であるホルンフェルスが確認された。粗骨材にひび割れが生じており、ひび割れに ASR ゲルが充填していた様子が確認されたことから、粗骨材である堆積岩が反応性骨材と推測された。また、粗骨材のひび割れ付近に隠微晶質ないし微晶質の石英が分布していることが認められた。
- (3) 水溶性アルカリ測定によるアルカリ量推定結果より、対象構造物はいずれもアルカリ濃度が高く、約 $4\sim 9\text{kg/m}^3$ 程度となった。
- (4) 塩化物イオン量の測定結果より、海水による外来アルカリの影響や十分に除塩されていない海砂の使用の可能性が考えられた。
- (5) 同一の構造物で、劣化の程度の異なる部位より採取したコアの偏光顕微鏡観察の結果より、劣化度の大きい部分には、接触変成作用や破砕作用を受けた骨

材が存在し、劣化していなかった部分にはそのような骨材は認められなかった。

- (6) カナダ法 (ASTM C 1260) による残存膨張率測定結果より、いずれの場合も「無害」と判定され、今後劣化が進行する可能性は少ないと考えられた。

謝辞

本研究において、構造物からのコア採取から各種試験を行うにあたり、(株) 太平洋コンサルタント東京営業所の山田一夫氏に示唆に富むご指摘を頂きました。ここに付記し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか、セメント・コンクリート, No.696, pp.1-9, 2005.2
- 2) 松下博通, 田中慎一郎, 山田一夫：骨材のアルカリ反応性判定法に関する問題点—ASR 抑制を目指した九州基準にむけて—, コンクリート工学, Vol.43, No.10, pp.9-17, 2005.10
- 3) Katayama T.: Petrography of alkali-aggregate reactions in concrete - reactive minerals and reaction products - , Supplementary papers of East Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar, pp.45-59, 1997
- 4) Hooton D.: The Kingston Outdoor Exposure Site for ASR- After 14 Years What Have We Learned?, Proceedings of Marc-Andre Berube symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete, pp.171-194, 2006
- 5) 西政好, 池田隆徳, 佐川康貴, 林建佑：遅延膨張性骨材による ASR 劣化事例および骨材の ASR 反応性検出法の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.935-940, 2010.7
- 6) Katayama T., Sarai Y., Higashi Y., Honma A.: Late-expansive alkali-silica reaction in the Ohnyu and Furikusa headwork structures , Central Japan , Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004
- 7) Katayama 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, pp.862-873, 2008