

論文 北陸地方における反応性骨材の岩石学的特徴とコアの残存膨張性の評価

野村 昌弘*1・小松原 昭則*2・畔柳 昌己*3・鳥居 和之*4

要旨：本研究は，2008年から2010年にかけて富山県，石川県および福井県(滋賀県の一部を含む)における24の道路構造物からコアを採取し，ASRに関する一連の調査を行った。この結果，この地域のASRの発生原因を岩石学的特徴から分類するとともに，構造物の膨張性状とコアの残存膨張性の関係について明らかにした。さらに，ASRの進行過程とASRゲルの化学組成との関係についても2,3の考察を行った。

キーワード：アルカリシリカ反応，ASRゲル，EPMA，偏光顕微鏡，残存膨張性

1. はじめに

1980年代半ばの「コンクリートクライシス¹⁾」，1990年代末の「コンクリート塊の落下²⁾」，2000年代初頭の「鉄筋破断の衝撃³⁾」などコンクリートの早期劣化に対するマスコミ報道がなされ，社会的関心が高まっている。コンクリートの代表的な劣化は，塩害，アルカリシリカ反応(以下ASR)，中性化，疲労，凍害が挙げられる⁴⁾。劣化の原因には，2000年代初頭まで増加していた交通量が依然として高い水準で継続していることや，1991年のスパイクタイヤの廃止に伴う凍結防止剤散布の増加が関係している⁵⁾。今後，これらの劣化対策に加え，政策的に実施してきた社会資本ストックの増加に伴う維持管理費の急速な増大が見込まれる。

NEXCO 中日本高速道路(株)金沢支社は，北陸自動車道木之本IC(滋賀県)～朝日IC(富山県)および東海北陸自動車道白川郷IC(岐阜県)～小矢部砺波JCT(富山県)の約300km(供用から9年～39年経過)の維持管理を担当している。その中の構造物は，橋梁525橋，C-Box1200基およびトンネル45基であり，橋梁下部工，C-BoxおよびトンネルではASRが確認されている。その割合は，全体の1～2割である。構造物の維持管理では供用期間において，その性能を許容範囲内に保持するとともに，どのタイミングでどのような補修・補強を実施するか，ライフサイクルコストの最小化や費用対効果を検討しながら，予防保全と事後保全に対する投資費用の割合も十分に考慮することが重要である。

そこで本研究では，最適な補修時期を把握するため2008年から2010年にかけて富山県，石川県および福井県(滋賀県の一部を含む)の24構造物(橋台，橋脚，C-Box，RCスラブ，PC桁)からコアを採取し，ASRに関する一連の調査を行った。また，反応性の岩石学的評価を実施

するとともに，約10年前(1998年から1999年に調査)のコアの残存膨張試験との関連性を検討した。さらにコアのASRゲルの化学組成を分析し，ASRの進行過程の判定について2,3の考察を行った。

2. 調査概要と試験方法

建設時に使用した骨材を河川水系あるいは地区別に区分し，構造物(1972年から1983年供用開始)ごとに目視によるASR劣化度の判定を分類するとともに，コア(φ=55mm，L=400mm)を採取して，粗骨材の岩種構成率および偏光顕微鏡による薄片観察を行った。また，コアのアルカリ量の測定，残存膨張試験(カナダ法)およびASRゲルの化学組成(EPMAにより定量分析)を実施した。試験方法の概要を表-1に示す。なお，コアのかぶり部分(表面から100mm程度)は中性化の影響を受けていることや，ASRが発生していないことなどの理由で試験に供していない。

3. ASR 構造物と岩石学的特徴

3.1 ASR 構造物と岩種との関係

北陸地方は，主としてコンクリート用骨材として河川産骨材を使用してきた。また，河川産骨材が採取できない地域では一部で砕石を用いている場合もあった。北陸地方の主要な反応性骨材は，火山岩系の安山岩，流紋岩および溶結凝灰岩，堆積岩系のチャートおよび頁岩であった。これらの中で，反応性が高いのは安山岩であり，反応性鉱物としてクリストパライトと火山ガラスを含有していた。安山岩の構成率が約10%以下の場合，その構成率が大きくなるほどASR劣化度が増加し，4%以下の場合にはASRは発生しにくいことが確認されている⁶⁾。

北陸地方のASR構造物のマップを図-1，調査対象構

*1 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)金沢支店 道路技術部 博(工) (正会員)

*2 中日本高速道路(株)金沢支社 技術検査部 品質検査・技術管理チ・ムリ・ダ

*3 中日本高速道路(株)金沢支社 技術検査部 品質検査・技術管理チ・ムサブリ・ダ

*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 各種試験調査および試験方法の概要

| 試験項目 | 試験方法 | 数量 |
|-----------------|---|-------|
| 目視による ASR 劣化度判定 | 目視により、構造物の ASR の劣化度を以下の 4 種類に区分した。 OK：ASR のひび割れが発生していないもの C：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 B：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 A：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 | 1 箇所* |
| 構造物の表面膨張率 | ひび割れの進展を追跡するため、標点間の基長約 100mm 間における経時変化をコンタクトマイクロメーターあるいは π 型ひずみゲージで測定した。 | 7 構造物 |
| 粗骨材の岩種構成率 | コンクリートコア(カナダ法用 $\phi=55\text{mm}$, $L=150\text{mm}$)に存在する粒子径が 5mm 以上の粒子に対し、岩種ごとの面積を算出し、その構成率を測定した。 | 2 本* |
| 偏光顕微鏡観察 | コアよりコンクリート断片(25×35mm 程度)を切出し、コンクリート薄片を作製し、偏光顕微鏡にて ASR が発生している岩種の特定および鉱物の同定を行った。 | 2 枚* |
| 水溶性アルカリ量 | 150 μm 未満に粉砕した試料 10g を 40 度の蒸留水 100ml に混合攪拌した後、ろ液のアルカリ濃度(Na^+ , K^+) を原子吸光度法により測定し、($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)eq. を算出した(総プロに準拠)。 | 2 試料* |
| 残存膨張量(カナダ法) | コア($\phi=55\text{mm}$, $L=150\text{mm}$)を温度 80 度、1 N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定した。 | 2 本* |
| ASR ゲルの化学組成分析 | 偏光顕微鏡にて薄片上の ASR ゲルの位置を確認し、EPMA の EDS(エネルギー分散型)により、ゲルの化学組成を ZAF 法にて定量分析した。 | 7 構造物 |

* 1 構造物当たりの試験数量



図 - 1 北陸地方の ASR 構造物の発生マップ

表 - 2 調査対象構造物の概要

| 構造物 | 部位 | 劣化度 | 地区 | 骨材水系 | 供用 |
|-----|-----|-----|-------|------|------|
| a | 橋台 | OK | 富山県東部 | 黒部川 | 1983 |
| | 橋台 | B | | 常願川 | " |
| b | 橋台 | OK | " | 黒部川 | " |
| c | 橋台 | C | " | 黒部川 | " |
| d | 橋台 | A | 富山県中部 | 常願川 | 1980 |
| | 橋脚 | A | | " | " |
| e | 橋脚 | A | " | " | " |
| | PC桁 | C | | " | " |
| f | 橋台 | C | " | " | " |
| g | 橋台 | OK | " | " | " |
| h | 側壁 | A | " | " | 1975 |
| i | 橋台 | A | " | " | " |
| j | 橋台 | C | " | " | " |
| k | 橋台 | B | " | " | 1973 |
| | スラブ | B | | " | " |
| l | 橋台 | B | " | " | " |
| | 橋台 | B | | " | " |
| m | 橋台 | OK | 富山県西部 | 庄川 | 1974 |
| n | 橋台 | C | 石川県加賀 | 庄川 | " |
| o | 橋台 | B | " | " | 1978 |
| p | 橋台 | OK | " | 手取川 | 1972 |
| q | スラブ | B | " | 九頭竜川 | 1973 |
| r | 橋台 | C | 福井県北部 | " | " |
| s | 橋台 | A | " | " | 1975 |
| t | 橋台 | OK | " | " | 1976 |
| u | 橋台 | OK | 福井県中部 | 砕石 | 1977 |
| v | 橋台 | OK | " | " | " |
| w | 橋台 | OK | 滋賀県北部 | 不明 | 1980 |
| x | 橋台 | OK | 滋賀県北部 | 不明 | " |

造物を表 - 2 および粗骨材の岩種構成率の算出結果を図 - 2 ~ 図 - 3 に示す。ASR 構造物の発生状況は、その地域ごとの骨材の供給地点と密接な関係があることが理解できる。

すなわち、富山県東部(滑川 IC ~ 朝日 IC)では、ASR 構造物がわずかに点在した。この地域では、骨材として一般的に黒部川水系の川砂、川砂利が使用される場合が多かった。黒部川水系の岩種構成率の算出結果は、34%を火山岩が占めるものの反応性の高い安山岩は約 2%であ

り、ASR が発生する可能性は低いと判断された。ASR がわずかに発生した構造物は、骨材の流通の関係で常願寺川水系の川砂や川砂利が使用されたことが原因と考えられた⁷⁾。

富山県中部(砺波 IC ~ 滑川 IC)では、ASR 劣化度が高い構造物が多数発生していた。一般的に常願川および神通川水系の川砂、川砂利が使用される場合が多かった。常願寺川および神通川の砂利採取場は、富山平野に分布していた。過去に常願寺川が氾濫して富山平野が形成され

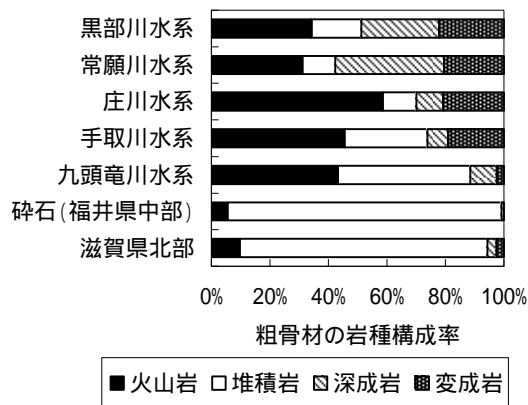


図 - 2 骨材の岩種構成率の算出結果

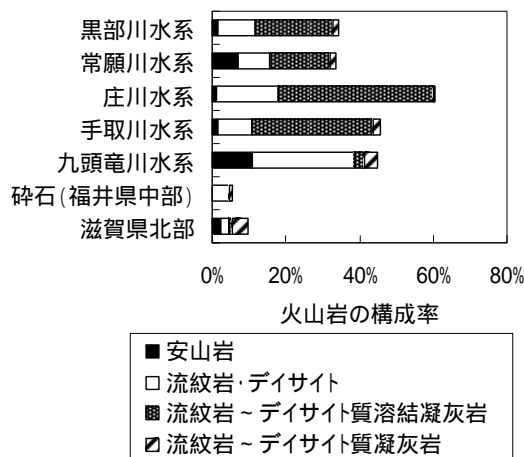


図 - 3 骨材の火山岩系岩種の内訳

たことを考慮すると、とくに2本の河川産骨材を区別せず、常願寺川水系とした⁸⁾。常願川水系の岩種構成率は、34%を火山岩が占め、反応性の高い安山岩は約7%であり、ASRが発生する可能性は高いと判断された。

富山県西部(県境～砺波IC)では、ASR構造物が点在していたが、ASR劣化度は高くなかった。骨材として一般的に庄川水系の川砂、川砂利が使用される場合が多かった。庄川水系の岩種構成は、61%を火山岩が占めたが、火山岩の内訳では流紋岩やデイサイト質溶結凝灰岩の構成率が多いのが特徴であった。反応性の高い安山岩は約1%であり、深刻なASRが発生する可能性は低いと判断された。

石川県加賀地区でも、ASR構造物が点在していたが、骨材としては一般的に手取川水系の川砂、川砂利が使用される場合が多かった。手取川水系の岩種構成率は、46%を火山岩が占めた。火山岩の内訳では流紋岩やデイサイト質溶結凝灰岩の構成率が多いのが特徴であった。同様に反応性の高い安山岩は約1%程度であり、深刻なASRが発生する可能性は低いと判断された。これまで、手取川の上流部で採取された川砂、川砂利は、ASRを発生させることが報告されている⁹⁾。また、富山県との県

境付近では庄川水系や常願寺川水系の川砂、川砂利が、福井県との県境付近では九頭竜川産の川砂、川砂利を使用した構造物でASRが発生していた⁹⁾。一方、石川県能登地区では、骨材として使用した安山岩砕石により、ASR劣化度が高い構造物が多数発生しているが、調査対象構造物にて安山岩砕石が使用された事例はなかった¹⁰⁾。

福井県北部(加賀IC～武生IC)では、九頭竜川の下流地域でASR構造物が点在し、ASR劣化度が高いものも少なくなかった。九頭竜川水系の岩種構成率は、45%を火山岩が占めたが、反応性の高い安山岩は約11%であり、ASRが発生する可能性は高いと判断された。なお、石川県や富山県の河川産骨材に比較して堆積岩の構成率が高いのが特徴であり、堆積岩のほとんどは砂岩であった。最近の調査により、1975年前後、九頭竜川河口にて採取した浚渫砂がコンクリート用骨材として流通していたことがわかっている。この地域では内在塩分による塩害発生事例もあり、ASRを助長させる一因ともなっていた。

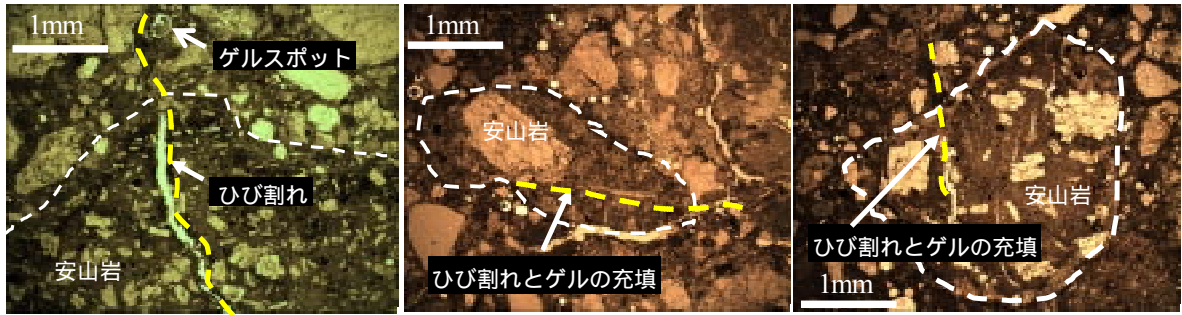
福井県中部(武生IC～県境)では、ASRが発生していなかった。骨材としては地元の堆積岩系の砕石が使用される場合が多かった。堆積岩の内訳は70%が砂岩で、24%が珪質頁岩であった。珪質頁岩は一般に反応性のものであるが、隠微晶質石英の含有率が低いことから、構造物にASRによるひび割れが発生しなかったと考えられた。

滋賀県北部(県境～木之本IC)では、ASRが発生していなかった。工事記録がないが、骨材として琵琶湖周辺の川砂、川砂利や一部硬質砂岩の砕石が使用されたものと推察された。岩種構成率の算出結果より、火山岩が10%で、堆積岩が87%を占めた。火山岩では安山岩が2%を占め、堆積岩の内訳は74%が砂岩で、12%が珪質頁岩であった。安山岩や珪質頁岩の構成率が低いことからASRが発生しないものと考えられた。

3.2 コアの偏光顕微鏡観察

コアより薄片を作製し、偏光顕微鏡観察を行った。構造物e、iおよびsでは構造物全体にかなり進行したひび割れが発生していた。薄片観察では写真-1に示すように、安山岩粒子中のひび割れにはロゼット状のASRゲルが充填されていた。このひび割れは、セメントペースト中に進展しており、周辺の気泡内をASRゲルが充填していた。反応性鉱物としては、クリストバライトと火山ガラスが同定された。なお、常願寺川水系の安山岩は、手取川水系や九頭竜川水系よりもクリストバライトの含有量が多い傾向にあった。

一般にクリストバライトやトリディディマイトを含有する火山岩は反応性が高く、異常膨張を生じる配合比率(ベシマム配合)が小さいのに対し(10%程度)、ガラス質の火山岩は比較的反応が低く、明瞭なベシマム現象を示さないとされている¹¹⁾。河川水系により安山岩と粒子中



(1)構造物 e (常願寺川水系) (2)構造物 i (常願寺川水系) (3)構造物 s (九頭竜川水系)

写真 - 1 コアの偏光顕微鏡観察 (単ニコル)の結果

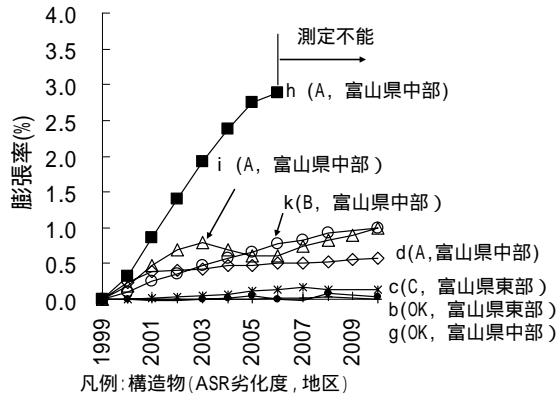


図 - 4 構造物の膨張率の推移

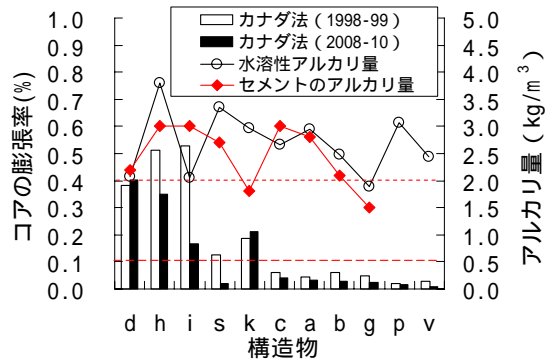


図 - 5 カナダ法膨張率の変化とアルカリ量との関係

のクリストバライトの含有率が異なることが想定されることから、川砂、川砂利では複雑なペシマム現象が存在すると考えられた。

4. カナダ法によるコアの残存膨張性の検証

ASR が進行中の構造物では、これまでの膨張量と残存膨張量の総和から鉄筋拘束による膨張抑制量を差引いたものより今後の膨張量が予測できるとされている⁴⁾。現在、残存膨張量の評価手法として3種類の試験法が提案されている。しかし、湿気養生法(JCI DD2 法、温度 40 の相対湿度 95%以上)は、北陸地方のように反応性骨材の構成率が少なく、凍結防止剤 (NaCl、平均 2kg/m²/年散布) による外部からのアルカリ供給の影響を受ける場合では適さなかった。また、デンマーク法では供用からの経過時間が長くなると膨張量が小さくなることやカナダ法では通常反応しない安定な岩種まで ASR を発生させることが指摘されていた⁶⁾。

富山県東部および富山県中部の構造物表面における膨張率の経時変化を図 - 4 に示す。これは、構造物でコアを採取した付近の測定結果である。構造物 h は、膨張量が大きく、2006 年以降は測定が不能となった。また、構造物 i および k も膨張率が緩やかに増加する傾向にあった。これらの3構造物は、ASR が進行中であることが判明した。構造物 d は、2001 年以降は、ほぼ横ばいであるが、わずかに膨張傾向があった。また、他の構造物 c、

b および g では ASR 劣化度が C または OK であり、膨張挙動を示さなかった。富山県中部 (常願寺川水系の骨材使用) では ASR が継続しているケースがほとんどあり、富山県東部では ASR が収束しているものと考えられた。

10 年前に行ったカナダ法(試験日数 21 日のデータ)およびアルカリ量との関係を図 - 5 に示す。なお、セメントのアルカリ量は 10 年前に EPMA により未水和セメント粒子から測定した最小アルカリ量 (等価アルカリ量 × セメントの単位質量) である¹²⁾。10 年前の測定結果と比較して今回の膨張率が小さくなり、時間の経過とともに反応性鉱物が消費されコアの残存膨張率が小さくなる傾向が確認できた。この結果は、ASR の進行過程と矛盾するものではなかった。しかし、構造物 d および k では残存膨張率はほぼ横ばいであった。この原因としては、セメントのアルカリ量が 2kg/m³ 程度以下と低いことから 構造物では ASR がほとんど進行していなかったにも係らず、カナダ法により供給されたアルカリが残存した反応性鉱物と反応したことによるものと考えられた。このため、構造物 d および k は、緩やかではあるが ASR が継続する可能性が推察された。一方、構造物 h および i では、構造物表面の膨張傾向が継続するものの、ASR による反応は収束方向に向かってしていると判断された。構造物の膨張挙動やコアのカナダ法を定期的実施することにより、ASR 劣化構造物の維持管理に役立つ情報が得られた。なお、水溶性アルカリ量とセメントのアルカ

表 - 3 EPMA による ASR ゲルの化学組成分析の結果(その 1)

| 構造物 分析位置 | d (常願川水系, ASR劣化度A) | | | | e (常願川水系, ASR劣化度A) | | | | h (常願川水系, ASR劣化度A) | | | | i (常願川水系, ASR劣化度A) | | | | | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Ag | AG-Cp | Sa | Cp | Ag | AG-Cp | Cp | Air | Ag | AG-Cp | Sa | Cp | Air | Ag | AG-Cp | Sa | Cp | |
| 質量 % | SiO ₂ | 40.81 | 38.78 | 38.86 | 39.03 | 50.40 | 45.80 | 36.89 | 38.94 | 50.37 | 48.04 | 35.41 | 40.09 | 37.29 | 52.48 | 41.88 | 39.56 | 36.24 |
| | Al ₂ O ₃ | 10.44 | 8.61 | 6.73 | 8.68 | 13.66 | 7.71 | 7.44 | 6.20 | 11.25 | 11.32 | 7.70 | 8.53 | 6.77 | 9.08 | 7.60 | 8.70 | 7.57 |
| | CaO | 7.60 | 9.86 | 11.54 | 13.31 | 5.08 | 10.63 | 12.21 | 13.92 | 5.96 | 9.57 | 14.68 | 13.41 | 14.51 | 2.93 | 10.64 | 10.95 | 12.63 |
| | Na ₂ O | 4.57 | 3.89 | 3.27 | 4.40 | 7.17 | 5.07 | 3.94 | 4.32 | 5.82 | 6.17 | 3.89 | 4.40 | 4.30 | 5.07 | 3.75 | 4.19 | 3.96 |
| | K ₂ O | 2.00 | 2.10 | 1.60 | 1.68 | 2.94 | 2.60 | 1.70 | 1.55 | 2.54 | 2.32 | 1.78 | 1.99 | 1.50 | 2.81 | 1.70 | 1.39 | 1.19 |
| | Total | 65.42 | 63.23 | 62.00 | 67.11 | 79.26 | 71.81 | 62.18 | 64.93 | 75.96 | 77.42 | 63.46 | 68.42 | 64.37 | 72.37 | 65.56 | 64.78 | 61.58 |
| 原子 数 | Si | 21.23 | 20.93 | 21.61 | 20.30 | 21.40 | 21.92 | 20.69 | 20.73 | 22.44 | 21.25 | 19.60 | 20.40 | 20.28 | 24.74 | 21.71 | 21.05 | 20.73 |
| | Ca | 4.24 | 5.70 | 6.88 | 7.52 | 2.31 | 5.47 | 7.65 | 8.17 | 2.88 | 4.56 | 8.80 | 7.37 | 8.73 | 1.48 | 5.40 | 6.30 | 7.64 |
| | Na | 4.58 | 4.07 | 3.53 | 4.43 | 5.89 | 4.71 | 4.15 | 4.51 | 4.94 | 5.27 | 4.15 | 4.33 | 4.56 | 4.63 | 4.10 | 4.27 | 4.13 |
| | K | 1.37 | 1.44 | 1.13 | 1.11 | 1.60 | 1.59 | 1.25 | 1.05 | 1.46 | 1.30 | 1.25 | 1.29 | 1.01 | 1.69 | 1.24 | 0.93 | 0.84 |
| Ca/Si | 0.20 | 0.27 | 0.32 | 0.37 | 0.11 | 0.25 | 0.37 | 0.39 | 0.13 | 0.21 | 0.45 | 0.36 | 0.43 | 0.06 | 0.25 | 0.30 | 0.37 | |
| Ca/(Na+K) | 0.71 | 1.03 | 1.48 | 1.36 | 0.31 | 0.87 | 1.42 | 1.47 | 0.45 | 0.69 | 1.63 | 1.31 | 1.57 | 0.23 | 1.01 | 1.21 | 1.54 | |

分析位置の凡例 Ag : 粗骨材中 Ag-Cp : 粗骨材界面近傍 Sa : 細骨材中 Cp : セメントペースト中 Air : 気泡中

表 - 4 EPMA による ASR ゲルの化学組成分析の結果(その 2)

| 構造物 分析位置 | k (常願川水系, ASR劣化度B) | | | | | q (九頭竜川水系, ASR劣化度B) | | | | | s (九頭竜川水系, ASR劣化度A) | | | | | |
|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Ag | AG-Cp | Sa | Cp | Air | Ag | AG-Cp | Sa | Cp | Air | Ag | AG-Cp | Sa | Cp | Air | |
| 質量 % | SiO ₂ | 46.61 | 41.12 | 31.14 | 39.03 | 34.50 | 39.18 | 38.96 | 34.55 | 38.50 | 35.96 | 39.68 | 38.94 | 40.92 | 37.27 | 33.80 |
| | Al ₂ O ₃ | 9.79 | 9.37 | 6.37 | 8.68 | 6.79 | 7.68 | 7.59 | 5.87 | 5.45 | 5.65 | 7.95 | 8.59 | 6.46 | 6.72 | 4.82 |
| | CaO | 6.12 | 11.07 | 15.21 | 13.31 | 14.79 | 7.13 | 9.90 | 15.75 | 15.28 | 14.42 | 7.94 | 9.72 | 12.70 | 14.38 | 15.43 |
| | Na ₂ O | 5.95 | 5.03 | 3.47 | 4.40 | 3.71 | 4.13 | 3.98 | 3.90 | 2.83 | 1.48 | 5.63 | 5.23 | 3.11 | 3.09 | 2.50 |
| | K ₂ O | 2.97 | 2.48 | 1.43 | 1.68 | 1.26 | 2.72 | 2.60 | 0.97 | 1.53 | 1.28 | 2.87 | 1.95 | 3.03 | 1.60 | 1.36 |
| | Total | 71.44 | 69.07 | 57.62 | 67.11 | 61.06 | 60.84 | 63.03 | 61.05 | 63.59 | 58.79 | 64.07 | 64.44 | 66.21 | 63.05 | 57.91 |
| 原子 数 | Si | 22.15 | 20.68 | 19.01 | 20.30 | 19.95 | 21.82 | 21.39 | 20.29 | 21.43 | 21.66 | 21.32 | 20.79 | 21.88 | 20.81 | 20.79 |
| | Ca | 3.22 | 5.98 | 9.95 | 7.52 | 9.19 | 4.38 | 5.87 | 9.90 | 9.31 | 9.47 | 4.60 | 5.59 | 7.24 | 8.79 | 10.43 |
| | Na | 5.54 | 4.91 | 4.11 | 4.43 | 4.17 | 4.55 | 4.29 | 4.43 | 3.02 | 1.71 | 5.81 | 5.45 | 3.22 | 3.31 | 3.02 |
| | K | 1.82 | 1.60 | 1.11 | 1.11 | 0.94 | 1.96 | 1.84 | 0.73 | 1.08 | 0.97 | 1.99 | 1.35 | 2.11 | 1.13 | 1.07 |
| Ca/Si | 0.15 | 0.29 | 0.52 | 0.37 | 0.46 | 0.20 | 0.27 | 0.49 | 0.43 | 0.44 | 0.22 | 0.27 | 0.33 | 0.42 | 0.50 | |
| Ca/(Na+K) | 0.44 | 0.92 | 1.91 | 1.36 | 1.80 | 0.67 | 0.96 | 1.92 | 2.27 | 3.53 | 0.59 | 0.82 | 1.36 | 1.98 | 2.55 | |

り量の分析結果は概ね類似した傾向を示したが、構造物 i および c では両者が一致しなかった。水溶性アルカリは、骨材の混入量によりデータがばらつくものと推察された。水溶性アルカリ量分析ではなるべく多くの試料から、分析試料を抽出することが必要と考えられた。なお、カナダ法の膨張率 0.1% 以上の場合には、有害な膨張であるか判断するためにアルカリ量の測定や岩種構成の確認が必要になると考えられた。

5. EPMA による ASR ゲルの化学組成分析

偏光顕微鏡により、反応性骨材を確認した後、EPMA により ASR ゲルの化学組成を定量分析した。分析の対象としたのは常願川水系(構造物 d, e, h, i, k)および九頭竜川水系(構造物 q, s)の安山岩である。分析位置は、ASR ゲルが発生した粗骨材内部、粗骨材界面、ひび割れ中、気泡中と細骨材内部の 5~10 点とした。各分析位置の平均値を表 - 3 および表 - 4 に示す。定量分析値の合計が 100% とならないのは、ASR ゲルのようなポーラスで水を含む物質を分析する際に、酸素や水素を測定しないためであった¹³⁾。この結果から、おおむねシリカ(SiO₂)、アルミナ(Al₂O₃)、アルカリ(Na₂O, K₂O)は粗骨材中~セメントペースト中に向かうにつれて減少する傾向があるのに対して、カルシウム(CaO)は逆に増加する傾向が

あった。これは ASR ゲル中のアルカリ分がセメント中のカルシウム分に置換される現象を示したものであった。

構造物 i について、ASR ゲルの Ca/Si および Ca/(Na+K) の関係を図 - 6 に示す。両者の関係はほぼ直線上に分布するのが特徴である。粗骨材中の ASR ゲルの化学成分は細骨材に比較して Ca/Si および Ca/(Na+K) が小さい傾向を示した。これは細骨材が粗骨材に比較して比表面積が大きいことから ASR が早期に発生するとともに、その反応過程の早い段階で粒子界面からセメントペースト中の Ca を取込んだものと推察された。これは、反応性の細骨材が使用された場合、ASR は初期に発生するが、長期にわたり反応が継続するものではないことを示唆している¹⁴⁾。

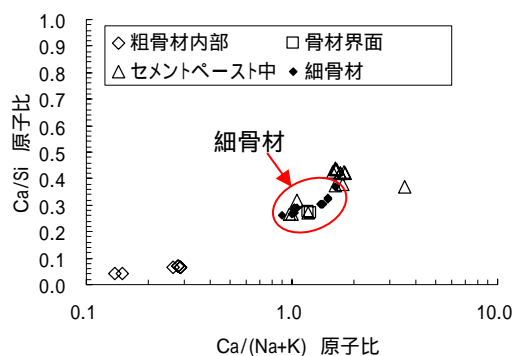


図 - 6 ASR ゲルの化学組成 (構造物 i)

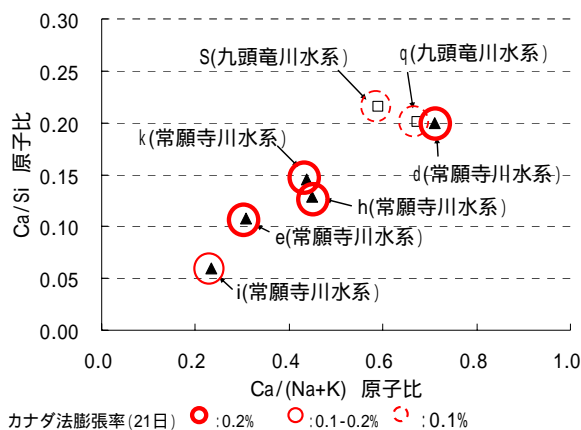


図 - 7 ASR ゲルの化学組成と残存膨張率の関係

粗骨材中の ASR ゲルの Ca/Si, Ca/(Na+K) とコアの残存膨張率(試験日数 21 日)との関係を図 - 7 に示す。すべての点が Ca/Si=0.25 未満の領域にプロットされており、吸水膨張性のある ASR ゲルと判定された¹⁴⁾。しかし、残存膨張性がほとんどない構造物 s および q を考慮すると吸水性の高い ASR ゲルと判断できるのは Ca/Si が 0.15 ~ 0.2 以下であることが推察された。なお、構造物 d のカナダ法の残存膨張率が高いのは、前述したように反応性骨材を含有するが、セメントのアルカリ量が低いため ASR が十分進行していなかったためであった。以上の結果より、供用から 30 年以上経過した構造物において、常願寺川水系の川砂利では ASR の進行はまだ継続する可能性が高かった。それに対して、九頭竜川水系の川砂利では ASR の進行がほぼ収束したものと判断された。吸水性の高い ASR ゲルが否かの閾値については今後、データをさらに蓄積して測定精度を向上させる予定である。

6. 結論

本研究により得られた主要な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 北陸地方の道路構造物では、常願川水系(富山県)や九頭竜川水系(福井県)の河川産骨材を使用したことにより、一部の構造物に劣化度の高い ASR が発生していた。この地域の河川産骨材は、安山岩の岩種構成率がペシマム混合率に近いことが深刻な ASR 発生の原因の一つと考えられた。
- (2) 構造物の膨張率およびコアの残存膨張率の測定を継続的に行うことにより、維持管理に有効なデータが蓄積できた。この際、カナダ法の膨張率が 0.1% と高い場合、岩種構成率やアルカリ量を確認する必要があった。
- (3) ASR ゲルの化学組成を分析した結果、反応性の川砂は早期に ASR を生じるが、長期にわたり反応が継続するものではなかった。

(4) ASR ゲルの化学組成およびコアのカナダ法の結果より、とくに ASR 劣化度の高い、常願川水系の河川産骨材を使用した構造物は、供用から 30 年以上経過しても ASR による膨張が継続していた。それに対して、九頭竜川水系の構造物では ASR による膨張がほぼ収束したと判断できた。

参考文献

- 1) 土木研究センター：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，1989
- 2) 土木学会：コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策，コンクリートライブラリー 103，2000
- 3) 宮川 豊章：アルカリ骨材反応の今 - 鉄筋破断の重み - ，土木学会第 59 回年次学術講演，研究討論会，研-8，2004
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書・維持管理編，pp.81-221，2007
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の耐久性力学委員会報告書，pp.2-7，2007
- 6) 野村昌弘ほか：ASR 劣化構造物から採取したコアの残存膨張性評価の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.965-970，2010
- 7) 大代武志ほか：富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1251-1256，2007
- 8) 大代武志ほか：富山県の ASR 劣化橋梁の実態調査に基づく ASR 抑制対策および維持管理手法の提案，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.1，pp.45-57，2009
- 9) 鳥居和之ほか：石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1017-1022，2008
- 10) 鳥居和之ほか：能登半島の ASR 劣化構造物に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.779-784，2006
- 11) Katayama, T. et al. : Petrography and Alkali-reactivity of Some Volcanic Aggregates from Iceland, Proc. of The 10th ICAAR, pp.377-384, 1996
- 12) Katayama, T. et al. : Alkali-Aggregate Reaction under the Influence of Deicing Salts in the Hokuriku District, Japan, Materials Characterization, Vol.53, pp.105-122, 2004 .
- 13) コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書，p .7，2008
- 14) 藤村友城ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.899-904，2010