

論文 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

野村 昌弘*1・小松原 昭則*2・丑屋 智志*3・鳥居 和之*4

要旨: 本研究では富山県および石川県の 23 構造物からコアを多数採取し, ASR による残存膨張性に関する一連の調査を行った。また, 約 10 年前に実施した試験結果との比較を行い, ASR 劣化構造物の進行過程について検討した。さらに, コアの残存膨張性試験後にて圧縮強度および静弾性係数試験を実施し, 補修・補強を検討する際のコンクリートの設計強度の取扱いやコアの残存膨張性試験の意義について考察した。

キーワード: アルカリシリカ反応, 残存膨張性, ASR 劣化度, 偏光顕微鏡観察, 岩種構成率

1. はじめに

北陸地方のアルカリシリカ反応 (以下 ASR) は 1970 年頃より顕在化し, 1988 年よりひび割れ注入や表面被覆による第 1 次補修を行ってきた。当時の ASR 残存膨張性の評価は, JIS A1146 に準拠したコアによる湿気槽養生法 (JCI-DD2, 温度 40°C, 相対湿度 95%以上) を適用したが, コアがほとんど膨張せず, 「残存膨張性なし」と判断された。しかし, 補修後数年で表面被覆材にひび割れやふくれが発生することが多く, コアによる残存膨張性の評価と現場での ASR 劣化の実態が相違する結果となった¹⁾。一方, 10 年ほど以前より ASR 残存膨張性の評価手法として, 外部からアルカリを供給するカナダ法 (温度 80°C, 1N・NaOH 溶液浸漬) およびデンマーク法 (温度 50°C, 飽和 NaCl 浸漬) を採用している²⁾。これらの試験法では, ほとんどの構造物でコアの膨張が収束せず, 「残存膨張性あり」との判定結果が得られた。また, 2001 年より第 3 者に対するコンクリート片のはく落防止や内部鉄筋の腐食抑制のため, ひび割れ注入と表面被覆や断面修復工法, コンクリート巻立てによる第 2 次補修が実施されてきている。この際に, 多くの ASR 劣化構造物に効率的な維持管理を行っていくためには構造物ごとの ASR の劣化過程を正確に把握し, 最適対策工を選定することがより重要になっている。

本研究では, 2008~09 年にかけて富山県および石川県の 23 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, 約 10 年前 (1998~99 年) に調査した試験結果との比較を行い, ASR 劣化構造物の進行過程について検討した。さらに, 残存膨張性試験後にて圧縮強度および静弾性係数試験を実施し, 補修・補強の検討を行う際のコンクリートの設計強度の取扱いやコアによる残存膨張性試験の意義について考察した。

2. ASR による再劣化過程のモニタリング

ASR 劣化の一事例を写真-1 に示す。本橋脚は, 上部工の掛違い部に位置し, 冬期に凍結防止剤 (NaCl) の影響を受けていた。供用から 12 年後 (第 1 次補修) にひび割れ注入と表面被覆を行ったが, その数年後には表面被覆材にひび割れが発生し, 供用から 29 年後 (第 2 次補修) では ASR の進行とともに表面被覆材の経年劣化が進行し, 第 1 次補修前とほぼ同じ箇所ではひび割れが発生した。

ひび割れ延長の密度 (幅 0.2mm 以上が調査対象) の推移を図-1 に示す。第 1 次補修時と比較して第 2 次補修時 (表面被覆除去後) のひび割れ延長の密度が大きく増加する傾向を示した。20 構造物 (川砂, 川砂利は常願寺



第 1 次補修前 第 2 次補修前
写真-1 ASR による表面被覆の再劣化

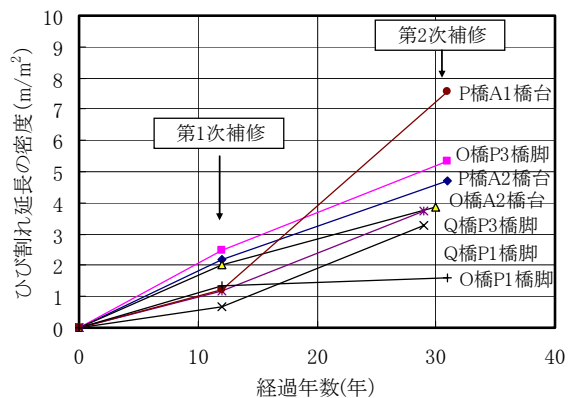


図-1 ひび割れの延長密度の推移 (骨材の河川水系: 神通川および常願寺川)

*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・技術管理チームリーダー

*3 金沢大学 工学部土木建設工学科

*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)

川および神通川水系)を対象とした調査では第1次補修後、ひび割れ延長の密度が収束していたのは、凍結防止剤の影響を受けないO橋P1橋脚1基(中間橋脚)だけであり、その他の構造物ではすべて右肩上がりが増加し、今後もASRが進展していく可能性が高いと考えられた。このように、コンクリートの残存膨張性の評価を誤ると適切な補修効果が得られないことがあった。

3. 調査概要と試験方法

建設時に使用したコンクリートの川砂および川砂利を河川水系別に区分し、構造物(1972~83年供用開始)ごとに目視によるASR劣化度を分類するとともに、コア

(φ=55mm, L=400mm)を採取して川砂利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、コンクリートのアルカリ量の測定、2種類の残存膨張性試験(カナダ法およびデンマーク法)、コアの圧縮強度および静弾性係数試験を同時に実施した。試験方法の概要を表-1に示す。なお、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があることから、試験に使用していない。

4. 試験結果および考察

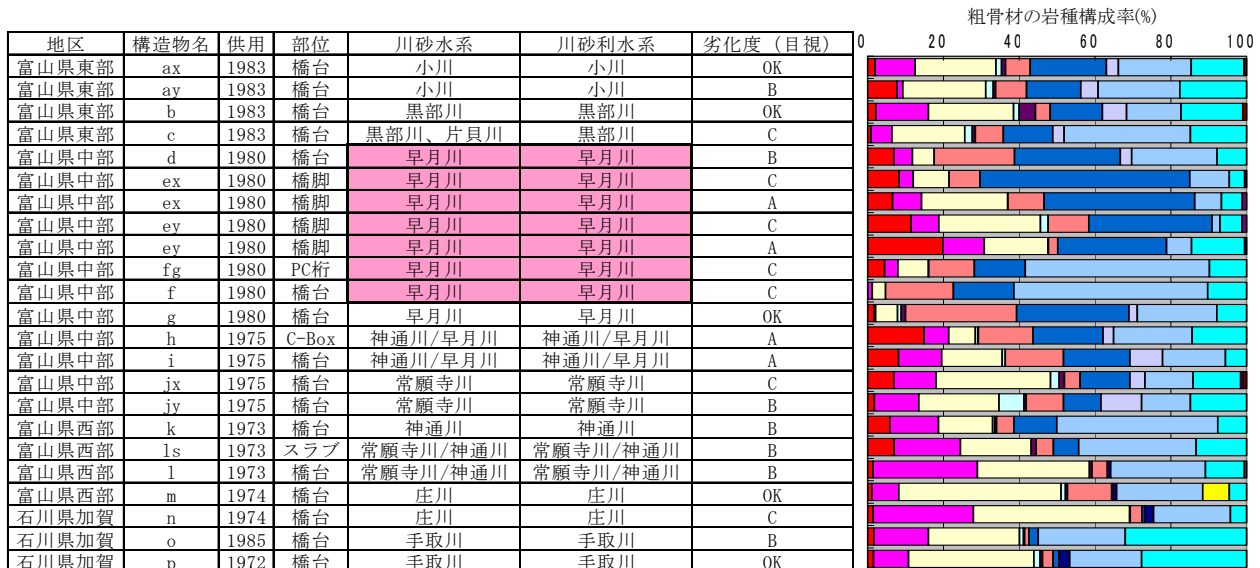
4.1 川砂利の岩種構成率

採取したコアを使用して、川砂利の岩種構成率を調べ

表-1 コアによるASR判定の各種試験方法の概要

試験項目	試験方法		数量*
川砂利の岩種構成率	コンクリートコア(カナダ法用φ=55mm, L=150mm)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、その構成率を算出した。		2本
偏光顕微鏡観察	コアよりコンクリート片(25×35mm程度)を切出し、コンクリート研磨薄片を作製した。		2枚
アルカリ量	150μm未満に粉砕した試料10gを40℃の蒸留水100mlに混合、30分攪拌した後、ろ液のアルカリ濃度(Na ⁺ , K ⁺)を原子吸光度法により測定し、(Na ₂ O+0.658K ₂ O) eq.を算出した(総プロ ³)に準拠)。		2試料
残存膨張性試験	カナダ法	コンクリートコア(φ=55mm, L=150mm)を温度80℃, 1NのNaOH溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定した。	2本
	デンマーク法	コンクリートコア(φ=55mm, L=150mm)を温度50℃, 飽和NaCl溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定した。	2本
圧縮強度および静弾性係数試験	コアより試験体(φ=55mm, L=110mm)を切り出し、圧縮強度および静弾性係数(JISA1108)を測定した。		2本

*1 構造物当たりの試験数量、本稿のデータでは平均値を使用している



ASR劣化度(目視)

- 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
- : 常願寺川の可能性あり

粗骨材の岩種判別

- 安山岩 **
- 流紋岩~デイサイト質溶結凝灰岩 *
- 珪質頁岩 *
- 閃緑岩
- ひん岩
- 礫岩
- 石灰岩
- 方解石
- 流紋岩・デイサイト *
- 流紋岩~デイサイト質凝灰岩 *
- 花崗岩
- 石英斑岩・花崗斑岩
- 片岩・片麻岩
- 砂岩
- 蛇紋岩

**高反応性岩種 *反応性岩種

図-2 調査対象構造物の目視によるASR劣化度と川砂利の岩種構成

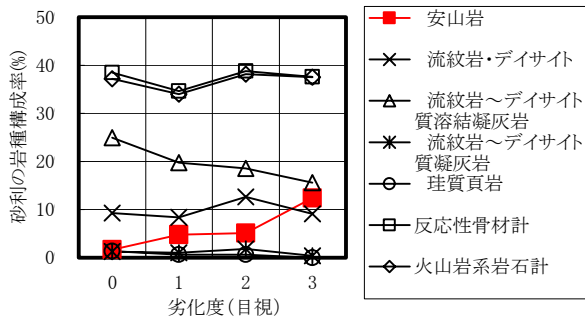


図-3 川砂利の岩種構成率と ASR 劣化度との関係

た。また、目視により構造物の ASR の劣化度を 4 段階で評価した。結果を図-2 に示す。アルカリシリカ反応性をもつ岩種として火山系岩石（安山岩、流紋岩、溶結凝灰岩）と堆積岩（頁岩）が確認された。なお、図-2 に示す川砂利、川砂利の水系は生コン業者からの聞き取り調査のものであった。しかし、早月川水系は無害の花崗岩や閃緑岩の混入比率が高く、安山岩はほとんど含まれないことが報告されている⁴⁾。したがって、構造物 d~f は安山岩の構成率から常願寺川水系の川砂利が使用されたことによる ASR と推察された⁵⁾。

川砂利の岩種構成率と目視による ASR 劣化度との関係を図-3 に示す。安山岩の構成率が 4% を超えると構造物に ASR が発生し、また安山岩の構成率が増加するにつれて、構造物の ASR 劣化度が高くなった。これは安山岩の構成率がペシマム混合率に近づいていくためであると考えられた⁶⁾。

4.2 偏光顕微鏡によるコアの観察

コアから薄片試料を作製し、偏光顕微鏡による観察を行った。また、薄片観察により ASR 劣化度を評価し、10 年前に実施した試験結果と照合した。薄片観察による ASR 劣化度は Katayama らの手法⁷⁾を参考に 5 段階に区分した。表-2 に劣化度の判定結果を、写真-1 に薄片の観察事例を示す。

写真-1(1)の構造物 c では、10 年前には ASR によるひび割れが発生していなかったが（劣化度 OK）、薄片観察では砂利中のデイサイトや流紋岩質溶結凝灰岩に軽

表-2 目視と薄片観察による ASR 劣化度の判定結果

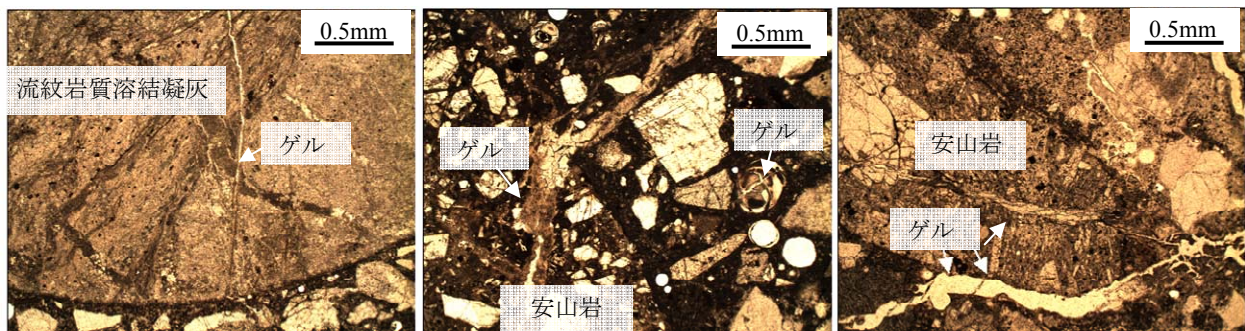
構造物名	1998-99年調査		2008-09年調査	
	目視	薄片	目視	薄片
ax	OK	1	OK	1
av	B	—	B	3
b	OK	1	OK	1
c	OK	1	C	2
d	B	3	B	4
ex	C	—	C	—
ex	C	—	A	4
ev	C	—	C	—
ev	C	—	A	4
fg	OK	—	C	1
f	OK	—	C	0
g	OK	1	OK	1
h	A	3	A	4
i	A	3	A	4
ix	C	—	C	3
iv	B	—	B	3
k	C	3	B	4
ls	B	—	B	3
l	B	—	B	3
m	OK	—	OK	2
n	C	—	C	1
o	B	—	B	2
p	OK	1	OK	1

ASR 劣化度（コア薄片）

- 0：反応がないもの
 - 1：反応リムが見られるもの
 - 2：ゲルが骨材内に発生しているもの
 - 3：ゲルが骨材からセメントペーストに達しているもの
 - 4：ゲルが骨材からセメントペーストに激しく達し、気泡内を充填するゲルがみられるもの
 - ：過去に調査を行っていないもの
- 前回の調査より目視による ASR 劣化度が進行したものの

微な反応リムが認められた（劣化度 1）。なお、反応性鉱物としては火山ガラスと隠微晶質石英が確認された。今回の調査では構造物に ASR によるひび割れが発生し（劣化度 C）、薄片観察では流紋岩質溶結凝灰岩にて ASR ゲルの脈が確認され（劣化度 2）、ASR が進行した事例であった。

写真-1(2)の構造物 k では、10 年前に ASR によるひび割れがすでに発生し（劣化度 C）、薄片観察では砂利中のデイサイト、流紋岩質溶結凝灰岩、安山岩、川砂利中の流紋岩、流紋岩質凝灰岩、安山岩が反応していた（劣化度 2）。なお、流紋岩には隠微晶質石英、火山ガラス、カルセドニーが含まれていたが、反応性の高いオパールや



(1) 構造物 (c)

(2) 構造物 (k)

(3) 構造物 (i)

写真-1 コアの偏光顕微鏡による観察結果（単ニコル）

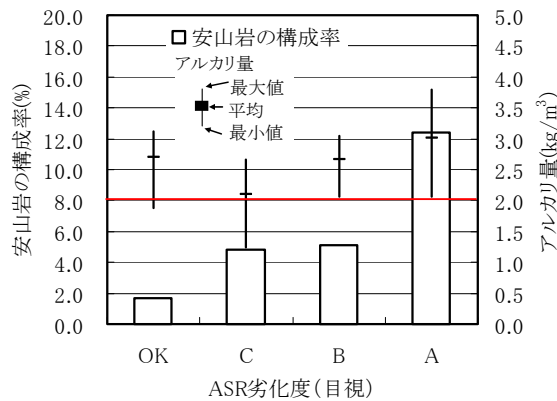


図-4 コンクリートのアルカリ量と構造物のASR劣化度との関係

クリストバライトは同定されなかった。今回の調査では構造物のひび割れの発生面積が増加した(劣化度B)。また、薄片観察では安山岩粒子からASRゲルが生成し、セメントペースト中にひび割れが進展するとともに、気泡内に滞留するASRゲルも確認された(劣化度4)。今後、構造物表面でのひび割れが進展する可能性が予測された。

写真-1(3)の構造物iでは、10年前にASRによるひび割れが発生し(劣化度A)、薄片観察では川砂利および川砂の安山岩が反応していたとともに、セメントペースト中にもASRゲルが充填したひび割れが多数発生していた(劣化度3)。安山岩には火山ガラスおよびクリストバライトが同定された。今回の調査では構造物のひび割れの発生状況に大きな変化は見られなかった(劣化度A)、薄片観察では安山岩粒子からASRゲルが生成し、セメントペースト中には激しいひび割れが発達していた(劣化度4)。

このように、薄片による観察結果より、構造物cおよびkでは今後も構造物の劣化が進行する可能性が高いと判断された。したがって、薄片観察を定期的を実施し、同時にコアの残存膨張性やASRゲルの化学組成分析を行うことにより、ASRの劣化予測の精度が向上すると考えられた。

4.3 コンクリートのアルカリ量の測定

外部から構造物に浸透したアルカリの影響を避けるために、表面から200mm以上の深さの部分でコンクリート中のアルカリ量を測定した。そのASR劣化度(目視)との関係を図-4に示す。コンクリートのアルカリ量と安山岩の構成率が増加するとともに、構造物のASR劣化度が高くなった。また、アルカリ量が2kg/m³程度でも劣化度AのASRが発生していた⁸⁾。なお、アルカリの分析手法は40℃の温水抽出であり、骨材から溶出するアルカリ⁹⁾を含んでいることに注意する必要がある。しかし、1.5kg/m³程度のアルカリ量でも劣化度CのASRが発生し

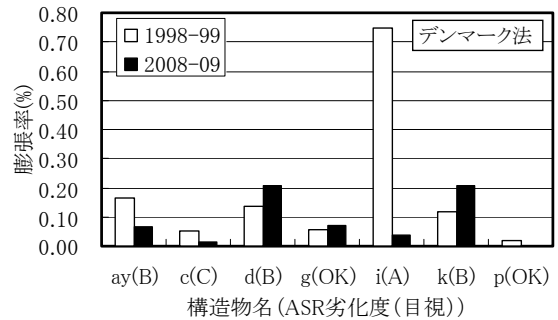
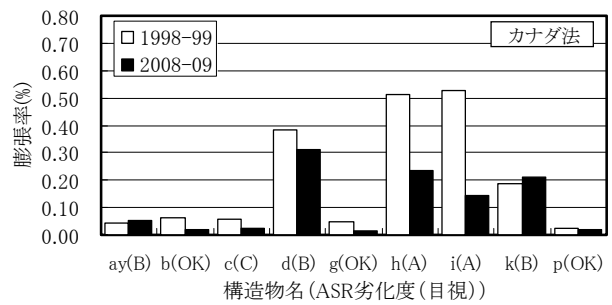


図-5 残存膨張性試験の比較(膨張率:カナダ法試験日数21日,デンマーク法試験日数91日)

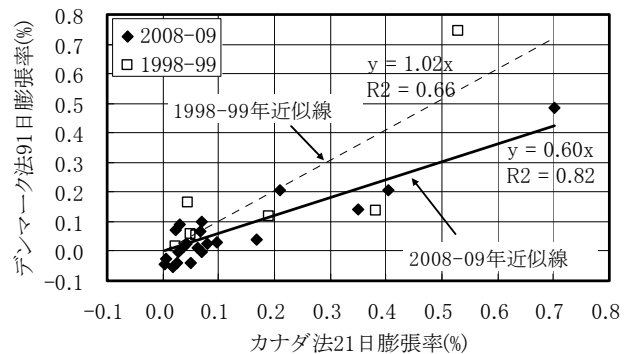


図-6 デンマーク法とカナダ法との相関性

ていることから、現行のアルカリ総量規制値3kg/m³を遵守してもASRの発生を完全に抑制することができないものがあることが判明した。

4.4 コアの残存膨張性試験

コアの残存膨張性を評価するためにカナダ法およびデンマーク法を実施した。10年前の残存膨張率と比較した結果を図-5に示す。劣化度Aの構造物では残存膨張率が10年前の半分以下になっておりASR膨張が収束する傾向が認められた。また、劣化度Bの構造物ではほぼ横ばいの膨張率となり、今後もASR膨張が継続することが予想された。コアの残存膨張性試験は促進環境条件下でのものであり、必ずしも構造物の使用環境条件とは一致せず、得られる膨張率の意味についても不明な点があることが指摘されている¹⁰⁾。しかし、コアの残存膨張率を定期的に追跡し、さらに薄片観察の結果を併用することにより、構造物の維持管理に役立つ有効な情報を得られるものと考えられた。

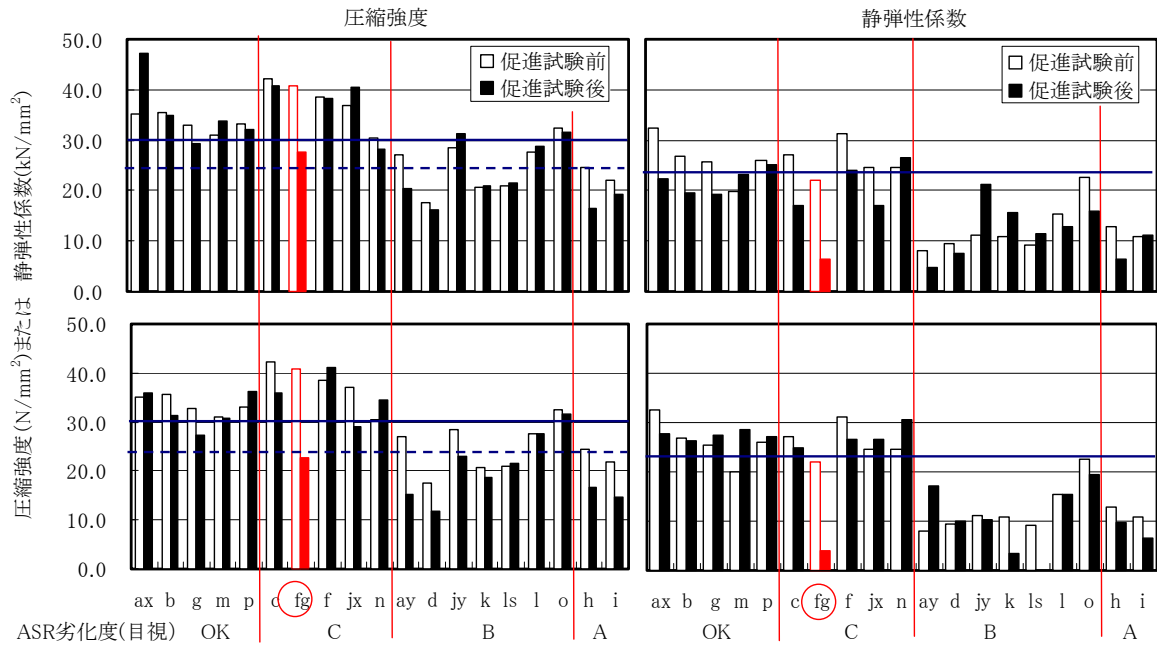


図-7 残存膨張性試験前後での圧縮強度および静弾性係数の変化（上段：カナダ法，下段：デンマーク法）

カナダ法とデンマーク法との残存膨張率の関係を図-6 に示す。両者の残存膨張率の結果には高い相関性が認められた。10 年前の残存膨張率の結果はカナダ法（試験日数 21 日）とデンマーク法（試験日数 91 日）とで 1 : 1 の対応関係が認められたが¹⁾、今回の調査結果ではデンマーク法の残存膨張率が低下したことから、1 : 0.6 の対応関係に変化した。カナダ法はコアに直接 NaOH 溶液を供給し、ASR を促進するのに対して、デンマーク法はコンクリート中の水和物との相互作用により、間接的にアルカリ雰囲気（NaOH）を誘発させるものである¹¹⁾。デンマーク法では、供用から 30 年以上経過した構造物を対象とした場合には、水酸化カルシウムやセメント中の C₃A の減少により、ASR を十分に促進させるアルカリ雰囲気を作り出すことができない可能性が考えられた。

4.5 コアの圧縮強度および静弾性係数

コアによる圧縮強度および静弾性試験を実施するとともに、残存膨張性試験後のコアを用いて同一の試験を

行った。その結果を図-7 に示す。ASR 劣化度（目視）が高くなるにつれて、コアの圧縮強度および静弾性係数が大きく低下する傾向があり、劣化度 B および劣化度 A では設計基準強度の 24N/mm²を下回るものもあった。残存膨張性試験後の圧縮強度の方が低い場合があり、将来

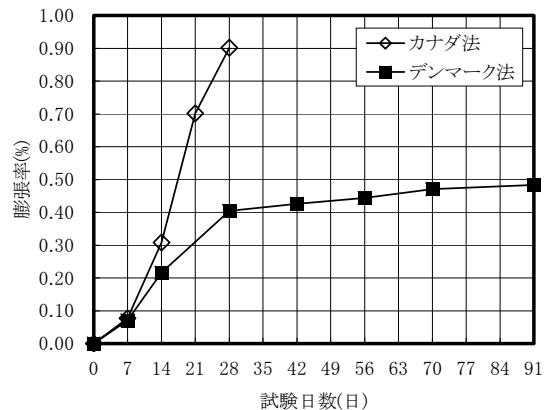
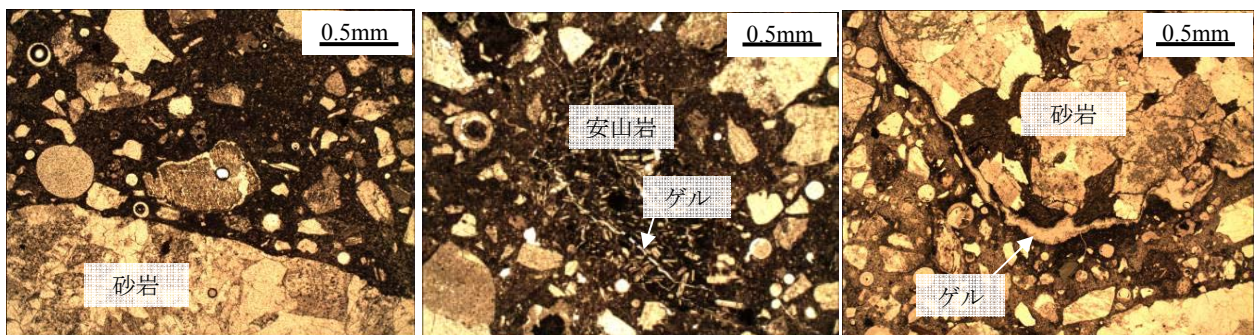


図-8 残存膨張性試験の結果（構造物 fg）



(1) 残存膨張性試験前 (2) 残存膨張性試験後（安山岩） (3) 残存膨張性試験後（砂岩）

写真-2 残存膨張性試験（カナダ法）前後におけるコアの偏光顕微鏡の観察結果（単ニコール）

の ASR の劣化進行を考慮すると残存膨張性試験後の圧縮強度を補修・補強における設計値として確認する必要性が考えられた。また、構造物 fg は劣化度 C であるが、残存膨張性試験後の強度低下が著しかった。

4.6 構造物 fg の残存膨張試験後の薄片観察

構造物 fg は PC 桁であり、凍結防止剤の影響を受ける桁端部にて一部 ASR が発生していた程度であった。調査結果より安山岩の構成率が 4.5%、コンクリートのアルカリ量が 1.8kg/m^3 であり、図-8 に示すように残存膨張性の試験結果では大きな膨張傾向を示した。残存膨張試験前の偏光顕微鏡による薄片観察では、写真-2(1)に示すように安山岩に反応リムなど軽微な ASR が発生していたが、砂岩に反応は認められなかった。しかし、写真-2(2)に示すように、残存膨張性試験後のコンクリート薄片では、外部から供給されたアルカリの影響によって安山岩が反応し、ASR ゲルで充填されたひび割れが安山岩粒子を貫通しているなど、ASR が促進された状況が観察された。また写真-2(3)に示すように、砂岩の周囲にも ASR ゲルが生成していた。30 年程度の経過年数では反応しにくい岩種のものも厳しいアルカリ雰囲気下において反応が生じていた。ただし、ゲルから放射状に伸びるひび割れの発生は確認されなかった。したがって、カナダ法やデンマーク法は、通常、ASR が発生しない岩種にも ASR を発生させる可能性があった。コアの残存膨張性の評価の際には、コアの残存膨張率の大小だけで判定するのではなく、偏光顕微鏡観察による岩石学的評価も併せて実施する必要性が考えられた。

5. まとめ

富山県および石川県に分布する 23 構造物の調査結果より得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) この地方の ASR 劣化には、川砂および川砂利中の安山岩の構成率が関係していた。また、コンクリートのアルカリ総量の規制値 (3kg/m^3) を遵守しても ASR が発生する場合があった。
- 2) コア薄片の観察は、構造物に発生する ASR の外観観察と比較して、ASR の劣化予測を行う際に、より有効な情報が得られた。また、構造物から採取したコアを使用して定期的に薄片観察と残存膨張性試験を実施することにより、ASR の劣化進行を正確に予測できる可能性があった。
- 4) ASR の劣化進行を考慮した補修・補強設計を行う際に、カナダ法やデンマーク法による試験終了後のコアの圧縮強度や静弾性係数の値を確認することが有効であった。
- 5) カナダ法（試験日数 21 日）とデンマーク法（試験日数 91 日）との残存膨張率には高い相関性が認められた。

しかし、カナダ法およびデンマーク法では、通常、反応しない岩種でも ASR を誘発させる傾向があった。コアによる残存膨張性の評価の際、コアの膨張率だけで判定するには十分注意を払う必要があった。

謝辞：本研究にあたり中日本高速道路(株)金沢支社より、多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野村昌弘ほか：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法、コンクリート工学論文集、Vol.13, No.3, pp.105-114, 2002.
- 2) 野村昌弘ほか：コアによるコンクリート構造物のアルカリシリカ反応の判定、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.1, pp.1147-1152, 2001
- 3) 土木研究センター：建設省総合技術プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果）コンクリート構造物におけるアルカリシリカ反応の実態調査（案）pp.159-160, 1989
- 4) 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
- 5) 大代武志ほか：ASR 劣化構造物の経年劣化と補修効果の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.30, No.1, pp.1047-1052, 2008
- 6) 大代武志ほか：コンクリート橋脚の ASR による再劣化と対策工の選定、コンクリート工学、Vol.44, No.12, pp.31-38, 2006
- 7) 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, Proc. of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.862-873, 2008
- 8) 野村昌弘ほか：実構造物における骨材のアルカリ溶出の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp.791-796, 2006
- 9) Nomura M, Torii K: The Alkali-leaching Property of Sands and Inspection on Alkali-leaching from Aggregate in Structures, Proc. of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1054-1063, 2008
- 10) 鳥居和之ほか：コンクリートコアによる ASR 残存膨張性の評価、セメント・コンクリート、No.715, pp.64-70, 2006
- 11) 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.45-47, 2009