

# 論文 北陸地方における水利構造物の ASR 劣化の特徴と維持管理

麻田 正弘<sup>\*1</sup>・杉森 学<sup>\*2</sup>・橋本 徹<sup>\*3</sup>・鳥居 和之<sup>\*4</sup>

**要旨**：常に水の供給を受けるダムや水門、堰などの水利構造物には、常時水中に没している部位、乾湿繰り返しを受ける部位、常時乾燥した部位があり、ASR による劣化を生じた場合、使用・環境条件（水分供給）により ASR による劣化が大きく相違する。このため、北陸地方における ASR を生じた水利構造物の事例を調査するとともに、水分供給の異なる部位から採取したコアの各種試験を実施することにより、部材断面内での ASR 劣化に及ぼす水分供給の影響を把握することを試みた。その結果、ASR で劣化した水利構造物を維持管理する際の基本的な考え方と、水分環境の異なるコンクリートの ASR 劣化の特徴を明らかにした。

**キーワード**：水利構造物, ASR, 水分供給, 維持管理, 補修技術

## 1. はじめに

ダムや水門、堰などの水利構造物では、水の供給を常に受けるため、ASR による劣化が発生した場合、コンクリートの膨張が長期にわたり継続することが懸念されている。また、その ASR 劣化の程度や進行性に関して、水利構造物は他の構造物に比べ特徴的な性状を示すことも知られている<sup>1)</sup>。一方、北陸地方では、安山岩や溶結凝灰岩など、火山岩性の川砂・川砂利が広く分布しており、これら反応性骨材をコンクリートに使用したことで、ASR による劣化構造物が数多く存在することが知られている<sup>1)</sup>。このため、ASR 劣化が発生した水利構造物に対しても合理的かつ経済的な維持管理が求められている。この際に、水利構造物は ASR の促進要因である水分環境下において、その機能や目的を発揮するものであり、水の供給抑止や防水を目的とした補修技術は採用しにくいのが現状である。とくに、河川内にある ASR 劣化構造物では、水力発電とともに下流域における利水（上水道や農業用水）を考慮することも維持管理の条件として重要な課題である。

水利構造物は、河川の洪水調節や水力発電のためのダム、溪流における土石流を抑止する砂防堰堤、河川や湖沼に設けられる制水や防潮のための水門、また、農業用水への取水のための堰、さらに水力発電所の管路末端に設けられる流量調整のためのサージタンクなど、それぞれに多種類の機能形態が求められる。このため、北陸地方における ASR で劣化した水利構造物の外観上の特徴を把握するために目視を主体とした事例調査を実施した。外観目視調査では、常時水中に没する部位、乾湿繰り返しを受ける部位、常時乾燥した部位など、ASR による劣化と水の影響との関係に着目し、構造物の種類や部材断面ごとの維持管理の基礎資料を得ることを試みた。また、

すでに補修されている構造物では、補修技術の適否を判定した。次に、水利構造物に見られる水分環境の違いによる ASR の劣化程度を把握するために、水力発電所の取水口施設を対象にしてコア採取による詳細調査を実施した。ここでは、水分環境が異なる乾湿繰り返し部と乾燥部から多数のコアを採取し、外観目視を主体にした事例調査とコンクリートの ASR 劣化の程度との関係を考察した。

本研究は、北陸地方における ASR で劣化した水利構造物の実態を把握することを目的としており、事例調査とコア試験の結果より水利構造物の調査診断と維持管理の基本的な考え方を提案するものである。

## 2. 水利構造物の ASR 劣化と補修対策の事例調査

### 2.1 ASR 劣化の事例調査

水利構造物における外観目視を実施した ASR 劣化構造物の代表的なものを写真-1 に示す。写真-1(a) はダムの取水口であり、河川の洪水調整のため湖面が上下することで、同じ部材でもコンクリート表面の水分環境が乾湿繰り返し部と常時水中部の異なる条件が生じたものである。この相違により ASR の劣化程度が大きく影響を受けている。常時水中部では ASR が軽微なのに対して、乾湿繰り返し部は劣化が顕著である。これは、常時水中にあるコンクリートでは、細孔溶液中のアルカリが水中に滲出する<sup>2)</sup> ことでアルカリ濃度が減少し、ASR が抑制されたものと考えられる。また、水分が非常に多い環境では、アルカリシリカゲルとなりやすく、流動性が高いゾルのままでは膨張力を発揮しないとの指摘がある<sup>3)</sup>。一方、乾湿繰り返し部では、乾燥時に細孔溶液のアルカリ濃度が表面にて上昇する<sup>2)</sup> ことで ASR が局部的に促進されること、また湿潤環境下で生成されたゾルが一旦乾

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (正会員)

\*2 北陸電力(株) 富山支店常願寺電力部 課長

\*3 金沢大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (正会員)

\*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)



(a) ダム取水口



(b) 砂防堰堤



(c) 防潮水門



(d) サージタンク

写真-1 水利構造物の ASR 劣化事例

燥することでアルカリシリカゲルとなり、吸水することでさらに膨張を生じる<sup>3)</sup>こと、などの理由により、ASRがより促進されることが考えられる。水量調節を目的にしたダムなどでは、ASRが原因でゲートの開閉に支障が生じることもあるので、部材の変形に着目した維持管理が必要になる。

写真-1(b)は山間部の溪流におけるASRと凍害の複合劣化を生じた砂防堰堤の事例である。この地域の凍害危険度<sup>4)</sup>は2(軽微)であり、凍害による劣化程度はそれほど大きくない。しかし、コンクリート表面にASRによるひび割れが発生した場合、この箇所でコンクリート中の水分の凍結融解が繰り返されることにより、コンクリート表面のはく離やはく落が進行していくと考えられる。ASRと凍害の劣化事象は、水の供給や日射条件などの、劣化を促進させる環境条件がほぼ同じであることから、北陸地方の山間部では両者による複合劣化が生じやすいとの認識が必要である。隣接する溪流の砂防堰堤において実施した、総プロ法<sup>5)</sup>による水溶性アルカリ量の分析結果は $1.7\sim 2.4\text{kg/m}^3$ であり比較的低濃度のアルカリ量であった。もともと砂防堰堤は単位セメント量 $230\text{kg/m}^3$ 程度の貧配合コンクリートで打設されており、コンクリートの膨張は長期間にわたり継続しないと考えられる。また、外観上の劣化部位は、堰堤上部の水通し袖部のみが顕著であり、ASR劣化はこの範囲に限定されていた。一方、堰堤本体は水平打ち継ぎ目から溶出消石灰が発生している程度であった。本体コンクリートは自重により膨張が拘束されているのに対して、袖部では上方が解放されているため、この箇所の膨張による劣化が顕在化したものと考えられる。このような砂防堰堤を補修する場合、袖部の劣化部分を打換える方法が、施工性が良く、長期的な確実性も高いと判断した。ASRと凍害による複

合的な劣化は、この北陸地方では白山山麓や立山山麓の標高が高い地域で多く発生しており、構造物の維持管理が実際に喫緊の課題になっている。

写真-1(c)は防潮水門で上下開閉ゲートを支持する柱部材にASRによる劣化が発生したものである。このような施設では、前述したダム施設と同様に、ゲートの開閉機能を維持することがもっとも重要であり、門柱に傾き(変形)が生じていないかを継続的に監視することが必要であった。しかし、門柱への影響がない場合には、まずRC構造物の耐荷力を保持する鉄筋の健全度を確認したうえで、表面のひび割れを通した水分によるコンクリート内部の乾湿繰り返しを抑制するために、セメント系の材料で、ひび割れ注入のみを実施しておくのが適切である。

写真-1(d)はサージタンクに軽微なASRが発生した事例である。サージタンクの形状は地上高33m、上部の内径は8mで壁厚が1m、下部の内径は7mで壁厚が1.5mとなっている。外壁からのアルカリシリカゲルやエフロレンスの滲出は、水頭圧10m以上の壁厚1mの範囲で確認されている。このように水圧がかかるサージタンクでは、ASRで生じた微細なひび割れを通して、コンクリート内からの浸透水の影響を受けるので、劣化が壁厚全体に及んで、次第に進行していくものと考えられる。したがって、水圧が作用する構造物へのASR抑制には水密性の大きなコンクリートを建設時に使用することが求められる。北陸地方では分級フライアッシュによるコンクリートの耐久性向上が進められており、その遮塩性を明らかにするために、実効拡散係数が実験室内で求められている<sup>6)</sup>。普通ポルトランドセメントに内割で15%の分級フライアッシュを混和したものは、普通ポルトランドセメント単体に比べて実効拡散係数が $0.2\sim 0.35$ の割



(e) 取水堰のひび割れ注入と表面被覆



(f) 海中基礎コンクリートの鋼板保護



(g) ため池洪水吐きのひび割れ注入と鉛直鉄筋挿入



(h) サージタンクのケイ酸塩系表面含浸材

写真-2 水利構造物の ASR 補修対策

合で小さくなる事が判明している。水圧が作用する水利構造物を水密性の高いコンクリートとする場合、北陸地方で施工実績を延ばしている<sup>7)</sup>フライアッシュコンクリートによる対策が非常に有効であると考えられる。

2.2 ASR 補修対策の調査

ASR 劣化の補修を実施した水利構造物の代表的なものを写真-2 に示す。それぞれにて左の写真が補修前、右の写真が補修後を現している（ただし、(h)を除く）。写真-2(e)は農業用水のための取水堰で、ひび割れ注入と表面被覆を施したものである。表面被覆材は内部水分のみで膨張する場合や未補修部からの水分補給によって簡単に劣化（水ぶくれや剥がれ）することが多く<sup>1)</sup>、被覆材料の弾性的な性質の消失にともなうひび割れ追従性の低下が指摘されている<sup>8)</sup>。このため、北陸地方において樹脂系材料による表面被覆工の適用はできるだけ避けるのが望ましいと考えている。

写真-2(f)は海水中における無筋の基礎コンクリートで、橋梁の重力式橋台を支持する仮想地盤としての機能を有するものである。コアによる JCI-DD2 法、デンマーク法(飽和 NaCl 溶液浸漬)、海水浸漬法の 3 種類の促進養生試験を実施した結果、いずれの試験でもコンクリートの「残存膨張性が低い」と判断された。しかし、ASR による劣化でコンクリートの内部深くまで大きなひび割れが進展しており、また無筋コンクリートであるために、基礎コンクリートの形状を保持する目的で、アンカーボルトを併用した鋼板による保護工を設けたものである。現在、海水による鋼材腐食の進行を定期的に観測することにより、監視を続けている。

写真-2(g)は農業用水のため池の洪水吐きにある重力式擁壁に水平方向のひび割れが発生したもので、ひび割れ注入と鉛直鉄筋挿入を施した事例である。ひび割れ幅

の最大値は 10mm で、高さの低い無筋擁壁では上向きに膨張力が解放されるために、このような大きなひび割れが発生したものであった。降雨時には洪水調節として、擁壁天端に越流が生じるため、擁壁には流水圧による水平力が作用する。水平方向のひび割れで水平抵抗力が低下しており、これを補う目的で鉛直方向に鉄筋を挿入し補強したものである。擁壁天端から削孔し、鉄筋を挿入して無収縮モルタルを充填することで、擁壁の一体性を保つとともに、ひび割れの進展を抑制したものであった。

写真-2(h)はサージタンクへの ASR 補修対策として、ケイ酸塩系表面含浸材を塗布したが、早期に再劣化した事例である。北陸地方でも 20 年ほど前にこの種の補修材が道路構造物や電力施設などに積極的に使用された経緯があった。このケイ酸塩系表面含浸材については、反応性細骨材を使用した 40mm×40mm×160mm の角柱モルタル試験体にケイ酸塩系表面含浸材を塗布し、50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬し ASR 促進試験を行った結果、含浸材の Na 成分の影響により ASR に対して促進作用があったと報告されている<sup>9)</sup>。実構造物のサージタンクにおいても、ケイ酸塩系表面含浸材の塗布による ASR 抑制効果はまったく発揮されておらず、内部からの浸透水によるひび割れの進展とアルカリシリカゲルの析出により、塗布した含浸材が剥がれ、ASR による再劣化が生じていた。ケイ酸塩系表面含浸材はひび割れ追従性が期待できないので、ASR 劣化した水利構造物へは不相当と判断した。

3. 取水口施設における試験概要

3.1 構造物の概要と水分環境

水力発電所（富山市郊外の平野部に位置し、凍害の影響は小さい）の取水口施設(写真-3)でコアを多数採取し、コンクリートの各種試験を実施した。取水口の形状は地



正面 側面

写真-3 取水口施設

上地中を合わせた内空高が 11.4m、内空幅 10m、壁厚は正面が 2.0m、側面 1.25m の RC 構造である。1985 年より運転を開始しているが、ASR が原因と考えられる劣化が建設後数年で現れていた。外観観察から分かるように、側面の管理用階段の軒下は常時乾燥した状態であり、その他の面は乾湿繰り返し状態となっていた。この水分環境（降雨による雨がかりと水路内の水の浸透）の違いにより ASR による劣化程度にも大きな差が生じていた。この構造物はとくに興味深い事例であったので、水分環境の相違に着目し、乾湿繰り返し部と乾燥部にてコンクリートコア(φ55mm)によるコンクリートの各種試験を実施した。また、コンクリートに使用された川砂利・川砂の河川水系が打設リフトによって異なっており、河川産骨材の産地（常願寺川産（反応性）と早月川産（非反応性）の相違による劣化程度にも注目した。コンクリートコアの採取は、①乾湿繰り返し部（常願寺川産）、②乾燥部（常願寺川産）、③乾湿繰り返し部（早月川産）の 3 箇所で行った（写真-3 の○印）。

### 3.2 各種試験方法の概要

#### (1) 構造物のコンクリート表面水分率

高周波容量式水分計(20MHz)を用い、現地構造物のコンクリート表面の水分率を測定した。測定は上下左右に 20cm 間隔で 15 箇所測定し、その平均値を採用した。一般に、コンクリートの水分率は 0~12% の範囲を示す。

#### (2) コアの残存膨張性

コアの残存膨張性を確認するため、促進養生試験を行った。試験方法は ASTM C 1260（温度 80℃、1N・NaOH 溶液浸漬）に準拠した。コア（φ55mm、L=250mm）に 3 箇所の金属バンドを取り付け、2 つの基点間の膨張量（各基準長：100mm）を一定期間測定した。

#### (3) コンクリートのアルカリ量

コアの一部（厚さ 2 cm 程度のスライスカット片）を切り取り試料調整した後、総プロ法<sup>5)</sup>（温度 40℃ の蒸留水による温水抽出法）にてコンクリート中の等価アルカリ量（水溶性アルカリ量）を算出した。

#### (4) 骨材の岩種構成率

コア側面にて展開写真を撮影し、直径 5mm 以上の骨材を対象に岩種判定を行った。展開写真上にて岩種ご

の面積を集計し、個々の岩石の構成率(%)を算出した。

#### (5) コアの偏光顕微鏡による薄片観察

コアよりコンクリート片（縦 35×横 25×厚 10mm 程度）を切り出し、蛍光樹脂塗料入りエポキシ樹脂で固めた後、薄片（厚さ 20μm）を作製した。また、一部の試料で幅 50×長さ 80×厚さ 10mm 程度の蛍光樹脂を含浸させた断片試料を作製し、表面に発生したひび割れとその深さを紫外線照射することにより観察した。

## 4. 取水口施設におけるコンクリート試験の結果

### 4.1 試験結果と考察

#### (1) コンクリート表面水分率

降雨時および曇天時に水分率を測定した結果を図-1 に示す。乾湿繰り返し部の測定値は、乾燥部に比べて平均で約 5% 大きくなった。また、天候にかかわらず各測定値がほぼ横ばいになったが、これは北陸地方の冬季の気象条件の特徴であると考えられる。

#### (2) コアの残存膨張性

コアの促進膨張試験（温度 80℃ の 1N・NaOH 溶液浸漬）の結果を図-2 に示す。常願寺川産骨材を使用した、ASR 劣化が発生している乾湿繰り返し部および乾燥部のコンクリートは、浸漬 21 日で 0.1% 以上の膨張を示しており、旧道路公団北陸支社の判定基準<sup>10)</sup>によると「残存膨張性有り」と判断された。なお、乾燥部は外観上の ASR 劣化をまったく生じておらず、建設後 30 年近く経過した段階では、今後、水分環境が大きく変化しないかぎり新たに劣化が顕在化する可能性はないと考えられる。コアの促進養生試験の結果から残存膨張性を評価する際には、

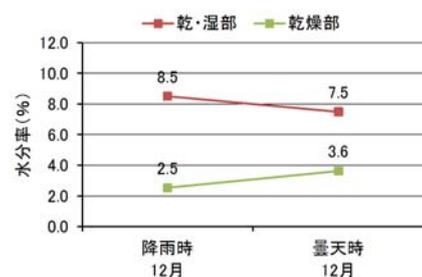


図-1 コンクリート表面水分率

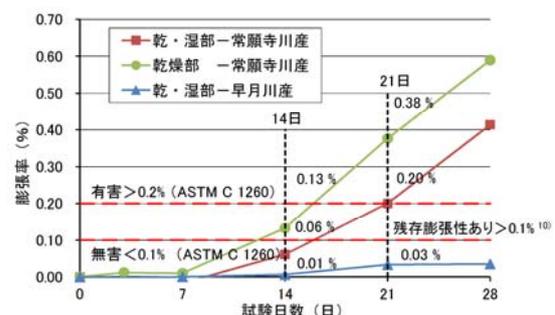


図-2 コアの促進養生試験

実際の使用・環境条件と照らし合わせて、今後のコンクリートの膨張性の有無を判断することが肝要である。

### (3) コンクリートのアルカリ量

コンクリート中の等価アルカリ量（水溶性アルカリ量）を算出した結果を図-3に示す。このアルカリ量にはそれぞれ骨材のアルカリ量を含むことから、アルカリ総量規制  $3\text{kg}/\text{m}^3$ （セメント+混和材料由来のアルカリ）と直接比較できないが、すべてのコアで高いアルカリ量が確認された。これまでの調査結果では、水溶性アルカリ量が約  $2\text{kg}/\text{m}^3$ でも ASR によるひび割れが発生している<sup>11)</sup>ことを考慮すると、ASR 劣化に十分なアルカリ量のあることが明らかになった。乾燥・湿潤下のコンクリートでは、水分の移動にともない、表面部でアルカリの濃縮現象が生じており、その影響を把握することが必要であった。

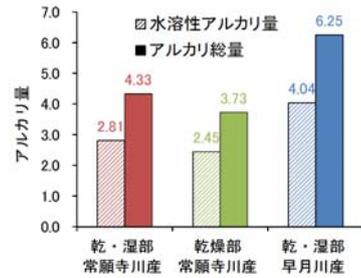


図-3 コンクリートのアルカリ量

### (4) 骨材の岩種構成率

岩種構成率を算出した結果を図-4に示す。常願寺川産と早月川産の骨材では、反応性の高い岩種の安山岩の構成率が大きく異なり、常願寺川産の安山岩の構成率は約30%となった。北陸地方の調査結果では安山岩の構成率が4%以上になると ASR を生じる傾向がある<sup>12)</sup>ことを考慮すると、30%の構成率はペシマム混合率に近いものであった。

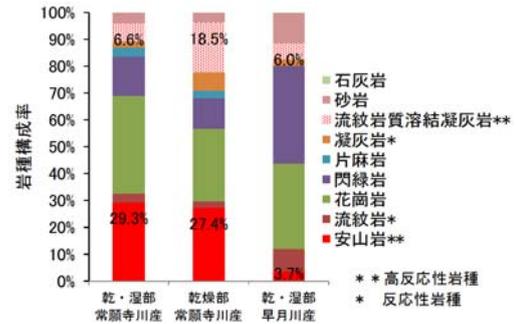


図-4 骨材の岩種構成率

### (5) コアの偏光顕微鏡による薄片観察結果

コアの薄片試料および断片試料の観察結果を写真-4に示す。(i)乾湿繰り返し部(常願寺川産)では、安山岩の砂利や砂がともに激しく反応していた(写真-4(a)(b))。安山岩から発達したゲルがセメントペーストに達し、気泡内にゲルが堆積していた。また、気泡内がエトリンガイドで満たされ、セメントペーストにひび割れを発生させていた(写真-4(c))。富山県内の河川産骨材の中で、常願寺川産の川砂・川砂利の反応は同程度であり、ともに高

い反応性鉱物であるクリストバライトやオパールを含有することが知られている。(ii)乾燥部(常願寺川産)では、安山岩の砂や砂利の骨材周囲に反応リムを発生しているものもあったが、乾燥の影響により骨材からのひび割れは生じていなかった(写真-4(d))。(iii)乾湿繰り返し部(早月川産)では、流紋岩の砂や砂利の骨材周囲に反応リムを発生しているものもあるが、骨材のひび割れは生じていなかった(写真-4(e))。一方、同じ(iv)乾湿繰り返し部(早月川産)の断片試料の蛍光観察では、深さ6cmからのひび割れが構造物表面へ達していた(写真-4(f))。このひび割れは砂利の周囲を介して発生しており(写真-4(g))、また、内部の砂利に発生した ASR が原因と考え

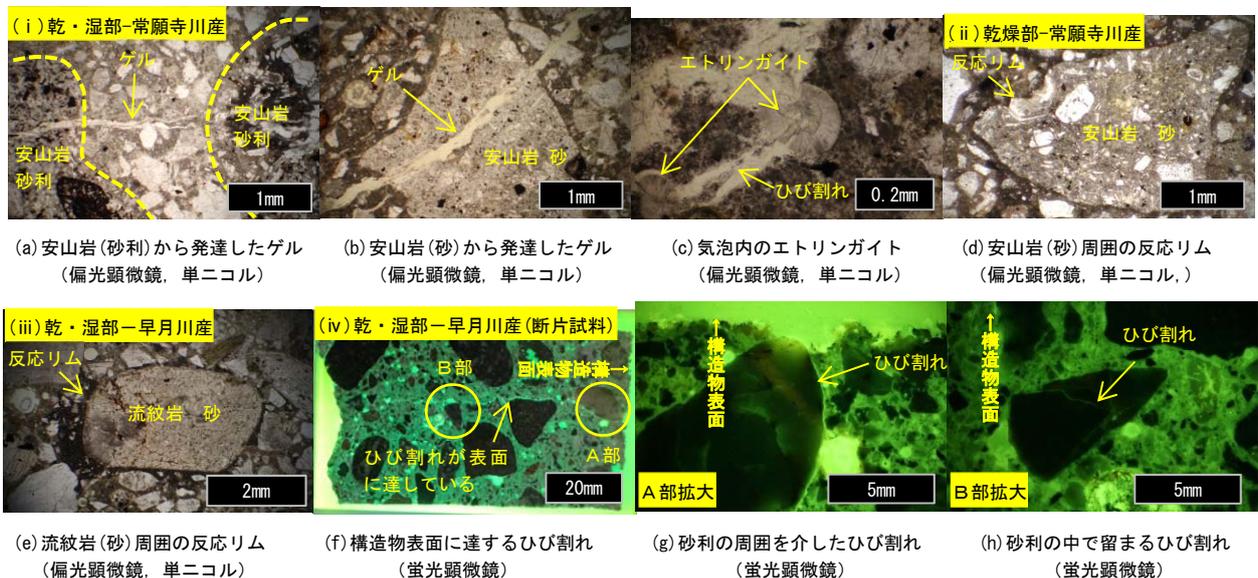


写真-4 コアの薄片試料および断片試料の観察

られるひび割れは砂利のなかで停止しており(写真-4(h)), 砂利のひび割れが構造物表面に発生したひび割れの直接的な原因にはなっていなかった。

#### 4.2 乾湿繰り返し部と乾燥部の劣化の比較

ASR の劣化は、化学反応によってアルカリシリカゲルが形成される過程と、ゲルが細孔溶液を吸収して膨張する物理化学的な過程に分けられる<sup>2)</sup>。取水口施設における反応性の高い安山岩を多量に含む乾湿繰り返し部と乾燥部の薄片観察の結果より、乾燥部ではアルカリシリカゲルの形成過程までであったのに対して、乾湿繰り返し部は膨張・劣化過程まで進行していたことが明らかになった。また、早月川産の骨材を使用した乾湿繰り返し部のひび割れは、コンクリート打設時の沈降ひび割れやその後の乾燥収縮によるひび割れに水が浸透し、ひび割れが進展したものであると推察された。これらの結果より、ASR が発生した水利構造物の乾湿繰り返し部で外観上の劣化が顕著となるのは、アルカリシリカゲルの吸水膨張が原因のひび割れと、初期欠陥などのひび割れへの水の浸透や凍結融解作用によるひび割れの進展などの複合的な作用によるものと考えられた。

#### 結論

北陸地方における ASR を発生した水利構造物の事例調査とコアによるコンクリート試験の結果をまとめると、次のようである。

- (1) 水利構造物の現地調査の結果より、使用・環境条件(雨がかりや内水の浸透)により同一の構造物でも ASR の発生とその進行状況が大きく相違していた。
- (2) 乾湿の繰り返しを受ける水利構造物では、ASR と凍害の共通の促進条件として水分供給があり、構造物の調査・診断にて構造物の内外からの水分供給の影響把握が重要であった。
- (3) 浸透圧が作用する水利構造物では、一旦 ASR が発生するとその後の劣化進行の収束が期待できなかった。このため、新設構造物では、水密性向上と ASR 抑制を兼ね備えたフライアッシュコンクリートの採用が非常に有効であると考えられた。
- (4) 水利構造物の ASR 劣化対策で、ケイ酸塩系表面含浸材が使用された補修事例では、補修後に ASR が促進され、表面改質部に再劣化が生じていた。

#### 参考文献

- 1) 久保善司, 鳥居和之: アルカリ骨材反応によるコン

クリートの劣化損傷事例と最新の補修・補強技術, コンクリート工学, Vol. 40, No.6, pp. 3-8, 2002.6

- 2) 小野紘一, 川村満紀, 田村 博, 中野錦一: コンクリート構造物の耐久性シリーズ アルカリ骨材反応, 技報堂出版, 1986
- 3) Tetsuya Katayama: ASR Gels and Their Crystalline Phases in concrete. Universal Products in Alkali-silica and Alkali-carbonate Reactions, Proceedings of the 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Austin, Texas, USA, CD-R
- 4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, JASS5, 鉄筋コンクリート工事, 1997
- 5) 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, (財) 土木技術センター, 1989.5
- 6) 宮里心一, 鳥居和之, 伊藤 始: 北陸産分級フライアッシュによるコンクリートの遮塩性向上効果に関する地域特性を踏まえた評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No.1, 2013.7
- 7) フライアッシュ・高炉セメントの施工管理について新潟駅付近連続立体化事業: 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所, 2013.11
- 8) 大代武志, 鳥居和之: 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, 2009.1
- 9) 呉 承寧, 郭 度連, 俵 道和, 浜中昭徳: アルカリ骨材反応に対する各種塗布剤の抑制効果に関する研究, 第 40 回セメント・コンクリート研究討論論文集, pp. 65-70, 2013.11
- 10) 野村昌弘, 青山實伸, 平 俊勝, 鳥居和之: 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, 2002.9
- 11) 野村昌弘, 渡辺暁央, 鳥居和之: 砂のアルカリ溶出性状と構造物における骨材からのアルカリ溶出の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.153-158, 2007.7
- 12) 野村昌弘, 青山實伸, 平 俊勝, 鳥居和之: 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, 2002.9