

論文 ASR と凍害による複合劣化を生じた電力土木施設の調査事例

参納 千夏男^{*1}・杉森 学^{*2}・齋藤 匠^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：ASR と凍害による劣化との相関関係を調べることを目的として、北陸地方の山間部の電力土木施設において ASR と凍害に関する調査を行った。その結果、凍害は構造物の端部や打継ぎ部等において部分的に進行する場合が多く、ASR によるひび割れが必ずしも凍害の進行に影響を与えていないことが確認された。また、凍害による劣化が ASR の進行に与える影響に関しても不明確であった。

キーワード：ASR, 凍害, 複合劣化, 電力土木施設, 現地調査

1. はじめに

北陸地方の電力土木施設の内、中小水力発電設備は山間部の高標高に位置することが多く、凍害危険度 3（凍害の予想程度：やや大きい）の範囲に分布するものが多く^{1),2)}、これまで凍害による劣化を受けることがあったが、断面修復やひび割れ補修等により適宜補修してきた。一方、北陸地方では、コンクリート骨材として川砂および川砂利が長年使用されてきたが、その中にアルカリシリカ反応性を示すものが含まれ、アルカリシリカ反応（以下 ASR）による損傷を起こしている道路構造物が多く報告されている³⁾。また、北陸地方の山間部は、ASR と凍害による複合劣化を生じる可能性のある地域の一つに挙げられているが⁴⁾、全国的にも実構造物での ASR と凍害による複合劣化の事例報告は少ないことから^{5),6)}、北陸地方における ASR と凍害による複合劣化の実態を把握した上で、さらに最適な維持管理計画を立てることが望まれる。

本研究は、北陸地方の中小水力発電設備について劣化状況の調査を行い、ASR と凍害による劣化の関連性について 2、3 の考察を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 実構造物における調査概要

(1) 調査構造物の概要

本研究において調査対象とした構造物は、北陸地方（富山県 2 地点 2 箇所、新潟県 1 地点 2 箇所）に位置している。調査対象構造物の概要を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に、それらの外観の劣化状況の一部を写真-1, 2 に示す。これらの構造物は、いずれも凍害危険度 3（凍害の予想程度：やや大きい）の範囲に分布しているが、A 構造物はとくに高標高に位置している。また、使用骨材はそれぞれ位置する河川水系の骨材を使用しており、ASR 反応性が異

表-1 調査対象構造物の概要

	劣化原因	部位	構造	設置標高	骨材の河川水系	建設年 (建設後年数)
A	凍害	アンカー・ブロック	無筋	650m	早月川	1963年 (42年)
B	ASRと凍害	アンカー・ブロック	無筋	380m	常願寺川	1959年 (46年)
C	ASR	擁壁 仕切り壁	RC	380m	鏡川	1982年 (23年)

表-2 コンクリートの配合

	使用セメント	呼び強度 (kgf/cm ²)	Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)
A	普通ポルトランドセメント	180	40	9	4	70
B	普通ポルトランドセメント	180	60	7.5	4	72
C	普通ポルトランドセメント	270	25	15	4	48

*1 北陸電力(株) 土木部土木計画チーム (正会員)

*2 北陸電力(株) 土木部土木技術チーム課長代理

*3 京都大学 工学研究科 (正会員)

*4 金沢大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻教授 工博 (正会員)

なることが予想された。

コアの試験項目は、以下の(2)～(6)に示すものである。

(2) ASR ゲルの生成状況

構造物における ASR 発生の有無を確認するために、採取したコアの割裂面にある骨材粒子周辺の ASR ゲルの生成状況を酢酸ウラニル蛍光法により調べるとともに、骨材周囲に生成した ASR ゲルの形態およびその化学組成を SEM-EDX により計測した。

(3) 反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴

構造物から採取したコアから ASR ゲルが確認された岩種と同種の粗骨材を取り出して、粉末試料を用い X 線回折分析 (XRD, $\text{CuK}\alpha\text{-N}$:フィルター, 40KV-20mA) により、骨材に含まれる含有鉱物を同定した。また、採取したコア表面の粗骨材の目視観察により主要な岩種判定を行った。

(4) コンクリートコアの残存膨張性

構造物から採取したコア ($\phi 55\text{mm}$) を用いて、残存膨張性を評価するために促進養生試験を行った。促進養生の方法として、JCI-DD2 法 (40°C, 100%湿気槽養生) およびデンマーク法 (50°C, 飽和 NaCl 溶液浸せき) の 2 種類の方法を用いた。測定結果は、JCI-DD2 法では、91 日後の膨張率

に対して 0.05%未満を「膨張性なし」、0.05%以上を「膨張性有り」と判定し、デンマーク法では 91 日後の膨張率に対して 0.1%未満を「膨張性なし」、0.1～0.4%を「不明確」、0.4%以上を「膨張性あり」と判定する。

(5) コンクリートの力学的性質

各構造物から採取したコア ($\phi 55\text{mm}$) を用いて、圧縮強度、静弾性係数および超音波伝播速度を測定した。

(6) 凍害深さの推定

最も凍害の影響が顕著であると考えられる高標高の A 構造物において構造物にコアドリルで 2 箇所削孔を行い、コア孔間の超音波伝播速度を測定 (測定間隔: 440mm) し、凍害深さを推定した。また、コアに蛍光染料含有エポキシ樹脂を含浸した後、切断面に紫外線を照射することにより、ひび割れ発生状況を観察し、ASR と凍害による複合劣化のメカニズムについて検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 構造物の外観およびコアの観察結果

(1) A 構造物の劣化状況

A 構造物においては、写真-3 に示すような端部や打継ぎ部においてははく落が見られた。端部

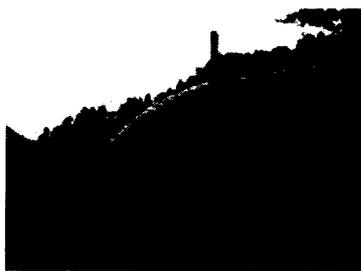


写真-1 A構造物の劣化状況 写真-2 B構造物の劣化状況 写真-3 A構造物のはく落状況

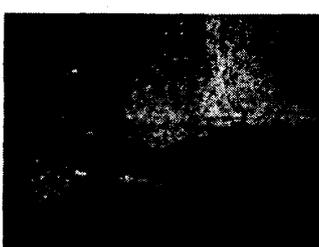


写真-4 B構造物の劣化状況 写真-5 B構造物のはく落状況 写真-6 B構造物のASRゲル状況

や角部においては温度変化が大きいことが指摘されており⁵⁾、凍結融解の繰返しにより凍害による劣化が進んだものと考えられる。また、打継ぎ部においては、ブリーディングの影響により脆弱部が形成されたため劣化が進んでいることが考えられる。いずれの場合も、凍害は水がかりのあるところでしか発生しないことから、劣化部は、水分が供給され易い部分であったことが推察される。

(2) B 構造物の劣化状況

B 構造物においては、ASR 劣化により、亀甲状のひび割れが全面に観察されたが(写真-4 参照)、ひび割れのほとんどは、遊離石灰により充填されていた。また、A 構造物と同様に端部や打継ぎ部においてははく離が見られた。(写真-5 参照) 端部に近い所で採取したコアでは、表層部において、はく離の発生が観察された。また、コア内部では、大きなひび割れの発生が観察された。コア採取箇所の状況より、B 構造物においては、ASR と凍害による複合劣化が進んでいるものと考えられた。

(3) C 構造物の劣化状況

a. 擁壁

擁壁においては、全面に亀甲状のひび割れが観察されたが、A、B 構造物で見られたようなはく離は見られなかった。これは、C 構造物は B 構造物と同じ標高であるが、北側斜面に位置し、日射や水の影響を受けることが少なく、凍結融解の繰返しが少ないために凍害による劣化が進行せず ASR による劣化のみが進行しているためであると推察される。

b. 仕切り壁

仕切り壁においては、天端中央にひび割れが見られた。コア内部には、空隙にゲルが充填さ

れているのが観察されたことより、ASR による膨張により天端にひび割れが生じたものと考えられた。また、北側斜面に位置し、擁壁と同様、凍害による劣化は見られなかった。

3.2 ASR ゲルの生成状況

(1) 酢酸ウラニル蛍光法による観察

酢酸ウラニル蛍光法によりコアの破断面における ASR ゲルの生成状況を確認した。その結果、B 構造物、C 構造物(擁壁、仕切り壁)の骨材界面において発光が見られたことから、これらの構造物においては、ASR が劣化の一因になっていると判定された。B 構造物のコアの破断面においては、粗骨材のみに ASR の発生が見られたのに対し、C 構造物のコアの破断面においては、粗骨材、細骨材ともに ASR の発生が見られた。

(2) ASR ゲルの化学組成

ASR ゲルの SEM による観察結果を写真-6 に示す。B、C 構造物の安山岩骨材の周囲に生成した生成物の化学組成は、B 構造物(SiO_2 : 50.0%, Na_2O : 6.6%, K_2O : 6.8%, CaO : 32.2%), C 構造物(SiO_2 : 43.0%, Na_2O : 12.8%, K_2O : 0.5%, CaO : 34.8%) であり、ともに典型的なアルカリ-カルシウム-シリカ型のゲルであった⁷⁾。この

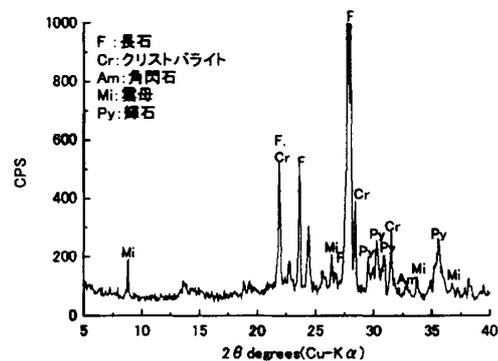


図-1 岩石のX線回折図(B構造物:安山岩)

表-3 コンクリートに使用された粗骨材の岩種構成

	岩石学的特徴
A	花崗岩、閃緑岩が主要な岩種であり、安山岩はほとんど含まれていない。
B	花崗岩、砂岩、閃緑岩が主要な岩種であり、安山岩も多く含まれている。
C	流紋岩質凝灰岩、蛇紋岩、花崗岩が主要な岩種であり、安山岩粒子も少量含まれている。

生成物は、使用骨材の種類に関わらず頻繁に観察されるものであり、乾燥に伴って半透明～白色化するものが多いとされている。B構造物、C構造物においては、これらのASRゲルの生成が劣化の一因であることが明らかとなった。

3.3 反応性骨材の岩石・鉱物学的特長

コアから取り出した粗骨材のX線回折分析の結果を図-1に示す。B構造物の安山岩、C構造物の安山岩中には、反応性鉱物としてクリストパライト、火山ガラスが同定された。また、B構造物、C構造物におけるコアの粗骨材岩種構成を表-3に示す。北陸地方の河川産骨材を使用した構造物においては、安山岩の含有率が多いほど構造物の劣化度が大きい傾向にあり、安山岩の含有率が4%を超えると実際にASRによる損傷が発生していたことが報告されている³⁾。B構造物の粗骨材中には、安山岩粒子が多く含ま

れており、経過年数も長いことから、B構造物はC構造物に比べて劣化が進んでいたと考えられる。

3.4 コンクリートコアの残存膨張性

構造物から採取したコアの促進養生試験の結果を図-2、3に示す。JCI-DD2法では、いずれの地点のコアも「膨張性なし」と判定されたが、C構造物(擁壁)はB構造物およびC構造物(仕切り壁)よりも膨張率が大きかった。一方、デンマーク法でも、C構造物(擁壁)ではB構造物およびC構造物(仕切り壁)よりも膨張率が大きかったが、判定は「不明確」であった。B構造物は、経過年数が長く、ASR反応がほぼ収束していると考えられる。一方、C構造物においては、外部からアルカリ分の供給がない条件では、今後もASRは進行しないと考えられる。

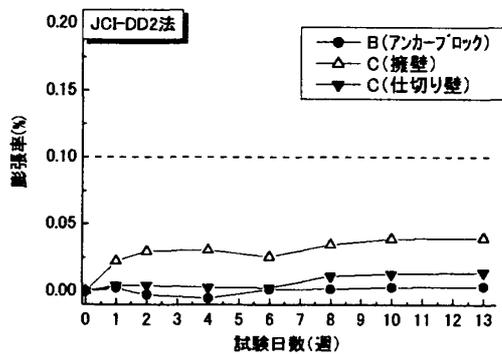


図-2 コアの残存膨張量 (JCI-DD2法)

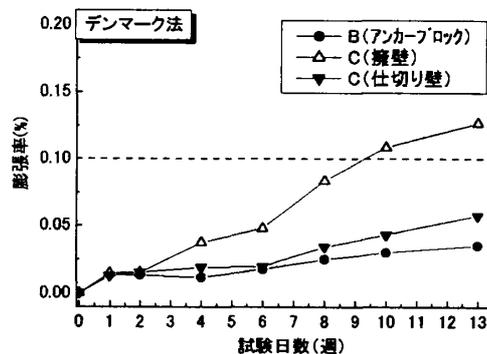


図-3 コアの残存膨張量 (デンマーク法)

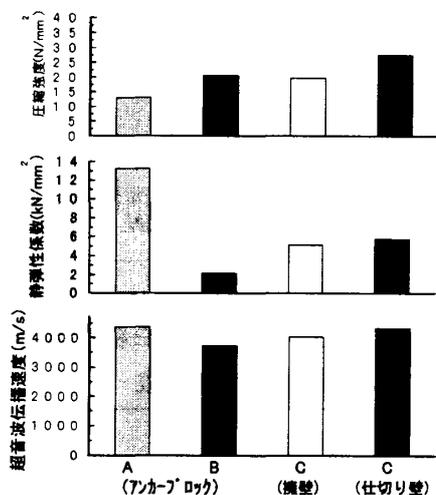


図-4 コアの力学的性質

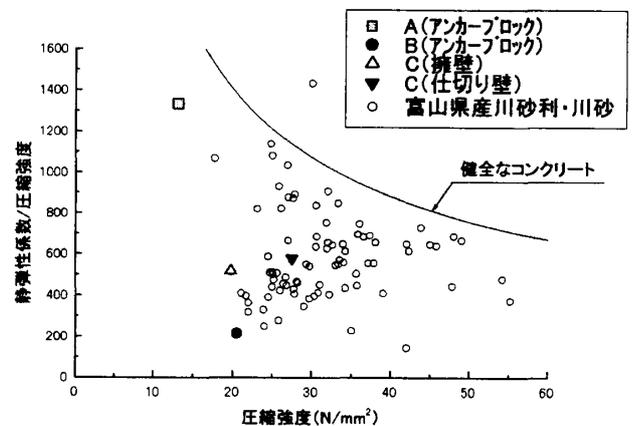


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.5 コンクリートの力学的性質

構造物から採取したコアの力学的性質を図-4に示す。A構造物においては、静弾性係数は大きく、凍害による影響は表面にとどまっていることが考えられた。一方、B、C構造物においては、静弾性係数は低下しており、特にB構造物の低下が著しかった。超音波伝播速度の値は、A、B、C構造物ともに大きな差はなく、ASR劣化度の判定には適さないことがわかった。図-5にコアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度比との関係を示す。この図には、富山県内においてASR劣化を生じた電力土木施設以外の構造物のデータ（河川産骨材使用）も加えている。ASRにより劣化したコアは、圧縮強度の低下に比較して静弾性係数の低下が大きいことが知られており、この図より判断すると、B構造物はC構造物に比べてASRによる劣化度が大きいこと、A構造物は、他のコアと異なる点にプロットされていることから、ASRによる劣化は生じていないことが推察される。

3.6 凍害深さの推定

A構造物の側面中央部におけるコア孔間の深さ方向(0～350mm)の超音波伝播速度は、4,500m/sec程度(4,596m/sec～4,440m/sec)の比較的高い値で安定しており、深さ方向に差がほとんどないことより、測定した側面中央部は、深部では凍害による劣化をほとんど受けておらず、A構造物における凍害による劣化は、ごく表層部と端部や打継ぎ部において部分的に起こっていることが明らかとなった。

また、B構造物において採取したコア（写真-7参照）の切断面の観察状況を写真-8に示す。



写真-7 B構造物の採取コア状況（蛍光樹脂含浸後）

写真-8に見られるように表面から平行に層状のひび割れが4～6mm間隔で6層、32mmの深さまで入っている。ひび割れ幅は0.1～0.5mmで表面に近い方が大きい傾向であった。また、層状のひび割れから離れた位置（深さ65mm）にもひび割れが見られた。コア表面に観察された亀甲状のひび割れは、切断面においては1層目で止まり、遊離石灰により充填されていたため、蛍光しなかった。以上のことから、コア切断面の観察により、B構造物においては、ひび割れ間隔が6mm程度、凍害最大深さが65mmと推定され、今後補修する場合は100mm程度の断面修復が必要であることがわかった。

土木学会では、コンクリート構造物の耐久性照査として、凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値が規定されている。また、相対動弾性係数を満足するための最大水セメント比として、65%(気象条件：激しい、断面：一般の場合、構造物の露出状態：普通の状態)が規定されている⁸⁾。A、B構造物は、水セメント比が65%以上であり、凍害を受け易かったことが考えられることから、凍害対策としては、水セメント比を重視した配合を選択すべきであると言える。

3.7 ASRと凍害による劣化の関連性

調査結果により、調査地点の劣化原因は表-1のように推定され、B構造物においては、ASRと凍害による劣化が生じており、A構造物で見られた凍害による劣化の特徴、C構造物で見られたASRによる劣化の特徴が同時に観察された。

今回調査した範囲では、凍害による劣化の特徴としては、表面から層状にはく離が発生する

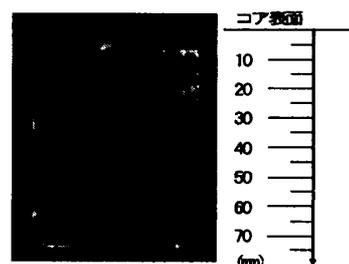


写真-8 B構造物のコアの切断面発色状況

こと、はく離が発生している範囲は表層部に限られており端部に近い範囲で特に多く見られたこと、端部や打継ぎ部においてははく落が進行していたことが挙げられる。一方、ASRによる劣化の特徴は、劣化が局所的ではなく広範囲に見られたことである。これは、ASRによる劣化は、構造物内部で膨張が発生することから、ある程度の水分条件があれば凍害に比較して広い範囲で劣化が表面に現れるためであると考えられる。特に表層部に反応性骨材が存在する場合は、ポップアウトなどが進行することが考えられるが、今回の調査地点では、凍害を促進させているようなポップアウトは見られなかった。反応性の高い安山岩粒子が含まれる場合には、著しいポップアウトが見られ、凍害を促進することが考えられ、注意が必要である。また、凍害により劣化した表層にASRによる内部膨張によりひび割れが入った場合、はく離が進むことが考えられたが、前述したようにASRによるひび割れは、遊離石灰により充填されており、表層のはく離は促進されていなかった。

以上のことより、今回調査した構造物においては、ASRと凍害では劣化進行は水の供給を受ける環境下で促進されるという共通する環境要因があるが、劣化の特徴が異なることから、互いに劣化を促進させている明確な関連性はなかった。

4. 結論

本研究で得られた主な結果をまとめると、以下のようである。今回得られた知見は、今後の構造物の維持管理に活かしていきたい。

(1)凍害の進行は、端部や打継ぎ部等において部分的に進行するケースが多く、ASRが同時に発生していても遊離石灰が充填されている場合には凍害に対する弱部となっておらず、ASRと凍害との複合劣化の関連性はなかった。

(2)これまで報告事例のない、凍害による層状ひび割れが発生する劣化形態が確認された。

(3)コンクリートに蛍光塗料を含浸させ、内部の観察をすることにより凍害深さの推定が可能であった。

(4)コアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度比との関係よりASRによる劣化を受けているか否かの推定が可能であった。

謝辞：試験に協力いただいた、㈱クエストエンジニアの皆様へ感謝いたします。

参考文献

- 1) 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 2003, pp.542-545, 2003
- 2) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案, セメント技術年報, Vol.29, pp.294-253, 1975
- 3) 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, 日本コンクリート工学協会, コンクリート工学論文集, 第13巻第3号, pp.105-114, 2002
- 4) 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.63-64, 2001
- 5) 山下英俊, 境孝司, 佐伯昇：コンクリート構造物の凍害発生要因に関する研究, 土木学会論文集 No.602/VI-40, pp.93-105, 1998
- 6) 鍵本広之, 前田哲宏, 川村満紀：アルカリシリカ反応と凍害の複合劣化特性, 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.215-220, 1999
- 7) 小林一輔, 丸章夫, 立松英信：アルカリ骨材反応の診断, コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ2, 森北出版株式会社, pp.44-49, 1991
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編], pp.81-82, 2002