

論文 ASR が発生したコンクリート構造物の耐久性調査

池富 修*1・大深 伸尚*2・久保 善司*3・鳥居 和之*4

要旨: アルカリシリカ反応(ASR)が発生したコンクリート構造物(橋台, フーチングおよび砂防ダム堤体)の耐久性調査を実施した。これらの構造物は、いずれも水の影響を長期にわたって受けており、ASRによるひび割れの発生が顕著であるとともに、コンクリートの強度低下、鉄筋の腐食や破断などの大きな損傷が確認された。コアの促進膨張試験および強度試験の結果より、水の影響を常時受けた構造物のASRによる損傷度および膨張予測を反応性骨材の使用形態と環境条件との関係より評価することができた。

キーワード: ASR, 調査・診断, 使用環境条件, コアの促進膨張試験, 補修・補強設計

1. はじめに

従来、ASRが発生したコンクリート構造物では、ひび割れによる鉄筋腐食が主要な問題とされ、外部からの水分の浸入を防ぐために、構造物の表面塗装処理が実施されてきた。最近の調査結果より、橋台や基礎構造物などの構造物では、土中水の影響によりASRによる膨張が長期にわたって継続するために、表面塗装処理だけでは十分なASRの抑制効果を期待できないことが分かってきた。また、これらの構造物では、過大な膨張が発生した時に、コンクリートの強度低下、かぶりコンクリートの剥離・剥落、鉄筋の破

断などの大きな損傷が生じる可能性があり、構造物の調査・診断の際にこれらの事項に留意する必要があることが指摘されている¹⁾。しかし、ASRが発生した構造物の現況調査の結果は公表されているものが少なく、水の影響を常時受けた構造物の損傷の実態は必ずしも十分に把握されているとは言いがたい²⁾。

本論文は、水の影響を常時受けたASR損傷コンクリート構造物の耐久性調査より、過大な膨張が発生した構造物の性能低下に及ぼす各種要因の影響について検討したものである。

表-1 調査対象コンクリート構造物の概要

構造物の種類	供用期間(年数)	環境条件*			骨材の使用形態および反応性骨材の混入率**	コンクリートの品質	
		温度変化	日射の影響	水の浸透		骨材寸法(mm)	f'ck(N/mm ²)
橋台	25	大	中	背面土砂	川砂利と両輝石安山岩碎石の混合物(約50%)	25	24
フーチング	20	小	小	地下水	両輝石安山岩碎石単独(100%)	25	24
ダム堤体	29	大	大	貯留水	川砂利の中に安山岩及び流紋岩が混入(約20%)	40	21

* 調査構造物の存在する地域では凍結融解による被害は報告されていない。

** 細骨材にはいずれも反応性粒子を含有しない川砂が使用されていた。

*1 (株)中研コンサルタント (正会員)

*2 アルスコンサルタンツ(株)取締役社長 工修(正会員)

*3 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 工博(正会員)

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博(正会員)



写真-1 橋台の損傷状況
(塗膜の再劣化, 錆汁)



写真-3 ダム堤体の損傷状況
(ひび割れ, 剥離・剥落)



写真-2 フーチングの損傷状況
(ひび割れ, 鉄筋の破断)

布される凍結防止剤の影響を受けていたが、フーチングは地表下であり、凍結防止剤の影響は直接には受けていなかった。しかし、ASRによるひび割れが多数発生するとともに、端部の曲げ加工部で鉄筋(D19, SD295A, 鉄筋間隔250mm)が破断していた(写真-2参照)。

ダム堤体は無筋コンクリートの砂防ダムの堤体である。ダム堤体は貯留水の浸透を常時受けており、日射を受ける前面には亀甲状のひび割れが進展しており、かぶりの剥落も観察された(写真-3参照)。

2. 調査概要

2.1 調査構造物の劣化状況

調査を実施したコンクリート構造物の概要を表-1に示す。橋台はRCラーメン橋(昭和50年建設)であり、エポキシ樹脂による表面塗装が実施されていたが、背面土砂からの水分供給によりASRが進展し、塗膜の亀裂発生および構造物の再損傷が生じていた(写真-1参照)。本橋では長年にわたって凍結防止剤が散布されており、ひび割れを通して浸透した塩分の影響で、橋台の上部の鉄筋が激しく腐食するとともに、ASR膨張により側面の鉄筋(D16, SD295A, 鉄筋間隔250mm)の一部が曲げ加工部で破断していた。

フーチングはプレテンションPC桁橋(昭和55年建設)の橋脚基礎部である。柱部は冬季に敷

2.2 調査項目

調査対象構造物より、貫通コア(直径55mm)を、橋台の横梁(4本)、フーチングの中央部(2本)およびダム堤体の上部(4本)より採取し、表面から内部におけるASRゲルの生成状況および損傷度の相違を目視観察および酢酸ウラニル蛍光法にて調べた。その後、コアを切り出し、化学成分分析(アルカリ量:原子吸光光度法, 塩化物イオン含有量:2Nの硝酸溶解, 電位差滴定法), 力学的試験(圧縮強度, 弾性係数, 超音波パルス速度)および促進膨張性試験(デンマーク法:50℃の飽和NaCl溶液浸漬法, カナダ法:80℃の1N・NaOH溶液浸漬法)に供した。また、ASRゲルの形態およびその化学組成を走査型電子顕微鏡およびエネルギー分散型X線回折装置(SEM・EDXA)により調べた。

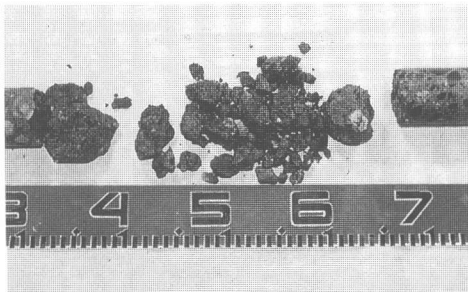


写真-4 橋台より採取した
コアの破碎状況

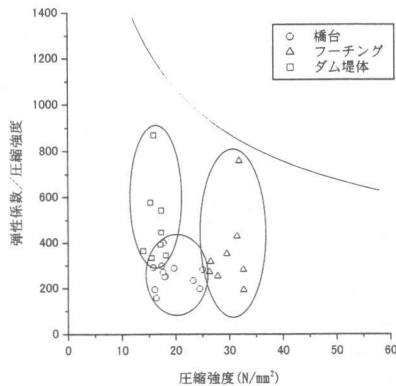


図-1 コアの圧縮強度と弾性係数の関係

3. 測定結果および考察

3.1 コンクリートの損傷状況

常時水の影響を受けたコンクリート構造物では、表面のひび割れだけでなくコンクリートの内部で大きな損傷が発生していた。すなわち、橋台では、コアが10~20cm間隔で破断するとともに横梁の中央部にてコンクリートが破壊しているのが観察された(写真-4参照)。これはASRによる過大な膨張力によるものであり、コア採取時に拘束が開放された結果、破壊が発生したものである。一方、フーチングでは、橋脚基部の鉄筋拘束の大きいところからコアを採取したため、20~30cm間隔でコアが破断していたが、コアの状況は比較的健全であった。また、無筋コンクリートであるダム堤体では、表面に数mm

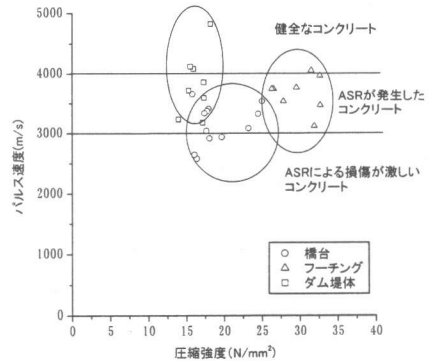


図-2 コアの圧縮強度とパルス速度の関係

幅の大きなひび割れが発生するとともに、表面(下流側)から1m位内部にまで破損を伴う損傷が発生していた。

3.2 圧縮強度、弾性係数および超音波パルス速度

コアの圧縮強度と弾性係数の関係を図-1に示す。ASRによる損傷度が大きくなるにつれて圧縮強度に対する弾性係数/圧縮強度の比が小さくなることが知られている³⁾。今回調査した構造物はコアの強度が設計基準強度を下回るものが多く存在するとともに、弾性係数/圧縮強度が全体にかなり小さくなっていることが特徴である。特に、橋台から採取したコアは他のものに比べて弾性係数の低下が非常に顕著であった。

構造物の強度をコアの強度試験の結果より推定する際には、比較的長いコアを採取して、内部の破壊の有無を確認すること、および強度試験に用いたコアは比較的健全な箇所から採取されているものであること、に留意すべきである。

コアの圧縮強度と超音波パルス速度の関係を図-2に示す。ASRが進行し、コンクリートに微細なひび割れが多数発生するとともに、コアの超音波パルス速度は低下する傾向があるが、両者の関係は構造物ごとに相違しているのが認められた。全体の傾向として、ASRが発生した

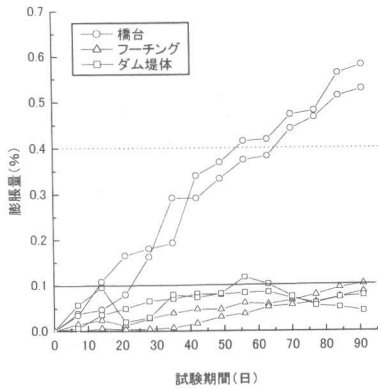


図-3 残存膨張性試験の結果
(飽和 NaCl 溶液浸漬法)

構造物では超音波パルス速度が 3500m/sec 以下の値を示すものが多くなり、さらに破損を伴う大きな損傷が発生した橋台およびダム堤体では図-2に示すように 3000m/sec 以下の値を示す場合があった。

3.3 残存膨張量

コアのデンマーク法およびカナダ法の結果を図-3および図-4に示す。カナダ法およびデンマーク法で大きな膨張量を示した橋台のコアには、コンクリート中に反応性骨材が多量に残存しており、今後ともアルカリが供給される環境下では大きな残存膨張を示す可能性が高い。一方、フーチングおよびダム堤体からのコアは全体に膨張量が小さく、かつ比較的早期に収束しているため、膨張する可能性は小さい。しかし、カナダ法およびデンマーク法の判定基準は、骨材のアルカリシリカ反応性の値 (ASTM C1260) を準拠したものであり、コアの残存膨張性に対して明確な基準値が定められてはいないので、構造物の損傷と残存膨張量の関係のデータを蓄積が必要である。

コンクリートの塩化物イオン量およびアルカリ量の測定結果を表-3に示す。ダム堤体では、アルカリシリカ反応の進行、浸透水によるアルカリの溶出の影響でアルカリ量が小さくなり、骨材中の反応性粒子のASR反応はほぼ終了していると判断できる。一方、安山岩砕石を使用した橋

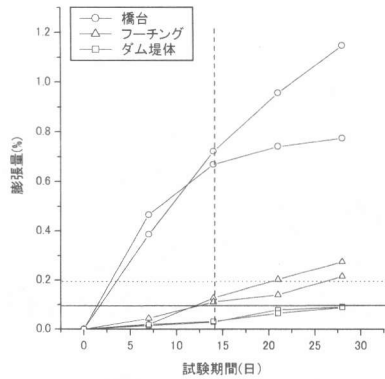


図-4 残存膨張性試験の結果
(1N・NaOH 溶液浸漬法)

台およびフーチングではアルカリ量が 7.1kg/m^3 および 10.3kg/m^3 とかなり高くなっている。橋台、フーチングで用いた安山岩砕石は結晶度の低いガラス質安山岩で、火山ガラスは多量のアルカリ(約7%)を含み、化学的に不安定であることが知られている。橋台やフーチングのアルカリ量の測定結果が大きくなったのは、試料の煮沸処理中に骨材中の火山ガラスから多量に溶出したアルカリの影響によるものと思われる⁴⁾。

3.4 ゲルの形態と化学組成

骨材の周囲に形成されたASRゲルの形態を写真-3(a, b, c)に示す。走査形電子顕微鏡観察の試料作製では、真空乾燥が行われるため、水あめ状のASRゲルが脱水された結果、表面にひび割れが多数発生している(写真-3 a)。一方、ASRゲルは材齢が進むにつれて周囲のセメントペーストからカルシウム分を取り込み、アルカリ・カルシウム・シリカゲルに変化するとともに、ASRゲルの結晶化が進行する(写真-3 b)。また、反応が進行した段階で見られる、

表-3 コンクリートの塩化物イオン量
およびアルカリ量 (kg/m³)

	塩化物イオン量	Na ₂ O	K ₂ O	等価アルカリ量
橋台	0.52	4.53	3.83	7.05
フーチング	1.75	6.38	5.93	10.28
ダム堤体	0.24	2.22	1.59	3.27

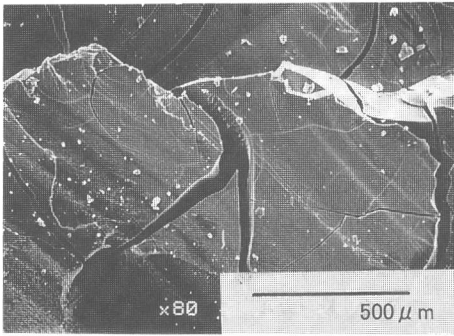


写真-3a アルカリシリカゲルの形態

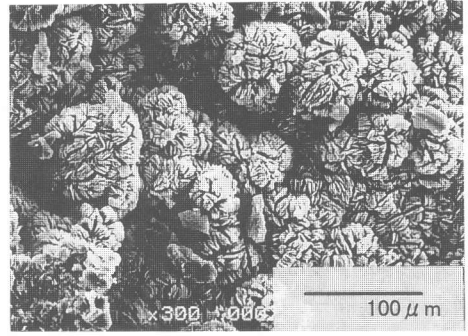


写真-3c ラメラ状のゲルの形態

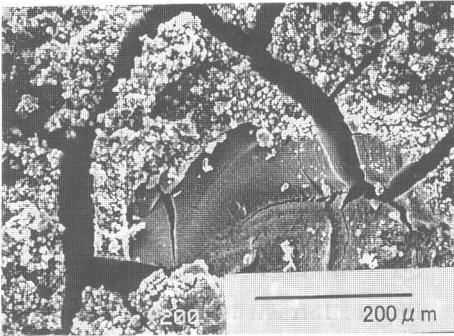


写真-3b 結晶化の進んだゲルの形態

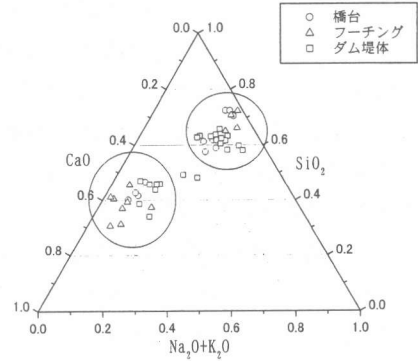


図-5 SEM-EDXA分析結果

SRゲルも存在する(写真-3c). しかし, ASRゲルの形態およびその結晶化が構造物のASRによる損傷度とどのように関係しているかは不明である.

アルカリシリカゲルの組成とモルタルの膨張性との関係を検討したの研究では, ゲル中のアルカリ量が少なくなり, カルシウム量が多くなると, ゲルの剛性が大きくなり, モルタルの膨張性が低下すると指摘している⁵⁾. SEM-EDXA分析によるASRゲルの化学組成分析の結果を図-5に示す. ASRゲルの化学組成分析はかなりばらつくので, 安山岩粒子(5mm程度)の骨材界面に存在するゲルを対象にして7~8箇所にて点分析(定量分析)を実施した. 図-5に示すように, 調査構造物から採取したコアのASR

ゲルの化学組成は大きく2つに分類できる. 1つは, アルカリ分を15~30%含有し, カルシウム分が比較的少ないものであり, もう1つは, アルカリ分が0~20%と少なく, カルシウム分を40~60%程度と多く含むものである. 前者はアルカリ分が多い, 膨張性を示すゲルであり, 後者のものはカルシウムを多く取り込み, 結晶化が進んだもので, 非膨張性のゲルであると推測される. 調査構造物によるASRゲルの化学組成の相違を見ると, 橋台には前者のゲルが多く, フーチングには後者のゲルが多いことが分かる. また, ダム堤体には両者のゲルが等しく含まれている. このように, ASRゲルの化学組成とコンクリートの膨張性との間にはある程度関係が認められた.

4. 補修・補強設計

橋台はRCラーメン橋の一部であり、橋台の横梁部は常時および地震時に所定の耐荷力が要求される構造部材であった。一方、横梁より採取したコアによる調査では、ASRが進行中であり、コンクリートの残存膨脹性と強度低下が認められた。補強の基本的考え方として、現橋の橋台コンクリートの強度は設計上考慮せず、新設する増し打ち鉄筋コンクリート部ですべての荷重を負担するものとした。また、ASRによる膨脹を拘束する目的と、増し打ちコンクリートと現況コンクリートを一体化させるために、PC鋼棒を降伏荷重の1/3で緊張し、プレストレストを導入した。また、フーチングでの鉄筋破断に対する補強方法は確立されていない。このため、鉄筋の破断箇所を詳細に調査した後に、応急的な措置として破断箇所に添え筋を施し、ポリマーセメントモルタルにて断面修復を行った。

一方、砂防ダム堤体では、損傷を受けた堤体を取り壊して、新たに打設する方法が最も容易であり、経済的にも優れることが多い。しかし、大量のコンクリート廃材が発生するため、できるだけ現在の構造物を利用する構造形式を検討した。このため、乾燥湿潤作用を受け、ひび割れが発達した前面部はコンクリートを新たに打設することにした。水面側の背面は、ひび割れに樹脂を注入した後に、伸び能力がある表面被覆材で表面塗装処理することにしたが、常時水の影響を受ける環境下では、長期にわたる補修効果は期待できないと判断された。

5. 結論

本調査で得られた主要な結果をまとめると次のようである。

(1) 今回調査した構造物では、長期間にわたる水の影響でASRが促進されており、コンクリートの内部劣化や鉄筋の破断のような大きな損傷が発生した。

- (2) カナダ法およびデンマーク法によるコアの膨脹は同様の傾向を示し、骨材のアルカリシリカ反応性およびコアの残存膨脹性を評価することができた。
- (3) 安山岩砕石が使用されたコアのアルカリ量の測定においては、骨材からのアルカリの溶出を考慮する必要があった。
- (4) 構造物から採取したコアの化学組成は、アルカリ量とカルシウム量との関係で2つに分類でき、コアの残存膨脹性との関係が認められた。
- (5) 常時水の影響を受ける構造物の補修・補強は、背面土砂または地下水からの水分の遮断を検討する必要があった。

参考文献

- 1) 土木学会・コンクリート標準示方書「維持管理編」, 2001.
- 2) A.Shayan, Characterization of AAR-Affected Concrete from a Dam Structure for Rehabilitation Purpose, Proc of Infrastructure and Rehabilitation Improving the Quality of Life through Better Construction, Sheffield, pp.777-787, 1999.
- 3) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二: 圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.4.60, pp.151-154, 1993.
- 4) Mcrc-Andre Berube et.al.: Measurement of the Alkali Content of Concrete Using Hot-Water Extraction, Proc. of 11th Inter. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, pp.159-168, 2000.
- 5) 荒野憲之, 川村満紀, 寺島努: アルカリシリカ反応におけるカルシウムの役割, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1057-1062, 1999.