

論文 鉄筋コンクリート堤体の耐久性調査

大深伸尚*1・鳥居和之*2・池富修*3・川村満紀*4

要旨:アルカリシリカ反応 (ASR) による損傷が認められた鉄筋コンクリート堤体の耐久性調査を実施した。鉄筋コンクリート堤体では、貯水池の水の影響で ASR が促進されており、調査を実施したすべての箇所でも堤体内部のコンクリートの強度低下が確認された。また、鉄筋コンクリート堤体の天端付近では、鉄筋が曲げ加工部で破断しており、端部より斜め方向に大きなひび割れが発生しているのが観察された。さらに、コンクリートコアの残留膨脹性試験の結果より、約 20 年が経過した鉄筋コンクリート堤体では、ASR はほぼ終了しており、コンクリートの残留膨脹性が小さいことが明らかになった。

キーワード: ASR, 貯水池ダム堤体, 耐久性調査, 残留膨脹性, ゲルの組成分析

1. はじめに

ASR が発生したコンクリート構造物の補修・補強が重要な課題になっているが、その際には現時点での ASR による損傷の評価と将来における劣化予測を行なうことが必要になる。特に、ダムなどの水利構造物は、水の供給を常時受けるので、ASR が一旦発生すると大きな損傷が発生するとともに、損傷を受けた構造物の補修・補強にも多大な困難が伴うことが予想される。実際に、アメリカやオーストラリアの事例では、ASR が発生したダム堤体では長期にわたって膨脹が継続することが報告されている¹⁾。今回、調査を実施した鉄筋コンクリート堤体は、山間部に位置する小規模の貯水池ダムにあり、約 20 年を経過した鉄筋コンクリート堤体には ASR によるひび割れが多数観察された。

本研究は、ASR による損傷を受けた鉄筋コンクリート堤体の耐久性調査より、使用骨材の種類と反応性鉱物の特徴、コンクリートの品質と残留膨脹性について調べるとともに、貯水池ダムの使用および環境条件が ASR によるコンクリートの損傷度に及ぼす影響について 2, 3 の検討を行った。

2. 調査概要および試験項目

本調査を行った貯水池ダムのコンクリート堤体は、高さ 14m, 幅 50m の逆 T 式堤体と重力式堤体の 2 つの構造形式によって構成されている。この地域では積雪も比較的少なく、凍結融解作用による損傷や、融雪剤や海水などの外部からの塩分浸入の可能性もないために、調査対象堤体の損傷は ASR によるものではないかと推定された。

鉄筋コンクリート堤体の試験項目の詳細を表 1 に示す。コンクリートに使用された反応性骨材の種類を調べるために、コンクリート塊より取り出した粗骨材の X 線回折分析および化学法 (JIS A 5308-1989) を実施した。その結果、骨材には川砂と両輝石安山岩砕石が使用されており、安山岩砕石は火山ガラスとクリストバライトを反応性鉱物として含有することが判明した。また、化学法の結果 ($R_c : 86 \text{ m mol/l}$, $S_c : 883 \text{ m mol/l}$, $S_c/R_c=10.3$) より、使用された安山岩砕石のアルカリシリカ反応性はかなり高いものと推定された。

現地調査としては、ひび割れ、変色、ゲルの滲出などの目視調査を実施するとともに、コンクリ

*1 アルスコンサルタンツ (株) 取締役社長 工修 (正会員)

*2 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

*3 金沢大学大学院 自然化学研究科

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

表-1 測定項目および測定方法の詳細

| 測定項目 | 測定方法 | | |
|---------------|------------|--|---|
| 骨材に関する試験 | 反応性鉱物の同定 | コンクリート塊を希塩酸で溶解した後、骨材を取り出し、粉碎した試料についてX線回折および骨材の化学法（JISA5308-1998）を実施した。 | |
| | ASRゲルの生成状況 | 酢酸ウラニル蛍光法 | 酢酸ウラニル蛍光法によりASRゲルの生成状況を観察した。 |
| | | 走査型電子顕微鏡（SEM-EDXA） | 骨材に生成したゲルの観察およびASRゲルの組成分析を実施した。 |
| コンクリートコアによる試験 | アルカリ量 | 150~300 μ mに粉碎した試料2gを蒸留水20mlに混合し、10分間煮沸した後、濾過液のアルカリ濃度（Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ ）を原子吸光度法により測定した。 | |
| | 力学的性質 | 貫通コンクリートコアより切り出した試験体（ ϕ 55mm、長さ110mm）にて圧縮強度、弾性係数および超音波パルス速度を測定した。 | |
| | 残留膨張性 | 飽和NaCl溶液浸せき法 | コンクリートコア（ ϕ 55mm）を温度50 $^{\circ}$ Cの飽和NaCl溶液に浸せきし、膨張量の経時変化を測定した。 |
| JCI-DD2法 | | コンクリートコア（ ϕ 55mm）を温度40 $^{\circ}$ C、湿度100%の条件にて膨張量の経時変化を測定した。 | |

表-2 コンクリートの劣化状況の比較

| | | 環境の影響 | | | コンクリートの劣化状況* | |
|--------|-----------|-------|-------|------|--------------|-----------|
| | | 水の影響 | 日射の影響 | 温度変化 | ひび割れ | 変色およびゲル滲出 |
| 逆T式堤体部 | 貯水池側 階段上部 | 大 | 大 | 大 | IV | IV |
| | 貯水池側 階段下部 | 大 | 小 | 小 | II | II |
| | 雑木林側 | 大 | 小 | 小 | IV | II |
| 重力式堤体部 | 貯水池側 | 小 | 大 | 大 | III | III |
| | 雑木林側 | 小 | 大 | 小 | II | II |

* I：無し II：少ない III：多い IV：非常に多い

ートのはつり検査を実施し、かぶりコンクリートおよび内部鉄筋の状況を調べた。その後、逆T式堤体（貯水池内に位置する）と重力式堤体（斜面部に位置する）より貫通状態のコア（ ϕ 55mm、長さ2m）を堤体の高さ方向（上部、中央部、下部）にてそれぞれ2本ずつ合計12本採取した。採取したコアは、中性化深さ（フェノールフタレイン1%エタノール溶液噴霧）、塩分含有量（2Nの硝酸溶解による全塩分量）およびアルカリ量（原子吸光度分析（煮沸法））を測定するとともに、コアより切り出した試験体により圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス速度の測定を行った。また、堤体内部のコアを使用して、コンクリートの残留膨張性を判定するための試験（飽和NaCl溶液浸せき法およびJCI法）を実施した。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの劣化状況

コンクリートの劣化状況を表-2に示す。コンクリート堤体にはASRによるひび割れ、変色およびゲルの滲出が観察されたが、コンクリート損傷の程度は環境条件の影響を大きく受けており、堤体の調査位置によって大きく相違していた。従来、ASRによる損傷は温度、日射および水分の供給の影響を受けることが知られている²⁾。コンクリート堤体には同一のコンクリートが使用されていたことから判断すると、コンクリートの損傷度の相違は堤体周囲の環境条件の影響によるASRの進行状況の相違が明確に表れていると判断できる。すなわち、表-2に示すように、貯水池内のコン

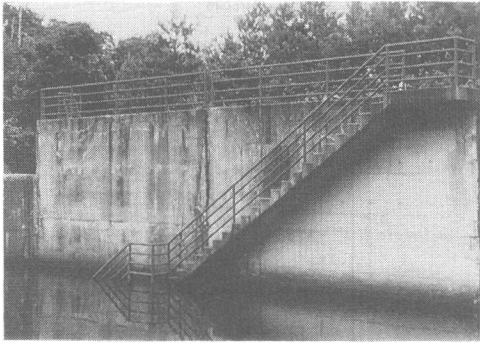


写真-1 堤体側面のひび割れ状況

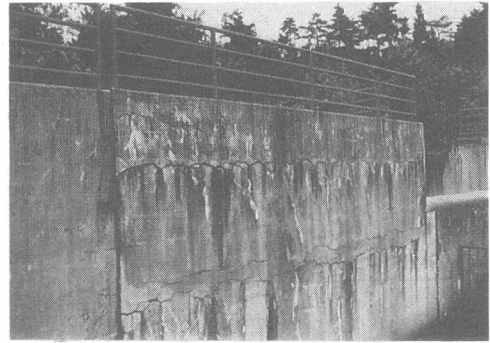


写真-2 水平方向のひび割れ発生

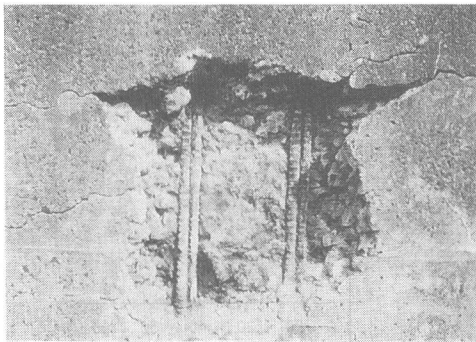


写真-3 堤体側面のコンクリートの剥落

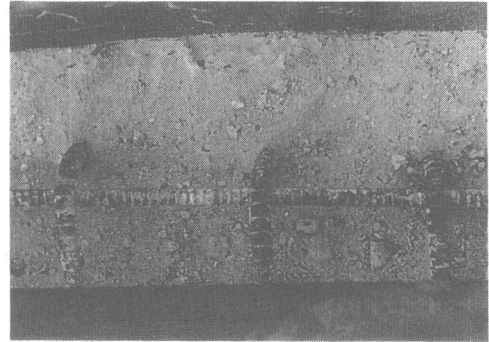


写真-4 堤体天端の鉄筋破断

クリートの ASR による損傷は、日射および温度変化の影響を受ける貯水池側の方が雑木林側よりも顕著であり、また、堤体の下部から上部に向かって ASR によるひび割れの密度が増加する傾向にあった（写真-1参照）。特に、日射が階段によって遮られ、温度変化が小さい階段下の箇所では、ASR によるひび割れの発生が抑制されるとともに、コンクリートの変色およびゲルの滲出も少なかった。また、重力式堤体の ASR による損傷は逆 T 式堤体よりも全体的に小さくなったが、重力式堤体では、斜面のアスファルトの影響で貯水池の水の吸い上げによる影響を受けていないことが原因と推定された。

3.2 かぶりコンクリートの剥落と鉄筋の破断

コンクリート堤体の側面では、ASR によって水平方向のひび割れや打ち継ぎの開きが拡大するとともに、鉄筋とかぶりコンクリート間の付着がかなり低下しており、貯水池側側面の一部ではかぶりコンクリートの剥落が発生した（写真-2および3参照）。また、コンクリート堤体の天端付近では、側面の片側が押し出されており、1cm 程度のズレを伴うコンクリートの割れが観察されたので、端部付近のはつり調査を実施した。その結果、貯水池側と雑木林側の両側で鉄筋（D19@200mm, SD295A）が破断しているのが発見された。鉄筋の破断面には絞りの形跡はまったく認められず、すべて脆性的に破壊していた（写真-4参照）。

コンクリートの中性化深さは最大でも数 mm 程

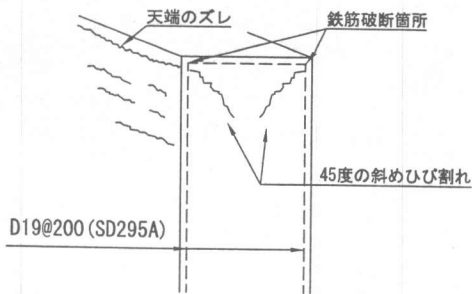


図-1 コンクリート堤体のひび割れ状況

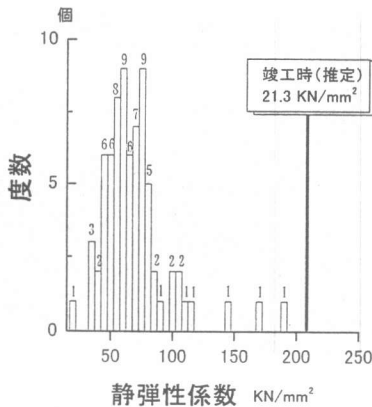


図-3 静弾性係数の分布状況

度であり、塩化物イオン含有量の試験でも塩化物イオンはまったく確認されなかった。このため、鉄筋破断は中性化や塩分による鉄筋腐食とは関係しておらず、純粹に ASR による過大な膨張が原因と考えられた。ASR が発生するとコンクリートの膨張を拘束する鉄筋には大きな引張り力が発生することが知られている³⁾。鉄筋破断の機構に関しては、曲げ加工時に発生する残留応力の影響、鉄筋の降伏領域での応力腐食割れなどの詳細な検討が今後必要である。また、鉄筋破断の影響で、コンクリート堤体には図-1に示すような内部に向かう 45°の方向に大きなひび割れが発生していた。

3.3 コンクリートの圧縮強度、静弾性係数および超音波パルス速度

コンクリートコアの圧縮強度および静弾性係数

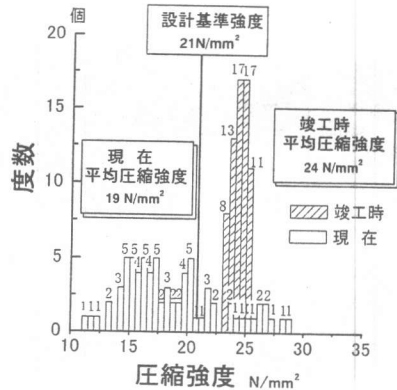


図-2 圧縮強度の分布状況

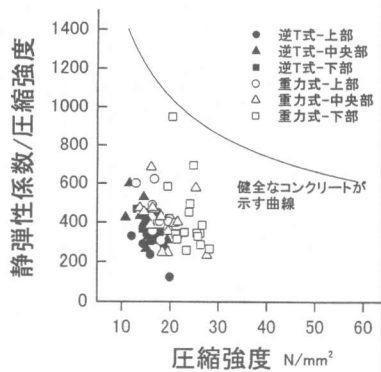


図-4 コアの静弾性係数/圧縮強度比

の分布状況を図-2および3に示す。貫通コアの内部には酢酸ウラニル蛍光法により多量の ASR ゲルが観察されるとともに、鉄筋の内部に位置する箇所破断や欠損が発生していた。図-2に示すように、建設当時のコンクリートの圧縮強度が約 24N/mm²であるのに対して、採取したコアによる圧縮強度試験の結果は平均 19N/mm²となり、設計基準強度の 21N/mm²を下回った。また、測定結果より逆 T 式堤体の上部および中央部では 15N/mm²を下回るものもあり、コンクリート堤体全体で ASR による強度低下が確認された。一方、図-3に示すように、圧縮強度より推定される静弾性係数の値 (21kN/mm²) に対して、採取したコアの静弾性係数の低下は圧縮強度の場合よりも大きくなり、大部分のものが 10 kN/mm²以下と非常に小さな値となった。また、図-4に示すように、

コアの静弾性係数/圧縮強度比は、逆T式堤体の方が重力式堤体よりも、また堤体の下部よりも上部の方が小さくなり、目視観察によるコンクリートの劣化状況とも一致していた。天端付近は、鉄筋の破断によりコンクリートの拘束が開放されたため、圧縮強度および弾性係数の低下が大きくなったものと考えられた。さらに、採取したコアの超音波パルス速度の値は3400~3800m/secの範囲に分布しており、健全なコンクリートの目安とされる4000m/secを全てのものが下回った。

3.4 コンクリートの残留膨脹性とASRゲルの組成

コアの残留膨脹性は、調査時点でのASRの進行度を評価する一つの指標であり、骨材の反応性成分がどの程度残っているか、また反応を継続するために必要な十分なアルカリが存在するかによって決まる⁴⁾。コンクリートコアのアルカリ量の測定結果を表-3に示す。コンクリートの等価アルカリ量は3~6kg/m³の範囲にあり、アルカリの総量規制値(3kg/m³)を超えていた。全体の傾向として、逆T式堤体のものは重力式堤体よりも等価アルカリ量が大きくなり、重力式堤体では上下方向での相違が存在した。しかし、安山岩砕石では、火山ガラスの反応過程でアルカリが溶出している可能性もあり、測定値にはガラス中のアルカリ分の影響が含まれていることを考慮する必要がある。

コンクリートコアの残留膨脹性試験の結果を

表-3 コンクリートのアルカリ量
測定結果(kg/m³)

| | | Na ₂ O | K ₂ O | 等価アルカリ量* |
|-----|----|-------------------|------------------|----------|
| 逆T式 | 上部 | 3.7 | 2.5 | 5.4 |
| | 中央 | 3.3 | 2.3 | 4.8 |
| | 下部 | 4.2 | 2.5 | 5.8 |
| 重力式 | 上部 | 2.0 | 1.9 | 3.3 |
| | 中央 | 2.4 | 1.8 | 3.6 |
| | 下部 | 3.0 | 2.2 | 4.4 |

* 等価アルカリ量: Na₂O+0.658K₂O

コンクリートコアの単位体積重量

(2.20~2.24 g/cm³)より計算した。

表-4に示す。飽和NaCl溶液浸せき法およびJCI法による残留膨脹性試験の結果より、一部のコアでは残留膨脹性が認められたが、逆T式および重力式堤体ともに残留膨脹量は小さかった。これは、コンクリート堤体では調査時点までの20年間にASRが活発に進行しており、骨材の反応成分の大部分がすでに反応を終了していることが原因と考えられた。一方、アルカリシリカゲルの組成と残留膨脹性の関係を研究した最近の研究では、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、コンクリートの膨脹性が低下すると指摘している⁵⁾。SEM-EDXA分析によるアルカリシリカゲルの組

表-4 残留膨脹性試験の結果

| 試験方法 | 構造形式 | コア採取位置 | 膨脹量(%) | 残留膨脹性の評価 |
|---------------|------|--------|--------|----------|
| 飽和NaCl溶液浸せき法* | 逆T式 | 上部① | 0.11 | 不明確 |
| | | 上部② | 0.07 | 無し |
| | | 中央① | 0.09 | 無し |
| | | 中央② | 0.05 | 無し |
| | | 下部 | 0.05 | 無し |
| | 重力式 | 上部① | 0.09 | 無し |
| | | 上部② | 0.06 | 無し |
| | | 中央① | 0.03 | 無し |
| | | 中央② | 0.07 | 無し |
| | | 下部 | 0.12 | 不明確 |
| JCI-D2法** | 逆T式 | 上部① | 0.04 | 無し |
| | | 上部② | 0.11 | 有り |
| | | 中央① | 0.04 | 無し |
| | | 中央② | 0.04 | 無し |
| | | 下部 | 0.17 | 有り |
| | 重力式 | 上部① | 0.09 | 無し |
| | | 上部② | 0.03 | 無し |
| | | 中央① | 0.08 | 無し |
| | | 中央② | 0.04 | 無し |
| | | 下部 | 0.14 | 有り |

* 飽和NaCl溶液浸せき法における判定基準

0.1%未満: 残留膨脹性無し

0.1%~0.4%: 不明確

0.4%以上: 残留膨脹性有り

** JCI-DD2法における判定基準

0.1%未満: 残留膨脹性無し

0.1%以上: 残留膨脹性有り

成分分析の結果を図-5 に示す。ゲルの分析結果はかなりばらつく傾向にあったので、骨材界面に存在するゲルを対象にして4～5箇所、分析を実施した。ゲルの組成は、アルカリ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)が20%前後、シリカ(SiO_2)が50～70%、カルシウム(CaO)が10～30%であり、アルカリ量が少なく、カルシウム量が多い組成であり、非膨脹性を示すものと考えられた。骨材の反応がほぼ終了していることと、生成したゲルが非膨脹性であることによりコアの残留膨脹量が小さくなったものと判断された。

4. まとめ

今回調査した貯水池ダム堤体のような水利構造物では、水の影響でASRが促進されており、堤体内部のコンクリートの劣化や鉄筋の破断のような大きな損傷が発生した。ASRによる過大な膨脹が発生すると、鉄筋には大きな引張力が長期にわたって働くので、低鉄筋比のコンクリート構造物では鉄筋の破断に対する検討が必要である。

本研究で得られた主要な結果をまとめると次のようである。

- (1) 鉄筋コンクリート堤体のASRは日射や水の影響を大きく受けており、貯水池内では水の吸い上げの影響で安山岩砕石のASRが促進されていた。
- (2) 長期にわたるASRにより、鉄筋コンクリート堤体の天端付近の鉄筋が曲げ加工部で破断しており、端部より斜め方向に大きなひび割れが発生していた。
- (3) 鉄筋コンクリート堤体より採取したコアでは破断や断面欠損が存在し、堤体内部のコンクリートの圧縮強度および弾性係数が大きく低下していた。
- (4) コアの残留膨脹性試験より、鉄筋コンクリート堤体で使用された安山岩砕石のASRはほぼ終了しており、残留膨脹性は認められなかった。

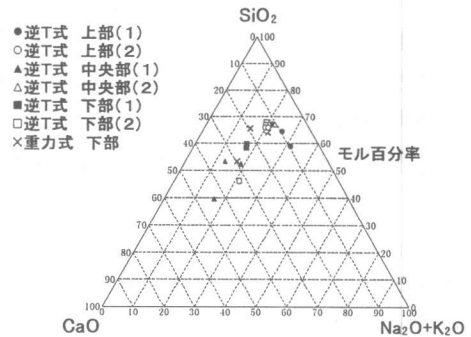


図-5 アルカリシリカゲルの組成分析

謝辞：本調査にご協力いただいた金沢大学工学部
中瀬理至氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 鍵本広之, 川崎昌三, 川村満紀, 実構造物を対象としたアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化に関する現地調査と屋内試験, Proc. of East Asia Alkali-Aggregate Reaction Seminar, Tottori, pp.39-46, 1997.
- 3) 鳥居和之, 奥田由法, 石井浩司, 佐藤健一, PC鋼材により補強したASR損傷コンクリート柱の交番載荷試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1051-1056, 1999.
- 4) 竹内勝信, 川村満紀, 鳥居和之, アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートの組織と残留膨脹性の予測, 材料, Vol.43, No.491, pp.963-969, 1994.
- 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.