

論文 60 年以上経過した長安ロダムの堤体コンクリート内部から採取した コア供試体の物性値の評価

川原 恵理子*1・阿邊 浩市*2・橋本 親典*3・渡邊 健*4

要旨:長安ロダム(徳島県那賀郡)は、昭和 31 年に建設された重力式コンクリートダムで約 60 年間その役割を維持してきたが、洪水調節機能の向上を目的とした改造事業を行った。それに伴い、撤去した堤体コンクリートについて、物性値の評価および配合推定を行った。その結果、圧縮強度は 40N/mm² 程度である、中性化していない内部のコンクリートである、耐凍害性を有する AE コンクリートである等が確認できた。

キーワード:堤体コンクリート, コア供試体, 圧縮強度, 凍結融解抵抗性, AE コンクリート, 配合推定

1. はじめに

長安ロダムは、徳島県那賀郡に位置する、昭和 31 年(1956 年)に建設された重力式コンクリートダムである。建設後約 60 年間、その役割を維持してきたが、近年の度重なる洪水を機に洪水調節機能の向上を目的として、既設ダム堤体を 2ヶ所切り欠き、洪水吐ゲートを 2 門増設する改造事業を行った。改造工事に伴い、堤体コンクリートの一部を撤去した。この事業が国内初のダム大規模切削であるため、既存ダムの堤体内部のコンクリートについての研究は著者が知る限り、見当たらない。一方、工事記録では、内部コンクリートにも AE コンクリートが適用されているが、当時の AE コンクリートが 60 年間経過してもその性能が維持しているかどうか、60 年間という経過時間に伴いマイクロクラック等が発生し外部から浸透する水分等によってセメント硬化体の変質する可能性はないのか等の疑問がある。本報告では、この長期間経過した既設ダム堤体内部のコンクリートの物性値の調査を行い、コンクリートの長期安定性について検討することを目的とする



写真-1 ブロックの外観

表-1 配合表

配合	大砂利 (kg)	中砂利 (kg)	小砂利 (kg)	砂 (kg)	セメント (kg)	AE (cc)	水 (kg)
A (上・下部)	467	481	510	595	250	110	110
B (外部)	476	491	521	595	230	110	105
C (内部)	494	509	540	582	180	100	105

表-2 粗骨材寸法

	大砂利 (mm)	中砂利 (mm)	小砂利 (mm)
粗骨材寸法	130~75	75~35	35~5

2. 実験概要

2.1 試験体

撤去した大量の堤体コンクリートの一部を研究用として四国地方整備局那賀川河川事務所から提供していただいた。写真-1 は、この堤体切削後のコンクリート片で標準寸法が 1200×1200×1500mm であり、長安ロダムの貯水池仮設構台に一次保管していた。写真-1 の右側は、現在のコンクリート片である。コンクリート片をさらに 600×600×300mm のコンクリートブロックに切削し、18 体にした。このコンクリートブロックは、平成 30 年と令和元年にそれぞれ 2 体と 1 体を用い、非破壊試験を行い、

試験体 1 体に対し、φ100mm×200mm 及び φ150 mm×300 mm のコアを 4~7 本採取した。コアについて、各種試験を行い、コアから小片及び円盤を採取し化学分析を行った。なお、コンクリートブロックの保管環境は、屋外で雨水にさらされている状態である。

2.2 配合及び粗骨材寸法

鹿島建設株式会社堰体部のダム工事記録(昭和 34 年 12 月調)及び徳島県那賀川開発建設事務所の竣工図に掲載されている配合表を表-1 に、粗骨材寸法を表-2 に示す。配合は、3 種類あり、堤体の上部及び下部・外部・内部に分類されていた。粗骨材は、3 水準で最大寸法は

*1 中日本高速道路株式会社 修(工) (正会員)

*2 麻生セメント株式会社 技術部 工修(正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博(正会員)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博(工) (正会員)

130mmであった。また、細骨材は、小砂利をロッドミルで製砂して使用し、製砂前は、川砂が採取されていたことが記載されている。AE 剤が使用されたコンクリートであることも記録されている。

2.3 コア供試体の分析項目と実験方法

(1) 各種強度試験

JISA 1107 に準じて、圧縮強度試験、JISA 1113 に準じて割裂引張強度試験及び JIS A 1149 に準じて静弾性係数試験を行った。

(2) 中性化試験

JIS A 1152 に準じて、コア供試体の中性化深さ試験を行った。

(3) 凍結融解試験 (JIS A 法・急速法)

JISA 1148 に準拠して、コア供試体の凍結融解試験 (JIS A 法) を行った。

凍結融解試験 (急速法) は、液体窒素を用いたコンクリートの簡易凍結融解試験⁷⁾を行った。この簡易凍結融解試験は、容器の中で液体窒素を供試体底面に 30 秒吹き付け、30 秒間静置することで凍結作用を行った。その後 5 分間、45~50℃の湯に浸漬することで融解作用を行い、超音波伝搬時間を計測し、相対動弾性係数を以下の式(1)より求めた。

$$\text{相対動弾性係数(\%)} = \left(\frac{VL_n^2}{VL_0^2} \right) \times 100 \quad (1)$$

ここで、VL₀: 初期値の超音波伝搬速度 (km/s)、VL_n: n サイクル後の超音波伝搬速度 (km/s) である。以上を 1 サイクルとし、10 サイクル終了するか相対動弾性係数が 60%以下で試験が終了する。JIS A 法の 30 サイクルが本試験の 1 サイクルに相当し、凍結融解試験を簡易に行うことが可能である。供試体には、φ100mm 及び φ150mm のコア供試体を用いた。この試験は、φ100mm についての試験であるため、φ150mm のコア供試体については、凍結時間及び融解時間を全て 1.5 倍にして試験を行った。

(4) 長さ変化試験 (迅速法)

コンクリートの乾燥収縮ひずみを検討する試験方法としては、JISA 1129-2 (モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部: コンタクトゲージ法) を使用している。しかし、この試験は非常に多大な労力と時間が必要とされる。長さ変化試験 (迅速法) は、1/3 程度の時間で乾燥収縮ひずみを検討する手法で井上²⁾が考案したものである。チップは 4 か所で、円柱供試体の断面对称の軸方向直線状に供試体中心位置から 25mm の位置 (チップ間 50mm) に貼り付けた。したがって、1 つの供試体に対して、2 ヶ所の長さ変化を 2 つの供試体で測定し乾燥収縮ひずみの平均を求めた。6 日間 40℃で低温炉乾燥し、その後 24 時間 20℃の試験室に静置し供試体温度を下げ、56 日になるまで繰り返した。供試体には、φ100mm

及び φ150mm のコア供試体をそれぞれ 2 本用いた。

2.4 コア供試体を用いた化学分析

(1) 配合推定試験

配合推定試験は、「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告 F-18) /セメント協会」³⁾に従って、配合推定を行った。供試体は、φ100mm×180mm (外部環境による中性化進行の影響がない試料) のコア供試体を用いた。

(2) 微細構造に関する試験 (水銀圧入法・リニアトラバース法)

水銀圧入法により、細孔径分布を求めた。リニアトラバース法は、ASTM C457 に準じて気泡間隔係数を求めた。

2.5 非破壊試験

(1) ハンマ打撃法 (反発度法)

JISA 1155 に準じて、反発度を求めた。リウンドハンマーのうちシュミットハンマーを用いた。コンクリートブロックの測定箇所を図-1 に示す。試験体の 2 面について、それぞれ 20 点計測し、日本材料学会の標準式(2)⁴⁾を使用した。

$$F(N/mm^2) = -18.0 + 1.27 \times R_0 \quad (2)$$

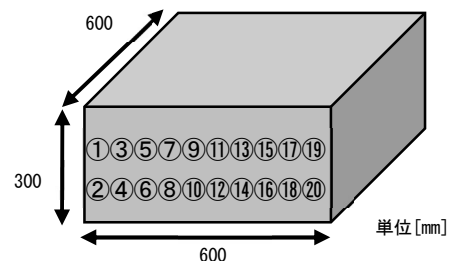


図-1 反発度法の測定箇所

(2) 弾性波速度の測定 (衝撃弾性波法・超音波法)⁵⁾

衝撃弾性波法の測定方法は、多重反射法と伝搬時間差法の 2 手法がある。

多重反射法は、多重反射による周波数特性を利用した測定方法 (図-2) である。コンクリート端面を鋼球等で打撃すると弾性波が入力され、打撃面と対向面で多重反射を起こす。この弾性波を近傍に設置した受信センサで測定し、時間波形としてパソコンに記録する。周波数特性を求めるためには時間波形を周波数スペクトルに変換する必要があるが、この変換には高速フーリエ変換を用いる。弾性波速度の算出には式(3)を用いる。

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \quad (3)$$

ここで、V_p: 弾性波速度 (m/s)、f₀: コンクリートの共振周波数 (基本周波数) (Hz)、L: 打撃面と対向面との距離 (m) である。

コンクリートブロックの測定箇所を図-3 に示す。鋼球

の直径は、20mm である。サンプリング時間 10 μ 秒、解析点数を 4096 点に設定したため、周波数分解能は 24.4Hz である。

伝搬時間差法は、弾性波の伝搬時間差を利用した測定方法(図-4)である。測定対象のコンクリート表面において、同一面に弾性波の入力点と2点の受信点を設け、それらが一直線上になるように設置する。コンクリート表面から弾性波を入力し、受信点1および受信点2で測定した波形の立ち上がりから、それぞれの受信点における弾性波の到着時間を読み取る。受信点2と受信点1との伝搬時間差を求めることで、コンクリート表面を伝搬した弾性波速度が算出できるだけでなく、コンクリート表面にひび割れが存在する場合はそのひび割れ深さの検出も可能となる。弾性波速度の算出には式(4)を用いる。

$$V_{time} = \frac{L_2 - L_1}{\Delta t} \quad (4)$$

ここで、 V_{time} ：伝搬時間差を利用して測定した弾性波速度 (m/s)、 L_1 ：弾性波の入力点から受信点1までの距離 (m)、 L_2 ：弾性波の入力点から受信点2までの距離 (m)、 Δt ：伝搬時間差 (μ s) である。コンクリートブロックの測定箇所を図-5 に示す。鋼球の直径は、8、10、15mm である。サンプリング時間 2 μ 秒、解析点数を 4096 点に設定した。

超音波法は、ハンディタイプの測定器を用いて試験を行った。探触子の距離は 150mm であり、コンクリート表面を伝搬する超音波を測定することが可能である。コンクリートブロックの測定箇所を図-6 に示す。

(3) 表層透気試験 (トレント法・簡易透気法) ⁶⁾

トレント法での測定は、内部と外部のチャンバー内を減圧し、減圧開始 60 秒以降の内部チャンバー直下からの栓流によるチャンバー内の圧力変化量と経過時間を測定し、透気係数を算出した。コンクリートブロックの測定箇所は、前述した多重反射法と同様である。評価方法を表-3 に示す。

簡易透気法は、外形 ϕ 100mm のシリコンスリーブ、アタッチメント、シリンダー (容量 100ml)、真空用ウレタンチューブで構成されており、トレント法よりも簡易的に表層透気性を評価することが可能である。コンクリートブロックの測定箇所は、前述した多重反射法と同様である。

3. 実験結果

3.1 コア供試体を用いた試験結果

(1) 各種強度試験結果

表-4 にコア供試体 (ϕ 100mm (平成 30 年実施) 及び ϕ 150mm (令和元年実施)) (以下、H30 及び R1 と示す。) の圧縮・割裂引張強度試験結果及び静弾性係数、平成 18 年に堤体切削を行うための事前調査として鹿島建設が実

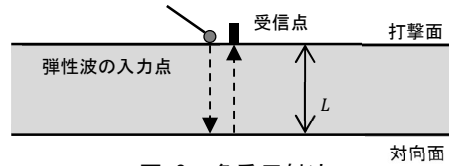


図-2 多重反射法

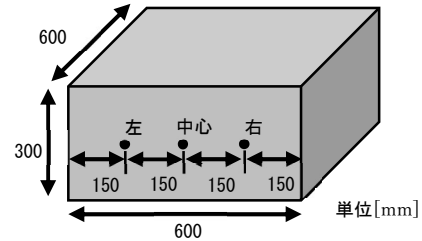


図-3 多重反射法の測定箇所

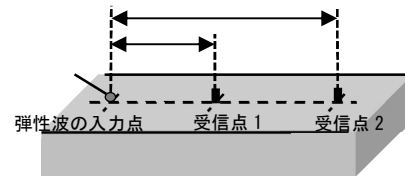


図-4 伝搬時間差法

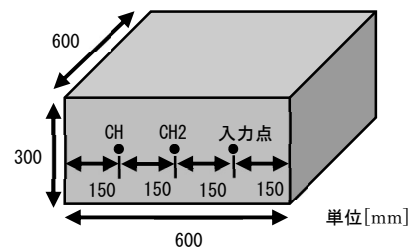


図-5 伝搬時間差法の測定箇所

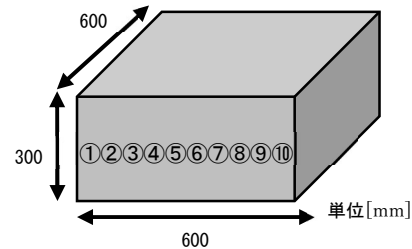


図-6 超音波法の測定箇所

表-3 表層透気試験 (トレント法) の計測結果に基づく品質 (評価) のグレーディング

表層透気係数	$kT \times 10^{-16} (m^2)$
優	0.001~0.01
良	0.01~0.1
一般	0.1~1
劣	1~10
極劣	10~100

施したボーリングコア (ϕ 150mm) (以下、H18 と示す。) の圧縮・割裂引張強度試験結果を示す。

コア供試体の圧縮強度は、H30 で 23.9~36.1N/mm² (3 本平均、標準偏差 5.16)、R1 で 33.7~41.7N/mm² (3 本平均

均、標準偏差 3.26) を示し、同じ試験体から採取したコアであるが、ばらつきが確認できた。このダムコンクリートは粗骨材最大寸法がコア径よりも大きいいため、 $\phi 100\text{mm}$ 及び $\phi 150\text{mm}$ では供試体内の粗骨材の分布が不均一になったことが考えられる。H30 は、H18 と比較して強度が増大した。H18 は、改造事業担当者がコアを採取しており、必ずしも堤体内部のコンクリートではない可能性がある。同一ブロックから採取した H30 より R1 の強度が増大した理由は、供試体の寸法効果よりもコア採取時による潜在的欠陥の影響、すなわち、潜在的欠陥が $\phi 150\text{mm}$ の方が小さいことによると考えられる。一般に寸法効果の影響では、寸法が大きくなるに従い強度が低下するという考えがある。しかしながら、小径コア供試体の既往の研究では、寸法効果の影響よりも潜在的欠陥が寸法の与える影響が大きくなり、小さい供試体の方が強度が低下するという報告がある。⁷⁾ダムコンクリートは粗骨材寸法が 80mm 以上であり、通常寸法効果の影響よりも、潜在的欠陥の影響が大きく表れたと考えられる。

静弾性係数は、H30 は示方書の式から得られる値 (26.7kN/mm^2) とほぼ同程度であり、R1 は示方書の式から得られる値 (28.6kN/mm^2) よりも大きい値であった。

引張強度は、圧縮強度の 1/11~1/12 程度の値となったため、妥当な値であると考えられる。

表-4 強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
令和元年 ($\phi 150\text{mm}$)	37.9	36.9	2.89
平成30年 ($\phi 100\text{mm}$)	30.9	26.6	2.62
平成18年 ($\phi 150\text{mm}$)	29.6		2.37

(2) 中性化深さ試験結果

写真-2 に割裂した供試体断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した断面を示す。粗骨材以外のモルタル部分に変色したことを確認した。よって、このコンクリート片は、ダム堤体の内部のコンクリートであり、中性化



写真-2 中性化深さ試験結果

していないことが確認できた。

(3) 凍結融解試験 (JIS A 法・急速法) 結果

図-7 に凍結融解試験 (JIS A 法) 結果を示す。超音波伝搬時間から求めた値及び共鳴周波数から求めた値で相対動弾性係数は、60%以上を維持している。

図-8 に凍結融解試験 (急速法) 結果を示す。 $\phi 100\text{mm}$ 及び $\phi 150\text{mm}$ において、相対動弾性係数の平均値は、10 サイクル終了後も 60%以上を維持しており、耐凍害性を有するコンクリートであることが確認できた。また、 $\phi 150\text{mm}$ の供試体では、1.5 倍の凍結時間及び融解時間では凍結及び融解時間が不十分であった可能性があり、十分に検証できなかった可能性も考えられる。

以上の 2 つの試験結果から、耐凍害性を有するコンクリートであることが確認できた。

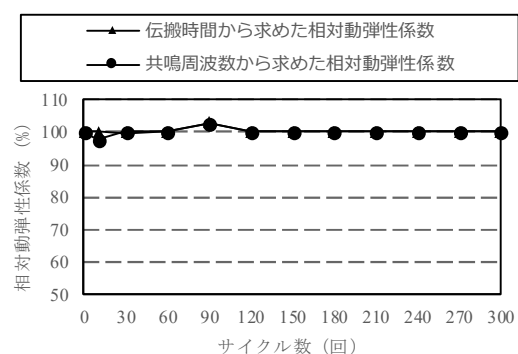


図-7 凍結融解試験 (JIS A 法) 結果

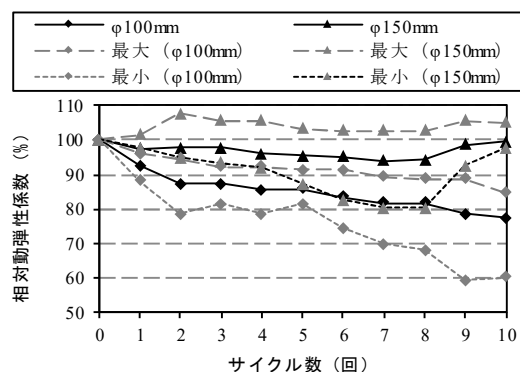


図-8 凍結融解試験 (急速法) 結果

(4) 長さ変化試験 (迅速法) 結果

図-9 に乾燥収縮ひずみを示す。材齢が 60 年以上経過しているため、水和反応は収束している可能性がある。しかしながら、内部コンクリートであり、自由水がすべて逸散したとは考えられない。よって、内部コンクリート中に存在する自由水による乾燥収縮が計測できる可能性がある。 $\phi 100\text{mm}$ 及び $\phi 150\text{mm}$ のコア供試体において残存する自由水が乾燥することによる収縮を確認することができた。なお、 $250\mu\text{m}$ 程度の収縮量は現在のコンクリートと比較して半分以下であり、当時の一般のコンク

リートの乾燥収縮と比較しても高品質であったと思われる。

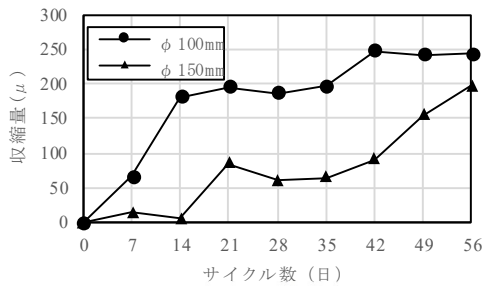


図-9 長さ変化試験 (迅速法) 結果

3.2 コア供試体を用いた化学分析

(1) 配合推定試験結果

表-5 に配合推定の結果を示す。1979 年以前のポルトランドセメントは、JIS で少量混合成分(5%)の添加が認められていないため、石灰石や高炉スラグがポルトランドセメントに混合されることはないと考えられる。そのため、ig. loss.は現在よりも低い値となっていると思われる。また、CaO (H.M.)は、現在にくらべて当時のセメントのほうが高くなった。これは、長期強さを発現するピーライト (C₂S) の鉱物比率が、現在にくらべて当時のセメントのほうがやや低いと推計される。よって、長安ロダムでもこのようなセメントが使用された可能性がある。

文献情報から当時のセメントの化学成分として、ig.loss.を 0.8%、insol.を 0.4%および CaO を 65.4%と仮定して推定した結果を示す。更に、空気量を 2%、3%及び 4%と仮定した場合のそれぞれのケースで配合を推定した。なお、細骨材率はすべて 27%とした。配合推定の結果、単位セメント量は 160kg/m³を下回り水セメント比は空気量を 1~3%と仮定した場合、50.6~64.1%と推定され、長安ロダムの配合表と比較すると、内部コンクリートの値に近いことが確認できた。

表-5 配合推定試験結果

配合	大砂利 (kg)	中砂利 (kg)	小砂利 (kg)	砂 (kg)	セメント (kg)	AE (cc)	水 (kg)	W/C (%)
空気量 1.0(%)		2178			156	-	100	64.1
空気量 2.0(%)		2188			158	-	88	55.7
空気量 3.0(%)		2195			158	-	80	50.6
空気量 4.0(%)		2205			158	-	71	44.9

(2) 微細構造に関する試験 (リニアトラバース法・水銀圧入法)

図-10 及び図-11 に、モルタル小片の微細構造分析と

して、細孔径分布と気泡間隔係数の分析結果を示す。

細孔径分布からは、1μm 以下の微細な空隙の存在を確認することができた。

気泡間隔係数は、290μm であることが確認できた。耐凍害性に有効な気泡間隔係数 200μm 以下よりも大きい値であるが、凍結融解試験の結果と合わせると、連行空気量の存在が明らかになった。また、微細な連行空気は、細孔径分布の計測結果から妥当であると判断できた。以上の結果より、堤体コンクリートは AE コンクリートであると判断できる。

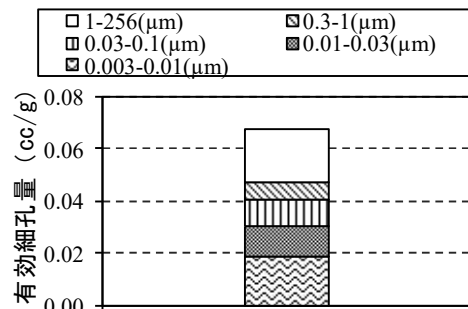


図-10 細孔径分布計測結果

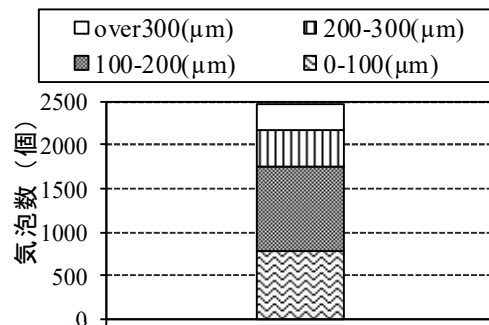


図-11 気泡間隔係数計測結果

3.3 非破壊試験

(1) ハンマ打撃法による結果

シュミットハンマーによる圧縮強度推定結果は、41.2(N/mm²)となり、実際の圧縮強度よりも増大した。シュミットハンマーが内部全体の強度を反映するわけではなく、表面性や骨材の影響を受けるといわれているため、粗骨材最大寸法 130mm を使用しているこのコンクリートでは、骨材の影響を受けたと考えられる。

(2) 弾性波速度の測定 (衝撃弾性波法・超音波法) 結果

図-12 に多重反射法で求めた弾性波速度の結果を示す。圧縮強度と弾性波速度の結果に相関は確認できなかった。また、日本非破壊検査協会規格に記載されている解説式⁸⁾よりも大きい値が得られることがわかった。粗骨材の骨材径が大きいほど弾性波 (超音波) 伝搬速度が若干速くなる傾向が認められている。これは、骨材径が大きいほど比表面積が小さくなるため、脆弱な遷移体形成量が

少なくなることがあげられている⁹⁾。図-13 に伝搬時間差法で求めた弾性波速度の結果を示す。鋼球の違いは、入力される弾性波の周波数が異なることを表す。試験体1においては、鋼球による弾性波速度の違いは確認できなかったが、試験体2においては、周波数が小さくなるに従って、弾性波速度が速くなることが確認できた。図-14 に超音波法で求めた弾性波速度の結果、圧縮強度と伝搬速度に相関関係は確認できなかった。

(3) 表層透気試験 (トレント法・簡易透気法)

図-15 にトレント法の結果を示す。結果がない箇所は、大きい透気係数を示し、測定不可であった箇所である。

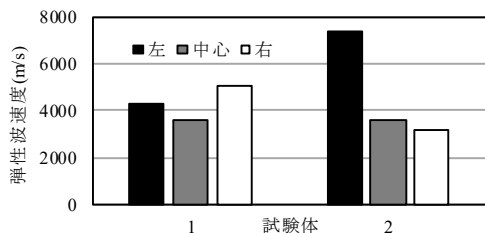


図-12 多重反射法の結果

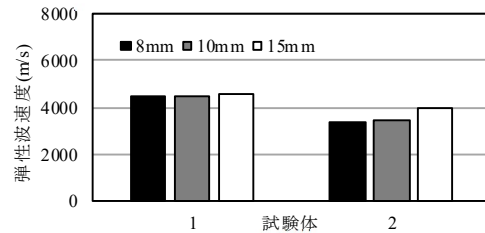


図-13 伝搬時間差法の結果

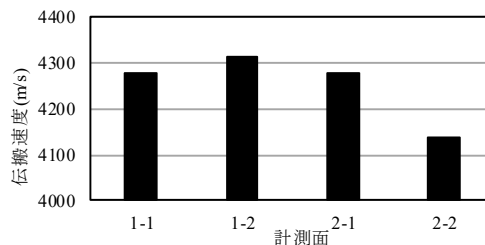


図-14 超音波法の結果

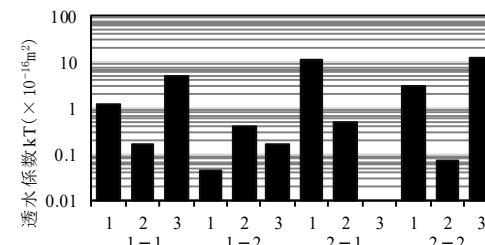


図-15 トレント法の結果

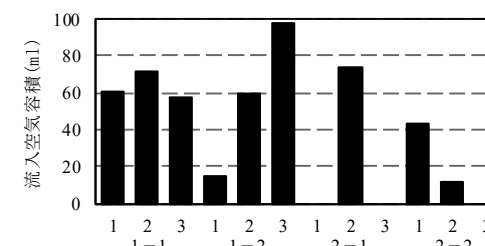


図-16 簡易透気法の結果

表層透気試験の計測結果に基づく品質のグレーディングに従うと、良～極劣でばらつき、同じ傾向は確認できなかった。図-16 に簡易透気法の結果を示す。結果がない箇所は、流入空気容積が大きく、計測終了時間までに試験機が落下し、測定不可であった箇所である。いずれの結果からも流入空気容積は、値がばらつき、傾向を確認することはできなかった。以上から、内部のコンクリートの表層透気性は、骨材等の影響を受け、計測するのは困難であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、長安ロダムの堤体内部コンクリートの物性値の評価を目的とした。調査結果から以下の知見が得られた。

- 1) 圧縮強度は 40N/mm²程度である。
- 2) 中性化深さ試験結果より、中性化していない。
- 3) AE コンクリートである。

謝辞 本研究を実施するにあたり、国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所には、撤去した堤体コンクリートのブロックの提供を受けました。また、阿南生コンクリート工業㈱には、ブロックの保管場所を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 弓場上有沙, 高橋篤史, 橋本親典, 渡邊健: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.941-946, 2011
- 2) 井上裕貴, 橋本親典, 渡邊健, 石丸啓輔: 骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.473-478, 2011
- 3) (一社)セメント協会コンクリート専門委員会: F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同実験報告, 1967
- 4) 社団法人日本材料学会試験協会: シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針(案), 「材料試験」第7巻59号, pp.40-44
- 5) 鈴木彩莉, 渡邊健, 岩野聡史, 小椋紀彦: 圧縮強度の非破壊的推定における速度測定手法および評価式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1951-1956, 2017
- 6) 小谷健太, 渡邊健, 面矢建次郎, 関川昌之: シリンダーを用いた簡易透気試験の検討および検定器による測定精度の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1701-1706, 2018
- 7) 国本正恵, 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 小径コアを用いたコンクリートの圧縮強度試験方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.427-432, 2000
- 8) 日本非破壊検査協会規格 NDIS 2426-2: コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第2部: 衝撃弾性波法
- 9) 岩波光保ほか: コンクリート中における弾性波伝搬挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.627 V-44, pp.223-238, 1999.8