

土用ダムにおける堤体の計測および安全性評価（10年間の評価結果）

Safety Evaluation of Rockfill Dam with the Result of Measurement at Doyoh Dam, Japan

土江真吾	Shingo TSUCHIE	(中国電力(株)電源事業本部)
仁科晴貴	Haruki NISHINA	(中国電力(株)電源事業本部)
小畑大作	Daisaku OBATA	(中国電力(株)電源事業本部)
横田英嗣	Hidetsugu YOKOTA	(中国電力(株)電源事業本部)

土用ダムは中国電力が所有する出力 120 万 kW の揚水式発電所（俣野川発電所）の上池ダムとして建設された、高さ 86.7m の中央遮水壁型ロックフィルダムである。土用ダムの安定性を評価するため、堤体の変形量、ダム漏水量、漏水濁度、堤体内および基礎岩盤内の間隙水圧を計測しているが、変形量の計測値に一定期間に亘って改ざんが認められたため、当ダムの堤体の安定性を適正に評価する目的で第三者を交えた「堤体の安定性点検」を 10 年間実施してきた。

本報告は、これまで実施してきた当ダムの堤体の安定性に関する評価結果および高度化を図ってきた計測値の管理について、最終結果を取りまとめたものである。

キーワード：中央遮水壁型ロックフィルダム、堤体の安定性、変形量、ダム漏水、
間隙水圧 (IGC : H04)

1. はじめに

土用ダムは、揚水式発電所の上池ダムであり、岡山県新庄村に位置する（図-1）。本ダムは昭和 62 年 12 月に完成したダム高 86.7m、堤頂長 480m の中央遮水壁型ロックフィルダムである。本ダムでは、完成以降、継続的にダムの変形やダム漏水等を計測し、安全管理を行ってきたが、ダム堤体変形（沈下量および水平変位量）の計測値に一定期間に亘る改ざんの事実が確認された。このため、当該値を欠測したものとして取り扱い、ダム堤体の安定性の評価を毎年実施^{1) 2)}している。

この安定性の評価結果は、国土交通省の命令に基づき、第三者で構成される委員会（地盤工学会中国支部：以下、「第三者委員会」とする）による点検および審査を平成 19 年度から 10 年間受け、平成 29 年 1 月末に最終の評価結果を国土交通省に報告している。

本稿は、前回報告（5 年目中間報告）に続く 10 年間の評価結果およびこれまで実施してきた計測値管理の高度化検討について報告するものである。

2. 計測項目および方法

一般的にフィルダムの堤体に異常がある場合、基礎からの漏水の発生、堤体コア部を浸透するダム漏水量の増加等、

ダムの異状を示す何らかの前兆現象が表れるとされる³⁾。既往事故事例報告⁴⁾でも、堤体変形に関連する事故は、クラック等の外観の変状や漏水（量や濁度）の変化を伴っている例が多いとされている。

これらの特性を踏まえ、土用ダムでは、大別して①堤体の変形（沈下量、水平変位量および層別沈下量）、②堤体内および基礎岩盤内の間隙水圧、③ダム漏水、漏水濁度等の計測を実施している。これらの主要な計測機器の配置を図-2、3 に示す。

2.1 堤体の変形

堤体の変形は、天端・上下流面上に 5 測線 22 箇所の測点を設置し、ダム周辺地山に設置した 10 箇所の固定標的から沈下量と水平変位量（上下流方向）を計測している。また、堤体中央部で層別沈下量も計測している。各計測頻度は、1 回/月（冬季の積雪期間除く）である。

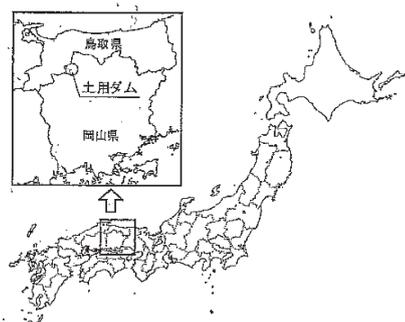


図-1 土用ダム位置図

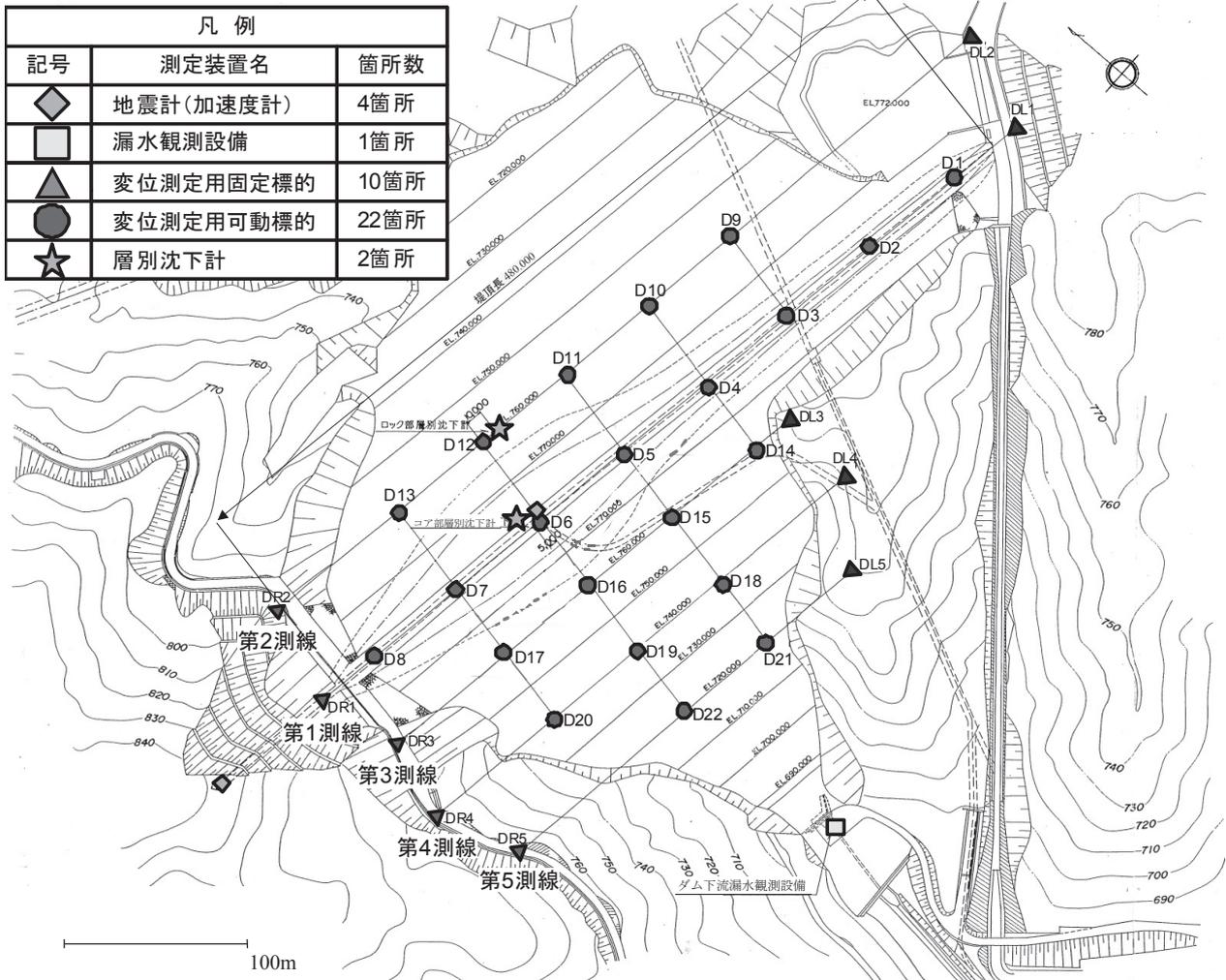


図-2 土用ダム平面図および計測位置図

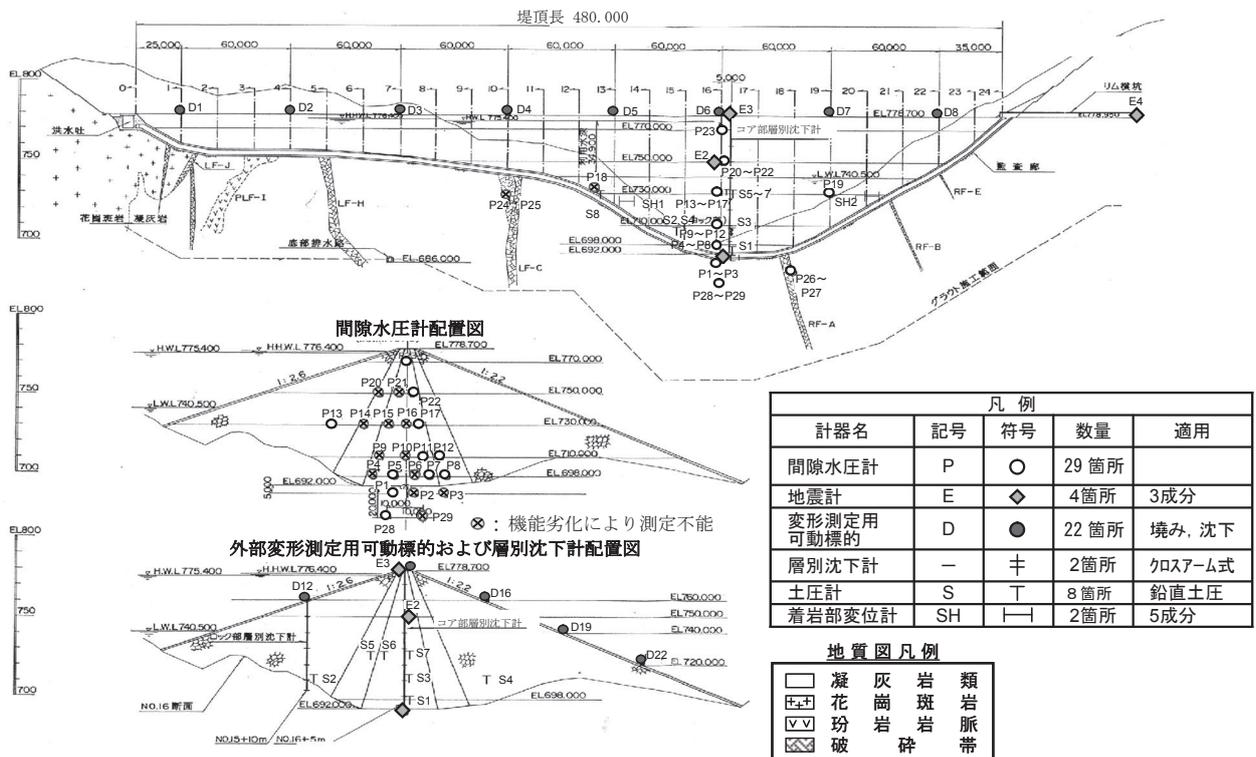


図-3 土用ダム断面図および計測位置図

2.2 間隙水圧

堤体の間隙水圧は、堤体内部に配置した間隙水圧計 29 箇所のうち現在でも計測可能な 13 箇所（16 箇所故障）を用いて計測している。計測頻度は 1 回/日である。

2.3 ダム漏水量と濁度

ダム漏水量と濁度は、ダム下流（ロックゾーン）末端に設置した漏水計測設備を用いて計測している。計測頻度はいずれも 1 回/時間である。

3. 管理基準の設定

ダム堤体の各計測項目において異常値の有無を判断するには、経時変化図と相関図をもとに定性的に判断する手法が一般的である⁵⁾が、これのみに頼ると異常の判断に客観性を保てない恐れがある。このため、異常値や計測ミス等を等しく判断できるよう、ダム管理において基本かつ重要な計測項目である次の 4 項目を対象に管理基準を作成し、多角的に分析を行う等、管理の高度化を図ってきた。

3.1 堤体の変形（沈下量、水平変位量）

堤体の変形量の管理基準での評価対象は、沈下量、水平変位量の計測箇所（各 5 測線・22 箇所）のうち、堤体天端測線および下流側第 3 測線において盛り立て高さが最大である D6、D16 を代表管理箇所として選定した。評価に用いる管理基準は、重回帰分析により算出した推定式に管理範囲 $\pm 2\sigma$ （信頼区間 95%を採用）を採用していたが、精度向上を目的に検討してきた結果、次のような考え方を推定式に採用した。

沈下量については、計測値に対して貯水位の影響がほとんどなく、時間経過による圧密沈下作用の影響が大きいことと、鳥取県西部地震（平成 12 年 10 月発生）前後で計測値の傾向に違いがあることから、推定式の変数には竣工日と鳥取県西部地震発生日を起算日とする 2 つの経過日数を採用した。なお、推定式の決定係数は D6、D16 それぞれ 0.98、0.87 と高精度に実測値を再現している。

水平変位量については、計測値と貯水位に相関性を確認できていることから、沈下量の推定式に採用した 2 つの経過日数に加え計測時の貯水位を採用し 3 つの変数とした。なお、推定式の決定係数は D6 で 0.65、D16 で 0.42 と高くはないが、現行から 0.1 程度上昇した。

3.2 堤体内および基盤岩盤内の間隙水圧

間隙水圧の管理基準での評価対象は、間隙水圧計測箇所

のうち管理の効率性・確実性を考慮し、次の 5 点を代表管理箇所として選定した。

コア部 : P7, P11, P17, P22

フィルター部 : P8

従来の管理基準は、間隙水圧と貯水位に明確な相関関係が認められていなかったことから、計測値の平均値 $\pm 2\sigma$ （信頼区間 95%を採用）と、貯水位を高水位に保持した状態での最大値とを併用してきた。しかし、貯水位の運用方法によっては、管理基準を超過する等の課題を有していたため、間隙水圧と貯水位の移動平均との関係に着目し、移動平均水位を変数とした重回帰分析を行った。移動平均日数は 10 日毎最大 180 日の中から、決定係数が最も高くなった移動平均日数の推定式に管理範囲 $\pm 2\sigma$ （信頼区間 95%を採用）を管理基準として採用した。その特徴は、コア内下流側に位置する測点 P11, P17, P22 で採用した貯水位の移動平均日数がそれぞれ 190 日（決定係数:0.75）、160 日（同:0.85）、110 日（同:0.79）と、計測器の設置標高が低くなるに連れ日数が増加する結果となった。この関係は、一般的なフィルダムの浸潤線と時間経過の関係の考え方と一致し、推定式はこれを表現できた精度あるものと評価している。なお、計測値に移動平均水位との相関性が確認されなかった堤体下部に位置する測点 P7, P8 については、従来の管理基準を最新データにより再計算したものを採用した。

3.3 ダム漏水量

ダム漏水量の評価に用いる管理基準は、既往計測データ（平成 5 年）を用いて、夏季は 3 変数（降水量、貯水位、漏水温）、冬季は 4 変数（降水量、融雪量、貯水位、漏水温）による重回帰分析で予測式を作成し、平成 20 年 4 月から運用していた。

しかし、降雨成分の推定誤差が相対的に大きく、融雪期と渇水期で十分な推定精度が得られていない等の課題を有していたことから、融雪期の推定精度の向上に主眼を置いた水文推定モデルの導入検討を行った⁶⁾。具体的には、土用ダムで観測されるダム漏水量の成分を「地下水成分」「漏水量成分」「降雨成分」の 3 区分に分離し、そのうちの降雨成分の推定に、融雪モデルを組み込んだ降雨量連動型 4 段タンクモデルを採用した。なお、推定式の決定係数は 0.80 と高精度に実測値を再現している。

3.4 ダム漏水濁度

土用ダムのダム漏水濁度は、降雨時を除いて 1 度（ppm）程度以下の清澄な状態となる特徴がある。これに計測センサーの精度 ± 1 度（ppm）を勘案して管理基準を上限値 2 度（ppm）とした。なお、管理対象は「無降雨時および降

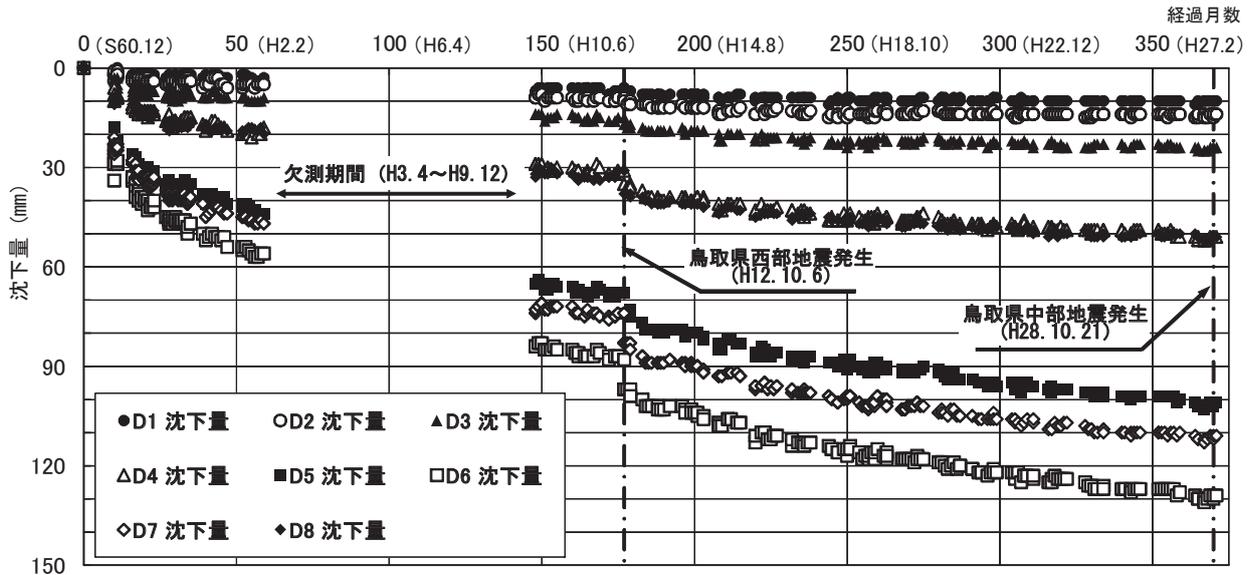


図-4 堤体天端測線における沈下量経時変化図 (昭和 60 年～平成 28 年)

※鳥取県西部地震 規模：M7.3，土用ダム天端中央における地震加速度の最大値：437gal (上下流方向)

鳥取県中部地震 規模：M6.6，土用ダム天端中央における地震加速度の最大値：110gal (ダム軸方向) (以下の図も同様)

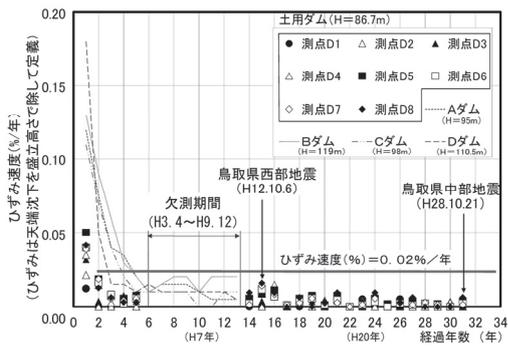


図-5 年間ひずみ速度経時変化図 (昭和 60 年～平成 28 年)

雨 (10mm 以上) 後は 3 日目以降」を条件に抽出した計測値とした。

4. 計測結果および安定性評価

4.1 堤体の変形 (沈下量, 水平変位量, 層別沈下量)

(1) 沈下量

堤体の天端測線における沈下量の経時変化を図-4 に示す。至近の各測点の傾向は、従来と同様に大きなバラツキはなく、ダム盛立高さに応じており、一般的なフィルダムと同様の沈下傾向を示している⁷⁾。

年間ひずみ速度 (1 年当りの沈下量/ダム盛立高さ (%)) の経時変化として整理した結果を図-5 に示す。年間ひずみ速度は、ダム完成後 2 年目以降、安定期に入ったダムの値とされる 0.02% 以下⁷⁾ になっている。また、最新のひず

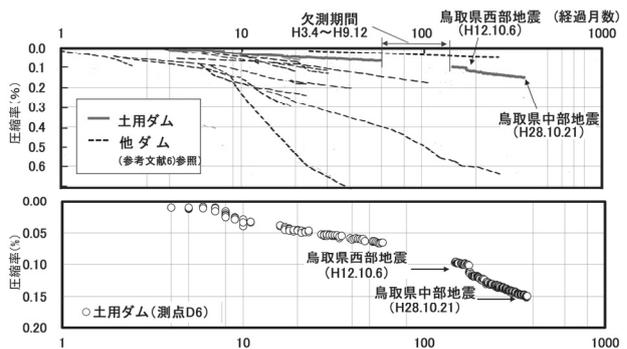


図-6 圧縮率の経時変化図⁸⁾ (昭和 60 年～平成 28 年)

み速度は D6 測点で 0.0023% であり、他ダム⁷⁾ と比べても十分に小さいことから、安定期であることを示している。

土用ダムと他ダムの圧縮率 (沈下量/ダム盛立高さ (%)) の経時変化を図-6 に示す。土用ダムの圧縮率は他ダム⁸⁾ と比べて小さく、かつ圧縮速度も小さいことから、ダム堤体の剛性が高いものと判断される。

平成 28 年の計測値について管理基準に基づく管理図を図-7 に示す。D6, D16 測点の計測値は、管理基準内に収まっている。

また、平成 28 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部地震後 (土用ダム周辺で震度 3 を記録) の計測値についてもこれまでの傾向を逸脱することなく安定して推移している。

以上から、至近の沈下量の傾向は安定した挙動を示していると判断できる。

(2) 水平変位量

堤体の天端測点における水平変位量の経時変化を

土用ダムにおける堤体の計測および安全性評価（10年間の評価結果）

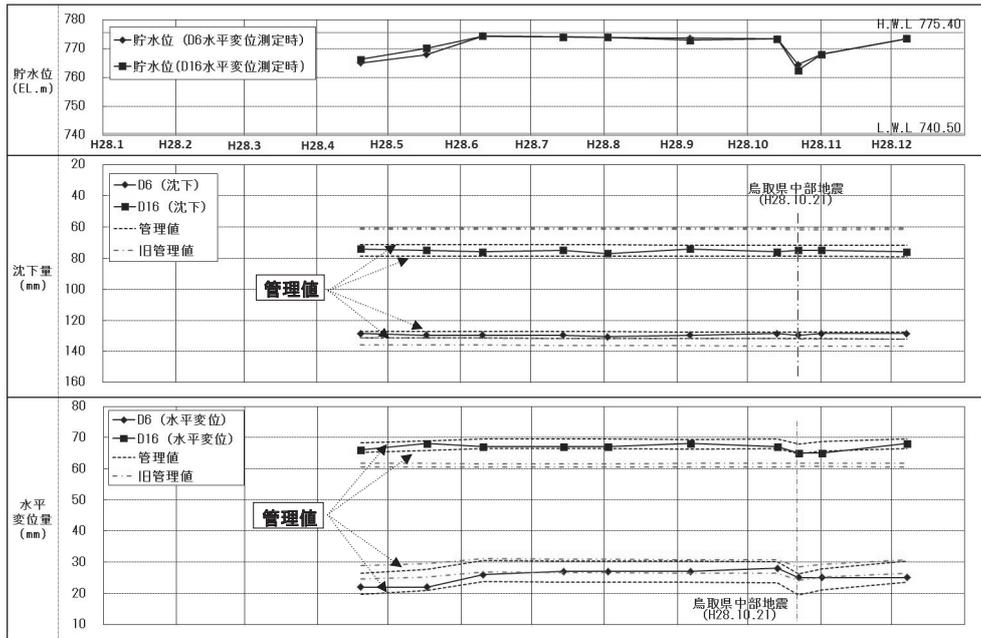


図-7 管理基準に基づく管理図（沈下量および水平変位量）

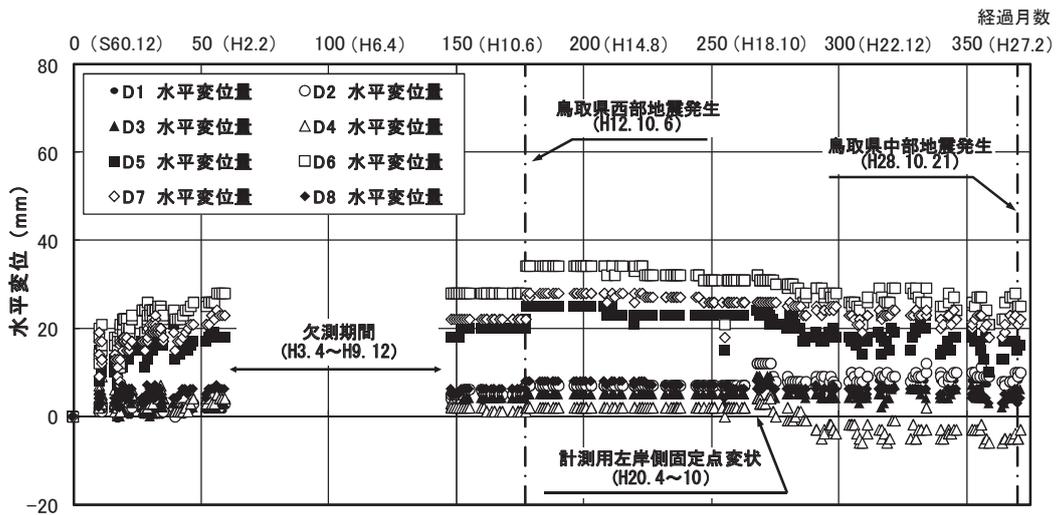


図-8(a) 堤体天端測線における水平変位量経時変化図（昭和60年～平成28年）

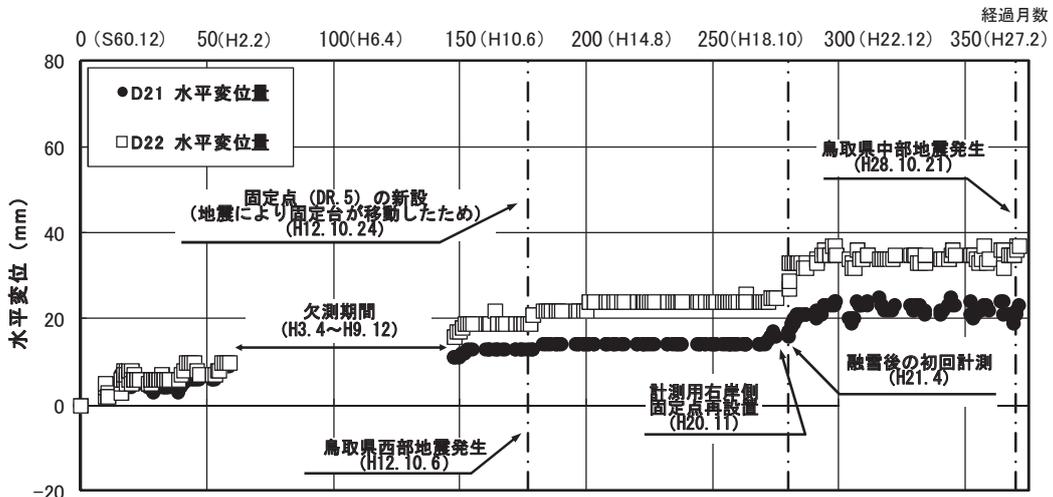


図-8(b) 第5測線における水平変位量経時変化図（昭和60年～平成28年）

表-1 第5測線での補助測量等の内容

項目	実施内容
補助測量	新たに堤趾部に固定標的を設置し、測距を計測する補助測量を実施。
基準点の確認	ダム堤体周辺地山に設置した固定点を対象に基準点測量、水準測量を実施し、地山の変状の有無を確認。
リップラップ	第5測線付近のリップラップの状況を写真の状況監視。撮影時期は積雪期の前後。

図-8(a)に示す。至近の各測点の傾向は、天端測線では僅かに上流側（一方）へ変位する傾向にあり、盛立高さの高い測点 D5～D7 で顕著に表れている。これは図-9に示すとおり、平成12年の鳥取県西部地震時に盛土高さの大きい箇所を中心に生じた下流側への変位が、その後の経年的な堤体の変形および貯水位の変動に伴う堤体の弾性的変形の繰り返し等により、堤体全体が徐々に安定化する方向である上流側へ移行した結果と推察される。一方でダム軸に沿って水平変位の分布をみると、S字の類の形状を呈している。これについては、平面図（図-2）からわかるように堤体左岸側下流に張り出す地山が堤体の下流側への変位を拘束しているためと考えられる。また、この形状は、他のダムでも同様の報告はあり⁹⁾、特に問題は報告されていないものの、一般的なものではないことから、日常管理の中で留意すべき事項として取り扱っている。

第5測線における水平変位量の経時変化を図-8(b)に示す。第5測線では平成21年4月（融雪後の初回計測）にこれまでの傾向を逸脱する計測値を確認したため、表-1に示す補助測量等によるバックチェックを実施し、計測値の信憑性を確認している。その後の計測値は、同年8月頃から現在まで安定しており、異常な状況は確認していない。また、ダム盛立高さが最大となるD6-D16-D19-D22断面の水平変位量および沈下量の分布図（図-10）から、現在（平成28年9月）のダム堤体の水平変位量はダム高に応じて滑らかに分布していることが伺える。これらのことから、平成21年4月に第5測線で確認されたこれまでの傾向を逸脱する計測値については、ダムの安定性には問題ないと判断した。これを踏まえて、第5測線で実施してきた補助測量によるバックチェックは平成29年以降取りやめるとし、これまで蓄積したデータは異状時における比較検証用の値として活用することとした。

ダム盛立高さが最大となる断面のダム天端の測点（D6測点：盛立高さ86.7m）における水平変位量と貯水位の関係を図-11に示す。水平変位量は、鳥取県西部地震によって生じた残留変形を除き、通常運用範囲の水位変化（20～35m）に対して数mm/年の幅で変化する状態で落ち着いている。また、至近は前述のとおり上流側へ収束する傾向

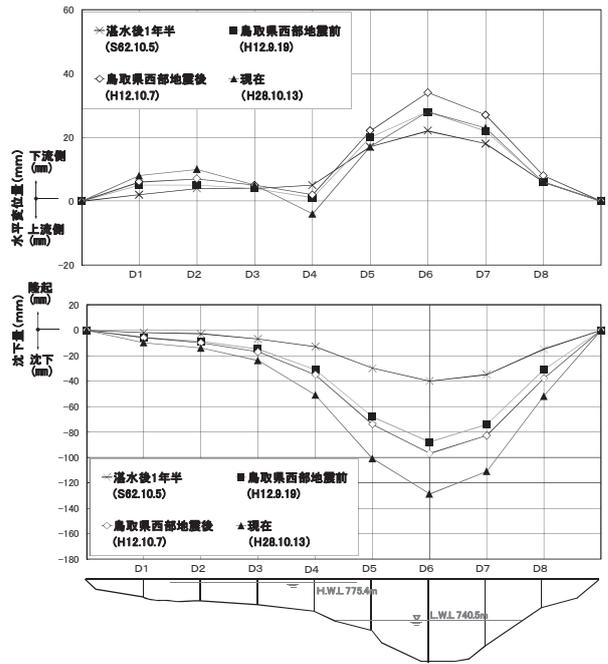


図-9 堤体天端測線の外部変形（沈下量および水平変位量）

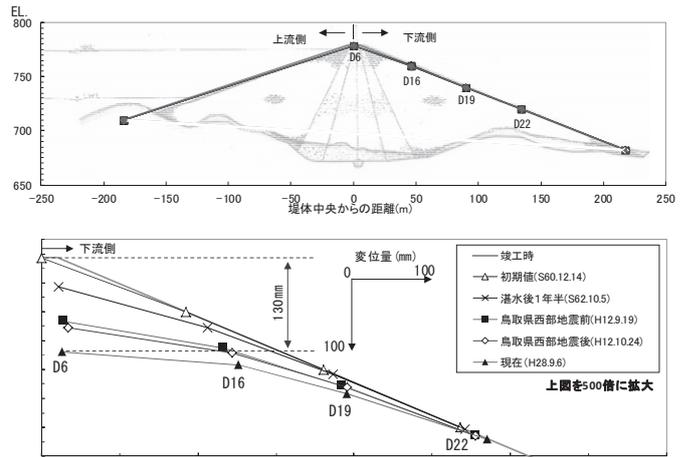


図-10 ダム最大断面における外部変形（沈下量および水平変位量）

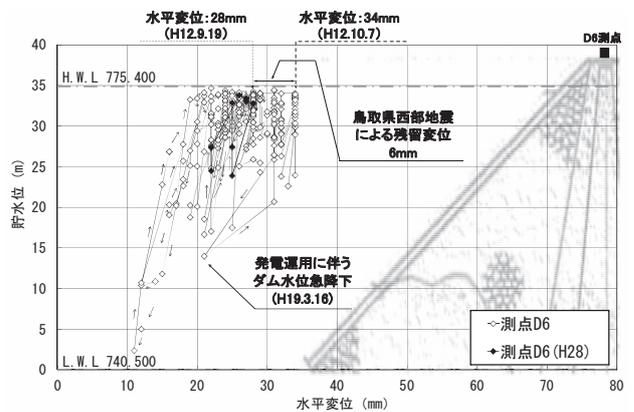


図-11 水平変位量と貯水位の関係

が認められる。平成 28 年の計測値について管理基準に基づく管理図を図-7 に示す。D6 測点は全 10 計測値全ての計測値が管理基準内であるのに対し、D16 測点は全 10 計測値中 1 回が管理基準から外れているが、その程度は 0.6mm と僅かである。また、鳥取県中部地震直後の計測値は、管理基準値内で上流側への変位が見受けられるが、これは計測時における貯水位が比較的低かったことによる影響が大きいと推察している。その後は累加的に変位する傾向もなく、安定して推移していることから問題ないと判断している。

以上から、至近の水平変位量の傾向は安定した挙動を示していると判断できる。

(3) 層別沈下量

図-12 にダム盛立完了時を基準としたコア部の層別沈下量の分布を示す。これによると、層別沈下量は深さ方向に滑らかに分布しており、局所的に沈下量が増大している箇所は認められない。また、鳥取県西部地震後には天端付近（EL.770～780m）の層の沈下が確認されたが、その後は再度収束傾向にあり、鳥取県中部地震後の計測値についてもこれまでの傾向を逸脱することなく安定して推移している。

これらのことから堤体の内部の変形は、沈下量および水平変位量と同様安定した挙動を示していると判断できる。

4.2 間隙水圧

ダム最低水位（EL.740.500m）以下の標高に埋設された堤体内の間隙水圧計 P9, P10, P11, P12（EL.710.000m）の計測結果と貯水位の相関図を図-13 に示す。この図より、水位変化に伴い間隙水圧が局所的に変動する等の異常な傾向は認められないことや、下流側の測点ほど値が小さいこと、また経年による大きな変化は生じていないことから、コアの遮水性が十分に保たれていると判断される。

平成 28 年の計測値について管理基準に基づく管理図を図-14 に示す。測点 P7 で一時的に管理値下限を下回る場合もあるが、ほぼ管理基準値の範囲にあり、これまでの傾向を逸脱するものではない。

また、鳥取県中部地震後の計測値についてもこれまでの傾向を逸脱することなく安定して推移している。

以上から、至近の間隙水圧の傾向は安定した挙動を示していると判断できる。

4.3 ダム漏水量

ダム漏水量は、貯水位の変動に伴う浸透流量の変化、降雨（雪）・融雪の影響を受けて変動する。堤体の安定性を評価する上では、漏水量から降雨成分を分離するのが望ま

しい。しかし、土用ダムではこれらを定量的に分離できないことから、両者を合計したもので評価を行った。

平成 28 年のダム漏水量・漏水濁度の経時変化、昭和 62 年から現時点までのダム漏水量の毎月の最低値の経時変化を図-15、図-16 に示す。これらからダム漏水量は経年的に減少傾向を示している。これはダム基礎岩盤の目詰まり等に起因するものと考えられる。

図-17 に降雨の影響をできるだけ排除するため、平成元年から平成 28 年の計測値のうち、「7 日間無降雨」、「融雪が含まれる可能性のある計測値（1 月～4 月）を除く」の条件を満たす計測値を用いて整理した貯水位とダム漏水量の関係を示す。この図より、最高貯水位付近のダム漏水量の最小値は約 250ℓ/分、最大値は約 560ℓ/分とほぼ一定の

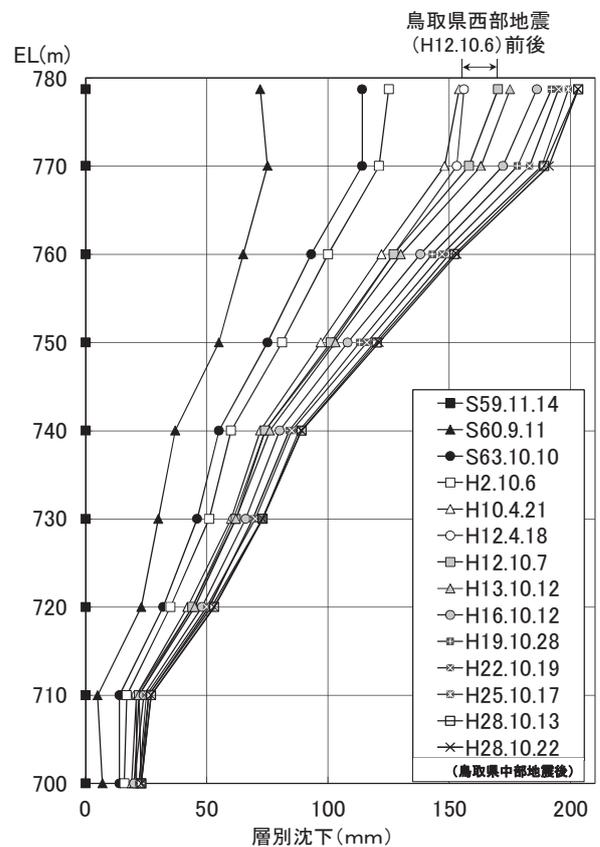


図-12 層別沈下量経時変化図

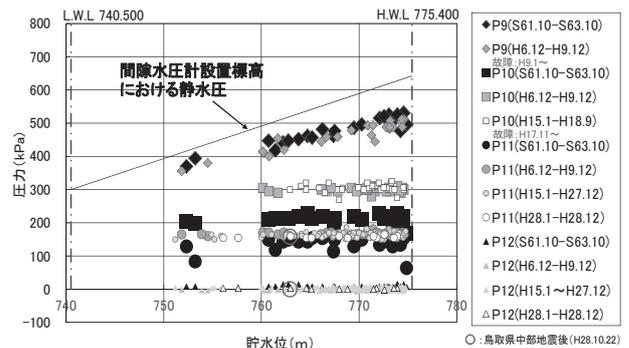


図-13 間隙水圧（P9, P10, P11, P12）－貯水位相関図

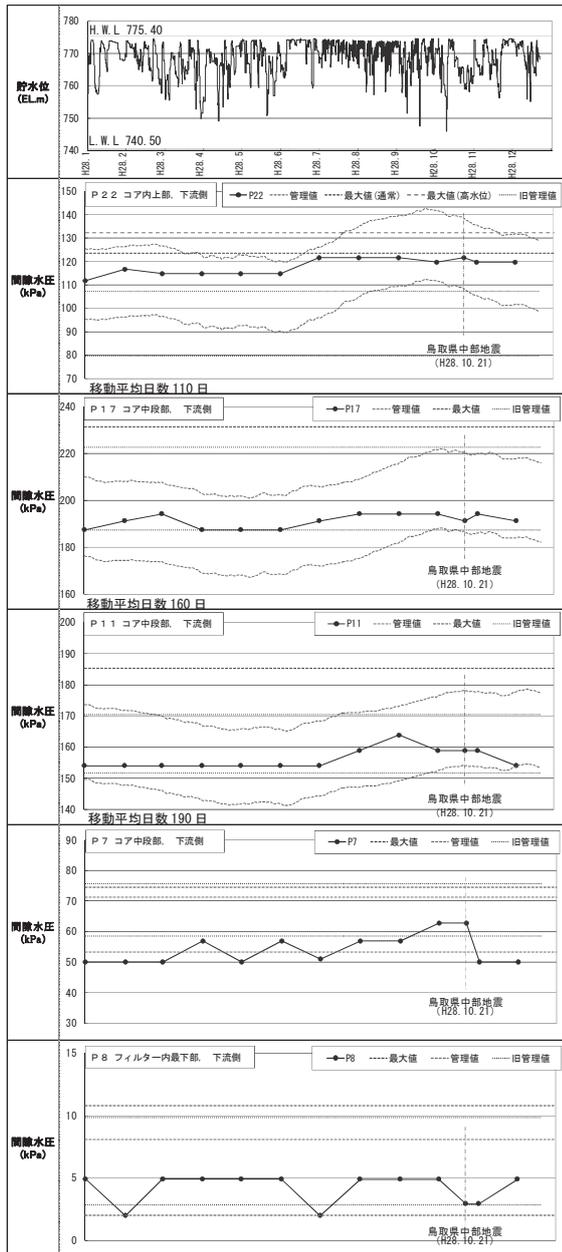


図-14 管理基準に基づく管理図（間隙水圧）

幅に収まっている。また、最も頻度が高い漏水量は300～400l/分であり、初期湛水時の漏水量600l/分から大幅に低下している。平成28年の抽出した計測値は、1点（316l/分）であり、これまでの傾向を逸脱するものではない。

平成28年の計測値について管理基準に基づくダム漏水管理図を図-18に示す。この図より、降雨時および融雪時に管理基準を一時的に超過するときもあるが概ね管理基準内で推移している。また、鳥取県中部地震後の計測値についてもこれまでの傾向を逸脱することなく安定して推移している。

以上から、至近のダム漏水量の傾向は安定した挙動を示していると判断できる。

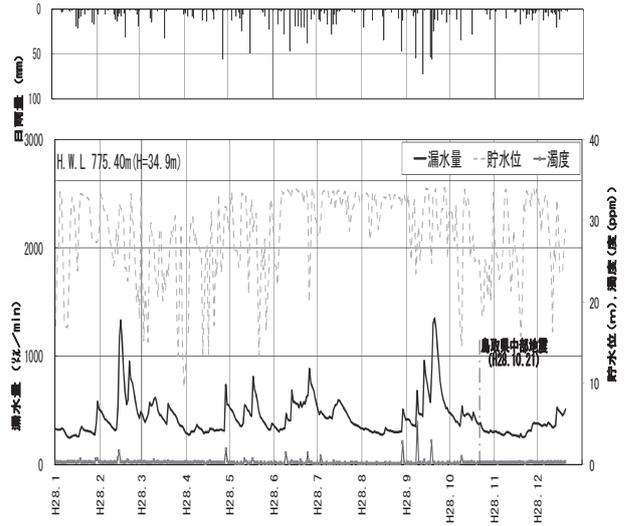


図-15 ダム漏水量・漏水濁度の経時変化（平成28年）

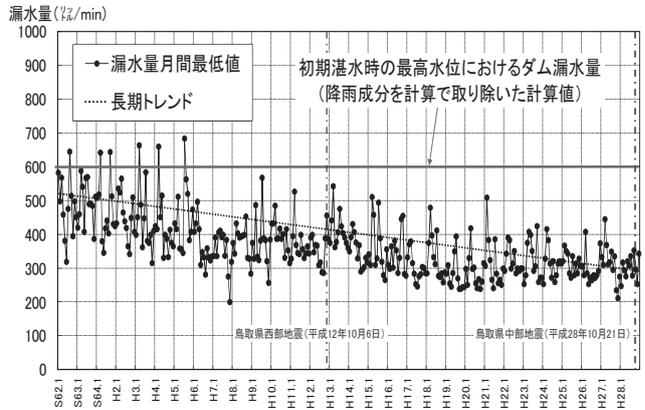


図-16 ダム漏水量の月間最低値（昭和62年～平成28年）

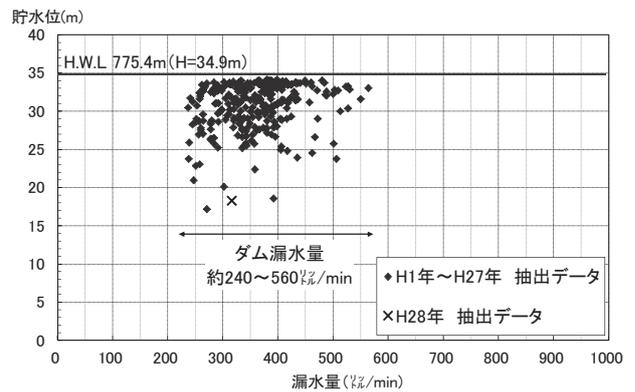


図-17 貯水水位とダム漏水量関係（平成元年～平成28年）

4.4 ダム漏水濁度

図-15から、ダム漏水の濁度は、降雨時を除いて1度（ppm）程度以下の清澄な状態で推移しており、これまでの傾向を逸脱するものではない。

平成28年の計測値について管理基準に基づくダム漏水濁度管理図を図-19に示す。全計測値が管理上限値以下で

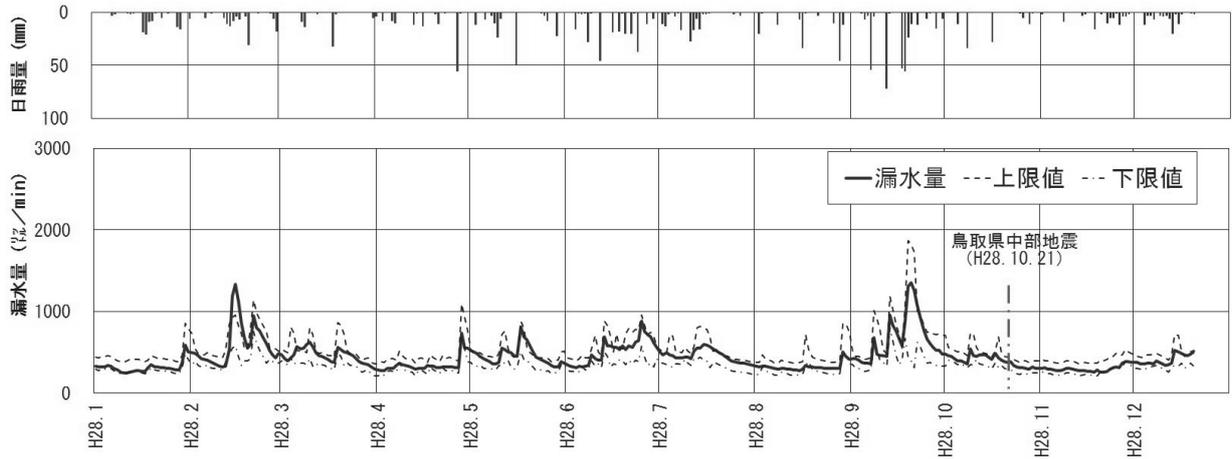


図-18 管理基準に基づく管理図（ダム漏水量）

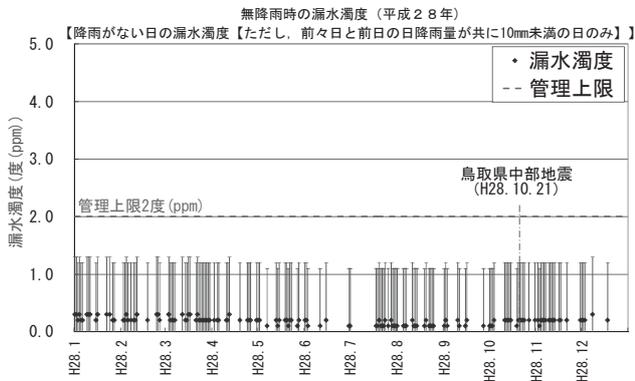


図-19 管理基準に基づく管理図（ダム漏水濁度）

表-2 日常管理の内容

項目	頻度	実施内容
点検 (通常時)	1回/年	構造物（監査廊含む）等の機能・構造・部品等の異常の有無調査
巡視 (通常時)	1回/週	構造物（監査廊含む）異常の有無確認、計測機器の動作確認等

断のみに頼らず、客観性を保つために検討した管理基準の作成、②計測データの分析・評価、③同型・同規模の他ダムの計測値との比較・検証、④ダムの巡視・点検他による確認を行った結果を以下に示す。

あり、鳥取県中部地震後の計測値についてもこれまでの傾向を逸脱することなく安定して推移している。

以上から、至近のダム漏水濁度の傾向は安定した挙動を示していると判断できる。

4.5 日常管理による評価

日常管理は、ダム全体の安定性や機器の信頼性等を把握する上で重要な要素である。平成28年は、表-2のとおり巡視・点検を実施しており、安定性に影響を及ぼす異常な兆候は確認しておらず、鳥取県中部地震後に実施した臨時点検においても、異状は無かった。

また、巡視に併せて実施している監査廊基盤部の相対変位測量および監査廊連絡坑クラックの計測結果に大きな変動はないなど、異常な兆候は確認されておらず、これまでの傾向を大きく逸脱するものではない。

5. 結論

土用ダムの堤体の安定性を評価するにあたり、①定性的判

- (1) 外部変形の評価に用いる管理基準は、計測値と相関性の高い経過日数と貯水位を変数とした重回帰分析を行うことで、精度の高い推定式を得た。
- (2) 間隙水圧の評価に用いる管理基準は、計測値に影響する貯水位には時間遅れが生じることに着目し、貯水位の移動平均を変数とした回帰分析を行うことで、精度の高い推定式を得た。
- (3) 漏水量の評価に用いる管理基準は、土用ダムの漏水を形成する成分の1つである降雨の推定に融雪モデルを組み込んだ降雨量連動型4段タンクモデルを採用し、降雨時および融雪時における推定精度が向上した推定式を得た。
- (4) 堤体の変形について、沈下量、水平変位量の経時変化、他ダムとの比較、管理基準に基づく評価から、堤体の力学的変化は安定した状態にあることを確認した。また、層別沈下量の経時変化についても同様に、安定した挙動を示すことを確認した。
- (5) 堤体内および基礎岩盤内の間隙水圧について、各測点における貯水位との相関関係に経時的変化がないこと、同一標高測点における計測値比較および管理基準

に基づく評価から、計測値は安定して推移しており、コアの遮水性が確保されていることを確認した。

- (6) 漏水量について、計測値および月間最低値の経時変化、管理基準に基づく評価から、計測値は安定して推移しており、水理的挙動における堤体の安定性は保持していることを確認した。
- (7) 漏水濁度について、計測値の経時変化および管理基準に基づく評価から、堤体は安定性を保持していることを確認した。
- (8) 土用ダムの日常管理の結果から、ダムの安定性に影響を及ぼす異常な兆候はないことを確認した。

以上を総合的に評価した結果、土用ダムの安定性は確保されていると判断した。

6. おわりに

本報告は土用ダムの堤体の安定性について、計測値の改ざんが判明した以降 10 年間の総合評価を取りまとめたものである。この過程において堤体の安定性評価にとどまらず、各計測管理の高度化、UAV 等の最新技術を活用した管理方法策定¹⁰⁾等、ダムの安定性評価に資する検討を実施している。今後もこれら検討を継続し、さらには、日々進歩を遂げている AI や IoT といった ICT 技術の情報を収集し、新たな視点による水力発電設備の維持・管理手法を検討していく所存である。

弊社では、これまで報告してきた土用ダムでの取り組みのほかに、ダムや水力発電設備の安全性を評価する「ダム安全性評価委員会」を設置し自己点検を継続実施している。ここでは、各ダムの安全性評価のみならず、土用ダムや他ダムで新たに取り組んだ技術検討事項の紹介や各事業所が保有する土木設備の点検・評価結果ならびに課題について議論を行い、自らの設備を自らで適正に評価できる社員の育成を図っている。また、安全性を評価する計測値や関係法令に基づく報告値に誤りがないようチェック体制を強化しているが、それでも誤りが認められた場合には、直ちに社内規定に基づき社内外的関係機関に情報を発信し、原因究明や再発防止対策、安全性再評価を行うなど、速や

かに是正措置を講じている。これも、土用ダムを発端にした不適切事案で学んだ教訓から、社員一人ひとりにコンプライアンス意識が定着したものと考えており、これら取り組みを風化させず継続していく所存である。

謝辞

10 年間もの長期間にわたり、地盤工学会中国支部の第三者委員会の委員の皆様には、ダムの安定性に関する点検および審査はもとより、コンプライアンス意識の醸成に向けた取り組みに対しても厳しくとも温かいご意見・ご指導を頂きました。この場をお借りし、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 志水克成, 末國光彦, 國西達也, 入江彰, 田岡洋: 土用ダムにおける堤体の計測及び安全性評価, 地盤と建設, Vol.26, No.1, pp.77-83, 2008.
- 2) 森賢太郎, 横田英嗣, 浅間康史, 大山裕聡, 仁科晴貴: 土用ダムにおける堤体の計測および安全性評価 (至近 5 年間の取り組み), 地盤と建設, Vol.31, No.1, pp.175-184, 2013.
- 3) 財団法人ダム技術センター: 多目的ダムの建設管理編, p.1, 2005.
- 4) (社)電力土木技術協会: 最新フィルダム工学, 改訂新版, pp.691-726, 1981.
- 5) ダム管理調査委員会: ダム管理調査要領, pp.226-228, 1987.
- 6) 森賢太郎, 横田英嗣, 仁科晴貴: フィルダム漏水量管理の高度化検討の取組み, (社)電力土木技術協会誌, No.375, pp.47-51, 2015.
- 7) 近藤信昭: 長期観測結果に基づくロックフィルダムの挙動に関する研究, 大ダム, No.140, pp.71-83, 1992.
- 8) (社)電力土木技術協会: 最新フィルダム工学, 改訂新版, p.264, 1981.
- 9) Nakamura, A., Yasuda, N., Kojima, M., Fujisawa, T., Itou, M., : Analyses of Behaviors of Filldams (Part 2), *Technical Memorandum of P.W.R.I.* No.3255, pp.1-45,1994.
- 10) 土江真吾, 砂子田正和, 小畑大作: UAV (無人航空機) を活用したフィルダムリップラップ材の劣化状況把握手法, (社)電力土木技術協会誌, No.389, pp.37-40, 2017.

(2017 年 6 月 23 日 受付)