

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）

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

森賢太郎	Kentarou MORI	(中国電力(株) 流通事業本部)
横田英嗣	Hidetsugu YOKOTA	(中国電力(株) 流通事業本部)
浅間康史	Yasufumi ASAMA	(中国電力(株) 流通事業本部)
大山裕聡	Hirotooshi OHYAMA	(中国電力(株) 流通事業本部)
仁科晴貴	Haruki NISHINA	(中国電力(株) エネルギー総合研究所)

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）の上池用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」を実施している。

本報告は、初回の「堤体の安定性点検」から 5 年が経過した時点でのダムの堤体の安定性の評価内容について、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 : H-4)

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、ダム頂長 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取り扱い、改めてダム堤体の安定性の評価を実施し¹⁾、その評価を毎年継続・実施している。

この安定性の評価結果については、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 年度から受けている。

本報告は、至近（平成 19 年～平成 23 年）の審査内容の他に考察を加え、中間報告とするものである。

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など、ダムの異状を示す何らかの前兆現象があらわれるとされる²⁾。既往事故事例報告³⁾でも、沈下や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、漏水濁度など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・法面上に 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、堤体中央部に層別沈下量も計測している。各計測頻度は、1 回/月である。このうち、変形量の計測方法については、従来の方法¹⁾から以下のとおり一部変更している。

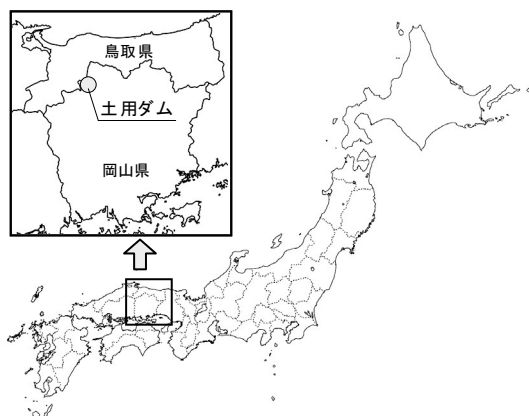


図-1 土用ダム位置図

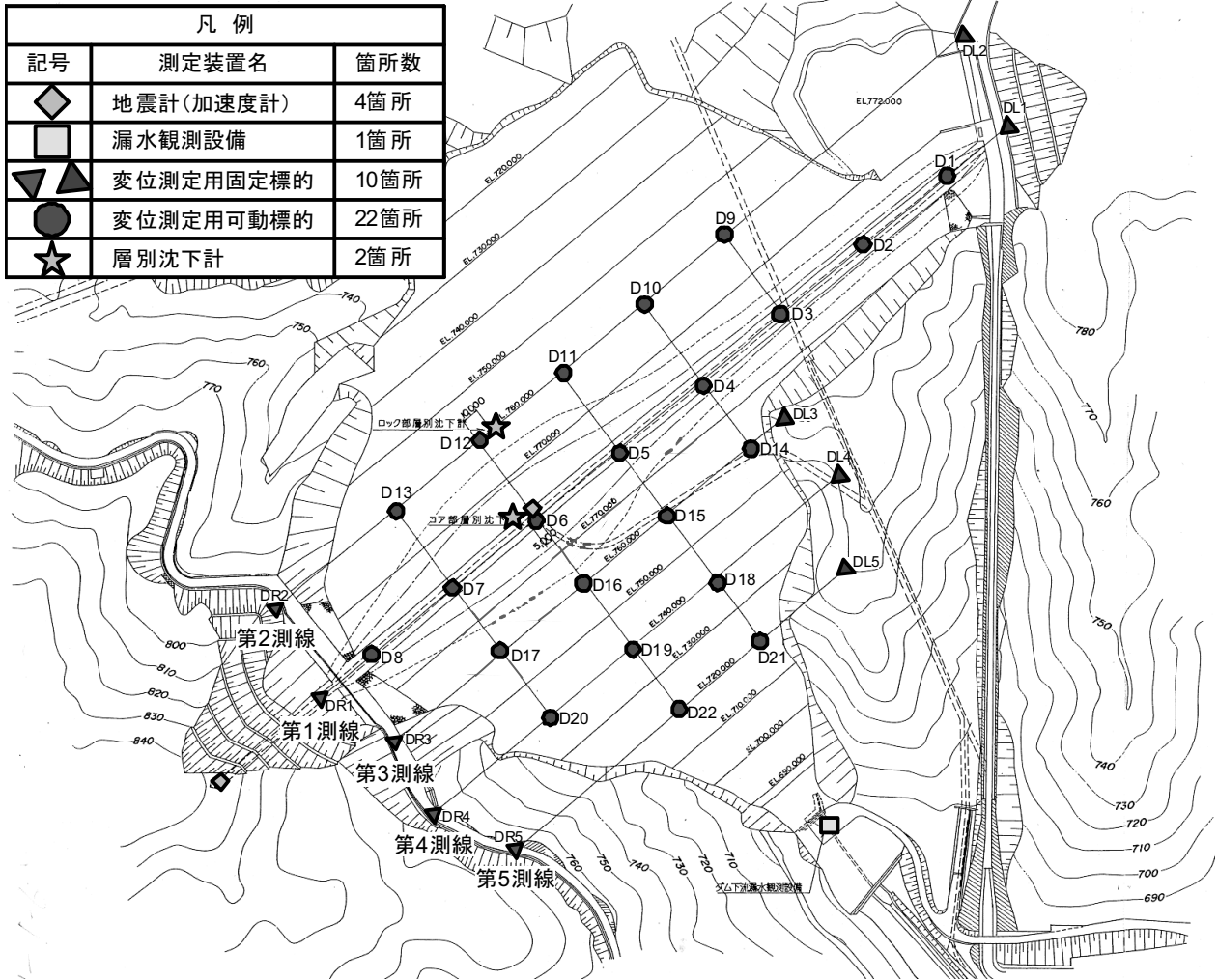


図-2 土用ダム平面図および計測位置図

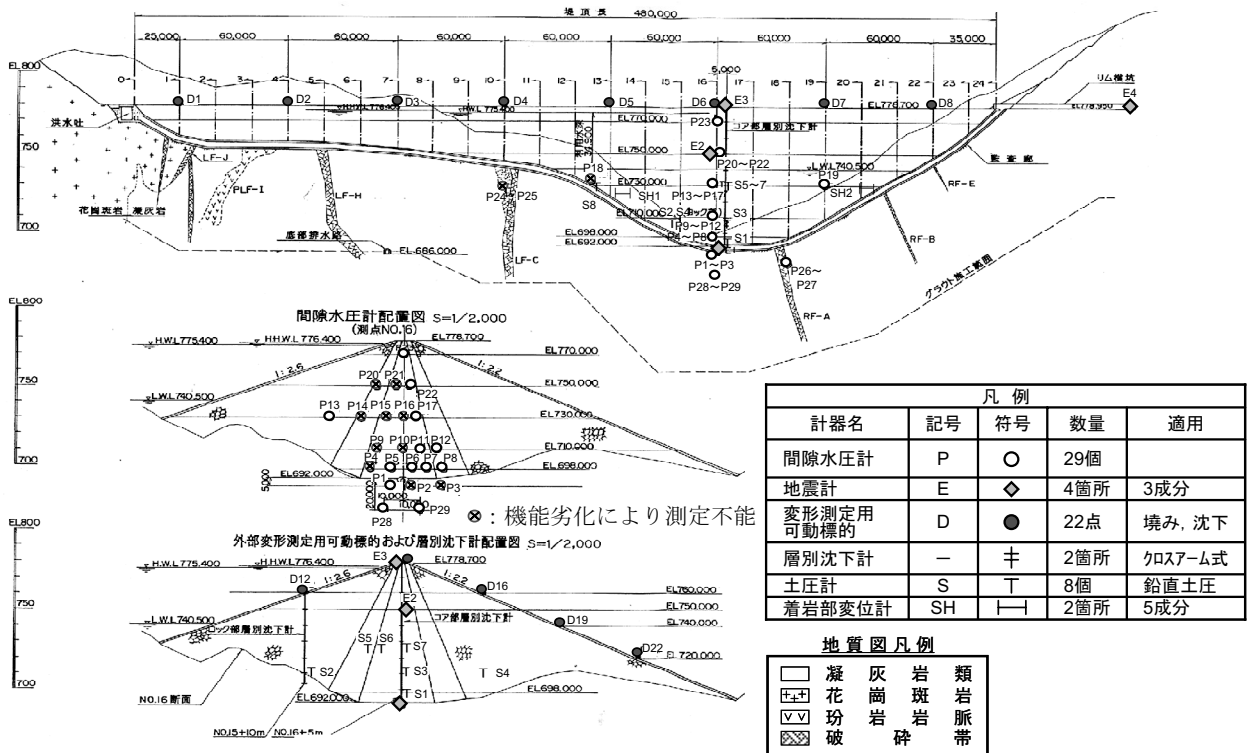


図-3 土用ダム断面図および計測位置図

外部変形（水平変位量）の計測は、セオドライト正視準から反視準への移行時に正視準時の標的位置のまま反視準の計測値を読み取っていた。この方法では前回計測値の先入観および個人の癖が計測値に反映されることから、平成20年12月から反視準への移行時には標的位置を変更した後、改めて標的位置を確認し、計測値を読み取る方法に改善した。計測方法の変更に伴う計測値のバラツキは、計測値の評価に影響がない程度（1～2mmのバラツキ）であることを確認し、また、変更前の計測方法で計測された値は、そのまま評価に用いた。計測のイメージ図（変更前後）を図-4に示す。

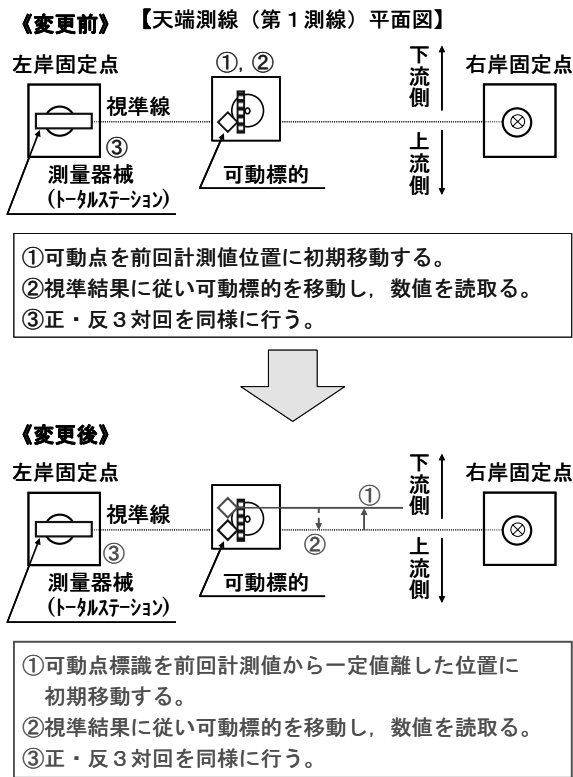


図-4 外部変形（水平変位量）計測方法の変更

2.2 間隙水圧

堤体の間隙水圧は、堤体内部に配置した29箇所の間隙水圧計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、相関図をもとに定性的に判断する手

法が一般的である⁴⁾。しかし、定性的判断のみに頼ると異常の判断に客観性が保てない可能性があるため、異常値や計測ミス等を等しく判断できるように、管理基準を作成した。

管理基準は次の4項目を対象とし、その他（応力、変位、土圧および層別沈下等）の計測記録は管理の対象外とし、管理基準に基づき異常が想定される場合等の考察時に用いる補足資料とした。

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、管理の効率性・確実性確保の観点からD6、D16を代表管理箇所として選定した。母データ（実測値）には、鳥取県西部地震時（平成12年10月6日）による影響を排除し、変形量が安定して推移している平成12年10月～平成19年12月の計測データを採用し、重回帰分析により推定式を作成した。また、水平変位量については平成20年8月から計測方法の一部改善により計測値にバラツキが発生したこと等を踏まえ、計測方法の一部改善後（平成20年12月～平成22年6月まで）のデータを用いた暫定的な管理基準（以下、「管理基準（暫定）」とする）を設定して評価することとした。管理範囲は $\pm 2\sigma$ （信頼区間95%を採用）とした。

3.2 堤体内および基盤岩盤内の間隙水圧

間隙水圧の管理対象は、間隙水圧計測箇所（17箇所、29箇所中12箇所故障）から、管理の効率性・確実性確保の観点を考慮し、次の6点を代表管理箇所として選定した。

コア部	: P6, P11, P17, P22
破砕帯部	: P26
フィルター部	: P8

母データ（実測値）は、初期湛水時および鳥取県西部地震時（平成12年10月6日）の影響を排除し、安定して推移している平成15年～19年の計測データを採用した。また、間隙水圧とダム水位には、明確な相関関係が認められなかったため、管理基準は計測値の平均値 $\pm 2\sigma$ （信頼区間95%を採用）および調整池水位を高水位に保持した状態での最大値以下とした。

3.3 ダム漏水量

ダム漏水量は管理の高度化を図るため、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月から運用している。管理基準は、その予測式から管理範囲 $\pm 2\sigma$ （信頼区間95%を採用）とした。

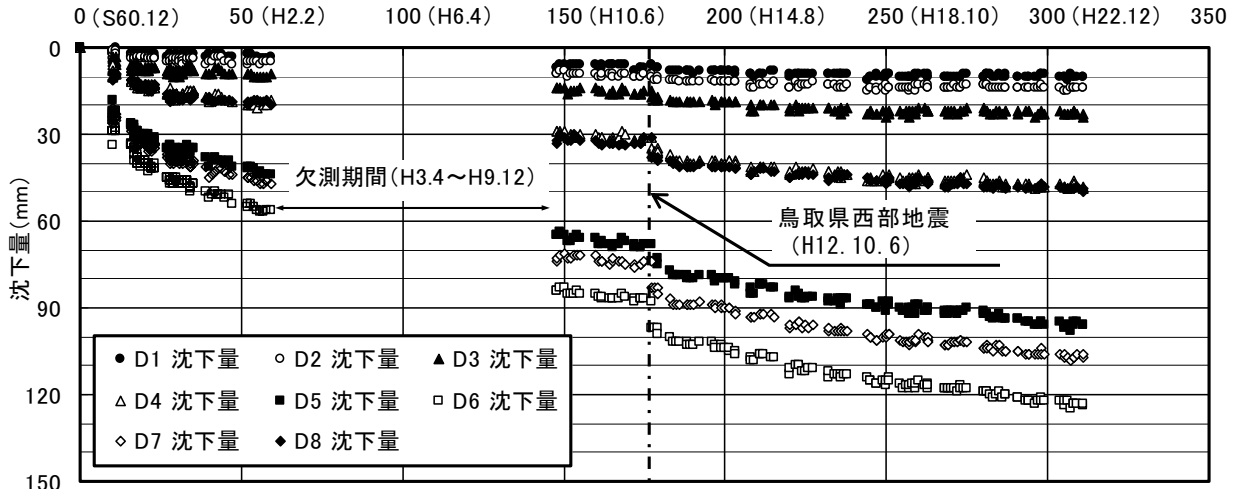


図-5 堤体天端測点における沈下量経時変化図 (昭和 60 年～平成 23 年)

※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）（以下の図も同様）

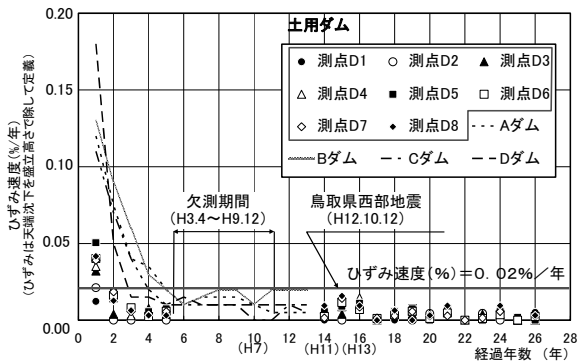


図-6 年間ひずみ速度経時変化図 (昭和 60 年～平成 23 年)

なお、予測式の重相関係数は 0.932 と高精度に実測値を再現している。

3.4 ダム漏水濁度

管理基準に用いる母データ（実測値）は、計器取替（平成 18 年 11 月）以降、平成 19 年 12 月末迄の計測データを採用した。データの傾向から降雨の影響がない期間は清澄な状態で推移しており、管理基準は「無降雨時および降雨量 10mm 以上時は 3 日目以降 1ppm 以下」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

堤体の天端測点における沈下量の経時変化を図-5 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、ダム盛立高さに対応しており、一般的なフィルダムと同様の沈下傾向を示している⁵⁾。

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-6 に示す。年間ひず

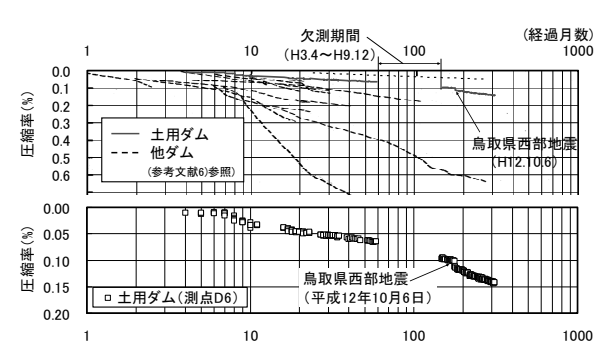
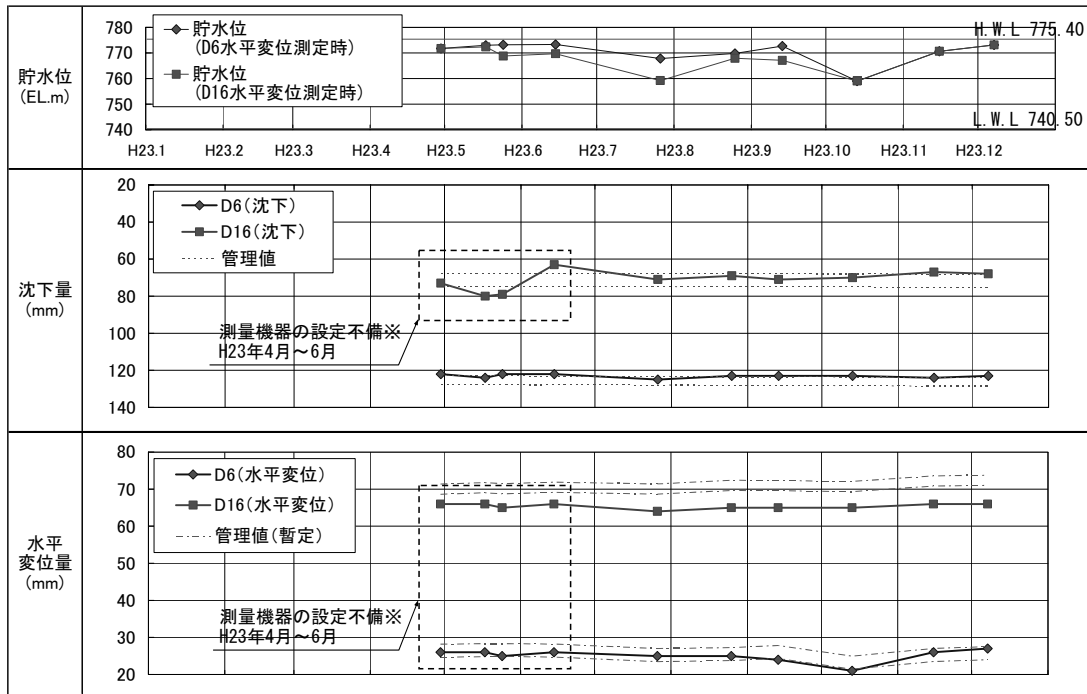


図-7 圧縮率の経時変化図⁶⁾ (昭和 60 年～平成 23 年)

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⁵⁾ になっている。また、最新のひずみ速度は D6 測点で 0.0023% であり、他ダム⁵⁾ と比べても十分に小さいことから、安定期のダムの挙動を示している。

ダムの圧縮率（沈下量/ダム盛立高さ（%））の経時変化を他ダムと併せて図-7 に示す。土用ダムの圧縮率は他ダム⁶⁾ と比べて小さく、かつ経時的に安定した増加傾向を示しており、ダム堤体の剛性が高いものと判断される。

平成 23 年の計測値について管理基準（暫定）に基づく管理図を図-8 に示す。D6、D16 測点の計測値は、ほぼ管理基準を満足しているが、D6 測点で 4 点、D16 測点で 2 点が管理基準値から僅かに外れている。しかし、その量は D6 測点の計測値（12 月 7 日計測値：123mm）で管理基準値（下限値：123.9mm）に対して 0.9mm、同様に D16 測点の計測値（11 月 15 日計測値：67mm）では管理基準値（下限値：68.1mm）に対して 1.1mm と僅かであり、前後の計測値との差は殆ど無く、傾向にも変化が無い、他の各測点の沈下量の傾向に異常なバラツキ等はない、計測後に実施した目視による巡視・点検で異常は認められない等から、堤体の安定性の低下が疑われる事象は想定されない。



※ダム安全性を評価するデータからは除外する。

図-8 管理基準に基づく管理図（沈下量および水平変位量）

以上、沈下量からみて至近のダム堤体は安定した挙動を示していると判断される。

(2) 水平変位量

堤体の天端測点および第5測線における水平変位量の経時変化を図-9、図-10に示す。

図-9から、至近の各測点の傾向は、天端測線では僅かに上流側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。これは平成12年の鳥取県西部地震時に盛立高さの高い箇所を中心に生じた変位が経年的な堤体の変形および調整池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、堤体全体として徐々に安定化方向へ移行した結果と推察される。

また、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、他の計測項目の結果や巡視・点検結果、直上流の第4測線の挙動、周辺地山等に異常な状況は確認していない。また、図-11に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を示す。これより、現在（平成23年12月）のダム堤体の水平変位量およびはダム高に対応して滑らかに分布していることがわかる。これらを踏まえて第5測線で確認された変状については、今後とも原因究明を行うとともに継続監視を行う。

ダム天端測点における湛水後1年半、鳥取県西部地震の

前後および現在（平成23年12月）の水平変位量と沈下量の分布を図-12に示す。現在の水平変位量は既往計測値と同様にダム高に応じて滑らかに分布しており、異常な箇所は認められない。一方でダム軸に沿った水平変位の分布はS字状を呈している。この形状については、他のダムでも前例の報告はあり⁷⁾、特に問題は報告されていないものの、一般的な分布形状ではないことから、日常管理の中で留意すべき事項として取り扱っている。

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ダム水位の関係を図-13に示す。この図より、初期湛水時の水平変位量はダム水位の変化に応じたループ状の変化を示したが、鳥取県西部地震によって生じた残留変形を除き、ダム水位が変化しても通常運用範囲の水位変化（20～35m）に対して数mm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が認められる。

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	第5測線上の測点と高低差の少ない箇所に新たに固定標的を設置し、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。
固定台間の相対変位確認	第4測線（D18、D19）と第5測線（D21、D22）の可動標的を用いて、これらを座標管理して求めた相対変位の推移を確認。
リップラップの状況監視	測線付近のリップラップの状況を写真管理撮影時期は融雪期の前後。

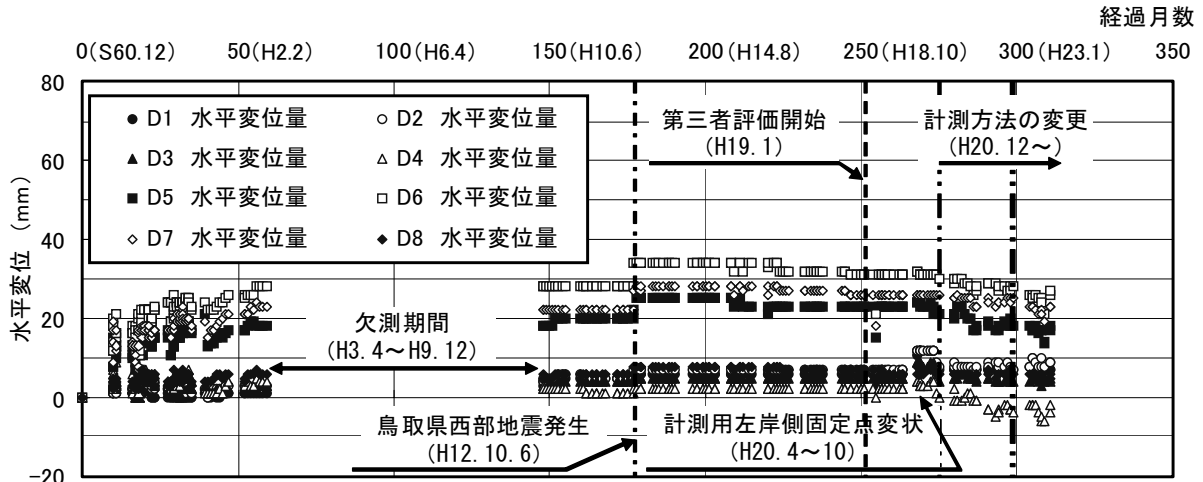


図-9 堤体天端測点における水平変位量経時変化図 (昭和60年～平成23年)

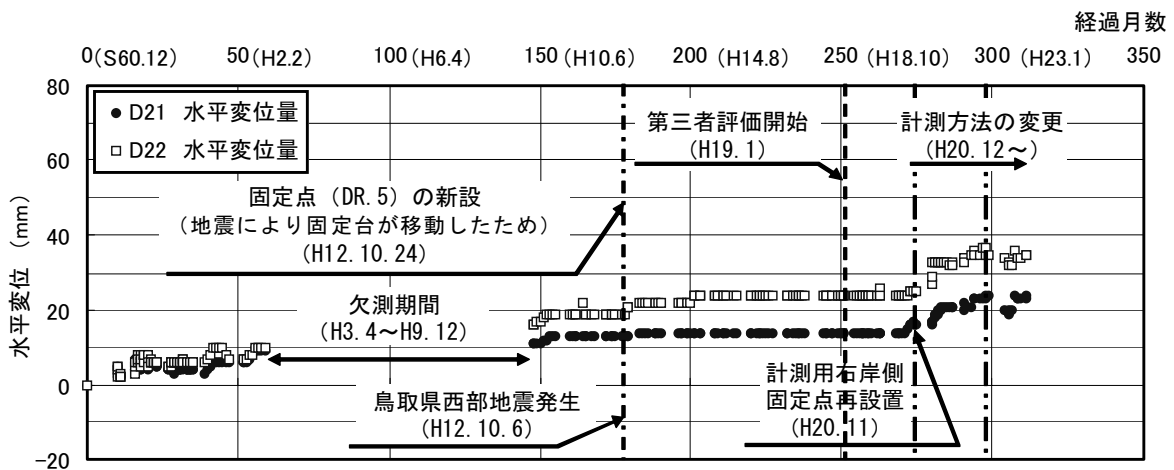


図-10 第5測線における水平変位量経時変化図 (昭和60年～平成23年)

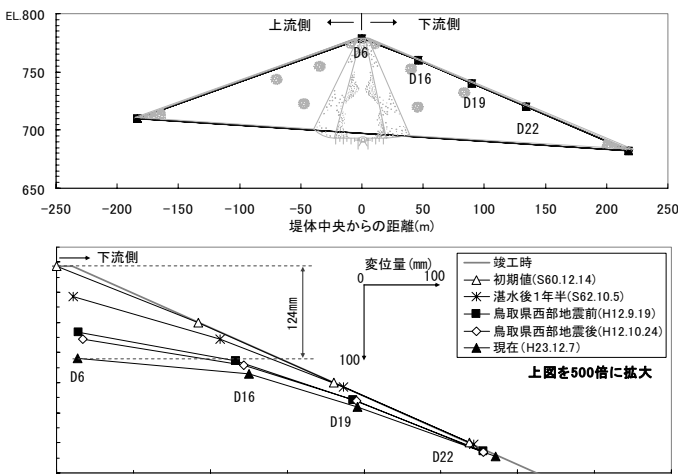


図-11 ダム最大断面における外部変形 (沈下量および水平変位量)

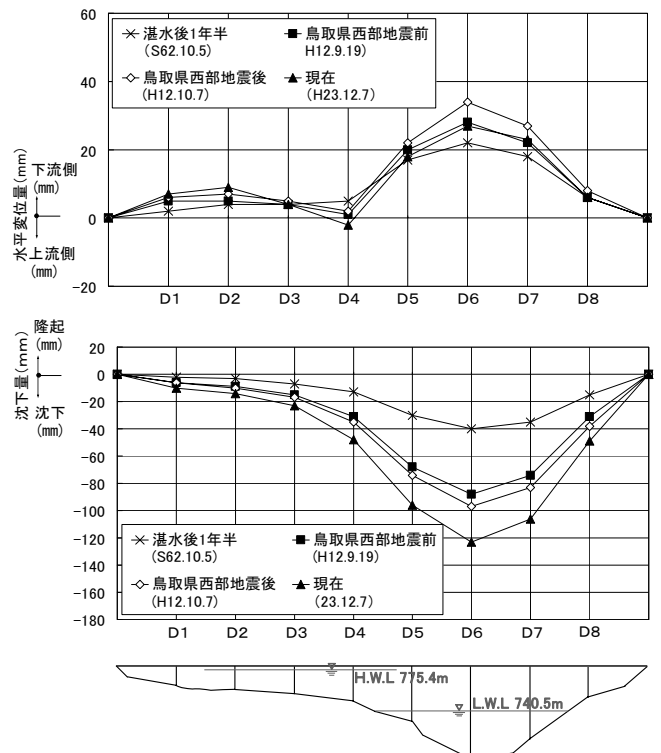


図-12 ダム天端測点の外部変形 (沈下量および水平変位量)

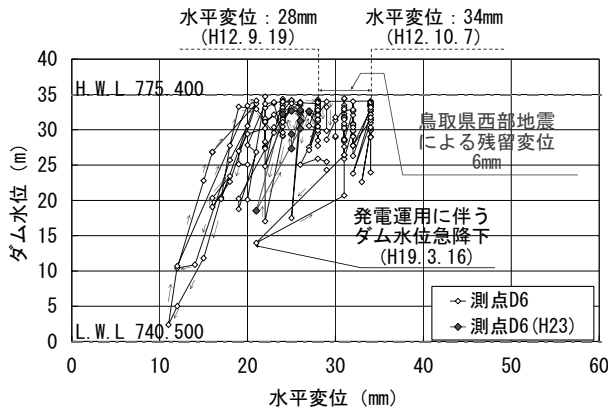


図-13 水平変位量とダム水位の関係

平成 23 年の計測値について管理基準（暫定）に基づく管理図を図-8 に示す。D6 測点は全 6 計測値中殆どの計測値が管理基準（暫定）内であるのに対し、D16 測点は全 6 計測値全てが管理基準（暫定）から外れている。これは D6 測点の管理基準（暫定）に用いた母データの期間の計測値は経時的に微増傾向を示したのに対し、その後は安定傾向に推移したためと考えられる。また、計測後に実施した目視による巡視・点検で異常は認められないことから、堤体の安定性の低下が疑われる事象は想定されない。

以上、水平変位量からみて至近のダム堤体は安定した挙動を示していると判断される。

(3) 層別沈下量

図-14 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、局所的に沈下量が增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される。

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）の計測結果とダム水位の相関図を図-15 に示す。この図より、ダム水位と間隙水圧は線形関係にあり、水位変化に伴って間隙水圧が局所的に変動するなどの異常な傾向は認められない。また、下流側の測点ほどダム水位と間隙水圧関係の勾配および値が小さいことから、コアの遮水性が十分に保たれていると判断される。経年により線形関係に大きな変化は生じていない。

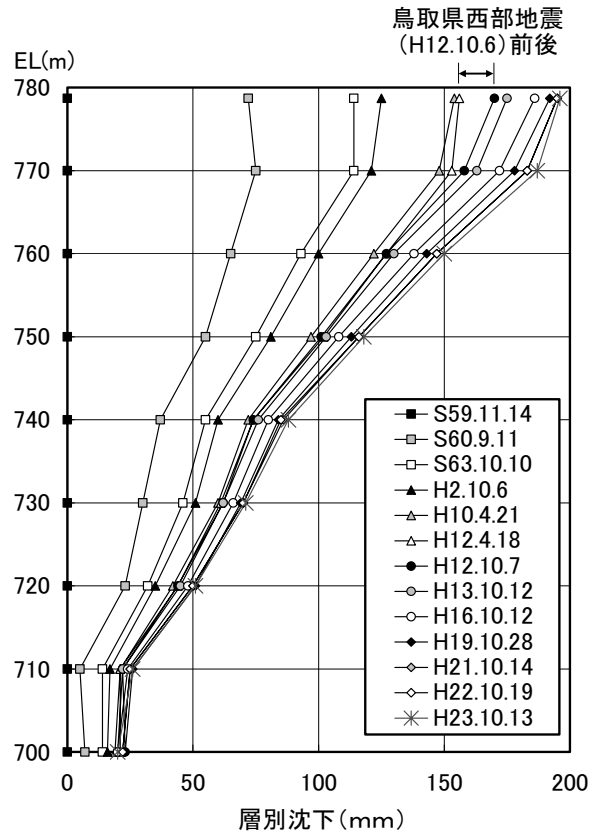
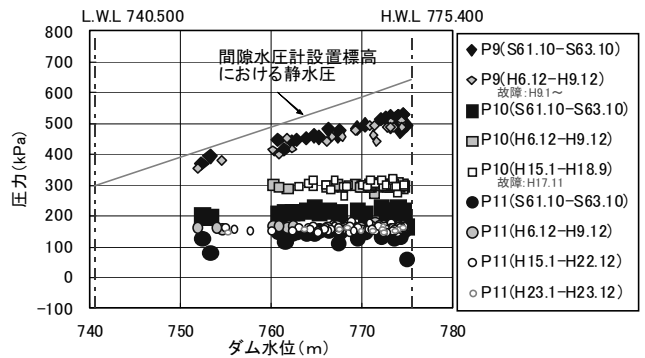
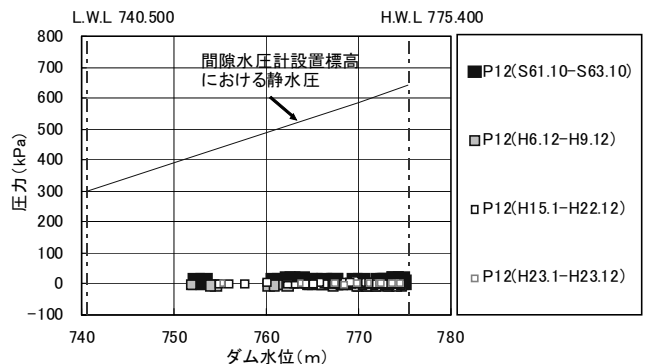


図-14 層別沈下量



(計器 No.P9, P10, P11)



(計器 No.P12)

図-15 間隙水圧－ダム水位相関図

平成 23 年の計測値について管理基準に基づく管理図を図-16 に示す。測点 P22 は上限管理値を超える場合があるが、過去の最大値を超過するものは認められない。一方、それ以外の測点においては、一時的に下限管理値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。

以上、間隙水圧からみて至近のダム堤体は安定した挙動を示していると判断される。

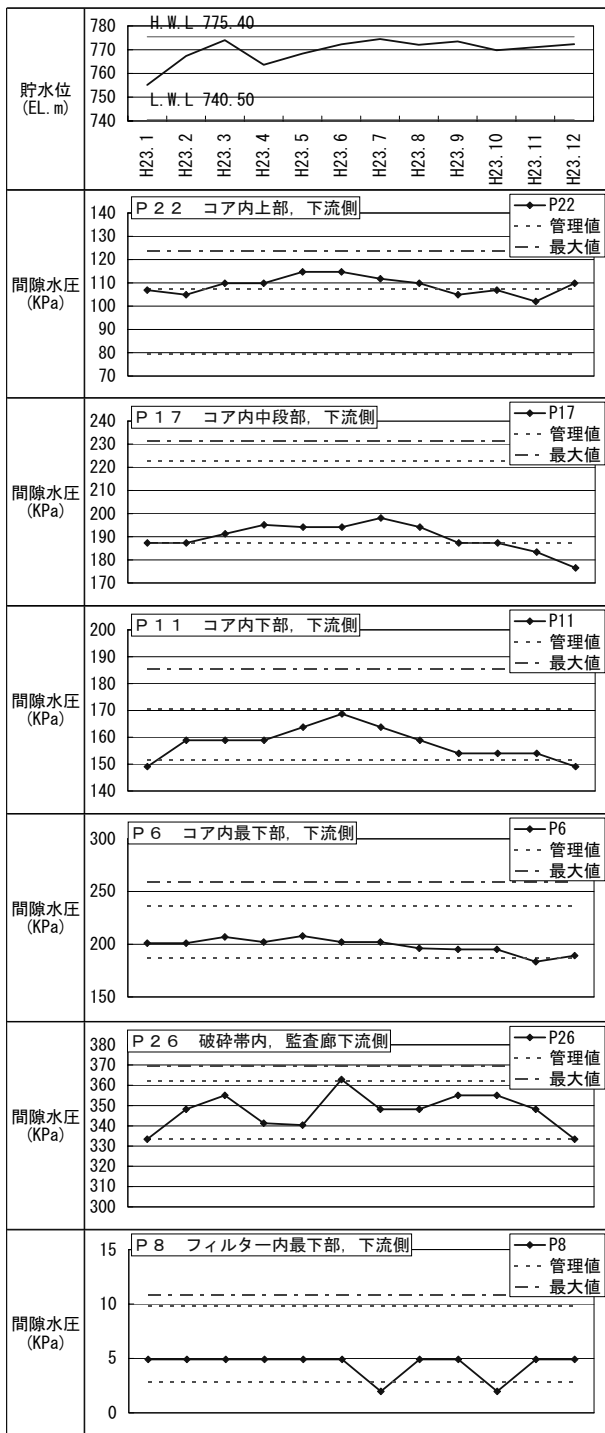


図-16 管理基準に基づく管理図 (間隙水圧)

4.3 ダム漏水量

ダム漏水量は、ダム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するには至っていないことから、両者を合計したもので評価を行った。

平成 23 年のダム漏水量・漏水濁度の経年変化、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年変化を図-17、図-18 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-19 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 23 年の観測データのうち、「7 日間無降雨」、「融雪期や 8 日前以上の降雨が 50mm 以上の降雨が含まれるデータを除く」の条件を満たすデータを用いて整理したダム水位とダム漏水量の関係を示す。この図より、最高水位付近のダム漏水量の最小値は約 250ℓ/分、最大値は約 560ℓ/分とほぼ一定の幅に納まっている。また、最も頻度が高い 300~400ℓ/min は、初期湛水時の漏水量 600ℓ/分から大幅に低減している。平成 23 年抽出データは、5 点 (271~313ℓ/min) であり、これまでの傾向を逸脱するものではない。

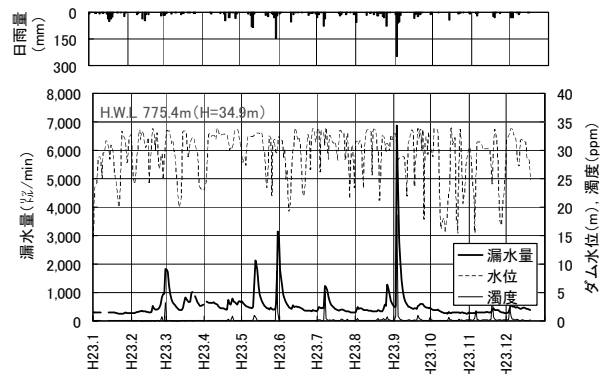


図-17 ダム漏水量・漏水濁度の経年変化 (平成 23 年)

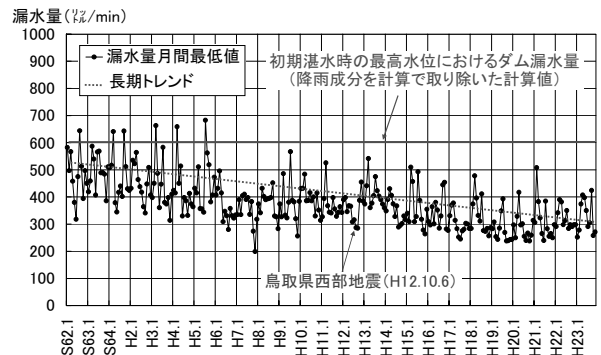


図-18 ダム漏水量の月間最低値 (昭和 62 年~平成 23 年)

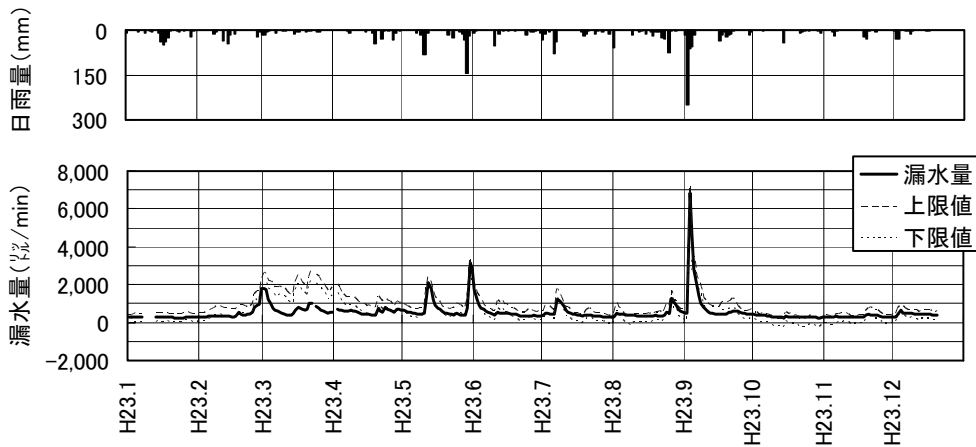


図-20 管理基準に基づく管理図（ダム漏水量）

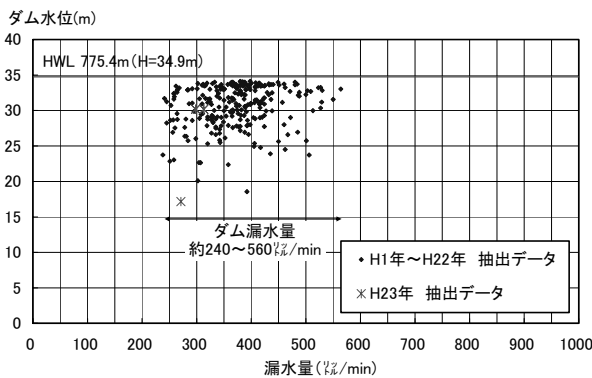


図-19 ダム水位とダム漏水量関係
（平成元年～平成23年）

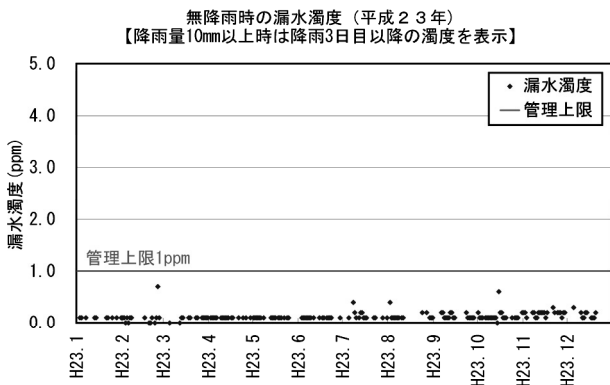


図-21 管理基準に基づく管理図（ダム漏水濁度）

平成23年の計測値について管理基準に基づくダム漏水量管理図を図-20に示す。この図より、降雨時および融雪時（変動影響予測の限界等に起因して管理基準を超過するものと推定される）を除き概ね管理基準内で推移しており、堤体の安定性の低下が疑われる事象は想定されない。

以上、ダム漏水量からみて至近のダム堤体は安定した挙動を示していると判断される。

4.4 ダム漏水濁度

図-17から、ダム漏水の濁度は、降雨時を除いて1ppm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23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-21に示す。この図より、全計測値が管理上限値以下であり、ダム堤体の安定性の低下が疑われる事象は想定されない。

以上、ダム漏水濁度からみて至近のダム堤体は安定した挙動を示していると判断される。

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などを把握する上で重要な要素である。平成23年には、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されていない。

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く、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。

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/月	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
委託監視	1回/週	構造物（監査廊含む）等の状態を目視確認

5. 結論

至近の土用ダムの堤体の安定性について、①主要計測設備による計測データの分析・評価、②同型・同規模の他ダムの計測値との比較・検証、③ダムの巡視・点検他による確認に基づき再評価を行った結果を以下に示す。

- (1) 堤体の変形について、沈下量、水平変位量の経年変化、他ダムとの比較、管理基準に基づく客観的評価を行い、堤体は安定した状態にあることを示した。また、層別沈下量の経年変化を示し、堤体は安定した挙動を示すことを確認した。
- (2) 堤体内および基礎岩盤内の間隙水圧について、代表点のダム水位との相関関係を示し、コアの遮水性が確保されていることを示した。
- (3) 漏水量について、計測値の経年変化および月間最低値の推移を示し、漏水量は基礎岩盤の目詰まり等に起因して減少傾向にあることを示すとともに管理基準に基づく客観的な評価を行い、堤体は安定性を保持していることを示した。
- (4) 漏水濁度について、経年変化を示すとともに管理基準に基づく客観的な評価もを行い、堤体は安定性を保持していることを示した。
- (5) 土用ダムの日常管理の結果から、ダムの安定性の異常を示す情報はないことを示した。

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される。

6. おわりに

土用ダムを始めとする水力発電所のダムの多くは、高度経済成長期に建設されており、現在、経年劣化に伴う設備の健全性・安定性の評価が技術的な課題として認識されている。一方、東日本大震災以降の我が国のエネルギー供給体制を踏まえると安定した電力供給能力を有し、かつ再生可能エネルギーである水力発電が再度脚光を浴びており、既存設備の適正な維持・管理は、電力事業者に課せられた重要な使命である。

本報告は土用ダムの堤体の安定性について、初回の堤体の安定性点検から5年が経過した時点での再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止まらず、ダム水位の変動が堤体の変形量および漏水量に与える影響や降雨成分の影響を踏まえた漏水量の高度管理等、ダムの安定性評価に資する検討を実施している。これらの検討を継続し、新たな視点による水力発電設備の維持・管理手法を提案していく所存である。

謝辞

本稿を作成するにあたり、地盤工学会中国支部の第三者委員会の各委員様には、ダムの安定性に関する点検および審査はもとより、学術的・技術的な観点からの多大なるご指導・ご協力を頂きました。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) 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.
- 3) (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.
- 4) ダム管理調査委員会: ダム管理調査要領, pp.226-228, 1987.
- 5) 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.
- 6) (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.
- 7) Nakamura, A., Yasuda, N., Kojima, M., Fujisawa, T., Itou, M., : Analyses of Behaviors of Filledams (Part 2), Technical Memorandum of P.W.R.I. No.3255, pp.1-45, 1994.

(2013年6月24日 受付)