

# GPSを用いた大型ロックフィルダム堤体の長期変位挙動

竹田 匠吾<sup>1\*</sup>・中島 伸一郎<sup>1</sup>・清水 則一<sup>1</sup>・小堀 俊秀<sup>2</sup>・山口 嘉一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目 16-1)

<sup>2</sup>国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

<sup>3</sup>一般財団法人ダム技術センター (〒110-0008 東京都台東区池之端2丁目 9-7 池之端日殖ビル2F)

\*E-mail: b006vev@yamaguchi-u.ac.jp

**Key Words :** rock filldam, external displacement, GPS, reservoir water level

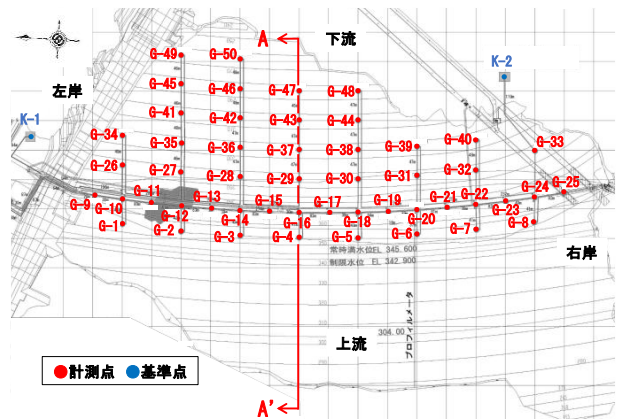
## 1. はじめに

GPS変位計測システムの導入により、ダム、特にロックフィルダムの堤体変位を自動的かつ連続的に観測できるようになってきている。ロックフィルダムにおいて従来の光波・水準測量による手法<sup>2)</sup>では、最も密に計測を行う試験湛水期間でも1週間に1回であるのに対して、GPSシステムでは1時間に1回の高い頻度で変位が自動計測される。ダムの運用期間を通じて連続的で高精度な堤体変位が自動記録されることは、地震時や洪水時などの緊急時の迅速対応という観点からも、また、常時の堤体変形挙動の詳細分析という観点からも堤体の安全管理において有意義である。GPS変位計測におけるデータの時間的連続性や空間的多点性を有効に活用すれば、堤体の安全性・健全性をより合理的に評価できると期待される。

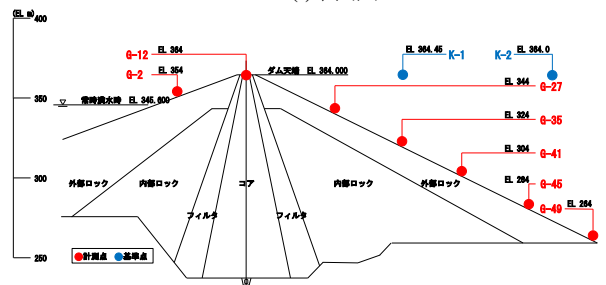
本研究では、試験湛水期間を含め約9年間にわたりGPS変位計測システムを用いて堤体変位を連続計測している大型ロックフィルダムの事例を紹介する。堤体変位の経年的変化とその空間的な分布を示すとともに、貯水位-堤体水平変位関係図が描く曲線の勾配から、堤体の変形特性の経年推移を評価する。

## 2. 対象ロックフィルダムおよびGPS変位計測の現場概要

対象ダムは堤高132.0m、堤頂長723.0mの中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。図-1にダムの平面図と断面図を示す。このダムは、2010年5月に堤体の盛り立てが完了し、2012年12月3日から2013年10月11日まで試験湛



(a)平面図



(b)断面図 (A-A' 断面)

図-1 対象ダムのGPSセンサ配置



(a)基準点K-1 (b)計測点G-29 (c)計測点G-16

図-2 対象ダムのGPSアンテナ

水が行われ、2013年11月16日に竣工した。

図-1に示すように、堤体変位を計測するGPSセンサは、

基準点は堤体外の左岸・右岸に1点ずつ (K-1およびK-2)、計測点は上流側斜面に8点 (G-1~G-8)、天端に17点 (G-9~G-25)、下流側斜面に25点 (G-26~G-50) 設置されている。GPSアンテナは、基準点および上流・下流側斜面の計測点では図-2(a), (b)のようなポール型、天端の計測点では図-2(c)のようなマンホール埋設型<sup>9)</sup>が用いられている。

GPS計測は、試験湛水が始まる直前の2012年11月25日に開始し一部は現在も継続中である。計測方法はL1波 (1575.42MHz) を用いたスタティック測位法<sup>4)</sup>であり、1時間ごとに計測される各計測点の3次元座標から変位を求める。また、計測結果にトレンドモデル<sup>9)</sup>による平滑化処理を行って真の変位を推定している。

### 3. GPSによる堤体変位の長期連続計測結果

図-3は、ダム軸中央の断面であるA-A'断面における計測点6点の、GPS変位計測値である。3次元変位のうち、上下流方向変位は下流向きを正、左右岸方向変位は左岸向きを正、高さ方向変位は隆起方向を正としている。計測期間は基準点K-2が設置された2012年11月から2021年9月末まで約9年間連続計測して得られたものである。図-3(a)の貯水位グラフにおいて①の期間が試験湛水期間に相当する。

図-3(b)より、上下流方向変位の変化は、図-3(a)の貯水位の変化と同期的であり、貯水位が上昇すれば下流に変位し、貯水位が下降すれば上流側に戻る変位を示す。また、全期間を通じて徐々に下流側に変位しており、上流側斜面G-4は2021年4月22日時点で約93mmの下流側変位となっている。下流側斜面では、全期間において天端近くのG-29の変位が大きく、斜面下方のG-47では変位の変動が小さい。図-3(c)より、左右岸方向変位は、A-A'断面においては全期間通じて目立った変化が見られない。

図-3(d)より、高さ方向変位は天端G-16および上流側斜面G-4において、試験湛水期間以降の沈下が100mm程度であるが、試験湛水期間以降の沈下は収束傾向にある。試験湛水期間の天端G-16および上流側斜面G-4地点の大きな沈下は、上流ロック材の浸水沈下とコアの圧縮の影響を反映したものと考えられる。

図-4はGPSによる3次元変位を平面・断面ベクトル図として表示したものである。図-3(a)に示すように、試験湛水期間から1年ごとの変位である。図-4(a)の平面ベクトル図より、堤体の平面的な動きはダム軸中央のA-A'断面に向かう方向に変位していることが分かる。図-4(b)の断面ベクトル図より、堤体の断面的な動きは、全体的に下流方向かつ沈下方向へ変位している。中でも、天端と上流側斜面上の計測点において沈下が大きく、下流側

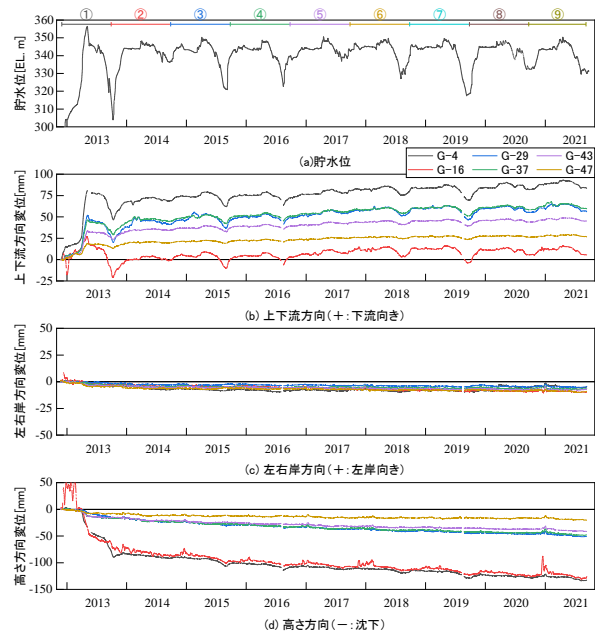
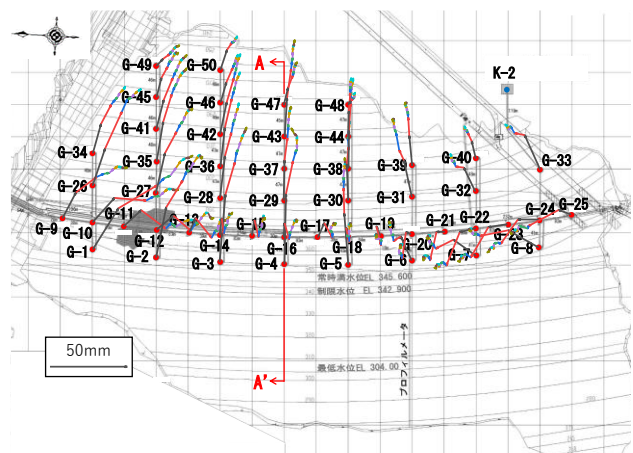
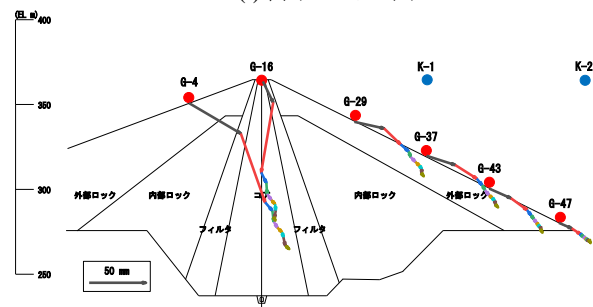


図-3 A-A'断面のGPS変位計測結果 (基準点K-2)



(a)平面ベクトル図

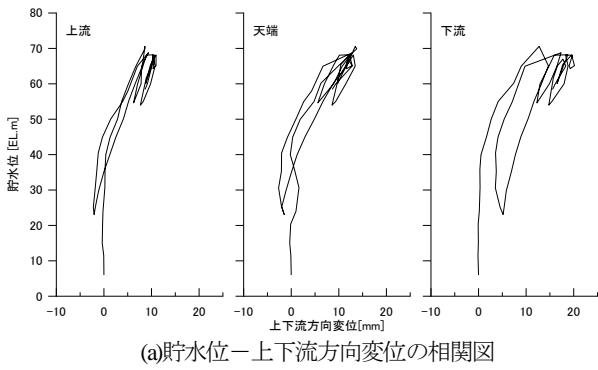


(b)A-A'断面の断面ベクトル図

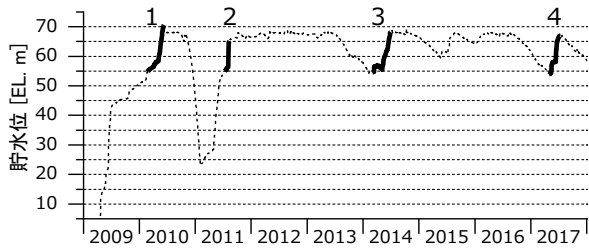
図-4 平面ベクトル図および断面ベクトル図 (基準点K-2)

へ行くにつれて沈下が小さくなっている。天端および上流側斜面において沈下が大きいのは、コアの圧縮と上流側ロック材の浸水沈下による影響で他計測点に比べて沈下していると考えられる。

以上のように、GPS変位計測システムで堤体変位を自動連続計測することにより、貯水位の変化に伴う堤体の水平変位挙動や沈下挙動を詳細に捉えられているほか、図-4のような多点計測結果のベクトル表示により、堤体の空間的な動きの傾向を知ることが可能となっている。

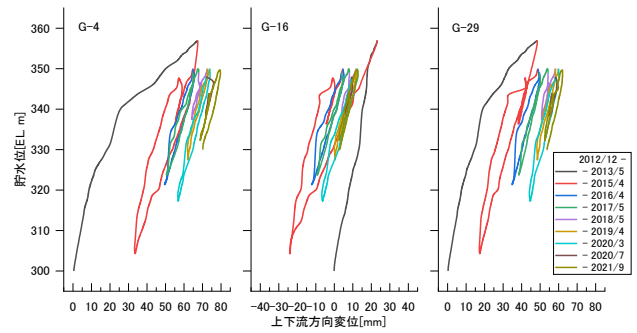


(a)貯水位—上下流方向変位の相関図

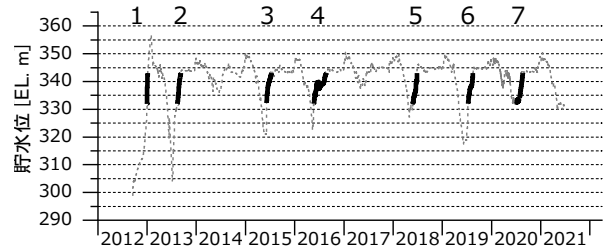


(b)貯水位1 m上昇あたりの上下流方向変位の増分[mm/m] (平均勾配 $\alpha$ )の経年変化

図-6 大保脇ダムの貯水位—上下流方向変位関係<sup>9)</sup>



(a)G-4, G-16, G-29の貯水位—上下流方向変位の相関図



(b)貯水位1 m上昇あたりの上下流方向変位の増分 [mm/m] (平均勾配 $\alpha$ )の経年変化

図-7 対象ダムの貯水位—上下流方向変位関係

#### 4. 貯水位—上下流方向変位関係に基づく堤体変形特性の経年変化の評価

図-3で示したとおり、堤体の上下流方向変位が計測全期間を通じて、貯水位の変化に連動して変位している様子がGPSによる自動連続計測によって捉えられている。同様に計測結果は、筆者らが大保脇ダム（中央土質遮水壁型ロックフィルダム、堤高66.0 m）で行ったGPS堤体変位計測<sup>9)</sup>でも得られている。図-6は、大保脇ダムの中央断面上に位置する3計測点（上流側斜面、天端、下流側斜面）の貯水位とGPSによる上下流方向変位との関係であり、試験湛水から数えて9年間の結果である。図より、貯水位が上昇すれば下流に変位し、貯水位が下降すれば変位が減少する関係が見られる。これは、堤体に作用する水圧荷重の増減によって堤体が水平に押し・戻されているさまを示しており、曲線の勾配は堤体の変形特性をあらわしているといえる。そこで、試験湛水から2017年までの9年間の観測記録から、貯水位がEL. 55 mからEL. 65 mまでほぼ単調に上昇する4期間を取り出し、各期間の貯水位-上下流方向変位の平均勾配 $\alpha$ を求めたのが

図-6(c)である。ただし、平均勾配 $\alpha$ は貯水位1 m上昇あたりの下流方向変位の増分[mm/m]として求めているので、図-6(a)の曲線から求める勾配の逆数にあたる。棒グラフが長いほど堤体の変位が大きくなることとなる。図より、上流側斜面および天端の計測点では、第1期間（初期湛水時）の平均勾配が最も大きく、すべての計測点において、期間が進むにつれて $\alpha$ は低下していることから、堤体の剛性が高まっていることがわかる。

本研究の対象ダムにおいても貯水位EL. 332 m～EL. 344 mの範囲で単調に上昇する7期間を選び、大保脇ダムの事例と同様に貯水位—上下流方向変位関係の平均勾配 $\alpha$ を求めたものを図-7(b)に示す。図より、大保脇ダムと同様に、上流側斜面の計測点G-4、および天端の計測点G-16では、第1期間（試験湛水時）の平均勾配 $\alpha$ が大きく、経年的に $\alpha$ が低下している傾向、すなわち貯水位の上昇に対する堤体の変形量が小さくなっていることがわかる。

今後もGPSによる堤体変位計測を継続し、図-6や図-7のように貯水位—上下流方向変位の平均勾配 $\alpha$ の推移を追跡していけば、堤体の健全性の評価に役立つものと考えられる。なお、図-7の平均勾配 $\alpha$ が大保脇ダムよりも

大きいのは、堤体のサイズのほか、築堤材料等の影響を受けているものと考えられる。今後はそれらの影響を規準化した評価指標を検討していく必要がある。

## 5. まとめ

大型ロックフィルダムの試験湛水開始から約9年間にわたり連続計測されたGPS変位計測結果を用いて堤体変位挙動を評価した。そのうえで貯水位—上下流方向変位関係を用いて大保脇ダムと比較した。

- 1) 水平方向のGPS変位は、上下流方向の変位が卓越し、貯水位が上昇すれば下流に変位し、貯水位が下降すれば上流側に戻る変位を示している。
- 2) 左右岸方向変位のGPS変位は、上下流方向に比べて小さいが、平面ベクトル図によれば、ダム軸中央の断面に集まる方向に変位している。
- 3) 高さ方向のGPS変位は、図-4より、天端と上流側斜面で沈下が大きく、下流側斜面では小さい。天端の沈下はコアの圧密によるもの、上流側斜面の沈下はロック材の浸水沈下によるものと推測される。
- 4) 貯水位—上下流方向変位の平均勾配 $\alpha$ は経年的に減

少しておりダム堤体の変形性は経年的に小さくなっていると考えられる。また、平均勾配 $\alpha$ の経年的推移や空間分布の評価は、堤体の健全性や安全性の判断のための有効な手段であることが示された。

## 参考文献

- 1) 岩崎智治, 小堀俊秀, 増成友宏, 山口嘉一, 清水則一: フィルダム外部変形計測へのGPS自動変位計測システムの適用に関する研究, ダム工学, 22(1), pp.4-15, 2012.
- 2) ダム管理研究会編著: ダム管理の実務, ダム水源地環境整備センター, pp.215-243, 1999.
- 3) 小堀俊秀, 山口嘉一, 岩崎智治, 中島伸一郎, 清水則一: フィルダム天端堤体内部に設置するGPSアンテナの変位計測性能実験とダム外部変形計測への適用性, 土木学会論文集F3, vol.70, pp.18-28, 2014.
- 4) 中島伸一郎, 川崎秀明, 久保田昇助, 中野太郎, 清水則一: GPSおよび振動弦型間隙水圧計によるフィルダム挙動の観察事例, 土木研究所資料第4185号, pp.151-160, 2010.
- 5) 北川源四郎: FORTRAN77, 岩波書店, 390p, 1993.
- 6) 中島伸一郎, 清水則一, 小堀俊秀, 山口嘉一: ロックフィルダムの安全管理を目的としたGPS変位計測の利用と堤体変形特性の評価, ダム工学, 31(1), 2021.