

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

中島 伸一郎¹ 清水 則一¹ 小堀 俊秀² 山口 嘉一³

¹山口大学大学院, ²国土技術政策総合研究所, ³(一財)ダム技術センター

GPS堤体変位計測システムにより得られるロックフィルダムの連続的な堤体変位データを利用して、堤体の安全性・健全性を評価する手法を検討する。GPSシステムが導入された2基のロックフィルダムについて、貯水位-堤体水平変位関係から堤体の変形特性の経年推移を評価した。大保脇ダムでは堤体の剛性が経年的に高まり安定傾向にあることがわかった。石淵ダムでは東北地方太平洋沖地震時に10 mm程度の変位が生じ、堤体の変形特性が一時的に変化したが、その後は地震前と同様の変形特性に回復した。GPSによる堤体変位計測に基づく貯水位-水平変位関係は堤体の安全性・健全性を評価する一つの指標となりうるといえる。

キーワード：ロックフィルダム, GPS, 連続変位計測, 貯水位, 堤体水平変位

1. はじめに

GPS変位計測システムの導入により、堤体外部変位の計測が自動化され、フィルダムの安全監視の省力化と集約化が可能となっている¹⁾。特に、時々刻々と堤体変位データが自動記録されることによって、地震時²⁾や洪水時³⁾などの緊急時に、堤体の挙動を遠隔から安全かつ迅速に把握できるようになった効果は極めて大きい。同時に、時間的に切れ目なく変位を観測できるようになったことで、堤体の常時挙動を詳細に分析することが可能となっている。実際に、貯水位の変化に伴う堤体の前後運動や初期湛水時の浮力による堤体の隆起方向の変位⁴⁾、ロック材の浸水沈下による堤体の上下流方向に偏った沈下⁵⁾、コアの圧縮に伴う経年的な沈下、気温変化による日周期的な微細な変形挙動⁶⁾など、これまでフィルダム工学分野で提示されてきた堤体の力学挙動のいくつかは、GPSによる変位計測によって実証的に確認されつつある。これらを可能にしているのは、時間単位に高い頻度で計測できることに加えて、GPS計測では避けることが困難であった様々な誤差を適切に処理し、真の変位を高い信頼性で推定できるようになった^{7,8)}ことが大きい。

一方、堤体の安全性・健全性の評価という観点からいえば、GPSによる変位計測の活用はまだ開発途上にある。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ことが期待される。

本研究は、GPSによって計測される堤体上下流方向水平変位の関係に着目し、貯水位に対する堤体の変形勾配の経年変化と空間分布から、堤体変形特性と健全性を評価することを目的とする。2基のロックフィルダム、大保脇ダムおよび石淵ダムを評価事例として取り上げる。

2. GPSによる堤体外部変位計測

GPSによるフィルダム堤体外部変位計測は、図-1に示すシステム⁹⁾を利用することが多い。堤体表面の計測点と堤体から離れた基準点にそれぞれGPSセンサを設置し、GPS衛星から送られる電波のうちL1波(1575.42 MHz, 波長約19 cm)を用い、30秒ごとに位相を観測しスタティック方式により1時間ごとに3次元変位を得る。

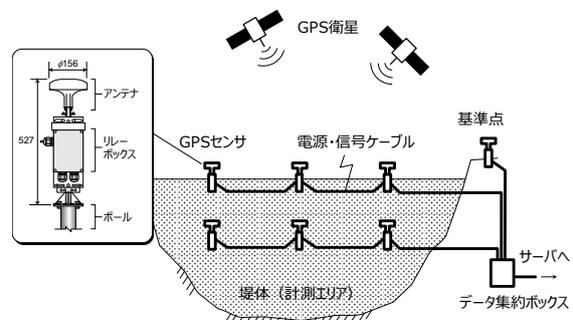


図-1 GPS変位計測システム

正確なGPS変位計測を実施するには、誤差要因に応じた対応が必要となる。衛星数や衛星配置に問題ない場合、GPS衛星から受信機アンテナまで電波が到達するまでの誤差要因には、GPS衛星の時計誤差と軌道誤差、電波の電離層遅延や対流圏遅延、マルチパス、アンテナ位相中心位置の誤差、上空障害物、受信機ノイズ等がある。これらのうちいくつかは、変位計測に用いる干渉測位法の場合、観測方程式として受信電波位相の二重位相差を導く過程で相殺される^{10, 11)}。さらに残る重要な誤差要因が上空障害物とマルチパス、対流圏遅延である。上空障害物と対流圏遅延によるバイアス誤差をマスク処理や対流圏

遅延補正等の手法で除去あるいは抑制したうえで、ランダム誤差に対してトレンドモデルによる平滑化処理を適用すれば、真の値が高精度に推定される⁷⁾⁸⁾。

3. 大保協ダムにおけるGPS変位計測結果と堤体の変形特性

(1) 現場概要

大保協ダム（内閣府沖縄総合事務所北部ダム統合管理事務所管理）は沖縄県国頭郡大宜味村に位置し、堤高66.0 m、堤頂長445.0 mの中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。堤体材料の物性の詳細は他文献^{12), 13)}に譲るが、このダムの特徴として、下流側にランダムゾーンが配置されていて、大規模な押さえ盛土となっているという特徴がある。GPSセンサは図-2に示すように、ダム堤体の下流側斜面に7点、天端に8点、上流側斜面に7点の計22点設置され、基準点K1はダム堤体から離れた右岸に設置されている。GPSによる堤体変位計測は2006年12月から開始し、試験湛水（2009年4月～2011年2月）を経て2020年現在まで10年以上継続している。

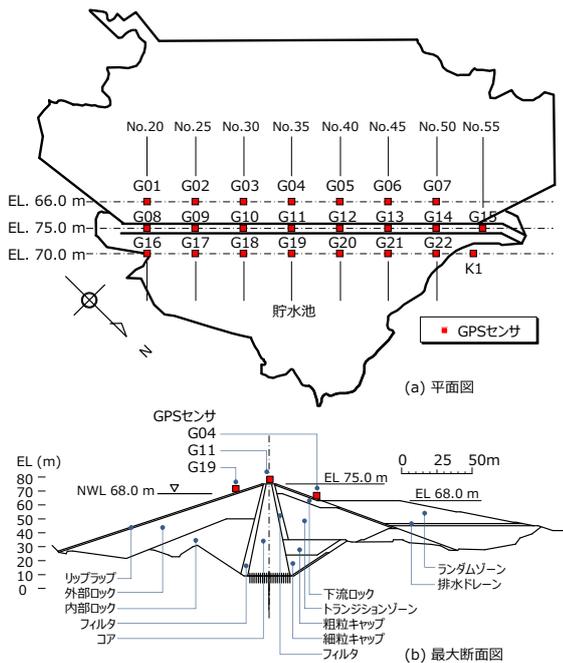


図-2 大保協ダムのGPSセンサ配置図

(2) GPS変位計測結果

図-3は、試験湛水開始日（2009年4月22日）を基準とした各GPS計測点の水平変位（上下流方向）と鉛直変位である。水平変位は下流向きを正、鉛直変位は隆起方向を正としている。変位は1時間ごとに計測されているが、ここでは1日分（24個）を平均して日別値としてトレンドモデル⁷⁾⁸⁾を適用した後、改めて局所重み付き線形回帰¹⁴⁾による平滑化処理を施している。

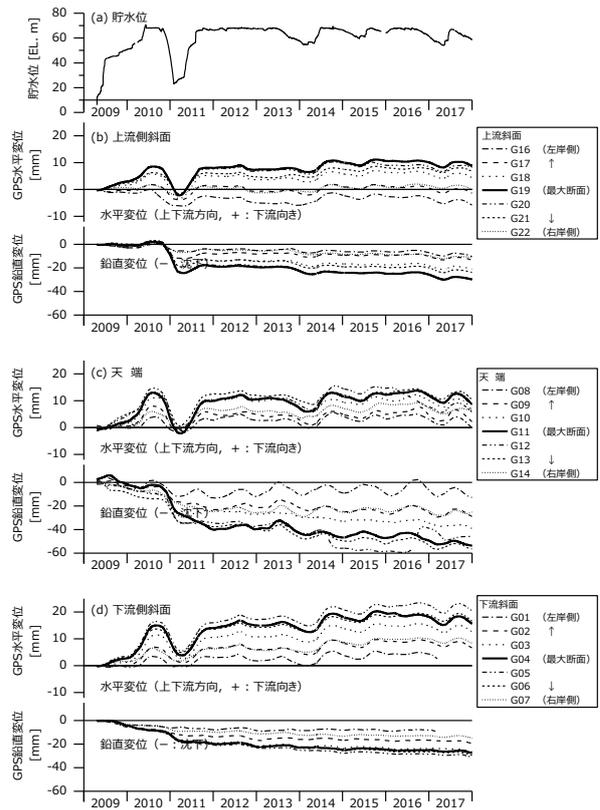


図-3 大保協ダムのGPS堤体変位計測結果

図より、いずれの計測点においても水平変位の変化は貯水位の変化とよく一致しており、貯水位が上昇すれば下流方向に変位し、貯水位が低下すれば上流方向へ戻っている。貯水位の昇降に伴う水圧荷重の増減によって、堤体が下流方向に載荷・除荷されている様子が、滑らかかつ感度良く計測変位に現れている。堤体は長期的には下流方向に変位しており、その速さは下流側斜面G04、天端G11、上流側斜面G19でそれぞれ1 mm/年、0.8 mm/年、0.6 mm/年程度である。

鉛直変位は全体的には沈下傾向を示す。特に、最大断面の上流側斜面の計測点G19や天端計測点G11を見ると、試験湛水期間中の最高水位付近で3 mm程度隆起したあと、つづく水位低下時には一挙に20 mm以上沈下している。初期浸水による浮力によってロック材がわずかに浮き上がって⁴⁾粒子間接点がゆるみ、その後の水位急低下とともに締め固まっている様子、すなわち浸水沈下の様子が鉛直変位に現れていると考えられる。さらに天端計測点G11の鉛直変位には、コアの圧密による長期的な沈下の影響も現れている。

以上のように、GPSでは変位を1時間ごとという高頻度で長期連続的に観測することによって、堤体のわずかな変位も感度良く捉えることが可能である。なお、図-3(c)に示す天端の計測点の鉛直変位の一部には年周期的な上下変動が見られるが、これはGPSアンテナをマンホール内に設置していることによる電波障害の影響（マンホール蓋の影響）であることがわかっている¹⁵⁾。

(3) 貯水位-水平変位関係に基づく堤体の変形特性の評価

図-4は、最大断面の3つの計測点G19, G11, G04における貯水位と水平変位との関係を示している。貯水位の昇降サイクルを識別するため、7期間に区分した。

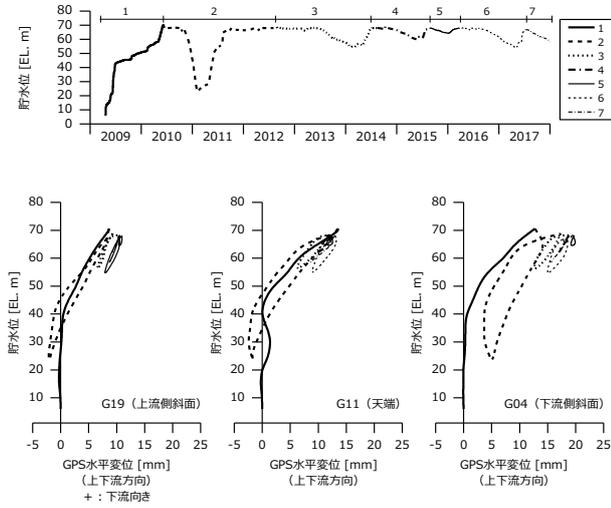


図-4 大保脇ダム最大断面計測点の貯水位-水平変位関係

図より、水平変位はいずれの計測点も、貯水位の上昇とともに下流側に変位し、貯水位の低下とともに変位が減少するループを描く。上流側斜面G19では貯水位の変化に対して水平変位はほぼ一定の勾配で直線的に変化しており、水位上昇時と低下時でおおむね同一の経路を辿っている。天端G11から下流側斜面G04にかけては、水位上昇過程での変位曲線の湾曲が強まると同時に、水位上昇過程と低下過程でのヒステリシスが大きい。

ここで、貯水位の昇降は、堤体上流面に作用する水平荷重の増減に対応するので、貯水位-水平変位関係は、繰り返し水圧を受ける堤体の荷重と変位の関係に対応している。同じ水位の範囲における貯水位-水平変位関係は、堤体の剛性が変化しなければ、貯水位の変化速度が極端に変わらない限り、貯水位の変化に対してほぼ同じ曲線を描くものと考えられ、長期的に勾配の推移を追跡することで堤体の健全性が評価できると思われる。

図-5に示すように、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-水平変位の平均勾配 α を求めて並べた。棒グラフの横軸の1~4は、貯水位グラフの第1期間から第4期間に相当する。ただし、この平均勾配 α は貯水位1 m上昇当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-4の曲線から求める勾配の逆数に当たる。棒グラフが長いほど堤体の変形が大きいことになる。図より、多くの計測点では、第1期間（初期湛水時）の平均勾配 α が最も大きく、期間が進むにつれて α は低下している。勾配 α のダム軸方向の空間的な分布をみると、各測線での堤体高さに応じて、最大断面付近（測線No. 35, No.40）の α が

大きく、左右岸に近づくにつれて α は小さくなっている。ダム軸直交方向の測線で空間分布をみると、上流側斜面の計測点での平均勾配 α は天端や下流側斜面の計測点に比べて相対的に小さいことが確認できる。上流側斜面の水平方向の変位が小さいのは、湛水による水圧荷重を直接支えるのは、上流ロック材ではなくコアであること、コアの水平変位の全てでなく追従したぶんだけ上流ロック材に変位が現れること、さらに、上流ロック材の浸水沈下の影響¹⁰⁾によるものと考えられる。

以上より、ほぼすべての計測点において運用水位の範囲における貯水位-水平変位関係の平均勾配 α の値が経年的に小さくなっているということは、堤体の剛性が全体的に高まっていることを意味している。今後もGPSによる堤体変位計測を継続し、図-5のように貯水位-水平変位の平均勾配 α の推移を追跡していけば、堤体の健全性の評価および異状発生個所の空間的な把握に役立つものと考えられる。

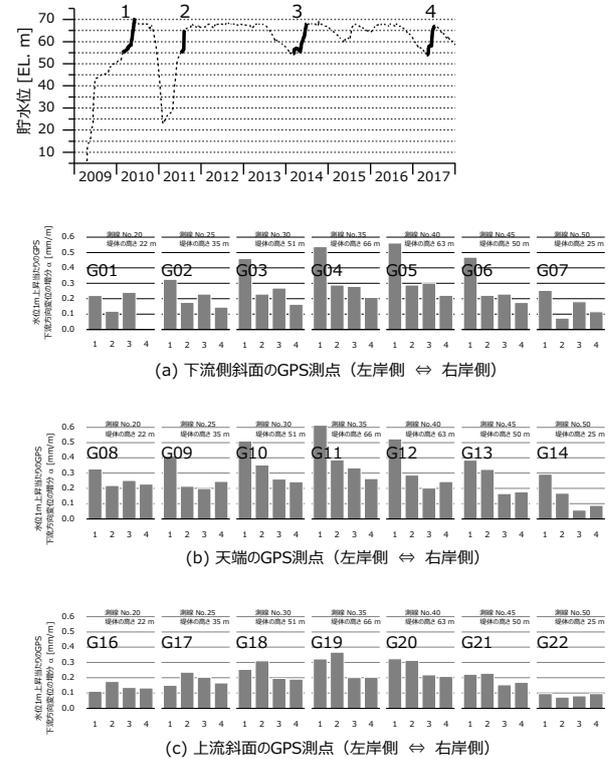


図-5 大保脇ダムのGPS計測点における水位1m上昇当たりの水平変位の増分[mm/m] (平均勾配 α) の経年変化

4. 石淵ダムにおけるGPS変位計測結果と堤体の変形特性

(1) 現場概要

石淵ダム（国土交通省東北地方整備局北上川ダム統合管理事務所管理、現在は下流に建設された胆沢ダムの貯水池に水没）は1953年に建設された堤高53 m、堤頂長

345 mのコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムである。2008年6月の岩手・宮城内陸地震のあと、堤体監視のためにGPS変位計測システムが導入された¹⁷⁾。

図-6は石淵ダムのGPSセンサ配置図である。GPSセンサは上流側斜面に5点、天端に5点、下流側斜面に5点である。基準点K1は左岸下流の洪水吐導流壁に設置されている。GPSによる観測は、上流側斜面と下流側斜面は2008年6月26日から、天端は同年12月19日から開始した。

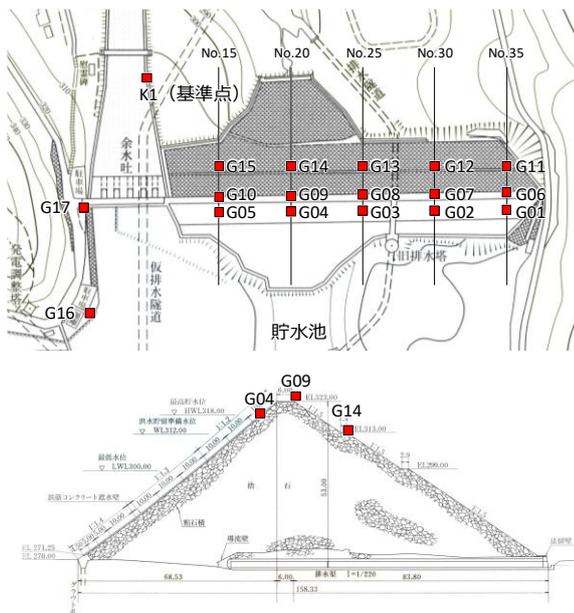


図-6 石淵ダムのGPSセンサ配置図

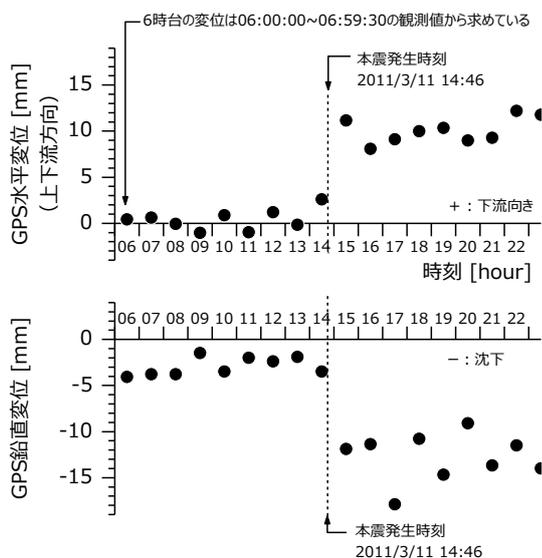


図-7 東北地方太平洋沖地震の本震発生時前後のGPS変位計測結果（最大断面天端計測点G09）²⁾を修正

(2) GPS変位計測結果

石淵ダムは2011年の東北地方太平洋沖地震の際に堤体変位がGPSにより連続計測された貴重なデータを残している²⁾。計測結果によれば、天端の計測点G09では、本震（2011年3月11日）で下流方向へ約11 mm、右岸方向へ約3 mm、沈下方向へ約11 mmの変位を生じ、最大余震（同年4月7日）で下流方向と沈下方向にそれぞれ約2 mmの変位が生じた。また、本震発生時前後を取り出して天端G09の計測結果（図-7）を拡大して見ると、地震発生から1時間後には変位が明瞭に計測されている。このことから、GPSによる変位計測は突発的な変位に対しても即応性が高いことが明らかにされている。

(3) 貯水位-水平変位関係に基づく地震前後の堤体の変形特性の評価

図-8は2009年1月1日を基準とした石淵ダムのGPS変位である。図より、石淵ダムは建設後50年以上経っているが、貯水位の変化に応じて各計測点に水平変位が生じており、水位が上昇すれば下流方向に変位し、水位が低下すれば変位が戻る変化を示している。最大断面の計測点G04、G09、G14での水平変位を比較すると、大保脇ダムでは下流側斜面に比べて上流側斜面の変位の変化が小さかったのに対して、石淵ダムでは逆に、上流側斜面（G04）のほうが下流側斜面（G14）や天端（G09）より大きい。これは石淵ダムの上流側斜面がコンクリートフェイススラブにより遮水され、水圧荷重を直接支えているからと考えられる。

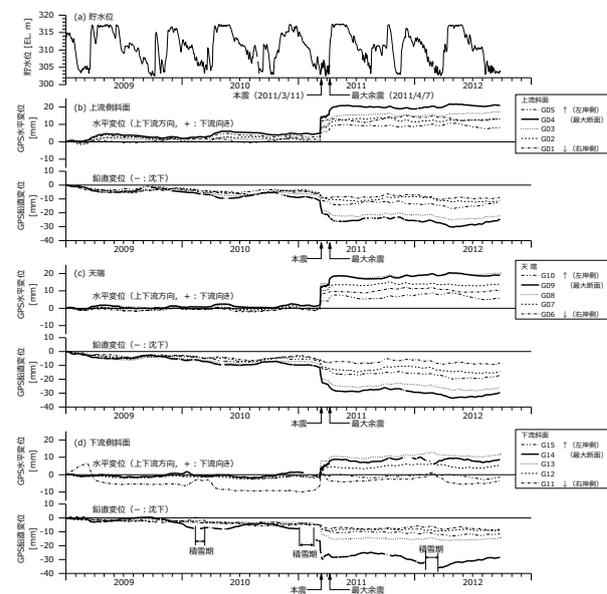


図-8 石淵ダムのGPS堤体変位計測結果

図-8の結果から、最大断面の計測点3点における貯水位-水平変位関係を示したのが図-9である。本震から最大余震まで（2011年3月11日～4月7日）を地震期間とし

て実線で表示している。図より、これらの計測点では、地震期間に約10~15 mmの下流方向への塑性的な変位が生じているものの、最大余震後の貯水位-水平変位曲線の勾配は本震前と変わらない。すなわち、地震前後で貯水位-水平変位の平均勾配 α は変わっていないといえる。

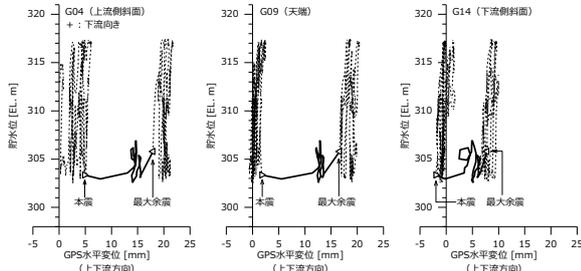


図-9 石淵ダムの最大断面計測点の貯水位-水平変位関係

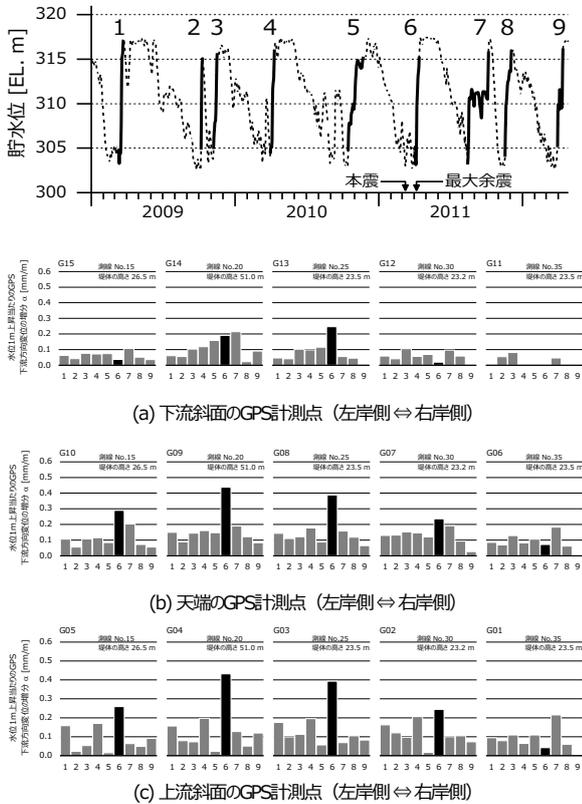


図-10 石淵ダムのGPS計測点における水位1m上昇当たりの水平変位の増分[mm/m] (平均勾配 α) の経年変化

図-10は、大保脇ダムの事例と同様に、貯水位上昇過程 (EL. 305 m~EL. 315 m) での、水位1 m上昇当たりの下流方向変位の増分 [mm/m]の推移を一覧表示したものである。貯水位図の実線に示すように、貯水位がEL. 305 mからEL. 315 mまで上昇した9期間を取り出し、貯水位-水平変位関係の回帰直線の勾配を求めた。棒グラフの黒色で示した第6期間は、地震期間 (本震~最大余震) 後の最初の水位上昇期に相当する。図より、地震後の最初

の水位上昇期 (第6期間) においては、地震前よりも2倍以上の勾配 α を示した計測点がある。しかしながら、その後の平均勾配 α は地震前と同等まで下がっている。すなわち、地震後は堤体の変形が一時的に増大したが、その後は地震前と同等まで回復している。地震によって生じた堤体のゆるみが、その後の時間経過と貯水位上昇によって締め固められ、元の変形形状に近い状態に戻る過程が一時的に大きい勾配 α となって計測されたものと考えられる。

以上より、石淵ダムの堤体は本震から最大余震までの地震期間に10~10数 mm程度、下流方向に塑性的に変位し (図-9)、最大余震後の貯水位上昇過程では、最大断面付近で地震前の2倍程度の変形性を示したが (図-10)、これは一時的なもので、その後の貯水位上昇過程では、地震前と同等の平均勾配 α に回復したことが示された。このことから、堤体の健全性に関して地震による顕著な影響は受けなかったものと考えられる。

5. むすび

本研究では、GPS変位計測システムによって得られる堤体変位の長期連続計測結果を利用し、2基のロックフィルダムについて堤体の変形特性の経年推移と空間分布を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) ロックフィルダムでは長期的にわたり、貯水位の昇降に対応して堤体は下流方向-上流方向へと繰り返し変位を示す。この貯水位-水平変位関係から、堤体の変形性の経年推移を評価することが可能である。
- 2) 貯水位変化に伴う堤体の繰り返し水平変位を精密に描くためには連続的な変位データが必要であり、長期間にわたり堤体の変位を自動連続計測可能なGPS変位計測システムは有効である。
- 3) 大保脇ダムにおける堤体の貯水位-水平変位の平均勾配 α は試験湛水時が最も大きく、その後は堤体の剛性が全体的に徐々に高まり、安定した状態にある。
- 4) 石淵ダムにおける貯水位-水平変位関係から、東北地方太平洋沖地震によって、堤体は下流方向に塑性的に変位しその平均勾配 α は一時的に大きくなったものの、その後は地震前と同程度の平均勾配 α に回復し、堤体の健全性に関して地震による顕著な影響は受けなかったものと考えられる。

以上の成果から、GPS変位計測結果を用いたロックフィルダム堤体の貯水位-水平変位の平均勾配 α の経年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となることが示された。今回は上下流方向変位に焦点を絞って検討を行ったが、今後は鉛直変位や左右岸方向変位も取り込みながら、堤体全体の健全性を定量的に評価可能なシステムの構築を目指す。堤体の変位挙動は、表面遮水壁型と中央土質遮水壁型などの型式によっても異なることから、今後も多くのダムで

GPSによる堤体変位のデータが蓄積されることを期待する。本研究で得られた知見は、胆沢ダムをはじめ、ロックフィルダムの維持管理において適用していく予定である。

謝辞：内閣府沖縄総合事務所北部ダム統合管理事務所および国土交通省東北地方整備局北上川ダム統合管理事務所には貴重な現場計測結果を提供いただいた。また、計測結果の整理は山口大学大学院生の須磨優樹君（現大林組）および上田和男君（現JPハイテック）に協力いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- ダム工学会計測管理研究部会：フィルダムの変位計測に関するGPS利用マニュアル，ダム工学会，2014.
- 小堀俊秀，山口嘉一，中島伸一郎，清水則一：GPSを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測，ダム工学，25(1)，pp.6-15，2015.
- 佐藤信光，市川滋己，津田守正：GPS計測によるロックフィルダム堤体の変形挙動の新たな知見と取り組み，第55回地盤工学研究発表会講演集，21-7-3-07，2020.
- 中島伸一郎，川崎秀明，久保田昇助，中野太郎，清水則一：フィルダムの堤体挙動観察へのGPS変位計測システムおよび振動弦型間隙水圧計の適用，土木学会論文集F3，68(1)，pp.1-12，2012.
- 佐藤信光，富田尚樹，波多野圭亮，曾田英揮：GPSによるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の検討，ダム工学，21(3)，pp.178-189，2011.
- 曾田英揮，佐藤信光：GPS計測を用いたフィルダムの長期水平変位挙動の近似手法の提案と利用に関する研究，土木学会論文集C，74(3)，pp.248-258，2018.
- 清水則一：GPSによる地盤／構造物の高精度変位計測の現状と今後，電力土木，総説，No.366，pp.3-9，2013.
- Shimizu, N., Nakashima, S., Masunari, T.: ISRM suggested method for monitoring rock displacements using the Global Positioning System (GPS), *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.47, pp.313-328, DOI 10.1007/s00603-013-0521-5, 2014.
- 山口嘉一，小堀俊秀，横森源治，大野誠，岩崎智治：GPSを用いたフィルダム外部変形計測に関する一考察，ダム工学，15(2)，pp.137-148，2005.
- Misa, P. and P. Enge（測位航法学会訳）：精鋭GPS基本概念・測位原理・信号と受信機，改訂第2版，航法測学会，2010.
- B. ホフマン-ウェレンホフ, H. リヒテネガー, J. コリンズ（訳：西 修二郎）：GPS-理論と応用（第5版），シュプリンガー・フェアラーク東京，2005.
- 板屋英治，森田陽弘，我喜屋靖：大保ダムにおける設計と施工について，ダム日本，No.756，pp.7-21，2007.
- 板屋英治：重力式コンクリートダムとロックフィルダムの2ダムで構成された大保ダムにおける技術開発，土木技術資料，Vol.51，No.1，pp.38-41，2009.
- Cleveland, W.S.: Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots, *Journal of the American Statistical Association* 74, pp.829-836, 1979.
- 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の適用性，土木学会論文集F3，70(1)，pp.18-28，2014.
- 佐藤信光，米崎文雄，大藪勝美，太田秀樹，中川浩二：ロックフィルダムの実測変形挙動に関する検討，土木学会論文集，No.736/III-63，pp.179-192，2003.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所，独立行政法人建築研究所：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第486号，239p，2008.