

GPSを用いた地震時のダムの変位計測

小堀俊秀・榎村康史・山口嘉一・清水則一

1. はじめに

ダムの安全管理において、堤体の変位を計測する新しい技術としてGPS変位計測システムの開発と導入が進んでいる^{1),2)}。GPS変位計測システムは、3次元変位を自動的かつ連続的に計測可能であるため、ダムの安全管理のための計測の合理化、地震時など緊急時の迅速な計測を実施する手法として期待されている。また、導入の方法として、フィルダムを対象とした変位計測のガイドライン「フィルダムの変位計測に関するGPS利用マニュアル」³⁾（本誌P.50参照）や、岩盤変位を対象とした推奨計測法「ISRM* Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS)」⁴⁾が策定されている（*ISRM: International Society for Rock Mechanics, 国際岩の力学会）。

筆者らは、高精度で連続計測が可能なGPSによるダム変位計測システムを開発し、多くのフィルダムに適用してきたが、これまでに大きな地震時におけるダム変位を計測する機会はなかった。しかし、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震の際、石淵ダムに設置していたGPS変位計測システムによって、地震前から地震後にかけて連続的にダム堤体の外部変位を計測することができた。本報文は、石淵ダムにおける地震時の変位計測結果を示すとともに、地震時の計測の即応性および地震によるダムの堤体変位について考察し、GPSによる変位計測の有効性を検証するものである⁵⁾。

2. GPSによる石淵ダムの変位挙動監視

2.1 導入の経緯

石淵ダムは、1953年に完成した堤高53m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14日、石淵ダムから直線距離で9.4kmの地点を震源とする岩手・宮城内陸地震が

発生した。被害として、天端舗装の波打ちや亀裂、天端舗装と高欄との境界の開きが生じ、堤体の天端や高標高部の下流側斜面には大塊であるロック材料の張り出しが認められたが、上流側の遮水壁には目立った損傷は見あたらなかった⁶⁾。堤体下流部で観測している河床部漏水量については、地震後に大幅に急増したものの、同程度の貯水位に対する初期湛水時の漏水量を上回っておらず、その後は貯水位に応じた変動を示した。

以上より、石淵ダムは安全性を保っていると判断されたが、より安全性を期するために、堤体の外部変形を注意深くモニタリングするものとし、自動連続で変位を計測することが可能なGPS変位計測システムを導入することとした。

2.2 GPS変位計測システムの概要

石淵ダムの外部変位計測に使用したGPS変位計測システムの構成を図-1に示す。GPS変位計測システムはGPSセンサーと通信集約ユニットで構成される。GPSセンサーおよび通信集約ユニットはケーブルで接続し、データの送受と電力供給を行う²⁾。石淵ダムでは、人工衛星から送られる電波の位相を各計測点において同時に30秒間隔で観測し、1時間の観測データを用いてスタティック測位⁷⁾により各計測点の座標を求める。ここで、スタティック測位とはGPS測量の干渉測位の一方法で、基準点を含む複数の観測点にアンテナを設置し、各観測点において4個以上の人工衛星からの搬送波位相を一定の時間同時観測し、観測データを用いて基線解析を行い、各点の基準点位置からの相対座標を求める方法である。変位

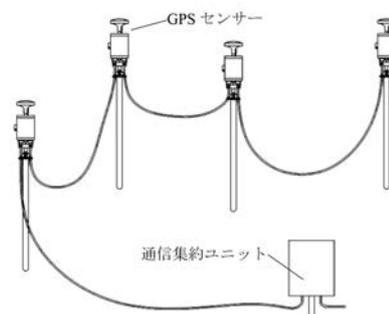


図-1 GPS変位計測システム²⁾

は、1時間毎の計測点の座標値の推移から求めるので、1時間毎の変位を得ることができる。得られた変位に対して、トレンドモデル⁹⁾と呼ばれる時系列解析手法を適用して、真の変位の推定値を求める。トレンドモデルを用いることにより、2mm程度の突発的な変位、平均速度0.1mm/日程度の変位が検出可能である⁹⁾。筆者らは、フィルダム堤体の外部変位計測においてトレンドモデル適用後の計測値が、従来の光波測量よりバラつきが小さく高精度であることを確認している^{1),2)}。

石淵ダムのGPSセンサーは、図-2 (a) の平面図に示すように、堤体上流面のコンクリート遮水壁上に5箇所 (G-1~G-5)、ダム天端に5箇所 (G-6~G-10)、ダム下流面に5箇所 (G-11~G-15)、その他に2カ所 (G-16, G-17) の17ヶ所に配置した。さらに、基準点 (K-1) をダム左岸下流の洪水吐導流壁に設置した。計測は、岩手・宮城内陸地震発生から12日後の2008年6月26日に開始した。ダム上流の法面に設置したGPSセンサーの設置状況を写真-1に示す。GPSセンサーはコンクリート遮水壁やロック材料の上にアンカーボルトで固定し、基礎部をモルタルで固定した。

3. 計測結果

3.1 計測結果の概要

計測結果の例として、図-2 (b) に示すダムの最大断面であるNo.20測線の計測点G-4、G-9およびG-14の三次元変位の推移を図-3に示す。図-3には、スタティック測位で得られた結果にトレンドモデルを適用し、平滑化した結果を変位計測値として示している。図-3には、ダム上下流方向、ダム軸方向および高さ方向の変位計測結果を示している。なお、G-14の計測結果のうち冬季は、GPSセンサーおよびその周辺の積雪により、電波の受信が困難、あるいは不能となり、計測値を得ることができなかつたため、欠測としている。なお、高さ方向変位には、貯水位変化による変動に加えて、年周期がみられる。これは、大気の水蒸気量等に起因する電波の対流圏遅延の影響と考えられ、適切な補正を行うと変動は低減される¹⁰⁾。対流圏遅延補正法のダム計測への適用は今後の課題とする。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (以下本震) では、右岸段丘部にある地震計で

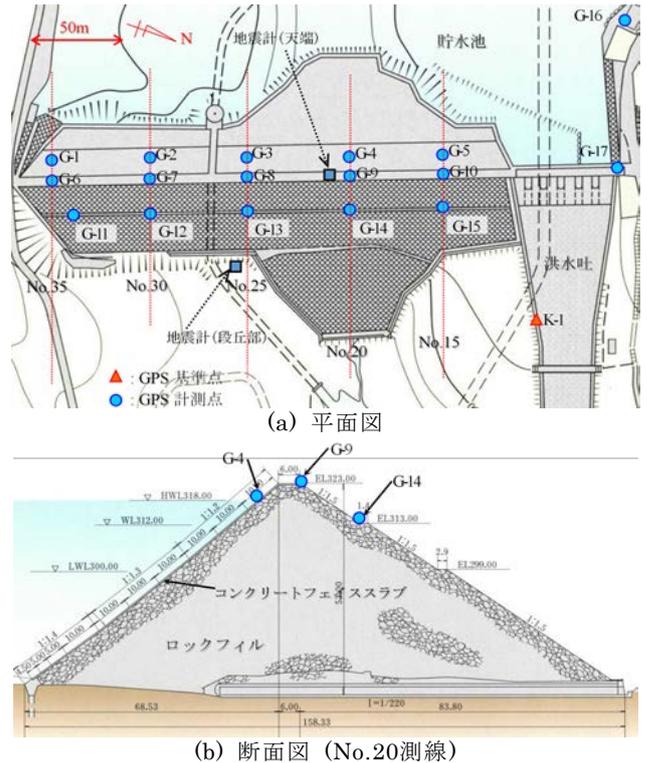


図-2 石淵ダムの平面図と縦断面図およびGPSセンサーの配置



写真-1 法面部におけるGPSセンサーの設置状況 (コンクリート遮水壁上の設置)

最大184galを記録した。また、4月7日に発生した最大余震では、同箇所にある地震計で最大140galの揺れを記録した。図-3中の点線は本震 (3月11日 14:46)、一点鎖線は最大余震 (4月7日 23:32) の発生時刻である。図-3からダム天端のG-9では本震時に下流方向へ約11mm、右岸方向へ約3mmの変位があり、さらに、約11mmの沈下が生じている。また、最大余震時には、約2mmの下流方向変位と沈下がそれぞれあり、左右岸方向の変位はほぼ0であった。

他の計測点においても、本震・余震発生に伴い、ほぼ同様に下流方向および沈下方向の変位が発生している。最大余震後には、突発的あるいは継続的な顕著な変位は見られず、地震前の変位傾向と同様な傾向となったため、地震による堤体の変位

は概ね収束したものと考えられた。

石淵ダムは地震後、天端高欄基礎にクラックが確認されたものの、詳細調査の結果、上流の表面遮水壁に損傷が認められないことから、GPSの変位計測結果とあわせてダムの安全性に問題は生じていないものと判断された。

3.2 地震時の変位計測の即応性

地震の発生時刻をはさんだ計測結果の一例としてG-9地点の上下流方向変位を図-4に示す。図に示す変位は、トレンドモデルを適用する前のスタティック測位による解析結果の値である。図-4(a)は地震発生直前の14時までの変位(図中○で示す)の推移である。それまでの計測結果と特に変わるところはない。図-4(b)は図-4(a)に地震発生時を含む14:00:00~14:59:30の位相観測データを用いて15時に得た変位(図中○で示す)を加えたものである。位相は各計測点において30秒間隔で観測し、1時間の観測データを用いてスタティック測位により変位を求めるため、15時時点では、地震発生時刻14:46前の位相観測データと地震後から15時までの位相観測データを用いて解析され、1時間の観測データが平均されたかたちで変位が得られる。そのため、突発的な変位がこの時間においては得られていない。

しかし、16時の計測結果(図-4(c)の●)では、下流側および沈下方向にそれぞれ約10mmの

明確な変位をとらえている。17:00以降の計測値(図-4(c)~(f)参照)は計測誤差の範囲で変動しているものの、地震直後とほぼ同じ変動幅で推移しているため、16時の計測結果は地震によるダムの変位と考えられる。以上の結果から、GPS変位計測システムは、地震によるダム堤体の変位を、地震発生後約1時間で検出したことがわかる。

3.3 地震前後のダム全体の変位

本震発生前後のダム堤体の計測点の平面変位ベクトルを、図-5に示す。本震前後は、堤体すべての計測点において右岸および下流方向に変位が発生した。その変位量は大きい箇所では下流側に約13.5mm(G-8)、小さい箇所では2.5mm(G-15)であった。

4. まとめ

本研究では、GPS変位計測システムの地震時におけるダム堤体の変位計測の適用性について、東北地方太平洋沖地震時の石淵ダムにおける計測結果に基づき検証した。その結果、GPSによる変位計測により地震による数mm~10数mmの比較的小さなダム堤体の変位が、三次元的に連続計測された。また、変位は地震発生1時間後には明瞭に計測されており、即応性は高く、従来の測量による計測方法に比べ、迅速な計測を行うことが可能であることが確認できた。よって、GPSに

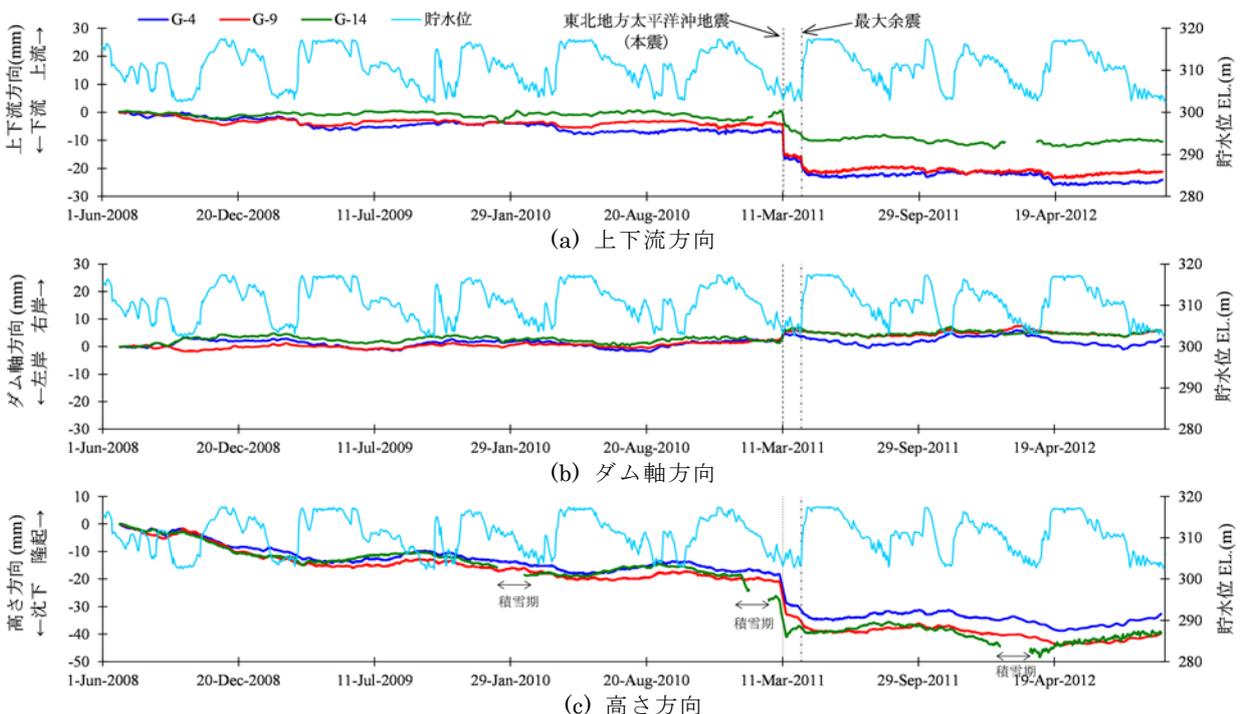


図-3 GPSによるダム変位計測結果 (No.20測線)

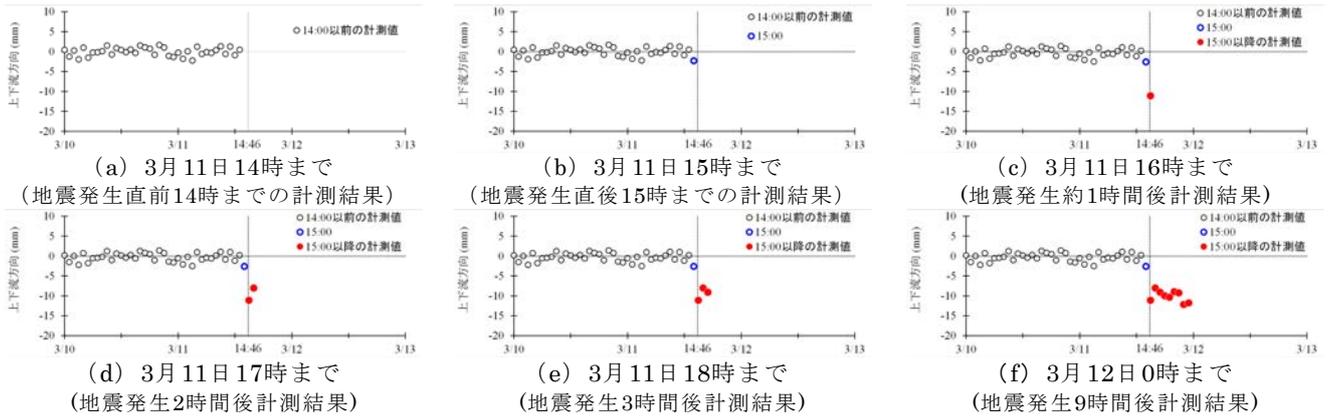


図-4 地震発生後の計測結果 (G-9, 上下流方向変位)
(トレンドモデルを適用する前のスタティック測位による解析結果)

よる変位計測は地震時後のダムの迅速な安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。

実際の地震時のダムの臨時点検では、基本的には地震発生後の後の3時間以内に1次点検、24時間以内に2次点検を実施する。今後は臨時点検における計測結果の具体的な活用の手順、方法等の検討を行う。

参考文献

- 1) 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 (土木情報学)、70(1)、pp.18~28、2014
- 2) 岩崎智治、小堀俊秀、増成友宏、山口嘉一、清水則一：GPSを用いた自動変位監視のためのWebシステムの開発、ダム工学、Vol.22、No.1、pp.4~15、2012
- 3) 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
- 4) N. Shimizu, S. Nakashima and T. Masunari: ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS), Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.47, Issue1, pp.313-328, 2014. DOI 10.1007/s00603-013-0521-5.
- 5) 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、2015.3
- 6) 葛西敏彦、山口嘉一、小堀俊秀：大規模地震で被災したフィルダムのGPSによる地震後の変形挙動監視、ダム技術、No.276、pp.9~20、2009
- 7) Misa, P. and Enge, P. (測位航法学会訳)：精説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
- 8) 北川源四郎：時系列プログラミング、岩波書店、1993
- 9) 松田浩朗、安立寛、西村好恵、清水則一：GPSによる斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証、土木学会論文集、No.715/III-60、pp.333~343、2002
- 10) 増成友宏、武地美明、船津貴弘、清水則一：現場気象データを用いたGPS変位計測の補正について、土木学会論文集F、Vol.65、No.3、pp.356~363、2009

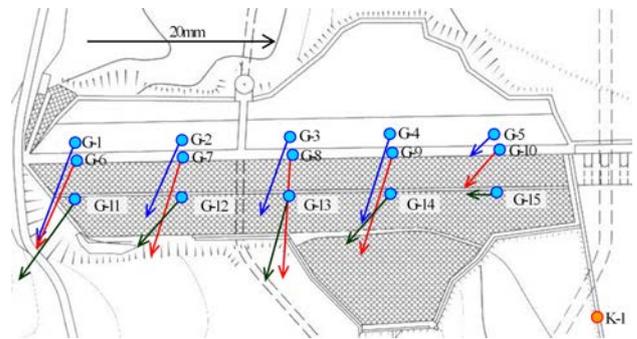


図-5 各計測点の本震時の平面変位ベクトル

小堀俊秀



国立研究開発法人土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム 研究員、博士(工学)
Dr. Toshihide KOBORI

榎村康史



国立研究開発法人土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム 上席研究員
Yasufumi ENOMURA

山口嘉一



国立研究開発法人土木研究所 地質研究監 (元 水工構造物チーム上席研究員)、博士(工学)
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

清水則一



国立大学法人山口大学大学院理工学研究科社会建設工学専攻 教授、博士(工学)
Dr. Norikazu SHIMIZU