

湛水時におけるフィルダム堤体外部変位のGPSによる連続計測事例

川田 陽介^{1*}・中野 太郎²・川崎 秀明¹・清水 則一¹・三村 陽一³・川島 敏幸⁴

¹山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²山口大学 工学部 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

³呉工業高等専門学校 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南2-2-11)

⁴山口県 土木建築部 (〒753-8501 山口県山口市滝町1-1)

*E-mail: kawata@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

ダム安全管理のための計測の合理化は、常時計測のあり方、地震時などの緊急時のリスク管理、コスト削減の観点から重要な課題とされている。現在、ダムの外部変形計測は、光波および水準測量により計測が行われているが、これらの従来測量法では計測や結果の整理に時間がかかるため、非常時に迅速に対応することが困難な場合があり、人件費などのコスト、精度や透明性といった点でも改善の余地があるように思われる。そこで本研究では、迅速かつ連続計測に優ると考えられるGPS変位計測システムを外部変形計測に適用する。そして、従来測量の結果と比較しGPSの適用性を検討する。

Key Words : GPS, displacement monitoring, fill dam, safety management

1. はじめに

ダム安全管理のための計測の合理化は、常時計測のあり方、地震時などの緊急時のリスク管理、コスト削減の観点から重要な課題とされている。ダムの安全管理のための計測は、河川管理施設等構造令¹⁾によって、フィルダムにおいては堤体および基礎岩盤浅部からの浸透量と外部変形量が安全管理上の主要計測項目になっている。このうち外部変形の測定は、光波測量と水準測量によって行っている。

測量方法は、日常管理において取り扱いが容易で便利である反面、計測や結果の整理に時間を要し、たとえば、地震後などの非常時において直ちに外部変形を測量する必要が生じて、技術的、また、費用面から迅速に対応することが困難な面もある。GPS変位計測システムは、自動で連続的な計測が可能であり、その課題を克服する可能性がある。

すでに(独)土木研究所ではフィルダムの外形変位計測にGPS変位計測システムを適用しその有効性を示し、ダム計測への本格的導入に向けて取り組まれている^{2) 3)}。

本研究では、山口県内の比較的小規模ではあるが都市に近い上流に建設されたフィルダムの外部変形計測にGPS変位計測システムを適用し、ダムの3次元変位を連続的かつ高精度計測した事例の一部を紹介する。

2. GPS変位計測システム

(1) GPS変位計測システムの概要

図1に本研究で用いたGPS変位計測システム^{6), 7)}を示す。GPSは、カーナビゲーションや長基線高精度測量で知られている人工衛星を用いた全天候型の測位システムで、地球上のいかなる位置においても天候に関係なく24時間利用できる。また、精度、コスト、操作性において、これまで課題があるとされてきたが、筆者らの研究^{6) 9)}により、高精度、低コスト、全自動計測が可能になった。

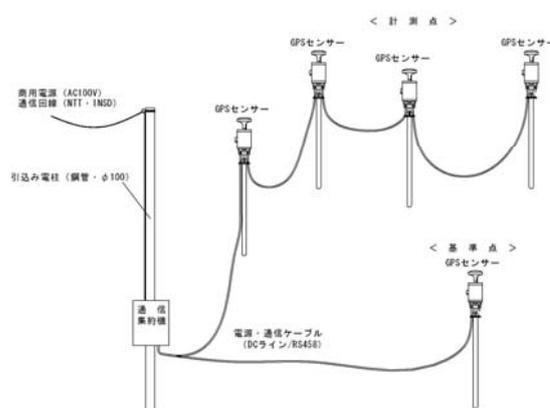


図1 GPS機器の構成図^{6), 7)}

(2) 計測現場の概要

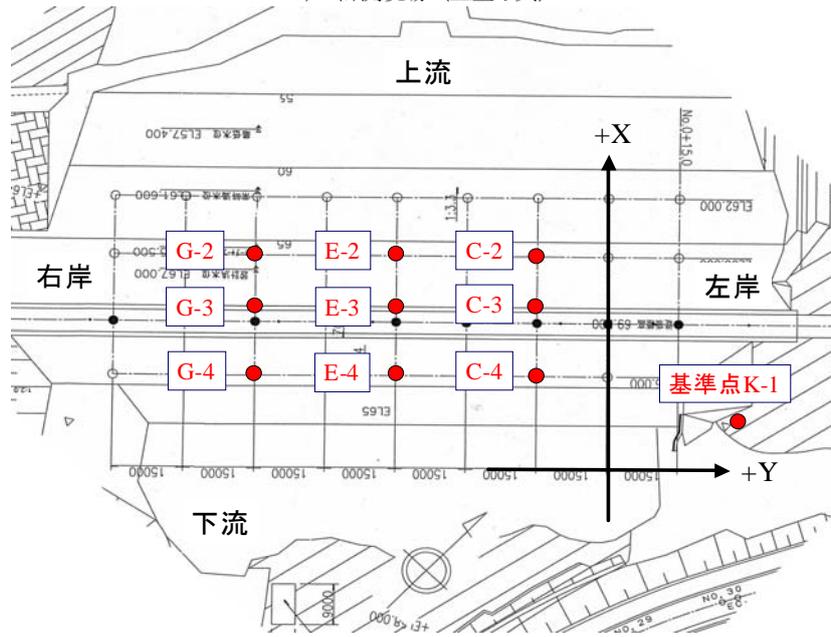
図2に、GPSセンサーを設置するダムの上空写真、および、センサー設置場所（計測点）を示す。すなわち、計測点は、下流側堤体側に C-4, E-4, G-4, 堤体天端に C-3, E-3, G-3, 堤体上流側に C-2, E-2, G-2を格子状に配置し、それぞれにGPSセンサーを設置した。

座標はX軸を上下流方向（上流方向を正）に、Y軸を左

右岸方向（左岸方向を正）に、H軸を隆起・沈下方向（隆起を正）にとる。なお、設置時期の関係から下流側のGPSセンサーG-4, E-4, C-4は2007年4月1日から、堤体天端G-3, E-3, C-3, 上流側G-2, E-2, C-2は2007年9月7日から計測を開始した。図3にセンサーE-2, E-3, E-4の設置状況を示す。



a) 計測現場（上空写真）



b) 計測点位置（平面図）

図-2 計測ダムとGPS計測点配置



a) 下流側計測点 E-2



b) ダム天端計測点 E-3



c) 上流側計測点 E-4

図-3 ダム堤体の計測点のセンサー（E-2, E-3, E-4）

3. 計測結果

(1) GPS と従来測量による計測結果の比較

図 4 に、すべての計測結果の代表として、計測点 E2 (ダム上流側) の三次元変位を貯水位とともに示す。また、図 5 は、計測点 C2 (ダム上流側) および G2 (ダム上流側) の X 軸方向変位の時間変化である。両図には、光波およびレベルによる測量結果を併せて示している。なお、計測は GPS では 1 時間毎、測量では 1 週間に 1 度の頻度で実施した。計測期間は 2007 年 9 月 1 日～2009 年 2 月 15 日である。

計測期間中、GPS では途切れることなく連続的に変位を計測していることが分かる。また、梅雨前までの貯水位の増加、放流による貯水位の減少、再び貯水上昇に対して、ダム堤体の変位は、数 mm という微小変位にもかかわらず、滑らかに対応して推移している。

一方、測量結果はばらつきが大きく、mm オーダーの変位の計測は困難となっている。

また、図 4(b) の計測点 E2 の上流方向変位、および、図 5(a), (b) の計測点 C2, G2 の上流方向変位において、測量結果は測量の基準点 (左岸側) から、遠ざかるほど (C2, E2, G2 の順に) ばらつきが大きくなる。これは水平角の誤差によるものである。一方、GPS ではこのような計測点の位置の差異による誤差が生じることはない。

図 6 にすべての計測点の平面内の変位ベクトルの推移を、GPS による計測結果と測量による計測結果を併せて示す。また、図 7 には代表としてダム堤体中央断面内の変位ベクトルの推移を示す。これらの計測結果を図 5 および図 6 に示す貯水位の増減に応じて区分した期間ごとにベクトル表示したものである。

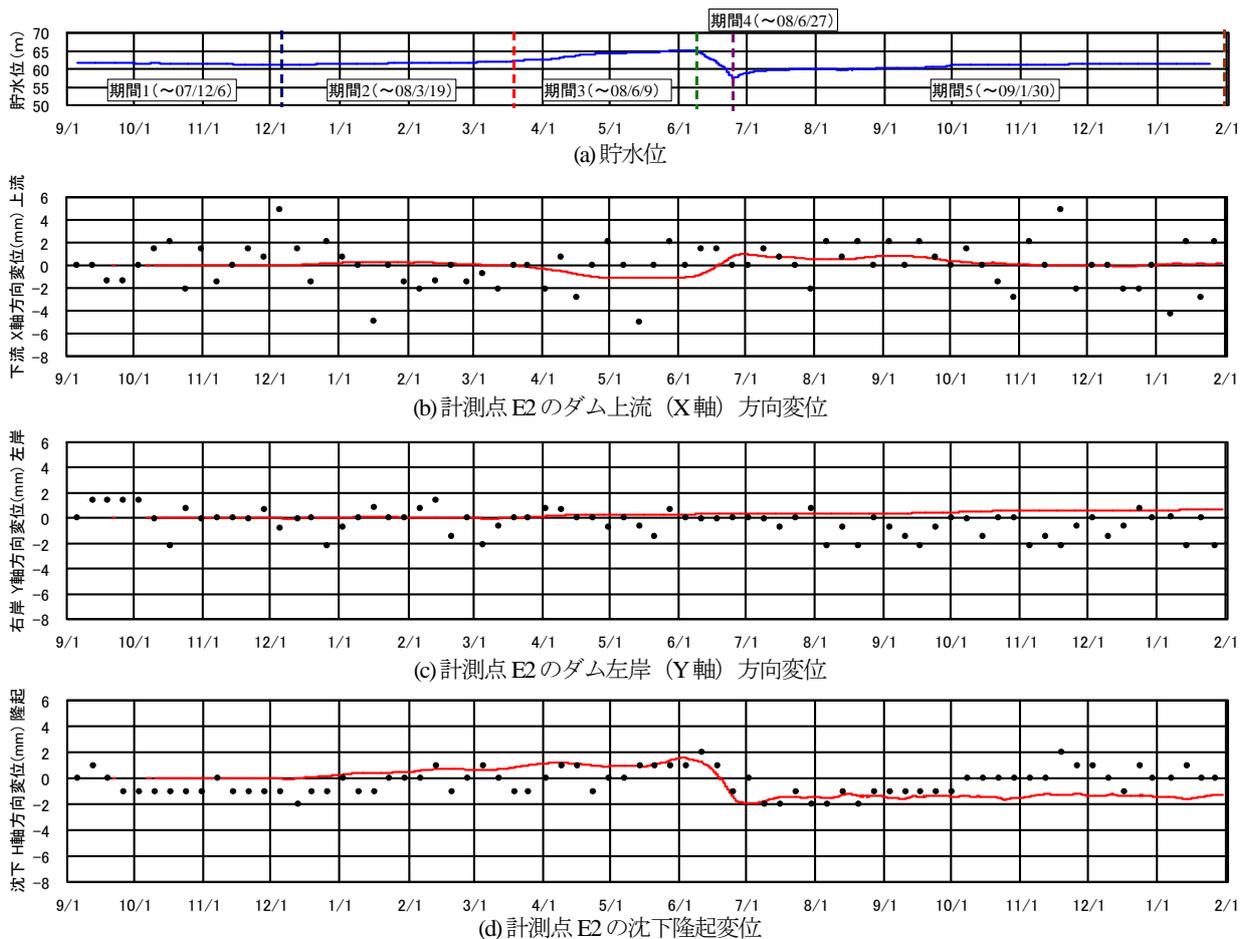


図-4 GPS と測量との比較(上流側, E2, 2007/09/01～)

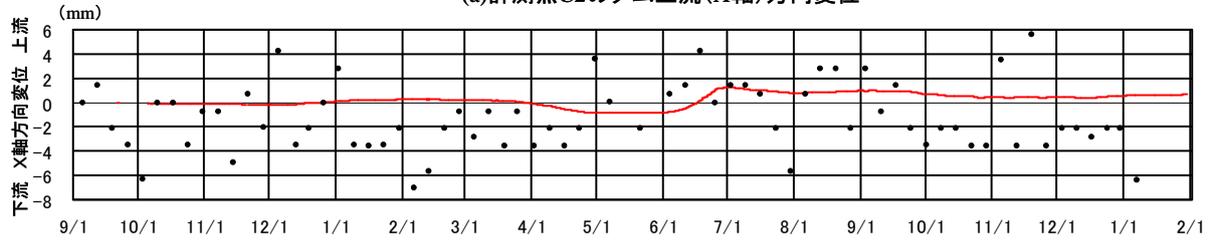
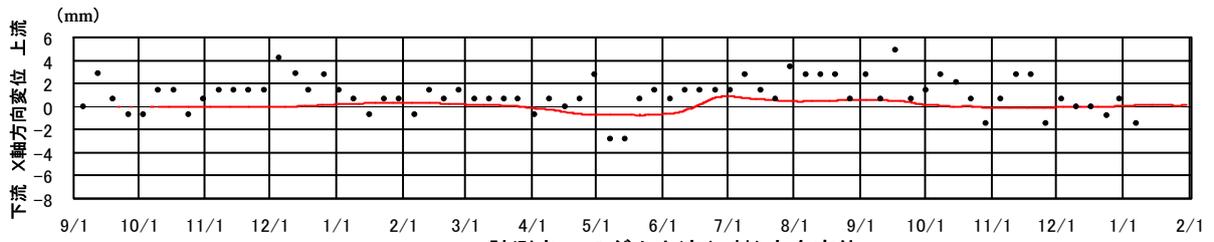


図-5 GPSと測量との比較(上流側, C2・G2, 2007/09/01~)

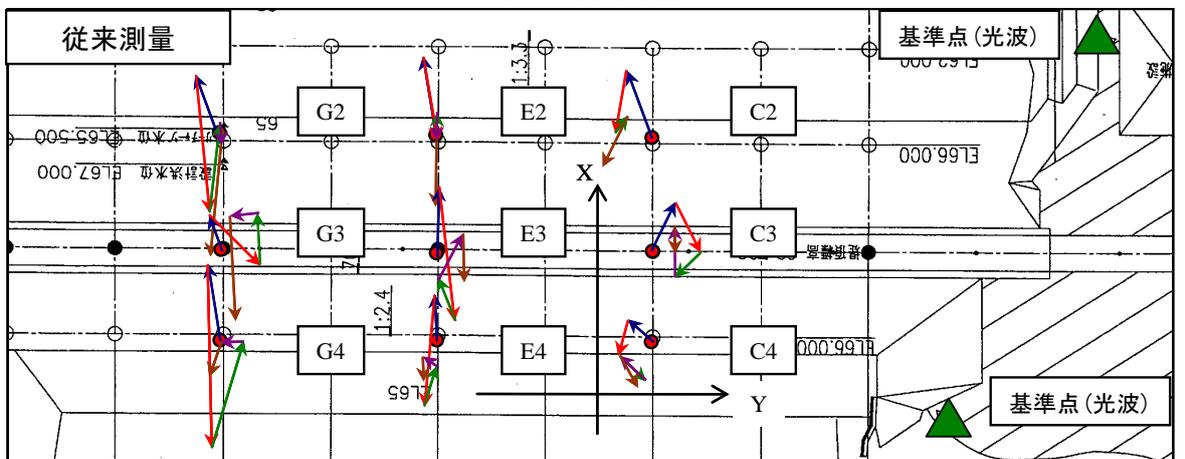
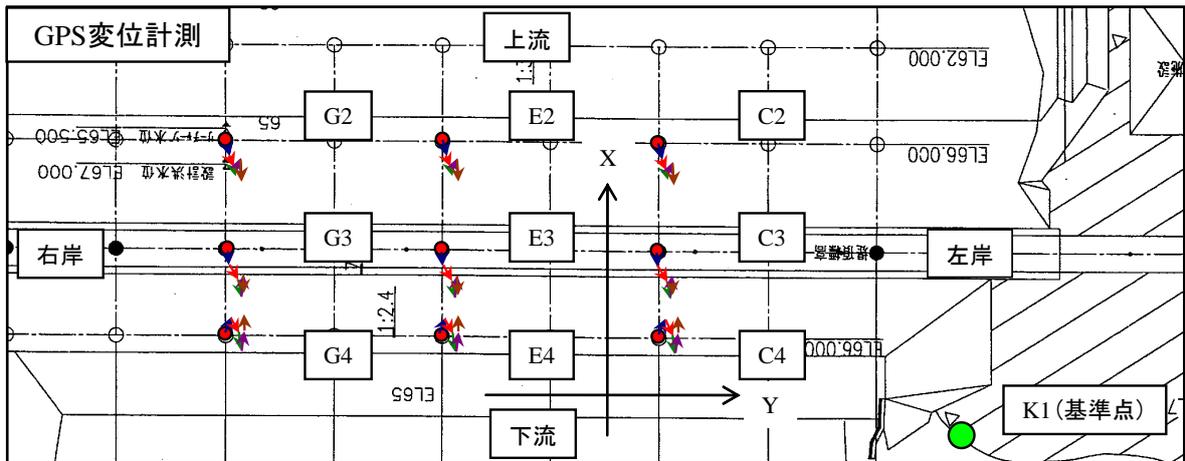
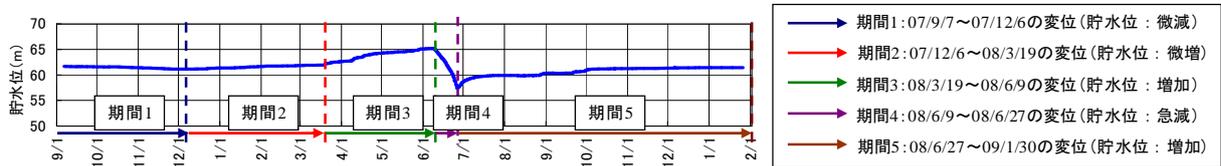
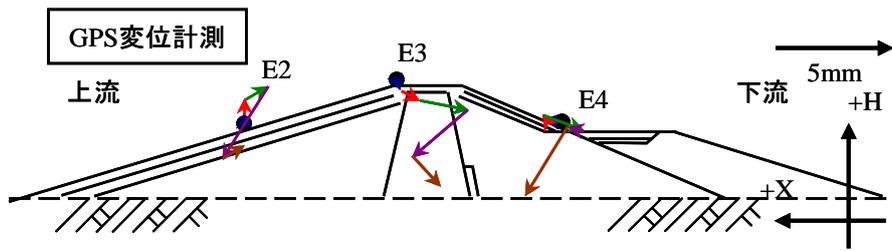
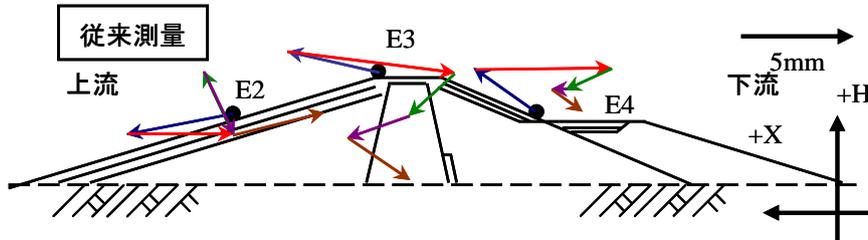


図-6 GPSおよび測量による変位計測結果に基づく平面ベクトル



(a) GPS 変位計測結果(E 断面)



(b) 従来測量結果(E 断面)

図-7 GPS および測量による変位計測結果の比較 (E 断面)

以上のように、従来測量の結果を用いて作成したベクトル図はばらつきが大きく、ダム堤体の変位の状況が把握できない。一方、GPS 計測に基づく変位ベクトルは、滑らかに推移しており、3(2)「試験湛水時における変位の傾向」にて述べるが、水位との関連も明確である。

以上の結果から、GPS 変位計測は測量による変位計測結果と比べて誤差による変動は小さく、わずかな貯水位の変化に対しても、mm 単位でダムの三次元変位を把握することができ、GPS 変位計測の優位性が明らかである。

(2) 試験湛水時における変位の傾向

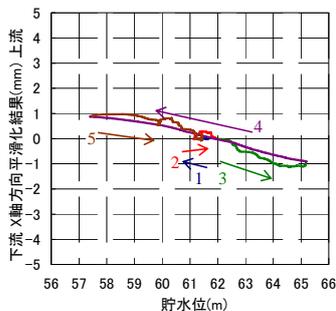
試験湛水時に最も水位が高くなった期間(期間 3 : 2008 年 3 月 19 日～2008 年 6 月 9 日)および、放流により水位が急減した期間(期間 4 : 2008 年 6 月 9 日～2008 年 6 月 27 日)を中心に変位の傾向を調べる。E2 (上流

側堤体) の変位と貯水位との関係を図 8 に示す。期間は 3(1)の図 6 と同様貯水位の増減に応じて区分した。以下の図において、期間 3 は緑線、期間 4 は紫線で示している。

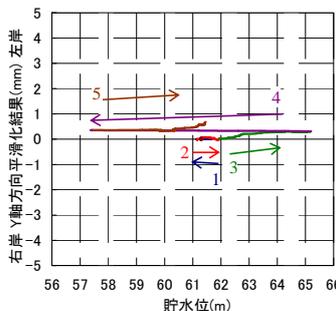
まず、X 軸方向について、変位は貯水位が上がると下流側へ、貯水位が下がると上流側へと推移し、その関係は線形的である。Y 軸方向はダム軸方向の変位であるので、X 軸方向の変位や H 軸方向の変位に比べて非常に小さい。H 軸方向について、変位は貯水位が上がると隆起、貯水位が下がると沈下する傾向にある。

以上のようにダム堤体の変位は貯水位と対応しており、貯水位の上昇・下降することでダムに作用する圧力の増減があり、それに対応した変位が生じる。

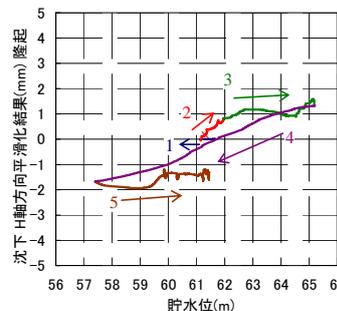
このような貯水位と対応したダム堤体変位を連続的、高精度に 3 次元的に計測できるのは、GPS の特徴であり、今後のダム堤体の安全監視に対して有効なモニタリング手法と考えられる。



(a) X 軸方向変位と貯水位の関係



(b) Y 軸方向変位と貯水位の関係



(c) H 軸方向変位と貯水位の関係

図-8 E2(上流側堤体) と貯水位の関係

4. むすび

本研究では、GPS 変位計測システムを用いてフィルダムの外部変位計測を実施した。その結果、わずかな貯水位の変化に対しても、水位の増減に対応した微小な 3 次元変位が、連続的にリアルタイム計測することができた。その結果の精度は、従来測量の結果を大きくしのぐものである。

GPS 変位計測にかかるランニングコストは、一般の地盤変位計測と遜色ないところまで低減されているが、システムの初期コストはいくぶんまだ大きく、短期間の計測や、計測頻度が少ないケースなどに対するコストや機能の優位性を示すことが課題である。

参考文献

- 1) (社)日本河川協会：改定 解説・河川管理施設等構造令、(財)国土技術研究センター編、山海堂、2000.1.
- 2) 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、pp.137-148, 2005.
- 3) Yamaguchi, Y., T. Kobori, H. Yoshida, T. Sakamoto, H. Itaya and T. Iwasaki, 2009, *Real-time monitoring of exterior deformation of embankment dams using GPS, the 23rd ICOLD (International Commission on Large Dams) Congress, Q.91-R.1 (CD-ROM)*.
- 4) 板屋栄治、森田陽弘、新垣敏一：フィルダム安全管理の高度化を目的とした堤体外部変形計測への GPS 全面導入に関する取組み、ダム技術、No.264, pp.47-56, 2008.9.
- 5) 日野浩二、曾田英揮、木下真理子、田中幹大：徳山ダムの試験湛水、ダム技術、No. 266, pp.42-58, 2008.11.
- 6) 増成, T., K.田中, N.大久保, H.及川, K.武智, T.岩崎, N.清水：GPS Continuous Displacement Monitoring System, Int. Sympto. Field Measurements in Geomechanics, FMGM03, pp.537-543 2003.9
- 7) 岩崎智治, 武智国加, 武石朗, 清水則一：道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発, 土と基礎, vo.50, No.6(533), pp.25-27, 2002.6.
- 8) 清水則一, 安立 寛, 小山修治：GPS 変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究. 資源・素材学会誌, 114(6):9-14, 1998.6.
- 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, 2002.9.

CONTINUOUS DISPLACEMENT MONITORING OF A ROCKFILL DAM BY USING GPS; A CASE STUDY

Yosuke KAWATA, Taro NAKANO, Hideaki KAWASAKI, Norikazu SHIMIZU, Yoichi MIMURA, Toshiyuki KAWASHIMA

It is important to monitor continuously deformation of the embankment for safety management of dam. Generally conventional surveying method, i.e. the electronic distance meter, the level equipment, etc., are used for the purpose. However the accuracy and the frequency of the measurement are not still satisfied with the requirement of the dam safety management. The GPS displacement monitoring system has potential to meet the requirement even for real time monitoring at emergency time, i.e. earthquake, heavy rain, flood, etc. In this paper, a case study on application of GPS displacement monitoring to a rockfill dam is described.