

ロックフィルダムにおける GPS 計測を用いた 長期変位挙動と近似手法

○久保田 貴史¹・曾田 英揮²・佐藤 信光³

概要：

ロックフィルダムの管理において、ダム堤体の変形計測は安定性の評価を行う上で重要な計測である。近年、各機関で GPS を用いたフィルダムの変形計測が積極的に進められ、GPS の導入によるダムの安全管理の高度化、合理化が期待されている。水機構でも 3 つのロックフィルダムにおいて GPS 計測を用いて変形計測を行っており、総合技術センターでは、光波測量と比較して、GPS 計測データが高頻度、高精度という特徴を活かして、変形量の予測式の検討に取り組んでいる。

本論文では、水平変形量（上下流方向）の予測式に対して合理的なパラメータの設定方法を作成するとともに、新たに、ダム堤体の鉛直方向変化量（沈下量）の予測式を作成し、水平変形量および沈下量の予測式による推定値に対して GPS 計測の実測値が概ね同じ値を示すことを確認することで、予測式の適用性を提示した。

キーワード：ロックフィルダム、GPS、予測式、沈下量

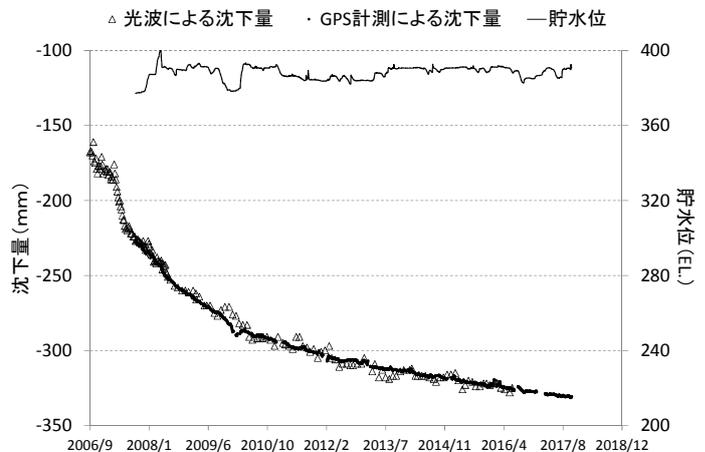
1. はじめに

ロックフィルダムの堤体計測のうち変形量の計測は、河川管理施設構造令に定められている必須項目であり、フィルダムの安全管理において重要な計測項目の一つである。フィルダムの変形量を、精度よく、かつ連続して計測することは、安全性の評価を適切に行う上で非常に有効であると考えられる。

近年、各機関においてフィルダムの変形量計測に GPS 計測を用いることが進められている。図-1 に GPS 計測と光波測量による計測値の比較を示す。GPS 計測による計測値は、基本として 1 時間ごとに取得できることから、従来の光波測量と比較すると計測頻度は大きく短縮できるとともに、測定誤差も水平方向であれば、標準偏差で $\pm 2\text{mm}$ 程度と高精度な計測が可能となった。

一方で、フィルダムの変形に関する安全性評価は、経験の豊富な技術者により、過去の堤体の挙動などを基に定性的に行われてきている。

そこで、総合技術センターでは、これらの定性的な



(例：徳山ダム天端沈下量)

図-1 GPS 計測と光波測量による沈下量の比較

評価を定量的に行い、誰でも異常発見ができるようにするための評価手法を検討するために、正常なダムの挙動を近似し、定式化することを検討してきた。

今回、既に提案している水平変形量（上下流方向）の予測式に対して合理的なパラメータの設定方法を検討するとともに、新たにフィルダム堤体の鉛直方向変化量（沈下量）の予測式の作成を行い、複数のダムに

- 1.総合技術センター ダムグループ
- 2.総合技術センター ダムグループ チーフ
- 3.総合技術センター 上席エンジニア

適用した。本稿では、その予測式の設定方法ならびに予測式の妥当性および適用性を確認したので報告する。

2. フィルダム堤体計測で用いる GPS 測位法

GPS による測位法は、単独測位法と相対測位法に大別される。単独測位法は、車や携帯電話などに利用され、日常生活に欠かせないものとなっているが、計測精度は数m～数 10mのため、ダム の 堤 体 計 測 に 適 して いない。相対測位法は、2 台の受信機で電波を受信し、2 点間の相対的な座標を高精度に与える方法である。

フィルダムの堤体計測では、相対測位法のうち、スタティック測位法（静的干渉測位法）が用いられる。スタティック測位法は、2 箇所に固定した受信機で一定時間受信データを所得した後に解析（基線解析と呼ばれる）することにより座標を求める方法で、標準的な計測精度は 5～10mm 程度であり、各種補正および平滑化処理を行うことで、計測精度をさらに向上させ、計測値を算出している¹⁾。

3. 水平方向（上下流方向）の変位量予測式

ロックフィルダムの水平変位について明確な予測式はなかったが、松本ら²⁾の長期沈下に関する対数回帰式等に基づき、フィルダムの水平方向（上下流方向）変位量の予測式として、曾田ら³⁾は、以下の式型を提案している。

$$dh = \alpha \times \ln(\text{day}) + \beta - \gamma(\text{hi} - \text{hw}) \cdots (\text{式} 1)$$

dh：上下流方向変位量（mm）

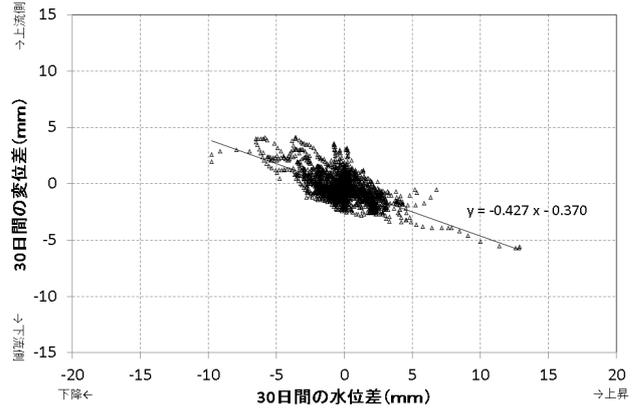
day：試験湛水完了後の日数（日）

hi：ある時間の貯水位（EL.m）

hw：基準水位（EL.m）

α, β, γ ：係数または定数

本検討では、水位変化に係わる係数 γ の設定方法を見直した。一般的なダムでは貯水位の大きな変化はあまりなく、大きく低下しても数ヶ月という長い期間となることが多い。その場合、貯水位の変化の期間における堤体の変形量にはクリープ変位やその他の影響が含まれ、適切に γ を設定することが難しい。今回、クリープ変位などの影響が小さい短期間において、係数 γ を適切に設定する方法を検討した⁴⁾。定めた期間(30日)について水位差(m/30日)と堤体の変位差(mm/30日)の単回帰から貯水位 1m 変化当たりの弾性変形量 γ を求め、この期間を複数パターン検討した。徳山ダムでは、複数検討した結果、**図-2**に示す 30 日間の条件



(徳山ダム GD-4) (30 日間)

図-2 水位差と堤体変位差の相関関係

表-1 予測式の係数、定数（徳山ダム GD-4）

	α	β	γ
GD-4	-15.857	72.489	0.43

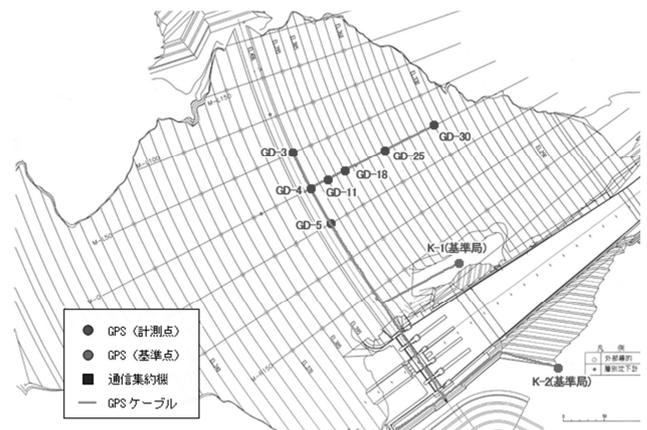


図-3 徳山ダムの GPS 設置箇所

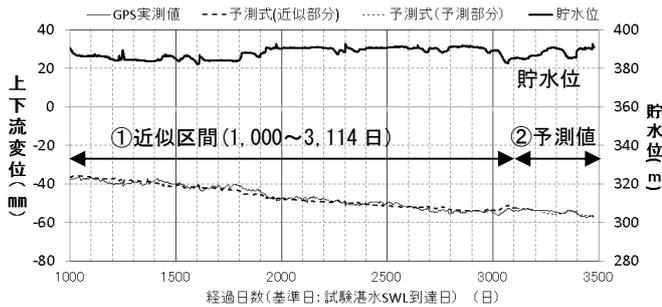
の弾性変形量 γ を設定した。**表-1**に最大断面の GD-4 地点における各係数、定数の値を示す。

図-3に徳山ダムの GPS の配置を、**図-4**に今回検討した予測式による推定値と GPS 実測値を示す。**図-4**において示す「①近似区間」は、GPS 計測の実測値を基にして、式 1 における係数、定数を定めた区間であり、「②予測値」は、近似区間で作成した予測式から、経過日数と貯水位により算出した値である。

GPS 計測による実測値と式 1 による予測値の差は、最大でも 2mm 程度であり、GPS 計測において一般的な誤差とされる $\pm 2\text{mm}$ にほぼ収まっている。

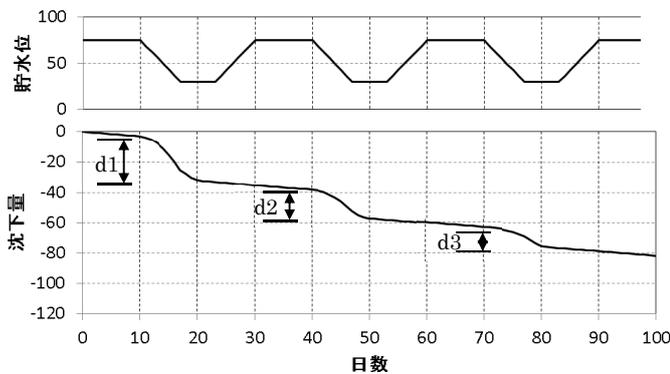
4. 鉛直方向（沈下量）の変位量予測式

ロックフィルダムの沈下特性について太田垣ら⁵⁾は 26 ダムの沈下傾向を基に、経過時間を変数とした近



(上図：GPS 実測値と予測値、下図：実測値と予測値の差)

図-4 GPS 実測値と予測値の比較(徳山ダム)



・同じ水位低下量でも、沈下量は次第に小さくなる (d1 > d2 > d3)

図-5 貯水位低下と沈下量の関係 (イメージ図)

似式を提案した。吉越ら⁶⁾は、「貯水位の低下に伴う沈下現象は、排水条件下での「繰返しせん断」に類似し、貯水位低下の繰返しに伴い、沈下増分が次第に減少すること、貯水位低下後の放置期間が長いほど沈下が大きくなること」を示し、井上ら⁷⁾は貯水位低下に伴う沈下現象を、貯水位低下回数対数の対数により近似した。図-5に貯水位低下と沈下量の関係のイメージ図を示す。

これらを踏まえ、太田垣らの沈下量予測式に以下の点を考慮した改良を行った。

- ・「貯水位低下後の放置期間が長いほど沈下量が大きくなる」ことに対して、貯水位の低下量を累積値として定義することで貯水位低下継続時間の大小を考慮する
- ・「貯水位低下の繰返しに伴い沈下増分が次第に減少する」ことに対して、累積水位低下量をパラメータとした片対数を適用する

上述したことを考慮して、沈下量の予測式として、

以下の式型を作成した。

$$dv = \alpha \times \ln(\text{day}) + \beta + \eta \log \sum_{i=1}^n (hw - hi) \quad \dots \text{(式 2)}$$

dv : 沈下量 (mm)

day : 築堤完了後の経過日数

hi : ある時間の貯水位 (EL.m)

hw : 基準水位 (EL.m)

α, β, η : 係数または定数

なお、(hw-hi)は hw>hi かつ h(i-1)>hi の場合のみ

予測式の作成例として、表-2に阿木川ダム GD-5 地点における係数および定数を示す。

また、図-6に阿木川ダムの GPS 配置、図-7に阿木川ダム天端における沈下量について、今回検討した予測式 (式 2) による推定値と GPS 実測値を示す。

表-2 予測式の係数、定数 (阿木川ダム GD-5)

	α	β	η
GD-5	-89.6	549.9	-49.8

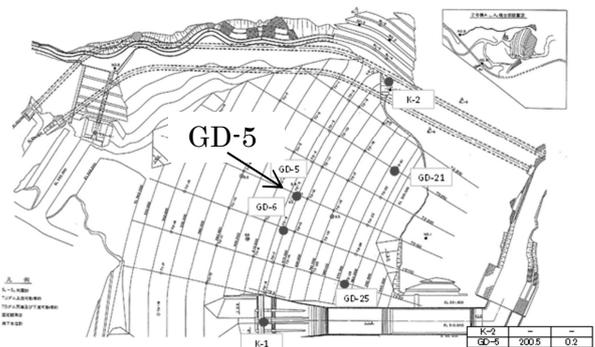
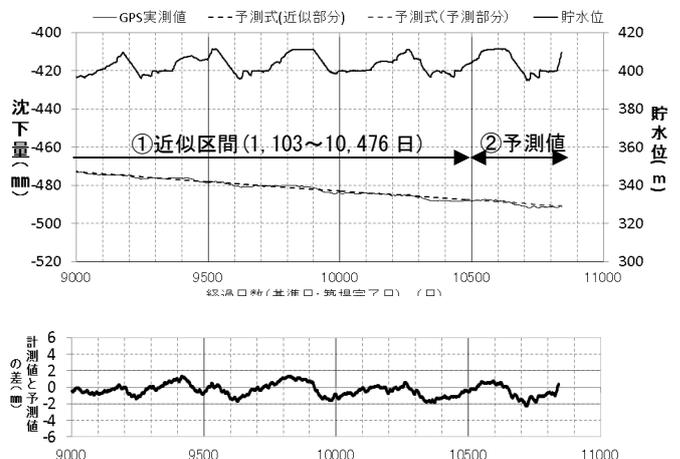


図-6 阿木川ダムの GPS 設置箇所



(上図：GPS 実測値と予測値、下図：実測値と予測値の差)

図-7 GPS 実測値と予測値の比較(阿木川ダム)

阿木川ダムでは式 2 による予測値は、GPS 計測の実測値と比較して、残差は最大 2mm 程度であった。また、他ダムでも同様に検討した結果、徳山ダムにおいても式 2 による予測値と GPS 計測による実測値の残差は最大で 2mm 程度であった。

5. まとめ

本稿では、GPS 計測を用いた計測値の「計測頻度が短い」、「計測精度が高い」という特徴を利用し、水平方向（上下流方向）および鉛直方向（沈下量）について、ダムの経過日数と貯水位から算出される予測値について実測値との比較を行い、予測式の精度について確認した。その結果として、上下流方向、沈下量の予測式とも概ね GPS 計測において一般的とされる誤差範囲の±2mm を実現できていることを複数のダムで確認し、予測式の適用性を示した。

6. 今後の取組み

これまでの検討の結果、上下流方向変位量、沈下量の予測式は、概ね実測値と同程度の予測値を算出できることを確認できた。

予測式のパラメータを決定する際に近似を行った期間を「ダムの安全性が保持されていた期間（通常の状態の期間）」とすると、予測式が算出する予測値は、その時点のダム経過日数および貯水位の条件のもと、ダムが通常の状態であるならば計測されると想定される値を示していると考えられる。

仮に図-8 の経時変化に示すように GPS 計測による実測値が予測値から外れる傾向がみられた場合には、ダムは「通常の状態ではない」と想定できることから、異常の早期発見・対応を図ることが可能になると考えられる。また、図-9 は、1 年間の貯水位と堤体変形の相関関係を示しているが、GPS 計測と予測値は短期間かつ水位変化の小さい期間においても堤体の弾性変形性を視覚的に示すことができる。参考に光波測量の結果も併記しているが、バラツキがあり判定できない。

このように通常な状態でないことの早期発見を行うにあたっては、過去の近似範囲における差の傾向を踏まえて適正な補正を実施すること、および健全であったと考えられる時期に発生した誤差に基づき上下限を定める必要がある。引き続きこの予測式の実用性を高め、ダムの安全管理に活用するための検討を進めたいと考えている。

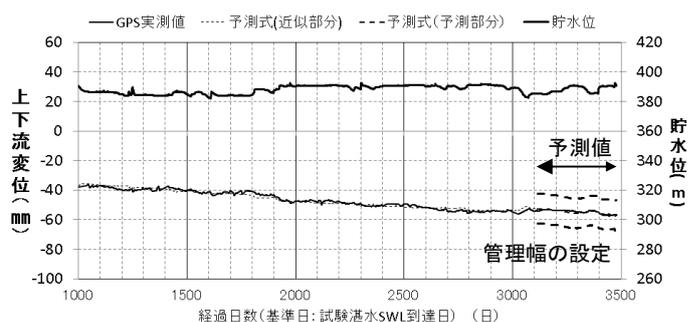


図-8 予測値による安全管理の事例（経時変化）

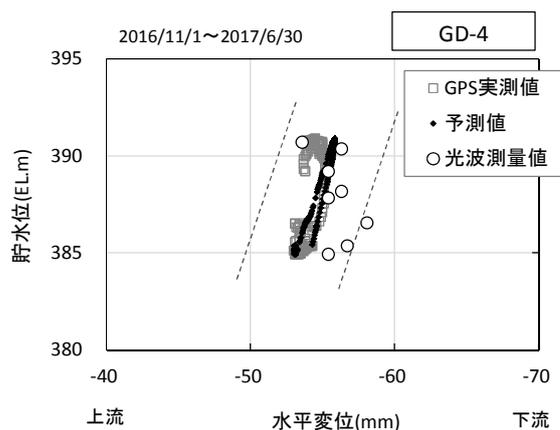


図-9 予測値による安全管理の事例（相関関係）

参考文献

- 1)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，ISBN978-4-9908097-0-6，2014.12
- 2)松本徳久，安田成夫，伊藤基博：フィルダムの挙動解析（その1）-天端最大断面の外部変位-，土木研究所資料，第3001号，1993.3
- 3)曾田英揮，太田垣晃一郎，佐藤信光：GPS 計測を用いたロックフィルダムの計測精度向上の取り組み，水資源機構 H26 技術研究発表会
- 4)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. Vol. 74, No. 3 248-258, 2018.7
- 5)太田垣晃一郎，曾田英揮，佐藤信光：ロックフィルダム沈下挙動の安定性評価に関する検討，水資源機構 H25 技術研究発表会
- 6)吉越洋，井上元之，津田正寿，内田善久，藤山哲雄，太田秀樹ら，ロックフィルダム遮水ゾーンの長期沈下挙動，土木学会論文集 No. 582/III-41 197-205 1997.12
- 7)井上元之，内田善久，望月直也，石黒健，太田秀樹，ロックフィルダム遮水ゾーンの湛水後長期沈下メカニズム，土木学会論文集 No. 582/III-41, 275-284, 1997.12