

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

○ 曾 田 英 揮¹・太 田 垣 晃 一 郎²・佐 藤 信 光³

概要：

ダムの堤体変形計測は、河川砂防基準に定められている必須項目であり、施設の適切な安全管理の為に正確かつ継続的なデータ蓄積が重要である。しかし、堤体変形測量は、その頻度が低いこと、その精度が観測者や計測手法のわずかな違いにより影響を受ける可能性がある。そこで、徳山ダム、阿木川ダム、香川用水調整池においては、連続かつ高精度の観測が可能な GPS による堤体変形計測を試験的に導入している。本論文では、これまでに蓄積した機構ダムのデータを基に、GPS によるロックフィルダムの鉛直方向計測値の精度向上を行い、併せて高精度、連続観測という特徴を生かした、GPS 計測結果に基づく水平変形の予測手法の提案を行うものである。

キーワード：堤体変形、GPS 計測、ロックフィルダム

1. はじめに

近年、高度成長期に建設された構造物の老朽化が話題になり、社会的インフラ設備の補強、改築の実施や検討が行われている。これら施設を適切に維持管理し、適切な補強や、改築を実施するには、構造物の現況を把握しておくことが重要である。水資源機構においても牧尾ダムのように竣工から 50 年以上が経過しているダムもあり、総合技術センターでは、これまで機構が所管する 8 基のロックフィルダムの堤体計測データの蓄積を実施することにより、横断的な安全性の確認や堤体挙動の評価を行ってきた。

これら堤体計測のうち堤体変形測量は、河川砂防基準に定められている必須項目である。しかしながら、堤体変形測量は、その頻度が低いこと、その精度が観測者や計測手法のわずかな違いにより影響を受ける可能性があり、計測により数値が変化したときに、誤差の範囲なのか、または計測上の問題が発生したのかの判断が常に求められるものとなっている。

一方、堤体計測の高度化の一環として、斜面計測に用いられる GPS 計測を用いられる事例が増加している¹⁾。GPS 計測は連続、高精度、3 次元での計測を可能としてお

り、堤体計測に用いた場合には従前の手法より正確な計測、地震時等の変位の早期発見などの効果が見込まれるとされている²⁾。

水資源機構においても GPS 計測についてはいち早く取り組んでおり、阿木川ダムをはじめとしていくつかのダムにおける計測結果がある³⁾。これら計測結果に基づき詳細に分析することで、ダムの健全性評価手法を高度化する必要がある。これら手法の高度化に当たっては過去の実測記録に基づく傾向の分析⁴⁾に基づき、定量的な将来予測を行う必要がある。

本検討ではこれらを踏まえ、2. において徳山ダムにより得られたデータに基づき GPS 計測において発生するとされる鉛直方向変位⁵⁾の補正方法について検討した。加えて 3. ではダムの上下流変位について、詳細に検討することにより中・長期的な堤体挙動の安定性確認手法について検討を行った。以上により計測精度の向上と、適用性向上についてとりまとめたものである

1. 総合技術センター ダムグループ チーフ

2. 総合技術センター ダムグループ

3. 総合技術センター マネージャー

2. 鉛直計測結果の補正

2.1 鉛直方向誤差の原因と補正方法

GPS 計測に用いる衛星からの電波は図-1 に示すように、大気圏で屈折し、遅延することが知られている。数 km の距離までの計測においては水平方向での遅延による差は無視できるほど小さいものの、高低差をもつ観測では、これら屈折による遅延の影響が無視できないものとなってくるとされている。

これら大気圏内での遅延について、増成ら⁶⁾は修正 Hopfield 法等により補正する方法を提案している。一方で水資源機構では、現地で得られた固定点間に発生するゆらぎに基づき補正する手法⁷⁾を検討している。今回、図-2 に示す徳山ダムの 3 固定点 (K-1, K-2, K-3) により計測されたデータを用いてその適用性について検討し、現地気象との比較も含めてどの手法が有効かを確認したものである。

2.1 補正式

補正のための式として、修正 Hopfield 法による補正式を式-1 に示す。式-1 によれば、これら誤差は、乾燥大気による屈折と、水蒸気による屈折により発生するとされている。気圧については直接計測が可能であるが、水蒸気については直接計測が困難であることから気温に基づく飽和水蒸気量に当該地点における湿度を乗ずることにより計算することが一般的に行われている。

一方で式-2 は、実測に現れる振幅の発生量が図-3 に示すように比高差に概ね比例することに着目し、式-1 に示されるような乾燥大気・水蒸気のように原因を分別せず、固定点間の計測値を補正に用いようとするものである。

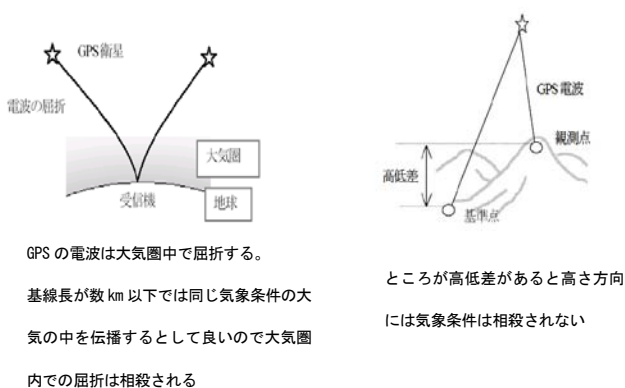


図-1 高低差による電波経路長の相違

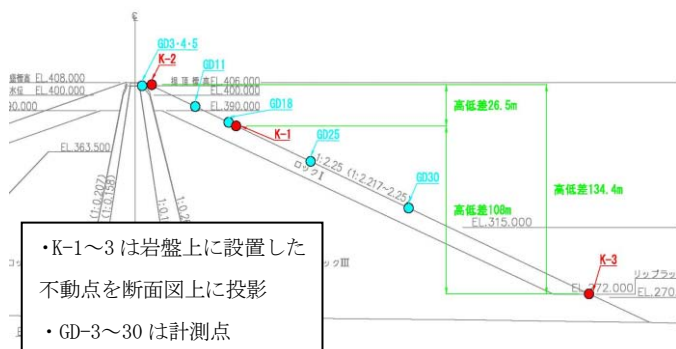


図-2 観測点および基準点の配置

$$\Delta R_{m,hop} = 10^{-6} \int N_{dry} ds + 10^{-6} \int N_{wet} ds$$

$$N_{dry} = N_{d,0} \left(1 - \frac{h}{h_d} \right)^4 \quad N_{wet} = N_{w,0} \left(1 - \frac{h}{h_w} \right)^4 \quad \text{式-1}$$

$$N_{d,0} = \frac{77.64P}{T} \quad N_{w,0} = \frac{0.373 \times 10^6 e}{T^2}$$

ここに、 $\Delta R_{m,hop}$: 対流圏遅延量 (mm)

N_{dry} : 乾燥大気の屈折性, N_{wet} : 水蒸気の屈折性,

$N_{d,0}$: 乾燥大気の標高 0m の天頂方向の屈折性,

$N_{w,0}$: 水蒸気の標高 0m の天頂方向の屈折性,

h_d, h_w : 乾燥大気、水蒸気の最大高

h : 標高、 T : 絶対温度 (K) p : 大気圧、 e : 蒸気圧

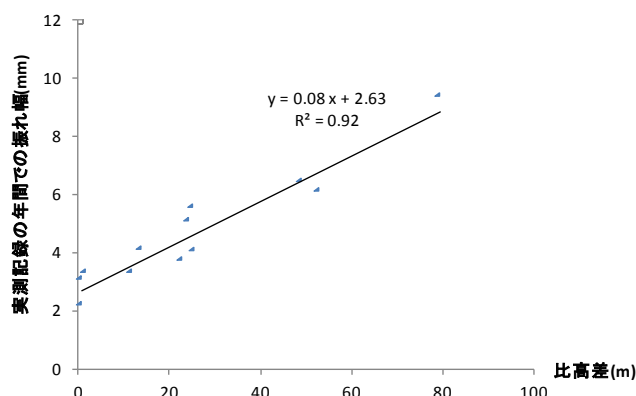


図-3 点間の比高差と年間の振幅の関係

$$K = M - T_k \times \frac{h}{h_k} \quad \text{式-2}$$

ここに K : 補正後の変位

M : 補正前の変位

T_k : ゆらぎ量 = 基準点間の計測値

h : 計測点と基準点の高低差

h_k : 基準点間の高低差

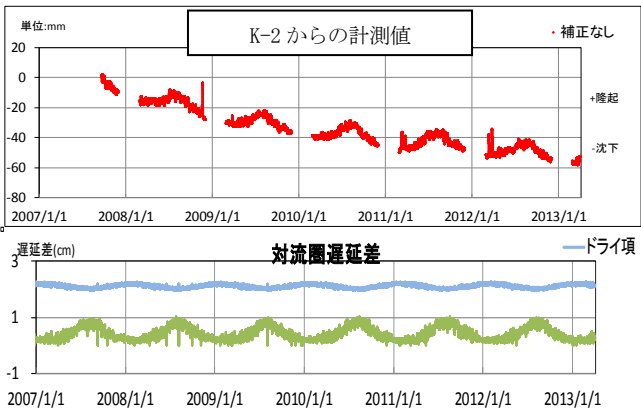
2.2 補正結果

図-4 に GD-30 を K-2 から計測した場合の計測値、および気象条件により求めた修正 Hopfield 式による補正值を示す。補正值グラフの上は式-1 右辺左項に示す Dry 項（乾燥大気による屈折分の補正）で、下は式-1 右辺右項に示す Wet 項（水蒸気による屈折分の補正）である。観測点である GD-30 は概ねダムの中間標高にあたり、K-2 との比高差は概ね 80m である。徳山ダムは豪雪地帯であり、概ね 12 月～2 月までの計測は、GPS 計測機器が積雪に埋没して計測できない。そのため当該期間のデータは削除されている。一方、対流圏補正值によれば乾燥大気による補正は年間の最大と最小との差で 5mm 未満である一方、水蒸気に関わる補正量は年間の最大と最小の差が 1cm 以上あることがわかる。また、GD-30 の計測値では夏場に隆起し、冬場に沈下する傾向にあるが、気圧により決定されるドライ項の補正量は夏場小さくなり、水蒸気により決定されるウェット項の補正量は夏場大きくなる傾向にある。実測における変動の状況は、ウェット項の補正量と同様な挙動を示している。

GD-30 の補正を行わない計測値および式-1 および式-2 式による補正結果を図-5 に、式-2 における補正条件を表-1 に示す。補正なしの場合には、年間で 1cm 以上の幅の変動があり、mm 単位での変形を計測することが困難な状況である。一方で式 1、式 2 の補正結果はいずれの方法も若干の変動がある程度となっている。これらについてより詳細に見るために各補正法による補正結果を並べてみたものが図-6 である。図-6 によれば、現地気象を用いて式-1 による補正を行った際にも若干の年間の変動が残っていることがわかる。式-2 による方法はいずれも大きな差を生じていないことから、この程度の外挿・内挿の範囲であれば同等の補正が可能であると考えられるが、外挿の倍率が大きくなると、基準点間で発生するノイズが大きくなる可能性があることから、可能であれば内挿の範囲で基準点を設置することがより良い結果になるものと考えられる。

表-1 式-2 による場合の補正条件

	K1K2 による補正	K2K3 による補正
基準点～GD-30 間の比高差	約 80m	約 80m
基準点間の比高差	26.5m	134m
補正の方法	外挿	内挿



（補正值 上、Dry 項、下 Wet 項）
図-4 K-2 からの GD-30 計測結果（比高差 80m）
および修正 Hopfield 法による補正量

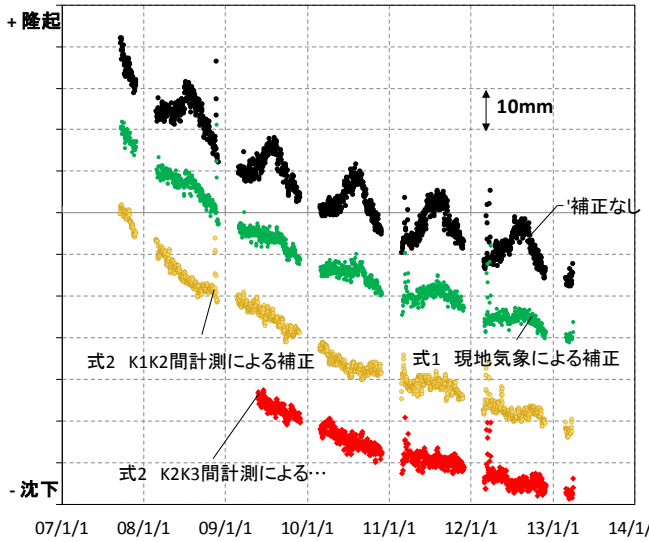


図-5 各補正法による補正結果

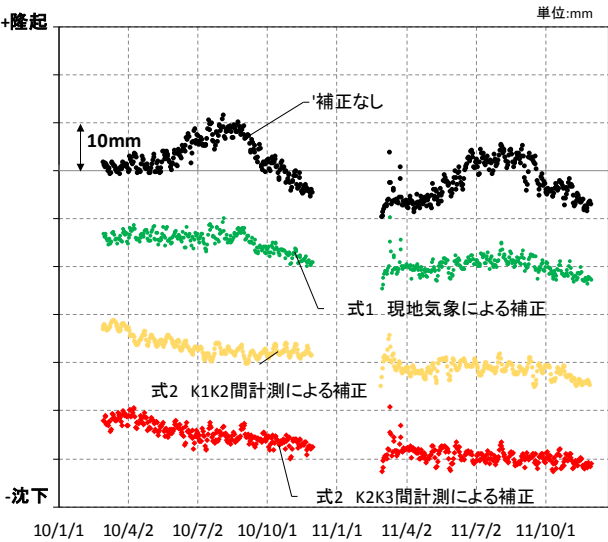


図-6 各補正法による補正結果(拡大)

3. 水平変位の将来予測に関する検討

3.1 ロックフィルダムの変形・沈下について

ロックフィルダムの変形および沈下について、総合技術センターではこれまで、変形・沈下の要因分析⁴⁾を行い、さらに、多くのダムの沈下事例が図-7に示すように対数軸で直線性を有することに着目して既往の光波測量による沈下実績に基づく将来予測手法を提案⁵⁾している。

一方で、水平変位については図-8に示すように一定以上の水圧が継続して掛かることによる粘性的な挙動と、水圧の変化に対する弾性的な挙動、加えて上流側ロックゾーンの浸水沈下が混在している。しかしながら光波測量による計測頻度は試験湛水時においても1回/週であり、ダムの水位変化がこれに対して大きいことから、これまで将来予測・評価が困難であるため、これまでの挙動評価は主として定性的な評価が主であった。

これら粘性的な挙動と弾性的な挙動を分離することができれば、今後のダムの挙動評価に定量的な指標を加えることが可能と考えられる。筆者らはGPS計測による精密な連続計測結果を用いることで、ダムの水平変位挙動を詳細に観察し、粘性的な挙動と弾性的な挙動を分解することを試みたものである。

3.2 評価対象のダム

評価の対象としたのは徳山ダムである。徳山ダムでは試験湛水開始より連続計測を実施しており初期の塑性変形、その後の弾性変形への変化をGPSでとらえられている。徳山ダムの水平変形量の経時変化および水位との相関図を図-9, 10に示す。

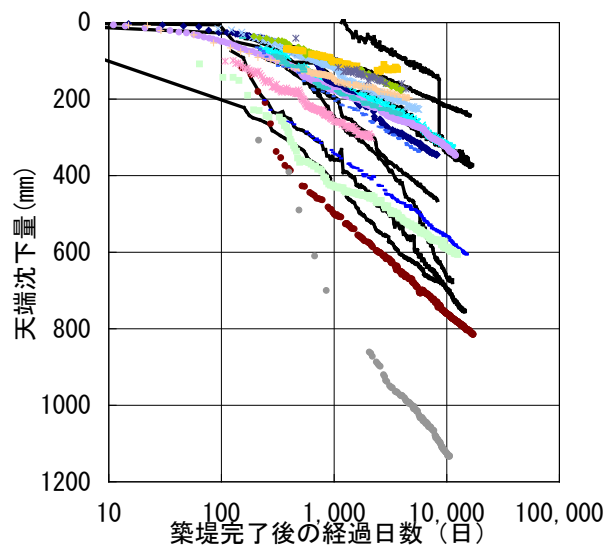


図-7 ロックフィルダムの沈下量

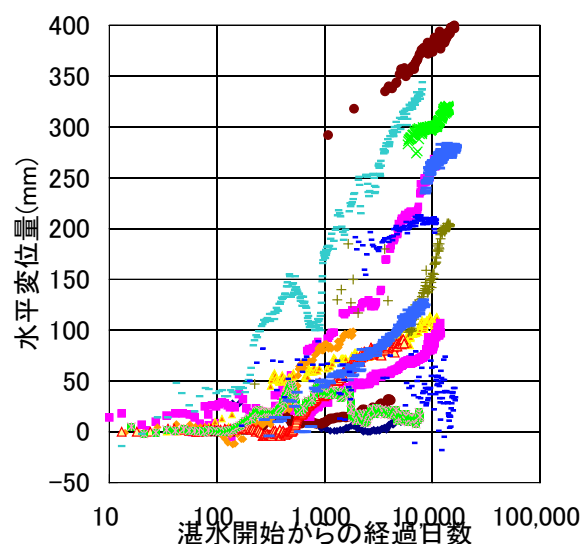


図-8 ロックフィルダムの水平変形量

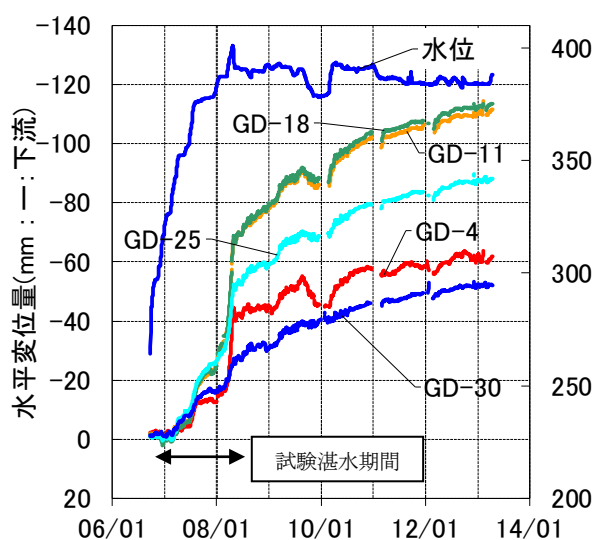


図-9 徳山ダム水平変形量の経時変化

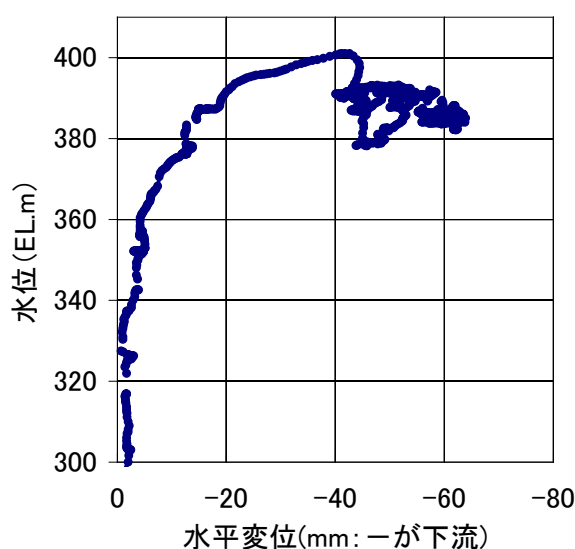


図-10 徳山ダム水位と水平変形量との相関

3.3 評価の方法

水平変位は水圧による水平方向の圧密変形と水位変化による弾性変形の重ね合わせで示されるのでは無いかと考えた。仮にこの考えが妥当であれば、現在は傾向管理的な安定性評価をしている水平変位データも数値基準を持った安定性評価に替えられるのではと考えた。

評価の手順を以下に示す。

- ① 水平変位の全体像をとらえるために、**図-11**のとおりに沈下と同様に日付を対数として、直線性を有すると考えられる期間を設定した。対象期間は検討の目的である、長期的な挙動を評価可能な範囲を考慮した。
- ② ①で選定した期間において**図-12**のとおりに、同一水位時の水平変位量を選定し、時間軸に対して対数近似した。
- ③ ②で求めた対数近似式を実際の変形量から差し引き、**図-13**のとおりに水位との関係を求めた。

1) 水平変位を想定する為の期間の設定

長期的な変形量を求めるために、試験湛水完了後からの経過日数と変形量の関係をプロットしたものが**図-11**である。**図-11**によると、水平変形量は200日を超えたあたりから時間の対数と線形関係にあるように見える。

図-7に示すとおりに、沈下量においては100日経過以降、直線関係となっていることから、水平変形量においても沈下量同様、応力の最大値を経験してからある程度時間経過して時間の対数に直線的な傾向を示すものと考えられる。

この結果に基づき、試験湛水完了後、200日以降のデータを用いて整理することとした。

2) 同一水位時の水平変位量の選定と対数近似

1)において選定した期間におけるGD-11の変形量を水位別に色分けしたものが**図-12**である。**図-12**の各水位のうち、最も長い期間のデータがある水位EL. 382m～EL. 384mについて対数近似を行った。その場合の決定係数は $R^2=0.945$ と概ね良好な相関を示している。

3) 対数近似による変形速度の除去

2)に求めた対数近似による変形速度を実測の変形から控除して、水位との関係としたものが**図-13**である。ここで基準水位はEL. 383.0mとしている。**図-13**によれば、変形速度を除外した結果、水位と変形は常に一定勾配の軌跡を描いているように見える。この関係に基づき、水位差18mに対して12mmの変位を想定し、 0.67×10^{-3} の関係を得た。

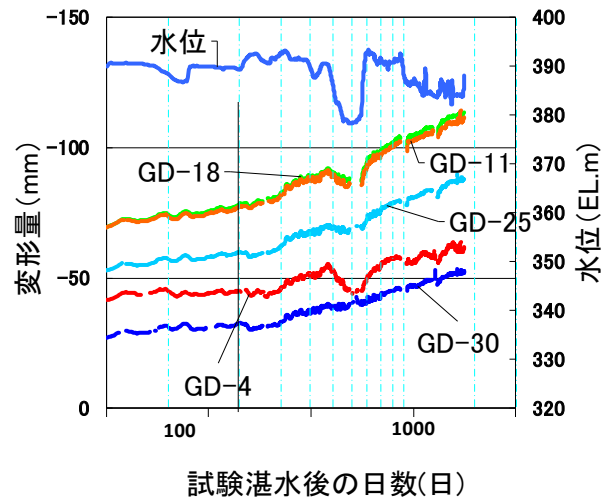


図-11 経過時間と水平変形の関係

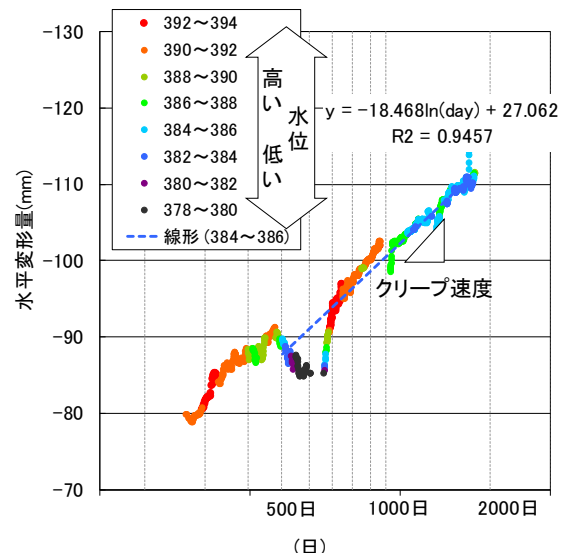


図-12 同一水位条件下における水平変形量の経時変化 (GD-11)

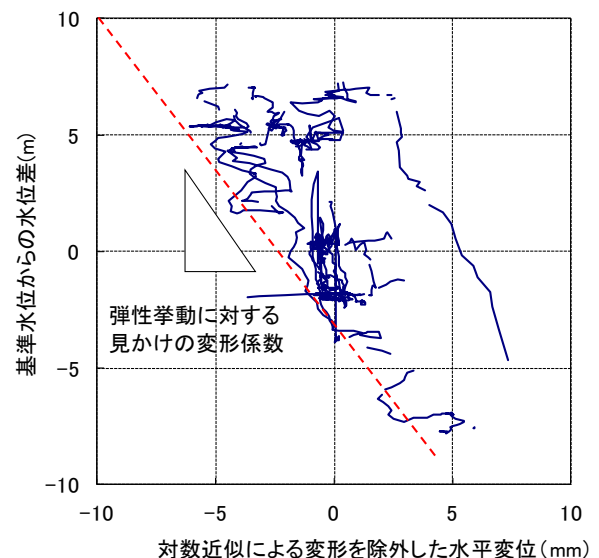


図-13 経時変化分を控除した水平変形量の水位との関係 (GD-11)

以上の関係に基づき、徳山ダムの GD-11 における実測挙動を経験的に定式化したのが**式-3**である。

$$\delta_h = -18.468 \ln(t) + 27.062 + 0.67(h_w - 385) \quad \text{式-3}$$

ここに、 δ_h ：水平変位（mm, 下流側を-）

t ：試験湛水完了後の日数（日）

h_w ：予測対象日における水位（EL. m）

これら経験的な定式化は、徳山ダムに設置した他の GPS 計測点においても実施され、定式化そのものが不可能となる点は存在していないように見えた。

GD-11 における堤体の水平変位の実測値と**式-3**による予測値を重ね合わせたものが**図-14**である。**図-14**によれば、実測値と予測値は概ね整合しており、本手法により数年間の記録に基づき整理することで、堤体の水平変位を経験的に予想できる可能性があることが示唆された。

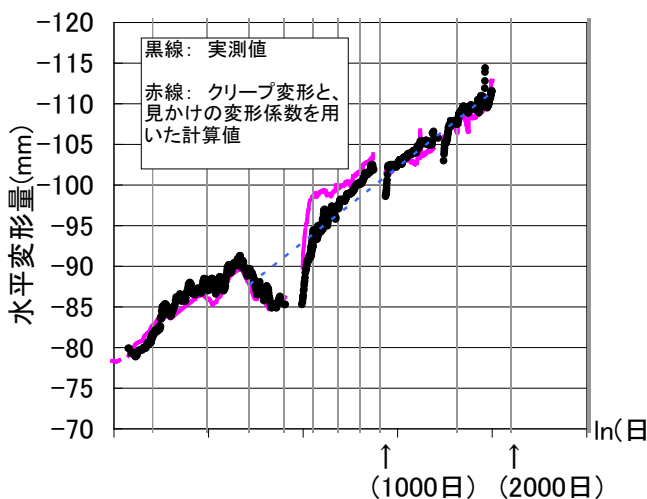


図-14 水平変形量の実測値と予測値（GD-11）

5. まとめ

本論文は、これまで経験的に行われてきたロックフィルダムの挙動評価を既存データに基づき定量化する一環^{4b)}として、GPS計測を用いた変形挙動の計測並びに評価手法について提案するものである。ここでは鉛直並びに上下流変形に着目し、これまでに蓄積した機構ダムのデータを基に、GPSによるロックフィルダムの堤体変形計測精度の向上やGPS計測を採用する際の適用性向上について検討を行った。

2.においては、GPS 計測を用いたフィルダムの計測における、鉛直方向の計測値の精度向上を行う事を検討し

た。

3.においてはGPS計測により得られたデータに基づきダム堤体の水平変形量を予測するための予備的検討として、水位変動に伴う弾性挙動と時間経過に対する粘性挙動に分解することを試みた。

検討の結果、GPS 計測において複数の基準点を用いて得られた誤差を内挿または外挿する方法は、鉛直方向の測量誤差を効率的に除去することが可能である事がわかった。本手法は気象データを取り扱うことなく補正ができることから有効な手法と考えられる。

また、GPS 計測により得られる連続かつ高精度な測量結果に基づき、水平変形量を適切に表現することが可能と考えられる。その上でロックフィルダムの定量的な安全管理手法を提案出来ればと考えている。

これらの手法を行うことで、堤体変形の適切な管理と将来予測が可能になると考えられる。今後は今回検討した手法の適用性について他のダムにおける計測結果を踏まえて実用性の確認を行って行きたいと考えている。

最後に、中部電力株式会社様には内挿のための基準点データとして GPS 基準点での計測データをご提供頂きました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば 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), 120-136, 2005
- 2) 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
- 3) 曾田英揮, 田口孝男, 福井正泰, 佐藤信光: GPSを用いたフィルダム堤体変形の測定と地震時速報, 水資源機構 技術研究発表会, 2005
- 4) 曾田英揮, 太田垣晃一郎, 佐藤信光: ロックフィルダム計測結果による安全性評価手法, 水資源機構 技術研究発表会, 2012
- 5) Shimizu, N., Nakashima, S., Masunari, T., : ISRM suggested method for monitoring rock displacements using the Global Positioning System (GPS), Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1), 313-328, 2014
- 6) 増成友宏, 清水則一: GPSによる地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討, 土木学会論文集 F, 63(4), 437-447, 2007
- 7) 曾田英揮, 佐藤信光, 自閑茂治, 岩崎智治: GPS計測を用いたフィルダムの堤体計測の高度化の検討, ダム技術, 4-17, 2010. 3
- 8) 太田垣晃一郎, 曾田英揮, 佐藤信光: ロックフィルダムにおける堤体挙動の安定性評価手法に関する検討, 水資源機構技術研究発表会, 2013