

重力式コンクリートダムの 基礎岩盤の水平変位計測

小堀 俊秀^{1*}・山口 嘉一¹・大舘 渉¹・清水 則一²

¹独立行政法人土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

*E-mail: kobori@pwri.go.jp

コンクリートダムでは、堤高が高い場合や基礎岩盤に弱層がある場合などには岩盤の水平変位を計測するリバースプラムラインが設置されている。リバースプラムラインは、設置作業の煩雑さや、設置コストなどからダム堤体複数ブロックに設置するのは困難である。そのため、堤体内部の水平変位を計測するノーマルプラムラインとダム堤体および基礎岩盤の全体挙動を計測する他の方法を組み合わせることにより、基礎岩盤の水平挙動を把握することが出来れば、相対的に安価に合理的な変位計測が可能となる。本論文では、ダムの全体挙動を計測するために、ダム天端にGPS変位計測システムを設置して得られた結果と、ノーマルプラムラインの計測結果を組み合わせ、基礎岩盤の水平変位を把握する方法について述べる。

Key Words : GPS, concrete gravity dam, displacement, measurement, safety management

1. はじめに

堤高50m以上の重力式コンクリートダムは、河川管理施設等構造令¹⁾により、漏水量、変形、揚圧力を計測することが規定されている。現在、重力式コンクリートダムの変形計測は、主にプラムラインで行われている。

重力式やアーチ式のコンクリートダムでは、堤高が高い場合や基礎岩盤に弱層がある場合などには岩盤とダム堤体の水平変位を計測するリバースプラムライン(以下、RPL)が設置されている。RPLは計測機器を設置するにあたり、基礎岩盤にかなりの長さでφ300mm程度の大口径の孔の掘削が必要である。この方法では、施工に多くの労力が必要となり、またコストもかかることから、ダム堤体複数ブロックに設置するのは非常に困難である。そのため、堤体内部の水平変位を計測するノーマルプラムライン(以下、NPL)とダム堤体および基礎岩盤全体挙動を計測する他の方法を組み合わせることにより、基礎岩盤の水平挙動を把握することが出来れば、相対的に安価に合理的な変位計測が可能となる。

本論文では、ダムの全体挙動を計測するために、長井ダム(重力式コンクリートダム、堤高125.5m、国土交通省東北地方整備局)のダム天端にGPS変位計測システム²⁾を試験導入³⁾して得た計測結果と、NPLの計測結

果を組み合わせ、基礎岩盤の水平変位を把握する方法について述べる。

2. 重力式コンクリートダムへのGPSの設置

GPS変位計測システムを設置した長井ダムの主要諸元を表-1に示す。長井ダムは、2006年11月に本体コンクリート打設が終了し、2009年11月30日から試験湛水を開始した。2010年4月3日に常時満水位(EL. 367.30m:以下, N.W.L.)、2010年4月30日にサーチャージ水位(EL. 392.10m:以下, S.W.L.)に到達後、水位を下げ、2010年5月29日に再びN.W.L.に到達した。その後、貯水池の水位を低下させて、2010年9月22日に最低水位(EL.322.00m:以下, L.W.L.)まで下げ、堤体や貯水池周辺地山等の安全性を確認し、一連の試験湛水の作業を完了した。

GPSセンサーの設置位置上流側縦断面図を図-1に、断面図を図-2に示す。GPSセンサーは、ダム堤頂上に可動点3点(G-1~G-3)、ダムの挙動の影響を受けない左岸に基準点として固定点1点の合計4点設置した。また、GPSセンサーは図-2に示すように、G-1はNPL DN-2と同じ15ブロックに、G-2はダム敷直下に低角度の断層が分布するためNPL DN-1とともにRPL DR-1が設置されている20ブロックに、G-3は8ブロックに設置した。基準点は、

左岸堤体取付け部付近のコンクリート上に設置したGPSセンサーの設置方法の例として、G-1の設置状況を図-3に示す。GPSセンサーは堤頂下流部の高欄上に設置した。本研究に用いたGPSセンサーの主要部を構成するアンテナ部の外形はφ156mm×H116mm、質量は0.6kgと小型のセンサーであるため、図-3に示すような場合も含めダム天端のマンホールの中等の多様な場所⁴⁾への設置が可能である。また、GPSの計測結果にトレンドモデルによる誤差処理²⁾を施すことにより、平面方向に比べ計測精度の低い鉛直方向についても、誤差処理後の精度は2~3mmと、従来の測量と同等ないしはそれ以上の精度が確保できている。

表-1 長井ダム諸元

型 式	重力式コンクリートダム
堤 高	125.5m
堤 頂 長	381m
堤 体 積	1,200,000 m ³

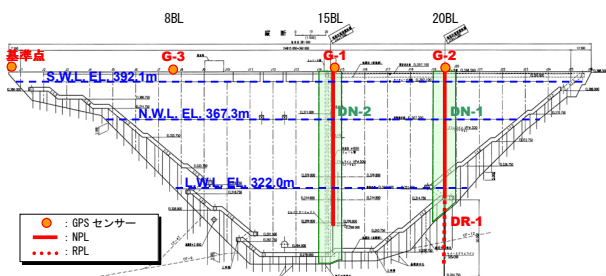


図-1 GPSセンサー設置位置 (上流面図)

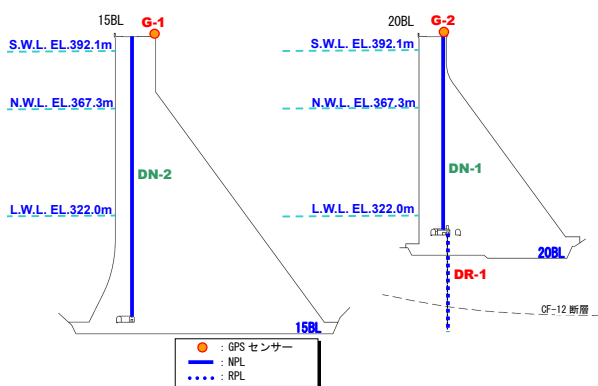


図-2 GPSセンサー設置位置 (断面図)

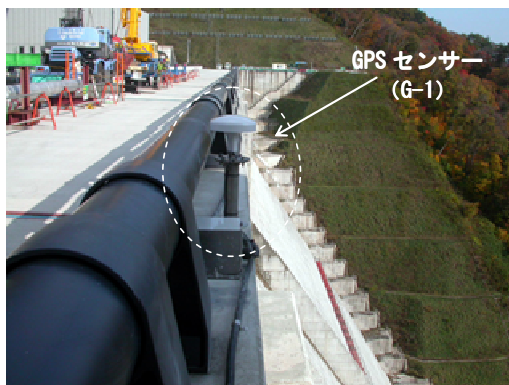


図-3 GPSセンサー設置状況 (G-1)

3. ダムの変位挙動計測結果

本章では、GPS変位計測システムとプラムラインによる変位計測結果について示す。GPS変位計測システムは、GPSセンサーを設置した2009年11月1日から2010年12月1日まで、プラムラインは試験湛水を開始した2009年12月1日から2010年12月1日までの計測結果を示す。

(1) GPSによる変位挙動計測結果

GPSによる長井ダムの変位計測結果を貯水位とともに図-4に示す。図は、上からG-1~G-3の (a) 上下流方向変位、(b) ダム軸方向変位、(c) 鉛直方向変位を示している。それぞれの挙動の特徴を以下に示す。

a) 上下流方向変位

上下流方向の変位については、試験湛水開始後2010年3月まで貯水位をほぼL.W.L.に保っている間は、下流側への変位はそれほど発生していない。なお、図内に示すAの部分では上下流方向変位に特異な挙動が見られる。これはGPSセンサー周辺に雪が積もり、マルチパス（GPS衛星からの電波の乱反射）が発生したためと考えられる。実際には、除雪を行うことにより、変動が収まることを確認した。

次に、L.W.L.からN.W.L.に水位を上昇させるに従い、各計測地点とも下流方向へ5mm程度の変位が発生している。その後、水位を2009年4月29日のサーチャージ水位S.W.L.まで上昇させると、水位変化に応じてG-1で最大29.0mmの下流側への変位が発生している。

その後、水位の低下に従い、上流側への変位が発生している。上流側への変位は、2010年5月30日に水位をN.W.L.まで下げ、その後水位をN.W.L.で二ヶ月程度保った2010年7月26日になっても上流側への変位が若干進んでいる。この上流側への変位は、水位をL.W.L.まで低下させる途中の貯水位がEL.340m付近まで続くが、それ以降は再び下流側への変位が発生し、水位をL.W.L.に維持してからは、計測開始時の値に近づきつつある。

b) ダム軸方向変位

ダム軸方向の変位については、試験湛水開始後2010年12月下旬頃より変位が発生している。G-1、G-2は左岸側、G-3は右岸側への変位である。この変位は、L.W.L.保持期間中の2010年3月1日まで徐々に進行している。この期間中は、上下流方向変位が発生していないことから、ダム堤体に相対的に大きな水圧は作用していないと考えられる。しかし、それぞれの計測地点で2mm程度ではあるが変位が発生している。変位が発生した理由の一つとして、設置場所の温度の影響等が考えられるため、今後外気温や堤体温度を踏まえた検討が必要である。

上下流方向の計測結果から、堤体に大きな水圧がか

かりはじめると考えられる、N.W.L.からS.W.L.までの水位上昇期間は、G-1はほとんど変化がないが、G-2は右岸側への、G-3は左岸側への変位が発生している。次に、水位を低下させるに従い、G-1とG-3はほとんど変化がなく、G-2は水位上昇時とは逆に左岸側へ変位が発生している。その後、水位をL.W.L.まで低下させる途中の貯水水位がEL.340m付近になると、再び、G-2は左岸側へ変位が発生している。

c) 鉛直方向変位

鉛直方向の変位は、当初は貯水に関わらず沈下傾向にあり、2010年5月からは上昇する傾向、その後2010年9月から下降する傾向にある。鉛直方向の変位は水位との相関はみられない。季節による変動を示しているようにも見える。今後、長期的な観測ならびに堤体の温度応力解析を実施し、変位挙動の詳細な検討が必要である。

なお、先にも述べたが図中Aは雪の影響と考えられる異常値が発生している。鉛直方向については、既往の試験⁵⁾により、GPSセンサー上に積もった積雪深によりばらつくことが確認されている。また、図中Bは各点ともに同じような変位のばらつきが発生している。重力式コンクリートダムでこのように短時間で隆起することは考えにくく、またデータも各計測地点同時にシフトしていることから、固定点付近にマルチパスを発生する何らかの異常があったものと把握できる。

(2) プラムラインによる変位挙動計測結果

GPSとプラムラインの位置の関係は図-1～図-2に示すように、GPSセンサーのG-1はNPL DN-2と、GPSセンサーのG-2はNPL DN-1とRPL DR-1と同じブロック上に設置している。なお、プラムラインは自動測定方式により計測している。

プラムラインによる変位計測結果を図-5に示す。図は上より (a) 上下流方向、(b) ダム軸方向、(c) 貯水水位を示している。また、NPL DN-1とRPL DR-1の変位量の合計を図中に示している。なお、NPLはGPSと違い鉛直方向の変位計測を行うことはできない。それぞれの挙動の特徴を以下に示す。

a) 上下流方向変位

上下流方向変位は、湛水を開始し、L.W.L.で水位を一定に保っている期間は、DN-1とDN-2は上流側へ最大3mm程度の変位が発生している。一方、DR-1の変位はほとんど発生していない。水位をN.W.L.まで上昇させると、その間、すべての計測結果に下流側への変位が見られる。水位がS.W.L.まで上昇すると、DN-2で23.7mmの変位、DN-1とDR-1の合計で30mmの変位が発生している。その後、水位がN.W.L.まで下降するに従い、DN-1とDN-2は上流側への変位に転じ元の変位まで戻る傾向にあるが、DR-1はほとんど変化が生じていない。コンクリートダム堤体内に設置してある、DN-1とDN-2は弾性的な挙動を示し、岩盤内に設置してあるDR-1は塑性

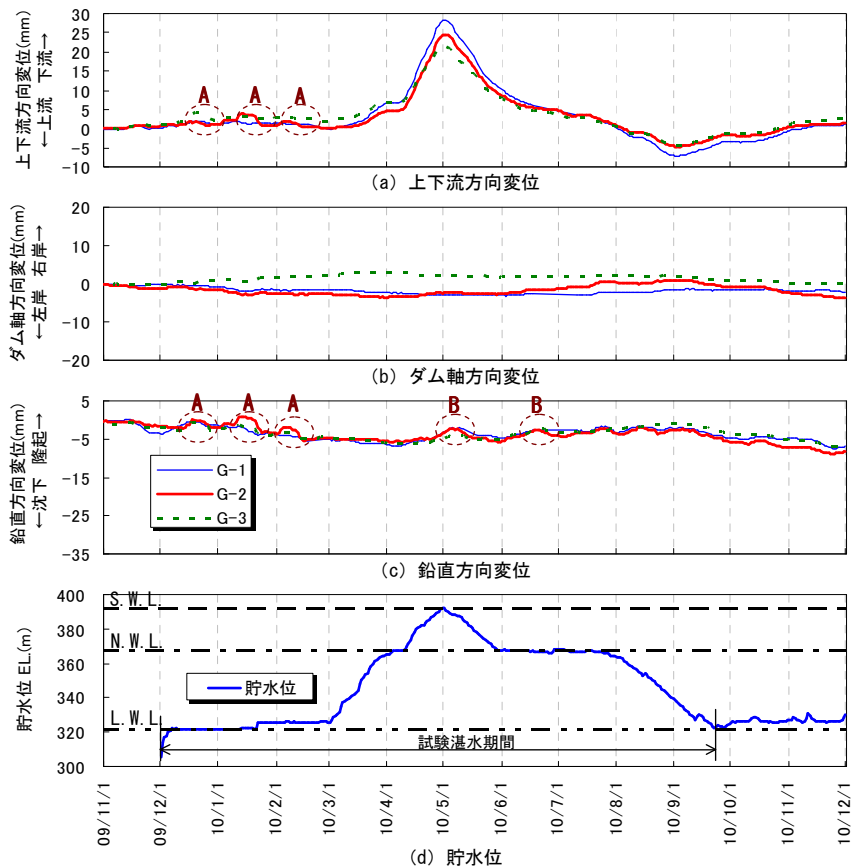


図-4 GPSによる変位計測結果

的な挙動を示していると考えられる。N.W.Lで水位を一定に保っている期間は、DN-1とDN-2は継続して上流側へ変位が発生し、計測開始時の値に戻る傾向にあるが、DR-1にほとんど変位はみられない。その後、水位をN.W.LからL.W.Lに下降させる途中、EL.340m付近でGPSの計測結果と同様に、DN-1とDN-2は下流側へ変位が発生し、L.W.Lで水位を一定にした後に下流側への変位は収まっている。

b) ダム軸方向変位

ダム軸方向変位は、水位をL.W.Lに保っている期間はほとんど変位が発生しないが、2010年3月以降に水位をN.W.Lまで上昇させるとDN-1は右岸側に、同じ地点の岩盤内にあるDR-1は左岸側に、DN-2はほとんど変位が発生しない。この変位は、水位をS.W.Lまで水位を上昇させる間、継続して大きくなる。S.W.L到達以降、水位を下降させると、DN-1は左岸側へ、同じ地点の岩盤内にあるDR-1は右岸側へ変位が発生しているが変位量はそれぞれ2mm程度と極めて微量である。その間、DN-2は徐々に右岸側への変位が発生している。

(3) GPSとプラムライン計測値の比較と岩盤変位の推定

本節では、それぞれ同じブロックに設置してあるG-1とDN-2、G-2とDN-1及びDR-1の計測結果の比較を行う。計測値は、両者の比較ができるように、プラムラインの計測開始時である2009年12月1日をゼロ値として整理を行った。

a) G-2とDN-1・DR-1の比較

GPSによる計測結果と、NPL・RPLとの計測結果の比較ができる、G-2とDN-1・DR-1の比較を図-6に示す。

図-6 (a) に示す上下流方向変位は、プラムラインDN-1、RPL DR-1の計測結果は、特に水位上昇時に着目するとGPSの計測結果と比べて小さい。いま、プラムラインの計測結果は、図-7の計測位置模式図に示すように、NPLは、ダム堤体内の固定点NBを基準にしたNA地点の変位、RPLは、基礎岩盤内の固定点RBを基準にしたRA地点の変位を示しており、GPSは基礎岩盤を含めた全体の挙動を計測していると考えられる。そこで、DN-1とDR-1を合成した結果を図中「(DN-1) + (DR-1)」(以下、プラムライン合成値)に示す。合成した結果、上下流方向変位は、水位上昇時は、GPSとプラムライン合成値による計測値は同様の傾向を示したが、水位下降時には、GPSの計測結果は、計測の初期値よりダム上流側に変位するのに対し、プラムライン合成値は計測初期値よりダムの上流側へ変位することはなかった。最終的には、GPSの計測値は下流側へ1.4mm、プラムライン合成値は下流側へ2.1mmとほぼ同じような計測値となった。

図-6 (b) に示すダム軸方向変位については、DN-1とDR-1の単体の挙動はGPSの計測結果とまったく違った挙動となっている。図-6 (a) と同様に、図中にプラムライン合成値を示す。プラムライン合成値はGPSの計測結果と同じような傾向を示しているが、変位量には最大で4mm程度の差が見られる。この理由の一つとして、ダム軸方向の変位量の絶対値が上下流方向の変位量と比べて小さいことがあげられる。

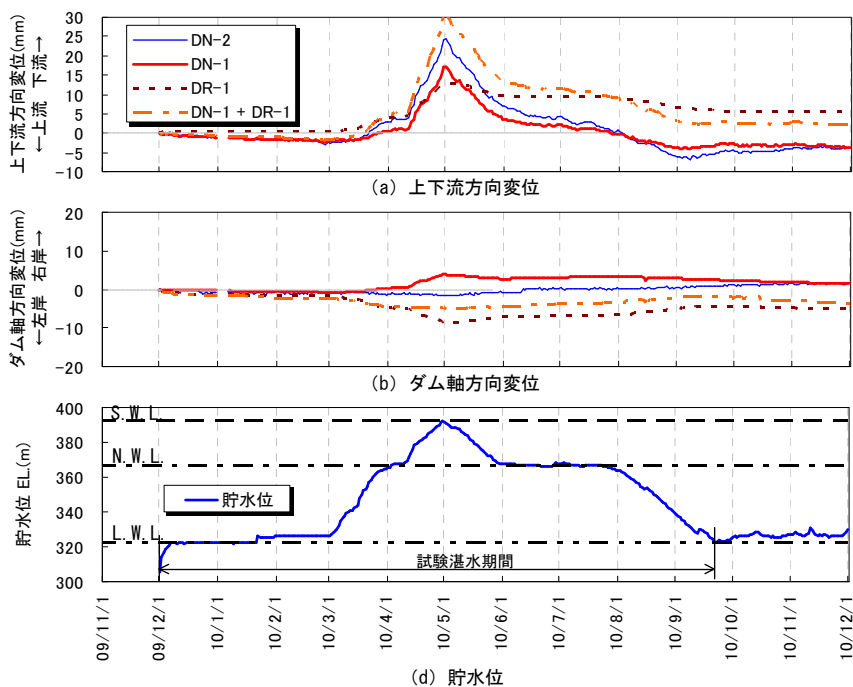


図-5 プラムラインによる変位計測結果

b) 岩盤変位の推定

次に、GPSの計測値から岩盤の変位量の推定を行った。図-7の計測位置模式図に示すように、NPLは、ダム堤体内の固定点NBを基準にしたNA地点の変位、GPSは基礎岩盤を含めた全体の変位を計測していると考え、GPSの計測結果G-2から、NPLの計測結果DN-1を引いた値（以下、「(G-2) - (DN-1)」）は、基礎岩盤の変位量を計測しているRPL計測値NR-1と近い値を示すと考えられる。DR-1の計測岩盤変位と、GPSの計測結果から試算した推定岩盤変位の比較を図-8に示す。図より、DR-1と(G-2) - (DN-1)の値は、(a)上下流方向変位と(b)ダム軸方向変位はともに変位の発生方向は同じであるが、変位量には差がある。

次に、RPLが設置されていない地点での岩盤変位量の算出を行った。G-1とDN-2の比較を図-9に示す。(a)上下流方向、(b)ダム軸方向ともにGPSの計測結果とプラムラインの計測結果は同じような傾向を示している。また、計測結果は20ブロックと同様にGPSの計測値がプラムラインの計測値に比べて大きくなる傾向にある。図-9中には、図-8と同様に、GPSの計測結果からNPLの計測結果を引いてもとめた「(G-1) - (DN-2)」を示している。この値が、推定岩盤変位となる。また、「(G-1) - (DN-2)」の貯水位との相関図の傾向は、ブロックは異なるがRPLであるDR-1の傾向に一致している。

4. まとめ

本研究では、GPS計測システムを用いてダム堤体および基礎岩盤の全体挙動を計測したうえで、同一ブロックのNPLの計測値を組み合わせることにより、基礎岩盤の水平挙動把握の可能性についての検討を行った。今回の検討により得られた知見を以下に示す。

- GPS変位計測システムは、NPLと同様の傾向の計測

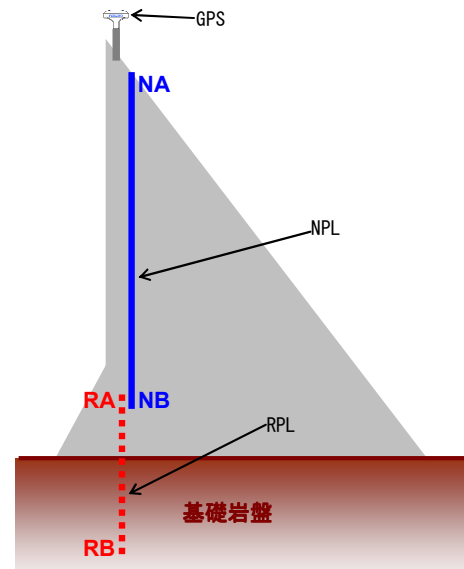
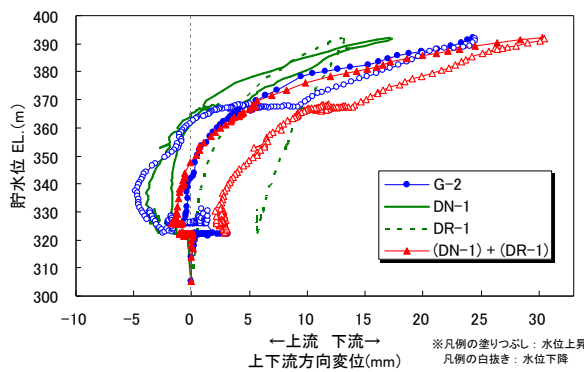
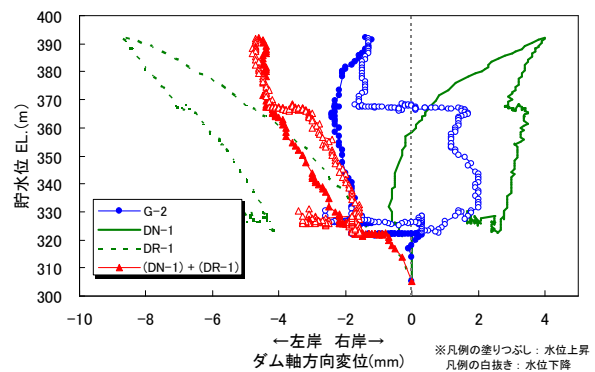


図-7 計測位置模式図

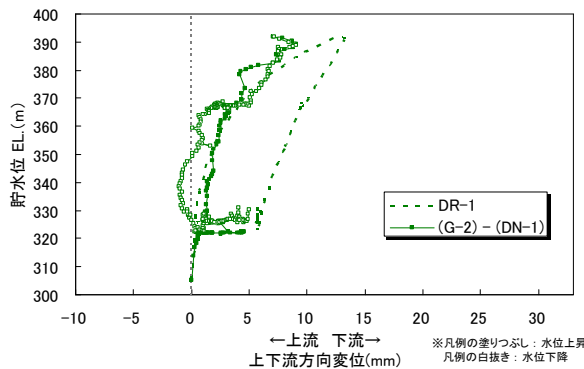


(a) 上下流方向

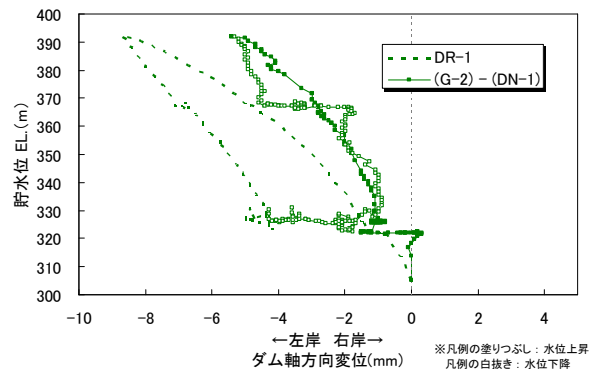


(b) ダム軸方向

図-6 G-2とDN-1・DR-1の比較

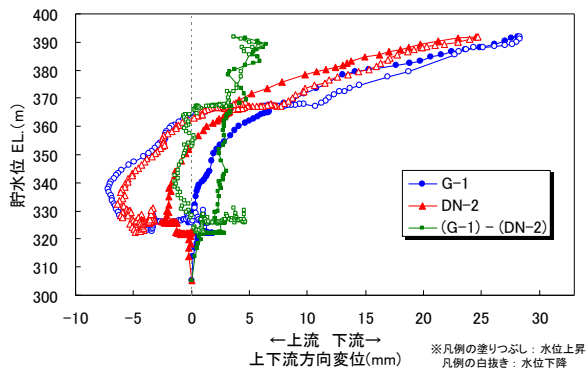


(a) 上下流方向

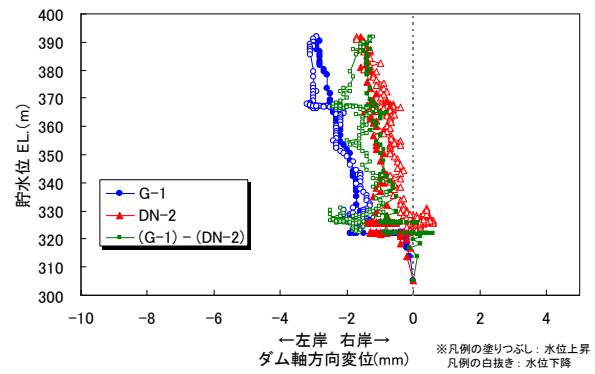


(b) ダム軸方向

図-8 DR-1と、GPSの計測結果から試算した推定岩盤変位



(a) 上下流方向



(b) ダム軸方向

図-9 G-1とDN-2の比較

結果を得ることができる。

- GPS変位計測システムの計測結果は、NPLの計測結果より大きくなる傾向にある。これは、GPS変位計測システムは基礎岩盤を含めた全体の挙動を計測しているのに対し、NPLは、天端と監査廊内に設置した固定点間の変位、つまり堤体のみの変位を計測しているためと考えられる。
- 上記の特性を利用し、GPS変位計測システムの計測結果から、NPLの計測結果を減算することにより、推定岩盤変位を算出した。その結果、DR-1と(G-2) - (DN-1)の値は、量的に差はあったが、上下流方向変位とダム軸方向変位はともに変位の発生方向は同じであった。
- 同様に、NPLの設置されていないG-1とDN-2の計測点で、推定岩盤変位を算出した。

今後は、それぞれプラムラインが設置してある地点の挙動の詳細を考察するため、FEM解析等を用いて挙動の詳細分析を行う予定である。

参考文献

- 1) (財)国土開発技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，山海堂，pp.95-97，2000。
- 2) Shimizu, N. : Monitoring Rock Deformation Using Global Positioning System - Fundamentals, New Developments and Practical Applications -, Keynote Lecture at the 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 2009.
- 3) 山口嘉一，小堀俊秀，矢沢賢一，斉藤明，岩瀬秀一：GPSを用いた重力式コンクリートダムの変位計測，ダム技術，No.294，(財)ダム技術センター，pp.8-18，2011。
- 4) Yamaguchi, Y., Kobori, T., Yoshida, H., Sakamoto, T., Itaya, H. and Iwasaki, T. : Real-Time Monitoring of Exterior Deformation of Embankment Dams Using GPS, 23rd ICOLD Congress, 2009.
- 5) 漆山洋治，宮崎裕之，山口嘉一，小堀俊秀，池澤市郎，岩崎智治，飯島功一郎：天端埋設型GPSを用いた豪雪地帯におけるフィルダムの安全管理に関する検討，平成18年度土木学会東北支部技術発表会，土木学会東北支部，CD-ROM IV-33，2007。

MEASUREMENT OF DEFORMATION OF FOUNDATION FOR CONCRETE GRAVITY DAM USING GPS

Toshihide KOBORI, Yoshikazu YAMAGUCHI, Wataru OODATE and Norikazu SHIMIZU

The measurement of deformation is one of the most important measuring items for safety management of concrete gravity dams. Displacement measurement of concrete gravity dams is commonly made by normal and inverted plumb lines. However, the installation of inverted plumb line is a cost and time consuming work. Our previous research revealed that GPS displacement measurement system has sufficient accuracy for practical use. If we can confirm that the combination of normal plumb line and GPS displacement measurement system can make was estimate the displacement of foundations for concrete gravity dams, safety management will become more sophisticated and inexpensive.