

## ◆ 報 文 ◆

## フィルダムの安全管理へのGPSの利用

山口嘉一\* 小堀俊秀\*\* 横森源治\*\*\* 大野 誠\*\*\*\*

## 1. はじめに

フィルダムの安全管理のための計測の中で、最も重要な計測項目は、ダム全体の挙動を示す漏水量と変形の2つである。このうち、変形の計測は、堤体の天端およびのり面に適切な間隔の測線により格子を組み、各格子点に測量用の標的を設置し、水平および鉛直方向の変位量を測量することにより測定されている。

従来の計測方法は、光波測量または水準測量を用いた方法であるが、測定に時間と費用を要している。洪水時や地震後に迅速な計測を行い、計測コストを縮減するためには、従来の方法に代わるより合理的な計測手法の開発が必要である。

迅速にかつ比較的安価に測量を行うシステムにGPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) がある。GPSは、カーナビゲーションや測量作業でよく知られる人工衛星を用いた全天候型の測位システムである。

近年、GPSによる測量に関しては、電子機器の改善、演算機能の飛躍的な進歩、計測データの誤差処理技術の向上などにより、計測の精度が飛躍的に向上している。

本報文では、以上のような状況に鑑み、既設の中央土質遮水壁型ロックフィルダムにおいて、光波測量および水準測量に基づく従来の外部変形計測と、GPSによる外部変形計測の比較を行い、GPSによるフィルダム外部変形計測の可能性について考察する。

## 2. フィルダムの外部変形計測の現状と課題

ダムの安全管理のための計測は、巡視とあいまってダム堤体および基礎岩盤の安全性を確実に確認できるものでなければならない。河川管理施設等構造令<sup>1)</sup>では、ダムの安全管理にとって必要な計測項目を規定しているが、その項目はダムの安全管理にとって必要最小限の項目、換言すれば最も重要な計測項目を示したものである。フィルダムにおいては、堤体および基礎岩盤浅部からの漏水量と変形が安全管理上の主要計測項目として規定

されている。これは、これらの項目の計測により、特定断面に限った局所的な挙動ではなく、堤体および基礎岩盤の全体的な挙動が把握できるためである。このため、これらの計測項目のためには、故障の心配がない計器が用いられている<sup>2),3)</sup>。

フィルダムのうち、大規模ダムを築造する際の一般的型式である内部土質遮水壁型ロックフィルダムの外部変形計測用標的の設置例を図-1に、また可動点標的の詳細構造例を図-2に示す。計測は、堤体の天端およびのり面に適切な間隔の測線により格子を組み、各格子点に測量用の標的(可動点)を設置し、左右岸に設けた標的(固定点)より可動点標的の水平および鉛直方向の変位量を光波測量および水準測量によりおこなう。

ダムの安全管理の期間の区分と計測、巡視の標準的な頻度を表-1に示す<sup>2),4)</sup>。ダムの安全管理の第I期とはダムの試験湛水中の期間をいう。また、試験湛水の終了からダムの挙動が安定した定常状態に達するまでの期間およびダムの挙動が定常状態に達した後の期間を、それぞれダムの安全管理の第II期および第III期という。表中の変形がここでいう外部変形量にあたる。フィルダムにおける外部変形量の測定は、第I期は1回/週、第II期は1回/月、第III期は1回/3月の計測を行う。フィルダムの外部変形量の測定精度について厳密な規定はないが、mm単位での精度は必要であると考えられる。なお、表-1より、このフィルダムの外部変形量の計測頻度は、堤体内に埋設されたプラムラインにより計測されるコンクリートダムの変形量計測頻度よりも低いことがわかる。ここで、プラムラインとは、堤体内に設けられた鉛直の堅坑に振り子を吊り下げ、錘の変位からダム変形量を計測するものである。

光波および水準測量によるフィルダムの外部変形量の計測方法については、従来から、①計測や結果の整理に要する時間が比較的長く、費用もかなりかかる、②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、迅速に対応できていない、などの課題があった。

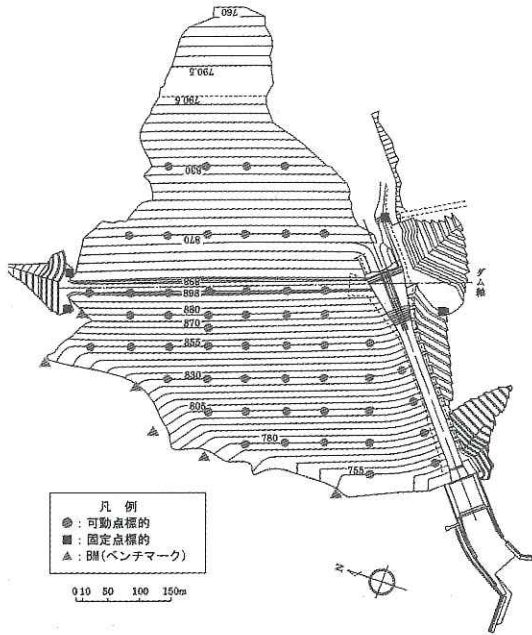
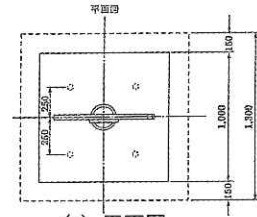
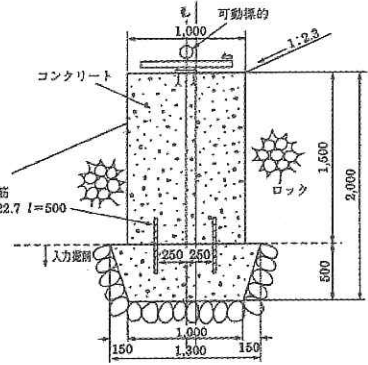


図-1 外部変形計測用標的の設置例 (奈良保ダム) <sup>5)</sup>



(a) 平面図



(b) 側面図

図-2 可動点標的の詳細構造例 (寒河江ダム) <sup>6)</sup>

表-1 ダムの安全管理の期間の区分と計測、巡視の標準的な頻度 <sup>2,4)</sup>

	重力式コンクリートダム <sup>*1)</sup>			フィルダム		
	第I期	第II期	第III期	第I期	第II期	第III期
漏水量 <sup>*2)</sup>	1回/日	1回/週	1回/月	1回/日	1回/週	1回/月
変形	1回/日	1回/日	1回/週	1回/週	1回/月	1回/3月
揚圧力	1回/日	1回/週	1回/月			
巡視	1回/日	1回/週	1回/月	1回/日	1回/週	1回/月

\*1) 堤高50m以上の重力式コンクリートダムが対象となる。

\*2) 河川管理施設等構造令では「漏水量」と定義されているが、この「漏水」は設計で考慮されている「漏水」であるから、本稿では、コンクリートダムの場合には「排水量」、フィルダムの場合には「浸透量」と呼ぶこととする。

### 3. GPS計測技術の現状と適用したGPSの特徴

#### 3.1 GPS計測技術の現状

最近、地盤計測に特化した新しいGPS計測システム <sup>7)</sup> が開発された。このGPS計測システムは、受信機や電源・通信装置、メモリーなどの装置を通信集約機に集約し、各計測地点にはGPSセンサーのみを設置する機器構成とすることで計測精度を劣化させずに小型・軽量・安価を実現させた地盤計測用のGPS計測機器を用いている。また、データ通信にインターネットを利用することで通信コストの低減と利便性の向上を図ったものである。図-3に地盤計測用の新型GPS計測機器の概要を示す。

計測地点にはGPSセンサーを設置する。GPSセンサーで受信した計測データは、通信集約機に導かれ、NTT回線等を通じて監視センターに送信される。監視センターでは、計測中に変位は発生しないと仮定して1~3時間程度のデータを用いて測位する方法で、水平方向に対して5~10mm + 1ppm × 基線長、上下方向に対して10~20mm + 2ppm × 基線長の精度を有するスタティック測位による基線解析を実施し、後述のトレンドモデルによる誤差処理を行って、変位グラフ、平面ベクトル図等にとりまとめる。これらの計測結果はインターネットを経由して監視対象構造物の管理者に配信される。



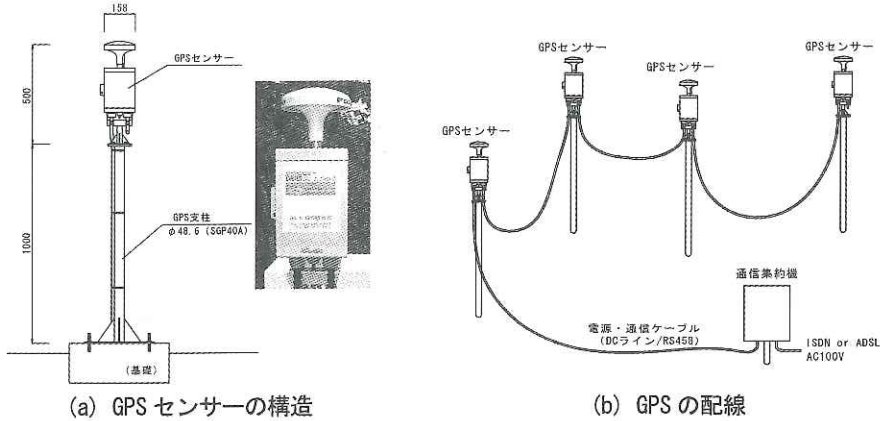


図-3 地盤計測用の新型GPS計測機器の概要

### 3.2 トレンドモデルによる計測精度の向上

GPS計測では、衛星配置や上空視界、基線長(基準点と計測点間の距離)、気象条件、マルチパス(建物などの地物による反射波)等の様々な誤差要因のため計測値がばらつき、通常の基線解析のみでは最も高精度なスタティック測位でもmm単位の変位判定は難しい。そこで、本研究で使用したシステムでは、清水ら<sup>8),9)</sup>が提案するトレンドモデルによる時系列統計処理(誤差処理)を導入した。

この方法は、トレンドモデル<sup>10)</sup>と呼ばれる確率構造を持った時系列解析モデルを用いて、ノイズを含む計測データから真の変位挙動を推定するものである。具体的には、推定したいn回目計測時点の真の変位 $u_n$ をトレンド成分モデルと呼ばれるシステム方程式のパラメータとし、さらに、実際に計測される変位 $y_n$ を観測方程式として関係づけ、次のように連立させたモデルを用いる。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad (1)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad (2)$$

ただし、 $v_n$ は平均値0、標準偏差 $\tau$ のシステムノイズ、 $w_n$ は平均値0、標準偏差 $\sigma$ の観測ノイズで、いずれも正規分布に従うものとする。また、 $\Delta$ は時間差分演算子で、 $\Delta^k$ は $k$ 回差分を意味する。解析に際しては、トレンドモデルにカルマンフィルタのアルゴリズムを適用して計測値の平滑化を行い、観測ノイズおよびシステムノイズの分散値は最尤法で求めている。また、モデル次数 $k$ はAIC(赤池の情報量基準)<sup>11)</sup>が最小となるように推定する。

大寺ら<sup>12)</sup>は、高速道路沿いの切土斜面にGPSセンサーを設置し、2mm~10mmの範囲でGPSセンサーを強制的に変位させた実験を行って、

GPS計測値に対してトレンドモデルによる誤差処理を行うことで2mm程度の変位計測が可能であることを示した。また、岩崎ら<sup>13)</sup>は、地すべりでのGPS計測値にトレンドモデルによる誤差処理を行い、光波測量や地表面伸縮計の計測結果と比較することで、1~2mm/月程度の地すべり変位計測が可能であることを確認した。

## 4. 羽地ダムにおける計測事例

### 4.1 試験計測の概要

試験計測を実施した羽地ダムは、内閣府沖繩総合事務局が沖縄本島北部に建設した、堤高66.5m、堤頂長198mの中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。当該ダムは、ダム完成後の平成13年7月から平成16年6月にかけて安全管理の第I期である試験湛水が実施され、従来の光波・水準測量によるダム堤体の外部変形量の計測が週1回の計測頻度で行われた。試験湛水後は、安全管理における第II期の計測体制に移行し、月1回の計測頻度で堤体の外部変形量計測が継続されている。GPS計測は、試験湛水期間中の平成15年10月10日から開始している。

ダム堤体の計測点の配置を図-4に示す。GPSセンサーは、19箇所ある可動点標的のうち堤体中央付近の4箇所(S-8、9、12、13)に設置した。また、不動地盤でかつ上空視界の良いダム堤体脇の旧尾根線上にGPS用の基準点を設置した。基準点から各計測点までの距離(基線長)は103.2m~147.6mで、各計測点とも常に4~6基の人工衛星を捕捉することができ、スタティック測位においては良好な計測条件であった。

設置位置S-8のGPSセンサーの設置方法を図-5に示す。S-8、S-9のGPSセンサーは、ロックゾーンの中に基礎を根入れしている可動点標的コンク

リートに設置した。S-12、S-13は、近傍の測量標的がダム堤体天端の歩道部に埋設されているため、GPSセンサーを天端歩道路肩の化粧岩に固定した。

4.2 GPS計測結果と従来方法による結果の比較

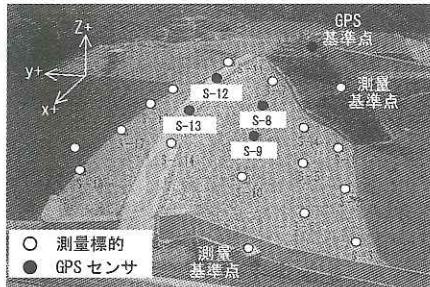
計測例として、ダム下流面中腹に設置したS-8におけるGPS計測結果と、同地点の光波・水準測量の結果の比較を図-6に示す。図の上から順にX(ダム軸)方向、Y(上下流)方向、鉛直方向の変位の、最下段はダム貯水位の経時変化で、変位についてはGPS計測開始時点をもととして図化している。変位グラフの黒丸は光波・水準測量、実線が誤差処理前のGPS計測の結果、実線がトレンドモデルによる誤差処理後の1時間に1点のGPS計測結果である。なお、X方向、Y方向および上下方向の変位については、それぞれ右岸、ダム上流、鉛直向を正として図化している。

まず、GPS計測の誤差処理前と誤差処理後の計測結果について検討する。誤差処理前のGPS計測値(実点)は、XおよびY方向で約5mm程度、上下方向で10~15mm程度の幅で分布している。このように計測値がバラつくのは、通常のGPS基線解析では除去しきれない電離層や対流圏の影響や人工衛星の軌道誤差、GPS受信機のノイズ等に起因する誤差のためである。一方、トレンドモデル

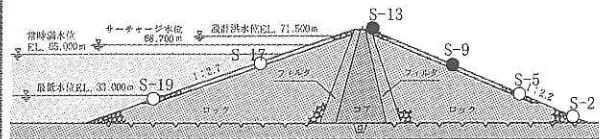
による誤差処理後のGPS計測値(実線)も1mm未満で揺れているが、誤差処理前の計測値の分布幅に対して1/5~1/10程度の揺れ幅であり、良好な誤差処理が実施されていることがわかる。

次に、GPS計測と光波・水準測量の計測結果の比較を行う。S-8のGPSセンサーは図-4に示されるロックゾーンの中に基礎を根入れしている測量標的コンクリートに設置した。したがって、GPS計測と光波・水準測量の結果は、ダム堤体表面の同一地点の計測値として直接比較することができる。S-8の誤差処理後のGPS計測値と光波・水準測量の値は概ね整合しているといえる。特に上下方向に関しては、全計測期間にわたって誤差処理後のGPS計測値と水準測量の値はほぼ同様であり、双方とも良好な計測が行われていることがわかる。しかし、XおよびY方向については、誤差処理後のGPS計測値に比較して光波測量の計測値はバラつきが大きい。

光波測量では、測距儀の測角誤差や大気密度の変化による屈折率の違いによる測距誤差により計測誤差が発生する。特に大気密度の影響については、実際の測量作業では、気温・気圧等を測定して大気補正を行う他、大気密度の日周変化や年変化の影響を低減するために大気が比較的安定する



(a) 空中写真



(b) 中央断面

図-4 計測点の配置

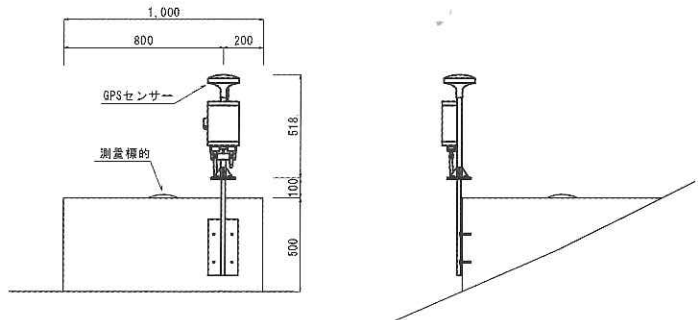
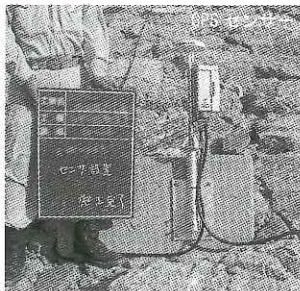


図-5 S-8 GPSセンサーの設置状況



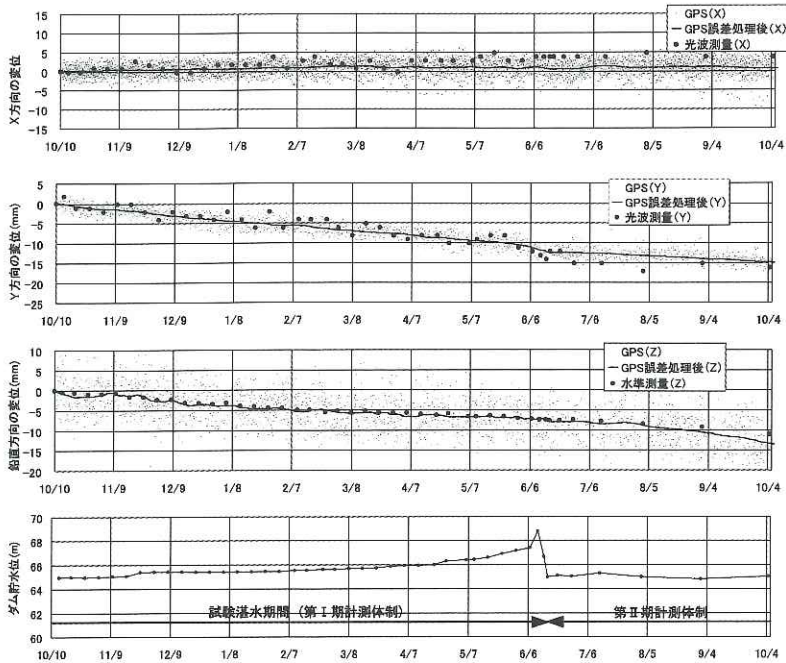


図-6 S-8測点のGPS計測と光波・水準測量との結果比較

未明から早朝にかけて作業をするように配慮するが、フィルダム堤体の外部変形計測は多数点の測量を通年実施するため全ての測量作業で大気の影響を完全に除去することは難しい。そのため、羽地ダムにおける光波測量は水準測量に比較すると計測精度がやや劣り、光波測量においては最大±4mm程度のばらつきが発生した。今回の試験計測では、GPS計測や水準測量に比較して光波測量の計測精度がやや劣っているのはこのためと考えられる。

なお、S-8と同様に可動点標的コンクリートに設置したS-9の観測結果はS-8と同等の結果を得た。

一方、S-12、S-13の計測結果は、GPS計測と光波・水準測量の値は概ね整合していたが、鉛直方向ではGPS計測と水準測量の計測値に2mm～5mm程度の差異が認められた。これは、S-12の可動点標的がダム堤体天端の歩道部に埋設されているため、GPSセンサーを可動点標的と同一地点に設置できなかったこと、また、GPSセンサーを天端歩道路肩の化粧岩に固定したため、GPS計測値はダム堤体の挙動を正確に計測できていない可能性もあること、などの理由によると推測された。従来の基線解析のみを実施するGPS計測では、光波測量より計測精度が劣ることも多い。今回の計測でも、誤差処理前のGPS計測値は光波測量よりバラつきが多い。しかし、誤差処理後のGPS計測

値が光波測量の結果よりバラつきが小さく高精度となったのは、本システムでは常時自動計測（1時間に1回の連続計測）で膨大な計測値を取得することでトレンドモデルによる誤差処理が可能となり、GPS計測値に含まれる誤差を効果的に除去しているためである。

### 5. GPSによるフィルダム外部変形計測についての考察

試験計測結果を踏まえ、GPSによるフィルダムの外部変形計測の利用方法や今後の課題についての考察を以下に示す。

- (1) 本研究で用いたGPS計測システムは、従来の方法と同等、ないしはそれ以上の計測精度で、ほぼリアルタイムに近い短時間間隔での計測（1時間に1回）が可能となり、より精度の高い安全管理を行うことができる。また、大規模な洪水による急激な貯水位上昇や大規模な地震発生などの非常時において、ほぼリアルタイムで変位計測を行えるという利点がある。なお、1999年にダムの試験湛水実施要領（案）が策定され<sup>14), 15)</sup>て、従来の試験湛水において設定していた貯水位上昇速度に関する制限が取り除かれ、また兵庫県南部地震以後、土木構造物について、大規模地震後の迅速な安全点検方法の必要性について議論されるようになって

おり、GPS計測システムの有用性がますます高まっていると考える。

- (2) 本研究で用いたGPS計測システムでは、計測精度を劣化させずに小型・軽量・安価を実現させたGPS計測機器を使用している。また従来の測量手法に比較して人件費・解析処理費を大幅に削減できる。そのため、特に、新設のダムにおいて、規定されている計測頻度の高い安全管理の第Ⅰ期にあたる試験湛水時から本システムを導入すれば、計測コストの大幅な縮減が可能と考える。

## 6. おわりに

今後のGPS計測システムについてのさらなる検討により、精度的および経済的な課題が解決すれば、フィルダムの外部変形計測の方法を、光波・水準測量からGPS計測に全面的に変換、ないしはGPS計測を主、光波・水準測量を従とすることも期待される。しかし、当面は、変形量が最も大きくなる最大堤高断面の天端や、大規模地震時に大きな塑性変形が推定されるような箇所<sup>16), 17)</sup>に、従来の測量用標のとともGPSセンサーを設置し、常時にGPSセンサーの精度の再確認を行いながら、非常時の迅速な計測にGPSを役立てるなどの利用方法が考えられる。

## 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年1月。
- 2) ダム管理研究会編著：ダム管理の実務、(財)ダム水源地環境整備センター、pp.215-243、1999年3月。
- 3) 山口嘉一、岩下友也：ロックフィルダムの計器による挙動計測、ダム技術、No.174、pp.32-43、2001年3月。
- 4) 建設省土木研究所ダム部：ダムの安全管理、建設省土木研究所資料、No.1834、1982年5月。
- 5) 水資源開発公団奈良俣ダム建設所：奈良俣ダム工事誌、p.667、1991年3月。

- 6) 建設省東北地方建設局寒河江ダム工事事務所：寒河江ダム工事誌、p.862、1991年3月。
- 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、Vol.50、No.6、No.533、pp.25-27、2002年6月。
- 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、資源と素材、Vol.114、pp.397-402、1998年6月。
- 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年9月。
- 10) 北川原四郎：FORTRAN77時系列統計解析プログラミング(第4版)、岩波書店、pp.245-264、1997年4月。
- 11) 例えば、鈴木義一郎：情報量規準による統計解析入門(第6刷)、講談社、pp.77-79、2001年8月。
- 12) 大寺正宏、吉田幸信、内田純二、大西邦晃、岩崎智治：GPSを用いた動態観測の実用化検討：平成14年地盤工学会四国支部技術研究発表会発表講演集、pp.47-48、2002年11月。
- 13) 岩崎智治、及川典生、清水則一：斜面計測用の新しいGPS監視システム(2)ートレンドモデルによる計測精度の向上についてー、第41回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.193-196、2002年8月。
- 14) 建設省河川局開発課：試験湛水実施要領(案)、1999年10月。
- 15) 建設省河川局開発課：平成11年10月に策定された試験湛水実施要領(案)の概要、ダム技術、No.163、pp.86-87、2000年4月。
- 16) 山口嘉一、佐藤弘行：Newmark法による大規模地震時のロックフィルダムの沈下量予測、第58回土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)、2003年9月。
- 17) 山口嘉一、佐藤弘行、富田尚樹、水原道法：大規模地震時に対するロックフィルダムの耐震性能照査ーNewmark法における最大すべり変位量を与える円弧の検討ー、第31回土木学会関東支部技術研究発表会概要集(CD-ROM)、2004年3月。

山口嘉一\*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム上席研究員、工博  
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

小堀俊秀\*\*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員  
Toshihide KOBORI

横森源治\*\*\*



内閣府沖繩総合事務局北部ダム事務所所長  
Motoharu YOKOMORI

大野 誠\*\*\*\*



国土交通省九州地方整備局(前 内閣府沖繩総合事務局北部ダム事務所開発調査第二課課長)  
Makoto OONO