

GPS 自動計測システムによる フィルダム安全管理の高度化について

土江 清司¹・赤松 光²・大西 雄士³

¹中国地方整備局 苫田ダム管理所 管理所长 (〒708-0433 岡山県苫田郡鏡野町久田下原 1592-4)

²中国地方整備局 苫田ダム管理所 管理係長 (〒708-0433 岡山県苫田郡鏡野町久田下原 1592-4)

³中国地方整備局 苫田ダム管理所 管理係 (〒708-0433 岡山県苫田郡鏡野町久田下原 1592-4)

国土交通省管理のダムは、治水や利水等に重要な役割を担っているが、管理ダム数の増加や経過年数に伴い、ダムの安全確保は年々その難易度が高くなってきている。また、近年、大規模地震が多発しており、東北地方ではフィルダム堤体の変状や灌漑用アースダムの崩壊が報告されるなど、地震時のダムの安全管理の高度化が急務となっている。そこで、苫田ダムでは、従来からの手動の測量作業によるフィルダム堤体外部変形計測の自動化手法を検討し、管理段階のフィルダムに最新の GPS 自動計測システムを本格導入して、フィルダム堤体の安全管理の高度化と、あわせて計測コスト低減を実現した。

キーワード GPS、自動計測、フィルダム、安全管理、コスト縮減、ダム管理

1. はじめに

国土交通省管理のダムは、治水や利水等に重要な役割を担っている。一方、管理ダム数の増加や建設からの経過年数に伴い、ダムの安全確保は年々その難易度が高くなってきている。また、近年、岩手宮城内陸地震や東北地方太平洋沖地震などの大規模地震が多発しており、東北地方ではフィルダム堤体の変状や灌漑用アースダムの崩壊が報告されるなど、地震時のダムの安全管理の高度化が急務となっている。

ダム堤体の安全管理において、堤体の変形計測は重要な管理項目であり、近年のコンクリートダムではプラムラインによる自動計測が実施されている。しかし、殆どのフィルダムでは手動による外部変形計測が行われており、地震による堤体変状の迅速な把握が難しいのが現状である。

そこで、苫田ダムでは、鞍部ダム（フィルダム）の堤体外部変形計測の自動化手法を検討し、管理段階のフィルダム堤体外部変形計測に最新の GPS 自動計測システムを本格導入した。

本書では、苫田ダムにおいて、GPS 自動計測システムを導入しフィルダム堤体の安全管理の高度化の実現と、あわせて計測コスト低減を行った事例を報告する。

2. フィルダム外部変形計測の現状

フィルダムの安全管理のための計測は、河川管理施設等構造令やダム構造物管理基準において、計測項目・頻

度が規定されており、なかでもダム堤体外部変形計測は、漏水量計測と相まって、堤体全体の状態を評価する最も重要な計測項目である。

フィルダムの堤体外部変形計測は、堤体上に設置された測量用標的の水平および鉛直方向の変位量を光波・水準測量により行い、表-1 のように試験湛水中の第Ⅰ期は1回/週、挙動の安定期に移行するまでの第Ⅱ期は1回/月、挙動安定後の第Ⅲ期は1回/3月の頻度で実施される。

表-1 ダムの安全管理の区分と計測巡視の標準的な頻度

	フィルダム			コンクリートダム		
	第Ⅰ期	第Ⅱ期	第Ⅲ期	第Ⅰ期	第Ⅱ期	第Ⅲ期
漏水量	1回/日	1回/週	1回/月	1回/日	1回/週	1回/月
変形	1回/週	1回/月	1回/3月	1回/日	1回/日	1回/週
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

しかし、従来の測量による外部変形計測では①測定や結果の整理に要する時間が長く地震時などの緊急時において必ずしも迅速な計測ができない、②技術者や測量機器の違いより計測成果の品質にバラツキがある、③計測頻度が高い管理の第Ⅰ期（試験湛水時）や第Ⅱ期では計測コストが高額などの課題がある。

これらの課題を解決する手法として、GPS（Global Positioning System）やトータルステーション（自動光波測距儀）によるフィルダム外部変形の自動計測手法の導入が検討されている¹⁾²⁾。これらは、すでに幾つかの施工中のダムや管理段階のダムで試験的に導入されており、その効果が確認されている³⁾⁴⁾。

3. 苦田ダムの概要

苦田ダムは、国土交通省中国地方整備局が岡山県苦田郡鏡野町(旧奥津町)の吉井川に建設した多目的ダム(洪水調節, かんがい用水, 上水道用水, 工業用水および発電)である。

苦田ダムは、堤高 74m の重力式コンクリートダムの本ダムと、本ダムの左岸上流の堤高 25m の CFRD (コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム) 型式の鞍部ダムで構成されている。



図-1 苦田・鞍部ダムの位置と諸元

鞍部ダムの位置と諸元を図-1に、平面図・断面図を後掲の図-6, 図-7に示す。

重力式コンクリートの本ダムは、プラムラインにより堤体変形計測が自動化されているが、ロックフィルダムの鞍部ダムでは従来からの手動の測量作業により行われ、地震等緊急時のダム安全管理体制を構築する上で鞍部ダム堤体の自動計測導入が課題である。

鞍部ダムは、現時点で管理の第II期に相当し、堤体外部変形計測は従来からの測量作業により1回/月の頻度で実施している。

4. 自動計測システムの検討

鞍部ダムにおいて堤体外部変形の自動計測を行うに際して、これまでの研究開発・試験導入の成果に基づき、GPS自動計測および光波自動測量と従来からの光波・水準測量を比較検討した。

比較検討結果を表-2に示す。表-2のとおり、精度・頻度・迅速性・情報共有・安定性等の全ての比較項目で、GPS自動計測が優れている。

なお、経済性については、後述の第6章にGPS自動計測システム導入後10年間の計測コストの比較を示したので参照されたい。

表-2 フィルダム堤体外部変形量の自動計測手法の比較検討結果

比較項目	① GPS自動計測	② 光波自動測量	③ 光波・水準測量【従来方法】
概要図			
概要	<ul style="list-style-type: none"> GPS受信機を利用した自動計測 計測結果はインターネットでリアルタイム配信 機械可動部が無いためメンテナンス容易 天端の埋設標的の自動計測も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 自動追尾式トータルステーションによる自動計測 測定点の視準が可能な位置に観測小屋を複数設置機器設置 機械移動部があり定期的なメンテナンス必要 天端の埋設標的の自動計測ができない 	<ul style="list-style-type: none"> 従来から行われている測量手法(手動計測) XY方向は光波測量、Z方向は水準測量を実施 管理段階に応じて計測頻度を変えて実施
精度(実績値)	XY方向=±1mm程度、Z方向=±1.5mm程度 (基線長1km以下の場合)	XY,Z ±5~10mm程度以上 (視準距離、気象・日射条件に大きく依存)	X,Y ±5mm程度、Z ±2.5mm程度 (視準距離、気象・日射条件に大きく依存)
頻度	1回/時 (毎時~1回/月程度まで変更可能)	1回/日 (精度確保のために1日分を平均)	1回/週~1回/3ヶ月
迅速性	<ul style="list-style-type: none"> 地震時も常時計測可能 地震直後の変位を配信可能 インターネットで何処にいても確認可能 	<ul style="list-style-type: none"> 強い地震動後は不可(点検必要) 管理所内の管理用PC上でのみ目視確認(管理所以外では即時に確認できない) 	<ul style="list-style-type: none"> 地震発生直後の計測は不可(作業指示、移動、計測整理に2日以上必要) 夜間や悪天候時の即時対応は不可
情報共有	<ul style="list-style-type: none"> 観測結果をインターネットで配信 管理所意外とも情報共有が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 観測結果は管理所内のパソコン上に表示 情報共有先へFAXなど人手を介す必要あり 	<ul style="list-style-type: none"> 観測結果は作業員からの人的に報告 情報共有先へFAXなど人手を介す必要あり
安定性	<ul style="list-style-type: none"> 夜間や天候に関係なく計測が可能 地震後も計測可能 基本的にメンテナンスフリー 	<ul style="list-style-type: none"> 豪雨・濃霧時の計測は不可能、陽炎による精度低下大きい 地震後に機器点検・メンテナンス必要 	<ul style="list-style-type: none"> 夜間や荒天時は作業が不可能であり、データの安定性の面から、作業には静穏な日が望ましい
評価	<ul style="list-style-type: none"> 天候・地震に関係なく自動計測可能 天端標的の自動計測可能 最も高精度、高頻度 基本的にメンテナンスフリー、耐雷性能が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 悪天候・地震時に計測できない場合有り 天端標的の自動計測できない 視準距離や陽炎等の条件により精度低下(GPSより精度悪い) 頻度低い、地震等緊急時に計測ができない可能性あり 定期メンテナンス必須、GPSよりコスト高、耐雷性能に不安 	
判定	◎	△	×

5. 重要測点の選定

自動計測システムを導入するに際しては、フィルダム測量用標的の全点に自動計測機器を設置することが望ましい。ただし、測量用標的が密に設置されている場合や、既にダムの挙動が安定している場合は、必ずしも測量用標的の全点に自動計測機器を設置しなくとも、経済的に堤体全体の挙動を効率よく把握することが可能である。そこで、堤体全体の挙動を把握するための「重要測点」の選定作業を行い最適な自動計測点の選定を行った。

(1) 重要測点の選定方法

重要測点の選定方法については、(独)土木研究所から最新の研究成果⁹⁾が示されている。表-3に重要測点の選定時の検討項目とその考え方を示す。

(2) 重要測点の選定結果

鞍部ダムでは耐震性能照査が実施されていないため、検討項目のうち③については除外した。その他の①②④の項目について検討した結果を図-3に示す。

検討結果から、全ての測量用標的が1つ以上の項目で重要と判断され、このうち2項目以上の条件が一致する測量用標的は18箇所となった。

鞍部ダムは、現時点で管理の第Ⅱ期であり現在も微小な変形が継続していることから全ての測量用標的が重要測点と判断され、計測を継続することが望ましいと考えられる。したがって、全測量用標的を自動計測点とした。

表-3 重要測点の選定時の検討項目とその考え方

検討項目	条件	イメージ	調査資料
①ダム構造上における重要測点	天端のダム軸方向測線		構造図
	標準(最大)断面の上下流方向測線		
②設計・施工資料における重要測点	ダム縦断面方向における地形(掘削面)の急変点		設計・施工資料
	断層などの弱層が幅広い範囲・箇所、変形性の硬軟が極端な箇所		
	基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所		
③耐震性能照査資料における重要測点	耐震性能照査の検討でサベリが発生すると評価される箇所		耐震性能照査解析結果
④過去の計測結果における重要測点	外部変形が安定するまでに他地点より時間を要した計測点		試験湛水時の計測結果 常時・非常時の計測結果
	地震時や洪水時等に一時的に比較的大きな外部変形の累積が発生した計測点		
	その他、ダム軸平行測線、上下流測線の変形について注意を要するような結果が見られる測線上の計測点		
	試験湛水時・その後の常時・非常時の全てのデータ計測結果より得られた懸念事項が存在する箇所の計測点		

6. GPS 自動計測システムの設置

(1) GPS 自動計測システムの概要

図-4にGPS自動計測システム概念図を、表-4に計測仕様を示す。現地に設置したGPSセンサーでは30秒毎にGPS衛星からの電波を受信し、1時間分のデータを一つのファイルにまとめて、毎時ISDN回線を通じて監視センターの解析サーバーに送信される。

解析サーバーでは、送信されたデータを使用してスタティック測位法によるGPS基線解析を実施し、計測点の三次元座標を算出した後に、時系列統計処理(トレンドモデル)¹⁰⁾で真の変位値と誤差成分に分離してmm単位の変位検出を行う。計測結果は、後掲の図-13に示すようなグラフや一覧表に整理され、インターネットを利用してリアルタイムに配信される。

このシステムでは、データ通信や計測結果の配信にインターネットを使用するため通信費が安価となる他、インターネットに接続できるPCや携帯電話を利用して、ダム管理所だけでなく複数の関係者が24時間いつでも何処でもGPS計測結果を閲覧することが可能であり、リアルタイムの情報共有が容易となる。

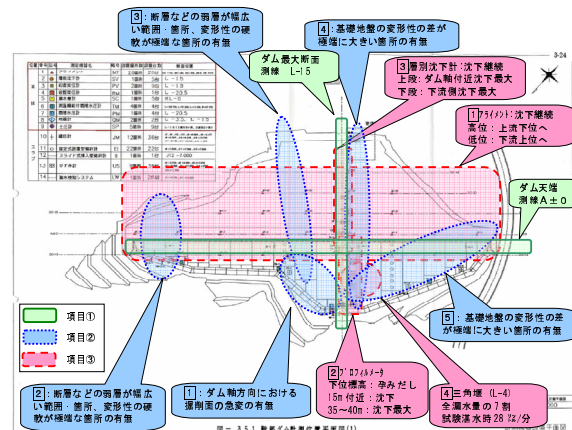


図-3 重要測点の選定結果図

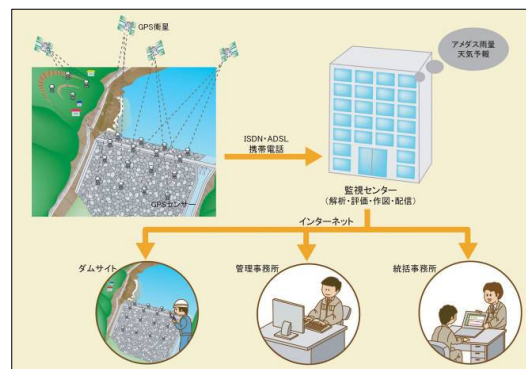


図-4 GPS自動計測システム概念図

表-4 GPS自動計測システムの仕様

項目	仕様
測位法	L1波による静的干渉測位(スタティック測位)
データエポック	30秒毎(搬送波位相の計測間隔)
誤差処理	トレンドモデルによる時系列統計処理
計測精度	XY方向: ±1mm, Z方向: ±1.5mm
計測頻度	1回/時間
計測結果配信	1時間毎(インターネット配信)

また、解析や作図処理をインターネット上の解析サーバーで実施するため、専用の PC や解析システムを購入・維持管理する必要がなく、利便性・経済性の高い自動計測が可能となる。

(2) トレンドモデルによる誤差処理と計測精度

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 GPS 測量作業で実施される基線解析のみでは最も高精度なスタティック測位法でも mm 単位の変位判定は難しい。そこで、松田・清水ら⁶⁾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。

$$\Delta \kappa un = vn \quad (\text{システム方程式}) \dots\dots (1)$$

$$yn = un + wn \quad (\text{観測方程式}) \dots\dots (2)$$

vn : 平均値 0, 標準偏差 τ のシステムノイズ
 wn : 平均値 0, 標準偏差 σ の観測ノイズ
 Δ : 時間差分演算子
 κ : 回差分の次数

トレンドモデルによる時系列統計処理（誤差処理）を導入することにより、計測精度を向上させ水平方向で $\pm 1\text{mm}$ 、鉛直方向で $\pm 1.5\text{mm}$ 程度の変位検出が可能となる。

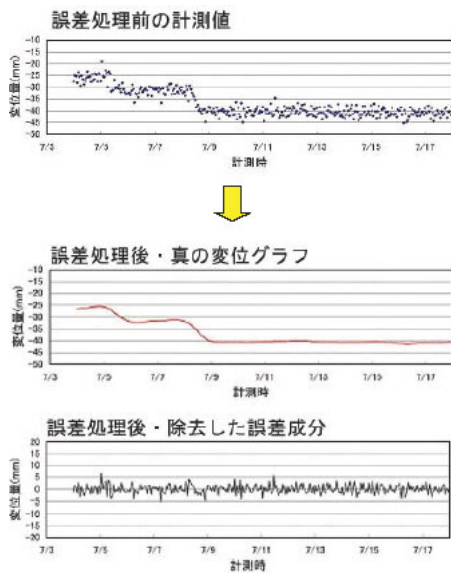


図-5 トレンドモデルによる誤差処理の事例

(3) GPS 自動計測機器の配置

GPS 自動計測機器の配置図を図-6、図-7 に、同・システム構成図を図-8 に示す。

26 箇所の堤体測量用標的の全点と堤体右岸側の 2 箇所の基準点に GPS センサーを設置し、GPS ケーブルで数珠繋ぎに配線して通信集約機に接続する。

通信集約機には商用電源 AC100V と ISDN 回線を接続し、落雷対策として電源用および通信用避雷器、自動復帰ブレーカを組み込むことともに、地震時等の停電対策として UPS（無停電電源装置）を併設し停電時にも数時間のシステム稼働を確保した。

これらの GPS センサーおよび通信集約機は、ダム堤体や道路構造物、地すべり等の土木構造物や地盤の計測専用開発されたもので、測量用 GPS に比べて小型・軽量・安価である。また、各 GPS センサーと通信集約機にそれぞれ耐雷素子を組込むことで、非常に高い耐雷性能を有している。

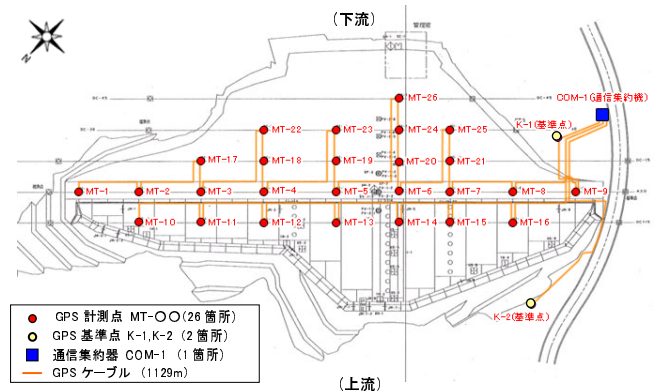


図-6 GPS 自動計測機器の平面位置図

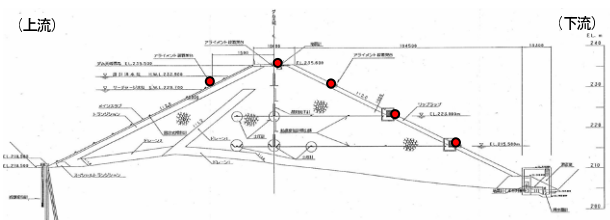


図-7 GPS 自動計測機器の主断面位置図

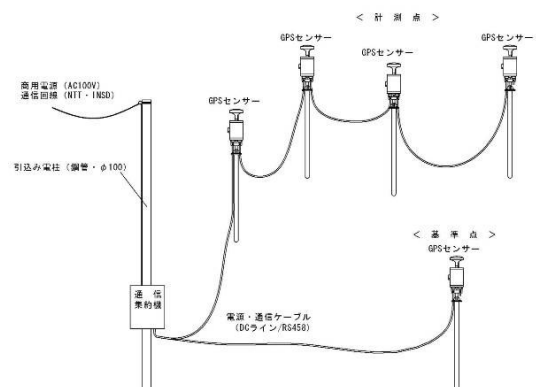


図-8 GPS 自動計測機器のシステム構成図

(4) GPS 自動計測機器の設置方法

GPS 自動計測機器は、ダム堤体および周辺設備の状況に合わせて設置方法を工夫する必要がある。

a) 堤体測量用標的 (図-9)

堤体の測量用標的は、500mm×500mm のコンクリート柱で、中央部に測量用標的が設置されている。

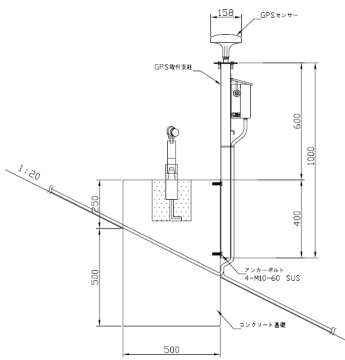


図-9 下流側測量用標的の設置構造

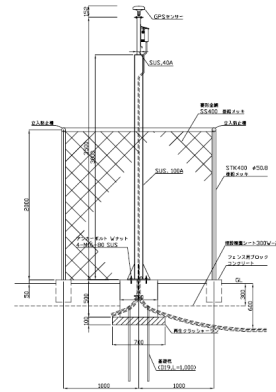


図-11 基準点の設置構造

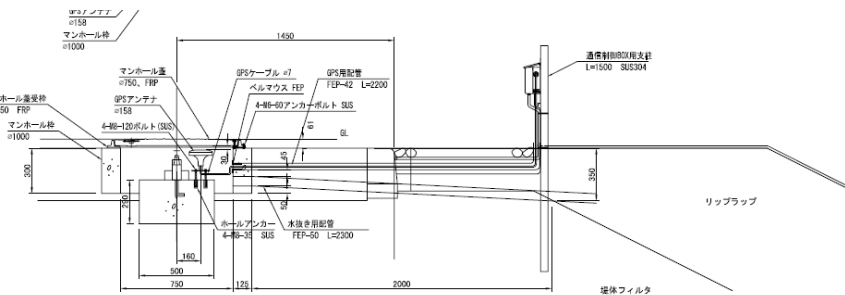
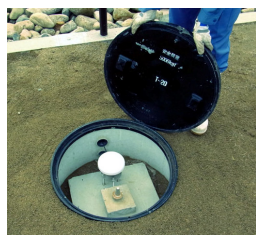


図-10 天端測量用標的の設置構造

GPS センサーの設置に際しては、今後の測量作業を妨げないように、コンクリート柱の下流側面に図-9 のようなステンレス製の取付金具を用いて固定した。

ただし、上流側の測量用標的は設計洪水位より 1.9m 程度低い位置にあるため、貯水位が設計洪水位に達すると GPS センサーが 0.9m 程度水面下に没する。そこで、防水仕様の GPS センサーを用いることで短期的な水没に対応した。なお、GPS センサーに付属の通信 BOX は防水対応が難しいため天端高欄部に別途固定した。

b) 天端測量用標的 (図-10)

天端の測量用標的は管理用通路下に埋設されている。そこで、(独)土木研究所が開発した天端埋設型 GPS センサー⁷⁾を採用した。具体的には、マンホール蓋を現在の鋳鉄製から電波が透過可能な FRP 製の蓋 (φ750、破壊荷重 200kN) に交換し、測量用標的に防水仕様の GPS センサーを取り付けた。この方法なら常時良好な GPS 自動計測が行えるうえ、大型車輛の通行も可能である。

c) GPS 基準点 (図-11)

従来の光波・水準測量と同様に、GPS 計測においても基準点の変位すると外部変形計測全体の精度低下を招く。そこで、計測精度の安定確保と基準点同士の変位監視を目的として 2 箇所に基準点を配置した。

基準点の位置選定に当たっては、①不動と考えられる硬固な岩盤上、②用地に制約が少ないこと (ダム管理用地内が望ましい)、③GPS ケーブルの配線が容易なこと、④悪戯防止対策 (フェンス等) の実施が可能なこと等を

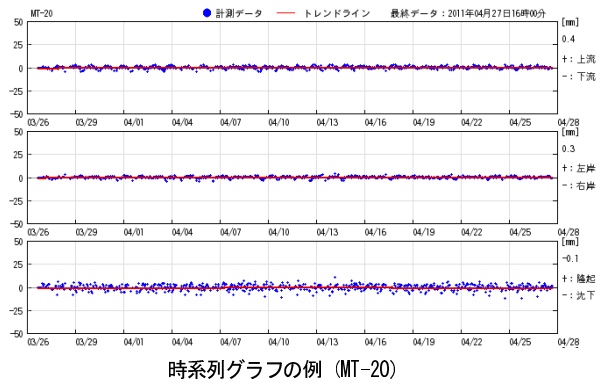
考慮し、天端付近の右岸下流側と右岸上流側の平坦地で地山の強固な箇所を選定した。

基準点では、可能な限り GPS センサーを高い位置に置き良好な GPS 電波受信環境を確保する必要があることから、高さ 3.5m の支柱を介して GPS センサーを設置した。また、第三者による接触防止を図る必要から、基準点の周囲に立ち入り防止柵を設置する計画とした。

(5) GPS 自動計測システムの稼働状況

GPS 自動計測システムの計測結果の一例を図-13 に示す。計測開始は 2011 年 3 月 26 日で、本稿の執筆時点で概ね 2ヶ月が経過し、システムは安定して稼働している。

GPS 計測値の精度を確認するために、計測点の標準偏差を求め、天端標的と上下流斜面の標的ごとの平均値を表-5 に示した。誤差処理前の GPS 計測値の標準偏差の平均値は、上下流標的では水平成分 (上下流および左右岸方向) が 1.5~1.8mm、隆起沈下が 3.0mm であるのに対し、マンホール蓋を通過した電波を受信している天端標的では同・2.4mm と 4.6mm と若干大きな値を示す。しかしながら、測量規定等で示されている一般的な GPS 測量の精度の目安 (水平 : 5mm、鉛直 10mm) の 1/2 以下の値であり当該地での GPS 自動計測は十分に良好な精度を示していると言える。さらにトレンドモデルによる誤差処理後には最大でも 0.6mm と極めて小さな標準偏差であり、±1mm~±1.5mm 程度の高精度で変位検出が可能と判断される。



時系列グラフの例 (MT-20)

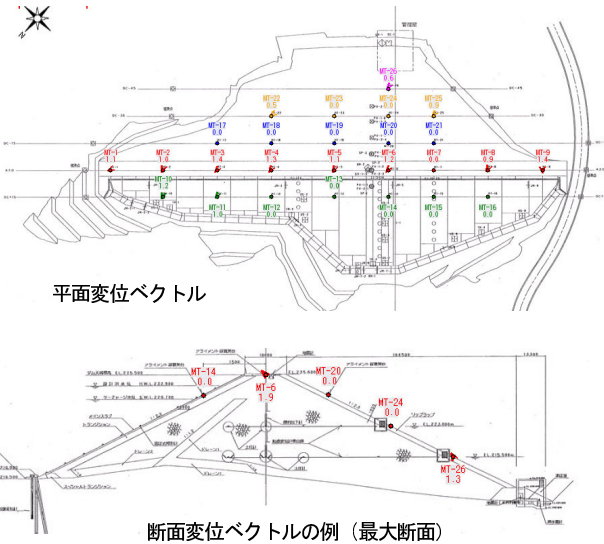


図-13 GPS 計測結果の一例

表-5 GPS 計測値の標準偏差の平均値

	標準偏差の平均値 (mm)					
	誤差処理前			トレンドモデルによる誤差処理後		
	上下流	左右岸	隆起沈下	上下流	左右岸	隆起沈下
天端標的	2.4	2.4	4.6	0.2	0.1	0.6
上下流標的	1.8	1.5	3.0	0.1	0.0	0.1

7. GPS 自動計測システム導入によるコスト低減効果

GPS 自動計測システムの導入により、従来の光波・水準測量に比較してどの程度の計測コスト低減が見込めるかについて下記の条件で検討した。

- 10年間の総費用（直接費）で比較する
- 1年目～4年目は管理の第Ⅱ期とし光波・水準測量は1回/月の頻度で実施
- 5年目～10年目は管理の第Ⅲ期とし光波・水準測量は1回/3ヶ月の頻度で実施
- GPS 自動計測のランニングコストとしてインターネット解析・配信費用を計上した

比較結果を表-6 および図-14 に示す。このように、GPS 自動計測は初年度にイニシャルコスト（機器購入費用および設置費用）が発生する。しかし、2年目以降のラン

ニングコストが安価なため、導入から5年後には計測コストの累計が光波・水準測量とほぼ同額となり、6年目以降は逆に安価に転じる。GPS 自動計測システムの導入で、10年間の計測コストの合計は、光波・水準測量を継続する場合に比較して約17%のコスト低減となった。

表-6 計測コストの比較表

項目	費用 (万円)	
	GPS自動計測	光波水準測量
初年度：機器買取費用	1,900	0
初年度：機器設置費用	500	0
1～4年目：管理第Ⅱ期の計測費用	360	2,650
5～10年目：管理第Ⅲ期の計測費用	540	1,320
直接費の合計（10年間）	3,300	3,970
コスト低減額	-670	-
	(-16.9%)	-

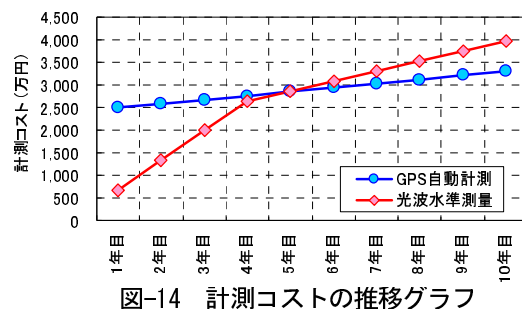


図-14 計測コストの推移グラフ

8. まとめ

苫田の鞍部ダムに最新の GPS 自動計測システムを導入し、堤体外部変形計測の精度・頻度を向上させると共に、地震等緊急時の迅速な変状把握が可能な計測体制を構築して、安全管理の高度化を実現した。また、合わせて計測コストの低減も可能となった。

今後は、長期的な運用を通じて当該システムの効果を適宜検証し、フィルダム安全管理の高度化とコスト低減に資する情報を提供したい。また、プラムラインが設置されていないコンクリートダムの堤体変形計測への応用が期待される。

参考文献

- 1) 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, Vol.15, No.2, 120-136, 2005
- 2) 独立行政法人土木研究所: フィルダム安全管理における GPS の全面導入に関する研究, 土木技術資料 VOL.49, NO.7, JULY, 2007
- 3) 板屋英治, 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.264-9, 47-59, 2008
- 4) 安倍富雄, 柴田敏明, 佐藤真也: 摺上川ダムにおける外部変形計測について, 平成16年度 東北地方整備局管内技術研究発表会講演集, 2004
- 5) 独立行政法人土木研究所: フィルダムの外部変形計測の重要測点の選定方法の提案, 土木研究所資料, 第4189号, 2011
- 6) 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, 333-343, 2002
- 7) 中国幸樹, 山口嘉一, 小堀俊秀, 清水則一, 岩崎智治, 飯島功一郎: フィルダム安全管理のための天端埋設型 GPS の適用性検討, 土木学会西部支部2006年度研究発表会講演集, 571-572, 2007