

博士論文

ロックフィルダムの安全管理のための GPS を用いた  
外部変位計測法の実用化に関する研究

**Practical Applications of GPS to Exterior Deformation Measurements  
for Safety Management of Rockfill Dams**

2015年3月

小堀俊秀

山口大学大学院理工学研究科





# 要 旨

ダムは貯水池に大量の水を貯める構造物であり，万一の際に下流に及ぼす影響が大きい．そのため，ダムの運用中は常に安全管理を行っている．ロックフィルダムの安全管理上の主要計測項目は，堤体および基礎地盤浅部からの漏水量と外部変位の計測が定められている．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，堤体および基礎地盤の全体的な挙動を把握するためである．

近年，完成後長期間が経過したダムの数が増加する一方で，ロックフィルダムの安全管理のための外部変位計測は，従来行われている測量では，計測やデータ整理の煩雑さや，人件費がかなりの負担となっている場合がある．また，将来においては合理化のための複数ダムの統合的な管理，また長期的なコスト縮減のため，人的労力によらない自動計測が必須となると考えられる．そのためには，連続的な計測が難しく，地震時などの臨時点検の対応が困難な従来の測量手法に代わる計測手法を整備することが課題である．

本論文は，これらの課題を克服するため，GPS変位計測システムによるダムの外部変位計測の実用化について研究を行ったものである．本研究は実用化にむけて，ダムの計測に適したGPS変位計測システムの開発，GPS変位計測システムによる地震時の挙動計測の検証，計測の合理化のためにGPSセンサーを設置するための外部変位計測箇所の選定方法を提案する．

以下に，本研究の概要を各章ごとに示す．

第1章『序論』では，本研究の背景を述べるとともに，関連する研究として，近年のダムの各種計測に関する研究についてとりまとめ，その中から堤体変位計測について概要を示した．また，本研究の課題を明確にするために，目的および構成を示した．

第2章『ダムの安全管理・点検と現場計測』では，現在ダムで行われている安全管理のための計測項目と計測頻度や臨時点検について述べ，ダムの安全管理のための計測の現状と課題を示した．また，これまで計測されたロックフィルダムの常時と非常時の計測事例を示し，変位計測のための要求性能として，常時は年間数 mm 単位から非常時は短時間に数 10cm 単位と幅広い計測が行えることが求められることを示した．

第3章『GPS変位計測システムのロックフィルダム外部変位計測への初期の適用』では，ロックフィルダムに適用するGPS変位計測システムと実際の適用事例を示した．ここでは，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

づく従来の外部変位計測とともに、GPS変位計測システムによる外部変位計測を実施し、両計測結果の比較を行い、課題を抽出した。初期の適用では、GPSセンサーの天端への設置方法が課題となった。

第4章『ロックフィルダム天端堤体内部に設置するためのGPS変位計測システムの改善』では、第3章で得られた課題を踏まえ、ロックフィルダム天端でのGPSセンサー設置について検討した。GPSセンサーの設置は、これまでのダムの安全管理の障害にならないようにするとともに、GPSアンテナをコアに直接設置する方法が必要となる。そこで、ダム天端の視準測量用のマンホール内にGPSアンテナを設置方法について提案した。マンホール内に設置するにあたり、蓋の材質、深さ、積雪時の基本的な実験を行った。その結果を踏まえ、実際のダムにおける計測を実施し、マンホール内に設置できるよう改善したGPSセンサーは実用性があることを検証した。

第5章『GPS変位計測システムを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測』では、GPS変位計測システムによる計測の有効性を検証するために、地震時における計測の即応性および地震後の堤体の変位計測について検討した。その結果、地震時における計測の即応性については、地震による数mm～10数mmの比較的小さなダム堤体の変位が、GPS変位計測システムによる計測によって三次元的に連続計測できた。さらに、変位は地震発生1時間後には明瞭に計測されており即応性は高く、迅速な計測を実施できることが明らかとなった。また、地震後は、15mm程度の沈下による変位を高精度にかつ連続的に計測することで地震後の収束を早く捉えることができた。これらの結果より、GPS変位計測システムによる変位計測は地震時の迅速な安全性の判断、地震後の精度高い安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。

第6章『GPS変位計測システムによるロックフィルダム外部変位計測における計測点の選定方法』では、GPS変位計測システムのための外部変位計測の重要測点の選定方法について提案した。前章までの研究の成果により、ダムの外部変位を、GPS変位計測システムを用いて監視することが可能となったが、管理段階のダムでは計測にかかるコストは限られており、既存のロックフィルダム堤体表面の外部標的全地点を網羅するようにGPSセンサーを設置することは難しい。そこで、これまでのダムの安全管理の体制を考慮しながらGPS変位計測システムを導入できるように、外部変位計測の重要測点の選定方法について提案した。

第7章『結論』では、本研究の各章の成果について取りまとめるとともに、今後の課題、展望について述べた。

# ABSTRACT

Dams are structures that store large quantities of water in their reservoirs, and so if they break, downstream areas will be severely damaged. Therefore, their safety is managed constantly. The principal measurements required to manage the safety of rockfill dams are stipulated as leakage from the dam body and foundation bedrock, and deformation of their exterior parts. These measurements can clarify the overall behavior of the dam body and foundation bedrock, but not localized behavior.

In recent years, the number of dams that have been used for many years has been increasing. Furthermore, when measurements of exterior deformation for managing the safety of rockfill dams are done using conventional surveying methods, it is difficult to make the measurements and organize the data, and personnel costs are high. To manage the safety of dams in the future, it will be necessary to undertake integrated management of multiple dams for rationalization. Furthermore, to reduce long-term costs, automatic measurement methods that do not depend on human labor will be necessary. Therefore, a challenge to the management of dam safety is establishing measurement methods to replace conventional surveying methods, which are difficult to perform continuously and cannot be done quickly for emergency inspections after an earthquake.

This research aimed to overcome these challenges by establishing a practical method of measuring the exterior deformation of dams based on a GPS measurement system. The research examined the installation of GPS antennas inside the crest manholes of rockfill dams as a practical method. It also proposed the selection of external deformation measurement locations in order to arrange the GPS sensors on a dam. The results of deformation monitoring of a rockfill dam before, during, and after an earthquake are shown, and the validity of the system for the safe management of dams after earthquakes is discussed.

An outline of each chapter of this dissertation is given below.

## Chapter 1 Introduction

This chapter presents the background of the research and summarizes related research on various measurements in recent years. It also describes the purpose and organization of the research.

## Chapter 2 Safety management, inspections and site measurements of dams

This chapter presents measurement items, measurement frequency, and emergency inspections for managing dam safety. It also shows the present state and problems with measurements for managing the safety of dams. It presents cases of measurements made at rockfill dams at normal times and in emergencies. The results show that deformation needs to be measured in millimeter order in normal times, and to tens of centimeters in an emergency, and reveals the need for a wider range of measurements.

### Chapter 3 First application of GPS deformation measurement systems to exterior deformation measurements of rockfill dams

This chapter describes GPS deformation measurement systems used at rockfill dams, and reports on exterior deformation measurements made using such systems. It compares GPS-based measurements with conventional surveying to identify challenges to measurements. The first trial application revealed that one challenge is how to install GPS sensors on the crest of dams.

### Chapter 4 Improvement of the GPS deformation measurement system for installation inside the crest of a rockfill dam

This chapter describes research on installing GPS sensors on the crest of rockfill dams. GPS sensors must not hinder safety management of dams, and must also be installed directly in the core. A method of installing GPS antennas in the manholes as survey targets on dam crests is proposed. To install GPS sensors inside manholes, basic experiments were conducted on the material of the covers, manhole depth, and the effects of snow cover. Based on the results, measurements were done at a number of rockfill dams, confirming the usefulness of GPS sensors which had been improved to enable their installation in manholes.

### Chapter 5 Measuring deformation behavior during earthquakes in the body of rockfill dams using GPS deformation measurement systems

This chapter describes studies on making prompt measurements after an earthquake and measuring the deformation of dam bodies after an earthquake, to verify the effectiveness of deformation measurements using GPS.

The results revealed that the response is rapid, with deformation clearly measured within one hour after an earthquake. Post-earthquake measurements also accurately measured the settlement of the dam. These results show that GPS deformation measurement is an effective method of rapidly judging safety during an earthquake, and precisely assessing safety after the earthquake.

### Chapter 6 Method of selecting measurement points for rockfill dam exterior deformation measurements using GPS deformation measurement systems

Past research has resolved problems concerning installation locations, permitting safety management of dams using GPS deformation measurement systems. However, the budget for measurement at dams is limited, and it is difficult to install many GPS sensors. I propose a method of selecting measurement points which are important for measuring exterior deformation in order to be able to install GPS sensors while considering the established safety management system.

### Chapter 7 Conclusions

This chapter summarizes the achievements of the research and describes future challenges and prospects.

# 目 次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b> .....	1
1.1	研究の背景 .....	1
1.2	ダムの変位計測に関する近年の研究 .....	2
1.3	本研究の目的と構成 .....	6
	【第 1 章の参考文献】 .....	8
<b>第 2 章</b>	<b>ダムの安全管理・点検と現場計測</b> .....	11
2.1	はじめに .....	11
2.2	ロックフィルダムの安全管理実施の根拠 .....	11
2.2.1	安全管理のための計測項目と計測頻度 .....	11
2.2.2	地震後の臨時点検 .....	14
2.3	ロックフィルダムの外部変位計測 .....	15
2.4	ロックフィルダムの挙動 .....	16
2.4.1	経年変化の計測事例 .....	16
2.4.2	地震時の挙動計測事例 .....	19
2.5	まとめ .....	23
	【第 2 章の参考文献】 .....	24
<b>第 3 章</b>	<b>GPS 変位計測システムのロックフィルダム外部変位計測への 初期の適用</b> .....	25
3.1	はじめに .....	25
3.2	GPS 変位計測システム .....	25
3.2.1	GPS 測位 .....	25
3.2.2	本研究で用いた GPS 変位計測システム .....	27
3.3	計測精度を向上させるための手法 .....	29
3.3.1	基線解析の方法 .....	29
3.3.2	トレンドモデルによる誤差処理 .....	30
3.4	測量と GPS 変位計測システムの比較 .....	31
3.5	ロックフィルダムでの試験計測 .....	32
3.5.1	試験計測の概要 .....	32
3.5.2	GPS 計測結果と測量による結果の比較 .....	35
3.6	まとめ .....	39
	【第 3 章の参考文献】 .....	40

<b>第 4 章</b>	<b>ロックフィルダム天端堤体内部に設置するための</b>	
	<b>GPS 変位計測システムの改善</b> .....	41
4.1	はじめに .....	41
4.2	ロックフィルダムのコア変位計測への	
	<b>GPS 変位計測システム適用の課題</b> .....	41
4.3	マンホールに設置した GPS アンテナによる変位計測実験 .....	42
4.3.1	マンホール蓋材質の影響 .....	43
4.3.2	GPS アンテナ設置深さの影響 .....	47
4.3.3	積雪の影響 .....	49
4.4	現場への適用 .....	53
4.4.1	適用事例 1(大保脇ダム) .....	53
4.4.2	適用事例 2(白川ダム) .....	57
4.5	まとめ .....	61
	<b>【第 4 章の参考文献】</b> .....	62
<b>第 5 章</b>	<b>GPS 変位計測システムを用いた</b>	
	<b>ロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測</b> .....	63
5.1	はじめに .....	63
5.2	GPS 変位計測システム導入の経緯 .....	63
5.3	GPS 変位計測システムの概要と設置位置 .....	63
5.4	地震時の即応性の評価 .....	66
5.4.1	計測結果の概要 .....	66
5.4.2	地震時の変位計測の即応性 .....	69
5.4.3	地震前後のダム全体の変位挙動の考察 .....	71
5.4.4	地震時の即応性の評価のまとめ .....	75
5.5	地震後の計測結果の評価 .....	76
5.5.1	地震後の安全確認の概要 .....	76
5.5.2	GPS 変位計測システムによる地震後変位挙動監視 .....	76
5.5.3	地震後の計測結果の評価のまとめ .....	81
5.6	まとめ .....	82
	<b>【第 5 章の参考文献】</b> .....	83
<b>第 6 章</b>	<b>GPS 変位計測システムによるロックフィルダム</b>	
	<b>外部変位計測における計測点の選定方法</b> .....	85
6.1	はじめに .....	85
6.2	可動標的の重要測点の選定 .....	85
6.3	可動標的の重要測点の選定事例 .....	92
6.3.1	ダムの概要 .....	92
6.3.2	重要測点候補の選定 .....	93

6.3.3 重要測点の選定 .....	100
6.4 まとめ .....	101
【第6章の参考文献】 .....	102
<b>第7章 結論</b> .....	103
7.1 本研究のまとめ .....	103
7.2 今後の展望 .....	105
【第7章の参考文献】 .....	106
<b>謝辞</b> .....	107
<b>本研究の関連論文</b> .....	109





# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

ダムは貯水池に大量の水を貯める構造物であるため、ダム堤体や基礎岩盤は貯水池の水圧による荷重を確実に支える構造物でなければならない。河川法の規定に基づき制定された河川管理施設等構造令<sup>1)</sup>の第 4 条(構造の原則)には、「ダムの堤体及び基礎岩盤は必要な水密性を有し、及び予想される荷重に対し必要な強度を有するものとする」と示されている。また、ダムは万一の際に及ぼす社会的な影響が大きいいため、細心の注意をはらいながらダムの設計、施工が行われる。管理移行後においてもダムは常に安全性を要求される。

ダムの安全管理のための計測は、ダム堤体および基礎地盤の安全性を確実に確認できる必要がある。同じく河川管理施設等構造令<sup>1)</sup>の第 13 条(計測装置)は、ダムの安全管理にとって必要な計測事項を規定しているが、その項目はダムの安全管理にとって必要最小限の項目、言い換えれば最も重要な計測項目を示したものである。

ダムの型式のうち、ロックフィルダムの安全管理上の主要計測項目は、堤体および基礎地盤浅部からの漏水量と外部変位の計測が規定されている。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、堤体および基礎地盤の全体的な挙動が把握できるためである<sup>2),3)</sup>。

近代的な施工がはじまった 1900 年以降に日本国内で築堤されたダムの経年推移を図-1.1 に示す。日本国内では大別して天然の土砂や岩石を盛り立て築いたロックフィルダムやアースダムがおよそ 1500 箇所、コンクリートを主材料とした重力式コンクリートダムが約 1100 箇所に築堤された。完成後 50 年以上経過したダムは、2020 年には全完成ダムの 40%に達する<sup>4)</sup>。

このように、完成後長期間が経過したダムの数が増加する一方、ロックフィルダムの安全管理のための外部変位計測は、従来行われている測量では、計測やデータ整理の煩雑さや、人件費がかなりの負担となっている場合がある。また、将来においては合理化のための複数ダムの統合的な管理、また長期的なコスト縮減のため、人的労力によらない自動計測が必須となると考えられる。そのためには、連続的な計測が難しく、地震時などの臨時点検<sup>5)</sup>の対応が困難な従来の測量手法に代わる計測手法を整備することが課題である。

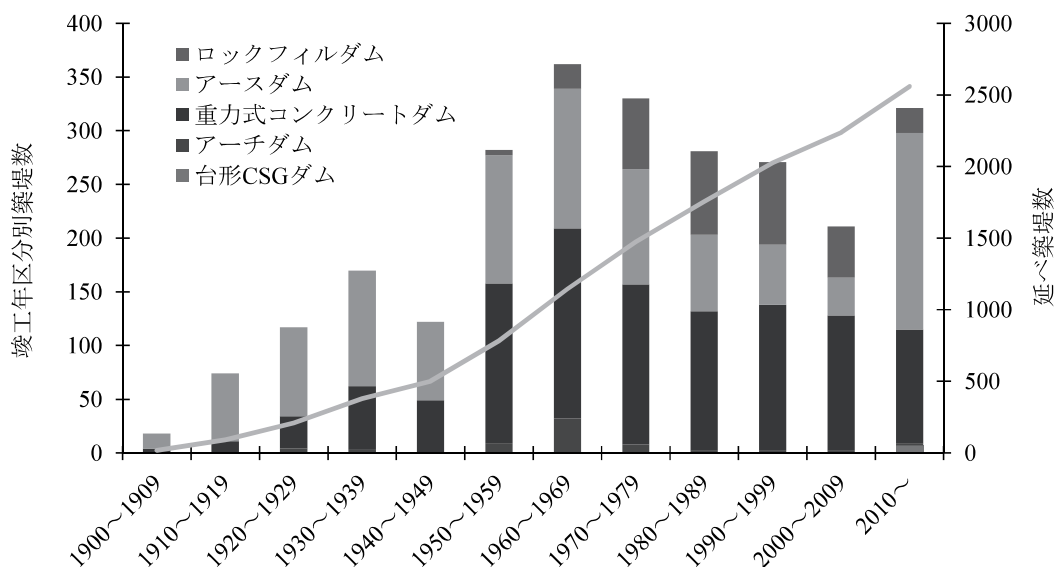


図-1.1 1900年以降に築堤されたダムの数\*<sup>4)</sup>

※本図は、ダム便覧<sup>4)</sup>に掲載されている1900年以降の日本のダム数をもとに作成したものである。図の内、アースダムはアースダムとアスファルトコアフィルダムの合計である。重力式コンクリートダムは重力式コンクリートダムと重力式アーチダムと重力式コンクリート・フィル複合ダムと中空重力式コンクリートダムの合計である。アーチダムはアーチダムとパトレスダムの合計である。

## 1.2 ダムの変位計測に関する近年の研究

先にも述べたように、ダムでは河川管理施設等構造令に従い、巡視とともに変位量、漏水量・揚圧力等の計測を実施して安全管理を行っている。しかし、ダムの長寿命化をはかりダムを有効活用するためには、供用期間の長期にわたる適切な安全性の維持と、ライフサイクルコストの観点から、省コスト管理を両立した安全管理システムが必要である。また、現在から将来にわたって発生する可能性のある大規模地震動による損傷形態に着目した計測も行うことができなければならない。

このような状況下において、近年、各種の新しい計測機器・システムを用いたダム堤体および基礎地盤の安全管理の取り組みが積極的に行われてきている。

近年のダムの安全管理における新しい計測機器の開発状況を表-1.1に示す。新しい計測機器の開発は、従来の計測項目における計測精度の高度化、新たな計測項目に応じた計測技術、情報通信技術の高度化、新形式ダムに対応した計測技術、想定外外力に対応した計測技術等に分類できる。表に示すように、それぞれの目的に対して多くの新しい計測機器の開発が進んでおり、多くのダムへ適用が進められている。

表-1.1 ダムの安全管理における新しい計測機器の開発状況<sup>6)</sup>

分類	目的	新しい計測機器
従来の計測項目における計測精度の高度化	変位計測	<u>GPS</u> によるダムの堤体変位計測.
	揚圧力, 間隙水圧計測	<u>振動弦間隙水圧計</u> による間隙水圧の計測.
	変位計測	外部可動標的 <u>自動追尾システムを搭載したトータルステーション</u> を用いたダムの外部変位計測.
新たな計測項目に対応した計測技術	水没面の変位計測	<u>表面連続変位計</u> を用いたロックフィルダム堤体表面の変位計測.
	ひび割れ調査	<u>ビデオカメラ</u> を用いたコンクリートのひび割れ調査.
	変位計測	<u>SAR (合成開口レーダー)</u> によるフィルダム外部変位計測.
情報通信技術の高度化	情報の共有, 早期対応	ダムサイト <u>地震計ネットワーク</u> の構築による地震後の早期対応.
	情報の共有, 透明性確保	<u>GPS</u> により計測されたデータの <u>インターネット</u> を利用した配信による情報の共有および, 安全管理の透明性確保.
	施工の合理化	<u>ワイヤレス間隙水圧計</u> を用いた, 計測機器のケーブルレス化による施工の合理化. <u>重力式コンクリートダム堤体を透過する無線通信技術</u> による施工の合理化.
新型式ダムに対応した計測技術	漏水位置特定	CFRD <u>遮水壁漏水センサー</u> によるフェイススラブ上任意の箇所 <sup>7)</sup> の漏水位置特定.
想定外外力に対応した計測技術	変位計測	<u>GPS</u> によるダムの堤体変位計測.

次に、表-1.1 に示した新しい計測機器のうち、ダムの変位計測に関する研究について以下に概要を述べる。

#### (1) 自動追尾システムを搭載したトータルステーションの利用<sup>7)</sup>

ロックフィルダムの外部変位計測は、重要な計測項目であるにもかかわらず、従来から手動測定による水準測量や視準測量が一般的である。しかしながら、手動測量では測定が断続的になる。このため、松鶴ら<sup>7)</sup>はトータルステーション(光波測量器)を用いた自動追尾システムを構築・導入した。自動追尾トータルステーションの例を写真-1.1 に示す。本システムを導入することにより、手動による測量に比べて測定時間の短縮、連続的な自動変位計測、現場に測定者が入る必要が無い等、トータルステーションによる計測の高度化に成功した。



写真-1.1 観測小屋内に設置した自動追尾トータルステーション

## (2) 表面連続変位計の利用<sup>8)</sup>

ロックフィルダム外部変位の計測方法について、従来の測量による方法や、GPSやトータルステーションを用いた自動追尾計測システム等では、水没部分の変位挙動観測を行うことができない。ロックフィルダムは、築堤時および湛水時ともに、ダム堤体表面は変形しており、安全管理の面から水没部分の変位挙動観測も重要になるものと考えられる。

これらの課題を解決する一つの手段として、山口<sup>8)</sup>らは、写真-1.2に示すように忠別ダムのロックフィルダム部の堤体表面付近に埋設した測定管に、水没斜面も含めた堤体法面の変位を連続的に計測できる表面連続変位計を挿入し、その計測データを解析するとともに、この計器を用いた新しいロックフィルダムの変位に関する安全管理手法について提案した。

表面連続変位計は水没部も含め高精度での計測が可能であるが、1回の計測に数10分～数時間程度かかり、地震時等の即応性に課題がある。



(a)ロックフィルダム堤体表面に埋設中の測定管



(b)表面連続変位計本体

写真-1.2 表面連続変位計

## (3)GPSの利用

- ・GPSによる斜面や地滑りの計測

GPS(Global Positioning System)<sup>9)</sup>は、1970年代初頭にアメリカの陸海空軍で別々に計画立案されていた衛星測位システムを統合して開発が始まった。1980年代前半には、相対測位法(高精度干渉測位法)が確立し、測地測量、地殻変位の計測が行われた。1980年代後半には、地盤沈下、地すべり、ダム、パイプラインなどの変位計測手法として利用が始まった<sup>10),11)</sup>。

日本においては、1980年代後半から、地殻変動測定、測量(電子基準点網、工事測量)、地すべり計測等へ適用され、切度斜面において精度5mm～10mmで計測できることが確認された<sup>12)</sup>。この時期の計測は測量用のGPS受信機を用いた手



動計測で行われている。1990年代半ばごろから、地盤や構造物の変位計測に特化した受信機および自動計測システムが開発され<sup>13)</sup>、鉱山の長大斜面計測<sup>14)</sup>や地すべり斜面計測<sup>15)</sup>に適用された。1990年代後半からは計測精度向上の研究を進め、トレンドモデルを用いることにより mm 単位の三次元計測を実現され<sup>16),17)</sup>、さらに、実用システムとして、オンライン地盤変位計測システム<sup>18)</sup>やインターネット配信システム<sup>19)</sup>が開発された。2000年代半ばには、気象の影響による対流圏遅延補正<sup>20),21)</sup>や上空障害物の影響低減手法の開発<sup>22)</sup>が行われ、計測環境条件によらない高精度計測が実施できるようになった。この時期に前後して、実務への展開がはじまり、地すべり監視<sup>23)</sup>、道路斜面監視<sup>24)</sup>、トンネル情報化施工<sup>25)</sup>に適用された。

#### ・GPSによるダムの変位計測

GPSのダムの変位計測への適用は以前からコンクリートダムにおいて実施され<sup>26)-28)</sup>ている。例えば、Hudnut<sup>27)</sup>らはアメリカのロサンゼルス近郊にある1928年に完成した堤高113mのアーチダムのパコイマダムにて1994年に発生したノースリッジ地震の後、将来に備えたダムの安全性評価のため、GPSを利用して継続的にダムの変位計測を実施した。写真-1.3はパコイマダムに設置したGPSである。実験により季節変動の変位を計測することができたが、さらなる高精度化とリアルタイム処理に課題が残った。Rutledge<sup>28)</sup>らは、重力式コンクリートダムにおいてGPSによる計測結果とプラムラインの比較を行い、両者ともに同様の計測結果を得られていることを確認している。

また、最近ではロックフィルダムへの適用も積極的に進められている<sup>29)-32)</sup>、例えば、曾田ら<sup>31)</sup>はロックフィルダムに、また、喜多<sup>32)</sup>らは表面アスファルト遮水壁型ロックフィルダムにそれぞれGPS変位計測システムを試験的に導入し、ロックフィルダムの外部変位計測への適用性について検討している。



(a)GPS 設置位置(DAM1, DAM2)



(b)DAM2 に設置した  
GPS アンテナ

写真-1.3 パコイマダムに設置した GPS アンテナ<sup>27)</sup>

#### (4) SARによるロックフィルダム外部変位計測<sup>33)</sup>

陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS, Advanced Land Observing Satellite)に搭載された SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダー) の観測データを用いて、佐藤<sup>33)</sup>らは、ロックフィルダムの外部変形計測の可能性について検討した。そこでは、2つの時期の位相差により地表面の変位量を求める InSAR (Interferometric SAR, 干渉 SAR)を用いて、ダムの沈下傾向を面的にかつ定量的に評価した。InSARでは、数日から数カ月となる計測周期、対象領域データの干渉性、データ取得から結果を得るまでの即応性、等に課題があるものの、今後の研究が期待されている。

### 1.3 本研究の目的と構成

本研究は、GPS変位計測システムによるダムの外部変位計測の実用化のために、ダムの計測に適したGPS変位計測システムの開発、GPS変位計測システムによる地震時の挙動計測の検証、計測の合理化のためにGPSアンテナを設置するための外部変位計測箇所の選定方法の提案を行う。

本論文は序論を含め、7つの章から構成されている。本論文の構成を以下に示すとともに、各章の概要を示す。

#### 第1章 序論

本研究の背景と既往の研究や過去の事例について述べ、本研究の目的と意義を明確にする。

#### 第2章 ダムの安全管理・点検と現場計測

ダムの安全管理のための根拠や、計測の現状と課題について述べる。また、これまでのロックフィルダムでの外部変位計測結果より、ロックフィルダムの変位計測に必要な計測範囲を明確にする。

#### 第3章 GPS変位計測システムのロックフィルダム外部変位計測への初期の適用

ロックフィルダムに適用するGPS変位計測システムの詳細や精度向上のための手法について述べ、実際のロックフィルダムへ適用し、問題点の抽出する。

#### 第4章 ロックフィルダム天端堤体内部に設置するためのGPS変位計測システムの改善

ロックフィルダム外部変位計測におけるコア変位計測の重要性について述べ、ロックフィルダム堤体内部に設置するためのGPSアンテナの変位計測実験及び実際のダムにおける計測を実施し、適用性を検証する。

## 第 5 章 GPS 変位計測システムを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測

地震前後における GPS 変位計測システムを用いた高精度の計測を実施し、地震時計測の即応性および地震後の堤体の変位計測について考察し、地震時変位計測の有効性を検証する。

## 第 6 章 GPS 変位計測システムによるロックフィルダム外部変位計測における計測点の選定方法

ロックフィルダムの外部変位計測を、GPS 変位計測システムによって効率的かつ効果的に実施するため、外部変位計測の重要測点の選定方法について提案する。

## 第 7 章 結論

本研究の各章の成果を要約して総括するとともに、今後の課題と展望を述べる。

## 【第1章の参考文献】

- 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) 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.
- 3) 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.
- 4) 一般財団法人日本ダム協会：ダム便覧ホームページ ダム数集計表(竣工年別型式別)，<http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranA/Syuukei.cgi?sy=syunkei>
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課長：地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について，国水流第4号，2012.
- 6) 山口嘉一：ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題，ダムの安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム発表論文集，土木研究所資料，第4185号，pp.11-34，2010.
- 7) 松鶴正則，杉浦直人：ロックフィルダム外部変位計測における自動追尾計測システムの導入，電力土木，No.317，pp.108-112，2005.
- 8) 山口嘉一，小堀俊秀，加賀恒雄，平野正則，西村義：表面連続変位計を用いたロックフィルダム表面の変形分布測定，ダム技術，No.257，pp.40-50，2008.
- 9) 土屋淳，辻宏道：GNSS測量の基礎，社団法人日本測量協会，p.12，2008.
- 10) 桜井春輔，清水則一：GPS（汎地球測位システム）の地盤変位計測への応用，土と基礎，Vol.38，No.387，pp 65-72，1990.
- 11) 清水則一・桜井春輔：GPSの岩盤変位計測への適用，資源と素材，Vol.109(1)，pp 1-7，1993.
- 12) 桜井春輔，清水則一，古谷茂成，皿海章雄：GPSによる切取り斜面の変位計測，土木学会論文集，Vol.475，III-24，pp137-142，1993.
- 13) 近藤仁志，Cannon E. M.，清水則一，中川浩二：GPSによる地盤変位モニタリングシステムの開発，土木学会論文集，No.546/VI-32，pp.157-168，1996.
- 14) 清水則一，小野浩，近藤仁志，水田義明：長大残壁の安全監視へのGPS変位計測システムの応用に関する現場実験，資源・素材学会誌，Vol.112，No.5，pp.283-288，1996.
- 15) 清水則一，安立 寛，荒井 正，会津隆志：GPS変位モニタリングシステムの地すべり監視への適用，土と基礎，Vol.48，No.2，pp.25-27，2000.
- 16) 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，資源素材学会誌，Vol.114，No.6，pp.9-14，1998.
- 17) 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.
- 18) Masunari, T., Tanaka, K., Okubo, N., Oikawa, H., Takechi, K., Iwasaki, T. and Shimizu, N.: GPS Continuous Displacement Monitoring System, 6th Int. Sympto. on Field Measurements in Geomechanics, FMGM03, pp.537-543, 2003.
  - 19) 岩崎智治, 武智国加, 武石明, 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, pp.25-27, 2002.
  - 20) 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, Vol.63, No.4, pp.437-447, 2007.
  - 21) 増成友宏, 武地美明, 船津貴弘, 清水則一: 現場気象データを用いたGPS変位計測の補正について, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.3, pp.356-363, 2009.
  - 22) 増成友宏, 武地美明, 田村尚之, 船津貴弘, 清水則一: GPS変位計測における上空障害物の影響とその低減法, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.4, pp.394-402, 2008.
  - 23) 岩崎智治, 荒川隆嗣, 中里裕臣, 増成友宏, 清水則一: GPSを主体とした大規模地すべり発生時の計測システムの構築, 日本地すべり学会誌, 第48巻, 第2号, pp.26-32, 2011.
  - 24) 岩崎智治, 清水則一, 増成友宏, 佐藤渉, 原口勝則, 大島洋志: 斜面安全監視のためのGPS自動変位計測システム, 応用地質, 第52巻, 第4号, pp.256-263, 2012.
  - 25) 平野宏幸, 臼田芳彦, 神澤幸治, 宮田和, 清水則一: トンネル施工時における地すべり斜面の三次元変位計測へのGPS変位計測システムの適用とその評価, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.2, pp.81-92, 2012.
  - 26) Goad, C. C.: Kinematic Survey of Clinton Lake Dam, *J. Surveying Engineering*, ASCE, Vol.114, No.4, pp.67-77, 1989.
  - 27) Hudnut, K. W. and Behr, J. A.: Continuous GPS Monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California, *Seismological Research Letters*, Vol.69, No.4, pp.299-308, 1998.
  - 28) Rutledge, D. R. and Meyerholtzs, S. Z.: Performance Monitoring of Libby Dam with a Differential Global Positioning System, *25th Annual Conference, United States Society on Dams*, pp.493-508, 2005.
  - 29) Levent, T.: Dam Deformation Measurements with GPS, *Geodezija ir Kartografija*, Vol. 34, Issue 4, pp.116-121, 2008.
  - 30) 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, pp.47-56, 2008.
  - 31) 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, Vol.282, pp.4-16, 2010.
  - 32) 喜多佑介, 水田真二, 江原昌彦: 沼原ダムにおけるGPSを用いた堤体挙動測

定, ダム工学, Vol.21, No.3, pp.190-195, 2011.

- 33) Satoh, H., Kobori, T., Sasaki T., Yamaguchi, Y., Iwasaki, T., Mushiake, N. and Honda, K.: New Exterior Deformation Monitoring Method for Embankment Dams Using Synthetic Aperture Radar, *ICOLD 2013 International Symposium -Seattle USA* -, pp.2365-2375, 2013.

## 第 2 章 ダムの安全管理・点検と現場計測

### 2.1 はじめに

ダムは事故が起きると下流に及ぼす影響が極めて大きいため、ダムの管理中は常に計測や巡視による安全管理を実施している。本章ではロックフィルダムの安全管理の根拠となる法令等の具体的な内容を示す。また、これまで計測されたロックフィルダムの常時と地震時の計測結果を例示し、ロックフィルダムの挙動の特徴を示す。そして、ダムの安全管理のための計測の現状と課題およびダムの変位計測の要求性能をとりまとめる。

### 2.2 ロックフィルダムの安全管理実施の根拠

#### 2.2.1 安全管理のための計測項目と計測頻度

ダムの安全管理上の最も重要な計測項目は、河川管理施設等構造令<sup>1)</sup>においてダムの型式と堤高に応じて表-2.1のように定められており、測定が義務づけられている。ロック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外部変位、浸潤線が安全管理上の主要計測項目として規定されている。また、これらの項目の計測のためには故障しにくく、故障した際の取り替えが可能な計器が用いられている<sup>2),3)</sup>。

表-2.1 河川管理施設等構造令 第 13 条(計測装置)<sup>1)</sup>

(計測装置)				
第 13 条 ダムには、次の表の中欄に掲げる区分に応じ、同表の下欄に掲げる事項を計測するための装置を設けるものとする。				
項	区		計 測 事 項	
	ダムの種類			
1	重力式コンクリートダム		基礎地盤から堤頂までの高さ(単位 m)	
			50 未満	漏水量 揚圧力
2	アーチ式コンクリートダム		50 以上	漏水量 変形 揚圧力
			30 未満	漏水量 変形
3	フィルダム		30 以上	漏水量 変形 揚圧力
			ダムの堤体がおおむね均一の材料によるもの	漏水量 変形 浸潤線
	その他のもの	漏水量 変形		
2. 基礎地盤から堤頂までの高さが 100m以上のダムまたは特殊な設計によるダムには、前項に規定するもののほか、当該ダムの管理上特に必要と認められる事項を計測するための装置を設けるものとする。				

表-2.1 に示した各計測項目の測定頻度は、表-2.2 に示すダム点検整備基準<sup>4)</sup>に定める点検の頻度を基準に各ダムが個別に点検整備基準を策定している。

ダムの安全管理は第1期、第2期、第3期と3期間に区分している。各区分における点検の頻度は、表-2.2 中に示すとおりである。

第1期は試験湛水開始から満水以後2カ月以上を経過するまでの期間である。第1期はダムが完成した後に初めて行う貯水に対してダムの安全性を確認するための時期であり、安全性の検証、管理移行後の基礎データを得るため、計測頻度を密に行う。この時期に得られたデータは地震時等の大規模災害が発生した際、ダムの安全性の判断の指標の一つになる。

第2期は、ダムの挙動が安定したと確認できるまでの期間である。ダムの挙動が徐々に安定した状態に達する過程を判断するために、計測頻度は第1期より落としながらもある程度の頻度で計測を行い、測定した計測結果を整理・分析する。

ダムの挙動が安定した第3期では、測定項目や箇所を絞り込むことも検討し、ダムの老朽化や劣化の監視、計測へと安全管理の重点を移していく<sup>5)</sup>。

また、ダムは常時の安全管理の他に、定期検査や総合点検を実施し、ダムの健全性の評価を行っている。定期検査とは河川法に基づき、ダムの機能の確保のため概ね3年に1回以上定期的に実施する検査である。総合点検<sup>6-8)</sup>とは、これまで国土交通省が管理する直轄ダムや都道府県が管理する補助ダムを対象にダムの機能の維持と安全性確保の観点から実施する点検である。具体的には、30年程度に1回の頻度で、建設当時の設計、施工、試験湛水や日常の管理点検結果について総合的に評価する。

表-2.2 ダム点検整備基準に定める点検の頻度<sup>4)</sup>

計測項目	コンクリートダム					フィルダム		備考
	重力・中空重力			アーチ		均一型	ゾーン型 及び表面 しゃ水壁型	
	50m未満	50m以上, 100m未満	100m以上	30m未満	30m以上			
漏水量 (※)	第1期	1回/日						・ダム毎に定められた計測箇所において行うものとする。
	第2期	1回/週						
	第3期	1回/月						
変形	第1期	—	1回/週	1回/日	1回/週	1回/日	1回/週	・ダム毎に定められた計測箇所において行うものとする。
	第2期	—	1回/月	1回/週	1回/月	1回/週	1回/月	
	第3期	—	1回/3月	1回/月	1回/3月	1回/月	1回/3月	
揚圧力	第1期	1回/週			—	1回/週	—	・ダム毎に定められた計測箇所において行うものとする。
	第2期	1回/月			—	1回/月	—	
	第3期	1回/3月			—	1回/3月	—	
浸潤線	第1期	—				1回/週	—	・ダム毎に定められた計測箇所において行うものとする。
	第2期	—				1回/月	—	
	第3期	—				1回/3月	—	
地震動	地震時						・ダム天端、ダムの基礎地盤(あるいは堤体底部)及びその他ダムの安全管理上必要な箇所計測し、デジタルの時刻歴波形として記録する。	
<p><b>【補足事項】</b></p> <p>(1) 各管理期間における計測データの検計結果を基に、安全管理上支障のないよう、計測箇所、計測頻度を変更することができるものとする。</p> <p>(2) 計測による変形にほとんど変化が認められない場合は、30m以上のアーチダムを除き、第3期における変形の計測頻度を変更することができるものとする。</p> <p>(3) 全ての計測箇所において漏水量が比較的少なく、かつ揚圧力が小さいダムについては、第3期における揚圧力の計測頻度を変更することができるものとする。</p> <p>(4) 自動計測と手動計測を併用できる計測項目については、年1回、自動計測と手動計測の比較による計測精度の確認を行うものとする。</p>								
<p><b>【管理期間の区分】</b></p> <p>第1期：試験湛水開始から満水以後2ヶ月以上を経過するまでの期間とする。揚水発電、洪水調節等で水位の急速低下による影響を考慮する必要があるフィルダムについては、この期間を含むものとする。</p> <p>第2期：第1期経過後、貯水位等の変化に計測値が正しく追従し、その値が妥当と判断されることにより、ダムの挙動が安定したと確認できるまでの期間とする。ただし、100mを超えるダムまたは特殊な設計のダム(アーチダム、中空重力式ダム、表面しゃ水壁型フィルダム、パットレスダム、台形CSGダム等の特殊な構造型式のダム、基礎が岩盤でないダム、特殊な基礎処理を行ったダム(袖部を除く)、貯水池内で地すべり対策を行ったダム、計測監視を行う大規模な地すべりが存在するダムを含む。)については、3年以上の期間を見込むものとする。</p> <p>第3期：第2期経過以降の期間とする。</p>								

※漏水量は、設計上考慮されているものを指しており、コンクリートダムでは排水量、フィルダムでは浸透量が相当する。

## 2.2.2 地震後の臨時点検

河川内にあるすべてのダムは、一定規模の地震が発生した場合に、ダム管理者はダムの臨時点検を実施することが国土交通省より義務付けられている。地震直後のダムの臨時点検は、主に目視により外観を点検する一次点検と、詳細な外観点検と計測値の確認による二次点検からなる。

平成 24 年 4 月 1 日付国河流第 4 号「地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について」<sup>9)</sup>を表-2.3 に示す。表中の(1)または(2)に該当する国土交通省所管の多目的ダム、治水ダムおよび河川法第 44 条に規定する利水ダムにおいて、一次点検または一・二次点検を実施し、その結果を報告することになっている。

実際のダム管理では、地震後の 3 時間以内に 1 次点検、24 時間以内に 2 次点検を実施している。

この地震発生後の臨時点検によって、何らかの変状、あるいは異常な徴候が発見された場合、必要な緊急対応を図る、または継続的な監視を実施し、ダムの安全性を確保する。よって、地震後の臨時点検においては、変位を含め、迅速に堤体挙動に関する計測値を得て評価、分析することが求められる。

表-2.3 地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について（抜粋）<sup>7)</sup>

<p>平成 24 年 4 月 1 日付国河流第 4 号「地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について」より抜粋</p> <p>(1)最大加速度が 80gal 以上である地震(最大加速度を測定していない場合を含む)又は気象庁震度階が 5 弱以上である地震の場合には、速やかに一次点検および二次点検により、被害の状況を把握するものとする。なお、二次点検の実施が夜間に及ぶ場合には、一次点検において、被災が確認されない場合に限り、地震後の出水の可能性に配慮しつつ、即時点検の必要性や夜間視認の不確実性を考慮の上、二次点検を翌日の早朝に実施することができるものとする。</p> <p>(2)最大加速度が 80gal 未満である地震でかつ気象庁震度階が 4 以下である地震の場合には、一次点検により、迅速に被災概況を把握し、一次点検において、被災が確認されない状況においては、以下の a)～c)に掲げるダム等を除き、二次点検の実施を省略できるものとする。</p> <p>また、最大加速度が 25gal 未満である地震でかつ気象庁震度階が 4 である地震の場合には、以下の a)①～⑤、b)及び c)に掲げるダム等を除き、地震発生の日または翌日(翌日が閉庁日の場合は次開庁日)に平常時の点検と合わせて一次点検等を実施することができるものとする。</p> <p>a)堤体の二次点検を省略できないダム</p> <ul style="list-style-type: none"><li>①ダムの基礎地盤、あるいは堤体底部に地震計を設置していないダム</li><li>②管理の期間の区分における第 1 期および第 2 期のダム</li><li>③特殊な設計によるダム アーチダム、中空重力式ダム、表面遮水壁型フィルダム、バットレスダム、台形 CSG ダム 等</li><li>④基礎地盤が岩盤でないダム</li><li>⑤特殊な基礎処理を行ったダム(袖部を除く)<ul style="list-style-type: none"><li>・連続地中壁により基礎処理を行っているダム</li><li>・二重管ダブルパッカー工法により基礎処理を行ったダム</li><li>・土質材料以外の材料により貯水池遮水(ブランケット)を行ったダム</li><li>・配筋が必要なコンクリート置換工を行っているダム</li></ul></li><li>⑥堤高が 100m を超えるダム</li></ul> <p>b)貯水池周辺地山の二次点検を省略できないダム</p> <ul style="list-style-type: none"><li>①管理の期間の区分における第 1 期及び第 2 期のダム</li><li>②継続して計器監視する地すべり(対策済みを含む)を有するダム</li></ul> <p>c)その他、既往の点検結果等から整備局等が指定する利水ダムとその点検項目</p>
--

## 2.3 ロックフィルダムの外部変位計測<sup>10)</sup>

ロックフィルダムのうち、大規模なダムを築造する際の一般的型式である中央土質遮水壁型ロックフィルダムの外部変位計測用標的の設置例を図-2.1に、また可動点および固定点の標的の詳細構造例を図-2.2に示す。

ロックフィルダムの外部変位は、堤体の天端および法面にグリッド（格子）を組み、各グリッドの点に測量用の可動標的を設置し、左右岸に設けた固定標的より可動標的の変位量を求める。

光波測量は、トータルステーションを用いる。トータルステーションは測角を行うセオドライトと測距を行う光波測距儀の機能をもちあわせた測量機器である。ロックフィルダムの外部変位計測では主に水平方向の計測を光波測量により行う。水準測量は、水準儀(レベル)を用いる。水準儀は水平を計る測量機器であり、標尺(スタッフ)を用いて基準点からの高低差を求める。ロックフィルダムの外部変位計測では、高さ方向の計測を水準測量により行う。

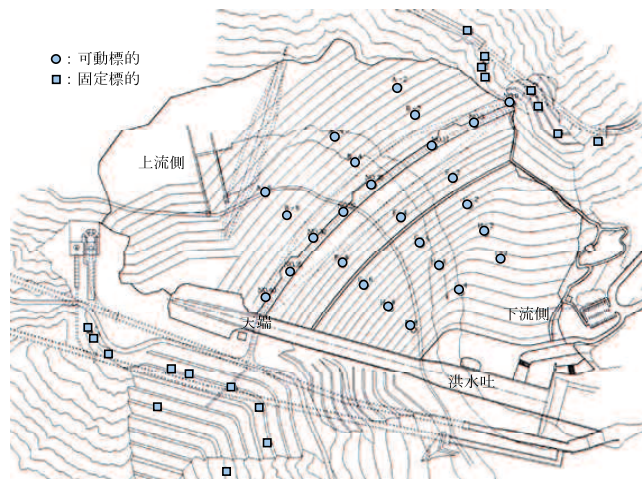


図-2.1 外部変位計測用標的の設置例<sup>11)</sup>

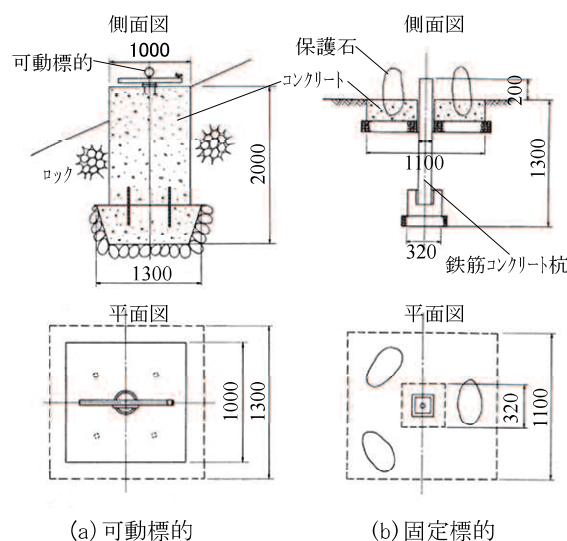


図-2.2 標的の詳細構造例<sup>12)</sup>

## 2.4 ロックフィルダムの変位挙動

ロックフィルダムの変位計測は、常時はダムの安定した挙動を把握するため、計測結果の推移、あるいは変化の傾向を得ることを目的としている。大規模地震時直後の非常時は、地震前後の計測値の比較や、堤体表面の面的な変状を把握するために行う。地震後はダムの安定性を確認するために継続して計測し、常時の計測結果と比較する。

本節では、常時の計測結果と非常時の計測結果の事例について示し、ロックフィルダムの挙動の特徴について述べる。

### 2.4.1 経年変化の計測事例

斜面の変位挙動は単調増加であるが、ロックフィルダムは築堤後の経年的な沈下の他、貯水位の上下変化によって下流側への変位と上流側への変位がくり返し生じる。また、ダムの変位の大きさは斜面に比べて一般的に小さい。

本節では、長期的なダムにおける上下流方向変位・鉛直変位沈下の計測結果として、最上川水系白川ダムにおける計測結果を示す。なお、変位計測はトータルステーションとレベル測量によって実施された。

白川ダムの諸元を表-2.4に、外部変位計測を行うための可動標的の位置を図-2.3に示す。白川ダムの可動標的は、下流側法面に17点(M1～M17)、ダム天端に10点(M18～M27)、上流側法面に6点(M28～M33)の計33地点設置されている。

白川ダムの天端測線であるM18(右岸)からM24(左岸)の変位計測結果を図-2.4に示す。天端の水平変位は第1期の試験湛水において貯水位の上昇にしたがい大きく下流側に変形している。その後は貯水位上昇に伴い下流側に、貯水位の低下により上流側に変形する挙動を示す。図-2.5に図-2.4のM-22地点の上下流方向変位と貯水位の関係図を示す。第1期の試験湛水時に相対的に大きく下流側に変形していること、その後の貯水位上昇と貯水位低下においては水位昇降に対する上下流方向変位の増減の幅が徐々に減っていることがわかる。このことから、貯水位の増減に対して数mm程度の繰り返し変位が計測されることが望まれる。

図-2.4に示す天端の高さ方向変位はおおむね時間経過に従って、年間の沈下量が減少し、一定値に漸近していく傾向にある。高さ方向変位は、ダム最大断面付近にあるM20～M23では、他の測点と比べ沈下量が大きくし、湛水開始後からの変位量は140～150mm程度となっている。ダムの両岸では沈下量は小さくM27では湛水開始後からの変位量は30mm程度である。

近年は年間数mmの沈下量が計測されている。このように、安定期に入ったロックフィルダムでも年間数mm程度の変化は発生しており、ロックフィルダムの挙動の安定性を確認するためには、測定精度について厳密な規定はないが、年間数mmの沈下が計測できる精度が必要であると考えられる。



表-2.4 白川ダムの諸元<sup>13)</sup>

型式	中央土質遮水壁ロックフィルダム	
堤高	66 m	
堤頂長	348.2 m	
堤体積	2,233,000 m <sup>3</sup>	
法勾配	上流面	1 : 2.5
	下流面	1 : 2.3

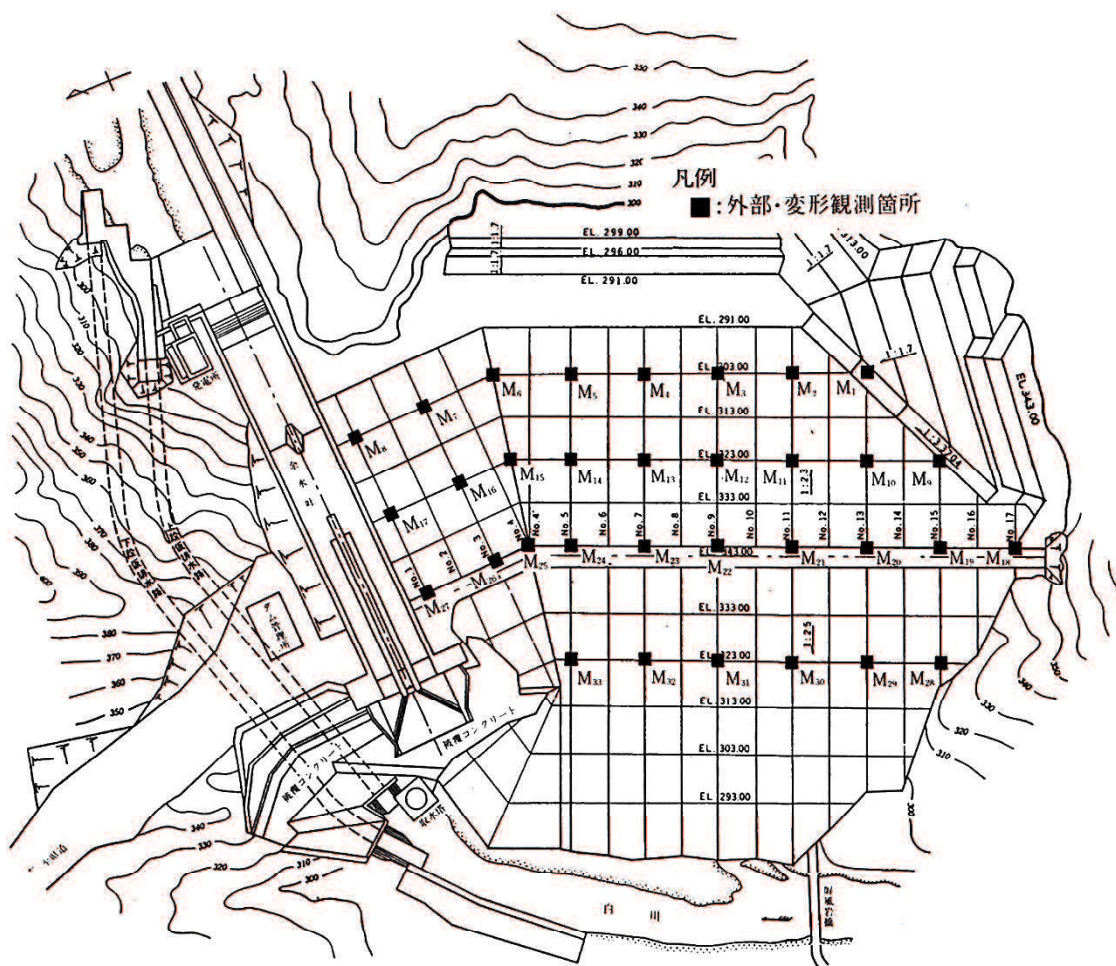


図-2.3 白川ダムの可動標的の位置<sup>13)</sup>

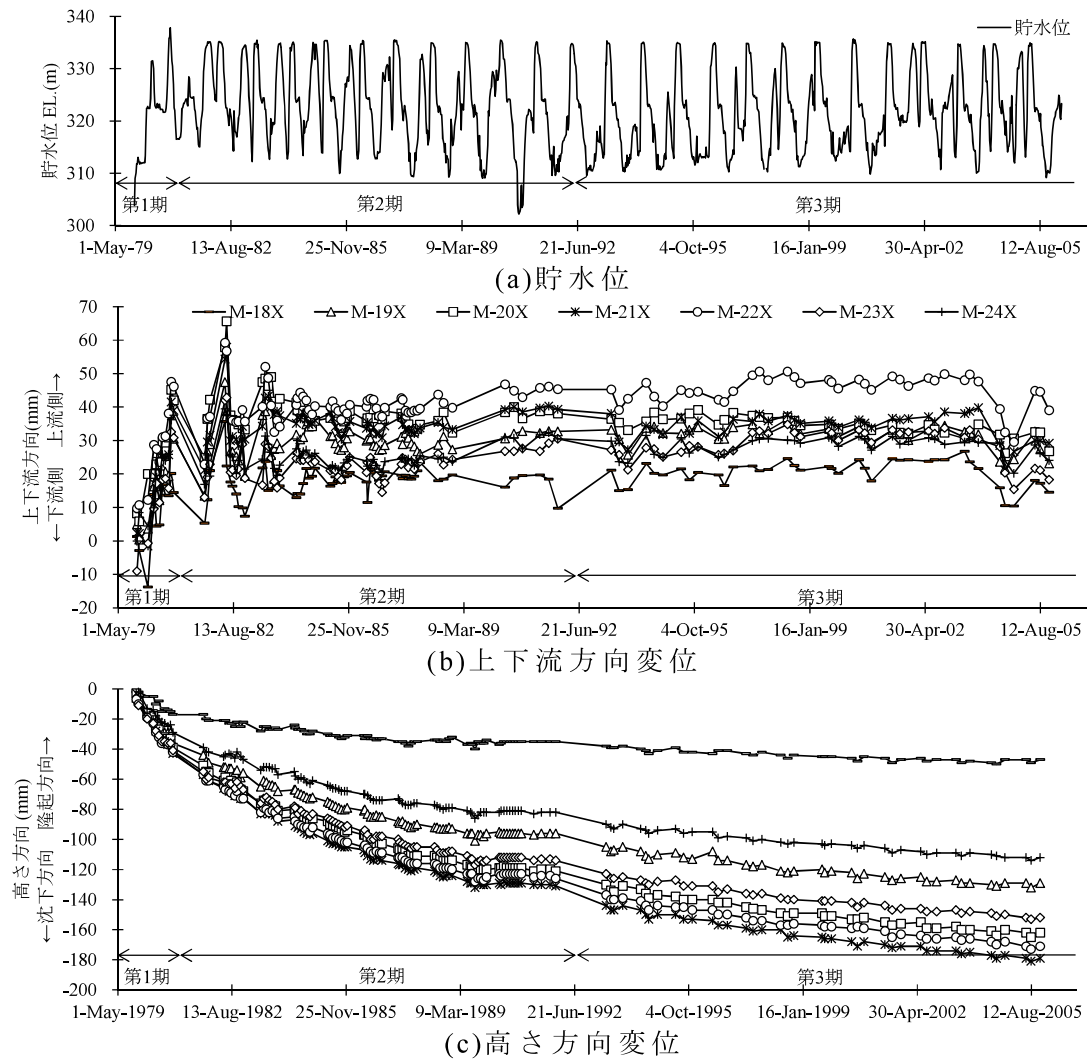


図-2.4 白川ダムの外部変位計測結果(ダム天端)

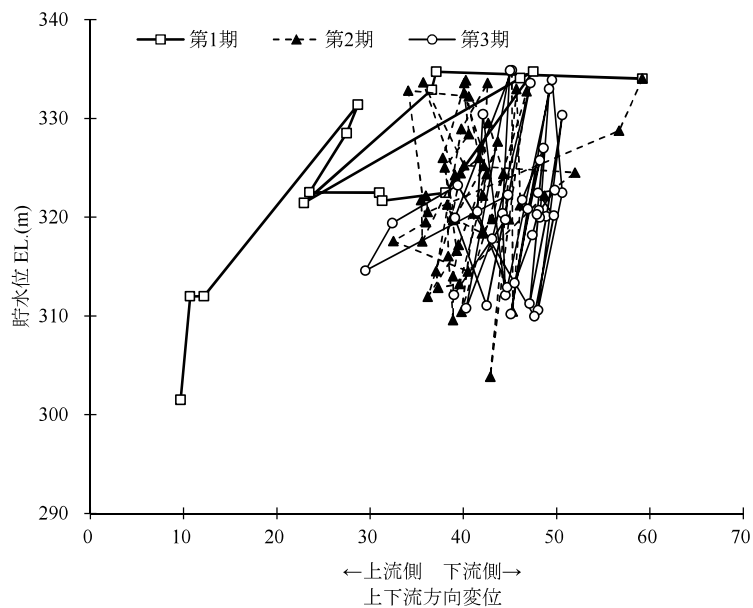


図-2.5 白川ダムにおける貯水位と上下流方向変位の関係(M-22)

## 2.4.2 地震時の挙動計測事例

本節では、大規模地震時のダムの挙動を例に挙げ、変位計測を行うにあたっての要求性能について述べる。

2008年6月14日午前8時43分、岩手県内陸南部を震源とする岩手・宮城内陸地震(Mj7.2, Mj: 気象庁マグニチュード)が発生し、震源に近い数ダムにおいて被害が生じた。国土交通省所管のダムで本震の震源に最も近いダムは、北上川水系石淵ダムであり震央から9.4kmに位置する。震央とダムの位置を図-2.6に示す。

石淵ダムの諸元を表-2.5に、堤体の標準断面図および縦断面図を図-2.7に示す。石淵ダムは1953年に完成した堤高53mのコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム(CFRD)である。なお、岩手・宮城内陸地震発生時の貯水位は約EL.314mであり、常時満水位(EL.318m)のより4m低かった。

また、天端の地震計では、上下流方向1,461gal、ダム軸方向934gal、鉛直方向で2,070galの最大加速度を記録した。

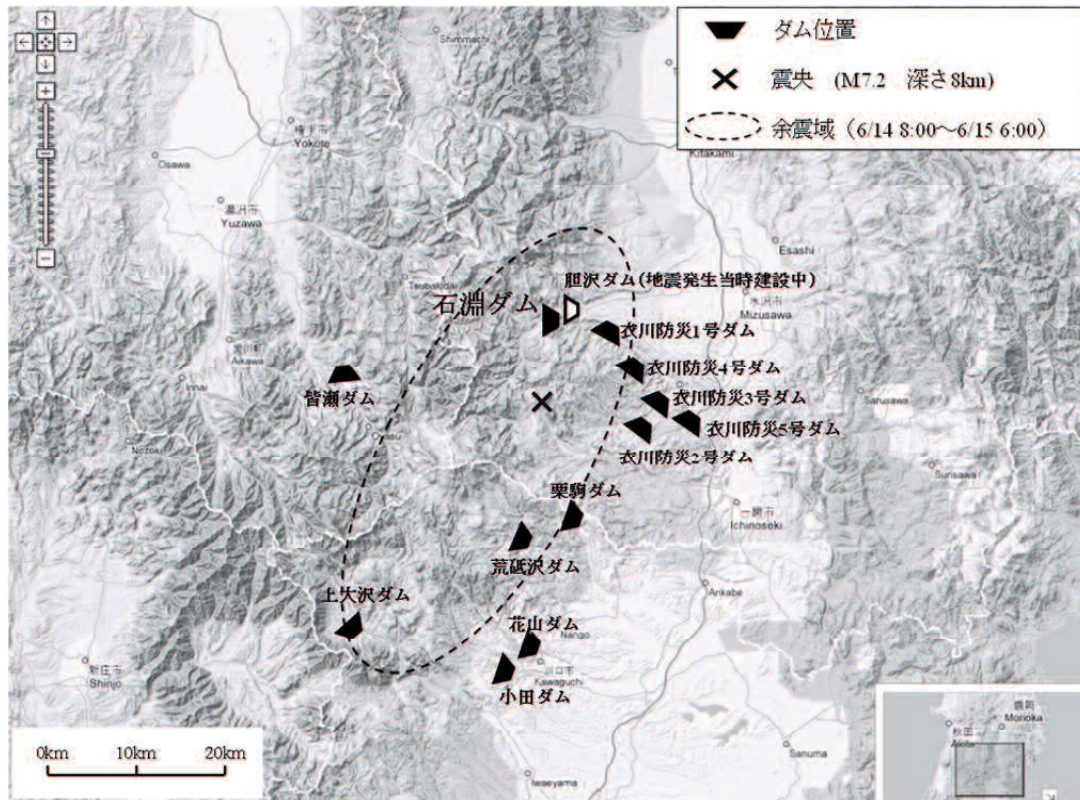
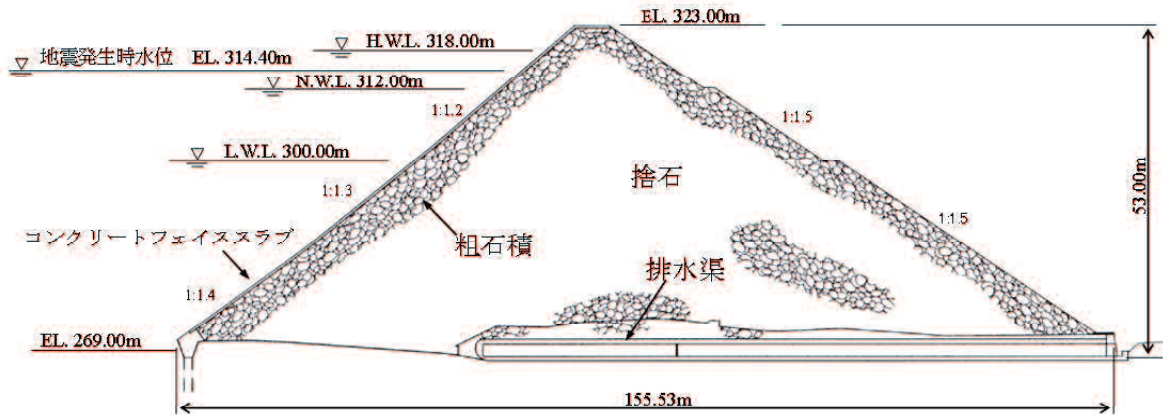


図-2.6 震央とダムの位置(地震発生時)<sup>14)</sup>

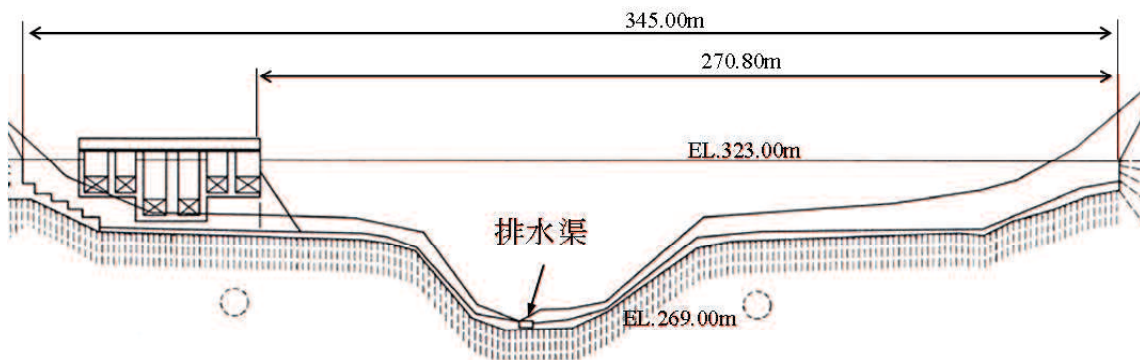
表-2.5 石淵ダムの諸元

型 式	コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム	
堤 高	53.0 m	
堤 頂 長	345.0 m	
堤 体 積	411,300 m <sup>3</sup>	
法勾配	上 流 面	1 : 1.2~1.4
	下 流 面	1 : 1.5





(a)断面図



(b)縦断面図

図-2.7 石淵ダムの標準断面図および縦断面図<sup>14)</sup>

目視による変状の確認を行った結果，CFRDの貯水機能上最も重要であるコンクリートフェイススラブについては，遮水壁およびその継ぎ目部分での目立った損傷は認められなかった．しかし，ダム为天端舗装に，写真-2.1に示すように“なみうち”が見られ，亀裂も認められた．また，ダム下流法面では，写真-2.2に示すように天端の法肩部にあたる高欄と舗装部の境界に開きが見られ，天端舗装の“なみうち”の突出部の岩石にせり上がりが見られた．その段差は50cm程度である．さらに，せり上がり部から一部リップラップの落石が認められた．

ダム完成後(昭和28年)からの累積沈下量を図-2.8に，石淵ダム天端の沈下量推移を図-2.9に示す．計測は従来からの視準測量により行ったものである．岩手・宮城内陸地震では，最大沈下量は最大断面であるNo.20断面の天端において約55cmであった．

このように，大規模な地震が発生した場合に，変位量は数10cmのオーダーにも達する場合も予想される．したがって，地震時には，微小な変位から数10cmの変位を計測できることが要求される．また，即応性の観点から，地震発生後における1次点検あるいは，少なくとも2次点検の際に変位が計測されることが望まれる．



写真-2.1 天端舗装面の亀裂と”なみうち”<sup>14)</sup>



写真-2.2 天端高欄と舗装面との段差 (約 50cm)<sup>14)</sup>

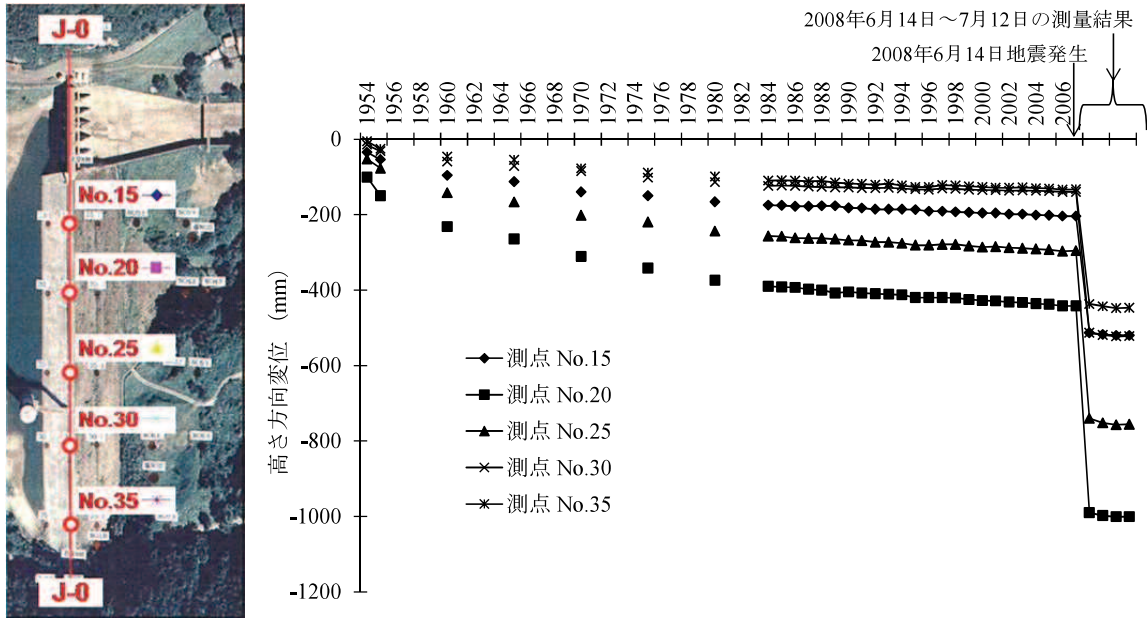


図-2.8 ダム完成後(昭和 28 年)からの累積沈下量(J-0 : 天端測線)<sup>10)</sup>

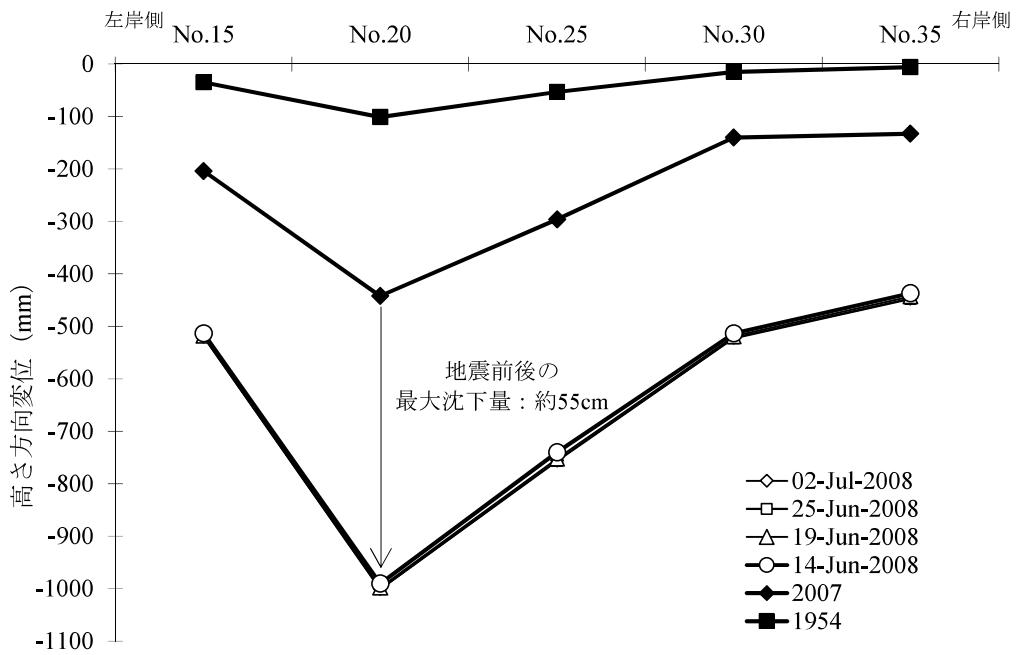


図-2.9 石淵ダム天端の沈下量推移<sup>14)</sup>

## 2.5 まとめ

第2章では、安全管理のための計測項目と計測頻度や臨時点検の詳細について述べ、ダムของ安全管理のための計測の現状と課題を示した。また、これまでのダムにおける変位の計測結果から一般的な変位計測の要求性能についてとりまとめた。

その結果を以下にまとめる。

- (1) ダムの安全管理のための計測の項目や頻度は、河川管理施設等構造令や河川砂防技術基準に定められている。また、大規模な地震発生時には河川管理者への報告が義務付けられており迅速な変位計測が必要となる。
- (2) 光波および水準測量によるロックフィルダムの外部変位の計測方法については、従来から、計測や結果の整理に要する時間が比較的長く、迅速な対応が難しい。地震後などの非常時において直ちに外部変位を測量する必要があるが生じてても、計測に要す時間や費用的な負担から必ずしも迅速に対応できていない、などの課題がある。
- (3) 挙動の安定期に入ったロックフィルダムでも年間数 mm から数 10mm 程度の変位が発生している。
- (4) 貯水位の変化によって、平面方向は下流側への変位と上流側への数 mm 程度の変位が繰り返し生じる。この繰り返し変位はダムの挙動が安定するにしたがい、水位昇降に対する上下流方向変位の増減の幅が徐々に減る。
- (5) これまでの地震時のダムの挙動計測結果より、大規模な地震が発生した場合に、変位量は短時間に数 10cm のオーダーにも達する場合も予想される。
- (6) ダムの変位計測に導入する計測機器の要求性能は、常時は mm 単位から非常時は数 10cm 単位と幅広い計測が行えることが求められる。

## 【第2章の参考文献】

- 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) 山口嘉一：ロックフィルダムの計器による挙動計測，ダム技術，174，pp.32-43，2001.
- 3) 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.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局：河川砂防技術基準 維持管理編(ダム編)，p.9，2014.
- 5) 飯田隆一：ダムの安全管理，ダム技術センター，pp.59-72，2006.
- 6) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課長：ダム総合点検実施要領について，国水環第65号，2013.  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/dam/pdf/02.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf/02.pdf)，2013.
- 7) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説(本編)，[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/dam/pdf/03.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf/03.pdf)，2013.
- 8) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説(参考資料)，[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/dam/pdf/04.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf/04.pdf)，2013.
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課長：地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について，国河流4，2012.
- 10) 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，pp.120-136，2005.
- 11) 建設省 北陸地方建設局 三国川ダム管理所：信濃川水系三国川ダム図面集Ⅰ，1995.
- 12) 建設省 東北地方建設局：寒河江ダム工事誌，p.862，1991.
- 13) 建設省 東北地方整備局：白川ダム工事誌，pp.597-608，1981.
- 14) 独立行政法人土木研究所：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告，土木研究所資料，No.4120，pp.90-137，2008.



## 第3章 GPS 変位計測システムのロックフィルダム

### 外部変位計測への初期の適用

#### 3.1 はじめに

ロックフィルダムの外部変位の測定は第2章で示したように、堤体の天端および法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(可動標的)を設置し、左右岸に設けた基準点(固定標的)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行われている。しかし、これらの方法は、計測や結果の整理に要する時間が比較的長く、迅速な対応が難しいなどの課題がある。

近年のダムの安全管理のための変位計測に関する研究は第1章に述べたように様々な新しい計測機器について検討が進んでいる。このうち GPS 変位計測システムはこれまでの研究成果から第2章で示したダムで常時発生する年間数 mm の変位から、非常時に発生する短時間に数 10cm 以上の変位まで幅広く計測できる可能性がある。

本章では、先ずロックフィルダムに適用する GPS 変位計測システムの詳細や精度向上のための手法について述べる。また、従来から行われている測量と GPS 変位計測システムを比較し、ロックフィルダムの安全管理に GPS 変位計測システムを導入する際の優位性について示す。次に、ロックフィルダムに GPS 変位計測システムを導入し、課題の抽出を行う。

#### 3.2 GPS 変位計測システム

##### 3.2.1 GPS 測位

###### (1)GPS の構成<sup>1)</sup>

GPS は GPS 衛星からの電波を受信して、計測点の3次元座標を求める測位システムである。このシステムは、宇宙部分、制御部分、利用者部分からなり、電波が届く箇所であれば、計測点の位置を知ることができる。

宇宙部分では、図-3.1 および表-3.1 に示すように、約 30 個の人工衛星(GPS 衛星)が、半径約 2 万 km の 6 つの円軌道を約 12 時間で周回している。人工衛星からは、複数の GPS 電波は発信されるが、一般に利用できる民生用電波は、L1 波(1575.42 MHz)と L2 波(1227.60 MHz)の 2 種類で、コードと呼ばれる信号が送信されている。

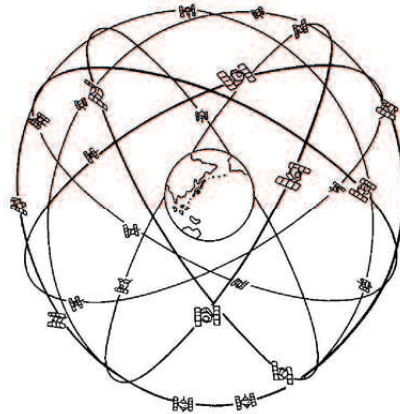


図-3.1 地球周回する GPS 衛星の軌道<sup>2)</sup>

表-3.1 GPS 衛星の主要諸元<sup>1)</sup>

項目	仕様
衛星の数	4個×6軌道面(加えて予備衛星が数基あり)
軌道高度	約 20,200 km
軌道傾斜角	55度
周回周期	0.5 恒星日(11 時間 58 分 2 秒)
設計寿命	7.5 年
送信周波数	L1 : 1575.42 MHz (10.23 MHz×154) L2 : 1227.60 MHz (10.23 MHz×120)
測距信号	L1 : Pコード, C/Aコード L2 : Pコード, Cコード(試験中)

制御部分は、米国にある主制御局と、世界中に配備されたモニタ局等からなる。制御局では、すべての GPS 衛星を追跡し、衛星から送信される測距情報を収集して、衛星軌道を維持する。

利用者部分は、GPS 受信機や解析処理システム等で構成される。本論文の GPS 変位計測システムは、利用者部分に相当する。

## (2)GPS 測位法<sup>1),2)</sup>

GPS による測位法は、図-3.2 に示すように、単独測位法と相対測位法に大別される。

単独測位法は、車や飛行機・船舶などのナビゲーションに利用され、GPS 衛星からの電波を 1 台の受信機で受信し、受信位置の絶対的な緯度、経度、高さを瞬時に計測する方法である。単独測位法では安価であるが、位置の計測精度が数 m ~ 数 10m である。そのためロックフィルダムの堤体変位計測などの精密計測には利用できない。

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求める方法である。相対測位法にもいくつかの種類があるが、その中でも GPS 電波の搬送波位相を利用する干渉測位法は高精度測量に利用される。

干渉測位法は大別すると 2 種類あり、その一つであるスタティック測位法(静的

干渉測位法)は、2箇所に固定した受信機で一定時間受信データを取得した後に基線解析を行うことによって、座標を求める方法である。その座標は一方の受信機を基準点とした3次元相対座標であり、標準偏差で数 mm~cm 単位の高精度計測を行う事ができる。

もう一つの干渉測位法であるキネマティック測位法(移動体測位法)は、固定した基準点に対して、移動する計測点側の受信機の座標を求める方法である。リアルタイムに座標を求めることもでき、これを RTK-GPS(リアルタイム・キネマティック方式)と呼ぶ。位置の計測精度は、おおむね数 cm 程度である。

ロックフィルダム堤体の変位計測では、常時の計測で mm 単位の高精度な計測精度が求められるため、本研究に用いる GPS 変位計測システムは、GPS 測位法のうち最も計測精度が高いスタティック測位を用いる。

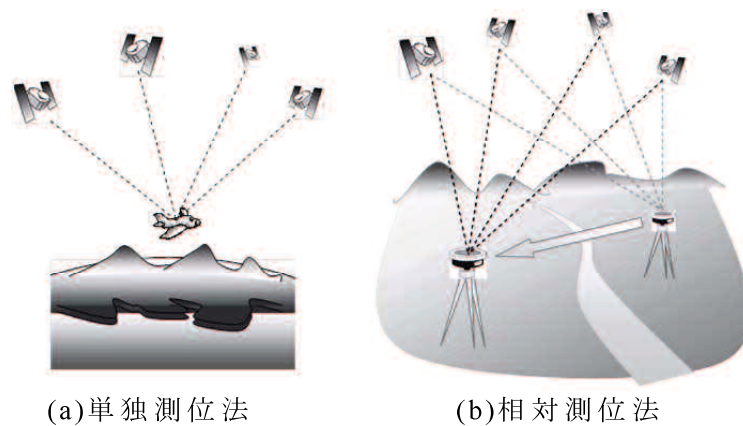


図-3.2 GPS の測位法 <sup>2)</sup>、(図は <sup>3)</sup>)

### 3.2.2 本研究で用いた GPS 変位計測システム <sup>4)-7)</sup>

測量用 GPS 機器は高価で取り扱いが難しく、より安価で取扱いが容易な自動計測用 GPS 機器の開発が必要である。そこで、高価な測量用 GPS 機器から変位計測に不要な機能や部品を省き、可能な限り簡素な機器構成とすることで計測精度を低下させずに小型・軽量・安価な GPS 自動変位計測システムを開発された <sup>4),5)</sup>。さらに、それらのシステムを基盤として、地盤や構造物を対象とした変位計測用のシステムが開発および適用された <sup>6),7)</sup>。

GPS 変位計測システムの機器構成を図-3.3 に示す。GPS 変位計測システムは GPS センサーと通信集約器で構成される。

GPS センサーの構造と諸元を図-3.4 および表-3.2 に示す。GPS センサーは、1 周波(L1)受信用のアンテナユニットと受信データの通信制御を行う制御ユニットだけからなる簡素な構成で、測量用 GPS 機器のように計測点ごとに高価な受信機や記録ユニット・電源ユニット等を配置する必要がないため、比較的安価となる。

通信集約器の構造と諸元を図-3.5 および表-3.3 に示す。通信集約器には、受信機とデータ記録用 ATA カードおよびシステム全体を制御するマイコン部などを収納した通信制御ユニットと、外部の解析システムへデータ通信を行うためのア

ナログモデムおよびターミナルアダプタ (ISDN または ADSL 通信に対応), 電源ユニット等の機材をまとめて格納した構成となっている。また, これら通信機器のかわりに, 携帯電話モジュールを使用することも可能である。

図-3.3 のように, ロックフィルダム堤体の可動標的には安価な GPS センサーを設置するだけでよく, GPS センサーで受信したデータは多芯ケーブルを介して通信集約器に集約・記録され, 解析・図化用の解析システムに順次伝送される仕組みである。また, 同じ多芯ケーブルで各 GPS センサーへの給電も行う。

このような機器構成とすることで, 多数の可動標的を計測する場合でも, 比較的安価な GPS センサーを設置するだけでよく, その他の計測に必要な機材は現地に 1 基だけ設置する通信集約器にまとめて搭載することでシステム全体の機器数量を減らすことができ, 測量用 GPS 機器を流用する場合に比較して機器費用を低減できる。

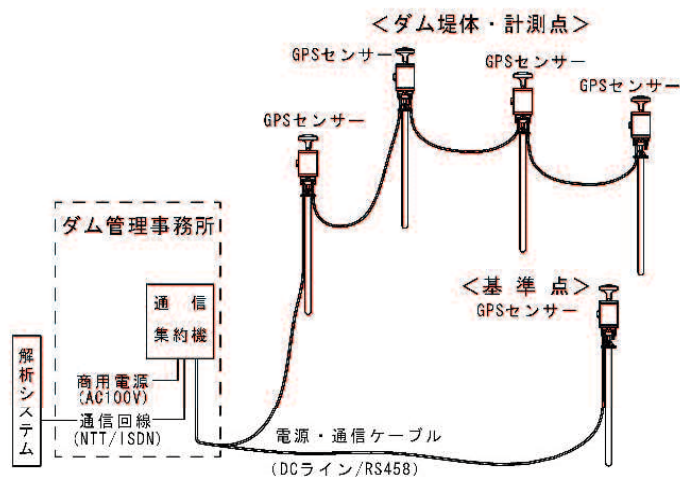
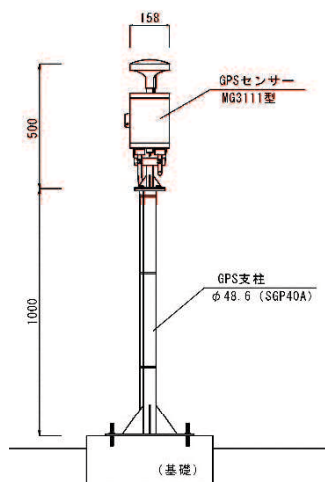


図-3.3 GPS 自動変位計測システムの機器<sup>7)</sup>



(a)GPS センサーの構造



(b)GPS センサーの外観

図-3.4 GPS センサー(古野電気製)<sup>8)</sup>

表-3.2 GPS センサーの諸元<sup>7)</sup>

項目	仕様
受信周波数 受診 Ch 数	L1 帯(1575.42MHz), C/A コード及び搬送波 12ch
センサー外形	アンテナ : φ 156mm×116mm 制御ボックス : 160mm×210mm
センサー重量	0.8kg
GPS ケーブル	デバイスネットケーブル(4 芯)

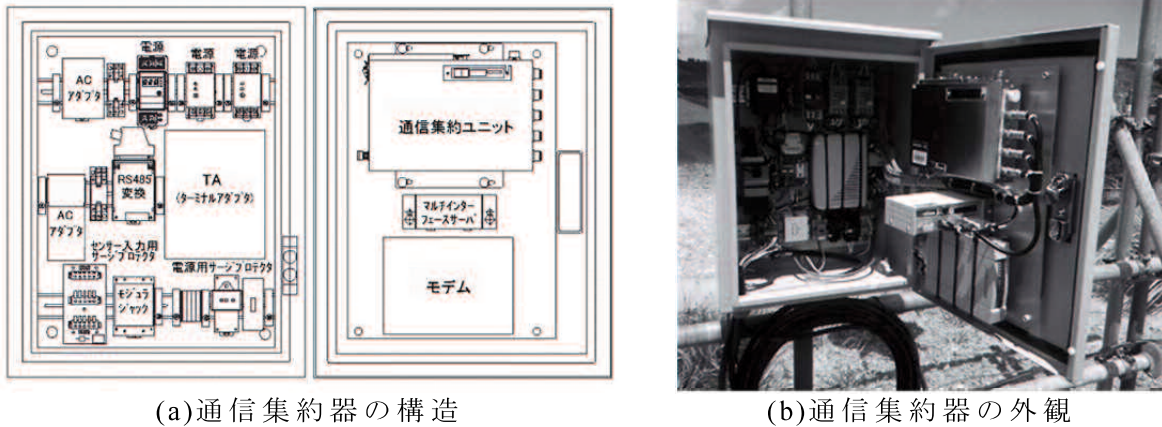


図-3.5 通信集約器(古野電気製)<sup>7)</sup>

表-3.3 通信集約器の諸元<sup>7)</sup>

項目	仕様
LINE 入出力	通信 : RS485(2LINE), 電力 : DC24V(2LINES)
外形	400mm×530mm×250mm
重量	約 10kg
通信・回線	ISDN・ADSL(携帯電話やアナログ回線も可)
電源	商用電源・AC100V(DC12V も利用可能)
センサー接続	1~29 基まで接続可能

### 3.3 計測精度を向上させるための手法

#### 3.3.1 基線解析の方法

本研究で用いた GPS 自動変位計測システムでは, スタティック測位法を用いて基線解析を実施する.

本システムでは, 現地に設置した GPS センサーで 30 秒毎に衛星からの搬送波位相データを得て, 1 時間分の搬送波位相データ(120 個のデータ)を使用してスタティック測位法による基線解析を実施する.

スタティック測位法の計測精度は, 基線長(基準点と計測点の間の距離)や電波の受信状況にもよるが, 通常期待される計測精度は次式で示される<sup>9)</sup>.

$$\sigma_h = \pm 5\text{mm} \pm 1\text{ppm} \times D \quad (3-1)$$

$$\sigma_v = \pm 10\text{mm} \pm 2\text{ppm} \times D \quad (3-2)$$

ここで、

$\sigma_h$  : 水平成分の標準偏差

$\sigma_v$  : 高さ成分の標準偏差

$D$  : 基線長(km)

GPS 計測値の誤差が正規分布に従うとすると、実際に取得される計測値は式 (3-1), (3-2) に示した標準偏差の 2~3 倍程度の分布幅をもつため、基線長  $D$  が 1km 以下の場合でも水平成分で  $\pm 10\text{mm} \sim \pm 15\text{mm}$ 、高さ成分では  $\pm 20\text{mm} \sim \pm 30\text{mm}$  の範囲でバラつくことになる。

### 3.3.2 トレンドモデルによる誤差処理<sup>12),13)</sup>

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<sup>10),11)</sup>のため計測値がバラつき、通常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、本研究で用いた GPS 変位計測システムは、トレンドモデルによる時系列統計処理(誤差処理)<sup>12),13)</sup>を導入した。

この方法は、トレンドモデル<sup>14)</sup>とよばれる確率構造を持った時系列解析モデルを用いて、観測ノイズを含む計測データ  $y_n$  から真の変位挙動  $u_n$  を推定するものである。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad (3-3)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad (3-4)$$

ここで、

$v_n$  : 平均値 0, 標準偏差  $\tau$  のシステムノイズ

$w_n$  : 平均値 0, 標準偏差  $\sigma$  の観測ノイズ

$\Delta$  : 時間差分演算子

$k$  : 差分の階数

トレンドモデルの適用によって、2mm 程度の突発的な変位を、また、速度が 0.1mm/日の連続した変位を検出できることが示されている<sup>13)</sup>。

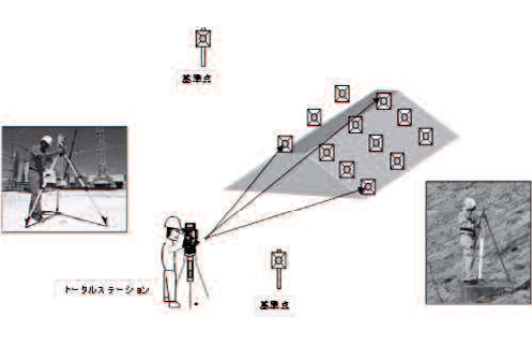
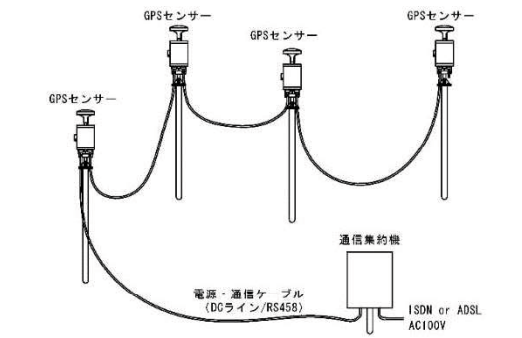
### 3.4 測量と GPS 変位計測システムの比較

本節では、これまでの外部変位計測手法である測量と GPS 変位計測システムを用いた手法について比較を行う。光波・水準測量と GPS 変位計測システムの特徴を表-3.4 に示す。

従来の光波測量や水準測量は、固定点に測量機器を設置し、可動点の計測を行うため、固定点と可動点の間の距離が離れるほど精度が低くなるが、GPS 変位計測システムによる計測では、GPS 衛星からの電波を受信するための上空視界が得られていれば、ダムのどの可動点でも同様の精度で計測を行うことができる。

また、光波・水準測量によるロックフィルダムの外部変位の計測方法については、計測や結果の整理に要する時間が比較的長く、地震後などの非常時において直ちに外部変位を測量する必要性が生じてても、計測に要す時間から必ずしも迅速に対応できていない、などの課題が挙げられる。一方、GPS 変位計測システムは、自動で連続計測を行うことができるため、地震前時のダムの変形等、従来の測量頻度では解明することが困難であったダムの変形挙動を、測量のための技術者を余震などの危険にさらすことなく、計測することができる。

表-3.4 測量と GPS 変位計測システムの比較 <sup>1)</sup>に加筆修正

計測手法	光波・水準測量	GPS 変位計測システム
概要図		
計測形態	手動計測	自動計測
標準偏差	水平方向 ±5mm 程度 高さ方向 ±2.5mm 程度 (視準距離, 気象・日射条件に依存)	水平方向 ±1mm 程度 高さ方向 ±1.5mm 程度 (トレンドモデルを用いた場合, 基線長 1km 以下の場合)
計測の安定性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・夜間や荒天時は作業が不可能</li> <li>・データの安定性の面から, 作業には静穏な日が望ましい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・夜間や荒天時でも計測が可能</li> </ul>
地震時の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震発生後, 作業指示, 移動, 計測, 結果整理等のため時間を要する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震時の計測可能</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原理が単純で実績が多い</li> <li>・手動計測のため, 計測者や使用機器の違いによる誤差や人為的誤差が発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・観測点の増設にはケーブル敷設などの工事が必要</li> <li>・観測点の上空が遮蔽されると計測不可</li> </ul>



### 3.5 ロックフィルダムでの試験計測<sup>6)</sup>

GPS 変位計測システムをダムに導入する目的は、常時はダムの挙動計測に基づく安全性の評価を行うとともに、大規模地震時等の非常時には異常の兆候を速やかに探知することである。本節では、実際の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位計測とともに、GPS による外部変位計測を行い、両者の比較を行い、課題の抽出を行う。

#### 3.5.1 試験計測の概要

試験計測を実施した羽地大川水系羽地ダムは、内閣府沖縄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 2001 年 7 月から 2004 年 6 月にかけて試験湛水(安全管理の第 1 期)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位量の計測が週 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 2 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位量計測が継続されている。GPS 計測は、試験湛水期間中の 2003 年 10 月 10 日から開始している。

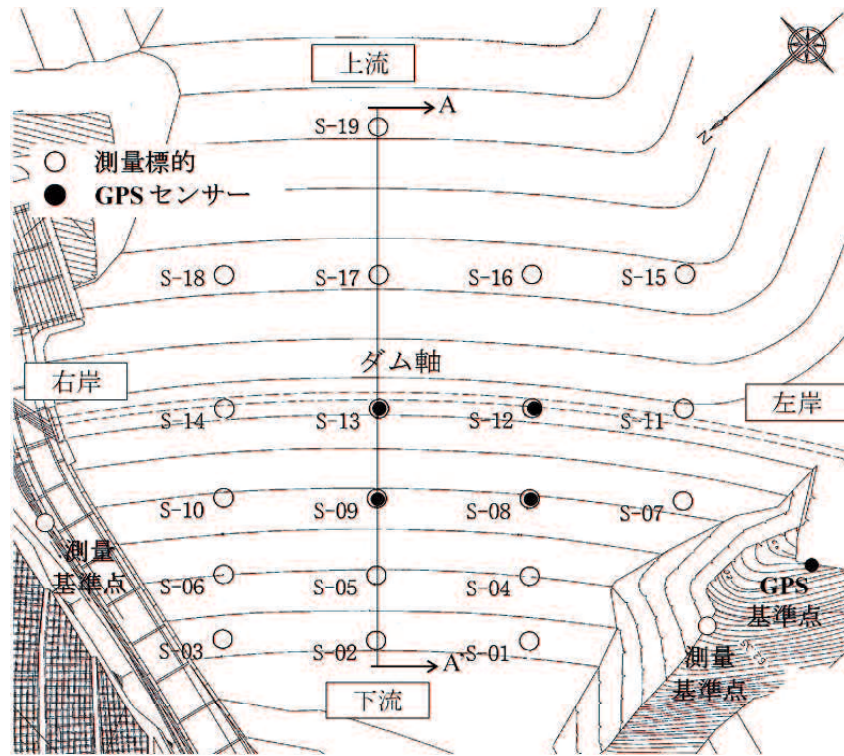
光波測量(1 級基準点測量)はトータルステーション(ソキア SET2EX)を、水準測量(1 級水準測量)は電子レベル(ライカ NA3003)を使用した。GPS 変位計測システムは 3.2.2 に示す機器を使用した。

ダム堤体の計測点の配置を図-3.6 に、空中写真を写真-3.1 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好なダム堤体脇の旧尾根線上に GPS 用の基準点を新たに設置した。基準点から各計測点までの距離(基線長)は 103.2 m ~ 147.6 m 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、良好な計測条件であった。

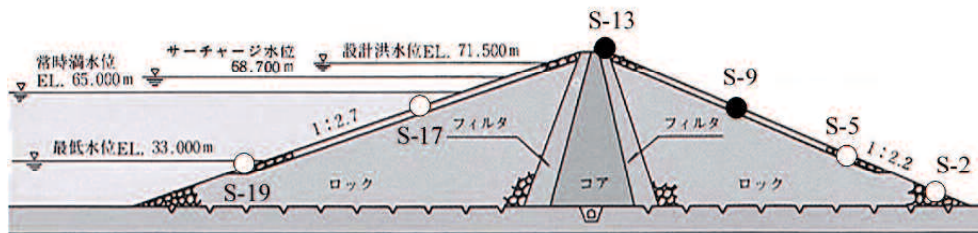
各 GPS センサーは専用ケーブルで連結し、管理棟内の通信集約機に導かれる。GPS センサーで 30 秒毎に受信したデータは、通信集約機で 1 時間分を 1 ファイルにまとめて NTT 回線(ISDN)で解析を行うサーバーへ送信し、直ちに解析処理する。すなわち、1 時間分のデータを受信する間に堤体の変位は無いと仮定し、1 時間分のデータを用いて解析して 1 点の GPS 計測値を得ることになる。

設置位置 S-8, S-12 の GPS センサーの設置方法を図-3.7 に、設置状況を写真-3.2 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のマンホール内に設置されているため、GPS センサーを天端下流側歩道路肩の化粧岩に固定した。





(a) 平面図



(b) 断面図(A-A'測線)  
図-3.6 計測点の配置

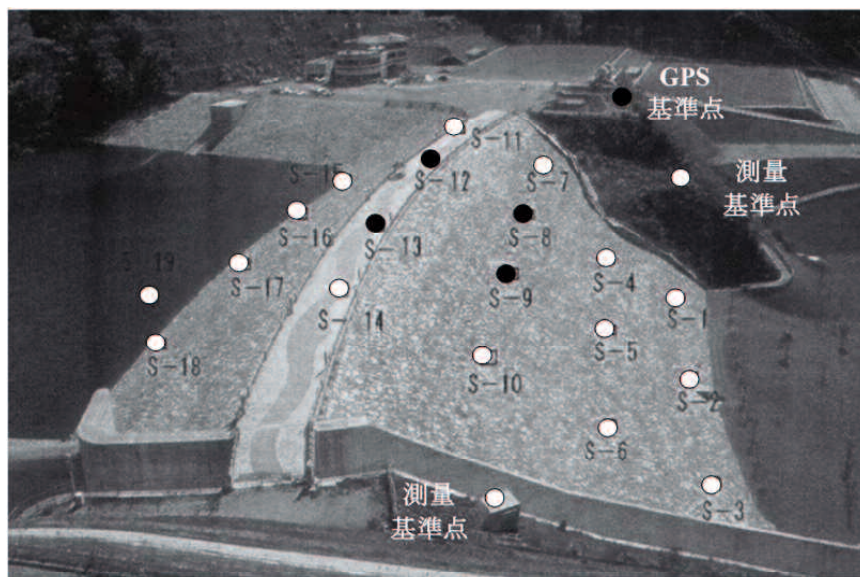
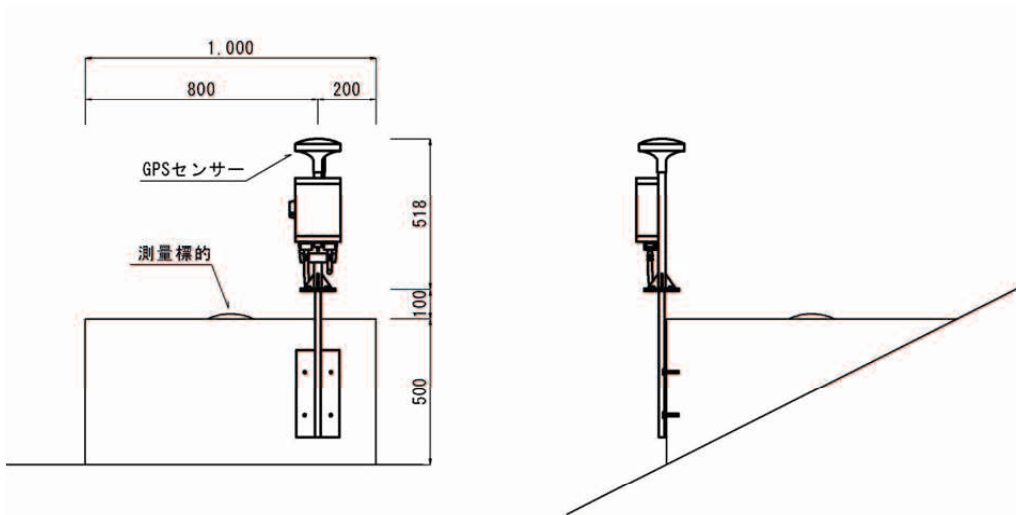
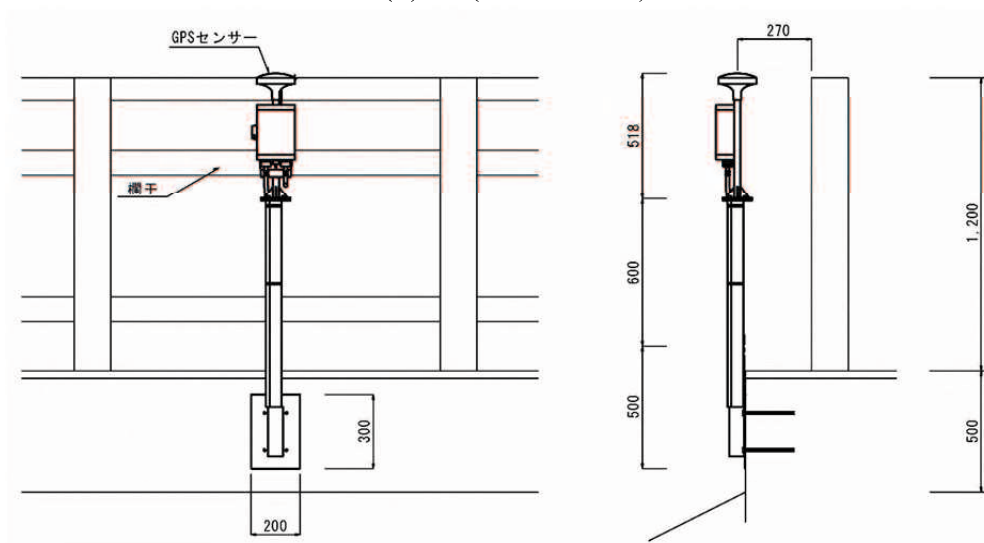


写真-3.1 空中写真



(a)S-8(S-9 も同様)



(b)S-12(S-13 も同様)

図-3.7 GPS センサーの設置詳細



(a)S-8 に設置した GPS センサー



(b)S-12 に設置した GPS センサー

写真-3.2 GPS センサーの設置状況

### 3.5.2 GPS 計測結果と測量による結果の比較

計測例として、ダム下流面中腹に設置した S-8 とダム天端付近に設置した S-12 の GPS 計測結果と、同地点の光波・水準測量の結果の比較をそれぞれ図-3.8、図-3.9 に示す。期間は 2003 年 10 月 10 日から 2004 年 10 月 5 日の約 1 年間で、図の上から順に上下流方向、ダム軸方向、高さ方向の変位を、最下段はダム貯水位の経時変化を示している。変位グラフの丸は光波・水準測量、実点が誤差処理前の 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、変位については GPS 計測開始時点を 0 とし、また、それぞれ右岸、ダム上流、上方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、上下流およびダム軸方向で約 5mm 程度、高さ方向で 10~15mm 程度(上下流およびダム軸方向の 2~3 倍)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を比較する。

S-8 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(図-3.7(a)参照)。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。特に鉛直方向に関しては、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、上下流およびダム軸方向については、誤差処理後の GPS 計測値と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未明から早朝にかけて作業をするように配慮するが、ロックフィルダム堤体の外部変位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、光波測量は水準測量に比較すると計測精度がやや劣ることになる。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。

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。今回の計測結果より、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、GPS 変位計測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。

S-12の計測結果についても、GPS計測と光波・水準測量の値は概ね整合しているが、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る。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(図-3.7(b)参照)、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る。試験計測堤体天端でのGPS計測と光波・水準測量の比較と、GPSセンサーの天端への埋設方法について課題となった。



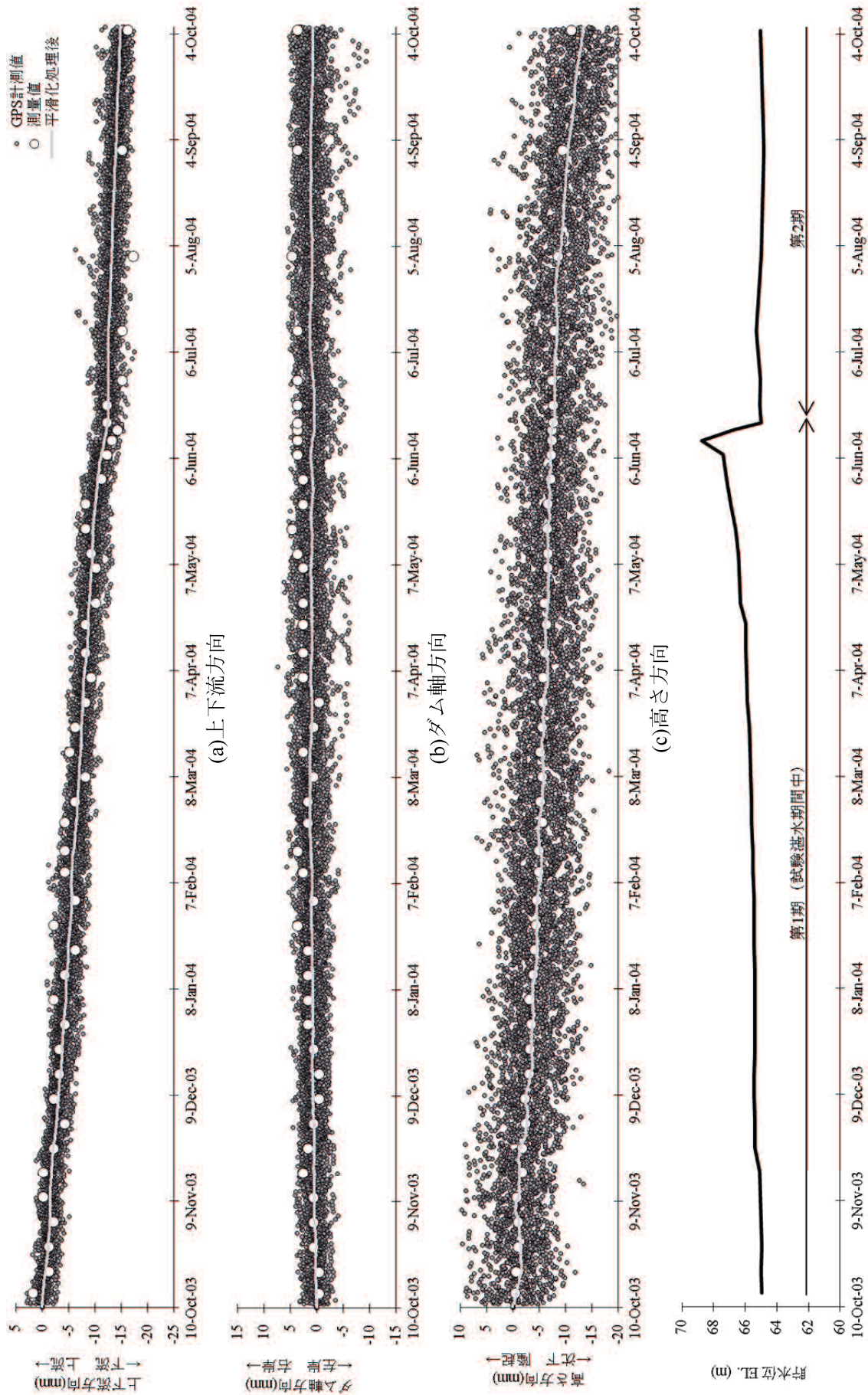


図-3.8 S-8 測点の GPS 計測と光波・水準測量との結果比較

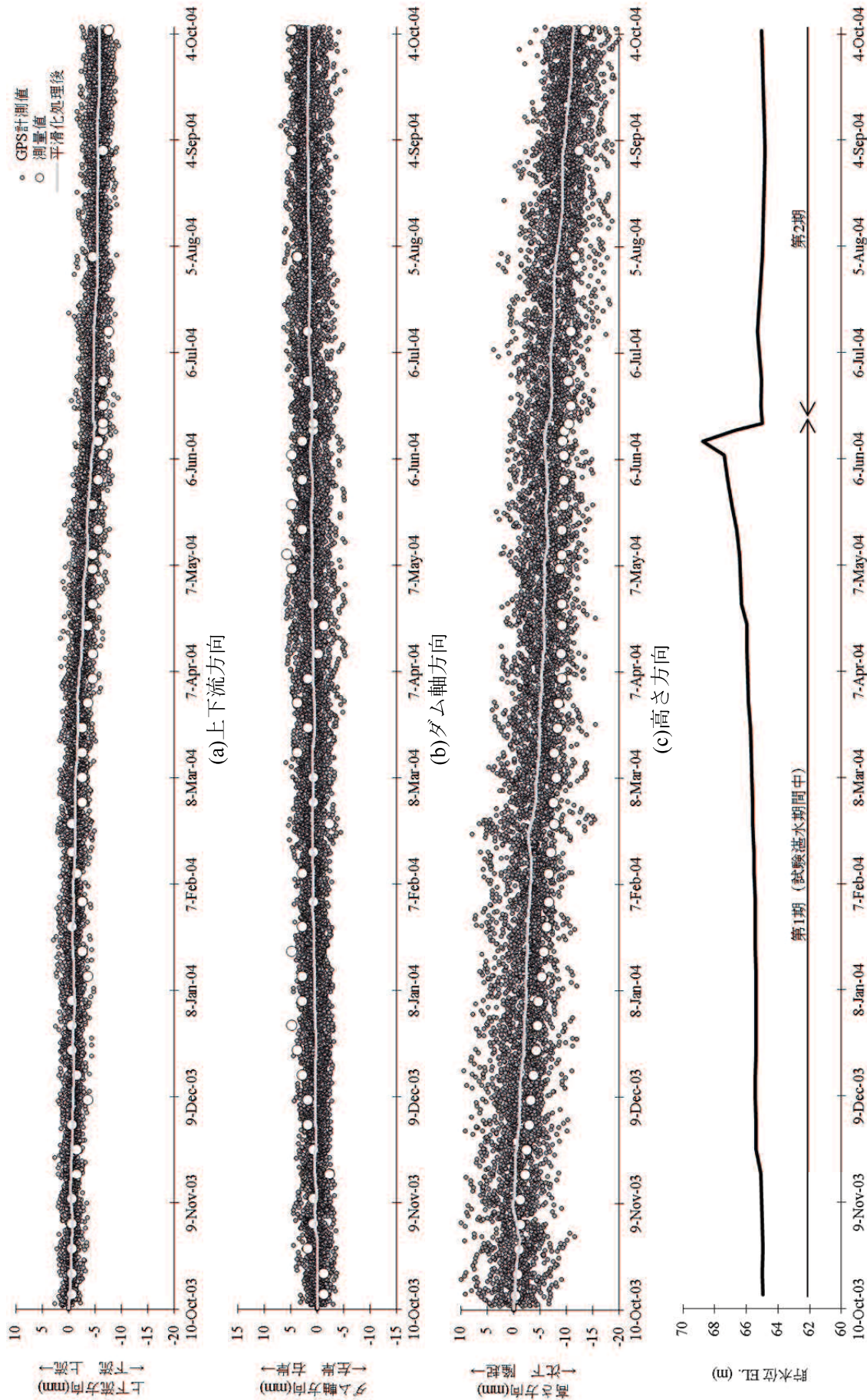


図-3.9 S-12 測点の GPS 計測と光波・水準測量との結果比較

### 3.6 まとめ

第3章では、ロックフィルダムに適用するGPS変位計測システムと実際の適用事例を示した。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位計測とともに、GPS変位計測システムによる外部変位計測を実施し、両計測結果の比較を行い、課題を抽出した。

本章で得られたGPS変位計測システムによるロックフィルダムの外部変位計測の成果や課題について以下にまとめる。

- (1) ロックフィルダムの外部変位の試験計測結果より、GPS計測は従来の外部変位計測方法である光波・水準測量と同等、ないしはそれ以上の精度で外部変位計測が可能であることがわかった。
- (2) GPS計測では、センサー上空視界の良否や、マルチパスの有無、基線長等が計測精度に大きな影響を与える。今回の試験計測では、ダム堤体中央の天端付近にGPSセンサーを設置したため、上空視界が良好でマルチパスの影響も無く高精度な計測を行うことができた。
- (3) ダム堤体天端において、GPSセンサーを可動標的ではなく、天端下流側の歩道路肩に固定した計測結果は、高さ方向変位についてGPS計測と光波・水準測量に差が出る結果となった。これは計測位置が異なることが原因と考えられる。ダムコアの変位を正確に計測するには、GPSセンサーを天端のマンホール内の可動標的に設置する必要がある、センサーの設置方法が課題となった。

### 【第3章の参考文献】

- 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，一般社団法人ダム工学会，pp.3-1～3-3，2014.
- 2) 土屋淳，辻宏道：GNSS測定の基礎，社団法人日本測量協会，p.11，2008.
- 3) 清水則一：GPSによる変位計測技術の変遷と展望，ダム技術，No.296，pp.4-12，2011.
- 4) 近藤仁志，Cannon E. M.，清水則一，中川浩二：GPSによる地盤変位モニタリングシステムの開発，土木学会論文集，No.546/VI-32，pp.157-168，1996.
- 5) Masunari, T., Tanaka, K., Okubo, N., Oikawa, H., Takechi, K., Iwasaki, T. and Shimizu, N.: GPS Continuous Displacement Monitoring System, 6th Int. Sympto. on Field Measurements in Geomechanics, FMGM03, pp.537-543, 2003.
- 6)岩崎智治，原口勝利，佐藤渉，増成友宏，内田純二，清水則一：GPSを用いた自動変位監視のためのWebシステムの開発，日本地すべり学会誌，第49巻，第4号，pp.256-263，2012.
- 7) 岩崎智治，小堀俊秀，増成友宏，山口嘉一，清水則一：フィルダム外部変形計測へのGPS自動変位計測システムの適用に関する研究，ダム工学，Vo.22，No.1，pp.4-15，2012.
- 8) 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，pp.120-136，2005.
- 9) 社団法人日本測量協会：国土交通省公共測量作業規程，2007.
- 10) 土屋 淳，辻 宏道：新・GPS測定の基礎，社団法人日本測量協会，2002.
- 11) P. Misra and P. Enge(測位航法学会訳)：精鋭GPS基本概念・測位原理・信号と受信機，改訂第2版，2010.
- 12) 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．資源素材学会誌，Vol.114 No.6，pp.9-14，1998.
- 13) 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.
- 14) 北川源四郎：時系列プログラミング，岩波書店，p.255，1993.



## 第4章 ロックフィルダム天端堤体内部に

### 設置するための GPS 変位計測システムの改善

#### 4.1 はじめに

ロックフィルダムの変位計測手法について GPS を用いた変位計測に着目し、第3章ではロックフィルダムの外部変位計測への適用の可能性およびその効果について検証した。

本章では第3章のロックフィルダムに対する GPS の試験的な適用を通して課題となった、ダムコア変位の直接計測に対して、GPS アンテナをダム天端堤体内に設置する新しい方法を提案し、実際のダム計測に適用し検証する。

#### 4.2 ロックフィルダムのコア変位計測への GPS 変位計測システム適用の課題

ロックフィルダムでは、堤体に複数の材料を使用するため、ロック材とコア材の変形挙動は異なる。そのため、安全管理上、遮水の要であるコアの変位挙動を直接計測することは極めて重要となる。したがって、大規模な内部土質遮水壁型ロックフィルダムにおいては、図-4.1 に示すようにコアの直上に可動標的を設置し、計測することが多い。

一方、GPS を用いてロックフィルダムの外部変位計測を行う場合、人工衛星からの電波を受信しやすいよう、ポール上に GPS アンテナを設置することが考えられる<sup>1-3)</sup>。ところが、日本の多くの大規模ロックフィルダムでは、ダム天端軸上を管理用道路として利用しており、日常的にコアの直上にポールを立ててアンテナを設置し計測することはできないため、天端の上下流の歩道路肩等にアンテナを固定せざるを得ない。しかし、この場合 GPS アンテナをコアに直接設置していないため、コアの挙動を適切に計測できないことがある<sup>1)</sup>。したがって、ロックフィルダムの安全監視における最重要測点のひとつであるコアの変位を測るためには、天端道路の通行とダム管理の障害にならないようにするとともに、GPS アンテナをコアに直接設置する方法が必要となる。

そこで、ダム天端の視準測量用のマンホール内に GPS アンテナを設置することによって、コアの変位を直接計測することを考えた。しかし、GPS は人工衛星からの電波を受信できることが前提であるので、地表面より低い位置で、しかも蓋のあるマンホールに設置されている条件下でいかにして電波を受信し、またどの程度の精度で計測できるかを明らかにすることが課題となる。本章では、これら

の点に的を絞り，基本的な実験を行った．その結果を踏まえ，実際のダムにおける計測を通して提案方法の妥当性を検証する．

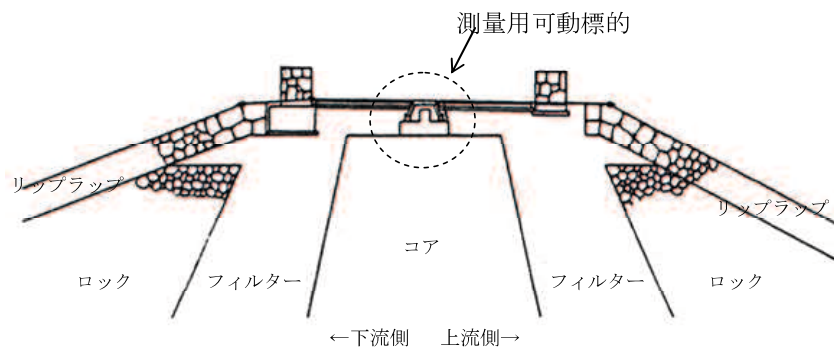


図-4.1 ロックフィルダムの天端における測量用標的

#### 4.3 マンホールに設置した GPS アンテナによる変位計測実験

GPS アンテナをマンホール内へ設置するために，以下の点を検討する．

- (1) マンホールの蓋の影響
- (2) マンホール内の設置深さの影響
- (3) 積雪地方においては，マンホール上の積雪の影響

いずれも，正しく電波を受信できなくなり，受信強度の低下が生じ，計測精度に影響を及ぼす懸念がある．もともと GPS はこのような受信環境を想定していないため，その影響を明らかにしなければならない．

そこで，本章ではマンホール内に設置する場合の(1)～(3)の影響を調査する目的で，基礎的な実験を行う．

使用する GPS アンテナ(古野電気製，MG3111)の外観および諸元を図-4.2 および表-4.1 に示す．受信センサー部は，1周波(L1)用のアンテナユニットと受信データの通信制御を行う制御ユニットで構成される．アンテナと制御ユニットはケーブルで接続し，さらに制御ユニットと通信集約器とをケーブルで連結して自動計測する<sup>4)</sup>．実験では，人工衛星からの電波の位相観測間隔(エポック)を 30 秒とし，1 時間の連続計測データに基づくスタティック測位によって計測点の座標値を求め，座標値の推移から変位を得る．

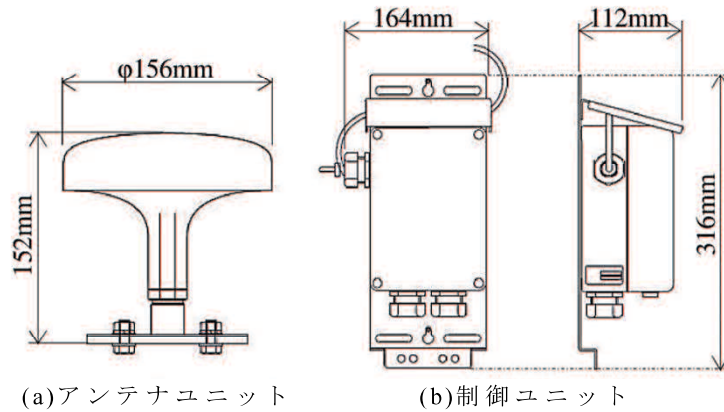


図-4.2 GPS アンテナと制御ユニットの外観

表-4.1 GPS アンテナの諸元

項目	仕様
受信周波数	L1 帯(1575.42MHz) C/A コードおよび搬送波
受信 ch 数	12ch
センサー外形	アンテナ：φ1156mm×116mm 制御ボックス：160mm×210mm
センサー質量	0.8kg
GPS ケーブル	デバイスネットケーブル(4 芯)

#### 4.3.1 マンホール蓋材質の影響

一般的にダムの天端に設置されているマンホールには鉄製の蓋が使用される。鉄製のマンホール蓋は材質が導電体であるため、GPS 衛星から送られる電波を反射し、マンホール内に GPS アンテナを設置した場合に電波が届かない。そのため、GPS の電波が透過し、かつ堤体走行車両に対する耐性を有する材質の蓋を選ぶ必要がある。

そこで、実験では市販されており入手が容易な FRP(Fiber Reinforced Plastics) 製と塩化ビニール製の蓋を用いた。FRP 製蓋はガラス繊維などで強度を高めたプラスチック複合材料製で、電波透過性に優れている。実験で使用した FRP 製蓋は直径が 650mm、厚さ 37mm、耐荷重 T-25(道路橋示方書<sup>5)</sup>で定められている設計荷重で、車両総重量 25t の大型トラックの後輪荷重を想定したもの)の製品である。また、塩化ビニール板は縦横 730mm、厚さ 30mm の市販品を用いた。

実験は、FRP 製蓋および塩化ビニール板で、それぞれ覆ったアンテナおよび蓋のない状態のアンテナの、合わせて 3 つのアンテナを用いて同時計測を行うことにより実施した。図-4.3 に各アンテナ配置状況を示す。それぞれの GPS アンテナの平面間隔を 1000mm とし、FRP 製蓋および塩化ビニール板と GPS アンテナのクリアランス(隙間)は 10mm とした。実験場所は東京都内の上空に障害物のない建物の屋上で、144 時間連続計測した。

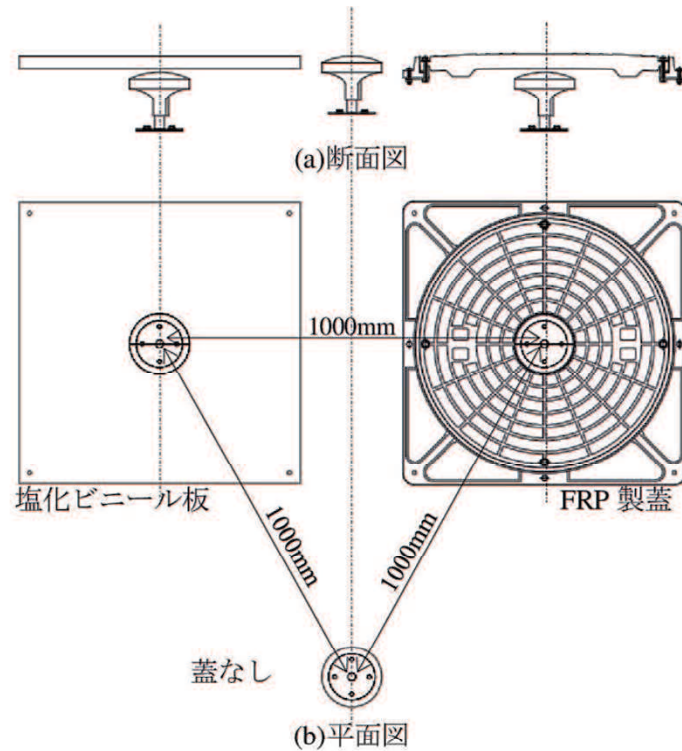
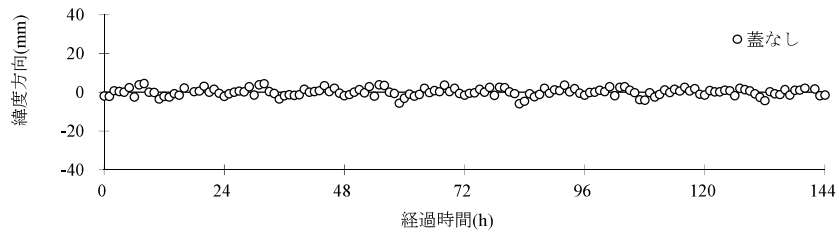
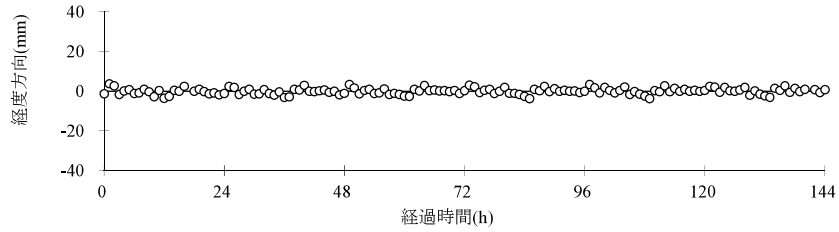


図-4.3 蓋材質の影響確認実験の概要

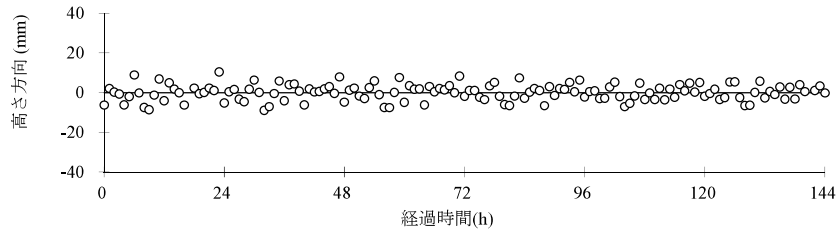
蓋なしの計測結果を図-4.4に、FRP製蓋の計測結果を図-4.5に、塩化ビニール板の計測結果を図-4.6に示す。図はそれぞれ上から緯度方向、経度方向、高さ方向を示している。また、各変位成分に対する標準偏差を表-4.2に示す。蓋のない場合の標準偏差は、上空に障害物のない環境下における連続スタティック測位(1時間毎の連続計測)の標準偏差(水平方向 1~2mm, 高さ方向 2~4mm)と同程度の結果である。FRP製の蓋を通した計測では、蓋なしの標準偏差の2倍程度の値となり、塩化ビニール板では3倍程度であり、蓋の影響は避けられない。しかし、実験結果が示すように、蓋があっても欠測することなく安定して連続計測できた。FRP製の蓋を用いる場合、水平方向で3~5mm, 高さ方向で7mm程度の標準偏差があることを踏まえる必要がある。なお、第2章に示したように、地震時には数cm以上の変位を計測するため、7mm程度の標準偏差であれば変位の検出は可能であると考えられる。



(a)緯度方向

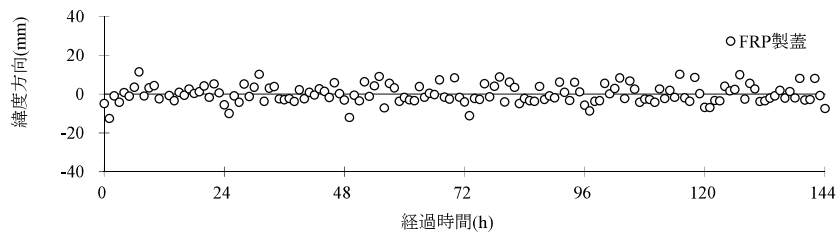


(b)経度方向

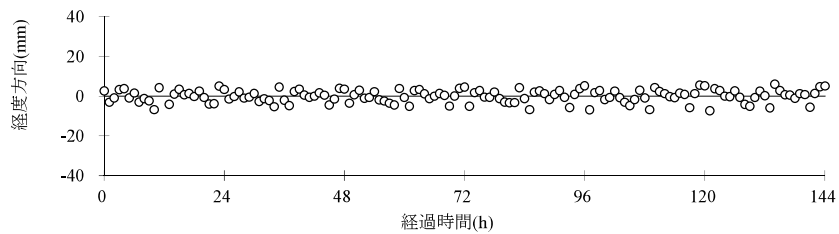


(c)高さ方向

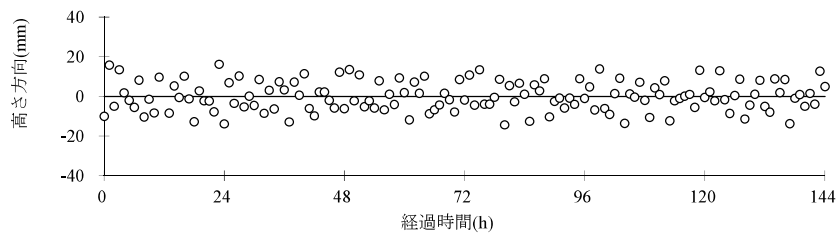
図-4.4 蓋材質の影響確認実験結果(蓋なし)



(a)緯度方向



(b)経度方向



(c)高さ方向

図-4.5 蓋材質の影響確認実験結果(FRP製蓋, クリアランス 10mm, 屋上実験)

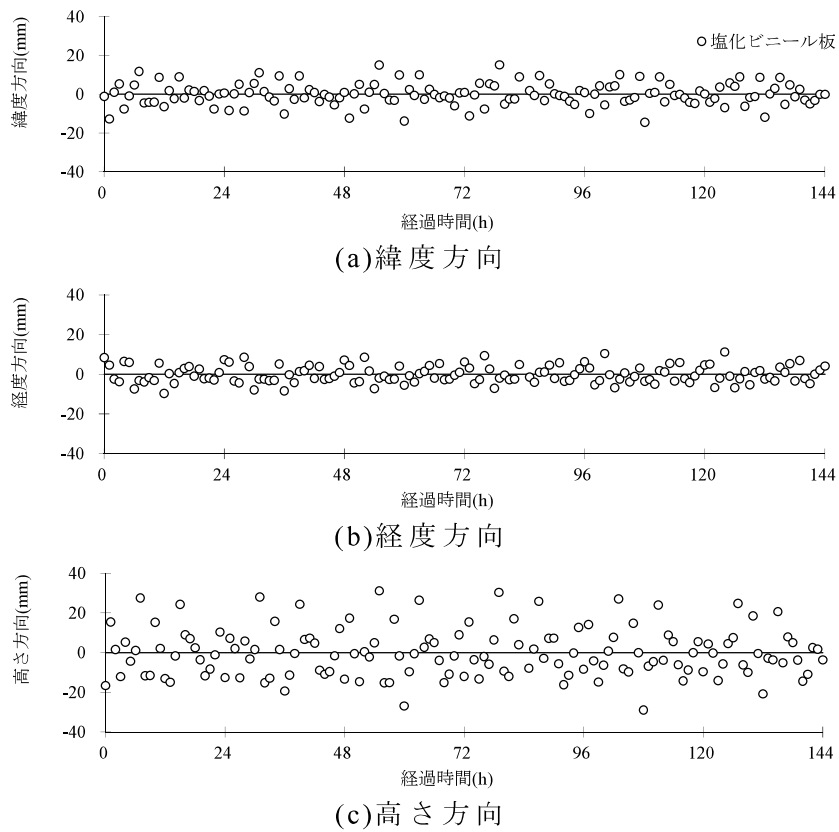


図-4.6 蓋材質の影響確認実験結果  
(塩化ビニール板, クリアランス 10mm, 屋上実験)

表-4.2 マンホール蓋の種類に対する変位計測結果の標準偏差(屋上実験)

計測点	計測値の標準偏差 (mm)		
	NS 方向	EW 方向	UD 方向
蓋なし	2.0	1.6	4.0
FRP 製蓋	4.6	3.1	7.4
塩化ビニール板	5.7	4.3	12.2

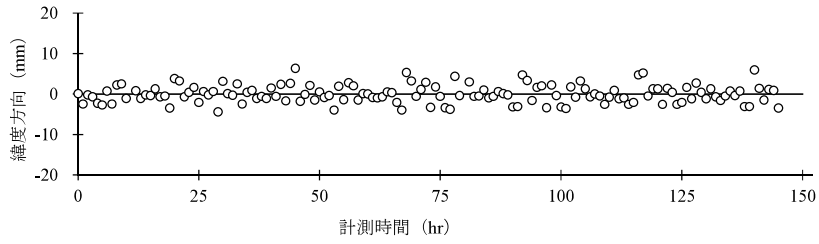
#### 4.3.2 GPS アンテナ設置深さの影響

マンホール内に GPS アンテナを設置する場合、設置深さとマンホールの縁の位置の関係から、電波を受信できる上空の範囲が限られる。さらに、マンホール壁や地表から反射される電波を受信するマルチパスが懸念される。いずれも計測精度に影響を与える要因である。

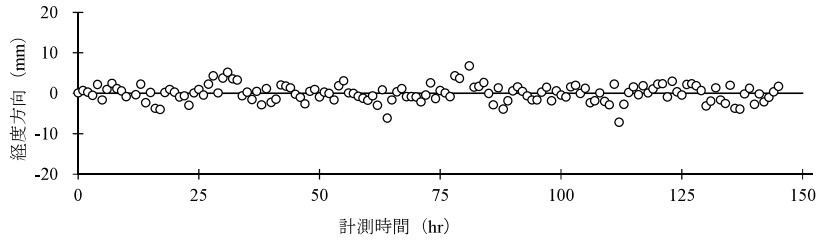
そこで、FRP 製蓋を用いた場合において、マンホール内の GPS アンテナの設置深さが計測結果に与える影響について検討する。実験は、FRP 製蓋と GPS アンテナのクリアランスを 15mm および 50mm とし、ダムサイト(大保ダム、内閣府沖縄総合事務局)付近に実験用に掘削したマンホールで実施した。

GPS アンテナと FRP 製蓋のクリアランスが 15mm の計測結果を図-4.7 に、クリアランスが 50mm の計測結果を図-4.8 示す。

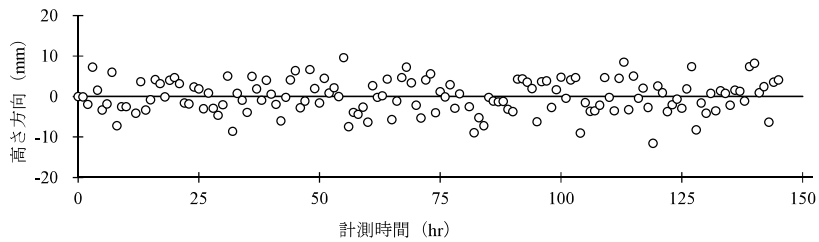
また、計測結果の標準偏差を表-4.3 に示す。なお、電波の受信最低仰角は 15 度としている。実験結果からクリアランスが 15mm の場合、標準偏差は蓋がない場合と比べて 2 倍程度である。実験場所と条件が異なるため若干の差はあるが、4.3(1)に示したクリアランスが 10mm の場合とほぼ同じ傾向である。また、クリアランスが 50mm の場合は、蓋のない場合の 3 倍程度となるだけでなく、基線解析によって変位が求まらない率(欠測率)が 10%を超える。クリアランスが 10mm および 15mm の場合の欠測率が 1.0%前後であることと比較すると、クリアランスが大きすぎると標準偏差だけでなく、欠測率も大きくなる。アンテナをマンホール内に設置する場合、設置位置が深いほど図-4.9 に示すように電波を受信できる下限仰角が大きくなり、受信衛星数と受信時間の制約およびマルチパスの可能性も大きくなる。このことから、精度の悪化、さらには基線解析の結果が得られず、欠測する率が大きくなると考えられる。



(a)緯度方向

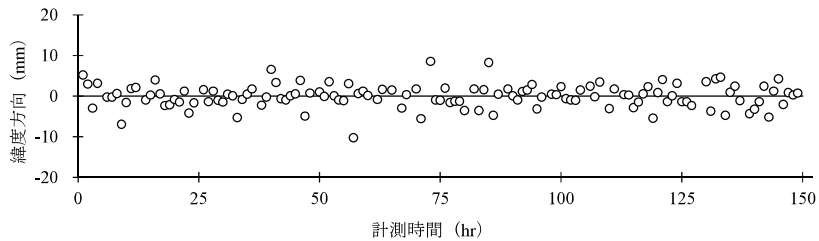


(b)経度方向

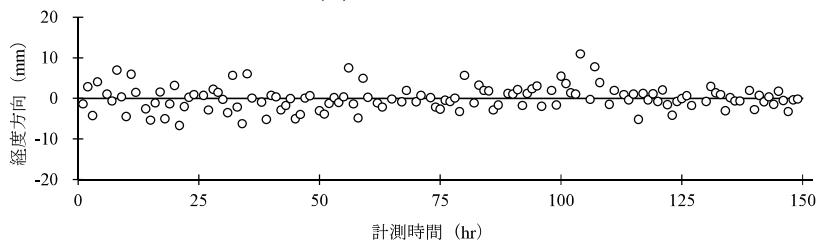


(c)高さ方向

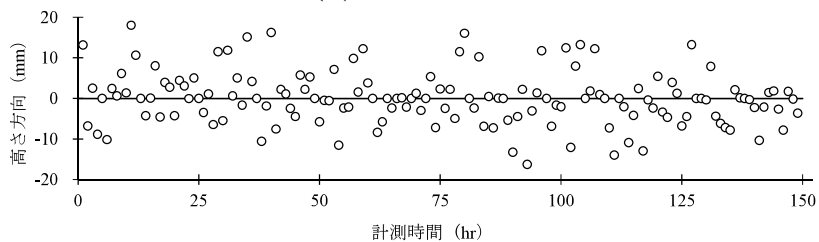
図-4.7 GPS アンテナ設置深さ確認実験結果  
(クリアランス 15mm, FRP 製蓋, ダムサイト実験)



(a)緯度方向



(b)経度方向



(c)高さ方向

図-4.8 GPS アンテナ設置深さ確認実験結果  
(クリアランス 50mm, FRP 製蓋, ダムサイト実験)



表-4.3 マンホール蓋とアンテナのクリアランスに対する  
変位計測結果の標準偏差(ダムサイト実験)

GPS	クリアランス	仰角	計測値の標準偏差(mm)			欠測率
			NS 方向	EW 方向	UD 方向	
FRP 製蓋	15mm	15°	2.2	2.1	4.1	1.4%
	50mm	20°	2.8	3.0	7.0	12.8%
蓋なし		15°	1.0	0.8	2.3	0%

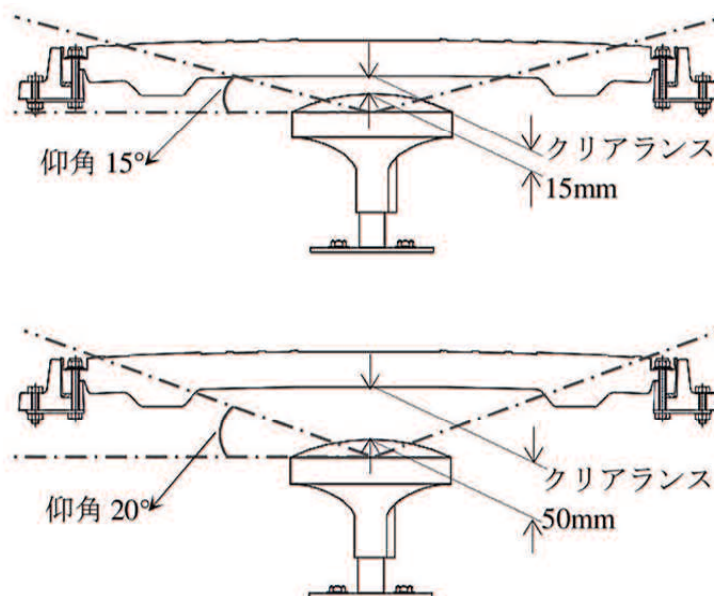


図-4.9 クリアランスと仰角の関係

以上の実験結果から、マンホール内にアンテナを設置して変位を計測するには、FRP製の蓋を用いること、また蓋とアンテナとのクリアランスは10～15mm程度とすることとした。

### 4.3.3 積雪の影響

雪は電気導電性があるため、GPSアンテナ上に積雪すると電波の受信に影響を与える<sup>6)</sup>。そのため、積雪地帯に築堤されたダムの冬季の外部変位計測においては、マンホール上の積雪が計測に影響を与えることが考えられる。そこで、積雪地帯に築堤されたロックフィルダムにおいて、GPSアンテナをロックフィルダム堤体天端のマンホールに設置し、積雪時における計測精度を調査した。

実験は、図-4.10 および図-4.11 に示すように、FRP製蓋上に雪のブロックを重ねて置き積雪を模擬する。なお、雪のブロックは周辺積雪の比重を測定して、その値(比重0.40)となるよう作成した。雪の厚さは10mm～200mmまでの6通りとし、ひとつの雪厚につき約6時間の連続計測を実施した。

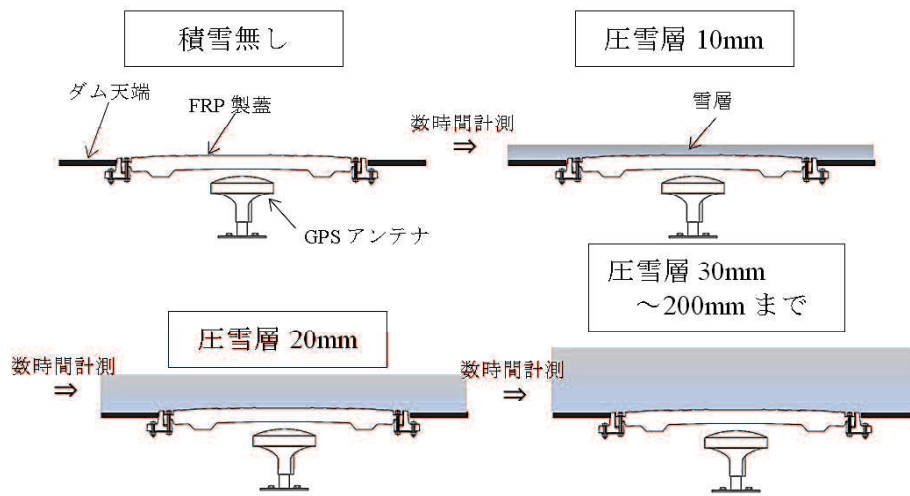
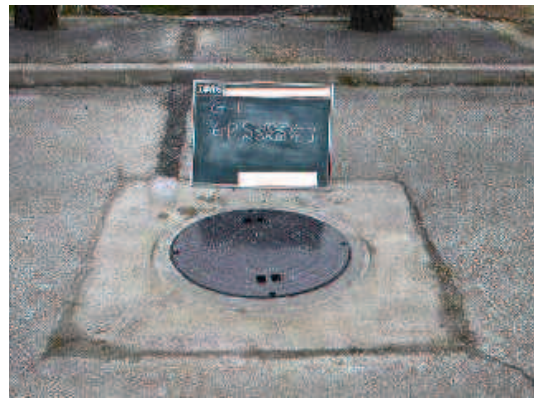


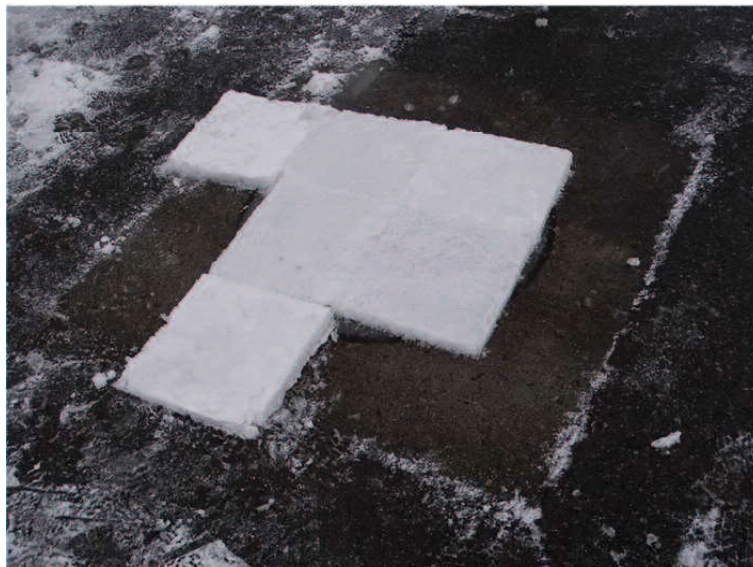
図-4.10 積雪実験の模式図



(a)マンホール内のGPSアンテナ



(b)FRP製マンホール蓋



(c)マンホール上の圧雪設置状況

図-4.11 実験の状況

雪厚を変化させた際の緯度方向，経度方向，高さ方向のそれぞれの計測値を図-4.12に示す．また，積雪深と計測値の関係を図-4.13に示す．図から，雪厚の増加にしたがって，高さ方向の計測値が，水平方向(ダム上下流・ダム軸方向)の計測値と比べ，大きく変動していることがわかる．

また，図-4.13に示されるように，雪厚が増加するにしたがって，計測値のばらつきが多くなる．雪厚ごとの計測結果の平均値および標準偏差を表-4.4に示す．標準偏差については，雪厚が増すにつれ大きくなり，積雪に伴い計測値のばらつきが大きくなることが予測される．一方，計測値の平均値は，実験中計測点は不動であるので，本来は0となるべきであるが，雪厚が20mmを越えると0からシフトし始める．雪厚30mmからは，特に高さ方向の平均値が20mmを越え，計測値に大きな偏差が生まれ正確な計測ができないことが予測される．

したがって，GPSアンテナをダム天端のマンホール内に設置した場合，マンホール上の雪厚が10mmを超える場合は除雪する必要がある．

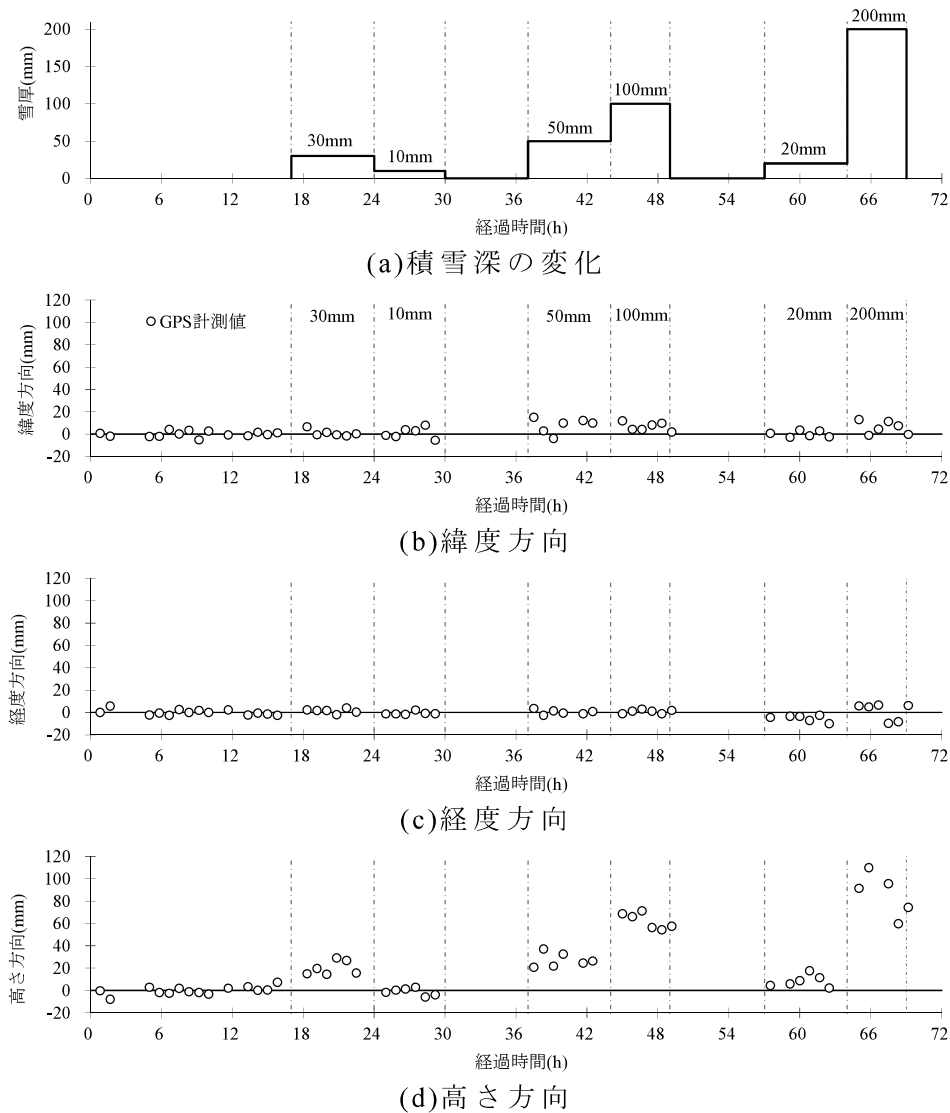


図-4.12 積雪の影響確認実験結果

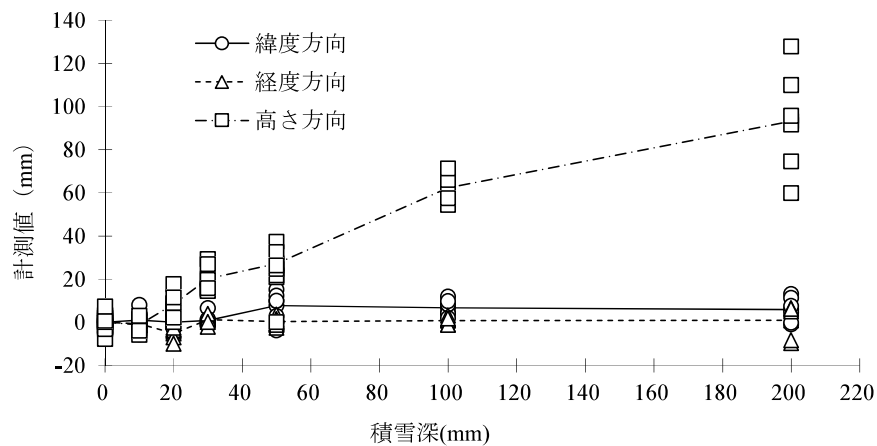


図-4.13 積雪深と計測値の関係

表-4.4 計測結果の標準偏差

マンホール上の 雪厚(mm)	計測値の平均(mm)			計測値の標準偏差(mm)		
	NS 方向	EW 方向	UD 方向	NS 方向	EW 方向	UD 方向
0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.4	3.6
10	1.0	-0.7	-1.1	4.9	1.4	3.3
20	0.1	-5.2	8.4	2.8	2.8	5.6
30	0.9	1.2	20.2	3.0	2.0	6.4
50	7.7	0.3	27.2	6.9	2.2	6.4
100	6.7	0.8	62.4	3.8	1.7	7.2
200	5.8	0.9	93.2	5.8	7.7	24.3



#### 4.4 現場への適用

4.3 の実験結果に基づき，ダム天端堤体のマンホール内に設置する GPS アンテナの現場での適用性を検証する．

##### 4.4.1 適用事例 1(大保ダム)

###### a) 大保ダムの概要

大保川水系大保ダムは，本ダム(堤高 77.5m，重力式コンクリートダム)と脇ダム(堤高 66.0m，中央土質遮水壁型ロックフィルダム)からなり，脇ダムに GPS 変位計測システムを導入している．大保脇ダムの平面図を図-4.14 に示す．大保脇ダムは当初，従来の測量による変位計測を行う設計であったが，建設と平行して実施していた GPS による変位計測の基礎実験でその有効性が確認できたため<sup>7)</sup>，外部変位計測に GPS 変位計測システムを導入した．GPS アンテナは基準点 2 箇所および測量用可動標的 22 箇所の計 24 箇所設置している．その内，天端には測量用標的が設置されている 8 箇所のマンホール内に，FRP 蓋とのクリアランスが 10～15mm となるように GPS アンテナを設置した．天端に設置した GPS アンテナの設置構造を図-4.15 に示す．変位の算出は，4.3 で行った実験と同様に，人工衛星からの電波の位相観測間隔(エポック)を 30 秒とし，1 時間の連続計測データに基づくスタティック測位によって 1 時間毎に計測点の座標値を求め，座標値の推移から変位を得ている．

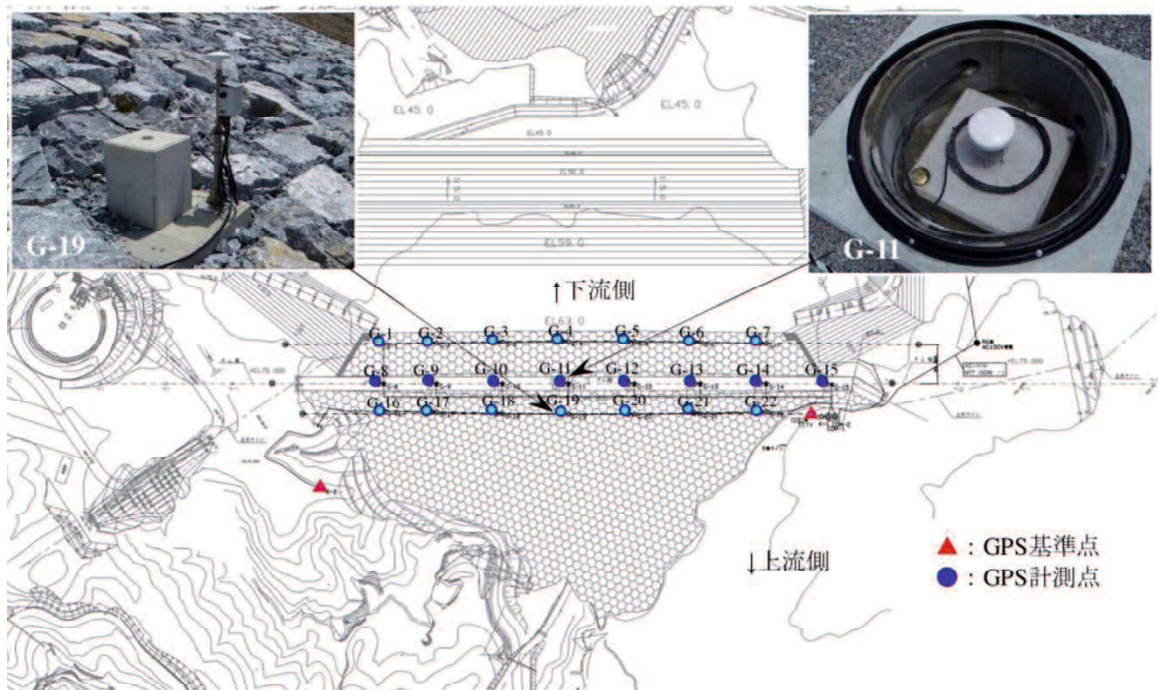


図-4.14 大保脇ダム平面図

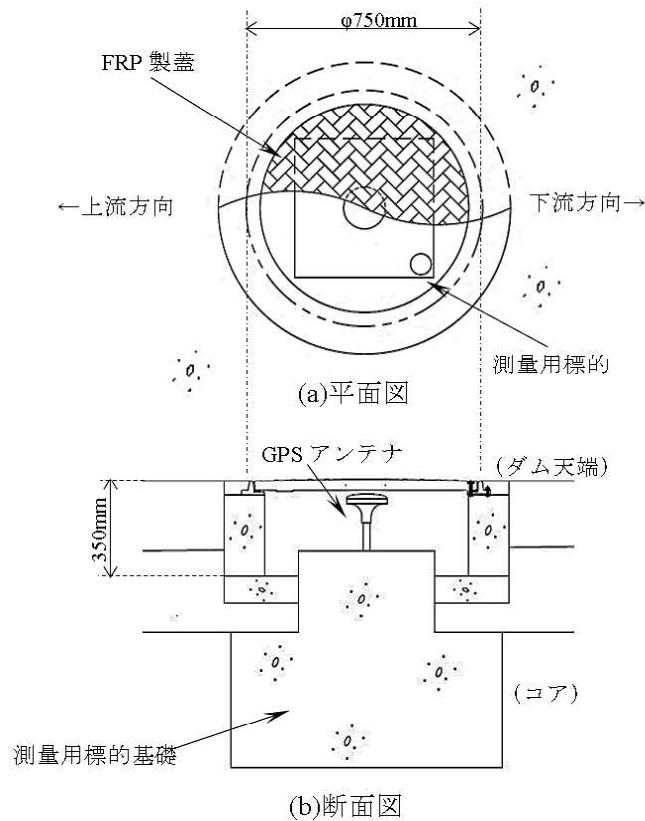
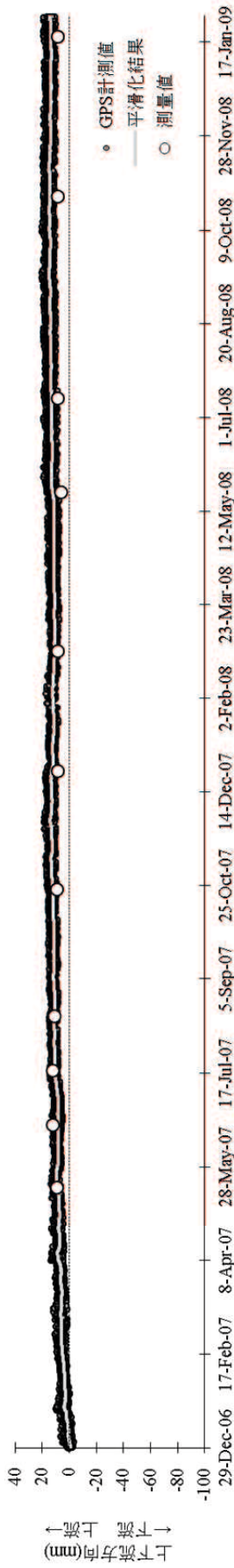


図-4.15 天端に設置した GPS アンテナの設置構造

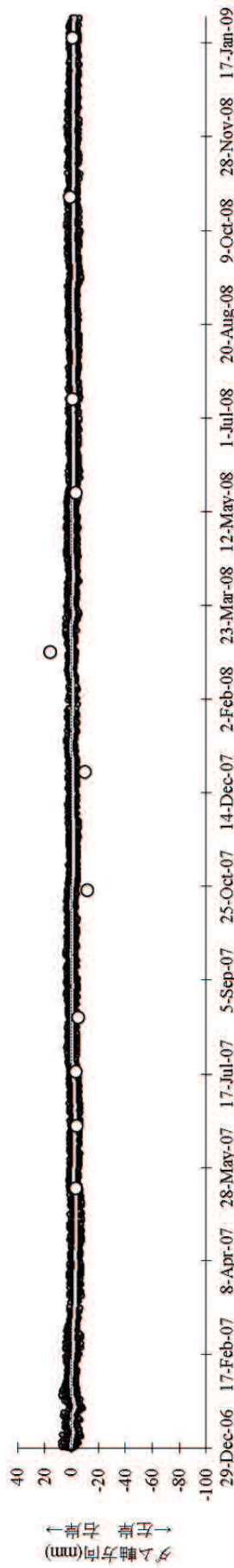
## b) 計測結果

ダム天端マンホール内に設置した GPS アンテナによる計測結果の一例として、ダム軸中心の G-11 地点の計測結果を図-4.16 に示す。また、その結果と比較するために、ダム軸上流側法面上に設置した G-19 地点の計測結果を図-4.17 に示す。

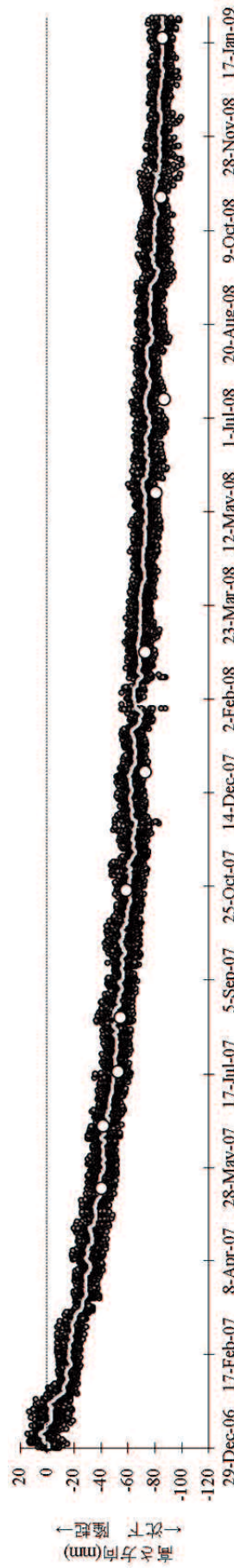
計測結果は、それぞれ図の上から順にダム上下流方向、ダム軸方向、高さ方向を示している。図中の黒点が基線解析による GPS 計測の結果、実線の平滑化結果は GPS の基線解析結果に対しトレンドモデル<sup>8),9)</sup>を適用して得た真の変位の推定値である。参考として、従来の測量結果(水平方向には光波測量、高さ方向に対しては水準測量で精密に測量した結果)を白抜き点で示している。GPS と従来測量による結果を比較すると、一部の測量結果のばらつきが大きい箇所を除いて、両者はおおむね数 mm 程度の差の範囲で変位の推移傾向は一致しており、GPS 計測値のトレンド解析後の平滑結果は連続的に安定した計測結果を与えている。



(a)ダム上下流方向

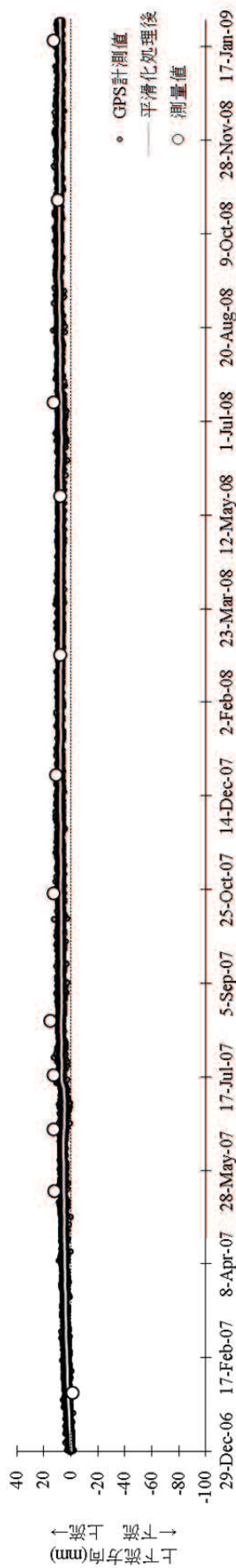


(b)ダム軸方向

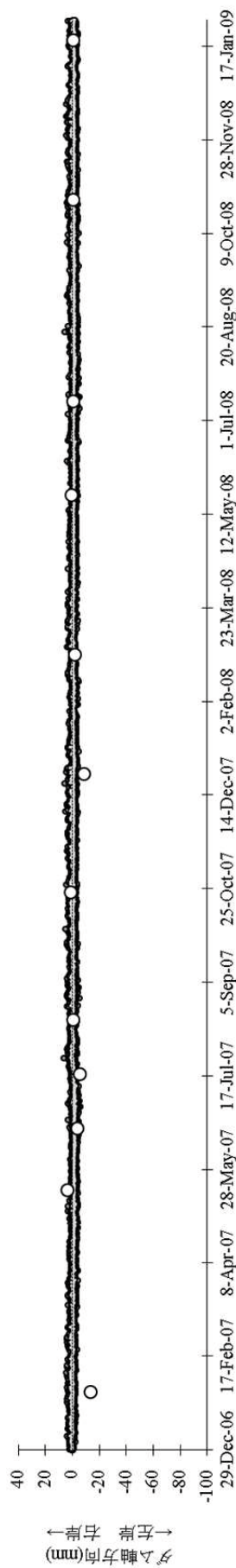


(c)高さ方向

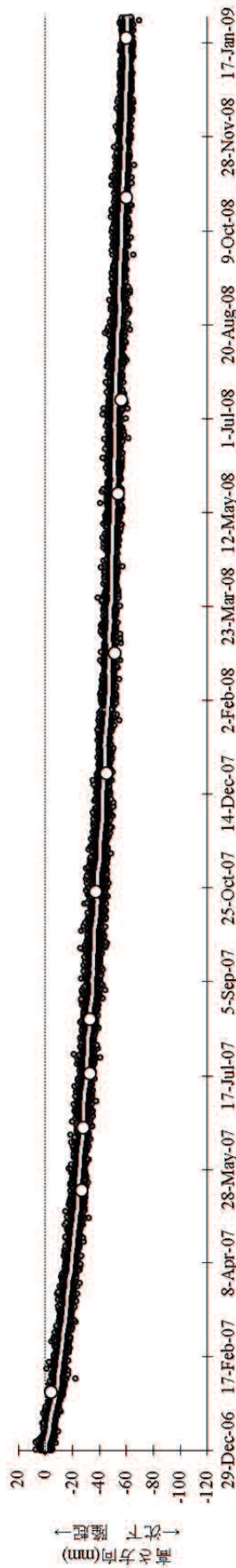
図4.16 大保協ダム計測結果(G-11)



(a)ダム上下流方向



(b)ダム軸方向



(c)高さ方向

図-4.17 大保脇ダム計測結果(G-19)



GPSによる変位計測結果の標準偏差を表-4.5に示す。これらの標準偏差は、トレンドモデル<sup>8),9)</sup>によって推定した値である。ダム天端のマンホール内に設置したG-11地点における計測値の標準偏差は、ダム上下流方向に対して1.8mm、ダム軸方向に対して1.9mm、高さ方向に対して4.8mmであり、図-4.14に示すダム上流側法面上に設置したG-19における計測値の標準偏差は、上下流方向に対して0.9mm、ダム軸方向に対して0.9mm、高さ方向に対して2.4mmである。4.3(1)、(2)の実験と同様、マンホール内に設置したアンテナの標準偏差は、地表に設置したアンテナの標準偏差と比べ約2倍の大きさとなるが、図-4.17から分かるように、GPSによる変位計測結果は、従来の光波測距儀やレベル等で実施される測量結果とほぼ同様な結果を得られる。

以上のことから、現場における長期計測においても、ダムの外部変位計測に十分適用できると考えられる。

表-4.5 計測結果の標準偏差

計測点	計測値の標準偏差 (mm)		
	上下流方向	ダム軸方向	高さ方向
G-11(マンホール)	1.8	1.9	4.8
G-19	0.9	0.9	2.4

#### 4.4.2 適用事例2(白川ダム)

##### a) 白川ダムの概要

積雪地帯に築堤された最上川水系白川ダム(堤高66.0m、中央土質遮水壁型ロックフィルダム)は、巡視等の安全管理のため、冬季に積雪した際には天端の除雪を実施している。そのため、白川ダムにおいて除雪車などによる現実的に対応可能な除雪作業を行いながら、冬季に適切なGPS計測データがどの程度取得できるかについて検証した。

GPSアンテナは、ダム堤体中央付近の天端にあるマンホール(図-4.18 G-1参照)内に設置した。なお、アンテナとFRP蓋とのクリアランスは10~15mmである。GPSアンテナの設置構造を図-4.19に示す。変位の算出は、大保ダムと同様に、人工衛星からの電波の位相観測間隔(エポック)を30秒とし、1時間の連続計測データに基づくスタティック測位によって計測点の座標値を求め、座標値の推移から1時間毎に変位を得る。

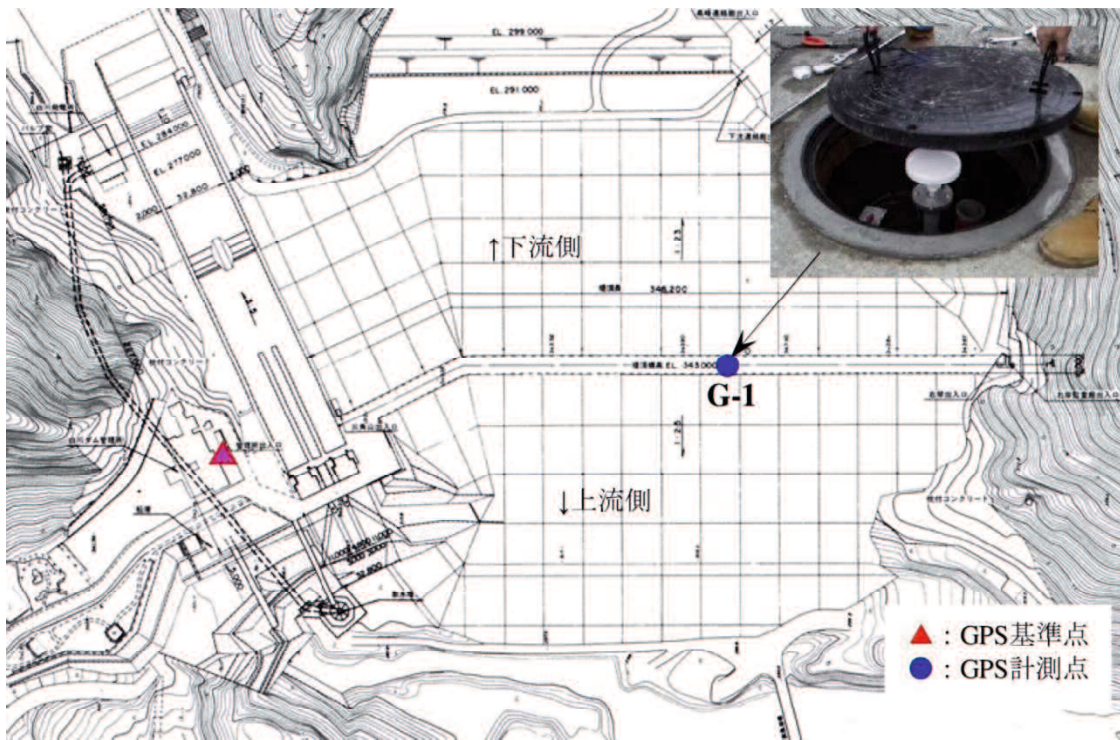


図-4.18 GPS アンテナ設置位置

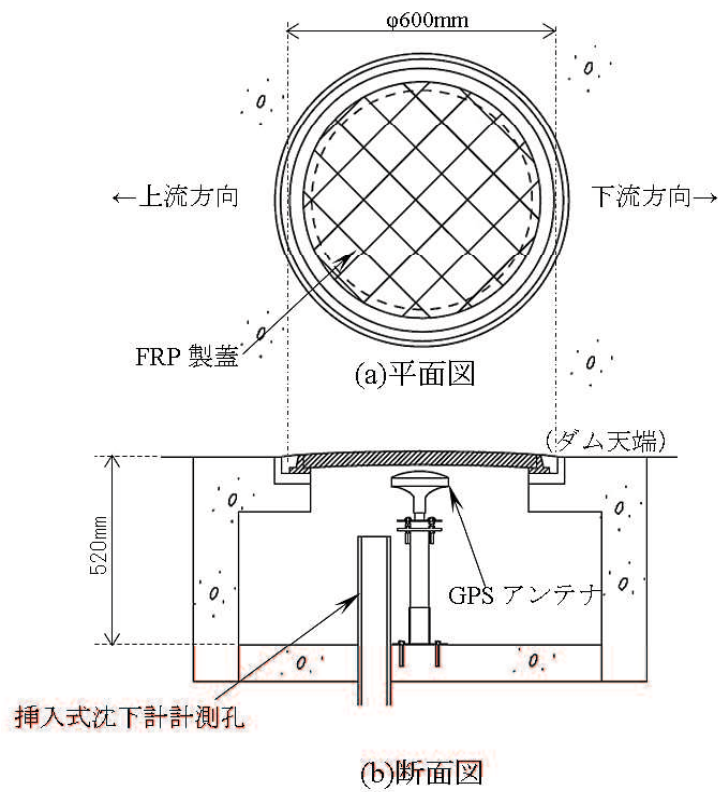


図-4.19 天端に設置した GPS アンテナの設置構造

## b) 計測結果

計測結果の例として、堤体天端のマンホール内に設置した G-1 の積雪期間中の 1 月から積雪のない 5 月末にかけての計測結果を図-4.20 に示す。図は、上からダム上下流方向、ダム軸方向、高さ方向、GPS アンテナを設置しているマンホール上の積雪深の計測結果を示している。

除雪は、図-4.20(d)中において矢印で示したタイミングでロータリータイプの除雪車を用いて行い、除雪車通過後に、箒でマンホール上を完全除雪した。

図中の黒点は基線解析による GPS 計測の結果である。また、図中の×印は積雪期間中(積雪が始まってから除雪までの期間)の計測結果を示している。実線は、積雪の期間を除いた期間における GPS 計測値に対してトレンドモデル<sup>8),9)</sup>を適用した結果である。

4.3(3)の実験の結果に基づき除雪を実施した場合は、計測結果に大きな乱れもなく計測が継続できたが、現場の諸条件により除雪が遅れ積雪深が 20mm を越えると、特に、図-4.20(c)に示すように、高さ方向の計測結果に大きな影響を与える。たとえば、路面の積雪深が 10cm を越えると高さ方向に 20～80mm の変動が生じたことが図-4.20(c)および図-4.20(d)から分かる。

計測結果の標準偏差を表-4.6 に示す。白川ダムは築堤後 30 年以上経過し、年間の沈下量はほとんど計測されていない。そのため計測期間中のダムの変位量をゼロとして GPS 計測結果の標準偏差の算出を行った。高さ方向変位の標準偏差に着目すると、冬季の 1/15～3/22 のうち、図-4.20 において×で示されている積雪のあった延べ 23 日間では 23.3mm、冬季の 1/15～3/22 のうち、積雪の影響の無い延べ 43 日間では 5.6mm、その後の雪が降らない夏季では 6.5mm となった。

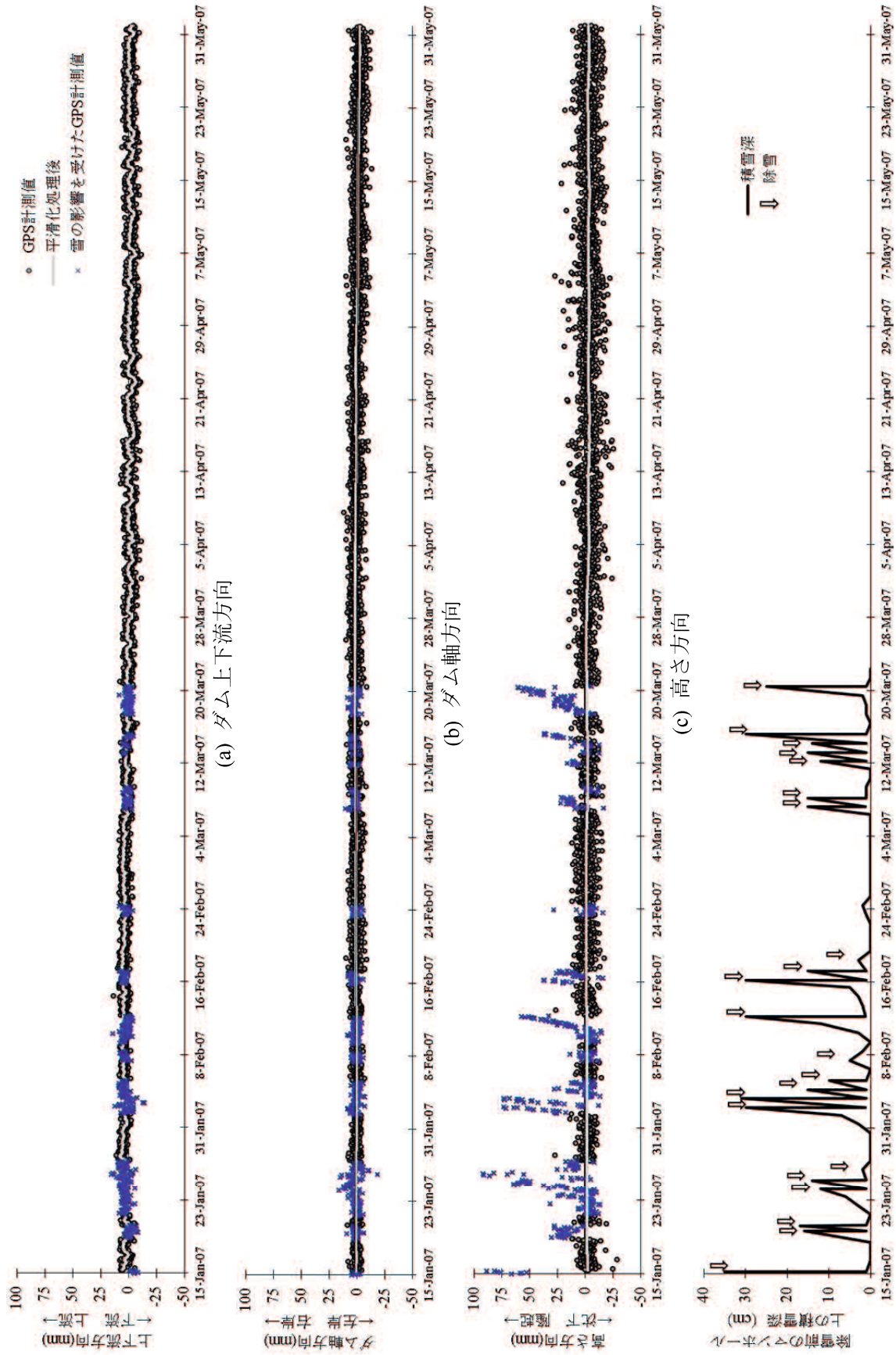


図-4.20 白川ダム冬季計測結果(G-1)

表-4.6 計測結果の標準偏差

計測期間	計測値の標準偏差(mm)		
	上下流 方向	ダム軸 方向	高さ 方向
1/15～3/22のうち，図-4.20において×で示されている積雪時の延べ23日間	3.7	3.4	23.3
1/15～3/22のうち，積雪の影響の無い延べ43日間	2.8	2.9	5.6
3/23～5/31の積雪の無い70日間	3.1	3.6	6.5

以上のように，適切に除雪すれば積雪のある冬季においてもマンホール内のGPSアンテナによって連続した変位計測が実施できることが示された．今後は，継続した計測ができるよう，除雪のタイミングと方法について検討することが課題である．

#### 4.5 まとめ

第4章では，ロックフィルダムのコアの変位を正確に計測することを目的に，GPSアンテナをダム天端堤体内に設置する新しい方法を提案した．ロックフィルダム天端堤体内部にGPSを設置するにあたって，マンホール蓋の材質，蓋とアンテナのクリアランス，積雪時の影響について基礎実験を実施し計測精度に及ぼす影響を明らかにした．さらに実際のダムで現地計測を行い，適用性を検証した．本章で得られた成果を以下にまとめる．

- (1) 天端マンホール蓋の材質をFRP製にすることにより，GPSアンテナをロックフィルダム天端のマンホール内に設置しても，実用的な計測精度が確保され，コア位置における変位計測ができることが明らかとなった．
- (2) 実ダムでの連続計測により，マンホール内に設置したGPSアンテナによる変位計測は，従来の地表で行うGPS変位計測と比べると標準偏差は2倍程度大きいものの，ダムの外部変位計測に十分適用できることが示された．
- (3) 積雪地帯における運用時には，適切に除雪を実施すれば，冬季の積雪時においてもマンホール内のGPSアンテナによって連続した変位計測が実施できることが示された．しかし，除雪のタイミングと方法についてさらに検討する必要がある．

#### 【第4章の参考文献】

- 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，pp.120-136，2005.
- 2) Yamaguchi, Y., Kobori, T., Yoshida, H., Sakamoto, T., Itaya, H. and Iwasaki, T.: Real-Time Monitoring of Exteri-or Deformation of Embankment Dams Using GPS, 23rd ICOLD Congress, Q.91-R.1, 2009.
- 3) 中島伸一郎，川崎秀明，久保田昇助，中野太郎，清水則一：GPS変位計測システムによる試験湛水時のフィルダム外部変位計測事例，土木学会論文集 F3(土木情報学)，Vol.68，No.1，pp.1-12，2012.
- 4) 岩崎智治，原口勝利，佐藤渉，増成友宏，内田純二，清水則一：GPSを用いた自動変位監視のためのWebシステムの開発，日本地すべり学会誌，Vol.49，No.4，pp.174-185，2012.
- 5) 国土交通省 道路局：道路橋示方書 I 共通編，pp.6-7，2012.
- 6) 中里裕臣，鈴木尚登，寺田剛：多雪地域におけるGPS移動量観測用二重管式支柱の提案と適用，農村工学研究所技報，第214号，pp.1-7，2013.
- 7) 小堀俊秀，山口嘉一，岩崎智治，中島伸一郎，清水則一：フィルダム天端提体内部に設置するGPSアンテナの変位計測性能実験とダム外部変形計測の適用性，土木学会論文集 F3(土木情報学)，Vol.70，No.1，pp.18-28，2014.
- 8) 北川源四郎：時系列プログラミング，岩波書店，1993.
- 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.

## 第 5 章 GPS 変位計測システムを用いた

### ロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測

#### 5.1 はじめに

地震が発生した際、河川法の下で管理されている河川区域内にあるダムでは、第 2 章で述べたようにダム管理者が地震発生後のダムの臨時点検<sup>1)</sup>を実施することが義務付けられている。地震直後のダムの臨時点検は、主に目視により外観を点検する一次点検と、詳細な外観点検と計測値の確認による二次点検からなる。

本章では、GPS 変位計測システムを用いた地震時における計測の即応性および地震後の堤体の変位計測について考察し、地震時変位計測の有効性を検証する。

#### 5.2 GPS 変位計測システム導入の経緯

2008 年 6 月 14 日岩手・宮城内陸地震(Mj7.2, Mj: 気象庁マグニチュード)が発生した。震源から直線で 9.4km の地点にある北上川水系石淵ダムでは、ダム天端に設置された地震計で最大加速度 1461gal(上下流方向)および 2070gal(鉛直方向)を記録した。被害として、天端舗装の波打ちや亀裂、天端舗装と高欄との境界の開きが生じ、堤体の天端や高標高部の下流側斜面には大塊であるロック材料の張り出しが認められたが、上流側の遮水壁には目立った損傷は見あたらなかった(被害の詳細については、2.3.2 地震時等の非常時の計測の要求性能を参照)<sup>2)</sup>。堤体下流部で観測している河床部漏水量については、地震後に大幅に急増したものの、同程度の貯水位に対する初期湛水時の漏水量を上回っておらず、その後は貯水位に応じた変動を示した。以上より、本ダムは安全性を保っていると判断された。しかし、より安全性を期するために、堤体の外部変位を注意深くモニタリングするものとし、自動連続で変位を計測することが可能な GPS 変位計測システムを導入することとした。

#### 5.3 GPS 変位計測システムの概要と設置位置

石淵ダムの外部変位計測に使用した GPS 変位計測システムの構成を図-5.1 に示す。GPS 変位計測システムは GPS センサー(1 周波(L1 波)用のアンテナユニットと受信データの通信制御を行う制御ユニット)と通信集約ユニットで構成される。センサーおよび通信集約ユニットはケーブルで接続し、データの送受と電力供給を



行う<sup>3)</sup>。石淵ダムでは、人工衛星からの電波の位相観測間隔(エポック)を30秒とし、1時間の連続計測データに基づくスタティック測位<sup>4)</sup>によって1時間毎に計測点の座標値を求め、座標値の推移から変位を得ている。石淵ダムにおいても、トレンドモデル<sup>5)</sup>による平滑化処理を行い高精度の計測を実施している。

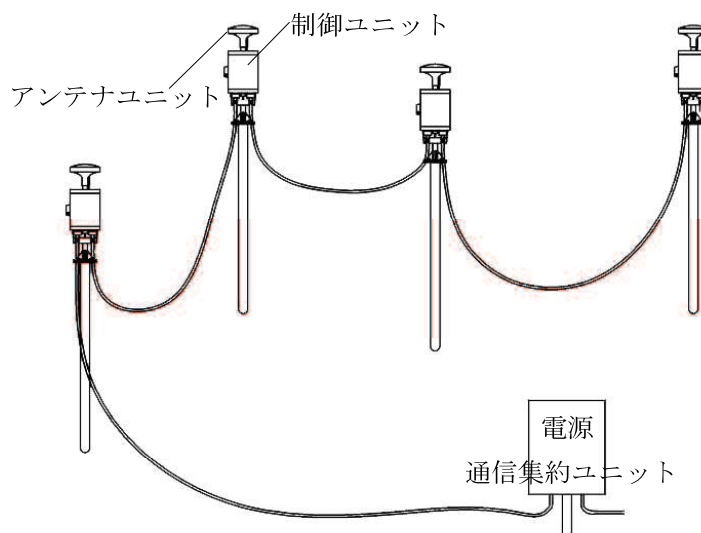
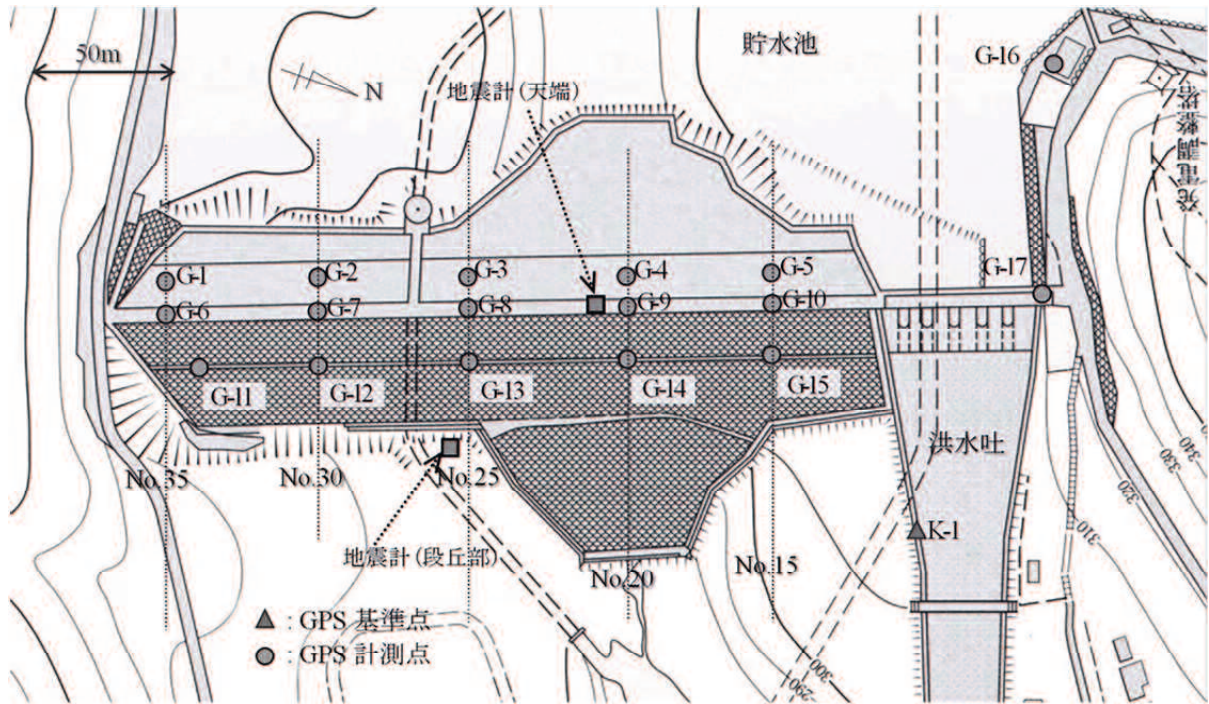


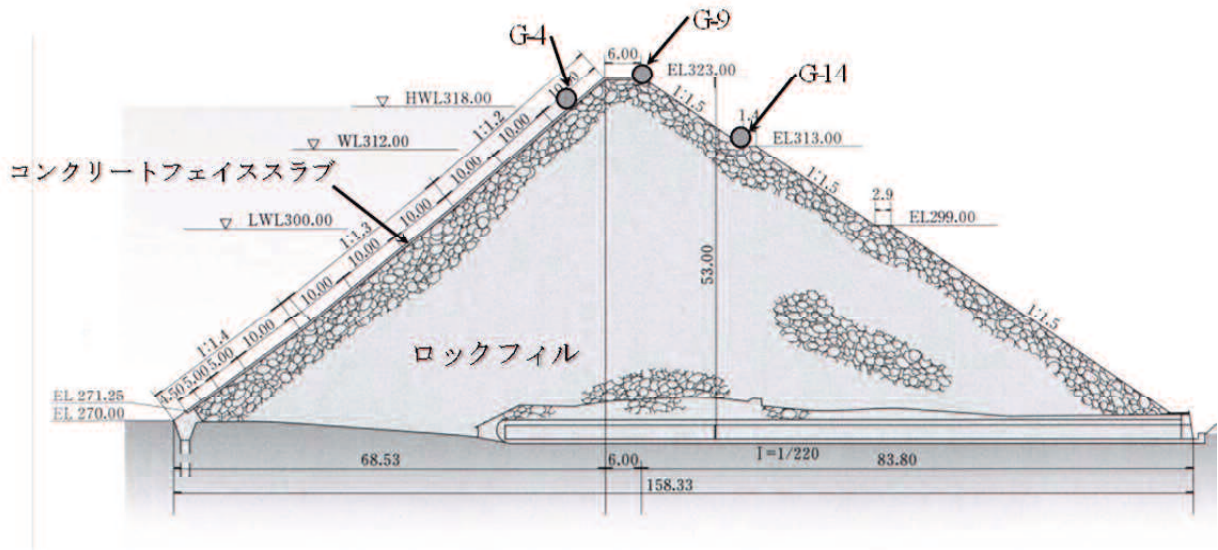
図-5.1 GPS 計測システム<sup>3)</sup>

石淵ダムの、GPS センサーは、図-5.2(a)の平面図に示すように、堤体上流面のコンクリート遮水壁上に5箇所(G-1~G5)、ダム天端に5箇所(G-6~G10)、ダム下流面に5箇所(G-11~G-15)、堤体左岸の艇庫屋上(G-16)、ならびに、洪水吐きピア上(G-17)の17ヶ所に配置し、さらに、基準点(K-1)をダム左岸下流の洪水吐導流壁に設置した。計測は、岩手・宮城内陸地震発生から12日後の2008年6月26日に開始した。

ダム上下流の法面に設置したGPSセンサーの設置詳細および設置状況の一例を、それぞれ、図-5.3および写真-5.1、写真-5.2に示す。GPSセンサーはコンクリート遮水壁やロック材料の上にアンカーボルトで固定し、基礎部をモルタルで固定した。



(a) 平面図



(b) 断面図 (No.20 測線)

図-5.2 石淵ダムの平面図と縦断面図および GPS センサーの配置

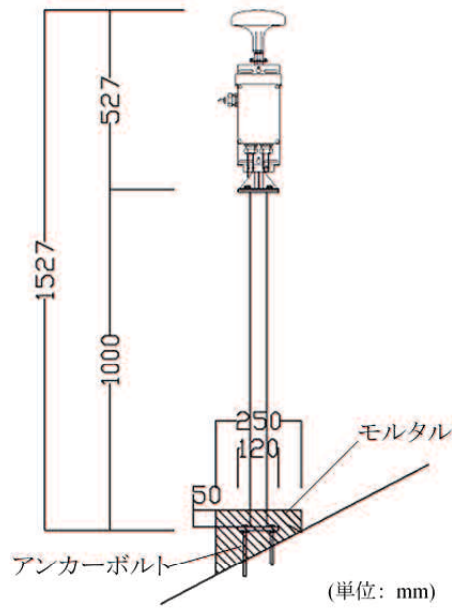


図-5.3 法面部における GPS センサーの設置詳細



写真-5.1 ダム上流面のコンクリート遮水壁に設置した GPS センサー



写真-5.2 ダム下流面ロック部に設置した GPS センサー

#### 5.4 地震時の即応性の評価<sup>6),7)</sup>

本節では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(Mw9.0, Mw:モーメントマグニチュード)時のGPS変位計測システムを用いたダム堤体の挙動計測結果により地震時の即応性を評価する。

##### 5.4.1 計測結果の概要

計測結果の例として、図-5.2(b)に示すダムの最大断面であるNo.20測線の計測点G-4, G-9およびG-14の三次元変位の推移を図-5.4に示す。図-5.4には、スタ

ティック測位で得られた結果にトレンドモデル<sup>5)</sup>を適用し平滑化した結果を変位計測値として示す。図-5.4には、ダム上下流方向、ダム軸方向および高さ方向のそれぞれ変位計測結果を示している。

計測は、2008年6月26日から開始した。ダム天端のG-9は、岩手・宮城内陸地震後により天端の変状が大きく天端上に直接GPSセンサーを設置することができなかつたため、当初は天端の下流側に設置した。その後、天端の補修が終了したため、2008年12月19日に天端上に移設した。本論文では、移設後のデータは移設前からの連続な変位として整理を行った。なお、G-14の計測結果のうち、冬季はGPSセンサーおよびその周辺の積雪のため、電波の受信が困難、あるいは、不能となり計測値を得ることができなかつたため欠測としている。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以下本震)では、右岸段丘部にある地震計で最大184galを記録した。石淵ダムは震央から216kmに位置する。また、4月7日に発生した最大余震では、同箇所にある地震計で最大140galの揺れを記録した。なお、石淵ダムにはダム天端、右岸段丘部および基礎部(排水隧道)の3箇所に地震計が設置されている。基礎部の地震計は、岩手・宮城内陸地震の時に故障し、その後排水隧道入り口が閉塞し修理することができず欠測となっている。なお、右岸段丘部の地震記録は地震計の設置土台となっている岩石の局所的な振動も含んだものである。

図中の点線は本震(3月11日 14:46)、一点鎖線は最大余震(4月7日 23:32)の発生時刻である。図-5.4からダム天端のG-9では本震時に下流方向へ約11mm、右岸方向へ約3mmの変位があり、さらに、約11mmの沈下が生じている。また、最大余震時には、約2mmの下流方向変位と沈下がそれぞれあり、左右岸方向の変位はほぼ0であった。

他の計測点においても、本震・余震発生に伴い、ほぼ同様に下流方向および沈下方向の変位が発生している。最大余震後には突発的あるいは継続的な顕著な変位は見られず、地震前の変位傾向と同様な傾向となったため、地震による堤体の変位は概ね収束したものと考えられた。

石淵ダムは地震後、天端高欄基礎にクラックが確認されたものの、詳細調査の結果、上流の表面遮水壁に損傷が認められないことから、変位計測結果とあわせてダムの安全性に問題は生じていないものと判断された<sup>8)</sup>。

なお、岩手・宮城内陸地震では天端舗装の波打ちや亀裂、天端舗装と高欄との境界の開きが生じたが、これに対し東北地方太平洋沖地震では、最大加速度が岩手・宮城内陸地震時と比べて小さいこともあり、上に述べた天端高欄基礎の一部にクラックが発生した程度の軽微なものであった。



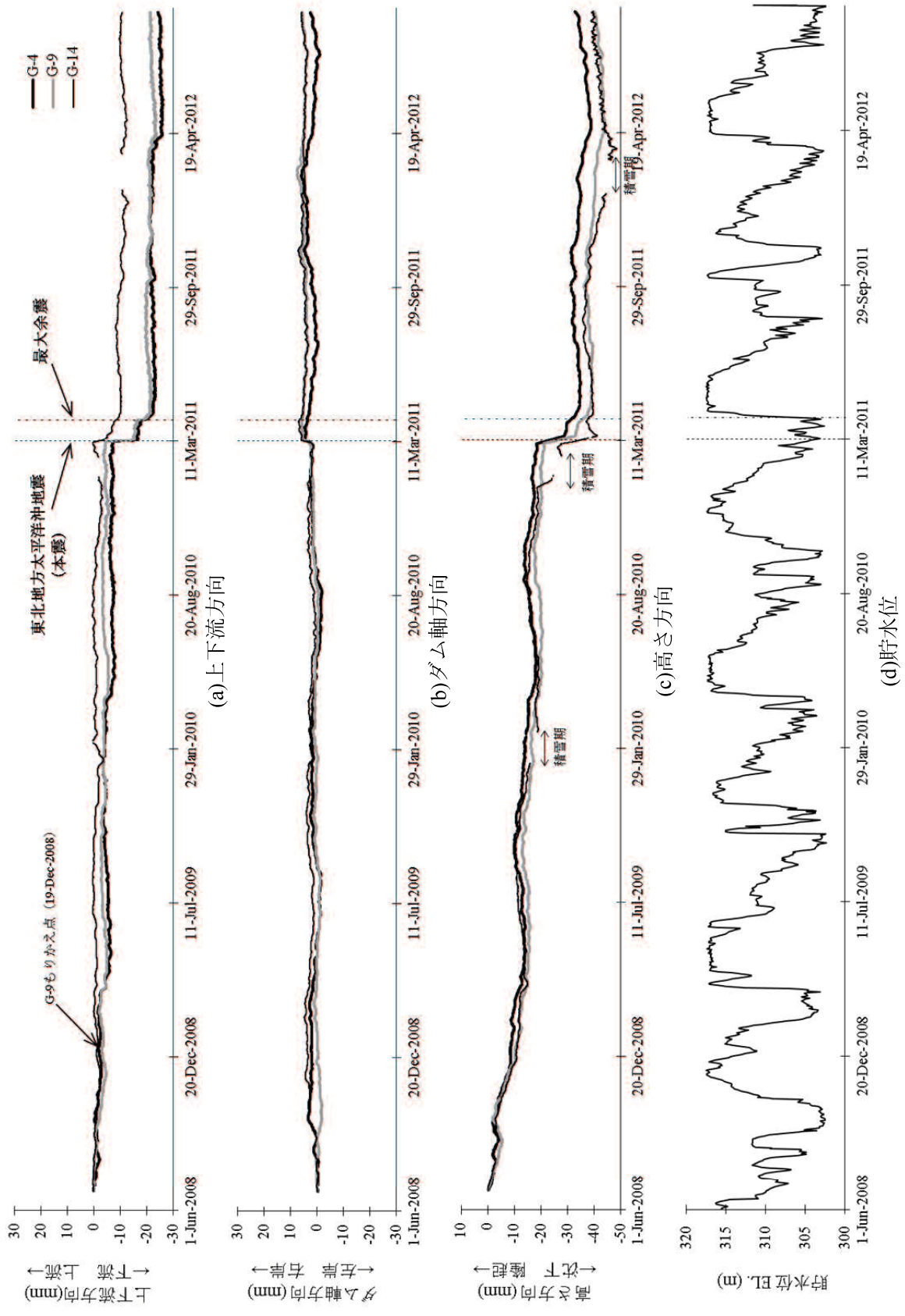


図-5.4 GPSによるダム変位計測結果(No.20 測線)

### 5.4.2 地震時の変位計測の即応性

地震の時刻をはさんだ計測結果の一例(G-9)を図-5.5～10に示す。なお、図に示す変位は、トレンドモデルを適用する前のスタティック測位による解析結果の値である。図-5.5は地震発生直前の14時までの変位(図中○で示す)の推移である。それまでの計測結果と特に変わるところはない。図-5.6は図-5.5に地震発生時を含む14:00:00～14:59:30の位相観測データを用いて15時に得た変位(図中○で示す)を加えたものである。15時に得られる変位は、地震発生時14:46を境に地震前の位相観測データが77%、地震後の位相観測データが23%で、そのデータが平均化され得られた変位であるため、地震による顕著な変位はみられない。

しかし、16時の計測結果(図-5.7の●)では、下流側および沈下方向にそれぞれ約10mmの明確な変位をとらえている。17:00以降の計測値(図-5.8～10参照)は計測誤差の範囲で変動しているものの、地震直後とほぼ同じ変動幅で推移しているため、16時の計測結果は地震によるダムの変位と考えられる。以上の結果から、GPS変位計測システムは地震によるダム堤体の変位を、地震発生後、約1時間で検出したことがわかる。

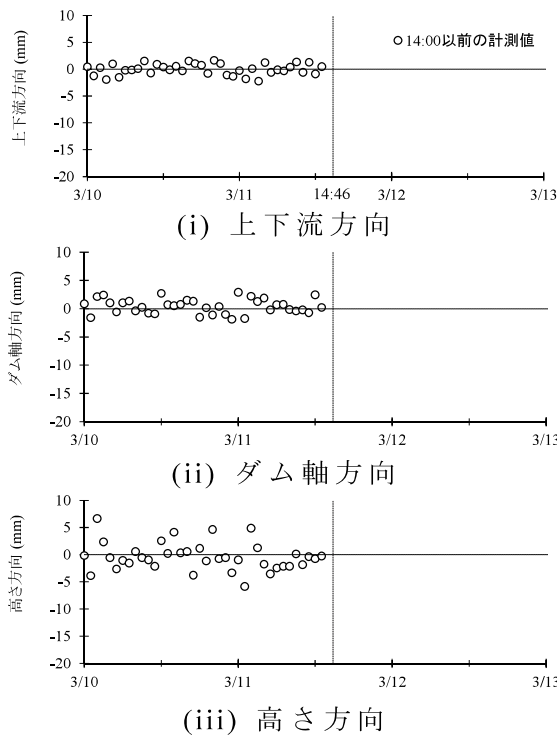


図-5.5 地震発生後の計測結果  
3月11日14時まで  
地震発生直前14時までの計測結果

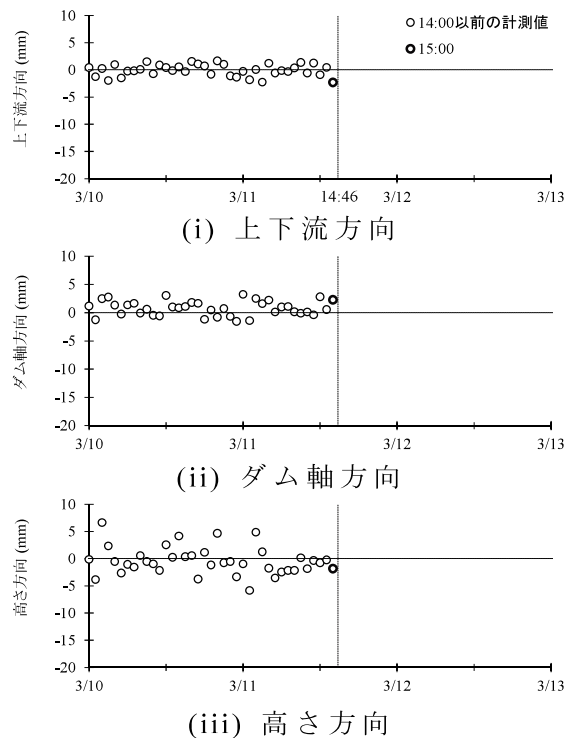
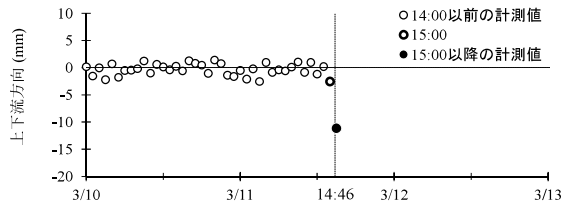
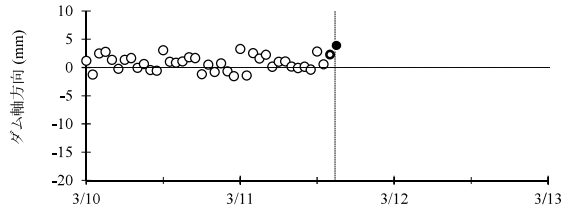


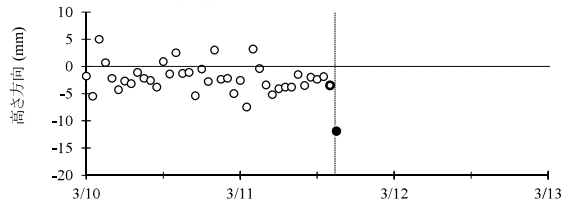
図-5.6 地震発生後の計測結果  
3月11日15時まで  
地震発生直後15時までの計測結果



(i) 上下流方向

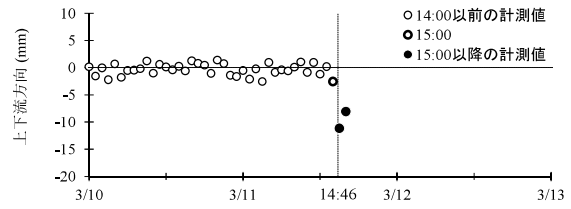


(ii) ダム軸方向

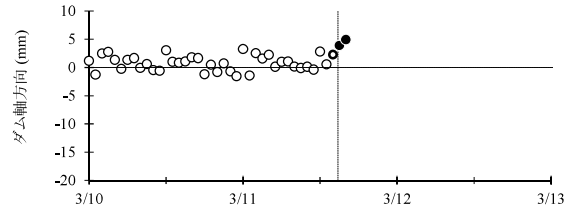


(iii) 高さ方向

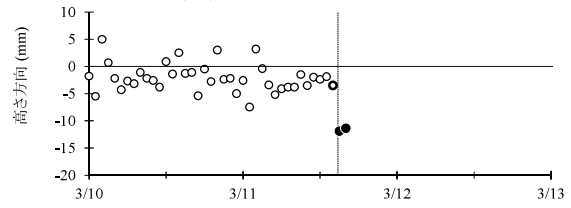
図-5.7 地震発生後の計測結果  
3月11日16時まで  
地震発生約1時間後計測結果



(i) 上下流方向

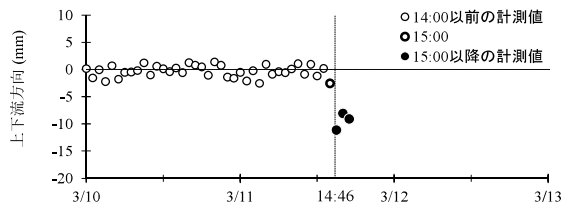


(ii) ダム軸方向

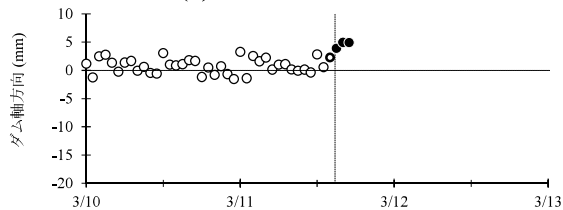


(iii) 高さ方向

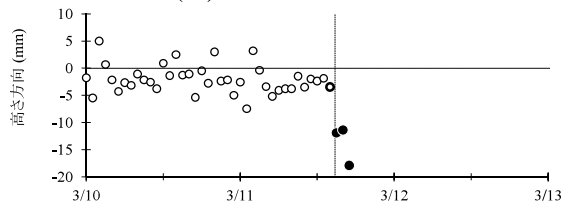
図-5.8 地震発生後の計測結果  
3月11日17時まで  
地震発生2時間後計測結果



(i) 上下流方向

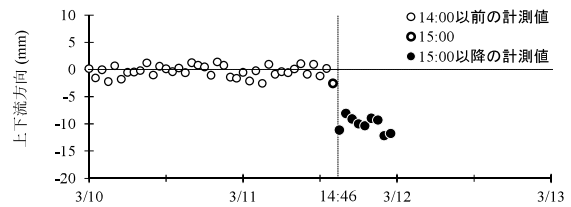


(ii) ダム軸方向

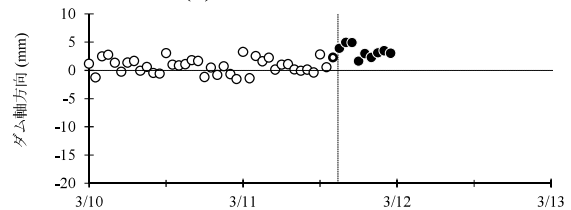


(iii) 高さ方向

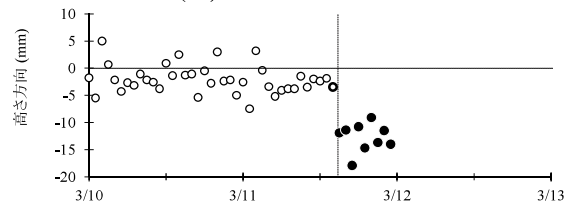
図-5.9 地震発生後の計測結果  
3月11日18時まで  
地震発生3時間後計測結果



(i) 上下流方向



(ii) ダム軸方向



(iii) 高さ方向

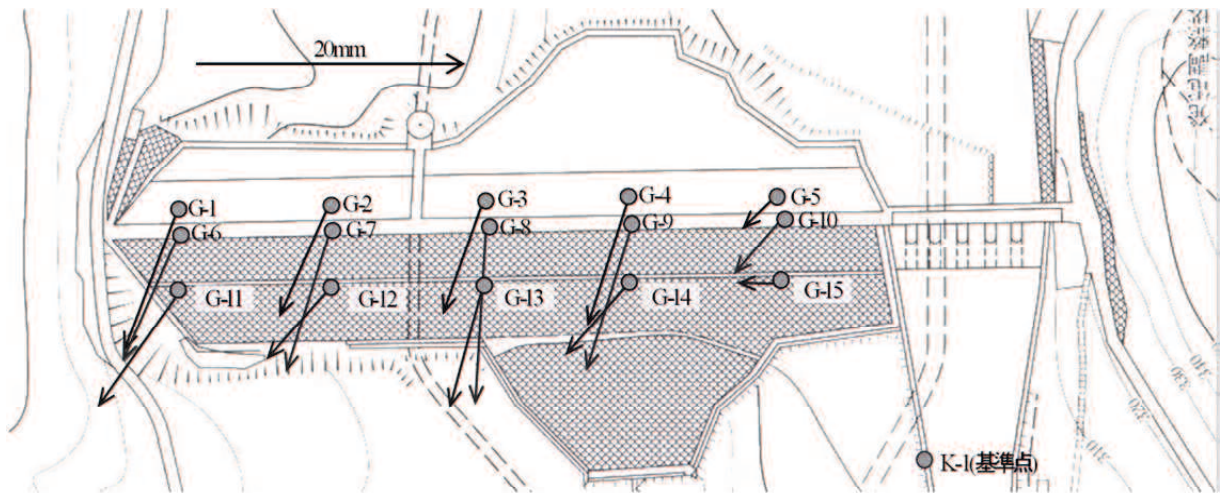
図-5.10 地震発生後の計測結果  
3月12日0時まで  
地震発生9時間後計測結果



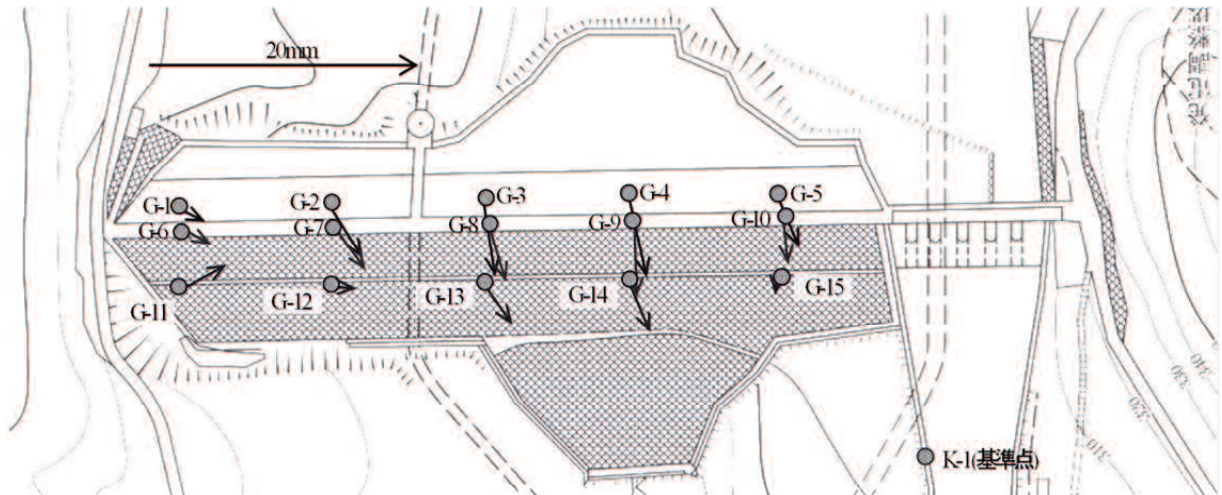
### 5.4.3 地震前後のダム全体の変位挙動の考察

地震発生前後のダム堤体の計測点の平面変位ベクトルを、図-5.11 に示す。図-5.11(a)には3月11日の本震発生前後、図-5.11(b)には4月7日に発生した余震前後の平面変位ベクトルを示している。

図-5.11(a)より本震前後は、堤体すべての計測点において右岸および下流方向に変位が発生した。その変位量は大きい箇所では下流側に約13.5mm(G-8)、小さい箇所では2.5mm(G-15)である。最大余震時は、下流中央部に向かって変位が発生し、最大でも約2mm(G-9)であった。



(a)本震前後(2011年3月11日)



(b)最大余震前後(2011年4月7日)

図-5.11 各計測点の地震時の平面変位ベクトル(K-1基準)

図-5.11(a)より，本震時の挙動は最大断面の天端である G-9 より G-8 の変位量が大きかった．この理由として，G-8 が地形の急変点であること（2章図-2.7 参照），近傍に写真-5.3 に示す施工時のピアが埋設されていることが挙げられる．石淵ダムは，写真-5.3 に示すように投石工法により築造された．このとき建設された投石用のトロッコ軌道のピアを堤体に埋設させていた．岩手・宮城内陸地震時には，写真-5.4 内の丸で囲ったピアのある箇所で大きな変状が発生している．



写真-5.3 投石工法による盛立工事中の石淵ダム<sup>9)</sup>

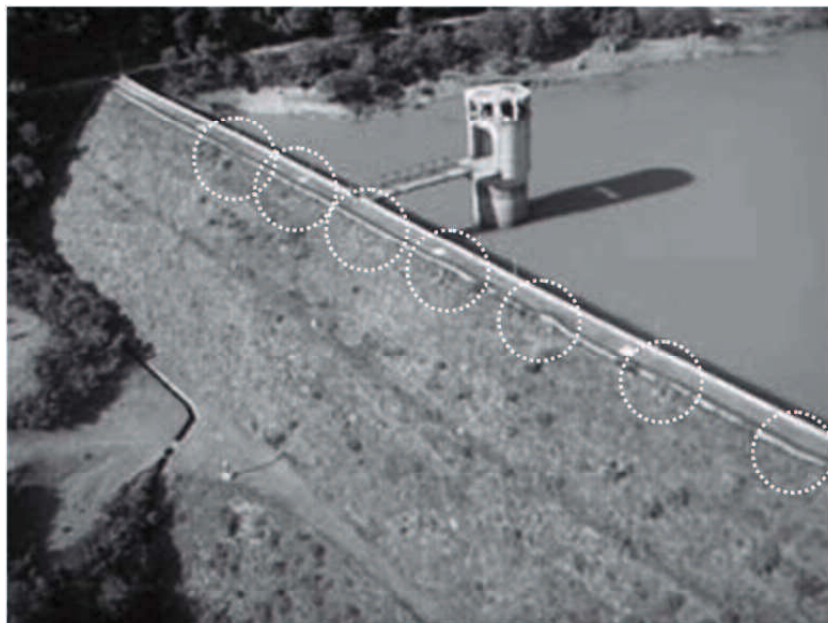


写真-5.4 天端および下流面の状況<sup>9)</sup>



次に，広域的な視点からダムサイトの変位とダムサイト内の局所的な変位との関係を調べる。

まず，国土地理院が公表した本震に伴う電子基準点の水平方向の変位<sup>9)</sup>を図-5.12に示す。これらの変位の基準点(固定局)は，島根県三隅にある電子基準点である。石淵ダムの最寄りの電子基準点は「胆沢(基準点コード EL05840575901)」(以下，電子基準点胆沢と省略する)である。電子基準点胆沢は震源方向に2.18m変位している。石淵ダムと電子基準点胆沢の位置関係を図-5.13に示す。石淵ダムと電子基準点胆沢は約7km離れている。石淵ダムサイトも震源方向に変位していると考えられる。

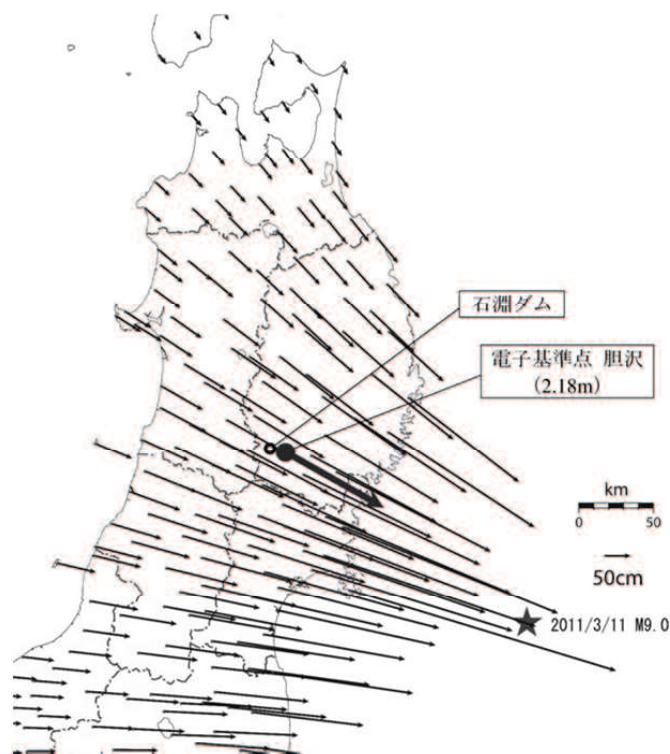


図-5.12 本震に伴う電子基準点の水平方向変位<sup>10)</sup>に加筆



図-5.13 石淵ダムと電子基準点胆沢の位置関係<sup>11)</sup>に加筆  
(東北地方太平洋沖地震発生当時，胆沢ダム建設中)

次に、電子基準点胆沢において得られた L1 波の位相観測データと、石淵ダムの各計測点で得られた L1 波の位相観測データを用いてスタティック測位の解析を行い、電子基準点胆沢を基準とする変位を求めた。

電子基準点胆沢より得られた変位の平面ベクトルを、計測点 G-4, G-9, G-14 および基準点 K-1 について図-5.14 に示す。図-5.14 から、基準点 K-1 および各計測点ともに震源方向とは逆の西北西方向(上流・左岸側方向)に約 170mm の変位が生じている。この変位は図-5.12 で示した電子基準点の変位とは逆の方向である。このことは、石淵ダムの位置が電子基準点胆沢より震源から遠く、震源に向かう変位は図-5.12 に示されるように電子基準点胆沢の変位より小さいため、石淵ダムサイトの変位は電子基準点胆沢からみて相対的に震源方向とは逆になることが理解される。

さらに、図-5.14 で示した電子基準点胆沢より得られた石淵ダムの変位量から石淵ダム基準点 K-1 の変位量を差し引いた変位の平面ベクトル、つまり、基準点 K-1 を基準とした石淵ダム堤体の変位を、電子基準点胆沢を基準点とした解析から求めた結果を図-5.15 に実線矢印で示す。同図には、図-5.11(a)に示したダムサイトの観測データのみから求めた変位を破線矢印で示している。図-5.15 から、両計測値は大きさでは数 mm、角度で約 10 度の差はあるものの、電子基準点までの距離が約 7km であることを考慮するとおおむねよい一致を示している。すなわち、ダムサイト全体としては震源方向に変位はしているが、ダム堤体はサイト内では相対的に下流側へ変位したことがわかる。

以上のように、GPS による変位計測によってダム全体の挙動とともに、サイト内の相対的な変位が計測でき、ダムに対する安全管理に役立つものと考えられる。

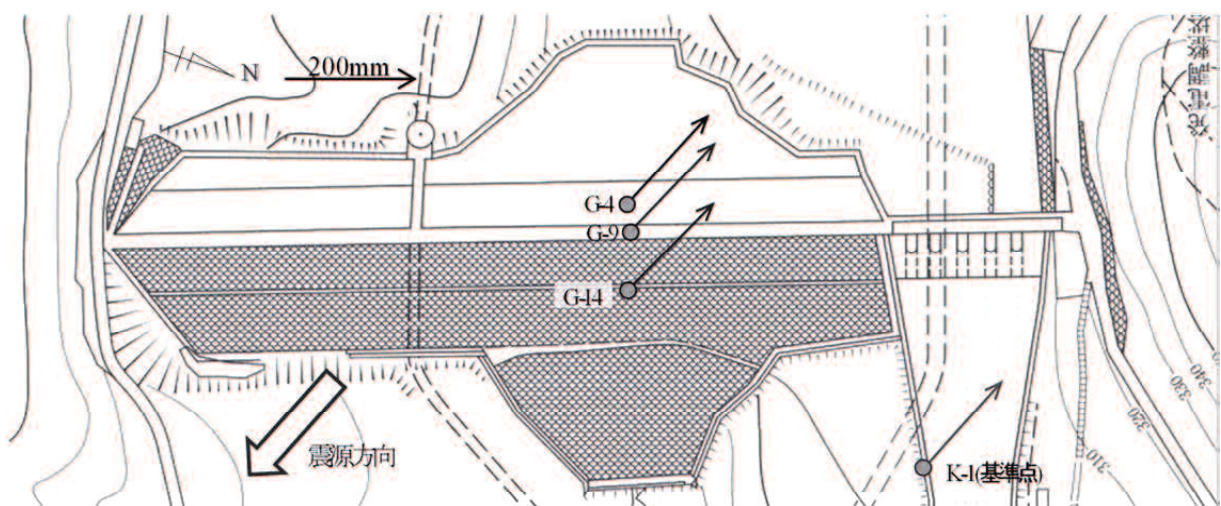


図-5.14 電子基準点胆沢を基準とした石淵ダムの計測点 G-4, G-9, G-14 および基準点 K-1 の変位ベクトル

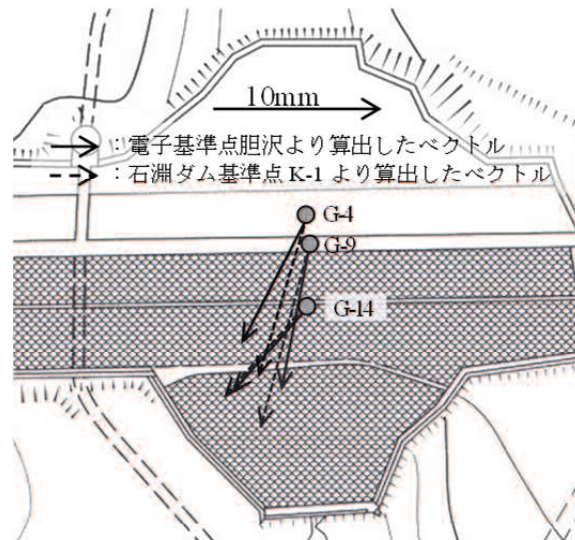


図-5.15 電子基準点胆沢を基準とした変位ベクトルと石淵ダム基準点 K-1 を基準とした変位ベクトルの比較

#### 5.4.4 地震時の即応性の評価のまとめ

本節では、GPS 変位計測システムの地震時におけるダム堤体の変位計測の適用性について、東北地方太平洋沖地震時の石淵ダムにおける計測結果に基づき検証した。

その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) GPS による変位計測により地震による数 mm～10 数 mm の比較的小さなダム堤体の変位が、三次元的に連続計測された。また、変位は、地震発生 1 時間後には明瞭に計測されており即応性は高く、従来の測量による計測方法に比べ迅速な計測を行うことが可能である。
- (2) GPS による変位計測によれば、ダム堤体の局所的な相対変位とともに、電子基準点を基準としたダムサイトの広域的な変位も計測できる。

以上の成果から、GPS による変位計測は地震時時のダムの迅速な安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。

## 5.5 地震後の計測結果の評価<sup>2),12)</sup>

本節では、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震後のGPS変位計測システムを用いたダム堤体の挙動計測結果により地震後の計測を評価する。

### 5.5.1 地震後の安全確認の概要

岩手宮城内陸地震時のダムの貯水位は、EL.314.40mであった。被災直後よりダムの安全性確保のための緊急放流を行い、常時満水位(N.W.L.)EL.311.00mまで貯水位を低下させた。その後、2008年11月1日より、安全確認試験(湛水試験)を実施した。

安全確認試験は、地震後の未経験貯水位であるEL.317.50m(計画高貯水位(H.W.L.)-0.5m)まで貯水位を上昇させた。2008年11月25日に、EL.317.50mに到達、1日間貯水位を維持し、この間、漏水量及び堤体変位等の計測・監視を行い、異常がないことを確認し、2008年11月27日より貯水位の低下を開始した。12月19日には、貯水位が被災時の貯水位であるEL.314.40mまで低下し、監視観測データに異常がないことを確認し、安全確認試験を終了した。

### 5.5.2 GPS変位計測システムによる地震後変位挙動監視

GPSによる計測結果の例として、最大断面であるNo.20測線(図-5.2(b))の計測結果を図-5.16に示す。No.20測線上の計測地点は、上流側遮水壁G-4地点、ダム天端付近G-9地点、ダム下流側ロック部G-14地点の3地点である。計測結果としては、図の上からそれぞれの計測地点の(a)上下流方向変位、(b)ダム軸方向変位、(c)鉛直方向変位と(d)貯水位と降水量を示している。GPSの計測値は、地震後の設置時をゼロとし、その時点からの変位量を示している。それぞれの計測結果の特徴を以下に述べる。

上下流方向変位は、プラスはダム上流側、マイナスはダム下流側への変位を示している。観測開始からの挙動は、各計測地点共に経時的に微増する同じような傾向を示し、安全確認試験では最大で4mm程度下流側への変位が発生している。2009年3月17日より再度、貯水位を305mから317mへ上昇させると、上流側遮水壁G-4、ダム天端付近G-9はほぼ同じような挙動を示し、貯水位上昇に伴い、下流側へ変位が発生し、貯水位低下とともに上流側へ戻る傾向であった。しかし、2009年3月17日以降のダム下流側ロック部G-14は貯水位上昇および一定時の下流側への変位はほとんどないが、貯水位低下時に上流側へ変位した。

ダム軸方向変位は、プラスはダム右岸側、マイナスはダム左岸側への変位を示している。貯水位変動に伴い、当初は各観測点とも同じような挙動を示していたが、安全確認試験前よりそれぞれ異なった挙動となった。変位量は最大でG-4地点で、右岸側へ4mm程度である。湛水時におけるロックフィルダムの一般的な挙動としては、主に貯水位の変動の影響を強く受ける上下流方向変位と圧密的な鉛直方向変位として現れる。本計測におけるダム軸方向の変位量は、絶対量として

大きい値ではないため、厳密な分析、考察を行うことは難しいが、上流側遮水壁に作用する水圧の影響を受けた三次元的な変位挙動の結果による可能性がある。

高さ方向変位は、プラスは隆起側、マイナスは沈下側への変位を示している。観測開始からの挙動は、各計測地点共に同じような傾向を示し、安全確認試験では、最大 8mm 程度の変位が発生している。その後も、沈下傾向が継続し、2009年6月10日にダム天端付近 G-9 で-15.7mm(沈下側)の変位を計測している。なお、2009年3月5日までは、貯水位をほぼ一定に保っている期間(2008年9月17日～2008年10月14日や2009年2月11日～2009年3月5日)においても、沈下方向へ変位が発生する傾向にある。その後、2009年3月17日～2009年6月14日の間は貯水位を EL.317.00m と高い貯水位での運用を行っているが、その間の継続した沈下は計測されておらず、沈下挙動は安定してきていると考えられる。

なお、地震発生前までの定期測量により、地震発生前10年間で No.20 測線上流側コンクリート遮水壁の計測地点で年間 2.7mm の沈下、天端では年間 2.4mm の沈下、下流側ロック部では年間 1.3mm の沈下が計測されている。No.20 測線は、図-5.2 に示すように、堤体の最大断面であり、地震前の沈下量は他の測線より大きい。

安全確認試験後の評価では、GPS による計測結果より、地震後の沈下は安定してきている傾向であるが、さらに今後も、地震発生前の年間平均沈下量を踏まえつつ、継続的な計測が必要であると考えた。



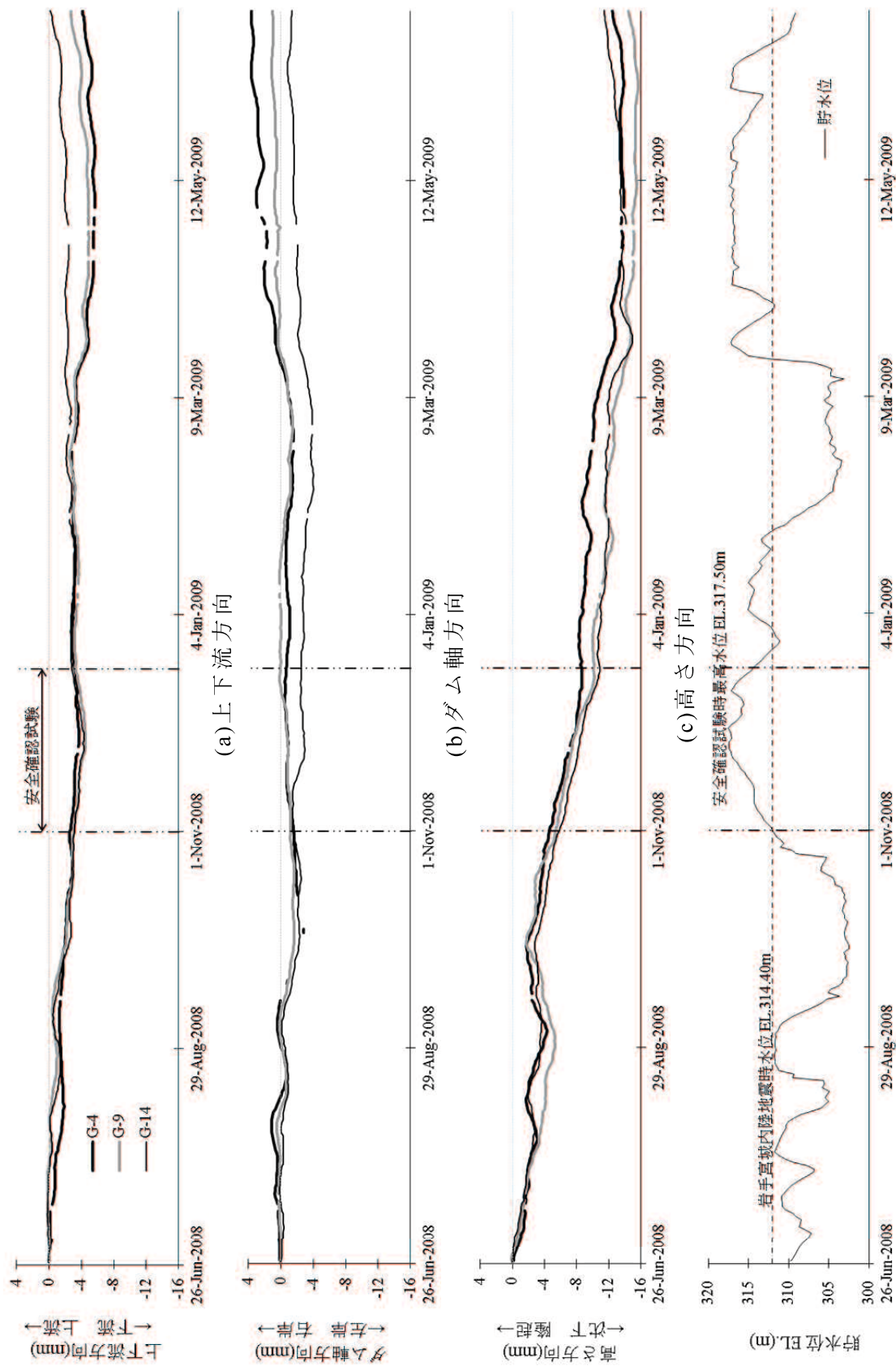


図-5.16 GPSによるダム変位計測結果(No.20 測線)

No.20 測線上の計測結果について、図-5.17 に示すように、計測期間内の貯水位条件をそれぞれ、貯水位上昇時(実線)、貯水位下降時(点線)、貯水位一定時(一点鎖線)に分類したうえで整理を行った。また、上流側遮水壁 G-4 地点、ダム天端付近 G-9 地点、ダム下流側ロック部 G-14 地点の上下流方向と鉛直方向の変位の合成ベクトルを図-5.18 に示す。図はそれぞれ横軸が上下流方向変位、縦軸が鉛直方向変位である。図中の凡例は、図-5.17 と同様に、貯水位上昇時(実線)、貯水位下降時(点線)、貯水位一定時(一点鎖線)に分類している。

全体の傾向は、安全確認試験最高貯水位(EL.317.50m)前後で傾向が分かれる。安全確認試験最高貯水位前では、貯水位上昇時には、下流・沈下方向に変位が発生し、貯水位下降時及び貯水位一定時には、下流方向へ変位する。しかし、安全確認試験最高貯水位後は、貯水位上昇時には、下流・沈下方向に変位が発生するが、貯水位下降時及び貯水位一定時には、上流・沈下方向に変位が発生する。また、2009年4月13日～2009年5月23日の貯水位をおおよそ EL.317.00m と高い貯水位での運用を行っているが、上下流方向、鉛直方向共に変位がほとんど発生していない。その後の貯水位低下に伴い、上流側へ変位する。

次に、それぞれの計測地点の特徴を述べる。上流側遮水壁 G-4 地点は、経時的に沈下傾向が継続するが、上下流方向変位については、安全確認試験最高貯水位後も下流側へ変位が発生し、2009年4月13日～2009年5月23日の貯水位一定の期間に下流側への最大変位を計測する。ダム天端付近 G-9 地点は、安全確認試験後は、経時的に沈下傾向は継続するが、貯水位変動に応じた上下流方向に変位が発生する。ダム下流側ロック部 G-14 地点については、安全確認試験最高貯水位後は、沈下に合わせ上流側へ変位が発生する。

これら GPS により計測された挙動を模式的に示したものを図-5.19 に示す。安全確認試験最高貯水位前までは、貯水位の上下にかかわらず経時的に沈下し、それに伴い徐々に下流側へ変位している(図-5.19 中 A～B の間)。これは、大規模な地震により、堤体、特に天端および下流面の表層付近に発生した緩みによるものではないかと推察する。地震後に実施した横断測量結果を図-5.20 に示す。地震前の横断測量は 1982 年に実施している。地震後の横断測量は、2008年7月26日に実施した。横断測量の結果より、地震による変状はダム天端付近に発生していることがわかる。

その後、安全確認試験によりダムに相対的に大きい水圧が作用し、水圧の影響が相対的に小さい、ダム天端付近 G-9 地点、ダム下流側ロック部 G-14 地点の下流側への変位は収まり、主に沈下のみの変位となる(図-5.19 中 B～D)。一方、水圧の影響を強く受ける上流側遮水壁 G-4 地点は下流側への変位が発生するが、その変位量の絶対値は小さい。2009年4月13日(図-5.19 中 C)以降は、大規模な地震により発生したと推察される表層付近の緩みによる変位が概ね収束したと考えられる。

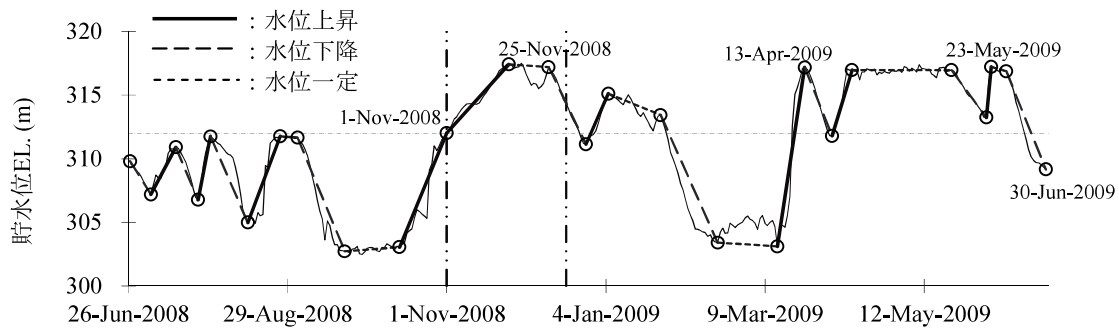


図-5.17 貯水位に基づく変位整理条件

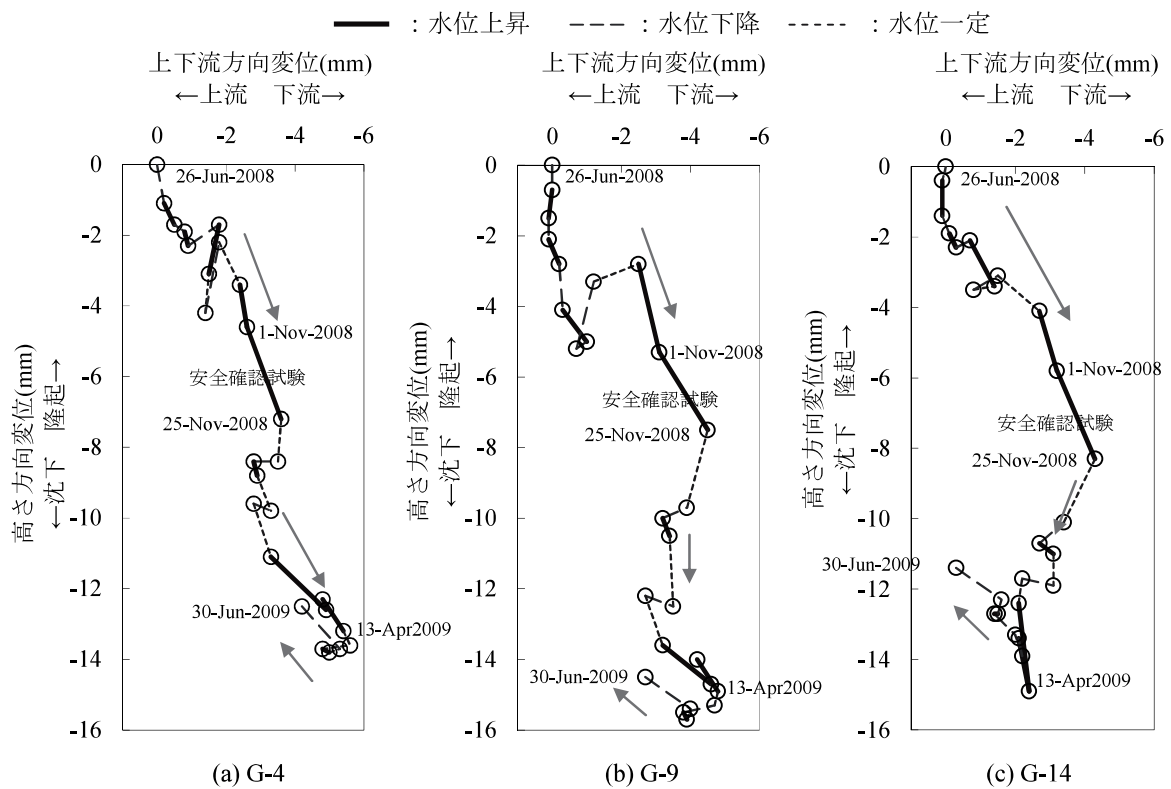


図-5.18 ダム上下流方向および鉛直方向の変位ベクトル

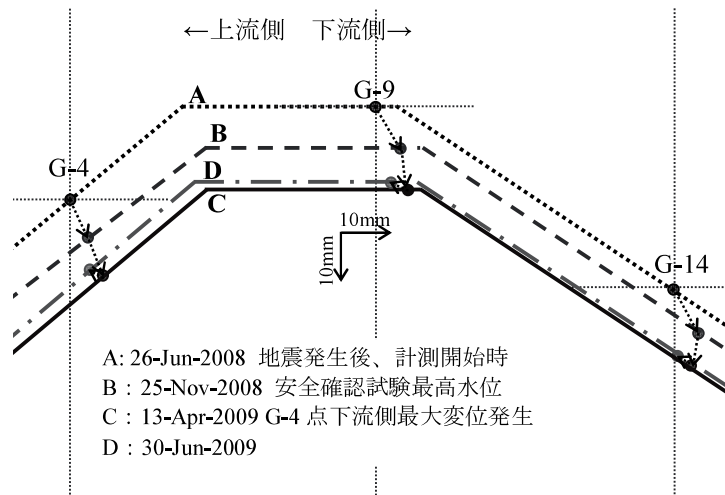


図-5.19 変位模式図

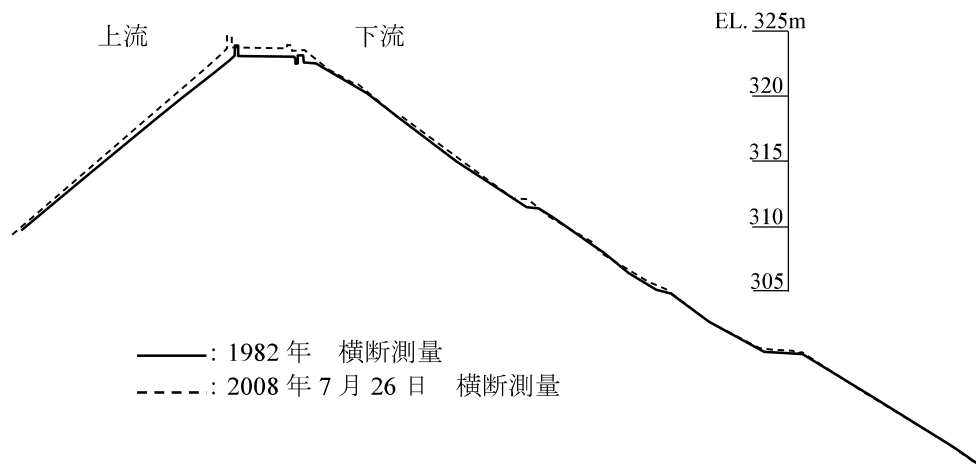


図-5.20 石淵ダムの横断測量結果<sup>13)</sup>

### 5.5.3 地震後の計測結果の評価のまとめ

本節では、GPS 変位計測システムの地震後のダムの変位計測について、岩手・宮城内陸地震後の石淵ダムにおける計測結果に基づき検証した。

その結果、次の事が明らかとなった。

- (1) GPS による変位計測の結果、沈下方向に着目すると長期間にわたる 15mm 程度の変位が精度よく計測することができた。
- (2) 連続的に計測することで地震後の収束を早く捉えることができた。

以上の成果から、GPS による変位計測は地震時後のダムの安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。

## 5.6 まとめ

第5章では、GPSによる変位計測の有効性を検証するために、地震時における計測の即応性および地震後の堤体の変位について考察した

本章で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) GPSによる変位計測により地震による数mm～10数mmの比較的小さなダム堤体の変位が、三次元的に連続計測することができた。この変位は、地震発生1時間後には明瞭に計測されており即応性は高く、従来の測量による計測方法に比べ迅速な計測を行うことが可能である。よって、GPSによる変位計測は地震時のダムの迅速な安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。
- (2) GPSによる変位計測の結果、沈下方向に着目すると長期間にわたる15mm程度の変位を高精度に計測することができ、連続的に計測することで地震後の収束を早く捉えることができた。GPSによる変位計測は地震時後のダムの精度高い安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。
- (3) 実際の地震時のダムの臨時点検では、基本的には地震発生後の後の3時間以内に1次点検、24時間以内に2次点検を実施する。今後は臨時点検における計測結果の具体的な活用の手順、方法等の検討を行う。

## 【第5章の参考文献】

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課長：地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について，国河流第4号，2012.
- 2) 葛西敏彦，山口嘉一，小堀俊秀：大規模地震で被災したフィルダムのGPSによる地震後の変形挙動監視，ダム技術，No.276，pp.9-20，2009.
- 3) 岩崎智治，小堀俊秀，増成友宏，山口嘉一，清水則一：GPSを用いた自動変位監視のためのWebシステムの開発，ダム工学，Vo.22，No.1，pp.4-15，2012.
- 4) Misa, P. and Enge, P.(測位航法学会誌)：精説GPS－基本概念・測位原理・信号と受信機，改訂第2版，航法測学会，2010.
- 5) 北川源四郎：時系列プログラミング，岩波書店，1993.
- 6) Kobori, T., Yamaguchi, Y., Nakashima, S. and Shimizu, N.: Displacement Monitoring of a Rockfill Dam Before, During and After the Great East Japan Earthquake Using GPS, *Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium*, pp.930-938, 2014.
- 7) 小堀俊秀，山口嘉一，中島伸一郎，清水則一：GPSを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測，ダム工学，(Vol.25，No.1，2015.掲載予定)
- 8) Yamaguchi, Y., Kondo M. and Kobori, T.: Safety inspections and seismic behavior of embankment dams during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, Volume 52, Issue 5, pp.945-955, 2012.
- 9) 独立行政法人土木研究所：平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告，土木研究所資料，No.4120，pp.90-137，2008.
- 10) 国土交通省国土地理院：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動について，[http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi\\_tohoku2.html](http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_tohoku2.html)，2011.
- 11) 国土交通省国土地理院：地理院地図(電子国土Web)，<http://portal.cyberjapan.jp/>
- 12) Kasai, T., Yamaguchi, Y., Kobori, T. and Sakamoto, T.: Exterior Deformation Measurement For CFRD After a Large-Scale Earthquake Using GPS, *Proceedings of ICOLD 78th Annual Meeting Symposium*, Topic 6-05, 2010.
- 13) 山口嘉一，佐藤弘行，坂本博紀：3.5 大規模地震時におけるフィルダムの沈下量の評価方法に関する研究，平成22年度重点プロジェクト研究報告書，3. 大地震に備えるための道路・河川施設の耐震技術，<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/project/2010/pdf/pro-3-5.pdf>，2010.





# 第 6 章 GPS 変位計測システムによるロックフィルダム 外部変位計測における計測点の選定方法

## 6.1 はじめに

第 3 章で得られた GPS センサーの設置に関する課題を踏まえ、第 4 章ではロックフィルダム天端堤体内部に設置するために GPS アンテナを改善した。また、第 5 章では地震動の計測結果を検証し、災害時にも GPS 変位計測システムは有効であることが示された。これらの検討により、ダムの外部変位を、GPS 変位計測システムを用いて監視することが可能となった。そこで、本章では、どのような観点から GPS 計測点を導入すべきか述べ、GPS 変位計測システムのための外部変位計測の重要測点の選定方法について提案する。

## 6.2 可動標的の重要測点の選定<sup>1)</sup>

GPS 計測点の導入の方法として、測量用の可動標的(第 2 章図-2.1 参照)へ全面導入あるいは部分導入がある。全面導入とはすべての計測箇所に GPS センサーを導入することを、部分導入とは全計測点のうちから GPS 計測点を選定して GPS センサーを導入することと定義する。

ダムの安全管理の区分に沿った GPS 変位計測システムの導入時期について図-6.1 に示すような区分が考えられる。GPS 変位計測システムの導入を検討するタイミングは、ダムの設計時、安全管理の区分の移行時(たとえば第 2 期から第 3 期への移行時)、定期検査や総合点検時に併せて実施すると効率がよいと考えられる。導入の検討にあたっては、次に示すように設計・施工時の状況の検証や、これまでの各計測結果のデータを整理したうえで GPS 計測点を選定することが重要である。

安全管理の区分	GPS 計測の導入箇所	
第 1 期	全面導入 1)既存の可動標的が無い場合、2)ある場合	配置計画済みの計測位置に 部分導入
計測地点配置検討のタイミング：設計時		
	↓	↓
第 2 期	既存の計測位置へ 全面導入	既存の計測位置へ部分導入 (全面導入から部分導入へ移行の場合も含む)
計測地点配置検討のタイミング：第 1 期から第 2 期への移行時（完成検査時），定期検査や総合点検時など		
	↓	↓
第 3 期	既存の計測位置へ 全面導入	既存の計測位置へ部分導入
計測地点配置検討のタイミング：第 2 期から第 3 期への移行時，定期検査や総合点検時など		
その他	大規模地震時や異常な変状が発生するなどの非常時以降の GPS 導入	

図-6.1 GPS 変位計測システム導入の区分

重要測点の選定には、該当ダムの、設計・施工資料、耐震性能照査資料、常時・非常時の計測結果、巡視の結果等の資料を用いる。まず、重要測点候補の選定の考え方として、設計資料等からは

- ①ダムの構造に基づく可動標的の選定
- ②基礎地盤に基づく可動標的の選定
- ③耐震性能照査に基づく可動標的の選定

を行う。これまでダムで計測された各種データからは

- ④これまでの計測結果に基づく可動標的の選定
- を行う。さらに、大規模地震後には必要に応じて、
- ⑤大規模地震後などの非常時の対応に基づく可動標的の選定
- を行う。

以下に、上記の項目について詳細を述べる。

### ①ダムの構造に基づく可動標的の選定

ダムの構造に基づく可動標的の選定では、構造上、最も重要な箇所、設計と比較ができる箇所の計測を行うことができる箇所を選定する。

#### 1)測量用の可動標的の配置が決まっていない場合

ロックフィルダムに設置されている外部変位計測の計測点について、可動標的の配置が決まっていない場合の基本的に計測をすべきと考えられる範囲を表-6.2に示す。ダムにおける最も重要な計測点範囲としては、ダム天端のダム軸方向の測線(①-1：表-6.2 中イメージ図(A))と標準(最大)断面付近の上下流方向の測線(①-2：表-6.2 中イメージ図(C))が挙げられる。これは、堤体および基礎地盤のダム軸方向・ダム上下流方向の全体的な挙動が効率的に把握できると考えられるためである。

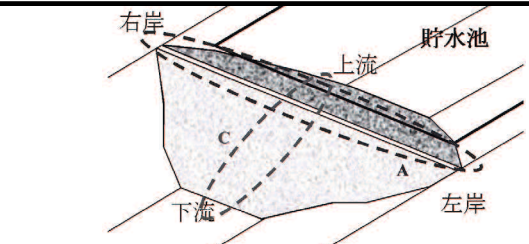
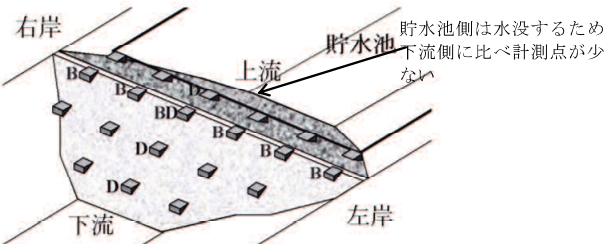
また、標準（最大）断面は設計断面でもあり、設計時にはすべりに対する安全性について検討しており、特に上流側の可動標的の計測は水位の急速低下の際の滑りの把握について有効である。また、標準(最大)断面は設計断面でもあり、外部変位計測点のほかに多種多数の計器が埋設されているため、外部変位で特異な挙動を示す計測値が得られた場合にその妥当性の検証をさまざまな計測データに基づいて行うことができると考えられる。

なお、測量用の可動標的の配置が決められていない場合、①～③に示した計測点の範囲を選定した後、それらの計測点候補の配置範囲を適切に包括するように計測点のグリッドを設定する必要がある。しかし、これまでダム外部波動標的のグリッド配置については、導入の考え方は明確には定められておらず、過去の設置状況等を参考に決められていたのが現状である。GPS変位計測システムでも同様、上記①～③で重要計測点を決めた後は過去の事例も踏まえながら経済的にGPSセンサーの間隔を決める。

## 2)測量用の可動標的がある設置されている場合

次に、可動標的が設置されている場合の基本的に計測をすべきと考えられる計測点を表-6.2に示す。ダムにおける最も重要な計測点(線)としては、ダム天端のダム軸方向の測線上の計測点(①-1：表-6.2中イメージ図(B))と標準(最大)断面付近の上下流方向の測線上の計測点(①-2：表-6.2中イメージ図(D))が挙げられる。これは、上記1)と同じ理由によるものである。なお、河床部の幅が広いダムの場合は、最大断面と同等な大きさの断面の範囲が広がる。このような場合、複数の断面を選定することを考慮すべきと考えられる。

表-6.1 ダムの構造に基づき選定される可動標的の計測点

調査資料	条件	イメージ
設計資料	①-1 (既存の可動標的が無い場合) 天端のダム軸方向測線の範囲(A)  (既存の可動標的が有る場合) 天端のダム軸方向測線の計測点(B)	 <p>天端のダム軸方向および標準断面の上下流方向測線 (既存の可動標的が無い場合)</p>
設計資料	①-2 (既存の可動標的が無い場合) 標準(最大)断面(あるいは付近断面)の上下流方向測線の範囲(C)  (既存の可動標的が有る場合) 標準(最大)断面(あるいは付近断面)の上下流方向測線の計測点(D)  谷幅が広い場合は、複数測線計測することも検討する。	 <p>天端のダム軸方向および標準断面の上下流方向測線</p>

### ② 基礎地盤に基づく可動標的の選定

基礎地盤に基づく可動標的の選定では，設計や施工時に基礎地盤で懸案事項が発生した箇所を選定する．基礎地盤に基づく選定より条件によっては計測をすべきと考えられる計測範囲を表-6.2に示す．基礎地盤がダム堤体に影響を及ぼす要因として，ダム縦断方向における地形(掘削面)の急変点(②-1)や，断層などの弱層が幅広い範囲・箇所，変形性の差が極端な箇所(②-2)，基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所(②-3)が挙げられる．これらの箇所では，第3期のダムにおいても，洪水後の水位低下時や地震時に不等沈下発生の可能性が相対的に高いと考えられる．そのため，このような地盤上のダム堤体に設置されている可動標的は重要計測点候補として選定する．そのほかに，設計・施工資料等より基礎地盤の留意点が挙げられる場合は，計測点候補とする．

表-6.2 基礎地盤に基づき選定される可動標的の計測範囲

調査資料	条件	イメージ
設計・ 施工資料	②-1 ダム縦断方向における地形(掘削面)の急変点付近の計測点	
	②-2 断層などの弱層が幅広い範囲・箇所，変形性の差が極端な箇所付近の計測点	
	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所付近の計測点	

### ③ 耐震性能照査に基づく可動標的の選定

耐震性能照査に基づく可動標的の選定では，耐震性能照査によって破壊が生じると考えられる箇所を選定する．耐震性能照査解に基づく選定により計測をすべきと考えられる計測範囲を表-6.3に示す．レベル2地震動などの大規模地震動を受けた場合を想定した耐震性能照査解析<sup>2)</sup>を実施している場合の解析対象断面ですべり等の損傷が発生すると評価される箇所や，累積損傷により沈下が発生すると評価される箇所(③)では計測点候補とする．

表-6.3 耐震性能照査に基づき選定される可動標的の計測範囲

調査資料	条件	イメージ
耐震性能照査解析結果	<p>③ 耐震性能照査の検討で、すべり等の損傷が発生すると評価される箇所や、累積損傷による沈下が想定される計測点.</p>	

#### ④これまでの計測結果に基づく可動標的の選定

これまでの計測結果に基づく可動標的の選定では、これまでの安全管理で実施されてきた測量による変位計測を含む、ダム安全管理のための各種計測結果より選定を行う。これまでの計測結果に基づく選定により条件によっては計測をすべきと考えられる計測点を表-6.4示す。選定箇所として、外部変位が安定するまでに他地点より時間を要した計測点(④-1(1))、地震時や洪水時等に一時的に比較的大きな外部変位の累積が発生した計測点(④-1(2))やダム軸平行測線、上下流測線の変位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(④-1(3))等が挙げられる。

具体的評価方法としては、表内に示すように、各計測点の沈下量  $S$  の絶対値での評価や、各計測点の沈下量  $S$  を各計測点の堤高  $H$  の二乗で除した指標にて評価を行う。

堤体を弾性体と考え、その弾性係数  $E$  を一定とすると、一次元の変形量の積分値として、沈下量  $S$  は式(6-1)として求めることができる<sup>3)</sup>。

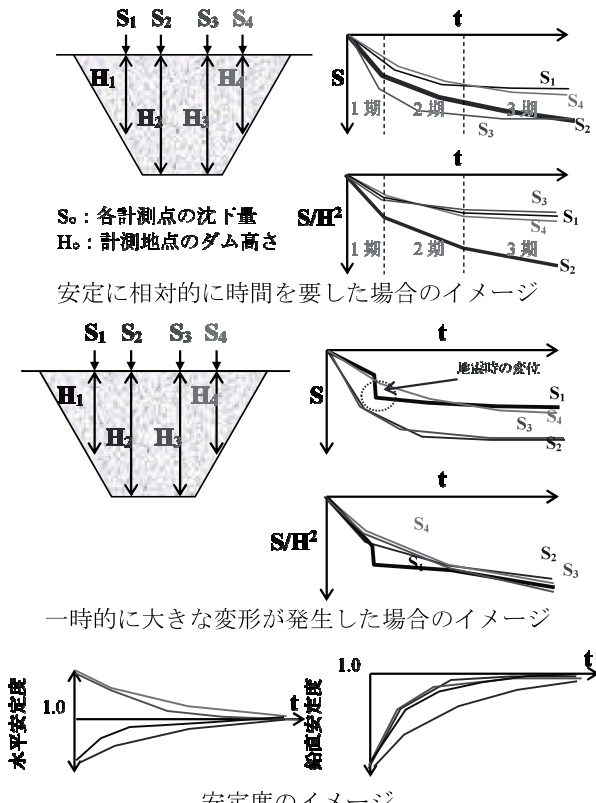
$$S = \frac{\gamma}{2E} \cdot H^2 \quad (6-1)$$

ここに、 $S$ ：計測点における沈下量、 $\gamma$ ：単位体積重量、 $E$ ：弾性係数、 $H$ ：計測点の堤高。式(1)より、仮に堤体の弾性係数と単位体積重量が堤体内で大きな差がないとすると、 $S/H^2$ は計測点によらず同程度の値を示すことがわかる。そこで、本研究では、有次元の指標ではあるが、 $S/H^2$ を評価指標とし、以下、堤高補正沈下量と呼ぶ。

また、外部変位の計測値の安定度についての評価を行う。安定度とは、各地点観測時の計測値を、最新データで除して無次元化したもので、表-6.4に示すように1に近い数値を示す期間が長いほど、安定期間が長いことを表す。なお、水平変位は経年変化のほか、貯水位による影響を強く受けるので、同じ貯水位での安定度の計算・検討を行うなど留意する必要がある。

そのほか、第1期時およびその後の常時・非常時のすべての計測機器のデータ整理結果より得られた懸案事項(④-2)の整理を行う。巡視の記録から懸案事項(④-3)があれば、④-2の計測機器のデータ計測結果と合わせて整理を行う。これは、地震時や急激な水位低下時に安全管理上問題となり得る特異な挙動を示す可能性がある箇所を抽出するためである。

表-6.4 これまでの計測結果に基づき選定される可動標的の計測点

調査資料	条件	イメージ
試験湛水時の計測結果  常時、非常時の計測結果	④-1 これまでの外部変形計測結果より得られた懸案事項  (1) 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  (2) 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  (3) 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	 <p> <math>S_0</math>: 各計測点の沈下量  <math>H_0</math>: 計測地点のダム高さ         </p> <p>安定に相対的に時間を要した場合のイメージ</p> <p>一時的に大きな変形が発生した場合のイメージ</p> <p>安定度のイメージ</p>
	④-2 試験湛水時・その後の常時・非常時のすべての計測機器のデータ計測結果より得られた懸案事項が存在する箇所の計測点	-
	④-3 巡視の結果から得られた懸案事項	-

⑤大規模地震後などの非常時の対応に基づく可動標的の選定

大規模地震後や異常な変状が発生後のダムにおいては、臨時点検等により変状箇所の発見・特定が実施される。これらのダムにおいてはこれらの変状の経過観察を、対策を実施していれば効果の測定を目的としたGPS計測の導入が5章の石淵ダムの計測結果でも示されているように有効である。

上記に述べた考え方を踏まえ、それぞれの安全管理の区分(図-6.1 参照)に対する GPS 計測点選定の考え方を表-6.5 にとりまとめる。この表にはそれぞれの管理区分における GPS 変位計測の導入時の検討項目を記載している。GPS 変位計測を実施する際には、表-6.5 に従って計測点を選定する。

表-6.5 それぞれの安全管理の区分における GPS 計測点選定の考え方

管理区分	GPS 導入の方法	検討項目	備考
第 1 期	(a) 第 1 期 全面導入	1) 測量用の可動標的の配置が決まっていない場合 ①, ②, ③+測点配置 (計測グリッド) の検討  2) 測量用の可動標的が設置されている場合 GPS 導入時の配置に関する検討項目はなし	計測点が決定していない場合は、まずは計測を行うべき範囲を選定し、その後、計測点配置の検討を行う。  測量用標的すべてに GPS の導入を行う。
	(b) 第 1 期 部分導入	①, ②, ③	第 1 期部分導入を行う際には、すでに測量用の標的が設置されているという前提である。 標的が設置されていない場合は、(a) 2) を行い、計測グリッドを設定した上で、部分導入箇所を選定する。
第 2 期	(c) 第 2 期 全面導入	GPS 導入時の配置に関する検討項目はなし	測量用標的すべてに GPS の導入を行う。
	(d) 第 2 期 部分導入	①, ②, ③, ④	第 1 期に全面導入し、第 2 期から部分導入に切り替える際には同様に (d) について検討を行う。
第 3 期	(e) 第 3 期 全面導入	GPS 導入時の配置に関する検討項目はなし	測量用標的すべてに GPS の導入を行う。
	(f) 第 3 期 部分導入	①, ②, ③, ④	第 1 期ないしは第 2 期に全面導入し、第 3 期から部分導入に切り替える場合には同様に (f) について検討を行う。
大規模地震発生後		⑤	



### 6.3 可動標的の重要測点の選定事例

#### 6.3.1 ダムの概要

ダムの挙動が安定状態に達した後（安全管理の第3期）の最上川水系寒河江ダムを例に挙げ、6.2 に示した可動標的の重要測点の選定方法に基づき、外部変形計測の重要測点を選定する。

寒河江ダムの諸元を表-6.6 に、変位計測用の可動標的の位置を図-6.2 に示す。寒河江ダムの可動標的は、下流側法面に 24 点(M1～M24)、ダム天端に 9 点(M25～M33)、上流側法面に 9 点(M34～M42)の計 42 地点ある。これら 42 地点のすべてに GPS センサーを設置することは多大な費用がかかってしまうため、計測点を絞り GPS センサーを設置する必要がある。

表-6.6 寒河江ダムの諸元

型式	中央土質遮水壁ロックフィルダム	
堤高	112.0 m	
堤頂長	510.0 m	
堤体積	10,400,000 m <sup>3</sup>	
法勾配	上流面	1 : 2.9
	下流面	1 : 2.1

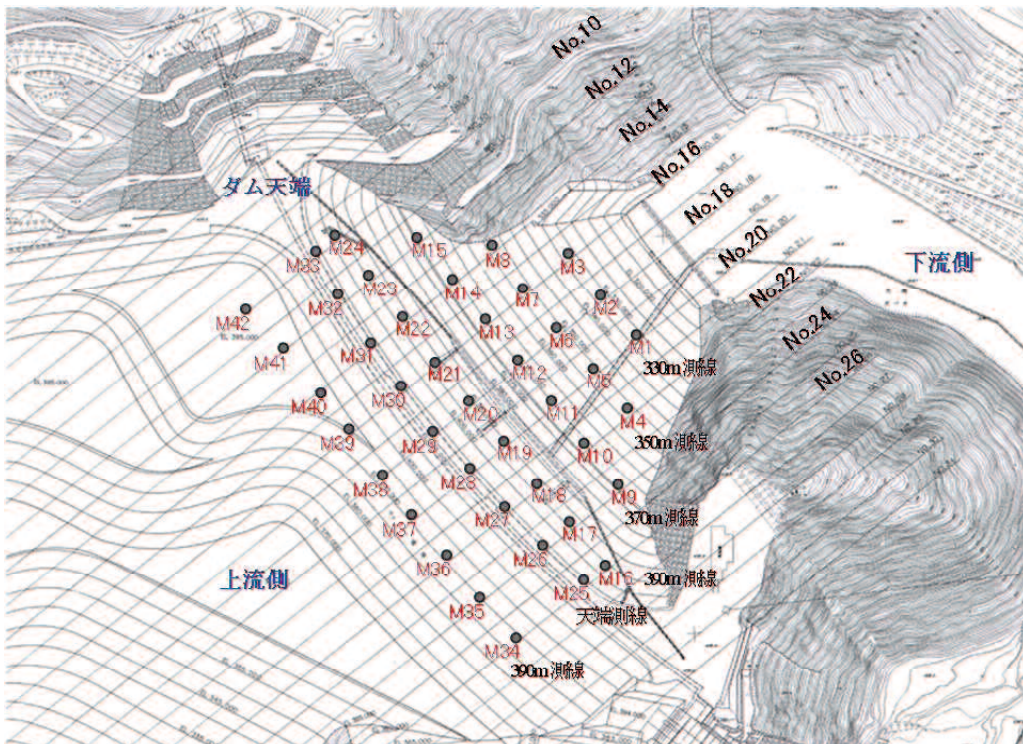


図-6.2 寒河江ダムの可動標的の位置<sup>4)</sup>

### 6.3.2 重要測点候補の選定

#### ① ダムの構造に基づく可動標的の選定

コアや堤体および基礎地盤の上下流および左右岸方向の全体的な変形挙動を把握するため、天端測線（①-1）および最大断面測線（①-2）上の計測点は外部変位計測の重要測点候補と考える。最大断面測線は、他の計測計器が数多く設置されている代表断面である No.18 測線とする。該当する測点候補を図-6.3 に示す。

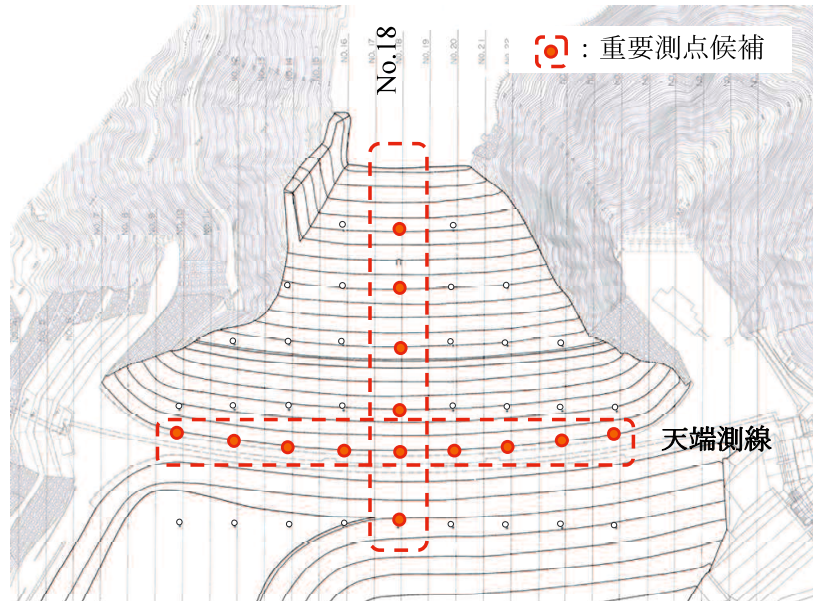


図-6.3 ダムの構造に基づく可動標的の選定結果

#### ② 基礎地盤に基づく可動標的の選定

##### ②-1 ダム縦断方向における地形（掘削面）の急変点付近の計測点

寒河江ダムの縦断面を図-6.4 に示す。寒河江ダムのダム縦断方向の掘削勾配は、左右岸ともに概ね一様で、表-6.2 の②-1 に示すような不等沈下が生じる可能性のある地形の急変箇所は存在しないと考えられる。そのため、掘削面の地形条件に基づき抽出すべき外部変位計測の重要測点候補はないと判断する。

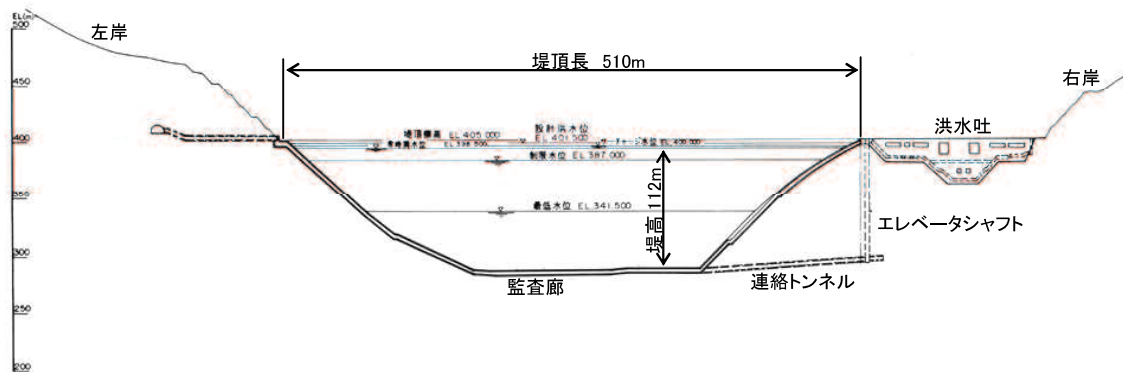


図-6.4 寒河江ダムの縦断面<sup>4)</sup>

## ②-2 断層などの弱層が幅広い範囲・箇所、変形性の差が極端な箇所付近の計測点

寒河江ダムのダム軸縦断面における断層分布を図-6.5 に示す。設計時の評価では、変形性に問題がある大規模な断層はないとしている。しかし、F4断層は破碎帯の規模が相対的に大きく、F3、F5断層との交差部では幅5m程度の大規模な破碎帯となっている。ただし、F4断層は緩傾斜で、上記破碎部も施工時に掘削除去されているので、変形性の観点からは問題は小さいと考えられる。掘削面にF4断層が露出する箇所は、置換コンクリートにより処理している。

また、河床部右岸側の上下流方向に分布するF6、F7、F7'、F8断層は、浸透流抑制の面からグラウチングによる断層処理工を実施している。

基礎地盤の変形計測として、No.18測線に上下流3箇所、No.10、26測線に各1箇所の岩盤変位計を設置している。これらの岩盤変位計の計測結果、計測値は第1期（試験湛水開始：1989年10月）から2006年6月に至るまで、貯水位の昇降に関係なく、ほぼ一定で安定している。近年の変動幅は全て0.1mm以下である。また、盛立時の変位状況にも異常は認められない。

従って、寒河江ダムの基礎地盤には、規模の大きい断層は存在しないこと、断層はグラウチングで改良されていること、岩盤変位計の計測結果に問題がないことから、外部変位計測の重要測点の選定において、基礎地盤の変形性の観点から選定すべき計測点はないと考えられる。

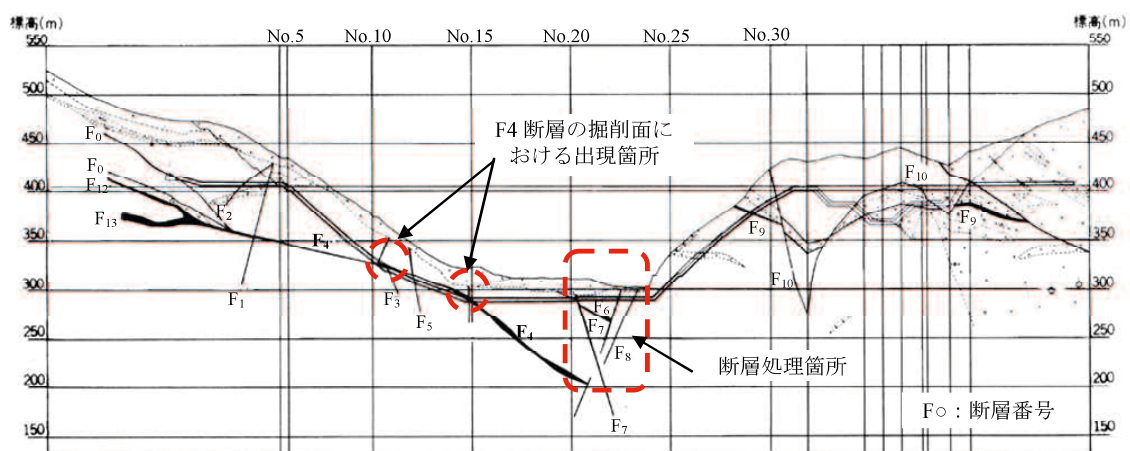


図-6.5 寒河江ダムのダム軸縦断面における断層分布<sup>4)</sup>

## ②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所付近の計測点

寒河江ダムのダム軸岩級区分平面を図-6.6 に示す。寒河江ダムでは、従来の経験やグラウチング試験の結果から25Lu以下の岩盤であれば、グラウチングによって1~5Luまで改良が可能であることと、岩盤の強度や岩盤と土質材料の密着性および施工性を考慮して、岩級区分のCMの上面を遮水（コア）ゾーン敷とした。そのため、変形性に極端な差異のある地質が隣りあう箇所は掘削除去されており、この条件に基づき選定すべき計測点はないと考えられる。



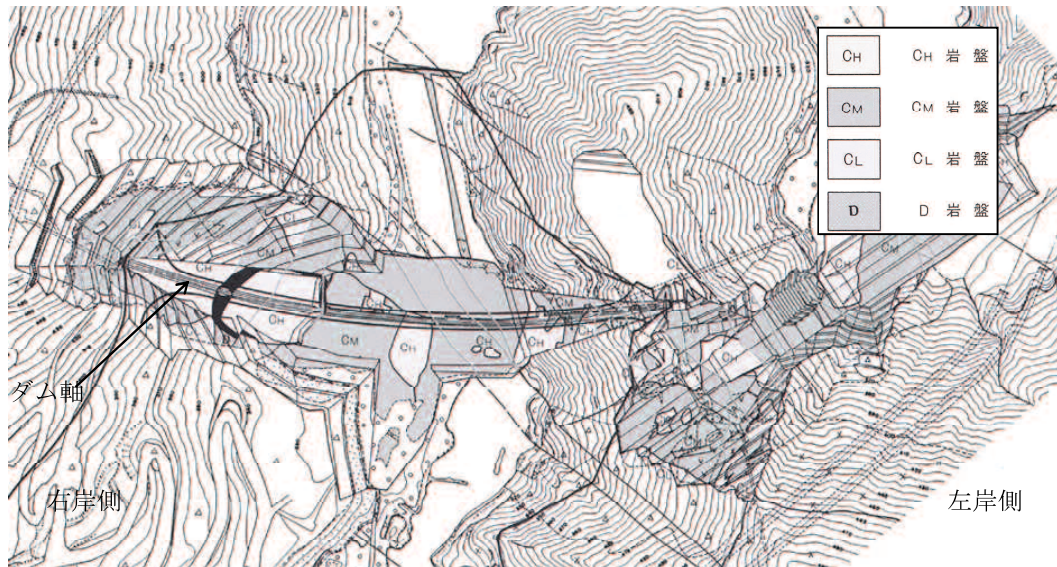


図-6.6 寒河江ダムのダム軸岩級区分平面図<sup>4)</sup>

### ③ 耐震性能照査に基づく可動標的の選定

寒河江ダムでは、現在、レベル2地震動に対する耐震性能照査を実施していない。今後、耐震性能照査を実施し、すべりが発生すると評価される箇所は外部変位計測の重要測点の候補とする。ただし、大規模地震動によるすべりは、相対的に堤高の高い箇所において発生しやすいと考えられることから、最大断面測線として選定した No.18 測線上の計測点により概ね目的を達成することができると考えられる。

### ④ これまでの計測結果に基づく可動標的の選定

#### ④-1 これまでの外部変位計測結果より得られた懸案事項

ダム上下流方向と鉛直方向に着目した計測結果の整理例として、寒河江ダムの最大断面である No.18 測線の計測結果を図-6.7 に示す。

水平変位は、ダム天端計測点 M29 を除き、第1期で大きく下流側に変位した後、貯水位変動に対して上下流方向への変動を繰り返しながら、計測結果が安定に向かう傾向にある。ダム天端計測点 M29 の水平変位は、貯水位がサーチャージ水位に到達後の貯水位低下以降、上流方向に変位する。その後、水位変動に対応して上下流方向への変動を繰り返しながら、上流側へ 60mm 変位し、2006 年ではその変位を保ったまま、計測結果は安定する傾向にある。

鉛直変位は、図-6.7 より、ダムの高標高部にある、上流側法面計測点 M38、ダム天端計測点 M29、ダム下流側法面計測点 M20 で他の計測点と比較して大きいことがわかる。

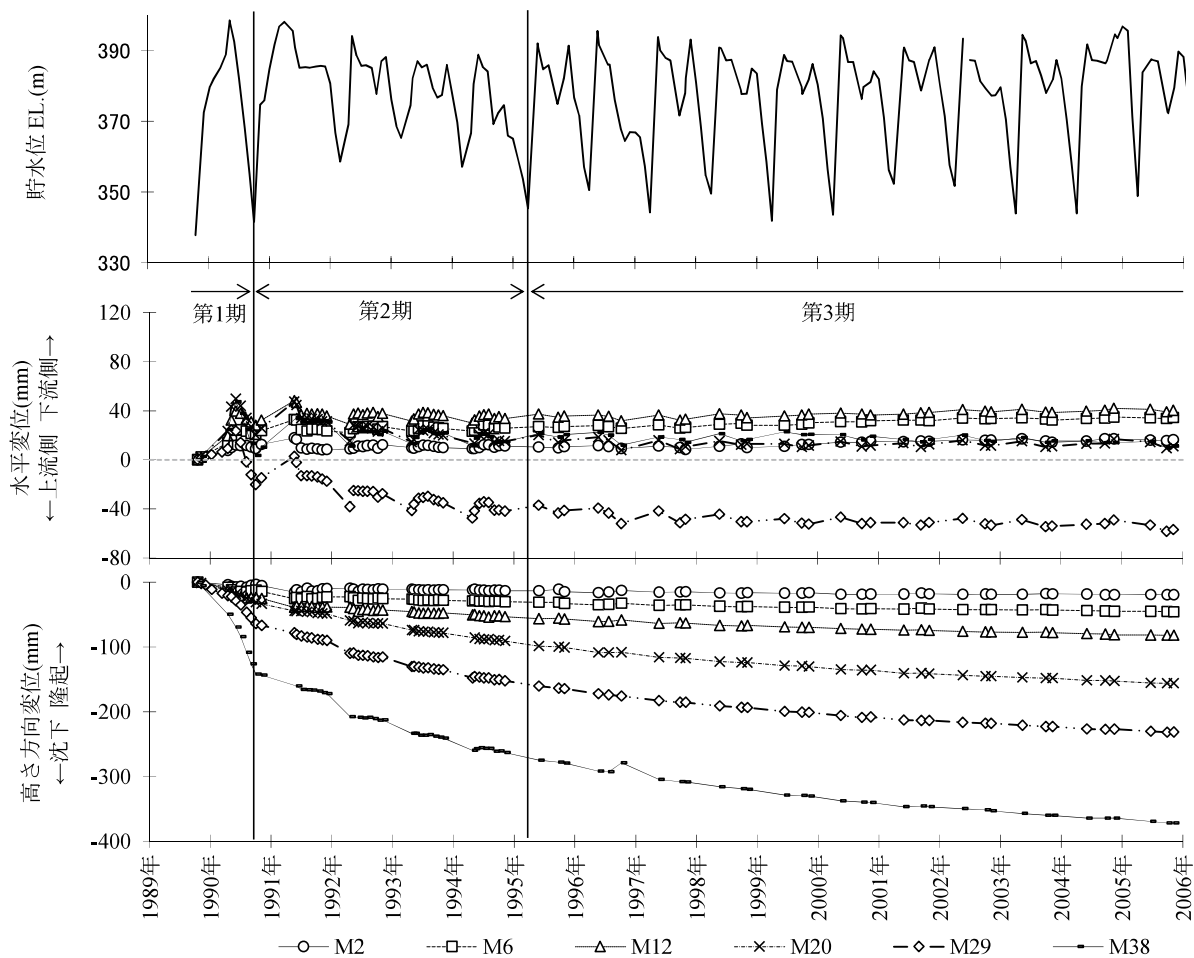


図-6.7 外部変位計測結果(No.18 測線)

次に、鉛直変位について堤高補正沈下量  $S/H^2$  を用いて整理した。整理結果の例として、No.18 測線の堤高補正沈下量の経時変化を図-6.8 に示す。図の作成にあたって、沈下量  $S$  と堤高  $H$  は mm 単位で処理をしている。

図より、上流側法面計測点 M38 は、他の計測点と比べると沈下傾向は大きくなっていることがわかる。

上流側法面計測点 M38 の沈下量が他測点に比較して大きいのは、原因は特定できないが、ロック内部に浸透力が発生すること、または堤体積の大半を占めるロックゾーンを形成する粒径の大きい岩石同士を隔離している相対的に細粒な粒子で構成されている部分が柔らかくなることや、岩石同士の小さな接触部における応力集中により岩石自身の局所的な圧壊によって沈下が生じる浸水沈下によるものと想定される<sup>5)</sup>。

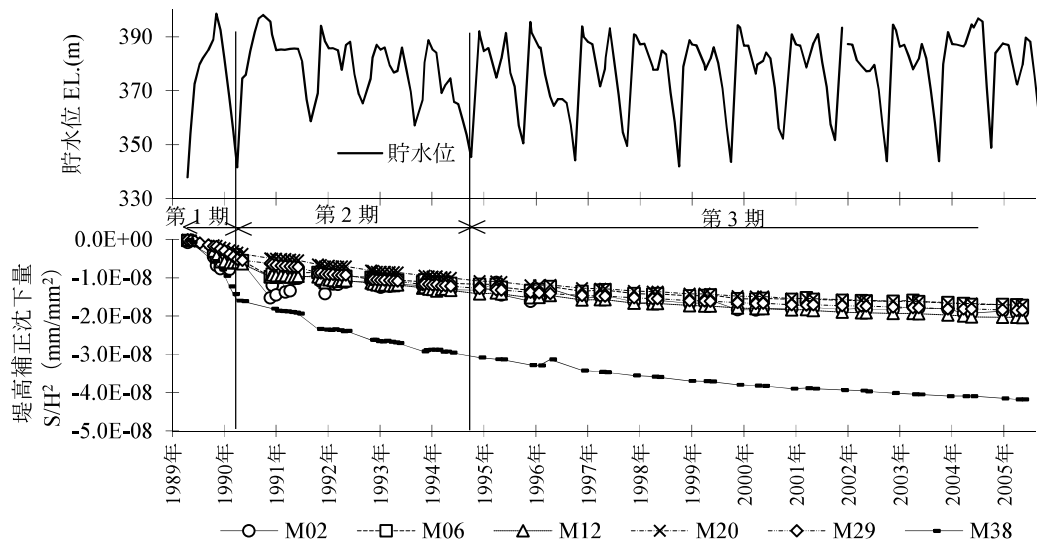
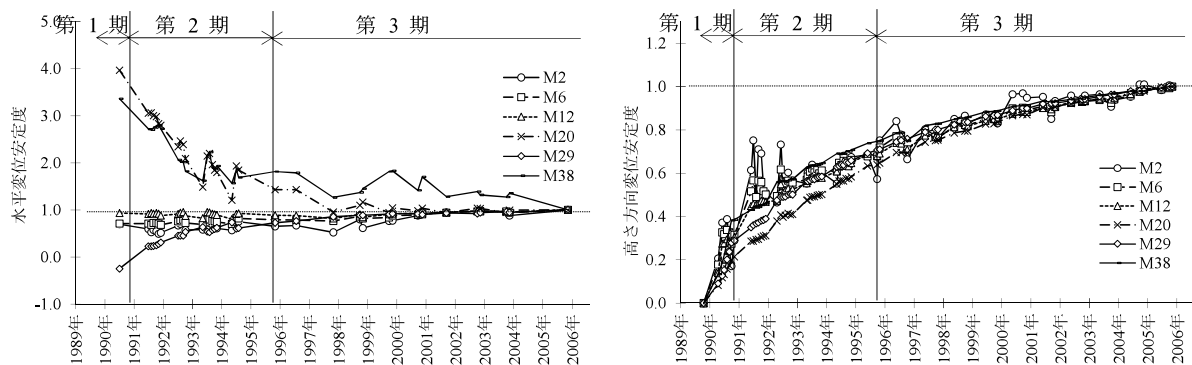


図-6.8 堤高補正沈下量の経時変化(No.18 測線)

外部変形の計測値の安定性評価結果を，図-6.9 に示す．横軸は計測期間，縦軸は水平方向および鉛直方向計測結果の安定度を示している．水平変位安定度については，貯水位の変動により上下流方向への変位を繰り返す傾向にある．そのため，経年的な安定度を評価するため，測量結果の多い貯水位  $EL.381.26m \pm 5m$  の水平変位測量値を取り出し水平変位安定度の整理した．

図-6.9(a)に示すように，水平変位の安定性は第 1 期に水平変位量が他の計測点より大きかった M38 が安定までに相対的に長い時間がかかっている．上流側測点 M38 は他と比べ安定度が 1 から離れており，第 1 期後 15 年が経過した 2006 年 6 月でも緩やかに水平変位が進行していることがわかる．その他の計測点は 2000 年頃から安定度は概ね 1 を示しており，変位はほぼ収束したものと考えられる．

図-6.9(b)に示す鉛直変位の安定度は，全計測点ともに同様の傾向を示しており，2004 年頃からは各点ともにほぼ 1 を示しており，鉛直方向の変位はほぼ収束したと考えられる．



(a)水平変位の安定度  
(貯水位  $EL.381.26m \pm 5m$ )

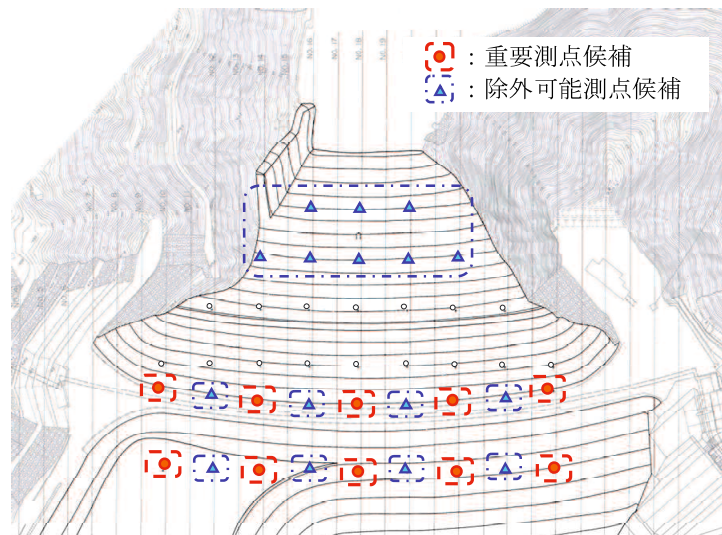
(b)鉛直変位の安定度

図-6.9 計測値の安定性評価結果(No.18 測線)

以上の外部変形の計測結果に関する検討結果から選定した，外部変位計測の重要測点候補を表-6.7に示す．堤体外部変形に留意して選定する重要な測線は，「ダム天端測線」および「上流390m測線」と判断した．ただし，計測データの整理結果から，隣接測点の変形量の連続性がよいことから，中間測点の観測データがなくても，最大断面，水平変形が大きい右岸部，地すべりブロックを有する左岸部の変形分布状況を網羅できると考えられる．また，下流端部の測点は図-6.10に示すように他の断面も同様に変化が小さく，湛水初期から概ね安定していることから，計測の必要性は低いと考えられる．

表-6.7 外部変位計測の重要測点候補の選定結果

	条 件	選定理由
④-1 外部変形計測結果より 得られた懸案事項	(1)外部変形安定までに他地点より時間を要した計測点	天端測線，上流側390m測線
	(2)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	該当なし
	(3)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	左右岸方向の変形は，隣り合う測点の変形量の連続性がよいため除外可能．下流端部の測点は変化が小さく，湛水初期から概ね安定していることから，除外可能





#### ④-2 試験湛水時・その後の常時・非常時のすべての計測機器のデータ計測結果より得られた懸案事項が存在する箇所の計測点

これまでの堤体および基礎地盤の挙動について、計測データの整理結果をもとに、安全管理上の懸念される特異な挙動の有無を確認する。検討にあたり、漏水量、変形（外部変形を除く）、間隙水圧などの堤体および基礎地盤の安全性判断に重要と考えられる観測項目を主対象として、挙動の特性を整理する。

##### (1) 漏水量

ロックフィルダムの漏水量には、下流三角堰で計測する堤体漏水量（一部基礎浅部の漏水量も含む）と、監査廊内の浸透流観測孔で計測する基礎浸透流量がある。漏水量に関するデータ整理の結果、浸透流観測孔のSQ-13とSQ-16は他地点より比較的浸透流量が多いことが分かった。ただし、これに基づく計測点の選定は安全側の対応であるが、浸透量の多い箇所の直上にある計測点を重要測点候補とする。

##### (2) 埋設計器による堤体および基礎地盤の計測

寒河江ダムの堤体の埋設計器には、層別沈下計、岩盤変位計、着岩部変位計、水平鉛直変位計、ゾーン間沈下計、地山変位計、間隙水圧計等が設置されている。いずれも計測値は安定しており、異常を示す箇所は認められていない。よって、外部変位計測の重要測点の候補選定にあたって、その他の埋設計器によるダムの変形計測結果に特に留意する必要はないと考えられる。

### 6.3.3 重要測点の選定

寒河江ダムについて、外部変位計測の重要測点の選定で提案した方法に従い選定した結果を表-8に示す。

表に示す各項目の外部変位計測の重要測点候補の選定結果と、除外可能測点候補を考慮し、最終的な外部変形重要計測点の選定を行った。選定結果を図-6.10に示す。結果的に外部変位計測点42点のうち、重要計測点として、上流側6点、天端6点、下流側3点の計15点を選定した。

表-6.8 外部変位計測の重要測点候補の選定結果

項目	条件	選定理由	選定結果
①ダムの構造に基づく外部可動標的の選定(表-6.1)	①-1 天端のダム軸方向測線の計測点。	ダム天端測線	
	①-2 標準(最大)断面(あるいは付近断面)の上下流方向測線の計測点 谷幅が広い場合は、複数測線計測することも検討する	No.18 測線	
②基礎地盤に基づく外部可動標的の選定(表-6.2)	②-1 ダム縦断方向における地形(掘削面)の急変点付近の計測点	該当なし	選定すべき計測点はないと考えられる
	②-2 断層などの弱層が幅広い範囲・箇所、変形性の差が極端な箇所付近の計測点	断層部の変形性は問題なし	
	②-3 基礎地盤の変形性の差が極端に大きい箇所付近の計測点	該当なし	
③耐震性能照査に基づく外部可動標的の選定(表-6.3)	③ 耐震性能照査の検討で、すべり等の損傷が発生すると評価される箇所や、累積損傷による沈下が想定される計測点	実施後、選定結果に反映。ただし、標準(最大)断面であるNo.18測線を含めておくことで概ね対応可能と推定	未実施
④これまでの計測結果に基づく外部可動標的の選定(表-6.4)	④-1 (1)外部変形安定までに他地点より時間を要した計測点	天端測線、上流側390m測線	
	(2)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	該当なし	
	(3)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	左右岸方向の変形は、隣り合う測点の変形量の連続性がよいため除外可能。下流端部の測点は変化が小さく、湛水初期から概ね安定していることから、除外可能	
	④-2 試験湛水時・その後の常時・非常時のすべての計測機器のデータ計測結果より得られた懸案事項が存在する箇所の計測点	浸透流観測孔のSQ-13とSQ-16は他地点より比較的高い浸透流量が多い。ただし、これに基づく計測点の選定は若干安全側の対応。その他、埋設計器による堤体の計測結果に異常は見られない	

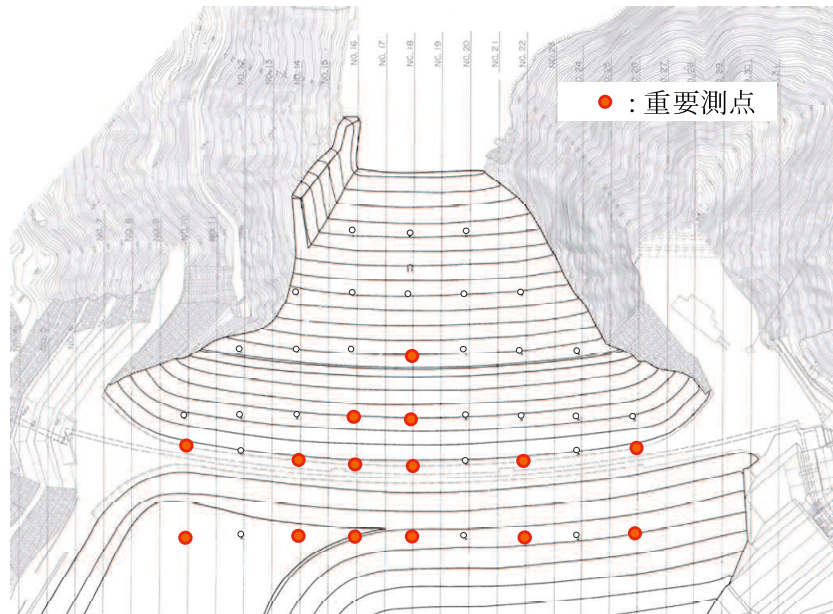


図-6.10 外部変位計測の重要測点の選定結果

#### 6.4 まとめ

第6章では、GPS変位計測システムをロックフィルダムへ導入するために、どのような観点からGPSを導入すべきか述べ、ダム構造、基礎地盤、耐震性能照査および、これまでの計測結果を踏まえた、外部変位計測の重要測点選定の方法について提案した。本選定により、GPSセンサーの効率的かつ効果的な設置が可能となる。

## 【第6章の参考文献】

- 1) 小堀俊秀, 山口嘉一: フィルダムの外部変形計測の重要測点の選定方法, ダム工学, ダム工学, No. 21 Vol.1, pp.21-38, 2011.
- 2) 国土交通省 河川局 治水課: 大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説, [http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/bousai/dam12/](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/dam12/), 2005.
- 3) 藤澤侃彦, 安田成夫, 伊藤基博: ロックフィルダムの実測挙動解析, ダム技術, No.69, pp.25-32, 1992.
- 4) 建設省 東北地方建設局 : 寒河江ダム工事誌, 1991.
- 5) James L. S., Richard J. W., Stanly F. G. and William A. C.: Earth and Earth-Rock Dams, pp.212-214, 1963.

## 第 7 章 結論

### 7.1 本研究のまとめ

本研究は、GPS 変位計測システムによるダム外部変位計測の実用化のために、ダムの計測に適した GPS 変位計測システムの開発、GPS 変位計測システムによる地震時の挙動計測の検証、計測の合理化のために GPS センサーを設置するための外部変位計測箇所の選定方法を提案した。

以下に、本研究の成果を各章にまとめる。

第 1 章『序論』では、本研究の背景を述べるとともに、関連する研究として、近年のダムの各種計測に関する研究についてとりまとめ、堤体変位計測に関する研究について概要を示した。また、本研究の課題を明確にするために、目的および構成を示した。

第 2 章『ダムの安全管理・点検と現場計測』では、現在ダムで行われている安全管理のための計測項目と計測頻度や臨時点検について述べ、ダムの安全管理のための計測の現状と課題を示した。また、これまで計測されたロックフィルダムの常時と非常時の計測事例を示し、変位計測のための要求性能として、常時は年間数 mm の変位から非常時は短時間に数 10cm 単位と幅広い計測を行うことが求められることを示した。

第 3 章『GPS 変位計測システムのロックフィルダム外部変位計測への初期の適用』では、ロックフィルダムに適用する GPS 変位計測システムと実際の適用事例を示した。ここでは、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位計測とともに、GPS 変位計測システムによる外部変位計測を実施し、両計測結果の比較を行い、課題を抽出した。

初期の適用では、天端に設置した GPS センサーは、天端の可動標的ではなく、下流側の歩道路肩に固定した。計測結果は、高さ方向変位について GPS 計測と光波・水準測量に差が出る結果となった。光波・水準測量の可動標的はコア直上に設置されており、正確に計測ができないことは安全管理上好ましくない。そのため、GPS センサーの天端への設置方法が課題となった。

第 4 章『ロックフィルダム天端堤体内部に設置するための GPS 変位計測システムの改善』では、第 3 章で得られた課題を踏まえ、ロックフィルダム天端での GPS センサー設置方法について検討した。日本の多くの大規模ロックフィルダム

では、ダム天端軸上を管理用道路として利用しており、日常的にコアの直上にポールを立てて GPS センサーを設置し計測することはできない。天端道路の通行とダム管理の障害にならないようにするとともに、GPS センサーをコアに直接設置する方法が必要となる。そこで、ダム天端の視準測量用のマンホール内に GPS アンテナを設置する方法について提案した。

GPS は人工衛星からの電波を受信できることが前提であるので、地表面より低い位置で、しかも蓋のあるマンホールに設置されている条件下でいかにして電波を受信し、またどの程度の精度で計測できるかを明らかにするため基本的な実験を行った。その結果を踏まえ、実際のダムにおける計測を実施し、マンホール内に設置できるよう改善した GPS センサーは実用性があること確認した。

第 5 章『GPS 変位計測システムを用いたロックフィルダム堤体の地震時変位挙動計測』では、GPS による変位計測の有効性を検証するために、地震時における計測の即応性および地震後の堤体の変位計測について検討した。

その結果、地震時における計測の即応性については、GPS による変位計測により地震による数 mm～数 10mm の比較的小さなダム堤体の変位が、三次元的に連続計測でき、また、変位は地震発生 1 時間後には明瞭に計測されており即応性は高く、迅速な計測を行うことが可能であることがわかった。

また、地震後の計測については、15mm 程度の沈下による変位を高精度にかつ連続的に計測することで地震後の収束を早く捉えることができた。

これらの結果より、GPS による変位計測は地震時の迅速な安全性の判断、地震後の精度高い安全性の判断に有効な手段となり得ることが示された。

第 6 章『GPS 変位計測システムによるロックフィルダム外部変位計測における計測点の選定方法』では、GPS 変位計測システムのための外部変位計測の重要測点の選定方法について提案した。前章までの研究の成果により、ダムの外部変位を、GPS 変位計測システムを用いて監視することが可能となったが、管理段階のダムでは計測にかかるコストは限られており、既存のロックフィルダム堤体表面の外部標的全地点を網羅するように GPS センサーを設置することは難しい。そこで、これまでダムで行われてきた安全管理の体制を考慮しながら GPS 変位計測システムの導入が行われるように、外部変位計測の重要測点の選定方法について提案した。また、管理中のダムを例に挙げ、外部変位計測の重要測点選定事例を例示し、GPS センサーの合理的な配置が可能になることを示した。



## 7.2 今後の展望

本研究によってロックフィルダムの外部変位が GPS 変位計測システムにより連続的にかつ三次元的に、また、少なくとも精密測量と同等な精度で計測できるようになった。その成果を踏まえて今後の発展の可能性を展望する。

### ・ロックフィルダムの管理における定量的な計測評価

GPS 変位計測システムにより、これまでの測量による計測間隔では詳細に把握することが困難な堤体の変形挙動を計測できることが明らかになった。このように、詳細な堤体の変形挙動を確認できることは、堤体の変形挙動の安定性の確認を行うために必要な期間を短縮する効果がある。また、何らかの異常があった場合にその兆候を早期に発見することができることも考えられる。これらの多くの計測データを用いることにより水位や時間経過に基づいて詳細に整理することができる。今後、変形の要因を詳細に分析することにより、挙動の定量的な判断が可能となれば、将来予測や異常の早期発見が可能となる可能性がある。

### ・統合的なダム管理

現在、国土交通省所管のダムでは、ダム管理所へ常駐し管理を行っている。これは、平常時や洪水時、夜間休日にかかわらず、職員又は委託職員が常駐するものである。GPS 変位計測システムを用いて定量的な評価を行い、管理基準値を設定することができれば、複数のダムを統合管理事務所等で一括管理し、ダム管理所では、常時は巡回管理にて目視点検や日常点検を実施し、地震時や洪水時等は職員が管理する非常駐型の体制の構築も可能であると考ええる。

### ・重力式コンクリートダムへの適用

GPS 変位計測システムは、GPS センサー設置の容易さから、施工や費用の条件により変位計測箇所には制約のある重力式コンクリートダムへの適用を行えば、コストを縮減した上で複数のブロックでの変位計測が可能になると考えられる。現在、重力式コンクリートダムに GPS 変位計測システムを導入し、GPS 変位計測システムより得られるコンクリートダムの変位挙動の確認やプラムライン<sup>1)</sup>との計測値の比較を行い、その適用性について検証を行っている<sup>2),3)</sup>。今後は、GPS 変位計測システムを重力式コンクリートダムの変位計測手法の一つとして確立するために、重力式コンクリートダムでのデータの蓄積をすすめて、課題の抽出および、その対応を行う。

## 【第7章の参考文献】

- 1) (財)ダム技術センター編：コンクリートダムの細部技術，(財)ダム技術センター，pp.560-565，2010.
- 2) 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.
- 3) 小堀俊秀，山口嘉一，大館渉，清水則一：重力式コンクリートダムの基礎岩盤の水平変位計測，第4回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.111-116，2012.

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、指導教官の山口大学大学院理工学研究科システム設計工学系専攻の清水則一教授より、丁寧かつ熱心なご指導を頂きました。清水教授からは、本研究を通じて、考え抜くことの重要性、一枚の図や一言の重さ、研究者としてのあるべき姿を、丁寧に教えて頂きました。清水教授の元で研究に携わった4年間は、今後の仕事を進める上での大きな糧になります。深く感謝の意を表します。

本論文の審査をして頂きました、羽田野袈裟教授、麻生稔彦教授、三石真也教授、鈴木素之准教授には、貴重なご意見とご助言を頂きました。深く感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、中島伸一郎助教には、研究内容や論文執筆のご指導から学生生活のことまで、幅広くご相談に乗っていただきました。当時学生であった殿村奏氏（株式会社フジタ）、上田和男氏（株式会社JPハイテック）には、大量のデータの整理をして頂いたおかげで円滑に研究を進めることができました。また、社会人ドクターとして、大学の研究室に在室する時間に限りがあった私を、清水研究室の皆様は暖かく迎えてくださり、気を遣うことなく研究室での作業に集中することができました。中島先生をはじめ、清水研究室の皆様には、心より感謝いたします。

本研究の実施は、国際航業株式会社の岩崎智治博士、佐藤渉氏、飯島功一郎氏の協力なくしては成り立ちません。岩崎智治博士と論文を執筆したことが本研究の始まりとなりました。その後のGPS変位計測システムの基礎実験やダムへの本格導入など、岩崎博士、佐藤氏、飯島氏と常に一緒に動いてきました。また、増成友宏博士（当時、古野電気株式会社）には、技術的な質問に関して丁寧にいろいろと教えていただきました。心より感謝いたします。

私が初めて研究に携ったのは、東京電機大学工学部建設環境工学科4年の時に、山口高志博士の研究室に所属したのがきっかけです。山口高志博士からは、現場計測の楽しさや、計測結果のとりまとめ等の研究の基礎を学びました。また、私が行政職に向かないと見抜き、土木研究所への就職を勧めていただきました。

土木研究所では、ダム研究室、ダム構造物チーム、水工構造物チームと組織名は変わりましたが、一貫してダムに関する研究に携ることができました。本研究は、当時の上司であった山口嘉一博士（現、ダム技術センター）から、GPSを用いたダムの安全管理という課題をいただいたことにより始めることができました。上司の佐々木隆博士（現、国土技術政策総合研究所）からは、研究のバックアップだけでなく、ご自身の学位取得の時の経験など教えていただきました。私が入

所した当時の土木研究所の次長であった上阪恒夫博士（現、建設技術研究所）には、研究の進み具合など気にかけて頂きました。入所当時の上司であった吉田等氏（ダム技術センター）には、私自身が出向時に悩んでいた時、土木研究所に戻り再びダムに関わる研究に携る機会を頂きました。また、安田成夫博士（ダム技術センター）には今後のことを考え学位取得を勧めて頂いた事が山口大学入学への後押しとなりました。本論文をまとめる事ができたのも良い上司に恵まれたからだと思えます。皆様には心より感謝いたします。

職場の皆様には大学での研究を進めるにあたり、いろいろと御負担をかけてしまいました。直属の上司である金銅将史氏には、職場での仕事が疎かになりがちに多量なる御配慮を頂きました。佐藤弘行氏には本論文とりまとめにあたり、フィルダムの計測技術についてアドバイスを頂きました。同僚である、水工構造物チームの藤田将司氏、坂本博紀氏（現、水資源機構）、切無沢徹氏（現、北海道開発局）、矢田一也氏、土田将己氏、志田孝之氏（現、建設技術研究所）、藤川祥氏、小林雅幸氏（現、大成建設株式会社）、太田兵庫氏（現、大成建設株式会社）、加嶋武志氏（現、日本工営株式会社）には仕事のみならず多岐にわたるご支援を頂きました。特に加嶋武志氏には、職場での仕事のみならず、本論文とりまとめに必要な現場計測を手伝っていただき、現地でいろいろと議論をして楽しい時間を過ごすことができました。良い同僚に恵まれました。皆様には心より感謝申し上げます。

大学への入学を後押ししてくれた父・忠司と母・京子に感謝いたします。父は私が大学に入学する前年に永眠しましたが、病床にて出来の悪い息子が学位を取ろうとしていることに大変に驚きながらも、快く援助をしてくれました。母は、子供の頃の状態から見たら信じられないわと言いながら、大学に入学することを温かく見守ってくれました。惜しみなく無償の愛情を注いでくれた父母に感謝いたします。

最後に、平日も帰りが遅く、土日もほとんど職場、家族のことをあまり顧みなかった私を支えてくれた妻・久美子と息子・結生に感謝申し上げます。

## 本研究の関連論文

### (a) 査読のある雑誌等

- (1) 著者氏名 : 山口嘉一, 小堀俊秀, 横森源治, 大野 誠, 岩崎智治  
論文題目 : GPS を用いたフィルダム外部変形計測に関する一考察  
学術雑誌名 : ダム工学  
巻、号、頁 : Vol.15 , No.2 , pp.120-136  
発行年月 : 平成17年 6 月発行  
(本文との関連 : 2 章, 3 章)
- (2) 著者氏名 : 小堀俊秀, 山口嘉一  
論文題目 : フィルダムの外部変形計測の重要測点の選定方法  
学術雑誌名 : ダム工学  
巻、号、頁 : Vol.1 , No. 21 , pp.21-38  
発行年月 : 平成23年 1 月発行  
(本文との関連 : 6 章)
- (3) 著者氏名 : Yoshikazu Yamaguchi, Masafumi Kondo, Toshihide Kobori  
論文題目 : Safety inspections and seismic behavior of embankment dams during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake  
学術雑誌名 : Soils and Foundations  
巻、号、頁 : Vol. 52, Issue 5, pp.945-955  
発行年月 : 平成24年12月発行  
(本文との関連 : 5 章)
- (4) 著者氏名 : 小堀俊秀, 山口嘉一, 岩崎智治, 中島伸一郎, 清水則一  
論文題目 : フィルダム天端堤体内部に設置する GPS アンテナの変位計測性能実験とダム外部変形計測の適用性  
学術雑誌名 : 土木学会論文集F3 (土木情報学)  
巻、号、頁 : Vol.70 , No.1 , pp.18-28  
発行年月 : 平成26年 7 月発行  
(本文との関連 : 4 章)

**(b) 査読のある国際会議の会議録等**

- (1) 著者氏名 : Yoshikazu Yamaguchi, Toshihide Kobori, Hitoshi Yoshida,  
Tadahiko Sakamoto, Hideharu Itaya, Tomoharu Iwasaki  
論文題目 : Real-Time Monitoring of Exterior Deformation of Embankment Dams Using  
GPS  
学術雑誌名 : Proceedings of 23rd International Congress on Large Dams  
巻、号、頁 : Q.91, R.1  
発行年月 : 平成17年 5 月 発行  
( 本文との関連 : 4 章 )
- (2) 著者氏名 : Toshihiko Kasai, Yoshikazu Yamaguchi, Toshihide Kobori,  
Tadahiko Sakamoto  
論文題目 : Exterior Deformation Measurement For CFRD After a Large-Scale Earthquake  
Using GPS  
学術雑誌名 : Proceedings of ICOLD 78th Annual Meeting Symposium  
巻、号、頁 : Topic 6-05, 20 pages  
発行年月 : 平成22年 6 月 発行  
( 本文との関連 : 5 章 )
- (3) 著者氏名 : Yoshikazu Yamaguchi, Toshihide Kobori, Takashi Sasaki,  
Tomoharu Iwasaki, Tomohiro Masunari, Norikazu Shimizu  
論文題目 : Application of the GPS for Monitoring Exterior Deformation of Embankment  
Dams  
学術雑誌名 : Proceedings of ICOLD 81st Annual Meeting Symposium  
巻、号、頁 : pp.2399-2410  
発行年月 : 平成25年 6 月 発行  
( 本文との関連 : 3 章, 7 章 )
- (4) 著者氏名 : Toshihide Kobori, Yoshikazu Yamaguchi, Shinichiro Nakashima,  
Norikazu Shimizu  
論文題目 : Displacement Monitoring of a Rockfill Dam Before, During and After The  
Great East Japan Earthquake Using GPS  
学術雑誌名 : Proceedings of 8th Asian Rock Mechanics Symposium  
巻、号、頁 : pp.930-938  
発行年月 : 平成26年10月 発行  
( 本文との関連 : 5 章 )



**(c)その他**

(1)著者氏名 : 葛西敏彦、山口嘉一、小堀俊秀

論文題目 : 大規模地震で被災したフィルダムのGPSによる地震後の変形  
挙動監視 - 岩手・宮城内陸地震後の石淵ダムの変形挙動監  
視 -

学術雑誌名 : ダム技術

巻、号、頁 : No.276 , pp.9-20

発行年月 : 平成21年9月発行

(本文との関連 : 5章)

