

土木研究所資料

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

平成 22 年 12 月

独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム構造物チーム

Copyright © (2010) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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

水工研究グループ ダム構造物チーム 上席研究員 山口 嘉一
研 究 員 小堀 俊秀

要 旨：

「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」を、一般社団法人ダム工学会、独立行政法人土木研究所、国立大学法人山口大学の3者の共催、財団法人ダム技術センターの協賛で、2010年10月1日（金）に、東京都千代田区において開催した。本シンポジウムは、ダム工学会の20周年記念事業の一環として位置づけている。本シンポジウムでは、ダムの安全管理や点検のための計測における最新技術に関して、産官学の技術者、研究者が一同に会し最新技術に関する論文発表や質疑応答を通じて、今後の新しい計測機器、システムを用いたダムの安全管理のあり方について討論、技術の交換等を行うことを趣旨とした。本資料は、シンポジウムでの発表論文等を取りまとめたものである。

キーワード：安全管理、計測、臨時点検、総合評価、GPS、長寿命化

はじめに

我が国においては、他の公共構造物と同様に、完成後長期間を経過したダムが増加する一方、厳しい財政条件を反映してその管理に関する予算は縮減傾向にある。しかし、ダムは社会基盤を構成する重要構造物として、長期間にわたって効果的に活用しなければならない。そのためには、既設ダムの安全管理を適切に行うための技術開発・研究が重要となってくる。

このような現状に鑑み、独立行政法人土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チームにおいては、GPS (Global Positioning System) を用いたダムの変位計測に基づく安全管理や既設ダムの超寿命化の研究などを積極的に実施してきている。また、この研究を効果的、効率的に進めるために、土木研究所 ダム構造物チームは、GPS 変位計測の高精度化についての最先端の研究を実施している国立大学法人 山口大学 工学部との意見交換、議論を行うために「土木研究所・山口大学 GPS 変位計測研究会」(以下、ダム GPS 研究会)を、平成 21 年 6 月 25 日に設立した。

ダム GPS 研究会を進めていくなかで、ダムの安全管理やそのための計測技術に関する小規模なシンポジウムを開催して、情報交換や議論の場を少しずつ広げていきたいという意見がでた。シンポジウム開催の検討を進める中で、シンポジウムを土木研究所と山口大学の 2 者のみで進めるのではなく、ダム工学研究の向上発達と研究成果の社会へのすみやかな還元をはかることを目的として設立されている、一般社団法人 ダム工学会と共同で開催することにより、情報交換や議論の場をより大きくすることを目指した。

平成 22 年 3 月より企画、準備を開始し、平成 22 年 10 月 1 日(金)に、東京都千代田区内神田において、「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」を、当初予想を上回る 90 名の参加者を得て開催することができた。これも、本シンポジウムの企画・準備に参加いただいた方々のご支援の賜物である。

シンポジウムでは、3 つのキーノートレクチャーと 13 編の一般論文発表が行われた。キーノートレクチャーの具体的表題は、「ダムの経過年数を考慮した安全管理の提案 (財団法人 ダム技術センター 吉田 等 (敬称略、以下同様))」、「ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題 (土木研究所 山口 嘉一)」、「GPS による変位計測技術の変遷と展望 (山口大学 清水 則一)」であった。また、一般論文発表では、ダム GPS 研究会で検討対象とした GPS 技術だけでなく、ワイヤレス計器、振動弦型計器、合成開口レーダーなどの技術の発表や特殊基礎処理を施したダムや再開発ダムにおける計測事例など、現在におけるダムの安全管理・点検に関する幅広い観点からの研究発表がなされ、活発な質疑応答、議論がなされた。これにより、多くの参加者にダムの安全管理・点検に関する最新の情報を提供するとともに、今後の検討課題を示すことができた。

本資料においては、本シンポジウムにおける、3 編のキーノートレクチャー原稿と 13 編

の一般論文とともに、発表に用いられたスライドを収録した。本資料については、シンポジウムの参加者のみならず、幅広く頒布することにより、多くのダム関係の技術者、研究者に有用な技術資料になるものと確信している。加えて、出来るだけ早い時期に、第 2 回のシンポジウムを開催し、ダムの安全管理・点検に関する、さらに幅広い技術開発、研究、事例などに関する情報交換、議論の場を設けたいと考えている。是非期待していただきたい。

平成 22 年 12 月吉日

独立行政法人土木研究所
水工研究グループ ダム構造物チーム 主席研究員

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
技術委員会 共同委員長

山口 嘉一

目 次

1. シンポジウム開催のための組織	1
2. 開催案内・プログラム	3
3. キーノートレクチャー	
[KN-1] ダムの経過年数を考慮した安全管理の提案	7
財団法人 ダム技術センター	吉田 等
[KN-2] ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題	11
独立行政法人 土木研究所	山口 嘉一
[KN-3] GPS による変位計測技術の変遷と展望	35
国立大学法人 山口大学	清水 則一
4. テクニカルセッション	
TS-1 新しい計測技術①	
[TS-1-1] フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムの開発	55
岩崎 智治 (国際航業株式会社)、小堀 俊秀、増成 友宏、清水 則一	
[TS-1-2] 沼原ダムにおける GPS を用いた堤体挙動測定	67
喜多 佑介 (電源開発株式会社)、水田 真二、江原 昌彦	
[TS-1-3] 重力式コンクリートダムの変位計測への GPS の適用	77
山口 嘉一 (独立行政法人土木研究所)、小堀 俊秀	
[TS-1-4] GPS によるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の取り組み	91
佐藤 信光 (独立行政法人水資源機構)、富田 尚樹、波多野 圭亮、 曾田 英揮	
TS-2 新しい計測技術②	
[TS-2-1] ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証	103
林田 洋一 (独立行政法人農研機構 農村工学研究所)、遠口塚 良一、 浅野 勇、増川 晋、田頭 秀和	
[TS-2-2] SAR (合成開口レーダー) によるフィルダム外部変形計測の適用性の検討	117
佐藤 弘行 (独立行政法人土木研究所)、山口 嘉一、小堀 俊秀、 岩崎 智治、飯島 功一郎、虫明 成生、原田 正道、本田 謙一	
[TS-2-3] ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートの ひび割れ観察手法の開発と実ダムへの適用	125
中野 靖 (東京電力株式会社)、岡田 和明、山内 優	

TS-2-4	既設アンカー・緊張力モニタリングシステムの開発	135
	田中 尚 (Aki-Mos 研究会・事務局 (日特建設株式会社))、藤澤 和範、 横田 弘	

TS-2-5	GPS および振動弦型水圧計によるフィルダム挙動の観測事例	151
	中島 伸一郎 (国立大学法人山口大学)、川崎 秀明、久保田 昇助 中野 太郎、清水 則一	

TS-3 実ダムでの計測

TS-3-1	H20 岩手・宮城内陸地震における石淵ダム安全確認 (湛水)試験について	165
	佐藤 慶竜 (国土交通省 東北地方整備局 北上川ダム統合管理事務所)、 鈴木 弘二、大塚 勝章	

TS-3-2	砂礫層を基礎とした忠別ダムの挙動について	183
	京田 悟 (国土交通省 北海道開発局)、西村 義、野村 強、前田 章博	

TS-3-3	津軽ダムの施工に関する (近接) 日屋ダムの挙動計測について	197
	谷田 広樹 (国土交通省 東北地方整備局 津軽ダム工事事務所)、田川 和義、 腰山 武治	

TS-3-4	管理段階のダム (羽地ダム・福地ダム) における GPS 自動計測システムの導入事例	213
	上原 勇賢 (内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所)、大城 朝一、 新垣 敏一	

5. 開催報告		225
----------------	--	-----

1. シンポジウム開催のための組織

1. シンポジウム開催のための組織

ダム計測シンポジウムでは、開催にあたり、実行委員会と技術委員会を組織した。

実行委員会は、ダム計測シンポジウムの運営に当たった。実行委員会委員名簿を表-1 に示す。

表-1 実行委員会委員名簿

役職	名前	所属
共同実行委員長	本庄正史	ダム工学会副会長、(株)大林組 副社長
共同実行委員長	川崎秀明	国立大学法人 山口大学 教授
実行委員	安部友則	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ長
実行委員	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 上席研究員
実行委員	清水則一	国立大学法人 山口大学 教授
実行委員	池田 隆	ダム工学会企画運営委員会副委員長 財団法人 ダム技術センター 企画部長

*) 敬称略。

また、技術委員会は、ダム計測シンポジウムの論文募集、論文収集、書式チェック、論文集印刷を担当した。技術委員会委員名簿を表-2 に示す。

表-2 技術委員会委員名簿

役職	名前	所属
共同技術委員長	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 上席研究員
共同技術委員長	清水則一	国立大学法人 山口大学 教授
技術委員	川崎秀明	国立大学法人 山口大学 教授
技術委員	中島伸一郎	国立大学法人 山口大学 助教
技術委員	宮内茂行	ダム工学会学術研究発表会小委員会委員長 独立行政法人 水資源機構 総合技術センター マネージャー
技術委員	小堀俊秀	独立行政法人 土木研究所 研究員

*) 敬称略。

なお、ダム計測シンポジウムの総務関係の運営にあたり、森芳夫氏（ダム工学会学術研究発表会小委員会副委員長、アイドルエンジニアリング株式会社）の協力を得た。

2. 開催案内・プログラム

ダム工学会20周年記念事業

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

平成22年10月1日(金)9:30~17:00



土木学会認定
GPD プログラム

主 催：一般社団法人 ダム工学会
独立行政法人 土木研究所
国立大学法人 山口大学

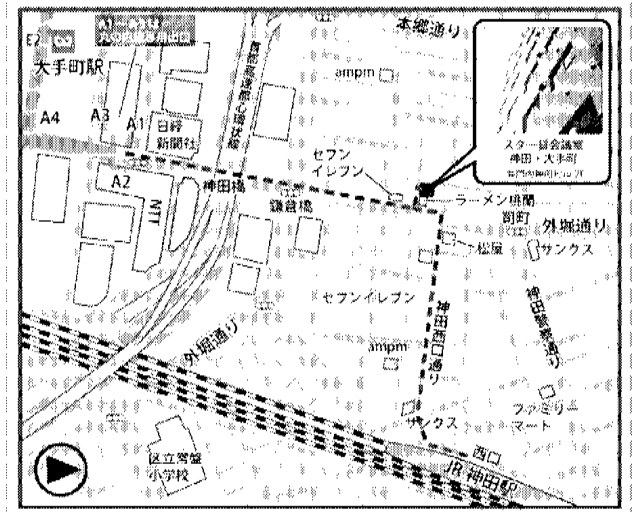
協 賛：財団法人 ダム技術センター

場 所：スター貸会議室 神田・大手町

アクセス：

JR 山手線・中央線・京浜東北線「神田駅」西口 徒歩 5 分
東京メトロ銀座線「神田駅」1 番出口 徒歩 5 分
東京メトロ千代田線・半蔵門線・丸の内線・東西線、
都営三田線「大手町駅」徒歩 6 分

参 加 費：2000 円（当日会場にてお支払い下さい。）



ご参加には
事前申し込みが必要です。
お問い合わせ・申し込み先 →

〒166-0011 東京都杉並区梅里 1-7-7

アイドルエンジニアリング(株) 設計部

ダム工学会学術研究発表会小委員会 事務局 森、西村

TEL : 03-5306-1702、FAX : 03-5306-5842（申し込み用紙は別紙）

プログラム（調整中）

(9:00~9:30 受付)

9:30~9:45 **開会 主催者挨拶**

9:45~12:00 **キーノートレクチャー**

- ・ダムの経過年数を考慮した安全管理の提案 吉田 等 (財団法人 ダム技術センター)
- ・ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題 山口 嘉一 (独立行政法人 土木研究所)
- ・GPS による変位計測技術の変遷と展望 清水 則一 (国立大学法人 山口大学)

(12:00~13:00 休憩)

13:00~14:15 **テクニカルセッション1 セッション名：新しい計測技術①**

発表論文数 5 (予定)

(14:15~14:30 休憩)

14:30~15:30 **テクニカルセッション2 セッション名：新しい計測技術②**

発表論文数 4 (予定)

(15:30~15:45 休憩)

15:45~16:45 **テクニカルセッション3 実ダムでの計測事例**

発表論文数 4 (予定)

16:45~17:00 **購読・閉会**



吉田 等



山口 嘉一



清水 則一

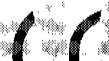
シンポジウムの内容に関するお問い合わせ先

独立行政法人土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チーム

研究員 小堀 俊秀

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6

TEL : 029-879-6781 FAX : 029-879-6737 E-mail : kabori@pw1.go.jp



ダム工学会20周年記念事業

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

平成22年10月1日(金)9:30～17:00



土木学会認定
GPD プログラム

主 催: 一般社団法人 ダム工学会
独立行政法人 土木研究所
国立大学法人 山口大学
協 賛: 財団法人 ダム技術センター

プログラム

受 付 09:00 - 09:30

開 会 式

09:30 - 09:45

共同実行委員長挨拶

本庄 正史 ダム工学会副会長、(株)大林組
川崎 秀明 山口大学

キーノートレクチャー

09:45 - 10:25

ダムの経過年数を考慮した安全管理の提案

吉田 等 (財)ダム技術センター

10:25 - 11:05

ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題

山口 嘉一 (独)土木研究所

11:05 - 11:45

GPS による変位計測技術の変遷と展望

清水 則一 山口大学

11:45 - 12:00

質疑応答

昼 食 12:00 - 13:00

テクニカルセッション①

13:00 - 14:00

新しい計測技術①

座長: 山口 嘉一 (独)土木研究所

TS-1-1

フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムの開発

岩崎 智治 国際航業(株)

TS-1-2

沼原ダムにおける GPS を用いた堤体挙動測定

喜多 佑介 電源開発(株)

TS-1-3

重力式コンクリートダムの変位計測への GPS の適用

小堀 俊秀 (独)土木研究所

TS-1-4

GPS によるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の取り組み

佐藤 信光 (独)水資源機構

休 憩 14:00 - 14:15



テクニカルセッション②

14:15 - 15:30

新しい計測技術②

座長：川崎 秀明 山口大学

TS-2-1

ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証

林田 洋一 (独)農研機構 農村工学研究所

TS-2-2

SAR(合成開口レーダー)によるフィルダム外部変形計測の適用性の検討

佐藤 弘行 (独)土木研究所

TS-2-3

ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートの

ひび割れ観察手法の開発と実ダムへの適用

山内 優 (株)東設土木コンサルタント

TS-2-4

既設アンカー緊張力モニタリングシステムの開発

田中 尚 Aki-Mos研究会・事務局
(日特建設(株))

TS-2-5

GPS および振動弦型水圧計によるフィルダム挙動の観測事例

中島 伸一郎 山口大学

休 憩 15:30 - 15:45

テクニカルセッション③

15:45 - 16:45

実ダムでの計測事例

座長：佐藤 信光 (独)水資源機構

TS-3-1

H20岩手・宮城内陸地震における石淵ダム安全確認(湛水)試験について

大塚 勝章 国土交通省 東北地方整備局 北上川ダム統合管理事務所

TS-3-2

砂礫層を基礎とした忠別ダムの挙動について

西村 義 国土交通省 北海道開発局

TS-3-3

津軽ダムの施工に関する(近接)目屋ダムの挙動計測について

腰山 武治 国土交通省 東北地方整備局 津軽ダム工事事務所

TS-3-4

管理段階のダム(羽地ダム・福地ダム)における GPS 自動計測システムの導入事例

新垣 敏一 内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所

閉 会 式

16:45 - 17:00

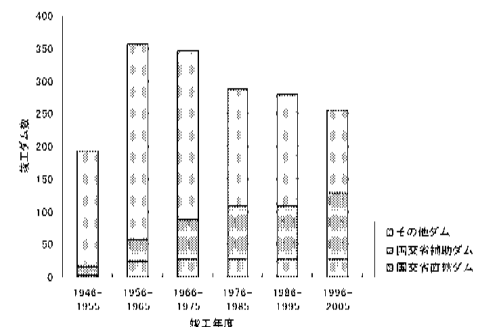
閉会の挨拶 安部 友則 (独)土木研究所

メモ



3. キーノートレクチャー

平成22年10月1日
 (財)ダム技術センター
 研究第一部長 吉田 等

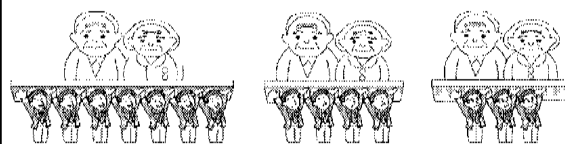


✓このほか、第二次世界大戦までに竣工したダムが約1000ダム
✓5年後には、経過年数50年以上のダムが1500ダムを超える

[illegible]

2050年

〔出典〕日本経済産業省人口政策調査課「人口問題研究」第10号（平成14年1月）による。

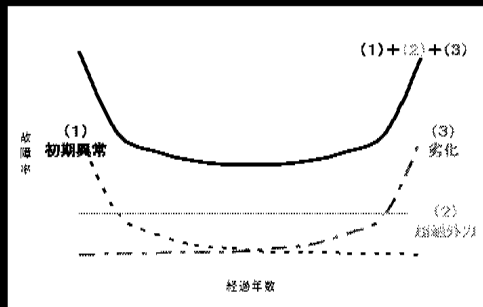


2025年までの25年間に、高齢者に対する負担が倍増

* 計測技術の開発は、喫緊の課題

◎ 計測の考え方を転換する必要

経過年数に応じた計測の着目点



ダムを経過年数と故障率

経過年数に応じた計測（安全管理）の提案

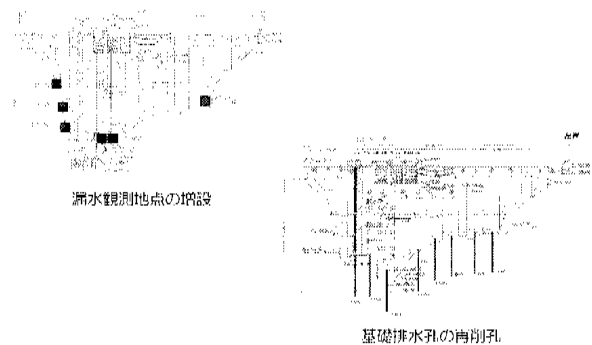
- I. 日常の安全管理のための計測
- II. 危機管理のための計測
- III. 劣化の監視のための計測

ダムを経過年数に応じて
重点をシフトさせる必要

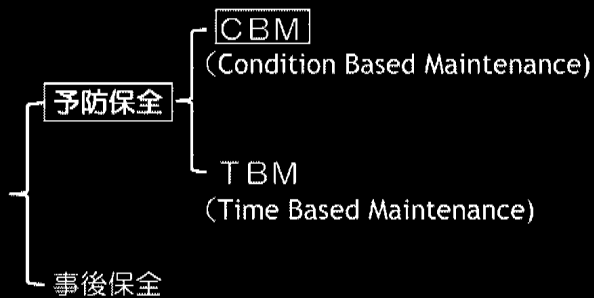
危機管理のための計測

- 大規模ダム、下流に大都市を控えたダムは、大地震や大洪水に対する危機管理に万全を期す必要
- 大地震や大洪水発生時に、直ちに異常発生の有無と異常発生箇所を特定できる計測が必要
 - ・ダム本体
 - ・放流設備
 - ・周辺地山（地すべり、掘削のり面）

危機管理のための計測強化の例



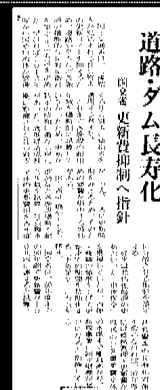
劣化の監視のための計測



※TBMからCBMへ

※CBMを推進するためには、計測の強化が不可欠

ダムの長寿化指針の策定



- 点検・修繕の頻度を上げて、更新までの期間を長期化させる
- 2012年から指針適用

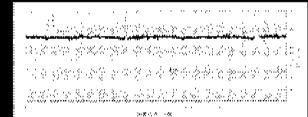
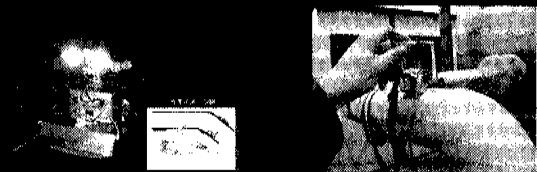
（日本経済新聞：10.09.17）

劣化の計測の新たなニーズ

【例】
巡視、点検でカバーできない部分の
計測技術の開発

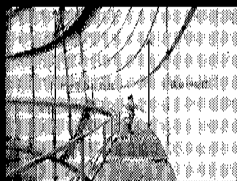
- ・鋼材の板厚、塗装皮膜厚の測定
- ・堤体のクラック調査

鋼材の板厚、塗膜厚の測定事例

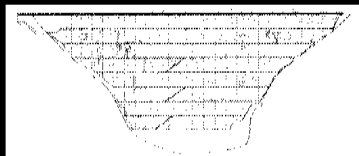


<http://www.tdsnet.co.jp/>より引用

堤体のクラック調査事例



<http://www.tdsnet.co.jp/>より引用



「ビデオカメラを用いたダムダム下流面コンクリートのひび割れ調査」実の報告
(中野編訳:「ダム」第20(3),177-180,2010より引用)

まとめ

- 計測を強化することによって維持管理費用を削減し、省力化を推進できる
- 計測技術の開発は喫緊の課題
- ダムの経過年数に応じて計測の重点がシフト
- 大規模ダム、大都市を控えるダムは危機管理に万全を
- 劣化の監視はTBMからCBMへ
CBMの推進には計測技術の開発が不可欠

ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題

山口 嘉一¹

わが国のダムの総数は 2009 年までにおよそ 2700 に及ぶ。ダムの建設は、1960 年代から 1970 年代にピークを迎えた。これらのダムが今後一斉に完成後 50 年を迎え、老朽化に伴い機能の発揮が不十分になる等の問題の発生が予想される。しかし、既存のダムは社会基盤を構成する重要な構造物として、効果的に活用しなければならない。そのため、既設ダムの適切な安全管理が必要になる。

本論文では、まずわが国におけるダムの安全管理の現状について紹介する。次に、わが国のダムの安全管理に関する課題とその対策について示す。最後に、ダムの安全管理の合理化・高度化への取り組みとして計測における省力化・自動化等の最新の技術を紹介する。

キーワード：ダム，安全管理，有効利用，計測，合理化，高度化

1. はじめに

ダムは、万一事故が生じ、貯水が大量に流下するような事故が発生すると、下流に甚大な被害が生じる。そのため、他の構造物以上に慎重で適切な安全管理を継続的に行う必要がある。ダムの安全管理のための計測は、巡視と併せてダムの堤体および基礎地盤の安全性を確実に確認できるものでなければならない。ダムおよび貯水池の安全管理という観点からは、貯水池地すべりについても言及すべきであるが、ここではダムの堤体および基礎地盤の安全管理に限定する。

わが国のダムの安全管理については、法令である河川管理施設等構造令¹⁾において、必要な計測項目が規定されている。これは、ダムの安全管理にとって必要最小限の計測項目、換言すれば最も重要な計測項目である。

わが国では、1960 年代から 1970 年代にかけて多くの大規模ダムが建設された。これらのダムが今後一斉に完成後 50 年を迎える。1900 年以降に建設された既設ダム（予定を含む）の完成後の経過年数区分の経年推移を図-1 に示す。完成後 50 年以上経過したダムは、2010 年には全完成ダムの 45% に達し、2020 年には 58% と過半数を超える。

このように完成後、長期経過したダムが増える一方、厳しい財政状況を反映してダムの管理に関する予算は縮減傾向にある。さらに、このようなダムの中には施設の老朽化等により必ずしも適切な安全管理が行われ

ていない事例もみられる。しかし、ダムは社会基盤を構成する重要な構造物として、効果的に活用されなければならない。そのため、既設ダムの適切な安全管理が必要になる。

本論文では、まずわが国におけるダムの安全管理の現状について紹介する。次に、ダムの安全管理に関する課題とその対策について示す。最後に、ダムの安全管理の合理化・高度化への取り組みとして計測における省力化・自動化等の最新の技術を紹介する。

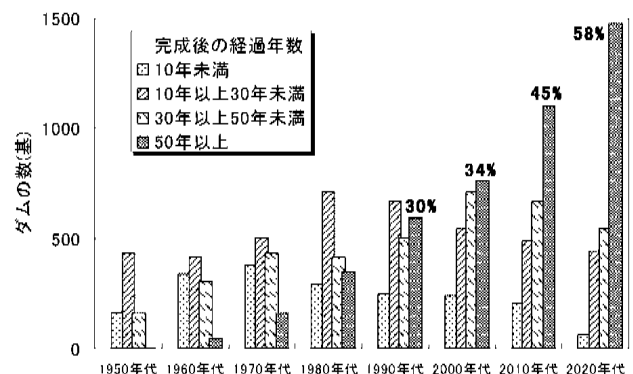


図-1 既設ダムの完成後経過年数区分の経年推移²⁾

2. ダムの安全管理の現状

2.1 計測項目

ダムの安全管理上、必要最小限の計測項目は、河川管理施設等構造令¹⁾においてダムの型式と堤高に応じて表-1 のように定められている。なお、平成 7 年（1995 年）の兵庫県南部地震以降、ダムサイトにおける地震

¹ 独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チーム、主席研究員、博(工)

動観測網の充実を図る目的から地震動の計測が事実上の必須項目となっている³⁾。

2.2 計測頻度⁴⁾

安全管理のための計測は、ダム堤体および基礎地盤の挙動に異常が生じた場合に、直ちにそれを探知できる適切な頻度で実施する必要がある。

ダム堤体および基礎地盤の挙動の安定性は、ダムの型式、規模、湛水後の経過年数等によって異なってくるため、計測頻度はこれらに応じて定めるのが妥当と考えられる。

また、計測項目によって、ダム堤体および基礎地盤の安全性に対する評価方法が異なるため、計測頻度は計測項目に応じて変化することが妥当と考えられる。

ダム堤体および基礎地盤の安全性を判断する場合、ダ

ム完成後の年数に応じて次の3つの時期に分けることが一般的である。

- (1) 湛水開始から湛水以後所要時間を経過するまでの期間（第1期）
- (2) 第1期経過以後、ダムおよび基礎岩盤の挙動が定常状態に達するまでの期間（第2期）
- (3) ダムの挙動が定常状態に達した以降の期間（第3期）

土木研究所資料⁴⁾では、計測の頻度を各時期に対して表-2を標準とすることが望ましいとしている。表-2における計測項目は、河川管理施設等構造令に示されている最低限の項目よりも多くなっている。これは、土木研究所資料で対象としているのが、比較的規模の大きいダムであることによる。

表-1 河川管理施設等構造令 第13条（計測装置）＜抜粋＞¹⁾

(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 分		計 測 事 項
	ダ ム の 種 類	基礎地盤から堤頂 までの高さ (単位 m)	
一	重力式コンクリートダム	50 未満	漏水量 揚圧力
		50 以上	漏水量 変 形 揚圧力
二	アーチ式コンクリートダム	30 未満	漏水量 変 形
		30 以上	漏水量 変 形 揚圧力
三	フィルダム	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、前項に規程するもののほか、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 安全管理のための計測頻度⁴⁾

(a) 第1期

項目 型式	漏水量	変形量	揚圧力 または 間隙水圧	浸潤線	温度	応力 または 土圧	ひずみ または せん断変位	巡視による 堤体等の 状況
重力式 コンクリートダム	1回 / 1日	1回 / 1日	1回 / 1日	-	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日
アーチ式 コンクリートダム	1回 / 1日	1回 / 1日	1回 / 1日	-	1回 / 3.5日*	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日
ロックフィルダム	1回 / 1日	1回 / 7日	1回 / 1日	-	-	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日
アースダム	1回 / 1日	1回 / 7日	1回 / 1日	1回 / 1日	-	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日

*: 1回 / 3.5日は週2回の意である。

(b) 第2期

項目 型式	漏水量	変形量	揚圧力 または 間隙水圧	浸潤線	温度	応力 または 土圧	ひずみ または せん断変位	巡視による 堤体等の 状況
重力式 コンクリートダム	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 7日	-	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月
アーチ式 コンクリートダム	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 7日	-	1回 / 0.5月	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月
ロックフィルダム	1回 / 7日	1回 / 1月	1回 / 7日	-	-	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月
アースダム	1回 / 7日	1回 / 1月	1回 / 7日	1回 / 7日	-	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月

(c) 第3期

項目 型式	漏水量	変形量	揚圧力 または 間隙水圧	浸潤線	温度	応力 または 土圧	ひずみ または せん断変位	巡視による 堤体等の 状況
重力式 コンクリートダム	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月	-	-	-	-	1回 / 1月
アーチ式 コンクリートダム	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月	-	1回 / 1月	-	-	1回 / 1月
ロックフィルダム	1回 / 1月	1回 / 3月**	1回 / 1月	-	-	-	-	1回 / 1月
アースダム	1回 / 1月	1回 / 3月**	1回 / 1月	1回 / 1月	-	-	-	1回 / 1月

**: 状況に応じて測定間隔をのばすことができる。

2.3 地震直後の安全点検

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20年10月28日付国河第3号「地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について」の中の次の(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。

(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。

(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、二次点検の実施を省略できるものとする。なお、地震計が設置されていないダムにおいては、二次点検は省略できないものとする。

上記は、従来の臨時点検より緩和されている。具体的には二次点検が省略されている。この緩和に際しては、以下のように、「二次点検(堤体)を省略できないダム」を設定している。

- (1) 管理の期間の区分における第1期および第2期のダム
- (2) 堤高が100mを越えるダム
- (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
- (4) 基礎地盤が岩盤でないダム
- (5) 特殊な基礎処理を行ったダム(袖部を除く)
 - ・連続地中壁により基礎処理を行っているダム

- ・二重管ダブルバックカー工法により基礎処理を行ったダム
- ・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
- ・配筋が必要なコンクリート置換工を行っているダム

2.4 老朽化したダムの安全点検⁵⁾

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のうち、完成後長期間を経過したダムの一部では、これまで、財団法人ダム技術センターにより、建設当時の設計、施工、試験洪水、日常の管理点検を含めて、ダムの挙動等について総合的に点検を行う「総合評価」を実施している。

総合評価では、現行河川管理施設等構造令に照らした安定解析、管理記録に基づく点検および解析、現地調査に基づく点検やゲート関連設備の点検を行い、構造物の安全度の評価や危険が想定される場合の事故防止対策および管理への提言等が行われている。ダム技術センターが実施した、総合評価の実施までの平均経過年数とダムの数の関係を図-2に示す。この図より、総合評価は、主に20～30年経過したダムを対象に実施していることがわかる。

ダム総合評価では、図-3に示すように、既設ダムを対象に「ダムの機能の維持と安全性の確保」の観点から、安全性に着目した「施設点検」と洪水調節機能等の妥当性を評価する「機能点検」を実施している。

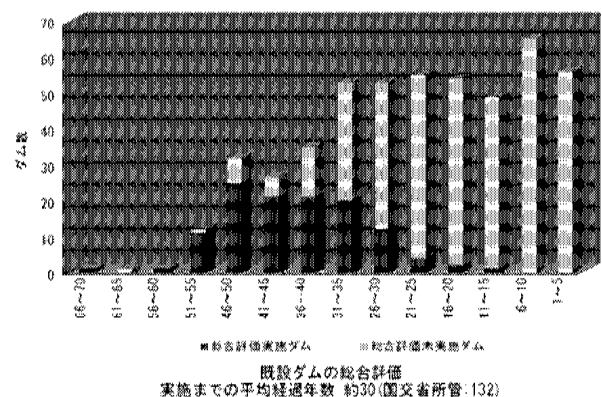


図-2 総合評価実施済みの完成後の平均経過年数とダム数の関係⁵⁾

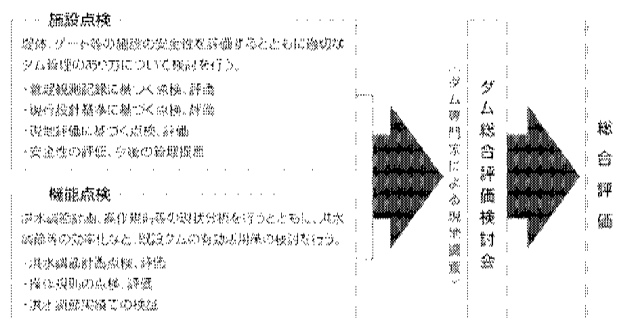


図-3 ダム総合評価の流れ⁵⁾

3. ダムの安全管理における課題

本章では、近年のわが国におけるダムの安全管理に関する課題について述べる。まず、完成後長期間経過したダムの安全管理の考え方として、安全管理の第3期移行の判断について示す。次に、安全管理の第3期に移行したダムの計測の現状を踏まえ、コンクリートダムとフィルダムに分けて計測の現状と課題への取り組みを紹介する。また、このような安全管理における経年的な課題の他に、大規模地震に備えた計測の課題についても示す。さらに、新しいダムの型式として、近年計画事例が増えた流水型ダムや再開発ダムにおける計測について示す。

3.1 安全管理の第3期移行の判断

わが国のダムの安全管理は、「2.2 計測頻度」に紹介したように、三期に分けて実施されている。このうち第3期は、ダムの挙動が安定したことが確認できた後の期間である。挙動が安定するとは、貯水位等の変化に計測値が正常に追随し、その値が定常状態に達したと判断されることをいう。なお、定常状態とは、貯水位、堤体の温度等の外的要因を一定とした場合に、計測されたデータがほぼ一定値となる状態をいう。

つまり、安全管理の第3期への移行の判断は経過年数のみによるものではない。あくまでも、気温、降雨、貯水位等の季節変化等、特に貯水位の変化を考慮し、ダムの挙動の安定を確認することが重要である。

ダム挙動の安定判断をする際には、計測値の経時変化図や貯水位と計測値の相関図の他、主たる荷重である貯水位が一定の条件下での計測値の経時変化で整理するとよい。例えば、コンクリートダムの漏水量、揚圧力、変形等の計測値の傾向としては表-3のような傾向が考えられる。

3.2 完成後長期間経過したダムの挙動計測

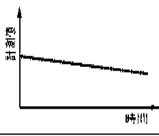
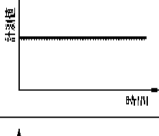
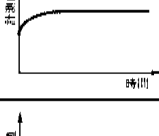
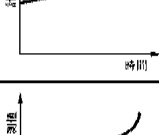
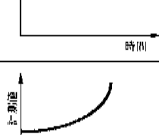
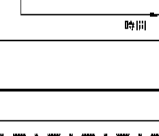
2.4に示すダムの総合評価によると、ダムの劣化事象の中に「計器異常」が含まれている。つまり、完成後長期間経過したダムの中には、重要な計測項目・箇所であっても、「計器異常」により計測をとりやめた後復旧していない等、安全管理上適切ではない計測箇所の削減が行われている事例もあると考えられる。そのため、ダムを長寿命化し、適切な有効利用を図るためには、ダム計測計器の状況調査、必要に応じた更新を義務付ける基準等の整備が望まれる。

3.2.1 コンクリートダムの計測の現状と課題への取り組み

安全管理の第3期に入った重力式コンクリートダムの中には、重要な計測項目・箇所であっても、計器の故障により計測をとりやめた後復旧していない等、安全管理上適切ではない事例がみられる。これらの課題を解決するために、土木研究所では、コンクリートダムの安全管理における必要最小限の計測箇所の選定方法について取りまとめを行っている⁷⁾。

ダムの堤体および基礎地盤の挙動が安定した安全管理の第3期に入った重力式コンクリートダムにおける必要最小限の計測箇所選定の流れを図-4に示す。なお、ここで対象とする計測項目は、河川管理施設等構造令で規定されている、①漏水量、②変形、③揚圧力である。

表-3 貯水位が一定の条件下での計測値の傾向⁶⁾

条件	概念図	概念図の説明	状態
(i)		漏水量、揚圧力、たわみ、応力等の測定値が外荷重の変動によって増減するが、同一の荷重状態でみるときに時間とともに減少する場合。	完成後、数年以上経過したダムでよく見られる現象で極めて安定した状態である。
(ii)		測定値が同一の荷重状態でみるときに時間に無関係に一定している場合。	極めて安定した状態にある。
(iii)		測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加しているが、その増加している割合が時間とともに減少している場合。	湛水直後のダムによく見られる現象である。この状態は、いずれは安定化する傾向を示しており、危険な状態とはいえない。
(iv)		測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加していて、その増加する割合が時間に無関係に一定している場合。	危険な状態にあると云える。しかし、(iii)の状態にあって収斂が遅い場合にも(iv)の状態にあるように見えることがある。この場合にはいずれにせよ安全性の余裕は小さいことを示しているのであるから原因、対策等の調査をしておく必要がある。
(v)		測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加していて、その増加する割合が時間とともに増加している場合。	明らかに危険な状態であり、早急な対策が必要となる。
(vi)		測定値が同一の荷重状態で急激に増加していく場合。	破壊に近い状態であり、それが部分的な現象にとどまっているか否かによりその対策は異なってくるが、ダムの安全性に大きな影響を与える部分の測定値がこのようなようになったときは、水位を下げる等の緊急な処置が必要となろう。

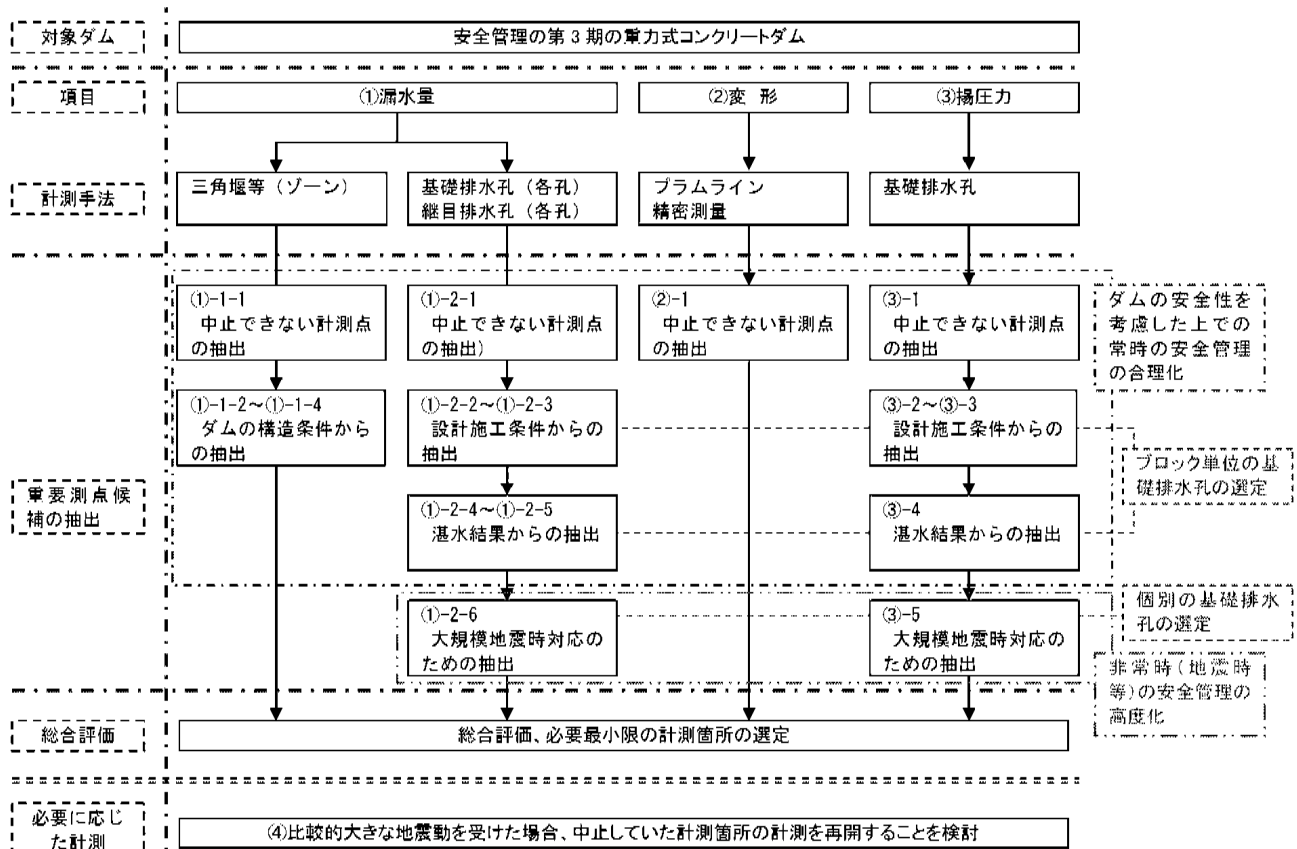


図-4 コンクリートダムにおける必要最小限の計測箇所選定の流れ⁷⁾

3.2.2 フィルダムの計測の現状と課題への取り組み

安全管理の第3期に入り挙動が安定したフィルダムの安全管理のための外部変形計測については、測量による計測の煩雑さや、人件費がかなりの負担となっている場合がある。また、地震時等の非常時における臨時点検においては、被災地での測量作業員の確保が困難であるうえ、非常時に外部変形計測を行うことは作業員に危険がともなう。そのため、フィルダムの外部変形挙動を安全にかつ迅速に計測することが望まれている。

これらの課題を解決するために、山口ら⁸⁾は高精度かつ迅速に計測を行うことができるGPS変位計測システムを用いて、フィルダムの外部変形計測への適用性を検証し、既に多くのダムで適用されている。

しかし、現在、管理段階のダムでは安全管理のための予算が限られており、フィルダム堤体の外部変形計測用の測量全点にGPSセンサー等の高精度の自動変位計測機器を設置することは難しい。そのため、ダムごとに重要な計測地点を選定した上で、効果的に変位計測機器を設置する必要がある。また、重要な計測地点を選定することにより、これまでの測量による外部変形計測においても効率的な安全管理を行うことができる。そこで、土木研究所では、安全管理の第3期のフィルダムを対象にした外部変形計測への、高精度の自動変位計測機器の効率的かつ効果的な適用を目的として、外部変形計測の重要測点の選定方法について検討を行った²⁾。安全管理の第3期のフィルダムの外部変形計測の重要測点選定の流れを図-5に示す。

3.3 大規模地震に備えた計測の課題

安全管理は、計測結果のみにより行えるものではない。安全管理には、計測に加えて目視による点検が重要である。これは計器を用いた計測では必ずしもとらえられないダムの挙動や状態を目視により把握するためである。つまり、定量的な評価のできる計測と目視を適切に組み合わせることが、ダムの安全管理の基本である。

大規模地震後の安全管理を適切に、精度高くかつ迅速に実施するためには、以下の課題についても併せて検討していく必要がある。

a) 地震時のような非常時のみならず常時も含めて過

去の各種計測データの推移を整理し、地震時貯水位における過去の計測データとの比較を迅速に行う。

- b) 過去の地震により、ダムの不等沈下や亀裂の発生等の被害を受けた場所に関する情報（写真を含む）をデータベース化する。
- c) 過去の補修履歴に関する情報（写真を含む）をデータベース化する。
- d) 大規模地震に対するダム耐震性能照査⁹⁾の解析結果に基づき損傷の形態やその発生が推定される箇所を念頭においたうえで、適切な計測計器の選定ないしは開発するとともに、大規模地震時の安全管理体制を確立する。

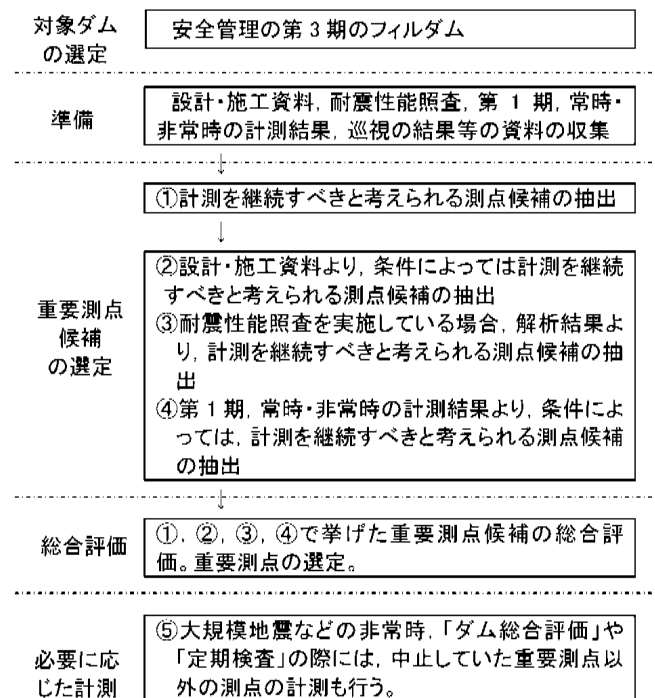


図-5 フィルダム外部変形計測の重要測点選定の流れ²⁾

3.4 流水型ダムおよび再開発ダムにおける計測計画

3.4.1 流水型ダムにおける計測

近年、治水機能のみに特化して、洪水吐きを河床付近に設置し、常時は全く貯水を行わず、河水はダムが無い場合と同様に普通に流下していく、流水型ダムの計画・建設事例が増加している。

益田川ダムは堤高48mの流水型の重力式コンクリートダムである。益田川ダムの断面を図-6に示す。

益田川ダムでは、河川管理施設等構造令の規定に従い、漏水量と揚圧力の計測による安全管理を実施している。漏水量の計測については、全漏水量の計測は1箇所、基礎排水量の計測は25箇所、継目排水量は各横継目（10箇所）でブロック毎に実施している。揚圧力の計測は、基礎排水孔を利用し、25箇所で行っている。

益田川ダムは、2005年10月から2006年2月の間、安全管理の第1期であった。第1期は試験湛水期間であるため、その期間中には貯水位をサーチャージ水位（EL.72.7m）まで上昇させている。第1期の期間中、漏水量は1回/1日、揚圧力は1回/週の頻度で計測された。第1期の計測の他巡視等の結果、ダムの安全性は確認された。

2006年3月から、第2期に移行し、漏水量は1回/週、揚圧力は1回/月の頻度で実施している。第1期以降は、大規模な洪水も無く、益田川ダム貯水池の水位が上昇することもなかった。そのため貯水による漏水量と揚圧力の変化がなかった。

益田川ダムでは、安全管理の第3期移行の検討に際して、第2期の期間中にほとんどは、貯水がなく貯水位に応じた、計測結果が得られておらず、ダム挙動の安定確認ができない状況にあった。また、今後も洪水による水位上昇時以外に貯水位に応じた計測はできないと考えられる。その状況を踏まえ、益田川ダムでは安全管理の第3期に移行するにあたり、以下のような計測体制をとることとした。

（1）通常時の計測

貯水池に水が貯まっていない、つまり通常時の計測は、漏水量は1回/月、揚圧力は1回/3月とする。

（2）洪水時の計測

貯水位が上昇し、図-7に示す EL.40.0m（洪水量 $120\text{m}^3/\text{s}$ 相当）以上となった場合は、漏水量と揚圧力は3時間ごとに計測を行うことで、非常時の計測体制を強化する。ただし、基礎排水孔からの漏水が無い場合、揚圧力は計測しない。

3.4.2 再開発ダムの計測

建設から長期間経過したダムの中には、その後の水需要の変化や、当時計画していた洪水調節流量を超える洪水被害の経験によって、次第に本来の目的を発揮しにくくなるダムもある。これまでは、このような課題を解決するために、主に別の地点に新たにダムを建設することや、堰、堤防や放水路を建設することで対応してきた。しかし、昨今は、ダムの建設に適した箇所が少なくなり、反対運動や環境問題への関心の高まり、ダム事業費の縮小等から新たにダムを建設することは次第に困難さの度合いを増してきている。このような中でその事業の重要性が増しているのが嵩上げ等によるダムの再開発である。ここでは、重力式コンクリートダムの嵩上げ後の安全管理事例について紹介する。

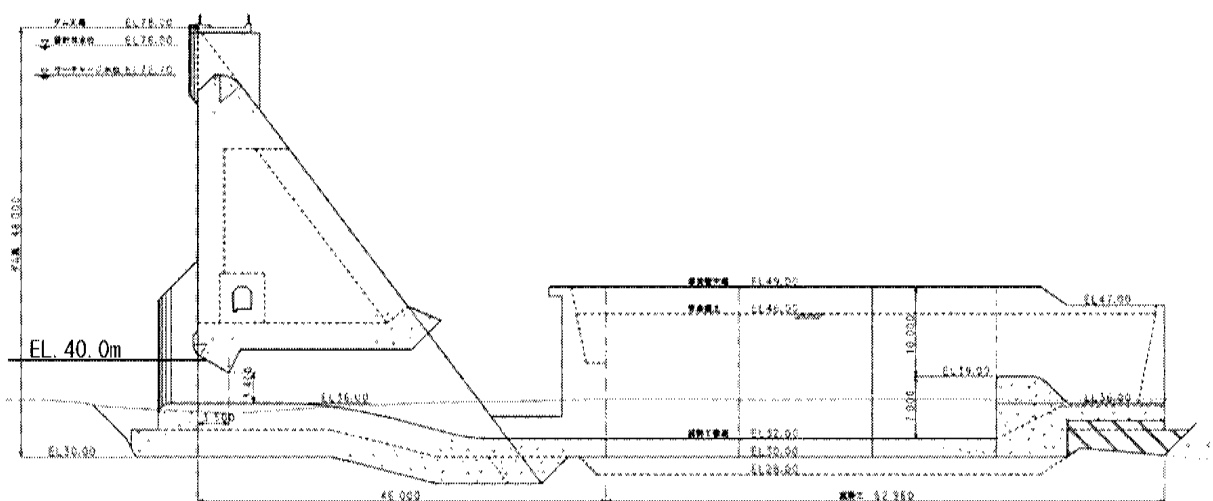


図-6 益田川ダムの断面¹⁰⁾

新中野ダムは、堤高 74.9m の重力式コンクリートダムである。ダム高 53m の既設のダムを 21.9m 嵩上げした再開発ダムである。新中野ダムの断面を図-7 に示す。

新中野ダムでは、嵩上げにあたり、新たにブラムラインを設置した。ブラムラインの配置を図-8 に示す。ブラムラインは、堤頂部から旧ダム監査廊までφ200mm のたて孔を設け、この中に設置した。さらに、旧堤体天端付近の相対変位を測定するため、旧堤体天端にクランプ室を設けた。

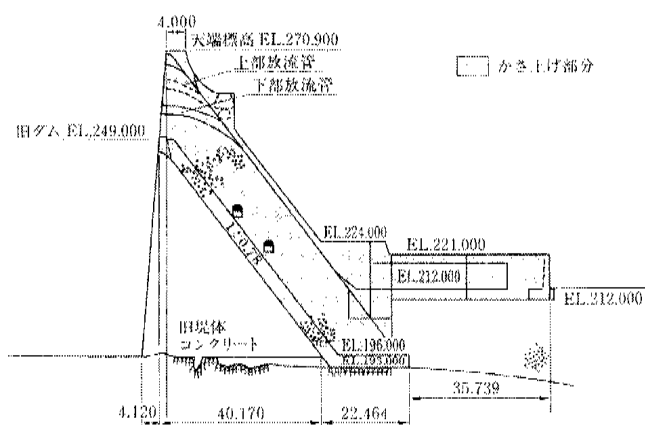


図-7 新中野ダムの断面¹¹⁾

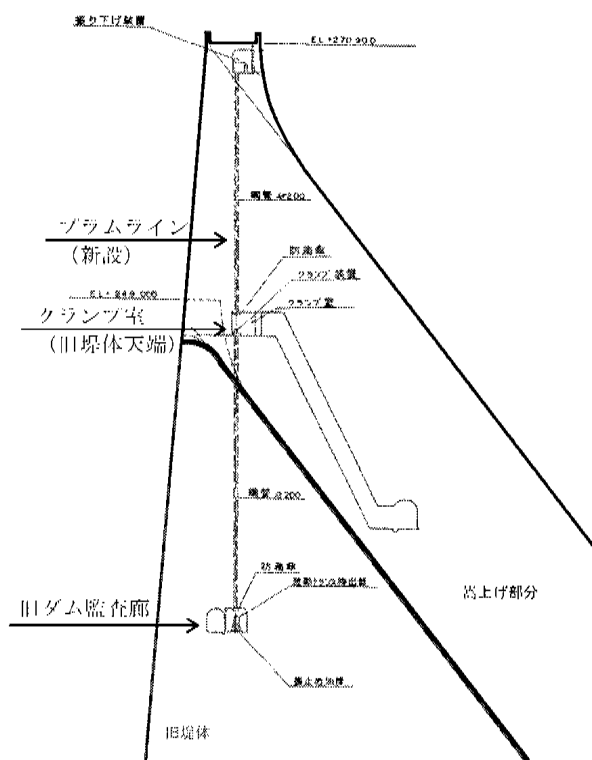


図-8 新中野ダムにおけるブラムラインの配置¹¹⁾

新中野ダム以外の重力式コンクリートダムの嵩上げ事例を見ると、変形量を計測するブラムラインについては新たに設置する事例が多い。

変形量以外に河川管理施設等構造令で規定されている計測項目は漏水量と揚圧力である。

漏水量の計測は、基本的に旧堤体の監査廊内にある機器をそのまま使用する事例が多い。必要に応じて漏水の計測箇所を増やす等の対策を行っている。また、揚圧力の計測についても、同様に旧堤体の監査廊内にある機器を使用する事例が多い。

4. 安全管理の合理化・高度化のための計測の省力化・自動化

現在、ダムでは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についても関心が高まっている。

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-4 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、新型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-4 ダムの安全管理における新しい計測機器の開発状況

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	変形計測	GPS によるダムの堤体挙動計測。
	揚圧力、間隙水圧計測	振動弦型間隙水圧計による間隙水圧の計測。
	変形計測	外部可動標的自動追尾システムを搭載したトータルステーションを用いたダムの外部変形計測。
新たな計測項目に対応した計測技術	水没面の変形計測	表面連続変位計を用いたフィルダム堤体表面の変形計測。
	ひび割れ調査	ビデオカメラを用いたコンクリートのひび割れ調査。
	変形計測	SAR（合成開口レーダー）によるフィルダム外部変形計測。
情報通信技術の高度化	情報の共有、早期対応	ダムサイト地震計ネットワークの構築による地震後の早期対応。
	情報の共有、透明性確保	GPS により計測されたデータのインターネット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	ワイヤレス間隙水圧計を用いた、計測機器のケーブルレス化による施工の合理化。 重力式コンクリートダム堤体を透過する無線通信技術による施工の合理化。
新形式ダムに対応した計測技術	漏水位置特定	CFRD 遮水壁漏水センサーによるフェイススラブ上任意の箇所の漏水位置特定。
想定外力に対応した計測技術	変形計測	GPS によるダムの堤体挙動計測。

4.1 新しい計測機器の開発

4.1.1 従来の計測項目における計測精度の高度化

(1) GPS によるダムの堤体変形の挙動計測システム

山口らは高精度かつ迅速に計測を行うことができる GPS 変位計測システムを用いて、フィルダムの外部変形計測への適用性を検証し既に多くのダムで適用した。GPS センサーの外観を図-9 に示す。この GPS 変位計測システムは清水によって開発された^{12), 13)}。計測は、時系列データの平滑化手法の一つであるトレンドモデルを適用することにより、従来の GPS 測量より高精度な計測が行える。また、近年、清水らは、GPS 計測の気象補正、高低差補正や上空視界障害物の影響低減を行いさらなる精度向上を達成している¹⁴⁾。

その後、山口ら^{15), 16)}は大型フィルダムである土質遮水壁型ロックフィルダムの土質遮水壁（コア）直上の天端における外部変形計測を、GPS センサーを天端通行の障害とならないように天端保護層内に埋設したうえで行うことができる、天端埋設型 GPS センサーの開発を行った。天端埋設型 GPS センサーを図-10 に示す。そして、従来の測量機器でない GPS を用いたフィルダムの安全管理のための外部変形計測導入の具体的提案を行った。

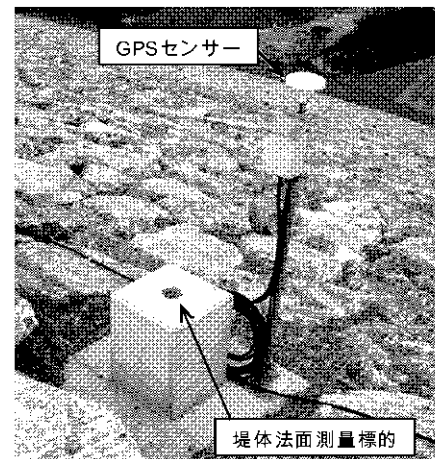


図-9 GPS センサー

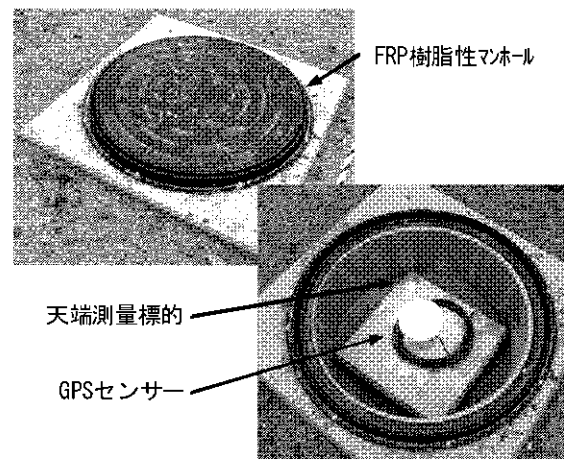


図-10 埋設型 GPS センサー

(2) 振動弦型間隙水圧計

振動弦型センサーは、従来方式であるひずみゲージ式あるいは差動トランス式のセンサーに比べて、①ケーブルの絶縁低下によるデータの信頼性低下が少ない、②振動数を測定する一種のデジタル計測であるためノイズの影響が少ない、③弦とコイルという単純なセンサー構造である、等の特徴を持ち、長期計測に必要な観測計器の耐久性と観測データの信頼性に優れている。近年、振動弦型計器が簡便に扱え、安価になったことから、振動弦型計器のダムへの導入に対する期待が増している。

川崎ら¹⁷⁾は、振動弦型間隙水圧計の長期計測の必要のあるダムへの本格的な適用を目的として、実際のフィルダムの基礎岩盤およびコア内に振動弦型の間隙水圧計を設置し、試験満水時の堤体内の間隙水圧計測および、長期信頼性評価を行った。

(3) トータルステーションを用いた自動追従計測システム

ロックフィルダムの外部変形計測は、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（水準測量・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¹⁸⁾はトータルステーション（光波測量器）を用いた自動追従システムを構築・導入した。本システムを導入することにより、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。

4.1.2 新たな計測項目に対応した計測技術

(1) 表面連続変位計

フィルダムの外部変形の計測方法について、従来の測量による方法や、これまで新しく開発されたGPSやトータルステーションを用いた自動追従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。フィルダムは、築堤時および満水時ともに、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が変形監視上に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、山口ら¹⁹⁾は、忠別ダムのフィルダム部の堤体表面に、水没斜面も含めた堤体法面の変形を連続的に計測できる表面

連続変位計を設置し、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フィルダムの変形に関する安全管理手法について検討を行なった。

計測原理を図-11に示す。計測は、各測定点において、傾斜角 θ_i を計測し、それに測定間隔 L を乗じることでよりその区間の高さ $L\sin\theta_i$ を求める。この値を累積することによりフィルダム堤体表面や面の形状を求めることができる。

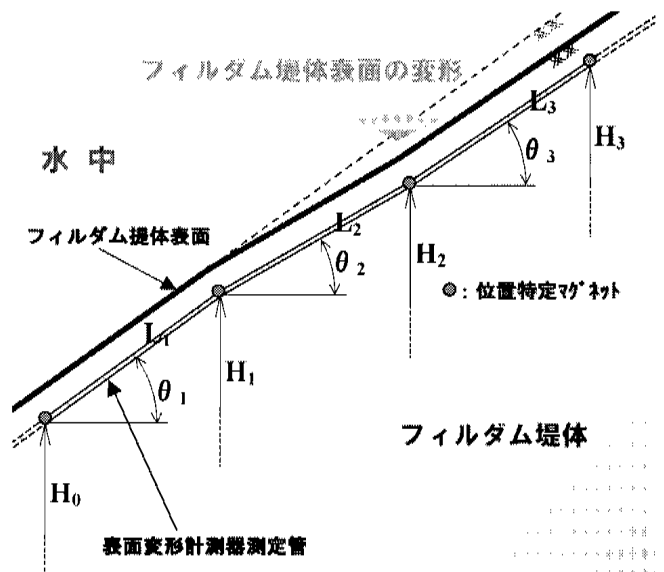


図-11 表面連続変位計の計測原理

(2) ビデオカメラを用いたコンクリートのひび割れ観察手法

堤高100m級の大規模なアーチダムにおいては、キャットウォーク等の目視点検設備のみからダム下流面に発生したひび割れを全体的に観察するのは困難である。今後、設備の高経年化や地震後のダムの安全性を評価する上で、ひび割れの性状を把握しておくことは重要なことであると考えられる。山内ら²⁰⁾は、高精度なビデオカメラを用いて遠方からダム下流面全体を比較的軽微なひび割れまで正確に観察できるシステムを開発し、堤高100m超のアーチダムへの適用を行った。

(3) SAR（合成開口レーダー）によるフィルダム外部変形計測の適用性の検討

3.2.2で前述したように、現在、フィルダムの外部変形挙動を安全にかつ迅速に計測することが望まれている。佐藤ら²¹⁾は、災害観測等に用いられているSAR

(Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダー)の観測データを用いて、地震時や當時のフィルダムを対象とし、SARによる外部変形計測の適用性を検討した。SARの概念を図-12に示す。SARは、概念的には、衛星軌道上に仮想的なアンテナをいくつも並べたものである。つまり、衛星軌道を移動中に何回も送受信を行ない、受信した電波を合成することによって、分解能を向上させている。すなわち、小さな開口面(アンテナ)を合成して大きな開口面を実現するレーダーであるといえる。わが国では、「だいち」(ALOS, Advanced Land Observing Satellite)による合成開口レーダーの計測が行われており、本論文においても、「だいち」の観測データを使用した。「だいち」は2006年1月24日に種子島宇宙センターから打ち上げられた世界最大級の陸域観測技術衛星である。その主な目的は、地図作成、地域観測、災害状況把握、資源調査等への貢献、となっている。

このSARによるフィルダム外部変形計測の利点は、地上の観測設備が不要であること、これまでの測量方法と違い、面的に変位情報を得ることができること、課題としては、現時点では、計測頻度は衛星に依存するため連続計測ができない、解像度が約10mである等が挙げられる。しかし、2013年度には、「だいち(ALOS)」の後継機であるALOS-2の打ち上げが計画されており、ALOS-2は解像度が1~3m、データ取得範囲が約3倍等、現在運用中の「ALOS(だいち)」よりも高性能なSARを搭載する予定であり、今後はSARによるダムの外部変形量の計測がより高精度になることが期待される。

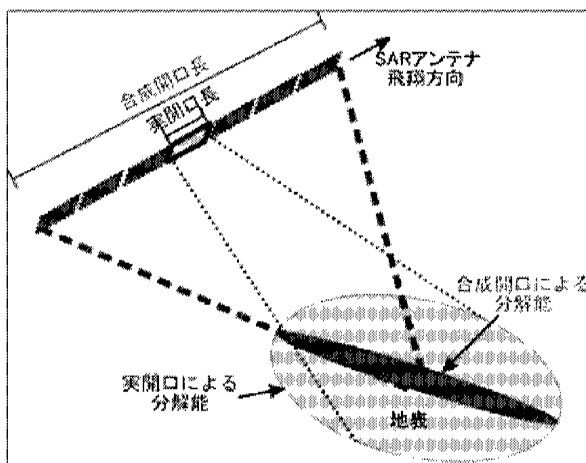


図-12 SARの概念図²¹⁾

4.2 情報通信技術の高度化

(1) ダム地震計ネットワークの構築²²⁾

国土交通省は、1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に、ダム地震計ネットワークの構築を進めている。ダム地震計ネットワークの概念を図-13に示す。本ネットワークでは、地震記録データをダム管理所、国土技術政策総合研究所、国土交通本省で共有する。そして、地震データの早期検討を行い、適切な安全管理の指示、緊急対応の指示を行うことを目的としている。

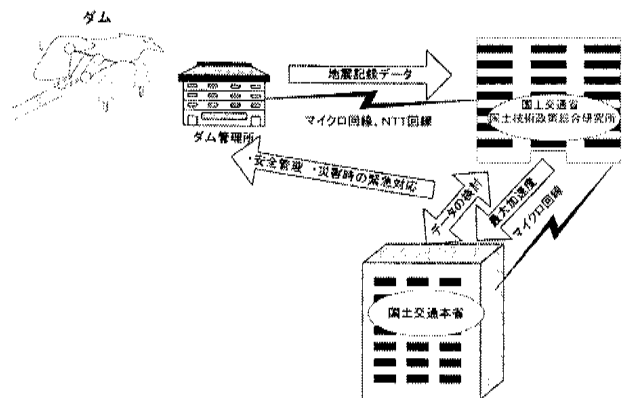


図-13 ダム地震計ネットワークの概念²²⁾

(2) インターネットを利用した計測データの配信

GPS自動変位計測システムのデータ配信の概念を図-14に示す。データ配信にインターネットを利用することでダム管理者や河川管理者が情報をリアルタイムで確認できる等、通信コストの低減と利便性の向上を図ることができる。また、計測結果は、インターネットを用いることによりリアルタイムで確認することができるため、社会的にも透明性のあるダムの安全管理が可能となる。

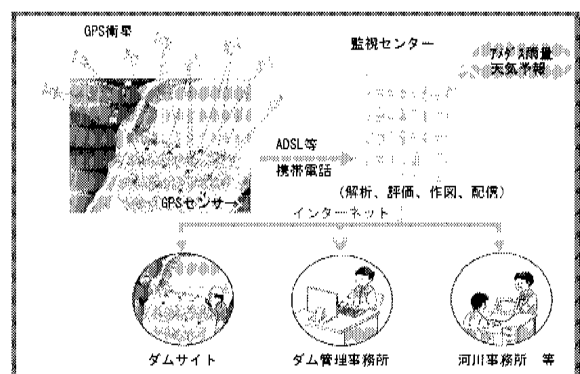


図-14 GPS計測監視システムのデータ配信の概念⁸⁾

(3) 計測機器のケーブルレス化

フィルダム堤体内には、施工時および完成後におけるダム堤体の安全性を確認するために、間隙水圧計、土圧計等多数の埋設計器が設置されている。従来用いられている埋設計器には信号送信用のケーブルが付属しており、次のような課題が挙げられている。①ケーブルトレンチが水道になる可能性がある、②計器設置時の施工を煩雑にする、③ケーブルにコストがかかる、④雷サージにより機器が故障する。向後らは、これらケーブル付き埋設計器が有する問題を解決するため、送信ケーブルを必要としない埋設計器の開発を行った²³⁾。従来型とワイヤレス間隙水圧計による計測システムの比較を図-15に示す。

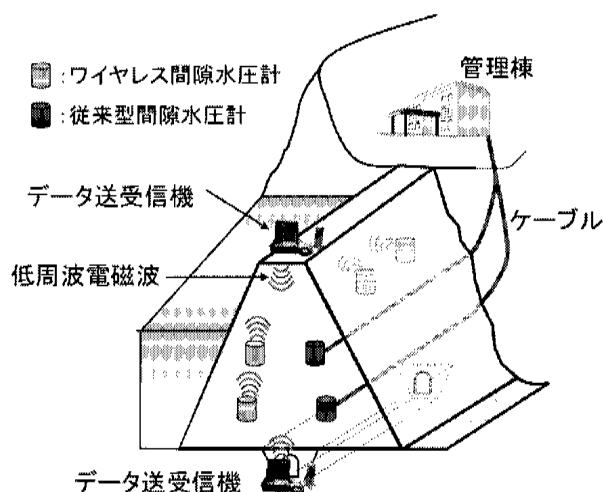


図-15 従来型とワイヤレス間隙水圧計による計測システムの比較²³⁾

また、管理段階のダムにおいて、漏水量等の計測データを、ケーブルレスで取得することができれば、人力で計測しているダムや、自動観測を行っているダムにおいて機器の異常が発生した場合でも、簡単かつ迅速に新たな計測体制を整えることが可能である。大谷ら²⁴⁾は、上記で示したワイヤレスシステムを応用し、重力式コンクリートダム堤体を透過する通信技術について検討を行った。ワイヤレス漏水量計の使用概念を図-16に示す。

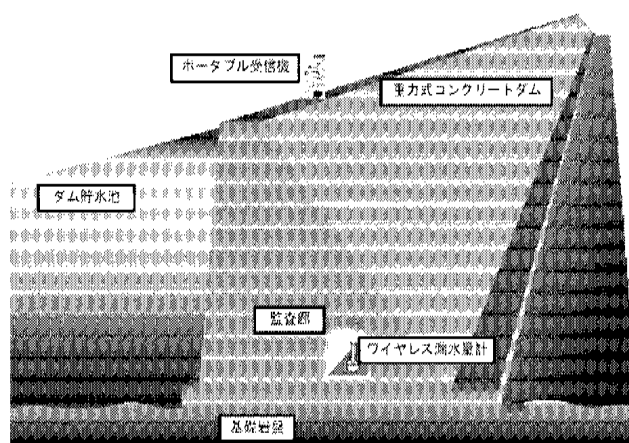


図-16 ワイヤレス漏水量計の使用概念²⁴⁾

4.3 新形式ダムに対応した計測技術

近年、新しいダムの型式として、コンクリート表面遮水壁ロックフィルダム（Concrete Face Rockfill Dam: 以下 CFRD）や台形 CSG（Cemented Sand and Gravel）ダムの施工が行われている。本節では、これらの新形式ダムに対応した計測技術のうち、CFRD 遮水壁漏水センサーについて示す。

(1) CFRD 遮水壁漏水センサー

近年の施工技術の向上によって、ロックフィルダムの完成後の沈下量を小さく抑えることが可能となり、従来の CFRD で問題視されていたコンクリート遮水壁のひび割れによる漏水発生の可能性が小さくなった結果、海外では多くの堤高の高い CFRD が建設されるようになった。わが国でも苦田ダムの鞍部処理工等に CFRD 型式が採用され、その設計・施工に関する細部の検討が進められた。その過程で、CFRD の本格的導入に先立ち、湛水中にコンクリート遮水壁に漏水が発生した場合に、漏水位置を精度よく特定できる探知システムの構築が求められた。

山口ら²⁵⁾は、任意の箇所で発生した漏水を精度よく探知できるケーブル状のセンサーを開発した。センサーの概要を図-17に示す。センサーは、平行な二本の電極からなるケーブル状センサーの周辺状態の違いによる電気的特性の差を利用したものである。また、センサーに不透水部を持つ透水性被覆ツイスト電線を開発することにより、漏水位置の特定を容易にした。

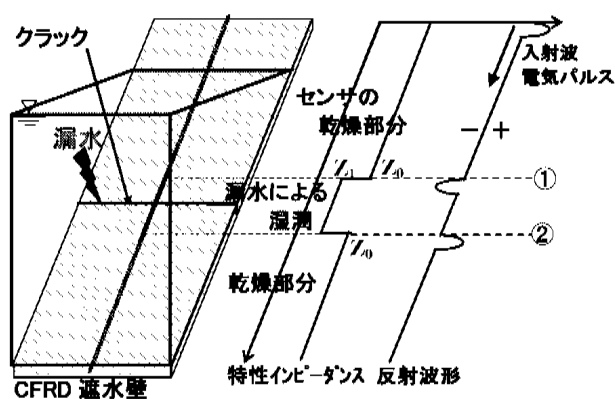
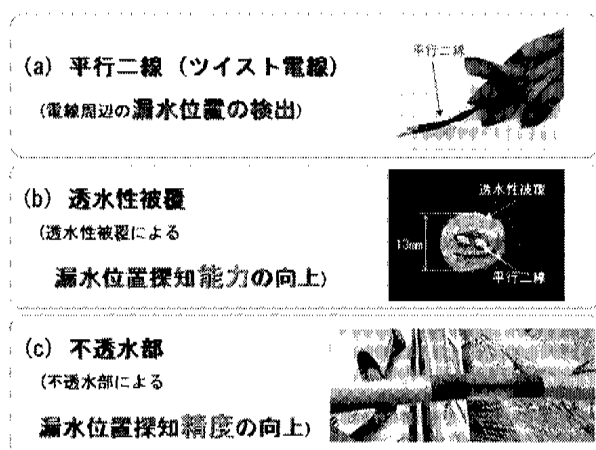


図-17 漏水探知センサーの概要²⁵⁾

4.4 設計荷重を超える外力に対応した計測技術

GPS によるダムの変位挙動計測は、設計荷重

を超える外力を受けた場合の挙動や損傷にも対応できる計測技術である。山口ら²⁶⁾は平成20年6月14日に発生した岩手・内陸地震により堤体変状等の被害を受けた石淵ダム（堤高53m, CFRD）において、余震が発生する中、危険を伴う従来の測量作業に代え、GPS変位計測システムによる外部変形計測を行い、フィルダムの非常時における安全管理の有用性を実証した。

5. まとめ

本論文において述べた、ダムの安全管理の現状と課題および、その課題に対する安全管理の合理化・高度化への取り組みをまとめた連関図を、図-18に示す。図に示すように、現在のダムの安全管理には多くの課題が存在している。それは、ダムの型式や完成後の経過年数、地震後の対応等いろいろな要素が絡み合っており、一つの解決策で全ての課題を解決できない。また、一つの方策により一つの課題も解決できない場合もある。現在、図中のダムの安全管理の合理化・高度化への取り組みに示すように、個別には多くの技術開発や対応案を実施してきている。今後は、これらの技術を複合的に用いることにより、より確実な安全管理を行えるよう検討を進めていく必要があると考えている。

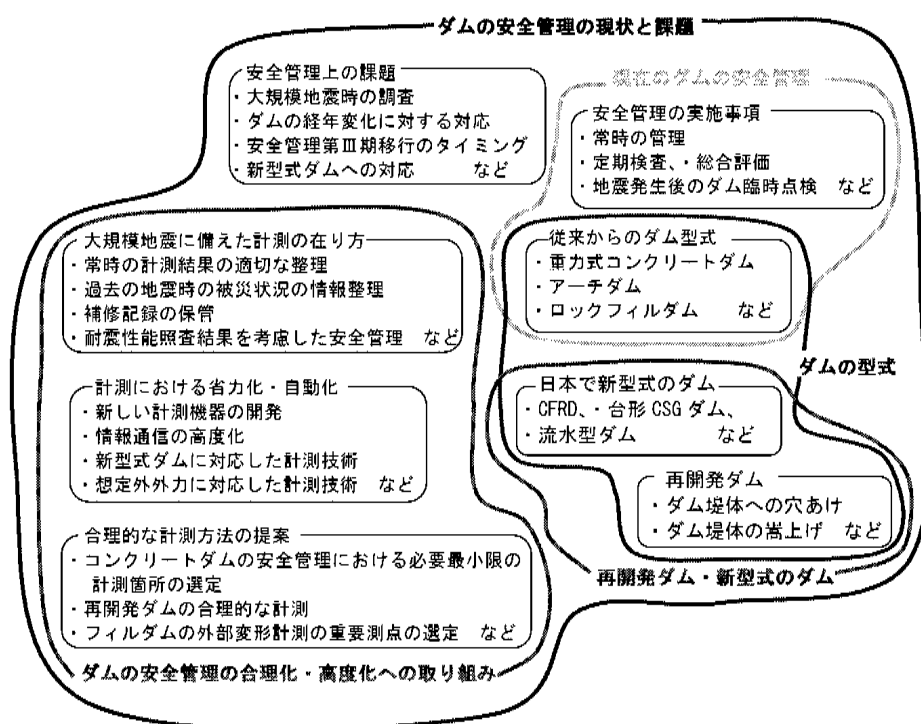


図-18 ダムの安全管理の現状と課題および合理化・高度化への取り組みの連関

参考文献

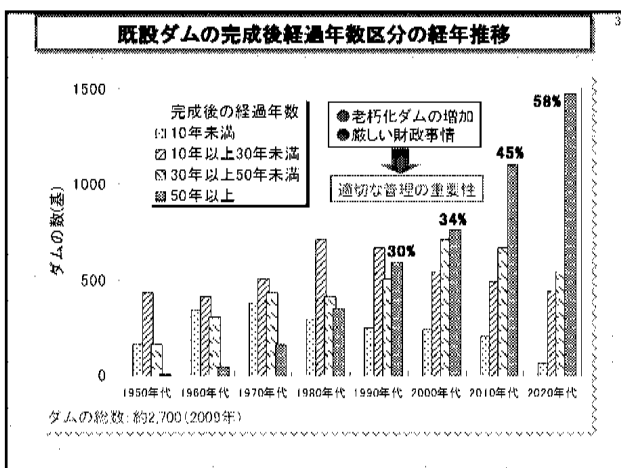
- 1) (財)国土開発技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，山海堂，2000.1.
- 2) 小堀俊秀，山口嘉一：フィルダムの外部変形計測の重要測点の選定方法，ダム工学（投稿中）
- 3) T. TAMURA, K. TAKEMURA, T. FUJISAWA, I. NAGAYAMA, A. NAKAMURA and A. SUZUKI: Behavior of Dams During The Hyogoken-Nambu Earthquake on January 17, 1995 in Japan, 19th ICOLD Congress, Q.74-R.60, 1997.5.
- 4) 土木研究所ダム部：ダムの安全管理：建設省土木研究所資料，第1834号，1982.5.
- 5) S. YOKOTSUKA, T. SAKAMOTO and N. MATSUMOTO: Comprehensive Inspections of Dams and Reservoirs in Japan, Proc. Symposium on Rehabilitation of Dams, pp.366-372., 1999.
- 6) 飯田隆一，米道久：コンクリートダムの安全管理の手引（改訂版），建設省土木研究所資料，No.692，1971.
- 7) 山口嘉一，小堀俊秀：コンクリートダムの安全管理における必要最小限の計測箇所（試案），未定稿
- 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.120-136，2005.6.
- 9) 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，2005.4.
- 10) 島根県：益田川ダム工事誌，2008.3.
- 11) 北海道：新中野ダム工事誌，1992.9.
- 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，資源と素材，Vol.114，pp.397-402，1998.6.
- 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.333-343，2002.9.
- 14) N. SHIMIZU: Monitoring Rock Deformation Using Global Positioning System - Fundamentals, New Developments and Practical Applications -, Keynote Lecture at the 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 2009.10.
- 15) 横森源治，中園幸樹，山口嘉一，小堀俊秀，池澤市郎，清水公二，岩崎智治，飯島功一郎：フィルダムの安全管理のための天端埋設型 GPS の適用性検討，平成 18 年度土木学会西部支部技術発表会，土木学会西部支部，CD-ROM III-107，2007.3.
- 16) Y. YAMAGUCHI, T. KOBORI, H. YOSHIDA, T. SAKAMOTO, H. ITAYA and T. IWASAKI: Real-Time Monitoring of Exterior Deformation of Embankment Dams Using GPS, 23rd ICOLD Congress, 2009.5.
- 17) 川崎秀明，長原寛，山下武宣，安仁屋勉：間隙水圧計長期性能試験による振動弦型計器の現地適用性検討，ダム技術，Vol.14，No.1，pp.39-48，2004.1.
- 18) 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.108-112，2005.5.
- 19) 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.40-50，2008.2.
- 20) 山内優，中野靖，岡田和明：ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートのひび割れ観察手法の開発，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，2010 年 10 月
- 21) 佐藤弘行，山口嘉一，岩崎智治，原口 正道：SAR（合成開口レーダー）によるフィルダム外部変形計測の適用性の検討，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，2010 年 10 月
- 22) K. IKEUCHI, H. TANIDA, K. INAGAKI, T. SASAKI and T. UESAKA : Strong Motion Measurement and Seismograph Network of Dams in Japan, ICOLD 19th Congress, pp.663-679, 2003.6.
- 23) 向後雄二，浅野勇，林田洋一，遠田塚良一：ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測，ダム工学，Vol.16，No.3，2006.
- 24) 大谷知樹，安田成夫，島本和仁，平田俊二：重力式コンクリートダム堤体を透過する無線通信技術の適用性に関する調査，ダム技術，No.268，pp.28-34，2009.1.
- 25) Y. YAMAGUCHI, T. KOBORI: Development of Leakage Detective Sensor for Face Slab of CFRDs, ICOLD 72nd Annual Meeting Workshop, WI-26-A011, 2004.5.
- 26) Y. YAMAGUCHI, T. KOBORI, T. SAKAMOTO, T. KASAI : Real-Time Monitoring of Exterior Deformation of Embankment Dams Using GPS, ICOLD 23rd Congress, Brasilia, Brazil 2009.5.


 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
 2010年10月1日(金)

< キーノートレクチャー >
ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題
 独立行政法人土木研究所
 山口 嘉一

講演内容

1. はじめに
2. ダムの安全管理の現状
3. ダムの安全管理における課題
4. 安全管理の合理化・高度化のための計測の省力化・自動化



2. ダムの安全管理の現状

- 2.1 計測項目
- 2.2 計測頻度
- 2.3 地震直後の臨時点検
- 2.4 老朽化したダムの安全点検 (総合評価)

計測項目：河川管理施設等構造令 第13条 (計測装置)

(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。

区 分	計 測 項 目
ダムの種類	基礎地盤から堤頂までの高さ(単位:m)
重力式コンクリートダム	50未満 漏水量 揚圧力 50以上 漏水量 変形 揚圧力
アーチ式コンクリートダム	30未満 漏水量 変形 30以上 漏水量 変形 揚圧力
フィルダム	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、前項に規程するもののほか、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。

(注) 1995年兵庫県南部地震以降、地震動の計測は事実上の必須項目。

計 測 頻 度

● 土木研究所資料 No.1834
 (比較的規模の大きいダムを対象)

安全管理の3区分に応じた計測頻度

- (1) 湛水開始から満水以後所要時間を経過するまでの期間 (第1期)
- (2) 第1期経過以後、ダムおよび基礎岩盤の挙動が定常状態に達するまでの期間 (第2期)
- (3) ダムの挙動が定常状態に達した以降の期間 (第3期)

安全管理のための計測頻度 — 第1期 —								
項目 型式	漏水量	変形量	揚圧力 または 間隙水圧	浸潤線	温度	応力 または 土圧	ひずみ または せん断変位	監視による 堤体等の 状況
重力式 コンクリートダム	1回 / 1日	1回 / 1日	1回 / 1日	—	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日
アーチ式 コンクリートダム	1回 / 1日	1回 / 1日	1回 / 1日	—	1回 / 3.5日*	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日
ロックフィルダム	1回 / 1日	1回 / 7日	1回 / 1日	—	—	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日
アースダム	1回 / 1日	1回 / 7日	1回 / 1日	1回 / 1日	—	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 1日

*: 1回/3.5日は週2回の意である。

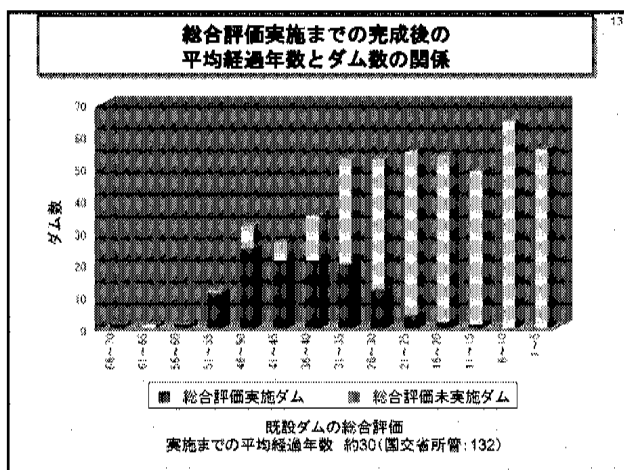
安全管理のための計測頻度 — 第2期 —								
項目 型式	漏水量	変形量	揚圧力 または 間隙水圧	浸潤線	温度	応力 または 土圧	ひずみ または せん断変位	監視による 堤体等の 状況
重力式 コンクリートダム	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 7日	—	1回 / 7日	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月
アーチ式 コンクリートダム	1回 / 7日	1回 / 7日	1回 / 7日	—	1回 / 0.5月	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月
ロックフィルダム	1回 / 7日	1回 / 1月	1回 / 7日	—	—	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月
アースダム	1回 / 7日	1回 / 1月	1回 / 7日	1回 / 7日	—	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月

安全管理のための計測頻度 — 第3期 —								
項目 型式	漏水量	変形量	揚圧力 または 間隙水圧	浸潤線	温度	応力 または 土圧	ひずみ または せん断変位	監視による 堤体等の 状況
重力式 コンクリートダム	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月	—	—	—	—	1回 / 1月
アーチ式 コンクリートダム	1回 / 1月	1回 / 1月	1回 / 1月	—	1回 / 1月	—	—	1回 / 1月
ロックフィルダム	1回 / 1月	1回 / 3月	1回 / 1月	—	—	—	—	1回 / 1月
アースダム	1回 / 1月	1回 / 3月	1回 / 1月	1回 / 1月	—	—	—	1回 / 1月

地震直後の安全点検（臨時点検）								
一次点検：目視による外観点検 二次点検：詳細な外観点検と計測値による安全確認								
平成20年10月28日付国河流第3号 「地震発生後のダムの臨時点検結果の報告について」								
(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。 (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、二次点検の実施を省略できるものとする。								

地震直後の安全点検（臨時点検）								
堤体の二次点検を省略できないダム (1) 管理の期間の区分における第1期および第2期のダム (2) 堤高が100mを超えるダム (3) 特殊な設計によるダム ・アーチダム、・中空重力式ダム、・表面逆水壁型フィルダム、 ・バットレスダム、・台形CSGダム (4) 基礎地盤が岩盤でないダム (5) 特殊な基礎処理を行ったダム（袖部を除く） ・連続地中壁により基礎処理を行っているダム ・二重管ダブルバック工法により基礎処理を行ったダム ・土質材料以外の材料により貯水池遮水（プランケット）を行ったダム ・配筋が必要なコンクリート置換工を行っているダム								

老朽化ダムの安全点検：ダム総合評価								
施設点検 堤体、ゲート等の施設的安全性を評価するとともに適切なダム管理のあり方について検討を行う。 ・管理観測記録に基づく点検、評価 ・現行設計基準に基づく点検、評価 ・現地評価に基づく点検、評価 ・安全性の評価、今後の管理提言								
機能点検 洪水調節計画、操作規程等の現状分析を行うとともに、洪水調節等の効率化など、既設ダムの有効活用策の計を行う。 ・洪水調節計画点検、評価 ・操作規程点検、評価 ・洪水調節実施後の検証								
以上を踏まえ、ダム総合評価検討会（ダム専門家による現地調査）を経て、総合評価を行う。								



- 3. ダムの安全管理における課題**
- 3.1 安全管理の第3期移行の判断
 - 3.2 完成後長期間経過したダムの挙動計測
 - 3.3 大規模地震に備えた計測の課題
 - 3.4 流水型ダムおよび再開発ダムにおける計測計画

- 安全管理の第3期移行の判断**
- 第3期：挙動の安定
- (1) 貯水位等の変化に計測値が正常に追随
 - (2) 貯水位、堤体の温度等の外的要因を一定とした場合に、計測値がほぼ一定値となる

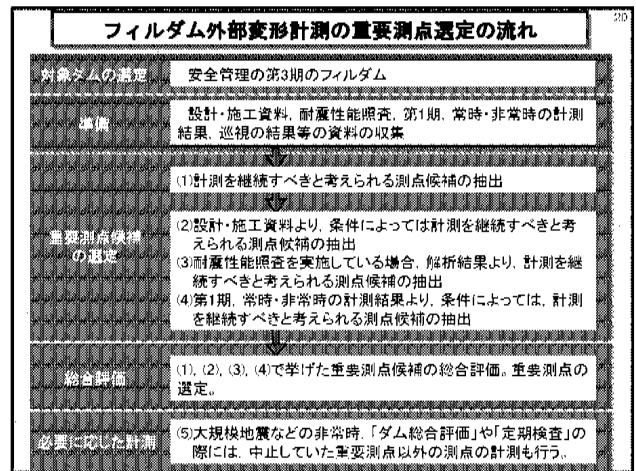
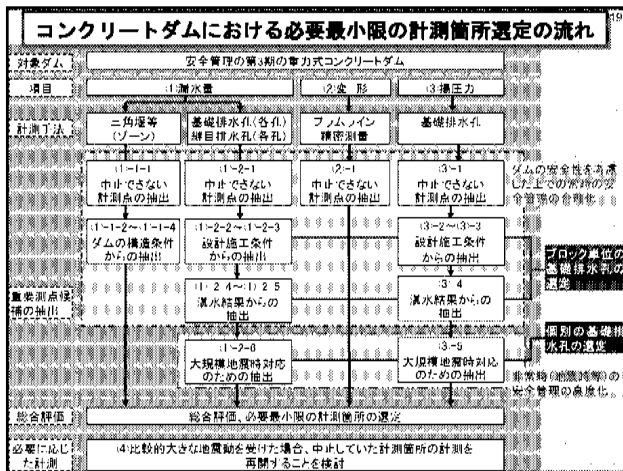
貯水位が一定の条件下での計測値の傾向 (1)

条件	(i)	(ii)	(iii)
概念図			
概念図の説明	漏水量、揚圧力、たわみ、応力等の測定値が外荷重の変動によって増減するが、同一の荷重状態でみるときに時間とともに減少する場合。	測定値が同一の荷重状態でみるときに時間に無関係に一定している場合。	測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加しているが、その増加している割合が時間とともに減少している場合。
状態	完成後、数年以上経過したダムでよく見られる現象で極めて安定した状態である。	極めて安定した状態にある。	漏水直後のダムによく見られる現象である。この状態は、いずれは安定化する傾向を示しており、危険な状態とはいえない。

貯水位が一定の条件下での計測値の傾向 (2)

条件	(iv)	(v)	(vi)
概念図			
概念図の説明	測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加しているが、その増加する割合が時間に無関係に一定している場合。	測定値が同一の荷重状態でみるときに時間とともに増加しているが、その増加する割合が時間とともに増加している場合。	測定値が同一の荷重状態でみるときに増加していく場合。
状態	危険な状態にあると云える。しかし、(iii)の状態にあって収収が遅い場合にも(iv)の状態にあるように見えることがある。この場合にはいづれにせよ安全性の余裕は小さいことを示しているのであるから原因、対策等の調査をしておく必要がある。	明らかに危険な状態であり、急速な対策が必要となる。	破壊に近い状態であり、それが部分的な現象にとどまっているか否かによりその対策は異なってくるが、ダムの安全性に大きな影響を与える部分の測定値がこのようになったときは、水位を下げる等の緊急な処置が必要となる。

- 完成後長期間経過したダムの挙動計測**
- < 課題 >
- (1) 「計器異常」により計測をとりやめた後復旧していない等、安全管理上適切ではない計測箇所の削減が行われている事例の存在
 - (2) ダムを長寿命化し、適切な有効利用を図るためには、ダム計測計器の状況調査、必要に応じた更新を義務付ける基準等の整備が必要



大地震に備えた計測の課題

- 地震時のような非常時のみならず常時も含めて過去の各種計測データの推移を整理し、地震時貯水位における過去の計測データとの比較を迅速に行う。
- 過去の地震により、ダムの不等沈下や亀裂の発生等の被害を受けた場所に関する情報(写真を含む)をデータベース化する。
- 過去の補修履歴に関する情報(写真を含む)をデータベース化する。
- 大規模地震に対するダム耐震性能照査の解析結果に基づき損傷の形態やその発生が推定される箇所を念頭においたうえで、適切な計測計器の選定ないしは開発するとともに、大規模地震時の安全管理体制を確立する。

洪水調節(流水型)ダムの事例

平常時(平成19年3月12日：流量約2m³/s程度) 洪水時(平成18年7月2日：流量約100m³/s程度)

23

国土交通省所管 洪水調節専用(流水型)ダム一覧表

完成 (管理)	直轄・補助	都道府県	河川名	ダム名
	補助	鳥根県	益田川	益田川ダム (益田川総合開発)

本体準備、 生活再建等 (建設事業)	直轄	北海道開発局	石狩川	三笠ぼんべつダム (幾多別川総合開発)
	直轄	近畿地整	九頭竜川	足羽川ダム
	直轄	九州地整	島川	立野ダム
	補助	岩手県	大股川	津付ダム
	補助	山形県	最上小国川	最上小国川ダム
	補助	長野県	浅川	浅川ダム
	補助	石川県	栗川	辰巳ダム (栗川総合開発)
	補助	鳥根県	浜田川	浜田ダム(浜田川総合開発)
	補助	鹿児島県	新川	西之谷ダム

計画中 (実施計画調査)	直轄	九州地整	筑後川	城原川ダム
	補助	鳥根県	三隅川	矢野川ダム

※河川整備計画等法定計画が策定されている河川
※益田川ダムについては平成18年度完成

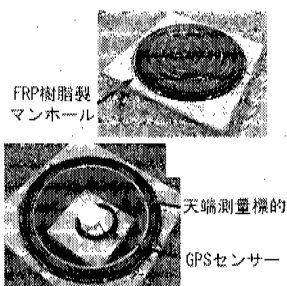
H21.11現在

益田川ダムにおける第3期の計測体制

管理者：鳥根県 堤高：48m

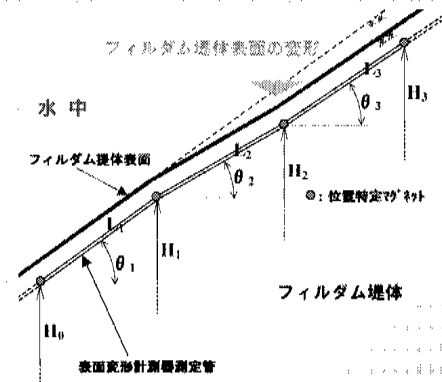
- 通常時の計測(貯水池に水が貯まっていない)
漏水量：1回/月、揚圧力：1回/3月
- 洪水時の計測
貯水位が上昇し、EL.40.0m(洪水量120m³/s相当)以上となった場合は、漏水量と揚圧力は3時間ごとに計測を行うことで、非常時の計測体制を強化する。ただし、基礎排水孔からの漏水が無い場合、揚圧力は計測しない。

31

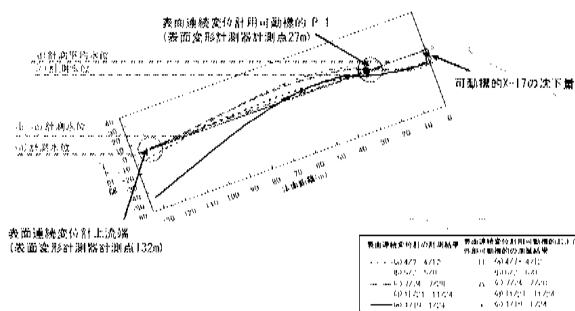


天端マンホール内に設置した埋設型GPSセンサー

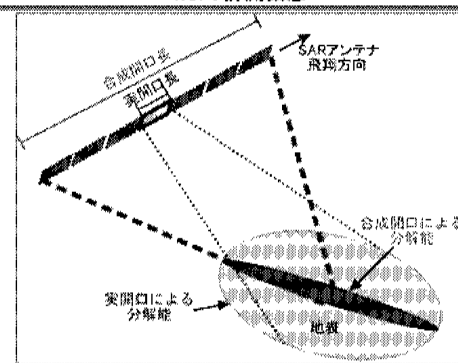
32



33

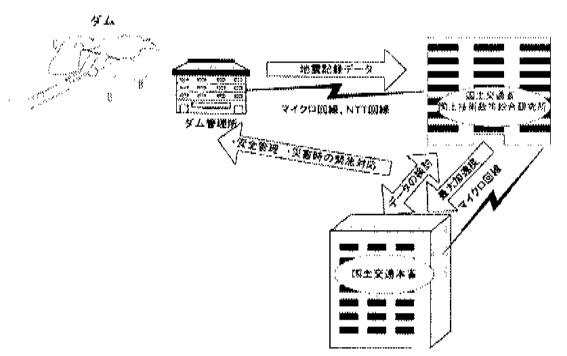


34

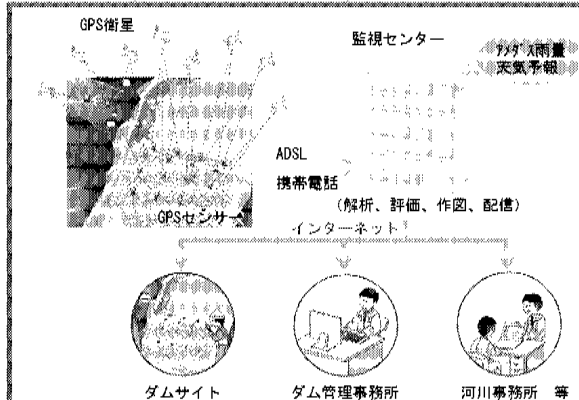


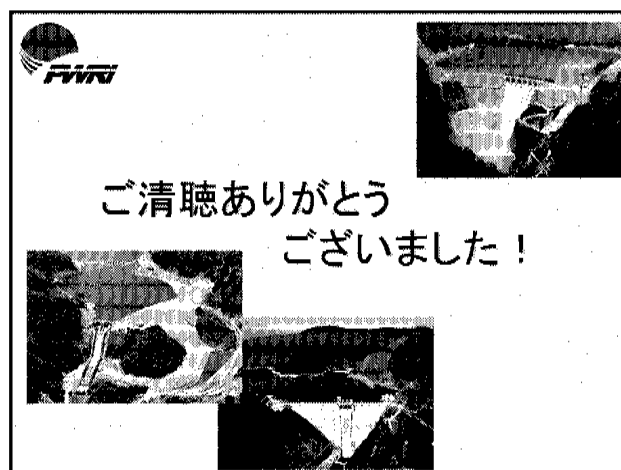
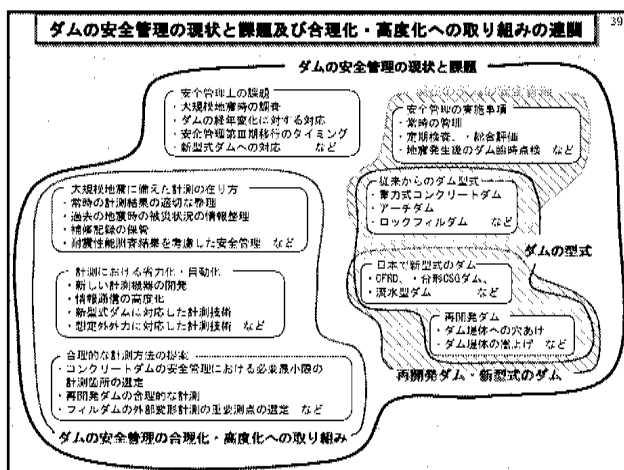
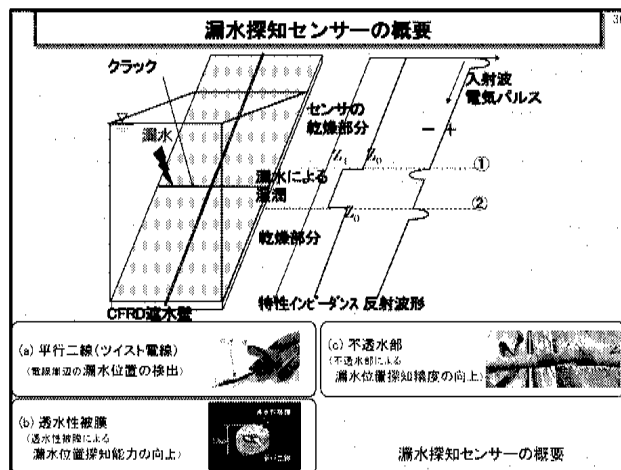
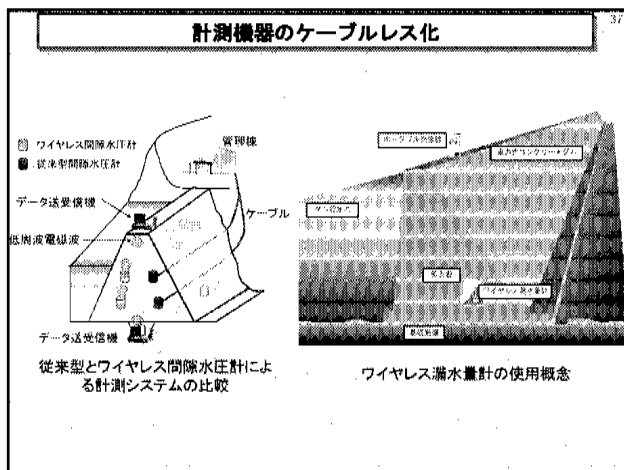
利点: 地上の観測設備が不要
面的変位情報の取得

35



36





GPS による変位計測技術の変遷と展望

清水 則一¹

GPS による変位計測が実施され始めておよそ四半世紀のときが過ぎた。この間、当初の課題であった、自動化、高精度化、使いやすさ、価格の低廉化などが実現され、今では多くの現場で利用されるようになっている。GPS には、もともと、広範囲な領域における 3 次元計測システムとして、従来の計測システムより優れた点があり、これまでの研究開発によって、その特徴が十分生かされるようになったといえよう。本文は、GPS による変位計測技術のこれまでの変遷を概観し、現状の技術を紹介し今後の展望に触れる。

キーワード: GPS, 3 次元変位計測, 高精度化技術

1. はじめに

社会基盤施設の安全管理において、関連する構造物や周辺地盤の挙動を日常的に監視することは重要である。ところが、規模の大きい構造物や広範囲の地盤を限られた予算と人員によって継続的に監視することは必ずしも容易ではない。そこで、経済的かつ効果的な安全監視、あるいは、計測システムが必要である。

GPS (Global Positioning System) はそのような要求に応えるものと考えられる。本文では、GPS による変位計測に関して技術開発の変遷と現状を概観し、今後の展望を述べる。

2. GPS と変位計測

2.1 GPS について

GPS (Global Positioning System) は、専用の人工衛星からの信号とデータを受信して、受信点の位置 (3 次元座標) を求める測位システムである^{1), 2)}。このシステムは、米国国防省によって 1970 年代から構築され、(1) 人工衛星 (24 個以上の衛星が半径約 26,000km の円軌道を約 12 時間で周回している。図-1 参照)、(2) 制御局、(3) 受信機、から構成されている。受信機を持つユーザは、いつでも、電波が届く場所ならどこでも、受信点の位置を知ることができる。

GPS によって位置を計測する方法 (測位法) は、単独測位法と相対測位法に大別される (図-2 参

照)。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、アンテナと受信機によって受信位置の絶対的な緯度、経度、高さを (世界測地座標系の一つである WGS84 における値として) 瞬時に得られる。最近では、携帯電話にも組み込まれているので、一般の人にとっては、GPS を使っていると特に意識することなく自分の位置がたちどころに得られる。ただし、単独測位法による位置の計測精度は数 m~数 10m である。

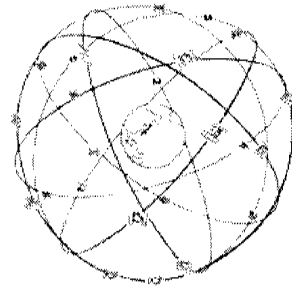


図-1 周回する人工衛星¹⁾

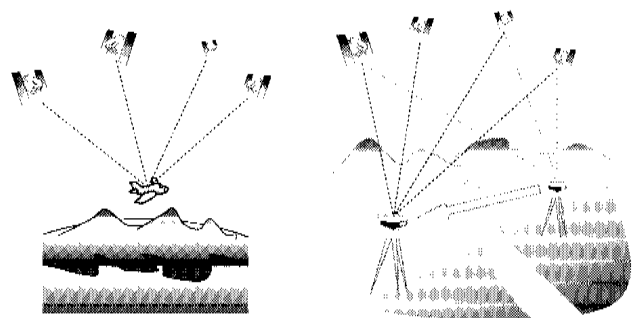


図-2 GPS の測位法 (左: 単独測位, 右: 相対測位)

¹⁾ 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻, 教授

一方、相対測位法は、2 点間の相対的な座標を得る方法で、中でも、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ている。ここで、搬送波とは人工衛星から送られる信号で、L1 波（1575.42 MHz）と L2 波（1227.60MHz）の 2 種がある。

干渉測位法にも大別すると 2 種類あり、そのひとつであるスタティック方式では、複数の観測点にアンテナと受信機を設置し、受信データを保存した後、データをコンピュータにダウンロードして、専用の解析プログラム（基線解析プログラム）によって座標を求める。その座標は一方の観測点を基準とした 3 次元相対座標である。

また、もう一つの方法であるキネマティック方式では、固定した基準点に対して移動する観測点側の受信機の座標を得る方式である。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。この方式では、計測の初期化を行わねばならないこと、また、瞬時でも電波を受信できなくなると座標を求めることができなくなる、などスタティック方式とは異なる点がある。

標準的な測位精度は、L1 波を用いるスタティック方式では、緯度、経度方向に対して、 $5\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{基線長 (km)}$ 、高さ方向に対して $10\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{基線長 (km)}$ である。したがって、GPS 干渉測位法による測位の標準偏差は、観測点間の長さ（基線長）が 1km 程度以内の場合、水平方向で 5mm、高さ方向で 10mm 程度となる。キネマティック方式の精度は、スタティック方式に比べやや劣る傾向にある。

GPS の特徴は、3 次元測量であること、観測点間の見通しが不要であること、測位中において雨や霧などの天候の影響を受けにくいこと、数 m の短い基線長から 10km 程度の比較的長基線まで同じ受信システムが使えるなどである。なお、基線長が 10km 以上の場合、L1 波および L2 波を受信できる 2 周波受信機と呼ばれる受信機を用いることが推奨されている。これは長基線長の場合、計測結果が電離層の影響を受けるため、その影響を除去するために 2 周波が必要となるからである。

2.2 GPS による変位計測とかつての課題

一般に、土木における変位計測では、伸縮計や地中変位計、傾斜計、最近では光ファイバーなどの計測機器が用いられる。これらは、高精度で自動計測も可能であるが、計測範囲はたかだか数 10m に限られており、広範囲な領域の計測には適用が難しい。また、設置や計測には専門的な技術が必要である。

一方、光波測距儀やレベルなどの測量機器は、広い領域を対象とした変位計測が可能であるが、天候や気象条件の影響を受けやすく、長基線において、mm 単位の高い精度を求める場合には、高価な機器およびマンパワーが必要となる。そこで、一般の土木計測機器および測量機器の双方のメリットを持つ GPS の適用が考えられる。

GPS によって構造物や地盤の変位を計測するには、少なくとも数 mm 以下の精度が必要なので、上に述べた搬送波位相を利用する干渉測位法が用いられる。干渉測位法では、計測点の座標は基準点からの相対座標として求められるので、変位を得るには時系列的に座標を得て、初期あるいは一つ前の計測時の座標との差を求めることになる（図-3 参照）。

干渉測位法の技術が確立したのは 1980 年代半ばころであり、その後、変位計測への利用が始まった^{3,4)}。初期の適用事例としては、石油地下採掘による広域地表面沈下、地殻変動、地すべり変位測定などがある。構造物への事例としては高圧ガス輸送パイプライン、ダム堤体などに適用された。わが国においても、1990 年代前半までに、地震・火山活動による地殻変動、地すべり計測などに適用された。

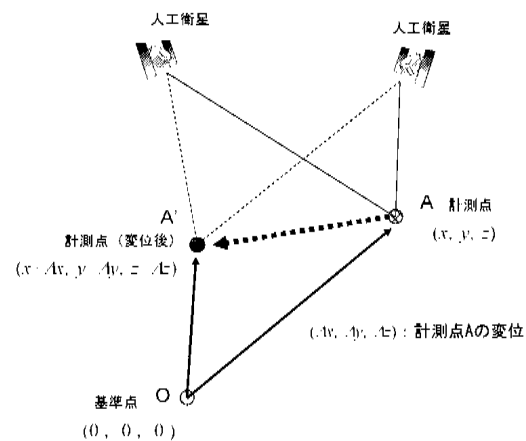


図-3 GPS による変位計測の原理

しかし、干渉測位法によっても標準的な精度は 5 ～10mm であるので、実務においてはより高い精度が望まれた。また、干渉測位法では、人工衛星からのデータ受信と保存、受信データの収集と解析などが必要であること、また、1990 年代当初は、受信機として測量用の機器を用いていたため、地盤計測機器と比べてかなり高価（当時、数 100 万～1000 万円以上）であったことから、GPS は「高価で、使いにくく、精度が悪い」といった印象が持たれていた。

筆者らが GPS に注目したのは 1980 年代末であり、測量用の受信機ではあったが、それを用いて綿密な計画の下で実施した斜面変位の計測によって、GPS は光波測距儀と比べても勝るとも劣らない精度を有することを明らかにした⁵⁾。また、数 10m～数 100m の範囲を計測できる計測機器が欠落していること、新しい 3 次元変位の自動計測手法となる可能性を持つことなどから GPS を実用的な変位計測に適用できるように、1) 計測の高精度化、2) 自動計測システムの開発（使いやすさ、操作性の向上）、3) システムの低廉化、を解決すべき課題と考えた。

2.3 GPS による変位計測システムの開発

GPS の干渉測位法（スタティック方式）によって変位を得るための手順は次のようになる。

1) センサー（アンテナ、受信機）を基準点および計測点に設置する、2) 人工衛星から発信される信号（L1 波）とデータ（人工衛星軌道や基線解析に必要な諸量）を基準点と計測点において同時に連続受信する、3) 受信データを用いて基線解析を行い、計測点の緯度、経度、高さの 3 次元座標を求める、4) 定めた時間間隔毎に（たとえば、1 時間毎）2), 3) を繰り返し、基準となる時刻の座標の変化を求めこれを計測変位とする。

当初は、センサーとして測量用のアンテナと受信機を用いたが、変位計測センサーとしては使いにくく、操作性も悪いため、変位計測専用のセンサー、さらに、データの受信から、保存、収集、解析、そして、変位の出力まで自動的に行われるシステムの開発を目指した。

図-4 は、計測点に設置したセンサーをケーブル

で連結し、さらに、現場に設置したデータ収集および保存用のコンピュータに接続し、電話回線、または、光ケーブルなどによって、遠隔の監視室で制御し、データの受信と収集、基線解析、計測変位の表示までのプロセスをすべて自動的に処理できるシステムである⁶⁾。このシステムによって、計測の自動化が実現され、操作性が格段に進歩し、価格も一般の計測システムとほぼ同等になった。なお、他にリアルタイム・キネマティック方式のシステムも開発している⁷⁻⁹⁾。

さらに、このシステムと、後述する計測精度向上のためのトレンドモデルによるデータ処理を組み合わせ、計測結果とともに安全評価結果などをインターネットで配信するシステムが構築された¹⁰⁾（図-5 参照）。

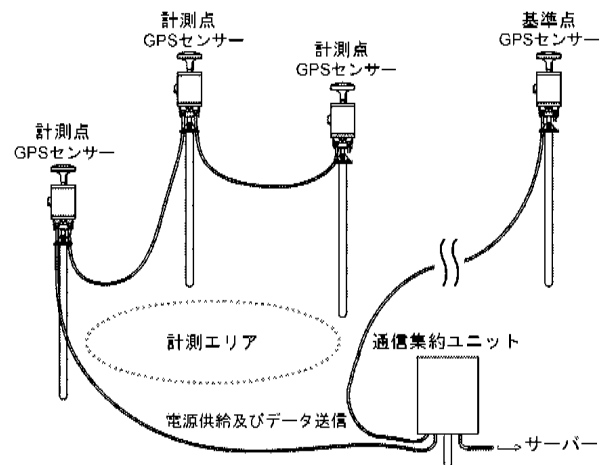


図-4 オンライン GPS 自動変位計測システム

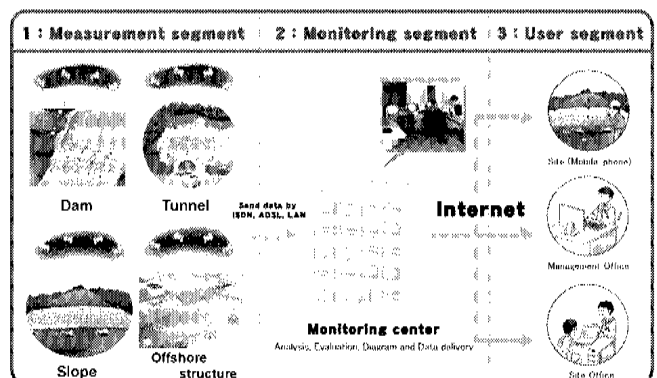


図-5 GPS 自動変位計測 web 配信システム

3. 計測精度向上のための取り組み

先に述べたように、GPS の搬送波位相を利用した干渉測位法では、基線長が 1km 程度以内であれば、標準偏差 5～10mm の変位計測が可能である。これは単発的に実施した際の標準的な精度である。2.3 で紹介した自動計測システムによって、たとえば 1 時間の受信データを解析して連続的に求めた（すなわち 1 時間ごとに得る）変位の標準偏差は 2～5mm 程度となる。このように標準的な値の半分程度になったのは連続的に数多くの計測結果を得た効果である。連続計測によって、計測結果はばらついていても、おおむね ±5～10mm の幅に収まる。

しかし、mm 単位で精密に計測するには、なお、一層の工夫が必要となる。その要請に応えたのが「トレンドモデル¹¹⁾」の適用である。トレンドモデルによって、1～2mm の変位や、0.1mm/日程度の速度を持つ変位を検出できることが現場計測を通して明らかとなった^{12, 13)}。

次に、トレンドモデルによって高精度計測が実現されるにつれ、今度は、これまでは見過ごされてきた GPS 固有の誤差要因に対して対処する必要性が生じてきた。

GPS 衛星から送信される電波に関して、変位計測の誤差要因としては、1) 気象による電波遅延、2) 上空障害物による電波の乱れ、3) 電波の多重経路（マルチパス）、4) 電離層による電波遅延、などが知られている。土木・建設分野における変位計測においては、一般に計測点間の距離がたかだか数 km 程度以下であることが多く、その場合、電離層の影響はあまり受けないため、4) を除く上記の 3 点に対する補正方法や対処方法が課題である。

特に、最も影響の大きいといわれている大気の大気による電波遅延（大気遅延と呼ぶ）は、その誤差の除去はきわめて難しく、GPS による変位計測だけでなく、GPS 測量における究極の精度制限因子であろうと言われていた¹⁾。

一方、実務では、必ずしも上空視界が開けている理想の場所にセンサーを設置できるとは限らず、

斜面やダム堤体のように傾斜地点にセンサーを設置する場合、センサー周囲の勾配や樹木などが上空を遮る障害物となり、人工衛星からの電波を乱す要因となり、ひいては計測精度の低下をもたらすことがある。また、電波が周辺の障害物などに反射して、複数の経路を通過してセンサーに入射するマルチパスによる誤差もある。

本章では、トレンドモデルに続き、これらの誤差の要因を取り除き計測精度の向上を図る方法について述べる。

3.1 真の挙動の推定～トレンドモデルの適用～

2.2 で述べたように、GPS による変位計測の大きな課題はその精度にあり、実用化には目的とする計測に適した精度と信頼性が不可欠である。特に、安全監視を目的とした変位計測に適用する場合には、GPS の一般的な精度である水平方向 5mm、高さ方向 10mm よりも高い精度が要求される。

筆者は時間方向に連続的に計測した変位に対して、平滑化手法のひとつであるトレンドモデルを適用することを提案した^{12, 13)}。実際、さまざまな時系列解析手法を適用する中で、トレンドモデルが GPS による変位計測の処理（ばらつきのあるデータの中から真の変位を推定する）に、ふさわしいことを見出した。

トレンドモデルとは、多項式回帰モデルに確率構造を導入したトレンド成分モデルをシステム方程式 (1) とし、観測方程式 (2) とあわせて次のように連立させるものである¹¹⁾。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (1)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (2)$$

ここで、上式において u_n は経時的に推移する真の変位、および、 y_n は実際に計測される変位である。また、 w_n は観測ノイズ（計測誤差：平均値 0、標準偏差 σ の正規分布に従うと仮定）、および、 v_n はシステムノイズ（モデル誤差：平均値 0、標準偏差 τ の正規分布に従うと仮定）である。 Δ は時間差分演算子であり、添字 k は差分の階数を意味する。

式 (1) および式 (2) で表したトレンドモデルに

においては、計測変位 v_n から真の変位 u_n だけでなく、計測誤差を表すパラメータ σ^2 （観測ノイズの分散）、モデル誤差を表すパラメータ ϵ^2 （システムノイズの分散）を推定することができる。さらに、モデルの次数 k もデータとの統計的フィッティング度によって自動的に求められる。この点はあらかじめ関数を決めて近似する一般的な方法と異なるところで、柔軟性の高い方法といえる。

トレンドモデルの有効性を検証するために、アンテナに変位を与え、それをGPSによって計測し、さらにトレンドモデルを適用してどの程度正確に変位を検出できるか調査する現場実験を行なった。実験では、1日1回、表-1に示すように0.8～12.5mmの変位をアンテナに与え（実際には1mm読みのスチール尺の目盛りに沿ってアンテナを移動させる。1mm以下の値は目視で与えた）、これを真の値とし平滑化結果と比較する。図-6に計測結果と平滑化結果を、また、表-1には与えた変位と平滑化結果の比較を示す¹³⁾。これらの結果から、階段状に生じる突発的な変位を真の変位との差が1mm程度で計測されることがわかる。

トレンドモデルは、理論的には計測値の誤差が正規分布である限り、その標準偏差 σ の大きさによらず真の値を推定することができる。すなわち、水平方向だけでなく高さ方向に対してもmm単位の計測が可能となる。その結果、GPSによる変位計測の実用性と信頼性が一気に高まり、実務への適用に大きく道が開かれた。なお、先に述べたシステム（図-5）にはトレンドモデルが導入されている。

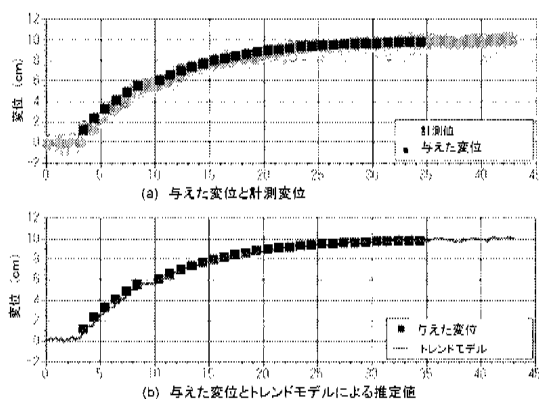


図-6 変位計測精度調査実験¹³⁾

表-1 計測値と与えた変位との比較¹³⁾

与えた変位 (mm)	計測変位 (mm)	誤差 (mm)
12.5	11.8	0.7
9.6	8.7	0.9
7.4	8.3	0.9
5.6	4.8	0.8
4.3	5.1	0.8
3.3	3.0	0.3
2.5	2.6	0.1
2.0	1.9	0.1

3.2 気象の影響とその補正～大気遅延の補正～

(1) 気象補正の考え方

GPSの電波は、伝搬経路上にある大気圏を通過するとき屈折し、直線を進む場合と比べ受信機到達に遅れを生じる。そのため、受信機で計測される位相にも遅れが生じ、得られた位置に大気遅延による誤差が生じる（図-7参照）。大気圏中の気象は日々または季節ごとに変化するので、高精度計測ではその影響を無視できないことがある。

一般に、基準点と計測点の距離（基線長）が数km以下のようなGPS変位計測としては比較的短い場合は、電波は同じ気象条件の大気の中を伝搬すると考えられるため、水平方向の座標（変位）については気象の影響は相殺される。一方、比較的短い基線長であっても基準点と計測点の間に図-8のように高低差がある場合、伝搬経路長 r_{mi} 、 r_{mb} に違いがあり、その経路差における気象の影響（位相の遅延量の差）は相殺されない。したがって、基線解析において気象の影響を適切に考慮しないと、大気遅延に基づく誤差が生じる。

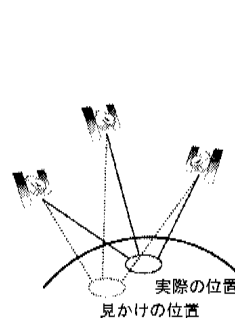


図-7 位置の誤差

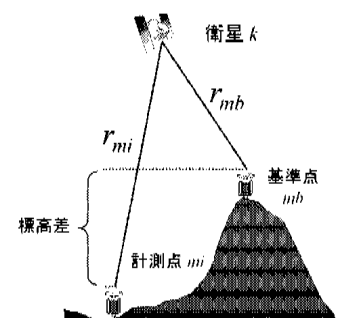


図-8 伝搬経路長

トポメトリ法における基線解析においては、一般に、実際の気象状況に関わらず標準的な大気（気圧1010hPa、気温20℃、相対湿度50%）による大気遅延を気象補正式に適用している。そのため、計測現場における現実の気象の変化には対応していないのは明らかである。したがって、それをどのように適正に補正するかが重要な課題である。

大気圏遅延の補正は、水蒸気ラジオメータにより水蒸気量を直接計測して補正量を算出する方法やGPSの位相データ中に含まれる水蒸気遅延量を推定する方法が知られている。筆者らが適用する地上気象による補正法は、GPS電波の伝搬経路に沿った大気の気象条件を用いるものではないので、補正方法として厳密でないとの指摘がある。しかし、土木・建設分野で対象とするような高低差が大きく基線長が数km程度の比較的狭い範囲における変位計測においては、GPS電波の伝搬経路に沿った気象に基づく誤差は位相差を取ることで相殺され、誤差の要因となるのは地上付近の気象であると推定できる。この考えに基づき、筆者らは、地上気象による大気遅延補正の妥当性を示した^{15, 16)}。

電波の大気圏内の伝搬は、人工衛星の軌道確定のため、大気の厚い層の下から電波やレーザ光での観測を余儀なくされた1970年代に盛んに研究された。地球周回衛星から火星探査を目指した高精度軌道確定のため、特に人工衛星が低い高さに見える場合（低仰角）での精度向上を目指して、さまざまなモデルが提唱されている。筆者らは、いくつかのモデルを検討し、Modified Hopfieldモデル¹⁴⁾が適切であることを示した。

(2) 気象補正の実際

大気圏遅延の誤差が現れやすい条件として、10km以下の基線長で高低差が大きい場所を選定し、Modified Hopfieldモデルを適用して気象補正を行った¹⁵⁾。いずれも1年半から2年にわたる連続計測結果である。一般に、水平方向の変位は気象の影響をあまり受けないことからここでは高さ方向変位のみを扱う。

最初のA現場（北緯43度、基線長9.4km、高低差729m）において、気象の変化による大気遅延が

衛星からの電波にどのように影響を受けるか調べる。図-9に気象データと電波の大気遅延差（計測点と基準点のそれぞれの大気遅延量の差。気象データからModified Hopfieldモデルによって計算される。高低差100mあたりの値に換算している）を示す。ここで、ドライ項とは遅延量のうち気圧と気温のみに依存する項（量）のことであり、ウェット項とは水蒸気分圧（気温と湿度から推定）に依存する項（量）のことである。この図から遅延量の絶対値はドライ項が大きく、変化量はウェット項が大きくなることがわかる。GPSによる変位計測は、基線解析で時々刻々得られた座標の差によって変位を求めるため、変化量の少ないドライ項は座標差を取ることでおおむね相殺されるため影響は比較的小さい。一方、変化量の大きいウェット項は座標差を取ることによって消去できず、計測結果はウェット項による影響を大きく受けることになる。

気象補正はこのような大気遅延の影響を気象データからModified Hopfieldモデルを用いて推定し、基線解析を行うものである。

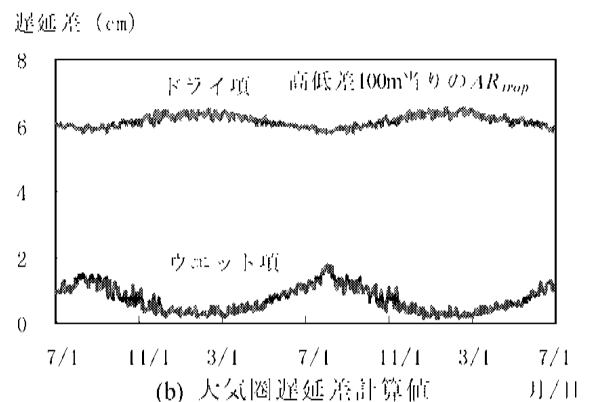
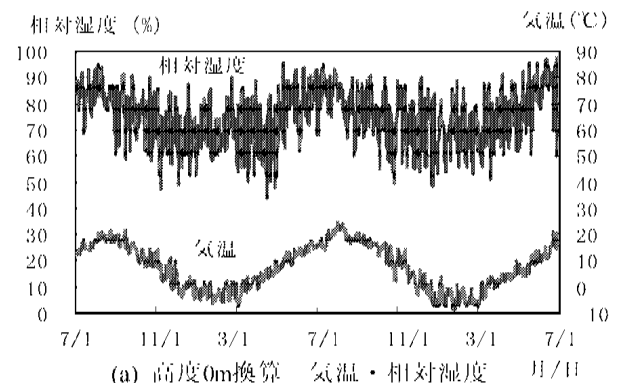
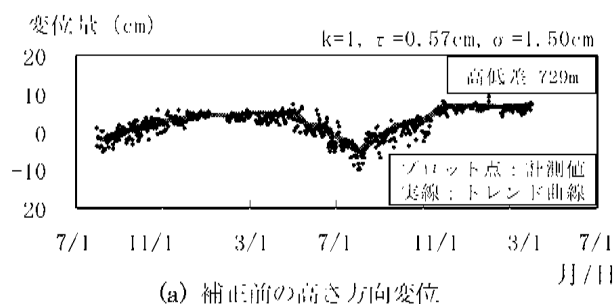
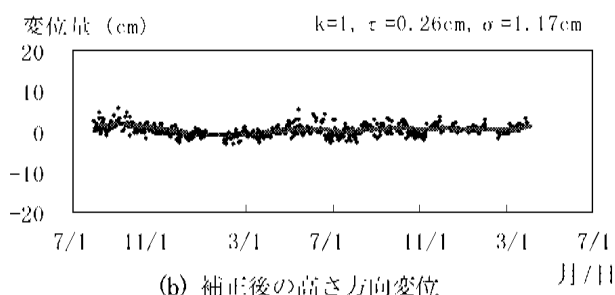


図-9 A現場の気象データと大気遅延量



(a) 補正前の高さ方向変位

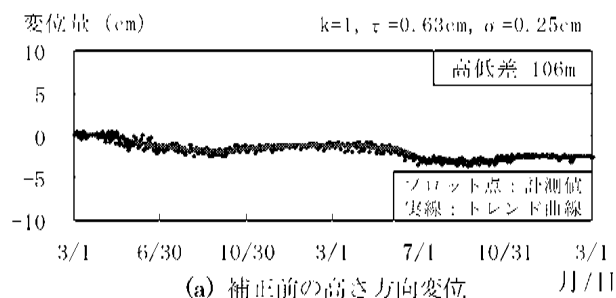


(b) 補正後の高さ方向変位

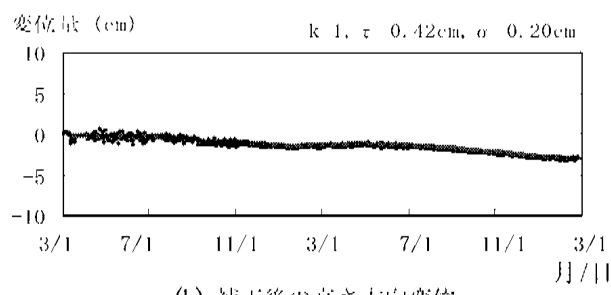
図-10 A 現場の高さ方向変位の補正結果

高さ方向変位の補正前後の時系列グラフを図-10に示す。時系列グラフの実線は、トレンドモデルによって、計測値から真の変位を推定した曲線である。高さ方向の変位について、標準偏差は 1.5cm であり、 9.4km の基線長としては良好な結果であるが、補正前には年周期的な大きな変動がみられる。Modified Hopfield モデルによる気象補正を適用すると、年周期変動は著しく減少している。トレンドモデルにより真の挙動を推定すると、実際の高さ方向の変位には年周期はなく、変位の大きさも小さいことが示されている。本現場では急激な変位が生じる要因が見当たらないことから、気象補正によって改善された計測結果が得られたものと考えられる。

次に、地すべり地域のC現場（北緯 35° 、基線長 0.3km 、高低差 106m ）における計測データに対して、Modified Hopfieldモデルによる気象補正を適用した。高さ方向変位の計測結果と補正結果を図-11に示す。C現場はA現場と比べて基線長と高低差が小さい現場であるため（基線長 $9.4\text{km} \rightarrow 0.3\text{km}$ 、高低差 $729\text{m} \rightarrow 106\text{m}$ ）、変位の年周期変動量そのものはそれほど大きくない。しかし、年間を通じて地盤が沈下と隆起を繰り返しているように見える。一方、別に実施されている地盤変位計測から、本現場では継続し



(a) 補正前の高さ方向変位



(b) 補正後の高さ方向変位

図-11 C 現場の高さ方向変位の補正結果

た沈下があることが分かっている。気象補正を行うことによって変位は、初夏から冬季にかけての継続的な沈下と冬季に停留する挙動、および、年間 $1.5 \sim 2\text{cm}$ （月平均 $1 \sim 2\text{mm}$ ）の沈下が生じていることが明瞭に読み取れるようになった。

以上のように、現地の気象条件を入力し Modified Hopfield モデルによって大気遅延量を推定し、これを用いた基線解析を行えば、通常の GPS の基線解析に比べ、高さ方向変位の大きな年変動を補正し、気象の変化を排除した GPS 変位計測ができることが示された。なお、上記事例の気象データとしては現場から最寄りの測候所において得られた値を用いている。もし、現場の計測位置で気象データを観測できればよりよい補正ができる¹⁶⁾。

図-9 に示した大気遅延量から、気象による高さ方向変位の変動は、おおざっぱにいうと基準点との高低差が 100m につき年間に $1 \sim 2\text{cm}$ 程度である（高低差 10m あたり $1 \sim 2\text{mm}$ ）。したがって、ダムにおける計測においても基準点と計測点の高低差が数 10m 以上あり、大気遅延に基づく年間の周期的な変動が無視できない場合は、気象の影響を考慮するとよいであろう。

3.3 上空障害物の影響の低減～マスク処理～

(1) 上空視界障害物の影響低減の考え方

人工衛星と受信センサーとの間に背後斜面や樹木などの障害物があると、受信電波に乱れが生じる。この課題については、これまでも指摘されているものの、対策としては、障害物の存在する環境下での計測を避けるために上空視界が良好な位置を選んで計測する、あるいは、障害物を排除するなどが推奨されるにとどまっている。しかし、土木・建設分野の計測では、用地などの問題で計測点の選定などに制限があり、なんらかの方法で上空障害物の影響を抑えて一定の精度を保証する実用的な方法が望まれる。

そこで、上空障害物があり計測精度が劣化している計測点について影響調査を行い、精度改善手法を提案した¹⁷⁾。図-12 に調査対象とする計測点の上空写真を示す。この計測点は、切土斜面上にあり背後に民有地の樹木が迫っている。図-13 は、当該計測点の変位計測結果であり、正常な計測値とともに周期的に大きく外れている計測結果が見られる（図中の○印、No.1～No.3）。

正常値と計測値 No.1 の基線解析に使用した 1 時間分の衛星軌道を上空写真に重ね合わせたものを図-14 に示す。図中の番号は衛星（SV）の番号である。また、矢印は衛星の移動方向を示している。図-14(a)では各衛星は樹木にかかっていないが、図-14(b)では SV4 と SV20 が樹木にかかっている。計測値 No.2, No.3 についても同様な状況である。

一般に、樹木などを通して受信される衛星の電波は障害物の影響で誤差を含むことが指摘されて

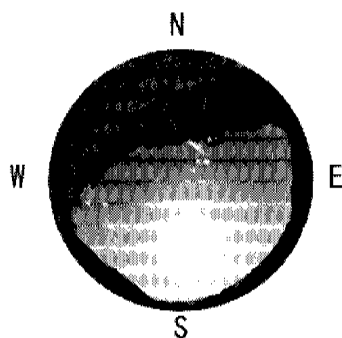


図-12 計測点の上空写真

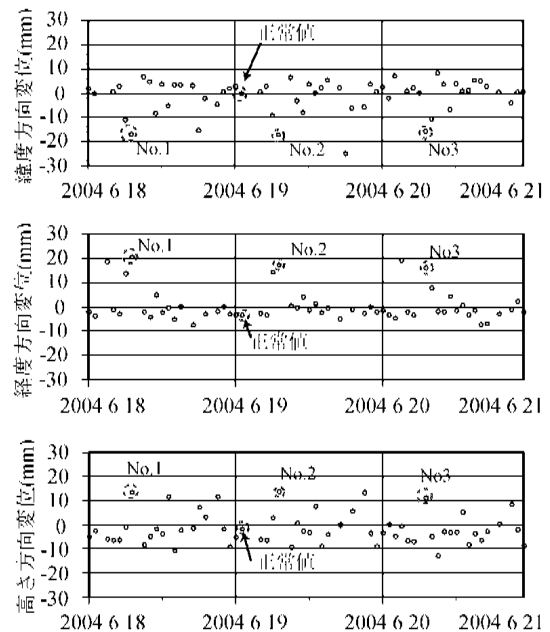


図-13 上空視界が悪い計測点の計測結果

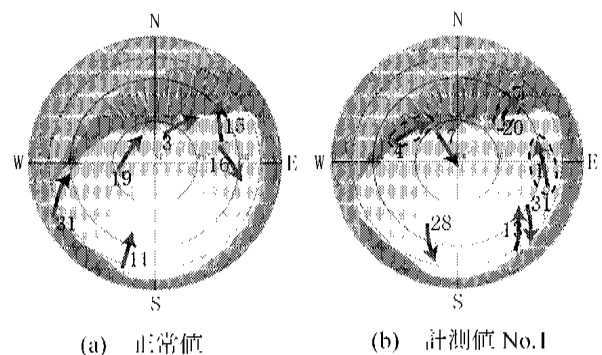


図-14 計測点の上空視界と衛星軌道

いる。そこで、図-13 における計測値 No.1 について、衛星番号 SV1, SV4, SV20 に対して、残差¹⁷⁾を計算し、その経時的な推移を図-15 に示す。ここで、残差とは、直接計測された電波の位相と基線解析によって得られた数値をもとに計算によって求めた位相との差に電波の波長をかけたものである。直感的には、上空障害物による電波の乱れに起因する衛星と計測点間距離の誤差である。

図-14(b)において衛星 SV1 の軌跡は障害物のない範囲にあり、図-15(a)に示した残差は十分小さいことがわかる。一方、衛星 SV4 および SV20 は斜面上部の樹木の背後を移動し、残差も大きく乱れている（図-15(b)および図-15(c)）。

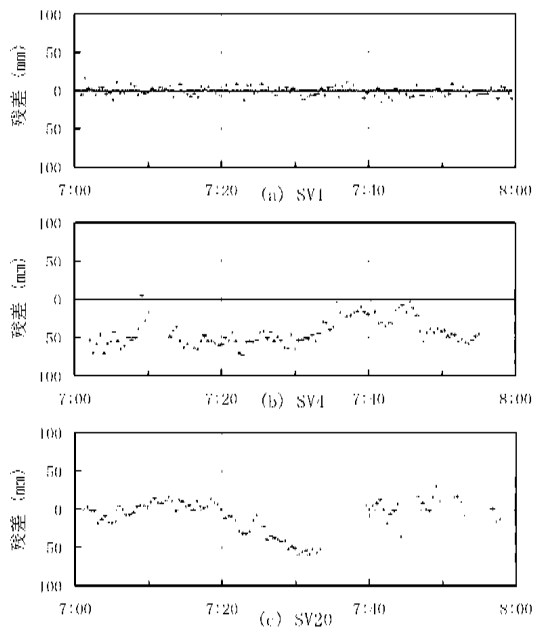


図-15 計測値 No. 1 の残差

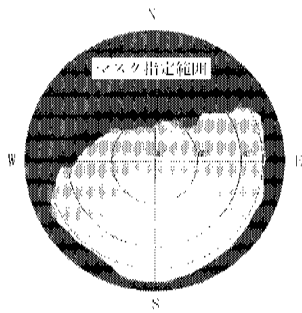


図-16 マスクの設定

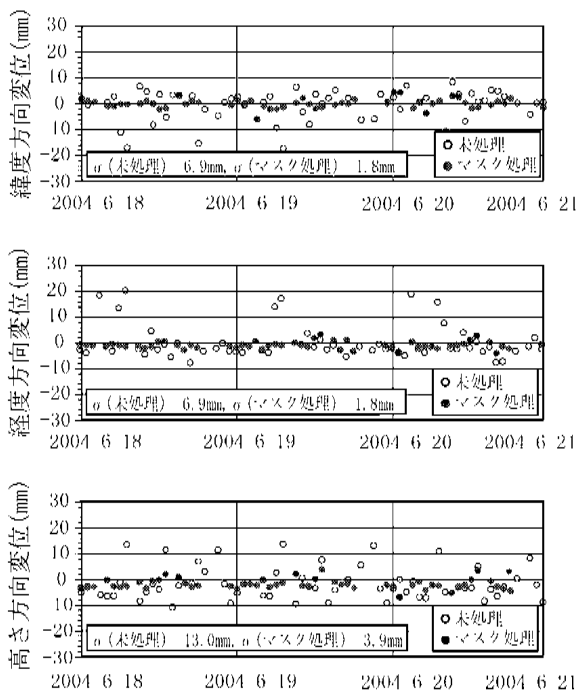


図-17 マスク処理による結果

以上のことから、上空障害物の背後にある人工衛星に対する残差は大きく、その衛星からの受信電波に誤差があることがわかる。そこで、上空障害物の背後を移動する人工衛星からの受信電波を基線解析において用いないことを考える。そのため、図-16 のように上空写真における障害物の領域を指定し、その領域を通過する人工衛星の受信データを排除する。この処理のことをマスク処理と呼ぶ。

マスク処理をした結果を、図-17 に示す。大きく外れていた計測値が、緯度、経度、高さといずれの成分に対しても正常と考えられる値となっている。標準偏差は、緯度、経度方向が 6.9mm から 1.8mm に、高さ方向は 13.0mm から 3.9mm に飛躍的に改善された。

(2) 影響低減の実際

次に長期間計測した結果に対してマスク処理を適用する。図-18, および、図-19 にそれぞれマスク処理の適用前、および、適用後の変位計測結果を示す。マスク処理前に大きくばらついていた計測変位が、マスク処理後は正常な値となっている。また、標準偏差も大きく改善されている。このことから、上空視界が悪い計測条件でも、マスク処理によって精度のよい計測が可能となる。

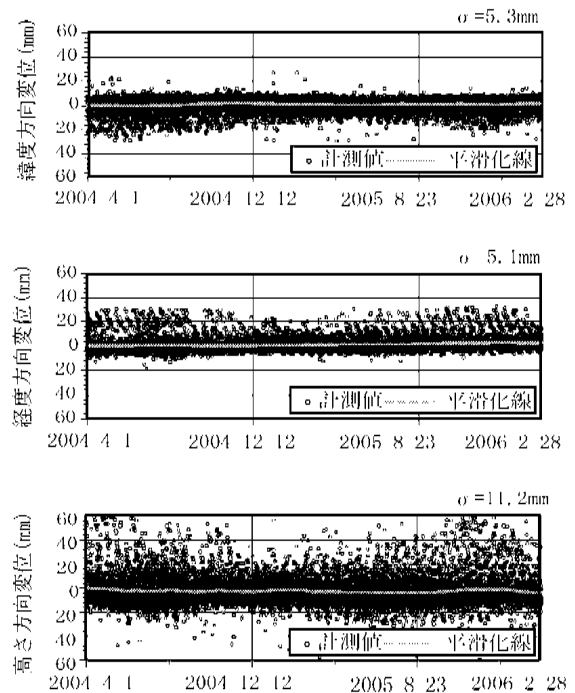


図-18 長期計測結果 (マスク処理前)

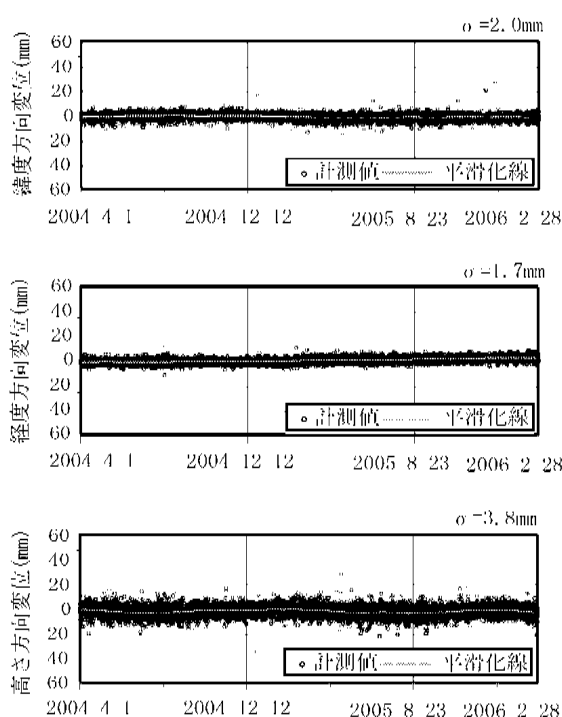


図-19 長期計測結果（マスク処理後）

以上のように、気象補正と上空障害物の影響除去という、GPS 変位計測にとって最も大きな誤差要因に対する対策が可能となり、これまで対応が困難であった観測条件でも、高精度で3次元変位を計測できるようになる¹⁸⁾。

4. 適用事例

GPS による変位計測は、ダム、地すべり、高速道路斜面、切盛土、鉱山斜面、埋立地、開削連壁、トンネル坑口斜面、杭頭、鉄塔、建築物、護岸、堤防、軌道、高架など多岐に渡り実施されている。個々の内容は本文では省略することとし、ここでは公表されているいくつかの報告を挙げておく¹⁹⁻²⁶⁾。

5. GPS 変位計測指針について

GPS 変位計測がより一層普及するためには、誰でも同じ品質で計測結果を得られるような「計測指針（ガイドライン）」が必要となろう。

国際岩の力学学会（International Society for Rock Mechanics）の標準化委員会において、“Displacement Measurements using Global Positioning System”部会を立

ち上げるための準備が始まり筆者は下記の目次を提案している。

Standard Practice on Displacement Measurements using Global Positioning System

1. Scope

1.1 Purpose

1.2 Limitation

2. Significance and use

2.1 Background

2.2 Special features of GPS

2.3 Positioning methods - Carrier-Phase GPS

2.3.1 Static positioning

2.3.2 Kinematic positioning

2.3.3 Others

3. Apparatus

3.1 General

3.2 GPS antenna

3.3 GPS receiver

3.4 Data control unit

3.5 Communication control unit

3.6 Others

4. Procedure

4.1 Preparatory investigations

4.1.1 Planning

4.1.2 Selection of bench mark and measurement points

4.2 Installation of bench mark and measurement points

4.3 Installation of apparatus

4.4 Observation

4.4.1 Carrier-phase measurements

4.4.2 Error factors

5. Calculation

5.1 Baseline computing

5.2 Displacements

5.3 Smoothing measurement results

6. Report

6.1 General

6.2 Installation reports

6.3 Monitoring reports

上記には本文で述べた誤差補正法が含まれていないので、今後は最新の成果が盛り込まれるようにしたい。

わが国では GPS による変位計測において多数の適用事例があり高度な技術や経験が集積されてきているので、国内においても指針などが作成され一層活用が促進されることが望まれる。

6. むすび

筆者らが GPS による変位計測の可能性に注目し関連文献や先行研究の調査を始めた当時は人工衛星の個数も少なく、3 衛星以上同時に受信できる時間帯は制限されていた。そのような状況でも数 mm 程度の変位を検出できることが現場適用によって明らかとなり、広範囲な領域の 3 次元変位計測の新しい手段として大いに期待を持つこととなった。その後、GPS の人工衛星が計画の個数打ち上がり 24 時間連続して利用できるようになり、企業等との共同研究によって計測システムの開発が進んだ。

現在は、システムを活用されている方々の研究によって適用範囲は拡大し、それぞれに新たな開発や工夫がなされている。特に、ダム分野への着実なる適用は大いに成果を上げている。その他の分野への適用も含め、GPS 変位計測がこれほど実務上利用されている国は少なく、おそらくわが国は世界の先端を進んでいると思われる。

GPS 変位計測の将来展望にはいくつかの方向があると考えている。

まず、計測システムのさらなる改善である。精度向上に成功したものの、まだ完全ではなく、いかなる計測の環境下においても高品質の計測が行えるようにしなければならない。本文でも述べたが、GPS の誤差の要因である、(1) 大気遅延、(2) 上空障害物、(3) マルチパス、への取り組みは今後とも重要である。

また、GPS 変位計測システムのより一層多様な活用も重要である。斜面から始まりダムや他の構造物に広がっている計測対象のさらなる拡大や、GPS の特徴を生かしつつ問題点は他の計測機器で補う相互補完的な複合システムへの展開が考えられる。また、3 次元変位がこれほどの精度で連続して計測できるシステムはほかになく、各適用分野においてこの点に着目して計測

結果を活用する新しい評価手法などの研究が望まれる。

3 点目は GPS そのものの改善と発展である。GLONASS, GALILEO, COMPASS など GPS と同様な人工衛星測位システムが開発・計画されている。これらは総称して GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれている。また、先日我が国でも独自の準天頂衛星が打ち上げられたことは記憶に新しい。多少の時間がかかるともこれらが実用化され、組み合わせて利用できるようになれば変位計測システムとしてより信頼性の高いものとなろう。

GPS による変位計測が始まって四半世紀が経過し、当初想像していた以上の成果が生まれている。次の 10 年後にはどのように展開しているか大いに期待される。

GPS 変位計測システムの研究開発および現場適用については、(株)国際航業、清水建設(株)、秋芳鉱業(株)、住金鉱業(株)、常盤地下工業(株)、飛島建設(株)、(独)土木研究所、中日本高速道路(株)、(株)日さく、(株)フジタ、古野電気(株)、山口県、などの関係者の方々に御協力および御支援いただいた。また、計測、解析、成果の取りまとめなどは山口大学の筆者の研究室の学生諸君に負うところが大きい。さらに、研究の一部は、石灰石鉱業協会研究奨励金、文部科学省科学研究補助金を受けて実施した。ここに記して深く感謝の意を表す。

参考文献

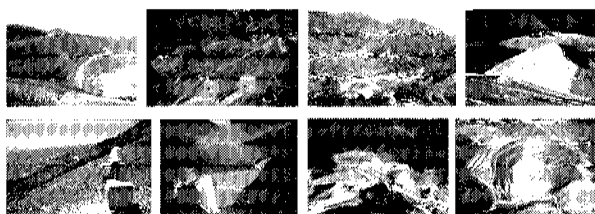
- 1) 土屋 淳, 辻 宏道: 新・GPS 測量の基礎, 社団法人日本測量協会, 2002.
- 2) Misa, P. and P. Enge (測位航法学会訳): 精鋭 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, 改訂第 2 版, 航法測学会, 2010.
- 3) 桜井春輔, 清水則一: GPS (汎地球測位システム) の地盤変位計測への応用, 土と基礎, 地盤工学会誌, 38 (387): 65-72, 1990.
- 4) 清水則一, 桜井春輔: GPS の岩盤変位計測への適用, 資源と素材, 109 (1): 1-7, 1993.
- 5) 桜井春輔, 清水則一, 古谷茂也, 皿海章雄: GPS による切取り斜面の変位測定, 土木学会論文集, No.475/III-24:137-142, 1993.
- 6) Masunari, T., K. Tanaka, N. Okubo, H. Oikawa, K. Takeuchi, T. Iwasaki and N. Shimizu: GPS Continuous Displacement Monitoring System, Int. Sympo. Field Measurements in Geomechanics, FMGM03, pp.537-543, 2003.
- 7) 近藤仁志, M. Elizabeth Cannon, 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.

- 8) 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.
- 9) 清水則一, 小山修治, 小野 浩, 宮下耕一, 近藤仁志, 水田義明: GPS 変位モニタリングシステムの連続観測による安定性の検証と計測結果の処理方法の提案, 資源・素材学会誌, vol.113, No.7, pp.549-554, 1997.
- 10) 岩崎智治, 武智国加, 武石朗, 清水則一: 道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発, 土と基礎, vol.50, No.6 (533), pp.25-27, 2002.
- 11) 北川源四郎: 時系列プログラミング, 岩波書店, 1993.
- 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, 114 (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) Hoffman-Wellenhof, H., H. Lichtegger and J. Collins (西修二郎 訳: GPS 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2005).
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 増成友宏: GPS による地盤変位計測の高精度化に関する研究, 山口大学博士論文, 2009.
- 19) 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, 地盤工学会誌, 48 (2), pp.25-27, 2000.
- 20) 平野宏幸, 田山 聡, 清水則一, 岩崎智治: 坑口動態観測に GPS 自動変位計測システムを適用—第二東名高速道路 引佐第二トンネル, トンネルと地下, 35 巻 9 号, pp.49-55, 2004.
- 21) 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, pp.137-148, 2005.
- 22) 斉藤英二, 井口正人, 小山修治: 日永良部島火山における GPS 連続観測による気象要素を加味した 3 次元変位検出, 火山, 51, pp.21-30, 2006.
- 23) 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.
- 24) 中里裕臣, 井上敬資, 阿部栄一, 高木圭介, 増成友宏, 武地美明: GPS による地すべり移動量観測における留意点, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.6, pp.55-61, 2008.
- 25) 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—岩手・宮城内陸地震後の石淵ダムの変形挙動監視, ダム技術, Vol.276, pp.9-20, 2009.
- 26) 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.



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
ダム工学会20周年記念事業

GPSによる変位計測技術の変遷と展望



平成22年10月1日

山口大学大学院 教授 清水則一

なぜGPSか？

- 広領域地盤、大型構造物の監視
計測限界(範囲)
従来 ～数10mまで → 数10m～数kmの範囲を計測
- 自動化、省力化、透明化、低コスト
完全自動、集中管理、共有・みえる化、トータルコスト縮減
- 高付加価値
三次元計測、高精度、長期連続計測、リスク管理

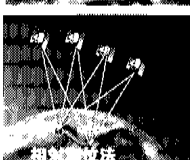
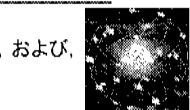
YAMAGUCHI UNIVERSITY

Global Positioning System(GPS)

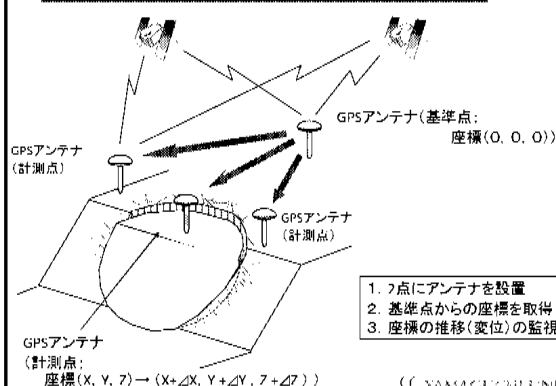
- 人工衛星を用いた3次元のナビゲーション、および、測量システム
- いつでも、だれでも、どこでも、利用できる。

利用法

- 単独測位法: ナビゲーション
 - レシーバーはひとつ
 - 3次元絶対座標 (緯度、経度、高さ)
 - 精度は10m～
- 相対測位法: 測量
 - レシーバーは2個以上+コンピュータ
 - 3次元相対座標
 - 精度は1-2cm (基線長<10km)



変位計測の手法



1. 2点にアンテナを設置
2. 基準点からの座標を取得(解析)
3. 座標の推移(変位)の監視

YAMAGUCHI UNIVERSITY

GPS変位計測の沿革

- 1970年代 航法援助法としてGPSの開発スタート(米国防省)
- 1980年代前半 相対測位法(高精度下歩測位法)確立
測地測量、地殻変位の計測
- 1980年代後半 広領域・大型構造物の変位計測手法として応用開始
- 日本において 地殻変動測定
測量(電子基準点網、工事測量)
地すべりなどが始まる
(ここから講演者の研究)
- 1989 GPS変位計測の研究調査
- 1990 変位計測実験(精度5mm-10mmを確認)
- 1991-92 切土長大斜面への適用
(測量用受信機の利用)
- 1992-97 フェーズ1 変位計測専用システムの開発*
海上測位システム*
リアルタイム変位計測システム*
現場への適用
掘削長大斜面長期計測
地すべり斜面計測
- 1997-2003 フェーズ2 計測精度向上の研究
トレンドモデルの適用(1mm精度の実現)
実用システム開発*
自動計測自動処理*
インターネット配信システム*
- 2004- 実務への展開**
地すべり監視、道路斜面監視、
トンネル情報化施工、ダム外観変位計測、
高架、近接、復旧、調査、改良工事の監視など
- 2006- フェーズ3 条件に依存しない高精度計測
気象補正、上空障害影響低減手法の開発
*共同研究者 **一般活用

YAMAGUCHI UNIVERSITY

発展の経緯

課題(当初、20年前)

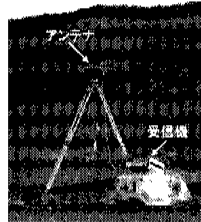
GPSは、値段が高い、精度が悪い、使いにくい。



- 精度向上 → データ処理技術
- 使いやすさ → 受信・解析・表示の自動化
- 低コスト → センサー、システムの開発

YAMAGUCHI UNIVERSITY

センサーの変遷～測量機器から計測センサーへ



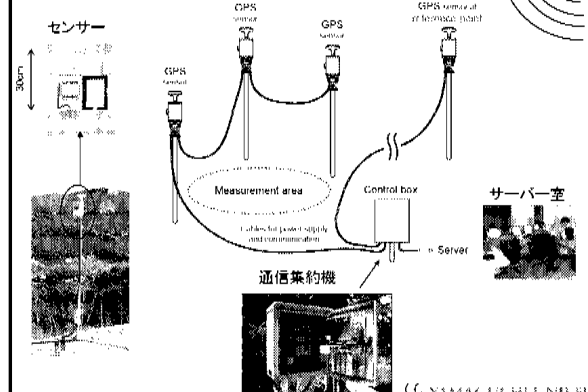
測量用のアンテナと受信機
(Trimble Ltd., 1991)



変位計測用センサー:
アンテナ・受信機一体型
(古野電機, 1998)

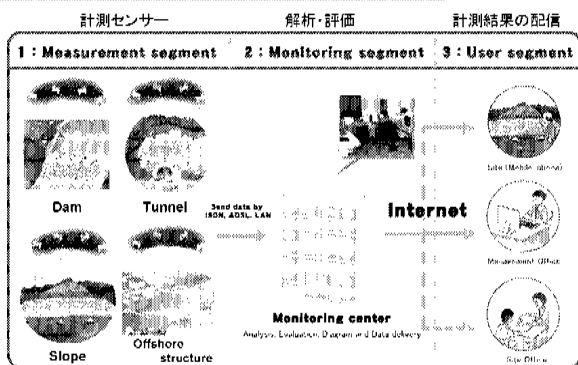
YAMAGUCHI UNIVERSITY

計測センサー～手動から自動計測へ



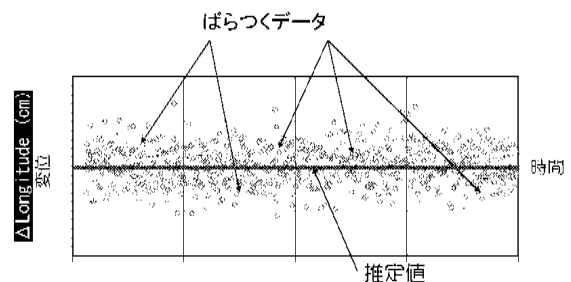
YAMAGUCHI UNIVERSITY

Webシステム～計測センサーから計測システムへ



YAMAGUCHI UNIVERSITY

コア・コンピタンス(核となる技術) — いかにして精度を向上させるか? —

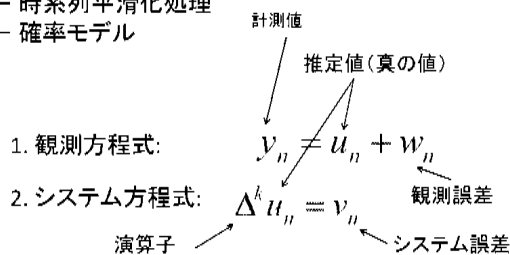


清水剛, 佐々木 浩, 中山隆夫 (1998年). クラウドシステムによる測地多角計測結果の平滑化に関する研究. 測量学報第54巻, 114001-114, 1998.
清水剛, 佐々木 浩, 中山隆夫 (1999). クラウドシステムによる測地多角計測結果の平滑化に関する研究. 測量学報第55巻, 114001-114, 1999.

YAMAGUCHI UNIVERSITY

トレンドモデルの適用(1998年)

- 時系列平滑化処理
- 確率モデル



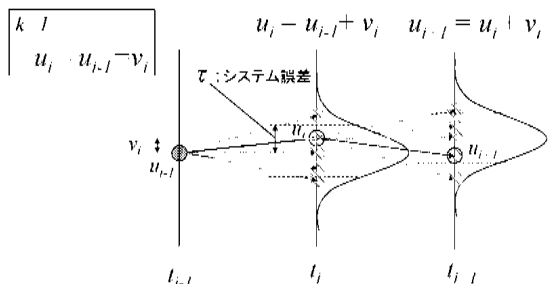
清水剛, 佐々木 浩, 中山隆夫 (1998年). クラウドシステムによる測地多角計測結果の平滑化に関する研究. 測量学報第54巻, 114001-114, 1998.
清水剛, 佐々木 浩, 中山隆夫 (1999). クラウドシステムによる測地多角計測結果の平滑化に関する研究. 測量学報第55巻, 114001-114, 1999.

YAMAGUCHI UNIVERSITY

トレンドモデル k=1

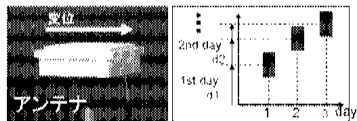
$$\Delta^k u_n = v_n \quad (\text{システム方程式})$$

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



YAMAGUCHI UNIVERSITY

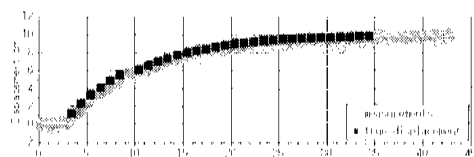
実証実験(1997年)



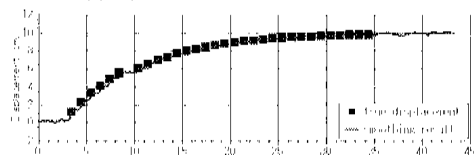
Exact Value (mm)	GPS with Trend Model (mm)	GPS - Exact (mm)
12.5	11.8	0.7
9.6	8.7	0.9
7.4	8.3	0.9
5.6	4.8	0.8
4.3	5.1	0.8
3.3	3.0	0.3
2.5	2.6	0.1
2.0	1.9	0.1

YAMAGUCHI UNIVERSITY

変位シミュレーション実験結果



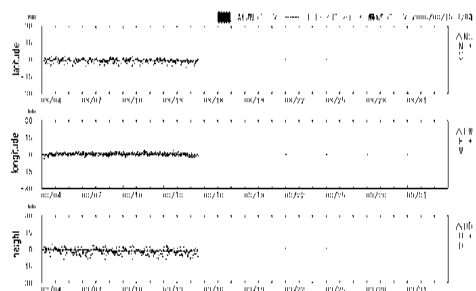
(a) Displacement and Measurement Results



(b) Smoothing Results and True Displacement

YAMAGUCHI UNIVERSITY

トレンドモデルによる真の変位の推定



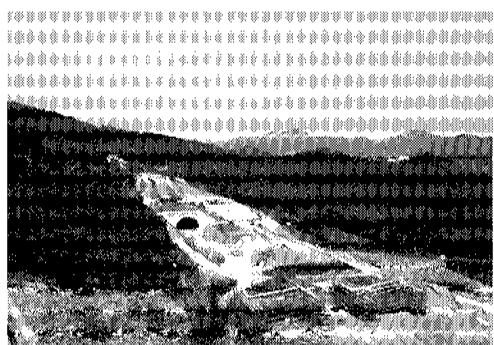
YAMAGUCHI UNIVERSITY

安全監視:地すべり計測



YAMAGUCHI UNIVERSITY

施工管理:地すべり地におけるトンネル施工

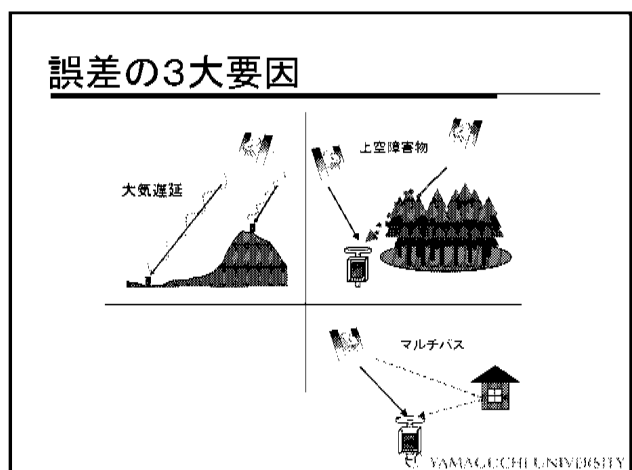
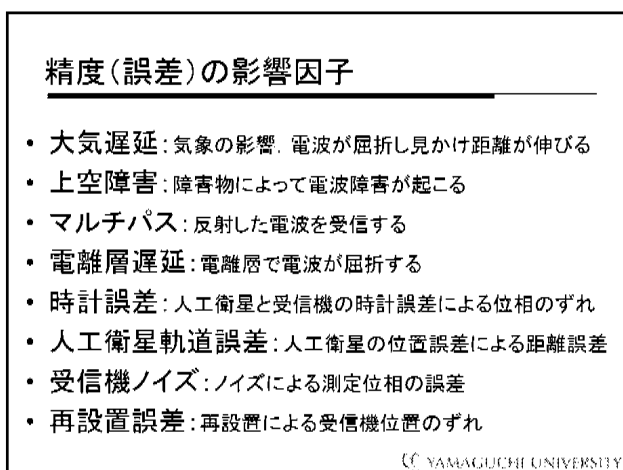
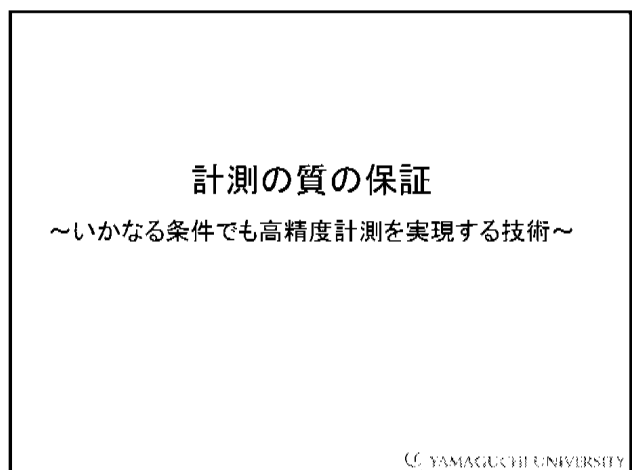
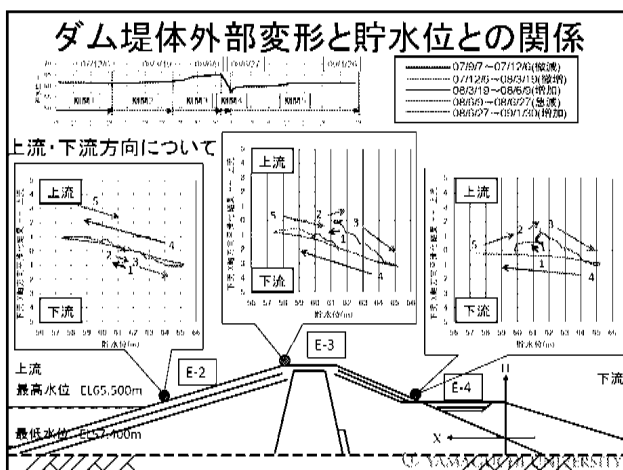
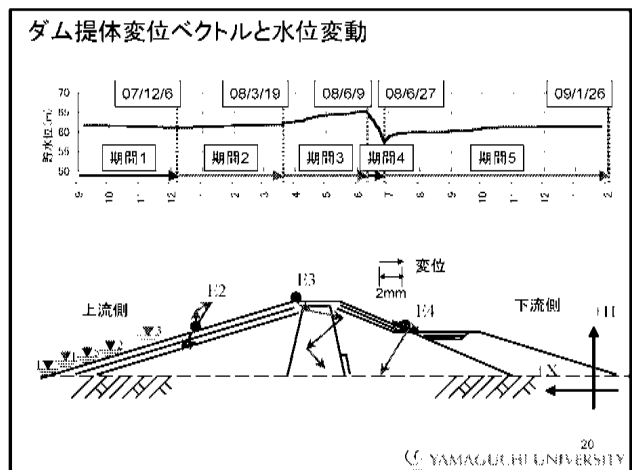
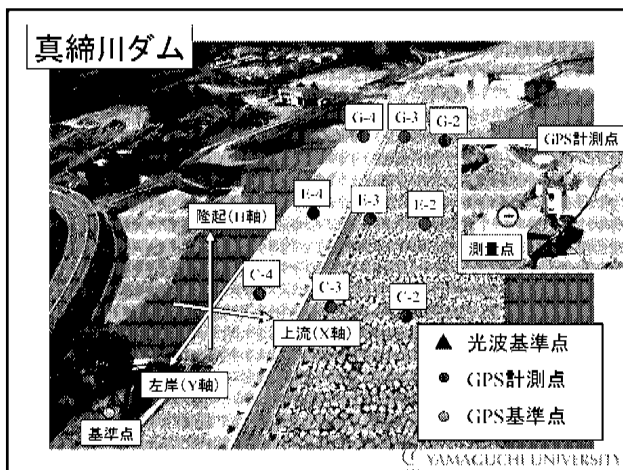


YAMAGUCHI UNIVERSITY

維持管理:フィルダム

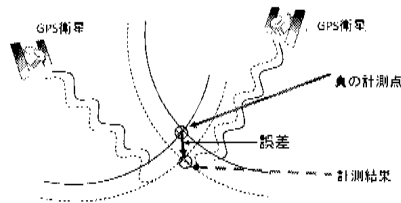


YAMAGUCHI UNIVERSITY



遅延による位置の誤差

GPSの誤差の仕組み



© YAMAGUCHI UNIVERSITY

GPS衛星 衛星から計測点までの距離
距離=波長×(端位相+波数)
 $r = \lambda \cdot (\phi + N)$ λ (波長): 約19cm
受信機で計測される
 $\phi = r / \lambda + N'$

GPS相対測位の基礎式(位相の式)

整数値バイアス(未知数)

電離層誤差 気象誤差 時計誤差

計測誤差

見測点 u^k の位置 見測点 m^k の位置

$$\phi_{m^k}^k = \frac{r_{m^k}^k + I_{\phi}^k + T_{\phi}^k}{\lambda} + \frac{c(\delta t_{m^k} + \delta t^k)}{\lambda} + N_{m^k}^k + \varepsilon_{\phi_{m^k}^k}$$

© YAMAGUCHI UNIVERSITY

GPS相対測位の基礎式(2重位相差)

$$\phi_{m^k}^k = \frac{r_{m^k}^k + I_{\phi}^k + T_{\phi}^k}{\lambda} + \frac{c(\delta t_{m^k} + \delta t^k)}{\lambda} + N_{m^k}^k + \varepsilon_{\phi_{m^k}^k}$$

$$\phi_{u^k}^k = \frac{r_{u^k}^k + I_{\phi}^k + T_{\phi}^k}{\lambda} + \frac{c(\delta t_{u^k} + \delta t^k)}{\lambda} + N_{u^k}^k + \varepsilon_{\phi_{u^k}^k}$$

↓ 電離層、気象の誤差が消去される

$$\phi_{m^k}^k - \phi_{u^k}^k = \frac{r_{m^k}^k - r_{u^k}^k}{\lambda} + f \cdot \delta t_{m^k - u^k} + N_{m^k - u^k}^k + \varepsilon_{\phi_{m^k - u^k}^k}$$

一方、

$$\phi_{m^l}^l - \phi_{u^l}^l = \frac{r_{m^l}^l - r_{u^l}^l}{\lambda} + f \cdot \delta t_{m^l - u^l} + N_{m^l - u^l}^l + \varepsilon_{\phi_{m^l - u^l}^l}$$

↓ 時計の誤差も消去される

$$\phi_{m^k - u^k}^{k-l} = (\phi_{m^k}^k - \phi_{u^k}^k) - (\phi_{m^l}^l - \phi_{u^l}^l) = \frac{r_{m^k - u^k}^{k-l}}{\lambda} + N_{m^k - u^k}^{k-l} + \varepsilon_{\phi_{m^k - u^k}^{k-l}}$$

© YAMAGUCHI UNIVERSITY

GPS相対測位の基礎式(2重位相差)

未知計測点座標 ($X_{m^k}, Y_{m^k}, Z_{m^k}$) 含む

測定値(位相)

人工衛星位置(既知)

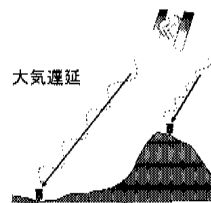
$$\phi_{m^k - u^k}^{k-l} = (\phi_{m^k}^k - \phi_{u^k}^k) - (\phi_{m^l}^l - \phi_{u^l}^l) = \frac{r_{m^k - u^k}^{k-l}}{\lambda} + N_{m^k - u^k}^{k-l} + \varepsilon_{\phi_{m^k - u^k}^{k-l}}$$

波長(既知)

未知整数値バイアス

© YAMAGUCHI UNIVERSITY

・気象条件による大気遅延の誤差処理 (2007)



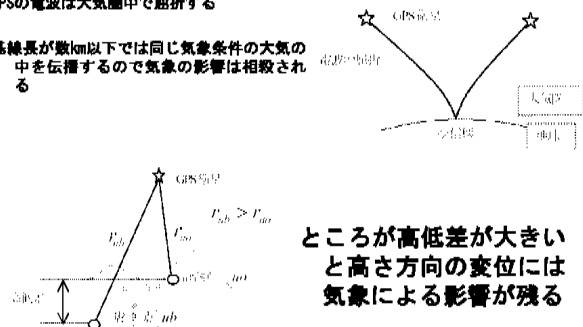
・津波太郎、津波利、GPSによる地盤変位計測における気象の影響の修正方法の検討、土木学会論文集、Vol.15, No.4, 447-460, 2007, 50
・津波太郎、石井孝典、松澤孝典、津波利、気象条件によるGPS相対測位の補正について、土木学会論文集、Vol.15, No.3, 449-460, 2006

© YAMAGUCHI UNIVERSITY

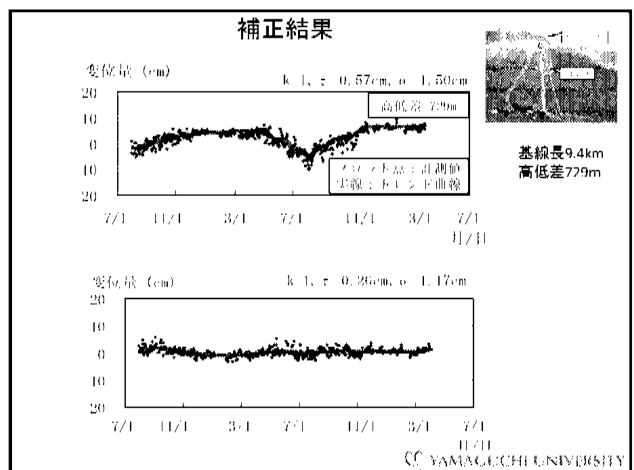
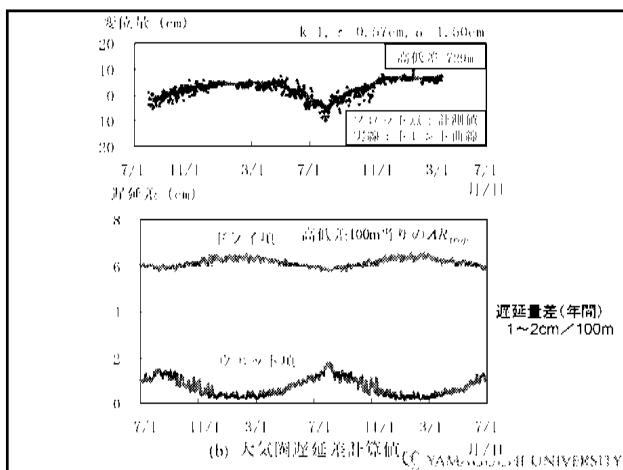
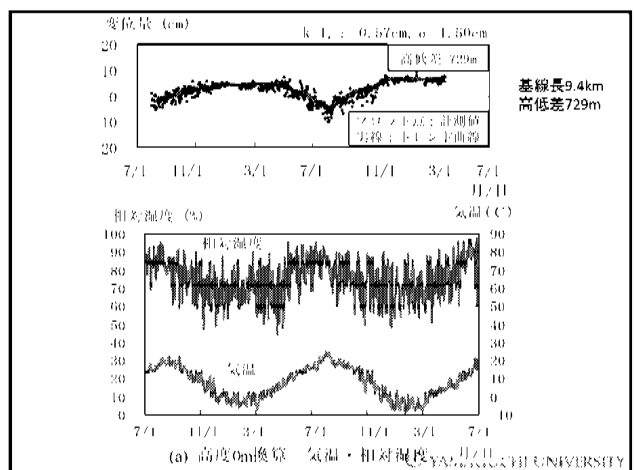
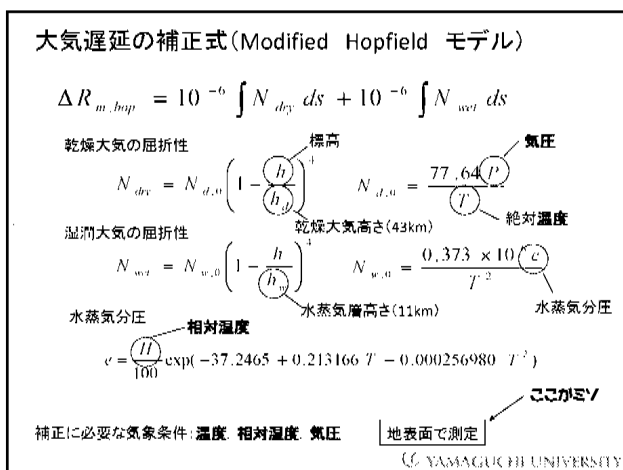
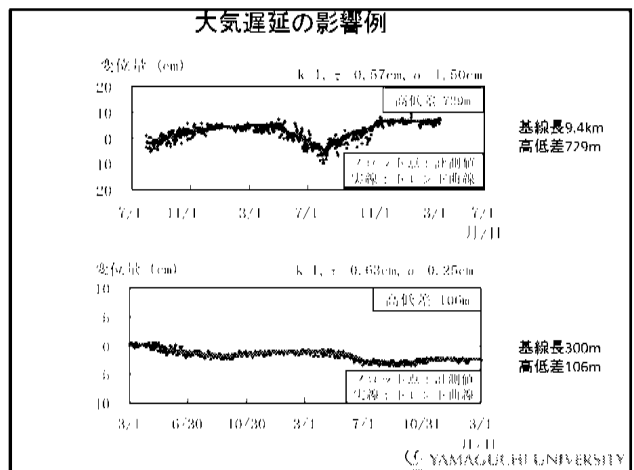
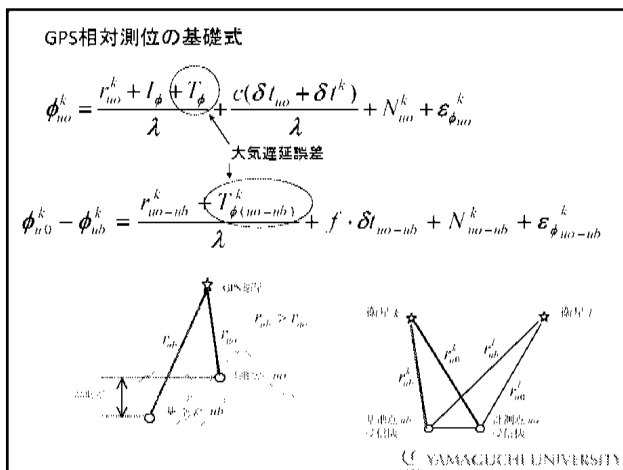
気象条件による電波の遅延：大気遅延

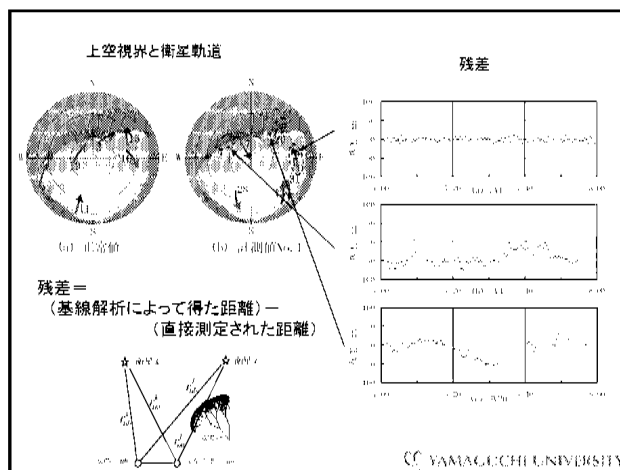
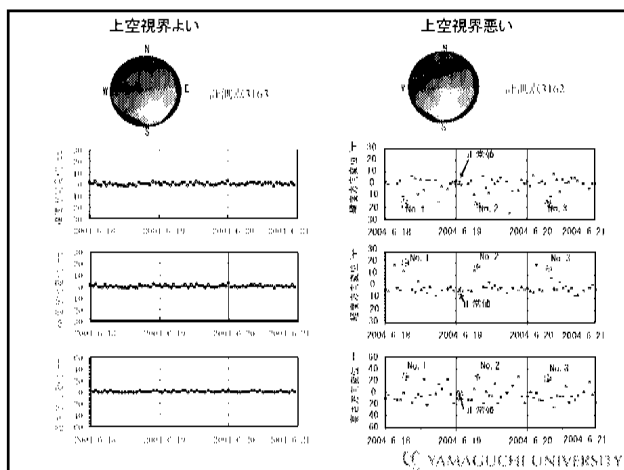
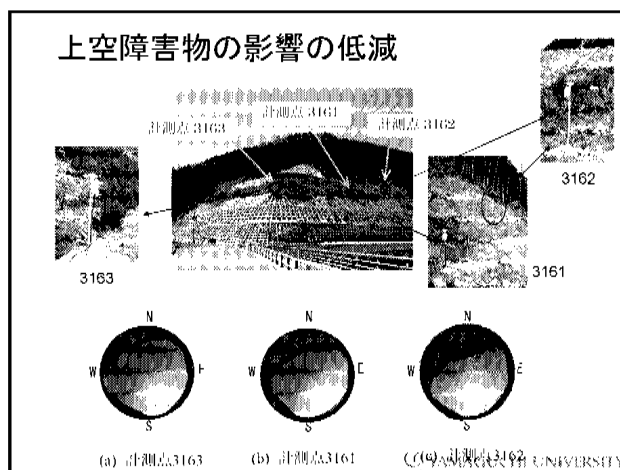
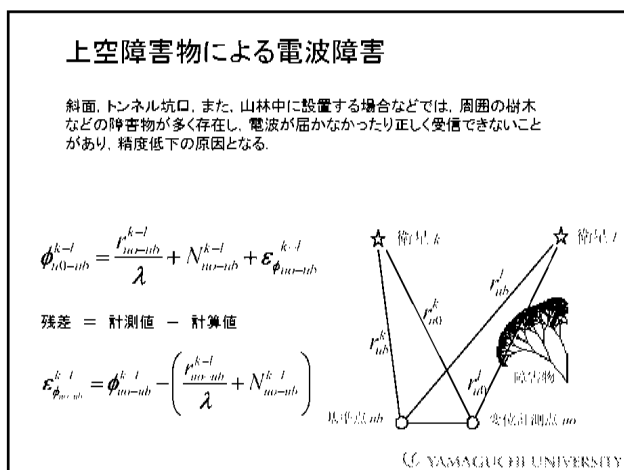
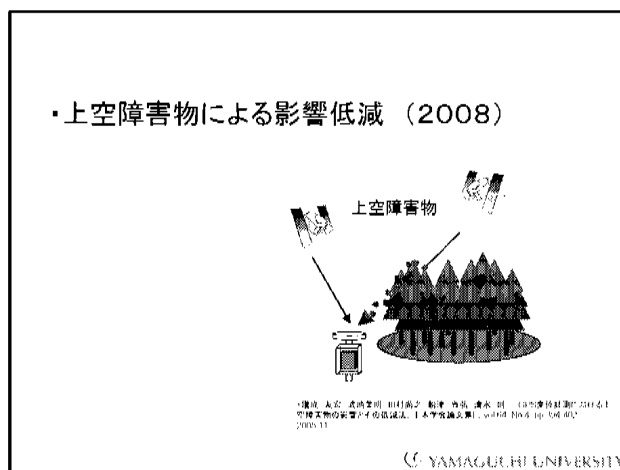
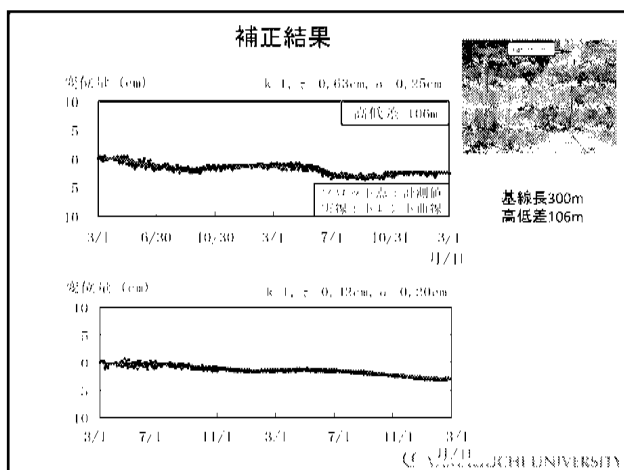
GPSの電波は大気中で屈折する

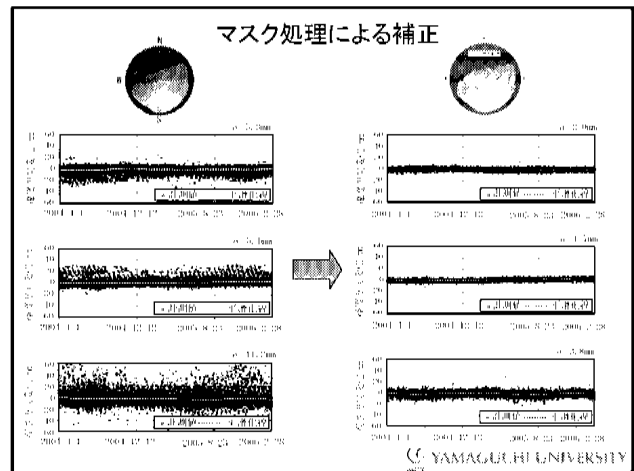
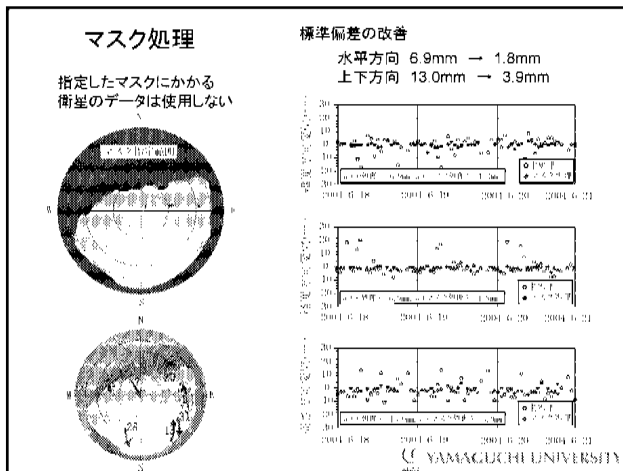
基線長が数km以下では同じ気象条件の大気の中を伝播するので気象の影響は相殺される



© YAMAGUCHI UNIVERSITY







ISRM Commission on Guideline of "Monitoring Rock Movements Using GPS "

GPS変位計測のガイドライン案(国際岩の力学学会)

Contents

1.Scope	4.Procedure
1.1 Purpose	4.1 Preparatory investigations
1.2 Limitation	4.1.1 planning
2.Significance and use	4.1.2 selection of observation points
2.1 Background	4.2 Installation of observation points
2.2 Special features of GPS	4.3 Installation of apparatus
2.3 Positioning methods	4.4 Observation
- Carrier-Phase GPS	4.4.1 carrier-phase measurements
2.3.1 static positioning	4.4.2 error factors
2.3.2 kinematic positioning	5.Calculation
2.3.3 others	5.1 Baseline computing
3.Apparatus	5.2 Displacements
3.1 General	5.3 Smoothing measurement results
3.2 GPS antenna	5.4 Error correction
3.3 GPS receiver	6.Report
3.4 Data control unit	6.1 General
3.5 Communication control unit	6.2 Installation reports
3.6 Others	6.3 Monitoring reports

45

YAMAGUCHI UNIVERSITY

今後の展望

- 高品質計測(精度の保証)
- 低コスト化(システム普及)
- 複合計測システム
 - 他の衛星測位システムとの組み合わせ
 - 他計測システムとの組み合わせ
- 3次元連続計測を生かした結果の評価法
 - 安全評価, 管理手法
- 計測の役割: 保険から投資へ
 - 計測によるBenefitとは

4. テクニカルセッション

フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムの開発

岩崎 智治¹ 小堀 俊秀² 増成 友宏³ 清水 則一⁴

フィルダムの維持管理において堤体の外部変形計測は非常に重要な計測項目である。しかし、従来は光波測量・水準測量による手動計測が実施されており、計測精度や計測頻度、計測データの透明性、地震等の緊急時に迅速な対応ができない等々の課題が指摘されていた。そこで我々は、フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムを開発した。本発表では、GPS をフィルダム堤体の外部変形計測に適用するために行った開発の成果と現場への適用事例について報告する。

キーワード: フィルダム, GPS, 自動計測, 適用事例

1. はじめに

フィルダムの維持管理において堤体の外部変形計測は非常に重要な計測項目である。しかし、従来は光波・水準測量による手動計測が実施されており、計測精度や計測頻度、計測データの透明性、地震等の緊急時に迅速な対応ができない等々の課題が指摘されていた。そこで我々は、フィルダム堤体外部変形計測のための GPS 自動計測システムの開発に取り組んできた。

GPS (Global Positioning System) は、米国が運用する測位衛星を利用した測位技術で、ナビゲーション分野や測量分野で目覚ましい進歩を遂げているが、フィルダム堤体の外部変形計測に適用するには幾つかの課題を克服する必要がある。

本発表では、GPS をフィルダム堤体の外部変形計測に適用するに際して行った開発の成果と現場での適用事例について報告する。

2. GPS をフィルダム堤体計測に適用する上での課題

GPS による精密計測は測量分野で発達し、1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて主に地すべりや大規模切土のり面の変位計測を目的とした土木計測分野での利用が始まった¹⁾。

しかし、GPS をフィルダム堤体の外部変形計測に適用するには以下に示す幾つかの課題を克服する必要がある。

①自動計測用 GPS 機器の開発

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った。

②計測精度の向上

既存の GPS 測量技術では mm 単位の精度を得ることが難しく、計測精度の向上が課題であった。

③ダム天端への設置

ダム天端は管理用道路として利用されることも多く GPS の設置が困難である。そこで、ダム天端の管理用道路にも設置可能な埋設型 GPS の開発が必要であった。

④耐雷性の向上

ダム堤体は山間部の雷の多発地域に位置することも多く、耐雷性の高い GPS 機器の開発が望まれた。

⑤積雪対策

積雪地域では雪による GPS 機器の破損や計測不能が問題であり、積雪対策を検討する必要がある。

⑥地震等緊急時の対応

地震等の緊急時にはダム堤体の変状の有無を迅速に判定する必要があり、GPS 計測結果を速やかにとりまとめ関係各所で情報共有する仕組みが必要であった。

3. フィルダム堤体計測用の GPS 自動計測システム

第 2 章の様々な課題の解決にとりくみフィルダム外部変形計測のための GPS 自動計測システムを開発した。

¹ 国際航業(株) 社会基盤事業部、技術マネージャー

² 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チーム、研究員

³ 古野電気(株) システム機器事業部、技師長

⁴ 山口大学大学院、教授

3.1 自動計測用 GPS 機器の開発

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った。そこで、高価な測量用 GPS 機器からフィルダム堤体計測に不要な機能や部品を省き最適な機器構成とすることで計測精度を劣化させずに小型・軽量・安価な GPS 自動計測機器を開発した。図-1 に GPS 自動計測機器の構成図を示す。

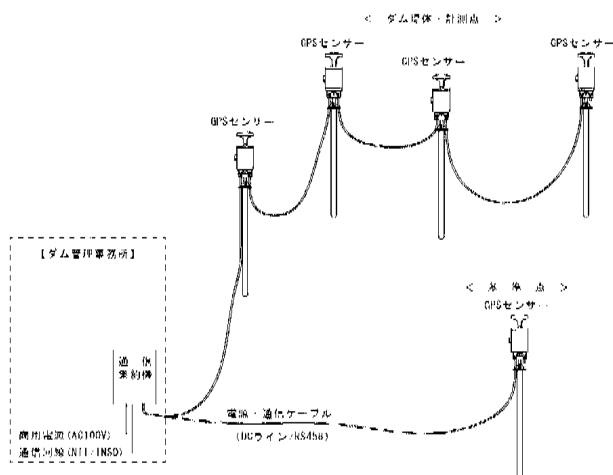
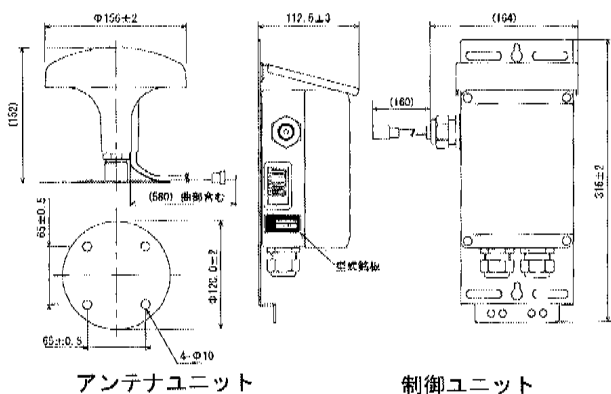
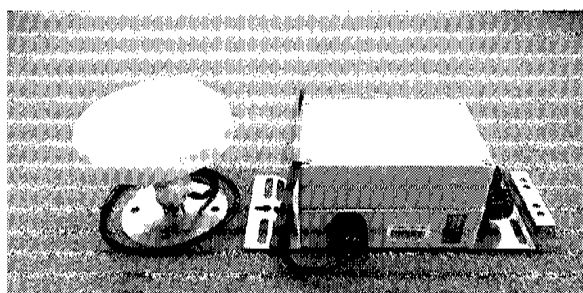


図-1 GPS 自動計測機器の構成図

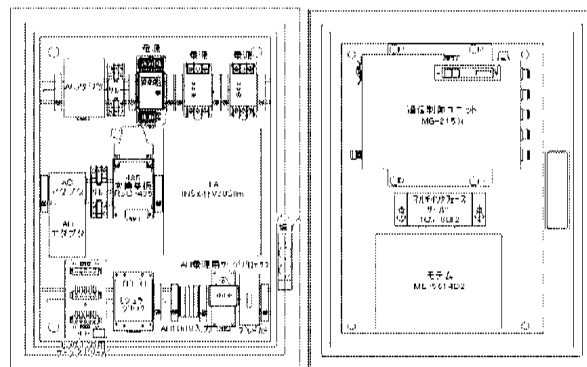


a) GPS センサーの構造図



b) GPS センサーの外観

図-2 GPS センサー (古野電気製: MG3111 型)



a) 通信集約器の構造図



b) 通信集約器の外観

図-3 通信集約器 (古野電気製: MG3155 型)

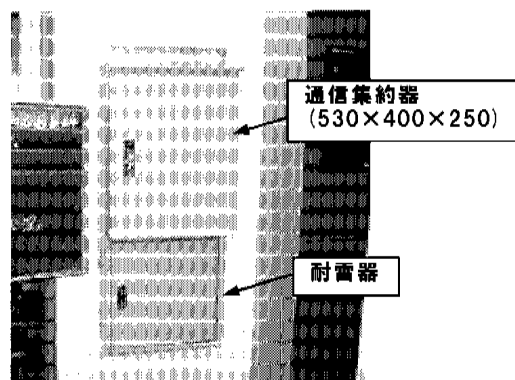


図-4 ダム管理事務所内の通信集約器の設置例

堤体の外部標的にはアンテナユニットと制御ユニットだけからなる安価な GPS センサー (図-2) を設置するだけで、GPS センサーで受信したデータは多芯ケーブルを介して現地に 1 基だけ設置する通信集約器 (図-3, 図-4) に集約・記録されデータ通信を行う仕組みである。

このような機器構成とする事で、多数の外部標的を計測する場合でも、比較的安価な GPS センサーを増設するだけでよく機器費用の負担は比較的小額に抑えることが可能となった。

3.2 計測精度の向上

(1) トレンドモデルによる誤差処理

GPS 計測では、衛星配置や上空視界、基線長（基準点と計測点間の距離）、気象条件、マルチパス（建物などの地物による反射波）等の様々な誤差要因のため計測値がばらつき、通常の測量作業で実施される基線解析のみでは最も高精度なスタティック測位法でも mm 単位の変位判定は難しい。そこで、清水ら^{2, 3)}が提案するトレンドモデルによる時系列統計処理（誤差処理）を導入した。

この方法は、トレンドモデル⁴⁾と呼ばれる確率構造を持った時系列解析モデルを用いて、ノイズを含む計測データから真の変位挙動を推定するものである。

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

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

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

岩崎ら⁵⁾は、地すべりでの GPS 計測値にトレンドモデルによる誤差処理を行い、光波測量や地表面伸縮計の計測結果と比較することで、1～2mm/月程度の地すべり変位計測が可能であることを確認した。また、山口ら⁶⁾は、実際のフィルダム堤体の外部変形計測において誤差処理後の GPS 計測値が従来の光波測量の結果よりバラつきが小さく高精度であることを確認した。

本システムでは、トレンドモデルによる時系列統計処理（誤差処理）を導入することで計測精度を向上させ概ね 1～2mm 程度の変位検出が可能となった。

(2) 対流圏補正

高精度の GPS 変位計測は、基準点と観測点の 2 点の受信機により電波の攪乱や誤差の相殺を行うディファレンシャル方式となっている。しかし、図-5 のように基準点と観測点の間的高低差がある程度大きくなると、通常の解析処理だけでは計測結果に誤差が残る。

増成・清水⁷⁾によると、この誤差は主に地表付近の大気中の水蒸気之多寡に関係しており、現場近傍の気象データ（気温・気圧・相対湿度）を用いて補正することが可能である。この補正作業は、対流圏補正と呼ばれる。図-6 に、基準点と観測点の高低差が 92m の場合の対流圏補正の実施例⁸⁾を示す。

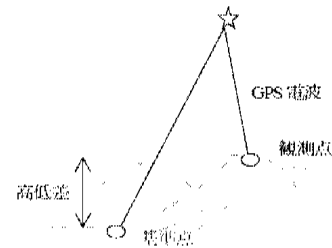
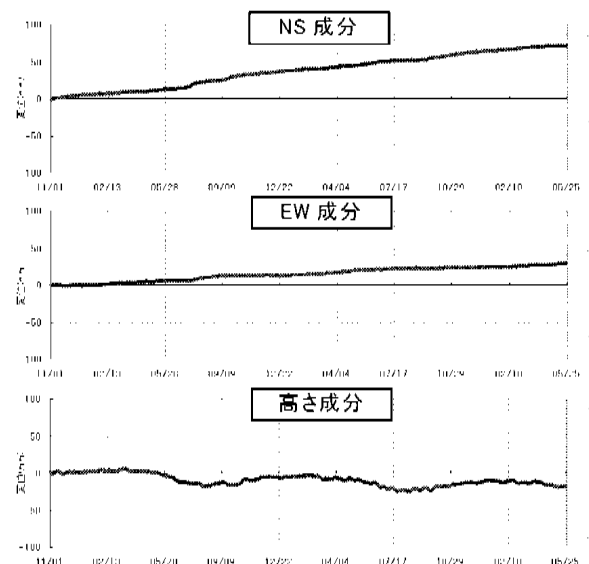
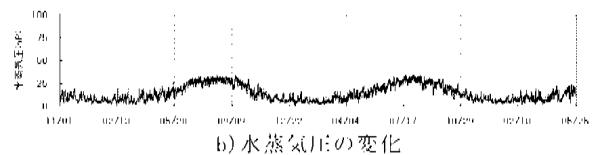


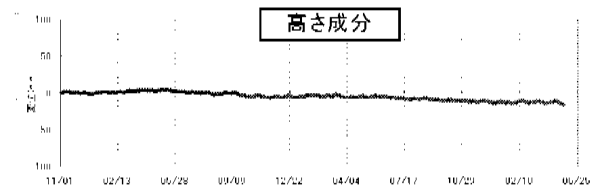
図-5 高低差による電波経路長の相違



a) 対流圏補正前の GPS 計測結果



b) 水蒸気圧の変化



c) 対流圏補正後の GPS 計測結果（高さ成分のみ）

図-6 対流圏補正の実施前後の比較図

図-6a は対流圏補正を実施しない場合の GPS 計測結果で、上記 (1) のトレンドモデルによる誤差処理後の値をプロットした。また、図-6b に観測地に近い気象庁気象官署で観測された水蒸気圧を併記した。

図のように、高さ成分の GPS 計測値は年周期的の変動を示し、水蒸気圧の変化と相関が高いことがわかる。

一方、NS 方向、EW 方向の計測値には年周期的の変動はほとんど見られず、大気中の水蒸気の状態は、主に高さ方向の計測値に影響を与えることがわかる。

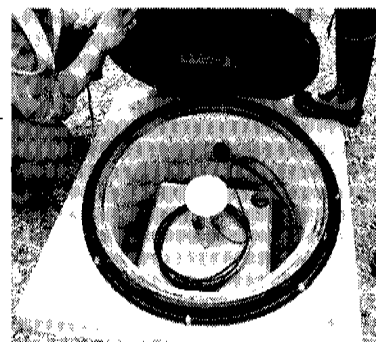
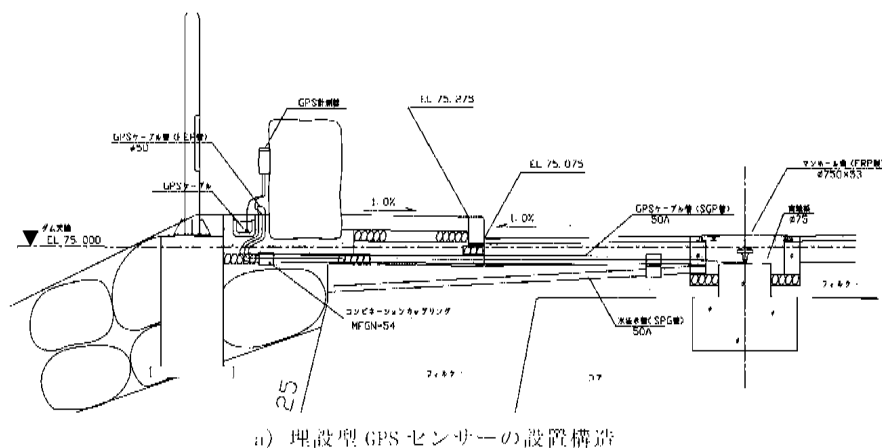


図-7 埋設型 GPS センサーの設置状況

次に、気象データを使用した対流圏補正を実施した場合の GPS 計測結果を図-6c に示す。対流圏補正後は、高さ成分の年周期変動はほとんど除去されており、補正計算は効果的に実施されたと推察される。当該システムでは全国の気象官署の気象データを常時取込み対流圏補正をリアルタイムに実施できる（後掲の図-13）。

なお、曾田・岩崎ら^{9, 10)}は、個々のダムごとに高低差と対流圏の影響度や補正量との関係を事前に把握しておくことで比較的簡易に補正を実施する手法を提案しており、今後の実用化が期待される。

3.3 ダム天端への設置（埋設型 GPS センサー）

多くのフィルダムでは、ダム天端を管理用道路として利用しているため測量用外部標的はダム天端のマンホール内に設置されており、このような条件下で通常の GPS センサーをダム天端に設置することは難しい。そこで、GPS センサーをダム天端のマンホール内に埋設すべく、防水機能を付加しマンホール内の高温多湿条件でも作動可能とした埋設型 GPS センサーを開発し、さらにマンホールの蓋を電波が透過し易い FRP（繊維強化プラスチック）製に変更した¹¹⁾。なお、マンホール蓋は既製品の FRP 製（厚さ 37mm、耐荷重 T-20・大型トラック通行可）とし、実際のダム天端で使用可能な仕様とした。

図-7 に埋設型 GPS センサーの設置事例を示す。板屋・新垣ら¹²⁾は、埋設型 GPS センサーを実際のフィリゲム天端外部標的に設置し良好な計測精度を有することを確認している。

3.4 耐雷性の向上

ダム堤体は山間部の雷の多発地区に位置すること

多く、雷により発生する瞬間的な高電圧・高電流（雷サージとよばれる）により計測機器が破損することがある。

一般的な自動計測システムは、計測センサーとデータロガーを 1 対 1 でケーブル接続するスター型（図 8a）のために 1 本のケーブルが長くなり大きな雷サージが発生しやすい。

そこで、当該 GPS 自動計測システムでは GPS センサーと通信集約器を数珠繋ぎにケーブル接続するチェーン型(図-8b)を採用し、センサー間のケーブル長を短くしてセンサー間の雷サージを小さくした。その上で、図-9 のように各 GPS センサーおよび通信集約器の内部に耐雷素子を組み込み、雷サージを短いケーブルスパンごとに消滅させることで雷による機器破損を防止した。

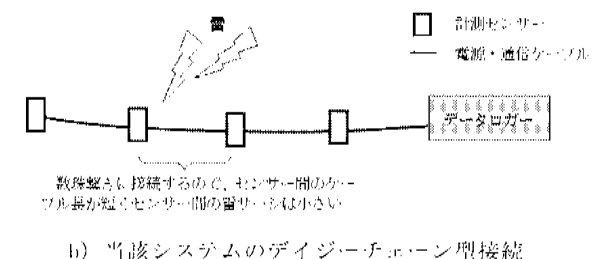
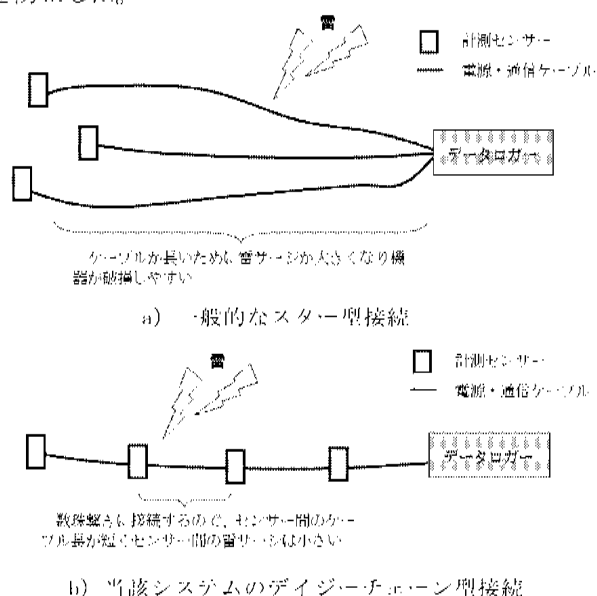


図-8 センサー接続方法と雷サージの概念図



図-9 GPS自動計測システムの耐雷装置の配置

また、ダム堤体計測では通信集約器を管理事務所内に設置することが多く、大規模な落雷の際には GPS センサーの耐雷素子では消滅しきれない雷サージが管理事務所に侵入することも想定される。そこで、通信集約器の直前に耐雷器を設置し、二重の雷対策を採用している（図-4、図-9 参照）。

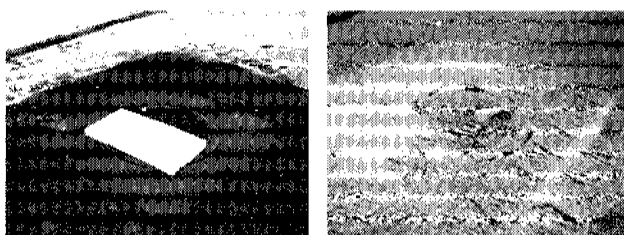
3.5 積雪対策

積雪地域では雪による GPS 機器の破損や計測不能が問題であり次ぎのような積雪対策を講じる必要がある。

(1) 埋設型 GPS センサーの利用

ダム天端に埋設型 GPS センサー（図-7）を設置した場合には、天端道路の除雪作業により GPS を設置しているマンホール上の雪を除去すれば、積雪深が圧雪の場合で 10mm 程度、新雪の場合なら数 10mm 程度に達するまでの間は適切な GPS 計測の実施が可能である¹³⁾。

この方法では、ダム天端に積雪がある状態では GPS 計測は実施できないが、頻繁に実施される除雪作業の



a) 積雪影響実験の状況
(人為的に積雪厚を調整)
b) 除雪作業後の積雪
(この程度なら計測可)

図-10 積雪地域でのダム天端埋設型 GPS の状況

直後には一時的に GPS 計測が実施されるため冬期でもある程度の頻度で堤体の変位状況が把握できる。また、地震等の緊急時に堤体天端のマンホール上だけを人力で除雪することはさほど困難ではないことから、緊急時の迅速な変位状況の把握にも対応できる。

(2) 支柱を用いる方法

積雪深が概ね 1.5m 以下とさほど大きくない場合には、堤体斜面内の外部標的のコンクリートに比較的管径の大きな金属製の鋼管支柱を設置して GPS センサーを固定する方法が効果的である（図-11）。この方法なら積雪のある冬期でも常時 GPS 計測を継続することができる。ただし、積雪深が大きくなると支柱の破損・曲がりが発生する可能性があるため、支柱の設計時には積雪深に十分注意する必要がある。

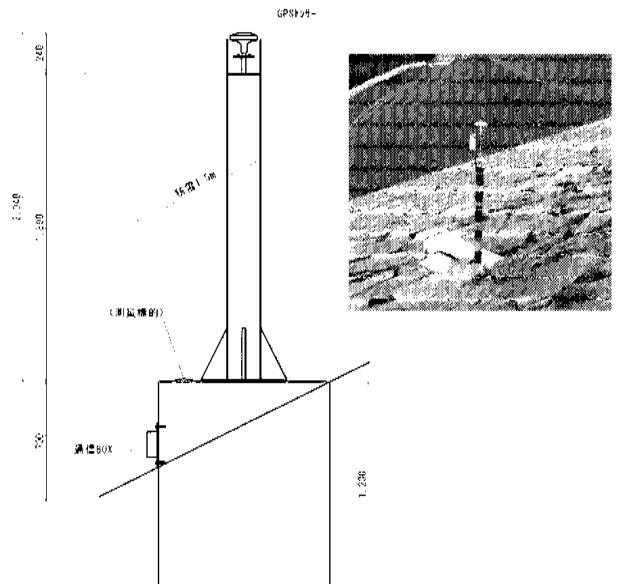


図-11 積雪地域での金属製支柱による GPS 設置例

(3) 外部標的のコンクリート埋設型 GPS

積雪深が大きい地域では堤体斜面の外部標的に (2) の方法で支柱を用いて GPS センサーを設置すると支柱の破損・曲がりが発生し正常な計測ができない可能性がある。また、堤体斜面での除雪作業は容易ではないため (1) の埋設型 GPS センサーと FRP 製マンホール蓋を使用した設置を行ってもあまり意味が無い。

そこで、堤体斜面内の外部標的のコンクリートに GPS センサーを簡易・安価に埋設し積雪による GPS 機器の破損を防止する方法を採用しているダムもある（図-12）¹⁴⁾。この方法では、積雪のある冬期には基本的に

GPS 計測は実施できないが、試験湛水中や地震等緊急時などの堤体変形の把握が重要な際には除雪作業を行うことで GPS 計測を実施することが可能である。また、埋設部の上面に保護用の安価な FRP 製板を設置しておけば、除雪作業時の機器破損も防止できる。

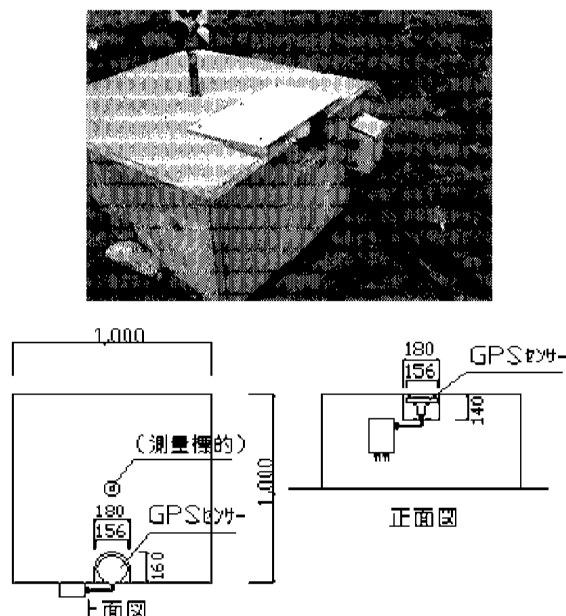


図-12 外部標的コンクリート埋設型 GPS の例

3.6 地震等緊急時の対応

堤体基礎地盤において最大地震動加速度が 25gal を超えた場合、または気象庁が観測するダム近傍の地震観測所において震度 4 以上を観測した場合にはダム堤体の変状の有無を迅速に判定し関係各所で情報共有する必要がある。しかし、従来の光波・水準測量による堤体変位計測では緊急時の計測作業及び計測結果の整理・報告に相当の時間を要していた。

そこで、図-13 に示す監視システムを構築し、地震発生後の迅速な変位計測と情報共有を実現した。

監視センターには 24 時間体制で監視員が常駐し、まず、気象庁からの震度 4 以上の地震発生を自動受信するかダム管理事務所からの最大地震動加速度 25gal 以上の観測の報告を受けた場合には、地震時緊急体制（地震スクランブルと呼ぶ）に移行する。

次に監視センターでは、通常の GPS 計測に加えて地震発生前後の堤体変位の増分を計算・とりまとめて地震スクランブル用の配信を開始し、インターネットを介して関係各所で地震による堤体変位情報の常時共有

を可能にする。

また、インターネットによる常時配信の他に「地震発生後 3 時間以内の堤体変形量速報」「24 時間以内の堤体変形量確定報」をメール送信することでダム管理事務所の地震対応作業を支援することができる。

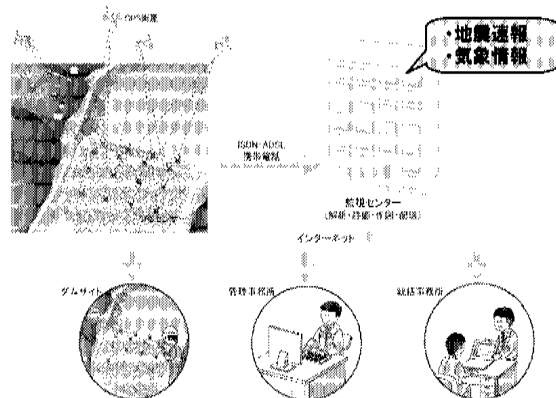


図-13 インターネットを利用した GPS 自動計測システムの概念図

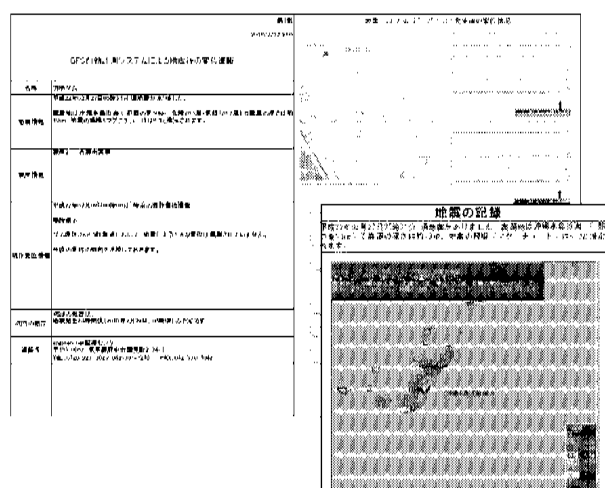


図-14 地震スクランブル時に配信される情報の例

4. GPS 自動計測システムの適用事例

GPS 自動計測システムの適用事例として沖縄県の大保協ダムの事例を簡単に紹介する。詳細については参考文献^{15, 16)}を参照されたい。

4.1 現場概要

大保ダムは、沖縄北西部河川総合開発事業の一環で大保川水系大保川に建設された多目的ダムである（図-15）。ダム堤体は、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）の 2 つからなり、今回、GPS 自動計測システムを導入したのは大保協ダムである。

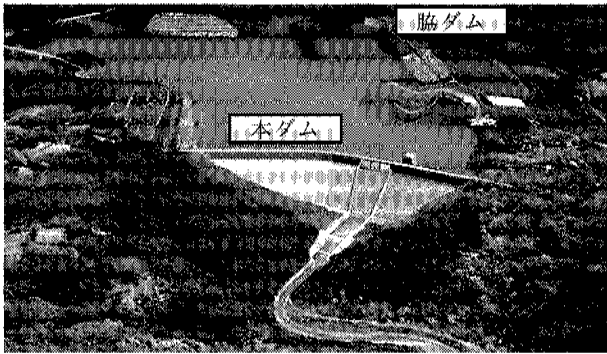


図-15 大保ダムの完成予想図

4.2 GPS 自動計測システムの設置状況

図-16 に大保脇ダムに設置した GPS センサーの配置図を示す。GPS センサーは、堤体の外部標的（22 箇所）の全てに設置した。そのうち、8 箇所はダム天端に

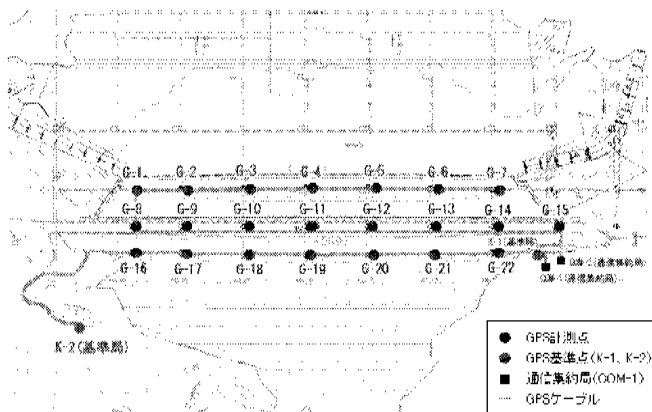
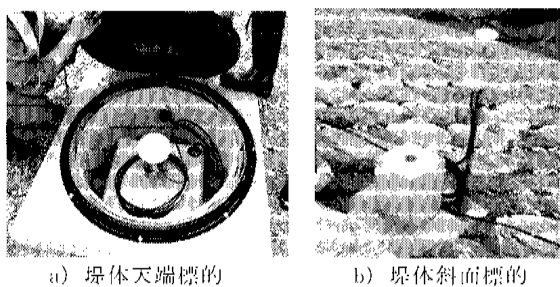


図-16 大保脇ダム・GPS センサーの配置図



a) 堤体天端標的

b) 堤体斜面標的

図-17 GPS 設置状況写真

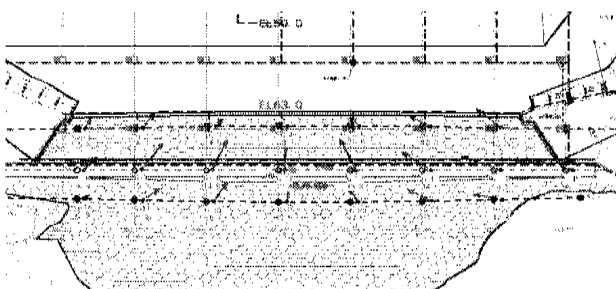


図-20 GPS 計測による平面変位ベクトル図

位置し、FRP 製マンホール蓋を利用した埋設型 GPS センサーを適用している。図-17 に GPS 設置状況を示す。

4.3 GPS 計測結果の概要

GPS 自動計測は、大保脇ダム堤体盛立て完了後の 2006 年 12 月末から 1 回/時の頻度で計測を開始し、現時点でも安定稼働している。なお、当該地では従来手法の光波・水準測量も併用実施し、GPS の計測結果と比較できるようにした。

GPS 計測結果の一例として、図-18 に主断面上流側の G-4 を、図-19 に同・天端の G-11 の結果を示す。上から順に、上下流方向、左右岸方向、上下方向のグラフで、図中の実点は誤差処理前、実線はトレンドモデルによる誤差処理後の GPS 計測点である。光波・水準測

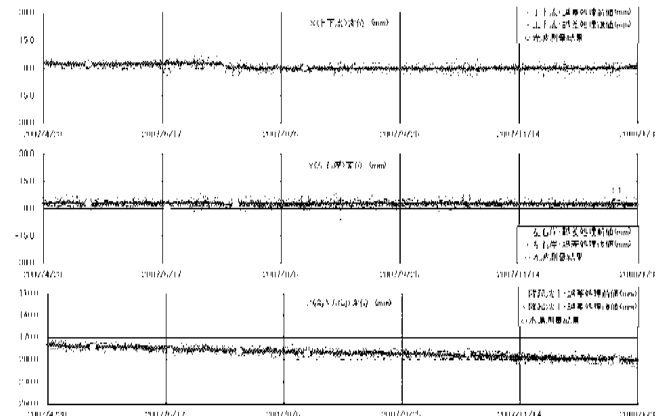


図-18 GPS 計測と光波・水準測量の結果 (G-4)

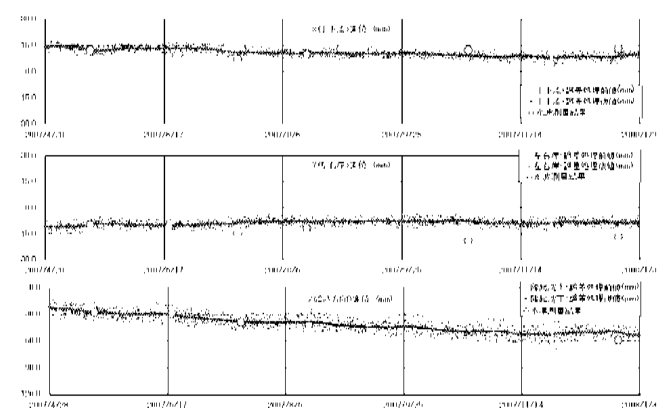


図-19 GPS 計測と光波・水準測量の結果 (G-11)



図-21 GPS 計測による断面変位ベクトル図

量の結果は丸点で示した。図-18, 19 から次のことがいえる。

①トレンドモデルによる誤差処理後の GPS 計測結果と光波・水準測量の結果は概ね整合している

②上下方向では誤差処理後の 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

③上下流および左右岸方向では誤差処理後の GPS 計測よりも光波測量の方がバラつきはやや大きい

これらの結果は、山口ら¹⁷⁾の報告ともほぼ同様の結果であり、大保脇ダムで導入した GPS 自動計測システムは、期待通りの計測精度を有していることがわかった。特に、ダム天端に埋設した GPS (G-11) でも図-19のように良好な計測精度を示しており、新規に開発した埋設型 GPS センサーが十分に実用的な性能であることが証明された。

次に、GPS 計測値を用いて描いた堤体外部変形のベクトル図を図-20 と図-21 に示す。ダム堤体の外部変形は、平面的には下流方向および最大断面方向に変位し、断面的には沈下方向および下流方向に変位している様子が良くわかる。GPS 自動計測では、三次元変位量が 1 回/時の頻度で得られるため、計測結果を変位ベクトル図に當時整理することでダム堤体の外部変形の様子を三次元かつ時系列的に把握することが容易である。

なお、GPS 自動計測システムの導入に際しては、今後 20 年間の計測コストについて、従来の光波・水準測量を実施する場合との比較検討を行った。その結果、GPS 自動計測システムの導入により約 20% 程度の堤体計測コストの削減が期待されることがわかった。

5. まとめ

フィルダム堤体の外部変形計測において、従来は光波・水準測量によるしかなかったが、GPS 自動計測システムを用いることでより高精度・高頻度の堤体計測が可能になった。今後は、米国の運営する GPS 衛星以外の測位衛星の打上げ計画されており、それら多種・多数の測位衛星を利用した衛星測位技術 (Global Navigation Satellite Systems) の実用化を進め、より高精度で安定したフィルダム堤体計測の実現に取り組むと共に、GPS 計測コストのさらなる低減に努力したい。

本発表に際し様々な協力を頂いた沖縄総合事務局北部ダム事務所ならびに北部ダム統合管理事務所、国土交通省胆沢ダム工事事務所、(独)水資源機構に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 櫻井春輔, 清水則一, 古谷茂也, 皿海章雄: GPS による切り取り斜面の変位計測, 土木学会論文集, No. 475/III-24, 137-142, 1993
- 2) 清水則一, 安立 寛, 小山修治: GPS 変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究, 資源と素材, Vol.114, 397-402, 1998
- 3) 松田浩朗, 安立 寛, 西村好忠, 清水則一: GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No.715/III-60, 333-343, 2002
- 4) 北川原四郎: FORTRAN77 時系列統計解析プログラミング (第4版), 岩波書店, 245-264, 1997
- 5) 岩崎智治, 武智同加, 武石 朗, 清水則一: 道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発, 土と基礎, Vol.50, No.6, No.533, 25-27, 2002
- 6) 山口嘉一, 小堀俊秀, 横森源治, 大野誠, 岩崎智治: GPS を用いたフィルダム外部変形計測に関する一考察, ダム工学, Vol.15, No.2, 120-136, 2005
- 7) 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, 437-447, 2007
- 8) shamen-net 研究会技術委員会, 高知県中央西土木事務所越知事務所: GPS による地すべり地表面計測の実用性検証③, 第48回日本地すべり学会研究発表会 講演集, 242-243, 2009
- 9) 曾田英揮, 佐藤信光, 白閑茂治, 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 No.282-3, 4-16, 2010
- 10) 岩崎智治, 佐藤渉, 曾田英揮, 田中幹大, 清水則一: GPS を用いたフィルダム外部変形計測における高低差の影響と補正方法について, 土木学会第64回年次学術講演会講演集, VI-139, 2009
- 11) 中園幸樹, 山口嘉一, 小堀俊秀, 清水則一, 岩崎智治, 飯島功一郎: フィルダム安全管理のための天端埋設型 GPS の適用性検討, 土木学会西部支部 2006 年度研究発表会講演集, 571-572, 2007
- 12) 板屋英治, 森田陽弘, 新垣敏一: フィルダム安全管理の高度化を目的とした堤体外部変形計測への GPS 全面導入に関する取組み, ダム技術, No. 264-9, 47-59, 2008
- 13) 漆田洋治, 宮崎裕之, 山口嘉一, 小堀俊秀, 池澤市郎, 岩崎智治, 飯島功一郎: 天端埋設型 GPS を用いた豪雪地帯におけるフィルダムの安全管理に関する検討, 土木学会東北支部 2006 年度研究発表会講演集, 2007
- 14) 9) に同じ
- 15) 12) に同じ
- 16) 11) に同じ
- 17) 6) に同じ

TS-1-1 フィルダム堤体計測のための GPS自動計測システムの開発

岩崎 賢治（国際航業株式会社）
小堀 俊秀（独立行政法人土木研究所）
増成 友宏（古野電気株式会社）
清水 則一（山口大学大学院）

国際航業グループ

1. はじめに

フィルダムの維持管理において堤体の外部変形計測は非常に重要な計測項目だが、従来は光波・水準測量による手動計測が実施されており、次のような課題が指摘されていた。

- 計測精度、計測頻度
- 地震等の緊急時に迅速な対応ができない
- 計測データの透明性 等々

そこで我々は、フィルダム堤体外部変形計測のためのGPS自動計測システムの開発に取り組んできた。

本発表では、GPSをフィルダム堤体の外部変形計測に適用するに際して行った開発の成果と現場での適用事例について報告する。

国際航業グループ

2. ダム堤体計測に適用する上での課題

GPS(Global Positioning System)は、米国が運用する衛星を利用した測位技術で、ナビゲーション分野や測量分野で目覚ましい進歩を遂げている
しかし、フィルダム堤体の外部変形計測に適用するには幾つかの課題を克服する必要があった

主な課題...

- ① 自動計測用GPS機器の開発・・・安価で取扱い容易な機器
- ② 計測精度の向上・・・mm単位の精度
- ③ ダム天端への設置・・・ダム天端管理用道路に設置
- ④ 耐雷性の向上・・・雷による損傷低減
- ⑤ 積雪対策・・・欠測・破損対策
- ⑥ 地震等緊急時の対応・・・迅速対応・速報

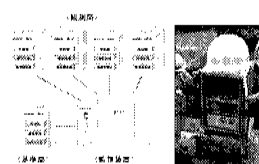
国際航業グループ

3. ダム堤体計測用のGPS自動計測システム

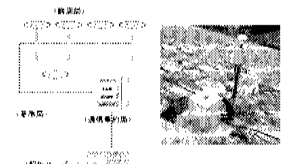
3.1 自動計測用GPS機器の開発

測量用GPS機器は高価で取り扱いが難しい。そこで、
一 フィルダム堤体計測に不要な機能や部品を省き最適な機器構成
一 計測精度を劣化させずに小型・軽量・安価なGPS自動計測機器を開発

<測量用GPS機器を流用した自動計測システムの例>



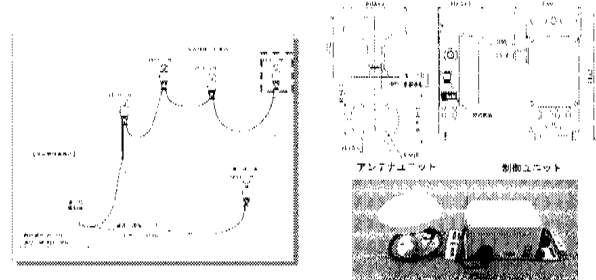
<ダム堤体計測用のGPS自動計測システム>



国際航業グループ

3. ダム堤体計測用のGPS自動計測システム

3.1 自動計測用GPS機器の開発

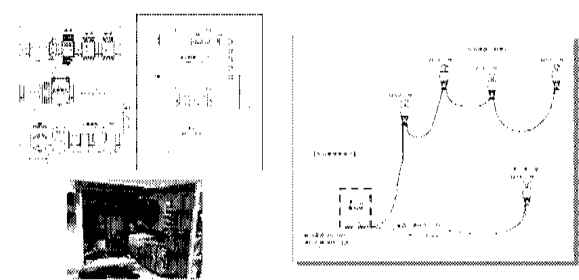


GPSセンサー(古野電気製:MG3111型)

国際航業グループ

3. ダム堤体計測用のGPS自動計測システム

3.1 自動計測用GPS機器の開発



通信測器(古野電気製:MG3155型)

国際航業グループ

3. ダム堰体計測用のGPS自動計測システム

3.2 計測精度の向上

GPS計測では、衛星配置や上空視界、基線長（基準点と計測点間の距離）、気象条件、マルチパス（建物などの地物による反射波）等の様々な誤差要因のため計測値がバラつき、最も高精度なスタティック観測法でもmm単位の変位判定は難しい。

精度向上技術...

(1) トレンドモデルによる誤差処理

トレンドモデルによる時系列統計処理（誤差処理）を導入することで計測精度を向上させ概ね1～2mm程度の変位検出が可能となった

(2) 対流圏補正

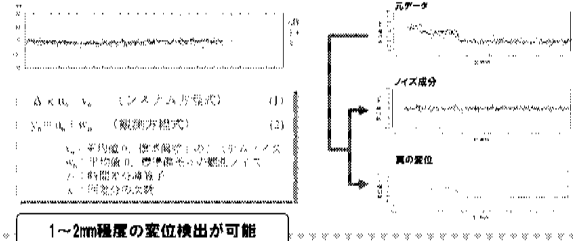
基準点と観測点の間の高低差がある程度大きい場合の大気中の影響を補正

国際航業グループ

3. ダム堰体計測用のGPS自動計測システム

(1) トレンドモデルによる誤差処理

トレンドモデルと呼ばれる確率構造を持った時系列解析モデルを用いて、ノイズを含む計測データから真の変位挙動を推定する



国際航業グループ

3. ダム堰体計測用のGPS自動計測システム

(2) 対流圏補正

基準点と観測点の間の高低差がある程度大きくなると、地表付近の大気の影響を受ける。そこで、現場近傍の気象データ（気温・気圧・相対湿度）を用いて『対流圏補正』を実施。

【Example Description】



気象官署の気象データを自動取得してリアルタイム補正

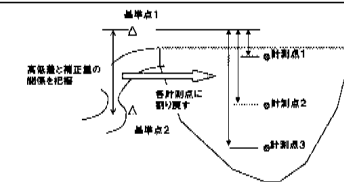
国際航業グループ

3. ダム堰体計測用のGPS自動計測システム

(2) 対流圏補正・その他の方法

また、その他の対流圏補正の方法として、

- (1) 標高の異なる2つの基準点を設置
- (2) 2つの基準点間の解析から高低差と対流圏の影響度や補正量を推定
- (3) 各計測点と基準点の高低差から、比較的簡易に補正値を算定
- (4) 今後の実用化が期待される



国際航業グループ

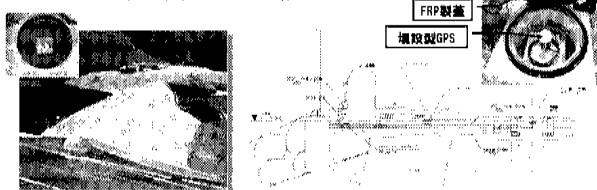
3. ダム堰体計測用のGPS自動計測システム

3.3 ダム天端への設置（埋設型GPSセンサー）

多くのフィルダムでは、ダム天端を管理用道路として利用されているため、防水機能を付加した埋設型GPSセンサーを開発し電波が透過しやすいFRP製マニホール蓋に変更し、常時の自動計測を可能にした

<フィルダム天端の横断>

<埋設型GPSセンサー>

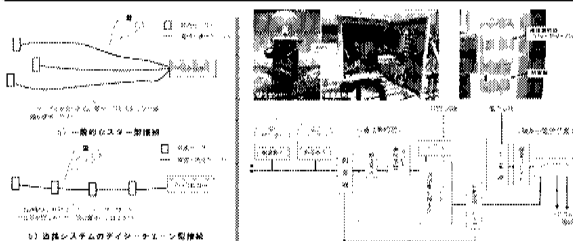


国際航業グループ

3. ダム堰体計測用のGPS自動計測システム

3.4 耐雷性の向上

デイスリーチエオン型を採用、センサー間の雷サージを小さくし耐雷性を向上。また、管理事務所の直前にも耐雷器を設置し二重の雷対策を採用



国際航業グループ

3. ダム堤体計測用のGPS自動計測システム

3.5 積雪対策

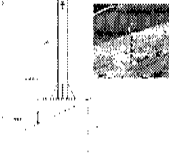
積雪地域では雪によるGPS機器の破損や計測不能が問題。積雪対策を講じた

(1) 埋設型GPSセンサー



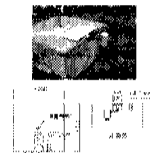
積雪が圧雪の場合で10mm程度、新雪の場合なら数10mm程度まで計測可能

(2) 支柱を用いる方法



金属製の鋼管支柱を設置する方法。積雪のある冬期でも計測可能。積雪深に十分注意

(3) 外部標的コンクリート埋設型GPS



積雪期は計測不能だが、除雪作業を行えば計測可能。上面の保護用板の設置で積雪や除雪作業による破壊を防ぐ

国際航業グループ

3. ダム堤体計測用のGPS自動計測システム

3.6 地震等緊急時の対応

最大地震動加速度が25gal以上、震度4以上で地震スクランブル体制に移行

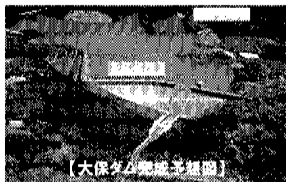
- (1) 地震発生前後の堤体変位の増分を計算・とりまとめ
- (2) インターネットを介し関係各所で情報共有
- (3) 地震発生3時間後や24時間後に速報値・確定値を配信

<インターネットを利用したGPS自動計測システムの概念図> <地震スクランブル時に配信される情報の例>



国際航業グループ

4. GPS自動計測システムの適用事例

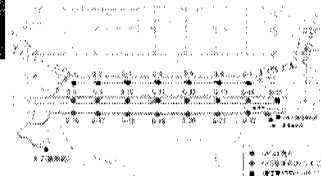


【大保ダム完成予定図】

【大保ダム(沖縄総合事務局 北部ダム事務所)】

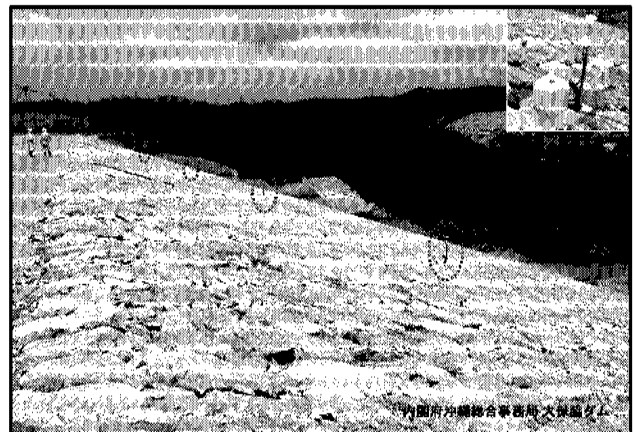
- ・大保川水系大保川・多目的ダム
- ・本ダム(堤高77.5m、重力式コンクリートダム)
- ・協ダム(堤高66.0m、中央土質連水壁型ロックフィルダム)

→ GPS自動計測システムは大保ダムに導入



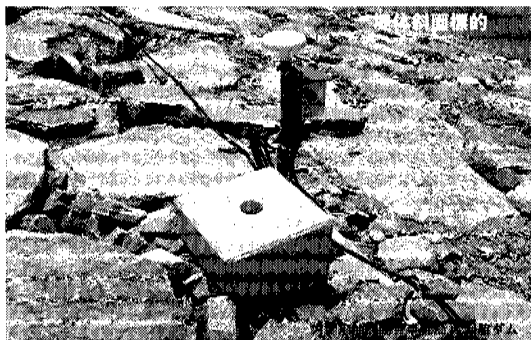
大保ダム・GPSセンサーの配置図

国際航業グループ



内閣府沖縄総合事務局 大保ダム

4. GPS自動計測システムの適用事例

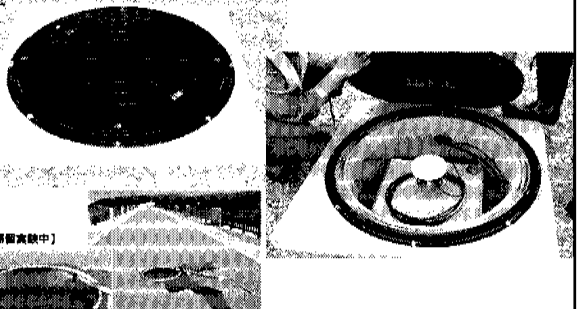


外部埋設型

国際航業グループ

4. GPS自動計測システムの適用事例

堤体天端標的



【雨水滞留実験中】

内閣府沖縄総合事務局 大保ダム

4. GPS自動計測システムの適用事例

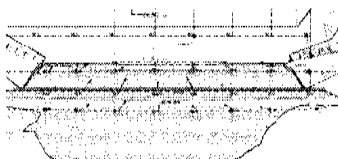


図-20 GPS計測による平面変位ベクトル図
2005年12月29日～2006年1月31日(平均値)

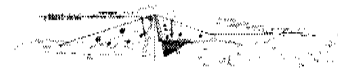


図-21 GPS計測による断面変位ベクトル図
2005年12月29日～2006年1月31日(平均値)

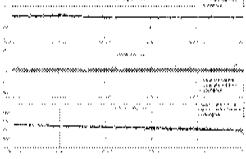


図-18 GPS計測と光波・水準測量の結果(G-4)

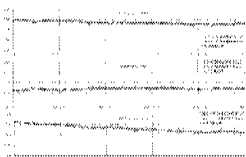


図-19 GPS計測と光波・水準測量の結果(G-11)

5. ま と め

【まとめ】

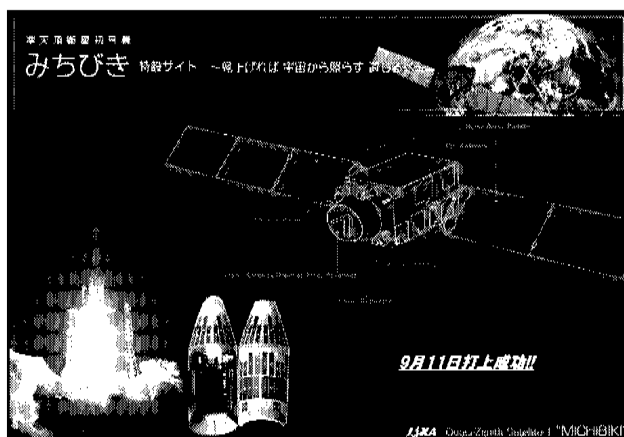
- フィルダム堤体の外部変形計測は光波・水準測量によるしかなかった
- 本研究ではフィルダム堤体計測用のGPS自動計測システムを開発した
- GPS自動計測システムを用いることでより高精度・高頻度の堤体計測および地震等緊急時の迅速な対応が可能になった

【今後について】

- 多種・多数の衛星を利用するGNSS(Global Navigation Satellite Systems)の実用化を進め、より高精度で安定した計測の実現に取り組む
- また、GPS計測コストのさらなる低減に努力したい。

国際航業グループ

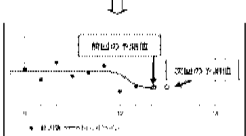
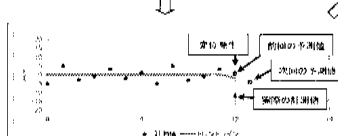
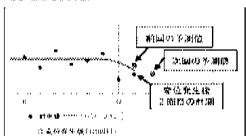
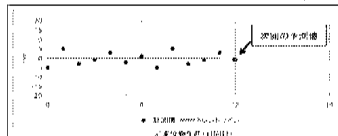
「みちびき」の軌道



お わ り

国際航業グループ

トレンドモデルの解析概念



国際航業グループ

沼原ダムにおける GPS を用いた堤体挙動測定

喜多 佑介¹ 水田 真二² 江原 昌彦³

当社は、栃木県那須連山に位置する沼原ダムにおいて、平成 19 年 9 月から GPS によるダム変位測定を開始した。従来の視準測量と比較すると共に、降雪地帯における GPS の適用性を検証することを目的とした。測定期間中には、極寒環境故に生じる機器の着氷や装置基礎の凍上などの問題が生じたが、結果として得られた測定データは大変精度良く、GPS の有効性が確認できた。また、ダムの充排水の際には、連続観測という GPS の特性によって、従来の視準測量では捉えられなかったダム堤体の詳細な挙動を測定でき、この結果に基づき堤体物性について考察した。

キーワード: ダム, 変位, GPS

1. はじめに

沼原ダムは、1973 年（昭和 48 年）、栃木県那珂川水系那珂川の最上流に位置する深山ダムを下部調整池とした揚水発電を行なう為の上部調整池として、那須連山の西端、標高約 1,200m の位置に建設されたアスファルト表面遮水型フィルダムである。調整池は東側が掘削でそれ以外の三方が盛立となっており、調整池内面には総面積 197,000m²に厚さ 30cm のアスファルト遮水壁が敷設されている。概要を表-1 及び図-1 に示す。

沼原ダムは、純揚水式発電所の上部調整池であり、河川からの自然流入は無い。そのため、概ね 5 年に 1 度の頻度にて実施している水路点検においては調整池を完全に排水し、併せてアスファルト遮水壁の点検・補修等を行なっている。

沼原ダムの通常監視項目は、監査廊内における漏水及び堤体の変形である。このうち、変形測定については、外部変形測量として堤頂道路上に設置した測定点に対し、視準測量による水平変位と水準測量による沈下変位を、また内部変形としては層別沈下計によるモニタリングを実施している。

近年、GPS の計測技術の発達に伴い、GPS によるダム変位測定の事例²⁻⁴⁾が増えつつある。当社でも、ダム変位測定における GPS の有効性を検証すべく、平成 19 年 9 月より GPS によるダム水平変位測定を開始した。

表-1 沼原ダム主要諸元

容量 (m ³)	全容量:	4,336,000
	有効容量:	4,220,000
利用水深 (m)		40.0
堤頂長 (m)		1,597.0
堤体高さ (m)		38.0
堤頂標高 (E.L. m)		1,240.3

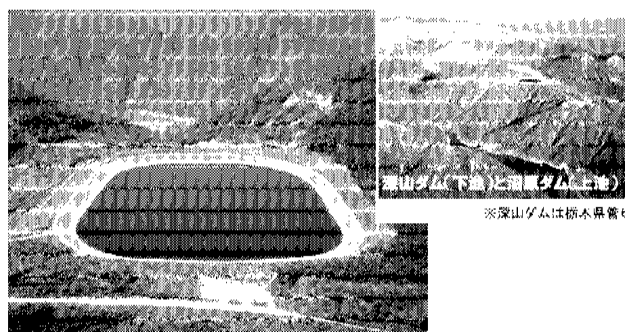


図-1 沼原ダム

2. 沼原ダム変位測定の概要と GPS 測定の位置付け

2.1 従来の水平変位測定の概要

沼原ダムにおける従来の水平変位測定は、ダム近傍の比較的堅硬な地盤上に設置した基準点を用いた視準測量により実施している。視準距離は最大約 400m に及ぶため、良好な天候条件下でも高精度の計測は困難である。

通常の視準測量では、堤頂上の測定点を挟むように設置した基準点と視準点を結ぶ見通し線に対して測定点の水平変位を測定するが、図-2 に示すように、西側と南側堤体の水平変位の測定では、地形的要因から堤

¹ 電源開発株式会社 水力エンジニアリング部 土木技術室

² 電源開発株式会社 水力・送電部 沼原電力所 所長代理

³ 電源開発株式会社 水力エンジニアリング部 業務推進役

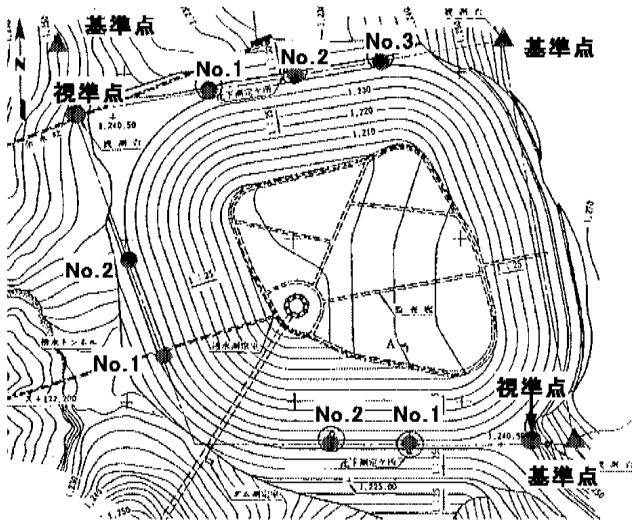


図-2 沼原ダム水平変位測定概要図

頂上の測定点を挟むような適切な位置に基準点と視準点を設置できず、基準点と視準点の延長線上に測定点を置く位置関係となっている。このため、通常よりも困難な測定を実施してきた。なお、沼原ダムでは冬季の著しい低温と積雪のため、計測は5月から11月までの非積雪期に限定され、その間に原則として年4回の頻度で実施している。

2.2 GPSによる堤体変位測定

今般、沼原ダムの挙動をより正確に把握することを当初の契機として、従来からの測量方式と並行して積雪期にも実施可能なGPSによる堤体変位測定を平成19年9月に開始した。

GPSを用いた堤体変位の測定方法は、図-3に示す通り、貯水の影響が軽微であり、かつ地盤条件が良好な位置に固定点としてのGPS基準局を設置し、堤体上に設置したGPS観測点（可動点）との相対位置を評価するものである。観測点は調整池の北、西、及び南側堤体のそれぞれ盛立高さが最も高い位置の法面とし、GPSセンサはその位置に設置したコンクリート基礎上に固定した。収録装置はダムに近接する測定建屋内に設置し、ここから電源を供給するとともに、データを発電所に伝送し、基線解析及び平滑化処理を経て変位データを得ることとした。なお、平滑化処理の方法はトレンドモデル⁵⁾を使用している。

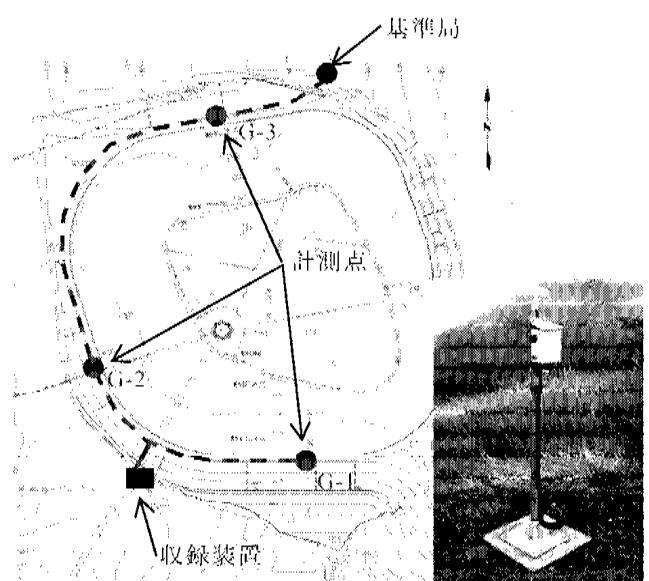


図-3 沼原ダムGPS機器配置

3. 測定機器に生じた問題

3.1 着氷

図-4は、設置したGPSセンサの平成20年1月17日時点における着氷状況である。これは、空気中に含まれる過冷却状態の水または水蒸気がGPS支柱等に衝突し、凍結したものと推定される。このスイッチボックス上の氷塊がGPSアンテナを押し上げた結果、測定データが図-5のような推移を示したものと推定される。このデータ異常を確認後、速やかに現地にて状況確認及び着氷除去を行った結果、変位データはほぼ従前の傾向線に復帰した。



図-4 GPS(G-1)着氷状況

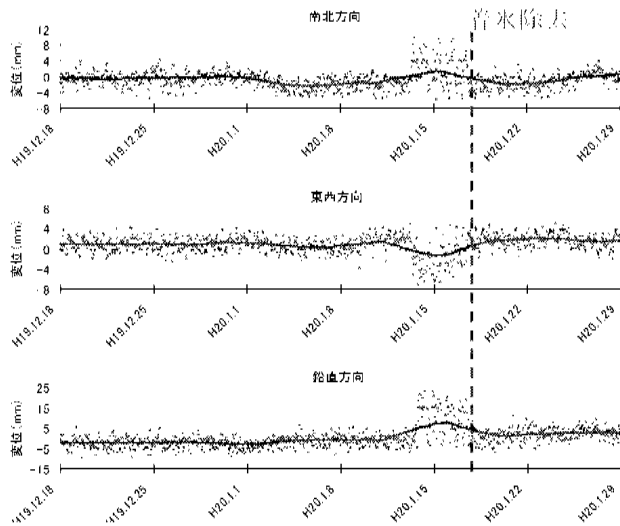


図-5 GPS(G-1) data (H19.12.18~H20.01.29)

3.2 凍上

図-6 に示すとおり、着氷を除去した後、平成 20 年 2 月上旬頃から 4 月中旬にかけて再び異常な変位傾向が記録された。そのため、ダム天端に設置してある遠方監視装置 (ITV) にて GPS センサを確認したものの、顕著な着氷は確認されなかった。その後、気温変化等のデータ分析の結果、この現象は GPS 基礎部の凍上が原因である可能性が高いものと判断した。

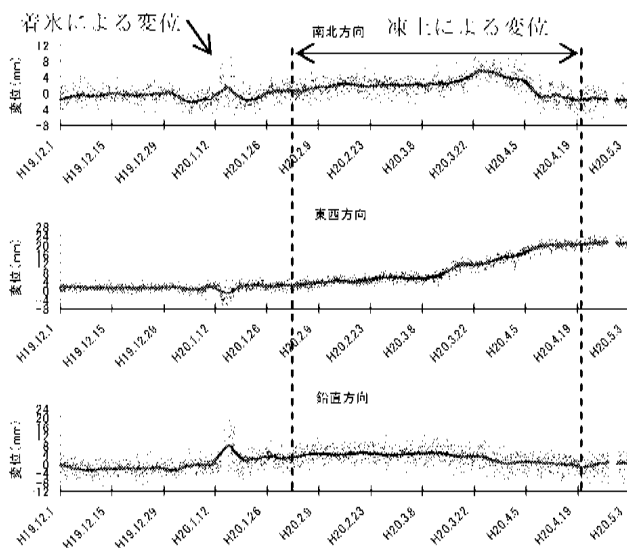


図-6 GPS(G-1) data (H19.12.01~H20.05.03)

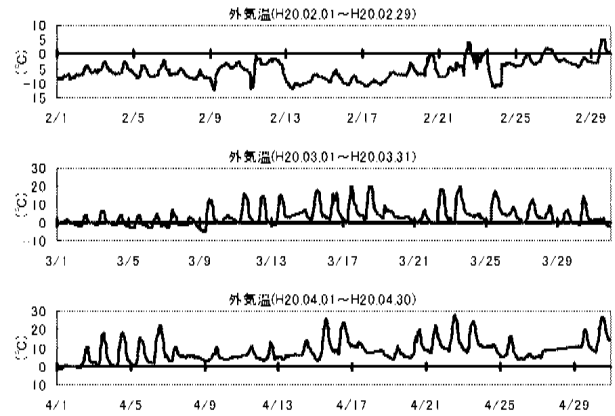


図-7 GPS(G-1)周辺外気温 (2月~4月)

図-7 は、GPS センサの支柱に設置した気温計の記録である。GPS 計測値が特に大きな動きを示しているのは平成 20 年 3 月初旬である。この時期の気温を見ると、日中は零度以上となり、夜間に氷点下になる傾向を繰り返している。すなわち、この期間においては日中の融雪水が GPS 基礎底面に浸透し、夜間に凍結する状況が推測される。実際、日中でも気温が零度以上にならない 2 月上旬までは GPS データに有意な変化は生じておらず、また夜間でも氷点下まで気温が下がらない 4 月中旬以降には異常な変位傾向は認められない。

3.3 対策

(1) 応急対策とその効果

上記の着氷と凍上への応急対策として、①スイッチボックス上に成長する着氷が GPS アンテナに影響しないよう、スイッチボックスの位置を下げ、かつ風下側へ移動した、②基礎コンクリート周辺の地中温度が氷点下まで低下するのを防ぐため、基礎コンクリート周辺を発泡スチロール断熱材で被覆する処置を施した。併せて、対策工の評価として地表及び地中温度を確認する為に、小型温度計を埋設した (図-8)。

この結果、対策を施した平成 21 年度の冬季には、測定データの傾向において着氷や凍上が原因と思われる異常な挙動は認められなかった。また、図-9 に示すとおり、断熱材によって GPS 基礎周辺温度は氷点下まで低下することはなかったことが確認された。

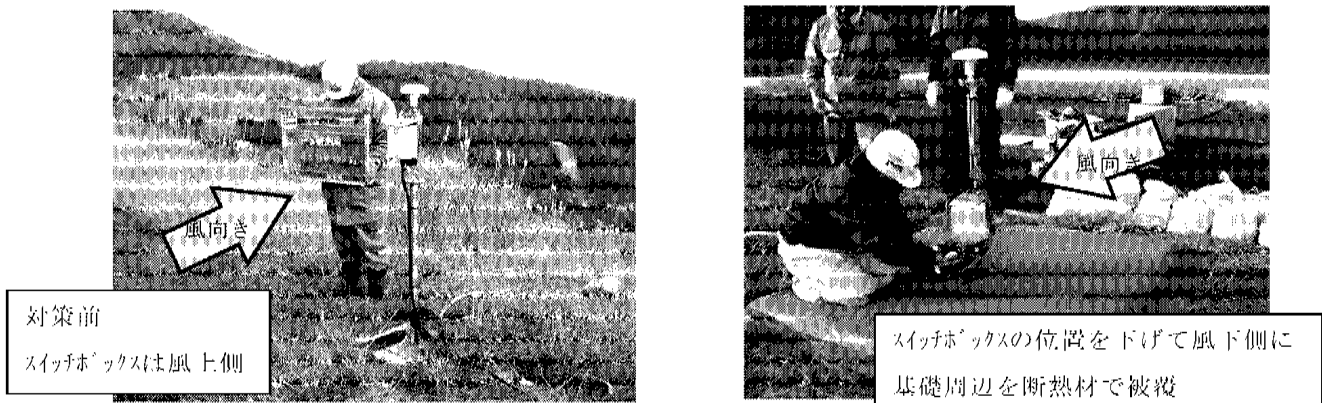


図-8 着水・凍土対策状況

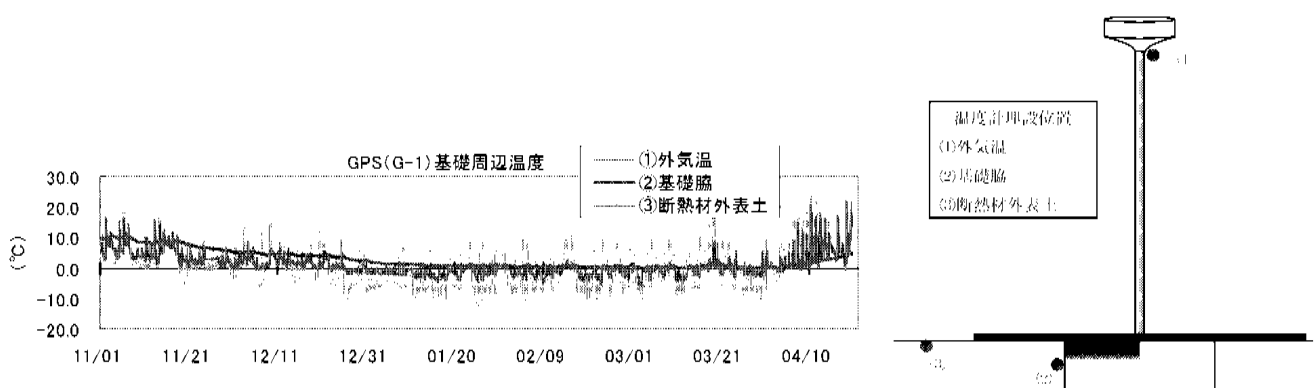


図-9 GPS (G-1) 基礎周辺温度計測

(2) 本格運用に向けた仕様変更

これら発生した問題とその対策の経験を踏まえ、GPS 計測設備の本格運用に向けて、平成 22 年 6 月に GPS 基礎の改良工事を実施した。改良にあたっては確

実な凍土防止のため、基礎深さを 60cm とし、基礎周辺地盤には地表から深さ 10cm の位置に発泡スチロール断熱材を埋設した(図-10)。

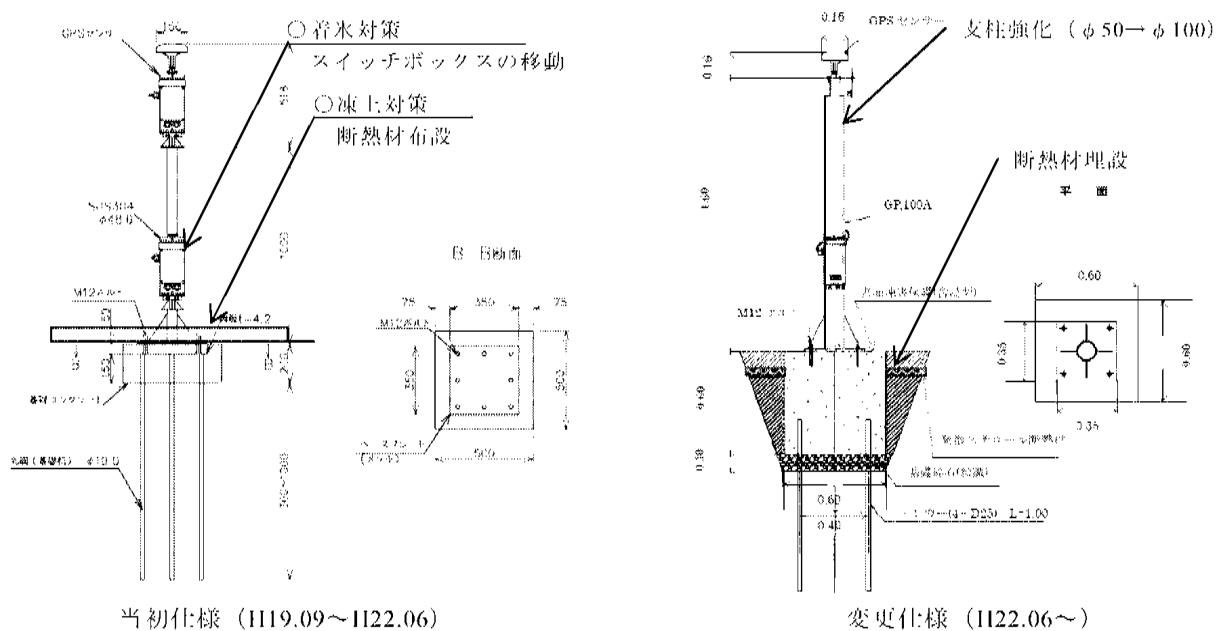


図-10 GPS 基礎仕様

4. ダム充排水時の挙動について

4.1 ダム充排水作業の概要

沼原ダムでは水路排水に併せ、アスファルト表面遮水壁の点検を行い、劣化部については適宜補修を行っている。竣工以来、漏水につながるような損傷は生じておらず、表面保護層の損耗や密粒度アスファルトコンクリート層のプリスタリングの補修など、いずれも予防的な措置にとどまっている。⁶⁾

4.2 排水時堤体挙動

平成 21 年度に実施した排水時においては、排水前、排水中、排水後、充水中、充水後のタイミングで従来通りの視準測量及び水準測量を実施すると共に、GPS による連続変位計測を行なった。GPS 及び測量による計測結果を図-11 から 13 に示す。

GPS 計測記録に基づく堤体挙動及び従来の測量結果との比較は以下の通りである。

- ① 排水に伴って堤頂は外側へ約 2～5mm 変位しており、再び充水を行った際には同程度の変形が貯水池内に向かって生じている。この傾向は GPS では明瞭に捉えられているものの、視準測量の結果ではほとんど認められない。
- ② 排水に伴って堤頂では約 1～2mm 程度隆起する挙動が観測された。充水後には再び同程度の沈下を示し、ほぼ排水前の状態に戻っている。この傾向は GPS ほど明瞭ではないが、水準測量によっても捉えられている。

沼原ダムは竣工後 38 年経過しているが、充排水時のこのような挙動を計測できたことは初めてであり、GPS の適用性検証と併せ、堤体及び基礎地盤の変形特性に関する非常に有用なデータが得られたものと判断している。

5. 充排水時堤体挙動の分析

今回計測された充排水時の堤体挙動に対し、2 次元静的線形弾性解析を行い、計測された挙動傾向の妥当性について確認を行った。用いた解析プログラムは「2D-σ」である。

解析にあつては、堤体高さが最も高い南側の堤体の鉛直断面を採用した。用いた解析モデル及び境界条件

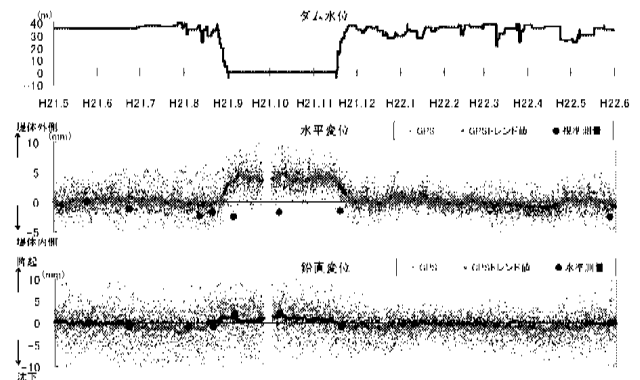


図-11 G-1 地点 充排水時変位記録

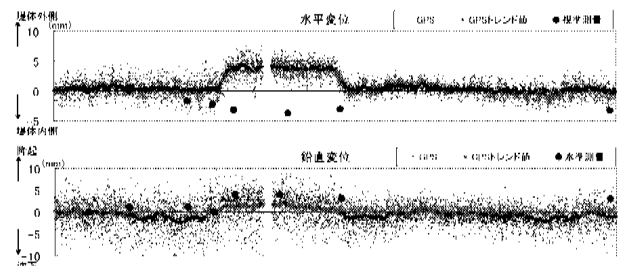


図-12 G-2 地点 充排水時変位記録

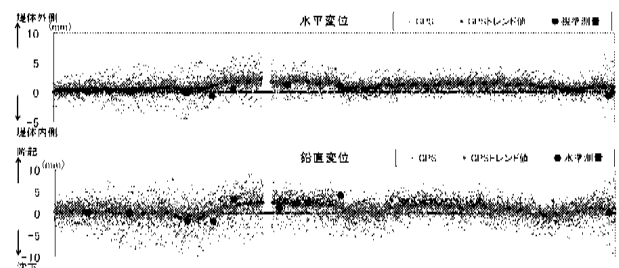


図-13 G-3 地点 充排水時変位記録

を図-14 に示す。また、堤体及び基礎地盤について、弾性波速度等の実測値や建設時の既存資料をもとに解析用物性値を設定したが、軟岩のポアソン比については実測挙動の再現を図るため試行的に値を設定した。なお、解析手法が線形解析であること、及び実測挙動が排水と充水で定量的にほぼ逆の傾向を示すことから、ここでは充水時のみの解析を行うこととした。

解析結果は図-15 に示す通りである。すなわち、充水によって調整池底部が沈み込み、堤体自体は貯水池外側へ作用する静水圧を受けつつも、堤体基礎の傾斜によって堤頂は貯水池側に変形している様子が示されている。

この傾向は実測と符合しており、充排水に伴う堤体及び基礎の変形のメカニズムは再現できているものと考えられる。しかしながら、変形量については

実測値と解析値との間に乖離があり、水平変位／鉛直変位の比についても実測と解析ではかなり異なっている。

GPS の精度は受信状態や基線長等に依存するものの、概ね+2mm 程度と言われていることから、ある程度の解析結果との乖離についてはやむを得ないと考えられる。しかしながら、堤体特性を明らかにする観点からは更に解析精度向上の余地があり、今後は堤体の材料特性及びモデルの 3 次元性、地盤モデルの異方性等を考慮した解析を行う予定である。

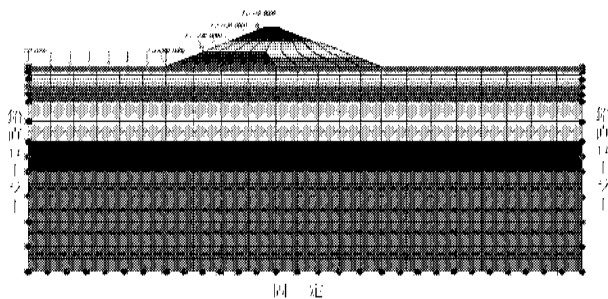


図-15 解析断面モデル

表-2 堤体及び基礎岩盤の物性

地層	厚さ (m)	ポアソン比 ν	S 波速度 (m/s)	圧縮弾性係数 (N/mm ²)	せん断弾性係数 (MPa)
堤体 1	3	0.3	240	117	300
堤体 2	10	0.3	375	273	700
堤体 3	18	0.3	500	485	1200
上部火山礫層	12	0.20	625	840	2400
安山岩	5	0.25	1450	5656	14000
下部火山礫層	13	0.20	950	1940	5600
安山岩	13	0.25	1450	5656	14000
下部火山礫層	40	0.20	950	1940	5600
湖成層	30	0.20	950	1940	5600
花崗岩	100	0.25	1700	7716	20000

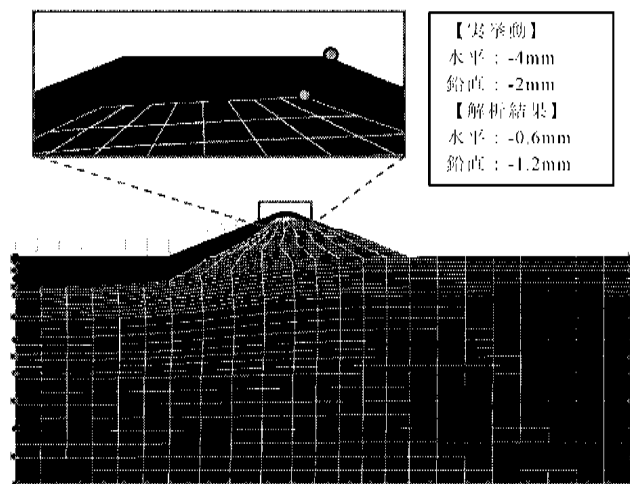


図-16 解析結果変形図

6. 結論と今後の課題

平成 19 年度から 3 年間の試行計測の結果、沼原ダムに設置した GPS による変位計測設備は、積雪によって覆われることは無かったものの、着氷や凍土等、低温環境に起因した障害をクリアし、現時点で今後の継続使用に耐え得る状態になったものと考えられる。また、GPS による変形データもこれまでの測量では得られなかったダムの挙動を示しており、堤体の耐震性能照査等における堤体の現状把握に極めて有用であった。

今後は、豪雪地域での GPS 設置方法⁷⁾を検討すると共に、ダムの安全管理における GPS による変位計測が果たす機能と役割について整理し、諸地点への適用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 電源開発株式会社：沼原発電所新設工事工事記録、昭和 48 年 10 月
- 2) 川田陽一、中野太郎、川崎秀明、清水則一、三村陽一、川島敏幸：洪水時におけるフィルダム堤体外部変位の GPS による連続計測事例、第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、(社)土木学会、2010 年 1 月、講演番号 30
- 3) 山口嘉一、坂本忠彦、小堀秀俊、池澤市郎、板谷英治、岩崎智治：フィルダムの外部変形計測への GPS の適用、大ダム、No.205、2008-10
- 4) 山口嘉一、小堀秀俊、吉田等、坂本忠彦、板谷英治、岩崎智治：Q.91-R.1 GPS を用いたフィルダム外部変形のリアルタイム監視、大ダム、No.210、2010-1
- 5) 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挙動予測手法の実用性の検証、土木学会論文集、No.715、III-60、333-343、2002.9
- 6) 小野実、栗島敏、岩金健寿：沼原発電所 沼原ダムアスファルト保護層改修工事、電力土木、No.248、p.89-98、1993 年 11 月
- 7) 漆山洋治、宮崎裕之、山口嘉一、小堀秀俊、池澤市郎、岩崎智治、飯島功一郎：天端埋設型 GPS を用いた豪雪地帯におけるフィルダムの安全管理に関する検討、土木学会東北支部技術研究発表会、IV-33、平成 18 年度

1 POWER 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

沼原ダムにおけるGPSを用いた堤体挙動測定

平成22年 10月 1日（金）

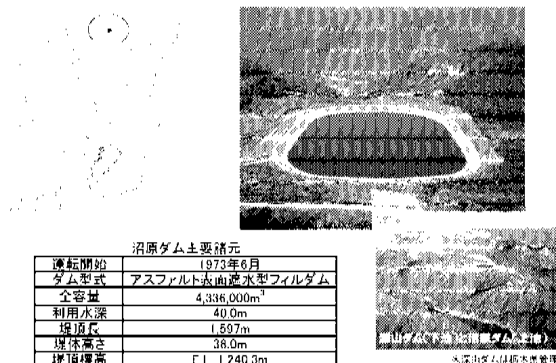
電源開発株式会社
水力エンジニアリング部 土木技術室
貞多 佑介

2 POWER 【発表内容】

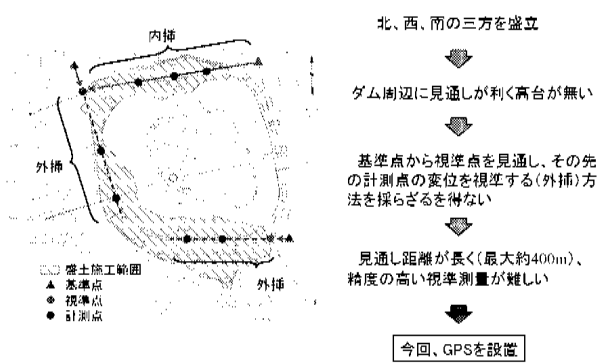
①設置したGPSに生じた問題とその対策

②充排水時におけるGPSによる堤体変位連続測定データ

3 POWER 1. 沼原ダム

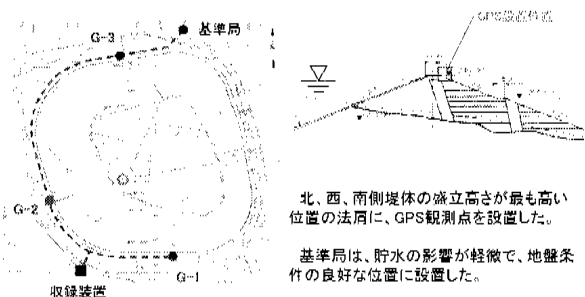


4 POWER 2. 沼原ダムの特徴と変位測定方法

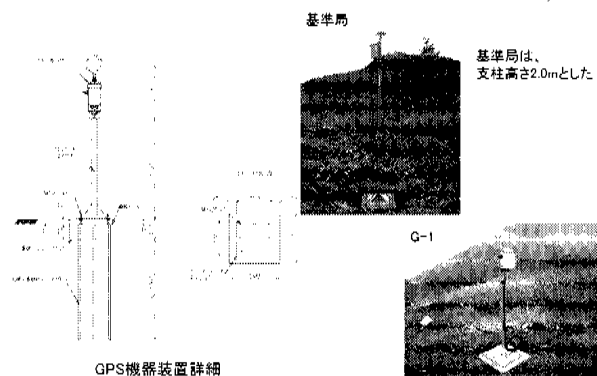


5 POWER 3. GPS設置

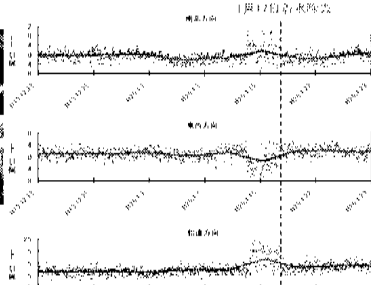
平成19年9月 GPSを3基（基準局1基）を設置



6 POWER 3. GPS設置



7

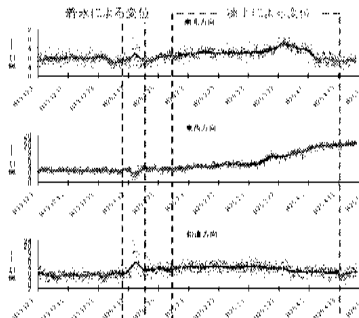


スイッチボックス上に成長した氷塊
がアンテナを押し上げた？

GPS(G-1)測定データ (H19.12.18~H20.01.29)

2

4284859

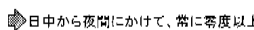
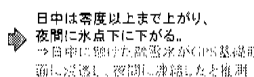
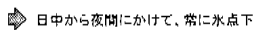


遠方監視装置(ITV)で確認するも、顕著な着氷は確認されなかった。

GPSセンサー部に設置した気温計を分析した結果、GPS基礎部の凍上が原因と判断

GPS(G-1)測定データ (H19.12.01~H20.05.03)

9



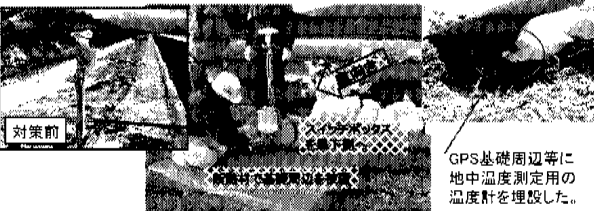
10



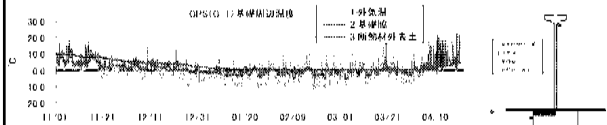
スイッチボックスから上部へ成長する氷塊がアンテナ部へ影響しないよう、スイッチボックスを風下側・下方へ移動した。

GPS基礎周辺の地中温度が氷点下まで低下するのを防ぐため、基礎コンクリート周辺を発泡スチロール断熱材で被覆した

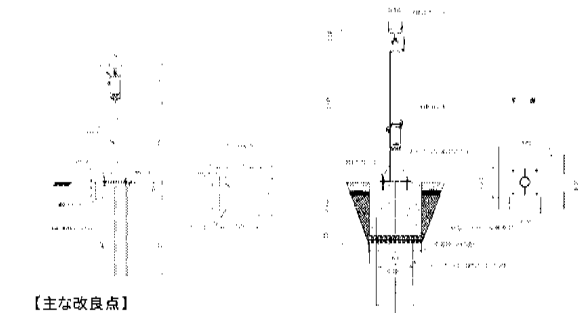
11



GPS基礎周辺等に
地中温度測定用の
温度計を埋設した。



12



- ・基礎深さを20cmから60cmへ
- ・基礎周りに発泡スチロール断熱材を埋設

5. 本格運用に向けた仕様変更

凍害・凍上防止対策

凍害防止塗料の塗布

GPSのコンクリート基礎表面に凍害防止塗料を塗布した。

※凍害防止塗料「エバープロテクト」
珪酸塩系含浸コンクリート保護材



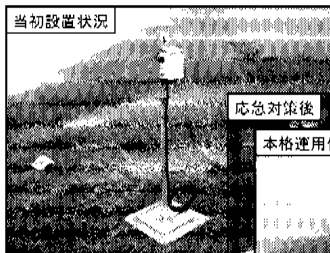
発泡スチロール断熱材の埋設

GPS基礎周辺埋戻し土に、地表から深さ10cm位置に、厚さ5cmの発泡スチロールを凍上防止断熱材として埋設した。



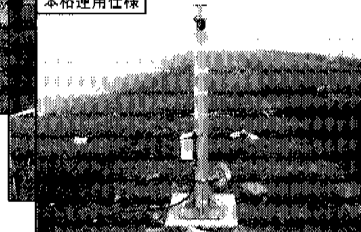
5. 本格運用に向けた仕様変更

当初設置状況



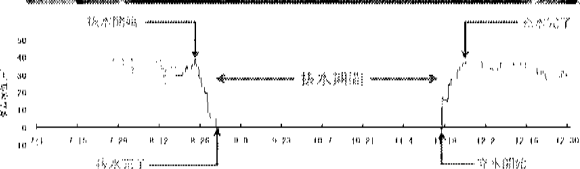
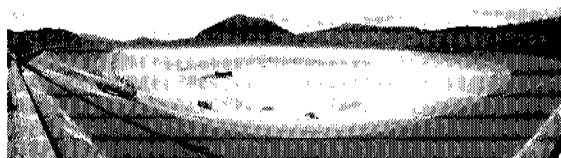
応急対策後

本格運用仕様



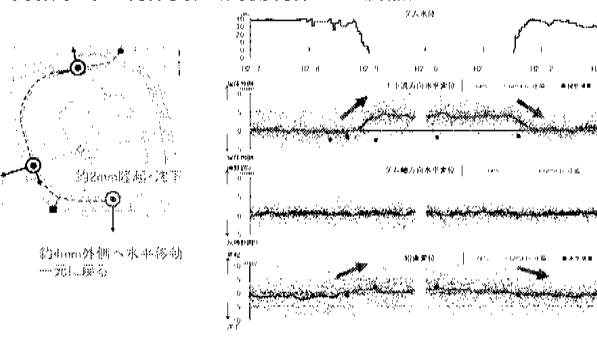
6. ダム充排水時のGPS測定結果

沼原ダム抜水点検期間：平成21年9月1日～11月16日



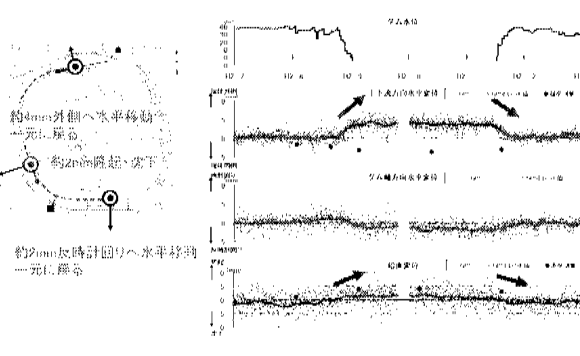
6. ダム充排水時のGPS測定結果

充排水時の堤体変位(南側堤体・G-1測点)



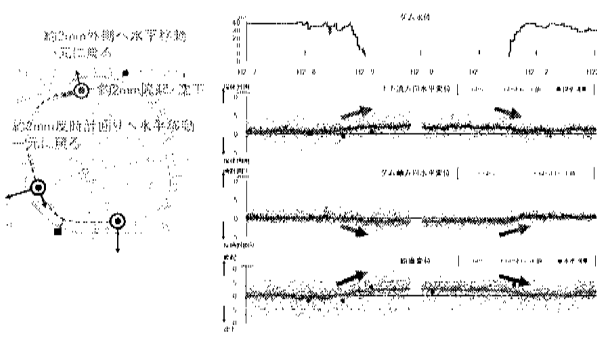
6. ダム充排水時のGPS測定結果

充排水時の堤体変位(西側堤体・G-2測点)



6. ダム充排水時のGPS測定結果

充排水時の堤体変位(北側堤体・G-3測点)



7. まとめと今後の課題

19



・沼原ダムでは、厳寒地、高標高位置という地理的要因により、GPS及びその基礎に問題が生じたが、設備上の対策を講じることで、恒久的に利用可能な設備とすることができた。

・GPSの連続観測機能によって、従来の測量方法では捉えるのが困難であったダムの詳細な挙動を把握することが出来た。

【今後の課題】

・GPSで得られた充排水時の堤体挙動に基づき、堤体及び基礎地盤の物性について、より詳細な検討を行い、今後の維持管理に資する情報を得る。（堤体及び基礎地盤の変形特性や異方性について）

・ダム堤体の安全管理におけるGPSの利用方法と位置付けの検討（ダムタイプに応じた変形特性に対するGPSの適用性など）

20



ご清聴ありがとうございました。

重力式コンクリートダムの変位計測への GPS の適用

山口 嘉一¹ 小堀 俊秀²

堤高 50m 以上の重力式コンクリートダムは、河川管理施設等構造令により、ダムの変形を計測することが規定されている。現在、重力式コンクリートダムの変位計測は、主にブラムラインで行われている。しかし、古いダムの中にはブラムラインが設置されていないダムもあり、地震後の変位挙動の計測が迅速に行えないなどの問題がある。またダムの安全管理に関わる予算が限られる中、効率的な変位計測を行うことが望まれている。

本研究は、上記課題の解決策の一つとして、フィルダムの外部変位計測においては既に高い精度を得ることが確認できている GPS により重力式コンクリートダムの変位計測を適切な精度で実施できることを検証する。

キーワード: GPS, コンクリートダム, 変位, 計測, 安全管理

1. はじめに

河川管理施設等構造令¹⁾により、堤高 50m 以上の重力式コンクリートダムは、漏水量、変形、揚圧力を計測することが規定されている。現在、重力式コンクリートダムの変形計測は、主にブラムラインで行われている。しかし、ブラムラインによる変位計測は極めて高精度な計測方法であるが、その設置費用や施工への影響は大きく、一般的には代表 1~2 断面に設置されているにすぎない。一方、フィルダムにおいては築堤材料の物性がダムごとに大きく異なる場合があり、個別ダムにおいても物性のばらつきがコンクリートに比べて大きいなど、堤体の挙動がコンクリートダムに比べて複雑であるという特徴があるが、20~30 の変形計測の測定点を有するダムも多く見られる。また、重力式コンクリートダムは横継目によりブロックを区切った構造になっているため、隣同士のブロックであっても基礎岩盤や地形の条件によっては、異なる変位挙動を示す可能性がある。特に、大規模地震後の変位挙動を点検する場合には、このような点検の観点が必要になってくる。

そこで、これまでの斜面部²⁾やフィルダムの外部変位計測における研究成果³⁾で実用上十分な精度を得ることが確認できている 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に適用し、有用性が確認できれば、重力式コンクリートダムの変位計測・安全

管理がより高度化し、かつ安価になるものと考えられる。

本研究では、堤高 120m 級のダム堤体に GPS 変位計測システムを試験導入し、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ブラムラインとの精度比較等を行い、その適用性について検証するものである。

2. 重力式コンクリートダムへの GPS の設置

GPS 変位計測システムを設置した N ダムの諸元を表-1 に示す。GPS センサーの設置位置平面図を図-1 に、上流側縦断面図を図-2 に示す。GPS センサーは、ダム堤頂上に可動点 3 点 (G-1~G-3)、左岸に基準点として固定点 1 点の合計 4 点設置した。また、GPS センサーは図-2 に示すように、G-1 はノーマルブラムライン DN-2 と同じブロック内に、G-2 はダム敷直下に低角度の断層が分布するためノーマルブラムライン DN-1 とともにリバースブラムライン DR-1 が設置されているブロック内に設置した。GPS センサーの設置方法の令として、G-1 の設置状況を図-3 に示す。GPS センサーは堤頂下流部の高欄上に設置した。本研究に用いた GPS センサー外形はアンテナ部が $\phi 156\text{mm} \times \text{H}116\text{mm}$ 、アンテナ部の質量が 0.6kg と小型のセンサーであるため、図-3 に示すような場合も含め多様な場所⁴⁾に設置が可能である。

¹⁾ 独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チーム、主席研究員、博 (工)

²⁾ 独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チーム、研究員

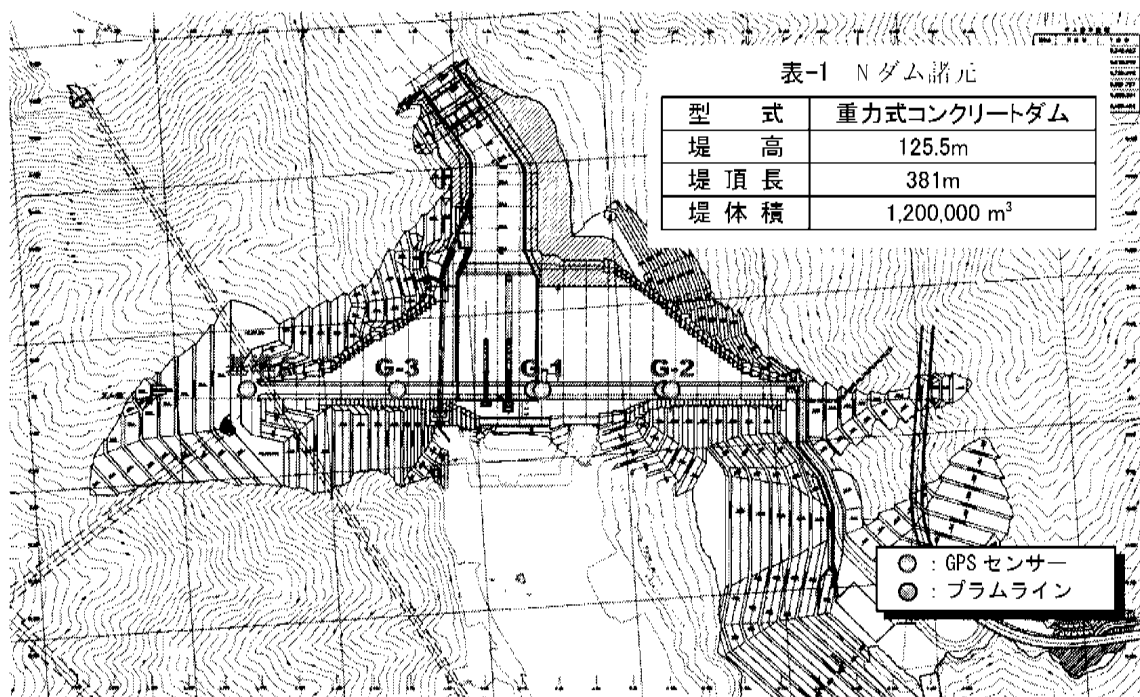


図-1 GPS センサー設置位置（平面図）

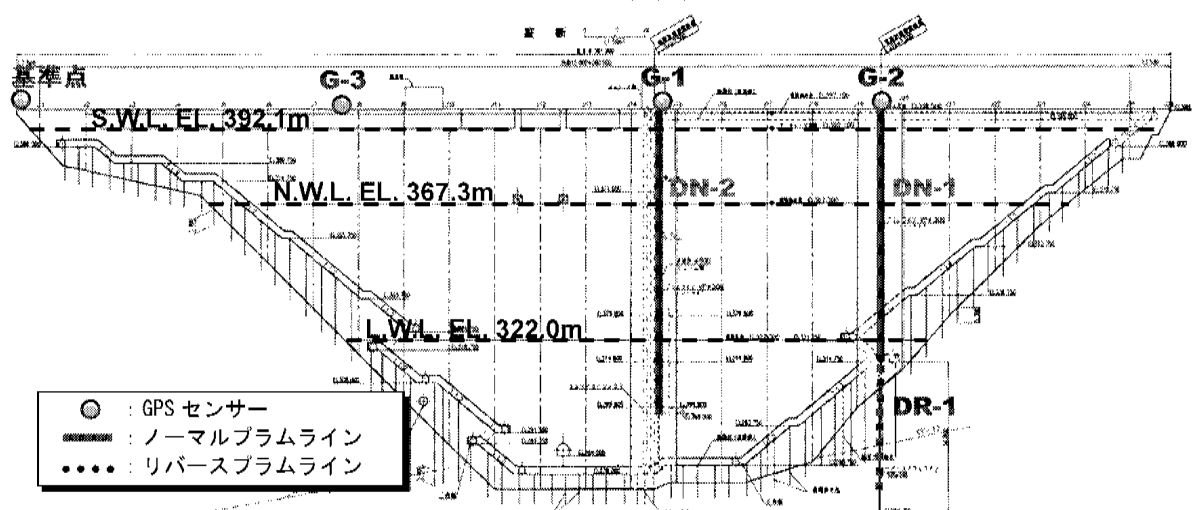


図-2 GPS センサー設置位置（上流面図）

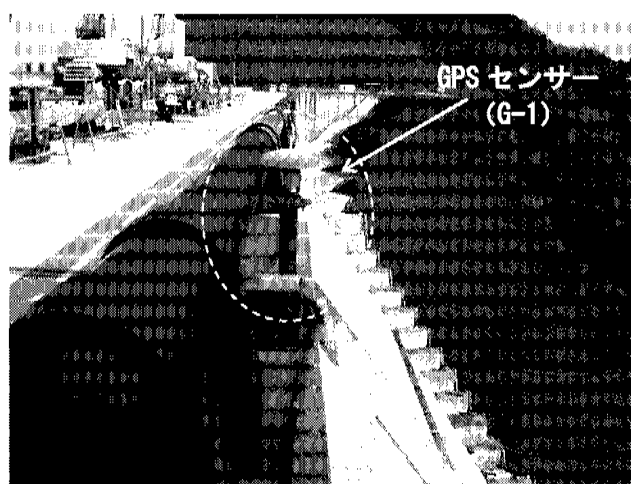


図-3 GPS センサー設置状況（G-1）

3. ダム挙動計測結果

本章では、GPS 変位計測システムとプラムラインの変形計測結果について示す。GPS 変位計測システムは、GPS センサーを設置した 2009 年 11 月 1 日から 2010 年 7 月 25 日まで、プラムラインは満水を開始した 2009 年 12 月 1 日から 2010 年 7 月 25 日までの計測結果を示す。なお、N ダムでは、サーチャージ水位（以下、S.W.L.）到達後、水位を低下させ、2010 年 5 月 30 日より常時満水位（以下、N.W.L.）を約 2 月間維持し、2010 年 7 月 26 日より水位を低下させている。本論文では、N.W.L.維持期間終了の 2010 年 7 月 25 日までの計測結果を示す。

3.1 GPSによる挙動計測結果

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

(a) 上下流方向変位

上下流方向の変位は、試験湛水開始後2010年3月まで貯水位を最低水位（以下、L.W.L.）に保っている間は、下流側への変位はそれほど発生しない。なお、図内に示すAの部では上下流方向変位に特異な挙動が見られる。これはGPSセンサー周辺に雪が積もり、マルチパス（GPS衛星からの電波の乱反射）が発生したた

めと考えられる。除雪を行うことにより、変動が収まることを確認した。

次に、L.W.L.からN.W.L.（常時満水位）に水位を上昇させるに従い、各計測地点とも下流方向へ5mm程度の変位が発生する。その後、水位を2010年4月29日のS.W.L.まで上昇させると、水位変化に応じてG-1で最大29.0mmの下流側への変位が発生する。その後、水位の低下に従い、上流側への変位が発生する。2010年5月30日に水位をN.W.L.まで下げ、その後水位をN.W.L.で二月程度保った2010年7月末になっても上流側への変位が若干進み、計測開始時の値に近づきつつある。

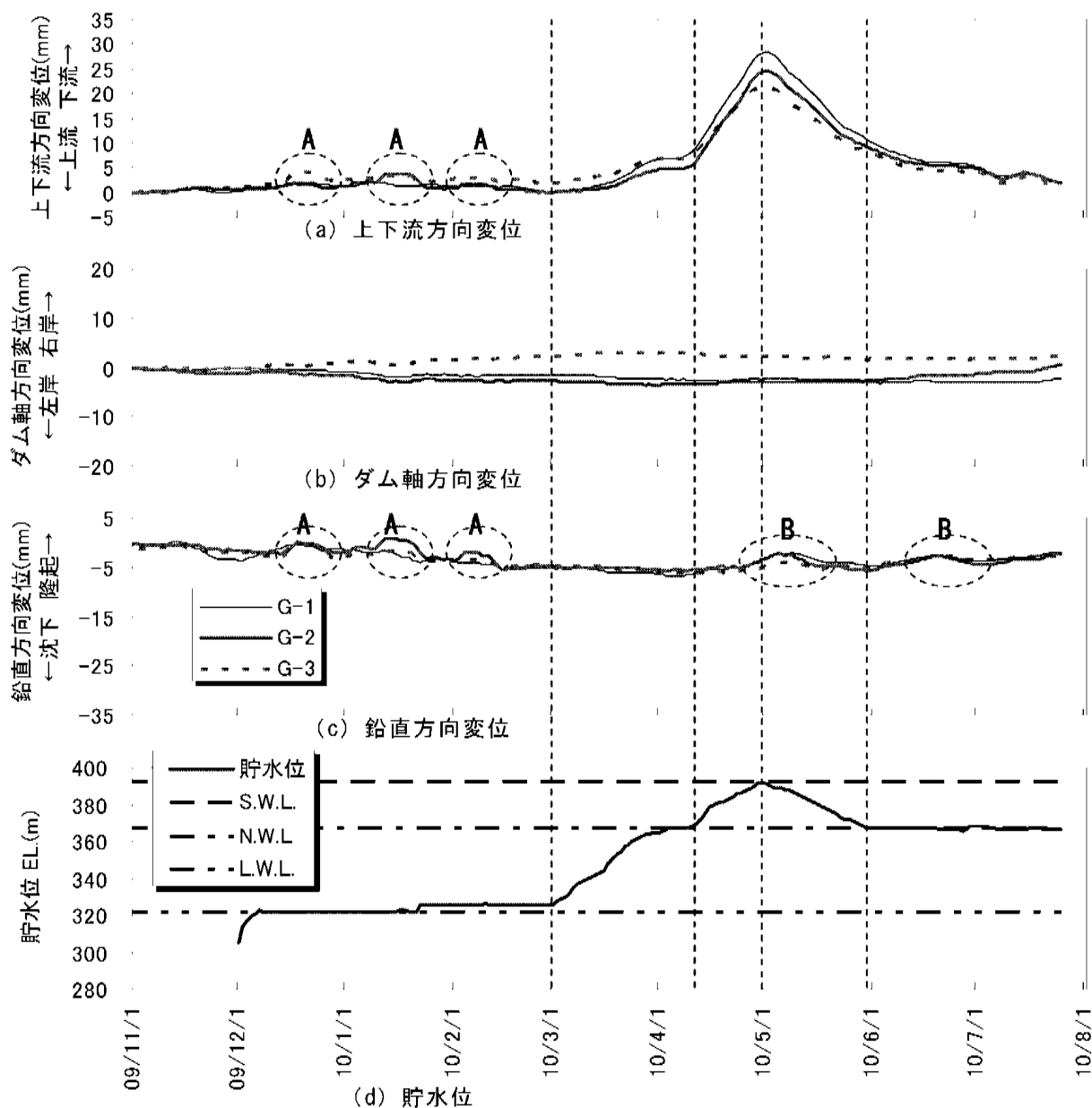


図-4 GPSによる変位計測結果

(b) ダム軸方向変位

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

上下流方向の計測結果から、堤体に大きく力がかかりはじめると考えられる、N.W.L.から S.W.L.までの水位上昇期間は、G-1 はほとんど変化がなく、G-2 は右岸側への、G-3 は左岸側への変位が発生する。その後水位を低下させるに従い、G-1 はほとんど変化がなく、G-2 は水位上昇時とは逆に左岸側へ、G-3 は右岸側へと変位が発生する。

(c) 鉛直方向変位

鉛直方向の変位は、当初は貯水に関わらず沈下傾向にあり、2010 年 5 月からは上昇する傾向にある。鉛直方向の変位は水位との強い相関はないと考えられる。なお、先にも述べたが図中 A は雪の影響と考えられる異常値が発生している。鉛直方向については、既往の試験⁵⁾により、GPS センサー上に積もった雪の量によりばらつくことが確認されている。また、図中 B は各点ともに同じような変位が発生している。重力式コンクリートダムでこのように隆起することは考えにくく、またデータも各計測地点同時にシフトしていることが

ら、固定点付近にマルチパスを発生する何らかの異常があったものと推測できる。今後、周辺工事の確認等原因の調査を行う。

次に、上下流方向変位とダム軸方向変位の平面方向の変位について、整理を行った。変位は図-5 の貯水位に基づく変位整理条件に従い整理を行った。変位整理条件の詳細について表-2 に示す。

GPS による平面方向の変位計測結果を図-6 に示す。図は設置位置に合わせ (図-1、図-2 参照) 左から (a) 左岸側に設置した G-3、(b) ダム中央付近に設置した G-1、(c) 右岸側に設置した G-2 となっている。図より、それぞれ地点ともに、「③水位上昇↑N.W.L.」以前は、上下流方向変位はほとんど発生しておらず、ダム軸方向変位がそれぞれの地点で発生している。そのため、貯水による変位が発生したと考えられる「③水位上昇↑N.W.L.」以降の挙動について示す。なお、図中の破線は、「③水位上昇↑N.W.L.」の開始時 (2010 年 3 月 2 日) の変位量を示している。

表-2 変位整理条件

記 号	状 況	期 間
①水位上昇↑L.W.L.	L.W.L. まで 水位上昇	2009.12.1 ~2009.12.6
②水位一定→L.W.L.	L.W.L. で 水位一定	2009.12.7 ~2010.3.1
③水位上昇↑N.W.L.	N.W.L. まで 水位上昇	2010.3.2 ~2010.4.8
④水位上昇↑S.W.L.	S.W.L. まで 水位上昇	2010.4.9 ~2010.4.30
⑤水位下降↓N.W.L.	N.W.L. まで 水位下降	2010.5.1 ~2010.5.29
⑥水位一定→N.W.L.	N.W.L. で 水位一定	2010.5.30 ~2010.7.25

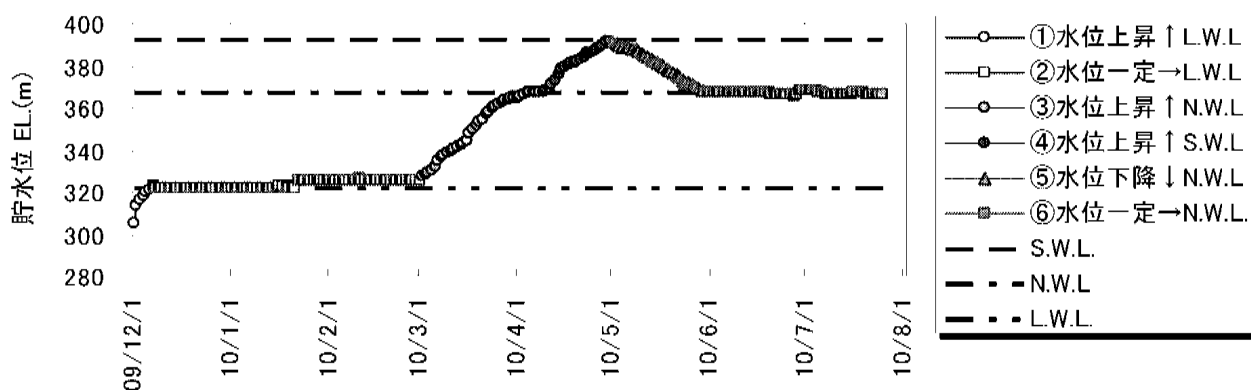


図-5 貯水位に基づく変位整理条件

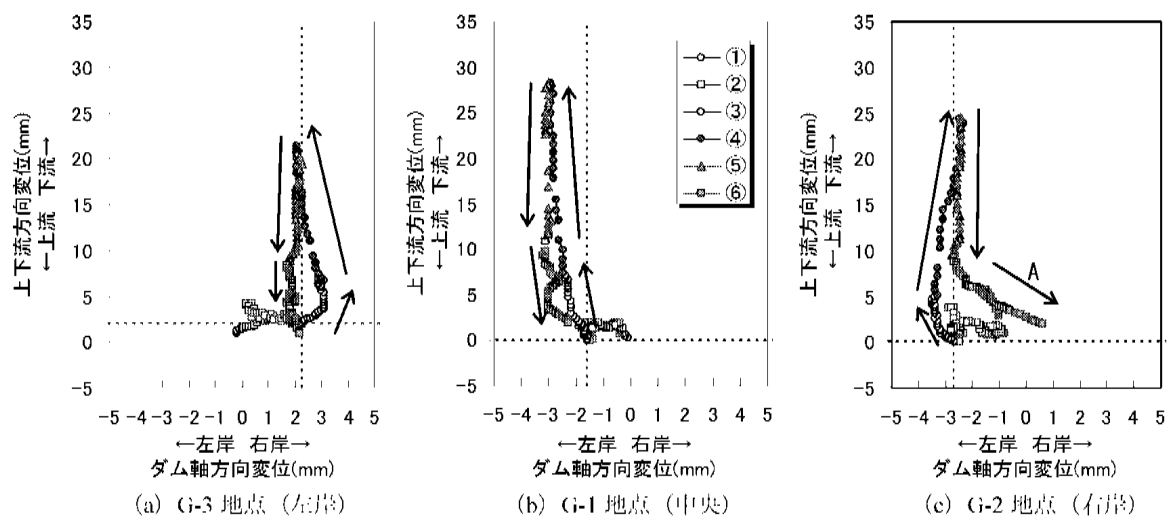


図-6 GPS による平面方向の変位計測結果

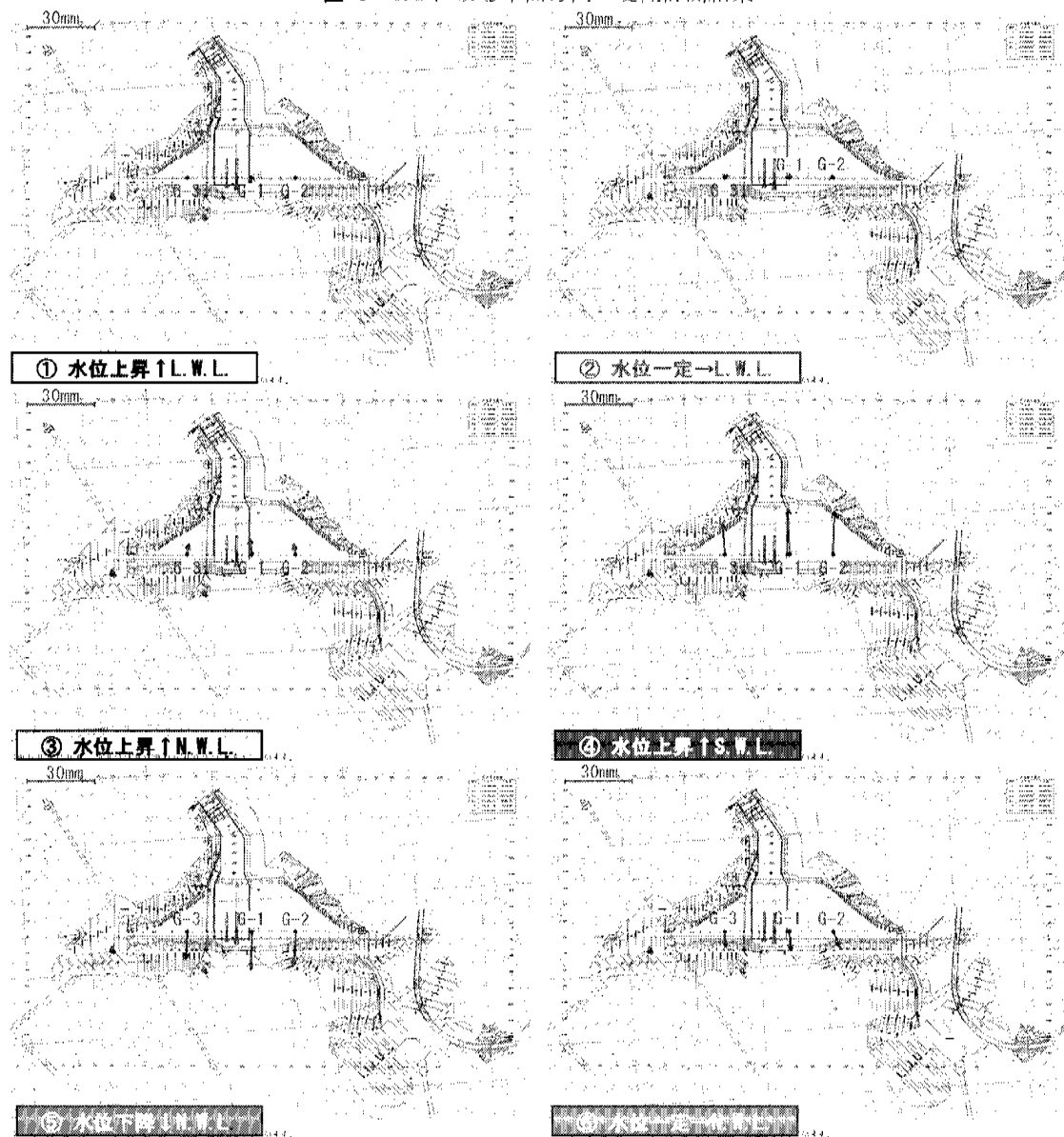


図-7 平面方向変位ベクトル

(a) G-3 (左岸)

図より、「③水位上昇↑N.W.L.」時には上下流方向は下流側へ、ダム軸方向は右岸側（G-3 からみて、ダムの内側）に変位が発生する。「④水位上昇↑S.W.L.」時には上下流方向は大きく下流側へ変位が発生し、ダム軸方向は左岸側（G-3 から見て、ダムの外側）に変位が発生する。その後、水の低下に伴い、「③水位上昇↑N.W.L.」開始時の変位量に戻る傾向にある。

(b) G-1 (中央)

図より、「③水位上昇↑N.W.L.」時には上下流方向は下流側へ、ダム軸方向は左岸側に変位が発生する。「④水位上昇↑S.W.L.」時には上下流方向は大きく下流側変位が発生するが、ダム軸方向変位はほとんど発生しない。その後、水の低下に伴い、「③水位上昇↑N.W.L.」開始時の変位量に戻る傾向にある。

(c) G-2 (右岸)

図より、「③水位上昇↑N.W.L.」時には上下流方向は下流側へ、ダム軸方向は左岸側（G-2 からみて、ダムの内側）に変位が発生する。「④水位上昇↑

S.W.L.」時には上下流方向は大きく下流側へ変位が発生し、ダム軸方向は右岸側（G-1 から見て、ダムの外側）に変位が発生する。その後、水の低下に伴い、「⑤水位下降↓N.W.L.」時には、「③水位上昇↑N.W.L.」開始時の変位量に戻る傾向にあったが、図中 A に示すように、「⑥水位一定→N.W.L.」時には、右岸方向へ大きな変位が発生している。

これらの挙動を、平面方向変位ベクトルで示した図を図-7 に示す。水位が上昇するに従い、外側に広がるようにベクトルが発生し、水位低下時に G-3 以外は N.W.L.時の変位量に戻る傾向にある。この G-3 の変位については、今後詳細分析を行う。

3.2 プラムラインによる挙動計測結果

GPS とプラムラインの位置の関係は図-1～図-2 に示すように、GPS センサーの G-1 はプラムライン DN-2 と、GPS センサーの G-2 はプラムライン DN-1 とリバーズプラムライン DR-1 と同じブロック上に設置している。

プラムラインによる変位計測結果を図-8 に示す。図は上より (a) 上下流方向、(b) ダム軸方向、(c) 貯

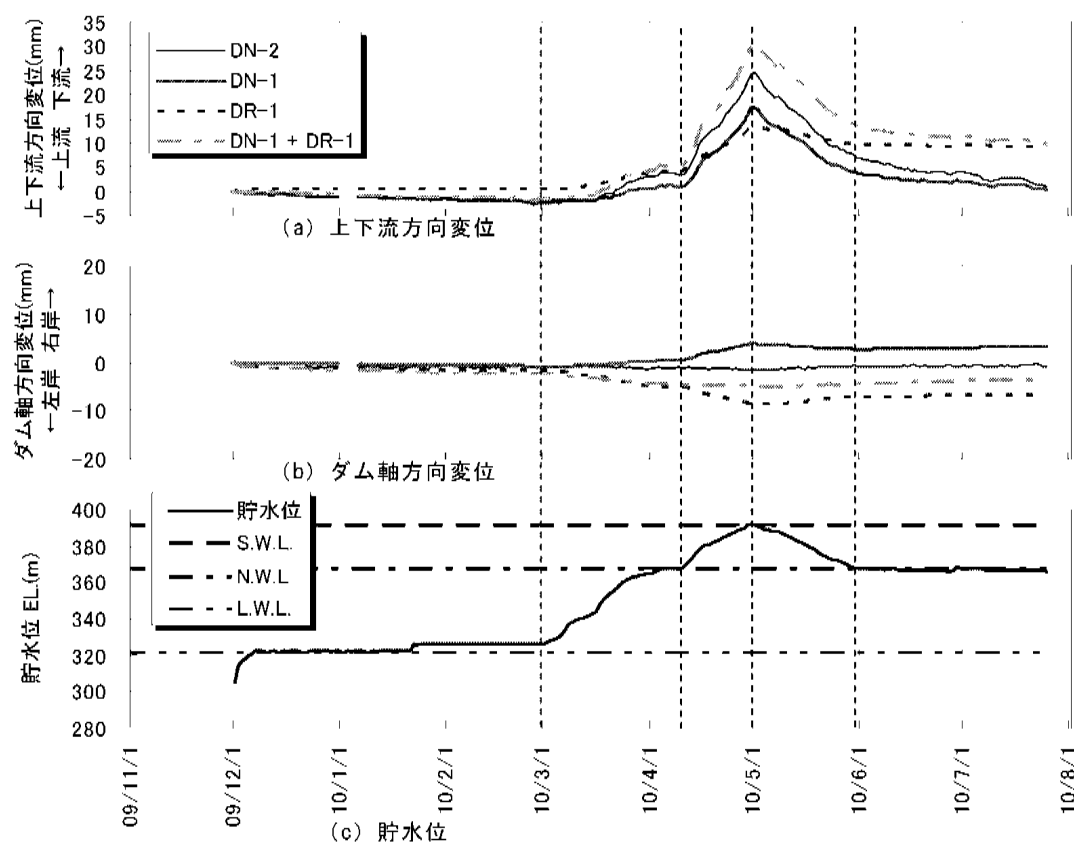


図-8 プラムラインによる変位計測結果

水位を示している。また、ブラムライン DN-1 とリバーブラムライン DR-1 の変位量の合計を図中に示している。なお、ブラムラインは GPS と違い鉛直方向の計測を行うことはできない。それぞれの挙動の特徴を以下に示す。

(a) 上下流方向変位

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

定に保っている期間は、DN-1 と DN-2 は継続して上流側へ変位が発生し、計測開始時の値に戻る傾向にあるが、DR-1 にほとんど変位はみられない。

(b) ダム軸方向変位

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

3.3 GPS とブラムラインの比較

本節では、それぞれ同じブロックに設置してある G-1 と DN-2、G-2 と DN-1 及び DR-1 の計測結果の比較を行う。

G-1 と DN-2 の比較を図-10 に示す。(a) 上下流方向、(b) ダム軸方向ともに GPS の計測結果

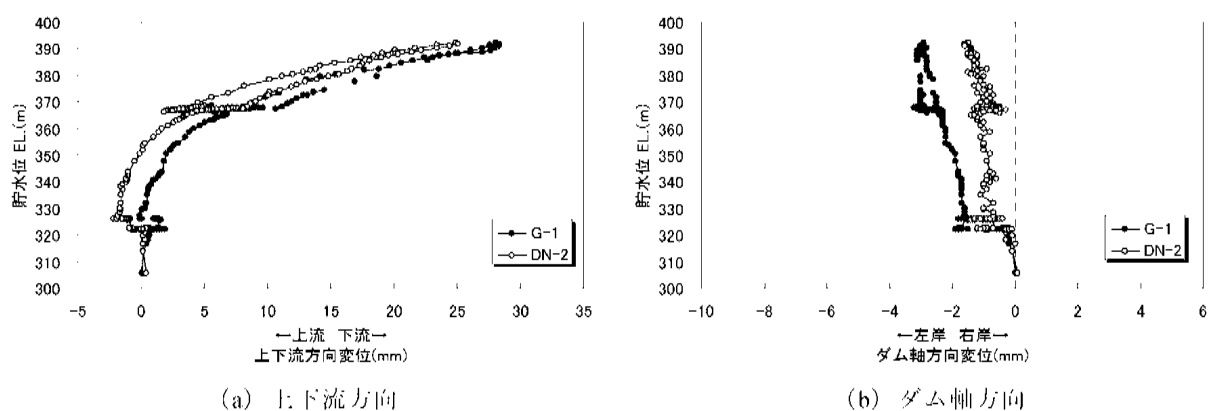


図-10 G-1 と DN-2 の比較

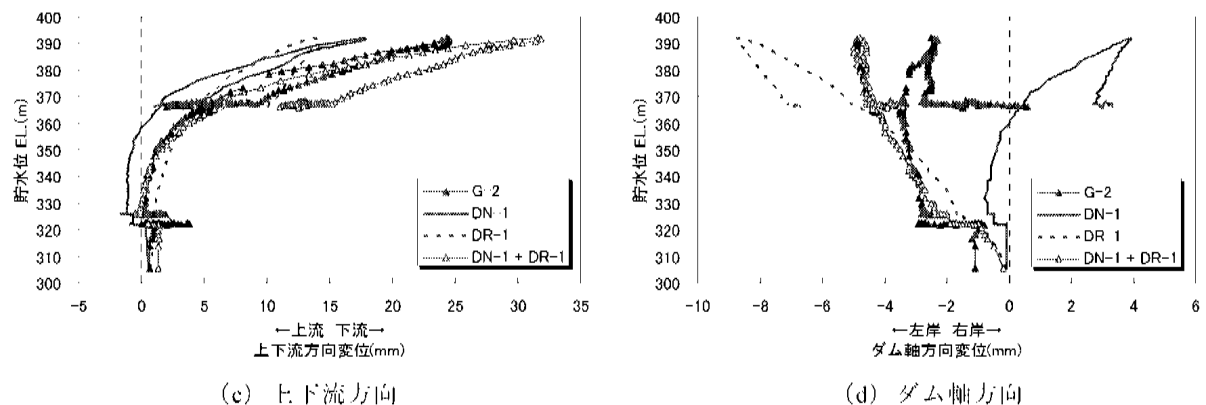


図-11 G-2 と DN-1・DR-1 の比較

とブラムラインの計測結果は同じような傾向を示している。また、計測結果は GPS の計測値がブラムラインの計測値に比べて大きくなる傾向にある。

G-2 と DN-1・DR-1 の比較を図-11 に示す。

(a) 上下流方向について、ブラムライン DN-1、リバーズブラムライン DR-1 の計測結果は、GPS の計測結果と比べて小さい。ブラムラインの計測結果は、図-12 の計測位置模式図に示すように、ノーマルブラムラインは、ダム堤体内の固定点 NB を基準にした NA 地点の変位、リバーズブラムラインは、基礎岩盤内の固定点 RB を基準にした RA 地点の変位を示しており、GPS は基礎岩盤を含めた全体の挙動を計測しているためと考えられる。DN-1 と DR-1 を合成した結果を図中の凡例「DN-1 + DR-1」に示す。合成した結果、(a) 上下流方向は、GPS と同様の挙動を示した。また、GPS の計測結果より変位が大きく観測されている。(b) ダム軸方向については、DN-1 と DR-1 の単体の挙動は GPS の計測結果とまったく違った挙動となっているが、合成することで、GPS と同じような傾向となった。

なお、図-10 の G-1 と DN-2 は同様の傾向は示しているが、ノーマルブラムラインの変位は岩盤を含めた全体の挙動を表してはならず、GPS の計測結果との比較には留意が必要である。今後は FEM 解析等を用いて挙動の詳細分析を行う。

4. まとめ

本研究では、GPS 変位計測システムが重力式コンクリートダムの変位計測として有用であるかを検証する目的として、堤高 120m 級のダム堤体に GPS 変位計測システムを試験導入し、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ブラムラインとの精度比較等を行った。

その結果、GPS はブラムラインと同程度の計測結果を得ることができた。しかし、計測結果を細かく検証すると、これまでブラムラインでは計測できなかった挙動が計測された。今後は、これらの挙動の要因分析を行い、ダムそのものの変位の抽出を行う予定である。

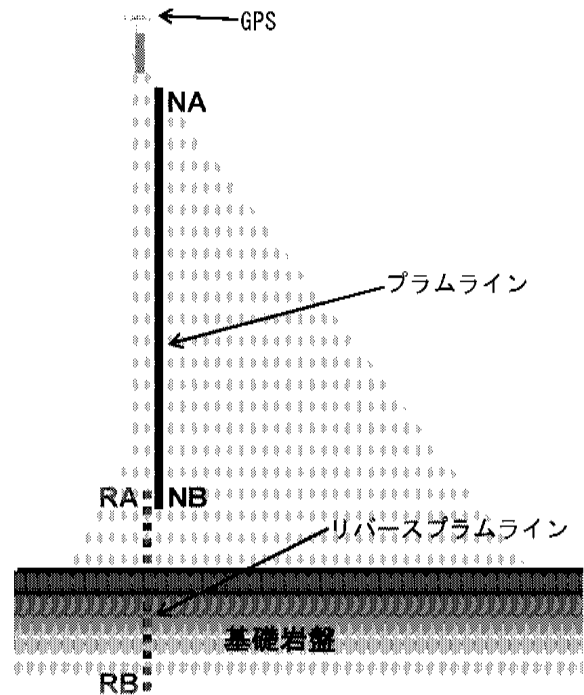
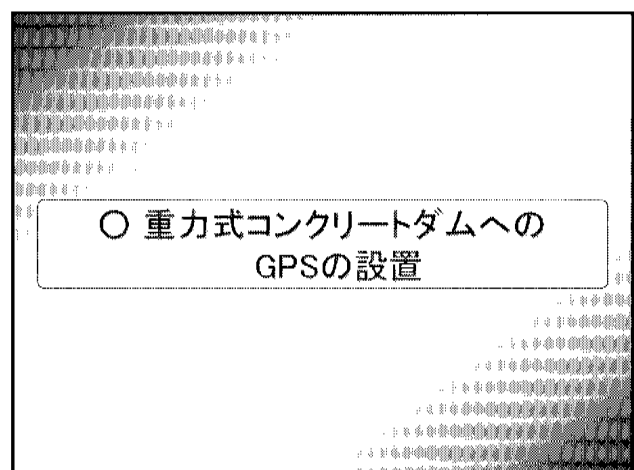
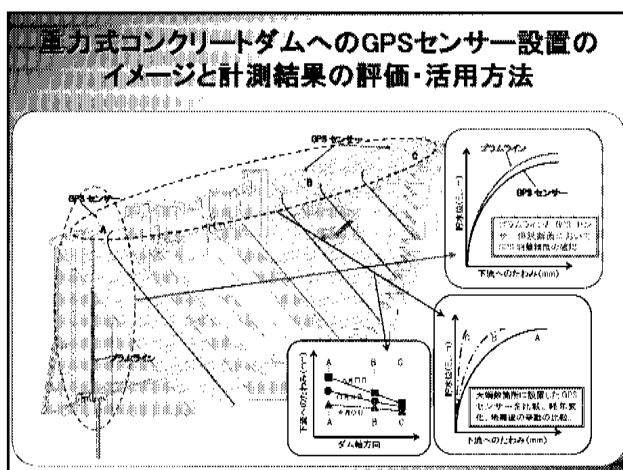
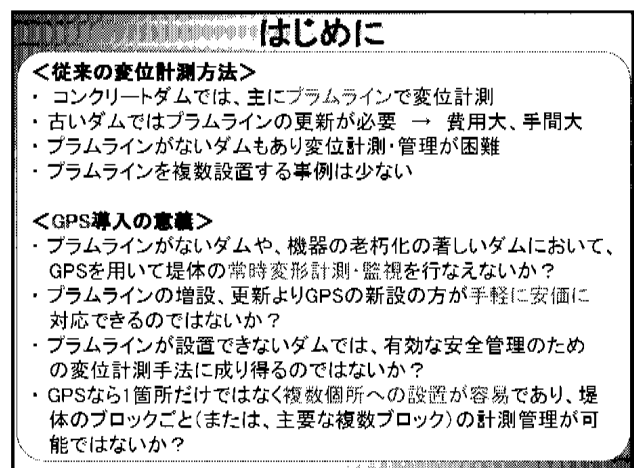
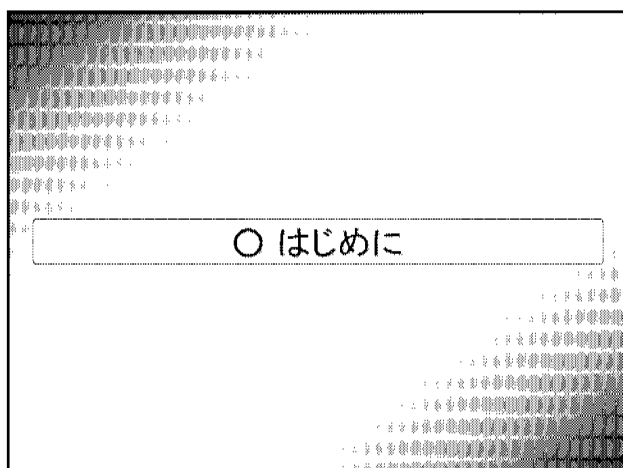
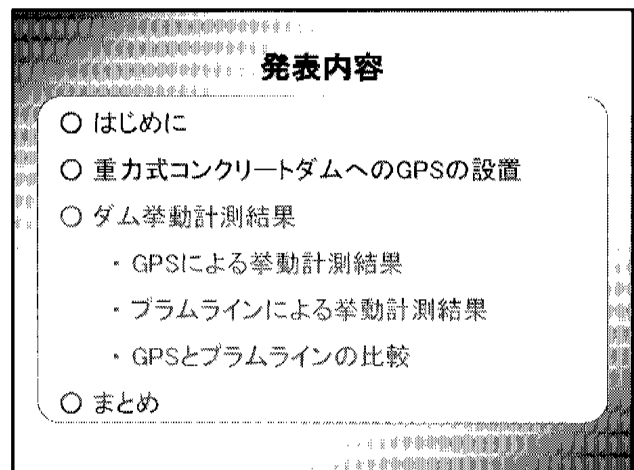
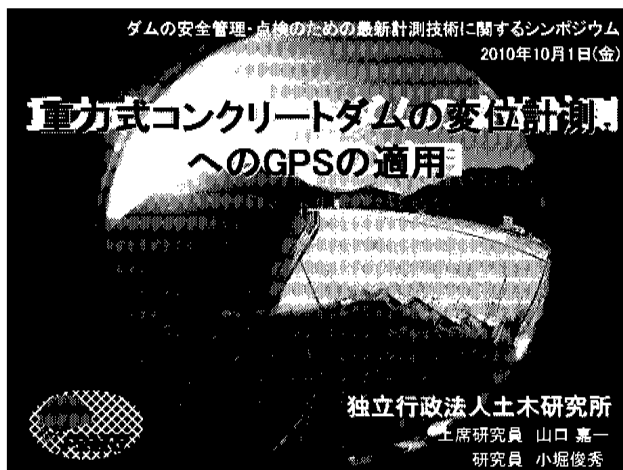


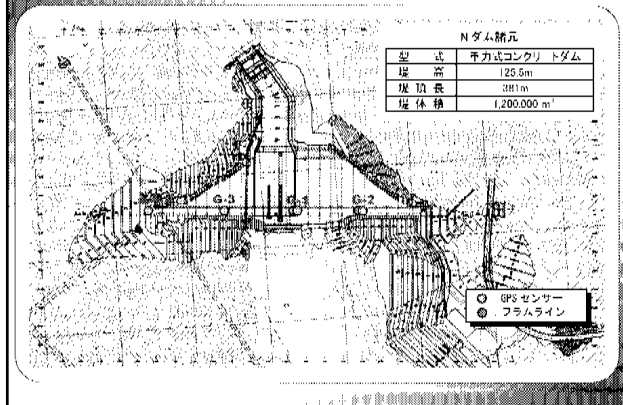
図-12 計測位置模式図

参考文献

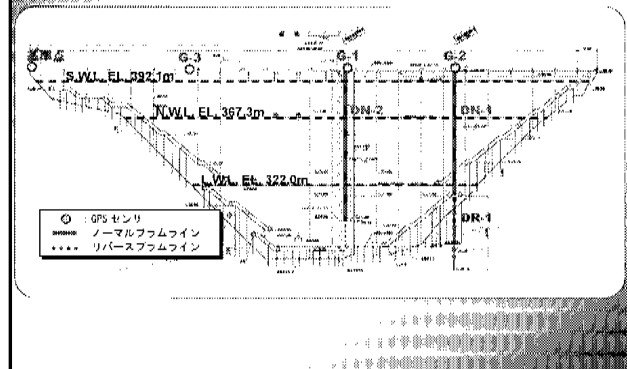
- 1) (財)国土開発技術研究センター編：改定 解説・河川管理施設等構造令，山海堂，pp.95-97，2000.1.
- 2) Norikazu SHIMIZU: Monitoring Rock Deformation Using Global Positioning System - Fundamentals, New Developments and Practical Applications -, Keynote Lecture at the 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, 2009.10.
- 3) 山口嘉一，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.120-136，2005.6.
- 4) Yoshikazu YAMAGUCHI, Toshihide KOBORI, Hitoshi YOSHIDA, Tadahiko SAKAMOTO, Hideharu ITAYA and Tomoharu IWASAKI: Real-Time Monitoring of Exterior Deformation of Embankment Dams Using GPS, 23rd ICOLD Congress, 2009.5.
- 5) 漆山洋治，宮崎裕之，山口嘉一，小堀俊秀，池澤市郎，岩崎智治，飯島功一郎：天端埋設型 GPS を用いた豪雪地帯におけるフィルダムの安全管理に関する検討，平成 18 年度土木学会東北支部技術発表会，土木学会東北支部，CD-ROM IV-33，2007.3.



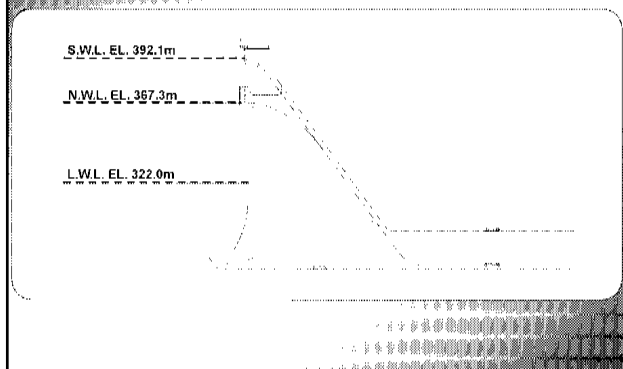
GPSセンサー設置位置(平面図)



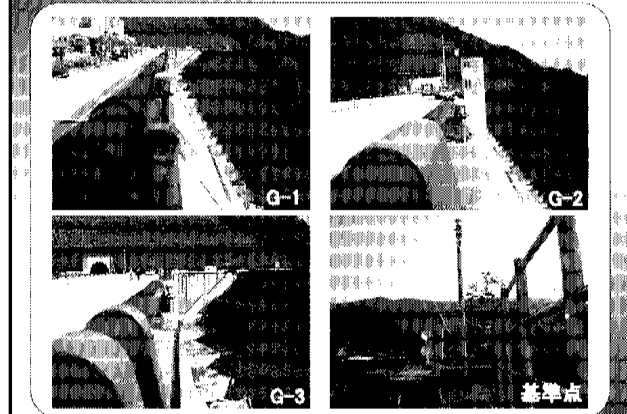
GPSセンサー設置位置(上流面図)



Nダム 断面図



GPSセンサー設置状況

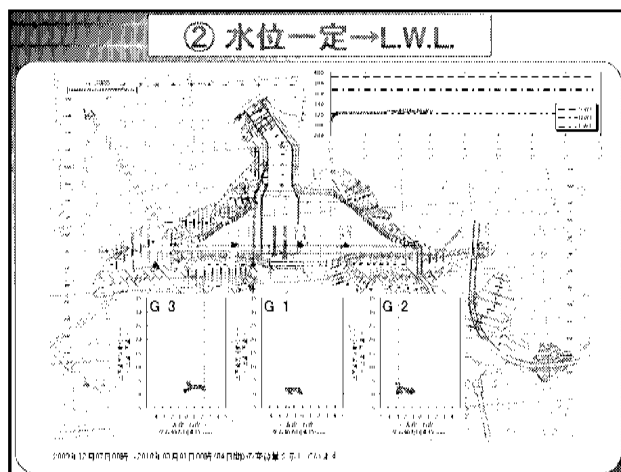
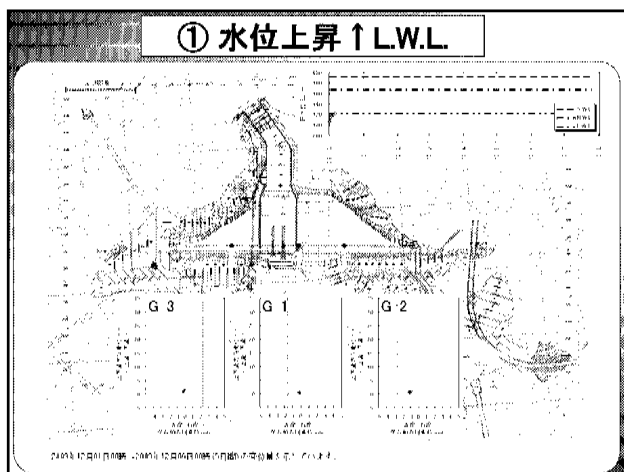
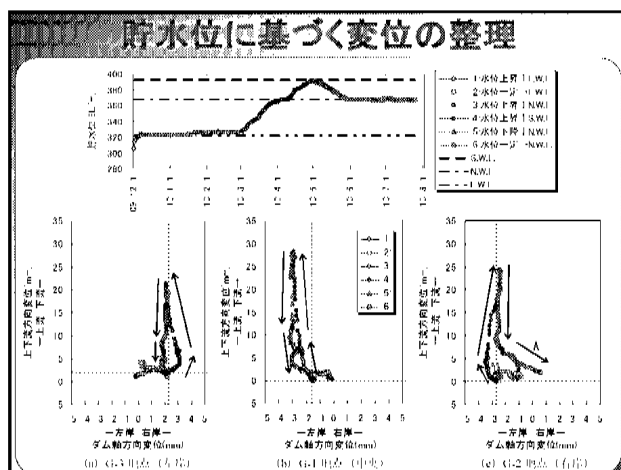
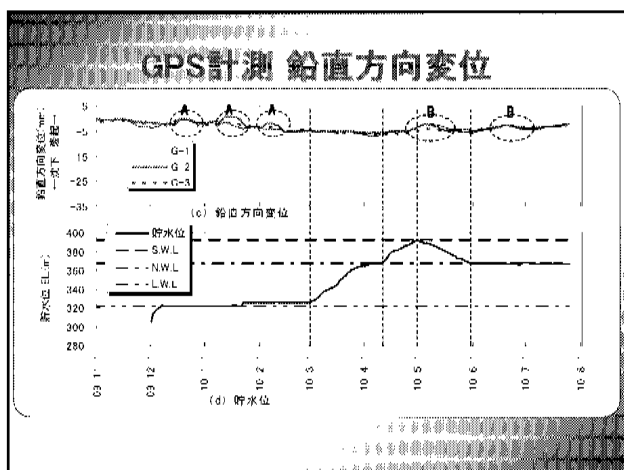
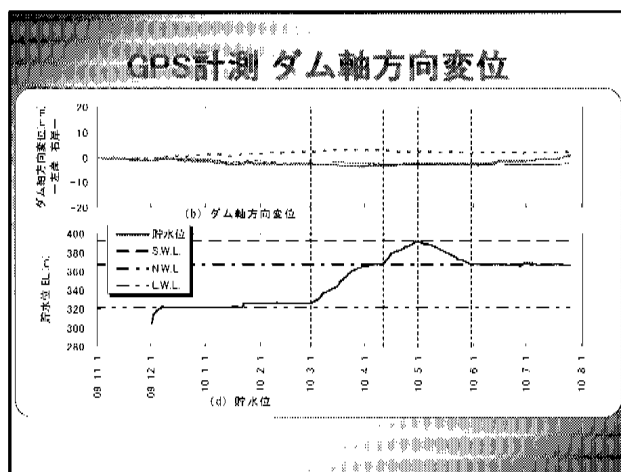
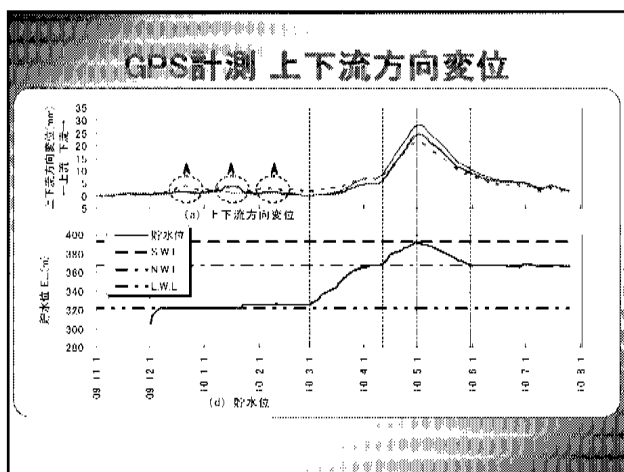


○ダム挙動計測結果

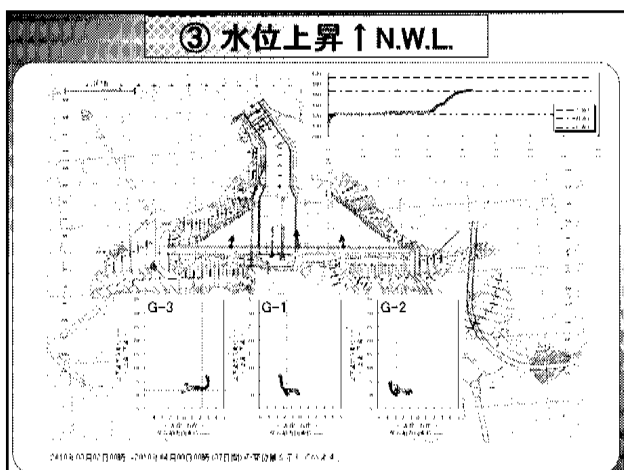


・GPSによる挙動計測結果

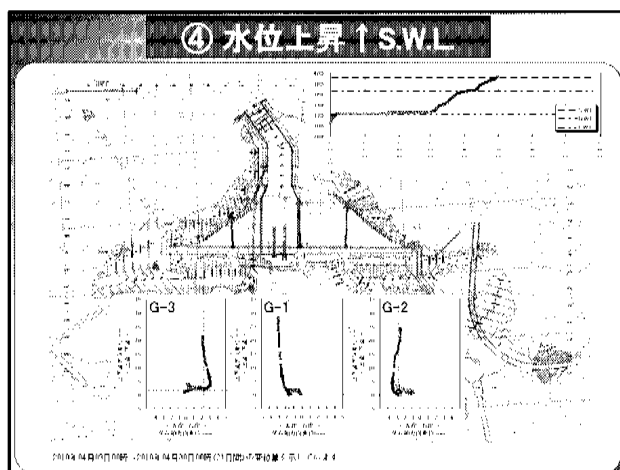




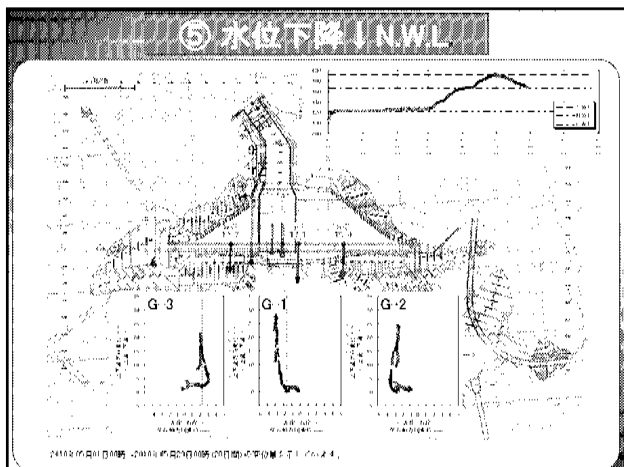
③ 水位上昇↑N.W.L



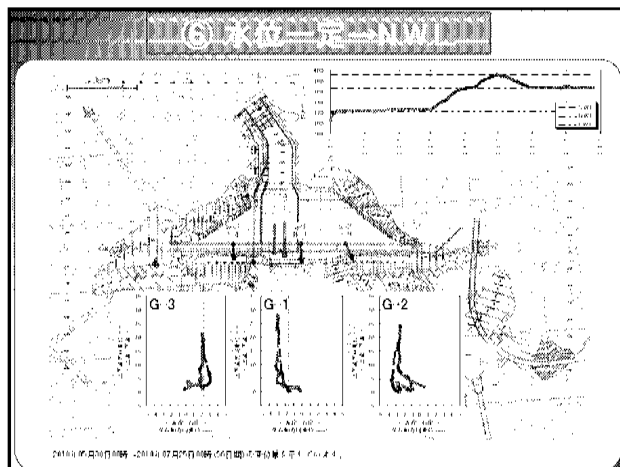
④ 水位上昇↑S.W.L



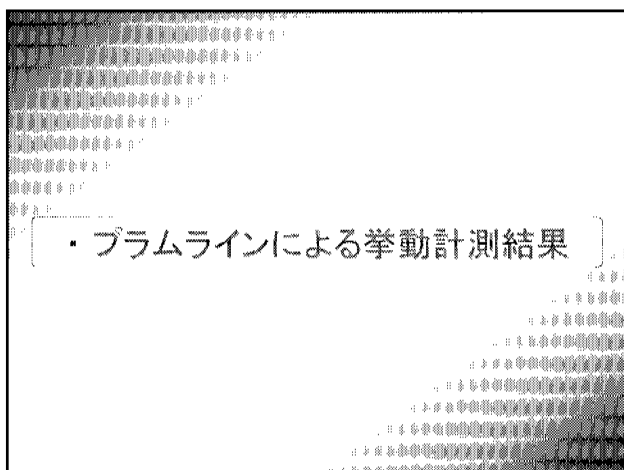
⑤ 水位下降↓N.W.L



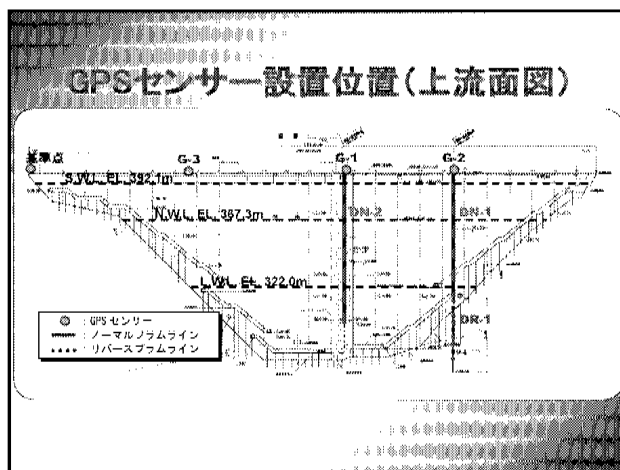
⑥ 水位一定→N.W.L

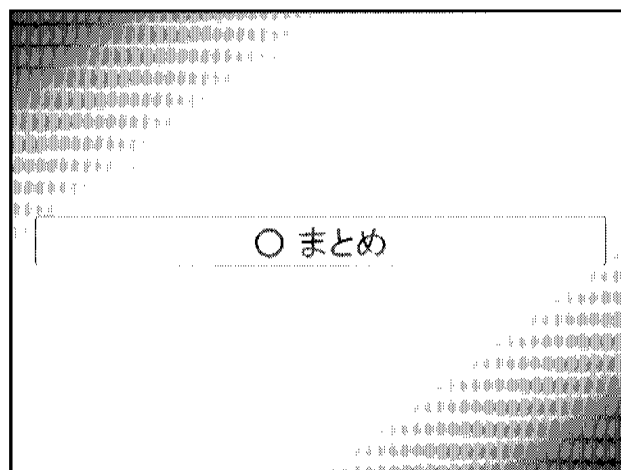
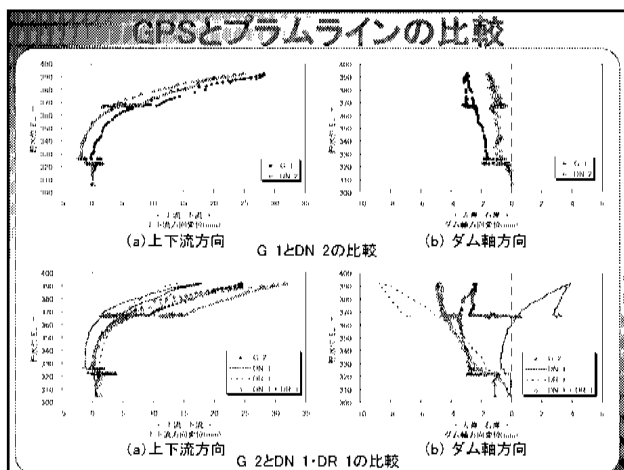
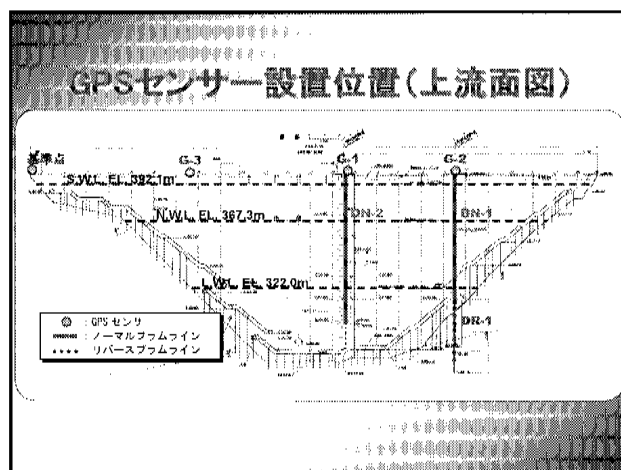
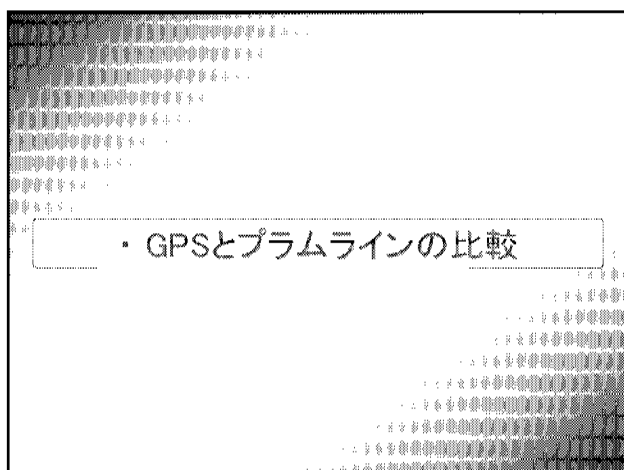
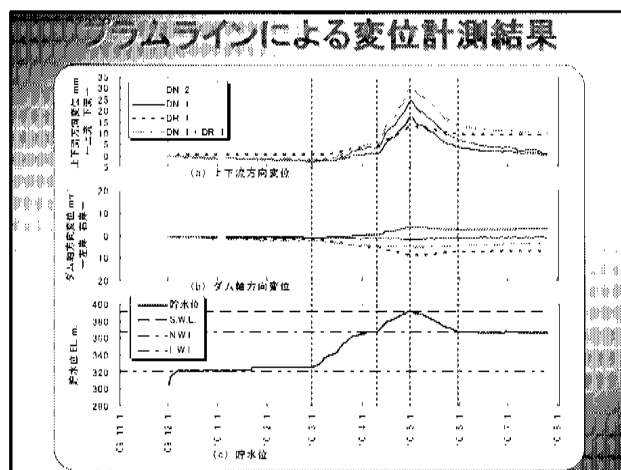
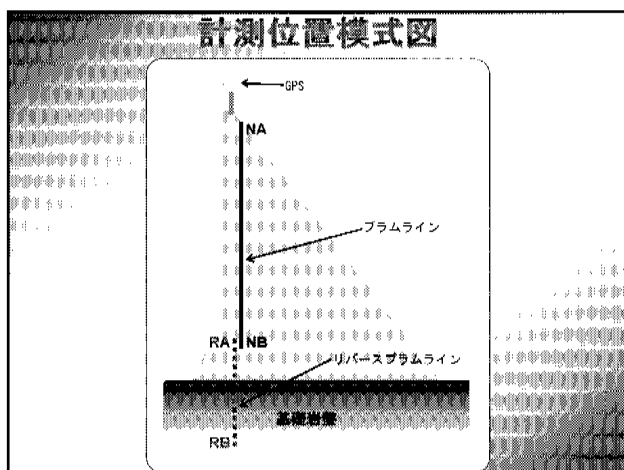


・ プラムラインによる挙動計測結果



GPSセンサー設置位置(上流面図)





まとめ

目的

GPS変位計測システムが重力式コンクリートダムの変位計測として有用であるか？

検証

堤高120m級のダム堤体にGPS変位計測システムを試験導入。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ブラムラインとの比較。

結果

GPSはブラムラインと同程度の計測結果を得ることができた。

今後の予定

ブラムラインでは計測できなかった挙動の要因分析を実施。

GPS によるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の取り組み

佐藤 信光¹ 富田 尚樹² 波多野 圭亮³ 曾田 英揮²

最近、フィルダムではダムの安全管理の高度化・合理化を目的に、GPS を用いた外部変形計測の自動化の取り組みが行われている。本論文では、初期湛水開始からのロックフィルダムの堤体変形ならびにアースダムにおける堤体変形、長期間にわたるフィルダムの堤体変形に対して、GPS 計測結果から外部変形計測への適用性を確認するとともに、貯水位や堤体形状の影響を受けた堤体変形挙動を明確にした。さらに、代表 GPS 計測による堤体の全体変形挙動の関係を検討し、今後のフィルダムの安全管理に対する高度化・合理化の取り組みの方向性を示した。

キーワード: フィルダム, 安全管理, 外部変形, GPS

1. はじめに

フィルダム堤体の外部変形計測はダムの安全管理上の重要な計測項目の一つで、河川管理施設等構造令¹⁾やダム構造物管理基準²⁾で規定されている。この外部変形計測は、従来から光波測量と水準測量を用いて行われているが、不動点や視距の確保上の課題に加え、計測や結果の整理に時間を要し、地震時などの非常時において直ちに測定する必要が生じて、迅速に対応できない課題がある。

このような背景から、最近ではフィルダムにおいて GPS を用いた堤体の外部変形計測の自動化の取り組みが行われている³⁾。筆者らは、GPS を用いてフィルダムの外部変形計測による堤体の安全管理の高度化ならびに合理化を進めることを目的に、阿木川ダムにおいて GPS による外部変形計測の現地実験を行い、堤高 100m クラスのロックフィルダムにおける適用性を確認した⁴⁾。この成果を受けて、堤高 161m の徳山ダムにおいて、国内で初めて試験湛水時から本格的な GPS 計測を実施した⁴⁾。また、アースダムにおける GPS 計測の適用性を確認するために、試験的に香川用水の調整池において試験湛水時から GPS 計測を実施した。

本論文は、3 ダムにおける GPS を用いた計測結果を整理し、GPS による堤体変形計測からロックフィルダムの初期湛水時および長期的な堤体変形挙動を、アースダムの初期湛水時の堤体変形挙動を分析し、フィルダムにおける GPS 計測の適用性を確認する。そして、

堤体変形挙動評価の高度化を目的に、高精度な連続計測値を用いて、貯水位や堤体形状等の影響を受けたフィルダム堤体の変形挙動を検討する。さらに、GPS 計測の合理化を目的に、堤体挙動を代表する複数の GPS 計測結果と光波測量による全体外部変形計測を比較し、重要測点による GPS 計測の合理化の可能性を検討する。本論文は、上記の GPS によるフィルダム堤体の外部変形計測を用いて、今後のフィルダムの安全管理に対する高度化・合理化の取り組みを示すものである。

2. 初期湛水時におけるロックフィルダムの GPS 計測

2.1 徳山ダムの概要

徳山ダムは、木曾川水系掛斐川に建設した堤高 161m の中央コア型ロックフィルダムである。ダムの標準断面を図-1 に示す。ダムは 2006 年 9 月に試験湛水を開始し、2008 年 5 月に完了して管理に移行した。

2.2 GPS 計測

徳山ダムでは、図-2 に示すように堤体挙動を代表する複数の標的に GPS を設置した。また、徳山ダムは豪雪地帯に位置するため、一般に使用される支柱式の GPS では積雪の影響によって支柱の変形や GPS 本体の破損の可能性がある。このため、図-3 に示すように標的コンクリートに箱抜きを設け、GPS アンテナを埋設し、上部は電波を透過する FRP 製カバーを被せ、除雪を容易にできる「標的埋設型 GPS」を設置した⁵⁾。

¹ 独立行政法人水資源機構 総合技術センター、マネージャー

² 独立行政法人水資源機構 総合技術センター、チーフ

³ 独立行政法人水資源機構 総合技術センター、スタッフ

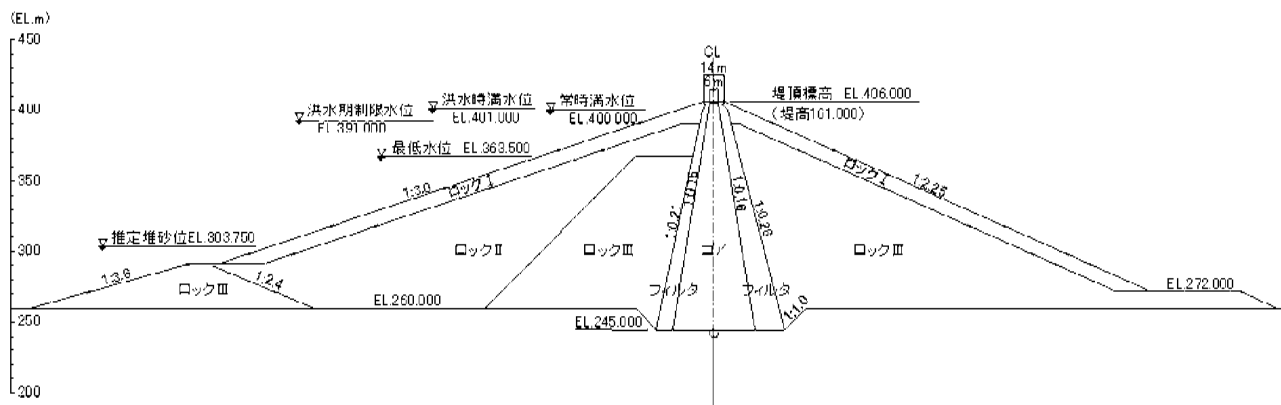


図-1 徳山ダム 標準断面図

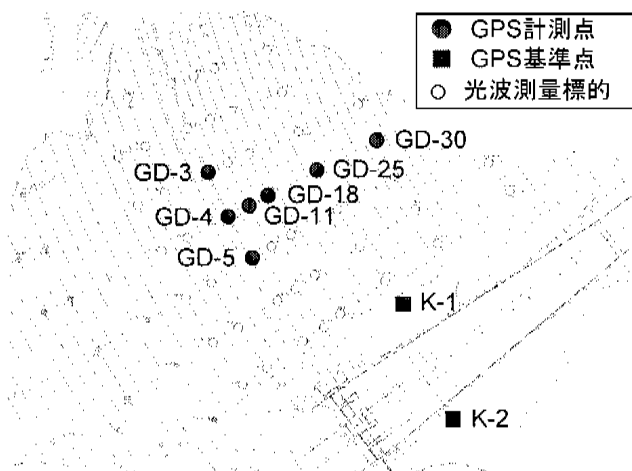


図-2 徳山ダム GPS および標的の配置

また、GPS 計測では、基準点と計測点の高低差が大きい場合には、鉛直方向の GPS 計測値に微小な季節変動現象（以下「ゆらぎ」という）が確認されている⁶⁾。徳山ダムでは、基準点と計測点の標高差が最大約 80m あり、ゆらぎの補正を検討した。ゆらぎは、地表付近の大気による電波の大気遅延が季節的に変動することに起因するとされ、大気中の水蒸気量すなわち水蒸気圧の相関が高いとされている。このゆらぎは、計測点付近の気象データ（気温、気圧、相対湿度）があれば補正可能であることが示されている⁶⁾。しかし、ダムが設置される山間地では局地的な気象現象が起こりうることから、GPS 計測に取り組むことは必ずしも容易ではない。徳山ダムでは、標高の異なる 2 つの基準点の GPS の計測値を用いて直接各 GPS 計測値のゆらぎを補正する方法を考案し、GPS 計測の補正に用いた^{4, 7)}。

徳山ダムにおける GPS 計測は、試験湛水開始の 2006 年 9 月から開始した。なお、本論文における現時点と

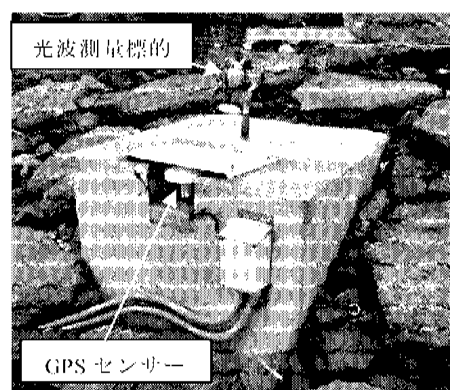


図-3 徳山ダム標的埋設型 GPS

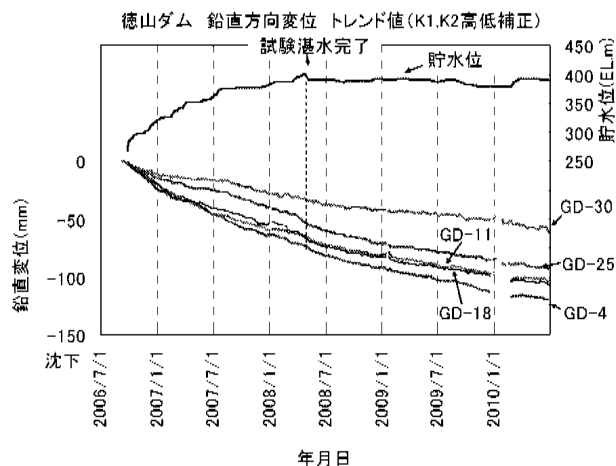


図-4 徳山ダム GPS 計測鉛直変位の経時変化

は 2010 年 6 月末時点である。

2.3 GPS 計測結果

(1) 変位計測の経時変化

徳山ダムにおける GPS 計測による鉛直変位の経時変化を図-4 に示す。最大沈下量は、天端部の GD-4 で約 120mm 程度になっている。堤体沈下の経時変化は、貯水位の上昇の影響は殆ど受けず、沈下が増加している。

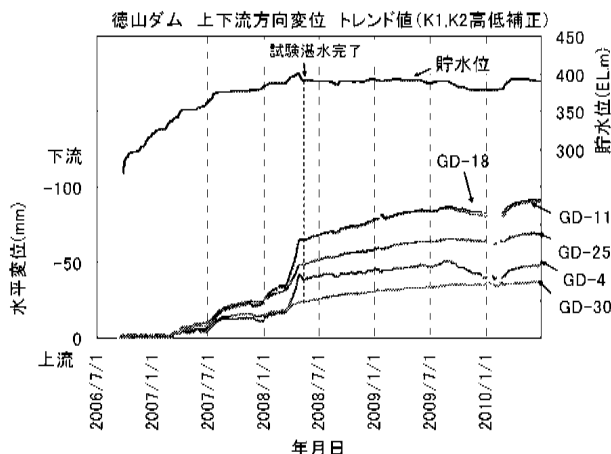


図-5 徳山ダム GPS 計測水平変位の経時変化

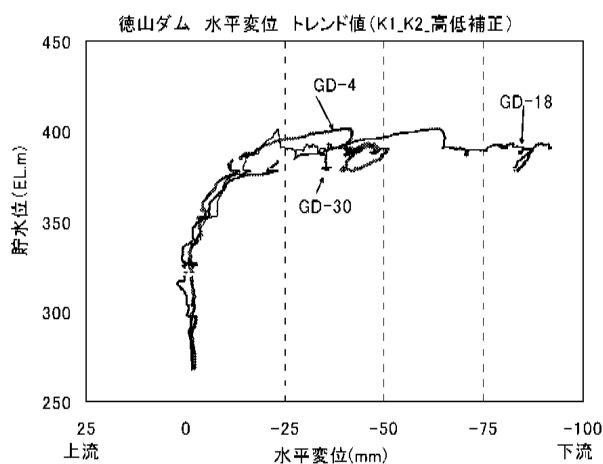


図-6 徳山ダム GPS 計測水平変位・貯水位の相関

なお、2010 年 1～2 月は積雪の影響により欠測している。

GPS 計測による上下流方向の水平変位の経時変化を図-5 に示す。天端部の GD-4 よりも下部の GD-11 および GD-18 の方が最大変位量約 90mm 程度と大きくなっている。また、2008 年 4 月の最高水位付近で急に下流方向への水平変位が大きくなっている。試験湛水完了後の 2009 年 9 月から貯水位が低下すると、堤体の水平変位が上流側に戻り、貯水位の上昇とともに下流側に変位する貯水位の影響がみられる。

(2) 貯水位と水平変位の相関

上下流方向の水平変位と貯水位の相関を図-6 に示す。貯水位が EL.350m を超えると、下流側への水平変位が増加し始め、天端の GD-4 と中標高の GD-18 は EL.390m を超えると急に下流側へ変位している。試験湛水完了後の貯水位低下では、天端の GD-4 は貯水位

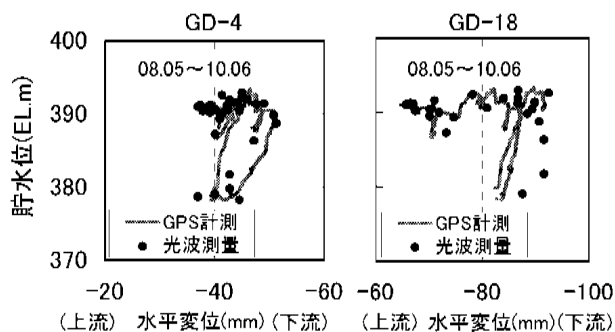


図-7 徳山ダム GPS 計測と光波測量の比較

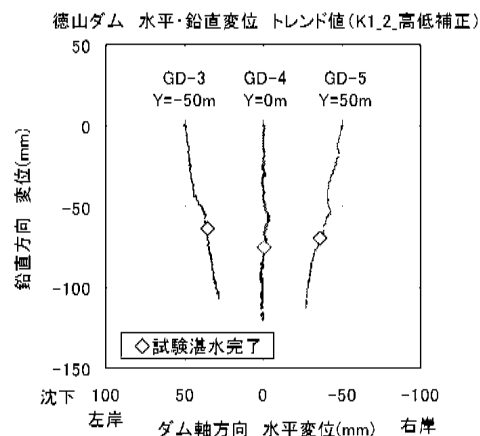


図-9 徳山ダム GPS 計測水平・鉛直変位の縦断面

の低下と上昇の経路が異なるループを明瞭に描いている。中標高の GD-18 でも少しループを描き、最下部の GD-30 では直線状で貯水位の影響は見られない。図-7 に光波測量と GPS 計測の比較を示す。光波測量の頻度は 1 ヶ月に 1 回を標準としている。従来の光波測量ではこのようなループを明瞭に把握することは困難であったが、GPS 計測による高精度な連続計測によって明瞭なループを把握することができた。

(3) 水平・鉛直連続変位

中央断面における各 GPS 計測点の水平・鉛直連続変位を図-8 に示す。湛水初期は、各標高とも水平変位を顕著に示さず、鉛直方向が卓越している。試験湛水の後半になると GD-4, 11, 18, 25 において貯水の影響により急に下流側へ変位している。下位標高の GD-30 ではそれほど顕著でない。試験湛水後の定常期においては、水平・鉛直変位は直線的に変形が進行している。この期間は貯水の水平荷重が一定状態で作用しているので、堤体は沈下とともに下流方向へ変位するせん断

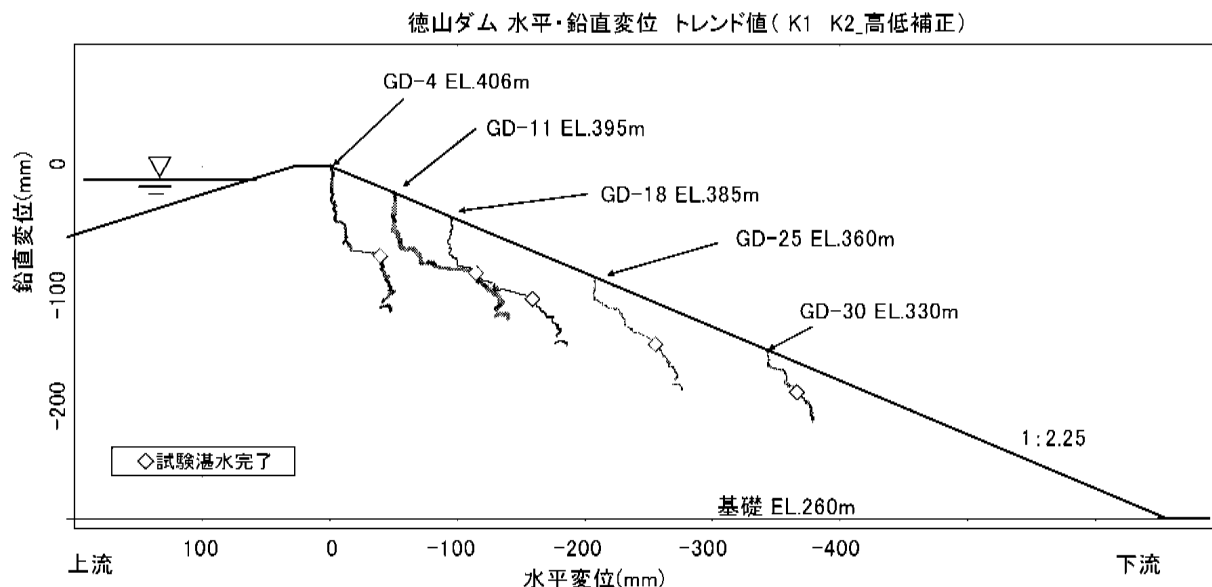


図-8 徳山ダム GPS 計測水平・鉛直変位の横断面

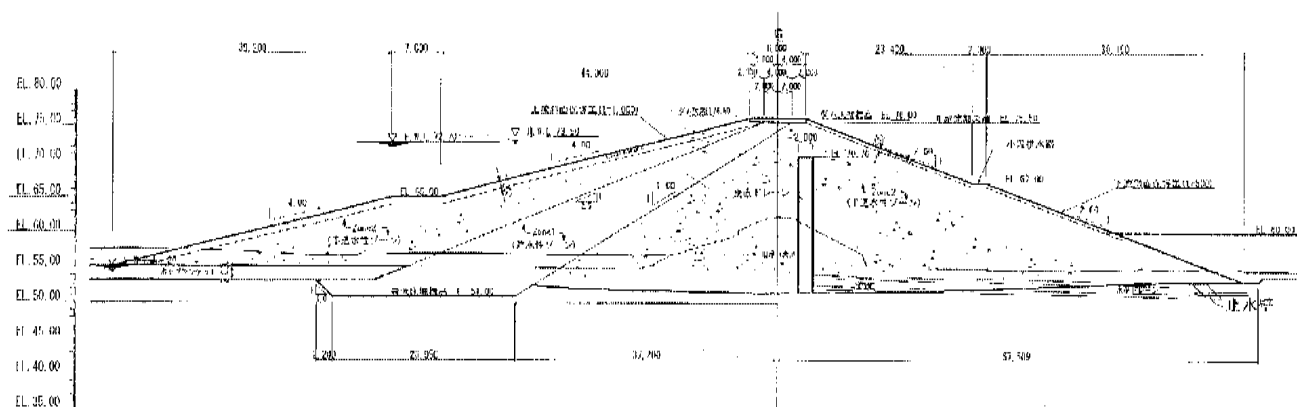


図-10 香川用水調整池 標準断面図

変形挙動を示している。なお、天端部は貯水池側の浸水沈下の影響を受けて、下流側への水平変位が小さくなっているものと考えられる。

図-9 に天端部の 3 測点による縦断方向の連続水平・鉛直変位を示す。ダムサイトの谷形状の影響を受けて、沈下の初期から谷の中央方向に遷移する挙動を示している。堤体のダム軸方向の圧縮状態が徐々に増加していること現している。

(4) まとめ

GPS 計測による高精度な連続データによって、初期湛水時の約 70mm 程度の大変形から試験湛水完了後の定常期の数 mm の小変形まで、貯水位や堤体形状、地山形状の影響を受けた堤体の連続変形挙動を把握することができた。また、5 節で示すように GPS 計測と光波測量の結果を比較すると、GPS 計測値の精度は光波

測量値と同等か、それ以上あることがわかった。よって、GPS 計測はフィルダムの外部変形計測に十分適用性があることを再確認した。さらに、初期湛水時の高精度な連続データは、初期湛水時のダムの安全性を評価する FEM 解析において、重要な実測データとなるものである。

3. アースダムにおける GPS 計測

3.1 香川用水調整池の概要

香川用水調整池は、吉野川から香川県へ送水する香川用水に建設した堤高 25m の傾斜遮水ゾーン型アースフィルダムである。ダムの標準断面を図-10 に示す。ダムは 2008 年 10 月に試験湛水を開始し、2009 年 3 月に完了して管理に移行した。

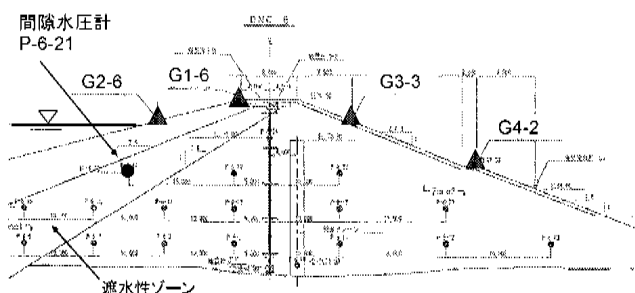


図-11 香川用水調整池 GPS 計測点の配置

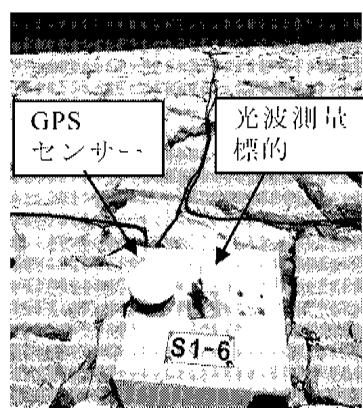


図-12 香川用水調整池 GPS 計測装置

3.2 GPS 計測

アースダムにおける GPS 計測の適用性を確認するために、GPS 計測開発者⁸⁾の協力を得て、香川用水調整池において試験湛水開始から試験的に GPS 計測を行った。調整池では、図-11 に示すように代表断面に GPS を設置した。特に、湛水に伴う堤体上流側の挙動を詳細に把握するために、堤体の上流法面にも GPS を配置した。なお、この地域では積雪の影響はないので、図-12 に示すように標的の上に GPS センサーを設置している。

調整池における GPS 計測は、試験湛水開始の 2008 年 10 月から実施している。なお、本論文における現時点は 2010 年 6 月末時点である。

3.3 GPS 計測結果

(1) 変位計測の経時変化

調整池における GPS 計測による鉛直変位の経時変化を図-13 に示す。顕著な沈下は天端部の G1-6 と上流側の G2-6 で発生し、G2-6 が最も大きくなり、現時点で最大沈下量 15mm 程度である。沈下の経時変化はあまり貯水位の変化の影響を受けず、2009 年 10 月頃まで沈

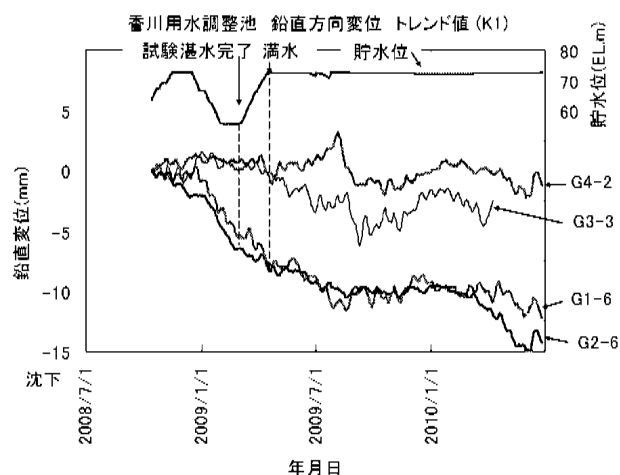


図-13 香川調整池 GPS 計測鉛直変位の経時変化

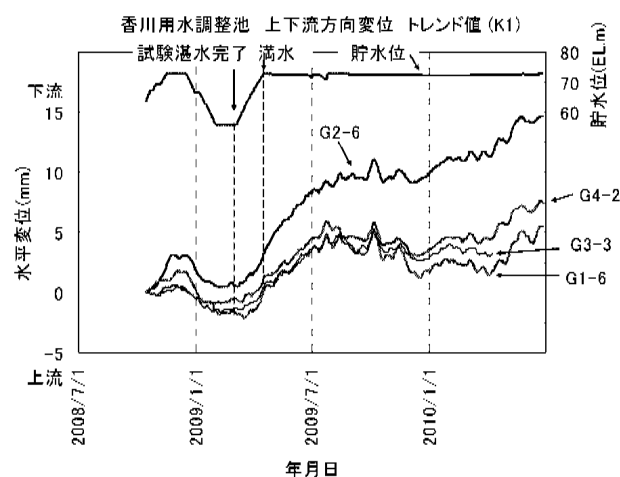


図-14 香川調整池 GPS 計測水平変位の経時変化

下が増加し、その後安定した。そして、2010 年 4 月頃からまた少し沈下が進行している。なお、G4-2 では、2009 年 7～8 月頃に隆起現象を計測している。その原因は不明であるが、隆起量も 3mm 程度で計測精度の限界に近い値である。G3-3 においても 2010 年 4 月以降に異常値を計測し、図から除外している。

上下流方向の水平変位の経時変化を図-14 に示す。天端部の G1-6 よりも上流側の G2-6 の方が下流方向への水平変位量が大きく、現時点で最大変位量 15mm 程度である。試験湛水中は、水平変位は貯水位の影響を受けて上下流に変位しているが、試験湛水完了後の満水後も下流側への変位が継続し、2009 年 10 月頃に一旦安定した。その後、2010 年 4 月頃からまた下流側へ増加している。

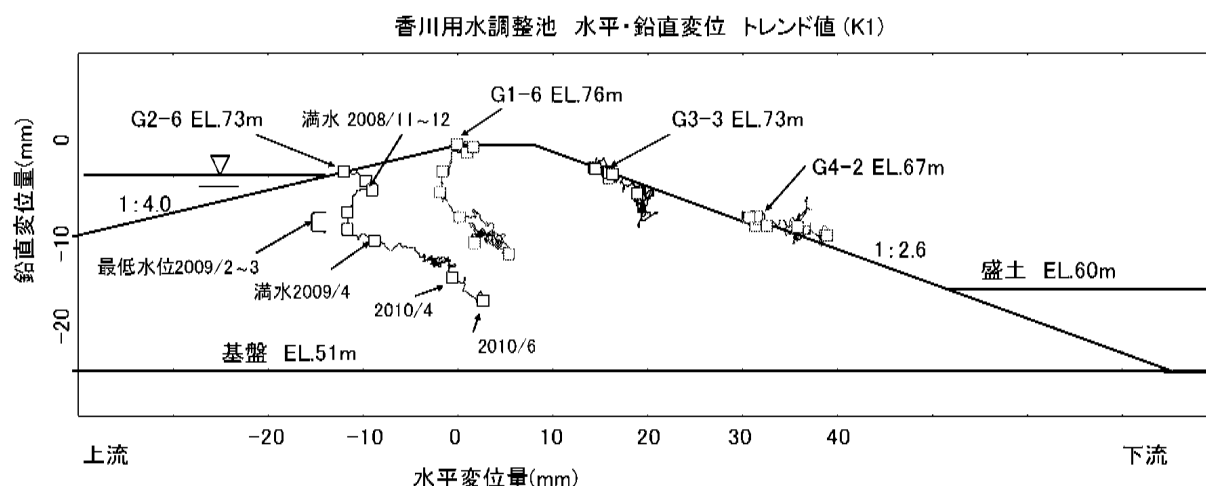


図-17 香川調整池 GPS 計測水平・鉛直変位の横断面

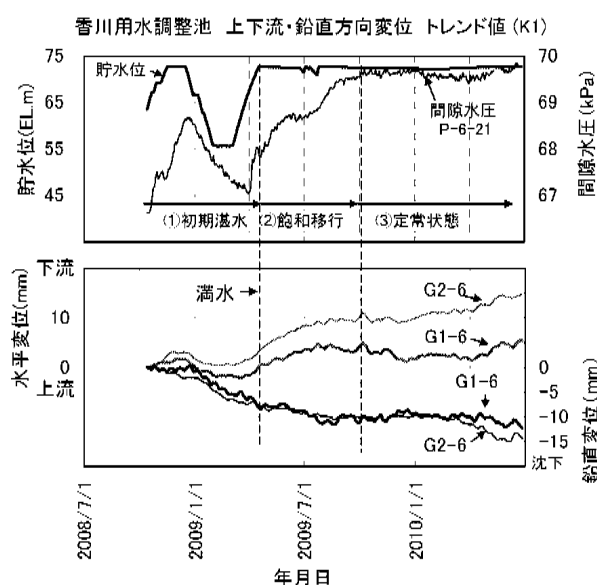


図-15 香川調整池 GPS 計測変位と間隙水圧の関係

(2) 間隙水圧と変位の相関

図-15 に貯水位と堤体内の間隙水圧 (P-6-21), GPS 計測 (G1-6, G2-6) による沈下と水平変位の経時変化の比較を示す。間隙水圧計 (P-6-21) は遮水性ゾーンに埋設されたもので、上流側 GPS (G2-6) に最も近い位置にある。試験湛水時において満水期間が短く、間隙水圧は上昇しきらず、試験湛水完了後の満水以後も間隙水圧は上昇し、2009 年 10 月頃に安定している。GPS 計測による沈下と水平変位はこの堤体内の間隙水圧の上昇、すなわち堤体の飽和状態への遷移過程を相似している。

2009 年 10 月以降の定常状態における貯水位と堤体内の間隙水圧、GPS 計測による水平変位と鉛直変位の

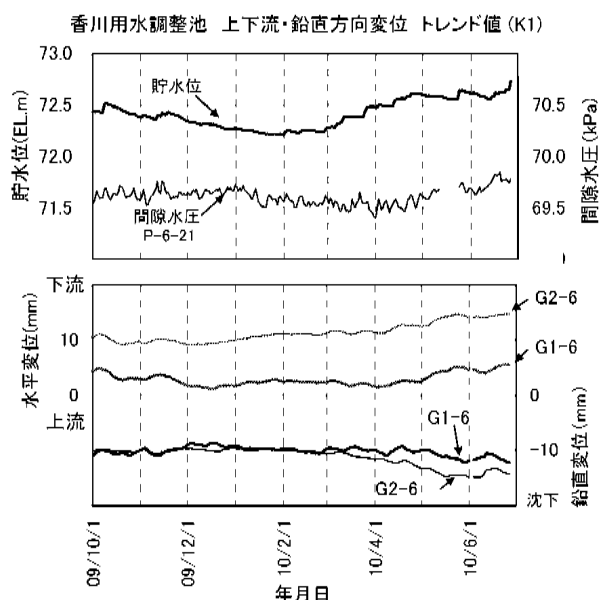


図-16 香川調整池 定常期の経時変化

関係を図-16 に示す。貯水位の変化に少し遅れて堤体内の間隙水圧が追従変化し、GPS 計測の水平変位と鉛直変位はこの変化に反応して少し増加傾向を示している。

(3) 水平・鉛直連続変位

代表断面における各 GPS 計測点の水平・鉛直連続変位を図-17 に示す。堤体上流部の G2-6 と天端部の G1-6 における連続変位は、貯水位の上昇とともに一旦下流側へ変位し、水位低下に伴い上流側に戻っている。試験湛水完了後の満水以降は、下流方向に直線的に沈下変位を示している。堤体下流側の G3-3 と G4-2 はあまり貯水位の影響を受けず、堤体斜面方向に沈下変位している。なお、G3-3 および G4-2 で鉛直方向の変形が

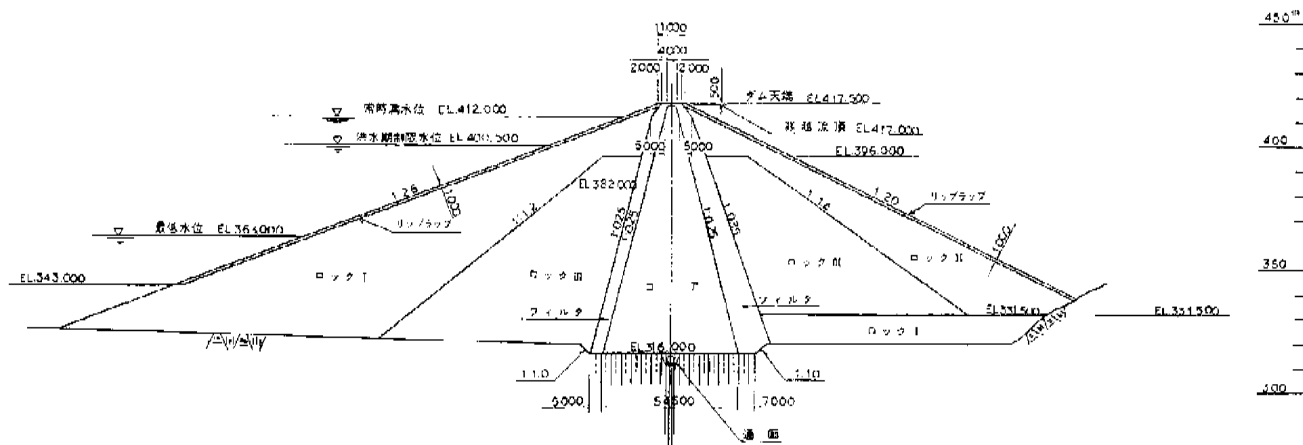


図-18 阿木川ダム 標準断面図

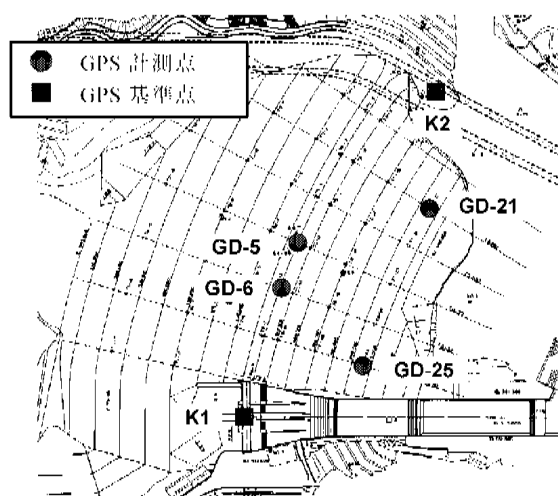


図-19 阿木川ダム GPS 計測点の配置



図-20 阿木川ダム GPS 計測装置

生じているのは、一時的鉛直変位が乱れた影響によるものである。貯水圧による水平荷重、堤体の飽和遷移と二次圧密による沈下によって、下流方向に直線的に沈下しているものと考えられる。

(4) まとめ

アースダムは堤高が 20m 程度と低く堤体の変形量が小さいため、従来の光波測量では初期湛水時における堤体の変形挙動を明瞭に把握することは困難であった。今回 GPS を用いた高精度で連続な計測データにより、アースダムにおいて初期湛水時の変形挙動を把握することができ、変形量が小さいアースダム堤体の外部変形計測に対して、GPS 計測は適用可能と考えられる。さらに、堤体の上流側の変形挙動を、貯水位や堤体内の間隙水圧を比較して把握できたことは、大変貴重なデータとなるものである。現在も堤体の沈下や水平変

位は増加傾向を示しているが、変位量が最大で 15mm 程度と小さく、ダムの安全性に問題がないものである。なお、GPS 計測値の最大変位量が 15mm で、その間の変化量も GPS の計測限界 (1~2mm) に近い値があり、設置箇所やその他の環境要因による計測誤差の影響も大きくなるため、計測環境の変化にも注意する必要がある。

4. 長期間にわたるフィルダムの GPS 計測

4.1 阿木川ダムの概要

阿木川ダムは、木曾川水系阿木川に建設した堤高 101.5m の中央コア型ロックフィルダムである。ダムの標準断面を図-18 に示す。ダムは 1989 年 10 月に試験湛水を開始し、1991 年 5 月に完了して管理に移行した。

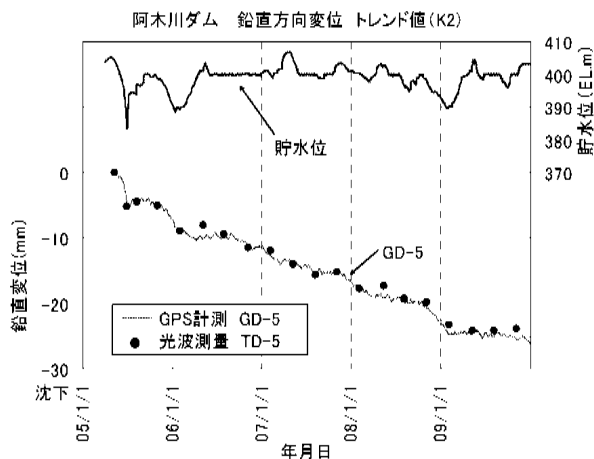


図-21 阿木川ダム 鉛直変位の経時変化

4.2 GPS 計測

阿木川ダムでは、100m クラスのダムに GPS を試験的に設置してその適用性を確認することから、図-19 に示すように基本的な計測データの取得を目的に天端部と低標高に GPS を設置した。GPS 計測は 2004 年から開始し、当初、GPS 基準点 (K1) を右岸の洪水吐の上屋にしたが、コンクリートの温度応力による撓みを GPS 基準点で計測したために、2005 年 4 月から右岸側の K2 基準点に移設して計測した。GPS センサーは積雪の影響が小さいことから、図-20 に示すように支柱方式としている。

また、阿木川ダムの現地実験では、GPS 計測点を人為的に 50mm 程度スライド移動させ、真の移動量と GPS による計測値を比較して、1~2mm 程度の精度を確認した⁹⁾。さらに、地震等による堤体の突発的な変形に対して、GPS 計測が突発変位後、どの程度の時間で信頼できる計測値を算出できるかを把握するために、GPS 計測点を急速変位させる現地実験を行った。その結果、突発変位発生後 2~3 時間で変位発生の有無を、24 時間以内に信頼できる計測値を算出できることを確認した¹⁰⁾。

阿木川ダムでは、GPS 計測を開始する時点で、湛水後約 15 年を経過し、管理区分の第 3 期となる安定期である。本論文では、特に GPS 計測を開始して 5 年を経過することから、ロックフィルダムの安定期における長期間にわたる GPS 計測の適用性について検討した。

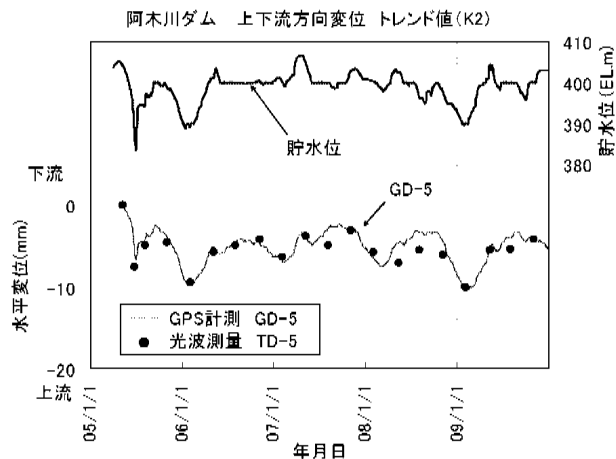


図-22 阿木川ダム 水平変位の経時変化

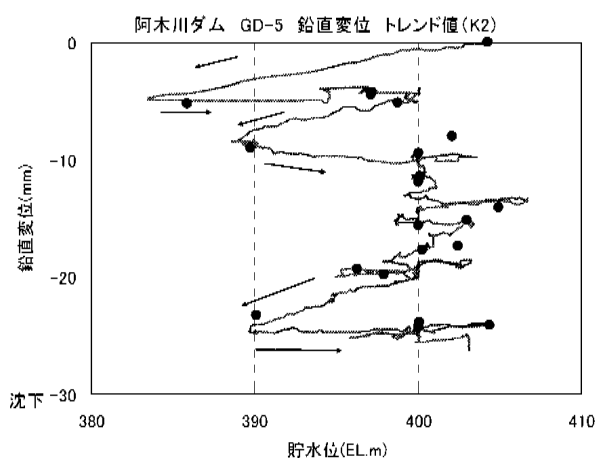


図-23 阿木川ダム 水平変位と貯水位の関係

4.3 GPS 計測結果

(1) 変位計測の経時変化

GPS 計測の長期間にわたる適用性を検討するために、阿木川ダムの最大断面天端部の代表点において、GPS 計測 (GD-5) と光波測量 (TD-5) を比較した。なお、光波測量の頻度は、3 ヶ月に 1 回を標準としている。

図-21 に鉛直変位の経時変化の比較を示す。0 基準は 2005 年 4 月としている。阿木川ダムは湛水後 20 年が経過しているが、最近の 5 年間で 25mm 程度沈下が進行している。また、貯水位の変化、特に水位低下時に沈下が進行する傾向を示している。5 年間に渡る GPS 計測では概ね光波測量と同等の計測結果を示している。

図-22 に水平変位の経時変化の比較を示す。阿木川ダムでは、天端部は堤体上流ロック部の沈下の影響を受けて水位低下時に上流側に変位し、この 5 年間の計測でも同様である。また、GPS 計測と光波測量とも同様

な計測結果を示している。

(2) 貯水位と鉛直変位の相関

図-23 に鉛直変位と貯水位の関係を示す。貯水位の低下時に堤体の沈下が進行し、貯水位の上昇時は沈下が進行していない。阿木川ダムでは満水の初期から上流ロック部は貯水位の低下に伴う浮力の低下によって沈下が進行し、この影響によって天端部も沈下しつつ上流側へ変位する挙動を示している。光波測量では、3ヶ月に1回の計測になるためにこの明確なトレンドがみえなかったが、GPS による高精度な連続計測によって貯水位の低下と堤体の沈下の関係を明確に把握することが可能となった。

(3) まとめ

5 年間にわたる長期間の GPS 計測結果と光波測量の結果を比較し、フィルダムにおいて GPS 計測が光波測量と同程度の精度を有し、長期間のフィルダムの外部変形計測に対して GPS 計測は適用可能と考えられる。また、連続変形計測によって貯水位変化の影響を明瞭に示すことができたことは、今後のフィルダムの長期的な堤体の安全性の評価に重要な基礎データとなるものである。なお、低標高の GD-21, 25 の計測値には基準点との高低差によるゆらぎ現象が発生しており¹⁰⁾、今後、ゆらぎの補正を実施していく必要がある。

5. 重要測点によるフィルダムの GPS 計測

5.1 代表 GPS による計測

GPS 計測では、リアルタイムで精度の高い堤体の外部変形データが得られる特徴を有している。しかし、全標的において GPS 計測を行った場合に、計測は高度化にはなるものの、コストアップになるために、従来の光波測量に対して合理的な方法とは言えない。

徳山ダムでは堤体挙動を代表する複数の標的に GPS を配置し、計測の高度化を図りつつ、コスト削減できる方策を検討した⁴⁾。この検討に当たっては、①計測点の代表性に基づき GPS 計測を配置し、目視や GPS 計測において異常が発見されれば光波測量による確認を行うこと、②計測の正確性を確保するために光波測量と GPS 計測を一定期間併用しその正確性を確認するとともに定期的に正確性のチェックを行うことの2点が重要と考える。代表性のある複数の GPS による計測に

よって、リアルタイムで精度の高い堤体の外部変形挙動を把握するとともに、異常があった場合に光波測量で全体の挙動を確認することで信頼性のある堤体計測が可能となる。将来的に、光波測量による全体測量の頻度を低減することで、外部変形計測の合理化が図れるものである。

本論文では、徳山ダムにおける代表 GPS 計測と光波測量による全体堤体変形計測の結果を比較することとした。図-2 に徳山ダムの代表 GPS 計測点と光波測量標的の配置を示す。GPS 計測点は地形条件や既設ロックフィルダムの実測挙動等も考慮して、最も挙動が現れやすい天端と主測線の下流ロックに計7点配置した。

5.2 代表 GPS 計測と全体堤体挙動との関係

(1) 変位計測の経時変化の比較

代表 GPS 計測点のうち、変形量が大きい天端部の GD-4 と上部標高の GD-11 における GPS 計測と光波測量の経時変化の比較を図-24 に示す。2 計測点において、水平変位および鉛直変位とも GPS 計測と光波測量は同程度の経時変化を示している。なお、GPS 計測値に比較して光波測量値にばらつきが多いのは、光波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などによる計測誤差が発生していたものと考えられる。以上のことから、GPS 計測の精度は光波測量と同等か、それ以上あるものと考えられる。

(2) 代表 GPS 計測と全体変形計測との比較

光波測量による堤体全体の沈下測量結果と代表 GPS 計測による鉛直変位結果の比較を図-25 に示す。各標高の光波測量による最大沈下量は最大断面で表れ、GPS 計測でもその沈下量は概ね把握されている。なお、貯水池側の標的 (TU-4) が浸水沈下の影響によって最大沈下量を示しているが、GPS 装置は貯水位上昇で水没すると使用不能となるために上流側には配置していない。

図-26 に光波測量による水平変位の全体測量結果と代表 GPS 計測結果による水平変位の比較を示す。光波測量の最大水平変位量を GPS 計測で概ねカバーしている。なお、TD-10 は光波測量の標的ターゲットが積雪によりずれた可能性があり、参考値としている。

(3) 代表 GPS 計測による全体堤体変形挙動の把握

上記の光波測量で最大値が発生している標的におけ

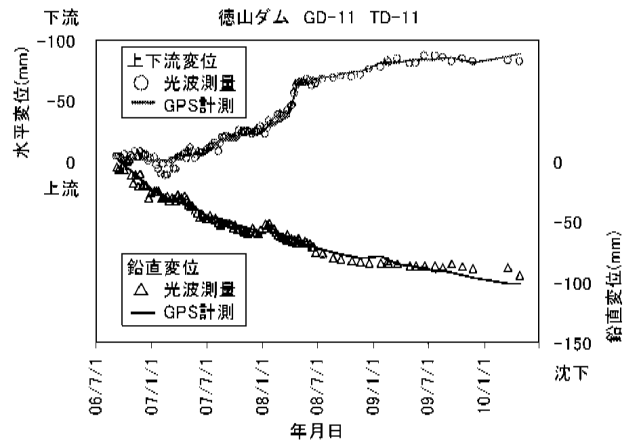
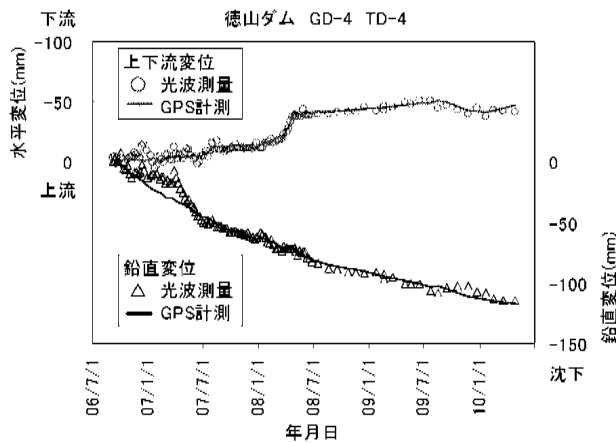


図-24 徳山ダム GPS 計測と光波測量の経時変化の比較

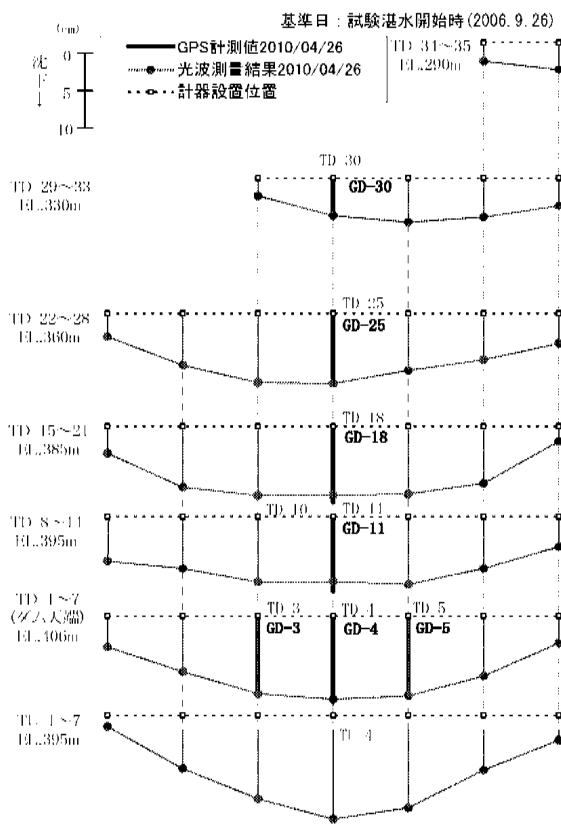


図-25 徳山ダム代表 GPS 計測と全体挙動の鉛直変位の比較

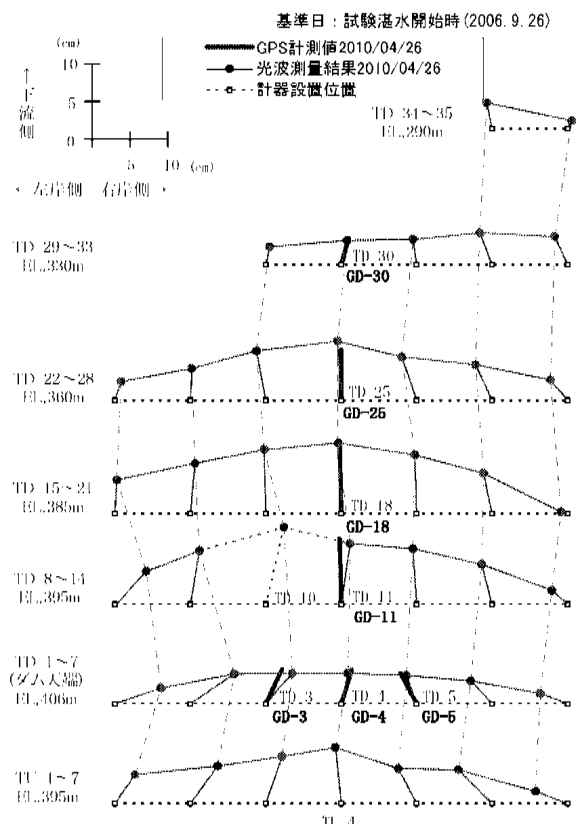


図-26 徳山ダム代表 GPS 計測と全体挙動の水平変位の比較

る光波測量値の経時変化と GPS 計測値の傾向は、図-24 に示すようにほぼ同じ変化を示している。また、試験湛水時ならびにその後の湛水時の堤体の全体の変形挙動は、図-25、26 に示すようにバランスのとれた安定した変形を示している。よって、①堤体変形挙動の最大値を概ね GPS 計測でカバーしていること、②その経時変化も GPS 計測が光波測量に対して同等以上の精度を

有していること、③堤体全体の変形挙動は試験湛水から現在まで安定した増加傾向を示していることから、代表した複数の GPS 計測によって徳山ダムの堤体変形挙動を概ね把握することは可能であると考えられる。なお、TD-10 の挙動ならびに上流側の標的の取り扱いについては今後再確認をしていく必要がある。

また、フィルダムの外部変形計測の重要測点の選定

方法については、小堀ら¹²⁾は標的の計測結果による評価だけでなく、設計・施工資料（縦断方向の地形急変する箇所、基盤の変形性が極端に大きい箇所）ならびに耐震性能照査の結果（すべりが発生すると評価される箇所）によって計測が中止できないと考えられる測点候補についても評価して、重要測点を選定する必要性を示している。

徳山ダムはまだ管理区分二期に移行して2年が経過した段階であり、今後の堤体計測値の推移に基づきGPS計測を継続すべき重要測点を取りまとめていく予定である。

6. GPSによるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の取り組み

3ダムのGPSの計測結果から、GPS計測の精度は光波測量の精度と同等かそれ以上あることを確認できた。GPSによる高精度な連続変位計測によって、試験湛水時において毎日の巡視点検と同レベル堤体変形の監視強化を図ることができるとともに、管理2期において3期移行への堤体挙動評価に対して信頼性が高い安定性検討が可能になるものである。さらに、管理3期において、従来の3ヶ月1回の計測頻度に対して重要測点によるGPS連続計測によって特異な堤体挙動を速やかに把握することができる。GPS計測によって、フィルダム堤体の安全管理の高度化が可能となるものである。

さらに、GPS計測をリアルタイムで行うことにより、地震時等の突発変位に対して短時間で変位量を算定することが可能となり、地震直後のダム臨時点検における速報にも活用できるものである⁹⁾。徳山ダムでは、2009年2月18日に発生したマグニチュード5.2の地震において、天端部の地震計で最大加速度 78cm/s^2 を観測したが、GPS計測を用いて地震による堤体の残留変位が発生していないことを速やかに確認することができた。

このように、GPSをフィルダムの外部変形計測に用いることで、計測精度の向上ならびに地震時等の危機管理に対応することができ、堤体の安全管理の高度化が図れるものである。

また、徳山ダムでは、既設ロックフィルダムの堤体変形挙動を考慮して徳山ダムの堤体挙動を代表すると

推定される測点を複数選定してGPSを設置し、この代表GPS点を計測した結果、堤体変形挙動を概ね把握することは可能であることを確認した。このことは、代表点による連続で精度の高いGPS計測と、計測頻度を低減した光波計測による全標的測量を実施することで、コストと信頼性を備えた合理的なフィルダムの堤体計測である可能性を示している。

7. おわりに

本論文では、3ダムにおけるGPSを用いた計測結果を整理し、GPSによる堤体変形計測からロックフィルダムの初期湛水時および長期的な堤体変形挙動を、アースダムの初期湛水時の堤体変形挙動を分析した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 徳山ダムにおける初期湛水開始からのGPS計測結果を分析し、初期湛水時の堤体の変形挙動を把握し、ロックフィルダムにおいてGPS計測が適用可能であることを再確認した。さらに、GPS計測による高精度な連続データによって、初期湛水時の約70mm程度の大変形から試験湛水完了後の定常期の数mmの小変形まで、貯水位や堤体形状、地山形状の影響を受けた堤体の連続変形挙動を従来の光波測量と比べて大幅に短い期間で把握することができた。

(2) アースダムは堤高が20m程度と低く堤体の変形量が小さいため、従来の光波測量では初期湛水時における堤体の変形挙動を明瞭に把握することは困難であった。香川用水調整池のアースダムにおいて初期湛水開始からのGPS計測結果を分析し、アースダムにおいてもGPS計測により湛水時の挙動を捉えることが可能であることを確認した。なお、堤体挙動の最大値が小さいために、相対的に設置箇所やその他の環境要因による計測誤差の影響が大きくなるため、計測環境の変化等に注意する必要がある。

(3) 長期間にわたるフィルダムのGPS計測の適用性として、阿木川ダムにおいて5年間にわたるGPS計測結果を分析し、フィルダムにおいてGPS計測が光波測量と同程度の精度を有し、GPS計測が長期間のフィルダム計測に適用可能であることを確認した。また、連続変形計測によって貯水位変化による小さな堤体変形挙動を明瞭に捉えることができた。

(4) 徳山ダムにおける代表 GPS の計測と光波測量による全体堤体変形挙動を比較分析し、複数の代表した GPS による堤体計測によって、堤体の変形挙動を概ね把握することが可能であることを示した。なお、GPS 計測の代表測点のとりまとめに当たっては、これまでの計測結果と小堀らの評価項目（既往の設計・施工資料、耐震性能照査結果など）などを考慮してとりまとめていく必要がある。

(5) GPS 計測をフィルダムの外部変形計測に適用することによって、計測精度の向上によるダムの安全管理の向上や地震への危機管理対応など、堤体の安全管理の高度化が図れるとともに、光波計測の頻度を低減することによって、合理的な堤体計測の可能性を示した。

今後、本論文の成果を踏まえ、GPS 計測を用いてフィルダム堤体の安全管理の高度化・合理化の検討を進めていきたいと考えている。

本検討にあたり、技術的な指導をいただいた山口大学清水教授、技術協力をいただいた GPS 計測関係者ならびに GPS 計器の設置や管理に支援していただいた現場管理所の職員の方々に末尾ながら謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター編：改訂 解説・河川管理施設等構造令，山海堂，pp.95-97，1993.5.
- 2) 日本大ダム会議：ダム構造物管理基準，1986.5.3)
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，

2005.6.

- 4) 曾田英揮，佐藤信光，白閑茂治，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 No.281，pp.4-16，2010.3.
- 5) 岩崎智治，佐藤渉，曾田英揮，山田一宏，山本史朗：豪雪地のフィルダムでの標的埋設型 GPS を用いた外部変形計測の実用性検証，平成 20 年度土木学会全国大会 第 63 回年次学術講演会講演集，VI-046，2008.9.
- 6) 増成友宏，清水則一：GPS による地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討，土木学会論文集 F Vol.63 No.4,437-447，2007.10.
- 7) 岩崎智治，佐藤渉，曾田英揮，田中幹大，清水則一：GPS を用いたフィルダム外部変形計測における高低差の影響と補正方法について，土木学会第 64 回年次学術講演会講演集，VI 139，2009.9.
- 8) 岩崎智治，武智国加，武石朗，清水則一：道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発，土と基礎，Vol.50，No.6，Ser.No.533，pp.25-27，2002.6.
- 9) 曾田英揮，牧野隆，佐藤信光，田口孝男：GPS を用いたフィルダム堤体変形の測定と地震時速報，水の技術，第 16 号，pp.39-50,2008.1.
- 10) 佐藤 渉，岩崎智治，飯島功一郎，安養寺学，大家充裕，曾田英揮：ダムの外部変形評価方法，特開 2008-076117.
- 11) 大家充裕，米崎文雄，曾田英揮：GPS を用いたフィルダム堤体変形測定と突発的に発生した変位の評価システム：大ダム No.203，pp.74-77，2008.4.
- 12) 山口嘉一，小堀俊秀，池澤市郎，岩瀬秀一，矢ノ口健一：フィルダムの安全管理のための外部変形重要計測点の選定，土木学会 平成 19 年度 東北支部技術研究発表会，IV-50，2008.3.

ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証

林田 洋一¹ 遠目塚 良一² 浅野 勇³ 増川 晋⁴ 田頭 秀和⁵

フィルダムにおける施工性の向上、計測の安定性の向上を目的に、低周波電磁波を用いたワイヤレス間隙水圧計の開発を行い、2基のロックフィルダムにおいて、その適用性を検証してきた。これら試験的に設置されたテストモデルは、設置後5年半程度経過時にデータ回収不可能な状況に至った。その原因を、電池容量試験および実ダムでの電池電圧データから解明し、ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能について検証を行なう。

キーワード: フィルダム, 間隙水圧, ワイヤレス間隙水圧計, 長期性能

1. はじめに

フィルダムなどの盛土構造物には、施工時、運用時の構造物の安全性を確認するため、間隙水圧計や土圧計などの埋設計器が設置されている。これらの多くは対象とする物理量を電気信号に変換する電気式計器であり、電源の供給および計測データの伝送のための導電ケーブルが必要であった。このため、(1) ケーブル敷設用トレンチの掘削、ケーブル敷設、埋め戻し工程に伴う盛立て作業効率の低下、(2) ケーブルの断線、絶縁低下や誘導雷による埋設計器の故障に伴う計測の不安定化、等の問題点が指摘されてきた。そこで筆者らは、フィルダムにおける施工性の向上、埋設計器による計測の安定性の向上を目的に、低周波電磁波を用いた地中通信技術を活用した、導電ケーブルを必要としないワイヤレス埋設計器の開発を行った。また、当時農水省が建設中の2基のロックフィルダムにおいて、試験的に従来のケーブル式センサと併設し、開発したワイヤレス間隙水圧計テストモデルの適用性を検証してきた¹⁾。開発時には計測頻度：1回/日、通信頻度：1回/週、の使用条件で10年以上の計測を可能と想定したが、実際に設置されたテストモデルは設置後5年半程度経過時にデータ回収不可能な状況に至った。本報告では、これまでにテストモデルにより計測されたデータと、従来のケーブル式センサによるデータとを比較検討し、ワイヤレス間隙水圧計による計測結果の妥

当性について検証する。また、テストモデルが、想定動作期間10年よりも大幅に短い期間で通信途絶状態に至った原因を、電池容量試験および実ダムでの電池電圧データから解明し、ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能について検証する。

2. ワイヤレス間隙水圧計

2.1 地中通信技術の概要

低周波電磁波は、高周波電磁波に比べて距離減衰は大きいものの、透過する媒質の導電率や誘電率による影響をあまり受けないという特徴がある。このため、低周波電磁波の場合、比較的近距离であれば、土中や水中においてもその減衰は少なく、通信が可能となる。このような低周波電磁波の特性と、微弱な信号の読みとり精度を上げるためのデジタル通信技術を併用することで、信号対ノイズ比(S/N比)が2以上であればデータ送受信が可能であり、地中においても最大約100mの双方向無線データ通信が可能となる。現在では、様々な分野の土木計測に活用されている²⁾。

地中通信技術の概念を図-1に示す。図-1に示すように、コイルに発生する低周波電磁波には指向性があるため、機器側のコイルと送受信装置のコイルの軸が一致する位置関係において、最も効率的な地中通信が可能となる。なお地中通信技術では、周波数8.5kHzの低周波電磁波を用いるが、無線免許や設備許可を必要と

¹ (独) 農研機構 農村工学研究所 構造研究室, 主任研究員

² 坂田電機(株) 技術部設計課, 課長

³ (独) 農研機構 農村工学研究所 水利施設機能研究室, 室長

⁴ (独) 農研機構 農村工学研究所 構造研究室, 室長

⁵ (独) 農研機構 農村工学研究所 構造研究室, 主任研究員

せず使用可能である。また、ワイヤレス埋設計器の通信出力は 5W と小さいため、機器から発生する磁界の強さは、機器から 7cm 程度離れた距離で、300mG と地球の地磁気と同程度になり、WHO の基準を満足する。

2.2 ワイヤレス間隙水圧計の概要

ワイヤレス間隙水圧計は、従来のケーブル式間隙水圧計をフィルダムに適用する上での問題点を改善し、フィルダムにおける施工性の向上、埋設計器による計測の安定性の向上を図るため、地中通信技術を活用することでケーブルを必要とせず、堤高 100m 程度のフィルダムにおいて 10 年以上安定した計測ができることを目標に、耐水圧性能 3MPa 以上、地中通信距離 100m 以上、電池寿命 10 年以上、堤体に対しての異物とならないよう計器寸法をフィルダム遮水材の最大粒径以下に抑えることを設計仕様とし、独立行政法人 農村工学研究所、坂田電機株式会社、東京電力株式会社が農林水産省農村振興局官民連携新技術研究開発事業により平成 13～15 年度に共同開発したものである。試験的に実ダムへの埋設を行ったワイヤレス間隙水圧計テストモデルの外形と内部構造を図-2 に示す。計器は、①回路基板、②通信アンテナ、③電池、④間隙水圧計、⑤筐体により構成される。基板部の小型化、省電力化、送受信アンテナの統合、部品数の削減、高エネルギー密度のリチウム電池の使用により、設計仕様を満たす小型化に成功した。形状は、直径 125mm、高さ 205mm の円筒形である。電源には装置内部に直列で搭載された 3 個のリチウム電池を利用しており、テストモデルによる使用電池容量を短期間で確認するための室内電池負荷試験結果から、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件で 10 年以上の計測が可能と推定した。なお、間隙水圧計は従来のケーブル式センサと同等のものを使用している。

ワイヤレス間隙水圧計によるフィルダムの計測システムの概要を図-3 に示す。なお比較のため、従来型の間隙水圧計による計測システムも併記している。ワイヤレス間隙水圧計を用いた計測システムでは、ダム天端あるいは監査廊にデータ送受信装置を設置し、ワイヤレス間隙水圧計との間でデータの送受信を行う。

図-3 から明らかなように、従来型の埋設計器を用いた場合には、堤体内にケーブルが張り巡らされる

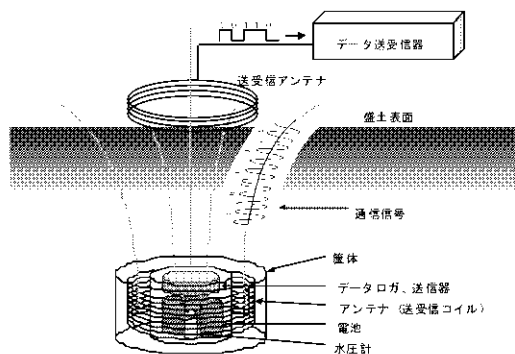


図-1 地中通信技術の概念図

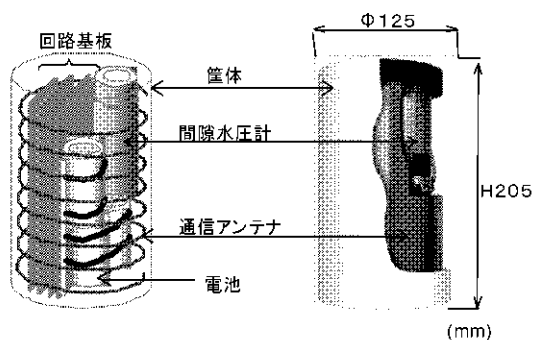
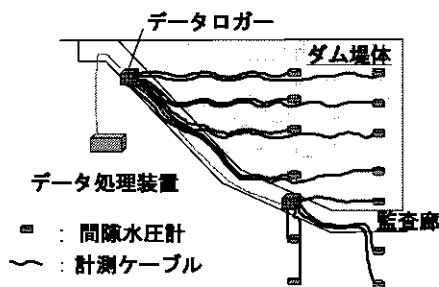


図-2 ワイヤレス間隙水圧計テストモデルの概要

従来型計測システム



ワイヤレス計測システム

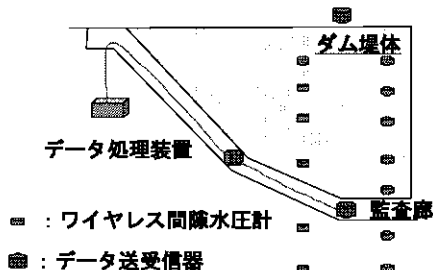


図-3 従来型とワイヤレス間隙水圧計による計測システムの比較

ため、設置作業が複雑で、コストも掛かる。これに対しワイヤレス間隙水圧計を用いた場合には、埋設計器の設置が簡便で、堤体内で大きな異物となるケーブルが存在せず堤体内の均質性が保たれるため、施工性、堤体の安全性の観点から、有効と考える。

テストモデル開発後の基板の改良等により、開発終了時には、同一寸法で2倍のリチウム電池を搭載することが可能となり、併せてスリープ時、測定時における電池の消費電流は大幅に削減された。現在では農水省所管の5フィルダムに75台のワイヤレス埋設計器が設置されている。しかしながら、そのうち2台は通信途絶状態にある³⁾。ワイヤレス間隙水圧計は設置工程を短期化できるなどのメリットがあるものの、①計器に付帯する電池寿命までしか測定できない、②電池寿命は現在約10年程度である、③低周波磁界を用いた通信機であり、環境ノイズで送信距離に影響する可能性がある、④データ受信機が必要になるが、送信側と受信側の設置位置には注意を要する、といったことが現状での課題点として指摘されている⁴⁾。

3. 実ダムにおける長期計測試験

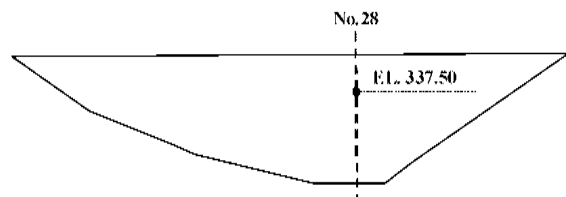
3.1 Aダム

(1) 試験の概要

図-4に示すAダムは、堤高69.9m、堤頂長312.5m、堤体積1,575千 m^3 の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムである。No.28断面 EL.337.50mに設置されているケーブル式間隙水圧計(P18およびP19)の近傍にワイヤレス間隙水圧計(WP-2およびWP-3)を試験的に設置し両者の比較を行っている。これらの間隙水圧計の設置位置の概要を図-5に示す。ワイヤレス間隙水圧計は、ケーブル式間隙水圧計が設置されるNo.28断面から1.5m離れたケーブルトレンチ先端の一段高い箇所にはコア抜き法⁵⁾で設置している。

コア抜き法による作業手順を概説すると、①設置を容易にするためワイヤレス間隙水圧計の埋設位置周辺を約 $1m^2$ 掘削し整形する、②埋設のための穿孔および整形を行い、設置標高を確認する、③ワイヤレス間隙水圧計を静置する、④粒度調整した盛土材で計器周辺を人力により締め固め覆土する、⑤計器周辺を覆土後、

【縦断面図】



【横断面図 No.28断面】

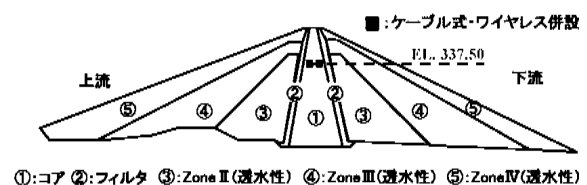


図-4 Aダムの概観と間隙水圧計設置位置

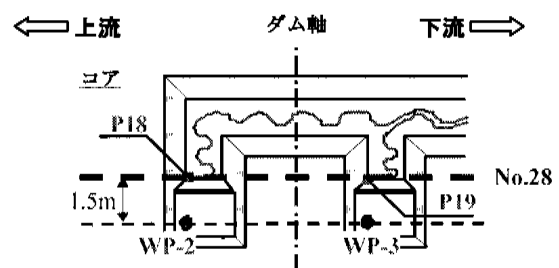


図-5 間隙水圧計設置平面の概要

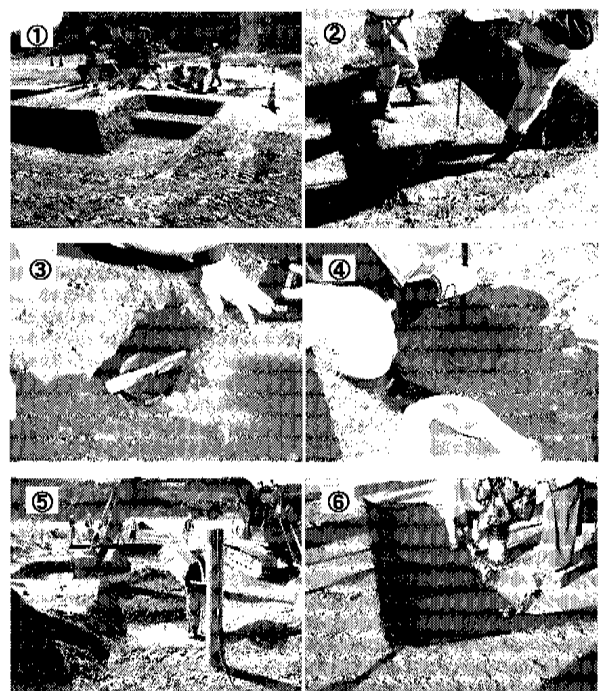


図-6 ワイヤレス間隙水圧計の設置状況

掘削箇所を重機により盛土材で埋め戻す、⑥振動ローラー等により締め固める、となる。なお、この一連の

作業に要する時間は、1時間弱である。ワイヤレス間隙水圧計の設置状況を図-6 に示す。

(2) 試験結果

No.28 断面 EL.337.50m 周辺における間隙水圧計の経時計測結果を図-7 および 8 に示す。図-7 は P18 および WP-2、図-8 は P19 および WP-3 の結果を示している。なお、それぞれに築堤時の盛り立て標高の経時変化と試験満水開始後の設置標高における貯水圧の経時変化を併記している。貯水圧は貯水位と設置標高の差に水の密度を乗じて算出しており、貯水位が設置標高以下の場合には 0 としている。

図-7 および図-8 から、コアに埋設したケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計では、若干値が異なるものの、全期間を通して両者は良い一致を示すことがわかる。

なお、ワイヤレス間隙水圧計については、2009 年 3 月 5 日にデータ回収を実施した際には、全ての計器から送信データを受信することができたが、2009 年 7 月 9 日にデータ回収を実施した際には WP-3 からの送信データは受信できず、WP-2 のみデータの回収が可能であった。このことから、ワイヤレス間隙水圧計デス

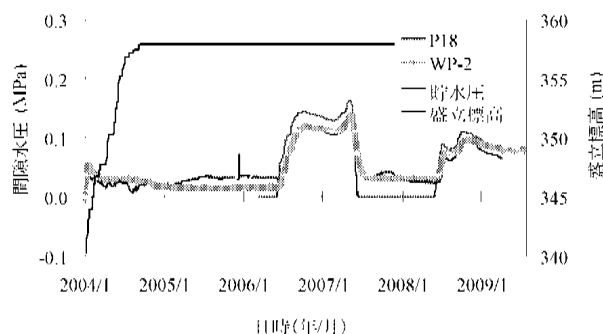


図-7 P18およびWP-2による間隙水圧の経時変化

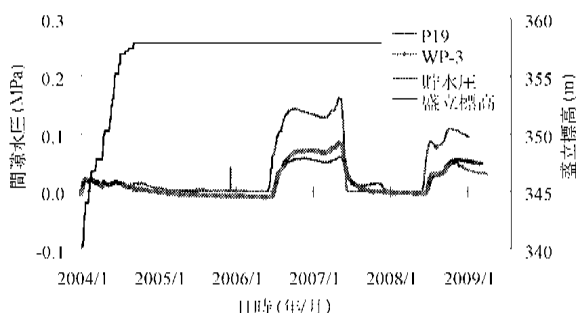


図-8 P19およびWP-3による間隙水圧の経時変化

トモデルは設置から 5 年半程度でその計測寿命を迎えたこととなる。

3.2 B ダム

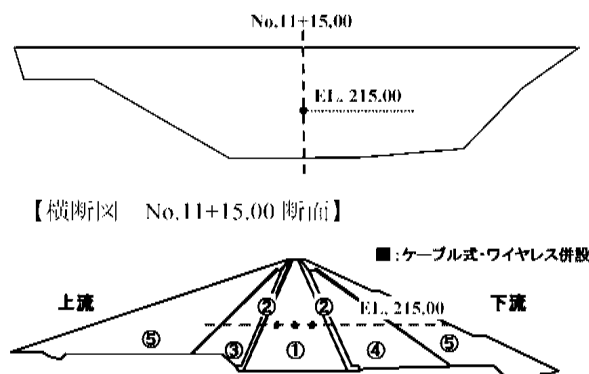
(1) 試験の概要

図-9 に示す B ダムは、堤高 50.0m、堤頂長 256.0m、堤体積 801 千 m^3 の中心遮水ゾーン型ロックフィルダムである。EL.215.0m に設置されているケーブル式間隙水圧計 (P36, P37, P38) の近傍に、ワイヤレス間隙水圧計 (WP-2, WP-3, WP-4) を試験的に設置し両者の比較を行っている。これら間隙水圧計の設置位置の概要を図-10 に示す。ワイヤレス間隙水圧計は、ケーブル式間隙水圧計が設置される No.11+15.00 断面から 5m 左岸側に離れた箇所にコア抜き法で設置している。

(2) 試験結果

No.11 断面 EL.215.00m 周辺における間隙水圧計の経時計測結果を図-11～13 に示す。図-11 は P36 および WP-2、図-12 は P37 および WP-3、図-13 は P38 および WP-4 の計測結果を示している。また、それぞれに築

【縦断面図】



【横断面図 No.11+15.00 断面】

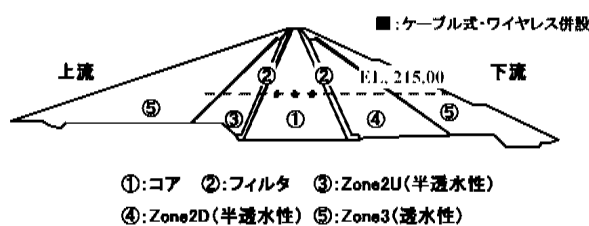


図-9 Bダムの概観と間隙水圧計設置位置

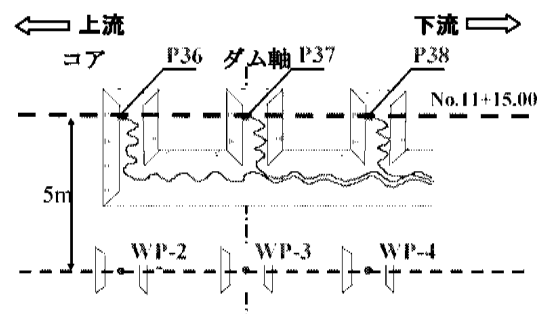


図-10 間隙水圧計設置平面の概要

堤時の盛り立て標高の経時変化と試験湛水開始後の埋設標高における貯水圧の経時変化を併記している。なお、貯水圧は A ダムの場合と同様に算出しており、貯水位が設置標高以下の場合には 0 としている。

ワイヤレス間隙水圧計については、2007 年 12 月 27 日にデータ回収を実施した際には全ての計器から送信データを受信することが可能であったが、その後データの回収を実施していない。A ダムと同様のテストモデルを設置していることから、2009 年 10 月時点でデータ回収不能と推定されたため、データ回収を試みずに試験を中止した。

図-11 および図-12 より、P36 と WP-2 および P37 と WP-3 では、ケーブル式間隙水圧計とワイヤレス間隙水圧計が全期間を通して良い一致を示していることがわかる。一方、図-13 より、埋設時から初期湛水時に貯水位が埋設標高に達するまでの期間において、WP-4 が P38 と比較し、かなり大きな過剰間隙水圧が発生していることがわかる。しかしながら、その増減の傾向は一致しており、貯水位が埋設標高に達して以降、両者の値はほぼ等しくなっている。前者の期間において両者の値が異なった理由として、設置位置や設置方法の違いが過剰間隙水圧発生量の違いとして現れたことが考えられるが、それらの影響は貯水により緩和されたのではないかと考えている。以上の結果から、B ダムにおいても、ワイヤレス間隙水圧計は従来のケーブル式間隙水圧計と同様な計測が可能であることが確認された。

4. 電池負荷試験

4.1 試験条件

ワイヤレス間隙水圧計の開発当初より、用いる電池の性能を評価するため、ワイヤレス間隙水圧計の消費電力を模擬した実験装置を作製し、室内電池負荷試験を実施した。試験装置は図-14 に示す負荷回路ブロックからなり、R1、R2、R3、R4 は、それぞれスリープ時、受信待機時、計測時、データ送信時の消費電力を模擬した負荷抵抗である。ここで、時計のみが動作している状態をスリープ時、地上からの送信要求が受信可能な受信待機状態を受信待機時、間隙水圧の測定を行う測定状態を計測時、地上への

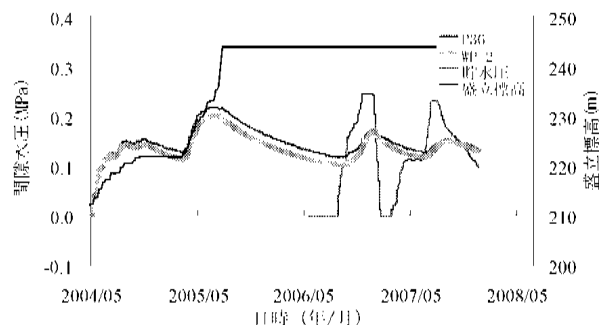


図-11 P36およびWP-2による間隙水圧の経時変化

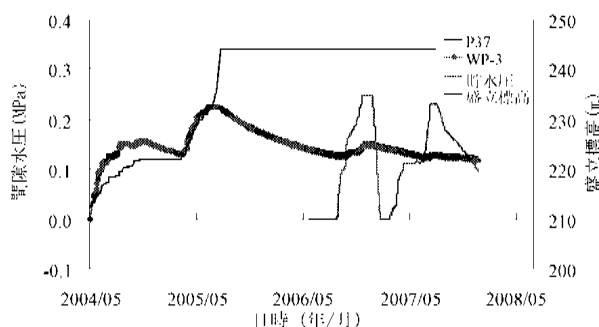


図-12 P37およびWP-3による間隙水圧の経時変化

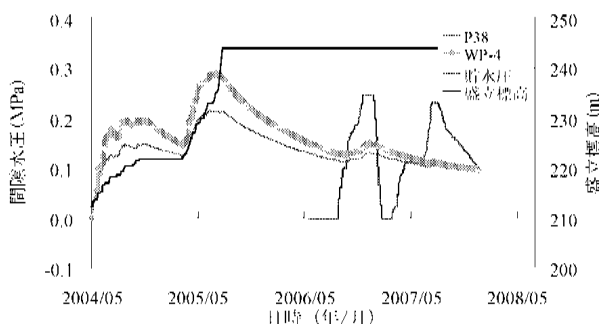


図-13 P38およびWP-4による間隙水圧の経時変化

データ送信を行う送信状態をデータ送信時としている。また、電圧計により、各負荷をかけた際の電池電圧を計測している。各負荷回路ブロックの設定値を表-1 に、電池負荷試験における負荷パターンを図-15 に示す。本試験では、計測条件として 1 日に 1 回のデータ計測およびデータ送信を設定した。このため、1 回の負荷パターン中に受信待機、データ計測、データ送信の負荷を、各 1 回負荷し、スリープ負荷は常時負荷している。

ワイヤレス間隙水圧計は、動作期間 10 年を目標としているが、開発期間が目標動作期間に比べ短いため、10 年間に消費される電力を模擬できるように、1 日に実施する負荷パターンの頻度を変えた 4 つの促進試験ケースを実施し、電池容量の検証を行った。表-2 に示すように、“case1”では、図-15 に示す負荷パターンを 1 日に 20 回繰り返すことで、想定期間中に消費される電力を 0.5 年で消費するよう模擬されている。同様に、“case2”では 1 日に 10 回、“case3”では 1 日に 4 回、“case4”では 1 日に 1 回、負荷パターンを繰り返すことで、試験期間を想定動作期間 10 年の 1/10、1/4、1 倍となるようにしている。なお、これに併せて、スリープ負荷時の負荷抵抗は表-1 に示すように設定している。

試験に用いたリチウム電池のカタログ仕様を表-3 に示す。この電池は無負荷状態であっても、一年当たり公称容量の 3%を放電するため、長期間の使用を考える場合には、電池の自己消費量は無視できない。また、終止電圧 2.0V に至った時点で、安定した動作が保証されなくなる。

4.2 試験結果

各試験ケースにおけるスリープ負荷時、送信負荷時の電池電圧の経時変化を図-16 に示す。なお、各ケースともに 4 台の試験装置を用いて同時に試験を実施しており、図-16 に示す結果は、その平均値である。

図-16 より“case1, 2, 3”と“case4”では、送信負荷時の電池電圧計測結果の傾向が大きく異なることがわかる。前者 3 つのケースでは、試験期間をとおして 3.0V 以上の電圧をほぼ維持し、試験期間終了頃に急激に電圧が減少し、終止電圧である 2.0V を経て 0V になる。また、スリープ負荷時の電池電圧も同様の傾向を示している。これらの挙動は、試験期間中に電池容量が使い切られたためとだと考えている。一方、“case4”の場合、送信時の電池電圧が経時的に緩やかに減少し、終止電圧に至るのに対して、スリープ負荷時の電池電圧は公称電圧値の 3.6V を保持している。このことから、“case4”については、電池容量が使い切られることなく送信負荷時の電池電圧が終止電圧に至ったものと考えられ

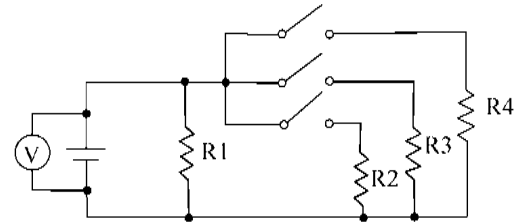


図-14 試験装置回路図

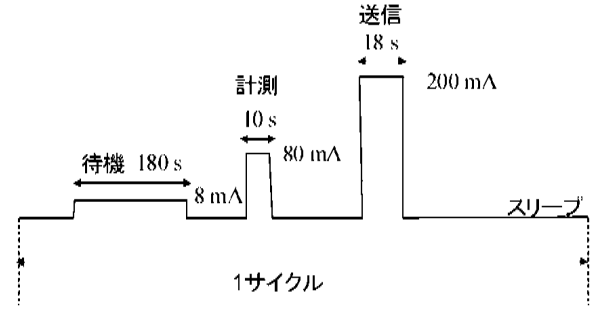


図-15 負荷パターンの概要

表-1 負荷条件設定値

負荷条件	ケース	抵抗	定格電流	負荷時間
R1 スリープ	case1	3.3 kΩ	1 mA	常時
	case2	6.6 kΩ	0.5 mA	
	case3	16.5 kΩ	0.2 mA	
	case4	66.0 kΩ	0.05 mA	
R2 受信待機	共通	432.2 Ω	8 mA	180 s
R3 データ計測	共通	39.3 Ω	80 mA	10 s
R4 送信	共通	14.1 Ω	200 mA	18 s

表-2 試験ケース

試験ケース	試験期間	1 サイクル時間	負荷頻度
case1	0.5 年	72 分	20 回/日
case2	1 年	144 分	10 回/日
case3	2.5 年	6 時間	4 回/日
case4	10 年	24 時間	1 回/日

表-3 電池仕様

公称容量	13.0Ah
公称電圧	3.6V
終止電圧	2.0V
自己消費率	3%/年 以下

る。

このことを確認するため、負荷時に計測された電池電圧と各負荷抵抗値から、負荷中の電流値を算出し、負荷時間に乗じることで、負荷中に消費される電池容量を算出した。これを、送信負荷時の電池電圧が、終止電圧 2.0V に至るまでの実動作期間分積分することで、実動作期間中の負荷時使用容量を求めた。また、表-3 に示すように使用した電池は 3%/年の自己消費が見込まれることから、初期容量 13.0Ah の 3%にあたる 0.39Ah/年 に実動作期間を乗じ、実動作期間中の自己消費容量を算出した。これら実動作期間中の負荷時使用容量と自己消費容量を足し合わせ、実動作期間中における実使用容量とした。また、実動作期間中における実使用容量と電池の公称容量の割合を容量使用率とした。各試験ケースにおける、実動作期間、負荷時使用容量、実使用容量、容量使用率を表-4 に示す。また、各試験ケースにおけるスリープ時、受信待機時、計測時、送信時の各消費容量および自己消費容量の内訳比較を図-17 に示す。これらの結果から、“case1, 2, 3”では電池容量がほぼ全て消費されているのに対し、“case4”では 26%程度の電池容量が消費されず残っていることが確認された。

一般に電池を負荷抵抗に接続し電流を流した場合、電池の起電力（無負荷の状態の端子電圧）よりも端子電圧は低くなる。この原因は負荷抵抗と直列に接続された電池内部の抵抗によるものと考えられ、電池の内部抵抗と表現される。電池の内部抵抗によって起こる電圧降下は、流れる電流の大きさに比例するため、負荷抵抗に供給する電流が小さい場合は、その影響がほとんどない。一方、大きな電流が流れる場合には、電圧降下の影響が問題となる。一般に電池の内部抵抗は、放電による電池の劣化により増大する。その原因のひとつは、電池の極板の有効面

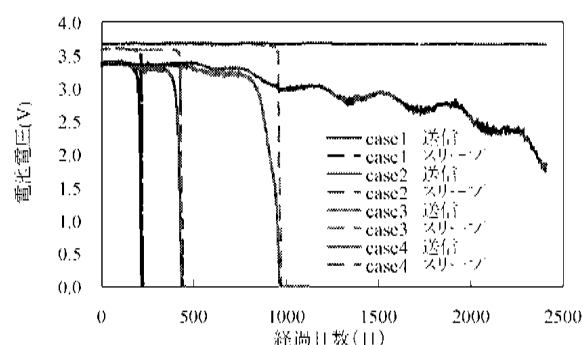


図-16 スリープおよび送信負荷時における電池電圧の経時変化

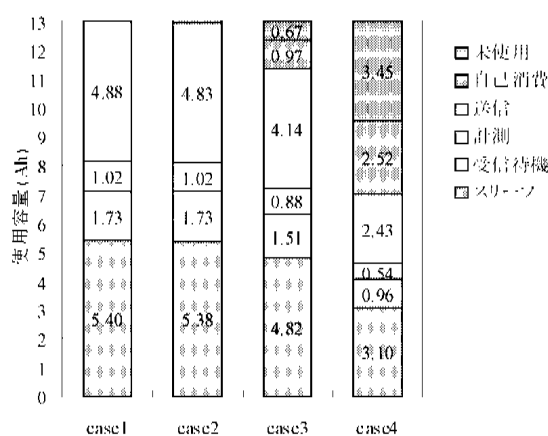


図-17 各負荷による使用電池容量の内訳

積の減少だと考えられる。ワイヤレス間隙水圧計テストモデルに使用している塩化チオニルリチウム電池は、放電により、負極であるリチウム電極表面に LiCl 膜が生成し内部抵抗が増加する。

そこで、電池の内部抵抗が試験結果に与えた影響を確認するため、“case3”および“case4”について内部抵抗を試算した。試算に当たっては、スリープ負荷時の電池電圧が起電力に等しいと仮定し、送信負荷時の電池電圧値とその際に算定される電流値から次式により電池の内部抵抗を算出した。

表-4 試験結果から算定した容量使用率

試験ケース	想定試験期間	実動作期間	負荷時使用容量	実使用容量	容量使用率
case1	0.5 年	0.57 年	13.0 Ah	13.3 Ah	102.3 %
case2	1 年	1.14 年	13.0 Ah	13.4 Ah	103.1 %
case3	2.5 年	2.49 年	11.4 Ah	12.3 Ah	94.6 %
case4	10 年	6.45 年	7.0Ah	9.6 Ah	73.8 %

$$R_{in} = (V_{sleep} - V_{send}) / I_{send} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$I_{send} = V_{send} / R_{send} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 R_{in} ：電池の内部抵抗（ Ω ）， V_{sleep} ：スリープ負荷時の電池電圧（V）， V_{send} ：送信負荷時の電池電圧（V）， I_{send} ：送信負荷時の電流（A）， R_{send} ：送信負荷抵抗（ Ω ）である。

算出した電池内部抵抗の経時変化を図-18 に示す。

図-18 より、算定された電池内部抵抗は 750 日経過頃までは“case3，4”ともに同様な傾向を示す。その後，“case3”では電池内部抵抗の増加率が急増し、図-16 において送信負荷時の電池電圧が終止電圧 2.0V に低下した 900 日経過頃には電池内部抵抗が 10 Ω に達している。一方，“case4”では経時的に電池の内部抵抗が増加しており、その関係は指数関数として次式で近似することができる。

$$R_{in} = 1.0094 \exp(0.0009 t) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 R_{in} ：電池内部抵抗（ Ω ）， t ：経過日数（日）である。

なお、図-16 に示される周期的な電池電圧値の増減や、図-18 で示される電池内部抵抗値の周期的な増減は、温度変化と密接な関係にあることが、温度計測データより判明している。

以上の電池容量および電池内部抵抗に関する検証結果から、“case4”では電池容量は残存しているものの、電池内部抵抗が時間経過により増大し、比較的大きな電流が流れる送信負荷時に電圧降下が起こり、電池電圧が終止電圧を下回る結果となることが明らかとなった。

4.3 実ダムにおける試験計測結果との比較

A ダムでは、実際のワイヤレス間隙水圧計テストモデルにおいて、データ送信時の電池電圧の経時変化を測定している。埋設当初からデータ回収時毎に測定されたデータ送信時の電池電圧の経時変化を図-19 に示す。比較のため、電池負荷試験における“case4”の結果を併記している。なお、テストモデルと電池負荷試験では、使用している電池の本数が異なる。このため、図-19 では電池負荷試験の“case4”の結果を補正し、両者の比較を容易にしている。

図-19 から、A ダムにおける試験計測結果、電池

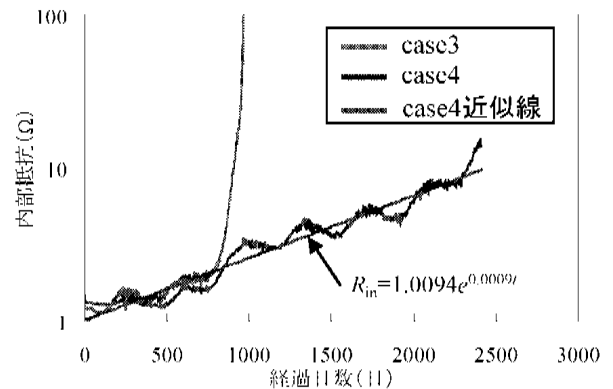


図-18 電池内部抵抗の経時変化

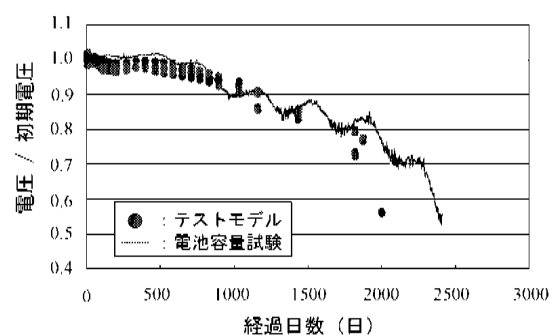


図-19 Aダムでの送信時電池電圧の経時変化

負荷試験結果とともに約 500 日経過頃から電池電圧の低下率が大きくなり、その後ほぼ一定の低下率で電池電圧値が減少している。A ダムにおけるテストモデルの計測結果は、電池容量試験の“case4”の結果と同様な傾向を示している。

また、図-17 より“case4”の送信負荷時の使用電池容量を、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件となるよう補正し、想定動作期間 10 年分に換算した負荷時使用電池容量を算出し、10 年分の自己消費容量を足し合わせた結果、想定動作期間 10 年間に消費される使用電池容量は 11.6Ah となり、電池の公称容量 13.0Ah を下回った。このことから、計測頻度：1 回/日、通信頻度：1 回/週、の使用条件の場合、電池容量は、想定動作期間 10 年を十分に満足すると考えられる。

以上の結果から、電池負荷試験の結果同様、A ダムにおいて埋設後約 5 年半でワイヤレス間隙水圧計のデータ回収が不能となった原因は、電池容量が完全に消費されたためではなく、電池内部抵抗の経時

的な増加により、データ送信時に電圧降下が発生し、電池電圧が終止電圧を下回ったためと考えられる。

4.4 運用中のワイヤレス間隙水圧計における検討

電池容量が満足することが確認されたことから、想定動作期間中のワイヤレス間隙水圧計の正常な動作を保障するためには、電池の内部抵抗の経時的な増加に起因する電圧降下の影響を適切に評価し、これを低減する必要がある。

データ送信時の電圧降下の影響を低減するためには、データ送信時の消費電流を小さくすればよい。そのためには、データ送信回路の省電力化、使用する電池の個数を、並列で増加させることが考えられる。電池を並列化した場合、電池一本当たりが流す電流は減少し、並列化数を n とすることで電池一本当たりの消費電流は $1/n$ となり、内部抵抗による電圧低下も $1/n$ となる。

テストモデル開発後の基板の改良等により開発終了時には同一寸法で2倍のリチウム電池を搭載することが可能となっており、現在運用中のワイヤレス間隙水圧計は少なくとも2並列以上で電池が搭載さ

れている。そこで、現在運用中のワイヤレス間隙水圧計における、送信時電池電圧と電池の内部抵抗の経時変化から、その長期計測性能を検証した。

テストモデルと現在供用中のワイヤレス間隙水圧計の送信時電池電圧の経時変化を図-20に、電池内部抵抗の経時変化を図-21に示す。これらの図より、両者の傾向は異なることが伺える。現在供用中のワイヤレス間隙水圧計では、1000日経過後も送信時電池電圧の低下や電池内部抵抗の増加が認められない。図-18に示すように、電池内部抵抗の経時的増加は指数関数で近似できるものと想定し、両者の電池内部抵抗を指数近似した。テストモデルの結果は電池容量試験の結果と同様、指数関数で良く近似できている。現在運用中のワイヤレス間隙水圧計については、未だ1000日目程度までのデータしか得られていないが、現在までの結果を指数近似し外挿すると、10年経過後も内部抵抗が 10Ω を下回るものと推定される。

これらの結果は、電池内部抵抗によるデータ送信時の電圧降下の影響が、電池の並列化により緩和され、ワイヤレス間隙水圧計の長期性能が向上したことを示していると考えられる。

以上のことから、現在供用中のワイヤレス間隙水圧計については、想定した供用期間において計測が可能だと推定される。

5. 結言

平成13～15年度の農林水産省官民連携新技術研究開発事業により開発したワイヤレス間隙水圧計のテストモデルにより、実ダム設置後5年半にわたり計測された結果から、従来のケーブル式間隙水圧計と同等な計測が可能になったことが明らかとなった。その結果、施工時の利便性と併せ、ワイヤレス間隙水圧計の有効性が示された。しかしながら、実ダム設置後、想定動作期間10年を下回る5年半で通信途絶状態となった。その原因は、ワイヤレス間隙水圧計内部に搭載されたリチウム電池の内部抵抗が経時的に増大し、大きな電流が必要となるデータ送信時に電池が電圧降下を起こし、正常に動作しなくなったためであることが明らかとなった。開発時には消費される電池容量については検証を行い、計測頻度：

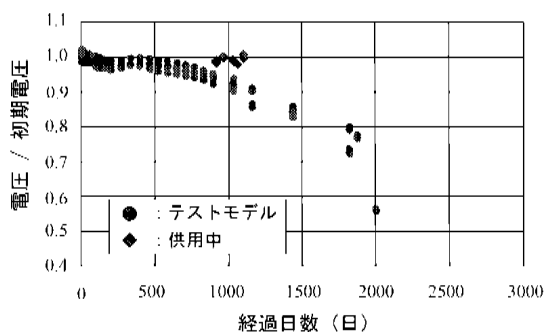


図-20 送信時電池電圧の経時変化の比較

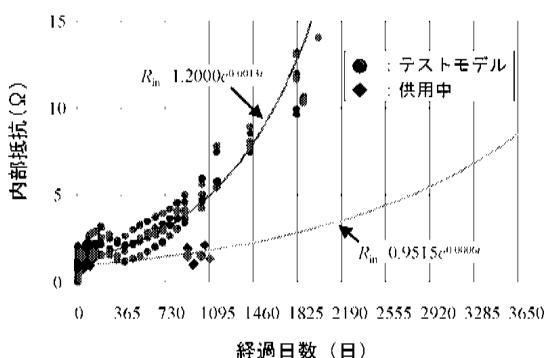


図-21 電池内部抵抗の経時変化の比較

1 回/日，通信頻度：1 回/週，の使用条件で，10 年以上の計測が可能と想定した。しかしながら，電池内部抵抗の経時的な増加については，想定されていなかった。ワイヤレス間隙水圧計により長期計測を実施する際は，電池の内部抵抗の状態を評価することが重要であることが，今回明らかとなった。

現在稼働しているワイヤレス間隙水圧計は，テストモデルと比べ，回路基板が改良されるとともに，電池の並列化が行なわれている。このため，電池内部抵抗による電圧降下の影響が緩和されており，電池の内部抵抗の増加もテストモデルに比べ，極めて緩慢であり，想定した動作期間において計測が可能だと推定される。

しかしながら，未だ十分な期間のデータが得られている訳ではないため，今後も計器の挙動について継続的にデータの検証を行い，その長期計測性能を評価していくことが重要であると考えている。

本研究に当たり，データの提供等ご尽力いただきました関係各機関の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 林田洋一・向後雄二・浅野勇・増川晋・田頭秀和：低周波電磁波を用いたワイヤレス計測システム，農業農村工学会誌，第 76 巻，第 9 号，13-16，2008
- 2) 樋口佳意・遠目塚良一：「地中無線通信システム」を用いた地盤の無線調査技術，地盤工学会誌，Vol. 58，No. 8，22-25，2010
- 3) 浅野勇・林田洋一・田頭秀和・増川晋：ワイヤレス埋設計器の現状について，平成 21 年度 ダム工学会研究発表会・講演会 講演集，1-4，2009
- 4) 財団法人日本ダム協会：フィルダムの施工，財団法人日本ダム協会，587-589，2009
- 5) 向後雄二・浅野勇・林田洋一・遠目塚良一：ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測，ダム工学，Vol. 16，No. 3，165-176，2006

ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証



(独)農業・食品産業技術総合研究機構

農村工学研究所

林田 洋一

浅野 勇

増川 晋

田頭 秀和

坂田電機(株)

遠目塚 良一

背景

従来の埋設計器における問題点

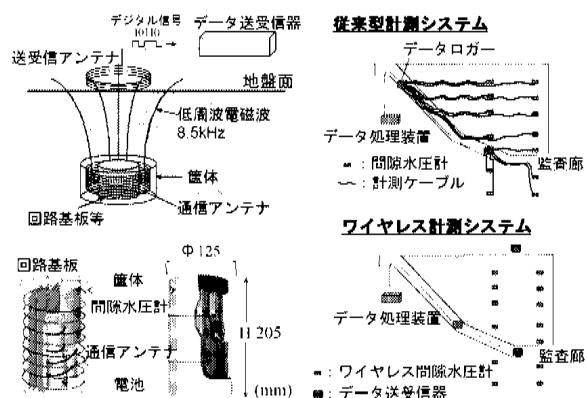
- ◇ケーブル敷設用トレンチの施工に伴う盛立て作業効率の低下
- ◇ケーブルの断線、絶縁低下、誘導雷による埋設計器の故障による計測の不安定化

ケーブルを不要にすれば・・・

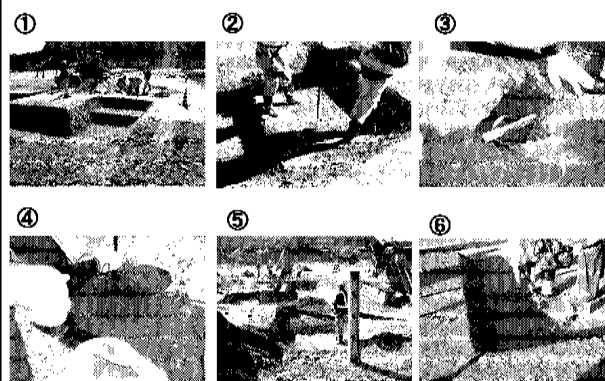
- ・フィルダムにおける施工性の向上
- ・埋設計器による計測の安定性の向上

平成13～15年度にかけ、(独)農村工学研究所、坂田電機(株)、東京電力(株)で共同研究を実施し、『ワイヤレス間隙水圧計』を開発。

ワイヤレス間隙水圧計の概要



ワイヤレス間隙水圧計の設置方法



ワイヤレス間隙水圧計のメリットとデメリット

◎メリット

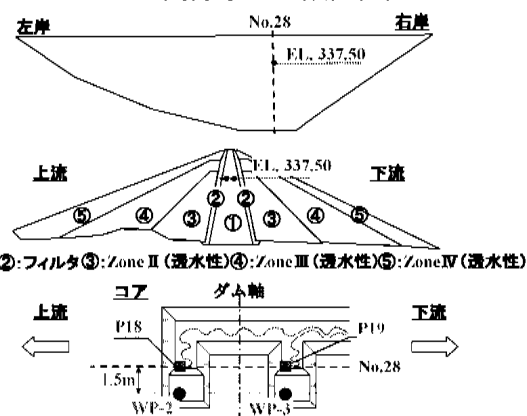
*財団法人日本ダム協会「フィルダムの施工」より

- ・延長ケーブル配線土工に伴う盛り立て休止期間の短縮
- ・コア内ケーブル配線及び埋戻し工における材料の乾燥・トレンチ施工不良の機会を減少
- ・着岩部のケーブル処理及び監視廊内への引き込み処理が不要

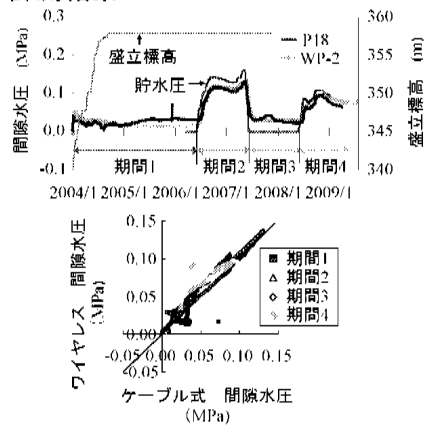
×デメリット

- ・計器に付帯する電池寿命までしか測定できない
- ・電池寿命は現在約10年程度
- ・低周波磁界を用いた通信器であり、環境ノイズが送信距離に影響
- ・送信側と受信側の設置位置に注意が必要

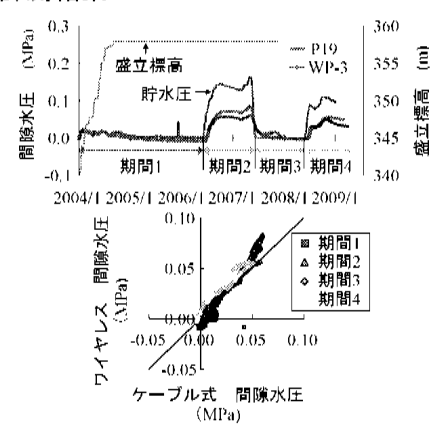
Aダムワイヤレス間隙水圧計設置位置



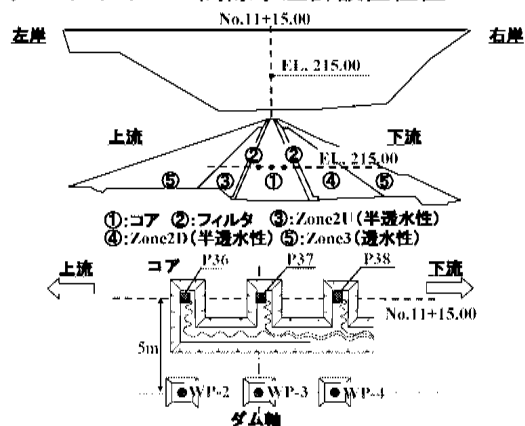
Aダム計測結果



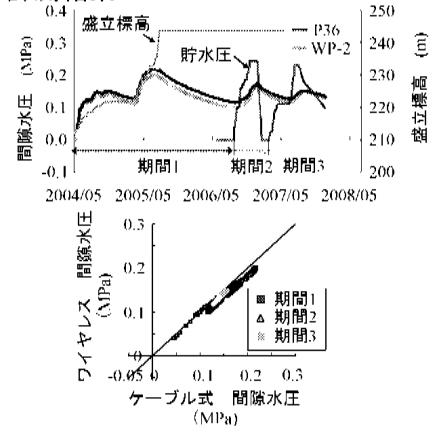
Aダム計測結果



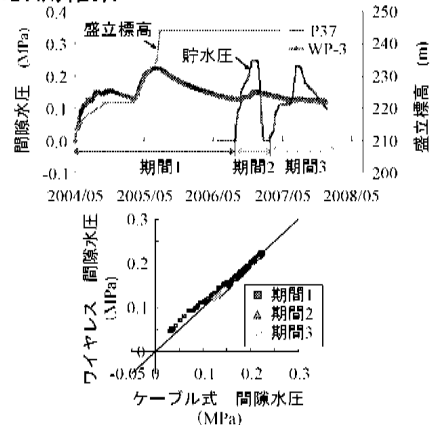
Bダムワイヤレス間隙水圧計設置位置



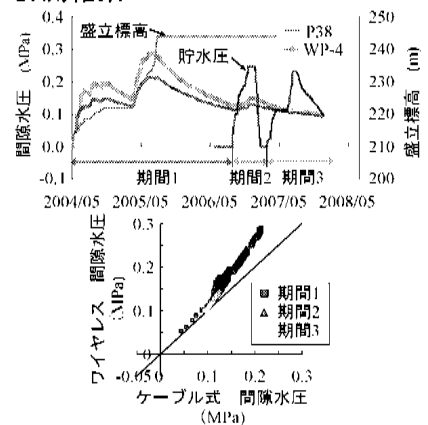
Bダム計測結果



Bダム計測結果



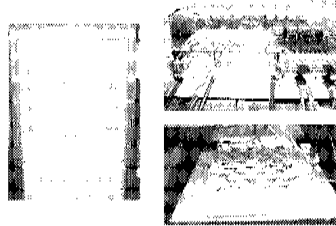
Bダム計測結果



室内電池負荷試験

目的

- ◇電池特性の比較
- ◇電池容量の評価
- ◇計測寿命の検証



ただし、
想定動作期間：10年

実証が困難

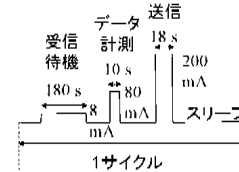
負荷促進試験を実施

電池仕様

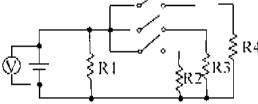
公称容量	13.0Ah
公称電圧	3.6V
終止電圧	2.0V
自己消費率	3%/年 以下

試験条件

負荷パターン



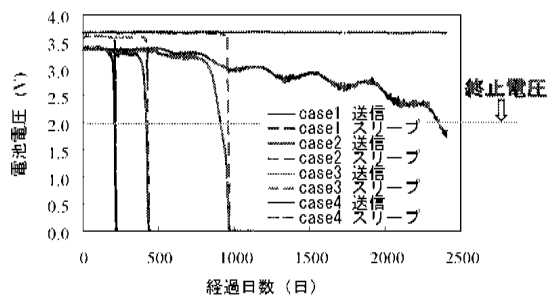
回路図



試験ケース	試験期間	1サイクル時間	負荷頻度
case1	0.5年	72分	20回/日
case2	1年	144分	10回/日
case3	2.5年	6時間	4回/日
case4	10年	24時間	1回/日

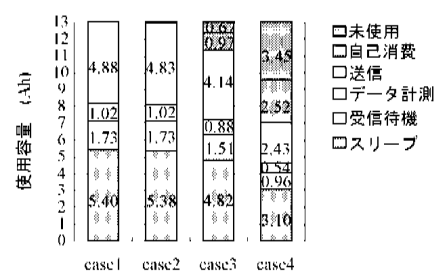
負荷条件	ケース	抵抗	定格電流	負荷時間
R1 スリープ	case1	3.3k Ω	1mA	常時
	case2	6.6k Ω	0.5mA	
	case3	16.5k Ω	0.2mA	
	case4	66.0k Ω	0.05mA	
R2 受信待機	共通	432.2 Ω	8mA	180s
R3 データ計測	共通	39.3 Ω	80mA	10s
R4 送信	共通	14.1 Ω	200mA	18s

試験結果



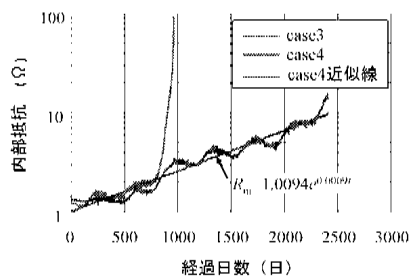
case4だけ、傾向が異なる。
送信時にのみ、終止電圧に至っている。

使用容量の検証



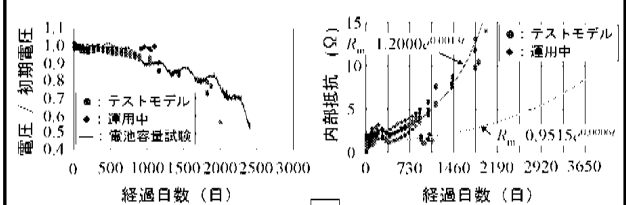
試験ケース	想定試験期間	実動作期間	負荷時使用容量	実使用容量	容量使用率
case1	0.5年	0.57年	13.0Ah	13.3Ah	102.3%
case2	1年	1.14年	13.0Ah	13.4Ah	103.1%
case3	2.5年	2.49年	11.4Ah	12.3Ah	94.6%
case4	10年	6.45年	7.0Ah	9.6Ah	73.8%

送信時内部抵抗の検証



送信時電圧が、終止電圧に至った時期の内部抵抗は、
両ケースとも、およそ10 Ω 。

実ダムにおける送信時電圧と内部抵抗



◇電池容量試験とテストモデルは、同様の結果を示す。

➡ 電池内部抵抗の影響

◇運用中の計器は、10年経過後も内部抵抗は10 Ω 以下と推定される。

➡ 想定動作期間を満足

まとめ

- ◇開発当初に試作したテストモデルによる実ダムでの長期計測試験結果から、従来型のケーブル式間隙水圧計と同等の計測結果が得られることが実証された。
- ◇しかしながら、テストモデルによる計測期間は、想定動作期間を満足しない結果となった。その原因は、電池容量不足ではなく、電池の内部抵抗に起因するデータ送信時の電圧降下だと考えられる。
- ◇現在運用中のワイヤレス間隙水圧計は、電池の並列化によりデータ送信時の電圧降下が抑制されており、想定動作期間を満足するものと推定される。

SAR（合成開口レーダー）による フィルダム外部変形計測の適用性の検討

佐藤弘行¹ 山口嘉一² 小堀俊秀³
岩崎智治⁴ 飯島功一郎⁵ 虫明成生⁶ 原口正道⁷ 本田謙一⁸

フィルダムの外部変形計測に関する安全管理については、測量による計測の煩雑さや、人件費がかなりの負担となっている場合がある。また、地震時などの非常時における臨時点検においては、被災地での測量作業員の確保が困難であるうえ、非常時に外部変形計測を行うことは作業員に危険がともなう。そのため、常時および地震時において、フィルダムの外部変形挙動を安全にかつ迅速に計測することが望まれている。本論文は、災害観測などに用いられている SAR（Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダー）の観測データーを用いて、フィルダムを対象として、SAR による外部変形計測の適用性を検討した。

キーワード: SAR, フィルダム, 外部変形計測

1. はじめに

日本国内において、1900 年以降に建設（予定も含む）したダムの総数は約 2500 基である。そのうち、完成後 50 年以上経過したダムは、2020 年には約 1500 基になりダムの総数の 58%と過半数を超える。このように、ダム完成後長期間が経過し、堤体および基礎地盤の挙動が安定したダムの数が増加する中で、フィルダムの外部変形計測に関する安全管理については、測量による計測の煩雑さや、人件費がかなりの負担となっている場合がある。また、地震時などの非常時における臨時点検においては、被災地での測量作業員の確保が困難であるうえ、非常時に外部変形計測を行うことは作業員に危険がともなう。そのため、フィルダムの外部変形挙動を安全にかつ迅速に計測することが望まれている。

本論文は、災害観測などに用いられている SAR（Synthetic Aperture Radar, 合成開口レーダー）の観測データーを用いて、フィルダムを対象とし、SAR による外部変形計測の適用性の基礎的な検討を行った。なお、SAR はダムの計測分野では新し

い手法であるため、本論文では SAR の基礎的なことについても簡単に記載した。

2. SAR について^{1), 2)}

2.1 合成開口について

一般的に、レーダーは、マイクロ波と呼ばれる電磁波を対象物に照射し、反射してきた信号を分析することによって対象物の観測を行なう。図-1 に、電磁波の波長とマイクロ波の波長とバンド名を示す。マイクロ波は可視光などに比べて波長が長いので、雲などの影響を受けずに観測ができるという利点がある。一方、電磁波を使ったセンサの分解能は波長に比例するため、長い波長のマイクロ波を使用するレーダーは、同じ直径の光学レンズなどに比べると分解能が非常に低く、光学レンズ並に分解能を上げようとするとアンテナの直径を極めて大きくする必要があり、物理的に困難である。この短所を解消するために考え出されたのが SAR である。図-2 に

SAR の概念図を示す。SAR は、概念的には、軌道

¹ 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ ダム構造物チーム、主任研究員

² 同上、主席研究員

³ 同上、研究員

⁴ 国際航業株式会社 社会基盤事業部、技術マネージャー

⁵ 同上、shamen-net、課長

⁶ 同上、技術開発部 リモートセンシング事業室、主任技師

⁷ 同上、技術開発部 リモートセンシング事業室、技師

⁸ 同上、技術開発部 リモートセンシング事業室、技師

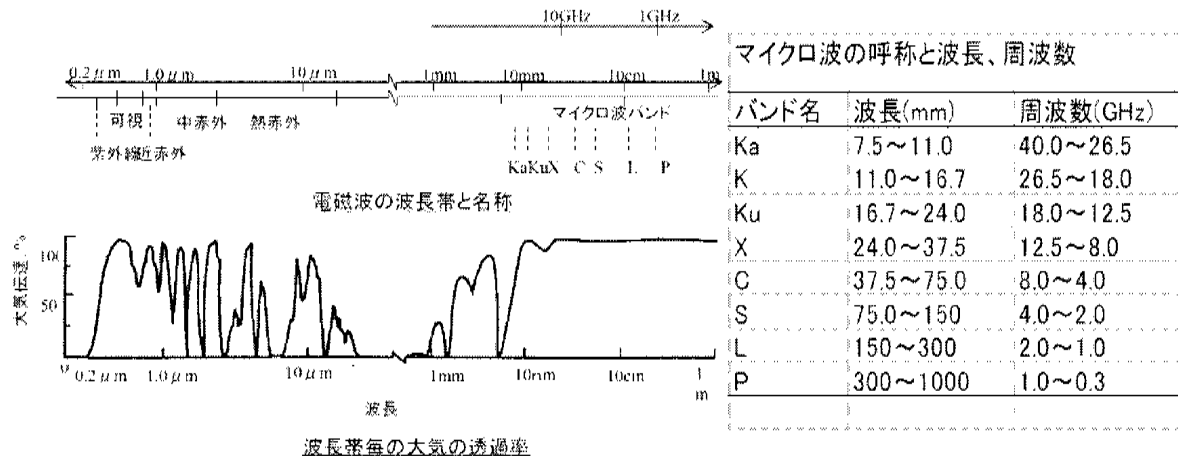


図-1 電磁波の波長、大気の透過率、マイクロ波のバンド名と波長・周波数³⁾

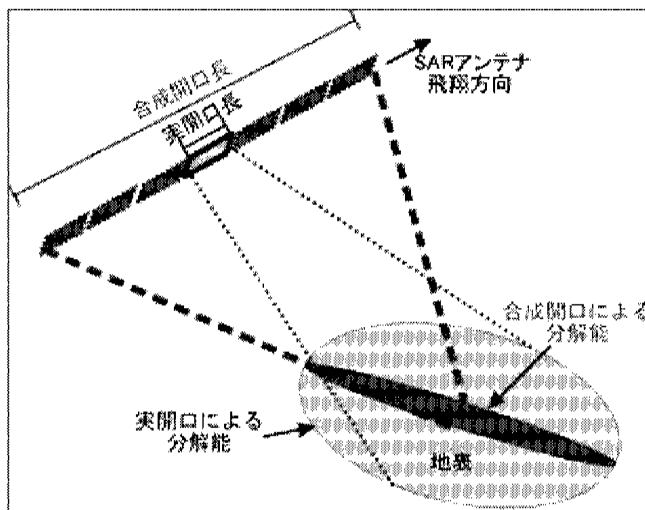


図-2 SAR の概念図³⁾

上に仮想的なアンテナをいくつも並べたものである。つまり、軌道を移動中に何回も送受信を行ない、受信した電波を合成することによって、分解能を向上させている。すなわち、小さな開口面（アンテナ）を合成して大きな開口面を実現するレーダーであるといえる。

2.2 ALOS（だいち）について⁴⁾

本論文では、現在運用中の陸域観測技術衛星「だいち」（ALOS, Advanced Land Observing Satellite）による観測データを使用した。

「だいち」は2006（平成18）年1月24日に種子島宇宙センターから打ち上げられた世界最大級の陸域観測技術衛星である。その主な目的は、地図作成、地域観測、災害状況把握、資源調査などへの貢献、

となっている。

「だいち」には以下の3種類のセンサが搭載されている。

(1) PRISM

パナクロマチック（可視光領域全ての）立体視センサ。標高など地表の地形データを読みとることを主な目的とする。

(2) AVNIR-2

可視光（赤・青・緑）と近赤外線領域センサ。土地の表面の状態や利用状況を知るための観測データ取得を主目的とする。

(3) PALSAR

昼夜・天候によらず陸地の観測が可能なLバンド合成開口レーダー。災害観測など、陸域のモニタリングを主目的とする

本論文では、PALSAR によるLバンドの観測データを使用した。

2.3 Lバンドの優位性について

SAR において、Lバンドを使用する主なメリットは以下の3つである。

(1) 全天候性

降雨や雲を透過して観測することが可能。

(2) 昼夜観測が可能

能動的に電磁波を発信・受信して観測を行うアクティブセンサ。太陽光不要。

(3) 植生の透過

Lバンドの電磁波は植生を透過する。

一方、L バンドの主な短所は、水蒸気により観測誤差が発生すること、などがあげられる。

L バンドの優位性の例として、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が実施した「『だいち』によるカザフスタン大雨・雪解け水の被害にともなう緊急観測」を簡単に紹介する⁵⁾。

2010 年 3 月 11 日、カザフスタン南東部のアルマトイ州で、大雨と雪解け水のために Kyzyl-Agash ダムが決壊、発生した洪水により下流地域にある村が被災し、少なくとも 43 人が死亡した。JAXA は AVNIR-2 と PARSAR で緊急観測を実施し、その結

果をホームページで公開している⁶⁾。図-3 に AVNIR-2 の観測結果、図-4 に PARSAR による観測結果を示す。AVNIR-2 の可視光による観測は雲の影響を受け、ダム決壊後の堤体付近の様子がはっきりしないが、PARSAR の L バンドによる観測では決壊後の堤体付近の様子が鮮明になっている。

日本は国土の 7 割程度が森林に覆われており、地震・火山・地滑りなどの災害発生時には、森林等の植生に左右されずに地表を観測できる L バンドが優位であると考えられている。

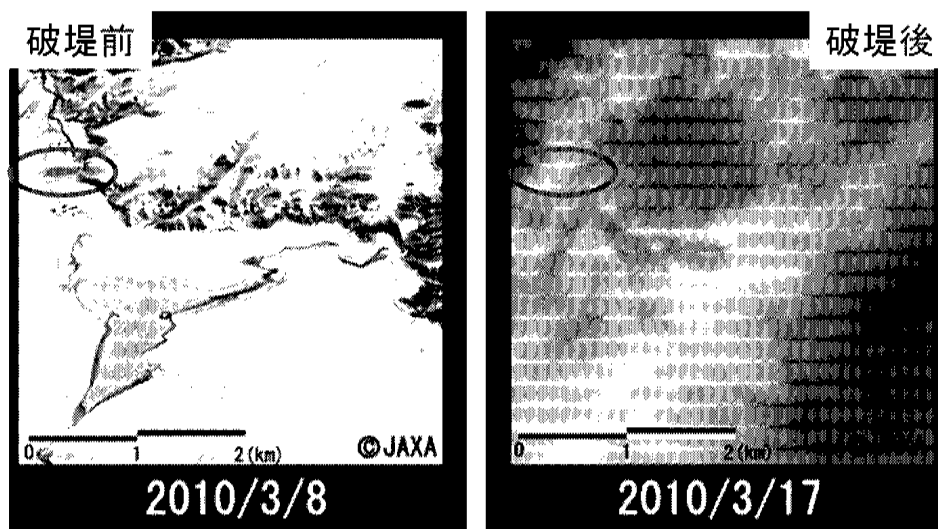


図-3 AVNIR-2 による可視光観測データ⁶⁾

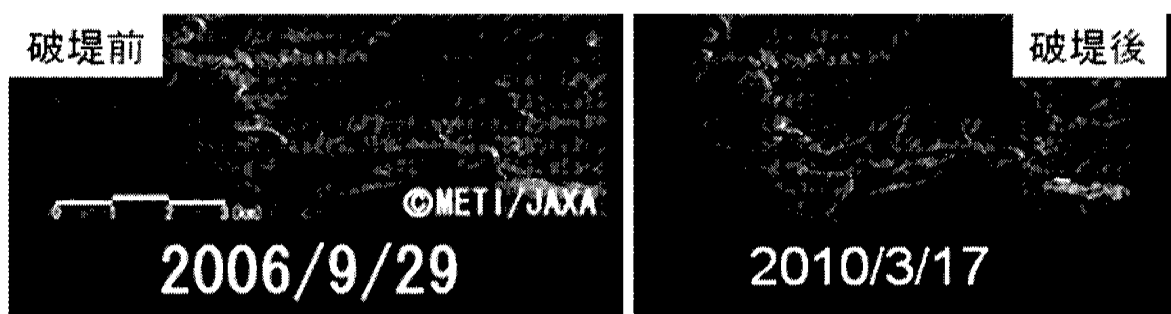


図-4 PARSAR による L バンド観測データ⁶⁾

2.4 InSAR（干渉合成開口レーダー）について

SAR を応用した技術の一つに、InSAR（干渉合成開口レーダー、Interferometric SAR）がある。

InSAR とは、地表の同一の場所に対して 2 回（以上）の SAR 観測を実施し、観測データ同士の位相の差を読みとる（干渉させる）手法である。図-5

に InSAR の概念図を示す。InSAR により、位相の差に応じた干渉縞が得られるのが特徴である。図-6 に InSAR による干渉縞の概念を示すが、位相は 0° から 360° のため、干渉縞は図-6 のように、位相差に応じて同じ色の組み合わせを繰り返したパターンとなる。図-7 に、InSAR により計測された、2008 年

岩手・宮城内陸地震による地殻変動の干渉縞の例を示す⁶⁾。干渉縞は位相差を示す色のパターンで描かれるため、変位量に換算するためには、波長や衛星の視線方向などを考慮する必要がある。

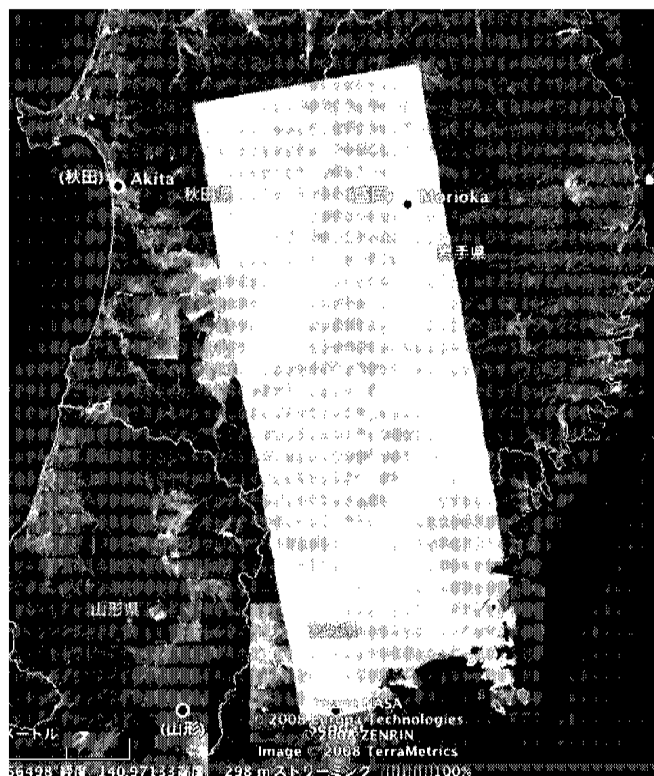
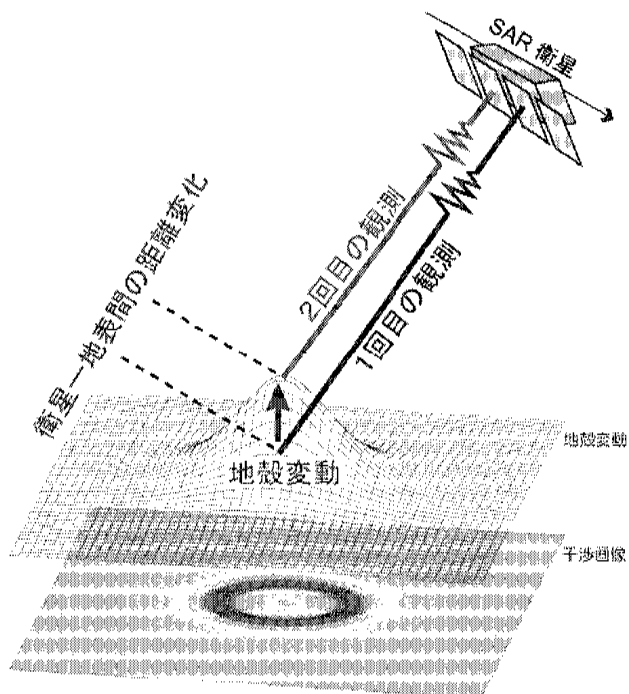


図-7 2008 岩手・宮城内陸地震の地殻変動の干渉縞⁶⁾

2.5 SAR と GPS の違い

人工衛星を利用した変位計測システムとして GPS があるが、SAR と GPS の主な違いを表-1 に示す²⁾。

SAR の主な長所は、地上の観測施設が不要なこと、面的な情報が得られることである。一方、GPS の主な長所は、連続・24 時間観測が可能なこと、変動量の絶対値が直接的に求められること、があげられる。

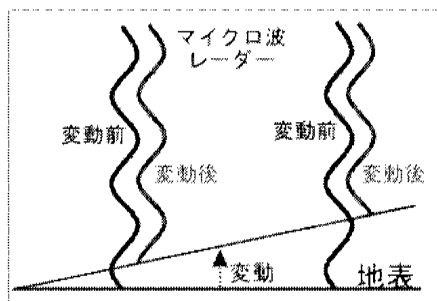


図-5 InSAR の概念図²⁾

表-1 SAR と GPS の違い²⁾

	SAR	GPS
(A) 地上の観測施設	不要	受信機が必要
(B) 面的情報	可能	不可能
(C) 連続観測	不可能	可能
(D) 変動量の絶対値	直接求められない	観測可能
(E) 測定量	衛星～地表の往復量	衛星～受信機の片道量
(F) 測定量の方法	1次元	3次元
(G) 観測時期	数十日に1回	24時間可能

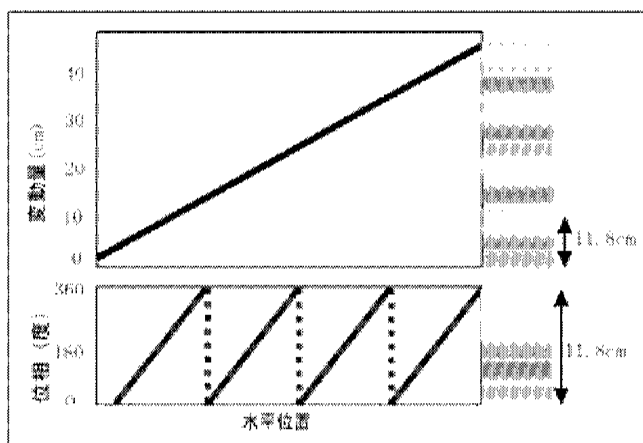


図-6 InSAR の干渉縞の概念図²⁾

3. SAR によるフィルダムの外部変形計測の基礎的検討

本論文では、SAR によるフィルダムの外部変形計測の基礎的検討を、GPS により外部変形が綿密に計測されている⁷⁾大保脇ダムを対象として行った。

大保脇ダムは、堤高 66m の中央コア型ロックフィルダムである。その断面図を図-8 に示す。大保脇ダムは 2006 年 10 月 31 日に盛立を終了し、盛立終了直後から 24 点で GPS により外部変形計測を実施している⁷⁾。

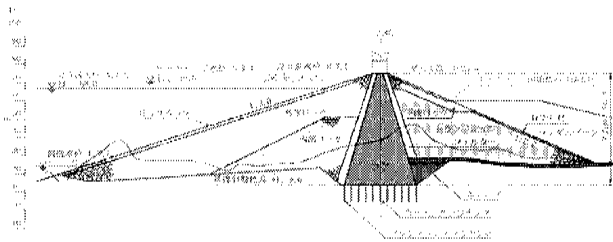


図-8 大保脇ダム断面図

本論文では、①盛立終了直後の 2006 年 12 月 6 日の SAR データーと、②その約 3 年後の 2009 年 12 月 14 日の SAR データーを用いて、InSAR により沈下量の検討を行った。

なお、InSAR により変形量を精度よく求めるためには、地形や衛星軌道の影響を少なくするために、堤体表面の形状データー（DSM, Digital Surface Model）が必要となる¹¹⁾。しかし、大保脇ダムは最近建設されたダムであり、国土地理院が公表している数値標高モデル（DEM, Digital Elevation Model）には含まれていない。そのため、大保脇ダムの設計図面から堤体表面の DSM を作成して InSAR を行った。

図-9 に InSAR の結果の図を示す。図-9 では、ダムの天端ラインを黄色の実線で示している。

図-9(a) は、2006 年 12 月 6 日の SAR による反射強度を示す画像であり、マスタ画像と呼ばれる。一方、図-9(b) は、2009 年 12 月 14 日の SAR による反射強度を示す画像であり、スレーブ画像と呼ばれる。マスタ画像、スレーブ画像ともに、衛星の視線方向にほぼ垂直な堤体下流面の反射強度が強く（白く）になっている一方、堤体上流面の反射強度が弱く（黒く）になっており、衛星の視線方向とほぼ垂直であれば、フィルダム堤体表面のロック材の反射が良好であることがわかる。

図-9(c) は、2 時期の画像の InSAR の干渉性の良さを示す画像で、コヒーレンス画像と呼ばれる。堤体上下

流面ともにコヒーレンス性はよい（白くなっている）が、図-9(a) (b) の反射強度も考慮すると、天端ラインを示す黄色実線から堤体下流面の InSAR 結果の信頼性が高いと考えられる。

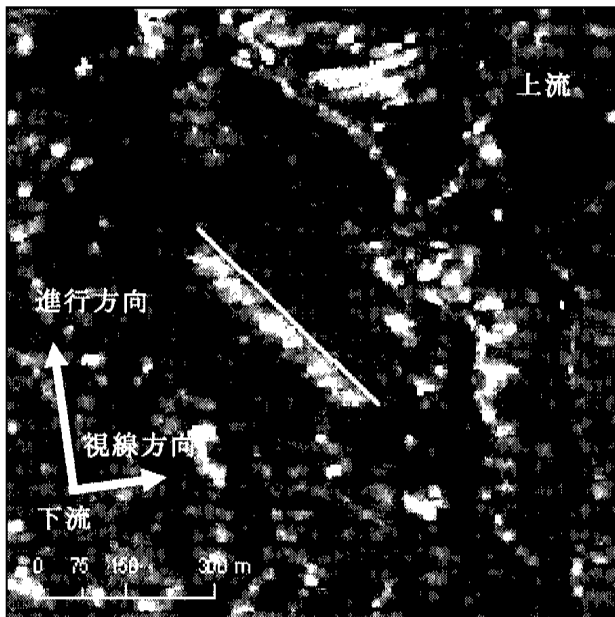
図-9(d) に、InSAR による干渉結果を示すとともに、拡大したものを図-10 に示す。また、InSAR の検討時期とほぼ同時期の約 3 年間の GPS による外部変形の計測結果を図-11 に示す。

図-10 を見ると、点 A は黄色、点 B は青色、点 C は紫色となっており、左岸地山にある点 A を不動点とすると、天端ライン上にある点 C は、衛星から遠ざかっている、つまり沈下しているという結果になっており、InSAR により堤体の沈下が定性的に評価できている。

表-2 に、図-10 の点 A を不動点とした場合の、点 C の位相差、視線方向の変位量、および InSAR による沈下量と点 C 近傍の GPS による沈下量を示す。PALSAR の解像度は約 10m であり、天端幅とほぼ同等となっているため、表-2 には点 C が水平面（天端）と下流面である場合の沈下量を記載している。

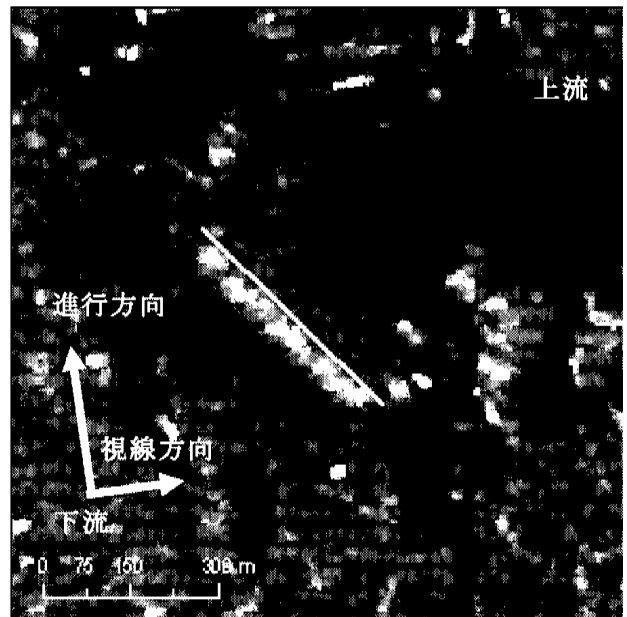
点 A と点 C の位相差は 174° であり、これを変位量に換算すると 57.0mm となり、これは前述のとおり衛星から離れた距離であり、堤体の沈下に伴う変形を表しているものと考えられる。この変位量は、衛星の視線方向の変位量であるため、衛星の視線方向の角度やダムの傾斜角などを考慮して、沈下量に換算した。その結果、点 C が水平面（天端）である場合の沈下量は 47.1mm、点 C が下流面である場合の沈下量は 56.6mm となった。一方、点 C 近傍の GPS (G-12) の沈下量は 100.4mm となっており、InSAR による沈下量が小さくなる結果となった。これは、PALSAR の解像度が約 10m と求められる沈下量の精度に比べて低解像度であること、2 時期の衛星軌道にわずかなずれ（303m）があること、2 時期の水蒸気の分布が異なること（2006 年 12 月 6 日の湿度 53%、2009 年 12 月 14 日の湿度 58%）、などの影響が重なった結果による誤差が原因と考えられる。

今後、さらに InSAR による変形量の定量的な検討を進め、より精度の高い方法の検討を進めていく必要がある。



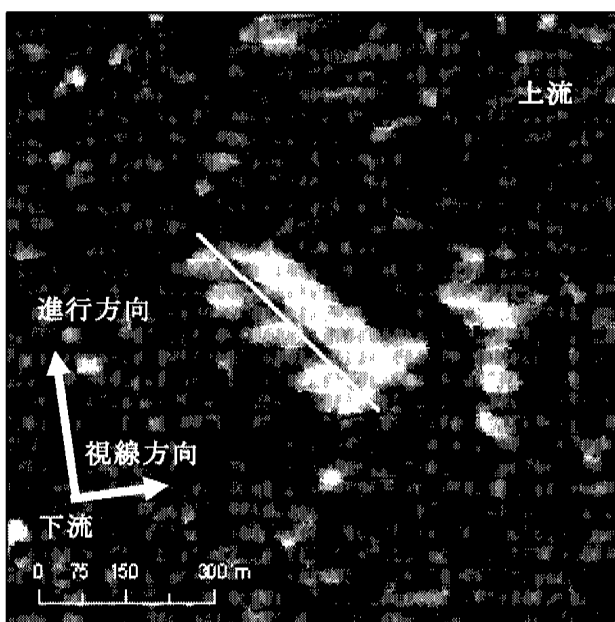
(a) マスタ画像

(2006 年 12 月 6 日の SAR の反射強度)

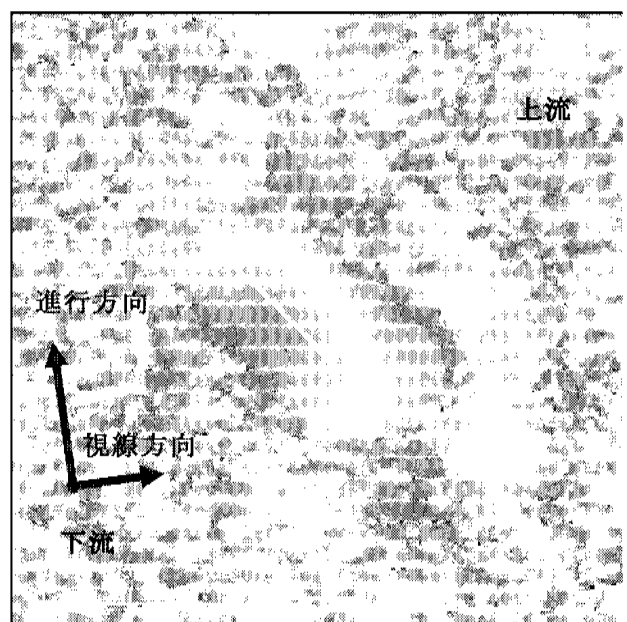


(b) スレーブ画像

(2009 年 12 月 14 日の SAR の反射強度)



(c) コヒーレンス画像 (干渉性の度合い)



(d) 干渉画像

図-9 InSAR 結果 (黄色実線は推定ダム天端ライン)

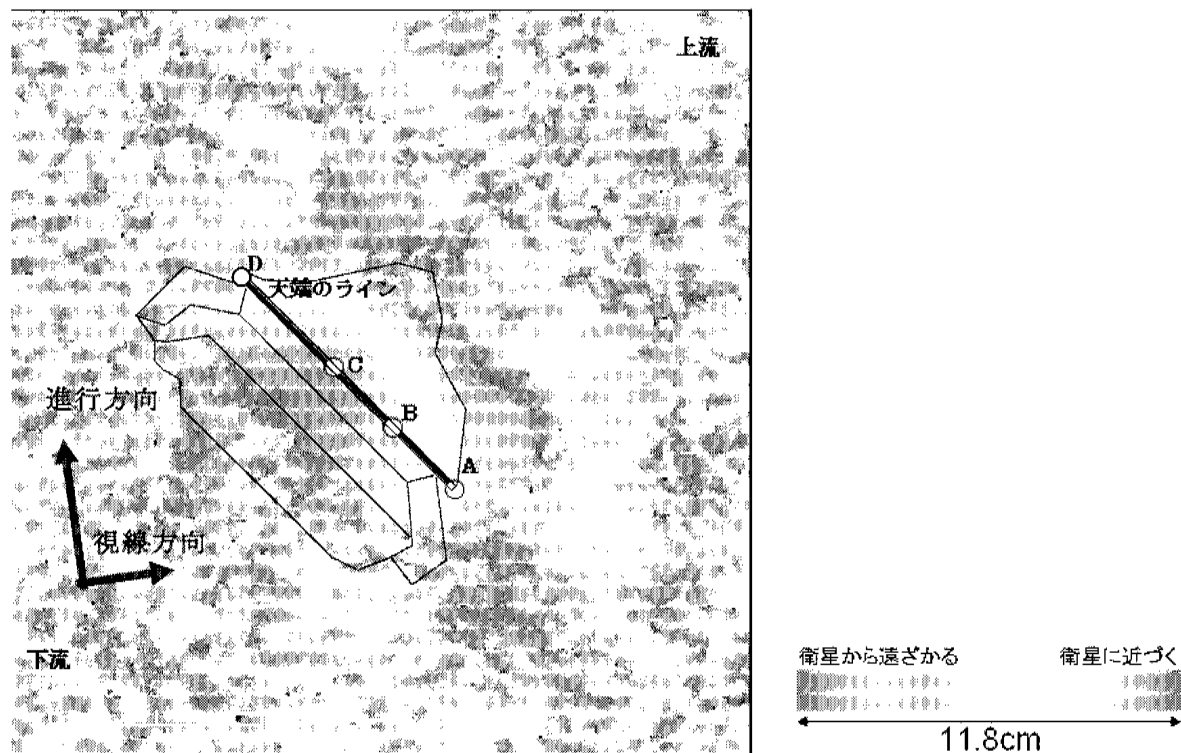


図-10 InSAR による干渉画像

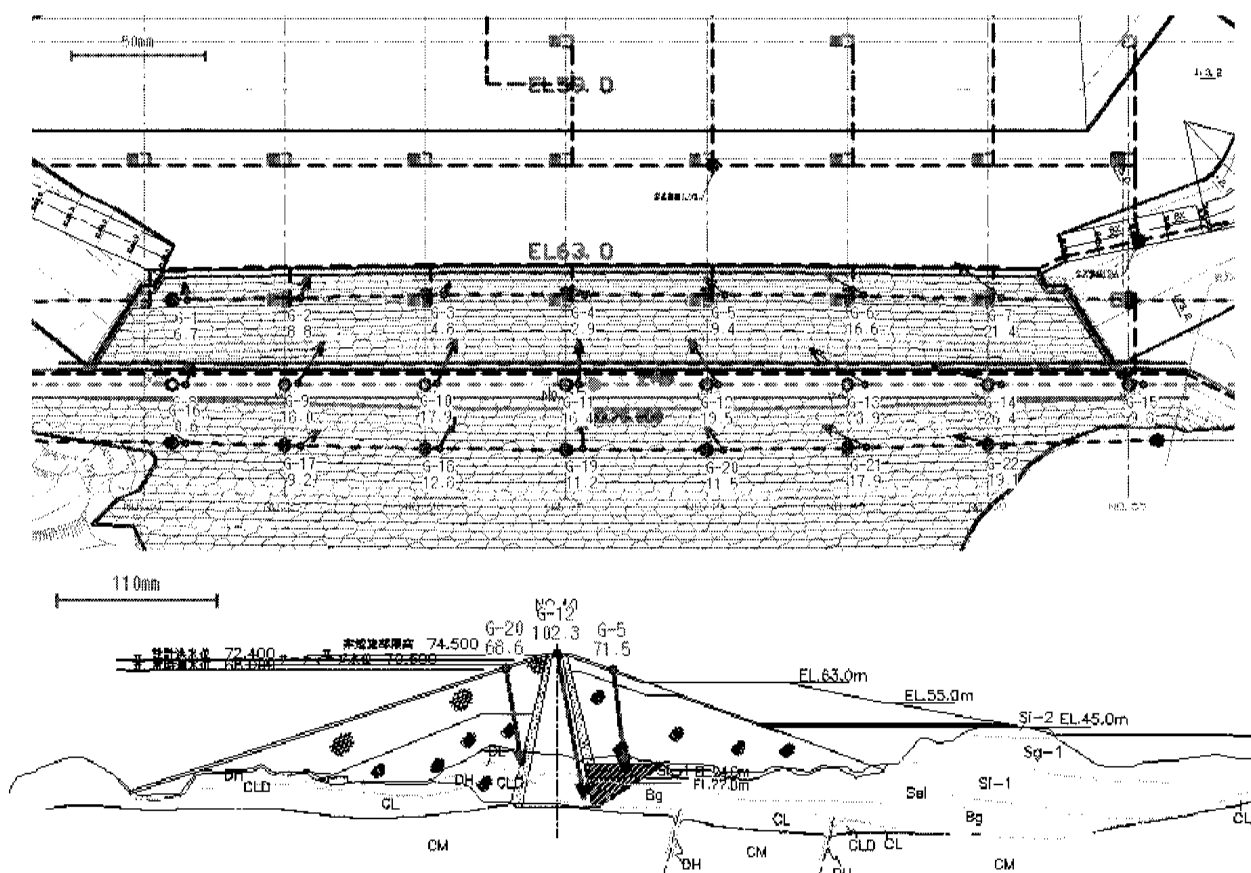


図-11 2006年12月29日と2009年12月14日の約3年間のGPS計測による大保脇ダム外部変形
(上：平面図、下：最大断面図)

表-2 InSAR と GPS による沈下量の比較

点 AC 間の位相差	174°
点 C の衛星の視線方向の変位	57.0mm
衛星の視線方向変位から推定される沈下量	
点 C が水平面である場合	47.1mm
点 C が下流面である場合	56.6mm
GPS (G-12) 計測により測定された点 C 近傍の沈下量	100.4mm

4. おわりに

本論文では、SAR によるフィルダム外部変形量の基礎的検討として、2006 年 10 月に盛立が終了した堤高 66m の大保脇ダムを対象として、盛立終了直後、およびその約 3 年後の SAR データを用いて InSAR による沈下量の検討を行い、GPS との沈下量の比較を行った。その結果、以下のことがわかった。

- ・衛星の視線方向に堤体がほぼ垂直な場合には、堤体からの反射強度が良好である。
- ・堤体の InSAR のコヒーレンス性は高く、干渉性は良好で、干渉縞が得られた。
- ・InSAR によりフィルダム堤体の沈下の定性的な傾向は得られたが、GPS の結果と比較して InSAR による沈下量は小さくなった。

PALSAR の解像度が約 10m という点などもあり、GPS の結果と比較して InSAR による沈下量が小さくなる傾向となったが、まだ取り組み始めたばかりの研究であり、今後も引き続き検討を行いたい。

平成 25 年度には、「だいち (ALOS)」の後継機である ALOS-2 の打上げが予定されている⁸⁾。ALOS-2 は解像度が 1~3m、データ取得範囲が約 3 倍など、現在運用中の「ALOS (だいち)」よりも高性能な L バンド SAR を搭載する予定である。また、政府は、「だ

いち」などの衛星データなどを統合してデータベース化する方針である⁹⁾。このようなことから、今後は SAR によるダムの外部変形量の計測がより高精度になるとともに、より SAR データの利用がしやすくなることが期待される。また、SAR データの 1 シーンには複数のダムが含まれていることが多く、複数のダムの外部変形を InSAR などにより一度に算出できる可能性もあると考えられる。今後も SAR によるダムの外部変形計測の検討を実施するとともに、SAR と GPS や測量などを統合した、より合理的で効率的なダムの外部変形計測方法についての検討を行っていきたい。

参考文献

- 1) 大内和夫：リモートセンシングのための合成開口レーダーの基礎，東京電気大学出版局，341p.，2004.
- 2) 国土地理院：干渉 SAR，<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>
- 3) 森山 隆：リモートセンシング衛星とその利用～だいちの活躍～，日本衛星ビジネス協議会，http://www.sspt-tokyo.org/archives/doc/pdf/doc0607_jaxa.PDF，2008.
- 4) JAXA：陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)，http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html.
- 5) JAXA：陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS)によるカザフスタン大雨・雪解け水の被害にともなう緊急観測，http://www.core.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_alos_kaz_100317.htm，2008.
- 6) 京都大学防災研究所地震予知研究センター：平成 20(2008) 年 岩手・宮城内陸地震，<http://www.reep.dpri.kyoto-u.ac.jp/IWAT1/insar.png>.
- 7) 山口嘉一，小堀俊秀：フィルダムの安全管理への GPS 計測の全面導入，検査技術，pp.40-47，2009.9.
- 8) JAXA：陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2)，http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_j.html.
- 9) 読売新聞朝刊記事，2010.8.27.

ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートのひび割れ観察手法の開発と実ダムへの適用

中野 靖¹ 岡田 和明² 山内 優³

堤高 100m 級の大規模なアーチダムにおいては、キャットウォーク等の目視点検設備からダム下流面に発生したひび割れを全体的に観察するのは困難である。今後、設備の高経年化や地震後のダムの安全性を評価する上で、ひび割れの性状を把握しておくことは有意義なことであると考えられる。本報告では、新たに開発された、高精度なビデオカメラを用いて遠方からダム下流面全体を比較的軽微なひび割れまで正確に観察できるシステムの概要ならびに実ダムへの適用結果について述べる。

キーワード: アーチダム, コンクリート, ひび割れ, 観察システム, ビデオカメラ,

1. はじめに

アーチダムは、薄いコンクリート壁のアーチ作用により貯水している。このため、他の形式のダムと比較してコンクリートには継続的に大きな応力が作用している。今回、報告するアーチダムでは、乾燥収縮や温度応力による軽微なひび割れが認められるが、目視観察による進展状況やブラムラインによる変位計測結果からは、ダムの安定性に問題ないことを確認している。

しかしながら、堤高 100m 級の大規模なアーチダムにおいては、高さ 15m 程度間隔で設置されているキャットウォーク等の目視点検設備からダム下流面に発生したひび割れを全体的に観察するのは困難である。今後設備の高経年化や地震後のダムの安全性を評価する上でひび割れの性状を把握しておくことは有意義なことであると考えられる。

このため、目視調査の補助的手段として、高精度なビデオカメラを用いて遠方からダム下流面全体を比較的軽微なひび割れまで正確に観察できるシステムを開発した。

本報告では、アーチダム下流面全体を観察可能なひび割れ観察システムの概要、および実ダムに本システムを採用して得られたひび割れ観察結果を示し、その適用性について述べる。

2. 開発の目的

2.1 アーチダムにおける目視点検の現状と課題

一般に、アーチダムでは、堤体コンクリートの健全性を確認するため、点検項目の一つとしてコンクリート表面のひび割れの有無とその性状調査が目視により行われている。

この目視観察は、アーチダム背面には空中に張り出した幅の狭いキャットウォークから行われている(図-1)。しかしこのキャットウォークは、一般的に高さ 15m 毎程度の間隔で設置されているため、ダム背面に発生したひび割れを全体的に詳細に観察するのは困難であった。



図-1 アーチダム背面のキャットウォーク

¹ 東京電力株式会社 松本電力所 土木建築グループ マネージャー

² 東京電力株式会社 工務部 工務土木グループ マネージャー

³ 株式会社東設土木コンサルタント 基盤情報部長

2.2 ダム全体が観察可能なシステムの開発

キャットウォークの設置状況に影響を受けずに、アーチダム背面に発生したひび割れを全体的に観察するために、高精度な望遠ズームレンズを装着したビデオカメラでダム下流側からダム全体を撮影し、撮影画像を自動的に変形してつなぎ合わせ、画像から精密な位置、幅、長さのひび割れ図を作成する新ひび割れ観察システムを開発した。デジタルカメラではなくビデオカメラを用いた理由は、ビデオ撮影は1秒間に30枚の画像を撮影するため、撮影時間が短く撮り漏れがなく、低コストであるためである。

3. 観察システムの概要

3.1 撮影装置

画像の撮影装置は、図-2 に示すように、ビデオカメラ、高倍率ズームレンズ、レーザ測距離計、目的の場所を漏れなく撮影するための自動制御装置他からなる。ビデオカメラはテレビ局で使用するような高精度なものである。ダム下流側からの撮影状況を図-3 に示す。

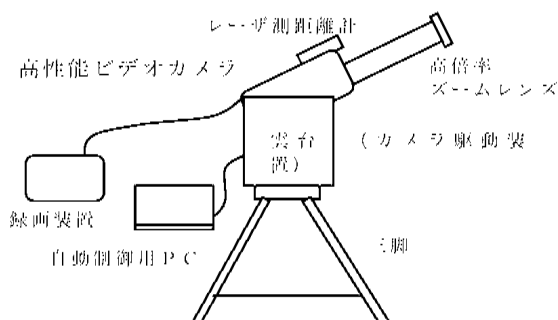


図-2 撮影装置

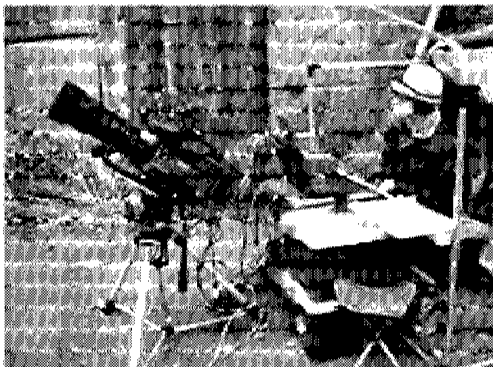


図-3 撮影状況

3.2 撮影方法

まず、ダム下流面からの距離および撮影幅を変えた試し撮影により画像精度の比較を行い、最適な撮影位置および撮影幅を決定する。画像の目標精度（撮影可能な最小ひび割れ幅）は、既往目視調査結果の最小分類に合わせて0.2mmとした。

撮影にあたっては、アーチダム下流面のような広い面を同じ精度で漏れなく撮影するために、以下の方法を用いた。

(1) ダム全体のブロック化

撮影距離の変化により撮影幅が変わることで、画像精度が変わることを防ぐため、ダム全体を15～20mメッシュにブロック化する。

(2) 各撮影ブロックの撮影角度および距離の測定

自動撮影や画像変形処理に必要なブロック四隅の水平角、鉛直角および距離をカメラ駆動装置、レーザ測距離計で測定し、パソコンに入力する。

(3) 撮影ブロック毎の自動撮影

パソコンへの入力情報に基づき、図-4 に示すように、各ブロックの上方から下方に若干オーバーラップさせながら左から右方向に撮影する。

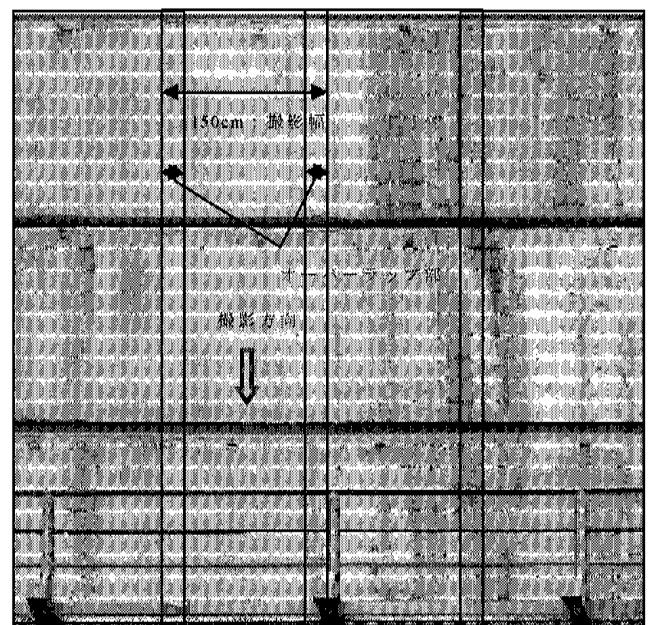


図-4 撮影方法

3.3 ひび割れ分布図の作成方法

(1) 画像の変形およびつなぎ合わせ

鉛直な壁を見上げて撮影すると、長方形は台形に見えるため、このままでは画像をつなぎ合わせる事ができない。このため、図-5 に示すように、正面から撮影したように長方形に変形できるような画像変形ソフトを作成し、各画像のつなぎ合わせを行う。

(2) ひび割れの抽出

ひび割れの抽出は、つなぎ合わせた撮影画像をひび割れが判別できるまで拡大し、1つ1つのひび割れをマウスまたはタッチペンでなぞることで行う。また、ひび割れ幅は、クラックスケールをディスプレイに表示して、ひび割れと比較することで判定した。ディスプレイ上でトレースされたひび割れ分布図の例を図-6 に、各ひび割れの基本データ例を表-1 に示す。

なお、各ひび割れの番号、始点・終点の座標、長さは、ディスプレイ上でトレースすることで自動的に記録されるため、ひび割れの抽出作業が効率的に行えるシステムとなっている。

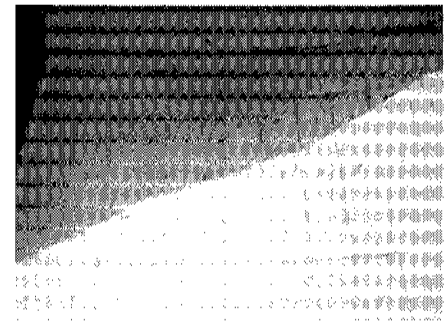


図-5 画像の変形

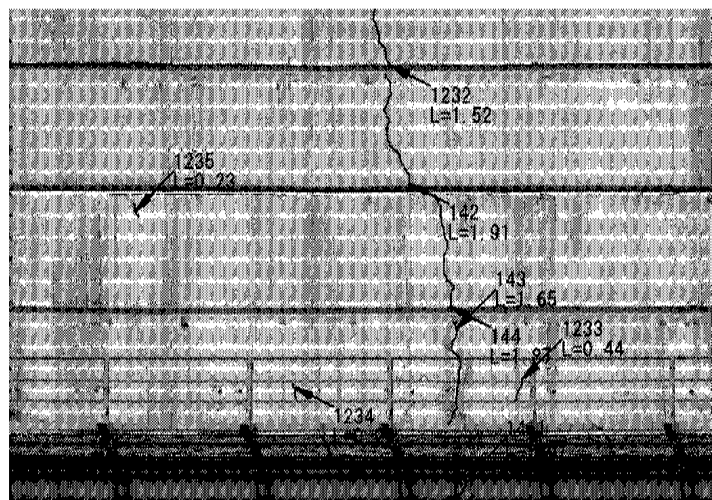


図-6 ひび割れ抽出の状況例

表-1 各ひび割れの基本データ例

番号	調査日	凡例	始点X	始点Y	終点X	終点Y	延長	面積	長辺	短辺	方向
282	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	265.92	107.54	266.02	106.06	1.74				↑
290	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	271.24	108.95	271.24	108.77	0.19				↑
300	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	274.67	141.33	275.34	139.69	1.93				↑
302	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	274.74	173.34	274.86	172	1.43				↑
310	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	275.12	137.11	275.42	135.56	1.79				↑
311	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	275.12	115.69	275.94	113.96	2.15				↑
317	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	275.51	129.83	275.8	128.93	0.99				↑
360	2007/11/12	はく離 はく落	243.57	135.56	243.69	136.44	1.91	0.08	0.89	0.12	
411	2007/11/12	あばた	243.59	141.82	244.34	143.34	4.3	0.68	1.53	0.74	
412	2007/11/12	あばた	243.59	137.58	244.76	139.7	6.15	2.06	2.12	1.17	
413	2007/11/12	あばた	253.86	137.58	254.46	139.66	4.82	0.8	2.08	0.6	
414	2007/11/12	あばた	254.74	137.94	256.12	139.6	5.24	1.28	1.66	1.39	
427	2007/11/12	ジャンカ	243.95	133.67	245.82	133.72	3.75	0.07	1.86	0.05	

4. 実アーチダムへの適用

4.1 観察方法

今回開発したひび割れ観察システムを用いて、実際のアーチダム下流面の観察を行った。撮影対象としたダムは、高さ 100m 超のアーチダムであり、竣工後 40 年程度経過している。

今回対象としたダムでは、下流面からの距離を 100m、撮影幅を 150cm とすることで、目標精度を満足し、かつ効率的に撮影することができた。また、撮影ブロック割りは、縦方向をキャットウォーク、横方向をブロックジョイントとした。

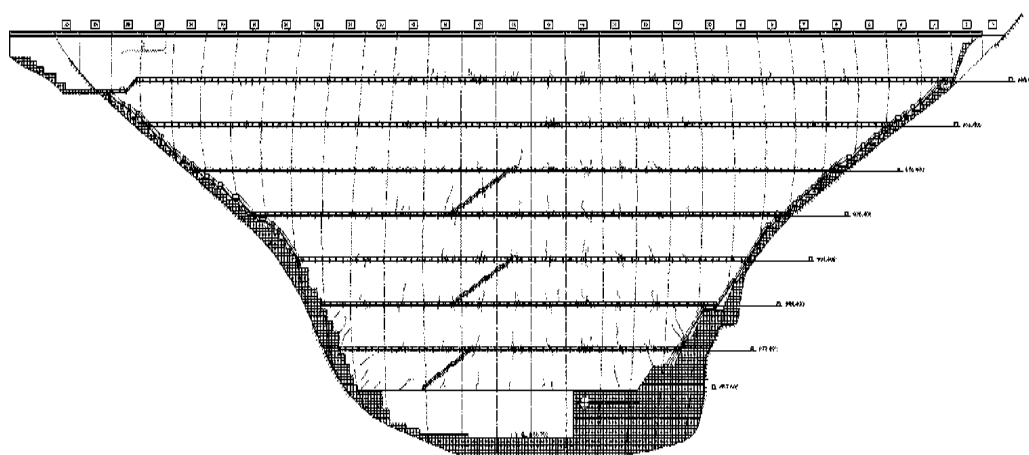
4.2 観察結果

従来のキャットウォークからの目視によるひび割れ観察結果と、今回開発したビデオカメラを用いたひび割れ観察システムによる観察結果を比較したものを図-7 に示す。

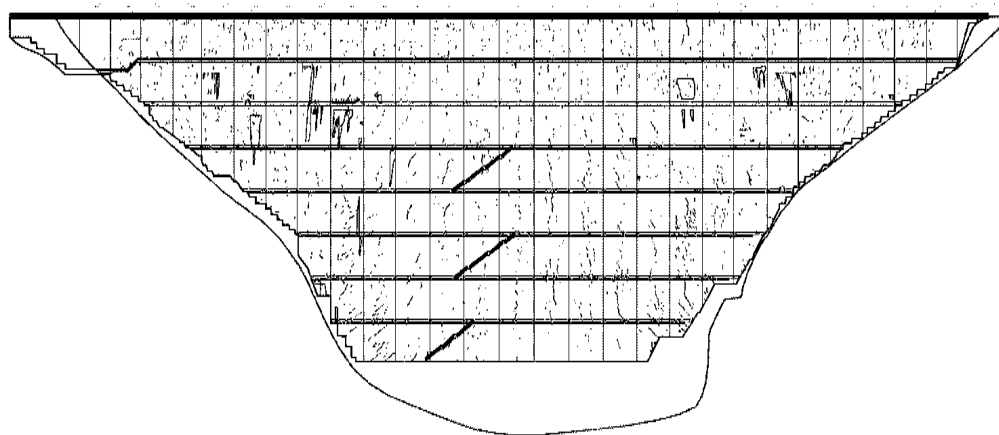
従来の目視による観察結果においては、キャットウォークから離れるにつれてひび割れ観察は困難となり、全体的なひび割れ分布が把握できていない状況であった。

これに対し、今回開発したひび割れ観察システムでは、これまで把握されていたひび割れに加えて、キャットウォーク設置標高間のひび割れについても新たに観察可能となり、下流面全体のひび割れ分布が把握できることが確認された。

また、従来の目視観察を行っていた範囲で、両者のひび割れ観察状況を比較したところ、目標精度としていたひび割れ幅 0.2mm のひび割れが今回開発したシステムでも判読でき、従来の目視観察と同等の観察精度を確保していることが確認された。



(a) 従来の目視による観察結果



(b) ひび割れ観察システムによる観察結果

図-7 下流面のひび割れ観察結果の比較

4.3 ひび割れ性状の考察

ひび割れ観察結果を評価するには数年後に同じ調査を実施し、ひび割れの進展の有無、新たなひび割れの発生の有無を評価することが重要であると考えられるが、現時点での初回観察結果からの考察は以下のようなものである。

全体としては、連続性の高いひび割れは無く、大半がマイクロクラックである。これらは乾燥収縮や温度応力によるものと考えられる。ただし以下に示すやや連続性があり、かつ一定方向を向いたひび割れが特徴的に分布している。

① 斜め方向のひび割れ

左右岸の低標高部からダムの2/3ほどの高さまで、着岩面に対してほぼ垂直方向となる斜め方向のひび割れが分布している（図-8の破線で囲まれた範囲）。ひび割れ幅は大半が0.5mm以下であるが、着岩面付近には0.5mm以上のものも一部分布している。ひび割れが断続的なことから現段階では問題ないものと考えられるが、今後も継続的に監視していく必要がある。

② 鉛直方向のひび割れ

ダム中央付近の着岩面からダムの2/3ほどの高さまで、鉛直方向のひび割れが分布している（図-8の一点鎖線で囲まれた範囲）。前述の斜め方向のひび割れと同様に、ひび割れ幅は大半が0.5mm以下であるが、ごくわずかに0.5mm以上のものも分布している。ひび割れが断続的なこと

から現段階では問題ないものと考えられるが、今後も継続的に監視していく必要がある。

以上から、今回新たに観察されたひび割れの性状については、上記のようなやや連続性のある特徴的なひび割れが一部に確認されたものの、全体としては従来の目視で観察されていたものと同様に、ひび割れが断続的なことから現段階では問題ないものと考えられる。

5. おわりに

アーチダム下流面のひび割れについては、経年による変化や地震後における変化を把握することで、ダムの安全管理に万全を期すことができるものと考えられる。今回開発したひび割れ観察システムを用いることで、一定期間経過後あるいは地震後におけるひび割れの進展を全体的かつ数値的に捉えることができる。このため、本システムはダムの定期点検または臨時点検における従来の目視観察の補助として有効であると考えられる。

また、実際のアーチダムにおいて、本システムを用いてひび割れを観察したところ、従来の調査法では見えなかった範囲のひび割れを明瞭に観察することができた。これらのひび割れは、一部にやや連続性のある特徴的なものが分布しているものの、全体としては微細なものがほとんどで、連続性も低いことから、大半は乾燥収縮や温度応力によるものと考えられる。

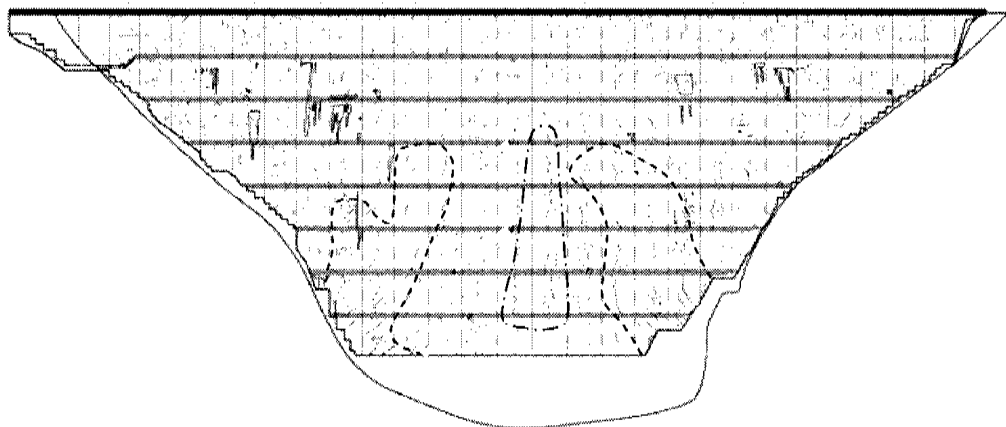
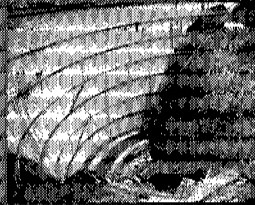


図-8 やや連続性のあるひび割れの分布

ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートのひび割れ観察手法の開発と実ダムへの適用



東京電力（株） 松本電力所土木建築グループ 中野 靖
東京電力（株） 工務部工務土木グループ 岡田 和明
（株）東設土木コンサルタント 基盤情報部 山内 優

1

1. はじめに

・ダム の安定性評価は日本ダム会議が定めた構造物管理基準により行われている。

今回報告するダムは目視観察によるひび割れの進展調査やフライングラインによる変位計測結果から、ダムの安定性に問題無いことが確認されている。

本観察手法はアーチダム背面全面の目視調査を、効率的に行うための補助的手法である。

・開発したアーチダム背面のひび割れ観察システムと、実ダムへの適用性を紹介する。

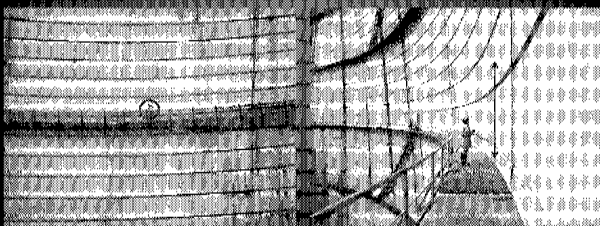
2

2. 開発目的

アーチダム背面に発生したひび割れを全体的に観察する

従来の観察方法：キヤットウォークからの観察

課題：ダム背面に発生したひび割れを全体的に詳細に観察できない



3

3. 観察システムの概要

ダム全体のビデオ撮影
(30枚/秒)

自動制御電動雲台

画像の変形歪み合わせ

専用ソフト

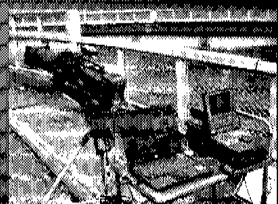
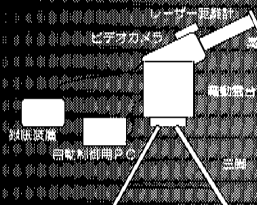
PCディスプレイ
でひび割れの図化

専用ソフト

ひび割れ進展の数値管理
(位置、幅、長さ)

4

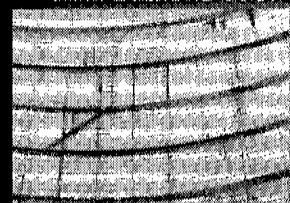
3. 1 撮影装置



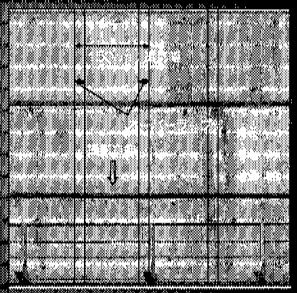
5

3. 2 撮影方法

(1) 撮影範囲のブロック化
(撮影幅、撮影速度を一定にするため)



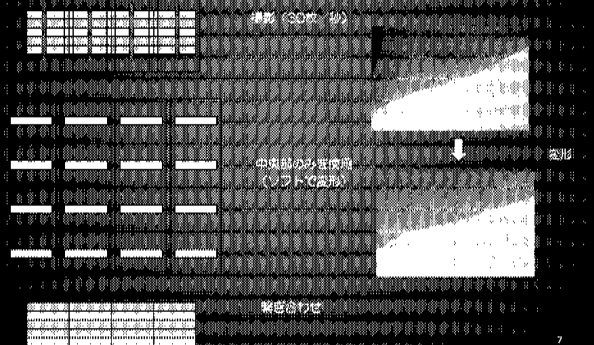
(2) ブロック位置情報の入力
四隅の鉛直水平角、距離



6

3. 3 ひび割れ分布図の作成方法

(1) 画像の変形・繋ぎ合わせ



7

(2) ひび割れの抽出



8

各ひび割れの基本データ例

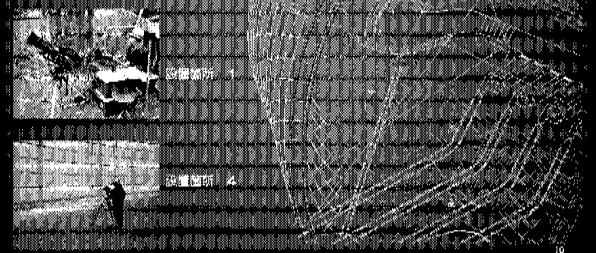
番号	撮影日	尺目	始点X	始点Y	終点X	終点Y	長さ	面積	長さ	面積	方向
292	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	265.92	107.54	286.00	106.05	1.74				1
290	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	271.24	109.93	271.24	106.77	0.10				1
300	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	274.67	141.33	275.34	139.63	1.93				1
302	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	274.74	173.34	274.80	172.14	1.43				1
310	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	275.12	137.11	275.42	133.66	1.78				1
311	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	275.12	115.09	275.94	113.90	2.15				1
317	2007/11/12	クラック(0.20mm以上0.50mm未満)	275.57	129.55	275.00	129.93	0.98				1
350	2007/11/12	ゴケ類 ほか	242.57	135.06	243.69	136.44	1.91	0.98	0.99	0.12	1
411	2007/11/12	あばた	243.59	141.92	244.34	143.34	4.3	0.68	1.61	0.74	1
412	2007/11/12	あばた	243.59	137.26	244.75	139.7	6.13	7.68	2.17	1.17	1
413	2007/11/12	あばた	253.90	137.59	254.40	138.95	4.92	0.9	2.69	0.6	1
414	2007/11/12	あばた	254.74	137.94	256.12	139.7	5.24	1.48	1.96	1.99	1
427	2007/11/12	ジャンカ	243.93	133.07	245.92	132.72	3.73	0.97	1.80	0.05	1

9

4. 実アーチダムへの適用

4.1 観察手法

撮影箇所：約100m離れた4箇所
撮影幅：150cm

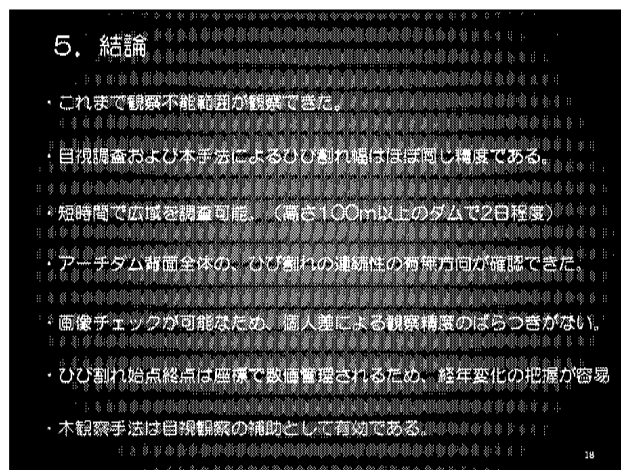
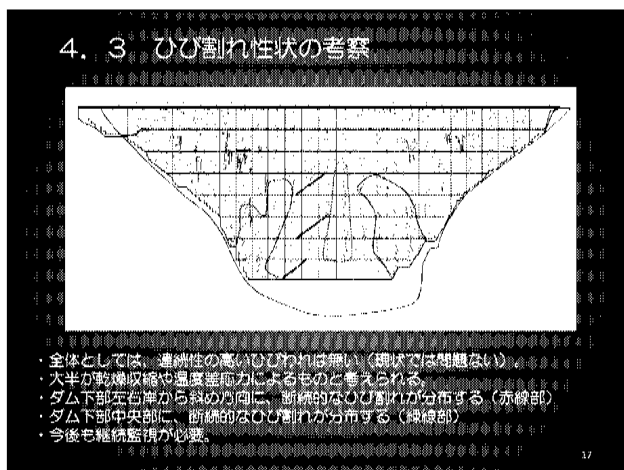
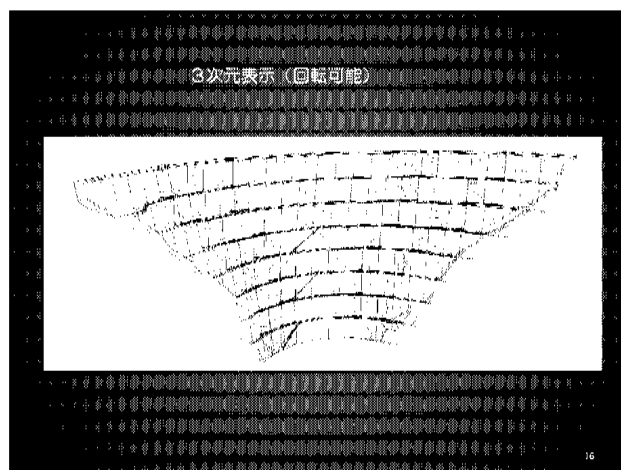
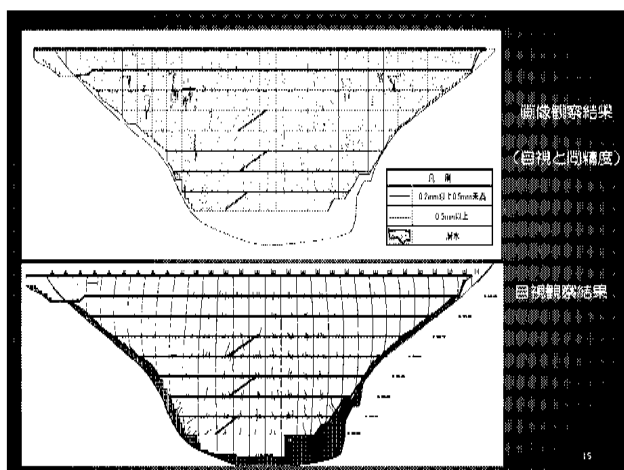
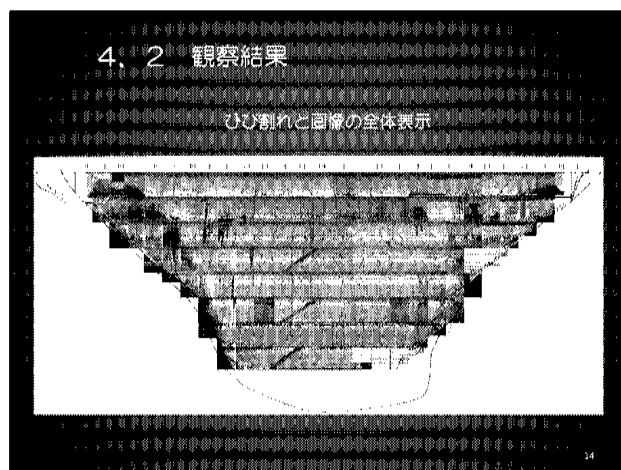
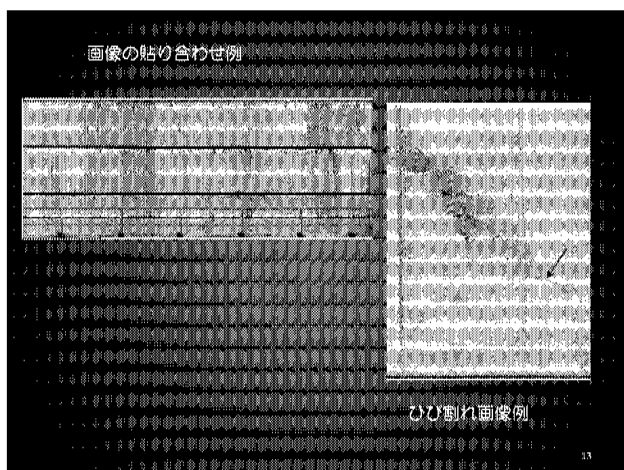


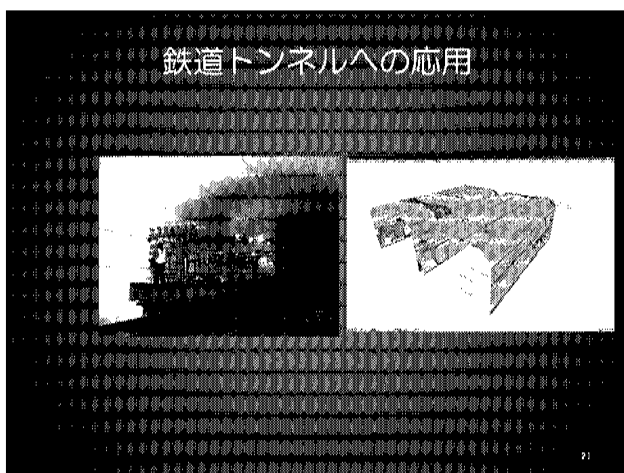
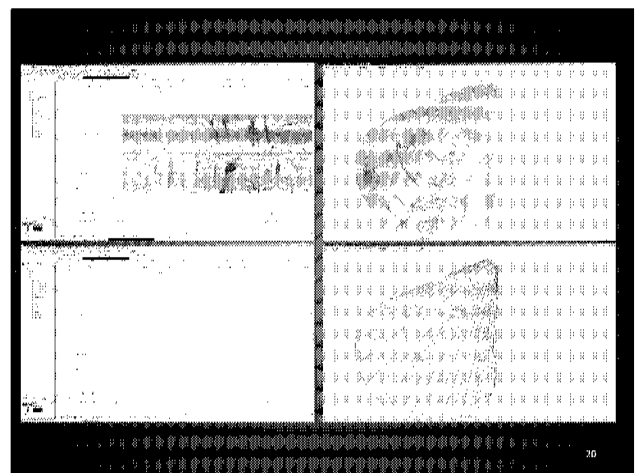
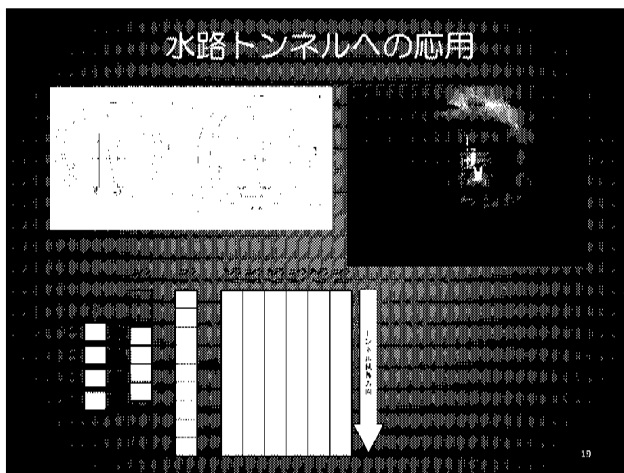
10

撮影状況



11





既設アンカー緊張力モニタリングシステム（Aki-Mos）の開発

田中 尚¹ 藤澤 和範² 横田 弘一³

近年、地すべり対策や斜面安定対策に用いられた既設アンカーにおいても予防保全型の維持管理が求められている。筆者らはアンカーの維持管理を高度化するために「既設アンカー緊張力モニタリングシステム」を開発した。本システムは、特別に設計された“荷重計”と荷重計を取付け・交換するための“緊張治具”、そして荷重計の計測値を取得するための“計測データ取得システム”の3つの要素技術からなり、それらを組合せて既設アンカーへの荷重計の取付けと荷重計計測値の取得を行う。本システムの運用マニュアルを作成したので、ぜひ活用して頂きたい。

キーワード: グラウンドアンカー、緊張力モニタリング、維持管理、荷重計、取付け・交換可能

1. はじめに

グラウンドアンカー（以下、アンカーという）工法が我が国に導入されて約半世紀が経過した。国内での使用の歴史は、1957年に藤原ダムの副ダムにおいてプレストレスを与えるために採用したアンカーに始まったとされている¹⁾。それから現在までに、アンカー技術基準が1977年に土質工学会（現在の地盤工学会）において制定され、その後、アンカーに高性能な防食構造が要求されたことから、1988年および1990年にアンカー技術基準の改訂が行われた。これを期にアンカーの二重防食の義務化^{2)・3)}が図られ、技術の進歩とともに多くのアンカー工法が開発されてきた。現在のアンカー工法は、我が国の脆弱な地質構造を補い、効率的に社会資本を整備する上で必要不可欠な技術になっている。

その一方で、近年、高度経済成長期に建設された社会資本は更新の時期を迎え、従前の対処療法的な維持管理から予防保全型の維持管理が求められている。こうした社会的な背景に応じ、地すべり対策や斜面安定対策に用いられた既設アンカーにおいても同様なことが求められている。しかしながら、現状では確立された既設アンカーの維持管理技術は開発されていない。

そこで、（独）土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチームと民間企業8社（日特建設（株）、守谷鋼機（株）、ライト工業（株）、（株）共和電業、（株）エスイー、（株）東横エルメス、坂田電機

（株）、（株）東京測器研究所）で共同研究を実施し、アンカーの維持管理を高度化するために「既設アンカー緊張力モニタリングシステム（Aki-Mos）」（以下、本システムという）を開発した。

なお、Aki-Mos（アキモス）とは、「既設アンカー緊張力モニタリングシステム」をローマ字書きにした頭文字（kisetsu Anka kinchouryoku Monitaringu sisutemu）をつづったものである。

2. アンカーの構造特性と維持管理における課題

2.1 アンカーの構造特性

地すべり対策や斜面安定対策に用いられているアンカーの模式的な構造を図-1に示す。アンカーの構造において、テンドンに作用している引張り力（以下、アンカー緊張力という）は、アンカーヘッド、支圧板及び受圧構造物を介して移動土塊に抑止力として伝達している。

そのため、対策された斜面の安定性を確保する上で重要であるアンカー緊張力は、受圧構造物背面の移動土塊が降雨の影響により地下水位が上昇し滑動した場合、あるいは地震などの外力により変形した場合、それに付随して変動する特性を有している。また、テンドンの腐食やグラウトと安定地盤（アンカー定着地盤）との付着強度の低下が進行する場合などにおいても、アンカー緊張力は変動する特性を有している。

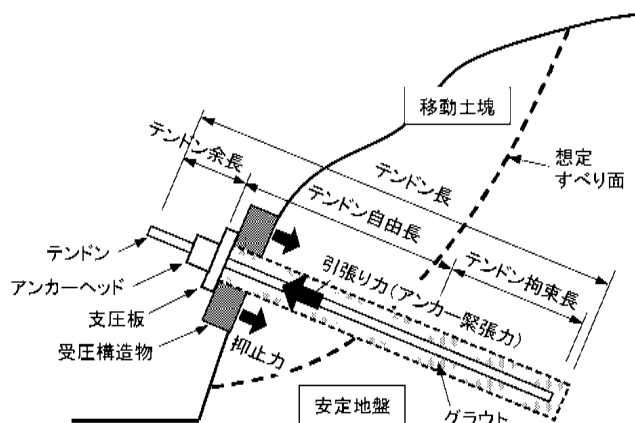
すなわちアンカー緊張力は、斜面を安定化させる力

¹ 既設アンカー緊張力モニタリングシステム研究会 事務局長（日特建設株式会社 技術本部）

² 同 技術企画委員長（独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム）

³ 同 会長（ライト工業株式会社 生産事業本部 施工技術部）

を発揮している構造物というだけでなく、抑止している移動土塊の変状ならびにアンカー自体の健全性を捉えることができるセンサーの特性を有している。



※アンカーとは、作用する引張り力を適当地盤に伝達するためのシステムをいう。
※テンドンとは、引張り力を伝達する部材(PC鋼より線、PC鋼棒など)をいう。

図-1 アンカー構造模式図

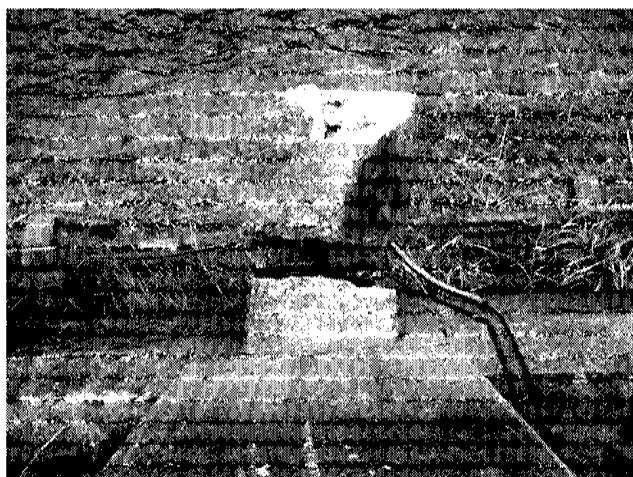


写真-1 テンドンの腐食によるアンカーの破断事例

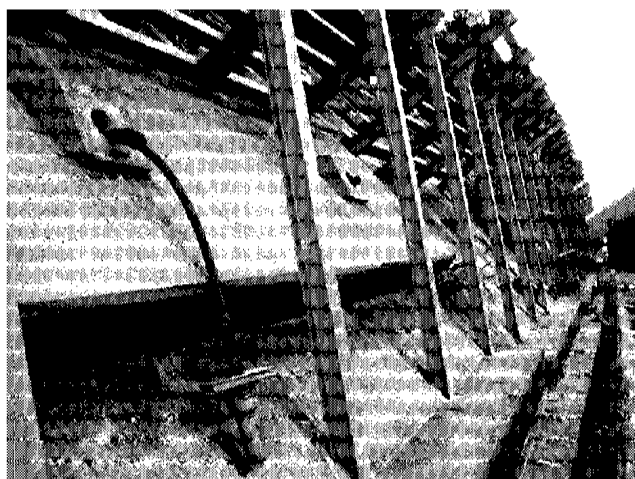


写真-2 想定外の地すべりによるアンカーの破断事例

2.2 アンカー緊張力計測の重要性

アンカーは、構造の特性上、アンカーで対策した斜面の動態観測、またアンカー自体の健全性診断に利用できる可能性を有しているが、施工後は、現場の立地条件などの関係から必ずしも十分な緊張力計測が行われているわけではないのが現状である。

昨今、1990 年以前に施工されたアンカーは、防食構造が十分でないことからテンドンの腐食が進み、破断してアンカーの機能を果たせなくなった事例（写真-1）が散見される。一方、防食構造が十分なアンカーでも、想定外の地すべり滑動により、テンドンに過剰な引張り力が作用して破断した事例（写真-2）が報告されている。

仮に、こうした現場においてアンカー緊張力の計測を経時的に実施していれば、その変動からアンカー自体の健全性や斜面の安定性を評価し、破断前に対策を講じて被害を最小限にとどめることが可能であったと考えられる。さらには経済性に優れた対策を講じられることも少なくないと考えられる。

以上のことから、経時的にアンカー緊張力を計測することは、非常に重要であることは間違いない。

2.3 既往のアンカー緊張力計測技術の課題

既往のアンカー緊張力計測技術には、実用的な方法として 2 種類ある。それぞれの方法にはコスト面や計測機器の耐用年数の課題があり、現状ではアンカーの供用期間を通じて用いるには十分ではないと考える。

ここで、既往のアンカー緊張力計測技術の概要と課題について整理する。

(1) リフトオフ試験によるアンカー緊張力計測

リフトオフ試験とは、施工されたアンカーのテンドン余長やアンカーヘッドを特殊構造の治具で掴み、それを油圧ジャッキによって引張り、アンカーヘッドの変位と油圧ジャッキ圧力の関係から残存しているアンカー緊張力を求めるものである（図-2、写真-3）。

本方法は、任意の場所とタイミングで実施できるものの、得られるアンカー緊張力のデータは試験時のみにとどまり、経時的な計測は不向きである。また、試験に用いる機材は、施工時の重量が重いものを使用する場合が多いため、試験実施に要する仮設が大掛かりとなる。その結果、試験全体費用に対する仮設費用の

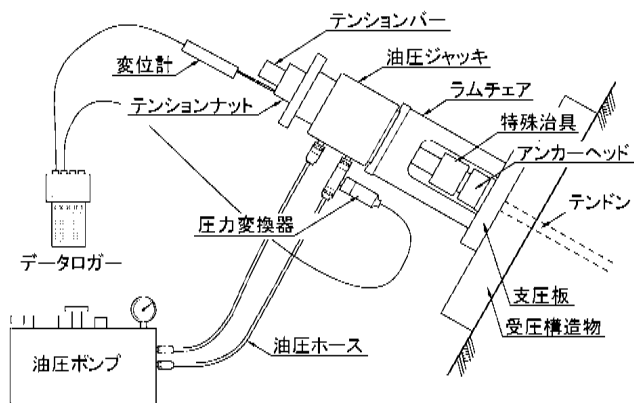


図-2 リフトオフ試験の概要

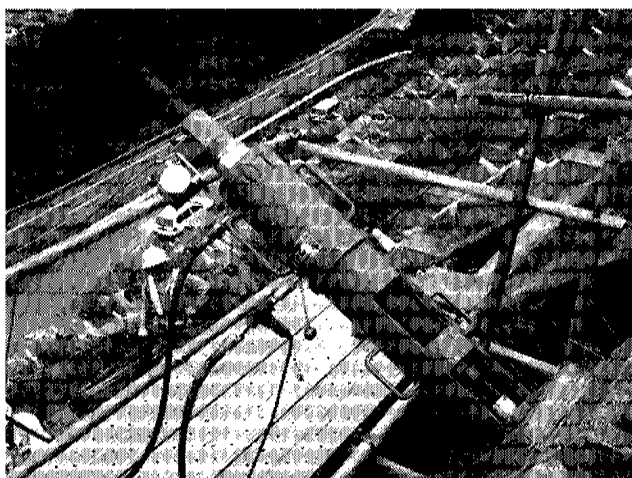


写真-3 リフトオフ試験の現場状況

割合が比較的高い傾向にある。

(2) 荷重計によるアンカー緊張力計測

荷重計によるアンカー緊張力計測では、アンカーの施工後、常にアンカー緊張力が荷重計に作用するように設置する。一般的には荷重計を2枚の支圧板で挟み込む方法が採用されている（写真-4）。

本方法は、荷重計とデータ収録装置を併設することで、アンカー緊張力の経時変化を把握することが可能である。また、現在のネットワーク通信技術を活用すれば、荷重計計測データを事務所などで一次的に管理するシステムの構築が可能である。しかしながら、現状では、こうしたシステムを構築する際の初期設備費や維持管理費の面から、荷重計は設置しているがデータを取得するシステムは併設されていない場合が多いと推測される。この背景には荷重計計測データ専用の管理システムが開発されていないことが考えられる。

また、一般的に荷重計の耐用年数は5年から10年⁴⁾

と言われており、アンカーの供用期間に対して短く、荷重計の耐用年数を越えてアンカー緊張力を計測するためには、荷重計の交換が必要になる。しかしながら、既設アンカーに対しての荷重計の交換や後からの設置は、テンドン自由長や残存しているアンカー緊張力と再緊張余長の関係などから困難な場合が多い（図-3）。特に「クサビ定着方式」のアンカーは施工後にテンドン余長部を切斷することが多いため、荷重計の交換や新規設置は非常に困難である。

3. 既設アンカー緊張力モニタリングシステム

これまでに、アンカー緊張力計測の重要性と既往の実用的なアンカー緊張力計測技術の課題を述べた。筆者らは、これらを踏まえ、既設アンカーへの荷重計の取付け・交換を容易にし、計測したデータを簡易な収録装置に蓄積させて無線通信により遠隔から取得でき

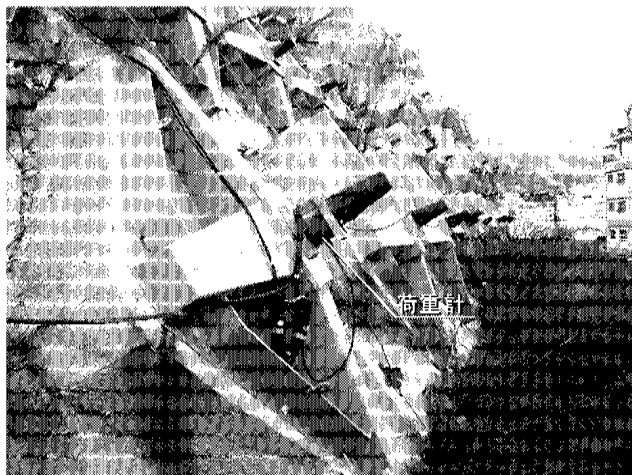


写真-4 荷重計によるアンカー緊張力計測

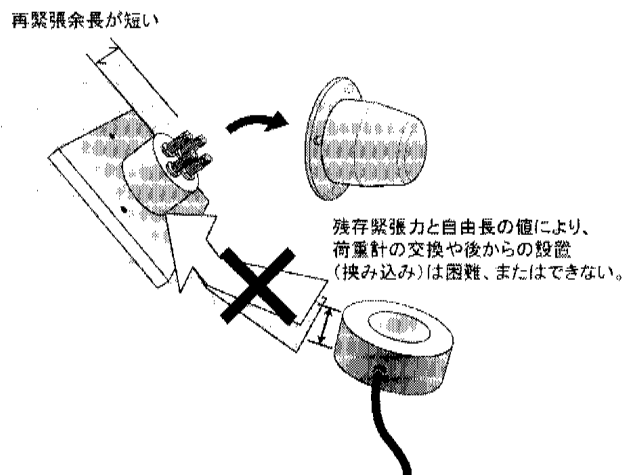


図-3 既設アンカーへの荷重計取付け時の問題点

る一連のアンカー緊張力計測技術「既設アンカー緊張力モニタリングシステム（Aki-Mos）」を開発した。

なお、本システムにおけるアンカー緊張力計測システムの開発仕様は、国内において施工実績の多いアンカーを対象に設定した。具体的には、1980年代後半から1990年代後半においてシェアが高かった「クサビ定着方式」のアンカーとした。また、アンカーの設計アンカー力を500kN以下（500kNタイプ）と1,000kN以下（1,000kNタイプ）に分けて開発を行なった。計測データ取得システムの開発仕様は、アンカーを維持管理する上で必要とされるデータの記録回数や取得回数、また管理する作業の効率性を検討し設定した。

3.1 システムの特徴

本システムの運用イメージを図-4に、システムの構造を図-5に示す。そして、本システムが有する特徴を以下に挙げる。

特長①：アンカーに導入されている緊張力を低下させることなく、既設アンカーへの荷重計の取付け・交換が可能である。荷重計の寿命が到来しても、新しい荷重計に交換することでアンカーの供用期間を通しての緊張力計測が可能である。

特長②：荷重計計測データを簡易なデータ収録装置で蓄積し、さらにデータを無線通信により遠隔から取得できる。商用電源を必要とせ

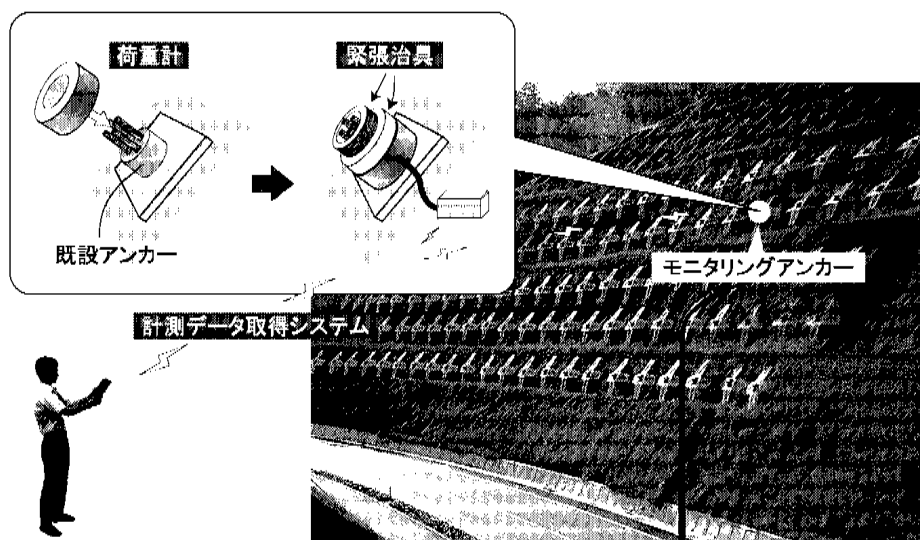


図-4 本システムの運用イメージ

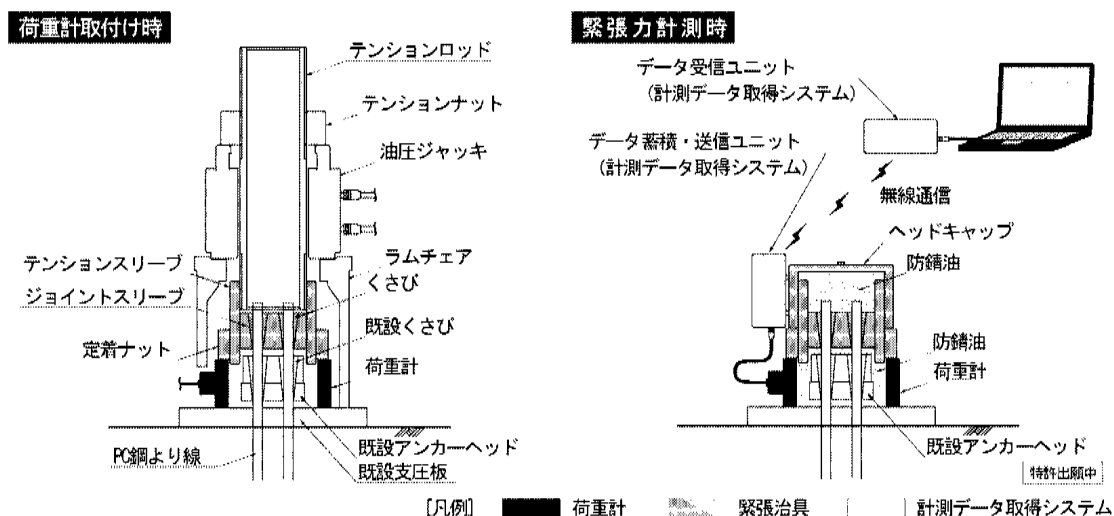


図-5 システムの構造

ず、アンカー緊張力データを経時的に把握できるため、維持管理費の低減が図れる。

特長③：従来の同等規格の油圧ジャッキ等と比較し、開発した緊張装置および治具はコンパクトかつ軽量である。作業性と安全性の向上、さらに作業に伴う仮設費の低減が図れる。

3.2 システムを構成する要素技術

本システムは“荷重計”と荷重計を取付け・交換するための“緊張治具”，そして荷重計の計測値を取得するための“計測データ取得システム”の3つの要素技術から構成されている（図-4）。そして、それらを組合せ、既設アンカーへの荷重計の取付け（図-5 左）と荷重計計測値の取得（図-5 右）を行う。

（1）荷重計

荷重計は、測定原理の異なる“ひずみゲージ式”，“差動トランス式”，“油圧式（ひずみゲージ式圧力変換器付）”の3種類を開発した（図-6）。形状・寸法は既設アンカーヘッドの外側へ荷重計が配置できる内径、かつ開発したラムチェアの内側に配置できる外径とした。

（2）緊張治具

緊張治具は、緊張装置と治具からなる。緊張装置は、荷重計を取付ける時に使用するラムチェア、油圧ジャッキ、テンションロッド、テンションナットからなる。治具は、荷重計を取付けた後に現場に存置されるジョイントスリーブ、テンションスリーブ、定着ナットからなる（図-7）。

それぞれの構造・寸法は、既設アンカーのアンカーヘッドや支圧板の大きさ、荷重計との組合せを検討し決定した。特に現場での作業性を向上させるために、緊張装置の構造・寸法は、極力小型かつ軽量なものとした。

（3）計測データ取得システム

計測データ取得システムは、荷重計の測定原理に合わせて、“ひずみゲージ式用”および“差動トランス式用”の2種類を開発した。システム構成は荷重計により計測したデータを蓄積させる「データ蓄積・送信ユニット」と、遠隔からデータを取得するための「データ受信ユニット」からなる（図-8）。

「データ蓄積・送信ユニット」は、アンカーへの

ッドキャップの外側に取付け、計測したデータを最大 2,200 回分のデータ蓄積することができる。そして、「データ受信ユニット」を用い、任意のタイミングで無線通信によりデータを受信することができる。データ蓄積・送信ユニットは、維持管理の容易さを考慮し、市販の乾電池を電源として1日2回のデータ蓄積と1回/月のデータ取得であれば約3年間の稼働を可能としている。なお、計画する計測期間やデータ取得回数、消費電力設定、電源容量などの組合せにより、現場に応じた設定ができる。

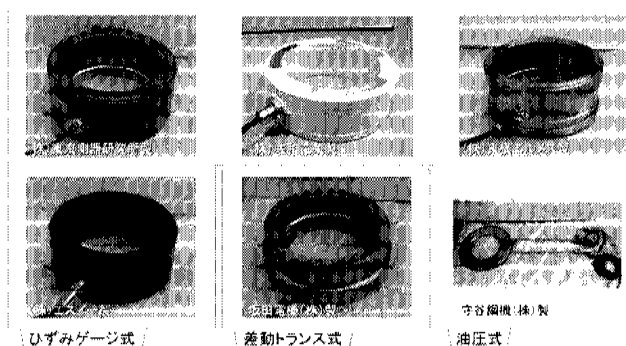


図-6 開発した荷重計（1,000kN タイプ）

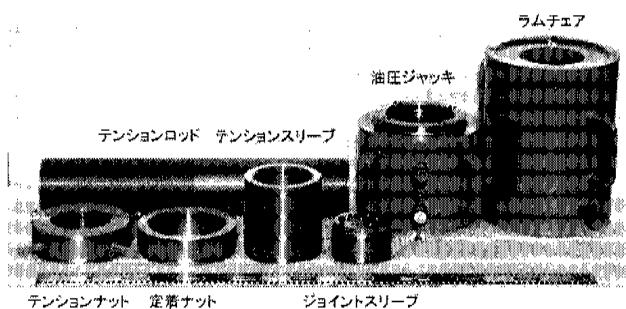


図-7 開発した緊張治具（1,000kN タイプ）

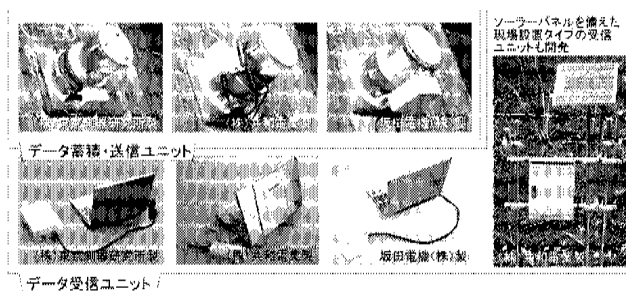
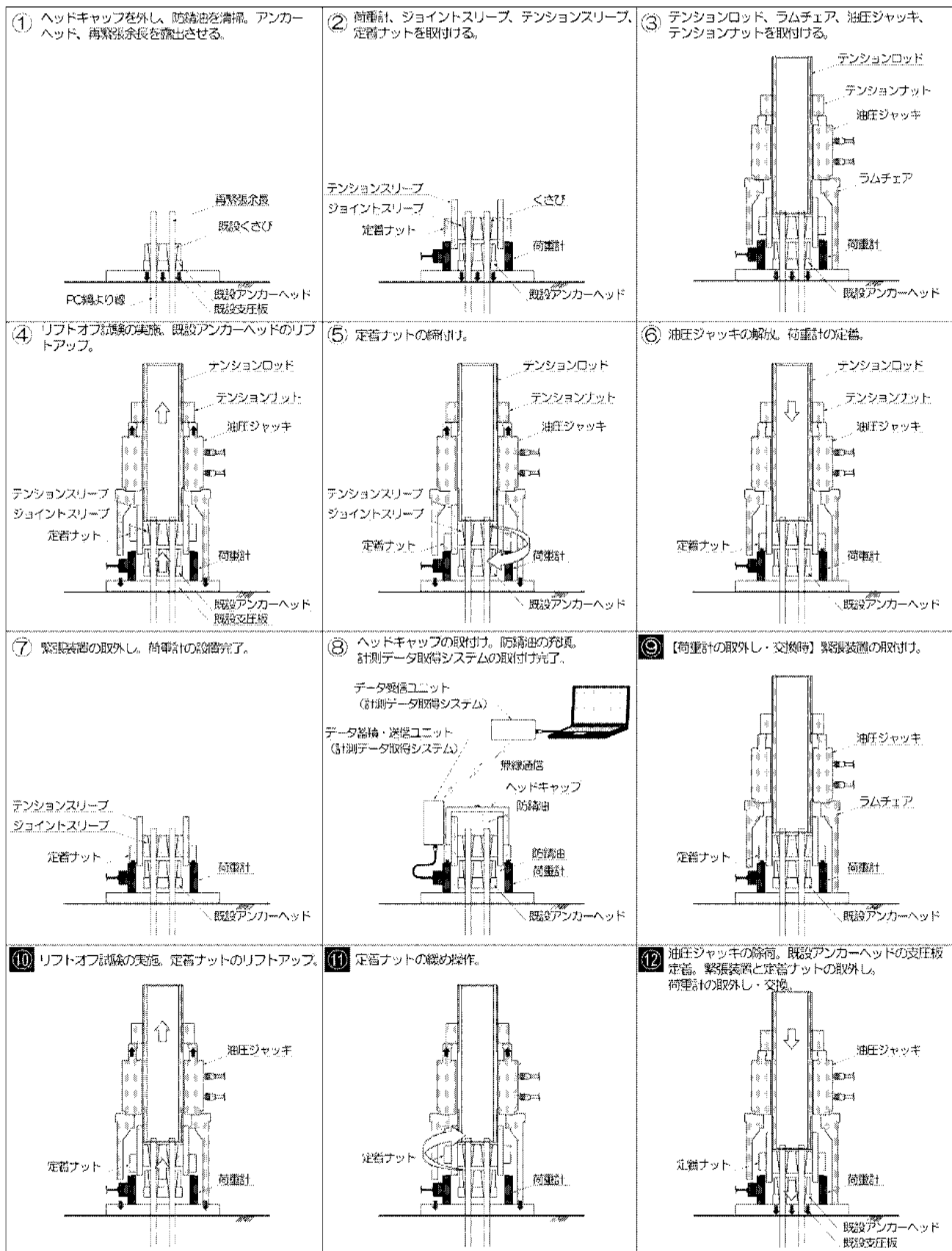


図-8 計測データ取得システム



①～⑧：荷重計の取付け手順

⑨～⑫：荷重計の取外し・交換手順

図-9 荷重計の取付け・交換手順

3.3 荷重計の取付け・交換手順

荷重計の取付け・交換手順を図-9 に示す。

荷重計を取付けるにあたり、まず既設アンカーに緊張治具を取付ける（図-9 ①～③）。具体的には、アンカーヘッドの外側に円筒形の荷重計を被せると共に、PC 鋼より線の再緊張余長（500kN タイプは 60mm、1,000kN タイプは 70mm 必要）を利用してジョイントスリーブ、テンションスリーブ、定着ナットを取付ける。そして、ラムチェアと油圧ジャッキを組立てる。

次に、リフトオフ試験を実施し、アンカーの残存引張り力を求める。これを指標に荷重計定着時の緊張力を決定する（図-9 ④）。

そして、リフトオフ試験により既設アンカーヘッドが既設支圧板から浮いた状態（3mm 以上が望ましい）で定着ナットを締付け、ジャッキの油圧を解放することで荷重計へアンカー緊張力を移行させる（図-9 ⑤～⑦）。

荷重計を取付けた後には専用ヘッドキャップにより頭部防錆処理を行う。そして、ヘッドキャップにデータ蓄積・送信ユニットを取付ける（図-9 ⑧）。

荷重計の取外しが必要な場合は、取付けの逆手順を実施する（図-9 ⑨～⑫）。

4. 現場実証試験

開発した荷重計、緊張治具、データ取得システムに対して室内試験やアバットメント試験を実施した後、現場における実用性の評価を行うために現場実証試験を実施した（写真-5）。試験は、500kN タイプでは約1年間、1,000kN タイプでは約8ヶ月間実施した。その結果、荷重計の取付け、取外し作業がスムーズに行なえること、荷重計により計測したデータをデータ蓄積・送信ユニットに蓄積させ、50m 程度離れた場所からデータを取得できることを確認し、本システムの実用性を実証することができた。

5. 運用マニュアルの作成

本システムの完成後、現場への導入を図るために必要な運用マニュアルを、土木研究所資料⁹⁾として作成した。マニュアルは現場での扱い易さを考慮して「本文・解説型」とし、図-10 のような構成となっている。

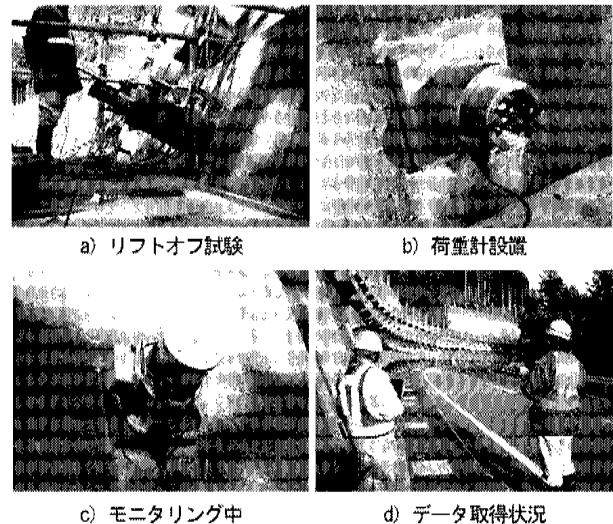


写真-5 現場実証試験（1,000kN タイプ）の状況

- 第1章 はじめに …… 目的、技術概要、用語の定義
- 第2章 システム構成 …… 各要素技術の基本性能
- 第3章 適用条件 …… 適用できる現場条件
- 第4章 事前調査・計画 …… 資料・現地調査および導入計画の方法
- 第5章 モニタリング …… 実現場におけるモニタリングの作業手順
- 第6章 Q&A …… 導入検討・運用時の想定される疑問点と回答
- 第7章 巻末資料 …… 外観図および緊張治具と荷重計の組合せ図

図-10 運用マニュアルの構成と主な内容

6. おわりに

今後、アンカーおよびアンカーにより対策された斜面の維持管理を行っていく上では、アンカー緊張力の計測は必須項目であり、その重要性は益々高くなっていくと考えられる。アンカー管理者および斜面防災に携わる技術者等の関係者には、ぜひ本システムを活用した効率的な維持管理を実施して頂きたい。

なお、現在は「既設アンカー緊張力モニタリングシステム研究会」を設立し、技術の向上と普及の促進を通じて斜面保全・斜面防災に貢献する活動を進めている。

最後に、本システムの開発にあたり、現場実証試験の現場をご提供して頂きました関係者の皆様に、紙面をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社) 土質工学会：アースアンカー工法，1976
- 2) (社) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，1988
- 3) (社) 土質工学会：土質工学会基準－グラウンドア

ー設計・施工基準，同解説，1990

- 4) (社)地盤工学会：地盤工学会基準ーグラウンドアンカー設計・施工基準，同解説 (JGS4101 2000)
- 5) (独)土木研究所：既設アンカー緊張力モニタリングシステム運用マニュアル，土木研究所資料第 4171 号，

2009

※運用マニュアルは，下記 URL よりダウンロード可能
<http://www.db.pwri.go.jp/kenkyu/indexD.asp>
キーワードに“アンカー”と入れて検索

既設アンカー緊張力モニタリングシステム(Aki-Mos)の開発

2010.10.1

独立行政法人 土木研究所 土砂管理研究グループ
地すべりチーム 阿部大志



Aki-Mos 既設アンカー緊張力モニタリングシステム

口通称名 Aki-Mos(アキモス)

ki	setsu
A	nka
ki	nchouryoku
Mo	nitaringu
S	isutemu




Aki-Mos 既設アンカー緊張力モニタリングシステム



— 3つの要素技術 —
既設アンカーに荷重計を取付け、
緊張力をモニタリングするシステムです

取付 交換 簡易 軽量 安全



目次

1. グラウンドアンカーの破断事例
2. アンカー緊張力測定の必要性
3. システムの特徴
4. システム開発の過程
5. システムの詳細
6. Aki-Mos研究会



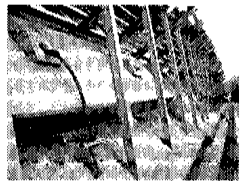
1. グラウンドアンカーの破断事例



グラウンドアンカーの維持管理

口アンカーの機能：計画された緊張力を発揮
 > アンカーの破断や緊張力の低下は、
 補強構造物の安定性の低下

口維持管理：緊張力の計測・モニタリングが必要
 > 施工後の十分な管理がなされておらず、
 現在の緊張力が不明

腐食による破断 地すべり滑動による破断

6

2. アンカー緊張力測定 の必要性

維持管理 課題

腐食アンカー緊張力モニタリングシステム開発

グラウンドアンカーの維持管理

Aki-Mos

- アンカーの機能：計画された緊張力を発揮
 - アンカーの破断や緊張力の低下は、補強構造物の安定性の低下
- 維持管理：緊張力の計測・モニタリングが必要
 - 施工後の十分な管理がなされておらず、現在の緊張力が不明

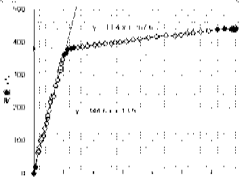



腐食による破断 地すべり滑動による破断

リフトオフ試験の課題

Aki-Mos

- 油圧ジャッキを用いてアンカーを引張る
- 荷重－変位曲線より、残存緊張力を求める
- 既設アンカーの緊張力測定が可能

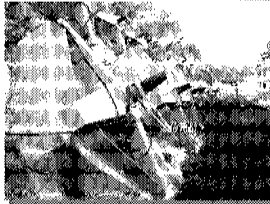



- ◆得られるデータは試験時のみ
- ◆得られるデータに対して仮設費割合が大きい

荷重計による計測の課題

Aki-Mos

- アンカー施工時に設置
- 経時的データを取得可能



- ◆自動計測システムを組むか、頻繁に測定を実施
- ◆アンカー供用年数に比べ、荷重計の耐用年数が短い
- ◆荷重計の交換が困難である

既設アンカーへの荷重計取付け

Aki-Mos

- 既設アンカーに荷重計を取付けられないのか？

しかし・・・

- 再緊張余長が短い場合、除荷・再緊張が困難
- 荷重計分の高さの隙間を空けるとなると、緊張力が増大



□多くのアンカーは、荷重計の設置ができない

↓

□既設アンカー緊張力モニタリングシステムの開発
✓(独)土木研究所 地すべりチームと民間8社の共同研究

3. システムの特徴

Aki-Mos

腐食アンカー緊張力モニタリングシステム開発

システムの特徴 (1/5) Aki-Mos

今まで不可能であった
既設アンカーへの荷重計の取付け問題を解決！

取付 既設アンカーに荷重計を取付け可能

- これからでもアンカーの緊張力モニタリングを開始できます
- 過去に設置されたアンカーの維持管理に役立ちます



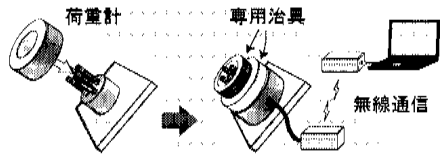
13

システムの特徴 (2/5) Aki-Mos

今まで不可能であった荷重計の交換問題を解決！

交換 取付けた荷重計を交換することも可能

- 荷重計が老朽化しても交換が可能
- アンカー供用期間中、継続した計測が実施可能



14

システムの特徴 (3/5) Aki-Mos



危険なり面に上がる必要がなくなった！

簡易 荷重計測データの簡易な取得方法

- アンカー頭部に取付けたデータ蓄積・送信ユニットで測定保存
- データ受信ユニットで無線通信にてデータを取得



15

システムの特徴 (4/5・5/5) Aki-Mos

軽量 油圧ジャッキ等の緊張治具は専用設計で軽量

- リフトオフ試験専用として軽量化
- 作業性が向上

安全 緊張力を除荷することなく取付け・交換が可能

- 緊張力の除荷による受圧板の落下の心配がない
- 安全に荷重計の取付け・交換ができる

16

4. システム開発の過程



性能評価試験



現場実証試験



既設アンカー緊張力モニタリングシステム開発

17

性能評価試験 Aki-Mos

□ アバット試験

- 荷重計取付け・取外しの作業性を確認
- ジャッキ荷重と荷重計出力値の比較

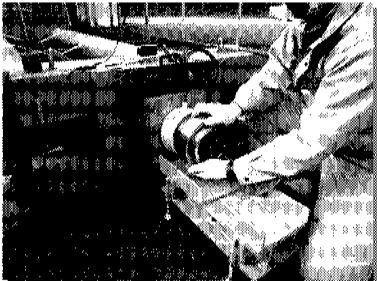


18

性能評価試験 Aki-Mos

□ マッチング試験

➢ 荷重計と緊張治具の組合せ確認

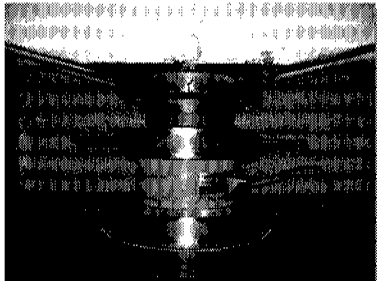


19

性能評価試験 Aki-Mos

□ 精度確認試験

➢ 荷重計の非直線性やヒステリシスを測定、評価



20

性能評価試験 Aki-Mos

□ 通信試験

➢ データ通信システムの無線通信性能を評価

➢ 遠方に置いた送信ユニットからのデータを受信



21

現場実証試験 Aki-Mos

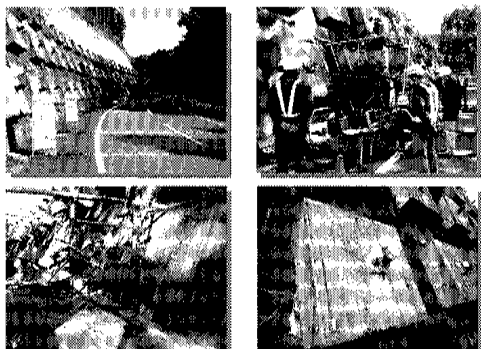
□ 500kNタイプ: 平成20年4月～平成21年5月



22

現場実証試験 Aki-Mos

□ 1,000kNタイプ: 平成21年1月～9月



23

5. システムの詳細

3つの要素技術 荷重計の設置手順



東横アンカー株式会社

要素技術①：荷重計

Aki-Mos

□本システム専用の設計

- アンカーヘッドの外側に設置できる内径
- ラムチェア内に収まる外径

□ひずみゲージ式、差動トランス式、油圧式の3方式

□定格容量500kN、1,000kNの2タイプ ※特注も可



ひずみゲージ式
(4メーカー)



差動トランス式
(1メーカー)



油圧式
(1メーカー)

25

要素技術②：緊張治具

Aki-Mos

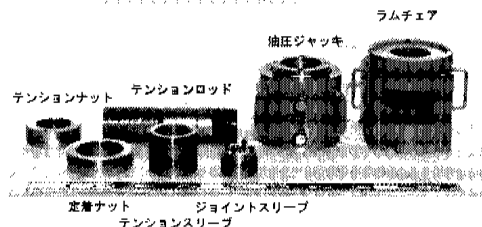
□荷重計とのメカニカルな組合せにより緊張力を伝達

□アンカーの再緊張余長を利用し組立てる

□リフトオフ専用機として軽量化

- 油圧ジャッキ：ストローク50mm

500kNタイプ 35kg、1,000kNタイプ 49kg ※従来品の1/2



26

要素技術③：計測データ取得システム

Aki-Mos

□時間と荷重計測値の記録 (1台/荷重計)

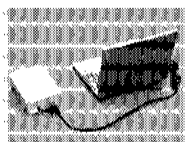
□電池で1年間計測可能 (2回計測/日)

□屋外仕様

□受信ユニットは、一度に50chまでデータ回収可能



データ蓄積・送信ユニット



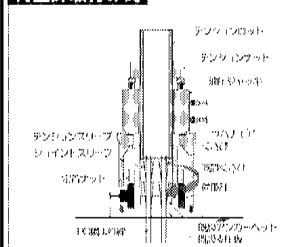
データ受信ユニット

27

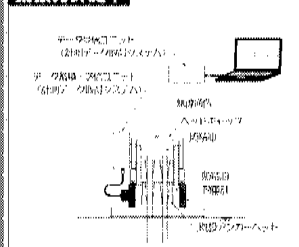
要素技術の組合せ

Aki-Mos

荷重計取付け時



緊張力計測中

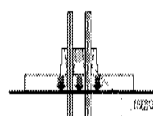


28

荷重計の設置手順①

Aki-Mos

■既設アンカーヘッド



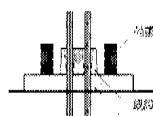
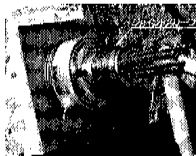
既設アンカーヘッド
既設アンカープレート

29

荷重計の設置手順②

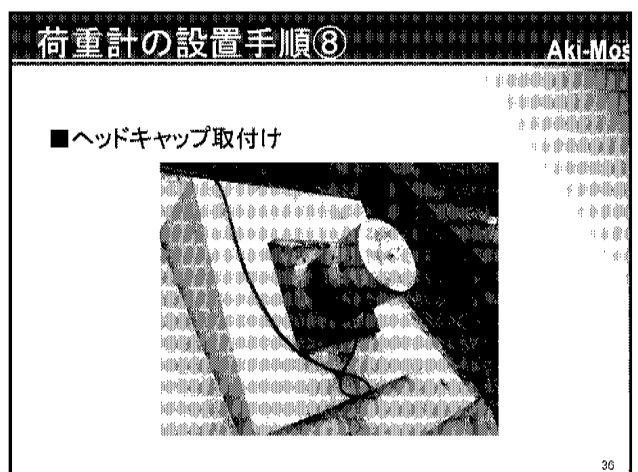
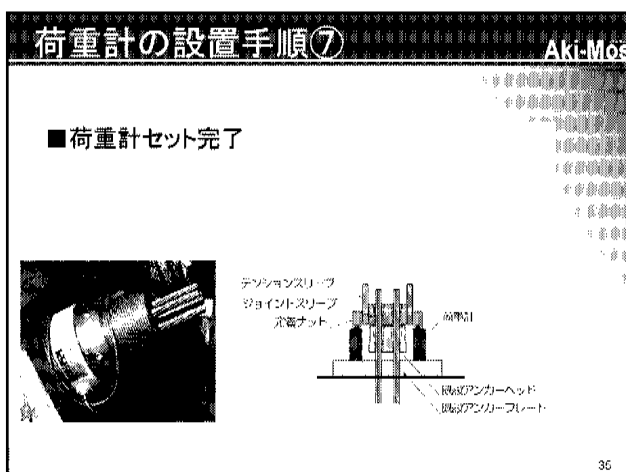
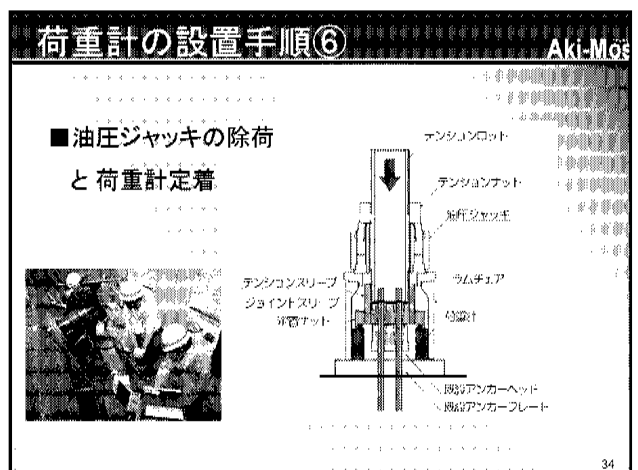
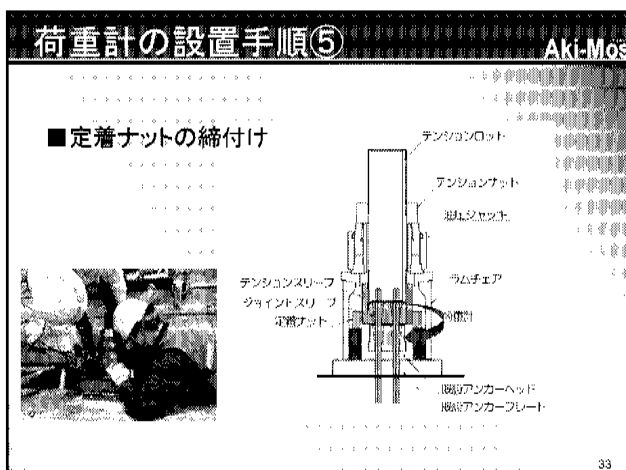
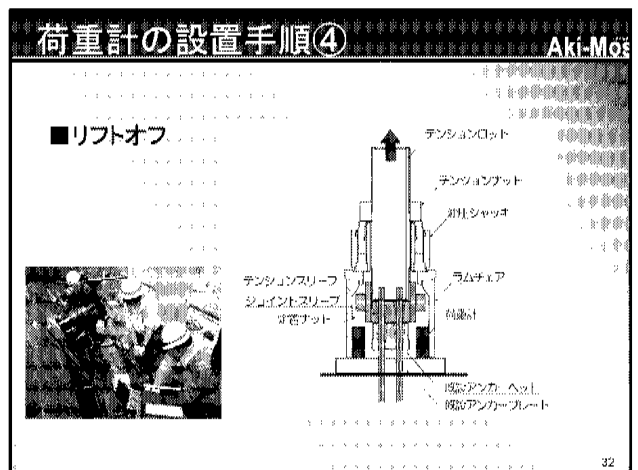
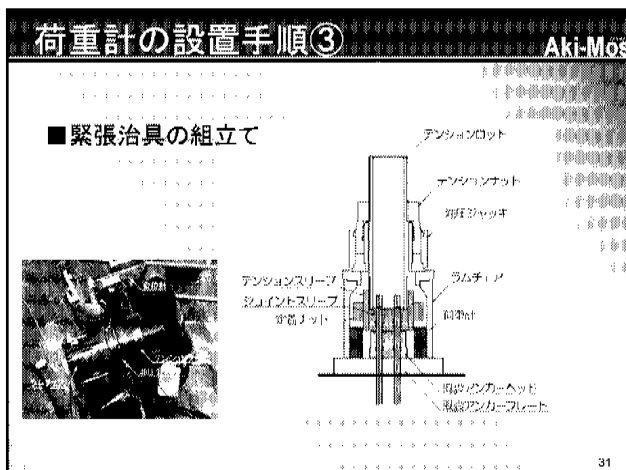
Aki-Mos

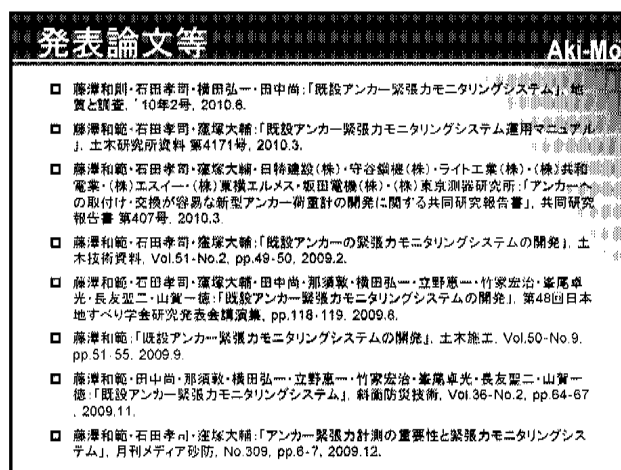
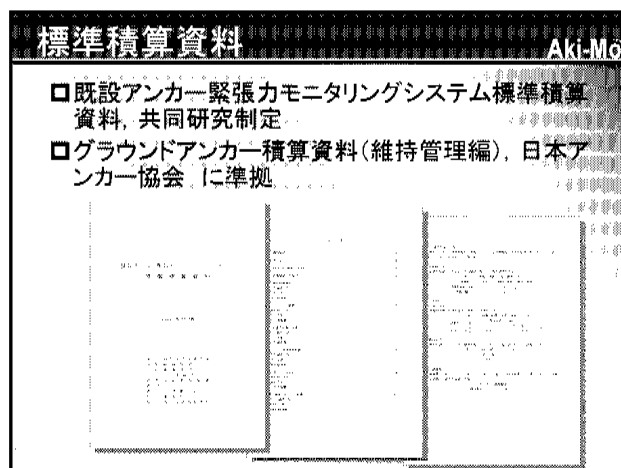
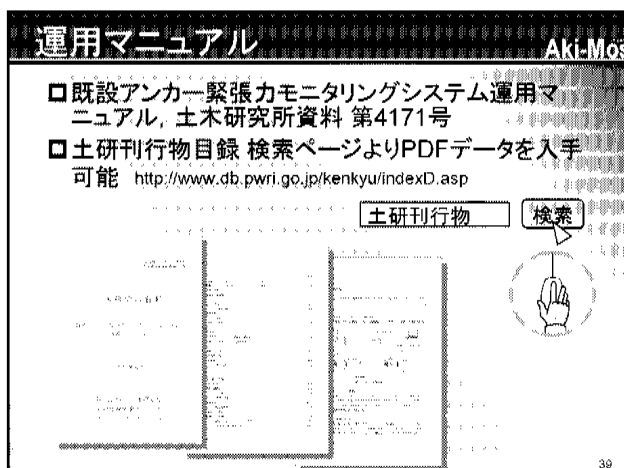
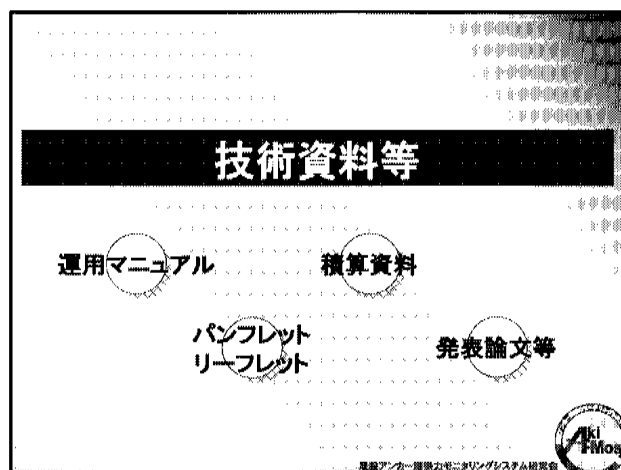
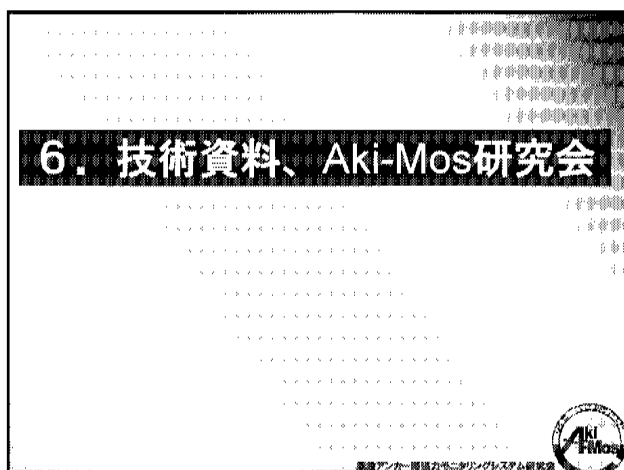
■荷重計の設置



既設アンカーヘッド
既設アンカープレート

30





Aki-Mos研究会

■「既設アンカー緊張力モニタリングシステム研究会」
では、技術の普及活動を行っています。

■研究会メンバー(2010.10現在)

- (独)土木研究所
- 日特建設(株)
- 守谷鋼機(株)
- ライト工業(株)
- (株)共和電業
- (株)エスイー
- (株)東横エルメス
- 坂田電機(株)
- (株)東京測器研究所

今後の展開 Aki-Mo

斜面の健全性評価やアンカーの機能評価を研究

アンカーの種類

アンカーの種類	アンカーの機能
① 鋼材アンカー	① 鋼材アンカーの機能
② 鋼材アンカー	② 鋼材アンカーの機能
③ 鋼材アンカー	③ 鋼材アンカーの機能
④ 鋼材アンカー	④ 鋼材アンカーの機能
⑤ 鋼材アンカー	⑤ 鋼材アンカーの機能
⑥ 鋼材アンカー	⑥ 鋼材アンカーの機能
⑦ 鋼材アンカー	⑦ 鋼材アンカーの機能
⑧ 鋼材アンカー	⑧ 鋼材アンカーの機能
⑨ 鋼材アンカー	⑨ 鋼材アンカーの機能
⑩ 鋼材アンカー	⑩ 鋼材アンカーの機能

研究項目

- ① 鋼材アンカーの機能評価
- ② 鋼材アンカーの機能評価
- ③ 鋼材アンカーの機能評価
- ④ 鋼材アンカーの機能評価
- ⑤ 鋼材アンカーの機能評価
- ⑥ 鋼材アンカーの機能評価
- ⑦ 鋼材アンカーの機能評価
- ⑧ 鋼材アンカーの機能評価
- ⑨ 鋼材アンカーの機能評価
- ⑩ 鋼材アンカーの機能評価

GPS および振動弦型水圧計によるフィルダム挙動の観測事例

中島 伸一郎¹ 川崎 秀明² 久保田 昇助³ 中野 太郎⁴ 清水 則一²

アースフィルダム（真締川ダム，堤高 21.5m，2009 年完成）の堤体外部変形および間隙水圧を GPS 変位計測システムおよび振動弦型間隙水圧計を用いて計測した。堤高が比較的低く，湛水開始から 3 年間の堤体変位量は最大でも 10mm に満たないが，GPS システムは貯水位の昇降やコアの圧縮に対応した堤体のわずかな変位を感度よく滑らかに捉えている。振動弦型間隙水圧計は，基礎岩盤およびコア内に計 19 基設置したが，埋設後 4 年半経った現在においても破損はなく信号異常も見られない。また，水圧計測値は定量的にも貯水位とその変化に整合した値を示している。

キーワード：GPS 変位計測システム，振動弦型間隙水圧計，アースフィルダム

1. はじめに

真締川ダム（山口県宇部市）は，堤高 20m 余りの比較的小規模なアースフィルダムである。本ダムは，グラウチングによる基礎の止水処理を原則として行なわない構造として設計されたため，完成後の恒久的な安全管理として，堤体・基礎の浸透状況と変形を注意深く監視することが必要となった。一方，本ダムは，基礎の支持力や漏水への懸念から監査廊を設けておらず，堤体内部や基礎の状況を直接的に監視することができない。そのため，安全監視のための観測計器として，より精度が高く，耐久性に優れたものを用いることで，監査廊が無いことによる構造上・安全管理上のリスクを補うこととなった。

これらの要求性能を満たす観測計器として選ばれたのが，堤体外部変形計測については GPS 変位計測システム，堤体・基礎の間隙水圧計測については振動弦型間隙水圧計である。

GPS 変位計測システム^{1, 2)}は，天候に左右されず，広範囲にわたる多点の 3 次元変位を自動的かつ連続的に計測できるという特長を有しており，ダム計測の高度化・省力化に大きく寄与する有効なツールとして認識され，実用段階に進みつつある³⁻⁶⁾。変位計測精度についても，高頻度に計測

可能であることを活かし，データの時系列処理を工夫することによって精度の飛躍的な向上を実現している^{1, 2, 7, 8)}。

振動弦型センサは，従来方式であるひずみゲージ式あるいは差動トランス式のセンサに比べて，①ケーブルの絶縁低下によるデータの信頼性低下が少ない，②振動数を測定する一種のデジタル計測であるためノイズの影響が少ない，③弦とコイルという単純なセンサ構造である，などの特長を持ち，長期計測に必要な観測計器の耐久性と観測データの信頼性に優れている。海外での普及率の高さに比して，日本での実績は限定的である⁹⁾。

本論文では，湛水開始から約 3 年間が経過した真締川ダムの GPS システムによる堤体外部変形計測結果と振動弦型間隙水圧計による堤体・基礎の間隙水圧計測結果を示し，その精度と耐久性を検証するとともに，計測期間中のダムの変形挙動，水圧挙動を分析する。

2. 真締川ダムの概要

真締川ダムは，山口県中西部に位置する真締川における治水計画の一環として建設された堤高 21.9 m の比較的小規模な均一型アースフィルダムである。ダム諸元を表-1 に示す。

¹ 山口大学大学院 助教

² 山口大学大学院 教授

³ 山口県土木建築部

⁴ 常盤地下工業株式会社

表-1 貞縮川ダム諸元

河川名	本川：貞縮川，支川：戸石川		
位置	山口県宇部市川上		
形式	アースフィルダム		
完成年月日	2009年4月		
堤高	本川 21.9 m	支川 20.4 m	
堤頂長	本川 209.5 m	支川 145.0 m	
堤体積	本川 152000 m ³	支川 89300 m ³	
堤頂標高	EL.69.5 m		
堤頂幅	7.0 m		
総貯水容量	842000 m ³		
最低水位	EL.57.4 m		
常時満水位	EL.61.6 m		
サニタリー水位	EL.65.5 m		

図-1 に示すように、本ダムは貞縮川本川と支川戸石川に 2 つの堤体を有し、2 つの河川を隔てる中尾根と呼ばれる部分に洪水吐きを設けている¹⁰⁾。

図-2 に本川ダムの上下流断面図を示す。基礎岩盤は、CLL 級（シルト～砂礫状）のマサ状花崗岩（中風化）からなり、地表付近は 10～20Lu と透水性が高く、深部は 5Lu 以下となっている。現位置透水試験結果においても、CLL 級基礎岩盤の透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec と比較的高い透水性を示す¹¹⁾。

この基礎岩盤は止水改良が難しいことから、原則としてグラウチング等の止水処理を実施しない構造として設計された。基礎における浸透流の制御方法としてはコアトレンチによる止水工法が採用されている。また、基礎の支持力の弱さを配慮し、堤体上流面を緩勾配（1:3.3）としている。さらに、堤体の安定を図るため、垂直ドレーン工法を採用し堤体下流域の水位の上昇を防いでいる。

盛土材料として、コアには、単材（マサ土 D 級）とブレンド材（泥質片岩+マサ土 CLL 級）が使用され、その透水性は現場透水試験から $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec である。また、ゾーン材（マサ土 CLL 級）の透水性は現場透水試験から $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec である¹⁰⁾。

3. 計測システム

3.1 GPS 変位計測システム

貞縮川ダムでは、基準点と計測点に GPS センサを設置し、スタティック測位により、基準点を原点とした各計測点の 3 次元座標を 1 時間ごとに求める方式を採用している。

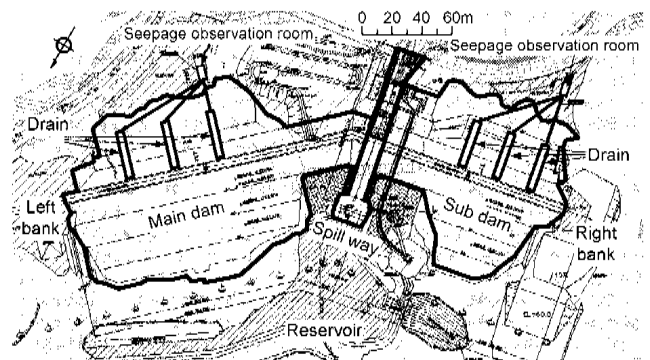


図-1 貞縮川ダム平面図

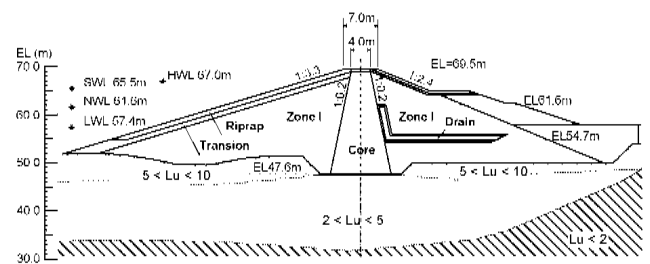


図-2 本川ダムの上下流断面

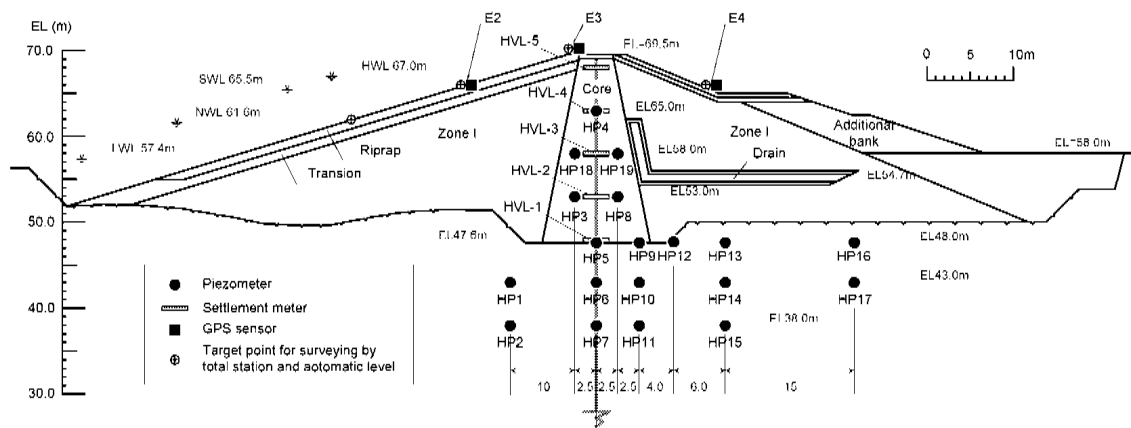
GPS 計測点は図-3 に示すように、堤体上下流面および天端に 3 点ずつ計 9 点配置されている。また、GPS 基準点は左岸下流側 K1 点に設置されている。GPS センサの設置状況を図-4 に示す。

GPS 計測は満水開始 2 ヶ月前の 2007 年 4 月よりセンサ 3 基で開始し、5 ヶ月の試験運用を経て 2007 年 9 月より 9 基に増設して本格運用を開始した。

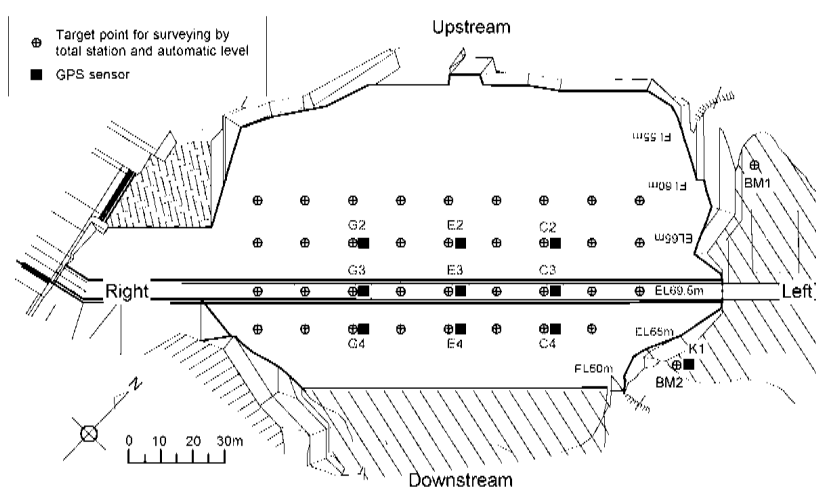
堤体変形に関する計測としては、GPS システムのほかに、堤体表面の可動標的による光波・水準測量と、コア内の層別沈下計による沈下計測が行なわれている。

測量用の可動標的は、図-3(b)に示すように、堤体表面に計 35 基が格子状に配置されている。左岸の測量基準点（BM1, BM2）からトータルステーションおよび自動レベルを用いて測量する。

層別沈下計（摺動方式、型式 ESD-7110PP、測定範囲 10cm/100cm、精度 $\pm 1.0\%$ F.S.）は、築堤中および完成後の盛土沈下量の測定を目的として、図-3(a)に示すように、堤体中央のコア内に深度 5m ごとに合計 5 基設置されている。



(a) 断面図（ダム軸中央E断面）



(b) 平面図

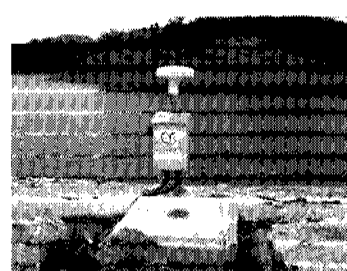
図-3 本川堤体の計測機器配置図



(a) 下流面 E4



(b) 天端 E3



(c) 上流面 E2

図-4 GPS センサの設置状況

3.2 振動弦型間隙水圧計

振動弦型間隙水圧計（型式 PWF-500，容量 500 kPa，精度 $\pm 0.5\% \text{F.S.}$ ）は，図-3(a)に示すように，ダム軸中央上下流断面（E 断面）上に計 19 基埋設されている。基礎内部の間隙水圧計はボーリング孔を利用して埋設し，基盤表面およびコア内の

間隙水圧計は所定の位置に水平に設置してから埋め戻している。間隙水圧の計測は，埋設直後から開始し，計測頻度は，築堤中はほぼ 1 回/日，築堤完了後は 1 回/週，試験満水完了後は 1 回/週～1 回/月である。

4. GPS による堤体外部変形計測結果および考察

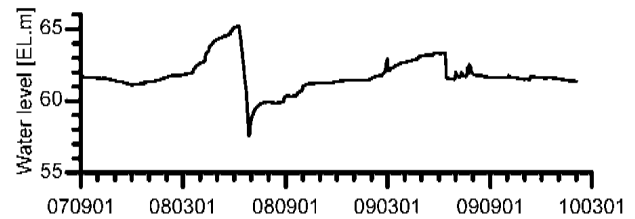
4.1 GPS 変位計測システムの精度

GPS システムによる変位計測結果の一例として、ダム軸中央天端 E3 地点の GPS 変位を光波・水準測量の結果とともに図-4 に示す。GPS 変位はトレンドモデルを適用して得た測定値である。X は上下流方向（上流向きが正）、Y はダム軸方向（左岸向きが正）、H は鉛直方向（隆起方向が正）である。

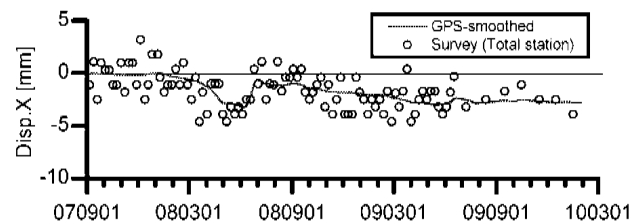
図-4 より、貯水位変動に伴う堤体変位の動向は、GPS 変位と測量結果とで概ね一致している。しかし、測量による変位は特に X、Y 方向においてばらつきが大きく、測量結果単独では変位の動向を判断することは難しい。一方、トレンドモデルを適用した GPS 変位は、変位の動向を滑らかに表現し、かつ、貯水位の変動に対して感度良く反応していることが確認できる。

図-5 は、図-4 と同じく E3 地点の鉛直方向の GPS 変位を、ほぼ同位置に設置した層別沈下計による天端沈下量（HVL-5）と比較したものである。図より、GPS による天端の鉛直変位は層別沈下計による沈下量と定量的によく一致している。すなわち、GPS による計測は堤体内部に埋設された高精度の沈下計（分解能 1mm）に劣らず精度良く計測できていることを示す。

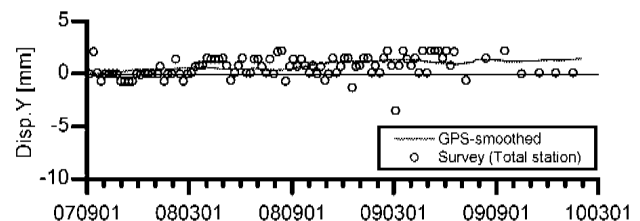
GPS 変位は、個々の生データを見ればノイズを含み、特に鉛直方向については計測精度の低さを指摘されることが多い。しかしながら、1 時間に 1 回という高頻度で自動計測可能であることを活かし、適切な時系列解析処理を介することで、水平方向・鉛直方向ともにミリオーダーの精度を実現することが可能である。特に、層別沈下計に劣らぬ精度で堤体の沈下を計測可能であることが示されたのは特筆すべき成果である。以上のことから、GPS 変位計測システムは、フィルダムの静的な堤体外部変形計測には極めて有効であるといえる。



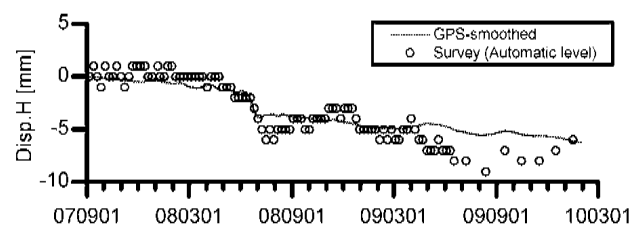
(a) 貯水位



(b) 上下流方向変位



(c) ダム軸方向変位



(d) 鉛直方向変位

図-4 GPS 変位と光波・水準測量結果との比較（計測点 E3）

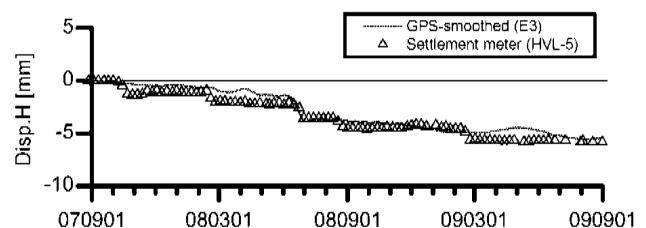


図-5 GPS 変位と層別沈下計計測結果との比較（計測点 E3）

4.2 GPS 変位に基づく堤体の変形挙動

(1) 堤体変位の経時変化

図-6 はダム軸中央断面の計測点 E2, E3, E4 の GPS 変位の経時変化である。

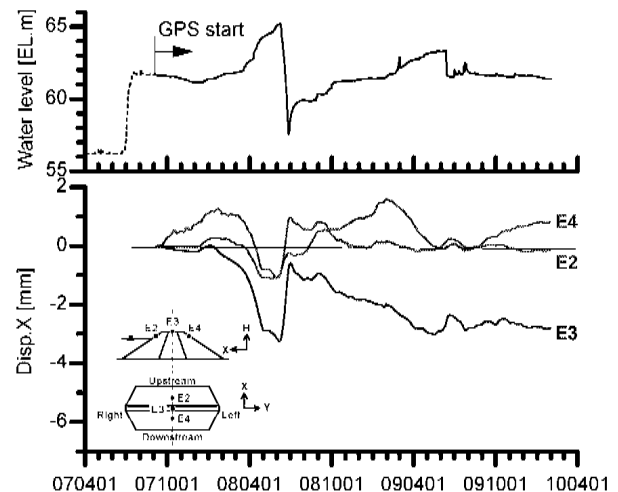
図-6(a)より、上流面 E2 および天端 E3 の上下流方向変位は、貯水位が上昇すると下流側へ変位し、貯水位が低下すると上流側に戻る挙動を示す。堤体上流側およびコア部は、貯水位の昇降に伴う静水圧荷重の変化を直接的に受けるため、貯水位が上昇すれば下流側へ押され、貯水位が低下すれば除荷されて上流側に戻るものと思われる。変位の大きさ自体は数ミリ以内であるが、GPS はそのわずかな変位を感度良く捉えている。

図-6(b)より、上流面 E2 の鉛直方向変位は、貯水位が上昇すれば隆起し、貯水位が低下すれば沈下する傾向にある。貯水位の昇降に伴う上流面の隆起と沈下は、堤体の水没による浮力の増大と減少にそれぞれ対応するものであると考える。

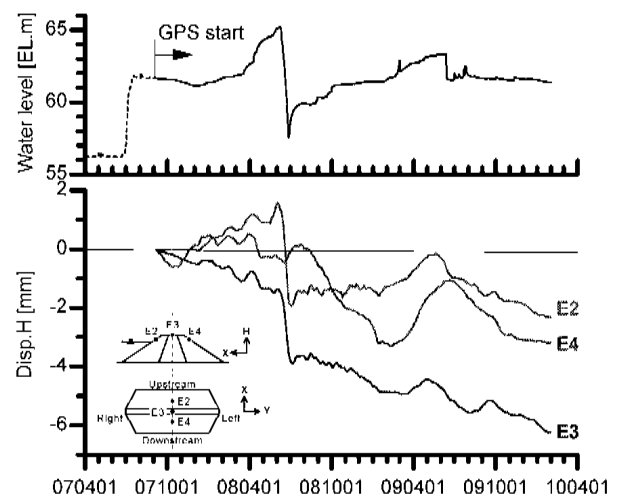
一方、天端 E3 の鉛直方向変位は、一貫して沈下を示し、特に初期湛水完了後の水位急低下時には急激な沈下を示している。天端の単調な沈下は、コアの自重圧密が継続していることを示し、これに加えて、貯水位の急低下時には水締めによるコア材の圧縮が生じているものと考えられる。

図-6(c)より、ダム軸方向変位は、いずれの計測点においても緩やかに左岸方向に変位していることが確認できる。

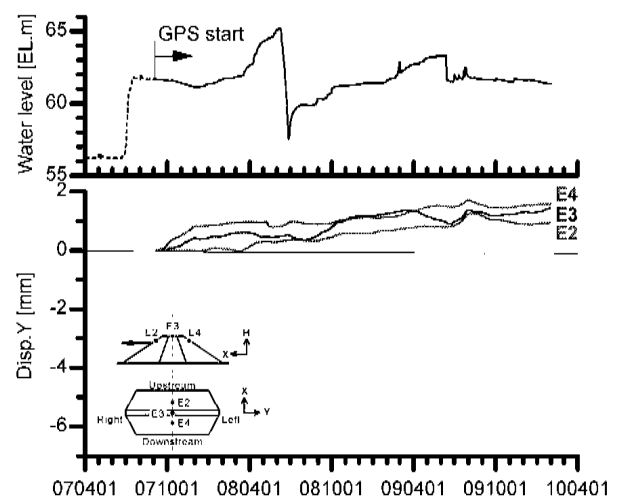
下流面 E4 の挙動は上流面 E2 や天端 E3 とはモードが若干異なる。例えば、図-6(a)より 1 回目放流後の E4 の X 方向変位は、貯水位の上昇とともに上流側に変位しており、E2, E3 とは変位の方法が逆である。また貯水位が単調増加している最中に変位が上流向きから下流向きに転じており、動きが貯水位の昇降に連動していない。同様に、図-6(b)より鉛直方向変位についても、貯水位上昇の途中で沈下方向から隆起方向へと転じている。このような下流面 E4 の動きと貯水位の関係は、現時点では明確な説明が困難であるが、コア下流域は法面勾配や盛土材料が一樣でなく、またドレーンにより水位を強制低下させているなど、変形



(a) 上下流方向変位



(b) 鉛直方向変位



(c) ダム軸方向変位

図-6 ダム軸方向 GPS 変位 (E2, E3, E4)

を複雑にする要素がいくつか存在する。E4 の挙動のメカニズムについては今後の課題である。

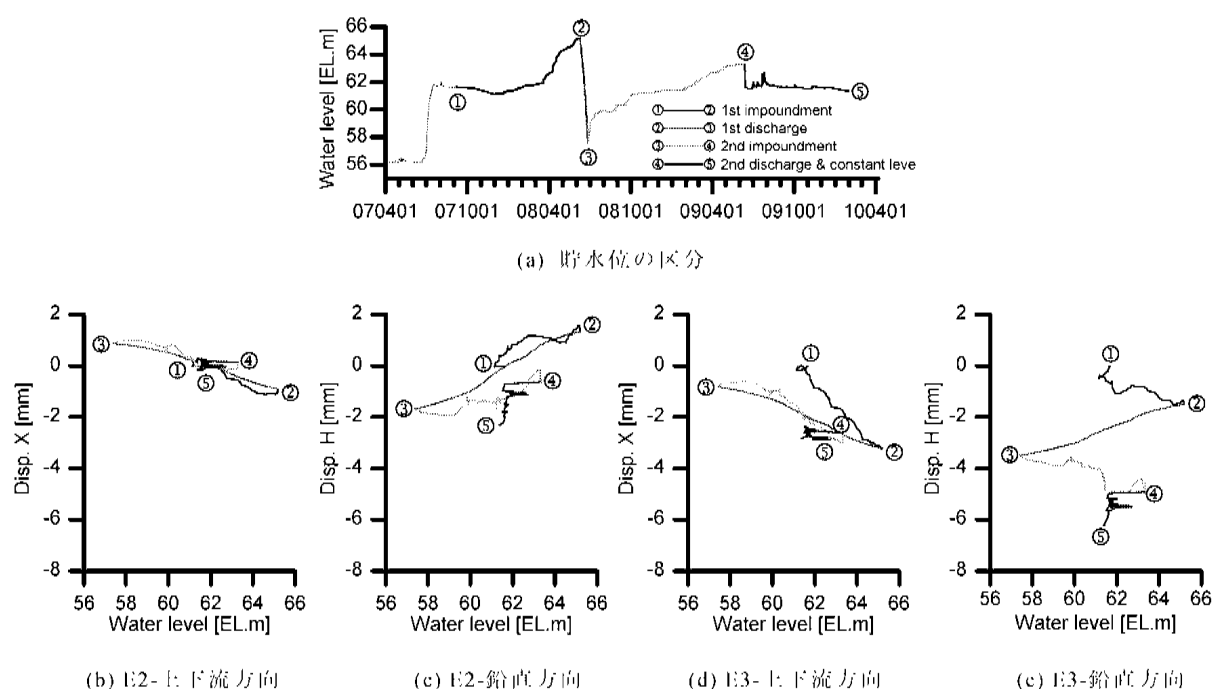


図-7 貯水位と GPS 変位との関係 (E2, E3)

(2) 貯水位と堤体変位との関係

図-7 は、上流面 E2 および天端 E3 について、貯水位と GPS 変位との関係を示している。図-7(a)に示すように、水位の昇降に応じて期間を 4 分割して表示した。

図-7(b), (c)より、上流面 E2 の GPS 変位は、上下流方向、鉛直方向ともに、貯水位の昇降に対してほぼ同一経路をたどる。すなわち上流面 E2 は貯水位の昇降に対して弾性的な挙動を示す。

図-7(d)より、天端 E3 の上下流方向変位は、初期の水位上昇過程 (①→②) は下流側に大きめに変位するものの、それ以降 (②以降) は同一経路をたどっており、E2 と同様に弾性的な挙動である。また図-7(e)より、天端の鉛直変位は貯水位の変化にかかわらず一方的に沈下を示すことが確認できる。

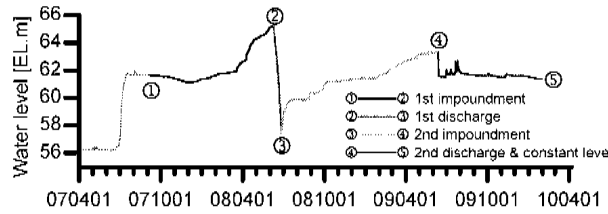
(3) 堤体の 3 次元変位挙動

図-8 は、E 断面各計測点の鉛直断面内変位と、全計測点の水平面内変位を示す。図より、各計測点の 3 次元的な変位モードがよくわかる。

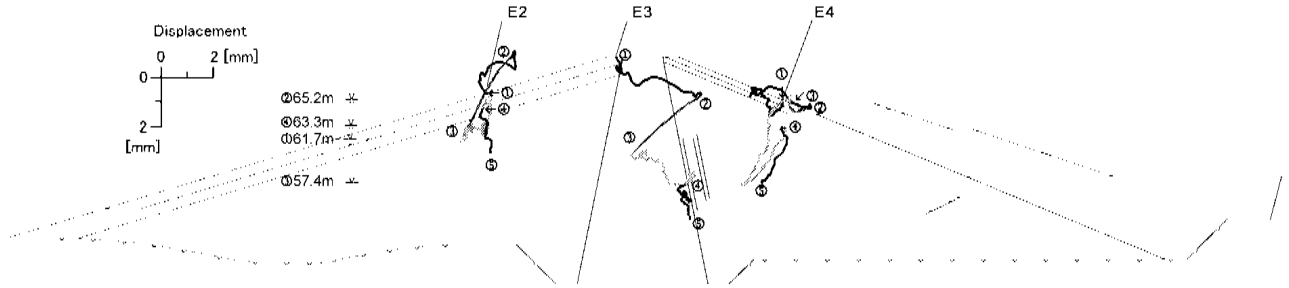
図-8(b)より、下流面 E4 については、初期湛水から水位急降下 (①→②→③) まではのり面勾配に沿う変位を示し、点②以降は変位の方法が 90 度回転し、のり面の法線方向に変位することが読み取れる。また③→④→⑤の変位挙動がほぼ同じ経路をたどっていることも特徴的である。

堤体の変位挙動は、これまで述べてきたように、上流面、天端、下流面で、それぞれ異なるモードを示すが、図-8(c)より、C 断面、G 断面も E 断面と同じようなモードで変位することが確認できる。すなわち、ダム軸方向には均質な変位挙動を示している。

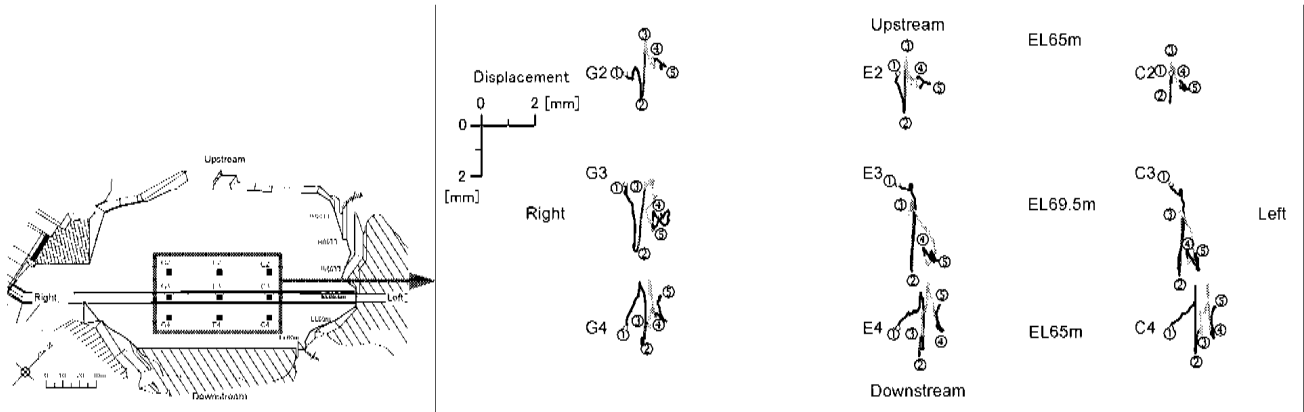
以上の結果より、大まかには、①貯水位の昇降による水平荷重の増減、②堤体の水没による浮力の増減、③コアの圧縮沈下、の 3 つが、真縮川ダム堤体の現在までの変形の主たる支配要因であることが予想できる。GPS によって堤体外部変形を高頻度で計測し、トレンドモデルにより変形挙動を高精度かつ滑らかに捉えることは、堤体の変形挙動を詳細に分析する上で非常に有意義である。



(a) 貯水位の区分



(b) E断面のX-H面内変位



(c) 全計測点のX-Y面内変位

図-8 GPSによる3次元変位

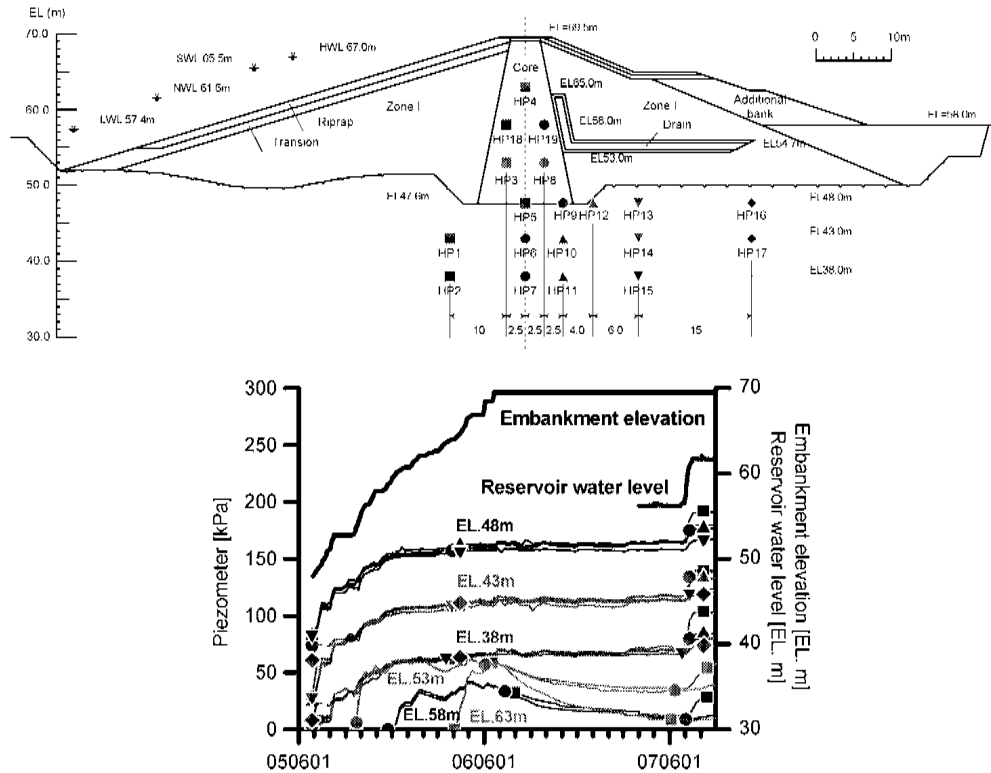
5. 振動弦型間隙水圧計による堤体・基礎の間隙水圧計測結果および考察

5.1 築堤から湛水開始までの間隙水圧挙動

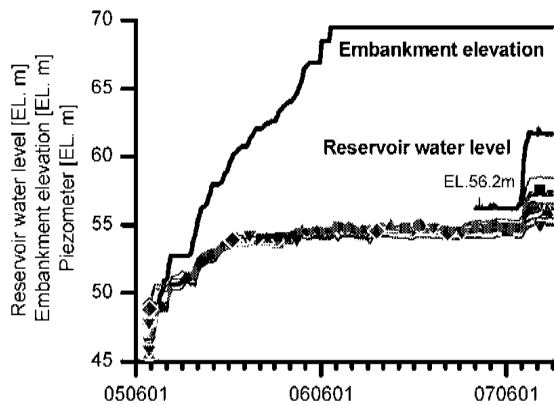
図-9は、築堤期間中の基礎岩盤およびコアの間隙水圧計測結果である。図-9(a)では全地点の間隙水圧を圧力単位(kPa)で表示している。図より、間隙水圧は基礎岩盤内もコア内もともに、センサの設置標高ごとにグループとなって同一の挙動を示している。基礎岩盤の間隙水圧(EL.38m, EL.43m, EL.48m)はいずれも、築堤とともに単調に増加している。一方、コアの間隙水圧

(EL.53m, EL.58m, EL.63m)は、盛立ての進行とともに上昇し、ピークを持って、盛立て完了とともに徐々に低下していることが確認できる。

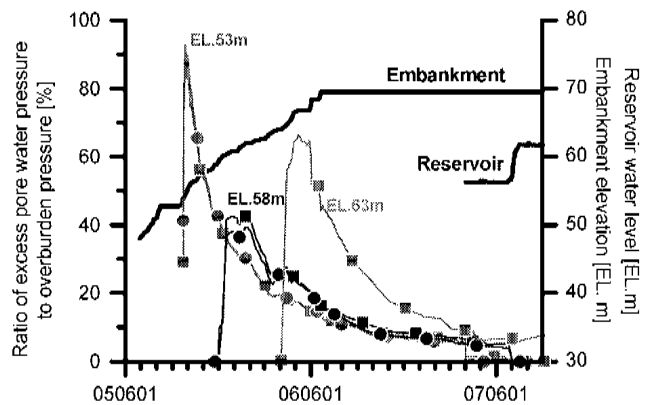
図-9(b)は、基礎岩盤内の間隙水圧について、センサの設置標高を考慮した水頭標高(EL.m)で表示したものである。図より、水頭標高で表示した間隙水圧は基礎岩盤の全地点で一致し、単調に増加して、湛水開始時点にはほぼ貯水位(EL.56.2m)に達していることが確認できる。基礎岩盤における水圧の単調な増加は、盛立てによる過剰間隙水圧ではなく、ウェルポイントで低下



(a) 基礎岩盤およびコアの間隙水圧計測結果（圧力表示）



(b) 基礎岩盤の間隙水圧（水位標高表示）



(c) コア土内に発生した過剰間隙水圧

図-9 築堤～湛水開始までの基礎岩盤およびコア内の間隙水圧計測結果

させていた地下水位が回復している様子を捉えているものであると考える。

図-9(c)は、盛立て期間中のコア内の過剰間隙水圧を推定したものである。過剰間隙水圧の推定にあたり、盛立て期間中の地下水位は、図-11(b)に示した基礎岩盤の水頭標高に等しいとした。また、過剰間隙水圧は、各センサに上載する盛土の上柱重量から計算される上かぶり圧に対する比率として表示した。図-9(c)より、センサの上に土を盛った直後に過剰間隙水圧は発生している。

HP-3、HP-8 では、推定土かぶり圧の 90%まで過剰間隙水圧が上昇している。ただし、水圧の消散も比較的速く、湛水開始前までに、全ての計測点で 5%未満まで消散していることが確認できる。

以上の結果より、振動弦型間隙水圧計は築堤から湛水開始までの地下水位および堤体内水位を十分な精度で計測できていること、センサや設置箇所による計測値のばらつきがほとんど無いこと、コア内に発生する過剰間隙水圧は、湛水開始前までにほぼ消散しきっていることが確認できた。

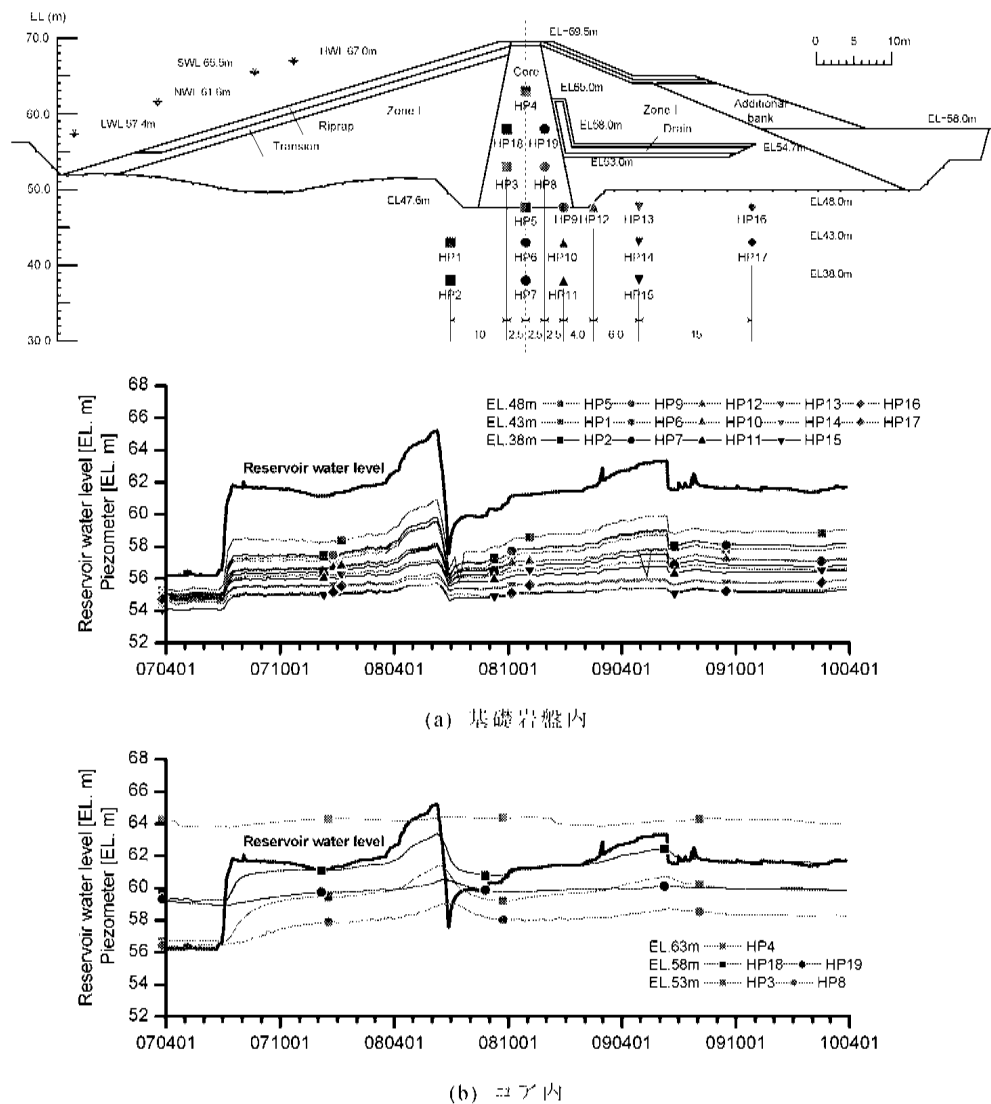


図-10 湛水開始以降の基礎岩盤およびコア内の間隙水圧計測結果

5.2 湛水開始以降の間隙水圧挙動

図-10 は、湛水開始から約 3 年間の基礎岩盤内およびコア内の間隙水圧の経時変化を示す。間隙水圧は水頭標高 (EL.m) で表示している。図より、間隙水圧は全体的に貯水位の昇降と連動しており、貯水位が上昇すると水圧は増加し、貯水位が下降すると水圧は低下している。図-10(a)より、基礎岩盤内の間隙水圧は貯水位の変化に感度良く対応して変化していることが確認できる。一方、図-10(b)より、コア内の水圧は貯水位の変化に対する感度が若干鈍く、貯水位の急速な上昇や低下

に対しては、水圧の変化に時間的な遅れが見受けられる。コア内のセンサ HP8, HP19 およびコア下流域基盤表面のセンサ HP12, HP13 の間隙水圧は、貯水位変動の影響をほとんど受けず一定値を示していることから、垂直ドレーンが有効に機能していることが確認できる。

図-10(b)より、コアの最も標高の高い位置に設置した HP4 は、全期間内でほとんど変動していない。2008 年 5 月～6 月には、貯水位が水圧計の設置標高 EL.63m を超えているが、水圧計の値はほぼ無反応であることから、この期間においても

コア内の浸潤線は HP-4 の高さには達しなかったものと判断される。

振動弦型間隙水圧計を埋設してから現在まで約 5 年間経過しているが、図-10 のとおり、いずれのセンサもデータの欠損や信号異常は無く、安定した計測が行なえている。

6. おわりに

真縮川ダム堤体の変形挙動および浸透挙動を、GPS 変位計測システムおよび振動弦型間隙水圧計を用いて観測した。

真縮川ダムの堤体変形量は約 2 年半の計測期間中で最大でも 10mm に満たないものであったが、GPS 変位計測システムは、貯水位の昇降に伴う堤体の前後運動や上下運動、コアの圧縮に伴う堤体の沈下挙動を、ミリオーダーで詳細に、かつ滑らかに計測した。1 回/時間という高頻度で計測し、トレンドモデルを用いた時系列解析により変位を推定するというシステムが有効に機能しており、変位の動向を知るという目的に対しては、1 回/週程度で実施される測量よりもデータの信頼性は高い。また、今回は鉛直方向の計測精度に関して、GPS と層別沈下計の計測結果を比較したが、GPS システムはミリ精度の沈下計に全く劣らない精度で鉛直変位を計測できることが明らかとなった。

振動弦型間隙水圧計に関しては、現在のところいずれの計器にも破損や信号異常は無く、数年レベルでの耐久性が確認できた。また、振動弦型間隙水圧計の計測値は、貯水位や水位観測孔での水位観測結果とも定量的に整合した値を示しており計測データの長期信頼性が確認できている。

以上より、フィルダム計測における GPS 変位計測システムの有効性と振動弦型間隙水圧計の長期計測信頼性が明らかとなった。これらの観測機器は、単なる安全監視にとどまらず、堤体内部の変形・浸透現象を非破壊・非接触に観測する手法

として今後発展することが期待される。

参考文献

- 1) Masunari, T., Tanaka, K., Okubo, N., Oikawa, H., Takechi, K., Iwasaki, T. and Shimizu, N. : GPS continuous displacement monitoring system, Proceedings of International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM03, pp.537-543, 2003.
- 2) 岩崎智治, 武智国加, 武石朗, 清水則一, 道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発, 土と基礎, Vol.50, No.6, pp.25-27, 2002.
- 3) 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, pp.137-148, 2005.
- 4) Yamaguchi, Y., Kobori, T., Yoshida, H., Sakamoto, T., Itaya, H. and Iwasaki, T., Real-time monitoring of exterior deformation of embankment dams using GPS, Proceedings of the 23rd ICOLD Congress, Q.91-R.1, CD-ROM, 2009.
- 5) 板屋榮治, 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.
- 6) 日野浩二, 曾田英揮, 木下真理子, 田中幹大 : 徳山ダムの試験湛水, ダム技術, No.266, pp.42-58, 2008.
- 7) 清水則一, 足立寛, 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.
- 8) 松田浩朗, 足立寛, 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手法の実用性の検証, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp.333-343, 2002.
- 9) 川崎秀明, 長原寛, 山下武宣, 安仁屋勉 : 間隙水圧計長期性能試験による振動弦型計器の現地適用性検討, ダム技術, Vol.14, No.1, pp.39-48, 2004.
- 10) 吉松三男 : 真縮川ダムの設計と施工について—ふたつの堤体(本川側, 支川側)で構成されたアースフィルダム, 月刊ダム日本, No.759, pp.9-26, 2008.
- 11) 岩田一郎 : 真縮川ダムにおける基礎地盤の透水係数に関する考察, ダム技術, No.241, pp.77-83, 2006.

GPSおよび振動弦型水圧計による フィルダム挙動の観測事例

中島 伸一郎¹・川崎 秀明¹・久保田 昇助²・中野 太郎³・清水 則一¹

¹山口大学大学院, ²山口県土木建築部, ³常盤地下工業株式会社



図1 観測対象ダム

1

背景・目的

山口県が管理する比較的小規模なフィルダムの変形挙動・浸透挙動の監視に、GPS変位計測システムおよび振動弦型間隙水圧計を適用

監視網が無いことによるリスクを精度・信頼性・耐久性の高い観測でカバー

GPS変位計測システム

- 3次元変位を多点同時に自動連続計測
- 省力性・緊急時対応性に優れる

振動弦型間隙水圧計

- 耐久性に優れ、長期計測に適する

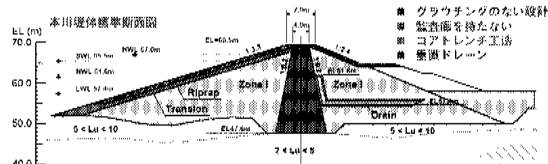
- 湛水開始から約2年半の計測結果に基づき計測精度と耐久性の検証
- ダムの変形・水圧挙動を分析

2

真綿川ダム



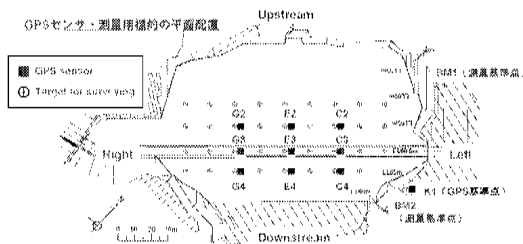
	真綿川（本川）堤体
位 置	山口県宇部市川上
型 式	均一型アースフィル
堤 高	21.9 m
堤頂長	209.5 m
堤頂幅	7.0 m
堤体積	152,000 m ³



3

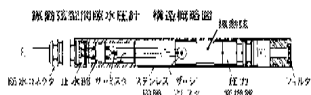
GPS変位計測システム

- 計測方式：スタティック方式
- 計測間隔：1回/時間
- 計測点数：9地点（3断面×3地点）
- データ処理：トレンドモデルによる統計処理



4

振動弦型間隙水圧計

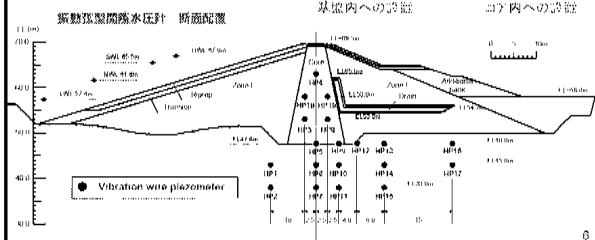
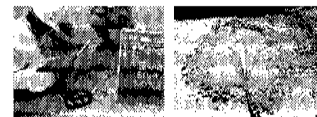


- 測定原理：外力による振動弦の張力変化を弦の振動数の変化で取り出す。信号がデジタル（周波数）で、直圧・抵抗・電流に無関係。
- 耐久性：変換部に接着剤など有機物をを用いていないため長期的に安定。
- 耐湿性：電気回路に浸水したりしてケーブルや計器の絶縁抵抗が劣化しても他方式に比べて安定した測定が可能。
- 延長距離：周波数読みは長いケーブルであっても減衰なしに伝達可能（波動トランス型：最大600m、振動弦型：最大2700m）

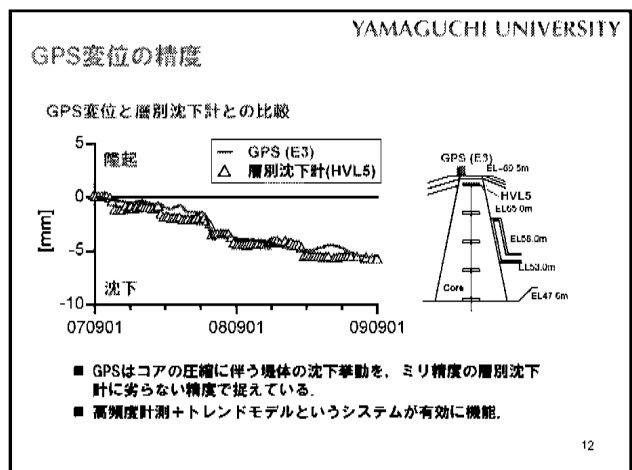
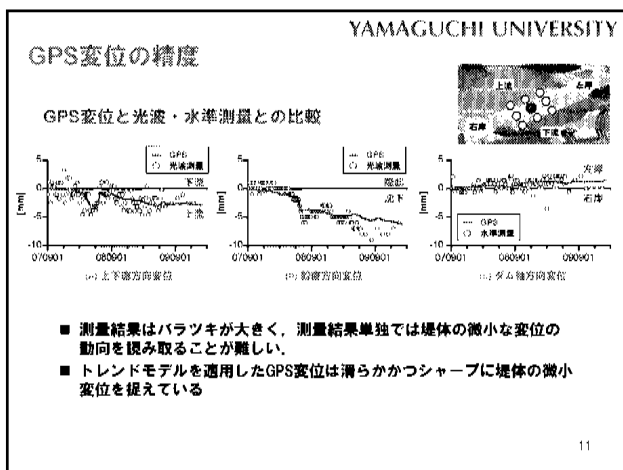
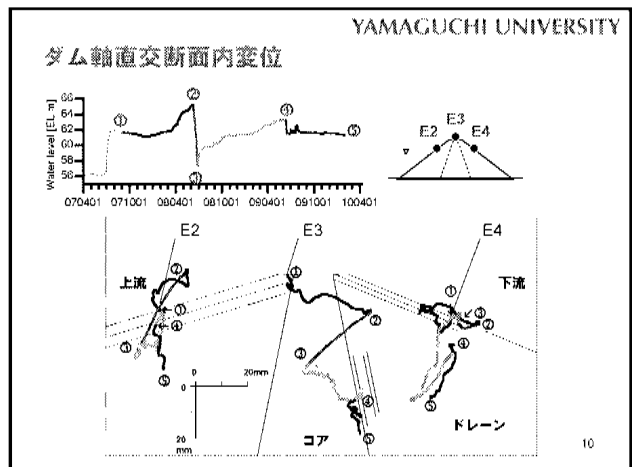
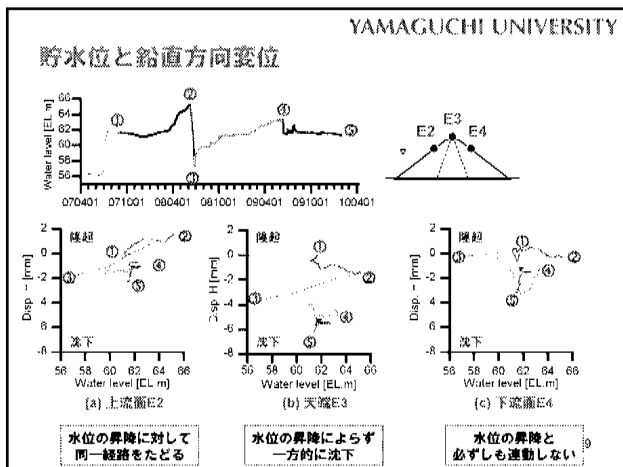
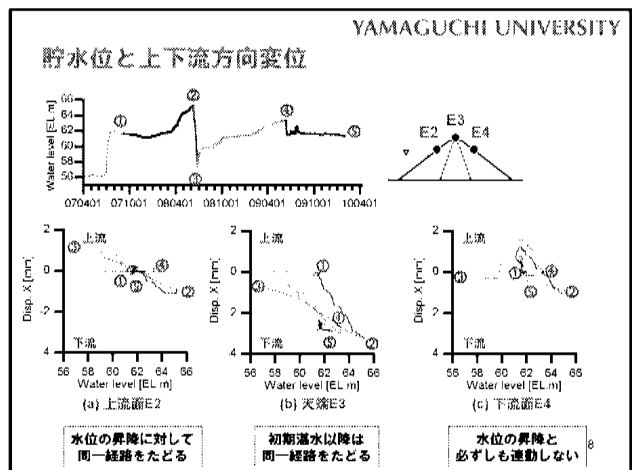
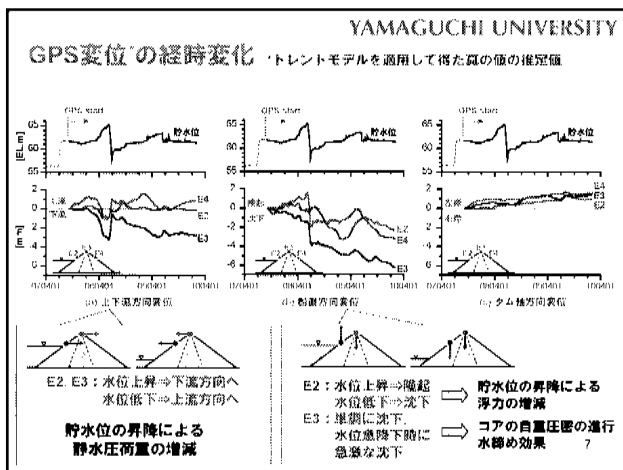
長期にわたる計測の信頼性が要求されるダム計測に適している

振動弦型間隙水圧計

- 計測容量：200～500 kPa
- 計測精度：0.5 % F.S.
- 計測点数：19地点
（基盤内14点、コア内5点）



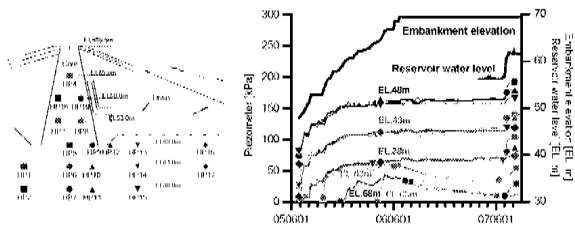
6



YAMAGUCHI UNIVERSITY

築堤期間中の間隙水圧挙動

築堤期間中における全計測点の間隙水圧挙動（水圧表示）



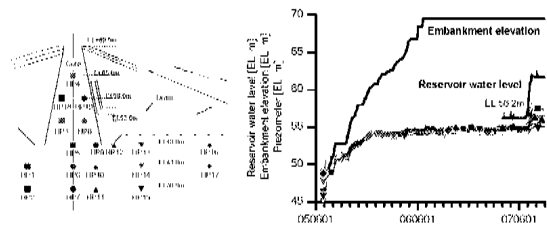
- センサの設置標高ごとにグループとなって同一の挙動
- 基礎内の間隙水圧は単調増加。
（ウェルポイントで低下した地下水位の回復）
- コア内の間隙水圧はピークを持つ。
（盛立てに伴う過剰間隙水圧の発生・消散）

13

YAMAGUCHI UNIVERSITY

築堤期間中の間隙水圧挙動

築堤期間中における基礎内の間隙水圧挙動（水頭表示）



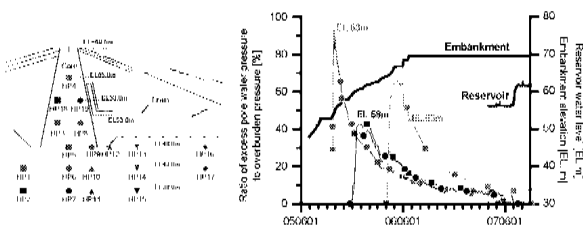
- 基礎内の間隙水圧（水頭表示）は同一経路をたどり、最終的には試験湛水開始前の貯水位にほぼ一致

14

YAMAGUCHI UNIVERSITY

築堤期間中の間隙水圧挙動

築堤期間中におけるコア内の過剰間隙水圧

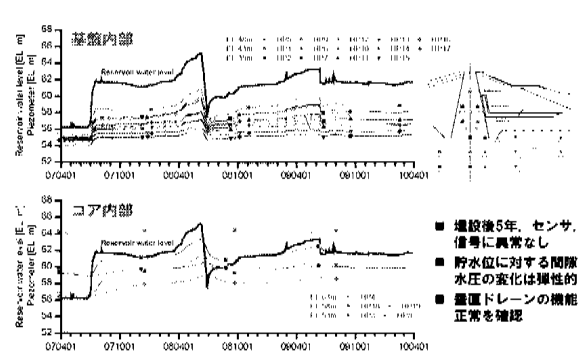


- コア内はセンサの置上を盛り立てた時に過剰間隙水圧が発生するが、しだいに低下し、湛水開始直前には土被り圧の5%以下にまで消散している

15

YAMAGUCHI UNIVERSITY

間隙水圧挙動（湛水開始以降）



- 埋設後5年、センサ、信号に異常なし
- 貯水位に対する間隙水圧の変化は弾性的
- 露置ドレーンの機能正常を確認

16

まとめ

- GPS変位計測システム：
堤体の微小な変形挙動を高精度に計測。特に鉛直方向についてミリ精度の層別沈下計と同等の精度を確認。
- 振動弦間隙水圧計：
埋設後5年でいずれのセンサにも破損・信号異常はなく、貯水位や堤体内水位と整合した値を表示。
- 今後の課題：変形挙動、浸透挙動の定量的な評価

17

H20岩手・宮城内陸地震における 石淵ダム安全確認(湛水)試験について

佐藤 慶¹ 鈴木 弘二² 大塚 勝章³

2008年6月14日(土)8:43AM発生のH20岩手・宮城内陸地震(M7.2)は、東北地方中央部を襲い岩手県奥州市と宮城県栗原市の両市において気象庁震度6強が観測された。震源に近い国土交通省東北地方整備局の石淵ダム(直轄)では、堤体天端や高標高部のロック材料の張り出しが認められたが上流側の遮水壁は目立った損傷は見あらず、漏水量は地震後に一時急増したが既往最大漏水量(試験湛水以降)以下であった。本論文は、石淵ダムの被災直後から安全確認(湛水)試験の結果について述べるものである。キーワード: 石淵ダム, H20岩手・宮城内陸地震, 表面遮水壁型ロックフィルダム, GPS監視

1. はじめに

石淵ダムは、岩手県南西部に位置(図-1)しており、昭和16年策定の北上川上流部改修計画において北上川上流5大ダム(石淵、湯田、田瀬、御所、四十四川)の1つとして、昭和28年に竣工した国内初の表面遮水壁型ロックフィルダムである。

石淵ダムの諸元は、図-2のとおりである。

H20岩手・宮城内陸地震の震央から約10kmでダム管理用の地震計で最大加速度2097.2galを記録した、その概要は図-3のとおりである。

＜我が国初の「表面遮水壁型ロックフィルダム」＞

ダム名	石淵ダム
河川名	鮎沢川
集水面積	154.0km ²
湛水面積	1.1km ²
総貯水量	1,615万m ³
洪水調節容量	560万m ³
計画最大流入量	1,200m ³ /s
計画最大放流量	900m ³ /s
ダム形式	ロックフィル
堤高	53.0m
かんがい	19.0m ³ /s
上水道	—
発電(取水量)	16.0m ³ /s
(最大出力)	20,800kw
着工/完成	S21年/S28年

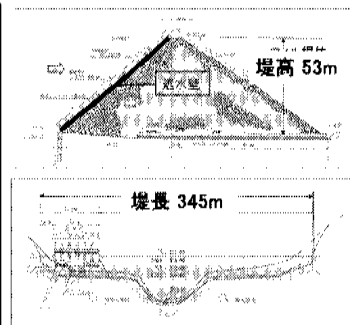


図-2 石淵ダムの諸元

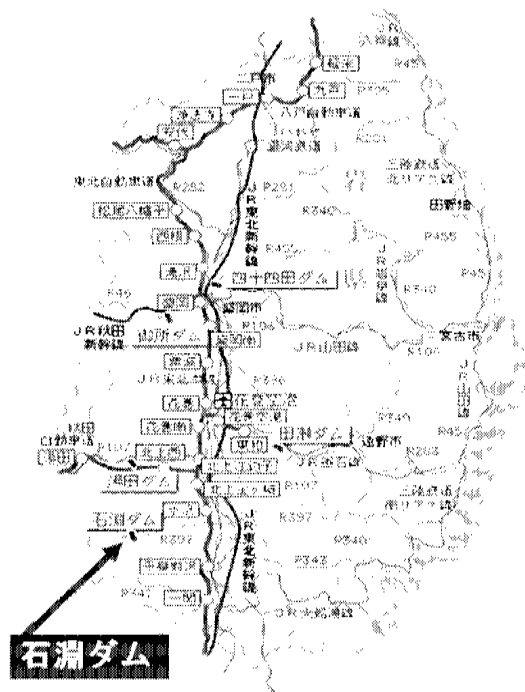


図-1 石淵ダムの位置図

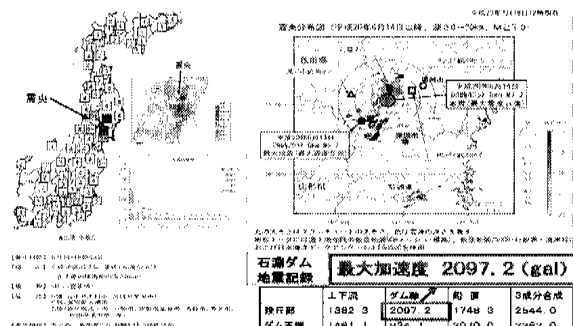


図-3 石淵ダムの地震記録

¹ 東北地方整備局 北上川ダム統合管理事務所 事務所長
² 同 技術副所長
³ 同 調査課長

2. 地震発生時から専門家による緊急調査

2.1 地震発生時の対応

地震発生時に、電気設備点検作業のため職員 2 名と点検請負業者 4 名が在庁、石淵ダム堤体など被災状況をマイクロ無線回線で震災対策支部（事務所）に円滑な伝達がなされ、震災対策本部（本局）に報告するとともに被災から約 1 時間後の 10 時には記者発表した。

2.2 石淵ダムからの緊急放流

被災時のダム貯水位は 314.4m で常時満水位（318m）と制限水位（312m）のほぼ中間位置にあり、ダム堤体などの被災状況確認のため利水者と 312m までの水位低下で合意し、14 時 30 分から最大 200（ m^3/s ）の緊急放流を実施した。

2.3 現地対策本部の設置

16 時 45 分に現地対策本部を設置。被災状況調査、石淵ダム工事誌やダム管理データなど、ダム機能確認及び検討に必要な資料の整理を急いだ。

また、対策支部（事務所）と連携しダム運用を継続するための応急復旧対策や緊急運用体制などのハード及びソフト対策に着手した。

2.4 専門家による緊急調査

6 月 15 日（日）早朝（6:30）に、専門家 3 名（国総研 1 名、土研 2 名）本局 T E C - F O R C E が防災ヘリミチのく号で石淵ダム臨時ヘリポートに到着、午前中に緊急調査及び検討した。13:30 から記者会見で、その結果を次のとおり発表した。

＜専門家（山口上席研究員）からのコメント＞

本日の調査による限り、堤体の天端や下流面における変状は認められるものの天端付近の高標高部に限られること。また、ダムの遮水壁機能上、最も重要なコンクリート表面遮水壁に大きな問題がみとめられなかったこと、更に、ダムの下流で計測している漏水量が通常より若干多いものの、異常な状態になっていないことなどから、現時点においては、ダムの安全性に大きな問題はないと判断される。

観測体制を継続するとともに詳細な調査を実施する必要があると思われる。

2.5 漏水量観測の強化

専門家のコメントを受けて、自動漏水観測データ（河床部、右岸トンネル部、段丘部の 3 系統）の精度検証のため 1 日 2 回（9 時と 15 時）現地観した。

その結果、データに微妙な違いがあることが判明、6 月 16 日に機器納入業者による点検で河床部と段丘部の漏水計のフロートワイヤーの修理で正常に戻した。

一方、右岸トンネル部は構内に設置されており法面崩壊で確認不能の状況であったがトンネル排水路の流量観測が過去データに近似、代替水路と四角堰（計測可能範囲：3.3L～91.0L）」で対応した。

図-4 は、被災直後の対応状況である。

2.6 体制の移行（非常体制から警戒体制へ）

地震発生から 5 日目の 6 月 18 日（木）には応急復旧作業の結果、①ダム天端の浸水対策が完了、②被災箇所への応急復旧完了、③監視体制確立、④電力、有線通信回線、管理用光ケーブル復旧、⑤利水補給の確保など一連の緊急応急対策が完了したことから、同日の 17:00 で支部体制を「非常体制」から「警戒体制」に移行し現地対策本部を解散した。

3. 各種観測機器の導入

ダム監視体制強化とダム安全確認（湛水）試験に向けた各種監視データ収集のために、土木研究所などから最新観測機器情報や事務所職員、ダム管理業務委託や関係機関の協力を得ながら、現地調査、機器選定、機器設置など短期間で、①漏水量観測、②堤体変位（GPS）観測、③映像監視、④地山変状観測の各種観測監視機器を設置した。

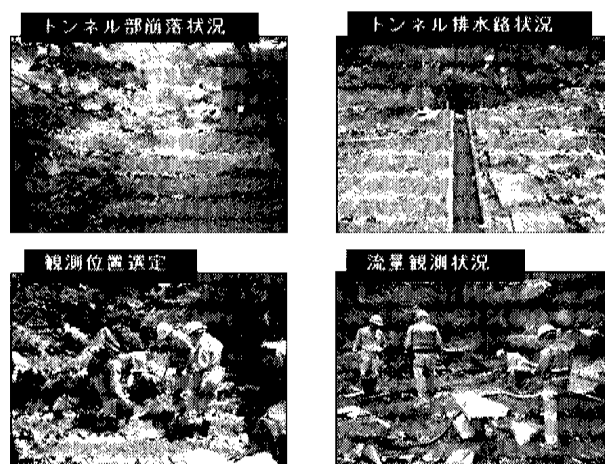


図-4 トンネル部の漏水量観測（被災直後）

図-5 は、監視観測設備全体配置図である。

3.1 漏水量観測の自動化

トンネル部の漏水量計は、代替水路及び四角堰による手動計測していたものを自動化した。

水位センサーを設置し、石淵ダム管理支所までセンサーケーブルを敷設して、自動記録設備を設置した。

図-6 及び図-7 は、漏水観測の状況である。

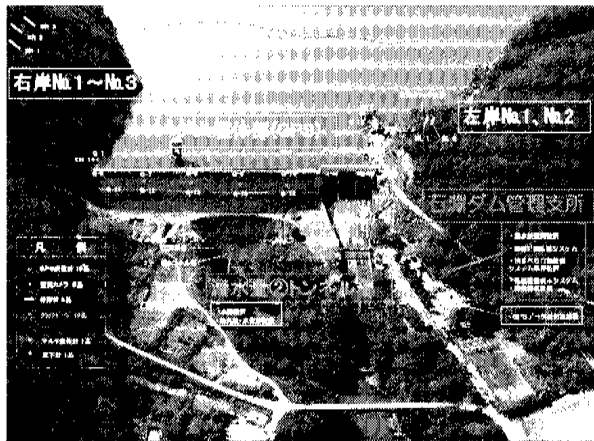


図-5 石淵ダム監視（観測）設備全体配置図

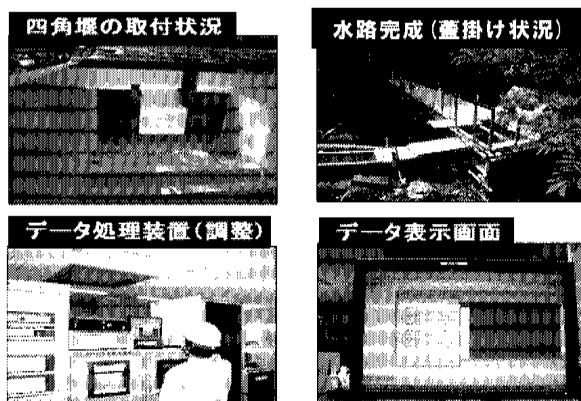


図-6 トンネル部の漏水量観測（応急対応）

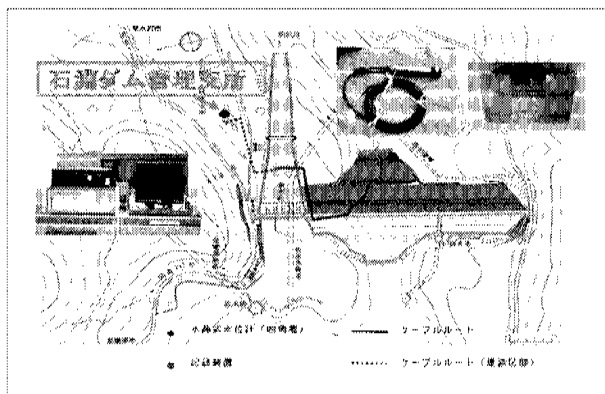


図-7 漏水観測用の機器配置（トンネル部）

3.2 堤体メッシュデータ及び3D表示化

地震直後にダム堤体定点観測用の基準点が斜面崩壊で使用不能になり建設時基準点（若柳橋付近）を固定点として堤体挙動確認のためメッシュ測量を実施して3D表示化を行った（図-8）。

結果は、ダム機能に影響を及ぼす規模の変位は発生していないことが確認された。

3.3 堤体変位（GPS）観測

図-9 は、ダム堤体の継続的な挙動監視に優れているGPS観測機器の設置位置である。

堤体計測ポイントは天端及び上下流部の15カ所で不動点2カ所にも設置した。

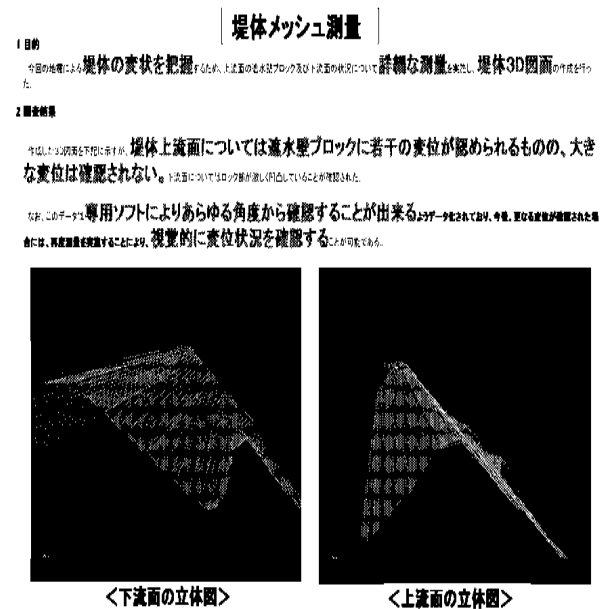


図-8 堤体メッシュ測量の概要

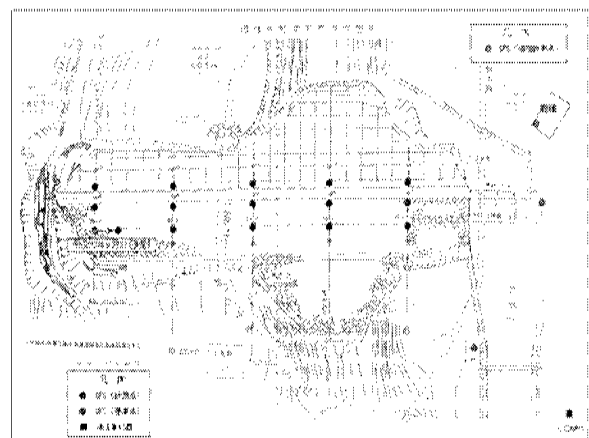


図-9 堤体変位の観測機器配置検討

図-10 は、GPS観測機器の設置状況で通信集約機を経由し石淵ダム管理所まで有線ケーブルで伝送している。また、衛星データとの校正管理により精度 5mm 以下で変位を記録している。

3.4 映像による監視

図-11 は、映像による監視の強化対策の状況であり監視範囲と設置状況を示している。カメラ 5 台の映像を無線 LAN 及び有線ネットワークを経由して石淵ダム管理所で映像監視している。

図-12 は、監視観測筒状況で、右岸斜面クラック箇所については画像処理技術を導入し変位が発生した場合に警報を発する機能も備えている。

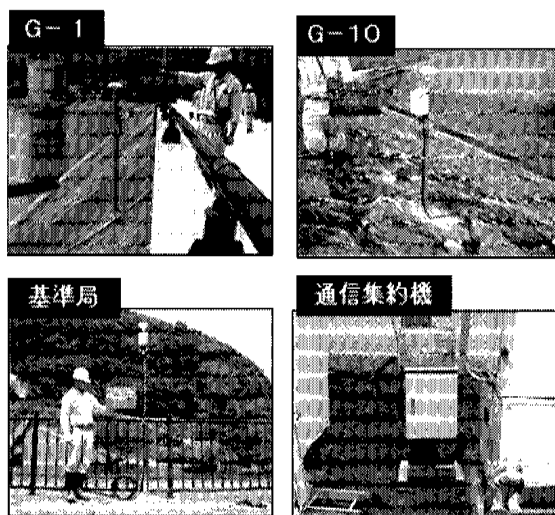


図-10 堤体変位の観測機器設備状況

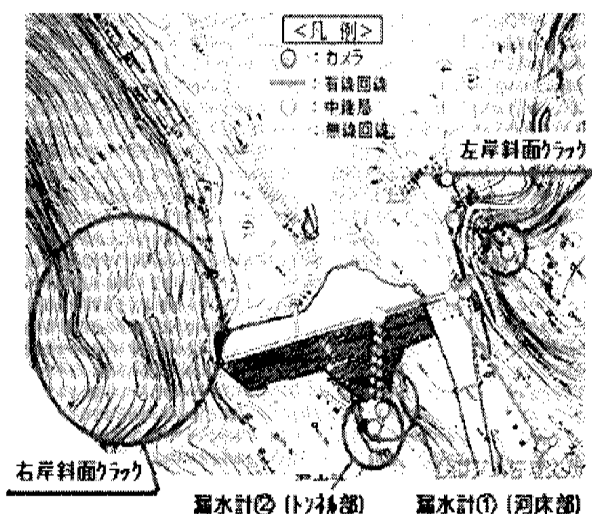


図-11 映像監視範囲及びカメラ設置場所

3.5 地山変位の監視計測

右岸及び左岸の地山変位は、ヘリコプタからの現地視察及び航空写真などを参考に現地踏査を行った。その結果から小規模な変位が見られたが、土木研究所地すべりチームの指導で「地盤伸縮計」と「クラックゲージ」による監視を行っている。

図-13 は、右岸地山変位箇所監視状況で小規模な変位が見られる箇所の両端と中央部の 3 カ所に設置した地盤伸縮計の設置状況である。

設置から現在まで、強風時等の影響による短期変化は発生しているものの、地すべりにつながるような大きな変位は計測されていない。

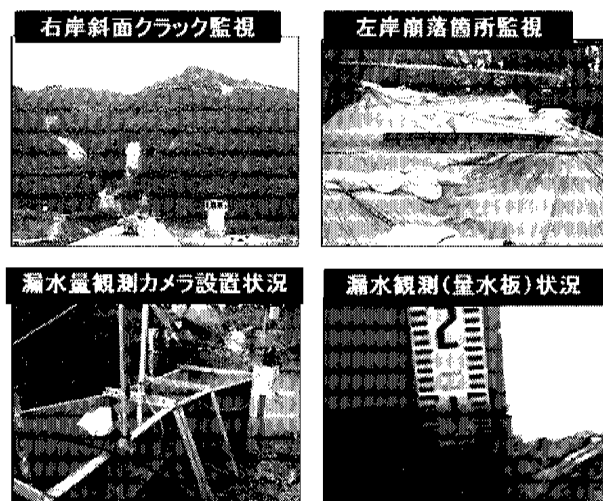


図-12 監視カメラ映像強化の状況（一部）

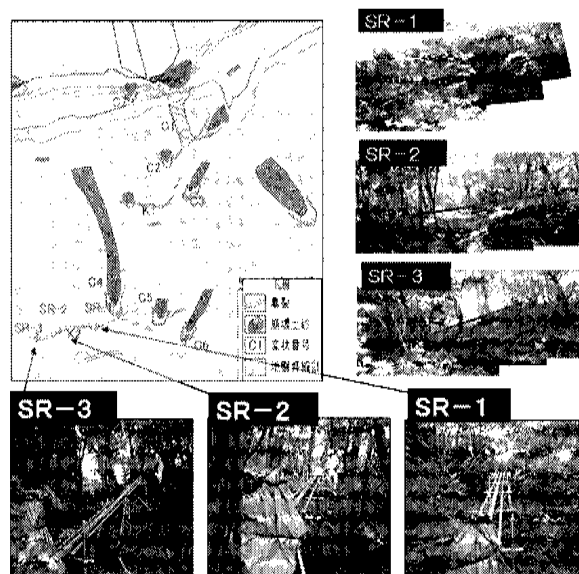


図-13 右岸地山変位の監視状況

図-14 は、左岸地山変状箇所の監視状況で、突き出ている箇所全体に小規模な変状が見られた箇所であり、旧岸倉設置箇所の上段付近の代表地点 2 カ所に設置したものである。

また、石淵ダムに接して整備されている国道 397 号の法面に小規模なクラックも発生しており地山変状による影響のものと推測されるため、クラックゲージ 9 台を設置し左岸全体の動きをきめ細かく監視することとし機器を設置し監視している。

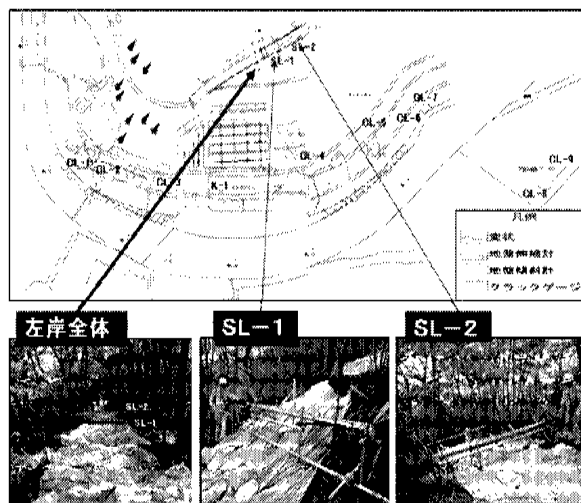


図-14 左岸地山変状の監視状況

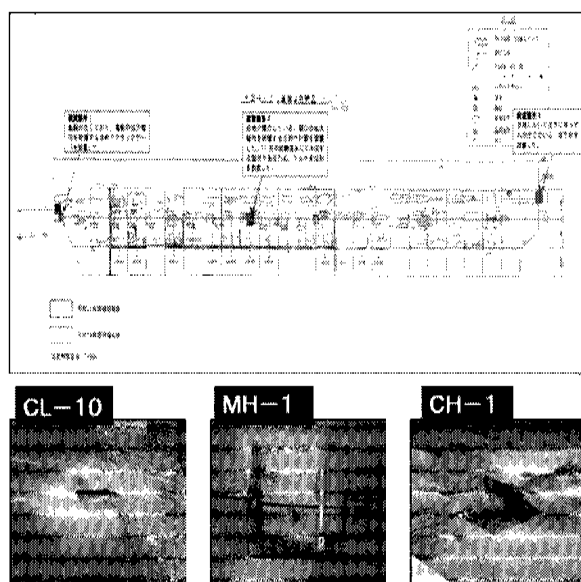


図-15 ダム堤体貯水池法面監視状況

図-15 は、石淵ダム堤体の表面遮水壁で横断的にクラックが発生している箇所について詳細調査した時に表面保護材を剥いだ箇所の継ぎ目部分にクラックゲージを設置し、貯水位の変化との関連を監視するために設置したものである。

図-16 は、これらの地盤伸縮計やクラックゲージなどの監視センサーで得られた各種データを石淵ダム管理支所に収集し監視データとして画面表示させたものである。監視データに異常値が発生するとパソコン画面から自動的に警報を発する機能を持たせている。

また、これらの監視データについては、安全確認（湛水）試験の際などにおいて、確認するための基本データとして活用している。

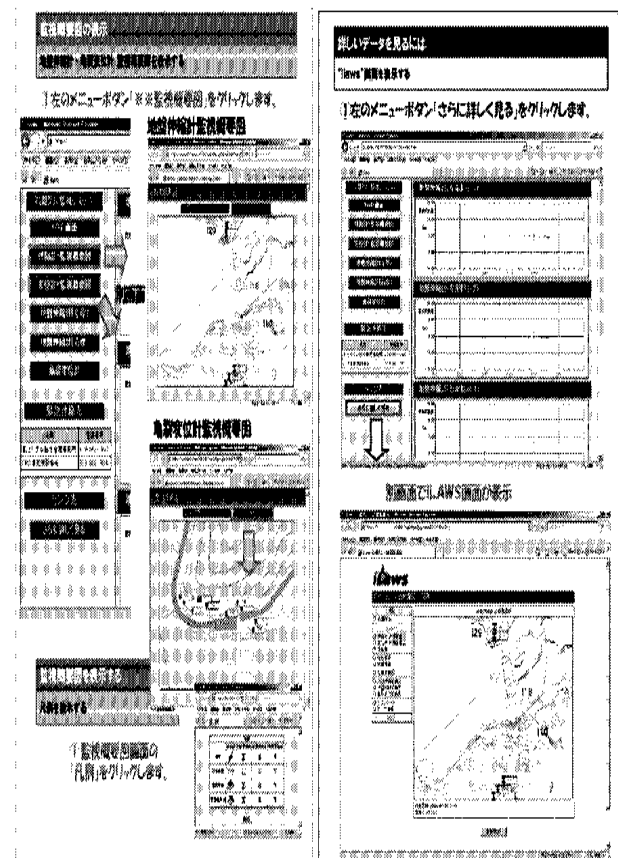


図-16 クラックゲージと地すべりセンサーの監視画面

4. 安全確認（湛水）試験

4.1 安全確認（湛水）試験計画書

ダム機能が正常であることを最終的に確認するためには、ダム完成時に実施する湛水試験に準じて各種試験を実施することで、それまでに確認されたデータや平成22年7月19日に設置された「石淵ダム機能評価検討会（座長：土木研究所吉田地質監）」意見及び局長承認などの手続きを進め、洪水期（7月～9月）以降に実施することで計画案を策定した。

石 淵 ダム 安全確認(湛水)試験計画書(案) 平成20年10月 東北地方整備局 北上川ダム統合管理事務所	はじめに 平成20年6月14日発生した「平成20年 岩手・宮城内陸地震」で被災した石淵ダムの機能回復のため、「石淵ダム機能評価検討会」と設置し、技術的課題等の指導・助言を備ながら調査、検討をこれまで実施してきた。 その検討等の結果の概要は次のとおりである。 ① ロック部の変状・・・ ○ 旧機軸付近以外は地震により開き、上部のみ（圧密）沈下したが、地盤が沈下したわけではない。また、その後も大きな変状はみられていない。 ② 漏水部の変状・・・ ○ 2号の漏水部での亀裂、破損は認められなかった。また、コア採取した内部も背後の岩石とは異なる。その後も通常の岩石の状態となっており、目視・ブロックとも大きな変状は認められなかった。 ③ 漏水量・・・ ○ 地震後に漏水量は増加したが、ダムの当初（300年台）の頃と同様な状態で、貯水位に比例した量となっている。 ④ 左右岩地山・・・ ○ 右岸の一部でやや変位のある箇所はあるが、概ね大きな変状はない。 ・のように各種監視・観測のデータ等に基づき「石淵ダムの機能評価（総合的な評価）」の結果、ダム竣工時同等の機能を有していると判断できるため、「安全確認(湛水)試験」(以下、本試験という)を行い、地震以前と同様の機能が確保されているか、確認するものである。 本計画書は、「本試験に必要な監視体制」、「データの異常値等が確認された場合の対応・対策等」をまとめたものである。
--	---

図-17 安全確認（湛水）試験の計画書（一部抜粋）

1. 目的 石淵ダムの操作は、平成20年6月14日発生した「平成20年 岩手・宮城内陸地震」後の、7月31日に東北地方整備局長より承認された「地震発生後における操作要領」で運用中である。 10月末に、被災したダム天端の補修が完成するため、11月に本試験を実施し、堤体の安全を確認し、地震前の操作規則の運用ができるか判断することを目的とする。 2. 安全確認(湛水)試験概要 本試験は、地震後の漏水量の値が確認されていないEL312.0mから本試験最高水位のEL317.5m(満水位-0.5m)までの貯水位を上昇させて行うものとする。 実施期間は利水者（発電）と調整した結果、今年度の貯水位運用計画にもとづき11月上旬頃より開始し、11月末に最高水位まで上昇させるものである。 最高水位は1日間水位を維持し、この間、漏水量及び堤体変位等の計測・監視を行い、異常がなければ安全確認試験を終了させる。 その後は、発電運用により水位低下させ、地震前のダム運用を行うものとする。
--

図-18 安全確認（湛水）試験の目的と概要

図-17 は、計画書の冒頭部分の試験条件で、被災した6月14日～9月末までの観測データや現地監視状況、石淵ダム機能評価検討委員会での専門家による現地確認やアドバイスを踏まえて、安全確認（湛水）試験の計画（案）の内容を吟味した。

図-18、図-19 及び図-20 は、過去データ、安全確認の目的管理基準などであり、バックデータをもとにこれらの実施要領及び管理体制を策定し、局長承認を得て実施した。

○ 漏水量の管理基準 ① 全 体 漏水の測定は、河床部、トンネル部、段丘部の3ヶ所について量と漏りの観測を行うものとする。 ② 河床部 図-20は、石淵ダム完成初期の漏水量経年変化図を、また図-21は昭和29年～昭和33年の4年間及び平成20年の計5年間の河床部漏水量のループ履歴図である。 この図より、貯水位と漏水量が連動していることと、地震後の漏水量はダム完成初期と類似していることがわかる（なお、図-21の昭和29年の漏水量は漏水壁補修前であったため、他の年より多くなっている）。これらの漏水量は、漏水壁及び地盤を通過してくるものと、堤体に降った雨が浸透してくるものの2種類ある。そのため、降雨の影響がない漏水量と貯水位の関係を示したものが、図-22である。また、降雨による漏水量は図-23に示したとおりである。 全体の漏水量は、図-22に示す関係式から得られる量と、図-23の日雨量による増加量を加えたものである。 これらから得られた式は、下記の管理基準に示すとおりである。 ・雨無しの漏水量 $Q = (11 - 298.02) / 0.1785 + [\sigma - 2\sigma]$ H : 貯水位(m) $[\sigma = 25.6, 2\sigma = 51.2]$ 日雨量換算 $qr = 0.1377 \times r24$ $r24$ 日雨量(mm) ・雨有りの漏水量 $Qr = Q + qr$ ③ トンネル部及び段丘部 過去の最大漏水量の、トンネル部30l/s、段丘部20l/sを管理基準とする。 ④ 漏 り 浸透破壊を誘発する土粒子の移動の有無を確認するために、三(四)角堰での「漏り」の発生状況を監視するものとする。
--

図-19 漏水量の管理基準

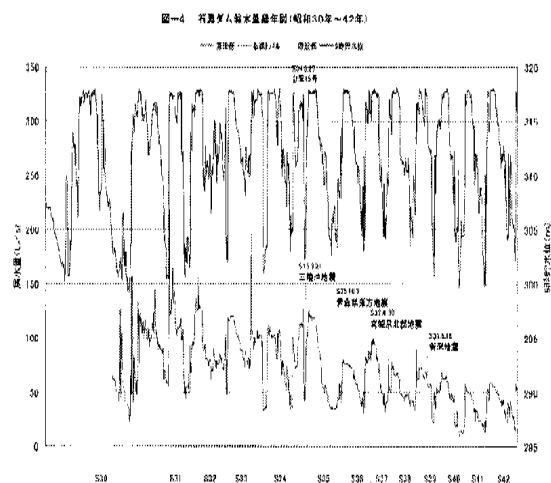


図-20 完成初期の漏水経年変化

図-21 のデータは、石淵ダム完成後の、漏水量のループ展開図であり、完成の翌年にやや多量の漏水量化観測されている。工事誌によればこの時補修工事で漏水量の低減対策を講じている。

図-22 は、貯水と漏水量の関係を建設当時からのデータで整理したもので、相関がとれていることが判明しこれに基づいて確認試験の設定値を設けた。

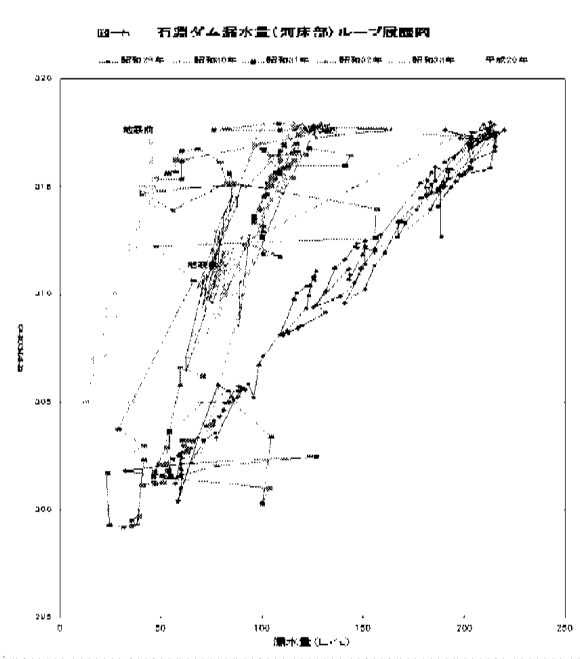


図-21 完成初期の漏水量ループ履歴図

図-23 は、降雨量による漏水量への影響を検討したものである。石淵ダム下流面の投影面積を算出して降雨量を流量に換算して、概算値ではあるが降雨による影響を考慮したものを判定式（基準）に加味したものとしている。

図-24 は、管理体制の基準を表にしたものであり貯水位と降水量を考慮した漏水観測データの監視体制の基準である。

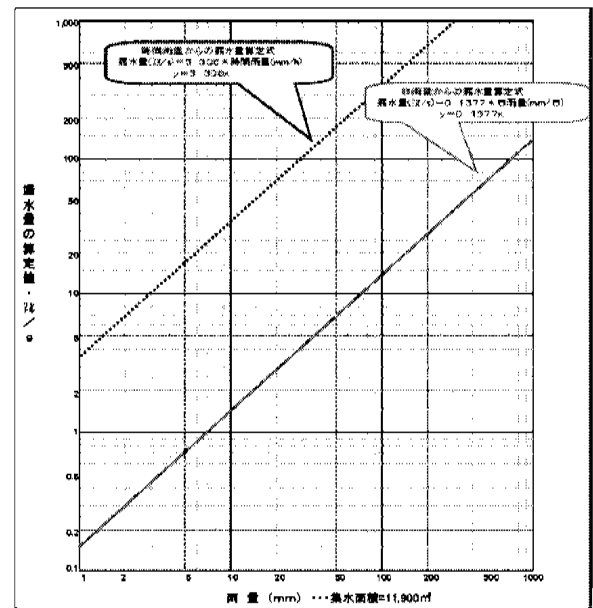


図-23 石淵ダムの雨量 漏水量

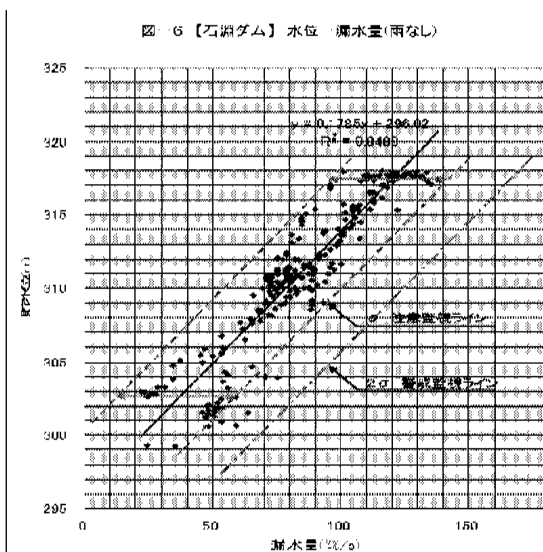


図-22 石淵ダムの水位－漏水量図

通常監視体制 漏水量及び清水状態を確認し、湛水試験を継続する

【 σ 迄】

注意監視体制 ・漏水に濁りが発生した場合

【 $\sigma \sim 2\sigma$ 】 ・漏水量が目安値に到達した場合(降雨を考慮)

↓
漏水量が(濁りが消え)、目安値からさらに上昇しなければ
清水状態を確認後、湛水試験を継続する。

警戒監視体制 注意監視体制にて下記に該当した場合、警戒監視体制に移行し、水位上昇を一旦停止する。

【 2σ 以上】
・水位保持状態で濁りが1日間継続した場合
・漏水量が目安値からさらに上昇する場合

↓
さらに濁りが継続し、計測値に大きな変動傾向がみられる時は
特定箇所を確認後に、湛水試験を中止する。(水位低下)

図-24 監視体制の基準

図-25 は、堤体変位の管理基準である。既存の定期測量データやGPS観測データの実績などを考慮して、洪水期と非洪水期の既往最大変位量である5mmを「基本データ」とし、2倍の10mm超で「注意体制」、4倍の20mm超で「警戒体制」を執る管理体制とした。なお、石淵ダムに導入したGPS計測データでは、誤差5mm以下であることは確認済みである。

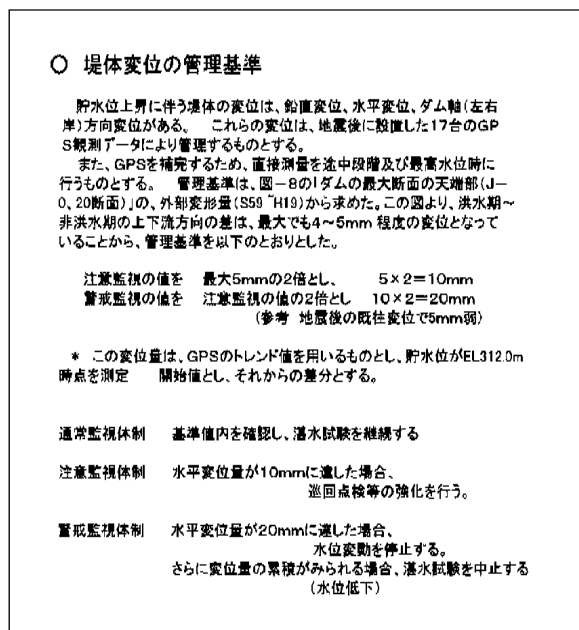


図-25 堤体変位の管理基準

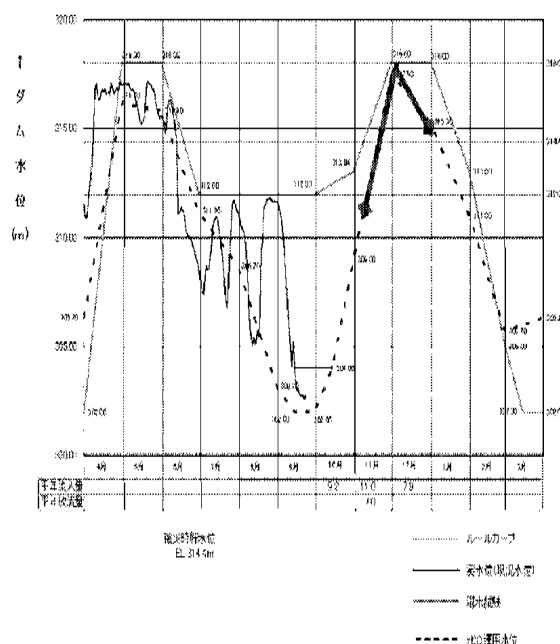


図-26 地震発生に伴う湛水試験計画図

図-26 及び表-1 は、安全確認試験の実施時期を示す計画図及び測定項目及び異常値の日安をまとめたものである。

図-27 は、安全確認(湛水)試験期間の H20.10.31～H20.12.19)までのダム諸量グラフであり、この期間に312m から318m での貯水位を確保している状況を示している。

表-1 測定項目及び異常値の日安

漏水	量	過去の最大漏水量以上であり、貯水位との相関よりも多量である。 (ただし、降雨による影響も加味する)
	箇所	異常な箇所の見え。
堤体変位	GPSデータ	過去の年間最大変位量から算出した以上の変位発生。
	メッシュ部測量	GPSデータを主とするが、必要に応じてメッシュ部の測量も実施し、異常値をチェックする。
貯水池周辺	地山の变化	湛水による増すべり等の発生。

○ 試験中の測定頻度

- 漏水……… 自動観測データを主体(日数回の監視カメラによる日視点検及び週1回以上の現地点検)
- 堤体変位… GPSデータを主体(ただし、水位上昇の途中段階及び最高水位時に直接測量により測定するものとする。
- 堤体及び貯水池周辺 …… 日1回以上の巡回による点検

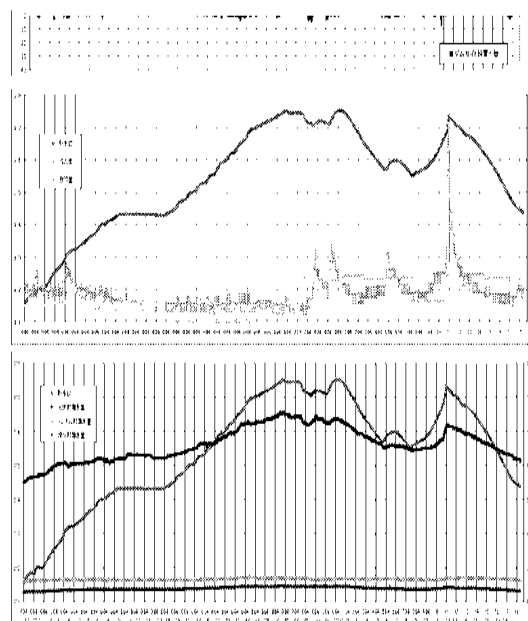


図-27 安全確認(湛水)試験 ダム諸量グラフ
 (H20.10.31～12.19)

4.4 ダム堤体の計測結果

図-28 は、ダム堤体に設置したGPS観測データであり、この期間に基準値を超えたのは強風時(20m/s超)でGPSの固定方法に問題があり補修したその後のデータには基準値を超えるものが無かった。

4.5 表面遮水壁の確認

図-29 は、表面遮水壁の「潜水調査」と「吸い込み試験」を実施した結果、表面遮水壁の本体の損傷を確認できる十分なデータは得られなかった。また、遮水壁ブロック損傷調査においても、本体に機能に影響を及ぼす損傷が確認されなかった。

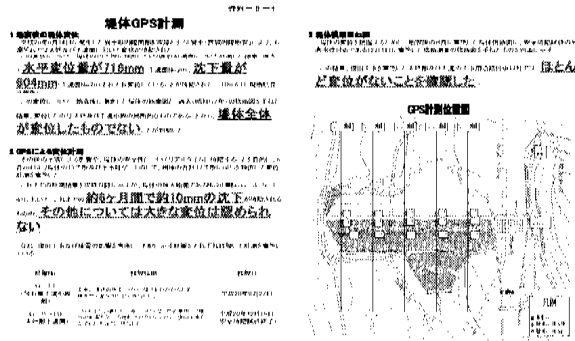


図-28 堤体GPS計測の概要

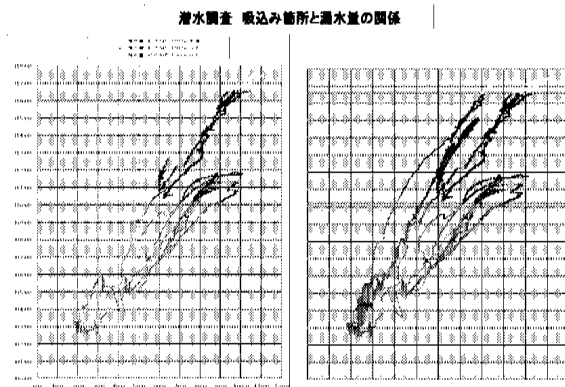


図-29 吸い込み箇所と漏水量の関係

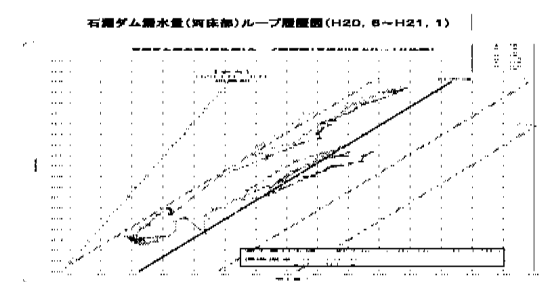


図-30 漏水量のループ履歴の概要

4.6 漏水量の確認

図-30 は、安全確認(湛水)試験中における貯水位の変化をループ履歴としてグラフ化したものである。

本データによれば、損傷を示すようなデータは発生していないことを確認した。図-31 は、漏水観測データの約2年分(H20～H21)のグラフである。異常は見あたらない。

4.7 遮水壁面の確認

図-32～34 は、遮水壁目地部の変位を監視するために設置したラックゲージ(3カ所)と遮水壁のコブ抜き調査で強度等の安全が確認された。

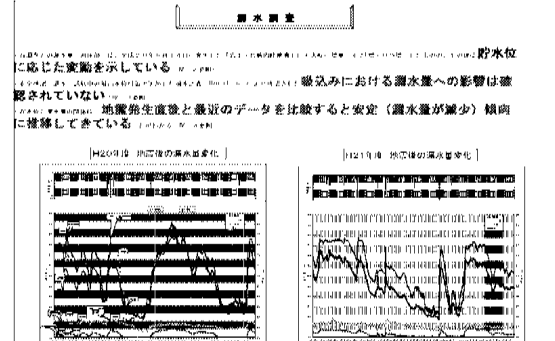


図-31 漏水調査の概要

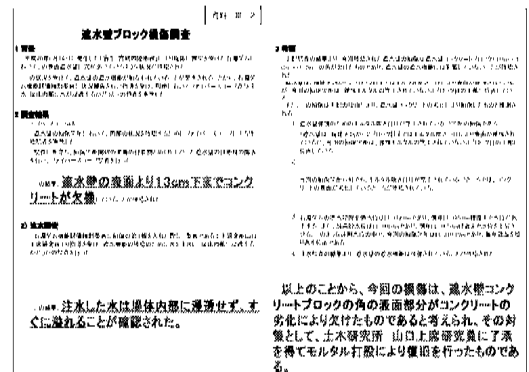


図-32 遮水壁ブロック損傷調査の概要

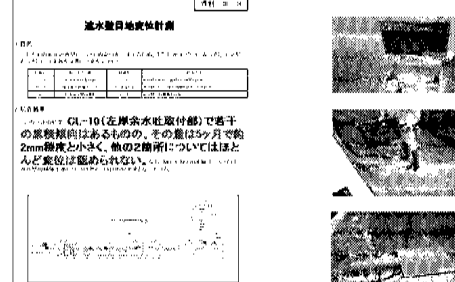


図-33 遮水壁目地変位計測の概要

4.9 地山変状

図-35～36 は、地山変状についての評価結果であり、現段階でも特段の変化が認められない。

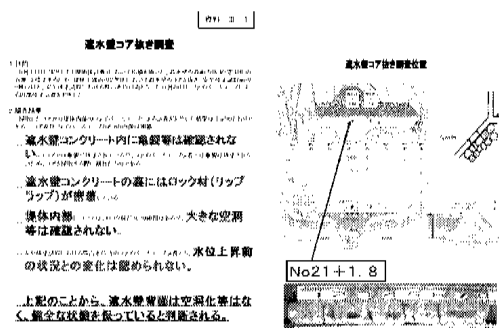


図-34 遮水壁コア抜き調査の概要

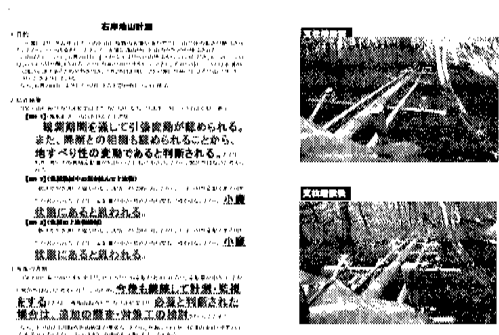


図-35 左岸地山計測の概要

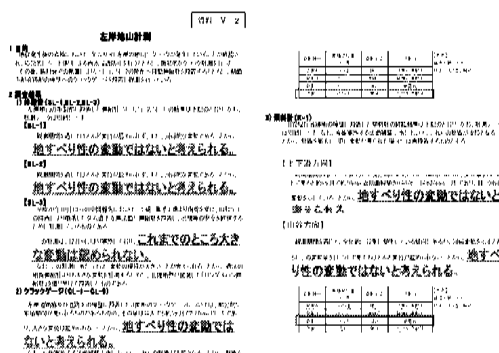


図-36 右岸地山計測の概要

5. 石淵ダム機能評価検討委員会

5.1 石淵ダム機能評価検討委員会

平成 20 年 7 月 19 日に石淵ダム機能評価検討会を設立、各段階で現地に赴いていただき現地確認や監視観測データの評価確認していただき、継続的な監視体制が整う中で復旧工事も完了し、10 月 31 日からの安全確認（洪水）試験を実施、平成 21 年 1 月 21 日の機能評価検討会に最終報告して確認及び審議の結果石淵ダムの「安全宣言」に至った。

6. おわりに

石淵ダム機能評価検討会の御指導と御提案のもとに「平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震の記録」として、被災直後から平成 21 年 12 月末までの対応を漏れなく記録保存するため編集して平成 22 年 3 月に全編 704 ページ、DVD データ：1.44GB で編集。

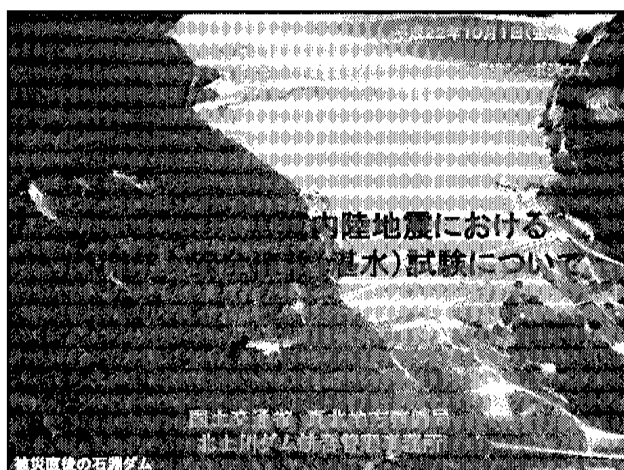
本報告は、計測技術に関連する項目を抜粋し被災直後から安全確認（洪水）試験までの現地対応を整理したものである。

石淵ダムの震災に際して協力いただいた、独立行政法人土木研究所、国土技術政策総合研究所及び関係各位の迅速な対応と技術指導に感謝する。

また、石淵ダムは平成 25 年に完成する胆沢ダムにその役目を引き継ぐ予定であるが、引き続き安全な運用が出来ること並びに関係者一同の益々の発展を祈念する。

参考文献

- 1) 葛西敏彦：石淵ダムにおける平成 20 年岩手・宮城内陸地震への対応
ダム技術、No. 276、26～40、2009
- 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 による地震後の変動挙動監視
ダム技術、No. 276、9～20、2009



報告の概要

1. はじめに
 <石淵ダムの概要など>
2. 各種観測機器の導入
3. 安全確認(湛水)試験
4. 石淵ダム機能評価検討委員会
5. おわりに

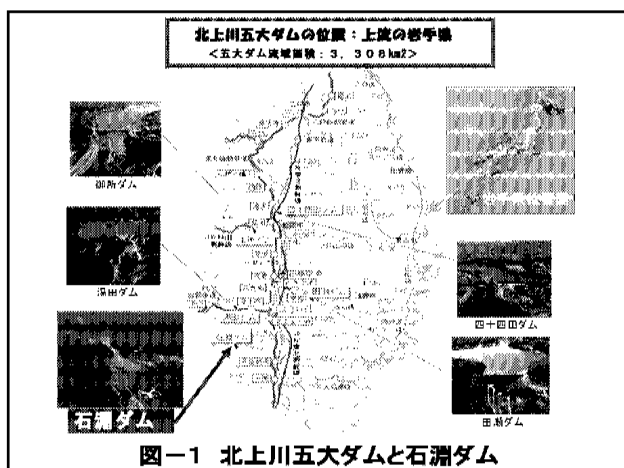


図-1 北上川五大ダムと石淵ダム

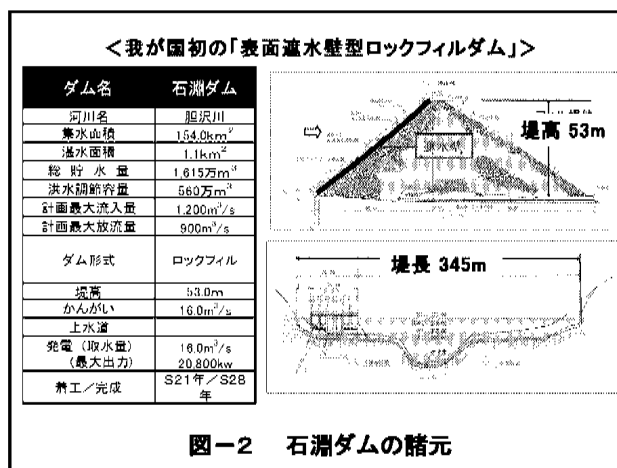


図-2 石淵ダムの諸元

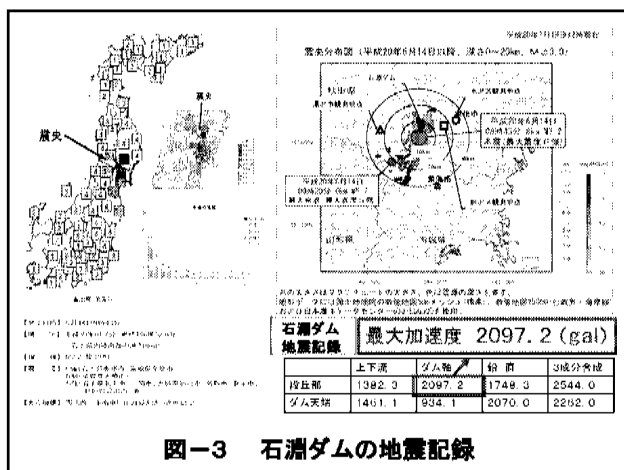


図-3 石淵ダムの地震記録

2 各種観測機器の導入

1. 監視(観測)設備全体配置
2. トンネル部の漏水量観測
3. 堤体変位観測
4. 映像監視の実施
5. 地山変状(地這り)の監視

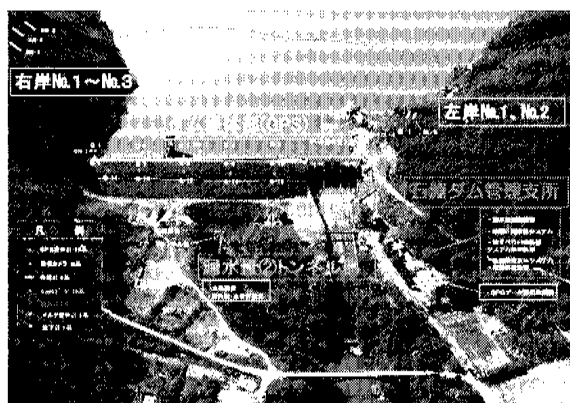


図-4 石淵ダム監視(観測)設備全体配置図

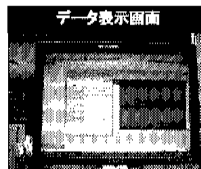
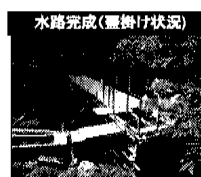
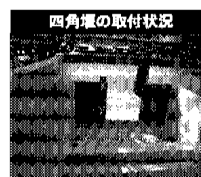


図-5 トンネル部の漏水量観測(応急対応)

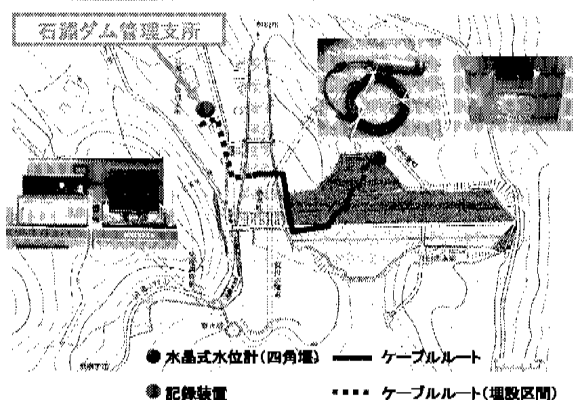


図-6 漏水観測用の機器配置(トンネル部)

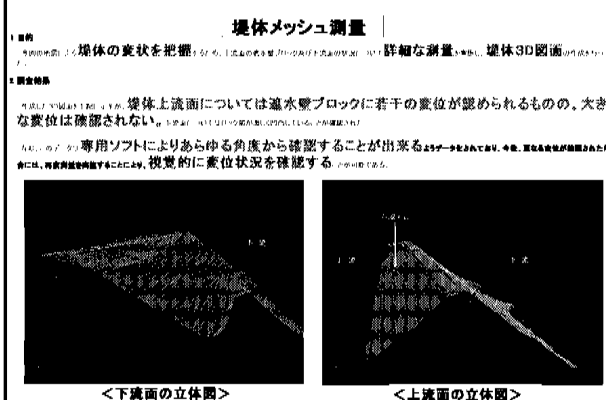


図-7 堤体メッシュ測定の概要

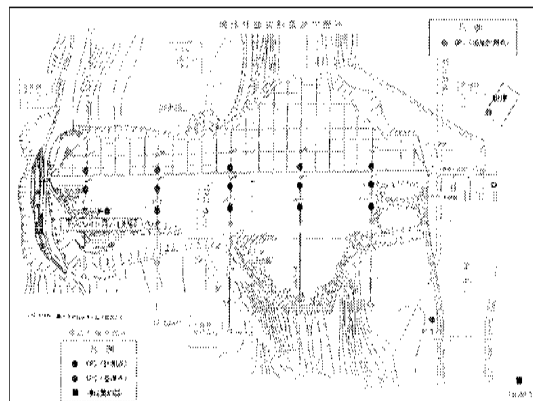


図-8 堤体変位の観測機器配置検討

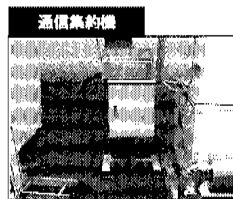
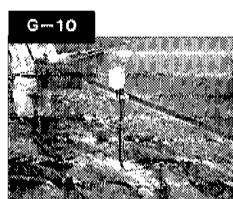
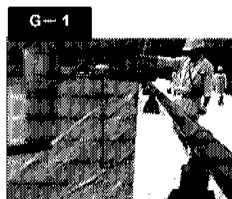
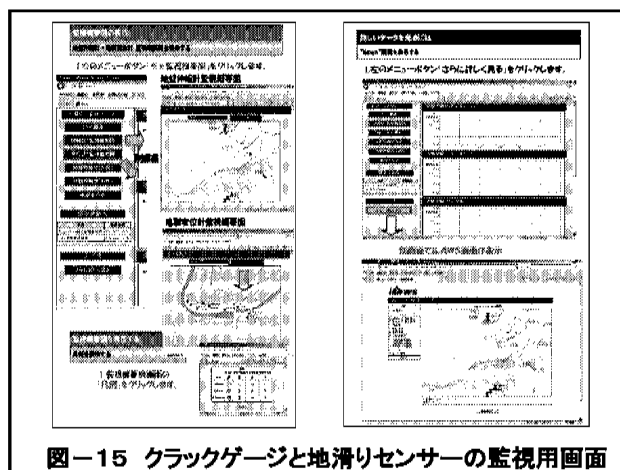
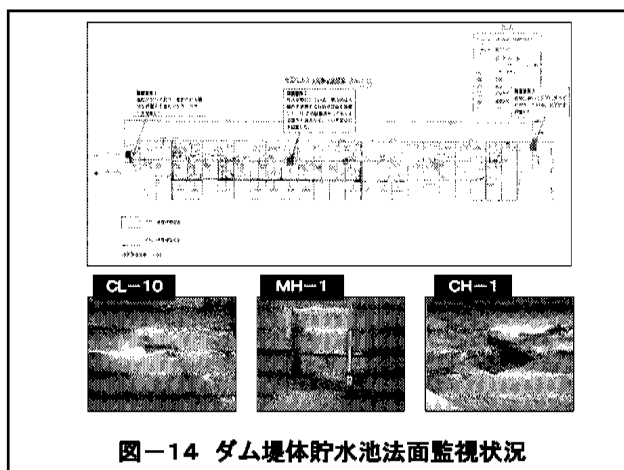
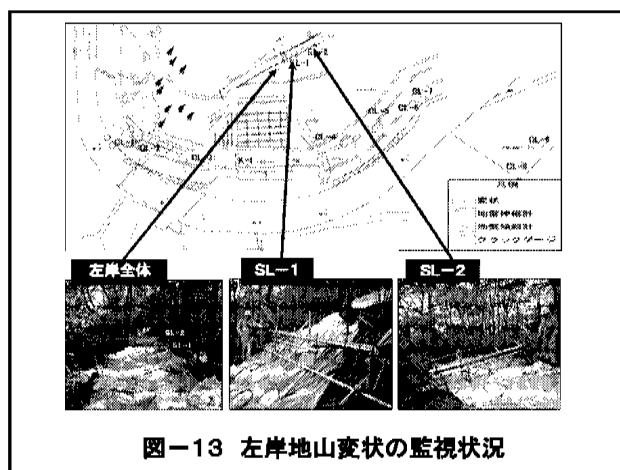
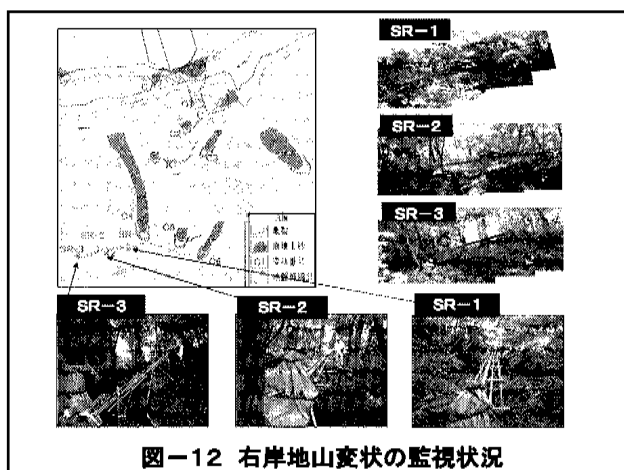
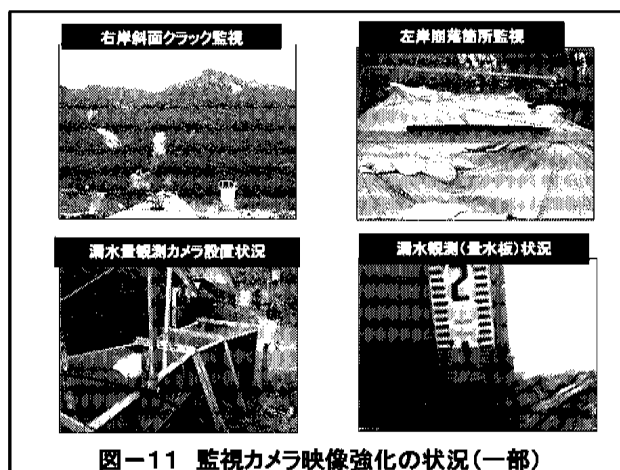
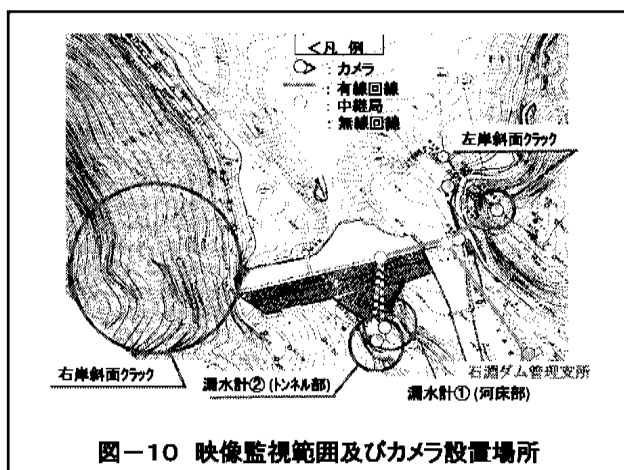


図-9 堤体変位の観測機器設置状況



3 安全確認(湛水)試験

1. 安全確認(湛水)試験計画書
2. 安全確認(湛水)試験の観測結果
 - ・ダム運用
 - ・堤体監視
 - ・漏水観測
 - ・遮水壁調査
 - ・地山変状

はじめに

平成20年6月14日発生した「平成20年 岩手・宮城内陸地震」で被災を受けた石淵ダムの機能回復のため、「石淵ダム機能評価調査検討会」を設置し、技術的評価等の指導・助言を得ながら調査、検討をこれまで実施してきた。
その検討等の結果の概要は次のとおりである。

- (1) ロック部の変状・・・
 - 旧橋脚付近以外は地震により揺らされて、上部のみ(圧密)沈下したが、地盤が沈下したのではない。また、その後し僅かな変動にとどまっている。
- (2) 遮水部の変状・・・
 - 2度の潜水調査での変位、吸込みは認められなかった。また、コア採取した内部も背後の粗石とは密着、その奥も通常のロックの状態となっており、目地・ブロックとも大きな変位は認められなかった。
- (3) 漏水量・・・
 - 地震後に漏水量は増加したが、ダムの当初(630年代)の値と同様な状況で、貯水位に比例した量となっている。
- (4) 左右岩地山・・・
 - 右岸の一部でやや変位のある箇所はあるが、概ね大きな変位はない。
このように各種監視・観測のデータ等に基づく「石淵ダムの機能評価(総合的な評価)」の結果、ダム竣工時と同等の機能を有していると判断できるため、「安全確認(湛水)試験」(以下、本試験という)を行い、地震以前と同様の機能が確保されているか、確認するものである。

本計画書は、「本試験に必要な監視体制」、「データの集約運営が確認された場合の対応・対策等」を定めたものである。

石 淵 ダム 安全確認(湛水)試験計画書(案)

平成20年10月

東北地方整備局

北上川ダム統合管理事務所

1. 目 的

石淵ダムの操作は、平成20年6月14日発生した「平成20年 岩手・宮城内陸地震」後の、7月9日に東北地方整備局より発出された「地震発生後における操作要領」で運用中である。

10月末に、被災したダム天端の補修が完成するため、11月に本試験を開始し、堤体の安全を確認し、地震後の操作要領の運用ができるかを判断することを目的とする。

2. 安全確認(湛水)試験概要

本試験は、地震後の漏水量の値が確認されていないE1542.6mから本試験最高水位のE1517.5m(満水位-0.5m)までの貯水位を上昇させて行うものとする。

筑造期間に利水等(発電)と調整した結果、今年度の貯水位運用計画にもとづき11月上旬より開始し、11月末に満水位まで上昇させるものである。

最高水位は1日間水位を維持し、この間、漏水量及び堤体変位等の計測・監視を行い、異常がなければ安全確認試験を終了させる。

その後は、発電運用により水位低下させ、地震後のダム運用を行うものとする。

○ 漏水量の管理基準

- (1) 全 体
漏水の測定は、洞床部、トンネル部、断丘部の3ヶ所について量と漏りの観測を行うものとする。
- (2) 洞床部
図-20は、石淵ダム完成初期の漏水量経年変化図を、また図-21は 昭和29年～昭和33年の4年間及び平成20年の計5年間の洞床部漏水量のループ履歴図である。
この図より、貯水位と漏水量が連動していることが、地震後の漏水 量はダム完成初期と類似していることがわかる(なお、図-21の昭和29年の漏水量は漏水量補修後であったため、他の年より多くになっている)。これらの漏水量は、漏水量及び地盤を通過して行くものと、堤体に貯った水が浸透して行くものの2種類ある。そのため、両者の影響がない。
漏水量と貯水位の関係を示したものが、図-22である。また、降雨による漏水量は図-23に示したとおりである。全体の漏水量は、図-22に示す関係式から得られる量と、図-23の日雨量による増加量を加えたものである。これらから得られた式は、下記の管理基準に示すとおりである。
・概無しの漏水量 $Q = (H - 298.02) \times 0.1785 + [0 \sim 2.0]$
H 貯水位 (m) $[0.256, 2.0 \sim 51.7]$
H雨量換算 $q = 0.1377 \times r \times 24$ r 24 H雨量(mm)
・固有りの漏水量 $Q_0 = Q + q_0$
- (3) トンネル部及び断丘部
過去の最大漏水量の、トンネル部30l/s、断丘部20l/sを管理基準とする。
- (4) 漏 り
浸透破壊を発生する土粒子の移動の有無を確認するため、二(四)角柱Cの「漏り」の発生状況を監視するものとする。

図-17 漏水量の管理基準

図-16 安全確認(湛水)試験の計画書(一部抜粋)

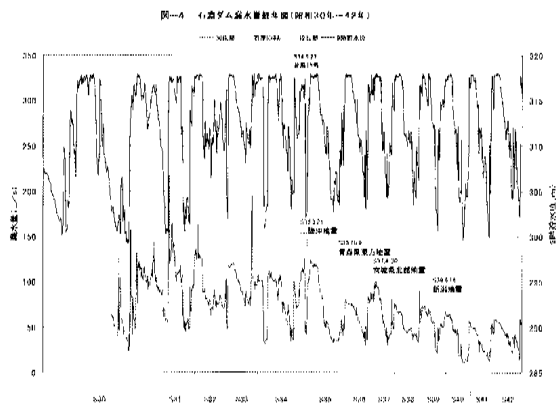


図-20 完成初期の漏水経年変化

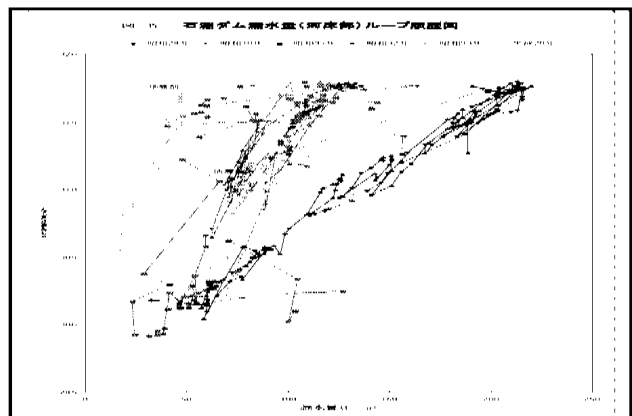


図-21 完成初期の漏水量ループ履歴図

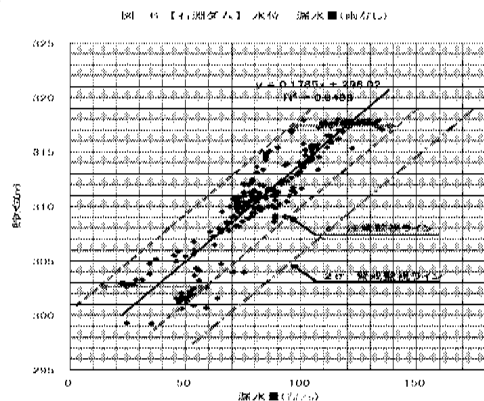


図-22 石淵ダムの水位一漏水量図

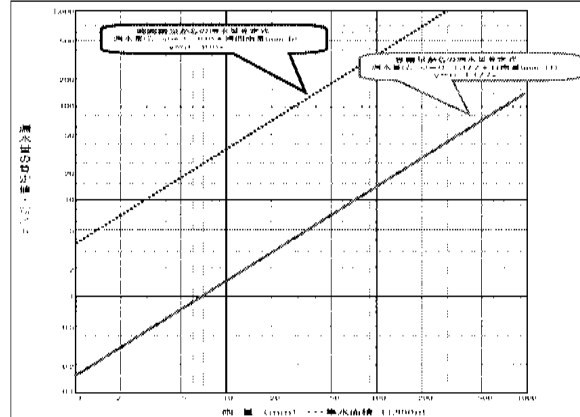


図-23 石淵ダムの雨量一集水量

通常監視体制 【σ迄】 漏水量及び清水状態を確認し、湛水試験を継続する

注意監視体制 【σ+2σ】

- ・漏水に濁りが発生した場合
- ・漏水量が目安値に到達した場合（降雨を考慮）

↓

漏水量が（濁りが消え）、目安値からさらに上昇しなければ清水状態を確認後、湛水試験を継続する。

警戒監視体制 【2σ以上】

注意監視体制にて下記に該当した場合、警戒監視体制に移行し、水位上昇を一旦停止する。

- ・水位保持状態で濁りが1日間継続した場合
- ・漏水量が目安値からさらに上昇する場合

↓

さらに濁りが継続し、計測値に大きな変動傾向がみられる時は特定箇所を確認後に、湛水試験を中止する。（水位低下）

図-24 監視体制の基準

○ 堤体変位の管理基準

貯水位上昇に伴う堤体の変位は、鉛直変位、水平変位、ダム軸（左岸）方向変位がある。これらの変位は、地震後に設置した17台のGPS観測データにより管理するものとする。

また、水位を補完するため、南側測測を途中段階及び最終水位時に行うものとする。管理基準は、図-8の「ダムの最大断面の天端部（d=0.20断面）」の、何型変位量（S50～d119）から求めた。この図より、洪水期～非洪水期の上下流方向の差は、最大でも4～5mm程度の変位となっていることから、管理基準を以下のとおりとした。

注意監視の値を 最大5mmの2倍とし、 $5 \times 2 = 10\text{mm}$
 警戒監視の値を 注意監視の値の2倍とし、 $10 \times 2 = 20\text{mm}$
 （参考 地震後の既計変位で5mm弱）

* この変位量は、GPSのトレンド値を用いるものとし、貯水位がSL312.0m時点を測定開始値とし、それからの差分とする。

通常監視体制 基準値内を確認し、湛水試験を継続する

注意監視体制 水平変位量が10mmに達した場合、巡回点検等の強化を行う。

警戒監視体制 水平変位量が20mmに達した場合、水位変動を停止する。さらに変位量の累積がみられる場合、湛水試験を中止する（水位低下）

図-25 堤体変位の管理基準

3. 安全確認(湛水)試験

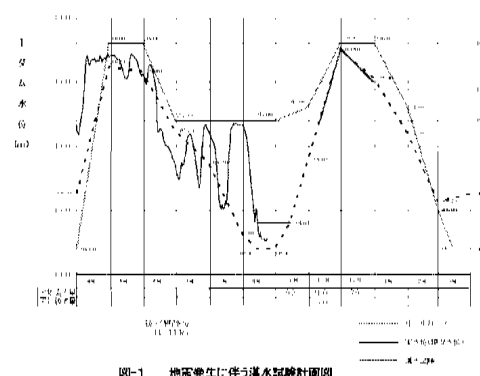


図-26 地震発生に伴う湛水試験計画図

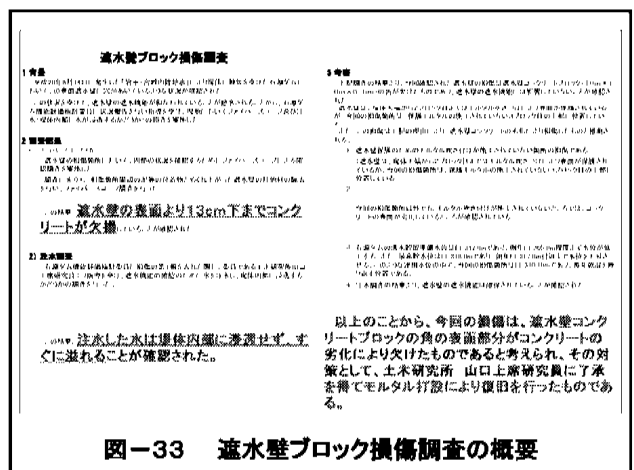
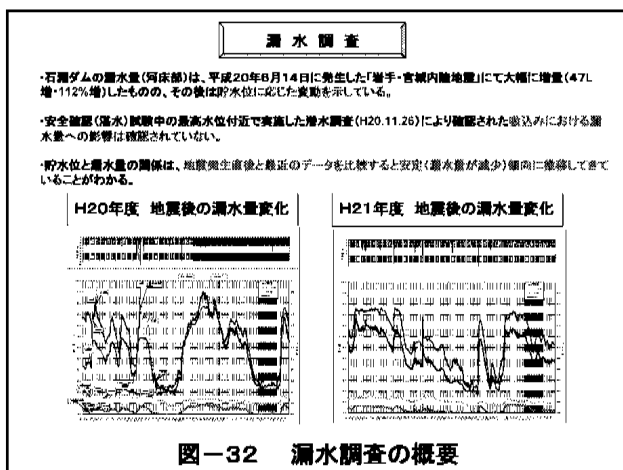
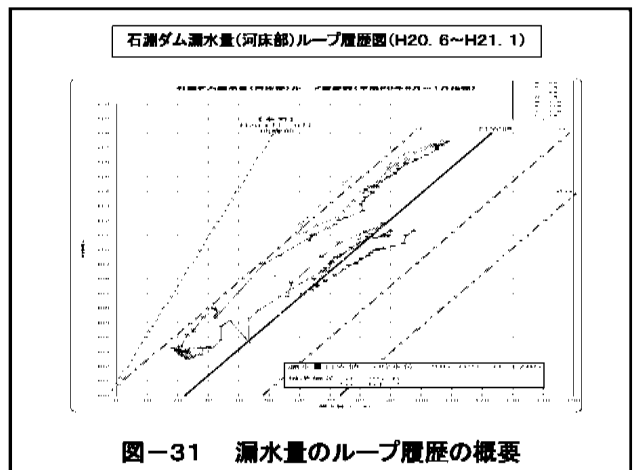
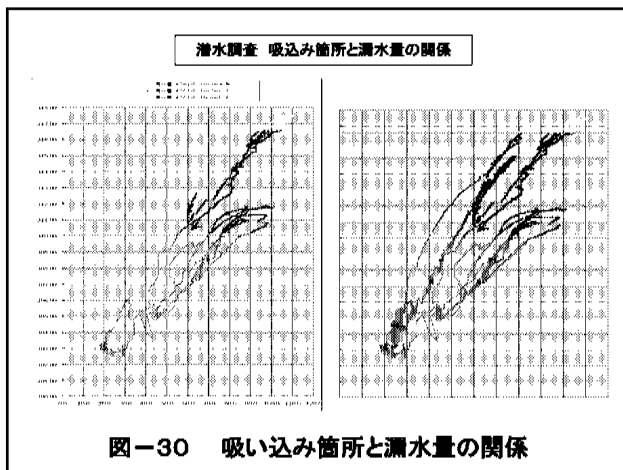
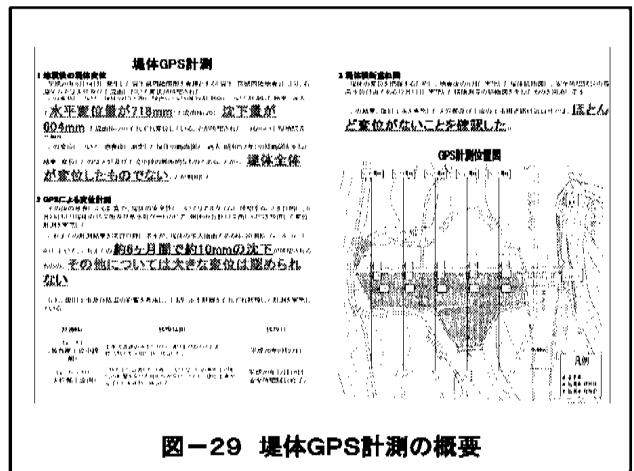
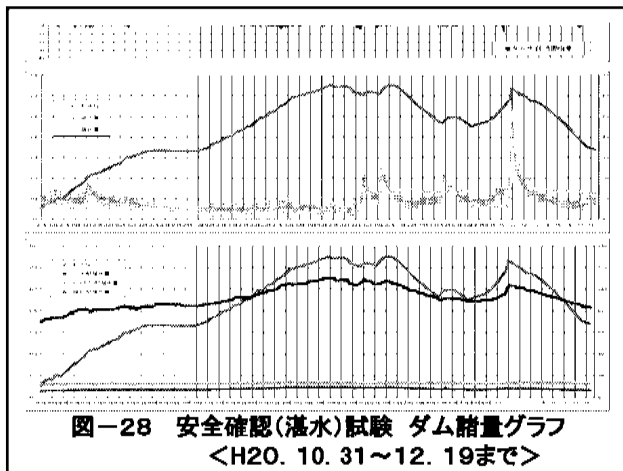
表-27 測定項目及び異常値の目安

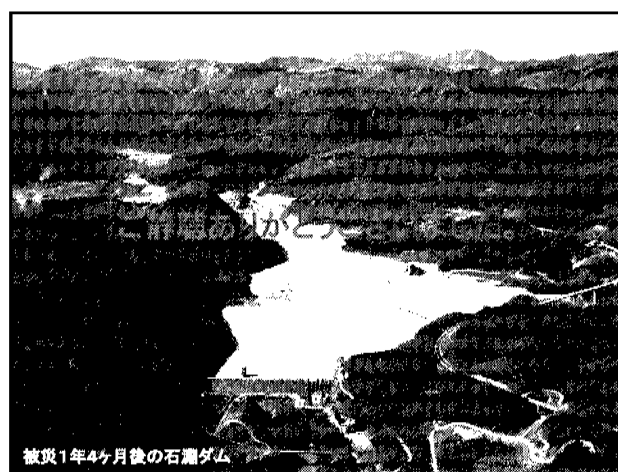
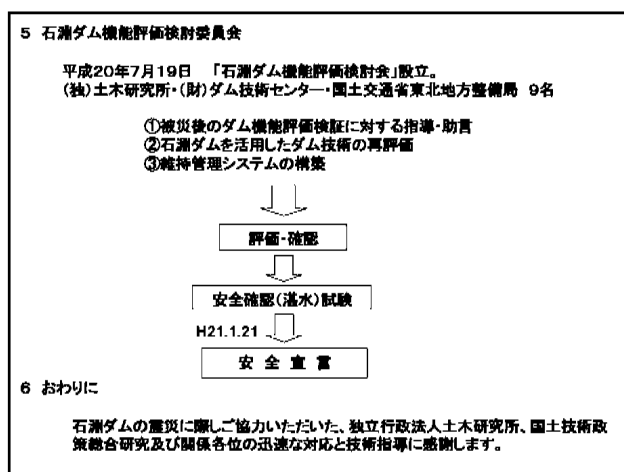
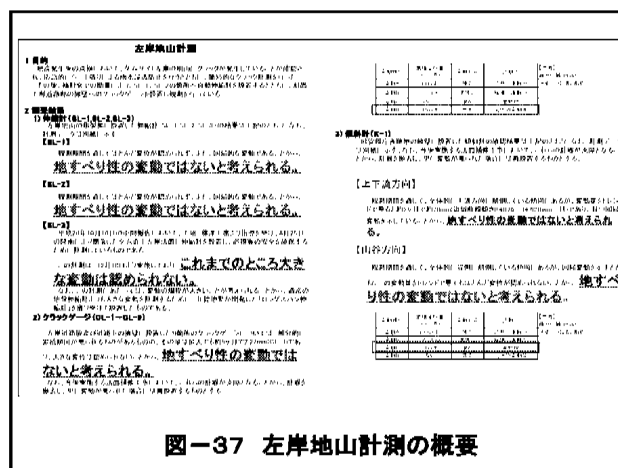
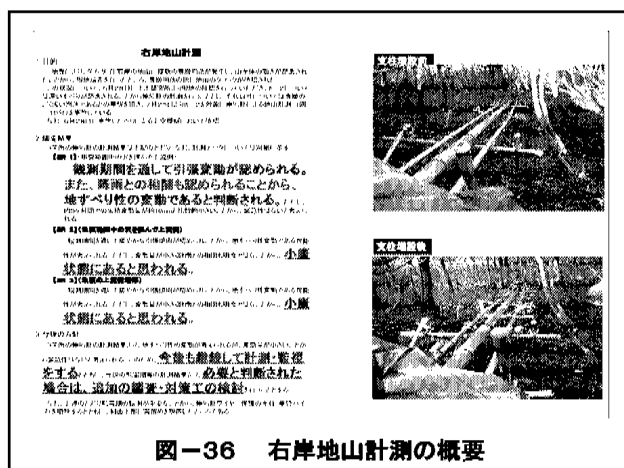
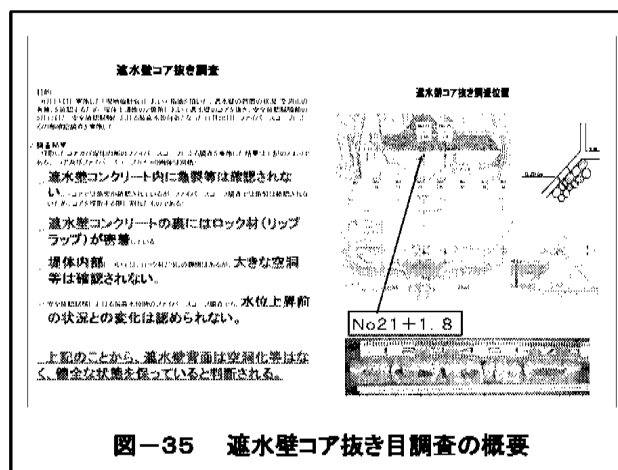
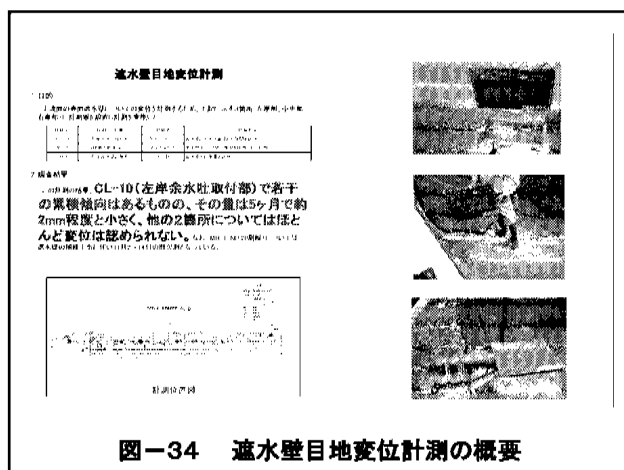
○ 測定項目及び異常値の目安（表-2）

漏水	目	湛水の最大漏水量(1日あたり貯水位の増減に比例した量)である。ただし、観測水位が異常に低下した場合
	警	異常な漏水に気づく
堤体変位	目	観測所直上からの雨量と集水量の算出値に比例した変位
	警	観測所直上からの雨量と集水量の算出値に比例した変位に比例した変位に気づく
貯水池周辺	目	貯水池周辺の地盤沈下等の異常

○ 試験中の測定頻度

- 漏水 …… 自動観測システム（1日1回の観測/水位、水位の増減及び湛水水位の増減、湛水水位の増減）
- 堤体変位 …… 観測所直上からの雨量と集水量の算出値に比例した変位に気づく
- 堤体及び貯水池周辺 …… 1日1回の観測による点検





砂礫層を基礎とした忠別ダム の挙動について

京田 悟¹ 西村 義² 野村 強³ 前田 章博⁴

忠別ダムは、複合ダムとしては日本最大級の規模であり、砂礫層を基礎としたフィルダム部には、アスファルト混合物によるコア敷保護工や連続地中壁による特殊な基礎処理工を実施している。本報告では、河川管理施設等構造令で規定されている項目に加え、特殊基礎処理工部に設置した計測機器についての結果を整理し、忠別ダムの挙動の現状について報告するものである。

半ハード：複合ダム、砂礫層、特殊基礎処理

1. はじめに

忠別ダムは、北海道のほぼ中央にある大雪山国立公園の西端に隣接し（図-1），石狩川の支川である忠別川に建設された多目的ダムである。ダム型式は，左岸側が重力式コンクリートダム，右岸側が中央コア型ロックフィルダムの複合ダムであり，この型式としては日本最大級の規模である（表-1，図-3～5）。フィルダム河床部には，河床堆積物が広く分布していることから，アスファルト混合物によるコア敷保護工や連続地中壁による特殊基礎処理工を実施している。本報告では，特殊基礎処理工の計測結果を主体に，試験満水時および現状の挙動について報告するものである。

2. 忠別ダム の地質概要

2.1 ダムサイト

ダムサイトの地質は、新第三紀中新世中期から後期の輝石安山岩が分布し、第四紀未固結層が被覆している。河床部右岸には F-2 断層が存在し、堤敷掘削面では下部溶岩層と下部火砕岩層が F-2 断層を介して接する。第四紀の未固結堆積物として分布する河床堆積物は、層厚最大 40m にも及ぶ（図-2）。

表-1 忠別ダム の諸元

	目的	洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道、発電
貯水地	流域面積	238.9km ²
	湛水面積	3.7km ²
	総貯水容量	93,000 t-m ³
	有効貯水容量	79,000 t-m ³
ダム	型式	複合ダム（重力式コンクリートダム、中央コア型ロックフィルダム）
	堤高	コンクリートダム部：86.0m、フィルダム部：78.5m
	堤頂長	コンクリートダム部：290m、フィルダム部：595m
	堤体積	コンクリートダム部：1,008 t-m ³ 、フィルダム部：8,347 t-m ³

2.2 河床堆积物

フィルダム河床部に分布する河床堆積物は、上部河床堆積物(Ua)と下部河床堆積物(Ia)に区別され、上部、下部とも大部分が砂礫層である(図-2、表-2)。砂礫層の変形特性は、ボーリング孔内水平載荷試験と掘削トレンチおよび竖坑での水平載荷試験により確認し、変形係数は精度の高い平板載荷試験結果に基づき定めた。

コア基礎は変形係数が 500MPa 以上、透水係数 $6 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 程度の密に縮まった下部砂礫層を基礎とした (表-3)。

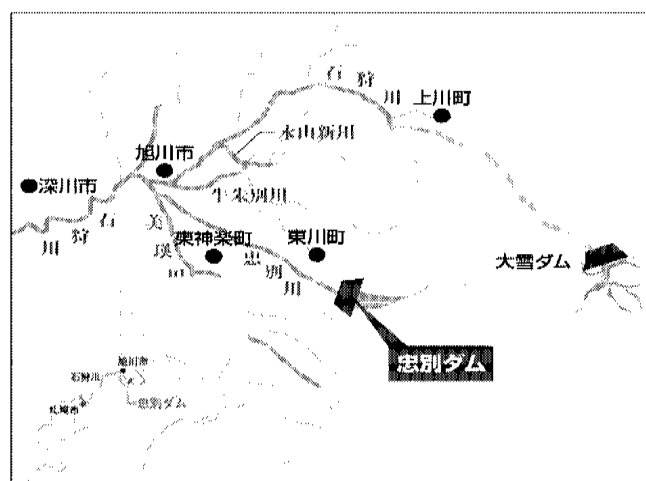


図-1 患別ダム位置図

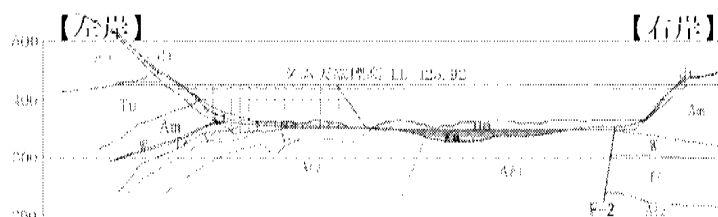


図-2 ダムサイト地質断面図

¹ 国土交通省北海道開発局 建設部 河川工事課 課長補佐²国土交通省北海道開発局 建設部 河川工事課 ダム・砂防係長³国土交通省旭川開発建設部 旭川河川事務所 忠別支所管理支所 支所長

⁴国土交通省旭川開発建設部 旭川河川事務所 忠別支所 管理係長

表-2 ダムサイト地質層序

時 代	地 層 名		記号	構成・岩 相	
第四紀	完新世	上部河床堆積層	ua	角礫、砂、シルト	
	完新世 ～ 更新世	下部河床堆積層	la	角礫、砂、シルト	
		前 灘 堆 積 層	dl	角礫、巻石、粘土	
	更新世	後 灘 堆 積 層	tr	角礫、砂、シルト	
第 一 紀	中 新 世	礫石・安山岩類	上 部 溶 岩	Au	角閃石系新方角石系粗粒石英安山岩
			上部大砂岩層	P	礫石・安山岩質粗粒凝灰岩
				Tu	礫石・安山岩質凝灰岩・火山角礫岩
				中 部 溶 岩	Am
			下部大砂岩層	W	礫石・安山岩質粗粒凝灰岩
				Al	泥岩、シルト岩
				S	凝灰質砂岩、火山角礫岩
				Th	礫石・安山岩質凝灰岩・火山角礫岩
				下 部 溶 岩	Al

表-3 河床堆積物の性状

時代	地層	層厚	特徴	変形係数 (MPa)	透水係数 (cm/s)
第四紀	完新世	上部砂礫層 (ua)	最大 15m ・全体的にルーズ ・礫分80%、砂分19%、細粒分1%(平均)	120	6×10^{-3}
				EL357.2m 170 EL349.2m	
	更新世	下部砂礫層 (la)	最大 25m ・表層2～3mは顕著な褐色を帯びくさり礫が多い ・全体的に締まった砂礫 ・礫分81%、砂分17%、細粒分2%(平均)	220	6×10^{-1}
				EL347.5m 500	

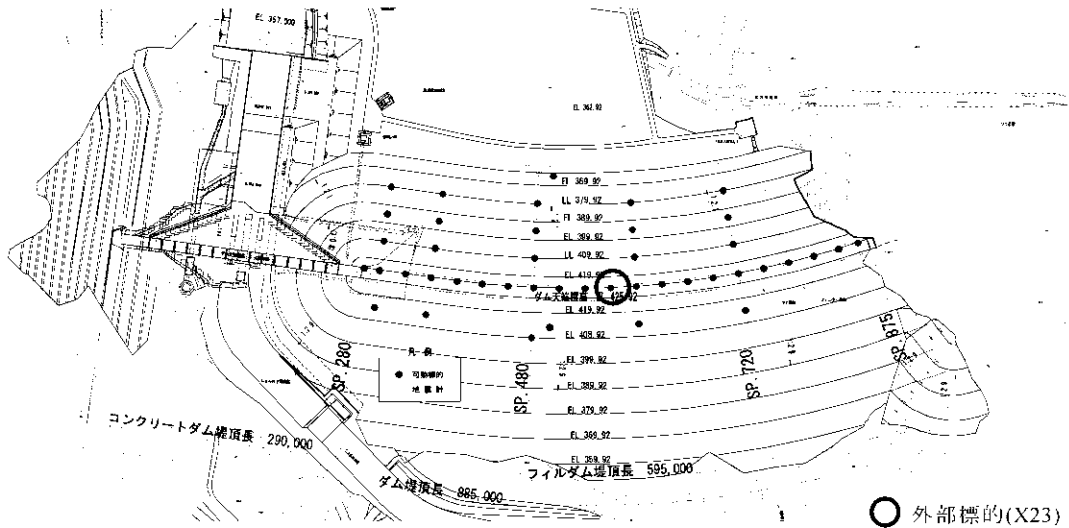


図-3 計測設備配置平面図

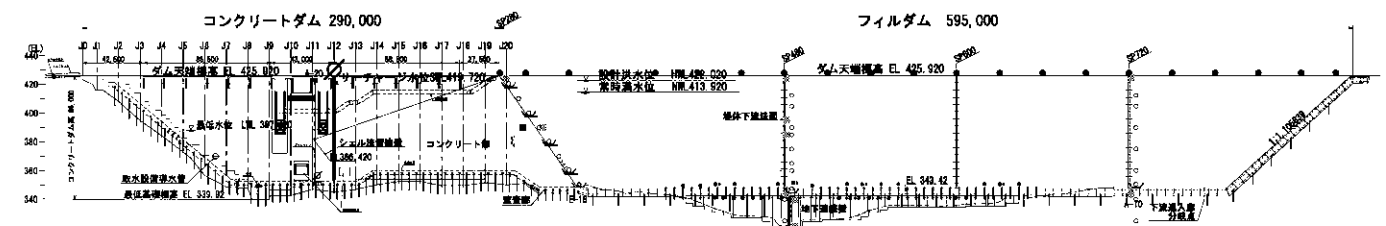


図-4 計測設備配置縦断面図

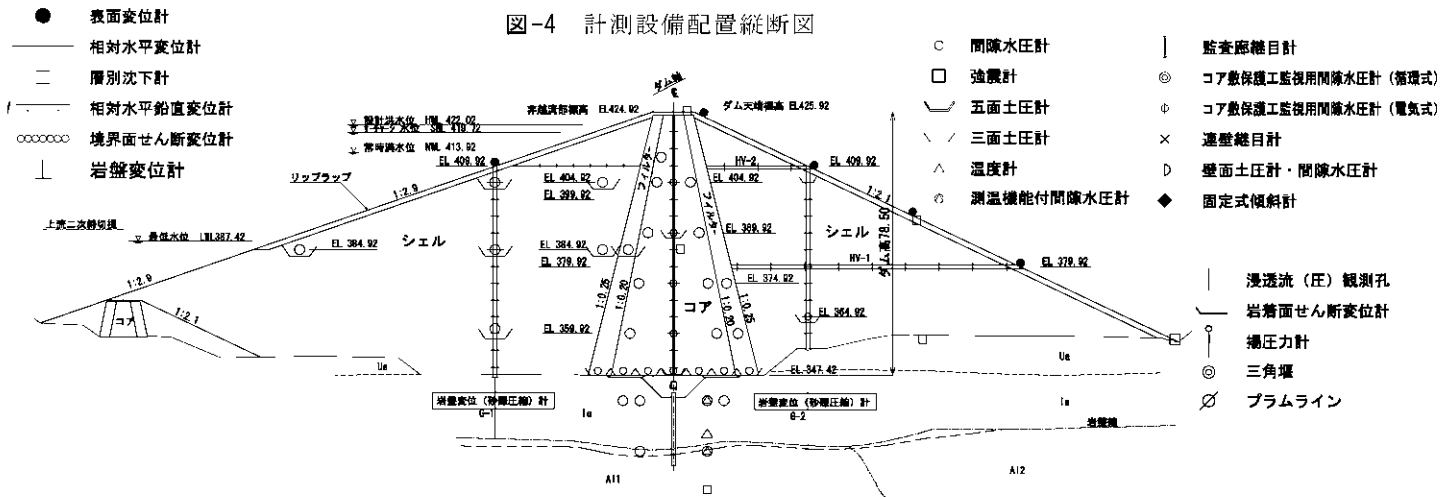


図-5 フィルダム計測設備配置断面図 (砂礫基礎処理部 SP180)

3. 砂礫層部の基礎処理工設計

砂礫層をダム基礎とした場合には、フィルダム部コアが砂礫層内の高流速による洗掘の恐れがあること、砂礫層を均一な遮水性に改良すること等の課題があったことから、以下に示す計画とした。

3.1 砂礫層部の止水対策

砂礫基礎におけるグラウチング試験の結果、通常のグラウチングによる均一的な遮水性の改良が困難であることが判明した。このため、砂礫層の止水は確実な止水効果を期待できる連続地中壁（鉄筋コンクリート）を採用した（図-6）。また、コア基礎には最大水深（約 80m）に対して 20%相当の天端幅（15m）を有する難透水性の監査廊コンクリートを配置した。なお、監査廊コンクリートは天端幅が 15m と大規模であるため、頂版付近に発生する引張応力の緩和を図る目的で応力継目を設けた（図-6）。

連続地中壁（以下、「連壁」という）と監査廊コンクリートの接合方式は、互いの応力・変形挙動が影響しないよう分離構造とし、両者の間に一定の空間を確保した。空間部は、応力変形解析（FEM）結果等を踏まえ、止水板の耐久性・施工性のばらつきを考慮して上流側 3cm、下流側 5cm、天端 10cm の幅を確保し、ゴム系目地材とアスファルト系充填材を敷設した。また、接合部の止水は、目地材に対応できる止水板（B 350mm）3 枚とアスファルト系充填材で対応した（図-7）。

3.2 コア基礎の浸透流抑制

砂礫層を連壁で止水した場合、止水性が高いためコア基礎監査廊周辺の動水勾配が大きくなる。このため、コア基礎の動水勾配低減・均一化を図る目的で、図-6.8 に示すようにアスファルト混合物によるコア敷保護工（密粒度アスコン）を敷設した。

4. 忠別ダムの計測項目と結果

忠別ダムの計測項目は、河川管理施設等構造令に準拠した項目を計測している以外に、砂礫部に実施した特殊基礎処理工の機能を確認するための計測も行っている。平成 18 年 3 月から平成 19 年 3 月まで実施した試験満水時の挙動（以下、「試験満水時」という）に加えて、現状の挙動として平成 21 年 3 月から平成 22

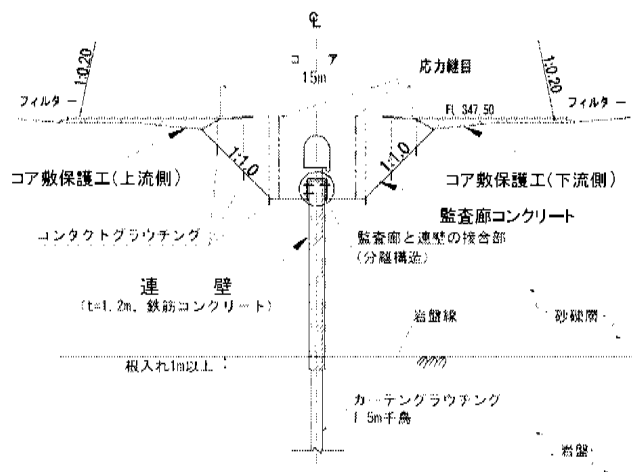


図-6 特殊基礎処理一般図

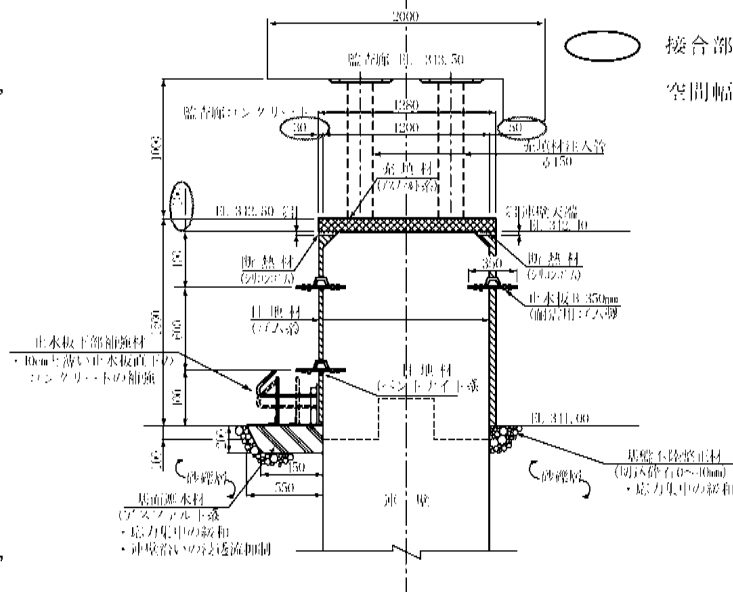
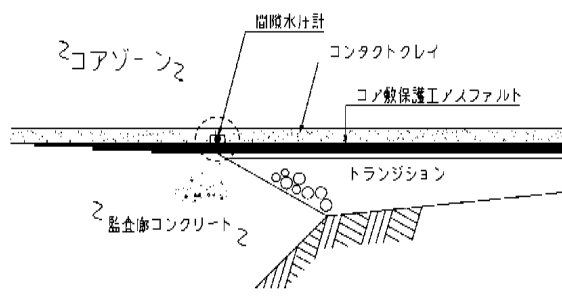
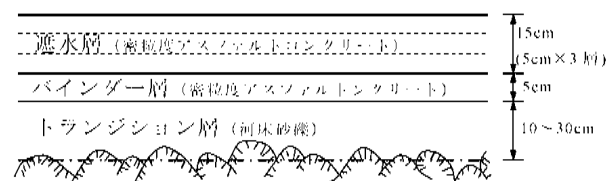


図-7 監査廊コンクリートと連壁の接合部

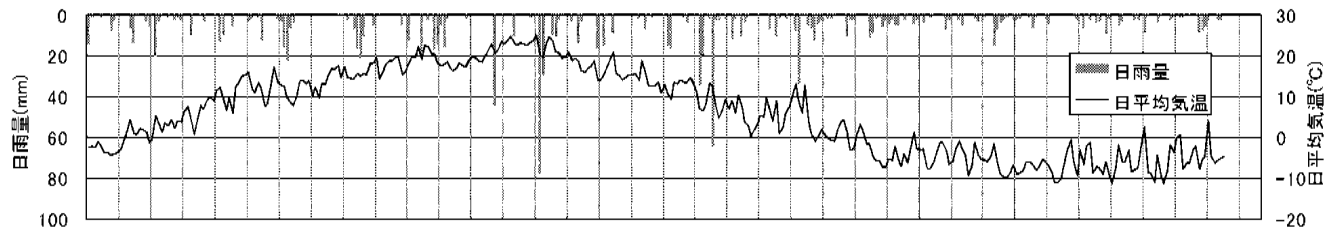


(1) コア敷保護工構造図

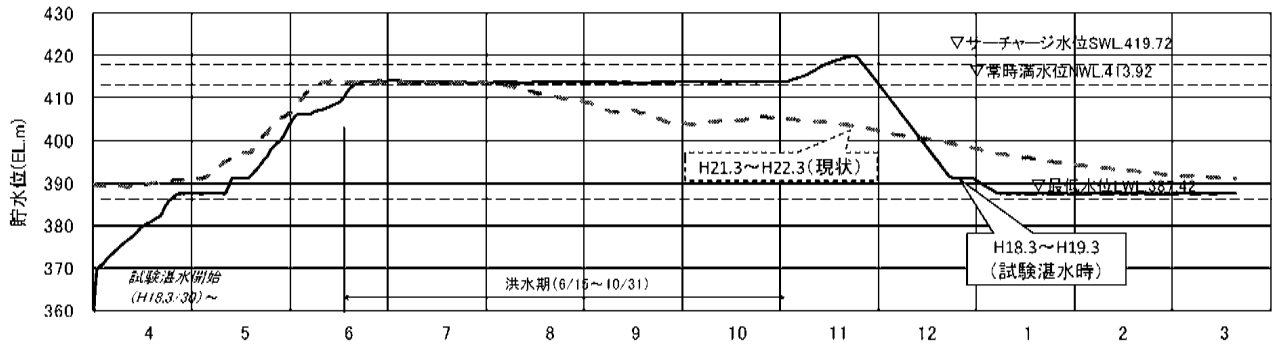


(2) コア敷保護工アスファルト構造図

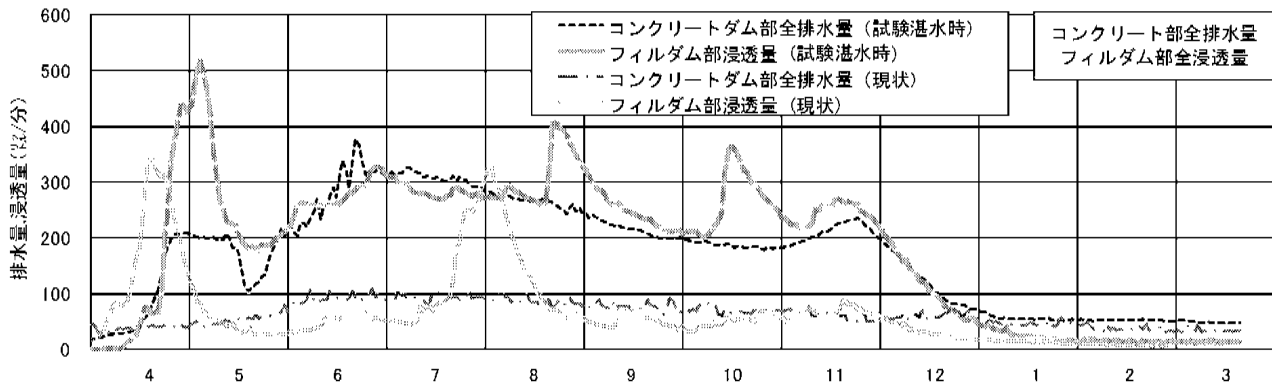
図-8 コア敷保護工詳細図



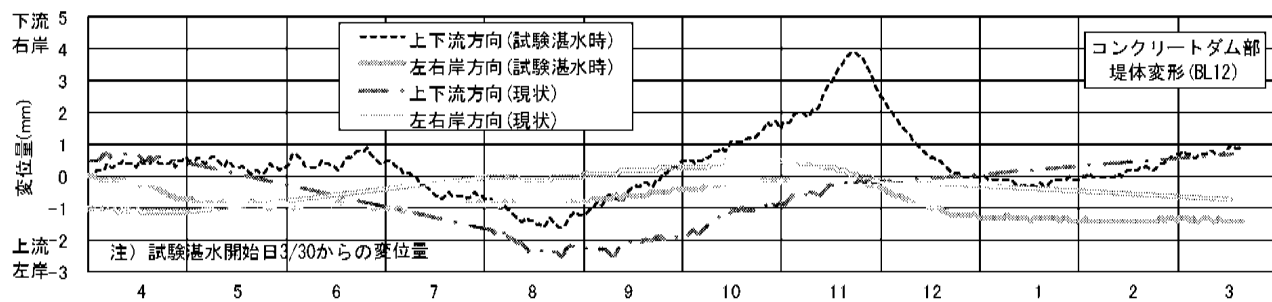
(1) 日雨量および平均気温（試験洪水期間中）



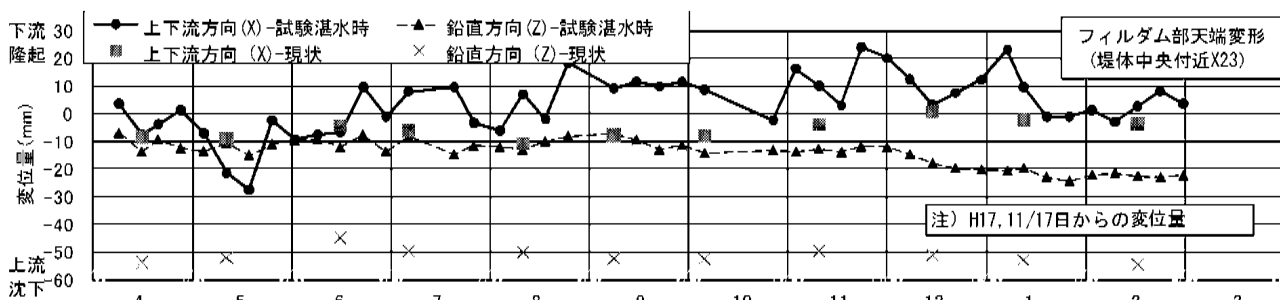
(2) 貯水水位（試験洪水時と現状）



(3) 全排水量および全浸透量（試験洪水時と現状）



(4) コンクリートダム部変位量（試験洪水時と現状）



(5) フィルダム部変位量（試験洪水時と現状）

図-9 試験洪水時と現状の排水量・浸透量および変位量の挙動対比図

年 3 月までの挙動（以下、「現状」という）の分析・評価結果を以下に述べる。

4.1 コンクリートダム部計測結果について

(1) 排水量

全排水量は、堤体継目からの継目排水量と基礎排水孔からの基礎排水量を合わせたものである。試験湛水時および現状において全排水量は、貯水位と連動し安定しており、経年的に徐々に減少し、現状の全排水量は大きく減少している。これは、試験湛水時の常時満水位維持期間（6/15 から 10/31）に見られた目詰まりによる影響と考えられる。

(2) 変形

コンクリートダム部の変位量は BL12 に設置したブラムラインにて計測している。変位量は、貯水による水圧と外気温に影響される。試験湛水時の上下流方向への変位量は、試験湛水開始から常時満水位到達時で若干下流側へ変位し、その後は、8 月中旬から上流側へ変位している。上流側への変位は、常時満水位期間中のため、水圧（貯水位）の変化がないものの、夏場の気温上昇により堤体下流側のコンクリートが熱膨張した影響によるものと推察される。その後、気温低下に伴い、堤体コンクリートの熱膨張の影響が少なくなり、下流側へ推移している。サーチャージ水位までの上昇時に生じた変位量は約 4mm となっており、水圧と外気温の相乗作用によるものであるが、ダムの安全上問題のない変位量である。現状においては、試験湛水時同様、水圧と外気温に規制された弾性的な挙動を示し、夏場の気温上昇による上流側への変位が認められるが大きな変位量ではなく、安定した挙動を示している（図-9）。

4.2 フィルダム部の計測結果について

(1) 浸透量

全浸透量は、堤体下流および基礎からの浸透量を計測したものである。全浸透量は融雪時や降雨時に増加している（図-9）。これは、堤体基礎からの浸透量の他に、融雪に伴い堤体下流の地山地下水位が上昇し、下流側からの浸透水が供給されたと推測される。湛水時、現状ともに 4 月中旬から 5 月中旬の貯水位変動が小さい期間において、急激な上昇が見られているが、その後 6 月以降に浸透量が減少して

いることから伺える。試験湛水時と現状では、貯水位が一定でも浸透量が減少しており、コンクリート部と同様、目詰まりの影響と考えられる。

(2) 変形

フィルダムの変位量は、堤体天端および堤体上下流面に設置した外部標的の測量により計測している。上下流方向の変位量は、ばらつきがあるものの貯水位水圧の影響を受け下流側へ変形している。変位量には急激な変化が見られず、試験湛水時で約 25mm と小さく安定した挙動を示している。また、鉛直方向では、試験湛水時に約 25mm の沈下が見られたが、現状では、さらに約 30mm（累積約 55mm）の沈下が見られている。鉛直方向の変形は、フィルダム堤体の盛立完了後の圧密沈下の影響と考えられ、この傾向は現状でも見られているが、安定した状態である（図-9）。

4.3 特殊基礎処理部の計測項目と計測設備配置

特殊基礎処理を実施した砂礫基礎部において、以下に示す箇所の計測を行った。なお、この他にも計測を実施しているが、今回は遮水性および変形に着目した挙動評価について述べる。

(1) 連壁接合部の遮水性

連壁と監査廊コンクリートとの空間部には、下流への浸透を防ぐ目的で設置した止水板の効果を確認するために、間隙水圧計を設置し、上下流への浸透圧変化を計測した（図-10）。

(2) コア敷保護工の遮水性

盛土荷重によりコア敷保護工のアスファルトに大きな曲げ変形が生じてクラックが発生し、遮水性が低下する傾向がないか監視した。計測設備は、コア敷保護工において最も歪みが大きいと予想される監査廊コンクリートとの接合部付近のコア（コンタクトクレイ部）に間隙水圧計を設置した（図-8）。

(3) 砂礫基礎の遮水性

基礎処理工の止水効果を確認するため、連壁を境に上下流の砂礫基礎部に間隙水圧計を設置し、浸透圧の変化を計測した（図-11）。

(4) 砂礫層の変形

砂礫層は岩盤に比べて変形性が大きく、僅かであるが細粒分が含まれクリープ変形が予想されるため、砂

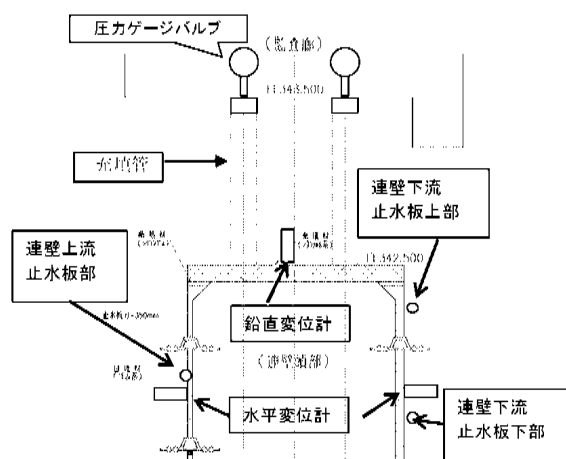


圖-10 監査廊、連壁接合部詳細図

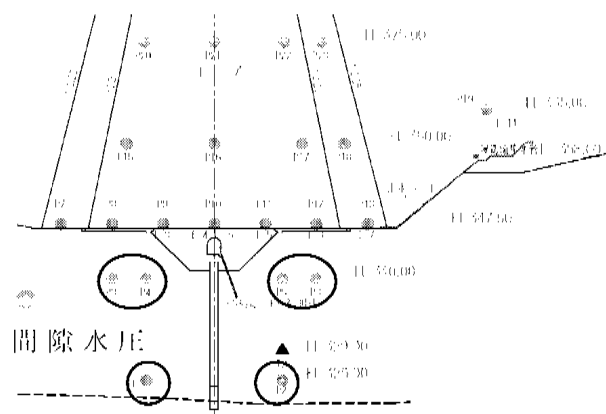


図-11 コア基礎間隙水压配置図

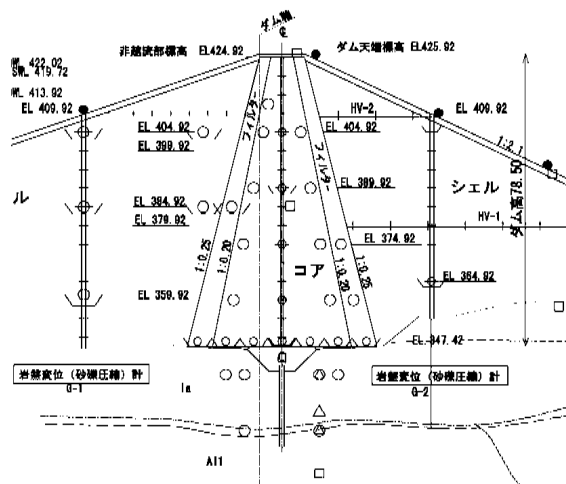


圖-12 砂礫部岩盤變位計配置圖

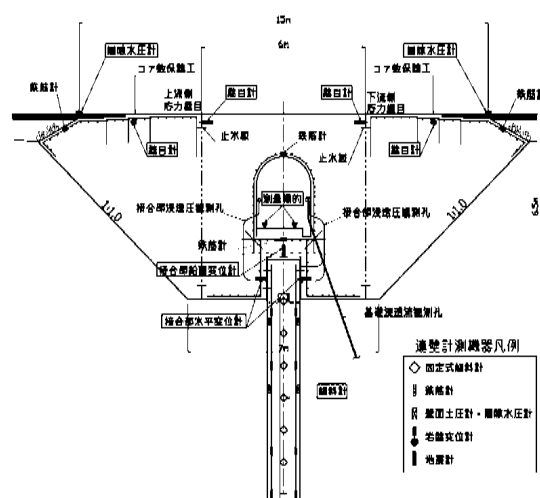


图-13 連壁傾斜計配置図

礫層の変形量（圧縮量）を監視した。計測設備は、砂礫最大層厚部（SP480）の上下流シエル基礎に岩盤変位計（砂礫層圧縮変位計）を設置した（図-12）。

(5) 連壁接合部の変形

連壁と監査廊コンクリートの接合部の空間が常時確保され、連壁と監査廊コンクリートが接触する傾向にないか監視した。計測設備は、連壁頭部の上・下流面、天端に水平変位計および鉛直変位計を設置した（図-10）。

(6) 連壁の変形

砂礫層厚が最大となる地点に着目して、連壁のたわみ量について監視した。計測設備は、最大断面部の連壁に固定式傾斜計を設置した(図-13)。

4.3 計測結果と評価

(1) 連壁接合部からの遮水性

砂礫最大層厚部の SP480 付近の観測結果を図-14 に示す。観測の結果、試験湛水時および現状ともに、上流側の止水板上部に浸透圧が生じているものの、下流側

にはその影響は及んでいない。接合部の遮水性は止水板と連壁頭部のアスファルト充填材により保持されており、現状で問題ない挙動を示している。接合部の止水機能を保持する3つの止水板のうち、下流止水板下部での浸透圧は、貯水位との相関性が低く、むしろコア下流側のフィルター間隙水圧（下流側水位）と相関する。

上流側および下流止水板上部の浸透圧は、貯水位変動と相関性の高い挙動を示す。貯水深に対する上流側の浸透圧は約 40～60%である。しかし、この浸透圧挙動は、次の事象より止水板の機能消失を示すものでなく、接合部としての遮水性が確認され、安全性に影響はないと評価できる。

- ・浸透経路は、試験湛水初期に監査廊継目グラウチングの実施によって一時的に浸透圧が減少したことから、監査廊の継目からと推定される。すなわち、接合部の止水板が浸透の原因ではない。
- ・試験湛水時において最低水位に低下後、監査廊

インバート面に敷設されている充填管の圧力ゲージバルブを解放すると、接合部浸透圧が低下する。すなわち、下流側で止水されているため、接合部の浸透圧は圧力の出口がなく上昇したものである。

- ・充填管の圧力ゲージバルブを解放した際の浸透量は微小（約 180cc/min）である。すなわち、人口の浸透経路は水みちとしては極小さい圧力伝搬路である。

現状の観測値は、試験湛水時同様に貯水位の変化にかかわらず急激な変化がない。

(2) コア敷保護工の遮水性

コア敷保護工に破損等の異常がある場合、間隙水圧計は急激に変化する。試験湛水時および現状の間隙水圧は、水位上昇に伴い緩慢に上昇するものの、急激な変化が見られない。試験湛水時の間隙水圧は貯水位に対し全般的に高いが、これはコア材が透水性の極めて低い細粒材で転圧され、遮水性の高いコア敷保護工が敷設されているため間隙水圧が消散しにくいことによるものと推察されるが、これに対し、現状の間隙水圧は低減していることから、間隙水圧の消散が図られたことと推察される。試験湛水時および現状でも、上流側と下流側の間隙水圧に明確な差が生じており、その傾向は貯水位が高いほど大きくなることから、コアと併せて特殊基礎処理工の遮水効果が現れている（図-15）。

(3) 砂礫基礎の遮水性

砂礫および岩盤基礎に設置した間隙水圧の貯水位との関係を図-16 に示す。砂礫を基礎（止水処理；連続地中壁）とした SP480 では、連壁下流側基礎部の間隙水圧が貯水位に対し変動量が小さく、概ね一定傾向を示す。現状においても、試験湛水時と比べ間隙水圧の分布に変化がなく、安定した挙動を示している。また、岩盤を基礎（止水処理；カーテングラウチング）とした SP720 ではカーテングラウチングの上下流で貯水位に比例する変動傾向を示す。止水ライン下流側の間隙水圧は上流側に比べて小さく、グラウチングによる遮水効果が認められる。SP480 では連壁の止水性が高いため貯水位との反応が極めて鈍い。一方、SP720 は岩盤基礎であり、下流側の間隙水圧が砂礫基礎部の間隙水圧に対し大きい

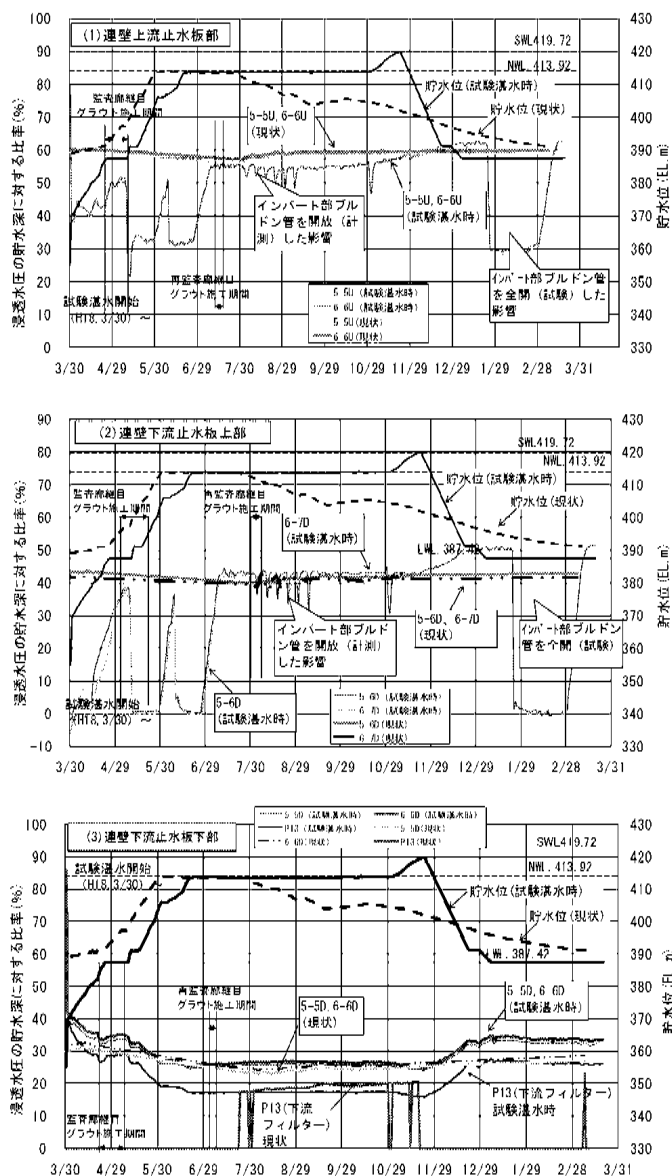


図-14 接合部浸透圧観測孔結果

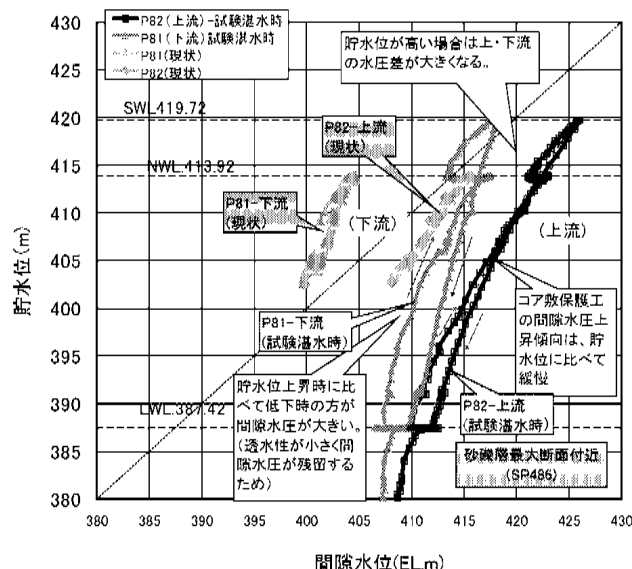
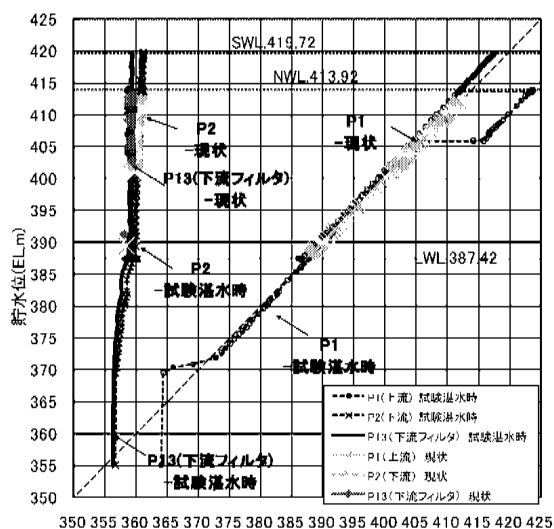
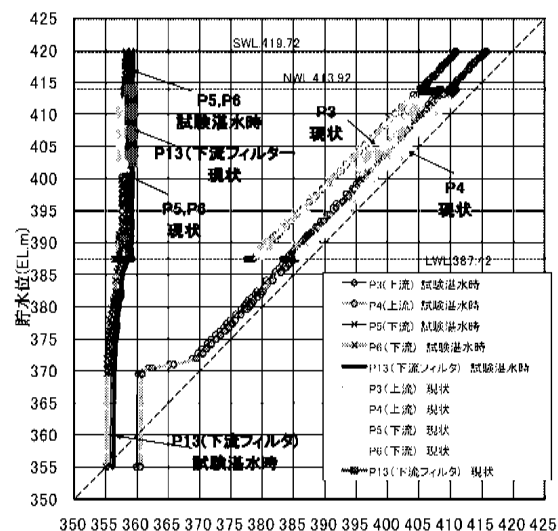


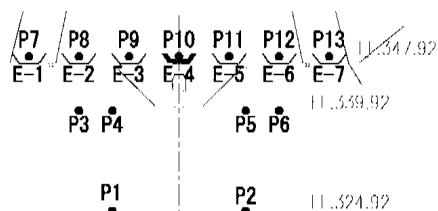
図-15 コア敷保護工浸透圧観測孔結果



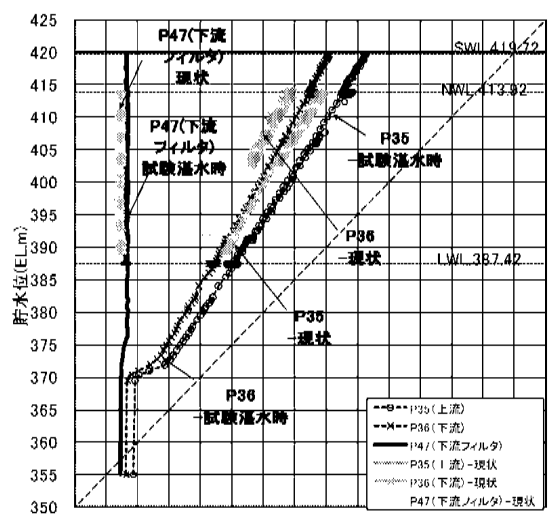
間隙水圧 (EL.m) ※水位換算



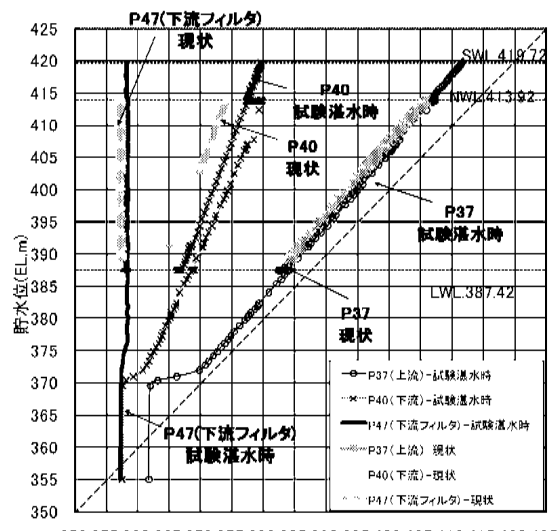
間隙水圧 (EL.m) ※水位換算



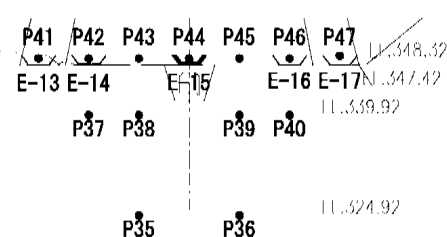
(1) 砂礫基礎部 (SP480)



間隙水圧 (EL.m) ※水位換算



間隙水圧 (EL.m) ※水位換算



(2) 岩盤基礎部 (SP720)

図-16 貯水位と間隙水圧計の関係 (コア部, 基礎部)

下流側水位を計測している下流フィルター内の間隙水圧がほぼ一定か僅かに低減する傾向にあるため、安定した挙動を示している。

(4) 砂礫層の変形

シェル基礎の砂礫層の圧縮変形は、盛立に伴い増加する他、盛立休止中の荷重一定期間にも増加する

クリープ変形が生じた (図-17)。試験満水開始までの圧縮量は上流側 9.1cm, 下流側約 12.6cm である。試験満水中は、下流側の圧縮量は約 0.3cm, 現状では 0.4cm まで増大したが、上流側は一定である (図-17)。

岩盤変位計を設置したシェル敷直下は、コア基礎

の下部砂礫層（変形係数は 500MPa 程度）と異なり、図-18 のとおり上流側は埋戻し部、下流側は上部砂礫層（変形係数 170MPa 程度）が分布し、相対的に変形性の大きい基礎であったため、圧縮量が大きかったと推定した。試験湛水時および現状では明瞭な増加傾向を示さず、砂礫層の圧縮変形は概ね収束したと判断した。

(5) 連壁接合部の変形

砂礫最大層厚部である SP480 付近の連壁接合部の挙動監視結果を図-19 に示す。接合部の鉛直変位は、盛立期間中に生じた圧縮変形がそのまま残留し、全般的に試験湛水時の増減量は微小である。

接合部の水平変位は全般的に大きな変動は認められず、砂礫最大層厚部の下流側で約 2mm 増大した。

接合部変位は表-4 のとおりであり、解析精度および計測精度を考えると観測値は推定値と同程度と考えられる。また、試験湛水時に明瞭な増大傾向を示していないため、正常な挙動と考えられる。

(6) 連壁の変形

水平変位（たわみ量）は、連壁上部ほど大きくなる傾向を示す。連壁は岩盤に根入れしているため、変形形態としては妥当である。また、水平変位は試験湛水時の貯水位上昇に伴い下流側へ変位し、最大はサーチャージ水位で約 6mm 生じたが、貯水位低下により、水平変位は戻る弾性挙動を示す。サーチャージ水位時の最大たわみ量（約 6mm）は、弾性支承上の梁計算結果で約 5mm、FEM 解析では約 12mm であることから、概ね推定どおりである（表-4）。一方、監査廊～連壁接合部に設置している変位計によれば、下流水平圧縮量が約 2mm である。このため、監査廊自体もサーチャージ水位時の水圧により 4mm 程度（=6mm-2mm）下流側に移動したと推定される（図-21）。現状では、試験湛水時に対し約 3.5mm の変位は見られるものの安定した状態である（図-20）。

5. まとめ

5.1 コンクリート部およびフィルダム部の挙動

コンクリート部の全排水量およびフィルダム部全浸透量は、試験湛水時および現状とも貯水位と連動した挙動を示しており、観測値も減少傾向にあり安定した状態である。

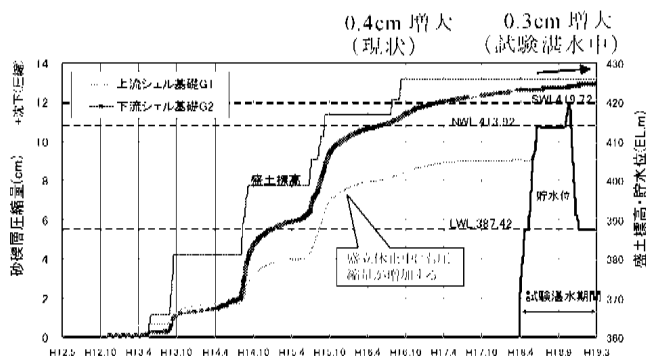


図-17 岩盤変位計の経時変化（試験湛水時）

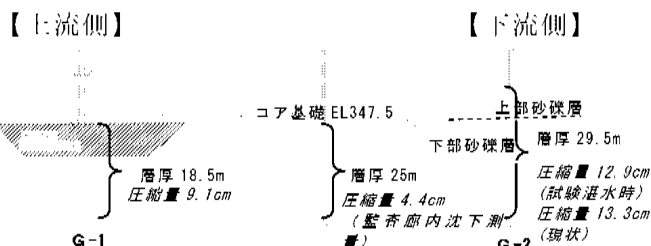


図-18 岩盤変位計の変位量（試験湛水時）

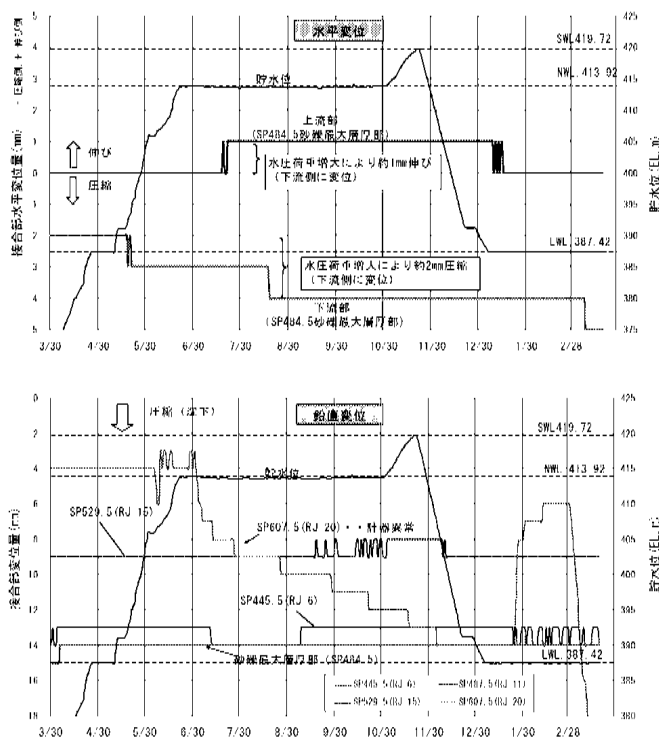


図-19 連壁接合部の変位量（水平、鉛直）

表-4 接合部変位の解析値と観測値

項目	鉛直方向(mm)		水平方向(mm)		推定方法
	推定値	観測値	推定値	観測値	
接合部の相対変位	21		0.9		静的応力変形解析
連壁のたわみ量		14	12	2	静的応力変形解析
			5		梁計算

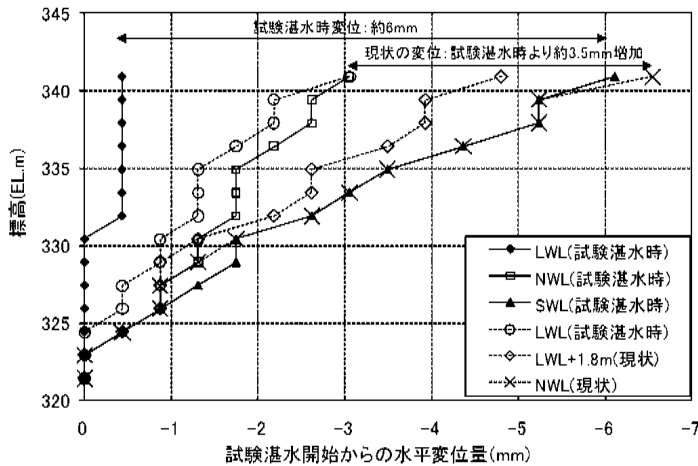


図-20 連壁傾斜計変位量（試験湛水時）

コンクリート部の変形は、貯水からの水圧や気温変動に応じた弾力的な変形が見られるが、急激な変化がなく安定した挙動を示している。

フィルダム部の変形は、上下流方向での変位量は小さく、急激な変化が見られず安定した状態である。鉛直方向の変形は、盛立後の圧密沈下の影響が現状でも見られているが、変位量が小さく安定した挙動を示している。

5.2 特殊基礎処理工の挙動

(1) 連壁接合部からの遮水性

試験湛水時および現状における連壁接合部の上流側の浸透圧は、貯水深に対して浸透圧は約 40～60%であるが、下流側の浸透圧は下流側水深相当で小さく、止水板およびアスファルト充填材の効果が現れている。浸透圧を上昇させる主な浸透経路が監査廊継目からと思われることから、安全性に影響はないと考えられる。

(2) コア敷保護工からの遮水性

コア敷保護工の間隙水圧は、水位上昇より緩慢に上昇し、貯水位が高いほど上下流の観測値に違いが生じていることから、コアと併せてコア敷保護工等の特殊基礎処理工の遮水効果が得られていると思われる。また、試験湛水時に対し、現状の間隙水圧が減少していることは、コア内の間隙水圧消散によるものと思われる。

(3) 連壁深部からの浸透

基礎部に設置した間隙水圧は、砂礫基礎部（SP480）や岩盤基礎部（SP720）において、上下流で観測値に差

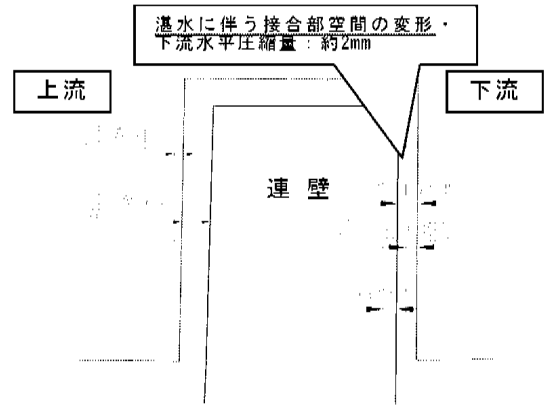


図-21 連壁および監査廊接合部の変位概念図（試験湛水時）

が生じている。これは、基礎処理の効果を示す結果となっているが、岩盤部に比べて砂礫基礎部の差が大きいことは、連壁の止水性の効果が大きいことが伺える。

(4) 砂礫層の変形

砂礫層は堤体盛立に伴い圧縮変形を生じている他、盛立休止期間中にも沈下が進行するクリープ変形が見られている。その後、試験湛水中および現状では沈下が進行しておらず、基礎の沈下はほぼ収束したと思われる。フィルダム部堤体天端の変位量は試験湛水時に比べ現状で約 30mm 増大したが、砂礫基礎では変形が進行していないことから、主にフィルダム部堤体の圧密沈下が進行したものと考えられる。

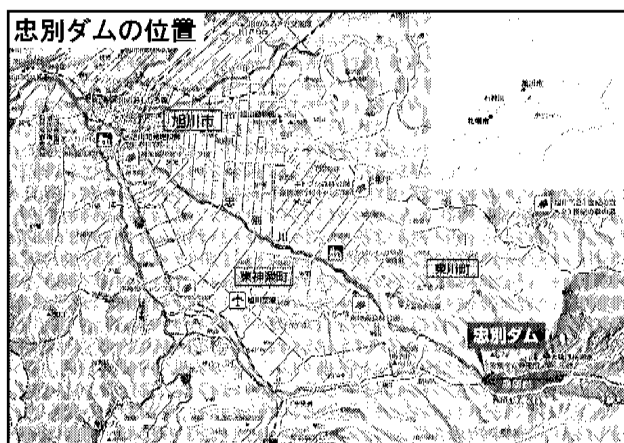
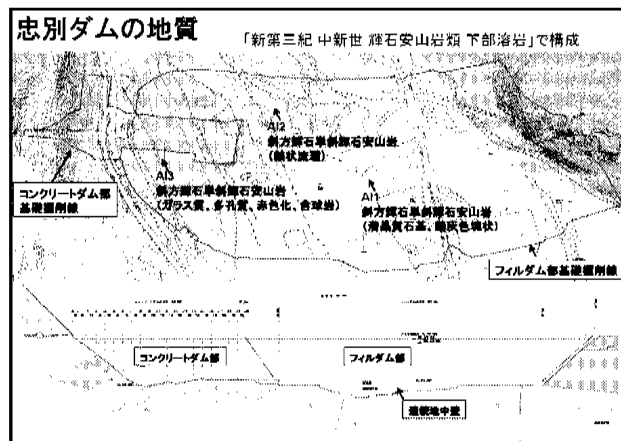
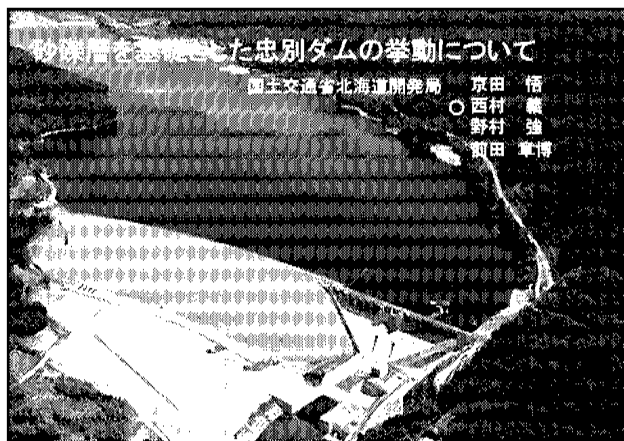
(5) 連壁接合部の変形

連壁接合部の変形は、試験湛水中に沈下、水平変位が生じているものの、現状では進行しておらず安定している。変位量は推定値と同様であり、安全上問題となる傾向は示していない。

(6) 連壁の変形

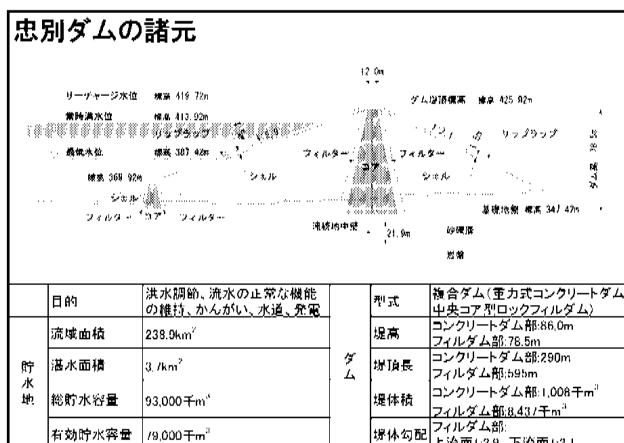
連壁の水平変位量は、試験湛水中において下流側に最大約 6mm となるが、推定値以下であり弾性領域内での挙動であることから、問題ない挙動を示す。

最後に、忠別ダムは平成 19 年 3 月の試験湛水完了から約 3 年半経過し、観光地として訪れる人々の潤いの場となっている。今後もこのダムが恒久的な安全と潤いをもたらす、自然に溶け込んでいくことを願う。



河床堆積物の性状

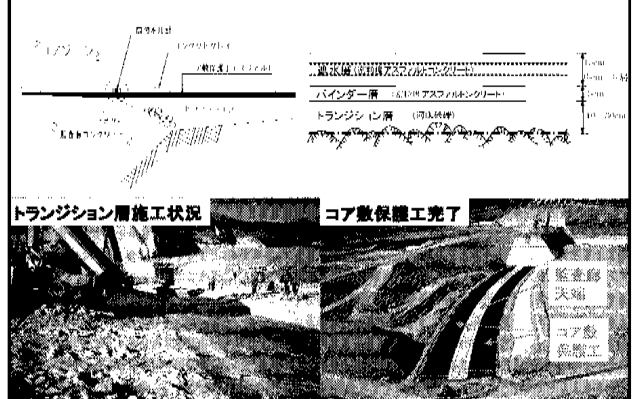
時代	地層	層厚	特徴	変形係数 (kg/cm ²)	透水係数 (cm/s)
第四紀	完新世	上部砂礫層 (ua)	最大 15m ・全体的にルーズ ・機分80%、砂分19%、細粒分1%(平均)	1200 EL357.2m 1700 EL349.2m	6×10^{-3}
		下部砂礫層 (la)	最大 25m ・表層2~3mは顕著な褐色を帯び ・くさり礫が多い ・全体的に締まった砂礫 ・機分81%、砂分17%、細粒分2%(平均)	2200 EL347.5m 5000	
	更新世				



本発表での計測箇所

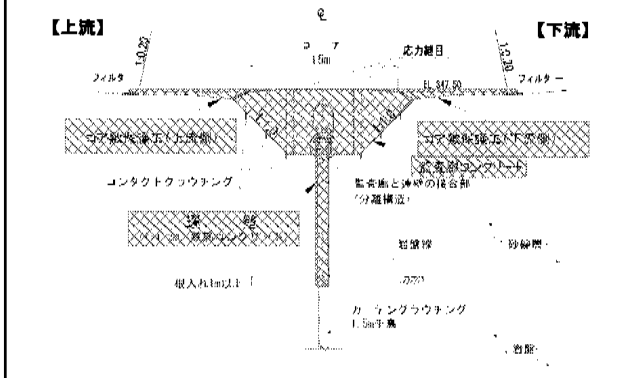
コンクリートダム部	変形	ブラムライン	期間 試験湛水中 (H18.3.~ H19.3) 現状 (H21.3.~ H22.3)
	排水量	監査廊内三角堰	
フィルダム部	変形	堤体外部の測量標的	
	浸透量	堤体下流浸透量 観測室内三角堰	
特殊基礎処理部	監査廊と連壁接合部の 遮水性	間隙水圧計	
	コア敷保護工 の遮水性	間隙水圧計	
	砂礫基礎 の遮水性	間隙水圧計	
	砂礫層の変形	岩盤変位計	
	監査廊と連壁接合部 の変形	変位計	
	連壁の変形	傾斜計	

砂礫層部の基礎処理(コア敷保護工)



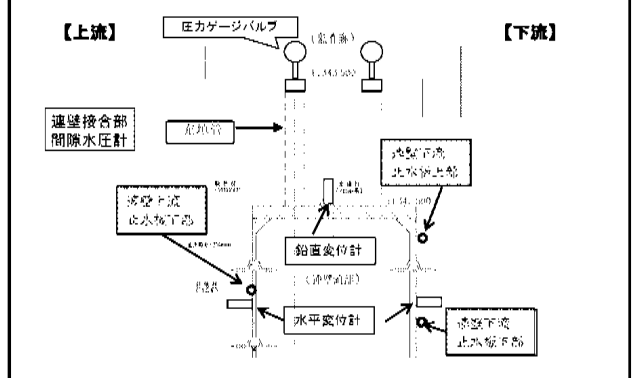
砂礫層部の基礎処理

(監査廊コンクリートと連壁の接合部)

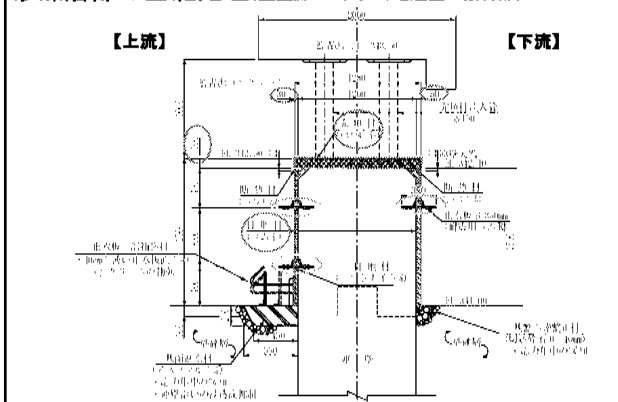


特殊基礎処理部計測箇所

(監査廊コンクリートと連壁の接合部の遮水性監視)



砂礫層部の基礎処理(監査廊コンクリートと連壁の接合部)



計測結果(監査廊コンクリートと連壁の接合部の遮水性監視)

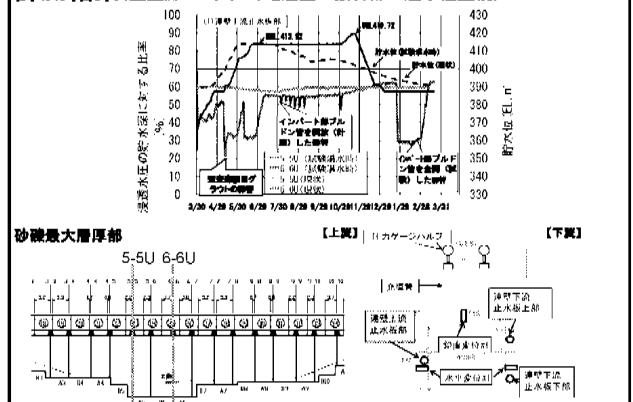


Figure 1 consists of two vertically stacked line graphs sharing a common x-axis representing time from March 30 to March 31, 1998.

The top graph plots water level (m) on the y-axis, ranging from 330 to 430. It shows three distinct seismic events: the 1998 Great East Japan Earthquake (solid line), the 1994 Great Hanshin Earthquake (dashed line), and the 1995 Great Kobe Earthquake (dotted line). The 1998 event shows a sharp rise in water level, peaking around 410m.

The bottom graph plots sediment thickness (m) on the y-axis, ranging from 0 to 100. It shows the same three seismic events. The 1998 event shows a sharp increase in sediment thickness, peaking around 80m.

圧カゲージバルブ

総浸透量 180cc/min

【上流】

【下流】

浸透経路

浸透経路

浸透経路

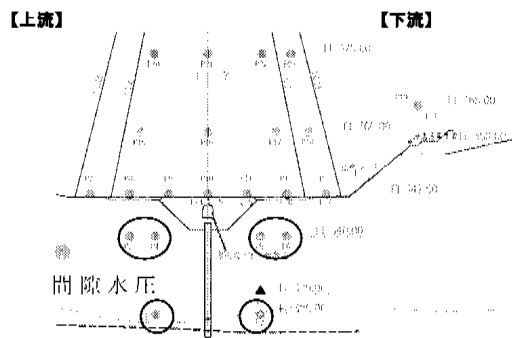
浸透水圧の上昇要因は
監査廊側目から浸透

浸透水圧低下

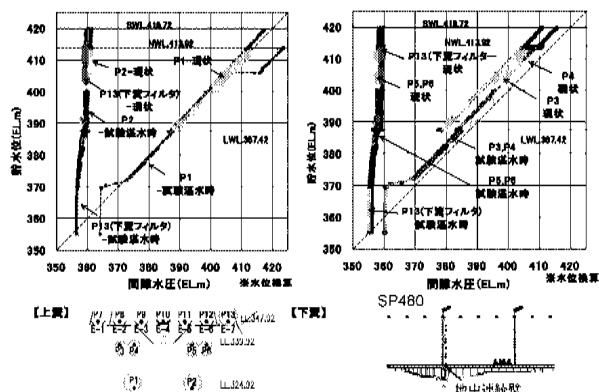
Figure 1 is a plan view of the main line and branch line. The main line (上線) and branch line (下線) are shown. The main line has stations P71 through P92, with intermediate points P75 CP02, P78 CP01, P81 CP04, P84 CP03, and P86 CP05. The branch line has stations P72 through P92, with intermediate points P75 CP02, P78 CP01, P81 CP04, P84 CP03, and P86 CP05. A legend indicates that the symbol represents the '間隔水圧計' (Interval Water Pressure Gauge).

Figure 10 consists of two diagrams. The top diagram is a cross-section of the observation chamber, showing a trapezoidal concrete structure (監査廊コンクリート) with a water stop (止水板) and observation points (透視口観測) and water level measurement points (間隙水圧計). The bottom diagram is a plan view of the observation chamber, showing the layout of the observation chamber (監査廊平面図) with a water stop (連壁) and observation points (透視口観測) and water level measurement points (間隙水圧計).

特殊基礎処理部計測箇所(コア基礎間隙水圧の透水性監視)



計測結果(コア基礎部間隙水圧-SP480)



まとめ



津軽ダムの施工に関する（近接）目屋ダムの挙動計測について

谷田 広樹¹ 田川 和義² 腰山 武治³

津軽ダムは目屋ダムの再開発ダムで、目屋ダムの直下流 60mに建設するダムであり、平成 20 年から本体工事に着工した。津軽ダム本体工事の発破・掘削等により目屋ダムへの影響が懸念されるため、目屋ダムの保全措置として、計測システムを設置、監視しながら施工を実施している。今回、半川締切り方式により河床部までの左岸基礎掘削が完了したため、目屋ダムの計測システムの概要を報告するとともに、現地で行った発破試験や施工管理等についても報告するものである。

キーワード：重力式コンクリートダム、ダム再開発、堤体観測、発破計測

1. はじめに

国土交通省東北地方整備局 津軽ダムは、既設の青森県 目屋ダムの直下流 60mに建設する重力式コンクリートダムである。目屋ダムの機能を維持しながら、津軽ダムを建設することとし、津軽ダム施工中の目屋ダムの堤体挙動を観測するシステム（以下、目屋ダムモニタリングシステム）を設置し、安全性を確認しながら施工することとした。

2. 目屋ダムの概要

岩木川は青森・秋田両県境に源を発し津軽平野を南北に貫流し、河口の十三湖を経て日本海に注いでおり、その延長 101.6km、流域面積 2,540km²である。

目屋ダムは昭和 28 年 8 月に建設省直轄事業として着手され、総工費 23 億円で昭和 35 年 3 月に完成し、同年 4 月より青森県に移管されたダムである。

表-1 目屋ダム 堤体諸元

①ダム名	目屋ダム
②管理者	青森県
③河川名	岩木川水系岩木川
④位置	右岸：青森県中津軽郡西目屋村居森平 左岸：青森県中津軽郡西目屋村藤川
⑤地質	安山岩
⑥型式	重力式コンクリートダム（柱状工法）
⑦堤高	58.0m
⑧堤頂長	170.0m
⑨堤体積	118,050m ³
⑩天端標高	EL.187.50m
⑪上流面勾配	1：0.06
⑫下流面勾配	1：0.75

3. 津軽ダムの概要

目屋ダム完成後も計画以上の出水による被害が相次いだため、昭和 48 年 3 月には岩木川水系の工事実施基本計画が改定され、五所川原地点の基本高水流量を 5,500m³/s とし、このうち 1,700m³/s を浅瀬石川ダム、津軽ダム等の上流ダム群により洪水調節することとした。

また、岩木川は、津軽地方の水道用水、農業用水等の各種水源として広く利用されているが、目屋ダム完成後もたびたび水不足に見舞われ、深刻な社会問題となっている。

このように治水・利水の両面から、抜本的対策として目屋ダムの機能を大幅に向上させるため、津軽ダムの早期完成が強く望まれている。

津軽ダムは昭和 58 年に予備調査が開始され、平成 3 年に津軽ダム工事事務所が設置され、建設が着手された。その後、平成 20 年に本体工事に着手し、平成 28 年度に竣工する予定である。

津軽ダムの事業目的は以下のとおりである。

- ①洪水調節：ダム地点の計画高水流量 3,100m³/s のうち 2,940m³/s の洪水調整を行う。
- ②流水の正常な機能の維持：ダム地点下流の既得用水の補給等、流水の正常な機能の維持を図る。
- ③かんがい用水：岩木川左岸地区の約 9,600ha の農地に対するかんがい用水の補給を行う。
- ④水道用水：弘前市に対し、新たに 14,000m³/日を提供

¹国土交通省津軽ダム工事事務所 事務所長

²国土交通省津軽ダム工事事務所 調査設計課長

³国土交通省津軽ダム工事事務所 工事課長

給する。

⑤工業用水：五所川原市に対し、新たに 10,000 m³/日を供給する。

⑥発電：最大出力 8,500kw の発電を行う。

表-2 津軽ダム 堤体諸元

①ダム名	津軽ダム
②管理者	国土交通省東北地方整備局
③河川名	岩木川水系岩木川
④位置	右岸：青森県中津軽郡西目屋村居森平 左岸：青森県中津軽郡西目屋村藤川
⑤地質	安山岩類、火山礫凝灰岩
⑥型式	重力式コンクリートダム (RCD工法、ELCM)
⑦堤高	97.2m
⑧堤頂長	342.0m
⑨堤体積	717,000m ³
⑩天端標高	EL.226.70m
⑪上流面勾配	1：0.6（フィレット）
⑫下流面勾配	1：0.74

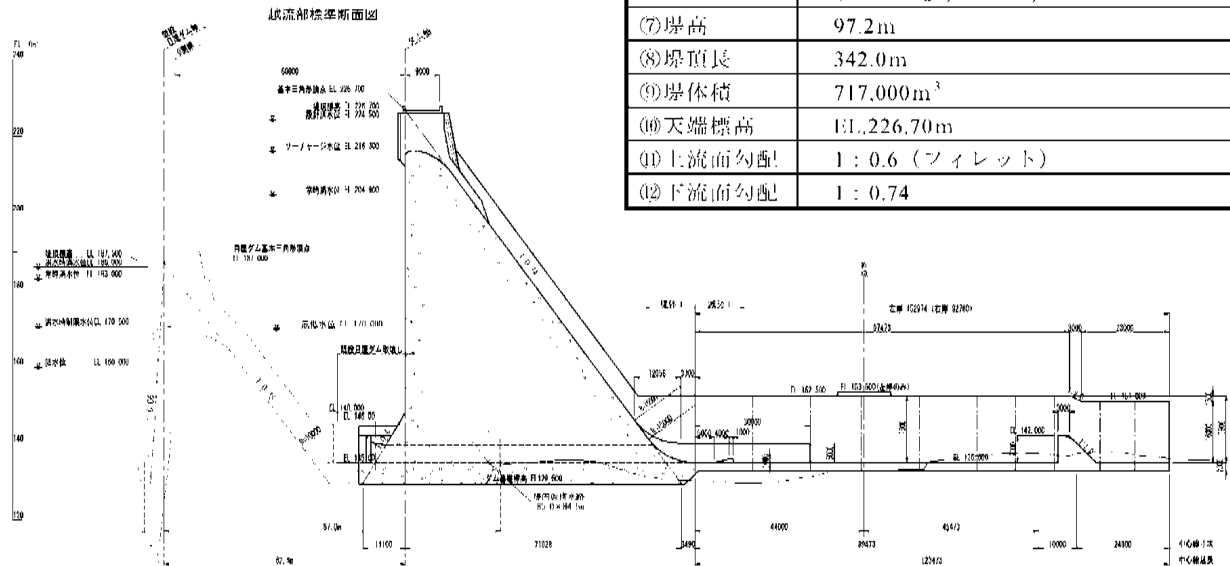


図-1 津軽ダム標準断面図

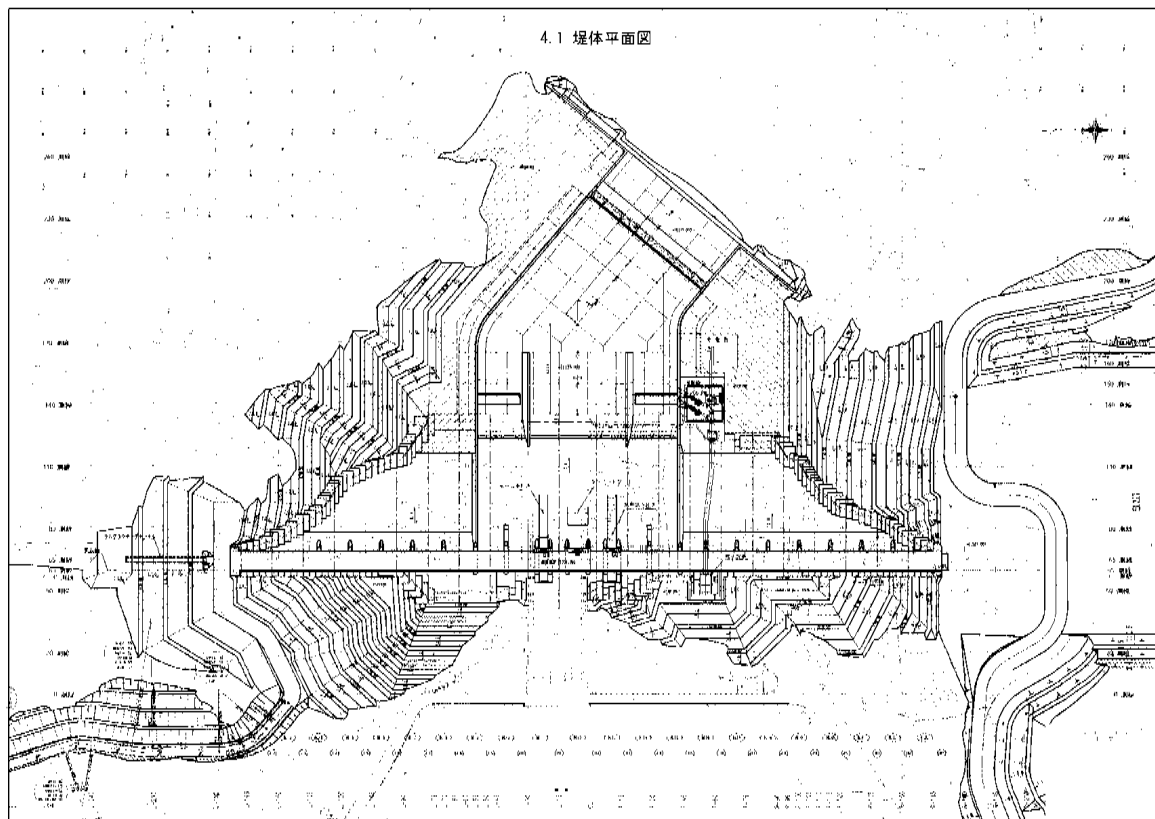


図-2 津軽ダム平面図

2. 目屋ダムの安全性評価

津軽ダム工事により目屋ダム堤体下流の掘削や発破振動が目屋ダムの基礎岩盤に影響することが考えられる。津軽ダム工事にあたっては、現況の目屋ダムの安定性を把握し、また津軽ダム工事の影響を想定し目屋ダムにどのようなリスクが生じるのか評価しておく必要がある。

ここでは、津軽ダム工事による掘削や発破振動が目屋ダムの基礎岩盤に影響を及ぼし、カーテングラウチングが損傷し、揚圧力が 100%作用するような危機的状況に至ったことを想定した。この状態に地震荷重が作用した場合の目屋ダムの安定性を評価することとした。

2.1 計算水位と荷重条件

表-3 計算水位と荷重条件

	地震慣性力	揚圧力係数
常時満水位	k=0.12	100%
サーチャージ水位	k=0.06	100%
設計洪水水位	k=0.00	100%

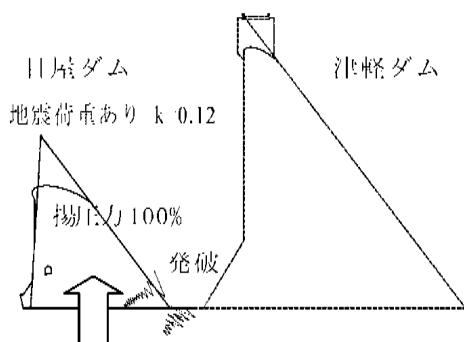


図-3 目屋ダム安定計算概念図

2.2 目屋ダム安定計算結果

安定計算の結果、常時満水位時、サーチャージ水位時において、地震荷重を作用させた場合、滑動安全率は BL.3 において安全率 $F_s=3.9$ となり、4 を下回る。

また、ミドルサードの条件は BL.2～7 において目屋ダムコンクリートの許容引張 (20tf/m^2) を超過し、 30tf/m^2 程度の引張が発生する。その他のブロックは安定性に支障はない。

○滑動の条件 ($F_s \geq 4$)

BL.3 : $F_s=3.9 \leq 4$ NG

BL.1～2, BL.4～13 ブロック : OK

○ミドルサードの条件

BL.2～7 : $>30\text{tf/m}^2$

すなわち目屋ダムに揚圧力が 100%作用し、地震荷重が作用するような危機的な状態では、BL.2～7 の安定性に支障をきたす可能性がある。

したがって、目屋ダムのモニタリングシステムは BL.2～7 に優先して計器を配置し、堤体挙動を監視しながら津軽ダムを施工することとした。

3. 津軽ダム工事前及び工事中の計測設備の配置

3.1 計測項目の抽出

目屋ダムは、重力式コンクリートダム(H 50m 以上)に該当するため、『河川管理施設等構造令第 13 条』で規定される漏水量、揚圧力、変形は必須の計測項目となる。また、津軽ダム工事中は、①発破・掘削、②下流水位上昇、③下流側掘削に対して目屋ダムの安全性を確認しながら施工することとし、観測項目は下記の 5 項目とした。

- ・漏水量、・揚圧力、・変形、・振動速度
- ・下流水位計

3.2 配置計画

表-4 計測計器の配置概要

計測項目	構造令	施工影響評価	計測機器の配置
漏水量	○	○	2 箇所 (左岸・右岸)
揚圧力	○	○	8 箇所 (2～7BL, 右岸カーテンウォール部)
変形	○	○	8 箇所 (J-1～J-6, J10, 右岸カーテンウォール部)
振動速度		○	5 箇所 (11BL, 5BL, 6BL, 11BL, 右岸カーテンウォール部)
下流水位	○	○	1 箇所(減勢池内)

(1) 漏水量計 (三角堰)

漏水量計は三角堰とし、左・右岸の掘削の影響を判断するために、右岸と左岸のゾーンに分けて、2 箇所に設置した。設置箇所は底部クロスギャラリ部とした。

・漏水量計の仕様 : 30° 三角堰 浮力荷重式水位計

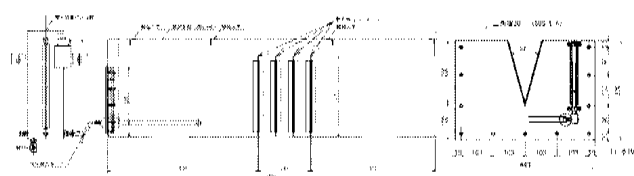


図-4 目屋ダム漏水量計 (三角堰 30°)

(2) 揚圧力（間隙水圧計）

揚圧力は、監査廊から基礎岩盤に間隙水圧計を埋設することとし、BL.2～7 に揚圧力計を 1 箇所ずつ配置した。また、ダム軸横断方向の揚圧力分布を把握するために底部クロスギャラリー部（BL.5）の下流に 1 箇所、原石山の発破振動の影響を受けやすい、右岸カーテンウォール部に 1 箇所配置することとした。

日屋ダム監査廊の既設ドレーン孔を水洗いし、間隙水圧計を着岩部に埋設する方法とした。

- ・間隙水圧計の仕様：ひずみゲージ式測温機能付

BPB-A-1MP-T 1Mpa

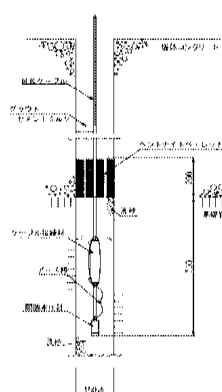


図-5 日屋ダム揚圧力計（埋設間隙水圧計）

(3) 変位（継目計）

通常の継目計 3 器を 3 方向に設置し、継目間の相対変位を計測する。設置箇所は、BL.2～7 とした。また、右岸カーテンウォールに 1 箇所配置することとした。

- ・継目計の仕様：ひずみゲージ式測温機能付

BJ-20AT 0～20 mm

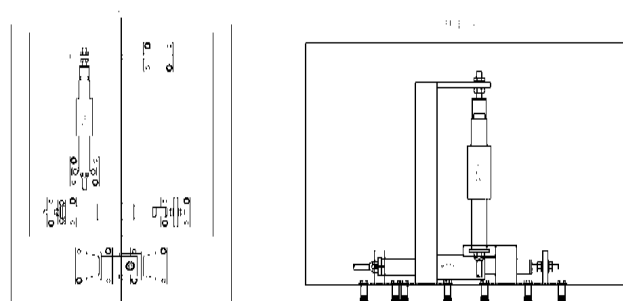


図-6 日屋ダム変位計（継目計 3 成分）

(4) 下流水位

日屋ダムの下流水位は、堤体安定性に影響を与えるとともに、津軽ダムの安全施工にとっても重要な監視

項目であるため、日屋ダムと津軽ダム間に水位計を配置することとした。

(5) 発振動速度計

発破振動が構造物に与える影響を評価する尺度として、振動速度（変位速度）が適しているとされており、管理基準値は速度で設定している事例が多い。津軽ダムにおいても制限発破を施工管理するために、「速度計」を設置することとした。

津軽ダム掘削範囲に近接する左岸部（BL.1）、右岸（BL.11）に 1 箇所ずつ配置することとした。また、最大断面の発破振動を監視するため、底部 1 箇所（堤内部）と天端（BL.6）に右岸カーテンウォールは原石山掘削の影響を受けやすく、止水上の重要であるため、1 箇所配置することとした。

4. 管理基準値の設定

4.1 発破等による振動規制値

発破に伴う振動、騒音に関し、法的に定められた規制はない。構造物の安全性（主にクラックを誘発させないため）に対しては、「理論式」と理論式に対する「安全率」の確保から規制値を設定しているのが現状である。すなわち、この「安全率」には構造基準類等から定められた標準的な安全率はなく、既往の施工管理事例等で採用された安全率に倣って検討されているのが現状である。

すなわち、理論式から導いた限界振動速度に守るべき構造物の重要度を加味し 3～10 程度の安全率を考慮したものを、許容振動速度として管理基準値に採用している例が多い。

4.2 理論式からの振動速度の規制

コンクリートの引張強度以下になる限界振動速度を理論式から求め、これに安全率を加えた許容振動速度を算出する。

津軽ダムの既往地質調査で得られた物性値に基づき、安全率 $F_s=10$ （制限発破事例で多く採用されている）とした場合の許容振動速度は $V=2.05\sim 2.66\text{ kine}$ となる。

〔限界振動速度の算定〕

$$V = \sigma \div (\rho \cdot c)$$

$$= 1950 \times 980 \div (2.66 \times 27,000 \sim 35,000)$$

$$= 20.5 \sim 26.6 \text{ (kine)}$$

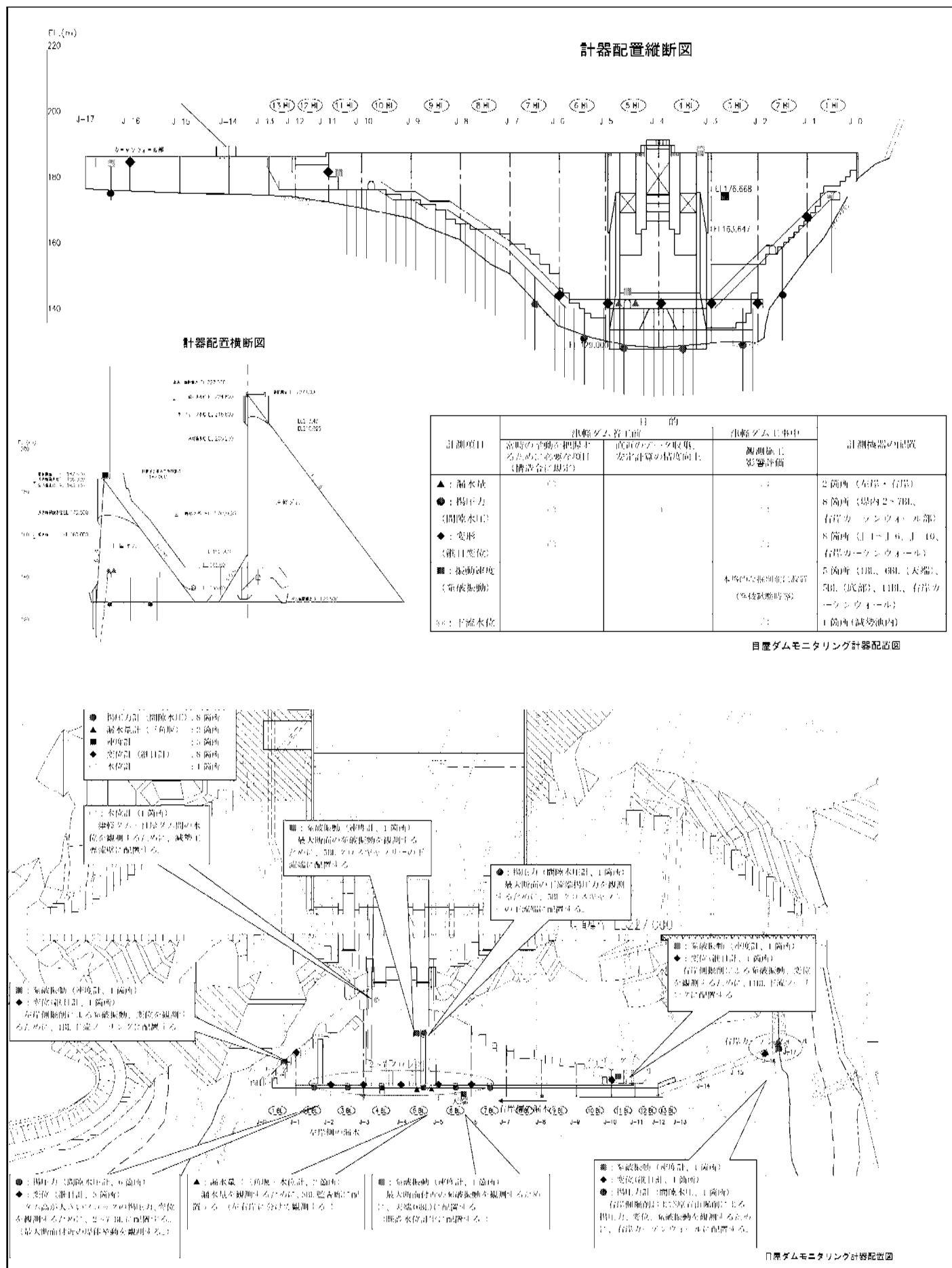


図-7 目屋ダムモニタリングシステム計測器配置図

ここに、 V ：限界振動速度(kine)

σ ：引張強度 ($\sigma = 1,950 \text{ gf/cm}^2$)；日屋ダムコンクリート試験値から設定

ρ ：材料の密度 ($\rho = 2.66$)；安山岩(AnI)の試験値から設定

c ：材料の弾性波速度 (27,000 ～ 35,000cm/sec)；安山岩の弾性波速度から設定

[許容振動速度の算定]

$$V = v \div F_s$$

$$= 20.5 \sim 26.6 : 10 = 2.05 \sim 2.66 \text{ kin}$$

ここに、 V ：許容振動速度 kin

F_s ：安全率 ($F_s = 10$)；制限発破事例より

4.3 管理基準値の設定

管理基準の初期設定値は、理論式から得られた限界振動速度 20kine を、西山ダム、三高ダム等の重力式ダムの近接施工事例で採用された安全率 10 で除し、許容振動速度を 2kine とした。

ただし、発破振動速度の管理基準値は発破試験や実施工の中で見直しをするべきであり、速度計測値が管理基準値を超えても堤体に異常がない場合は、管理基準値を緩和する等も考える必要がある。また、計測値が 2kine 以下でも堤体に変状が生じた場合は管理基準値を厳しくする等の対応が必要である。このように、管理基準値は、その決定根拠からいっても、管理中の実績等により、より実態に即した値に見直し・検証を行うべきと考える。

4.4 制限発破

発破掘削の振動の予測式は一般に旭化成式が用いられており、振動速度は火薬量の $2/3$ 乗、距離の -2 乗に概ね比例するとされている。

$$V = K \cdot W^{\frac{2}{3}} \cdot D^{-2} \dots\dots\dots \text{旭化成式}$$

ここに、 V ：発生する変位速度(kine)

W ：1段当たりの火薬量 (kg)

D ：爆源から測定位置までの距離 (m)

K ：定数 (ベンチ発破の場合 200～500)

振動予測式に使用する定数 K は、地形状況、岩盤の硬軟、爆薬の種類など様々な要因によって定まるもの

であり、実際の現場では、一定の値とはならない。

したがって、掘削時の発破を制限するにあたって、掘削前に試験発破を行い火薬量と距離との関係から現場状況にあった定数 K を把握することとした。

5. 試験発破

5.1 試験概要

(1) 試験実施日

本体基礎掘削の本格的施工に先立ち、に平成 21 年 7 月 27、28 日に実施した。

(2) 試験発破実施箇所および測定点

発破箇所は津軽ダム本体掘削範囲の左岸 2 箇所（発破 NO.1、NO.3）、右岸 1 箇所（発破 NO.2）とし、発破振動の測定点は日屋ダム監査廊内とし左右岸 2 箇所（測点 A、測点 B）と既設寒沢トンネル内（測点 C）とした。

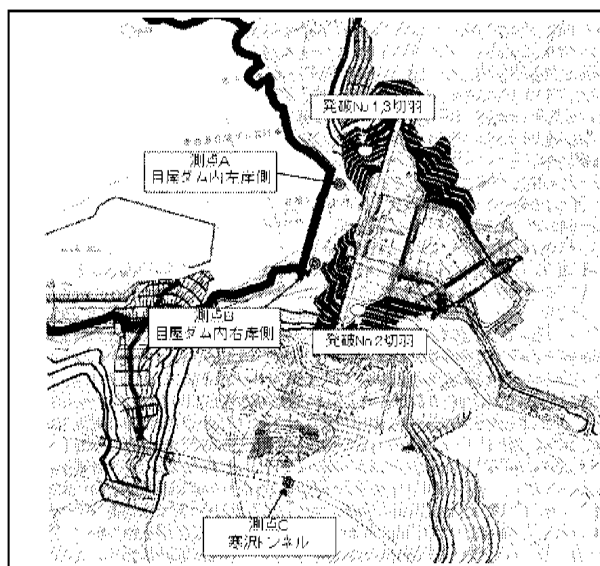


図-8 試験発破箇所および測定点

表-5 発破振動の測定距離

発破地点	測定点	切羽からの距離
発破 No.1	測点 A 日屋ダム左岸	59m
発破 No.2	測点 B 日屋ダム右岸	110m
	測点 C 寒沢トンネル	245m
発破 No.3	測点 A 日屋ダム左岸	55m
	測点 B 日屋ダム右岸	184m

(3) 発破振動測定器

表-6 発破振動測定器の仕様

計測項目	機種	特性
変位速度	動電型速度計	共振周波数 4.5Hz 範囲 5～100Hz
加速度	サーボ加速度計	周波数 0.1～100Hz 感度 0.03～0.999cm/s ²

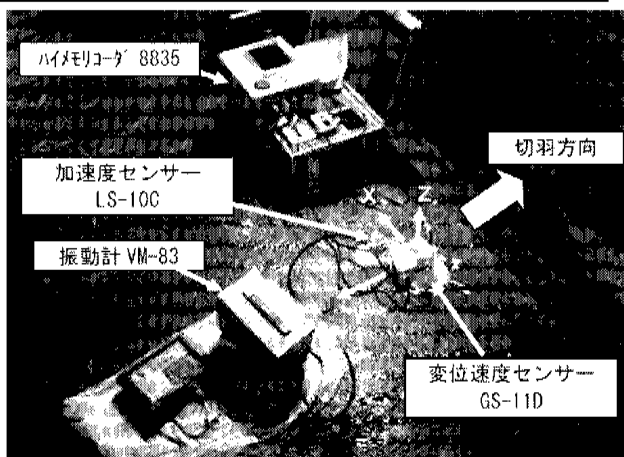


写真-2 発破振動測定器（日屋ダム監査廊内）

(4) 試験発破パターン

表-7 試験発破パターン

1孔の装薬量	2.0 kg
孔数	40 孔
段発数	20 段発（瞬発、DS②～⑩段）
最大斉発薬量	4.0 kg

5.2 試験発破の結果

(1) 変位速度

試験発破による変位速度の最大値は管理値 2.0kine より小さい。発破 No.3 で日屋ダム監査廊内の左岸において、床面と壁面の変位速度を同時計測した結果、床面よりも壁面の方がやや大きくなる傾向が認められた。

表-8 発破試験時の変位速度最大値

切羽	計測点	変位速度 最大値(kine)
発破 No.1 左岸斜面	測点 A（床面） 日屋ダム監査廊左岸	0.2202
発破 No.2 右岸斜面	測点 B（床面） 日屋ダム監査廊右岸	0.0740
	測点 C 日屋ダム監査廊右岸	0.0495
発破 No.3 左岸斜面	測点 A（床面） 日屋ダム監査廊左岸	0.2986
	測点 A（壁面） 日屋ダム監査廊左岸	0.3548
	測点 B（床面） 日屋ダム監査廊右岸	0.0316

(2) K 値の推定

試験発破の結果から、旭化成式の K 値を算定した。

一般的に K 値は 200～500 程度といわれている。今回の試験結果からも、平均的な K 値は概ね一般的な範囲にあることが解った。

表-9 K 値（平均）の推定

切羽	計測点	K 値（平均）
発破 No.1 左岸斜面	測点 A（床面） 日屋ダム監査廊左岸	165
発破 No.2 右岸斜面	測点 B（床面） 日屋ダム監査廊右岸	181
	測点 C 日屋ダム監査廊右岸	508
発破 No.3 左岸斜面	測点 A（床面） 日屋ダム監査廊左岸	170
	測点 A（壁面） 日屋ダム監査廊左岸	220
	測点 B（床面） 日屋ダム監査廊右岸	397

6. 施工

6.1 掘削数量

表-10 基礎掘削数量

掘削箇所	標高 (EL.m)	土石掘削 (m ³)	発破掘削 (m ³)	計
左岸部	227.0～ 140.0	207,775	115,348	323,023
右岸部	227.0～ 140.0	205,024	98,127	303,151
河床部	140.0～ 129.5	33,024	22,718	56,645
		14,413	19,678	34,086
計		461,039	255,866	716,905

6.2 制御発破計画

日屋ダム堤体構造物末端からの離隔距離は図-11 に示すとおりである。津軽ダム軸付近で日屋ダムとの離隔距離は 20～32m である。

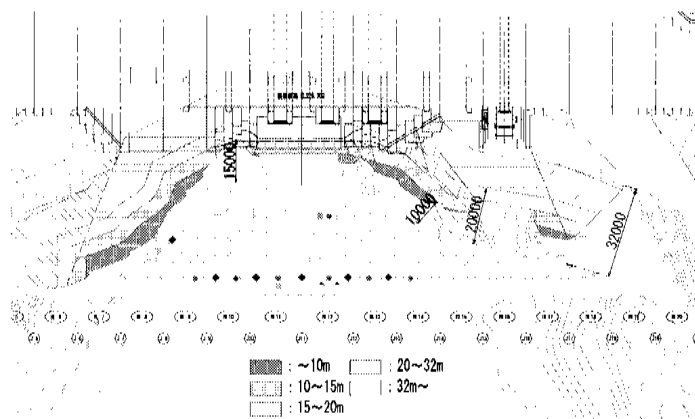


図-9 日屋ダムからの離隔距離

日屋ダムにおいて発破振動を 1.6kine 以下に抑制することを日安に掘削工法を表-12 のように計画し、実施工に当たった。

また、日屋ダム監査廊内の変位速度を観測し、1.6kine 以上が観測される毎に、K 値を見直し、火薬量を設定することとした。

MS・DS 雷管の併用や非電気式雷管を使用した断発発破により、1 段当たりの装薬量を小さくし、日屋ダムの安全性を確認しつつ、所定の掘削量、工期を確保することとした。

6.3 制御発破実績

以下に平成 21 年 9 月から掘削した左岸斜面 (EL.185m～EL.155m まで高低差 30m の区間) における段発発破の実績を示す。ここでは、非電気式雷管を使用し、段発発破を 20 回実施した。1 回当たりの平均孔数は 87 孔 (段) であり、1 回当たりの掘削量は約 1300m³ となった。

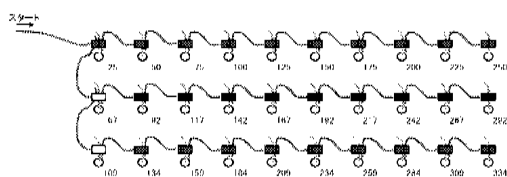


図-12 非電気式雷管 30 段の例

1 回当たりの最大段数は 120 段、m³ 当り火薬量の最大値は 0.39kg/m³ (最小値 0.06kg/m³)、段当り火薬量の最大値は 13.02kg/段 (最小値 0.60kg/段) となった。

表-12 非電気式雷管による段発発破の実績

項目	単位	実績
標 高	—	左 岸 斜 面 EL.185.0 ～ EL.155.0m
使用期間	—	H21.9 末～H21.10 末
対象発破数量	m ³	27,200
発破回数	回	137 回中 20 回
1 回当り平均 発破数量	m ³	819
1 発破当り 雷管段数	段	最大 120 最小 24

日屋ダムから 30～70m 程度離れた地点までは比較的、硬固な岩盤を掘削する箇所であることから、単位薬量は 1.0～1.5 kg/段とやや多いケースがある (図-11 参照)。

しかし、これらのケースでも、振動速度観測値は 1.4kine 程度以下におさまり、管理値を満足することができた。

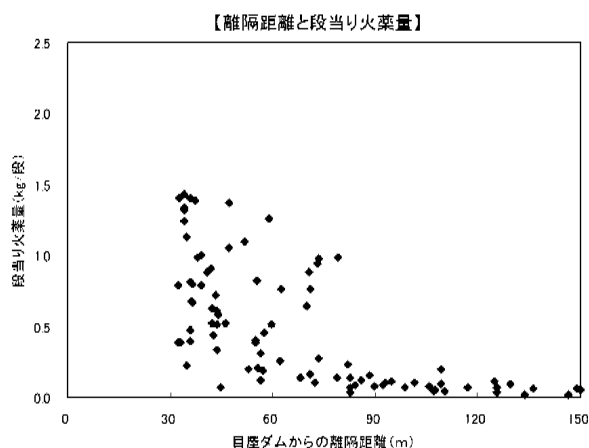


図-11 日屋ダムからの離隔距離と単位薬量の関係

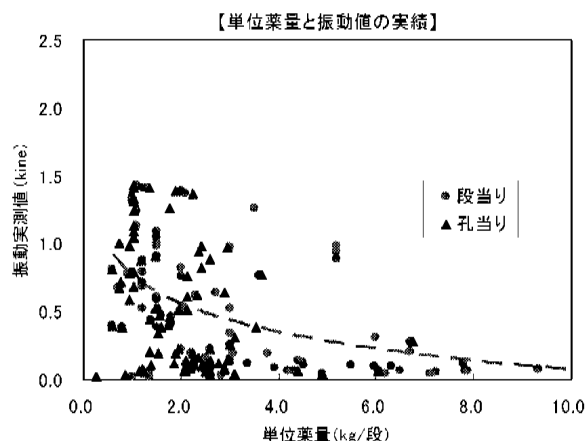


図-12 単位薬量と振動実測値(kine)の関係

表-11 発破掘削施工区分

離隔距離	掘削工法区分	ベンチ高	発破方法
10m 未満	機械掘削		
10～15m	小ベンチ	2.5m	1 孔当たり段発 1 段
15～20m	本ベンチ	2.5m	分散装薬 2 段 1 段当たり装薬量 2.4 kg 20 段以上は、非電気式雷管使用 (最大 200 段)
20～32m	本ベンチ	5.0m	1 孔当たり段発 1 段
32m 以上	本ベンチ	5.0m	4 孔当たり段発 1 段



写真-2 津軽ダム本体掘削状況（左岸）

7. おわりに

津軽ダムは半川縮切り方式により、左岸部の掘削を完了し左岸部の堤体コンクリートを鋭意打設中である。左岸堤内バイパス完成後、転流し、右岸の掘削を完了させることとなる。

今後は、掘削と平行して堤体コンクリート打設が最盛期を迎えることとなり、打設高の進捗に伴

い、日屋ダム～津軽ダム間の水位上昇に対するリスクにも対応しなければならない。

今回、日屋ダムモニタリングシステムの概要、試験発破、管理基準値に基づいた制限発破の管理を実施したところまでを紹介させていただいた。

既設ダムが極めて近接している施工条件であり、施工事例も少なく、様々な制約・課題に対応しながら、津軽ダムの完成を目指しているところである。

今後とも、皆様から当ダムについて、ご指導、ご助言をいただけたら幸いである。

参考文献

- 1) 東北地方建設局 日屋ダム工事事務所：日屋ダム工事報告書
- 2) 株式会社ニュージェック：日屋ダムモニタリング検討業務報告書，平成18年12月
- 3) 日本無線株式会社：日屋ダム保全設備設置工事完成図書，平成20年2月
- 4) ハザマ・西松建設共同企業体：本体基礎掘削における試験発破の発破振動測定報告書，平成21年9月
- 5) ハザマ・西松建設共同企業体：津軽ダム左岸本体基礎掘削について，平成22年3月

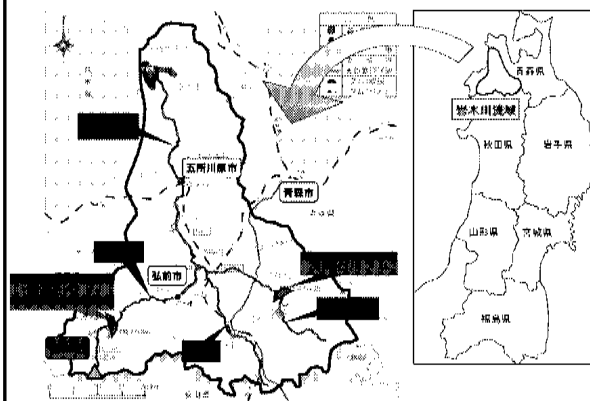
ダムの安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム

津軽ダムの施工に関する (近接)目屋ダムの挙動計測について

平成22年10月1日

津軽ダム工事事務所

津軽ダムの位置



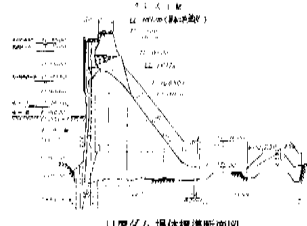
目屋ダムの概要

●目屋ダム

- 昭和28年8月に建設省直轄事業として着手
- 総工費23億円
- 昭和35年3月に完成、同年4月より青森県に移管

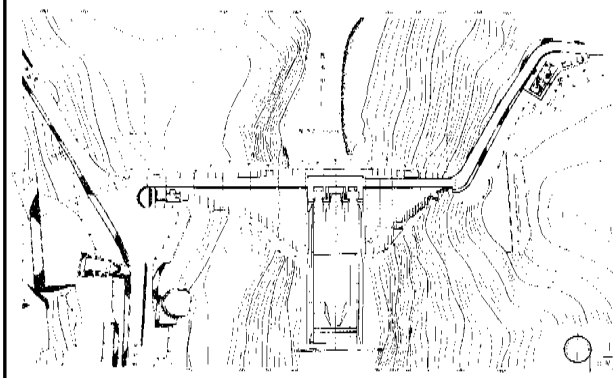
目屋ダム 堤体諸元

1.ダム名	目屋ダム
2.管理者	青森県
3.河川名	岩木川水系岩木川
4.位置	右岸 青森県中津軽郡西目屋村森平
5.地質	安山岩
6.型式	重力式コンクリートダム (柱状下法)
7.堤高	55.0m
8.堤頂長	170.0m
9.堤体積	115,050m ³
10.堤体傾斜	1:0.95
11.上流面勾配	1:0.75
12.下流面勾配	1:0.75



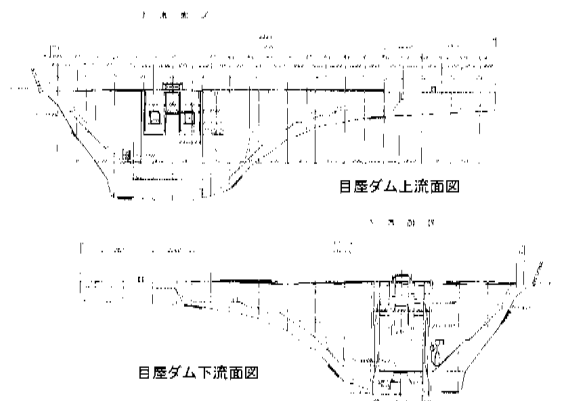
目屋ダム 堤体横断面図

目屋ダムの概要



目屋ダム平面図

目屋ダムの概要



目屋ダム上流面図

目屋ダム下流面図

津軽ダムの概要

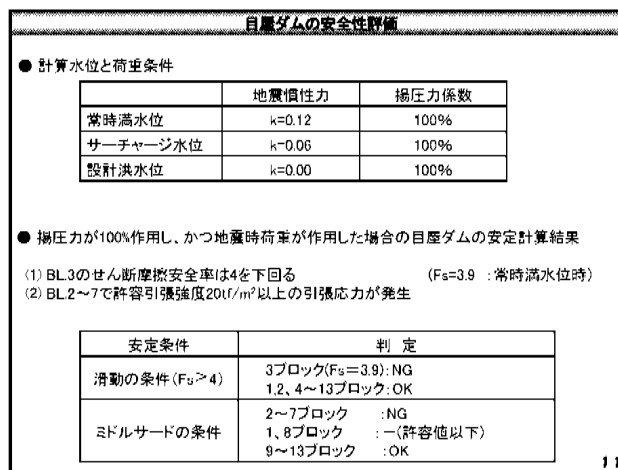
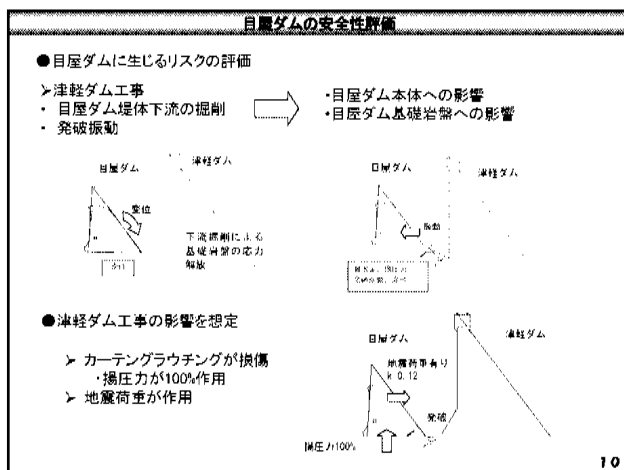
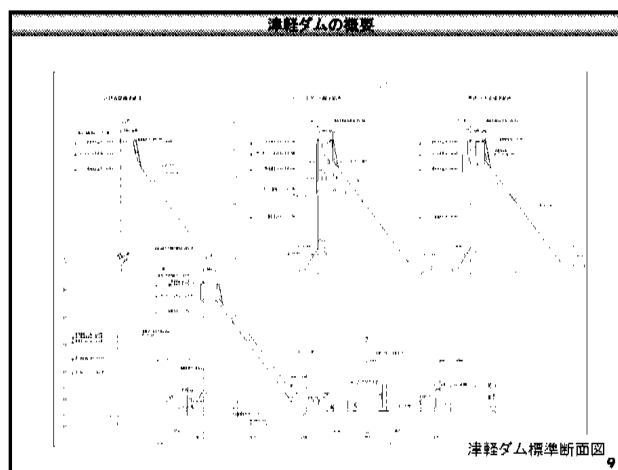
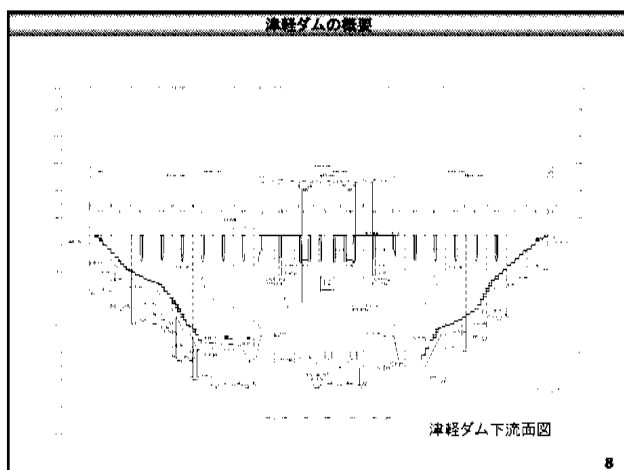
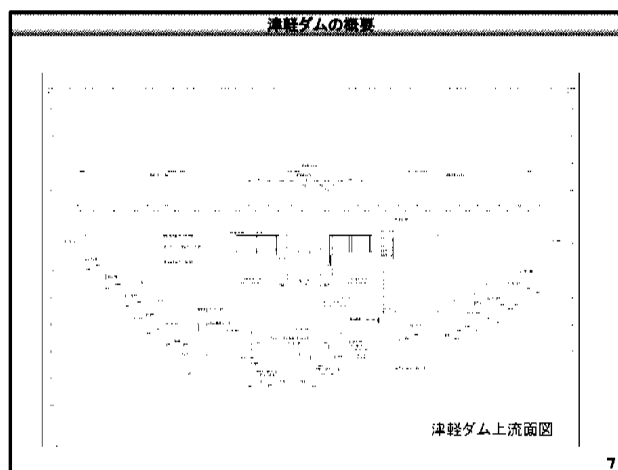
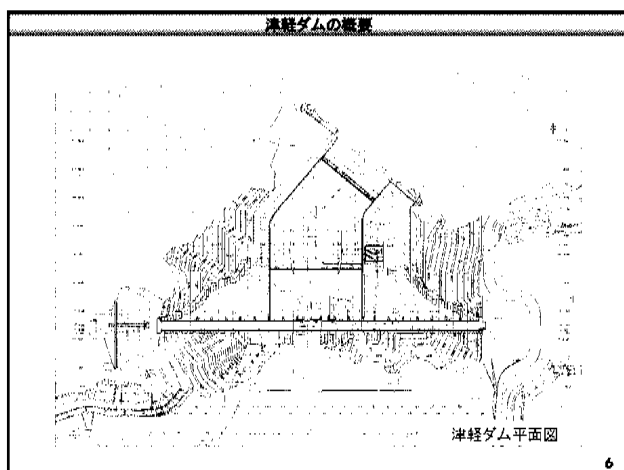
- 津軽ダム
 - 昭和58年 : 予備調査開始
 - 平成 3年 : 津軽ダム工事事務所設置
 - 平成20年 : 本体工事に着手
 - 平成28年度 : 竣工予定

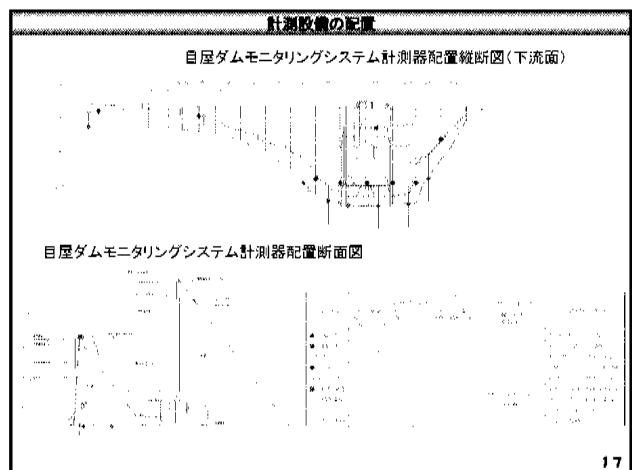
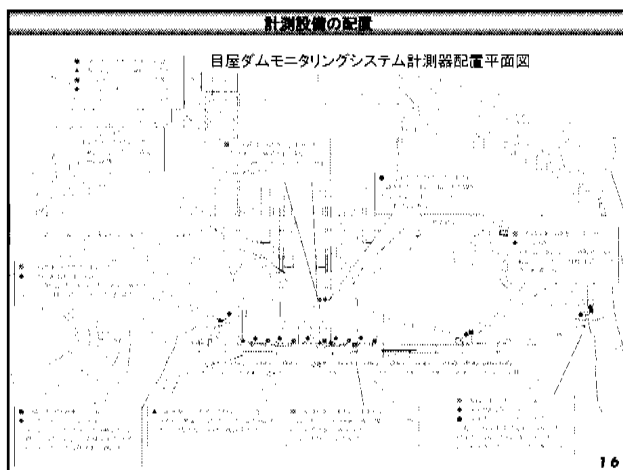
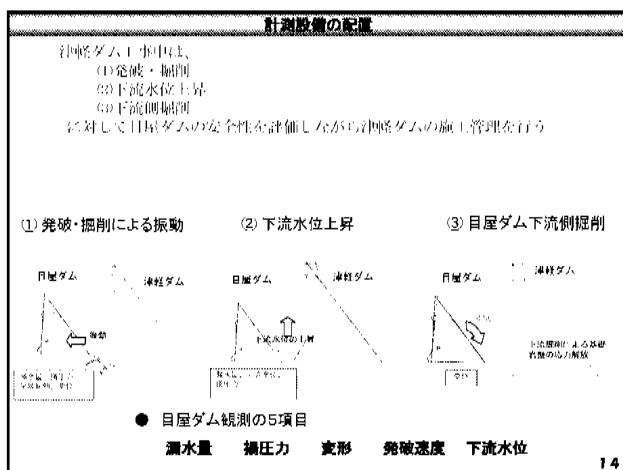
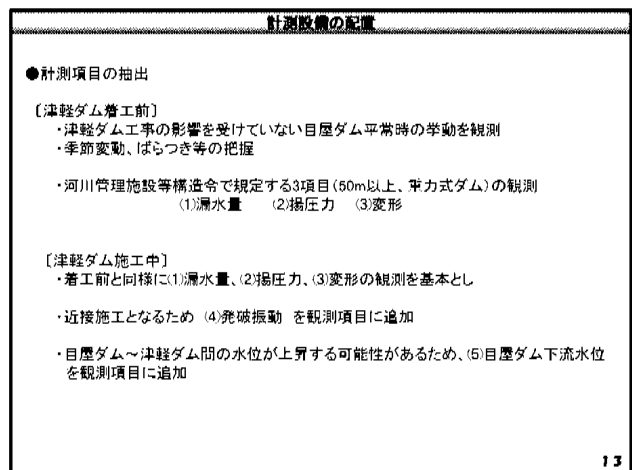
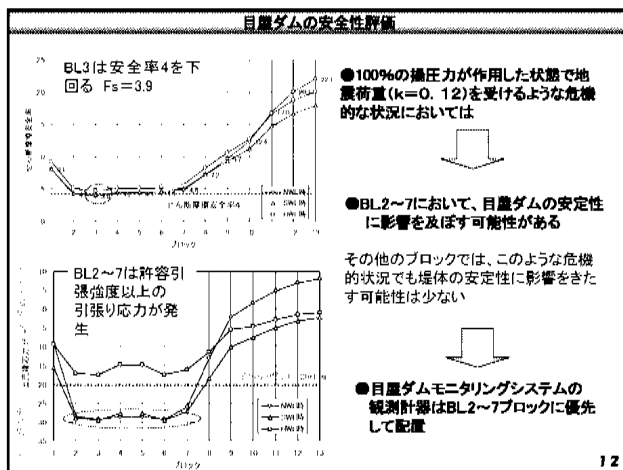
●事業目的

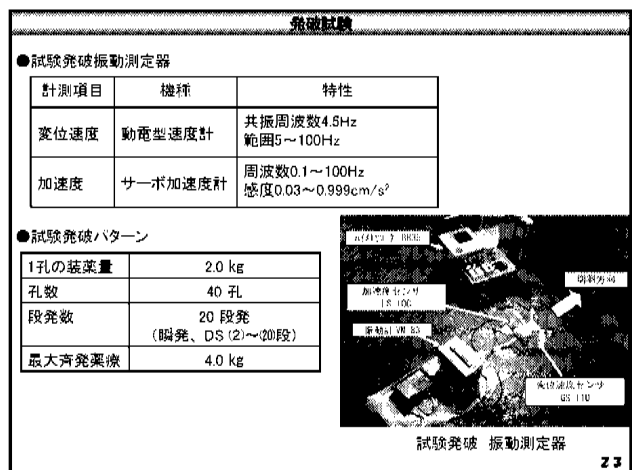
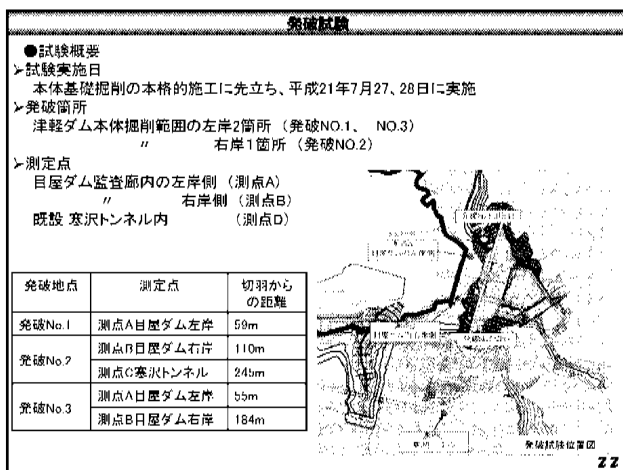
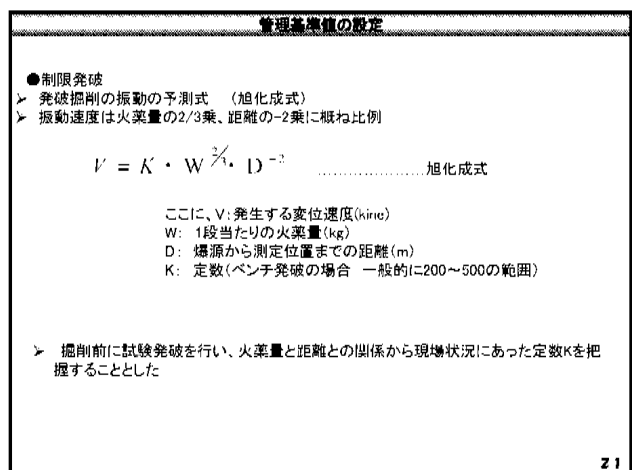
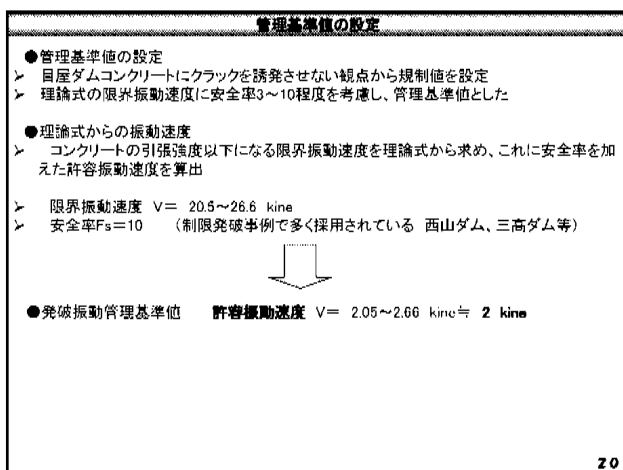
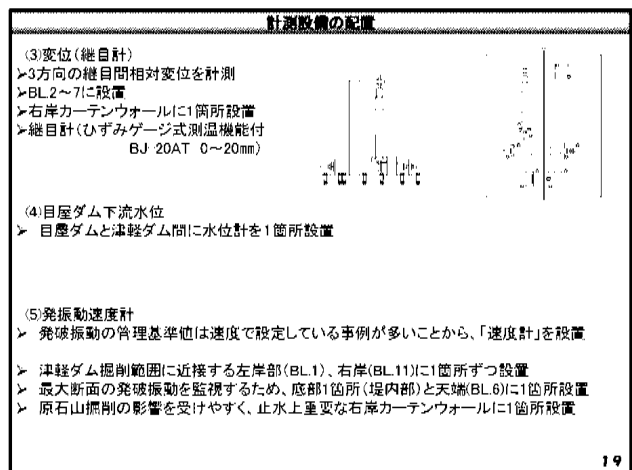
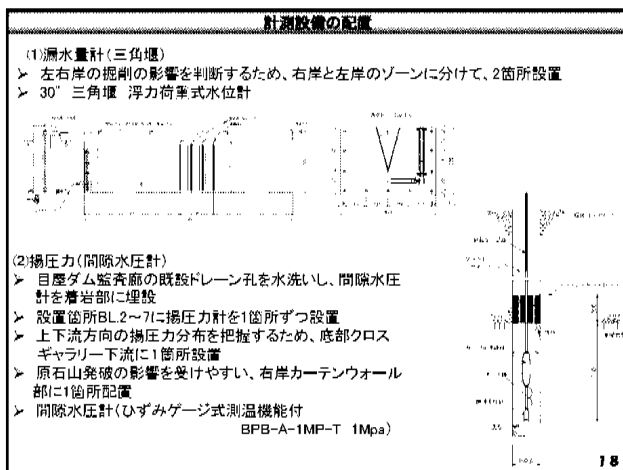
- (1)洪水調節
ダム地点の計画洪水流量3,100m³/sを2,940m³/sに調節
- (2)流水の正常な機能の維持
ダム地点下流の既得用水の補給等、流水の正常な機能の維持
- (3)かんがい用水
岩木川左岸地区の約9,600haの農地に対するかんがい用水の補給
- (4)水道用水
弘前市に対し、新たに14,000m³/日を供給
- (5)工業用水
五所川原市に対し、新たに10,000 m³/日を供給
- (6)発電
最大出力 8,500 kw

津軽ダム 堤体諸元

1.ダム名	津軽ダム
2.所在地	宮城県大崎市 東北地方整備局
3.河川名	岩木川水系岩木川
4.位置	右岸 宮城県大崎市 西目屋村森平
5.地質	安山岩類、火山礫層状岩
6.型式	重力式コンクリートダム (RCD工法、RCDM)
7.堤高	97.2m
8.堤頂長	342.0m
9.堤体積	717,000m ³
10.堤体傾斜	1:0.226 (90°)
11.上流面勾配	1:0.8 (ノーマル)
12.下流面勾配	1:0.74







発破試験		
●試験発破の結果		
▶ 変位速度 ・試験発破における変位速度はすべて管理値2.0kine未満 ・発破No.3(左岸)において、床面よりも壁面の方が変位速度がやや大きくなる傾向		
切羽	計測点	変位速度 最大値(kine)
発破No.1左岸斜面	測点A(床面)目屋ダム監査廊左岸	0.2202
発破No.2右岸斜面	測点B(床面)目屋ダム監査廊右岸	0.0740
	測点C 目屋ダム監査廊右岸	0.0495
発破No.3左岸斜面	測点A(床面)目屋ダム監査廊左岸	0.2996
	測点A(壁面)目屋ダム監査廊左岸	0.3548
	測点B(床面)目屋ダム監査廊右岸	0.0316

24

発破試験		
●試験発破の結果		
▶ K値の推定 ・今回の試験発破による平均的なK値は、一般的な範囲(200～500程度)		
切羽	計測点	K値(平均)
発破No.1左岸斜面	測点A(床面)目屋ダム監査廊 左岸	165
発破No.2右岸斜面	測点B(床面)目屋ダム監査廊 右岸	181
	測点C 目屋ダム監査廊 右岸	508
発破No.3左岸斜面	測点A(床面)目屋ダム監査廊 左岸	170
	測点A(壁面)目屋ダム監査廊 左岸	220
	測点B(床面)目屋ダム監査廊 右岸	397

25

施 工

●掘削数量

掘削箇所		標高 (EL.m)	土石掘削 (m³)	発破掘削 (m³)	計
左岸部		227.0～140.0	207,775	115,348	323,023
右岸部		227.0～140.0	205,024	98,127	303,151
河床部	左岸	140.0～129.5	33,024	22,718	56,645
	右岸		14,413	19,678	34,086
計			461,039	255,866	716,905

Z6

26

施 工

●制御発破計画

- 目屋ダムの離隔距離は津軽ダム軸付近で20～32m

●管理目標とK値の見直し

- 1.6kine以上が観測される毎に、K値を見直し、火薬量を設定

●発破掘削の方法

- MS・DS雷管の併用
- 非電気式雷管を使用した段発発破
- 1段当たりの装薬量を少なく設定

目屋ダムからの離隔距離

掘削掘削	掘削1段の寸法	レイアウト	発破方法
10m未満	機械掘削		
10～15m	ホッパ	2.5m	1段当たり1段目
15～20m	ホッパ	2.5m	分散装薬2段、1段当たり装薬量2.4kg、20m以上は、非電気式雷管使用(最大2000g)
20～32m	ホッパ	5.0m	1段当たり1段目
32m以上	ホッパ	8.0m	1段当たり1段目

27

27

施 工		
●制御発破実績 (左岸斜面EL185m～EL155m 高低差30mの区間の実績紹介)		
▶ 非電気式雷管を使用し、段発発破を20回実施		
項目	単位	実 績
標 高	—	左岸斜面EL185.0～EL155.0m
使用期間	—	H21.9末～H21.10末
対象発破数量	m³	27,200
発破回数	回	137回中20回
1回当たり平均発破数量	m³	819
1発破当たり雷管段数	段	最大 120
		最小 24

28

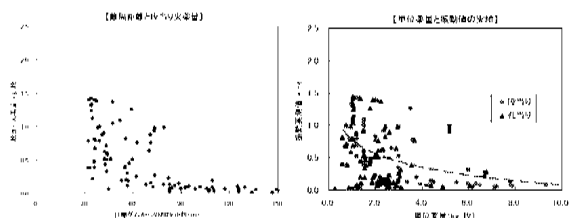
施 工	
●技術的対応 ▶ 試験発破によるK値の算定 ・事前に試験発破を行ない、K値の概略値を算定しておき、あたりをつけた ▶ 計測管理 ・日々、振動速度を測定し、想定K値を見直し、次の火薬量を設定 (1.6kineを超える毎に行ない、結果として計6回、K値の見直しを行なった) ▶ 発破1段あたりの薬量を小さくするための技術 ・MS・DS雷管の併用 ・非電気式雷管の使用 ・大型ブレーカー(4 t級)の使用	
	

29

施 工

●制御発破の結果

- 目屋ダムから30～70m程度離れた地点までは比較的、硬固な岩盤であり、単位薬量は1.0～1.5kg/段とやや多いケースがある
- これらのケースでも、振動速度観測値は1.4kine程度以下におさまリ、管理値を満足することができた



目屋ダムからの距離距離と
単位薬量の関係

単位薬量と
振動実績値の関係

30

施 工

●技術的成果

- 非電気式雷管を使用することで工程を確保できた
(左岸天端から河床までの掘削速度実績 H25m/月)
- 発破振動の管理基準値を満足させ、また既設目屋ダムに悪影響を及ぼすことはなかった

●現時点での展望と課題

- 既設構造物に近接して、発破掘削する場合、非電気式雷管による段発が有効
(非電気式雷管 : 150～200段可能、ただし1段1孔)
- 非電気式雷管の欠点 :
 - ・ 配線に手間がかかること
 - ・ コネクター等の片廃処理
 - ・ 不発の確認
 - ・ コスト増

31

管理段階のダム（羽地ダム・福地ダム）における GPS 自動計測システムの導入事例

上原 勇賢¹ 大城 朝一² 新垣 敏一³

ダム管理においては、全国的に管理ダム数が増加し維持管理コストの縮減が求められる一方、近年多発する大地震や異常気象に対する安全管理の高度化が求められている。我々は、こうした社会的要請に対して、管理段階のフィルダムの堤体外部変形計測に GPS 自動観測システムを先駆的に導入し、ダム管理の合理化・高度化とともに地震等災害時の安全・安心の確保に取り組んでいる。本発表では、管理段階における 2 箇所のフィルダム（福地ダム・羽地ダム）での GPS 設置位置の選定方法や導入した GPS 自動計測システムの構成、計測結果について報告する。

キーワード: GPS, 外部変形計測, 管理, 測量, 地震, 自動計測

1. はじめに

沖縄本島では、人口増加、生活水準の向上および観光客の増加に伴って水需要量が増加する一方、河川からの用水安定確保が難しく、ダムによる用水の安定供給が重要である。特に沖縄本島の水需要量の 58% を担う直轄管理ダムの役割は大きい。

内閣府沖縄総合事務局北部ダム統合管理事務所は、沖縄本島の直轄ダム群の統合的な流水管理を行なう事務所として昭和 58 年 4 月に発足し、2010 年現在で福地、新川、安波、普久川、辺野喜、漢那、羽地の計 7 ダムの管理を行なっている。また、現在建設中の大保ダム・億首ダム完成後の管理ダム数は 9 箇所（図-1）となり、今後は更なる合理的な統合管理を推進する必要がある。

このような背景から北部ダム統合管理事務所では、ダム管理の高度化と省力化、地震等の緊急時の迅速な点検実施による安全性の確保を目指し、管理段階の 2 箇所のフィルダム（福地ダム・羽地ダム）の堤体外部変形計測に GPS 自動計測システムの導入を試みた。

本発表では、GPS 設置位置の選定方法や導入した GPS 自動計測システムの構成、計測結果について報告する。

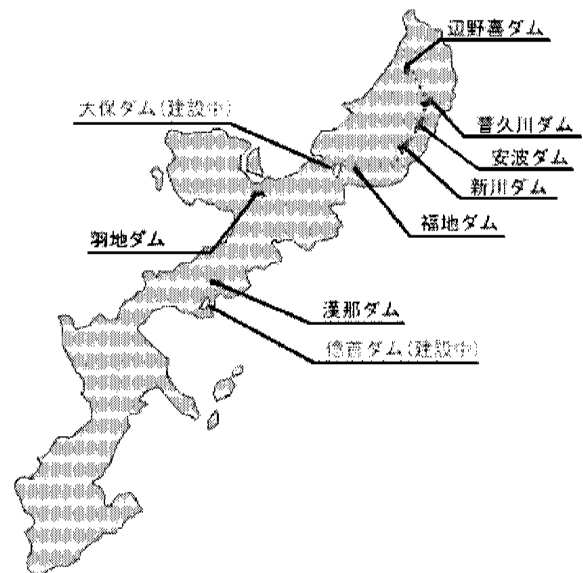


図-1 北部ダム統合管理事務所の管理ダム位置

2. 管理段階のフィルダムでの堤体計測の課題と GPS 自動計測システム導入のメリット

フィルダムの安全管理のための計測項目のうち、堤体および基礎岩盤浅部からの浸透量計測と堤体の外部変形計測は安全管理上の主要項目になっている。

近年に施工されたダムにおいては、浸透量計測を含め始どの計測機器が自動化され、計測結果をリアルタイムに確認することが可能となってきた。しかし、フ

¹ 内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 所長

² 内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 管理課長

³ 内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所 管理係長

イルダムの堤体外部変形計測は、旧来どおり光波・水準測量を用いた手動観測が一般的であるため、①計測や結果の整理に時間・費用を要す、②地震時など緊急時に迅速な対応ができない、③管理ダム数が増加する中で外部変形計測にかかる費用が低減されない等の課題があった。

また、完成から長期間が経過したダムでは自動計測機器がそもそも設置されていない、機器の老朽化による故障が発生しても再設置が困難である等の問題を有しており、ダム管理の合理化・効率化が求められる中、上記①②とあわせて堤体外部変形計測の自動化による常時監視体制の構築が望まれる。

沖繩総合事務局では、これまでに建設中～試験満水（管理の第Ⅰ期）のダムの堤体外部変形計測に、全国に先駆けて GPS 自動計測システムの試験導入を行い計測精度や計測頻度の向上、地震時の迅速な対応、長期的な計測コスト低減の効果等を確認している¹⁾²⁾。その成果を受けて、管理段階（管理の第Ⅱ期・第Ⅲ期）のダムとしては全国で初めて堤外部変形計測に GPS 自動計測システムを導入した。管理段階のダムに GPS 自動計測システムを導入するメリットは表-1 の通りである。

表-1 GPS 自動計測システム導入のメリット

緊急時の安全管理	迅速な緊急対応。地震や台風等の緊急時でも、ほぼリアルタイムに堤体変位を監視可能。
平常時の安全管理	これまで難しかった水位変動に伴う堤体変形を正確に把握。第Ⅱ期から第Ⅲ期への早期移行。
複数ダムの管理	複数ダムの自動計測結果を一括監視、複数ダムの管理の合理化に寄与
計測コストの縮減	堤体挙動を代表する重要測点に GPS を導入し、頻度を低減した従来測量を併用することで計測コストを縮減可能。

3. GPS 自動計測システムの導入対象ダム

北部ダム統合管理事務所が管理するダムのうち福地ダム、安波ダム、辺野喜ダム、漢那ダム、羽地ダムの5箇所がフィルダム形式ないしはフィル形式を含む複合ダムである。今回、GPS 自動計測システムの導入対象として選定したダムは、2010年現在は管理の第Ⅱ期で今後第Ⅲ期に移行予定の羽地ダム（図-2）と、7ダムの中で最も貯水量が多く築堤年度が古く埋設計器等が

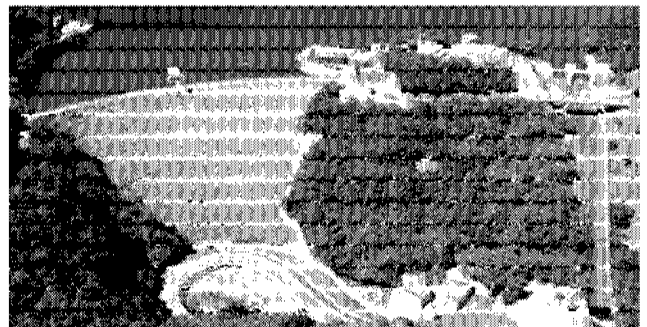
存在しない第Ⅲ期の福地ダム（図-3）の2ダムである。

これら2ダムにおいて、GPS 自動計測システムの有用性が確認されれば、他のフィルダムにも GPS 自動計測システムの導入を検討する予定である。



型式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	66.5m
堤頂長	198m
総貯水容量	19,800×10 ³ m ³
管理開始年月	2005年4月（現在第Ⅱ期）
外部標的点数	19点（年12回計測）

図-2 羽地ダム概要



型式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	91.7m
堤頂長	260m
総貯水容量	55,000×10 ³ m ³
管理開始年月	1973年12月（現在第Ⅲ期）
外部標的点数	36点（年4回計測）

図-3 福地ダム概要

4. 重要測点の選定

建設中のダムの場合には、GPS 自動計測システムを外部標的の全点に導入することで計測精度や計測頻度、緊急時の迅速な変位把握等のメリットに加えて、第Ⅰ期・第Ⅱ期に実施される従来の測量作業の費用を考えればコストメリットも期待されるため、GPS への全面移行が進められている³⁾。

しかし、既に第Ⅱ期や第Ⅲ期のダムでは外部標的の全点に GPS を導入することはコスト面から現実的ではない。そこで、堤体挙動を代表する堤体管理上の重要測

点に絞り込んで GPS を設置する必要がある。

4.1 重要測点の選定方法

重要測点の抽出については、山口・小堀ら⁴⁾が提案する「フィルダムの安全管理の為の外部変形重要計測点の選定」の方法を参考に、図-4 の選定作業フローおよび表-2 の重要測点抽出の考え方を作成するとともに、(独)土木研究所と協議を行い実施した。

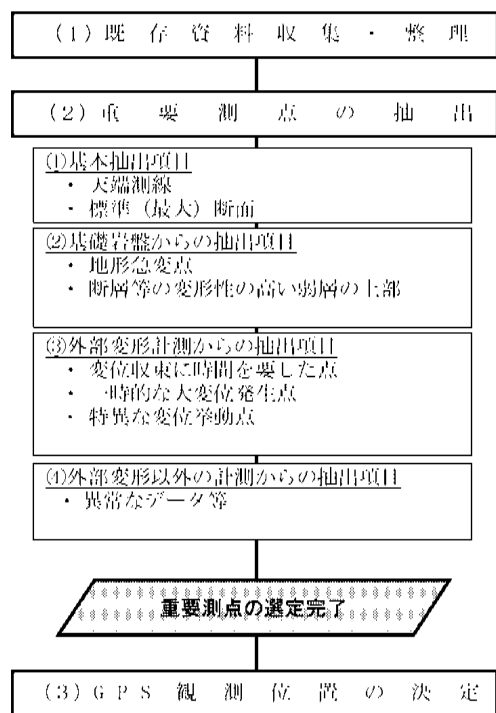


図-4 GPS 観測位置の選定フロー

4.2 羽地ダムにおける重要測点の選定結果

ここでは、紙面の制約から羽地ダムにおける重要測点の選定結果のみを以下に示す。

(1) 基本抽出項目

堤体および基礎岩盤の上下流、左右岸方向の全体的な挙動を把握するため、天端(S-11～S-14)および最大断面(S-5,S-9,S-13)の外部標的を重要測点とした。なお、堤高の低い S-2 および常時満水位以下に測点が位置する上流側 S-17,19 については、重要測点から除外した。

(2) 基礎岩盤からの抽出項目

ダム縦断方向の掘削勾配は、左右岸ともに概ね一様で、勾配急変箇所等での不等沈下が生じる可能性は小さいと考えられたため、掘削面の地形条件からの重要測点抽出はないと判断された。また、断層や破碎帯などの弱層の分布や、基礎岩盤の変形性の硬軟が極端で不等沈下の可能性がある箇所についても、当該ダムに該当の箇所はないため重要測点を抽出しなかった。

(3) 外部変形計測からの抽出項目

既往計測結果における重要測点として、これまでに実施された堤体外部変形計測の結果(図-5,6 に一例を示す)から、①他に比べ変位収束に時間を要した測点、②一時的に大きな変位が発生した測点、③堤高と沈下量の比が他の測点に比べて極端に特異な測点を抽出する。

表-2 重要測点抽出の考え方

抽出項目	細目	内容	参考資料 (収集資料)
(1) 基本抽出項目	天端	堤体および基礎岩盤のダム軸方向の全体的な挙動を把握するため、天端の標的は基本的に全点抽出する	工事誌 構造図等
	最大断面	堤体および基礎岩盤の標準(最大)断面(あるいは付近断面)におけるダム上下流方向の挙動を把握できるように、最大断面を抽出する	
(2) 基礎岩盤からの抽出項目	地形急変	不等沈下の可能性がある、ダム縦断方向における地形(掘削面)の急変点付近を抽出する	工事誌 基本設計会議資料等
	断層・弱層	不等沈下の可能性がある、断層などの弱層が幅広い範囲(箇所)、変形性の硬軟が極端な箇所を抽出する	
(3) 外部変形計測からの抽出項目	変位速度	変形性の安定までに、他の地点より時間を要した箇所	工事中・試験湛水時 および 常時の外部標的計測結果
	一時的な変位発生	地震時や洪水時に一時的に比較的大きな変形の累積が見られた箇所	
	特異な変位挙動	ダム軸平行測線に沿って、あるいは、上下流測線に沿って各計測点の結果を比較したとき、変形に不連続な結果を要するような結果が見られる測線上の点	
	変位量/堤高の比率	ダム軸平行測線に沿って、あるいは、上下流測線に沿って各計測点の変位量と堤高の比率を比較したとき、比率が周辺より大きい測線上の点	
(4) 外部変形以外の計測からの抽出項目	異常なデータ等	試験湛水時のさまざまな計測機器のワーク整理結果より得られた懸念事項(特別法下計、岩盤変位計、漏水量計等で注意すべきデータが得られている箇所の抽出)	工事中・試験湛水時 および 常時の各種計測結果

① 変位収束：沈下量や上下流方向へ移動量が大きい天端の S-11～S-14 および S-8～S-10 は変位が安定するまでに時間を要しているため、変形計測における重要測点として抽出した。

② 一時的な大変位発生：洪水の水位急上昇時にも一時的な大変位の傾向は認められず、本項目で抽出された測点は無かった。

③ 特異な変位挙動：沈下量と堤高の比が相対的に大きい標的は、S-4, 7, 10 の 3 点であった（図-6）である。ただし、S-4, 7 は堤高が低く、変位量自体が小さいため除外した。

(4) 外部変形計測以外の計測からの抽出項目

漏水量および浸透圧計測の結果を整理した結果、特に問題となる挙動は認められなかった。

以上の作業の結果から選定された重要測点を図-7 に示す。

5. GPS 自動計測システムの導入

5.1 GPS 自動計測システムの概要

本ダムで利用する GPS システムは、地盤計測用に開発された安価な GPS センサーを用いて 24 時間 365 日の連続計測を行うものである⁵⁾。図-8 に GPS 自動計測システムの概念図を示す。

一般に GPS 計測では、様々な誤差要因により GPS 計測値に誤差が含まれるため mm 単位の計測は難しいが、当該 GPS 自動計測システムはトレンドモデルと呼ばれる最新の誤差処理手法⁶⁾を導入することで 1mm～1.5mm 単位の変位計測が可能である。

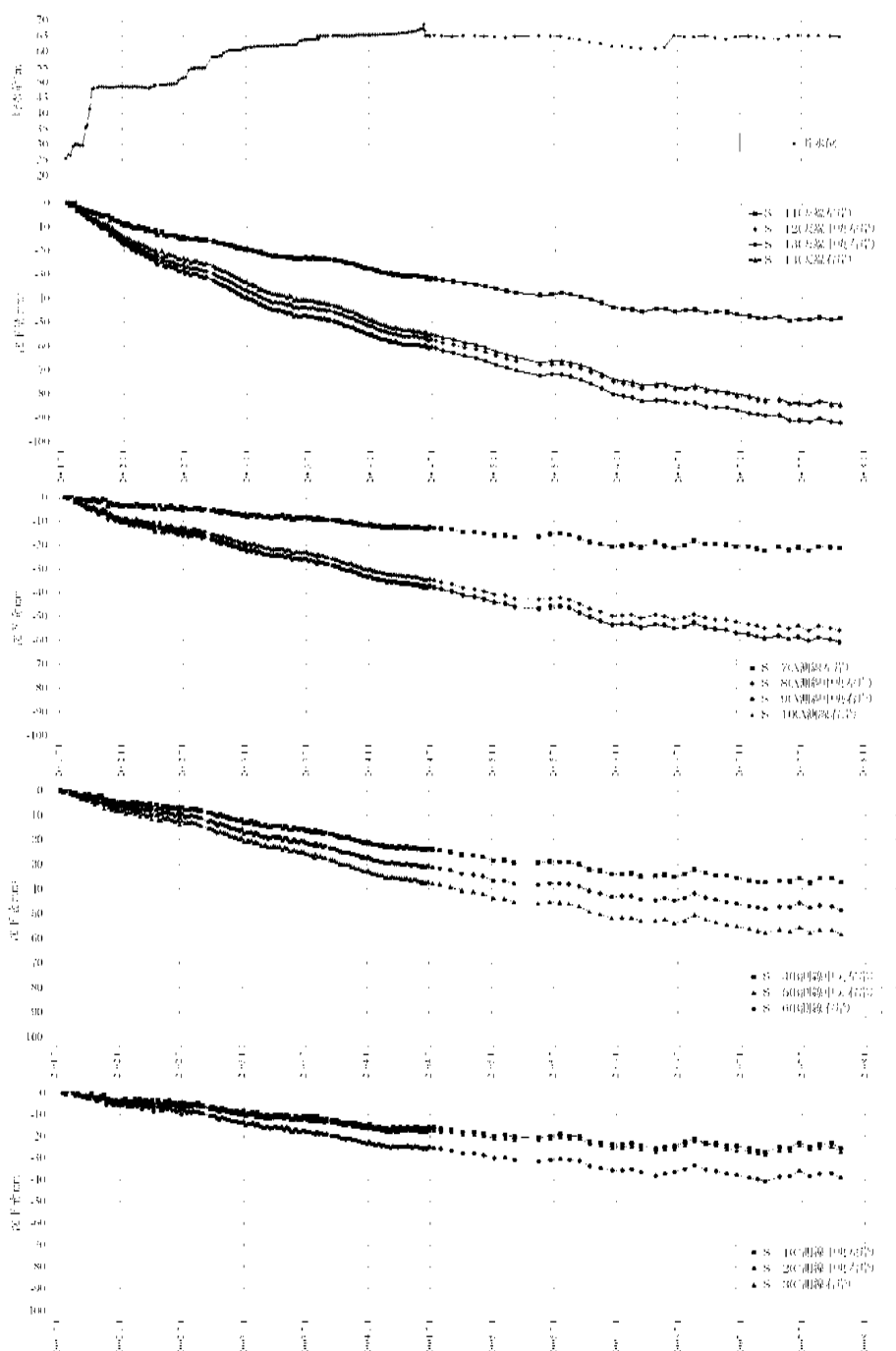


図-5 羽地ダムにおける各測点の沈下量

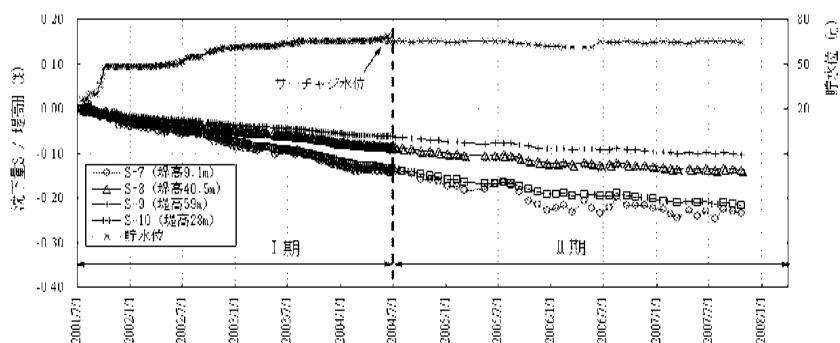


図-6 羽地ダム・沈下量/堤高の変化図 (S 7～S 10)

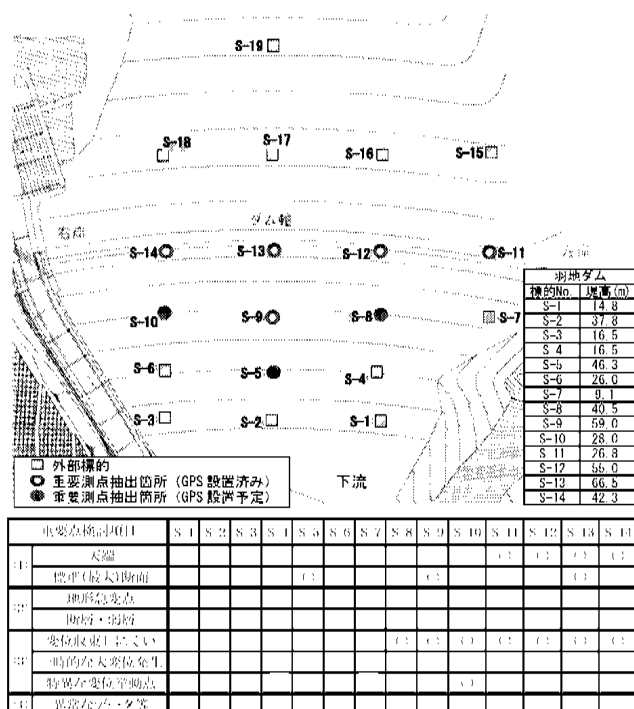
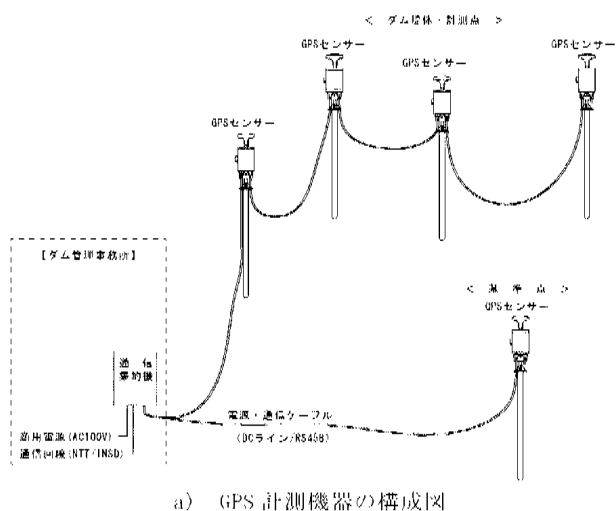
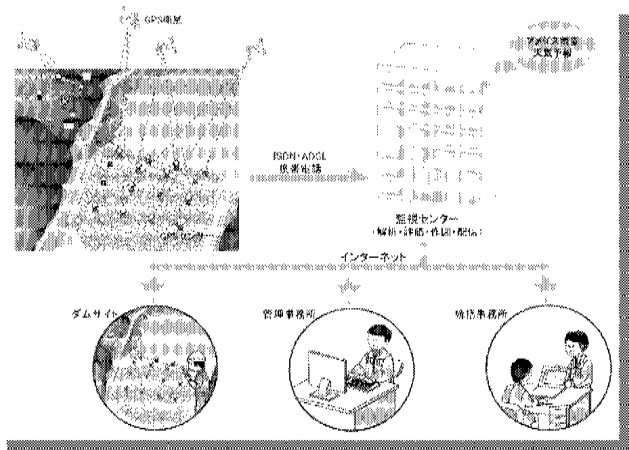


図-7 羽地ダム重要測点の選定結果



a) GPS 計測機器の構成図



b) データ通信処理・結果配信

図-8 GPS 自動計測システムの概念図

さらに、計測結果はインターネットを介して提供され、ダム管理者はパソコンや携帯電話上のブラウザを利用して何時でも何処でも計測結果の閲覧が可能である。

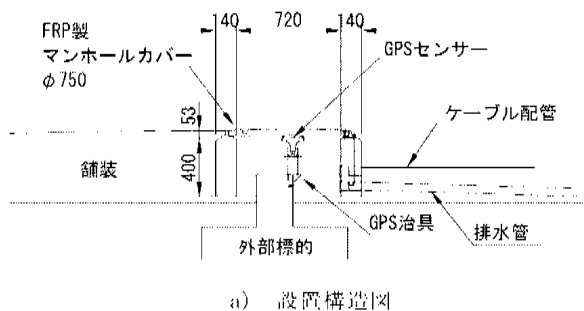
5.2 GPS 自動計測システムの設置

羽地ダムでは、第4章で選定した8点の重要測点のうち図-7に○で示した5測点にGPSを設置した(残り3点の重要測点についても今後設置予定である)。

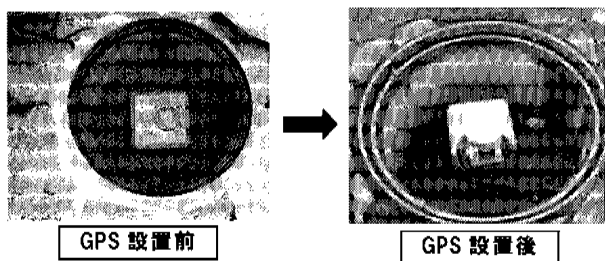
今回導入したGPS自動計測システムの諸元を表-3に示すとともに、図-9、図-10にはGPSセンサーの設置状況を示した。

表-3 羽地ダムのGPS自動計測システムの諸元表

GPS 計測点	6 点 (天端埋設型 4 点)
GPS 基準点	1 点
通信集約局	1 基
通信回線	フレッツ ISDN
測位方法	スタティック測位法 (1 時間セッション)
誤差処理	時系列統計解析 (トレンドモデル)
観測精度	< 誤差処理前 > 水平 $\pm 5\text{mm}$
	鉛直 $\pm 10\text{mm}$
	< 誤差処理後 > 水平 $\pm 1\text{mm}$
	鉛直 $\pm 1.5 \sim 2\text{mm}$
データ配信方法	インターネット配信
データ更新頻度	1 回/月 (地震発生時: 1 回/時)



a) 設置構造図



b) 設置状況写真

図-9 堤体天端外部標的へのGPS設置状況

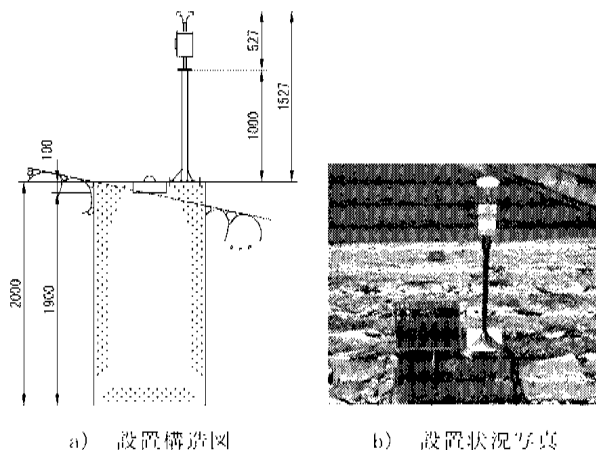


図-10 堤体斜面外部標的への GPS 設置状況

当該ダム天端は管理用道路に利用されるため外部標的はマンホール内に設置されている。そのため、天端部への GPS の設置は、大保脇ダムにて検証・導入を行った天端埋設型 GPS センサー⁷⁾ とし、既設の鋼製マンホール蓋を FRP 製マンホール蓋 (耐荷重 T-20) に交換して GPS センサーを設置した。

6. GPS 計測結果

羽地ダムでは平成 20 年 3 月 21 日より計測を開始し、現時点まで安定して計測を継続している。

6.1 羽地ダムの GPS 計測結果

GPS 計測結果の一例として図-11 に G-9 測点の計測グラフを示す。グラフ縦軸は上下流 (X)・左右岸 (Y)・隆起沈下 (Z) の変位量で、横軸は時刻である。図中の実点が誤差処理前の GPS 計測値、実線が誤差処理後の GPS 計測値で、貯水位と光波・水準測量の成果 (四角点) も併記した。また、図-12、図-13 には GPS 計測結果をベクトル表示した変位ベクトル図を示す。

GPS で計測された計測期間中 (約 2 年間) の変位量は、天端の水平変位で 2mm~3mm 程度で、主断面に向かう方向に変位している。また、天端の沈下変位は 11mm~12mm 程度で主断面 (最大断面) に位置する G-13 の沈下量が最も大きいことが明らかとなった。

また、図-11 に示すとおり堤体の変形はかなり収束しているものの沈下変位は未だに累積傾向があり、特に貯水位の低下時期に沈下変位が増加する傾向にあることがわかった。

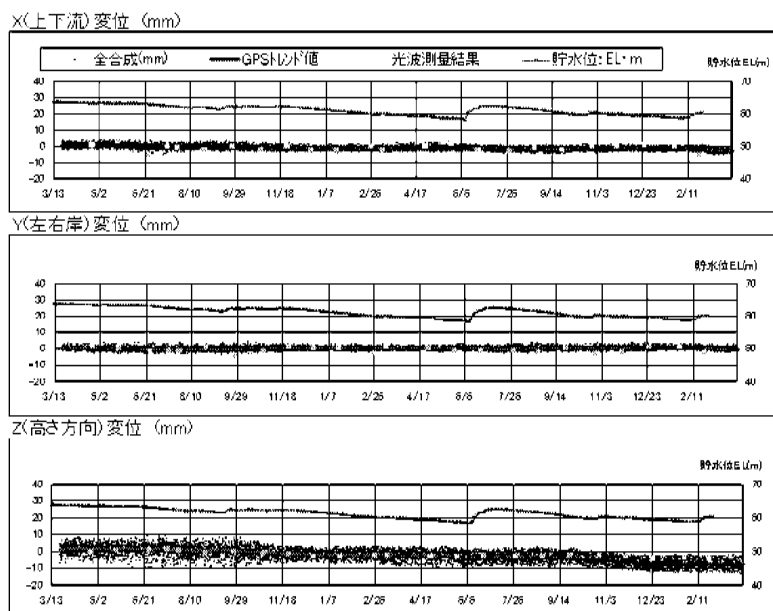


図-11 GPS 計測結果の一例 (G-9)

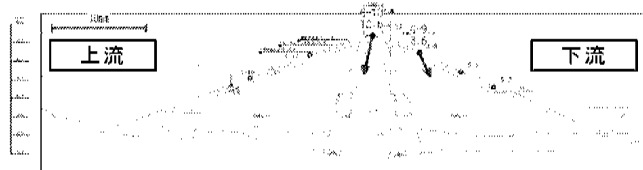


図-12 断面変位ベクトル図

表-4 GPS と光波・水準測量結果の偏差

	GPS と光波・水準測量の偏差 (mm)		
	上下流方向	左右岸方向	高さ方向
G-9	1.4	1.2	1.1
G-11	2.3	3.6	1.6
G-12	1.8	3.1	1.2
G-13	1.6	4.1	2.4
G-14	2.0	3.9	2.1
平均	1.8	3.2	1.7

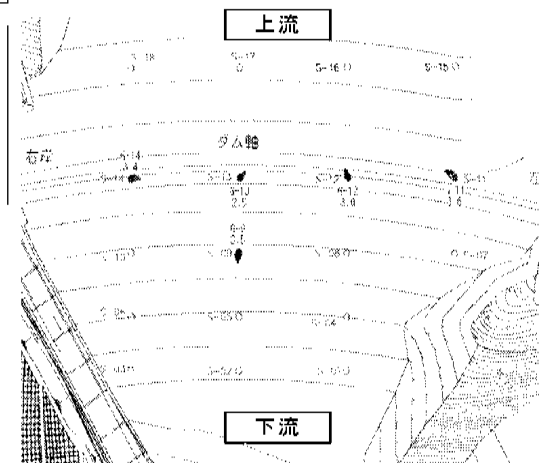


図-13 平面変位ベクトル図

第1報		地震 (2010/02/27 05:31) 発生後の変位状況
2010/2/27 9:00		
GPS自動計測システムによる地震後の変位速報		
名称	福地ダム	
地震情報	平成22年02月27日05時31分 地震がありました。震源地は沖縄本島近海（那覇の東50km、北緯26.3度・東経128.2度）で震源の深さは約10km、地震の規模（マグニチュード）は6.9と推定されます。	地震発生 (2010/02/27 05:31)
震度情報	震度 4 : 東村平良 震度 不明 : 大宜味村大兼久 現場地震計 : 25 gal 以上記録	地震発生 (2010/02/27 05:31) 発生後からの変位ベクトル
堤体変位情報	平成22年02月27日09時00分 時点の堤体変位情報 現時点で、 ダム堤体のGPS計測点において、地震による大きな変位は観測されていません。 今後の変位の動向を注視しておきます。	地震発生 (2010/02/27 05:31)
次回の報告	次回の報告は、 地震発生24時間後（2010年2月28日、05時頃）の予定です	地震発生 (2010/02/27 05:31)

図-14 地震発生3時間の堤体変形量速報（平成22年2月27日発生地震，福地ダム）

6.2 光波・水準測量との比較

図-11 で光波・水準測量とトンネルモデルによる誤差処理後の GPS 計測結果を比較すると、ほぼ同様の変位量を示し、両者の計測精度は共に良好と思われる。ただし、光波・水準測量の成果は GPS 計測値中心としてややバラついているようである。そこで、表-4 に GPS 計測値と光波・水準測量成果との偏差をまとめた。GPS と光波測量の計測値の偏差は上下流方向で平均 1.8mm、左右岸流方向で平均 3.2mm であり、左右岸方向の光波測量の成果は GPS 計測値に比べかなりバラつきが多い。一方、水準測量（高さ方向）の偏差は平均 1.7mm であり、上下流方向のバラつきと同程度であった。

以上のことから、本ダムに導入した GPS 自動計測システムは、光波・水準測量と同様かやや精度が高いと考えられ、堤体計測にとって有用な計測手法であることが確認された。

7. 地震等緊急時対応について

7.1 緊急対応の内容

GPS 自動計測システム導入のメリットの一つに、地震発生時の堤体変形の迅速な把握が可能なが挙げられる。当該ダムの GPS 自動計測システムでは、下記①②の基準を超える地震が発生した場合には地震時緊急体制（地震スクランブルと呼ぶ）に移行する。

- ① 堤体基礎地盤に設置された地震計で最大地震動加速度が 25gal を超えた場合
- ② ダム近傍の気象庁が観測する地震観測所におい

て震度4以上を観測した場合

具体的には、通常の GPS 計測結果に加えて地震発生前後の堤体変位の増分を計算・とりまとめた地震スクランブル用の配信が開始され、インターネットを介して複数の関係者が地震による堤体変位情報を常時共有することができる。

また、「地震発生後3時間以内の堤体変形量速報」と「24時間以内の堤体変形量確定報」が監視センターからメール送信され、ダム管理事務所の地震対応作業を支援する。

7.2 緊急対応の事例

平成20年7月8日に、沖縄県北部の一部で震度4を記録する地震が発生した。福地ダムでは、最大地震動加速度が 25gal を超えたため、地震スクランブル体制に移行し、図-14 に示す「地震発生後3時間の堤体変位量速報」や「24時間の堤体変位量確定報」が監視センターから管理関係者にメール送信された。

この速報により地震発生後3時間の時点で地震による変位がなかったことが明らかとなり、GPS 自動計測システムの導入により迅速に堤体の安定性確認と関係者の情報共有が可能になった。

8. 管理段階のフィルダムでの GPS 計測コストの検討

8.1 従来の測量頻度低減の妥当性について

羽地ダム・福地ダムでの検討の結果、以下の観点から GPS 自動計測システムを導入することで従来の測量作業の頻度を低減することは妥当と考えられる。

- ① 重要測点を様々な尺度から技術的に検討して抽出す

ることで堤体挙動計測の「代表性」は担保されている

② 2年間の計測結果から GPS 計測の「精度・信頼性」についても十分な成果が得られた

③ 連続で高精度な計測により地震等緊急時において迅速な堤体挙動が把握でき「適時性」が確保される

ただし、GPS が設置されていない外部標的も含めた堤体全体の挙動を定期的に監視する観点から、従来の測量作業を全く実施しないのは問題であり、ダムの総合点検や定期点検の際に全外部標的の測量作業を実施（概ね1〜3年に1回程度）するのが妥当と思われる。

8.2 GPS 計測コストの検討

GPS 自動計測システムを導入した場合の運用コストを検討した。コスト試算にあたっては、従来の測量作業の頻度を1回/年や1回/3年に低減した場合の測量費用を推定し、GPS 自動計測と併用した場合のトータルコストを10年間の試算期間で比較した。

管理段階のダムに GPS 自動計測システムを導入する場合、従来の光波・水準測量の計測頻度や GPS を設置する重要測点の選定結果により計測コストの縮減度合いは異なるが、羽地ダムのように管理の第Ⅱ期から導入すると数%程度の計測コスト縮減が期待できる。一方、福地ダムのような第Ⅲ期のダムでは、現状では1.2倍程度のコスト高となるが、今後は GPS 自動計測の普及に伴い導入コストの低減が期待され、将来的には第Ⅲ期のダムでも従来よりも計測コストが縮減される可能性が高い。

9. まとめ

① 全国に先駆け管理段階のダム（羽地、福地ダム）に GPS 自動計測システムを導入し、システムの安定稼働および光波・水準測量と同等以上の精度であることが確認された

② 貯水位の変化に伴う堤体挙動を詳細に把握できた

③ 地震等緊急時において迅速な堤体挙動が把握できた

④ 計測結果をインターネット配信することで複数のダムの計測結果を一括管理できる

⑤ GPS 自動計測システムを導入し従来の測量作業の頻

度を低減することで管理の高度化と信頼性を両立した合理的な堤体計測が可能である

⑥ GPS 自動計測を管理の第Ⅱ期から導入すると数%程度の計測コスト縮減が期待できるが、第Ⅲ期のダム場合は現状では1.2倍程度のコスト高となる

今後は、本発表の成果を踏まえ、管内の他のフィルダムについても重要測点の抽出ならび GPS 自動計測システムの導入を進め、複数ダムの合理的な統合管理体制を構築しダム管理の高度化・効率化を図る必要があると考えている。

全国的に管理ダム数が増加し、管理の高度化・効率化が求められるなか、今回の北部ダム統合管理事務所の取組みが全国のダム管理の参考になれば幸いである。

今回の発表にあたっては、独立行政法人土木研究所ダム構造物チームに有益なアドバイス・ご教示を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

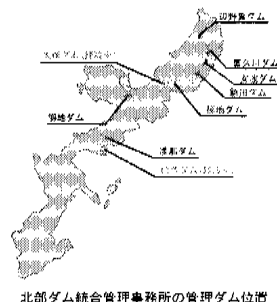
- 1) 山口嘉一、小堀俊秀、横森源治、大野誠、岩崎智治：GPS を用いたフィルダム外部変形計測に関する一考察、ダム工学、Vol.15、No.2、120-136、2005
- 2) 板屋英治、森田陽弘、新垣敏一：フィルダム安全管理の高度化を目的とした堤体外部変形計測への GPS 全面導入に関する取組み、ダム技術、No. 264-9、47-59、2008
- 3) 山口嘉一、小堀俊秀：フィルダム安全管理における GPS の全面導入に関する研究、土木技術資料 VOL.49、NO.7、11-12、2007
- 4) 山口嘉一、小堀俊秀、池澤市郎、岩瀬秀一、矢ノ口健一：フィルダムの安全管理の為の外部変形重要計測点の選定、土木学会 平成 19 年度東北支部技術研究発表会、IV-50、2008
- 5) 岩崎智治、武智同加、武石 朗、清水則一：道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発、土と基礎、Vol.50、No.6、No.533、25-27、2002
- 6) 清水則一、安立 寛、小山修治：GPS 変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究、資源と素材、Vol.114、397-402、1998
- 7) 中園卓樹、山口嘉一、小堀俊秀、清水則一、岩崎智治、飯島功一郎：フィルダム安全管理のための天端埋設型 GPS の適用性検討、土木学会西部支部 2006 年度研究発表会講演集、571-572、2007



1. はじめに

全国的に管理ダム数が増加し維持管理コストの削減が必須。一方で、近年多発する大地震や異常気象に対する安全管理の高度化が求められる。

内閣府沖縄総合事務局・北部ダム統合管理事務所では、現在7ダムを管理し、将来的には9箇所を管理することになる。



そのため、

- ➡ 合理的な統合管理が求められる
- ➡ そこで、平成19年度から福地・羽地ダムにおいてGPS自動計測システムによる堤体外部変形計測を管理段階のダムに先駆的に導入し、ダム管理の高度化と合理化を進めている。
- ➡ 本発表では、GPS設置位置の選定方法や導入したGPS自動計測システムの構成、計測結果について報告

2. 管理段階のフィルダムの外部変形計測の課題とGPS自動計測システム導入のメリット

フィルダム堤体の外部変形計測は安全管理上の主要項目の一つである。が、従来は光波・水準測量を用いた手動観測が一般的であり、次ぎのような課題があった。

- 課題1 : 計測や結果の整理に時間・費用を要し、外部変形計測にかかる費用が低減されない
- 課題2 : 地震時など緊急時に迅速な対応ができない

また、完成から長期間が経過したダムでは既存自動機器の老朽化による故障が発生しても再設置が困難なことも多く、ダム管理の合理化・効率化が求められる中、堤体外部変形計測の自動化による常時監視体制の構築が望まれる。

沖縄総合事務局では、これまでに全国に先駆けてGPS自動計測システムの試験導入を行いその有効性を確認している。

その成果を受けて、管理段階（管理の第Ⅱ期・第Ⅲ期）のダムとしては全国で初めて堤外部変形計測にGPS自動計測システムを導入した。

【管理段階のフィルダムへのGPS自動計測システム導入のメリット】

緊急時の安全管理	迅速な緊急対応。地震・台風時でも、ほぼリアルタイムに堤体変位を監視
平常時の安全管理	水位変動に伴う堤体変形を正確に把握。第Ⅱ期から第Ⅲ期への早期移行。
複数ダムの管理	複数ダムの自動計測結果を一括監視。複数ダムの管理の合理化に寄与

3. GPS自動計測システム導入対象ダム

羽地ダム



型式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	66.5m
堤頂長	198m
総貯水容量	19,800 × 10 ³ m ³
管理開始年月	2005年4月 （現在第Ⅱ期）
外部標的点数	19点（年12回計測）

福地ダム



型式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	91.7m
堤頂長	260m
総貯水容量	55,000 × 10 ³ m ³
管理開始年月	1973年12月 （現在第Ⅲ期）
外部標的点数	12点（年4回計測）

4. 重要測点の選定

【建設中のダムの場合】

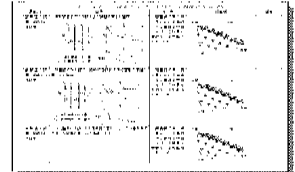
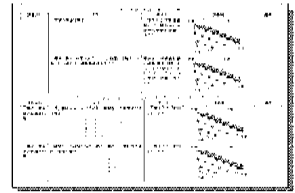
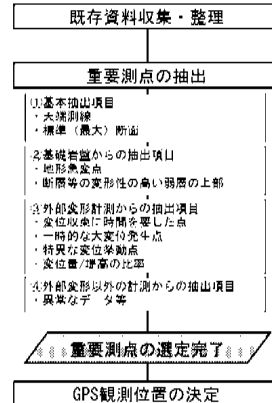
GPS 自動計測システムを外部標的全点に導入することで計測精度や計測頻度、緊急時の迅速な変位把握等のメリットに加えて、第Ⅰ期・第Ⅱ期に実施される従来の測量作業の費用を考えればコストメリットも期待されるため、GPSへの全面移行が進められている

【管理段階の第Ⅱ期や第Ⅲ期のダム】

外部標的全点にGPSを導入することはコスト面から現実的ではない。そこで、堤体挙動を代表する堤体管理上の重要測点に絞り込んでGPSを設置する必要がある

⇒ 堤体挙動を代表する重要測点にGPSを導入し、従来測量の頻度を低減し併用すれば、計測コストを縮減可能。

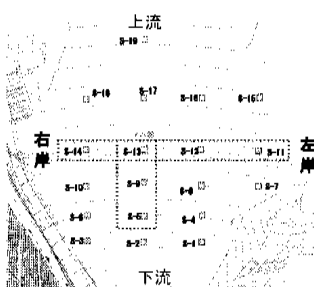
4.1 重要測点の選定方法



「フィルダムの安全管理のための外部変形計測点の選定」方法

4.2 重要測点の抽出結果（羽地ダム）

(1) 基礎抽出項目



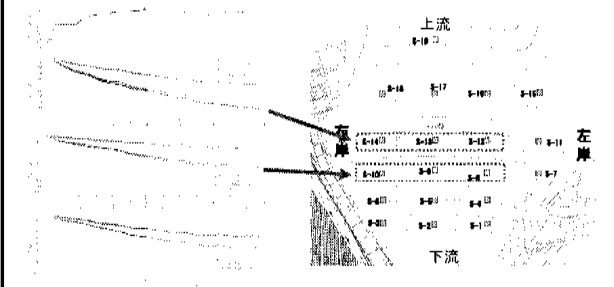
- ・天端測線 : 4箇所
- ・標準(最大)断面 : 3箇所

(2) 基礎岩盤からの抽出項目



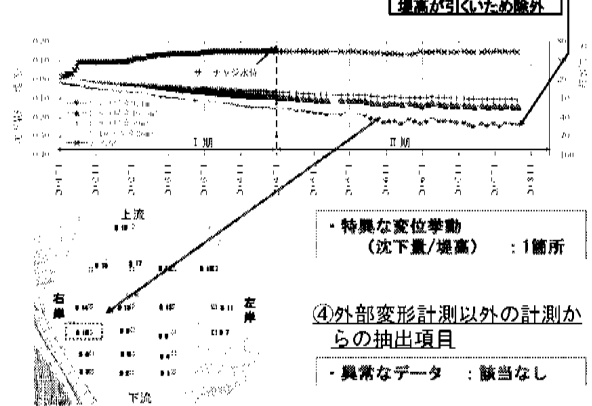
- ・地形急変点 : 該当なし
- ・割部の分布 : 該当なし

(3) 外部変形計測からの抽出項目(その1)



- ・変位収束に時間を要した : 6箇所
- ・一時的な大変位発生箇所 : 該当なし

③外部変形計測からの抽出項目(その2)



- ・特別な変位挙動(沈下量/堤高) : 1箇所

④外部変形計測以外の計測からの抽出項目

- ・異常なデータ : 該当なし

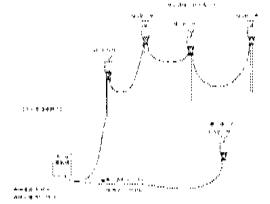
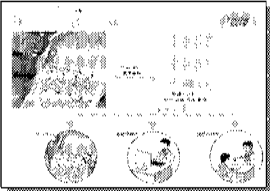
重要測点の抽出結果まとめ（羽地ダム）



- ・外部標的点数 : 19点
- ・重要測点抽出箇所 : 8点
- ・GPS設置済み : 5点
- ・GPS設置予定 : 3点

重要測点抽出項目	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	S-19
1. 天端測線																			
2. 標準(最大)断面																			
3. 地形急変点																			
4. 割部の分布																			
5. 変位収束に時間を要した																			
6. 一時的な大変位発生																			
7. 特別な変位挙動																			
8. 異常なデータ																			

5. GPS自動観測システムの導入

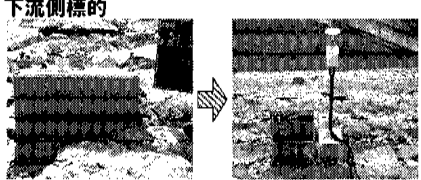
	GPS計測点	5点（天端埋設型4点）
	GPS基準点	1点
	通信集約局	1基
	通信回線	フレッツ/SDN
	測位方法	スタティック測位法（1時間セッション）
	誤差処理	時系列統計解析（トレンドモデル）
	観測精度	＜誤差処理前＞ 水平 ±5mm 鉛直 ±10mm
		＜誤差処理後＞ 水平 ±1mm 鉛直 ±1.5～2mm
	データ配信方法	インターネット配信
	データ更新頻度	1回/月 （地震発生時：1回/時）

5.2 GPS自動観測システムの設置（羽地ダム）

天端標的

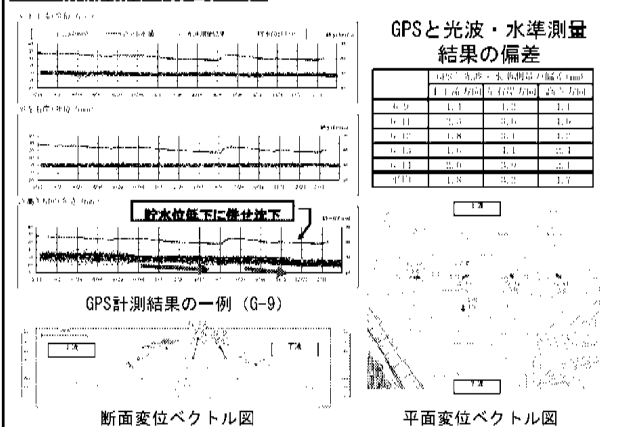


下流側標的

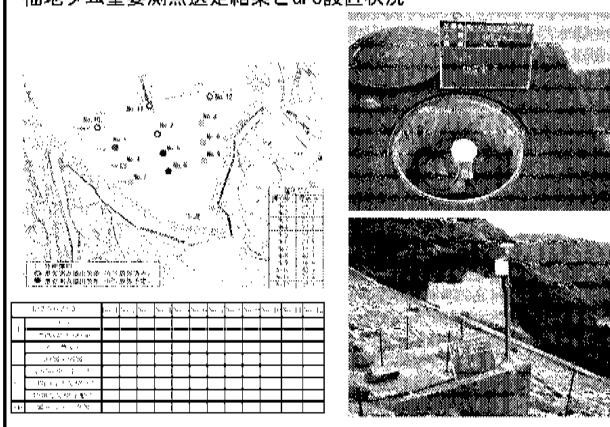


GPS設置前 GPS設置後 設置構造図

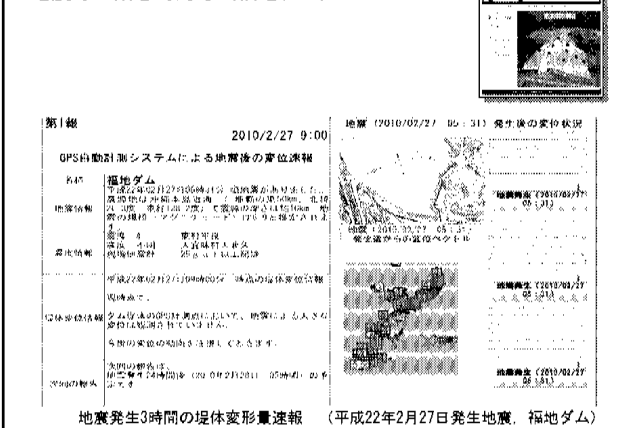
6. GPS計測結果（羽地ダム）



福地ダム重要測点選定結果とGPS設置状況



7. 地震等の緊急時対応（福地ダム）



8. 管理段階のフィルダムでのGPS計測コストの検討

GPS自動計測システムは、

- ①重要測点を様々な尺度から検討して抽出
→堤体挙動計測の「代表性」が担保
- ②2年間のGPS計測の計測結果から
→「精度・信頼性」について十分な成果
- ③連続で高精度な計測により地震等緊急時において迅速な堤体挙動が把握
→「適時性」が確保

GPS自動計測システムを導入することで従来の測量作業の頻度を低減することは妥当（概ね1～3年に1回程度）

管理第Ⅱ期（羽地ダム）から導入 数%程度の計測コスト増減
管理第Ⅲ期（福地ダム）から導入 1.2倍程度の計測コスト増減
（今後GPS自動計測の普及によりコスト低減が期待）

9. まとめ

- ①全国に先駆け管理段階のダム（羽地、福地ダム）にGPS自動計測システムを導入し、システムの安定稼動および光波・水準測量と同等以上の精度であることが確認できた
- ②貯水位の変化に伴う堤体挙動を詳細に把握できた
- ③地震等緊急時において迅速な堤体挙動が把握できた
- ④計測結果をインターネット配信することで複数のダムの計測結果を一括管理できた
- ⑤従来の測量作業の頻度を低減することで管理の高度化と信頼性を両立した合理的な堤体計測が可能
- ⑥管理第Ⅱ期から導入で数％程度の計測コスト縮減
管理第Ⅲ期からの導入では現状1.2倍程度のコスト高

⇒ **管内の他のフィルダム**についても重要測点の抽出ならび**GPS自動計測システムの導入を進め**、複数ダムの合理的な統合管理体制を構築しダム管理の高度化・効率化を図る

5. 開催報告

5. 「ダム安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム」 開催報告

(ダム技術 No.291 2010 年 12 月掲載原稿に加筆)

山口 嘉一

独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム主席研究員

ダム安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム実行委員、共同技術委員長

小堀 俊秀

独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員

ダム安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム技術委員

キーワード：安全管理、計測、臨時点検、総合評価、GPS、長寿命化

1. はじめに

これまでに我が国では、20 世紀以降近代建設技術に基づき建設され竣工した堤高 15m 以上のダムの数は 2400 を超える。ダムは重要構造物であり、常に水を貯留しているため、ひとたび決壊するような事故があれば甚大な被害を引き起こす。このため、建設時には入念な調査・設計を踏まえたうえで高度な技術と細心の注意を払って建設されるとともに、完成後は、巡視時の目視による点検に加えて、変位量、漏水量・揚圧力等の計測を実施し堤体および基礎地盤の安全管理に万全を期す必要がある。

また、近年は、長期に及ぶ供用期間中の確実な安全性の確保と、管理費の縮減を両立させる、これまでにないダムの安全管理の必要性が高まってきている。さらに、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により万が一ダム堤体ないしは基礎地盤が損傷した場合を想定し、堤体および基礎地盤の損傷形態に着目した新しい計測についても関心が高まっている。

このような背景から、ダム堤体および基礎地盤の計測については、これまでに多種に及ぶ計測手法、計測機器が開発されてきたが、最近では GPS のような最新の技術を活用した新しいダムおよび基礎地盤の計測技術も開発され、その安全管理への活用が積極的に行われてきている。このような現状を踏まえて、「ダム安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム」（以下、ダム計測シンポジウム）を、一般社団法人ダム工学会、独立行政法人土木研究所、国立大学法人山口大学の 3 者の共催、財団法人ダム技術センターの協賛で、2010 年 10 月 1 日（金）に、東京都千代田区において開催した。なお、本シンポジウムは、ダム工学会の 20 周年記念事業の一環として位置づけている。本シンポジウムでは、ダムの安全管理や点検のための計測における最新技術に関して、産官学の技術者、研究者が一同に会し最新技術に関する論文発表や質疑応答を通じて、今後の新しい計測機器、システムを用いたダムの安全管理のあり方について討論、技術の交換等を行うことを趣旨とした。

本シンポジウムは、予想を上回る 90 名の参加者を得る盛況であったが、ここではシンポジウムの概要について報告する。

2. シンポジウムの準備

ダム計測シンポジウムでは、開催にあたり、実行委員会と技術委員会を組織した。

実行委員会は、ダム計測シンポジウムの運営に当たった。実行委員会委員名簿を表-1 に示す。

表-1 実行委員会委員名簿

役職	名前	所属
共同実行委員長	本庄正史	ダム工学会副会長、(株)大林組 副社長
共同実行委員長	川崎秀明	国立大学法人 山口大学 教授
実行委員	安部友則	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ長
実行委員	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 上席研究員
実行委員	清水則一	国立大学法人 山口大学 教授
実行委員	池田 隆	ダム工学会企画運営委員会副委員長 財団法人 ダム技術センター 企画部長

*)敬称略。

また、技術委員会は、ダム計測シンポジウムの論文募集、論文収集、書式チェック、論文集印刷を担当した。技術委員会委員名簿を表-2 に示す。

表-2 技術委員会委員名簿

役職	名前	所属
共同技術委員長	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 上席研究員
共同技術委員長	清水則一	国立大学法人 山口大学 教授
技術委員	川崎秀明	国立大学法人 山口大学 教授
技術委員	中島伸一郎	国立大学法人 山口大学 助教
技術委員	宮内茂行	ダム工学会学術研究発表会小委員会委員長 独立行政法人 水資源機構 総合技術センター マネージャー
技術委員	小堀俊秀	独立行政法人 土木研究所 研究員

*)敬称略。

なお、ダム計測シンポジウムの総務関係の運営にあたり、森芳夫氏（ダム工学会学術研究発表会小委員会副委員長、アイドールエンジニアリング株式会社）の協力を得た。

3. プログラム

ダム計測シンポジウムのプログラムを表-3 に示す。午前中は、開会式に引き続き、3つのキーノートレクチャーが行われた。午後は、一般投稿の13編の論文の発表が、3つテクニカルセッションに分けて実施されたあと、閉会式によりシンポジウムが締めくくられた。

表-3 ダム計測シンポジウムのプログラム

09:30 - 09:45	共同実行委員長挨拶 本庄 正史 ダム工学会副会長、(株)大林組 川崎 秀明 山口大学
09:45 - 10:25	キーノートレクチャー1 ダムの経過年数を考慮した安全管理の提案 吉田 等 (財)ダム技術センター
10:25 - 11:05	キーノートレクチャー2 ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題 山口 嘉一 (独)土木研究所
11:05 - 11:45	キーノートレクチャー3 GPS による変位計測技術の変遷と展望 清水 則一 山口大学
11:45 - 12:00	質疑応答
12:00 - 13:00	休憩
13:00 - 14:00	テクニカルセッション① 新しい計測技術① 座長：山口 嘉一 (独)土木研究所
TS-1-1	フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムの開発 岩崎 智治 国際航業(株)
TS-1-2	沼原ダムにおける GPS を用いた堤体挙動測定 喜多 佑介 電源開発(株)
TS-1-3	重力式コンクリートダムの変位計測への GPS の適用 小堀 俊秀 (独)土木研究所
TS-1-4	GPS によるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の取り組み 佐藤 信光 (独)水資源機構
14:00 - 14:15	休憩
14:15 - 15:30	テクニカルセッション② 新しい計測技術② 座長：川崎 秀明 山口大学
TS-2-1	ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証 林田 洋一 (独)農研機構 農村工学研究所
TS-2-2	SAR (合成開口レーダー) によるフィルダム外部変形計測の適用性の検討 佐藤 弘行 (独)土木研究所
TS-2-3	ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートの ひび割れ観察手法の開発と実ダムへの適用 山内 優 (株)東設土木コンサルタント
TS-2-4	既設アンカー緊張力モニタリングシステムの開発 田中 尚 A k i - M o s 研究会・事務局 (日特建設(株)) (田中氏欠席のため、当日は阿部大志(独)土木研究所が代理発表。)
TS-2-5	GPS および振動弦型水圧計によるフィルダム挙動の観測事例 中島 伸一郎 山口大学
15:30 - 15:45	休憩
15:45 - 16:45	テクニカルセッション③ 実ダムでの計測事例 座長：佐藤 信光 (独)水資源機構
TS-3-1	H2O岩手・宮城内陸地震における石淵ダム安全確認(湛水)試験について 大塚 勝章 国土交通省 東北地方整備局 北上川ダム統合管理事務所
TS-3-2	砂礫層を基礎とした忠別ダムの挙動について 西村 義 国土交通省 北海道開発局
TS-3-3	津軽ダムの施工に関する(近接)目屋ダムの挙動計測について 腰山 武治 国土交通省 東北地方整備局 津軽ダム工事事務所
TS-3-4	管理段階のダム(羽地ダム・福地ダム)における GPS 自動計測システムの導入事例 新垣 敏一 内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所
16:45 - 17:00	閉会の挨拶 安部 友則 (独)土木研究所

*)敬称略。

4. 開会式

開会式では、共同実行委員長の本庄正史氏（ダム工学会副会長、（株）大林組）と川崎秀明教授（山口大学）が挨拶を行った。本庄共同実行委員長（写真-1 参照）からは、ダムの安全管理をとりまく現状を概説していただくとともに、ダム計測シンポジウムの開催の意義について紹介いただいた。また、川崎共同実行委員長（写真-2 参照）からは、新しい計測機器の開発の現状を踏まえた、開催の挨拶をいただいた。



写真-1 本庄共同実行委員長の開会の挨拶



写真-2 川崎共同実行委員長の開会の挨拶

5. キーノートレクチャー

ダム技術センターの吉田部長には、「ダムの経過年数を考慮した安全管理の提案」と題してご講演をいただいた（写真-3 参照）。これまで、あまり報告いただく機会の少なかった、ダム完成後長期間経過したダムを対象に行われている総合評価の結果を踏まえたダムの維持管理について紹介いただくとともに、危機管理や劣化監視のための計測などについての建設的なご提案を頂いた。



写真-3 ダム技術センター吉田部長の講演

土木研究所の山口は、「ダムの安全管理における最近の動向と今後の課題」と題して講演を行った（写真-4 参照）。山口は、わが国におけるダムの安全管理の現状（地震直後の臨時点検、総合評価などを含む）や、ダムの安全管理に関する課題とその対策について紹介するとともに、最近の計測機器の概説を行った。



写真-4 土木研究所山口の講演

最後に、最新の計測技術の話題として、山口大学の清水教授より、「GPS による変位計測技術の変遷と展望」と題したご講演をいただいた（写真-5 参照）。近年、ダムの安全管理において GPS による変位計測が積極的に取り入れられてきており、計測技術の根幹技術の開発研究に関わっておられる清水教授の最新の計測技術についての紹介は、今後の GPS のダムの計測への導入を加速してくれるものと思われる。



写真-5 山口大学清水教授の講演

6. テクニカルセッション（一般論文発表）

6.1 概説

現在、ダムでは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有効活用するためには、供用期間の長期間にわたる適切な安全性維持と厳しい財政事情を踏まえた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による損傷形態に着目した計測についても関心が高まっている。このような現状を反映して、本シンポジウムにおいては、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に関する一般論文発表がなされた。

計測機器等に基づく発表論文の分類を表-2 に示す。発表論文のうち、GPS に関する論文は、全体の50%を占めた。しかし、これまでの GPS のダム変位計測への適用は、内部土質遮水壁型ロックフィルダムへの適用が主体であったが、アスファルト表面遮水壁型フィルダムや、重力式コンクリートダム、アースダムへとその適用範囲が拡大していっていることがわかった。また、適用範囲が拡大するに従い、それぞれのダム型式における GPS による変位計測の課題解決のための技術開発も進んでいることもわかった。

GPS 以外の計測技術としては、ワイヤレス間隙水圧計、SAR（合成開口レーダー）によるフィルダム外部変形分布計測、ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートのひび割れ観察手法、など興味深い技術開発の発表があった。特に、SAR など今後の技術進捗に大いに期待できる基礎的な研究も含まれていた。また、ダムの貯水池に関連する安全管理のための計測技術開発として、地すべり等の対策として実施される既設アンカーの緊張力モニタリングシステムの発表があった。

実ダムでの計測事例では、砂礫基礎にコンクリート遮水壁やアスファルト保護工を施工するという特殊基礎処理を行って築堤されたダムの計測や、再開発ダム建設における既設ダムの堤体に対する施工の影響評価のための計測に関する発表があった。このことから、現状のダム建設における基礎地盤条件の厳しさを再開発ダム事業の活性化が促された。

表-2 計測機器等に基づく発表論文の分類（全 13 編）

計測機器等の項目	発表論文番号
GPS	TS-1-1、TS-1-2、TS-1-3、TS-1-4、TS-2-5、TS-3-1、TS-3-4
ワイヤレス計器	TS-2-1
SAR（合成開口レーダー）	TS-2-2
ビデオカメラ （クラック調査）	TS-2-3
既設アンカー緊張力モニタリングシステム	TS-2-4
振動弦計器	TS-2-5
特殊基礎処理ダム （特殊条件の基礎）	TS-3-2
発破、掘削影響評価 （再開発ダム）	TS-3-3

*) TS-2-5 では、2 項目の内容が含まれている。

なお、テクニカルセッションは、主に GPS によるダムの変位計測結果の発表であるテクニカルセッション①「新しい計測技術①」（4 編）、ワイヤレス間隙水圧計や SAR 等の発表を行ったテクニカルセッ

セッション②「新しい計測技術②」(5編)、各ダム現場での安全管理について発表を行ったテクニカルセッション③「実ダムでの計測事例」(4編)と3つに分けて実施した。以下にそれぞれのセッションにおいて発表された論文の概要をまとめておく。

6.1 テクニカルセッション①「新しい計測技術①」

テクニカルセッション①では、GPSによる変位計測手法に関する4つの論文発表が行われた。座長は(独)土木研究所 山口嘉一、進行補助は国際航業(株) 飯島功一郎氏であった(写真-6 参照)。以下にそれぞれの発表論文の概要を示す。なお、概要を示すにあたり、その主語は論文著者としている。



写真-6 座長 山口、進行補助 飯島氏

TS-1-1 フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムの開発

発表者：岩崎智治氏、国際航業(株)(写真-7 参照)

概要：

フィルダムの維持管理において堤体の外部変形計測は非常に重要な計測項目である。しかし、従来は光波測量・水準測量による手動計測が実施されており、計測精度や計測頻度、地震等の緊急時に迅速な対応ができない等の課題が指摘されていた。これらの課題を解決するために、フィルダム堤体計測のための GPS 自動計測システムを開発した。本発表では、GPS をフィルダム堤体の外部変形計測に適用するために行った開発の成果と現場への適用事例について紹介した。

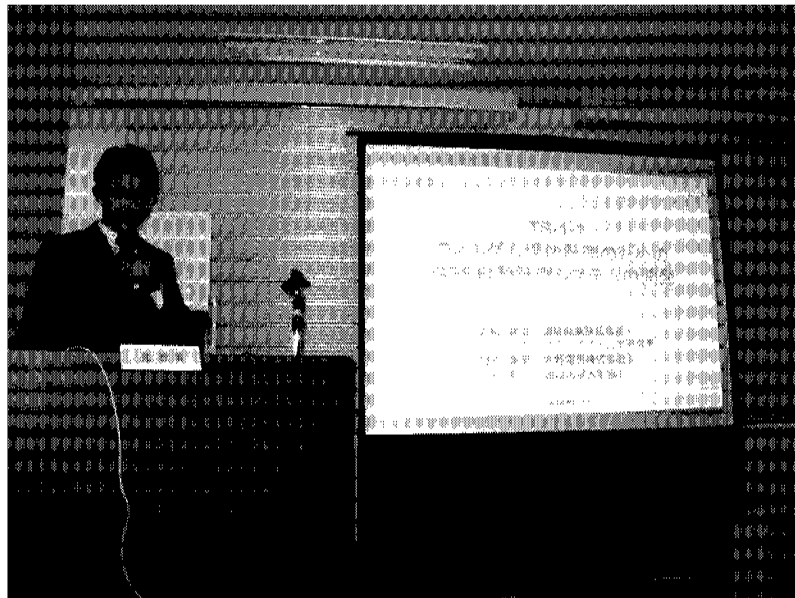


写真-7 岩崎氏の発表

TS-1-2 沼原ダムにおける GPS を用いた堤体挙動測定

発表者：喜多佑介氏、電源開発（株）（写真-8 参照）

概要：

電源開発（株）では、栃木県那須連山に位置する沼原ダムにおいて、平成 19 年 9 月から GPS によるダム変位測定を開始した。従来の視準測量と比較するとともに、降雪地帯における GPS の適用性を検証することを目的とした。測定期間中には、極寒環境故に生じる機器の着氷や装置基礎の凍土などの問題が生じたが、結果として得られた測定データは大変精度が良く、GPS の有効性が確認できた。また、ダムの充排水の際には、連続観測という GPS の特徴によって、従来の視準測量では捉えられなかったダム堤体の詳細な挙動を測定できた。本発表では、上記に示す計測結果ならびに課題解決のための検討結果について報告した。



写真-8 喜多氏の発表

TS-1-3 重力式コンクリートダムの変位計測への GPS の適用

発表者：小堀俊秀、(独) 土木研究所 (写真-9 参照)

概要：

堤高 50m 以上の重力式コンクリートダムは、河川管理施設等構造令により、ダムの変形を計測することが規定されている。現在、重力式コンクリートダムの変位計測は、主にブラムラインで行われている。しかし、古いダムの中にはブラムラインが設置されていないダムもあり、地震後の変位挙動の計測が迅速に行えないなどの課題がある。また、ダムの安全管理に関わる予算が限られる中、効率的な変位計測を行うことが望まれている。本発表では、上記課題の解決策の一つとして、フィルダムの外部変位計測においては既に高い精度を得ることが確認できている GPS を重力式コンクリートダムの変位計測に適用した事例について報告した。



写真-9 小堀の発表

TS-1-4 GPS によるフィルダムの外部変形計測の高度化・合理化の取り組み

発表者：佐藤信光氏、(独) 水資源機構 (写真-10 参照)

概要：

最近、フィルダムではダムの安全管理の高度化・合理化を目的に、GPS を用いた外部変形計測の自動化の取り組みが行われている。本発表では、初期湛水開始からのロックフィルダムの堤体変形ならびにアースダムにおける堤体変形、長期間にわたるフィルダムの堤体変形に対して、GPS 計測結果から外部変形計測への適用性を確認するとともに、貯水位や堤体形状の影響を受けた堤体変形挙動について発表した。さらに、GPS 計測を行う主要計測点について検討し、今後のフィルダムの安全管理に対する高度化・合理化の取り組みの方向性を示した。



写真-10 佐藤氏の発表

6.2 テクニカルセッション②「新しい計測技術②」

テクニカルセッション②では、新しい計測技術として5つの論文発表が行われた。座長は山口大学 川崎秀明教授、進行補助は坂田電機（株）才田誠氏であった（写真-11 参照）。以下にそれぞれの発表論文の概要を示す。



写真-11 座長 川崎教授、進行補助 才田氏

TS-2-1 ワイヤレス間隙水圧計の長期性能の検証

発表者：林田洋一氏、（独）農研機構 農村工学研究所（写真-12 参照）

概要：

農村工学研究所では、フィルダムにおける施工性の向上、計測の安定性の向上を目的に、低周波電磁波を用いたワイヤレス間隙水圧計の開発を行い、2基のロックフィルダムにおいて、その適用性を検証

してきた。これら試験的に設置されたテストモデルは、設置後 5 年半程度経過時にデータ回収不可能な状況に至った。その原因を、電池容量試験および実ダムでの電池電圧データから解明した。本発表では、ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能について検証を行った結果を報告した。



写真-12 林田氏の発表

TS-2-2 SAR（合成開口レーダー）によるフィルダム外部変形計測の適用性の検討

発表者：佐藤弘行氏、（独）土木研究所（写真-13 参照）

概要：

フィルダムの外部変形計測に関する安全管理については、測量による計測の煩雑さや、人件費がかなりの負担となっている場合がある。また、地震時などの非常時における臨時点検においては、被災地での測量作業員の確保が困難であるうえ、非常時に外部変形計測を行うことは作業員に危険がともなう。そのため、常時および地震時において、フィルダムの外部変形挙動を安全にかつ迅速に計測することが望まれている。本発表では、災害観測などに用いられている SAR（Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダー）の観測データを用いて、フィルダムを対象として、SAR による外部変形計測の適用性を検討した結果を報告した。



写真-13 佐藤氏の発表

TS-2-3 ビデオカメラを用いたアーチダム下流面コンクリートの

ひび割れ観察手法の開発と実ダムへの適用

発表者：山内優氏、(株)東設土木コンサルタント（写真-14 参照）

概要：

堤高 100m級の大規模なアーチダムにおいては、キャットウォーク等の目視点検設備からダム下流面に発生したひび割れを全体的に観察するのは困難である。今後、設備の高経年化や地震後のダムの安全性を評価する上で、ひび割れの性状を把握しておくことは有意義なことであると考えられる。本発表では、新たに開発された、高精度なビデオカメラを用いて遠方からダム下流面全体を比較的軽微なひび割れまで正確に観察できるシステムの概要ならびに実ダムへの適用結果について報告した。



写真-14 山内氏の発表

TS-2-4 既設アンカー緊張力モニタリングシステムの開発

発表者：田中尚氏、Ak i-M o s 研究会・事務局（日特建設（株））

（阿部大志氏（（独） 土木研究所）が代理発表。）（写真-15 参照）

概要：

近年、地すべり対策や斜面安定対策に用いられた既設アンカーにおいても予防保全型の維持管理が求められている。発表者らはアンカーの維持管理を高度化するために「既設アンカー緊張力モニタリングシステム」を開発した。本システムは、特別に設計された“荷重計”と荷重計を取付け・交換するための“緊張治具”、そして荷重計の計測値を取得するための“計測データ取得システム”の要素技術からなり、それらを組合せて既設アンカーへの荷重計の取付けと荷重計計測値の取得を行う。本発表では、これらのシステムの概要について紹介した。

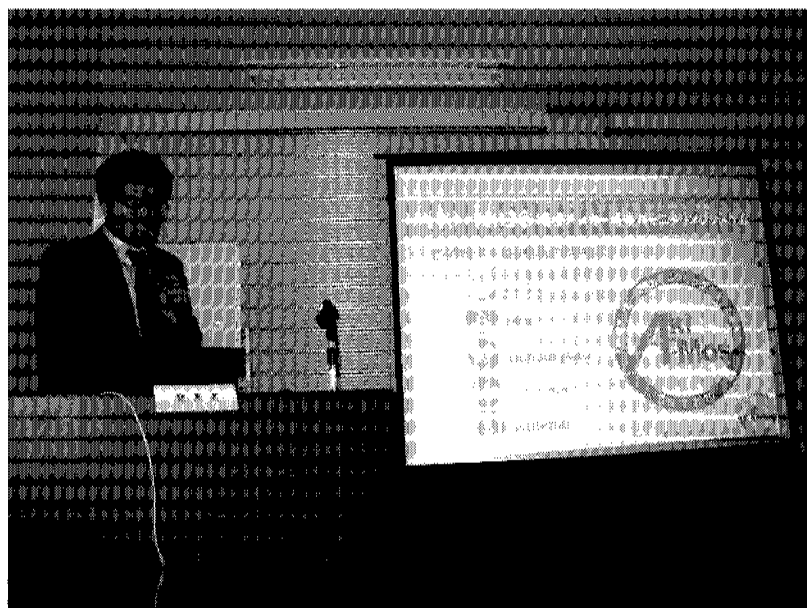


写真-15 阿部氏の発表

TS-2-5 GPS および振動弦型水圧計によるフィルダム挙動の観測事例

発表者：中島伸一郎氏、山口大学（写真-16 参照）

概要：

発表者らは、アースフィルダム（真締川ダム、堤高 21.5m、2009 年完成）の堤体外部変形および間隙水圧を GPS 変位計測システムおよび振動弦型間隙水圧計を用いて計測した。堤高が比較的低く、湛水開始から 3 年間の堤体変位量は最大でも 10mm に満たないが、GPS システムは貯水位の昇降やコアの圧縮に対応した堤体のわずかな変位を感度よく滑らかに捉えている。振動弦型間隙水圧計は、基礎岩盤およびコア内に計 19 基設置したが、埋設後 4 年半経った現在においても破損はなく信号異常も見られない。また、水圧計測値は定量的にも貯水位とその変化に整合した値を示している。本発表ではこれらの計測結果について報告を行った。

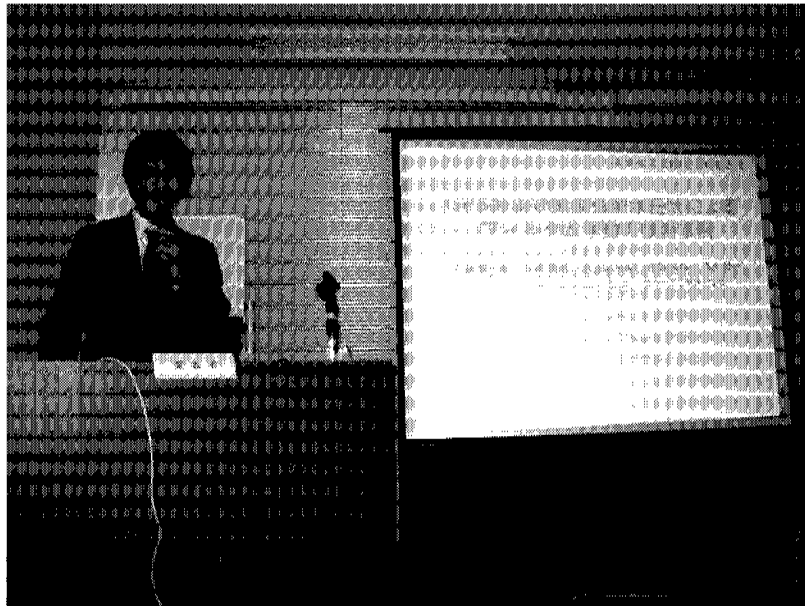


写真-16 中島氏の発表

6.3 テクニカルセッション③「実ダムでの計測事例」

テクニカルセッション③では、実ダムにおける安全管理の事例として、4つの論文発表が行われた。座長は（独）水資源機構 佐藤信光氏、進行補助は（独）土木研究所 大館渉氏であった（写真-17 参照）。以下にそれぞれの発表論文の概要を示す。



写真-17 座長 佐藤氏、進行補助 大館氏

TS-3-1 H20 岩手・宮城内陸地震における石淵ダム安全確認（湛水）試験について

発表者：大塚勝章氏、国土交通省 東北地方整備局 北上川ダム統合管理事務所（写真-18 参照）

概要：

2008年6月14日（土）午前8:43発生 of H20 岩手・宮城内陸地震（M7.2）は、東北地方中央部を襲い、岩手県奥州市と宮城県栗原市の両市において気象庁震度6強が観測された。震源に近い国土交通省

東北地方整備局の石淵ダム（コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム）では、堤体天端や高標高部のロック材料の張り出しが認められたが上流側の遮水壁は目立った損傷は見あたらず、漏水量は地震後に一時急増したが既往最大漏水量（試験湛水以降）以下であった。本発表では、石淵ダムの被災直後から安全確認（湛水）試験の結果について報告した。



写真-18 大塚氏の発表

TS-3-2 砂礫層を基礎とした忠別ダムの挙動について

発表者：西村義氏、国土交通省 北海道開発局（写真-19 参照）

忠別ダムは、複合ダムとしては日本最大級の規模であり、砂礫層を基礎としたフィルダム部には、アスファルト混合物によるコア敷保護工や連続地中壁による特殊な基礎処理工を実施している。本発表では、河川管理施設等構造令で規定されている項目に加え、特殊基礎処理工部に設置した計測機器についての結果を整理し、忠別ダムの挙動の現状について報告した。



写真-19 西村氏の発表

TS-3-3 津軽ダムの施工に関する（近接）目屋ダムの挙動計測について

発表者：腰山武治氏、国土交通省 東北地方整備局 津軽ダム工事事務所（写真-20 参照）

概要：

津軽ダムは既設目屋ダムの再開発ダムで、目屋ダムの直下流（ダム軸間隔 60m）に建設するダムであり、平成 20 年から本体工事に着工した。津軽ダム本体工事の発破・掘削等により目屋ダムの安全性への影響が懸念されるため、目屋ダムの保全措置として、計測システムを設置し、挙動監視しながら施工を実施している。本発表では、目屋ダムの計測システムの概要を報告するとともに、現地で行った発破試験や施工管理等についても報告した。



写真-20 腰山氏の発表

TS-3-4 管理段階のダム（羽地ダム・福地ダム）における GPS 自動計測システムの導入事例

発表者：新垣敏一氏、内閣府沖縄総合事務局 北部ダム統合管理事務所（写真-21 参照）

概要：

ダム管理においては、全国的に管理ダム数が増加し維持管理コストの縮減が求められる一方、近年多発する大地震や異常気象に対する安全管理の高度化が求められている。発表者らは、こうした社会的要請に対して、管理段階のフィルダムの堤体外部変形計測に GPS 自動観測システムを先駆的に導入し、ダム管理の合理化・高度化とともに地震等災害時の安全・安心の確保に取り組んでいる。

本発表では、管理段階における 2 箇所のフィルダム（福地ダム・羽地ダム）での GPS 設置位置の選定方法や導入した GPS 自動計測システムの構成、計測結果について報告した。



写真-21 新垣氏の発表

7. 閉会式

閉会式では、実行委員の安部友則氏が閉会の挨拶を行った（写真-22 参照）。安部実行委員からは、まず、ダム計測シンポジウムの開催について、ダム工学会、山口大学と土木研究所の3者が共催で実施した初めての試みである旨の説明が行われた。また、キーノートレクチャーやテクニカルセッションを踏まえ、ダムの安全管理については、多くの検討課題、つまり今後のやるべき仕事が残されていること、計測技術については、今後のダムの変位計測方法の発展に大いに期待が持てること、今後は、本シンポジウムのような集まりを定期的を開催することによって、管理に携わる技術者・研究者の意識の向上につながることであれば幸いであることなどが述べられた。

最後に、発表者、質問者、聴講者の方々の拍手をもって、本シンポジウムを閉会した。



写真-22 安部実行委員の閉会の挨拶

8. おわりに

我が国においては、他の公共構造物と同様、ダムにおいても管理の時代に入り、安全管理の重要性が益々高まってきている背景を反映したためか、ダム計測シンポジウムには当初予定の定員 75 名を大幅に上回る聴講の申し込みを頂いた。実際には、開催当日に 90 名の参加者を得た。聴講申し込み開始後短期間で当初予定の定員 75 名に達してしまい、追加で椅子のみの座席数を増やす等の対応を行ったが、それ以降も多く聴講申し込みがあり、聴講募集を途中で取り止める事態となってしまった。また、狭い会場に席を詰め込んだため、聴講して頂いた方々が大変窮屈な思い(写真-23 参照)をさせてしまい、主催者として大変心苦しく感じた。

キーノートレクチャーでは、講演者の一人である、ダム技術センターの吉田等部長の「管理における計測技術はダム分野における成長分野である」という言葉が参加者の方々に強い印象を与えたのではないかと感じた。公共事業費が削減され、特にダムの維持管理費用が縮減される中、ダムの安全管理には管理手法、コスト等に多くの課題を抱えていること、つまり今後のやるべき仕事が多く残されていることが示唆されている。

また、テクニカルセッションでは、新しい計測技術の紹介、導人事例の発表が多く見受けられたが、今後これらの計測を継続して行い、その検討の成果を是非発表していただきたいと考えている。また、他にも同種の研究開発、現場適用事例が多く存在すると考える。このような状況を考えると、できるだけ早い時期に第 2 回のシンポジウムを開催したいと、今回のシンポジウムの開催に加わったものとして強く感じた次第である。

最後に、本シンポジウム開催にご尽力頂いた方々に、ここに記して感謝の意を表したい。



写真-23 会場の状況

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4185 December 2010

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305 8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754