ISSN 0386 - 5878 土木研究所資料 第 4330 号

土木研究所資料

常時微動計測等を用いた 重力式コンクリートダムの 振動特性の調査・分析

平成28年3月

国 立 研 究 開 発 法 人 土 木 研 究 所 水工研究グループ水工構造物チーム

Copyright © (2016) 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、国立研究開発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、国 立研究開発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。

※本書のカラー版は付属の CD に収録されています。

ISSN 0386 - 5878 土木研究所資料 第 4330 号

常時微動計測等を用いた

重力式コンクリートダムの振動特性の調査・分析

水工研究グループ

上	厚		研		究		員	1	夏	村	康	史
総	括	主	任	石	开	究	員	2	金	銅	将	史
研			究				員)	1	堀	俊	秀
((現)	元 地質4) 研究監	上斥	席	研	究	員	ļ	Ц	П	嘉	
(前)	上质	甫	研	究	員					
(現) 国土 河川 室長	交通省 部大規	国土技 模河川	術政 構造	策総合 物研究	合研究 究室	所	1	左	々オ	7	隆
((現)	元 (株)) ドー	交 え コン	巟	研	究	員	-	大	舘		渉
((現)	元日本) 工営(オ	交 ?	巟	研	究	員)	ЪП	嶋	武	志
((現)	元 (株)) 建設:	交 <i>注</i> 技術研	充 究所	研	究	員	-	£	田	将	己
	上総研((((()(()))))))))))))))))))))))))))))	上総研(現(現)(現)(現)(現) 括元地前国河室元(元日元)(税)	上 席 総 括 主 研 元) (現) 地質) (現) 町川二部) (現) 10) (現) (二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二二	上 席 研 総 括 主 任 研 完 代 (一元) 上 月 (現) 地質研究監 日 (現) 地質研究監 日 (現) 国土交通省国土技 河川部大規模河川 室長 一元) 交 (現) (株) ドーコン (現) 日本工営(株) (代) (現) (株) 建設技術研	上 席 研 総 括 主 任 4 研 究 ((研 穴 次 ((元) 上 席 (前) 上 席 (前) 上 席 (前) 上 席 (前) 上 席 (前) 上 席 (前) 上 席 (元) 交 流 (元) 交 流 (元) 交 流 (元) 交 流 (元) 交 流 (元) 交 流	上 席 研 究 総 括 主 任 研 研 究 第 第 研 元 上 席 研 (現) 地質研究監 日本 市 研 (現) 上 席 研 研 (現) 国土交通省国土技術政策総領 河川部大規模河川構造物研 室長 (元) 交 流 研 (現) (株) ドーコン ((現) 日本工営(株) (元) 交 (現) (株) 建設技術研究所 (現 (株)	上 席 研 究 総 括 主 任 研 究 研 究 (一元) 上 席 研 究 (1) 地質研究監 (1) 地質研究監	上 席 研 究 員 総 括 主 任 研 究 員 研 究 員 (一元) 上 席 研 究 員 (現) 地質研究監 (1) 日本 (1) (1) (現) 地質研究監 (1) (1) (1) (1) (現) 生交通省国土技術政策総合研究所 (1) (1) (1) (1) (現) 国土交通省国土土技術政策総合研究所 (1) (1) (1) (1) (現) 国土交通省国土土技術政策総合研究所 (1) (1) (1) (1) (現) (株) ドーコン (1) (1) (1) (1) (現) (株) ドーコン (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	上 席 研 究 員 精 総 括 主 任 研 究 員 4 研 究 員 グ 6 7 (一元) 上 席 研 究 員 7 (現) 地質研究監 (1) 上 席 研 究 6 (現) 地質研究監 (1) 上 席 研 究 6 (現) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川部大規模河川構造物研究室 5 6 7 (現) (株) ドーコン 7 7 7 (現) (株) ドーコン 7 7 7 (現) 日本工営(株) (1) 7 7 7 (現) (株) 建設技術研究所 7 7	上 席 研 究 員 榎 総 括 主 任 研 究 員 小 研 究 員 小 (一元) 上 席 研 究 員 山 (現) 地質研究監 山 山 (現) 生 席 研 究 員 山 (現) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川部大規模河川構造物研究室 室長 佐 広 次 流 研 (現) 国土交通省国土大規模河川構造物研究室 室 室長 大 人 大 人 大 (現) (株) ドーコン 大 人 大 人 (現) 日本工営(株) (一、 交 流 研 (現) (株) 建設技術研究所 土 土	上 席 研 究 員 榎村 総 括 主 任 研 究 員 金 銅 研 究 員 小 堀 (一元) 上 席 研 究 員 山 口 (現) 地質研究監 山 口 山 口 (現) 地質研究監 山 口 口 (現) 生 席 研 究 員 山 (現) 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川部大規模河川構造物研究室 佐々オ て (現) (株) ドーコン 大 舘 (現) (株) ドーコン 大 舘 (現) 日本工営(株) 小嶋 1 (現) (株) 建設技術研究所 土田	上席研究員榎村康総括主任研究員金銅研究員小小堀俊(一元)上席研究日日声(現)地質研究監山口嘉(現)上席研究日日(現)国土交通省国土技術政策総合研究所 河川部大規模河川構造物研究室 室長佐々木た本(現)(株)ドーコン大舘大舘(現)(株)ドーコン大舘加晶武(現)日本工営(株)(代)交流研究員土田将(現)(株)建設技術研究所土田将土日将

要 旨:

長期供用されるダム堤体の経年的な状態の変化を継続的に監視したり,大規模地震後に地 震動によるダム堤体への影響を迅速に把握したりするため,長期にわたり継続的に適用可能 で客観的かつ効率的な健全度診断手法の開発が望まれている。本資料は,重力式コンクリー トダムを対象に,ダム堤体での常時微動計測や地震動観測記録の解析から得られる振動特性 に着目し,その変化からダム堤体の健全度診断を行う上で必要となる固有振動数の基本特性 や影響要因を明らかにするために行った実ダムでの計測データおよびその分析結果をとり まとめたものである。

キーワード:重力式コンクリートダム,健全度診断,振動特性,常時微動,固有振動数

目 次

1.	はじめに	1
2.	重力式コンクリートダムの基本的な振動特性	3
3.	ダム堤体の固有振動数の推定(同定)方法	5
	3.1 常時微動計測による方法	5
	3.2 地震動観測記録の分析による方法	10
4.	計測・分析事例	11
	4.1 Aダム	12
	4.2 Bダム	19
	4.3 Cダム	24
	4.4 Dダム	28
	4.5 Eダム	32
5.	考察	
	5.1 概要	35
	5.2 貯水位及び温度変化がダム堤体の固有振動数に及ぼす影響と	
	その定量化方法	36
	5.3 ダム堤体の健全度低下が固有振動数に及ぼす影響	
	(数値解析による試算)	59
6.	まとめ	65
参え	今文献	67
付釒	录 常時微動計測記録	
	付録-1 A ダム	付-1
	付録-2 Bダム	付-7

付録-3	Cダム	付-12
付録-4	Dダム	付-16
付録-5	Eダム	付-19

1. はじめに

コンクリートダム堤体の健全度診断では、日常または定期的な巡視での目視点検記録や漏水量 や変位などの計測データといった安全管理記録の分析が基本となるが、近年、定期検査¹⁾やダム 総合点検²⁾を契機として、必要に応じてシュミットハンマー、赤外線、超音波を用いた各種の非 破壊による堤体表面からの調査や、ボーリングやつぼ掘りなどコンクリート内部の状況を直接確 認する調査などが行われる事例が増えている。今後、供用開始後長期間経過する管理ダムの数が さらに増加することを考えると、より多くのダムを対象に継続的・定期的かつ今まで以上に効率 的に健全度診断を行っていくことが求められる。

また,平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では,東北地方を中心に300以上のダムで臨時点検が実施された³⁾が,このように強い揺れが広範囲に及ぶような大規模地震時には, 多数のダムへの影響をできるだけ早期にかつ定量的に把握することも重要となる。

このようなことから、ダム堤体の経年的な状態の変化を継続的に監視したり、大規模地震後に おいて地震動によるダム堤体への影響を迅速に把握したりする上で、各種の詳細な調査の必要性 を判断できるような一次スクリーニング手法として、有効な健全度診断手法の開発が必要と考え られる。

本資料は、このような診断手法の一つとして、常時微動計測や地震動観測記録の解析により得 られたるダム堤体の固有振動数に着目し、その変化から経年や大規模地震による影響を定量的に 評価する手法についての基礎的検討として、重力式コンクリートダムを対象に、貯水位や温度変 化によるダム堤体の固有振動数への影響を中心に実ダムでの計測データとその分析結果をとり まとめ、あわせてダム堤体の健全度診断の適用に向けた考察を加えたものである。

1

2. 重力式コンクリートダムの基本的な振動特性

弾性論に基づけば,重力式コンクリートダムの堤体内応力分布は三角形断面無限梁としての理 論解により精度よく近似できるとされ⁴⁾,同型式ダムの基本断面設計ではいわゆる梁理論による 2次元弾性設計が適用される。三角形断面梁の1次固有振動数*f*₁は,中立軸に対称な断面の梁の 場合には,振動方程式の解として次式で与えられる。

$$f_1 = \frac{s}{1.183H} \sqrt{\frac{E}{12\rho}}$$
(2-1)

ここに,

H:固定端からの梁の長さ

s=*B*/*H*(*B*:固定端での梁の幅)

E: 弹性係数

 ρ :密度

重力式コンクリートダム堤体の横断面形状は実際には中立軸に対称ではないが,式(2-1)は s(ダ ム堤体の上下流面勾配に対応)及び ρ(同コンクリートの単位体積質量に対応)が同一ならば,三角 形断面梁の1次固有振動数が H と E により決定されるという基本特性を示している。

一方,地震観測記録に基づく重力式コンクリートダムの1次固有周期 T₁の経験式として,松本ら⁵による次式がある。

$$T_1 \left(=1/f_1\right) = \frac{0.18}{100} H \pm 0.05 \tag{2-2}$$

また,最近観測された地震動記録も加えた経験式として,日本大ダム会議⁶により次式が提案 されている。

$$T_1 \left(=1/f_1\right) = \frac{0.191}{100} H \pm 0.029$$
(2-3)

式(2-2),(2-3)は、いずれもダム堤体の固有周期が堤高 Hにほぼ比例する関係にあることを示し ており、この関係は式(2-1)で E, ρ 及び s を一定と見なしたときの関係に対応している。しかし、 実際には地震時に生じる堤体の振動は、貯水の付加質量効果を反映したものになると考えられる。 その効果の大きさは貯水位によって相違すると考えられるが、これらの経験式ではその影響まで は考慮されていない。また、コンクリートダムでは、毎年春先に堤体内の横継目に設けられた継 目排水孔からの漏水が増加する事例があるが、これは年間の外気温などの温度変化やそれに伴う コンクリート温度の変化に伴う堤体内の横継目の開閉が生じるためと考えられる。このような挙 動によってもダム堤体の構造体としての剛性が変化し、固有振動数が変化する可能性がある。

ダム堤体の固有振動数を指標として,堤体の健全度診断に活用するには,経年による劣化や大 規模地震による損傷の固有振動数への影響を検出する必要があるが,そのためには上記のような 影響についても考慮し,定量的に分離する必要がある。

3. ダム堤体の固有振動数の推定(同定)方法

本研究では、重力式コンクリートダム堤体の振動特性の指標である固有振動数を常時微動計測 及び地震動観測記録の分析により推定(同定)した。

3.1 常時微動計測による方法

常時微動とは,構造物や地盤中を伝播する種々の振動のうち,特定の振動源の影響を受けない 状態で,さまざまな振動によって発生する微小な振動である。この常時微動を測定することによ り,構造物や地盤の振動特性を知ることができる。

本研究では、ダム堤体の振動特性のうち、固有振動数とその変化を調べる目的で複数の重力式 コンクリートダムにおいて常時微動計測を行った。この計測では、図-3.1 に示す高精度サーボ加 速度計及びバッテリーが内蔵されたポータブル型計測装置を使用した。同装置は、3 成分(鉛直 1 成分、水平2 成分)の振動が計測可能なサーボ型加速度計であり、表-3.1 に示す仕様のものである。 このようなポータブル型計測装置を利用した常時微動計測は、任意の日時および箇所で計測が可 能なことや、多数箇所での計測を効率的に行うことができるメリットがある。



図-3.1 ポータブル型常時微動計測装置の例(本研究で使用したもの)

センサー型式	サーボ型加速度計
分解能	1µG
測定レンジ	±4G
サンプリング周波数	500 • 250 • 100 • 50 • 20Hz
データ記録容量	最大 連続 15 時間
寸法	220mm(W)×245mm(D)×250mm(H)
重量	約 7.5kg

表-3.1 機器仕様(本研究で使用したもの)

本研究において実施した重力式コンクリートダムでの常時微動計測とその結果に基づく固有振動 数推定(同定)までの流れを図-3.2 に示す。以下にこの手順の詳細を示す。



図-3.2 常時微動計測と解析の流れ

常時微動計測箇所の選定

常時微動計測箇所の選定例を図-3.3 に示す。本研究での各計測事例では,鉛直アレイを構成す るよう同一ブロックの堤体上部(ダム天端または天端に近い上段監査廊内)と基礎岩盤に近い基礎 監査廊の同時計測を行った。なお,計測は,重力式コンクリートダムでの主要な振動である上下 流方向を最も捉えやすいと考えられる最大断面付近で,かつ地震観測記録との対比のため,地震 計が設置されているブロックにおいて行うことを基本とした。

常時微動計測の実施状況の一例を図-3.4~図-3.6 に示す。図-3.4 は,監査廊内での計測状況であ るが,常時微動計測装置の奥に見えるのはダムに設置されている地震計である。常時微動計測は, 地震動観測結果との比較を行えるよう,基本的に1箇所は地震計が設置されているブロックで計 測を行うこととした。図-3.5 はダム天端における計測状況である。天端での計測時に風が吹いて いる場合は,計測装置自体が風の影響を受ける恐れがあるため図-3.6 に示すようにカバーを設置 し計測を行った。



図-3.3 計測箇所の選定例



図-3.4 基礎監査廊内での計測状況



図-3.5 ダム天端での計測状況



図-3.6 強風時のダム天端での計測状況(カバー設置)

②常時微動計測の実施

常時微動の計測は,計測装置2台を用いて基礎部と天端付近の2箇所で同時に行った。計測時間は,天端付近と基礎監査廊付近ともに静穏な同一時間帯の計測結果を得るために必要な時間として1ブロックあたり30~40分程度とした。

常時微動計測のサンプリング周波数は、250Hz とした。これは、既往の地震観測記録の分析事例 ⁵⁾より重力式コンクリートダムの主要な固有振動数である最低次の固有振動数(1 次固有振動数)は 4~20Hz 程度と考えられることから、これらの固有振動数が十分捉えられるよう、その 10 倍程度以上の周波数とした。

③解析用時刻歷波形の抽出

常時微動計測により得られた加速度時刻歴波形データを,計測箇所,計測成分(ダム上下流方向, ダム軸方向,鉛直方向)ごとに出力し,計測中の各種影響要因(強風,交通作業(工事)振動等)によ ると思われるノイズを含まない安定した波形が得られている時間帯を解析対象時間帯として抽 出した。解析対象時間帯は,120秒程度を基本とした。

④フーリエスペクトルおよび伝達関数の算出,⑤固有振動数の推定

抽出した解析対象時間帯毎に各計測箇所でのフーリエスペクトル(ダム上下流方向,ダム軸方向, 鉛直方向の3成分)を高速フーリエ変換によって求め,このうち,同一ブロックでの天端付近での 計測データと基礎監査廊でのフーリエスペクトルから,各方向成分の伝達関数(フーリエスペクト ル比)を次式により求めた。

$$Z(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} A_1(t) e^{-i\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} A_0(t) e^{-i\omega t} dt}$$
(3-1)

ここに,

Z(ω): 伝達関数

ω:振動数,

A1(t):上部の加速度時刻歴

A₀(t):基礎部の加速度時刻歴

上式の右辺の分母が基礎部,分子が堤体上部の常時微動の各フーリエスペクトルに相当する。 このようにして各ブロックで得られた3成分の伝達関数のピーク周波数よりダム堤体の固有振 動数を推定(同定)した。なお,重力式コンクリートダムでの最も主要な固有振動数(1次固有振動 数)は上下流方向の伝達関数における最少のピーク振動数として推定(同定)した。また,伝達関数 の算出にあたってはピーク周波数を特定しやすくするため,平滑化処理を行った。この処理には パルザン窓関数(ウィンドウ幅 0.5Hz)を用いた。

3.2 地震動観測記録の分析による方法

ダム堤体の固有振動数は,我が国の多くのダム堤体に設置されている地震計で得られた地震動 の加速度時刻歴波形を用いても推定(同定)することができる。その手順は,堤体の基礎部と上部 の2箇所に設置された地震計で得られた地震動の加速度時刻歴波形から各々のフーリエスペクト ルを求め,その比として式(3-1)より得られる伝達関数のピーク振動数から固有振動数を推定(同 定)するもので,用いる加速度データの取得方法が異なるほかは基本的に常時微動計測の場合と同 じである。

ただし,地震動観測記録から得られる固有振動数は,常時微動計測の場合と異なり,地震動観 測時かつ地震計設置位置(ブロック)でのものに限定される。また,極めて強い地震動の場合,ダ ムの振動特性に何らかの影響を与える可能性もある。しかしながら,地震動観測記録は同一箇所 (ダム)での経時的な振動特性(固有振動数)の変化など過去の観測記録との比較による分析を行い たい場合には有効なデータとなる。このため,常時微動計測により得られたダム堤体の固有振動 数の分析においては,一部地震動観測記録の解析から得られた固有振動数を対象に加えた分析も 行った。

4. 計測・分析事例

本研究では、5つの重力式コンクリートダムを対象に常時微動計測と分析および、一部のダム では地震動観測記録の分析を併せて行った。各ダムの諸元を表-4.1に示す。

	Aダム	Bダム	Cダム	Dダム	Eダム
堤高(m)	119.0	33.7.0	65.0	42.0	110.6
堤頂長(m)	320.0	140.0	174.0	138.0	390.0
堤体積(m ³)	1,060,000	40,000	195,000	80,000	940,000
竣工年	2012	1966	1997	1975	2014
備老	試験湛水期間				試験湛水期間
加石	を含めた計測				内に計測

表-4.1 調査対象ダムの諸元

4.1 Aダム

貯水位変動によって生じる付加質量効果の相違がダムの固有振動数に及ぼす影響を調べるこ とを主な目的として、大幅な貯水位変化が生じる試験湛水中のAダムにおいて、表-4.2 に示すよ うに計 21 回の常時微動計測を実施した。Aダムの主要計測位置は、図-4.1 に示すとおり、ダム中 央付近(最大断面ブロック(BL.11))の上段監査廊と基礎監査廊であり、基礎岩盤からの高さは、上 段監査廊底面が 102.0m、基礎監査廊底面が 7m である。なお、上記箇所での計測にあわせて、比 較のため複数の異なる断面(ブロック)でも計測を行った(付録-1 参照)。

日付	貯水位 (EL.m)	外気温* (℃)
2011/11/28	571.0	4.7
2012/2/10	627.0	-3.2
2012/3/2	631.5	0.6
2012/3/16	639.1	1.1
2012/4/11	652.8	9.1
2012/5/1	664.8	14.9
2012/6/15	680.7	16.2
2012/6/20	684.0 (S.W.L)	20.8
2012/9/7	667.1	20.0
2012/10/31	634.7	6.6
2012/11/14	620.2	5.7
2012/11/29	613.0 (L.W.L)	2.2
2013/1/29	621.8	-1.2
2013/2/13	624.5	0.0
2013/3/18	634.0	10.2
2013/4/4	644.3	10.4
2013/7/18	659.6	20.8
2013/9/27	667.2	13.8
2013/12/18	681.4	-0.1
2014/1/14	682.6	-4.3
2014/2/5	683.3	-7.7

表-4.2 常時微動計測時の貯水位・外気温(A ダム)

※2012/5/1 以前の気温は最寄りの気象観測地点の日平均気温, 以降 ダム地点日平均気温。



図-4.1 常時微動計測位置(A ダム)

A ダム(最大断面ブロック(BL.11))において実施した計 21 回の常時計測結果をもとに 3.1 に示した方法で得られた伝達関数のうち,重力式コンクリートダムで卓越すると考えられる上下流方向振動成分によるものを図-4.2 に示す。また,同図より求めた 1 次固有振動数を表-4.3 に示す。



図-4.2 常時微動計測から求めた伝達関数(最大断面(BL.11), 上下流方向振動)(A ダム BL.11)

日付	貯水位 (EL.m)	1 次固有振動数 (Hz)
2011/11/28	571.0	3.73
2012/2/10	627.0	3.87
2012/3/2	631.5	4.06
2012/3/16	639.1	3.66
2012/4/11	652.8	3.50
2012/5/1	664.8	3.81
2012/6/15	680.7	3.48
2012/6/20	684.0 (S.W.L)	3.11
2012/9/7	667.1	3.67
2012/10/31	634.7	4.14
2012/11/14	620.2	4.29
2012/11/29	613.0 (L.W.L)	4.29
2013/1/29	621.8	4.14
2013/2/13	624.5	3.78
2013/3/18	634.0	3.78
2013/4/4	644.3	4.03
2013/7/18	659.6	3.55
2013/9/27	667.2	4.16
2013/12/18	681.4	3.68
2014/1/14	682.6	3.46
2014/2/5	683.3	3.28

表-4.3 常時微動計測から求めた1次固有振動数(A ダム BL.11)

図-4.2 より推定したダム堤体の 1 次固有振動数(上下流方向)と計測時の貯水位の関係を図-4.3 に示す。図中には、A ダムの最大断面ブロック(BL.11)と同一断面形状の 2 次元有限要素モデルでの固有値解析による 1 次固有振動数の推定値(A ダム内部コンクリート施工時の品質管理値(材齢 91 日圧縮強度)からコンクリート標準示方書 ⁷⁾の関係式を用いて求めた弾性係数を仮定した場合の結果)も示している。計測で得られた固有振動数にはばらつきがみられるものの、貯水位が上昇すると 1 次固有振動数が次第に減少する傾向は、固有値解析結果の傾向と共通している。

なお、計測による推定値には貯水位変動以外の要因として外気温の違いによる影響も含まれて いる可能性がある。そこで、計測により推定した1次固有振動数と外気温の関係を図-4.4 に示す。 一般に外気温が下がると堤体コンクリートが収縮し、横継目が開くことなどにより堤体の剛性が 低下して、固有振動数は減少する可能性が高いと考えられるが、同図からはその傾向は確認でき ない。この理由としては、試験湛水中のダムであり、外気温変化による影響に比べ貯水位が空虚 から最高水位付近まで大幅に変化していることの影響の方が支配的であることや計測値のばら つきが大きいことなどが考えられ、外気温変化による影響を明らかにするためには、重回帰分析 などにより詳細な検討が必要であると考えられる。



図-4.3 貯水深と1次固有振動数の関係(A ダム BL.11)



図-4.4 常時微動計測により推定した1次固有振動数と外気温の関係(Aダム BL.11)

なお、A ダムでは、ダム堤体の振動特性(特に固有振動数)に与える各種要因の影響をより詳細 に把握するために表-4.2 および表-4.3 に示した常時微動計測(以下、「個別計測」)とは別に 2013 年 2 月よりダム堤体内の最大断面ブロック(BL.11)の基礎部と上部において常時微動の 24 時間連続 計測(以下、「連続計測」)を実施している。計測位置は図-4.1 に示す通常の計測位置と同じである。 サンプリング周波数はデータ容量の関係から 100Hz とした。

連続計測よりこれまでに得られたダム堤体の1次固有振動数の変化を図-4.5に示す。同図には, 表-4.1 に示した個別計測の結果及び常時微動計測位置と同一ブロックに設置された地震計で観測 された地震動記録の分析から求めた1次固有振動数も示しているが,各々の計測や観測から得ら れた1次固有振動数は概ね整合していることがわかる。

ただし、図-4.5 を詳しく見ると、一部前述の期間と比べて固有振動数のばらつきが小さく、か つやや高周波側となる期間が見られる。この点について、同図に示す貯水位や外気温の変化との 関係で説明することは難しい。そこで、これら以外の要因にダム堤体の振動特性に影響を及ぼす 可能性がある要因を挙げると、その1つにダムの放流にともなう振動が考えられる。そこで、ダ ムの各放流設備からの放流量の変化(図-4.6)に着目すると、A ダムに2つある利水放流ゲートのう ち、放流能力の大きい方のゲート(利水用放流ゲート(大))からの放流期間中に限って上記のような 傾向が見られることがわかった。この原因として、ダム堤体の固有振動が当該ゲートからの放流 を主な振動源として励起されやすくなることが考えられる。このように常時微動計測から固有振 動数を推定する際には、放流振動による影響にも留意する必要があると考えられる。

連続計測により得られたダム堤体の1次固有振動数(上下流方向)と計測時の貯水深の関係を図-4.7 に示す。図中には、図-4.3 と同様に個別計測の結果と2次元有限要素モデルによる固有値解析 から得られた1次固有振動数の推定結果に加え、BL.11の常時微動計測位置に設置してある地震 計での地震動観測記録より求めた1次固有振動数も示している。連続計測や地震計により得られ た1次固有振動数は、個別計測と同様に、ばらつきがみられるものの、貯水位が上昇すると次第 に減少する傾向が認められる。





図-4.7 貯水深と1次固有振動数の関係(A ダム BL.11)

4.2 Bダム

堤体コンクリートは、外気温や貯水温の変化により体積変化を生じると考えられる。このため、 堤体継目部の僅かな開閉などの挙動によって、常時微動として計測される堤体の固有振動数に影 響を及ぼす可能性がある。そこで、貯水位とともに温度変化がダムの固有振動数に及ぼす影響を 調べることを主な目的に、貯水池運用上、年間の貯水位変動が比較的小さい B ダムで常時微動計 測を実施した。なお、温度としては、年間の変動幅が大きく日別の計測データが得られる外気温 を指標とした。

常時微動の主な計測位置は図-4.8 に示すように最大断面に近い非越流ブロック(BL.4)とした。 当該計測位置の基礎岩盤からの高さは,天端が 33.7m,基礎監査廊が 3.2m である。計測は表-4.4 に示す日程で計 19回実施した。なお,上記箇所での計測にあわせて,比較のため複数の異なる断 面(ブロック)でも計測を行った(付録-2 参照)。



図-4.8 常時微動計測位置(Bダム)

衣-4.4 訂	一側時の貯水位・外注	虱温(B ダム)
日付	貯水位 EL.(m)	外気温* (℃)
2011/9/12	274.46	28.1
2012/2/17	276.67	-0.7
2012/9/14	273.70	24.1
2012/10/19	275.54	12.0
2012/11/16	276.91	8.3
2012/12/14	277.32	3.1
2013/2/14	277.90	2.3
2013/3/15	277.43	3.3
2013/4/19	279.00	7.7
2013/5/17	277.30	11.8
2013/6/21	275.79	17.9
2013/7/19	273.99	20.9
2013/8/23	273.25	23.7
2013/9/20	274.68	19.9
2013/10/18	276.55	12.3
2013/11/15	277.03	10.6
2013/12/19	277.36	5.8
2014/1/15	277.92	-0.5
2014/2/21	278.52	0.2
	the second	

4 乱測味の貯また、从屋洞の ゲーン

※2011/9/12 気温は気象庁最寄観測地点日平均気温

以降、ダム地点での日平均気温

各計測回における主要計測箇所(BL.4)での計測結果より得られた上下流方向の伝達関数(天端/ 基礎監査廊)を図-4.9 に示す。また、同図より求めた1次固有振動数を表-4.5 に示す。いずれの計 測結果についても、15Hz 付近に1次固有振動数と推定されるピーク振動数が認められる。

次に、このピーク振動数から推定した1次固有振動数の計測期間中の変化を図-4.10に示す。同 図より、本ダム堤体の1次固有振動数は、夏期には16Hz程度となるが、冬期は逆に15.0Hz前後 と夏期に比べ低くなっていることがわかる。



図-4.9 上下流方向伝達関数(B ダム BL.4)

日付	貯水位 EL.(m)	1 次固有振動数 (Hz)
2011/9/12	274.46	15.78
2012/2/17	276.67	14.97
2012/9/14	273.70	15.85
2012/10/19	275.54	15.09
2012/11/16	276.91	14.95
2012/12/14	277.32	14.93
2013/2/14	277.90	14.82
2013/3/15	277.43	15.19
2013/4/19	279.00	15.02
2013/5/17	277.30	15.23
2013/6/21	275.79	15.98
2013/7/19	273.99	15.82
2013/8/23	273.25	16.04
2013/9/20	274.68	15.63
2013/10/18	276.55	15.21
2013/11/15	277.03	15.12
2013/12/19	277.36	14.88
2014/1/15	277.92	15.03
2014/2/21	278.52	14.94

表-4.5 常時微動計測から求めた1次固有振動数(Bダム BL.4)



図-4.10 1次固有振動数の変化(Bダム BL.4)

図-4.11,図-4.12に堤体の1次固有振動数と貯水位,外気温との関係をそれぞれ示す。図中●は 冬期(10月~5月),▲は夏期(6月~9月)の常時微動計測記録より推定した固有振動数を示してい る。両図より当ダムの1次固有振動数は貯水位が高く外気温が低い冬期には夏期に比べて低く, 逆に貯水位が低く外気温が高い夏期には冬期より高いことがわかる。したがって,当ダムの1次 固有振動数に夏期と冬期で相違する原因として貯水変化に伴う付加質量効果の変化による影響 と,外気温変化に伴う影響のいずれの可能性も考えられることとなる。



図-4.12 1次固有振動数と外気温の関係(Bダム BL.4)

Bダムを含め、治水、利水機能を併せ持つ国内の多くの多目的ダムでは、外気温の高い夏期は 洪水に備え貯水位を低く維持し、外気温の低い冬期は貯水位を高く保っている運用となってい るケースが多い。このような場合、任意の貯水位・温度条件でのダム堤体の固有振動数を予測 するには貯水位変化による影響と温度変化による影響を分離する工夫が必要と考えられる。

4.3 Cダム

常時微動計測で得られるダム堤体の固有振動数を指標として健全度診断を行う上では,比較対 象として初期値となる固有振動数データが必要となる。これには,我が国ではダム堤体への設置 が一般的となっている地震計により得られた既往の地震動観測記録(加速度波形データ)をあわせ て利用することが考えられる。そこで,比較的多くの地震動観測記録が得られている C ダムを対 象に常時微動計測とあわせ,既往地震動観測記録の分析を行い,両者から推定される固有振動数 とその変化傾向について比較した。

Cダムでの地震計は図-4.13 に示すように最大断面(BL.6)の上部(ゲート室内)および下部(基礎監 査廊)に設置されている。サンプリング周波数は 100 Hz である。分析の対象とした地震動観測記 録は 2008 年 6 月~2013 年 10 月までの計 113 データで、この中には 2011 年東北地方太平洋沖地 震時の観測記録も含まれる。C ダムの主な常時微動計測の位置は地震計設置位置近傍とし、表-4.6 に示す計 6 回実施した。なお、上記箇所での計測にあわせて、比較のため複数の異なる断面(ブロ ック)でも計測を行った(付録-3 参照)。

計測で得られた C ダムの1 次固有振動数の時系列を図-4.14 に示す。また,同図より求めた1次 固有振動数を表-4.7 に,地震動より求めた1 次固有振動数を表-4.8 に示す。同図表より,常時微 動計測から得られた1 次固有振動数は地震観測記録の分析から得られた1 次固有振動数とよく一 致している。よって両者のデータを合わせて利用することは経年的な振動特性の変化を把握する 上で有効であると考えられる。

また, C ダムにおいても B ダムと同様の年間を通しての貯水位あるいは外気温の変化に伴う周 期的な変動が認められる。



図-4.13 地震計及び常時微動計測位置(Cダム)

日付	貯水位 EL.(m)	外気温* (℃)
2013/3/12	325.60	3.1
2013/6/20	317.79	20.5
2013/8/22	318.04	25.2
2013/10/17	316.94	11.5
2013/12/20	315.85	0.9
2014/2/20	320.19	0.0

表-4.6 常時微動計測時の貯水位・外気温(Cダム)

※ダム地点での日平均気温



図-4.14 地震動観測記録および常時微動計測から推定した固有振動数の変化(Cダム BL.6)

表-4.7 常時微動計測から求めた1次固有振動数(Cダム BL.6)

日付	貯水位 EL.(m)	1 次固有振動数 (Hz)
2013/3/12	325.60	7.73
2013/6/20	317.79	8.55
2013/8/22	318.04	8.74
2013/10/17	316.94	9.15
2013/12/20	315.85	8.39
2014/2/20	320.19	7.87

表-4.8 地震動観測記録から求めた1次固有振動数(Cダム BL.6)

日付	貯水位 EL. (m)	1 次固有 振動数 (Hz)	日付	貯水位 EL. (m)	1 次固有 振動数 (Hz)	日付	貯水位 EL. (m)	1 次固有 振動数 (Hz)
2008/6/14	318.09	8.44	2012/10/24	319.63	8.63	2013/5/2	325.60	7.95
2011/3/11 🔆	320.32	7.38	2012/10/27	319.62	8.85	2013/5/7	325.20	8.12
2011/3/11	320.32	7.18	2012/11/6	319.75	8.48	2013/5/15	324.94	8.30
2011/3/11	320.32	7.31	2012/11/9	319.84	8.62	2013/5/18	324.53	8.04
2011/3/11	320.32	7.32	2012/11/9	319.84	8.41	2013/5/24	323.40	8.29
2011/3/11	320.32	7.38	2012/11/11	319.86	8.13	2013/5/25	322.99	7.97
2011/3/11	320.32	7.43	2012/11/15	319.97	8.24	2013/6/4	319.55	8.54
2011/3/11	320.32	7.20	2012/11/24	320.10	8.33	2013/6/6	319.31	8.57
2011/3/12	320.48	7.35	2012/12/3	320.04	8.19	2013/6/20	317.82	8.59
2011/3/19	321.85	7.62	2012/12/7	320.12	7.89	2013/7/5	318.14	8.73
2011/4/7	324.75	7.36	2012/12/7	320.12	8.06	2013/7/20	317.80	8.73
2011/4/11	325.12	7.62	2012/12/12	320.08	8.24	2013/7/23	317.80	8.72
2011/4/11	325.12	7.60	2012/12/15	320.07	8.02	2013/7/26	317.69	8.91
2011/4/12	325.19	7.53	2012/12/15	320.07	8.14	2013/7/31	317.71	8.75
2011/4/22	325.32	7.69	2012/12/17	320.11	7.92	2013/8/4	317.74	8.85
2011/7/8	317.87	8.75	2012/12/21	320.14	8.09	2013/8/6	317.74	8.85
2011/7/25	317.87	8.84	2012/12/21	320.14	7.93	2013/8/10	317.75	8.79
2011/7/31	317.85	8.97	2012/12/29	320.21	8.09	2013/8/10	317.75	8.94
2011/8/12	317.89	8.64	2012/12/30	320.28	8.04	2013/8/12	317.69	8.95
2011/8/19	318.19	9.22	2013/1/3	320.97	8.04	2013/8/13	317.73	8.91
2011/10/10	318.44	8.51	2013/1/4	321.00	8.13	2013/8/29	317.69	8.96
2012/4/1	325.64	7.43	2013/1/10	321.32	7.87	2013/9/4	317.72	8.98
2012/8/1	317.86	9.02	2013/1/14	321.67	7.92	2013/9/5	317.72	8.83
2012/8/7	318.02	9.11	2013/1/18	322.06	8.06	2013/9/13	317.74	8.74
2012/8/8	318.02	8.85	2013/1/24	322.63	7.87	2013/9/19	317.72	8.91
2012/8/11	318.01	8.89	2013/1/28	323.02	7.97	2013/9/20	317.70	9.35
2012/8/11	318.01	8.85	2013/2/2	323.45	7.78	2013/9/20	317.70	8.79
2012/8/17	317.82	9.06	2013/2/9	324.36	7.91	2013/9/27	317.70	8.86
2012/8/21	317.83	8.87	2013/2/24	325.05	7.86	2013/9/28	317.70	8.97
2012/8/23	317.84	9.00	2013/3/18	325.65	7.74	2013/9/30	317.70	8.75
2012/8/26	317.83	9.18	2013/3/21	325.65	7.91	2013/10/11	315.80	9.00
2012/8/30	317.87	9.23	2013/3/22	325.65	7.53	2013/10/12	315.80	8.92
2012/8/31	317.89	9.02	2013/4/6	325.67	8.00	2013/10/13	315.78	8.79
2012/10/2	317.79	8.74	2013/4/14	325.64	7.75	2013/10/17	316.94	8.92
2012/10/2	317.79	8.90	2013/4/17	325.65	7.82	2013/10/20	316.27	8.85
2012/10/4	317.76	8.74	2013/4/21	325.70	7.78	2013/10/22	315.83	8.76
2012/10/7	317.85	8.84	2013/4/25	325.70	8.09	2013/10/30	315.92	8.62
2012/10/24	319.63	8.46	2013/4/29	325.70	8.01			

※: 東北地方太平洋沖地震(本震)

常時微動計測及び地震動観測記録で推定した C ダム堤体の1 次固有振動数と貯水位の関係を図 -4.15 に示す。ばらつきは大きいが、概ね貯水位が高い時期に固有振動数が減少する傾向が確認で きる。



図-4.15 貯水位と1次固有振動数の関係(Cダム BL.6)

また、Cダムでの1次固有振動数と外気温の関係を図-4.16 に示す。同図より、外気温の低い時 期は1次固有振動数が減少する傾向が確認できるもののばらつきも大きい。CダムもBダム同様、 夏期に洪水期制限水位で運用される多目的ダムであり、1 次固有振動数の予測には、貯水位と温 度の影響を分離する工夫が必要と考えられる。



図-4.16 外気温と1次固有振動数の関係(Cダム BL.6)

4.4 Dダム

D ダムでは、その一部ブロックの水平打継面の補強を目的として図-4.17 内に示す箇所に、図-4.18 に示すように堤体上部からの鉄筋挿入工を実施している。この対策前後における固有振動数 の変化を調べることで打継面の状態変化によるダムの振動特性への影響を把握できる可能性が あると考え、その影響の確認を目的として常時微動計測を実施した。計測は対策を実施したブロ ック(BL.2)を対象に行った。計測は表-4.9 に示す日程で計 3 回実施した。当該ブロックでの計測 位置は基礎部に近接する下流面側フーチング上および天端道路上である。なお、当該ブロックは 堤体端部のブロックで、その平面形状は扇形をしている。また底部形状も斜面に沿って切れ上が っている。

このほか, Dダムでは上記の BL.2 での計測にあわせて,比較のため他の断面(ブロック)での計測も行った(付録-4 参照)。



図-4.17 常時微動計測位置(Dダム)



図-4.18 打設面補強のための鉄筋挿入工(Dダム BL.2)

表-4.9 計測時の貯水位・外気温(Dダム)

	回数	日付	貯水位 EL.(m)	外気温* (℃)	備考	
	第1回	2011/ 1/10	219.6	6.0	対策前	
	第2回	2012/10/11	226.4	20.8	対策後	
	第3回	2013/2/19	229.9	2.4	対策後	
※見まりの信毎観測地 ちゃの日平均信泪						

※最寄りの気象観測地点での日平均気温

対策前(第1回)および対策後(第2回,第3回)の常時微動計測で得られた BL.2 での上下流方向 振動成分のフーリエスペクトルを図-4.19 に,伝達関数(天端/基礎(フーチング))を図-4.20 にそれ ぞれ示す。計測対象ブロック中央部での上下流断面をモデル化した 2 次元有限要素モデルでの固 有値解析の結果(表-4.10)を参考に上下流方向成分が卓越する 1 次固有振動数として予想される 25Hz 付近の振動数のピーク周波数に着目すると,第1回計測(対策前)では天端,周波数応答関数 ともに 28.0Hz,第2 回計測(対策後)では同様に 29.9 Hz,第3 回計測(対策後)では,26.6Hz 及び 30.0Hz 付近にそれぞれピークが確認された。



図-4.20 上下流方向の伝達関数(Dダム BL.2)

固有振動数に影響を与える要因は,主に,①貯水位,②外気温などの温度条件及び③対策(補強) の有無と考えられる。このことを踏まえ,対策前の第1回計測時を基準とした場合に①~③の各 要因が固有振動数に与える影響を予想すると表-4.11のようになる。第1回計測から第2回計測の 間での固有振動数の増加(1.9Hz)は,上記①および②の2つの要因の影響が考えられる。しかし, 第3回目の計測では,1次固有振動数と考えられるピーク振動数の候補が2つ(26.6Hz, 30.0Hz)存 在し,いずれが1次固有振動数であるかによって解釈が異なる。第1回計測時より卓越振動数の 低い26.6Hz が1次固有振動数であった場合には,①および②の影響が卓越したと考えられ,第1 回計測時よりもピーク振動数が高い30.0 Hz が1次固有振動数であった場合には,③による影響 (補強対策の効果)が卓越したことが考えられる。しかしながら、計測データが限られており、本 ケースでは固有振動数が変化した要因を特定するのは難しい。なお、打継面の状態の変化が堤体 の振動特性に与える影響はより高次の固有振動数に現れる可能性もある。しかし、堤高が低く特 異な形状の本計測対象ブロックでは、図-4.20 に示すように1次固有振動数でも 30Hz 近くの高周 波数であり、今回の計測結果から2次以上の固有振動数を同定するのは難しい。

堤体中央部のブロックなど堤高が高く1次以外のモードも含めより高次の固有振動数を捉えや すいブロックであるか,あるいは対策前の一定期間にわたり比較的密な計測を行うなどで貯水位 や外気温変化などの影響をより精度よく把握することができれば、より対策の効果が把握しやす くなるものと考えられる。

表-4.10 固有値解析結果(Dダム対象ブロック,上下流方向断面2次元モデル)

	日付	貯水位 EL.(m)	貯水深 (m)	固有振動数 (Hz)			
				1次	2 次	3次	4 次
第1回 (対策前)	2012/1/10	WL.219.6	空虚	25.22	77.31	79.95	152.54
第2回(対策後)	2012/10/11	WL.226.4	3.4m	25.22	77.17	79.88	151.12
第3回(対策後)	2013/2/19	WL.229.9	6.9m	24.68	72.75	79.20	142.31

表-4.11 常時微動計測による卓越振動数および固有振動数への影響要因による予測(Dダム)

計測回			第1回計測 (対策前)	第2回計測 (対策後)	第3回計測 (対策後)
冬世		貯水位 EL.(m)	219.6	226.4	229.9
*件	外気温 (℃)		6.0	20.8	2.4
卓越振動	卓越振動数(計測値)			29.9	26.6 30.0
予想される		①貯水位の影響	_	減少	減少
」固有振動数の影響		②外気温の影響	_	増加	減少
第1回計測時を基 とした変化の方	達 う 】	③対策の影響		増加	增加
4.5 Eダム

A ダム同様, 貯水位変動によって生じる付加質量効果の相違がダムの固有振動数に及ぼす影響 を調べることを主な目的として, 大幅な貯水位変化が生じる試験湛水中の E ダムにおいて, 表-4.12 に示すように計 8 回の常時微動計測を実施した。E ダムの主な計測位置は, 図-4.21 に示すと おり, ダム中央付近非越流部のほぼ最大断面に相当するブロック(BL.14)の天端と基礎監査廊であ り, 基礎岩盤からの高さは, 天端が 106.6m, 基礎監査廊が 16.75m である。なお, 上記箇所での 計測にあわせて, 比較のため複数の異なる断面(ブロック)でも計測を行った(付録-5 参照)。

表-4.12 常時微動計測時の貯水位・外気温(E タ	rム)
----------------------------	-----

日付	貯水位 EL.(m)	外気温 (℃)
2014/2/27(1回目)	湛水前	-4.8
2014/2/27(2 回目)	湛水前	-4.8
2014/6/25(1回目)	288.6	18.3
2014/6/25(2 回目)	288.6	18.3
2014/11/11(1 回目)	301.3	5.6
2014/11/11(2 回目)	301.3	5.6
2015/2/25(1回目)	260.0	-2.2
2015/2/25(2 回目)	260.0	-2.2



図-4.21 常時微動計測位置(Eダム)

E ダムの BL.14 において実施した計 8 回の常時計測結果をもとに 3.1 に示した方法で得られた 最大断面ブロック(BL.14)での伝達関数のうち,重力式コンクリートダムで卓越すると考えられる 上下流方向振動成分によるものを図-4.22 に示す。また,同図より求めた 1 次固有振動数を表-4.13 に示す。



図-4.22 常時微動計測から求めた伝達関数(最大断面(BL.14), 上下流方向振動)(Eダム BL.14)

日付	貯水位 EL.(m)	1 次固有振動数 (Hz)
2014/2/27(1回目)	湛水前	4.43
2014/2/27(2回目)	湛水前	4.55
2014/6/25(1回目)	288.6	4.68
2014/6/25(2回目)	288.6	4.59
2014/11/11(1回目)	301.3	3.41
2014/11/11(2回目)	301.3	3.36
2015/2/25(1回目)	260.4	4.62
2015/2/25(2回目)	260.4	4.42

表-4.13 常時微動計測からもとめた1次固有振動数(Eダム BL.14)

図-4.22より推定したダム堤体の1次固有振動数(上下流方向)と計測時の貯水深の関係を図-4.23 に示す。図中には、Eダムの最大断面ブロックと同一断面形状の2次元有限要素モデルでの固有 値解析による1次固有振動数の推定値(Eダム内部コンクリート施工時の品質管理値(材齢91日圧 縮強度)からコンクリート標準示方書⁷⁾の関係式を用いて求めた弾性係数を仮定した場合の結果) も示している。計測値の数が限られるものの貯水位が上昇すると1次固有振動数が減少する傾向 は固有値解析結果と共通している。なお、固有値解析に比べ実測値はやや大きく、中でも2014年 6月の計測値は固有値解析結果より1Hz程度大きくなっている。この原因としては、堤体コンク リートの強度増進に伴う弾性係数の増加や、外気温変化による影響等が考えられる。



図-4.23 貯水深と1次固有振動数の関係(Eダム BL.14)

5. 考察

5.1 概要

ダム堤体の健全度診断において,指標の一つとして考えられる固有振動数について,前章に示 した常時微動計測や地震動観測記録の分析により,貯水位や温度変化の影響を受けて変化すると 考えられることなど,ある程度の特性がわかってきた。このような構造物としても健全度の変化 以外の要因による影響を定量的に明らかにしたうえで,健全度の変化(低下)による固有振動数へ の影響を予測することができれば,経年や大規模地震による健全度の変化(低下)を固有振動数の 変化傾向を分析することによって検知することができる可能性がある。

しかし、ダム堤体の経年に伴う健全度の変化(低下)は、数十年あるいはそれ以上の長期間をかけて緩やかに進行するものと考えられる。また、ダム堤体の健全度に影響を及ぼすような大規模 地震はごく稀にしか発生しない。このため、ダム堤体の振動特性の変化を一定期間の常時微動計 測や地震動観測記録の分析から実証的に確かめることは容易でない。

そこで,以下では前章までに述べたダム堤体の基本的な振動特性やその実ダムでの計測等の結果を踏まえ,今後の本診断手法の適用に向けた基礎的検討として,次の2点について考察を行った。

①貯水位や温度の変化がダム堤体の固有振動数に及ぼす影響とその定量化方法

(実ダムでの計測結果等に基づく重回帰分析)

②ダム堤体の健全度低下が固有振動数に及ぼす影響

(数値解析による試算)

5.2 貯水位及び温度変化がダム堤体の固有振動数に及ぼす影響とその定量化方法⁸⁾

5.2.1 各ダムの固有振動数とその変化

ダム堤体の固有振動数を健全度診断の指標として活用する上で、本来把握したい構造物として の健全度の変化以外の影響要因として、貯水深や温度(外気温やコンクリート温度)の変化による 影響を明らかにすることを目的に、4章に示した各計測事例のうち3ダム(Aダム、Bダム、Cダ ム)を対象に、常時微動計測結果のほか、地震動観測記録の解析結果も加え固有振動数と貯水位及 び外気温などの温度変化が及ぼす影響について重回帰分析を用いて詳しく調べた。分析対象ダム 及び各ダムでの分析に用いた常時微動計測や地震動観測記録の概要を表-5.1 に示す。また、各ダ ムでの計測位置を図-5.1 に示す。同図中には、ここでの分析に用いた常時微動データの計測位置 及び地震動観測(地震計設置)位置のほか、ダム堤体コンクリートの温度計測が行われているダム についてはその計測位置を示している。これは、固有振動数との関係を分析するための温度指標 として、外気温のほか堤体コンクリートの温度についても合わせて検討したためである。

		···· /· /·· ·· · · // // // //		
ダム名	1	Aダム	Bダム	Cダム
堤高		119.0m	33.7m	65.0m
運用開如	台	2012年	1966年	1997年
貯水池運用*	洪水期	6/15~9/30 (95.5m)	6/21~10/10 (28.6m.但し7/26~8/31は26.0m)	6/11~10/10 (47.0m)
	非洪 水期	10/1~翌6/14 (113.0m)	10/11~꿮6/20 (32.7m)	10/11~翌6/10 (55.0m)
常時微動	計測	2011年11月 ~2014年2月 (計22回)	2011年9月 ~2014年2月 (計19回)	2013年3月 ~2014年2月 (計6回)
地震観測書	記録	2011年11月~2013年9月 (計60地震)	**	2011年3月 ~2013年10月 (計112地震)

表-5.1 分析対象ダム及び常時微動計測等の概要

* 操作規則による。括弧書きは各期間中の平常時最高水位での貯水深。

** 最大加速度値しか得られなかったため常時微動計測結果のみによった。











各ダムでの常時微動計測及び地震動観測記録から得られた固有振動数とその変化については4 章に示したが、改めて各ダムでの分析対象期間における貯水深(毎日9時の値)h及び外気温(日平 均値)の変化と伝達関数の最も低振動数側のピークから推定した1次固有振動数fiの推移が対照 できるように整理したものを図-5.2~図-5.4に示す。なお、コンクリート温度が計測されている A ダム、Cダムでは、図-5.1に示す代表箇所での計測値 θc も示している。地震動観測記録が最大加 速度値しか入手できなかった Bダムの1次固有振動数は、常時微動計測から得た値のみ示してい る。

① A ダム

竣工後間もない A ダムでは, 貯水位が空虚から洪水時最高水位まで大幅に変化する試験湛水期 間中を中心に常時微動計測を行った。A ダムでは図-5.2 より, ダム堤体の1 次固有振動数は, 2012 年7月頃と2013年末頃以降にやや減少している。このうち前者は試験湛水中の洪水時最高水位 到達時前後に相当する。また,外気温が高い時期であり堤体の剛性を低下させるコンクリート収 縮による横継目の開きなどは考えにくい。よって,この時期に固有振動数が減少した原因として は,貯水位上昇に伴い,ダム堤体の振動中に作用する貯水の動水圧が見かけ上堤体の質量を増加 させる効果(付加質量効果)が堤体上部で大きくなったことが考えられる。また,後者は,通常 運用移行後に貯水位が高い状態で外気温が低下した時期に相当することから,外気温の低下によ るコンクリートの温度低下に伴う収縮によって横継目の開きが生じることの影響が現れた可能 性がある。

② Bダム

Bダムの1次固有振動数は、図-5.3より夏期に増加し、冬期に減少する年周期変動が認められる。この変動は概ね外気温変化と対応しているが、わが国の多目的ダムに多い夏期制限水位方式で運用される同ダムでは、外気温が高い夏期は貯水位が低い洪水期、外気温が低い冬期は貯水位が高い非洪水期にあたる。このため、上記変動には貯水深の変化による影響も含まれている可能性がある。

③ C ダム

図-5.4 より、Cダムの1次固有振動数においても、Bダムと同様に夏期に増加、冬期に減少す る年周期変動が認められる。Cダムも夏期制限水位方式の多目的ダムであり、上記の変動には貯 水深の変化に伴う付加質量効果と温度(外気温、堤体コンクリート温度)の変化による横継目の開 閉に伴う影響の両方の影響が含まれている可能性がある。なお、Cダムでは2011年3月の東北地 方太平洋沖地震で比較的大きな地震動(最大水平加速度:基礎監査廊195cm/s²、上部監査廊 932cm/s²)が観測されており、同地震及びその余震等のデータも含まれている。ただし、Cダムに おいて、これら一連の地震による特段の変状等は報告されていない。 以上,3ダムでの常時微動計測及び地震観測記録の分析から,ダム堤体の固有振動数は貯水深 と**温度(外気温及びその影響を受けるコンクリート温度)**の両方の影響を受けて変化すると考えら れる。なお,図-5.2(A ダム),図-5.4(C ダム)とも,常時微動計測と地震観測記録による1次固有振 動数の推定結果に明瞭な相違は認められない。







5.2.2 重回帰分析を用いた貯水深・温度変化が固有振動数に及ぼす影響の定量化

(1) 回帰モデル

ダム堤体の固有振動数に及ぼす貯水深及び外気温など温度指標の影響を確認するとともに、それらの影響を定量的に分離するため、3 つのダムでの常時微動計測及び地震観測記録の分析から 求めた1次固有振動数 f₁(以下、「実測値」という)を目的変数、貯水深や外気温を説明変数とする 重回帰分析を実施した。重回帰モデルとしては、付加質量効果に影響する貯水深hを含む関数 g₁(h) 及び堤体剛性を変化させる可能性のある横継目などの収縮継目の開閉状態に対応する温度指標 θ (外気温やコンクリート温度)を含む関数 g₂(θ)の線形結合で表される次式のモデルを考えた。

$$f_1(h,\theta) = c_0 + c_1 g_1(h) + c_2 g_2(\theta) + e$$
(5-1)

ここに,

*c*₀, *c*₁, *c*₂: 定数(偏回帰係数)

e:回帰残差

なお, $g_1(h)$ 及び $g_2(\theta)$ の関数形は, それぞれ $g_1(h)=h$, $g_2(\theta)=\theta$ とする線形モデルが最も簡単であるが, 一定の物理特性を考慮することでより再現性の高いモデルとするため, ここでは以下のように検討した。

まず $g_1(h)$ については、堤体の振動に伴う貯水の付加質量効果の貯水深変化による影響を数値解 析(固有値解析)を用いて調べることでその関数形を推定した。固有値解析には、3 ダムの横断面形 状を反映した堤体と貯水位を種々変化させた貯水池からなる 2 次元有限要素モデルを用いた。貯 水の付加質量効果は付加質量マトリクスにより考慮した。固有値解析より得られた 1 次固有振動 数と貯水深の関係を図-5.5 に示す。同図において、貯水深比は堤高 H に対する貯水深 h の比、1 次固有振動数比は空虚時に対する比である。図-5.5 より、無次元化した貯水深と 1 次固有振動数 の関係は、堤高によらず 3 ダムともほぼ同一であること、貯水位が高くなると次第に固有振動数 の低下割合が大きくなり、貯水深が堤高に等しくなる状態(h/H=1)では空虚時(h/H=0)の約 80%に 低下することがわかる。なお、この値は以下の概略的検討から予想される値に近い。すなわち、 貯水(単位体積質量 ρ_w)の振動により堤体上流面全体に動水圧(Westergaard の近似式で表せるもの とする)が作用する状態(h/H=1)を考え、付加質量効果を堤体コンクリートの単位容積質量 ρ_c の増 分に置き換えて考慮すると、式(2-1)に示す三角形断面無限梁(固定端幅/梁の高さ(長さ)=s)の理論 解の関係から、空虚時に対する h/H=1 のときの 1 次固有振動数比として次式を得る。

$$\frac{f_1\Big|_{h/H=1}}{f_1\Big|_{h/H=0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{7}{6s}\left(\frac{\rho_w}{\rho_c}\right)}}$$
(5-2)

式(5-2)の値は,重力式コンクリートダムで一般的な ρ_c=2300kg/m³, s=0.8(例えば,上流面鉛直, 下流面勾配 1:0.8)のとき 0.78 となり,図-5.5 の固有値解析結果(約 80%)に近い。

そこで、固有値解析結果(図-5.5)から、貯水深比と1次固有振動数比の関係が次式で表せるもの

とする。

$$1 - \frac{f_1}{f_1|_{h/H=0}} = \alpha (h/H)^{\beta}$$
(5-3)



図-5.5 固有値解析による貯水深比と1次固有振動数比

このとき,固有値解析結果をよく近似するよう定数 *a*, *β*の値を定めると *a*=0.18, *β*=6 となる。 すなわち,一般的な形状の重力式コンクリートダム堤体の場合での 1 次固有振動数比は貯水深比 のほぼ 6 乗に比例して減少すると考えることができる。よって,式(5-1)における *g*₁(*h*)の関数形は 次式のとおり設定した。

$$g_1(h) = (h/H)^{\circ}$$

(5-4)

次に,温度(外気温やその影響を受けるコンクリート温度)の変化による影響を考慮するための g2(θ)の関数形について検討する。この関数形を設定するには,温度変化に伴う横継目の開口変位 と横継目に挟まれる堤体ブロックの上下流方向振動の固有振動数との関係を何らか推定しなけ ればならない。そこで,最も単純なモデルとして,図-5.6 に示すような堤体ブロックと横継目を それぞれ質点(質量 m)とせん断バネ(せん断剛性 k_s)でモデル化した振動系を考えると,この系の固 有振動数 f_s は次式で表せる。

$$f_s = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{k_s}{2m}} \tag{5-5}$$



図-5.6 横継目の挙動を模擬するせん断バネモデル

一方,重力式コンクリートダム堤体の横継目は先行ブロック硬化後の後行ブロックの打継ぎも しくは同時打設後の目地板挿入によって造成され、人工的にひび割れを誘発する界面の役割を果 たしていると考えられるが、コンクリート界面のせん断剛性に関する既往実験データを分析した 吉川ら⁹は、ひび割れ界面におけるせん断剛性のせん断変位中の最大値 k_{s max} とひび割れ幅 δ_nの 間に次式の関係を得ている。

$$k_{\rm smax} \propto \delta_n^{-0.96}$$
 (5-6)

また,初期ひび割れを有するコンクリート試験体のせん断挙動を実験的に調べた篠原ら¹⁰は, せん断剛性 k₂と初期ひび割れ幅 δ₀の関係として次式を示している。

$$k_{s} / k_{s0} = 1 / (1 + a\delta_{0})$$
(5-7)

ここに,

k_{s0}: 圧縮試験で得られた割線弾性係数より求めた初期ひび割れ幅0のときのせん断剛性 a: 実験定数

式(5-6)(5-7)より, せん断変位を生じるコンクリート部材界面のせん断剛性は, ひび割れ幅に対 して概ね反比例する関係にあるとみなすことが可能と思われる。そこで, 上記の関係が堤体ブロ ックのコンクリート温度が θ_c のときの堤体ブロック間の横継目の開口幅 δ(θ_c)と横継目の上下流 方向振動におけるせん断剛性 k_s との間にも成り立つと仮定する。すなわち,

$$k_s \propto 1/\delta(\theta_c) \tag{5-8}$$

さらに、コンクリートの線膨張係数が常温範囲ではほぼ一定であることを考慮し、式(5-8)の $\delta(\theta_c) \ge \theta_c$ の関係に線形性を仮定した上で、 $\delta(\theta_c)=0 \ge c$ なるコンクリート温度を $\theta_c^*(\ge \theta_c)$ とすると、

$$\delta(\theta_c) \propto (\theta_c^* - \theta_c) \tag{5-9}$$

このとき,図-5.6の振動系のせん断方向振動(固有振動数 f_3)がダム堤体の上下流方向の主要振動 モードである1次モード(固有振動数 f_1)に対応するものと考えると,式(5-5)と式(5-8),(5-9)より, 貯水深一定時の $f_1 \ge \theta_c$ の間に次式の関係が成り立つものと推定される。

$$f_1 \propto 1/\sqrt{\theta_c^* - \theta_c} \tag{5-10}$$

そして、同様の関係が外気温を含むコンクリート温度と連動する温度指標との間にも成り立つ と考えれば、式(5-1)の重回帰モデルにおける g₂(θ)は次式のように表せることになる。

$$g_2(\theta) = 1/\sqrt{\theta^* - \theta} \tag{5-11}$$

ここに,

 $\theta^*: 横継目の開口幅が温度指標 θ と線形の関係にあると仮定したときに開口幅がゼロとなる温$ $度指標 θ の値(<math>\geq \theta$)

なお,実際には堤体内部の横継目の開閉をもたらすコンクリート温度と外気温の間には堤体表 面からの熱伝達に伴う位相差(時間遅れ)があると考えられる。このため, θ としては外気温データ θ_0 よりも,位相差 τ [日]を考慮した値 $\theta_{\tau}(\tau>0)$ を用いる方が良好な回帰結果が得られる可能性がある。

ここで、式(5-11)は多くの仮定に基づき得られた関係であることからその妥当性を確認するた め、貯水深がほぼ一定で外気温が比較的大きく変化する期間がある C ダムの当該期間における 1 次固有振動数の実測値を抽出し、その温度指標 θ の関係を図-5.7 にプロットして示す。温度指標 θ は外気温[℃]とし、日平均外気温 θ₀ 及び堤体内部への熱伝達による位相差(時間遅れ)を考慮した θ1₅(位相差 τ =15 日)及び θ₃₀(同 30 日)を用いた。θ1₅ 及び θ₃₀ は、外気温の日間変動の影響が小さく なるよう、θ₀ の 31 日間移動平均値をもとに各位相差(15 日、30 日)を考慮して求めた。また、図 -5.7 には、これらデータに対し、式(5-11)に基づき温度変化の影響のみ考慮した次式の単回帰モデ ルを適用した回帰結果(回帰曲線及び決定係数 *R*²)も同時に示している。

$$f_1(\theta) = c_0 + c_2 / \sqrt{\theta^* - \theta} + e$$

(5-12)

ここで、 $\theta^*[^{\mathbb{C}}]$ の値は、 $\theta[^{\mathbb{C}}]$ の最高値が 30^C前後となることを想定して式(5-12)の根号内が負とならないことや、30~70^Cの範囲で決定係数の変化を調べたところ殆ど変化がなかったことを考慮し、 $\theta^*=40^{\mathbb{C}}$ とした。

図-5.7 の実測値のプロットから、ばらつきはあるものの、貯水深がほぼ一定であれば外気温が 高いほど 1 次固有振動数が増加することが明らかである。また、式(5-12)の単回帰モデル適用時 の決定係数の値も 0.7 程度と比較的大きい。よって、式(5-1)中の g2(θ)として式(5-11)の関数形が 仮定できると判断した。



図-5.7 貯水深一定条件での温度*と固有振動数(Cダム) *温度の実測値は、外気温データから遅れ時間 0.15.30 日の値をプロット

(2) 回帰結果

前節での考察に基づき,式(5-1)及び式(5-4)(5-11)から得られる重力式コンクリートダムの1次 固有振動数についての次式の重回帰モデルを図-5.2~図-5.3に示した3ダムのデータに適用した。

$$f_1(h,\theta) = c_0 + c_1(h/H)^6 + c_2/\sqrt{\theta^* - \theta} + e$$
(5-13)

なお、本検討での温度指標 θ [\mathbb{C}]は、3 ダム全てでデータが得られている外気温を用いた。また、 考慮する位相差は 0~75 日(θ = θ_0 , θ_{15} , θ_{30} , θ_{45} , θ_{60} , θ_{75})の 6 ケースとし、前節同様、 θ_0 は日平 均値、 $\theta_{15} \sim \theta_{75}$ は θ_0 の移動平均値(31 日間)に位相差(15~75 日)を考慮した値とし、 θ^* は一律 θ^* =40 \mathbb{C} とした。

式(5-13)のモデルによる重回帰分析の結果を表 5-2 に示す。C ダムについては,表-5.1 に示した 回帰対象期間内の全実測値を用いた結果に加え,一部(2011 年 3~4 月)の実測値を除いて回帰した 結果も併記しているが,この理由は後述する。また,同表には,比較のため,貯水深のみを説明 変数とした次式の単回帰モデルを適用した場合の結果もあわせて示している。

$$f_1(h) = c_0 + c_1(h/H)^6 + e$$
(5-14)

表-5.2 には、このほか得られた各回帰式の切片 c₀と偏回帰係数 c₁,c₂の値、決定係数及び回帰の 標準誤差のほか、重回帰モデルに g₁(h)、g₂(θ)の各項を考慮することの統計的有意性の指標となる 偏回帰係数の t 値、また各項の目的変数(1 次固有振動数)への寄与度の指標となる標準化偏回帰係 数(平均 0、分散 1 の分布となるよう規準化したときの偏回帰係数 c₁',c₂'の値)、回帰結果の安定性 に関わる共線性の発生目安となる説明変数間の相関係数及び付加質量効果のみ考慮される固有 値解析結果(図-5.5)との整合性を表す次式の I_aの値も示している。

$$I_{\alpha} = \alpha / \alpha_0 \tag{5-15}$$

ここに,

α: 各ダムの固有値解析結果の最小自乗近似で求めた式(5-3)の a の値(≒0.18)

α₀:温度 θ を各回帰データ(外気温データまたはコンクリート温度データ)取得日の値の平均値 として重回帰式から求まる α の値

つまり、*I*_αの値が1.0に近いほど、温度(外気温またはコンクリート温度)条件一定時の貯水深と 1次固有振動数の関係が2次元線形弾性体モデルでの理論解に近いことを意味する。

		-XF		HALLA. MAL	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 · / Http					0.080		(
ダム名	いず子県回						重回	帰:式(5-13	$\theta = 40[$	5					単回帰:	武(5-14)
(観測数)		説明変数	h, t	9 0	h,	θ_{15}	h, t	9 ₃₀	h, (θ_{45}	h, 6	160	h, 6	9 ₇₅	h	
	決定係数")	R^2	0.4]	15	0 .4	430	0.4	32	0.4	35	0.4	40	0.4	35	0.3	42
	標準誤差	SE [Hz]	0.20	01	0.]	861	0.19	98	0.1	97	0.19	96	0.19	26	0.2	13
		c_0	3.57	73	3.4	475	3.4	69	3.4	61	3.4:	55	3.4	89	4.0	28
	切片	c1	-0-0-	26	- 0	924	-0.8	82	-0.	337	-0.7	73	-0.7	703	-0.7	32
	および	t 直	7.65	94	7.5	940	7.9.	29	7.8	25	7.4	62	6.7	88	6.5	67
A (é)	偏回帰係数**)	c 2	2.6	84	3.2	263	3.2	66	3.2	76	3.24	t 3	2.9	73		
(70)		t 値	3.3(00	3.6	545	3.6	96	3.7	71	3.8	74	3.7.	58		
	標準化	c1'	-0.7	49	-0-	747	-0.7	13	-0.6	577	-0.6	25	-0.5	69	-0.5	92
	回帰係数***)	c_{2}'	0.32	22	0.2	343	0.3	32	0.3	26	0.3	24	0.3	15		
	$g_1(h) \succeq g_2(\theta) \mathcal{O} \ddagger$	钼関係数	0.48	87	0.4	453	0.3	64	0.2	60	0.1(03	-0.0	174		
	固有値解析との)整合性 I_a	1.2	30	1.2	228	1.1	73	1.1	15	1.0	33	0.0	42	0.0	76
	決定係数")	R^2	0.8	28	0.5	747	0.6	44	0.6	62	0.7	01	0.7	50	0.6	61
	標準誤差	SE [Hz]	0.13	71	0.0	208	0.2	46	0.2	40	0.2	23	0.20	90	0.2	40
		c 0	13.4	56	13.	944	15.9	976	17.)	123	17.4	61	17.5	506	16.3	50
	切片	c1	-0.3	22	.	704	-2.1	89	-2.5	772	-3.1	15	-2.9	620	-2.4	56
,	および	t値	0.54	18	0.5	924	2.7	81	4.5	36	6.1	47	7.3	96	6.0	13
n (f	偏回帰係数**)	c ₂	10.2	38	8.8	368	1.2	94	-2.3	723	-4.0	62	-4.5	559		
(61)		t 値	4.18	80	2.5	599	0.4	00	1.0	07	1.9	55	2.6	49		
	標準化	c1'	-0.10	08	-0-	236	-0.7	35	-0.5	866	-1.0	46	-1.0	00	-0.8	25
	偏回帰係数***)	c2'	0.82	25	0.6	564	0.10	90	. 0-	122	-0.3	33	-0.3	58		
	$g_1(h) \succeq g_2(\theta) \mathcal{O} \ddagger$	킙関係数	-0.8	69	-0-	886	-0.8	47	-0.	782	-0.6	99	-0.4	190		
	固有値解析との)整合性 I_a	0.1]	14	0.0	246	0.7.	33	0.9	73	1.0	16	0.0	75	0.8	16
	決定係数")	R^2	0.729	(0.822)	0.818	(0.887)	0.837	(0.874)	0.792	(0.793)	0.659	(0.674)	0.534	(0.640)	0.478	(0.643)
	標準誤差	SE [Hz]	0.290	(0.196)	0.238	(0.156)	0.225	(0.165)	0.254	(0.211)	0.326	(0.265)	0.380	(0.278)	0.402	(0.277)
		c_0	7.252	(7.895)	6.269	(7.093)	5.775	(6.750)	5.790	(66.6))	6.628	(8.270)	7.880	(9.576)	9.334	(9.403)
	테부숙: 노기	c,	-2.906	(-3.304)	-1.444	(-2.149)	-0.533	(-1.520)	-0.472	(-1.787)	-1.566	(-3.416)	-3.240	(-5.032)	-4.969	(4.831)
ç	974340.	t 值	7.322	(11.334)	3.905	(8.004)	1.387	(4.748)	1.040	(4.034)	2.705	(6.237)	5.086	(9.786)	10.400	(13.643)
118	通口市区数	c ²	8.354	(5.929)	11.816	(8.739)	13.329	(9.763)	13.197	(8.794)	10.122	(4.169)	5.548	(-0.652)	•	•
(011)		t 値	10.428	(10.183)	14.758	(14.890)	16.029	(13.720)	13.257	(8.658)	7.893	(3.283)	3.850	(-0.541)		•
	標準化	c_1'	-0.406	(-0.550)	-0.202	(-0.358)	-0.075	(-0.253)	-0.066	(-0.297)	-0.219	(-0.568)	-0.453	(-0.837)	-0.695	(-0.804)
	偏回帰係数***)	c_2'	0.579	(0.494)	0.763	(0.665)	0.796	(0.731)	0.841	(0.638)	0.639	(0.299)	0.343	(-0.046)	•	•
	$g_1(h) \succeq g_2(\theta) \mathcal{O} \ddagger$	钼関係数	-0.499	(-0.514)	-0.646	(-0.671)	-0.720	(-0.754)	-0.747	(-0.794)	-0.745	(-0.787)	-0.705	(-0.723)	•	•
	固有値解析との)整合性 I_a	1.872	(2.080)	0.964	(1.389)	0.364	(0.997)	0.323	(1.164)	1.041	(2.140)	2.064	(3.036)	3.034	(2.928)
*) 举行东举	は自由度調整済る	なの値、														

ま、50 有回帰分析結果一階(鋼掛け、 冬ガ) が見も説明性が言い レ 考っられ 2回帰子 デル

*) 決定係数は自由に調整済みの値 **) 偏回帰係数の 95%信頼区間に対応するt値(t₀₀₅)はAダムで1.990, Bダムで2120, Cダムで1.981. ***) Cダムの括弧書き数値は, 2011年3月~4月の地震観測記録を除いた場合の回帰結果.

また,表-5.2 中の主なケースの回帰結果と実測値との比較を各ダムについて図-5.8~図-5.10 に それぞれ示す。なお,各図での回帰モデルは,考慮した説明変数を付して,例えば「重回帰(h, θ_0)」 のように表記してある。また,各図中には、1 次固有振動数が実測値と概ね一致するよう堤体コ ンクリートの弾性係数 E_c を設定した場合に得られる固有値解析結果も付記している。

以上の結果をもとに、以下、各ダムの振動特性を説明可能な回帰モデルついて考察する。

① A ダム

表-5.2 における各重回帰ケースの偏回帰係数の符号に着目すると、全ケースで c_1 が負、 c_2 が正 であり、貯水深が大きく温度指標値が低いほど 1 次固有振動数が減少する、つまり、付加質量効 果を考慮した固有値解析結果やコンクリートの温度変化に伴う横継目の開閉挙動から推測され る傾向と矛盾しない結果が得られている。また、偏回帰係数に係る t 値の絶対値は各ケースとも 有意水準 5%相当値より大きいことから、式(5-4)及び式(5-11)に基づき仮定した $g_1(h)$ と $g_2(\theta)$ 、す なわち貯水深と外気温の影響は、全ての重回帰ケースでともに有意であると判断される。なお、 どのケースも決定係数は 0.4 程度と余り大きくないが、その値及び偏回帰係数の値に大きな違い はなく、固有値解析との整合性も比較的高い。よって、重回帰モデルの中では、他のケースと大 差はないものの決定係数が最大となる $\theta=\theta_{60}$ としたケースが最も説明性の高いモデルと考えるこ とができる。

また,実測値との比較を図-5.8(a)に示す時系列でみると,上記ケースの重回帰結果は概ね実測値の傾向と対応している。ただし,併せて同図中に示した $\theta=\theta_0$ のケースと顕著な相違はない。これは,表-5.2に示した偏回帰係数が両ケースで大きく相違しないことや,両ケースとも標準化偏回帰係数が $|c_1'|>|c_2'|$ であって外気温変化の寄与度が貯水深変化に比べ小さいことが要因と思われる。

なお、上記の位相差(遅れ 60 日)は図-5.2(a)の外気温に対するコンクリート温度の位相差と同程 度である。よって、当該コンクリート温度を説明変数に用いることも考えられるが、堤体内に埋 設されるコンクリート温度計測用の温度計はデータ取得の継続性が計器寿命に左右されるため、 長期にわたる健全度診断への活用を目的とする場合は、少なくとも外気温データを用いた重回帰 式を得ておくのが良いと思われる。

他方,単回帰モデルでの回帰結果は,表-5.2 の *Ia* の値や図-5.8(b)での固有値解析との整合性の 点,また図-5.8(a)に示す時系列での実測値との比較からは重回帰モデルと大差はないが,表-5.2 に示す決定係数は重回帰モデルに比べ小さく,実測値の説明性にやや劣る。外気温やその影響を 受けると考えられるコンクリート温度の変化による影響が考慮されないモデルであることが一 因と考えられる。



② Bダム

表-5.2 より,各重回帰モデルの回帰結果の決定係数はAダムの場合より高値であるが、考慮す る外気温の位相差(遅れ)により偏回帰係数が大きく変化することがわかる。そして、2つの標準化 偏回帰係数の比較から、 $\theta=\theta_0$ 、 θ_{15} のケースでは1次固有振動数の変化に対する寄与は外気温の方 が大きいが、他の重回帰ケースでは、逆に貯水深の寄与度が大きいことがわかる。これは図-5.9(a)、 (b)(特に図-5.9(b))において代表的な2ケース($\theta=\theta_0$ 、 $\theta=\theta_{30}$)の重回帰結果が大きく異なることでも明 らかで、説明変数の取り方次第でいずれによる解釈も可能なことになる。ただし、表-5.2 から、 位相差(遅れ)として45日以上を考慮すると、 $g_2(\theta)$ に対する偏回帰係数 c_2 が負、つまり外気温の温 度上昇に伴い固有振動数が減少する回帰結果となって、横継目の挙動から推測される挙動と矛盾 する。 $g_1(h) \ge g_2(\theta)$ の相関係数がかなり大きいことを考慮すると、このように回帰結果が不安定と なる原因は、説明変数間の相関の強さに起因して共線性が生じやすい条件となっている点にある と思われる。つまり、年間の貯水深変化と外気温の温度変化が連動するような $g_1(h) \ge g_2(\theta)$ の相 関が高い場合には、両者の影響分離が困難となる。洪水調節を目的に含むわが国の多目的ダムで は、夏期に洪水期を設け、非洪水期よりも平常時の最高水位を低く設定する夏期制限水位方式で 運用されるダムが多く、同種の問題が起こりうる。

B ダムの場合,このような課題はあるものの,表-5.2 に示した各ケースの中では,偏回帰係数 の符号に矛盾がなく,固有値解析結果との整合性が比較的良い $\theta = \theta_{30}$ のケースが最も問題が少な いと思われる。ただし, $g_2(\theta)$ に係る t 値が小さく, θ_{30} を説明変数に加えることが統計的には有意 とはいえない。また,図-5.9(a)に示す時系列での実測値との比較を詳しく見ると,上記ケースの 重回帰式からやや外れるデータもある。この原因として,回帰モデルに起因するものや固有振動 数の推定に関わるものが考えられるが,現時点では明らかでない。このため、今後、特に通常の 貯水池運用とは異なる貯水深・外気温の組合せとなる条件での実測値を含めより多くのデータを 得るとともに,説明変数として他に追加できるものがないか検討するなどしてより信頼性の高い 回帰モデルを得ることが望まれる。



③ C ダム

表-5.2 において,まず全期間の実測値を用いた場合の回帰結果を比較すると次のようである。 すなわち,偏回帰係数の符号に問題があるケースは見られない。しかし,決定係数が比較的高い 一方で,考慮する外気温の位相差の違いにより偏回帰係数が大きく変化する点は B ダムと類似し ている。g1(h)とg2(θ)の相関係数も比較的大きく, B ダム同様,貯水深変化と外気温変化の影響の 分離が難しいことを示している。

そこで、 I_{α} の値に着目すると、固有値解析との整合性は $\theta=\theta_{15}$ 及び $\theta=\theta_{60}$ の両ケースで良好であるが、うち決定係数が大きいのは前者のケースで、図-5.10(a)に示す時系列での実測値との対応も概ね良好である。これらの点を考慮すると、 $\theta=\theta_{15}$ とした重回帰ケースが最も説明性の高いモデルの候補となる。

ただし,図-5.10(a)の2011年3~4月の実測値に着目すると,回帰結果よりもやや大きく下方に 外れていることがわかる。これらの実測値は、東北地方太平洋沖地震とその後の余震など一連の 地震の観測記録から得られたものである。そこで、これらを回帰データに含めることが妥当かど うか判断するため、全データを回帰に用いた場合の重回帰モデルとして上記で選定した θ=θ₁₅の ケースについて、表-5.2 に示した回帰の標準誤差の範囲及び回帰値の95%信頼限界を次式により 求めた結果を実測値と併せ図-5.11 に示す。

$$\left|F_{1} - f_{1}\right| \le t_{0.05} \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n} D_{0}^{2}\right)} V_{e}$$
(5-16)

ここに,

F₁: 重回帰式による回帰値

n:回帰データ数(n=118)

to 05:95%信頼限界に対するt値(自由度 n-p-1, 重回帰モデルでの説明変数の数 p=2)

D₀: 重回帰に用いた g₁(h), g₂(θ)の各平均値及び g₁(h), g₂(θ)の分散共分散行列から求まる汎距 離(マハラノビスの汎距離¹¹)

Ve: 誤差分散の不偏推定量

図-5.11 より,2011 年 3~4 月の実測値は、回帰の標準誤差や信頼限界を考慮すると過小値であ ることがわかる。なお、同図中には、東北地方太平洋沖地震(本震)の波形データのうち、仮に堤 体の振動特性を変化させるような影響があったとしても当該影響が生じる以前の状態であった 可能性が高い初動部(主要動部以前の 60s 間)のみの波形から求めた 1 次固有振動数も参考に付記 しているが、この値は標準誤差の範囲内にある。また、上記地震後の点検では漏水の増加など目 立った変状は報告されていないが、監査廊内の横継目に設置された継目計の変位に図-5.12 に示す ように若干不連続な挙動が計測されている。

これらのことや、過去の地震時に他の重力式コンクリートダム堤頂部の高欄や監査廊の横継目 部の剥落など堤体ブロックの相対変位によるものと思われる痕跡が報告された事例¹²⁾があるこ とを考慮すると、Cダムでは強震動により横継目での僅かな相対変位が生じ、接合面の不陸など

54

によりブロック間の密着性が低下したことで固有振動数の低下が生じた可能性がある。なお,2011 年夏以降の実測値はほぼ回帰値程度に回復しており、ダムに特段の変状等も報告されていないこ とから、上記の事象は一時的で、既に地震前の状態に回復していると推察される。

以上のことより,地震による健全度への影響は,その後一定期間における固有振動数の推移も 踏まえ,正常値からの不可逆的変化の有無により評価する必要があると考えられる。

以上の考察から、C ダムについては 2011 年 3~4 月のデータを除外して求めた重回帰式を用い るのが良いと考えられる。表-5.2 及び図-5.10 にこの場合の結果も併記したのはこのためである。 そして、当該期間のデータを除外した場合、 $\theta = \theta_{30}$ とした重回帰ケースの回帰結果が、決定係数 や固有値解析結果との整合性が良好で、かつ偏回帰係数の符号や有意性にも問題がないことから、 回帰モデルとして C ダムの振動特性を最も良く説明しているものと判断される。図-5.10(a)に示し た時系列での比較でも、2011 年 3~4 月を除き、上記の回帰結果は実測値と比較的良く対応して いる。

なお、この場合の外気温に対する位相差(遅れ 30 日)は図-5.4(a)のコンクリート温度の外気温に 対する位相差よりやや短いことから、C ダムでは分析に用いたコンクリート温度の計測箇所より もやや堤体表面寄りの箇所での温度の方が1次固有振動数との対応が良いものと思われる。

また、CダムはBダム同様の夏期制限水位方式のダムでありながら、貯水深と外気温の影響が ほぼ分離できた。Bダムでは2段階の制限水位が設定され、貯水位がほぼ一定に維持される期間 が少ないのに対し、Cダムではある程度そのような期間があることが相違の一因と思われる。





図-5.11 実測値と重回帰結果及びその標準誤差・信頼限界の比較(Cダム)



図-5:15 東北地方太平洋沖地震(2011)前後における横継目部継目計の計測値(Cダム)

5.2.3 本手法の健全度診断への活用

常時微動計測や地震観測記録から求めた重力式コンクリートダムの固有振動数に対し,貯水深 及び外気温の変化が影響を及ぼしていること,またその影響は物理特性を考慮した重回帰分析に よりある程度定量化しうることがわかった。貯水池運用の違いによる難易差はあるが,前章に示 したような分析を行えば,任意の貯水深・温度(外気温またはコンクリート温度)条件での固有振 動数の期待値(正常値)を知ることができ,実測値との比較によって,ダム堤体の健全性やその変 化を監視するための一次診断指標としての利用が期待できる。例として,表-5.1 に示した分析対 象期間以前の地震観測記録が得られているCダムについて,主な2つの地震観測記録から求めた 1 次固有振動数(実測値)と重回帰モデル(2011 年 3~4 月のデータを除外し, θ=θ30 としたモデル) による回帰値との比較を図-5.13 に示す。同図には,回帰式の標準誤差のほか,次式により計算し た 95%信頼限界(回帰データ以外の新たなデータに対する観測誤差も考慮した範囲)も示している。

$$\left|F_{1} - f_{1}\right| \le t_{0.05} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{n} D_{0}^{2}\right)} V_{e}$$
(5-17)

図-5.13 より,実測値は重回帰モデルの信頼限界内にあり,2つの地震時と重回帰モデルの作成 に用いたデータ期間の間での統計的に有意な健全度変化は認められない。

このような回帰値と実測値の比較により,堤体コンクリートのひび割れなど経時的な劣化の発 生・進行や大規模地震による損傷の可能性についての一次診断が可能になることが期待される。



5.3 ダム堤体の健全度低下が固有振動数に及ぼす影響(数値解析による試算)¹³⁾

5.3.1 概要

常時微動計測によりダム堤体の健全度診断を行う上で,堤体の健全度を低下させる変状(劣化・ 損傷)の発生・進行によってダムの振動特性(固有振動数)がどのように変化するかをある程度把握 しておくことも重要である。しかし,経年的な劣化や損傷の発生による健全性の変化を実際のダ ム堤体の振動特性の変化を継続的に把握することで確認することは容易でない。そこで,重力式 コンクリートダムの既往点検結果などから想定される事象として,①ダムの安定性への影響が特 に大きいと考えられる打設面沿いの水平ひび割れ,及び②長期的に進行する可能性のある堤体表 面から内部への劣化を想定し,それらに伴うダム堤体の固有振動数の変化を数値解析により試算 した。

5.3.2 水平ひび割れによる固有振動数の変化

水平ひび割れを有する重力式コンクリートダム堤体(堤高 100 m)と貯水からなる 2 次元有限要 素モデルを作成し,固有値解析を実施した。なお,堤体部の振動特性に着目するため,ここでは 岩盤はモデル化していない。堤敷面の境界条件は,水平方向及び鉛直方向ともに固定とした。貯 水位はダム高の 90%とし,貯水は非圧縮性流体としてモデル化した。堤体内の水平ひび割れは EL.30 m, EL.60 m, EL.90 m (EL.0 m を堤敷面標高とする)の 3 標高のいずれかに想定した。図-5.14 に解析モデルと想定する水平ひび割れの設定標高を示す。



図-5.14 解析モデル(水平ひび割れを考慮)

堤体コンクリート部及び水平ひび割れ部の物性値は表-5.3 に示すとおり設定した。堤体コンク リート部の物性値は,既設の重力式コンクリートダムに使用されている一般的な値に設定した。 水平ひび割れによる影響については,水平ひび割れ部にジョイント要素を設け,その剛性を低下 させることにより考慮する方法を基本とした。なお,ひび割れのモデル化については,当該位置 のコンクリート(ソリッド要素)の弾性係数を低下させる方法も考えられる。このため、代表的ケ ースについて、ジョイント要素を用いず、コンクリートの弾性係数を健全部より低下させる方法 での解析も行った。

		項目	設定値
	相体动	弹性係数 Ec(N/mm ²)	29,000
健全部	(近1) 近日本	ポアソン比 v	0.2
		単位体積質量(kg/m ³)	2,300
	ジョイント	軸剛性 kn(N/mm ³)	2,900
	要素	せん断剛性 ks(N/mm ³)*	1,200
ひび割れ部	ていてど生ました 立7	弾性係数 E(N/mm ²)	2,900
	ソリッド要素・	ポアソン比 v	0.2
		単位体積質量(kg/m ³)	2,300
	※せん断剛性に	は軸剛性 kn の値から弾性論で求ま	こる値とした

表-5.3 堤体コンクリート部の物性値

解析ケースは、水平ひび割れの想定位置・形態、標高、深さの組合せにより、表-5.4 に示すと おり設定した。ケース1,2では表-5.4 中の位置・深さの連続したひび割れ、ケース3では表-5.4 中の位置・深さの断続的な(ミシン目状)ひび割れを想定した(図-5.15)。なお、ひび割れ部分を当該 部のコンクリートの弾性係数の低下で考慮する方法では、EL.30 m、EL.60 m、EL.90 m の各標高 に下流面からの連続した水平ひび割れを想定した3ケースで解析を実施した。

表-5.4 解析ケース

		ていてが実用わ	ひび割れ深さ	ひび 設定	割れの 方法
番号	定位置・形態	想定標高	():ひび割れ想定標高に おける堤体幅	ジョイント 要素 (剛性低下)	ンリッド 要素 (剛性低下)
		EL.30m	0m~51m (56m)		
	上流面のみ	EL.60m	0m~29m (32m)	0	—
1		EL.90m	$0m\sim7m~(8m)$		
1		EL.30m	$0m\sim$ 52m (56m)		
	下流面のみ	EL.60m	$0m\sim 30m$ (32m)	0	0
		EL.90m	$0m\sim7m~(8m)$		
		EL.30m	$0m\sim 51m^{*}$ (56m)		
2	上・下流面	EL.60m	$0m\sim 31m^{*}$ (32m) 0		—
		EL.90m	$0m \sim 7m^{*}$ (8m)		
	断続	EL.30m	2m,4m,8m間隔(56m)		
3	(ミシン目	EL.60m	2m,4m,8m間隔 (32m)	2m,4m,8m間隔 (32m) 0 -	
	状)	EL.90m	1m,2m 間隔(8m)		

※上流面と下流面のひび割れ深さは同一値とした (表中の値はそれぞれの水平ひび割れの深さの合計)。



図-5.15 ミシン目状ひび割れの設定例(模式図)

各ケースの固有値解析結果から得られた上下流方向振動の主要な固有振動モードである1次モ ード,2次モード,及び4次モードの固有振動数と考慮したひび割れ長の堤体幅に対する比の関 係を各モードの振動形とともにそれぞれ図-5.16に示す。

同図において剛性低下させたジョイント要素によってひび割れ部をモデル化した各ケースの 結果を比較すると、水平ひび割れによる堤体固有振動数への影響は、この3つの振動モードで異 なることがわかる。また、低標高部にひび割れを想定した場合にはより低次のモードにおいて、 高標高部にひび割れを想定した場合にはより高次のモードにおいて、その影響(固有振動数の減 少)が相対的に顕著になる傾向がみられる。

このため、低標高部にあるひび割れは、重力式コンクリートダムの上下流方向振動モードとし て一般的に卓越する1次モードの固有振動数の変化により捉えられる可能性が高く、他の振動モ ードとの分離は比較的容易と考えられる。しかし、高標高部のひび割れはより高次の振動モード のうち特定の振動モードの固有振動数を同定して、その変化を検知する必要があると考えられる。

また、ミシン目状の断続的なひび割れがある場合は、合計長さが同じ連続したひび割れがある 場合より固有振動数の減少量が小さくなり、断続的な水平ひび割れの間隔が短くなれば、その影響はさらに小さくなることもわかる。これより、常時微動計測により捉えることのできる堤体内 部のひび割れはある程度連続したものに限られると考えられる。

なお,図-5.16から,ひび割れ長さと各モードの固有振動数低下量の関係は,コンクリートの弾 性係数の低下によりひび割れ部を考慮した解析でも,ジョイント要素を用いて剛性低下を考慮し た場合と概ね同様の傾向であることがわかる。

61



図-5.16 水平ひび割れに伴う固有振動数の変化

5.3.3 表面からの劣化進行による固有振動数の変化

重力式コンクリートダム堤体と貯水からなる2次元有限要素モデルで、堤体表面からの劣化の 進行を堤体表面付近のコンクリートの弾性係数の低下により考慮した場合の固有振動数の変化 について、固有値解析により検討した。解析モデル形状、入力物性値等は、図-5.14のモデル(ダ ム高100m)と同様とし、水平およびひび割れのかわりに表-5.5に示す堤体表面からの劣化深度ま での範囲について健全部よりも堤体表面部のコンクリートの弾性係数を低下させた。解析モデル を図-5.17に示す。

表-5.5 解析ケース(表面劣化を考慮)

表面劣化深度**1	劣化部弹性係数*2
1.0m 3.0m 5.0m 10.0m	0.8Ec 0.5 Ec 0.1 Ec

※1 表面劣化深度は表面から直交方向とした。
 ※2 Ec は堤体コンクリート(健全部)の弾性係数



図-5.17 解析モデル(表面劣化を考慮)

固有値解析の結果を図-5.18 に示す。弾性係数の低下率が大きくなるほど,また弾性係数の低下 を考慮する劣化深度が大きくなるほど固有振動数の低下が大きくなることがわかる。また,振動 モードの次数別では,高次のほうが固有振動数の低下量が大きくなることがわかる。たとえば劣 化部の深さが堤体表面から 3m で弾性係数が健全な状態から 80 %まで低下したと想定した場合 の1次固有振動数の低下は 0.12 Hz であるが,2次固有振動数の減少は 0.36 Hz となった。よって 表面からの劣化進行度を振動特性の変化により捉えようとする場合には,比較的検出が容易な 1 次固有振動数だけでなく,より高次の振動モードの固有振動数に着目することが有利となる可能 性があり,振動モードの検出(同定)が可能な精度で常時微動計測や地震動観測記録の分析を行え ることが重要になると考えられる。



図-5.18 表面からの劣化進行に伴う固有振動数の変化

6. まとめ

本資料では、ダム堤体の経年的な劣化や損傷の発生による健全性の変化(低下)を捉える手法の 1つとして、ダム堤体の振動特性の指標である固有振動数の変化に着目する手法を取り上げ、そ の実ダムの維持管理への適用に向けて、実施した調査・分析等についてとりまとめた。

重力式コンクリートダムを対象とした実ダムでの常時微動計測や地震観測記録等の分析から は、ダム堤体の固有振動数に影響を及ぼす要因が明らかになった。また、それら要因がダム堤体 の固有振動数に及ぼす影響を健全性の低下によるものと区別するために定量化する手法を示す とともに、健全性の低下が生じた場合に予想される固有振動数への影響についても検討を加えた。 得られた主な知見を今後の課題とともにまとめると以下のとおりである。

- (1) 実ダムでの常時微動計測や地震観測記録の分析(4章)
- ・ダムの固有振動数は貯水位変動により影響を受け、貯水位が高くなると低下する。その原因として、貯水の振動に伴う付加質量効果の変化が考えられる。
- ・ダムの固有振動数は外気温の変化と対応し、外気温が低い冬期には夏期よりも低下する。その 原因として、外気温やそれに伴う堤体コンクリートの温度及び体積変化による横継目などの僅 かな開閉による堤体ブロックの拘束条件の変化が考えられる。
- ・常時微動計測結果より推定(同定)される固有振動数は、地震動観測記録より推定(同定)される 固有振動数と概ね対応する。このため、ダム堤体の振動特性についての経時的な変化を把握す るための過去との比較においては、地震動観測記録も活用することが有効である。
- (2) 貯水および温度変化が固有振動数に及ぼす影響とその定量化方法

(重回帰分析による検討,5章5.2)

- ・貯水位及び外気温の変化がダム堤体の固有振動数に及ぼす影響要因として、前者は付加質量効果、後者は堤体内部への熱伝達に伴って生じる横継目の開閉による横継目部のせん断剛性の変化を考え、これらの物理特性を同時に考慮できる1次固有振動数の重回帰モデルを提示した。
- ・個々のダムにおいて、一定期間の貯水深・外気温データを用いて上記モデルでの重回帰式を作成しておけば、任意時点の貯水位・温度条件での回帰式の値を常時微動計測や地震動観測記録に基づく固有振動数の実測値と比較することで、固有振動数をダム堤体の健全度診断のための一次診断指標として利用できる可能性がある。

65

- ただし重回帰モデル適用の際,貯水位変化と外気温変化が連動する貯水池運用のダムでは両者の影響の分離が難しくなる。このため、できるだけ貯水深と外気温の組合せが異なる条件での実測値を得るなどして重回帰モデルの信頼性を向上することが重要となる。
- ・ 今後は、健全度診断における本手法の実用化に向け、ダム堤体で想定される具体的な劣化形態
 に応じた固有振動数への影響や、その検出可能性についても明らかにすることが望まれる。
- (3) ダム堤体の健全度低下が固有振動数に及ぼす影響(数値解析による試算,5章 5.3)
- ・ 堤体内に水平ひび割れがある場合、ひび割れが深くなるほど固有振動数が低下する。
- ・水平ひび割れによる固有振動数の低下傾向は、深さのほか、ひび割れの位置によっても異なる。
 低標高部にある場合は上下流方向振動の1次振動モードに変化が現れやすいが、高標高部にあるひび割れではその影響は小さくなり、より高次モードの固有振動数にも着目する必要がある。
- 水平ひび割れの影響は、その連続性の程度によっても異なる。ミシン目状の細かな断続的ひび 割れは、合計ひび割れ長が同じであっても連続性のあるひび割れに比べてその影響は小さい。
- ・表面劣化に伴う堤体表面部付近のコンクリートの弾性係数の低下によっても固有振動数の低下が生じる。この場合の影響は、1次振動モードに比べより高次の振動モードのほうが大きい。
- ・ 今後,振動特性の変化をダム堤体の健全度の指標として活用しようとする場合,以上のような
 特性を踏まえる必要があると考えられる。

参考文献

- 国土交通省 河川局河川環境課:国土交通省所管ダムにおける定期検査の実施について、国河 環第 80 号, 2001.
- 国土交通省 水管理・国土保全局河川環境課:ダム総合点検実施要領, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/, 2013.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所,独立行政法人土木研究所:平成23年(2011年)東北地方 太平洋沖地震土木施設災害調査速報,国土技術政策総合研究所資料646号,土木研究所資料第 4202号,pp.342-366,2011.
- 4) 飯田隆一: コンクリートダムの設計法, pp.146-154, 1992.
- 5) 松本徳久, 大町達夫, 安田成夫, 山口嘉一, 佐々木 隆, 倉橋 宏: ダムで観測された強震記録の解析, 大ダム, No.193, pp.88-94, 2005.
- 6) 一般社団法人日本大ダム会議ダム地震記録データベース更新分科会:技術委員会 ダム地震記録データベース更新分科会報告,大ダム,No.231, pp.6-54, 2015.
- 7) (公社)土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編, p.39, 2012.
- 8) 金銅将史,小堀俊秀,加嶋武志,佐々木隆:重力式コンクリートダムの固有振動数変化とその 重回帰分析,ダム工学, Vol.25, No.1, pp.16-28, 2015.
- 9) 吉川弘道,呉 智深,田辺忠顕:コンクリートのひびわれ界面に関する構成方程式と基本4係 数の同定,土木学会論文集,第408号/V-11,pp.61-70,1989.
- 10) 篠原保二,金子 葉,高田典英:軸方向変位または荷重制御下におけるコンクリートのせん断 挙動に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.565-570, 1998.
- 例えば、奥野忠一、久米 均、芳賀敏郎、吉澤 正:≪改訂版≫多変量解析法、株式会社日 科技連出版社、pp.259-322、1992.
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所,独立行政法人土木研究所,独立行政法人建築研究所: 平成 19 年(2007 年)能登半島地震被害調查報告,国土技術政策総合研究所資料第 438 号,土木 研究所資料第 4087 号,建築研究資料第 111 号, pp.59-81, 2008.
- 13) 佐々木 隆,金銅将史,小堀俊秀,加嶋武志,大舘 渉:重力式コンクリートダム堤体の健全 度診断における常時微動計測の活用に関する検討,ダム技術, No.313, pp.18-30, 2012.
付録 常時微動計測記録

付録-1	Aダム
付録-2	Bダム
付録-3	Cダム
付録-4	Dダム
付録-5	Eダム







←左岸側



付図-1.2 Aダム標準断面図



	1	12.33	12.48	13.62	13.89	3.81	4.60	4.20	3.73	3.87	4.06	3.66	3.50	3.81	3.48	3.11	3.67	4.14	4.29	4.29	4.14	3.78	3.78	4.03	3.55	4.16	3.68	3.46	3.28
	外気温 (°C)	11.0	26.0	27.0	16.0	16.0	8.0	30.6	4.7	-3.2	0.6	0.2	10.2	14.9	16.2	20.8	19.8	7.4	7.5	7.5	1.3	0.7	10.2	10.4	24.6	17.3	2.0	-1.4	-6.3
(+)	計測箇所 水深 (m)	34.2	22.9	14.8	12.5	89.5	109.9	91.2		54.0	58.5	66.1	79.8	91.8	107.7	111.0	94.1	61.7	47.2	47.2	40.0	51.3	61.0	71.3	86.6	94.2	108.3	109.6	110.3
^ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	計測箇所 基礎標高* EL.(m)	650.0	650.0	650.0	650.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0
	貯水位 EL.(m)	684.2	672.9	664.8	662.5	662.5	682.9	664.2	貯水前	627.0	631.5	639.1	652.8	664.8	680.7	684.0(S.W.L)	667.1	634.7	620.2	620.2	613.0	624.3	634.0	644.3	659.6	667.2	681.3	682.6	683.3
	計測箇所	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廁/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊	上段監査廊/基礎監査廊
	計測 BL.	2	2	2	2	10	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	計測 実施日	2014/4/4	2014/5/30	2014/7/30	2014/10/1	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4	2011/11/28	2012/2/10	2012/3/2	2012/3/16	2012/4/11	2012/5/1	2012/6/15	2012/6/20	2012/9/7	2012/10/31	2012/11/14	2012/11/14	2012/11/29	2013/2/13	2013/3/18	2013/4/4	2013/7/18	2013/9/27	2013/12/18	2014/1/14	2014/2/5

付表-1.1 Aダムの計測結果(1/4)

1	3.37	3.25	4.17	3.74	3.74	3.74	4.14	5.00	1.95	1.68	3.80	3.46	4.20	1.66	1.52	3.87	3.58	4.10	1.89	1.41	3.61	3.50	4.23	2.06	1.56	3.69	4.36	4.55
外気温 (°C)	11.0	11.0	27.0	16.0	16.0	8.0	30.6	30.6	-1.4	-6.3	16.0	8.0	30.6	-1.4	-6.3	16.0	8.0	30.6	-1.4	-6.3	16.0	8.0	30.6	-1.4	-6.3	16.0	8.0	30.6
計測箇所 水深 (m)	111.2	111.2	91.8	89.5	89.5	109.9	91.2	91.2	108.3	109.0	88.2	108.6	89.9	103.9	104.6	83.8	104.2	85.5	98.2	98.9	78.1	98.5	79.8	91.6	92.3	71.5	91.9	73.2
計測箇所 基礎標高* EL.(m)	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	574.3	574.3	574.3	574.3	574.3	578.7	578.7	578.7	578.7	578.7	584.4	584.4	584.4	584.4	584.4	591.0	591.0	591.0	591.0	591.0
貯水位 EL.(m)	684.2	684.2	664.8	662.5	662.5	682.9	664.2	664.2	682.6	683.3	662.5	682.9	664.2	682.6	683.3	662.5	682.9	664.2	682.6	683.3	662.5	682.9	664.2	682.6	683.3	662.5	682.9	664.2
計測箇所	上段監査廊/基礎監査廊																											
計測 BL.	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	15	15	15	15	15
計測 実施日	2014/4/4	2014/4/4	2014/7/30	2014/10/1	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4	2015/8/4	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4

付表-1.2 Aダムの計測結果(2/4)

*基礎標高はブロック中央の基礎岩盤標高を示している。

	1	3.80	4.34	3.69	3.97	3.90	3.59	3.60	3.28	4.48	3.08	4.76	4.36	5.96	2.07	1.62	5.57	6.45	6.52	6.28	4.37	4.59	6.32	1.71	6.64	5.00
	外気温 (°C)	4.7	-3.2	0.6	0.2	10.2	14.9	14.7	25.1	2.2	0.7	24.6	17.3	2.0	-1.4	-6.3	11.0	26.0	27.0	16.0	8.0	30.6	-1.4	-6.3	16.0	30.6
(4)	計測箇所 水深 (m)	-	25.1	29.6	37.2	50.9	62.9	78.8	82.1	19.8	22.4	57.7	65.3	79.4	80.7	81.4	82.3	71.0	62.9	60.6	81.0	62.3	65.2	65.9	45.1	46.8
ゝの計測結果(3	計測箇所 基礎標高* EL.(m)	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	601.9	617.4	617.4	617.4	617.4
E-1.3 A & J	貯水位 EL.(m)	貯水前	627.0	631.5	639.1	652.8	664.8	680.7	684.0	621.7	624.3	659.6	667.2	681.3	682.6	683.3	684.2	672.9	664.8	662.5	682.9	664.2	682.6	683.3	662.5	664.2
付表	計測箇所	上段監査廊/基礎監査廊																								
	計測 BL.	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	17
	計測 実施日	2011/11/28	2012/2/10	2012/3/2	2012/3/16	2012/4/11	2012/5/1	2012/6/15	2012/6/20	2013/1/30	2013/2/13	2013/7/18	2013/9/27	2013/12/18	2014/1/14	2014/2/5	2014/4/4	2014/5/30	2014/7/30	2014/10/1	2015/3/19	2015/8/4	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/8/4

9
₩
結
剄
- <u>1</u> 1111≖
6
4
Ŕ
V
ŝ
-
喪
1
~

	1	6.37	5.87	6.10	4.72	10.78	6.23	11.76	5.00	18.10	4.07	
	外気温 (°C)	-1.4	-6.3	16.0	8.0	-1.4	-6.3	16.0	30.6	16.0	30.6	
	計測箇所 水深 (m)	48.2	48.9	28.1	48.5	31.7	32.4	11.6	13.3	2.8	4.5	
	計測箇所 基礎標高* EL. (m)	634.4	634.4	634.4	634.4	650.9	650.9	650.9	650.9	659.7	659.7	
	貯水位 EL.(m)	682.6	683.3	662.5	682.9	682.6	683.3	662.5	664.2	662.5	664.2	
-	計測箇所	上段監査廊/基礎監査廊										
	計測 BL.	18	18	18	18	19	19	19	19	20	20	
	計測 実施日	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/3/19	2014/1/14	2014/2/5	2014/10/1	2015/8/4	2014/10/1	2015/8/4	

付表-1.4 Aダムの計測結果(4/4)

○付録-2 Bダム

←左岸側

右岸側→





付図-2.2 Bダム標準断面図

付-8

			が-7.1 n /		(c/I)		
計測 実施日	計測 BL.	計測箇所	財水位 EL.(m)	計測箇所 基礎標高* EL.(m)	計測箇所 水深 (m)	外気温 (°C)	1 次固有振動数 (Hz)
2013/7/19	2	天端/基礎監査廊	274.0	256.3	17.7	22.7	27.40
2013/8/23	2	天端/基礎監査廊	273.3	256.3	17.0	25.6	31.19
2013/9/20	2	天端/基礎監査廊	274.7	256.3	18.4	26.2	30.37
2013/10/18	2	天端/基礎監査廊	276.6	256.3	20.3	16.9	26.77
2013/11/15	2	天端/基礎監査廊	277.0	256.3	20.7	13.2	12.81
2013/12/19	2	天端/基礎監査廊	277.4	256.3	21.1	6.6	29.61
2014/1/15	2	天端/基礎監査廊	277.9	256.3	21.6	1.6	27.47
2014/2/21	2	天端/基礎監査廊	278.5	256.3	22.2	5.0	6.81
2012/2/17	ю	天端/基礎監査廊	276.7	250.9	25.8	-0.4	9.41
2012/12/14	ю	天端/基礎監査廊	277.3	250.9	26.4	3.1	8.51
2013/2/14	ю	天端/基礎監査廊	277.9	250.9	27.0	5.0	7.77
2013/7/19	ю	天端/基礎監査廊	274.0	250.9	23.1	22.7	16.01
2013/8/23	ю	天端/基礎監査廊	273.3	250.9	22.4	25.6	16.26
2013/9/20	3	天端/基礎監査廊	274.7	250.9	23.8	26.2	12.32
2013/10/18	з	天端/基礎監査廊	276.6	250.9	25.7	16.9	9.53
2013/11/15	з	天端/基礎監査廊	277.0	250.9	26.1	13.2	8.95
2013/12/19	ю	天端/基礎監査廊	277.4	250.9	26.5	6.6	8.50
2014/1/15	ю	天端/基礎監査廊	277.9	250.9	27.0	1.6	7.85
2014/2/21	ю	天端/基礎監査廊	278.5	250.9	27.6	5.0	14.34
2011/9/12	4	天端/基礎監査廊	274.5	248.9	25.6	28.1	15.78
2012/2/17	4	天端/基礎監査廊	276.7	248.9	27.8	-0.7	14.5
2012/9/14	4	天端/基礎監査廊	273.7	248.9	24.4	24.1	15.85
2012/10/19	4	天端/基礎監査廊	275.5	248.9	26.6	12.0	15.09
2012/11/16	4	天端/基礎監査廊	276.9	248.9	28.0	8.3	14.95
2012/12/14	4	天端/基礎監査廊	277.3	248.9	28.4	3.1	14.93
2013/2/14	4	天端/基礎監査廊	277.9	248.9	29.0	2.3	14.82
2013/3/15	4	天端/基礎監査廊	277.4	248.9	28.5	3.3	15.19
2013/4/19	4	天端/基礎監査廊	279.0	248.9	30.1	7.7	15.02
2013/5/17	4	天端/基礎監査廊	277.3	248.9	28.4	11.8	15.23
*基礎標高はブロ>	ック中央の。	基礎岩盤標高を示している	o				

	1	15.98	15.82	16.04	15.63	15.21	15.12	14.88	15.03	14.94	13.18	14.40	11.86	9.56	9.04	8.51	7.80	6.81	9.48	8.48	7.84	6.36	6.71	5.81	5.20	8.90	7.07	7.83	7.45
	外気温 (°C)	17.9	20.9	23.7	19.9	12.3	10.6	5.8	-0.5	0.2	22.7	25.6	26.2	16.9	13.2	6.6	1.6	5.0	-0.4	3.1	5.0	22.7	25.6	26.2	16.9	13.2	6.6	1.6	5.0
c(2/3)	計測箇所 水深 (m)	26.9	25.1	24.4	25.8	27.7	28.1	28.5	29.0	29.6	26.7	26.0	27.4	29.3	29.7	30.1	30.6	31.2	29.4	30.0	30.6	26.7	26.0	27.4	29.3	29.7	30.1	30.6	31.2
ムの計測結果	計測箇所 基礎標高* EL.(m)	248.9	248.9	248.9	248.9	248.9	248.9	248.9	248.9	248.9	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3	247.3
表-2.2 B ダ	貯水位 EL.(m)	275.8	274.0	273.3	274.7	276.6	277.0	277.4	277.9	278.5	274.0	273.3	274.7	276.6	277.0	277.4	277.9	278.5	276.7	277.3	277.9	274.0	273.3	274.7	276.6	277.0	277.4	277.9	278.5
付	計測箇所	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊	天端/基礎監査廊
	計測 BL.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	6	6
	計測 実施日	2013/6/21	2013/7/19	2013/8/23	2013/9/20	2013/10/18	2013/11/15	2013/12/19	2014/1/15	2014/2/21	2013/7/19	2013/8/23	2013/9/20	2013/10/18	2013/11/15	2013/12/19	2014/1/15	2014/2/21	2012/2/17	2012/12/14	2013/2/14	2013/7/19	2013/8/23	2013/9/20	2013/10/18	2013/11/15	2013/12/19	2014/1/15	2014/2/21

		- -			(c,c)		
「「「」」	計測	計測箇所	貯水位	計測箇所 基礎標高*	計測箇所	外気温	1 次固有振動数
美施日	BL.		EL.(m)	EL. (m)	水深 (m)	(°C)	(Hz)
2012/12/14	7	天端/基礎監査廊	277.3	250.7	26.6	3.1	13.28
2013/2/14	7	天端/基礎監査廊	277.9	250.7	27.2	5.0	12.61
2013/7/19	7	天端/基礎監査廊	274.0	250.7	23.3	22.7	20.79
2013/8/23	7	天端/基礎監査廊	273.3	250.7	22.6	25.6	13.72
2013/9/20	7	天端/基礎監査廊	274.7	250.7	24.0	26.2	5.58
2013/10/18	7	天端/基礎監査廊	276.6	250.7	25.9	16.9	13.82
2013/11/15	7	天端/基礎監査廊	277.0	250.7	26.3	13.2	15.66
2013/12/19	7	天端/基礎監査廊	277.4	250.7	26.7	6.6	18.86
2014/1/15	7	天端/基礎監査廊	277.9	250.7	27.2	1.6	13.68
2014/2/21	7	天端/基礎監査廊	278.5	250.7	27.8	5.0	13.54
2013/7/19	8	天端/基礎監査廊	274.0	257.1	16.9	22.7	25.56
2013/8/23	8	天端/基礎監査廊	273.3	257.1	16.2	25.6	13.71
2013/9/20	8	天端/基礎監査廊	274.7	257.1	17.6	26.2	13.91
2013/10/18	8	天端/基礎監査廊	276.6	257.1	19.5	16.9	25.93
2013/11/15	8	天端/基礎監査廊	277.0	257.1	19.9	13.2	5.55
2013/12/19	8	天端/基礎監査廊	277.4	257.1	20.3	6.6	24.36
2014/1/15	8	天端/基礎監査廊	277.9	257.1	20.8	1.6	25.98
2014/2/21	8	天端/基礎監査廊	278.5	257.1	21.4	5.0	15.23

$\widehat{\mathbf{s}}$
(3/3
₩
凯
6
Ϋ́ Μ
B
ŝ
<u>5</u> -2.
ま ぞ
~



←左岸側









		<u>-</u>			(7/1)~		
「「「」」	計測 DI	計測箇所	貯水位 51.(…)	計測箇所 基礎標高*	計測箇所 *%(…)	を気道	1 次固有振動数
天旭日	DL.		EL.(III)	EL. (m)	小(禾 (III)	(\cap)	(211)
2013/8/22	2	天端/基礎監査廊	318.0	313.8	4.2	25.2	14.08
2013/10/17	2	天端/基礎監査廊	316.9	313.8	3.1	11.5	8.86
2013/12/20	2	天端/基礎監査廊	315.9	313.8	2.1	0.9	3.91
2014/2/20	2	天端/基礎監査廊	320.2	313.8	6.4	0.0	19.90
2013/8/22	3	天端/基礎監査廊	318.0	298.3	19.7	25.2	11.70
2013/10/17	3	天端/基礎監査廊	316.9	298.3	18.6	11.5	4.16
2013/12/20	3	天端/基礎監査廊	315.9	298.3	17.6	0.9	4.06
2014/2/20	3	天端/基礎監査廊	320.2	298.3	21.9	0.0	8.32
2013/8/22	4	天端/基礎監査廊	318.0	283.5	34.5	25.2	8.90
2013/10/17	4	天端/基礎監査廊	316.9	283.5	33.4	11.5	9.35
2013/12/20	4	天端/基礎監査廊	315.9	283.5	32.4	0.9	10.37
2014/2/20	4	天端/基礎監査廊	320.2	283.5	36.7	0.0	7.09
2013/8/22	5	天端/基礎監査廊	318.0	271.0	47.0	25.2	8.77
2013/10/17	5	天端/基礎監査廊	316.9	271.0	45.9	11.5	9.09
2013/12/20	5	天端/基礎監査廊	315.9	271.0	44.9	0.9	8.31
2014/2/20	5	天端/基礎監査廊	320.2	271.0	49.2	0.0	7.81
2013/3/12	9	天端/基礎監査廊	325.6	271.0	54.6	3.1	7.73
2013/6/20	9	天端/基礎監査廊	317.8	271.0	46.8	20.5	8.55
2013/8/22	9	天端/基礎監査廊	318.0	271.0	47.0	25.2	8.74
2013/10/17	9	天端/基礎監査廊	316.9	271.0	45.9	11.5	9.15
2013/12/20	9	天端/基礎監査廊	315.9	271.0	44.9	0.9	8.39
2014/2/20	9	天端/基礎監査廊	320.2	271.0	49.2	0.0	7.87
2013/8/22	7	天端/基礎監査廊	318.0	284.0	34.0	25.2	8.87
2013/10/17	7	天端/基礎監査廊	316.9	284.0	32.9	11.5	9.38
2013/12/20	7	天端/基礎監査廊	315.9	284.0	31.9	0.9	8.40
2014/2/20	7	天端/基礎監査廊	320.2	284.0	36.2	0.0	9.87
	-						

_
$\overline{\mathbf{O}}$
1
$\widetilde{\mathbf{m}}$
ШĶ
晤
Ē
∛
11111
3
.1
1
X
()
0
_
<u> </u>
表
1-
Ý

		-					
計 演 海田	計測 BL.	計測箇所	貯水位 EL.(m)	計測箇所 基礎標高* TT (11)	計測箇所 水深 (m)	外気温 (°C)	1 次固有振動数 (Hz)
				EL. (M)			
2013/8/22	×	大端/基礎監査郎	318.0	293.2	24.8	25.2	11.72
2013/10/17	8	天端/基礎監査廊	316.9	293.2	23.7	11.5	9.13
2013/12/20	8	天端/基礎監査廊	315.9	293.2	22.7	0.9	8.74
2014/2/20	8	天端/基礎監査廊	320.2	293.2	27.0	0.0	11.58
2013/8/22	6	天端/基礎監査廊	318.0	301.8	16.2	25.2	9.99
2013/10/17	6	天端/基礎監査廊	316.9	301.8	15.1	11.5	5.00
2013/12/20	6	天端/基礎監査廊	315.9	301.8	14.1	0.9	6.63
2014/2/20	6	天端/基礎監査廊	320.2	301.8	18.4	0.0	11.58
2013/8/22	10	天端/基礎監査廊	318.0	313.4	4.6	25.2	11.83
2013/10/17	10	天端/基礎監査廊	316.9	313.4	3.5	11.5	8.91
2013/12/20	10	天端/基礎監査廊	315.9	313.4	2.5	0.9	3.94
2014/2/20	10	天端/基礎監査廊	320.2	313.4	6.8	0.0	11.60
2013/8/22	11	天端/基礎監査廊	318.0	320.7	-	25.2	19.04
2013/10/17	11	天端/基礎監査廊	316.9	320.7	-	11.5	23.15
2013/12/20	11	天端/基礎監査廊	315.9	320.7	-	0.9	31.30
2014/2/20	11	天端/基礎監査廊	320.2	320.7	,	0.0	30.89

$\widehat{\mathbf{A}}$
2
9
₩
讵
) M
∛
1111111
3
2
1
R
\mathbf{O}
-
2
ω.
111
ΨŔ
Ţ





1975

竣工年



	1	28.0	29.9	26.6	12.07	14.81	11.26	14.5	17.1	17.51
	外気温 (°C)	6.0	20.8	2.4	6.0	20.8	6.0	6.0	20.8	2.4
	計測箇所 水深 (m)	-	5.7	9.2	9.7	25.3	21.2	1.4	8.2	11.7
	計測箇所 基礎標高* EL.(m)	220.7	220.7	220.7	209.9	201.1	198.4	218.2	218.2	218.2
	貯水位 EL.(m)	219.6	226.4	229.9	219.6	226.4	219.6	219.6	226.4	229.9
-	計測箇所	天端/フーチング	天端/フーチング	天端/フーチング	天端/基礎	天端/フーチング	天端/基礎	天端/基礎	天端/フーチング	天端/フーチング
	計測 BL.	2	2	2	3	4	5	11	11	11
	計測 実施日	2012/1/10	2012/10/11	2013/2/19	2012/1/10	2012/10/11	2012/1/10	2012/1/10	2012/10/11	2013/2/19

付表-4.1 Dダムの計測結果(1/2)

2/2
$\dot{\mathbf{v}}$
₩
結
画
1
111111
6
4
TX.
_``
Д
2
4
11
表
+-
Ý

	1	11.7	11.9	10.7	10.7	11.6
	() () ()	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
~	計測箇所 水深 (m)	26.2	26.2	26.2	26.2	12.7
	計測箇所 基礎標高* EL.(m)	198.5	198.5	198.5	198.5	212.0
	貯水位 EL.(m)	224.7	224.7	224.7	224.7	224.7
	計測箇所	天端(ピア上)/基礎	天端(ピア上)/基礎	天端(ピア上)/基礎	天端(ピア上)/基礎	天端(ピア上)/フーチング
	計測 BL.	9	L	8	6	10
	計測 実施日	2014/10/8	2014/10/8	2014/10/8	2014/10/8	2014/10/8



〇付録-2 Eダム





到日日	計測 BL.	計測箇所	貯水位 EL.(m)	計測國所 基礎標高* EL.(m)	計測箇所 水深 (m)	外気温 (C)	1
/2/27	10	天端/基礎監査廊	湛水前	238.4	-	-0.9	5.80
./6/25	10	天端/基礎監査廊	288.6	238.4	50.2	18.3	6.00
/11/11	10	天端/基礎監査廊	301.3	238.4	62.9	5.6	4.42
5/2/26	10	天端/基礎監査廊	260.0	238.4	21.6	-1.6	5.30
1/2/27	11	天端/基礎監査廊	湛水前	227.5	-	-0.9	5.39
1/6/25	11	天端/基礎監査廊	288.6	227.5	61.1	18.3	5.16
/11/11	11	天端/基礎監査廊	301.3	227.5	73.8	5.6	4.69
4/2/27	12	天端/基礎監査廊	湛水前	205.3	-	-0.9	5.00
4/6/25	12	天端/基礎監査廊	288.6	205.3	83.3	18.3	5.00
/11/11	12	天端/基礎監査廊	301.3	205.3	96.0	5.6	4.34
1/2/27	13	天端/基礎監査廊	湛水前	205.3	-	-0.9	4.23
1/6/25	13	天端/基礎監査廊	288.6	205.3	83.3	18.3	5.00
-/2/27	14	天端/基礎監査廊	湛水前	205.3	-	-0.9	4.43
-/2/27	14	天端/基礎監査廊	湛水前	205.3	-	-0.9	4.55
-/6/25	14	天端/基礎監査廊	288.6	205.3	83.3	18.3	4.68
-/6/25	14	天端/基礎監査廊	288.6	205.3	83.3	18.3	4.59
/11/11	14	天端/基礎監査廊	301.3	205.3	96.0	5.6	3.41
/11/11	14	天端/基礎監査廊	301.3	205.3	96.0	5.6	3.36
(/2/25	14	天端/基礎監査廊	260.0	205.3	54.7	-2.2	4.62
5/2/25	14	天端/基礎監査廊	260.0	205.3	54.7	-2.2	4.42
-/6/25	16	天端/基礎監査廊	288.6	196.0	92.6	18.3	6.31
/11/11	16	天端/基礎監査廊	301.3	196.0	105.3	5.6	3.56
(/2/25	16	天端/基礎監査廊	260.0	196.0	64.0	-2.2	4.59

付表-5.1 Eダムの計測結果(1/2)

計測	計測	世輿東桂	貯水位	計測箇所 其涨趰宣*	計測箇所	外気温	1 次固有振動数
実施日	BL.	17(日1)(11)	EL.(m)	金硬術同 EL. (m)	水深 (m)	(°C)	(Hz)
2014/2/28	17	天端/基礎監査廊	湛水前	196.0		-0.9	6.17
2014/6/25	17	天端/基礎監査廊	288.6	196.0	92.6	18.3	3.85
2014/11/11	17	天端/基礎監査廊	301.3	196.0	105.3	5.6	3.97
2015/2/25	17	天端/基礎監査廊	260.0	196.0	64.0	-2.2	4.38
2014/2/28	18	天端/基礎監査廊	湛水前	196.0	-	-0.9	5.46
2014/6/25	18	天端/基礎監査廊	288.6	196.0	92.6	18.3	5.81
2015/2/25	18	天端/基礎監査廊	260.0	196.0	64.0	-2.2	5.91
2014/2/28	19	天端/基礎監査廊	湛水前	205.3	-	-0.9	5.03
2014/6/25	19	天端/基礎監査廊	288.6	205.3	83.3	18.3	5.79
2014/11/11	19	天端/基礎監査廊	301.3	205.3	96.0	5.6	3.97
2015/2/25	19	天端/基礎監査廊	260.0	205.3	54.7	-2.2	5.91
2015/2/25	20	天端/基礎監査廊	260.0	225.9	34.1	-2.2	6.00
2014/2/28	21	天端/基礎監査廊	湛水前	235.7	-	-0.9	7.90
2014/6/25	21	天端/基礎監査廊	288.6	235.7	52.9	18.3	6.64
2014/11/11	21	天端/基礎監査廊	301.3	235.7	65.6	5.6	5.70
2015/2/25	21	天端/基礎監査廊	260.0	235.7	24.3	-2.2	5.96

6
5
$\widetilde{\mathbf{u}}$
結
剄
Ŧ
6
4
۲Ľ
() ()
щ
•
Ci.
ч) Т
表
1-

土木研究所資料 TECHNICAL NOTE of PWRI No.4330 March 2016

編集·発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは 国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754