

◆特集：「ストック・メンテナンスの世紀」への対応◆

## 重力式コンクリートダム の揚圧力計測による 安全管理の合理化に関する検討

富田尚樹\* 山口嘉一\*\* 佐々木 隆\*\*\* 小堀俊秀\*\*\*\*

### 1. はじめに

管理中のコンクリートダムでは、堤体および基礎岩盤の安全管理を目的として、漏水量、変形、揚圧力などの計測が行われている。

漏水量、変形、揚圧力の計測については、管理段階が進んでダムの挙動が安定するにしたがい、その頻度を低下させるのが一般的であるが、圧力計の故障による測定不能、基礎排水孔の目詰まりの放置など、本来、実施しておかなければならない作業が必ずしも実施されていない事例も多く見られる。

また、地震などの突発的事象の発生を想定すると、極端に計測頻度や点数を減らすことは安全管理上、問題が発生する可能性があると考えられる。実際、地震時に揚圧力や排水量、漏水量等が変化している事例<sup>1),2)</sup>が報告されている。一方で、地震被害調査では計測頻度が粗になっているため、直前のデータの確認が出来ず、その結果、測定値の異常の判断が困難となった事例もある。

以上のことから、漏水量、変形量、揚圧力などの基本的な計測項目については、常時のみならず、地震時も想定して、計測機器、設備の点検、清掃を行い、常に良好な状態に保つ必要がある。また、これらの計測項目については、堤体の挙動が安定状態に達した第3期以降も必要最小限の計測点数、計測頻度により上記の計測を継続する必要があると考えられる。

特に、揚圧力は貯水池からの浸透流によりダム堤体を持ち上げる方向に作用し、その安定性検討において重要な荷重である。揚圧力は堤体内通廊に設けた基礎排水孔の孔口部に圧力計を設置して測定される。基礎排水孔は揚圧力を低減し、堤体の安全性を確保、向上させる機能をもつとともに揚圧力測定にも用いられる。また、基礎排水孔は

ダム軸に平行なライン上にはほぼ全域に配置されるため、これで測定される揚圧力、基礎排水量の変化傾向から堤体周辺の基礎岩盤の状況を推定することができる。そこで本論文では、重力式コンクリートダムの揚圧力に着目し、基礎排水孔の状態と揚圧力値および堤体安定性に及ぼす影響について三次元浸透流解析を用いて検討するとともに、揚圧力計測の合理化について考察した。

### 2. 解析モデルと解析の基本条件

基礎排水孔や横継目の効果も考慮して揚圧力分布を検討するために三次元浸透流解析を行う。解析モデルを図-1に示す。

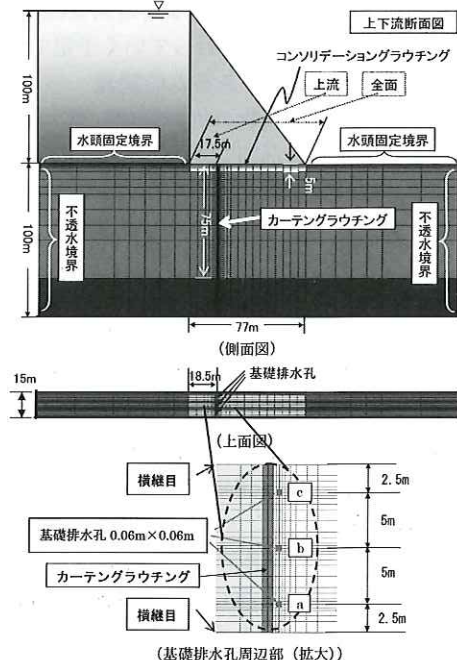


図-1 解析モデル

モデルダムは、堤高100m、堤敷長77mの上流面鉛直の重力式コンクリートダムで、堤体幅(解析領域の奥行)は通常の1ブロック幅の15mとした。堤体上流端から17.5m地点にカーテングラウ

Rationalization of Safety Management Based on Uplift Measurement for Existing Concrete Gravity Dams

チングを深度75mまで施工し、その改良幅は1mとした。また、コンソリデーショングラウチングの施工深度は5mとし、堤敷全面とカーテングラウチング施工位置より上流範囲のみに施工した場合の2種類を設定した。よって、グラウチングパターンとして表-1の2ケースを設定することとなる。基礎排水孔は上流端から18.5mの位置に、孔径φ0.06mに相当するように0.06m×0.06mの正方形断面で、鉛直方向に5m、ダム軸方向で横継目から2.5mの地点および中心部に5m間隔で3孔設置した。また、基礎排水孔の孔口は地表面標高に一致させた。横継目内の浸透挙動をより現実に近い形で表現するために横継目部をモデル化した。また、カーテンラインより上流部での横継目部への浸透流の周り込みを防ぐために、横継目部直下の基礎岩盤部に、便宜的に難透水性の要素を設定した。

境界条件は岩盤底部と側面、およびダム堤体底部の基礎排水孔部を除いた範囲は不透水境界とした。また、岩盤上面のダム堤体上流部と下流部は水頭固定境界とし、各々基準面を地表面として100mと0mの水頭を設定し、基礎排水孔の孔口は浸出面とした。

各部の透水係数を表-2に示す。ここでは、基礎岩盤の透水係数について、ルジオン値の1Luを $1 \times 10^{-5}$ cm/secと等価として設定している。ルジオン値は岩盤の透水性の指標であり、0.98MPaの有効注入圧力でボーリング孔内の締め切った区

表-1 グ라우チングパターン

ケース	条件
CASE-1	コンソリデーショングラウチング (上流) +カーテングラウチング
CASE-2	コンソリデーショングラウチング (全面) +カーテングラウチング

表-2 各部の透水係数

領域	ルジオン値 (Lu)	透水係数 (cm/sec)
未処理岩盤部	75m以浅: 50	$5.0 \times 10^{-4}$
	75m以深: 1	$1.0 \times 10^{-5}$
コンソリデーショングラウチング部	5	$5.0 \times 10^{-5}$
カーテングラウチング部	1	$1.0 \times 10^{-5}$
基礎排水孔部	開放時: $1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^0$
	閉塞時: 別途設定	別途設定
横継目部		別途設定

間に注入した場合の区間長1m、単位時間1min当りの注入量 (ℓ/min/m) で示される。

### 3. 検討条件

#### 3.1 横継目排水の影響検討

横継目に相当する要素に各種の透水係数を与え、横継目の透水状況が揚圧力分布に与える影響を検討した。グラウチングパターンはCASE-2とした。

横継目に与える透水係数は $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10$ cm/secの範囲で1オーダー刻みとした。ここで、幅1cmの横継目モデルに上記の透水係数を与えた場合と等しい浸透能力を持つ平行平板の幅をヘルショウ流れ<sup>3)</sup>に基づいて求めると0.001~0.1cm幅に相当する。

#### 3.2 基礎排水孔および基礎岩盤の目詰まりの影響検討

横継目要素に10cm/secの透水係数を与え、グラウチングパターンはCASE-2としたうえで、基礎排水孔および基礎岩盤の目詰まりが揚圧力分布に与える影響を検討した。

##### (1) 基礎排水孔およびその周辺基礎岩盤の目詰まりの影響

基礎排水孔が目詰まりした場合と基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合の両者の影響を検討した結果、同様な傾向が得られたため、ここでは基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合について示す。

基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした条件を考慮するために、図-2の基礎排水孔周辺部拡大図における基礎排水孔周辺1.0m×1.0m四方の地表より深度5m (「周辺側部」と呼ぶ。) および

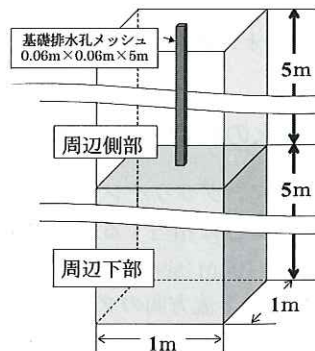


図-2 基礎排水孔周辺部拡大図

基礎排水孔直下1.0m×1.0m四方の基礎排水孔底部より深度5m（「周辺下部」と呼ぶ。）の範囲を設定した。基礎岩盤「目詰まりなし」の場合として「周辺側部」を5Lu（コンソリデーショングラウチング部に相当）、「周辺下部」を50Lu（未処理岩盤部に相当）とし、「目詰まり」の場合として、「周辺側部」と「周辺下部」のルジオン値を同じ値で、5Lu、1Lu、0.1Lu、0.01Luとして与えた。

(2) カーテングラウチングより上流側基礎岩盤の目詰まりの影響

カーテングラウチングより上流側の堤敷範囲で地表より75mまでの広範囲が経年的に目詰まりしたことを想定し、目詰まり部の透水係数としては基礎岩盤の透水係数の約1/2の20Luまで低下した場合と、コンソリデーショングラウチング程度の5Luまで低下した場合を想定した。

3.3 揚圧力の計測時の揚圧力分布の検討

現場で揚圧力を測定する方法には、基礎排水孔を隔孔ごとに閉塞する隔孔閉塞法、基礎排水孔を全て閉塞する全孔閉塞法がある。

なお、ここでの揚圧力は、定常状態での値であり、揚圧力計測のために基礎排水孔を閉めてから十分に時間が経過した場合を想定したものである。

揚圧力測定時の分布と実際に堤体に作用する揚圧力分布の関係を把握するために、図-1中のブロック中央の基礎排水孔bを閉塞して揚圧力を測定するブロッカー一孔閉塞（隔孔閉塞に相当）、および基礎排水孔a、b、cを全て閉塞して揚圧力を測定する全孔閉塞で検討した。

解析は、横継目に10cm/secの透水係数を与え、グラウチングパターンCASE-1、CASE-2ともに採用した。また、基礎排水孔周辺の基礎岩盤は目詰まりの有無も考慮し、基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりをした場合では、「周辺側部」と「周辺下部」のルジオン値を同じ値で、0.01Luとして与えた。

4. 横継目排水の影響検討結果

図-3、図-4に、グラウチングパターンCASE-2において、横継目に相当する要素の透水係数を $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10 \text{cm/sec}$ まで1オーダー刻みで変化させた場合の上下流方向のダム軸方向平均揚圧力分布（上下流方向の平均揚圧力分布と呼ぶ。）、および基礎排水孔設置線上における揚圧力分布

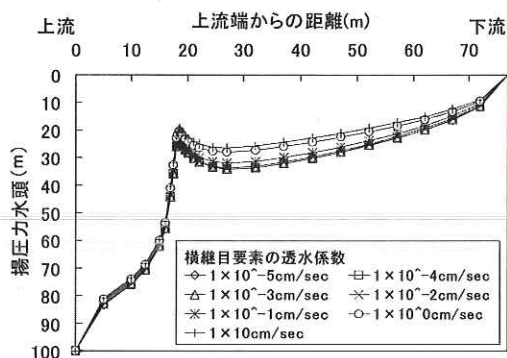


図-3 上下流方向の平均揚圧力分布（横継目要素の透水係数を変化させた場合）

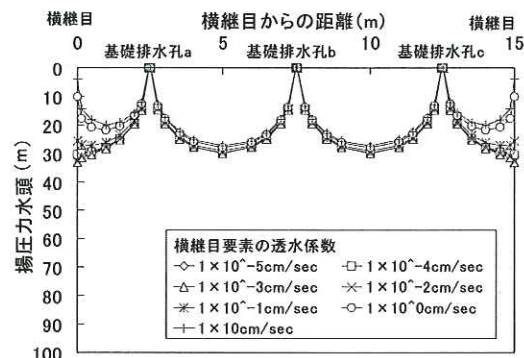


図-4 ダム軸方向の揚圧力分布（横継目要素の透水係数を変化させた場合）

（ダム軸方向の揚圧力分布と呼ぶ。）を示した。

図-3から、カーテングラウチングおよび基礎排水孔より上流側においては、横継目の透水係数の変化に伴う揚圧力分布の変化は小さいが、下流側においては、横継目の透水係数の増加に伴い揚圧力が低下することに加えて、揚圧力分布が直線的な分布へ移行していることがわかる。

図-4から、ダム軸方向の揚圧力分布についても、全体としては、横継目の透水係数が大きくなると揚圧力は低減するが、揚圧力低減効果は横継目付近に限定され堤敷中央まで達しないことがわかる。

5. 基礎排水孔および基礎岩盤の目詰まりの影響検討結果

5.1 基礎排水孔周辺基礎岩盤の目詰まりの影響

グラウチングパターンCASE-2について、基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合の、上下流方向の平均揚圧力分布を図-5に、ダム軸方向の揚圧力分布を図-6に示す。また、目詰まり

岩盤の透水係数とダム軸方向に平均した上下流方向の全揚圧力の関係を整理したものを図-7に示す。

基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりが進行し透水係数が小さくなると、ダム軸方向および上下流方向の揚圧力分布はともに増加傾向を示すが、その影響範囲は基礎排水孔から下流に10~20m程度である。

また、基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりが進行し透水係数が小さくなると、全揚圧力は増加するが、今回の解析条件下では1割程度の差しかない。

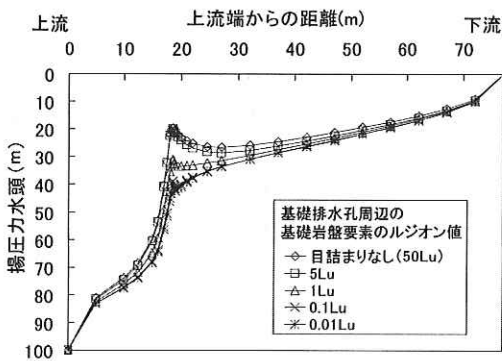


図-5 上下流方向の平均揚圧力分布 (基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合)

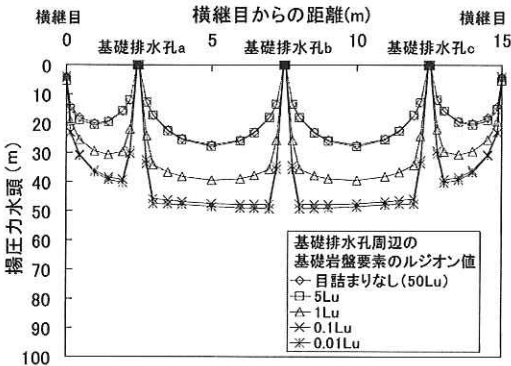


図-6 ダム軸方向の揚圧力分布 (基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合)

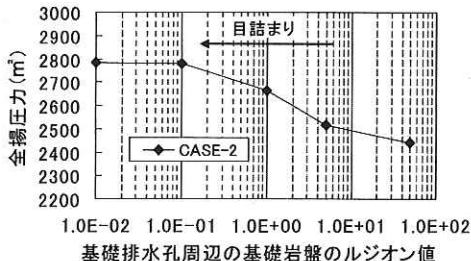


図-7 透水係数と上下流方向の全揚圧力の関係

## 5.2 カーテングラウチングより上流側岩盤の目詰まりの影響

グラウチングパターンCASE-2において、カーテングラウチングより上流側基礎岩盤が広範囲にわたって20Lu、5Luまで目詰まりした場合の、上下流方向の平均揚圧力分布を図-8に示す。

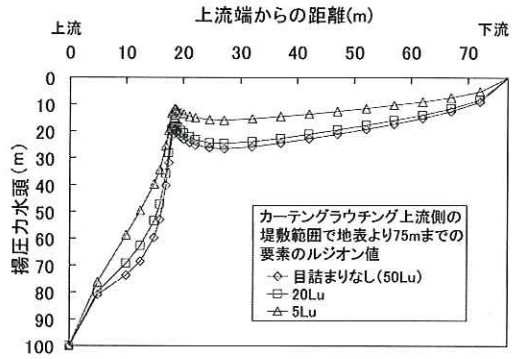


図-8 上下流方向の平均揚圧力分布 (カーテングラウチング上流側岩盤が目詰まりした場合)

カーテングラウチングより上流側の基礎岩盤が20Luまで目詰まりが進行した場合、上下流方向の平均揚圧力分布は、若干減少する。一方、5Luまで目詰まりが進行した場合は、上下流方向の平均揚圧力分布は大きく減少している。

以上から基礎排水孔およびその周辺の基礎岩盤が目詰まりが進行した場合は、上下流方向の平均揚圧力分布は増加傾向を示す。一方、カーテングラウチングより上流側の基礎岩盤の目詰まりが進行した場合は、その目詰まりによる程度の違いはあるが、上下流方向の平均揚圧力分布は減少傾向を示すという両者の違いが確認された。

## 6. 揚圧力の計測方法と揚圧力分布の検討結果

揚圧力測定方法ごとに、グラウチングパターンCASE-1、CASE-2について検討した結果、同様な傾向が得られたため、ここではCASE-2の結果について示す。また、比較対照として揚圧力が増加する基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりしたケースについても、目詰まりしていないケースとともに検討した。基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりしていない場合、および基礎排水孔周辺の基礎岩盤が0.01Luまで目詰まりした場合について、ダム軸方向の揚圧力分布を整理したものをそ

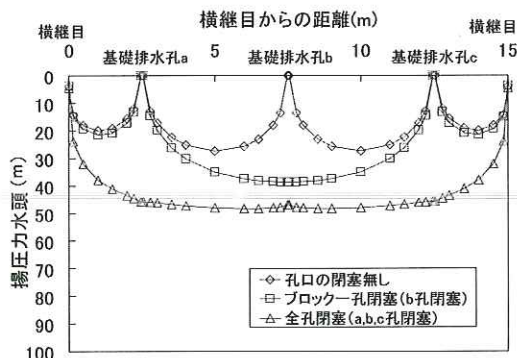


図-9 ダム軸方向の揚圧力分布 (基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりしていない場合)

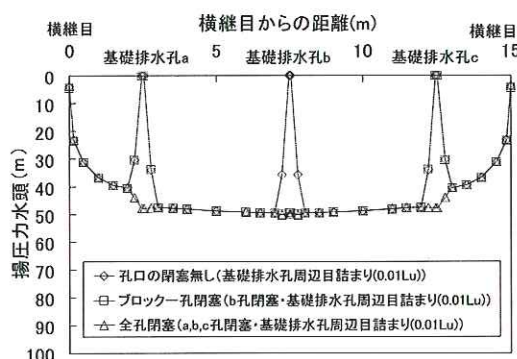


図-10 ダム軸方向の揚圧力分布 (基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合)

表-3 揚圧力測定値とダム軸方向揚圧力の比較

ケース	条件	ブロッカー孔閉塞		全孔閉塞	
		最大値	ダム軸方向の平均揚圧力	最大値	ダム軸方向の平均揚圧力
CASE-1	基礎排水孔周辺基礎岩盤目詰まりなし	0.66	0.71	0.49	0.41
CASE-2	基礎排水孔周辺基礎岩盤目詰まりなし	0.71	0.74	0.57	0.45
CASE-1	基礎排水孔周辺基礎岩盤0.01Luまで目詰まり	0.87	0.97	0.87	0.90
CASE-2	基礎排水孔周辺基礎岩盤0.01Luまで目詰まり	0.99	0.97	0.98	0.91

※表の値は、各測定方法による測定値に対する孔を閉塞しない場合の実際に分布する値の比率を示したものである。

それぞれ図-9、図-10に示す。

また、孔を閉塞しない場合の揚圧力の最大値、およびダム軸方向の平均揚圧力を、ブロッカー孔閉塞、全孔閉塞と比較したものを表-3に示す。

ブロッカー孔閉塞ないしは全孔閉塞により測定された揚圧力は通常のダム運用状況、つまり基礎排水孔を閉塞していない場合と比較してかなり大

きい値となっているが、孔周辺の日詰まりにより両者の差が、特にブロッカー孔閉塞の場合、かなり小さくなるのがわかる。

## 7. 堤体安定性の検討

5. 1、6で得られた揚圧力分布をもとに基礎岩盤の日詰まり等が堤体の安定性に及ぼす影響について検討した。グラウチングパターンはCASE-1、CASE-2とし、基礎岩盤が目詰まりしていない基本ケース、および基礎排水孔周辺の基礎岩盤が0.01Luまで目詰まりした条件について、せん断安全率を算出し、表-4のようにまとめた。なお、基礎岩盤のせん断強度および内部摩擦角は、河川管理施設等構造令<sup>5)</sup>(以下、構造令)で規定される設計揚圧力分布を用いた場合にせん断安全率が4.0となるように、基礎岩盤のせん断強度を258tf/m<sup>2</sup>、内部摩擦角を45°とした。また、参考までに基本ケースで、ブロッカー孔閉塞による揚圧力測定値(6の計算結果)を基礎排水孔位置での揚圧力係数とし、上流側100%、下流側0%の2直線分布で揚圧力を与えた場合の計算も行った。

表-4 せん断安全率

ケース	条件	せん断安全率
基本ケース	CASE-1 基礎岩盤目詰まりなし	3.97
	CASE-2 基礎岩盤目詰まりなし	3.89
基礎排水孔周辺の基礎岩盤が0.01Luまで目詰まりしたケース	CASE-1 基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まり	3.94
	CASE-2 基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まり	3.84
参考(揚圧力はブロッカー孔閉塞の測定値をもとに2直線分布を仮定)	CASE-1 基礎岩盤目詰まりなし	4.00
	CASE-2 基礎岩盤目詰まりなし	3.89

基本ケースにおいて、せん断安全率が4.0以下となっていることから、揚圧力分布は構造令で与えられている分布より若干大きいものになっているのがわかる。また、基本ケースをベースとして、基礎排水孔周辺の岩盤の日詰まりが進行した場合のせん断安全率を見てもその減少は小さい。参考ケースとしてブロッカー孔閉塞による揚圧力測定値を基礎排水孔位置での揚圧力係数とし、上流側100%、下流側0%の2直線分布で揚圧力を与えた場合については基本ケース、基礎排水孔周辺

の岩盤の目詰まりが進行した場合のケースと比較してその差は小さい。

## 8. まとめ

コンクリートダム的重要な計測項目の一つであり、安定性検討において重要な荷重である揚圧力に着目し、横継目排水の揚圧力に対する影響、基礎排水孔および基礎岩盤が目詰まりした場合の揚圧力分布の変化、揚圧力測定時の分布と実際に堤体に作用する揚圧力分布の関係について検討し、揚圧力計測設備の機能回復の必要性の判断方法を検討した。

本検討の成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 基礎排水孔およびその周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合は、堤体に作用する揚圧力が増加する。一方、カーテングラウチングより上流側の基礎岩盤が広範囲に渡って目詰まりした場合は、堤体に作用する揚圧力が減少する。
- (2) 基礎排水孔やその周辺岩盤に目詰まりが発生した場合、基礎排水孔の排水機能、揚圧力低減効果が低下する。よって、揚圧力が経年的に低下してきた場合には、それが基礎岩盤全体の性状変化を表すものか、あるいは局所的な性状変化かについて排水量の変化とあわせて判断することが重要と考えられる。揚圧力、基礎排水量の変化傾向から判断しにくい場合は、①基礎排水孔内を清して、揚圧力計測値に変化がないかを見る、②基礎排水孔の水面位置を計測し、揚圧力が低下しているか、あるいは孔そのものが目詰まりしているかを調べる、あるいは③既存の基礎排水孔の間に新たな観測孔を設けて、基礎排水孔以外の場所での揚圧力の大きさを調査するとともに、既

存基礎排水孔の開閉が観測孔における揚圧力に与える影響を評価することが対策として考えられる。

- (3) 浸透流解析により得られた揚圧力分布をもとにせん断安全率を算出した結果、基礎排水孔、基礎排水孔周辺の基礎岩盤が目詰まりした場合のせん断安全率は、目詰まりしていない場合と比較して、それほど差がない結果となった。

## 参考文献

- 1) 藤沢侃彦、永山 功、中村 昭、佐々木 隆、岩下友也、松本徳久：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告 第8編 ダム施設の被害、土木研究所報告、第196号、p.321-339、1996.3
- 2) 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、独立行政法人港湾空港技術研究所：平成15年5月26日宮城県沖地震に係わる現地調査報告書 6. ダムの被害状況、pp.24-25、2003.9
- 3) 市原裕之、山口嘉一、佐々木 隆、小堀俊秀：重力式コンクリートダムの横継目の揚圧力低減効果に関する解析的検討（その2）、第58回土木学会年次学術講演会講演概要集（CD-ROM）、2003.9
- 4) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック、p.76、1989.1
- 5) (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、(社)日本河川協会、山海堂、2002.1

富田尚樹\*



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  
Naoki TOMIDA

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首席研究員、工博  
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI

佐々木 隆\*\*\*



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  
Takashi SASAKI

小堀俊秀\*\*\*\*



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