

### 3.2 実測揚圧力に基づく重力式コンクリートダム の安定計算に関する調査

研究年度：令和4年度

研究分野：ダム構造・設計及び施工に関する調査研究

調査研究名：実測揚圧力に基づく重力式コンクリートダム の安定計算に関する調査

研究者：山口 嘉一

#### 【要約】

試験湛水後の安全性評価時や総合点検時には、基礎排水孔を用いた実測揚圧力を用いた安定計算が実施されることがある。本論文では、そのような場合における、安定計算モデル・物性値の設定等についての留意点や3ダムにおける実測揚圧力の補正（バルブを開放した状況での揚圧力分布の推定）方法などに着目した事例調査を行い、その結果についてとりまとめた。

#### 【キーワード】

重力式コンクリートダム、揚圧力、安定計算、安全管理

#### （注記）

本論文において、他文献から図表等を引用する際、引用文献の記号表記をそのまま採用している。そのため、本論文全体としては記号の不統一となる場合があるが、記号出現時に確実にその定義を行うことで対応している。

#### 1. はじめに

揚圧力は重力式コンクリートダムの設計において最も重要な設計荷重のひとつである。そのため、現行のダムの設計基準<sup>1), 2)</sup>においては、揚圧力を設計荷重として考慮し、その分布について基礎排水孔の設置あるいは効果の有無に応じて規定されている（河川管理施設等構造令第6条（堤体等に作用する荷重の種類）<sup>1)</sup>、同規則第8条（貯留水による揚圧力）<sup>1)</sup>）。また、重力式コンクリートダムの湛水、運用にあたっては、安全管理の基本となる計測項目として、基礎排水孔に設置された圧力計等を用いた揚圧力の計測が規定されている（河川管理施設等構造令第13条（計測装置）<sup>1)</sup>）。つまり、揚圧力は重力式コンクリートダムの安全管理のために最も重要な計測項目の一つでもある。揚圧力は、揚圧力が実際に作用する面積の比率を示す「面積係数」と実際に作用する圧力強度を示す「強度係数」の積で表現されるといわれている<sup>3)</sup>。前者の面積係数については、厳密に具体的数値を設定するには未解明の課題があること、また強度係数については、数多くの実測結果等も踏まえて設定されているもののダムごとの地

質条件等の違いによりばらつきがあることや、基礎排水孔を閉塞して揚圧力を計測する方法では通常の開放時の揚圧力を厳密には計測できないなどの課題がある。このようなことから、設計荷重として揚圧力を設定するに際して、他の荷重よりも不確実性の高い荷重であると考えられている。

ただし、現行設計における揚圧力は、上記のような課題を踏まえて、設計上安全側の立場から面積係数を100%と設定するなど工学的に適切に設定されていること、設計全般としては、設計荷重等における不確実性を補う適切な安全率を設定していること、さらには現行の設計基準に基づいて設計されたダムが1995年の兵庫県南部地震やその後頻発している大規模地震においても安全性に係わるような被害を被っていないことなどから、現行設計方法は十分な安全設計を可能にしていると考えられる。上記に示した、揚圧力の設計荷重としての不確実さも踏まつつも、例えば試験湛水時に計測した揚圧力が設計値よりもかなり大きくなった場合には、実測揚圧力を用いた安定計算を実施して所要の安全率を満足していることを確認しているダムも最近では少なくない。ここで示す実測揚圧力は基礎排水孔を用いて計測した揚圧力であるが、通常は開放しているバルブを閉塞して計測した揚圧力であるため、通常バルブを開放した状態での揚圧力ではなく（より大きく）、実測値をそのまま用いて安定計算を行った場合には安全側の対応となる。この課題に対する対応として、基礎排水孔の周辺に揚圧力専用の測定孔（以下、「揚

圧力専用孔」とよぶ。)を設置することが考えられる。これにより、基礎排水孔のバルブの開閉とは無関係に揚圧力の計測が行える。しかし、多くの重力式コンクリートダムにおいては、揚圧力専用孔を設置している状況にはない。また、堤体コンクリートの打設前に基礎地盤中に間隙水圧計を設置して揚圧力を計測する場合もある。この場合も、基礎排水孔のバルブの開閉とは無関係に揚圧力の計測が行えるメリットがある。

しかし、設置に当たってはグラウチングによる閉塞について考慮する必要があること、間隙水圧計の計器寿命などを考えると、ダムの安全管理を目的とした長期的な計測には必ずしも適していない。

以上のことから、基礎排水孔を用いた揚圧力計測が一般的に用いられており、実測揚圧力を用いた安定計算を行う場合には、その計測値を踏まえた安定計算が行われている場合が多いと考える。そこで本報告では、そのような場合における安定計算モデル・物性値の設定や実測揚圧力の補正（バルブを開放した状況での揚圧力分布の推定）などに着目して事例調査を行った。

なお、重力式コンクリートダムの安全管理における実測揚圧力の評価にあたっての留意点などについては、参考文献<sup>3)~6)</sup>を参照されたい。このうち、「多目的ダムの建設（平成17年版）」<sup>6)</sup>には以下のような記述がある。「(前略) 揚圧力からダムの安全性を判断するには、基礎排水孔の排水量の場合と同様に、貯水位と揚圧力の相関性を重視する必要がある。

すなわち、揚圧力と貯水位が線形関係にあれば、ダムの挙動は安定した状態にあり、ダムの安全性は確保されているといえる。

なお、揚圧力の計測値と設計値を比較することによってダムの安全性を評価することも可能であるが、この方法はあまり推奨できる方法ではない。すなわち、揚圧力が基礎排水孔の位置で、設計値より小さくても、揚圧力が貯水位の変化に対応していなければ、基礎地盤に何らかの異状が生じていると判断すべきであり、また計測された揚圧力が設計値より大きくなっても、揚圧力と貯水位の線形性が保たれていれば、ダムは安定した状態にあると判断すべきだ

からである。

したがって、揚圧力が高いという理由だけで対策を講じることは少ない。

なお、対策工としては、当該基礎排水孔の周辺に追加の基礎排水孔を設置するのが一般的である。(以下略)」

また、近年試験湛水を実施した重力式コンクリートダムにおける実測揚圧力についての調査結果<sup>7)</sup>については別途とりまとめているので参照されたい。

## 2. 設計揚圧力

設計揚圧力は、河川管理施設等構造令規則第8条（貯留水による揚圧力）<sup>1)</sup>によると、断面の区分（「排水孔の効果の及ぶ断面」と「排水孔の効果の及ばない断面又は排水孔のない断面」）に応じ、表-1に示す値を基礎として計算することが規定されている。

また、表-1に文章として規定されている揚圧力の分布を図化すると図-1のようになる。ここで、例えば、排水孔の効果の及ぶ断面の排水孔位置での揚圧力は、堤体の上流側水圧と下流側水圧の差の「5分の1」ではなく「5分の1以上」であることに注意されたい。

なお、上記に示した「排水孔の効果の及ばない断面」を想定するうえで適切な説明が文献<sup>3)</sup>に示されているので以下に引用しておく。

「・・・排水孔の孔口の高さが比較的高い位置となり、場合によっては着岩面より0.2H（筆者注釈：原著では、堤体上流端の水位をH、下流端水位を0として議論が進められている）と同程度あるいはそれ以上の高さとなることがある。このような場合には排水孔を設けても、排水孔を結ぶ線での平均の揚圧力を0.2Hに低減することは不可能となり、孔口の高さに対応した揚圧力を排水孔の位置で仮定するか、あるいは排水孔内の水位が孔口に達しない場合には、排水孔のないダムとして設計せざるをえなくなる。・・・」さらに、文献<sup>3)</sup>には、設計揚圧力の課題や現行設計基準での設定に到る経緯について詳細に記述されている。

表-1 設計揚圧力の算出方法<sup>1)</sup>

断面の区分	断面上の位置		(2)			(3)
	上流端	上流端と下流端との間	上流端と排水孔との間	排水孔	排水孔と下流端との間	
1	排水孔の効果及び断面	上流側水圧の値	(イ)	(ロ)	(ハ)	下流側水圧の値
			(1)欄の値と(2)の(ロ)欄の値とを直線的に変化させた値	(1)欄の値と(3)欄の値との差の5分の1以上の値に(3)欄の値を加えた値	(2)の(ハ)欄の値と(3)欄の値とを直線的に変化させた値	
2	排水孔の効果及び断面又は排水孔の無いダムの断面	上流側水圧と下流側水圧との差の3分の1以上の値に下流側水圧を加えた値	(1)欄の値と(3)欄の値とを直線的に変化させた値			下流側水圧の値

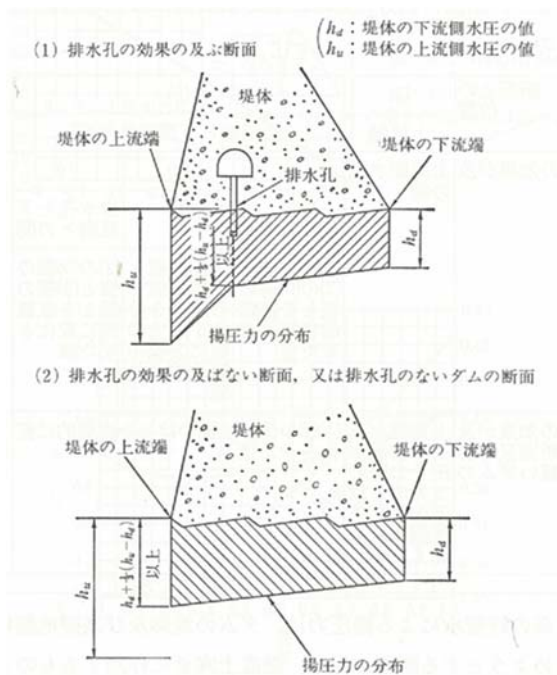


図-1 設計揚圧力分布<sup>1)</sup>

### 3. 検討対象の基礎排水孔を用いた実測揚圧力

基礎排水孔を用いた揚圧力の計測値は、周辺の基礎排水孔のバルブの開閉状態によって異なる。すなわち、周辺の基礎排水孔のバルブが閉められていれば、計測される揚圧力の値はその分だけ大きくなる。本来、ダムの底面に作用する揚圧力は基礎排水孔のバルブがすべて開いているときの揚圧力であることから、揚圧力を計測する場合、周辺の基礎排水孔のバルブは開いた状態にあることが望ましい。このため、揚圧力の計測に当たっては、計測の効率性も考慮して、図-2 のように1孔おきに基礎排水孔のバ

ルブを閉め、1孔おきに揚圧力を計測する（以下、「隔孔閉塞法」とよぶ。）ことが望ましい<sup>7)</sup>とされている。なお、このほかに、すべての基礎排水孔のバルブを閉めて揚圧力を計測する「一斉閉塞法」と呼ばれる方法で計測されている事例もある<sup>4)</sup>。この両閉塞方法で得られる揚圧力は、通常「一斉閉塞法」の方が「隔孔閉塞法」よりも大きい。この事実からも基礎排水孔を用いて計測された揚圧力の実測値と設計値を直接比較することは適切でなく、安全管理という観点からは揚圧力の実測値が安定しているかどうかを確認することが重要であるとされている<sup>4)</sup>。

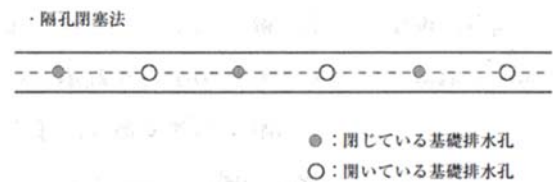


図-2 隔孔閉塞法の説明図<sup>7)</sup>

以上のことも踏まえて、本報告では、「隔孔閉塞法」で計測された揚圧力を対象に検討を進める。基礎排水孔のバルブを閉塞して計測した揚圧力は、全基礎排水孔を開放して排水している通常時の揚圧力とは厳密には異なる。このことを説明するために図-3がしばしば用いられる<sup>3)</sup>。基礎排水孔列に沿った断面内の揚圧力分布は、単純には図中の実線のような分布をしていると考えられる。いま、中央の排水孔を閉塞すると、計測される揚圧力は実線から破線に、さらには一点鎖線へと時間の経過とともに増加していく。しかし、現在、一般的に測定している閉塞してから30分から1時間経過後の値がどれに相当するかが厳密には明らかでない。

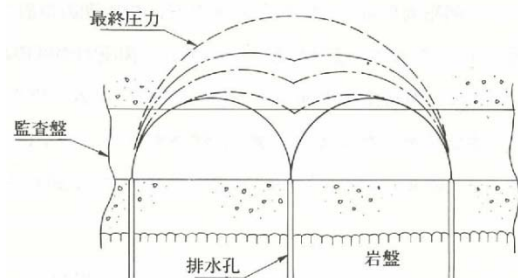


図-3 基礎排水孔を開放時および閉塞時の揚圧力分布<sup>3)</sup>

しかし、揚圧力専用孔や間隙水圧計が設置されているダムは必ずしも多くなく、また設置されているダムでもその数や設置個所が限定されているため、ここでは基礎排水孔において隔孔閉塞法で計測された揚圧力を踏まえた安定計算という観点で調査を行うこととした。

#### 4. 実態に即した安定計算におけるモデル・荷重条件（揚圧力分布を除く）の設定

試験湛水後の安全性評価時や総合点検時には、実測揚圧力を用いた安定計算が実施されることがある。その際、本論文における主課題である揚圧力分布以外で実態に即して設定されている検討条件について整理しておく。なお、前述したように、安全管理という観点からは、揚圧力の実測値が、経時変化図や貯水位との相関図から安定しているかどうかを確認することが重要であるため、安定計算を行う前提として、上記の観点でダムの安全性が説明できている必要がある。そのうえで、あえて安定計算を行い設計における安定条件を満足することを確認する場合の対応についての調査であることに注意されたい。

(1) 実際の堤体コンクリートの単位体積質量（密度）に基づく自重の設定設計値ではなく、品質管理試験結果など実際のコンクリートの単位体積質量（密度）を用いてダムの自重の設定・計算を行う。

(2) 解析モデルとして、基本三角形断面ではなく実際の堤体断面形状を踏まえた解析モデルを設定する。この際、基本三角形に対して付加される断面のみに着目するのではなく、放流管設置ブロックにおいては空洞断面を控除したり、監査廊などの小規模な空洞についても控除したりする対応が必要である。

(3) フーチングも含めた解析断面モデルの揚圧力分布、せん断強度等の設定(2)にも関連するが、フーチング部分も解析断面モデルに含める場合には、フーチング基礎部の岩盤状況、コンソリデーショングラウチングの実施状況などを踏まえたうえで、フーチング下の揚圧力分布について設定する必要がある。いま、フーチング基礎の岩盤状況が基礎岩盤と同等な状況までの掘削・仕上げを行っておらず、コンソ

リデーショングラウチングの効果が及んでいない場合には、フーチング下での揚圧力の低減効果はないとして設定する必要がある。また、フーチング下の基礎岩盤のせん断強度を見込む場合には、その岩盤状態の評価や掘削面の仕上げや着岩面処理の状況の確認が重要となる。

さらに、フーチングも解析断面に含めた場合、安定計算時に泥重+泥圧を見込む場合と見込まない場合でどちらが安全側の設計になるのかについてはダムごとに異なることが予想されるため、検討にあたっては注意が必要である。

#### 5. 基礎排水孔のバルブを閉塞していない場合の揚圧力分布の推定事例

##### 5.1 札内川ダムの事例 8)

札内川ダムは、国土交通省北海道開発局が建設・管理する、堤高 114.0m の重力式コンクリートダムで、1998 年に竣工している。

札内川ダムにおいては、基礎排水孔のバルブを閉塞していない状態での揚圧力分布を以下のように、実際に基礎排水孔間に作用する揚圧力の最大値は隔孔閉塞法によって計測される揚圧力約半分と仮定して試験湛水における計測結果に基づく安定計算を実施している<sup>8)</sup>。

(以下原文) \* \* \* \* \*

通常の状態では、5m 間隔に並んだドレーン（著者注釈：「基礎排水孔」。以下同じ。）によって排水され、ドレーン位置での揚圧力は 0 である。（ブルドン管の読み値として）

揚圧力の測定はドレーン孔 1 つおきに閉塞して 10m 間隔の排水を行いながら測定するので、**図-9.5.18**

（本報告の**図-4**）において P を測定することになる。しかし、常時はドレーン孔を開放しているので、実際にドレーン孔の間にかかる揚圧力の最大は約半分と仮定した場合のダムの安全性について検討した。

\* \* \* \* \*

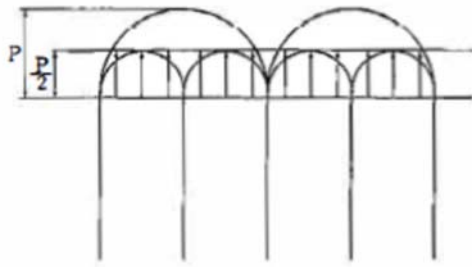


図-4 仮定した揚圧力分布（札内川ダム）<sup>8)</sup>

### 5.2 A ダムの事例

A ダムにおいては、飯田<sup>9)</sup>の著書に示された図-5 の考え方を基本として、札内川ダムの事例も参考として、揚圧力分布を設定している。

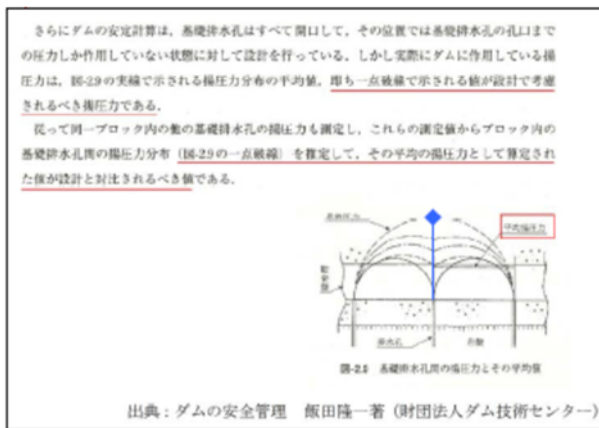


図-5 基礎排水孔間の揚圧力とその平均値<sup>9)</sup>

具体的には、図-6 に示すように、対象ブロックをⅠ～Ⅲの3区間に区分し、それぞれの区間に対して、以下の揚圧力（基礎排水孔で計測した揚圧力であることに注意）を設定している。

- 区間Ⅰ：(P0～P2 で最も大きい圧力) ÷ 2
- 区間Ⅱ：(P1～P3 で最も大きい圧力) ÷ 2
- 区間Ⅲ：(P2～P4 で最も大きい圧力) ÷ 2

各区間において、安全側の対応として、その中央に位置する基礎排水孔の両隣の基礎排水孔も含めた3孔での観測揚圧力の最大値を採用したうえで1/2とした値を揚圧力として安定計算に用いている。

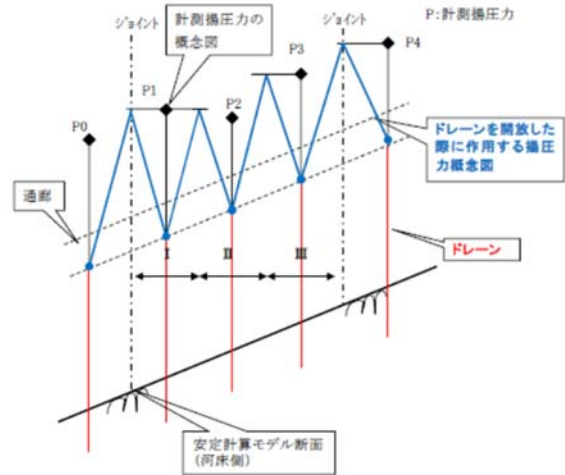


図-6 A ダムにおける安定計算に用いる揚圧力の設定方法

### 5.3 B ダムの事例

前述しているとおり、基礎排水孔で揚圧力測定に隔孔閉塞法を採用しても、すべての基礎排水孔を開放した通常状態での揚圧力に対して計測した揚圧力は大きくなる。B ダムでは、すべての基礎排水孔を開放した通常状態での揚圧力を推測するため、河床部の代表3ブロックにおいて標準的な基礎排水孔5m間隔の中央に揚圧力専用孔を配置し、隔孔閉塞による測定及び一般孔を全て開放状態にした場合の揚圧力専用孔における測定という2手法での測定を行っている。そのうえで、図-7 に示す3ケースの方法で揚圧力を設定し、それぞれについて安定計算を実施している。

ケースⅠ：通常の隔孔閉塞法により計測された揚圧力をブロック平均して設定。

ケースⅡ：全孔開放時の揚圧力専用孔における揚圧力（▲：揚圧力係数として整理した値）と隔孔閉塞法による揚圧力（●：揚圧力係数として整理した値）の比率を算定し、揚圧力を補正して設定。

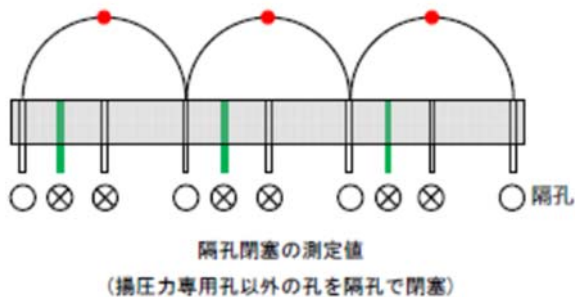
なお、B ダムの3ブロックの平均値として、▲/●=0.845の値を得ている。

ケースⅢ：図-5 に示した飯田<sup>9)</sup>の考え方に基づく全孔開放時の平均的な揚圧力を算定するため、全孔開放時に揚圧力専用孔で観測した揚圧力を最大値とする楕円分布を仮定し、楕円分布と等しい面積となるような長方形分布で近似して平均的揚圧力を算定

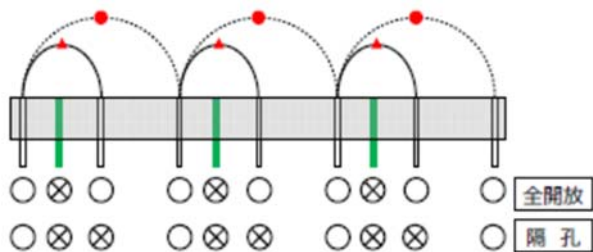


(■：揚圧力係数として整理した値) (図-8 参照)。  
この値と隔孔閉塞法による揚圧力 (●：揚圧力係数として整理した値) の比率を算定し、揚圧力を補正して設定。なお、B ダムの3ブロックの平均値として、■/●=0.612の値を得ている。

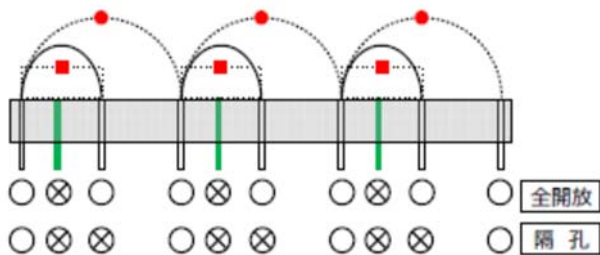
ケースⅠ～Ⅲで設定した揚圧力を用いて安定計算を実施した結果、ケースⅠでは安定条件を満足しないブロックが存在したが、ケースⅡ、Ⅲではすべてのブロックで安定条件を満足した。



(a) 通常の隔孔閉塞法による揚圧力計測 (ケースⅠ)



(b) 全孔開放状態での揚圧力専用孔における揚圧力計測 (ケースⅡ)



(c) 全孔開放時の平均揚圧力推定 (ケースⅢ)

図-7 安定計算に用いる揚圧力の設定方法

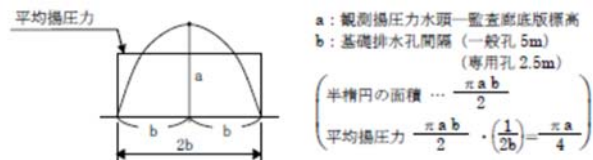


図-8 B ダムにおける平均揚圧力算定方法

## 6. おわりに

試験湛水後の安全性評価時や総合点検時には、基礎排水孔を用いた実測揚圧力を用いた安定計算が実施されることがある。本論文では、そのような場合における安定計算モデル・物性値の設定等についての留意点や実測揚圧力の補正 (バルブを開放した状況での揚圧力分布の推定) 方法などに着目した事例調査を行った結果についてとりまとめた。

事例調査から得られた主要な知見は以下のとおりである。

- (1) 安全管理という観点からは、揚圧力の実測値を用いた安定計算よりも、揚圧力の実測値の経時変化図や貯水位との相関図から揚圧力が安定しているかどうかを確認することが重要である。
- (2) 揚圧力の実測値を用いた安定計算を実施する場合の安定計算モデル・物性値の設定等についての留意点として、①実際の堤体コンクリートの単位体積質量 (密度) を用いた自重の設定、②基本三角形断面ではなく実際の堤体断面形状 (付加断面及び控除断面) を踏まえた解析モデルの設定、③フーチングも含めた解析断面モデルを設定する場合の揚圧力分布、せん断強度等の設定、などについてとりまとめた。
- (3) 揚圧力の実測値を踏まえて安定計算を対象として、飯田<sup>9)</sup>の考え方にに基づき全基礎排水孔開放時の平均的な揚圧力等を算定するための実測揚圧力の補正方法に関する3ダムの調査結果を整理した。詳細は5章に譲るが、このような補正を行うことで安定計算に用いる揚圧力は実測値よりも小さい、しかしより実態に近い値となる。

今回の調査は、試験湛水後の安全性評価時や総合点検時に実施される、実測揚圧力を用いた安定計算を想定して実施した。今回の調査結果、特に実測揚圧力の補正方法は、同様な場面における堤体の安全性

評価に対して重要な基礎資料になるものと考えている。ただし、今回調査結果としてまとめた実測揚圧力の補正方法を、再開発ダム設計時の安定計算に用いることの妥当性については、慎重な検討、議論が必要になるものとする。

## 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、第2章 ダム、(社)日本河川協会、山海堂、第1刷、pp.27-102、平成12年(2000年)1月20日。
- 2) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説、設計編[I]、第2章 ダムの設計、(社)日本河川協会編、山海堂、第1刷、pp.145-251、平成9年(1997年)10月16日。
- 3) 飯田隆一：コンクリートダムの設計法、4.2 揚圧力、技報堂出版、第1版、1992年4月10日。
- 4) 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室：コンクリートダムの安全管理についてー揚圧力の測定ー、ダム技術、No.36、pp.93-96、1989年12月。
- 5) 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室：コンクリートダムの設計揚圧力について、ダム技術、No.82、pp.115-118、1993年7月。
- 6) (一財)ダム技術センター：多目的ダムの建設(平成17年版)、第7巻(管理編)、第35章 試験湛水、第2刷、平成17年6月。
- 7) 山口嘉一：重力式コンクリートダムの実測揚圧力に関する調査、令和4年度ダム技術研究所調査研究活動報告書、pp.3-1~pp.3-7、令和5年12月。
- 8) 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部：札内川ダム工事誌、pp.440-442、平成13年3月。
- 9) 飯田隆一：ダムの安全管理、(財)ダム技術センター、pp.39-45、平成18年5月。