

3.1 重力式コンクリートダムの実測揚圧力に関する調査

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：重力式コンクリートダムの実測揚圧力に関する調査

研究者：山口 嘉一

【要約】

近年試験湛水を実施した重力式コンクリートダム 48 ダムを対象に、基礎排水孔を利用した実測揚圧力について調査し、揚圧力係数として整理分析を行った。その結果、「ほぼ全調査ダムにおいて、実測揚圧力が設計揚圧力を上回ったブロックが存在し、揚圧力係数がブロック平均でも 0.3～0.5 に及ぶブロックが存在するダムもかなりある。」、「大半の調査ダムにおいて、実測揚圧力を踏まえて安定計算を実施して所要の安全性を有していることを確認している。」、「ブロック平均の揚圧力係数が 0.6 程度を越えるブロックが存在するダムは、全 48 ダム中 16 ダム (33%) で、ブロック平均揚圧力係数の最大値は 0.8 程度である。」ことなどが明らかになった。

【キーワード】

重力式コンクリートダム、揚圧力、設計、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。

【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^{1), 2)}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)¹⁾、規則第8条(貯留水による揚圧力)¹⁾)。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)¹⁾)。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。

いま、重力式コンクリートダムの設計荷重のうち、自重、静水圧荷重などは、実際に大きなばらつきを持つ荷重ではなく、かつ実態と大きな差違なく設定

できる荷重といえる。地震荷重に関して、震度法に基づく現行設計においては時々刻々変化する実際の地震荷重を考慮することはできないが、有限要素法等に基づく動的解析により地震動の加速度時刻歴を用いた安全性の照査³⁾が可能になってきている。また、令和3年9月には、ダムの耐震性能照査が河川砂防技術基準設計編に規定され、新設ダムも含めた全ダムを対象とした設計基準となった⁴⁾。

一方、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⁵⁾。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かさから、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などには、実測の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少なくない。なお、ここで示す実測揚圧力は基礎排水孔を用いて、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が、バルブを開放した状況での揚圧力分布を推定して安定計算を行っている場合もある。

また、国土交通省は、水管理・国土保全局 河川環境課長より、「ダム総合点検実施要領・同解説」を、平成 25 年(2013 年)10 月 1 日付けで北海道開発局、各地方整備局、沖縄総合事務局、(独)水資源機構宛て通知される^{6)・8)}とともに、都道府県には参考送致され、約 30 年のサイクルで実施する「ダム総合点検」が制度化され、現在順次点検が実施されている。このダム総合点検においても、重力式コンクリートダムの安全性を評価するために実測揚圧力の経年変化を分析するとともに、実測揚圧力（上記の注記を参照）を用いた安定計算が実施される場合がある。以上のような現状を踏まえ、近年試験湛水を実施した重力式コンクリートダムを対象に、実測揚圧力について調査した。この調査の結果として得られた実測揚圧力に関する資料は、現状の実測揚圧力分布を把握することに留まらず、今後の重力式コンクリートダムの設計の合理化検討やダム総合点検における実測揚圧力の評価およびそれに関連した堤体の安全性評価にとって重要な基礎資料になるものと考えている。

1. 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)¹⁾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⁵⁾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 5)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

断面の区分	断面上の位置		(1)			(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	下流端	
排水孔の効果の及ぶ断面	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
排水孔の効果の及ばない断面又は排水孔のないダムの断面	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		

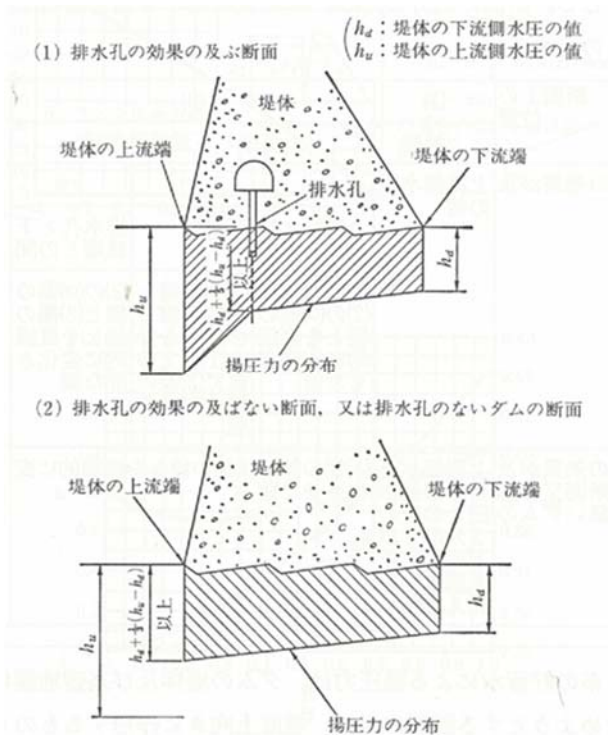


図-1 設計揚圧力分布¹⁾

2. 調査対象ダム

基礎排水孔を用いた実測揚圧力の調査対象ダムは、平成 11 年度（1999 年度）以降に試験湛水が終了した重力式コンクリートダムでその堤高が 50m 以上のダムとした。ただし、調査実施時期が少し古いため、最新のデータは平成 24 年度（2012 年度）完成ダムとなる。なお、調査対象ダムにおいても、アバットメント部の高位標高の実測揚圧力データについては分析対象外とした。このように、調査対象ダムの堤高に下限を設けたり、データ分析範囲を限定したりした理由は以下のとおりである。

堤高の低いダム、あるいは規模にかかわらず堤体の高位標高部においては、基礎排水孔が設置されていなかったり、設置されていても貯水位が相対的にかなり高くなると揚圧力が計測されなかったりする場合がある。なお、初期の地下水圧が高い場合、地下水圧が後述の方法で算定する揚圧力に与える影響が大きいと考えられるが、この点については対象ダムの選定において考慮できていない。

調査対象とした重力式コンクリートダムは、国土交通省直轄および水資源機構のダムが 15 ダム、都道府県の補助ダムが 33 ダムの計 48 ダムである。

なお、調査ダムの堤高と完成年度の頻度分布をそれぞれ図-2 と図-3 に示す。

図-2 より、調査対象ダムの堤高は 70m 未満（ただし 50m 以上）が 23 ダムと全体の約半数を占め、堤高 100m 以上の大規模ダムは 8 ダムである。なお、堤高 100m 以上のダムは全て国土交通省直轄および水資源機構のダムである。また、図-3 より、年度ごとの調査ダム数には若干のばらつきがあるものの、調査対象期間の約 15 年に完成したダムを大きな偏りなく抽出していると考ええる。

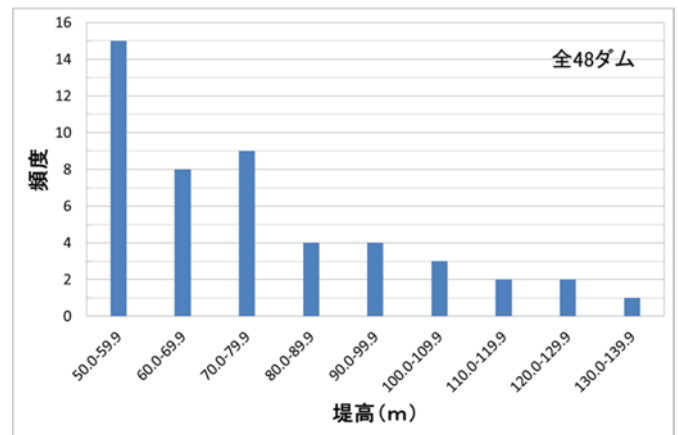


図-2 調査ダムの堤高の頻度分布

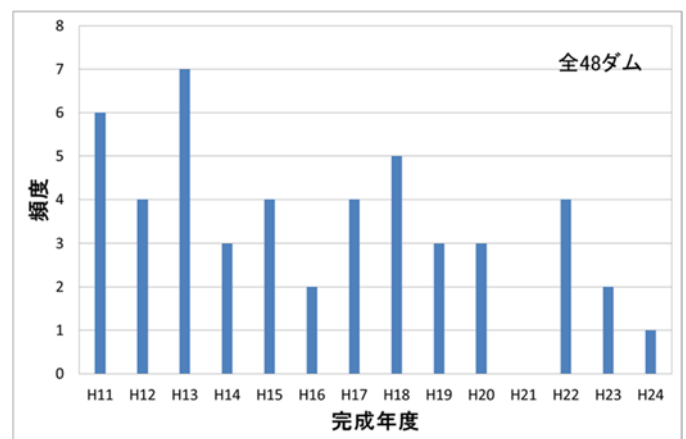


図-3 調査ダムの完成年度の頻度分布

3. 分析対象の実測揚圧力

揚圧力のデータについては、各ダムにおいて規定された方法に従い、揚圧力計測対象の基礎排水孔を閉塞してある一定時間後に計測した揚圧力を採用する。基礎排水孔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-4 がしばしば用いられる⁵⁾。基礎排水孔列に沿った断面内の揚圧力分布は、単純に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ということである。

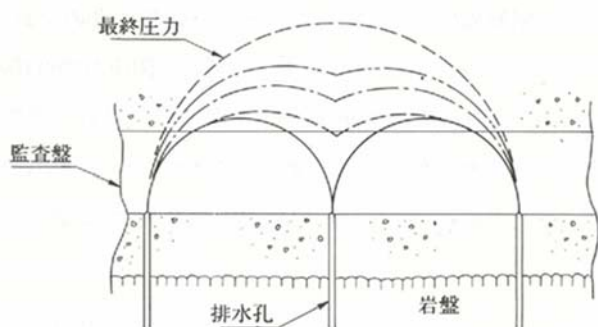


図-4 基礎排水孔を開放時および閉塞時の揚圧力分布

しかし、揚圧力専用孔が設置されているダムは多くなく、また設置されているダムでもその数が限定されているため、調査全体の整合性を図ったうえで、ダム堤敷に関して幅広い揚圧力のデータを得る目的から、各ダムで規定された方法に従い、基礎排水孔を閉塞して計測した揚圧力を分析の対象とした。

また、一般に、1ブロックに3本の基礎排水孔が設置されている。揚圧力の評価を1本ごとの計測値について行うと特異な値に大きく影響を受けるおそれがあること、安定計算に用いる揚圧力という観点からはブロック平均の揚圧力が重要になってくることから、揚圧力の評価はブロック平均を対象とする。また、揚圧力の調査データの対象時期は、全体の統一を図るため試験湛水時とした。

4. 実測揚圧力の評価指標としての揚圧力係数の算出方法

実測揚圧力の評価指標としては、図-5 に示すように、基礎排水孔で計測された基礎岩盤面と基準とした揚圧力水頭値 h_p を、その基礎排水孔を含む上下流断面における上流端における基礎岩盤面を基準とした貯水水位水頭 h_u で除した値として定義する、「揚圧力係数」を用いる。

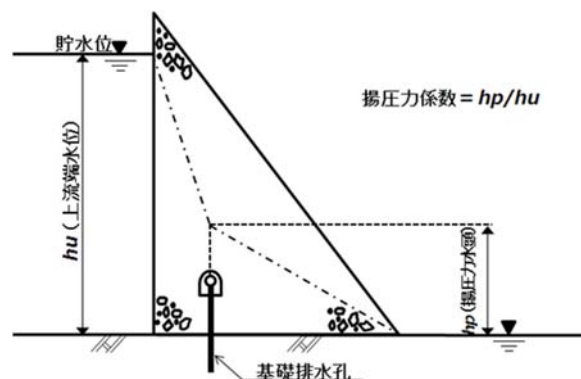


図-5 揚圧力係数の算定方法の説明

例えば、2章に示した、設計揚圧力の設定方法における、基礎排水孔位置での「5分の1」という係数と厳密な比較を行うためには、各ダムの全段面の下流側水位を明らかにしたうえで、堤体の上下流の水位差を減じた形で評価を行う必要があるが、下流側水位が分析対象期間である試験湛水期間中でも変動しているであろうこと、下流側水位が断面ごとに異なる、特に河床部を除けば地表面以下に存在することなども踏まえて、下流側水位は0と仮定して基礎排水孔地点での水頭値を上流端水位によって除した係数により分析を行うこととした。そのため、本論文に示す方法で揚圧力係数を算出すると、下流側水位が地表面より高い位置にある場合は、実際よりも揚圧力係数を大きめに評価していることに注意されたい。

また、同じ高さのダムであっても、フィレットの有無、フィレットがある場合にはその大小、仮に全く同断面であっても監査廊の設置位置により、揚圧力係数の定量的な意味は厳密には異なってくるが、この点についても分析の対応から外している。

さらに、上記のような揚圧力係数の定義を踏まえて、堤高の低いダム、および中大規模のダムも含めてその高位標高部の揚圧力データを分析対象外としたのと同様の理由から、分析対象とする揚圧力データは、相対的に貯水位の高い常時満水位（NWL）時およびサーチャージ水位（SWL）時を基本とした。

5. 揚圧力係数の調査結果

前述したように、基礎排水孔を閉塞して一定時間後に計測された圧力が基礎排水孔を開放・排水している際の揚圧力とは厳密には一致しないが、ほぼ全ての調査ダムにおいて、実測揚圧力が設計揚圧力を上回った少なからずのブロックが存在していた。これより、5章で述べたように、下流側水位が地表面に一致しているとして揚圧力係数を算出すると、基礎排水孔を設置しているほとんどのダムにおいて、揚圧力係数 0.2 以上のブロックを有していること（2章より明らかなように、0.2 はあくまで設計として設定する最低値であることに注意されたい）が明らかとなった。さらに、実際には揚圧力係数がブロック平均でも 0.3~0.5 に及ぶブロックが存在するダムもかなりの数に上ることも判明した。

このような状況に対して、調査した大半のダムにおいては、実測揚圧力を用いて安定計算を実施して所要の安全性を有していることを確認している。なお、ダムによっては、各ブロックについて、所要の安全率を満足する揚圧力の許容上限値を計算しておき、その値と実測揚圧力値を比較している場合もあるが、基本的には同様の主旨の対応である。また、数は多くないが、安定計算とあわせて、ブロックの揚圧力を低減させるために、基礎排水孔を増設して1ブロック4本以上の基礎排水孔のブロックを有するダムも存在する。設計揚圧力より大きい実測揚圧力を用いた安定計算においても所要の安全性を満足しているのは、基礎排水孔を開放・排水している際の揚圧力分布を実測揚圧力から推定している場合があることに加えて、設計時の安全率に適切な余裕代があること、コンクリートの単位体積重量や堤体形状についても実際の施工データを基本に設定することで安全側に作用することなどによるものと考えら

れる。なお、ダムの安全管理を目的とした場合の実測揚圧力の評価や実測揚圧力を用いた安定計算の留意点については、文献⁹⁾に詳述されているので一読頂きたい。

揚圧力係数がブロック平均でも 0.3~0.5 に及ぶブロックが存在するダムがかなりの数に上ることを踏まえて、NWL 時ないしは SWL 時に、ブロック平均の揚圧力係数が 0.6 程度を超えたブロックに着目したデータ抽出を行った結果を表-2 に示すとともに、ブロック平均の揚圧力係数の最大値の頻度分布を図-6 に示す。

上記の条件を満たすブロック（河床部および兩岸アバットメントの低位から中位標高部のブロックを対象）を有するダムは、全 48 ダム中 16 ダム（33%）と、3 ダムに 1 ダムは、ブロック平均の揚圧力係数が 0.6 程度を超えるブロックを有することになる。

さらに、ブロック平均揚圧力係数の最大値が 0.7 程度のダムが 4 ダム（8%）、0.8 程度のダムが 4 ダム（8%）あり、ブロック平均揚圧力係数が 0.8 とかなり高いダムも存在していることがわかる。

このように設計の下限値と考えられる揚圧力係数 0.2 よりもかなり高い実測値が得られる原因としては、通常バルブを開放している基礎排水孔を、バルブを閉塞して揚圧力を計測しているということに加えて、個々のダムの地質特性、透水係数分布、グラウチング、特にカーテングラウチングの効果の程度などが複雑に関連しているものと推察する。しかし、本論文においては、揚圧力係数にのみ着目して、この点について個別ダムごとに考察することは行っていない。

また、0.6 以上のブロック平均揚圧力係数の最大値と堤高の関係を図-7 に示す。0.6 以上のブロック平均揚圧力係数、かつ堤高 50m という条件下での図化であることも影響している可能性があるが、堤高が高いほどブロック平均揚圧力係数の最大値が大きくなるという明確な傾向は見出すことはできない。

表-2 ブロック平均の揚圧力係数が0.6程度を超えるブロックを有するダム

ダム名	堤高(m)	完成年度	ブロック平均の揚圧力係数の状況
A	64.6	H11	左岸低標高部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
B	97.0	H12	河床部から右岸低標高部の3ブロックで <u>0.6程度</u>
C	73.5	H12	右岸低標高部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
D	123.0	H13	河床部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
E	109.0	H13	右岸中標高部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
F	53.5	H14	右岸中標高部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
G	114.0	H15	右岸低位から中位標高部の2ブロックで0.7程度、1ブロックで0.75程度、1ブロックで <u>0.8程度</u>
H	52.0	H15	河床部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
I	71.5	H15	左岸中標高部の1ブロックで <u>0.8程度</u>
J	87.0	H16	河床部から左岸中標高部の4ブロックで0.5~ <u>0.7程度</u>
K	65.0	H17	河床部から左右岸低標高部で0.6~ <u>0.7程度</u> のブロックが多い
L	77.0	H18	左岸中標高部の1ブロックで <u>0.7程度</u>
M	93.5	H19	河床部の1ブロックで0.6程度、左岸中標高部の1ブロックで <u>0.7程度</u>
N	55.0	H20	左岸低標高部の1ブロックで <u>0.6程度</u>
O	125.5	H22	右岸中標高部の1ブロックで0.6程度、1ブロックで <u>0.8程度</u>
P	119.0	H23	右岸中標高の1ブロックで0.6程度、1ブロックで <u>0.8程度</u>

(注1) 下線部は、各ダムのブロック平均の揚圧力係数の最大値を示す。

(注2) 1ブロック、2ブロックなどは、ブロック番号でなくブロック数を表している。

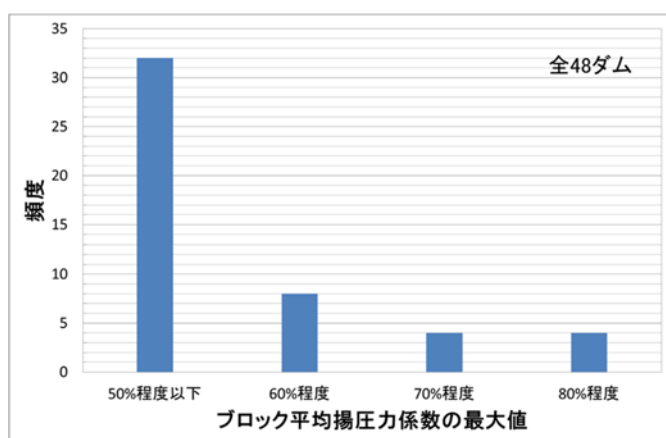


図-6 ブロック平均揚圧力係数の最大値の頻度分布

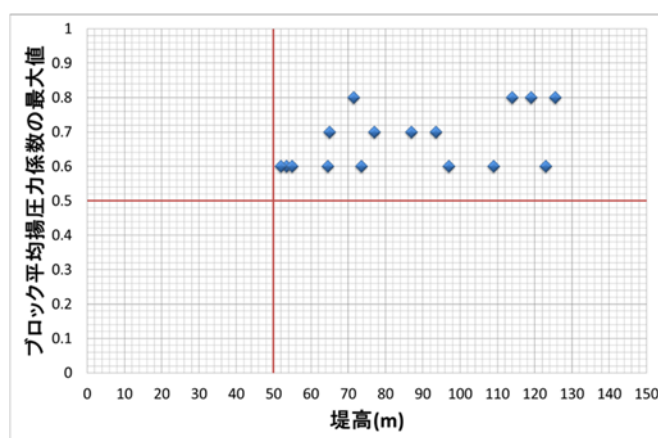


図-7 ブロック平均揚圧力係数と堤高の関係

6. おわりに

本論文では、近年試験湛水を実施した重力式コンクリートダムを対象に実測揚圧力について調査した。

その結果、以下のことが明らかになった。

(1) ほぼ全ての調査ダムにおいて、実測揚圧力が設計揚圧力を上回った少なからずのブロックが存在し、揚圧力係数がブロック平均でも 0.3~0.5 に及ぶブロックが存在するダムもかなりの数に上ることが判明した。

(2) 調査した大半のダムにおいては、実測揚圧力を用いて安定計算を実施して所要の安全性を有していることを確認している。なお、安定計算において、基礎排水孔を開放・排水している際の揚圧力分布を実測揚圧力から推定しているダムもあることに注意されたい。また、数は多くないが、安定計算とあわせて、ブロックの揚圧力を低減させるために、基礎排水孔を増設しているダムも存在する。

(3) ブロック平均の揚圧力係数が 0.6 程度を超えるブロックが存在するダムは、全 48 ダム中 16 ダム (33%) と、3 ダムに 1 ダムの比率である。また、ブロック平均揚圧力係数の最大値は 0.8 程度である。

今回の調査では、揚圧力係数が非常に高くなった個別ダムの原因については詳細な分析が行えていないが、今回の調査結果より、近年に完成した重力式コンクリートダムの実測揚圧力分布を把握できるとともに、今後の重力式コンクリートダムの設計の合理化検討やダム総合点検における実測揚圧力の評価およびそれに関連した堤体の安全性評価にとって重要な基礎資料になるものと考えている。

【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) 国土交通省河川局治水課：大規模地震に対する

ダム耐震性能照査指針 (案)・同解説、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/daml2/、2005 年 4 月。

4) 国土交通省水管理・国土保全局：国土交通省河川砂防技術基準設計編 (技術資料)、第 2 章 ダムの設計、第 12 節ダムの耐震性能照査、https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/sekkei/pdf/2_g.pdf、2021 年 9 月

5) 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。

6) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課長：ダム総合点検実施要領について、国水環第 65 号、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf/02.pdf、2013 年 10 月。

7) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説 (本編)、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf/03.pdf、2013 年 10 月。

8) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：ダム総合点検実施要領・同解説 (参考資料)、http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/dam/pdf/04.pdf、2013 年 10 月。

9) 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。