

(22) 重力式コンクリートダムにおける揚圧力の実測解析

建設省土木研究所 正会員 永 山 功
建設省土木研究所 ○渡 辺 和 夫
建設省土木研究所 片 平 博

Some Considerations on Measured Uplift Pressure on Concrete Gravity Dams

I s a o NAGAYAMA
K a z u o WATANABE
H i r o s h i KATAHIRA
PUBLIC WORKS RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF CONSTRUCTION

Abstract

Uplift pressure is one of the important loads in the design of concrete gravity dams. It is however not easy to evaluate the value of uplift pressure properly in the design stage because the pressure is influenced by the characteristics of bed rock of the dams and result of foundation grouting as well as the layout of drainage holes.

Uplift pressure on dams is usually measured for safety evaluation of the completed dams by Bourdon pressure gages which are installed on drainage holes. Such measured uplift pressure is studied in this paper. The study includes the stable time of uplift pressure after closing drainage holes, the effects of layout of drainage holes, correlation to the reservoir water level, and geological effects.

1. はじめに

揚圧力は、コンクリートダムの安定解析における重要な設計荷重の一つである。特に、堤体自重によって水圧荷重等の外力に抵抗する重力式コンクリートダムでは、揚圧力は堤体自重による鉛直荷重を減じる方向に作用し、その大きさがダムの構造的な安定性に及ぼす影響は極めて大きいといえる。

しかし、揚圧力の大きさは、基礎岩盤の透水性状やカーテングラウチングの効果の影響を受け、一義的にその大きさを定めることが困難な荷重でもある。したがって、設計外力としての揚圧力の大きさを適正に評価することは、極めて重要な設計上の課題である。一方、完成後のダムにおいては、ダムの安全管理を目的として揚圧力の測定が行われている。したがって、これらの実測データを収集分析することは、ダムの安定解析の合理化を図る上で極めて有効であると考えられる。

本論文は、揚圧力の実測データを基に、揚圧力の大きさと測定方法、基礎排水孔の配置との関係、揚圧力の大きさと地質条件との関係、その他の揚圧力の特性について調査分析した結果をとりまとめたものである。

2. 調査結果

2.1 基礎排水孔の閉塞後の時間と揚圧力

一般に、重力式コンクリートダムの揚圧力は、揚圧力の低減を目的として設置される基礎排水（ドレーン）孔にブルドン管式圧力計を取付け、この基礎排水孔のバルブを閉めることによって測定している。

ここでしばしば問題になるのが、基礎排水孔のバルブを閉めてからどの程度の時間が経過すれば安定した揚圧力が測定されるかである。図-1は基礎排水孔のバルブを閉めた時からの経過時間と揚圧力係数 U_p の関係を示した例である。ここに、揚圧力係数は(1)式によって揚圧力を無次元化したものである。図より明らかなように、基礎排水孔によって揚圧力の上昇速度に差があることがわかる。

$$U_p = \frac{1}{\gamma_w H} (\gamma_w H_d + P) \dots\dots (1)$$

H : 基礎排水孔を設置した断面における貯水深

H_d : 堤体着岩面からブルドン管までの高さ(ドレーン水頭)

P : ブルドン管指示圧力

γ_w : 水の単位体積重量

次に、基礎排水孔からの漏水量と揚圧力が安定するまでの時間の関係をより詳細に検討してみる。図-2は、基礎排水孔からの漏水量と、基礎排水孔のバルブを閉めてから1時間後の揚圧力を24時間後の揚圧力に対する百分率で表わしたものととの関係を示したものである。両者の間には明確な相関性が認められないが、漏水量が大きな基礎排水孔ほど揚圧力が安定する時間が短くなる傾向があり、たとえば、漏水量がおよそ300cc/min 以上の場合には、1時間後の揚圧力は24時間後の値に対してほぼ80パーセント以上の値を示している。

以上、基礎排水孔閉塞後の時間と揚圧力の測定値の関係について代表的な事例を示したが、事例にみられるように、揚圧力が安定する時間には、個々の基礎排水孔によって大きなバラツキがある。したがって基礎排水孔毎にあらかじめ揚圧力が安定するまでの時間を把握しておくことが望ましい。

2.2 基礎排水孔の閉塞方法と揚圧力

基礎排水孔は一般にダム軸方向に5m間隔で設置されるが、基礎排水孔を利用した揚圧力の測定方法を事例から分類すると、次の3通りの方法がある。

- ① 一斉閉塞法…すべての基礎排水孔を一斉に閉めて揚圧力を測定する。
- ② 隔孔閉塞法…基礎排水孔を一孔おきに閉めて揚圧力を測定する。
- ③ 特定孔閉塞法…特定した基礎排水孔だけを閉めて揚圧力を測定する。

ここでは、事例の多い①、②の方法について検討を加える。

図-3に一斉閉塞法と隔孔閉塞法による揚圧力の測定値の比較を示す。図は、同一の基礎排水孔において、同一貯水位時に一斉閉塞法と隔孔閉塞法によりそれぞれ揚圧力を測定した結果である。図より、揚圧力の測定値は一斉閉塞法に比較して隔孔閉塞法の方が小さな値となっている。これは、一斉閉塞法の場合は全ての基礎排水孔が機能していない状態にあたり、隔孔閉塞法の場合は1孔おきに基礎排水孔が機能し

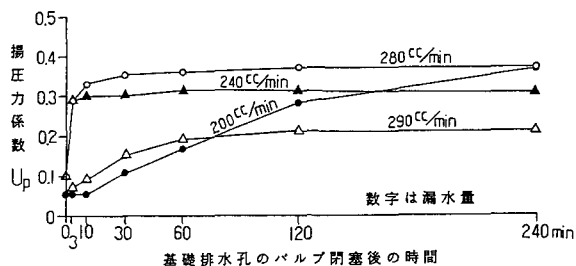


図-1 基礎排水孔のバルブ閉塞後の時間と揚圧力係数

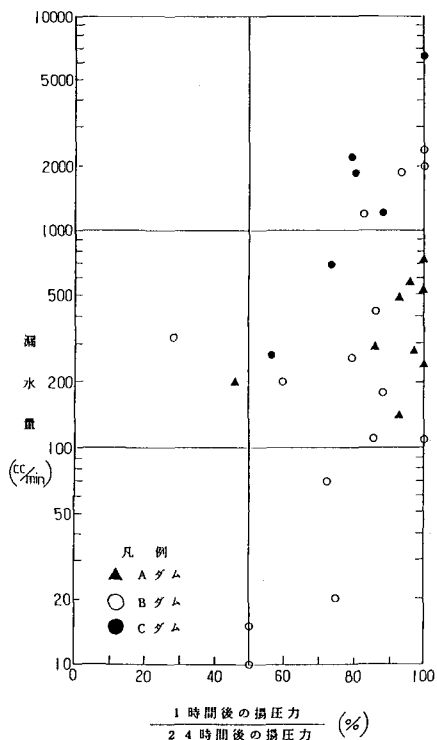


図-2 漏水量と基礎排水孔のバルブ閉塞後の揚圧力上昇率

ている状態に等しいことによるものである。

次に、基礎排水孔の影響範囲を調査した結果を図-4に示す。調査は、当該揚圧力測定孔の左右の隣接基礎排水孔を順次閉塞した時の揚圧力を測定したものである。この事例では、揚圧力の測定孔から隣接基礎排水孔までの距離が10m以上になると、揚圧力の測定値はほとんど一定となっている。

次に、堤体上下流方向の揚圧力について調査した事例を示す。図-5は、ダム軸方向の基礎排水孔を全開にした場合、隔孔閉塞および一斉閉塞した場合について、上下流方向に設けた基礎排水孔の揚圧力測定値を示したものである。図より、ダム軸方向の基礎排水孔が全開の状態に比較して隔孔閉塞することによって上下流方向の揚

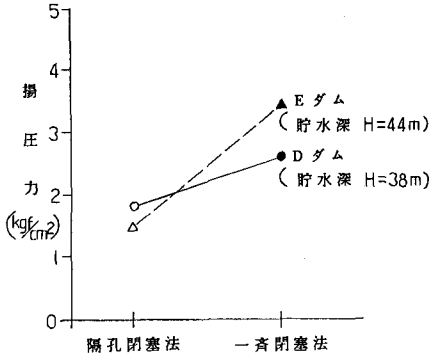


図-3 隔孔閉塞法と一斉閉塞法による揚圧力の比較

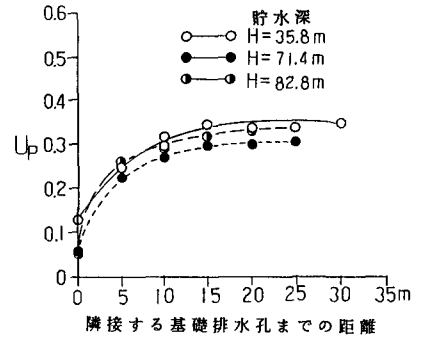
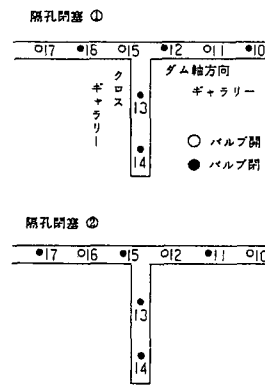
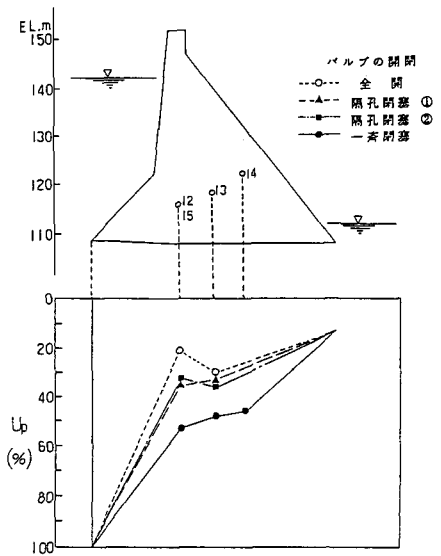


図-4 隣接する基礎排水孔までの距離と揚圧力係数



(a) 隔孔閉塞時の閉塞状態



(b) 閉塞方法と揚圧力分布

図-5 基礎排水孔の閉塞方法と上下流方向の揚圧力分布

圧力が上昇していることがわかる。また、一斉閉塞することによってさらに揚圧力の上昇が現われている。

以上の測定事例から、基礎排水孔の閉塞方法によって測定される揚圧力の大きさが異なることがわかる。なお、測定方法の影響の大小は基礎排水孔の間隔や岩盤の透水性状にも支配されるものと考えられるので、測定方法の相違が測定値に与える影響を各ダムで調査しておくことが望ましい。

2.3 貯水位と揚圧力

一般に貯水位と揚圧力の関係は図-6のように直線関係にある。しかし、図-6に示すように、貯水位と揚圧力の大きさとの関係は、基礎排水孔の閉塞方法によって変化することがわかる。これを図-7の模式図にしたがって考察すると次のようになる。

① 基礎排水孔の孔内水位 D_n が孔口まで達しない場合、基礎排水孔によるドレーン効果が現われない。したがって、その場合の揚圧力は図のOAのようになり、

$$P_u = \gamma_w U_{p1} H \quad \dots \dots (2)$$

で表わされる。

② 一斉閉塞法による場合には、基礎排水孔によるドレーン効果がない場合に等しい。したがって、その場合の揚圧力は図のOABのようになり、①と同様に

$$P_u = \gamma_w U_{P1} H \quad \dots\dots (3)$$

で表わされる。

③ 隔孔閉塞法による場合には、基礎排水孔の孔内水位 D_h が孔口に達して初めて基礎排水孔によるドレーン効果が現われる。したがって、孔内水位によって P_u の大きさが異なり、揚圧力は図のOACのようになる。これを式で表わせば、

$D_h < H_d$ の時 (ドレーン効果なし) :

$$P_u = \gamma_w U_{P1} H \quad \dots\dots (4)$$

$D_h \geq H_d$ の時 ($H - H_d$ に対してドレーン効果あり) :

$$P_u = \gamma_w U_{P2} (H - H_d) + \gamma_w H_d \quad \dots\dots (5)$$

となる。ここに、 H_d はドレーン水頭である。いま、

$$\gamma_w H_d = \gamma_w U_{P1} H_0 \quad \dots\dots (6)$$

とすれば、 $D_h \geq H_d$ の時

$$\begin{aligned} P_u &= \gamma_w U_{P2} (H - U_{P1} H_0) + \gamma_w U_{P1} H_0 \\ &= \gamma_w U_{P1} \left(\frac{U_{P2}}{U_{P1}} (H - U_{P1} H_0) + H_0 \right) \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

となり、 U_{P2}/U_{P1} が基礎排水孔によるドレーン効果となる。

2.4 地質条件と揚圧力

ダムの基礎岩盤は一般に硬岩と軟岩に分けることができる。硬岩の一般的な特性としては、岩片は緻密・硬質であるが連続性のある割れ目が発達していることがあげられる。また、軟岩の一般的な特性としては、岩石の固結度は低く軟質ではあるが、一般に割れ目の発達は少ないことがあげられる。したがって、岩盤内の透水性は、硬岩の場合には割れ目の大きさと連続性、軟岩の場合には岩石自体の透水性が大きく支配しているものと考えられる。

ここでは、カーテングラウチング施工時のパイロット孔におけるルジオン値と単位セメント注入量によって硬岩をさらに次の3つに分類し、これらの岩盤について、ダムに作用する揚圧力について検討を行った。

- ① 硬岩Ⅰ……ルジオン値が10 Lu 以上、またはセメント注入量が100 kg/m 以上の岩盤。
- ② 硬岩Ⅱ……硬岩Ⅰおよび硬岩Ⅲ以外の岩盤。
- ③ 硬岩Ⅲ……ルジオン値が2 Lu 以下、またはセメント注入量が20 kg/m 以下の岩盤。

図-8は一斉閉塞時にダム堤体の上下流方向断面に作用する揚圧力の合力を、上流堤踵部で $\gamma_w H$ 、下流堤趾で0となる三角形分布の揚圧力に対する百分率で表わしたものである。図より、透水性が高い基礎岩盤よりも透水性の低い基礎岩盤の方が揚圧力が大きい傾向にあることがわかる。これは、基礎岩盤内の

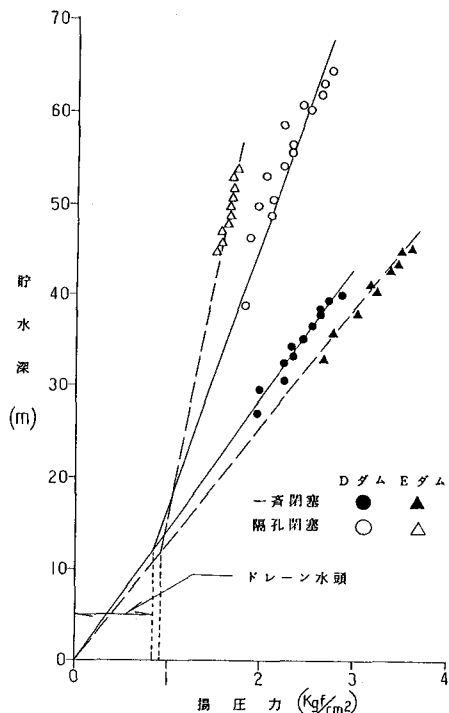


図-6 貯水深と揚圧力の大きさ

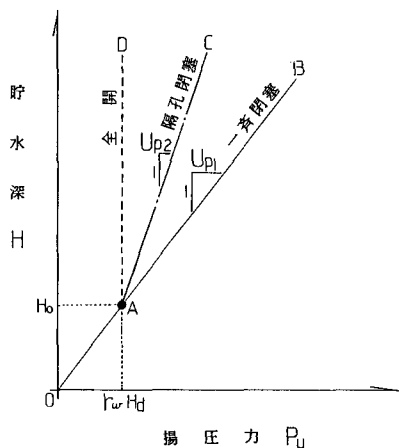


図-7 貯水深と揚圧力の関係

透水性が低いほど、相対的にカーテングラウチングによる遮水性の改良効果が小さくなり、カーテングラウチングによる遮水効果が現われにくくなることによるものと考えられる。また軟岩のようにダルシーフローにしたがう場合にも、カーテングラウチングによる遮水効果が小さいものと考えられる。なお、透水性の比較的高い基礎岩盤においても、ダム軸方向に断層を有するダム(△)では大きな揚圧力を示している。これは、断層に伴われる粘土脈の透水性が一般に低いことから、浸透水が断層より下流に抜けにくくなり、その結果、揚圧力が大きくなるものと考えられる。逆に透水性の低い軟岩の場合でも、下流側に透水性が大きい岩盤が存在する場合(×)には、揚圧力はそれほど上昇しない。

3. まとめ

重力式コンクリートダムにおける揚圧力の実測データを解析した結果をとりまとめると、以下のとおりである。

- 1) 揚圧力は一般に基礎排水孔を利用して測定されているが、この場合、基礎排水孔の閉塞方法と閉塞後の経過時間によって、その値が変化する。
- 2) 基礎排水孔を利用して揚圧力を測定する場合、これを閉塞してから揚圧力が上昇して安定するまでの時間は、基礎排水孔からの漏水量が少ないほど長くなる。
- 3) 揚圧力の大きさは貯水位の変動に追従して変化し、両者の関係は直線的である。
- 4) 一斉閉塞法によって揚圧力を測定する場合、揚圧力の大きさは、その断面における堤体基礎面の標高を原点とした場合の上流側水位に比例して変化する。しかし、隔孔閉塞法による場合は、基礎排水孔の孔口標高を原点とした場合の上流側水位に比例して変化する。これは、基礎排水孔の孔口まで浸透水が上昇しそのドレーン効果が生じることによって、初めて揚圧力の低減効果が現われるためである。
- 5) 軟岩を基礎とする場合は硬岩を基礎とする場合に比較して揚圧力が大きくなる傾向がある。これは、カーテングラウチングによる遮水効果が、硬岩の場合よりも相対的に小さいためと考えられる。
- 6) 基礎岩盤内にダム軸方向に走る断層が存在する場合には、揚圧力が大きくなる傾向がある。逆に下流に浸透水が抜けやすい場合には、揚圧力が小さくなる傾向がある。

今後は、上述の揚圧力の特性に加えて、基礎排水孔間の揚圧力分布、基礎排水孔の深さの影響などについても調査検討し、ダムの基礎排水孔の合理的設計法について検討する予定である。

最後に、揚圧力の実測資料を提供して頂いた関係ダムの各位に対して深く謝意を表します。

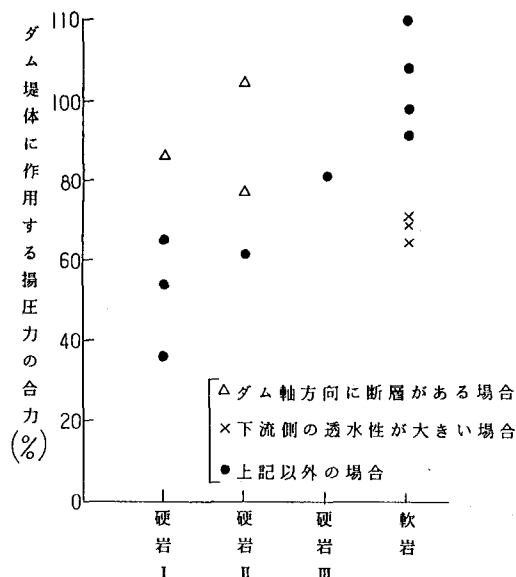


図-8 地質条件と揚圧力の合力の大きさ
(一斉閉塞の場合)