

# 川上ダムの試験湛水における揚圧力の動向と対策

北爪 皓<sup>1</sup>・大高 英澄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人水資源機構 一庫ダム管理所 (〒666-0153兵庫県川西市一庫唐松4-1)

<sup>2</sup>独立行政法人水資源機構 琵琶湖開発総合管理所 湖北管理所 所長 (〒521-0011滋賀県米原市中多良1-2) .

川上ダムは、淀川水系木津川支川前深瀬川に建設された重力式コンクリートダムであり、2021年12月に試験湛水を開始し、現在も継続中である。試験湛水中は、安全性の確認のため、揚圧力等の種々の計測等を実施している。2022年10月11日時点では、設計値に対して揚圧力が高い状態が確認されており、洪水時最高水位において堤体の安定条件を満足しない懸念があった。そこで、同年12月より揚圧力低減のための対策を実施した。本稿は、川上ダムの試験湛水の中間報告として、揚圧力計測結果及び揚圧力低減対策の効果について報告するものである。

キーワード 揚圧力、試験湛水、基礎排水孔、対策工、コンクリートダム

## 1. はじめに

川上ダムは、淀川水系木津川支川前深瀬川に建設された重力式コンクリートダムで、洪水調節、新規利水、流水の正常な機能の維持を目的とした多目的ダムである。ダムの諸元を表-1に示す。

川上ダムは、2021年12月16日に試験湛水を開始しており、現在も継続中である。試験湛水とは、初めて湛水す

表-1 川上ダムの諸元

|       |                          |
|-------|--------------------------|
| 形式    | 重力式コンクリートダム              |
| 堤高    | 84.0m                    |
| 堤体積   | 455,000m <sup>3</sup>    |
| 堤頂長   | 334.0m                   |
| 総貯水容量 | 31,000,000m <sup>3</sup> |
| 集水面積  | 54.7 km <sup>2</sup>     |

るときに貯水位を上昇・下降させ、ダム堤体、基礎地盤及び貯水池斜面の安全性を確認する試験である。川上ダムの場合、試験湛水時に洪水時最高水位 (EL.276.9m) まで水位を上昇させ、その後、1m/日を上限に不安定化懸念斜面の最低標高 (EL.245.0m) まで下降させる予定である。ダムは大規模な構造物であり、その安全性が社会に及ぼす影響が極めて大きい。そのため、「試験湛水実施要領(案)」<sup>1)</sup>に則り策定した計測・監視計画に基づき、毎揚圧力をはじめ漏水量や変形量等の種々の計測等を実施し、試験湛水中の安全性を確認している。

## 2. 観測揚圧力に対する堤体の安定検討

### (1) 揚圧力の計測方法

川上ダムの揚圧力観測設備の配置図を図-1に示す。川

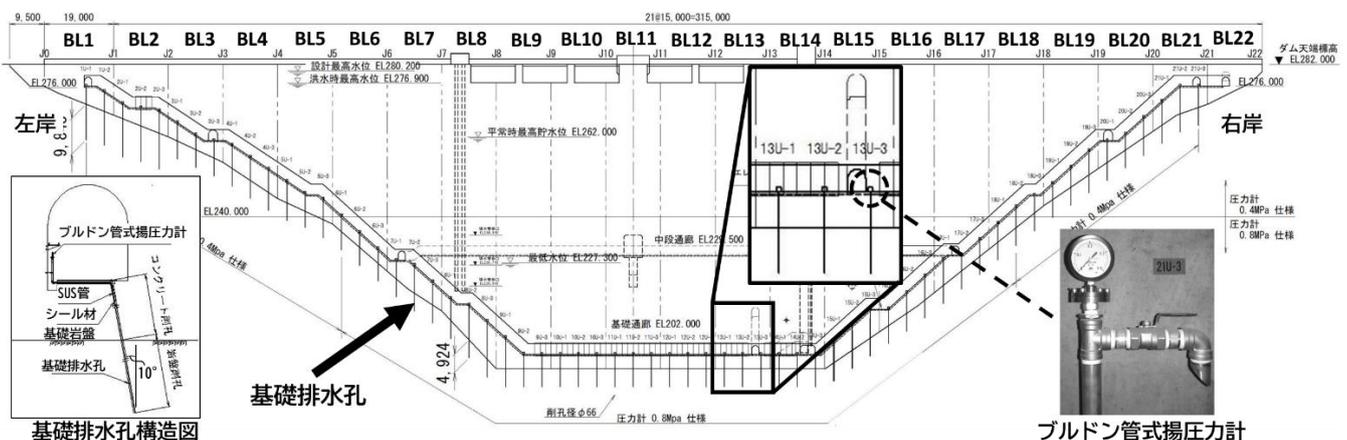


図-1 揚圧力観測設備配置図

上ダムの揚圧力は、基礎監査廊内の基礎排水孔に設置されたブルドン管式揚圧力計（左右岸方向62孔、クロスギヤラリー2孔）により手動計測している。計測は、観測孔を1つおきに閉塞する隔孔閉塞法により行っており、閉塞から1時間後の揚圧力計の数値を記録している。試験湛水中は貯水位の上昇・下降に伴う揚圧力の変動を監視するため、通常、1回/日の計測を行っている。

$$F_s = (\tau_0 B' + fV')/H' \quad (2)$$

ここに、 $F_s$ :せん断摩擦安全率、 $\tau_0$ :岩盤せん断強度、 $B'$ :せん断抵抗を考慮する堤敷長、 $f$ :岩盤内部摩擦係数、 $V'$ :単位幅当たりの傾斜堤敷面に対する鉛直合力、 $H'$ :単位幅当たりの傾斜堤敷面に対する水平合力

(2) 堤体の安定計算手法

堤体の安定条件は次の①～③とおりでである。また、安定計算上の外力モデル及び各貯水位における外力条件を図-2に示す。

- ①堤体上流端の鉛直方向に引張応力を生じない
- ②せん断に対して安全である（安全率4以上）
- ③許容圧縮応力及び許容引張応力を超えないこと

条件①は堤体の転倒に対する検討であり、転倒しないためには、式(1)のとおり、堤体に作用する合力が堤敷の中央三分点内に入ることが条件となる。そのため、Middle Third条件ともいわれる。

$$d = \Sigma M / \Sigma V, L/3 \leq d \leq 2L/3 \quad (1)$$

ここに、 $d$ :合力の作用位置、 $\Sigma M$ :総モーメント、 $\Sigma V$ :鉛直合力、 $L$ :堤敷長

条件②は、外力に対するせん断抵抗力の検討である。式(2)の堤敷傾斜 $\alpha$ を考慮したHennyの式により、安全率4以上を満足するものとする。

条件③は、式(3)より堤体の縁応力を求め、その値が堤体コンクリートの許容圧縮応力及び許容引張応力を超えないことを確認する。

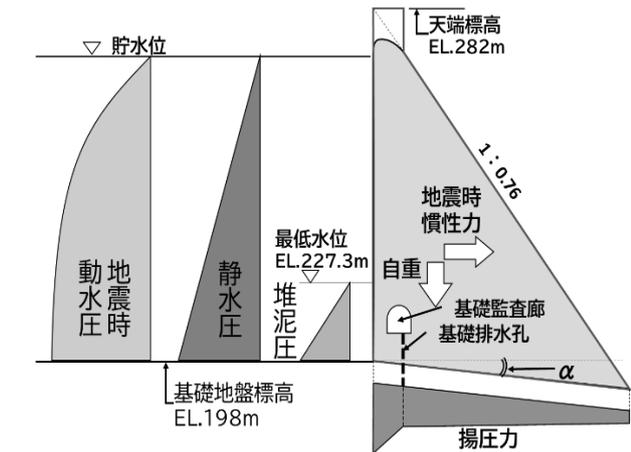
$$\sigma = V/A + My/I \quad (3)$$

ここに、 $V$ :鉛直合力、 $A$ :ブロック毎の底面積、 $M$ :底面中心軸まわりのモーメント、 $y$ :底面中心軸より堤体縁までの距離、 $I$ :底面中心軸に対する断面二次モーメント

(3) 計測揚圧力に対する堤体の安定検討

川上ダムの揚圧力の計測値は、2022年10月11日時点で、設計値（揚圧力係数にして0.2）よりも高い状態が確認されており、洪水時最高水位において堤体の安定条件を満足しないことが懸念された。例えば、観測孔13U-2の場合、揚圧力係数にして0.5程度の値を計測していた。そこで、(2)に示す安定条件を満足する最大の揚圧力を観測孔毎に求めた上で、計測揚圧力に基づく回帰分析を行った。理論上、揚圧力は貯水位（水圧）に比例すると考えられるため、回帰分析は線形回帰分析とした。

13U-2の回帰分析の結果を図-3に示す、13U-2の場合、



|                    | 自重 | 静水圧 | 堆泥圧 | 地震時慣性力 | 地震時動水圧 | 揚圧力 |
|--------------------|----|-----|-----|--------|--------|-----|
| 平常時最高貯水位 EL.262.0m | ○  | ○   | ○   | ○      | ○      | ○   |
| 洪水時最高水位 EL.276.9m  | ○  | ○   | ○   | ○*     | ○*     | ○   |
| 設計洪水位 EL.280.2m    | ○  | ○   | ○   | -      | -      | ○   |

\* 洪水時最高水位における水平震度は平常時最高貯水位の1/2

図-2 外力モデル及び貯水位別外力条件

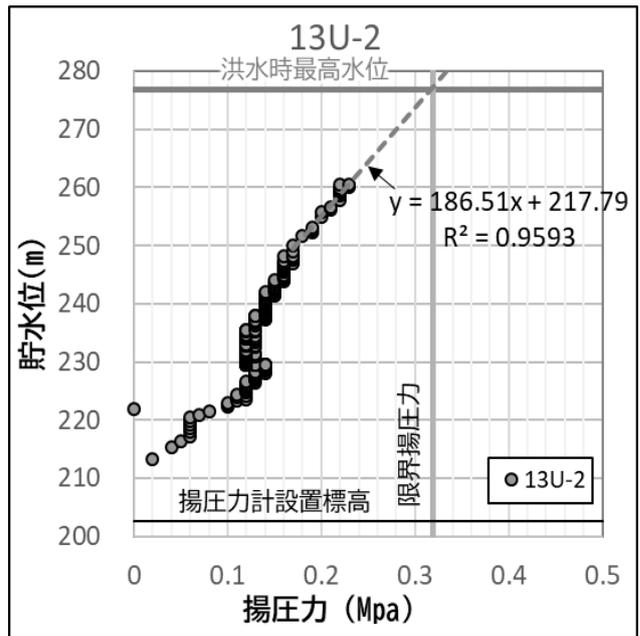


図-3 貯水位-揚圧力相関図(2022年10月11日時点)

洪水時最高水位において安定条件上の最大揚圧力（以下、限界揚圧力）を超えることが推定された、この時の決定係数 $R^2$ は約0.96であった、一般的に $R^2 \geq 0.5$ で式の当てはまりがよいとされるため、回帰式の説明力は高いものと考えられる。

全観測孔について同様の検討を行い、洪水時最高水位において限界揚圧力を超える観測孔について揚圧力低減のための対策を実施することとした。また、検討の結果、限界揚圧力を超えないと予想される観測孔も、貯水位の上昇に伴い貯水位と揚圧力の関係が変化する可能性がある。そのため、想定揚圧力が3割程度増加する可能性も考慮し、その場合に限界揚圧力を超える観測孔についても対策を実施することとした。

検討の結果、対策の対象となった観測孔を表-2に示す。対策としては、揚圧力を低減する場合の対策工として採用事例<sup>2)</sup>の多い、追加基礎排水孔の施工を採用することとした。追加基礎排水孔は、既存の基礎排水孔に隣接して設ける排水孔であり、常時、開放状態とし、基礎岩盤からの浸透水をそこから排水することで、揚圧力を低減する。

### 3. 揚圧力低減対策工

#### (1) 基礎排水孔内カメラ調査

表-2の観測孔について、追加基礎排水孔の施工前に、基礎排水孔の健全性確認のため、孔内カメラによる閉塞状況の調査を行った。BL13の調査写真の例を図-4に示す。調査の結果、基礎排水孔の閉塞はなく、閉塞による揚圧力の上昇はないものと判断した。一部の観測孔では、基礎排水孔に設置したSUS管と孔壁との接着部のシール材

表-2 対策実施対象観測孔

|                                 |  |                                |
|---------------------------------|--|--------------------------------|
| 洪水時最高水位で<br>限界揚圧力を超過            | 11U-2, 13U-2, 15U-1,<br>15U-2, 15U-3<br>計 5/62 孔 | 合計<br><b>10</b><br><b>62</b> 孔 |
| 洪水時最高水位で<br>3割増の場合に限<br>界揚圧力を超過 | 10U-2, 12U-2, 14U-3,<br>16U-1, 16U-2<br>計 5/62 孔 |                                |

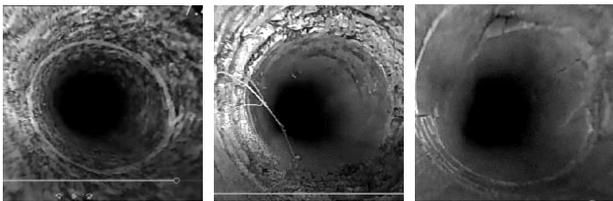


図-4 孔内カメラ調査状況 (BL13)

に剥離を確認したが、シール材を除去及び再施工しても、揚圧力及び基礎岩盤からの漏水量に大きな変化はなく、観測孔を閉塞するものではなかった。

#### (2) 追加基礎排水孔の施工

孔内カメラ調査より、孔内閉塞による揚圧力への影響がないことが判明したため、表-2の観測孔を対象に当該孔の揚圧力低減を目的として、追加基礎排水孔の施工を実施した。追加基礎排水孔の施工位置を図-5に示す。

追加基礎排水孔の施工は、図-6に示すコアドリル（φ66）により削孔を行った。削孔長は、既存の基礎排水孔と同様に、岩着後5mを削孔するものとした。削孔は2022年12月14日より開始し、2023年1月12日に全15孔の施工が完了した。追加基礎排水孔の削孔後、漏水量等の計測も可能なように、既存基礎排水孔と同様にSUS管を設置した。

### 4. 対策工による揚圧力低減効果

追加基礎排水孔施工前後の揚圧力水頭の分布状況を図-7に示す。図-7より対策工実施前後で、対策対象孔の揚圧力水頭が低減していることがわかる。

次に、追加基礎排水孔施工後の揚圧力が、堤体の安定性に与える影響を確認するため、2.(3)節と同様の回帰分析を追加基礎排水孔施工後の揚圧力を対象に行った。13U-2の分析結果を図-8に示す。図-8より、追加基礎排水

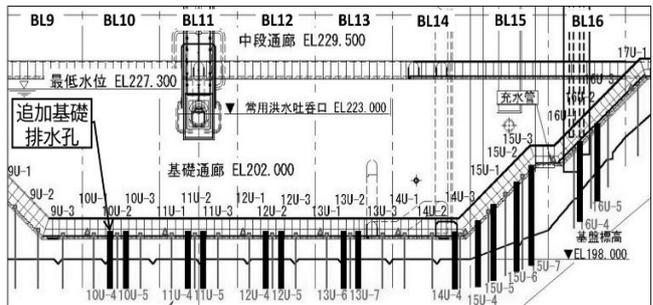


図-5 追加基礎排水孔施工位置

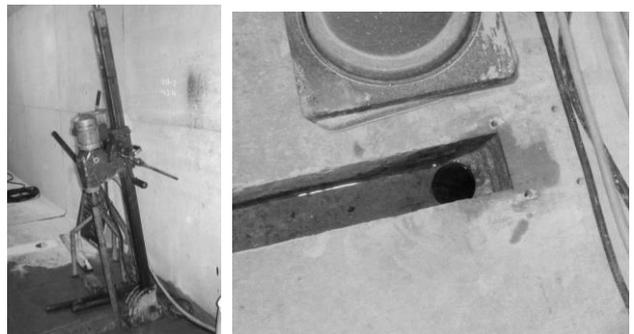


図-6 施工機械(コアドリル)及び追加基礎排水孔

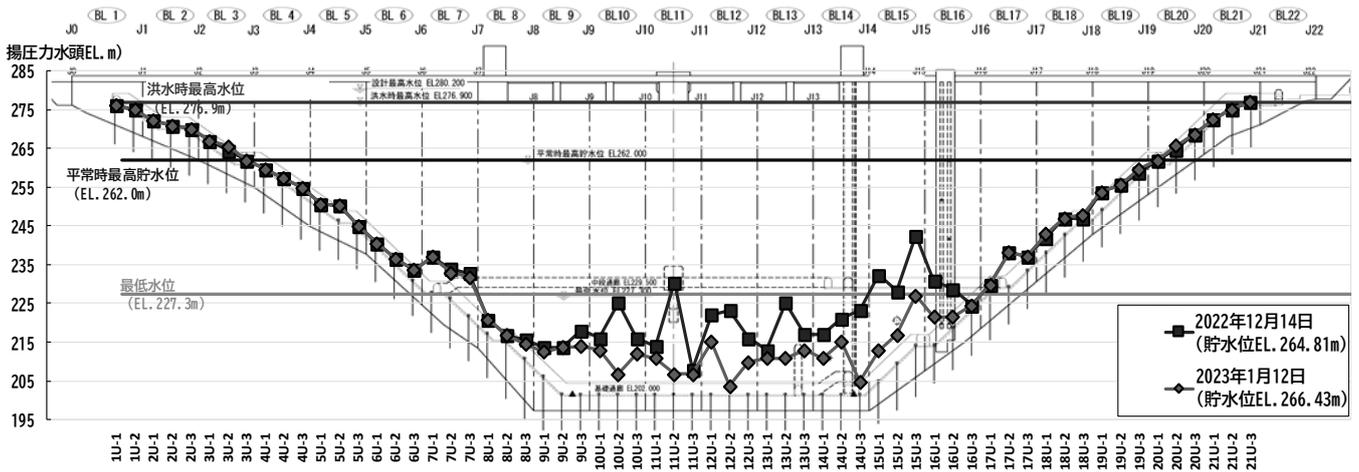


図-7 対策施工前後の揚圧力水頭

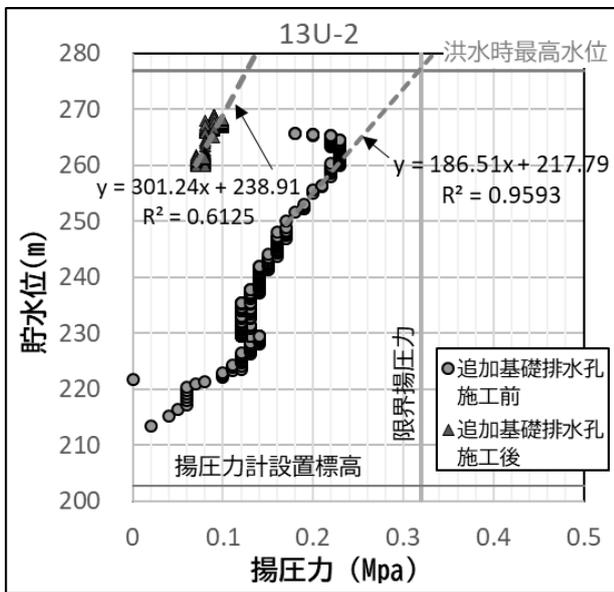


図-8 水位-揚圧力相関図(追加基礎排水孔施工後)

孔施工後の13U-2の揚圧力は、追加基礎排水孔施工前に対して、3~4割程度に低減されていた。施工前は0.5程度であった揚圧力係数は、0.2程度まで低減されており、おおむね設計値と同程度となった。この時のR<sup>2</sup>は約0.61であり、回帰式の当てはまりはおおむね良好な結果であった。

全観測孔について同様に分析を行った結果、揚圧力係数が設計値まで低減されない観測孔はあるものの、回帰式より推定した洪水時最高水位における揚圧力に対して3割増加しても、限界揚圧力を超える孔はなかった。また、回帰分析の結果、R<sup>2</sup>≥0.5を確保できない観測孔もあったが、その孔については、対策前の5割程度に揚圧力が低減されており、現状で追加の対策は不要と判断した。なお、追加基礎排水孔施工後の基礎地盤からの漏水量は、全体で約5L/min程度の増加であり、著しい増加や

漏水の濁り等は確認されなかったため、問題ないものと判断した。以上より、本対策により、ダム堤体の安定性が向上したことを確認した。

## 5. まとめ

川上ダムでは、試験湛水中の揚圧力が設計値に対して高い状態であったことから、洪水時最高水位において堤体の安定条件を満足しないと推定される観測孔について、追加基礎排水孔による揚圧力低減対策を実施した。その結果、全対策対象孔で揚圧力の低減効果が認められ、洪水時最高水位において限界揚圧力を超えると推定される観測孔はなくなった。

以上より、追加基礎排水孔の施工により、堤体の安定性が向上したことを確認した。また、追加基礎排水孔は、揚圧力の低減に効果的であることが示唆されたものと考えている。今回は、計測した揚圧力から将来の揚圧力を推定し、堤体の安定性を検討することで、事前に対策を講じることができた。

今後は、貯水位の上昇に伴う揚圧力の動向に注視しつつ、試験湛水を継続していく。

※本論文の内容は、筆者の従前の所属である独立行政法人水資源機構木津川ダム総合管理所川上ダム管理所における業務に基づくものである。

## 参考文献

- 1) 建設省河川局開発課：試験湛水実施要領（案）について（建設省河開発第98号）。1999。
- 2) 独立行政法人水資源機構（技術研究発表会）：大山ダム試験湛水実施状況の報告。2012。