

ラオス国ナムニアップ1水力プロジェクトにおける洪水吐エアレーター構造の決定について

関西電力株式会社 正会員 ○山本 悠貴
関西電力株式会社 正会員 青坂 優志
関西電力株式会社 正会員 村上 嘉謙

1. はじめに

関西電力が出資するラオス国ナムニアップ1水力発電プロジェクト（NNP1）では、メコン川の支流ナムニアップ川の2か所に、世界的にも珍しい高落差のスキージャンプ式洪水吐を有する主ダムと大規模なラビリンス式洪水吐を有する副ダムを建設した。洪水吐の設計に当たり、負圧によるキャビテーションの抑止が課題となったが、大規模な水理模型実験による試行錯誤を経て、エアレーターを設置することで解決を試みた。

2. 主・副両ダム洪水吐における減勢工の特徴

主ダム建設地点は狭隘な谷形状であるため、跳水式減勢工では大幅な設備投資が必要となる。そこで、流水による下流河川および周辺地山の洗堀・侵食や堆積物による流水の阻害などが懸念されるものの、減勢池として自然地形の活用を図ることができ、掘削およびコンクリート量を最小限にできるスキージャンプ式洪水吐（写真-1）を採用した。形状としては、着水地点を2か所に分散させるためにマルチプルフリップバケット（3条）を採用し、発射角度を中央レーンで40度、両サイドレーンで25度とした。構造的な特徴として、洪水吐の落差（約110m）が大きく、フリップバケット部における流速が、設計値で45m/sと高流速であることが挙げられる。一方、副ダムは主ダムの放水位を押し上げるため十分な越流水深が取れない。それでは越流長が長くなってしまいうので、これを解決する方法としてジグザグの越流形式（ラビリンス式洪水吐：写真-2）とし、越流幅自体を元河川の幅と同じ90m程度とした。これで越流長を確保しつつ、両アバットの掘削と改変エリアが小さくなり環境にもやさしいレイアウトとなった。なお、越流部のダム高は世界最高水準の17.7mである。両ダムとも、シュート部に負圧を発生させないことが課題であったが、このクラスの設計事例が少ないことと、水理特性が把握されていないことから、水理模型実験により対策工の最適化を図った。

表-1 各ダムの諸元

位置	主ダム	副ダム
ダムタイプ	重力式	重力式
主要コンクリート	ローラー転圧コンクリート	有スランプコンクリート
ダム高	167.0m	20.6m
堤頂長	530.0m	90.0m
打設量	約236万m3	約24万m3
洪水吐形式	スキージャンプ式	ラビリンス式
設計洪水量	5,210m3/s	5,210m3/s
ゲートタイプ	ラジアルゲート	-
ゲート数	4門	-
吐口条数	3条	1条



写真-1 主ダム

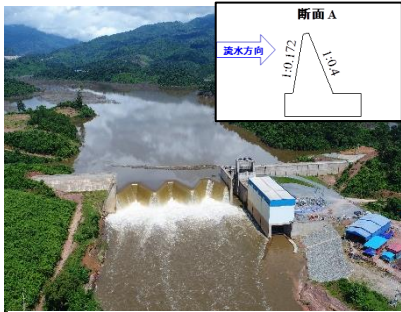


写真-2 副（逆調整）ダム

3. 主・副両ダム洪水吐における課題

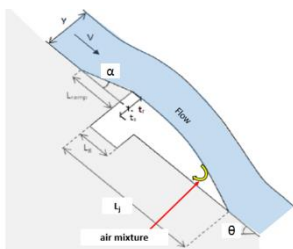
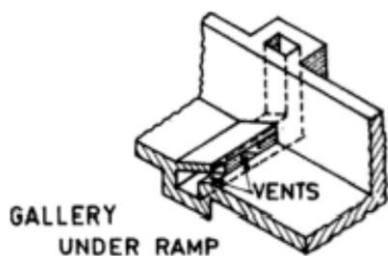
洪水吐では、越流部の形状や流水面の凹凸による放流水の乱れにより負圧が発生し、キャビテーションに繋がる。そこで、越流部直下にエアレーターを設置し、放流水に空気を強制的に混入させることで、キャビテーション抑止を図った。主ダムについては、水理特性検討のため実験施設の物理限界となる1/65の模型縮尺を採用したが、フルード相似則を考慮した場合には、レイノルズ数の観点から放流水の空気混入時の特性は再現できないと考えられたため、海外の文献による経験式を用いてエアレーターを設計することとした。設計にあたっての課題はエアレーターの①構造形式決定、②空気混入率 C_o 算定、③自己曝気を含む空気混入率 C_m 算定、④実機による空気量測定であった。一方、副ダムでは1/65の模型縮尺にてレイノルズ数の観点から空気混入時の特性を再現できると考えられたため、課題であった負圧発生抑止対策を模型により検討することとした。

キーワード 重力式ダム、スキージャンプ式洪水吐、ラビリンス式洪水吐、キャビテーション、エアレーター
連絡先 〒553-0003 大阪市福島区福島 5-1-7 関西電力（株）水力エンジニアリングセンター TEL 06-4796-8857

4. スキージャンプ式洪水吐のエアレーターの設計

洪水吐は、既往知見によれば、キャビテーション指数 σ が 0.2 以下、流速が 25m/s 以上の時に、キャビテーションによる損傷を受けやすく、水路が急傾斜（シュート角度 $\theta > 20^\circ$ ）であれば、水面の乱れにより自己曝気が起こり、空気が混入することでキャビテーションを抑止できる。

エアレーターの構造形式は技術図書やその他プロジェクトを参考に、水路底部に設けられた監査廊により空気供給を図る構造（図-2）とした。監査廊上部（ランプ）を流水がジャンプする際に空気が混入する。（図-3）設置位置は、エアレーターによる空気混入の促進と、エアレーター通過後の流水の乱れ防止を考慮して $\sigma > 0.2$ となる位置とし、エアレーターの設計条件（図-4）から空気混入率の計算を実施した。



設計条件	備考
W: シュート幅	49m
Q_w : 流量	5,210 m ³ /s 設計洪水量
q_w : 単位幅流量	106.3 m ³ /s/m
y : 越流水深	4.1 m
θ : シュート勾配	53.9°
α : ランプ角度	4°
V: 流速(= Q_w/y)	25.9 m/s EL.285.0m地点
Pb: 大気圧	10.3 m 固定値
Pv: 蒸気圧	0.233 m 固定値

図-2 エアレーター構造図 図-3 エアレーター付近の流形 図-4 エアレーター設計条件

エアレーターによる空気混入量を小さく見積もる方が安全側の設計となるため、式-1 を用いて式-2 により空気混入量 C_o を、式-3 により自己曝気を含めた空気混入率 C_m を算出した。Zhang(1991)は、流速 45m/s の実機を用いて、空気混入率 4%以上を満たせばキャビテーション防止可能であるとしていることから、当該地点でも空気混入率 $C_o > 4\%$ を基準値として設計に考慮した。結果、シュート上流部の空気混入率 4.8%、シュート下流部で 24% となり、十分な空気混入率を確保できる設計とした。

$$Q_{air} = C_1 * V * L_j * W \quad (\text{式-1}) \quad C_o(\%) = \frac{Q_{air}}{Q_{air} + Q_w} * 100 \quad (\text{式-2}) \quad K_o = \frac{1}{1 - c_e} \left[\frac{1}{1 - c_e} * \ln \left(\frac{1 - c_x}{c_e - c_x} \right) - \frac{1}{1 - c_x} \right] \quad (\text{式-3})$$

5. ラビリンス式洪水吐のエアレーターの設計

洪水吐の形状設計は、Lux (1989) の式を採用し、施工性を考慮した形状とした。越流部の形状は、刃型形式を採用した。実験の結果、クレスト部での負圧を計測したため、キャビテーション防止のために、空気を強制的にクレスト部下流面へ通期させるために①空気管と②水切りの2案を検討した。実験結果として、①空気管の方が負圧の抑制効果が高く（許容値 $\Delta 3m$ に対して設計洪水時に $\Delta 2.4m$ ）、かつ流水を障害しない（設計洪水時に越流水深 6.6m、下流部流速 4.0m/s）ことから、採用することとした。

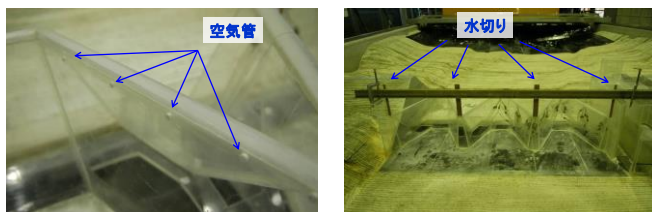


図-5 負圧対策設備、(左) 空気管、(右) 水切り

6. 施工後の状況

主ダムおよび副ダムのエアレーターの施工後の写真を写真3、4に示す。

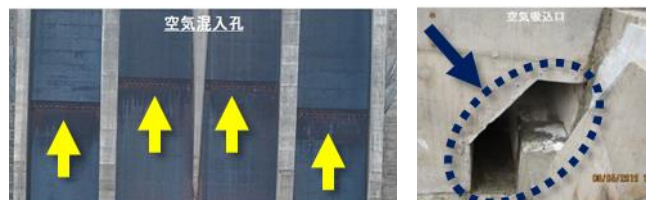


写真-3 スキージャンプ式洪水吐のエアレーター



写真-4 ラビリンス式洪水吐のエアレーター

7. 最後に

本プロジェクトのように、落下高さ、単位幅流量、流速が大きく、狭隘な谷地形においても、エアレーターを適切に配置することで、空気混入率 4%以上を確保できることが分かった。今後は、実機による空気量計測を実施し、実計測を通じて設計および既存の設計式の妥当性について検証を進めていきたい。