

ダム放流管の水理模型実験について

北海道電力(株) 正 山崎 誠

1. はじめに

雨竜オ1ダム(石狩川水系雨竜川)はわが国でも指折りの大きな人造湖として有名で、朱まり内湖を形成し、貯溜された水は出力5,100kWの雨竜発電所から天塩川に流域を変更し、放流されている。また、ダム下流河川で水量が不足し、かんがい用水が必要なときは雨竜オ1ダムから貯溜水を雨竜川に放流するという重要な役割を担っている。

雨竜オ1ダムには図-1に示すように堤体内にかんがい放流管を設けてある。たまたま昭和51年の異常高水時に貯水池水位が越流頂を下回ったためにダムゲートからの放流が不可能となり、放流管前面ゲートを操作したところ、水理的に不安定な現象(前面ゲートの振動、中央バルブ室からの異常な音の発生など)が生じた。そこで、設備の保全と放流量の管理上、放流管内の水理現象の解明とゲートおよびバルブ操作時のダム水位と開度流量の把握を目的とし、 $1/2$ の縮尺模型により実験的検討を行ったので、その結果を報告する。

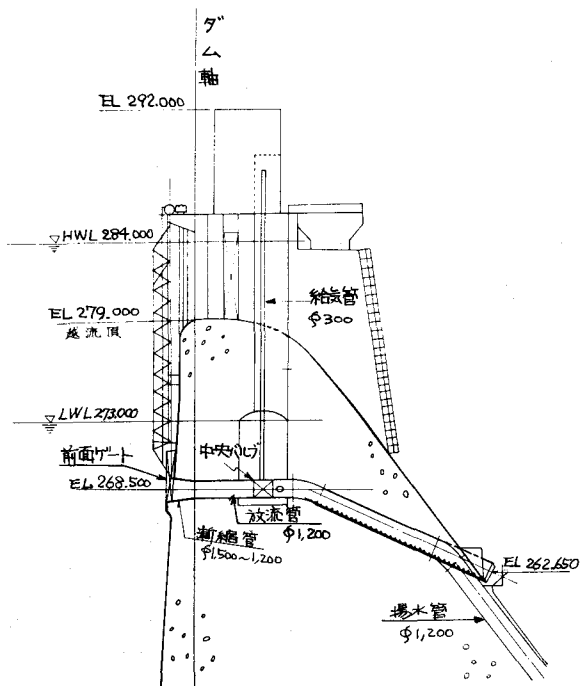


図-1 雨竜オ1ダムかんがい放流管断面図

2. かんがい放流設備の概要

かんがい放流管は図-1に示すように、前面にスライドゲート、水平部中央にスルースバルブを有し、中央バルブ後方に $\phi 300$ mmの給気管が設置されている。管路各口1.02mの区間は $\phi 1,500 \sim \phi 1,200$ の漸縮管となっている。

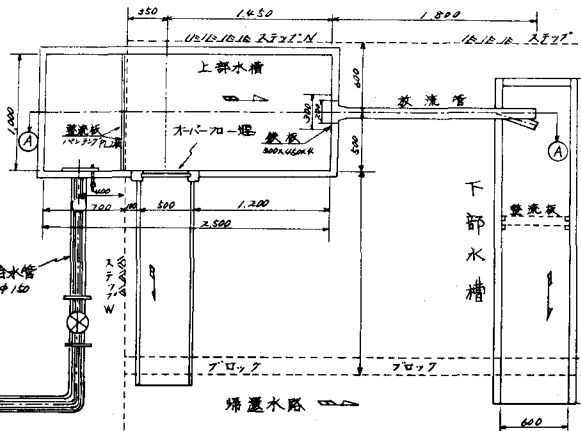


図-2 模型の概要(平面図)

3. 相似律と模型の縮尺

模型実験の相似律はその現象の支配的力が重力の場合にはフルードの相似則 $\frac{V}{\sqrt{gH}} = \text{const}$ による。また、粘性力の場合にはレイ

ルズの相似則に従うべきものである。しかし、模型実験を行う場合、全てに共通して適用できる相似則は無く、管路の実験においては重力と粘性力が作用し、両者の力関係を同時に相似させることは不可能である。

本実験の主目的がゲート操作時の放流量の把握および放流管内の流況の観察にあること、また半管路放流管の場合、摩擦による損失水頭よりも、ゲートおよび入口などの形状変化による損失水頭が大であることから、フ

ルードの相似則を適用することとした。

模型の縮尺は実験室の大きさから取り得る最大落差を考え、 $k_d = 1/12$ と決定した。この縮尺でレイノルズ数を検討すると $Re > 200,000$ と十分に大きな範囲に入り、フルードの相似限界を満足すると考えられる。⁽¹⁾

4. 実験設備

図-2に示す通り模型への給水はφ150 mmの給水管で、既設高架水槽より模型上部水槽へ導水し整流した後、アクリル樹脂の管路を通り模型下部水槽へ放流される。上部水槽は雨竜オ1ダム貯水池に相当し、下部水槽の末端に全幅堰を設け流量を計量した。貯水池水位は上部水槽の側面に設置したオーバーフロー堰により調節した。前面ゲートの操作方法はねじ止め式とし、中央バルブの操作方法は開度に応じて作製したゴムフランジを交換することによって所要のバルブ開度を得ることとした。給気管は前面ゲート直後に設置することとし、φ200、300、400 mmの3種類の管径に交換できるように構造とした。中央バルブ後方に設置されている既設の給気管(φ300)についても同様に交換できるようにした。圧力の測定は放流管の管壁に上、下、左、右4点のピエゾ孔を設け、ビニール管で水柱マンオメーターに接続して行った。

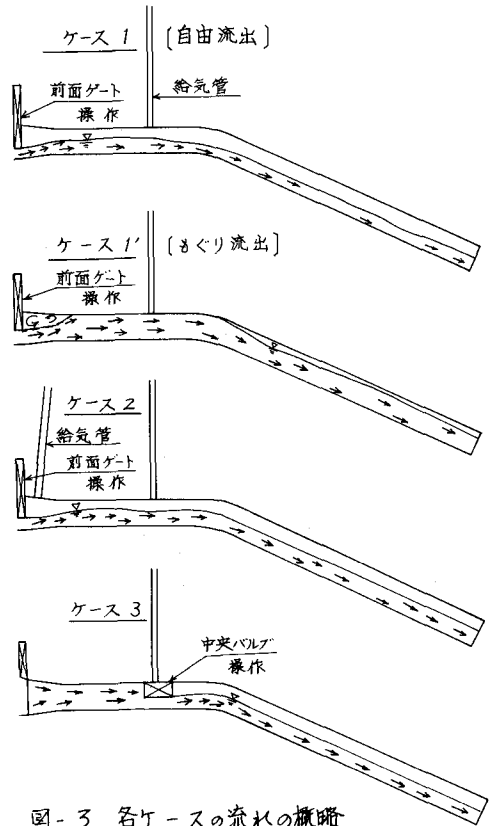


図-3 各ケースの流れの概略

5. 実験のケース

現状の放流管で、前面ゲートを操作して流量調節を行う場合をケース1とし、ケース1の前面ゲート直後に給気管を新設した場合をケース2とした。このときの中央バルブはいずれも全開の状態である。

次に、中央バルブで流量調節を行う場合をケース3とした。各ケースの流れの概略を図-3に示す。

6. 実験結果

{ゲート開度と水位流量の関係}

ケース1で同一開度でゲート背後の流れがもぐり流出(管路流)と自由流出(開水路流)の2種類存在する。ゲート開度が50%以下で貯水池水位が $WL = 278.00 \sim 279.00$ 付近で突然自由流出からもぐり流出に遷移する。自由流出の場合をケース1、もぐり流出の場合をケース1'として区別する。両者の水位と流量の関係を比較すると、常にケース1'の放流量が上回っている。この解析にはそれぞれの流れにおいて基本方程式の検討、各種の損失水頭の検討を

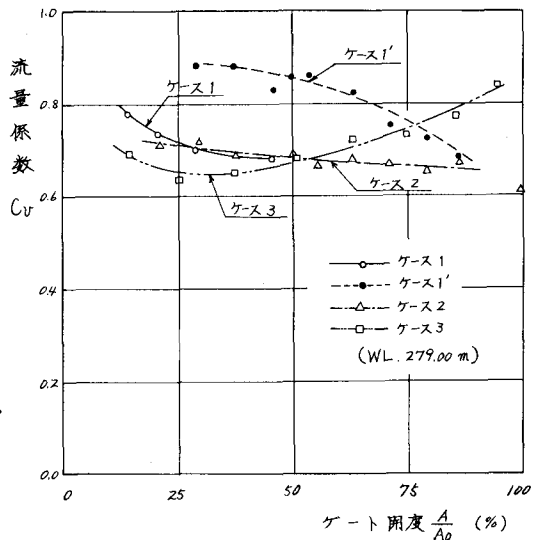


図-4 ゲート(バルブ)開度と流量係数

必要とするものと考える。

ケース2の流況は自由流出となり、ケース1の結果にほぼ一致する。
(ゲート(バルブ)開度と流量係数)

もぐり流出と自由流出では流量係数を算出する基本式が異なるが、
 いま便宜上次式を用いて流量係数を求めることとする。

$$Q = A_g \cdot V_g \text{ ----- (1)}$$

$$V_g = C_v \cdot \sqrt{2gH} \text{ ----- (2)}$$

ここに、

A_g : ゲート開度面積

V_g : ゲートの下の縮流ジェットによる流速

C_v : ゲートおよび入口損失などを含んだ流量係数

H : 貯水池水位とゲート(バルブ)開口部中心点
 までの水位差

図-4に各ケース間の C_v の比較を示す。

次に、Naudascher、Kobus、Raoの研究に従って、自由流出と
 もぐり流出の場合に定義される流量係数 C_d と実験結果から得られる
 流量係数 C_v を比較すると、図-5に示すようにパラメータの設定
 が不十分ではあるが、傾向的に比較的よくあっている。

(もぐり流出時の流量係数)

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2 \left[\left(\frac{2\beta_1}{K} \right) + \left(\frac{1}{C_0} \right) \cdot a_1 \right] - \left[\frac{2a'}{K} \right] - \left[a^2 - (1 + a)^2 \frac{N}{8K} \right] \frac{l}{D}}} \text{ --- (3)}$$

(自由流出時の流量係数)

$$C_d = \sqrt{\frac{H}{\Delta H}} \sqrt{\frac{1 - \frac{h^*}{H}}{1 + a^2 C_e}} \text{ ----- (4)}$$

また、ゲート全開時の流量 Q_{max} と、ゲート開度との関係の実験結果
 をNaudascherによって得られ、計算結果と比較すると図-6、
 図-7のように、もぐり流出の場合は $C_0=1.0$ の曲線に、また自由流
 出の場合は $C_0 \frac{h^*}{H} = 1.0$ ($C_e = 0.5$)の曲線と類似している。雨竜
 1ダムかんがい放流管では同一のゲート開度で2つの曲線のいずれか
 が適用されるという結果を得たが、クレスト頂(EL. 279.00m)に
 近い水位でゲート操作を実施することなどを考慮すると、もぐり流出
 が支配的であると考えられる。

次に、流量係数をゲート総断面積 A_0 を基準とした(5)式で表わし、
 各ケースを比較すると図-8に示すとおりである。

$$C_a = Q/A_0 \sqrt{2gH} \text{ ----- (5)}$$

ケース3を除き、流量係数 C_a の曲線は一般的な増加率
 の傾向を示していない。これはケース1、1およびケ
 ース2で入口およびゲートによる損失が大きく影響して
 いるものと考えられる。

(管内圧力分布)

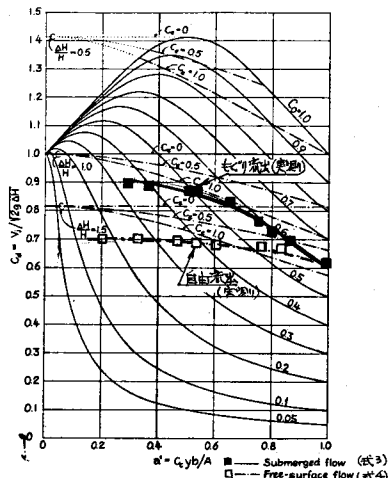


図-5 流量係数 C_d とゲート開度の関係
 (Naudascherの計算値と実験値の比較)

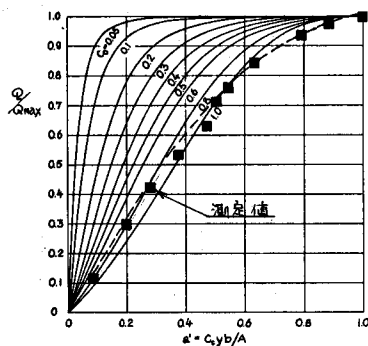


図-6 Q/Q_{max} とゲート開度の関係
 (もぐり流出時)

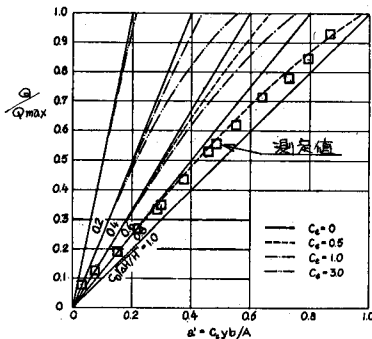


図-7 Q/Q_{max} とゲート開度の関係
 (自由流出時)

放流管の設計条件で特に重要なことは導水部のすべての場所でキャビテーションに対して十分安全であることとされている。特に半管路型放流管のゲート下流部では極度に低圧となり、キャビテーションによる浸蝕破壊や不安定な圧力変動による構造物の振動を誘発する危険がある。

ケース1' (もぐり流出) の場合の圧力分布を図-9に示す。前面ゲート直後および曲管部始点の2箇所が急激な圧力降下がみられる。前面ゲート直後の圧力低下は前面ゲート背後に空気が補給されていまいこと原因しているのは明らかであるが、ゲート開度が50%以上になると徐々に圧力が上昇する。この傾向をベルヌーイの定理により考察すると、ゲートから噴出するジェット流速が管内流速を常に上回っている場合(ゲート開度面積<放流管断面面積)は流速水頭の差が圧力水頭の低下によって現われる。一方、曲管部の圧力低下は流速の増大とともに大きくなる。これは曲管部の曲率が小さく、水流のまく離れを生じ不安定な流れとなっていること、また半管路型放流管のゲート下流で拡大した断面を必要とするが等断面となっているため、曲管部で下流側の空気運行為妨げられ、給気管からの空気供給量も少くなり局部的な低圧部を発生しているものと考えられる。

前面ゲート直後に給気管を新設したケース2の場合の圧力分布を図-10に示す。前面ゲート直後の低圧部におよび許容負圧(3m)以内に圧力が高まっているが、曲管部での圧力低下はケース1'と同じである。また、中央バルブで流量調節した場合の圧力分布を図-11に示す。バルブ直後の低圧部は発生しないが、曲管部ではケース1、2同様低圧となる。

管内圧力条件から各ケースを比較すると、ケース3が他ケースと比較して圧力低下量が小さく良好な結果となった。

圧力の測点は上、下、左、右の4点設けたが、管路の流れが開水路流あるいは空気を大量に含んだ流れとなるため、圧力値としては下側の一点を使用した。

(需要空気量の推定)

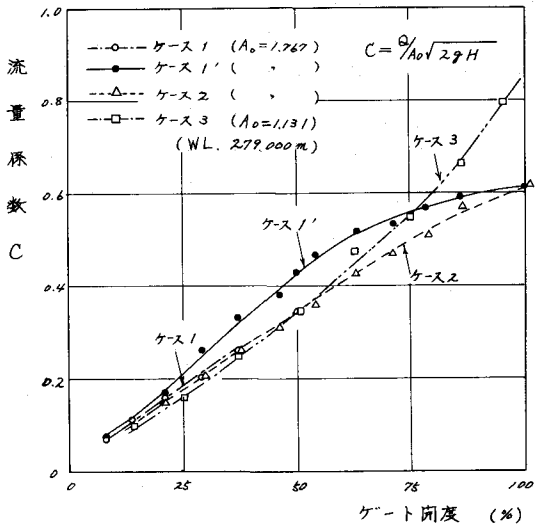


図-8 ゲート断面積を基準とした流量係数

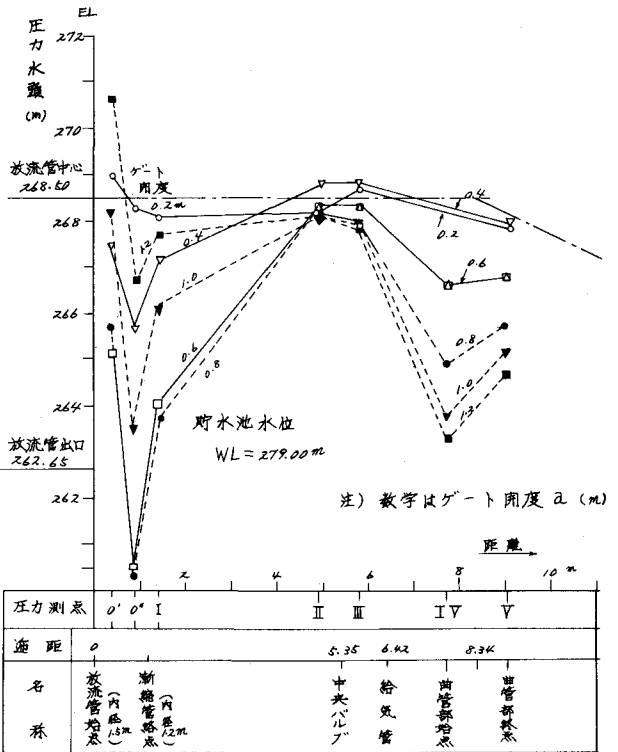


図-9 ゲート開度と管内圧力(ケース1')

給気管の必要空気量に熱線式風速計(測定範囲0~20 m/s)で測定した給気管内の風速から推定した。

現状の給気管(口径300mm, 中央バルブ後方1m)について、風速を測定したところ、ケース1(自由流出)の場合に空気の供給が行われていることばかりだが、ケース1'(もぐり流出)の場合にゲート開度が大きくなると風速が低下している。これは曲管部での流れが不安定で、給気管より下流側への空気連行が妨げられていることによると考えられる。また、この傾向は曲管部での圧力低下がゲート開度が大きくなるに従って増加することと一致している。

前面ゲート背後で生ずる圧力低下を抑制するために、前面ゲート背後に給気管を設置した場合(ケース2)、流れは開水路流となり、 $\phi 200\text{mm}$ 以上の給気管で十分供給し得ることがわかった。中央バルブで流量調節する場合(ケース3)、現在の給気管($\phi 300\text{mm}$)で十分である結果も得られた。

給気管の設計では実測資料にもとづく経験的方法が採用されており、キャンベル・ガイトン⁽⁴⁾は必要空気量 Q_a と水流量 Q_w との比 β と、ゲート噴出流のフルード数 F_r との関係を提案した。

$$Q_a = \beta Q_w \text{ ----- (6)}$$

$$\beta = 0.04 (F_r - 1)^{0.85} \text{ ---- (7)}$$

ケース2、ケース3について、(6)式より給気管の検討を行うと、それぞれ約 $\phi 200$ 程度の大きさを必要とするが、給気管内の各種の損失等を考慮すると、 $\phi 300$ 程度が妥当と考えられる。

7. まとめ

雨竜オ1ダムかんがい放流管の水理模型実験について、その結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 貯水池水位とゲート開度流量の関係を明らかにし、流量係数を求めた。
- (2) 現状の前面ゲート操作で放流量を調節した場合、ゲート背後の流れはもぐり流出が支配的となり、前面ゲート背後で極度の圧力降下を生ずる。これ

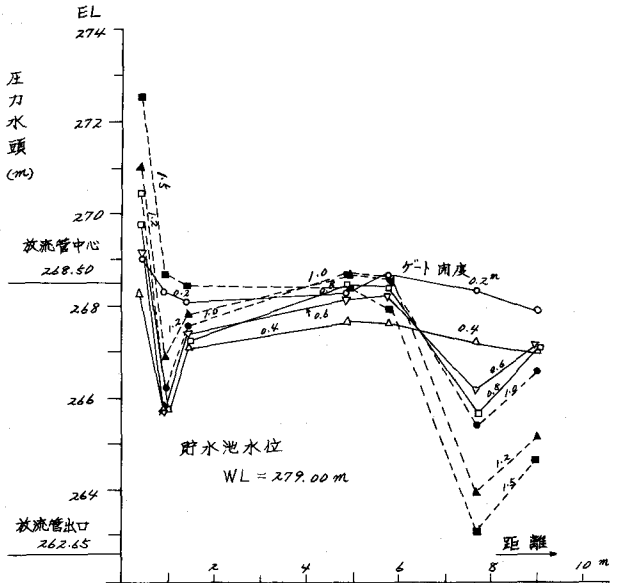


図-10 ゲート開度と管内圧力(ケース2)

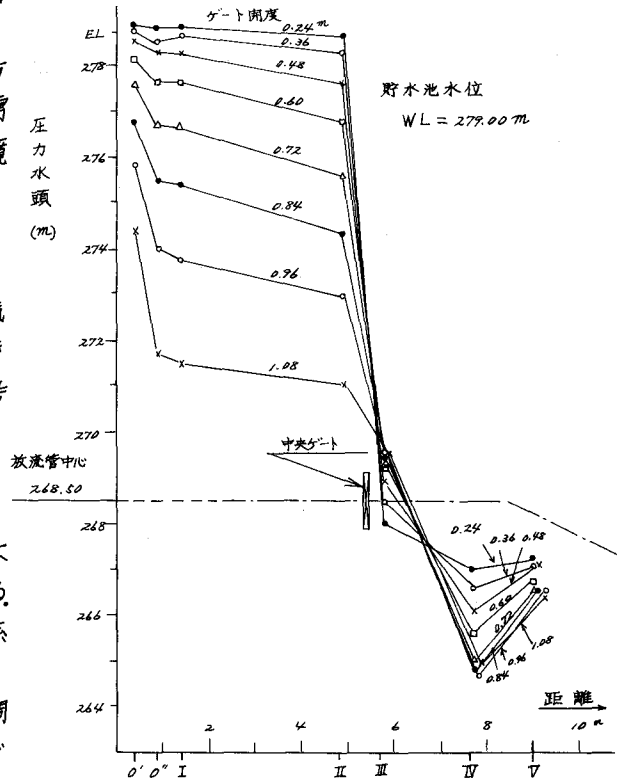


図-11 ゲート開度と管内圧力(ケース3)

により発生するキャビテーション、ゲートの振動などが予想される。

- (3) 中央バルブ室からの異常音の発生については、放流管の曲率が小さいこと、増大する流量に対しゲート下流の断面を拡大していきふいこびなどにより、ゲート開度が大きくなるに従って曲管部の流れが不安定になるためと考えられる。
- (4) 以上の問題点の対策として、①前面ゲート直後に給気管を新設する、②中央バルブを改造するの2案について検討を行った結果、後者がやや安定した流れとなるが、前者でも前面ゲート背後の圧力低下は十分に抑制することができる。

8. あとがき

雨竜第1ダムかんがい放流管の前面ゲート操作時に発生した問題点を水理模型実験によって得られた結果からある程度説明することができた。今回の実験から同一開度でもぐり流出、自由流出の2種類の流れが存在し、この現象は管路の安定性に重要な影響を与えていることがわかった。今後、更に実験を進め詳細な検討を行う予定である。

最後に、本実験の実施にあたり、助言を戴いた電力中央研究所石橋主任研究員、北大工学部田村、鈴木両助手（機械工学科）、長谷川助手（土木工学科）に厚く御礼申し上げます。

(参考文献)

1. 安芸：井川ダム放水管排砂管の水理模型実験；電研報告（土木57001），1957
2. 山岡：ダム α Outlet Worksの設計〔土木学会1965年度水工学に関する夏期研修会講義集〕，1965
3. Naudascher, E., Kobus, H. E., Rao, R. P. R. : Hydrodynamic Analysis for High-Head Leaf Gates, Proc. ASCE, Vol 90, No. HY-3, May, 1964
4. 水理公式集：昭和46年度改訂版；土木学会
5. 石原藤次郎他：応用水理学中冊；丸養