

ダム放流設備の給気問題に関する一考察

日立造船 正会員 与口正敏, 日立造船 非会員 小野 透
 " 非会員 高橋和夫, " 正会員 田窪宏朗

1. はじめに

ダムゲートからの高速放流水は大量の空気を連行するため、給気配管系の抵抗が大きくなると負圧の発生量が大きくなり、キャビテーションや振動の原因になる。通常、給気量は Campbell & Guyton の式¹⁾によって推定されるが、下流管が充水する場合は、実験式が導かれた条件と異なるため、推定精度が悪くなる。故に、運動量理論による検討を行った。また、給気系の動特性についても簡単な考察を加えた。

2. 下流管の充水限界

下流管が湾曲している場合、小開度を除き充水状態となるが、直線の場合は充水する場合としない場合がある。したがって、二次元模型²⁾と JFG 模型³⁾による実験を行うと共に、I ダム⁴⁾と A ダム²⁾実機放流実験結果を基に充水状態判定線図の試案を作成した。図 1 に示すように縦軸と横軸は気相と液相の容積流束 ($j_A = Q_A / A_D$ と $j_w = Q_w / A_D$) である。図から明らかなように j_w が 6m/s 以上になると充水状態になる。少ない実験結果から断言することはできないが、概ね妥当と考える。

3. 充水状態における給気量

3.1 直線下流管の給気

高速放流水脈による現象は複雑であるが、下流管の断面積と勾配が一定であると仮定すれば運動量理論を適用することができる。ここに、基礎式は、運動量の式、水と空気の質量保存の式、および給気系のエネルギーの式になる。

$$M_2 - M_1 = \int (P_A - P_0) dA - F_f - F_G \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$M_j = \int \rho_w (1 - \alpha_j) u_j^2 dA + \int \rho_A \alpha_j u_j^2 dA$$

$$F_G = \int \int \rho_w g (1 - \alpha) \sin \theta dA dx$$

$$Q_w = \int (1 - \alpha_1) u_1 dA = \int (1 - \alpha_2) u_2 dA \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_A = \int \alpha_1 u_1 dA = \int \alpha_2 u_2 dA \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\rho_A}{2} U_A^2 + P_A + \zeta_A \frac{\rho_A}{2} U_A^2 = P_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

記号の意味と座標系の関係をまとめ、図 2 に示す。また、添え字：1 と 2 は検査面を示す。

検査面 1 では空気と水の混合層厚さがゼロであるから u と α 分布が求まり、検査面 2 では気液の完全混合 (u と α が一様分布で、気相と液相の流速が等しい) を仮定することにより確定となる。連立方程式は単純ではないが、未知数の数がさほど多くないので、繰り返し収束計算で解くことができる。

I ダムの給気量の実験結果と計算結果の比較を図 3 に示す。

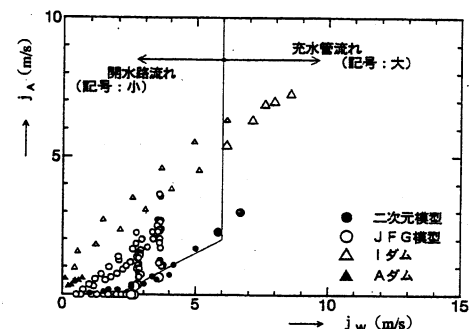


図 1 充水状態判定線図の試案

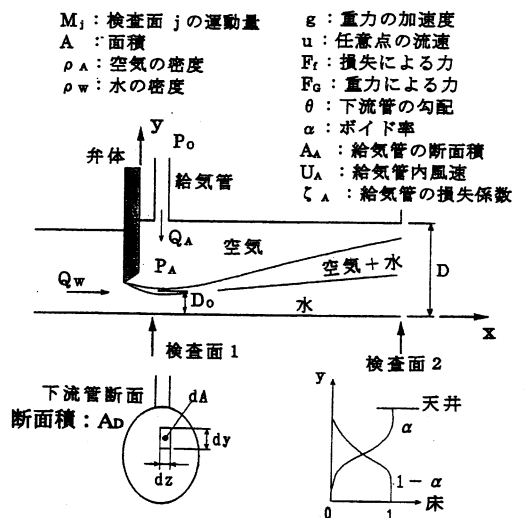


図 2 記号の意味と座標系

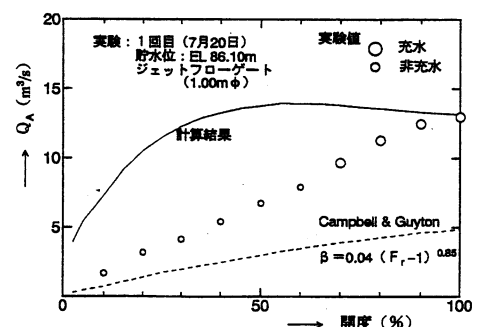


図 3 I ダムの給気量と開度の関係

キーワード：給気量、運動量理論、Campbell & Guyton の式、充水下流管、伝達関数

〒551-0022 大阪市 大正区船町 2 丁目 2 番 11 号 日立造船 (株) 技術研究所 Tel. 06-6551-9239, Fax. 06-6551-9841

図に示す大印は下流管が充水していることを示す。開度が大きくなると実験値と計算値が一致するようになり、完全混合に近付くことを示している。なお、Campbell & Guyton の値はかなり小さく、推定精度は悪い。

3.2 湾曲下流管の給気

下流管が湾曲する場合は、これを円弧に仮定することにより、角運動量理論が適用できる。すなわち、運動量と力の関係に代わり角運動量とモーメントの関係式になるため、基礎式は類似である。故に、省略する。なお、直線下流管の場合の損失は摩擦だけであるが、湾曲下流管の場合は水脈が下流管天井に衝突することによる損失が加わる。既往の実験では不明であるので、模型実験結果から求めた。

Uダムの実験状況を図4、実験結果と計算結果の比較を図5に示す。実験値と計算値は、大開度では一致するが、小開度になると差が認められる。目視では充水しているように見えても完全混合状態になっていないことを示唆している。

4. 給気系の動特性

下流管内圧力と給気風速の関係は非定常 Bernoulli の式から考察することができる。 q と P を平均値と変動成分の和とし、変動成分を複素数で表せば、下流管内圧と給気風速に関する伝達関数 H を求めることができる³⁾。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + q \frac{\partial q}{\partial S} = F - \frac{1}{\rho_A} \frac{\partial P}{\partial S} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$q = \bar{q} + q', \quad P = \bar{P} + P'$$

$$q' = a_q e^{i\omega t}, \quad P' = a_p e^{i\omega t}$$

$$H = \frac{a_q}{a_p} = \frac{-1}{\rho_A \{ i\omega L_A + (1 + \zeta_A) \bar{q} \}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$S_U = H H^* S_P \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 S_U と S_P は給気風速と下流管内圧のスペクトル、 ω は円振動数、 $i = \sqrt{-1}$ 、 t は時間である。

一例として、二次元模型で得られた結果と解析値の比較を図7に示す。高周波数領域では若干異なるが、1Hz 以下の低周波数領域では良く一致することが分かる。

5. おわりに

下流管が充水する場合について、運動量理論による計算を行い実験結果と比較・検討した結果、完全混合状態の給気量が推定できることが明らかになった。この場合、Campbell & Guyton の値は過小となる。また、給気系の動特性について、低周波数領域の伝達関数は解析から得られたものに等しくなることを示した。

謝辞：本研究にあたっては、水資源開発公団の関係各位には貴重なご指導とご支援をいただいている。本報告の紙面をかり、深甚なる謝意を表します。

参考文献 1) F.B.Campbell, B.Guyton : Air demand in gated outlet works, Proc. of Minnesota International Hydraulic Convention, IAHR (1953), 2) 貞弘丈佳, 高橋陽一, 巻幡敏秋, 与口正敏 : トンネル内放流における高圧ゲートの給気特性に関する研究, ダム工学, No.23, 1996.9, 3) 与口正敏, 小野 透 : 高速放流水脈の水利特性と下流管充水問題に関する一考察, 水門鉄管, No.201, 1999.12, 4) 与口正敏, 他 4 名 : 生見川ダム選択取水設備の放流実験, 日立造船技報, 第 45 巻第 2 号, S59.6

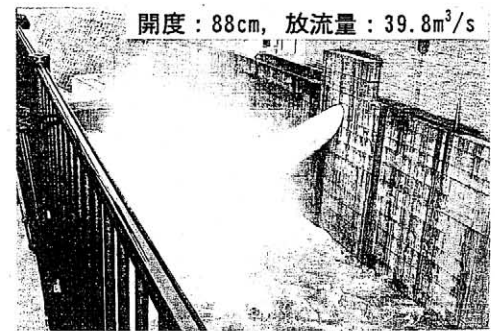


図4 Uダムの実機放流実験状況

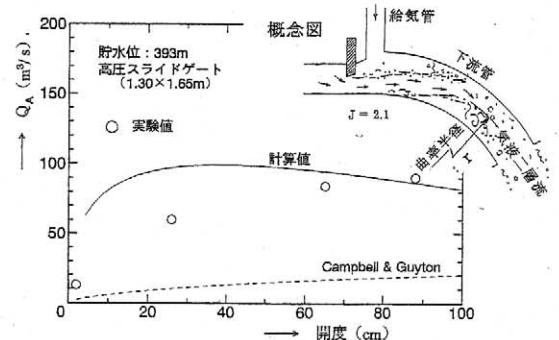


図5 Uダムの給気量と開度の関係

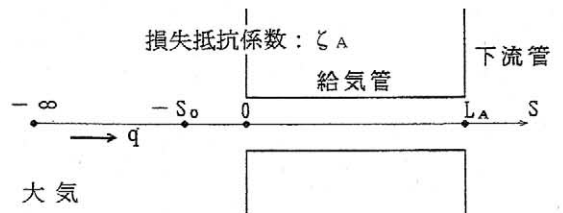


図6 記号の意味と座標系

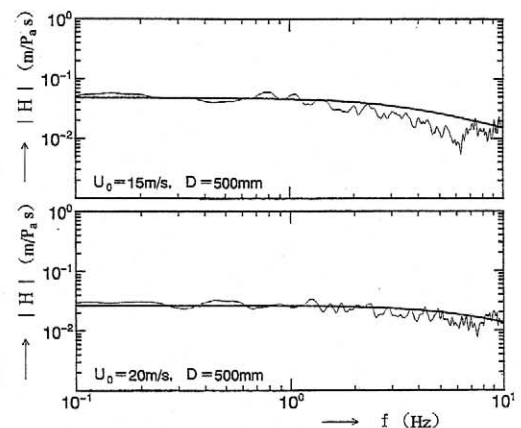


図7 給気系の伝達関数