

ジェットフローゲートの水理特性に関する実験的研究

建設技術研究所 林 栄 港
石川島播磨重工業(株) ○上 田 幸 彦
石川島播磨重工業(株) 西 村 敬 一

1. 結 言

最近わが国では、利水放流設備や洪水放流設備の流量調節装置としてジェットフローゲートが脚光をあびている。ジェットフローゲートは、米国開拓局が 1946 年に開発したキャビテーション・フリーゲートと呼ばれる流量調節ゲートで、その高い信頼性と安全性は実験的研究と数多くの実績によって実証されている。

しかしながら、これらはジェットフローゲートを放流管路の途中または末端に配置し高速空気混入流で流下させることが前提となっているので、わが国のようにフィルダムの建設にともない仮排水トンネルを転用したトンネル式放流水工の流量調節ゲートとして用いる場合には、放流設備の安全性と経済性を確保するために、新たにその設計手法を開発することが急務となった。

その一環として、筆者らはジェットフローゲート本体の基本的な水理特性ならびに仮排水トンネルの中に設けられるジェットフローゲートの周辺やその下流域での水理的挙動を把握するために高水圧試験装置による一連の水理実験を行った。ここにその概要を報告する。

2. ジェットフローゲート本体の基本的な水理特性

2.1 実験装置および方法

実験の装置は、東京芝浦電気(株)重電技術研究所の実験場に据付けられた。本研究所には高圧タンクに直結している Head 40 m、流量 400 L/s のポンプがあり、高圧タンクには内径 300 mm の給水管が連結されており、その途中に電動バルブと電磁流量計が取り付けられている。給水管の末端には一様な流れを得るために整流格子を組込んだ内径 300 mm の整流管が設けられ、その下流側にレジュース、上流管路、ジェットフローゲートおよび放流水路が配置された(図-1)。この中、上流管路は内径 155 mm の鋼管でその長さは整流効果を上げるために 3.0 m とした。

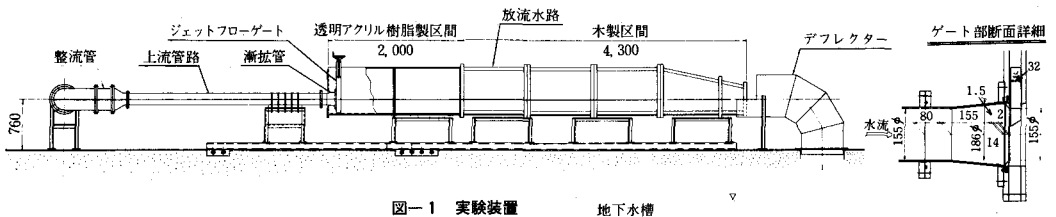


図-1 実験装置

ジェットフローゲートは鋼製の漸拡管、真鍮製のボデー、カバー、扉体および鋼製の手動開閉機からなっている。ボデーには小口径実物ゲートと同じようにシールリングを兼用した口径 155 mm のオリフィスを設け、更に O リングを組入れて完全水密とした。特にオリフィス先端は明確なスプリングポイントができるようにシャープエッジとした。漸拡管はその最大径をオリフィス口径の 1.2 倍としその拡がり勾配は 6/100 (約 3° 30' … I 型), 1/10 (約 5° 30' … II 型), 13/100 (約 7° 30' … III 型) の 3 種類を製作した(表-1)。

放流水路は幅 480 mm、高さ 700 mm、長さ 6.3 m で上流側 2.0 m は流況観測に便利のように透明なアクリル樹脂製とした。

表-1 実験に用いられた漸拡管

形 状	型 式	拡がり勾配	最大径 Dc	長さ Lc
	I	6/100	1.2D	(10/6) D
	II	1/10	1.2D	D
	III	13/100	1.2D	(10/13) D

実験は定常流状態で行い、いろいろなゲート開度に対し漸拡管始端より1口径上流側の有効水頭を約3 mから3.5 mの範囲で種々変化させ上流管路と漸拡管各部の圧力測定、噴出ジェットの観測特に噴出角度や拡散角の測定および流量係数の測定を行った。この場合各部の圧力は壁面に垂直に埋設したピエゾメータによりピックアップし、これに連結したU.S. Newtown Conn社製のHeise Gaugeにより計測した。またジェットの噴出角度と拡散角は磁石式傾斜計により測定し、流量は電磁流量計により計測された。

2.2 実験結果および考察

(1) 上流管路および漸拡管内の圧力

管路内が高速流にさらされると速度水頭の増大によりその平均圧力が低下するため、断面の変化があると流れのはく離によって局部的な圧力降下が加わり損失水頭が増すだけでなく管路壁面に沿うキャビテーションを発生することがある。従って漸拡管を設けたジェットフローゲートの場合には、この漸拡管始端から流線のはく離が発生しないようにその拡がり角を決めなければならない。図-2は拡がり勾配が6/100のI型漸拡管および上流管路の側面圧力と有効水頭 H_E の関係を表わしたものである。この H_E は漸拡管始端より1口径上流側の管軸中心標高における圧力水頭 H_s と速度水頭 H_v の和である。

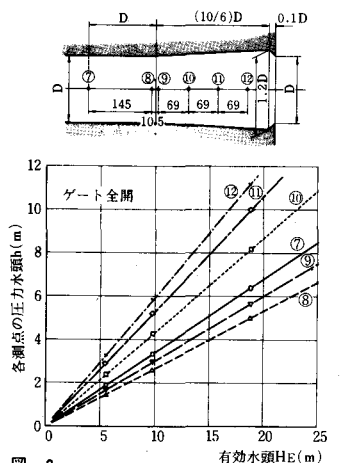


図-2 上流管路・I型漸拡管側面の圧力水頭 h

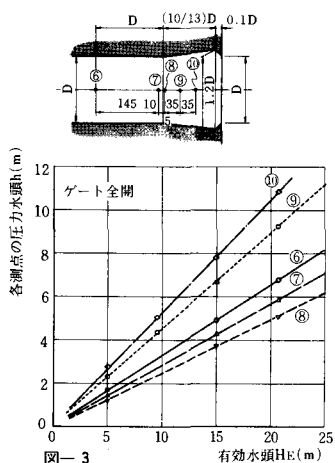


図-3 上流管路・III型漸拡管側面の圧力水頭 h

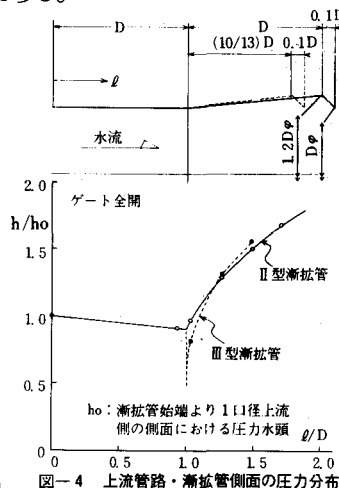


図-4 上流管路・漸拡管側面の圧力分布

図-2から各測点の圧力はすべて正圧で H_E に比例することがわかる。従って漸拡管内の圧力は H_E が増大しても、すなわち管内流速が増えても負圧になることはない。同様のことが拡がり勾配1/10のII型漸拡管についても云えることが確かめられている。拡がり勾配が13/100のIII型漸拡管の場合には、各測点の圧力は正圧で H_E に比例するけれども、漸拡管始端付近の圧力(測点⑧)が上流管路終端付近の圧力(測点⑦)よりも低下することがわかる(図-3)。このため、III型漸拡管始端での圧力は図-4の圧力分布に示すように更に低下すると考えられる。このようにI型、II型漸拡管では理想的な圧力分布を示すがIII型漸拡管ではその始端付近での圧力が急激に低下し流線のはく離を起しやすいと考えられるので、漸拡管の拡がり勾配は1/10以下にすることが望ましいであろう。

(2) 噴出ジェットの特性

ゲートから噴出するジェットの形状はHeadやゲート開度によって相連し、Headが上昇する程白濁した空気混入流となるけれども H_E が2.0 m付近を越えるとほとんど類似していることが観測されたので $H_E \geq 2.0$ mのときの噴出ジェットの特性を調べてみた。

(A) ジェットの噴出方向

ゲート開度が100%のときは、ジェットは水平に噴出し重力の影響を受けて次第に落下していくが、ゲートを閉じていくに従いスキムプレート面に沿った下向きの速度成分が増大するため、ジェットは下方に噴出

する。図-5はジェットの下向角度 ϕ とゲート開度の関係を表わしたものであるが、開度が20%以下になるとジェットの下向き角度が急激に増大することがわかる。図-5に示す×印は米国開拓局がシャスタダム の102 inch ジェットフローゲートを開発する過程で計測したジェットの下向き角度である。

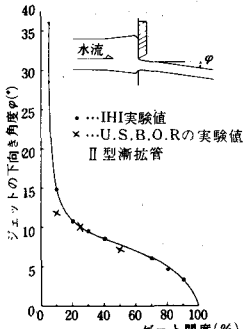


図-5 ジェットの下向き角度

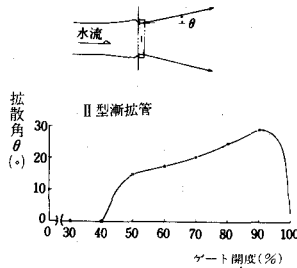


図-6 ゲートリップ両側部から噴出するジェットの水平面内拡散角

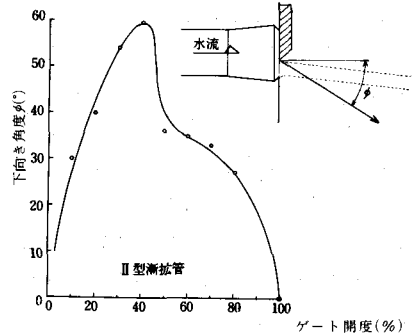


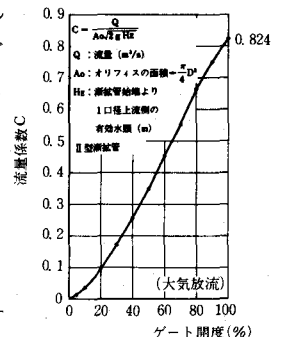
図-7 ゲートリップ両側部から噴出するジェットの下向き角

(B) ジェットの断面形状

ゲートが全開のときには、噴出ジェットはマクロ的にみれば円形断面となるが、ゲートを閉じていくと、水平なゲートリップの影響によって上面がフラットになり、そのリップがオリフィス先端と交わる点から薄いヒレ状のジェットが発生する。このヒレ状のジェットは左右に拡散し、メインジェットよりも更に下方に噴出する。図-6と7はそれぞれヒレ状のジェットの拡散角 θ と下向き角 ϕ がゲート開度によってどのように変化するかを表わしたものである。これらの図によると θ と ϕ はそれぞれ90%および40%開度付近で最大となる。またゲート開度が30%以下になるとヒレ状のジェットは非常に薄い噴霧状に変化することが観測された。以上のように噴出ジェットの特性は開度によってかなり相違するけれども、メインジェットはゲートオリフィスによって確実に戸溝を飛び越えるため、微小開度を含めいろいろな角度においてキャビテーションノイズや振動は全く感知されなかった。

(3) 流量係数

ゲートの流量係数は通常開口面積を基準として定められるが、ジェットフローゲートのように部分開度における開口面積を算定するのがやっかいな場合にはゲート全開時の開口面積すなわちオリフィス面積を基準として流量係数を定める方が設計上便利である。そこで、ここでは流量係数 C を $C = Q / A_o \sqrt{2gH_E}$ (Q : 流量, A_o : オリフィス面積, g : 重力加速度 $= 9.8 \text{ m/s}^2$, H_E : 有効水頭) によって定義し、図-8に C と開度の関係を表わした。この図に示された C は各開度毎に H_E を約3mから35mの範囲で種々変化させたときに得られた流量係数の平均値をプロットしたものであるが C は H_E にほとんど左右されない。図-8から、ゲート全開時の流量係数は0.824でトリニティダム⁸⁴⁾ジェットフローゲートの1/14.87 水理模型実験で得られた値(0.833)よりも幾分小さいようである。



3. 仮排水トンネルの中に設けられるジェットフローゲートの水理特性

3.1 実験装置

本実験に必要な装置は放流水路以外はすべて前記の装置を流用した(図-9)。従って新たに用意された模型は空气管、下流管路および仮排水トンネルを再現するための放流トンネルである。空气管は内径80mmのプラスチックで製作された。図-8 流量係数 C と開度の関係
下流管路は高さ $h = 1.2D$ 、幅 $b = 1.2D$ (D : オリフィス口径)の馬蹄型断面でその長さは $l = h, 2h, 3h, 4h$ および $5h$ の5種類とした。放流トンネルは高さ $2h$ 、幅 $2b$ の馬蹄型断面でその長さは6.0mとした。なお下流管路と放流トンネルは、内部の流況が観察できるように透明なプラスチックで作り、各々

の底面は一致させて、その勾配は $1/100$ とした。

3.2 実験方法

高水頭のもとで流量調節を行うゲートの設計上しばしば問題になるのが「空気管の寸法を如何に決定すべきか」ということである。

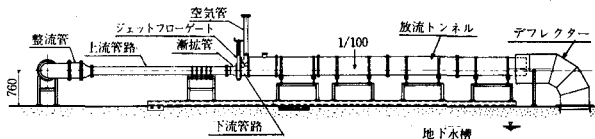


図-9 実験装置

これはゲート下流側へ供給すべき空気量がゲートおよび下流管路のキャビテーションや振動を防止する重要な役割を果たすからである。この空気量の特徴やゲート下流側の負圧は、フルードの相似則を満足させた通常の縮尺模型実験によって明らかにすることは困難である場合が多いと云われている。これは主として、(1)高水頭での空気混入効果や空気の膨張効果が低水頭における場合と異ってくると考えられること。(2)高水頭でのジェットの軌跡や乱れの強さ等が低水頭の場合と異なる。(3)縮尺した低水頭での実験では、発生する負圧が小さくしかも圧力変動があるため負圧の測定誤差が大きくなること等がある等の理由によるものである。従ってゲート下流域での水理的挙動をより正確に把握するには、出来るだけ実物に近い高水頭のもとで実験することが必要である。このようなことから本実験ではいろいろなゲート開度に対し有効水頭 H_E を 5 m から 3.6 m 付近まで種々変化させ、流況の観測、各部の圧力測定、空気量の測定および流量係数の測定を行った。この場合、各部圧力はスキャニバルブ社製の多点圧力変換器により計測した。空気量は入口オリフィス、流量は電磁流量計にてそれぞれ計測された。

3.3 実験結果および考察

(1) 放流トンネル内の流れと下流管路長

仮排水トンネルの中に単純に設置されたゲートまたはバルブにより流量調節を行うと、放流トンネル内にキャビテーションや洗堀が生じ重大な損傷を招くことがあるので、ゲートまたはバルブからの噴出流は空気混入流とし、かつトンネル底面と下部側面に沿ってスムーズに流下させることが必要である。このようなことから、本実験ではジェットフローゲートの下流側にいろいろな長さの管路を設けて流況の観察を行った。その結果次のことが明らかになった。(A) 噴出ジェットは有効水頭 H_E が上昇する程、また下流管路長が長い程白濁した空気混入流となり下流管路および放流トンネル内に激しい空気連行現象が生ずる。(B) ゲート開度が 100% であれば、噴出ジェットは $l = h$ (l : 下流管路長, h : 下流管路高さ) でも H_E に関係なく徐々に拡散しトンネル内をスムーズに流下する。(C) しかしながらゲート開度が $60 \sim 80\%$ になると $l = h$ ではトンネル始端からの拡散が激しく、 $H_E \geq 6\text{ m}$ になるとトンネルの途中から噴流のはいり現象が生じ、噴流はトンネル底面と側面だけでなく天井に沿って流下する(図-10)。(D) このような噴流のはいり現象は $l = 2h$ のときにも発生するが $l \geq 3h$ にすれば拡散流は下流管路によって整流されるので防止できる。(E) 次にゲートを更に閉じていき開度を $40 \sim 20\%$ にすると、ゲート下端から噴出したジェットは $l \leq 3h$ の場合、下流管路底面にあたって後トンネル天井に激しく衝突する(図-11)。この衝突現象は H_E が 6 m 付近の低水頭のもとでも明確に現われる。(F) $l = 4h$ にするとトンネル天井への衝突現象は $l \leq 3h$ の場合に比べて緩和されるけれどもこれを十分に防止できない。(G) $l = 5h$ にするとこの衝突現象は十分に防止できる(図-12)。すなわち、下流管

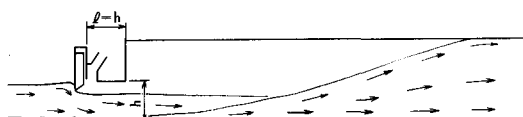


図-10

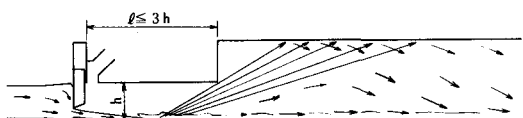


図-11

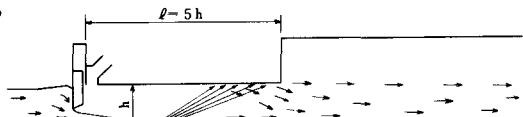


図-12

路底面にあったジェットは下流管路上面に衝突して整流され、しかもある程度減勢されてからトンネル底面と下部側面に沿ってスムーズに流下する理想的な流況となる。(Ⅱ) ゲート開度が10%以下の微小開度になると H_E が上昇しても噴出ジェットは下流管路底面との衝突でかなり減勢されてしまい、40~20%開度においてみられたようなトンネル天井へ衝突現象は現われずスムーズに流下する。(Ⅲ) 従ってゲートから噴出したジェットを全開度にわたってトンネル底面と下部側面に沿ってスムーズに流下させ、放流トンネルの安全性を確保するには、 $l=5h$ の下流管路を設けることが望ましい。

(2) ゲート下流側の圧力

ゲート下流側の圧力はゲート開度、有効水頭および下流管路長等によって異ってくる。ここでは $l=5h$ の下流管路を設けた場合について述べよう。

(A) 下流管路と戸溝内の圧力

下流管路および戸溝内の圧力は有効水頭 H_E が同じであれば H_E の値に関係なくゲート開度が100%のときに最も低下し、90%開度以下になると急速に上昇する。特に下流管路底面の圧力はゲート下端からのジェットが下方に噴出するため動水圧を受けて著しく上昇する。

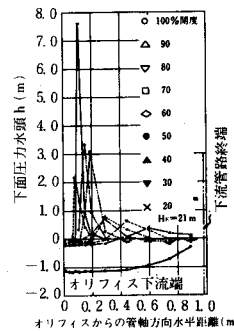


図-13 下流管路の下面圧力水頭分布

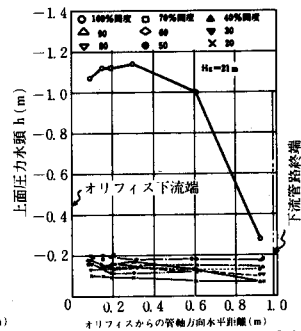


図-14 下流管路の上面圧力水頭分布

図-13は $H_E=21m$ における下流管路底面の圧力分布を示したもので、部分放流時における底面圧力はゲート開度が小さくなる程上昇し、そのピーク値はオリフィスに近づいていくことがわかる。図-14は $H_E=21m$ における下流管路上面の圧力分布を示すもので、ゲート全開時と部分放流時の圧力特性の相違が非常によく現われている。図-14では20~40%開度において管路上面は負圧となっているが、これはピエゾメータに拡散ジェットがたまたま衝突しなかった為である。戸溝内の圧力は下流管路上面の上流端付近の値とほとんど同じである。従って適切な空気を設ければ、戸溝や下流管路内にキャビテーションが発生することはない。

(B) 放流トンネル内の圧力

放流トンネル内の圧力はトンネル断面が大きいので、トンネル出口から十分に給気され大気圧に近い値となる。図-15は $H_E=21m$ におけるトンネル上面の圧力分布を示したものである。

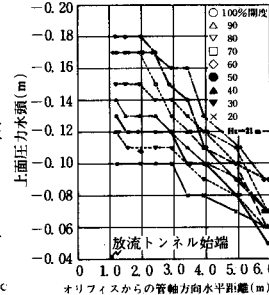


図-15 放流トンネルの上面圧力水頭分布

(3) 流量係数

流量係数は前と同じようにオリフィス面積を基準として定義し、 $l=5h$ の下流管路を設けた場合についてゲート開度との関係を表わすと図-16のようになる。この図は各開度毎に H_E を約5mから36mの範囲で種々変化させたときに得られた流量係数の平均値を示したものであるが、 C は H_E にほとんど左右されない。図-16からゲート全開時の流量係数は0.851で、管路末端に設置された場合の流量係数(図-8)よりも幾分大きくなるがこれは前述のようにゲート背面が幾分負圧となるためである。

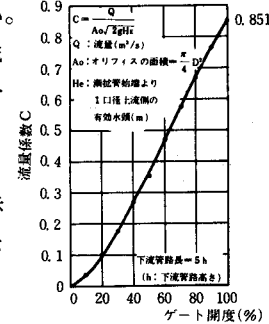


図-16 流量係数Cと開度の関係

(4) 需要空気量

ゲート背部に給気されるべき空気量は、下流管路内に跳水が起る場合次式で示すようなKalinske and Robertsonの実験式が実際の空気量とよく一致すると云われている。

$$Q_a = 0.0066 (Fr - 1)^{1.4} Q_w$$

ここに、 Q_a : 空気量, Fr : 噴出ジェットのフルード数, Q_w : 放流量

また、ゲート下流側が自由流出の場合にはU.S.Army Engineersが次式で計

算することを推奨している。

$$Q_a = 0.03 (Fr - 1)^{1.06} Q_w \quad (Q_w: 80\% \text{ 開度での放流量})$$

このように必要空気量はゲート下流側の流水条件によって非常に異ってくるけれども、過去における実測値によると Q_a は放流条件の他に下流管路の形状、長さおよび噴出ジェットの状態等によって大幅に異ってくるようである。そこで本実験では仮排水トンネルに設置されるジェットフローゲートの背部に空気管より給気されるべき空気量を知るために有効水頭 H_E 、流量 Q およびゲート開度が空気量とどのような関係にあるかを調べてみた。なお以下のデータは $l = 5 \text{ h}$ の場合についてまとめられたものである。

(A) H_E と Q_a および Q_w と Q_a の関係

ゲート開度をパラメータとして空気量 Q_a と有効水頭 H_E の関係を表わしたのが図-17である。この図からわかるように、 Q_a は H_E が上昇する程増大する。また $H_E = \text{一定}$ のもとでゲートが操作される場合には、 Q_a は常に 100% 開度において最大となり、その値は 90% 開度以下の空気量よりも非常に大きい。これはゲートが全開の場合、空気混入量が下流管路一杯に膨張し空気管からのみ給気されるのに対し、90% 以下の開度では下流管路が短いため空気混入流の上部にエアースペースが生じて、空気管と下流管路出口の両方からゲート背部に給気されるためである。

次に Q_a/Q_w (Q_w : 流量) と H_E の関係を表わしてみると図-18のようになる。この図から Q_a/Q_w は開度が 40% 以上であれば、 H_E に関係なくほぼ一定であると云える。従って、40% 以上の各開度においては高速流によって連行される空気量は噴出ジェットの流速にほぼ比例すると考えることができる。このような特性は、 Q_a を決定する上に非常に都合がよい。すなわち、 $H_E = \text{一定}$ のもとでゲートが操作される場合、ゲート背部に供給すべき必要な空気量 Q_a は次式で与えられる。

$$Q_a = 0.6 Q_w \quad (Q_w: \text{全開時の流量})$$

図-19はゲート開度をパラメータとして Q_w と Q_a の関係を表わしたものである。この図において着目すべきことは、常に一定流量を放流するような場合には、必ずしも全開時において Q_a が最大になるとは限らないということである。従って、全開状態からある開度まで一定流量を放流するような場合、空気管よりゲート背部へ供給すべき空気量を決定するには、次に示すようなゲート開度と Q_a/Q_w の関係を知ることが必要である。

(B) ゲート開度と Q_a/Q_w の関係

前述のように Q_a/Q_w は開度が 40% 以上であればほぼ一定であり、30% 以下であれば H_E とほぼ比例の関係にあるから、 Q_a/Q_w と開度の関係を表わしてみると図-20のようになる。この図から Q_a/Q_w は 90% 付近の開度で最小になり、60% 開度付近で $Q_a/Q_w \approx 0.6$ となることがわかる。従って、100% 開度からある開度 a まで一定流量を放流する場合、 $a \geq 60\%$ ならば供給すべき空気量 $Q_a = 0.6 Q_w$ となるが、 $a < 60\%$ ならば $Q_a > 0.6 Q_w$ となるので Q_a の決定には十分留意しなければならない。

3.4 空気管の配置について

前述のように放流トンネル内の圧力は、ほぼ大気圧となりトンネル内はその出

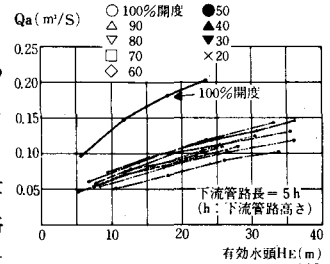


図-17 空気量 Q_a と有効水頭 H_E の関係

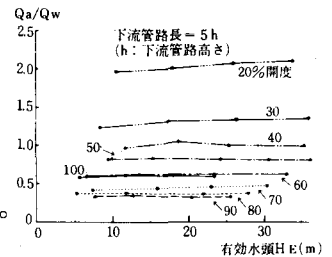


図-18 Q_a/Q_w と有効水頭 H_E の関係

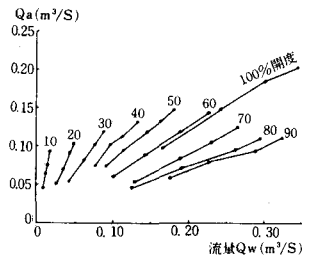


図-19 空気量 Q_a と流量 Q_w の関係

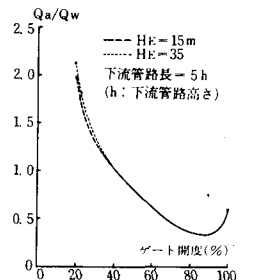


図-20 Q_a/Q_w とゲート開度の関係

口から十分に給気されていることが明らかとなった。
これは流水の近傍の空気は下流へ連行され、トンネル上部の空気は上流側へ引き込まれるという空気の循環現象がトンネル上部に発生しているためである。

このようなことから、ゲート背部へ給気するには図-21に示すように空気管入口をトンネル上部に開口する方式をとることができる。このことは、空気管入口をトンネル天井に開口して行った実験によって確認されている。

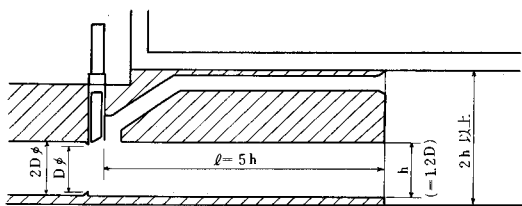


図-21 仮排水トンネルの中に設けられるジェットフローゲート

4. 結 論

以上の実験によって明らかになったことを要約すると、次のようになる。

- (1) 漸拡管を設ける場合には、その拡がり勾配は $1/10$ 以下にすることが望ましい。
- (2) ゲートから噴出するジェットは開度が小さくなるに従い下方へ向き、その下向き角度は 20° 開度以下になると急激に増大する。
- (3) 管路末端に設置されるゲート（すなわちゲート本体）の流量係数は、全開時で 0.824 である。
- (4) 仮排水トンネルの中に設置されるゲートの下流側には、 $l = 5h$ （ l ：管路長、 h ：管路高さ）の管路を設けることが望ましい。
- (5) この管路を設けることによって、ゲートから噴出したジェットは多量の空気を混入した空気混入流となり、如何なる開度においてもトンネル底面と下部側面に沿ってスムーズに流下する。またこの場合の流量係数は全開時で 0.851 である。
- (6) 空気管よりゲート背部へ供給すべき空気量 Q_a は、ゲートの操作方式によって大幅に異なるので十分留意しなければならない。
- (7) ゲート上流側の Head が一定のもとで操作される場合には、 $Q_a = 0.6 Q_w$ （ Q_w ：全開時の流量）で与えられる。

なお、ここでとりまとめたデータは、一種の小型ゲートに対する実物実験値に対応すると考えられるわけであるが、これを大型ゲートに適応させるには更に詳細な研究が必要である。その一環として、筆者らは現在さらに 90 m Head クラスの実験を行っている。

参 考 文 献

- 1) "The Hydranlic Design of a Control Gate for the 102-inch Outlets in Shasta Dam" by F.C.Lowe, Report No. Hyd. 201, USBR.
- 2) "Hydraulic Model Studies of the Trinity Dam Auxiliary Outlet Works Jet Flow Gate Central Valley Project, California" by W.P.Simmons, Jr, Report No. Hyd. 472, USBR.
- 3) "放流施設に関する研究—ジェットフローゲート試験報告—"；松山宣信，藤本成，中沢顕司，河川総合開発事業調査費報，年報98号，昭48。
- 4) "Calibration of a 10-inch Flow Gate" by D. Colgate, Report No. Hyd.569, USBR.
- 5) "Handbook of Applied Hydraulics—Third Edition" by C.V.Davis & K.E.Sorensen, 1969.