

◆ 報 文 ◆

整流管付きジェットフローゲートの給気量

柏井条介* 大澤信哉**

1. はじめに

本報告の対象とするジェットフローゲート（以下JFGと称する）は、円形放流管下流端に設けられた止水用のコニカルノズルと流量調節用のスライドゲートにより構成されるゲートをいう（図-1参照）。コニカルノズルは、放流管側の水圧により下流に移動してスライドゲートに押し付けられる構造となっており、高水頭時の止水性に優れることなどから、ダムの流量調節用ゲートとして、わが国で多く用いられてきている。

ジェットフローゲートのゲート半開時の放流水脈は、下方向きかつ両側に広がる傾向がある。このため、ゲート下流に十分大きな空間が無い場合には、放流水脈は何れかの開度で周辺構造物や護岸に衝突飛散する結果となる。こうした周辺構造物等への水脈の衝突・飛散を避けるため、ゲート下流に整流管を設け、放流方向を規制する場合が多い。

ダム・堰施設技術基準マニュアル（案）（以下、マニュアル（案））の解説によれば、整流管は管口径をゲート口径の1.2倍以上、管長は5～10倍とされている。実際の整流管は流向を変えるために管を曲げる場合もあり、様々な形状が用いられているが、何れにしても、整流管と放流水脈の間隙は比較的小さい。このため、放流水脈の振動やキャビテーションの原因となる有害な圧力降下を生じないよう給気管が設けられる。

マニュアル（案）の解説では、必要給気量は、ゲート形式によらず放流量の0.8倍とされているが、本来は水量やゲート形式を始めとする様々な因子により変化するものであり、極めて経験的な設定となっている。

経験的な設定である理由として、高速水流が空気を取り込むという空気連行現象の複雑さを挙げることができる。通常の水利施設であれば、模型実験による系

統だった検討を実施し、適切な水利設計手法を提示することができるが、空気連行現象では、現象の相似性が明確でない問題がある。このため、旧土木研究所で実施した比較的大規模な模型での実験結果¹⁾や現地観測の限られたデータをもとに0.8の値が設定されている。

こうした状況に鑑み、今回、JFG整流管内への給気量を対象に、幾何学的に相似で大きさの異なる2種類の模型を用いた実験を行い、支配パラメーター等を検討したのでここに報告する。

2. 実験概要

図-1に実験を行った模型の概要を示す。実験は、ゲート口径 $D = 0.14$ 及び 0.28m の幾何学的に相似で大きさの異なる2種の模型を用いて行った。整流管径 D_b 、整流管長 L_b はマニュアル（案）の推奨値を参考に設定しており $D_b/D = 1.21$ 、 $L_b/D = 6.17$ である。また、給気管径 D_a は、十分な給気が可能なものとして既往実績を踏まえ $D_a/D = 0.71$ とした。給気管長 $L_a/D = 4.64$ である。

実験では、ゲート開度及び放流量を変化させて給気量を計測するとともにゲート直下流における整流管上面（点P）の圧力を測定した。給気量は給気管内に設けたベンチュリー管を用いて計測しており、ベンチュリー管及び点Pの圧力測定には差圧計を用いた。

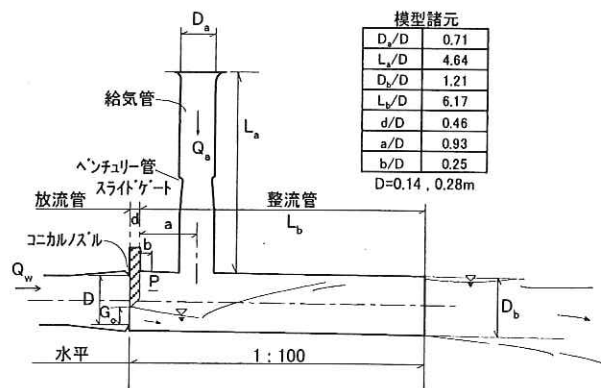


図-1 模型概要

表-1 実験ケース一覧表

ケース	口径 D (m)	ゲート開度 G_0/D	放流量 Q_w (m ³ /s)	給気量 Q_a (m ³ /s)	P点圧力 $P_P/\rho_a g$ (m)	放流水脈			Q_a/Q_w
						フルード数 Fr_w	レイノルズ数 Re_w	ウェーバー数 We_w	
1-1	0.28	1	0.465	0.258	-45.5	4.56	20.9×10^5	468	0.55
-2			0.658	0.405	-136.2	6.45	29.6×10^5	663	0.62
-3			0.805	0.520	-244.6	7.89	36.2×10^5	811	0.65
-4			0.930	0.611	-434.7	9.12	41.9×10^5	937	0.66
-5		0.75	0.346	0.183	-16.7	4.87	14.5×10^5	375	0.53
-6			0.489	0.302	-25.6	6.88	20.5×10^5	530	0.62
-7			0.599	0.384	-30.8	8.43	25.1×10^5	649	0.64
-8			0.692	0.479	-38.0	9.74	29.0×10^5	750	0.69
-9		0.5	0.203	0.129	-12.7	5.94	9.6×10^5	305	0.63
-10			0.287	0.231	-16.3	7.96	12.9×10^5	409	0.81
-11			0.351	0.318	-19.5	9.73	15.8×10^5	500	0.91
-12			0.406	0.402	-23.2	11.80	19.2×10^5	606	0.99
-13		0.25	0.074	0.087	-5.9	7.42	4.3×10^5	191	1.18
-14			0.105	0.139	-9.7	10.53	6.0×10^5	270	1.32
-15			0.129	0.190	-10.7	12.94	7.4×10^5	332	1.47
-16			0.149	0.230	-12.6	14.94	8.6×10^5	384	1.55
2-1	0.14	1	0.082	0.0376	-2.60	4.55	7.4×10^5	234	0.46
-2			0.116	0.053	-14.74	6.43	10.4×10^5	330	0.46
-3			0.142	0.0819	-35.14	0.88	12.8×10^5	405	0.58
-4			0.164	0.0986	-53.35	9.10	14.8×10^5	467	0.60
-5		0.75	0.061	0.0205	-0.54	4.87	5.1×10^5	187	0.34
-6			0.086	0.0372	-1.77	6.85	7.2×10^5	264	0.43
-7			0.106	0.0499	-2.95	8.44	8.9×10^5	325	0.47
-8			0.122	0.0605	-4.59	9.71	10.2×10^5	374	0.50
-9		0.5	0.036	0.0180	-0.32	5.65	3.2×10^5	145	0.50
-10			0.051	0.0324	-0.91	8.00	4.6×10^5	205	0.64
-11			0.062	0.0462	-2.31	9.73	5.6×10^5	250	0.75
-12			0.072	0.0579	-3.17	11.29	6.5×10^5	290	0.80
-13		0.25	0.013	0.0110	-0.08	7.38	1.5×10^5	95	0.85
-14			0.019	0.0230	-0.42	10.78	2.2×10^5	138	1.21
-15			0.023	0.0329	-0.78	13.05	2.7×10^5	168	1.43
-16			0.026	0.0390	-1.29	14.75	3.0×10^5	189	1.50

実験ケースを表-1に示す。放流量は放流管出口での $H/D = 15 \sim 60$ (H : 総水頭) の範囲で設定しており、表中の各種無次元パラメーターについては、以降に述べる。

3. 次元解析による無次元パラメーターの設定

空気連行現象についての運動方程式等に基づく解析の試みは幾つかあるが²⁾、現象の複雑さから十分なモデリングがなされていないのが現状である。ここでは、実験結果の整理に当たり、まず次元解析により検討を行う無次元パラメーターを設

定することとする。

給気量に関わる現象を f で表すと、 f は次式で表される。

$$f = f(\text{給気管形状, 整流管形状, } D, Ga, Q_w, Q_a, \rho_w, \rho_a, \nu_w, \nu_a, g, T) = 0 \quad (1)$$

ここに、 Ga : ゲート開き、 Q_w : 放流量、 Q_a : 給気量、 ρ_w, ρ_a : それぞれ水及び空気の密度、 ν_w, ν_a : それぞれ水及び空気の動粘性係数、 g : 重力加速度、 T : 表面張力である。このほか、壁面粗度等も関連パラメーターとして考えられるが、こ

ここでは、主たる因子を考慮することとして省略した。

式 (1) において、本実験では給気管形状、整流管形状は一定であり省略する。更に、給気量が放流水の状態のみで決まっているものと仮定し (給気管形状を省略したことにもなる)、空気 の物性値に関するパラメーターを省略すると、残るパラメーターは8個である。 π 定理より無次元パラメーターは5つ抽出され、次式を得ることができる。

$$Q_a/Q_w = h(G, Fr_w, Re_w, We_r) \quad (2)$$

ここに、 G : ゲート開度 $= G_a/D$ 、 Fr_w : フルード数 $= v_w/\sqrt{gG_a}$ 、 Re_w : レイノルズ数 $= v_w G_a/\nu_w$ 、 We_w : ウェーバー数 $= \sqrt{v_w^2 G_a/(T/\rho_w)}$ である。 v_w は、流量 Q_w とゲート開き G_a の関数として表されるゲート位置での平均流速であり、ここでは、流量に換わるパラメーターとして用いて整理した。

ここで、以下の検討に先立ち、上記で用いた給気量が放流水の状態のみで決まるという仮定の意味について確認しておく。

給気は放流水が空気を取り込みつつ流下することにより生じる訳であるが、空気を取り込まれることにより給気管及び整流管内には複雑な空気の流れが生じる。給気量が放流水の状態で決まるという意味は、水流により連行される空気量がこうした空気の流れの影響を受けないということを仮定したことになる。こうした仮定が成立しない場合として、整流管内の空気圧が大きく低下し、放流水脈形状が変化してしまう場合が考えられる。空気流が非常に速い場合や、空気流において非常に大きなエネルギー損失が生じる場合にこうした空気圧の低下が想定され、上記仮定がある程度成り立つためには、今回の実験条件がこうした大きな圧力降下を生じない範囲にある必要がある。

このことの完全な証明は今回実施していないが、ゲート直下流の点Pにおける圧力降下量は、ゲート位置の全水頭に対し3% (−0.52m水柱) 以下と小さく放流水脈の性状を変えるものではないと考えてよいであろう。また、 $D=0.14m$ の模型では、給気管の下流端 (整流管との接続位置) 付近に口径の異なるオリフィスを設けた実験を別途実施しているが、オリフィス口径を0.105mと小さくしても給気量はほとんど変わらないこと、0.07m以下とするとかなり小さくなることが確認されている。このことから、今回の給気管径は十分大

きく、放流水脈が連行する空気が十分給気されていると考えて良いものと思われる。

4. 実験結果

4.1 ゲート開度 G と給気量 Q_a の関係

図-2に、ゲート開度と給気量の関係を示す。図は、ゲート位置での H/D が同じケースについてゲート全開時の給気量を1として作成したもので、比較のため実施での現地観測結果についても併せて示してある^{3),4)}。現地観測における給気管等諸元を表-2に示す。

図より、実験結果は、ゲート開度に概ね比例して給気量が変化している。実測値についても岩屋ダムを除き実験値と同様の傾向を示しており、給気量は主としてゲート開度が大きい場合を対象に検討すれば良いことが分かる。

岩屋ダムのケースは、かなり様相を異にしており、ゲート開度が0.3以下の小さい場合を除き、半

表-2 実測ゲート等の諸元

ダム	ゲート口径 $D(m)$	空気管径 $D_a(m)$	空気管長 $L_a(m)$	整流管径 $D_b(m)$	貯水位とゲート中心の標高差 (m)
岩屋	1.86	1.00	47.0	2.30	73.0
美田	0.50	0.205	8.5	0.63	20.2
生見川	1.00	0.45	35.1	1.5	36.6

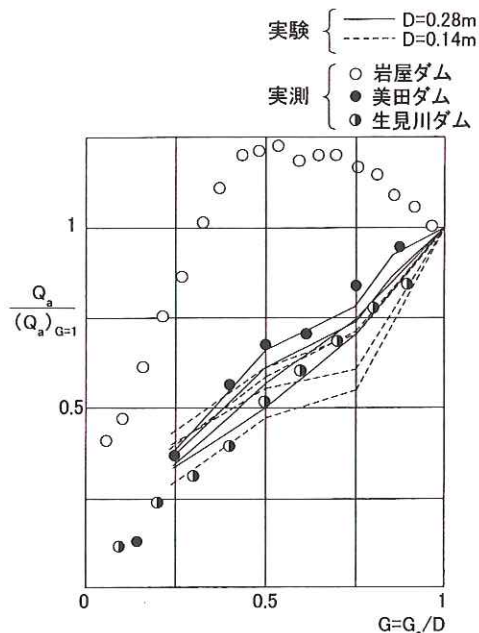


図-2 ゲート開度 G による給気量の変化

開時の給気量が全開時より大きく、 $G=0.5$ 付近で最大値を生じている。この理由は明らかではないが、給気管からの給気が十分でなく、ゲート開度が大きくなるに従って給気不足の影響が大きくなったものと思われる。十分な給気がなされた場合には、より大きな給気量になったことが推察される。

4.2 無次元パラメーターの関係

ここでは、式(2)に基づき Q_a/Q_w と各種無次元パラメーターの関係を調査する。

図-3, 4, 5にそれぞれ Q_a/Q_w 、 G と F_{rw} 、 Re_w 、 We_w の関係を示す。図の黒丸が $D=0.14\text{m}$ の模型、白丸が $D=0.28\text{m}$ の模型での値を示している。

従来、放流管の Q_a/Q_w を表す式として、フルード数をパラメーターとするものが多く提案されてきているが⁵⁾、図-3より同じ F_{rw} でも模型規模が小さいと Q_a/Q_w 値も小さくなっており、 F_{rw} のみの表現では不十分であることが分かる。また、 Re_w との関係を見ると、全般に模型規模が小さい程同じ Re_w での Q_a/Q_w が大きい傾向がある。

今回のパラメーターの中で模型規模による差が最も小さいのは We_w であり、特に $G=1.0, 0.75$ での Q_a/Q_w と We_w の関係は、模型規模によらずほぼ同じ曲線上にある。一方、 G が小さい場合には、模型規模の影響が見られており、模型規模が小さい程同じ We_w での Q_a/Q_w が大きくなっている。こ

の理由は明らかではないが、 G が小さいと放流水脈の拡幅や下方向きの傾向が顕著になるなどの影響が考えられる。即ち下方向き、或いは拡幅した放流水脈は整流管に衝突し飛散する傾向があり、空気と水の界面での特性を表す We_w とともに、流れの飛散状況を表す F_{rw} など他のパラメーターの影響が顕著になることが考えられる。

ここで、 We_w による相似を考えると、模型での使用流体を変化させない限り、縮尺実験での再現

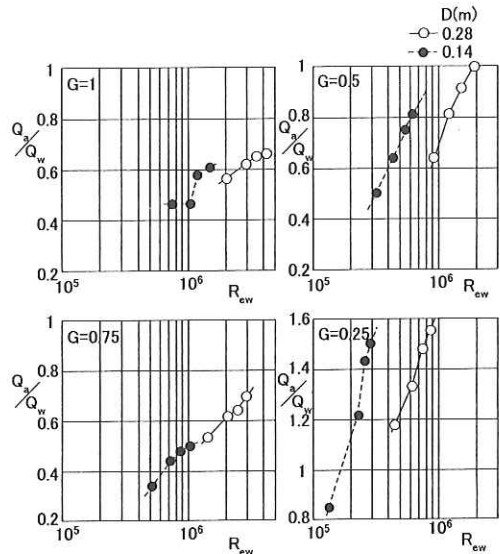


図-4 Q_a/Q_w とレイノルズ数 Re_w の関係

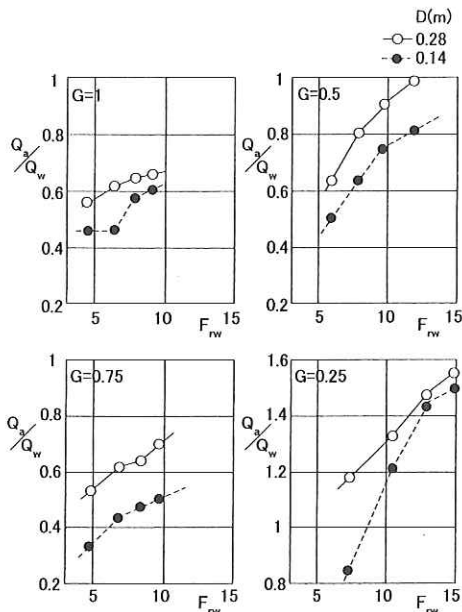


図-3 Q_a/Q_w とフルード数 F_{rw} の関係

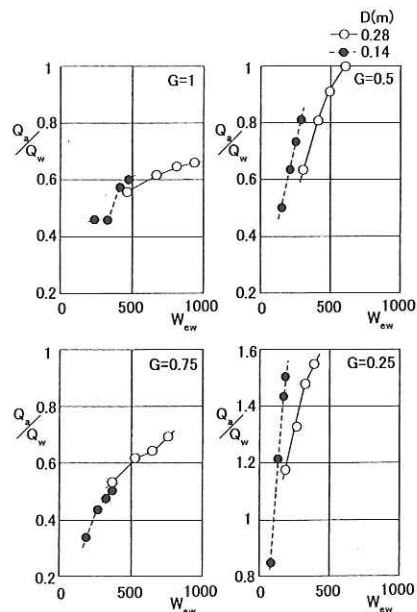


図-5 Q_a/Q_w とウェーバー数 We_w の関係

ができないことになる。このことはなほだ不自由である。ここでは、試みとして実験結果を外挿して推定する場合を検討してみる。

図-5より、いずれの G においても W_{ew} が大きくなるに従って Q_a/Q_w の増加率が減少することが分かる。そこで、 Q_a/Q_w と W_{ew} の関係について次の式形による近似を行う。

$$Q_a/Q_w = a W_{ew}^b \quad (3)$$

ここに、 a 、 b ：定数であり、最小2乗法で求められた値を表-3に示す。なお、模型規模の影響が見られた $G=0.5$ 、 0.25 の係数は $D=0.28\text{m}$ のデータのみから求めている。上式により実験結果はよく近似されており、これを用いてより大きい W_{ew} での値を外挿し実測値との比較を行ったのが図-6である。

図より、式(3)による外挿値は実測値より大きい値を与える傾向があるが、先に述べたよう

表-3 a 、 b 値

G	a	b
1	0.10	0.28
0.75	0.026	0.50
0.5	0.016	0.65
0.25	0.145	0.40

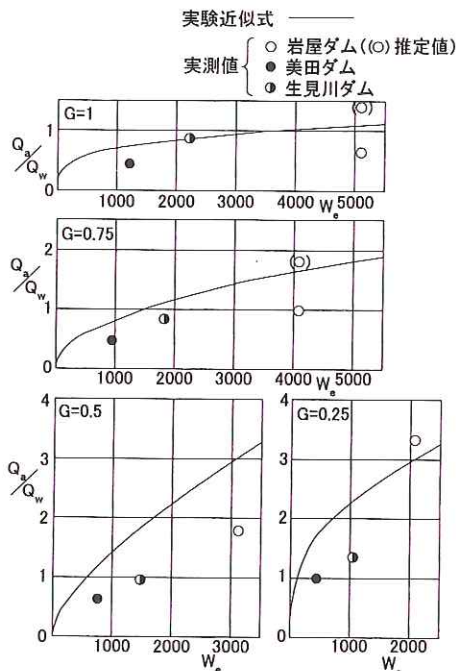


図-6 実験近似式と実験値の関係

に、 W_{ew} の大きい岩屋ダムの実測値は、ゲート開度が大きい場合には、給気システムの影響により給気量が減少している可能性がある。このことを考慮すると、特に給気量が問題となるゲート開度の大きい部分での外挿値は、放流水脈の性状を変えない十分な給気を行った場合の給気量を、ある程度表しているといつてよいであろう。参考までに図-2の $G \leq 0.5$ のデータを直線近似して求めた $G=0.75$ 、1の Q_a/Q_w 値を(○)に示す。外挿値により近い値となっており、特に $G=0.75$ の値はほぼ一致する。なお、先に述べたように、 $G=0.5$ 、 0.25 の場合は W_{ew} 以外のパラメータの影響が考えられ、全般に実測値は外挿値よりかなり小さい。

4.3 ゲート直下流の圧力

4.2では給気量が放流水脈により決まるものとして議論を進めた。一方、ゲート直下流の点Pでの圧力降下は空気流の結果として生じ、4.2の無次元パラメータとは別のパラメータにより支配されると考えられる。ここでは、放流管等の管内圧力分布でよく用いられている次の圧力降下係数 C_d により点Pの圧力を検討する。

$$C_d = \frac{H - (Z + p_p/\rho_a g)}{v_a^2/2g} \quad (4)$$

ここに、 H ：給気管入り口の総空気柱=0、 Z ：給気管と当該点の標高差 $=-L_a$ 、 v_a ：代表流速であり、代表流速としてここでは給気管の平均流速を用いる。ベルヌーイ式から類推すると、式(4)の分子は、給気管入り口から当該点に至る間に生じるエネルギー損失及び当該点でのエネルギーの流速への変換量を表している。放流管に関する既往の実験結果によればこのうち流速への変換量は $v_a^2/2g$ に比例するものと考えられる。エネルギー損失についても同様に $\alpha v_a^2/2g$ の式形で表されるものと考えられるが、壁面摩擦損失の傾向から推察されるように、 α はレイノルズ数 $Re_a = v_a D_a / \nu_a$ の関数となることが予想される。そこで、ここでは、 C_d と Re_a の関係を調査することとした。

図-7に結果を示す。図より、模型規模によらず同様の傾向を示しており、上記の整理方法の有用性が確認される。

ゲート開度が0.75以下では、ゲート開度が大きいほど C_d も大きくなる傾向があるがその差は小

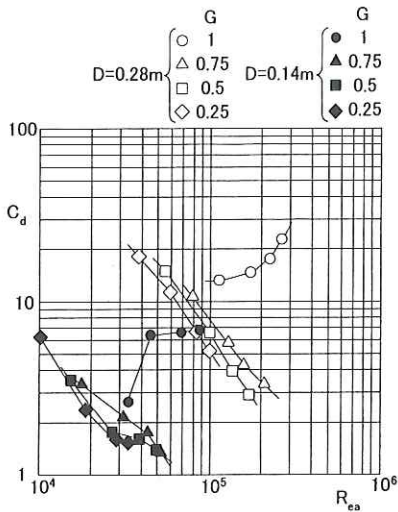


図-7 C_d とレイノルズ数 Re_a の関係

さく、全体として Re_a が大きくなるに従って C_d が小さくなる傾向を示している。この傾向は、摩擦損失係数の傾向と同様であり、主としてエネルギー損失の変化により生じているものと思われる。一方、ゲート全開時の傾向は逆に Re_a が大きくなるに従って C_d も大きくなっている。この理由として、ゲート全開時には整流管と放流水脈の間隙空間が小さいことが考えられる。即ち、空気連行により増大した流積により、空隙が更に狭まり、点P付近の空気流の流速が大きくなったものと推察される。今回の整流管径は、ゲート直下流の圧力降下を完全に防止するという意味ではやや小さい規模というべきかもしれない。

C_d は模型規模の影響を受けており、模型規模が小さい場合の圧力降下量が小さくなっている。この理由は明確ではない。模型材質は、 $D=0.28\text{m}$ の模型がペイント塗装の鋼製、 $D=0.14\text{m}$ の模型がアクリル製であり、壁面粗度が異なっていることなどが考えられる。

5. おわりに

JFGの給気量について、幾何学的に相似で模型規模が異なる2種の模型を用いた実験を行った。放流水脈の空気連行量に見合う十分な給気が行われていることを念頭に、主な結果をまとめると次の通りである。

- (1) 給気量はゲート開度に概ね比例して変化する。
- (2) Q_a/Q_w は、従来行われているフルード数のみをパラメータとする方法では適切に表すこと

ができず、他の無次元量 (We_w , Re_w) による模型規模の影響を受ける。

- (3) Q_a/Q_w に対し模型規模の影響の最も小さかったパラメータはウェーバー数であり、式 (3) の近似式で外挿することで、ゲート開度が小さい場合を除き、実施設の給気量を概略推定することができる。

- (4) ゲート直下流の圧力特性は圧力降下係数とレイノルズ数の関係で整理され、ゲート半開時には給気管でのレイノルズ数が大きくなるほど小さくなり、エネルギー損失の影響がみられる。ゲート全開時にはレイノルズ数の増加により圧力降下も増大しており、 $1.2D$ 程度の整流管径では、整流管規模の影響があるものと推察される。

今回は、給気管、整流管を固定した実験であり、給気管の設計方法を確立していくためには、今後更に実験、実測のデータを蓄積していく必要がある。その際、必要給気量の概念についても明らかにしていく必要があると思われる。今回の実験は給気が十分行われていることを念頭に実施したが、ゲート直下流でのある程度の圧力降下を許容すればこうした給気に必ずしもこだわる必要はないであろう。

参考文献

- 1) 中澤顕治、五十川政志：ジェットフローゲートの水理特性に関する試験報告，土木技術資料，Vol.19, No.3, 1977.
- 2) たとえば、高須修二、中澤顕治、村岡敬子、井熊均：ダム放流管における空気連行流の特性，土木技術資料，Vol.28, No.10, 1986.
- 3) 戸田五郎、三浦真治、吉田治：岩屋ダム放流管用ジェットフローゲートの放流実験，水門鉄管，No.109, 1978.
- 4) 与口正敏、巻幡敏秋、西原徹、松田定夫、井口理一郎：生見川ダム選択取水設備の放流実験，日立造船技報，Vol.45, No.2, 1984.
- 5) 高須修二：ダムと貯水池における気液二相流，ダム技術，No.75, 1992.

柏井条介*



独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム水
理チーム首席研究員
Josuke KASHIWAI

大澤信哉**



(前) 独立行政法人土木研
究所水工研究グループダム
水理チーム交流研究員
Shinya OHSAWA