

Ⅲ－１６ トンネル内放流設備の水理設計手法に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 16～平 17

担当チーム：河川・ダム水理チーム

研究担当者：柏井 条介、宮脇 千晴

【要旨】

既設ダムのより効率的な利用を促進するため、放流設備の増設が今後多く必要になることが予想される。既設ダム堤体内に設置スペースがない場合、この増設放流設備はトンネル式放流設備として地山内に設置されることになり、その合理的な設計方法の確立が求められている。本調査は、トンネル内放流設備の水理特性及び空気連行特性を解明し、トンネル断面及び空気管システムの設計方法を提案することを目的に実施するものである。調査項目は、放流管が1条でトンネル断面が一樣な場合の、給気管が無い場合の流況及びトンネル上流端圧力、これらに対する模型縮尺の影響、給気管がある場合のトンネル上流端圧力改善効果、放流管が2条でトンネル断面が下流に向かって縮小する場合の影響の各項目であり、水理実験を通じて検討するとともに、トンネル断面及び給気システムの設定方法を検討した。17年度は最終年度であり、これら内容をとりまとめた。

キーワード：トンネル放流設備、空気連行現象、水理模型実験、フルード数、ウェーバー数

1. はじめに

既設ダムのより効率的な利用を促進するため、放流設備の増設が今後多く必要になることが予想されるが、ダム幅が小さいなどの理由により既設ダム堤体内に設置スペースがない場合、この増設放流設備はトンネル式放流設備として地山内に設置されることになる。

ここで、トンネル放流設備は閉空間であるトンネル内に大量に空気を連行する高速流を放流するものである。このため、流れに適切な給気が行われない場合には、大きな圧力降下が生じ、キャビテーションの発生等の問題を生じる。また、満管流が生じるような場合には流れの脈動の原因ともなる。従って、トンネル放流設備の設計では、流れへの給気が重要な検討項目となるが、空気連行現象に対する十分な知見が得られていないことなどから、その設計方法は十分には確立していない現状にある。

上記に鑑み、本調査では、トンネル内放流設備の水理特性及び空気連行特性を解明し、トンネル断面及び空気管システムの設計方法を提案することを目的としている。

調査は主として水理模型実験を通じて行っており、円形一様断面トンネル内に円形放流口から放流する場合を対象に、まず、給気管が無い場合の流況とトンネル断面、長さ及び水理諸量の関係を把握すると

ともに、放流口直下流のトンネル上面圧力の降下状況を把握した。また、給気管を設置した場合の圧力改善効果を把握した。

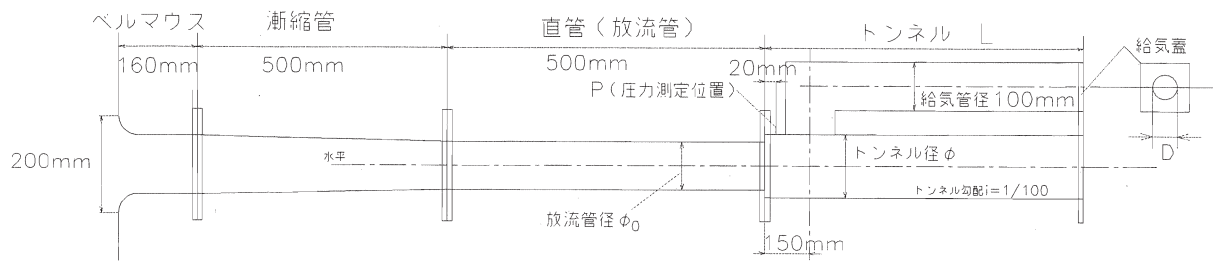
以上の水理実験は諸量の変化が容易なよう、比較的小さい模型で実施しているが、現象が空気連行を伴う現象であることから、模型縮尺が流況変化や圧力降下に及ぼす影響について、形状が相似で大きさの異なる模型を用いて検討し、以上の結果をもとに、トンネル断面及び給気システムの設定方法を従来の設計方法を踏まえつつ整理した。

上記の検討は、放流管1条からの放流を対象としており、放流管が2条設置され、トンネル断面を下流で縮小する場合について、無給気時の流況及び圧力降下状況を把握した。また、給気の効果を把握した。

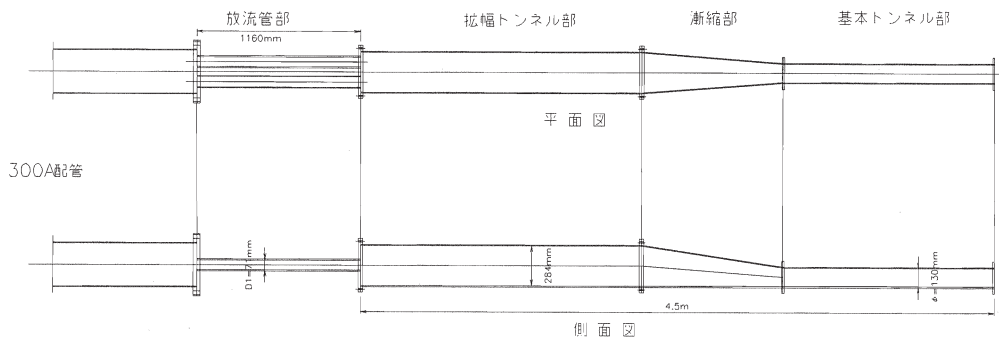
2. 実験概要

図－1に実験模型を、表－1に実験ケースを示す。実験は、ケースA、Bの放流管1条実験及びケースCの2条実験に大別される。また、1条実験はトンネル条件や給気条件を変化させてその影響を検討したケースAの実験と、形状が相似で大きさを変化させたケースBの縮尺効果実験に大別される。

ケースBの実験は給気の無い場合を対象に実施している。給気がある場合については、文献1)にて



(a) 1条模型



(b) 2条模型

図-1 使用模型概要

表-1 実験ケース

1) 1条実験

| ケース | 放流管径 ϕ_0 (m) | トンネル径 ϕ (m) | トンネル長 L (m) | トンネル勾配 i | 給気管径 d_0 (m) | 給気管入口径 d (m) | ϕ / ϕ_0 | L / ϕ_0 |
|----------|-------------------|------------------|---------------------|----------|----------------|--------------------------------|-----------------|--------------|
| A-1 | 0.08 | 0.13 | 2.5, 4.5, 8.5, 16.5 | 0.01 | 0.1 | 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.1 | 1.63 | 31~206 |
| A-2 | 0.09 | | | | | | 1.44 | 28~183 |
| A-3, B-1 | 0.1 | | | | | | 1.3 | 25~165 |
| A-4 | 0.11 | | | | | | 1.18 | 23~150 |
| A-5 | 0.12 | | | | | | 1.08 | 21~138 |
| B-2 | 0.025 | 0.0325 | 1.125 | | | 0 | 1.3 | 45 |
| B-3 | 0.05 | 0.065 | 2.25 | | | 0 | 1.3 | 45 |
| B-4 | 0.3 | 0.39 | 13.5 | | | 0 | 1.3 | 45 |

2) 2条実験

| ケース | 放流管径 ϕ_0 (m) | トンネル径 (m) | | トンネル長 (m) | | | | 漸縮角 θ (度) | 給気管径 d_0 (m) | 給気管入口径 d (m) |
|-----|-------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------|------------------|----------------|--------------|
| | | 上流端 ϕ_u (m) | 下流端 ϕ (m) | 拡幅部 L_1 (m) | 漸縮部 L_2 (m) | 基本部 L_3 (m) | 全長 L (m) | | | |
| C-1 | 0.07 | 0.28 | 0.13 | 2.1 | 0.6 | 1.8 | 4.5 | 14 | 0.1 | 0, 0.1 |
| C-2 | | | | 1.6 | 0.6 | 2.3 | 4.5 | | | |
| C-3 | | | | 1 | 0.6 | 2.8 | 4.4 | | | |
| C-4 | | | | 2.1 | 0.9 | 1.5 | 4.5 | 9.5 | | |
| C-5 | | | | 1 | 0.9 | 2.5 | 4.4 | | | |

検討を行っており、本調査では両者の結果から模型の縮尺効果を検討した。

ケース A の 1 条模型の実験は、直径 $\phi=0.13\text{m}$ 、勾配 1/100 の透明合成樹脂性トンネル模型を、出口径 ϕ_0 で水平方向に放流する透明合成樹脂性円形放流管模型に接続して実施した。ここで、トンネル軸及び放流管軸は両者の接続部で一致させて接続している。

実験では ϕ_0 を変化させて、トンネル断面積と放流

口断面積比を変化させるとともに、トンネル長を変化させ、影響を調査した。また、給気は $d_0=0.1\text{m}$ の給気管をトンネル上流端から 150mm 位置のトンネル上面に設置しており、給気管入口に径 d の孔を開けたオリフィス板を設置して給気の抵抗を変化させた。

実験での観測項目は、流況、トンネル上流端の上面気圧、給気量の各項目であり、一部条件については、壁沿いの水面形を計測した。トンネル上流端の

上面気圧は、トンネル上流端から 20mm の位置 P 点にて差圧形で計測している。また、給気量は、入口から 0.5m 流下断面での風速測定により求めている。

ケース B の縮尺検討実験は、ケース A-3 でトンネル長が 4.5m の場合を基本として、これを幾何学的相似により縮小及び拡大させた、合計の 4 種の大きさの異なる模型を用いて実施した。前述の通り給気は実施しておらず、実験での観測項目は流況、及びトンネル上流端上面の気圧である。

ケース C の放流管 2 条の模型もケース A-3 でトンネル長が 4.5m の場合を基本形状として設定した。すなわち、2 条の放流口の合計断面積がケース A-3 に等しいものとし、トンネル全長を 4.5m としている。

トンネル上流端断面は 1 条の放流管径の 4 倍の径の拡幅円断面とし、拡幅トンネル長及び基本トンネル断面に接続する漸縮角度を変化させた。拡幅断面は、既往のジェットフローゲートの設置事例を参考に、放流管中心間距離を管径の 2 倍、放流口側面からトンネル側面までの余裕を 0.5 倍として設定した。なお、断面の漸縮は上面のみで行っており、実験での観測項目はケース A と同様である。

3. 流れに関する無次元パラメーター

空気連行現象についての運動方程式等に基づく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り、まず次元解析により流れに関する無次元パラメーターを検討する。

例えば、給気量や点 P の作用圧力など、トンネル内放流に係わる現象を表わす諸量を f とすると f は次式で表わされる。

$$f = f(\phi_0, Q_w, \rho_w, \nu_w, g, T, e(l)) \quad (1)$$

ここに、 Q_w : 放流量、 ρ_w : 水の密度、 ν_w : 水の動粘性係数、 g : 重力加速度、 T : 表面張力、 $e(l)$: トンネルや給気管形状を表す長さに関するパラメーターである。この他、壁面粗度等も関連パラメーターとして考えられるが、ここでは、主たる因子を考えることとして省略した。

式(1)において、 $e(l)$ の形状要素が n 個あるとすると、括弧内のパラメーターは $5+n$ 個である。 π 定理より無次元パラメーターは $3+n$ 個抽出され、次式を得ることができる。

$$f' = f'(F_{r0}, R_{e0}, W_{e0}, e(l/\phi_0)) \quad (2)$$

ここに、 f' : f に関する無次元量、 F_{r0} : フルード数 $= v_0 / \sqrt{g\phi_0}$ 、 R_{e0} : レイノルズ数 $= v_0\phi_0 / \nu_w$ 、

W_{e0} : ウェーバー数 $= \sqrt{v_0^2\phi_0 / (T/\rho_w)}$ であり、 $e(l)$ については、代表長さとして ϕ_0 を用いて無次元化している。

水理的な無次元量は F_{r0} 、 W_{e0} 、 R_{e0} であり、 T 等の物理定数が一定であるとする、 k_1 、 k_2 を定数としてそれぞれ次の関係がある。

$$R_{e0} = k_1\phi_0^{1.5}F_{r0} \quad (3)$$

$$W_{e0} = k_2\phi_0F_{r0} \quad (4)$$

開水路流の水理模型実験では、流れの状況を再現させるため、通常、フルード相似による模型と原型値の関係が設定されているが、上式から明らかのように、現象に R_{e0} や W_{e0} の影響が無視できない場合には、 ϕ_0 、すなわち模型規模が影響することになる。

ここで、 R_{e0} については十分大きければ現象への影響は小さく、空気連行に関連する水面周辺の現象は F_{r0} と W_{e0} による影響が大きいと考えられる³⁾。ジェットフローゲート下流の給気量について実施した、幾何学的に相似で大きさの異なる模型を用いた相似性の検討実験の結果でも、 W_{e0} の重要性が確認されており¹⁾、以下では、流れに関するパラメーターとして F_{r0} 、 W_{e0} の無次元パラメーターを用いて実験結果を整理する。

3. 1 条放流管実験

3. 1 無給気実験結果

3. 1. 1 流況

ここでは、ケース A の 1 条放流管実験のうち、無給気状態での実験結果について整理する。

まず、流況であるが、流量を徐々に増加させていった場合、何れの ϕ/ϕ_0 においても、次のような流況変化が確認された (写真-1 参照)。

流況 1 : 放流水脈に空気混入はほとんど見られず、

放流水は着水位置下流でトンネル壁面沿いに若干這い上がるが、滑らかに流下する。

流況 2 : 放流水脈に白濁がみられるようになり、空気混入が生じている。着水位後の水脈はトンネル壁沿いに這い上がるがトンネル天端に達することはない。

流況 3 : 空気混入が生じており、着水位置下流のトンネル壁沿いの這い上がり水脈がトンネル天端に

達する。着水位置周辺はトンネル壁面全体が水流で覆われており、放流管出口への給気は放流位置への這い上がり水脈と放流水脈の間の空間からなされる。

流況4：着水位置下流のトンネル壁沿いの這い上がり水脈が下流向きとなり、天端に達しない。水脈の白濁が顕著。

流況5：満管流

流量増加に伴う上記の流況変化は、何れのケースでも同様であったが、例えば放流管径に対し、トンネル径が十分大きい場合には流況3が生じない可能性がある。この場合、流況2～4の違いが明確で無くなるが、空気混入開始から満管に向けて順次激しくなる空気混入状況を3

段階に分けたものと考えれば、同様の分類は可能である。なお、当然のことながら流況5の満管流は、放流管出口部で大きな圧力降下を生じ、避けるべき流況である。他の流況については、トンネル内圧力の降下量を評価した上でその是非を検討することになるがこれについては、後に検討する。

なお、流況3は勿論、他の流況においても着床部下流の水脈の這い上がりは比較的大きいので、トンネルの設計は天端部も比較的高速流が通過するものとして実施する必要があり、表面に不陸のない施工を心掛けなければならない。

図-2に、上記流況と各無次元パラメータの関係を示す。図は ϕ/ϕ_0 ごとに示したが、本の実験では同じ ϕ/ϕ_0 での F_{r0c} と W_{e0c} には1:1の関係があるので、横軸に両者の値を示している。

図中の破線は、参考までに、等流状態でトンネルを流下する場合の満管時の条件を示したものである。ここに、満管時の条件は、

$$\text{エネルギー勾配 } i \geq \text{トンネル勾配 } i_0 \quad (5)$$

として与えられる。 i は摩擦損失係数 f を用いて次式で表わされる。

$$i = f \frac{1}{\phi} \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

ここに、 v ：トンネルの断面平均流速である。式(6)及び F_{r0c} 、 W_{e0c} の定義より式(3)で等号となるフルー

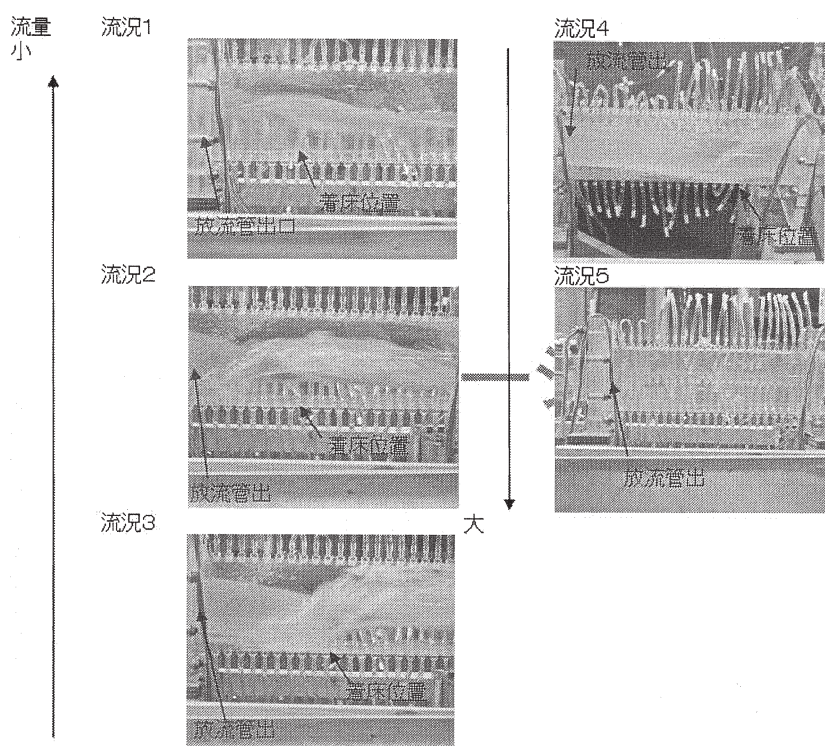


写真-1 流量による流況変化（放流口直下流付近、1条、無給気）

ド数、ウェーバー数（添え字cを用いる）は、次式で与えられる。

$$F_{r0c} = \sqrt{2 \frac{i_0 \phi^5}{f \phi_0^5}} \quad (7)$$

$$W_{e0c} = \sqrt{2g \frac{\phi^5}{\phi_0^3} \frac{1}{T/\rho_w} \frac{i_0}{f}} \quad (8)$$

上記 F_{r0c} 、 W_{e0c} が図-2の破線である。上式の算定にあたり、 f は透明アクリル樹脂を用いた他の実験での値⁴⁾を参考に0.013とした。

これより左側で満管流への遷移が生じる場合として空気連行によりトンネル内の空気が排出されることによる場合が考えられるが、トンネルが十分長い場合には、満管状態を維持することができないので、流れが不安定になることが想定される。また、これより右側で遷移する場合には、トンネル全体に圧力が作用することになる。流量差が大きいほど遷移時の流況変化が激しくなり、水脈が壁面に吸いつけられるように急速に満管流に移行する。

図より、 ϕ/ϕ_0 が小さいほど、また、 L/ϕ_0 が大きいほど F_{r0c} 及び W_{e0c} の小さい領域で流況遷移が生じることが分かる。特に $\phi/\phi_0 = 1.08$ で L/ϕ_0 が50程度以上では、 F_{r0c} 、 W_{e0c} と同程度か小さい領域で満管流への遷移が生じており、安定した開水路流とし

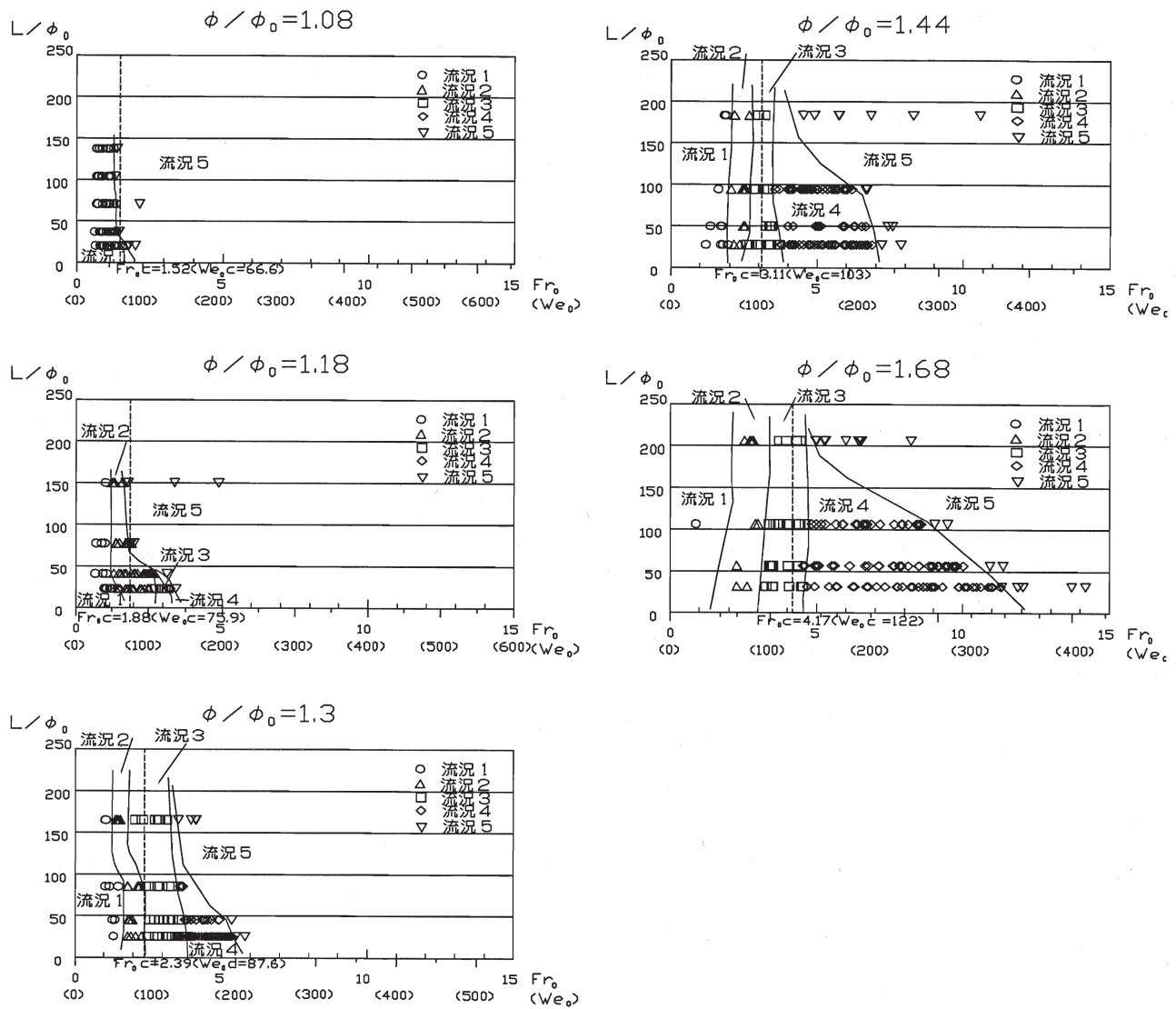


図-2 流況と ϕ/ϕ_0 、 L/ϕ_0 、 Fr_0 、 We_0 の関係 (給気なし)

て流下できる領域はきわめて小さい。

今回の実験結果では、 $\phi/\phi_0 \geq 1.3$ で $L/\phi_0 \geq 150 \sim 200$ 程度の流況領域は余り変化がなく、満管流に遷移する Fr_0 及び We_0 は Fr_{0c} 、 We_{0c} に近づいている。また、 Fr_{0c} 、 We_{0c} での流況は流況 3 となっている。

ところで、後に詳細に検討するが、 $\phi_0 = 0.08\text{m}$ のトンネル断面に十分余裕のあるケースでは水面形測

定を実施しており、水脈着床時のエネルギー損失を適切に評価すれば、水面形が不等流計算により求めることが可能である。不等流計算によりトンネル出口で水面がトンネル頂部に接する条件と満管流に遷移する条件を比較すると、実験で満管流に遷移する Fr_0 (We_{0c}) は計算のそれよりかなり小さく、トンネル内の排気の影響が大きいことが確認されている。

このことは給気により満管流に遷移する F_{r0} (W_{e0c}) が大きくなることから確認されている。

3. 1. 2 トンネル上流端の圧力降下

図-3に放流管出口直下流の壁面作用圧力 p_p と F_{r0} の関係を示す。ただし、 p_p については、 $-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2g)$ として無次元化してある。これは、放流水脈の速度水頭に対する圧力降下量の比を表わしている。なお、流況5では非常に大きな値が生じており、こうした大きな負圧については、図示は省略している。また、 L/ϕ_0 の影響は顕著でなく、図ではまとめて示してある。

図より、 F_{r0} が大きいほど、また、 ϕ/ϕ_0 が小さいほど圧力降下が生じやすいことが分かる。特に $\phi/\phi_0 = 1.08$ では、僅かな F_{r0} の変化により急激に圧力が低下している。満管流への遷移が生じやすいことが確認されよう。

同じ ϕ/ϕ_0 において F_{r0c} の増加に伴い、圧力も連続的に下がっており、流況の違いによる急激な変化は生じていない（ただし、流況5を除く）。なお、 ϕ/ϕ_0 が大きくなるにしたがって圧力降下量が小さくなるのは、トンネル出口からの給気によるものと考えられる。

圧力降下量はキャビテーションに対する安全性等から評価する必要がある。流れの状況にもよるが、ダム放流設備の壁面作用圧力を -3m 水柱程度以上として設計している現状から考えると、-1~-2m 水柱程度に抑える必要があると考えるが、後に検討する。なお、放流管出口に設けられる給気管の設計では放流管出口の周辺圧力が -1.5m 水柱以上となるよう設計されている。

後に示すが、水理設計では、満管流への遷移に対し十分な安全性を確保するとともに、圧力降下量に対する安全を確保する必要がある。両者は互いに関連するものであり、本実験結果では、無次元圧力降下量が 0.01~0.02 程度では満管流への遷移は生じていない。満管流への遷移を防止するための、無次元圧力降下量の目安になるものと考えている。

3. 2 給気の影響

図-4に給気を行なった場合の無次元圧力降下量と F_{r0} の関係を示す。図は $\phi/\phi_0 = 1.3$ 、 $L/\phi_0 = 45$

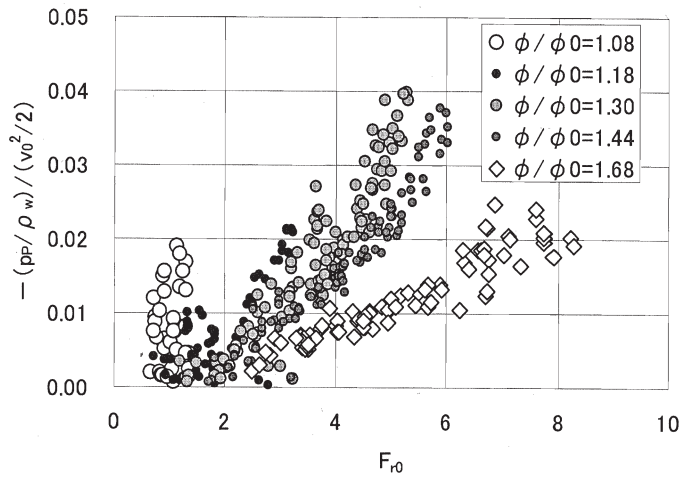


図-3 $-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2)$ と ϕ/ϕ_0 、 F_{r0} の関係

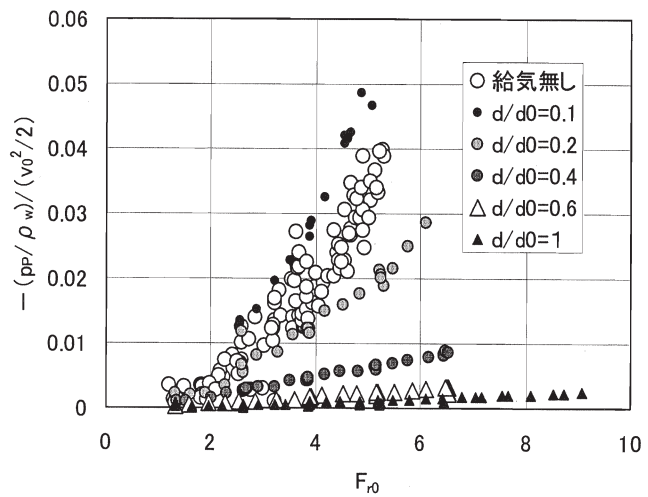


図-4 給気管効果への入口径の影響

($\phi/\phi_0 = 1.3$ 、 $L/\phi_0 = 45$ 、 $d_0/\phi_0 = 1$)

のケースについて示したもので、給気無しの場合も併せて示してある。

図より、給気を行なうことにより、トンネル上面の圧力降下を低減できることが確認される。 $d/d_0 < 0.4$ では圧力降下低減量に対する給気管入口径の影響が大きく、給気システムの設計が重要であることが分かる。次に検討するように、圧力降下量には模型規模の影響が考えられ、模型実験での推定精度には問題が残る。設計では、システムによる圧力降下低減効果への影響の少ない、例えば $d/d_0 > 0.4$ といった状態を確保できるよう設定するのが妥当であろう。

図-5、6には、それぞれ給気に及ぼすトンネル長の影響、 ϕ/ϕ_0 の影響例を示す。トンネル長の影響例は、 $\phi/\phi_0 = 1.3$ 、 $d/d_0 = 0.02$ の場合について、 ϕ/ϕ_0 の影響例については、 $L/\phi_0 = 77 \sim 106$ 、 $d/d_0 = 0.2$ のもの

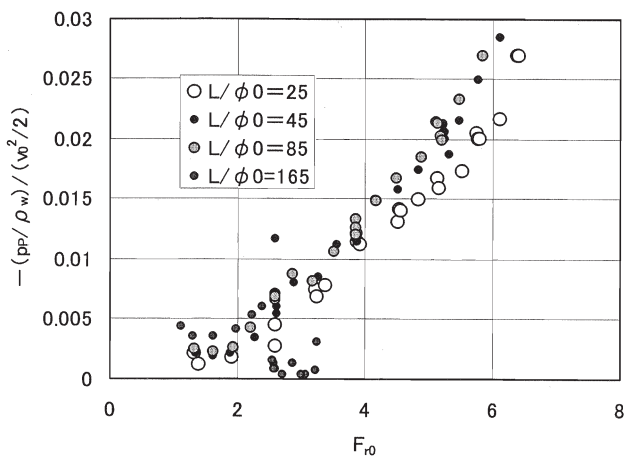


図-5 給気管効果へのトンネル長の影響
($\phi/\phi_0=1.3$, $d/d_0=0.02$, $d_0/\phi_0=1$)

について、給気管入口断面を縮小しない場合について示した。

図-5より、トンネル長が長くなると、同じ F_{n0} に対する無次元圧力降下量が大きくなる傾向があることが分かる。ただし、その差は小さく、トンネル長がかなり短い $L/\phi_0=25$ を除くケースでは差は明瞭ではなくなっている。

トンネル長の影響が顕著でないことは、今回の実験範囲のトンネル長において、放流に伴う空気混合層が十分発達していることを意味している。なお、 $L/\phi_0=165$ の $F_{n0}=3$ 周辺の圧力降下量が極端に小さくなっているが、圧力が上昇する理由はなく、差圧計の不具合によるものと考えている。

トンネル長の影響が余り顕著でないことから、図-6では $L=4.5\text{m}$ 以上のものを併せて示した。図より、同じ給気システムの場合、 ϕ/ϕ_0 が大きいほど圧力降下が小さいことが分かる。これは、無給気の図-3から予想される結果であり、トンネル出口からの給気量が、 ϕ/ϕ_0 が大きいほど大きくなっているものと思われる。

給気量であるが、給気量が給気管入口径の影響を受けることから分かるように、給気システムにより変化する。現地の給気システムは様々な経路が用いられ、流下する空気流の損失は別途計算される。そこで、ここでは、トンネル上面で計測した気圧により、給気量が決まっているか否かの確認を行うものとする。確認ができれば、給気システムの損失は管路系の計算により別途可能であり、これを用いてトンネル上面

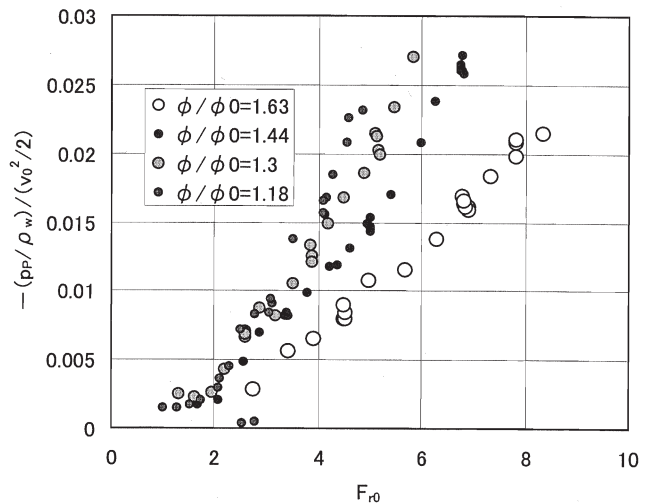


図-6 給気管効果への ϕ/ϕ_0 の影響
($L/\phi_0=77\sim 106$, $d/d_0=0.2$, $\phi=0.1\text{m}$)

の圧力降下が計算できることになる。

給気管内の空気流のレイノルズ数が十分大きい場合、給気管の損失は管内流速の2乗、つまり給気量 Q_a の2乗に比例するはずである。給気管に作用する全エネルギーがトンネル上面の負圧によるものとする、これを水頭表示した $p_p/(\rho_w g)$ と Q_a^2 は比例することになる。図-7に両者の関係を示す。図は、給気管入口径の異なるケースごとに示してあるが、給気管のシステムが同じであれば、 Q_a^2 と $p_p/(\rho_w g)$ はほぼ直線の関係にあり、給気管の給気量がトンネル上面の圧力降下量と給気管システムの損失特性により表されることが確認される。

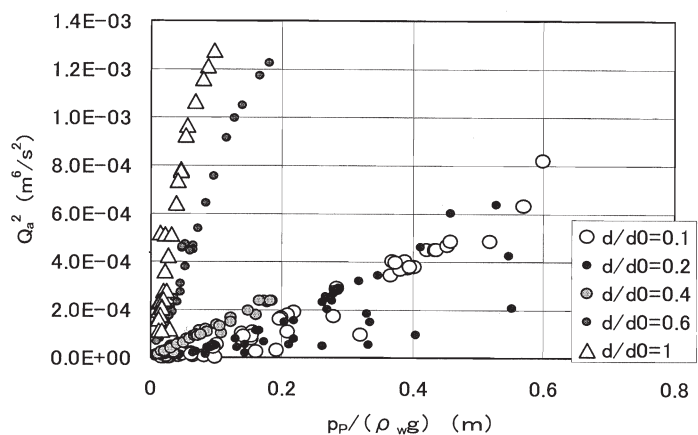


図-7 (給気量)²と圧力降下水頭の関係
($\phi/\phi_0=1.3$, $d/d_0=0.2$, $d_0/\phi_0=1$)

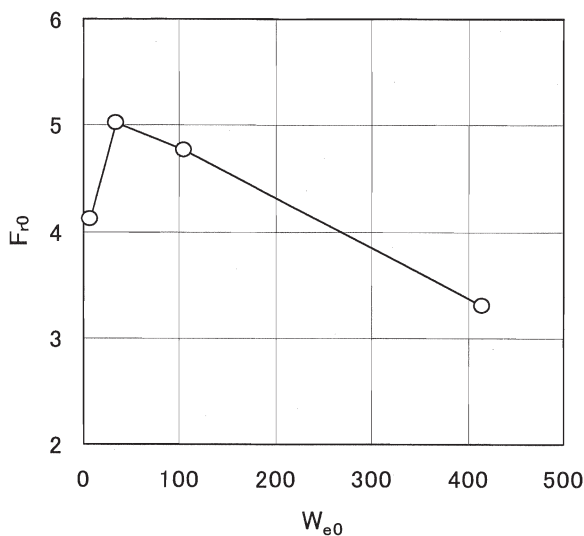


図-8 満管となる臨界の F_{r0} と W_{e0} の関係

3. 3 模型縮尺の影響

図-8に満管流に遷移する F_{r0} と W_{e0} の関係を示す。式(4)から分かるように、模型規模が変化すると、同じ F_{r0} に対し、 W_{e0} は模型規模に比例して変化する。

図より、満管流に遷移する F_{r0} は、 W_{e0} に対しピークをもっており、比較的大きな模型規模では F_{r0} が減少、つまり、満管流に遷移しやすい結果となっている。 $\phi_0=0.025\text{m}$ 模型で F_{r0} が小さくなっている理由は明確でない。 $\phi_0=0.025\text{m}$ はやや小さい R_{e0} であること、また、次に示す無次元圧力降下量については、 $\phi_0=0.025\text{m}$ で大きくなる傾向が見られていないことから、或いは流れの抵抗の増加など R_{e0} の影響を受ける現象が生じているかもしれない。

図-9、10には、それぞれ無次元圧力降下量と F_{r0} 、 W_{e0} の関係を示す。何れのパラメーターに対するプロットでも、無次元圧力降下量は模型規模により異なる傾向を示しており、同じ F_{r0} に対しては模型規模が大きいほど降下量が大きく、同じ W_{e0} に対しては小さくなっている。

以上のように、模型規模が異なる場合の無次元圧力降下量は、単独の流れに関する無次元パラメーターで表すことはできない。そこで、両者が同程度に影響していると考えるのが妥当と考え、

$$-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2) = KW_{e0}^a F_{r0}^b \quad (9)$$

の式形にて重回帰近似を行い、 a 、 b により W_{e0} 、 F_{r0}

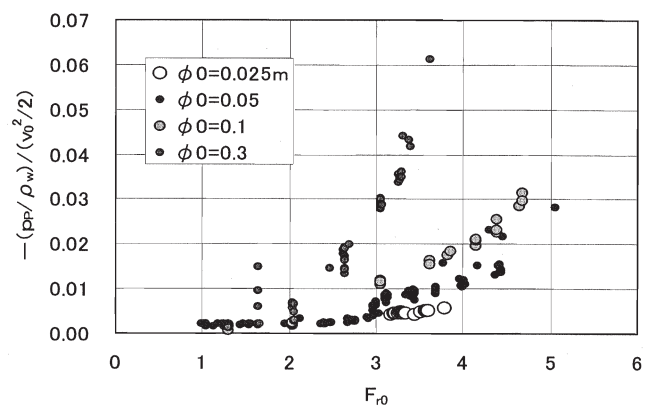


図-9 $-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2)$ と F_{r0} の関係

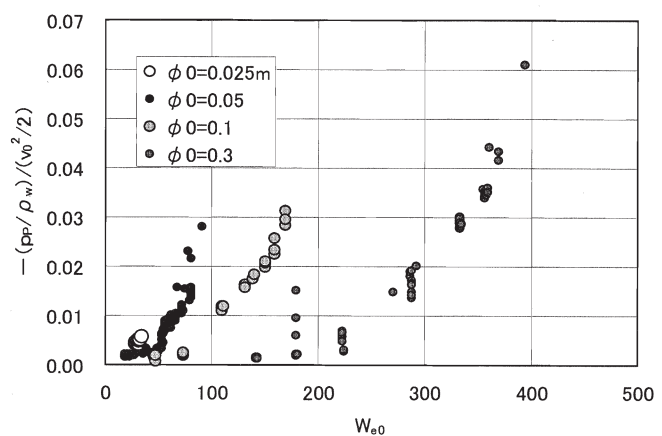


図-10 $-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2)$ と W_{e0} の関係

それぞれの影響度をチェックした (K : 定数)。近似の結果、 $a=0.62$ 、 $b=1.37$ (相関係数 0.8) の結果を得た。図-11に近似状況を示す。

無次元圧力降下量に対し、 W_{e0} 、 F_{r0} が同程度に影響することが示されたが、図-11をみると、模型が大きい場合のデータにおいてやや近似が悪い結果となっている。そこで、実験結果の原型換算において、安全側の設定になるよう、ここでは、 $a=b=1$ とし、

$$-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2) = K'W_{e0}F_{r0} \quad (10)$$

にて表すものとした。図-12に結果を示す。ただし、図-12の作成に当たっては、模型規模別に K' を求め、その平均値を用いて無次元圧力降下量を計算した。図より、本ケースでも模型規模の影響が十分反映されていると考える。また、 K' は模型規模が小さいほど大きく、計算値は模型規模が大きいほど大きな値を与える安全側の傾向となっている。

図-13は文献1)のジェットフローゲート直下流

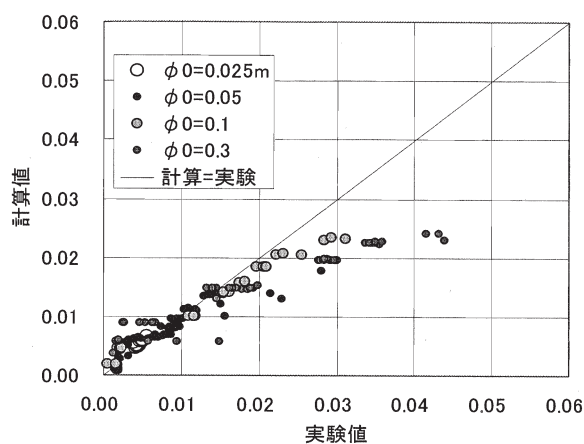


図-11 重相関による $-(p_p / \rho_w) / (v_0^2 / 2)$

無次元圧力降下量について同様の整理を行なったものである。実験は十分な給気が行なわれている場合のもので、ゲート全開時について示した。今回の結果とは逆に、模型規模が小さい場合にやや計算値の圧力降下量が小さくなっているが、模型規模の影響を概ね評価できている。なお、文献1)ではゲート半開時の検討も行なわれているが、ゲート半開時には式(10)の適合性はよくなかった。この理由は明確ではないが、ゲート半開時の水脈は乱れの大きいものであり、空気連行機構が異なることが考えられる。同じ設計水頭での給気量は、一般に全開時に最大となることからここでは、全開時を対象に以下の検討をすすめるものとする。

以上より、フルード則を用いて得られた実験結果を原型換算する場合の無次元圧力降下量の補正として、模型と原型の W_{e0} の比を乗じることを提案する。すなわち、

$$-\left\{ (p_p / \rho_w) / (v_0^2 / 2) \right\}_p = -\left(W_{e0p} / W_{e0m} \right) \times \left\{ (p_p / \rho_w) / (v_0^2 / 2) \right\}_m \quad (11)$$

を提案する。ここに、添字 m 、 p はそれぞれ模型及び原型での値を示している。式(4)より、模型と原型の F_{r0} が同じであれば、 W_{e0} の比は模型規模の比となる。上式は、結局模型値に1/模型縮尺を掛けることを意味している。

3. 4 トンネル断面及び給気システムが満たすべき条件設定

3. 4. 1 圧力降下による条件設定

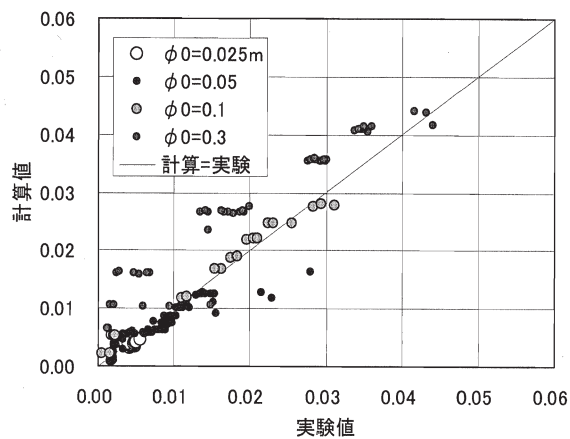


図-12 $-(p_p / \rho_w) / (v_0^2 / 2) = K' W_{e0} F_{r0}$ の場合の実験値と計算値の関係

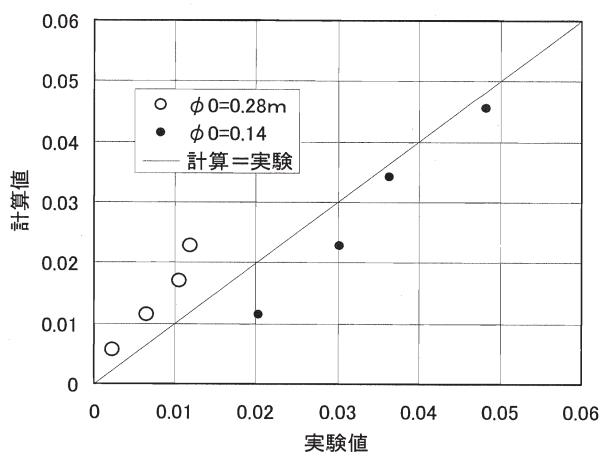


図-13 $-(p_p / \rho_w) / (v_0^2 / 2) = K' W_{e0} F_{r0}$ の場合の実験値と計算値の関係 (既往実験：給気有、ジェットフローゲート)

1) 有害な負圧発生の防止

以上の実験検討を踏まえ、ここでは、トンネル断面の設定方法と給気システムの設計方法について検討する。設計の目標は、満管にならず、かつトンネル内の圧力降下量を有害なものとしないうことにある。

トンネル内の圧力降下量については、先にも述べたように、キャビテーションに対する安全を考慮し、 $-1 \sim 2$ m水柱以上とするのが適当であろう。接水面のトンネル壁面の作用圧力は、 -3 m水柱以上になるよう設計されるのが通例であるから、両者を加えて $-4 \sim 5$ m水柱の負圧を許容することになる。ここでは、放流管の設計に準じ -1.5 m水柱以上を条件として設定する。

圧力降下量の推定について、まず、無給気の場合

には、図-3を用いて推定することができる。ただし、模型縮尺の効果について補正する必要があり、3.3で検討したように原型と模型規模の比を乗じる必要がある。

次に給気がある場合であるが、給気システムを想定の上、給気量と損失特性の関係から求めることができる。損失特性については、通常の管路系の計算による算定が可能である。問題は給気量の設定にある。これについては、今回十分な検討を行っていないが、ジェットフローゲートを対象とした文献1)の検討では、十分な給気が行われている場合の模型及び原型の給気量から次式を求めており、参考にすることができる。

$$Q_a/Q_w = 0.1W_{e0}^{0.28} \quad (12)$$

利水放流管の設計では $Q_a/Q_w = 0.8$ の値が用いられているが、上式では W_{e0} が1680を超えると0.8より大きくなり、多くの施設では利水放流管で従来用いられている値より大きな値を与える。ただし、実測値の数が少ないことから実際の設定では上式で得られる値に余裕を見込むのが望ましい。

ϕ/ϕ_0 が大きくなると、必要給気量の一部はトンネル出口から供給され給気管の能力を低減することができるが、体系だった検討が必要であり、現状では定量的な評価は困難である。当面は必要に応じ水理模型実験を行い、個別に検討する必要がある。

2) 満管を回避するための条件

満管になる条件について、まず、無給気の場合には図-2を求めているが、縮尺効果を勘案すると、図-2をそのまま用いることはできない。

一方、先にも示したように、トンネル上面の無次元圧力降下量が0.01~0.02程度以下であれば、トンネル断面の閉塞は生じていない。このことは、縮尺を変化させた実験でも同様であり、ここでは、無次元圧力降下量が0.15以下となるよう設定することを提案したい。この場合、作用水頭が100mを超えなければトンネル上面圧力は先の-1.5m水柱より大きいことになる。すなわち、殆どの施設は本条件で設計されることになる。

無次元圧力降下量は先に述べたように図-3に模型の縮尺効果を補正して求められる。例えば、今回の実験が1/10~1/50相当の縮尺とすると、図-3での許容無次元圧力降下量は0.015~0.003となる。今回実験を行った ϕ/ϕ_0 の範囲では、適用範囲はかなり狭く、多くの場合、更に大きな ϕ/ϕ_0 として実験を

行うか、給気を実施する必要が生じるものと思われる。

ところで、先に提案した無次元圧力降下量の0.15の値は、今回の実験範囲全体を包絡するものであり、 ϕ/ϕ_0 が大きい場合にはかなり安全側の設定となっている。トンネル径が大きい場合や、給気管を設置した場合にはより大きな値を採用することも可能であろう。今回の実験結果からは $\phi/\phi_0 \geq 1.3$ では0.3程度の値を採用してもよいように思われる。

給気を実施した場合の圧力降下量であるが、給気システムの損失特性の影響を受けるので、先に示したように、給気量を設定の上、算定することとなる。給気を行った場合もトンネル径が大きい場合の設定と同様に無次元圧力降下量の設定値を大きめに設定することが可能であろう。

3.4.2 水面形からの条件設定

以上は作用圧力の観点から検討したが、給気を行う場合には、上記条件のみではトンネル径を決めることができない。また、実験値を提示した無給気の場合にも、トンネルの粗度が模型のそれとは異なることが考えられること、更に、上記条件はあくまで実験範囲のものであり、トンネル長が更に長い場合には、水面が更に上昇すると考えられることなどから別途水面形からのチェックが必要となる。

実験では、ケースA-1のトンネル断面に十分余裕がある状態において水面形を計測している。この水面形に対し、自由落下として計算される水脈着床点中心を基点とした不等流計算を実施した結果、水面勾配がほぼ一致することを確認した。計測の水面は計算結果を平行移動させた形状となっており、こ

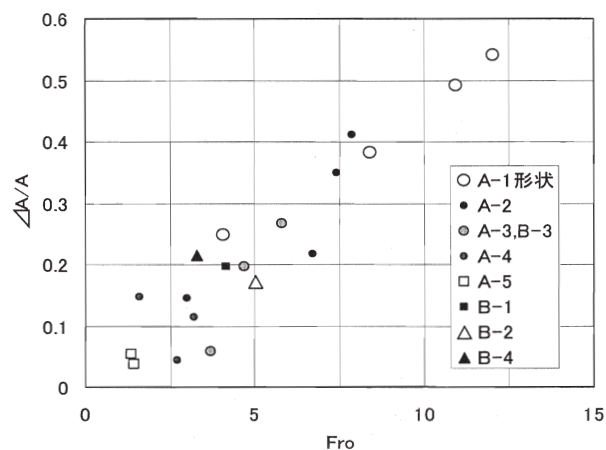


図-14 $\Delta A/A$ と Fro の関係 (給気無し)

れから着床時のエネルギー損失 ΔE を求めた結果、

$$\Delta E = 0.1(v_0^2/2g) \quad (13)$$

の結果を得、計算値と計測値のよい一致を得た。

図-14はこの不等流計算を用いて、作成したものである。縦軸は、トンネル出口の水の無い断面積 ΔA とトンネル断面積 A との比を表しており、無給気の満管流臨界条件におけるものを示した。 $\Delta A/A > 0$ となっているのは、これより僅かな流量増加により、水面がトンネル上面に、吸いつけられるように上昇し満管になることを意味している。

図より、 F_{r0} が大きくなるに従って臨界条件での $\Delta A/A$ が大きくなり、必要なトンネル断面が大きくなる事が分かる。模型縮尺の影響が考えられるが、ケース B における差が小さいことから、得られた値に若干の割り増しを考慮することで対応が可能なものとする。

上記は、空気混入の無い場合の水面であり、原型の流れでは空気混入による水面の上昇を勘案する必要がある。この空気混入量については、今後の研究に負うところも多いが、水理公式集には十分発達した場合の空気濃度が示されており⁵⁾、当該流速に対応する濃度として用いれば安全側の設定が可能であろう。図-14を参考にする場合の水面形は、不等流計算結果にこの空気混入量を加えた水面とするのが適当である。

以上は無給気の場合である。十分な給気を行った場合には、水理模型実験や設計実績から $\Delta A/A = 0.25$ 程度以上の値が提唱されている⁶⁾ので参考にすることができる。ただし、高速流のトンネル放流については、実績が少ないのが実情であり、今後、更に検討を進める必要がある。

4. 2条放流管実験

2条放流管模型の放流管出口断面積の合計は、1条放流管模型の A-3 ($\phi_0 = 0.1m$) 模型と一致させている。以下では、1条放流管模型の結果と比較するため、流れに関する無次元パラメーターの代表長さとして $\phi_0 = 0.1m$ を用いて整理した。

給気無しの場合の2条放流管における満管流となる臨界の F_{r0} は、漸縮角度 14度の C-1~3 のケースで 2.1程度、9.5度の C-4、5 で 2.2~2.3程度であり、漸縮角度が小さいほど満管になりやすいが、その差は小さい。トンネル全長が 4.5 の1条放流管の結果では、 $F_{r0} = 4.8$ であり、2条放流となることで、満管流

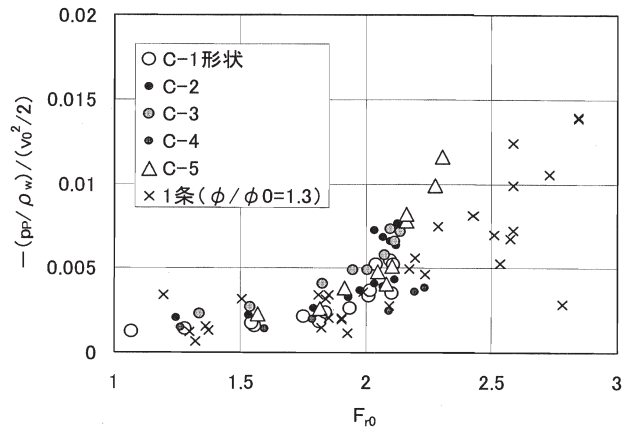


図-15 給気無しの F_{r0} と $-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2)$ の関係 (2条放流管)

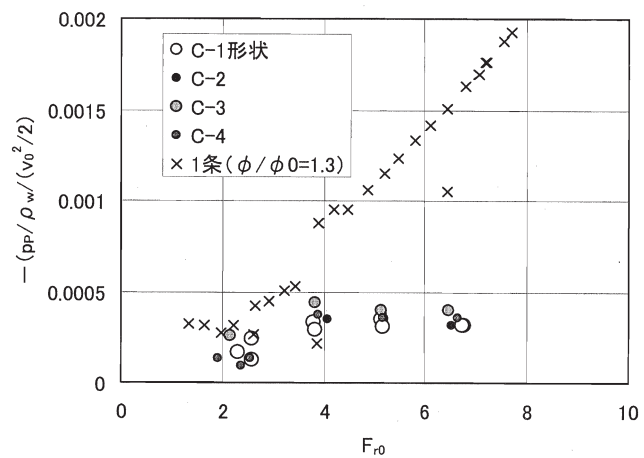


図-16 給気ありの場合の F_{r0} と $-(p_p/\rho_w)/(v_0^2/2)$ の関係 (2条放流管)

となる流量がかなり小さくなっている。

この満管流となる臨界流量の低下は、放流水脈の合流とその後の縮流によるエネルギー損失が大きいこと、それぞれの放流管径に対し定義される実際の F_{r0} が大きいことに原因があるものと考えられる。

図-15には、放流口直下流のトンネル上面での無次元圧力降下量と F_{r0} の関係を示す。図中には、A-3のケースで同じトンネル長の結果も示しており、無給気時のものである。2条放流管の場合が若干大きな圧力降下量となっているが、その差は小さいことが分かる。

図-16には、給気時の無次元圧力降下量を示すが、給気時の無次元圧力降下量は1条放流管と比較して非常に小さいものとなっている。これは、給気管が拡幅断面に設置されており、気流の流速が小さいことに原因があるものと考えられる。すなわち、給気管からトンネル出口への流れを一連の管路流と想定

すると、拡幅部で気流流速は低減し、圧力が上昇する。

1 条放流管の実験結果から、このことは、給気管からの給気量を小さくし、給気システムの効率を低下させることを意味している。今回は計測を実施していないが、断面縮小後のトンネル上面の圧力は、拡幅断面でのそれよりかなり低下していることが想定される。給気管は、断面縮小後の位置に設置するのが効率的であろう。

また、同様の類推から、無給気時の縮小断面での圧力は、計測された拡幅断面のそれよりかなり小さいことが予想される。複数の放流管が設置され、拡幅断面が設けられる場合には、縮小後のトンネル断面において作用圧力の評価を行う必要がある。縮小後の断面を対象とした圧力、水面形を対象とすることにより、1 条放流管の場合の設計と同様の考え方で必要トンネル径、給気システムの検討を行うことが可能と考える。ただし、想定すべき空気量や、合流や断面縮小によるエネルギー損失については、別途求める必要がある。これらの体系的な調査については、今後の課題としたい。

5. まとめ

本課題では、水理実験を中心に、トンネル内放流設備のトンネル断面及び給気施設の設計方法を検討した。主な成果をまとめると以下の通りである。

まず、放流管 1 条の放流について、

- 1) 給気が無い場合の流況を分類するとともに、 $F_{r0}(W_{e0})$ 、 L/ϕ_0 、 ϕ/ϕ_0 をパラメーターとする模型上での流況区分を示した。満管流となる臨界の $F_{r0}(W_{e0})$ は、 L/ϕ_0 が小さいほど、また ϕ/ϕ_0 が大きいほど大きくなる。
- 2) 給気が無い場合について、満管流にならない状態でのトンネル上流端付近の上面気圧の無次元圧力降下量を示した。上面の圧力降下は ϕ/ϕ_0 が大きいほど小さくなる。また、給気を行なった場合の圧力降下量低減効果を確認し、圧力降下が大気とトンネル上面との気圧差を全水頭とする管路系の計算で評価可能なことを示した。
- 3) 給気が無い場合を対象に形状が相似で大きさの異なる模型での実験を行い、模型規模が大きいほど同じ F_{r0} での圧力降下が大きく、満管流が生じやすくなることを示した。圧力降下量には F_{r0} と W_{e0} が同程度に影響しており、原型の無次元圧力降下量を模型値に 1/模型縮尺を乗じて求めること

を提案した。

- 5) 給気が十分なされている場合の水面形は、着床時のエネルギー損失を考慮した不等流計算で推定可能であり、着床時のエネルギー損失は放流水脈の速度水頭の 10%程度であることを示した。

以上の結果を元に考察を行い、トンネル内の圧力降下と水面形評価に基づく、トンネル径、給気管の設定方法を提案した。この設定方法は、新しいものであり、今後具体的施設への適用検討を通じて妥当性を検証するとともに、データの蓄積等を行い、精度を高めていく必要がある。

また、放流管 2 条の場合の影響を調査し、

- 6) 給気が無い場合、満管流へ遷移する流量は放流管 1 条と比較してかなり小さくなる。この原因として、放流水脈の合流や縮流によるエネルギー損失の影響や放流水脈のフルード数が大きいことが考えられる。
- 7) 拡幅断面の気圧は縮小断面のそれよりかなり大きくなる可能性があり、給気管は縮小断面部に取付けるのが効果的である。
- 8) 放流管 1 条に対して設定した設計方法は縮小断面下流の諸量に対し適用可能と考える。ただし、想定すべき空気量や、合流や断面縮小によるエネルギー損失については、別途求める必要がある。ことを示した。

参考文献

- 1) 柏井条介、大澤信哉：整流管付きジェットフローゲートの給気量、土木技術資料、No.45-4、pp.58~63、2003
- 2) 例えば高須修二、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、No.28-10、1986
- 3) Brocchini, M., Peregrine, D., H.: The dynamics of strong turbulence at free surface. Part1. Description, Journal of fluid mechanics, No.499, pp.225-254, 2001
- 4) 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室：五十里ダム新設放流管水理模型実験報告書、土木研究所資料 No.3698、p.69、2000
- 5) 土木学会編：平成 11 年版水理公式集、p.265、1999
- 6) 建設省河川局監修：昭和 62 年版多目的ダムの建設、設計Ⅱ編、p.273、1987