

地下河川の流入立坑部の水理特性

戸田 圭一・井上 和也・大本 雄二・府川 新

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A DROPSHAFT INTAKE OF UNDERGROUND TUNNEL

By Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Yuji OHMOTO and Shin FUKAWA

Synopsis

This paper deals with effects of shape of a dropshaft intake to energy dissipation and air transport control. First, free-surface swirling flows in vertical dropshafts are modeled and their solutions are derived. With these solutions, the energy dissipation effects of the dropshafts are examined by the vertical change of vertical momentum flux and kinematic energy, and some results of practical use are obtained. Next, the relations between the dropshaft shape and air entrainment are examined through dimensional analysis. Three types, that is, standard vortex flow dropshaft, helicoidal-ramp dropshaft and vortex flow dropshaft with contraction are analyzed. A hydraulic parameter influencing air entrainment is found and the excellence of the helicoidal-ramp dropshaft is clarified.

1. 緒言

都市域における近年の過密な都市化の進展は、治水面上において流域の保水・遊水機能の低下による洪水量の増大をもたらすこととなり、その対策の一つとして、東京、大阪等の大都市域では、河道拡幅等による河道改修方式に代わり、地下空間、しかも大深度の地下空間を有効利用することを念頭においた地下河川計画・地下調節池計画が策定されつつある。この地下治水施設の実現化に向けての当面の検討課題の一つは、地下施設が大深度の場合に、地表河川あるいは下水道からの取水流入地点において、高落差の流水を適切に減勢処理し、かつ空気混入量を極力抑止して地下河川に導く取水流入施設の、安全で合理的な設計法を確立することである。

本報は、取水流入施設形状として最近我が国で注目を集めている渦流式立坑を中心に、既往文献調査、理論解析および水理実験解析を通して、立坑形状が、減勢効果ならびに混入空気量の抑止効果にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的として検討を行ったものである。

2. 地下河川の流入立坑の形状の分類

立坑のタイプは大きく3種類に分類される (Fig. 1 参照)。1つは直下式 (プランジ型) と呼ばれるタイプで、流水は円筒形ないしは方形の立坑内を自由落下するものである。2つめは渦流式と呼ばれるタイプで、呑み口部の工夫により渦流を発生させ、円筒形の立坑内で壁面づたいに流れる渦流を形成させるものである。3つめは階段式と呼ばれるもので、階段状に設置されているスラブを水たたきとして利用し、流水を

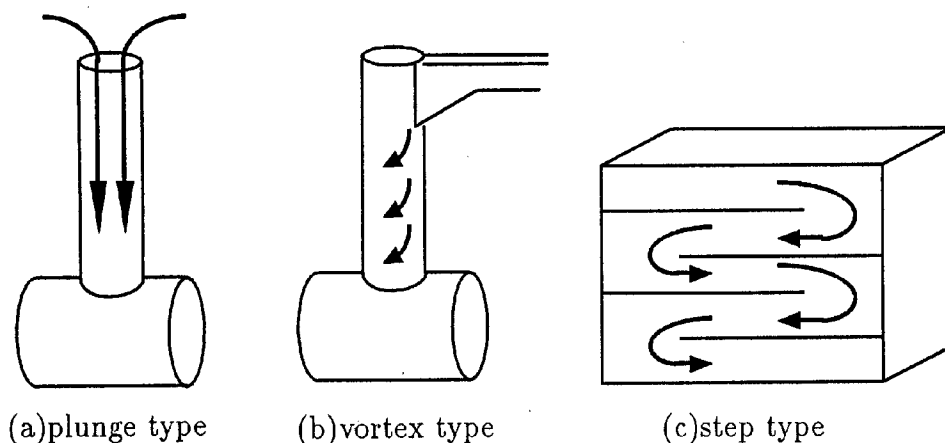


Fig. 1 Types of vertical dropshaft intake

段階的に水たたき部で減勢させながら落下させるものである。

Jain and Kennedy¹⁾は、1947年以降に発表された流入立坑に関する100編以上の調査研究結果を整理した中で、直下式と渦流式の比較について言及しており、

[1] 渦流式の方が直下式よりも下流トンネルへの空気混入量が少ない。

[2] 渦流式の場合には、立坑の壁に沿うらせん流がエネルギーを逸散させる効果を発揮するが、直下式の場合には立坑内での減勢効果は期待できない。

とし、渦流式の優位性を結論づけている。[1]に関しては、渦流式の場合、一旦立坑内に取り込まれた空気に対して、シャフト中心を軸として形成される空気柱（エアコア）が空気孔の役目を果たすことがその理由であると考えられる。

地下河川内へ混入する空気を極力抑止すること、および減勢効果をさらに高めることをねらいとして、渦流式立坑に工夫を凝らした形状も考案されている（Fig. 2参照）。Jain and Kennedy²⁾³⁾らは、立坑の内部にらせんの案内板を設置したらせん案内板式立坑を提案している。これはらせんの案内板づたいに強制的に流れを沿わせて底面および壁面の摩擦によるエネルギー減勢の増大を図り、空気混入量をできるだけ抑えよ

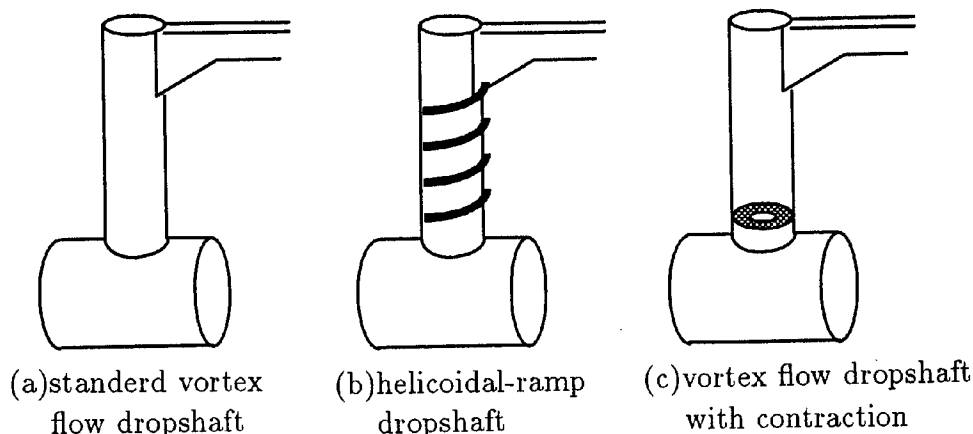


Fig. 2 Types of vortex flow dropshaft

うとするものである。最初は流入立坑の全域にわたって同じピッチの案内板をつけたものであったが、流下方向にピッチを変化させたり、中間部分の案内板を省いたりしたケースも検討されている。また、戸田ら⁴⁾は、立坑下端部に狭窄部を設置する案を提案している。狭窄部の設置により環状跳水が発生し、狭窄部上部では回転流が生じ、エネルギーの逸散効果が期待される。また、狭窄部を通過した流れは円錐状に拡がり、減勢池へ流入する流束の集中を緩和することが可能となり、その結果、混入空気量の軽減に寄与することとなる。

一方、階段式立坑⁵⁾は、高落差を分割して処理するものであり、減勢は確実で、混入空気量もコントロールしやすいものである。このタイプは普通、直方体の形状となるが、円筒内に収めたタイプ⁶⁾も報告されている。しかしながら形状が複雑で重厚な感を与えることは否めず、また大流量を流下させるにはかなりの平面積スペースを要する点に留意しなければいけない。

3. 渦流式立坑の減勢効果

3.1 概説

前章で整理したように、立坑のタイプには様々なものが考えられるが、なかでも渦流式立坑は、

- [1] 形状がシンプルであること。
- [2] 比較的小断面で大流量を流下させることが可能であること。
- [3] 壁面沿いを流下する渦流が、壁面の摩擦によりエネルギーを消費すること。
- [4] シャフト中心に形成されるエアコアが空気孔の役目を果たすこと。

からきわめて実用性に富んだ立坑形状の一つと考えられる。ここでは、この渦流式立坑の減勢効果に着目し、立坑内の流れをモデル化して解析し、減勢効果の指標となると考えられる運動エネルギーや、鉛直運動量の特性を調べてみることにする。そして、減勢効果と立坑形状及び水理量との関係を整理することとする。

3.2 流れのモデル化とその解析法

(1) Jain の解

Jain⁷⁾は立坑内の流れをモデル化し、解を導いている。彼は、

- [1] 流れは軸対象である。
- [2] 鉛直軸方向の流速はそれに垂直な断面にわたって一様である。
- [3] 流速の半径方向の成分は0である。

との仮定のもとに、現象を以下に示す3式でモデル化した。

(Fig. 3 参照)

連続式

$$Q = Av \quad \dots\dots\dots (1)$$

運動量方程式

$$\frac{d}{dz} \int_{r_1}^{r_2} (2\pi r v^2 + 2\pi r \frac{p}{\rho}) dr = gA - \frac{\pi D \tau_v}{\rho} \quad \dots\dots\dots (2)$$

角運動量方程式

$$\frac{d}{dz} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r v u r dr = - \frac{\pi D^2 \tau_t}{2\rho} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Q ：流量、 A ：流水断面積、 v ：鉛直軸方向の平均

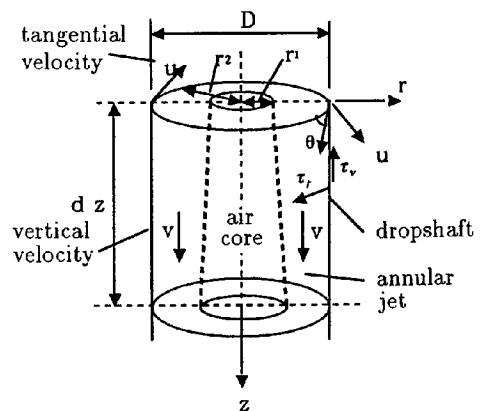


Fig. 3 Definition sketch of control volume

流速, u : 鉛直軸に垂直な断面の接線方向流速, z : 鉛直軸方向距離, p : z 軸に垂直な断面にかかる圧力, ρ : 流水の密度, g : 重力加速度, D : 立坑の直径, τ_v, τ_t : それぞれせん断応力の鉛直成分, 水平成分である。また, r : 半径方向距離, r_1, r_2 : それぞれ渦流の内径, 外径であり, $r_2 = D/2$ である。Jain はここで

[4] 接線方向の流速成分は, $ur = \Omega(\text{const})$ で与えられる (Ω : 循環)。

の仮定を設け, 上記基礎式の (2), (3) を以下のように表した。

$$\frac{d}{dz} \left(Qv + \frac{P}{\rho} \right) = gA - \frac{\pi D \tau_v}{\rho} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{d}{dz} (Q\Omega) = -\frac{\pi D^2 \tau_t}{2\rho} \dots\dots\dots (5)$$

ここに P は, z 軸に垂直な断面にかかる全圧力である。

さらに Jain は摩擦力を Darcy-Weisbach の式形で評価し, (4) 式の圧力項が運動量フラックスの項より十分小さいと仮定し, (1), (4), (5) 式を無次元化した後, 以下の解析解を得ている。

$$\xi = \frac{1}{3} \left(\frac{4F}{\lambda^2} \right)^{1/2} [\phi(R_0) - \phi(R)] \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi(x) = \frac{3}{2} \ln \frac{1 - (1 - \hat{a}x^2)^{1/2}}{\hat{a}^{1/2}x} + \sqrt{3} \arctan \frac{\sqrt{3}(1 - \hat{a}x^2)^{1/2}}{(1 - \hat{a}x^2)^{1/2} + 2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{R_0^2} - \frac{\lambda}{2} F(1 + \omega_0^2)^{3/2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2} = \frac{\lambda}{2} F[(1 + \omega^2)^{3/2} - (1 + \omega_0^2)^{3/2}] \dots\dots\dots (9)$$

$$f = \frac{1}{R\omega} \dots\dots\dots (10)$$

ここに, $\xi = z/D$, $\omega = \tan\theta$, $F = (Q/a)^2/(gD)$, $f = A/a$, $R = \sqrt{\pi a \Omega/Q^2}$ である。なお, θ は立坑壁面の流速ベクトルの角度, a は立坑の断面積, λ は Darcy-Weisbach の摩擦損失係数である。また, 下添字の 0 は初期値 (上方端の値) を表している。(6)~(10) より ξ に対して, f, R, ω が定まり, ついで, $u(r, z), v(z), A(z)$ を求めることができる。

(2) 接線方向流速が一様の解

Jain の解は, 接線方向の流速分布は $ur = \Omega(\text{const})$ で与えられるとの仮定のもとに導かれている。実際には, 渦流に付着する流れの厚みは薄いので, ここでは, 断面内の接線方向流速を, 断面内一様分布とした場合の解析を行ってみた。すなわち, $u = u(z) = \text{const}$ として取り扱ってみた。

連続式, 鉛直方向の運動量式, 角運動量方程式は前述した r_1, r_2 を用いて書き直すと, 連続式

$$Q = \pi(r_2^2 - r_1^2)v \dots\dots\dots (11)$$

運動量方程式

$$\frac{d}{dz} \{(r_2^2 - r_1^2)v^2\} = g(r_2^2 - r_1^2) - \frac{D}{8} \lambda \sqrt{u^2 + v^2} \cdot (v) \dots\dots\dots (12)$$

角運動量方程式

$$\frac{d}{dz} \{(r_2^3 - r_1^3)uv\} = -\frac{3}{32} D^2 \lambda \sqrt{u^2 + v^2} \cdot (u) \dots\dots\dots (13)$$

となる。なお(12)式では Jain の考え方と同様に圧力項が運動量フラックスの項より十分小さいと考えて, 圧力項を省略している。上記の3式をそれぞれ無次元化して,

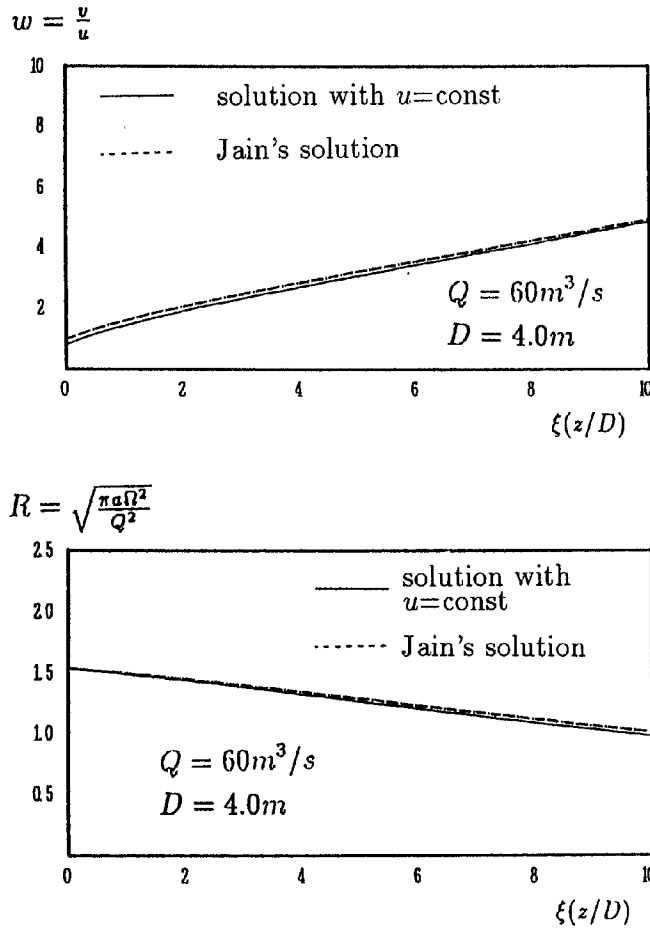


Fig. 4 Influence of the distribution of u

$$(r_2^{*2} - r_1^{*2})v^* = G \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{d}{d\xi} \{(r_2^{*2} - r_1^{*2})v^{*2}\} = (r_2^{*2} - r_1^{*2}) - \frac{\lambda}{8}v^*\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{d}{d\xi} \{(r_2^{*3} - r_1^{*3})u^*v^*\} = -\frac{3}{32}u^*\lambda\sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし、 $r_1^* = \frac{r_1}{D}$, $r_2^* = \frac{r_2}{D} = \frac{1}{2}$, $z^* = \frac{z}{D} = \xi$, $u^* = \frac{u}{\sqrt{gD}}$, $v^* = \frac{v}{\sqrt{gD}}$, $G = \frac{Q}{\pi\sqrt{gD}^5}$

式(14)～(16)より、初期値を与えると r_1^*, u^*, v^* が求まる。この方法で数値解を求めた値と、非回転流れの Jain の解から求めた値を比較したのが Fig. 4 である。これより、断面一様流の解でも、Jain の解とはほぼ一致する解が得られることがわかった。なお両者の比較のためには上端部の呑み口部で断面積 A 及び Ω をそれぞれ等しいとおいた。そのときの断面一様の解の循環の平均半径 \bar{r} 及び u は、次式で与えている。

$$\bar{r} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 dr}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr} = \frac{2}{3} \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1 + r_2}, \quad u = \frac{\Omega}{\bar{r}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

3.3 渦流式立坑の減勢効果

(1) 立坑径の大きさと減勢効果との関係

先ず、立坑径と流量の関係に着目し、それらが減勢効果に及ぼす影響を解析することを試みた。減勢効果を評価するにあたり、横軸に落差、縦軸に流量をとって等鉛直運動量線と等運動エネルギー線を描くこととし、計算については3.2で述べたJainの解析解を用いることとする。また、初期条件の与え方については以下の2通りを考えた。

Case1. 呑み口部の形状として接線型を考えた場合 (Fig. 5 参照)

Jain⁸⁾が提案した呑み口部の流速分布式

$$v = u \left[\frac{(1 - \epsilon)}{2\epsilon} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (18)$$

$$u = \left(\frac{gQ}{e} \right)^{\frac{1}{3}} (\cos\beta)^{\frac{4}{3}} (\text{ただし } r = D/2 \text{ の地点}) \dots\dots\dots (19)$$

$$\sqrt{\frac{(1 - \epsilon)^3}{2\epsilon}} = \left(\frac{Q^2 e}{g\pi^3 d^6 (\cos\beta)^4} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (20)$$

を採用した。ただし ϵ は呑み口部の空隙面積率、 d は立坑の半径、 e と β はそれぞれ呑み口部の絞り込み幅および流入角である。ただし上式が成立する条件として、実験結果との比較より、

$$\epsilon \leq 0.33 \dots\dots\dots (21)$$

の制約を設けている。

計算例としては、上記の条件を考慮して $e = 1/4, \beta = 27.5^\circ$ とし、この関係を満たす $D/\sqrt[5]{Q^2/g}$ の範囲の中から、 $D/\sqrt[5]{Q^2/g} = 1.0, 1.16, 1.25$ を計算条件として採用した。なお $D/\sqrt[5]{Q^2/g} = 1.0$ は、 $\epsilon = 0.25$ となる値であり神田川調節池⁹⁾ではこの値が採用されている。 $D/\sqrt[5]{Q^2/g} = 1.16$ は、Jain and Kennedy¹⁾が彼らの実験を通して推奨した値である。

Case2. 上流端で限界流の発生する場合 (Fig. 6 参照)

立坑内の渦流れにおいて、単位質量あたりの水の流れが持つ運動エネルギー E は、

$$E = \frac{\pi\Omega^2}{2g(a - A)} + \frac{Q^2}{2gA^2} \dots\dots\dots (22)$$

と表される⁷⁾。呑み口の上流端で限界流が発生すると仮定すると、限界流が発生するときには $dE/dA = 0$

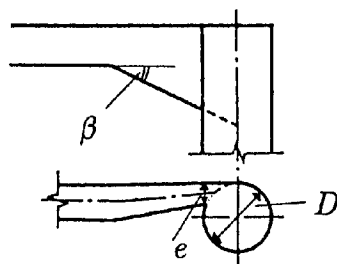


Fig. 5 Tangential inlet

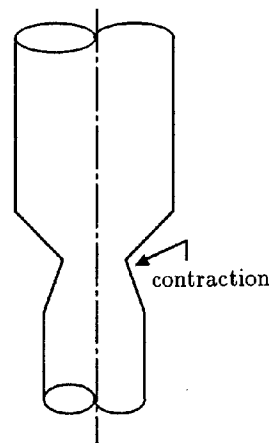


Fig. 6 Contraction of dropshaft

より、

$$V_c = \left[\frac{\pi \Omega^2 A_c}{2(a - A_c)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (23)$$

を得る。ただし $\Omega = ur$, a : シャフトの断面積, A : 流水の断面積, V_c : 限界流速, A_c : 限界流が生じる
ときの断面積である。

(23)式より, Q, D と上流端での Ω の値が決まれば初期条件を決定することができる。今回は, Ω として、

$$\frac{\Omega}{\sqrt{gD} \cdot D} = 1.27 = \text{const} \dots\dots\dots (24)$$

を考えた。なお $D/\sqrt{Q^2/g}$ については、変化の範囲を大きくとり、 $D/\sqrt{Q^2/g} = 1.0, 1.25, 1.5$ とした。

Case1 および Case2 について、鉛直運動量と落差、運動エネルギーと落差の関係をそれぞれ、等鉛直運動
量線、等運動エネルギー線で図示したものが、Fig. 7, Fig. 8 である。以下、ここでの検討において摩擦
損失係数は一定で、 $\lambda = 0.02$ を用いている。図より、等鉛直運動量線、等運動エネルギー線とも $D/\sqrt{Q^2/g}$
の値が大きい方が、上方にきている。これは $D/\sqrt{Q^2/g}$ が大きいほど、すなわち同一流量に対して立坑径が
大きいほど減勢効果が優れていることを意味している。接線型の呑み口の場合には、用いた呑み口部の制約
から、今回は広範囲での議論はできなかったが、少なくとも最近の事例として採用されている $D/\sqrt{Q^2/g} =$
 1.0 や、 $D/\sqrt{Q^2/g} = 1.16$ の値が、減勢効果という面ではベストな値ではないといえよう。

また、上流端で限界流が生じる場合には、立坑径を大きくすることにより減勢効果の改善が図れることが
認められる。上流端で限界流を生じさせるには、狭窄部を上方に設ける等の工夫が必要となるが、新しいタ
イプの立坑形状を考える際に注目すべき結果であると言えよう。呑み口で安定した渦流が形成されるという
条件のもとでは、同一流量に対して立坑径が大きいほど減勢効果が高まるという知見が得られたが、流れを
安定させるのに必要な立坑径の上限も存在すると考えられる。これに関しては今回の解析では表現すること
ができず、実験などを通してそれを明確にすることが今後の課題である。

(2) 接線型呑み口部の形状と減勢効果との関係

Jain and Kennedy¹⁾ は、実験から、最良な立坑径および、最良な接線型の呑み口部の形状 (β : 接近水路
の勾配, e : 絞り込み幅) を決定している。彼らの提案する最良値は、 $D/\sqrt{Q^2/g} = 1.16$, $e/D = 1/4$, $\beta =$
 27.5° である。ここでは、式(21)を満たす3通りの呑み口部の形状について、それらが減勢効果に及ぼす影
響を検討することとする。

計算例として、 $Q = 60(\text{m}^3/\text{s})$, $D/\sqrt{Q^2/g} = 1.25$ の条件を用い、

$$(e/D, \beta) = (1/4, 27.5^\circ), (1/3, 27.5^\circ), (1/4, 15^\circ)$$

の3組を選び比較してみたのが Fig. 9 である。

図より、同じ e/D の値では β が大きい方が、また、同じ β の値では e/D が小さい方が減勢効果が高いよ
うであるが、高落差になるほどその差は微小になる。したがって、式(20) (21) に従うような範囲での立坑呑
み口部の形状の違いが、減勢効果に与える影響は少ないと考えられる。

(3) 立坑径の鉛直方向変化と減勢効果との関係

ここでは、立坑の径が、鉛直方向に線形に変化する場合を想定し、それが減勢効果にどのような影響を及
ぼすかを調べてみた。3.2 で述べた断面一様流の数値解を求める方法で、 $r_2^* = \frac{1}{2}(1 + \alpha z^*)$ として、 α を 0
以外にすれば、立坑径が鉛直方向に線形に変化する場合の数値解が求められ、減勢効果についての解析を行
うことができる。今回は、 $\alpha = -0.05, 0, 0.05$ の3つのケースについて比較を行うこととした。

Fig. 10 より立坑径を鉛直下向きに小さくしていくと、接線方向速度が大きくなるという結果が得られた
が、図より3つのケース間で、鉛直方向速度 v にほとんど差はなく、減勢効果についての評価はほぼ同等で
あるといえる。いずれにせよ、設計上、施工上の問題を考慮すると、鉛直方向に径を変化させること(漸縮
あるいは漸拡)は、さほど有効ではないとの結論が得られた。

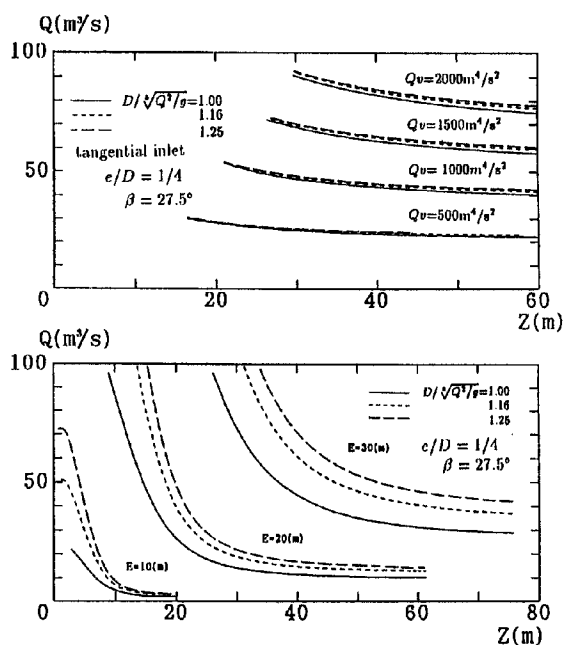


Fig. 7 Equi-vertical momentum flux lines and equi-kinematic energy lines (Case1)

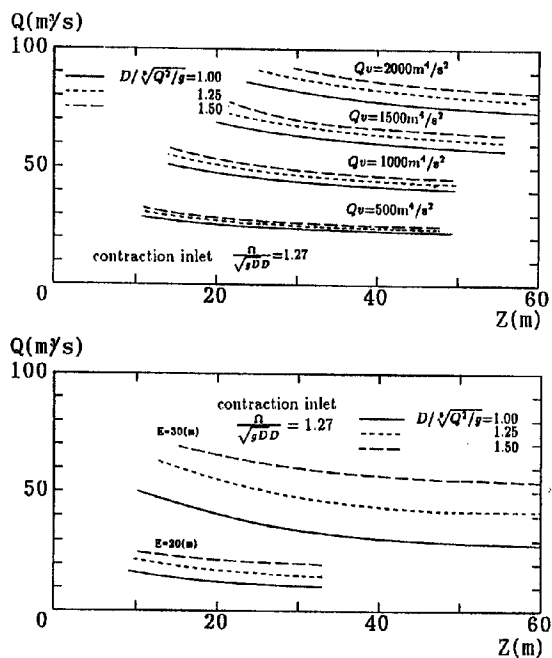


Fig. 8 Equi-vertical momentum flux lines and equi-kinematic energy lines (Case2)

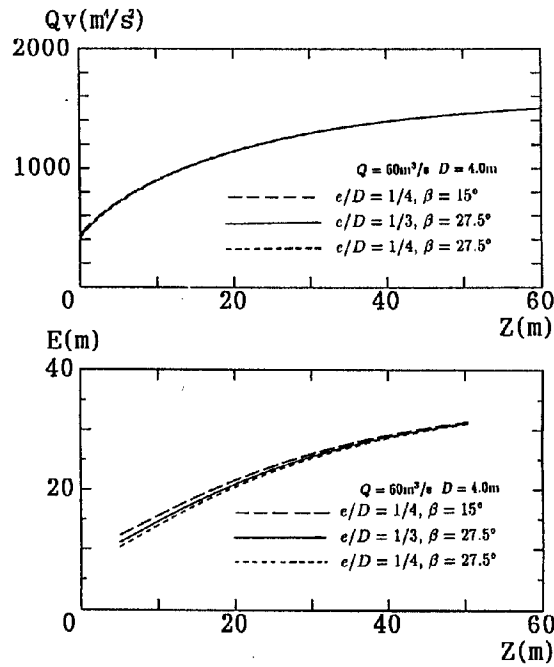


Fig. 9 Influence of the inlet shape

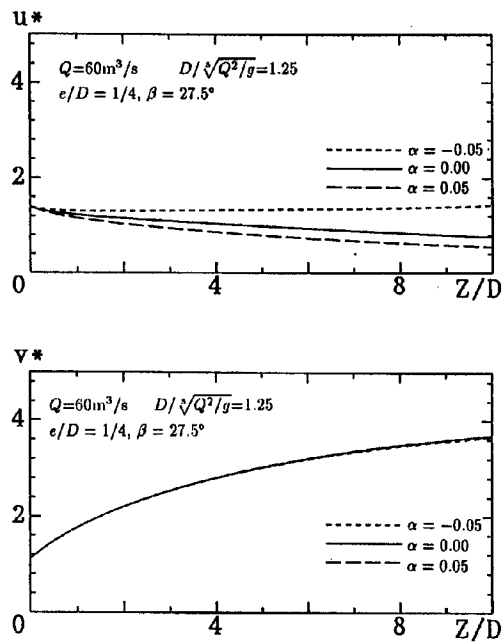


Fig. 10 Influence of the vertical change of drop-shaft

4. 渦流式立坑の空気混入特性

4.1 概説

地下河川のトンネル部に空気が混入することは、

- [1] トンネル部の疎通能力を低下させる。
- [2] 下流端にポンプが設置されている場合は、ポンプの効率を低下させる。
- [3] 地下河川内でエアだまりが形成され、圧縮されて調節池や立坑から吹き出す恐れがある。

との事由より施設運用上好ましくない。よって、可能な限り混入空気の少ない形状を考えることが重要であり、特に地下河川の運用において被圧運転を基本とするところでは、その重要性は一段と高まってくる。これまでも空気混入の軽減をめざした案が提案され、その効果が実験的に確認されているが、各々の成果は個別の施設を対象としたものであり、他の実験結果と比較しての議論はなされていない。また、基礎的な検討の意味あいで、立坑の混入空気と水理量の関係も系統的に調べられていないのが現状である。よって、ここでは、これまで行われた調査、実験結果を基に、渦流式立坑を基本形としたものを対象にして、立坑形状、水理量と混入空気濃度（混入空気量/立坑流入流量）の関係を検討することとする。また、工夫された形状の効果についても考察を加えることとする。

4.2 解析に用いた資料

解析に用いた資料は、以下に示す5つの調査結果であり、これらはすべて渦流式立坑を基本としたものであるが、標準的なもの、らせん案内板式のもの、狭窄部付きのもの3種類を含んでいる。

1. 案内板式高落差立坑の水理実験¹⁰⁾

らせん案内板式の立坑を研究対象としており、おもに流量の違いによる空気濃度の変化を考察している。立坑の連結法として、直接連結と側方連結とにわけてあるが、側方連結のデータは、ここでの検討に不要であると判断し使用していない。また、本管直径に対する水位の比が小さいものも下流のトンネルが開水路となるため省略している。

2. 地下河川流入施設基礎検討業務報告書¹¹⁾

この報告書では、実験を通して地下河川の流入立坑全般にわたり細かい検討がなされている。渦流式立坑とらせん案内板式立坑の両方の実験が行われ、この中で地下河川水位と混入空気量の関係を調べた諸量を基にして、落差、減勢池の体積を変化させたデータを得ている。

3. HELICOIDAL-RAMP DROPSHAFT²⁾

らせん案内板式立坑の水理特性を検討したものであり、混入空気量に関する項では、流量と混入空気量の関係をおもに考察している。この2つの水理量の関係を示した結果を用いたが、水位が連結管より低いものは、減勢池の体積にあたる部分が正しく評価できないのでデータとして使用していない。

4. 狭窄部を有する渦流式立坑の水理特性について⁴⁾

混入空気濃度の低減を目的とした狭窄部付きの渦流式立坑を研究対象としている。立坑径に対する狭窄部の開口径の比（狭窄開口比）を変化させ、その効果を考察しているが、ここでは代表的な開口比として開口比が0.7と1.0の実験結果のみを用いた。（開口比1.0は、標準的な渦流式立坑を意味する。）この結果からは、流量、落差を一定にして減勢池を変化させたデータが利用できる。

5. 寝屋川北部地下放水路取水減勢施設水理実験総括報告書⁵⁾

渦流式立坑を中心に、階段式や、らせんシュート式等様々なタイプの模型実験が行われている中から、渦流式立坑をとりあげ、減勢池の容積が異なるケースをデータとして使用した。

混入空気濃度の計測法に関しては、いずれの資料もその計り方はほぼ同様であり、減勢池の下流で、流下した混入空気を体積が既知のポリエチレン袋に集め、袋が一杯になるまでの時間を求める方法をとっている。また、減勢池の容積については、立坑が地下河川に直接連結され明確に減勢池が存在しないものも含ま

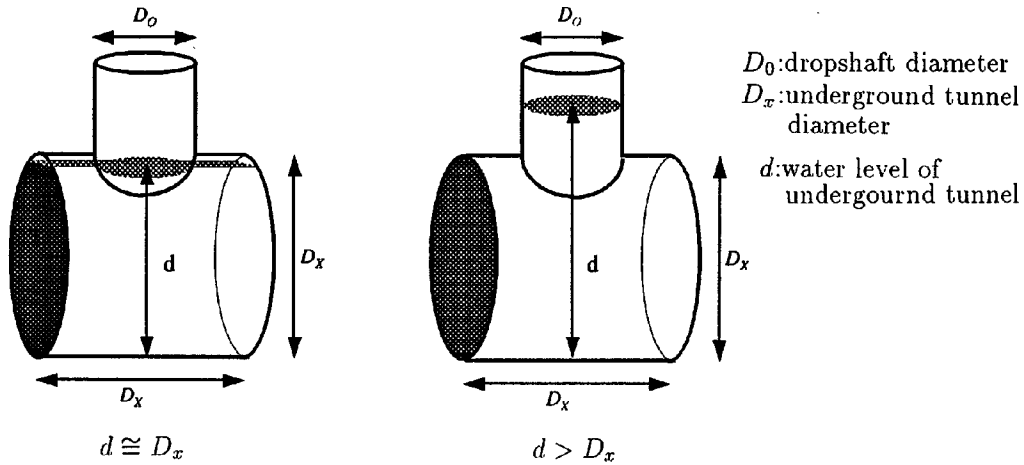


Fig. 11 Estimation of stilling chamber volume

れていたもので、それらについては Fig. 11 に示したような範囲として定義し、その値を用いることとした。

4.3 立坑形状、水理量と混入空気量の検討

(1) 水理解析結果

まず、混入空気濃度に関係が深いと考えられる流量、落差、および減勢池の容積について、混入空気濃度と各々との関係を調べたところ、全体的に混入空気濃度は概ね、落差の増加に伴い増大し、減勢池容積の増加に対して減少するが、流量との間では明瞭な関係が得られなかった。次に、次元解析の手法を用いて混入空気濃度について整理した。混入空気濃度 C に関する諸量を書き出し、数式で表現すると以下のとおりである。

$$f(C, g, V, H, Q) = 0 \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 C ：混入空気濃度、 g ：重力加速度、 V ：減勢池容積、 H ：落差、 Q ：流量である。

次元解析より混入空気濃度 C は、無次元パラメータを用いて、

$$C = F_1(V/H^3, V/(\sqrt[5]{Q^2/g})^3) \dots\dots\dots (26)$$

$$= F_2(V/H^3, H/(\sqrt[5]{Q^2/g})) \dots\dots\dots (27)$$

$$= F_3(V/(\sqrt[5]{Q^2/g})^3, H/(\sqrt[5]{Q^2/g})) \dots\dots\dots (28)$$

と表すことができる。そこで、 $C \sim V/H^3$ 、 $C \sim V/(\sqrt[5]{Q^2/g})^3$ 、 $C \sim H/\sqrt[5]{Q^2/g}$ の3種類の関係の図を描き、 C と無次元パラメータとの関係を調べてみたところ、空気濃度と流量を含むパラメータとの間では、狭窄部付きのものを除いて明瞭な関係が見出しづらかったことから、混入空気濃度を3種類の中で最も相関が大きいと考えられる V/H^3 の関数として表すことにした。すなわち

$$C = F(V/H^3) \dots\dots\dots (29)$$

の形で表現することとした。 C と V/H^3 の関係を両対数でプロットしたものが Fig. 12 である。これより、渦流式とらせん案内板式とで明確な差異が現れており、らせん案内板式の方が空気混入の軽減効果があることが確認される。そして標準的な渦流式に関しては、 C は V/H^3 の -1.1 乗に、らせん案内板式は1種類のデータ (図中の◆) を除いて C は V/H^3 の -1.9 乗に比例することがわかる。なお左にずれているデー

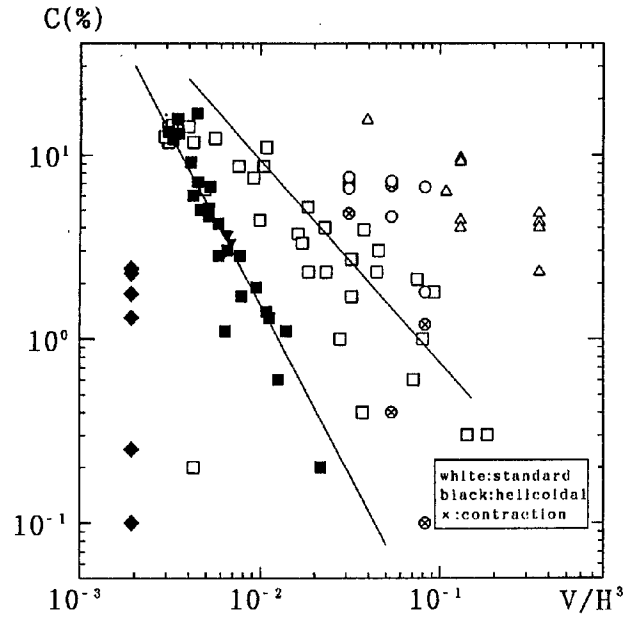


Fig. 12 Relation between C and V/H^3

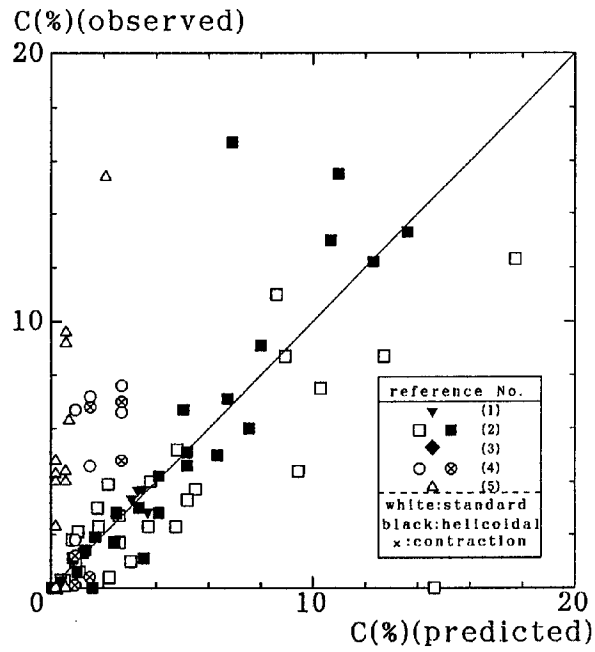


Fig. 13 Comparison of the predicted values with the observed ones

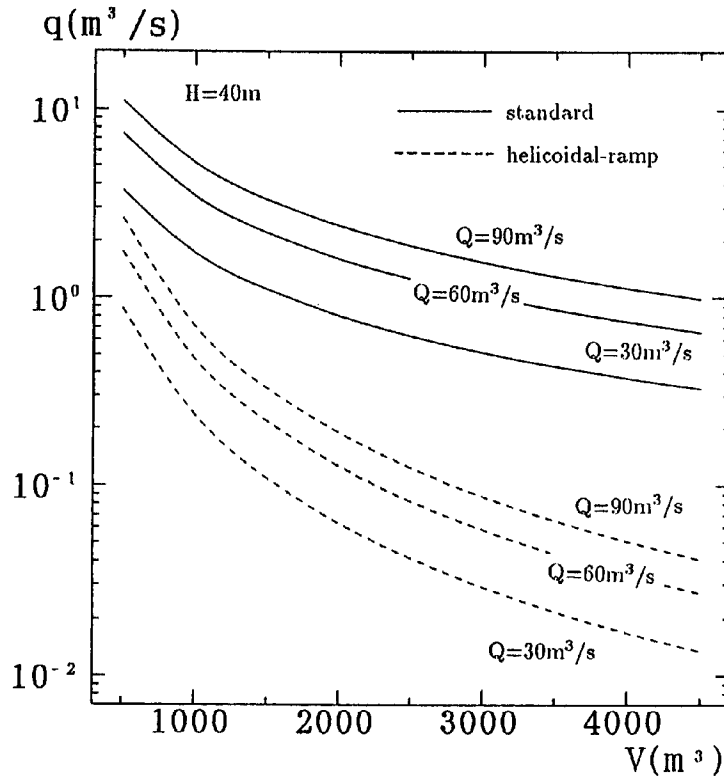


Fig. 14 Relation among entrained air, flow discharge and stilling chamber volume

タは、減勢池の容積として評価できる部分が他のものと比較して著しく小さいためである。次に、関数 F の式形を

$$C = a(V/H^3)^b : (a, b : \text{定数}) \dots\dots\dots (30)$$

とにおいて、近似式を求めてみると、それらは渦流式とらせん案内板式で分離され、それぞれ、

$$C = 5.9 \times 10^{-2} \left(\frac{V}{H^3}\right)^{-1.1} (\%) : (\text{渦流式}) \dots\dots\dots (31)$$

$$C = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{V}{H^3}\right)^{-1.9} (\%) : (\text{らせん案内板式}) \dots\dots\dots (32)$$

となる。なお、上記の近似式を求めるにあたって◆の実験データは対象から外している。実験値と近似式との整合度を調べたものが、Fig. 13 である。Fig. 13 より、らせん案内板式に対する式(32)は、実験値を比較的良く近似しているが、渦流式に対する式(31)は、ばらつきが見られる。

(2) 立坑形状と混入空気量

上述の議論より、流量が混入空気濃度に与える影響は定かではないが、巨視的に見て混入空気濃度は落差と減勢池の容積からなるパラメーター V/H^3 の関数として表現できることが分かった。また、研究者が異なる実験を統合してみても、標準的な渦流式立坑に比べてらせん案内板式立坑は、明らかに混入空気濃度を軽減する効果があることが知られた。Fig. 14 は、標準的な渦流式立坑とらせん案内板式立坑について、式(31)(32)を用いて混入空気量 q (流量 × 混入空気濃度) と流量および減勢池容積の関係をまとめたものである。落差は、近年の我が国の大都市部の地下河川の計画を基に 40 m と設定した。この図からも、らせん

案内板式立坑は、混入空気量を抑制する効果と減勢池容積を減少させる効果を兼備していることが確認される。

最後に、狭窄部を有する立坑の混入空気抑止効果は、標準的な渦流式立坑とらせん案内板式立坑の中間に位置するものとみなすことができる。なお、このタイプの立坑については、文献4)にあるように、流量に対して減勢池容積を十分確保することにより、はじめてその効果が発揮されることが考えられる。

5. 結 語

本報で得られた知見を要約して示すと以下のとおりである。

1. 渦流式立坑内の流れのモデル化において、断面内の接線方向流速の分布を一定とみなした解は、 $ur = \Omega$ (const) の仮定のもとに導かれた解とほぼ同様な結果を与える。
2. それらの解を用いて、立坑形状と、減勢効果の指標となる運動エネルギー量および鉛直運動量との関係を調べたところ、
 - (a) 呑み口部で安定した渦流が形成される範囲においては、同一流量に対して立坑径が大きいほど減勢効果が高まる。
 - (b) 立坑による減勢効果は、接線型呑み口の形状および立坑径の鉛直方向変化にはほとんど影響されない。
3. 立坑から下流のトンネルに流入する混入空気濃度は、水理実験資料の次元解析の結果、減勢池体積 V と落差 H からなる無次元量 V/H^3 の関数として表現することが可能である。
4. 研究者が異なる実験結果を統合してみたところ、らせん案内板式立坑は標準的な渦流式立坑に比べ、混入空気濃度を軽減する効果があることが確認された。また、狭窄部を有する立坑の混入空気抑止効果は、らせん案内板式と標準的な渦流式の中間に位置する程度のものであった。

なお、今後の課題として挙げられることは次のとおりである。

1. 渦流式立坑の減勢効果に関して、同一流量に対して立坑径が大きいほど減勢効果が高まるという知見が得られたが、呑み口部の流れを安定させるのに必要な立坑径の上限値も存在すると考えられる。実験などを通してその上限値を明確にしていく必要がある。
2. 立坑に流入する混入空気量に関しては、水理実験資料の集積を増やして次元解析の信頼度を高めるとともに、空気混入のメカニズムを考慮した実験、解析も考えていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Jain S. C. and Kennedy J. F. : Vortex Flow Dropstructures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District Inline Storage System, Rep. 264, Iowa Institute of Hydraulic Research, 1983.
- 2) Kennedy J. F., Jain S. C. and Quinones R. R. : Helicoidal-Ramp Dropshaft, J. Hydr. Eng. ASCE 114 (3); 1988, pp. 315-325.
- 3) Jain S. C., Paez D. and Kennedy J. F. : Air Entrainment in Helicoidal-Ramp Drop Structures, Fifth International Conference on Urban Storm Drainage, 1990, pp. 963-968.
- 4) 戸田圭一・井上和也・今本博健・江尻哲雄：狭窄部を有する渦流式立坑の水理特性について，水工学論文集第40巻，1996，pp. 655-660.
- 5) 大阪府土木部都市河川課・大阪府寝屋川水系改修工営所・(株)ニュージェック：寝屋川北部地下放水路取水減勢施設水理模型実験総括報告書，1993.
- 6) Yoshioka T., Matsuda S. and Nagai T. : Flexible Energy Dissipator for High Head Conditions, Double Core Unit Model, Third International Conference on Urban Storm Drainage, 1984, pp.

157-166.

- 7) Jain S.C. : Free-Surface Swirling Flows in Vertical Dropshaft, J. Hydr. Eng. ASCE 113(10), 1987, pp. 1277-1289.
- 8) Jain S.C. : Tangential Vortex-Inlet, J. Hydr. Eng. ASCE 110(12), 1984, pp. 1693-1699.
- 9) 東京都第三建設事務所・日本工営株式会社：神田川調節池水理模型実験調査概要報告書，1988.
- 10) 永井秀樹・玉井信行・徐海州：案内板付高落差立坑の水理実験，第50回土木学会年次学術講演会概要集，2-A，1995，pp. 300-301.
- 11) (財)国土開発技術研究センター：地下河川流入施設基礎検討業務報告書，1993.