

狭窄部を有する渦流式立坑の水理特性について

On Hydraulic Property of Vortex Flow Dropshaft with Contraction

戸田圭一*・井上和也**・今本博健***・江尻哲雄****

By Keiichi TODA, Kazuya INOUE, Hirotake IMAMOTO and Tetsuo EJIRI

Hydraulic characteristics of vortex flow dropshaft with contraction which is aimed to deal with energy dissipation and deaeration adequately are treated. Through the experiment, it is clarified that this structure has the effect of diminishing air entrainment. Next, free surface swirling flows passed through contraction are modelled and analyzed. The swirling flows are governed by the two nondimensional numbers, the circulation number and the Froude number. Some results of practical use are also presented.

Keywords : vortex flow, drop structures, air entrainment

1. 緒 言

大都市部で、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が策定されつつあるが、地下河川が大深度の場合、地表河川あるいは下水道からの取水地点の取水減勢施設設計における技術上の問題は、次の3点に集約される。

- 1) 適切な減勢効果と構造物としての安全性：人工的に水脈を高い位置から落下させるため、落下底付近には落差（ときに40m以上）相当の位置エネルギーに見合う衝撃が加わり構造物の損傷や騒音、振動等が懸念される。よって適切な減勢効果を得るとともに、構造物としての安全性、安定性を備えていることが重要である。
- 2) 空気混入の防止：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、取水地点からの混入空気は、疎通能を低下させ、地下河川下流端のポンプの効率の低下を招く。また、混入空気は地下河川中で合体しエアだまりとなり、圧縮されて調節池や立坑から吹き出す恐れがある。従って空気混入を極力抑止する形状を見出す必要がある。
- 3) 形状のコンパクト化：稠密化した都市域では、取水減勢施設を設置するスペースの確保にも困難を極めることが多々あり、少しでも平面積が小さくてすむコンパクトなものが求められている。

筆者らは従来より、形状がシンプルでしかもコンパクトな渦流式立坑に着目して、その水理機能や設計法に関して研究を行ってきている。渦流式立坑は、呑み口部で渦流を発生させ、遠心力を効かせて壁面沿いの流れを生じさせ、壁面の摩擦によりエネルギーを減勢させようとするものであり、高落差の処理に効果があることが知られている¹⁾。しかしながら、従来より提唱されている標準タイプでは、減勢池へ流入する際に落下流束が立坑面積以上に拡がらないため、流量増加時に流束の集中が見られ、減勢池に流入する際にある程度の空気混入は避けられない。また、壁面の摩擦効果は鉛直流速成分の加速を抑制する程度のものであり、多大なエネルギー逸散を生じさせるものではない。そこで今回、渦流式立坑の改善策として、主として空気

* 正会員 Ph.D., 京都大学助教授 防災研究所（〒611 宇治市五ヶ庄）

** 正会員 工博, 京都大学教授 防災研究所（同 上）

*** 正会員 工博, 京都大学教授 防災研究所（〒612 京都市伏見区横大路下三栖）

**** 正会員 大阪府土木部河川課都市河川室長（〒540 大阪市中央区大手前 2-1-22）

混入の低減を目的として立坑下端部に狭窄部を設置する案を考えてみた。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、混入空気濃度の低減に寄与するものと考えられる。さらに、狭窄部を通過した後の流れをモデル化し、流れの水力特性を解析してみる。

2. 狭窄部を有する渦流式立坑の水力実験

2.1 実験ケースおよび実験方法

図-1は用いた実験装置であり、すべてアクリルで製作されている。狭窄部の減勢効果を検討するにあたっては、流量 Q 、落差 H に対して立坑径 D 、狭窄部開口直径 ΔD 、および設置高さ H' を種々変化させる必要がある。また流れの拡がりや混入空気特性と関連して、減勢池の平面積（直径 D_1 ）も重要な要因となる。形状パラメーターを系統的に変化させていくと実験ケース数が膨大となるので、ここでは D と H' は一定とし、 ΔD と D_1 を変化させた。なお、 D は、狭窄部が設置してあることを考慮して、 Q に対して幾分余裕をみて $D/(Q_0^2/g)^{1/5}=1.7$ の関係を用いた。ここに g は重力加速度、 Q_0 は最大流量である。また H' については図のように狭窄部を立坑の終端に設置し、 $H'=30\text{ mm}$ とした。

実施した実験ケースを表-1に示してある。実験では流量を2種類変化させた。また図中に示す2種類の下流端水位を設定し、連絡水路が管路流となる水位をHWL、開水路流となる水位をLWLと便宜上名付けた。実験では流況を目視で観察するとともに、HWLの水位に対しては、連絡水路下流端に設置した風船を用いて空気濃度を測定した。

2.2 実験結果

図-2に流況のスケッチ図を示している。流況の定性的な特徴について言えば、狭窄部の設置により狭窄部上方には

表-1 実験ケース

ケース No.	立坑直径 $D(\text{cm})$	狭窄部開口径 $\Delta D(\text{cm})$	$\Delta D/D$	減勢池直径 $D_1(\text{cm})$	D_1/D
A-111	24.0	16.8	0.70	40.0	1.67
A-121	"	20.4	0.85	"	"
A-131	"	24.0	1.00	"	"
A-112	24.0	16.8	0.70	65.0	2.71
A-122	"	20.4	0.85	"	"
A-132	"	24.0	1.00	"	"
A-142	"	15.6	0.65	"	"
A-152	"	18.0	0.75	"	"
A-113	24.0	16.8	0.70	52.5	2.18
A-123	"	20.4	0.85	"	"
A-133	"	24.0	1.00	"	"

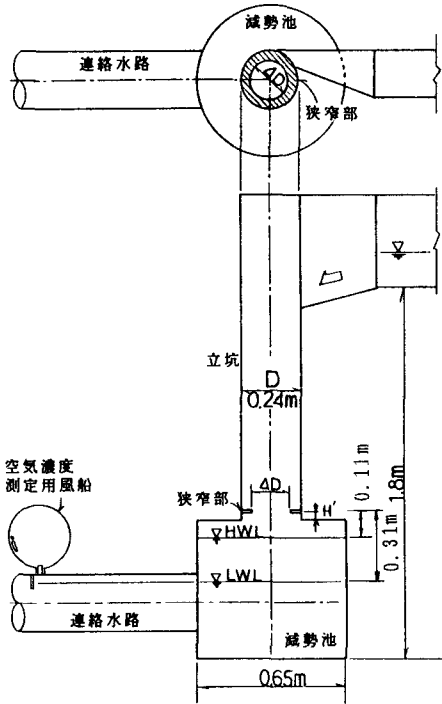


図-1 実験装置

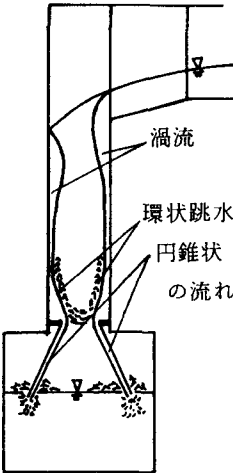


図-2 流況模式図

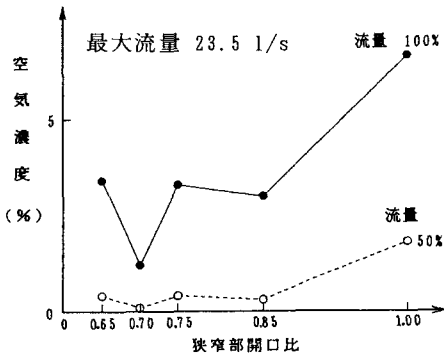


図-3 空気濃度の変化特性(1)

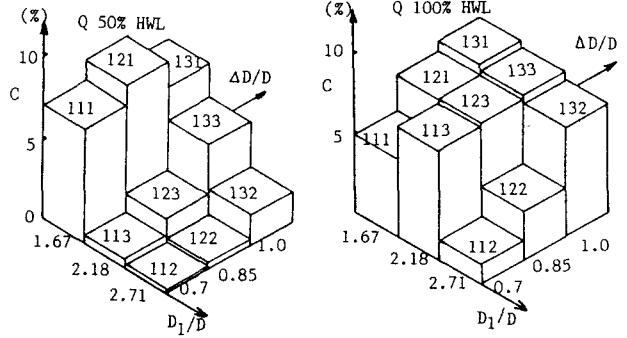


図-4 空気濃度の変化特性(2)

回転流が生じ、その流速の水平成分が大きいのが特徴であった。狭窄部を通過した流れは回転しながら円錐状に拡がり、減勢池に落下していったが、その際に、減勢池の平面積に余裕があると落下水脈は程良く分散して池内の流況は穏やかであったが、平面積が小さいと落下水脈が池の側壁に衝突したり、あるいは池全体が激しく乱れたりした。また、流量を2種類（最大流量23.5 l/sとその50%流量）変化させたが、池内での落下水脈の拡がり幅は概ね同程度であった。次に空気濃度の定量的な特徴について述べる。まず $D_1 = 0.65\text{ m}$ とし、 $\Delta D/D$ を変化させたときの混入空気濃度の変化を表したものが図-3である。図より、 $\Delta D/D = 0.7$ のときに極小値をとることが確認される。 $\Delta D/D$ が小さすぎると、狭窄部でのエアコアの面積が減少し、立坑から空気が逸脱しにくくなると考えられる。次に、 $\Delta D/D$ と D_1/D を同時に変化させたときの混入空気濃度の変化を表したものが図-4である。図より $\Delta D/D$ と同程度に D_1/D も影響しており、減勢池の平面積あるいは容積が重要となることがわかる。

上記の結果を次元解析の手法を用いて整理してみた。地下河川に混入する空気量 Q_a に関する諸量を書き出すと、以下のとおりである。

$$F(Q_a, Q, D, \Delta D, g, H, V_e) = 0 \quad (1)$$

ここに、 V_e は有効減勢池容積、すなわち減勢池容積の中で減勢に効果を及ぼす正味の体積である。次元解析より混入空気濃度 C は、

$$C = \frac{Q_a}{Q} = f\left(\frac{D}{(Q^2/g)^{1/5}}, \frac{H}{D}, \frac{\Delta D}{D}, \frac{V_e}{(Q^2/g)^{3/5}}\right) \quad (2)$$

と表すことができる。今回の実験では H/D は一定としているので、結局実験値は、

$$C = \frac{Q_a}{Q} = f\left(\frac{D}{(Q^2/g)^{1/5}}, \frac{\Delta D}{D}, \frac{V_e}{(Q^2/g)^{3/5}}\right) \quad (3)$$

なる形で整理される。 V_e を連絡水路中心軸より上方の水が満たされている部分とし、横軸に無次元有効減勢池容積 V'_e ((3)式の右辺の第3項)、縦軸に混入空気濃度 C をとり、実験結果をプロットしたものが図-5である。図より、 $V'_e < 30$ のとき、 C はほぼ5~8%の値をとり、点群は固まっているが、 $V'_e \geq 30$ になると、 C は片対数紙上で直線的にすなわち指数関数的に減少してくる。また、そのときの低減の度合いは狭窄部開口比により決定される。上記の結果から、適切な狭窄開口比の狭窄部を設置し、かつ流量に見合った

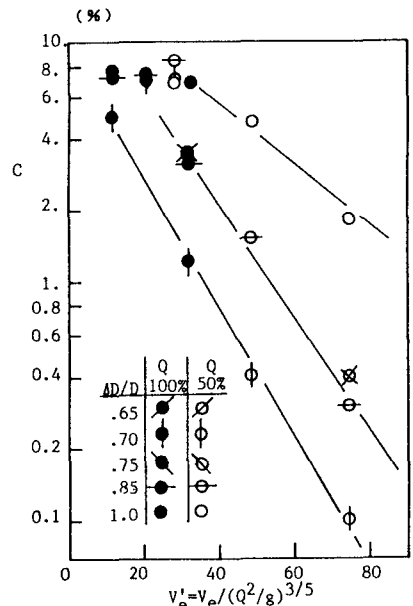


図-5 空気濃度の変化特性(3)

有効な減勢池容積を確保することにより、渦流式立坑の地下河川への空気混入の軽減が可能であることが明らかになった。

3. 狭窄部を通過した流れの水力特性

狭窄部を通過した後の流れは、円錐状に拡がりながら落下していく。流れが程良く分散されて減勢池に貫入するときには、減勢池の流況は平穏になり、混入空気濃度も軽減される。実際の設計にあたっては、流れの拡がりに伴う減勢効果や必要とされる最小限の平面積を把握することが重要であり、落下距離と鉛直流速成分の関係や、落下距離と流れの拡がり（鉛直中心軸からの半径）の関係を捉えておくことは意義がある。よって、ここでは狭窄部を通過した流れのモデル化を行い、モデルより得られた数値解と実験結果を比較することにより、モデルの妥当性を検討するとともに、モデルを用いて流れ場の一般化表示を行い、上述した水力特性の整理を行うことにする。

狭窄部を通過した流れをモデル化するにあたっては、以下のような仮定を設けることとする。

- 1) 流れは軸対称である。
 - 2) 接線方向の流速 u 、鉛直方向の流速 v 、および半径方向の流速 w は断面にわたって一様であり、鉛直方向距離 z のみの関数である。
 - 3) 円錐状に拡がる流れの外径、内径ともに z のみの関数である。
- これらの仮定のもとで、流れの場は以下に示す5式でモデル化される（図-6参照）。

連続式 $Q = \pi(r_2^2 - r_1^2)v$ (4)

鉛直方向の運動量方程式 $\frac{d}{dz} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r v^2 dr = g\pi(r_2^2 - r_1^2)$ (5)

角運動量方程式 $\frac{d}{dz} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 u v dr = 0$ (6)

半径方向の運動量方程式 $v \frac{dw}{dz} = \frac{2u^2}{r_1 + r_2}$ (7)

半径方向の流速の式 $v \frac{d}{dz} \frac{r_1 + r_2}{2} = w$ (8)

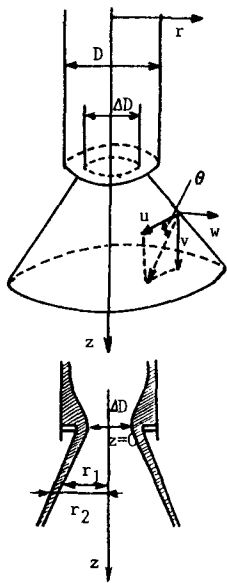


図-6 座標系

ここに、 r_1, r_2 : 円錐状の流れの内半径、外半径である。

(8)式を(7)式に代入し、(4)、(5)式を用いて若干の式変形を行うと、次式を得る。

$$g \frac{dR}{dz} + v^2 \frac{d^2 R}{dz^2} = \frac{u^2}{R}, \quad R = \frac{r_1 + r_2}{2} \tag{9}$$

表-2 実験結果と計算結果の比較

よって、(4)、(5)、(6)および(9)式より、未知数は r_1, r_2, u, v の4個となり、 $z = 0$ すなわち狭窄部での初期値を与えれば、常微分方程式の数値解を求めることができる。

ホットフィルム流速計により計測された流速データをもとに、狭窄部から減勢地の水面までの鉛直距離に対する流れの拡がり幅 r_2 を実験結果と計算結果で比較してみたものの一例が表-2である。A-132については、立坑終端部の実測流速値を初期値として与えた。A-112

ケース No	z = 27 cm		備 考
	実験値 r ₂ (cm)	計算値 r ₂ (cm)	
A-112	27	25~28	Q=23.5 l/s (10)式を採用
A-132	15	14	

については、流速を計測できた地点が狭窄部の直上流部の立坑壁面沿いであり、厳密に狭窄部での流速を計測できなかったため、Jain²⁾の提案している遷移部の渦流流れの限界流条件に準じた次式：

$$\tan \theta = \frac{v}{u} = \left[\frac{\pi r^2 A_c}{2(a - A_c)^2} \right]^{1/2}, \quad r = \frac{2(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{3(r_1 + r_2)} \tag{10}$$

に基づいて、計測値との対応を考慮した限界流速ベクトル（限界流速の絶対値と入射角 θ ）を数種類、初期値として与える方法をとった。なお、上式中の A_c は狭窄部の流水断面積、 a は狭窄部の断面積である。表より、計算結果は実験結果を概ね再現しているとみなすことができる。

狭窄部の直径 ΔD および g を用いて、 $r_1^* = r_1/\Delta D$, $r_2^* = r_2/\Delta D$, $u^* = u/\sqrt{g\Delta D}$, $v^* = v/\sqrt{g\Delta D}$, $\xi = z/\Delta D$ とし、また $G = Q/(\pi\sqrt{g\Delta D^5})$ を導入して整理すると、(4), (5), (6)および(9)の4式は以下のように無次元化される。

$$(r_2^{*2} - r_1^{*2})v^* = G \tag{11}$$

$$\frac{d}{d\xi} \frac{1}{r_2^{*2} - r_1^{*2}} = \frac{1}{G^2}(r_2^{*2} - r_1^{*2}) \tag{12}$$

$$\frac{d}{d\xi} \frac{r_1^{*2} + r_1^*r_2^* + r_2^{*2}}{r_1^* + r_2^*} u^* = 0 \tag{13}$$

$$\frac{dR^*}{d\xi} + v^{*2} \frac{d^2 R^*}{d\xi^2} = \frac{u^{*2}}{R^*}, \quad R^* = \frac{r_1^* + r_2^*}{2} \tag{14}$$

なお G は、狭窄部を満杯で通過する鉛直方向流れのフルード数に相当する意味を持つ無次元量である。また狭窄部での循環 Ω_0 は、 $\Omega_0 = u_0 r_0$ (r_0 は(10)式の r と同等)と表され、無次元化して $\Omega_0^* = u_0^* r_0^*$ となる。（下添字0は初期値をあらわす。）初期値については $r_{20}^* = 0.5$ であり、 Ω_0^* と入射角 θ ($\tan \theta = v_0^*/u_0^*$) および G の3個のパラメーターがわかれば u_0^* , v_0^* , r_{10}^* が定まり、流れの場を解くことが可能となる。さらに狭窄部で十分絞り込みがなされ限界流状態が生じるときには、(10)式を無次元化した関係式から θ は Ω_0^* と G により規定され（図-7参照）、対象としている流れ場は、結局、 Ω_0^* と G により決定されることとなる。

G と Ω_0^* をパラメーターとして変化させた際の、 r_2^*/r_{20}^* , v^*/v_0^* の ξ に伴う変化特性を表したものが図-8および図-9である。図より、 r_2^*/r_{20}^* は G に比較して Ω_0^* の影響をより強く受ける傾向があることがうかがえる。これに対して v^*/v_0^* は、 Ω_0^* と G の影響を同程度に受けているのがわかる。次に、 Ω_0^* , G と $\Delta D/D$ の関係を、実験結果をもとに整理したものが図-10である。 G および $\Delta D/D$ は既知であるので、狭窄部における限界流の発生を仮定して、実験結果の流れの拡がり幅から、 Ω_0^* を推定した。図より、 Ω_0^* と G の関係は、パラメーター $\Delta D/D$ の変化に対してほぼ平行に移動しているのがわかる。実際の設計にあたっては、狭窄部の絞り込みで

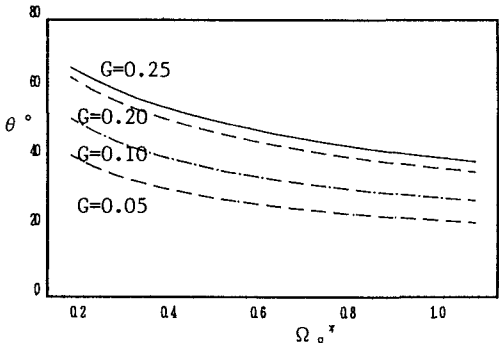


図-7 θ と Ω_0^* , G との関係

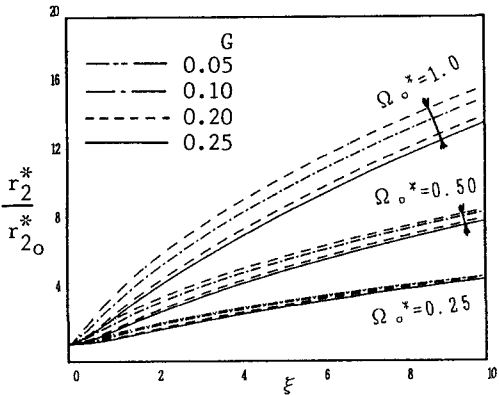


図-8 流れの拡がり幅の変化特性

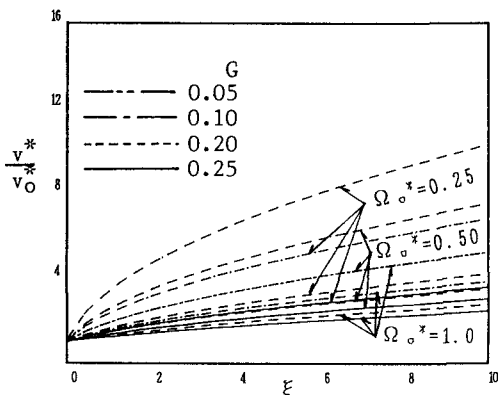


図-9 流速の鉛直分布の変化特性

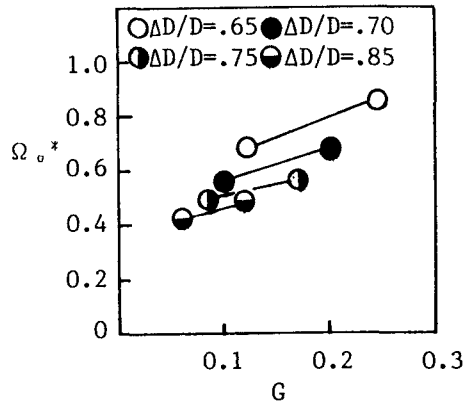


図-10 狭窄部と Ω_0^* , G との関係

Ω_0^* の値が増加した際に、平面積の縮小を考慮して、流れが拡がりすぎない落下距離で減勢池の水面に貫入させることが重要である。

4. 結 論

本研究を通して得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 適切な狭窄部開口比 ($\Delta D/D = 0.7$) の狭窄部を設置し、かつ流量に見合った減勢池容積を確保することにより、渦流式立坑タイプの、地下河川への空気混入の軽減が可能となる。
- 狭窄部を通過した後、円錐状に拡がりながら落下していく流れは、(4)~(8)の5式によりモデル化できる。また、狭窄部で渦流流れの限界状態が生じるとき、流れ場の特性は、無次元量 Ω_0^* と G により規定される。
- 実際の設計にあたっては、狭窄部開口比と同様に狭窄部から減勢池水面までの距離も重要な条件となる。

なお本研究の一部は、大阪府の寝屋川総合治水計画の中の地下河川事業の一環として実施したものであり、ご配慮頂いた関係者各位に謝意を表します。また、ご協力頂いた(株)ニュージェックの大本雄二氏に謝意を表します。

参考文献

- 戸田圭一・井上和也：渦流式立坑の水理特性について，水工学論文集第39巻，pp.583-588，1995.
- Jain, S. C.: Free-surface swirling flows in vertical dropshaft, J. Hydr. Eng., ASCE113(10), 1987.