

渦流式立坑の水理特性について

On hydraulic property of vortex
flow dropshaft

*

**

戸田圭一・井上和也

By Kei-ichi TODA and Kazuya INOUE

Hydraulic characteristics of vertical dropshaft with tangential vortex-inlet are treated. First, an analytical solution of a free-surface swirling flows in vertical dropshaft is examined through the comparison of experimental results. With the analytical solution, the relation among momentum flux, head, and discharge is discussed. This structure is certified to be effective to high drop disposal. Also, through hydraulic model experiments, suitable volume of a stilling chamber connected to a dropshaft is proposed as a function of head and discharge.

Keywords: vortex flow, dropshaft, hydraulic design

1. はじめに

近年都市化が飽和状態である都市部では、流出形態の変化による流出量の増大に対し、河道拡幅による河道改修方式に代わり、地下空間を利用した地下河川計画が策定されつつある。地下河川が大深度の場合には、(地上)河川からの取水地点において高落差の流水を適切に減勢させて地下河川に導く取水減勢施設を設置する必要がある。

接線型の呑み口を有する渦流式減勢立坑は、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、から欧米で多くの施工実績があり、我が国でも都市部の地下河川計画において最近注目されつつある。しかしながら実際の設計にあたっては、所要の減勢効果を得るための構造諸元と水理量の関係が明確でないため、既実施の設計を踏襲するか、あるいは水理模型実験で逐一形状を決定しているのが実状であり、合理的な設計を考える域には達していないと考えられる。

以上の事由により、本論文は、立坑内の流れの解析的アプローチと水理実験的アプローチを通して、地下河川に連結する渦流式減勢立坑の減勢効果について検討を加えたものであり、合理的な設計指針の作成を念頭においたものである。

* 正会員 Ph.D. 河川環境管理財団河川環境総合研究所大阪研究所 主任研究員
(〒540 大阪市中央区大手前1-6-4)

** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授
(〒611 宇治市五ヶ庄)

2. 渦流式減勢立坑の特徴と従来の研究

接線型の呑み口を有する渦流式減勢立坑は、図-1に示すように円形断面のシャフトの呑み口部で強制的に渦を発生させ、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る。また、一旦立坑内にとり込まれた空気に対して、シャフト中心を軸とした空気柱（エアコア）が空気孔の役目を果たす機能も兼ね備えている。

渦流式の立坑はかなり以前から欧米で採用されてきているが、呑み口部の形状は複雑なものが多かった。呑み口部の形状としてシンプルな接線型を提案し、系統的な実験を実施して渦流式の効果を確認したのはJain and Kennedy¹⁾である。彼らは水理模型実験を通してミルウオーキーの下水道部の落とし込み部の検討を行い、接線型の呑み口部を有する渦流式減勢立坑を提案した。また、接線型の呑み口部の形状や、最大流量と立坑径との関係についても実験を通して最良案を提案している。その後、Jain²⁾³⁾は、より減勢を高める方策として、立坑内に螺旋のへりを付設したり、螺旋のへりの角度を変化させたりした実験を実施し、その効果を確認しているが、逆に形状は複雑さを増している。

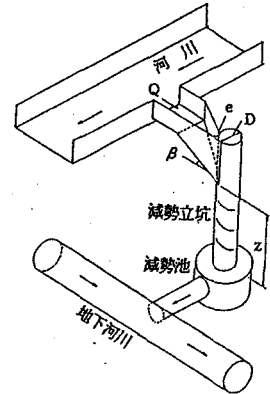


図-1 ドロップシャフト概念図

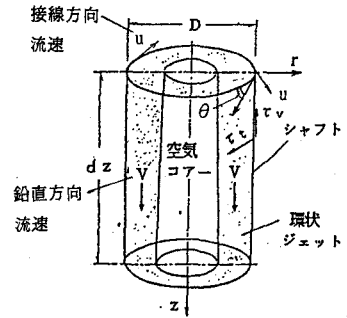


図-2 コントロールボリューム概念図

3. 立坑内の流れのモデル化と妥当性の検討

Jain⁴⁾ は減勢立坑内の流れをモデル化し、解析解を導いている。彼は、①流れは軸対称である、②接線方向の流速分布は $u_r = \Omega r$ で与えられる (u : 接線方向の流速、 r : 立坑中心軸からの距離、 Ω : 循環)、③軸方向の流速は断面にわたって一様である、④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 (図-2 参照)。

$$\text{連続式} \quad Q = AV \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{鉛直方向の運動量方程式} \quad \frac{d}{dz} \left(QV + \frac{P}{\rho} \right) = gA - \frac{\pi D \tau_v}{\rho} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{角運動量方程式} \quad \frac{d}{dz} (Q\Omega) = -\frac{\pi D^2 \tau_t}{2\rho} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 Q : 流量、 A : 流水断面積、 V : 鉛直方向の平均流速、 z : 軸方向距離、 P : 圧力、 ρ : 流水の密度、 g : 重力加速度、 D : 立坑の直径、 e : 呑み口部の絞り込みの幅、 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。Jain は摩擦力を Darcy-Weisbach の式形で評価し、(2)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)(2)(3)式を無次元化した後、以下の解析解を得ている。

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

$$\phi(x) = \frac{3}{2} \ln \frac{1 - (1 - \hat{\alpha} x^2)^{1/2}}{\hat{\alpha}^{1/2} x} + \sqrt{3} \arctan \frac{\sqrt{3} (1 - \hat{\alpha} x^2)^{1/2}}{(1 - \hat{\alpha} x^2)^{1/2} + 2}, \quad \hat{\alpha} = \frac{1}{R_0^2} - \frac{\lambda}{2} F (1 + \omega_0^2)^{3/2}$$

$$\frac{1}{R^2} - \frac{1}{R_0^2} = \frac{\lambda}{2} F [(1 + \omega^2)^{3/2} - (1 + \omega_0^2)^{3/2}] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$f = \frac{1}{R\omega} \dots\dots\dots(6)$$

ここに $\xi = z/D$, $\omega = \tan \theta$, $F = (Q/a)^2 / (gD)$, $f = A/a$, $R = \sqrt{\pi a Q^2 / Q^2}$ 。
 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「。」は初期値（上方端の値）を表している。(4)(5)(6)より ξ に対して f, R, ω が定まり、次いで $u(r, z), V(z)$ を求めることができる。図-3は筆者らがアクリル製の減勢立坑の模型を用いて実施した実験において、計測された流速ベクトルと、呑み口部での流速の実験値を初期値として得られた解析解の流速ベクトルとを比較したものの一例である。図より、解析解は実験値を概ね再現していることが確認され、減勢効果の検討を行うにあたって Jain の提案した解析解の一つの解析手法として用いることの妥当性が示されたと考えられる。

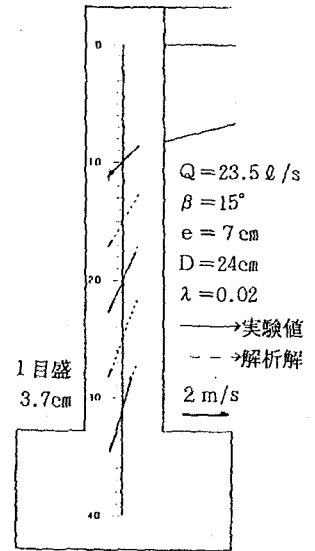


図-3 実験値と解析解の比較
 (立坑壁面の流速ベクトル)

4. 渦流式減勢立坑の減勢効果の検討

4. 1 落差、流量と減勢効果との関係

Jain の解析解を用いて落差と流量を変化させた際の鉛直方向の運動量の変化特性を整理し、減勢効果との関係を捉えることとする。

同一の立坑径に対して流量が変化すれば、流況も変化し減勢効果も変わる。予備的に実施した実験結果より、小流量の際には立坑内できれいな螺旋流が生じず壁面づたいに流水は鉛直方向に流下するが、流量の増加に伴い螺旋流が安定してくる。しかしながら、鉛直方向の運動量ならびに減勢池の乱れ状況を見ると、流量の増加に対してそれらは増加する傾向にあり、結局、同一の立坑径については、立坑径自身が中央に十分な空気柱を確保しながら安定した流況を得ることができる最大の流量で減勢効果を議論しておけば十分であることがわかる。よって、ここでは最大流量 Q と立坑径 D について、上記の理由により、Jain and Kennedy が最良案として提案している $D/(Q^2/g)^{1/4} = 1.16$ に沿って変化させることとし、接線型の呑み口形状も、同じく彼らが提案している $e/D=0.25, \beta=27.5^\circ$ を採用することとした。解析解の初期値である、呑み口部の立坑内への流入速度ベクトルはJain⁹⁾の提案式で与えている。なお、解析解においては、初期値の流速ベクトルを変化させても、落下距離の増加につれて鉛直運動量は初期値に依存しなくなる傾向にある。

流量と落差が変化した際の鉛直運動量の変化を、いわゆる等鉛直運動量曲線で表現したものが図-4である。

図より、等鉛直運動量曲線は緩やかな右下がりの特徴を示しており、特に落差が25mを越えると、落差の増大に対しても鉛直運動量はほとんど変化しなくなる傾向にある。一方、同一落差においては、流量の増減に対して鉛直運動量は敏感に変化する。上述した特性より、渦流式減勢立坑は、高落差を処理する上で優れた立坑形状であることが認められる。高落差の際でも流水が壁面沿いを流れ、壁面の摩擦力を受けることにより、鉛直方向の速度成

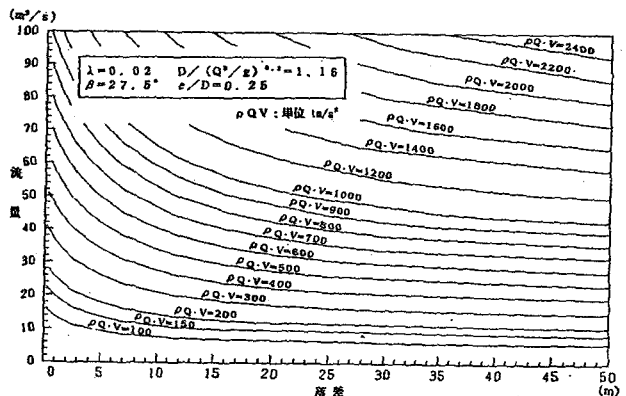


図-4 等鉛直運動量曲線

分が重力により加速されるのを防ぐことができるからである。Jain and Kennedy が行ったミルウオーキー下水道の検討においても、彼らは複数の立坑について最大流量を対象として立坑径を定め、落差（すべてのものについて40m以上）については特に考慮していない。一方、流量の変化に対しては、流量の増減に見合っただけの鉛直運動量の変化が現れるので、大流量に対して一定の減勢効果を確保するためには、立坑の下方に相当量の容積の減勢池を設ける必要がある、と考えられる。

4. 2 減勢池の大きさと減勢効果との関係

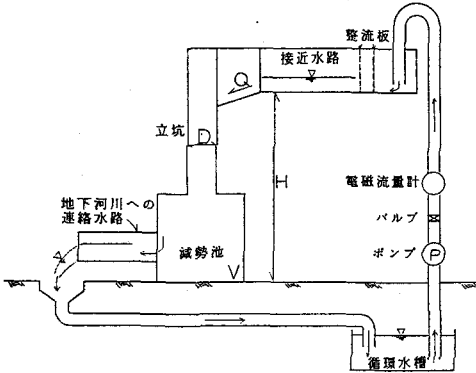
前述したように、大流量に対しては、立坑径自身は $Q^{1/4}$ に比例して増加するだけであるが、適切な減勢効果を得るには、流量および落差に規定される容積の減勢池を必要とする。今、減勢池の容積 V 。に影響を及ぼす物理量、すなわち流量 Q 、落差 H 、重力加速度 g との関係を考える。4個の物理量を無次元化して整理すると、

$$V_0/H^3=f(Q/\sqrt{gH^{3/2}}) \quad \cdots\cdots\cdots(7)$$

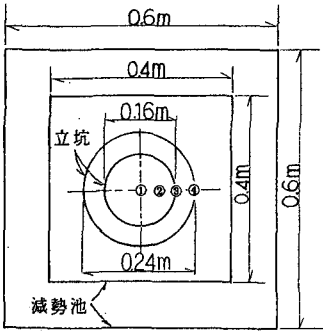
となる。(7)の関係を具体に求めるために水理模型実験を実施した。図一5のようなアクリル製の模型で接近水路、減勢立坑、減勢池（立方体）および連絡水路を作製した。先ず、立坑径 $D=0.24\text{m}$ 、落差 $H=1.8\text{m}$ 、最大流量 $Q=30.7\text{l/s}$ （縮尺1/25対応で $D=6\text{m}$ 、 $H=45\text{m}$ 、 $Q=96\text{m}^3/\text{s}$ に相当）の条件に対して、減勢池の容積を種々変えて流況の安定性の観察ならびに底面の圧力変動を測定した。なお、ここでは、呑み口部の形状を変化させた実験結果を基に、立坑内の中央で空気柱が余裕をもって確保されること、ならびに流量の変化により立坑内の流況特性が大きく変化しないことを考慮して、最大流量 Q と立坑 D の関係は、 $D/(Q^4/g)^{1/5}=1.53$ を用いている。無次元化された圧力変動率 γ は、図一6に示すような底面の計測点で測定された圧力 p に対し、

$$\gamma=(1/n)\sum_{i=1}^n((p_{\max}-p_{\min})/\bar{p}_i) \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

なる式で算出している。ここに、 n :測定点数、 $p_{\max}$: p の最大値、 $p_{\min}$: p の最小値、 $\bar{p}$: p の時間平均値である。その結果、圧力変動率がおよそ0.1程度以下の値を示すときに安定した減勢流況が得られたことより、この値を最小限必要な減勢池容積の基準値とする。次に種々、立坑径、落差、減勢池容量および流量を変化させて実験を実施した。実験ケースは表一1に示したとおりである。なお、表中の括弧内の値は、模型を縮尺1/25とみなして



図一5 実験装置模式図



図一6 圧力測定位置（平面図）

表一1 実験ケース

ケース	立坑径D	減勢池の大きさV。	落差H	最大流量 Q	備考
V5-3b	0.24m (6m)	0.6m×0.6m×0.6m (15m×15m×15m)	1.8m (45m)	30.7 l/s (96m³/s)	
V5-4d	0.16m (4m)	0.4m×0.4m×0.4m (10m×10m×10m)	1.6m (40m)	11.2 l/s (35m³/s)	立坑径→小 減勢池→小
V5-5d	0.16m (4m)	0.4m×0.4m×0.4m (10m×10m×10m)	1.12m (28m)	11.2 l/s (35m³/s)	立坑径→小 落差 →小 減勢池→小

実物値に換算した値である。縦軸に V_0/H^3 、横軸に $Q/\sqrt{gH^{5/2}}$ をとり、実験結果をプロットし、各ケースの圧力変動率を合わせて記載したものが図-7である。同図には、参考までに東京都神田川の調節池の模型実験結果もあわせてプロットしてある。圧力変動率が0.1程度となる包絡線を結ぶと、

$$V_0/H^3 = \alpha \cdot Q/(\sqrt{gH^{5/2}}), \quad \alpha = 12 \sim 17 \quad \cdots \cdots (9)$$

なる関係が得られる。これより(9)を用いれば、 Q と H の条件から最小限必要な減勢池の容積 V_0 を算出することが可能となる。(9)より、 V_0 は Q に比例することとなり、前節で述べた知見と一致する。

4. 3 立坑下端の狭窄部と減勢効果との関係

減勢効果を高めること、ならびに減勢池の容積を軽減する一つの試案として、立坑下方に狭窄部を設けてみた。立坑径0.24mの内側に平板のリングを設置し、開口径の大きさを変化させた実験を実施した。用いた模型装置は図-8のとおりである。実験結果を見ると、狭窄部により環状跳水が狭窄部の上端で発生し、エネルギーを逸散させるとともに、狭窄部を通過した流れは円錐状に拡がりながら減勢池に落下していく。狭窄部開口比（ $r = \Delta D/D$ 、 ΔD は狭窄部の開口直径、 D は立坑径）を変化させた際の、連絡水路下流端で測定された混入空気濃度の特性を示したものが図-9である。混入空気濃度の指標も減勢の度合いを相対的に示すものと推察されるが、図-9より、 $r = 0.70$ 付近で極小値を示す傾向がうかがわれる。流量、立坑径、ならびに狭窄部開口比を適切に選定すれば、狭窄部の設定は減勢効果を高め、ひいては減勢池の容積を減少に導く可能性があることが示唆される。

5. 今後の課題

主として地下河川系が開水路の場合の渦流式立坑の減勢効果と、水理量、構造諸元との関係を把握してきたが、さらに検討すべき内容も多い。課題の一部として例えば次のようなことが挙げられる。

(a) 減勢池の形状の減勢効果に及ぼす影響検討

減勢池の必要容量を求めるにあたっては、一般性を有し、かつ簡単な形状として立方体を考えたが、実際には施工性の有利さ等を勘案して円筒形が用いられることが多い。また、深さと平面積の関係等も落水水脈

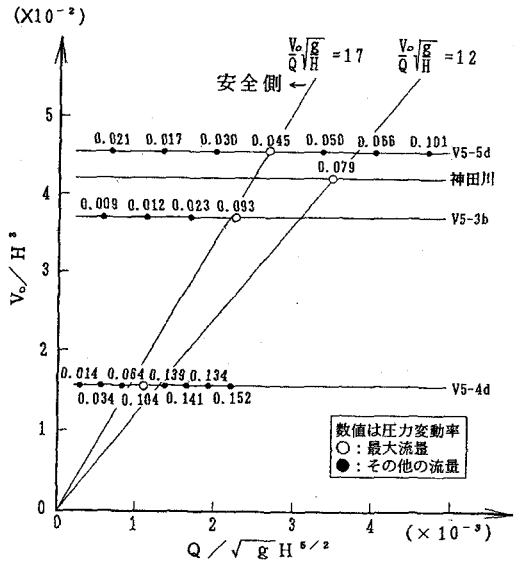


図-7 圧力変動をパラメータとした V_0/H^3 と $Q/\sqrt{gH^{5/2}}$

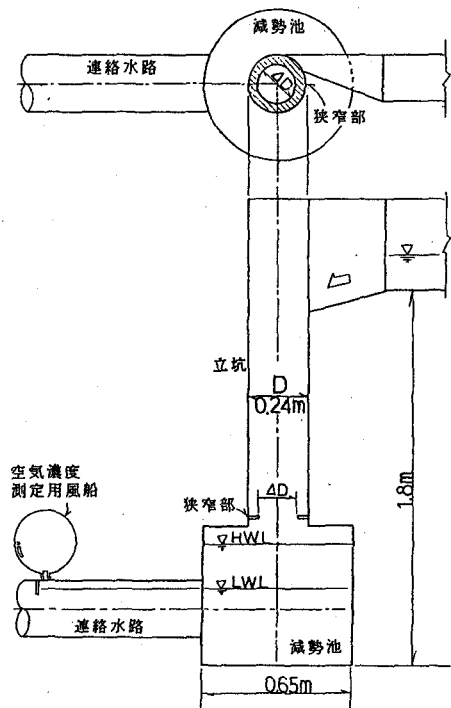


図-8 狭窄型減勢立坑模式図

のウオータークッションの効果と関係してくるものと推察され、減勢池の形状を系統的に変えた実験が必要と考えられる。

また、河川水を立坑から減勢池、連絡水路を経て地下河川に流入させる代替案として、地下河川に直接落とし込み、地下河川と減勢池とを一体化させることが可能となると、より構造がシンプルとなる。この代替案の実験的検討も必要である。

(b) 空気混入の防止策の検討

都市部の地下河川においては、その運用としてポンプによる強制排水を行い、さらにポンプの揚程確保のため、被圧運転を基本とするところがある。このように地下河川が圧力トンネルの場合には、立坑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効率の低下を招くのみならず、逃げ場のない空気は圧縮され空気の逆噴射を引き起こす可能性がある。よって空気混入を極力抑止する形状を見出していく必要がある。

6. おわりに

渦流式立坑に関して、立坑内の流れの解析解及び水理実験を通して、水理量ならびに立坑の形状と減勢効果との関係を検討した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- ①実験値との比較により、渦流式立坑内の流れに関するJain の解析解は妥当なものと考えられる。
- ②渦流式の立坑は高落差の処理に効果的である。
- ③大流量の場合には、流量に比例した容積の減勢池を立坑下方に設けた方が安全であり、その必要容量の一つの指標として(9)式が考えられる。

なお狭窄部の減勢効果については、京都大学防災研究所今本博健教授より貴重なご意見を頂いた。また、実験ならびに図表の作成にあたっては大本雄二氏をはじめとする(株) ニュージェックの水理実験所の諸氏にご協力頂いた。記して謝意を表します。

7. 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 Dropshafts,J.Hydr.Eng.ASCE 114(3), 1988.
- (3)Jain,S.C.,Diana P.,and Kennedy J.F.,:Air Entrainment in Helicoidal-Ramp Drop Structures, Fifth International Conference on Urban Storm Drainage, Osaka,Japan,1990.
- (4)Jain,S.C.,:Free-surface swirling flows in vertical dropshaft,J.Hydr.Eng.ASCE 113(10),1987.
- (5)Jain,S.C.,:Tangential vortex-inlet,J.Hydr.Eng.ASCE 110(12),1984.

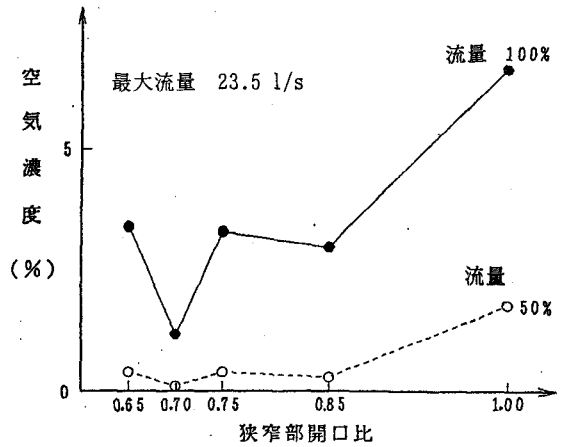


図-9 狭窄部開口比と空気濃度との関係(HWL)