

大深度地下河川の取水流入部の水理設計法

Hydraulic Design of Intake Structures of Deeply Located Underground Tunnel Systems

戸田圭一*・井上和也**

Keiichi TODA, Kazuya INOUE

This paper deals with hydraulic effects of intake structures of underground storage or tunnel systems from the aspect of energy dissipation and entrained air control. First, through the literature reviews, the advantage of vortex flow dropshaft type is confirmed. Next, with the analytical solutions of free-surface swirling flows in vertical dropshaft, the energy dissipation effects of vortex flow dropshaft are examined and some results of practical use are obtained. Also, the relation between the dropshaft shape and air entrainment is studied and the excellence of the helicoidal-ramp dropshaft is clarified.

keywords :vortex flow, drop structures, hydraulic design

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（図-1 参照）．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，地下河川の取水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，減勢効果・混入空気量の抑止効果に及ぼす取水流入施設の形状の影響を評価し，施設設計上の留意点をとりまとめたものである．

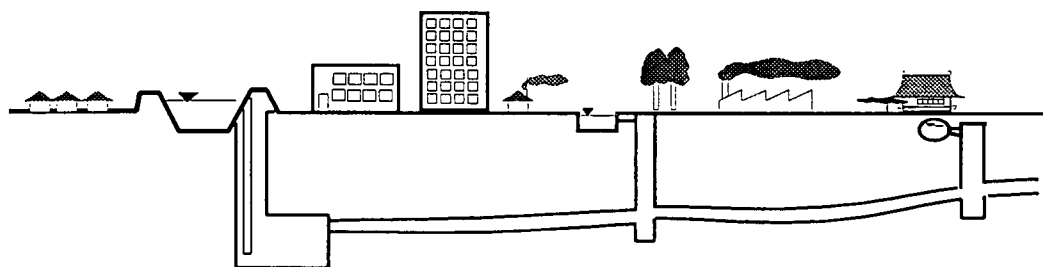


図-1 地下河川概念図

*正会員 Ph.D.，京都大学助教授 防災研究所水災害研究部門

**正会員 工博，京都大学教授 防災研究所水災害研究部門

2. 地下河川の取水流入立坑の形状の分類

取水流入立坑のタイプは大きく3種類に分類される(図-2 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つ目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つ目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混入空気量が少ない。

[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、渦流式の優位を結論づけている。混入空気量に関しては、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(図-3 参照)。Jain and Kennedy²⁾³⁾らは、立坑の内部にらせんの案内条を設置したらせん案内条式立坑を提案している。これは、らせんの案内条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条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、中間部分の案内条を省いたりしたケースも検討されている。また、戸田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ならない。

以上、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、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

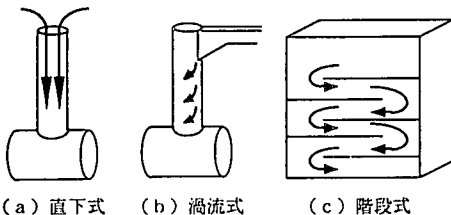


図-2 取水流入施設のタイプ

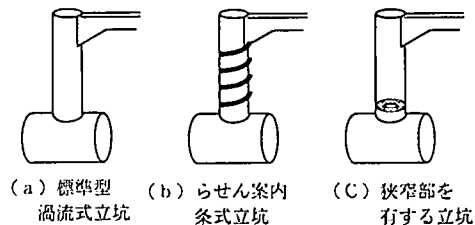


図-3 渦流式立坑のタイプ

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。よって以下では渦流式立坑に焦点を絞り、減勢効果や混入空気量の抑止効果を検討していくこととする。

3. 渦流式立坑の減勢効果

3. 1 流れのモデル化とその解析法

ここでは、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量との関係を整理することとする。

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。(図-4 参照)

連続式

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

運動量方程式

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

角運動量方程式

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

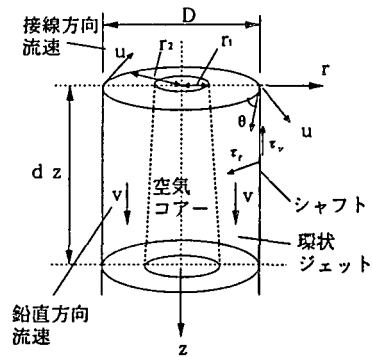


図-4 コントロールボリューム

ここに、 Q :流量、 A :流水断面積、 v :鉛直軸方向の平均流速、 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。

さらに摩擦力を Darcy-Weisbach の式で評価し、(2) 式の左辺中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すると、 u, v, r_1 なる未知数を(1)~(3)の式より求めることができ、立坑内の渦流流れを解くことが可能となる。なお Jain⁷⁾は、接線方向の流速成分は $u_r = \Omega$ (Ω は一定値の循環) で与えられるとの仮定を加えて渦流流れの解析解を得ている。

3. 2 渦流式立坑の形状と減勢効果の関係

(a) 立坑径の大きさと減勢効果との関係

まず、立坑径と流量・落差の関係に注目し、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、流水の有する運動エネルギー、鉛直方向運動量について着目することとし、計算については Jain の解析解を用いることにする。また、初期条件の与え方については呑み口部の形状として接線型を考え(図-5 参照)、Jain⁸⁾が提案した呑み口部の流速分布式

$$v = u \left[\frac{(1-\varepsilon)}{2\varepsilon} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$u = \left(\frac{gQ}{e} \right)^{\frac{1}{3}} (\cos \beta)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{ただし } r = D/2 \text{ の地点}) \quad (5)$$

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

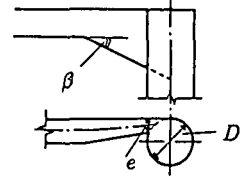


図-5 接線型呑み口部

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、

$$\varepsilon \leq 0.33 \quad (7)$$

の制約がある。

計算例としては、上記の条件を考慮して $e/D=1/4, \beta=27.5^\circ$ とし、この関係を満たす $D/\sqrt[3]{Q^2/g}$ の範囲の中から、 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.0, 1.16, 1.25$ を計算条件として採用した。なお $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.0$ は、 $\varepsilon=0.25$ 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。 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.16$ は、Jain and Kennedy¹⁾ が彼らの実験を通して推奨した値である。また摩擦損失係数は一定で、 $\lambda=0.02$ を用いている。

運動エネルギーと落差、鉛直運動量と落差の関係をそれぞれ、等運動エネルギー線、等鉛直運動量線で図示したものが、図-6 である。

まずこれらの図より、等運動エネルギー線、等鉛直運動量線は右下がりの様相を呈しており、特に等鉛直運動量線は、その勾配も緩やかである。これは、落差が増加して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。すなわち、渦流式立坑が高落差処理に適した形状であることを示している。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る。戸田ら¹⁰⁾は減勢池内の圧力変動に着目し、減勢池の容積、落差、流量を変化させた実験より、減勢にあたって最小限必要な減勢池容積 V_0 と落差 H 、流量 Q について次の関係式を得ている。

$$\frac{V_0}{H^3} = \frac{\alpha Q}{\sqrt{gH^5}}, \quad \alpha = 12 \sim 17 \quad (8)$$

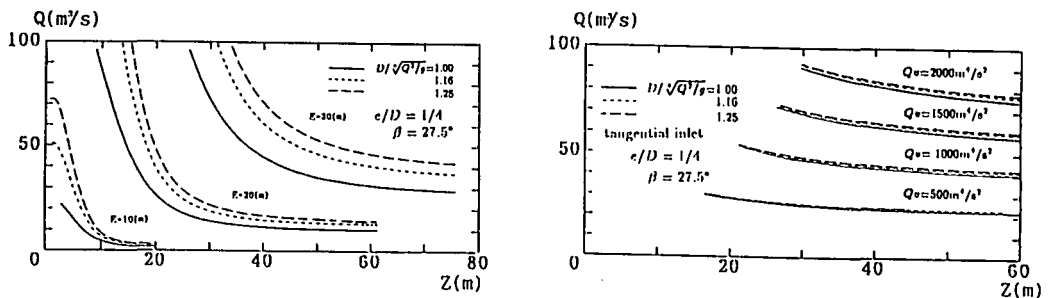


図-6 等運動エネルギー線と等鉛直運動量線

次に立坑径と減勢効果の関係をみると、図より、等運動エネルギー線、等鉛直運動量線とも $D/\sqrt[3]{Q^2/g}$ の値が大きい方が、上方にきている。これは $D/\sqrt[3]{Q^2/g}$ 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。呑み口部の流速分布式の適用範囲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 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.0$ や、 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.16$ 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、今回は紙面の都合上触れられなかったが、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同様の計算より認められる¹¹⁾。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いえよう。

(b) 接線型呑み口部の形状と減勢効果との関係

Jain and Kennedy¹¹⁾は、実験から、最良な接線型の呑み口部の形状 (D :立坑径、 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、 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.16$ 、 $e/D=1/4$ 、 $\beta=27.5^\circ$ である。ここでは、式(7)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してみた。計算例として、 $Q=60(\text{m}^3/\text{s})$ 、 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}=1.25$ 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図-7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 が大き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(4)~(7)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。

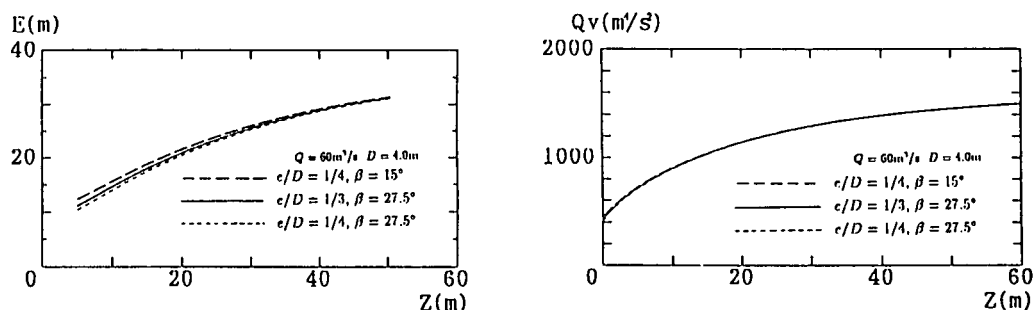


図-7 呑み口部の形状の影響

4. 渦流式立坑の空気混入特性

4. 1 検討目的

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状態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。これまでに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は、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。

解析に用いた資料は、参考文献(2)(4)(5)(12)(13)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、らせん案内条式のもの、狭窄部を有するものの3種類を含んでいる。

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れていたため、それらについては図-8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。

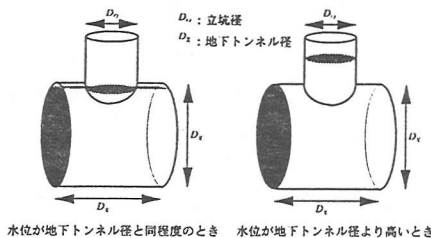


図-8 減勢池の容積の算定法

4. 2 立坑形状、水量と混入空気量の検討

(a) 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、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。

$$f(C, g, V, H, Q) = 0 \quad (9)$$

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、

$$C = F_1(V/H^3, V/(\sqrt[3]{Q^2/g})^3) = F_2(V/H^3, H/(\sqrt[3]{Q^2/g})) = F_3(V/(\sqrt[3]{Q^2/g})^3, H/(\sqrt[3]{Q^2/g})) \quad (10)$$

と表すことができる。そこで、 $C \sim V/H^3$ 、 $C \sim V/(\sqrt[3]{Q^2/g})^3$ 、 $C \sim H/\sqrt[3]{Q^2/g}$ 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 $C = F(V/H^3)$ 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図-9である。これより、渦流式とらせん案内条式とで明確な差異が現れており、らせん案内条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、らせん案内条式は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タは、減勢池の体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 : 定数) とおいて、近似式を求めてみると、それらは渦流式とらせん案内条式で分離され、それぞれ、

$$C = 5.9 \times 10^{-2} \left(\frac{V}{H^3} \right)^{-1.1} \quad (\%) : (\text{渦流式}) \quad (11)$$

$$C = 2.9 \times 10^{-4} \left(\frac{V}{H^3} \right)^{-1.9} \quad (\%) : (\text{らせん案内条式}) \quad (12)$$

となる。なお、上記の実験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。

(b) 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条式立坑は、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。図-10 は、標準的な渦流式立坑とらせん案内条式立坑について、式 (11)(12) を用いて混入空気量 $q(\text{m}^3/\text{s})$ (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 40m と設定した。この図からも、らせん案内条式立坑は、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。なお、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条式立坑の中間に位置するが、このタイプは、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。

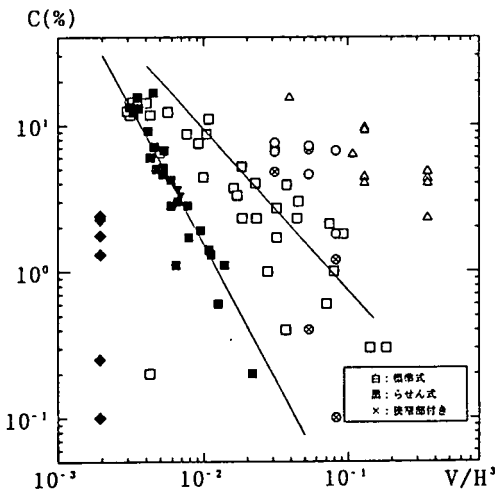


図-9 C と V/H^3 の関係

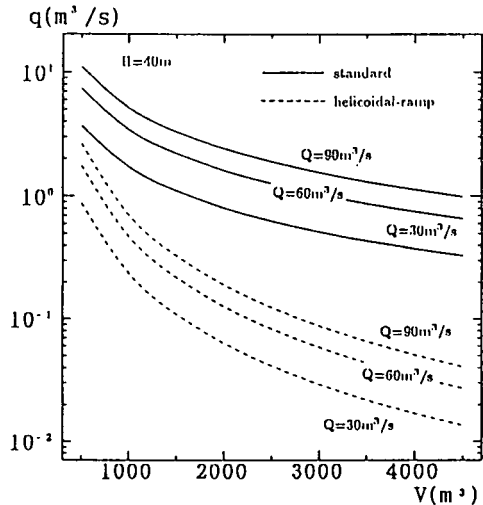


図-10 立坑形状と混入空気量

5. 施設形状の設計上の留意点

これまでに述べてきた成果をもとに、渦流式立坑を設計する際の基本的な考え方および留意点を箇条書きに記すと以下の通りである。

1. 渦流式の立坑は高落差の処理に効果的であり、地下 40m 以上の大深度に対しても適切な減勢効果を発揮する。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運動量の変化が現れる。小流量の際には減勢池の容積は少なくても済み、場合によっては立坑を直接地下河川に連結させることも可能である。これに対して大流量の場合には、減勢機能を確実なものにするために流量に比例した容積の減勢池を立坑下方に設置した方が安全であり、その必要容量の指標として例えば (8) 式が挙げられる。
2. 渦流式立坑の呑み口部の形状として接線型を用いる際には、Jain and Kennedy¹⁾の提案している形状案 ($D/\sqrt[3]{Q^2/g} = 1.16, e/D = 1/4, \beta = 27.5^\circ$) を基本的に踏襲すればよいが、(6)(7) 式を満たす範囲での $e/D, \beta$ の若干の変更によってもななら問題は生じない。同一流量に対して、 $D/\sqrt[3]{Q^2/g}$ の値が大きい程、減勢効果は向上するが、 $e/D, \beta$ の組み合わせにより、 $D/\sqrt[3]{Q^2/g} = 1.25 \sim 1.30$

まで高めることができる。また、狭窄部を設置するなどして狭窄部で限界流を起こすことができると、立坑径をさらに大きくすることができ、減勢効果の向上が可能となる。

3. 地下河川が被圧状態を基本とするところでは、混入空気量を極力抑止することが重要であり、その際には、らせん案内条式立坑や狭窄部を有する立坑が効果を発揮する。らせん案内条式立坑における混入空気量と形状の関係は(12)式で表現される。なお、らせん案内条式立坑は混入空気量の抑止のみならず、減勢池容積を縮小させる機能も有しており、空気混入を考慮しない場合でも、減勢池容積の確保に余裕がない場合に利用することも可能である。

6. 結語

本論文では、渦流式立坑に焦点を絞り、減勢効果ならびに混入空気量に及ぼす影響の検討を行い、その成果を渦流式立坑の設計上の留意点という形でとりまとめた。今後の課題として、取水立坑に接続する地表河川からの取水施設ならびに連絡水路の設計手法について、実験、数値解析両面から検討を加えていくことが挙げられる。

なお本研究を実施するにあたり、(財)河川環境管理財団の補助を受けた。また図面の作成においては京都大学工学部学生の府川新君の協力を得た。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 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・今本博建・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) 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 1995, pp.583-588.
- 11) 戸田圭一・井上和也・大本雄二・府川新: 地下河川の流入立坑部の水理特性, 京都大学防災研究所年報第39号, B-2, 1996 (印刷中) .
- 12) 永井秀樹・玉井信行・徐海州: 案内板付き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.
- 13) (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.