渦流式減勢立坑の減勢効果に関する一考察

ニュージェック　正員○戸田　圭一，正員　陳　活雄
日本工業試験所　樋口　克己

1．はじめに：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、絞り込みと同時に勾配を有した呑み口部で偏流を生じさせ、立坑の壁面沿いに渦流を起こして壁面の摩擦ロスを生じながら流水を落下減勢させるものである。欧米では多くの施工実績があり、我国でも最近注目されてきている。ここでは、立坑の減勢効果が呑み口の形状にどの程度敏感であるかを、Jainの解析解[1]を用いて若干の検討を行った。

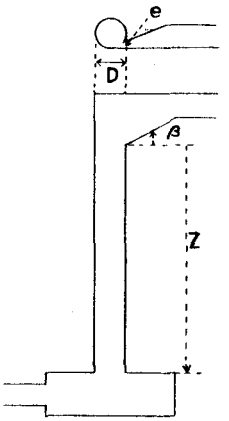
2．Jainの解析解：Jainは減勢立坑内の渦流流れをモデル化し、解析解を導いている。彼は①流れは軸対称である，②接線方向の流速分布は$vr=\Omega$で与えられる（v：接線方向の流速，r：半径，Ω：循環），③軸方向の流速は断面にわたって一様である，④流速の半径方向の成分は0である，との仮定のもとに現象を以下に示す3式でモデル化した。

連続式　$$Q=AV \quad \cdots\cdots (1)$$

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

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

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，τ_v，τ_t：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、解析解を得ている。解析解は以下のとおりである。



図－1　ドロップシャフト概念図

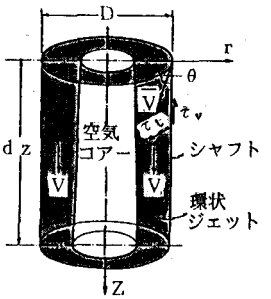
$$\xi=\frac{1}{3}\left(\frac{4F}{\lambda^2}\right)^{1/3}[\phi(R_0)-\phi(R)] \quad \cdots\cdots (4)$$

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

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

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

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



図－2　コントロールボリューム概念図

ここに、$\xi=z/D$，$\omega=\tan\theta$，$F=(Q/a)^2/(gD)$，$f=A/a$，$R=\sqrt{\pi a\Omega^2/Q^2}$。なお$a$は立坑の断面積，$\lambda$はDarcy-Weisbach の摩擦損失係数である。また、下添字の$_0$は初期値を表わしている。図－3では呑み口での流速の実験値を初期値として与え、解析解を実験結果と比較しているが、解析解は実験の流速分布を概ね再現していることが読み取れる。

3．呑み口部の形状の影響検討：Jainの解析解を使って、ここでは呑み口部の形状e/D（e：絞り込みの幅）およびβ（勾配角）の変化が流水が落下した際の鉛直方向の運動量や運動エネルギーにどの程度影響を及ぼすかを検討している。Jainら[2]が実験を通して求めた形状（$e/D=0.25$，$\beta=27.5°$）を基本形として

Keiichi TODA, Ikuo CHIN, Katsumi HIGUCHI

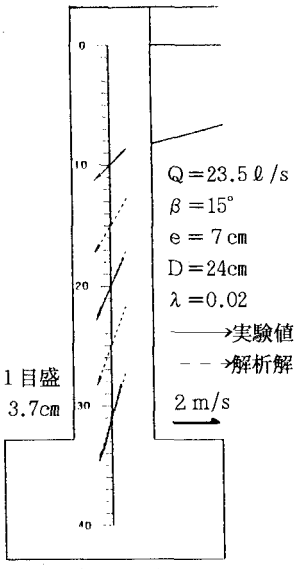
$D/\sqrt[5]{Q^2/g}=1.0\sim1.2$の範囲でe/Dを0.2～0.35，βを15°～30°まで変化させている。呑み口部での初期値は次のJain[3]の式で与えている。

$$v=(Qg/e)^{1/3}(\cos\beta)^{4/3} \quad \cdots\cdots (7)$$

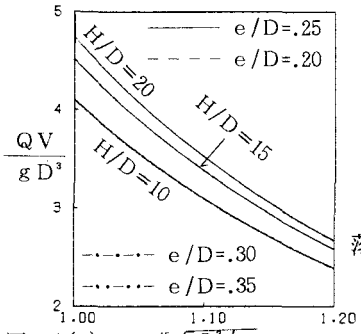
$$V=v\left(\frac{(1-p)}{2p}\right)^{1/2} \quad \cdots\cdots (8)$$

$$\sqrt{\frac{(1-p)^3}{2p}}=\left(\frac{Q^2e}{g\pi^3d^6\cos^4\beta}\right)^{1/3} \quad \cdots\cdots (9)$$

ここに、p：減勢立坑内の空隙率，d＝D/2である。Jain の指摘より実験結果との比較から(9)式が成立するのは概ね、$D/\sqrt[5]{Q^2/g}<1.2$ の範囲であるので今回の解析もその範囲に限定している。呑み口形状の変化に対する鉛直運動量および運動エネルギーE($E=\pi\Omega^2/2g(a-A)+Q^2/2gA^2$)の変化が無次元化した形で図－4，図－5に示されている。これらの図より、$D/\sqrt[5]{Q^2/g}=1.0\sim1.2$の範囲では落下距離が大きくなると形状の変化に伴う鉛直運動量、運動エネルギーの変化は1％内外に収まる程度のものとなり、呑み口部の形状の変化は流況の安定性に影響を及ぼすものの、高落差の減勢効果にそう敏感に効いてくるものではないと推察される。

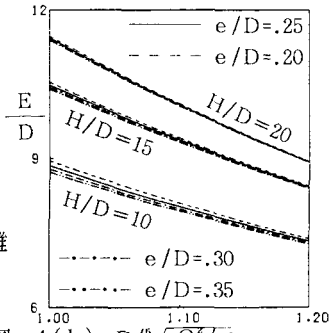


図－3　実験値と解析解の比較

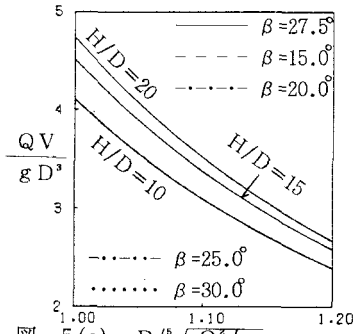


図－4(a)　$D/\sqrt[5]{Q^2/g}$
e/Dの変化による鉛直運動量の相違

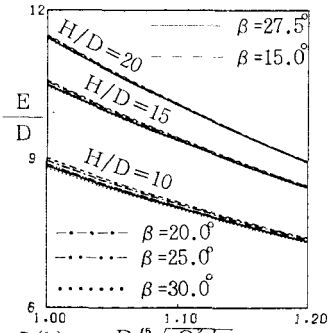
図中のHは落下距離



図－4(b)　$D/\sqrt[5]{Q^2/g}$
e/Dの変化による運動エネルギーの相違



図－5(a)　$D/\sqrt[5]{Q^2/g}$
βの変化による鉛直運動量の相違



図－5(b)　$D/\sqrt[5]{Q^2/g}$
βの変化による運動エネルギーの相違

4．おわりに：

本検討は、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、関係者各位に謝意を表します。

5．参考文献：

(1)Jain,S.C.,(1987) "Free-surface swirling flows in vertical dropshaft" J.Hydr.Eng.ASCE 113(10).

(2)Jain,S.C.,and Kennedy, J.F.(1983) "Vortex flow dropstructures for the Milwaukee Metropolitan Sewerage District inline storage system." IIHR Rep. No.264, Iowa Inst.of Hydr.Res.

(3)Jain,S.C.,(1984) "Tangential vortex-inlet" J.Hydr.Eng.ASCE 110(12).