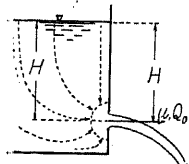


第十章 流出孔, 射出水及び水門

[45] 流出孔より流出する水の流速及び流量

(1) 小流出孔 (Small orifice) 第 356 圖の如く水槽の側壁に設けたる小孔に於て水の流出に對して何等の抵抗も作用せずと假定すれば、[18] に述べたる如く Torricelli 定理に従て水は



第 356 圖

槽外に流出し、水頭 H と理論流速 u, 理論流量 Q₀ との関係は孔の面積を a とすれば

u = sqrt(2gH), Q₀ = au = a*sqrt(2gH) = 4.4427 * a*sqrt(H) ... (333)

然るに此場合槽内の水は水面より孔に向て徐々に加速せられつゝ運動し、孔に接近して速度を急増して流出するを以て、此間に摩擦其他の抵抗に由り勢力の消耗あり、實際の速度 v は u に 1 より小なる係數 C_v ... 流速係數 (Coefficient of velocity) ... を乗じたるものに等しい。即ち

v = C_vu = C_v*sqrt(2gH) ... (334)

C_v は 1 より僅かに小なる數にして H 又は d の大なる程大である...(4)

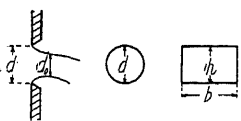
の第 365 圖参照。

次に孔の内壁面に於て水は流出の方向に直角に流るゝを以て流れの斷面を周圍より狹窄し s なる距離に於て凡ての點の運動が略平行となる、... 圓孔に於ては s = d/2, d は孔の直径... この斷面をベナコントラクタ (Vena Contracta) と稱し a より小なる斷面 a₀ を有する。然るに射出水 (Water jet) 内部の壓力の強さは孔の内側より漸減し a₀ に縮小する點に於て殆んど大氣壓に等しき迄低下する。従て v₀ は H なる水頭に相當する理論流速 u に極めて近き値を有する。

今 a₀/a = C_a ... 收縮係數 (Coef. of contraction) とし尙 C_v * C_a = C ... 流量係數 (Coef. of discharge) とすれば實際の流出量 Q は

Q = va₀ = C_vC_a * a*sqrt(2gH) = C * a*sqrt(2gH) ... (335)

但し C の値は長さの單位に無關係である。上記の場合孔の鉛直寸法 d に對し H 極めて大にして d/(2H) 極めて小に 1 に對して之を無視し得るものとし、孔の中心より水面迄を H とせるが、鉛直寸法小ならざる場合は [46] に述ぶる。普通 a₀ = 0.8d 位, C_a = 0.72 ~ 0.612 にして H 又は d の大なる程大である...(4) 第 366 圖参照。



第 358 圖

C_v, C_a 及び C の値は孔の大きさ及び形, H 及び隅の形等に依て異り、普通 C = C_v * C_a を

實驗に依て定むる。實驗は他より水を水槽に供給し溢流裝置を設けて H を一定に保ち、一定時間 t に孔より流出する水量 V を計り Q = V/t とし, C = Q / (a*sqrt(2gH)) に依て算定する。

(2) 動水相似律に據る流出孔の流量公式 [23] (3) の場合の如く流出に對して粘性の影響極めて微小なりとすれば (130) 式の l ... 單に長さの寸法... に H を用ひ

v proportional to sqrt(gH) ... Q proportional to a*sqrt(2gH)

然るに動粘性係數 nu の流速に對する影響を無視し得ざるものとすれば nu は H, nu, g 等の函數となる。依て

v proportional to H^x * nu^y * g^z

と置けば此式に對するデイメンション方程式は

[L]^1 [T]^-1 = [L]^x * [L]^y * [T]^-y * [L]^z [T]^-2z

兩邊に於ける同種基本量のデイメンションを等しと置けば

x + 2y + z = 1, -y - 2z = -1 ... x = 1/2 - 3/2y, z = 1/2 - 1/2y

v proportional to sqrt(gH) * (nu / (H^1.5 * g^0.5))^y = sqrt(gH) * H^-1.5y * g^-0.5y * nu^y = H^0.5 - 1.5y * g^0.5(1-y) * nu^y ... (336)

而して實驗の示す所によれば y は小なる正數にして, H 及び g の冪數は 0.5 より僅かに小にして且 nu は nu にも多少關係あり、nu の大なる程小にして實驗の結果 nu は H^0.40 ~ H^0.493 に比例する。

次に流量 Q に對しては

Q proportional to H^x * nu^y * g^z * d^s 茲に d ... 孔の寸法

[L]^3 [T]^-1 = [L]^x * [L]^y * [T]^-y * [L]^z [T]^-2z * [L]^s

x + 2y + z + s = 3, -y - 2z = -1 ... z = 1/2 - 1/2y, x = 5/2 - 3/2y - s

Q proportional to H^2.5 - 1.5y - s * nu^y * g^0.5(1-y) * d^s = d^2 * sqrt(gH) * (d/H)^(s-2) * (nu / (H^1.5 * g^0.5))^y ... (337)

實驗上 s は 2 に近く、y は小なる正數である。今 Q = C * a*sqrt(2gH) と置けば C は d/H, H, g 及び nu に依て多少異なる事は當然にして、相似形の流出孔に於ても d, H, g 及び水の粘性... 溫度に依て異なる... 等に依て C は多少異なるは實驗の示す通りである。

(3) 小流出孔の流量係數 C 小流出孔の流量は實際は動粘性の影響を受け (2) に述べたる如く

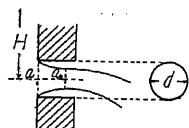
Q proportional to aH^n, n = 0.49

なるも實用の便宜上 (335) 式を用ひ

Q = C * a*sqrt(2gH), 即ち n = 0.5 ... (338)

n が實際と異なる爲の誤差は實驗上より定めたる $C=C_v \cdot C_a$ に依て補正さるゝを以て、 C の値は $H, H/d$, 孔の内側の角の形等に依て異なる。例へば鉛直壁に穿ちたる圓孔に於ての實驗値は

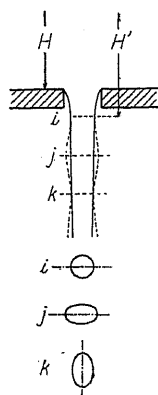
孔徑 d cm =	1	2	3	4
$H=0.6$ m, $C =$	0.628	0.621	0.614	0.607
$H=0.25$ m, $C =$	0.637	0.629	0.622	0.614



第 359 圖

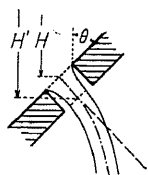
即ち大體に於て C は H 又は d の大なる程小に、同一の H に対しては d の大なる程小、同一の d に対しては H の大なる程小である。

第 360 圖の如く水平なる底に鉛直の方向に穿たれたる孔に於ては射出水が壁内面を離るゝも、猶流出の方向に重力の作用を受け漸次に速度を増し斷面積を縮小するを以て、(1) の場合の如くベナコントラクタの位置を確認し難きも、射出水の表面は波状を呈し斷面は橢圓形に變じ、その波形の起點 (i) がベナコントラクタに相當するを以てその斷面積を a_0 とすれば、壓力水頭は其點より水面迄の高さ H' なるも H と H' の差は微小なるを以て H を用ひ、之に因る 誤差は實驗に依て定めたる C に依て補正されて居る。



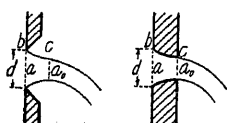
第 360 圖

第 361 圖の如き傾斜壁の流出孔に於ては射出水の中心線が孔の軸を離るゝ點がベナコントラクタに相當し、從て實際の水頭は H' なるも便宜上、壁内面の中心より水面迄の高さを H とし誤差は C に依て補ふ。

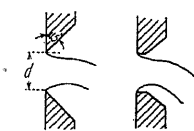


第 361 圖

孔の内側が第 362 圖の如く刃形を成す時は斷面の收縮は最も完全にして C_a の値は H 及び d に應じて一定し、第 363 圖の如く孔の内面が第 362 圖の場合の bc 間の射出水外面に接する如き形 (Bellmouth) なる時は、外側の斷面積 a_0 を孔の斷面積とすれば $C_a=1$ となる。然し孔の形が僅かに異なるも Q に影響するを以て、流出水の流量を精確に知る場合は内側面を離れたる水が再び周壁に接觸せぬ如き鋭縁孔 (Sharp-edged orifice) を用ふるを可とし、その標準形は 45° の刃形である(第 364 圖)。



第 362 圖 第 363 圖



第 364 圖

H. J. Bilton (英, 1908) の實驗に依れば H 及び d 小なる程收縮作用不完全にして、 $d > 5$ cm ならば大體完全收縮を爲すも、 $d < 5$ cm に

ては $H > 0.5$ m ならざれば收縮は完全でない。從て小流出孔に依て流量を測定する場合は豫め實驗に依て C と H との關係を定むる方確實である。

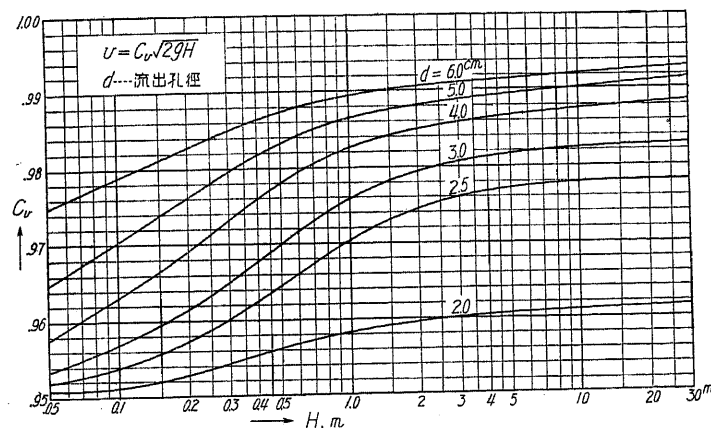
(4) 小流出孔の諸係數 C_v, C_a 及び C の實驗値 C_v の値は主として孔内側附近に於ける運動の方向變化及び流動に對する

摩擦抵抗に因るものにして、Smith & Walker (英, 1923) の實驗に據り H, d と C_v との關係を曲線を以て表はせば第 365 圖の如し。

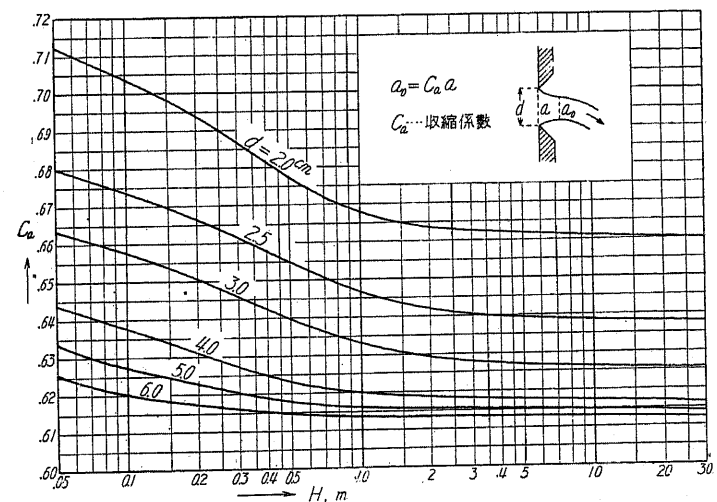
收縮係數 C_a の値は孔の入口に於ける流速の大き及び方向の變化の多少並に緩急に依て異り、 H 又は d の大なる程小となるも動水學上の理論に據れば d/H の極めて小なる限り $\frac{\pi}{2+\pi} = 0.611$ を下らず、Smith & Walker (英, 1923) の鋭縁圓孔に關する實驗結果に據り、 H, d と C_a との關係を曲線を以て表はせば第 366 圖の如し。

流量係數 $C=C_v \cdot C_a$ の値、Smith & Walker の實驗値に據り H, d と C との關係を曲線を以て表はせば第 367 圖の如し。

(5) 水平なる底面の流出孔 此場合は孔内面の水頭同一なるを以て孔



第 365 圖 鋭縁圓孔の流速係數 C_v (N.M.)



第 366 圖 鋭縁圓孔の收縮係數 C_a (N.M.)

稍大なる場合に於ても側壁の小孔と同様に次式を以て流量を表はし得る。

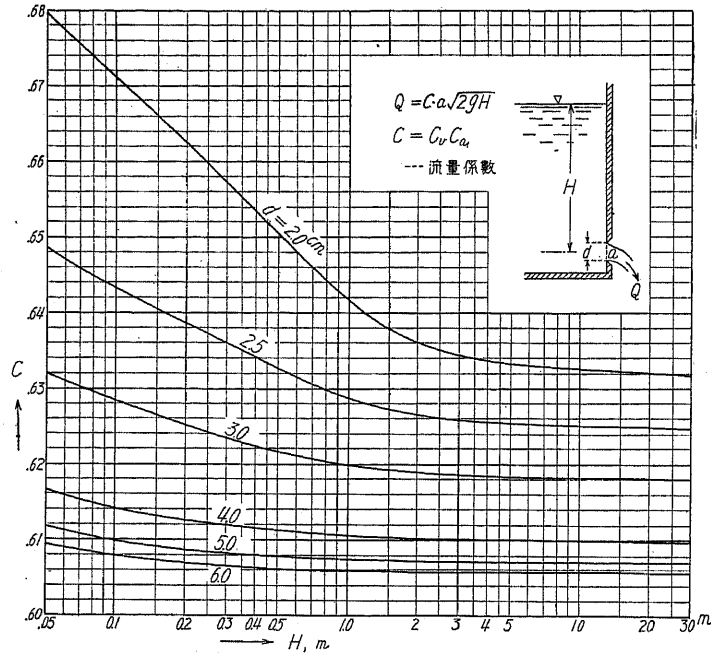
$$Q = C_v \cdot C_a \cdot a \sqrt{2gH} = C \cdot a \sqrt{2gH} \dots \dots \dots (339)$$

縁が 45° なる圓孔 (Poncelet 流出孔) に關する Schneider (獨, 1919) の實驗に依れば C は次表の如し。

第 68 表 Poncelet 流出孔の流量係數 C

H, m	0.06	.200	.40	0.80	1.2	2.0	3.0
d, cm	0.55	.681	.656	.640	.629	.624	.622

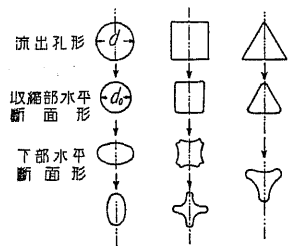
1.03	0.658	.639	.625	.615	.611	.6095	.6085
2.0	0.628	.617	.609	.603	.599	.598	.597
7.0~	0.614	.609	.603	.597	.594	.593	.593



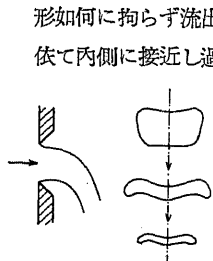
第 367 圖 鋭縁圓孔の流量係数 C (N.M.)

Poncelet 流出孔の内側面に於ける流速の分布は第 369 圖に示す如く周圍に於て最大に、 $v_{max} = C_v \sqrt{2gH} = 0.98 \sqrt{2gH}$ にしてベナコントラクタ (i...i) に於ける平均流速に等しく、中心に於て最小にして $v_{min} = 0.62 \sqrt{2gH} \sim 0.64 \sqrt{2gH}$ にして (i...i) 断面に於ては $v_{min} = 0.69 \sqrt{2gH}$ である。

(6) 孔を流出せる射出水の横断面 水平底の孔より鉛直に流下する射出水は重力の作用に依り流速漸増し断面の大きさは漸縮し形は連続的に變化し、ある程度以上落下すれば滴々に分離して噴霧状となる。断面形の変化(第 370 圖) は水の表面張力の作用に依り面積に對して周邊を最短ならしめんとするを以て、孔の形如何に拘らず流出後圓形に近づかんとし、この爲に水分子は惰性に依て内側に接近し過ぎ再び外方に向ひ波状運動を爲し、一方断面積は

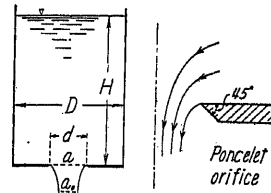


第 370 圖

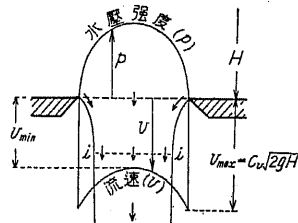


第 371 圖

漸縮するを以て形状の漸變を生ずるが、遂には圓形に收斂し更に霧散する。而て H 不變なる限り射出水の流れは定流的にして、断面の形状はその位置に依て殆んど一定して居る。鉛直孔より水平に流出する場合(第 371 圖) は上側の水平流速は下側より小なるを以て、



第 368 圖



第 369 圖

射出水の厚さは急減し幅は一時増大するも落下に伴ひ漸縮し断面も小となる。

[46] 小ならざる流出孔の流量

(1) 流量の一般式 小なる流出孔に於ては其中心に於ける水頭を以て全面積に對する水頭と看做したるも、小ならざる流出孔に於てはその上端と下端との水頭は稍著しく異なる。此場合は孔の断面を多數の狭き水平帶狀部分に分ち(第 372 圖)、その各々の幅...y, 高さ...dz, 水頭...z, 流量...dQ とすれば流出孔の理論流量 Q_0 は

$$dQ = \sqrt{2gz} \cdot y dz \quad \therefore Q_0 = \int_{H_1}^{H_2} y \sqrt{2gz} dz$$

但し H_1 は上端の水頭, H_2 は下端の水頭である。

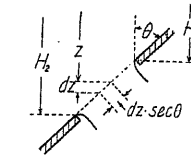
$$\text{實際の流量は係数 } C \text{ を乗じて } Q = C \int_{H_1}^{H_2} y \sqrt{2gz} \cdot dz \dots \dots \dots (340)$$

C は孔の形, 大さ, 水頭, 孔内縁の形状等に依て異り實驗に依て定むる。孔面が鉛直に對して θ

なる傾斜を爲す時は帯の幅は $dz \cdot \sec \theta$ にして

$$Q_i = C \sec \theta \int_{H_1}^{H_2} y \sqrt{2gz} \cdot dz \dots \dots \dots (341)$$

$$\text{即ち } Q_i = Q \sec \theta \dots \dots \dots (342)$$



第 374 圖

一般に理論流速 w_0 は壁内面を軸とし水面に頂點を有する拋物線を以て表はされ孔の理論流量は $k \ln m$ (第 373 圖) にて表はさるゝも、實際の流量は水平影線を施せる部分に過ぎぬ。

(2) 接近流速 (Velocity of approach) 及び接近水頭 (Head of approach velocity) 水槽又は水路に於て水が v_a なる流速を以て孔に接近する時は水頭 H に相當する位置の勢力の外

に $v_a^2/2g$ なる運動の勢力を有する。従て流出の速度は靜水頭 H に相當するものより大である。

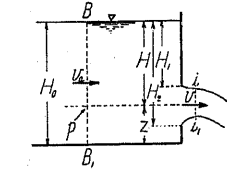
今第 375 圖に於て B...B1, i...i1 断面間に Bernoulli 定理を適用すれば

$$z + \frac{p}{w_0} + \frac{v_a^2}{2g} = z + 0 + \frac{v^2}{2g} \quad \text{又は} \quad H + \frac{v_a^2}{2g} = \frac{v^2}{2g}$$

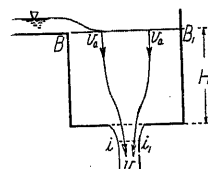
$\frac{p}{w_0} = H$ にして且つ $\frac{v_a^2}{2g} = h_a$ と置けば

$$v = \sqrt{2g \left(H + \frac{v_a^2}{2g} \right)} = \sqrt{2g(H + h_a)}$$

實際の流速 = $C_v v$, 實際の流量 $Q = C_v C_a \cdot v \cdot a$



第 375 圖



第 376 圖

$$\therefore Q = C \cdot a \sqrt{2g \left(H + \frac{v_a^2}{2g} \right)} \dots \dots \dots (343)$$

a ...流出孔の斷面積, A ...水槽斷面積, $v_a^2/2g = h_a$ を接近水頭, $H + h_a$ を有効水頭 (Effective head) と稱する。第 375 圖の場合 H は孔中心, H_1, H_2 等の水壓水頭は夫々の點より B 點の水面迄の高さである。 h_a の影響を考ふれば (340) 式は

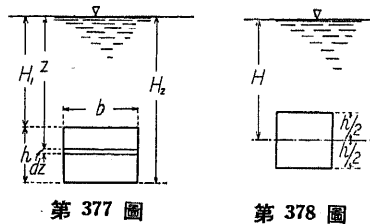
$$Q = C \int_{H_1}^{H_2} y \sqrt{2g(z+h_a)} dz \dots \dots \dots (344)$$

尙 $B \dots B_1$ 及び $i \dots i_1$ 斷面の流量は同一なるを以て

$$Q = v_a A \quad \therefore v_a = \frac{Q}{A} \quad \therefore Q = C \cdot a \sqrt{2gH + \left(\frac{Q}{A} \right)^2}$$

$$\therefore Q = \frac{C \cdot a \sqrt{2gH}}{\sqrt{1 - C^2 \left(\frac{a}{A} \right)^2}} \dots \dots \dots (345)$$

a/A が極めて小なる時は v_a/v も亦微小なるを以て之を無視する。尙 B_i の距離著しく大なればその間の摩擦抵抗に因る水頭損失の影響を受けるを以て水路に於ては普通 $B \dots B_1$ 斷面より孔までの距離は凡そ水深 H に等しからしめ、水槽の場合は餘り細長のものを用ひぬ(第 376 圖)。



(3) 鉛直壁の矩形流出孔 (Rectangular orifice) の流量 孔の幅は一様なるを以て之を b , 高さ h とすれば (340) 式に依り

$$Q = C \int_{H_1}^{H_2} b \sqrt{2gz} dz = C \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b (H_2^{1.5} - H_1^{1.5}) \dots \dots \dots (346)$$

稍大なる鋭縁孔に於ては平均

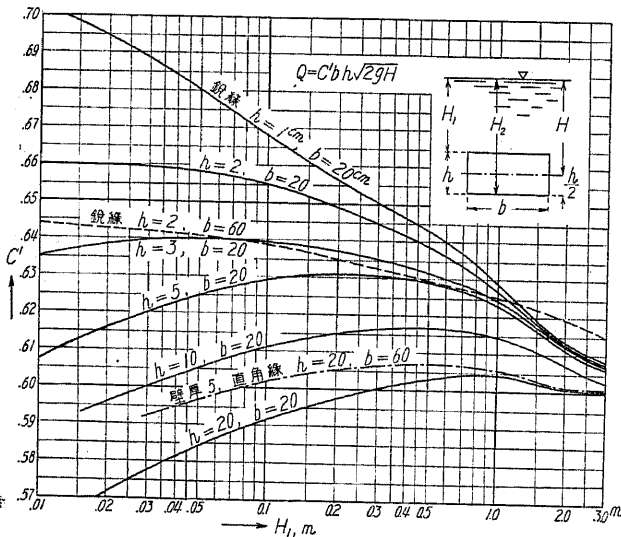
$$C = 0.62, \quad C \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} = 1.83$$

然るに h/H が小ならば $(H_2^{1.5} - H_1^{1.5})$ は $(H_2 - H_1) \sqrt{\frac{1}{2}(H_1 + H_2)}$ 又は $\sqrt{H_2^3 - H_1^3}$ に近き値を有するを以て便宜上次の式を用ふる。

$$Q = C' b (H_2 - H_1) \sqrt{2g \cdot \frac{1}{2}(H_1 + H_2)} = C' b h \sqrt{2gH} \dots \dots \dots (347)$$

$$\text{又は } Q = C'' \cdot \frac{2}{3} b \sqrt{2g(H_2^3 - H_1^3)} \dots \dots \dots (348)$$

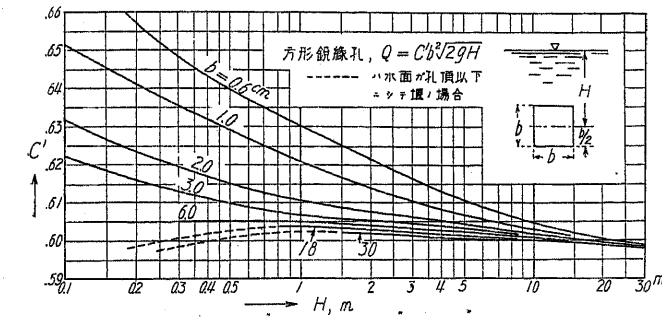
接近流速 v_a を考ふる時は H_1, H_2, H 等の代りに各々に $\frac{v_a^2}{2g}$ を



第 379 圖 矩形流出孔の係数 C' (N.M.)

加へたるものを以て水頭とする。之等の式に於て C, C', C'' 等は實驗に依て定め單位系に無關係である。

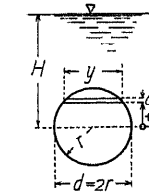
Poncelet 及び Lebros の實驗に據り種々の矩形流出孔の係数 C' と H_1 との關係を曲線を以て表せば第 379 圖の如し。



第 380 圖 鉛直壁方形鋭縁流出孔の流量係数 C' (N.M.)

鉛直壁の方形鋭縁流出孔の流量係数 C 及び C' ... (346), (347) 式...の値は $C = C'$ 但し $b = (H_2 - H_1)$...邊長...、H. Smith (米, 1886) の實驗値に據り H, b と C' との關係を曲線を以て示せば第 380 圖の如し。

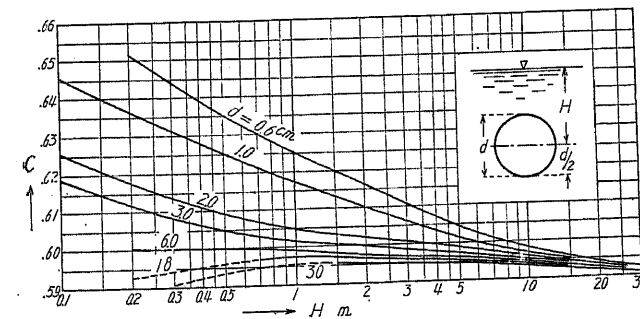
(4) 鉛直壁の鋭縁圓孔 (Sharp-edged circular orifice) 半径を r , 圓心に於ける水頭を H とす。(340) 式の z の代りに $H - z$ を入れ $y = 2\sqrt{r^2 - z^2}$



$$Q = C \int_{-r}^r 2\sqrt{2g(H-z)} \cdot \sqrt{r^2 - z^2} dz$$

$$Q = C \left[1 - \frac{1}{32} \left(\frac{r}{H} \right)^2 - \frac{5}{1024} \left(\frac{r}{H} \right)^4 + \dots \right] \cdot \pi r^2 \sqrt{2gH} = C' \pi r^2 \sqrt{2gH} \dots \dots \dots (349)$$

茲に $C = C' \left[1 - \frac{1}{32} \left(\frac{r}{H} \right)^2 - \dots \right]$



第 382 圖 鉛直壁鋭縁圓孔の流量係数 C (N.M.)

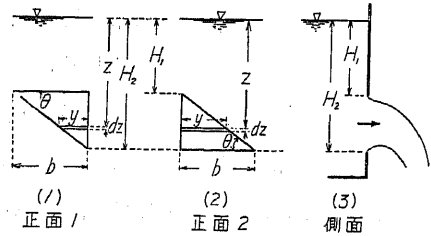
H. Smith (米, 1886) の實驗値に據り H, d と C との關係を曲線を以て示せば第 382 圖の如く、即ち (349) 式の C は孔径 d 又は水頭 H の大なる程小となり [45] (2), (3) の動水理論の結果に一致する。

第 69 表 鉛直鋭縁圓孔の $C'/C = 1 - \frac{1}{32} \left(\frac{r}{H} \right)^2 - \dots$ の値 (H. Smith, 米, 1886)

$H/r =$	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	5	6	9
$C'/C =$	0.9604	.9753	.9823	.9876	.9897	.9918	.9933	.9953	.9965	.9973	.9978	.9982	.9987	.9991	.9996

即ち孔の流量は $H/r > 3$ ならば小孔として (335) 式を用ふるも誤差は微小にして矩形及び方形孔に於ても略同様である。

(5) 側壁の直角三角流出孔 此種の流出孔はそれ自身としては實用なきも傾斜又は鉛直壁の一般多角形の孔及び堰の理論流量の算定の基礎となる。(340) 式に於て y は第 383 圖の (1), (2) に依て異り、



第 383 圖

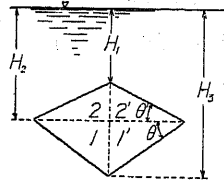
$$1. \quad y = (H_2 - z) \cot \theta, \quad \cot \theta = \frac{b}{H_2 - H_1}$$

$$\therefore Q = C \cdot \cot \theta \int_{H_1}^{H_2} (H_2 - z) \sqrt{2gz} \, dz$$

$$= C \cdot \cot \theta \sqrt{2g} \left[\frac{2}{3} H_2 (H_2^{1.5} - H_1^{1.5}) - \frac{2}{5} (H_2^{2.5} - H_1^{2.5}) \right] \dots \dots (350)$$

$$2. \quad y = (z - H_1) \cot \theta$$

$$Q = C \cdot \cot \theta \cdot \sqrt{2g} \left[\frac{2}{5} (H_2^{2.5} - H_1^{2.5}) - \frac{2}{3} H_1 (H_2^{1.5} - H_1^{1.5}) \right] \dots (351)$$



第 384 圖

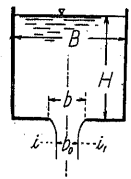
左右對稱なる菱形孔の流量を求むるに (第 384 圖)、1 と 1', 2 と 2' とは水理上全く同一なるを以て

$$Q = 2C \cdot \sqrt{2g} \left\{ \begin{array}{l} \cot \theta \left[\frac{2}{3} H_2 (H_2^{1.5} - H_1^{1.5}) - \frac{2}{5} (H_2^{2.5} - H_1^{2.5}) \right] \\ + \cot \theta' \left[\frac{2}{5} (H_2^{2.5} - H_1^{2.5}) - \frac{2}{3} H_1 (H_2^{1.5} - H_1^{1.5}) \right] \end{array} \right\} \dots (352)$$

尙複雑なる形の多角孔に就ては [53] (6) に述べる。

之等の孔の流量係數 C は各形の異なる毎に實驗に依て定むる。第 374 圖の如き傾斜壁の孔に於ける理論流量は鉛直壁の場合の理論流量に $\sec \theta$ を乗じたるものである。

(6) 流出間隙 (Slit orifice) 及び流出孔の流量係數の理論値 第 385 圖の如き横断面を有する長



第 385 圖

き矩形水槽の底の中央に幅 b なる間隙を作り、水頭 H を一定にして水を流出せむる場合の射出水のベナコントラクタの幅を b_0 とすれば、 b_0/b の理論値 ψ は B/b の同一なる水平圓形孔の流量係數 C に殆んど等しい。

今 $b=0$ なる極限の場合 $b_0/b = \psi_0$, $C = C_0$ とすれば、

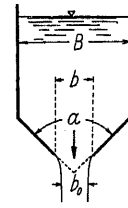
但し間隙の場合は $Q = \psi b \sqrt{2gH}$, l ... 間隙の長さ

b/B (圓孔又は間隙)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Mises の ψ/ψ_0	1.004	1.016	1.04	1.07	1.11
Weisbach 圓孔實驗値 C/C_0	1.006	1.026	1.058	1.103	1.160

此相似性を擴張して割合に大なる種々の流出孔の C を推定する事が出来る。下記の場合は凡て v. Mises (獨, 1917) の理論的解法に依る。但し第 386 圖の場合は角形の槽及び孔のみに適用する。

第 70 表 種々の流出孔及び間隙の $C = \psi$ の値

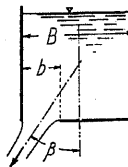
(第 386 圖)



第 386 圖

$b/B = a$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
45°	0.746	.747	.747	.748	.749	.752	.758	.765	.789	.829
90°	0.611	.612	.616	.622	.633	.644	.662	.687	.722	.781
125°	0.537	.546	.555	.569	.580	.599	.620	.652	.698	.761
180°	0.500	.513	.523	.544	.564	.586	.613	.646	.691	.760

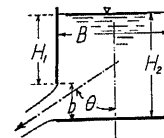
(第 387 圖)



第 387 圖

$b/B =$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\psi = C =$	0.673	.676	.680	.686	.693	.702	.720	.740	.782	.842
$\beta =$	21°	$20^\circ 55'$	$20^\circ 35'$	$20^\circ 5'$	$19^\circ 40'$	19°	$18^\circ 16' 30''$	$14^\circ 20'$	$11^\circ 5'$	

(第 388 圖)



第 388 圖

b/B	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$\psi = C$	0.673	.640	.582	.504	.438	.363	.320	.281	.250	.220	.200
θ	69°	$67^\circ 5'$	$63^\circ 50'$	$59^\circ 55'$	$57^\circ 5'$	$55^\circ 50'$	55°	$54^\circ 10'$	$53^\circ 45'$	$53^\circ 30'$	$53^\circ 20'$

Koch u. Carstanjen (獨) は開門の合掌扉 (Miter gate) を半開せる如き鉛直の間隙に對し次の如き計算法を發表して居る。

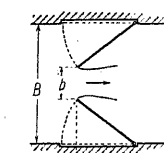
$$Q = C \cdot bH \cdot v, \quad C = \frac{4}{11 - 7 \frac{b}{B}} \dots \dots (353)$$

$b/B =$	0~0.637	0.7	0.8	0.9	1.0
$C =$	0.612	0.656	0.742	0.852	1.00

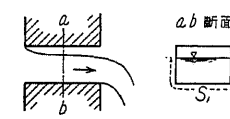
(7) 不完全收縮孔 (Incompletely contracted orifice) の流量係數 一般

に孔周邊 S の内 S_1 たけの部分に於て流水が周邊に接觸して流れ $S - S_1$ たけの邊が收縮を爲す場合は、完全收縮の場合よりベナコントラクタの斷面積は大、從て Q 及び C も大である。G. Bibone (伊, 1838) の實驗式は、

C ... 完全縮流の係數, C' ... 不完全收縮流の係數



第 389 圖



第 390 圖

$$C'/C = 1 + \lambda \frac{S_1}{S}$$

孔形	圓孔	小方形孔	小矩形孔 (Weisbach)	矩形孔 ($h=10$ cm, $b=20$ cm) (Weisbach)
$\lambda =$	0.128	0.152	0.134	0.157

(8) 流量係數 C に対する種々の影響 C は殆んど水温の影響を受けぬが粘性は温度に依て變化するを以て、水温著しく異なる時は C も多少異なる。Unwin (英, 1878) の實驗に依れば 90°C に於ける C は 16° の C に比し約 4% 大である。

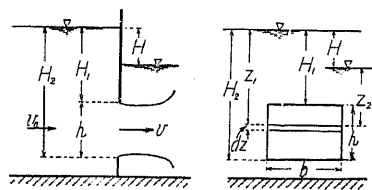
水以外の液體に對する C の値の實驗値は次の如し。

水銀 (Smith の實驗) $H=25$ cm $C=0.61$

にして水と同様 H 増せば C は漸減し、極限值は 0.58~0.59 である。機械油にて $C=0.73$

[47] 潜孔及び水門

(1) 潜孔の流量 流出孔の外側に水ありて其水面が孔頂より高き時は之を潜孔 (Submerged orifice) 又は完全潜孔 (Completely submerged orifice) と稱する。普通の流出孔に於ては外側の



第 391 圖

の壓力は氣壓に等しきも、潜孔の場合は水壓が作用するを以て流出の有効水頭はそれだけ減ずる。

先づ第 391 圖の如き $b \cdot h$ なる矩形孔を考へ、孔の上流側水槽の流速は全断面一様にして v_a 、孔に於て v とすれば、孔面に於て高さ dz の帯狀の内外兩側に Bernoulli 定理を適用して

$$z_1 + \frac{v_a^2}{2g} = z_2 + \frac{v^2}{2g} \quad \therefore \frac{v^2}{2g} = z_1 - z_2 + \frac{v_a^2}{2g} = H + \frac{v_a^2}{2g} = H + h_a$$

茲に h_a は接近水頭にして孔の有効水頭は帶の位置に拘らず、孔内外の落差に h_a を加へたるものにして一定である。

$$\therefore v = \sqrt{2g(H+h_a)}, \quad dQ = v \cdot b \cdot dz$$

$$\therefore Q = C \cdot b(H_2 - H_1) \cdot \sqrt{2g(H+h_a)} = C\sqrt{2g} \cdot b \cdot h \sqrt{H+h_a} \dots \dots \dots (354)$$

稍大なる孔に於ては平均 $C\sqrt{2g} \approx 2.75$ (m-sec)

潜孔の有効水頭 $H+h_a$ は孔の形に無關係なるを以て一般に

$$Q = C\sqrt{2g} \cdot a\sqrt{H+h_a}, \quad a \dots \dots \dots \text{孔面積} \dots \dots \dots (355)$$

C の値は第 71 及び第 72 表に示す。

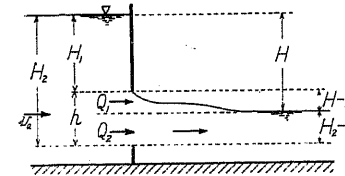
第 71 表 鋭縁潜孔の流量係數 C , H ...上下兩側の落差

孔寸法及び形	實驗者	$H, m=0.09$	0.15	0.30	0.60	1.20	1.80	3.00	5.50
圓, $d=1.5$ cm	H. Smith	...	0.599	.597	.595	.595			
” ” 3 ”	”	0.600	.600	.600	.599	.598			
方形, $b=1.5$ cm	”	...	.609	.607	.605	.604			
” $b=3$ ”	”	0.607	.605	.604	.603	.604			
矩形, $b=90$ cm, $h=1.5$ cm	”	...	.621	...	...	.620	.620	.618	
圓, $d=30$ cm	Ellis	...	...	...	.608	.602	.603	.600	.601
方形, $b=30$ cm	Ellis	...	...	...	.601	.601	.603	.605	.606
” $b=122$ ”	Steward	0.614							

第 72 表 内面の角に丸味を附したる方形潜孔の C (Ellis, 米), $d=30$ cm

$H, m=$	0.9	1.2	1.5	1.8	2.5	3.0	3.7	4.3	5.5
$C =$	0.952	.948	.946	.945	.944	.943	.943	.944	.944

(2) 不完全潜孔 (Partially submerged orifice) 下流水面が孔底、孔頂の中間に位する時は



第 392 圖

その水面以下の部分のみが潜孔となるを以て下流水面以上を高さ $H-H_1$ の普通流出孔とし、以下を高さ H_2-H の潜孔として各別に流量を求め、その和を以て孔の流量とする。但し各の流量係數を C_1, C_2 として區別する。

上部の流量 Q_1 は (346) 式に依り

$$Q_1 = C_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b [(H+h_a)^{\frac{3}{2}} - (H_1+h_a)^{\frac{3}{2}}]$$

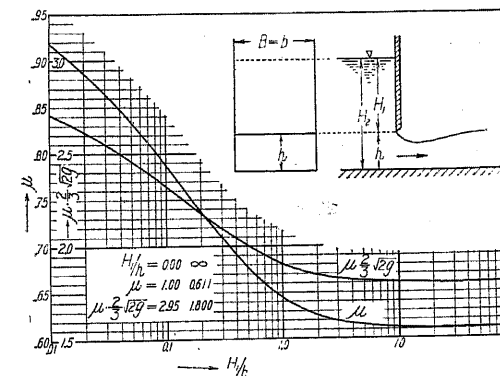
下部潜孔の落差は H なるを以て (354) 式に依り $Q_2 = C_2 \sqrt{2g} \cdot b (H_2 - H) (H+h_a)^{\frac{3}{2}}$

$$\therefore Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b [(H+h_a)^{\frac{3}{2}} - (H_1+h_a)^{\frac{3}{2}}] + C_2 \sqrt{2g} \cdot b (H_2 - H) (H+h_a)^{\frac{3}{2}} \dots (356)$$

略値として $C_1=0.62, C_2=0.53, C_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g}=1.83, C_2 \sqrt{2g}=2.75$ (m-sec 單位)

(3) 流量係數の理論値 (μ) 水門の如く

收縮は頂邊のみなる孔に於て下流側の底勾配が $i \geq \frac{v^2}{C^2 R^{2m}}$ 、而も $\frac{1}{10}$ 以下にして且つ上流水路幅 = 下流水路幅 (B) = 水門總純幅 (b) なる時は動水學に依り理論的に收縮係數 μ を算出し得、 C は μ より僅かに小である。

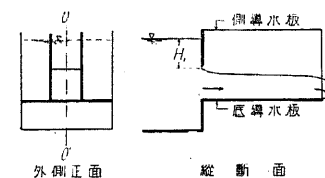


第 393 圖

$$\frac{1}{\mu} = 1 + \frac{2}{\pi} \left(\frac{H_2}{\mu h} - \frac{\mu h}{H_2} \right) \arctan \frac{\mu h}{H_2} \dots \dots \dots (357)$$

$$H_2 = H_1 + h$$

(4) 潜孔の流量係數 C の實驗値 鋭縁孔周圍の一部に、壁



第 394 圖

に垂直にして外側に突出する導水板を附すれば、流出水周面の一部は之に接觸して縮流は不完全となり流量係數 C は前記の場合と多少異なる。Lebros (佛, 1852) は 20 cm 角の鋭縁孔に於て外側に鉛直、水平又は勾配を有する導水板を附したる種々の場合に對し實驗に依て C を定めて居る (第 73 表)。第 395 圖の孔に於て太線を以て

示すは長さ 3 m の鉛直又は水平の導水板にして、二重細線を以て示すは 1:10 勾配の底板である。從て (c) は水門より廣き平底の水路に流出し、(d) は 1:10 底勾配の水路に流出する場合に相當する。

第 73 表 導水板を附せる方孔 ($h=b=20$ cm) の C

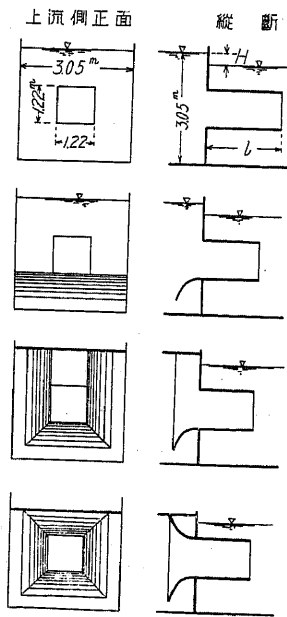
第 395 圖

孔番號	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
H_1 m						
0.02	0.572	.496	.480	.527	—	—
.05	0.585	.531	.510	.553	.528	—
.10	0.592	.563	.538	.574	.560	.593
.2	0.598	.591	.566	.592	.589	.617
.5	0.603	.621	.592	.607	.591	.632
1.0	0.605	.628	.600	.610	.601	.638
1.5	0.602	.627	.602	.610	.604	.641
2.0	0.601	.626	.602	.609	.604	.642
3.0	0.601	.624	.601	.608	.602	.641

次に上流側に鐘口状導板を附し下流側に樋を附したる方孔完全潜孔に對する C. B. Steward (米, 1908) の實驗値を示す。鐘口導板は孔の底及び側邊に附され第 396 圖に平行影線を以て示す。本實驗は規模極めて大にして $b=h=1.22$ m, 上流側水路 3.05 m 方形, 鐘口外端の擴がりは $b/2=h/2$ にして斷面は長半徑 0.91 短半徑 0.61 m の四分の一橢圓形、上下兩側の落差は 1.5~9.1 cm である。

$$Q = C \cdot bh \sqrt{2gH + v_0^2}, \quad H = \zeta \frac{v_0^2}{2g}, \quad v_0 \dots \text{樋中の平均流速}, \quad v_0 = 0.08 \sim 0.15 \text{ m/sec}$$

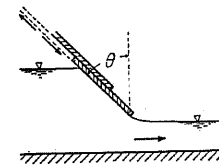
第 396 圖



第 74 表 樋を附したる完全潜孔の C 及び ζ

H cm	C				ζ			
	0.094	0.76	1.52	4.27	0.094	0.76	1.52	4.27
(i) 1.5	0.63	0.76	0.80	0.83	2.55	1.73	1.58	1.46
3.0	0.61	0.71	0.76	0.79	2.70	1.97	1.76	1.62
4.6	0.61	0.70	0.75	0.79	2.73	2.03	1.77	1.62
6.1	0.61	0.71	0.76	0.80	2.73	2.01	1.73	1.56
7.6	0.61	0.71	0.78	0.82	2.72	1.96	1.66	1.49
9.1	0.61	0.73	0.79	0.84	2.69	1.90	1.61	1.41
(ii) 1.5	0.67	0.74	0.80	0.84	2.25	1.85	1.56	1.43
3.0	0.63	0.69	0.77	0.79	2.51	2.09	1.72	1.60
4.6	0.63	0.68	0.76	0.80	2.55	2.14	1.73	1.58
6.1	0.63	0.69	0.77	0.81	2.54	2.11	1.69	1.52
7.6	0.63	0.70	0.78	—	2.52	2.04	1.63	—
9.1	0.64	—	—	—	2.48	—	—	—
(iii) 1.5	0.82	0.76	0.86	0.88	1.48	1.73	1.34	1.30
3.0	0.76	0.71	0.82	0.83	1.71	1.97	1.50	1.45
4.6	0.76	0.70	0.81	0.83	1.74	2.03	1.49	1.45
6.1	0.76	0.71	0.83	0.85	1.71	2.01	1.45	1.40
7.6	0.77	0.71	0.85	—	1.68	1.96	1.40	—
9.1	0.78	—	—	—	1.64	—	—	—
(iv) 1.5	0.93	0.93	0.93	0.92	1.15	1.10	1.17	1.19
3.0	0.92	0.90	0.89	0.88	1.19	1.24	1.27	1.29
4.6	0.92	0.90	0.89	0.88	1.17	1.24	1.27	1.28
6.1	0.94	0.91	0.90	0.89	1.14	1.21	1.24	1.25
7.6	0.95	0.93	0.92	—	1.10	1.17	1.19	—
9.1	0.97	—	—	—	1.06	—	—	—

(5) 傾斜扉を有する水門 鉛直に對し θ なる傾斜の扉を有する水門に於ては收縮は小となり従て C は大となる。Poncelet (佛, 1875) の實驗に依れば



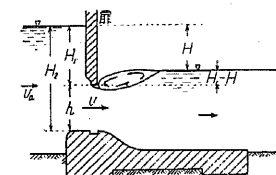
$\tan \theta = 0$	0.5	1
$C = 0.7$	0.74	0.8

第 397 圖

[48] 實際の水門に於ける流量係數

半開の水門は高さ h を自由に増減し得る矩形孔の大なるものなるも、下流の水路は水門流量を流す爲に一定の水深を必要とし、水深大にして下流水面が扉下端即ち孔頂を超ゆる時は潜孔にして、孔頂以下の場合不完全潜孔であるが多くの場合下流水面の位置明確ならず、(356) 式を適用するに困難なる場合多きため、矩形孔の (354) 式を用ひ C は實驗に依て定むるが、その精度は流速計に依る河川流量の測定以下である。[47] (4) に掲げたる Lebrons の實驗中兩側に導水板を有するものは類似の場合の大水門の C を定むるに指針となる。

(1) Rhein 河の August-Wyhlen 洗堰の實測 C (1921) 各幅 17.5 m の水門 10 徑間より成り基礎固定堰は河床上高さ約 1.5~3.0 m, 橋脚の厚 4.2 m (第 398 圖)、上游水位が固定堰天端上 $H_2=9$ m の時に開口の高さ h を増減して測定流量と開口天端水頭 H_1 とより流量係數 C を求めたる結果 (Fröhlich, 獨, 1921) は次の如し。但し此場合下流が流出流量を流す爲の水位が常に開口天端以上なるを以て凡て完全潜孔である。



$$Q = C \cdot bh \sqrt{2g \left(H + \frac{v_0^2}{2g} \right)},$$

第 75 表 C の實測値

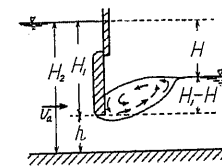
$$H_1 = H_2 - h, \quad H_2 = H_1 + h = 9 \text{ m}$$

$H_1 - H = 2.5$ m (扉下流面の水面以下の高さ)

h m =	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
H m =	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5
H_1 m =	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0
C	0.73	0.75	0.78	0.84	0.90

第 398 圖

即ち C 稍大なるは脚端及び固定堰に丸味を附し努めて抵抗を小ならしめたるに因る。但し總ての水門を h だけ開きたる場合にして、若し一徑間だけ開く時は收縮大となり C は小となる。

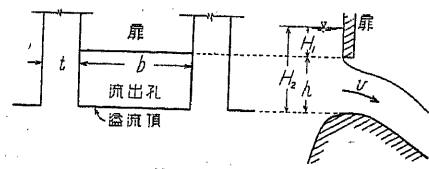


第 399 圖

(2) Wien の Donau 運河の水門の實測 C (1908) この水門は各幅 5.17 m の水門 18 連より成り各扉は上下二枚より成る。水位測定の誤差 < 1 cm, Q の測定誤差 < 2%, 脚の水平斷面形は略第 398 圖に同じ。

$$C = 0.81, \quad C \sqrt{2g} = 3.06$$

(3) Wilson 溢流堰堤の實測 C (G. Puls, 米, 1929) 水門の半開状態に於て Q を流速計にて測り



第 400 圖

$b=11.6\text{ m} \quad t=2.44\text{ m} \quad H_2=5.5\text{ m}$

$Q=C_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot b(H_2^{\frac{3}{2}} - H_1^{\frac{3}{2}}) \dots \dots (358)$

$C_1' = C_1 \frac{2}{3} \sqrt{2g}$

として C_1 及び C_1' を求めたるものにして、従て C_1 は (1), (2) の場合の C と多少異なる。脚の水平断面形は (1) と略同形。

第 400 圖の形の溢流堤にては最高頂に於て水面は既に著しく低下するを以て $h=4.5\text{ m}$ 以上にては溢流水面は扉下端に達せず、即ち普通の溢流となり、 $h < 4.5\text{ m}$ にては大なる流出孔である。

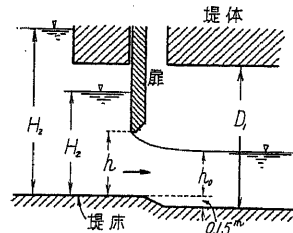
両側の水門の開又は閉に依て収縮を異にするため C_1 及び C_1' の値も異なる。

第 76 表 C_1 及び C_1' の實測値

$h=H_2-H_1=$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.275	4.51 m
$H_1 =$	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	0.225	(堰)
兩側全水門閉塞 C_1	0.603	0.607	0.608	0.610	0.615	0.624	0.644	0.685	0.715	0.688
” C_1'	1.78	1.79	1.794	1.80	1.813	1.84	1.90	2.02	2.11	2.03
兩側全水門開放 C_1	0.624	0.627	0.628	0.632	0.641	0.651	0.678	0.736	0.780	0.688
” C_1'	1.84	1.85	1.854	1.866	1.89	1.92	2.00	2.17	2.30	2.21

一般に水門に於て下流側の底勾配 i_0 が流出水の速度を保ち得る程度以上 ($v \leq C h^m i_0^{0.5}$ 即ち $i_0 \geq \frac{v^2}{C^2 h^{2m}}$) ならば孔全断面に對して 有効水頭 $= H_1 + \frac{v_0^2}{2g}$ として差支ない。

(4) Assuan 堰堤の水門の實測 C (1929) 埃及 Nile 河の Assuan 堰堤の水門 ($D_1=3.5\text{ m}$,



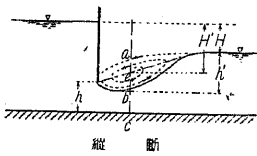
第 401 圖

$b=2.0\text{ m}$ 及び $D_1=7\text{ m}$, $b=2\text{ m}$ の二種、矩形水門) に於ける實測に依れば幅 b , 高さ h なる流出孔の流量は $H_2=4.25\sim 14\text{ m}$ に於て

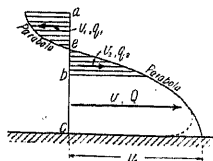
$Q=0.78 b h \sqrt{2g(H_2-2.57)} \dots (m\text{-sec}) \dots (359)$

この水門は底に 0.15 m の段あるを以て $C=0.78$ は段なき場合より大である。

(5) 水門流出に伴ふ諸現象 水頭 H が稍大なる時は流水は射流...[41] (3)...状態に在り、若し下流の水路が流量 Q を流す爲に要する水面の高が射流水面より高き時は門の若干下流に於て跳水 (Hydraulic jump) を生じて下流水面に一致し (第 402 圖)、射流部と下流との水面差が稍大なる時は點線を以て示すが如く上面に表面渦 (Surface eddy) を生じ、其下面は主流に牽かれて下流向に運動し上部は反對に上流に向ひ、その限界線は鎖線にて示す如く中央に近く在り、 $a b c$ 鉛直線上の流速の分布は圖に示す如く $a \dots e$ 部は逆流して流量 q_1 , $e \dots b$ 部は順流にして流量は $q_2 \approx q_1$, $b \dots c$ 部は主部にして流速大に、その流量 Q は全流量に等しい。 e 部に於て水壓最小にして $a \dots e$ 及び $e \dots c$ 部共流速分布は略水平軸拋物線にて表はさるゝも、床流速 v_0 は床面の抵抗に依り急減し點線の如き分布となる。従て流出の有効落差は $H+h'$ と H との中間 H' に近い。

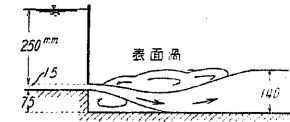


縦 断

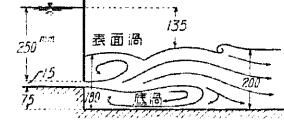


流速分布圖

第 402 圖



第 403 圖

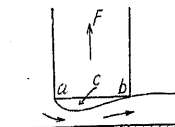


第 404 圖

流出孔の直下の床に段を付せば Q は多少増大し下部に底渦 (Bottom eddy) を生ずる。A. Schäfer (獨, 1929) の模型實驗に依れば下流水深小なれば底渦 (第 403 圖) 小に、下流水深大なれば底

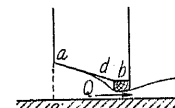
渦大に (第 404 圖)、表面渦の範圍は狭くなる。

浮力を利用して水門曳上げの力 (第 405 圖 F) を節約せんため中空の扉を用ふる場合、曳上げの初期に於て下面の水壓急減し浮力は著しく減ずる。



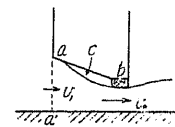
第 405 圖

第 405 圖の如き水平底に於ては a に於て既に水の全壓力は流速に變じ浮力は消滅し、又底面下に外氣との連絡なき時は上げ始むる時 c 部に低壓を生じ、吸着作用起りて自重のみの場合より却て大なる力を要する場合あり、此缺點を避くるため下面を傾斜せしむれば (第 406 圖)、上げ始めの際は流量 Q 微小なるため、浮力は若干低減するも猶下面の大部分に作用するが、曳上げの進むに従ひ Q 大となり a 部の流速増大し浮力は次第に減ずる (第 407 圖)。



第 406 圖

第 408 圖に於て v_2 は水頭 H_2 に對して一定し、理論上は



第 407 圖

$v_2 = \sqrt{2gH_2}$ 且 $v_1 = v_2 \frac{h_2}{h_1} \therefore a$ の流速水頭, $\frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 = H_2 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2$

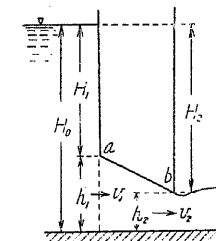
$\therefore a$ の浮力強度 $p_1 = w_0 H_1 - w_0 H_2 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 = w_0 H_1 \left[1 - \frac{H_2}{H_1} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2\right] = \mu w_0 H_1$

茲に $\mu = 1 - \frac{H_2}{H_1} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2$, 若し $H_1 = H_2$ ならば

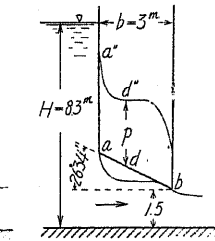
$\mu = 1 - \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2$

$h_2/h_1 =$	0 (閉塞)	0.25	0.5	0.75	1.0
$\mu =$	1.00	0.9375	0.75	0.5625	0

Carstanjen (獨, 1926) の計算に依れば第 409 圖の場合に浮力の分布は $a' d' b$ 線に示す如く閉塞時下面浮力の 40% 位に下り、下面が水平に近き程 a の附近は射水面を離れる傾向がある。

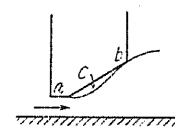


第 408 圖

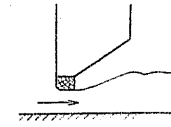


第 409 圖

第 410 圖の如く基礎面水平に近き時は下流の水面高きため射流は跳水を起すを以て、扉下面を上り勾配にするも猶 b 點附近に於て水に接し c 部に低壓を生ずる。従て吸着作用を防ぐには第 411 圖の如き形が最も有利である。

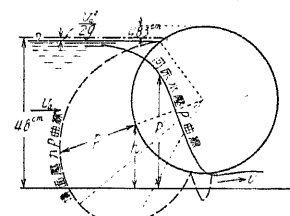


第 410 圖

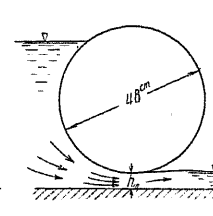


第 411 圖

轉動堰の如き水平圓錐を僅かに引上げて下端の開口より水を流出せしむれば (第 413 圖)、堰上流側に於て壓力水頭は漸次に流速に變ずるを以て堰面に作用する水壓は低下し、下側程流速大に壓力の低下も著しきを以て浮力は一層著し



第 412 圖



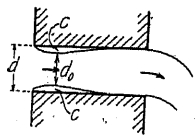
第 413 圖

く低下する。Kulka (獨, 1928) が徑 48 cm の圓壩を以て水を堰き種々の開口高 h_0 に就きて壩の外表面及び河床面に作用する水壓の強さを測定せしが、 $h_0=4.83$ cm に對するものを第 412 圖に示す。壩面壓力 p は總ての點に於て向心方向に作用し下面に於て急減し、河床水壓の分布は p' 曲線に依て示され略 $p+2w_0h$ に等しい。浮力は p の鉛直分力の和なるを以て閉塞時より著しく低減する。

一般に低壓に因る吸着作用を軽減するには扉下端面の幅を出来るだけ小にするを利とする。

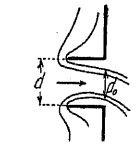
[49] 短管及び射出水

(1) 流出孔及び短管 稍厚き壁に穿ちたる孔、又は短管及び短樋 (Short tube, Mouthpiece)



第 414 圖

を取付けたる孔に於ては射出水は孔内にて收縮し再び擴大して孔内面に接觸して流出する。此場合 C 部 (第 414 圖) の空氣は水に伴はれて排出され低壓を生じ多くは渦にて充され、爲にベナコントラクタの流速大となり、從て流量及び流量係數 (C) は完全收縮の場合より大となる...[45] (1) 及び

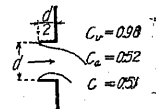


第 415 圖

(3) 参照...從て孔の入口を、收縮射出水の周面に近似せしめ其の最小斷面を a とすれば C_c は殆んど 1 に近づく。若し反對に内側に突出する短管 (第 415 圖) を附すれば入口の流向轉換激しく收縮は一層著しい。次に種々の流出孔及び短管に對し實驗に依て定めたる C_v , C_c 及び C を示す。

$$Q = C_a v \sqrt{2gH}, \quad a \dots \text{孔斷面積}, \quad h_r = f_{oc} \frac{v^2}{2g}, \quad f_{oc} = \left(\frac{1}{C^2} - 1 \right)$$

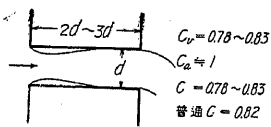
1. Borda の Mouthpiece



第 416 圖

$C_v = 0.98$
 $C_c = 0.52$
 $C = 0.51$

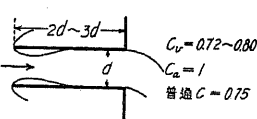
2. 標準短管



第 417 圖

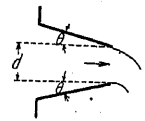
$C_v = 0.78 \sim 0.83$
 $C_c = 1$
 $C = 0.78 \sim 0.83$
普通 $C = 0.82$

3. 内側突出短管

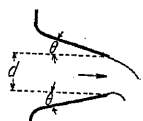


第 418 圖

$C_v = 0.72 \sim 0.80$
 $C_c = 1$
普通 $C = 0.75$



第 419 圖



第 420 圖

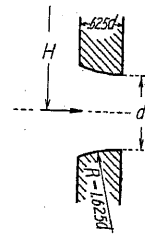
4. 錐筒狀短管 (第 419 圖) 5. 同 4, 内角丸味 (第 420 圖)

4 及び 5 の C

$\theta = 0$	$5^\circ 45'$	$11^\circ 15'$	$22^\circ 30'$	45°
$C_4 = 0.83$	0.94	0.92	0.85	—
$C_5 = 0.97$	0.95	0.92	0.88	0.75

6. 鐘口孔 (Bellmouth orifice), (Weisbach, 獨)

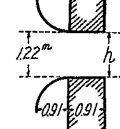
H m = 0.02	0.50	3.5	17	103
C = 0.959	0.967	0.975	0.994	0.994



第 421 圖

7. 内側に突出する方形鐘口大孔

$$h = b = 1.22 \text{ m}$$

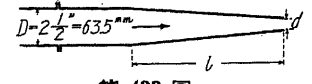


第 422 圖

水頭 H m	C
1.5	0.93
4.6	0.89
7.6	0.92

8. 射水管 (Nozzle)

(Freeman, 米, 1888)



第 423 圖

$d'' = \frac{3}{4}''$	$\frac{3}{8}''$	$1''$	$1\frac{1}{8}''$	$1\frac{1}{2}''$	$1\frac{3}{4}''$
d mm = 19	22.2	25.4	28.6	31.75	34.9
C = 0.983	.982	.972	.976	.971	.959

他の實驗 $D = 1\frac{3}{4}'' = 44.45 \text{ mm}$, $d = 1\frac{1}{4}'' = 31.75 \text{ mm}$

$C = 0.98$

9. 環射水管 (Ring nozzle)

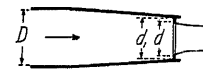
$$D = 2'' = 50.8 \text{ mm}$$

$$d_1 = 1\frac{1}{2}'' = 38.1 \text{ mm}$$

$$d = 1\frac{1}{4}'' = 31.75 \text{ mm}$$

$$C_v = 0.97, \quad C_c = 0.764$$

$$C = 0.74$$



第 424 圖

10. 射水管 (Nozzle)

$$D = 63.5 \text{ mm}$$

$$d_1 = 39.4 \text{ mm}$$

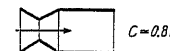
$$d = 28.6 \text{ mm}$$

$$C = 0.980 \sim 0.986$$

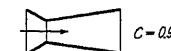


第 425 圖

11. 狹窄部を有する短管

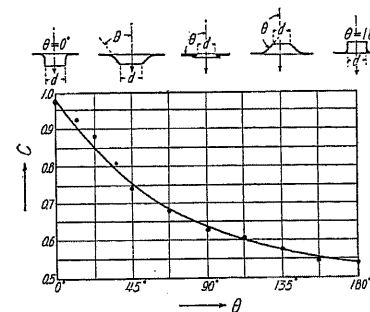


第 426 圖



第 427 圖

12. 種々の短樋 (Mouthpiece) の C (Weisbach)



第 428 圖

水槽底の圓孔に短樋 (Mouthpiece) を取付けたる場合小なる端の徑を d, 斷面積を a とすれば

$$Q = C a v \sqrt{2gH} = C \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2gH}$$

Weisbach の $d=2$ cm, $H=0.3 \sim 3$ m の實驗値は周邊面の鉛直に對する傾角 θ に依て異なる (第 428 圖)。

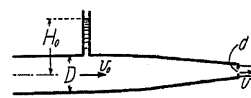
G. Zeuner (獨, 1856) は C と θ との關係を次式に依て表はした。

$$C = 0.6385 + 0.2121 \cos^2 \frac{\theta}{2} + 0.1065 \cos^4 \frac{\theta}{2}$$

... (360)

(2) 射出水 (Water jet) 射水管の端より流出する水の水速 v は

$$v = C_v \sqrt{2g \left(H_0 + \frac{v_0^2}{2g} \right)} = C_v \sqrt{2gH}$$



第 429 圖

C_v は d/D , 射水管の長さ, 形及び内面の粗滑等に依て異なるも普通 $C_v = C$ である。

然るに $Q = v_0 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 = v \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \therefore v_0 = \left(\frac{d}{D} \right)^2 v$ 之を上式の v_0^2 に代用して v を求むる、但し C 及び C_v は (1) に據る。

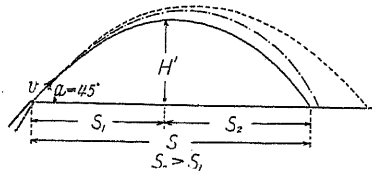
$$v = C_v \sqrt{\frac{2gH_0}{1 - C_v^2 \left(\frac{d}{D}\right)^2}}, \quad C_v = C \dots \dots \dots (361)$$

射水管を鉛直に上方に向ければ射出水は鉛直に上昇し、重力の逆作用並に種々の抵抗に依り次第に減速し、従て断面を拡大し遂に分散して落下する。此場合は固体と異り断面の漸擴に依る勢力消耗...[32] (2)...あるを以て上昇高は固体の場合より更に少ない。J. R. Freeman (米, 1889) の實驗に於ては次の如し。但し H は理論上の上昇高。

$$\left. \begin{array}{l} \text{射水管 } 8, 10, \quad H' = H - 0.000113 \frac{H^2}{d} \\ \text{,, } 9, \quad H' = H - 0.000131 \frac{H^2}{d} \end{array} \right\} \dots \text{但し } H \dots \text{理論上昇高} \dots (362)$$



第 430 圖



第 431 圖

尙 Koch (獨, 1927) によれば、 $H' = \frac{2}{3}H$

但し $\frac{H}{d} > 50$

次に斜に上方に向く時、最遠距離に達する傾角 α は、無抵抗なりと假定すれば體間に於ては $\alpha = 45^\circ$ なるも、連続せる

射出水に於ては上記の如く固体より大なる抵抗を受け α は H 及び v に依て異なる。Freeman (1889) の實驗に依れば

$H_m = 3.5 \sim 7.0$	10	35
S_{max} の $\alpha = 45^\circ$	$35^\circ \sim 40^\circ$	$30^\circ \sim 34^\circ$

次に Koch u. Carstanjen の研究に依れば

$$H' = \frac{2}{3}H(1 - \cos^2 \alpha) \quad \text{但し } H = \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (363)$$

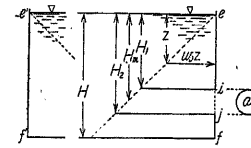
$$S = S_1 + S_2 = H \left[\frac{1}{2} \sin 2\alpha + \cos^2 \alpha \log_e \left(\frac{1 + \sin \alpha}{\cos \alpha} \right) \right] + 2H \cos \alpha \left[\frac{2}{3} (1 - \cos^2 \alpha) \right]^{\frac{1}{2}} \dots (364)$$

上式より S を最大ならしむる α を求め得る。

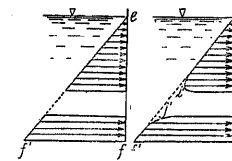
第 431 圖は $\alpha = 45^\circ$ の場合の射出水にして、點線は無抵抗の場合、實線は Koch の半理論的計算にして断面擴大の影響を考慮したるものである。鎖線は空氣中の投射固体の運動にして圖は兩者の差を示す。射出水に於ては空氣抵抗より断面漸擴の損失大なるを以て上昇部は下降部に比して水平速度の低減急である。

[50] 流出渦

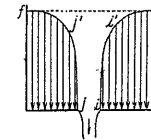
(1) 流出に因る壓力の低下 流出孔なき場合鉛直壁 ef (第 432 圖) に作用する水壓は普通



第 432 圖



第 433 圖 第 434 圖



第 435 圖

の静水壓に等しく各點の壓力強度は $w_0 z$ にして、 ef 面の幅を B 、全水深を H とすれば壁面に作用する全水壓は $\frac{w_0}{2}BH^2$ である。然るに壁に ij なる孔を設くる時はこの部分は氣壓と同一の壓力となるを以て、今、孔中心の水深を H_m 、孔の斷面積を a とすれば壁面の抵抗力は (第 432 圖)

$$P' = \frac{1}{2}w_0BH^2 - w_0aH_m$$

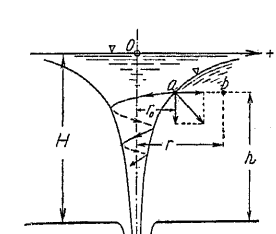
なるを以て結局 w_0aH_m だけの力が孔外に向つて作用する。然るに水衝原理...[41] (2)...に依り力は運動する質量 M の運動量の單位時間の増加に等しく、今 ij 面に於て水が静止より急に v なる速度を得るものとすれば運動量の増加は

$$\frac{1}{2}Mv = \frac{1}{2} \frac{w_0}{g} Qv = \frac{w_0}{2g} av^2 = w_0H_m a \quad \therefore v = \sqrt{2gH_m}$$

然るに實際は孔面の内側に於て既に接近の速度を生ずるを以て静水壓は多少低下し ef 面上の壓力強度の分布は第 434 圖の $ei'i$ 及び $ff'j'j$ に示す如く、水面は之に應じて多少低下する。

槽底の孔より流出する場合 (第 435 圖) に於ては、孔なき時は底全面に水深に相當する水壓作用するも、孔より流出せしむれば各點の水壓強度は周圍より中心に向ふて徐々に低下し孔附近に於ては急に低下する。従て水面は周圍より中心に向ふて低下し、孔の直上に窪を生ずる。然るに窪の水面を維持する爲には水の遠心力の作用を必要とするを以て水粒は高速の廻轉運動を爲す。一方流出する水は水面の低下に依て供給するを以て水面より孔に向ふ鉛直の運動も共存する、従て結局表面の水粒は螺旋運動を爲しつゝ孔に達すると考へ得る。斯の如く流出孔より水が流出する際に現はるゝ水流の螺旋運動を流出渦 (Outflow vortex) と云ふ。

(2) 渦窪 (Vortex pot) の理論 水粒の螺旋運動が Bernoulli 定理に従ふものと假定すれば、流出水は水面より供給さるゝを以て總ての水粒は最初槽底より H なる高さの位高 (Elevation head) を有し、運動して水底より h なる高さ迄下りし時壓力 p 、速度 v を有するものとす



第 436 圖

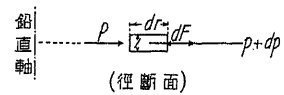
ば $H = \frac{p}{w_0} + \frac{v^2}{2g} + h$ 、今、窪表面の一點 a 及び之と同一高に存する内部の點 b (第 436 圖) に Bernoulli の定理を適用すれば

$$H = \frac{p_a}{w_0} + \frac{v_a^2}{2g} + h = \frac{p_b}{w_0} + \frac{v_b^2}{2g} + h \quad \dots \dots \dots (i)$$

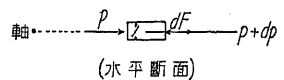
$$\therefore \frac{p}{w_0} + \frac{v^2}{2g} = \text{const.} \quad \therefore \frac{1}{w_0} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad \dots (ii)$$

然るに實際の運動に於ては廻轉速度に比し向心 (Radial) 及び鉛

直の速度は微小なるを以て、先づ之等を見捨れば p 及び v は r のみの函数にして (ii) 式は $\frac{1}{w_0} \frac{dp}{dr} + \frac{v}{g} \frac{dv}{dr} = 0 \dots \dots$ (iii) と書く事を得、而て一方水平方向の力の平衡より遠心力 dF と壓力差 dp とは平衡するを要するを以て r の方向に dr なる長さ



(徑断面)



(水平断面)

第 437 圖

有する微直角六面體を考ふれば (第 437 圖)

$$(p+dp) \cdot h - p \cdot h - dF = 0 \quad \text{即ち} \quad dp = dF$$

$$dF = \frac{w_0 \cdot l \cdot dr}{g} \frac{v^2}{r} = \frac{w_0}{g} \frac{v^2}{r} dr = dp$$

$$\therefore \frac{dp}{dr} = \frac{w_0}{g} \frac{v^2}{r}, \quad \text{之を (iii) に代入して}$$

$$\frac{1}{g} \frac{v^2}{r} + \frac{v}{g} \frac{dv}{dr} = 0 \quad \therefore \frac{dv}{dr} + \frac{v}{r} = 0$$

$$\text{積分して} \quad v \cdot r = \text{const.} = C \quad \therefore v = \frac{C}{r} \quad \dots \dots \dots (365)$$

即ち一の水平面上に於ては廻轉線速度 v は r に逆比例し軸に近き程線速度は大である。斯の如き渦動を自由渦 (Free vortex) と稱する。

次に (i) 式に (365) 式の関係を入れて書き直せば

$$p_0 - p = \frac{w_0}{2g} \left(\frac{C^2}{r^2} - \frac{C^2}{r_0^2} \right) = \frac{v^2}{2g} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad \dots \dots \dots (iv)$$

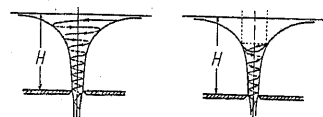
今、徑断面に於て等壓線を求めるに (i) に於て $p = \text{const.}$ と置けば

$$\frac{v^2}{2g} + h = \text{const.} = C' \quad \therefore \frac{1}{2g} \frac{C^2}{r^2} + h = C' \quad \therefore C' - h = \frac{C^2}{2g} \cdot \frac{1}{r^2} \quad \dots \dots (366)$$

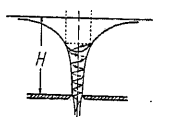
即ち等壓線は $h = C'$ なる水平線と渦軸とを漸近線とする拋物線にして、等壓面は之を渦軸の周りに廻轉して生ずる曲面である。渦窪の表面は (366) 式に於て $r = r_0$ の場合である。

上記の理論は水槽が極めて大なる半径を有する圓筒状と假定せるものにして、半径大ならば周面の摩擦抵抗に依り運動は多少異り、殊に槽の断面が圓形ならざる場合は上記の理論は中央部に對してのみ近似的に適用さる。

(3) 實際の流出渦 實際の流出渦に於ては窪の表面より飛散せる水沫が窪の下部を填め其の周囲の水の運動に伴はれて廻轉運動を起し、その角速度は略自由渦の内面のそれに等しく、従て線速度は中心に近き程小にして、理論上の強制渦 (Forced vortex) ... [7] (3) 及び [100] (6) 参照... に近似して居る。而して強制渦の部分の水は主渦の流動に伴はれて徐々に孔より流出するが、



第 438 圖



第 439 圖

その發生當時に混じたる空氣も共に流出する。従て孔より流出する水が管水路の如く自由水面を有せざる場合に於ては、水路中の一部、特に峰狀を爲す所に蓄積して高壓を生じ、且つ水流を著しく妨ぐる。第 438 圖は自由渦の表面水粒の運動

を示し、第 439 圖は中央部の強制渦の水分子の運動を示す略圖である。

自由渦の窪孔が孔に達すれば内側の空氣が水に伴はれて多量に流出する。之の現象は水深 H 小、孔径 d 大なるほど即ち H/d の小なる程、又槽が廻轉運動に都合よき圓筒状なる場合に起り易く、その限界は普通 $H/d = 1 \sim 2$ である。然し中央に強制渦の生ずる場合に於ても有害なる程度に空氣の巻き込まれぬ爲には $H/d > 3 \sim 4$ を要する。

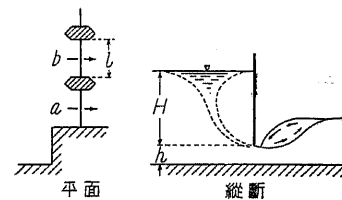
之等の現象は實地上極めて重要なるも充分なる實驗は行はれて居らぬが次に著者その他の觀測を述ぶる。

1. 著者 (1931)

i. 孔面積 (a) に比し水面積 (A) の極めて大なる場合、 $d = 25 \text{ mm}$

$H/d < 1.0 \sim 1.2$, 自由渦の空氣錐 (Air cone) が孔に達する。

$H/d > 2.0$, 強制渦を生じ空氣泡の巻き込みは著しくない。

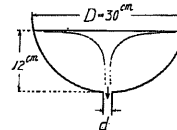


第 440 圖

ii. 模型水門を流出する場合 (第 440 圖) $H = 40 \text{ cm}$, $l = 36.4 \text{ cm}$

$H/h > 4$ a, b 共空氣は巻き込まれぬ。

$H/h = 2.4$ a 水門に於て空氣巻き込まれ、
 b 水門に於ては巻き込まれぬ。



第 441 圖

iii. 廻轉運動の生じ易き槽 (第 441 圖) $D = 30 \text{ cm}$, $d = 2 \text{ cm}$

$H/d < 4$ ならば空氣錐が孔に達する。

2. Winkel (獨, 1919) 實驗裝置の寸法は示されて居らぬ。

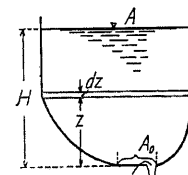
(第 442 圖) $H/d < 1 \sim 1.5$ ならば、空氣錐が管内に達する。

第 442 圖

(第 443 圖) $H/d < 1.5 \sim 2$ ならば、空氣錐が孔に達する。

第 443 圖

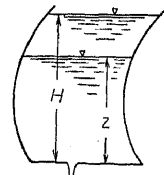
[51] 水槽内の水を排出するに要する時間



第 444 圖

(1) 一般の場合 底又は側壁下部の孔より水を排出する時は最初水面高き間は水頭 H 大、流出速度 v 大、従て單位時間の流量 Q 大なるを以て水面積の變化なき時は最初槽内水面は急に低下するも、 H は漸次に減少し従て Q も小となり水面は徐々に低下する。

H ... 孔面より最初の水面迄の高さ, A ... 水面の面積, a ... 孔面積, z ... 孔面より z に於ける水面迄の高さ, A_z ... z に於ける水面積



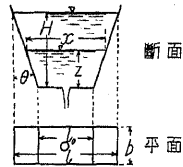
第 445 圖

水面 $+z$ に位する時微小時間 dt 間に流出する水量は $dQ = Ca\sqrt{2gz} \cdot dt$ にして同期間に槽内の水は $A_z dz$ だけ減じ兩者は同一量なるを以て

$$dQ = -A_z dz = Ca\sqrt{2gz} dt \quad \therefore \frac{dt}{dz} = -\frac{A_z}{Ca\sqrt{2gz}}$$

故に水面を H より z 迄下ぐるに要する時間 t は

$$t = -\int_H^z \frac{A_z}{Ca\sqrt{2gz}} dz = +\int_z^H \frac{A_z}{Ca\sqrt{2gz}} dz \quad \dots \quad (367)$$



第 446 圖

若し C が H に無関係なりと假定し尙 $A_z = f(z)$ にて表せば普通の積分法に依て t を計算し得るも、 $f(z)$ の函數形に依り積分不可能なる場合は圖式又は數値積分 (Numerical integration) を用ふる。

(2) 水槽の水平斷面積不變なる場合 (第 445 圖) $A_z = A$

$$t = \frac{A}{Ca\sqrt{2g}} \int_z^H z^{-\frac{1}{2}} dz = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}} (H^{\frac{1}{2}} - z^{\frac{1}{2}}) \dots \quad (368)$$

(3) 梯形水槽 (第 446 圖) 梯形其他水面積が z に伴ふて増大する水槽に於ては $A_0 = b_0$,

$$A = bl, \quad A_z = bx = b(b_0 + 2z \tan \theta)$$

一般に $A_z = k(m+z), \dots k, m$ は常數

$$t = \frac{k}{Ca\sqrt{2g}} \int_z^H (m+z)z^{-\frac{1}{2}} dz = \frac{k}{Ca\sqrt{2g}} \left[2m(H^{\frac{1}{2}} - z^{\frac{1}{2}}) + \frac{2}{3}(H^{\frac{3}{2}} - z^{\frac{3}{2}}) \right] \dots \quad (369)$$

(4) 漏斗狀水槽 (第 447 圖) 漏斗狀又は $+z$ の水面積 A_z に等しき圓の半徑 r_z が z に

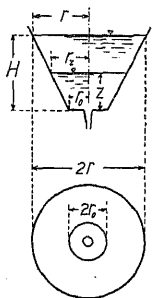
比例して増大する水槽に於ては一般に $A_z = k(l+mz+nz^2)$ にして水平斷面が凡て圓なる時は

$$A = \pi(r_0 + H \tan \theta)^2, \quad A_z = \pi(r_0 + z \tan \theta)^2, \quad A_0 = \pi r_0^2$$

$$k = \pi, \quad l = r_0^2, \quad m = 2r_0 \tan \theta, \quad n = \tan^2 \theta$$

$$t = \frac{k}{Ca\sqrt{2g}} \int_z^H (l+mz+nz^2)z^{\frac{1}{2}} dz$$

$$\therefore t = \frac{k}{Ca\sqrt{2g}} \left[2l(H^{\frac{1}{2}} - z^{\frac{1}{2}}) + \frac{2}{3}m(H^{\frac{3}{2}} - z^{\frac{3}{2}}) + \frac{2}{5}n(H^{\frac{5}{2}} - z^{\frac{5}{2}}) \right] \dots \quad (370)$$

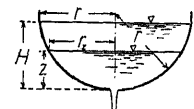


第 447 圖

(5) 缺球面水槽 (第 448 圖) $A_z = \pi[r^2 - (r-z)^2] = \pi(z^2 - 2rz)$

$$t = \frac{\pi}{Ca\sqrt{2g}} \int_z^H (z^2 - 2rz)z^{-\frac{1}{2}} dz$$

$$= \frac{\pi}{Ca\sqrt{2g}} \left[\frac{2}{5}(H^{\frac{5}{2}} - z^{\frac{5}{2}}) - \frac{4}{3}r(H^{\frac{3}{2}} - z^{\frac{3}{2}}) \right] \dots \quad (371)$$



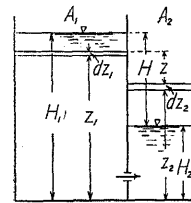
第 448 圖

側壁に穿たれたる流出孔に於ては (367) より (371) 迄の式は孔頂以上の

部分にのみ適用し得る。

(6) 潜孔に依て排出する場合 第 449 圖の如く隔壁に設けたる潜孔に依て水を水位高き方よ

り低き方に排出する時は落差 z は漸減する。兩槽共水平面積は一定にして之を A_1 及び A_2 と



第 449 圖

し、孔の面積を a 、最初の落差を H 、 t に於ける落差を z とすれば

孔の流速 $v = \sqrt{2gz}$ 、孔の流量 $q = Ca\sqrt{2gz}$

$$A_1 \text{ 水槽の水面下降の速度} = \frac{q}{A_1} = -\frac{dz_1}{dt}$$

$$A_2 \text{ ,, ,, 上昇 ,,} = \frac{q}{A_2} = \frac{dz_2}{dt}$$

$$\begin{aligned} \text{單位時間の } z \text{ の増加} &= -\frac{dz_1}{dt} + \frac{dz_2}{dt} = -\frac{d(z_1 - z_2)}{dt} = -\frac{dz}{dt} \\ &= Ca\sqrt{2gz} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \end{aligned}$$

故に落差が H より z に減する爲の時間は

$$t = \frac{1}{Ca\sqrt{2g} \left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right)} \int_z^H z^{-\frac{1}{2}} dz = \frac{2(H^{\frac{1}{2}} - z^{\frac{1}{2}})}{\left(\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) Ca\sqrt{2g}} \dots \quad (372)$$

貯水池の排水に關しては [84] (1) 参照。