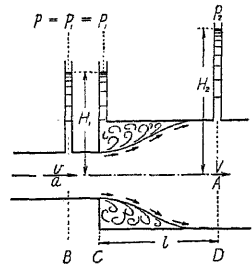


第七章 水路に於ける種々の水頭損失

[31] 断面の急變に因る水頭損失

水流の断面、水面勾配、流速等が位置及び時刻に依て變ぜぬ等速定流に於ては、勢力消耗即ち水頭損失は流動に對する抵抗に打克て等速運動を繼續する爲に要するものゝみなるも、水流の状況に稍急なる變化ある時はその爲に必ず餘分の勢力消耗を生じ、之等は熱、振動、音響等の勢力に變じ、後二者も亦結局熱に變じて共に放散し去る。

(1) 断面の急擴大に因る水頭損失 (Loss of head due to sudden enlargement) 今、管内



第 244 圖

に充滿して流るゝ水流の C 断面に於て面積が急に a より A に増大する場合を考ふるに、C を出づる際は慣性に依りて B 部と同一の流速 v と方向とを有し、其の外圍は渦を以て充たされ、急變に因る損失は實は之の渦動の爲に消費さるゝ。順流部の限界面は漸次に擴大し同時に流速は漸減して、若干下流 (D 断面) に於て全断面を充たし、それ以下は V なる等速の流れとなる。實測の結果 C 断面に於ける管内の水壓 p<sub>1</sub> は B 断面に於けるものと等しく、D 断面に於ては流速の低減に伴ひ Bernoulli の定理に依り p<sub>2</sub> に増大し CD の兩端に於て總水壓は p<sub>1</sub>A より p<sub>2</sub>A に増大す。

依て B, D 間に於ける断面急増に因る水頭損失を h<sub>e</sub> とすれば Bernoulli 定理 (80) 式に依り

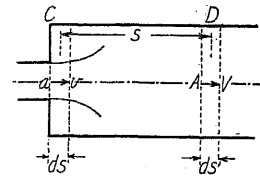
$$\frac{p_1}{w_0} + \frac{v^2}{2g} = \frac{p_2}{w_0} + \frac{V^2}{2g} + h_e \quad \therefore h_e = \frac{p_1 - p_2}{w_0} + \frac{v^2 - V^2}{2g} \quad \dots \quad (206)$$

而て流量は Q = av = AV にして同一なるも、流速異なるを以て單位時間に流過する水量 Q の有する運動量 (Momentum = mass · velocity) は C に於て  $\frac{w_0}{g} Q \cdot v$  にして D に於て  $\frac{w_0}{g} Q \cdot V$  に減する。然るに此變化は C 及び D に作用する總水壓 (p<sub>1</sub>A, p<sub>2</sub>A) の差に因るものと考ふる事を得るを以て

$$p_2 A - p_1 A = \frac{w_0}{g} Q(v - V) \quad \dots \quad (207)$$

二固體の衝突に於ては運動量の單位時間に於ける増加は Mass · dv/dt にして即ち増加の方向に作用する合成力に等しく、之の原理を水流に應用すれば

$$\begin{aligned} \text{C に於ける運動量} & \quad \frac{w_0}{g} a \cdot ds \cdot v \\ \text{D} & \quad \frac{w_0}{g} A \cdot ds' \cdot V \end{aligned}$$



第 245 圖

今 C より D まで流るゝに t なる時間を要するものとすれば

$$\begin{aligned} \text{運動量の單位時間の増加} &= \frac{w_0}{g} \left( A \cdot \frac{ds'}{dt} V - a \cdot \frac{ds}{dt} \cdot v \right) \\ &= \frac{w_0}{g} (A \cdot V - a \cdot v) = \frac{w_0}{g} Q(V - v) \quad \dots \quad (208) \end{aligned}$$

即ち連続的に運動する流水に於ては流量 Q の運動量の増加を以て運動量の單位時間の増加を表はす事を得る。

$$(207) \text{ 式より } w_0 A(H_2 - H_1) = \frac{w_0}{g} Q(v - V) \quad \therefore H_2 - H_1 = \frac{V}{g}(v - V)$$

$$\therefore h_e = -(H_2 - H_1) + \frac{v^2 - V^2}{2g} = \frac{(v - V)^2}{2g} \quad \dots \quad (209)$$

即ち衝力理論 (Impulse theory) に従へば差速に相當するだけの水頭を失ふ事となるも、實際の損失は流速水頭の差 (v<sup>2</sup> - V<sup>2</sup>)/2g の一小部を失ふに過ぎず他は壓力水頭に變形する。

(209) 式を書き直せば

$$h_e = \frac{v^2}{2g} \left( 1 - \frac{V}{v} \right)^2 = \frac{v^2}{2g} \left( 1 - \frac{a}{A} \right)^2 = \frac{v^2}{2g} \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 = f_e \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{茲に } e = \mu \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 = \mu_e \left( 1 - \frac{a}{A} \right)^2 \quad \dots \quad (210)$$

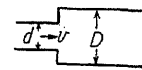
f<sub>e</sub>...急擴損失係數、 μ<sub>e</sub>...1 に近き係數

上記の理論の結果、f<sub>e</sub> は断面積のみに依て定まるも實際は a/A の値、断面形等に依て渦動の程度及び C 面に於ける壓力等多少異なる爲 f<sub>e</sub> は實驗に依て定められ、一般に擴大の度大なる程多少増大するを以て、精確に表はせば理論値に μ<sub>e</sub> を乗じたるものである。Gibson (英, 1911) に依れば  $\frac{a}{A} = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{12}$ , d 及び D = 12.5 ~ 150 mm に於て

$$\mu_e = 1.025 + 0.0025 \frac{D^2}{d^2} - 0.0008 \cdot d \quad \dots \quad (211)$$

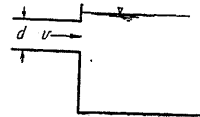
$$\text{又は } h_e = 1.08 \frac{(v - V)^{1.919}}{2g} \quad \dots \quad \text{(Archer)} \quad \dots \quad (212)$$

第 47 表 急擴損失係數 f<sub>e</sub>, h<sub>e</sub> = f<sub>e</sub> ·  $\frac{v^2}{2g}$ , (f<sub>e</sub> は單位系に無關係なる數)



D/d \ v m/sec.	0.50	1.00	1.50	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	12
1.2	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08
1.4	0.26	0.25	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20
1.6	0.40	0.38	0.37	0.36	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.32
1.8	0.52	0.49	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.41	0.40
2.0	0.60	0.57	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.49	0.48	0.47

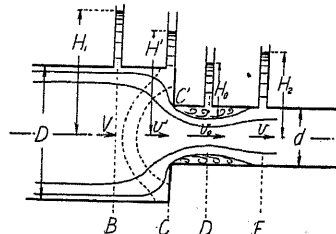
2.5	0.74	0.72	0.69	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59
3.0	0.83	0.80	0.77	0.75	0.74	0.73	0.71	0.70	0.69	0.68	0.66	0.65
4.0	0.92	0.88	0.85	0.83	0.82	0.81	0.79	0.78	0.77	0.75	0.74	0.73
5.0	0.96	0.93	0.90	0.88	0.87	0.86	0.84	0.83	0.82	0.80	0.79	0.78
10.0	0.99	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.91	0.90
∞	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



流速微小なる水槽中に流入する場合は  $D/d = \infty$  に相当し殆んど全流速水頭が失はるる。

第 246 圖

(2) 断面の急縮小に因る水頭損失 (Loss of head due to sudden contraction) 断面が C に



水流断面積	A	a	a <sub>0</sub>	a
平均流速	V	v'	v <sub>0</sub>	v
水圧強度	p <sub>1</sub>	p'	p <sub>0</sub>	p <sub>2</sub>
壓力水頭	H <sub>1</sub>	H'	H <sub>0</sub>	H <sub>2</sub>
管 徑	D	d	d <sub>0</sub>	d

第 247 圖

於て急に縮小する時はその上流側に於て中央部の水は軸線に沿ふて流るゝも、外周の水は急に方向を轉じ求心的に流れ、水流の断面を a よりも一層縮小せしめ稍下流の D に於て最小断面 a<sub>0</sub> 従て最大流速 v<sub>0</sub> を生ずる。然るに BD 間の變化は水壓の急減、流速の急増即ち力に因る加速運動にして水衝現象を伴はざるを以て、勢力損失は單に壓力水頭が流速に變ずる場合に伴ふものにして割合に小である。今この損失水頭を h'<sub>r</sub> とし B 及び D に Bernoulli 定理を適用し、尙損失なき場合の理論流速を u<sub>0</sub> とすれば

$$\frac{V'^2}{2g} + H_1 = \frac{v_0^2}{2g} + H_0 + h'_r \quad \therefore v_0 = \sqrt{2g(H_1 - H_0) + V'^2 - 2gh'_r} = C_c \cdot u_0$$

$$\therefore h'_r = (1 - C_c^2) \frac{u_0^2}{2g} = f_c' \frac{v_0^2}{2g}, \quad f_c' = \frac{1}{C_c^2} - 1$$

然るに  $A/a = 1$  ならば  $C_c = 1$ ,  $A/a = \infty$  ならば實驗上  $C_c \approx 0.96$  にして、普通管徑變化の場合  $A/a$  は餘り大ならぬを以て

$$C_c \approx 0.99 \quad \therefore f_c' = \frac{1}{C_c^2} - 1 \approx 0.02 \quad \therefore h'_r \approx 0.02 \frac{v_0^2}{2g} \quad \dots \quad (213)$$

次に DE 間の變化は (1) の場合と同様にして損失 h'<sub>e</sub> は

$$h'_e = f_e \frac{v^2}{2g} = \left(\frac{a}{a_0} - 1\right)^2 \cdot \frac{v^2}{2g} = \left(\frac{d^2}{d_0^2} - 1\right)^2 \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \dots \quad (214)$$

然るに a<sub>0</sub> と小管の断面 a との比、即ち收縮係數 (Coef. of contraction)  $C_a = a_0/a$  は a/A 又は d/D に依て略定まり實驗の結果は

第 48 表 收縮係數 C<sub>a</sub> の實驗値

a/A = 0.01	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
C <sub>a</sub> = 0.60	0.61	0.62	0.65	0.70	0.77	1.00... (Weisbach)
,, =	0.60	0.595	0.692			...(Gibson)

C<sub>a</sub> の實際の測定は困難にして結果も一定せざるが、Merriman は種々の實驗を綜合して次の如き實驗式を得た。

$$C_a = a_0/a = 0.582 + \frac{0.0418}{1.1 - d/D} \quad \dots \quad (Merriman, 米) \quad \dots \quad (215)$$

故に断面急縮小に因る水頭損失は

$$h_c = h'_r + h'_e = f_c \frac{v^2}{2g}, \quad f_c = 0.02 \frac{1}{C_a^2} + \left(\frac{1}{C_a} - 1\right)^2 = \frac{1}{C_a^2} [0.02 + (1 - C_a)^2] \dots (N.M.) \dots (216)$$

茲に f<sub>c</sub> ... 急縮損失係數

然るに BE 間の全損失を實測する事は比較的容易なるを以て f<sub>c</sub> を知る事を得る。Brightmore (英) が D=150 mm, d=100 及び 82.5 mm に對する實驗より得たる式は

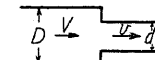
$$h_c = 0.7 \frac{(v - V)^2}{2g} = 0.7 \left(1 - \frac{a}{A}\right)^2 \frac{v^2}{2g} = f_c \frac{v^2}{2g} \quad \dots \quad (217)$$

而て h<sub>c</sub> = 0.30 m 以上の高速の場合は (216) 式、それ以下の場合は (217) 式を適當とする。

第 49 表に示す f<sub>c</sub> の値は King (米) が h<sub>c</sub> ≦ 0.30 m に對し (215) 式の C<sub>a</sub> を用ひて f<sub>c</sub> =  $\left(\frac{1}{C_a} - 1\right)^2$ , h<sub>c</sub> < 0.30 m に對し (217) 式を用ひて計算せるものを著者が更に挿入法に依て m-sec 單位に變じたるものである。

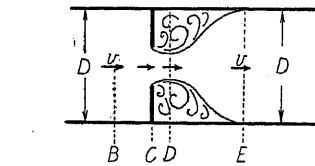
第 49 表 急縮損失係數 f<sub>c</sub> の値, h<sub>c</sub> = f<sub>c</sub>  $\frac{v^2}{2g}$ ,

(v ... 小管内の平均流速)



D/d \ v m/sec.	0.5	1.00	1.50	2.00	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	12
1.1	0.03	.04	.04	.04	.04	.04	.04	.05	.05	.05	.06	.06
1.2	0.07	.07	.07	.07	.07	.08	.08	.09	.09	.09	.10	.11
1.4	0.17	.17	.17	.17	.17	.18	.18	.18	.18	.19	.19	.20
1.6	0.26	.26	.26	.26	.26	.26	.26	.25	.25	.25	.24	.24
1.8	0.34	.34	.34	.34	.33	.33	.32	.32	.31	.30	.28	.27
2.0	0.38	.38	.37	.37	.36	.36	.35	.34	.33	.31	.30	.29
2.2	0.40	.40	.39	.39	.38	.38	.37	.36	.35	.33	.32	.30
2.5	0.42	.42	.41	.41	.40	.40	.39	.38	.37	.35	.33	.31
3.0	0.44	.44	.43	.43	.42	.42	.41	.40	.39	.37	.35	.33
4.0	0.47	.46	.46	.45	.45	.44	.43	.42	.41	.39	.36	.34
5.0	0.48	.47	.47	.46	.46	.45	.44	.43	.42	.40	.38	.35
10.0	0.49	.48	.48	.47	.47	.46	.45	.44	.43	.41	.39	.36
∞	0.49	.48	.48	.47	.47	.47	.46	.45	.44	.42	.40	.38

(3) 隔板 (Diaphragm) を以て断面を縮小せる場合 第248圖の如く薄板を以て管軸に對稱的に断面積を  $A$  より  $a$  に縮小すれば、その下流に於て縮流現象に依り更に縮小して  $a_0$  となりそれより漸増して全断面  $A$  を充たす。此場合も (2) と同様の勢力損失を來す、Weisbach の實驗に依れば水頭損失は

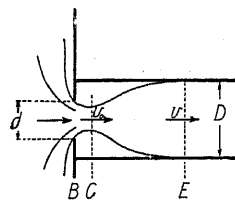


第 248 圖

第 50 表 隔板縮小に因る水頭損失  $h_c' = \left(\frac{A}{C_a a} - 1\right)^2 \frac{v^2}{2g} = f_c' \frac{v^2}{2g}$  ... (218)

$C_a$  及び  $f_c'$  の値,  $C_a = a_0/a$

$a/A = 0.0$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$C_a = 0.618$	0.624	0.632	0.643	0.659	0.681	0.712	0.755	0.813	0.892	1.00
$f_c' = \infty$	226	47.8	30.8	7.8	3.75	1.80	0.80	0.29	0.06	0.00



第 249 圖

大なる水槽より管中に流出する場合流出孔を第249圖の如く隔板を以て縮小する時は前場合と同様の現象を生ず。Weisbach の實驗に依れば水頭損失は

$$h_c'' = \left(\frac{A}{C_a a_0} - 1\right)^2 \frac{v^2}{2g} = f_c'' \frac{v^2}{2g} \quad \dots \quad (219)$$

第 51 表 隔板縮小流出孔の水頭損失

$C_a$  及び  $f_c''$  の値,  $C_a = a_0/a$

$a_0/A = 0.0$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$C_a = 0.618$	0.616	0.614	0.612	0.610	0.607	0.605	0.603	0.601	0.598	0.596
$f_c'' = \infty$	232	51.0	19.78	9.61	5.26	3.08	1.88	1.17	0.734	0.480

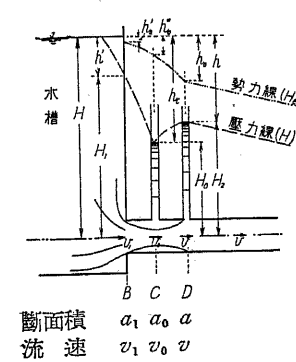
尚 Rankin は第248圖及び第249圖の場合の收縮係數  $C_a$  を次式を以て表はして居る。

$$C_a = \frac{a_0}{a} = \frac{0.618}{\sqrt{1 - 0.618 \frac{a^2}{A^2}}} \quad \dots \quad (220)$$

(4) 水槽より管中に流出する場合 (2) に於て上流側の断面  $A$  が下流側の管径に比し極めて大にしてその流速水頭を無視し得る場合は、水槽より流出する場合に等しく第49表中の  $A/a = \infty$  に相當する。極端なる断面急縮にして損失大なるを以て之を緩和する爲め [32] (1) の如く断面を漸縮せしむる場合あり、又は實地の都合上管端を却て内側に突出せしむる事もある。之等の

種々の場合の水頭損失は  $h_0 = f_0 \frac{v^2}{2g}$ ,  $v$ ...管中の流速、 $f_0$ ...流入損失係數、を以て表はされ  $f_0$  は實驗に依て定まり、流速の急變と縮流後の水衝とに因るものなるが前者は著しく小である。一般に流速の大きさと方向との變化が徐々なる程小である。

今管軸水平なる場合 (第250圖) に水槽内及び  $B, C, D$  断面に對し Bernoulli 定理を適用すれば



第 250 圖

$$\begin{aligned} \text{(水槽)} \quad (B) \quad (C) \quad (D) \\ H = H_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_0' = H_0 + \frac{v_0^2}{2g} + h_0'' = H_2 + \frac{v^2}{2g} + h_0 \\ Q = a_1 v_1 = a_0 v_0 = a v, \quad a_1 = a \quad \therefore v_1 = v \end{aligned}$$

	(水槽)	(B)	(C)	(D)
壓力水頭	$H$	$H - \frac{v_1^2}{2g} - h_0'$	$H - \frac{v_0^2}{2g} - h_0''$	$H - \frac{v^2}{2g} - h_0$
流速水頭	0	$+\frac{v_1^2}{2g}$	$+\frac{v_0^2}{2g}$	$+\frac{v^2}{2g}$
全水頭( $H_0$ )	$H$	$H - h_0'$	$H - h_0''$	$H - h_0$
全損失	0	$h_0'$	$h_0''$	$h_0$

$h_0'$  は  $v=0$  より  $v=v_1=v$  に達する急加速と方向の急轉とに因る損失、( $h_0'' - h_0'$ ) は  $BC$  間の加速に伴ふ損失にして微小、( $h_0 - h_0' - h_0''$ ) は  $CD$  間の急減速即ち水衝に因る損失にして前二者に比して著大である。故に  $a_1$  を充分大にし之れより流線狀に  $a$  に縮小せしめ、 $B$  に於ける方向の急變と  $C$  に於ける收縮とを緩和すれば、損失を著しく小ならしむる事を得る (第251圖)。

尚、第252圖の如き場合は收縮を著しからしめ損失を増大する。

普通流入損失  $h_0$  を次式を以て表はし

$$h_0 = h_0' + (h_0 - h_0'') = f_0' \frac{v^2}{2g} + f_0'' \frac{v^2}{2g} = f_0 \frac{v^2}{2g} \quad \dots \quad (221)$$

第 251 圖

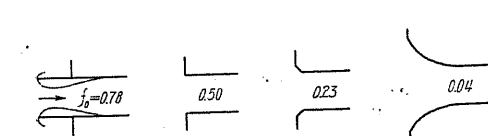
第 252 圖

$f_0', f_0''$  及び  $f_0$  に對し流速  $v$  の影響は小にして主として流入口の形に依て定まり略次の範圍に存する。

$$f_0' = 0.03 \sim 0.10, \quad f_0'' = 0.01 \sim 0.64$$

一般に ( $h_0 - h_0''$ ) 即ち  $f_0''$  は水流断面が  $a_0$  より  $a$  に急増するに因るものにして  $a_0/a = C_a$ ...

[31] (2)... を知れば  $f_0'' = \left(\frac{1}{C_a} - 1\right)^2 = f_0$ , 第252圖の場合は

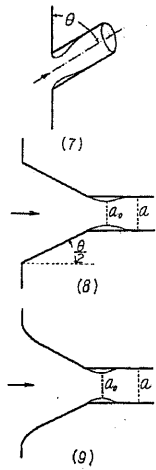
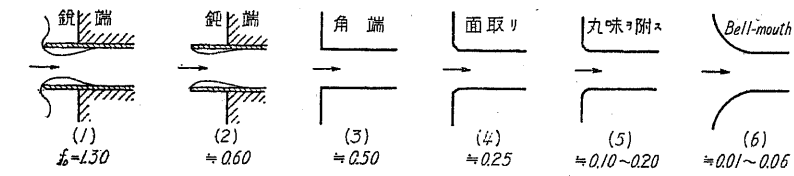


第 253 圖

$$C_a = 0.60 \quad \therefore f_0 = 0.45$$

實際は多少餘裕を見込み  $f_0$  に第253圖の如き値を用ひて居る (King)。

種々の場合の實驗結果は第 254 圖及び第 52 表に示す。



第 254 圖

(7) 管軸が壁面に對し  $\theta$  なる傾きをなす場合

$$f_0 = f_{00} + 0.3 \cos \theta + 0.2 \cos^2 \theta \dots \dots \dots (222)$$

端の形状	(3)	(5)
$f_{00} =$	0.50	0.15

第 52 表 漏斗状流入口 (Unwin の實驗)

	$\theta/2 = 0^\circ$	$5 \frac{3^\circ}{4}$	$11 \frac{1^\circ}{4}$	$22 \frac{1^\circ}{2}$	$45^\circ$
(8) $\left\{ \begin{array}{l} C_a = a_0/a = 0.83 \\ f_0 = 0.45 \end{array} \right.$	0.95	0.92	0.88	0.75	0.78
(9) $\left\{ \begin{array}{l} C_a = a_0/a = 0.97 \\ f_0 = 0.063 \end{array} \right.$	0.95	0.92	0.88	0.75	0.78

(5) 一般的障物物の断面縮小に因る水頭損失 ( $h_a$ ) 任意の形の障物物に依り  $A$  なる断面が局部的に  $a$  に縮小さるゝ場合は

$$h_a = f_a \frac{v^2}{2g}, \quad v \dots \text{断面積 } A \text{ に相當する平均流速}$$

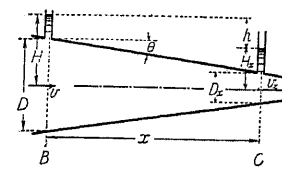
$f_a$  は障物物の形、對稱非對稱等に依て多少の差あるも  $A/a$  のみの函數として略之を表はす事を得る。

第 53 表

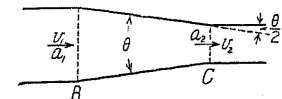
$A/a = 1.05$	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10
$f_a = 0.10$	0.19	0.42	0.96	1.54	2.17	2.70	3.27	4.00	5.06	6.75	8.01	9.4	10.4	11.3	12.5	13.5

[32] 断面の漸變に因る水頭損失

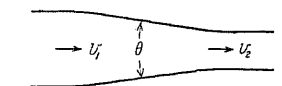
(1) 管水路の断面漸縮の場合 (Gradual contraction) 水が充滿して流るゝ管水路に於て断面漸縮する時その變化が極めて徐々にして、周邊に於て角の急變もなく流線が之に沿ふて徐々に方向を變じ得る時は (第 255 圖)、縮流及び渦を生ずる事なきを以て摩擦損失以外勢力の消耗は殆んど起らぬ。従て Bernoulli 定理に依り



第 255 圖



第 256 圖



第 257 圖

$$H + \frac{v^2}{2g} + z = H_x + \frac{v_x^2}{2g} + z_x$$

今管軸水平なりとせば  $z = z_x$  にして

$$h = H - H_x = \frac{1}{2g} (v_x^2 - v^2) = \frac{v_x^2}{2g} \left( 1 - \frac{A_x^2}{A^2} \right)$$

$$= \frac{v_x^2}{2g} \left( 1 - \frac{D_x^4}{D^4} \right)$$

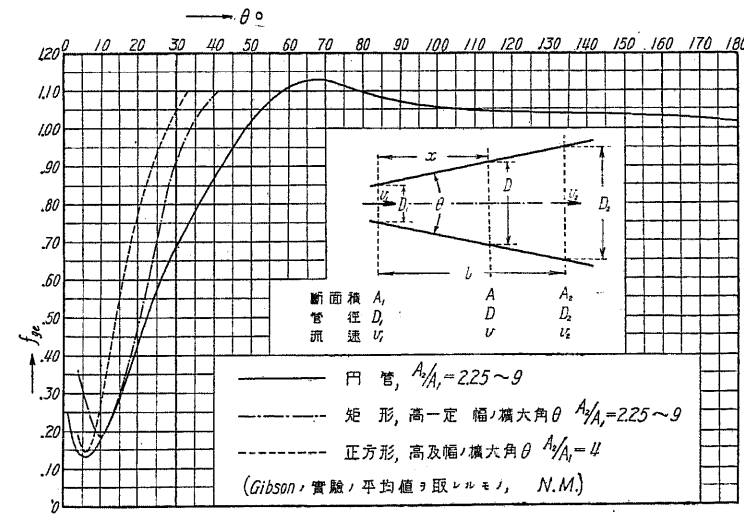
即ち 壓力水頭  $h = H - H_x$  が 流速水頭に 變形せるに 過ぎぬ。然し第 256 圖の如く折線狀に變じその角  $\theta$  が著しく小ならぬ時は、C 部の下流に縮流と渦とを生ずる 傾向を有し若干の損失を伴ふ。

Weisbach が實驗の結果より得たる水頭損失は

$$h_{ge} = f_{ge} \frac{v_2^2}{2g},$$

$$h_{ge} = \frac{f_{00}}{8 \sin \frac{\theta}{2}} \left[ 1 - \left( \frac{a_2}{a_1} \right)^2 \right] \frac{v_2^2}{2g} = \frac{f_{00}}{8 \sin \frac{\theta}{2}} \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \dots \text{但し } f_{00} = 0.025 \dots (223)$$

(2) 管水路の断面漸擴の場合 (Gradual enlargement) 一定の角度にて管徑又は幅が徐々に擴大する場合は輕度の水衝作用が連続的に起ると考へ得るを以て必ず水頭損失を伴ひ、擴大の角度 (Angle of divergence)  $\theta^\circ$  大なるに従ひ損失も亦大にして、角度著しく大に流線が周圍を離れて渦を生ずれば著しく大となる。此場合の損失水頭は普通次式を以て表はされ  $f_{ge}$  は實驗に依て定むる。



第 258 圖 断面漸擴に因る水頭損失係數  $f_{ge}$

$$h_{ge} = f_{ge} \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \dots \dots (224)$$

$$f_{ge} = 0.011 \cdot \theta^{1.22}$$

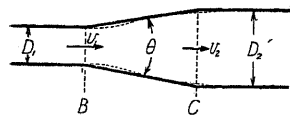
$$= 3.50 \left( \tan \frac{\theta}{2} \right)^{1.22} \dots \dots (Gibson)$$

茲に  $\theta$  は弧度、Gibson の實驗値は第 258 圖に示す。  
 $l$  なる距離に於て  $A_1$  より  $A_2$  に擴大するに當

り、減速度 (Retardation =  $\frac{dv}{dx}$ ) = const., 即ち  $\frac{dv}{dx}$  = const., 即ち  $\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{D^2} \right)$  = const. なる曲線を用ふる場合と、単位長當りの損失 = const., 即ち  $\frac{dv^2}{dx}$  = const., 即ち  $\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{D^4} \right)$  = const. とする場合との損失を比較するに後者の方 20~60% 少ない。

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{D^2} \right) = \text{const.} \quad \therefore \frac{1}{D^2} = \frac{1}{D_1^2} - \frac{x}{l} \left( \frac{1}{D_1^2} - \frac{1}{D_2^2} \right) \quad \dots \quad (225)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{D^4} \right) = \text{const.} \quad \therefore \frac{1}{D^4} = \frac{1}{D_1^4} - \frac{x}{l} \left( \frac{1}{D_1^4} - \frac{1}{D_2^4} \right) \quad \dots \quad (226)$$



第 259 圖

次に實際問題として管径を  $D_1$  より  $D_2$  に漸擴する場合は  $B$  及び  $C$  に於て渦を生ずるを以て、 $\theta$  が極めて小なる場合の外水頭損失  $h_{ge}$  は第 258 圖の場合より大である。King は從來の種々の實驗に依り次式を以て表はした。

$$h_{ge} = f'_{ge} \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = f_{ge} \frac{v^2}{2g} \quad \dots \quad (King) \quad \dots \quad (227)$$

第 54 表  $f_{ge}$  の値、 $(v \dots$  小管流速、 $\theta \dots$  擴大角)  
 $(D_1 \dots$  小管徑、 $D_2 \dots$  大管徑)

$D_2/D_1 \setminus \theta^\circ =$	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
1.1	0.01	.01	.01	.02	.03	.05	.10	.13	.16	.18	.19	.20	.21	.23
1.2	0.02	.02	.02	.03	.04	.09	.16	.21	.25	.29	.31	.33	.35	.37
1.4	0.02	.03	.03	.04	.06	.12	.23	.30	.36	.41	.44	.47	.50	.53
1.6	0.03	.03	.04	.05	.07	.14	.26	.35	.42	.47	.51	.54	.57	.61
1.8	0.03	.04	.04	.05	.07	.15	.28	.37	.44	.50	.54	.58	.61	.65
2.0	0.03	.04	.04	.05	.07	.16	.29	.38	.46	.52	.56	.60	.63	.68
2.5	0.03	.04	.04	.05	.08	.16	.30	.39	.48	.54	.58	.62	.65	.70
3.0	0.03	.04	.04	.05	.08	.16	.31	.40	.48	.55	.59	.63	.66	.71
$\infty$	0.03	.04	.05	.06	.08	.16	.31	.40	.49	.56	.60	.64	.67	.72

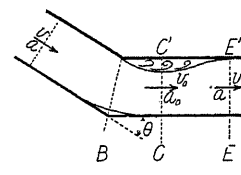
尙 Fliegner (獨) の實驗に依れば擴大角  $\theta$  と  $f_{ge}$  との関係は

$$h_{ge} = f_{ge} \frac{v_2^2}{2g} = f_{ge} \frac{v^2}{2g}, \quad f_{ge} = \sin^2 \theta \left( \frac{a_2}{a_1} - 1 \right)^2 \quad \dots \quad (228)$$

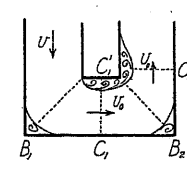
$\theta > 10^\circ$  にては流線が壁面を離れて渦を生ずる傾向あるを以て、普通  $\theta \leq 10^\circ$  即ち擴大度を 1/6 以下とする。普通の開渠の場合も略同様にして両端に曲線を入れて流線方向の急變を避ければ一層有利である。

[33] 水流の屈折に因る水頭損失

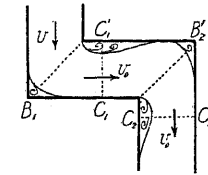
(1) 水流の屈折 (Angular bend) 水路が急に屈折する時(第 260 圖)、屈折の内側の水は運動の方向を保持せんとする性質を有する爲め流線は壁面を離れ  $C'$  部に渦を生じ、壓力の低下を生



第 260 圖



第 261 圖



第 262 圖

ずるを以て流線は徐々に變向して再び壁面に接する。この爲に  $CC'$  断面に於て有効面積は  $a_0$  に收縮し速度は  $v_0$  に増大し、更に  $CE$  間に於て  $v_0$  より  $v$  に復するを以て水衝作用に依て  $\frac{(v_0 - v)^2}{2g}$  だけの流速水頭が損失し、屈折の外側  $B$  に於ても流線が壁面を離れんとする傾向あるも、直接断面の收縮を起さざるを以て  $\theta$  が小なる限り勢力消耗に影響する事はない。第 261 圖及び第 262 圖は二の屈折が接近して存在する場合の縮流と渦の狀況を示すものにして、第 262 圖の如く二つの縮流部が分離する場合は各獨立の二つの屈折と見做して損失を略算し得るが、第 261 圖の如く第一屈折の影響が第二屈折に重複する場合は別に實驗に依て定むる必要がある。

何れの場合に於ても縮流部の最小有効断面積  $a_0$  を知れば水頭損失  $h_{b0} = \frac{(v_0 - v)^2}{2g} = \left( \frac{a}{a_0} - 1 \right)^2 \frac{v^2}{2g}$  に依て損失を求め得るも、 $a_0$  を測定する事は困難なるを以て種々の場合に對し  $h_{b0}$  を測定し

$$h_{b0} = f_{b0} \frac{v^2}{2g}, \quad f_{b0} = \left( \frac{a}{a_0} - 1 \right)^2 \quad \dots \quad (229)$$

に依て  $f_{b0}$  と屈折角  $\theta$  との関係を求むる。

Weisbach の實驗式 (獨, 1845),  $D = 30$  mm の圓管

$$f_{b0} = 0.9457 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.047 \sin^4 \frac{\theta}{2} \quad \dots \quad (230)$$

$$a = \frac{a_0}{a} = \frac{1}{1 + \sqrt{f_{b0}}}, \quad f_{b0} = \left( \frac{a}{a_0} - 1 \right)^2$$

Gibson の實驗値 (英)、幅 25 mm, 高さ 12.5 mm の矩形管に於て約 7 m/sec 迄の流速に對し實驗せる結果、 $f_{b0}$  は  $\theta$  に對して略一定し、其値は第 55 表の如く Weisbach の  $f_{b0}$  より 10~40% 大である。

R. Bambach の實驗 (獨, 1930)、幅 204 mm, 高さ 101.3 mm の矩形管に於て、平均流速  $\leq 4.8$  m/sec, 壓力水頭  $\leq 3.5$  m,  $\theta \leq 90^\circ$  の範圍に對し精密なる實驗を行ひ次式に依て  $f_{b0}$  を極めて精確に表はし得た。

$$f_{b0} = k \sin^2 \left( \frac{\theta}{4} \right), \quad k = 8.8 \quad \dots \quad (231)$$

第 55 表 屈折に因る水頭損失係數  $f_{b0}$  の表  $h_b = f_{b0} \frac{v^2}{2g}$

$\theta^\circ =$	15	30	45	60	90	120	140
Weisbach (圓形管)	0.0222	.0728	.183	.365	0.99	1.86	2.43
Gibson (矩形管)	0.0240	.111	.263	.492	1.20		
Bambach ( ,, )	0.0377	.182	.335	.616	1.40	(2.20)	(2.90)

$f_{b0}$  は Bambach 實驗に於て最大である。但し ( ) を附せるは實驗範圍外なるも假りに (231) 式より算出せるものである。

L 及び T 字狀の管は  $90^\circ$  の屈折管なるが、振込み管に對する實驗は多數に上り  $f_{b0}$  の値は管徑  $d$ 、流速  $v$ 、潤邊の状態等に依て異なる。

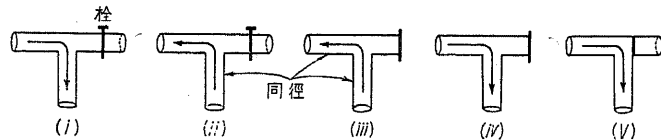
1. L 字管の屈折損失係數

第 56 表  $f_{b0}$  の値,  $h_{b0} = f_{b0} \frac{v^2}{2g}$

實驗者	管材料	新古	管徑 mm	流速 m/sec				
				0.30	0.60	1.5	3.0	7.6
Bain	鍛 鐵	古	19 ( $\frac{3}{4}$ " )	—	0.82	0.76	0.72	—
„	亜鉛鍍	新	„ ( „ )	—	0.57	0.53	0.50	—
„	鍛 鐵	古	25.4 (1" )	—	0.76	0.70	0.67	—
„	鑄 鐵	„	„ ( „ )	—	1.02	0.95	0.90	—
Davis	鍛 鐵	—	50.8 (2" )	—	0.74	0.72	0.69	—
„	鑄 鐵	—	„ ( „ )	—	1.29	1.34	1.32	—
Daley	„	—	76.2 (3" )	0.57	—	0.54	0.54	0.53
„	„	—	101.6 (4" )	0.69	—	0.61	0.58	0.54
Schoder	„	—	152.4 (6" )	—	—	0.50	0.48	—

2. T 字鑄鐵管の  $f_{b0}$

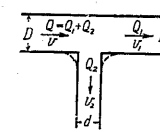
第 263 圖



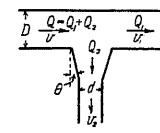
第 57 表  $f_{b0}$  の値

實驗者	流水の向き	管徑 (mm)	流速 m/sec				
			0.30	0.69	1.50	3.0	7.6
Davis	(i)	50.8	—	1.85	1.91	1.88	—
„	(ii)	„	—	1.43	1.55	1.63	—
Daley	(ii)	76.2	2.53	—	2.45	2.43	2.33
„	(i)	„	1.56	—	1.45	1.43	1.37
„	(iii)	„	1.30	—	0.91	0.91	0.89
„	(iv)	„	1.04	—	0.71	0.75	0.76
„	(ii)	101.6	1.88	—	1.55	1.41	1.22
„	(i)	„	1.44	—	1.27	1.17	1.10
„	(iii)	„	1.28	—	1.25	1.13	1.07
„	(iv)	„	1.13	—	0.97	0.97	0.95
„	(v)	„	1.12	—	1.10	1.07	1.07

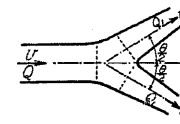
(2) 分岐損失 (Branch loss) 分岐に因る損失は管徑、分岐角等に依て種々の場合を生ずる。



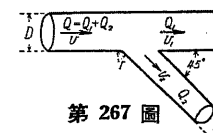
第 264 圖



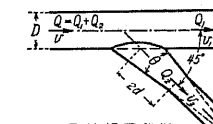
第 265 圖



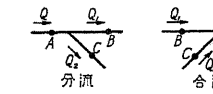
第 266 圖



第 267 圖



第 268 圖



第 269 圖

1. 直交支管  $h_n = f_n \frac{v^2}{2g}$

第 58 表  $f_n$  の値 (Vogal, 獨, 1926)

第 264 圖	$Q_2/Q$	0.25		0.50		0.75	
		$d/D = 0.35$	0.58	0.35	0.58	0.35	0.58
第 264 圖	丸味なき	3.9	1.6	13.7	3.2	28.2	6.4
	小なる丸味ある	2.9	1.35	12.2	2.1	26.4	3.8
第 265 圖	$\theta = 8^\circ 40'$	—	1.2	—	1.65	—	2.9
	$12^\circ 40'$	2.5	1.2	11.4	1.65	25.7	2.9
	$16^\circ 20'$	2.5	1.25	11.4	1.8	25.7	3.1

2. Y 分岐 支管始部を第 266 圖の如く圓錐狀にせるもの  $f_n = 0.50$ , 圓筒狀にせるもの  $f_n = 0.75$

King は一般的に丸味なき T 支管の  $f_n$  の  $3/4$  として居るが、T 支管の場合の  $f_n$  は示して居らぬ。

3.  $45^\circ$  支管 (第 267, 268, 269 圖)

次に示せるは Petermann (獨, 1929) の實驗にして、此場合は純損失にあらずして之に流速變化に因る水壓低下を加へたるものである。

	本管上流部	同下流部	支管
管 徑 mm	$D$	$D$	$d$
流 速 m/sec	$v$	$v_1$	$v_2$
流 量 $m^3/sec$	$Q$	$Q_1$	$Q_2$
水頭低下		$h_1$	$h_2$
低下係數		$f_{n1}$	$f_{n2}$

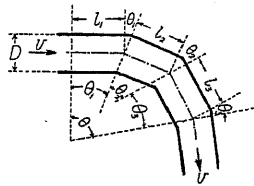
$h_1 = f_{n1} \frac{v^2}{2g}$ ,  $h_2 = f_{n2} \frac{v^2}{2g}$

$h_1$  は第 269 圖に於ける AB 又は BA 間の水壓低下、 $h_2$  は AC 又は CA 間の低下、負値の場合は増大を示す。但し  $AB = BA = 3.5$  m,  $AC = CA = 1.5$  m, 一般に圓錐狀分岐に於て低下小であるが、支管の徑大なる場合は分岐部の形は著しく影響せぬ。

第 59 表  $f_{n1}$  及び  $f_{n2}$  の値 (Petermann, 獨, 1929)

$D, d$ mm	分合 $f$	$r$ mm	$\theta^\circ$	$Q_2/Q$											
				0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
43, 15	分流	1.5	$12^\circ 40'$	$f_{n1}$ 0	-0.01	-0.03	-0.03	-0.02	0.0	+0.05	+0.10	+0.15	+0.21	+0.27	+0.35
				$f_{n2}$ 0	+1.0	+0.6	+1.1	+2.5	+6.0	+9.2	+14	+20	+25.7	+35	+45
	分合	1.5	$12^\circ 40'$	$f_{n1}$ 0	-0.01	-0.03	-0.04	-0.04	-0.01	+0.03	+0.07	+0.12	+0.18	+0.24	+0.32
				$f_{n2}$ 0	+1.0	+0.6	+1.1	+2.5	+6.0	+9.2	+14	+20	+25.7	+35	+45

43, 15	合流	$f_{n1}^0$	0.0	+0.1	-0.1	-0.5	-1.1	-2.0	-2.9	-4.2	-5.7	-7.6	-9.7
		1.5	0.0	+0.1	0.0	-0.35	-0.7	-1.4	-2.1	-3.0	-4.1	-5.5	-7.0
43, 25	分流	$f_{n2}^0$	-1.0	0.0	+2.0	4.2	8.2	13.5	19.5	27	35	43.5	54
		1.5	-1.0	0.0	+1.0	2.0	3.8	6.2	8.4	12	15	19	23
43, 25	分流	$f_{n1}^0$	0.0	-0.04	-0.05	-0.04	-0.03	+0.02	0.07	0.13	0.20	0.27	0.35
		2.5	0.0	-0.06	-0.06	-0.06	-0.04	0.0	+0.05	0.11	0.17	0.24	0.31
43, 43	分流	$f_{n2}^0$	+0.9	0.6	0.5	0.5	0.6	0.8	1.4	2.0	2.8	3.7	5.0
		2.5	0.6	0.5	0.45	0.3	0.4	0.55	0.9	1.3	1.8	2.5	3.4
43, 43	合流	$f_{n1}^0$	0.0	0.1	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-1.0	-1.5	-2.1	-2.9
		2.5	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-1.1	-1.4	-2.0
43, 43	合流	$f_{n2}^0$	-1.0	-0.5	-1.0	+0.3	0.7	1.4	2.1	2.9	3.7	4.6	5.5
		2.5	-0.9	-0.6	-0.30	0.0	+0.3	0.6	0.9	1.2	1.6	1.9	2.2
43, 43	分流	$f_{n1}$	+0.03	-0.04	-0.07	-0.06	-0.04	+0.01	0.06	0.13	0.19	0.26	0.32
		$f_{n2}$	+0.88	0.77	0.67	0.57	0.48	0.41	0.35	0.32	0.30	0.33	0.39
43, 43	合流	$f_{n1}$	+0.04	0.12	0.17	0.19	0.18	0.12	0.04	-0.06	-0.20	-0.37	-0.57
		$f_{n2}$	-0.91	-0.62	-0.37	-0.16	.00	+0.12	+0.22	+0.30	+0.37	+0.39	+0.37

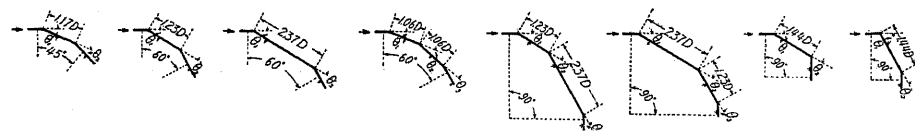


第 270 圖

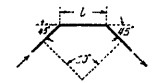
(3) 多角状彎曲の損失 損失水頭を  $h_b'' = f_b'' \frac{v^2}{2g}$  にて表せば總屈折角  $\theta$  だけ方向を轉ずる場合の  $f_b''$  は、各屈折角  $\theta_1, \theta_2, \dots$ , 總屈曲角  $\theta$ , 各屈折角に相當する管軸の長さと管徑  $D$  との比  $l_i/D, \dots$ , 及び管徑, 流速, 内面の粗度等に依て異なるが W. Schubart (獨, 1929) が  $D=43$  m の粗滑兩種の鋼管に就て實驗せる結果は

第 60 表  $h_b'' = f_b'' \frac{v^2}{2g}$ ,  $f_{bs}$  ... 平滑なる新鐵管、 $f_{br}$  ... 粗なる古管

第 271 圖	$\theta = 5$	10	15	22.5	30	45	60	90°
	$f_{bs}=0.016$	0.034	0.042	0.066	0.130	0.236	0.471	1.129
	$f_{br}=0.024$	0.044	0.062	0.154	0.165	0.320	0.684	1.265



$\theta_1 = \theta_2 = 22.5^\circ$	$\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$	$\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$	$\theta_1 = \theta_2 = \dots = 20^\circ$	$\theta_1 = \dots = 30^\circ$	$\theta_1 = \dots = 30^\circ$	$\theta_1 = 30^\circ$ $\theta_2 = 60^\circ$	$\theta_1 = 60^\circ$ $\theta_2 = 30^\circ$
$f_{bs}=0.112$	0.150	0.143	0.108	0.188	0.202	0.400	0.400
$f_{br}=0.284$	0.268	0.227	0.236	0.320	0.323	0.534	0.601



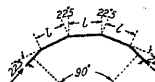
第 272 圖

$l/D=0.7$	1.0	1.5	2.0	4.0	6.0	
$f_{bs}$	0.52	0.34	0.28	0.30	0.36	0.39
$f_{br}$	0.53	0.40	0.38	0.40	0.46	0.44



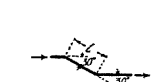
第 273 圖

1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0
0.20	0.18	0.16	0.18	0.19	0.20
0.36	0.31	0.32	0.35	0.35	0.36



第 274 圖

$l/D=1.2$	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	
$f_{bs}$	0.12	0.125	0.105	0.11	0.14	0.14
$f_{br}$	0.29	0.25	0.29	0.32	0.31	0.31



第 275 圖

1.2	1.5	2.0	3.0	3.8
0.16	0.16	0.15	0.15	0.16
0.30	0.34	0.32	0.25	0.24

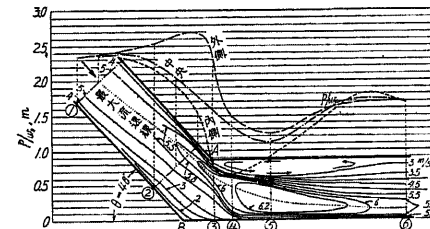
上記の實驗はレーノーズ常數,  $R=5 \times 10^4 \sim 25 \times 10^4$  の範圍内なるを以てこの範圍内に於ては管徑の如何に拘らず同値である。茲に

$$R = \frac{v \cdot D}{\nu}, \quad \nu = \text{動粘性係數} = 0.0115 \text{ (15°C)} \quad v, D \text{ cm 單位}$$

$R$  が  $25 \times 10^4$  以上に於ては  $f_b''$  は僅かに減少する傾向あるを以て上記の  $f_b''$  を使用すれば安全側の誤差となる。例へば水電の水壓管に於て  $D=100$  cm,  $v=250$  cm/sec. とすれば  $R=217 \times 10^4$  となる。

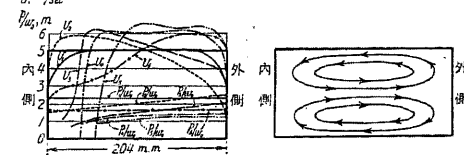
(4) 屈折部 (Knee bend) に於ける流速と水壓との分布 先づ矩形管の屈折部に就て見るに兩側壁は急に屈折するも實際の流線は第 276 圖の如く滑かなる曲線を爲し、内側壁の屈折點  $A$  より若干下流迄順流々線の外部は渦を以て充たされ、有効斷面縮小して流速増大し、更に下流に於て再び全斷面を充たして流る。

而て一般に各正斷面の各鉛直線上の平均流速は第 276 圖の等速線の示す如く最大流速...一鉛直線の平均速度...線即ち流心線は上流の直線部 1 に於ては中央にあり、それより次第に内側に寄



第 276 圖 等速線及び壓力水頭線

$Q=0.091 \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $v_m=4.41 \text{ m/sec}$ ,  $P/w_0=2.3$  m



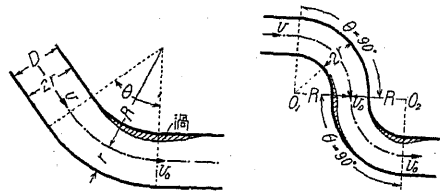
第 277 圖 第 278 圖 副流  $v$  及び  $p/w_0$  の分布

り  $A$  の稍上流に於て最も近くそれより漸次外側に移る。即ち流心線は内側流線より更に緩なる曲線を爲す。各斷面に於ける壓力水頭  $p/w_0$  (第 277 圖) は 1 に於ては等布、 $A$  の附近より以下に於ては外側に高く、稍下流 6 に於ては再び等布となる。 $\theta$  (第 276 圖) 大ならざる彎曲 (bend) に於ても略同様の流況を呈する。 $\theta$  大なる場合は屈折以後流心は交互に兩側に偏し各流線は螺旋狀をなす。

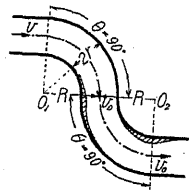
[34] 彎曲に因る水頭損失

(1) 一樣なる断面を有する管水路が方向を變ずる場合 彎曲の内外兩側壁が共通圓心の圓弧

を以て徐々に方向を變ずる時は、縮流は屈折の場合に比し輕微なるを以て同一の方向轉換をなす爲の勢力消耗は [33] の場合に比し著しく小である。然し内曲面に於ては慣性に依り流線が壁面を離るゝ傾向は避け難きを以て多少の水頭損失は免れぬ。



第 279 圖



第 280 圖

彎曲損失水頭も便宜上次式に依て表はす。

$$h_b = f_b \frac{v^2}{2g}, \quad f_b \text{ は } r/R \text{ 及び } \theta \text{ の函數} \dots \dots \dots (232)$$

$\theta = 90^\circ$  の場合に對しては  $f_b$  と  $r/R$  との關係に就き多くの實驗が行はれて居る。Weisbach が du Buat (佛) 及び自身の實驗に基き次式を得た。

$$\theta = 90^\circ, \text{ 小圓形管 } f_b = 0.131 + 1.847 \left( \frac{r}{R} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (233)$$

$$\dots \text{ 小矩形管 } f_b = 0.124 + 3.104 \left( \frac{r}{R} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (234)$$

(234) 式の  $r$  は彎曲面内の水路幅の 1/2 である。

$0^\circ < \theta \leq 90^\circ$  の彎曲角に對しては

$$f_{b\theta} = f_b \frac{\theta^\circ}{90} \dots \dots \dots (235)$$

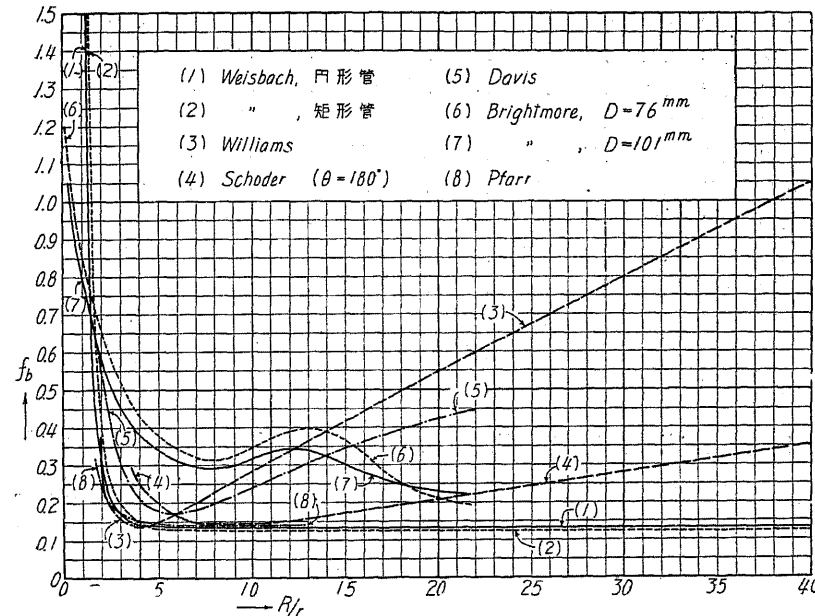
同様の場合に對する Fuller (米) の實用式は

$$f_{b\theta} = f_b \left( \frac{\theta^\circ}{90} \right)^{0.5} \dots \dots \dots (236)$$

縮流の程度は  $\theta$  に比例しては増さぬを以て (236) 式の方、實際に適すると考へらる。

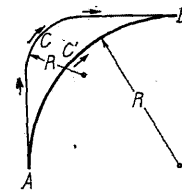
Williams (米, 1901) が徑 300, 390, 750 mm の水道管につきて實測せる結果、Brightmore (米, 1907) の 75, 100 mm 鑄鐵管、Schoder (米, 1908) の 150 mm 鍊鐵管、Davis (米, 1911) の水道管、Pfarr (獨, 1907) 等の  $\theta = 90^\circ$  の彎曲に對する  $f_b$  と  $R/r$  の關係は第 281 圖に曲線を以て示す。但し何れの實驗に於ても  $f_b$  は  $R/r$  の外、管徑  $2r$  及び  $v$  に依ても異り、曲線は夫等の平均値を示すものである。而て Brightmore の實驗に於ては  $R/r = 12$  の附近に於てその前後より大なる  $f_b$  を示して居る。

管水路が  $90^\circ$  だけ方向を變ずるに當り、彎曲半径  $R$  を大にすれば方向の變化は徐々になるも曲線部の長さ大となる爲、ある程度以上に大となれば彎曲損失は却て大となり、反對に  $R$  を



第 281 圖  $\theta = 90^\circ$  彎曲管に對する實驗値平均曲線 (N.M.)

$R/r = 5.1$  に於て  $f_b = 0.15$  (最小)



第 282 圖

然し  $AB$  二點間に於て (第 282 圖)  $90^\circ$  屈曲する場合を考ふれば、小曲の場合 ( $ACB$ ) 全長大となり、 $AB$  間の全損失... 摩擦損失其他を加へたるもの... は  $R$  大なるほど小に、曲管の数は多きも全管長は短縮さる。

何れの實驗に依るも  $R/r = 5 \sim 10$  に於ては  $f_b$  の値に大差なく  $v$  の影響の却て大なる事實に依り、Fuller は  $90^\circ$  屈曲に對し  $f_b$  を  $R$  及び  $v$  の函數とし

$$h_b = f_b \frac{v^2}{2g}, \quad f_b = kv^{0.25} \dots \dots k = R \text{ の函數} \dots \dots (237)$$

$90^\circ$  以下の彎曲に對しては  $f_{b\theta} = f_b \left( \frac{\theta^\circ}{90} \right)^{0.5}$  なる式を以て表はし、King は (237) 式に依て  $f_b$  の表を作りしが、第 61 表は King の表を m-sec 單位に改め挿入法に依て求めたものである。

第 61 表  $90^\circ$  彎曲の損失係數  $f_b$  の値,  $h_b = f_b \frac{v^2}{2g}$

$Rm \setminus v \text{ m/sec.}$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8	10	12
0.0	0.99	1.17	1.29	1.38	1.48	1.53	1.64	1.73	1.84	1.94	2.05	2.18
0.1	0.38	0.43	0.47	0.52	0.56	0.59	0.62	0.65	0.67	0.70	0.75	0.88
0.2	0.27	0.30	0.33	0.36	0.38	0.40	0.42	0.45	0.47	0.49	0.52	0.55
0.5	0.17	0.21	0.23	0.25	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40
1.0	0.17	0.21	0.23	0.25	0.26	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39

小にすれば曲線部の長さ小となり  $f_b$  を減少せしむるも、 $R$  過小なれば方向變化の急なるため彎曲損失即ち  $f_b$  は却て増大する。第 281 圖の曲線に於て  $R/r = 4 \sim 8$  に於て  $f_b$  の最小を示し、Williamsによれば



1.5	0.17	0.20	0.22	0.24	0.26	0.27	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38
2.0	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.27	0.29	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38
2.5	0.20	0.23	0.26	0.27	0.29	0.31	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.45
3.0	0.22	0.28	0.31	0.33	0.35	0.37	0.40	0.42	0.45	0.48	0.50	0.53
4.0	0.29	0.37	0.41	0.44	0.47	0.49	0.52	0.55	0.58	0.62	0.65	0.68
5.0	0.35	0.45	0.49	0.53	0.56	0.58	0.62	0.65	0.69	0.74	0.78	0.83
6.0	0.40	0.51	0.56	0.60	0.64	0.67	0.72	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
8.0	0.47	0.58	0.63	0.68	0.73	0.76	0.82	0.85	0.91	0.97	1.02	1.08
10	0.50	0.62	0.69	0.74	0.77	0.81	0.88	0.92	0.97	1.04	1.09	1.15
12	0.53	0.65	0.72	0.77	0.81	0.85	0.92	0.96	1.01	1.09	1.15	1.21
15	0.57	0.69	0.76	0.82	0.87	0.91	0.98	1.02	1.07	1.16	1.22	1.29
18	0.62	0.74	0.81	0.88	0.93	0.97	1.04	1.09	1.13	1.22	1.29	1.35

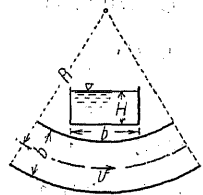
(2) 開渠の彎曲 開渠、河川等の彎曲損失に就ては餘り研究されて居らぬ。Boussinesq (佛, 1883) が W. Lahmeyer (獨, 1852) の矩形水路に對する實測に基づき理論的に求めたる關係は、直線水路に於て平均流速  $v = C\sqrt{HI_0}$  とすれば  $R$  なる半径の彎曲部に於て同一の流速を保つ爲

に要する水面勾配は、

$$I = \frac{v^2}{C^2 H} \left( 1 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{R}} \right) \dots \dots \dots (238)$$

上式より  $H$  を同一とし同じ平均流速を保つ爲に必要な勾配の比  
即ち單位長當りの損失水頭の比を求めれば

$$\frac{I}{I_0} = 1 + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{b}{R}} \dots \dots (N.M.) \dots \dots (239)$$

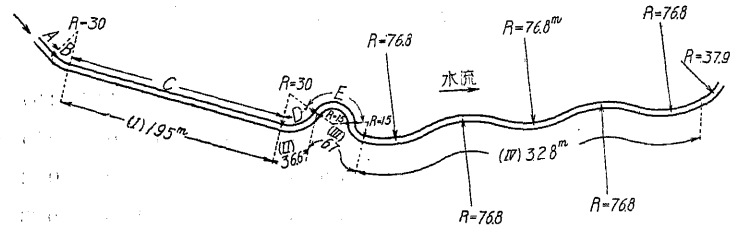


第 283 圖

$R/b$	= 0.5	1.0	1.5	2.0	3	4	5	10	20	50	100
$I/I_0$	= 2.06	1.75	1.61	1.53	1.43	1.375	1.335	1.237	1.168	1.106	1.10

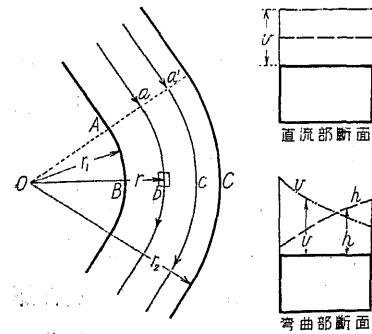
G. Hopson (米, 1911) が徑 3m の半圓形混凝土水路に於て種々の彎曲を含む 4 區間に於ける平均流速  $v$  を測定し、之れより Kutter の  $n$  を求めたる結果は次の如し。

區 間	I (直線)	II ( $R=30$ m)	III (S 曲線, $R=15$ m)	IV (緩曲線)
長さ m	195	36.6	67.0	328
$v$ m/sec.	2.16	2.09	2.13	2.18
$n$	0.0132	0.0149	0.0189	0.0142



第 284 圖

(3) 彎曲部に於ける流速と水壓との分布 屈折水路に於ても水流は漸次に方向を轉ずるを以



第 285 圖

て水流の狀況は彎曲部と近似するが、一定の半径を以て彎曲する水路中の完全液體の流れに對しては、理論的に  $v$  と水壓との關係を求むる事を得る。今、矩形管水路を考へ上流の直線部に於ては  $v$  及び  $h = \frac{p}{w_0}$  共に等布にして、彎曲部に於ては遠心力の爲に水壓は彎曲圓心よりの距離  $r$  に依て變じ、從て  $v$  も變ずる。今、第 285 圖に於て流線  $ab$  及び  $a'c$  に Bernoulli 定理を適用すれば、但し尾字 0 を付せるは直線部の量である。

$$a \text{ 及び } a' \quad b \quad c$$

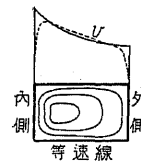
$$\text{全水頭} = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_b + \frac{v_b^2}{2g} = h_c + \frac{v_c^2}{2g} = h + \frac{v^2}{2g} = \text{const.}$$

故に半径の方向の變化は  $dh + \frac{v dv}{g} = 0 \dots \dots (240)$

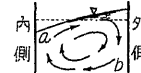
然るに半径  $r$  の點の單位體積に作用する遠心力は  $\frac{w_0}{g} \cdot \frac{v^2}{r}$  にして、半径の單位長に對する壓力の増加に等しく  $\frac{dp}{dr} = \frac{w_0}{g} \cdot \frac{v^2}{r}$  即ち  $w_0 \cdot dh = \frac{w_0}{g} \cdot \frac{v^2}{r} dr$  である。然るに (240) 式の  $dh$  は遠心力に因るものなるを以て、その代りに  $dh = \frac{1}{g} \cdot \frac{v^2}{r} dr = \frac{v^2}{g} \cdot \frac{dr}{r}$  を代用すれば

$$\frac{v^2}{g} \cdot \frac{dr}{r} + \frac{v dv}{g} = 0 \therefore \frac{dv}{v} = -\frac{dr}{r} \therefore v \cdot r = \text{const.} \dots \dots (241)$$

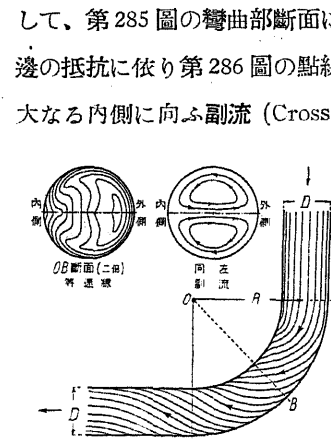
即ち  $v$  は  $r$  に逆比例し、彎曲の内側に於て  $v$  大、 $h$  小、外側に於ては反對に  $v$  小、 $h$  大に



第 286 圖  
管水路に於ける彎曲部断面



第 287 圖  
開水路に於ける彎曲部断面



第 288 圖

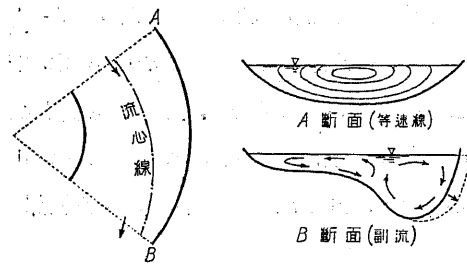
して、第 285 圖の彎曲部断面に示す如き分布を爲すが、實際の水流に於ては潤邊の抵抗に依り第 286 圖の點線の如き流速分布となり、上下面に於ては流速の大なる内側に向ふ副流 (Cross current, Secondary current) を生じ、中央部に於てはその反對の副流を生ずる。

然るに自由水面を有する場合は外側部の壓力増大の爲に直接水面高まり... [63] (2) ...爲に底部に於て内側に向ひ水面に於て外側に向ふ單一の副流を生ずる (第 287 圖)。而て實際の速度は  $a$  點に最大に  $b$  點に著しく小である。

圓管に於て  $R/D$  大なる時は内曲に殆ん

ど渦を生ぜず、流線は第 288 圖の如く螺旋運動を爲し、OB 断面の流速分布は内側に小に外側に大に、最大流速は水平直徑線の外側端に近く存在する。

次に河川及び土砂水路の如く周邊に洗掘堆積を起し得る場合は、内側の渦流部に著しき堆積起りて洲を生じ、外側部は流向變化の爲め洗掘され水深と曲度とを増し流速大となり、此作用は加速的に進行する (第 289 圖)。

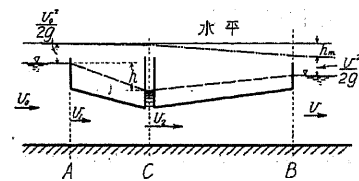


第 289 圖

直線部に於ては水面附近の流速は流心部に大に岸に小にして岸より流心に向ふ副流を生じ、底部に於ては反対向きの副流を生ずる。彎曲部に於て副流廻轉の向きの異なるは凹岸の水深從て流速大なる爲め水面に於て却て中央より凹岸に向ふ副流を生じ、岸の斜面に添ふて下り更に底部を中央に向ふ、此爲に凹岸の洗掘は一層助長さる。

[35] 量水器及び水弁に因る水頭損失

(1) 量水器に依る水頭損失 管水路又は開水路に於て短區間の断面を狹窄し、その下流に於て再び標準の断面に擴大せしむれば、狹窄部に於ては流速大となり水壓低下し、擴大後は流速減少し水壓は大部分回復するも、その間の變化の爲に  $h_m$  だけの水頭損失を生ずる ... [32] 参照。此場合、勢力線の高さ即ち全水頭の變化を示す線は漸減して結局  $h_m$  だけの勢力損失を生じ、主として擴大部 CB 間に於ける漸擴損失と AB 間の擦摩損失とよりなり、ベンチュリ・メーター (Venturi-meter) の如き構造に於ては損失は極めて少なく



第 290 圖

[80] (2) 参照、

$$Q = \mu K D_s \sqrt{h} \dots \dots \dots (242)$$

とすれば、實際流速は理論流速の  $\mu$  倍にして  $\mu = 0.95 \sim 0.995$  なるを以てメーターを通過する爲の損失は

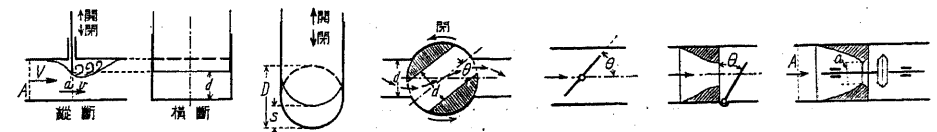
$$h_m = f_m \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (243)$$

種々の  $\mu$  に対して  $f_m$  を計算すれば

$\mu = 0.90$	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.995
$f_m = 0.19$	0.154	0.116	0.098	0.078	0.059	0.04	0.02	0.01

(2) 制水弁 (Valves) に因る水頭損失 管水路の水量を増減する水弁は水流断面積の増減に依るが、大なる水弁は全開の時に前後の管と殆んど同一の大きさ及び形の開きを有するを以て特に水頭損失を生ぜざるも、その半開の場合及び小なる弁に於ては全開の場合に於ても断面積の縮小又は流向の急變等ありて必ず多少の損失を生ずる。而て之等に因る損失水頭は弁の型式に依り種々雜多なるを以て一々試験に依て決定する必要あるが、次に Weisbach 及び Bach 兩氏の實驗結果を擧げて参考とする。

1. Weisbach の實驗 (獨, 1875)



第 291 圖 i. 仕切弁 (Sluice valve) 50×25 mm 矩形  
 第 292 圖 ii. 仕切弁 (Sluice valve) D=40 mm 圓形  
 第 293 圖 iii. コック (Cock)  
 第 294 圖 iv. 絞弁 (Throttle valve)  
 第 295 圖 v. 逆止弁 (Non-return valve)  
 第 296 圖 vi. 圓板弁 (Disc valve)

$$\text{損失水頭 } h_v = f_v \frac{v^2}{2g}, \quad f_v \text{ は弁の開きに依る係數} \dots \dots \dots (244)$$

第 62 表  $f_v$  の値

i. 第 291 圖 (50×25 mm 矩形)	$a/A = 0.1$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0				
	$f_v = 193.0$	44.5	17.8	8.12	4.02	2.08	0.95	0.39	0.09	0.0				
ii. 第 292 圖 (管徑 40 mm)	$s/D = 1/8$	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1.0			註、管徑大なるものほど $f_v$ は小となる			
	$a/A = 0.159$	0.315	0.466	0.609	0.740	0.856	0.948	1.00						
	$f_v = 97.8$	17.0	5.52	2.06	0.81	0.26	0.07	0.0						
„ 第 292 圖の大管 (Knichling 及び Smith)	$s/D = 0.05$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80					
	$a/A = 0.05$	0.10	0.23	0.36	0.48	0.60	0.71	0.81	0.89					
	$f_v (D=610 \text{ mm})$	235	100	28	11	5.6	3.2	1.7	0.95	—				
	$f_v (D=762 \text{ mm})$	333	111	23	9.4	5.2	3.1	1.9	1.13	0.60				
iii. 第 293 圖 矩形管の場合、全開 $\theta = 0$ 、閉塞 $\theta = 66^\circ 45'$	$\theta^\circ = 5$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	66°45'		
	$a/A = 0.93$	0.85	0.77	0.69	0.60	0.52	0.44	0.35	0.27	0.19	0.11	0.0		
	$f_v = 0.05$	0.31	0.88	1.84	3.45	6.15	11.2	20.7	41.0	95.3	275	$\infty$		
„ 第 293 圖 圓管の場合、全開 $\theta = 0$ 、閉塞 $\theta = 82^\circ 7' 30''$	$\theta^\circ = 5$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	82°7'30''
	$a/A = 0.93$	0.85	0.77	0.69	0.61	0.53	0.46	0.38	0.31	0.25	0.19	0.14	0.09	0.0
	$f_v = 0.05$	0.29	0.75	1.56	3.10	5.47	9.68	17.3	31.2	52.6	106	206	486	$\infty$

iv. 第 294 圖 矩形管、全開  $\theta=0$ , 閉塞  $\theta=90^\circ$

$\theta^\circ$	=	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	90
$a/A$	=	0.91	0.83	0.74	0.66	0.58	0.50	0.43	0.36	0.29	0.23	0.13	0.06	0.0
$f_v$	=	0.28	0.45	0.77	1.34	2.16	3.54	5.70	9.3	15.1	24.9	77.4	368	$\infty$

.. 第 294 圖 圓管、 同上、 同上

$\theta^\circ$  及び  $a/A$  同 上

$f_v$	=	0.24	0.52	0.90	1.54	2.51	3.91	6.22	10.8	18.7	32.6	118	751	$\infty$
-------	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----	-----	----------

v. 第 295 圖 全開  $\theta > 70^\circ$ , 閉塞  $\theta = 0^\circ$

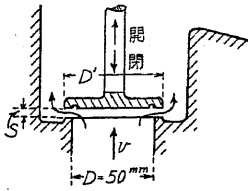
$\theta^\circ$	=	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$f_v$	=	90	62	42	30	20	14	9.5	6.6	4.5	3.2	2.3	1.7

vi. 第 296 圖  $f_v = \left(1.645 \frac{A}{a} - 1\right)^2$

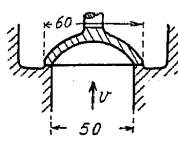
但し  $A$  は管の斷面積,  $a$  は錐狀部最小斷面積

全開の場合 i, ii, iii は殆んど損失なきも iv 以下は多少の損失ある。

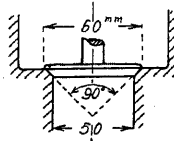
2. Bach の實驗 (獨, 1884) 小管に用ふる種々の制水弁に關する實驗の結果は次の如し。



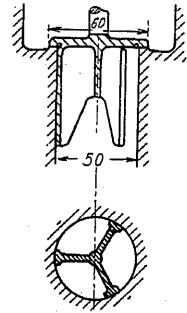
第 297 圖



第 298 圖



299 圖



第 300 圖

$$\text{水頭損失 } h_v = f_v \frac{v^2}{2g} = \left[ \alpha + \beta \left( \frac{D}{s} \right)^2 - \gamma \left( \frac{D}{s} \right) \right] \cdot \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (245)$$

全開  $s=0.25 D$ ,  $\gamma=0.8$ ,  $\alpha, \beta$  は次表の如し。

第 63 表  $\alpha$  及び  $\beta$  の値

水 弁	第 297 圖	第 298 圖	第 299 圖	第 300 圖
$D'$ mm =	60	74	—	—
$\alpha$ =	0.55	1.1	0.65	2.6
$\beta$ =	0.15	0.155	0.132	1.70