

II-78 水路の粗度と摩擦損失水頭に就いての實驗的研究

関東学院大学工学部 正會員 野田 文彦

I はしがき 一般水路における流速分布および流れの抵抗則を決定する主要素は、水路壁面の粗さであり、この粗さを解明する方法として、幾何学的にきわめて単純な形式をもつ人工粗度が数多くの實驗研究に用いられてきた。本研究もその一つであり、長さ4m、管径40mmの塩化ビニールパイプの側面に軸方向單位面積当り均一になるよう径8mmのボルトを打込み、パイプ内壁より突出したボルトの先端が水路壁面の人工点状粗度を形成するようにし、突出したボルトの先端を外側のボルトの頭をスパナで調節することにより、出入させて粗度の状態を容易に変化させ、その各々について流速分布、流れの抵抗則を測定し解析、検討を行つたものである。

II 實驗装置および實驗方法 長さ4m、内径40mm、外径45mmの塩化ビニールパイプを圧力水槽となつてゐる上流側水槽(800×800×1600mm)と流量測定堰を設けてある下流側水槽(600×600×2000mm)間に設置し、管長の中央部より上流側、下流側にそれぞれ1mの範囲にわたつて、図-1に示したように螺旋狀に配置し、軸方向單位面積当りのボルトの数は一定となるように配慮した。實驗方法はパイプの内壁より突出したボルトの先端の長さを0mmより7mmまで変化させて、その各々の場合に就いて、上流側水槽の水位を調節して各流速に対応する管路の損失水頭を求め、これより摩擦損失係数 f 、粗度係数 n を求めた。

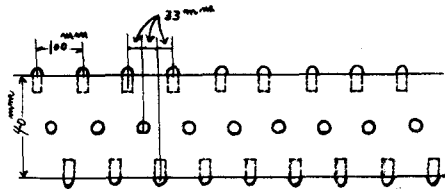


図-1

III 摩擦損失係数 本實驗においてはその各々の場合レイノルズ数 Re が7000以上となり、また流速測定により得られた流速分布図より判断して円管内の流れはすべて乱流であると判断された。乱流において、摩擦損失水頭 f は、水理学的に滑らかな(hydraulically smooth)なる壁面を有する水路においてはレイノルズ数 Re の函数であり、水理学的に粗い(hydraulically rough)なる壁面を有する水路においては壁面の粗度要素の函数であるとされている。ボルトの打込みの深さ(ボルト先端が内壁より突出している長さ)が0mmの場合を水理学的に滑らかな面の場合とし f と Re の關係を調べ次の函数關係を得た。

$$f = 0.223 Re^{-0.196} \quad (\text{図-2 参照}) \quad \text{----- (1)}$$

ボルトの打込みの深さを1mm~7mmとした場合は水理学的に粗い面とし、粗度要素の高さ R はボルトの打込みの深さとみなされるので、抵抗項の形 $\frac{1}{\sqrt{f}}$ と $\frac{D}{2R}$ の關係を表-1に示し、図-3に示すようにグラフにプロットしてやう。これより實驗式

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3.358 \log \frac{D}{2R} + 2.277 \quad \text{----- (2)}$$

が得られた。またこれよりカルマン常数 $\kappa = 0.22$ が求められた。しかしながら従来多数の實驗値より κ の値は多少の変動は見られるがその値はほぼ0.4である。この差異は本實驗において用いてゐるボ

ルトによる人工粗度

が、ニクラーゼの
均一砂粒粗度の場合
と全く形態を異
にしている事によ
り抵抗項のどこを
管壁の凹凸の平均
の高さ、即ちボ
ルトの打込み深さ
 h とある相対
粗度 $\frac{h}{D}$ をパラメ
ーターとして用い
る事の不適確さを
示していると考え
られる。このこと
は足立昭平博士が

「人工粗度の実験的研究」(土木学会論文集104号)で指摘され
ておられることであり、点粗度の相対密度 S/F (S : 水路壁面面積
積), (F : 点状粗度の投影面積)を導入されておられる。著者も
これを次元解析より検討し妥当であると判断しこれを採用した。

IV 点状粗度の相対粗度密度 S/F の次元解析

いま次元解析を行うにあたり、
変数として考慮に入れなければ
ならないものを挙げれば

h : ボルトの管内壁に突出

した長さ

r : 側壁からの距離

v : 流速

μ : 粘性係数

ρ : 密度

τ_0 : 剪断応力

S : 水路壁面面積

F : 点状粗度要素の流れに
対する投影面積

ボルトの打込み深さ 0mm

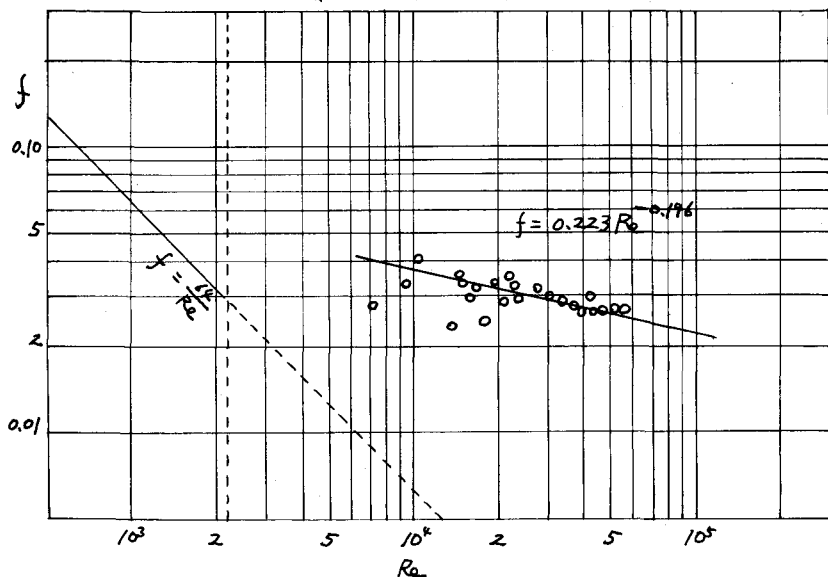


図-2

番号	f	$1/f$	$D/2k$
1	0.0312356	5.65815	20.000
2	0.0320351	5.58710	10.000
3	0.0385456	5.09346	0.667
4	0.0460102	4.66200	5.000
5	0.0552294	4.25514	4.000
6	0.0593343	4.10532	3.333
7	0.0715352	3.73886	2.857

表-1

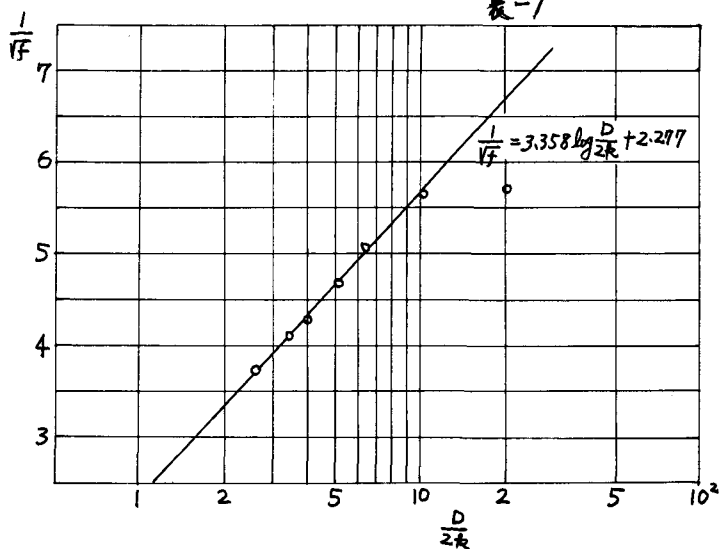


図-3

従って $f(k, r, \rho, \mu, \nu, \tau_0, S, F) = 0$ 又は $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ である事より $f(k, r, \rho, \nu, \tau_0, S, F) = 0$ である。この中で k, r , および S, F はそれぞれ同次元であるから $\pi_1 = \frac{r}{k}$, $\pi_2 = \frac{F}{S}$ は明らかに
あるので、次元マトリクスを考えると、この2つを除いて

$$\begin{matrix} & \nu & r & \rho & \tau_0 \\ L & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & -3 & -1 \end{pmatrix} \\ M & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\ T & \begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \text{----- (3)}$$

となる。上記マトリクスのランクは3であるから $\pi_3 = \nu^x \rho^y \tau_0^z$ なる式が成り立ち、次元方程式により x, y, z を求めれば、 $\pi_3 = \nu \sqrt{\rho \tau_0}$, $\pi_4 = \frac{\nu}{\rho} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ が求まる。ここで $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ は速度の次元を有するので摩擦速度 u_* といわれている。よって抵抗項 U/u_* は

$$\frac{U}{u_*} = \phi\left(\frac{r u_*}{\nu}, \frac{r}{k}, \frac{F}{S}\right) \quad \text{----- (4)}$$

であらわされる。水理学的に滑らかな水路の場合においては $\frac{r}{k}$, $\frac{F}{S}$ は考慮に入れる必要はなく、水理学的に粗い水路の場合においては $\frac{r u_*}{\nu}$ と $\frac{r}{k}$ および $\frac{F}{S}$ が共に速度分布に影響をもつが、レイノルズ数 $\frac{r u_*}{\nu}$ が大きくなると流れは乱流となり $\frac{r u_*}{\nu}$ の影響はなくなるので、抵抗項は

$$\frac{U}{u_*} = \phi\left(\frac{r}{k}, \frac{F}{S}\right) \quad \text{----- (5)}$$

であらわされる。いまここで $\frac{U}{u_*} = 0$ とおくと上式は次のように変形される。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{x} \log\left(\frac{r}{k} \cdot \frac{F}{S}\right) = 0$$

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{x} \left(\log \frac{r}{k} + \log \frac{F}{S}\right) = \frac{1}{x} \left(\log \frac{r}{k} - \log \frac{S}{F}\right) = 0$$

これから $\frac{r}{k} = \frac{S}{F}$ が得られる。

V 点状粗度の相当粗度 k_s と点状粗度要素の大きさ h との比 $\frac{k_s}{h}$ と $\frac{S}{F}$ との関係

本実験におけるボルト打込みの深さ h に対する F, S および S/F の値は表-2 に示す通りである。

また点状粗度の相当粗度 k_s と点状粗度要素の大きさ h との比 $\frac{k_s}{h}$ と S/F の関係は

$$\frac{k_s}{h} = 4.378 \left(\frac{S}{F}\right)^{-0.657} \quad \text{----- (6)}$$

となり、これを二次元流の対数抵抗則の形で書きあらわせば

$$\frac{U}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5.75 \log \frac{D}{2h} + 3.78 \log \frac{S}{F} + 1.06 \quad \text{----- (7)}$$

が求められる。

mm	h (mm)	F (cm ²)	S (cm ²)	S/F
1	1.0	0.24	1256	523.3
2	2.0	0.48	1256	261.7
3	3.0	0.72	1256	174.4
4	4.0	0.96	1256	130.8
5	5.0	1.20	1256	104.7
6	6.0	1.44	1256	87.2
7	7.0	1.68	1256	74.8

表-2

VI 結 論 本実験により点状人工粗度の抵抗特性として $\frac{S}{F} = 74.8 \sim 261.7$ において
(1) 式が成り立ち

$$\sqrt{\frac{S}{F}} = 5.75 \log \frac{D}{2h} + 3.78 \log \frac{S}{F} + 1.06$$

が得られたことは、カルマン常数 $2h$ が 0.4 であることであり、(2) 式であらわされたような矛盾した箇所がなくなっており、よって点状人工粗度による損失から得られる摩擦損失係数 f は、従来いわれてきた粗度要素の平均の高さ h の函数ではなく、相対粗度密度 $\frac{S}{F}$ の函数であることがわかった。
このことは一般に点状粗度に対して成り立つのではないかと考えるものである。

本実験に当り関東学院大学工学部土木工学科河海研究室の助手野澤雅美君、昭和44年度に同土木工学科四年次生であつた井澤幸男君、江益隆松君の盡力によつて大であつた。ここに記して感謝の意を表する。