(II－31)　下水汚泥の管路輸送に関する摩擦損失水頭の算定に関する研究

早稲田大学理工学部　学生員　三木陽介
早稲田大学理工学部　正会員　遠藤郁夫
国土総合建設（株）　正会員　福島徳良

1. 緒言　下水汚泥の管路による長距離輸送では、一般的にはHazen･Williamsの修正式を用いて汚泥濃度、汚泥温度、および管の経年変化等を勘案して摩擦損失水頭を求める。しかしながら、摩擦損失水頭の算定においてHazen･Williamsの係数C_Hの影響は極めて大きいにも関わらず、経験的配慮が必要であり、C_Hの合理的決定はしばしば困難である。そこで、この研究は、Hazen･Williamsの修正式と、DodgeおよびMetznerらの式を下水汚泥に適用するための修正式（以下、DodgeおよびMetznerらの修正式）とを用いて、下水処理場間に設置されている実際の汚泥管路について、実測値と上記2式による計算値とを比較検討したものである。

2. 実験方法　2.1 実験管路　実験管路は、塩化ビニール製、正方形断面(2.0×2.0cm)、全長6.0mとした。滑らかな管は円形および正方形断面管路を用い、粗い管は正方形断面管路の内面に均一に金剛砂を付着させて、人工的に粗度を作った。圧力測定は汚泥が入り込まないようにしたマノメータで、流速は重量法で測定した流量から求めた。

2.2 実際管路における圧力損失測定　実際の送泥管路の圧力損失の測定は、送泥ポンプの吐出口において圧力損失と汚泥濃度を30分～1時間間隔で測定した。測定時間は汚泥が送泥地点に到達すると考えられる時間に若干の余裕を考慮して3～5時間とした。

3. 実験結果および考察　3.1 Hazen･Williams式におけるC_Hの算定　下水汚泥の摩擦損失水頭の計算法として、乱流領域では、Hazen･Williams式(3.1)の修正式(3.2)のC_Hを、管種並びに通水年数を考慮して適当に選択し、算定する方法がある。

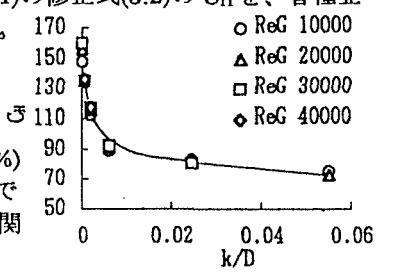
$$H_L=6.82C_H^{-1.85}\cdot D^{-1.17}\cdot V^{1.85}\cdot L \quad (3.1)$$

$$H_L=6.82C_H^{-1.85}\cdot D^{-1.17}\cdot V^{1.85}\cdot L\cdot(1+0.11C') \quad (3.2)$$

$$C'=\{1-0.019(T-10)\}^{0.37}\cdot C_T \quad (3.3)$$

C':10℃でのみかけ汚泥濃度(%)　C_T;T℃でのみかけ汚泥濃度(%)

下水汚泥濃度1500～12000mg･TS/lの範囲で液温18～22℃でRe_G>10000におけるC_Hとk/Dの関係は図－1のように指数関数$C_H=A(k/D)^B$の形で表されることが認められた。そこで、各下水汚泥濃度CとA,Bとの関係は図－2,3に示すことができた。以上のことから、C_Hとk/Dとの関係は(3.4),(3.6)式で表すことができた。



図－1 実験管路の相対粗度k/DとCHとの関係

$$C_H=48.76\cdot(k/D)^{-0.138} \quad (C\geqq 6000mg\cdot TS/l) \quad (3.4)$$

$$H_L=5.14\times10^{-3}(k/D)^{0.255}\cdot D^{-1.17}\cdot V^{1.85}\cdot L \quad (3.5)$$

$$C_H=-1.49\times10^{-3}\cdot C+57.53\cdot(k/D)^{-0.138} \quad (C<6000mg\cdot TS/l) \quad (3.6)$$

$$H_L=\{-1.49\times10^{-3}\cdot C+57.53\cdot(k/D)^{-0.138}\}^{-1.85}\times6.82\cdot D^{-1.17}\cdot V^{1.85}\cdot L \quad (3.7)$$

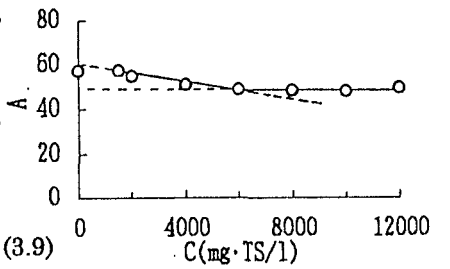
また、(3.6)式のC項がC_Hに比較して小さいため、若干精度は犠牲になるが、C≦12000mg･TS/lの範囲では、H_Lは(3.5)式で計算することができる。

3.2 DodgeおよびMetznerらの修正式　下水汚泥の層流領域(D=0.9cm円管)より、下水汚泥濃度Cと構造粘度指数nおよび擬塑性粘度係数Kp(=$8^{n-1}\cdot k$)との関係は、次の関係式で示すことができた。

・下水汚泥濃度Cとnとの関係（層流領域）

ニュートン流体：C≦1500mg･TS/l　n=1　(3.8)

非ニュートン流体：C≧1500mg･TS/l　$n=7.15\times C^{-0.270}$　(3.9)



図－2 下水汚泥濃度CとAとの関係

・下水汚泥濃度CとKpとの関係（層流領域）

C≧4000mg･TS/l　$Kp=2.49\times10^{-8}\cdot C^{1.72}$　(3.10)

(3.8),(3.9)および(3.10)式は、異なる管径(D=1.3cm円管)、断面形状(D=2.0cm正方形管)、並びに幾つかの下水処理場からの汚泥を用いてもよく一致することが認められた。

3.3 滑らかな管　Dodge および Metzner らによると、滑らかな管の場合、擬塑性流体の乱流領域における Re_G と f との間には次の関係がある。

$1/\sqrt{f}=An\log(Re_G\cdot f^{1-n/2})+Bn$　　(3.11)

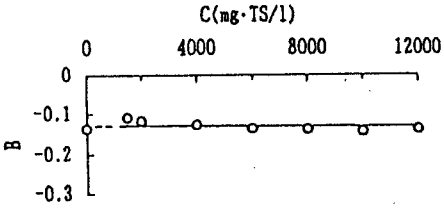
D=1.3cm 円管の乱流領域より下水汚泥濃度 C と An,Bn との関係は次式で表すことができた。

$4000\leqq C\leqq 15000 mg\cdot TS/l$

$An=1.85$　(3.12)　$Bn=1.66\times10^{-4}\cdot C-0.636$　(3.13)

以上のことから、滑らかな管における Re_G と f との関係は次式で表すことができた。

$1/\sqrt{f}=1.85\log(Re_G\cdot f^{1-n/2})+1.66\times10^{-4}\cdot C-0.636$　(3.14)



図－3 下水汚泥濃度CとBとの関係

3.4 粗い管　Moody 図表を参照して、ニュートン流体としての清水において完全乱流領域が得られる粗度について実験的検討を加えたところ、Re>30000 において k/D=0.12、0.058、0.055、0.053 および 0.025 の管路では完全乱流であることが分かった。一方、下水汚泥の場合も Re_G>30000 において、f は汚泥濃度（粘性）の影響を受けないことが認められ、下水汚泥の粗い管における完全乱流領域での f と k/D との関係は次式で表すことができた。

$$1/\sqrt{f}=1.75-1.73\log\frac{2k}{D}\qquad(3.15)\ (4000\leqq C\leqq 15000 mg/l)$$

3.5 粗滑遷移領域　下水汚泥においても、水の場合の Colebrook-White 式と同じ誘導方法で、(3.14)式と(3.15)式とを内挿して粗滑遷移領域式を誘導した。

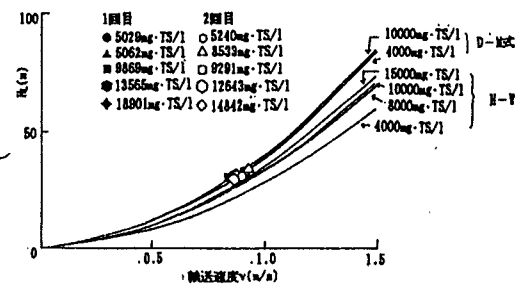
$$1/\sqrt{f}=1.75-1.73\log\left\{\frac{10^{(1.75-Bn)/1.73}}{(Re_G\cdot f^{1-n'/2})^{An/1.73}}+\frac{2k}{D}\right\}\qquad(3.16)$$

実際の汚泥管路輸送では粗滑遷移領域と考えられる。そこで、本実験では実用範囲と考えられる k/D=0.00056、0.0021 に加え 0.025、0.055、0.12 について、異なる下水処理場の汚泥を用いて(3.16)式の実証的検討を加えたところ、よく一致することが認められた。

4. 実際の汚泥輸送管路における圧力損失の調査結果と解析　4.1 理論式　摩擦損失水頭は下水汚泥処理場のポンプと吐出口と下水処理場の濃縮槽越流水面との間にベルヌーイ式を適用して求めた。すなわち、L/D>3000 であるから、漸拡および曲がりなどの諸損失を無視すると、摩擦損失水頭は、次の式で表すことができる。

$$H_L=(Z_A-Z_B)+\frac{P_A}{\rho g}+\frac{V_A^{\,2}}{2g}\qquad(4.1)$$

4.2 測定結果　(4.1)式で計算した実測値と式(3.5)および(3.16)による計算値を図－4 に示した。この図から、Dodege および Metzner らの修正式はよく一致していることが認められた。一方、Hazen·Williams の修正式による計算値は過小評価の可能性（危険側）がある。



図－4 H-WおよびD-W式修正式の計算値と実測値との関係

5. 総括および結論　汚泥の管路輸送において、摩擦損失水頭の算定は従来、Hazen·Williams の修正式による方法が一般的に採用されてきた。しかしながら、この式の精度および運用の手法に関して問題視することが多い。そこで、本論文は Dodge および Metzner らの式に対して、下水汚泥を適用して実験的修正式を提案し、実験室的には良好な精度であることが確かめられた。したがって、上記の二式について、経年変化のことを考慮して比較的新しい実際の送泥管路の圧力損失を測定して、比較検討を行った。次のような結論を得ることができた。

1. Dodege および Metzner らの修正式はよく一致していることが認められた。
2. Hazen·Williams の修正式は過小評価の可能性がある。
3. 上記の結論は、S 下水処理場における測定結果の解析であり、今後多くの下水処理場について調査検討を行う予定である。