

早稲田大学理工学部 正員 遠藤郁夫
 国士館大学工学部 正員 ○金成英夫

1. 結論 下水汚泥の管路輸送は他の輸送手段に比べて、維持管理が安く、かつ、簡単であるとされている。本研究は下水汚泥を管路輸送する場合の摩擦損失水頭について、実際の汚泥輸送管路と実験管路において検討を加え、摩擦損失水頭の設計計算法を示したものである。

2. 摩擦損失水頭の計算法の概要 下水汚泥の摩擦損失水頭の計算法として、次の三つの方法が提案されている。すなわち、

(a) Hazen-Williamsの式を用いる方法 この方法による下水汚泥の摩擦損失水頭は次式で算定する。

$$h_f = 6.82 \frac{L}{D^{4.75}} \left(\frac{V}{C_H} \right)^{1.85} \quad \text{----- (1)}$$

$$C_H = C_{HW} \times C_f \quad \text{----- (2)}$$

h_f : 摩擦損失水頭(m), L : 管長(m), D : 管径(m), V : 流速(m/sec), C_{HW} : 木の場合の Hazen-Williams の係数

ここで、下水汚泥の含水率と(2)式の C_f との間には図-1 の関係がある。摩擦損失水頭は汚泥の含水率に対応する C_f を図-1 から求め算定する。

(b) Aburascen technika (Ⅳ) の方法 この方法は回転粘度計で求めた下水汚泥の粘度を用いて摩擦損失水頭を求めるものである。すなわち、下水汚泥の速度勾配($G(F_0)$)とせん断応力(F_0)の関係

$$F_0 = R (G(F_0))^n \quad \text{----- (3)}$$

から、構造粘度指数(n)と流体粘度指数(R)を求め、(4)式および(5)式で摩擦損失係数(λ)を算定する。

$$\lambda = 8 \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n \frac{1}{Re_n} \quad (\text{層流領域}) \quad \text{----- (4)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \left(\frac{1}{n} \right)^{0.70} \log (Re_n \lambda^{-\frac{n}{2}}) - 0.8n \quad (\text{乱流領域}) \quad \text{----- (5)}$$

$$Re_n = D^n \cdot V^{2-n} \cdot \rho / R \quad \text{----- (6)}$$

摩擦損失水頭は次式で求める。

$$h_f = \lambda (L/D) \cdot (V^2/2g) \quad \text{----- (7)}$$

(c) 遠藤・金成の式(Ⅳ)による方法 この方法による摩擦損失水頭の計算法を次に示す。

$$(i) \text{定義のレイノルズ数; } Re = D^n \cdot V^{2-n} \cdot \rho / K_p' \quad \text{----- (8)}$$

ただし、下水汚泥の n

$$n = 10.35 C^{-0.327} \quad \text{----- (9)}$$

下水汚泥の K_p' ($K_p' = 8^{n-1} \cdot R'$) ($\text{dyn} \cdot \text{sec}^n / \text{cm}^2$)

$$K_p' = 1.76 \times 10^{-15} C^{1.75} \exp(4950/T) \quad \text{----- (10)}$$

下水汚泥の密度; ρ (g/cm^3)

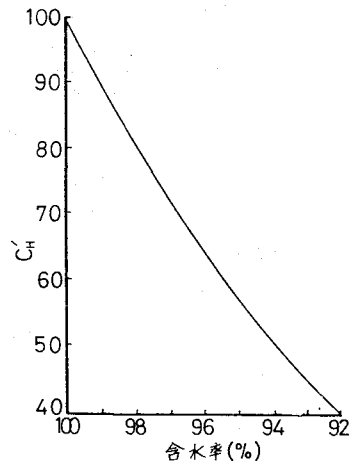


図-1. 下水汚泥の含水率と C_H との関係。

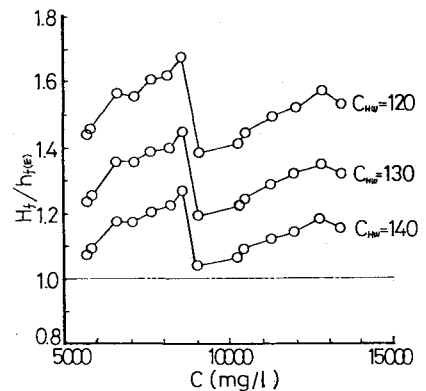


図-2. Hazen-Williams の式による $h_f/h_{f, H_2O}$ と C との関係

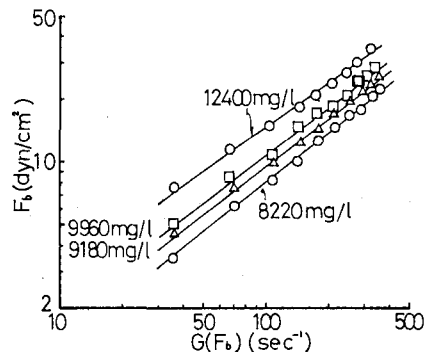


図-3. 下水汚泥の $G(F_0)$ と F_0 との関係 (回転粘度計)

$$\rho = \frac{3.9033 \times 10^3 \rho_w}{C \rho_w (131 + 1.67 R_p) + 390.38 (10^6 - C)} \quad (11)$$

D : 管径 (cm), v : 流速 (m/s), C : 汚泥濃度 (mg/l), T : 絶対温度 (K), ρ_w : 水の密度 (g/cm³), R_p : 汚泥の $V_{5/75}$ (%).

(ii) 摩擦損失係数; λ .

層流領域; $Re \leq 2000$, $\lambda = 64/Re$ ----- (12)

遷移領域; 滑らかな管 $Re = 2000 \sim 5000$, 粗い管 $Re = 2000 \sim 10000$.

若干精度は悪くなるが、乱流領域の関係式を適用できる。

乱流領域; 滑らかな管 ($Re \leq 5000$), $\lambda = 0.3164 Re^{-0.197}$ ---- (13)

粗い管 ($Re \geq 10000$), $\lambda = 0.0393 Re^{-0.071} (R_p/5 \times 10^3)^{-0.197}$ ---- (14)

(iii) 摩擦損失水頭は(7)式で算定する。

3. 汚泥輸送管路における比較検討.

測定に用いた汚泥輸送管路はA下水処理場からB下水処理場まで、下水汚泥を輸送している。管路延長は10.6kmおよび管径は333mmであり、管の内面はモルタルライニングされている。輸送汚泥の濃度は500~1500mg/l、流速0.9~1.2m/sおよび温度は9~23℃である。摩擦損失水頭の実測値($h_{f(w)}$)は管路始点の圧力と管内の流速をもとに算定した。

図2はHazen-Williamsの式による $h_f/h_{f(w)}$ と汚泥濃度との関係である。 C_{mw} が小さくなるにしたがって、 $h_f/h_{f(w)}$ は大きくなることから認められる。Abrassantechnik(Ⅲ)の方法の場合、回転粘度計で下水汚泥の粘度を求める必要がある。図3は下水汚泥の $G(w)$ と F_b との関係の一例である。図4はこの方法による $h_f/h_{f(w)}$ と汚泥濃度との関係である。図5は遠藤・金成の式(Ⅱ)による $h_f/h_{f(w)}$ と汚泥濃度との関係である。

以上の検討結果から、Hazen-Williamsの式を用いる方法は C_{mw} の選定が重要な問題となり、Abrassantechnik(Ⅲ)の方法では、下水汚泥の粘度を測定する必要がある。一方、遠藤・金成の式(Ⅱ)は下水汚泥の濃度等から簡単に h_f が算定でき、しかも、 h_f は $h_{f(w)}$ と良く一致する。

4. 摩擦損失水頭の設計計算法の提案.

汚泥輸送管路において、遠藤・金成の式(Ⅱ)を用いた方法が最も精度が良いことが認められた。そこで、遠藤・金成の式(Ⅱ)を用いた場合の設計計算法を示す。

図6は実験管路における摩擦損失水頭の実測値($h_{f(w)}$)と遠藤・金成の式(Ⅱ)による計算値(h_f)の誤差率(E)と名義のレイノルズ数(Re)との関係である。ここで、 E は次のようにして算定した。すなわち、 $E = (h_f - h_{f(w)})/h_{f(w)} \times 100$ ----- (15)

図6から、乱流領域では E は $\pm 10\%$ 以内にあることが認められる。一方、下水汚泥の輸送流速は $Re \geq 10000$ となる流速が必要であるため、 $Re \geq 10000$ では(15)式は $h_f = (0.9 \sim 1.1) h_{f(w)}$ と変形できる。ここで、遠藤・金成の式(Ⅱ)を用いた場合の摩擦損失水頭の設計値 $h_{f(D)}$ を、 $h_{f(D)} = 1.3 \cdot h_f$ (遠藤・金成の式(Ⅱ)) ----- (16) とすると、 h_f が $h_{f(w)}$ より小さい場合でも、 $h_{f(D)}$ は約20%の余裕をもつことになる。図7は、この設計値 $h_{f(D)}$ を汚泥輸送管路に適用したものである。 $h_{f(D)}$ は $h_{f(w)}$ に対して約20%の余裕をもつことが認められる。

5 結 論 下水汚泥の管路輸送における摩擦損失水頭の設計計算法として遠藤・金成の式(Ⅱ)及び(Ⅳ)を提案した。[参考文献] 1) 遠藤, 金成, "下水汚泥の輸送流速に関する実験的研究", 第36回年報(Ⅲ), P.135-136, 昭和三十四。

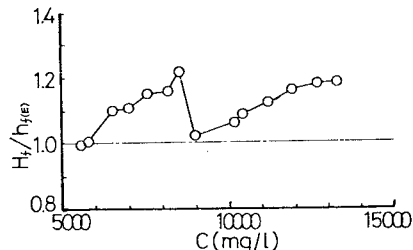


図4. Abrassantechnik(Ⅲ)による $h_f/h_{f(w)}$ と C との関係

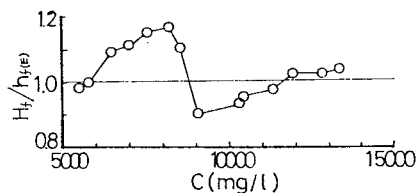


図5. 遠藤・金成の式(Ⅱ)による $h_f/h_{f(w)}$ と C との関係

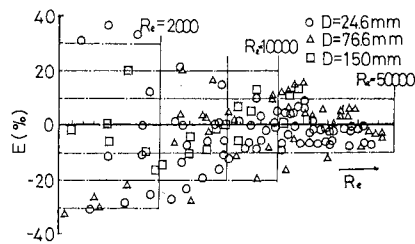


図6. 名義のレイノルズ数と誤差率の関係

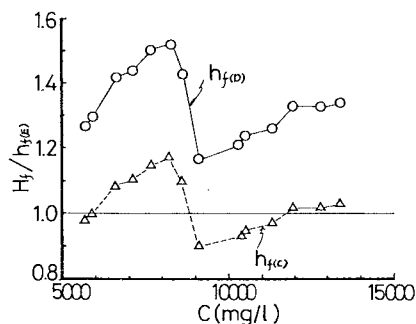


図7. 汚泥輸送管路における摩擦損失水頭の設計値