

1. はじめに

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(H-W 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(D-M 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。下水処理場の選定に当たっては、新しい送泥管としての A-下水

処理場(設置後 1 年 9 ヶ月)、古い送泥管としての O-下水処理場(設置後 33 年)とした。表-1 は、A および O-下水処理場における汚泥輸送管路の例である。

2. 調査方法 実際の送泥管路の圧力損失の測定は、ポンプの吐出口において 15 分間隔で測定した。汚泥濃度は 30 分間隔とした。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 5 時間行った。

3. 調査結果と考察 3.1 摩擦損失水頭計算式

下水汚泥の摩擦損失水頭の計算法としては、上述したように、乱流領域では、Hazen・Williams の修正式(H-W 修正式)と当研究室で誘導した Dodge・Metzner の修正式(D-M 修正式)およびその誘導式である粗滑遷移式とがある。これらの各式を表-2 にそれぞれ示した。

3.2 実際の汚泥輸送管路における摩擦損失水頭の解析

(1)摩擦損失水頭の算定 摩擦損失水頭は送泥側の下水処理場の汚泥貯留槽の水面と受泥側下水処理場のポンプ吐出口との間にベルヌーイ式を適用して求めた。 $L/D > 3000$ であることから、漸拡および曲がり等の諸損失を無視することとした。(2)摩擦損失水頭の解析表-1 における A-下水処理場は、測定時において供用年数が 1~2 年未満で、しかも 1 日当たりの送泥時間が 2~2.5 時間であったため、経年変化をほとんど無視できるものと考えられ、ダクタイル鋳鉄・モルタルライニング管の相対粗度 $k/D = 0.0012$ ($k = 0.3\text{mm}$)とし、粗滑遷移式(10)式による H_L -曲線を図-1

表1 実際の汚泥輸送管路の例

	A	O
下水処理場		
供用年数	1(1996.4~)	33(1964~)
全揚程(m)	35	42
平均流速(m/s)	0.577	0.896
送泥ポンプ稼動状況	間欠運転 2~2.5時間/day	連続運転
平均 Re_C	48853	37656
平均汚泥濃度(mg/l)	3928	7763
汚泥の種類	混合汚泥	混合汚泥
管種	ダクタイル鋳鉄	ダクタイル鋳鉄
延長(m)	7700	10614
管径(mm)	250	350
相対粗度(標準値)	0.0012	0.000857

表-2 摩擦損失水頭計算式

H-W 修正式

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

$$C = \{1 - 0.019(T - 10)\}^{0.37} \cdot C_T \quad (2)$$

C : 汚泥の液温 10℃におけるみかけの濃度(%)

C_T : 汚泥の液温 T℃におけるみかけの濃度(%)

C_H は経験的に $C_H = 110$ を用いることが多い。

D-M 修正式

(1) 下水汚泥濃度 C と n との関係 (層流領域)

$$\text{ニュートン流体: } C \leq 1500 \text{mgTS/l} \quad n = 1 \quad (3)$$

$$\text{非ニュートン流体: } C \geq 1500 \text{mgTS/l} \quad n = 7.15 \times C^{-0.270} \quad (4)$$

(2) 下水汚泥濃度 C と K_p との関係 (層流領域)

$$C \leq 1500 \text{mgTS/l} \quad K_p = 0.01 \quad (5)$$

$$C = 1500 \sim 2500 \text{mgTS/l} \quad \text{遷移領域} \quad (6)$$

$$C \geq 2500 \text{mgTS/l} \quad K_p = 2.49 \times 10^{-4} \cdot C^{1.72} \quad (7)$$

(3) 滑らかな管

$$1/\sqrt{f} = 1.85 \log(Re_C \cdot f^{-0.2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636 \quad (8)$$

$$3000 \sim 4000 \leq C \leq 15000 \text{mgTS/l}$$

(4) 粗い管

$$1/\sqrt{f} = 1.75 - 1.73 \log \frac{2k}{D} \quad (9)$$

$$Re_C \geq 30000$$

(5) 粗滑遷移領域

$$1/\sqrt{f} = 1.75 - 1.73 \log \left\{ \frac{23.9 \times 0.99979 C^2}{(Re_C \cdot f^{-1/2})^{1.25} + \frac{2k}{D}} \right\} \quad (10)$$

$$3000 \sim 4000 \leq C \leq 15000 \text{mgTS/l}$$

キーワード：汚泥輸送、汚泥管路輸送、汚泥の処理処分

〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL 03-3209-3211 (内)3517

に示した。この場合の汚泥濃度は測定 7 回の平均値 $C=3928\text{mgTS/l}$ (図-1 参照)を使用した。実測値とよく一致していることが認められた。温度の影響が認められないのは、D-M 修正式の諸係数の算定は汚泥温度 $18\sim 22^\circ\text{C}$ の範囲で決定したためと考えられた。図-2 は、(10)式にそれぞれの測定値を代入して、 Re_g - f 曲線を求めた。相対粗度 $k/D=0.0012$ 曲線によく適合していることが認められた。以上総括すると、A-下水処理場における新設送泥管(使用年数 1~2 年未満)では、相対粗度は公称相対粗度 $k/D=0.0012$ とよく一致している。すなわち、D-M 修正式の精度に重要な示唆を与えたものと考えることができた。また、図-1 に見られるように、H-W 修正式の算定は過大値を示すものと考えられた。図-3 は O-下水処理場の摩擦損失水頭を示したものである。相対粗度 $k/D=0.002\sim 0.003$ であることが認められた。O-下水処理場の場合、公称相対粗度 $k/D=0.00086$ 、しかも連続運転である。この場合、33 年間の稼働により、相対粗度は 0.00086 から 0.003 と増大して、実に 3 倍(k_{33}/k_0)となっている。一方、最も注目すべきことは、H-W 修正式では、過小評価の恐れがあることである。すなわち、経年変化が大きく影響していることが認められた。D-M 修正式(10)により、設計時の流速 $v=1.5\text{m/sec}$ とすると、粗滑遷移式(10)式による摩擦損失水頭 $H_L=86\text{m}$ となる。安全率 $F=1.5$ とすれば $H_L=129\text{m}$ となる。この場合は、経年変化により 33 年後の粗滑遷移式(10)式による H_L は 117m となる。すなわち、33 年後の安全率 $F_{33}=1.1$ となる。しかしながら、33 年後も安全率 $F=1.5$ であるためには、流速 $v=1.28\text{m/sec}$ となる。もし、 $v=1.0\text{m/sec}$ で送泥するとすれば $F=2.5$ すなわち、十分な安全性が確保されることになる。

4. 総括および結論

実際の汚泥輸送管路の圧力損失を測定し、摩擦損失水頭を計算した。また、経年変化に伴う損失水頭の増加についても検討を加え、汚泥輸送管路の損失水頭に関する安全率についても 2、3 の知見を得ることができた。今回は数回の調査結果の解析であり、甚だ不十分であるが、今後、更に多くの事例について調査解析を試みるつもりである。

図-1 A-下水処理場・ v - H_L との関係
($C=3928\text{mg/l}$, $D=250\text{mm}$, 供用年数 1 年)

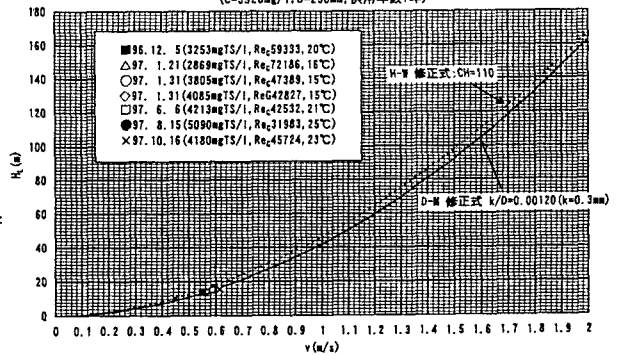


図-2 A-下水処理場・ Re_g - f との関係
($C=3928\text{mg/l}$, $D=250\text{mm}$)

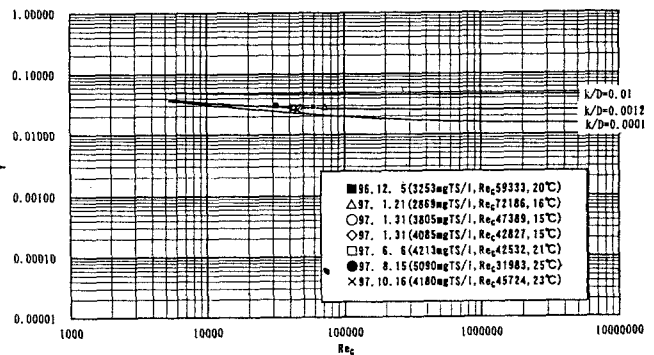


図-3 O-下水処理場・ v - H_L との関係
($C=7763\text{mg/l}$, $D=350\text{mm}$, 供用年数 33 年)

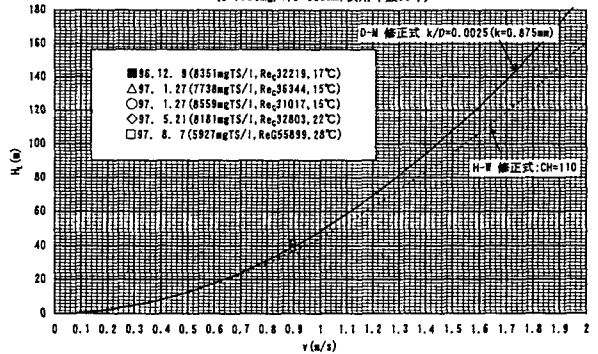


図-4 O-下水処理場・ Re_g - f との関係
($k/D=0.003$, $C=8216\text{mg/l}$, $L=10614\text{m}$, $D=350\text{mm}$, 16°C)
($k/D=0.002$, $C=7084\text{mg/l}$, $L=10614\text{m}$, $D=350\text{mm}$, 25°C)

