

地下水節水型消雪パイプの揚水量の算定法

長岡技大 正員 福嶋祐介・建設システム 八戸剛志・長岡市 木本二郎・近藤電機 原正栄
大和電機産業 小林敏夫・ウェブドゥ 酒井龍市・新潟電機 石丸民之栄・長岡技大大学院 石川有貴子

1. はじめに

本稿では、地下水節水型の消雪制御システムの実用化の一端を担う圧力センサーによる地下水揚水量の測定法の理論について述べる。すなわち、揚水ポンプとその直下流に取り付けられた圧力センサーと非常に多くの流出点を持つ消雪パイプについて、これを管路として取り扱う水理学的検討を行った。この理論を2003年12月10日から2004年4月1月27日までに長岡市内で現場測定した結果により、未定係数を決定した。さらに、圧力センサーによる流量の推定値と流量計による実測値と比較し、かなりの確度で流量を推定することができることを明らかにした。

2. 消雪パイプの水理学的検討

図-1に示すような消雪パイプを考える。消雪パイプの延長距離を L とし、その中に N 箇所の散水地点があり、さらに i 番目の散水地点には n_i 個のノズルがあるものとする。 i 地点では、基準面からの高さ z_i 、断面積 A_i をもつ消雪パイプ本管での断面平均流速 U_i 、圧力 P_i 、 n_i 個のノズルからの流出量の和を q_i とする。ここで、 i 番目の散水地点と $i+1$ 番目の散水地点に対して、摩擦損失水頭 h_{li} 、ノズルからの流出に伴うエネルギー損失 Δ_i を考慮する。流れを定常と仮定し、一次元のベルヌイの式を考慮すると以下ようになる。ただし、管路の曲がりなどによる損失は全て無視することにする。

$$\frac{P_i}{\rho g} + z_i + \frac{\alpha_i U_i^2}{2g} = \frac{P_{i+1}}{\rho g} + z_{i+1} + \frac{\alpha_{i+1} U_{i+1}^2}{2g} + h_{li} + \Delta_i \quad (1)$$

ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 α_i はエネルギー補正係数である。 i 番目の散水地点と $i+1$ 番目の散水地点の間を流れる本管の流量を Q_i とすると、連続の式は次

のようになる。

$$Q_{i+1} = Q_i - q_i \quad (2)$$

i 番目の散水地点での本管の管径を d_i 、ノズルの断面積を a_i とすると、摩擦損失水頭 h_{li} 、ノズルからの流出に伴うエネルギー損失 Δ_i は、それぞれ、次のように表される。

$$h_{li} = f_i \frac{\ell_i}{d_i} \frac{U_i^2}{2g} \quad (3)$$

$$\Delta_i = n_i c_{oi} \frac{1}{2g} \left(\frac{q_i}{a_i} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 f_i は摩擦損失係数、 ℓ_i は i 地点と $i+1$ 地点との距離、 n_i は i 地点でのノズルの個数、 c_{oi} はノズルからの流出に伴う係数である。式 (4) からノズルからの流出速度 u_i を $u_i = q_i/a_i$ としていることになる。

また、本管での断面平均流速 U_i は流量 Q_i と管の断面積 A_i を用いて次のように表される。

$$U_i = Q_i/A_i \quad (5)$$

消雪パイプシステムの制御に用いる流量 Q_0 を求めるという観点からは解を厳密に求める必要はない。また、式 (1)、(2) が厳密な流体力学の方程式ではない。ここでは以下の仮定の下に揚水量 Q_0 と圧力 P_0 を簡易な方法で求めることを考える。

ここで、以下のような仮定を置く。

- (i) 消雪パイプは水平に設置されているものとする。これより、

$$z_i = 0 \quad z_0 = -H, \quad (6)$$

ここで、 H は圧力センサーの位置とノズルの位置の高度差である。

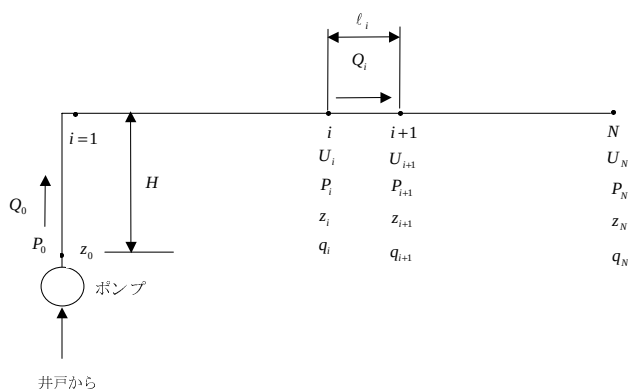


図 1: 消雪パイプの模式図と記号

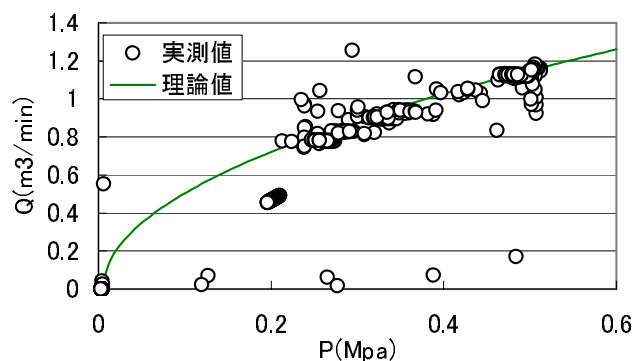


図 2: 圧力と実測流量との関係（実線は理論値、丸印は実測流量、2004年1月24日）

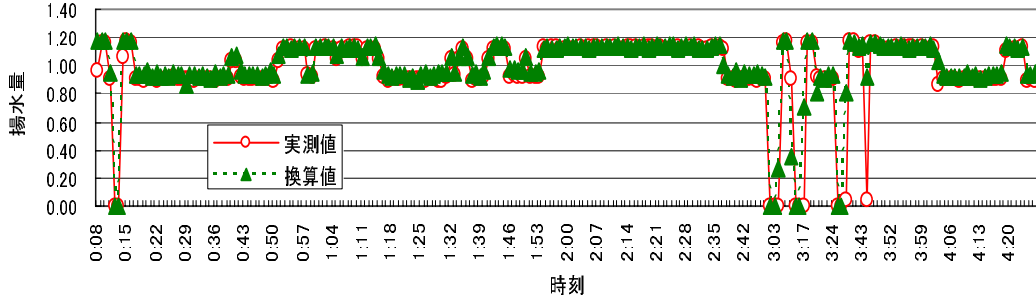


図 3: 実測流量と換算流量の時間変化

(ii) 消雪パイプの直径は一定であり d で表される．すなわち， $d_i = d$ ，本管の断面積も一定となり A で表され， $A_i = A = \pi d^2/4$ である．

(iii) 散水地点の間隔は一定であり ℓ で表され， $\ell_i = \ell = L/(N-1)$ とする．

(iv) 本管の摩擦係数 f_i ，ノズルでのエネルギー損失係数 c_{oi} は一定であり，それぞれ， $f_i = f$ ， $c_{oi} = c_o$ で表される．

(v) ノズルの形状が半径 d_1 円形状をなしているものとし，全てのノズルからの散水量は一定であるものとする．点 i での流出量（散水量になる）の和を q とすると $a_i = a = \frac{1}{\pi} d_1^2$ であり， $q_i = q = Q_0/N$ である．

以上の仮定の下で式 (1) から式 (5) は次のように書くことができる．

$$Q_{i+1} = Q_i - q \quad (7)$$

$$\frac{P_i}{\rho g} - \frac{P_{i+1}}{\rho g} = \frac{1}{2g} (U_{i+1}^2 - U_i^2) + h_{\ell i} + \Delta_i \quad (8)$$

$$h_{\ell i} = f \frac{\ell}{d} \frac{U_i^2}{2g} \quad (9)$$

$$\Delta_i = n_o c_o \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{a} \right)^2 \quad (10)$$

$$U_i = \frac{Q_i}{A} \quad (11)$$

式 (8) を $i = 1$ から $i = N-1$ まで足し合わせると次のようになる．

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_N}{\rho g} + \frac{1}{2g} (U_1^2 - U_N^2) = \sum_{i=1}^{N-1} h_{\ell i} + \sum_{i=1}^{N-1} \Delta_i \quad (12)$$

式 (8) より， i 地点での平均流速は $U_i = \frac{Q_i}{A} = U_0(1 - \frac{i}{N})$ は次のようになる．このとき，式 (12) の右辺第一項は，

$$\sum_{i=1}^{N-1} h_{\ell i} = \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ f \frac{\ell}{d} \frac{1}{2g} U_0^2 \left(1 - \frac{i}{N} \right)^2 \right\} = f \frac{L}{d} \frac{U_0^2}{2g} \frac{(2N-1)}{6N} \quad (13)$$

となる．式 (4) よりノズルからの流出に伴う損失の総和は次のようになる．

$$\sum_{i=1}^{N-1} \Delta_i = \sum_{i=1}^{N-1} n_o c_o \frac{1}{2g} (Q_0 n_o N a_o^2)$$

$$= c_o \frac{1}{2g n_o} \left(\frac{Q_0}{A_0} \right)^2 \left(\frac{A_0}{a_o} \right)^2 \frac{N-1}{N} \quad (14)$$

パイプの両端では，以下のような式が成立する．

$$\frac{P_0}{\rho g} - H + \frac{U_0^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + f \frac{H}{d} \frac{U_0^2}{2g} \quad (15)$$

$$\frac{P_N}{\rho g} = c_o \frac{n_o}{2g} \left(\frac{Q_0}{n_o a_o N} \right)^2 = c_o \frac{U_0^2}{2g} \left(\frac{A_0}{a_o} \right)^2 \frac{1}{n_o N^2} \quad (16)$$

式 (15)，(16) を式 (12) に代入し， P_1 ， P_N を消去し，揚水量 Q_0 について解くと次式を得る．

$$Q_0 = \left\{ \frac{(\frac{P_0}{\rho g} - H) 2g A_0^2}{f \left(\frac{L}{d} \frac{N-1}{6N} + \frac{H}{d} \right) - 1 + \frac{c_o}{n_o N} \left(\frac{A_0}{a_o} \right)^2} \right\}^{1/2} \quad (17)$$

ノズルからの流出にともなう損失係数 c_o については，よく分かっていない．そこで，この係数については，実測結果から逆算算定すると， $c_o = 0.0648$ となった．

消雪パイプ本管の摩擦損失係数については対数側を用いて算定する（日野，1983）．

3. 現場試験による係数の同定と流量の算定

節水型消雪パイプ制御部を設置したのは長岡市中島4丁目（長岡信金前，消雪パイプ総延長 404m）である（福嶋ほか，2003）．ここで実測した圧力計の出力と流量の実測値と理論値との比較を図2に，実測流量と式 (17) を用いた換算値との比較を図3に示す．図2から分かるように，実線で示す式 (17) は，実測流量をかなりの精度で再現できることが分かる．図から外れる点があるのは，この式が定常性を仮定しているのに対し，実際の消雪パイプでは降雪強度に伴い頻繁に流量の調整を行う非定常性があるためと考えられる．特に，圧力は降雪強度の変化に敏感に反応するが流量の変化はこれより緩慢であるためである．

引用文献

1. 日野幹雄（1983）：明解水理学，丸善，p. 174.
2. 福嶋祐介，木本二郎，原正栄，小林敏夫，酒井龍市，石丸民之栄，八戸剛志（2003）：地下水節水型消雪パイプ制御試験の実証試験（その1），雪氷（日本雪氷学会誌），65巻4号，pp.399-403.