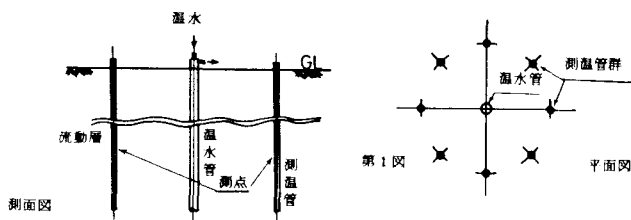


1. はしがき

地盤中に存在する地下水流速度の判定法としては、現在、(1) 地盤の動水勾配と透水係数より判定する方法、(2) **tracer** 法(食塩法、薬品法、放射性物質を使用する方法等がある)、(3) **dilution** 法(食塩水の稀釈状況より判定する)、(4) カーバイド法(カーバイドの発熱を利用して判定する)があるが、ここで紹介する方法は、筆者等が地盤凍結工法の施工に用いるために開発したもので、地盤中の温度の伝播を観測することによって、地下水流速度を判定しようとするものである。

2. 判定法の概要

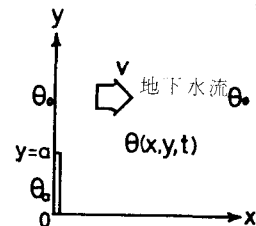
第1図に示す様に、温水管とその周囲に、測温管を埋設し、温水管中には、透水層に該当する深度に、あらかじめ測温点をおく。温水循環を開始してより、測温点が、温度変化



を感じる迄の時間を観測し、これらの観測値より計算によって、地下水流速度を判定する。温水管には、温水の代りに、冷水を使用しても、勿論差支はない。

3. 仮定条件と解析計算

第2図に示す様なモデルの熱伝導を解析するに当って、次の仮定条件を設ける。(i) 地盤は、等方均質であって、等深度断面の二次元問題として論じる。(ii) 地下水の流速は、地盤内一定で定常状態を保つ。(iii) 地盤内の熱の伝導は、水流軸に対して垂直な方向のみに行われ水流方向の熱伝導は無視するものとする。



第2図

仮定条件より解析領域内の微小部分の熱収支の平衡から次の微分方程式と境界条件が成立する。

$$\text{微分方程式} \quad (1) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \text{但し,} \quad \nu = v \frac{C_w \rho_w P}{C_p}$$

$$\text{境界条件} \quad (2) \quad t=0 \text{ で, } \theta(x, y, 0) = \theta_0, \quad (3) \quad x=0 \text{ で, } \theta(0, y, t)$$

$$= \theta_a - (\theta_a - \theta_0) \cdot E(y-a), \quad (4) \quad y=0 \text{ で, } \theta_y(x, 0, t) = 0,$$

$$(5) \quad y = \infty \text{ で, } \lim_{y \rightarrow \infty} \theta(x, y, t) = \theta_0,$$

次に、使用している記号を説明しておく。

$$x: x \text{ 座標距離 (m)}, \quad y: y \text{ 座標距離 (m)}, \quad t: \text{経過時間 (h)}, \quad \theta(x, y, t): \text{時間 } t$$

での x, y , 点の地盤温度 ($^{\circ}\text{C}$), θ_0 : 地盤の初期温度 ($^{\circ}\text{C}$), θ_a : y 座標軸上の $0 \leq y < a$ の部分の温度 ($^{\circ}\text{C}$), ν : 地下水流速値で方向は x 軸に平行とする (tracer velocity) (m/h)

$$k: \text{地盤の温度伝播率} (\text{m}^2/\text{h}), \quad P: \text{地盤の容積含水率} (\text{m}^3/\text{m}^3), \quad C_w: \text{水の比熱} (\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C})$$

$$\rho_w: \text{水の単位体積重量} (\text{kg/m}^3), \quad C: \text{地盤の比熱} (\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}), \quad \rho: \text{地盤の単位体積重量} (\text{kg/m}^3),$$

$$\nu; \frac{\nu C_w \rho_w P}{C_p} = \frac{\text{単位時間に単位断面を通過する水の熱容量}}{\text{地盤の単位体積の熱容量}} (\text{m/h})$$

境界条件の③式中の、 $E(y-a)$ の記号は、単位関数を表すもので、 $y-a < 0$ のときは 0 , で $y-a > 0$ のときは 1 となるもので、従って③の条件は、 $0 \leq y < a$ の区間では、温度 θ_a でその他の区間では θ_0 となることを示す。この解析問題の解は、演算子法を用いて⑥式の形に求められる。

$$(6) \quad \theta(x, y, t) = \theta_0 + E(t - \frac{x}{\nu}) \frac{\theta_a - \theta_0}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{y+a}{2\sqrt{k \frac{x}{\nu}}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y-a}{2\sqrt{k \frac{x}{\nu}}} \right] \right\}$$

ここに、

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-s^2} ds$$

(Gaussの誤差函数)

温水管の単位長あたりの加熱負荷を、 q (kcal/mh) とし、加熱管の外半径を a (m)、温水温度を θ_a (°C) とすれば、

$$\textcircled{7} \quad q = 2(\theta_a - \theta_0) \times \frac{a \sqrt{P C_w \rho_w}}{P}$$

⑥式の解は、時間 t が、

$E(t - \frac{x}{v})$ の形でのみ作用しており、このことは、 $t < \frac{x}{v}$ のときは、 $\theta = \theta_0$ で、 $t > \frac{x}{v}$ になると同時に温度が急変することを示している。その時点以後は、時間の経過と無関係に、定常的な温度分布を維持する。この様な地盤温度の特異性は、論文(1)の解にも共通点を見出す。地盤温度の変化は速度 v で進むが、この速度は、水流速 V より、小さい値である。(∵ $C_w \rho_w P < CP$)

第3図は、⑥式による計算結果をグラフで示したものである。

4. 地下水流速度の判定方法

第4図は、地下水流の存在する地盤の水平断面図である。

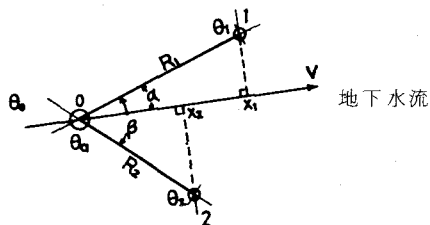
図中で、0; 温水管, 1, 2; 測温管, θ_1, θ_2 は、各測温管の測温値、又、 t_1, t_2 は、 θ_1, θ_2 の温度を感じる迄の経過時間、を示すものとする。(第5図参照)

これらの関係より、未知量の v, α は、それぞれ下記の

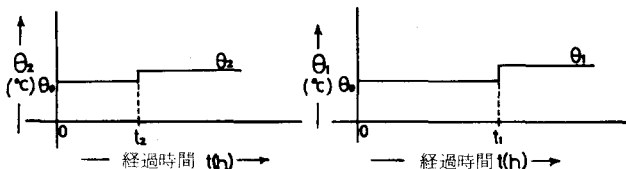
⑧, ⑨ 式によって、決定することができる。

$$\textcircled{8} \quad \alpha = \tan^{-1} \left\{ \operatorname{cosec} \beta \left\{ \frac{R_1}{R_2} \times \frac{t_2}{t_1} - \cos \beta \right\} \right\}$$

$$\textcircled{9} \quad V = \frac{CP}{C_w \rho_w P} v = \frac{CP}{C_w \rho_w P} \frac{x_1}{t_1} = \frac{CP}{C_w \rho_w P} \frac{x_2}{t_2}$$



第 4 図



第 5 図

[計算例]

第4図で、 $\beta = 45^\circ$, $R_1 = 3\text{m}$, $R_2 = 3.2\text{m}$, $t_1 = 246\text{h}$, $t_2 = 218\text{h}$, $P = 0.2\text{m}^3/\text{m}^3$ の条件の場合の、 v, α の数値を計算する。

$$\cos \beta = 1/\sqrt{2}, \quad \sin \beta = 1/\sqrt{2}, \quad \therefore \alpha = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{2} \left\{ \frac{3}{3.2} \times \frac{218}{246} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right\} \right\} = 10^\circ$$

$$P = 0.2\text{m}^3/\text{m}^3 \quad \text{のとき}, \quad CP/C_w \rho_w P = 3.464 \quad \text{であるから},$$

$$x_1 = 3 \times \cos 10^\circ = 2.955, \quad v = 3.464 \times 2.955 / 246 = 0.0416\text{m/h} (1\text{m/day})$$

と求めることができる。

(完)

(参考論文)

高志・戸部「凍結管例の冷却による地下水流速度の判定法」昭和44年度第24回土木学会年次学術講演

会講演集(Ⅲ-119)