

10. 多点温度検層の透水係数推定への応用の可能性

Possibility of application to estimation of hydraulic conductivity of multipoint temperature logging

○大矢基弘・露口耕治(株式会社四電技術コンサルタント)

栢木 智明 ((同) スイモンLLC)

1. はじめに

多点温度検層は地下水流動層の評価を目的に実施されることが多いが、温度復元率の経時変化より地下水流速を推定することができる。本研究は前記地下水流速と孔近傍の動水勾配を用いて、ダルシーの法則より透水係数を推定するとともに、妥当性を検証するため揚水試験・単孔式透水試験結果と比較した。

2. 調査地の概要

調査地は河川が東から西へ北に湾曲しながら流下する東西 1.8km、南北 0.5km の谷底平野の左岸である (図-1、図-2)。調査地の地盤は下層から洪積砂礫層(Dg)、沖積砂礫層 (Ag)、沖積砂質層 (As) であり、Ag 層の上部に自由地下水面がある (図-3)。

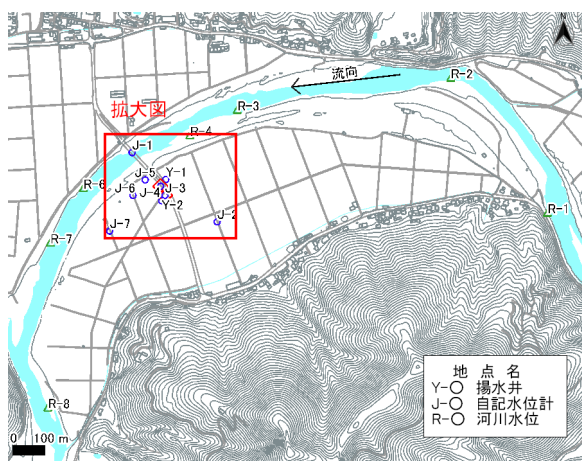


図-1 全体図

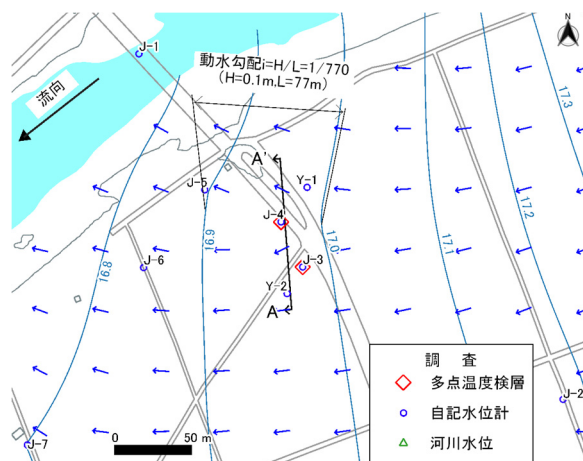


図-2 拡大図・地下水面等高線

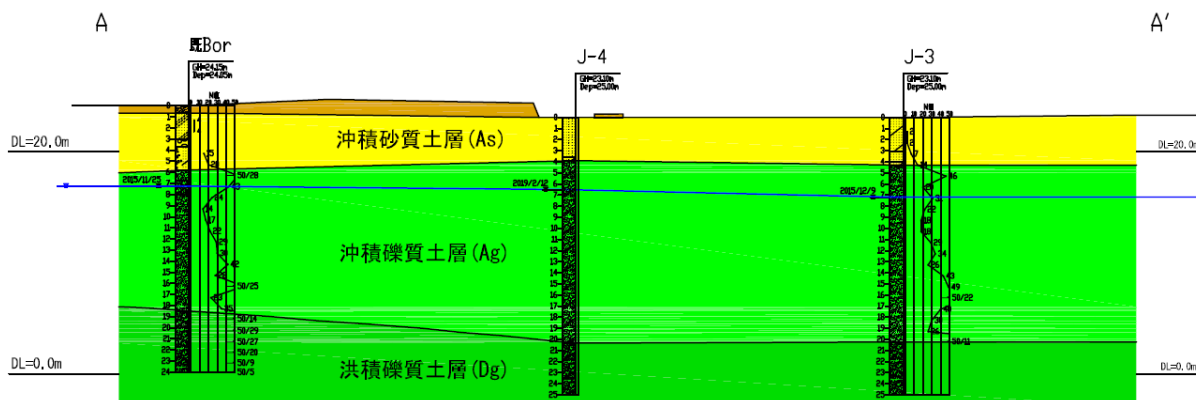


図-3 A-A' 断面

3. 多点温度検層による透水係数の推定

多点温度検層の実施手順は、0.5m 毎に温度センサーを接続したセンサーケーブルを観測孔に設置し、孔内に湯（60℃,100ℓ 程度）を送水・攪拌し、水温を約 5 秒間隔で測定した。

結果の整理について述べる。ボーリング孔内に注入された温水による昇温を、孔内全体均一にさせることは難しいことから、温度復元率を算出する（図-4）。

$$\text{温度復元率(\%)} = \frac{(\text{0分時の温度}) - (\text{任意経過時間における温度})}{(\text{0分時の温度}) - (\text{自然状態の温度})} \times 100$$

基準³⁾では、孔内流速を温度復元率・時間標準曲線より"測定開始から数分の直線区間"を用いて図解法により求めることとしているが、本研究では、管径 $D=100\text{mm}$ の孔内流速を算出するため、標準曲線より復元した図-5 内の式を用いた。温度復元率は図-6 に示すように管径を距離、温度復元率 $0\% \rightarrow 100\%$ の時間から求めた孔内速度を意味する。また、"ボーリング孔近傍の多孔性媒質中の流体は、ボーリング孔に吸い込まれるよう流れ込み"、孔中心での流速は地下水流速の 3 倍の値となることから、温度復元率から求めた孔内流速の $1/3$ を地下水流速とした。

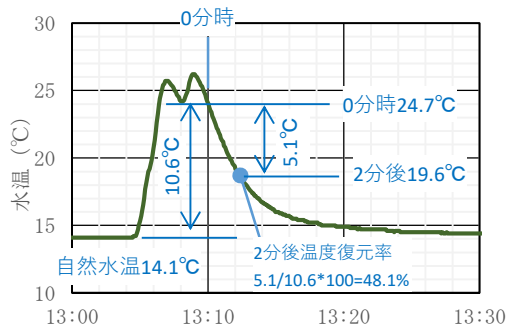


図-4 温度経時変化から
温度復元率の算出(J-4, GL-19m)

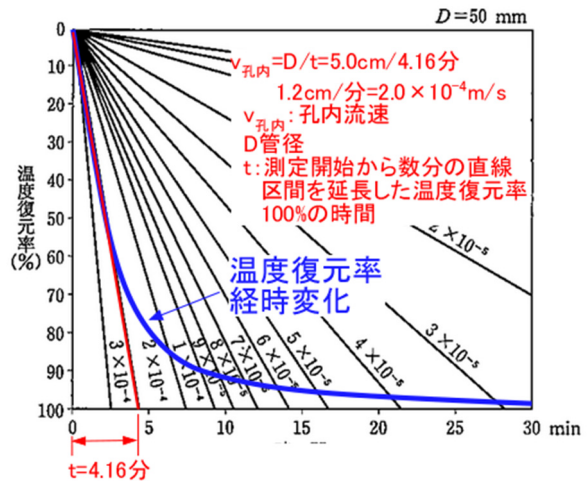


図-5 温度復元率・時間標準曲線
による孔内流速推定(J-4, GL-19m)

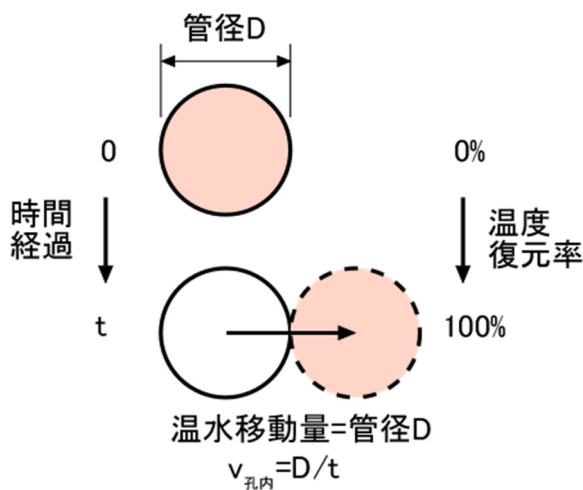


図-6 孔内流速イメージ

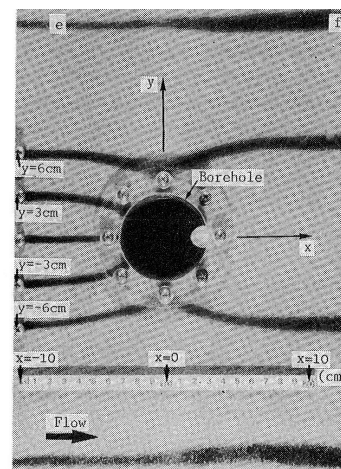


写真-1 流線の観測結果¹⁾

本研究では、さらに地下水流速を用いて、ダルシーの法則より透水係数を推定した。

$$k=v/i \quad \text{ここで、} k:\text{透水係数, } v:\text{地下水流速, } i:\text{動水勾配}$$

なお、 i は水位 $H=0.1\text{m}$ 間隔の地下水水面等高線 (図-2) の J-4 孔近傍の等高線間隔 $L=77\text{m}$ より求めた ($i=H/L=1/770$)。

J-4 孔 (管径 $D=50\text{mm}$) の試験結果を述べる (図-7)。試験開始前の自然水温は $14\sim 18^\circ\text{C}$ であり、上層の水温が高い状況であった。試験としては均一な昇温が望ましいが、流速の速い層は昇温しにくく、送水・攪拌後の最高水温は $22\sim 47^\circ\text{C}$ とばらついた。

温度復元率より、GL-24.0m の温度復元率の増加が遅く、後述の単項式透水試験結果等も踏まえて、それより下層が透水性の低い層、それより上層が透水性の高い層と判断し、また、GL-16~22m が特に流動の速い地下水流動層であると考えられた。

J-4 孔の多点温度検層より推定した透水係数は地下水流動層 (GL-7.5~23.5m) の平均値で $k=3.12\times 10^{-2}\text{m/s}$ 、最大値で $k=5.49\times 10^{-2}\text{m/s}$ となり、透水性は高い。

また、J-4 孔から 33m 離れた J-3 孔 ($D=100\text{mm}$) においても、地下水流動層 (GL-7.6~21.1m) の平均透水係数として同様の値 ($k=3.20\times 10^{-2}\text{m/s}$) が得られた。

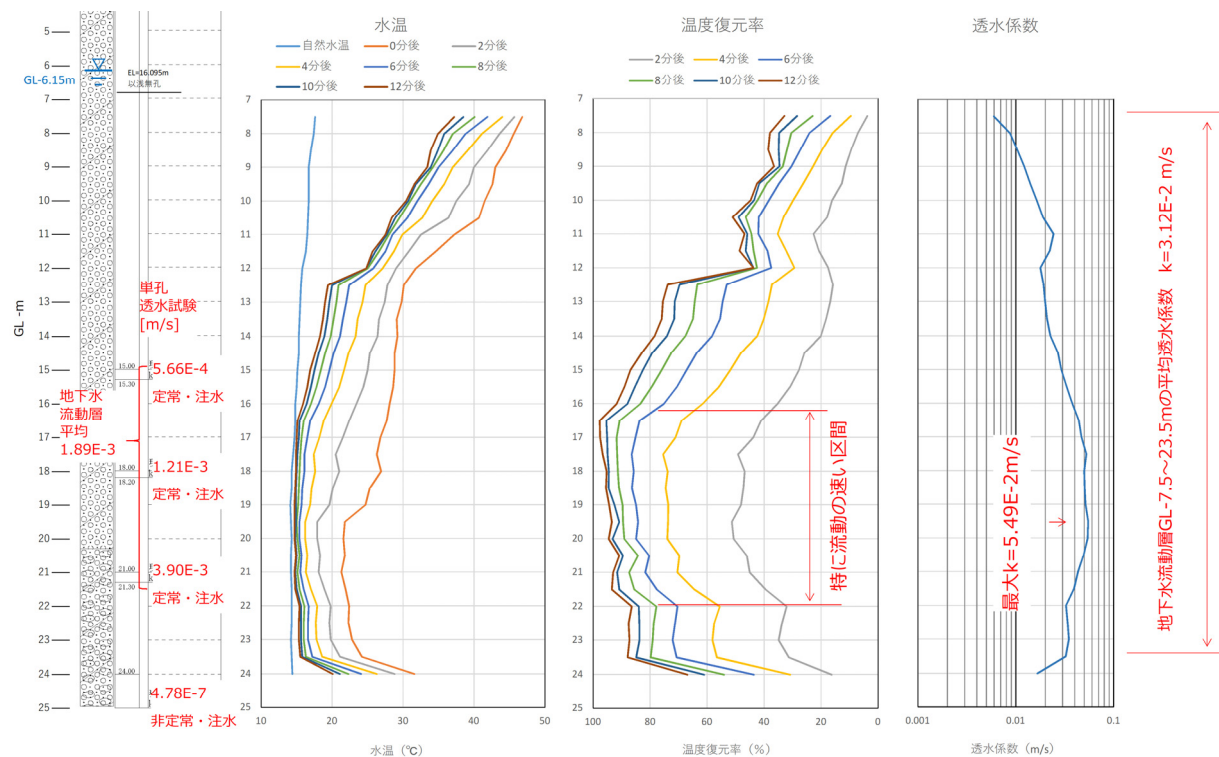


図-7 水温・温度復元率・孔内流速・透水係数 J-4 孔, $D=50\text{mm}$

4. 単孔式透水試験

単孔式透水試験は、J-4 孔を掘削中に 3m 間隔で 4 回実施し、GL-15.0~21.3m の比較的透水性の高い深度は定常・注水法、GL-24~25m の透水性の低い深度は非定常・注水法で実施した。

地下水流動層の平均値 (GL-15.0~21.3m) は $k=1.89\times 10^{-3}\text{m/s}$ であり、GL-24~25m は $k=4.78\times 10^{-7}\text{m/s}$ と低い値であった。

5. 揚水試験

自記水位計観測結果より、揚水井 Y-1 の稼働に伴う周辺観測孔の水位低下量を整理し、揚水試験に見立てて、定常の揚水試験整理方法である「 $s\text{-log}_{10}r$ プロットによる直線勾配法」により透水係数を推定した（図-8、図-9）。なお、同方法は被圧帯水層の推定方法であるが、帯水層厚に対し水位低下量が小さい場合（ $s/b < 0.2$ ）、不圧帯水層に適用でき、本地点では適合する。

Y-1 停止・揚水時の水位（図-8）より水位低下量を求め、 $s\text{-log}_{10}(r)$ 図（図-9）を作成すると概ね直線的な関係となり、これより $k=1.75 \times 10^{-2} \text{m/s}$ が得られた。

$$k = 2.3Q_p / (2\pi a) / b = 2.3 \times 0.0688 / (2\pi \times 0.0827) / 17.46 = 1.75 \times 10^{-2} \text{m/s}$$

ここで、 Q_p ：揚水量（ m^3/s ）、 a ： $s\text{-log}_{10}(r)$ プロットの勾配、 b ：帯水層厚(m)

また、Y-2 揚水に伴う水位低下から推定した値は（ $k=2.09 \times 10^{-2} \text{m/s}$ ）であった。

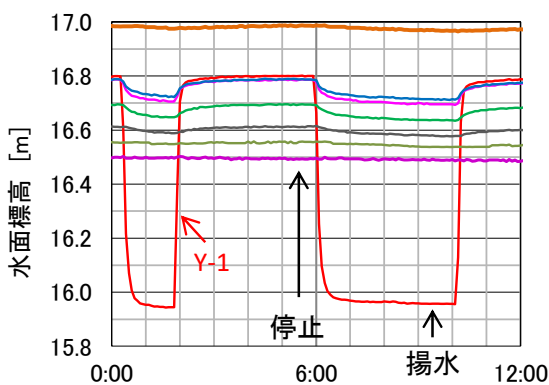


図-8 Y-1 揚水時の水位変動

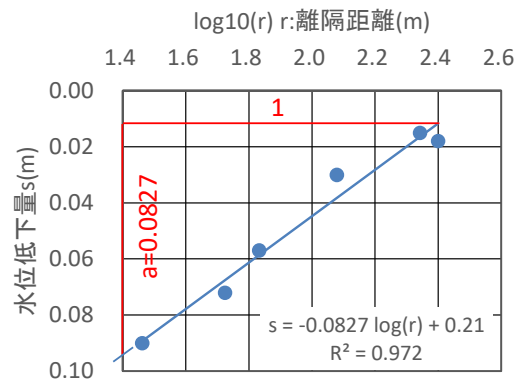


図-9 $s\text{-log}_{10}r$ プロット

6. まとめ

地下水流動層全体の平均透水係数として、揚水試験の値が平面的な試験区間も広く、原位置を最も適切に反映した透水係数と考えられる。揚水試験の値に比較して、単項式透水試験のそれは約 1/10 の値を示した。一方、多点温度検層による透水係数は揚水試験の約 1.6 倍の大きな値となったものの透水係数の指数表示のオーダー把握としては十分使えると思われる。

なお、今回 2 地点のみの試験であり、今後データを増やし本手法の再現性や適用範囲の把握に努めたい。

引用文献

- 1) 梶井和朗・神野健二・上田年比古・本村浩志・平野文昭・本田保(1989). ボーリング孔内の地下水流れに関する実験的研究, 日本地下水学会誌, Vol.31, No.1, pp13~18
- 2) 竹内篤雄 (1996). 温度測定による流動地下水調査法 古今書院, p278~316
- 3) 地盤工学会 (2013). 地盤調査の方法と解説 丸善出版, p615~629

表-1 透水係数の比較

試験・地点	対象区間	透水係数 (m/s)	平均透水係数 (m/s)	試験条件等
多温・J-4	GL-7.5~23.5m	3.12E-02	3.16E-02	D=50mm, i=1/770
多温・J-3	GL-7.6~21.1m	3.20E-02		D=100mm, i=1/845
単孔・J-4	GL-15.0~15.3m	5.66E-04	1.89E-03	定常法 (注水)
	GL-18.0~18.2m	1.21E-03		
	GL-21.0~21.3m	3.90E-03		
	GL-24.0~25.0m	4.78E-07	-	非定常法 (注水)
揚水・Y-1	GL-7.0~24.4m	1.75E-02	1.92E-02	Q=4.1 $\text{m}^3/\text{分}$
揚水・Y-2	GL-7.3~22.1m	2.09E-02		Q=3.2 $\text{m}^3/\text{分}$

揚水試験：定常法（ $s\text{-log}_{10}r$ プロットによる直線勾配法）