

地下水環境保全のための復水工法の設計法に関する研究

岡山大学環境理工学部 正会員 西垣 誠
岡山大学大学院 学生会員○福井博文

1. はじめに

地下水の環境保全を目的とする復水工法は、その実用性と経済性から近年大いに注目されている工法である。またこの工法を用いる際に最も問題となるのは、注水時に注入圧が高すぎるために、細粒分が移動し、復水井及び復水井の周辺の帯水層内で起こる目詰まりによる復水機能の経時的な低下であり、その対策法の確立が急がれている。そこで本研究では、本工法が実際に採用される北海道の千歳川放水路の建設予定地より採取された“不攪乱試料”を用い、一次元浸透モデルによる透水試験を行い、供試体内の間隙水圧と流量の測定から目詰まりを起こさせない（細粒分を移動させない）動水勾配の限界値（許容動水勾配）を算定し、さらにその許容動水勾配より井戸の構造（井戸径etc.）やそのピッチなどを決定することを目的とした。

2. 不攪乱試料の作成方法及び実験装置と手順

(1) 不攪乱試料の作成方法

①図-1のように木板に描いた円上にドリルで穴を開け、現場でその木板を採取する部分に当て、その穴から先端を尖らせた鉄筋杭を打ち込んで採取する。そして試料が現場における状態を保てるように凍結しておく。②凍結した試料をディスクグラインダを用いて削り、モールドに入る供試体を作成してそれにラップを巻き、モールドに入れ、モールドと供試体の間に充填材として白色セメントを用いて目詰めする。

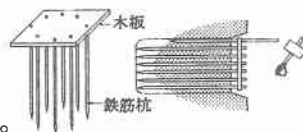


図-1 不攪乱試料採取方法

(2) 実験装置と手順

実験装置を図-2に示す。本実験では脱気水を連続的に供給するため、上流水位装置は2つのタンクによるマリオットサイフォン方式を利用する。実験用モールドでは、マンオメーターによって試料内部の間隙水圧を計測した。実験手順は以下の通りである。①供試体を下流側を下にし、脱気水をゆっくりと通水し、飽和度を高める。

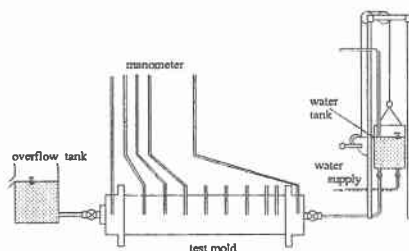
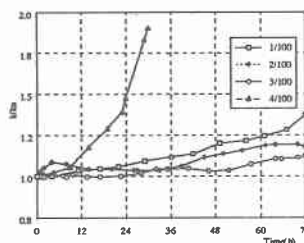


図-2 実験装置

なお、今回の実験では、細粒分の移動に注目するため、細粒分の移動を避けるために脱気装置による脱気は行わなかった。②供試体の上流側を上流水位装置に、下流側をオーバーフロータンクに連結させる。③上流水位装置を上昇させることによって、上流側のマンオメーターと下流側のマンオメーターに水位差を与え、動水勾配を $1/100$ から $i=0.01$ ピッチで上昇させる。④各段階における通水時間は連続72時間で、経過時間毎に流量と間隙水圧の測定を行った。ここで微小な水頭差を正確に計るため、マンオメーター用のビニールホースを精密ガラス管に連結させて測定した。また、実験は全て 22°C の恒温室を暗室にして実施した。

3. 実験結果及び考察

実験結果を図-3、図-4に示す。本実験では細粒分が下流側のメッシュを通過して流亡することによって、水みちが拡大し透水係数が上昇したものと考えられる。図-3より、 $i=4/100$ になると透水係数が急激に上昇している。一方、 $i=1/100$ においては $i=2/100$, $3/100$ よりも大きな変化が見られた。これは今回の実験では初期の通水後、脱気を行わなかったため、供試体が十分に飽和されていなかったため、低い動水勾配において供試体の飽和度が徐々に高まり透水係数が上昇したものと考えられる。また、図-4より下流側において透水係数が大きく上昇していることがわかる。これは細粒分が移動して下流

図-3 初期透水係数(k_{10})に対する全体の透水係数の経時変化

に向けて水みちが拡大していき、さらにその細粒分がメッシュを通過していったためだと考えられる。以上の結果から、千歳川放水路の現場における許容動水勾配 $i_{re}=3/100$ であることが判明した。

4. 許容動水勾配の復水工法への適用

本実験の結果より今回用いた試料に対しては、許容動水勾配 $i_{re}=3/100$ であるとの結論が得られた。次に許容動水勾配が判明したことにより、井戸の構造（井戸径etc.）や井戸ピッチを決定することができる。そのフローチャートを図-5に示す。

井戸径とそのピッチの算定方法は以下のとおりである。

被圧帯水層の定常軸対称浸透の式

$$Q = 2 \pi k D \frac{H - h}{1 \ln (R/r)} \quad (1)$$

を r で微分すると次式が得られる。

$$\frac{dh}{dr} = \frac{Q}{2 \pi k D} \frac{1}{r} \quad (2)$$

ここで、注水井近傍における動水勾配が最も高くなることから、井戸近傍での動水勾配が許容動水勾配よりも小さくなればよいので、井戸近傍の動水勾配に着目し r には井戸径 r_0 が代入でき、そのとき

$$\left. \frac{dh}{dr} \right|_{r=r_0} = \frac{Q}{2 \pi k D} \frac{1}{r_0} \leq i_{re} \quad (3)$$

を満足すればよいので、

$$Q_a = 2 \pi k D r_0 i_{re} \quad (4)$$

として、式(1)、式(4)から次式を得ることができる。

$$r_0 i_{re} \ln (R/r_0) = H - h = \Delta h \quad (5)$$

式(5)に $i_{re}=3/100$ を代入し、図に示したものが図-6である。

現場における現地下水流の動水勾配と遮水部の長さが判れば、上流の地下水位と下流の地下水位の水位差 $\Delta h'$ が算定できるが、実際に集水井、受水井を設置した後の両井戸の水位差 Δh はこの $\Delta h'$ の半分程度になるものと考えられる。そこで図-6を用いることにより井戸径及びそのピッチを算定することができる。

4. おわりに

本研究では、室内での多段階透水試験によって、与えられた試料の許容動水勾配を算定することができた。またその許容動水勾配より井戸の構造（井戸径etc.）や井戸のピッチを算定する方法を示すことができた。さらに本研究では、試料として攪乱試料ではなく、不攪乱試料を用いた。攪乱試料と不攪乱試料とでは同じ試料で同じ間隙率であっても、攪乱試料の方が現地盤のような固定した水みちが形成されていないため、低い動水勾配で目詰まりが起きたり、逆に、サンプリングの際に目詰まりの原因となる粒子に付着している細粒分が洗い流されてしまうため、実際の限界動水勾配を越えても目詰まりを起こさない場合も考えられる。これらの事より、復水工法の設計の際に許容動水勾配を決定するためには、不攪乱試料を用いることがきわめて有効であると言える。

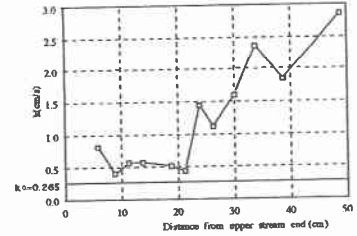


図-4 $i=4/100$ で30時間経過後の部分的な透水係数

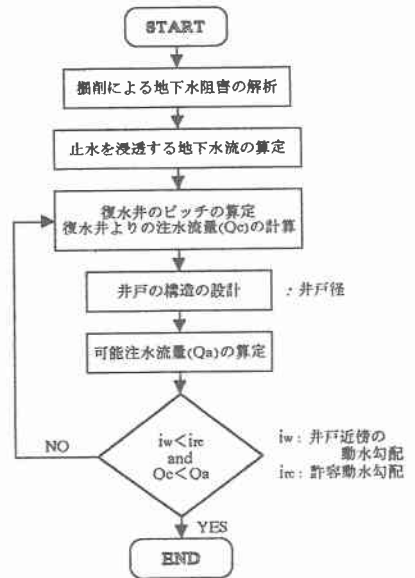


図-5 井戸の構造とそのピッチの設計手順

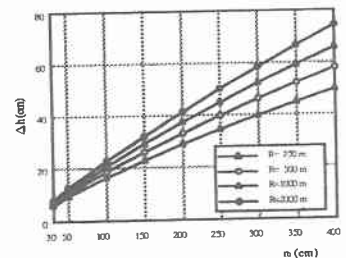


図-6 両井戸の水位差からの井戸径とそのピッチの算定法($i_{re}=3/100$)