

掘割構造物周辺の地下水流動状態保全 に関する研究

大東憲二¹・植下 協²・市川悦男³

¹正会員 工博 名古屋大学助手 工学部地圏環境工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町1)

²正会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科 (〒487 春日井市松本町1200)

³正会員 工修 岡崎市 (元名古屋大学大学院生)

本論文では、まず、掘割式の道路や鉄道などの掘割構造物の位置と地下水の流動方向に着目し、どのような場合に不圧地下水の流動阻害が生じるかについて考察した。そして、不圧地下水の流動阻害が最も大きくなる地下水の流動方向と掘割構造物が直交する場合について、帯水層の残存率と地下水流動阻害の関係を求めるための理論解を誘導した。また、地下水の流動方向と掘割構造物が直交しない場合について、三次元有限要素法を用いた数値解析により帯水層の残存率と地下水流動阻害の関係を求めた。次に、地下水流動状態保全の対策工の一つである地下水連通パイプを取り上げ、その設計方法について考察し、地下水連通パイプの通水能力や設置間隔と地下水流動阻害の軽減効果の関係を明らかにした。

Key Words : *saturated-unsaturated seepage analysis, groundwater, excavation, finite element method, environmental impact assessment*

1. まえがき

都市域の住宅地周辺に新たに建設される高速道路や鉄道では、騒音や景観悪化等の周辺環境への悪影響を少なくするために掘割式やトンネル式とすることが考えられる。しかし、このような地下構造物の建設により地下構造物を横切る地下水流が遮断され、地下水流の上流側ではダムアップ効果により地下水位が上昇し、下流側では逆に地下水位が低下する場合がある。

このように、地下構造物の建設に伴って地下水流動状態が変化し、井戸水の枯渇などの周辺住民の生活への悪影響が生じる場合、事前に地下水流動状態変化を予測し、その対策を講じていた場合とそうでない場合とでは、住民に対する迷惑度に大きな差を生じ、その問題処理に要する時間的、経済的な負担も大きく異なってくる。従って、地下水流動状態に関する事前調査と工事による影響の予測は、地下構造物の建設工事における重要な事前検討項目である^{1)・2)}。建設技術の進歩に伴って、工事後の地下水流動状態を工事前の状態に復元させるための地下

水流動状態保全対策も実施されるようになってきた^{3)・4)}。

本論文では、まず、掘割式の道路や鉄道などの掘割構造物の位置と帯水層の構造および地下水の流動方向に着目し、どのような場合に地下水の流動阻害が生じるかについて考察した。そして、地下水の流動阻害が最も大きくなる地下水の流動方向と掘割構造物が直交する場合について、不圧帯水層の残存率と地下水流動阻害の関係を求めるための理論解を誘導した。また、地下水の流動方向と掘割構造物が直交しない場合には、この理論解の適用が困難であるために、三次元有限要素法を用いた数値解析によって、帯水層の残存率と地下水流動阻害の関係を求めた。

次に、掘割構造物建設に伴う地下水流動阻害の程度が、周辺の地下水利用状況から設定した許容範囲を超える場合には、地下水流動状態を保全するための対策工の設置が必要となるが、その対策工の一つである地下水連通パイプを取り上げ、その設計方法について考察した。そして、この地下水連通パイプを一次元有限要素でモデル化して地盤の三次元有限

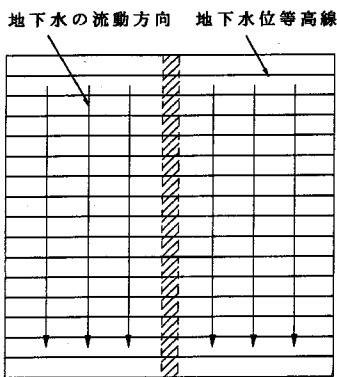


図-1(a) 地下水流と堀割構造物が同方向の場合
(斜線部分が堀割構造物)

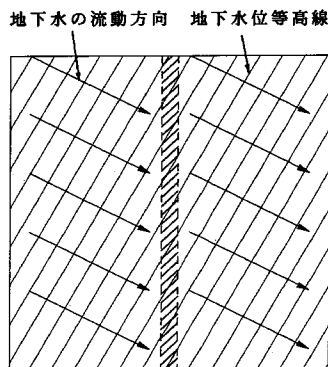


図-1(b) 地下水流と堀割構造物が交差する場合
(斜線部分が堀割構造物)

要素モデルに重ね合わせる数値解析法⁵⁾を用いて、地下水連通パイプの通水能力や設置間隔と地下水流動阻害の軽減効果の関係を明らかにした。

2. 堀割構造物建設時の地下水流動状態保全対策の要否

堀割構造物を建設する場合には、常に地下水流動状態保全対策が必要となるのではなく、帯水層や地下水流の状況と堀割構造物との位置関係によっては、地下水流動状態保全対策が必要でない場合もある。本章では、各種の地盤条件の下で建設される堀割構造物が、地下水障害を起こす可能性がある場合とない場合について整理し、地下水流動状態保全対策の要否の条件を考察する。

まず、地下水の流動状況と堀割構造物との位置関係については、

- (a) 堀割構造物建設前に地下水の流動がほとんどなかった場合は、地下水障害とならない。
- (b) 地下水流と堀割構造物が同方向の場合は、地下水流の遮断とならない(図-1(a)参照)。
- (c) 地下水流と堀割構造物が交差する場合は、地下水流の遮断の可能性を検討する必要がある(図-1(b)参照)。

また、上記(c)の場合には、以下のような帯水層と堀割構造物との位置関係について検討する必要がある。

- (1) 不圧帯水層を部分的に遮断する場合(図-2(a)参照)

堀割構造物が地下水流を阻害するので、堀割構造物箇所での通水面積は $2b/(h_1+h_2)$ の比率で減少する。しかし、その結果生じる地下水位変動量

Δh_1 、 Δh_2 が以下の条件を満足するならば、地下水保全対策は特に必要がない。

$$|\Delta h_1| \leq \Delta h_{s1}$$

$$|\Delta h_2| \leq \Delta h_{s2}$$

ここに、 Δh_{s1} 、 Δh_{s2} : 地下水位変化の許容値

もし、地下水位変動量が許容値を満足できなければ、図-2(b)に示すように、堀割構造物の下に地下水連通パイプなどの通水施設を設け、地下水位変動量が許容値以下になるようにする必要がある。

- (2) 不圧帯水層を完全に遮断する場合(図-2(c)参照)

堀割構造物が不圧帯水層を完全に遮断するので周辺の地下水流動状態に大きな変化が生じることが予想される。したがって、図-2(b)中に示すように、堀割構造物の下に地下水連通パイプなどの通水施設を設け、地下水位変動量が許容値以下になるようにする必要がある。

- (3) 地表部難透水層中の堀割構造物の場合(図-2(d)参照)

このような堀割構造物は地下水流動にとって遮断問題とはならないが、施工中に盤膨れ防止のために被圧地下水位を低下させる場合には、地下水位低下が広範囲で生じる可能性がある。

- (4) 地表部難透水層と下部難透水層に挟まれた透水層(被圧帯水層)を部分的に遮断する場合(図-2(e)参照)

堀割構造物箇所での通水面積は b/B の比率で減少する。もし、被圧地下水位の変動量が許容値を満足できなければ、図-2(f)に示すように、堀割構造物の下に地下水連通パイプなどの通水施設を設け、被圧地下水位の変動量が許容値以下になるようにする必要がある。

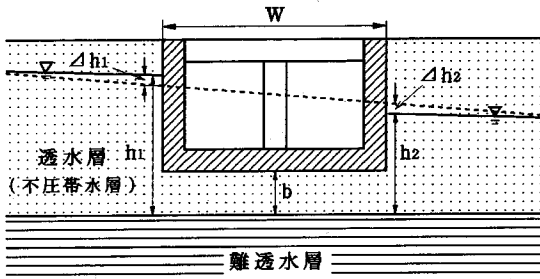


図-2(a) 不圧帯水層を部分的に遮断する場合

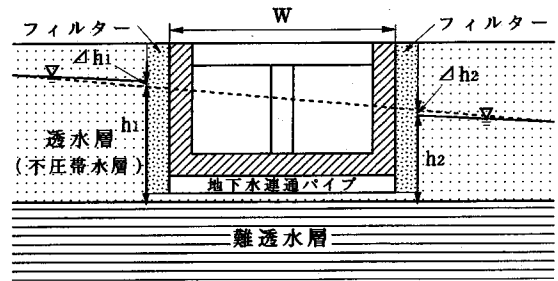


図-2(b) 不圧帯水層を部分的に遮断する場合 (地下水連通パイプを設置)

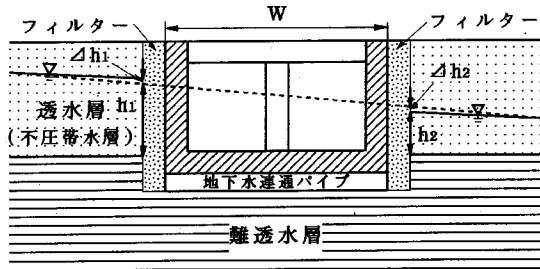


図-2(c) 不圧帯水層を完全に遮断する場合 (地下水連通パイプを設置)

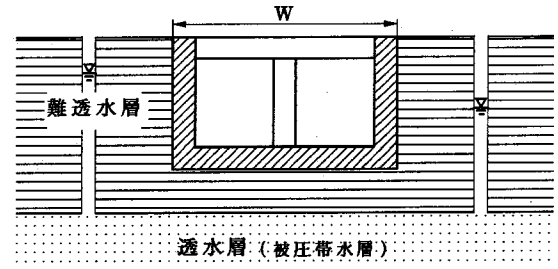


図-2(d) 地表部難透水層中の掘割構造物の場合

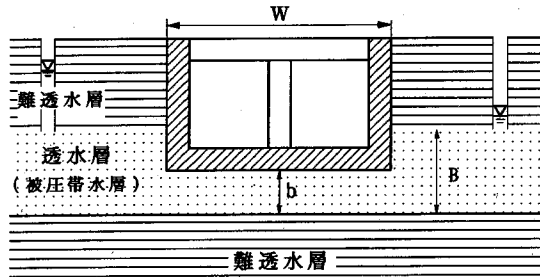


図-2(e) 地表部難透水層と下部難透水層に挟まれた透水層 (被圧帯水層) を部分的に遮断する場合

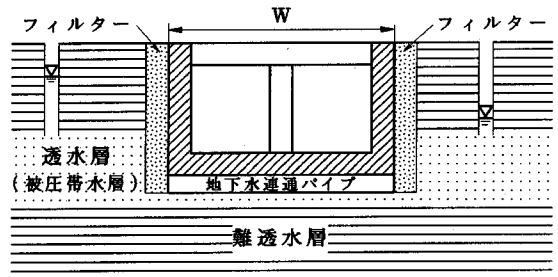


図-2(f) 地表部難透水層と下部難透水層に挟まれた透水層 (被圧帯水層) を部分的に遮断する場合 (地下水連通パイプを設置)

3. 不圧帯水層中の掘割構造物の地下水流動状態への障害度の評価

本章では、まず、地下水の流動障害が最も大きくなる地下水の流動方向と掘割構造物が直交する場合において、不圧帯水層の残存率と地下水流動障害の関係を求めるための理論解を誘導した。今回は、図-3に示すような不圧帯水層モデルを仮定し、地下水流動の基礎式としては、一次元浸透流の基礎式である次式を用いた。

$$k \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + N = 0 \quad (1)$$

ここに、 k : 地盤の透水係数、 h : 地下水位、

N : 降雨浸透量、 x : 距離

まず、掘割構造物建設前の任意の位置での初期地下水位は、式(1)を以下の条件で解くことにより求められる。

$$x = x_0 \text{ で } h = h_0, \quad x = x_3 \text{ で } h = h_3$$

これより、 $x = x_1$ および $x = x_2$ における初期地下水位は、次式で表される。

$$h_{1i} = \sqrt{\frac{h_0^2(x_3 - x_1) + h_3^2(x_1 - x_0) + \frac{N}{k}(x_1 - x_0)(x_3 - x_1)}{x_3 - x_0}} \quad (2)$$

$$h_{2i} = \sqrt{\frac{h_0^2(x_3 - x_2) + h_3^2(x_2 - x_0) + \frac{N}{k}(x_2 - x_0)(x_3 - x_2)}{x_3 - x_0}} \quad (3)$$

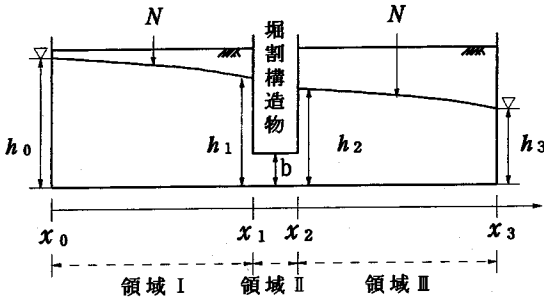


図-3 堀割構造物の存在する不圧帯水層モデル

式(2), (3)を用いると, 堀割構造物建設箇所(領域II)の初期地下水位勾配 $I_i = \frac{h_{2i} - h_{1i}}{x_2 - x_1}$ を求めることができる。

次に, 堀割構造物建設後の領域Iと領域IIIの境界条件は, それぞれ次式で表される。

$$\text{領域 I: } \begin{cases} x = x_0 \text{ で } h = h_0 \\ x = x_1 \text{ で } kh \frac{\partial h}{\partial x} = kb \frac{h_{2c} - h_{1c}}{x_2 - x_1} \text{ かつ } h = h_{1c} \end{cases}$$

$$\text{領域 III: } \begin{cases} x = x_3 \text{ で } h = h_3 \\ x = x_2 \text{ で } kh \frac{\partial h}{\partial x} = kb \frac{h_{2c} - h_{1c}}{x_2 - x_1} \text{ かつ } h = h_{2c} \end{cases}$$

ここに, b : 帯水層の残存厚,

h_{1c}, h_{2c} : 堀割構造物建設後の $x = x_1$ および $x = x_2$ における地下水位

領域I, 領域IIIの境界条件の下で式(1)を解くと, h_{1c} と h_{2c} を未知数とする以下に示すような方程式が2つできる。

$$h_{1c}^2 - h_0^2 - 2b \frac{h_{2c} - h_{1c}}{x_2 - x_1} (x_1 - x_0) - \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 = 0 \quad (4)$$

$$h_{2c}^2 - h_3^2 - 2b \frac{h_{2c} - h_{1c}}{x_2 - x_1} (x_3 - x_2) + \frac{N}{k} (x_3 - x_2)^2 = 0 \quad (5)$$

次に, 式(4), (5)を連立させて h_{2c} を消去すると次式のような h_{1c} についての4次方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right)^2 h_{1c}^4 + 2 \frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} h_{1c}^3 \\ & + 2 \left[1 - \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right)^2 \left(h_0^2 + \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right) \right] h_{1c}^2 \\ & - 2 \frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \left(h_0^2 + \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right) h_{1c} \\ & + \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right)^2 \left(h_0^2 + \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right)^2 \\ & - h_0^2 - h_3^2 - \frac{N}{k} ((x_1 - x_0)^2 + (x_3 - x_2)^2) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)に, $x_0, x_1, x_2, x_3, h_0, h_3, b, k, N$ を与えることによって h_{1c} が求められる。また h_{2c} は, この h_{1c} を用いて次式で求められる。

$$h_{2c} = h_{1c} + \frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \left(h_{1c}^2 - h_0^2 - \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right) \quad (7)$$

式(6), (7)より求めた h_{1c}, h_{2c} を用いて堀割構造物建設箇所(領域II)の地下水位勾配 $I_c = \frac{h_{2c} - h_{1c}}{x_2 - x_1}$ を求めることができる。

堀割構造物建設に伴う地下水流動状態への障害度を表す指標としては, 堀割構造物と地盤の境界における地下水位変動量 Δh が最もわかり易い指標であり, この値が設定した許容値以内であるかを判断すればよい。しかし, 初期地下水位勾配の大小によっては, 許容地下水位変動量 Δh_c も変化すると考えられるので, より一般的な地下水流動状態への障害度の指標として, 地下水位勾配変動係数 $\alpha = I_c/I_i$ を提案する。この地下水位勾配変動係数 α は, 堀割構造物建設区間の地下水位勾配が, 建設前後でどの程度変化したかを示す指標である。

次に, 地下水流と堀割構造物が交差する場合には, 地下水流が複雑な挙動をするために, 前述の理論式は適用できない。そこで, 図-4に示すような地盤モデルを用いた三次元飽和・不飽和浸透流の数値解析によって, 帯水層の残存率と地下水流動阻害の関係を求めた。

まず, 堀割構造物周辺の地下水の流動状況の計算結果の一例を図-5に示した。図-5中の A, B 地点の地下水位変動量 $\Delta h_A, \Delta h_B$ は, 次式で表される。

$$\Delta h_A = h_{Ac} - h_{Ai} \quad (8a)$$

$$\Delta h_B = h_{Bc} - h_{Bi} \quad (8b)$$

ここに, h_{Ai}, h_{Bi} : 堀割構造物建設前の A, B 地点の地下水位

h_{Ac}, h_{Bc} : 堀割構造物完成後の A, B 地点の地下水位

また, AB 間の初期地下水位勾配 I_{ABi} と堀割構造物完成後の地下水位勾配 I_{ABc} は次式で表される。

$$I_{ABi} = \frac{h_{Bi} - h_{Ai}}{W} \quad (9a)$$

$$I_{ABc} = \frac{h_{Bc} - h_{Ac}}{W} \quad (9b)$$

ここに, W : 堀割構造物の幅

式(8a), (8b), (9a), (9b)を用いて A, B 地点の地下水位変動量と地下水位勾配の関係を表す式を求めると, 次式のようになる。

$$\Delta h_A - \Delta h_B = W I_{ABi} \left(1 - \frac{I_{ABc}}{I_{ABi}} \right) \quad (10)$$

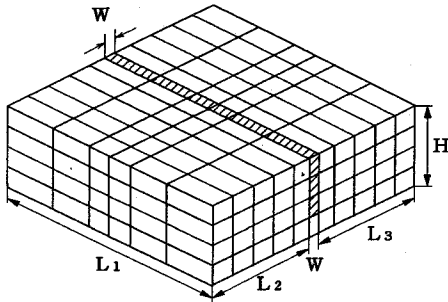


図-4 不圧帯水層中の堀割構造物の地下水流動状態への障害度の検討に用いた三次元有限要素地盤モデル (斜線部分が堀割構造物)

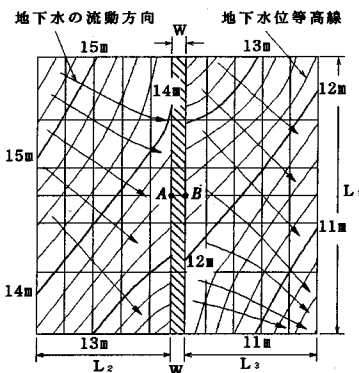


図-5 堀割構造物周辺の地下水流動状況の計算結果の一例 (斜線部分が堀割構造物)

式(10)を前述の地下水位勾配変動係数 $\alpha = I_{ABc}/I_{ABi}$ を用いて書き直すと次式になる。

$$\Delta h_A - \Delta h_B = W I_{ABi} (1 - \alpha) \quad (11)$$

また、式(11)を α を求める式に書き直すと、

$$\alpha = 1 + \frac{\Delta h_B - \Delta h_A}{W I_{ABi}} \quad (12)$$

式(12)中の I_{ABi} は、堀割構造物建設前の初期地下水位勾配 I_i が一定であっても、地下水流と堀割構造物のなす角度 θ によって変化する。この α を前述の場合と同様に堀割構造物によるその周辺地下水流動状態への障害度の指標とする。

また、帯水層の残存率 β は図-2(a)に示した記号を用いて次式で表わすことができる。

$$\beta = \frac{2b}{h_1 + h_2} \quad (13)$$

一例として、初期地下水位勾配 $I_i = 1.0\%$ 、堀割構造物の幅 $W = 20\text{m}$ 、堀割構造物の長さ $L_1 = 400\text{m}$ 、堀割構造物から解析領域境界までの距離 $L_2 = L_3 = 190\text{m}$ の場合について、地下水の流動方向と堀割構造物の交角 θ と帯水層残存率 β をパラメ

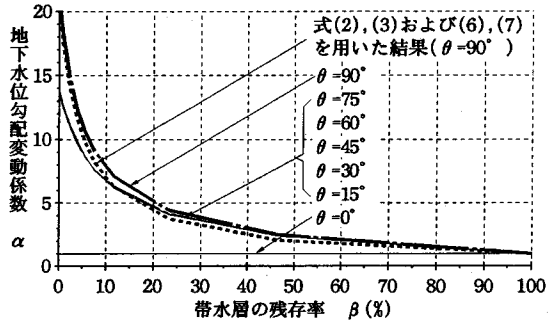


図-6 地下水の流動方向と堀割構造物の交角をパラメータとした堀割構造物の地下水位勾配変動係数 α と帯水層残存率 β との関係

(初期地下水位勾配 $I_i = 1.0\%$ 、堀割構造物の幅 $W = 20\text{m}$ 、堀割構造物の長さ $L_1 = 400\text{m}$ 、堀割構造物解析境界までの距離 $L_2 = L_3 = 190\text{m}$ の場合)

ータとして、地下水位勾配変動係数 α の変化の状況を前述と同様の有限要素法を用いた三次元飽和・不飽和浸透流の数値解析によって求め、その結果を図-6に示した。また、地下水の流動方向と堀割構造物の交角 θ が 90° の場合について、式(2)、(3)および(6)、(7)を用いて求めた結果も同図に示した。図-6において、帯水層残存率 β が小さいときには、解析領域の境界地下水位の大きさに α が大きく影響を受けるが、 $\beta > 20\%$ の範囲では、 α, β, θ の関係がほとんど等しい。

事前の地盤調査結果から求められた I_i, θ, β 等の値から、堀割構造物完成後の地下水位変動量が許容値より小さいと判断されれば、地下水流動状態保全対策は特に必要がない。しかし、許容値が満足できないと判断されれば、堀割構造物下部の通水能力を増加させる地下水流動状態保全対策が必要となる。

次章では、図-2(c)のような場合に、堀割構造物下部の通水能力を増加させる地下水流動状態保全対策について考察する。

4. 地下水流動状態保全対策の効果の評価

堀割構造物が許容地下水位変動量 Δh_{s1} 、および Δh_{s2} 以上の変動を与えると事前の検討で予測された場合には、図-7に示すように、堀割構造物本体下部に地下水連通パイプなどの通水施設を設けて堀割構造物本体下部の通水能力を大きくし、周辺地下水流動状態への影響を軽減する必要がある。

そこで三次元飽和・不飽和浸透流の数値解析を用いて、この地下水流動状態保全対策の効果の評価を

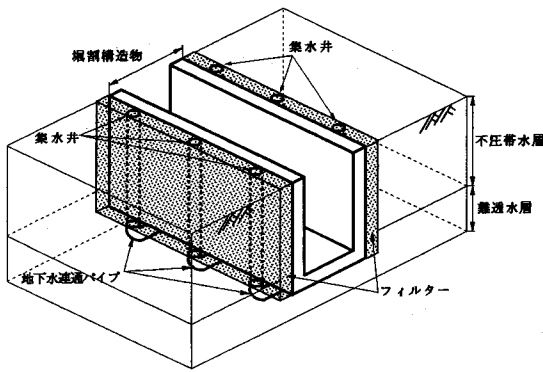


図-7 地下水連通パイプを設置する対策工法

以下のように行った。まず、地下水連通パイプへ地下水を集水させるためのフィルターに置換される地盤要素は、地盤の透水係数からフィルターの透水係数に変更することで対処したが、地下水連通パイプについては、一次元直線要素でモデル化し、両端を三次元要素を構成する節点に繋いだ。そして、この一次元直線要素に地下水連通パイプの透水係数を与えた。

地下水連通パイプを一次元直線要素で表現する場合、その内部の地下水流を円筒中の粘性流と仮定すれば、その平均流速 v_{av} は次式で表現できる⁶⁾。

$$v_{av} = -k_p \frac{\partial h}{\partial x} \quad (14)$$

ここに、 v_{av} : 地下水連通パイプ内の平均流速、
 k_p : 地下水連通パイプの透水係数、
 h : 地下水頭、 x : 距離

式(14)と質量保存則による次式、

$$\frac{\partial v_{av}}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

により、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (16)$$

そして、式(16)を一次元有限要素に離散化し、モデル化した。

今回の解析では、地下水の流動障害が最も大きくなる地下水の流動方向と掘割構造物が直交し ($\theta=90^\circ$)、かつ掘割構造物が不圧帯水層を完全遮断する場合を仮定した図-8に示すような解析モデルを用いて、掘割構造物本体下部へ設置した地下水連通パイプによって、地下水位勾配変動係数 α がどのように変化するかを求めた。

掘割構造物建設後の本体下部の透水能力 T_c は次式で表される。

$$T_c = nA_p k_p \quad (17)$$

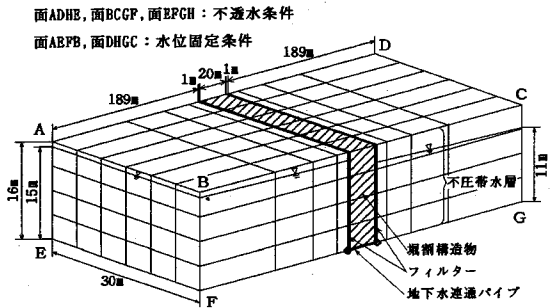


図-8 解析モデルの有限要素メッシュ分割と境界条件

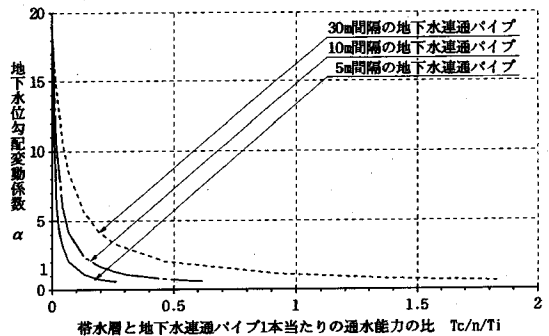


図-9 帯水層と地下水連通パイプ1本当たりの透水能力の比と掘割構造物の地下水位勾配変動係数の関係
 (フィルターの透水係数 $k_f=2 \times 10^{-1} \text{m/s}$, 解析モデルは図-8参照)

ここに、 n : 地下水連通パイプの本数
 A_p : 地下水連通パイプの断面積、
 k_p : 地下水連通パイプの透水係数

また、掘割構造物建設前の不圧帯水層の透水能力 T_i は次式で表される。

$$T_i = A_i k_g \quad (18)$$

ここに、 A_i : 工事前の透水断面積、
 k_g : 不圧帯水層の透水係数

工事前の透水能力 T_i に対する地下水連通パイプ1本当たりの透水能力 T_c/n の比を変数として結果を整理すると図-9のようになる。

地下水連通パイプ1本当たりの透水能力が比較的小さいときには、透水能力の増加に伴う掘割構造物間の地下水位勾配変動係数 α の低下が著しいが、透水能力が大きくなると地下水位勾配変動係数 α はあまり大きく低下しなくなる。また、図-9を用いると、以下のことが可能である。

a) 掘割構造物間の地下水位勾配を指定すると、地下水位勾配変動係数が決まり、地下水連通パイプの設置間隔(30m, 10m, 5m)に対応する1本当たりの透水能力を求めることができる。

b) 地下水連通パイプ1本当たりの通水能力と掘割構造物間の地下水位勾配を指定すると、地下水位勾配変動係数 α が決まり、その地下水位勾配を維持するために必要な地下水連通パイプの設置間隔を求めることができる。

5. 地下水流動状態保全対策としての地下水連通パイプの設計方法

第4章では、地下水流動状態保全対策の効果を簡単な解析モデルを用いて明らかにしたが、本章では、実際の掘割構造物建設現場において地下水連通パイプを用いた地下水流動状態保全対策をどのように設計すればよいかについて考察する。また、地下水連通パイプの通水能力や設置間隔およびフィルターの透水係数をどのように組合せれば地下水流動状態を工事前の状態に戻すことができるかを考察する。

まず、地下水連通パイプの直径は、以下のようにして決定する。直径 D の地下水連通パイプの通水係数は、次式で表される⁶⁾。

$$k_p = \frac{\gamma_w D^2}{32\eta} \quad (19)$$

ここに、 γ_w :水の単位体積重量,
 η :水の粘性係数

工事後の掘割構造物部分の上下流間の許容水位差から求めた I_s を維持するためには、工事前の浸透流量に等しい量を地下水連通パイプによって流してやればよい。掘割道路を横切る工事前の浸透流量 Q_i と工事後の地下水連通パイプによる浸透流量 Q_c は、それぞれ次式で表される。

$$Q_i = A_i k_s I_i \quad (20)$$

$$Q_c = \frac{n\pi D^2 k_p I_s}{4} \quad (21)$$

ここに、 n :地下水連通パイプの本数,
 A_i :工事前の通水断面積,
 I_s :地下水連通パイプ区間の動水勾配
そして、 $Q_i = Q_c$ とおくと、

$$A_i k_s I_i = \frac{n\pi D^2 k_p I_s}{4} \quad (22)$$

これより、

$$\frac{I_s}{I_i} = \frac{4A_i k_s}{n\pi D^2 k_p} = \frac{128A_i \eta k_s}{n\pi \gamma_w D^4} \quad (23)$$

この I_s/I_i を用いて地下水連通パイプの直径 D は次式で求められる。

$$D = 2 \left(\frac{8\eta A_i k_s}{n\pi \gamma_w} \cdot \frac{I_s}{I_i} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (24)$$

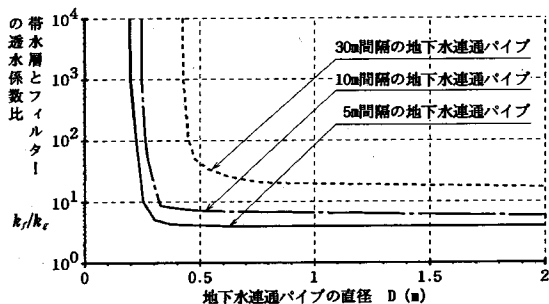


図-10 地下水位を工事前の状態に戻す($\alpha=1$)と仮定したときの地下水連通パイプの直径、設置間隔および帯水層とフィルターの透水係数比の関係(解析モデルは図-8参照)

しかし、実際には地下水連通パイプの端面で発生する水頭損失や目詰まりのために地下水連通パイプ端部で動水勾配が大きくなり、地下水連通パイプ区間の動水勾配が小さくなることが予想される。地下水連通パイプ区間の動水勾配が小さくなると、必要な流量を流下させるために地下水連通パイプの直径を大きくしなければならない。そのために適切な透水係数を有するフィルターを用いて水頭損失や目詰まりを軽減する必要がある。

そこで、地下水連通パイプの通水能力や設置間隔およびフィルターの透水係数の組合せを変化させて前述の三次元飽和・不飽和浸透流解析を行い、どのようにすれば地下水位勾配を工事前の状態に戻すことができるかを検討した。この解析では地下水位勾配を工事前の状態に戻すこと($\alpha=1$)を仮定している。この解析から求めた地下水連通パイプの直径 D 、設置間隔および帯水層とフィルターの透水係数比 k_p/k_s の関係を図-10に示した。図-10からは以下のことが分かる。

まず、透水係数比が $30 < k_p/k_s < 10^4$ 程度のフィルターを用いると、地下水連通パイプの設置間隔を大きくしても地下水連通パイプの直径をそれ程大きくする必要がないことが分かる。しかし、 k_p/k_s の値が大きいフィルターを用いると細粒土がフィルター内に流れ込み、目詰まりを起こす可能性もある。一方、 $4 < k_p/k_s < 30$ 程度のフィルターを用いた場合には、地下水連通パイプの設置間隔が大きくなると、地下水連通パイプの直径を著しく大きくする必要があることが分かる。

また、地下水連通パイプの直径 D が $D > 0.5\text{m}$ 程度であれば、地下水連通パイプの設置間隔を大きくしてもフィルターの透水係数をそれ程大きくする必要がないことが分かる。一方、地下水連通パイプの直径 D が、 $0.2\text{m} < D < 0.5\text{m}$ 程度であれば、地下水連通パイプの設置間隔を大きくすると、フィルター

の透水係数を著しく大きくする必要があることが分かる。

以上のように、地下水連通パイプの直径、設置間隔および帯水層とフィルターの透水係数比の関係には、それぞれの変化に対して感度が敏感な範囲がある。したがって、例えば、地下水連通パイプの設置間隔を10mとした場合には $10^2 \leq k_f/k_e \leq 10^4$ 程度のフィルターと直径が $D > 0.3\text{m}$ の地下水連通パイプを用いることにより、地下水流動状態保全の効果が期待できると思われる。なお、地下水連通パイプの維持管理を考慮すれば、通水能力が過大ではあるが、直径が $D \geq 1\text{m}$ の地下水連通パイプを前述の k_f/k_e の範囲のフィルターと組み合わせることも考えられる。

6. 結論

本論文では、まず、堀割式の道路や鉄道などの堀割構造物の位置と帯水層の構造および地下水の流動方向に着目し、どのような場合に地下水の流動障害が生じるかについて考察した。そして、地下水の流動障害が最も大きくなる地下水の流動方向と堀割構造物が直交する場合について、不圧帯水層の残存率と地下水流動障害の関係を求めるための理論解を誘導した。また、地下水の流動方向と堀割構造物が直交しない場合には、この理論解が適用が困難であるために、三次元飽和・不飽和浸透流の数値解析によって、帯水層の残存率と地下水流動障害の関係を求めた。次に、地下水流動状態の回復の指標には、堀割構造物両側の地下水位変動量から求めた地下水位勾配変動係数 α を用いて、堀割構造物本体下部の通水能力増加の程度と α の関係が分かる図を示した。これらの解析結果をもとにして、堀割構造物建設工事によって不圧地下水流動が阻害される可能性がある場合の地下水流動状態保全対策の要否の判断を以下のように提案する。

- 事前の地盤調査によって地下水流動方向と堀割構造物とのなす角度が分かる。その角度がほぼ0度に近い場合は、地下水流動方向が堀割構造物とほぼ平行であるので、地下水流動状態保全対策は必要ない。
- 地下水流動方向と堀割構造物とのなす角度が大きい場合でも、堀割構造物建設箇所の地下水位勾配が微小であれば、不圧帯水層が遮断されてもほとんど地下水位勾配に変化が生じないので、地下水流動状態保全対策は必要ない。
- 地下水流動方向と堀割構造物とのなす角度が大きく、しかも自然地下水位勾配が無視できない

程度に大きい場合には、堀割構造物本体下部の不圧帯水層の残存率が地下水位変化の許容値を満足できるだけ大きいかどうかを判断する。不圧帯水層の残存率が十分大きければ、地下水状態保全対策は必要ない。

- 不圧帯水層の残存率が十分でなかったり、不圧帯水層を全面的に遮水する場合には、堀割構造物本体下部に地下水連通パイプを設置するなどして通水能力を強化する必要がある。

地下水流動障害の程度が、周辺の地下水利用状況から設定した許容範囲を超える場合には、地下水流動状態を保全するための対策工の設置が必要である。そこで、その対策工の一つである地下水連通パイプを取り上げ、その設計方法を示した。そして、この地下水連通パイプを一次元有限要素でモデル化して地盤の三次元有限要素モデルに重ね合わせる数値解析法を用いて、地下水連通パイプの通水能力や設置間隔と地下水流動障害の軽減効果の関係を明らかにした。本論文で示した関係を参考にすれば、地下水連通パイプの適切な設計が可能になると考える。

付録

地盤モデルに与えた地下水流動の基礎式は以下のとおりである。

地下水流動解析には飽和・不飽和浸透流解析モデルを用いた。飽和・不飽和状態の土中の水の運動方程式は、ダルシーの法則が成り立つとすると次式で表される。

$$\vec{v} = -k(\theta) \vec{\nabla} h \quad (A1)$$

ここに、 \vec{v} : 流速ベクトル、 θ : 体積含水率、

$k(\theta)$: 透水係数、 h : 全水頭

また、質量保存則より次の式が得られる。

$$-\text{div } \rho \vec{v} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \theta) \quad (A2)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 t : 時間

式(A1)と式(A2)より、飽和・不飽和領域の地下水流動の基礎式は、次式のようになる。

$$\text{div } k(\theta) \vec{\nabla} (\psi + z) = \{C(\psi) + \alpha S_s\} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (A3)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 : \text{不飽和領域} \\ 1 : \text{飽和領域} \end{cases}$$

ここに、 ψ : 圧力水頭、 z : 鉛直座標、

$$C(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} : \text{比水分容量、}$$

$$S_s : \text{比貯留率}$$

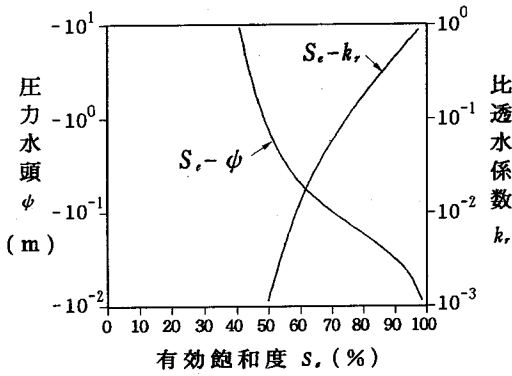


図-A1 解析で用いた帯水層の不飽和浸透特性

θ_r : 残留体積含水率,
 k : 不飽和透水係数,
 k_s : 飽和透水係数,

参考文献

- 1) 植下 協, 大東憲二: 地下水に関する環境アセスメント, 土と基礎, Vol. 41, No. 1, pp. 13~18, 1993.
- 2) 土質工学会編: 建設工事と地下水, pp. 1~18, 1980.
- 3) 宇野尚雄, 西垣 誠, 長井 宏, 柳田三徳: 種々の涵養方法と復水効果, 第37回土質工学シンポジウム発表論文集, pp. 115~120, 1992.
- 4) 長井 宏, 西垣 誠: 地下水環境保全のための復水工法の設計, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第3部, pp. 44~45, 1993.
- 5) 大東憲二, 植下 協: 掘削構造物建設時の地下水状態保全対策に関する研究-特に地下水連通パイプの設計法について-, 第7回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会中部支部, pp. 137~142, 1995.
- 6) 河野伊一郎: 地下水工学, 鹿島出版会, pp. 18~19, 1989.
- 7) 大東憲二, 松久智治, 植下 協: 礫質土の不飽和浸透特性に関する考察, 第27回土質工学研究発表会平成4年度発表講演集, Vol. 2, pp. 1967~1968, 1992.
- 8) 西垣 誠: 飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2, 3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol. 23, No. 3, pp. 165~177, 1983.

今回は定常状態の解析を行ったので, 式(A3)の時間項を消去した次式を用いた.

$$\text{div } k(\theta) \nabla (\phi + z) = 0 \quad (A4)$$

そして, 式(A4)を三次元有限要素に離散化し, モデル化した.

また, この不圧帯水層の不飽和浸透特性には, 砂礫地盤の不飽和浸透特性である図-A1の関係⁷⁾を仮定した. なお, 図-A1中の飽和度と比透水係数の関係には, 次式に示す Irmay 型の Averjanov の推定式⁸⁾を用いた.

$$k_r = S_e^{3.5}, \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad k = k_r k_s \quad (A5)$$

ここに, S_e : 有効飽和度, k_r : 比透水係数,
 θ : 体積含水率, θ_s : 飽和体積含水率,

(1994.11.14 受付)

STUDY ON PRESERVATION OF GROUNDWATER FLOW AROUND EXCAVATED LINEAR FACILITIES

Kenji DAITO, Kano UESHITA and Etsuo ICHIKAWA

Recently, excavated roads are constructed in order to decrease bad influence on noise and landscape. But these excavated roads may induce the lowering of groundwater level because of isolation of aquifer. Therefore the prediction of change of groundwater condition due to constructing excavated linear facilities is needed.

In this paper, at first under what condition of the location of excavated linear facilities and the direction of groundwater, the isolation of aquifer occurs is studied. And a relationship between a rest rate of aquifer and isolation of aquifer is discussed. Then when the allowable degree of isolation of aquifer can not be satisfied, a countermeasure (through pipes of groundwater) for keeping groundwater level is performed. And the effect of this countermeasure is discussed.