

掘割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 —

名古屋大学工学部 正会員 大東憲二
中部大学工学部 正会員 植下 協

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、工事後の地下水状態を工事前の状態に復元させるための地下水状態保全対策も実施されるようになってきた^{3)・4)}。

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、地下水状態を保全するための対策工の設置が必要となるが、本論文では、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阻害の軽減効果の関係を明らかにした。

2. 掘割構造物建設時の地下水状態保全対策の要否

掘割構造物を建設する場合には、常に地下水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掘割構造物との位置関係によっては、地下水状態保全対策が必要でない場合もある。本章では、不圧帯水層内に建設される掘割構造物が、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掘割構造物との位置関係については、

- (a) 掘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) 地下水流と掘割構造物が同方向の場合は、地下水流の遮断とならない。
- (c) 地下水流と掘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。

また、上記(c)の場合には、以下のような帯水層と掘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-1(a)参照）

掘割構造物が地下水流を阻害するので、掘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。

$$|\Delta h_1| \leq \Delta h_{a1}$$

$$|\Delta h_2| \leq \Delta h_{a2}$$

ここに、 Δh_{a1} 、 Δh_{a2} は地下水位変動量の許容値

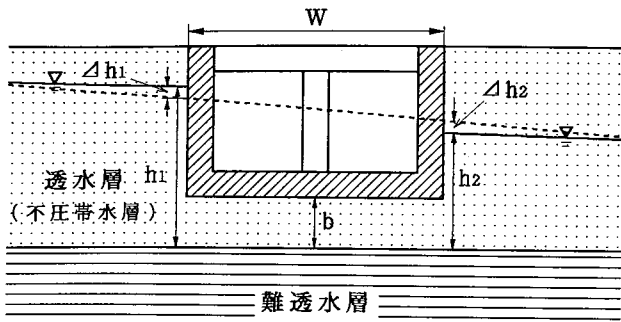


図-1(a) 不圧帯水層を部分的に遮断する場合

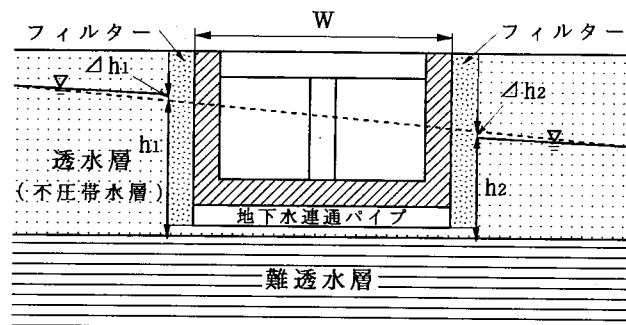


図-1(b) 不圧帯水層を部分的に遮断する場合
(地下水連通パイプを設置)

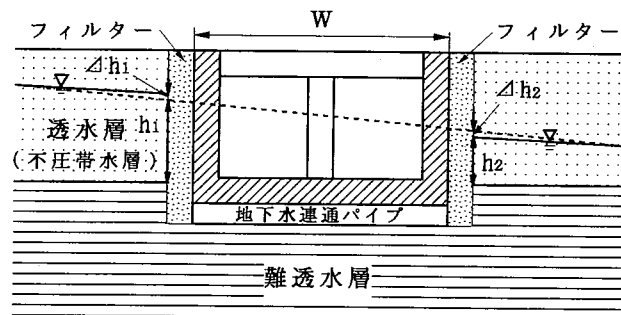


図-1(c) 不圧帯水層を完全に遮断する場合
(地下水連通パイプを設置)

もし、地下水位変動量が許容値を満足できなければ、図-1(b)に示すように、掘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-1(c)参照)

掘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-1(c)中に示すように、掘割構造物の下に地下水連通パイプなどの通水施

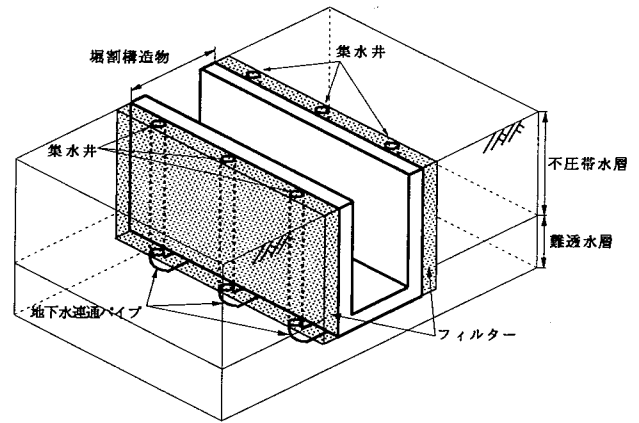


図-2 地下水連通パイプを設置する対策工法

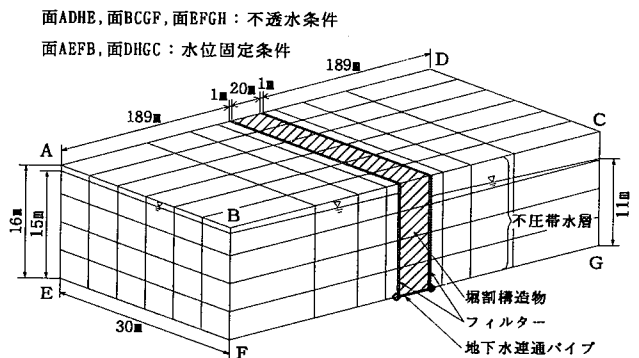


図-3 解析モデルの有限要素分割と境界条件

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. 地下水状態保全対策の効果の評価

掘割構造物が許容地下水位変動量 Δh_{a1} および Δh_{a2} 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-2に示すように、掘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掘割構造物本体下部の通水能力を大きくし、周辺地下水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、この地下水状態保全対策の効果の評価を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

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通水係数を与えた。

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⁵⁾。

$$v_{av} = -k_p \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

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通水係数、

h : 地下水頭、 x : 距離

式(1)と質量保存則による次式、

$$\frac{\partial v_{av}}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

により、次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

そして、式(3)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堀割構造物が直交し、かつ堀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-3に示すような解析モデルを用いて、堀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 $\alpha (=I_c/I_i)$ がどのように変化するかを求めた。ここに、 I_i は堀割構造物建設箇所の初期地下水位勾配であり、 I_c は堀割構造物建設後の地下水位勾配である。

堀割構造物建設後の本体下部の通水能力 T_c は次式で表される。

$$T_c = nA_p k_p \quad (4)$$

ここに、 n は地下水連通パイプの本数、 A_p は地下水連通パイプの断面積、 k_p は地下水連通パイプの通水係数である。

また、堀割構造物建設前の不圧帯水層の通水能力 T_i は次式で表される。

$$T_i = A_i k_g \quad (5)$$

ここに、 A_i は工事前の通水断面積、 k_g は不圧帯水層の透水係数である。

次に、解析モデルに設定した条件を以下に述べる。解析モデル底面を基準として上流側の端面 AEFB の

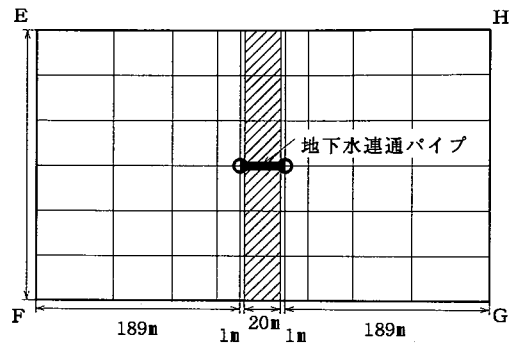


図-4(a) 30m 間隔を想定した場合の地下水連通パイプの位置 (Case 3)

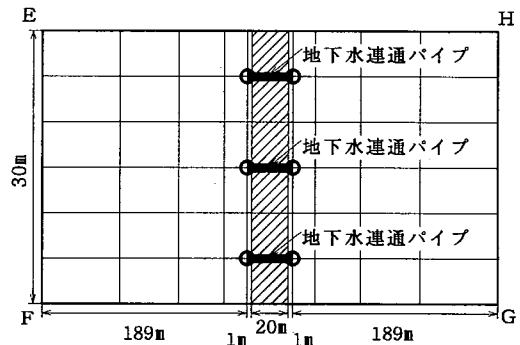


図-4(b) 10m 間隔を想定した場合の地下水連通パイプの位置 (Case 4)

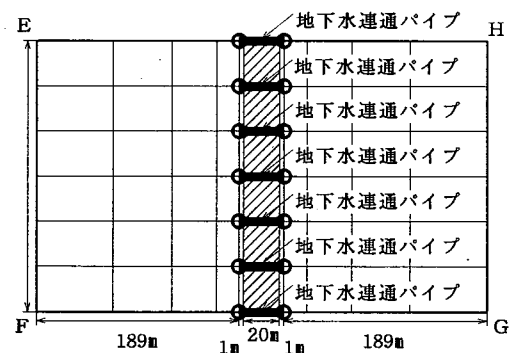


図-4(c) 5m 間隔を想定した場合の地下水連通パイプの位置 (Case 5)

地下水位を 15m に、下流側の端面 DHGC の地下水位を 11m に固定し、面 ADHE、面 BCGF、面 EFGH は不透水条件とする。

このような条件の下、次の 5 つのケースで解析を行った。

Case 1 : 堀割構造物建設前の状態

Case 2 : 堀割構造物建設後の状態 (地下水連通パイプ設置以前)

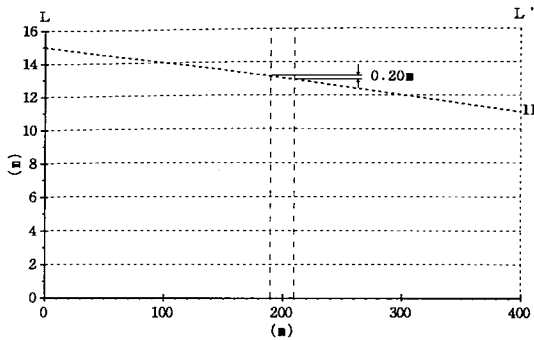


図-5(a) 堀割構造物建設前の地下水位(Case 1)

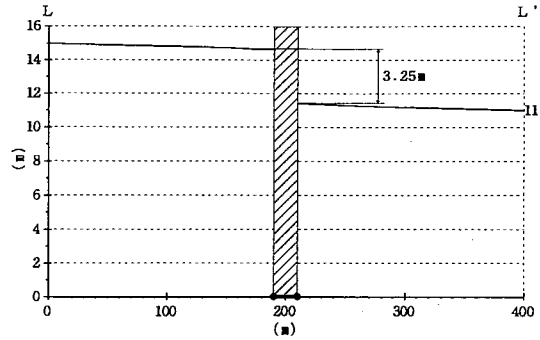


図-5(c) 通水能力 $0.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{本}$ の地下水連通パイプを30m間隔で設置した場合の地下水位(Case 3)

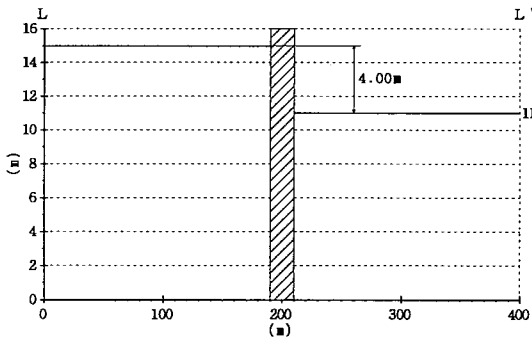


図-5(b) 堀割構造物建設後、対策工を施工しなかった場合の地下水位(Case 2)

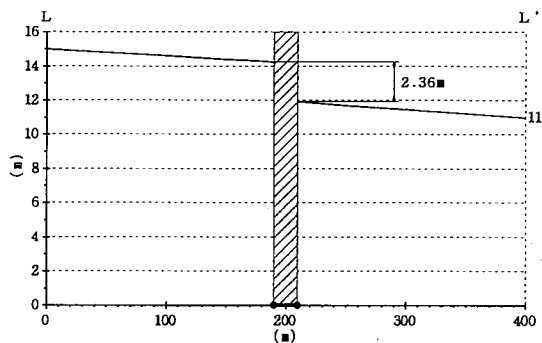


図-5(d) 通水能力 $0.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{本}$ の地下水連通パイプを10m間隔で設置した場合の地下水位(Case 4)

Case 3 : 堀割構造物下部に30m間隔の地下水連通パイプを設ける場合(図4-(a))

Case 4 : 堀割構造物下部に10m間隔の地下水連通パイプを設ける場合(図4-(b))

Case 5 : 堀割構造物下部に5m間隔の地下水連通パイプを設ける場合(図4-(c))

解析結果を以下に示す。

- 1) Case 1の解析では、図-5(a)に示すように、堀割構造物設置予定場所で上流側と下流側の地下水位差は0.20mとなり、堀割構造物建設前の初期地下水位勾配は、1.0%であった。
- 2) Case 2の解析では、図-5(b)に示すように、堀割構造物の上流側と下流側の地下水位差が4.00mとなり、地下水流の完全な遮断が再現されている。
- 3) 地下水連通パイプの通水能力を $0.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{本}$ とした場合、Case 3～Case 5の解析では図-5(c)～図-5(e)に示すような堀割構造物の上流側と下流側の地下水位差が生じた。

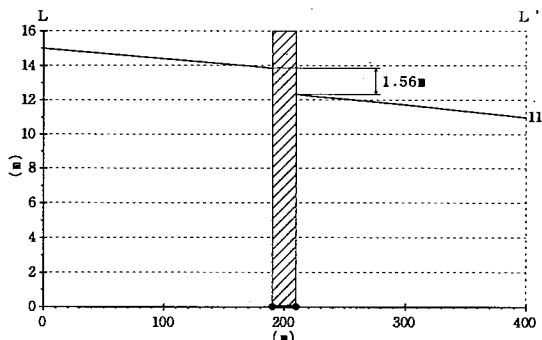


図-5(e) 通水能力 $0.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{本}$ の地下水連通パイプを5m間隔で設置した場合の地下水位(Case 5)

工事前の通水能力 T_i に対する地下水連通パイプ1本当たりの通水能力 T_i/n の比を変数として結果を整理すると図-6のようになる。

地下水連通パイプ1本当たりの通水能力が比較的小さいときには、通水能力の増加に伴う堀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、通水能力が大きくなると地下水位勾配変動係数 α

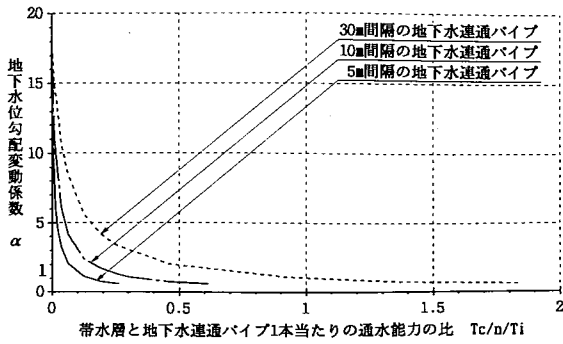


図-6 帯水層と地下水連通パイプ1本当たりの通水能力の比と堀割構造物の地下水位勾配変動係数の関係
(フィルターの透水係数 $k_f=2 \times 10^{-1} \text{ m/s}$, 解析モデルは図-3参照)

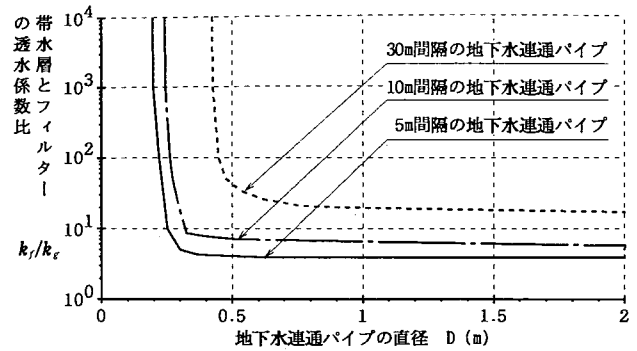


図-7 地下水位を工事前の状態に戻す($\alpha=1$)と仮定したときの地下水連通パイプの直径、設置間隔および帯水層とフィルターの透水係数比の関係
(解析モデルは図-3参照)

はあまり大きく低下しなくなる。また、図-6を用いると、以下のことが可能である。

- 堀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本当たりの通水能力を求めることができる。
- 地下水連通パイプ1本当たりの通水能力と堀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。

4. 地下水状態保全対策としての地下水連通パイプの設計方法

第3章では、地下水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、実際の堀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透水係数は、次式で表される⁵⁾。

$$k_p = \frac{\gamma_w D^2}{32\eta} \quad (6)$$

ここに、 γ_w :水の単位体積重量、
 η :水の粘性係数

工事後の堀割構造物部分の上下流間の許容水位差から求めた I_c 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。堀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。

$$Q_i = A_i k_g I_i \quad (7)$$

$$Q_c = \frac{n\pi D^2 k_p I_p}{4} \quad (8)$$

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_p :地下水連通パイプ区間の地下水位勾配

そして、 $Q_i = Q_c$ とおくと、

$$A_i k_g I_i = \frac{n\pi D^2 k_p I_p}{4} \quad (9)$$

これより、

$$\frac{I_p}{I_i} = \frac{4A_i k_g}{n\pi D^2 k_p} = \frac{128A_i \eta k_g}{n\pi \gamma_w D^4} \quad (10)$$

この I_p/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。

$$D = 2 \left(\frac{8\eta A_i k_g}{n\pi \gamma_w} \cdot \frac{I_i}{I_p} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

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地下水位勾配が大きくなり、地下水連通パイプ区間の地下水位勾配が小さくなるのが予想される。地下水連通パイプ区間の地下水位勾配が小さくなる

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_f/k_g の関係を図-7に示した。図-7からは以下のことが分かる。

まず、透水係数比が $30 < k_f/k_g < 10^4$ 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_f/k_g 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、 $4 < k_f/k_g < 30$ 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、 $10^2 \leq k_f/k_g \leq 10^4$ 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_g の範

囲のフィルターと組み合わせることも考えられる

5. 結論

本論文では、まず、堀割式の道路や鉄道などの割構造物の位置と帯水層の構造および地下水の流方向に着目し、どのような場合に地下水の流動阻が生じるかについて考察した。地下水流動阻害の度が、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、地下水状態を保全するための策工の設置が必要である。そこでその対策工の一である地下水連通パイプを取り上げ、その設計方を示した。そして、この地下水連通パイプを一次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阻害の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。

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) 河野伊一郎：地下水工学，鹿島出版会，pp. 18~19, 1989.