

地下水流動保全工法の現状

岡山大学環境理工学部

環境デザイン工学科

西垣 誠

1.はじめに

地下空間を有効利用しようとする社会の動きは、バブルの崩壊とともに一時的に停滞した感がある。しかし、阪神淡路大震災における高速道路の高架橋の被害や、騒音、振動、大気汚染などの周辺環境保全の立場から高速道路の地下化の計画が進んでいる。建設コストは高くなるが住民のコンセンサスを得られる建設が極めて重要になっている。また、地下化によって地域の景観の変化も防げる利点もある。さらに道路施設だけでなく下水道、通信、電気、ガスというライフラインの地下化も進み、共同溝としてシールド工法などによって施工されている。また、近年では地球全体の気象変動により、60mm/h、90mm/h と過去に経験をしたことがない集中豪雨に遭遇している。この豪雨より都市機能を守るために都市の地下に放水用の河川を設置する計画も進んでいる。これらの地下空間利用を整理すると表-1 のようになる。このように地下を線状に利用する計画は大都市周辺で進んでおり、それによるいろいろな障害を事前に検討して環境影響評価を行う必要がある。

本報では地下空間利用の際にどのような課題があるのか、またそれらをどのように解決していくかについて論述する。

表-1 地下空間利用

(1) 高速道路の地下化	(3) 共同溝の普及
(2) 地下鉄などの延長	(4) 地下河川の新設

2.地下空間利用による環境への影響

地下に線状構造物が施工されることによって地下水の流動阻害が生じる。この流動阻害によって生じる問題を整理したものが図-1 であり表-2 である。

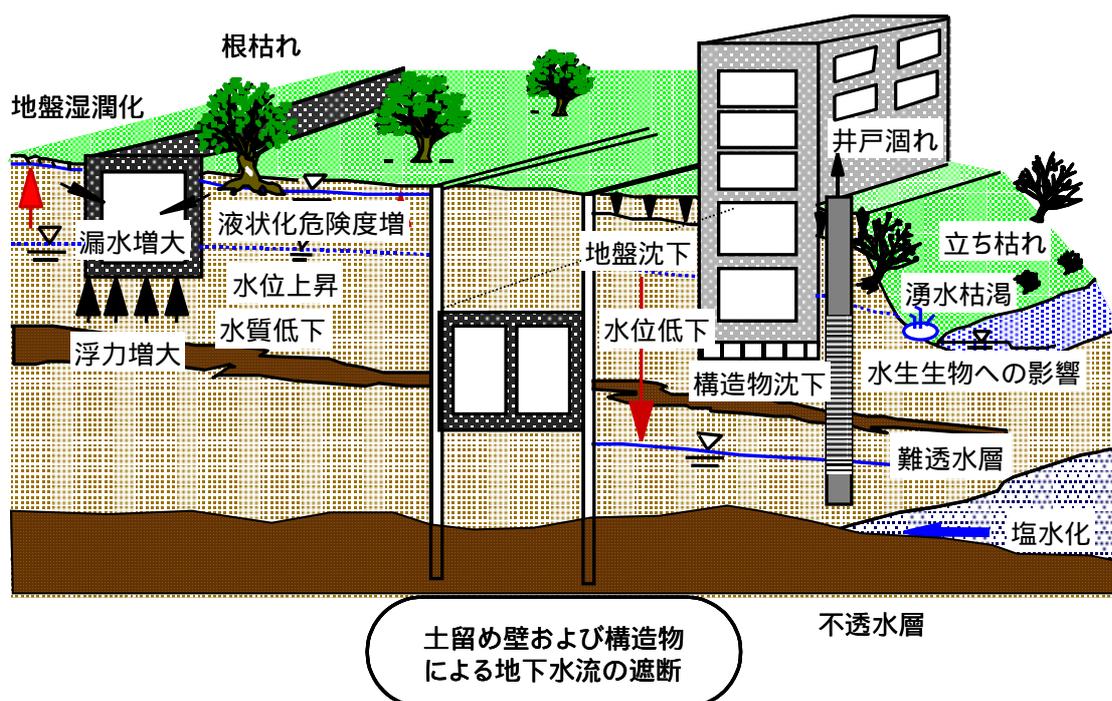


図-1 地下水流動阻害による地盤環境変化

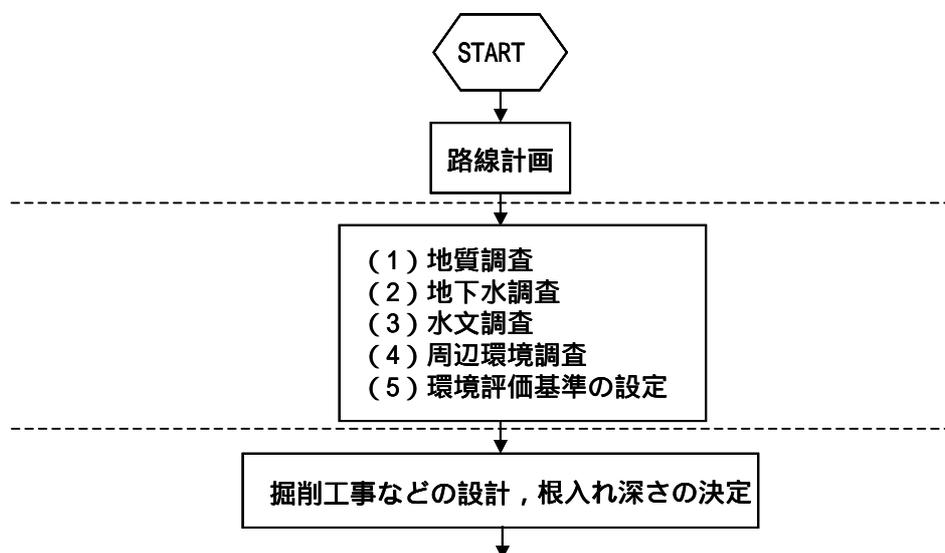
表-2 地下水流動阻害による地盤環境への影響

事象	水位の変化	
	上流側の水位(水圧)上昇	下流側の水位(水圧)低下
(1) 地下水利用	地下水位の回復	(1) 井戸枯れ (2) 揚水能力低下
(2) 地下水の水質	滞留による水質の悪化	地下水汚染 (1) 塩水化 (2) 地上からの汚染の流入
(3) 地盤環境	地表の湿潤化	水圧低下による軟弱地盤の沈下
(4) 耐震性	地下水位上昇による液状化の危険性増大	
(5) 構造物	(1) 浮力の増大 (2) 地下漏水の増大	地盤沈下によるネガティブフリクションの増大
(6) 生態系	(1) 根腐れによる樹木の被害 (2) 地中生物への影響	(1) 樹木の立ち枯れ (2) 水生生物への影響
(7) 泉, 池		泉の湧水涸渇, 池の水の漏水
(8) 水田	水はけ悪化	減水深の増加
(9) 地表の気象	霧の増加	地表温度の上昇
(10) 寒冷地区	凍上・融解による泥土化	
(11) 地表の陥没	水浸によるコラップス現象	地下水位低下による吸い込み現象

3. 地下水の流動阻害による影響評価手順

3.1 地下水の流動阻害の有無の判断

新たに地下に建設しようとする構造物によって、地下水流の流動阻害が生じ表-2のような種々の地盤環境への影響が生じるかどうかの判断をする必要がある。この手順を示したのが図-2の地下水流動保全の検討フローである。フローは大きく、事前調査、概略影響検討、その結果何らかの影響があると判断されるなら詳細調査と影響評価と対策工法の検討、施工、評価になる。しかし、事前調査の段階だけでは判定できないことが多い。



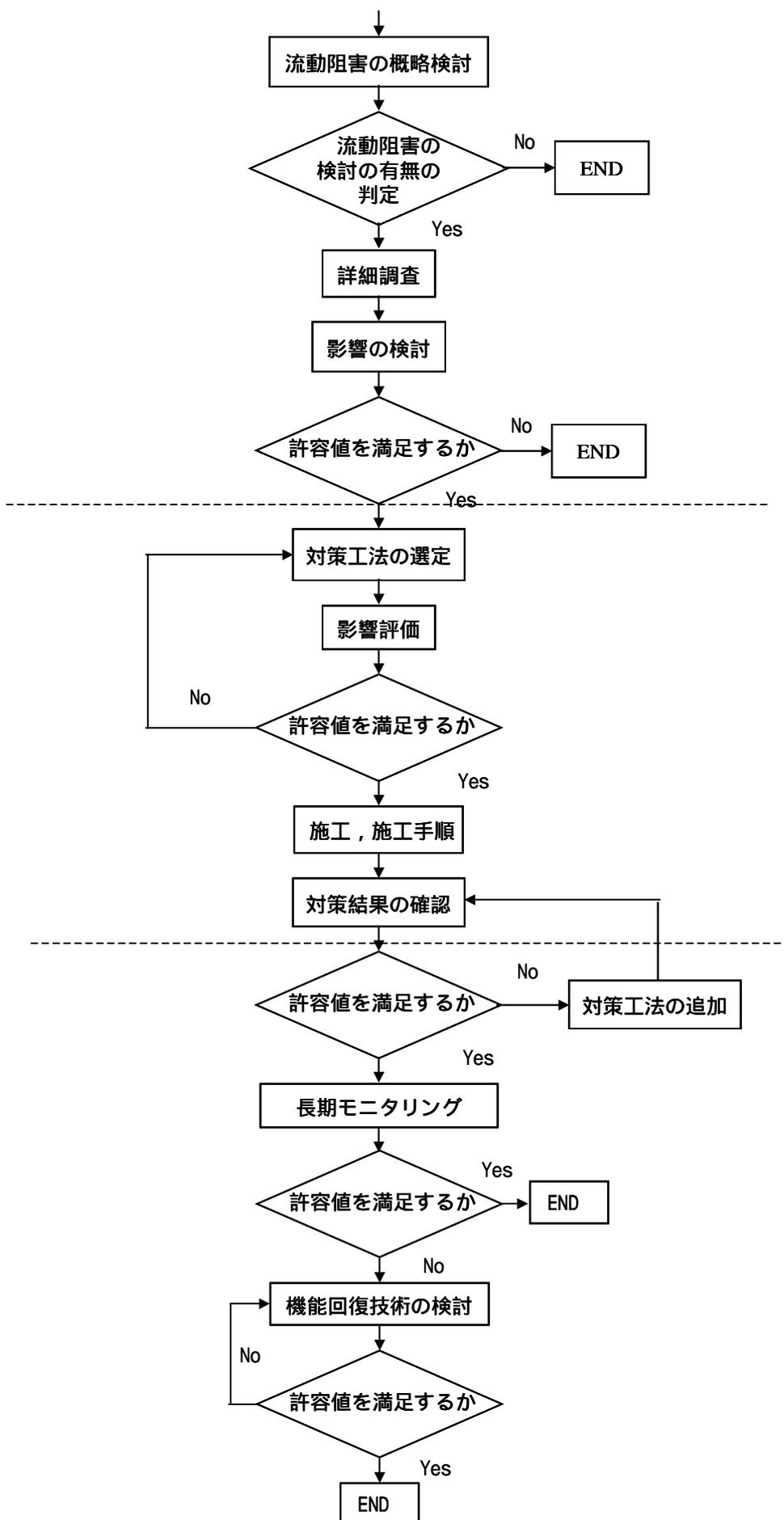


図-2 地下水流動保全の検討フロー

それを整理すると表-3のようになる。

表-3 事前調査だけで判定が困難な事項

(1)	地下水の流動方向
(2)	各帯水層での水圧の分布
(3)	難透水層の連続性
(4)	既設構造物の根入れ深さ
(5)	既設構造物建設中の止水壁の状況
(6)	地下水の利用状況
(7)	新しく施工する構造物の施工法

この表の中の各項目について検討をする。

(1) 地下水の流動方向

地下水の流動方向を知る方法として最も一般的な手法は、対象領域に複数の観測井を設けて、地下水の等ポテンシャル線を描いて流動方向を求める手法である。既設の井戸等を観測井に用いても良いが、対象としている同じ帯水層での水位（水圧）から等ポテンシャル線を描くべきである。事前調査でここまで既知とする事はきわめて困難である。

全体の地形、地質図より地下水の概略の流動方向を推定して、線状に施工される地下構造物によってどの程度地下水流動が変化するかを検討している。例えば図-3のように地下水の流動に対して直角方向の構造物（A型）、流動に対して平行な構造物（B型）、あるいはある部分は流動に平行で、ある部分は直角に面している構造物（C型）等があり、それぞれの場合によって地下水の流動がどの程度変化するかを予測する。この目的のために地下水の流動方向はきわめて重要である。その流動方向は当然平面上で同じ地点であっても各帯水層で異なることがある。

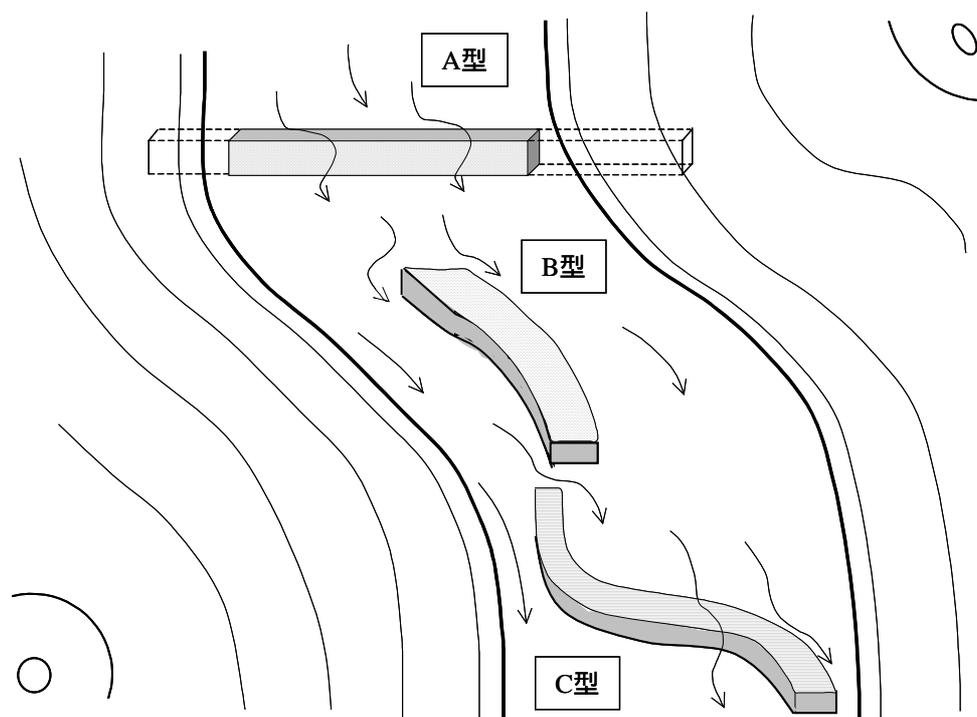


図-3 流動方向と線上構造物の方向

(2) 難透水層の連続性と構造物の根入れ深さ

地下水位のある地盤で地下に構造物を施工する際に地下水の処理が大きな問題となる。掘削地周囲の地下水位を低下させる工法がきわめて有効な工法で経済的でもあるが、地下水流動保全の調査と同様に地下水に関する事前の十分な調査が必要であり地下水位の低下によって生じる地盤沈下や周囲の井戸の枯渇などに対しての十分な対策が必要となる。工事が大規模になると地下水位低下のために揚水した水の処理費が膨大なものとなっていることも知っておく必要がある。

地下水位低下工法が不可能なら止水工法が考えられる。止水工法を用いるに際して地下に難透水層があるのか、またボーリングの点での調査で求められた難透水層（粘性土層）が線状地下構造物の全ての範囲に連続して分布しているのかの疑問が生じる。

不連続であれば薬液注入を行ったりするため工費が膨大なものになる。また、連続であると判断しても掘削の際に難透水層の下部からの揚圧力に耐えられるかどうかの検討も必要であり、これらより構造物の根入れ深さが決定される。

構造物の施工時の根入れ深さが決定されると、建設中に地下水の流動障害がどのように生じるかが検討できる。この検討方法として次の2つがある。

(a) 簡易検討法

(b) 数値解析による検討法

一般に(a)を用いる事が多いが、帯水層が複数存在したり複雑な境界条件などに対しては数値解析による準三次元解析か二次元解析が必要になる。

(3) 既設構造物の状況を考慮した地域全体の流動の把握

新しく地下構造物を施工する際に地下水の流動保全を環境アセスメント法に従って評価をするのが、本来流域全体の中でこのような状況にあるべきだとの大きなビジョンを行政が早急に構築すべきである。交通網、ライフライン網などのインフラネットの将来を考え、地盤環境に対して大きな計画と将来像を確立してその中で地下工事、地下施設の施工、建設であるべきである。そのためには、既設の構造物の地下における本体そのものの流動障害、あるいは建設のために設置された止水壁の設置状況を詳細に調査すべきである。これは現状の地下水の流動状況の把握であり、その中に新しい地下構造物が施工された事による変動を評価すべきである。現状の日本ではまだどこでもこのような理想的な状況にはなっていない。これは地域、流域全体の環境影響評価での最大の課題である。

3.2 地盤調査

地盤がどのような構成をしているかの調査である。近年では電気探査、弾性波探査等のトモグラフィにより、地盤のマクロな構成の調査も可能になっている。しかし、地盤構成を知るためにはボーリング調査が極めて有効である。また、このボーリング孔を用いての地盤内の複数帯水層の水位水圧の変動を調査する。

ボーリング調査より取得するパラメータを整理すると表-4のようになる。

表-4 地盤調査事項

(1) 地層構成
(2) N値の分布
(3) 粘性土層の構成材料の粒度分布
(4) 粘性土層の密度
(5) 粘性土層の圧密特性
(6) 帯水層の構成材料の粒度分布
(7) 帯水層の透水係数
(8) 地下水の水質，水温

地下に構造物を設計施工する際にこの構造物を施工することによって表-2や図-1に示すような障害が生じないか、またそれを回避するにはどのような設計施工を行うべきかを検討することは極めて重要である。たとえば、下流側で地下水位が低下することによって地盤沈下を起こすような軟弱な粘土層があるのか、これによって地表の沈下による変異はどこまで許されるのか。(許容沈下量と許容水位変動量)すなわち、どこまで地下水位を低下させることが許されるのかを決定する必要がある。また地下水がどの程度利用されているのかの現状把握も大切なことである。その他、湧水による泉や池はあるのか、地下水位が低下することによって水田の減水深はどの程度増加するのか、水位の変動によって既設構造物は大丈夫か、水分不足による生態系への影響も知っておかなければならない。

一方、地下水位が上昇することによって、地震時の液状化の危険度や地下水位の地表からの深さも重要である。これらを整理すると表-5になる。

表-5 調査と検討事項

(1)地下水位の利用状況(井戸涸れの検討)	(4)古地図，土地利用
a)どの帯水層からの利用か	a)軟弱層の分布
b)揚水流量は	b)地下水位の分布
c)井戸の構造	(5)既設構造物の分布(既設構造物の検討)
d)利用目的	a)構造物の形態
(2)地震によって液状化したことがあるか (水位上昇による液状化の検討)	b)地下水位の分布
	c)湧水流量
a)砂層の分布	(6)貴重種，植生の分布(植生の検討)
b)地下水位の分布	a)生態調査
(3)湧水の分布(湧水の検討)	b)樹種の調査
a)湧水量の変動	(7)帯水層構成材料の粒度分布(通水工法の検討)
	a)細粒分含有量
	b)許容動水勾配

3.3 設計地下水位

地中に構造物を施工することによって、地盤環境に種々の影響が生じやすいことがわかったが、それぞれの「許容地下水位変動量」の変動を定量的に評価するには、対象としている場の「設計地下水位」を設定する必要がある。これは河川構造物の設計に用いられる「計画洪水高」と同じような考

え方である。設計の際に誤った地下水位の設定によって、地中構造物が集中豪雨時の高い地下水位の揚圧力によって破壊された例がある。

地下水位は時々刻々と変化している。したがって、設計地下水位を設定するには長期間の地下水位の計測が必要である。これらの地下水位の変動と外的要因との相関性を求めて設計地下水位を設定することが重要である。地下水位の変動に関する要因を整理すると表-6 のようになる。

表-6 地下水位の変動に関する要因

(1) 降雨量の変化
(2) 積雪量の変化
(3) 地表の土地利用の変化(水田など)
(4) 河川水位の変化
(5) 地下水利用の変化
(6) 気圧, 潮位の変化

これらの要因と地下水位との関係より設計地下水位を 50 年あるいは 100 年確率などで設定する。たとえば降雨量と地下水位の関係に関して考えると、地下水位を変動させる降雨強度との関連を求め、過去の降雨の観測結果より設計地下水位を設定する。当然、地中構造物の重要度によって確率も変化する。

ここで、設計地下水位には対象とする地盤環境によって上限と下限がある。たとえば、地盤沈下への影響を検討するには地下水位が過去で最も低下したときよりさらに低下することによる許容値を定めなければならない。

表-7 での各項目に対して許容地下水位の変動を吟味して、流動保全対策を定量的に評価する方法はきわめて新しい手法であるが、この目的のために各地での平時での長期間での地下水位の観測が重要であることがわかる。当然、地下水位と言っても複数の帯水層がある場合はそれぞれの帯水層での地下水位である。また、設計地下水位を地表にしておけば十分であるという安易な設定もあるが、被圧であればその水圧は地表以上になることは良くあることに注意をする必要がある。したがって、設計地下水位を設定するためには、施工地区での長期間での広域の地下水位の計測データが重要であることがわかる。

表-7 設計地下水の上限・下限と地盤環境事象

現象 \ 地下水位	上限地下水位	下限地下水位
地盤沈下		
構造物の杭の支持		
揚圧力		
湧水量		
液状化		
地下水汚染		
地表の湿潤化		
植物の生態		
井戸涸れ		
漏水量の増加		

3.4 許容水位変動量の設定

地下に構造物を施工するとなんらかの影響が地下水に生じる。線状の地下構造物であれば、それぞれの場所での影響を検討しなければならない。検討事項は表-7の各項目について検討すべきであるが、再整理をすると表-8になる。ここで、これらの項目についての検討方法の概略について述べる。

表-8 許容水位変動量の検討事項

(1) 圧密沈下
(2) 井戸涸れ
(3) 湧水
(4) 既設構造物
(5) 液状化
(6) 植生

(1) 圧密沈下

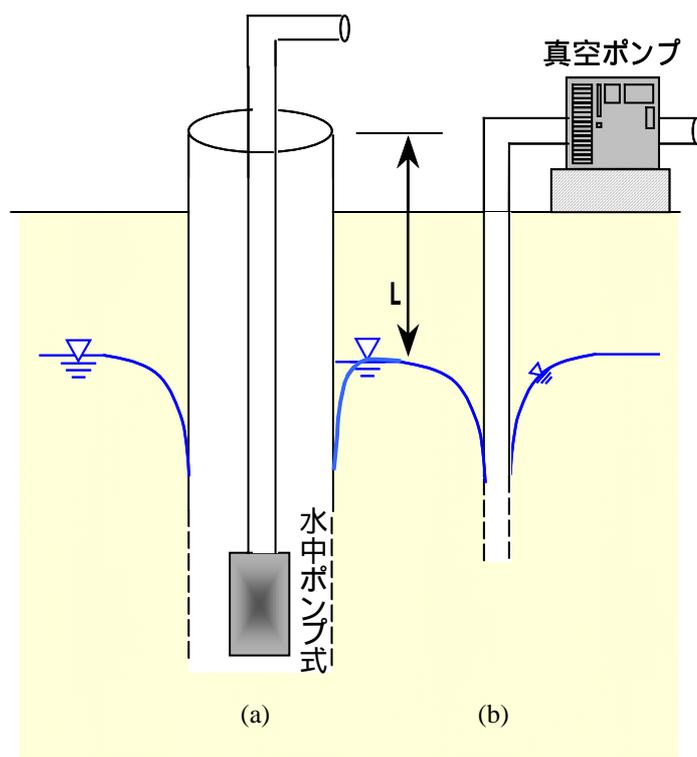
地下水位が地下構造物の施工によって低下する可能性があるところで、地下水位低下によって、地盤沈下が生じないかを検討するために、対象地区での試料を採集して圧密試験を行って $e\text{-log}P$ 曲線を求める。その結果より許容沈下量を設定して、許容地下水位低下量を算定する。許容沈下量は地表の土地利用によっても異なる。精密機器のあるような工場地帯ではこの値はきわめて小さい値になる。

(2) 井戸涸れ

地下水位低下によって、井戸涸れが生じる可能性のあるところでは、各井戸の構造を十分に調査する必要がある。工業用と家庭用などで井戸の構造は異なるが、家庭用に多い真空ポンプによって揚水されている井戸(図-4(b))では、地下水位がポンプ高から $L=5\text{m}$ 以下になると揚水が困難になる。理論的には L が 10m であっても揚水することは可能であるが、種々の水頭ロスやポンプの能力を考えると $L=5\text{m}$ が限度のようである。

図-4(a)のように工業用等に用いられている深井戸の場合には、井戸のポンプの設置深さまで地下水位が低下しても良いことになる。しかし、揚水して井戸内の水位がポンプの深さまで低下することによって揚水が可能になることを考慮すると、所定の揚水量を得るに可能な地下水位が定まってくる。それが許される地下水位まで自然水位を低下させることは可能である。その際には井戸のポンプの揚水能力も調べておく必要がある。

地域全体を考えると、家庭用の井戸の方が許容範囲が狭いため結果的にはこの値が井戸枯れの許容地下水位低下量になることが多い。



(3)湧水

湧水がある所で、地下水位を低下させて湧水が涸れることがある。これを防ぐことはきわめて困難である。湧水の源になっている帯水層の水位を計測し、その水位が湧水高より低くならないように設定するのが許容水位低下量になるが、帯水層内の水位が低下すると、湧水量は当然減少する。水位を低下させて湧水量を維持することはきわめて困難である。湧水地の集水面積を大きくするために水平集水孔や鉛直集水孔などの補助施設も検討する必要がある。これらを考えて許容水位低下量を設定する。

(4)既設構造物

地下水位の変動による既設構造物への影響に関しては、水位が上昇する場合と低下する場合がある。

()既設構造物に対しての許容水位低下量

地下水位の低下による軟弱地盤の沈下の結果、既設構造物の杭にネガティブフリクションが発生する。これを考慮した許容地下水位低下量を設定する。

()既設構造物に対しての許容水位上昇量

地下水位の上昇によって、地下構造物に作用する揚圧力の増加量を求める。上限の設計地下水位よりどれだけの水位上昇が許されるかを考慮して許容水位上昇量を設定する。

(5)液状化

地下水位の上昇による液状化の判定を行い、許容地下水位上昇量を設定する。地盤の土の細粒分含有率(FC)と粒度分布(D_{50} , D_{10})が必要である。地下水位が上昇すると、 σ_v が小さくなる。このことより平成8年の(社)日本道路協会(道路橋示方書)を用いて許容地下水位上昇量を決定する。

(6)植生

地下水位が変動することによる植物への影響を考慮した許容水位上昇量あるいは許容水位低下量を設定する。

()許容水位上昇量

地下水位の上昇によって植物の根腐れが生じない水位上昇量を設定する。植物の種類によって、根の分布、毛根の分布範囲を推定して地盤の水分特性曲線よりpF値が約1.5以下にならないように許容水位上昇量を設定する。このpFの値は植物の種類によっても異なり、まだ正確な値は定まっていない。

()許容水位低下量

地下水位が低下することによって植物の根の水分量が低下して植物が枯れることがある。pF値で3.0以上を萎れ点としているので地盤の水分特性曲線より、水位低下量と根系周囲のpF値の推定ができる。これより許容地下水位が推定できる。

樹根系を対象としたものだけでなく、根菜類を栽培しているところでは、地下水位と土地の湿潤状況とに関してはもっと厳密な管理が必要となる。我が国は降雨が多く、地下水位高だけでは一概に根系周囲の水分量の設定は困難である。ド

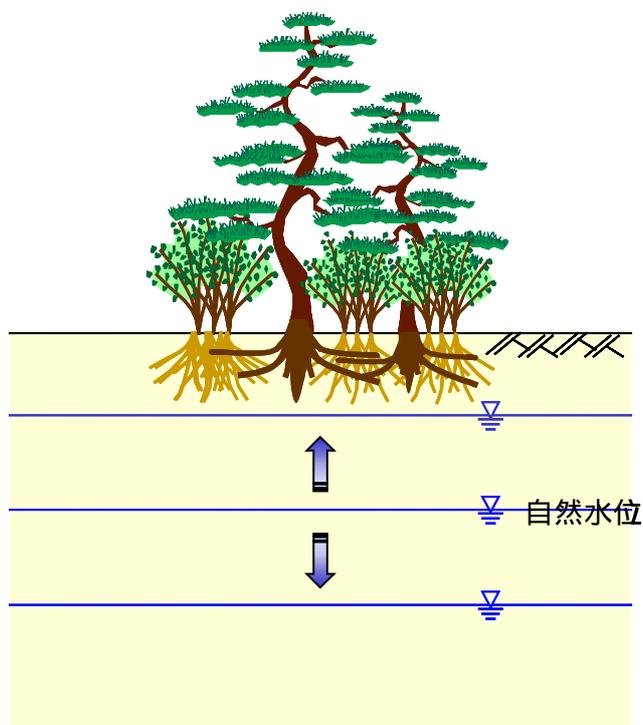


図-5 植生と地下水の関係

イツのベルリンの総合開発で周囲の森の地下水位を地表面下 2m を基準として掘削による地下水位低下を防止するために注水によってその水位を維持した例がある。

4. 流動保全の対策

多くの要因を対象とした許容地下水変動量の中で線状構造物であれば、それぞれの地点で許容地下水位低下量，許容地下水位上昇量を設定する。

地盤内の工事のための止水による地下水位の上昇および低下を予測して、それらが許容値を超えているようであれば地下水の流動保全対策を検討する必要がある。すなわち、地下水の流動をスムーズにする工法である。一般に対策工法としては、図-6 に示す(1)全面集排水型と(2)部分集排水型がある。全面集排水型は比較的浅い掘削に用いられている。それに対して部分集排水型は施工後の地下水障害の対策として設置されたりもして、帯水層の深さにも関係なく適用できる。しかし、部分集排水型では、集排水井のピッチによって排水井の周囲が目詰まりする可能性がある。

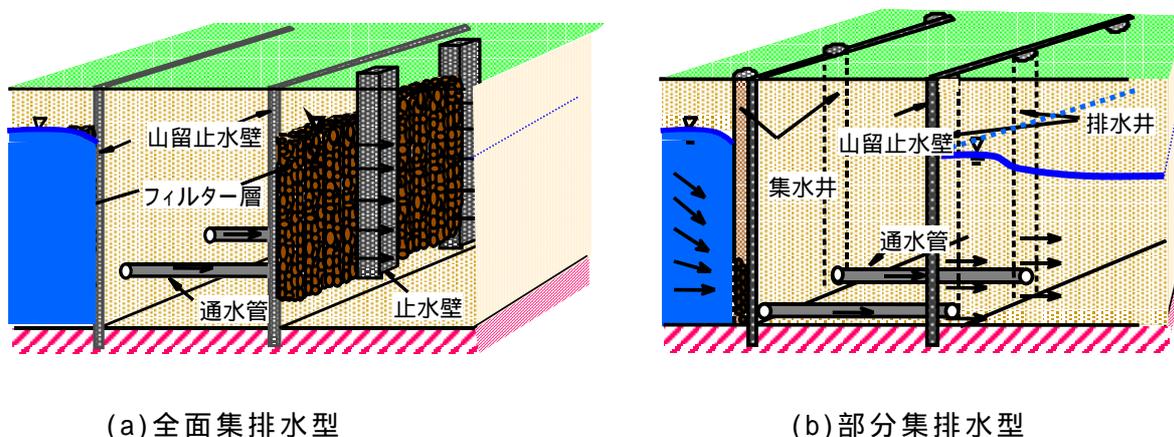


図-6 地下水流動保全施設例

4.1 許容動水勾配

地下水の流動を保全するために止水した壁体の何%を開放すると良いかが議論される。この場合に論じられるのは、下流への流入流量である。開放率が大きいほど集水施設への流入抵抗や排水施設から地盤への流入抵抗は小さくなる。全面集排水型では本来の自然水位に近い水位で流入するため、フィルター材を十分に吟味するだけで比較的目詰まりが生じにくい保全対策施設になる。

部分集排水型では、集水井と排水井の近傍において、大きな動水勾配が生じるために目詰まりが生じやすい。特に排水井側での細粒土の移動によって目詰まりが生じやすい。これは、地下水低下工法での周囲の地下水位低下防止のための注水井の近傍で目詰まりが生じやすいことから容易に判断できる。注水井(排水井)の近傍での動水勾配を徐々に大きくすることによって目詰まりが生じない動水勾配を「許容動水勾配」と定義づけている。

原位置での試験で段階的に排水井内の水位を上昇させて「許容動水勾配」を求める方法もある。しかし、目詰まりは施設の使用時間にも関係してくるので、昇圧時の1段階での試験時間を1日にするのか、1週間にするのか、1ヶ月にするのかがまだ良く分かっていない。

一例として、江戸川砂層では透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度であるが、井戸近傍の動水勾配が 0.2 程度になると、目詰まりを起こして注入流量が当初の 1/10 程度に数時間でなってしまう。このように考えると、地下水保全対策施設はどのような地盤に対しても有効であるとは考えにくい。

透水性が十分に良い地盤には有効であるが、透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 以下程度の地盤に対してはまだそれほど有効な対策工法がない。

地層の中に図-7のように高透水層があれば、この層を集水層と排水層として利用する方法も考えられる。

許容動水勾配は施設の耐久性に関係するため、対象としている地盤の土のこの値を求めて、地下水流動保全施設での集排水井の近傍で、動水勾配がこの許容動水勾配以下になるように集排水施設のピッチや井戸径を設計すべきである。図-8に部分集排水施設でのピッチの設計手順を整理して示す。

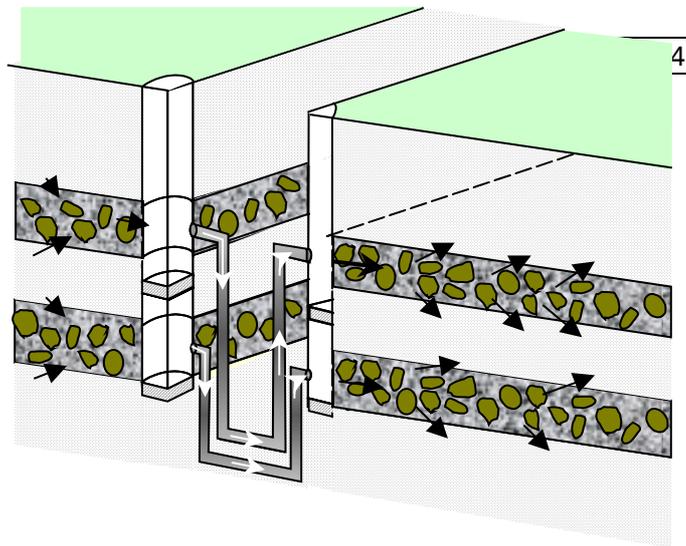


図-7 高透水層を対象とした地下水流動保全工法

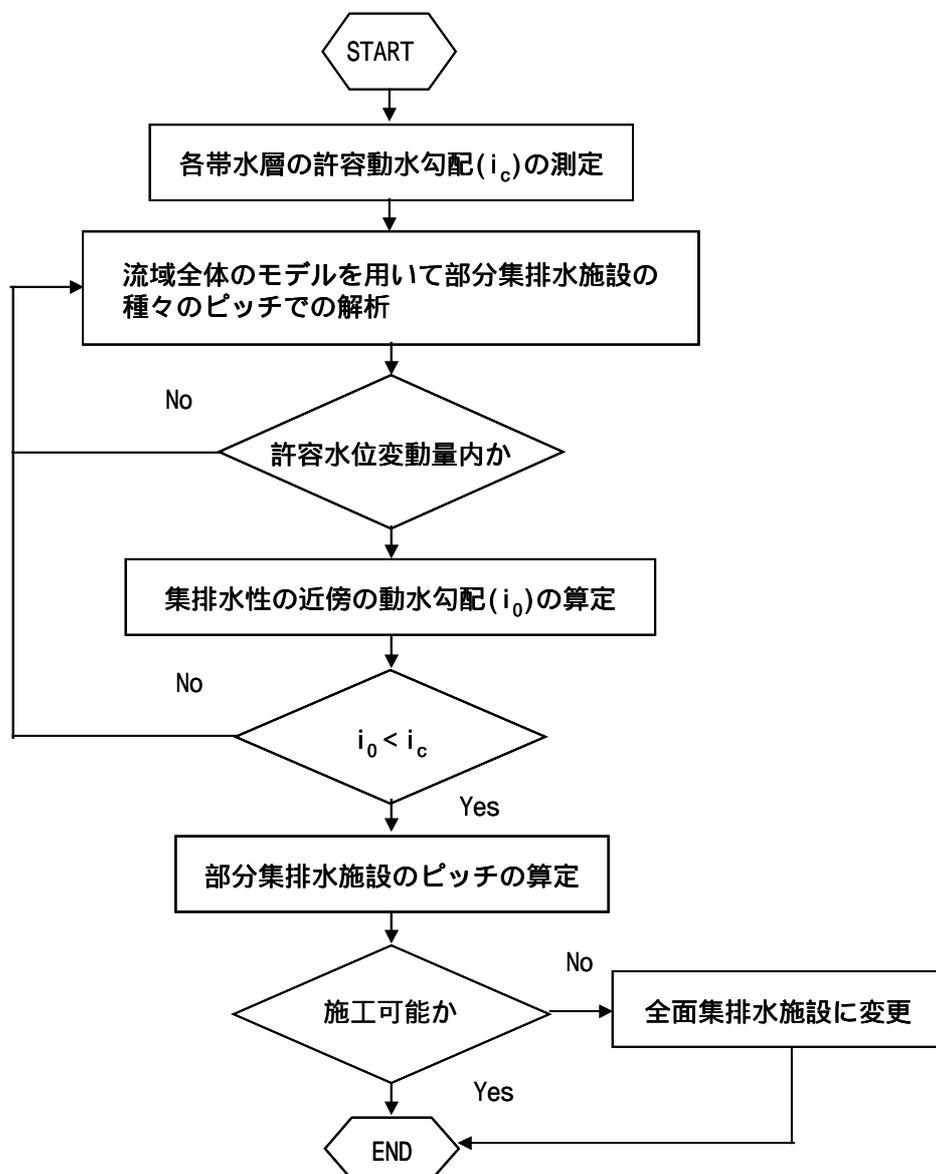


図-8 部分集排水施設のピッチの決定

4.2 施工手順

地下水流動保全を考慮した集排水施設の最終の施設についての全体の検討がなされたが、工事の際にどの手順で順に部分的に施工し、集排水施設を施工して工事期間中の地下水の流動保全を行っていくべきである。

5. おわりに

地下水流動保全の現状について論じた。現在では種々の流動保全工法が提案されている。しかも、その工法の結果に関しても3次元の浸透流解析で行われている。このような評価は一般的ではないが、地盤環境保全のために検討すべき事項はあらかじめ検討し、その後経済的なファクターを考えて評価すべきである。

本論では「設計地下水位」について強調して論じた。また、この設計地下水位に上限、下限があり、その値に対する「許容地下水位変動量」を多くの要素について検討し、その最小値を満たすように「地下水流動保全施設」の設計を行う。また、流動保全の対策工法で部分集排水施設のピッチの設計の際には「許容動水勾配」の値を超えないようにピッチを設計することも示した。

現状の技術である程度の地下水流動保全は可能である。しかし、まだまだ実施しなければならない事項がある。すなわち、水径(みずみち)の調査である。深さ方向には、ある程度層の透水係数の差によって評価できるが、図-9に示すような平面的な透水係数の不均質性に関する調査はきわめて困難である。水径の調査は比抵抗トモグラフィや地下水温の分布調査によってある程度わかる。しかし深部になると分かりにくい。

地下水流動保全施設の信頼性を高めることも今後の大きな課題である。特に長期モニタリングを行って施設の健全度を調査する必要がある。施設のマテリアル、目詰まりなどについても今後の研究が必要である。

当然のことであるが許容変動量の設定の際に流域全体のあるべき姿について常に検討しておくべきである。

また、地下構造物を建設の際に、表-9に示すような今後は流域全体の将来像を考慮した多目的の施設にできる可能性を常に考えておくべきである。

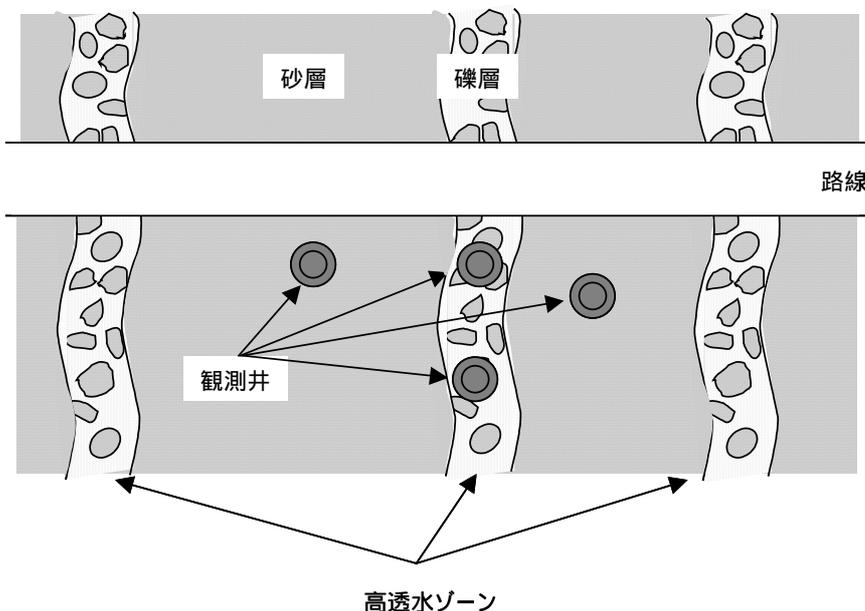


図-9 平面的な透水係数の不均質性

表-9 今後の課題

(1) 水みちの調査
(2) 施設の健全度の長期モニタリングシステム
(3) 流域全体の将来像の確立
(4) 地下施設の多目的利用
(a) 地盤災害防止システム(液状化防止)
(b) 水源集水システム
(c) 地下水位(水圧)コントロールシステム
(d) 地下水の水質浄化システム