

地下空間利用と地下環境保全

Subterranean and Subsurface Environmental Conservation

西垣 誠 *
Makoto NISHIGAKI

This paper discusses the methods of preservation of the subsurface environmental conditions under the subterranean utilization. The method for maintaining the original movement of groundwater, which is disturbed by the constructions in the subsurface, are especially explained in practical point of view. The methods to investigate the characteristics of the underground formations and multi-layered aquifers in the field and in the laboratory, to design the facilities for preservation of the groundwater flow which requires a special attention during the construction of the facilities, and to maintain the faculty of the facilities, and to prevent the clogging in the screen, the filter and the fine sandy aquifer are discussed. Finally, the more active utilization in the subsurface region is proposed by considering the artificial system for controlling the groundwater level using the underground structures. This control system can prevent the liquefaction disaster during earthquake and remediate the contaminated aquifers in long term.

「key word」 subterranean, subsurface environmental conservation, groundwater

1. はじめに

人類が地下空間を利用することは、地下空間が持っている利点を大いに利用しようとした結果である。したがって、その時点では、地下を掘削する事によって、周囲にどのような影響があるかについては、ほとんど検討されなかった。これは逆に地上を考えると、東京タワーを建築する時に、日照権や風害まで検討しなかったことと同じである。しかし、地上にどんどん高層ビルが連立してくると、風害や日照問題が生ずる。

地下空間も同様に、少数の地下構造物だけであれば、その利用によって地下水の流況阻害が生じることまでは検討する必要はなかった。しかし、地下空間に多くの地下構造物が建築されると、当然、色々な地盤環境問題が生じてくる。

本文では、どのような地盤環境問題が生じ、それを予測するためにどのようにすればよいか、また、地盤環境保全のためにどのような方策があるかについて論述する。さらに、より積極的に地下空間をトータルに利用する方法を検討する。

2. 地盤環境保全

1999年6月より環境影響評価制度が実施されるようになり、計画の段階で環境影響評価をしなければならなくなった。調査項目も施工中や施行後の影響も検討する必要が生じている。地下空間の利用に関しても、そのマニュアルや評価の事例が示されるようになってきている。

地下空間を利用する立場で、どのような事が問題になるかについて考えてみると表-1のようになる。この

「キーワード」 地下空間利用, 地下環境保全, 地下水

*正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境理工学部

表-1 地下空間利用による地盤環境保全課題¹⁾

- (1) 地表および地下の変位
- (2) 地下水への影響
- (3) 生態系への影響
- (4) 工事中の騒音、震動
- (5) 掘削した土砂処理
- (6) 地下水位低下のための揚水の処理

表-2 地下空間利用による地下水への影響課題

- (1) 井戸枯れ
- (2) 湧水枯渇
- (3) 地盤沈下
- (4) 地下水の水質汚染
- (5) 構造物の沈下
- (6) 生態系への影響
- (7) 地下水の流況阻害
- (8) 地表温度への影響

中で地下水への影響に着目すると、これだけでもきわめて多くの課題がある。従来は、工事のために地下水位を低下するための調査や設計が主であった。しかし、地下水位を低下することによって地盤沈下が生じたりした。ここで地下空間利用による地下水への影響による課題を整理すると表-2のようになる。この中で、掘削工事のための地下水位低下工法の設計や井戸枯れ、地盤地下に関しては、まだ不十分であるが設計が可能であり²⁾、多くの実績がある。

一方、地下水の水質汚濁に関しては、まだ何も解決していない。表-3に地下水位の変動による、種々の地下水の水質汚染を示すが、これに関しては、本当に今後の課題である。古くからある塩水遡上問題に関しても、その定量的な予測の3次元的な調査もなされていない。

地下水位が変動することによって、地表や地下の生態系にどのような影響が生じるのか、あるいは、それほど

影響がないのかについての判断もきわめて未知の分野である。湧水が枯渇して、水生植物や小生物が絶滅することはあるが、地下水位が低下して、植生が乾燥系の植物（例えば松）に変化していったとの報告もまだあまりされていない。地下構造物により地下水がダムアップされ、地下水位が上昇することによる植生への影響も検討されているが、これとて影響の評価が難しい。柳のように水辺を好む植物が枯れることがあるが、長期間での自然環境の変化の中で、地下水位の変化がどの程度生態系に影響しているかを知る必要がある。その為には、長期間にわたっての生態系の変化と環境の変化を調査し、時には人為的な環境の中での生態系の変化を計測して、はじめて、それぞれの環境の変化が生態系に荷する影響の度合いが分かるのかもしれない。

地下水位が恒常的に低下することによって、地表の温度が変化し、植生が変化していくことになる。このような現象は、大河の上流にダムを造り、地表水も地下水も灌漑に利用したために地下水位が低下して、地表の気温が変化した例が、黄河流域やタリム盆地（中国）で生じている。我が国は、このような大規模な地下水の低下が生じた例はなく、また、地下水位と地表の温度変化についての関係の研究もまだあまりなされていない。

地下構造物建設による地下水の流況阻害が本文の主たる目的である。地下構造物によって、図-1に示すように³⁾、上流側は地下水位が低下する、このような状況が生じると、どのような地盤環境問題が発生するかを検討すると、図-1に示すような事項が考えられる。

この中で、実際に下流で井戸枯れが生じたり、地盤沈下が生じ、急遽止水壁を取り除いたり、迂回浸透対策をした例がある。上流側での水位上昇による災害例はあまりないが、地下水位上昇によるコラップスと思われる道路陥没が生じた例はある。ただ、砂質地盤で地下水位が上昇すると、地震時の液状化の危険度が増すことは間違いない。したがって、地下構造物を建設しても、地盤環境にあまり影響を与えない対策が必要である。

表-3 地下空間利用による地下水の水質汚染

- (1) 地下水位低下による塩水遡上
- (2) 地下水滞留による硝酸汚染
- (3) 地下水位低下による地盤の酸化
- (4) 地下水位上昇による地下水の酸化

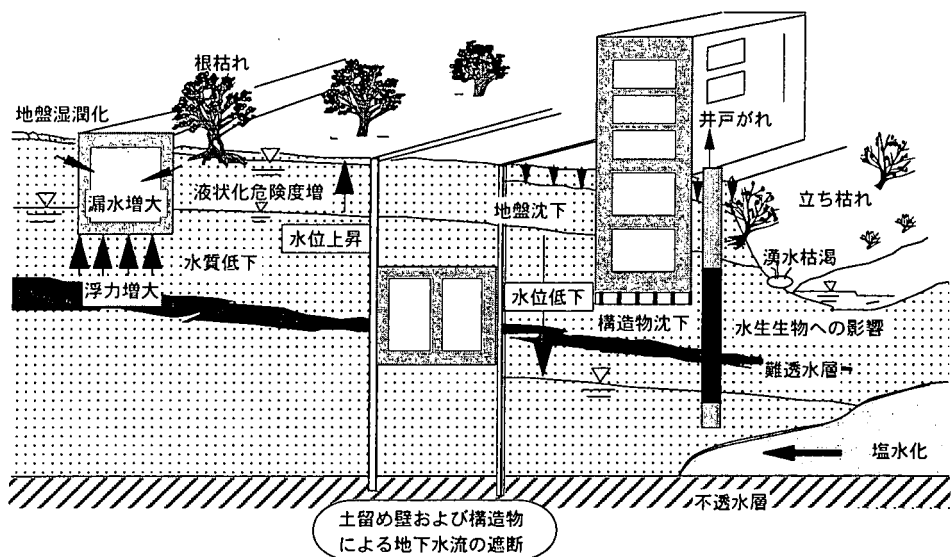


図-1 地下水流の遮断による地盤環境問題³⁾ (一部加筆修正)

ドイツの多くの町では、建設工事の水位低下のために揚水した水は浄化をして等し量を地下に復水するようである。飲料水の70%近くを地下水に依存している国と、15%程度しか依存していない国（日本）との差は大きいかもしれない。地下水の豊富なベルリンでも地下水を揚水しないで、止水工法が主に用いられている。また、たとえ揚水しても周囲の公園の植生を守るために、復水している。この復水の際に、流域全体の地下水の流況状況を検討して、効率の良いところまで、揚水を導入して復水している。建設現場からの水色のパイプラインが道路の上を横断して配管される光景を見ることがある。実際にどの地点に復水すると効率が良いかの判断は難しいが、数値解析によって検討したりしている。

当然、地下水の流況阻害になるような地下構造物を建造する際には、上流から下流へ地下水の浸透をすみやかにする地下水流動保全工法（バイパス工法，迂回浸透工法とも言う）が設計され，施工されなければならない。

表-4 地下水流動保全のための地下水調査項目

3. 地下水流動保全のための調査

3.1 流動阻害の有無の判断

地下構造物を施工したことにより，地下水の流動がどのように変化し，それによって色々な地盤障害が生じるかを予測するために，地盤および地下水調査が必要である。建設工事のための地下水調査に関しては，多くの説明書があるため，ここでは地下水流動保全のための調査法に絞って論議する。

- (1) 地下水の流動方向調査
- (2) 地下水の利用状況および湧水調査
- (3) 軟弱地盤層の分布
- (4) 流域全体の水収支（水文調査）
- (5) 地盤内の各帯水層の浸透特性
- (6) 帯水層構成材料の粒度分布
- (7) 覆水帯水層の許容動水勾配
- (8) 各帯水層の地下水の水質

表-4に地下水流動保全のための地下水調査項目を列挙する。地下構造物と地下水の流動方向とはきわめて重要な関係にある。それと，現状の地下水の利用状況を検討して，地下構造物施工による地下水の利用障害がないかを検討する。特に地下構造物が線状構造物であれば，その影響範囲は広く，一般の建設工事で議論している範囲（左右200m～500m）よりはるかに広い（時には数km）。障害の有無は幾何学的にある程度検討できるが，地下水を利用している所は旧河道が多く，図-2のように地下水の全体的な浸透の方向と平行であっても，地下水利用施設に大きな影響を与えることがある。したがって，地盤内の不均質性を十分に把握

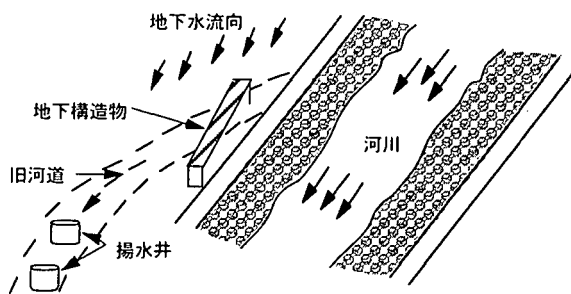


図-2 旧河道上の地下水利用と地下構造物

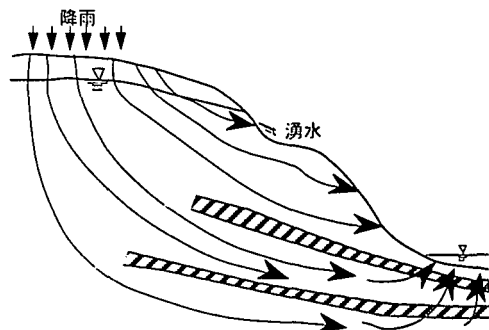


図-3 地下水の浸透

して、検討する必要がある。

地下水位低下による軟弱地盤の沈下を予測するために、軟弱地盤の立体的分布を把握し、地下水位が低下したことで圧密沈下が生じるかどうかの力学試験も実施する必要がある。都市部では旧ため池が埋め立てられたりして、部分的な軟弱地盤もある⁴⁾。したがって、古地図を参照して、そのような分布を調べ、実際に現地踏査やボーリング調査を実施して、地下構造物建設による地盤沈下を検討する必要がある。

地下水の利用状況の中で、湧水についても調査し、水源になっているような湧水の源である地下水を遮断していないか等についても検討する。これらの検討の結果、地下構造物を施工しても地下水環境に障害を与えないと判断すると、調査は終了である。

地盤調査に関しては、日本各地の地盤図が作成されているが、大深度で対象となる50m以深の地盤状況はきわめて未知な事が多い。特に地下水に関しては、各帯水層で異なる地下水位を持っている。都市のように排水域（降雨が地盤に浸透する領域を涵養域とすると）では、本来、地下水は流出して来るため、図-3のように、深部に行くほど、地下水位は大きくなるべきである。しかし、近年、浅層の地下水が汚染していることと、大量の地下水を必要としているため、100m～200mの深さまで揚水井を貫入して、良質の深部地下水を揚水している。したがって都市部で地下水を利用している所は、深部にいくほど水圧が低くなっている。この逆の水圧の勾配のため、山間部で涵養された良質の地下水の中に、都市部の浅層の汚染された地下水が混入しやすくなり、ますます水質の悪化現象が進行している。

ともあれ、地下構造物の工事毎に周辺の地下水の状況を調査しているような現状では、その環境影響評価がきわめて困難になる。地下水の水位は地盤の地質構造とは異なり、経時的に時々刻々と変化をしている。したがって、地下水位は、と言っても設計の為の地下水位は平時の平均地下水位高よりも、50年、100年の確率での地下水位高に設定しておく必要がある。河川堤防に「計画洪水高」があるように地下水位にも「設計地下水位」があるべきである。このような観点で設計をしていないと、大雨の時に施行された構造物が破壊してしまう事がある。

地下水位の地域の全対象域を長年にわたって調査し、構造物施行後も調査したデータの集積によってはじめて環境影響評価の予測が可能となる。我々が人間ドックを受けるのと同じである。周囲に次の新しい構造物が施工される場合でも、その施工中、施行後にも地下水位の変化が計測され、予測モデルの修正や追加がなされて、それがその後どのように変化しているかを調査する必要がある。

3.2 地下水保全工法実施のための調査

(a) 集排水施設

地下構造物の施工により、地下水環境に影響があると判断されると、構造物のルートや方向を変更することも検討する。当然、施工方法や施工深度の変更も検討される。しかし、一般に不可能なことが多く、保全工法を検討する必要がある。保全工法には種々の方法があるが、浅部地下構造物か深部地下構造物かによっ

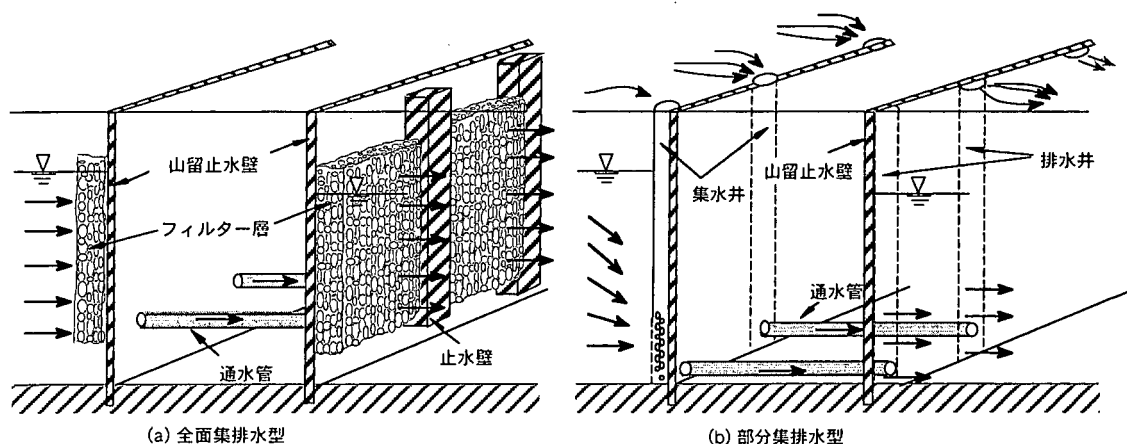


図-4 地下水流動保全施設例

て分けられる。無論、掘削用地にも関係してくるが、図-4に示すように全面集排水型と部分集排水型に分けられる。図-4(a)の全面集排水型は比較的浅い掘削に用いられ、止水壁の外にフィルターゾーンを設け、上流から下流へは通水管を通して連結する。この方法には色々な型体があるが、検討事項は表-5に示すようにフィルターの選択と通水管のピッチである。図-4(b)の部分集排水型は山留止水壁の外に集水部と排水部（復水部あるいはチャージウェルとも言う）を設けて、上流側から流入した地下水を集水部で集めて、山留止水壁内では上流側から下流へ通水管によって連結して保全工法としている。この工法にも、山留止水壁内に集排水機能を持つものもある。この場合は、井戸のように半円周より地下水を集めるが、下流で同様に排水するための井戸（特に排水井）の周辺で目詰まりが生じやすい。この場合の課題は集排水施設のピッチと目詰まり対策である。

(b) 地下水調査

地下水流動保全施設を施工するには、地盤内の多層の各層の透水係数を求める必要がある。保全施設は恒久的なものであるため、色々な検討は定常解析で行う。帯水層の間隙率がわかれば良いが、一般にこの値を計測することは不可能である。

帯水層の構成材料の粒度分布は、フィルターの選定に必ず必要な値である。しかし、砂質土を採集することは困難なことが多く、特に目詰りに関係する細粒分を流亡させないで採取するためには、地下水を低下させてピットを掘る時に採集するしか方法がなく、その後フィルターの選択をすることになる。

「許容動水勾配」の調査という、新しい調査も必要になる。これは図-5に示すように保全施設の排水側に高い動水勾配を与えると、排水井の近傍の細粒部が移動して、帯水層内で目詰りが生じる。建設工事での揚注水井の目詰りの原因は大半がこのために生じていると言っても過言ではない。

この目詰り現象を防止するためには、排水部に大きな動水勾配を発生させないようにする。関東平野の江戸川層では、動水勾配が0.5程度で復水していると透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ から $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ に低下してしまう。このような「許容動水勾配」を室内実験で求めるには、ピット掘削時に水平方向の不攪乱試料を採集して、一次元の透水試験から、動水勾配と透水係数の関係を求める必要がある。原位置で求めるには、段階注水試験を実施して求める。部分集排水施設のピッチは、排水側に「許容動水勾配」以下の動水勾配を持たせるようにして設計される。

表-5 地下水流動保全施設の設計上の検討事項

全面集排水型	部分集排水型
地盤土とフィルターの粒度 通水管のピッチ	地盤土とフィルターの粒度 通水管のピッチ 許容動水勾配

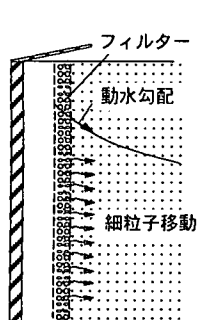


図-5 細粒子移動による目詰まり

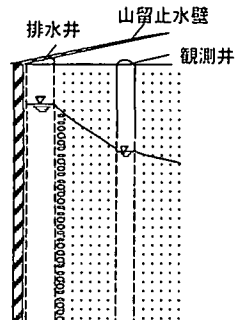


図-6 排水井近傍の目詰まり度観測用井戸

地下水の各帯水層の水質調査はきわめて重要である。特に、地下水の中に鉄バクテリアを多く含んでいると、集排水中に酸化して、簡単にスクリーンが目詰りしてしまう。また、自然界では中間に粘土層が存在して、本来混合しない2層の地下水をフィルターによって連結してしまうことで混合し、新しい化学反応が生じて、目詰りが生じることがある。このようなバクテリアや水質の化学反応は予測することが困難であるため、試験施設を設置して長時間試験をすべきである。そして、FRPのストレーナや配管パイプをステンレスにするなど、色々と改良が必要である。オランダの砂丘での注水井はコンクリートで鉄金属は使用していない。もし、常時ポンプを設置するなら、その材料についても検討すべきである。通水管の途中に濾過装置を設置する方法も考えられる。

4. 地下水保全対策工法の設計・維持管理

(1) 全面集排水方式の設計

山留止水壁の外側を掘削してフィルターを投入して、地下構造物を施工する方法である。山留止水壁を取り除く場合は、掘削の中に縦にフィルター層、そして下部、上部に通水フィルター層を設けると、簡単に全面集排水施設ができる。この場合の注意点は、集排水施設内のフィルター層内を地下水が新しい水みちとして流動してしまうので、フィルター層内にも断面的に図-4(a)に示すように止水壁を設ける必要がある。

山留を取り除かない場合には、上流から下流への通水管のピッチが課題になる。浸透をできるだけ、施工前の状態にするのであれば、ピッチをできるだけ狭くする必要がある。通水管の径は、地盤の透水性から考えると、 $\phi 40\text{mm}$ 程度で十分であることが多い。しかし、施工性を考えると、 $\phi 66\text{mm}$ 程度が便利であり、3次元解析からピッチを算定する方法が提案されている⁵⁾。

(2) 部分集排水施設

線状構造物(地下鉄、共同溝、地下河川等)の施工での地下水流況の阻害を回避する方法として、部分集排水施設がきわめて有効である。しかし、この方法ではどうしても排水側で目詰まりが生じやすいため、「許容動水勾配」を考慮することを提案している。実際に3次元か準3次元で全流体のモデルを作成して、施設のピッチを検討し、排水井の周囲の動水勾配が許容動水勾配以下になるように決定する。無論、関東平野の武蔵野礫層や大阪平野の天満層のように透水性の大きい層を対象とする場合には、「許容動水勾配」をあまり気にする必要はない。大阪の堺での段丘礫層では目詰まりを懸念して集排水井の断面を大きくし、さらに、地下水位が高かったため、井戸の両側にトレンチを掘って礫層を入れて、そのトレンチにグラベルドレーンを打設して、排水性周囲の動水勾配をできるだけ小さくした⁶⁾。施工後の地下水性の回復もダム湖の湛水のように時間をかけて徐々に行うべきである。急上昇すると「許容動水勾配」を越えた負荷が生じる。

(3) 施工手順

地下構造物が線状であれば、我々は当然、その施工手順を考慮しなければならない。一般的には、色々な建設機械の運用との関係があるが、山留止水壁のある区間で施工し、地下水保全工を施工した後、次の工区

の止水をするという、経済的な負荷があることを事前に知っておく必要がある。山留止水壁を全域にわたって施工した後に地下水保全工法を設置する工程を取ったために、工事中に下流側の井戸が枯渇し、上下流で地盤の陥没を生じさせた例がある。

流域全体を対象として、影響の少ない工程を選択する必要がある。この場合は、当然、非定常解析になるため、我々は帯水層の貯留係数が必要となる。

(4) 維持管理

地下に施工された構造物の状態のモニタリングは地上以上に重要になる。地下のどの位置にどのような構造物がどのような材料で施工されているかを地上から探査する技術開発もなされているが、廃鉱や探石鉱のような人為的なもの、石灰岩のドリーネのような空洞の天然的なものが原因となつての地上陥没事故などの社会的な問題が生じている。60年近く前の戦時中の地下構造物が地下水の挙動から発見された例もある。現在施工されている構造物はほとんどがコンクリート構造物であり、耐用年数が50年程度であるとなる⁷⁾と、一層、その構造物の変化のモニタリングが重要である。3000年前のエジプトの墓や2000年前のイスラエルの地下泉などが今もあるのは自然石を用いて造っているためであろう。

地下に施工した地下水保全施設の維持管理で最も重要なことは、保全施設の経時的な機能低下である。特に復水時の目詰まりが経時的に進行して、最終的にその施設が機能しないことになる。設計の段階でそのようなリスクを考え、そのような事が起こったならば、次にどのような補助施設を用いるか等に対して検討しておかなければならない。

保全施設の機能の評価は、地下水位が経時的にも経年的にも変動するため、きわめて困難である。一般的には図-6に示すように集排水施設の上、下流の近傍(1m程度)に観測井を設置して、集排水井と観測井との動水勾配を計測する。半円での軸対称であることを考慮して、その動水勾配の変化を求める。動水勾配が経時的に大きくなっている場合は当然、フィルターになり、集排水施設の機能が低下していることになる。さらに、構造物の上下流に観測井を設け、その水位の変動を計測する。これらの観測性は地下構造物から100m程度離れていても良い。地下構造物の施工によって影響すると考えられる範囲に設置する。これらの観測井の水位は工事の1年、2年前から計測し、工事に影響しないと考えられる地点にも参照用観測井(Reference observation well)を設置し、それらの長期計測結果より相互の相関性の強い井戸を選定する。地下水位は気候によっても変動するため、特に渇水時の時の地下水の挙動が大切である。このように、地下水保全施設の機能評価は、影響半径内と影響半径外の観測井の変動によって総合的にも評価されるべきである。

直接的な評価として、通水管内の流量計測を行う方法も考えられる。しかし、きわめて、緩慢な流速であるため、特殊な流量計測システムが必要である。集排水施設の上流にトレーサーを投入して流速を計測する方法も実施されている。目詰まりが発生した時の洗浄方法として、フィルター内にエアレーション用のパイプを施工中に事前に設置しておく。また、逆洗浄用の配管や空気施設も準備しておく。

5. 地下空間の新しい利用

地下空間に構造物を施工することによって地盤環境にどのような影響があるかを主に議論してきたが、逆に、地下構造物によって地盤環境を積極的に良くする工法が考えられる。例えば、地下構造物によって、下流の地下水位が低下するのであれば、これだけで地盤の液状化対策になる。このような地下空間の新しい利用のアイデアを表-6に示す。表-6は、地下の線状構造物網の掘削空間の新しい利用を提案したものである。

(1) 地下水位低下による地盤災害防止システム

地盤の液状化は、地下水位の高い細砂層で生じる。したがって、地下水位を恒常的に低下するために既設あるいは新設の地下構造物を用いて地下水位をコントロールするシステムである。このような地下水位のコントロールは、軟弱地盤では困難ではあるが、そこでは液状化などの地盤災害が発生しにくいので、その必要はない。この排水網より、洪水時の地盤のボイリングやパイピング現象も防止できる。また、地球温暖化

によって、海面水位が上昇してくると、当然地下水の水位も上昇する。その際の防災対策としても、地下構造物の排水網システムがきわめて有効である。現状でも汚染された使用できない地下水の水位が上昇し、揚圧力の上昇によって、半地下構造物に色々な問題が生じている。このような状態を回避するためにも、「都市排水網」を地下構造物によって構築すべきである。

表-6 地下空間の新しい利用

- | |
|--------------------------------|
| (1) 地下水位低下による液状化防止システム |
| (2) 地球温暖化による海面上昇による排水システム |
| (3) 線状地下構造物を利用した地下水浄化システム |
| (4) 線状地下構造物を利用した集水システム |
| (5) 線状地下構造物を利用した地下水位（水圧）コントロール |

(2) 地下水集水による利用および浄化システム

山岳トンネルや、地下水位下を掘削すると、地下水が湧水してくる。このような場合、地下水の利水としての利用と地下構造物の建設は、別の事として考えられている。地下構造物によって、地下水をダムアップして地下水を利水として利用することを同時に検討する方策が提案できる。

地下水が汚染している場合には、地下水保全施設の通水管の一部に地下水を洗浄する装置を設置すると、自然流下で広域の地下水が浄化でき、長時間の浄化システムが可能になる。

6. おわりに

地下空間利用の際の地盤環境保全について述べた。その中でも地下水流動保全のための調査、施設、設計法と施工中の注意点と維持管理法について具体的に述べた。そして最後に、地下空間を利用する際に、ただ単に構造物を設置するだけでなく、地下の環境をトータルにコントロールする施設まで拡張して設計することを提案した。そして、湧水として出てくる地下水を有効利用したり浄化することを提案した。

地下空間を利用して、色々な施設を設けても、その後、周囲にどのような変化が生じているかについて長期の計測データはほとんどない。自分達が住んでいる下で時々刻々と何が起きているか早く知り、その結果、何も問題がなければいいが、問題が生じていれば、それに対して早急に対処する必要がある。先にも述べたが、私たちが人間ドックに行って正常な時のデータの蓄積していくのと同じである。長期間の総合的なモニタリング施設が設置されてこそ、その地下の有効利用や地下水位(水圧)のコントロールが可能になる。トータルな検討がGISを用いて進められていることを期待する。

最後に地下水流動保全工法に関しては、「地下水流動保全工法に関する研究会」(丹原光隆委員長)の委員より貴重な御助言を頂いたことを記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 今田 徹：大深度地下利用制度の意義と課題，第3回地下シンポジウム，土木学会，1998，pp.1-8.
- 2) 地盤工学会編：根切り工事と地下水，1991.
- 3) 地下水流動保全に関する研究会編：地下水流動保全工法の設計の考え方と施工事例，平成10年度土木学会学術振興基金報告書，1999.
- 4) 杉本隆男他：環8・井萩トンネル工事での地下水対策工，東京と土木技術研究所年報，pp.211-218，1995.
- 5) 大東憲二，脇下協，高木利則，安江勝夫：掘削道路における地下水状態への影響評価に関する研究，土と基礎，43(9)，pp.27-29，1995.
- 6) 永井宏，西垣誠他：道路建設における地下水環境保全のための復水工法の検討，土木学会論文集，No.516，1995.
- 7) 小林一輔：「コンクリートが危ない」岩波書店，1999.