

都市地下空間開発における地下水環境保全・管理手法の研究

Study on Preservation and Control of Groundwater Environment for
Developing Underground Space in Urban Area

埼玉大学工学部

○佐藤 邦明 Kuniaki SATO

都市地下空間活用研究会

西 淳二 Junji NISHI

Summary: This paper is motivated by the social needs with respect to groundwater protection and prevention of land subsidence when developing the underground space in urban area. The hydrological assessment of groundwater environment is enumerated in realizing of a large scale and deeper underground space because it permits more reasonable design. The construction of underground space may locally invite the groundwater damming and withdrawal around underground works, and it may possibly create a new groundwater sink of aquifer in addition to the channeling flow along a tunnel extension. The water budget in underground space is evidently associated with groundwater inflow and air conditioning, but it may also be influenced by the relative humidity under a given temperature.

Keywords: Groundwater, Underground Space, Environment, Urban Area

1. 序 論

今日、わが国では内需主導型経済への転換、社会基盤の整備・充実へ向けて豊かで安全な質の高い国土づくりが進められつつある。国土の有効利用に加え新しい空間として地下空間の利用・開発が脚光を浴びている。とりわけ大都市における地価高騰、都市機能・施設の過密化及び都市再開発に係って地下空間に熱い目が注がれている。^{1), 2), 3)} 本邦における地下空間は大別すると、岩盤地下空洞のように都市外に作られるものと地下街のように都市内に建設されるものに分けられ、かつ形態も拠点的なものとトンネルのような線状のものに分かれる。このような地下空間の開発において地形・地質条件や空間形態はもとより利用の仕方によってもテクノロジー・アセスメント、設計、施工の考え方がかなり違ってくるが、いずれにしても共通して言えることは地下水・地盤環境への影響を的確に予測し、その評価手法を確立しておくことであろう。地下空間開発に伴う地下水環境の変化によってもたらされる障害・弊害は端的に言えば、地下水の異常な低下（あるいは上昇）とそれによって誘起する地盤変動、場合によって水質劣化である。従来、この種の障害や弊害は多くの工事・開発で多かれ少なかれ経験され、それなりに対策がとられてきたが何分開発する側から見れば、ネガティブな部分であるだけに系統的に論じられることは少ない。こういった背景にあって本研究は都市地下空間に注目し、地下空間建設時及び長期における空間周辺と広域の地下水挙動、地下水環境変化、加えて地下空間内の水収支と水分管理について述べ、地下水環境の評価の視点を明示したものである。

2. 地下空間の機能と利用形態

地中開発は、地下資源開発、地下エネルギー開発、地下空間開発の3つに整理され、地下空間開発は生活、都市、供給処理、生産、貯蔵、交通、防災等の施設から成るものであり、その多様化は人類のためにすべて適正に利用されることが求められている。今日の都市地下空間利用に当って、①地上に必ずしも必要のない施設の地下化による地上スペースの確保あるいは都市の美化、②都市域での過密・立地難による交通、通信、エネルギー及び廃棄物搬送システムの地下化、③工場、オフィスビル、レクリエーション施設などの地下化、④気候の厳しい都市における地下空間の利用、⑤防災のための地下空間の活用、などという概ね5

つの方向が見られる。4)・5)

一般に、地下構築物を特徴づける支配要素は地盤面との関係の仕方である。すなわち、表-1に示す様に、大略、①地下埋設型、②ビルディングの地下階利用型、③アトリウム (atrium) 型、④坑道型に分類できよう。歴史的に知られた中国のヤオトン (洞窟) やチュニジアのそれなども坑道型に入れることができよう。6)・7) 次に深度に着目してみれば、都市部における深い地下利用の状況は温泉井・井戸を除けば、現状では約50m以浅の利用である (杭基礎などでは、N値や支持層の深さによるので地層条件に依存)。しかし、近い将来のより深い河川の地下化、道路および鉄道の地下化 (地下駅を含む) など都市機能向上をねらった計画および構想が具体化されよう。これらの施設は、一般に深度が浅い場合には開削工法、深度が比較的深い場合や地表の土地利用による制約がある場合にはシールド工法、一部ではあるが、深度が比較的深く地盤が良好な場合にはNATMにより、各々建設されている。シールド工法を採用する場合は発進基地が必要となる。図-1には人類が到達した深さと人工空間の鉛直利用階層を選択的に描いた。また図-2には地下利用の歴史的経緯をまとめてある。

表-1 地下建築物の形状分類

分類 型式 特徴 区分	① 地下埋設型	② ビルディングの地下階利用型	③ アトリウム型 (atrium)	④ 坑道型
形状	地表 	空掘り サンクンヤード 	天窓、アトリウム 太陽光採光システム 	斜面
地盤面との関係	完全に地下に埋設。	地上の建造物の地下階として利用。	アトリウム (吹き抜き)・天窓などで地上部と連結。	坑道方式。主として、傾斜地盤面に対応。
主な利用事例	シェルター 備蓄 (貯蔵) 地下河川・湖沼地 都市交通施設 供給施設 など。	オフィス、地下街 駐車場 倉庫・地下工場 地下発電所 運動場 など。	地下街 地下生活施設 (住宅など) スポーツ施設 など。	貯蔵施設 地下生活施設 (住宅など) 軍事施設、掩護 など。
地上の有効利用との関係	地上のオープンスペース確保に有効。	日照確保や高度制限に対処可能。	景観保全・オープンスペース確保に相当程度有効。	(自然) 景観保全に有効。

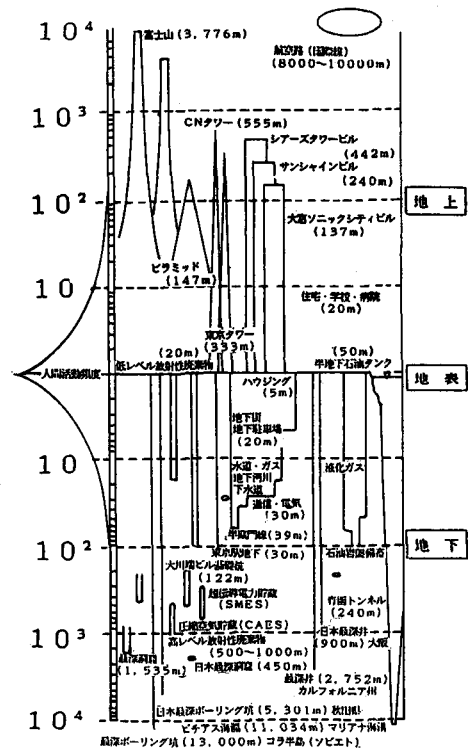


図-1 人類が到達した深さと人工空間の鉛直利用階層⁸⁾

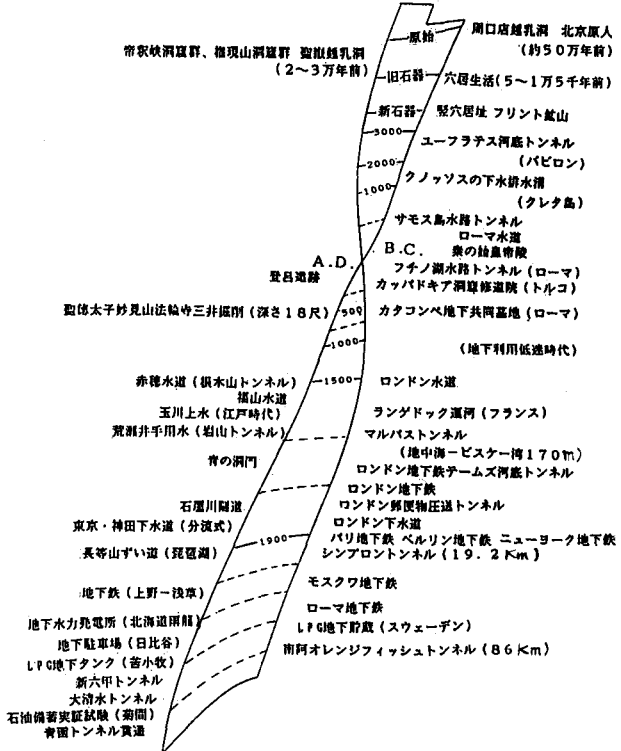


図-2 地下利用の歴史^{9)・10)}

3. 地下空間に係る環境因子

都市地下空間に係る環境因子は技術的側面から考えると、表-2のようになろう。これらは短期的（工事中）に地下水流の変化を通じて現われ易いものと地下空間が完成後操業中に徐々にかつ長期的に表面化してくる類のものが予想される。前者の中には必ずしも直接地下空間そのものによる影響とはいえないまでも、工事そのものによる水域汚染の恐れ、また騒音、振動といったものも環境に対する検討事項となる。工事中における地盤変性や地盤沈下は地下掘削に伴う地盤の支持力、強度、安定性の低下、土留めの不十分による陥没とか沁りを除けば、ほとんど地下水が関与して起こるから地下水の問題である。

表-2 地下空間に係る環境因子

環境影響 影響期間	内 容
短 期 的 (工事中)	地下水（局所的水位の異常低下、湧水、湧水等） 地盤沈下（陥没、すべり） 工事排水処理に伴う水質インパクト 振動 騒音
長 期 的 (完成後)	地下水環境の変化 (湧水・濁水、水位低下、湿地化、植生への影響、 湖沼・田畑の減水、枯渇、流況阻害等) 地盤変動（地盤沈下、耐震性の劣化） 水質変化

地下空間に係る地下水問題として従来から知られているものは水位低下工法による地下水障害であるが、帯水層の規模に比べて地下空間が大型化・長大化すると、地下空間そのものへの湧水による水位低下及び地下空間構造部による地下水流況の阻害が予想される（後述）。当然、それに伴う地盤変動が考えられる。しかし、問題の捉え方と評価の段階で次の点は念頭におく必要がある。つまり、都市を支える地盤のスケールは人が構築する地下構造部に比べて十分大きく、例え都市トンネルのように長いものであっても断面は十分小さく、かつ地下水盆の広がりから見ればそれは非常に細い線のようなものである。従って、広域地下水からすれば、拠点の地下空間は点、線状地下空間は細い線と見なし得よう。その観点から推して地下空間による広域地下水への影響は考えにくく、地下空間周辺のかかなり局所的な地下水流況の変化や工事中の水位低下といったものが問題の中心になるものと思われる。

つぎに、地下空間開発による水質問題は工事中の地盤改良材によるものが考えられるが、直接表面に現われるものは事故の場合（たとえば、地下貯油槽の漏えい）を除いて考えにくい。さらに、従来の環境問題に入るか否かは別として、地下空間の中の地下水湧水による環境影響は新しい角度から研究の余地はあるように思う。

4. 地下空間の地下水環境への影響と保全

(1) 地下空間と地下水の干渉

地下空間による地下水への影響は、工事中の短期的かつ局所的な水位の異常変化（低下やせき上げ等）と、完成後徐々に顕われる長期的な地下水の変化とに大別できよう。

掘削工事中の短期的な地下水への影響の中で最も表面化し易いものは、開削と立坑工事による場合であろう。開削工事は、地下街、ビルの地下、地下鉄の駅部といった拠点の地下空間の建設の際に、また、立坑工事は拠点の地下空間の建設に加えてシールドトンネルの発進基地建設の際に行われるものである。両者ともに地下水に影響を与えない工法をとるのが基本となるが、施工方法、地質条件、施工深度等によっては、工事の過程で周囲の地下水を低下させざるを得ない場合がある。その場合の開削による地下水への影響は模式的に表-3中①のように現われる。一般的に開削場内及び周辺にウエルポイントを配置して周辺の地下水位を強制低下させる方法がとられる。これら地下水位の予測や揚水計画を立案・評価するには、解析解のみでなく数値シミュレーション法等が用いられる。簡便な手法としては、井戸理論（群井理論、ホルヒハイマーの式等）が適用されよう。

次に、地下空間完成後における長期的な地下水への影響は、①トンネル部などの線状地下空間及び駅部などの拠点の地下空間による遮水効果、②地下空間内への漏水による周辺地下水位の低下、③シールドトンネルのような線状地下空間に沿う地下水の流れによる地下水位の低下などが考えられる。

遮水による地下水変化は、①地下空間の利用形態、②地質条件、③地下空間と地層の規模や位置関係等に関係するが、実用上は巨視的に構造物を遮水壁におきかえ、条件を単純化して検討してもおおよその水理的影響を知ることができる^{11), 12)}。その解析解による計算では遮水される帯水層が不圧か被圧地下水によって分け、また遮水の形態を全断面遮水か部分遮水に分けて比較的容易に遮水効果を算定することができる。この場合、表-3の②に示す様に鉛直二次元の問題として取りあつかうこともできよう。例えば、不圧地下水の全断面遮水の場合には遮水による地下水位の変化量 (h_{1b}/h_{10} , h_{2b}/h_{20}) は図-3のようになる。

なお、トンネル等の線状地下空間による遮水は上述したように鉛直二次元のとりあつかいでもよいが、拠点の地下空間の場合は表-3の④に示す様に三次元的な遮水効果を検討する必要がある。

トンネル部への漏水による地下水への影響は表-3の③に示す様に直上部の水位低下が生じる。しかし、都市部のトンネル施工には、密閉型シールドが主体になると考えられ、シールド材の改良・開発により、トンネル内への漏水が極力おさえられれば、この影響は比較的軽微となろう。また、シールドトンネルのセグメントの外周は注入材で充てんするのが常識となるが、周囲の地層よりも透水性のよいゾーンが形成されれば、トンネル直上部は表-3の③に示すように周囲よりも地下水位が低下する場合も生じ得よう。

以上のように地下空間による地下水の変化は空間の掘削時や完成後に局所的にいくつかの形態で現われることが予想される。水理解析法そのものは従来の方法の延長線上で対処できようから地形・地質のモデル化、パラメーターの決定、水理境界条件の設定といった実務との対応を調べ、適切な評価法を確立することが肝心となる。

(2) 地下空間内の水環境

地下街、駐車場、工場、交通トンネルといったものは常時、あるいは一時的にせよ必ず人間が活動する空間である。そのような空間においては適当な空調条件になければならない。閉空間における水の3要素は“湧水”、“湿度”及び“結露”であり、これらは気圧、温度及び換気条件に支配される。これらの事を概念的に示したものが図-4である。閉空間内へ入る水は湧水 q と換気流入水分 q_i であり、出る水は排水 q_d と換気流出水分 q_o である。従って、空間内の水の貯留量 S_s とすれば、水収支式は、

$$\frac{dS_s}{dt} = (q + q_i) - (q_d + q_o) \text{-----}(1)$$

となる。ここに、 t : 時間である。

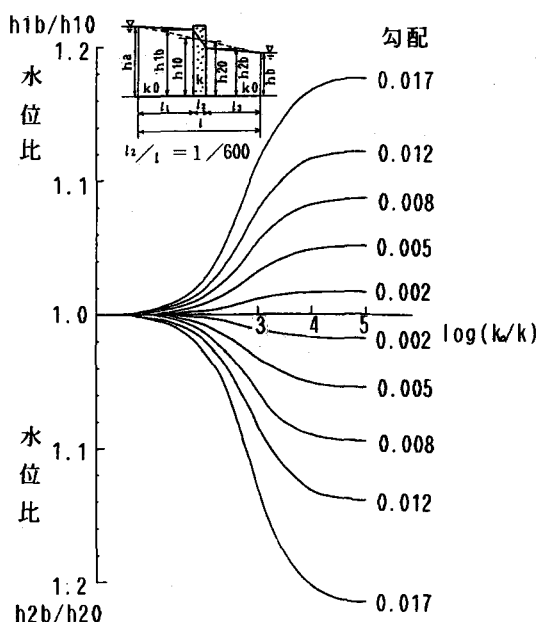


図-3 遮水壁上下流水位と透水係数比

表-3 地下空間と地下水の干渉

干渉の形態	干渉の状況		
① 工事中の 地下水位低下	開削	(不圧) 開削場 (不圧, 群井)	(被圧) 地表 不透水層
	立坑	(不圧) 立坑	(被圧)
② 地下空間 完成後の 遮水効果	全断面 遮水	(不圧) 遮水壁 円形断面構造物	(被圧)
	部分 遮水	(不圧)	(被圧)
③ トンネル内 への漏水等 による地下 水位低下	(帯水層が厚い場合)		
	(難透水層が近い場合)		
④ 3次元流れ による 流況阻害	(掘点的地下空間周辺の流れ)		
	(地下水面変動, 平面図) → (流れ方向)		

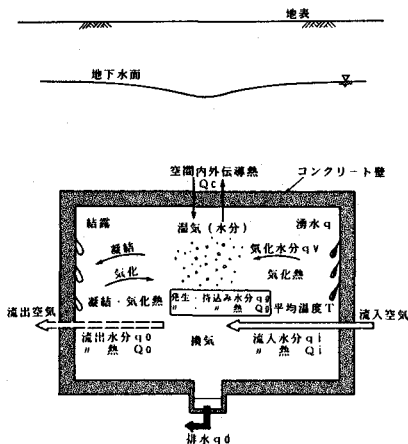


図-4 地下空間内の水、熱及び換気

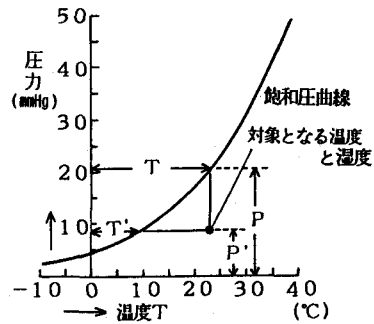


図-5 水蒸気の飽和圧と温度の関係

同様に、空間内の熱収支は、換気による流入熱量 Q_1 、空間内の発生・持込み熱量 Q_g 、空間外への伝導熱量 Q_c 、換気による流出熱量 Q_o 、及び貯留熱量 Q_s とすれば、

$$\frac{dQ_s}{dt} = (Q_1 + Q_g) - (Q_o + Q_c) \text{-----}(2)$$

とかける。

従って、式(2)において $dQ_s / dt = 0$ の状態における空間内の(適切)平均温度を T 、圧力を P' とすれば、図-5のような水蒸気の飽和圧と温度の関係から対象となる値が常に飽和圧力曲線の下にあるように保つことが空間内に結露を生じさせない条件となる。空間内の湧水も換気と密接に関係する。

5. 結 論

都市地下空間利用における地下水環境への影響とその保全について主として水理・水文学的立場より論じた。この類の技術は従来あまり焦点を絞って考究されてきたとは言いがたく、それだけにあまり系統立った議論が本論で出来たかどうか今の時点で結論づけられないかも知れないが、細かい点はさておき、ある程度考えられそうな技術的論点は示されたように思う。今回の検討によって少なくとも次の点が明らかとなった。

- ①現状における人工空間の鉛直利用階層が地下空間も含めて概略整理できた。
- ②地下空間に係る環境因子が整理され、地下水環境に関与する論点が提示された。
- ③地下空間構造部の短期的及び長期的な地下水流に及ぼす影響が構造部ごとに分類され、評価された。
- ④地下空間内の水環境における水収支概念が明らかにされ、水環境保全・管理の論拠が明らかにされた。

なお、最後に本研究を進める過程で環境庁水質保全局及び地下開発地盤環境管理検討会(環境庁)における関連の論議は参考にさせていただいた。ここに、記して心よりお礼申し上げる次第であります。

参考文献

- 1) 佐藤邦明：地下空間利用技術に関する研究小委員会の経過：地下空間利用に関するシンポジウム，土木学会，PP 1～ 7，昭和63年10月
- 2) 松本嘉司：大深度地下鉄道の可能性と課題，大深度地下鉄道－技術と課題－，鉄道総合技術研究所，PP 1～23，昭和63年 3月
- 3) 地下空間利用技術に関するテクノロジーアセスメント委員会：地下空間利用技術に関するテクノロジーアセスメント，日本産業技術振興協会・エンジニアリング振興協会，昭和63年 3月
- 4) 佐藤邦明，大野勝，西淳二：地下空間の現状と発展，土木学会第1回建設コンサルタントシンポジウム論文集，1987.11
- 5) 西淳二，笠原慶三郎，友末一徳：地下空間利用の現状と今後の動向，土木学会土木計画学研究講演集 No.8，1986. 1
- 6) 渡辺与四郎，梶谷修，加茂富士夫，西淳二：地表，地下生活者の都市地下空間適正化に関する一考察，土木学会，土木計画学研究・講演集No.10，1987.11
- 7) 西淳二：都市地下空間の活用，環境情報科学vol.17，No.3，1988
- 8) 青木栄一，大出健訳：ギネスブック1988年版，講談社
- 9) 日本大百科全書17巻，小学館，pp.167～173，pp.349～350，1987
- 10) 科学技術庁資源調査所：地下空間利用に関する基礎資料，資料第 115号，昭和59年 3月
- 11) 佐藤邦明：地下遮水工の水理効果，土木学会誌，PP25～30，1982年 2月
- 12) 佐藤邦明：部分貫入遮水による地下水挙動の水理解析，応用地質23巻 4号，PP18～24，1982