

大深度地下利用制度の意義と課題

The significance and the state of the art for deep subterranean utilization scheme

今田 徹*

Toru KONDA

The paper discusses the concept and its significance of deep subterranean utilization scheme that aims the rational use of underground space for the construction of infra-structure in densely populated large cities without consent of land owner. The paper also discusses the technology available for the scheme and the situation that presents difficulty or uncertainty. Main concerns are the recent technologies of access facility, tunnel and large cavern construction, and the problems relating to the safety and environmental impact due to the deep subterranean utilization.

「key word」 deep subterranean utilization, tunnel, shaft, shield tunnel, ground water, safety, environment

1、経 緯

大深度地下利用はジオフロントという言葉とともにもてはやされ一つのブームとなり、多くの官庁、建設会社からいろいろな構想が提案されたが、バブルの崩壊とともに、その動きは忘れ去られたかの感があった。最初の大深度地下利用の構想は運輸省のイニシヤティブで提案され、これの制度化のための法案提出の準備が閣議決定（昭和63年6月28日）されながら、実施に至らなかった。

大深度地下利用の構想の背景として、当時の土地の異常なまでの高騰による用地取得の困難さと、関係者との調整に時間を要し事業が長期化する方向にあり、事業の効率性が著しく低下する傾向にあったことが挙げられる。この打開策として、一般の土地所有者が通常は利用することのない深い地下に公的な性格の強い施設の建設をする場合、土地所有者との調整を簡略化し、また、権原の取得費用を抑制できる新しい制度を構築することを目論んだものであると考えることができる。このような考え方を可能にしたのは、トンネル技術が著しく発達し大深度を利用する技術の見通しがあったことにある。しかし、閣議決定されながら、土地所有権の一部を制限するという難しい問題が含まれていたためか、法制化には至らなかった。

バブルの崩壊により土地問題は若干緩和されたもののこの事情は本質的に現在でも変わったわけではない。特に、事業を行うにあたっての関係者との調整は一層難しくなりつつあるようである。

平成7年度から再び大深度地下利用制度の法制化の検討が始められた。今回は政府の検討という形ではなく臨時大深度地下利用調査会の設置という形で検討が進められることになった。臨時大深度地下利用設置法は議員立法（参議院提案）という形で提案され、平成7年6月2日に参議院内閣委員会を、6月9日衆議院内閣委員会を全委員の賛成を得て通過している。この法案は時限立法であり施行の日（平成7年8月25日）から3年で効力を失うと定められている。

「キーワード」 大深度地下利用、トンネル、立坑、シールドトンネル、地下水、安全、環境

*正会員 工博 東京都立大学教授 工学研究科土木工学専攻

設置の目的として「土地利用に係わる社会経済情勢の変化にかんがみ、大深度地下の適正かつ計画的な利用の確保とその公共的利用の円滑化に資するため」としている。調査会の所掌事務は「内閣総理大臣の諮問に応じ、大深度地下利用に関する諸問題について、広く、かつ、総合的に検討を加え、大深度地下利用に関する基本理念及び施策の基本となる事項並びに大深度地下の公共利用の円滑化を図るための施策に関する事項について調査審議する。」と定められている。また、調査審議を行うに当たっては「安全の確保及び環境の保全に関する事項について特に配慮しなければならない。」としている。委員は12名で構成され委員長は味村治元最高裁判所判事で、事務局は国土庁大都市圏整備局大深度地下利用企画室が担当している。また、技術・安全・環境部会（部会長松本嘉司東京理科大学工学部教授）及び法制部会（部会長藤田宙靖東北大学法学部教授）の2部会が設けられている。第1回調査会は平成7年11月9日開催され、内閣総理大臣からの諮問「今後の大深度地下の利用に関する基本理念及び施策の基本並びに大深度地下の公共的利用の円滑化を図るための施策は如何にあるべきか」を受け、検討を重ねてきたが、平成9年6月13日の第7回調査会で中間とりまとめが行われ、国民各層の意見を求め、さらに審議を重ね平成10年5月27日に開催された第11回調査会において答申がまとめられた。

2、大深度地下利用の意義

大深度地下利用制度の発想は、都市施設の整備において増大する工事費と工期を抑制しようという動機で出てきたものであると理解することができる。しかし、大深度地下利用制度は、このような効果にとどまらず、都市における土地利用に大きな影響を与えることになる。

都市の社会基盤には多くのものが必要であるが、鉄道や送電線のように必ずしも地表を利用する必要のない施設も少なくない。このような施設は、土地利用に余裕があったために、建設費が安価であると云うことから地表に建設されることが普通であったものである。しかし、土地利用が高度化すると、地表の施設としてなじまなくなり、騒音などの環境問題や景観などの問題を起こすようになってきているのが現状である。本来、都市の基盤施設が環境に問題を与えないような計画のもとに都市が建設されるべきであるが、現実にはそうはなっていない。多くの都市は成長しながら発展するものであるから、その発展にあわせて、社会基盤を整えて行かざるを得ないので、大都市においては地下の利用は必然性を持っていると言える。また、都市が高度に発展すれば、安全性に対する水準は高いものが要求されることになる。特に、地震に対する安全性の確保は我が国の大都市にとっては極めて大切な課題である。地下空間は地震に強い空間であることは、今までの地震の災害の事例から確認されており、安全性の高い都市を確保するには地下の利用が重要な位置を占めることになることを認識しておく必要がある。地上系の施設と地下系の施設を組み合わせることで冗長性を持たせることは安全性を確保する上で大きな意義を持つと考えられる。

地下を容易に利用できる制度ができれば、地表に必要な施設は地表に設け、地表に設けることが必ずしも必要でないものは地下を利用し、人々にとってより住み良い都市の形成が容易になることになる。本来は、大深度地下と浅深度地下のような区別をすることなく、また、地表の利用と一体的に計画、整備されるべきものであるが、権利が複雑に絡み合った現状においては、大深度の利用を一つの軸として都市における社会基盤を整備することも考えられる。

一方、今まで利用が限られていた地下を容易に利用できるようになると、今まで地表でなされてきたような、無秩序な利用は許されないことになる。なぜなら、地下構造物の場合は、地表に構造物を設ける場合と異なり、撤去したり、改造を行うことは不可能ではないが容易でないという特質を持っているからである。従って、地下を利用するためには長期的な視野のもとに計画的に利用していかなければならないことになる。大深度地下は広い空間のように考えたいが、決してそうではないことを認識する必要がある。従来の地下利用が道路下を利用して行われて来たので、民地下は殆ど利用されておらず、平面的には広い空間であるが、深さ方向には、水に与える影響やアクセスのことを考えれば100m程度が利用限界である。線的な利用

では交差を考慮しておかなければならないことになるが、構造物同士の間隔を考慮すると、何層もの交差が可能ではなく限られたものとなる。限られた貴重な空間であり、計画的に利用し、将来の人々の利用にも配慮したものでなければならない。

従って、大深度地下利用制度は、単に地下の利用を容易にする制度的、技術的な問題ではなく、哲学的な問題を含んだ枠組みで捉えることが必要ではないかと考えられる。

調査会の答申では、大深度地下利用制度の基本的考え方として、

①公益性を有する事業の円滑化に資する制度

②適正かつ計画的な利用を確保するための制度

として、位置づけている。また、『まえがき』において

『本答申の基本的な考え方は、次の三点である。

①大深度地下の利用例はこれまで必ずしも多いとは言えないこと等から、特に安全の確保や環境の保全に関しては、できるだけ早い段階から十分に配慮する必要があること。

②大深度地下は、土地所有者等による通常の利用が行われない空間であるので、必要性や公益性等が真に認められる事業については、良質な社会資本の効率的な整備に資するよう、国民の権利保護を図りつつ権利調整の円滑化に資する制度を導入すること。

③土地が公共性を有することについては異論のないところであるが、特に大深度地下は、大都市地域において残された貴重な空間であり、また、いったん施設を設置するとそれを撤去することが困難であること等から、適正な利用や計画的な利用が強く求められるものであること。』としている。

3、大深度地下の定義

大深度地下の定義は『「土地所有者等による通常の利用が行われない地下、すなわち、①地下室の建設のための利用が通常行われない深さ、または、②建築物の基礎の設置のための利用が通常行われない深さのうち、いずれか深い方から下の空間」とし、具体的には、①については地表面から40m程度であり、②については、建築物の建設により増加する荷重が30ト/㎡程度の建築物の基礎として利用可能な強度を持つ支持層上面から10m程度下であり、いずれか深い方から下の空間が大深度地下となる。』としている。

この定義は、土地所有者による通常の利用が行われない地下空間の上面を示したものであり、実際に構造物を設置する場合は、『大深度地下施設の規模、構造、地盤特性によっては、より深い位置に設置する等適切な設置位置を検討する必要がある。また、大深度地下施設の建設に際しては、上記の増加荷重の条件に対応した適切な構造をとることが求められる。』としており、計画毎に、既設の構造物に有害な影響を与えないようにすること及び将来建物が建設される場合には、建物がたてられても地下構造物の健全性が保たれることを検討することが要求され、具体的な設置深さと構造が決定されることになる。

4、大深度地下施設の建設技術

大深度地下の定義は、土地所有者等による通常の利用が行われない地下のことであり、この空間に施設を建設するためには、既存の物件に有害な影響を与えないこと、将来土地が利用されるようになった場合、その利用によって大深度の地下施設が有害な影響を受けないようにしておくことが必要であり、また、環境に有意な影響を与えないこと、出来上がった施設の安全性が確保されることが要求される。

現在適用が考えられている大都市の地盤は、沖積層、洪積層あるいは第3期後半に形成された地層など新しい時代の泥質、砂質、礫質の地層で構成されており、いわゆる岩盤ではなく土質の地盤である。従って、大深度地下の特性としては、深度が深くなり、地下水に与える影響を抑制する必要があることから、地下水圧が高くなること、構造物の支持層以下の空間であることから、一般的には地盤の固結度は高くなること、また、標高が低いことから地下水の流動が緩慢な条件下にあることなどが挙げられる。地下構造物を建設す

るという観点からは、有利になる条件と不利になる条件および慎重にならなければならない条件などがないまぜになっている。また、大深度地下は、従来の実績は多くなく、これから知見を積み重ねなければならない領域である。

現在の技術がこれらの条件に対してどのような位置づけにあるのかを考えてみることにする。大深度地下構造物の建設のためには、大深度地下にアクセスするための技術、トンネルを設ける技術、地下の拠点となる比較的規模の大きい空間を構築する技術が必要である。

(1) 大深度地下へのアクセス

大深度地下にアクセスするための構造としては、立坑を用いる方法と斜路を用いる方法とがある。一般に地下構造物の建設にあたって立坑を建設するのに必要とする工期は全体の工期の中で大きな部分を占め、立坑を如何に速く建設するか、その数を減らすかが工期の短縮と工費の節減に大きな影響を与える。大深度地下利用制度が適用される地域における地盤では土留めを用いた立坑の構築方法が適用されると考えられる。深さが深いことから、土留め形式としては、地下連続壁、鋼管矢板土留め壁、柱列式地下連続壁などの構造が適用性のあるものとして挙げることができるが、地下連続壁が主として用いられることになるであろう。壁の深度が 140m を超える地下連続壁の実績が既にあり、大深度地下に適用できる技術として確立されているとみなすことができる。一般に土留め壁の設計は、深さ方向の梁として行われる。深さが大きくなく、断面積が深さに比べて大きい場合は、適切な設計の考え方であるが、大深度地下の場合は、断面積に比べて深さが深く、また、立坑の下部の地盤は固結度の高い地盤であるから、従来のような設計の考え方ではなく、断面方向での検討が主体になるようにする必要があるものと考えられる。円形の立坑が用いられる場合には既にこのような考え方が取り入れられているが、荷重の取り方などさらに合理化を進めることが必要であろう。

軟弱な地盤の立坑の築造方法としてケーソンあるいはウェル工法がある。ケーソン工法では掘削に圧気を使用する必要があるので、適用深度に限界があったが、無人掘削技術が発達してきており、大深度地下への適用の検討を進めるべきであろう。

立坑の築造方法には岩盤の場合に適用されるショートステップ、ロングステップなどの山岳立坑工法がある。山岳立坑工法の大深度地下利用での適用性は低いものと考えられるが、地下水の制御技術が確立された場合、あるいは地下水への影響が小さい場合は、経済性が高いことから、適用性について十分検討すべきものと考えられる。立坑の建設では一般に単一の構造形式が用いられるが、地盤の条件に応じたハイブリッド構造なども検討に値するであろう。

また、球体シールド工法と呼ばれる立坑の開削と水平坑の掘削を一連の機械で行う工法が開発されており、大深度地下施設の建設技術として発展が期待される。

一般的には大深度地下へのアクセスは立坑が用いられるものと考えられる。これは斜坑にすると、浅深度地下部分が必然的に多くなり、用地取得などの問題が大きくなるであろうからである。しかし、大深度地下利用では地表の施設との総合的な連携が望ましく、従来のように公共用地の下を適切に利用するなどのことによって、アクセスを合理的に行うことが望まれる。

斜坑の建設技術としては、山岳工法による斜坑の建設とシールド工法によるものがある。山岳工法による斜坑の建設は立坑の場合と同様である。従って、シールド工法によって斜坑を建設することになると考えられるが、急勾配のシールドの経験は多くはない。しかし、27%勾配の泥水シールドの実績があり、シールド工法による斜坑の建設には大きな問題は少ないのではないかと考えられる。

立坑の建設には大きな工期と費用がかかることから、アクセスの手段としてシールド工法による斜坑は積極的に利用して行くべきであると考えられる。また、大深度地下へのアクセスを民間建物などの施設と一体的に建設することも、総合的な地下利用としては望ましい方向であるが、公共性の認定や所有権との関連などで難しい問題を惹起することも考えられる。

(2) トンネル建設技術

大深度地下利用で適用できるトンネル工法には、シールド工法、山岳工法がある。大深度地下利用制度が考えられるようになった背景にはシールド工法によるトンネルの建設技術の進歩があったとみなすことができる。シールド工法は大深度時下利用制度の中核技術と位置づけることができる。

我が国のシールドトンネルの技術は、厳しい施行条件下における軟弱地盤のトンネル建設工法として発達したもので、地盤の変状に与える影響、地下水に与える影響を最小限に抑制することが重要な目標として、技術開発が進められたものである。これは大深度地下利用において要求される建設技術そのものであるとも言える。

厳しい条件に適合するためのシールドの中核技術は、泥水式や土圧式のような密閉型シールドの開発による切羽の安定化、同時裏込注入などの注入方式及び注入材料の改良、水膨張性シールの開発などの止水方法の改良、セグメント及びセグメントの組立精度の改善、シールドの制御機構の自動化およびそのノウハウの蓄積によってもたらされたものである。

現在のシールドの施工技術は、大深度地下利用の要求に応えるレベルに達していると云えるであろう。すなわち、断面では東京湾横断道路などで径 14m 級のものが着実に施行され、水圧では横浜市今井川調整池で約 8kgf/cm² の実績があり、長距離掘進では横浜市新羽末広幹線で約 4.5km が掘られている。テールシールなどの耐圧性能は 10kgf/cm² 程度まで十分に対応できると考えられている。大深度地下利用では、その性格から今まで以上の長距離掘進が要求されることになる。カッターの寿命は掘削する地盤に大きく左右されるので、摩耗質の地盤、特に礫質の地盤での長距離掘進に対する対策は十分に検討しておくことが必要である。また、長距離、高速掘進に伴い、掘削された土砂の運搬、処理が工程を左右する要素となることが考えられ、この面からの検討も必要である。

シールドの構造面では、大深度地下においては、地盤の固結度が高くなりセグメントに作用する土圧の成分が小さくなり、水圧の成分が卓越することになるのでセグメントの設計は楽になる側面がある。しかし、10kgf/cm² の水圧はセグメントに非常に大きな軸力を発生させることになり、水圧を構造体に作用させる限り、構造的な限界に近く、大深度地下利用における深さの限界を規定する拘束条件になるものと考えられる。より深いところを利用するのであれば地下水の制御技術を検討していくことが必要になる。大深度地下制度では、将来地表に建物が造られることを考慮して、30tf/m² の増加荷重に耐えうる構造にしておくことが要求されている。この 30tf/m² の増加荷重はどの位置に作用させるかは正確に規定されてはいない。この増加荷重の性格は、理論的には地表面に建物が隙間なく立つことを想定しており、深さによる荷重強度の減衰は考えることが出来ないことになる。しかし、制度が想定するような建築物の建設は、都市計画法や建築基準法の制限を考慮すればあり得ないことであり、増加荷重を設計にどのように現実的に組み込んでいくかは重要な検討課題である。建物の建設がなされる時点で必要に応じてトンネル構造体の補強を行うことが出来る構造を採用するなどの手法が現実的である可能性が高い。

大深度地下利用のためのトンネルの工法として山岳工法が考えられる。山岳工法は、シールド工法に比べ工事費が少ないという利点がある。大深度地下では地盤の固結度が高くなるから、山岳工法を適用できる可能性は大きい。しかし、山岳工法では地下水はあらかじめ処理し、切羽の安定性を高めて掘削することが基本である。大深度地下利用では地下水に出来るだけ影響を与えないことが要求されるから、単純に山岳工法を適用することは出来ない。地下水に有害な影響を与えないよう十分な検討を行い、必要な場合には、リチャージなどの対策を行いながら工事を進めることが必要となる。工事が地下水に与える影響の解析の方法や対策は今後さらに精度や確実性を向上させるなどさらに検討を進めるべき課題である。また、地下水の影響に関してはただ単に地下水を現状のままに保つと云うことだけではなく、都市という環境において地下水にどのような影響を与えることが望ましくないのかというような評価も必要であろう。山岳工法を適用することによって問題を起こした例もあるが、従来、多くの山岳工法が都市部でまた山岳地域で適用されてきた実績

を考えていく必要がある。

(3) 拠点施設の建設技術

鉄道における地下駅、将来利用が考えられる地下物流システムのデポあるいは水処理施設などの拠点的な施設は大きな空間を必要とする点的な施設である。地表に近い部分におけるこれらの空間は通常、開削工法によって作られてきた。しかし、大深度地下では開削工法によって造ることは困難である。これらの拠点的な施設は断面が大きいと云うことのみでなく断面が複雑であったり、変化するなどの特徴を持っている。

拠点的な施設の建設には、断面の変化に適応が容易で、切羽の分割施行などによって大断面の掘削が可能な山岳工法の適用がまず考えられる。山岳工法では地下水が問題となるから、地下水に対する影響の検討を行い、地下水制御工法や注入工法あるいは凍結工法によって問題が生じないようにすることが必要である。補助工法の比重は大きくなるが、現在の技術でもこれは十分可能である。

より確実に安定的に拠点施設を建設するための工法として、通産省の研究としてジオドームの建設を中心とする一連の研究が行われた。規模は縮小されたが、スパイラルトンネルによる地盤の補強や水中掘削、水中覆土工技術などの開発検討が行われている。

また、現在首都高速道路公団で試験工事が行われている、小さな断面のシールドを積み重ねてトンネル構造体を構築する MMST 工法は、大深度地下における拠点施設の建設方法として十分な可能性を持っている工法である。

このように、拠点的な施設の建設は現在の技術でも十分可能であるが、堅岩における地下発電所などの地下空洞の建設とは違って、強度的には必ずしも十分でない大深度地下空間での地下大空洞の建設は、経験の乏しい領域であり、さらに検討を進める必要がある。

5、大深度地下空間における安全

大深度地下空間の安全の問題は、建設時と供用時の問題がある。建設時の問題は山岳トンネルの施行での経験あるいはシールドトンネルの施行の経験が直接参考になり、大深度地下利用が想定している深さでは十分多くの経験が積み重ねられている。

供用時の安全は、施設の性格によって異なる問題が提起されることになるが、基本的には無人あるいは有人であっても、点検や管理等のために訓練された職員が入る施設と不特定多数の人が利用する施設では異なった対応が必要である。前者では訓練やそれぞれの施設特有の危険性に対する知識を持つことによって安全性のレベルを保つことが可能であるが、後者の場合は、特別な知識のない一般の人々が異常な事態に遭遇した場合に、安全に避難することが出来るようにすることが必要である。また、救助体制を整えなければならない。

地下で想定される異常な事態としては、火災・爆発、浸水、停電、地震及び各種の設備の故障などがある。これは施設が浅い場合でも大深度の場合でも基本的には同じである。施設が浅い場合と大深度の場合との大きな差は、異常な事態が生じ避難しなければならなくなった時の移動の高低差の大小である。すなわち、深さが大きくない場合は、人力のみで避難できる場合が多いのに対し、大深度地下では一般にその限界を超え、機械力に依存するか、あるいは、特別に安全な空間を準備するなどの対応が必要になってくる。いずれにしても施設、機械設備に依存する度合いが大きくならざるを得ない。従って、異常な事態が生じたとしても、その区画を限定し、他の設備は正常に稼働するような冗長性の高い施設、設備が必要になる。また、状況の把握や情報の伝達も重要な役割を担うことになる。これらのことは、問題点を認識すれば、施設や設備の設計および管理で対応できる問題である。しかし、類似の経験は少なくないものの、大深度における直接的な経験は殆どなく十分な検討と慎重な対応が必要である。

大深度地下では今までの経験から地震の影響は小さく、影響は考慮しなくて良いものと考えられる。しかし、必ず地表とのアクセスがあり、この部分での考慮は必要である。これについては、浅深度での設計法が

適用できる。大深度地下で検討が必要となる地震関連の事象としては、地下水圧の増加の影響が考えられる。大きな地震の時には覆工から地下水が噴出する場合があることが経験されている。

地下空間では、停電は致命的な影響を与える可能性のある異常である。このため非常用電源や2系統受電などの措置がとられており、大深度地下利用ではこの重要性が格段に高くなることを認識することが必要である。

6、環境問題

地下の利用は環境問題の主要な解決策の一つであり、適切に利用することによって良好な都市環境を維持・改善することが出来る。地下を利用することによって新たな環境問題が生ずるようなことがあつてはならない。調査会の設置法においても安全の確保と環境の保全について特に配慮しなければならないとしている。経験の少ない事項を検討するにあたって当然のことである。

地下空間を利用することによって生ずる環境への影響としては、地盤の変位、地下水への影響、動植物への影響、工事中の騒音・震動、掘削した土砂の処理に関連する問題などがある。工事中の騒音・振動、掘削した土砂の処理、動植物への影響については山岳トンネルでの経験から多くの知見を得ている。大深度地下利用で問題となるのは都市という環境の中での地下水に与える影響とそれがもたらす地盤沈下などへの効果であると考えることが出来る。これらについても浅深度地下での経験は豊富であり、問題点を認識することによって対応が可能である。経済性あるいは合理性を考慮しなければ、基本的には地下水に有意な影響を与えない工法を選択することが可能である。このように、大深度地下利用に伴って生ずる環境上の問題は浅深度の場合と大きく異なるものではないと考えるのが妥当である。

大深度地下を利用するにあたって、地下に構造物を設けることによる周辺地盤に対する熱的な影響やそれに伴う微生物への影響あるいは地下水の移動に伴う酸素の供給による化学反応などの問題も地盤の条件によっては考えられる。熱の問題は地中に熱を蓄える試みが外国で行われている。熱の貯蔵は大深度地下利用の形態の一つになる可能性がある。これは将来、トータルな規模での環境問題の解決手段となり得るものとみなされる。地盤の条件や利用の方法などによって検討しなければならない問題が残されていると考えなければならない。

このように、大深度地下では経験が少ないことや新しい利用が考えられることから、十分な知見が得られているとは云えない。従って、答申では、『大深度地下に施設を建設した際の影響については、個々の施設毎に詳細な調査、分析を行い、計画、設計、施工、供用・維持の各段階で対策を検討しつつ実施することが必要である。特に大深度地下においては、供用中においても、継続的にモニタリングを実施する等により、基礎的なデータを蓄積し、環境への影響の発生を早期に発見するための努力を積み重ねていくことが求められる。』としている。

また、『環境影響評価制度を事業者が積極的に活用することにより、環境への影響が著しいものとならないことを示しつつ、地域の理解を得て、大深度地下利用を進めることが期待される。』とし、環境影響の検討が事業を進めるにあたって重要であることを示している。

参考文献

- 臨時大深度地下利用調査会 「臨時地下利用調査会答申」 平成 10 年 5 月 27 日
臨時大深度地下利用調査会 「臨時地下利用調査会答申（資料編）」 平成 10 年 5 月 27 日
日本トンネル技術協会研究開発委員会大深度地下利用技術調査幹事会 「大深度地下利用技術調査中間報告書」 平成 9 年 3 月
国土庁大深度地下利用研究会 「大深度地下利用の課題と展望」（臨時大深度地下利用調査会答申の解説）」
ぎょうせい 平成 10 年 10 月