

地下空間利用



今田 徹
顧問

1. 人は地下空間を使ってきた

地下空間は人類の出現とともに利用されてきた空間である。ラスコーの洞窟壁画などで知られているように、原始人は天然の洞窟を利用した。何時頃から天然の洞窟ではなく人工的に地下空間を造って利用するようになったのかは確かめようがない。紀元前2000年頃から人工的に地下空間を造ったという記録や遺構が見られるようになる。このころには英国には火打ち石の鉱山が存在したと考えられているし、ミケーネ時代のアテネでは公共上水道が存在していた。古バビロニア王国 ハンムラビ王（BC1728-1686）のときには、ユーフラテス河をはさんで建てられた王宮と神殿を結ぶ925mの水底トンネルが河を横断して建設されたことをヘロトダスの史書はつたえているという。現在残されている古い時代の地下空間利用は、神殿や墳墓など宗教目的や為政者の権威を示すものが多いが、上水道や下水道など市民生活を支える公共施設として利用されたと考えられるものも少なくない。ギリシャ、ローマ時代には水源の確保や灌漑のため大規模な公共工事が行われ、多くの水路トンネルが建設され、また、道路トンネルも建設されている。

西ローマ帝国の崩壊後、中世のヨーロッパでは注目すべき地下利用は見られなくなるが、ルネッサンスの始まりとともに社会、経済活動は活発化し地下利用も復活する。ルネッサンス以降の地下利用は社会インフラ目的のものが殆どとなり、地下空間が持つ現代的な性格が明確に示されて行くようになる。1370年にはペストの大流行をうけてパリ、モンマルトルには下水道が整備された。なお、パリの環状下水道が整備されるのは1740年である。ロンドンでは1832、1849と1854年にコレラが大流行し、テムズ川の82マイルに及ぶ流域下水道が1865年に完成している。下水道の整備は市民生活の衛生状態を改善するのに重要な役割を果たした。1450年にはニース、ジェノバ間

のテンダ峠にトンネル建設が始められた。これは近世トンネル工事の復活と位置づけられるものであったが、完成することはなかった。後の1882年、この峠には最初のアルプス越えの長さ3182mの道路トンネルが完成している。物の移動が活発化し舟運が重要になると運河の建設が盛んになる。1679年にはフランスのラングドック運河の建設でマルパストンネル（L=157m w=6.5m h=8）が造られた。これを初めとして多くの運河用のトンネルが18世紀から19世紀かけてフランス、イギリスを中心に造られた。1856年にはイギリスで45トンネル合計67Km、フランスでは22トンネル、28.5Kmの運河トンネルがあったという記録がある。蒸気機関車が発明され、1825年にストクトン―ダーリントン間の鉄道で使用されると、その利便性から鉄道が急速に発展することになった。それに伴い多くの鉄道トンネルが建設された。1857年にはモンズニートンネルの建設が始まりアルプス越えの長大トンネルの建設も進められ、このころ削岩機、ダイナマイトが発明され、トンネル技術が急速に発展することになった。20世紀にはいると自動車の時代を迎えることになり、道路トンネルの建設が進められる。モンブラン道路トンネルの着工は1959年であるから、アルプス越えの本格的長大トンネルの建設という点で見ると鉄道に約100年遅れて道路トンネルの建設が進められようになったということになる。

人は様々な形で時代とともにその時代の必要性や当時利用できる技術を用いて地下空間を利用してきた。19世紀の半ばまでは鑿とハンマーで掘削するという素朴な技術しかなかった。技術が殆どない時代に地下空間を設ける作業はきわめて困難であったことは容易に想像できる。それでも人は困難に打ち勝ち地下空間を利用してきた。地下空間の利用には困難に勝る価値が存在することは明らかである。地下空間はこれからも人の生活のために状況の変化に応じていろいろな形で利用されていくものと考えられる。

2. 地下空間利用の動向

地下空間がどのように利用されるかはその時代の社会の

要請、その時代を生きる人々の考えに全面的に依存している。飲み水を得るための、あるいは、灌漑のための水路を造るのに、また、為政者の権威を示すのにも使われた。しかし、近世以降の地下空間は人の生活を豊かにするための社会基盤施設が殆どである。

現在、何が地下空間に望まれているかを把握することは容易でない。価値観が多様化している現在にあっては特にそうである。従来型の地下利用はトンネルとしての利用、すなわち、通路あるいは管路としての利用が大部分である。多くは山地などの地形的な障害を克服するためにトンネルが設けられた。近年のように都市が発達し、人々の権利意識や環境に対する意識が高まると、都市自身が都市施設を整備するための障害物となり、それを避けるためにトンネルを設けるようになってきている。また、下水道のように必然的に地下に位置することになる施設もある。

いろいろな使われ方をしてきた地下空間であるが、従来型の利用は今後もなされていくことは当然として、新たな地下空間の利用は、都市というキーワードと環境、エネルギーという制約条件の下で考えていくことが必要である。また、我が国が現在直面する問題としては、少子、高齢化の進行、人口の減少、経済の成熟化、大国際競争時代、安全・安心などのキーワードがあげられている。これらのキーワードが時代の要請であり、この下で方向付けがなされることになる。

一方、これらのキーワード以前の問題として、我が国の多くの都市では都市機能が充足されているとは言い難い。戦後我が国では、農村から都市への著しい人口の移動が起こり、都市が無秩序に発展し、都市施設の整備が遅れ、都市の利便性が損なわれるとともに、都市環境の悪化を招いてしまった。いわば前世紀の問題も解決されていない状態である。都市再開発が叫ばれるのも景観法が定められたのも都市の劣悪な環境を示しているにすぎない。都市問題に対処するには、都市のあり方に対するビジョンをしっかりと持つことが必要であり、これがなければ従来の轍を踏むことになる。

都市の形成は土地政策によって多くが決定される。しかし、地下利用との関連において土地政策が論じられることはほとんど無かった。政策の基調は土地の供給をいかにし

て増やすかであったため、都市は拡大の一途をたどった。もちろん、線引き制度により、発展させるべき区域と市街化を抑制すべき区域を区分し、無秩序な都市の発展を避ける努力がなされたが、現実には現状の都市が出来上がってしまった。都市の骨格となるべき都市施設の整備は遅れ、特に環状道路の整備は遅れることになった。

都市施設の整備が遅れてしまったのは、無秩序な市街化に伴う小市民的意識と土地の持つ社会性の意識が希薄な我が国特有の土地所有概念および環境に対する意識の高まりが大きく関係している。土地の取得や関係者との合意形成に多大の時間と労力を必要とするようになってしまった。

これに対する危機意識は、土地所有者が通常使わない深い地下を都市整備の空間として利用しようとする動きとなった。こうした動きは高度経済成長期末期の1980年代の後半から見られるようになる。1988年に「大深度地下の公的利用に関する制度を創設するため、所要の法律案を次期通常国会に提出すべく準備を進める」と閣議決定された。こういう考え方が示されると、ジオフロントという言葉が出き、このキャッチコピーのもとに1989-1991年にかけて多くの地下利用構想が提案され、夢が描かれた。しかし、この閣議決定は頓挫し、経済状況の悪化とともに関心が薄れて行くことになった。しかし、地下利用の必要性は変わるわけではなく、1995年に議員立法として「臨時大深度地下利用調査会設置法」が成立し、法制化に向けて再スタートした。技術、法制上の検討を経て2000年5月に「大深度地下の使用に関する特別措置法」（以下大深度法という）として懸案の大深度地下法は成立し、2001年4月から施行されている。これにより都市においては、土地所有者が通常利用しない深い地下空間は、土地所有権とは切り離して、法で定める公共、公益事業者が国土交通大臣または都道府県知事からの使用の認可得て使用できることになった。都市の深いところの地下を、望ましい都市の形成のために、従来より容易に使用することの出来る制度ができあがった。言い換えれば、都市整備にあたって、地下をどのように使っていくのがよいのかという課題を与えられたと考えることができる。

都市において、地表と地下をどのような役割分担で使うかという問題は容易に解決される問題ではないことは



明らかであり、多くの議論が必要であろうが、地下でも差し使えない施設は地下に入れ、アメニティーに優れた人間活動の場を地表に最大限求めるという考え方は方向として間違いないと思われる。

地下を大胆に利用した事例として、米国のボストンのセントラルアーテリープロジェクトがある。ボストンの市街地を南北に州際道路93号線が高架道路で通過している。この道路は1959年に開通したが、グリーンモンスターと呼ばれ、都市の景観を醜いものにし、ボストンの北部とウオーターフロント地区をボストンの中心部と分断してしまうことになった。このため、交通量の増加に伴う改築を行うにあたり、現在の6車線を10~8車線にして地下化する計画が実施された。全体のプロジェクトは93号線の地下化を中心に二つの橋の建設、空港に通じる新しいトンネルの建設などを含むボストンの交通体系の改善を目指すものになっている。この構想は1980年代の初めに出され、マサチューセッツ道路公社が企業主となり、連邦政府道路局および州の認可を得て、1991年に着工した。1999年から完成部分が順次供用され、地下化部分は2003年に供用されている。工事は既存の高架道路の除去を含めてこの秋完成の予定である。地下化の結果、交通の渋滞解消、12%の排出ガスの低減など直接的な効果のほかに、高架道路跡地として約11万m²のオープンスペースを生み出し、都市景観の改善、地域分断の解消がはかれることになった。また、掘削土砂を埋め立て等に利用して合計約100万m²の広大な土地を造りだした。工費は当初約3500億円であったが最終的には1兆6千億円に達した。

この計画がなされる以前高架道路の拡幅工事が1970年に行われたが、住民の大反対に遭い1972年に中止を余儀なくされるという経過を経ている。このような背景から高速道路の渋滞解消策として地下化が有力な選択肢とならざるを得なかったものと思われる。高架道路の果たしている役割や機能は別として、グリーンモンスターと呼ばれる地域社会あるいは都市として望ましくない存在を目の前から出来れば除きたいという市民の素朴な気持ちがこの計画を実現させたと考えることが出来る。一つの地下利用の考え方が示されていると考えることが出来るであろう。

環状道路の整備はパリ、ストックホルム、マドリッドな

ど多くの都市で進められている。最近の都市道路の整備では、トンネル形式が採用されることが多い。ここであげた3都市の環状道路でもトンネル構造が主要な構造形式として採用されている。マドリッドのM30計画（Madrid Calle 30）は都市再生計画の中で既存のM30を改築するもので、主要な部分を地下に配置し、アスファルトで覆われた部分を、緑の公園、歩道、自転車道路、新たな住宅に変えようとするものである。全長99Kmのうち56Kmがトンネルである。環境問題を重視する動きが道路の地下化の主要な原動力になっている。また、トンネル技術の進歩により、トンネルの建設が容易になってきていることも地下化の決断をしやすくしているものと考えられる。マドリッドの環状道路M30は現在工事中であるが、外径15m級の土圧シールドが2機用いられ、最新の技術でトンネルが建設されている。

都市では鉄道が約100年前から地下化され、地下鉄という都市交通体系が形成されている。地下鉄は主に道路下を利用して鉄道を建設するという環境問題とは別の理由で地下化が進められたと考えることが出来るが、環境の面でも優れた存在であり、都市における交通体系としてなくてはならないものとなっている。地表にある必要のないものは地下を利用するという点で見ると、地下鉄はこの考え方を具現化してきた代表例と見なすことが出来る。もちろん、地下鉄は市街化されたところに後から建設しなければならなかったため、地下以外の選択肢がなかったといえるが、用地費を含めた建設コストは、道路下を使用することによって、地下化することによるコストの増加を受け入れられる範囲にとどめることが出来たと考えることができる。

道路は鉄道とは異なり、住居と接した生活の場そのものであり、また、オープンスペースを提供するものであることから、基本的に地下化になじまない性格を有している。しかし、道路も生活の場としての道路と幹線として自動車交通にひたすら用いられる道路があり、後者は生活の場の構成要素というよりも、分離して専用化できる種類の性格を持つ施設と見なすことが出来る。都市では専用化出来る道路は高架構造を用いて機能の分離が図られた。高架構造が用いられたのは、コストの問題と道路は地表に設けるのが常識と考えられていたためである。道路を

地下に入れるという発想はなかったし、地下道路を収容できるような規模の道路は殆どなかった。また、自動車は排気ガスを出すので地下道路では換気設備が必要であり、維持費も要するので、トンネル構造はできるだけ避けなければならない状態でもあった。したがって、幹線自動車道路という環境に大きな影響与える施設が、地下鉄のように地下化されることはなく、環境問題で地域の居住者との間で摩擦を起こすこととなった。近年ではボストンのように既存の道路であっても地下化が進められ、環状道路の建設では地下化が現実的には唯一の選択肢になってしまっている。この流れの中には、従来のコスト優先の考え方から、環境に配慮するという考え方に変わり、社会もこれを認める余裕を持つことが出来るようになったと見る事ができよう。また、排気ガス規制の強化やトンネル技術の進歩によって、地下道路の建設は従来と比べて格段に受け入れやすいものになっている。

環境とともに安全・安心はいま求められている大きな課題である。都市化により都市河川は流出のピークが大きくなり、河川の改修が必要になってきている。また、雨の降り方も変化してきているようにも思える。都市では河川の拡幅のために用地を求めることは難しく、その解決策として、道路下の地下を利用した環7地下河川、東京外郭放水路、平野川地下河川などの地下河川ないし貯留施設の建設が多く進められるようになってきている。地下河川は都市河川の改修方法として一般化している感がある。地下河川の多くは道路下に設けられているが、大深度地下を利用することによって計画の自由度がより大きくなるものと考えられる。

安心・安全にとって震災対策は重要な項目である。地下構造物は耐震性が高いことが過去の地震の被害状況から明らかになっている。都市のライフラインの幹線は重大な損傷を被らないようにしなければならない。共同溝は道路の掘り返しの防止を目的として設けられた制度であるが、ライフラインの耐震性の強化という面での効果は大きい。共同溝は都市生活を地震から守るという視点で積極的に造って行く必要がある。

都市景観の保全は地下空間利用の大きなインセンティブになりつつある。高架構造物を避けるという動きは都市の

景観の点からも自然なものと考えられるが、都市を取り巻く山並みの眺望を確保する、あるいは、歴史的景観を新しい建物が破壊することがないように建築物の高さを制限し、必要なスペースは地下を利用して確保する試みがなされている。これは日常生活の場を地下に求めるということであり適切なことであるかどうかは人によって判断が分かれるものと思われる。しかし、自然光を出来るだけ取り入れる試みなど多くの工夫がなされている。

3. 地下空間利用の形態

地下空間は今後多様な目的で使われていくものと考えられる。従来の利用は線的な構造すなわちトンネルとしての利用が多かった。トンネルとしての利用は地下利用の基本であるが、地下利用が高度に進むとトンネルとトンネルの結節点が必要となる。たとえば、地下道路の分岐合流部、あるいは、鉄道の駅部などがそれにあたる。結節点は当然規模が大きくなり大断面の空間を必要とするが、その広がりも点的であり、拠点的な利用がなされる。地下空間はトンネルすなわち線的な構造と接合部である拠点的な構造でネットワークが構成される形態が一般化するものと考えられる。備蓄設備あるいは下水処理場のプラントなどに利用する場合は拠点的な空間が主構造を構成することになる。拠点的な地下空間の形状は断面が変化する複雑な形状になることが多く、また、ドーム状などの形態になることが考えられ、拠点的空間の建設方法はトンネルの建設方法とは違った特別の方法が必要となる。

地下空間へのアクセスは重要な検討項目である。利用深度が浅い場合は立坑が設けられるのが普通である。しかし、立坑の構築には多くの工期、工費を必要とし、改善の必要性の多い工種である。大深度となればより合理的なアクセス方法を検討する必要がある。

4. 地下空間建設技術現状と課題

我が国の都市は沖積層あるいは洪積層などの軟弱な地盤

や強度の小さい地盤の上に展開されている。このため都市における地下空間の構築には、軟弱地盤に対応した建設技術が必要である。シールド工法は軟弱地盤に対するトンネルの工法として発展した工法である。シールド工法は19世紀の初めに発明された工法で180年の歴史を持つ。考え方はシールドと呼ばれる頑丈な枠をジャッキの力で地山に押し込み、その枠の保護のもとで覆工を構築し、トンネルを完成していくというものである。1825年にテムズ川の川底のトンネル建設に使われたが、工事は出水事故に遭い大変な苦勞の末に16年の歳月をかけて完成した。枠を地山に押し込んでその保護のもとで覆工を構築することによって横断面としての安定を図ることが出来たが、切羽鏡面の安定は図ることができず、地下水の侵入を許し切羽を崩壊させてしまったためである。この問題を解決するために圧縮空気を切羽に作用させ、地下水の侵入を防いで切羽の安定を図る圧気シールドが考え出された。この技術は19世紀の末にはほぼ一般的に使用されるようになり、20世紀の中頃まで使われた。しかし、圧気工法は潜函病、噴発などの危険性があるほか原理的に切羽の安定化には問題があるという欠点を持っており、厳しい条件の下での使用には問題があった。1960年代に入ると、この問題を解決すべく、日本、フランス、英国、ドイツで研究が開始され、豊富な工事量のもと、日本が世界をリードすることとなった。具体的な技術としては、シールドの前面をバルクヘッドで仕切り、切羽の部分のみに圧力を作用させる密閉型シールドとすることである。切羽に圧力を加える媒体としては泥水と泥土が選択され、泥水シールド、土圧シールドと呼ばれるシールドが開発されることとなった。土圧シールドは我が国で開発された技術であり、現在は世界で広く使用されるに至っている。密閉型シールドの開発によって長年の懸案であった切羽鏡面の安定の問題が解決され、シールド工法は完成度の高い軟弱地盤のトンネル建設工法として発展した。1997年に開通した東京湾アクアラインはシールド技術の集大成と位置づけることができる。現在シールド技術は密閉型シールドの基本技術を応用して、楕円、矩形、重複円シールドなど多様な技術が開発されるようになってきていると、ともに新たなニーズに対応する努力がなされている。

現在のシールドの課題は大断面化、長距離化、高速掘進である。大断面化は道路の地下化に対応するもので、3車線道路を建設するためには径16-17mのシールドが必要となる。検討の結果では地質にもよるが、17m程度のシールドは可能であるという結論になっている。長距離化は我が国のシールドの掘進長は1Km程度が多かったのに対し、より長距離化を目指し、経済化を図ろうとするものである。比較的掘進長が短かったのは駅や入出路の設置など計画上の理由が主なもので、計画上の問題である。機械の施工能力の点では余裕を持っていたと考えられるが、より長距離化を目指すため、地中でのビット交換システムの開発、テールシールの耐久性の検討など行われ10Km程度は目標とすることができるようになってきている。高速掘進は長距離化に伴う工期の長期化を避け、経済性を確保するものである。シールドの高速化には、セグメントの組立と掘進とを同時に行う方法、セグメントの組立方法を工夫してセグメントの組立時間を少なくする方法があるが、後者の方法で小口径のシールドでは月進500mを目標として、最高速度ではその倍程度の実績を得ている事例も出てきており、高速化も進んでいる。都市部では掘進速度を規制する要因はすり出し量であることが多く、効率的なすり運搬は重要な課題である。

密閉型シールドは地下水に影響を与えることがほとんどなく、また、切羽を安定化させることによって地盤の変位を最小限に抑えることができ、都市トンネルの殆どのニーズに対応できる技術となっている。

駅部や道路の分岐合流部などの拠点的な施設では単路部のトンネルと違い超大断面となる。また、断面が変化する複雑な形状となる場合もある。特に、道路の分岐合流部では柱を立てることができないため、幅25-30m程度の超大断面空間となってしまう。この規模の地下空間を弱い地盤の中で建設した経験は乏しく、十分な検討が必要である。拠点的な施設の規模としては当面道路トンネルの分岐合流部規模の建設ができれば他の用途においても対応できるものと考えられる。分岐合流部の建設方法としては、山岳工法、本線部と分岐部のシールドを繋ぎ合わせる方法、小規模のシールドを積層して外郭を形成する工法が考えられている。

山岳工法は変断面の場合でも容易に適用でき、分割施工することによって大断面にも対応可能であるが、地下水に影響を与える可能性が大きいこと、地盤変位に対しては大掛かりな補助工法を必要とすることなどの問題がある。特に、都市トンネルでは固結度の低い地盤が対象となることから、補助工法には慎重な検討が必要である。地下水に対しては注入や凍結工法の適用が考えられ、地盤変位に関しては、通常先受け工ではなく、横断方向に荷重の支持能力のある曲線パイプルーフの適用が必要であると考えられる。曲線パイプルーフの施工にはあらかじめパイプルーフを施工するための導坑が必要であり、規模が大きくなってしまふ。いろいろな案があるが曲線パイプルーフを地盤改良に利用するなどの案が考えられている。

本線シールドと分岐シールドを繋ぎ合わせる工法は地下鉄の駅部の建設に用いられていた‘かんざし’桁工法を拡張する考え方である。この工法でも切広げに際しては地山が露出されることになるので地下水への対応策が重要であり、また、構造的には非常に横長の構造となり、かんざし桁部分の構造が大規模なものとなる。この部分の設計が難しく、大きな桁を設置する方法、シールド部を利用できる空間を利用してトラス構造とする方法、アーチ構造として少しでも構造的な合理性を持たせようとする方法、コンクリートを充填し合成構造としようとするものなど多くの提案がなされている。セグメントと桁部分の接合部には大きな断面力が働くことになり細部構造についても十分な検討が必要である。この工法は形状的に地山自身が持つ安定化効果を取り入れることが難しいこと、水圧に対して不利な形状とならざるを得ないことなど、深い場合は地下構造物として無理な点がでてくるが、最も小さい断面で対応できるという点では有利である。

小さなシールドを積層して地下空間の外郭を構成し、その後、内部の土砂を取り除く工法は、川崎縦貫線で用いられているMMST（マルチ・マイクロ・シールド・トンネル工法）や米国シャトルのマウントベーカーリッジトンネルで採用された工法である。個々の小トンネルはコンクリートで充填されトンネル構造体を形成する。縦断方向に小トンネルを並べることになるので、通常、施

工には立坑が必要であるが、深さが大きくなると立坑の構築は難しくなり、この工法のネックとなる。しかし、最近のシールド工法は小さな曲線半径に対応することは容易になっており、反転して次の小トンネルを掘削することは難しいことではない。立坑を造らないで済ませることができれば施工を単純化でき工期、工費の節減が可能となる。検討すべき課題は残されているが、積極的に取り組むべき方法である。シールド工法は完成度の高い工法であり、小トンネル積層工法のように、シールドを基本要素として大きな構造物を構成して行くという方向は応用範囲が非常に大きいものと考えられ、これからの大きな役割を果たすものと期待される。

アクセスのための構造は、立坑の構築方法に工夫を加えることは当然であるが、斜坑の利用など計画上の工夫が重要になるものと考えられる。

5. おわりに

都市再生が叫ばれる中、これからの都市の姿をどのようにしていくかは重要な課題である。都心にマンションが多く建設される状況を見ると、都市問題が更に深刻化するのではないかと懸念される。都市のあり方についてはいろいろな考え方があるものと思われるが、人が住みやすい機能的で美しい都市としていくことが基本であり、環境やエネルギーの問題を考慮すれば、オープンスペースを持ちながら、よりコンパクトな都市を目指すことになるのではないかと考えられる。この場合、都市の地下を地表の計画と共にどの様に使うかが、すでに多くの問題を有している多くの都市では重要になってくるものと考えられる。

都市の地下空間構築技術はシールドの技術を中心に発展し、多様な条件に適應できるようになっている。地下空間の建設には多額の費用がかかるが、地下空間には費用では評価できない多くの利点がある。地下空間利用を単に工事費で評価するのではなく広い視野で判断することが必要であり、また、技術者には地下空間がより受け入れやすいものとなるよう努力することが求められている。