

## 都市トンネル技術の現状と技術開発

今田 徹

国土技術研究センター  
技術顧問



### はじめに

国連の DESA・Population Division の都市化予測 2009 年改定版によると、2009 年の中頃に世界の都市の人口は 34 億 2 千万人となり、都市以外に住む人口 34 億 1 千万人を超えた。報告では、世界は田舎というよりも都市となったと表現されている。2050 年までには都市に住む人口は 84% になるものと予測されている。また、今年の 5 月の発表によると、現在約 70 億の世界の人口は中位の予測で 2050 年には 93 億人、2100 年には 100 億を超えるということである。今世紀の中葉には現在の 70 億の全人口が都市で生活するようになるかと予測されている。都市には非常に大きな負担が掛かることが明らかである。

都市化は産業革命以降 19 世紀、20 世紀を通して現在も続き、変えようのない大きな流れである。過去の都市化の過程では都市基盤施設の整備が人口の増加に追いつかず、環境の劣化や都市機能の低下をもたらし、都市化は大きな問題を提起し続けてきた。都市には、安全な水、確実なエネルギー、下水道の整備等による衛生的な環境、円滑な交通施設、安らぎのある美しい景観が必要であり、また、何よりも都市は地震、洪水などの自然災害に強いものでなければならない。これらの条件は多くの都市で現在でも充足されていないのが実情であろう。成熟度が高いと考えられる欧米の諸都市でも、都市基盤の整備は精力的に進められている。たとえば、ロンドンでは Cross Rail と呼ばれる計画が進行中であるし、パリでは A86 の整備、CDG 空港高速鉄道計画、ニューヨークでは水道トンネル NO.3 計画が延々と進められ、最近頓挫しているようであるが ARC と呼ばれる大規模な鉄道の改良計画がある。我が国ではやらなければならないプロジェクトが多くある中で整備が停滞している感があるのは残念なことである。都市の整備は長期の計画に基づいて着実に実施されなければならない。我が国においては、事業が停滞する中で、技術のレベルを維持、発展させていくことが難しい状況に陥っているように思われる。今後の世界人口の動きは、発展途上国での都市化が著しい速さで進行することを予測させるが、グローバル化の中で、我が国は今までの経験を最大限に生か

し、計画的でより良い都市が形成されるよう世界に貢献して行くことが求められる。このためには我が国が持つ高い技術のポテンシャルを維持、発展させることが不可欠である。

### 都市基盤整備のキーテクノロジーとしてのトンネルの技術

都市基盤整備には多くの分野に関わる技術が必要である。また、都市の規模や発展の段階によっても必要とする技術は違う。小規模な都市や発展の段階が初期の都市では平面的に展開する余地があり、ライフラインの規模も小さく、地下を利用する場合も高度な技術は必要としない。問題は、大規模な都市における整備である。巨大都市ではその発展過程においてまず面的に広がり、発展に従って、土地利用の密度が高くなる。また、当然、高度な社会経済活動が行われ、関係者の利害が複雑に絡み合い、合意の形成に時間を必要とする。用地の取得には物理的、社会的制約が多くなるのが普通である。その結果、巨大都市では、都市基盤を整備する用地の取得が困難になる。また、環境問題に関する意識が高くなり、現状の環境を保全したいという意識が強くなり、都市全体としては必要な事業であっても、地域の合意を得ることが難しい場合が増加する。また、歴史的な町並みの保全、都市としてのアイデンティティーなど文化的な資産の継承の問題なども都市整備にあつての重要な要素になっている。このような状況の下では地表に大きな改変を加える計画の実施は非常に難しい。これから発展する都市を含めて都市基盤の整備は常に後追いつきならざるを得ない特性を持っている。しかし、都市ではその発展と変化にあわせて都市基盤の整備を怠ることは出来ず、都市が本来持つべき機能を確保して行くことが必要である。巨大都市では都市を平面的なものから立体的な都市空間として見直し、都市のあるべき姿を描き、それに沿った都市整備を進めることが必要になっている。地表にあるべきもの、高層利用で可能なもの、地下にあるべきものあるいは地下にあっても差し支えないもの、それぞれの特性に合わせて、より良い都市空間を創造していくことが必要である。

従来地下空間の利用を難しくしていた理由は、地下空間を建設する技術が限られており、難工事になることも少なくな

く、非常に大きな工費を要したためである。しかし、工事費の問題を超えて、地下に設けるのが普通となった都市構造物がある。

最初に開通した地下鉄道は 1890 年に開通した City & South London Railway である。この鉄道は名前の通りロンドンの中心であるシティとテムズ川を挟んだ南ロンドンを結ぶ鉄道である。長さは 5.1Km で 6 駅が設けられた。当時のロンドン著しく人口が増加し、中心部に向かう交通手段が必要だったのである。当然、鉄道を設けるのであれば地表に設けるのが技術的には容易である。地下鉄道が選択されたのは、市街地が既に形成されたロンドンで、地表での鉄道建設が困難だったからである。都市基盤の整備はこの時代から後手に回っていたと云える。当時の鉄道は蒸気機関車に牽引されるものであり、地下鉄としての利用には問題があった。このためケーブルによって牽引する鉄道として計画が始められた。途中で最新技術である電気機関車を利用することになった。この鉄道はロンドン地下鉄北線の一部として現在も利用されている。

地下鉄としての建設が可能であった背景には当時のトンネル技術の進歩がある。1825 年に Brunel によって建設が始まり 1841 年に完成したテムズトンネル (Thames Tunnel、長さ 460m)、1870 年に開通したタワーサブウェー (Tower Subway) の経験を経て、トンネル技術が著しく進歩した。ここで、サブウェーの言葉が使われているが、これは現在の地下鉄を意味するのではなく地下歩廊の意味である。テムズトンネルはブルネルによって発明された世界で初めてのシールド工法によって建設された。出水事故や資金難など多くの困難に遭遇し非常に長い時間がかかることになった。Brunel のシールドは必ずしも工法として成功したものではないが、その発想はすばらしいものであった。この経験を基に開発されたのが、タワーサブウェーの建設に使用された Greathead シールドと呼ばれるシールドである。このシールドは円形で、覆工には鑄鉄製のセグメントが使われ、現在のシールドの原型と位置づけられるものである。同じテムズ川の河底を抜くものであるが掘削は 9 ヶ月という期間で完了している。City & South London Railway ではこの技術にさらに改良が加えられて使用されている。この地下鉄

(“Tube”) の成功によって、多くの地下鉄計画が提案され 1910 年頃までに 6 路線が開業している。地下鉄は道路の地下を利用することが出来るということもあって、都市での交通形式として確立され、パリ、ニューヨークなどの大都市で受け入れられ、現在においても都市の重要な社会基盤として建設が続けられている。地下鉄という構造形式が既成の市街地に鉄道による交通手段を整備する上で適した構造であったと言うことであり、これを可能にしたのはトンネル技術である。

地下鉄はその建設が車両を含めて技術的に可能になったのと同時にその形態が確立していったが、道路の場合は河川を横断する場合など特殊な状況の下でしか地下道路は検討されなかった。地下鉄の建設が盛んに行われた時期である 1908 年には本格的な道路トンネルである Rotherhithe トンネルが完成しており、地下道路を建設する技術は存在していたと考えることが出来る。

戦後本格的な自動車交通の時代を迎え、都市での交通問題が深刻化し、都市内に自動車専用道路が建設されるようになって、道路においては地下鉄のような動きはなかった。道路ではアンダーパスように局部的なものを除いて高架構造という形式が採用された。高架道路を地下化したことで有名になったボストンの Big Dig の高架道路も、また、現在地下化が進められているシアトルの Alaskan Way Viaduct と呼ばれる高速道路も戦後計画、建設されたものであるが、地下道路として建設するという発想は見つけることは出来ない。

これは、道路は鉄道に比べて規模が大きく、また、自動車からの排出ガスに対応するため大規模な換気設備、自動車火災に対応するための非常用設備を必要とし、莫大な費用とともに技術的に多くの問題があったためであると考えられる。また、道路は最も生活に密着した都市基盤であるため、専ら自動車交通に用いられる道路が建設されるようになって、それは生活環境を乱すものではなく、利便性を向上させる身近なものとして受け入れやすかったのかもしれない。

このような状況に対して、1970 年代から道路交通を取り巻く環境問題が厳しくなり、道路を計画、管理する場合に環境問題は重要な要素として配慮しなければならないようになった。環境には自然環境、生活環境、景観など多岐な要素



たして切羽が崩れてこないように圧力を加えながら掘削するシールドである。水、土の密度で切羽を押さえるので、圧気の場合と違って切羽圧力のバランスが崩れることはない。1960年代からフランス、イギリス、ドイツ、日本で研究が始められたが、ヨーロッパでは途中で諦めるなどで開発は進まなかった。しかし、我が国では1980年代には基本技術が確立した。ヨーロッパの研究は泥水を使うものであったが、

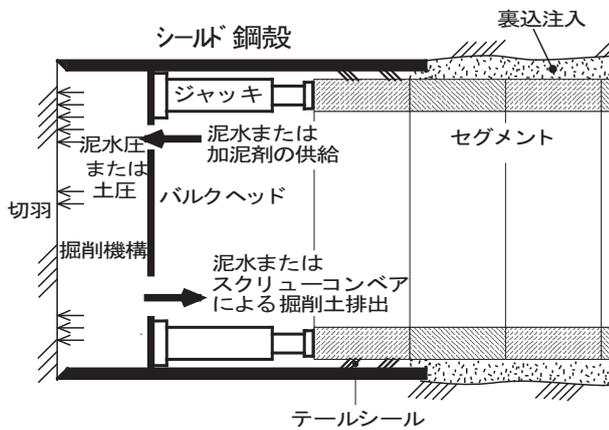


図-2 第二世代シールド（密閉型シールド）



図-3 世界初の上圧シールド

我が国では泥土を使う独自の方式を含めて開発が進められた。密閉型シールドを可能にするためには、密閉された空間での無人掘削機構、掘削した土砂を切羽の圧力を保持したまま取り出し運搬する技術、切羽で加圧された圧力を持った水が

シールド後方のセグメントとシールドの間隙を通してトンネル内に入ってこないようにするテールシールの技術が必要であった。これらを可能にしたのは戦後発達した機械、材料の技術である。シールドが開発された19世紀にも水で切羽を安定にするアイデアはあったが、周辺の技術が無く実現まで1世紀を要したと云えよう。密閉型シールドの開発によって、第一世代のシールドの持つ欠点が解決され、シールド工法は極めて安定性の高い工法になった。密閉型シールドは我が国で開発された工法であり、特に土圧シールドは独自の発想に基づく、優れた工法である。我が国が先行した技術力を保持していたが、現在この技術は世界に広がり、都市トンネルの建設に大きな役割を果たすとともに、独自の発展をしている。近年、我が国では工事が停滞する傾向にあるが、それにとともに、我が国の技術の優位性は失われつつあるように見える。それだけ第二世代のシールドは誰でも使える堅牢な技術であると考えることが出来よう。

第三世代のシールドは第二世代の技術を応用して特殊な形状の断面のトンネルを建設したり、大規模な地下空間を建設する技術である。矩形シールド、重複円シールド、MMST工法などをあげることが出来る。従来の円形を基本とするシールドから離れて、より応用性のあるトンネルの建設工法として発展しようとする方向の流れであり、シールド単体の技術とともに、それを組み合わせた地下空間の建設方法である。1990年代から計画、採用されるようになった。

地下空間の利用が進めば、近接する構造物との限られた空間にトンネルを設ける必要性や、断面形状が変化する大規模な地下空間を設ける必要性が高くなる。必要性と技術の発展が相互に作用して、より望ましい基盤施設とそれを造る技術が発展していくことになる。

第二世代のシールドは世界で使われるようになったが、世界では第三代的な動きはまだ見られない。シールド応用技術、すなわち、第三世代シールドは我が国が世界の先端を走る技術である。

## 技術の現状と今後必要とする技術

地下空間利用の基本技術は第二世代のシールド技術である。この技術は我が国を含め世界で発展している。最近のシールドは掘進距離、掘進速度、断面規模、適用深さにおいて著しく進歩している。掘進距離は、従来、1Km程度が普通で、長大と見なされるものであっても3Km程度であったが、現在では10Kmに近い実績が積み重ねられるようになってきている。長距離掘進では、カッターの耐久性が問題となるが、カッターの交換方法も各種のものが開発されてきている。必要があれば掘進距離はさらに延ばすことが可能であると考えられる状況にある。

掘進速度は高速化し、ずり搬出などの外部的な制約がなければ月500-1000mの掘進速度が得られる時代になっている。従って、多くのプロジェクトでは掘削のために要する時間の問題は相対的に小さくなっている。むしろ、高速化を実現するためには、関係者の合意形成などの工事の環境を整備する必要がある。

断面の規模としては、シアトルのAlaskan Way Viaductで、トンネル内径で約15.85mのトンネルが計画されており、シールド外径では17m級の実施されようとしている。これは通常考えられるシールドとして上限に近づいているものと見なされる。一方、現在のシールドは人が中に入ってセグメントの組み立てを行うため、シールドの小さい方の径には限界がある。管路などの小口径のものは推進工法によって施工するのが普通であるが、シールドとしてみたとき全自動による小口径シールドの技術の開発も課題の一つであろう。

シールドの適用の深さ、すなわち、対応できる水圧の大きさは、従来は1Mpaが一つの目安であったが、1.3Mpa程度の実績が出てきている。適用できる水圧には、トンネルの構造上の制約があり、セグメントの強度、止水構造についての検討も必要である。

以上のように、第二世代のシールドは拠点と拠点を結ぶトンネル工法、すなわち、単路部の工法として、適用範囲の拡大、性能の向上、合理化が進められ、建設費も条件によっては従来の半分程度以下のものも見られるなど著しく低下し、受け入れやすいものになってきている。

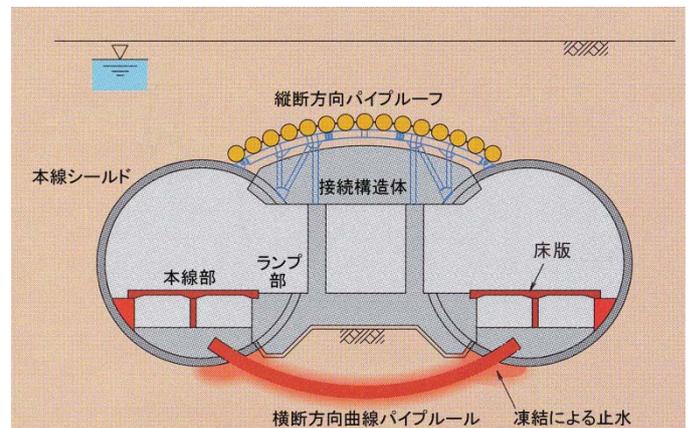


図-4 非開削による分岐・合流部の施工  
(中央環状新宿線富ヶ谷ランプ)

しかし、地下空間の利用では、拠点となる駅、分岐・合流部、換気所などの付帯施設を建設する必要がある。これらの部分は複雑な形状となり、また、大規模な構造となるので、シールドを必要とするような地盤では、開削工法によらざるを得ないのが現状である。しかし、開削工法は工事時の周辺環境に与える影響が大きいため忌避されがちであり、開削部の範囲を最小限にとどめることが要請されることが多い。このため、地中で必要な空間をシールドから拡幅して建設する地中拡幅工法も用いられるようになってきている。しかし、地中拡幅は非常に煩雑な工事となり、また、周辺地盤に与える影響に十分配慮する必要がある、必ずしも、使い勝手の良い工法ではない。大深度を利用した計画が多くなるものと考えられるが、深度が深くなれば、開削工法は技術的な困難性が増すとともに工事費が著しく増大する。従って、非開削で大断面の地下空間を建設する合理的な技術が必要である。開削工法に代わる非開削の大断面地下空間の建設工法として、首都高速川崎縦貫線の昨年開通した地下部分ではMMST (Multi-Micro-Shield-Tunnel)工法が使用された。MMST工法は必要な断面の外周部にいくつかのシールドを施工して、それぞれのシールドをつなぎ合わせて、トンネルの構造体として築造するものである。構造の基本となる部分をシールド工法により施工するので安定性に優れた工法である。シールドの間隔を調整することによって、断面の変化にも対応することが出来る。

しかし、この工法では多数のシールドを発進、到達させる

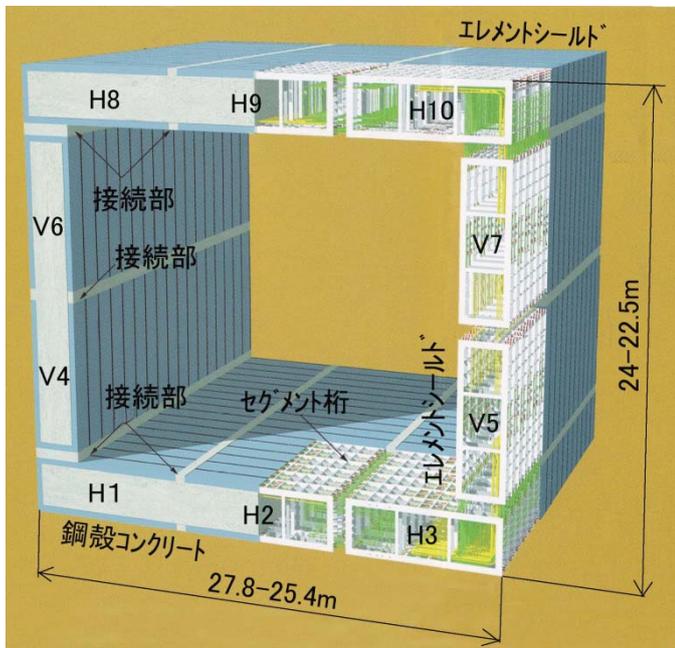


図-5 MMST 工法 (首都高川崎縦貫線)

ため立坑が必要である。深さが浅い場合は対応が可能であるが、深さが大きくなると立坑の建設が難しくなる。従って、立坑を建設することなしにエレメントとなるシールドを発進することを検討する必要がある。

従来、シールドの発進・到達には立坑が用いられてきた。これは、安定なシールドの発進・到達にはある程度の土被りが必要と考えられてきたためである。また、地下鉄や下水道などは地下で完結するシステムで、駅部などとして利用できる立坑は必要な構造であり、立坑からの発進・到達は自然な形態である。しかし、地下道路では地表と必ず連絡する必要があり、発進・到達が可能であれば必ずしも立坑を設ける必要はない。立坑の建設には多くの時間と工費を必要とするのが普通である。

立坑を省略して、地上から発進し、地上に到達するシールドの検討が進められ、中央環状品川線大井地区トンネル工事などで使用されている。この技術は MMST のエレメントとなるシールドにも適応可能であり、立坑なしに深さに関係なく MMST 工法を用いることが出来ることを意味する。

しかし、大深度での分岐合流部のように深い地中に大規模な空間を必要とする場合は、エレメントシールドの発進に工夫が必要である。ランプシールドなどの最終構造として必要

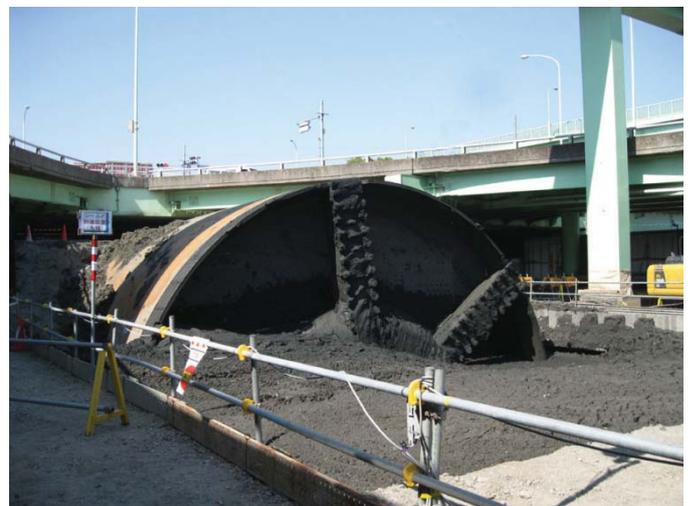


図-6 地上に到達したシールド (中央環状品川線-URUP 工法)

となるシールドを先行施工し、これを利用してシールドを発進することが考えられる。このために必要な、セグメントを切削する技術、切削可能なセグメントの検討が進められている。

道路の分岐合流部など地下での拠点的な空間の建設方法には、本線シールドとランプシールド同士をつなぐ方法、あらかじめ横断方向にアーチ状の支保工を施工し、必要な止水対策を施して山岳工法で施工するものなど多くの方法が考えられている。しかし、工期、工費の点で問題があり、大規模地下空間の建設方法は大きな課題となっている。しかし、基本となる要素技術は揃っているものと考えられ、総合的に技術として組み立てていくことが求められる。

現在の密閉型のシールドでは切羽に出て作業することは出来ない。従って、地中に残置された矢板、杭など障害物がある場合は、あらかじめ処理しておく必要がある。障害物の存在はルートを選定に影響を与えたり、処理のため工期、工費に大きな影響を与える。密閉型シールドの置き所とでもいうべきものである。障害物をシールドで掘削する技術の検討も進んできている。地下の利用が複雑化している中では、この技術は重要な技術である。

多くの都市は軟質な地盤に立地しており、殆どの場合に現在のシールドで十分に対応可能である。しかし、岩盤上に立地した都市もあり、また、都市が発展するにつれて都市の周辺部の山地に接した部分も利用されるようになってきている。このような部分では岩盤が出現するのが普通で岩盤を含む地質

の変化に対応する技術が求められる。岩盤の部分は山岳工法によってトンネルを建設するのが普通であるが、都市域であることから、環境の保全が重要であることが少なくなく、岩盤を掘削出来るシールドいわゆる岩盤シールドの技術が必要となっている。岩盤シールドはすでに実績があるが、カッターの交換を頻繁に行う必要があり、さらに検討が必要である。一方、このような部分では地下水圧が高くなることもあり、構造的な限界を超える場合がある。

また、基盤施設の機能が時代に合わなくなることや老朽化に対応することは避けることが出来ない。適切な維持管理により問題が生じないようにすることは基本であるが、既に存在する施設を更新あるいは廃棄する技術を持つておく必要がある。中央環状新宿線では支障となるシールドを別のシールドで撤去した。地下の空間は改変が容易でない空間であるが、逆に、地表から隔離された空間であり、また、地盤という支持体が必ず存在する。視点を変えれば、改変に有利な空間であるとも見ることができる。この技術でもシールドが基礎技術となるものと思われる。

## 技術開発について

世界をリードする我が国の密閉型シールドの技術は、我が国の都市が立地する軟弱な地盤とその上で高密度な社会経済活動が行われているという厳しい条件の下で、より安全で、合理的なトンネルを建設しようとする努力の結果として確立したものである。戦後の旺盛な需要が背景にあり、研究開発を続けることが可能であった。新しい土木技術は発注者のニーズと受注者の技術、技術開発の努力が作用し合い、建設工事の過程を経て開発されていくものであり、初めから完成された技術などあり得ない。発注者と受注者双方の努力と意思疎通が必要である。

しかし、近年の状況は、民間の持つ技術を利用して建設を進めればよいと云うような傾向が強いように思われる。そういうプロジェクトも存在することも確かであるが、大規模なプロジェクトでは新しい技術が常に求められる。プロジェクトを通して新しい技術が生まれ、確立されていく。それが次のプロジェクトに展開されより合理的な計画となる。当然の

ことであるが適用する技術が計画に大きな影響を与える。計画段階で技術開発の可能性、技術の適用性について精査を行うことが非常に重要である。

技術者はこの過程を通して、ニーズをつかみ技術の方向性を定めることが出来る。また、開発の可能性をつかみ、必要に応じて技術開発に進むことが出来る。

近年の技術は巨大化が進み、技術開発には大きな費用と時間が必要になっている。従って、研究開発をコーディネートする核が必要である。この核は発注者が担わなければならない。土木分野での技術開発はプロジェクトに採用されてはじめて意味を持ち、その利益は発注者すなわち国民が受ける。発注者は積極的に技術開発に関わり、必要な技術は自らが創っていく必要がある。

我が国の都市基盤整備で必要とする先端的な技術は、第二世代のシールドがそうであったように、世界で役立つ技術であり、世界が都市化する中であって、今後の世界に貢献する技術である。官民の協力の下、次世代技術の開発に積極的に取り組んでいく必要がある。