

■特集 建設のフロンティア

大深度地下開発におけるシールドトンネル工事の現状と将来展望

佐々木 幸 信

大深度地下開発の構想は、1980年代中期には盛んに打ち出されていたが、バブル経済の崩壊と共に沈静化してしまった。

しかし 近年のシールドトンネル技術の進歩は目覚ましいものがあり、主な技術だけでもビット交換、機械式地中接合、分岐シールド、高速施工、自動組立に対応の内面平滑1パスセグメント、大深度対応の泥土圧シールド、異形断面シールド、外殻先行シールドなどが挙げられる。

これらの新技術と大深度地下の利用法制が制定されたことにより、大深度地下開発の気運が再度高まりつつある。

このような現状を踏まえ、シールドトンネル工事における大深度地下開発の現状と将来展望について述べる。

キーワード：大深度地下，シールド，新技術，トンネルコスト比，地下利用，地下開発

1. はじめに

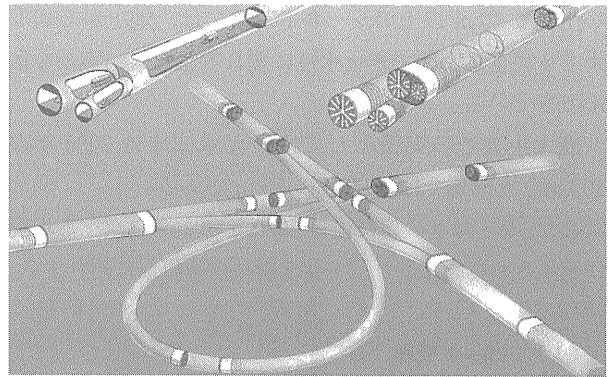
1980年代の大都市部及びその周辺では地価の高騰により、鉄道、道路、上下水道などの社会資本を整備するための用地確保が難しくなりつつあった。

また、電力、通信線等の地下化による地上部の景観や大地震時のライフラインの確保にも着目され、通常使われることのない大深度地下を開発して社会資本の整備を行う構想の提案が盛んになされていた。

しかし、土地の所有権問題や、バブル経済の崩壊により、大深度地下開発構想をめぐる動きも下火となってしまった。

一方、シールドトンネルの技術開発は継続的になされ、日本の最新技術によるドーバー海峡横断トンネルや東京湾アクアラインなどの施工技術がマスメディアを通して一般の人々の話題に上るようになり、再び大深度地下開発に関心が集まり始めている。

このような状況下、2000年5月には「大深度地下の公共的利用に関する特別措置法」^{※1}（以降、大深度地下法と呼ぶ）が公布され、通常の地下利用が行われないよう



図一 大深度地下ネットワークイメージ

な大深度地下に、公共性の高い事業の展開が出来るようになった。

大深度地下開発を行うための技術としては、地下空間を構築するハード面と防災、安全、維持管理などのソフト面に分けられる。

今回は地下空間を構築するハード面のうちでも特にシールドトンネルの施工技術について述べる。

2. シールド工事の現状

近年のシールドトンネル工事では、シールド機に隔壁を設け、地山（切羽）とトンネル坑内とを分離することが出来る、泥水式と土圧式の密閉型シールド機による施工が主流となっている。

「泥水式シールド」は、切羽と隔壁間を所定の圧力の泥水で満たし、切羽の安定を図るとともに掘削土砂を流

^{※1} 大深度地下は、建築物の用に通常供されることがない地下の深さとして政令で定める深さ（地表から40mとする予定）、または、通常の建築物の基礎杭を支持することができる地盤、いわゆる支持層の上面から政令で定める距離（10mとする予定）を加えた深さのうち、いずれか深いほうの地下としている（国土庁ほか、大深度地下マップ・同解説より）。

また、大深度地下マップでは三大都市圏の大まかな大深度の深さを明らかにしている。

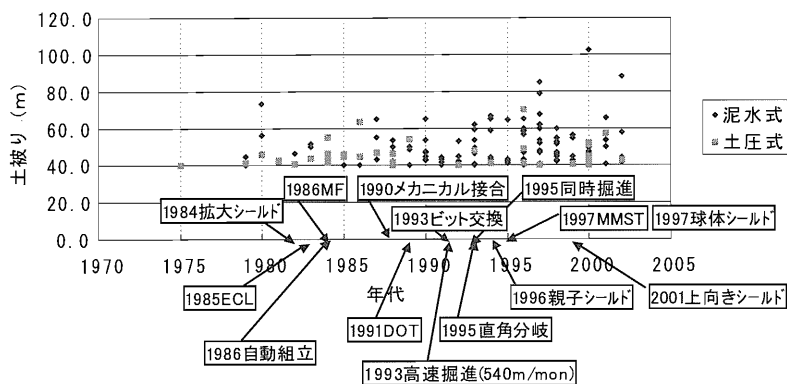


図-2 土被り 40 m 以上の施工実績と新技術

体輸送し、地上のプラントで泥水と土砂とに分離する方式で、1967年に東京・深川で施工された。

一方、「土圧式シールド」は切羽と隔壁間に掘削土砂を泥土化して満たし、所定の圧力を保ちながらスクリーコンベヤ等により土砂を排出する方式で、1974年に東京・葛飾で施工された。泥水式及び土圧式シールドの土被り 40 m 以上の施工実績及び新技術を図-2 に示す。

土被り 40 m 以上のシールド工事では、地上から切羽までを完全に密閉でき止水性に優れる泥水式が実績を積んできている。

最大土被りの実績としては、泥水式では 2000 年の 102 m、土圧式では 1996 年の 70 m がある。

また、シールドの新技術は 1980 年中頃から次々と現場に適用されてきており、主要な新技術を以下に紹介する。

(1) ビット交換

ここで取上げたビット交換は、点検立坑や補助工法を用いずに土中で行うもので、その方法としては、

- ① スポークの前後にビットを配置しスポークを回転することによりビットを交換する「スポーク回転方式」。
- ② 隔壁部に球体を設け、カッタディスクを 180° 回転することでシールド機内からビットを交換する「クルン方式」。
- ③ 連結したビットを外周部から中心部に向かってスライドさせ機内に取り込んで交換する「トレール方式」。
- ④ スポーク内に人が入って交換する「リレービット方式」。
- ⑤ カッタヘッドに予備ビットを配置し、ジャッキなどで押出して交換する「予備カッタ方式」。

など数種類がある。

(2) 機械式地中接合

機械式地中接合は、茶筒に蓋をするようにシールド機

同士を直接土中で接合するもので、その方法としては、

- ① 貫入側シールド機からリングを押出し、受入れ側シールド機の受圧ゴムリングに押付けて接合する「Mechanical Shield Docking 方式」。
- ② 受入れ側シールド機のカッタ全体を後方に引込み、貫入側シールド機を受入れ側シールド機に押込んで接合する「Concentric Interlace Docking 方式」。

などがある。

また、接合時に必要となるシールド機同士の相対位置を地上からのチェックボーリングを行うこと無しに検知することのできる技術も東京湾アクアライン等で採用されている。

(3) 分岐シールド

分岐シールドは、シールド機を必要に応じて土中で分離し、トンネルの方向や本数、断面を変化させるもので、その方法としては、

- ① シールド機隔壁部に球体を設け、球体を 90° 回転させ、そこからシールド機を発進させる「球体シールド」(軸直角方向分岐)。
- ② 親シールド機の内側に子シールド機を同心円状に抱込み、子シールド機を発進させる「親子シールド」(軸方向分岐)。
- ③ 親シールド機胴体に側方に向けて子シールド機を内蔵し、横方向に子シールド機を発進させる「地下茎シールド」。この方式では親機、子機とも引続き掘進することが出来る(軸直角方向分岐)。

などがある。

(4) 高速施工

高速施工には、高速で掘進した後、セグメントを組立てる高速掘進方式と掘進しながら同時にセグメントを組立てる同時掘進方式の 2 種類がある。

高速掘進では 1993 年に 540 m/月の実績があり、同時

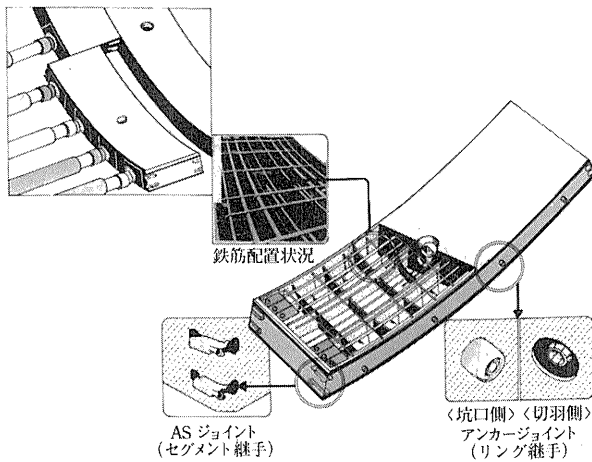
掘進による方法ではロングジャッキ方式で2000年に526 m/月を達成している。

なお、同時掘進には「ロングジャッキ方式（縦球面中折型及び圧力制御型）」と「ラチス式複胴方式」などがある。

(5) セグメント自動組立

セグメントの自動組立では、苦渋作業の解消と安全性向上を目的に1986年から現場に導入されている。

当初は通常のセグメントを用いていたが、最近では図一3に示すような内面平滑（2次覆工不要）で継ぎ手ボルトが無く、位置合わせ後シールドジャッキで押込むだけで組立てが完了する1パスセグメントが開発され、その採用により大断面シールドでも1リングを35~40 min程度で組立てることが可能となっている。



図一3 1パス新型セグメント
(株式会社クボタ DRC パンフレットより)

(6) その他

- ① 大深度対応の泥土圧シールドとしては、スクリーコンベヤに圧送ポンプを直結する方式や、高分子系の添加材によりスクリーコンベヤ部にプラグゾーンを作る方法により止水し、高水圧に対応出来るようになってきている。
- ② 掘削土砂の有効利用としては、掘削土砂を流動化処理（粒度調整や固化材を添加）して、シールドインバート部や他工事の埋戻しに利用したり、所定の強度が発生するように改質を行い、盛土や埋土に再利用している。
- ③ 長距離化では、既に施工延長5 kmを超える実績があり、現在10 km程度の工事計画もある。

さらに、多円形、矩形などの異形断面シールドや上向きシールド、MMSTのような外殻先行シールドも施工

されている。

3. シールド工事の将来展望

バブル全盛期には社会資本整備が追いつかぬまま市街地が拡大し、バブルが崩壊すると経済は低成長となり事業の縮小が余儀なくされてしまい、依然として社会資本整備が充実したとはいいがたい。例えば、突発的、局部的な洪水、河川、湖沼の汚染、交通渋滞やそのために発生する沿道住民の排気ガス被害などの問題が新聞ほかを賑わせている。

その対策として中小河川を集め浄化処理設備を設けると共に調節能力を持たせる河川網の整備や高速道路同士を結び不要な車両の都市部への進入を抑制する道路網等のネットワークの整備が挙げられる。

しかし、すでに地上に河川や道路網を新たに整備するスペースはなく、これらを整備するためには地下を利用してネットワークを構築することに目を向けなければならない。

(1) 大深度施工と長距離シールドトンネル

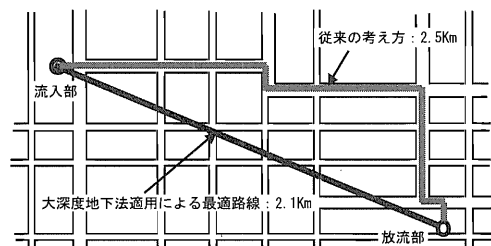
地下に、ネットワークを構築するための手段としてシールドトンネルがあるが、今までのシールドトンネル工事は、土地の所有権問題から道路地下や海底下に限定して施工されてきた。

しかし、新たに制定された大深度地下法を適用し、シールドトンネルを大深度地下に建設することにより、最適なルート及びトンネル断面の選定を行うことができるようになった。

図一4に示す雨水管路を例にとると、従来の考え方では、流入部と放流部を結ぶトンネル径以上の幅員のある道路地下にシールドトンネルを建設しなければならず、トンネルの施工延長が2.5 kmとなっている。

一方、大深度地下法を適用した場合、流入部と放流部を直線で結ぶことができ、施工延長を2.1 kmに短縮した最適路線の計画が可能となる。

つぎに、この大深度化したことによる施工コストについて考えてみる。



図一4 大深度地下法適用の路線計画

施工コストを立坑構築とシールド機、掘削工、2次覆工、防護工、残土処理に分け、試算してみると図-5のようになる。当然ながら同じ路線で大深度化すると、立坑の構築やセグメントのコストが増加することから浅深度よりコストアップとなる。

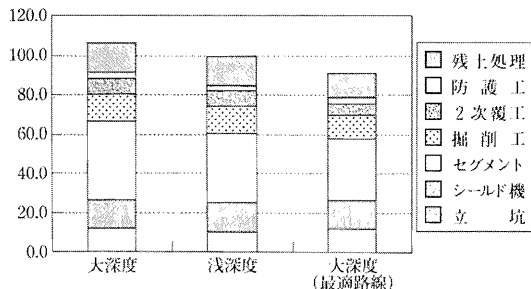


図-5 大深度のコスト比較

しかし、施工延長が短縮されたことを考慮に入れて比較し直すと、浅深度に比べ結果的に10%程度のコスト縮減となる。

また、シールドトンネル施工延長とコスト比(立坑含む)の試算結果を図-6に示す。

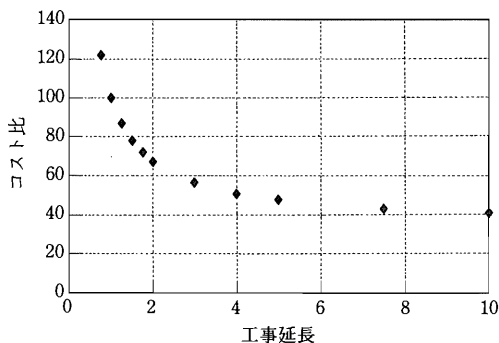


図-6 シールドトンネル施工延長とコスト比

図から明らかなように、施工延長が長くなると立坑やシールド機等の固定費の占める割合が下がることから、5kmの施工単価は1kmの50%程度となる。しかし、5km以上になるとセグメントや掘削などの変動費の比率が上がり、長距離化によるコストメリットは少なくなる。

(2) 将来展望

以上述べてきたように、シールドトンネルの最適路線を選び、シールドトンネルを長距離化することにより合理的な地下河川、地下道路網等のネットワークの構築が可能と考える。

例えば、立坑を10km程度の間隔で構築し、それらからシールドを発進させ、高速掘進を行い、機械式地中接合により長大トンネルを構築していくこともネットワーク構築の一つの手段であろうと考える。

また、地上部から幹線シールドトンネルに向かったり、逆に幹線シールドトンネル坑内から地上に向けてトンネルを構築する合流、分岐技術や駅舎部、非常駐車帯等の構築に必要な拡幅技術を新たに開発することも必要と考える(図-7参照)。

4. おわりに

このところ社会資本の整備が暫時縮小されてきているが、「社会資本整備はこれで十分だ」と実感している人は少ないのではないだろうか。

このような時代に、社会資本を充実させ豊かな生活を営むためには、より合理的な施工技術の開発が必要であり、今ほど「技術者は何をすべきか」とその真価を問われている時代はないと考える。

J C M A

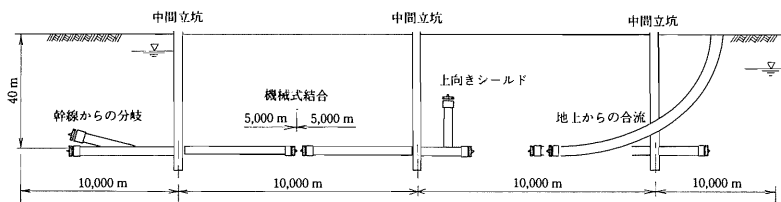


図-7 大深度地下利用

[筆者紹介]

佐々木 幸信 (ささき ゆきのぶ)
 鹿島建設株式会社
 東京支店
 機材部
 次長

