

第76回

鉄道シールド トンネルの建設

はじめに

シールドトンネルは、シールドとよばれる茶筒形の鋼殻を水平に据え、その内部の土を掘りながら、その後方でセグメントとよばれるプレキャストパネルをリング状に組み立てる「シールド工法」でつくられたトンネルです(図1)。シールド工法は、地表面からの掘削をともなわず道路交通を支障しないことや、地盤沈下や騒音・振動といった周辺への影響が小さいことから、我が国でも1960年代以降急速に普及しました。現在では、都市トンネルの主力工法の一つとなっています。

ここでは、シールドトンネルの建設技術の過去から現在までの変遷について解説します。

シールド工法の考案

シールド工法は、ブルネル(M. I. Brunel, 1769~1849)によって、木材を食べながらその後ろを殻で固める舟食虫の姿をヒントに発明された工法であり、1825年から工事が開始されたロンドンのテムズ川の河底トンネルで初めて実用化されました。このときは、外寸法が高さ6.78m、幅11.43mのシールド(図2)が用いられ、作業員の安全を確保する目的をもつ鑄鉄製のブロック12個から構成されていました。また、各ブロックはそれぞれ3段のコンパートメントに分かれ、掘削が終了したコンパートメントでは、板を掘削面に押しつけて崩壊を防止して

ました。覆工は、れんがを積んでつくり、これに反力を取ってシールドを前進させていました。このときのシールドトンネルは、現在でも鉄道トンネルとして用いられています(図3)。

その後、1869年に、グレートヘッド(Greathead)とバーロウ(Barlow)によりテムズ川に円形断面の人道用のシールドトンネルが建設され、覆工は鑄鉄製のセグメントを組み立ててつくりられています。さらに、1886年に南ロンドン鉄道のトンネルで圧気により切羽の安定を図りながら掘削を行う「圧気工法」が採用され、おおむね現在のシールド工法の基本ができました。

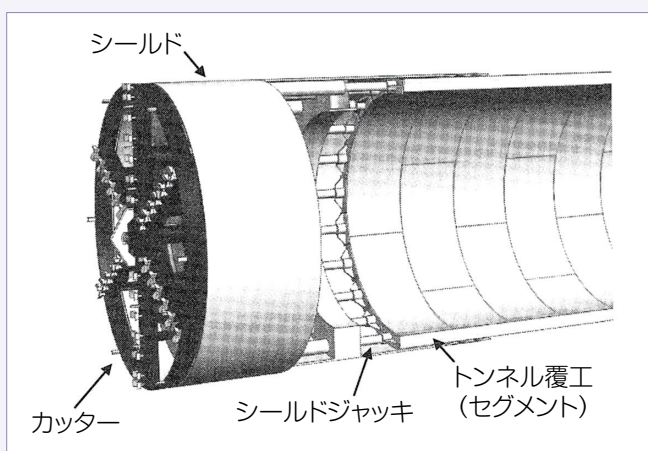


図1 シールド工法の概要

出典：地盤工学・実務シリーズ29シールド工法，地盤工学会¹⁾

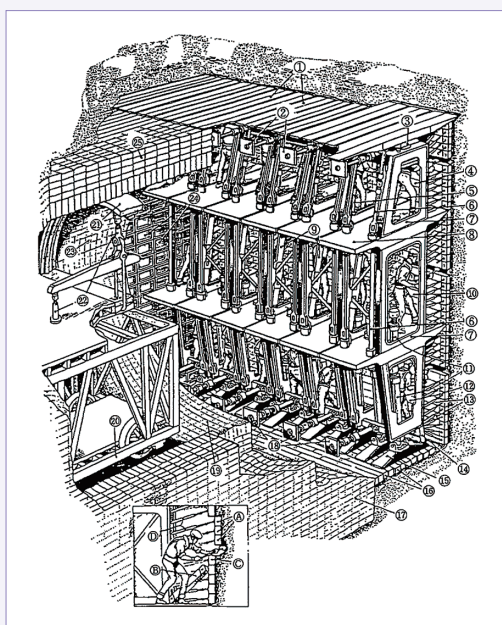


図2 テムズ河底トンネルの工事²⁾



図3 テムズ河底トンネル



図4 折渡トンネルのシールドの一部



図5 半機械掘り式シールドの例

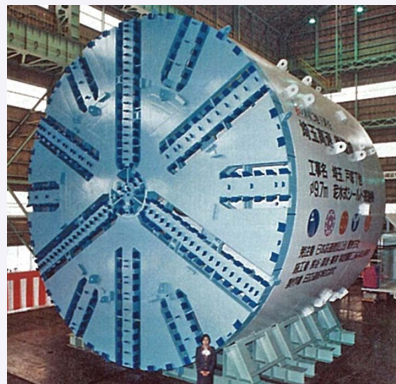


図6 泥水シールドの例

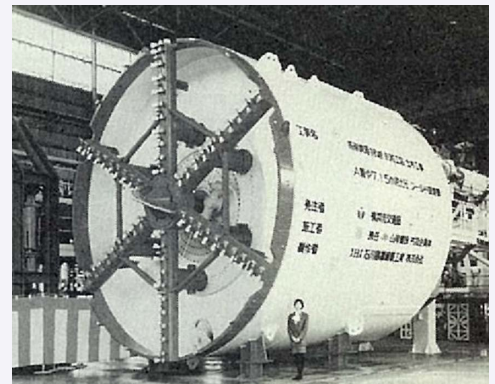


図7 泥土圧シールドの例³⁾

我が国におけるシールドトンネルの導入

我が国でシールドトンネルが建設されたのは少しあとになりますが、1920年に羽越本線折渡トンネルにおいて、膨圧区間の突破のために日本製のシールド掘削機が用いられました(図4)。その後、1926年に丹那トンネルの作業坑において、1936年に関門鉄道トンネルの工事において、シールド工法が用いられています。

戦後になり、1956年に関門道路トンネルで、1957年に旧営団地下鉄永田町トンネルで、断面が半円形状のルーフシールドが採用されました。また、1961年には名古屋市地下鉄の覚王山トンネルで円形シールドトンネルが構築されました。この事例が鉄筋コンクリート製のセグメントを組み立てて覆工を構築するシールド工法の本格

的な採用事例といわれています。これ以降は、地下鉄はもちろんのこと、上下水道、電力洞道、通信用道などの地下インフラ施設をつくる一般的な都市トンネル工法として定着し、急速に普及することになりました。

シールド掘削機の技術

日本における初期のシールド掘削機は、手掘り式とよばれるもので、おもに人力で掘るものでしたが、1963年にカッターを有する機械式シールドが導入されました。トンネルの分野では、掘削面を「切羽」とよんでいます^{きりは}が、この当時は、切羽が開放されている「開放型」とよばれるシールドが用いられていました。また、掘削面が崩れてこないよう、圧気かけることが一般的であり、薬液注入のような補助工法を用いる場合もありました。1985年に

完成した東北新幹線の下谷工区と寛永寺橋工区の工事では、外径12.7mに及ぶ複線断面の半機械掘式大口径シールド掘削機が用いられ、1991年に完成した東京・上野間の工事でも、第一上野トンネルで外径12.6mの半機械掘式大口径シールド掘削機(図5)が使用されました。

一方で、シールド機内に隔壁を設けて切羽との間に密閉した空間をつくり、そこに泥水を満たすことで切羽が崩れてこないようにする泥水式シールドが、フランスで1960年代に考案されました。図6は、泥水式シールドの例です。我が国では、その後、川崎市水道局配水本管の工事で採用されました。

その後、泥水の代わりに掘削土砂を流動化させて満たす「土圧式シールド」が日本で開発されました。現在では、泥水式シールドと土圧式シールドの1種である泥土圧シールドが主流

となっています(図7)。1994年には、当時世界最大断面であるシールド外径14.14mの東京湾横断道路トンネルが施工されました。これら泥水式シールドや土圧式シールドは、「密閉型シールド」に分類され、切羽安定の向上が図られました。

シールドトンネルは、円形状が基本ですが、限られた空間で施工しないといけないことも多く、円形以外の形状のシールドも開発されました。1988年には、JR京葉線の京橋トンネルでマルチサーキュラーフェイスシールドとよばれる二連の円形シールドが用いられました。その後も、楕円形や矩形などのシールドが開発されています(図8)。

シールド掘削機の技術発展とあわせて、シールド工事の省力化・効率化にも目が向けられるようになり、各種の自動化技術が開発されるとともに、掘進延長の長距離化や施工速度の高速化が進められました。

セグメントの技術

シールドトンネルは、工場で作られたプレキャスト製品のセグメントを組み立ててつくられます。セグメントの種別として、鉄筋コンクリート製セグメント、ダクタイルセグメント、鋼製セグメントおよび合成セグメントが

あります。

地下鉄では、1960年代から1990年代にかけて鉄筋コンクリート製の中子形セグメント(図9(b))が多く用いられました。ダクタイルセグメントは、1963年に営団地下鉄の洲崎町工区で^{すさき}使用され、その後、トンネルに作用する荷重が大きいなどの特殊な場所で用いられました。また、鋼殻内に鉄筋を配置しコンクリートを充填した「合成セグメント」が開発され、1965年に京都市水道局東山水路工事で使用されています。現在の鉄道シールドトンネルでは、平板形の鉄筋コンクリート製セグメント(図9(a))が主流となっており、特殊な区間では合成セグメントを用いる例が多くみられます。

セグメントとセグメントをつなぐ継手についても、技術開発が行われてきました。かつては、ボルト継手が大部分を占めていましたが、近鉄上本町・難波間の地下線工事(1968年)において、木製のプラグによるピン構造の継手が採用されました。その後、総武線と横須賀線のシールド工事で日本独自の継手としてピンほぞ継手が開発・実用化され、東北新幹線の大断面のトンネルで集大成したものが用いられています。1990年以降も、セグメント組み立ての自動化、施工の高速化、低コスト化などを目的として、インサート埋込み継手、ほぞ継手、くさび継手、

ピン式継手など、さまざまな種類の継手が開発され用いられています。

継手からの漏水をシール材により防ぐことも重要になります。地下鉄でシールドトンネルがつくられはじめた1960年代には、ゴムなどを材料とし、これの弾性圧や自己接着性で止水するようなシール材が使われていました。これに対して、1980年代になると、水により膨張する材料を用いた水膨張性シール材が開発されました。これによって、漏水をかなり抑制できるようになりました。

裏込め注入の技術

シールドトンネルにおいては、覆工と周辺地盤との間にテールボイドとよばれる空隙ができます。この空隙に充填材を入れることにより、地表面の沈下やトンネル周辺の地山が緩んで作用荷重のバランスが崩れることを防止しすることを「裏込め注入」とよんでいます。

裏込め注入の材料については、豆砂利、モルタル、セメント、ベントナイトなどが使われていましたが、これらはテールボイドの外に逸走したり、固結するまでに時間を要し、地盤沈下の発生が抑えられないなどの課題がありました。1970年代に入り、二液混合型の可塑状注入材料が開発されました。また、ワイヤーブラシ型のテールシー

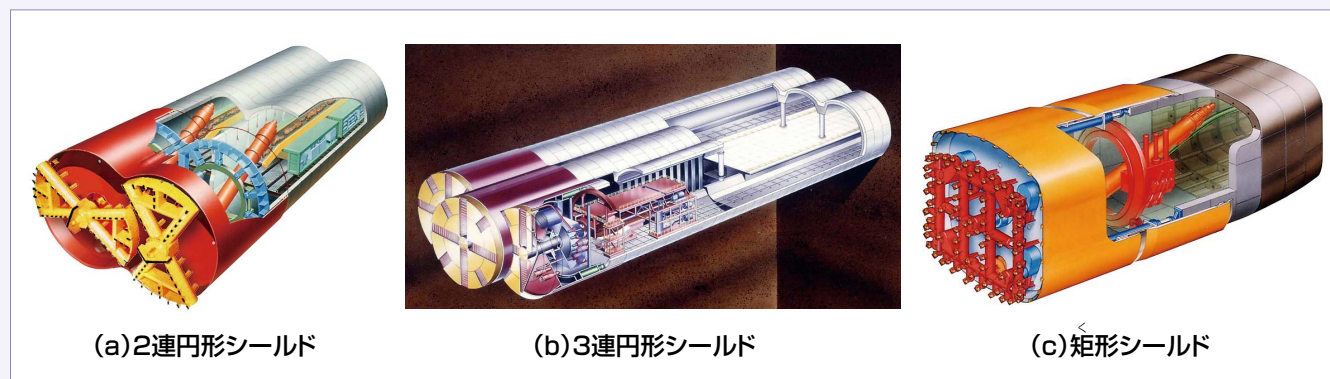


図8 特殊シールドの例

出典：2016年制定 トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[シールド工法編]・同解説、土木学会⁴⁾

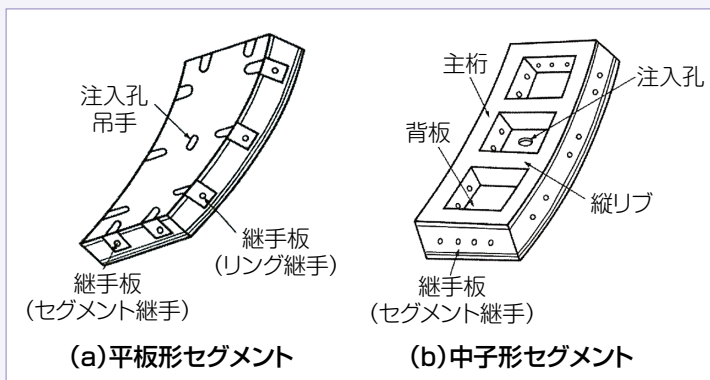


図9 鉄筋コンクリート製セグメント

出典：2016年制定 トンネル標準示方書〔共通編〕・同解説／〔シールド工法編〕・同解説，土木学会⁴⁾

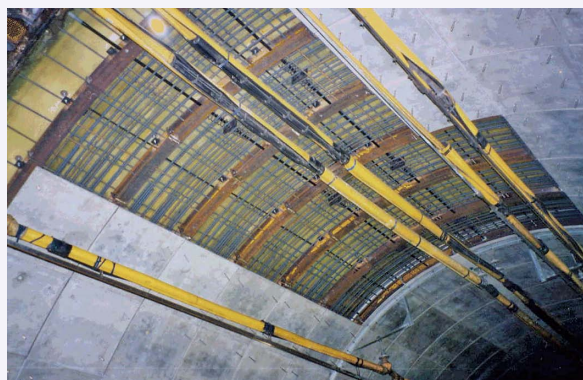


図11 二次覆工を追加した例⁶⁾

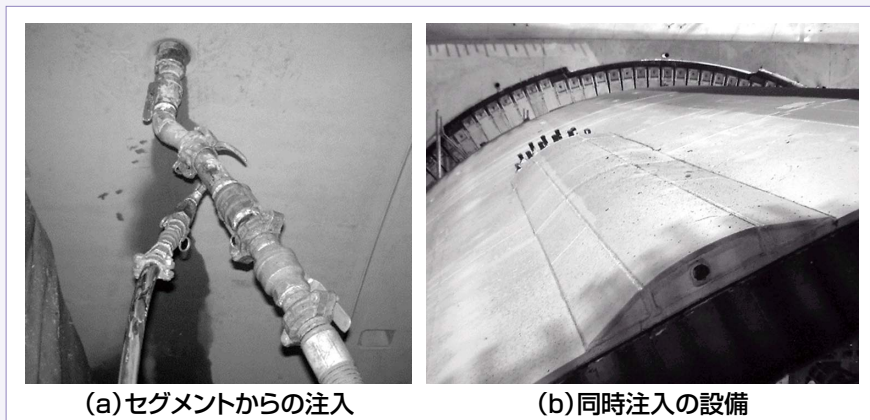


図10 裏込め注入の状況

出典：トンネルライブラリー17シールドトンネルの施工時荷重，土木学会⁵⁾

ルも開発されました。これにより，注入材料の切羽への回り込みや地山への逸走も少なくなつて充填性に富むとともに，注入孔を減らすことができることから，トンネル覆工の止水の面でも有利となり，現在では主流の材料となっています。

裏込め注入の施工についても，技術の進展がありました。かつては，セグメントを組み立てたあと後方の注入孔から裏込め注入を行う方法や，「即時注入」とよばれる1リング掘進したあとに注入する方法が主流でした(図10(a))。また，1980年代に入って密閉型シールドが主体になると，シールドに装備した同時裏込め注入管から注入する技術(図10(b))が開発され，シールド掘進と同時に注入ができることから，裏込め注入の効果がより発揮できるようになりました。

今後の展望

我が国のシールドトンネルの建設技術は成熟の域に達し，世界でもトップレベルとなっており，都市トンネルのインフラ整備に必要なものとなっています。鉄道においては中央新幹線などの大プロジェクトや連続立体交差化工事における地下化などの計画もあり，大断面化，大深度化，長距離化，高速化などが今後もキーワードになると思われます。

また，すでに建設したシールドトンネルの維持管理も今後重要になってきます。鉄道シールドトンネルは，山岳トンネルや開削トンネルなどと比べると比較的新しいものが多いのですが，河川水に塩分が含まれる感潮河川下や海岸近くで塩害による劣化や継手の鋼材腐食が進行しているトンネルもあ

り，二次覆工を追加した例もあります(図11)。また，ごくまれですが，かつての広域的な圧密沈下や近接施工によりトンネルが変形している例もあります。

おわりに

地下鉄をはじめ，都市域のインフラ整備に欠かすことができないシールドトンネルの建設技術について，これまでの変遷と今後の展望についてまとめました。普段何気なく通過していたシールドトンネルにも，このような技術開発の歴史があることを皆様を知っていただけたら幸いです。

(津野究／構造物技術研究部
トンネル研究室)

文献

- 1) 地盤工学会シールド工法編集委員会編：地盤工学・実務シリーズ29シールド工法，地盤工学会，p.1, 2012
- 2) 菅建彦：英雄時代の鉄道技師たち，山海堂，1987
- 3) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル，1997
- 4) 土木学会トンネル工学委員会編：2016年制定 トンネル標準示方書〔共通編〕・同解説／〔シールド工法編〕・同解説，土木学会，2016
- 5) 土木学会トンネル工学委員会技術小委員会シールドトンネル施工時荷重検討部会：トンネルライブラリー17シールドトンネルの施工時荷重，土木学会，p.24, 2006
- 6) 鉄道総合技術研究所編：トンネル補修・補強マニュアル，鉄道総合技術研究所，p.II-37, 2007