

3.2 ヨーロッパ

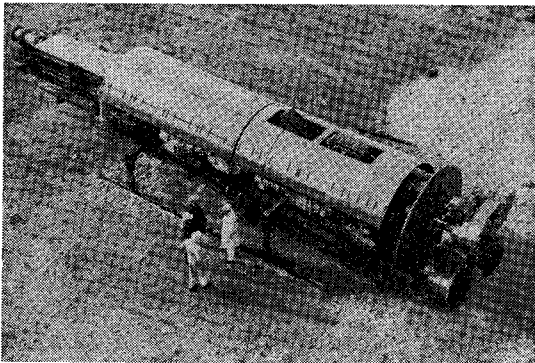
足立 貞彦*
遠藤 浩三**

1. 山岳トンネル

(1) クルップ・トンネル掘進機 8.5ヵ月で 4.3 km 掘進

最近ヨーロッパでもトンネル掘進機の使用は増えつつある。使われているのは Robbins 型 (合衆国) が多

写真-1 Wohlmeier-Krupp トンネル掘進機



いが、その他 Wohlmeier-Habegger 型 (スイス), Wohlmeier-Krupp 型 (西ドイツ), Demag 型 (西ドイツ) などもある。掘削径はパリ地下鉄およびマーシイ (後述) のロビンス型 2 機だけが 10 m で非常に大きい。他は 3.6 m ばかりである。

西ドイツ タールハイム トンネルは掘削径 2.96 m, 全長 24.1 km で、ボーデン湖から Stuttgart 付近に導水する水路の一部をなすもので、上流側 10.6 km は岩石強度 2400 kg/cm^2 と推定されるので在来工法を採用し、残りの 13.5 km のうち中央部の岩石強度 $800 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ の 3.9 km は Robbins 型で機械掘削する予定であり、下流側の岩石強度 $200 \sim 300 \text{ kg/cm}^2$ と推定された 9.6 km を Wohlmeier-Krupp 型で掘削した。

この 9.6 km 区間は、機械掘削としても相当はだ落ち

* 正会員 日本鉄道建設公団工務第一部第一課長

**正会員 東京都交通局高速度電車建設本部設計課長

写真-2 タールハイム トンネル坑口



のある状況であり、また 1 月には最大 3600 kg/cm^2 , 平均 2000 kg/cm^2 の黄鉄鉱染体にぶつかり 430 m/月の進行しかでなかったが、昭和 42 年 11 月には 753 m/月の進行をあげたこともあり、昭和 42 年 5 月中旬着手以来、昭和 43 年 2 月 1 日までの 8.5 ヶ月に 4.3 km の掘進を行なった。

(2) 直径 10.1 m のロビンス・トンネル掘進機掘削開始

イギリスのマーシイ第 2 トンネルは、リバプールのマーシイ河の河底をくぐる 2 車線の道路トンネルである。

写真-3 導坑から見たロビンス トンネルボーリング マシンの前面

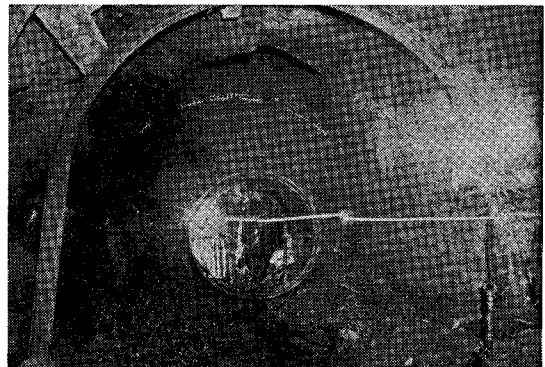
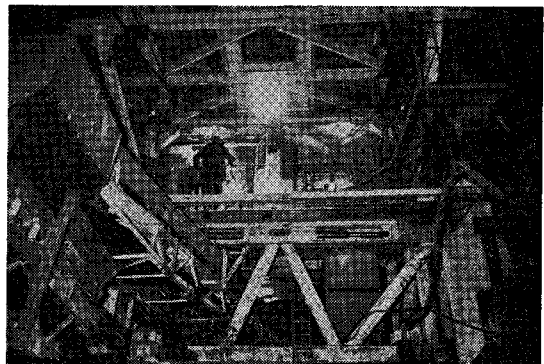


写真-4 ロビンス トンネルボーリング マシンの背面



内径は 9.1 m, 掘削径 10.1 m で全長 2 250 m のうち, 圧縮強度 300~400 kg/cm² の中生代の砂岩の区間 1 980 m は機械掘削を行ない, 残りの粘土層の区間は在来工法による予定。機械掘削区間はあらかじめ 3.6×3.6 m の導坑を在来工法で掘削済みであり, 昭和 42 年 12 月末より機械掘削に着手した。

欧州の機械掘削の現況をうかがう意味で タール ハイムおよびマーシイの例を紹介した次第である。

(3) 全断面掘削・掘削と覆工の分離方式

欧州におけるトンネルの掘削方式は, 小断面はもちろん 80 m² 程度の大断面トンネルであっても全断面掘削を原則としており, 地質の悪いときはカロッテ工法(ヘディングをリング カットで行なうベンチ方式)か側壁導坑方式などを採用しているようである。

また日本では掘削覆工の併進方式が原則と考えられているが, 欧州においては掘削と覆工の分離方式が原則と考えられており, 地質がきわめて悪い場合は掘削をやめて覆工を行なうこともあるが, その場合も 1 日のうち同時に掘削と覆工を行なうことはない。

(4) 重量さく岩機か軽量さく岩機か

日本では現在大断面トンネルでも小断面トンネルでもエアレグ式軽量さく岩機を使用するスウェーデン工法によって施工されているのがほとんどである。

欧州ではスウェーデン工法の本尊のスウェーデンでもおおむね 25~30 m² 程度以上のトンネルでは油圧ブームによる重量さく岩機を, 以下の小断面トンネルでは軽量さく岩機を使用しているようである。なお軽量さく岩機を使用する場合もエアレグによるほか Autofeed, ラダー工法, Zax 工法などにより, できるだけ人手を減らすように努力している。

(5) 心抜の形式・スムーズ プラスティング

欧州では心抜の形式は日本のように V カット一辺倒ではなく, 各現場でそれぞれ適合するカットを選んでおり, V カットのところもあるが, むしろ平行 カットが多いようである。その平行 カットも, 孔径は全部同じで空孔のないもの, 3 in のパーンホールをもつもの, コロマント カット, スパイラル カットなどさまざまである。

堅岩地帯の北欧ではスムーズ プラスティングに熱心で, 中欧ではあまり熱心ではないようである。しかし, その中欧でもダイナマイトは 1 切羽に少なくとも強弱 2 種類を使用する配慮はしている。なお, ANFO は現在のところ欧州ではあまり使われていないようである。

(6) 支保工の傾向

日本では鋼アーチ支保工が全盛であるが, 欧州では鋼アーチ支保工からルーフ ボルト(ロックアンカーともいう)または吹付コンクリートに変わってきている。これらをそれぞれ単独に使うこともあるし, 吹付コンクリートとルーフ ボルトを併用することもあり, 一番地質の悪いとき, 始めて鋼アーチ支保工とともに吹付コンクリートを施工するというようになってきている。

しかも欧州では明りの土留矢板には木材を使用しているが, トンネル内ではほとんど全部鉄矢板を使用している。

a) ルーフ ボルト

ルーフ ボルトの長さや太さはトライヤルで決定しているが, 径 16~26 mm のものを, 先普請のときは 3~4 m どり, 後普請的に追加孔として施工する場合は 6 m ぐらいまで施工するようである。

また膨脹性地質区間の支保工として特に深いルーフボルトの有効なことも強調されている。

b) 吹付コンクリート

吹付コンクリートの厚さは 5~20 cm 程度のもので, 地山と変形をともにするという考えから, 厚さはなるべくうすくして steel net を 1 層ないし 2 層入れるようである。

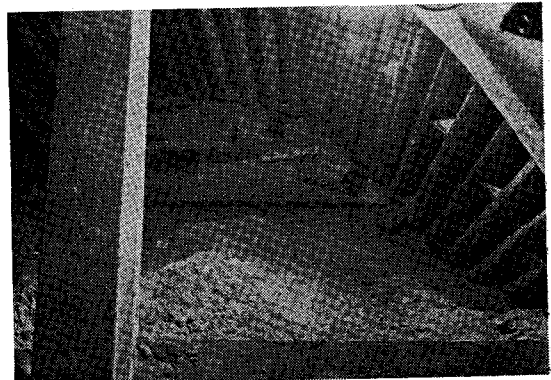
なお吹付コンクリートは, その吹付面をできるだけ円形にクローズさせることが, 厚さを厚くするよりもっと大事な要素であることが強調されている。

またスウェーデンではロボットと称するリモコン操作のできるコンクリート吹付作業用機械が開発されている。

(7) メッセル工法

欧州では軟弱地盤のトンネル掘進にメッセル工法が使われている。これは切羽の掘削にともない鋼アーチ支保工にそって鋼矢板を 1 枚ずつ油圧ジャッキで前方に送りながら掘進する工法で, 段取りもきわめて簡単で, 日本にも向いていると思われる。

写真-5 メッセル工法切羽
(ボン下水道工事)



2. 欧州におけるシールド工法

(1) 西欧の地下鉄シールド工法の現況

最近の西ヨーロッパにおけるシールド工法の普及は想像以上にさかんなものがあり、筆者らの見聞した地下鉄関係では、ロンドン、ハンブルグ、ミュンヘン、パリなどがその主なものであり、ベルリン、ミラノなどにおいては一部用いられている状態である。

中でも都市内において地上への影響をなるべく少なくするために、開削工法に代わる主要な工法としてシールド工法を本格的に使用しているのがロンドン、ハンブルグ、ミュンヘンの3都市で、ロンドン地下鉄のビクトリア線約 22.4 km には全面的にシールド工法が採用されており、ハンブルグ地下鉄東西線の市中心部 4 km 区間、またミュンヘン地下鉄南北 6 号線およびオリンピック線 14.1 km のうち、市の中心部の約 50% 区間にあたる 4 km 区間についても積極的にシールド工法が用いられており、今後ますます普及の傾向がうかがえる。

パリ地下鉄においては、建設中の東西線 22.8 km のうち、セヌ河底横断部の前後 2 ヶ所約 3.5 km 区間においてシールド工法による施工を行なったが、これはおもに地質上の理由によるものである。

ベルリンは約 100 km の地下鉄 U パーンがあり、現在も約 15 km 区間の地下鉄建設を行なっている代表的な地下鉄都市の一つであるが、シールド工法については現在まで施工例が一例あるだけで、今後も開削工法を主工法としてゆくものと思われる。この主な理由として、開削工法は経験が深く、肉眼で確認しながら施工できる最も安全確実な方法であり、一方、シールド工法は、地表面沈下防止に関する諸問題が未解明の懸案であり、まだ実用の段階ではないと考えている点は注目に値する。

(2) シールド工法の計画と実施上の諸問題

トンネルの掘削断面の大きさについて、複線断面を採用しているのはパリ地下鉄で、シールド外径 10.15 m、トンネル内径 8.70 m である。これは駅間普通部であるが、駅部では開削工法が、山岳トンネル式工法によっている。パリのシールド工法による施工区間が、セヌ河をはさんだ兩岸の、石灰石層下の流砂層という困難な場所であるにもかかわらず、わざわざこのような大断面としたのは奇異に感じるが、これは駅が相対式タイプを用いているので取付上の都合の良さと、単線併列で 2 本のトンネルとしても、保線上の通路を各線の両側に設置することになるので、複線断面とする方が設計上、経済的に有利であることによるものと思われる。

パリ以外の他の都市では、トンネルはできるだけ小さ

く掘る方が、技術的に安全確実であるという原則どおりに、単線併列の方式をとっている。ロンドンとハンブルグでは、駅部と駅間普通部において、おのおの別々の大きさの、しかもできるだけ小さな断面としており、ロンドンではそのほとんど大部分が、ロンドンクレイと称する良質の粘土層地盤であるが、普通部でシールド外径 13 ft 6 in (約 4.2 m)、トンネル内径 12 ft 6 in (約 3.8 m) の極端な小断面とし、車両の形をトンネル断面に合わせて天井部も円形にし、トンネルの空間を極力有効に利用している。駅部では 21~25 ft 直径で、3 m のホーム幅がとれる断面を併列し、両線ホーム間を連絡通路で結んでいる。ハンブルグは地質は堅い泥灰岩から、不安定な泥砂、砂、礫層などの互層できわめて変化が多い所であり、普通部でトンネル外径 5.4 m、内径 5.0 m、駅部でトンネル外径 7.48 m、内径 7.0 m のものをそれぞれ併列し、駅部では両線ホーム間を連絡通路で結んでいる。

ミュンヘンでは、地質は上部にフリッツサンドと称する透水係数の大きな砂層があり、その下にフリッツメルゲルと称する粘土質固結層があり、その下に下部滞水層のフリッツサンドがあるが、普通部だけに単線併列方式のシールド工法（シールド外径 6.72 m、トンネル内径 5.52~5.74 m）を適用し、駅部は開削工法や、特殊な山岳トンネル工法（メッサー工法）によっている。

地下水処理対策としては、パリでは圧気工法に注入と併用したが、きわめて難渋したようで、セヌ河底横断部を当初はシールド工法で計画していたが、途中でケーソン工法に変更している。ロンドンでは大部分は無圧気であるが、特殊箇所の一部注入や圧気工法をとっておりハンブルグでは圧気工法を主力としているが、駅部など施工区間の短い所や、土かぶりの少ない所では揚水による地下水位低下工法を使用している。一方ミュンヘンでは、圧気工法は使わずに、地下水位低下工法を全面的に採用しており、ディープウエルを主に、ウエルポイント工法などを使用している。これらの点については、各都市とも、それぞれの地質やその他の施工条件に応じて、独自の方式と考え方がるのが注目される。

ロンドンとハンブルグでは、トンネル線形をできるだけスムーズにし、かつ最短距離をとるために、道路下ではなく、公共用地や民地下を積極的に使用しているが、ミュンヘンでは、できるだけ道路を通し、やむをえない所だけは、たとえば市役所下などの公共用地を使用している。

シールドトンネルの併設施工の場合の必要なのはなれや、最小土かぶり、既設建物下、または接近施工の場合の問題などに関しては、特に地表面の沈下問題対策については、各都市とも入念な考慮を払っている様子がみえるが、数字上の根拠が明確でないのは、わが国と似ている。

ロンドンでは、民地下をとる場合の土かぶり、地表から 20 m 以上の深さをとることを原則としており、ハンブルグでは、土かぶりについては特別などころ以外はトンネルの直径以上はとっており、民地下で建物のある場合は、基礎低面より直径の 2 倍の土かぶりをとっており、地上に影響を与えない深さをとれば、社会通念上問題にならないようである。

ミュンヘンではシールド推進時の必要な土かぶり、両線間のはなれについては、土かぶりは $1.0 \sim 1.5 D$ (D は掘削外径) が標準で、 $1.5 D$ 以上ならば問題はなく、 D 以下ならば補助工法的な対策を考慮する必要があると考えている。実際の施工にあたっては、1 リング推進ごとの裏込注入 (セメントモルタルまたはセメント石灰混合物) を確実に実施しており、 $1.5 D$ の土かぶりで 2 cm 程度の地表面沈下しかないようである。

(3) セグメント

セグメントについては、その形状、材質、設計理論、2 次ライニングの有無について、各都市ともそれぞれ独自の異なった考えを持っており、多種多様である。わが国の地下鉄で現在最も多用されている鉄筋コンクリートの中ごう形式で、ボルト継手のものは、パリの東西線で見られる。在来からある鑄鉄製のボルト継手のものは、ハンブルグ、ロンドンビクトリア線では無筋コンクリート製または鑄鉄製のナックルジョイント拡張式で、駅や地盤その他条件の悪い所ではボルト継手のものも一部見られるが、前者のコンクリート製のものが大半である。パリ、ロンドン、ハンブルグでは、2 次ライニングは省いている。

ミュンヘンではベルリンで開発されたバイスウントフライターク社の六角形はちの巣形鉄筋コンクリートセグメントとチューブリン社の鉄筋コンクリート多ヒンジ系セグメントを使用しているが、今後は後者がおもに使用される傾向にある。これはトンネル軸方向は通しボルトで接合されているが、各セグメント同志はほぞでかみ合うようになっているだけでボルトは使わない。ミュンヘンとベルリンでは 2 次ライニングを行っており、ミラノでは曲がりボルトが試用されようとしている。

(4) シールド

メカニカルシールドについては、各都市とも積極的に取り組んでいるが、そのねらいは、高能率の掘進と有効な切羽土留めにある。

パリ東西線のセヌ河西側区間で使用され、前宣伝よろしく伝えられていた特殊な前面水圧加圧部分圧気式のものメカニカルシールドの範ちゅうには入らないかも知れないが、難行のすえ大改造を余儀なくされ、結局全体圧気の手掘り式のような形で何とか切りぬけたようであるが、くわしくは報告されていない。同じくセヌ河東側区間で使用されたロビンスの部分圧気方式のメカニカルシールドも、難行のすえ全体圧気切替えと注入などの補助手段を使って何とか切りぬけたようであるが、これらはいずれも、泥砂層における約 18 m 水圧の被圧泥水対策に難渋したものと推察される。

ロンドンビクトリア線で使用されたドラムディッカーメカニカルシールドは、前記したナックルジョイントセグメントと併用して大成功をおさめており、周進速度 400 ft と報ぜられている。

ミュンヘンでは改良形のカルウエルドメカニカルシールドを全面的に使用しているが、これも日進平均で 10 m 以上、最高 20 m 余の掘進を行なっている。

ロンドンクレイはもともと自立する切羽であり、ミュンヘンでは地下水位低下工法によって一時的に切羽自立を可能とできる点に、これらのメカニカルシールドの成功のおもな理由があると思われる。

ハンブルグで開発し使用している回転振り式バーデホルツマンメカニカルシールドは、これらと趣を異にしており、変化の多いハンブルグの地質に適応して、回転振幅やカッターフレームとフェースプレートとの組み合わせを調整し、切羽切削と切羽土留がそれぞれ有効に行なえるようになっており、強力な回転トルクをもつものである。また、このシールドは転石や玉石なども別に破碎して、手で処理できるようになっており日進 10 m 平均、最高 16 m は可能といわれ、額面どおりならばわが国においても特に注目すべきものと思われる。

以上、西ヨーロッパにおける地下鉄シールド工法について概説したが、くわしくは昭和 43 年 6 月に土木学会から発行された『第 4 回トンネル工学シンポジウム』を参照せられたい。

第 3 回 トンネル工学シンポジウム

B 5 判・146 ページ
800 円・会員特価
1000 円 (〒70 円)

トンネル土圧／トンネル土圧の測定方法と現況／トンネル用鋼アーチ支保工の強度について／トンネル掘削における余掘りの実態について／セグメントの設計について／栗子トンネルの工事計画と施工実績について／国鉄親不和トンネルの施工実績について／青函トンネルにおけるウォールマイヤー式トンネル掘削機の掘削試験について／大阪地下鉄線複線型と単線型シールドの実施例と問題点／シールド工法による駅部の施工計画について／わが国における中小口径シールド工事の現況について