

地下鉄建設技術と工事中用機械

90年の歴史を概観する

平野 隆

東京地下鉄の銀座線は、平成 29 年（2017 年）12 月に開業から 90 周年を迎える。この間には安全で確実な施工と効率的な建設を目指した建設技術の導入と開発の歴史があり、使用される機械もそれに合わせて進化を続けてきた。本稿は東京地下鉄が保有する路線を中心に建設技術の変遷と、そこで使用された建設機械の変化を戦前から高度成長までを中心に平成に至るまでの時代順に概説するものである。

キーワード：トンネル、地下鉄建設、開削工法、シールド工法、工事中用機械、合理化、効率化

1. はじめに

東京の地下鉄は昭和 2 年（1927 年）12 月に開業した上野～浅草間 2.2 km から始まった。90 年後の現在では東京地下鉄（以下「東京メトロ」）と東京都交通局の路線を合わせると 304.1 km の路線網を形成し、首都の基幹交通としての役割を担うまでになった。

ここに至る 90 年間には、安全確実に迅速な施工を目指して様々な建設技術の導入と開発、それに合わせた機械化が行なわれてきた。

本稿は、黎明期から現在までの地下鉄建設の歴史に沿って技術の変遷と、そこで使用された主な建設機械について、東京メトロの保有する路線を中心に概観するものである。なお、建設若しくは保有する組織については、時代順に東京地下鉄、帝都高速度交通営団（以下「営団」）、東京メトロの名称を時点に合わせて使用する事とする。

2. 戦前・戦中期の施工技術

昭和 2 年（1927 年）に東洋初の本格的な地下鉄道として開業した東京地下鉄道の浅草～上野間は大正 14 年（1925 年）に本格的に工事着手した。施工方法は都市トンネルの代表的な施工方法である開削工法を採用し、人力での施工が中心であった。当時の開削工法では土留めは親杭横矢板、中間杭や切梁、継材には角材を用い、路面覆工も木製であり、高価な鋼材を使用したのは土留め杭と鋼矢板、路面覆工桁などであった。

このような中で、用いられた建設機械は、I 型鋼を使用した土留め杭の打設にはドイツ製の直立式の打撃

式杭打ち機、坑内の土砂運搬にはナベトロ、土砂搬出には土砂巻き上げ機を使用し、コンクリートは現場練りで路上に電動ミキサーを設置して製造した。また、防水の下地に圧搾空気式のセメントガン、路上の運搬にはトラックなどが用いられた。

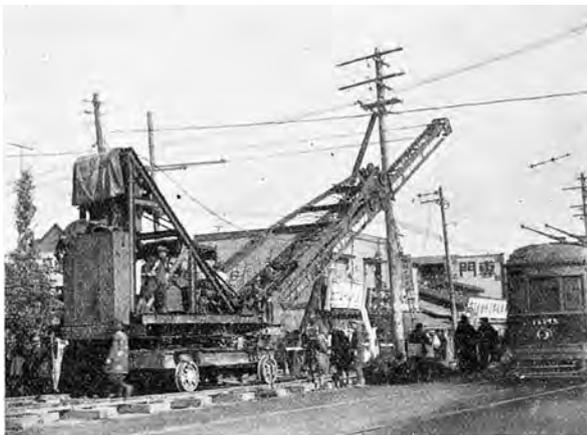
ドイツのシーメンス社から購入した直立式杭打ち機は「電動錘落下直立式杭打ち機」と呼ばれ、日本で最初に採用したものである（写真—1）。



写真—1 ドイツ製の直立式杭打ち機

東京地下鉄道史にはその使い勝手について「本機は其の構造簡易、重量大ならず、取扱ひにも便」である旨が記載されている。しかし、この杭打ち機は、直立固定であり、電話線や電灯線、路面電車の電車線などの架空線の直下を移動するときは、これらを撤去する

か杭打ち機本体を解体する必要があったため、圧搾空気錠による方式の「可倒式杭打ち機」を東京地下鐵道が独自に開発し、万世橋仮駅までの工事に使用したが、重量が重すぎたため、以降の工事ではあまり用いられなかったようである（写真—2）。



写真—2 東京地下鐵道が開発した可倒式杭打ち機

このほか、掘削土砂を搬出する方法でも色々として見られ、隅田川を利用した舟運や数種類の土砂巻き上げ機を採用している。

浅草付近の土砂搬出では隅田川の舟運に着目し、駒形付近から約70mの仮設隧道を築造して隅田川の駒形河岸に栈橋を設け、ナベトロから直接土砂運搬船に積み込む方式を採用した。仮設隧道には土工軌道を2線仮設し、エンドレスワイヤーによってナベトロを往復運転できる構造とし、栈橋で土砂を落としたナベトロは再び掘削坑内に戻るシステムを構築しており、この様子は建設記録映画にも残されている（写真—3）。



写真—3 仮設栈橋での土砂運搬、栈橋設備はほとんど木製である

土砂巻き上げ機にも数種の方式を採用しており、当初はベルリンの地下鉄で使用したスキップホイストを改良して使用したほか、地表の占用面積が少なく、移

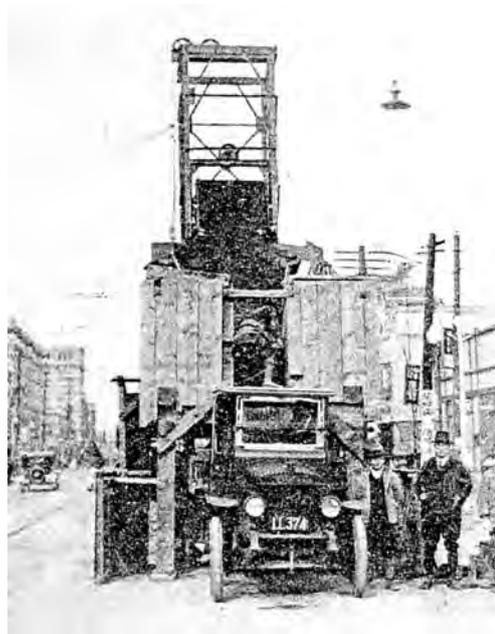
動が簡便な「エンドレスバケット」を万世橋仮駅までの建設工事で採用した（写真—4）。なお、当該工事では坑内の土砂移動にベルトコンベアーを初めて使用した。



写真—4 万世橋までの建設に使用したエンドレスバケット

以降、新橋までの建設工事では、戦後に多数用いられたスキップタワーの原型ともいえる「バケットタワーエレベータ」を改良を加えつつ採用し、坑内の土砂運搬にはボールベアリングの車軸とゴムタイヤを使用した手押し車（リヤカー）を利用し、土工軌道敷設の手間を省き効率化を図った（写真—5）。

このように戦前から戦中期にかけての施工技術は人力に頼る部分がほとんどであったが、施工の合理化と効率化を目指した機械の開発にも努力が注がれ、戦後に急速に発達した地下利用の推進につながる技術の基礎を構築した。



写真—5 バケットタワーエレベータ

3. 戦後復興期の施工技術

東京における戦後の地下鉄建設は営団の丸ノ内線から始まった。建設に着手した昭和26年(1951年)は講和条約の発効前であり、実質的にはGHQの統治下に置かれていた。終戦直後の混乱から一段落しつつはあったものの経済的にはまだ逼迫した時代で、材料の調達も困難であり技術者も少なく、戦前の技術水準までの立ち直りがまだできていなかった。このような時期に丸ノ内線の建設は、爆発的に増大した東京の交通需要に対応するため、喫緊の課題として掲げられたのであった。

これらに対処するため営団では、経済的に効率良く建設を進めるための施策として、当時朝鮮特需で高騰を続けていた鋼材の貸与と支給を行い、現場で大量に製作する事が困難なコンクリートは工場配合の生コンクリートを土木工事では日本で初めて本格的に採用して支給することを決定した。

(1) 初期の丸ノ内線工事

丸ノ内線の施工方法は、戦前の技術を踏襲したものであり、標準的な開削工法を主に建設され、建設機械も非常に少ない中での工事であった(写真—6)。

営団OBの渡邊健氏は1990年2月号の土木学会誌で、御茶ノ水駅建設工事の状況について以下のように記されている。「施工法は、銀座線当時の伝統的な標準開削工法がそのまま適用された。(中略)掘削は、土留め支保工の切梁にすべて松丸太が使われ、坑内はツルハシとスコップとリヤカーが主体で、ごく一部でベルトコンベヤーが使われている程度であった。建設機械に至っては、ウインチと三股とブロックが主で、クレーン車はまさに貴重品扱いだった。ただ一つ、我が国の土木分野で、最初に本格的採用に踏み切った生コンクリートだけは、ビンゾールの名前とともに忘れ難い。」



写真—6 丸ノ内線掘削工事、土工軌道と牽引用のウインチが見える

生コンクリートを土木工事では日本で初めて本格的に大量採用した理由について、丸ノ内線建設史では、「ずい道の建設には各種コンクリートを大量に必要とするが、これらを工事現場で調整することは難しく、生コンクリート製造工場から直接購入すれば、工事の進捗状況に合わせて必要量を購入でき、かつ工場内でセメント、砂利、砂などの配合比率が正確に混合され、強度の均一性を保つ事が出来るなど経済上、技術上の利点がある」と述べており、この大量採用によって生コンクリートに対する信用度が増し、その後の発展に大きく寄与したことが広く知られている。

生コンクリートの輸送に欠かせない運搬車は初期には専用のダンプトラックを使用していたが、供給者側の品質向上の努力により傾斜型のアジテータ車が昭和27年(1952年)に開発され、現在のアジテータ車の礎を築いた(写真—7)。



写真—7 丸ノ内線建設初期の生コン運搬車

(2) 丸ノ内線の特殊工事

丸ノ内線は第1期工事区間の池袋～御茶ノ水間を昭和29年(1954年)に開業後、東京、銀座、霞ヶ関、新宿と順調に延伸していった。

この間の建設工事で特筆されるべきものとして、内幸町付近での潜函工法と国会議事堂付近のルーフィールド工法による工事が挙げられる。

潜函工法は戦前から大阪の地下鉄などで採用されていたが、東京の地下鉄での採用は丸ノ内線が初めてであった。内幸町付近は地盤が軟弱で帝国ホテルや東京

宝塚劇場など主要な構造物に近接した施工となるため、周辺への影響を最小限とする工事方法が要求された。このため、144 m の区間で路上から函体を沈める潜函工法を採用した。構造は鉄筋コンクリート1層2径間の箱型で、幅9.6 m、長さ28 mの函体5基を深さ11 mまで沈める工事を行った（写真—8）。潜函工法はこの後も日比谷線日比谷付近や東西線、有楽町線などの軟弱地盤の箇所で大規模に施工されている。



写真—8 内幸町付近の潜函工事

また、昭和30年代に入ると次第にトンネルが深くなり、開削工法での工事では難易度が非常に高くなった。この頃から掘削深さの大きな区間については、開削を最小限にできるシールド工法の採用を検討するようになり、深さが22 mに達した丸ノ内線国会議事堂前駅付近では昭和32年（1957年）にルーフシールド工法を採用した。

ルーフシールド工法の採用にあたっては、土質、地下水、沿線建造物等の詳細調査を実施し、有識者による研究会を設けて数次にわたる討論・研究を重ねた結果、付近の建造物に与える影響が小さく、工期が確実である点を評価し、日本の地下鉄では初めてのシールド工法となる「ルーフシールド工法」を国会議事堂前～霞ヶ関間の231 mで施工することとなった。施工方法は、側壁導坑を圧気で掘削し、貫通後排気して本坑掘削を大気中で行なうもので、一次覆工は移動センターによる全断面1回打設で巻き厚を85 cmとし、約9ヶ月の工期で到達した（写真—9）。



写真—9 国会議事堂付近で使用したルーフシールド

4. 高度成長期における建設技術

1960年代以降は高度成長の時代に突入り、地下鉄の建設速度も更なる需要の増大に追従して加速していった。以降の約20年は、地下鉄の建設技術が大きく飛躍した時期であり、営団においても常に複数路線を同時施工していた最繁忙期であった。

(1) 社会の要請と技術革新

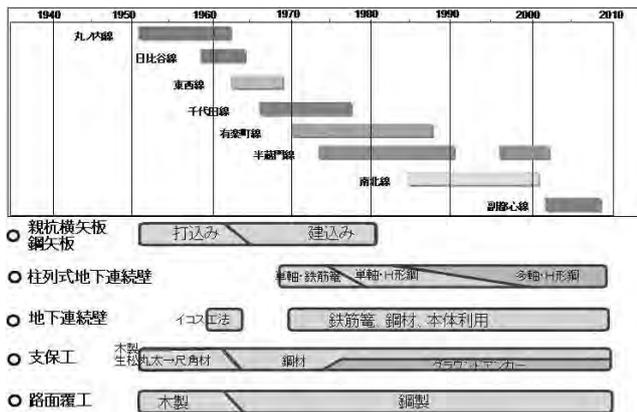
この頃から社会全体で公害問題や施工期間の短縮、省力化といった視点がクローズアップされ、騒音・振動や地下水低下、地盤沈下などに対する環境保全の要請、施工の機械化、路面交通の更なる増大などの変化を背景に、低振動・低騒音施工、剛性・遮水性の向上、施工空間の確保、重荷重対応など様々な技術革新が図られた。

開削工法においては、柱列式地下連続壁土留めの採用と施工機械の多軸化や芯材の鋼材化などの効率化と合理化が図られるとともに、杭打ち機のほかクレーンやブルドーザ、バックホウなどの導入も積極的に行なわれ、建設機械自体のパワーアップや低振動、低騒音化に努力が注がれた。

図—1は営団～東京メトロにおける開削工法の変遷を示したものである。これを見ると概ね1980年頃までに現在の開削工法の形態がほぼ確立されていることがわかる。

開削工法における土留め杭の打設方法は、1960年代の後半には従来の打撃式からアースオーガーによる建込み方式が変わっており、低騒音、低振動化が図られるとともに、杭自体が高剛性で遮水性の高い柱列式地下連続壁へと発展している（写真—10）。

また、掘削時に仮設する支保工も、より剛性の高い



図一 営団～東京メトロにおける開削工法の変遷



写真一 10 アースオーガによる柱列式地下連続壁の施工

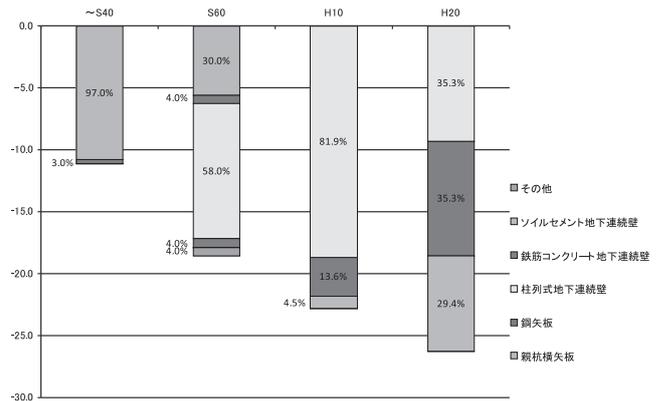


写真一 11 全面的に鋼製支保工を採用した日比谷線銀座駅の工事

鋼材へと変化しており、日比谷線の銀座・日比谷地区では全面的に支保工を鋼材化して設置間隔を広げたことにより、機械土工の先駆けとして導入されたブルドーザなどの重機類が自由に行動できる環境となったため、機械掘削の効率が大幅に向上するなど、工程の促進にも大きく寄与した(写真一 11)。

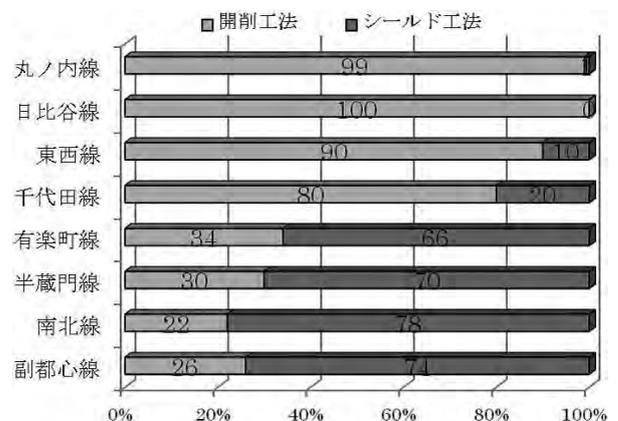
(2) 掘削深の増大とシールド工法の積極的な採用

1960年代後半以降は、既設路線や計画路線との交差接続に加え、河川との交差や道路計画等による制限からトンネルの設置位置が飛躍的に深くなり、これに起因して剛性が高く遮水性の良い柱列式地下連続壁や鉄筋コンクリート地下連続壁などの土留めが多く採用されるようになった。この関係を示すべく駅の設置深さと土留めの関係を表わしたのが図一 2である。



図一 2 営団～東京メトロにおける駅の設置深さと土留め杭

掘削深さの増大に伴って開削工法による施工が困難若しくは効率的ではない駅間においてはシールド工法が多用されるようになる。シールド工法は、前述のように1950年代後半から一部の掘削深さの大きな区間で検討されていたが、路面や周辺建物への影響が少ない利点を生かして図一 3のように積極的に採用されるようになった。これ以降、河川下や起伏の大きな地形の区間、さらに設置位置が深い駅においてもシールド工法を採用する事例が増えていった。



図一 3 営団～東京メトロにおける路線別の「開削」「シールド」比

地下鉄工事におけるシールド工法の採用は前述した丸ノ内線のルーフシールドを嚆矢(こうし)とするが、今日最も一般的に用いられている円形のランニングト

ンネルは、昭和 37 年（1962 年）に完成した名古屋市交通局の東山線の覚王山トンネルが最初であった。

初めてシールド工法を採用した 1950 年代後半から 1960 年代後半までは、地盤改良などの補助工法を併用した手掘りの開放型圧気式がほとんどであったが（写真—12）、1970 年代以降は補助工法無しに切羽の安定が図れる密閉型に移行した。密閉型シールドはその後も発展を続け、当初採用された泥水式のほか、土圧式も技術的進歩を遂げ、対象地盤などの施工条件によって方式を使い分けるなど、より安全で確実な施工ができるようになった。



写真—12 半蔵門線神保町駅付近で使用した開放型圧気シールド

その後は、大断面化、大深度化、長距離化などの技術が進むとともに、多様な断面形状を掘進できる機械の技術も開発され、現在では駅間トンネルのほぼ全てがシールド工法による施工となっている。

5. 平成以降の建設技術

平成以降の地下鉄建設では、駅部は開削工法、駅間はシールド工法という原則が完全に定着し、更に深度を増した開削工法における土留めは、硬質地盤では効率の良い多軸式の柱列式地下連続壁を、軟弱地盤ではより剛性の高い鉄筋コンクリート地下連続壁を採用するようになった。

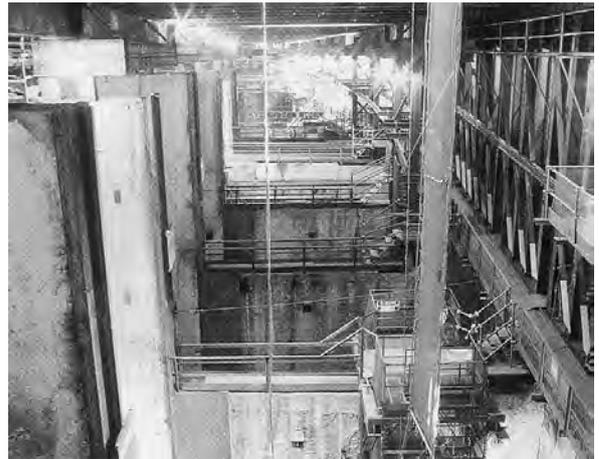
開削工法での掘削などに使用する機械も更に進化し、工事期間中の環境保全に配慮した機械の導入を積極的に行なうとともに、合理化や効率化、自動化なども視野に入れた技術の開発と試行なども行なわれた。

(1) 「7号ビジョン」の策定と南北線建設工事

東京メトロの南北線は命名前の名称を東京都市高速鉄道7号線と言い、営団では「21世紀を指向する便利で快適な魅力ある地下鉄」を目指して近未来型パッ

ケージともいえる「7号ビジョン」を昭和 63 年（1988 年）に策定した。

「7号ビジョン」は、利便性の向上、快適性の向上、ワンマン運転の実施、ホームドアの設置、建設費・運営費の低減の5項目からなり、建設費の低減では、駅のコンパクト化と浅層化、シールド区間の延長比率を増加させイニシャルコストの削減を図るとともに、新技術を積極的に開発して低コスト化することが大きな命題とされた（写真—13）。



写真—13 南北線六本木一丁目駅における大規模水中掘削

これに基づき、開削工法においては鉄筋コンクリート地下連続壁の積極的な本体利用や大規模水中掘削の採用、流動化処理土の開発と本格的な採用などを実施し、シールド工法においても、大断面シールドマシン転用の技術開発や断面変化対応型シールド機の開発、新型セグメントや継手の採用などが行なわれた（写真—14）。これらは全て施工の合理化と効率化、コスト縮減に大きく寄与しており、半蔵門線の押上までの延伸や副都心線の建設につながる技術革新の源となった。



写真—14 南北線白金台駅で採用した着脱式泥水三連型シールド

(2) 副都心線建設工事における環境負荷低減

副都心線は現在東京メトロが保有する路線では最後の開業区間として平成20年(2008年)に開業した。経過地である明治通りは東京都内でも特に交通量が多く作業時間等の制約が多い場所であり、地下空間も既存の地下鉄などが輻輳しているという厳しい施工条件の下、これまで培った建設技術とノウハウを駆使しながら、様々な新技術を積極的に採用し、3つの副都心を縦貫する基幹路線を完成させた。

工事では、社会の要請に基づく施工の効率化やコスト縮減とともに環境負荷低減に主眼をおき、路線の約7割をシールド区間とすると同時に、建設副産物の発生抑制と再利用、CO₂低減に寄与する建設機械の積極的な採用などを実施した。

シールド工事においては、採用断面の最適化を目指して、円形断面上下部の鉄道トンネルとして利用されない空間を減らしつつ、構造的に有利な円形断面の特性を活かした断面形状とした複線型の複合円形シールド(写真—15)を採用したほか、駅部と駅間部を1台の機械で掘進する親子シールドも採用した。



写真—15 副都心線で使用した複線型複合円形シールド

また、開削工事でも、酸化触媒装着10tダンプと圧縮天然ガス自動車の採用や排ガスゼロで騒音の小さ

い電動テレスコピックコラムシェルや電動クレーンの導入を実施し、建設工事全般では建設発生土や建設汚泥をリサイクルしてシールドトンネルのインバート材や流動化処理土として埋め戻しに再利用するなど、環境負荷の低減に努めた。

6. おわりに

地下鉄の建設技術は、その時代ごとに最善の施工方法を選択しつつ試行錯誤を繰り返すという経験の積み重ねが、安全確実で効率的な施工方法を確立する礎となっている。これらの技術を今後も継承し、次の世代へと繋げていくことが、これからの我々の使命ではないかと考えている。

本稿では地下鉄の建設技術と発展過程について時代順に追ってきたが、誌面の都合と筆者の不勉強に起因して、内容が不十分な部分も多々あると思われる。この場をお借りしてお詫びするとともに、御容赦願えれば幸いである。

JCMA

《参考文献》

- 1) 東京地下鉄道：東京地下鉄道史 坤, 1934
- 2) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道建設史「丸ノ内線、日比谷線、東西線、千代田線、有楽町線、半蔵門線、南北線」
- 3) 東京地下鉄(株)：東京地下鉄道建設史「副都心線」
- 4) 土木学会：土木学会誌 1990年2月号

〔筆者紹介〕

平野 隆(ひらの たかし)
東京地下鉄(株) 改良建設部
技術基準担当課長

