

開削工法における土留技術および解析技術の変遷

CHANGES OF SHEATHING AND ANALYSIS
TECHNIQUES IN OPEN CUT METHOD

渡 邊 健*

By Takeshi WATANABE

まえがき

地下構造物築造の代表的工法である開削工法は、施工および解析の両面で社会情勢の変化とともに種々の変遷を辿ってきた。これは都市内での工事が複雑化してきたことによると考えられ、この複雑化のうちには構造物が大型化、深層化していること、また、埋立地のようなきわめて軟弱な地盤地帯での工事が多くなったことにもよるが、一面においては、社会環境の保全のために開発された技術も多く見られるところである。

一方、開削工法の技術面における変遷を見ると、時代的に技術的進歩が成されているが、この進歩は各時代の他産業を含めた総合技術力と、その時代の社会的要求(需要)に負うところが多いといえることができる。

帝都高速度交通営団においては、戦後未だ混乱期にあった昭和 26 年丸の内線池袋—御茶ノ水間の建設工事に着手して以来、東京の都心部およびその周辺において継続して地下鉄建設を行ってきた。この建設における技術的経緯は標題と合致するものと思われるので、本文においては営団建設工事における歴代別の工法の変遷およびその理論的裏付けとなった解析技術の変遷について述べることにする。

1. 土留技術の変遷

(1) 変遷の概要

営団における地下鉄建設の歴史は、昭和26年3月30日丸の内線池袋—御茶ノ水間の工事の鉄入れ式によって幕が開かれた。この昭和 26 年はサンフランシスコ講和条約(昭和 26 年9月9日)が調印された年であり、この戦後の混乱期に建設資金、技術面等多くの問題がある中で着工にこぎつけた先人の苦労は大変なものであった。

当時の営団は、戦前の浅草—新橋間を建設した東京地下鉄道(株)の技術および技術者を引継いでおり、浅草—上野間の建設にあたっては、ドイツ人技師プリスケの指導を受けたことから、営団の開削技術はドイツの技術を祖とするといえるかもしれない。

営団では、丸の内線に引続き、日比谷線、東西線、千代田線、有楽町線、半蔵門線と 6 路線、延長にして 131.5 km を約 35 年にわたり建設してきたが、この間土留技術面でいえば、時代に即応した施工法を取り入れ、大型開削工法への適用と実績を作り上げてきた。このうち、特に土留工および土留支保工は、各路線別(年代別)に表-1 のような変遷を遂げている。

以下、各路線別に標準工法およびその時代に一般化した施工法について述べてみよう。

(2) 丸の内線建設時代

(昭和 20 年代後半~30 年代前半)

a) 標準土留工法

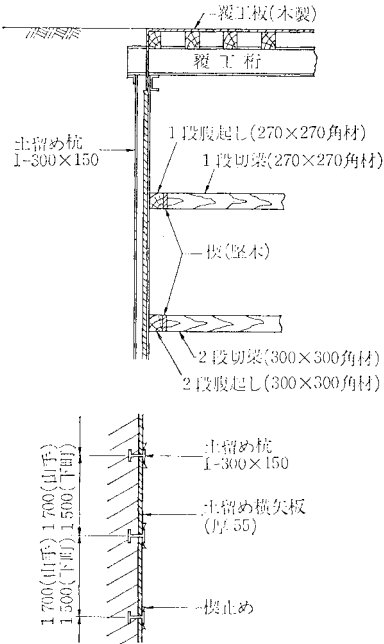
戦後の地下鉄建設は東京の丸の内線から開始された。本路線はほぼ全区間開削工法で行われたが、その標準的な施工法は図-1 に示すとおりである。当時は掘削深がせいぜい 10 m 程度であり、土留杭は I 形鋼 (300×150) を 1.5 m 前後の間隔で打込み、その間を木製の横矢板で土留を行う親杭横矢板工法であった。これは土留用の鋼

* 正会員 工博 帝都高速度交通営団理事

(〒110/東京都台東区東上野 3-19-6)

表一 開削工法における土留め工法の変遷

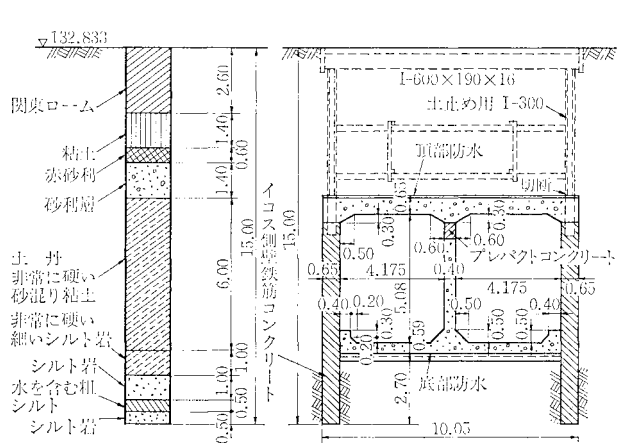
区 分	土 留 め 工		支 保 工
	標 準 工 法	特 殊 工 法	
丸の内線 (昭和20年代後半 昭和30年代前半)	<ul style="list-style-type: none"> 親杭・横矢板 (I形鋼・打込み) 軟弱地盤 鋼矢板 (打込み) 	<ul style="list-style-type: none"> イコス工法 (試験施工) 	<ul style="list-style-type: none"> 生松丸太 (初期) ↓ 木製尺角材
日比谷線, 東西線 (昭和30年代後半 昭和40年代前半)	<ul style="list-style-type: none"> 親杭・横矢板 (前期……I形鋼・打込み) (後期……H形鋼, セン孔・建込み) 軟弱地盤 鋼矢板 (打込み) 	<ul style="list-style-type: none"> イコス工法 	<ul style="list-style-type: none"> 尺角材 (初期) ↓ H形鋼 (切ばり), I形鋼 (腹起) ・ブレード工法 (軟弱地盤)
千代田線, 有楽町線 (第一期) (昭和40年代)	<ul style="list-style-type: none"> 親杭・横矢板 (H形鋼, セン孔・建込み) 	<ul style="list-style-type: none"> 軟弱地盤 ・柱列式地下連続壁 (前期……鉄筋籠) (後期……H形鋼) ・地下連続壁 (鉄筋籠) ・生石灰杭 (地盤改良) 	<ul style="list-style-type: none"> ・H形鋼 (切ばり), H形鋼 (腹起) ・(切梁ブレード工法の標準化) ・PC アンカー (鋼線残置)
有楽町線, 半蔵門線 (第二期以降) (昭和50年以降)	<ul style="list-style-type: none"> 親杭・横矢板 (H形鋼, セン孔・建込み) ・柱列式地下連続壁 (H形鋼, 口径増大) ・地下連続壁 (鉄筋籠) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下連続壁 (プレキャスト版, 泥水同化) ・多軸式オーガーによる柱列式地下連続壁 (H形鋼, 鋼矢板, プレキャスト版) 	<ul style="list-style-type: none"> ・H形鋼 (大型支保工 H-400 採用) ・PC アンカー (鋼線除去)



図一 丸の内線当時の標準掘削工法 (昭和20年代後半)

材に違いはあるが、現在でも最も一般的に用いられている工法である。当時の杭打ちは、やぐらを組みモンケンによる打撃工法で行い、支保工には着工当初は材料不足のため生松丸太を使ったが、後になり30cm角の尺角と呼ばれる木材が一般的となった。このように土留工法の原理は今日も全く変わらないが、施工機械や使用材料についてはまさに隔世の感がある。

また、特に地盤が軟弱などところでは、土留めの止水性



図二 イコス工法による地下連続壁 (昭和36年, 丸の内線方南町)

を考慮して鋼矢板が用いられたが、施工機械の能力が小さいため深い掘削や地盤が硬くなっているところでは、鋼矢板に曲りや噛合せのずれが生じ、掘削時に多大の補強を必要とした。

b) 特殊な工法

現在の地下連続壁工法の地下鉄利用への先駆を成すものとして、昭和36年に方南町付近においてイコス工法により土留壁および構築側壁を兼用するものが施工された。ここでのイコス工法の採用は最新の技術導入であり、試験工区的なものであったため、延長にして20m(両側40m)であった。当時、本工法の地下鉄での利用は日本で初めてのことであり、施工機械能力の貧弱さから施工はかなり困難を要したが、結果は成功を納め、わが国の

地下連続壁工法の草分けとなった(図-2)。

(2) 日比谷線・東西線建設時代

(昭和30年代後半~40年代前半)

a) 標準土留工法

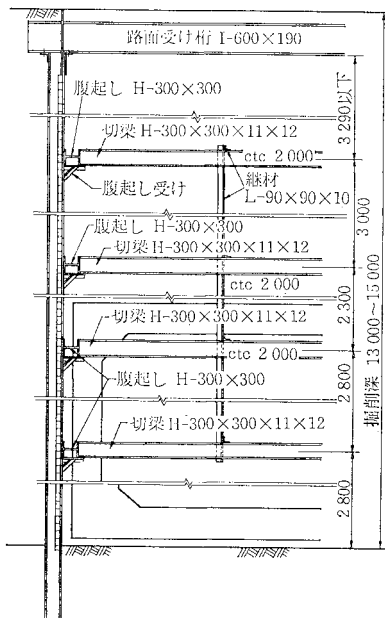
日比谷線・東西線の建設当時は、東京五輪に向けて各種工事が盛んに行われており、このため労働者不足の影響により作業の機械化の気運が高まった時代であった。また、路面交通の増大に加え、公害問題についての意識が高まってきており、さらに路線の立体交差等により構造物が深層化する傾向が顕著となってきた。したがって、標準土留工法は丸の内線建設時代と同様、親杭横矢板工法であったが、先に述べた諸事情に対処するため施工法に種々改良が加えられた。

b) 杭打工法の変化

日比谷線建設当初においては、開削工法での土留杭打ちはデルマック式の打撃工法を用いていたが、都心の銀座地区の着工を契機に沿道公害に対する配慮から、従来の打撃工法を止めアースドリルにて穿孔し、その後杭を建込むいわゆる穿孔鋼杭建込み工法に切替を行った。また、深層化に伴って土留杭強度を向上させる必要が生じ、剛性の大きいH形鋼が鋼杭の主体となった。東西線建設時には、全面的な穿孔鋼杭建込み工法となった。

一方、土留支保工についても日比谷線銀座地区から、それまでの木材にかわってH形鋼材が使用され、切梁間隔を広げることが可能となったため、機械による掘削の

掘削深 13.00m~15.00mの場合
土留杭 H-300×300×11×12, ctc=1.50m

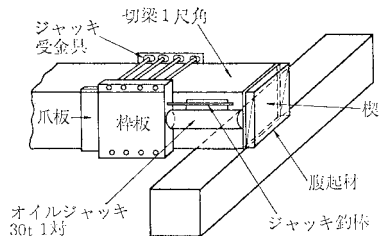


(昭和39年頃, 東西線)
図-3 鋼製支保工を用いた標準掘削工法

能率は大きく向上した。昭和40年頃になると形鋼生産量も大きく伸び、価格的にも木材と十分対抗できるようになったため、東西線竹橋以東では支保工には全面的に形鋼が使用された(図-3)。

c) 軟弱地盤地帯における施工法

日比谷線南千住一入谷にわたる軟弱地盤地帯における工事では数々の特殊な施工法を用い、今日の軟弱地盤における施工法を検討する上で貴重な施工例となった。当地域は、N値0~2のシルト層が地表面下25m以上にも及ぶきわめて軟弱な地盤であるため、土留めには鋼矢板が使用された。また、ヒービング防止のため根入れを6m以上と非常に大きくし、切梁間隔は水平・垂直とも従来より50cm程度縮小して土圧に抵抗させた。切梁架設時には、今日では一般的となっているが、オイルジャッキによって15~30tのプレロードをかけて締め付ける工法を初めて採用し、従来の楔打込みよりはるかに大きい効果をあげた(図-4)。また、当地区では、土圧および周辺地盤の沈下調査を行ったが、これは今日の計測管理の先鞭をつけたものとして評価される。



(昭和35年頃日比谷線)
図-4 切梁のジャッキ締め(プレロード工法)

(4) 千代田線・有楽町線(第一期)建設時代

(昭和40年代)

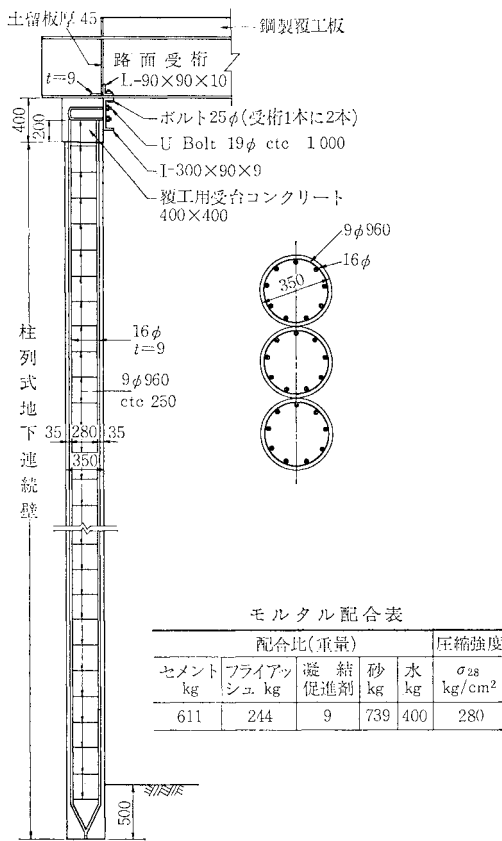
a) 標準土留工法

この時期における標準工法は、東西線建設後期の施工法を受け継ぎ、穿孔鋼杭建込み工法による親杭横矢板工法である。また、土留杭および土留鋼材の種類や使用間隔等については現在と変わらず、今日の標準的な穿孔鋼杭建込工法の仕様はこの時期に確立された。

b) 地下連続壁工法

地下連続壁工法は、わが国においては柱列式地下連続壁工法と壁式地下連続壁工法との2方式を指す言葉として用いられている。

① 柱列式地下連続壁工法：千代田線の第一期工事北千住~大手町間の建設工事を始めるにあたり、その設計時点の昭和39年に地下連続壁工法について突込んだ研究を進め、その本工事への適用化をはかった。それは、丁度騒音・振動を主とした建設公害問題が社会的にも厳しくなりつつある時代で、地下鉄工事にお



(昭和 41 年営団地下鉄)
図—5 土留用柱列式地下連続壁

ける夜間の杭打と鋼矢板打に代わる工法を案出する必要に迫られていたときにあたる。

杭打については、東西線工事においてアースオーガーによる穿孔・建込み方式が実施されていたので、これを全面的に採用することとし、鋼矢板打に代わる工法の採用が大きな問題であった。

当時一部民間工事で PIP 工法を試行しているのを参考にして、これを中心に検討を進めた。その結果、工事費も鋼矢板埋殺しの場合より少し高い程度で済むことがわかり、柱列式地下連続壁工法を本線工事に全面的に採用することを大胆に決定した。この工法の適用範囲は、軟弱地盤地帯、建造物近接施工箇所および掘削深さの大なる箇所とした。

昭和 41 年本線工事に着手したが、当時最も苦労したことは、ゼネコン各社が柱列式地下連続壁工法の施工経験がほとんどなく、技術的にも習熟しておらず、僅か 2, 3 社がなかば独占法に施工の状況であったことである。したがって、機械の購入から始まり、施工技術を習得しながらの作業を行うという状態で、まさに初歩的段階であった。当時用いた柱列式地下連続壁

は図—5 に示すとおり、全部鉄筋を芯に用いていた。各工区の施工実績から改良すべき主な点として、

1) シルト層では土留壁としても相当の止水性をもち、これがかえって背面土圧の著しい増加現象をきたし、土留壁としてもっと強度を増す必要がある。

2) 砂層、特に滞水砂層中での施工は、モルタル注入前に孔壁の土砂崩落現象がみられ、完全な丸柱形の場所打杭を形成せず、土留壁として不完全であるばかりでなく、路面覆工の支承としても不安定な構造物となり、安全施工上からも考慮すべきである。

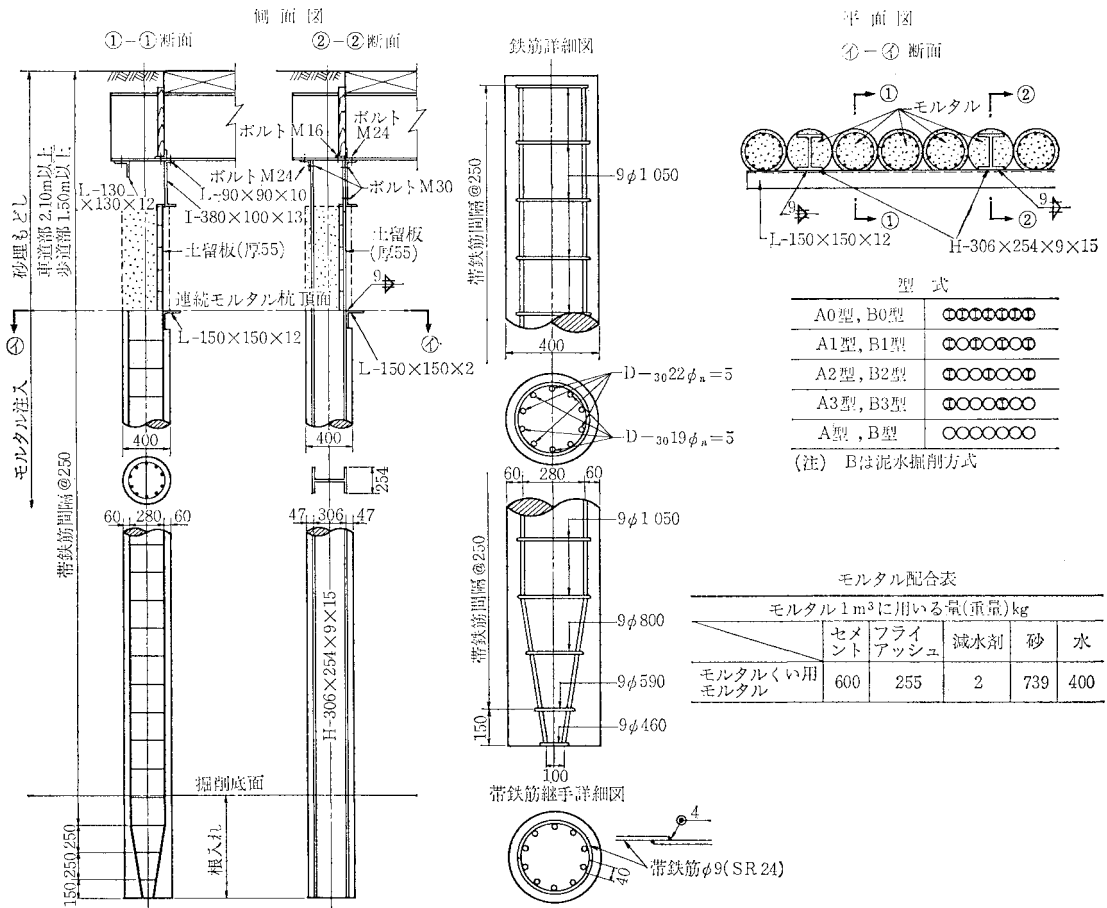
の 2 点が明らかとなった。

そこで、第二期工事の昭和 43 年からは図—6 に示すように覆工桁の支承となる親杭には芯に H-300 の形鋼を使用することとし、杭直径も 400 mm と大きくすることにした。親杭の間隔は、4 本に 1 本の割合で配置するのを標準型とし、地質および土圧に対応させるため、親杭間隔を適宜つめる手段を講ずることとした。さらに、狭隘な作業空間とか完全な杭形成が著しく困難な箇所には、泥水使用の穿孔方法をも用いることにした。これらの方法を用いることと施工業者の施工技術の向上により、柱列式地下連続壁工法もより一層万全な形での施工が可能となり、特に従来はケーソン工法以外は手段がなかった日比谷付近においても、6, 9 号両線の複々線トンネルを大規模な開削工法で、しかも安全施工の形で工事を遂行することができた。

さらに昭和 47 年からは、子杭に用いている鉄筋籠もこれを I 形鋼に取り代えた方が施工性と経済性に優ることから、図—7 に示すような構造に変更して、柱列式地下連続壁工法は現在に至っている。

② 地下連続壁工法：いわゆる壁式の地下連続壁工法については、前述のイコス工法の試用以来途絶えていたが、上記柱列式地下連続壁工法の採用が活発化するにつれ、この壁式地下連続壁工法も脚光を浴びるに至った。

すなわち、柱列式地下連続壁工法は土留用としては十分にその目的を果たしうる仮設構造物であるが、その工費と構造内容からみてこれを仮設にだけとどめておくのは不経済であり、積極的にこれを本構造物としても利用することを考慮すべきである。しかし、柱列式ではこれを本構造物として用いることは技術的な問題が残るので、そこでクローズアップされるのが壁式地下連続壁工法である。この工法を採用すれば、柱列式より完全な土留壁を形成するばかりでなく、安全施工の面からみても完璧であり、さらに、これを本体壁の一部として利用する場合は力学的にも柱列式より格



図一六 土留用柱列式地下連続壁 (昭和 43 年営団地下鉄)

段有利であるなど経済性の面からも成り立つというのである。ただ、技術面を中心とした問題点がいくつかあるので、実施に際してはこれらの問題解決が必要で

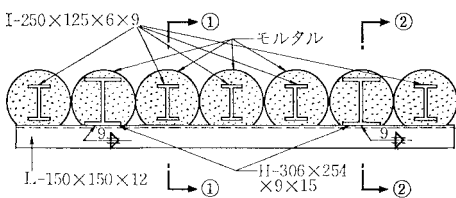
あることはもちろんであった。

千代田線においては、霞ヶ関引上線および国会議事堂前駅立坑における採用を皮切りに、乃木阪、表参道、代々木公園と施工され、有楽町線では江戸川橋に採用された。いずれも軟弱地盤や大深度掘削を行う滞水性地盤および重要近接構造物がある箇所での土留壁ないしは本体壁兼用として用いられ、良好な施工結果を得た(図一8)。

c) 生石灰杭工法

生石灰杭工法は、高含水比の粘土質地盤に生石灰を投入し、脱水と膨張による圧密作用により地盤の強さを増強する地盤改良工法である。

この工法は、昭和 42 年に千代田線町屋付近において最初に採用され(図一9)、ここでの良好な施工結果をもとに引続いて日比谷付近 6, 9 号線併行部にも採用された。これを契機として、従来ケーソン工法でなければ施工不可能だった軟弱地盤トンネル工事にも、地下連続壁による土留と生石灰杭による地盤改良とを併用した開削



型 式	
A0型, B0型	⊙⊙⊙⊙⊙⊙⊙
A1型, B1型	⊙⊙⊙⊙⊙⊙⊙
A2型, B2型	⊙⊙⊙⊙⊙⊙⊙
A3型, B3型(標準)	⊙⊙⊙⊙⊙⊙⊙
A型, B型	⊙⊙⊙⊙⊙⊙⊙

(注) Bは泥水掘削方式

(昭和 47 年営団地下鉄)

図一七 土留用柱列式地下連続壁

過することや、深層化に伴い大深度掘削箇所が増えてきたことから、親杭横矢板工法を採用できる箇所は少なくなってきた。このため、柱列式地下連続壁工法や地下連続壁工法が多用されることとなったが、その他にも新しい工法が種々採用されている。

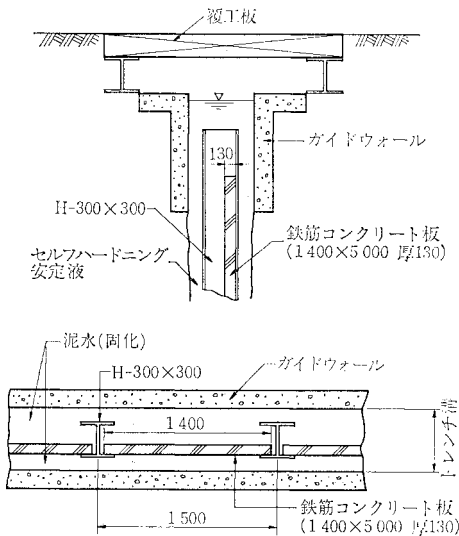
b) プレキャスト版による地下連続壁

地下連続壁工法の応用として、昭和 52 年に有楽町線要町付近でプレキャスト版建込み工法が試験的に施工された。ここでは、泥水掘削によるトレンチ溝内に 1.5 m 間隔で建込まれた H 形鋼の間に、幅 1.4 m、高さ 5 m、厚さ 13 cm の鉄筋コンクリート版を建込んで土留横矢板の役目をさせるものであり、トレンチ溝内の泥水固化については、自然硬化するものと強制固化させるものと 2 種について行われた(図—11)。ここでは壁体は仮設材としてのみ用いられたが、福岡の地下鉄工事ではこの壁体は本体壁としても利用された。

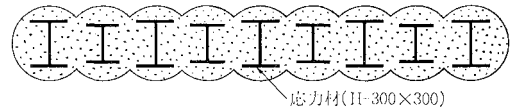
c) 多軸式オーガーによる柱列式地下連続壁工法

柱列式地下連続壁工法は、柱列杭の各接点を完全に密着させることは困難であるため遮水性に問題があったが、この欠点を解決するものとして多軸式オーガーによる工法が開発された。この工法は、福岡における地下鉄工事で好成績を収めたので、これを基に本工法が昭和 58 年に 8 号湾岸線豊洲駅付近で採用された。これは、特殊な機能を持つ多軸混練オーガー機により土中を掘削し、その際先端よりベントナイト液等の混合液を吐出させて掘削土砂を混合させつつ現場打ちのソイルセメント壁を造成するものである。この場合、各エレメント側部をラップさせ止水性を高めている(図—12)。

以上、営団が開削工法において今日まで採用してきた



(昭和 52 年, 有楽町線要町)
図—11 プレキャスト版による地下連続壁



(昭和 58 年, 8 号湾岸線豊洲)
図—12 多軸式オーガーによる柱列式地下連続壁

各土留工法について主なものを述べてみたが、これらわが国の戦後の開削工法の変遷を代弁するものとみてよいだろう。

2. 土留解析技術の変遷

(1) 変遷の概要

土留面に作用する土圧分布の算定は、現在まで多くの提案があり、一義的に決めることができないのが現状である。営団では丸の内線建設当時から開削工事における土圧算定の規準を制定しており、この規準を基としてその後の東西線、千代田線、有楽町線、半蔵門線の建設においては、実状に即した規準に改訂しながら現在に至っている。その間、特に地下鉄技術協議会において「仮設構造物設計指針」を昭和 49 年に制定し、または、昭和 52 年には土木学会で統一的基準として「開削トンネル指針」を制定するに至ったが、両指針の制定にあたって、営団の規準および実績が参考にされた事は意義あることと考えている。

しかし、最近の工事が大規模、大深度、また、軟弱地盤での施工が多くなったことから、これらの設計においても実状にそぐわない面が生じている。また、最近においては、現場計測技術の進歩とともに電子計算機を利用した高度な解析技術が使用される例も多くなってきた。

ここでは、営団における土留解析手法の変遷と、土木学会および地下鉄技術協議会の基準を示し、加えて最近の解析手法について述べることにする。

(2) 丸の内線、日比谷線建設時代

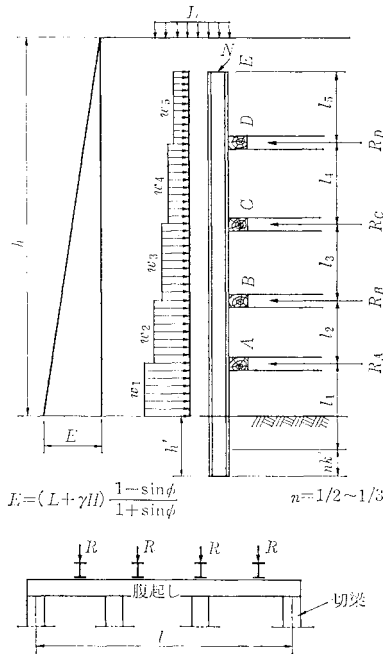
昭和 20 年代後半から 30 年代前半における丸の内線、日比谷線の建設においては、掘削深さも浅く、また、支保工は木材を使用しており、解析技術も簡易なものであった。

仮設構造物設計の規準も、本体構造物の設計示方書の内に包含されており、土圧の算定式はランキン土圧を採用している。

以下に当時の示方書のうち土留関係の抜粋を示す(図—13 参照)。

【土留関係】

a) 土 圧



$$E = (L + \gamma h) \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad n = 1/2 \sim 1/3$$

図-13 ランキン土圧による算式

表-2 土の内部摩擦角

区 分	山手および高台	下 町
ϕ	60°	35°

$$E = (L + \gamma h) \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

ϕ : 内部摩擦角

地下水位を低下し得る仮設構造物に対しては、表-2 の値を標準とする。

② 計算の順序 (土留杭, 腹起し, 切ばり)

① A, B, C, D, E 各段の土圧杭の場合は杭間距離, 矢板の場合は単位長をとる。

② 各段相互の土圧を平均して, w_1, w_2 等を決定する。

③ 各段の反力, R_A, R_B 等および, 曲げモーメント M_A, M_B 等を算出する (土留杭を連続ばりとして計算)。

④ その中の M_{max} と路面受けた反力の最大なる N に対して土留杭を決定する。

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A}$$

W : 土留杭の断面係数

A : 土留杭の断面積

⑤ 各段毎に③で算出した反力を荷重とし, 切ばりを支点とする連続ばりを考え, 腹起しを決定する。

⑥ ⑤の状態に於ける最大反力を軸力として切ばりを決定する。

$$F = \frac{P \left\{ 1 + C \left(\frac{l}{r} \right)^2 \right\}}{180}$$

C : 木材の両端回転端の場合 = 0.000 23

F : 所要断面積 (cm²)

P : 最大反力 (kg)

l : 切ばりの座屈長 (cm)

r : $\sqrt{I/A}$ 最小回転半径 (cm)

⑦ 土留板は鉄杭を支点とする単純ばりとして, 深さに応じた土圧に対して計算する。

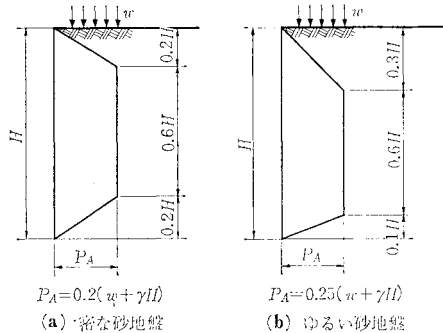
なお, 仮設構造物の許容応力度は次の通りである。

鋼 材……曲げ応力度	2 300 kg/cm ²
ボルト……せん断応力度	1 300 kg/cm ²
支圧応力度	2 900 kg/cm ²
木 材……曲げ応力度	180 kg/cm ²

(3) 千代田線, 有楽町線第一期建設時代

昭和 40 年代に入り, それまでの木製支保工から全面的に鋼製支保工が採用され, 工事は山手および高台が主体であったものが下町まで工事が拡大された。工事範囲

砂質土の場合



P_A = 最大土圧 (t/m²)

w = 地表面荷重 (t/m²)

H = 掘削深さ (m)

γ = 土の単位重量 (t/m³)

土の単位重量は, 1.6~2.0 の範囲で現地にあうよう地質調査の結果から決定するものとす。

粘性土の場合

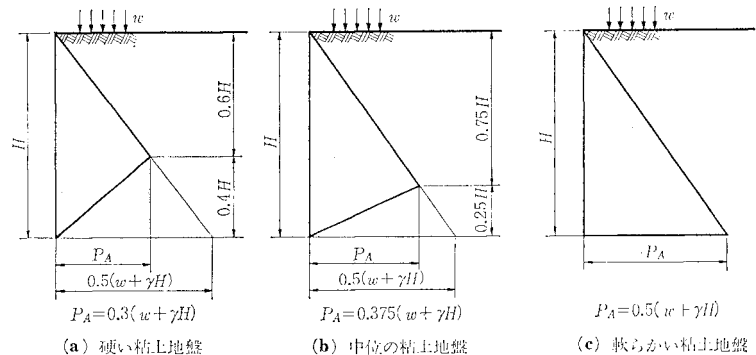
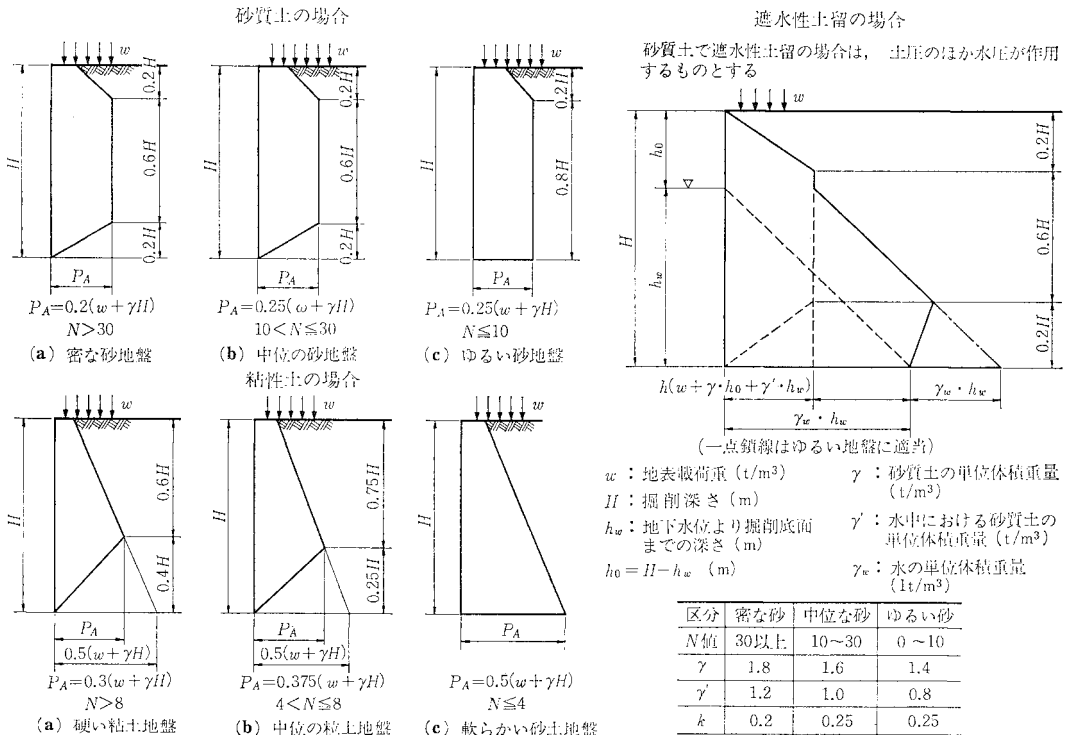


図-14 Terzaghi-Peck および Tschebotarioff の土圧算式



図—15 地下鉄技術協議会の指針による土圧 (昭和 49 年)

の拡大に伴い多様化する地質に対処するため、背面土圧をランキン土圧から、砂地盤は Terzaghi-Peck (テルツァギー・ベック) の土圧、粘土地盤は Tschebotarioff (チエボタリオフ) の土圧とした。また、それまで設計示方書の一部であった仮設構造物の規定を整備し、「仮設構造物設計指針」として規準化した。

図—14 に計算の根拠となる土圧分布の形状を示す。

なお、支保工は木製から鋼製に変わったが、土留杭、切梁、腹起の解析手法は丸の内線、日比谷線と同様な手法を使用している。

(4) 地下鉄技術協議会の指針 (半蔵門線建設時代)

わが国各都市の地下鉄の建設は各都市の企業体ごとに行っており、各企業体独自に規準を持っている。このような実情から、地下鉄技術協議会 (各都市の技術面での連絡会議) では、昭和 45 年度から仮設構造物設計について、統一的規準を作成するため委員会を設け検討を行った。その結果「仮設構造物設計指針」(案)(昭和 49 年 3 月) が作成された。

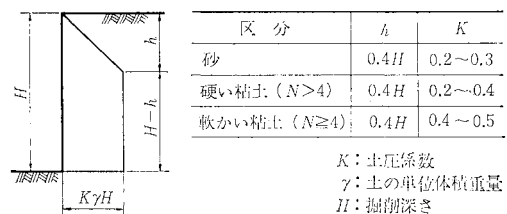
この指針における背面土圧分布は、その後改訂した営団の規準をほぼ踏襲しており、図—15 に示すように砂質土、粘性土とも土圧分布を 3 種類とし、 N 値による区分も示している。また、柱列式地下連続壁や地下連続壁等の遮水性土留に対しては、土圧と水圧を分離した分

布を取り入れている。

(5) 土木学会の指針

昭和 52 年土木学会により「開削トンネル指針」が新たに制定された。この指針はトンネル築造を目的とした開削工法においての指針であるが、トンネルに限らず一般的な基礎工としての開削工法も適用できる内容となっているので、その適用範囲も相当広いと考えられる。

指針の第 3 編仮設構造物の設計に示す背面土圧は、代表的な企業体 (地下鉄技術協議会、国鉄東京第一工事局、首都高速道路公団) における規準の考え方を参考として掲げているが、さらに土木学会としての実測結果の整理解析から、図—16 のような土圧分布を示している。なお、その後も上記委員会のワーキンググループにより土圧の研究が続けられ、昭和 56・58 年にその成果が発表された。



(昭和 52 年, 土木学会開削トンネル指針)
 図—16 土圧計の測定値から求めた土圧

その概要は、

① 現行指針の検討に用いた土圧計土圧の実測データと、全国にアンケート調査した切梁計土圧 44 例、土圧計土圧 66 例に及ぶデータの整理、分析を行った。

② 上記の結果、砂地盤における親杭横矢板工法の土圧係数は、「土木学会提案土圧」の下限値でほぼ満足されている(図-17)。

③ 粘土地盤で全体が極軟弱な場合は、実測値が極端に大きいものが多い(図-17)。

④ 土圧分布に影響を与える要因は、土留壁の根入部土質の影響が大きいものに対して、掘削部土質の影響はそれほどでもなく、排水状況、地盤改良等の影響は小さい。

(6) 最近の土留解析技術の傾向

最近の開削工事では、施工時の安全と周辺地盤への影響を最小限にするため、土留壁、土留支保工の挙動を実測して施工に反映させるような施工管理の方法が多くなっている。

これらの実測結果から得られる土留壁の曲げモーメントおよび変形性状、切梁反力の大きさなどは、これまで一般的に行われていた土留関係計算法によって得られるものとは異なり、変形を考慮すべきであることが明らかになっている。このことから、実測結果に基づいた仮想支点法や弾性式および弾塑性式等、種々の計算手法が提案されるようになった。本文ではこのうち、営団で採用している弾塑性法と計測管理についてその一端を紹介しよう。

a) 弾塑性法

弾塑性法による土留解析の方法は、土留壁、支保工、地盤を総合した土留関係計算法に、弾性支承、弾塑性ばねを考慮したモデルを取り上げ、各掘削段階ごとに解析を行う手法である(図-18)。

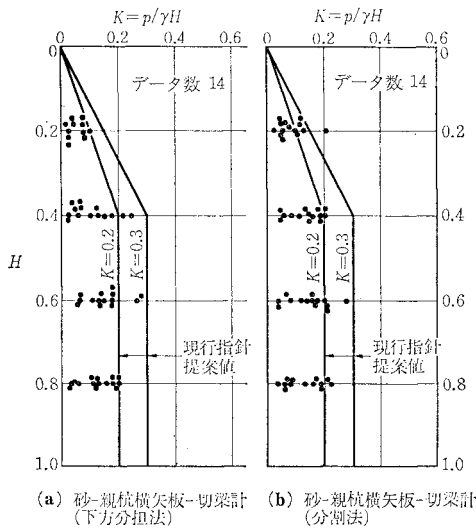
営団では昭和 57 年有楽町線新富町以東の軟弱地盤開削部の設計以来、この解析を実用に供している。

b) 現場計測管理

最近の軟弱地盤における開削工事では、安全施工と周辺地盤への影響を知るため現場計測が一般化してきた。掘削に伴う計測管理の目的は次の3つが考えられる。

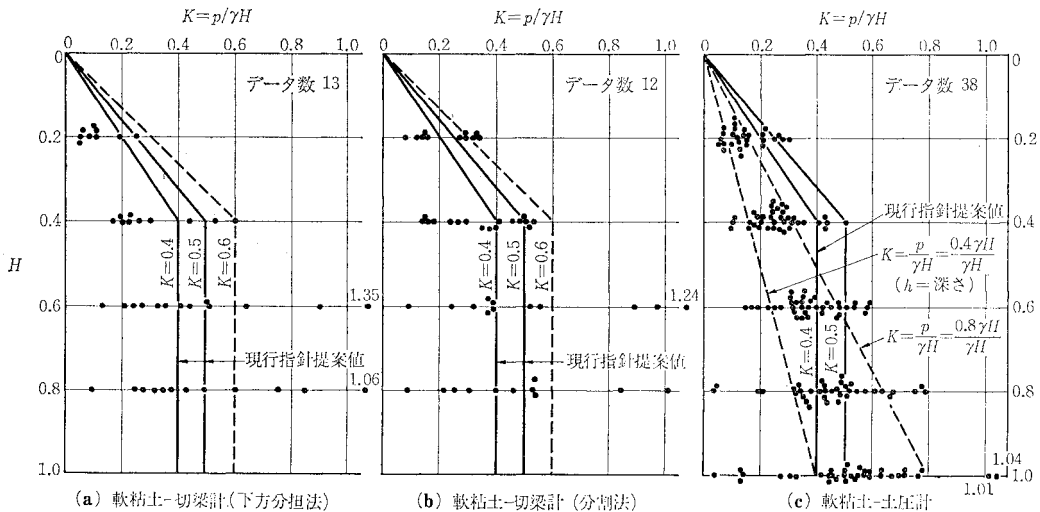
① 設計時における仮定と設計値が実際の施工においてどのような対応をしているかを、計測によって照合しながら安全な施工を推進する。

② 掘削の進行に伴う土留支保工および周辺地盤の



(a) 砂-親杭横矢板-切梁計(下方分担法) (b) 砂-親杭横矢板-切梁計(分割法)

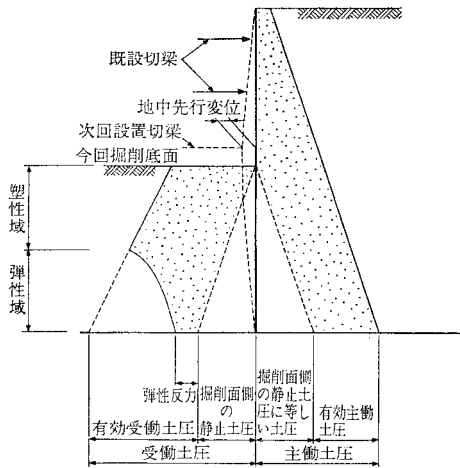
(A) 砂地盤(親杭横矢板)



(a) 軟粘土-切梁計(下方分担法) (b) 軟粘土-切梁計(分割法) (c) 軟粘土-土圧計

(B) 軟粒土地盤

図-17 土圧実測データと指針提案値との比較(土木学会, 1981年)



図一八 弾塑性法解析による土留解析の原理

変状を計測し、予測値と整合することにより、掘削過程において施工方法を再検討または変更し、各掘削段階の安全を確認する。

③ この計測管理を行うことにより、掘削土留工事を合理的かつ経済的な施工法とする。

営団は、昭和 58 年から有楽町線富町以東江東地区の軟弱地盤帯で、開削工事にこの手法を取入れた施工を行っているところである。

む す び

以上、戦後 30 数年にわたる営団地下鉄の建設工事を主体として、開削工法における土留技術および解析技術の変遷を辿ってみた。資材と資金とが不足するなかで開始された戦後の地下鉄工事は、鋼材の大量生産と価格低下、経済の高度成長、人件費の高騰と労働力不足、モータリゼーションの激化、建設機械の発達、新しい建設材料の開発、公害・環境意識の社会的高度化、安全に対する社会的要求、建設費低減化への要求等々の歴史的な社会情勢の変化とともに、開削技術にも種々の変遷を辿ってきた。

一方ではランキン土圧を金科玉条とした土留解析技術も、Terzaghi-Peck と Tschebotarioff の土圧導入により大きな進歩を成し遂げた。さらに最近では、現場計測技術と電算機技術の発達により、変位を主体とした解析技術に移行しつつある。すなわち、解析手法も静的解析

手法から動的解析方法への変化が特徴的である。

開削工法技術は、他の部門と同様に社会情勢の変化とともに今後とも技術的变化——進歩が成されるものと思考される。ただ、土質に関する技術は対象地盤が複雑なため、華々しい急速な進歩は期待できないかもしれないが、地道にたえず現場施工実績をフィードバックさせながら社会的ニーズに対応することが肝要であろう。

参 考 文 献

- 1) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道丸の内線建設史（上・下），1960年3月。
- 2) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道荻窪線建設史，1967年3月。
- 3) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道日比谷線建設史，1969年1月。
- 4) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄東西線建設史，1978年7月。
- 5) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄道千代田線建設史，1983年6月。
- 6) 渡邊ほか：地下鉄道施工法（上），山海堂，1975年9月。
- 7) 新井 実：市街地での土留め工法（土木）の推移と現状の問題点，基礎工，1981年4月。
- 8) 渡邊 健：地下連続壁工法の現況と展望，地下連続壁工法，総合土木研究所，1974年4月。
- 9) 渡邊 健：営団地下鉄9号線（千代田線）における泥水式鉄筋コンクリート壁の利用，土木施工，1969年12月。
- 10) 土質工学会：土質基礎工学ライブラリー軟弱地盤における工事実施例（その2），1977年3月。
- 11) 渡邊・小林：各種アンカー工法の設計と施工，最近の基礎工法，総合土木研究所，1974年9月。
- 12) 帝都高速度交通営団：2号線設計示方書（案），1959年1月。
- 13) 地下鉄技術協議会：仮設構造物設計指針（案），1975年8月。
- 14) 土木学会：開削トンネル指針，1977年1月。
- 15) トンネル工学委員会，開削トンネル小委員会，仮設構造物設計分科会：土留め壁土圧実測データ調査結果・中間報告，土木学会誌，1981年2月。
- 16) 同上：土留め壁土圧実測データ調査結果・最終報告，土木学会誌，1983年9月。
- 17) 山肩・吉田・秋野：掘削工事における切ばり土留め機構の理論的考察，土と基礎，1969年9月。
- 18) 中村・中沢：掘削工事における土留め壁応力解析，土質工学会論文報告集，Vol. 12, No. 4, 1972年。
- 19) 渡邊 健：地中構造物と地盤，基礎と地盤，土木学会，1973年8月。
- 20) 及川昭男：地下鉄工事における生石灰くい工法の施工，基礎工，1973年9月。
- 21) 柳田ほか：山留め壁の諸測定結果に基づく予測計算，第17回土質工学研究発表講演集，土質工学会，1982年6月。

(1984.8.6・受付)