

長大駅間・深層地下鉄道の設計・施工法に関する研究 RESEARCH ON DESIGN AND CONSTRUCTION METHOD OF DEEP UNDERGROUND RAILWAY FOR A-FEW-STATION-LINE

江河直人^{*}・齋藤 隆^{**}・飯田廣臣^{***}・藤崎 正^{****}・坂井五郎^{*****}

Naoto EGAWA, Takashi SAITO, Hiroomi IIDA, Tadashi FUJISAKI, Goro SAKAI

To comply with social needs for better urban functions, the utilization of deep underground space is now given attention. In the field of planning the network of railways at metropolitan area the deep underground railway for a-few-station-line is very important, urgent proposed project to solve the urban problems, such as congestion of traffic.

This paper mentions the possibility of subway construction to the greater depth with explanation about the design and construction method, studying the technical problems to take shape into the new railway.

Keywords : utilization of deep underground space, network of railways at metropolitan area, deep underground railway for a-few-station-line, design and construction method

1. はじめに

近年、東京をはじめとする大都市圏への人口および諸機能の集中に伴って、交通渋滞、居住環境の悪化等を招き、大都市における鉄道網の整備促進が急務となっている。しかしながら、住宅や都市施設が密集し、さらに土地価格が高騰している大都市においては、その整備が遅々として進まないとともに建設費が増大しているのが現状である。このため、大都市での地下深層部を鉄道施設の導入空間として利用することを考えざるを得なくなっている。このような地下鉄道は、駅間が長大になったり、現状よりも深い地下に構造物を構築しなければならず、設計上大きな土圧、水圧を考慮する必要がある等、従来の地下鉄道とは異なる条件を満足させなければならない。解決すべき技術的課題として、工事中の安全確保、経済的かつ効率的な設計・施工技術、駅の利便性を確保するための効率的な駅施設の配置、高速・大量アクセスのための昇降システムの開発および火災対策を含めた防災設備による安全性の確保等が挙げられる。

これらの多岐にわたる技術課題を解決するために、平成元年度および2年度の2か年にわたり、運輸省を中心として産・学・官の協力のもとに、「長大駅間・深層地下鉄道研究会」（委員長：松本嘉司 東京理科大学教授）を設置し、調査研究を進めてきた。この結果地下深層部に駅、トンネル等の地下鉄道施設を建設するための設計・施工法、駅間の長い深層地下鉄道の防災の考え方、安全性・利便性を配慮した駅設備のあり方等について成案を得て、建設の可能性を示すことができた。

本報告は、上述の技術的課題のうち、設計・施工法に関する事項について、現在の技術動向を踏まえ具体的検討を行い、その解決策等を述べるものである。

[*]	正会員	運輸省鉄道局技術企画課	^{****}	日本鉄道建設公団設備部機械課
^{**}	正会員	運輸省鉄道局技術企画課	^{*****}	正会員 日本鉄道建設公団設計室
^{***}	正会員	日本鉄道建設公団工務部工務第一課		

2. 設計に関する研究

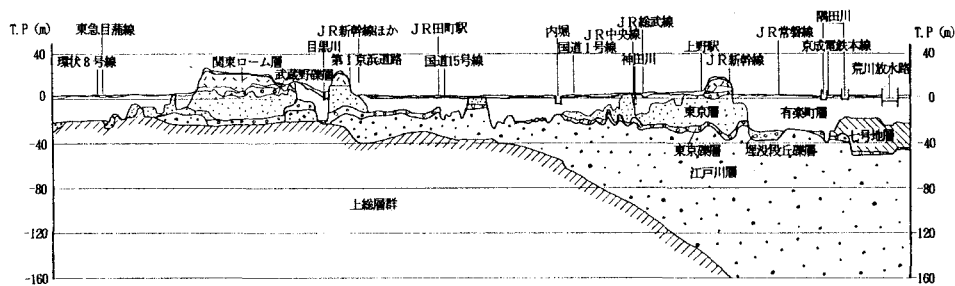


図-1 東京都区部の地質断面図：S-N

(1) 首都圏の地盤状況

首都圏に分布する地層は、上総層群、東京層群（江戸川層、東京礫層、東京層）、武蔵野礫層、関東ローム、七号地層、有楽町層等が分布し、大部分は第四紀層である。全域に分布している江戸川層は、砂を主体とする締まった地層であるが、場所によっては礫や粘性土を挟む。（図-1）

地下水位は、昭和40年から50年を境に復水してきており、一部を除いて静水圧分布に戻っていることがうかがえる。

地下深部における構造物を設計する場合、原地盤において強度特性や変形特性、地下水位の状況等をより厳密に把握することが重要である。

(2) 高層建物実態調査

大深部に地下構造物を設計する場合、高層建物の影響を考慮する必要があるので、高層建物を主体に70件のアンケートによる実態調査を行った。

この結果、上載荷重は概ね50 tf/m²、地下空間の利用深さは、建物の床付け深さとの関係から40～50 m程度とすることが適当と判断された。（図-2）

また、高層建物の沈下量（根切り後）は6～30 mm程度となっており、施工時の計測結果をもとに評価した地盤の弾性係数は、約1500～8400 kgf/cm²で地区ごとにほぼ同程度の値を示していることが判った。

(3) 駅間トンネルの検討

地下深部における複線シールドトンネルの設計について、覆工、地盤、建物の連続体モデルとして解析が可能なFEM解析（弾性）を主体として検討を行った。

解析ケースとして、①既設建物下をトンネルが通過する場合、②トンネル施工後、将来建物荷重を受ける場合の2通りとし、解析条件、解析モデルを表-1、図-3にそれぞれ示す。また、初期応力の解放率は施工実績等から50%とし、[土水圧] - [泥水圧]として考えた。

これらの検討結果をまとめると以下ようになる。

1) トンネルが既設建物下を通過する場合、地表面沈下量は約0 mmであり、建物基礎面の沈下量は離隔距離Hdが大きくなるほど少なくなり、Hd = 30 mでは4 mmとなる。

2) 将来建物荷重を受ける場合、建物基礎面での沈下量は26 mm程度であり、これはトンネルの無い地盤（原地盤）に建物が建てられた場合の沈下量25 mmと概ね同程度の沈下量である。したがって、トンネルが存在することによる建物側への影響は少ないと考えられる。（図-4）

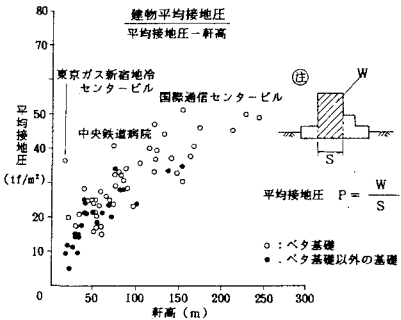


図-2 建物平均接地圧-軒高

表-1 解析条件

主要な設計条件	
・土被り: 35～50m	・トンネル外径: 10m
・巻厚: 50cm	
・地盤条件	
土質: 砂質土	
土の粘着力: C= 0 tf/m ²	
土の内部摩擦: φ= 40度	
土の単位体積重量: γ= 1.9 tf/m ³	
土の変形係数: E= 1700～5100 kgf/cm ²	

3) 覆工の応力状態は、軸力卓越の全断面圧縮応力状態となる。将来建物荷重を受ける場合に圧縮応力度は最大となるが、その応力度は $\sigma = +140 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であることから、通常の設計範囲で十分対応可能と考えられる。

一方、トンネルの耐震性について、大深度のモデル地盤を想定して検討を行ったが、地下深部であるため、その変位量および地震加速度も地表に比べて極めて小さく、地震時の特別な対応策は必要ないものと考えられる。

(4) 駅部の検討

駅部の検討にあたっては、3断面を同時に掘削、施工できる多連型シールドについて、FEMによる解析を行った。

この結果、本シールドは大断面で特殊形状であることから、円形シールドに比べて地表面沈下量も大きく、掘削断面周辺地盤の一部に地盤の安全率が低くなる領域が広がることが予想される。この度合は地盤条件（静止土圧係数、粘着力）や施工条件（泥水圧）に大きく支配されることが明らかになった。

したがって、多連型シールドの設計には、深部の地盤性状を正しく把握するとともに、泥水圧等の施工管理方法も詳細に検討する必要がある。

(5) 立坑の設計法

大深度立坑の設計法について、現時点においても50～60m級の立坑が設計・施工されていることから、基本的には現行の設計手法で対応可能と判断される。

地下連続壁を本体利用した立坑に関する設計法として、現行では仮設時と本設時を分離して、弾塑性逐次解析法、骨組解析法をそれぞれ適用するのが一般的となっている。しかし、大深度立坑においては、側圧等の荷重条件が厳しくなることから、地下連続壁残留応力あるいは中間柱の影響を考慮する必要もあり、図-5に示すような解析モデルで仮設から完成時までを一連の流れとして、弾塑性逐次解析を行う手法が合理的であると考えられる。

3. 施工に関する研究

(1) 検討条件の設定

土木施工の検討にあたっての条件を表-2に示す。

(2) 駅部トンネルの施工法

駅部トンネルの施工法として、在来シールド切掘げ工法、山岳工法、多連型シールド工法について検討を行った。

在来シールド切掘げ工法として、ルーフシールド方式が施工性、安定性にも優れ、補助工法も少なくすむことから最適と考えられ、また、止水を主目的とした補助工法について、FEM解析を実施した結果、改良範囲はルーフシールドの外側に改良厚 4.5mの改良ゾーンを形成することが好ましいと考えられた。(図-6)

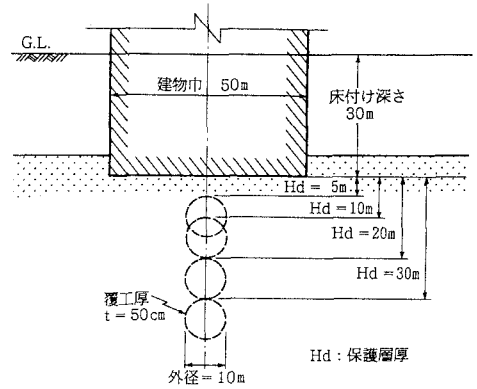
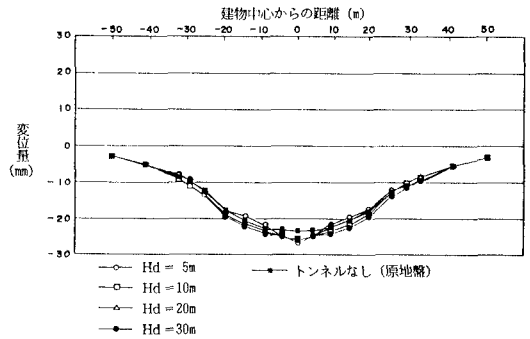


図-3 解析モデル略図



(トンネル施工後、将来建物荷重を受ける場合)
(中央部、 $E = 1700 \text{ kgf/cm}^2$, $B = 50 \text{ m}$)

図-4 建物基礎面変位量

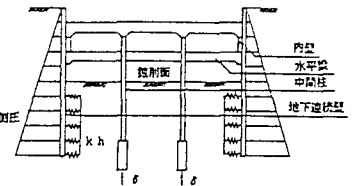


図-5 全体系弾塑性法解析モデル

山岳工法については、同工法で施工する場合の最適断面を検討した結果、3本の坑道を柱2本で支えるタイプが好ましいことが判明した。さらに、実際の施工を想定して、CRD、CD、ベンチの各工法に関して解析を行ったが、応力的には問題がないことが判った。本工法の適用に当たっては、地下水対策が不可欠であり、薬液注入工法を補助工法とする施工方法を提案した。(図-7)

シールド工法について、トンネルを全断面で施工する場合の断面形状を検討した結果、三連型で中央坑の径が両側坑より若干大きくしたものが掘削断面積も最小となり、部材応力も有利であることが判った。施工方法として、仮設柱を用いた工法を提案した。(図-8)

(3) 駅間トンネルの施工法

駅間トンネルの施工法として、シールド、山岳、直打ちコンクリート工法を検討した。

シールド工法は既存技術の延長で掘進可能であり、実施工の段階でより効率的かつ経済的工法の開発を目指せば良いことが判った。

山岳工法は断面が徐々に変化する区間に適用性が高いものと考えられ、パイプルーフを使用した工法を提案した。

直打ちコンクリート工法は、設計・施工法、高水圧対応等の技術実態調査の結果、深層地下鉄道への適応性は高いものと考えられる。

(4) 立坑の施工法

立坑は駅の両端に位置し、地上とのアクセスのための昇降設備を包含できる内空として、幅25m、長さ50mの矩形断面を検討対象とした。施工法については、地中連続壁工法とニューマチックケーソン工法による路下での施工を検討した。

地中連続壁内を深さ70mまで掘削することを想定したが、今回の検討モデルは、大断面の矩形で地下水位も地表面近くに設定しているため条件としては非常に厳しいものである。このため、先行地中梁を形成し、かつ底盤改良を行って掘削する工法を検討した。この結果、地中連続壁の壁厚は約2.5mとなり、支保工も密に必要となったが、立坑の形状を楕円形にするなどの工夫をすれば低減は可能である。補助工法としては先行地中梁が設計的に有利な工法であることが判った。(図-9)

ニューマチックケーソンを用いて躯体を一度に構築することを検討した結果、躯体断面、沈下等については問題がないことが判明した。

表-2 検討条件

深 度	トンネル天端は地表から50m以下
駅 間	断面は一般的な在来線断面とし、駅間距離は4.0~6.0km
形 式	ホームの両端に立坑を設けたトンネル形式で、島式ホーム幅11.0m、長さ200m
立 坑	エスカレーター、エレベーター等の昇降設備あり。
坑	幅25.0m×長さ50.0m、路下施工
斜	アクセス用エスカレーター、階段のためのトンネル形式
地	φ10m程度、取り付け角度30°
質	N値50以上、江戸川砂層、均等係数5以下、透水性係数 1.0^{-4} cm/sec程度、地下水位GL-0m
	変形係数E _s =1700 kg/cm ²

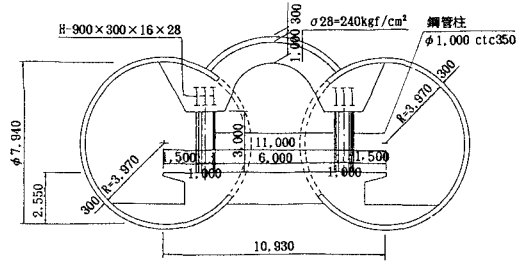


図-6 ルーフシールド方式構造一般図

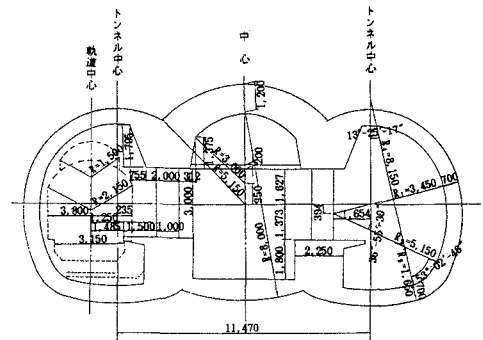


図-7 掘削解析から決定した断面形状

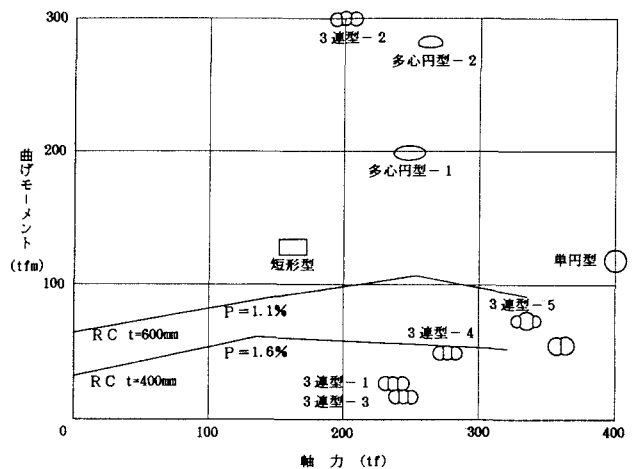


図-8 各断面形状の曲げモーメントと軸力

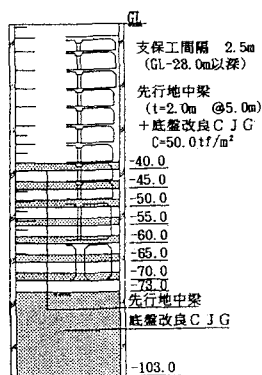


図-9 通常掘削時の施工断面図

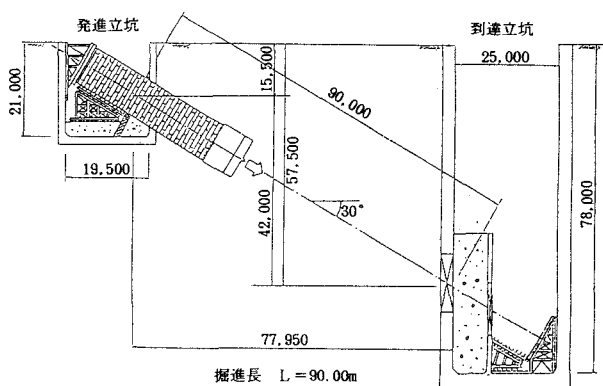


図-10 斜坑シールド施工図

(5) 斜坑の施工法

地上とホームのアクセスとしての斜坑に関する施工は、シールド工法を用いることが考えられる。大深度に向け斜坑シールドマシンを地上、地下から発進・到達させる際の問題点を実績を参考に想定し整理した結果、斜め発進・斜め到達に多少の難点はあるが、泥水式、泥土式のどちらの方式でも現状技術で十分対応できるものと考えられる。(図-10)

斜坑シールドは施工延長が短く不経済となるため、本線シールドと接合させたりする方法等を提案した。

4. シールド機に関する研究

(1) 長距離・高水圧シールドの検討

長大駅間・深層地下鉄道においては、シールドでの長距離掘進が必要であり、また、高い水圧を受けることになるので耐高水圧性が要求される。

密閉型シールドを、地下50m位置(水圧 5 kgf/cm^2)の東京礫層(礫径 100 mm 以下)と江戸川砂層の互層を6km掘進することを前提とした場合、各構成要素について長距離掘進、耐高水圧性能を高めるための対策を、現状調査に基づき分析検討を行った。この結果、現状技術の延長あるいは対策が必要なものを整理すると、カッタービット、カッター軸受、軸受シール、排土装置、テールシールの5項目となり、このうち、特にカッタービットについては最も重要な課題であることが認識された。

カッタービットの磨耗量は、粘性土及び砂質土の場合は掘削摺動距離にほぼ比例しているが、礫層を含む場合は定量的に把握することが困難であり、アンケート調査のうえ検討した。この結果、礫径が最も大きな破損の要因となっており、礫径を 100 mm 以下とした場合のビット寿命は $1\sim 1.5\text{ km}$ 程度であった。このため、6km掘進に対しては、新超硬ビットの採用、ビット形状の改良、ビット数の増などの耐久性を向上させる対策を必要とするが、礫層を含む6km掘進に対しては、磨耗検知ビットを設置し、2～3回のビット交換を考慮しておく必要がある。

(2) 横3連型シールドの検討

駅部をシールド工法で施工するためには、横3連型シールドを開発する必要がある。泥水式および土圧式のそれぞれについて検討した。前提条件として、機械の概略幅 20 m 、高さ $8\sim 12\text{ m}$ 程度とし、土被り 50 m 、ホーム長 205 m 程度を掘削するものとした。

まず最初に、基本的な問題として、強度的、機構的に可能か否かの検討、特にシールドテール部の強度的検討、セグメント組立用のエレクタの機能的検討を行った。前者については、材質 SM50 の板厚を 125 mm とすれば問題がなく、後者については、門型式あるいは片腕式エレクタで対応可能であることが判った。

以上の基本的な検討結果で、本シールドが強度的、機構的に可能であることが判明したので、概略設計を行った。設計は泥水式および土圧式について、横3連同径型、中央拡大型、同一底面型の3タイプで行って製作可能であることが確認できた。

超大型機械となる横3連型シールドを、駅部の200～300 m程度までの掘削にとどめるより、引き続き3連の左右、または中央のシールドをトンネル部掘削に転用できれば建設コストは更に低減できるものと考えられ、この可能性について検討を行った。(図-11)

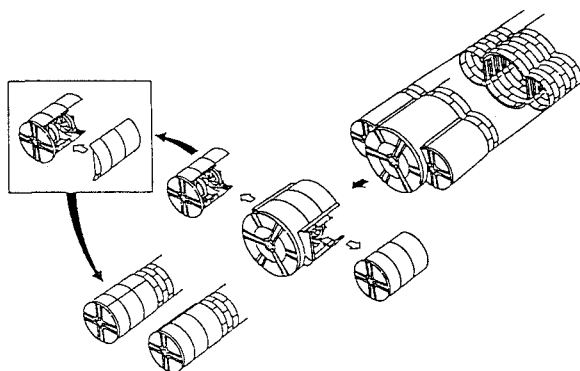


図-11 分離・転用概念図

(3) 斜坑用シールドの検討

深層地下駅へのアクセス手段として、高揚程・直行エスカレーターが必要となり、この場合、大深度位置になる程、斜坑での施工が有利となる。

斜坑用シールドは従来の円形を基本に、土被り5～50m、外径10m、掘削勾配30°の上りおよび下りの泥水式並びに土圧式とし、シールドに要求される装備能力、機能、後方設備、管理システムについて検討を行った。

シールドを構成する各構成要素に関する構造機能面、安全面等からの検討の結果、能力にある程度の係数を乗ずるとか、中折れ機構を採用する等の種々の対策を講じることにより30°斜坑に対応可能であることが判った。この結果から、概略設計を行った。

本工法においては、切羽面が鉛直とならないため、切羽安定性について不明な点が多く、模擬土槽中に斜坑シールド模型を設置して切羽安定性評価実験を行った。この結果、斜坑用シールド実機についての状態および負荷などに関する貴重な推定結果を得ることができた。

5. おわりに

長大駅間・深層地下鉄道は、人口集中の顕著な大都市における鉄道網の整備促進のために、早期の実現が強く期待されている。

この実現に向けては、行政面あるいは技術面の諸問題を解決していかなねばならないが、本研究の成果を通じて、技術的課題に対する方向づけがなされ、建設の可能性が示されたものと考ええる。今後は、実施工に結びつく詳細な技術的検討をさらに積重ねて経済性、合理性を追求しながら、効率的な全体システムを構築していくことが必要である。

本調査、研究を進めるにあたって御指導をいただいた関係の皆様に対して、厚く感謝の意を表する次第である。

6. 参考文献

運輸省：長大駅間・深層地下鉄道研究会報告書 平成3年3月