

浅層大断面トンネル工法の設計施工事例調査・提案

INVESTIGATION OF DESIGN AND CONSTRUCTION, AND PROPOSAL ON TUNNELING METHODS FOR LARGE SECTION TUNNEL WITH SHALLOW OVERBURDEN

橋本 正¹⁾・安田 亨²⁾・市川真治³⁾・小嶋 勉⁴⁾・長屋淳一⁵⁾

Tadashi HASHIMOTO, Toru YASUDA, Masaharu ICHIKAWA, Tsutomu KOJIMA and Junichi NAGAYA

Large-scale facilities such as subway station, underground car park, underground passage road were investigated on design and construction technology for constructing using tunneling methods in the comparatively shallow space for the purpose of efficient use of underground space in urban area.

In this paper, the controversial point and the problem to be solved are reported to make a correct application of tunneling methods for large section tunnel with shallow overburden.

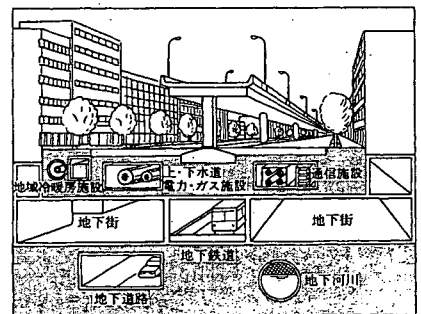
Key Words : tunneling method, shallow overburden, large section tunnel, tunnel-roof

1. 調査・提案の目的

わが国では、近年の人口の都市部集中によって、都市部における地下利用の重要性が再認識されており、また、海外においても、経済発展中の諸国も含め地下利用にかける意気込みは相当なものがある。地下鉄駅舎、地下道、地下駐車場はもとより、ライフラインを収納するスペース、防災上の避難スペース、さらには、人々の生活空間としての地下街などを確保するために、様々な工法で地下の開発が行われてきている。

著者等は、このような需要環境の下、都市部における地下利用の重要性を再認識し、これらの大規模施設を比較的土被りの浅い空間（浅層地下）にトンネル工法を用いて構築するための施工技術について調査・提案することを目的とし、かねてより活動を行ってきた。

本報告は、活動を通して現在までに得られた技術的知見について報告するものである。上記のトンネル工法を、以下、「浅層大断面トンネル工法」と呼ぶこととする。浅層大断面トンネル工法の利用例（案）を図-1に示す。



地下駐車場 地下庭園
地下通路 地下河川
地下街 地下道路

図-1 浅層大断面トンネル工法の利用例（案）¹⁾

- 1) 正会員 (財)大阪土質試験所 特別技術研究室 室長
- 2) 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社プロジェクト部
- 3) 正会員 (株)ニュージェック 道路部
- 4) 正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 第二設計部
- 5) 正会員 (財)大阪土質試験所 技術コンサルタント部

2. 浅層大断面トンネル工法の特徴

上記の需要環境から、ここでは、都市部主要道路下の深度 GL-2m~3m から GL-10m 程度の浅い空間（浅層地下）を対象とする。浅層大断面トンネル工法の特徴は以下のとおりである。

- (1) 非開削工法である。このため、開削工法などと比較して、施工による地上占有面積が非常に小さく、既存交通の障害とならない。
- (2) 土被りが小さいために、全土被りが作用しても支保規模が小さくてすむ。
- (3) NATM 的な地山アーチ効果は期待できないが、荷重が小さいので、構造物によるアーチアクションで荷重を支持することが可能である。
- (4) 開削工法と比較して、トンネル掘削除荷によるリバウンド量が小さいため、施工部直下に位置する既設構造物に対する影響が小さい。
- (5) 浅層部の掘削時には、地下水位低下が少なくて済むため、施工が容易となる。
- (6) 埋設管などは、ほとんどが土被り 2~3m 以内にあるため、施工の障害となりにくい。また、それより深い部分は掘削や埋戻しがされていない自然地山であるため、施工が比較的容易である。
- (7) 最初に仕上がった地下空間から、順次、拡張・延長施工が行える。また、深部への拡張も可能である。

3. 着目した方式

当面の対象とする浅層大断面トンネル工法として、小断面連結方式（小断面トンネルを連結してトンネルルーフを構築する工法）と柱列支承方式に焦点をあて、それらの実現性を探っていくこととした。

図-2、図-3 にその概念図を示す。

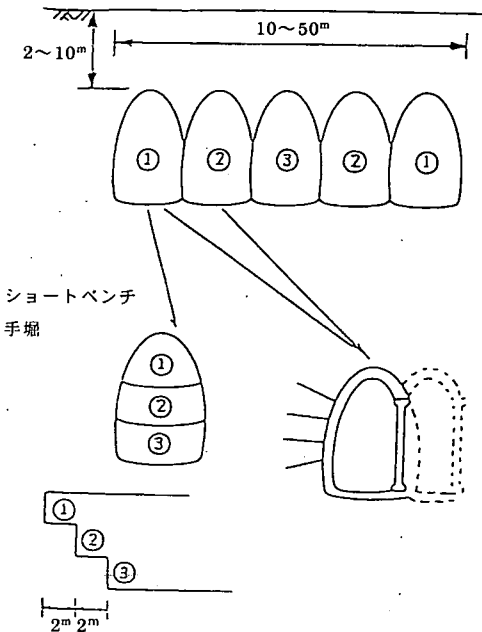
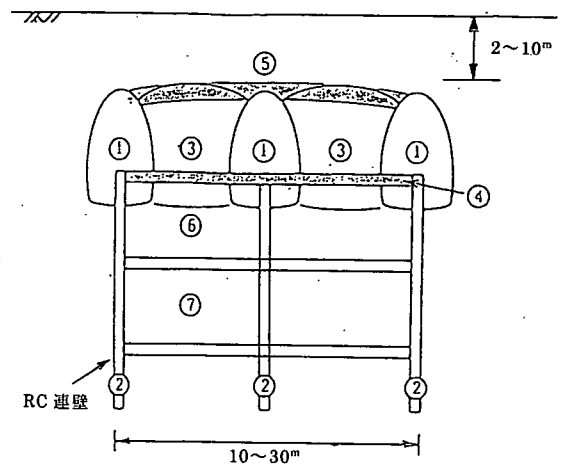


図-2 小断面連結方式概念図



施工の特徴

- 1) 大断面トンネルを小断面トンネルに分割。
- 2) 上部の導坑により導坑下部を自由に掘削できる。
- 3) 導坑下部は逆巻き工法により施工。
- 4) サイドの RC 連壁により遮水性が高い。

図-3 柱列支承方式概念図

4. 設計施工事例の紹介

4. 1 北京（中国）の事例²⁾

(1) 概要

北京市地下鉄 8 号線の王府井駅の事例を紹介する。制約条件の内、特記事項を以下に挙げる。

- a. 駅の規模は、総延長 241.1m、幅 24.4m、高さ 14.2m であり、頂部での土被りは 6~7m である。
- b. 現場は古永定河の沖洪積扇状地中下流に位置する。地質は、第四紀の地層に属し、主に人工盛土、粘性土、中細砂、砂礫、玉石層などからなる（図-4 参照）。
- c. 周辺地盤の地山強度比は 0.6 程度と非常に小さい値であるため、緩み・沈下を起こし易い。
- d. 地下水は豊富で、合計 3 層からなる。第 1 層は上層滞水で、深度は 4.5~5m である。またそれは主に軽亜粘土層に位置し、水量・水位などは季節による影響があり、変動幅は比較的大きい。第 2 層は潜水で、深度 13.5m のところに位置し、滞水層は主の中細砂である。第 3 層は被圧水で、深度は 17m、主な帯水層は中粗砂・砂礫及び玉石層であり、最大被圧水頭は 13m である（図-4 参照）。このため、施工中の止水管理およびボーリング管理に留意する必要がある。
- e. 交通量の非常に多い交差点の直下に位置し、大規模な開削工事が許されない。また、地表面土地利用と地下埋設物への影響を考慮して、地表面沈下量を 30mm 以下に抑えなければならない。

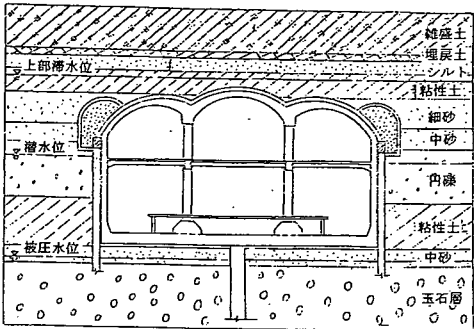


図-4 王府井駅舎地点の地質、水理条件の概念図

(2) 施工方法の決定

以上のような制約条件から、本工事は、比較検討（表-1、表-2、図-5 参照）の結果、杭柱支承法（3 径間 2 階アーチ構造）を採用している。

表-1 各施工方法の掘削、支保の手順

(3) 施工順序

施工順序を表-3 に示す。

(4) 杭柱支承法の特徴

- a. 駅舎上部の地下水位より浅い無水の地層の空間を工学的に利用し、地下水位以下の有水の地層での作業（保護柱壁と中間支承の杭柱の施工）を行うことができるため、地下水位低下工法を採用した場合の費用増加と地表面沈下を回避することができる。
- b. 地下水位以下の空洞切下げ時は、既に保護柱壁が施工されているため、湧水及び土砂ボーリング現象を回避することができる。
- c. 浅層での地下空洞の掘削における、各施工ステップごとの地山・空洞構造体全体の安定性および信頼性が、確実である。
- d. 掘削による地表面沈下量を小さく抑えることができる。
- e. 経済的である。コンクリート取壊し量が少

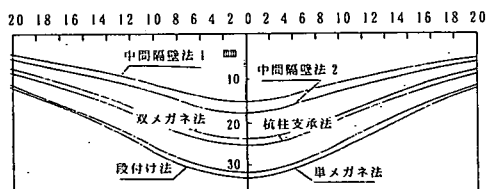
施工方法		開削、支保手順	
A	段付け法		
C	中間掘削法	C-I 横向掘削法 	C-II 堅向掘削法
		D-1 側穴“双メガネ”法 	D-2 中穴“メガネ”法

ない（中間隔壁法より 15～20%少ない。めがね法より 5%少ない。）。

f. 大型施工機械を使用し、大規模施工、高速施工を可能とする。

表－2 比較検討表

内容 方法	地表面沈下量 (mm)	安全信頼性	コンクリート 取捨し率	工事作業及びその他	国内外の現状
段付け法 A	>30	安全面であるが、地下水が 工事に影響を及ぼし、地下水 処理は困難である。	0.9	作業空間は大きく、大型機械 の使用に便利であるが、地表 から地下水低下を必要がある。	国内外に実例はある。
杭柱支承法 B	<30	施工過程の安全度が高く、また 地下水より上の空間を利用して、 地下水対策構造を設けるので地下水 を制御しやすく、水資源を損失させない。	0.95	作業空間は大きく、大型機械 の使用に便利である。地下保 留壁の向きにより、地下水を 低下させ、構造工事を行うこ とができる。	国内外に地表で直接 工事する実例がある。 地下の杭打ちは最初 の例である。
中間隔壁法 C	<30	安全度が高く、确实で信頼性 があるが、防水層の工事は比 較的困難である。	1.10 1.15	作用空間が適当で、大型機械 も使用できるが、施工上の障 害が大きい。	国外に地下鉄建設で の成功例がある。
メガネ法 D	<30	施工過程の安全度は高いが、 メガネ工法は防水層施工中の 地下水対策が難しい。	1.0	作業空間が小さく、工事障害 が大きく、大型機械設備の使 用に適さない。先に地下水低 下させてから工事を行う。	国内に地下鉄の建設 工事の実例がある。



図－5 地表面沈下曲線図

4. 2 コンドルセ（フランス）の事例³⁾

(1) 概要

地域高速鉄道（RER）コンドルセ駅の事例を紹介する。概要は、以下のとおりである。

- 駅の規模は、総延長 228.0m、幅 58.0m、高さ 13.5m であり、頂部での土被りは約 20m である。
- 構造は、スパン 21.2m のアーチを持つ中央トンネル、それを支える幅 6m の中空支持壁体 2 基および幅約 11m の左右 1 つずつの側部トンネルからなる（図－6 参照）。
- 地質は、大部分が粗い石灰石、泥岩および栗石層に位置する（図－6 参照）。
- 施工は、上部砂層内の地下水位を低下させて行う。

(2) 施工ステップ

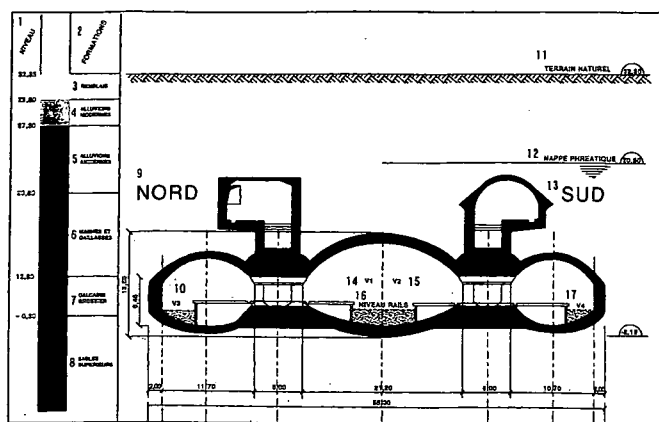
施工ステップは、以下のとおりである（図－7 参照）。

Phase 1：北側支持壁体の掘削。ジェット・グラウチングによる支柱施工。

Phase 2：北側支持壁体のコンクリート打設。A：インバート、B：側壁、C：上部。南側支持壁体の掘

表－3 施工手順（ステップ）表

順序番号	概念図	主要な工事手順及び方法
1		1. 駅舎の上半分断面の地下水位より浅い地層では、南、中央、北に分け、それぞれ杭柱施工のための導坑を設置する。導坑は、薬液注入で地盤を固化した上、格子状コンクリート吹付けを行って安定させる。
2		1. 南と北の両導坑には、φ60 の保型杭壁を設置する。特製の穿孔機を使用する。 2. 中央導坑には、φ1250 の中杭柱を立てる。間隔は 3m で、特製の穿孔機を使用する。
3		1. 杭柱を完了した後、隔壁杭間にテント（帷幕）注入を行い、それぞれの杭、柱の頭部を結ぶ縦梁を作り、一連の杭、柱を繋げて、隔壁本孔の初期支保を行う。
4		1. 駅舎隔壁本孔の上部アーチを掘削し、格子状コンクリート吹付けによる支保を行う。また、パイプ工法（大管工）の採用や、薬液注入による地山固化を行って、工事前支保とする。施工中は、核心土を残し、導坑を埋戻して側方支保を行う必要がある。
5		1. 第 1 段切梁を設置し、側方を支えながら下に掘削する。
6		1. 引続き下へ掘削し、第 2 段切梁まで掘削する。続いて第 2 段切梁を設置した後、底版まで掘削する。次に基礎掘削を行いながら底版支持層の工事を行う。



地盤柱状図およびトンネル断面図:

- | | |
|----------|-------------|
| 1: 標高 | 2: 地層構成 |
| 3: 盛土 | 4: 新神積層 |
| 5: 旧神積層 | 6: 泥岩およびぐり石 |
| 7: 粗い石灰石 | 8: 上部砂層 |
| 9: 北 | 10: 3 番線 |
| 11: 地面 | 12: 地下水位 |
| 13: 南 | 14: 1 番線 |
| 15: 2 番線 | 16: レール面高さ |
| 17: 4 番線 | |

図-6 挿入語の和訳

図-6 地盤柱状図およびトンネル断面図

削とジェット・グラウチングによる支柱施工。北側トンネルの側壁導坑掘削。アンカーボルトの打設。

Phase 3: 南側支持壁体のコンクリート打設。A: インバート、B: 側壁、C: 上部。南側支持壁体の掘削、アンカーボルトの打設。北側トンネル断面上半部の掘削。アーチ部の吹付けコンクリート施工 (厚み 20cm)。

Phase 4: 南側トンネル断面上半部の掘削。アーチ部の吹付けコンクリート施工 (厚み 20cm)。北側トンネル、インバート打設。

Phase 5: 南側トンネル断面下半部の掘削。インバート打設。北側トンネルのアーチ部覆工の打設。

Phase 6: 南側トンネルのアーチ部覆工の打設。

Phase 7: 中央トンネル断面上半部の掘削、アーチ部覆工の打設。

Phase 8: 中央トンネル断面下半部の掘削。インバート打設。

Phase 9: 北および南の周歩廊断面上半部の掘削。

Phasage des travaux de la Gare Condorcet

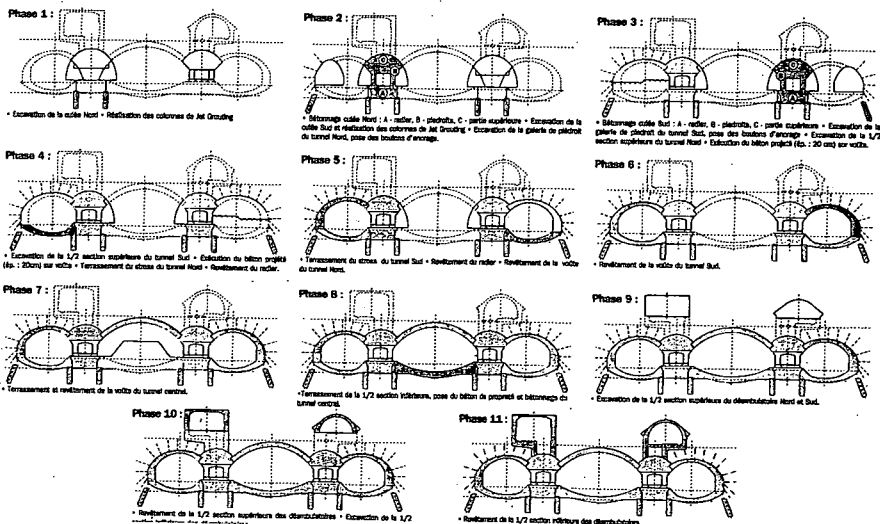


図-7 施工ステップ

Phase10：周歩廊断面上半部覆工の打設。周歩廊断面下半部の掘削。

Phase11：周歩廊断面下半部覆工の打設。

5. 設計施工事例から得られた技術的知見（国内に適用する場合の問題点：課題等）

海外事例の条件整理を基に、類似工法を国内に適用する場合の問題点・課題等について検討を行った。その検討結果を踏まえ、浅層大断面トンネル工法の技術的提案を行う。

国内へ適用する場合は、以下の点に留意する必要がある。

- (1) 人力施工による小断面連結方式は適用困難であり、断面サイズは機械施工が可能な導坑サイズとすることが望ましい。
- (2) 地質や制約条件を考慮した場合、柱列支承方式の方が適応性が高い。
- (3) 浅層地下に大断面を構築する場合は、構造的なルーフを如何に形成するかが最も重要であり、先受工に代表される NATM 的な発想よりは、むしろ、シールドや推進工法を組み合わせたルーフ形成工法が望ましい。

上記の技術的知見を踏まえると、今後の技術的課題としては、以下の点が挙げられる。

- (1) 浅層トンネルのメカニズムを解明する必要がある（浅層トンネルの土圧・アーチアクション、施工プロセスを考慮した周辺応力ほか）。
- (2) ルーフ部の形成方法を、さらに模索、検討しなければならない（構造物によるアーチ形成効果ほか）。
- (3) NATM・シールド・推進工法等の複合構造の更なる検討が必要である。

なお、浅層大断面トンネル工法のルーフ形成方法について、別途具体的な工法提案を行っている⁴⁾。この中では、地質、地下水、地表の制約条件、工期・工費等の適用条件に着目し、各工法の有効性、メリット・デメリット等について言及しているので、参照されたい。

6. おわりに

都市部における地下空間の有効活用を目的として、地下鉄駅舎、地下道、地下駐車場、各種ライフラインの複合施設、多目的地下空間などの大規模施設を比較的浅い空間（浅層）にトンネル工法（非開削）を用いて構築するための設計・施工技術について、国外ほかの事例を調査した。

今後は、ケーススタディーにより浅層大断面トンネル工法の設計施工上の問題点を整理する⁴⁾とともに、浅層トンネルのメカニズムの解明、ルーフ部の形成方法の模索等を重点的に行っていく予定である。

本報告は、「小断面連結 NATM による浅層地下利用研究準備会」において活動してきた結果の一部を集約したものである。

本報告が、浅層地下に地下空間を構築する施工技術を今後検討していく上での参考になれば幸いである。

参考文献

- 1)土木学会：ニューフロンティア地下空間（1990）、pp.59
- 2)謝量汎胡万毅：北京地下鉄“複一八線”王府井駅 浅埋暗掘杭柱支承法方案研究
- 3)コンドルセ駅、現場説明用パンフレット
- 4)東尾・渡邊・北村・内田・嶋村（1999）：浅層大断面トンネル工法の適用に関する研究 トンネル工学研究論文 報告集第9巻