

非開削地下空間構築技術

A non-open-cut technique for constructing underground space

粕谷太郎*

TARO KASUYA*

Recent innovations in technology have had a significant impact on social structures and the living environment. Under the present circumstances, further improvement of urban services is needed, including physical distribution, life lines and other elements of infrastructure. Traffic jams on highways are a serious problem in urban districts. Improvement of traffic networks utilizing underground space is a possible solution for this issue. However, difficulties are encountered, because buildings are built close together and the geology in urban areas is unconsolidated. These restrictions necessitate effective non-open cut techniques for constructing extremely large sections needed for junctions of road tunnels and twin tunnels.

Creation of underground spaces using non-open cut techniques is necessary, because such techniques reduce environmental impact when constructing subway stations, widening vertical shafts, or reconstructing underground structures.

This paper reports on tunneling projects employing the curved pipe technique, and discusses the actual status of technological development and the method to construct extremely large and twin underground sections, decreasing ground settlement, improving safety, and reducing costs.

「keywords」 Non-open-cut methods, underground space, curved boring method, Section width,
Curved pipe Underground road branches and junctions

1. まえがき

近年、科学技術の進展によって社会の構造や生活環境が大きく変化する中で、物流・交通・ライフライン等の都市機能の再整備が必要となってきた。特に都市域道路の交通渋滞は著しく、その解決手段として地下利用による交通網の整備が考えられている。しかし、都市域は建物等が密集した市街地であることや地盤の多くは未固結地質である等の地理的条件であることから、地下に計画される道路トンネルの分岐・合流部の超大断面や双設断面の施工にあたっては、非開削地下空間構築技術の開発が望まれている。

また、地下鉄道の駅部の建設時、立坑の拡幅、地下構造物の再構築等において、環境等に配慮が可能な建設技術としての非開削工法による地下空間の創出の社会的要求がある。

本論文では、曲線管敷設技術（旧 T U L I P 工法、NEW TULIP 工法で以下「本工法」と呼ぶ）を利用したトンネル構築等の事例（細径曲線ボーリング工法使用）の報告、太径曲線パイプルーフ工法開発の現状について述べる。また、地表沈下影響が少なく、安全に、速く、低コストで超大断面や双設断面の地下空間を構築する方法について概述する。

キーワード：非開削工法、地下空間、曲線ボーリング（推進）工法、断面拡幅、曲線管、地下道路分岐合流

* フェロー 鉄建建設(株) 土木本部

2. 非開削地下空間構築技術の現状と課題

2.1 非開削地下空間構築技術の必要性

現在検討されている地下空間利用の多くは、核となる拠点とその拠点同士を結合するネットワークで構成されている。このネットワークを形成する線状構造物（都市トンネル）は、拡幅・分岐により結節することになる。しかしながら、都市域ではこれらの結節部の建設に際しては、既設構造物の輻輳化や深層化と開削施工のための用地の確保難等から、非開削で施工することが必要となる。

したがって、これらの諸条件や高水圧下においても、安全かつ確実にトンネルの拡幅・分岐部の構築を可能とする非開削地下空間構築技術が求められている。

都市トンネルは、土木工事の中で合理的に省力化が進んでいるシールド工法が主力となり建設されることが考えられる。特に、密閉式シールドは、都市トンネルの構築において滞水層の掘削安定性や施工の安全性が高く、大口径・大深度に対しても高い適応性をもっている。

しかし、道路・鉄道等の交通施設における駅部や分岐・合流部、各種インフラ施設の拡幅部や接合部では、複雑なトンネル断面となり、シールド工法が得意とする同一形状のみではない。特に、シールド工法は同一断面の掘削、覆工を基本としており、要求される使用断面に合わせた断面形状の変化は、シールド機・覆工とも多くの課題の解決が必要となる。

2.2 近年における都市トンネルの建設技術の動向

都市域におけるトンネルの建設は、主としてシールド工法、開削工法、推進工法により建設されており、最近では、施工条件によっては適用可能である都市NATMも、地下鉄や洞道等の建設での施工実績がでてきている。しかし、地下空間利用の大深度化・長距離化等が進む中、開削工法および推進工法は適合した工法にはならない。

現状の技術レベルにおいては、地下利用位置が大深度し、高水圧下という施工条件下では密閉式シールド工法が有力となるが、トンネルの分岐・拡幅技術では、地下水処理等の課題があるが、地盤条件によっては掘削断面の形状変化が容易な都市NATMの適用も考えられる。

2.3 トンネルの断面拡幅、分岐・合流部の建設技術

2.3.1 トンネルの断面拡幅、分岐・合流部の建設技術の意義

都市域におけるトンネルの主力の施工法であるシールド工法は、掘削方式や覆工形状がシンプルで合理的である円形断面が多く採用されている。一方、同一断面を基本としていることから、要求断面（徐々に断面が変わる）に合った断面変化は得意な領域ではない。このため、シールドトンネルの拡幅、分岐・合流や断面変化などの特殊断面の場合には立坑などの開削工法での施工が一般的である。

しかしながら、近年の地中、地上の制約条件などから地上の社会活動への阻害を最小限にできる非開削地下空間構築技術が求められ、拡大、親子、分岐シールドなどのトンネル同一軸上や直角を基本とした施工技術が確立され、地中でのトンネルの拡幅や分岐が施工されている。

現状のシールドトンネルの拡幅、分岐技術は、

①任意の位置で拡幅、分岐できる。

②基本的に地上の用地を必要とせず、環境への影響が少ない。

③立坑等を必要とする場合に比べ、トンネルの建設深度が深いほど事業費削減と工期短縮が図れる。

等が特徴としてあげられる。

一方、都市NATMは、その合理性、経済性から、我国の都市域のトンネル技術として急速に普及しており、

①切羽がある程度自立するか適切な補助工法によって自立できる地山である。

②適切な加背割りや補助工法の採用で地表面沈下や地山の変位が既設の周辺構造物に対して許容範囲で施工できる。

これらの判断条件を満足する場合には、都市域でのトンネルの拡幅や分岐や断面変化などの特殊断面施工に適している工法といえる。

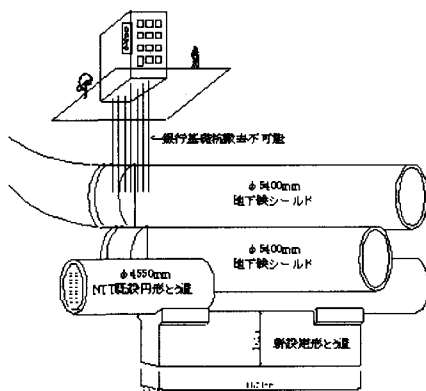
シールド工法によるトンネルの拡幅、分岐・合流部技術は、これまでに拡大、親子、分岐シールドなどの種々の工法により、トンネルの同一軸上の拡幅や直角方向の分岐を基本としたものが確立され、実際に施工されている。

また、シールド工法による分岐技術には、H&V シールド工法、球体シールド工法（縦横、横横）、地下茎シールド工法、T字接合シールド工法などがあげられる。H&V シールド工法がY型に分岐するのに対して、それ以外の工法は直角に分岐する工法である。最近では、道路や鉄道トンネルの分岐部に対応可能なシールド機の開発が数多く行われおり、立坑なしで地中分岐するシールドや、拡幅を伴いながら分岐するシールドなどが提案（ブランチシールド工法、オクトパスシールド工法など）されているが、現状では、実用化には至っていない。

シールド工法では、本トンネルから断面変化を伴う分岐は、道路や鉄道などの交通施設で視距確保などトンネル機能上、徐々に変化する断面形状が求められる構造であり、技術的にシールドの拡幅・縮小などの施工途中における掘削機構や止水機能の確保、それと同時に断面変化を伴う覆工構造など、今後の解決すべき課題がある。

近年では、曲線ボーリング技術等を用いて独自で地下空間切掘を可能とした事例があり、トンネルの拡張・分岐においても、すべての断面に適応可能であるとともに不可欠な技術である。現状技術では深度30m程度までは十分対応できる。しかし、大深度化に伴う0.5～1.0Mpa程度の高水圧に対応する技術、例えば高水圧対応型で任意に曲線が掘進できる機械や曲線管自動設置ロボットなどの開発が今後の課題となる。

この事例は、神戸市交通局地下鉄海岸線工事のシールドトンネルの掘進に既設とう道が支障をきたすことから、既設とう道の一部を撤去し、図-1に示すイメージのように、その直下に地中切下げ（拡幅）して新設とう道を構築する工事である。支障となる円形とう道は、セグメント外径 4,550mm、土被り約 19mで、重要な通信ケーブルが多数収容されている。また、工事場所は元町大丸、中華街等の繁華街に位置し歩行者の移動の多いスクランブル交差点の直下で、付近にはバス停が多くあり、交通量も多大であることから、長時間の道路占有による工事は困難である。



-211-

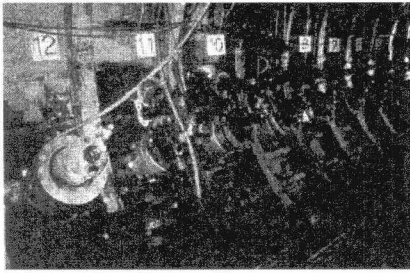


写真-1 凍土内掘削完了

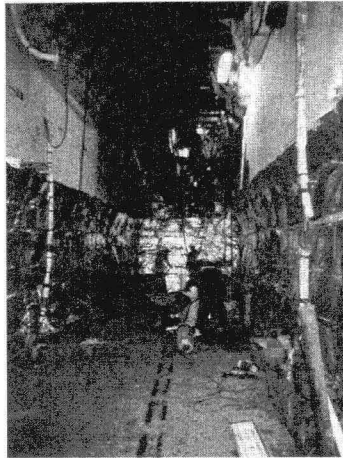


写真-2 坑内曲線管設置状況

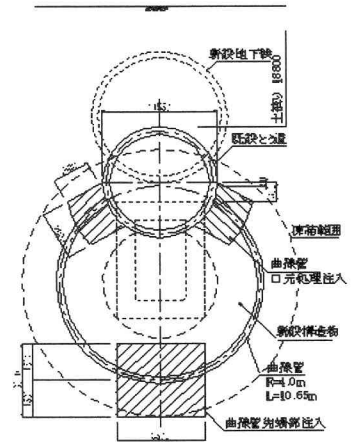


図-2 施工位置断面図

また、掘削深度がGL-25mであり、既設とう道上部に矩形地下河川が埋設されていることから、開削工法によるとう道の付け替え工事は極めて困難であるため、非開削工法である工法の検討が進められ、曲線ボーリング技術（以下本工法）が採用された。また、既設とう道下部に位置する地盤を凍結するために必要な凍結管の設置は、路上から施工することが不可能である。このため、図-2に示すように、既設とう道内より、掘削坑内に凍結管が露出することなく、計画範囲に凍土が造成できるように曲線ボーリング技術を用いて、曲線管を設置した。凍結完了後、内部を掘削して下部構造物を構築、ケーブル切り下げ後、上部構造物を構築した。写真-1に無支保工で掘削された状況を、既設とう道の曲線管設置状況を写真-2に示す。

3.2 先行支保工の設置

本事例は、東日本旅客鉄道株式会社発注の東京都北区王子堀船地先・東北本線王子駅構内首都高速道路新設工事（飛鳥山トンネル）に伴う支保工敷設にあたり、曲線ボーリング技術を用いて行った工事である。

施工場所（図-3）は、飛鳥山トンネルの拡幅・延伸部で、地上部はJR営業線と近接し、かつ急斜面で最小土被りが約3mであり、環境保全上の配慮等も求められた。

そのため、トンネルの拡幅部の施工（けん引工法の作業基地）に先立ち、地盤の改良・補強が必要であり、工法の比較検討の結果、図-4の施工断面図に示す本工法を用いて、曲線管を敷設し、先行支保を行うことがもっとも安全な施工が可能であると判断された。

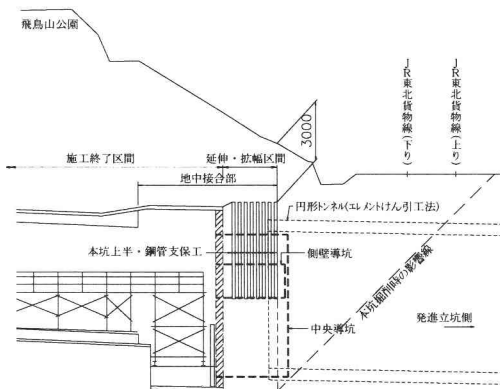


図-3 施工位置横断面図

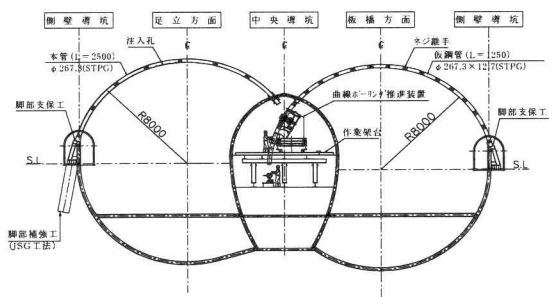


図-4 施工断面図

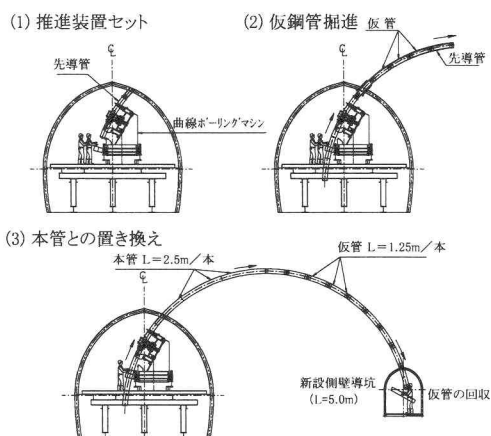


図-5 施工概要(順序)

施工法の概要は、曲線管（注入孔付き曲線管：外径 $\phi 267.4\text{mm}$ 、曲率 $R=8\text{m}$ 、左右8列の計16列、1列の埋設延長は $17.5\sim 18.0\text{m}$ ）を敷設し、次に、この管を利用した薬液注入（二重管ダブルパッカ方式）を行い、トンネル上半アーチ部を改良補強するものであり、新しいトンネル構築の技術である。

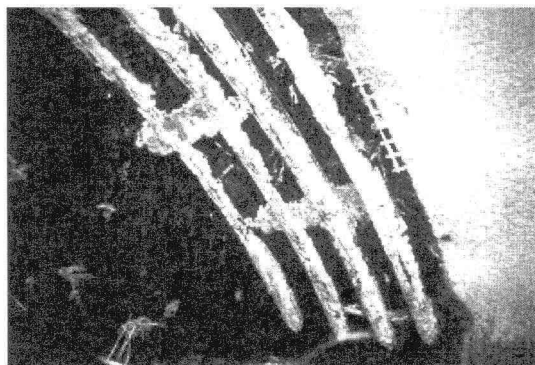


写真-5 注入状況と埋設曲線管状況

周電気溶接による方法とした。

地盤改良後のトンネル掘削は、上部半断面を上段、下段分けて行う。写真-4はその上段部を掘削した状況である。写真-5では、曲線管と交差した既施工のロジックジェット工法による改良部（白い部分）が確認できる。このように地盤改良工は 曲線支保工と一体となった地山の補強効果が確認できた。

また、本工法は、掘削の前に支保工の敷設、地盤改良工が実施できるため、施工、安全に対して高い効果があった。

3.3 シールドトンネルの上下接合

本事例は、日本コムシス(株)（NTTインフラネット(株)関西支

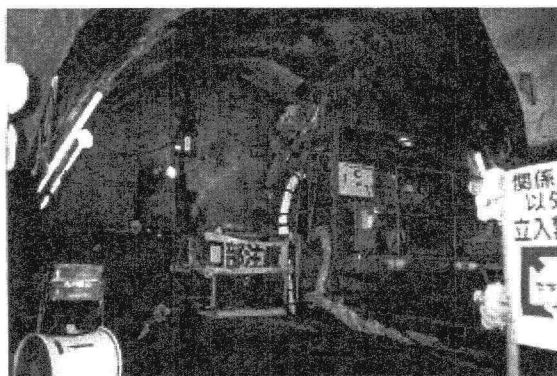


写真-3 施工概要

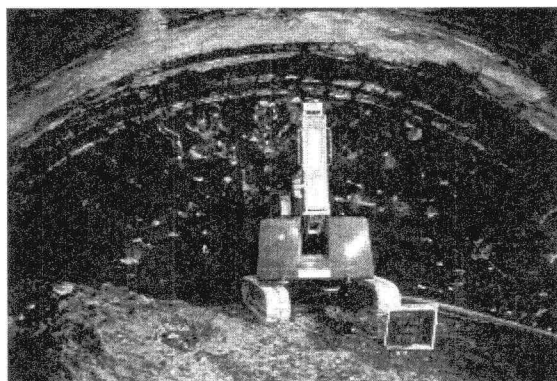


写真-4 トンネル掘削状況

先受鋼管支保工の敷設は、図-4の施工断面図に示すように、中央導坑内から推進装置（写真-3）により、掘削上半部へアーチ状に埋設する。

図-5の施工概要図に示すように、第一工程で仮曲線管（ネジ継手鋼管、 $1,250\text{mm}$ ）を用いて掘進を繰り返して行き、その先端が側壁導坑に到達後、第二工程目に仮曲線管の後方に本管（ $2,500\text{mm}$ ）を取付け、本管と置き換え施工をする。本管の接続は強度確保のため、現場円

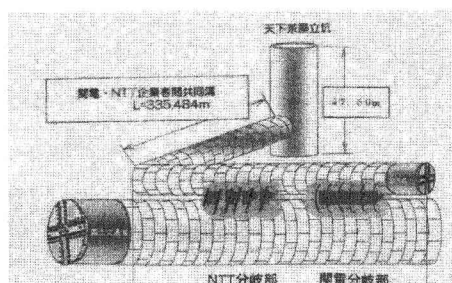


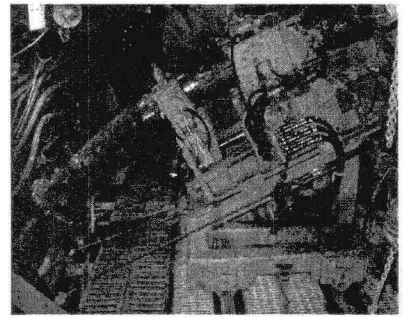
図-6 接合部イメージ

店）発注の関電分岐部接合工で本工法を用いて施工したものである。
（写真－６）

施工位置は、国道下の地下鉄四ツ橋線の直下、G L-40m付近である。

図－６、７に示すように、外径 $\phi 7,900\text{mm}$ の共同溝トンネル（国交省）に対して、直上部に併設した外径 $\phi 3,550\text{mm}$ の関電・N T T企業者トンネルとの間を接合する工事（凍結工）において、本工法を用いて、企業者トンネル内から凍結用の曲線管を埋設（写真－６）したものである。

施工箇所付近の地盤性状は、砂混じり粘土層、砂層およびレキ混じり砂層が複雑に介在した互層で、N値15～50である。施工数量は、約2.4～3.3m（ $\phi 267.4\text{mm}$ ）の曲線管を左右10本である。

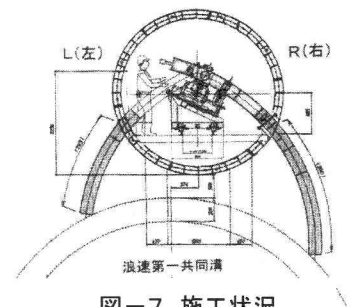


写真－６ 坑内推進装置設置状況

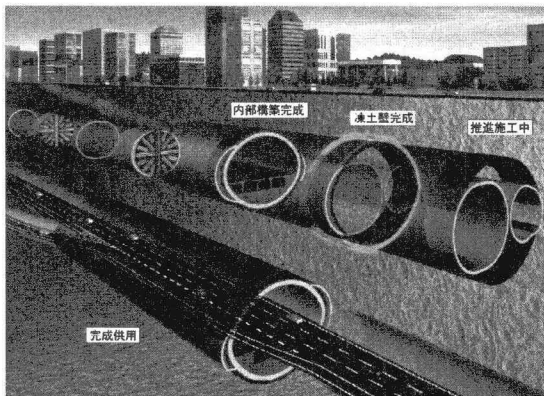
４．太径曲線パイプルーフ工法による非開削大断面地下空間構築工法

４.１ 開発経緯

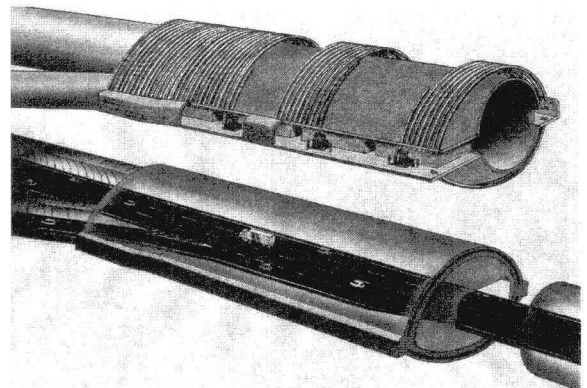
トンネル切詰め部の大断面化、大深度化、高水圧に対応するために、図－８に示すように、大口径の曲線管をシールドトンネルのセグメントを切削してトンネル間にアーチ状に設置し、土圧水圧に抵抗させてその内部に大空間を構築する工法が最適と考え、開発を進めてきた。また、図－９に示すように、山岳トンネル（導坑利用）における非開削地下空間構築への適用も可能である。



図－７ 施工状況



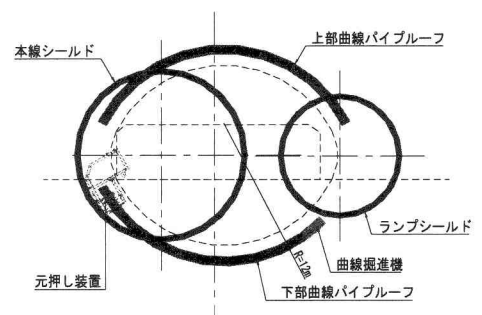
図－８ シールドトンネルにおける非開削地下空間構築



図－９ 導坑を利用した非開削地下空間構築

４.２ 太径曲線パイプルーフ工法の概要

本工法は、長手方向のトンネルと直方向に掘進する太径曲線パイプルーフを組み合わせ、大深度地下でも土圧水圧に鋼製の構造物として抵抗できる信頼性の高い覆工構造を構築するものである。パイプルーフ間に残る部分の土留め止水には、凍結工法を用いるが、凍結範囲が狭く、主として止水機能を期待すればよく、凍上、凍着切れなどの凍結工法のリスクと考えられる要因の低減を図ることができる。



図－１０ 施工状況概略図

４.３ 太径曲線パイプルーフ工法の装置と施工方法

図-10 に、太径曲線パイプルーフ工法のシールド坑内での施工状況を示す。

セグメント組立て済みのシールド坑内において、さらに前方のシールド掘進に必要なスペースを除いた部分で、枕木の下部に①発進エントランス、②下部架台(パイプ固定・位置制御装置)枕木の上部に③元押し装置(掘削機およびパイプルーフを正規の位置にセットし、推進させる装置)を設置し、④太径曲線掘削機、⑤下部パイプルーフ(数 m の長さに分割)を押し出し、掘進・接続を繰り返し、ランプシールドの⑥到達エントランスルームに到達させる。到達エントランスでは、パイプルーフにセット済みのチューブシールなどで止水後、掘削機を到達部から、あるいはリターンして発進側から回収する。

上向きの施工時も同様である。

4.4 実証試験の概要

試験場所：八王子実験ヤード

工法：泥水式曲線推進工法

鋼管径：外径 $\phi 812.8 \text{ mm}$

推進長： $L \approx 21 \text{ m/列}$ (3m 鋼管 $\times 7$ 本継ぎ)

鋼管曲率半径： $R=16 \text{ m}$

施工列数：5列(施工ピッチ 1.2m)

試験装置は、図-11 に示すように発進部には、鋼管をセットする押し輪や押し輪を押込む推進ジャッキ等から構成される元押し装置、掘進機・鋼管の位置調整および固定を目的とした下部架台、さらに発進坑口部のエントランスで構成される。

エントランスは、坑口部の止水を目的とするため、

ワイヤーブラシ式とゴムパッキン(押え金物つき)を併用した。また、掘進時の反力は、元押し装置背面の反力受け架台で受けることとした。掘進手順は、発進立坑から掘進機、鋼管を順次接続し、元押し装置で推進、到達する。

地山掘削時は掘進精度の確保を目的とし、掘進スピードを $20 \sim 30 \text{ mm/min}$ の範囲で、発進部のモルタルおよび到達部に設置した GFRP 部材の切削時は、約 3 mm/min で制御した。また、ジャッキ総推力は $300 \sim 500 \text{ kN}$ の間を、カットトルクは $10 \sim 15 \text{ kN} \cdot \text{m}$ の間で推移した。

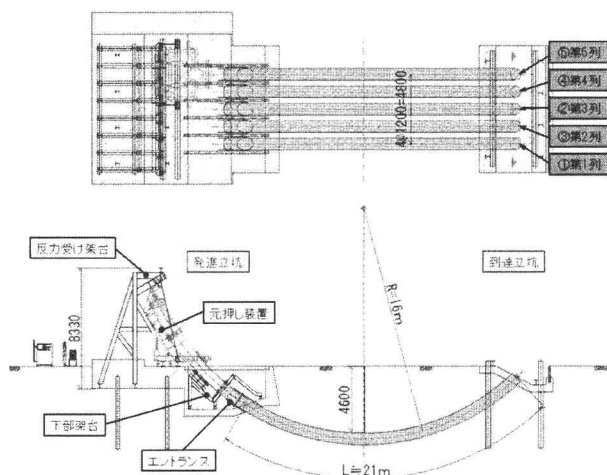


図-11 実証試験概要

4.5 工法の提案例

4.5.1 シールドトンネル内からの施工

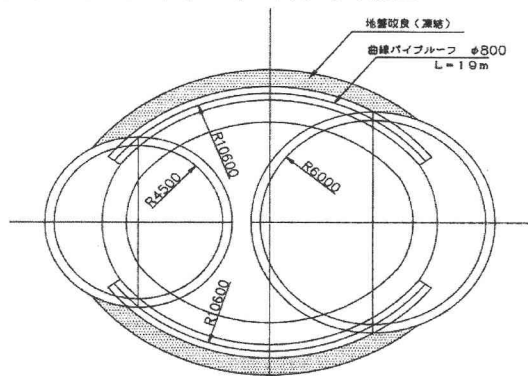


図-12 シールドトンネル内からの施工

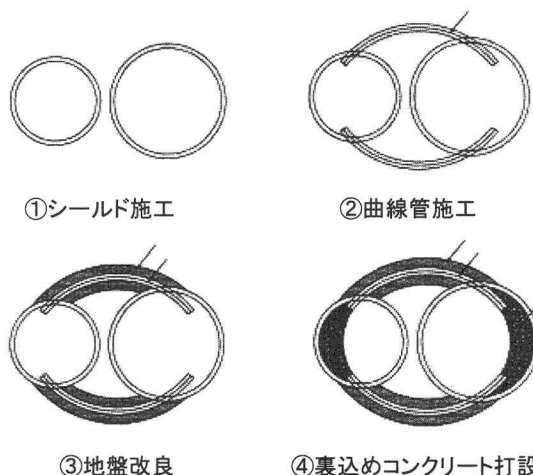
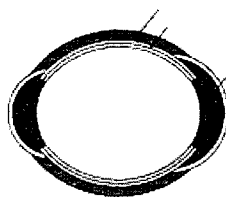
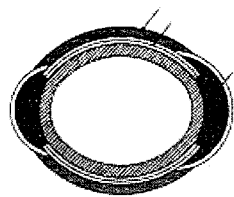


図-12 に示すように、先行したシールドトンネル内から、図-13 に示す概略施工手順により、構造物を構築する。

手順は、①シールド施工、②曲線管の施工、③地盤改良（凍結工法等）、④裏込めコンクリート打設、⑤分岐・合流部拡幅掘削（NATM）⑥覆工コンクリートの打設して、分岐・合流部の構築が完了する。



⑤拡幅掘削(NATM)



⑥覆工コンクリート打設

図-13 シールドトンネル内からの概略施工手順

4.5.2 導坑内からの施工

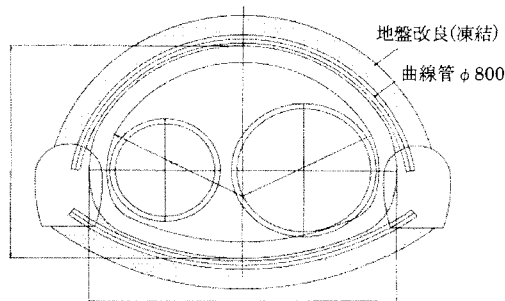


図-14 導坑内からの施工

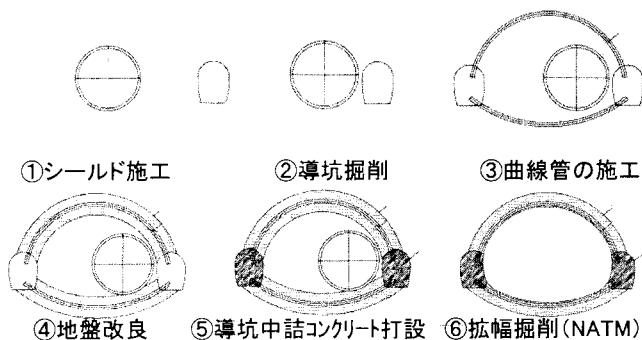
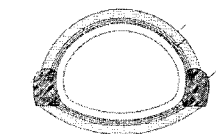


図-15 導坑内からの概略施工手順

図-14 に示すように、先行したシールドトンネル内から、図-15 に示す概略施工手順により、構造物を構築する。手順は、①シールド施工、②導坑掘削曲線管の施工、③曲線管の施工、④地盤改良⑤導坑中詰コンクリート打設、⑥分岐・合流部拡幅掘削⑦覆工コンクリートの打設で構築が完了する。



⑦覆工コンクリート打設

5. おわりに

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が平成12年5月19日に成立し、平成13年4月から施行しており、今後は、地下空間を構築する技術に対しても、安全、環境、コスト等により配慮した技術が必要となると思っている。これらニーズに対し、本工法は、大都市部でのトンネル、地下鉄道駅、道路トンネルの合流部等の構築を、地上部の構造物や輻輳する地下施設への影響、地域の都市機能への阻害を最小限にすることが可能であり、適用範囲が広いと考える。

また、報告したとう道移設、大断面の双設トンネル等の施工実績から、周辺の影響も少なく、本工法により設置した曲線管を利用した凍結工法、先行支保工の有効性は確認できたため、同様な施工事例が増えると考えている。今後は、その有効性が期待できる提案事例の実施工に向けて、太径管に対応できる施工法、玉石層対応等適応地盤の拡大、長尺管の施工精度管理方法、施工サイクル短縮に対応する管接合法の確立等に対する実証実験等を行い、そこで得た知見を生かした工法の深度化を、さらに進めていくつもりである。

参考文献および資料

- 1) 亀岡美友, 粕谷太郎: 曲線ボーリング工法(TULIP 工法) の開発、土木学会誌、1995. 4、pp.36-39
- 2) 粕谷太郎: 曲線ボーリング技術の開発と地下空間での応用、研究業績発表会、日本技術士会、2002.5
- 3) 粕谷、小山他: TULIP 工法を用いた先行支保工、建設の機械化、日本建設機械化協会、2002.11
- 4) 粕谷、青木: 都市部における大断面地下空間構築方法の提案、地下シンポ、第8巻、pp237~242、2003. 1
- 5) 粕谷太郎: 非開削地下空間構築方法の提案、地下空間シンポジウム 論文・報告集、第9巻、2004. 1
- 6) 粕谷他: 曲線パイプを活用した非開削大断面地下空間構築技術、地下シンポ 論文・報告集、第10巻、2005. 1
- 7) 国土交通省: 大深度地下利用の関する技術開発ビジョン報告書、大都市圏整備課大深度地下利用企画室