

非開削による大断面トンネル分割施工法の開発

DEVELOPMENT OF BUILDING METHOD OF A LARGE TUNNEL BY INTEGRATED SMALL SHIELDS

湯口正樹¹⁾・金子研一²⁾・大畑 裕³⁾・門田克美⁴⁾・若林正憲⁵⁾

Masaki YUGUCHI, Kenichi KANEKO, Yutaka OOHATA, Katsumi MONDEN, Masanori WAKABAYASHI

We are developing a new technique of building a large tunnel by piling up small shield tunnels, as a way of making underpasses at the intersection between a railway and a roadway, or between two roadways.

A tunnel is divided into several sections as if mouthpiece of a harmonica and each section is built individually, and then they are connected together. The miniaturization of machines makes it possible to build a tunnel which is shallow ground. Moreover, during the execution it does not significantly damages the ground, because of its cross-sectional structure. Since they are built partly, it eases traffic congestion. It is also suitable for a long distance or a curve-lined section.

Key Words: underpass, traffic jam, interchange, shield driving method

1. はじめに

都市再生特別法が2002年6月1日に施行され、「都市再生」をキーワードに土木事業が拡大することが期待されている。都市再生が目指すターゲットの一つに「交通渋滞の解消」があげられている。この対策として、トンネル分野では鉄道や河川の横断、交差点の地下立体交差といった比較的距離が短いアンダーパスと呼ばれる道路トンネル、あるいは鉄道を地下化することで踏切をなくすといった事業がある。50m～100m程度の鉄道横断なら、従来から実績のあるエレメント推進工法¹⁾で十分に対応できる。しかし、100mを超える距離、また曲線区間を含むといった条件ではこれらの工法には限界があり、シールド工法に頼らざるを得ない場合がある。

ところが、道路トンネルは下水道や共同溝と比較にならないほど大断面である。このため、施工距離が短いとトンネル工事費に占めるシールド価格のウエイトが大きくなり、トンネル工事費は高くなる。このため、自動車専用道路のように距離が長く、地下深部でないとシールド工法は採用されにくいのが現状である。

著者等はエレメント推進工法と従来のシールド工法が採用される隙間の領域を、シールド工法で安く施工するための技術開発に取り組んでいる。本文では、新しく誕生した大断面トンネル分割施工法について述べる。

2. 新工法の概要

前述したエレメント推進工法による道路トンネルの施工は、トンネル断面の外周部を推進機で環状あるいは門型に構築した壁の内部をバックホウ等の掘削機で掘削して道路トンネルを構築するというものである。同様の試みがシールドでも行われ、高速川崎縦貫線ではMMST (Multi-Micro Shield Tunneling) 工法²⁾が採用されている。ただし、MMST工法の場合、縦長あるいは横長の大型のシールドを新たに製造するためコストが高くなり、今回ターゲットにしている道路の交差点や鉄道横断部の浅い深度に

1) 大成建設(株) 土木技術開発部

4) 石川島播磨重工業(株) 油機・シールド設計部

2) 正会員 博士(工学) 大成建設(株) 土木技術開発部

5) 正会員 石川島建機工業(株)

3) 正会員 大成建設(株) 土木技術部

計画される比較的距離の短いトンネルには適さない。

一方、山岳トンネルでは道路トンネルのような大断面の空間を掘削するのに、小断面のトンネルに分割して地山をゆるませずに施工する方法が定着している。本工法はその考え方をシールド工法に踏襲することにした。アンダーパスや土被りの浅い地下鉄道の場合、トンネル断面は通常、長方形の形状をしている。これを矩形に等分割し、小断面の矩形トンネルを積み上げることで大断面トンネルを構築する施工方法に取り組んだ。最終的に、一体の構造物にするが、トンネルの掘削時には個々のトンネル覆工が大断面の土留支保工を兼ねているため、周囲の地山を緩ませにくいので、浅い土被りのトンネルに適していると考えたためである。イメージを図-1に示す。全断面を小型のシールドで分割して掘削後、掘りあがった大空間の内部に型枠を組み立て、壁・スラブのコンクリートを打設する。この時、外周のセグメントは構造物の外型枠、鋼材として利用する。外郭だけをシールドで掘削し、シールドで構築するトンネル断面全体をトンネルの覆工として利用するMMST工法とは全く異なる。

また、一つのトンネル断面を小さくすることで、土被りの浅いトンネルが構築できる。一つのトンネル断面を小さくすることはシールドの価格を抑えることができ、短い距離を掘るためにシールド価格を低減させたいという条件にかなうことができる。シールドの価格は、その寸法の3乗に比例（正確にはない）して上昇する。このため、大幅に安くなる小型のシールドを用いることで、トンネル全体の工事費を抑えることが可能になる。

覆工についても、個々のトンネルが小断面になることでセグメントの厚さも薄くて済む。隣り合うトンネルどうしはボルトで接合し最終的にSRC構造で一体化することで開削トンネルと同程度の壁厚のトンネルを構築できる。このことは、開削トンネルで計画されている4車線道路トンネルを従来のシールド工法に変更しようとした場合、上り・下り2本のシールドを掘るのに離隔が必要なため、開削トンネルより用地幅を必要とするため、採用されにくいといった問題を解消している。

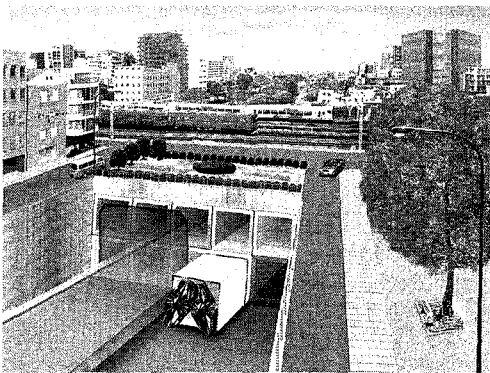


図-1 新工法のイメージ図

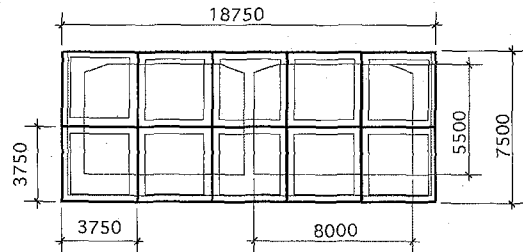


図-2 断面の分割

3. 断面の分割

トンネルを設計するに当たり、工事費、施工時間、環境条件、作業性などを考慮する必要がある。断面の分割数を多くすると工事期間が長くなり、分割数を小さくするとシールド価格が高くなり不経済になる。鉄筋・型枠組み立て等の作業性から、内空3m程度の空間が欲しい。また、1台のシールドで数本のトンネルを掘進することを考慮すると、環境条件からUターン施工ばかりでなく一方の掘削に限定され、シールドの陸上輸送もありうる。この場合、幅で3.5m以内、高さも同程度であることが望ましい。

一例として、対象トンネルを1方向に2車線の道路トンネルを2本（上り下り）有する断面を選定した場合、幅18.3m、高さ7.3mの断面を上下に2分割、幅方向に5分割、合計10分割することにした構築するイメージを図-2に示す。1つのトンネルは3.75m×3.75mの正方形である。

断面の寸法を3.5m以内に制限すると上下方向が3分割になり、発進設備を3回整備することになり、継手を含めて作業性が劣ることから、上下を2分割とした。

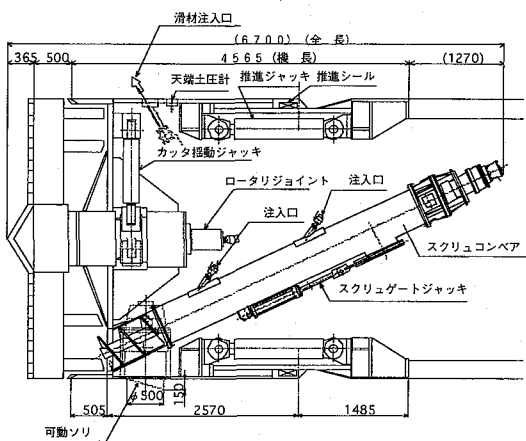


図-3 シールド全体図

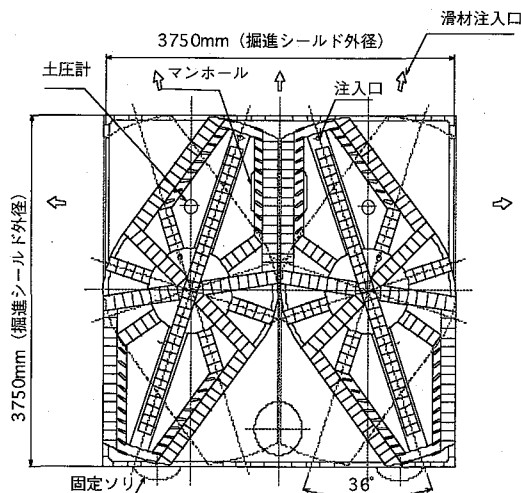


図-4 カッタ正面図

4. シールドの設計

シールドの設計にあたっては、①シールドどうしを接触させる。②長距離・曲線施工を可能にする。の2点を考慮した。

(1) 推進機構

通常、シールド工法はシールドのテール内でセグメントを組み立てる方式であるため、トンネルどうしを接触させることは不可能である。前述したMMST工法ではシールド間に1～1.5m程度の隙間を開けている。

このため、推進工法の施工方式を採用することにより、この問題を解決した。つまり、掘削機（以下シールドと呼ぶ）とセグメントの外寸法を同サイズにし、セグメントは発進立坑で組み立て、シールドとセグメント全体を元押しジャッキで推進する。

500m以上の長距離を目指しているため、推進機構に尺取り方式を取り入れた。シールドを前胴と後胴に分割し、推進ジャッキで接合する。掘削は、この推進ジャッキに負担させることで、元押しジャッキの負担を軽減できる。

また、シールドの推進ジャッキで方向制御が行えるため、曲線施工が容易に行える。シールドの全体図を図-3に示す。

推進工法では、セグメントの組み立てにエレクタを使用しないから、シールドのコストが低減する。

(2) カッタ

個々のトンネルの断面は正方形である。正方形の断面を掘削するシールドとして、遊星カッタを応用したものやルーローの三角形を応用したものがある。これらの機構は複雑であり、コスト高につながるだけでなく、コーナー部を直角に掘ることができない。そこで、コストが安価なカッタを開発した。図-4に示すカッタの正面図からわかるように、一対のブーメラン状のカッタを油圧ジャッキの伸縮で掘削する。しかし、カッタの揺動だけでは正方形の断面をカバーしていない。このため、断面の四隅および上下の中央には固定ビットを配置している。対象とする大方の地盤はこれで対応できる。

5. セグメントの設計

(1) セグメントの構造

矩形セグメントの材質は鋼製とする。断面は、シールドと同一寸法の正方形である。1リングの幅は1.2mを標準に、再利用を念頭に分割している。セグメントの高さ（厚さ）は、内側のセグメントの一部を支保工代わりに残し、撤去解体する状態で決まり、計算によれば、200mm程度である。

隣り合うセグメントどうしを接合させるため、ガイド材としてレールとガイド溝を設置した。自由度をもたせるために、

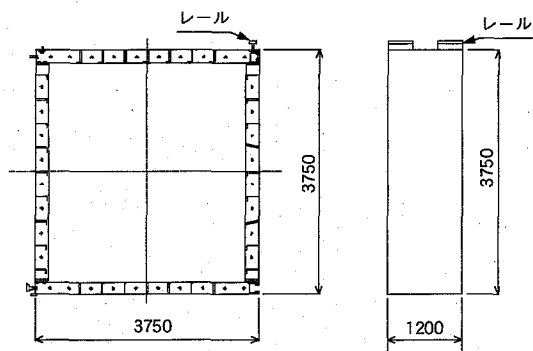


図-5 セグメント

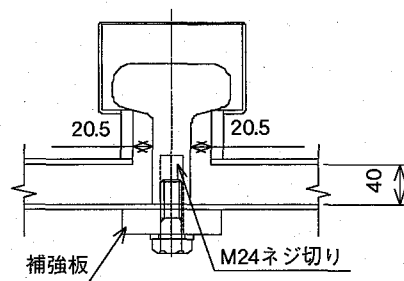


図-6 継手詳細図

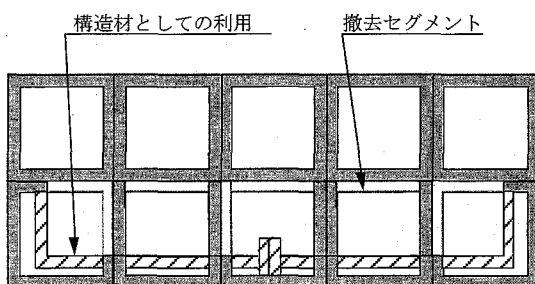


図-7 セグメントの再利用例（下床コンクリート打設前）

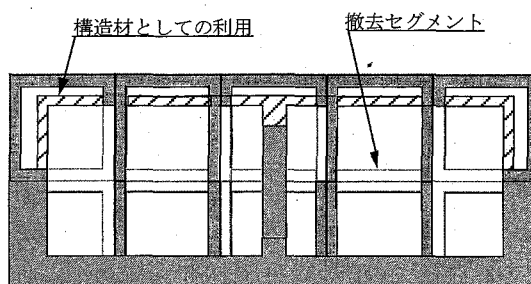


図-8 セグメントの再利用例（上床コンクリート打設前）

レールを連続して設けることはせず、1辺に2ヶ所設け、レールの長さは400mmにしている。また、トンネル間の継手には40mmのゆとりをもたせてある。図-5はトンネル単体のセグメント組み立て状況であり、図-6は継手部の詳細図である。

最終的にトンネルの外周の目地に当たる部位には、羽根と呼ぶ部材を取り付け、土砂の流入を抑制している。

外周部のセグメントは、構造材として躯体の一部に取り込まれるが、内側に残されたセグメントはスクラップになる。図-7、図-8に示すように、内側のセグメントを構造材として再利用することで、コストを削減する。セグメントを構造材として利用するとひび割れ防止の鉄筋を組み立てる程度で済む。

(2) セグメントの設計

セグメントの設計は施工時と完成時の2段階で行う。施工段階におけるセグメントは、施工ステップにより変化する荷重条件（土水圧、隣接トンネルの影響、セグメント自重など）および支持条件に対し耐えうように設計する。図-9に解析モデル例を示す。解析モデルは平面骨組み解析により断面力を算定する。ここではトンネル断面を6分割にしたケースで説明している。隣接するトンネルがある場合には、偏土圧になっているが、側方に水圧をかけると材料が小型化できる。最終的に、STEP2のケースで断面が決まることが多い。

完成時の段階では、単体トンネルのセグメントを構造部材とした鋼・コンクリート合成構造として設計を行う。設計は、一般部と継手部に分けて行う。一般部は、主桁を主鋼材とした鉄筋コンクリートの慣用設計法に従い、曲げモーメントおよび軸力に対する断面算定を行う。せん断力に対しては、コンクリートとせん断補強筋で抵抗する構造にする。

継手部は、単体トンネル時にボルトに引張り応力が発生しており、完成時に累加して引張り応力が発生する。この完成時の増分応力に対して抵抗できるようにボルトの設計を行う。ボルトで対応できない場合は、鉄筋に補強する。

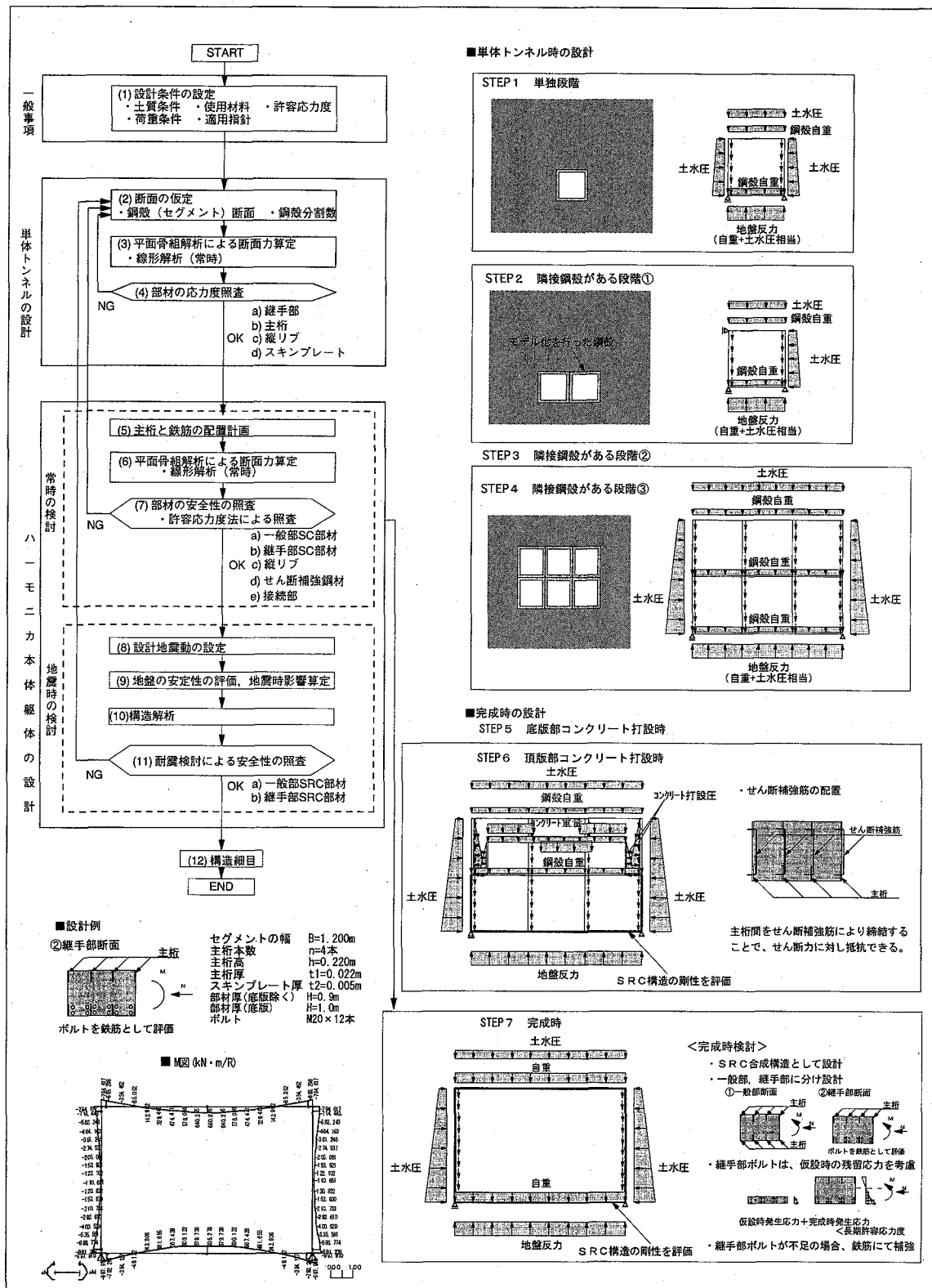


図-9

6. 施工

(1) トンネルの掘進

トンネルの掘進は1台、あるいは2台のシールドをくり返し使用することで行う。まず、上段中央のトンネルを慎重に施工する。これを基準トンネルと呼ぶ。これをガイドに、左右のトンネルを掘進し、上段の施工が完了後、下段のトンネルを掘進する。

上段のトンネルを掘進後、隣合うトンネルをボルトで接合後、下段のトンネルを掘進すると、上段がルーフ状になるため、下段のトンネル掘進による地山への影響は出にくい。条件によっては、一気に立坑を掘削し、下段を先行させて構築することも可能である。片側から上下に攻める場合も可能である。

トンネルの施工の手順を変えることで、トンネルのセグメントとして再使用することもできる。例えば、10分割の場合、片側6本のトンネル（3列2段）を先行し、片側のトンネルを構築後、内側のセグメントを撤去し、残り4本のトンネルのセグメントとして70%以上を賄うことができる。この場合、構築物の内側には鋼材が残置されないため鉄筋を配筋する必要がある。

(2) 躯体の構築

トンネル間には20～40mmのゆとりをもたせてある。このため、トンネル間には隙間が発生する。トンネル掘進後、この隙間を洗浄し、ボルトで結合した後に、無収縮モルタルを充填する。止水が必要な場合には地盤注入や隙間にパッカーで処理する。トンネル間のセグメントの一方は撤去するし、撤去しない場合でもプレートを切断することが可能なので、内側から完璧に止水をすることは可能である。

小断面荷分割したトンネルを掘進後、セグメントを構造物材として再利用し、コンクリートを打設するが、セグメントを仮設材として利用することもできる。

7. まとめ

本文で述べていないこともあるが、得られた知見は以下のとおりである。

- ・内側のセグメントを構造物材として再利用することで鉄筋を省略できる。ただし、ひびわれ防止鉄筋、せん断補強筋は必要である。
- ・施工段階におけるトンネルの浮き上がりを検討した結果、土被りの浅いところでは浮き上がりが生じた。この場合、下段3列の掘進が完了後、下床のコンクリートを打設すれば解消できる程度のものであった。
- ・隣接するセグメントがある場合、側方に水压をかけることで経済的な設計ができる。
- ・6分割のボックスの場合、継手の位置は曲げモーメントの小さな位置であり、継手の剛性を小さく評価しても構造に与える影響は少ない。

8. おわりに

以上、非開削工法を用いて大断面トンネルを分割施工する技術を報告した。解析モデルは大成建設土木設計部の服部佳文君が作成したものである。今年度は継手の実験を行う予定であり、その結果を設計に反映させたいと考える。

本工法は鉄道の横断を念頭にアンダーパスのうち従来の非開削技術では困難な領域を対象として開発に取り組んできたが、営業鉄道の地下化、鉄道の引き込み線など距離の短い矩形トンネル、共同溝など幅広い需要に適用できる。また、大断面を分割して施工する技術を応用してアンダーパスのアプローチ部（土被りが2mに満たないトンネル）にも技術展開する予定である。

参考文献

- 1) 連載講座小委員会：線路下横断工法（7）、トンネルと地下、第32巻4号、pp71-77、2001など
- 2) 田村英毅ほか：MMST工法を用いた施工、トンネルと地下、第30巻3号、pp13-20、1993