

大断面分割シールド工法の開発

—ハーモニカ工法—

湯口正樹・潮田悦郎・金子研一・植田堅朗・大畑裕^{*1}

Keywords : Underpass, Shield Driving Method, Traffic Jam, Interchange, Harmonica

アンダーパス, シールド工法, 交通渋滞, 交差点, ハーモニカ

1. はじめに

都市部における地下開発にシールド工法の果たす役割は大きい。立坑さえ造れば、道路を掘り起こすことなく1 km～2 km 以上のトンネルを構築し、しかも、地上の線形に追従することができる。このため、立坑付近で車線の切り回しを行うほかは地上からの工事を伴わないため、交通渋滞を引き起こさずに工事が可能である。

道路トンネルでシールド工法が本格的に検討されるようになったのは東京湾横断道路以降であり、その歴史は浅いが、実績は増えつつある。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、シールド工法のコストは高くなり、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。

近年、都市の道路トンネルとして新しい需要が増加してきた。鉄道や河川の横断、交差点の地下立体交差といった、比較的距離が短い道路トンネルである。50m～100m 程度の鉄道横断ならPCR工法¹⁾やHEP&JES工法²⁾といった従来から実績のある施工方法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シールドに頼らざるを得ない計画もある。卑近な例として秋田中央道路が挙げられる。

著者等は道路トンネルのうちアンダーパスと呼ばれているトンネル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分割シールド工法について述べる。

2. 大断面分割シールドの概要

2. 1 従来技術

都市の地下に道路トンネルをシールドで施工している例として、首都高道路中央環状新宿線、あるいは高速川崎縦貫線があげられる。前者は道路断面を大口径の円形のシールドで一気に掘る工法で施工している。後者にはMMST 工法³⁾が採用されている。MMST (Multi-Micro Shield Tunneling) 工法とは、複数の小断面シールドで、大断面トンネルの外殻部を先行して構築し、外殻を閉合後、その内部をバックホウ等で掘削、排土し、道路トンネルを構築する工法である。

前者は、シールドの直径が約 13m と大断面であったり、後者は複数(3枚)のカッタを組み込んだ横長あるいは縦長のシールドを用いるため、シールドのコストが高いものであった。

今回、ターゲットにしている道路トンネルは、道路の交差点や鉄道横断部であり、浅い深度に計画され、比較的距離の短いものである。このため、シールドを利用したコスト低減が可能な施工方法の開発を目指した。

2. 2 コンセプト

アンダーパスという浅い土被りのトンネルを対象にするため、キュービズムによるトンネルの施工方法を考えた。小断面のトンネルを積み上げることで大断面トンネルを構築しようと言うものである。トンネルの掘削と同時に土留支保工を兼ねているので、周囲の地山を緩ませないため、都市の地下改造に適している。

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。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が、本工法はその応用である。

^{*1} 土木本部土木技術部

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た。

シールドの価格は、その寸法の3乗に比例（正確には）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。

覆工に付いても、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で設計されている断面と同程度の壁厚のトンネルを構築できる。

このことは、従来のシールドで計画すると、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といった問題を解消している。

3. ハーモニカ工法

3.1 断面の分割

検討する対象の道路トンネルとして、1方向に2車線のトンネルを2本（上り下り）有する断面を選定した。開削トンネル（幅 18.3m、高さ 7.3m）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-1 に示す。分割した切り口がハーモニカの歯に似ていることから「ハーモニカ工法」と名付けた。1つのトンネルを 3.75m×3.75m の正方形としたが、長方形でも良い。

このように全断面を小型のシールドで分割して掘削し、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断面全体をトンネルの覆工として利用する MMST とは全く異なる。

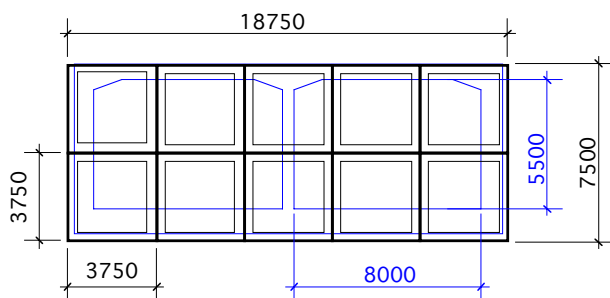


図-1 断面の分割図
Sectional Plan

3.2 シールドの設計

シールドの設計にあたっては以下の2点を考慮した。

①シールドどうしを接触させる。

- ・推進工法系で施工
- ・正方形断面（コーナー部が直角）の掘削
- ・トンネル間にガイド材の利用

②長距離・曲線施工を可能にする。

- ・推進ジャッキの負担の軽減
- ・方向制御機構の設置

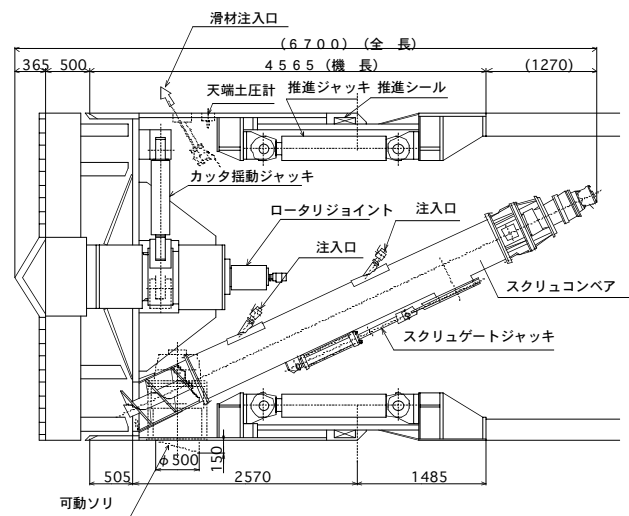


図-2 シールド全体組立図
Shield Machine

(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、シールド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、元押しジャッキを小型化できる。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-2 に示す。

この方式では、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。

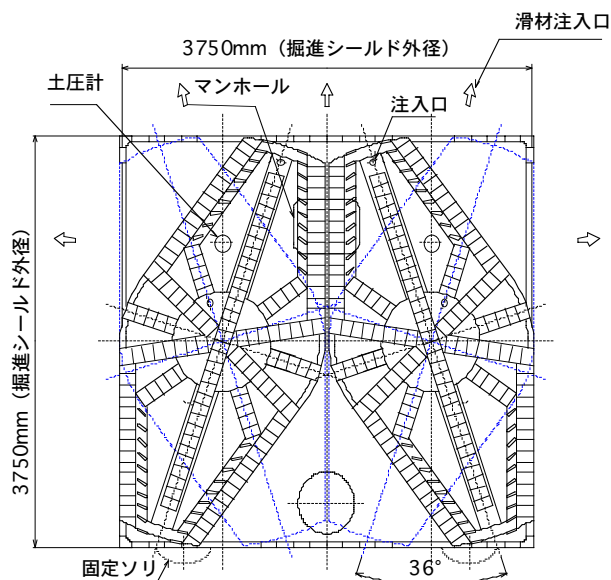


図-3 カッタ正面図
Cutterhead

そこで、コストが安価なカッタを開発した。図-3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、図からわかるように、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。

3.3 セグメントの設計

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、後述する再利用を念頭に分割している。

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、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。

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。セグメントの外観を図-4に示す。

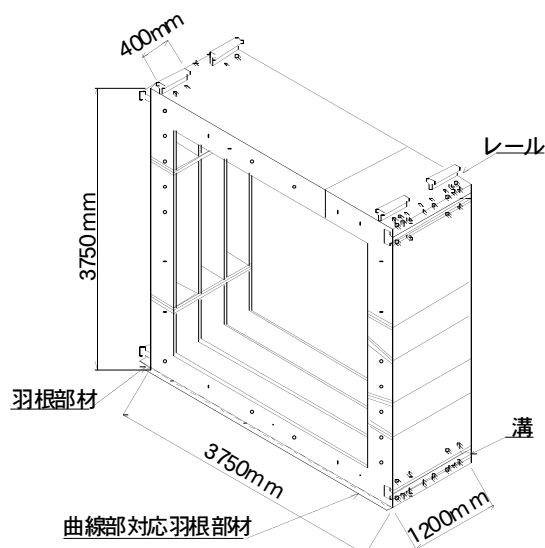


図-4 セグメント概念図
Segmented Lining

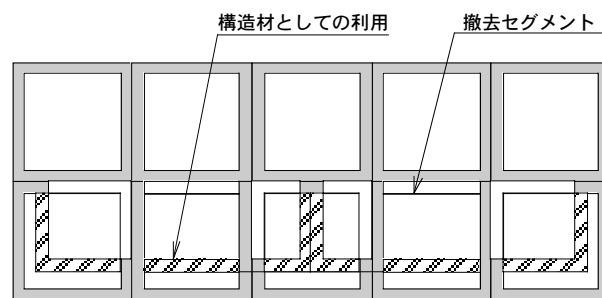


図-5 セグメントの再利用例 (床盤コンクリート打設前)
Used Recycled Segment Linings

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-5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、コストを縮減する。セグメントを構造材として利用すると鉄筋の組み立てが不要になる。

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と薄い。

3.4 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。

(2) 目地

トンネル間には 0~40mm 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。

(3) 躯体の構築

小断面のトンネルを積み重ねた後、セグメントを構造材として再利用し、コンクリートを打設する。セグメントの高さは 200mm に対し、ここでの壁厚は 900mm 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、左側 6 本のトンネル（3 列 2 段）で、片側の道路の躯体を構築後、撤去する内側のセグメントは、残り 4 本のトンネルのセグメントとして 50% 以上を賄うことができる。

4. 利用分野

鉄道の横断を念頭に開発していたが、他の分野にも応用可能である。

一つは、営業鉄道の地下化である（図-6）。現状では、土留め杭の打設から軌道の仮受けまで、夜間に工事を行わねばならず、工事期間が長期にわたるものであった。地下深く、駅間にトンネルを構築する場合は、コスト面からもシールド工法が最適であるが、道路横断部や地上との擦り付け部など距離が短い場合、あるいは土被りの浅い条件ではハーモニカ工法が適している。

トンネルの掘進完了が土留め支保工を兼ねていることから、安全性が高いだけでなく、立坑の構築を除けば、深夜作業はわずかな期間ですむため、沿線住民に対して住環境を配慮した施工方法と言える。

換気トンネルにも応用できる。地下鉄の駅舎と換気立坑を結ぶトンネルのように、距離が短く、いくつかの分割されたトンネルで構成される構造物には最適である。最終的に一体の構造物にする必要が無いため、セグメントは RC でも良い（図-7）。

この他、地下駅、地下駐車場などの大規模地下工事、道路トンネルの分岐に利用できる。

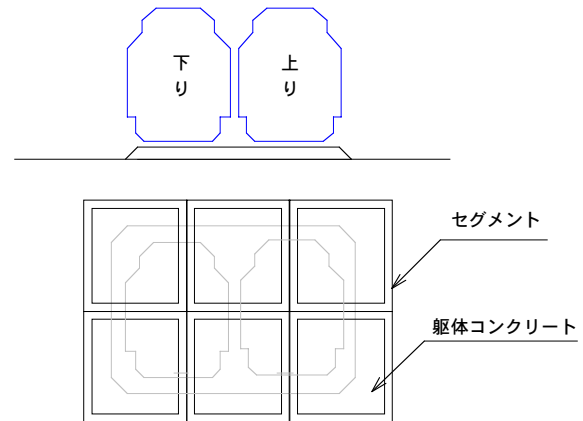


図-6 利用例1（営業線の地下化）

Applied Cation 1

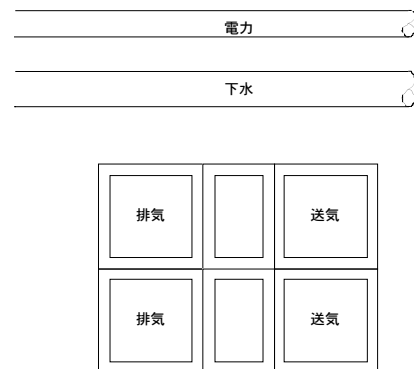


図-7 利用例2（換気ダクト）

Applied Cation 2

5. おわりに

ハーモニカ工法はアンダーパスのうち従来の非開削技術では困難な領域に取り組んでいるが、今後、大断面を分割して施工する技術を応用してアプローチ部、あるいは土被りが 2m に満たないトンネルといった開削トンネルの分野にも技術展開する予定である。

2003 年度は継手の実験を行ない、セグメントの設計に反映したい。また、実験の結果は次の機会に発表したと考える。

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
- 2) 渡邊明之ほか：線路下横断構造物を新工法で構築，トンネルと地下，第32巻5号，pp49-56，2001.
- 3) 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，pp.13-20，1993.