

ボックス掘進機による三連ボックストンネル土留壁の構築

CONSTRUCTION OF A RETAINING WALL FOR THREE SEQUENCE BOXTUNNEL USING BOX-TYPE -EXCAVATING -MACHINE

酒井栄治¹⁾・森田 智²⁾・島田英樹³⁾・松井紀久男⁴⁾

Eiji SAKAI, Tomo MORITA, Hideki SHIMADA, Kikuo MASTUI

Box-type-excavating-machine has been developed for structuring of big space in congested underground. This construction-site has a big shield sewer pipe with a diameter of 6,600 mm above a new planning railroad tunnel. Using this box-type-machine, underpath structure had to be constructed with limitlessly looseness underground and structures of established life infrastructure.

A new box tunnel is 18m wide 10m high and 15m long. 68 pieces of 85cm and 87cm iron square box were installed by pipe-jacking method to construct retaining wall.

Key Words: boxtunnel, underpath, box-type-excavating-machine, horizontally retaining wall

1. はじめに

都市部における用地の高度有効利用や基盤整備事業において、都市交通システムの立体交差に伴うアンダーパス工事が増加している。しかしながら、既設構造物の輻輳した地下空間においては、アンダーパス工事を行うにあたり幾多の障害物との遭遇が懸念される。

今回、つくばエクスプレスの常磐新線工事にあたり、既設シールド管渠下に軌道空間を構築する際、既設構造物との離隔の少なさが問題となり、これの解決のために地盤の変状に対応でき切羽圧力の制御が可能な矩形密閉式掘進機の開発が必要となった。本報告では、大型ボックストンネル掘削中に地中変位を最小限に抑制できる外郭土留壁を構築するために導入された密閉式ボックス推進工法について述べる。

2. 計画概要

(1) 施工条件

今回の施工現場では、直径 $\phi 6,600\text{mm}$ 、土被り $h=12.6\text{m}$ の既設下水道シールド管渠直下に離隔 $B=0.58\text{m}$ でボックストンネルが密閉式ボックス推進工法によって構築される計画であった¹⁾。

水平土留壁寸法を含めたボックストンネルの断面は $18.0\text{m} \times 10.0\text{m} \times 15.0\text{m}$ であった。土留壁に使用する鋼製エレメントは矩形ボックス掘進機により順次推進を行い、鋼性エレメント間は剛性継手により連結することと外郭土留壁を閉合し既設構造物を先受けした。その後、大型ボックストンネルの内部掘削、鉄筋コンク

1) 非会員 株式会社 アルファシビルエンジニアリング 開発部門 (九州大学大学院博士後期課程)

2) 非会員 株式会社 アルファシビルエンジニアリング 技術部門

3) 正会員 博士 (工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門

4) 正会員 工学博士 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門

リートによる二次覆工を実施し、ボックストンネルを完成させた。図-1に概略断面図を示す。

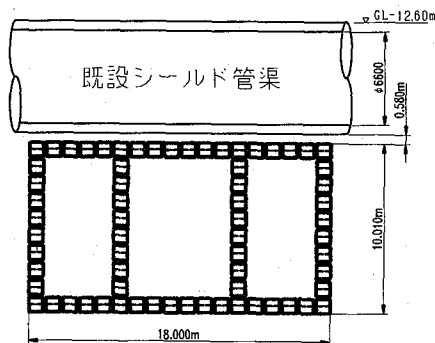


図-1 概略断面図

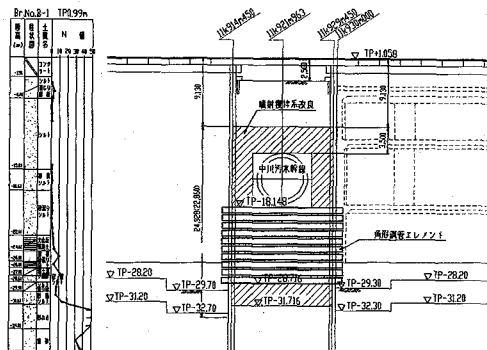


図-2 土質柱状図、縦断面図

(2) 土質条件

図-2に土質柱状図と縦断面図を示す。推進箇所の土質条件としては、上層部はN値=1~2の軟弱シルト層および砂層である有楽町層が存在し、側壁柱部においては火山灰土、粘土混じり細砂、細砂の互層でN値=4~10程度であった。地下水位においては、一部被圧水となっており、最大水圧として0.23MPaが計測されていた。下層部は硬質シルト層でN値=13と安定していた。このことから、上層部は軟弱地盤層で構成されているため、既設シールド管渠施工時の地山の乱れも想定され、このシールド管渠や地中変位を最小限に抑制できる工法の開発と施工管理が要求された。

(3) 角形鋼製エレメントの構造

密閉式ボックス掘進機を使用して推進工事を行う鋼製エレメントの構造を図-3に示す。なお、継手構造については、仮設構造物である外郭土留壁が最終的には本体構造物となるため、載荷実験により剛性を確認した上で決定した。また、鋼製エレメント内は高流動コンクリートを充填し、継手内部や継手間の空間部は洗浄した後、無収縮モルタルを充填する計画とした。

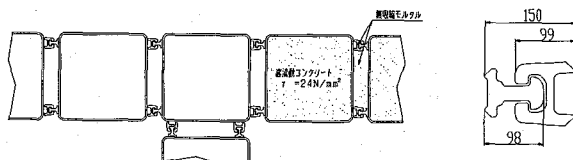


図-3 鋼製エレメント構造図および継手部拡大詳細図

3. 密閉式ボックス掘進機の開発

掘進機は外郭角形胴管内部にオーガ掘削機を挿入する構造が一般的である²⁾。しかし、その構造は地山の自立が前提で設計されており、被圧下の軟弱地盤層の掘進においては、切羽の安定性の確保に必要な切羽圧力の管理が困難であることや掘削土砂の過剰取り込み等の問題を抱えている。また、外郭が矩形断面であるために円形断面より地山と外郭の接触抵抗が増大することや鏡切り時の坑口補強として注入された高圧噴射攪拌杭の切削に伴う圧入抵抗の増大が懸念される。さらに、矩形管推進の場合、円形管推進に比べて方向修正機能が低下する等の課題を有している。以上のような理由から、密閉式のボックス掘進機の開発を行った。

(1) 掘進全断面の掘削が可能な駆動方式およびカッタービット形状の検討

まず、切羽において矩形断面の隅部を連続して掘削できる構造について検討した。センター駆動方式では、

コピーカッター装置のようにカッターアーム内に油圧装置を取り付け、カッタービットが隅部の掘削を可能にするために伸縮自在となるようにした。しかし、矩形掘進機の一辺が 850mm という小断面であるため、必要とされる駆動力に対しカッターアームが異常に大きくなり構造上不可能であることが分かった。

次に、自転公転型駆動の 3 軸スピンドルとすることでそこに取り付けられるカッタービットの辺長を調整し、隅部の掘削を可能にした。このことにより、角形隅部が掘削可能となることを見いだした。図-4、図-5 に掘削シミュレーション図および掘進機カッター図を示す。

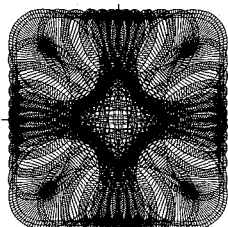


図-4 掘削シミュレーション図

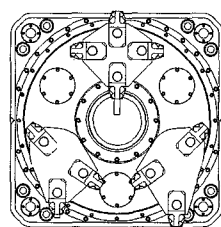


図-5 掘進機カッター図

(2) 切羽制御装置

切羽圧力制御機能を向上させるために、排土装置に 0.5MPa までの水圧に耐え得る特殊繊維を挿入したゴムバルブを装着した。このゴムバルブの対象現場への導入の可否について検討するために、予め連続 5 万回の耐圧開閉試験を実施し変形状態についての確認を行った。さらに、安全を期すために排土バルブと排土ゲートの双方を設置した。図-6 に排土制御バルブおよびゲート図を示す。写真-1 に排土バルブの開閉状況を示す。

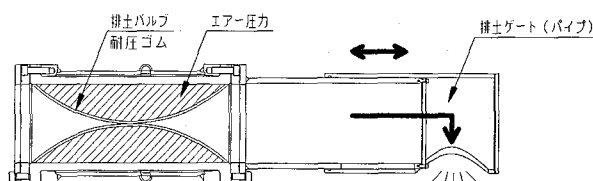


図-6 排土制御バルブおよびゲート図

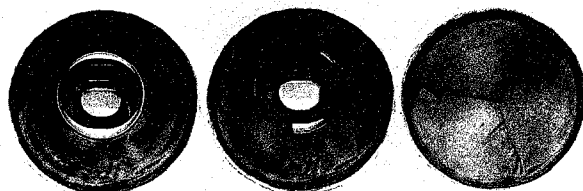


写真-1 排土バルブ

(3) ローリング修正機能

矩形推進においては、円形推進と比してローリング現象に対する修正が困難である。そこで、ローリングが発生した場合には、自動で逐次ローリングを修正できるように掘進機後続胴管内にスタビライザを設置した。図-7 に掘進機構造図、写真-2 に掘進機を示す。

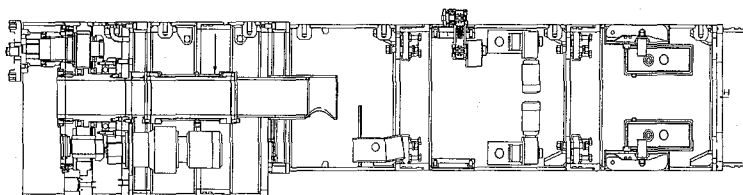


図-7 掘進機構造図

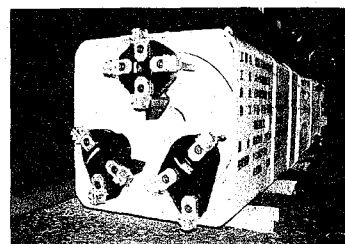


写真-2 密閉式ボックス掘進機

(4) 継手部掘削のためのサブカッターの検討

剛性が高く大きな断面を有する継手を挿入する場合は、継手の地山への圧入に伴う継手部の前面貫入抵抗や継手の挿入による継手間の接触抵抗が顕著に認められる。そこで、これらの値を低減するために継手部の

それぞれの箇所にサブカッターを設置した。図-8にサブカッターの構造、写真-3にサブカッターを示す。

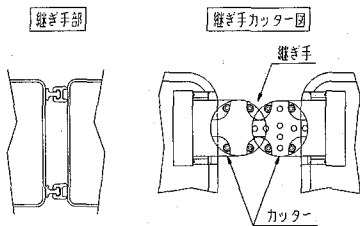


図-8 サブカッター構造

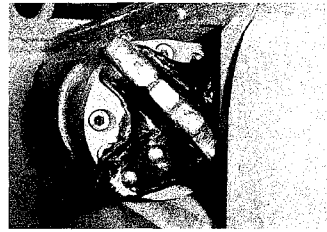


写真-3 サブカッター

(5) その他の対策

その他の課題としては、高水圧に対応可能な坑口パッキンを検討する必要がある。また、20MPa 程度の強度を有する高圧噴射攪拌杭の切削が可能なカッタービットの掘削効率等の向上等が挙げられる。なお、坑口部の安全性のために高水圧に対応可能な多重パッキン構造や外枠金物を検討した。その他、被圧水の立坑内への流入を防止するために坑口注入材の性状確認と加圧試験を行い止水性や耐圧性の確保に努めた。

4. 施工検討

(1) 元押総推進力の算定

これまで提案されている推進力算定式は、円形管に対するものばかりであり、矩形管に対するそれは全く存在しない。矩形管推進の場合には、推進管周辺の接触面積が円形管に比して明らかに大きい。そこで、泥濃式推進工法における算定式中の鋼管外周摩擦力の値を50%増加させて適用した。(1)式に計画元押総推進力算定式を示す³⁾。

1) 継手部を考慮しない元押総推進力の検討

$$F = F_0 + R \times S \times L \cdots (1)$$

F : 総推進力 (kN)

$$F_0 = (P_w + P_e + P_z) \times A$$

F_0 : 掘進機前面抵抗値 (kN)

R : 推進管外周面抵抗値 (kN/m²) (硬質土、軟弱土平均) 2.25

S : 推進管外周長 (m) 0.85×4

L : 推進延長 (m) 14.30

$$F = 299.7 + 2.25 \times 3.4 \times 14.3$$

P_w : 切羽圧力 (地下水圧 + 20.0 kN/m²) 270

$$\approx 409.1 \text{ kN}$$

P_e : 地盤強度 (換算 N 値 $\times 2 \text{ kN/m}^2$) 50×2 (地盤改良部)

P_z : 玉石接触抵抗値 (最大玉石径 $\div$ 管内径 $\times 200 \text{ kN/m}^2$) 0

A : 掘削断面積 (m²) 0.81

2) 継手部の抵抗を考慮した元押総推進力の検討

提案されている推進力算定式では、推進管間に取り付けられる継手の影響について全く考慮されていない。継手抵抗としては、①継手部の前面貫入抵抗、②継手の挿入による継手間の接触抵抗が挙げられる。なお、継手の地山への圧入に伴う継手部の前面貫入抵抗は、予め継手部サブカッターで地山を掘削するために小さな値を取ると考えられる。また、継手の挿入による継手間の接触抵抗には、鋼管エレメントの継手溶接時の変形やそりによる抵抗が考えられるため、ここでは全推進延長で継手が接触すると仮定して試算した。(2)式に本施工に適用した総推進力の算定式を示す。

$$F = (F_0 + R \times S \times L) + N \times R_1 + L \times R_2 \cdots (2)$$

N : 継手箇所数 最大 6 箇所

$$= 409.1 + 6 \times 50.0 + 14.3 \times 10.0$$

R_1 : 継手前面貫入抵抗 50.0 kN

$$= 852.1 \text{ (kN) (最大値)}$$

R_2 : 継手の挿入による継手間の接触抵抗 10.0 kN/m

(2) 矩形断面の地山の変形量および泥水濃度分布解析

今回のような大断面を予め分割された小断面で連続的に掘削する推進工法の方が、同じ大断面を一度に構築するシールド工法よりも周辺地山の変形量が小さいと言われている。また、泥濃式推進工法において矩形小断面を掘削するにあたり、使用する高濃度泥水の地山に対する影響を判断するために、経時変化の伴う泥水濃度分布の数値解析を行った結果を図-9、図-10に示す。なお、解析には透水性の小さなシルト混じり細砂層の諸データを用いた。泥水挙動解析モデルおよび解析方法の詳細については既報⁴⁾に譲る。

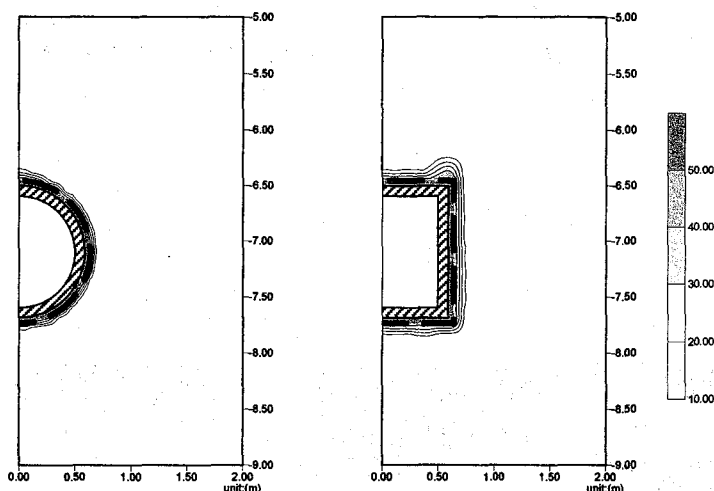


図-9 20分経過後の矩形泥水濃度分布（円形管） 図-10 20分経過後の矩形泥水濃度分布（矩形管）

この結果より、透水性の小さいシルト混じり砂層においては、掘削断面による泥水の影響の差異が認められないことが判明した。また、テールボイド材の注入による地盤の緩みの抑制、エレメント外周部における固結材の確実な充填、目詰材を多量に含んだ高濃度泥水の使用による切羽管理圧の保持等がこれまでの実績より保証されているため、本施工には泥濃式推進工法が最適であると判断した。

5. 施工結果

(1) 切羽の安定と地盤変状

多軸型のカッター構造を採用することで、高压噴射杭の改良体と軟弱地盤の両者を掘削することができた。また、一般的な内部オーガ式矩形掘進機よりも約2倍の掘進速度が得られ、35%の工期短縮、27%のコストが低減された。さらに、多軸カッター前面から切羽面に充填される高濃度泥水と掘削土砂の混合・攪拌効果が向上し、切羽掘削面の良好な造壁ならびに切羽からの排出が容易な流動性土砂の形成、掘削面からの地山崩落や地下水の流入の防止、切羽管理圧の保持等が可能となり、切羽の安定性が確保された。

また、鋼製エレメントの推進完了毎に順次裏込注入を実施し、推進に伴う周辺地山への影響を少なくしたため、エレメント周辺地盤の変形量や重要構造物の沈下量を計測誤差程度に抑えることができた。

(2) 元押推進力

施工時における推進力の推移を図-11に示す。この図より、概ね450kN以下の推進力で施工が終了したことが分かる。継手の挿入が容易であった箇所では、200kN程度の低い推進力を示したが、挿入が困難であった箇所では最大の推進力を示した。これは、継手間のクリアランスが小さかったために継手の挿入による継手間の接触抵抗が増大したことに起因している。そこで、推進機本体に挿入予定の継手と類似した形状の

部品を予め設置し、推進時に継手挿入用のパイロット孔を作製できるように改良した。また、継手部サブカッターの掘削効率を向上させるためにビットの形状を若干変更し、地山と掘進機の摩擦力の低減を図った。

(3) 推進による蛇行精度および推進完了状態

最終的な蛇行精度としては、最大蛇行変位量として左右 40mm、上下 31mm、平均蛇行変位量として左右 20mm 以内、垂直 15mm 以内であった。図-12、図-13 に施工後の水平および垂直蛇行変位量、写真-4 に推進完了の様子を示す。なお、推進終了後のボックストンネル掘削においても完全に閉合することができ、継手部の漏水は確認されなかった。写真-5 にボックストンネル内部掘削の様子を示す。

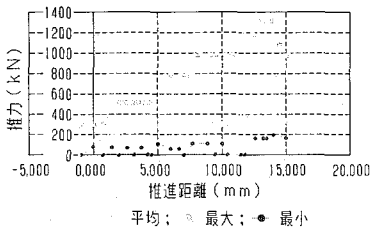


図-1-1 推進力の推移

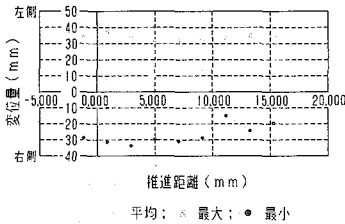


図-1-2 水平蛇行変位

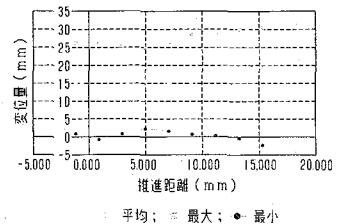


図-1-3 垂直蛇行変位



写真-4 推進完了状況

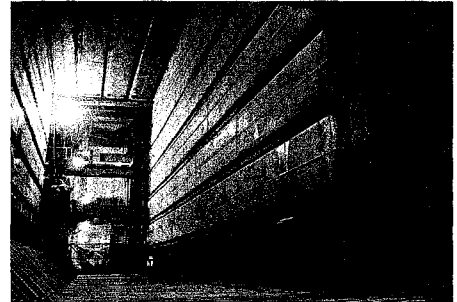


写真-5 ボックストンネル掘削完了状況

6. おわりに

一般的な推進工法は、下水道、通信、ガス、電力等の管路の構築に採用されることが多い。本報告では、大型ボックストンネル掘削中に地中変位を最小限に抑制できる外郭土留壁を構築するために導入された密閉式ボックス推進工法について述べた。今後も都市部における地下空間の有効利用のために、長距離、曲線に対応した推進工法の技術的な検証を行い、大規模地下構造物の構築に対する推進工法の新たな展開に応えるべく鋭意努力していきたいと考える。

謝辞

仮設工事の機械化の向上に対しご配慮下さった発注者各位をはじめ、計画や施工メンバー、その他関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建設機械化協会：建設の機械化，No. 636，2，2003
- 2) 日本非開削技術協会：第12回非開削技術研究発表会論文集，2001
- 3) 超流セミシールド協会：泥濃式推進工法「超流バランスセミシールド工法」設計指針（案），2002
- 4) 島田・酒井他：下水道協会誌，No. 489[7]，pp. 134-145，2003