

重要構造物直下における角形鋼管推進工事

—つくばエクスプレス六町駅工事—

半田 卓・下田 勝彦

つくばエクスプレス（常磐新線）の六町駅（仮称）で、 N 値 1~2、高被圧地下水下にある土被り 12.6 m の下水シールド管直下（ ϕ 6,600 mm、離隔 1.4 m）にボックストンネルを構築するにあたって、角形鋼管エレメント密閉型推進工法を考案し非開削で掘削することとした。

この工法は、軸直角方向に力の伝達が可能な継手を有する角形鋼管エレメントを連結しながら順次地中に推進し、軸直角方向に曲げ剛性を有する三連ボックス形状の仮設土留めを構築し、その中を掘削するものである。工法の利点としては、下水シールド管に与える影響を最小限にでき、高被圧地下水下の特別な盤ぶくれ対策および掘削時における支保工、中間杭が不要となることが挙げられる。

本報文は、角形鋼管エレメント密閉型推進工法の概要と施工実績について報告する。

キーワード：トンネル、非開削、角形鋼管エレメント密閉型推進工法、矩形ボックス推進機、エントランス、継手

1. はじめに

つくばエクスプレスの六町駅は、全長 373 m、幅員 15 m~25 m、深さ 29 m であり、3 層の駅舎部および 1 層のボックストンネル部からなる開削地下駅である。

起点方から 100 m 付近の位置に幅員 10 m の区道が横断し、この区道の下に外径 ϕ 6,600 mm の下水シールド管が土被り 12.6 m の深さで埋設されている。

そのため区道横断部のみが非開削工法にて計画されていた。区道横断部のボックストンネルの外寸法は幅 15.7 m、高さ 8.0 m、延長 15 m である。道路下横断工法として、非開削工法の中から工期、被圧水対策、発進立坑のスペースの問題から軸直角方向に力の伝達が可能な継手を開発して、その継手を取付けた角形鋼管エレメントを相互に連結しながら、順次地中に推進して軸直角方向に曲げ剛性を有する三連ボックス形状の仮設土留め構造物を構築する方法を考案した。

2. 土質概要

角形鋼管エレメント推進部の土質は、上床エレメント部分が N 値=1~2 の砂混じりシルトの下部有楽町層であり、側部エレメント部分が七号地層の互層地盤で上から火山灰質粘土 (N 値=4)、細砂 (N 値=9)、砂混じり粘土 (N 値=4)、粘土混じり細砂 (N 値=10) と続き、下床エレメント部分が硬質シルト (N 値=13) である。七号地層の砂質土は GL-5.0 m (0.23 MPa) まで被圧されている。

推進方向の土質は、トンネル延長 14.3 m うち発進側、到達側ともに高圧噴射攪拌杭の改良体を 3.0 m 施工しており、その間 8.3 m が地山となっている。

3. 角形鋼管エレメント密閉型推進工法

図一1、図一2 に角形鋼管寸法、エレメント割付け、推進部縦断面図を示す。

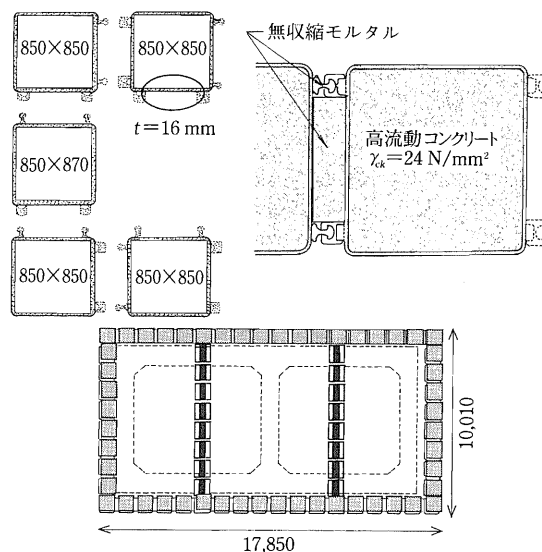
(1) 角形鋼管エレメント敷設方法

発進・到達立坑部は、掘削に伴う棲土留めの変位による下水シールド管の内空変位を抑えて断面方向の安全を確保することを目的として、棲土留め背面を 3 m 厚さで高圧噴射攪拌杭工法にて改良を行っている。

そのため、牽引工法の採用が難しい事から推進工法とした。さらに、被圧地下水圧が最大で 0.2 MPa を超えるため密閉型推進工法（泥濃式）を選定した。

(2) 角形鋼管エレメント

角形鋼管エレメントは、安価な日本鋼構造協会規格に



図一1 角形鋼管寸法及びエレメント割付け図

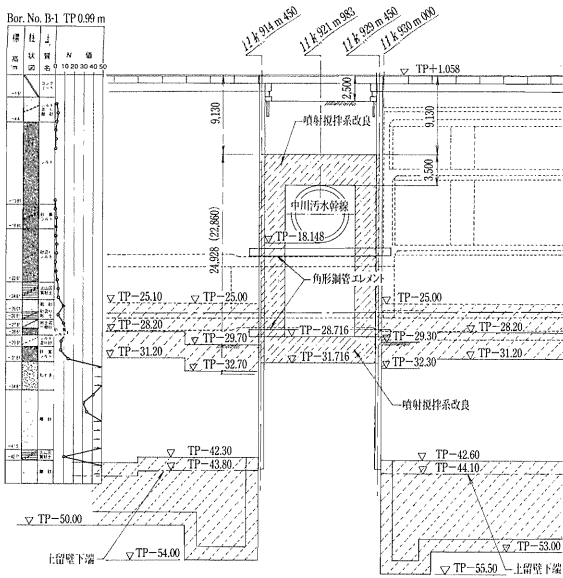


図-2 角形鋼管推進部縦断面

準じた角形コラムとした。角形コラムの寸法は、昭和50年労働基準監督局長通達より作業員が管内に入って作業ができる口径800mm以上を確保するものとし、矩形推進機の口径より850mm×850mm(870mm)とした。

(3) 角形コラムの板厚

規格の最小板厚であることおよび事前検討の結果より $t=16\text{mm}$ とした。

(4) 推進順序

下水シールド管への影響を最小限にするため、まず三連ボックス上床部を構築することとした。

推進順序は、上床エレメント中央部に基準管を推進した後、基準管の継手に新設管の継手を連結させながら順次、中央から端部に向かって施工することとした。上床エレメント完成後は側壁、中壁を上から下へ施工し、下床エレメントは端部から中央に向かって施工して中央部で閉合させる計画とした。

4. 施 工

(1) 矩形ボックス掘進機

(a) 密閉型推進工法の選定

中小口径の矩形掘進機においては、過去の実績を参考にして選定を行った。この選定過程において従来の矩形掘進機の構造は、おもに角形鋼管の内部にオーガ掘削機を挿入した形状に近い構造や、地盤改良による止水性、地盤強度に頼った人力併用構造等となっていたことが判明した。

理由としてインフラストラクチャ整備としての管路

は円形を中心に行われており、管路推進機の規格化も整っていたために、矩形掘進機に関する開発の目的が不明朗となり、汎用性に欠けた市場であった。したがってシールド工法、推進工法とも円形掘進機の研究、開発が主流となり矩形については機種が限定されていた。

任意断面、矩形断面については共同溝が中心で、大断面に適用されていた。今回のような中小断面の矩形掘進機は、密閉式構造掘進機が少なかった。市場に存在する工法の中から、掘削・攪拌能力、掘進速度、周辺摩擦力、作業環境、操作性、後続設備スペース、周辺地山への影響度、密閉式構造・機能、掘進精度等について比較検討を行い今回のボックス推進工法(密閉型推進工法)を選定した。

(b) 矩形ボックス掘進機の能力

矩形ボックス掘進機の構造については、従来にない多軸による一面性の掘削機構を有し、多軸方式となっているため掘削能力が倍増する機能となっている(写真-1、写真-2)。

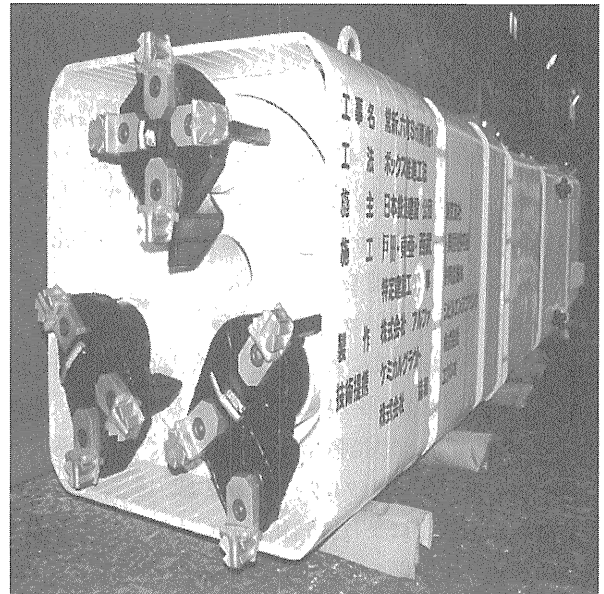


写真-1 推進機全景

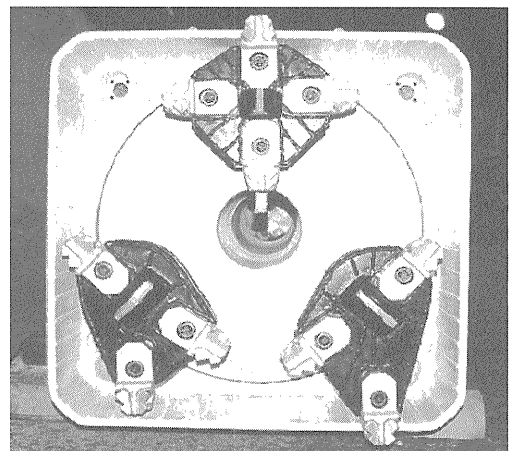


写真-2 推進機カッター

3本の各スピンドルは本体の公転駆動装置からギアトレインを介して伝達駆動される。各スピンドルに装着する掘削ビットのビット長および配置については、掘削軌跡のシミュレーションに基づいて決定されている(図-3)。

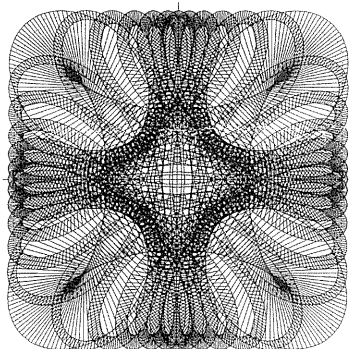


図-3 掘削のシミュレーション

円運動からビット最先端部が矩形運動を行う機構としたところが、当掘進機の特徴となっている。

また掘進機の固有の能力は以下の通りである(図-4)。

① 掘削途中の密閉度

高水圧に対応可能な、地下水の流入のない掘削排土構造を有する(耐水圧0.45 MPa可能)。

② 礫、玉石、流木、支障物の掘進への対応

排土口径は $\phi 200$ mmとし、玉石長径が $\phi 250$ mmまで対応可能とした構造を有している。

③ 掘進速度が速いカット構造

多軸自転・公転方式により、又同一切羽面を3個の偏心ビットを付けたカットが高速回転をする事により、カットビット1個当りの掘削受持ち範囲を少なくする構造となる。よって公転トルク能力の数倍の威力を有する結果となり、地盤改良により固結化された強度を有するセメント系改良部も問題なく掘進可能と判断した。

④ ローリング対策装置

掘進機が多軸カット構造ゆえ、一般的同軸駆動方式に

比べローリング現象が少なく、回転する事自体でローリングの打消し現象が発生する。ただし、先行エレメントの継手精度に影響を受けるために、ローリング修正装置を8箇所(1面当り2箇所)設置する。

⑤ 方向修正機能

矩形構造の方向修正機能は外部差込み口の制約が多く、円形掘進機の方向修正装置に比べ機能が低下する。よって方向修正ジャッキの取付けにはカラークリアランスを極力大きくとり、バックングの収縮率の大きいダブルバックング方式となっている。

矩形ボックス掘進機は以上のような機能の特徴を持っている。

(c) テールボイド部の対策

一般的に、泥濃式掘進機は円形掘進機の場合、25 mm程度余掘部を積極的に造成し、そのクリアランス部は地山粒子+高濃度泥水が加圧充満されている。その掘削攪拌されたテール部に裏込め材を注入して地山の安定を図る工法となっている。今回の場合、矩形構造の角形鋼管エレメントを推進するため、円形に比べてエレメント周辺摩擦力が上昇する可能性が高いと予測された。しかし、推進延長が短い事、カット部の余掘部を極力少なくする事などを考慮して、従来の最低テールボイド量を次のようにした(図-5)。

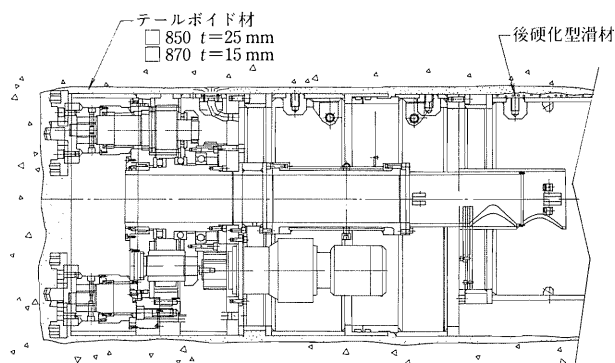


図-5 推進機注入位置とテールボイド部の図解

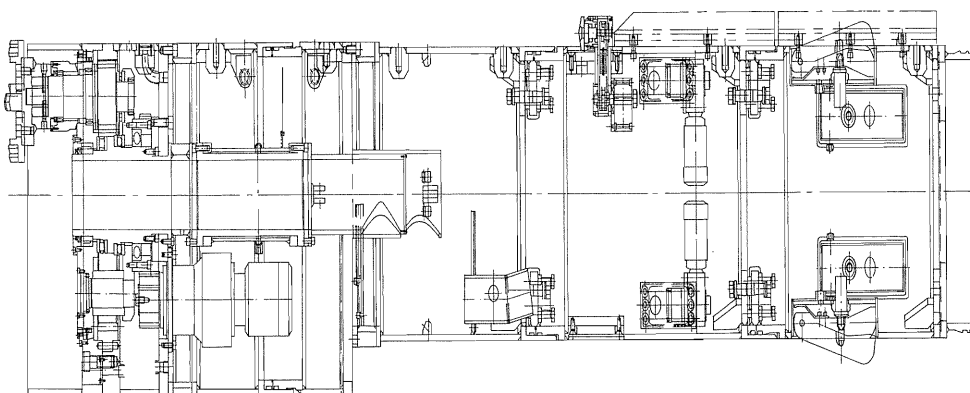


図-4 推進機全体構造図

□850 エレメント（掘削外径□900 mm）：片側 $t=25$ mm

□870 エレメント（掘削外径□900 mm）：片側 $t=15$ mm

今回は、地山の安定のために後硬化型滑材を使用して掘進完了後の硬化特性効果を期待する工法とし、裏込め注入工を省くことによる工期の短縮とコストの縮減を可能とした。

なお、後硬化型滑材とは、注入後、1週間を経過した後に地山の中で硬化が開始されるために、掘進中は滑材効果を、掘進完了後は裏込め効果を発揮する材料である。

(d) 継手部カッタの考案

矩形型掘進における推進力の算出根拠は、

- ① 切羽前面抵抗力、
- ② エレメント周辺摩擦力、
- ③ 継手部抵抗、

の合力となる。ただし①切羽前面抵抗力及び②のエレメント周辺摩擦力は従来の経験値に、矩形の補正として50%増加して計上した。

問題は、継手抵抗の低減であるが、一般的には圧入方式の考えとなる。今回の角形鋼管エレメントは継手が上下、左右4箇所が存在するため、大きな圧入抵抗となる事が懸念された。したがって、継手部カッタを考案し、当現場で採用する事とした。継手カッタの構造は円盤式、軸方向式の2種類を検討したが、今回は軸方向式の回転カッタに排土口を取付けた圧密回避構造を、掘進機後続作業胴管部に設置した。

当初、カッタ構造や排土方式で多少難渋したが、妥当性の確認を繰返す事により最終的には、継手推進の抵抗を1箇所当たり50 kN程度にする事が出来た。継手部は上下左右の挿入クリアランスが4 mmの精度となっていたために溶接時の反りや加工時の変形に苦慮し、推進力の増大を懸念しての掘進であったが、最終的に材料継手精度に対応した継手カッタが開発され、推進力においても、十分な低減を行うことが出来、低推進力施工の実績を残すことが出来た（図-6）。

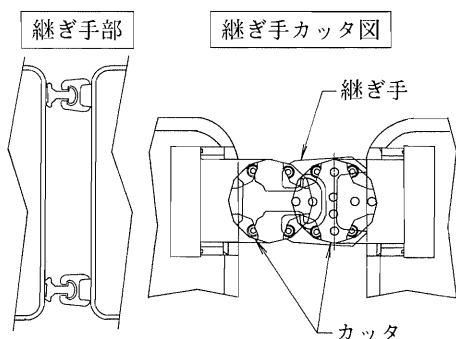


図-6 継手構造とカッタ図

(2) 角形エントランス

発進部はマシン先端が改良体を抜けた時、到達側はマシンの先端が到達坑に出た時にマシン外周伝いに被圧水が坑口から噴出する。この被圧水を封じこめるものがエントランスであるが、推進機およびエレメントが矩形であることから、継手付きエレメントであることから発進、到達のエントランス構造は極めて複雑なものとなる。

通常のゴムパッキンのエントランスは細部で合致しないため、1/3模型実験、実物大実験により角型止水ケースとゴムパッキン積層構造と加圧充填止水材（エコマール）を用いて坑口防護を行うこととした（写真-3）。

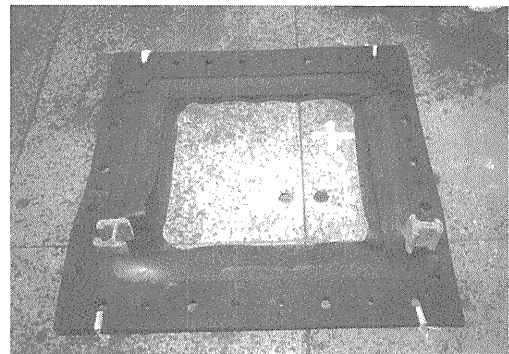


写真-3 積層ゴムパッキン

(3) 継手の開発および耐力

継手の形状および寸法は以下の手順にて決定した（図-7）。

- ① 三連ボックスの継手発生応力度算出および継手強度の算定
- ② 継手有限要素（FEM）解析による継手形状・寸法の検討
- ③ 継手単独引張り強度試験による継手強度の確認
- ④ 実物大載荷試験による継手強度の確認

継手は、厚さ $t=16$ mm の鋼板（SS 400 材）相当の曲げ耐力を有することを確認した。

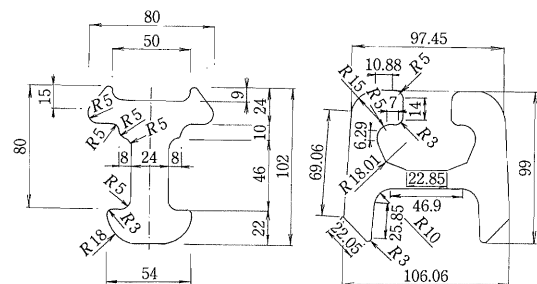


図-7 継手構造図

5. 施工実績

推進は上床エレメント中央の基準管エレメントから開

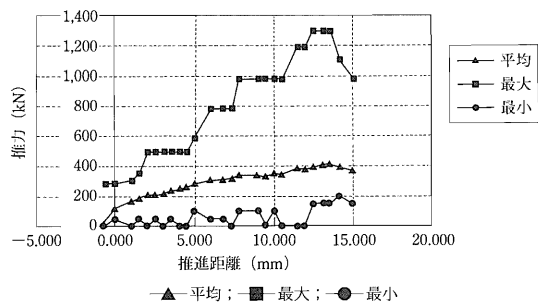


図-8 推力データ

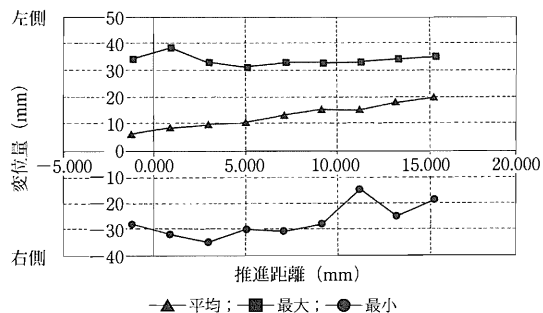


図-9 水平方向変位図

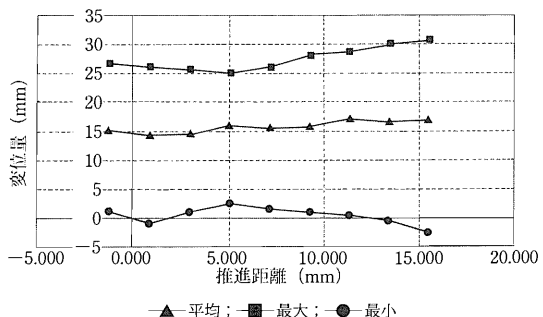


図-10 鉛直方向変位図

始した。基準管エレメントは左右に雌型継手がついた形状をしており、今回の推進において全エレメントが先行して設置された雌継手の中を後行する雄型継手のついたエレメントが推進する順序とした。

仮設作業に並行して連壁鏡切り部の水平ボーリングを行い高圧噴射攪拌杭改良体の出来形（湧水、強度）に問題がないことを確認し鏡切りを開始した。しかし連壁こわし後掘進開始までの間に改良体の破壊による異常出水も考えられたため、連壁こわしが縦断方向に半分程度進んだ段階でエントランスケースを取付け、ボックス推進機の据付けを行った。懸案事項であったエントランスパッキンの止水性も問題なく推進工事は終了した。

元押しジャッキの計画総推力は推進機前面抵抗、周面摩擦抵抗、推進機重量より 550.5 kN であったが、最大

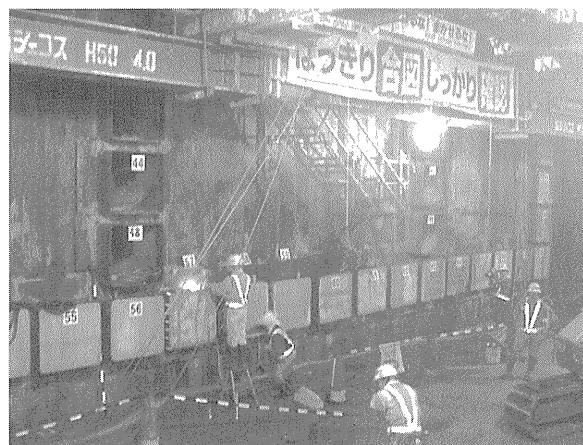


写真-4 完成した三連ボックス

1300 kN、平均 400 kN にて推進することができた(図-8)。

水平方向の変位を、最大+40 mm、平均+10 mm~20 mm、鉛直方向の変位を、最大+30 mm、平均+15 mm にて推進することができた(図-9、図-10)。

6. 終わりに

工事の進捗は、三連ボックスの閉合が8月末に完了し、現在三連ボックス内部の掘削を行っている状況である。三連ボックス完成時点での直上の下水シールド管への影響はほとんど出でおらず、今回の角形鋼管エレメント密閉型推進工法による仮設土留めの施工は良好に行われていることが確認されている。現在施工している内部掘削、その後続く本体ボックストンネル構築においても計測管理しながら一層慎重にかつ安全に工事を進めていきたい。

J C M A

《参考文献》

- 月刊推進技術，社団法人日本下水道管渠推進技術協会，Vol. 14，2000年9月号

【筆者紹介】

半田 卓（はんだ たかし）
日本鉄道建設公団東京支社
足立鉄道建設所
所長



下田 勝彦（しもだ かつひこ）
日本鉄道建設公団東京支社
足立鉄道建設所
所員

