

大口径下水幹線横断部での三連ボックス推進工法

3 CONSECUTIVE BOX JACKING METHOD JAST UNDER THE SHIELD DRIVEN BIG TUNNEL FOR SEWER

杉田文隆¹⁾、加藤 悟²⁾、小玉正文³⁾、渡辺勝広⁴⁾

Humitaka SUGITA, Satoru KATOU, Masahumi KODAMA, Katuhiro WATANABE

To construct a box tunnel (a width of 18m, a height of 10m, a length of 15m) at Rokucho st. of the Tsukuba Express (New Joban Line), it was decided to adopt the developed sealing type pipe jacking method with rectangular shaped steel pipe element and trenchless excavation method. The objective would be located just under the shield driven tunnel for sewer of 19m depths on 1-2 of N value and highly water-pressured condition, and there was only 50cm distance between them.

The construction steps of this method are shown as below. First excavates both ends of the cut-and-cover area beforehand, then sequentially jacks and connects the rectangular shaped steel pipe elements with joints which can transmit stress in the axis transversal direction, and constructs temporary earth retaining structures in the form of 3 consecutive box with bending rigidity in the axis transversal direction, lastly excavates the inside of it.

Key Words: Tunnel, Pipe jacking method, Rectangular shaped steel pipe element, Joints

1. はじめに

つくばエクスプレス（常磐新線）六町駅は、全長 373m、幅員 15m～25m、深さ 29mであり、南北2工区に分かれて開削工法（一部非開削工法）にて築造するものである。

六町駅を2分する位置に幅員 10mの区道が横断し、この区道の下に外径φ6600mmの中川汚水幹線が19m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。区道横断部の加平トンネルの外寸法は幅 15.664m、高さ 8.0m、延長 15mである。道路下横断工法として、非開削工法の中から大深度における施工実績、発進立坑のスペースの問題から山岳ベンチカット工法が選定され、その補助工法としてパイプルーフ工と高圧噴射攪拌工法による全断面地盤改良工が計画されていた。パイプルーフと中川汚水幹線との純離隔は 0.5mと近接している。

現計画では、被圧水対策が不十分であることや施工方法が煩雑で工期が長くなる等の問題があった。そこで、軸直角方向に力の伝達が可能な継手を開発して、その継手を取り付けた矩形鋼製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。本論文は継手の各種試験を通じて考案した矩形鋼製エレメント推進工法の開発経緯を中心に報告するものである。

2. 工事概要

- 1) 戸田建設(株)東京支店土木部
- 2) 戸田建設(株)東京支店土木部
- 3) 正会員 戸田建設(株)東京支店土木部
- 4) 戸田建設(株)東京支店土木部

工事名称：常新、六町 S t（南）他 1

工事場所：東京都足立区六町

発注者：日本鉄道建設公団

工 期：平成 11 年 1 月 28 日～平成 15 年 3 月 27 日

請負形態：戸田・東亜・西武・東武谷内田特定建設工事共同企業体

・工区延長 L=188m（つくばエクスプレス秋葉原起点 11K817m～12K005m）

・く体構造 加平トンネル部 地下 1 層構造 L=113m（非開削部 15m 含む）

駅 舎 部 地下 3 層構造 L=75m

・中川汚水幹線横断部推進工

口径：□0.85m×0.85m（上床・下床エレメント）、□0.85m×0.87m（側壁・中壁エレメント）

推進延長：14.3m／本×68 本=972.4m

三連ボックス構造出来上り寸法：□17.85m×10.01m

3. 土質概要

矩形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-5.0m（0.23Mpa）まで被圧されている。推進方向の土質はトンネル延長 14.3m うち、発進側・到達側ともに高圧噴射攪拌杭の改良体が 3.0m あり、その間 8.3m が地山となっている。

4. 現計画における中川汚水幹線横断部施工法の問題点

4-1 地盤改良の規模：全断面地盤改良から推進用の発進および到達立坑掘削に伴う土留め壁の水平変位による既設下水幹線への影響を低減できる最小必要限の改良範囲と厚さを FEM 解析により算定する。

4-2 既設下水幹線への影響：既設下水幹線直下の水平土留め材の鉛直変位による既設下水幹線への影響をより小さくできる構造形式を検討する。

4-3 掘削方法：上下段を 2 分割し、さらに各段を 3 つのブロックに分けて掘削する方法から全断面掘削が可能な方法を検討する。

4-4 支保工の有無：上半の各ブロックにおいて、縦断方向に 1.2m 掘削後、路下 TBH 杭を打設して支保工を組み立てるやり方を順次繰り返す方法から、無支保工で掘削できる方法を検討する。

4-5 掘削面における被圧水対策：コの字型パイプ工の場合には内部掘削時に被圧地下水による盤ぶくれが発生する。そのため地盤改良による盤ぶくれ対策を実施する必要があるが、既設下水幹線を避けながらの斜め削孔となり改良体の信頼性に疑問が残る。そこで、盤ぶくれ対策が不要な方法を検討する。

4-5 工期：原設計の場合には、施工方法が煩雑なため、中川汚水幹線横断部の工期が約 30 ヶ月を要し、つくばエクスプレスの開業に支障を来す恐れがある。よって、工期短縮が可能な方法を検討する。

5. 対策

5.1 中川汚水幹線横断工法

軸直角方向に力の伝達可能な継手を開発して、その継手を取り付けた矩形鋼製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。

1) 鋼製エレメント敷設方法

発進・到達立坑部の掘削に伴う棲土留めの変位による中川汚水幹線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3m厚さで高圧噴射攪拌杭工法にて改良する。そのため、牽引工法の採用が難しいため推進工法とした。さらに、被圧地下水圧が最大で0.2Mpaを超えるため密閉型推進工法（泥濃式）を選定した。

2) 矩形鋼製エレメント

鋼製エレメントは安価な日本鋼構造協会規格に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坑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16mmを基準とした。

4) 推進順序

中川汚水幹線への影響を最小限にするため、先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。

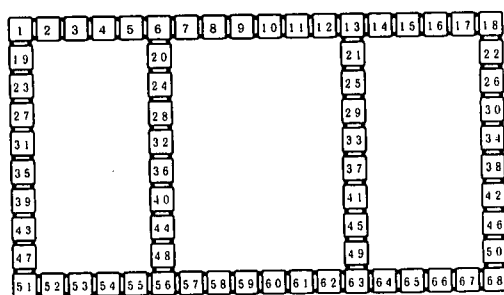


図-1 エレメント割付図

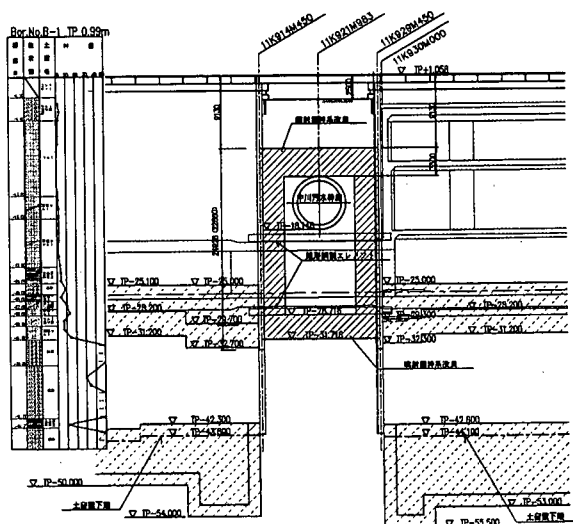


図-2 中川汚水幹線横断面縦断面図

5.2 鋼製エレメント断面の検討

鋼製エレメント断面の検討手順を以下に示す。

1) エレメント断面および三連ボックス構造の仮定

三連ボックス解析モデルはボックスカルバートで用いられる梁モデルとし、角形コラムとの結合条件を剛結と考え、床版、側壁などを角形コラムと継手の集合体からなる部材と考えた。エレメント断面モデルを図-3に示す。

2) エレメント中空時（エレメント内にモルタルが充填されていない時）の鋼殻発生応力度 σ_{sl} の算出

推進時の中空エレメントの設計荷重は、市街地における沖積粘土層において多くの実績を積んでいる「下水道推進工法の指針と解説(2000年度版)」に準じて算定した。モデル図を図-4に示す。

ここで、 $\sigma_{sl} < \text{許容応力度}$ の時、次ステップに進む。

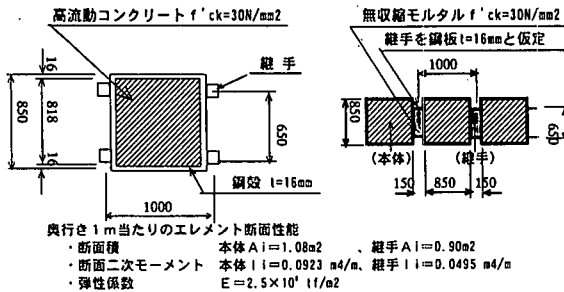


図-3 エレメント断面モデル図

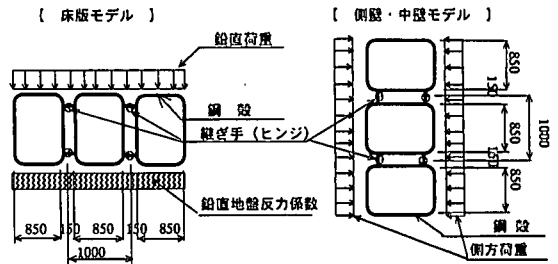


図-4 中空エレメント設計モデル図

3) 三連ボックス時（三連ボックスが完成し、内部掘削した時）のボックス発生応力度（ σ_{s2} 、 σ_c ）、変位量（ δy_2 ）および継ぎ手応力度（ σ_{st} 、 σ_{ct} ）の算出

- ・発生応力度、変位量はモデル-1 とモデル-2 を合成したものとする。
- ・土被り荷重は土木学会トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説、第 26 条の全土被り土圧を採用し、側方荷重は土木学会トンネル標準示方書（開削工法編）・同解説、第 27 条の開削トンネルに働く静止土圧および最小土圧のめやすとしての静止土圧（最大土圧）の 70%を採用した。

モデル-1 開削トンネル設計モデル

モデル-2 掘削解放力モデル（リバウンドの影響を考慮するためのモデル）

ここで、 $\sigma_{s2} < \text{許容応力度}$ 、 $\sigma_c < \text{許容応力度}$ 、 $\delta y_2 < \delta y_{\max}=25\text{mm}$ 、 $\sigma_{st} < \text{許容応力度}$ 、 $\sigma_{ct} < \text{許容応力度}$ の時、次ステップに進む。

4) ボックス鋼殻の合成応力度の算出

$\sigma_{s1} + \sigma_{s2} < \text{許容応力度}$ であることを確認する。

5.3 継手の開発

継手の形状および寸法は以下の手順にて決定した。

1) 三連ボックスの継手発生応力度の算出および継手強度の算定

三連ボックスフレーム計算時の継手剛性を厚さ $t=16\text{mm}$ の鋼板相当と仮定した時の単位幅当たりの継手の最大引張強度は、 $P = \sigma_{s\max} \times t = 114.7\text{N/mm}^2 \times 16\text{mm} = 1.836\text{KN/mm}$

2) 継手単独引張強度試験による継手強度の確認

事前に形状・寸法を FEM 解析により求めた継手を用いて引張強度試験を行った。

降伏時の引張強度は $P = \text{降伏荷重} / \text{試験体幅} = 240\text{KN} / 70\text{mm} = 3.42\text{KN/mm}$

3) 実物大載荷試験による継手強度の確認

曲げ耐力は設計荷重の 2 倍であることを確認し、せん断耐力は設計荷重の約 3 倍の耐力を確認した。

4) 継手モデルの評価

- ・三連ボックス構造体の継手が存在することによる剛性低下後の剛性は 25%となった。
- ・剛性低下を考慮した三連ボックス上床エレメントの最大変位量はフレーム計算で $\delta=11.9\text{mm}$ 、施工ステップを考慮した FEM 解析では $\delta=11.05\text{mm}$ となった。これに矩形推進施工時の沈下量 3mm（後硬化型滑材の「グリージング」分）を加えて約 15mm の鉛直変位が予想された。この変位は現設計のパイプルーフの最大沈下量 $\delta y=25\text{mm} + \alpha$ （施工時の影響）を大きく下回った。
- ・実物大載荷試験において、エレメント鋼殻の歪みを計測して安全であることを再確認し、角形コラムの板厚を規格の最小板厚である 16mm とし、寸法を 850mm×850mm(870mm)とした。
- ・継手を厚さ $t=16\text{mm}$ の鋼板相当と仮定した時の破壊抵抗モーメントと試験時に作用した最大曲げモーメントが近似しているため、当初の継手の仮定は正しいものと判断した。

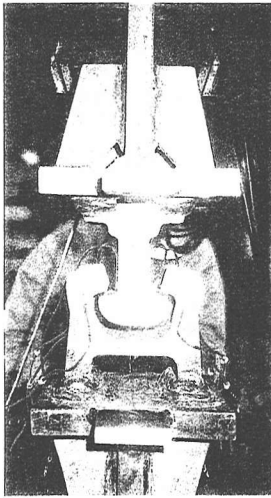


写真-1 継手引張試験

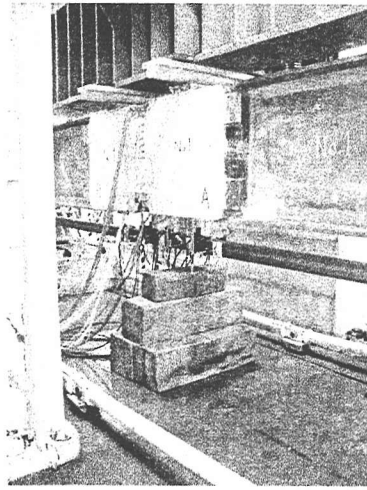


写真-2 実物大載荷試験

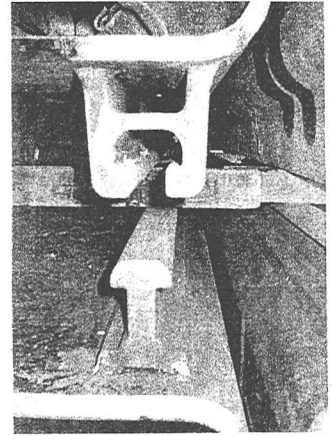


写真-3 継手

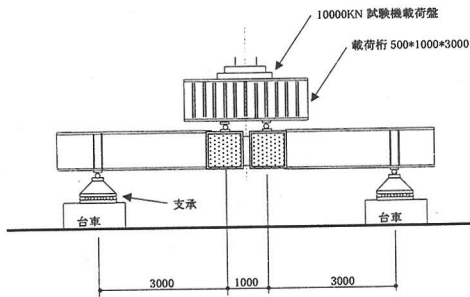


図-5 載荷試験

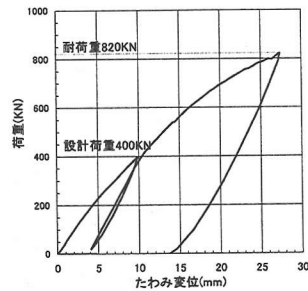


図-6 荷重-変位曲線図

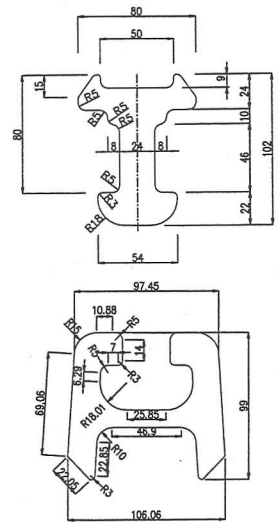


図-7 継手寸法

6. 期待される効果

現設計のパイプルーフ工に対して、矩形鋼製エレメント $\square 850(870) \times 850 \times 16\text{mm}$ 、 $L=16.70\text{m}$ 、 $n=68$ 本を推進させて、掘削前に三連ボックス形状の仮設土留め構造物を事前に構築することにより以下の効果が期待される。

- ・掘削時の盤ぶくれ対策は不要となる
- ・三連ボックス上床エレメントの最大変位量が約 15mm と小さく中川汚水幹線への影響は少ない
- ・支保工・中間杭が不要で、全断面掘削が可能である
- ・施工方法がシンプル且つ安全で、工期は約 12 ヶ月短縮される

7. 施工

7.1 矩形鋼製エレメントの製作

継手は、複雑な形状且つ少量生産となるため、熱間押出法により製造した。メス継手内面とオス継手外面とのクリアランスは、継手の軸方向の曲がり量(3mm)と継手の断面方向の公差($\pm 1.2\text{mm} \sim \pm 1.0\text{mm}$)から、推進

可能限界の片側 4mm とした。矩形鋼製エレメントは既製品の角形コラムにグラウトホール等の取り付けを行った後、継手を工場溶接して製作した。その際、継手溶接による角形コラムのひずみ取りを行った。

7.2 矩形推進機

泥濃式推進工法の中で対応土質範囲の広い、低推力推進の実績のある超流動性バランス式セミシールド工法の原理にてのボックス推進工法（推進機外径 ϕ 880mm、掘削外径 ϕ 900mm、排土バルブは多重制御、カッター駆動は多軸自転公転式）を採用した。

7.3 ジャンクションカッター

本工法は、継手を取り付けたエレメントを相互に連結しながら順次地中に推進する工法のため、高強度の地盤改良体を推進する際に継手部に発生する大きな抵抗力を減じる必要があり、推進機にメス型継手部を先行掘削するジャンクションカッター（外径 ϕ 110mm、突出高さはスペーサで調整可能）を推進機に装備した。

7.4 エントランス

継手付矩形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（エコメール）を用いて坑口防護を行った。

7.5 充填注入工

推進終了後、継手間および継手内を洗浄し、継手間は無収縮モルタル（ $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ ）を現場にて混練りしてモルタルポンプで充填注入し、継手内はハンドミキサで混練りした無収縮ミルク（ $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ ）を手押しポンプにてエレメントとメス継手の通し孔（注入孔）より注入した。

最後に、エレメント内に高流動コンクリート（ $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ ）を地上よりコンクリートポンプ車にて打設した。

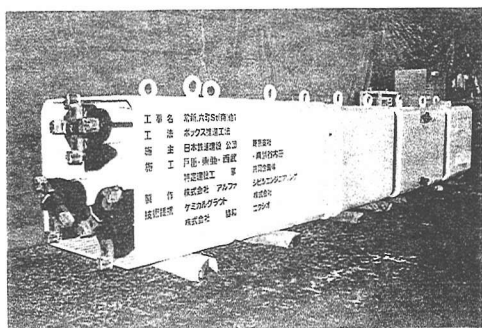


写真-4 矩形推進機

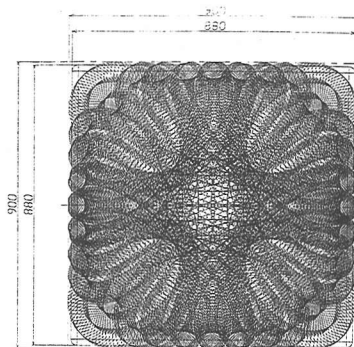


図-8 カッター軌跡図

8. おわりに

平成 14 年 8 月末現在において、全本数 68 本推進（ジャッキスピード 20～25mm/分、推力は平均で 800KN）し、閉合した。

矩形推進の鉛直精度は最大で 35mm である。また、中川污水幹線の最大鉛直方向変位は-0.6mm で、周辺地盤の最大鉛直方向変位は-1.0mm である。三連ボックス構造解析上の荷重条件の検証および三連ボックスの安全性の確保を目的として鋼製エレメント鋼殻に発生するひずみを計測（ひずみ計は 9 本のエレメントに 74 台設置）した結果、上床エレメントの中空時の鋼殻発生応力度 σ_{s1} は設計時の同応力度に対して平均で 67%、最大で 81%発生している。

9 月末から掘削を開始するが、掘削が終了しないと矩形鋼製エレメント推進工事（三連ボックス工事）の完了とはならないので、最終的な結果が出るまで計測管理しながら一層慎重に且つ安全に工事を進めていきたい。最後に、中川污水幹線横断部の計画に際し指導、協力を頂いた日本鉄道建設公団の関係者に、この紙面を借りてお礼申し上げます。