

密閉型ボックス掘進機を使用した 長距離、曲線推進の施工事例

森田 智^{1*}，松元 文彦¹，酒井 栄治¹

¹株式会社アルファシビルエンジニアリング 技術開発部 (〒812-0015 福岡県福岡市博多区山王 1-1-18)

*E-mail:arfa@oregano.ocn.ne.jp

地下空間の有効利用は、今後の高齢社会に対して重要な課題と考えられる。その中で、比較的小規模な地下空間（□3000mm 程度）の施工技術は未だ確立されていない。特に、推進工法においては、開放型（補助工法併用）推進工法以外では、矩形での安定した密閉型推進工法の事例は少ない状況である。

現状での地下空間の構築技術としては、その殆どがパイプルーフ工法（補助工法併用）を使用した先受け工法や箱型ルーフにより断面確保を行った後の現場打ちコンクリートの牽引による推進工法が中心となっている。一方で工期短縮，経済性，地盤環境への影響等から判断した場合，工場での品質管理が確実な二次製品を活用した密閉型ボックス推進工法の活用が有効な地下空間構築工法になると考えられる。

本報告では，ボックス推進工法の特徴および長距離，曲線推進施工の事例における事前検討の課題，施工結果や考察について述べる。

Key Words: pipe jacking method, rectangular pipe jacking, Box Culvert, numerical analysis

1. はじめに

地下空間の有効利用は，今後の高齢社会に対して重要な課題と考えられる。その中で，比較的小規模な地下空間（□3,000mm 程度）の施工技術は未だ確立されていない。特に，推進工法においては，開放型（補助工法併用）推進工法以外は，矩形での安定した密閉型推進工法の事例は非常に少ないのが現状である。

現状での地下空間の構築技術としては，開放型シールド工法や刃口推進工法を除き，その殆どがパイプルーフ工法（地盤改良工法併用）を使用した先受け工法，揺動式のシールド工法，鋼製エレメント牽引による躯体コンクリート一体型工法，箱型ルーフにより断面確保の後に現場打ちコンクリートを牽引する施工法等が中心となっている¹⁾。また，最近では公転ドラム揺動式のシールド工法も開発されている²⁾。このような施工技術は既に確立された領域とは考えられるが，地盤への影響の視点から考えた場合は，複数回繰り返される応力解放の問題もあり，収束に到るまでの時間的要素が課題となりやすい。

そのような背景から，工期短縮，経済性，地盤環境への影響等を検討し，工場での品質管理が確実な二次製品を活用した密閉型ボックスを使用する推進工法が，中小空間の有効な地下空間構築工法になるとの認識に至った。

今回，独立行政法人都市再生機構の発注による雨水渠排水工事で本工法が採用された。以下，本工法の特徴や事前検討の課題ならびに施工結果および考察について述べる。

2. 推進工法について

推進工法のうち，本研究が対象とする密閉型推進工法は推進管の先端に切羽圧力の制御機能や方向修正装置を装備した密閉型掘進機を先導体とし，操作性を保持しつつ，発進立坑に設置された元押しジャッキにより，推進力を順次推進管に伝達させながら掘進を行う工法である³⁾。大中口径推進工法の分類を図-1に示す。

推進工法における最大の課題は推進力の低減すなわち管外周と地山との摩擦力の低減にある。推進工法では掘進機により余掘りを行い，その部分に切羽添加材と地山を攪拌混合したものおよび滑材を充填させることで，管渠と地山との接触を避け，摩擦を低減させている。

また，元押しジャッキの他に，推進管列の途中に中押しジャッキを予め設置し，これらを交互に作動させ推進力を分担することで，推進距離を長くすることも可能である⁴⁾。図-2に推進工法概要図¹⁾を示す。

3. 本現場の施工条件

(1) 工事概要

- ・ 工事名：大宮西部地区扇通り線雨水幹線築造工事
- ・ 発注者：独立行政法人都市再生機構 埼玉地域支社大宮西部開発事務所
- ・ 施工者：飛鳥建設株式会社
- ・ 施工内容：内空寸法□2800×1800mm，外郭寸法□3300×2500mm，推進延長 220.97m
曲線条件 100R+100R：S字曲線，土被り 3.91m～0.97m
対象土質：軟弱地盤，N値 0～13，シルト質細砂，埋戻土，腐植土等

(2) 路線計画と縦断図および横断図の詳細

図-3に路線図，図-4に縦断面図を示す。写真-1，写真-2，写真-3に路線状況を示すが，地盤の緩みの制限を舗装強度に期待できない路線と考えられる。また使用したボックスカルバートについて図-5および写真-4に示す。

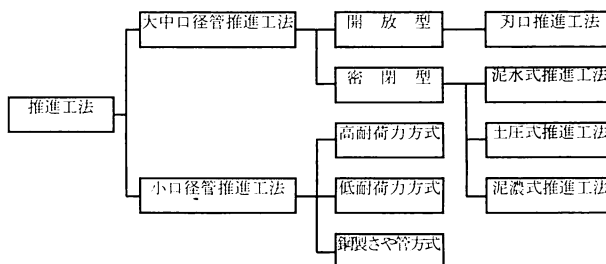


図-1 推進工法の分類

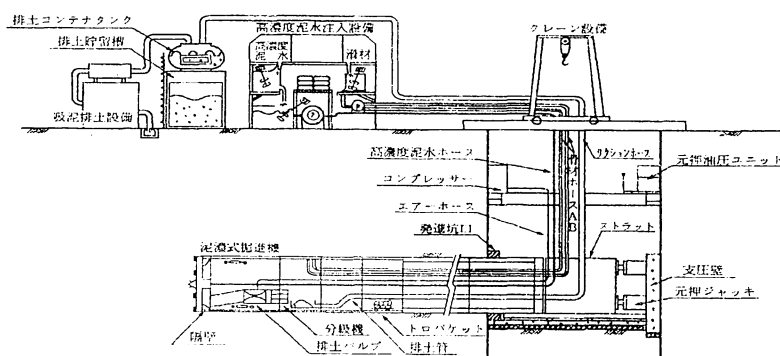


图-2 推進工法概要図

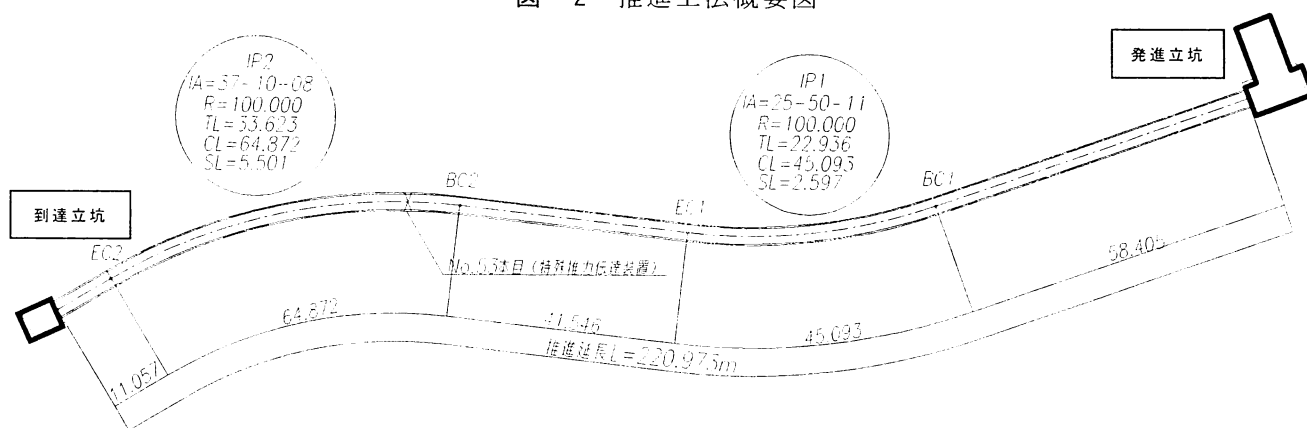


図-3 路線図

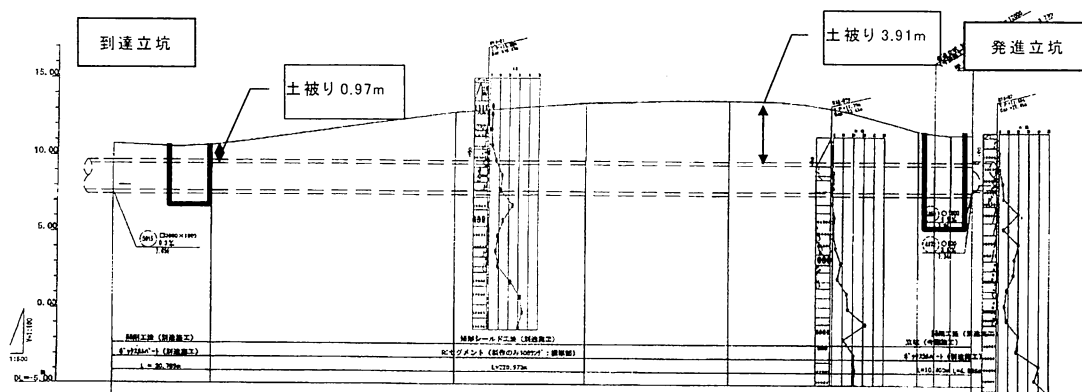


図-4 縦断図



写真-1 発進部

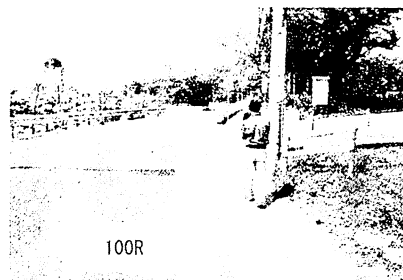


写真-2 第1曲線部



写真-3 第2曲線部

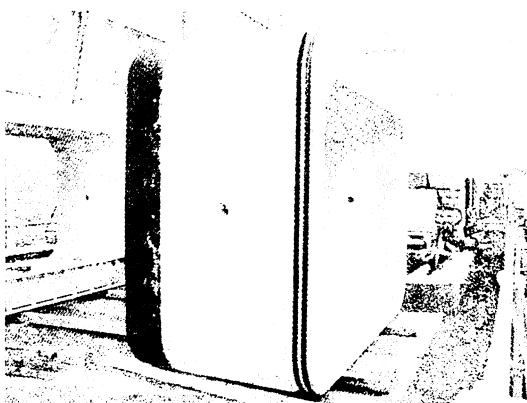


写真-4 使用したボックスカルバート

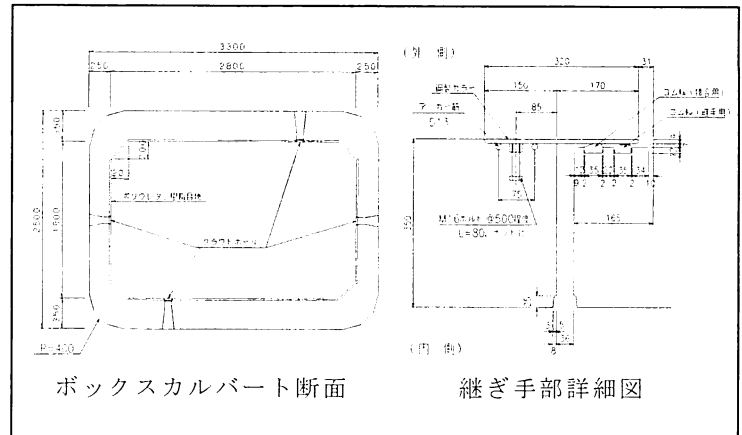


図-5 ボックスカルバート図面

4. 本現場における検討課題

今回の現場は大口径かつ低土被りの軟弱層推進であり、検討すべき課題として、以下のようなものが考えられた。

- ①掘進機構造
- ②切羽安定対策
- ③地表面への影響

以下、それら検討課題に対する対策ならびに実施工における結果について示す。

5. 掘進機構造について

(1) 検討すべき課題

矩形掘進機による構造上の課題は、カッターの回転メカニズムにあると考えている。シールド工法や推進工法は、切羽前方への押圧を伴いながら掘削を行うために、カッター回転がその加圧力により制限を受ける構造では掘進速度の向上は図れない。よって掘進機には以下のような克服すべき課題が考えられる。

- ① 掘削効果向上のための矩形断面同時掘削範囲の拡大
- ② 攪拌混合効果の高い不透水性泥土の形成が図れるカッター構造
- ③ 掘進機ヘッド重量と後続団体のバランスの欠如に起因する掘進機のノーズダウンへの対応

- ④ カッター回転力の反力または方向修正ジャッキ（中折装置）の加圧時の方向性や掘進地盤の強度ならびに性状により左右されるローリング現象
- ⑤ フードが地山に貫入されることで発生する先端抵抗の低減

(2) 課題に対する検討内容

写真-4に密閉型ボックス掘進機の全景を示す。ここでは頂部の土砂を前方に移動させることなく、地山との確実な縁切りを行いながら地盤の乱れを最小限とする構造および本工区の土被り比（1.56D～0.39D）に対応可能な機能を中心に検討を行った。以下、構造の詳細を述べる。

- ① 掘削効果の向上のために公転自転比を検討し、公転1回で多軸カッター（3軸）が複数回掘削できる構造とした。図-6に掘進機図、図-7にカッタービット軌跡図を示す⁵⁾。
- ② 駆動構造を自転かつ公転方式として公転回転数を少なくして駆動力の向上を図った。この構造は自転軸が高速回転となるため、掘進機中心にカッター中心がある掘削機より掘削、混合攪拌効果が向上する。また、多軸カッター構造としたことで一個のカッターが受け持つ掘削範囲を分割することで負荷を軽減し、カッター外径を小さくすることで、最外周と内周の周速差を限りなく少なくして掘削効率の向上を図った。写真-5に多軸カッター状況を示す。

- ③ ノーズダウン対策として、先導体および後続洞管と函体との緊結を行い、接続アダプターについては曲線施工に対応した自在性を有する構造とした。
- ④ ローリングの対策として、自転軸を多軸とすることで、直接地山に作用するカッタービットが複数となることや、自転と公転が相反する回転方向となることが効果的であると判断した。さらに掘進機フードを円形に可動させる機能を持たせ、ローリング等の検知センサーでの情報をリアルタイムで確認し、遠隔操作で制御できる装置を設置した。図-8 に回転式ムーバブルフードを示す。
- ⑤ カッターが直接掘削できない範囲の土砂取り込みは、追従的な掘削機能とし、外郭部先端のカッティングエッジがカッタービットより後方(20cm程度)で地山に接触する構造とし、先端抵抗の軽減を図った。
- ⑥ カッター負荷軽減対策としては、掘削添加材の注入口を左右フード内部に複数設け、公転時のカッタービットへの側方圧を減少させ、掘削時の側方ビット

への掘削抵抗の低減効果を図った。

- ⑦ 上下左右の余掘りは25mm程度確保することで曲線施工に対応し、テールボイド部には固結型充填材を注入することで、地山の保持効果に期待した。

(3) 実施工における状況

実績としては、掘進速度 50mm/分～15mm/分が確保できた。基本的には発進坑口部の地盤改良区間や曲線開始のBC地点及び修正戻しのEC地点付近の慎重な掘進機操作区間を除けば、低トルク状態で平均掘進速度は35mm/分程度であった。これは、多軸カッタービットによる掘削ならびに掘削添加材と地山との攪拌混合効率の向上が効果的に発揮された結果だと考えられる。

また、ローリングに対してはリアルタイムでの検知で、微小な現象の察知から回転式ムーバブルフードを稼働させたことで全線左右1°以内が確保できた。製品の個々の精度品質が良好な事もローリング現象を回避できた大きな要因とも考えている。

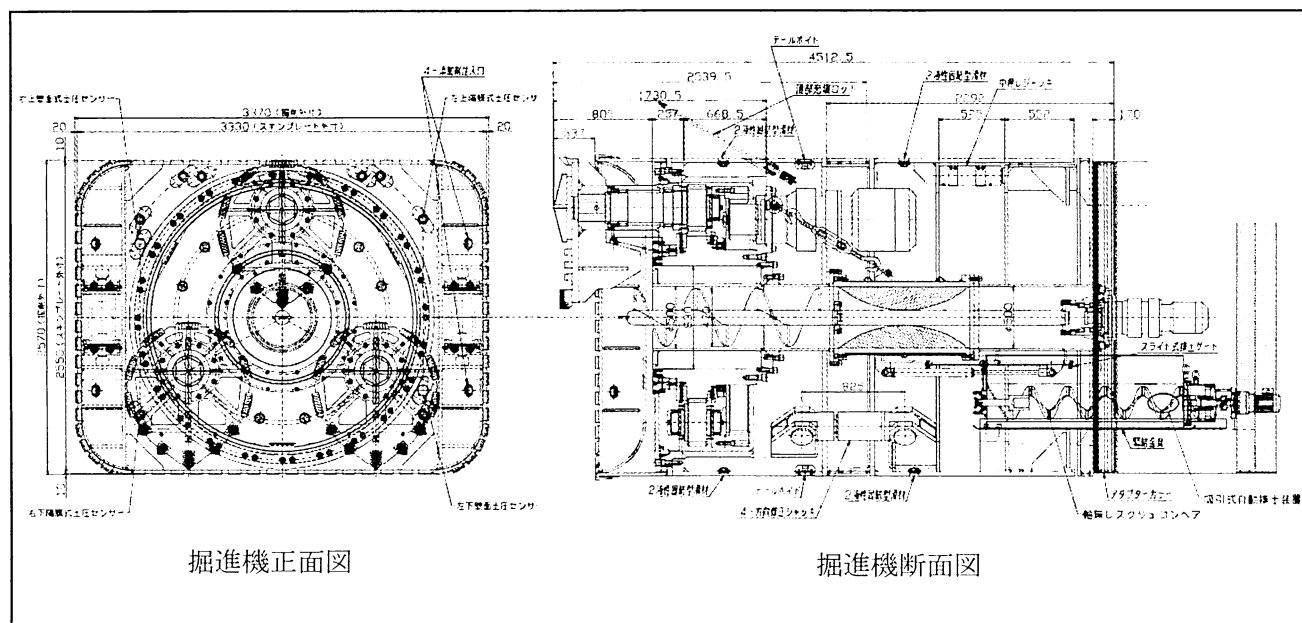


図-6 密閉型ボックス掘進機図面

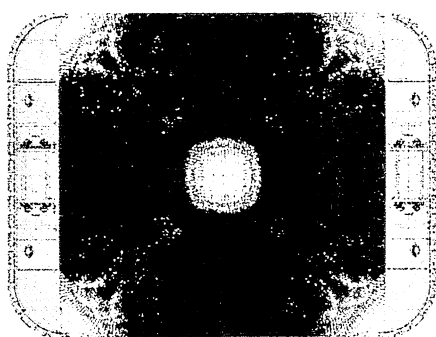


図-7 カッタービット軌跡図



写真-5 掘進機前面(多軸カッター)

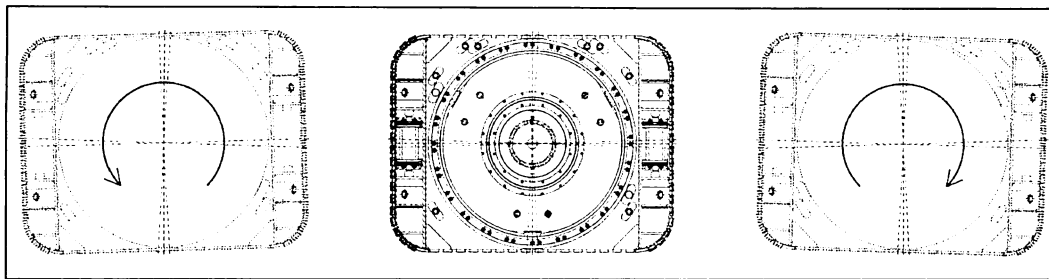


図-8 回転式ムーバブルフード

6. 切羽安定対策について

(1) 検討すべき課題

本工事は大口径かつ低土被りの軟弱層推進のため、切羽の安定が周辺地山に与える影響が大きいため、以下のような検討課題が挙げられた。

- ① 地山の挙動を最小限に止めるための装置
- ② 切羽圧力を一定に保持できる排土装置

(2) 課題に対する検討内容

本工区は非常に低土被り条件のため、切羽圧力の変動が地表面に大きく影響を与える。そのため、連続排土方式が一定の切羽圧力保持には効果的で、泥土圧式の軸付スクリー装置とエアーストームバルブの併用が地盤の安定に有効と判断し、排土量調整装置としては、泥土圧式および泥濃式の兼用型構造とした。

また、切羽管理圧力として、一般的には「静止土圧+水

圧+予備圧」で設定されるが、事前に静止土圧を特定することは難しくため、本現場においては、立坑掘削時の地下水位と初期掘進終了後（地盤改良区間通過後）に示されるカッター室内の検知圧力から予備圧（20kPa～40kPa）を加算して管理を行った。

また、掘進機（図-6）には頂部充填ロッドが設置可能な状況とし、必要に応じて注入可能な状況とした。

(3) 実施工における状況

掘進機から排出される土砂は、多軸カッター構造の攪拌混合効果や軸付スクリーでの再練りにより流動性は確保した。ただし、吸泥排土装置にて坑外に土砂搬出を行うため、吸引口に写真-6に示すリボンスクリー装置を追加して再混練りを行った。写真-7のように函内は6B×2連の鋼管で配置され、換気量（毎分 70m³）を含め坑内の作業環境は良好な状態を維持できた。

7. 地表面への影響について

(1) 検討すべき課題（地表面沈下の事前解析）

二次元有限要素解析プログラム Phase² を使って路線上の横断部3箇所の沈下量の事前解析を行った⁶⁾。図-9にその結果を示す。この結果から、土被りが深い方が地表面沈下量は少ないが、土被り差による横断方向の影響範囲の広がり確認できない。また、地盤改良を施さない条件下では、最大沈下量は36mm程度になると推定できた。

(2) 課題に対する検討内容

切羽圧力の保持は泥膜や土粒子の造壁性の形成が基本であるが、不透水性の高い半塑性流動体の土砂性状でカッター室内が充填されれば、各所に圧力の伝播が可能となるため頂部の土粒子崩落は一時的には防止できる。その後、安定したテールボイドの形成のため、固結型材料の機内からの充填を行う。しかし、排土性状が不安定な場合のカッター室内の土砂性状回復には、時間を必要とする場合も見受けられる。以上のような考え方を基本にして、本工区に適用性の高い密閉型矩形掘進機の構造や機能として、5章および6章に示す掘進機構造ならびに切羽安定機構により対応を図るものとした。

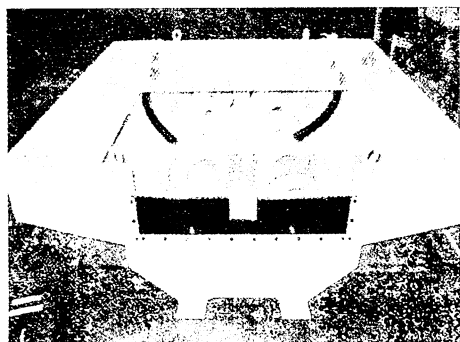


写真-6 リボンスクリー付貯泥槽

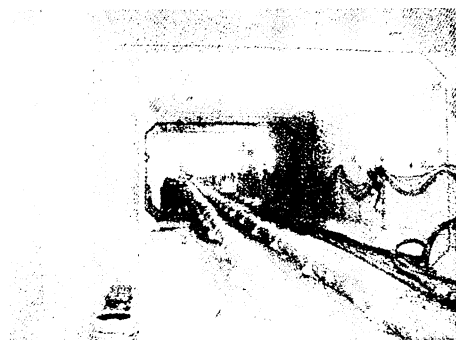


写真-7 函内排土鋼管（6B×2連）

(3) 実施工における状況

発進立坑の坑口付近は立坑構築後の時間の経過とともに圧密沈下が発生する。また、この路線は表層厚が30mm～50mm程度と薄く、活荷重を支えるための舗装や路盤の強度は期待できなかったため、沈下が発生した。

ボックス掘進機前方の地表面の挙動を確認するために切羽圧を下限管理値内で、一定期間調査を試みたが、隆起などの地表面変位への影響について大差はなかった。

土被りが1.5m以下になった後半の路線では、先行隆起が0mm～3mm程度発生したが、顕著な現象は確認されていない。推進中の地表面変位を表-1に、裏込め注入後の計測値を表-2にまとめた。

8. 施工結果

掘進速度や日進量の実態及び推進精度や実績推進力の結果を述べる。到達立坑における掘進機ならびに推進完了後のボックスカルバート内の状況写真について写真-8および写真-9にそれぞれ示す。また、各種施工実績について以下に示す。

(1) 施工サイクル

結果として、施工に問題がなければ、3函(3.75m)から4函(5.0m)の日進量(昼8時間施工)は確保できたが、函体ボックスの据付工時間、配管および配線、照明等の段取り替え作業は円形の2倍程度必要となり、掘進時間に追加されるべきと考えられる。今後は掘進中の方向修正以外にローリング修正作業を加味して、計画日進量に反映させる必要がある。表-3に施工サイクルを示す。

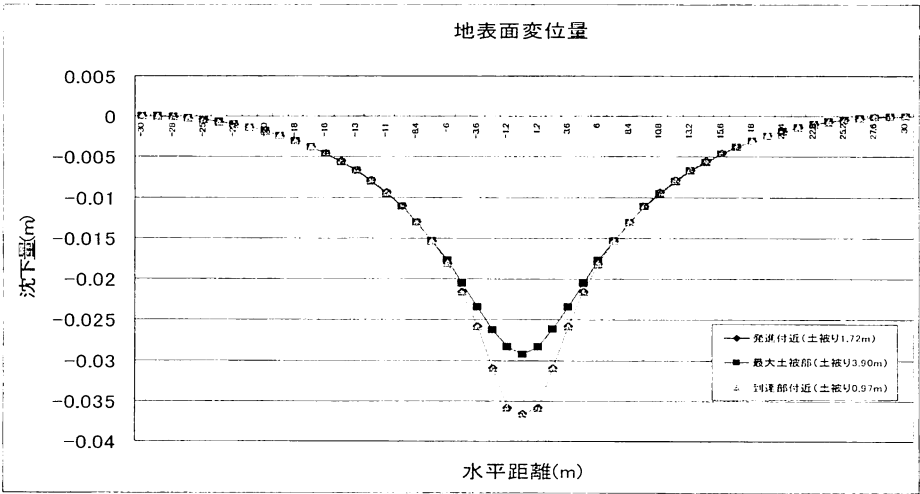


図-9 解析結果 (沈下量グラフ)

表-1 地表面の挙動 (推進中)

計測位置 (経時変化)	挙動の種類	隆起 (mm)	沈下 (mm)
先行地山の挙動 (切羽前方 3.0m 付近から先)		0～3	-1～-4
切羽前地山の挙動 (カッター前方 1.0m 程度)		0～4	-2～-5
テールボイド発生 (カッター後方 4.5m～6.0m) 時の挙動		0	-7～-28 (発進付近)
函体通過後の後続沈下		0	-10～-28 (発進付近)

※ 機内注入による変位回復前の実態

表-2 地表面計測値 (裏込め注入後)

位置 項目	発進 No.12+10m 付近 ～No.11 付近	BC1～EC1 (第1曲線) No.9+13m 付近 ～No.7+8.0m 付近	SP2 (第2曲線) No.3～No.4	到達 No.1+10.8m ～No.3 付近
推進延長 (m)	0～30.0	60.0～108.8	177.0～197.0	197.0～220.97
土被り (m)	1.83～2.87	3.91～3.74	2.35～1.77	1.77～0.97
特記事項	発進立坑水替工による 圧密沈下の懸念有り	最大土被り区間 Hmax = 3.91m, H=1.56D～1.5D	H=1.2D～0.71D	埋戻地盤含む H=0.71D～0.39D
実測値 (mm)	-27 (発進) ～-1	-3～-17	-5～+8	-3～+2 (-20)

※ 到達付近の (-20mm) は埋戻地盤中のコンクリートガラの影響による局所的な変位

(2) 施工精度

上下および左右の精度管理の結果を図-10 に示す。全体を見渡して、局部的な座屈のような現象は発生していない。高低変位量は、発進から 150m 付近までは-19mm 以内、到達地点に近づくにつれて-35mm 程度となっている。方向変位量は掘進機通過中の精度が最終的にはほぼ函体の精度となり、左右 45mm 以内（管理基準値：50mm）を確保できた。このことから判断すれば、円形の曲線施工では左右地山への競出しによる地山反力不足が問題となるが、矩形の場合は平面的な受圧のために掘進機通過後の函体の変位は非常に少ないと判断できる。

(3) 推進力

図-11 に計画推進力、初期推進力、推進中の推進力の実績グラフを示す。当初、毎日の推進開始時の初期抵抗力の増大を懸念して掘進機後続胴管内に 20cm ストロークの加圧ジャッキ（497kN×10 本）を装備した。その他、不測の事態を考慮して中押設備を 1 段設置した。施工開始直後に函体の止水パッキンが不均一に収縮し、漏水が確認され、その段階で推進中の管理値を越える推進力となった。そのため、2 段目の中押装置を急遽追加した。その後、

パッキン高さを規定した後では止水性の確保ができ、管理土圧の変動がなくなり、総推進力の安定が図られた。最終的な推進力は計画値（9,989kN）の 75%以下、函体コンクリート軸方向耐荷力（16,000kN）の 50%で推移し、中押装置は 2 段とも使用していない。単純に判定した結果では、先端抵抗力を除いた到達までの平均周面抵抗力は 2.46kN/m²、推進途中の周面抵抗力は 4.80kN/m²～2.00kN/m²で推移し、円形の実績と比べた場合は、1.5 倍程度の周面抵抗力となった。

表-3 施工サイクル表（標準）

- 函体吊降工（横引含む）	0.6 H
- 函体位置合わせ接続工	0.4 H
- 配線、配管工	0.4 H
- 掘進工（掘進速度 35mm）	0.6 H
- 排土工	0.5 H
- 測量工	0.5 H
函体 1 本（1.25m）当たり	3.0 H

※各作業において多少の競合時間は可能

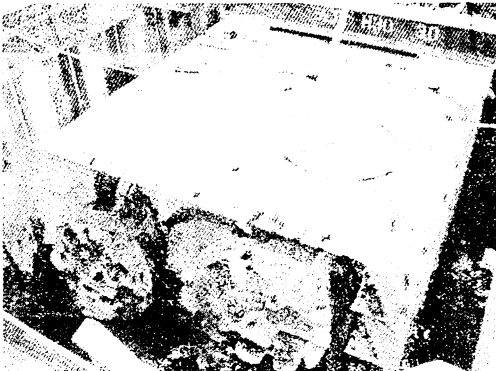


写真-8 掘進機到達状況

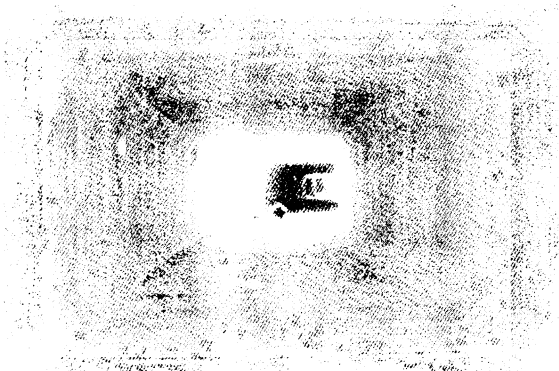


写真-9 函体コンクリート（曲線部）

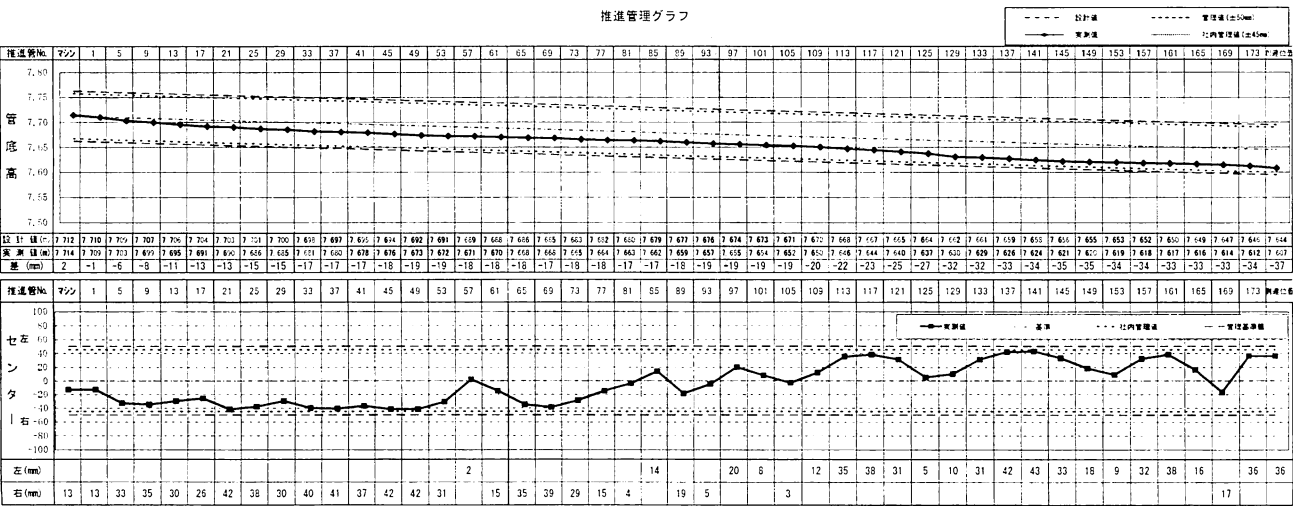


図-10 精度管理グラフ

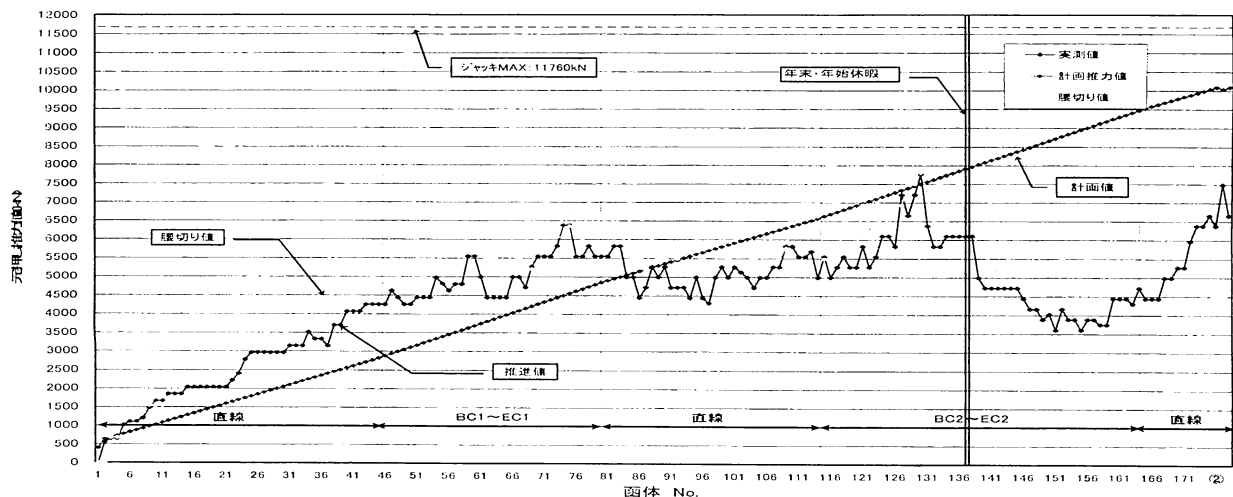


図-11 密閉型ボックス掘進機図面

当初計画では、矩形推進における周面抵抗力を 2.0 倍と想定していたが、それを下回る結果となった。これは、前述の多軸カッターによる攪拌混合効果ならびに固結型滑材の効果により、良好なテールボイドを構築できたことが要因と考えられる。

9. おわりに

本報告では、曲線を有する長距離路線を推進工法によりボックスカルバートを布設した場合における様々な課題および実施工における結果について検討した。その結果、掘進機構造および切羽安定対策について十分検討することで、課題を解決することができ、周辺環境に影響を及ぼすことなく十分な精度で完工することができた。また、推進力、精度ともに安定した結果が得られた他、掘進速度および周辺地山への影響等についても十分な結果が得られたことから、本ボックス推進工法の長距離、曲線施工に対する適用性を確認することができた。

今回のような地下の施工は事前の施工条件の掌握が難

しく、未確定要素が多く含まれている。そのため地下工事の計画設計では経験的な要素が中心となり、技術的な平準化に向かうまでには多大な時間を要する。しかし、今後も各現場の実績を踏まえ、新しい技術開発は展開されてゆくべきと考えている。これからも、微力ながら社会資本整備事業の一端を担うことが出来るように、励んで行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本プロジェクトリサーチ：“アンダーパス工法” 急速施工への展開，2006.
- 2) 日経 BP 社：日経コンストラクション 2010.1, pp.10, 2010
- 3) 森田他：資源・素材学会秋季大会 2008 (仙台) 論文・講演集，pp.4-7，2008.
- 4) 社団法人日本下水道協会：下水道用設計積算要領―管路施設（推進工法）編一，pp.237，2008.
- 5) 日本建設機械化協会：建設の機械化 2003.2 No.636, pp.8-12, 2003.
- 6) 株式会社地層科学研究所：3D-σ User's Manual

INSTALLATION OF BOX CULVERT WITH LONG DISTANCE AND CURVED LINE BY RECTANGULAR PIPE JACKING

Tomo MORITA, Fumihiko MATSUMOTO and Eiji SAKAI

The progress of recent no-dig technology is remarkable and, not only the shield method but also pipe jacking method can construct the rectangular pipe line. However, the promotion method of construction is the field where a lot of experiential judgment becomes deferment about the theory.

This report shows the problems, consideration and result of Box Culvert pipe line construction by rectangular pipe jacking machine.