

# 巨礫を含む複合地盤を克服したK-1推進工法の事例報告

## Application of K-1 Pipe Jacking Method in Ground of Boulder and Clay

林 茂郎\*1

Shigero Hayashi

### 要旨

K-1推進工法は、従来困難であった巨礫地盤や複合地盤の長距離推進施工を目的に開発した工法である。従来の掘削技術を見直し、カッターヘッドの新開発や推力低減システムの搭載などの工夫を集積して泥濃式と泥水式の2種類の推進機を製作した。既に40例を超える実績を有し、難易度の高い巨礫地盤や軟岩～硬質粘土の複合地盤などの克服を実証している。

キーワード：推進工法 巨礫 軟岩 複合地盤 破碎 面盤閉塞

## 1. はじめに

近年の推進技術の進歩は著しく、数々の困難な課題をクリアしてきたが、まだ解決すべき課題が残っている。300mmを超える大きさの巨礫・玉石地盤への対応もそのひとつである（写真-1）。

K-1推進工法はこの巨礫地盤の克服を目的として開発され、平成13年に協会を設立している。

本報告ではK-1推進工法の概要と施工事例を紹介する。

## 2. 破碎型泥濃式K-1推進機の開発

推進技術の発達により様々な用途の整備が進められているが、それまで施工困難とされていた巨礫地盤の整備事業が残されているという状況になっている。このように推進工法での巨礫地盤施工はかなり難易度の高い工事であった。

巨礫地盤施工時に発生する主なトラブルは、掘進速度の低下、切羽土砂取り込み過多による地表面沈下、ビットの磨耗・破損による掘進不能、推力の増加による推進管破損、粘土が出現した場合の面盤閉塞による推進停止などがあり、これらの課題の克服が要求されていた。

このような背景で「巨礫地盤で500m級の長距離を推進可能にする」事を目標として、K-1推進機を開発した。

### 2.1 切羽土砂取り込み過多の抑制

巨礫地盤では礫破碎に時間がかかり、その間に砂など切羽土砂取り込み過多が発生する事例が多い。この取り込み過多を防止するためには、切羽の安定と掘進速度の低下抑制を図る事が重要と考えた。



写真1 立坑掘削時に出現した巨礫の例

切羽の安定は地質に応じた推進工法の選択で決定される。それまで巨礫地盤などの硬質地盤では泥水式の適用例が多かったが、土粒子間の間隙が大きく透水性の非常に高い巨礫地盤の場合、泥水式では切羽の泥膜形成に限界があり、切羽の安定が困難になる。一方、土圧式はチャンパー内を不透水性に改良した泥土で充満させているため、高透水性地盤での切羽の安定が可能である。また、推進工法の場合は、土圧式を推進用に特化・改良した泥濃式の選択肢もある。この方式は土圧式に比べて加泥材の注入率が高く、ウラゴメールなどの目詰材を添加している泥濃式は透水性の高い巨礫地盤の切羽安定にも有効と考えられる（図1）<sup>1)</sup>。

掘進速度の低下抑制については、礫の機内取り込み可能な大きさに着目した。取り込み礫径は推進管径にも比例するが、巨礫を粉砕せずに取り込み可能なならば掘進速度は向上する。

推進管径φ800mmクラスでの推進機取り込み礫径は、排泥ポンプの通過流径で制限される泥水式は約50mm、リボ

\*1 大阪本店 土木技術部

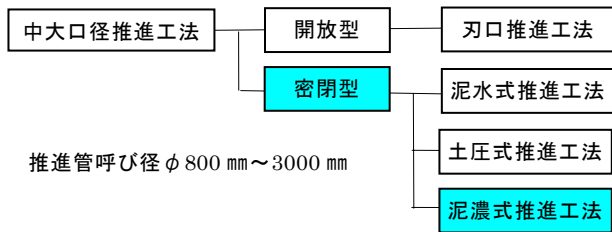


図1 推進工法の分類

nskリウを採用する土圧式では 100 mm程度であるが、泥濃式のピンチバルブ通過粒径は約 240 mmと最大である。

巨礫地盤の克服を目的としたK-1 推進機の開発にあたり、筆者らは「礫を大割りにして素早く機内に取り込み前進する」と言うコンセプトを立てた。そこで切羽の安定と取り込み礫径の大きさから推進工法は泥濃式を選択した。また、このコンセプト具現のために以下の対策を行った。

(1)効率的な礫破碎を可能とするカッターヘッドの開発

巨礫破碎時間が長くなるのは、ビットによって亀裂の入った破碎中の礫が動き、次のビットが接触する時には亀裂のない場所に当るいわゆる”礫が逃げる”という状況が発生し、効率的な破碎ができないと想定した。このため従来では礫固定の目的で薬液注入などが用いられることもあった。

そこで効率的な礫破碎のために以下の工夫を行った。

まず破碎に最も寄与する最外周のローラービット（ゲージカッター）数を従来機の 2~3 個から 4 個に増やし、ビット間隔を小さくする。さらにその 4 個のローラービットを 90 度間隔の均等配置ではなく、ビット間隔を 70 度・110 度の不均等配置とし、1 組 2 個のゲージカッターが連続して礫に当てるようにした。カッターヘッド形式はローラーカッターの多数搭載・強度を考慮してスポークタイプではなく、面盤形式とした（図 2）。

また、従来は硬質地盤掘削に際して、トルク増強のため

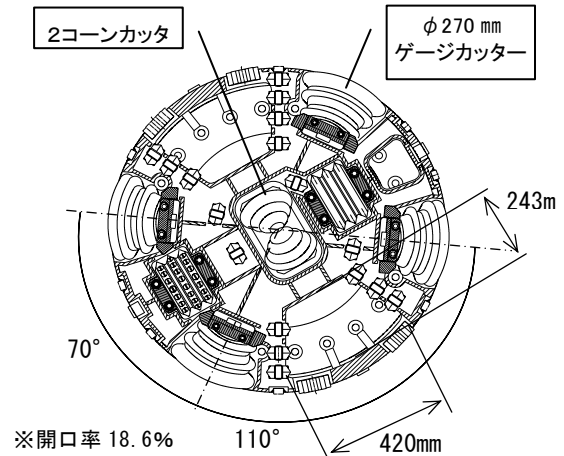


図2 φ 800 mm泥濃式K-1 カッターヘッド

カッターヘッド回転速度をギヤボックスにて落とすことがあったが、カッターヘッドの高速回転による衝撃力で破碎する考え方とした。そのため破碎型泥濃式K-1 推進機の回転数は、高速回転する通常地盤用の推進機と同等の 9.2rpm とした。この 2 つの工夫で礫を逃げる前に効率的な破碎を目指した。

面盤形式の開口部は大きくできないので、形状による工夫を施した。従来の面盤は巨礫のチャンバー内侵入を防止するため、半径方向・周長方向に開口制限を行っていたが、これを細長い開口から取り込む礫はピンチバルブを通過できるという判断に基づき、半径方向の寸法だけで開口制限を行い、長径は長い開口とした。このような開口の考え方で泥濃式の取り込み礫径を最大限に活かすようにした。

(2)発熱対策

巨礫地盤など硬質地盤を掘削する場合、駆動モーターには大きな負荷が掛かる。推進機で搭載されるモーターは大きな電流を流し続けると発熱し、サーマルリレーにより回路保護のため電源が切断される。モーターを冷却している

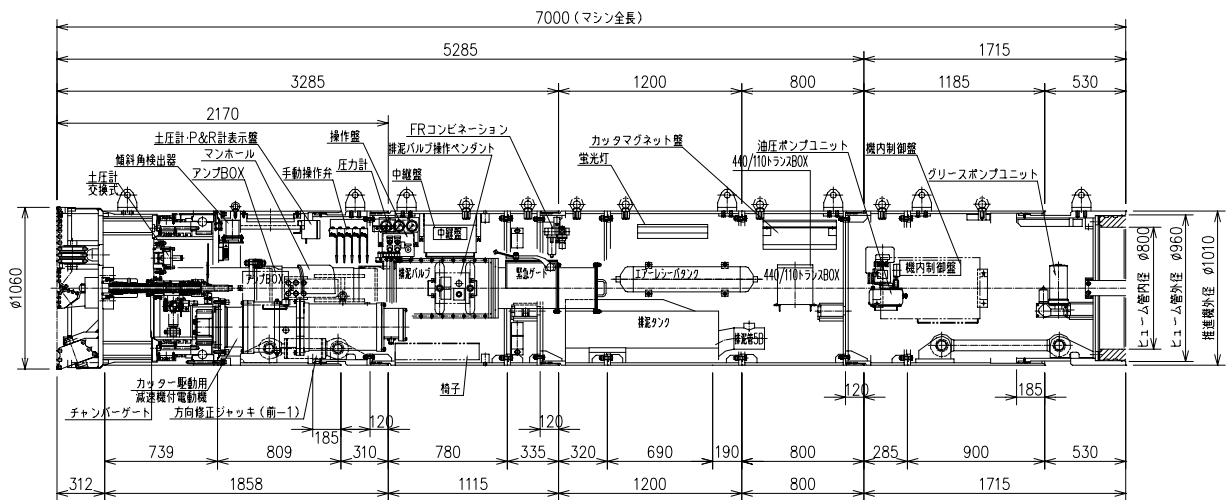


図3 φ 800 mm破碎型泥濃式K-1 推進機図

間は掘削することができず、日進量は低下する。

従来は、負荷低減を目的として大型モーターを搭載するため、適用管径の拡大や更に大径のシールド工法に変更するなどの対策が行われたが、当然工事コストは増大する。

発熱対策として従来の空冷モーターに代えて水冷式モーターを採用した。機材価格は約二倍となるが、高温になり悪化する坑内環境も緩和し、実掘削時間を長くすることも期待し、日進量の低下抑制を図った。

### (3)礫の坑内搬出方法

他の破砕型推進工法では、坑内作業の軽減を目的として礫を粉砕して全てバキューム搬送する方法を採る工法も存在するが、巨礫は坑内分級して専用の台車にて搬出するシステムを採用した。

粉砕した礫の長距離バキューム搬送は、土砂分離が発生して排泥管の閉塞が発生し易い。かつて長距離推進の技術開発時に 1000m のバキューム排土実験を行い、礫分は重いため排泥管底部に滞積しやすく、かなり粘土分を追加して流動性を上げないと長距離搬送は困難との知見を得ている。流動性の向上は結果的に排土量を増加させることになる。また、 $\phi 800$  mm級の管内での排泥管閉塞解除作業はかなりの難渋作業となり、実日進量の低下を招く。

このような理由で、K-1 推進工法では、取り込んだ大割りの礫を台車で直接搬出する方法を採る事とした。台車はパイプルール上を小型のバッテリーカーを走行させる小型軌条設備とした（写真 2,3）。



写真 2 小型バッテリーカー



写真 3 パイプルール

## 2.2 ビット耐摩耗性の向上

巨礫地盤でのビット摩耗については、従来の $\phi 800$  mm級の破砕型推進機での限界距離は 200m 程度までであった。K-1 推進工法ではこれを 500m という従来の 2 倍以上の目標を立てた。

この目標を満たすためには、推進機機内でのビット交換が可能なマシンとする方法と、ビット交換しない方法が考えられたが、K-1 推進工法では後者を選択した。

大径ビットは周長が大きく耐摩耗性に有利であるが、狭い推進機の機内空間では重量のある大径ローラービットの人力交換は不可能である。軽量のローラービットの径は必然的に小さくなるが、耐摩耗性は低下し長距離推進時には何回も交換する事となる。また、推進はシールドと異なり、ビット交換等で推進を停止させると、ボイド収縮による地山の推進管締め付けが発生し、推力過多となって再発進できなくなる懸念がある。また、推進停止自体が平均日進量の低下となりトータルコストが上昇する。このような理由でK-1 推進工法はビットの機内交換をせず、ビット無交換で 500m の長距離を推進することを目標とした。そこでビットの耐摩耗性を向上させるために、以下の対策を行った。

### (1)ビット軌跡数の増加

巨礫地盤を長距離推進するためにはビットの耐摩耗性の向上が最も有効であると考えられるが、同時に耐衝撃性も要求される。従って、単に耐摩耗性に優れた硬質な JIS M3916 の E3 に分類される材料を超硬チップとしては使用できず、ビットの欠損・剥離に重点を置いた軟らかい E5 ~6 相当の材料のチップを採用せざるを得ない。

そこで、ビットの軌跡数を増やすことに着目した。従来のビット軌跡は切羽面均一に 1 パス 1 カットが常識であったが、K-1 推進機では最外周部は 1 パス 4 カット、ゲージカッター部は 1 パス 2 カット、ゲージカッター以内は 1 パス 1 カットと摩耗の激しい外周ほどビット軌跡数を増加させることとした。そしてビット軌跡の間隔は、従来の岩盤用で採用されていた@30 mm と砂礫用@60 mm に対して@45 mm と設定した。超硬チップの形状は、巨礫地盤ではチップインサートタイプを標準とするが、切削が必要な軟岩に対してはチップを突出させたチゼルタイプとした（写真 4）。

### (2)ゲージカッターの大径化

従来の推進機では駆動力と操作性を考慮し、大きな径のローラービットは搭載していなかったが( $\phi 190$  mm程度)、K-1 推進機は $\phi 3.0$  m 級のシールド機に搭載される $\phi 270$  mmのゲージカッターを搭載した。

### (3)外周リングの補強

カッターヘッドで一番磨耗するのは最外周部であるが、推



写真4 左:チップインサートと右:チゼルタイプ

進機で外周リングを補強した例はあまりない。K-1では長距離対応とするため外周リングの補強を施した。

外周リング前方には櫛歯状に超硬チップを埋めたシェルビットを装着し、リング周面側には硬層肉盛以外にも超硬チップのプレートを12本埋め込んだ(φ800mm用)。

このようにカッターヘッドを強化したため、かなり前端の重量が増加し推進機前後の重量バランスが崩れる懸念があった。そこで推進機後端に後続鋼殻管を取り付け、前後重量バランスを取るようにした。後続鋼殻管は単にウエイトの役割だけでなく、シールドジャッキを装備している。長距離曲線推進時に推進管外周抵抗力にて推力が消費され、先端部で必要なカッターヘッドの切羽に対する押し付け力が不足した場合に、このシールドジャッキを作動させ補完する役割を持たせている。

### 2.3 推力増加の抑制

巨礫地盤は透水性が高い地盤であることが多く、滑材の地山への逸散から推力過多となり推進停止に至るトラブルが多発する。

この問題に対しては、900m級の長距離推進実績があるT.B.Kシステムの併用を標準とした。T.B.Kシステムは多孔式滑材注入用推進管を約50m間隔で配置し、地山と推進管との隙間(=以下ボイドと称す)に形成される滑材層の圧力を検知しながら自動的に滑材を追加注入することでボイドの維持を図り、推力を低減するものである(写真5)。



写真5 T.B.Kシステム坑内設備

K-1推進工法では多孔式注入管の配置ピッチを狭めることで、巨礫地盤に対応させている。また、ボイドの大きさは、急曲線施工時を考慮し片側50mmと設定した。

### 2.4 粘性土と巨礫の互層による閉塞対策

ローラービットを搭載する硬質地盤用推進機は、粘性土が出現すると開口閉塞が生じ推進不能に至る(写真6)。そこでK-1推進機では、この開口部の形状に着目した。

従来の面盤はスポーク間を鉄板で覆う事で面盤を形成していた。故にその開口は半径方向に長く周長方向に短い扇子形の形状となっている。最外周部で開口制限を行うと、中心部での開口幅は必然的に短くなる。回転速度が低い中心部での開口幅は最小であり、ここから粘土の居付きが発生して面盤閉塞に至ると考えられる。

そこで破碎型泥濃式K-1推進機では、以下の工夫をして面盤閉塞の抑制を図った。

#### ①面盤開口部の位置 (図2)

回転速度の遅い中心部には開口部を作らない。回転速度の速い外周部に開口を設ける。

#### ②開口部形状

開口は半径方向に短く、周長方向に長い形状とし、初期の粘土居付きを防止する。

#### ③カッターヘッドの高速回転

標準泥濃機と同様の高速回転9.2rpm(φ800mm)とする。

#### ④加泥材吐出孔の増強

φ800mm級の推進機加泥材吐出孔は通常センターに1箇所であったが、粘土の流動性を高める加泥材の供給量増強のため、面盤上に2ヶ所とした。

φ800mm用推進機での開口率は約24%しか確保できていないが、泥濃式K-1推進機では①②③④の工夫で土砂取り込み能力を上げ、粘土の居付き・付着を抑制するデザインとし、複合地盤対策とした。



写真6 面盤閉塞の例

### 3. 泥濃式K-1の施工事例

このように独自のコンセプトを持って破碎型泥濃式K-1推進機は完成した。その施工実績は、平成18年2月末現在で40件を超えた。特徴的な事例を幾つか紹介する。

#### 3.1 巨礫地盤での長距離施工

「500m ビット無交換での長距離施工」というK-1推進工法の開発目標に合致した条件の事例である。

<工事概要>

工事名称：四御神幹線汚水管理設工事

発注者：岡山市下水道局

工事場所：岡山市雄町、国分市場地内

工期：平成13年12月20日～15年3月28日

発進立坑：鋼矢板(2800×6400)×1箇所

到達立坑：φ2500×2箇所

中間立坑：各スパン1箇所

総推進延長：991.082m 2スパン

推進管径：呼び径 GS900mm(φ800)

ダクタイルGS管

スパン①：推進延長：540.545m

線形：R1000m×1箇所 0.7‰上り

土被り：7.06m 地下水位：GL-0.40m

土質：玉石混り砂礫 N値：18

礫率：85% 最大礫径：300mm

スパン②：推進延長：450.537m

線形：R200×1箇所 0.7‰下り

土被り：7.09m 地下水位：GL-0.85m

土質：玉石混り砂礫 N値：34

礫率：78% 最大礫径：300mm (写真7)

<課題>

巨礫地盤で500m級の長距離施工が2スパンあり、推力の抑制とビットの耐摩耗性が要求された。

<対策>

当現場の施工条件と同じ目標で開発した破碎型泥濃式K-1推進機を適用した(写真8)。

<結果>

推力・日進量・出来形精度の結果を表1、2に示す。課題をクリアし無事到達した。

<考察>

巨礫地盤で450mと540mという長距離施工であったが、推力は計画推力の範囲内で到達し、T.B.Kシステムの能力を確認した。

ビットの摩耗に関しては、スパンごとにビットの交換は行ったが途中は無交換であり、耐摩耗性対策が功を奏した。到達後のカッターヘッドの状況を写真8に示す。到達後の形状から、当該地盤であれば700m程度まで施工可能と推測された(写真9)。



写真7 四御神 排出礫

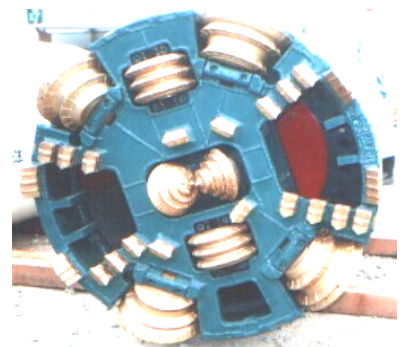


写真8 四御神 発進前面盤

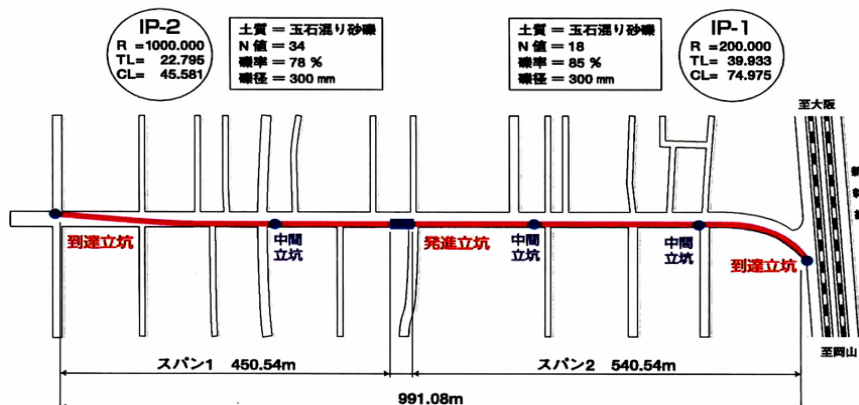


図4 四御神概要平面図



写真9 四御神 到達後面盤

表1 四御神 推力結果

計画		実施	
総推力	5860kN	最大推力	3016kN
		①到達時推力	2904kN
先端抵抗力	931kN	①-②	350kN
周面抵抗力	4929kN	②空押し推力	2554kN

計画		実施	
総推力	5001kN	最大推力	2569kN
		①到達時推力	1899kN
先端抵抗力	931kN	①-②	500kN
周面抵抗力	4070kN	②空押し推力	1499kN

表2 四御神 精度・日進量

施工区間	出来高精度 (垂直)	出来高精度 (水平)
スパン①	-28~47 mm	右16~左18
スパン②	-38~2 mm	右27~左30
施工区間	平均日進量 最大 ジャッキスピード*	
スパン①	9.2 m/日	40 mm/分
スパン②	8.0 m/日	30 mm/分

工事場所：岡山県浅口郡里庄新庄地内

工期：平成15年7月19日～平成16年3月10日

発進立坑：鋼矢板式 横引き方式

L6.0m×W2.8m×h5.43m

中間立坑：鋼製ケーシング×1基 φ2.0m×h5.2m

到達立坑：鋼製ケーシング φ2.0m×h5.6m

推進管径：呼び径800mm E-1種 500～700

標準管、注入管、可撓管

推進延長：L=477.08m 路線延長：485.94m

線形：R=100m×3箇所 下り2.2‰

土被：8.75～3.73m

地下水位：GL-3.3～5.7m

土質：シルト質砂～粘土

N値：2～10超

礫率：10% 最大礫径：15mm

<当現場の課題>

①477mの長距離施工であり、R=100mが3箇所ある多曲線なので推力低減が必要。

②古い構造物の基礎杭、横断河川での転石など不意に出現する支障物への対応。

③φ2.0mの小径到達立坑からの推進機を回収。(図6)

以上の課題に加え、到達間際に正月休暇を挟む工程を回避するための推進期間短縮も要求された。

<対策>

①については実績のあるT.B.Kシステムを併用する。

②については、スポーク型の従来型泥濃機では松杭が絡み付く、トルクが足りない等の懸念がある。絡み付きにく

### 3.2 粘性土地盤での施工

当現場は粘性土地盤に泥濃式K-1推進機を適用した事例である。粘性土なので当然普通地盤用の従来型泥濃機で設計されていたが、このような地盤の地域では図面に記載のない支持杭や転石に遭遇することが多々あり、当社でも過去にそのようなトラブルを経験している。そこで施工者側から破碎型推進機の適用を施工承諾として提案し、実施した事例である。

<工事概要>

工事名称：里庄町公共下水道事業里庄第1污水幹線工事

発注者：岡山県 里庄町

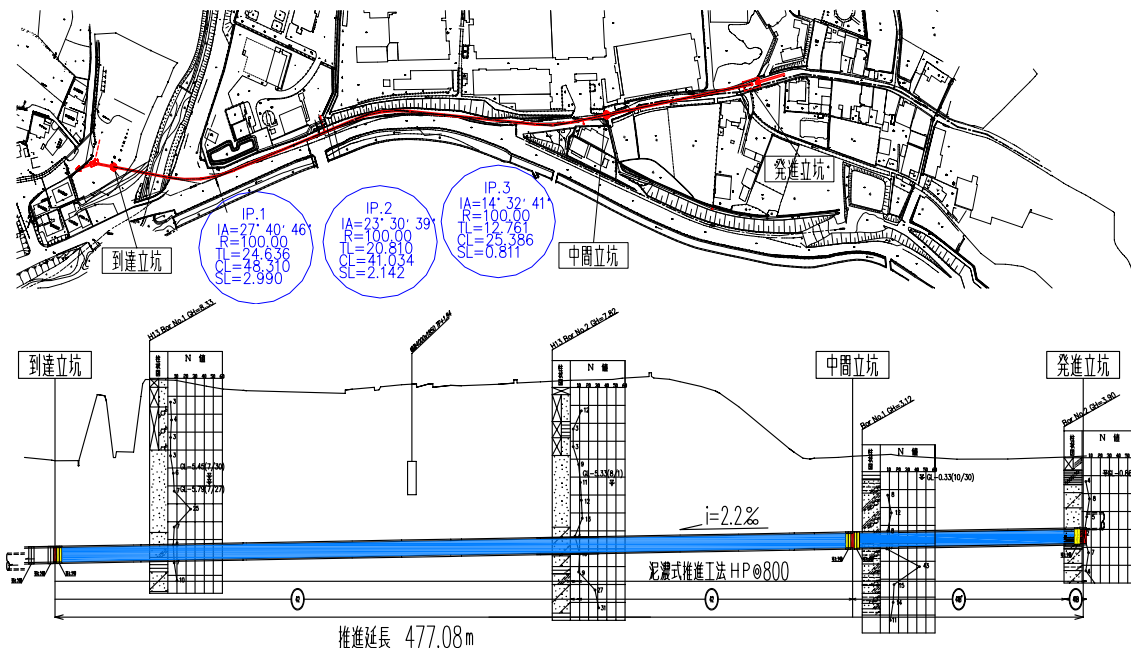


図5 里庄 平面・縦断図

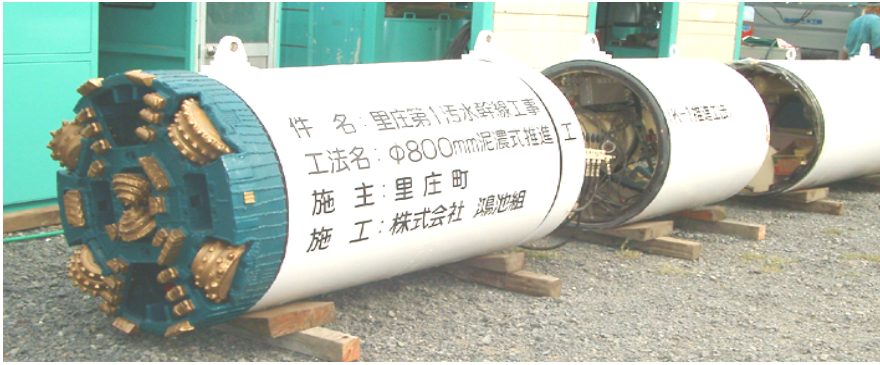


写真10 粘性土地盤用泥濃式K-1推進機

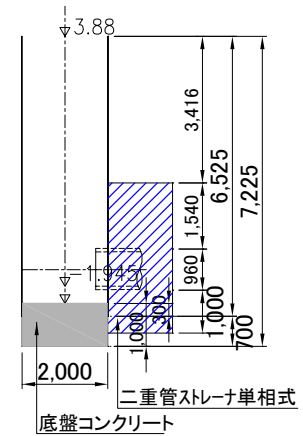


図6 里庄 φ2.0(m)到達立坑図

い面盤型カッターヘッドを装備しトルクも大きい泥濃式K-1推進機を適用する。粘土対策として開孔率向上のためインナーカッターを取り外した状態で使用する(写真10)。

③については、小分割できるK-1推進機を適用する。

粘性土への適性は以前の実績で確認していたが、工程短縮するためには従来機と同等以上の日進量が必要である。粘土地盤における面盤型カッターヘッドの適性が問われた。

<結果>

(1) 進捗

平均日進量 7.57m/8h、max8.0m/8h を記録し、正月休暇前に到達した。

(2) 排土状況・支障物

発進~100mは粘土混じり砂であり、100m~350mは砂主体(20m級粘土層挟む)、350m~到達は硬質粘土という排土状況であった。途中松杭(φ100~150mm級)が出現したが、止まる事無く通過した(写真11,12)。



写真11 里庄 排出した硬質粘土

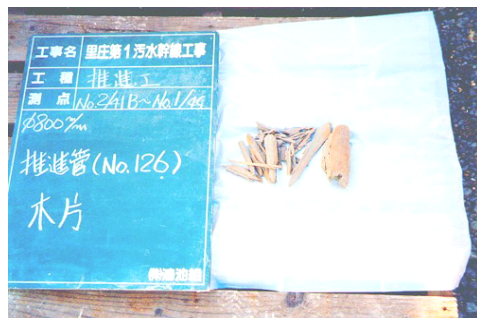


写真12 里庄 排出した木杭片



写真13 里庄 推進機分割回収状況

(3) 推力

計画推力2694kNに対し実績推力1251kNで到達(46%)、最大1540kNと低推力で到達した。

(4) その他

6分割可能な推進機を使用して回収した(写真13)。

<考察>

当初懸念された転石は出現しなかったが、松杭は出現した。しかし、計画通り松杭破碎時も日進量に影響なく、また、従来機と同等以上の日進量を確保し、工程短縮が果たせた事は評価できると考える。特に到達間際の地盤は硬質粘土であったが面盤閉塞は発生せず、複合地盤での優れた適性を実証した。

長距離・曲線施工に対しては、T.B.Kシステムの推力低減効果を確認できた。

この他、巨礫・軟岩・粘土の複合地盤施工例なども事例があり、破碎型泥濃式K-1推進工法は他工法が対応できない巨礫・軟岩からシルト・粘土という幅広い土質条件の中で実績を上げている。

#### 4. 泥水式K-1推進機の開発

泥濃式K-1推進機の開発がほぼ完了した時点で、泥水

式のニーズに応えるべく開発に着手した。

泥濃式K-1推進機の破砕能力・複合地盤対応能力は十分な成果を得ていたが、まだ克服できない課題もあった。硬岩対応と産廃問題である。

これまでで一軸圧縮強度 50MPa 以下の軟岩程度までの実績はあるが、中硬岩や硬岩には対応できていない。

また、泥濃式の残土は全量産業廃棄物指定される場合が多く、残土を改良・改質して一般残土化する技術も開発されているが、まだ本格的な普及には至っていない（粘性土に対応できない）。そのため、汚泥処分地が不足している地域では余程の事情がない限り泥濃式を採用しないところもあった。

一方、K-1推進協会には硬岩対応の泥水式アンクルモールスーパー（写真14）推進機を開発した会員が在籍していたが、小口径が主体のため、長距離・曲線推進の実績は少ない状況であった。

そこで、アンクルモールスーパーをベースに泥水式K-1推進機を開発する事とした。K-1推進機は長距離推進する事を目的とするため、以下の改良を実施した。

①硬岩掘削の実績を基に、さらに長距離・複合地盤に対応するカッタヘッドを開発する。

②推力低減装置は実績のある T.B.K システムを搭載する。  
③曲線推進のニーズに対応できるように R=100m 程度の曲線施工を可能にする。

①については、ゲージカッター径や面盤形状を泥濃式K-1機と同様にグレードアップする事とした。φ800mm用推進機と比較すると、従来機のゲージカッターをφ170mmからφ260mmに大径化した。ビットのチップ形状は既に実績のあるボタンタイプを踏襲した（写真15）。また、岩盤用の推進機にはゲージカッターのベアリング支持の関係からドーム型の面盤が用いられる事が多いが、直進安定性に難点がある。泥水式K-1推進機は直進安定性を考慮し平板型の面盤としたが、特殊なゲージカッター形状で曲線施工に対応している（図7）。4つのゲージカッターはK-1泥濃式面盤と同様に不均等配置（96度）とした。また、切削土砂を開口部に導くスクレーパーは開口端にあったものを開口中央部に設置し、土砂かき込み能力を向上させた。面盤の外周リングについても、それまでの硬質肉盛補強に加え、超硬プレートを埋め込み、長距離施工時の摩耗対策とした。

②については、後続設備なので取り付けなどの課題は無いが、推力低減効果は泥濃式と同等には期待せず、泥水式

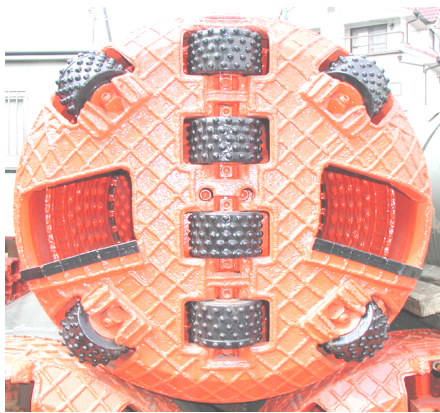


写真14 φ800mmアンクルモールスーパー機



写真15 φ800mm泥水式K-1機面盤

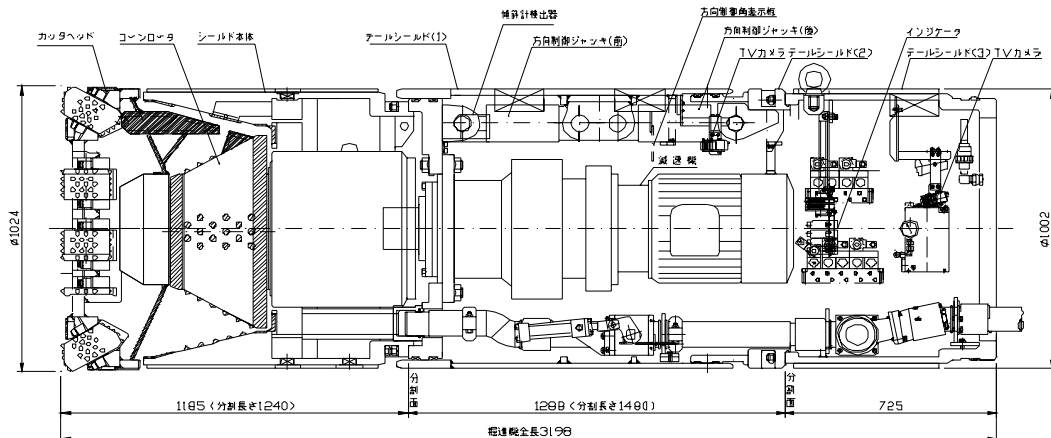


図7 φ800mm泥水式K-1推進機側面図



の実績を検証しながら独自の推力低減基準を作る事とした。

泥濃式ではボイドに充填する加泥材に目詰め材を混入するが、同様な方法を泥水式に適用すると排土分級に支障が生じる。泥水式のボイド充填材では目詰め材が無い為、滑材の逸散が発生しやすく推力にも影響する。そこで、泥水式に T.B.K システムを併用する場合は、推力低減効果を泥濃式に比べ約半分の設定とし推力算出することとした。

また、岩盤掘削時の切り粉がボイドに堆積して推進管締め付けが発生し推力上昇する事例がある。この切り粉締め付けを回避するため、オーバーカット量は片側 32 mm と泥水式推進機としては大きめに設定し、T.B.K システムによる積極的な滑材充填によるボイド保持を図った。

③については、従来機の修正ジャッキ 510kN×2 本を 247kN×4 本とし、中折れ部を 2 箇所を増加した。推進機の折れ角は左右 1.2 度・上下 1.7 度から左右 2.4 度・上下 2.6 度と約 2 倍の折れ角とし、R=50m の曲線施工に必要な折れ角を確保した (図 7)。

## 5. 泥水式 K-1 の施工事例

現時点で泥水式 K-1 推進工法の施工実績は 3 件しかないが、そのうち岩盤と粘土の複合地盤を K-1 推進機と当社独自技術である AK-2000 の併用で克服した事例を紹介する。

< 工事概要 >

工事名称：小野田・宇部高压幹線 (宇-1-2 工区) 工事

発注者：山口合同ガス株式会社

工事場所：山口県宇部市大字東須恵字一ノ平田～三ノ平田

工期：平成 17 年 8 月～平成 18 年 1 月

推進管径：φ 800 mm

推進延長：L=96.2m

線形：直線

土被り：5.7～13.0m

土質：砂岩と粘土の複合地盤

< 課題 >

宇部興産専用道路下を推進して 500A の高压ガス管を埋設するという工事であり、途中での救援立坑設置は不可という条件であった (図 8)。

当初のボーリング調査では、地表部には粘土があり、推進深度では砂岩～礫岩を掘削対象としていた。岩盤強度の

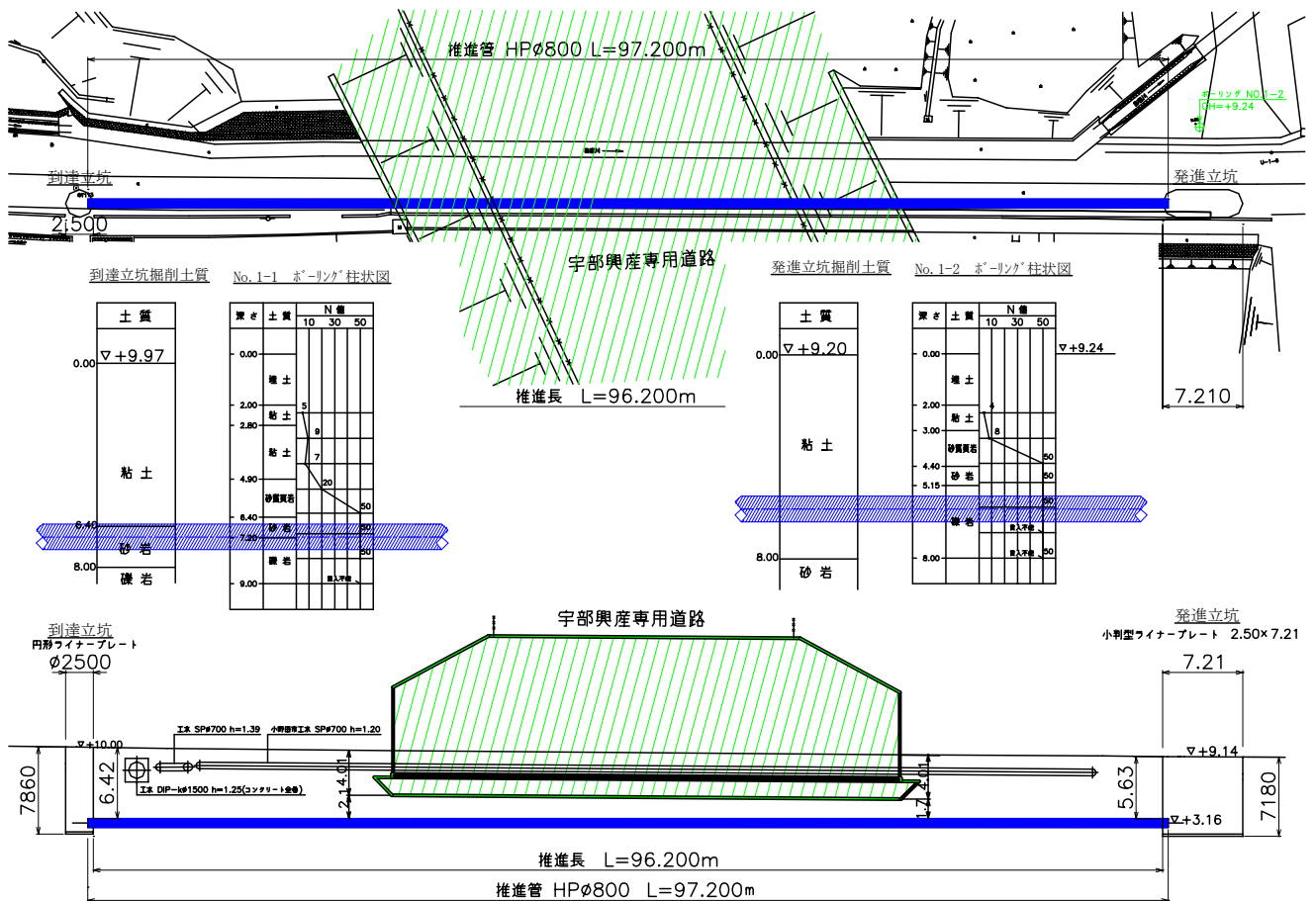


図 8 宇部 平面・縦断図

調査は行われていなかったが、礫岩の強度は 50MPa を超えることが予想された。そのため硬岩対応の泥水式推進機を計画していた。

ところが事前ボーリングから 5.0m 離れた位置で発達立坑を掘削すると、地表部の硬質粘土が推進深さまで堆積しており、事前ボーリング調査結果と大きく異なったことから推進深度や推進工法を見直すこととなった（写真 17）。

泥水式推進工法で粘土地盤を施工する場合は、粘土が掘削泥水に溶け込むため振動ふるいによる分級ができない。高濃度となった掘削泥水は粘性が上昇し、排泥ポンプが停止する原因となるため、その前に廃棄・交換しなくてはな



写真 16 宇部 工事場所全景



写真 17 宇部 粘土排出状況



写真 18 φ800 mm泥水式K-1 推進機

らず、地山粘土分の含有量に比例して廃棄泥水量が増加する。この産廃対策も含め工法検討を行った。

<対策>

周辺情報の収集では、この付近の開削工事でも岩盤が急遽出現する事例が多数あり、かなり層変わりする地盤と認識したため推進深度の変更は行わなかった。

推進工法の選択前に到達立坑を掘削すると、当初調査通りの岩盤であったので、岩盤の存在は確実と判断されたが、出現する硬質粘土の量は想定できない。岩盤と粘土の複合地盤を従来の岩盤推進機で掘進すると面盤開口部が粘土により閉塞し、掘削できなくなる。また、粘土掘削に適する泥濃度K-1 推進機でも硬岩出現の場合対応できない。

最終的に、宇部市内の一軸圧縮強度が 2~100MPa まで変化する岩盤を施工した実績があり、また面盤開口が粘土閉塞しにくい形状である泥水式K-1 推進機の適用を選択した。ただし、当現場の施工延長は 100m 未満の短いスパンで、ボイドの維持が容易な地盤であったので推力低減を目的とした T.B.K システムは省略した。

岩盤推進で重要なビットについては、既に 2 現場 200m を施工した K-1 推進機であったが、摩耗はほとんどしていないため交換せずに使用する事とした（写真 18）。

産廃対策としては当社の泥水クローズドシステムや濃縮式推進工法に使用される高性能分散剤 AK-2000 を適用した（写真 19）。

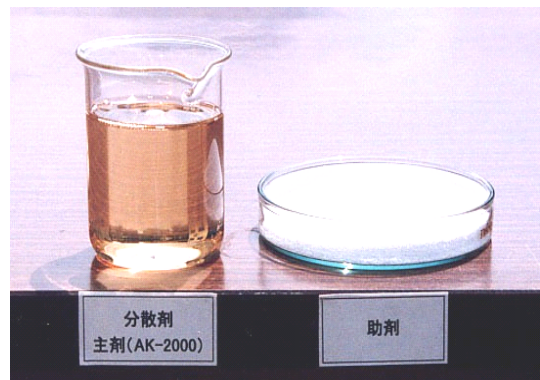


写真 19 AK-2000 と助剤

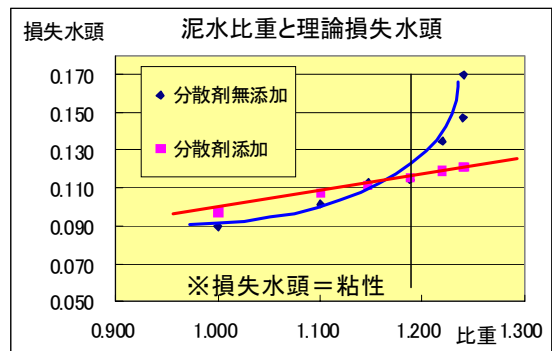


図 9 泥水の粘性特性

AK-2000 は当社と東亜合成が共同開発したもので、泥水の粘性上昇を抑制する働きがある。通常、泥水は図9に示すように比重  $\gamma = 1.20$  程度から急激に粘性が上昇する。このような性状に基づき、泥水式では  $\gamma = 1.15 \sim 1.20$  で泥水交換をする設定としている。しかし、AK-2000 を添加した泥水は粘性の上昇が  $\gamma = 1.20$  を超えても緩やかな直線状の上昇に留まり、濃縮式推進工法開発時の実験では  $\gamma = 1.40$  以上までの泥水還流を確認している。

つまり AK-2000 を掘削用泥水に適量添加することで、泥水の廃棄時の比重を従来の  $\gamma = 1.20$  から 1.40 に上昇できる。地山の粘土量が一定なので、水分が少なく粘土量を約 2 倍含む  $\gamma = 1.40$  の泥水を廃棄すれば、廃棄泥水量は約半分に削減する事ができる。

#### < 施工結果 >

この推進工事の対象地盤は、図 10 に示すように発達立坑付近の粘土からすぐに砂岩に変わり、その後粘土と砂岩の互層になるなど約 62% の区間で粘土が出現する結果であった。複合地盤対策を施している泥水式 K-1 推進機は粘土地盤では日進量の低下は見られたものの、面盤閉塞は発生せず、順調に到達する事ができた。到達時の推力は計画 1159kN に対し 800kN に収まった。

礫岩の出現は確認されなかったが、砂岩掘削によるビットの摩耗はほとんど見られなかった。過去の掘進速度実績から一軸圧縮強度は 50MPa 程度であったと類推される。今回の掘進により、岩盤強度は特定できないが、約 300m の岩盤をビット交換しないで連続施工した実績となった（写真 20）。

産廃削減については、余剰泥水削減率 53% の結果を得た。

AK-2000 の添加量は、掘削土の粒度分布試験等により掘削対象地山あたり  $2.0 \text{ kg/m}^3$  と決定した。現場での泥水管理は通常、泥水式と同様に泥水比重測定とファンネル粘度試験にて行った。

AK-2000 を添加しない泥水は粘土掘進中にファンネル粘度が 40 秒まで急激に上昇し、比重  $\gamma = 1.30$  で交換が必

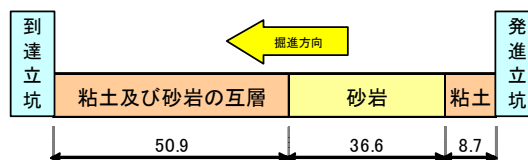


図 10 宇部 地質実績図

表 3 掘削可能な泥水の性状

	AK-2000 無添加時	AK-2000 添加時
比重	1.30	1.45
ファンネル粘度	40秒	30秒

表 4 粘土区間の推進速度

	AK-2000 無添加時	AK-2000 添加時
平均日進量	3.8m/8h	5.0m/8h
平均ジャッキスピード	7.8mm/分	10.5mm/分

表 5 AK-2000 使用区間の削減効果

	AK-2000 無添加時	AK-2000 添加時
泥水交換回数	23回	12回
余剰泥水発生量	117.1 $\text{m}^3$	61.9 $\text{m}^3$
余剰泥水低減率	53%	
コスト縮減率 (薬剤費含む)	64%	

要であった。通常、泥水交換目安比重は 1.20 だが、粘性が無く重い砂岩粒子が溶け込み 1.30 まで上昇したものである（表 3）。

AK-2000 を添加した泥水はファンネル粘度 30 秒程度にしか上昇せず、比重 1.45 まで掘削用泥水として使用可能であった。ただし、泥水の高濃度化に伴い、推進機のカッタートルクやジャッキスピードは低下する傾向が見られた。このため泥水交換の目安は比重や粘性ではなくジャッキスピードが 5 mm/分を切る段階と設定した。

泥水交換作業中は掘進することができないため日進量に影響を与えるが、AK-2000 の使用により泥水交換の回数が減少したことで結果的に日進量を 1.3 倍程度良化できた（表 4）。

AK-2000 を使用した 59.6m の区間で、使用しなかった場合を想定して産廃量とコストを比較した結果を表 5 に示す。産廃量は約 53%、薬剤費を加味したコストは 64% に低減した事となる。

#### < 考察 >

泥水式 K-1 推進機の開発目標通り、粘土と岩盤の複合地盤であっても面盤閉塞や切り粉の締め付けによるトラブルを発生させず到達可能であるということを確認した。

ビットの磨耗は、中硬岩の掘進ではほぼ無く、500m 級の長距離施工に対して可能性を示した。



写真 20 到達後の泥水式 K-1 推進機

推力は計画以内で収まっているが、このような地盤で推進延長が 150m 以上に増加する、あるいは曲線施工をするとなれば T.B.K システムは必要になると考えられる。

産廃削減は K-1 推進機の範疇ではないが、当社技術の AK-2000 を併用することで約半分に削減可能であり、工程短縮にも寄与することを確認した。

## 6. おわりに

K-1 推進工法の概要と施工事例を紹介した。破碎型泥濃式 K-1 推進機の掘削能力・複合地盤適応能力は開発目標を上回る成果を上げていると自負している。泥水式はまだ実績が少なく評価するのは時期尚早であると考え、推力やビットの摩耗などは長距離施工に期待が持てる傾向を見せている。

泥水式推進では、当社技術の AK-2000 と組み合わせることで産廃削減が可能となることを確認した。

巨礫地盤など難易度の高い推進工事では現在でも様々なトラブルで推進不能に陥り、救援立坑が必要とされることが多い。巨礫地盤の施工歩掛の標準化を目指し（社）日本下水道管渠推進技術協会が幾つかの工法協会にアンケート

を実施したが、工法による差異が大きく、土質区分と推進機口径で日進量を一律標準化することは現状では困難であると発表されている<sup>3)</sup>。その中で K-1 推進工法は全ての現場で確実に到達しており、工法指定されるまで信頼を得るようになっている。

最後に、ここに紹介した K-1 推進工法の施工に御理解・御協力を頂いた発注者および関係各位の皆様にはここに改めて謝意を表するとともに、K-1 推進工法への御期待に応えるため、技術向上への努力・研鑽に邁進する所存であります。

### 参考文献

- 1) (社)日本下水道協会：中大口径推進工法の分類 下水道推進工法の指針と解説 2003 年版、p.52、2004.3
- 2) 林茂郎：K-1 推進工法の進化と施工事例 新しい領域を切り開く推進工法最新技術、(有)日本プロジェクト・リサーチ講演テキスト、pp.42-69、2005.7
- 3) 濱田和人：中大口径管推進工法設計積算要領改訂のポイント、月刊推進技術、2006 年 3 月号、Vol.20、No.3、pp.53-58、2006.3