

高透水性砂礫地盤における密閉型矩形推進機による洞道構築

—中部電力・楠共同溝取付洞道工事—

名和 芳久・牛場 修・森下 公司

中部電力株式会社は、名古屋市内の電力需要増加ならびに供給信頼度向上に対処するため、「東・西・南・北」の拠点変電所から275kV地中送電線市内導入を計画的、段階的に実施している。楠共同溝取付洞道は北ルートの一部に当たり、延長275m、矩形（内空高2.5m×幅2.0m）の洞道である。洞道建設ルートには水道管やガス管等の埋設物の他、国道や鉄道横断があることから、近接構造物への影響や経済性等を比較検討して延長の約70%を推進工法での施工とした。地質は透水性の極めて高い砂礫地盤であることから、推進機の構造面その他に十分な対策を施したうえで「矩形密閉型機械式推進工法」を選択した。施工実績としては、総推力が想定値を大幅に下回る良好な結果が得られ、品質面においても上下、左右の推進誤差が15mm以内の高精度掘進で貫通した。

キーワード：高透水性砂礫層、矩形推進、加泥材、滑材

1. はじめに

近年、土地利用の高度化による地下の輻輳に伴い、都市部におけるトンネルの施工条件がますます厳しいものとなってきている。一方で、非開削のトンネル築造技術は難条件を克服することによりめざましい技術革新を遂げてきた。

今回の施工現場は、国土交通省の国道302号楠味美共同溝と中部電力株式会社の既設洞道を結ぶ接続洞道で、「矩形密閉型機械式推進工法」を選択したが、透水性の極めて高い砂礫地盤での本工法による施工例が見当たらないため、推進機の構造検討を始めとする十分な対策を講じて施工に臨んだ。

2. 工事概要

施工を行った工事概要は次のとおりである。

- ・工事名：楠共同溝取付洞道新設
- ・工事場所：名古屋市北区五反田町～若鶴町
- ・発注者：中部電力株式会社
- ・施工者：鴻池・名工・トーエネック共同企業体

- ・工事内容：洞道総延長 $L=274.5\text{ m}$
 開削部 $L=86.7\text{ m}$
 推進部 $L=187.8\text{ m}$
 （側道部 $L=133.5\text{ m}$ ，横断部 $L=54.3\text{ m}$ ）

図-1に平面図を、図-2に縦断図を示す。
 工事は平成12年4月に着工し、側道部推進の

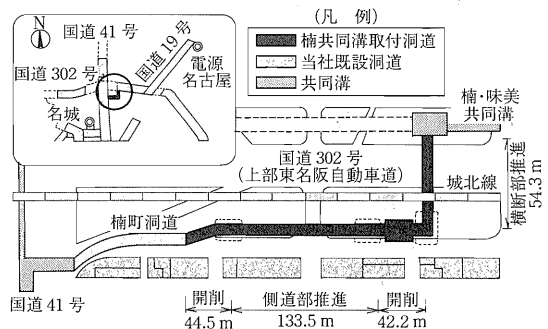


図-1 平面図

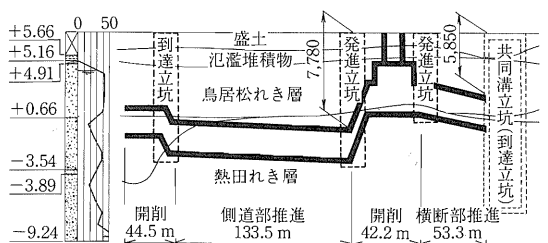


図-2 縦断図

発進を目前にして東海豪雨（平成12年9月）による被害から工程が2カ月遅延したが、平成12年11月に発進し、本年1月に到達した。

横断部推進については、本年3月に発進、4月に到達し、現在は東側の開削部を構築中である。なお推進機は、側道部の推進完了後、横断部に転用した。

3. 地質の概要

工事箇所の地盤構造は、上から順に盛土、沖積層、鳥居松礫層、熱田層である。地下水位は、GL-2.46 m～3.25 mの鳥居松礫層内にあり自由水面を形成している。側道部は熱田層上部層を、また横断部は鳥居松礫層を推進する。地質の概要を以下に述べる（図-2参照）。

① 鳥居松礫層：

鳥居松段丘面を形成する旧扇状地礫層で、当地の北東1～2 kmで地下に没し、沖積層下に広く分布する。名古屋市域では第一礫層と呼ばれる。透水係数は、 $1.4 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ である。

② 熱田層上部層：

熱田台地や守山台地を形成する地層で、平野下にも広く分布する。上部層は浮石や火山灰を含む砂層が主体となるが、当地付近では礫が優勢で、上面と下面に砂質土が付随している。透水係数は $8.6 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。

4. 施工計画

(1) 推進機的设计

(a) 推進機の形式選定

- ① 本工事推進部の地質は、平均 N 値 40 程度の比較的密な砂礫層である。
- ② シールド工事で安定した施工ができる判定のパラメータとなる細粒分の含有量が5.0～8.0%と低く、また透水係数が高い地盤状況である。
- ③ 周辺地域は都市開発が進み、種々の構造物が建造されており、その施工過程において原地盤の乱れ、あるいはゆるみが生じている可能性がある。
- ④ 矩形大断面であり、地山の自立は期待でき

ない。また中距離推進工事である。

上記の条件より、選定する推進機の形式としては、密閉型の泥水式と土圧式が考えられるが、砂礫および玉石層での安定施工が期待できる泥土圧式とした（写真-1、図-3、表-1参照）。

(b) 掘進機構

一般的なシールド工法では、フード前面に切削機構を配置し地山を強制的に切崩し、オーバカットすることでフードに直接荷重がかからない方法

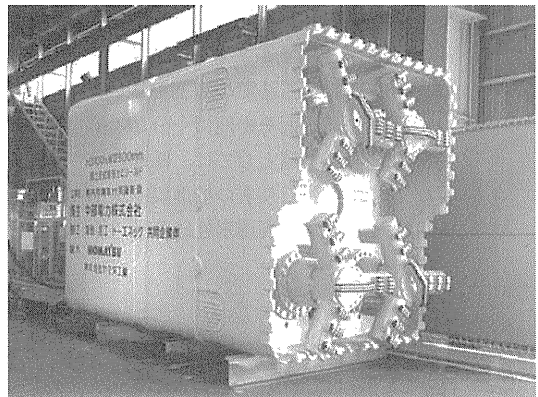


写真-1 推進機

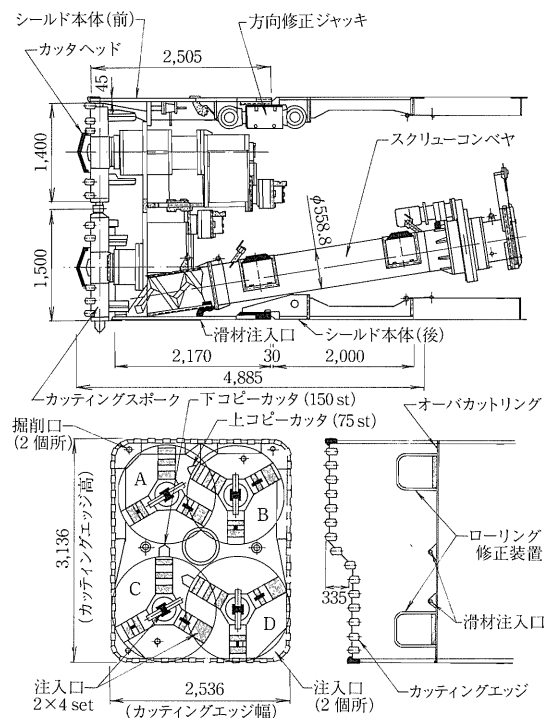


図-3 推進機構造図

表—1 主要諸元

推進機総質量	約80 t
方向修正ジャッキ総押力	11,760 kN(1,470 kN×8本)
中折れ角度	上下・左右1.5度
カッタヘッドトルク	常用 72.8 kNm 最大 83.3 kNm
カッタヘッド回転数	常用 2.5 rpm 最大トルク時 2.18 rpm
コピーカッタ仕様	上：170 kN×75 st×各1基 下：170 kN×150 st×各1基
開口率	73%
スクリュウ羽径×ピッチ×全長	φ515 mm×P 500 mm×5,345 mm
スクリュウコンベヤ回転トルク	26.2 kNm
スクリュウコンベヤ回転数	最大 5.6 rpm
スクリュウコンベヤ排土量	最大 30 m ³ /h

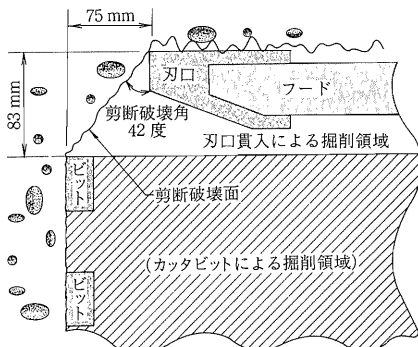
を採っている。

地山の細粒分が十分で地山が自立する地盤の場合は、フードの前面先行掘削を行っても問題の発生は少ないが、本工事地盤は細粒分が8%以下であるので、切削面周辺がゆるみやすく崩壊する可能性が高い。また、切削土量よりスクリュウコンベヤによる排土量が大きくなりすぎると、チャンバ内が負圧となり上部から全体に空隙が進行し土砂の取込みすぎに至り、地山崩壊につながる。

以上の検討を基本として、フード先端に刃口を取付けた構造とし、上半断面は刃口貫入によるせん断とビットによる前面切削の併用、下半断面はビットによる前面切削の機構とした。

(i) 刃口の貫入試験

地山に刃口を強制的に貫入するための荷重は、貫入量に従って増加する。しかし、図—4のように、刃口より地山のせん断抵抗角以上に先行掘削がある場合、刃口貫入は容易になりその圧入荷重も減少する。



図—4 ビットの配置

実験では、地盤の水平載荷試験による変形係数の約1/10以下の荷重で刃口貫入が可能となった。

(ii) 刃口による礫破碎試験

フード先端に取付けた刃口の礫破碎可否を確認した。その考察を以下に示す。

- ① 最大礫径（長辺）350 mm に対し、一軸圧縮強度 160~200 MN/m² 程度であれば、刃口による破碎荷重は 300~600 kN であり、破碎は可能と判断した。
- ② 破碎時の刃口の損耗は、先端部に 1~2 mm の局所的なへたりはあるが、有害な変形、亀裂はなく、材質は S45C 相当で強度上は問題ないと判断した（写真—2 参照）。



写真—2 礫破碎試験

以上の考察は、礫周辺のマトリックスが緻密で支持反力が十分得られる場合であり、実掘進での礫の挙動は、以下のとおりと推察した。

- ① 刃口が礫に接触し、礫は地山内に一旦、押し戻される。
- ② 周辺のマトリックス部が局部的に緩み、礫は緩んだ地山内を移動する。
- ③ 礫がマトリックスとともにフード内面側に向かって移動すれば、地山から掘起こされチャンバ内に取り込まれる。
- ④ 礫がフード外面側に向かって移動すれば礫は地山に押し戻され周辺のマトリックス部の再移動を伴い、フード外面に押しのけられ、チャンバ内には取込まれない。
- ⑤ 礫の出現頻度が高く上述の④が頻繁に生じた場合は、礫が周囲の礫と直接接触し、支持反力が得られるようになり、刃口による礫破碎が生じる

(iii) カuttingエッジとビットの配置

前項(i)の検討より、フードは切羽上部の地山崩壊を防止するとともに地山の余分な取込みをしないよう、上半断面を335mm前方に出した構造とし、ビットの配置を以下のとおりとした。

- ① スポーク先端のビットは刃口のカッティングエッジ先端より75mm前方に取付ける。
- ② スポーク先端のビットは刃口外側より83mmマシン中心側に取付ける。

(c) 切削機構

駆動は回転式で、駆動軸は未掘削領域を少なくするため4軸とした。駆動部の支持は過去に問題の少ないセンタ支持機構とした。また、偶角部の切削ができるよう、角度別にストローク制御が可能な油圧コピーカッタを各駆動軸のカッティングスポーク毎に1箇所装備(写真-3参照)し、未掘削領域を掘削断面の15%以下まで減少させる機構とした。

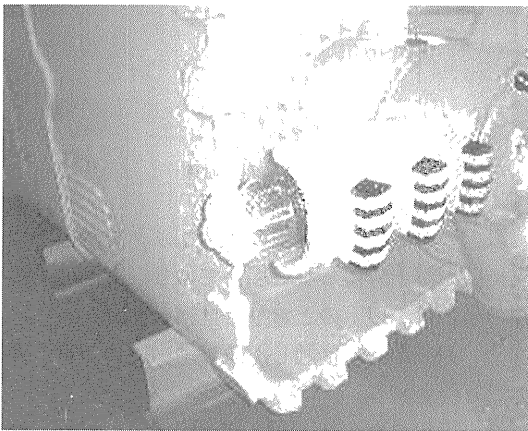


写真-3 下部コピーカッタ

以下に推進機の仕様を述べる。

- ① カッティングスポークは、構造がシンプルで故障が少なく、切削土と加泥材の混合単位面積を小割りにして加泥混合効果を高めるため3本スポークとした。
- ② ビットは礫の切削を考慮してシェル型ビットとし、材質は超硬チップE5相当とした。
- ③ カッティングエッジは100mm間隔とし、材質はS45C相当とした。
- ④ 上部のA, Bカッタは $\phi=1,400$ mmとし、カッティングエッジ内部を切削する。未掘削

領域を少なくするためコピーカッタ(ストローク75mm)を装備した。

- ⑤ 下部のC, Dカッタは $\phi=1,500$ mmとし、推進荷重が掛かりやすいことから、刃口貫入抵抗を軽減するためカッティングエッジ外周まで切削する。未掘削領域を少なくするためコピーカッタ(ストローク150mm)を装備した。
- ⑥ 加泥材注入口は、切羽先端での攪拌効果を高め切羽の安定を図るため、スポークセンターとスポークの先端に設置した(2×4set)。また、混合攪拌効果の促進を図るため、スポーク背面に攪拌翼を設置した(2×4set)。
- ⑦ ボックス断面の四隅にR250mmのカーブをつけた。

(d) 駆動部の特徴

- ① 未掘削領域を極力低減するため、矩形断面に対してカッタヘッドを上下左右合計4基配置するとともに、4基ともコピーカッタを装備し、回転角度に応じて伸縮させる構造とした。

コピーカッタには、伸縮軌道に遅れ等を生じた場合に左右の隣り合うカッタヘッドと干渉しないよう、カッタヘッド回転を停止させるインタロックを装備した。

- ② カッタヘッドは、各々1基の油圧モータ駆動とした。カッタの回転半径に対して左右の軸間距離が小さいため、スポーク同士の干渉を避ける必要があり、このため左右の駆動部はアイドラギヤを介したギヤトレインで連結し同期回転させる構造とした。したがって、左右各カッタヘッドの回転方向はお互い逆方向となる。
- ③ 上下のカッタヘッドは軸間距離が大きいので配置上の干渉はないが、スポーク先端部で礫のはさみ込み等による回転ロックやオーバートルクを避けるため、上下のカッタ回転角度の位相ずれが生じた場合、位相の速い方のポンプ吐出量を低下させ、相互の位相ずれを $\pm 30^\circ$ に収まるよう位相制御する構造とした。位相ずれが $\pm 30^\circ$ を超えた場合にはカッタ回転を停止させるインタロックを装備した。

(e) オーバカット量

オーバカット量については、地山ゆるみ、推進力に相関関係がある。

本工事区域の地盤は砂礫層であるので、滑材(スラリー状)を注入するのに必要な空隙、滑材の残置効果が発揮できる空隙、ローリング抑制等方向修正のための空隙が必要である。

以上の検討より、オーバカット量の設定は、必要最小限とし、日本下水道協会規格で定められた推進函出来高許容値が±9 mmであることを参考に18 mmとした。

(f) スクリューコンベヤの設計

スクリュー設計に当たっては、国土交通省の楠立坑掘削時に出現した最大礫(礫径350 mm)の排出、地下水圧78 kPaの止水、噴発防止等の対策を組入れ、以下の設計とした。

- ① $\phi 350$ mmの礫をスムーズに排出するため、ケーシングの内径を $\phi 558.8$ mmとした(排出可能な礫は短径368 mm、長径450 mmとなる)。
- ② 巨礫を直接排出するためリボンスクリューとした。
- ③ リボンスクリューは9ピッチとした(1ピッチ当たり8.8 kPaの止水効果)。
- ④ スクリュー内での固化材注入口を2箇所設けた。

(g) 推進力の低減設計

周面抵抗力の低減対策としては、地山と推進函の空隙の保持が重要であるが、矩形掘削のためアーチ作用効果が期待できない。このため、切羽にできるだけ近い位置に上下左右計8箇所の一次滑材注入口を設けた。また、推進機の蛇行やローリングも推進力に大きな影響があるため、上下左右に最大1.5度まで屈曲できる方向修正用(ジャッキ1,470 kN×8本)の中折れ装置と、推進機の両側面上下2段にジャッキガイド板方式のローリング修正装置を装備した。

(2) 推進函の設計

推進函は、全函に上下左右4方向の二次滑材注入口を設け任意の場所で滑材の注入ができる設計とした。また、推進函の接合は埋込みカラーおよびダブルジョイント方式とした(写真-4参照)。

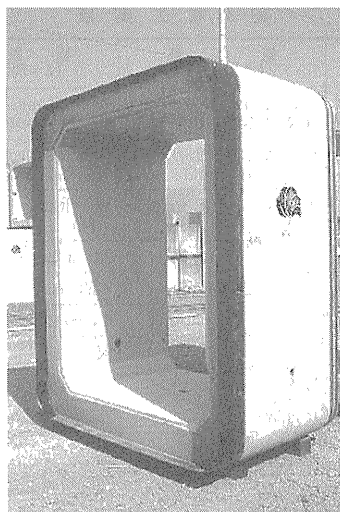


写真-4 推進函

(3) 必要推力の設計

必要推力は、下水道協会式(刃口式)修正式より側道部39,964 kN、横断部14,073 kNとした。

(4) 加泥材

加泥材は表-2の配合とし、使用量は掘削土量に対し30%注入を標準とした。排土のスランプ管理値は10~17 cmの範囲とした。

表-2 加泥材配合

高分子吸水材	高分子増粘材	水	練上り量	比重
3.4 kg	3.6 kg	994 L	1,000 L	1.0

(5) 滑材

滑材は、函外周における摩擦抵抗を減少させる目的で、推進機からの注入(一次注入)、推進函からの注入(二次注入)とした。

(6) 裏込め材

裏込め材は表-3の配合とした。

表-3 裏込め材配合

セメント	スーパーバック	水	練上り量
500 kg	100 kg	800 L	1,000 L

5. 施工実績

施工実績を表-4に示す。

表-4 施工実績

	側道部 (L=133.5 m)	横断部 (L=54.3 m)
地質	100~150 mm の礫が点在、比較的硬質の砂礫層	100~250 mm の礫が点在、比較的硬質の砂礫層
近接構造物	市道(如意第232号)、上水道、電力、ガス、通信	国道(302号)、鉄道、東名阪自動車道
管理土圧(MPa)	地下水頭+土圧+ α ($\alpha=0.02$)	地下水頭+土圧+ α ($\alpha=0.04$)
掘進平均速度	27 mm/分	23 mm/分
日平均施工量	2.95 m/日(昼のみ)	2.23 m/日(昼のみ)
最大日進量	4.5 m/日	4.5 m/日
実稼働日	51日	24日
平均礫率	17%	75%
排出最大礫径	150 mm	250 mm (写真-5 参照)

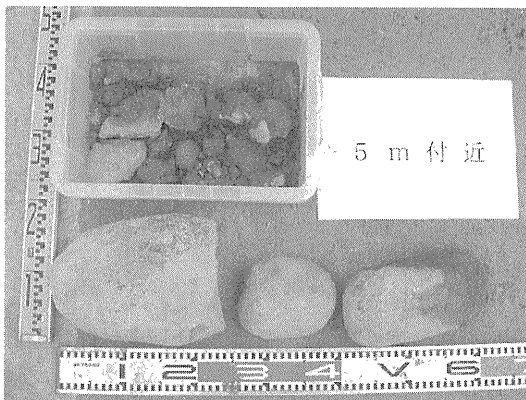


写真-5 排出最大礫径

(1) 切羽の管理

切羽は、掘削した土砂に加泥材を注入して練混ぜ、塑性流動性を有する土砂(泥土)に変換するとともに泥土圧で安定を図るものである。

実施工では、加泥材の練混ぜ状況が極めて良好で、チャンバ内、スクリュウコンベヤ内が塑性流動化された泥土で満たされ、連続的なマテリアルシールが形成された。したがってスムーズな作業が可能となり掘削土量と排土量のバランスが安定した。

(2) 推力

総推力の推移を図-5に示す。側道部での最大推力は推進距離100 m付近で発生、横断部は50 m付近で発生したが、想定値を大幅に下回る7,300 kN、9,000 kNであった。

総推力は、側道部では計画の約20%、横断部では約60%で元押しジャッキのみで施工できた。滑材の注入圧力管理は側道部・横断部とも0.08

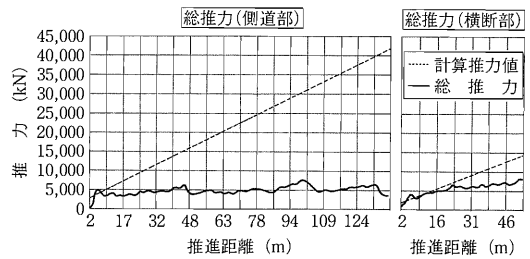


図-5 推力実績

MPaを目標で実施した結果、ボイド容積の2倍の量を注入した。

(3) 施工精度

図-6に推進管の出来形としての上下・左右の変位量を示す。

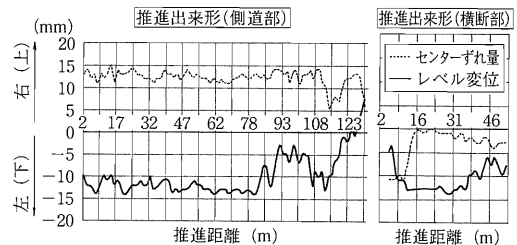


図-6 施工精度実績(変位量)

方向制御は、上下・左右とも15 mm以内で推進できており、設計に組み入れた中折れ機構による方向修正効果が確認できた。

図-7に推進機のローリングのデータを示す。

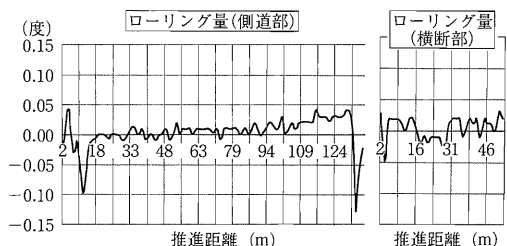
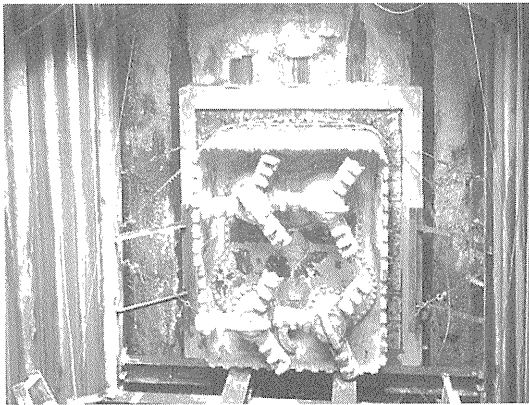


図-7 施工精度実績(ローリング量)

側道部においては、発進直後の推進機が立坑から土中に入った時点で0.1度近く傾斜したが、ローリング修正装置で修正し、その後は ± 0.04 度以内に収まった。横断部においても ± 0.05 度以内に収まり、設計に組み入れたローリング修正装置効果が確認できた(写真-6、写真-7参照)。



写真一六 側道部貫通状況



写真一七 側道部推進洞道内部

(4) カッタ回転方向毎の掘進実績





通常掘削は、表一五に示すパターン①で実施し順調に掘進できた。時々、礫率および礫径の大きな地層を掘削する際に、下部カッタヘッドトルクが上昇しオーバートルクによるインターロックが作動したが、パターン②（下部カッタヘッドの反転）で容易に解除することができた。

表一五に各掘削パターンの考察を述べる。

(5) 地盤の変状

推進箇所は土被りが浅く、上部に水道管、ガス管、電力管および鉄道高架基礎の接近、さらに過密通行量の国道があるため、施工には細心の注意を払った。その結果、推進機通過中、通過後も、地盤の変状は全くなかった。裏込め材注入量は、圧力管理で0.2 MPaを管理目標に実施した結果、ボイド容量の2.4倍の量を注入した。

表一五 掘削パターン考察

掘削パターン	考察
① 	通常時使用パターン。推進速度は平均30mm/分にて可能。礫が多い地層の掘削時、下部カッタヘッドトルクが上昇する。
② 	カッタヘッドトルクが上昇の傾向にあったので推進速度を下げ掘削を行った。このパターンはカッタヘッドトルクが上昇する際解除用に使用した。
③ 	トルク、推力ともパターン①と比較しても大きな変動は見られない。礫が多い地層の掘削時、上・下部カッタヘッドトルクが上昇する
④ 	カッタヘッドトルクが上昇し、このパターンの推進は不可能と判断した。

6. おわりに

今回実施した「矩形密閉型機械式推進工法（泥土加圧式）」は、全国的にも施工例が少なく、未経験な部分も多かったが、関係者の熱意と研究開発の成果が実り、無事貫通することができた。工事にあたりご協力を賜った関係官庁および地元関係の皆様、また、本報文の取りまとめにあたってご協力を賜った皆様に深く感謝の意を表する次第である。

J C M A

[筆者紹介]



名和 芳久(なわ よしひさ)
 中部電力株式会社
 基幹系統建設センター
 地中線工事課
 担当課長



牛場 修(うしば おさむ)
 鴻池・名工・トーエネック共同企業体
 所長



森下 公司(もりした こうじ)
 鴻池・名工・トーエネック共同企業体
 副所長