

巨礫，岩盤層における泥濃式破碎型推進工法を用いた急曲線施工およびその実態調査

松元 文彦¹・酒井 栄治²・森田 智³・島田 英樹⁴・松井 紀久男⁵

¹非会員 株式会社アルファシビルエンジニアリング 技術部 (〒812-0015 福岡市博多区山王1丁目1-18)
E-mail: arfa@oregano.ocn.ne.jp

²非会員 株式会社アルファシビルエンジニアリング 開発部 (〒812-0015 福岡市博多区山王1丁目1-18)

³非会員 株式会社アルファシビルエンジニアリング 技術部 (〒812-0015 福岡市博多区山王1丁目1-18)

⁴正会員 博士 (工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

⁵正会員 工学博士 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6丁目10番1号)

泥濃式推進工法は，管外周面抵抗値が小さいため長距離・急曲線推進に適用されることが多く，国内の厳しい施工環境によりその需要が拡大している．また現状では，これらの掘進技術を生かし，巨礫，岩盤層を対象とした地盤への適用性の拡大が図られている．しかしながら，巨礫，岩盤層における推進実績では，ビット，掘進機能力，施工技術等にバラツキがあり，系統的なデータの集積に乏しく，オペレーターの技量や経験ならびに切羽注材等に大きく左右されているのが実状である．

本報告では，泥濃式破碎型推進工法を用いた急曲線施工事例をもとに，ビットライフの実態や一軸圧縮強度と掘進速度の関係，管外周面抵抗値の実態等について報告する．

Key Words : pipe jacking-method, excavator with crushing cutter face, radical curve, rock layer

1. はじめに

泥濃式推進工法は，推進工法の中でも比較的新しい工法であり，1980年代後半から積極的に採用され始めた．また，その技術革新は目覚ましく，長距離，急曲線の推進現場への適用例が増大し，泥水式や泥土圧式工法に取って替わる新たな推進技術として注目を浴びてきた．

その背景として，泥濃式推進工法は，泥水式推進工法と泥土圧式推進工法の長所を活かしながら，推進工法の課題である切羽の安定性，推進力の低減に着目して開発された工法であることに起因していると考えられる．

今日，推進工法は沖積平野における堆積層の施工現場が減少し，山間部の洪積層に移行しつつあるが，このような地域においても，施工環境からの制限が多く，長距離，急曲線推進工事を余儀なくされている．

そこで本報告では，このような厳しい土質条件や路線条件に対応した施工事例として，破碎型掘進機を用いた急曲線推進の実態を確認し，これまでの施工事例との比較検証を行った．

2. 中硬岩急曲線推進の施工事例

(1) 施工概要および工事内容

本工事は，広島市の中心部から東部へ20km付近に位置し， $\Phi 800\text{mm}$ の鉄筋コンクリート管を途中 $R=22\text{m}$ の急曲線を含む $L=291.90\text{m}$ の区間を推進する工事である．対象土質は，広島花崗岩と呼ばれる塊状で中粒～粗粒の黒雲母花崗岩から構成されており，設計調査時の qu 値は最大で 92.1MPa を示していた．以下に工事内容を示す．

- ・工事名：飯田1号汚水幹線築造工事 (16-1)
- ・泥濃式推進工法 (超流バランスセミシールド工法)
- ・管径： $\Phi 800\text{mm}$ 推進管
- ・推進延長： $L=291.90\text{m}$ (1スパン)
- ・曲線半径： $R_1=65\text{m}$ ($IA=32^\circ 44' 38''$)
 $R_2=65\text{m}$ ($IA=16^\circ 11' 52''$)
 $R_3=22\text{m}$ ($IA=89^\circ 26' 03''$)
- ・縦断勾配：9.0‰ (下り)
- ・土質条件：花崗岩 $qu=92.1\text{MPa} \sim 44.6\text{MPa}$ (設計時)
- ・土被り：6.11m～5.60m程度
- ・地下水位：GL-1.50m

図-1に概略平面図・土質柱状図を示す．

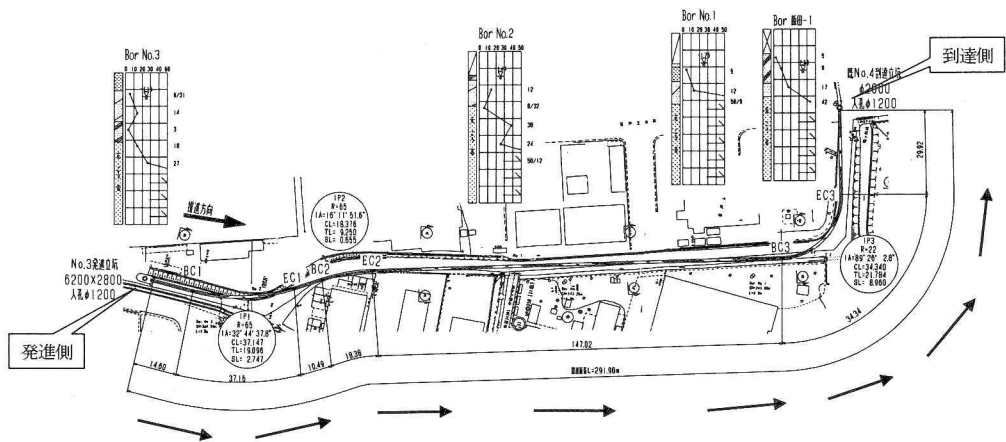


図-1 概略平面図・土質柱状図

このような岩盤層における推進工事の検討課題としては、①掘進対象区間の岩盤強度の再調査、②管外周面抵抗力の急激な上昇への対策、③岩盤特性を考慮した上での掘進機の急曲線造成能力と余掘り量の検討、④カッター・ビットライフの検討、⑤安定した掘進速度の確保等の検討が挙げられる。以下にこれらの検討課題についての対応策を述べる。

(2) 検討課題とその対応策

地下の非開削工事の詳細計画は、まず土質調査から開始されるが、事前調査ではサンプリング箇所や試料件数に制約を受けることが多い。その結果、掘進途中で予期せぬ土質の変化に遭遇して、推進不能に陥るケースも少なくない。したがって、今回のような岩盤層を評価する場合には、十分な岩盤強度や特性の再調査が重要となる。

そこで、調査箇所として発進立坑付近、到達立坑付近および掘進途中の排土岩片の破碎試験を行い岩盤を評価した。表-1に各地点の一軸圧縮強度、写真-1に排土された岩片の試験状況を示す。

一軸圧縮試験の結果は、最大値213MPa、最小値107MPaを示し、設計時の2倍の強度を有する硬岩で形成されていた。このような事例は、過去にも多く存在するが、実績の岩盤強度を精度良く把握するためには、サンプル数を増やす以外の方法はないと考える。したがって、推進不能による推進工事原価の増大を考えれば、事前調査の時間と費用を今まで以上に費やすことで、トータルコストの縮減につながると考えられる。

(3) 管外周面抵抗力の急激な上昇への対策

標準土質の掘進の場合、一般的には、地下水圧の状態にもよるがΦ800mmの標準取込型掘進機の前面抵抗値は、100kN程度以内と考えられる。しかし、岩盤層の掘進においては、標準型の2～4倍程度の切羽前面への押し付け

力が必要となるため、元押側の推進力と掘進機前方の抵抗力が相互作用し、両端支持となる場合が多い。このことにより、急曲線の推進時には管が側方に移動し、推進管外周面と掘削後の周辺地山との過度な接触が発生し、周辺摩擦力が上昇する傾向にあると考えられる。図-2にこのような状況下での概念図を示す。

このような現象は、一般的に考案されている元押推進力の算定のような管外周面抵抗予測値として想定されない場合が見受けられ、急激な推進力の上昇を招く結果となるため、岩盤層の掘進においては、掘進機の前面抵抗力の低減が重要な施工技術となることが理解できる。

表-1 一軸圧縮試験結果 (受注後の再調査結果)

コア番号	D(cm)	H(cm)	A(cm ²)	Pc(kg)	σ_c (MPa)
発進-1	2.49	5.36	4.87	5550	126.75
発進-2	2.50	5.40	4.91	4850	109.93
到達-1	4.45	8.99	15.55	33200	213.50
到達-2	2.44	2.27	4.68	1100	155.17
到達-3	2.48	4.99	4.83	8060	166.90
発進から95m地点	2.50	2.60	4.91	1050	123.19
発進から95m地点	2.44	2.85	4.66	950	107.18

D:供試体の直径, H:高さ, A:断面積, Pc:破壊荷重, σ_c :一軸圧縮強度

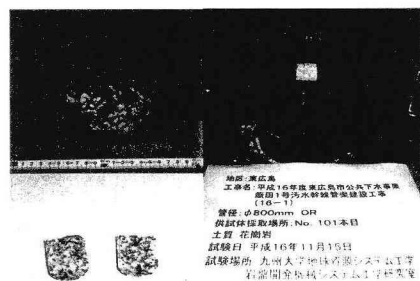


写真-1 排土された岩片の試験状況 (左上: 排土された岩片, 右: 一軸圧縮試験状況, 左下: 一軸圧縮試験後の岩片)

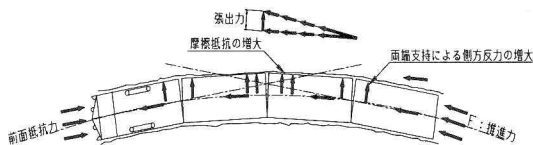


図-2 前面抵抗力の増大による曲線部側方反力の上昇概念図

前面抵抗力の低減方法としては、地山に適したローラービットの配置やチップの装着、ビット摩耗度の低減や掘削粉の流動性の確保のために切羽への高分子材の注入が必要であると考えられる。また、管外周面抵抗力の低減のためには、掘削破砕片をテールボイド部へ集積させない工夫が必要となる。その対策としては、TRS装置（テールボイド拉幅再構築装置）の装着による対策が効果的であると実績から判断されている。掘進機後続部に設置された回収型TRS装置を写真-2に示す。

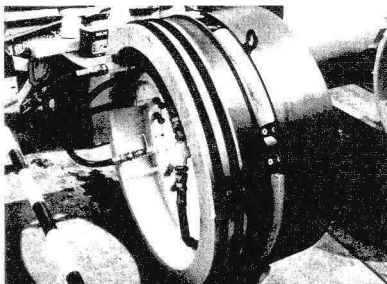


写真-2 回収型TRS装置

(4) 岩盤掘進機の急曲線造成能力と余掘り量の検討

一般的には、岩盤層の急曲線推進の場合、切羽抵抗が大きいため方向修正能力が不足し、操作性が悪くなる。また、4箇所設置した方向修正ジャッキに対しても、偏力が作用し、1箇所には負荷が集中するため、荷重分散が図りにくく、その結果、ジャッキのシールが破損しやすくなる。その対応策としては、1本当たりの方向修正ジャッキ能力を通常100kNから200kN（最大300kN）とすることで解消できる。また、曲線造成能力を向上させるために油圧中折装置を3箇所、機械中折装置を2箇所設置し、曲線半径9.2mの曲線能力を確保した。使用した掘進機の曲線シミュレーションを図-3、掘進機を写真-3に示す。

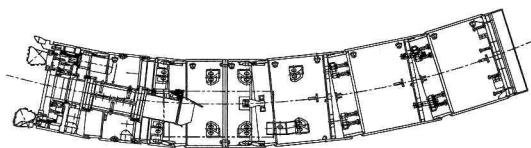


図-3 急曲線対応岩盤掘進機の曲線シミュレーション

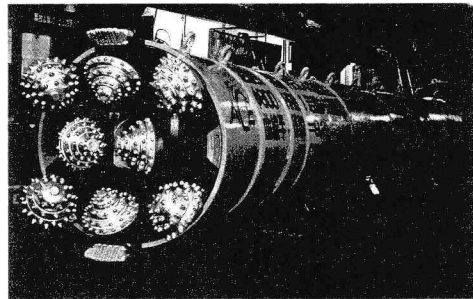


写真-3 急曲線対応岩盤掘進機

また、岩盤層の施工では、テールボイド部に破砕片が集積しやすいために、一般的な土質より余掘り量を増加させる必要がある。曲線半径22mの計算上の余掘り量は、4mm程度であるが、推進途中の掘進機のわずかな方向変位、精度管理上での一時的な曲線半径の変化、掘削時の地盤反力による掘進機側の変形等の影響が考えられる。このことにより、追従する推進管の通過を妨げ、管本体に作用する曲げモーメントの増大による管の胴割れも懸念される。このため、一般的な片側25mm程度の余掘り量では不足と判断し、片側40mmが適切であると判断した。

(5) カッタービットライフの検討

岩盤掘削時のローラービットの寿命（ビット交換距離）に関係する要因としては、チップ強度、チップ形状、チップ埋め込み数、ビット配置、ビット数、岩盤強度、岩盤硬度（モース硬度）、岩盤の節理や亀裂頻度、掘進機の回転数、掘進機カッターフェイスの形状、注入材の選定等が考えられる。しかしながら、このような要因との関連性に関しては、その評価は明確には公表されていない。そのために、継続的なデータの蓄積が最も重要となる。

ローラーカッターの有する固有の転動距離は、それぞれのチップの耐摩耗性から判定される。岩盤特性、搭載される掘進機構造や能力、施工法等により150km～450km程度とその範囲は大きい。特に、巨礫の場合は、カッター前面での玉石の移動が頻繁に起こるため、側方からの衝撃によりチップの欠損が生じやすく、転動距離は短くなると考えられる。泥濃式推進工法の場合、概ね350km程度が安全を考慮したビット摩耗限界と推定される。

超流バランス式掘進機におけるビット摩耗限界延長の算定式を以下に記す。

・掘削時間ライフ(h)

$$Lh = \frac{1000 \times \lambda}{2\pi \cdot rm \cdot n \cdot 60}$$

・掘削距離ライフ(m)

$$Lm = Lh \times V$$

λ : 転動距離 (km) 350km

rm : カッター回転平均半径(m) .. 0.422m

n : カッター回転数 (rpm) 5.25rpm

V : 平均掘進速度(m/h) 0.72m/h (12mm/min)

$$Lm = \frac{1000 \times 350}{2\pi \times 0.422 \times 5.25 \times 60} \times 0.72 = 301.7(m)$$

諸条件にもよるが、掘進速度12mm/min、一軸圧縮強度70MPa程度の中硬岩層を掘進する場合は、L≒300m~350m程度が許容推進延長となると考えられる。

(6) 安定した掘進速度の確保

推進工事における経済性は、掘進速度に一番の影響される。標準土質においては、これまでの実績の範囲からの判定が可能であるが、巨礫を含む地盤や岩盤での掘進は、他の要因も相まって計画時の進捗が確保できない場合が多い。したがって、このような地盤における推進施工においては、工事費が極端に上昇するリスクを抱えている。そのため、十分な地盤の調査とデータの蓄積が急務となっている。

泥濃式推進工法の場合、大きな排土口径を有したバルブが装備されており、2次破碎を必要としないため、小割りすることなく排土が可能となり、ビットの寿命が他の工法より長くなると考えられる。また、リアルタイムに排土性状を確認できる機構となっていることから、礫、岩片の直接排出が可能となり、事後処理とはなるものの様々なデータの蓄積が容易であるといえる。これまでの施工事例をもとに表-2に掘進速度と弾性波速度（P波）および一軸圧縮強度の関係を、表-3に巨礫地盤における礫径と掘進速度の関係を示す。

表-2 岩の一軸圧縮強度と弾性波速度および掘進速度の関係

管呼び径	土質	一軸圧縮強度	弾性波速度	平均掘進速度
Φ800mm	泥質片岩	99.59MPa	3.644km/sec	12.0mm/min
		244.11MPa	4.712km/sec	4.5mm/min
		227.43MPa	4.914km/sec	5.5mm/min
		248.50MPa	3.714km/sec	3.5mm/min
	花崗岩	138.30MPa	4.010km/sec	8.0mm/min
		57.80MPa	4.420km/sec	15.0mm/min
		207.27MPa	3.960km/sec	5.0mm/min
		155.82MPa	3.370km/sec	9.0mm/min
Φ1000mm	安山岩	195.26MPa	4.030km/sec	6.5mm/min
		84.00MPa	-	5.0~10.0mm/min
		50.00MPa	-	18.0mm/min
Φ1200mm	溶岩 変成岩	120.00MPa	-	6.0mm/min
		38.00MPa	-	18.0mm/min
		65.00MPa	-	12.0mm/min
		86.50MPa	-	9.0mm/min

表-3 巨礫地盤における礫径と掘進速度の関係

管呼び径	最大礫径	一軸圧縮強度	平均掘進速度
Φ700mm	400mm	-	25.0mm/min
Φ800mm	450mm	-	30.0mm/min
Φ800mm	600mm	-	20.0mm/min
Φ800mm	500mm	-	30.0mm/min
Φ1000mm	550mm	-	15.0mm/min
Φ1000mm	600mm	-	20.0mm/min
Φ1200mm	900mm	224.00MPa	10.0mm/min
Φ1350mm	600mm	-	30.0mm/min

表-2、表-3に示すとおり、岩盤層においては、一軸圧縮強度60MPa程度までは掘進速度15mm/min以上の確保が可能で、60MPa~100MPa程度になると9~12mm/min程度になる。また、それ以上の一軸圧縮強度では掘進速度が極端に低下する傾向にある。したがって、岩盤の一軸圧縮強度100MPa以上になる場合、掘進速度については、十分な注意が必要である。

掘進機外径の50%未満の巨礫地盤においては、20mm~30mm/minの掘進速度が確保されている。その背景としては、巨礫混入率にもよるが破碎効果として衝撃力や玉石同士の衝突による効果が大きいことが挙げられる。

3. 施工結果

(1) 元押推進力の実績

元押推進力の実績を図-4に、管外周面抵抗値の実績を図-5に示す。

計画元押推進力の結果は、計画値の管耐荷力の2,296kNに対し、F=1,833kNであり、推進軸方向に対する強度は許容範囲内であった。また、急曲線施工の場合、側方反力の増加に伴う曲げモーメントの発生が考えられ急曲線区間の管種の選定も必要となるが、今回の施工の場合、検討結果から全て1種管を採用すると判断された。しかし、巨礫、岩盤掘進の場合、管外周部に破砕片が楔状に集積し、管の破損が生じる恐れがあるため、曲線条件に関係なく、2種管の使用が望ましいとも考えられる。

施工の経緯としては、発進部から50m付近までの推進力は、350kN程度以下で推移した。その後、2曲線（R=65m+65m）通過後の80m付近では800kN~1,500kNと急激に上昇したものの、到達側の急曲線部（R=22m）については、極端な上昇は見られなかった。このことは、岩盤掘進における単曲線とS字曲線の特性の違いによる相違と考えられる。また、初期の曲線部通過時には、前面抵抗値が高くかつ両端支持となり、管外周面抵抗力が一時的に増大したが、到達側の曲線部通過時には推進力の伝達が順次スムーズに行われたため、極端な推進力の上昇に

はならなかったとも推測される。

(2) 掘進速度の実態

掘進速度等の関係を表-4に示す。なお、この表では推進延長を区切って掘進速度を比較した。岩盤強度は、設計時の調査および着手前の調査、推進途中の調査を含め8試料とした。この表より、前述の一軸圧縮強度と掘進速度の関係で述べたように、一軸圧縮強度が100MPaを超えたあたりから、極端に日進量が低下していることが顕著に認められる。また、実態の平均掘進速度は7mm/min程度と遅く、計画日数を60日程度超過して工事が完了した。

4. 掘進過程からの考察

岩盤層の中口径管（Φ800mm～Φ1,350mm）推進工事における現状の施工技術は、掘進機の構造や掘削能等に関係を抱え、施工の安定性に欠けている。特に未風化の花崗岩については、調査環境にもよるが、一軸圧縮強度が200MPaを超える事例が多い。また、花崗岩や片麻岩は石英や長石、黒雲母等を含み、ビット摩耗に著しく影響する鉱物から構成されている。そのため、標準土質の施工管理のように、切羽圧力、推進力、精度、取り込み量、地盤沈下、逸泥などのみに限定されず、岩盤層、巨礫層の管理は、ビット摩耗、掘進機駆動部とシール、推進管の局所的な破損、異常推進力などの追加要素を注意深く観察し、掘進との因果関係を追求する必要がある。

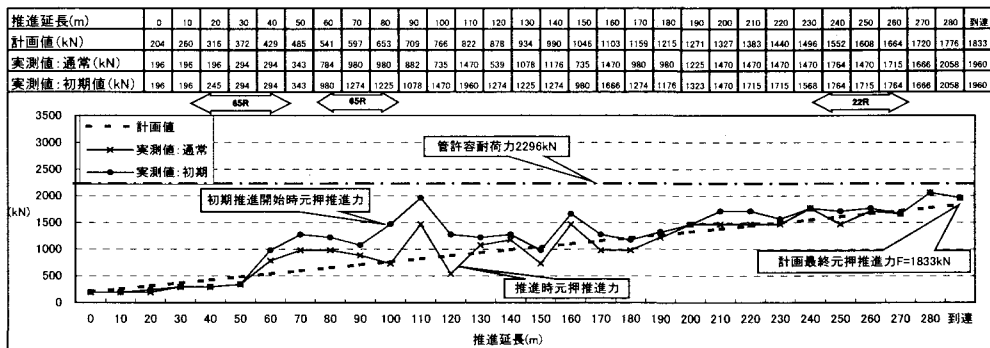


図-4 元押推進力図

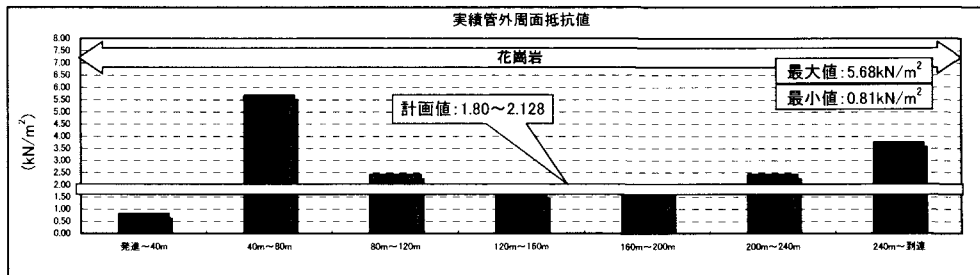


図-5 管外周面抵抗値図

表-4 掘進位置と岩盤強度および掘進速度の関係の実態

掘進区間	14.60m	37.15m	28.87m	147.02m	64.26m
掘進区間累計	14.60m	51.75m	80.62m	227.64m	291.90m
路線条件	初期直線	直線+ 曲線部①65R	曲線部②65R	直線区間	曲線部③22R+ 直線
岩盤性状	花崗岩と一部弱 風化花崗岩互層	花崗岩と一部弱 風化花崗岩互層	花崗岩 (地下水あり)	花崗岩	花崗岩
一軸圧縮強度(qu)	92.10MPa 126.75MPa -	- -	123.19MPa - -	44.60MPa 102.07MPa -	78.40MPa 155.10MPa 213.50MPa
掘進速度(mm/min)	23~15	25~8	6~3	8~3	3~4

本工区においても、到達手前7.0m付近で掘進機のカッターロックが頻繁に発生し、一時的に推進停止を余儀なくされた。その時点で、排土口からモニターカメラを挿入し、切羽の確認を行い、最外周のローラービット1個の脱落がカメラで確認できたが、脱落したビットの残骸はカッター室には存在しなかった。その後、安定したカッター回転に回復するまでには、7日間を要し、到達することができた。到達時のカッタービットの状況を写真-3に示す。

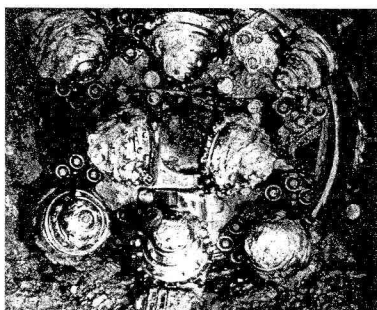


写真-3 到達状況（最外周ビットの脱落）

5. まとめ

現在、密閉型推進工法は、標準的な堆積土質から巨礫、岩盤層に移行し、さらに長距離、急曲線の複合した条件下での施工を強いられている。そこで、本報告ではこのような施工事例の一つとして、岩盤層における泥濃式破碎型推進工法を用いた急曲線施工の現状、岩盤強度

の評価、ビットライフの算定、推進力の低減を中心に種々検討した。

推進工法は、シールド工法とは異なり、工学的な検証に乏しく、巨礫、岩盤層における施工事例も少ないために、今後のデータの蓄積が望まれている。

推進力については、これまでの事例のとおりに、前面抵抗値を極力抑えることで、局所的な推進力の上昇を抑制できることが可能であることが分かった。ただし、S字曲線のような複合曲線については、単曲線のそれとは異なり、摩擦力の上昇が顕著であるため、今後さらに検証する必要がある。

また、ビットライフについては、掘進速度により大きく変化するため、今後も十分な実態調査を行い、岩盤の性質および強度別のデータ収集および分析を急ぐ必要がある。

今後は、このような課題を中心に、データの収集、検証を行い、巨礫、岩盤層における推進工法の設計活動の一助になればと考えている。

参考文献

- 1) 時枝直人, 酒井栄治: 超流セミシールド協会文献集, 2005.
- 2) 松元文彦, 酒井栄治, 島田英樹: 第 29 回推進工法最新技術, pp.22-41, 2005.
- 3) 勝沼清: 第 37 回特殊な条件下を掘る, pp.1-24, 1993.
- 4) 松元文彦, 酒井栄治: 岩盤・礫・玉石地盤推進技術の現状 (大口径管推進工法編), Vol.19, No.4, pp.11-17, 2005.

THE VIEW OF THE SHARP CURVED PIPE-JACKING WORKS IN THE GROUND COMPOSED BIG BOULDER AND ROCK LAYER USING DEYNO-PIPE- JACKING METHOD

Fumihiko MATSUMOTO, Eiji SAKAI, Tomo MORITA,
Hideki SHIMADA and Kikuo MATSUI

For the DEYNO-pipe-jacking method has the feature of low frictional forces out of pipes, it has dominated in the sharp curved line and long-distance pipe-jacking works for pipeline. Therefore the request has been expanding on working surroundings in Japan.

In present, this method has been applied for the ground of the big boulder and rock layer through the various pipelines. However we have little organized data on excavating of big boulder and rock layer, ability of machines, cutter-bits, the technology of pipe-jacking. As the result, those achievements have been subjected by the experience of operator or slurry material.

This report shows the actual conditions of cutter bit life, the relation of cutting speed and unconfined compressive strength and frictional forces out of pipes using DEYNO-crushing pipe jacking method.