

泥濃式破砕型掘進機を用いた 巨石・岩盤推進の現状

松元 文彦^{1*}・森田 智²・島田 英樹²・笹岡 孝司²・松井 紀久男²

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)

²九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

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

地下非開削工法の一つである推進工法は地盤への影響や周辺環境への影響の少なさなどから都市部を中心に多用されており、その中でも特に巨石・岩盤層を対象とした施工例が増加しつつある。このような地盤への対応として最も重要視されるローラカッタの寿命においては、許容推進延長やビット交換距離の指針を示すことが急務となっている。

そこで、本報告では推進工法の中でも地盤の安定性や周辺摩擦力の低減に定評がある泥濃式推進工法を用い、巨石・岩盤層での掘進速度やビット検証を中心に種々検討を行った。

Key Words : Pipe jacking method, excavator with crushing cutter face, big cobble layer, rock mass

1. はじめに

推進工法の中の一つである泥濃式推進工法は、掘削面と推進管の余掘り部に高粘性・高比重の高濃度泥水材や固結型滑材を加圧注入することで管外周面の摩擦力の低減を図り、長距離・急曲線推進を可能としてきた。そのため、周辺環境が厳しい都市部を中心として近年多く採用され、今では中大口径推進工法の中で60%近くのシェアを占めている¹⁾。

近年、推進工法は玉石砂礫層や岩盤層を含む土質への適用性の拡大が望まれていることから、泥濃式推進工法においても効果的な破砕メカニズムを有した掘進機の開発が必要とされている。しかしながら、その多くは事前調査のサンプリング数の少なさや不明瞭さなどから現場経験に頼っているのが現状で工学的な検証や実態の把握はまだ不十分と考えられる。

そこで本報告では、この泥濃式推進工法に着目し、過去の巨石・岩盤層を施工した事例を基に掘進速度やビット検証等について述べる。

2. 破砕型掘進機による破砕メカニズム

(1) 巨石・岩盤層での破砕型メカニズム

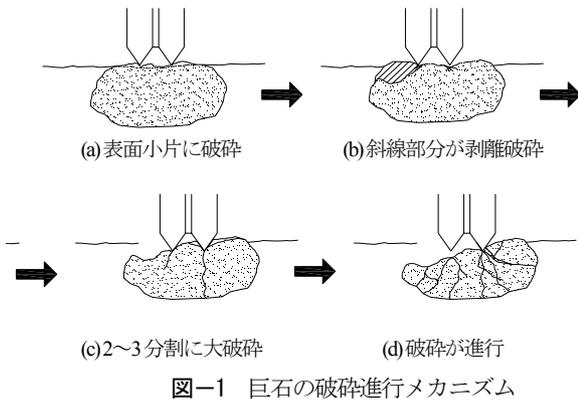
一般的な巨石・岩盤層での破砕のメカニズムは大別し

て以下の通りである²⁾。

- ・ 押付け力による破砕……ローラービット等を玉石や岩層に押し付ける事による破砕
- ・ 楔効果による破砕……岩部にディスクを押し付ける事で、楔効果にを利用した破砕
- ・ 表面剥離や小破砕チップングの繰り返し工程による破砕……玉石・岩盤の表面を小破砕の継続を行いながらクラックを促進させる破砕
- ・ 玉石・岩片の衝突破砕……カッター回転による切羽前面での破砕片や玉石の衝突を期待した破砕
- ・ カッター回転の衝撃力による破砕……カッターの回転力に伴う衝撃力による破砕

このような背景から、巨石等の破砕はせん断力と衝撃効果を組み合わせた破砕と考えることができる。

次に巨石の破砕メカニズムの概念図を図-1 に示す。この図に示すとおり、礫や岩の破砕パターンは①表面破砕から開始され、剥離は弱点部が中心にすべり状に破砕が進行する。②V字割裂が進行して大破砕に至る。③カッター回転による衝撃力や破砕片同士の衝突破砕が発生して大割される。これらの破砕メカニズムは、長い経験を有する TBM やシールド工法の実績から明確にされている。



(2) ローラービットによる礫破碎

プロトジャコノフの実験による礫の断面積と圧縮荷重の関係や「コマツ」が昭和52年、昭和58年の2回実施した礫破碎の実験結果²⁾を図-2に示す。この図に示すとおり、「コマツ」の実験式からはプロトジャコノフの実験式にみられるような礫の破碎断面積の増加と破碎荷重の比例関係とはならないことが分かる。この実験結果から破碎断面積が5倍となったときに必要な破碎荷重は2倍程度となっており、小さな圧碎力で破碎されることが分かっている。また、図-3に示すようにローラービットの礫破碎時の転動抵抗力(水平力)は垂直荷重の30%を示し、押し付け力よりかなり低い荷重で破碎に至ることが明らかになっている。

次に、と一軸圧縮強度とポイントロード指数を図-4に示す³⁾。この図に示すとおり、円柱状の岩石試料に対し、直角方向に60°の頂角と接触先端部を5mmの曲線半径の载荷球で加圧した場合、試料に対して効果的に引張応力が発生して比較的低い荷重で破断されるとの見解が示されている。この実験結果から効果的な破碎を行った場合には、岩盤は一般の一軸圧縮強度よりも極めて小さい荷重で破碎に至ることが確認されている。

さらに歯先の頂角に着目すると図-5に示すとおり、100°の頂角より70°と鋭角な頂角の方が切り込み量が深いことが分かる⁴⁾。以上のことからローラービットにおいては、60~70°の頂角を有した歯先が効果的であることが分かる。

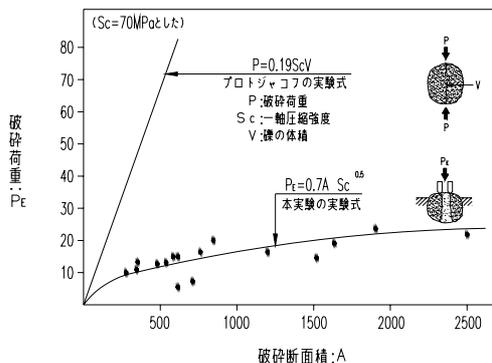


図-2 破碎断面積と破碎荷重の関係

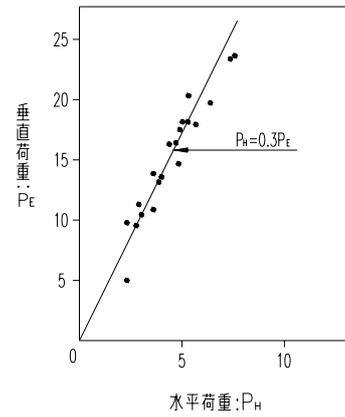


図-3 転動抵抗力(垂直・水平力)の関係

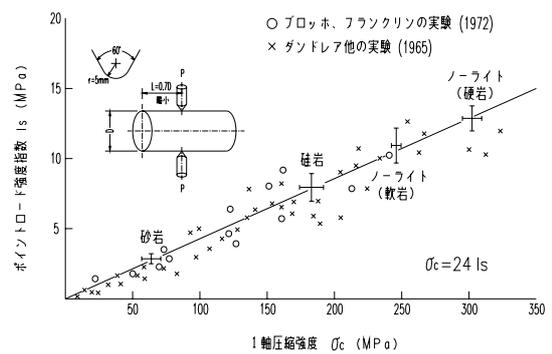


図-4 一軸圧縮強度とポイントロード指数の関係³⁾

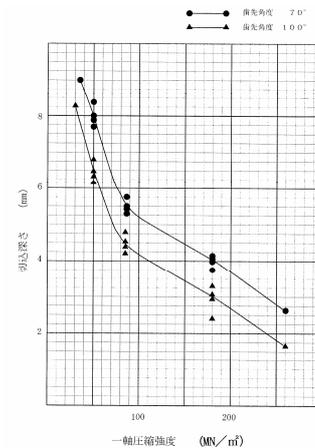


図-5 一軸圧縮強度と切り込み深さの関係⁴⁾

3. 破碎型カッターフェイスの形状別の掘進速度の実態

過去の実験において同一地盤における泥濃式破碎型掘進機のカッターフェイスの形状の違いによる掘進速度の調査を行った⁵⁾。対象掘進地盤は①コンクリート(一軸圧縮強度33.3MPa)、②コンクリート(一軸圧縮強度81.5MPa)、③巨石(φ700mm、一軸圧縮強度130MPa)の3パターンで実験を行った。使用した面盤フェイス型掘進機を写真-1に、ビット単体型掘進機を写真-2に示す。この写真に示すとおり、面盤フェイスの場合は、ビット

耐磨耗性を図る上でビット突出率，面盤開口率が小さく，ビット単体型は効果的な切り込み量を確保する上で逆にそれぞれ大きい形状となっている。

表-1に実験の結果を示す。この表に示すとおり，いずれの地盤においてもビット単体掘進機の掘進速度が1.5倍ほど速いことが分かる。このことは，突出率，開口率を大きくすることでローラービット全体が岩内に挿入され，効果的な破碎が可能となるが面盤型はビット突出率が30%程度しかないため，破碎効率が悪くなっていることに起因している。ただし，過去の経験から掘進機カッターフェイスの保護の観点からは面型の方が優位と考えられている。

表-1 破碎型カッターフェイスの形状の違いによる掘進記録

	面盤フェイス		ビット単体型	
	掘進速度 (mm/min)	カッターレ (A)	掘進速度 (mm/min)	カッターレ (A)
①コンクリート (qu=33.3MPa)	12	22	18	22
②コンクリート (qu=81.5MPa)	9	26	15	28
③巨石 (花崗岩qu=130MPa)	8	26	12	28



写真-1 面盤フェイス型：破碎型掘進機

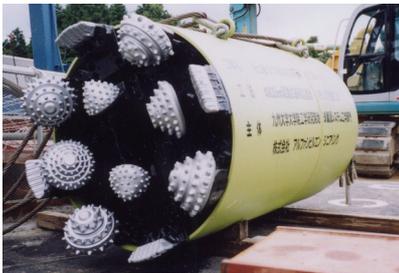


写真-2 ビット単体型：破碎型掘進機

4. 破碎型掘進機による掘進記録の実態

推進工事における経済性は，掘進速度に一番影響される。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⁹⁾。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基に表-2に岩盤層における掘進速度と一軸圧縮強度の関係を，表-3に巨石層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掘進速度の関係

管呼び径	土質	一軸圧縮強度	平均掘進速度
Φ800mm	泥質片岩	99.59MPa	12.0mm/min
		244.11MPa	4.5mm/min
		227.43MPa	5.5mm/min
		248.50MPa	3.5mm/min
	花崗岩	138.30MPa	8.0mm/min
		57.80MPa	15.0mm/min
		207.27MPa	5.0mm/min
		155.82MPa	9.0mm/min
		195.26MPa	6.5mm/min
	砂岩，頁岩	84.00MPa	50~100mm/min
花崗岩		155.00MPa	2.0mm/min
Φ1000mm	安山岩	50.00MPa	18.0mm/min
		120.00MPa	6.0mm/min
Φ1100mm	砂岩，頁岩	99.00MPa	50~100mm/min
Φ1200mm	溶岩 変成岩	38.00MPa	18.0mm/min
		65.00MPa	12.0mm/min
		86.50MPa	9.0mm/min

表-3 巨石層における礫径と掘進速度の関係

管呼び径	最大礫径	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
Φ800mm	750mm	3.0mm/min
Φ1000mm	550mm	15.0mm/min
Φ1000mm	600mm	20.0mm/min
Φ1200mm	900mm	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，一軸圧縮強度が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。これは地盤の強度に対して十分な押付け力を確保できにくいためだといえる。したがって，岩盤の一軸圧縮強度が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%未満の巨石層については，20mm~

30mm/minの掘進速度が確保されている。その背景としては、巨石混入率にもよるが破碎効果として衝撃力や玉石同士との衝突による効果が大きいことが挙げられる。

5. カッタービットライフの算定式

昨今、硬質地盤の施工事例が急増していることから、ローラカッターの耐久度の算定式が公表⁹⁾されており、一般的に転送距離は350km程度と推定されている。しかしながら、過去の数多くの実績から150km～450kmと大きく変動すると報告されているため、工法の特性や機構を十分に考慮した転送距離の設定が必要となる。泥濃式推進工法である超流バランスセミシールド工法の場合、過去の事例から転送距離を平均的な350kmと設定している⁷⁾。式(1a)、式(1b)にビットライフの算定式を示す。

・掘削時間ライフ(h)

$$Lh = \frac{1000 \times \lambda}{2\pi \cdot rm \cdot n \cdot 60} \quad (1a)$$

・掘削距離ライフ(m)

$$Lm = Lh \times V \quad (1b)$$

λ : 転送(転動)距離(km) 350km
 rm : 最外周ビット回転平均半径(m)
 n : カッター回転数(rpm)
 V : 平均掘進速度(m/h)

6. まとめ

本報告では、昨今、推進工事に要求されつつある巨石・岩盤層の施工について、カッタービットやカッター形状の違いによる一軸圧縮強度の関係や掘進速度の関係

などを調査し種々の考察を加えた。

これらの調査の結果、ローラカッターの転送距離として現時点では概ね350kmと推定される。しかしながら、カッタービットライフを算定する上で必要となる掘進速度については、その傾向は把握したものの不明瞭な部分も多いため、今後もさらなる調査が必要である。また、設計段階における判断基準の重要な要素である一軸圧縮強度については、限られたボーリング調査だけを頼りに施工検討しなければならず、想定外の土質に遭遇する可能性が非常に高いため、余裕を持ったビットライフの検討やより効果的で耐久性の向上を図った掘進機の開発が必要となる。そこで、今後も妥当性の確認と検討を十分に行っていく必要がある。

謝辞：今回の施工事例に関係する発注者、元請各社をはじめ、関係者の皆様方に多大なご指導やご協力を頂いたことを誌面を借りて心から感謝する。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道管渠推進技術協会調べ、2008.
- 2) 勝沼清：第37回「特殊な条件下を…掘る」pp.1～2、日本プロジェクトリサーチ、1993.
- 3) 鈴木光：岩盤の計測と解析、pp.33～36、土木工学社、1982.
- 4) 推進工法用設計積算要領「泥濃式推進工法編」pp.226、社団法人日本下水道管渠推進技術協会、2006.
- 5) 酒井栄治、森田智、島田英樹、松井紀久男：第33回岩盤力学に関するシンポジウム pp.391～396、社団法人土木学会、2004.
- 6) 松元文彦、森田智、島田英樹：第31回「厳しさへの対応」pp.30、日本プロジェクトリサーチ、2007.
- 7) 酒井栄治、時枝直人：泥濃式推進工法「超流バランスセミシールド工法」設計指針積算要領 平成18年度改訂版 超流セミシールド協会、2006.

THE SITUATION OF USING DEYNO-CRUSHING PIPE JACKING MACHINE IN THE BIG GRAVEL AND ROCK LAYER

Fumihiko MATSUMOTO, Tomo MORITA,
Hideki SHIMADA, Takashi SASAOKA, Kikuo MATSUI

The pipe jacking method influence to ground is little, it is adopted to be many and so on from including the urban area. The operation example which deals with especially big gravel and rock layer are increasing. Index of allowance jacking distance cutter bit exchange distance has become urgent in the life of the roller cutter which most is attached importance as a correspondence to this kind of ground.

Because of that, at big gravel and rock layer focusing on the jacking speed and bit verification examinations it did in this report making use of DEYNO pipe jacking method which has established reputation in stability of ground and lowness of frictional forces on pipeline in pipe jacking method.