

総論

岩盤・玉石地盤への 各部門(設計・施工・メーカー等)の 一体的な対応



なかの まさあき
中野 正明
機動建設工業(株)
代表取締役

1 はじめに

推進工法における技術困難な地盤（難敵地盤）といえば、その初期段階（刃口式推進全盛期）においては切羽の崩壊や湧水が発生する軟弱地盤や帯水砂層でしたが、機械式推進工法主流の近代では掘進に高度な技術を要する硬質な岩盤層や玉石地盤が技術困難な地盤となっています。特に山岳地でのパイプラインや導水管の敷設工事、かつて氾濫を繰り返した河川付近の雨水管整備工事などにおいて、このような難敵地盤が出現して施工トラブルになるケースがあります。

同じ難敵地盤でも岩盤と玉石地盤ではその課題が異なり、また工法別（泥水式、土圧式、泥濃式）でも異なった課題がありますので、その対応方法もケースバイケースで行わなければなりません。また、他の地盤における

施工と同様にこの難敵地盤でも長距離施工や曲線施工が求められるケースもあり、ますます緻密な対応が要求されます。

本稿ではこの難敵地盤に対して、それぞれの課題や対応方法の概要を筆者の経験と知識のみで記述しますので、読者の知識と経験も考慮して読み進めていただきますようお願いいたします。

2 岩盤推進工の課題

岩盤における推進工は切羽崩壊の危険が少ないため、かつては刃口式推進工法で行うのが主流で、中硬岩の場合は山岳隧道と同じく削岩機や発破などを用いて切羽の破碎を行った例があります。しかし近年は人力施工による効率の悪さ、切羽作業員の高齢化、作業の危険性、亀裂および水脈に遭遇した時の安全確保などの観点から、機械式密閉型の掘進機を用いて施工するのが主流になっています。

岩盤推進における課題としては強度の高い岩盤を掘削するための掘進機の回転トルク、全断面切削が可能な特殊面板、ビットの摩耗に対する想定とその交換方法などが考えられます（写真-1）。また長距離施工においては、岩盤の切削屑（削り粉）がテールポイドに沈殿、固結することによる推進力の増大などがあります。



写真-1 岩盤用掘進機

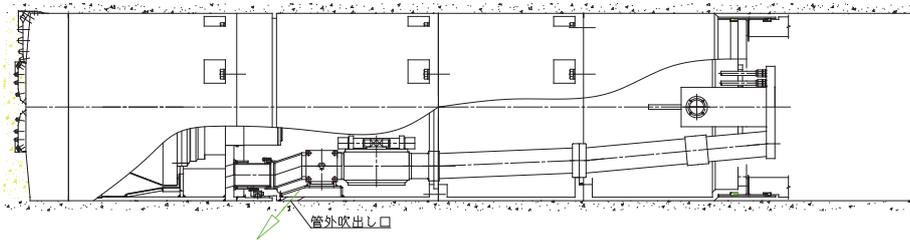


図-1 削り粉の沈殿防止対策の管外吹出し機構

2.1 掘進機のトルク

強度の高い岩盤を切削するためには普通土を掘削する場合より大きな回転トルクが必要であることは当然ですが、あまり大きすぎると、その反力を掘進機や推進管の外周摩擦から得ることができず、ローリングが頻発します。普通土の掘削に必要な掘進機のトルクは工法別で異なりますが、トルク係数 ($a = \text{トルク} \div \text{掘削外周径} \times 3$) で10～20程度ですが、岩盤掘進機の場合はそれ以上の装備が望ましいと考えます。またトルクは少し小さくても回転数 (rpm) を多くして切削量を確保する考え方もあります。

2.2 特殊面板

岩盤推進工ではビットによる一次切削が全断面をカバーできなければ (切り残しがあれば)、面板の摩耗損傷や切羽前面の抵抗増大が生じて、最悪の場合掘進不能になります。一次切削は中硬岩の場合はローラビットで行いますので、その配置、個数、形状、材質などを面板形式とともに事前に検討しなければなりません (写真-2)。



写真-2 岩盤用特殊面板

2.3 ビットの摩耗

岩盤推進における課題のひとつはビットの摩耗ですが、摩耗量に関しては岩盤の強度や組成およびビットの材質や使用 (施工) 状況によって異なります。できるだけ摩耗させないようにするのが第一ですが、長距離施工や想定外の摩耗進行で推進途中でビットを交換しなければならない場合もあります。想定外の摩耗原因としては押し付け過ぎや粘性土の付着などによってローラがスムーズに回転しないための偏摩耗 (片減り) や岩盤強度や組成の変化による摩耗進行などがあります。それぞれ対応しなくてはなりません。想定外に摩耗してしまっただけでは掘進不能になりますので、安全を見込んだ摩耗量の想定と、それに合わせたビット交換の装備が必要です。

2.4 削り粉の沈殿

岩盤の切削屑 (削り粉) は中硬岩の場合微粉末となって還流する泥水や注入された添加材に溶け込み、テールボイドに残留して沈殿、固結する場合があります (図-1)。

岩盤の場合は掘削したトンネルはそのまま保持され、推進管は其中でスムーズに移動できると考えがちですが、長距離施工などで、この現象 (削り粉の沈殿) が顕著になると推進管の締め付けが発生して推進抵抗が増大し、大きなトラブルになることがあります。

3 玉石地盤推進工の課題

玉石地盤において推進工を行う場合、掘削方法は2種類に分かれます。ひとつは玉石をその大きさのまま、あるいはある程度の大きさに割って取り込む方法で、もうひとつは玉石を小さく砕いて取り込む方法です。前者は刃口式、土圧式、泥濃式の各工法で、後者は泥水式

です。それぞれに一長一短がありますので施工条件に応じて選択する必要があります（写真-3、4）。



写真-3 玉石用泥濃式掘進機

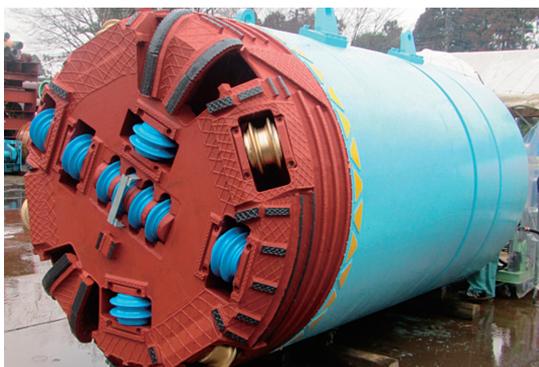


写真-4 玉石用泥水式掘進機

機械式密閉型の各工法で玉石地盤の推進を行う場合の課題としては、岩盤推進と同様に玉石を切削あるいは破碎するための掘進機の回転トルク、ビットの摩耗の想定と、それに対する交換機能があります。また玉石地盤固有の課題としては間隙の状況や透水係数に応じた切羽保持機構、外周付近に存在する玉石を切削するための特殊面板、掘進機通過後の玉石の転動による推進管の破損があります。

3.1 掘進機のトルク

前述したように玉石地盤の推進工においては面板ビットによる一次破碎（切削）のみの場合と、クラッシャによる二次破碎を併用する場合がありますが、いずれにしても普通土を掘削する場合より大きな回転トルクは必要です。各工法によって必要なトルクの考え方が異なりますが、一般的に特殊面板を装備する土圧式と泥濃式においては、チャンバに土圧を保持する必要があるため泥

水方式より前面への押し付力が大きく、より大きな回転トルクが必要です。

3.2 特殊面板

玉石地盤における特殊面板は岩盤の場合とは違って、一次破碎ビットが全断面をカバーする必要はありません。大きな玉石をある程度の大きさに破碎し、排泥ライン（排泥管、バルブ、排泥ポンプなど）およびスクリュコンベヤ、排泥管の通過粒径以下に制限されたスリットから取り込まれるようになればいいということです。

3.3 ビットの摩耗

玉石地盤におけるビットの摩耗は礫率、礫強度、組成およびビットの材質や寸法などによって異なりますし、また施工法によっても異なりますので、慎重な検討が必要です。最悪は交換の装備がない掘進機を使用して、想定外の摩耗が発生するケースです。また礫玉石地盤においては摩耗ではなく、玉石とビットの衝突によるビット（チップ）の欠けにも注意しなければなりません。

3.4 切羽保持

玉石地盤においては間隙が部分的に大きく、切羽の保持が困難な場合があります。透水性が高い（透水係数大きい）場合は泥水の還流が困難であるため、泥水式の施工は補助工法なしでの施工は不可ですので、他の工法（泥濃式または土圧式）を採用するか補助工法（薬液注入による間隙の充填）を併用します。

また、土圧式や泥濃式の場合でも玉石地盤においては削土の塑性流動化が困難であったり玉石の機内取り込み時に噴発したりすることがあるため注意が必要です。

3.5 玉石の転動

玉石地盤での推進の場合には掘進機通過後のテールボイド付近にある玉石の落ち込みや推進管の移動に伴ってともに移動しようとする現象によって、推進管と地山との間に噛み込むことがあります。噛み込んだ転石は推進摩擦により移動しようとするので、推進管外周と地山との間にクサビ効果を生じさせ、推進力の多大な増加となります（図-2）。また、噛み込んだ玉石によって推進管に集中荷重が加わってしまい内面にクラックや表面剥離が発生することがあります。特に外径の曲率が大きく管径に対して管厚の薄い大中口径管では応力集中によるコンクリートの部分破壊が懸念されます。

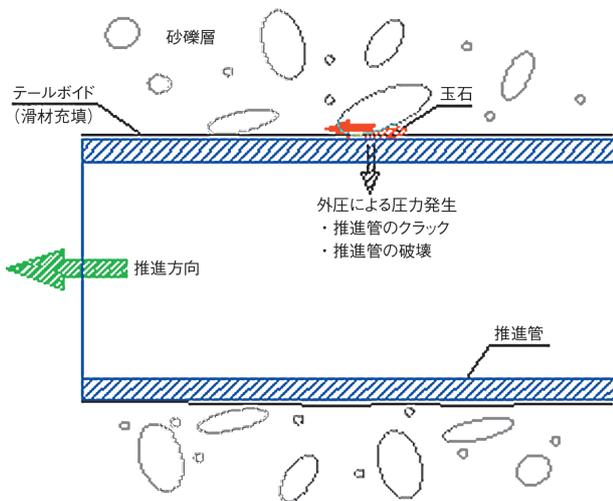


図-2 玉石の転動

4 岩盤での技術的対応

4.1 掘進機のトルク

岩盤を掘進するためには普通土用掘進機より大きなトルクが必要ですが、大きなトルクはその反力として掘進機のローリングを発生する要素になります。掘進機のローリングは排泥管のねじれ、機内ユニットなどの漏油、方向修正の困難などにつながりますので何らかの対策で防止しなければなりません。ローリングを防止する対策としては下記の事項が挙げられます

【ローリングインターロックの設置】

ある程度以上のローリングが起きればカッタの回転を自動停止する掘進機の装備ですが、岩盤推進の場合はカッタの回転が停止するとともに元押装置も、停止する元押インターロックも直列配置することが望ましいです。また、ローリングインターロックだけでは回転運動の慣性力によるローリングの進行や、頻繁に作動することで掘進困難になる場合があるため、根本的なローリング防止を併用する必要があります。

【掘進機と推進管の緊結】

掘進機本体のみの抵抗力では反力が得られない場合、掘進機と先頭から数本の推進管を緊結して反力を得る方法が一般的です。しかし岩盤の場合トンネルの孔壁が完全に保持されて推進管はトンネルの中で浮いたような

状態で移動するイメージですので、反力を確保するためには多くの推進管を緊結しなければならない場合があります。

【ローリング防止装置】

掘進機本体あるいは後方筒の外側部にローラを装備することで、前後進はスムーズに行いながらローリングに抵抗する装置です。ローラは適度な荷重で孔壁に押し付ける状態に張り出して推進し、必要なくなれば引き戻します(写真-5)。

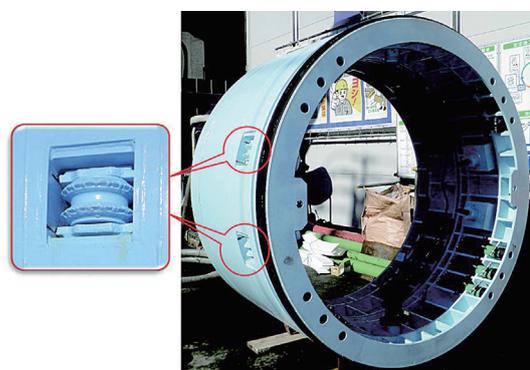


写真-5 ローリング防止筒

4.2 特殊面板

岩盤推進において全断面切削可能な特殊面板は必須ですが、面板形状はいくつか提案されています。大きく分けるとドーム型、セミドーム型、フラット型です。それぞれ特徴や意図がありますが、いずれにしても外周部まで完全な切削が行われ、削土がスムーズに取り込まれるとともに、摩耗が部分的に集中しない形状が望まれます。

また、泥岩、頁岩などの場合や粘性土の出現などによって削土が面板に付着して閉塞することがあります。そのような場合はスリットの形状を工夫したり面板洗浄のための注水口を設けたりする必要があります(写真-6)。

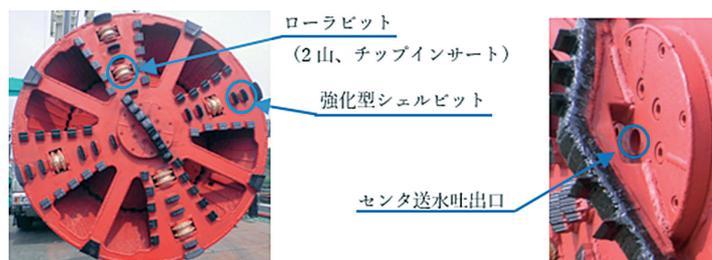


写真-6 センタ注水装置

表-1 ビット摩耗計算例

RQD 値	ローラ種別	岩盤強度 (MN/m ²)				
		圧縮	50 未満	50 ~ 100 未満	100 ~ 150 未満	150 ~ 200 未満
		引張	4.0 未満	4.0 未満	4.0 ~ 8.0 未満	8.0 ~ 13.0 未満
20% 未満	セントローラ		660	550	420	290
	フェースローラ		550	380	290	200
	ゲージカッタ		440	320	220	125
20 ~ 40%	セントローラ		600	500	380	260
	フェースローラ		500	340	250	170
	ゲージカッタ		400	260	160	65
40% 以上	セントローラ		540	450	340	230
	フェースローラ		450	300	220	140
	ゲージカッタ		360	200	120	45

4.3 ビットの摩耗

ビットの摩耗検討の第1歩は岩の強度や亀裂状態、組成などを正確に知ることです。特に砕けやすさの指標であるRQD値と石英分の含有率はビットの摩耗量を大きく左右するため、できるだけ正確な数値が必要です。そのうえで摩耗量を計算し、ビット交換の要否や交換回数を決めます(表-1)。

ビットの交換はあらかじめ築造しておいた交換用の中間立坑で行う方法と、推進途中の機内から行う方法があります。岩盤推進の場合は立坑の築造が困難な場合が多く、機内から行うのが一般的です。その場合事前の掘進機選定段階で機内ビット交換可能な掘進機を選定し使用しなければなりません。

4.4 削り粉の沈殿

岩盤推進は、掘削したトンネルの孔壁が岩盤であるため通常は崩れることなく保持され、推進抵抗は他の地盤と比較して小さいのが一般的です。しかし、長距離施工の場合などでは岩盤の切削屑(削り粉)が管外周のボイドに残留して沈殿、固結する場合があります、そうすると推進管を締め付けて推進抵抗が急激に増大し、最悪の場合推進不能になる場合があります。

この現象を防止するには削り粉が管外周に残留しないように洗浄する方法と、沈殿する前に滑材を充填する方法などがあります。洗浄方法には掘進機先端から送水して排泥する方法と、掘進機本体下部や推進管から送水して先端から排泥する方法があります(写真-7)。



写真-7 削り粉洗浄注水

5 玉石地盤での技術的対応

5.1 掘進機のトルク

玉石地盤の推進工に必要な掘進機のトルクは岩盤の場合と同じく普通土対応機よりは大きく、トルク係数で20以上ではないかと考えます。また、ローリングに関しては岩盤と同様に何らかの対応は必要ですが、掘進機および後続の推進管の緊結で対応するのが一般的です。

玉石地盤でトルクに関連して起こりうるトラブルとしてカッタロックがあります。多くの場合は面板ビットが玉石に引っかかって面板が動かなくなるケースですが、時にはその復旧に数日要する場合があります、対策が必要です。

【泥水(添加材)の性状】

泥水や添加材の濃度が薄く切羽の保持が困難な場合、前面の玉石は面板に凭れかかる(押し付けられる)状況になり、カッタロックが発生しやすくなります。玉石地

盤の施工においては泥水や添加材の管理を十分に行って、泥水ならば比重1.25以上、粘性40秒以上、添加材は10,000cps以上が望ましいように思われます。

【掘進機の引き戻し】

カッターロックになった場合、そのままの位置でカッターを正逆回転しても戻らないケースがよくあります。面板ビットが玉石を完全に噛みこんだ場合ですが、掘進機を少し後退させると簡単に回復する場合がほとんどです。つまり玉石地盤においては方向修正ジャッキや引き戻しジャッキなどの装備によって、少し（数cm）後退できるようにしておくことも重要です。

5.2 特殊面板

前にも述べたように玉石地盤の特殊面板はビットで全断面を切削する必要はなく、玉石を取り込み可能な大きさに一次破碎できれば良いと考えます。特に土圧式や泥濃式ではスクリュコンベヤや排土管に取り込める大きさ（20～30cm）に破碎できればよく、泥水式でもコーンクラッシャが装備されていれば同様の一次破碎でよいと思われまます（図-3）。しかしコーンクラッシャによる二次破碎のない泥水掘進機では礫取り箱まで接続する排泥管（6インチ、8インチ）で搬送可能な大きさまで一次破碎するとともにスリットによる取り込み制限も必要です。

5.3 ビットの摩耗

玉石地盤におけるビットの摩耗量についてもいくつかの計算方法があり、事前の土質調査結果に基づいて摩

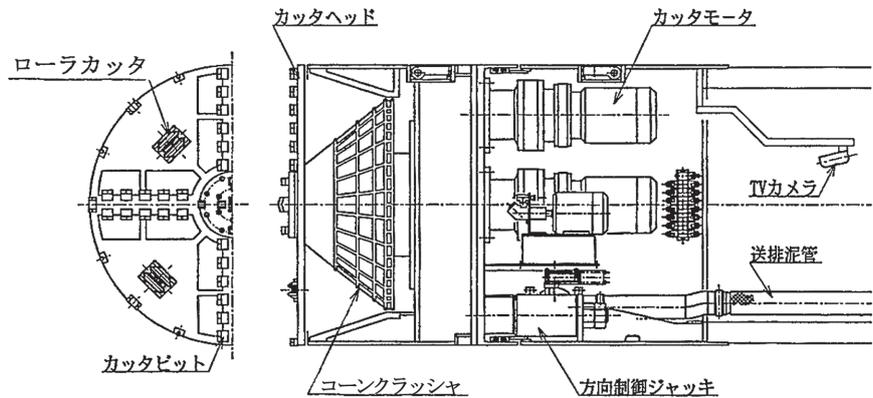


図-3 コーンクラッシャを装置した掘進機断面

耗量を想定します。その結果推進途中での交換が必要と判断すれば、岩盤と同様に掘進機内あるいは交換用立坑で交換する必要があります。機内交換の場合、玉石地盤では切羽からの出水や崩壊が懸念されるため、事前に地盤改良を行って改良ゾーンを設けるか、圧気を併用して安全を確保します（写真-8、9）。



写真-8 機内ビット交換型掘進機



写真-9 圧気設備

圧気を併用する場合は事前の各種調査や届出が必要です。交換用中間立坑を築造する場合は、掘進機を引き上げる場合と立坑内でビット交換する方法があります。いずれの場合も到達部、発進部の改良と通過後の処置（埋め戻しなど）を適切に行って、周辺地盤の陥没や推進抵抗の増大などを起こさないようにしなければなりません。

5.4 切羽保持

機械式密閉型の推進工法では切羽の保持が重要ですが、玉石地盤の推進工においては切羽保持が困難になるケースがあります。泥水式における透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ より大きな場合などですが、さらに礫玉石地盤（砂地盤）で細粒分（ 74μ 以下）含有率が一桁（10%以下）の場合や地下水に流れがある場合は切羽の保持が困難なケースがあり、地盤改良を併用したり他の工法での施工を検討したりする必要があります。

土圧式や泥濃式では泥水式より大きな透水係数の地盤でも施工は可能ですが、透水性や間隙があまり極端な地盤では補助工法の併用を検討しなければなりません。また、泥濃式の施工では玉石を排土管から機内に取り込む場合に切羽圧で押されるため、バランスを崩しやすく特に高水圧での施工には特段の注意が必要です。

5.5 玉石の転動

大きな玉石が外周付近に存在する場合は、切削するか取り込むかは大きな問題ですが、外周付近の玉石をそのまま取り込んでしまえば大きな空隙が生じますので、速やかに充填しなければなりません。できれば切削するに越したことはありません。しかし、切削するためには玉石が動かないこと、切削用のビットが外周に配置されていること、切削中も切羽のバランスが崩れないことなどが重要です。比較的締まった礫層であれば玉石は切削中に動くことはありませんが、緩い砂礫層であれば切削中に玉石が動くことがあり、そうなれば切削は困難になりますので、薬液注入などで玉石を固定することもあります。外

周のビットの配置は必ず必要ですが、とりわけ礫地盤の場合は外周には主ビットより先行し外周オーバカットを確実にこなうためのローラビット（ゲージカッタ）を装備します。ゲージカッタの形状・寸法や取付け角度は礫・玉石の性状によって適切な配置を検討しなければなりません。

そのうえで外周部にある礫の転動を防止するために掘進機および通過後のテールボイドを確実に充填保持しなければなりません。推進工のため、テールボイドの保持材として滑材を使用します。玉石地盤での施工の場合には液体性の滑材では自立強度が弱く、また地山間隙への逸出などによりテールボイドの保持は難しいと思われれます。滑材は施工性、コスト面、性能など著しい進歩がみられますが、特に長期間や長距離での玉石の落下防止や転動防止に適しているのは、テールボイドに残留性の高い、2液ショットタイプの半固結か固結するタイプの滑材が望ましいと思われれます。

6 おわりに

岩盤や玉石地盤の推進施工には特有の技術困難さがありますが、すべての工事において、その困難性が設計や施工計画に十分に反映されているとは言い難い状況があります。その原因としては発生しているトラブルの内容が一般的に公開されるケースが少なく、むしろ内々で処理することに起因しているように感じています。今後ますます岩盤、玉石地盤での長距離施工や曲線施工、大深度（大土被り）施工などの要請が増加すると思われれますので、より確実な岩盤および玉石地盤における推進技術の確立が望まれます。このような技術の確立にはトラブルの内容を十分に検討して、推進施工者、設計コンサルタント、掘進機メーカー、推進管メーカー、滑材メーカーなどがそれぞれ立場で研究開発するとともに、共同して問題の解決に当たる必要があるとおもいますので今後の協力をお願いして結びといたします。