

解説

施工難度の高い岩盤・玉石地盤に挑む —アルティミット工法—

す どう ひろし
須藤 洋

機動建設工業(株)
土木本部技術課課長



1 はじめに

我が国における推進工法は、1948年（昭和23）5月にガス管のさや管として初めての推進工事が施工されてから76年が経過しました。その間の推進工法の発展はめざましく、開放型から密閉型、地下水への対応、急曲線施工と長距離施工の実現といった当初では想像もできないような施工技術が確立されています。同時に、その適用土質についても拡大されてきました。現在では各工法協会において独自に適用土質区分を設定されていますが、その中でも密閉型推進工法において施工難度が高いとされるのは、玉石を含む地盤や岩盤層です。

玉石や岩盤の施工難度が高い要因としては、掘削に適したカッタや掘進機の選定といった機械設備の検討はもちろんですが、何よりもその施工管理の難しさにあるといえます。

本稿では、玉石を含む地盤や岩盤層における検討課題について、泥水式を中心に施工事例を含めて記述させていただきます。

2 岩盤・玉石地盤掘削への技術開発の変遷

2.1 アルティミット工法での取り組み

機動建設工業(株)（以下、当社）が主力としているアルティミット工法（以下、当工法）は、長距離・急曲線

施工をメインとして開発されており、筆者が入社した当時もその2つのテーマが主であったように記憶しています。そのためなのか、時代的な背景なのかはわかりませんが、数多くの施工事例の中でも玉石や岩盤といったキーワードはあまりなかったように思います。また、当時の当工法の適用土質区分には巨石土（当時は巨礫土と表記）はありましたが岩盤はなく、岩盤を追加記載したのは近年のことです。

2.2 粗石土または巨石土について

当工法の適用土質区分は、泥水式と土圧式ともに、普通土対応はA土質、礫または粗石対応はB土質、巨石対応はC土質、硬質土対応はD土質として長きにわたり設定されてきました。その中で、泥水式の粗石対応と巨石対応に関しては2018年に最大礫径と礫率について細分化のうえ適用土質区分を改訂しました。結果として、泥水式はB1土質およびB2土質とC1土質およびC2土質に区分化し、土圧式は基のB土質のみの対応としました。

2.3 岩盤層について

前述の改訂前には、適用土質区分に岩盤はなかったため、泥水式と土圧式ともに一軸圧縮強度 200MN/m^2 以下の岩盤層をF土質として新たに追加しました。また、F土質の適合区分についてはその一軸圧縮強度に応じてF1土質からF6土質までの6つの区分に分類しています。なお、土圧式については2024年の改訂において

適合範囲を一軸圧縮強度 $10\text{MN}/\text{m}^2$ 以下としました。

なお、当工法の従来の長距離・急曲線施工に対応するための技術を導入することで、巨石土や岩盤層においても長距離・急曲線施工を可能としています。

3 施工の課題

岩盤層や玉石を含む巨石土に対する主な確認事項および施工検討課題としては、次の項目が挙げられます。

①土質条件

最大礫径、礫率、巨石等の一軸圧縮強度、透水係数、粒度分布、コア写真

②岩盤条件

一軸圧縮強度、岩盤性状、石英含有率、RQD値

③近接地での施工事例

④カッタ形状

ビット種類および配置、ローラカッタ掘削軌跡、スリット大きさおよび開口率

⑤ビット交換の必要性および回数

⑥施工時の対策

ローリング防止、切羽の安定、巨石の転動、切り粉による周面抵抗力の上昇、面板閉塞、半岩半土、粘性土の出現

3.1 土質条件

巨石土や玉石地盤においてまず検討するのは最大礫径です。その大きさにより一次破碎が必要なのか否かが判断されますが、巨石土や玉石地盤ではまず必要だと考えます。最大礫径の検討においては、ボーリングにより採取されたコア長の3倍程度を想定するのが一般的ですが、河川に隣接している場合は5倍程度を考慮する必要があるとした文献もあります。最終的には立坑掘削時の実径の確認が必要です。

礫の含有率については結果の数値だけを見るのではなく、粒度試験の粒径におけるその通過百分率を確認したうえで、巨石および玉石の分布を想定することが重要だと考えます。

巨石等の一軸圧縮強度については強度試験が実施されていれば良いのですが、そうでない場合も散見されます。また、玉石の場合は河川において水の流れにより

弱い部分が削られたすえに残った芯の部分であることから、基本は硬いということを認識しておく必要があると考えます。

3.2 岩盤条件

まず確認するのは岩盤の一軸圧縮強度と岩質です。この2つの組合せによりローラカッタによる破碎方式とするか、強化型ビットによる切削方式とするか、または2つの組合せとするかの目安とします（図-1、2）。

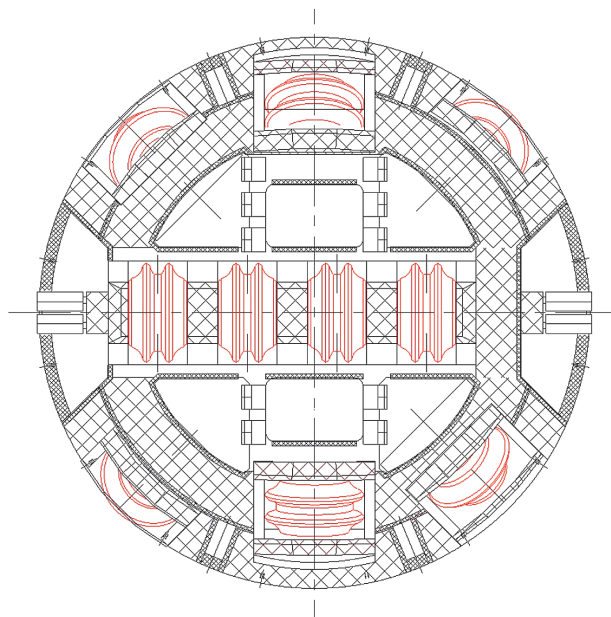


図-1 岩盤用カッタ 破碎方式

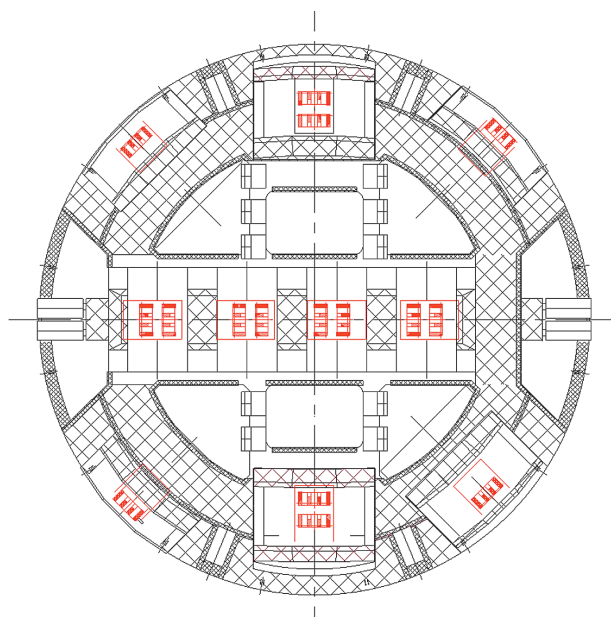


図-2 岩盤用カッタ 切削方式

岩盤層においてはビット交換を前提に掘進機を選定すべきであり、ビット交換回数を検討するための一つの基準となるのが一軸圧縮強度です。ただし、別に重要となるのが石英の含有率であり、この数値によっては一軸圧縮強度を基に計画したビット交換回数が実施工では異なる結果になることがあります。

3.3 近接地での施工事例

岩盤層や玉石地盤に限ったことではありませんが、土質調査が十分に実施されているとは限りません。例えば十分に実施されていても、施工者サイドが知りたい情報がない場合もあります。個人的な考えにはなりますが例えば、巨石土であれば一次破碎が必要となる石の含有率であり、岩盤層であれば石英含有率が挙げられます。特に前者は一般的な室内試験で判明するものではありません。そのため、施工検討をするうえで重要となるのが近接地での施工事例であり、筆者も検討の際には社内の共有データを探し回ります。そこに施工担当者によるデータの要約やコメントがあれば必ず確認しています。また、設計者サイドの方が施工地特有の土質や地盤の性状を熟知されている場合もあります。過去に、花崗岩が有名なある地域での施工検討を行っている際に、特徴的な岩線が明記された土質想定図がありました。担当された設計業者の方に確認すると、この地域ではこのような岩線になるとのことでしたが半信半疑でした。しかし、施工時に確認すると土質想定図と酷似した土質の変化であったため驚いたことがあります。

3.4 カッタ形状

土質条件または岩盤条件よりビット種類および配置、ローラカッタの掘削軌跡、スリットの大きさと開口率について検討します。ただ、このように文章として表現するのは簡単ですが、実際の検討は難しいものとなります。その要因は、土質条件または岩盤条件の見極めであると考えます。もちろんこれらの条件を見極めるというのはかなり難しいことだと理解しています。しかし、数値だけを見て判断するのは危険であり、与えられた土質資料が施工検討をするうえで十分な内容となっているのかも含めて確認する必要があると考えます。

3.5 ビット交換の必要性および回数

巨石土と岩盤層ではビット交換が必要となることが多

いのですが、ローラカッタの変化（劣化）についてはその性質が異なります。巨石土や玉石地盤ではインサートチップの欠損や母材部の摩耗が多く、岩盤層では全体的な摩耗が目立ちます（写真-1、2）。ビット交換の回数については、土質条件と岩盤条件に施工条件を併せて検討しますが、前述したように石英の含有率が大きく影響することがあります。



写真-1 ローラカッタ変化（巨石土、チップインサート）

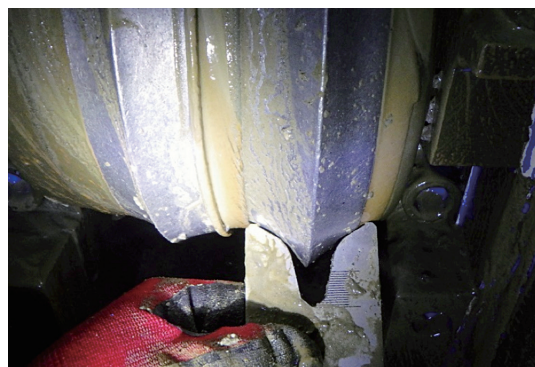


写真-2 ローラカッタ変化（岩盤層、ディスクカッタ）

3.6 施工時の対策

(1) ローリング防止

高トルク仕様の掘進機の場合、そのトルクに見合った反力が得られずに掘進機自体がローリングしてしまうことが懸念されます。直線施工であれば掘進機と後続推進管を緊結することで反力を得ることができますが、曲線区間では緊結することが難しい場合もあります。そのため、岩盤層においてはローラカッタにより回転反力を得ることのできるアルティミットローリング防止筒（U-ARC）を掘進機後方に配置することを検討します（写真-3）。

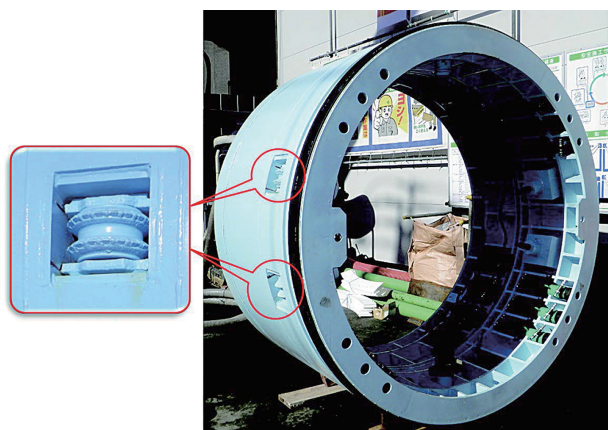


写真-3 アルティミットローリング防止筒 (U-ARC)

(2) 切羽の安定

岩盤層では切羽の自立が見込めることもありますが、巨石土の場合は切羽を安定させることが施工においての重要管理項目となります。そのうえでポイントとなるのが、透水係数と粒度分布です。推進工法体系（(公社)日本推進技術協会発刊）では、次のような記述があります（一部抜粋）。

- ・ 透水係数が概ね $k=1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ より大きい場合では、湧水による切羽崩壊や切羽圧力保持不能となる。
- ・ 帯水礫層での切羽崩壊発生の危険性（泥水式）
 - ①切羽水圧が0.07MPa以上
 - ②74 μ 以下の土粒子の含有量が8%以下
 - ③透水係数 $k=1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 以上

透水係数が高いことが要因とされる逸泥により切羽の安定が難しい場合、掘進機内から切羽面に直接固結滑材等を注入できる機構があれば応急的な対応ができると考えます。ただし、このような地盤では薬液注入等の地盤改良工が最も適していることは言うまでもありません。また、岩盤層においてはごくまれに鍾乳洞等の空洞に遭遇することがあります。特に沖縄の琉球石灰岩は有名なようで、当社においても遭遇したと推察される事例があります。

泥水式における切羽の安定を考えた場合、送泥水と排泥水の還流バランスが非常に重要となります。しかしながら、二次破碎装置としてラインクラッシャを使用した場合や粘性土との互層地盤においては、送排泥流量のバランスがとりにくく流量が低下することがあります。この

ような場合は、機内バイパスの後方に切羽流量を増加させるための還流ポンプを配置することで対応しています。

(3) 巨石の転動

巨石土や玉石地盤では推進管外周部で接触した石が回転し推進管を破損させることがあります。この事象は、玉石の強度や地盤のマトリックスのN値も関わってくるため必ず発生するわけではありませんが、発生した場合は推進管の破損等の大きな問題に発展してしまうことが懸念されます。

この対策として効果的なのは、ひび割れ荷重の大きな管種を選定することだと考えますが、管材料費が高価なため経済的な観点からはデメリットとなってしまいます。そのため、直近の工事では外周部の石がグラウト孔に引っ掛かって回転することを防止するために、グラウト孔凹部にグラウトホールキャップを取付けた事例があります（写真-4）。



写真-4 グラウトホールキャップ

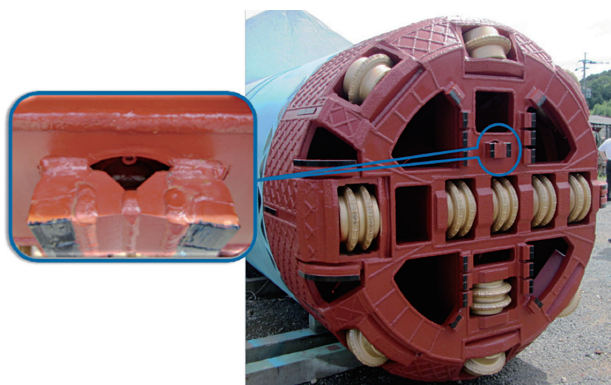
(4) 切り粉による周面抵抗力の上昇

当工法では近年積極的に岩盤推進に取り組んでいますが、切り粉がテールボイドに流れ込みくさび状に推進管を締め付け周面抵抗力が上昇したと推察される事例があります。この事象に対しては、グラウト孔からテールボイドを洗浄するといった対応策が挙げられますが、まずは初期掘進時からテールボイドを確実に充填することで切り粉をテールボイドに滞留させないことが重要です。

(5) 面板閉塞

岩質によっては、切削時に泥土化し面板に堆積または付着することで切削能力の著しい低下や面板閉塞が発生してしまうことがあります。当社ではこのような状態

に陥るのを防止するため、事前に泥土化が懸念される場合は面板洗浄機構を有した掘進機を選定し、掘進時に面板洗浄を同時に実施することで切削能力の低下や面板閉塞の発生を防止しています（写真－5）。



写真－5 面板洗浄機構吐出孔

(6) 半岩半土

岩盤層から一般的な地盤への変化区間またはその逆において、掘削断面の下半が岩盤層で上半が一般的な地盤となる半岩半土と呼ばれる互層地盤に遭遇することがあります。この半岩半土での課題は、次のように考えます。

①上半部地盤の取込過多の発生

②下半部岩盤層に乗り上げることによる精度不良

上半部の地盤が自立していれば別ですが、まずは上半部の地盤強化が必要だと考えます。ただし、いくら地盤改良を施しても岩盤層と同程度の強度を得るのは難しいため、掘進速度は岩盤層に合わせることになります。そのため、上半部の取込過多の防止策として、管路断面が完全に岩盤層に変化するまでの区間において、地盤を固化や置換する方法で改良することが適当ではないかと考えます。

また、岩盤層から一般的な地盤への変化については岩線が平面的に見れば両方向に傾きを伴っていることから、詳細調査が必要ではないかと考えます。

(7) 粘性土の出現

長距離化が進んだ現在では、発進から到達までが同じ地盤となることは稀です。玉石地盤から普通土や岩盤層から普通土、またはその逆となることがあり、この際

に検討が必要となるのがローラカッタでの掘進が適しているかです。このような場合、最も頭を悩ますのが粘性土の出現です。

課題として挙げられるのは次の項目です。

①面板に堆積または付着することで切削能力の低下や面板閉塞が発生する。

②ローラカッタが回転せずに偏摩耗が発生する（写真－6）。



写真－6 偏摩耗の発生したローラカッタ（ディスクカッタ）

課題事項が懸念される場合、破碎方式と切削方式でのビット交換を提案しています。また、粘性土との互層地盤が想定される場合は、岩盤層における泥土化と同様に面板洗浄機構を有した掘進機を選定するようにしています。

4 施工事例

岩盤層における施工事例の中で、石英含有率が影響したと推察する特徴的な事例を紹介します。

施工場所：長野県

工 法：アルティミット工法泥水式

推 進 管：呼び径2400

推進延長：283.5m（直線）

土 被 り：14.14～21.05m

対象土質：風化花崗岩

岩盤強度：一軸圧縮強度15MN/m²（最大）

一軸圧縮強度の値から、当初設計ではビット交換は外周部1回とされていました。しかし、発進立坑築造時

に想定よりも硬質な岩盤の掘削となったことから再調査を実施し、その結果、管路深度付近の岩盤は風化変質の影響が認められず一軸圧縮強度は最大 94MN/m^2 程度と推定されました。よって、ビット交換は外周部1回と全数交換1回の計2回が必要と計画されました。

しかしながら、実施工ではローラカッタの摩耗が激しく、掘進状況に変化が生じるたびに機内ハッチよりチャンバ内に入り、ローラカッタの摩耗状況を確認しました。いずれの場合もビット交換の目安である摩耗量を超過していました。最終的には計5回のビット交換作業（外周部5回、その内フェース部2回）を行いました。また、計5回のビット交換においてその最長距離は約100m、最短距離は約30mでした。今回の事象の要因として、切削ズリを用いたX線回析による定性分析結果から、石英と長石の推定含有率が非常に高い数値を示しており、これが影響したと考えられます（写真-7）。



写真-7 花崗岩（切羽面にて撮影）

5 おわりに

推進工事は目視することができない地中においての施工となるため、事前調査と施工検討というのは非常に重

要な要素だといえます。そのうえ、土質的に難度の高い玉石地盤や岩盤層となればなおさらです。ただ、近年色々な条件の施工案件を検討していると思うのは、調査資料が物足りないと感じる案件があることです。調査時に様々な事情があることは理解しているつもりですが、設計段階において概算工事費の算出を主とした調査ではなく、施工性についても十分に検討できるような調査内容となることを切に願います。

本稿は筆者の主観的な部分も交えて記述させていただきました。当然、読者の方々の中には否定的な考えを持たれる方もおられるかと思いますが、本稿が難土質に挑む際の一助になれば幸いです。

【参考文献】

- 1) 「推進工法体系Ⅱ 2023年版 第8編 第2章2.1.6 (3) 地下水および透水係数」(公社)日本推進技術協会
- 2) 「推進工法体系Ⅱ 2023年版 第8編 第2章(6) 推進工法で用いる土質分類 表8.2-11 土の性質における推進工法での注意点」(公社)日本推進技術協会

○お問い合わせ先

機動建設工業(株)

<https://www.kidoh.co.jp>

[土木本部]

〒553-0003 大阪市福島区福島4-6-31 機動ビル

Tel : 06-6458-6183 Fax : 06-6454-0274

[関東支店]

〒101-0035 東京都千代田区神田紺屋町38

エスポワールビル6F

Tel : 03-3289-4771 Fax : 03-5294-1281

