

特別寄稿

岩盤に挑む

岩盤・巨礫に挑み続けて30年 「岩盤・巨礫推進の基本的考え方と対処方法」 —本間良治先生の講演論文より—



の だ あきら
野田 彰
(株)推研
専務取締役

1 はじめに

1981年(昭和56年)、CMT工法の岩盤専用掘進機は、オープンセミシールド型の第1号機を完成させ、日本住宅都市整備公団(現(独)都市再生機構)ご発注の三田市内での都市下水管築造工事に投入されました。

以来30年間、CMT工法は、岩盤・巨礫推進工場の研究開発に取り組んで参りました。当時の推進業界は機械推進が手掘り推進にとって替わろうとする大きな変換期でありました。従来からの最大課題でありました軟弱地盤対策および水対策は掘進機の機械化により、殆ど解決するとの見込みのもとに推進技術は日々の進歩がなされ、まさに黎明期であったと言える時代でした。しかし、ひとり岩盤・巨礫推進だけは解決すべき課題が多すぎて、手付かずであり、その開発は、遅々として進展しない状況でありました。対象となる岩盤は、我が国特有の褶曲された特殊な岩盤が多いこと、推進工事における対象管径が小さいこと、これらの条件から生じる課題は、岩盤掘進には大きなトルクが必要であるにも拘らず大型原動機が投入できない、硬質岩盤

掘進に関する理論の欠如、専用ビットの寿命および交換の方法、曲進推進時におけるヒューム管の強度……等々、解決すべき困難な課題は限りなく存在しておりました。

CMT工法は、オープンセミシールド型の1号機に始まり現在までに、その掘削・掘進方式の開発、大トルク原動機器の投入、土質・岩質に適合する新型ビットの開発、ビット交換が可能な特殊タレットの導入等に成功し、一軸圧縮強度330MN/m²の輝緑安山岩盤、長径1600mmの巨礫、最大一軸圧縮強度360MN/m²の巨礫掘進等を含む岩盤・巨礫推進の実績は、2009年7月現在、施工件数は468件、施工延長約123,630mを得るに至りました。また、CMT工法は、岩盤への挑戦で得た新しい掘進方式や、機械システムから超長距離推進技術や障害物撤去推進技術を確認しました。その結果、1999年に笠松市において1スパン1,006mを、さらに2007年豊橋市において1,447mの超長距離推進を、また、障害物撤去に関しても2008年いわき市において、1スパン路線内で100本に余る松杭を、2009年神戸市の中心部交差点内で9本のH型鋼杭の

撤去をしながらの推進工事を完工する等、種々の実績をを樹立しております。これら『CMT工法と岩盤』に関しては本誌(月刊推進技術)2009年4月号(VOL.23No.4)に、掲載いたしておりますのでご一読いただければ幸いです。

さて、岩盤・巨礫推進には種々の課題があり、これを確実に解決しなければ成功は望めません。平成15年7月、日本非開削技術協会の主催で岩盤・巨礫推進に関する講演会が開催されました。この際、我が国で初めて岩盤・巨礫推進に取り組み、CMT工法を造り上げた故本間良治氏による『岩盤・巨礫対応推進の基本的考え方および対処方法』の講演がありました。この講演会には約500名の方々がご出席なさいましたが、他の協会員の皆様からその内容を再度示すようにとのご要望がありますので、その内容を基本に「岩盤・巨礫推進への概論」として此処に記したいと思っております。

2 岩盤推進の調査と設計

2.1 岩盤推進のための調査

(1) 調査の種類

岩盤推進工事においては、その対象



図-1 等高線の入った広域地質

岩盤の性質（岩層の方向、岩盤の種類、強度、造岩鉱物等）により、掘進の方式やビットの型式等が全く異なり工事の成否を左右します。岩盤推進工事におけるの事前調査は、一般推進工事のそれに較べて非常に重要であり、以下のような調査を入念に行わなくてはなりません。

【広域調査】

数km～数10km範囲で基盤構造、基盤岩名称と岩質、構造線、褶曲基盤の形を推定するために等高線の入った

地形図を基に検証します。なお、水成岩の場合は岩質と生成年代で割裂強度がほぼ推定できます。

【局地調査】

地形、河川と山の相対的位置、天然の池、河川の玉石、露頭の岩質と傾斜、露頭があればこれを観察して節理の方向が掘進方向に直角か並行かを調べます。現在は道路になっていても、昔の岩山の谷には巨礫がある場合があります。天然の池が散在しているところは断層があることが多いと考えられます。

岩盤推進には、調査の結果から上記のような推測ができるか否かが重要なポイントになります。

★上記の広域調査および局地調査は設計者は勿論のこと、施工者も着工前には必ず現場踏査を行い露頭や岩盤の流れ等、立地条件を確実に把握しなければなりません。このことが後々の施工に大きく影響する重大なポイントです。周辺の住民の方々から周辺の土質などの情報を得ることも重要です。

(2) 公的岩盤強度の分類

土木学会岩盤力学委員会による「主要岩盤分類」として33種類あります。使用目的による分類ですから用途が違

表-1 ボーリングの目的と調査内容

目的	調査内容
岩盤推進区間の決定資料	岩線調査、半岩半土区間調査、風化層の厚さ調査
先端抵抗の計算資料	岩の割裂強度、RQD、一軸圧縮強度 調査
推進抵抗の計算資料	岩の割裂強度とRQD 調査
掘進方式の決定資料（工法決定の資料）	岩の割裂強度、RQD、一軸圧縮強度 調査 半岩半土区間調査、風化層の厚さ調査
掘削ビットの選択資料	岩の割裂強度とRQD 調査、造岩鉱物調査
支圧壁の耐荷力計算資料	RQD 調査、風化程度の調査
切羽防護、立坑支保工検討資料	RQD、断層、破碎帯、半岩半土区間の調査
掘削速度（日進量）の算定資料	岩の割裂強度、RQD、節理方向、半岩半土の調査

表-2 ボーリングの方法と調査内容

方法	調査内容
ボーリング位置の選定	岩線傾斜と方向
ボーリング深さの決定	岩層傾斜と方向、基盤判定
ボーリング調査内容の選定	岩名称、割裂強度、RQD、超音波速度

表-3 ボーリング等調査資料の判定

一軸圧縮強度 (2MN/m ² ～30MN/m ²)	複数個の資料を採取しその内の最大値を採用する。報告書には平均値を記入している場合がありますが設計に当たっては最大値を採用することが重要です。 一軸圧縮強度試験は低く出ることあっても高く出ことはまずありません。試験資料の破断面を調べ、滑った試験資料は採用しない。本来節理の発達した岩の試験には不向きで、超音波試験による方が確実に測定できます。 主に切削方式による推進の日進量算定の資料に使用します。
割裂強度 (5MN/m ² ～26MN/m ²)	複数個の資料を採って最大値を採用する。一軸圧縮強度より節理や亀裂の影響を受けにくい層理に直角に加圧しているか調べる。 主に圧壊方式による推進の日進量算定の資料に使用します。
RQD (0%～90%)	ボーリングコア1m中、長さ10cm異常のコアが占める割合です。推進施工管径φ800～1200mm程度の場合はボーリング径をφ50mm以上とした方が実態に合うようです。 ボーリングクラウンにより破壊したものを判別して地盤本来の節理の発達した岩か否かを考慮しなければなりません。 主に圧壊方式による推進の日進量算定と支圧壁算定に使用します。
超音波試験 (3km/sec～4km/sec)	節理のある岩でも正確に測定できる。但し、比重と弾性率による伝播速度から岩の硬さを推定する方法であるため、硬すぎて脆い岩でも高い値が出る場合があります。RQDも併せて判定します。
弾性波試験 (2km/sec～4km/sec)	地形の影響を受けやすく、局所的な解析は無理。解析には高度な技術と長い経験が必要なので、大間違いもあります。しかし、100m単位の岩の硬さを見るうえでは有効。
造岩鉱物の化学	一軸圧縮強度や割裂強度等が同じであっても、造岩鉱物の含有比率の違いや造岩鉱物そのものの風化により掘削効率等に大きな影響をおよぼすことがあります。DIS試験などによる評価

えば分類も変わります。従って、用途の外れた分類を採用すると推進工事設計上の判断には有効といえませんので注意が必要です。

①ダム構造と基礎、鉄道基礎、道路法面、トンネル構造等、岩盤を構造材料として評価した分類

(例) ダム基礎岩盤分類基準

A、B、CH、CM、CL、D

道路トンネルの岩盤分類表

I、II、III、IV、V

②大断面トンネル掘進、坑道爆破、等破壊の対象としての分類

(例) プラスタビリティー岩盤の一軸圧縮強度と引っ張り強度の比

③トンネル断面の維持管理としての分類

・岩盤の膨張、塑性流動変形

頁岩や凝灰岩のなかには、テールボイドで膨張したり、押し出してくる岩もあります。このような場合、事前に対策を講じておかないと管が締められて酷い目にあいます。

④小断面トンネルとしての推進工法用の分類推進工法の対象としての分類が無いので次項で説明します。

(3) 推進工法のための分類

推進工法のための岩盤の分類が無いので、これを作ろうと試みたが難しい。その理由は、推進工法のための分類と一口に言っても、切羽の自立、切削掘削の難易度、圧壊掘削の難易度、推進抵抗に対する影響、曲線推進の難易度、支圧壁耐荷力等いろいろな要素を含むので1つの指標で表せないためです。例えば、圧壊掘削の難易度だけであれば、プラスタビリティーを指標に用いることが正解に最も近いようですが、これだけでは不十分で一般指標にはなりません。そこで、岩盤推進の設計や施工の説明の中で既存の個々の計測資料等を利用して如何にして工法用の判定資料とするかを考えてみます。

表-4 掘削方式とビット型式

掘削方式	ビット型式	掘削可能岩強度 MN/m ²	押付け圧力 MN/m ²		算定資料
			ビットのみ	カッタ全体	
切削方式	スクレーパカッタ	圧縮10以下	60~180	120~350	一軸圧縮強度、 節理方向
	スリットカッタ	圧縮30以下	20~60	70~200	
圧壊方式	ディスクカッタ	圧縮15以下	400~900	550~1200	割裂強度、節理方向 RQD、結晶粒径
	ローラカッタ	圧縮30以下	150~300	300~600	
打撃方式	ダウンザホール	圧縮40以上			割裂強度、節理方向 RQD、結晶粒径

3 岩盤推進工法的设计

3.1 岩盤掘削方式の選定と 先端抵抗の計算

岩を掘削する場合、まずどんな方式のビットで掘削するかを決めます。表-4に各ビット形式別に掘削可能な岩強度の参考値を示しました。この値は採算ベースで掘削ができる数値と考えると下さい。切削ビット方式では、一軸圧縮強度で、また、圧壊ビット方式では割裂強度で示しました。ここで注意をしないといけないことは、岩は人工的産物ではなく、大自然の産物です。調査データシートに風化花崗岩で砂状態だと書いてあっても花崗岩には必ず未風化の岩芯があり、その強度により掘削方式が決定されます。同様に、スクレーパビットでも容易に掘削できるような頁岩であっても、褶曲地帯では岩脈による変成があり、硬化していることも多々あります。硬いチャート層には粘土層が付き物です。

1つのスパンの中には岩区間以外に粘土区間や砂礫区間もあります。岩掘削方式の選定にはこのようなデータや配慮が不可欠で、このような路線上で岩盤の変化を読み取り、適切に対応することが最も重要で最も困難な事です。このために前述の調査が欠かせないと同時に検査結果を注意深く観察して対応する技術が岩盤推進には欠かせません。ビット単独の押し付け力は、

ビットの仕様や取り付け数によって大きな差があります。カッタ全体としての押し付け力は、切羽防護方式即ち面板加圧方式を採用する場合と、削土密閉を採用するかによって大きく異なりますし、各メーカーの掘進機の特性によっても異なり、一概には言えませんが、およそ表-4の程度の力が必要と見て下さい。

先端抵抗は上記のカッタ全体の押し付け力以外に、切羽水圧がかかります。切羽水圧は自然水圧だけでなく、添加材の注入圧や還流泥水の加圧も加算されることがあります。以上の2項目をまとめて先端抵抗は次式で求めます。

$$F_0 = (P_w + P_e) \times C_d \pi / 4$$

但し F_0 : 先端抵抗 KN

P_w : 切羽水圧 KN/m²

P_e : カッタ全体の押し付け力 KN/m²

C_d : カッタヘッド直径 m

★こんな事もあります!

一般に推進工事における切羽水圧は、現場GL下の水位が切羽に掛かると考えますが、山地の岩盤や溶岩地帯では一般的自由水とは異なり、亀裂や洞穴を介しての水圧が掛る場合があります。2005年山梨県甲府市の桂川流域下水工事現場で自然水位は3m程度でしたが、岩盤内部の亀裂や熔岩内の洞穴等を通じて、遠い箇所の水圧が掛かり、なんと9mもの水頭が掛かり物凄い水が噴発し、現場員は想定外の水

量と水圧でその対応に随分とご苦労をなさいました。

3.2 管外周抵抗の算定

岩盤推進の管外周抵抗は土圧が掛からないからゼロになるように思われますがそんな訳ではありません。実際には、砂礫地盤を推進する場合の抵抗と同じか、それ以上の抵抗が掛かります。岩盤推進の推進抵抗は推進距離とともに増加する「基礎抵抗」と「ソゲ」や岩塊の噛み込みで一時的に掛かる「変動抵抗」の和になります。基礎抵抗は岩を破碎する時に生じた岩粉や粘土鉱物による粘着力と考えられます。変動抵抗の大きさが基礎抵抗よりはるかに大きいので、変動抵抗が無い時は設計抵抗値の40%以下で推進しているように見えます。それなのに大きな「ソゲ」の1つが噛み込んで、推進抵抗が急に2,000KNも上がることがあります。推進力設備が1KNでも不足すると推進不能になります。岩盤推進の工事では岩が硬くて掘れないと言う工事は滅多にありません。当然、前もってその対応はなされているからです。しかし、推進抵抗の急激な変化による掘進機の固着やヒューム管の抵抗超過での推進不能は多々生じます。

★管外周抵抗をきめる要素には次のようなものがあります。

【スライム】

岩の種類やビット形式によってスライムの発生量が異なる以外に、カットビットの押し付け力不足のときも増加します。粘着抵抗を増加させます。割裂強度カッターヘッドで破碎された岩塊、坑道壁面から剥げ落ちた岩塊（ソゲ）がテールボイドの中で、坑壁と管外壁の間ですり潰される力が剪断（割裂）強度で決まります。一般的には剪断（割裂）強度が大きい岩塊ほど推進抵抗が大きくなります。

【RQD】

カッターヘッドで破碎された碎石状の岩塊の大きさがテールボイドに入る度合いや坑道壁面から「ソゲ」が剥げ落ちる度合いに関係します。

RQDが小さいほどテールボイドに岩塊や「ソゲ」が入る量が増えるので推進抵抗が大きい。

【テールボイド】

テールボイドが大きいと大きな岩塊やソゲが挟まるので抵抗も大きい。しかし、テールボイドが小さすぎると、岩の膨張や岩粉再固結で締め付けられる。また、方向修正した場合、「せり」が生じて大きな蛇行抵抗になります。

【真砂ジャミ】

風化花崗岩の真砂や節理を持つ岩の破碎帯のジャミ状の岩砕がテールボイドに水締め状態で充填されると、大きな抵抗になります。

【盤割れ】

深度の深い山岳トンネルに近い推進工事や、粘土系の破碎帯等で空洞を穿つことにより釣り合っていた応力が一気に開放されて推進管の外周を大きく締め付けることがあります。この現象に遭遇すると脱出するのに大変な労力を必要とします。

このように、岩盤推進の管外周抵抗は土圧のかかる土砂の管外周抵抗と、その様態が全く異なるので、土砂地盤のような管外周抵抗の算定式ができません。CMT工法では推進抵抗の源を



写真1 岩塊による掘進機の破損

「ズリ変形抵抗」と捉えた式をグラフと表で表示していますが、これは「フローティングシステム」と呼んでいる特殊な押し方をするを前提とした算定方式なので、一般には通用しません。そこで一般的に利用できる式として次の式を提案します。

$$f_0 = f_s + [\alpha \cdot \sigma_t / (Rq + \beta)] + \gamma$$

但し f_s : 粘着力による基礎抵抗

泥岩頁岩 KN/m²

破碎スライム KN/m²

σ_t : 岩の割裂強度 MN/m²

Rq : 岩のRQD %

α : 岩の割裂強度の補正係数

—

β : 岩のRQDの補正值 %

γ : 管表面、先端抵抗等による補正值 KN/m²

★フローティングシステム

一般に推進工法における管外周の推進抵抗は、掘進した管外周のテールボイド部分の空洞に対してテルツアギーの土圧理論により生じた土圧と管外周との摩擦により推進抵抗が生じるとされています。

フローティングシステムは、掘進により穿ったテールボイドに塑性体状の緩み土圧抑制材（一次裏込め材）を高圧注入をしてテルツアギー理論でいう高次の緩み土圧を生じさせなくする工法です。これにより、管の外周抵抗は「摩擦抵抗」では無く、塑性体である緩み土圧抑制材の「ズリ変形抵抗」であるとの理論です。この理論における「ズリ変形抵抗」は速度と粘度のみの関数であり、時間や土圧および土質の影響は受けません。即ち、超長距離推進等の際に生じる長時間施工においても、これによる推進抵抗の増加は生じません。また、緩み土圧抑制材は、自然に存在する素材を原料としている為に劣化が少なく地表への影響は最少に抑えることができます。

★こんな事もあります！

坑道壁面からの剥げ落ちた岩塊（ソゲ）による管外周抵抗は非常に大きなもので、推進ができなくなる場合もあります。2003年山梨県釜無川流域下水道工事では管外の岩塊のカム作用？のために掘進機本体の外周板（35mm）が押しつぶされ、補強フランジまでもが大きく変形するという、考えられないアクシデントが起きました。

3.3 支圧耐力の算定

支圧コンクリートの最小厚さ

岩盤が亀裂の少ない岩である場合でも、表面は凸凹なので支圧コンクリートを打設しなければなりません。その場合、支圧壁内部には元押しジャッキから受ける集中応力によって集中応力の1/5～1/6分の割裂応力が発生します。この割裂応力が原因で支圧壁が割れることの無い支圧壁を確保しなければなりません。引っ張り強度1,600KN/m²のコンクリートを用いる場合、支圧壁の大きさにもよりますが極めて大雑把に言えば、揚力1,000KNジャッキ4本使うならば最小厚さ、0.4m、揚力1,500KNジャッキを4本使うならば、最小厚さ0.6m程度は必要です。

岩盤のRQDが低くければ、岩盤でもN値＝60程度程度の砂礫として計算しておく方が安全です。支圧壁の範囲内でRQDの変動が大きいと、それが原因で支圧壁が割れることがあるので割増しての打設を考慮します。この場合の算定式は土砂推進の場合と同じなので式は省略します。

3.4 切羽防護のための掘進方法

岩盤推進には岩の破碎帯や泥土化帯、あるいは半岩半土帯など、何らかの方法で切羽防護しなければならないと部分で沢山あります。「岩盤推進」の難しさはむしろ切羽防護にあると言ってもよいくらいです。

破碎帯は巨大転石混じりの砂礫と

思ってください。泥土化帯はN値が「0」自沈の軟弱地盤を想定してください。半岩半土帯は上半断面の地盤が普通土程度であっても下半断面が岩であるため掘進速度が極端に遅く、そのため上半断面の地盤が、切羽防護なしでは崩落してきます。

このように、岩盤推進でも必ず、何らかの切羽防護方法を用意しなくてはなりません。

★岩盤推進で通常採用されている切羽防護方法には次のようなものがあります。

【面板加圧方式】 ディスクカッターやローラビットをもちいる、火成岩やチャート岩盤に採用されます。

【削土密閉加圧方式】 スクレーパーカッターやスリットカッターを用いる水成岩に主として採用されます。

3.5 曲進と方向修正

方向修正が正確にできると言うことは、曲進もできるということです。岩盤推進における方向修正は管のひび割れとの戦いです。特に100MN/m²を越える岩になると掘進機が作った先行路線から1mmたりとも凹んでくれません。掘進機のテールボイドに挟まった岩塊は掘進機の胴で押されても岩壁にめり込むことはありません。従って、僅かの修正も管2本以上に亘って、正確に修正しなくてはなりません。このために、岩盤内での曲進半径は概ね普通地盤内の可能半径の2倍程度を考慮しておく方が安全です。無理な設計をすると異常な推進力が発生したり、管破壊が生じたりして施工が不能に陥る恐れがあります。

3.6 排土方法

岩盤推進では日進量が小さいので、排土量だけから考えるとトロバケツ排土で十分に間に合うように見えます。しかし、硬い岩盤内での掘進においては、掘進機は振動と騒音が激しく労働

環境は必ずしも良好とは申せません。従って、作業員が常時掘進機内に居ることは好ましくありません。また、ビットを長持ちさせるためには水中で使う方が経済的に有利であるため、水力排土方式を採用している場合が多いようです。

4 岩盤推進の計画と施工

4.1 岩盤推進の計画

(1) 岩盤推進の線形の選定

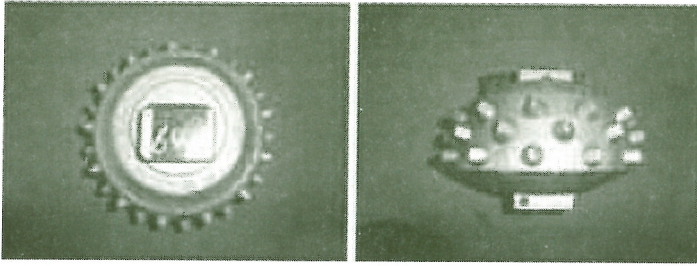
岩盤推進は難しいと言えどもその線形選定には変更することのできない、継続した管路であることや、地表の道路や建物などの施設による制約が多くあります。しかし、可能であれば以下のように選定できれば施工上は有利になると考えます。

①平面線形と立坑位置

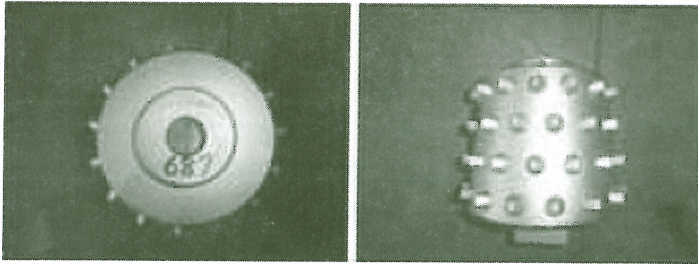
管路内に普通土と岩盤が存在する場合、岩盤内での立坑掘削は経済的に非常に高価になりますので、発進立坑位置はできるかぎり普通土の部分に設置するようにします。なお、このような条件下では推進施工途中で普通土から岩盤への層境部分が到来します。その半岩半土部分の通過の際には、オペレータの細心の注意が必要ばかりではなく、地盤改良などの補助工法なども考慮しなければなりません。また、推進方向としては岩線の等高線なるべく直角に岩に入ることが望ましい方向です。斜めに入ると水平と垂直の両方の方向制御をしなくてはならないので高度の熟練が必要です。また、先にも述べたように、曲進の曲率半径は一般地盤の場合の2倍程度にする方が安全です。

②縦断線形

縦断線形は管底高さの制約があって、必ずしも変更できるとは限りませんが、変更できる中があるようでした



ゲージカッタ3裂



フェイスローラ4裂

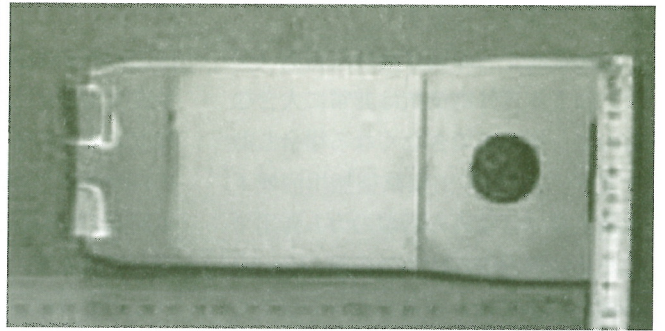


写真-2 ローラビットと切削ビット

ら、岩線近くを走らないようにして下さい。半岩半土の施工は技術的の難しいばかりではなく、薬液注入等の地盤改良が必要になる場合が多く経済的にも不利になります。一般的に岩盤想定線等はボーリング調査で得た岩線のポイントを直線で結んでいますが、実際の岩線は1~2mの波があります。岩線の直近を施工すると、岩盤に入ったり出たりするので、常に難しい層を施工する事となり、施工上不利になる訳です。

(2) カッタビットの耐用延長

カッタビットの寿命はビットの磨耗と破損が原因です。その内でも最大の原因である磨耗に関しては、近年超硬合金の材質が非常に良くなったことと、チップ形状やこれをシャンクに取り付ける技術が長足の進歩を見ましたので、ビットの磨耗は岩盤を構成する造岩鉱物である珪酸分の関数であると大雑把な理論だけでは適合しないことが明らかになりました。岩種やその性状、さらには切羽の亀裂状態により、掘削方法が大きく異なります。掘削方法の大きな要素は押付力です。適切な押し付け力で無ければ掘削でき

ません。例えば、押し付け力不足の場合には切削力を生じさせることができず、空運転に近い状況となり磨耗が激しくなり、寿命は格段に短くなります。特に、外周側のビットが早く磨耗します。ビットメーカーの技術や使用者側の使い方(オペレータ技術)で2倍程度の差を生じることがあります。このようにカッタビットの耐用延長は岩盤の種類・亀裂・構成鉱物 さらには工法による掘削方式・オペレータ技術など多くの要素により決まりますので一概にならないのが事実です。

①切削ビットの耐用延長

岩盤推進用の切削ビットも経験を積むに従いメーカーの技術が向上し、切削ビットの耐用延長はチップ部分よりもシャンクの磨耗の方が大きく影響する傾向になりました。シャンクが痩せ細ってくれば寿命です。シャンクの材質磨耗の度合いが大きく変化します。このことから、切削ビットの型式やシャンク材などに関しては更なる研究が必要です。因みに、CMT工法では切削ビットの寿命はおおよそ100~400m程度としています。

②ローラビットの耐用延長

昔はチップの破損や磨耗が寿命でしたが、今は殆どが、ベアリングかシールの寿命で耐用延長が決まります。CMT工法ではおおよそ100~300m程度です。

★こんな事もあります!

ローラビットの大きさは推進管の径によって制約されますので無闇に大きくすることができません。また、ローラビットには30tも40tもの大きな力が掛かりますから、ビット内部のベアリングは小さくすることができません。抛って、シール部分に使える断面が確保することができず、鉄壁なシール機能を得ることができないのです。富士山系の熔岩等は、磁気を帯びている為に粉砕された岩屑がローラビットの回転軸付近に集着し、シールを傷める結果となり、ローラビットの寿命は一般の岩盤でのそれに較べて1/3程度と非常に短くなってしまいました。

(3) 岩盤推進の日進量

①基準日進量

ローラビットを使う場合、実際に岩を破碎する速度は割裂強度の関数であって、一軸圧縮強度の関数ではないと言うことを述べました。しかし、岩盤の資料として、割裂試験資料が頂けることは滅多にないので、読者の都合上、一軸圧縮強度別に基準日進量を提示しています。CMT協会で見積るときは、岩の名称やその地域の岩の

特色やRQD、過去に試験した割裂強度を参考にして決めています。過去の割裂試験も資料が無い時は、岩のサンプルを頂いてCMT協会から公的機関に試験して貰います。これらの調査は単に基準日進量を決めるためだけでなく、ビットの型式やチップ硬度、カッタヘッドの仕様を決めることにも使用します。カッタヘッドの仕様が岩に合わない場合は実際の日進量が半減するので非常に大切なことです。

②各種補正

基準日進量に色々な補正係数を掛けて補正日進量を出します。補正のなかで大きく影響するのが、「半岩半土補正」と「粘土補正」です。半岩半土を掘進する場合は掘進速度を全面岩掘進の半分以下に落とさないと、岩に乗り上げてしまいます。粘土補正はローラカッタで掘進するとき、粘土層の中では土砂の取り込み不良が起るため、掘進速度が半減することを補正するものです。切削タイプのカッタでは粘土補正はありません。

1スパン内で岩盤から粘度地盤に変化する場において、当初岩盤用のローラビットを装着して発進し、これが粘度地盤に入ると掘進能力を全く失い推進が不能になる場合が多々あります。変化の激しい我が国での推進においては施工途中での機内からのビット交換が必須要件とさえいえます。

(4) 岩盤推進における湧水

岩盤推進では切羽に地下水等、出ないと思われる方がいらっしゃいますが、実際に湧水は多いものです。これは、日本の岩盤には断層に伴う破碎帯が如何に多いかと言うことの証明でもあります。ただ、富士山系の溶岩層での地下水は物凄い量が流れていますが、これは断層とは無関係のようです。

先に述べた桂川流域下水工事に置ける水の場合は、洞穴や亀裂を通じての

水が大半のようです。湧水内での切羽の確認やビットの交換は普通推進と同様に、地盤改良と圧気工法などを併用して止水した上でのビット交換になります。これは、切羽に薬液注入のみで止水すると推進抵抗が増加しその後の推進に支障がでることがありますので、控えめな薬液注入と圧気を併用するわけです。このタイミングや微妙な調整は経験によるしかなく、施工者の能力によるところが多い作業です。

(5) 岩盤推進に用いる推進管

岩盤推進における管外周抵抗は、先に述べたように、岩塊や「ソゲ」がテールボイドのなかで噛み込んだり、軋んだりする抵抗です。言い換えれば管の半径方向に1点集中荷重を掛ける事により生じる抵抗です。岩塊や「ソゲ」の割裂強度から1点集中荷重を計算して、その値に耐えるひび割れ荷重を持った管を選ばなければなりません。岩盤の割裂強度が大きいと、多くの場合、JSWAS A-2規格のヒューム管ではひび割れ強度が不足します。2種管や特圧管を使うこともありますが、JSWAS A-8規格管のひび割れ耐荷力は非常に大きな値をもっているため、殆どの場合、JSWAS A-8規格管が選定されます。半径方向の1点集中荷重に耐えるために、ひび割れ荷重のおおきなJSWAS A-8規格の管を選定した場合は、このヒューム管は管軸方向にも大きな耐荷力を持っているので、その大きな耐荷力により中押し段数を削減することができるのその部分での工費を節減をします。

ヒューム管規格を定めた時点では、土圧と軸推力は検討しているけれど、岩盤推進に伴う岩塊や「ソゲ」による1点集中荷重は予想もされていなかったと思います。しかし岩盤推進が増え始めると、1点集中荷重によるヒューム管割れで泣かされていました。それ

がJSWAS A-8規格管を使い始めてから、トラブルが激減しました。その理由は、管のコンクリートの軸圧縮強度が90N/mm²であると言う事も然ることながら次の特長や効果によるところが大きいと思います。

- 最もひび割れしやすいヒューム管の内面の直近部分にガラス繊維が入っているためにひび割れを防いでいる。
- コンクリート膨張剤が入っているので、ケミカルプレストレス管としてひび割れしにくい。この管は大きな歪に順応することができる
- 1点集中荷重を受けて、ヘアークラックが見えても、岩塊や、そげが破壊し応力が抜けるとヘアークラックは消えてしまいます。一方、JSWAS A-2規格のヒューム管の場合一度ヘアークラックが入ると応力が抜けてもヘアークラックは消えず、むしろその後の繰り返し応力で次第にクラックが広がります。
- 万一、ヒューム管に孔があいても、JSWAS A-8規格管の場合は局部的に孔が開くだけで、広い範囲に管割れを起こさない。そのため、坑内水没などの事故を免れることができます。

(6) 岩盤の種類とその特長

①主な火成岩

【流紋岩】

割裂強度は20~25MN/m²もあり、緻密で風化しにくい。節理は全く無く亀裂も少ない。岩盤推進で古生代砂岩と並ぶ手ごわい岩です。

【花崗岩】

割裂強度は8~10MN/m²と低く、掘削し易い岩の代表。結晶が大きく、水を透すので厚く風化します。

そのため半岩半土の乗り切りは比較的容易な場合が多いのですが、そのかわり風化花崗岩のなかにはところどころに未風化の岩芯があるので、岩芯で悩まされるのが特長です。

表-5 成分と結晶による火成岩の分類

成分 深度	酸性岩	中性岩	塩基性岩
浅成岩	流紋岩	安山岩	玄武岩
半深成岩	石英斑岩	玢岩	輝緑岩
深成岩	花崗岩	閃緑岩	斑麗岩

特長	割裂強度
結晶粒は小さくて見えない	大
	中
結晶粒が大きく識別できる	小

特長	石英分が66%以上白っぽい	斜長石に混ざって薄草色	輝石角閃石が多く黒っぽい
割裂強度	中	大	中

【安山岩】

割裂強度は15～20MN/m²程度。造岩鉱物として角閃石が混じって薄草色のものが多い。広域に纏まって分布する岩ではありませんが、局部的に多く存在する岩です。

【閃緑岩】

割裂強度は15～20MN/m²程度。結晶は小さいが肉眼で見えます。それでいて亀裂もなく、風化しないため、半岩半土になると、かなり苦労します。薄藍色をして広く分布しています。

【玄武岩】

割裂強度は12～16MN/m²程度。造岩鉱物として輝石、角閃石が入っているため黒っぽい。結晶構造の都合で柱状節理が発達しているため破碎はし易い。しかし破碎された岩塊は硬いので管外周抵抗が上がりやすい。富士山系の岩は殆ど玄武岩質です。

【斑麗岩】

割裂強度は8～12MN/m²程度、美しい草色の結晶は見えます。風化しやすいため掘削は容易です。

②その他の火成岩

【溶岩】

マグマが急冷してできたので、基本

表-6 年代と粒径による水成岩の分類

	凡その年代	大粒	粗粒	細粒	割裂強度
新生代	7千万年以後	礫岩	砂岩	泥岩	小
中生代	2.7～0.7億年	中硬質礫岩	中硬質砂岩	頁岩	中
古生代	2億7千万年以前		硬質砂岩	硬質頁岩	大
	割裂強度	小	大	中	

的にはガラス質です。富士山系の溶岩は成分としては玄武岩質なので割裂強度は大きく、粘っこい岩です。ガスを多量に噴出したものや、火山弾を取り込み礫岩になった岩や、火山灰が固まって凝灰岩になったものもあります。溶岩と言っても、七変化しているので、性質が随分違います。

【岩脈】

マグマが断層などに沿って既存の岩のなかに貫入して固まった岩です。急冷(ダイク)したので岩脈は硬く、切削タイプの Cutterヘッドで掘削中の頁岩のなかに岩脈があると、切削型のビットでは掘進不能になることもあります。岩脈に近接する水成岩は薄緑色に変成して硬くなっています。これもまた、不用意に遭遇するとひどい目にあいます。

③主な水成岩(堆積岩)

【礫岩】

主として砂岩の中に火成岩の礫を取り込んだ岩です。砂岩が硬くなく、礫の大きさも1cm程度なら、切削ビットでも掘削できることもありますが、2～3cmになるとチップが割れたり、はずれたりします。礫径は場所によって変わるので大きくなることも考慮しなければなりません。

【硬質砂岩】

見た目にも閃緑岩にそっくりで、割裂強度も20MN/m²程度あります。割裂強度も大きいけれど、節理や亀裂が全くないので、ローラビットのチップの先で突いて取れたズリだけしか掘削できません。

日進量が上がらないので、安請負をすると大変です。

【頁岩】

岩の一軸圧縮強度は20MN/m²以下なので、切削ビット方式で掘削した方が掘進能率も良いのですが、岩脈が貫入して変成し120MN/m²程度になっている部分があります。通常数mの距離で終わります。

【泥岩】

泥岩の中のシルト、砂の含有分が少ないと、粘着力が非常に大きくなって掘削ずりの取り込みが困難になります。

④その他の水成岩

【チャート】

チャートは一般に水成岩に分類されていますが、実際には交代変成作用で石英ばかりが集合してできたものもあります。しかし、水成岩のチャートは多くの場合、層状に5mm前後の頁岩を挟んでいて掘削するとチャートがサイコロ状になります。

【石灰岩】

典型的なのは沖縄の琉球石灰岩です。鍾乳洞があります。機長の短い掘進機では洞穴に落下する危険さもあります。

【凝灰岩】

多くは一軸圧縮強度は30MN/m²前後です。しかし、神戸層群の凝灰岩のように、70MN/m²に達する部分を含む硬いものもあります。切削タイプにするかローラタイプにするかの判断を間違えると酷い目にあいます。

⑤主な変成岩

【緑色片岩】

和歌山県の広域変成岩は緑色片岩と黒色片岩が殆どです。層状節理が強く発達しますので、掘進方向と節理の方向によっては掘進速度が極端に変わります。実際には、走行（ストライク）と傾斜（ジップ）が正確にはわからない場合が多く、積算に反映しにくい岩盤です。

【ホルンフェルス】

砂岩が、岩脈等に接触変成してできる変成岩の一種です。一軸圧縮強度が30MN/m²を越え、割裂強度も25MN/m²もある岩です。あまり広い範囲に分布はしていませんが、プレーカも受け付けません。

山岳地帯には存在していますのでご用心ください。谷間や河川の転石を調べて有無を判断します。

4.2 岩盤推進の施工

(1) 断層内での岩盤推進

日本の地盤は断層だらけです。殆どが褶曲断層ですが、実際に岩盤推進工事を施工していますとその多さに感心します。記録を取った訳ではないので正確ではありませんが300mに1箇所程度あるように思います。また、大雑把な言い方をすれば火成岩地帯の断層は巨大転石混じりの砂礫状になっている場合が多くあります。一方水成岩地帯の断層はN値=0回のヘドロ状になっていることが少なくありません。いずれも断層巾は1mから6mまでと考えてよさそうです。

日本の岩盤推進の難しさは、硬い岩を掘削することではなく、断層突破ができるか否かの技術の勝負です。後でも述べますが、岩盤と断層帯では掘削方式やビットの型式が全く異なる場合がありますので、我が国における岩盤推進の工法はこれらを解決できる手段を持った掘進機でないと対応ができません。

いといっても過言ではありません。

①巨大玉石混じり砂礫状断層

花崗岩のように水を透す岩盤の断層内では、巨大玉石混じり砂礫状になることはありません。流紋岩や閃緑岩は水を透さない岩盤内の断層では、巨大玉石混じり砂礫状になる場合が多くあります。そこを突破するためには、極力玉石を動揺させずに推進することが肝要です。

②N値=0回のヘドロ状断層

花崗岩基盤の断層では、火成岩でも、この「ヘドロ状断層」があります。これは断層内の破碎された花崗岩の石英分が地下水に溶けて流失し、残った斜長石が粘土化したものです。水成岩の断層内は一般的には超軟弱地盤になっていますが、古生代の砂岩は例外で火成岩並と考えておく方が正解です。

(2) 峡谷内での岩盤推進

岩盤推進では岩山の中腹の道路下の推進施工という場合が少なくありません。そのような道路は過去に谷間だったところを埋めて道路にしたので、元の谷間は岩山の上から落ちた大きな岩塊や、道路を作るときに破碎掘削したズリで埋められています。そのため巨大玉石混じりの砂礫状態です。断層と異なり、この場合は地下水がなく、添加材が抜けてしまう状態が少なくありません。突破方法は断層に準じます。

③空洞のある岩盤推進

先にも述べたように、岩盤推進に伴う空洞は、石灰岩地盤や溶岩地盤にあります。まれに、炭鉱や鉱山地帯では古い採掘跡や坑道に突入することがあります。岩盤推進をしていて、掘進機の先端が空洞に入ると急に静かになります。そのまま推進すると「ずっこける」ことがあります。切羽調査をしてその掘進機長と推進管長で渡り切れるかどうか即時に検討しなければなりません。また、滑材や添加材、さらには

泥水の流失にも気を付けなければなりません。

★こんなこともあります！

代表的な空洞は琉球石灰岩の鍾乳洞です。カッタートルクが急激に低下し、掘進機の推進抵抗も殆ど無くなったため施工を中止し切羽を点検したところ前面約1.5mは暗闇の空洞で点検員は驚愕。空洞長さを正確に確認の上、検討してこの空洞を渡り切りました。このような自然が造った空洞ばかりではなく北九州地区や旧金属鉱山地区には旧坑道という人工的空洞も存在することがあります。北九州では推進工事のため1km前方の地表が陥没し、その原因調査をしたところ、推進工事のための揚水が旧坑道に影響を及ぼして陥没を誘発したことが明らかになり、関係者一同は狐につままれた感で顔を見合わせました。

④半岩半土の岩盤推進

推進工法は比較的浅い土被りで推進することが多いので、殆どの場合、1スパンの中に岩盤の区間と一般地盤の区間があります。そのため、両区間の間には岩盤から一般地盤に、または一般地盤から岩盤に移り変わる区間が生じます。この区間では掘進機の掘削断面は下部が岩盤で上部が一般地盤と言う区間があり、このような状態を半岩半土区間とよんでいます。岩盤と一般地盤の境目を岩線といいますが、岩線は通常20°程度の傾斜をもっています。ときには、岩線がほぼ水平のため、長い区間が半岩半土のこともあります。岩盤推進工法でこの半岩半土区間を突破することは非常に難しく、上部の一般地盤の自立性、掘進機のオペレータの技能が必要なことは勿論のこと、掘進機の構造も半岩半土区間を乗り切れる特殊な構造が必要です。半岩半土区間を突破することの難易度は主に、(イ)岩の硬さ、(ロ)風化帯の厚さ、

(ハ)一般地盤の自立性、(ニ)岩線の勾配、(ホ)カッタヘッドの仕様、の5要素で判定します。

その他、掘進機の機長やテールボイドの大きさ、RQD、地下水の有無等も関係します。

1) 半岩半土の方向制御

岩は軟岩でも、一般地盤の固さは桁違いに硬いため、掘進機のカッタヘッドは岩を避けて一般地盤の方に逃げようとしていきます。いくら地盤改良しても、土砂地盤は岩ほどは硬くなりません。そこで、掘削速度を全面岩盤掘削の場合の半分以下に落として、少しずつ岩を削って進まなくてはなりません。半岩半土掘進の方向制御で最も難しいのは、岩線の傾斜が推進方向に対して、大きく斜めになっているときです。通常的地盤の中でも斜め方向の修正は非常に困難です。同時に左右の方向修正をすると掘進機先端は必ず上がり始めるので、どちらか、片方の緊急方向の修正を済ませてから、その時点での掘進機のセンタと勾配を判断して次の方向修正を行いません。岩盤の中では左右の方向修正を済ませたときには、勾配が修正不能の状態になってしまうことが多くあります。そのため、設計時点では岩線の走行傾斜を調べ、設計条が可能であれば岩線の傾斜方向に推進線形を合わせるようにし、どう

しても線形上困難ならば、斜め着岩施工ができる技能を持ったオペレータを有する専門業者に限定して施工を依頼しなくてはなりません。

2) 着岩または離岩

岩線は絵に書いたように綺麗な斜面になっていることは滅多にありません。着岩する場合でも、2~3回は着岩したり離岩したりした後に本格的に着岩します。そのための着岩までに手前の岩頭に乗り上げると、着岩後には容易に修正できなくなります。その点離岩の際は、あとの修正が土砂の中なので容易です。また、着岩や離岩の際は掘進機には激しく動揺します。この動揺で地盤を崩壊させることが少なくありませんので要注意です。

3) 半岩半土区間の切羽防護

(地盤改良)

半岩半土区間では、その岩盤を全面掘削する速度の半分以下の速度で掘進しなければならないので、上半断面の地盤にたいしては、適正な掘進速度の数分の1の遅すぎる速度になりま

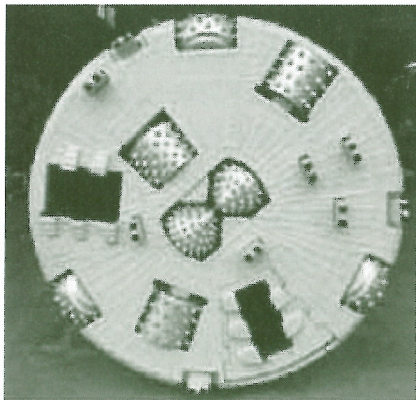
す。従って、上半断面の地盤にしてみれば、カッタヘッドは同じ位置で、回転しているのと変わりません。そのため、地盤によほど大きな自立性がないと地盤は次々に崩壊してカッタヘッドに飲み込まれていきます。これを防ぐため原則として、半岩半土区間では推進断面の上半断面の地盤の地盤改良を行います。地盤改良の目的は上記のように、地盤に自立性を与えると共に掘進機の動揺を抑制するためです。岩盤と同じ強度の地盤を作るためではありません。また岩盤と同じ強度の地盤など到底作れるものではありません。地盤改良の範囲は地盤条件によって変わりますが、目安としては以下の通りです。これに岩の風化勾配、地盤のN値、岩線の不陸、岩線の勾配と方向等を考慮して増減が必要です。

4) テールボイドに砂礫が巻き込まれる問題

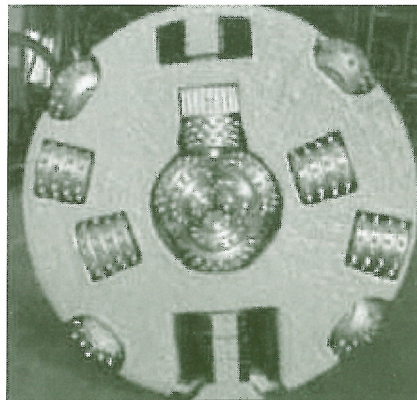
砂礫地盤から岩盤内へと推進すると、管外周の玉石や砂礫を岩盤のテールボイドに引き込んで、推進抵抗が突

表一七 半岩半土の地盤改良範囲

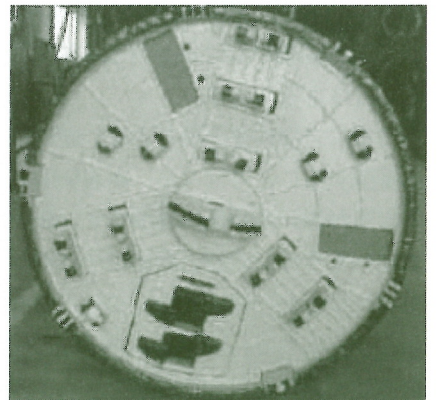
着岩改良長さ	着岩点の機長だけ手前から、掘進機天端が岩に入った点から機長の半分が挿入するまで。
離岩改良長さ	掘進機先端の天端が地盤に出た点の機長から半分手前から、掘進機後端に下端が地盤に出た点から機長だけ前方まで。
改良巾	管外周側面から1.0~1.5mはなれた位置から内側全部
改良厚さ	管天の1.0~1.5m上から、管の中心まで。



写真一三 マルチカッタヘッド



写真一四 ローラカッタヘッド



写真一五 切削カッタヘッド

然増加するだけでなく、ヒューム管がひび割れを起こします。この現象をなんとか防ぐ方法はないものかと色々やってみましたが、結局これを防ぐためには、JSWAS A-8管のようなひび割れ強度の高いヒューム管を用いる以外に今のところ良い方法がありません。JSWAS A-2管の2種管や3種管も数値の上ではひび割れ強度は大きいのですが、繰り返し荷重によるひび割れの拡大は止まらないようです。

⑤岩盤推進における必要条件

以上、説明申し上げたことで、岩盤掘進には何が必要かということがお分かり頂けたと思います。設計段階では「何とかなるだろう」との甘い取り組みは厳禁で、徹底した調査が必須であり、施工に関しては掘進機の能力が肝心であります。しかし、岩盤掘進に必要な条件を全て装備すると、掘進機は非常に複雑になり一般の地盤では使いづらい物になります。そのため、掘進機は完全なる岩盤専用機とはせず一種の汎用機になります。その場合、オペレータの能力が問題になります。掘進

機を運転するオペレータの訓練期間は数年にもなります。しかも、数年訓練しても適正の無い人には無理な部分があるようです。岩盤掘進に挑戦する場合は掘進機などの機器的整備ばかりではなく人的投資が欠かせないとの考えが必要です。

⑥岩盤掘進における立坑

1) 掘削方法

構成する岩質が非常に固い岩盤でも節理や亀裂の多い岩盤、即ちRQDの小さな(20%未満)の岩盤での立坑掘削は問題ありません。しかし、古生代の砂岩、火成岩の閃緑岩や安山岩、特定地域の溶岩のように亀裂や節理がなく、割裂強度の大きい岩盤では掘削が困難になります。立坑を築造するに要する工期も工費も設計の2~3倍かかることが少なくありません。発進立坑の掘削が2~3ヶ月遅れたので発進が遅れ、その間、掘進機や作業員を待たせたり、掘進が到達直前まで完了したのに、到達立坑がまだ掘削完了してなくて掘進機始め、全ての推進設備と作業員を1ヶ月以上遊ばした例は数

知れません。発進立坑および到達立坑共に十分な地質調査の基に綿密な計画を立てての施工をしなくては大きな損失を生じさせます。岩盤立坑の実績のある掘削方法には次のようなものがあります。

- ・ハンドブレイカによる手掘り
- ・機械ブレイカとハンドブレイカによる手掘りの併用
- ・ダウンザホールとハンドブレイカによる手掘りの併用
- ・SLB(サイレントブラッシング)とハンドブレイカによる手掘りの併用
- ・静的破碎材やロックスプリッタとハンドブレイカによる手掘りの併用

2) 岩盤内立坑の土留め

岩盤立坑と言っても、通常は途中までは土砂で、その下が岩盤です。土砂と岩盤の間、即ち岩線に通常は挟層礫層があって、伏流水が流れています。この水を考慮して計画をしなければなりません。岩盤立坑の実績のある土留め方法には次のようなものがあります。

- ・土砂部分から岩盤部分まで全部ライナープレートとする土留め
- ・土砂部分だけライナープレートで、岩盤部分は素掘りとする土留め
- ・土砂部分をロックオーガ併用の鋼矢板で、岩盤部分をライナープレートで

⑦岩盤掘進における環境保全

1) 岩盤立坑掘削の騒音と岩粉

割裂強度もRQDも大きい岩に立坑を掘削する場合、ダウンザホールによる掘り下げが有効とされる場合が多いのですが、物凄い騒音・振動と岩粉飛散のために、採用を見送られることが多々あります。設備が大型で簡単に防音ハウスで囲えないのも一因です。このような場合、岩掘削は地表から数m下がっていることが多いので、立坑周りを高めの防音シートで囲って音を真上に逃がせば、近所は意外と静かになります。



写真一六 機内からビット交換

2) 岩盤推進の振動

硬い岩盤を推進すると土被り数mの深さでも、近所の家では、遠くで雷が鳴っているような、音がします。岩盤の上の土が粘性土の時は障子がビリビリ振動することがあります。家の基礎が岩着している場合や、砂礫地盤の上に建っている場合はあまり振動を感じないようです。掘進機が通過する路線に接近している家屋に施工に対する影響を検討するときに備えて、家屋の基礎地盤の資料や家屋調査が是非必要です。掘進機のカッターヘッドでの防音はできないので、地表影響に対する時間制限等の対策を考えなくてはならなくなる場合があります。岩盤掘進は掘進速度が遅いので、時間制限をすると非常に割高になります。従って、時間制限は最小限の区間だけにしよう細かい計画が必要です。

【岩盤推進のポイント】

以上、説明申し上げたことでご理解頂けたことと思いますが、岩盤推進の技術は単に硬い岩盤を掘削する技術も然ることながら、その他の技術、即ち半岩半土の掘進、着岩、離岩の技術、破碎帯や泥土化帯の突破、岩盤内での方向修正等の方がはるかに難しいのです。発注者や設計者が工法を選定する場合は、選定した工法がこれらの問題に対して、何らかの対策を講じているか否かを確実に確認しなければなりません。現在使用されている工法の中にはこれらの対策が不十分であるにも拘らず岩盤推進に挑戦し、施工不能に陥ったり大幅な工期遅れになるケースが見られます。推進工法は一部に専門的要素が含まれた工法です。その中でも岩盤推進は特にその傾向が強いと言うべきかも知れません。検討すべき項目が多く、しかも経験的要素が多い事も否めない事実です。それでいて失敗すればその影響は非常に大きい事を充

表一8 玉石地盤用掘進機の分類

玉石飲み込み型	非破碎飲み込み型	典型的な泥濃工法型
	破碎飲み込み型	泥濃工法型に一次破碎を併用した型
破碎型	玉石破碎型	玉石を破碎する型 破碎できない巨礫のある地盤は不可
	岩盤掘進型	全面岩でも掘削する型
排除型	非破碎押しつけ型	飲み込めない礫はカッター外周に押し退ける

分に認識し、計画段階での地盤の把握をはじめとする調査が重要な問題であり、施工者は調査結果を十分に検討して事前に対応策を用意して着手しなければならぬ工事です。

5 巨礫・玉石地盤の推進

5.1 巨礫・玉石推進の調査・設計

(1) 巨礫の定義

巨礫の話をする前に、巨礫とは何かを定義しておきたいと思います。一般に玉石地盤を推進する掘進機の方法には次のようなものがあります(表一8)。

巨礫地盤推進にとって、巨礫と言っても掘進機の掘削径と相対的なもので、例えばφ800mmの玉石であっても、呼び径φ800mmの掘進機にとってはとんでもない巨礫ですが、呼び径φ3000mmの掘進機にとっては普通の玉石と言っても良いかも知れません。従って、ここでは、岩盤掘進型の掘進機でなければ掘進できないような大きさの玉石を巨礫と定義します。

(2) 巨礫・玉石推進の地盤調査

①巨礫地盤の成因による分類

- 河川に付随するもので、最も多いのが河岸段丘です。次いで扇状地があります。また、河川横断の推進では川底が洗掘された跡に巨礫が埋まり込んでいる場合があります。
- 溪谷に付随するものでは、岩山から岩塊が崩れ落ちて谷間を埋めたり、山裾に堆積して巨礫地盤を形成するものがあります。

- 花崗岩が風化してできた真砂土地盤では花崗岩の岩芯が残っていて巨礫になっていることがあります。

- 褶曲が激しい山岳地帯では基本的に土砂地盤であっても岩脈が崩れて巨礫になっていることがあります。

このように巨礫地盤でもその成因によっては、その性格が異なるので、その成因を調査しなくてはなりません。成因がわかればその地盤特性の半分は理解できると言えます。設計・積算時に「φ800mmの玉石がゴロゴロしている地盤」だけの条件では積算することができません。しかし、上記の4種類のどれかであるとの情報があればその予測が可能で設計や積算に着手することができます。

②巨礫の割裂強度

巨礫の割裂強度がおおよそ、18MN/m²未満であれば大抵の破碎形掘進機で掘進できます。しかし、これを越えると、それに対応した掘進機と、その掘進機に熟練したオペレータが必要になります。

割裂強度はボーリングのコアーでも試験できますが、調査費が少なくできない場合でも岩石の名称が判ると、岩盤推進の専門家なら、割裂強度が推定できます。何故なら巨礫・玉石は風雨や流水など、時には日光に照らされても風化せずに残った岩石です。ですから岩種が判れば巨礫の強度はその岩種の最高の硬さがあると判定して大きな間違いはありません。

③マトリックスの土質名、粒度組成とN値
小さな玉石はカッタービットで何度か衝撃を与えると割れますが、巨礫はそんなことでは割れません。岩盤推進と同じ様に手前から少しずつ削るように破碎していかなくてはなりません。削っている間、巨礫は地盤のなかでマトリックスに支えられて固定していなければなりません。ローラビットを押し付けて削っている時に巨礫が回転したり、逃げ回ったりすると、削れなくなります。また動揺する巨礫は切羽地盤を突き崩し、切羽崩壊をおこします。従って、巨礫推進では巨礫の硬さと同じマトリックスの支持力も掘進の判断に必要になります。

マトリックスの土質名や粒度組成はマトリックスがどの程度巨礫を固定する能力を持っているかを判断する有力な資料になります。マトリックスのN値が判れば良いのですが、巨礫や玉石混じりの砂礫地盤の場合のN値は大抵、巨礫・玉石を叩いて「50回以上」となっているのが判断できません。たまにN値=30回の部分があっても、マトリックスのN値は30回程度だと判断することは危険です。何故なら、叩いている途中で玉石が割れて急に下がる場合があり、その際のデータは「30回」と記録しがちです。

調査者はこれらのことを意識して記録していただければ最良の調査といえます。マトリックスの支持力を推定するのに、もう一つ手がかりになるのが、玉石を叩いたときの玉石の沈下量です。N値の測定した後で、その玉石を穿孔し玉石の直径が分かれば、50回叩いた間に何cm下がったか、によってマトリックスの支持力が推定できます。

シルト粘土混じりの砂礫のなかの巨礫を削っていると、削っている間に、巨礫は次第に到達側に押しやられ、3~4mも押して、削り終わる頃には次の

巨礫がその後ろに控えていることがあります。そうすると掘進機はそのスパン推進の間、ずっと巨礫を削り続けなくてはなりません。巨礫・玉石を削っていく速度は4mm/分以下の場合が多く、岩盤推進なみの日進量になります。

しかし、マトリックスのN値が大きいと、例えばφ800mmの巨礫を600mm削れば残りの200mmは一気に砕けるので、掘進速度が岩盤並みになるのは600mmの間だけです。次の巨礫に当たるまでは、マトリックスの掘進速度で推進することができます。この様に、マトリックスの支持力は日進量に大きく影響するので、巨礫推進には是非必要な判断資料です。

マトリックスの支持力と自立性も、巨礫掘進の切羽保護計画に大きな判断資料となります。マトリックスにシルト粘土分が適度にあると、切羽の自立性は良くなりますがシルト粘土分が多すぎると、支持力が低下します。支持力が低下するとカッターヘッドで巨礫を前方に押し進める現象が生じ、切羽面に空洞ができ、結果として地表沈下の原因になります。

④巨礫の分布率

掘進機として巨礫破碎型の掘進機を使用すれば、岩盤掘進機と同じ掘進機なので、巨礫が掘進機直径より大きくても掘進できます。そのため最大礫径は掘進可能かどうかの判断には不要です。むしろ、どの程度の確率で巨礫が分布しているかによって施工費が大きく変わります。しかし、よほど密にボーリングしないと巨礫の分布率を推定することができにくく積算上の問題になるところです。

巨礫・玉石の分布率は、通常、掘進1m中の断面に何mm以上の巨礫・玉石が何個程度出てくるかで表現します。掘進可能な礫径は掘進機の呼び径と破碎能力で決まります。しかし、実

際にはこの巨礫率の推定が最も困難です。それは巨礫が推進スパンのなかで均等に分布しているわけではなく、極端に偏在しているからです。実際に巨礫地盤を推進しても巨礫が集合している区間があるかと思えば、砂ばかりの区間もあります。結局その推進スパンではおよそ何個ぐらゐの巨礫が出るかを多面的に推定して設計しなければなりません。そのために、巨礫の分布率として最大玉石径φmmのみではなく、最多玉石径と言う表現を使い、掘進1mの掘削断面に少なくとも数個以上でる玉石径を採用しています。この最多玉石径と分布個数などの数値を用いて日進量の補正を行うのが最も合理的であるとされているようです。なお、一般的に言えば河岸段丘の巨礫・玉石は分布が偏っていますが、扇状地における分布率は比較的均等です。

(3) 巨礫・玉石推進の設計

巨礫・玉石地盤の推進設計に当たっては調査結果を十分に考慮して設計を行うことが重要であるが上記の通り岩盤以上に調査は困難であります。このため設計者は巨礫の出現が予想できる場合は予想される岩種の岩盤が掘進できる工法・機種を採用する事が肝要であるとされています。また、調査結果が現実と大きく異なることから、現実には則した設計変更の実施を考慮しなければならぬといえます。

①巨礫・玉石推進における推進管

巨礫・玉石地盤推進におけるヒューム管の破損は古くて新しい課題です。巨礫・玉石によるヒューム管の破損は岩盤推進の場合と機構が異なります。巨礫玉石地盤での管破損のメカニズムには次のようなものがあります。

●玉石のカム作用による破損

一般的には次のような条件が揃うとヒューム管がひび割れたり、孔が開いたりする事象が起こります。

- ・マトリックスのN値が40回以上
- ・長径が80mmから150mm程度の玉石が多数ある
- ・玉石の割裂強度がおよそ 18MN/m^2 以上
- ・ヒューム管の一点集中ひび割れ荷重が玉石のそれより小さい場合

これらの意味するところは、まず地盤のN値が小さいと、玉石がカム作用を起こしても地盤の方に玉石がめり込んでしまうので、ヒューム管を押す力が生じないため玉石によるカム作用は起こりません。次に、玉石があまり大きいとマトリックスに抱えられて回転できないし、小さすぎれば、ヒューム管の強度に負けて玉石が割れてしまいます。玉石の割裂強度が低くても、玉石の方の強が割れます。次は、玉石自身の一点集中ひび割れ荷重に対してヒューム管の1点に集中荷重を掛けてひび割れする荷重のほうが小さい場合、管に孔が開きます。

●巨礫と管の間に玉石が挟みこむで破損

巨礫がある地盤ではN値が低いのに、ヒューム管が破損することがあります。この場合は巨礫とヒューム管の間に玉石が挟まって玉石のカム作用や楔作用によって、管が破損します。

●巨礫のずり下がり破損

管の肩より上にある巨礫がテールボイドの緩みによって、ずり下がってきて管に当たり、管がひび割れることがあります。

●巨礫により偏った方向を早く修正しすぎたことによる破損

掘進機の先端の片方が巨礫に遭遇した場合、速度を落として巨礫を削って進みます。このとき、掘進機はどうしても巨礫から逃げる方向に推進方向が多少狂います。この狂いを早計に修正しようとする、ヒューム管が巨礫に接している部分でひび割れます。

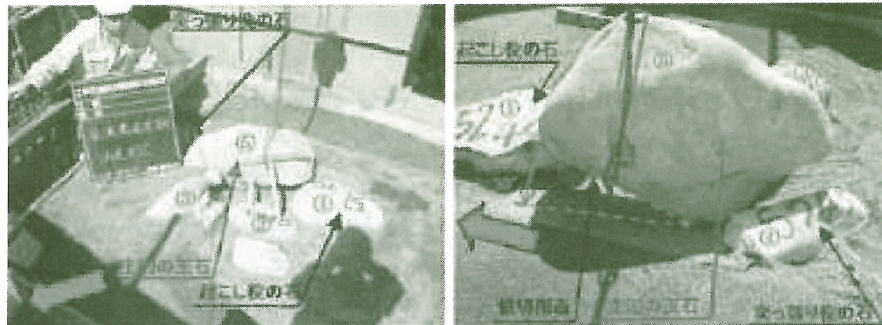


写真-7

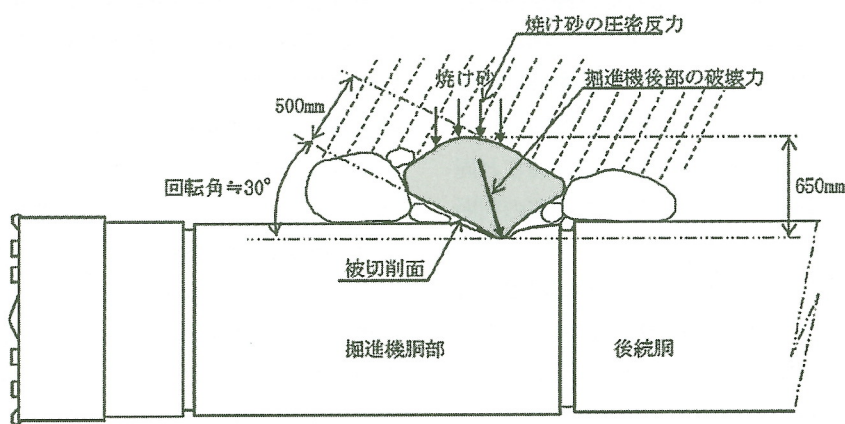


図-2 玉石のカム作用の模式図

5.2 巨礫・玉石推進の計画・施工

(1) 巨礫・玉石地盤の掘進

巨礫・玉石地盤での掘進においては1スパン内で地盤の状況が大きく変化する場合が多い為に掘削機のビットの選定が非常に困難で技術者を悩ませます。巨礫・玉石は強度が大きく、しかも、これが断続的に存在するので掘削ビットは常に衝撃を与えられ、岩盤掘進以上に破損や損耗が激しいといえます。しかし、この巨礫・玉石を支持しているマトリックス部分は、硬軟の何れも存在しこれの掘削にはローラビットでは不能な場合さえあります。巨礫・玉石地盤の掘削においては地盤調査における巨礫・玉石とマトリックスの状態を慎重に検討して掘削設備を準備しなければなりません。ビットの破損・損耗が激しいので施工途中でのビット交換は必要であると考えたほうが無難です。また前述の通り、掘削ビットは

巨礫・玉石の岩種が形作る岩盤を掘削できる強度と構造を有する物を装備しなければなりません。

(2) 巨礫・玉石地盤推進における管破碎の対処

ヒューム管が破損する条件が揃った場合は、管が破損しないように対策をしなければなりません。対策と言っても実際にはヒューム管の1点集中荷重によるひび割れ強度を玉石の割裂強度より大きくするしかありません。即ち、設計段階で上記のひび割れ破損条件を想定して、玉石の強度とヒューム管の強度を比較検討して管種を決定することが大切です。どんなに注意して正確に推進しても、管割れが起きるときは集中的に起きます。これは巨礫や玉石が平均的に分布せず、偏在しているためです。また、巨礫・玉石によるヒューム管の破損は管の半径方向の力によるもので、管の軸方向の力、即ち、推進

力には関係ないので、着工後に中押を増やしても何の効果もありません。

推進計画の際に十分な検討を怠ると管割れのためにとんでもないことになります。ひび割れ強度の大きい管としては、次のようなものがあります。

- ・JSWAS A-8規格管（ガラス繊維入り鉄筋コンクリート管）
- ・合成鋼管
- ・外径特厚管（管の外側に厚みを増やした管）
- ・内径特厚管（管の内側に厚みを増やした管）

内径特厚管は必要管径に余裕があるときは、内径側に厚い特厚管を採用することができますが、外径特厚管は1ランク大きな管の外径に合わせなくてはならないので、施工費は高くなります。

工費を節約して、工事を成功させるためには、玉石を数個アムスラー試験機で割って最大破壊荷重を求め、次いでヒューム管の先端側の1点集中ひび割れ荷重を試験または計算で求め、その地盤の玉石でひび割れしない管を選定すべきです。ヒューム管がひび割れしたり、孔が開くとヒューム管の軸耐荷力も大きく低下して推進力計画通りの推進ができなくなり、推進工事そのものが失敗します。

(3) 巨礫・玉石地盤推進における

方向制御

掘進機の先端の片方が巨礫に当たった場合、掘進機の呼び径が大きい程、方向が狂う程度が少なくなります。

呼び径の大きな掘進機ほどあとの修正が少なくてすみます。管径を大きくすると、管厚が増え、ひび割れ強度も上がるだけでなく方向制御が狂い難くなるため、管径を1ランク上げただけで、巨礫・玉石のトラブルは急減します。巨礫地盤の推進にはこのような配慮や決断も必要な場合があります。巨礫・玉石地盤を計画するとき、巨礫・

玉石推進に無知な人はまず、巨礫玉石が破碎できるか？に注目します。しかし、前もって対象巨礫・玉石が掘進できる掘進機を装備した限りは巨礫・玉石が硬くて掘進できないと言う失敗は殆どありません。多くの場合、方向修正の失敗が重なり、蛇行が酷くなり、推進抵抗が異常に増加して推進不能になる場合や、計画路線から大きく外れて修正不能になる失敗です。

(4) 巨礫・玉石地盤推進における 切羽保護

岩盤推進の半岩半土掘進と同じ様に巨礫を手前から少しずつ削っている間、マトリックスを先行して取込むことの無いようにし、巨礫を動揺させないようにしなければなりません。また、巨礫を削っている間、掘進機が激しく動揺しますが、この動揺が掘進機周辺の地盤を崩壊させた結果、掘進機と管を締め付けるので掘進機を動揺しないように抑えなくてはなりません。これらの方法については各社いろいろノウハウをもって施工しています。しかし、全く方法を講じない施工者もあり、要注意です。

【巨礫・玉石推進のポイント】

岩盤推進の技術がそうであったように、巨礫・玉石地盤推進の技術も近年大いに進歩して切削部の強化や掘削ビットの開発、さらにはビット交換の対策など、夫々の工法においても巨礫・玉石そのものを掘進することだけを取り上げるならば可能といえると考えます。巨礫・玉石推進においては単に巨礫・玉石を割ることができるか否かよりも巨礫・玉石地盤の中で確実に掘進し、正しい方向制御ができる機能と技術、巨礫・玉石が起こす管割れや切羽の空洞化による地表影響の防止、など種々の問題への対応ができるか否かが問題であることがご理解を戴けたと思います。施工者の立場から申しま

すと、これらの課題の一つでも未解決のまま巨礫・玉石に挑戦すると失敗した時の損失が非常に大きいため、一つの課題も見落とさず解決をしなければならぬことを肝に銘じるべきであると考えます。

6 おわりに

30年前に岩盤・巨礫地盤に挑戦した時に予想した通り、推進工法にとって岩盤・巨礫地盤は最も困難な地盤であり、技術的に大きく発展した現在においても解決しなければならぬ課題は山積しております。此処で最も重要なことは発注者・設計者・施工者などすべての関係者が問題点や現状を的確に捉えて対応・努力する事であろうと考えます。㈱推研前会長故本間良治は社内技術者に申しておりましたことは「技術者は常に壁に挑戦しなければならない。乗り越えるべき壁はすでに乗り越えた壁よりも必ず高い。しかし、壁の高さよりもこれに挑もうとする意志の高さが壁を乗り越えさせる」また、氏は逝去される数日前まで病床で、巨礫・玉石専用カッタの設計計算をなさっておられました。まさに「岩盤・巨礫推進に挑む」お姿でした。CMT工法は岩盤・巨礫推進の施工実績は何とか約100kmを越すに至りましたが、完成に至る道のりは未だ遠いと感じております。我が国の岩盤は殊に難しいことを十分に理解した上で、私どもは高い意思を以って挑戦し続ける所存であります。

今後とも諸兄のご支援、ご教示をお願いするところであります。

【参考文献】

- ・平成15年7月 日本非開削技術協会講演会講演者 本間良治「岩盤、巨礫対応の推進技術」資料より