

解説 礫・玉石に挑む

大中口径管推進工法の 礫地盤におけるトラブル防止

礫地盤推進技術の高度化に欠かせない環境とは

かわい あきら
川相 章

社団法人下水道管推進技術協会
技術部長



1 はじめに

推進工法で最も施工が困難な一つとして礫地盤推進がある。シールド工法が刃口式から密閉型に移行した際、泥水圧で切羽を安定させながら掘削するという概念が通用せず、崩壊性の砂礫地盤を安定掘削できずに、掘進機通過後に道路陥没を引き起こすトラブルが頻繁に発生した。礫地盤は一言で表現できないほど複雑多岐にわたり、計画時に時間をかけて準備した掘進機や掘進システムが機能を発揮できなかった例は多い。道路陥没には至らなくても、掘進機や推進管を損傷させて掘進を停止せざるを得なかったトラブルも多い。礫地盤におけるトラブル発生率は他の地盤に比べ圧倒的に高くなっているのではないと思われる。さらに、礫地盤では、礫と礫の間に含まれるいわゆるマトリックスの性状によって掘進機の対応を変えなければならない。崩壊性の礫地盤や、硬くて大きな巨石の礫地盤層を確実に推進させる難しさは、理屈ではなく、現場経験者のみが語れるものなのかもしれない。しかし、現場経験には限界がある。経験者は機会があればその情報を発信し、多くの

関係者が礫地盤に対する認識度を高めれば、わが国におけるこの分野の技術力は飛躍的に発展するものと考えている。以下では、大中口径管推進工法によって礫地盤を推進する場合の留意点と、礫地盤推進技術の高度化に不可欠な環境について示したい。

2 礫地盤とは

礫地盤とは、礫質土（15%≦細粒分<50%）、細粒分まじり礫（5%≦細粒分<15%）、あるいは礫（細粒分<15%）を言う（推進工法体系Ⅱ2010）。礫といっても、細かい礫から粗いものまであり、さらに、従来は玉石と称していた粗石、巨石まで範囲を拡大すると、現在の推進工法はとてつもなく困難な地盤を対象範囲にしていることが分る。巨石とは粒径が30cm以上のものを言うが、礫地盤の形成過程でその性状は異なる。堆積層に点在するものは転石であり、岩盤が風化されて芯だけ残ったものは岩芯（コア・ロック）という。土石流などで扇状地に拡散されたり、河川上流に取り残された巨石は全て転石である。

いずれにしても、転石にしるコア

ロックにしる、それらは周囲が削り取られて芯だけ残った最も硬い“石”の塊である。“石”はある時期、岩盤組織の一部として存在していたわけで、その岩盤の形成過程も硬さに大きな影響を及ぼすことになる。河原の“石”は、泥岩、砂岩、チャート、安山岩、玄武岩、凝灰岩、花崗岩など火成岩、堆積岩、変成岩からなり、また、それを構成している鉱物の性質によってさまざまな硬さを示すことになる。また“石”に変化した後の風化の度合いによっても硬さは異なる。さらに、それらの“石”が単体ではなく、掘進機の前面に砂礫地盤として出現した時、礫と礫に含まれる細粒分いわゆるマトリックスの性質によって、地盤は掘進機に



写真-1 河原の石もいずれ推進対象礫地盤に？

とってまったく異なった性状を示すのである。マトリックスが細砂と粘性土では地盤の安定掘削に及ぼす影響も異なる。マトリックスが細砂で、地下水位以下が対象地盤となった場合、カット面板の開口率を小さくして面板で抑えながら掘進しなければならない。逆に粘性土の場合には、開口率を小さくすると開口部を含めてカット機構に粘性土が付着して閉塞状態になる。開口を大きくすると、礫の破碎能力はカットローラだけでなく、機内に取り込んだ後で破碎する機構も必要になる。マトリックスが砂であれ、粘性土であれ破碎すべき石が移動すると破碎能力の低下は否めない。また切羽面に出現する礫の大きさと個数にも影響を受け

る。礫の個数が少ないと破碎時に礫そのものが移動して、破碎しにくくなる。これは粘性土層でも同じである。

わが国の主要都市はほとんど1万年前から堆積した地層いわゆる沖積層に立地している。通常の推進工法はこの沖積層や沖積層の下部にある2万年以降1万年までの間に堆積した洪積層で施工することが多い。この洪積層の下部には河川などで運搬された礫を多く含む。しかし、これらの下部層は河川の浸食や経年隆起によって、生活基盤の直下に出現することがある。さらに、山沿い地区では扇状地が多く、そこは礫層として形成された地盤が多い。さらに、1スパンの推進延長で礫地盤から粘性地盤に変化することもあり、わ

が国における推進工法はこれらの条件を事前に十分考慮して計画したとしても、想定外の施工を余儀なくされることが多い。

3 礫地盤と推進工法

コアーロックの場合は、それが存在する範囲をある程度想定できても、切羽に出現する転石の個数まで言いあえることは困難である。特に、掘進機の面板の開口部の大きさによっては取り込めない礫もある。したがってそのような大きな礫は破碎することが前提条件になる。土圧や泥濃方式では、機内に取り込めたとしても、大きな礫は坑外への排出は圧送ポンプや吸引排土では不可能で、トロバケットなどによる別途搬出になる。このように、各方式の排土形態が礫地盤への適応性に影響していることから、それを考慮した掘進機の仕様が必要となる。礫を破碎するために掘進機のカットビットを含めた機構全体の工夫が要求されるのである。礫地盤ではカットはローラカットまたはディスクカットやチップインディスクカットを用いる。写真-2は礫地盤用ディスクカット装備掘進機、写真-3はチップインサート型ローラカットである。

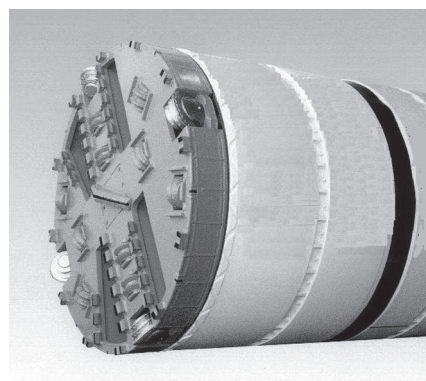


写真-2 ディスクカットを装備した礫泥水掘進機

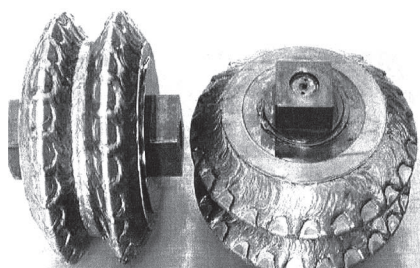


写真-3 チップインサート型ローラカット

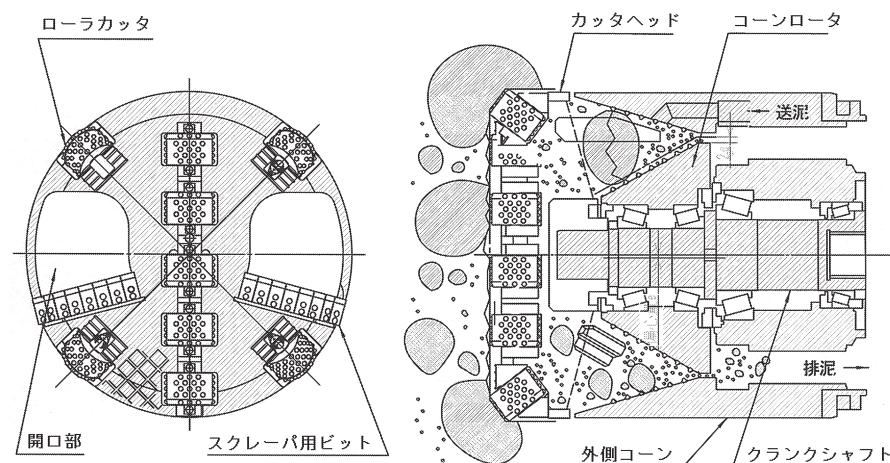


図-1 泥水掘進機による礫破碎イメージ

4 礫地盤におけるトラブル

4.1 カットビットの摩耗

実工事における礫地盤は計画時と異なり様々な性状変化を示すので、最適な掘進方法を事前に決定することは甚だ困難なものがある。掘進機の仕様を経験的に決定したとしても、予想外のトラブルに遭遇することが多い。例えば、掘進機と推進管および掘削後の地盤とのクリアランスなどが微妙に影響して推進管にトラブルを発生させる。

あるいは掘進機のカッタビットや面板が掘進開始後、早い段階で摩耗してしまう例などがある。摩耗については、推進抵抗力の増大だけでは判断はできない場合が多い。写真-4は、礫地盤で掘進機のローラカッタが摩耗欠損している例である。最外周部のビットが欠損すると、掘進機は前に進むことができない。摩耗の原因として、適正な材質、形状のビットを選択できたか、あるいは寿命を考慮していたかということが取り上げられる。本例のようなローラカッタの場合、特に外周部のものに最も破碎効果を期待することになるので、取り付ける配置、個数および摩耗度の進行をあらかじめ理解し、交換作業をどの時点で行うのが最善か十

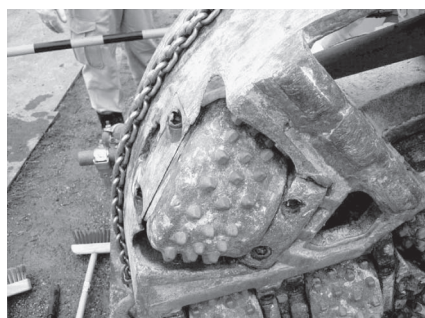


写真-4 外周ローラビットの欠損

分認識しておく必要がある。これはローラビットの可能転動距離を知っておくことでもあるが、機内から交換できない掘進機の場合には、交換場所としての立坑設置場所をあらかじめ計画しておかなければならない。現場技術者には十分な経験が必要になる。

4.2 礫地盤におけるトラブルと対策

礫地盤では、掘進機の礫破碎能力が工事の成否を左右することになるが、同時に礫地盤を安定状態で掘進できることが極めて重要となる。マトリックスが細砂の場合、切羽を崩壊させることがある。密閉型の泥水、土圧および泥濃方式に限らず切羽天端部分の安定は必須である。掘削地山の不安定は地上部への影響（図-2）、ひどい場合は推進管（図-3、写真-5）、掘進機の破損（写真-6）原因になる場合がある。図-2については、前述しているように、礫地盤の特質が原因で、数日から数ヶ月後に切羽天端部の崩壊が地上部まで移動して道路陥没を生じさせる場合を示している。掘進機内への礫取り込みが閉塞状態に陥り、その状態で掘進機のカッタを同一地点で回転させ続けると、天端部の細砂分だけ掘進

機内に取り込むことで、そのうち礫分の崩落を生じさせ、結果的にその崩落が地上部まで移動する。空洞が小さい場合は、舗装面の沈下で済むが、大きい場合は陥没する。トレーラや生コン車、大型バスのように輪荷重が大きい場合に陥没させてしまうことがある。

このような地表面の沈下や陥没を防止するためには、

- ① 礫径と礫率が把握できる地盤調査方法を採用すること
- ② 切羽面を崩壊させないこと
- ③ 面板の開口率を礫の状態に応じて工夫すること
- ④ ディスクカッタやローラカッタの切削能力および機内二次破碎設備能力を十分理解しておくこと
- ⑤ 切羽面での閉塞の防止
- ⑥ 掘削土量の変化を把握すること
- ⑦ 余分なオーバカットはしないこと

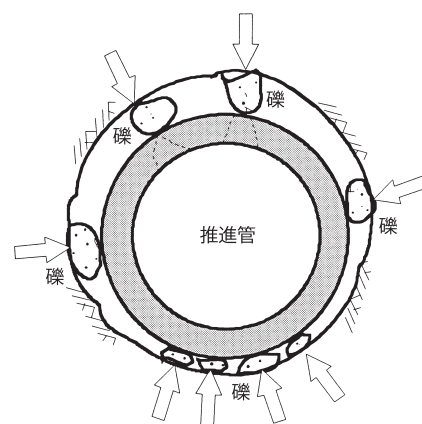


図-3 礫による推進管の破損

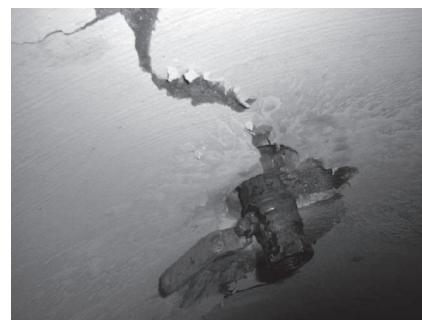


写真-5 推進管の破損

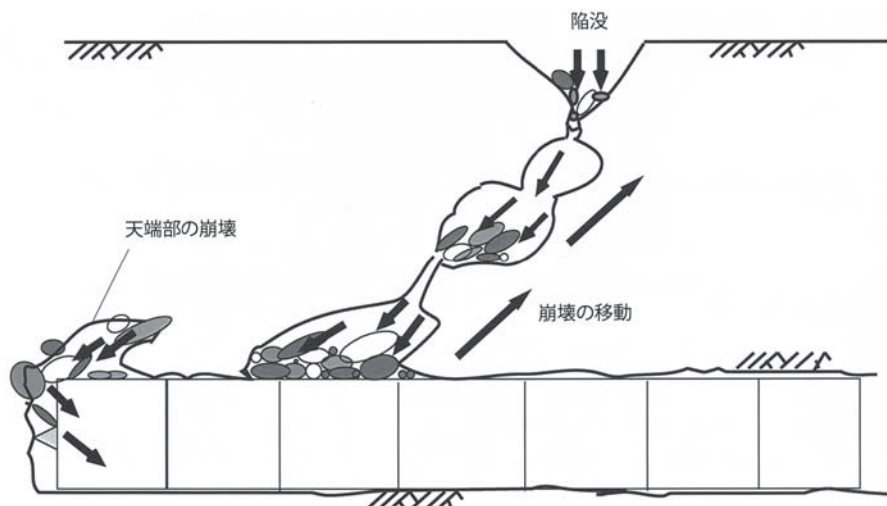


図-2 礫崩落による地上面陥没

⑧地盤を安定保持できる滑材、泥水、作泥材、泥漿材、高濃度泥水を工夫すること

⑨地上部の監視を怠らないこと

礫地盤において、推進管と掘削地山とのクリアランスに礫が挟まった状態を想定してみる。礫は推進管の同一断面で接しても、進行方向で異なる位置で接していても良いが、このような状態で推進管に推進力を作用させた場合、推進管は継手部の状態によっては左右、上下に振られる可能性がある。特に曲線線形を含む場合は顕著である。推進力によって推進管には地山方向に移動させようとする力が作用し、それが逆に地盤反力として戻ってくる。図-3は、推進管と地盤の空隙に数個の礫が挟まった状態を示しているが、実際にはローラカッタで破碎した破砕片なども多く挟在している。空隙にはさらに、泥水方式であれば泥水が、土圧方式や泥濃方式であれば、高濃度の泥状の泥土が含まれている。図-3のような状態で礫と推進管が接触すれ

ば、礫と管との間で摩擦力が生じ、それが推進抵抗力となる。推進管を強く押せば押すほど礫からの反力は大きくなり、結果的に推進管の耐荷力を超えると壊れてしまう。

このように推進管を破損させるほどの推進抵抗力だが、実際には元押部における推進力として確認できる。それが管のいわゆる軸方向耐荷力より小さくても、管は容易に割れることがある。軸方向耐荷力は、推進力を管の有効断面積全体で受け持つことを前提に設定してあるので、局部的な応力集中に耐えられるというものではない。推進管と地山との間の礫が推進に伴って回転し、いわゆる「くさび作用」となって推進管に集中荷重をかけた場合、推進管は簡単に破損する。写真-5はグラウトコック付近の推進管の破損状況を示しているが、推進管外周面のグラウトコックの孔にはまり込んだ礫が推進に伴い推進管に集中荷重として作用した結果であろうと思われる。礫地盤では、大きなクリアランスを生じさせ

ない、また、管の周辺抵抗力をいかに小さくできるかが大きなポイントとなる。そのためにも地盤崩壊を生じさせないような安定掘削が極めて重要になる。また、曲線部を含む場合は、クリアランスに十分な滑材や泥水または掘削地山と混合された泥漿材が満たされていることが対応策となる。外圧に対し耐荷力の大きな推進管を使用することも対策の一つである。

礫地盤では、推進管ばかりか掘進機をも破壊させる場合がある。面板の破損は、掘進機の外周カッタビットの欠損→推進力の増大→面板の破損へとつながる場合が多い。推進管の軸方向耐荷力以内であっても、掘進機的面板は損傷し、到達時に掘進機本体から脱落してしまうことが多々ある(写真-6)。これなどは、外周ビットの欠落が推進力の増大につながり、さらに面板の損耗を経て面板の脱落へとつながったケースである。写真-7は掘進機の損傷による掘進停止後に、その位置に立坑構築し、掘進機を状況確認してい



写真-6 到達時カッタ脱落

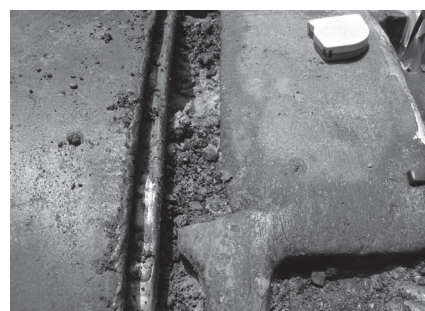


写真-7 礫による掘進機の破損



写真-8 破損させた礫地盤状況

る。礫の大きさは巨礫というほどのものではない。ただし、マトリックスは砂であり、崩壊性の砂に礫が点在している。地盤の自立が困難な状況で、礫が掘進機のカッタ外周部と躯体の間の隙間に入り込み、カッタ回転に伴って躯体が損傷した例である。

外周カッタビットについては転動距離と摩耗の関係を十分把握することが重要であるが、実は、これも岩盤の場合と礫地盤とは異なる。礫地盤の場合には、切羽に出現する礫の個数が不明なものと、出現した礫と回転しながら接触するカッタビットの衝撃力がどの程度ビットに影響を及ぼすが明確ではない。そこで、各ビットメーカーでは、経験からビットの摩耗量については、礫の硬さに応じた摩耗係数を想定し、転動距離にそれに乗じて算出する方法を採用している。すなわち、カッタビットのダメージを定量的に表現する難しさはこのあたりにあると言えよう。いずれにしても、現状では、カッタ外周部の取り付け半径やカッタの回転速度などから転動距離を定めているのが実情である。経験的な判断力が問われるところである。

5 礫地盤推進における設計積算の考え方

当協会では、2006年度改訂版の推進工法用設計積算要領「泥水、土圧、泥濃式推進工法編」において、はじめて砂礫土(2)硬質土(2)における推進速度の算定から標準日進量を算出する方法を示した。ここで言う砂礫土(2)は、別記国土交通省都市・地域整備局下水道部監修の「下水道工事積算基準」で示す砂礫土の範囲(径20mm以上で最大礫径は掘進機外径の20%未満かつ400mm以下)以外で、礫含有率30%以上80%未満の土質を言う。すなわち、実際の礫地盤に即して、推

0.005		0.075		0.25		0.85		2		4.75		19		75		300	
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石								
		砂			礫			石									
細粒分		粗粒分								石分							

図-4 地盤材料の工学的分類方法

進速度(cm/分)を算定し、推進管の接続作業や測量時間などから標準日進量を算出する方法を示した。例として、砂礫土(2)巨礫長径500mm、一軸圧縮強度100MN/m²および硬質土(2)一軸圧縮強度100MN/m²における1本当りの推進時間(h/本)を掲載している。ここでは、設計者が、対象地盤の礫の状態から、掘進機のカッタ能力を想定し、毎分どの程度カッタが礫に切り込むことができるかを判断しなければ日進量は算出できないことになる。このような表現方法しかできないのは計画設計の担当者にとっては、非常にやりにくいと思われるが、礫地盤においてはカッタの寿命は非常に短くなることを認識していただく意味ではやむを得ないと考えている。

一方、国土交通省都市・地域整備局下水道部監修の「下水道工事積算基準」においては、密閉型が対象としている土質は普通土と砂礫土である。ここで言う砂礫土とは、礫径20mm以上で最大礫径は掘進機外径の20%未満かつ400mm以下となっている。礫径20mm以上、400mm以下という表現は、図-4の地盤材料の工学的分類方法 JGS 0051-2000からすれば、粗礫、粗石そして巨石の一部まで含むことになる。ただし、掘進機外径の20%未満という条件を同時にクリアするには、呼び径2000の礫泥水掘進機の場合、外径2375mmとすると、外径の20%475mmではなく、400mm以下が適用範囲ということになる。このように国の積算では、400mmの礫まではさほど問題なく適用できるように

なっているが、実際には礫地盤はそれほど単純なものではない。

礫地盤において、通常のボーリング調査で、礫は400mm以下が主体であるとして判断できるのかといった問題が残る。

土質調査の補足として立坑構築時の対象地盤の再検討、施工者が発注時の調査に加えて追加すること、さらには当該周辺地盤の形成過程を古地図や周辺地形から想定することも重要である。近隣で施工した工事のボーリング調査結果も参考にしながら、路線全体の地盤を読み取ることができればより効果的である。

6 礫対応掘進機の整備について正しい認識をもつ

推進工法の利点として、シールド工法にはない掘進機の転用というものがある。掘進機は到達立坑で回収され、一旦工場に戻され、整備され、それから再び次の工事のために待機する。礫地盤対応の掘進機であれば、次期工事の礫地盤の性状に合わせて整備され、最適な仕様に造り直される。しかし、掘進機は万能ではないし、ビットは消耗品である。通常土質の推進用掘進機の耐用年数は標準的には8年だが、礫対応型は6年となっている。それだけ消耗が激しいということである。カッタビットの耐用距離は、それを取り付ける呼び径や、対象地盤にもよるが通常土質では長くても500~600mである。礫の硬さ、ここでは一軸圧縮強度が200MN程度になると150m程度まで低下する。当然、掘進機の外周用

ビットの寿命は極端に短くなる。カット面板についても、6年間修理しないで済むわけではない。礫地盤の推進工事では、これらの寿命を考えた適用距離を設定するとともに、ビットの交換時期や中間立坑の設置個所をあらかじめ想定したスパン割りを考えなければならない。

ところで、設計積算時に掘進機の損料として、基礎価格と損料率から供用日当たり損料というものを計上する。この損料には実は維持修理比率や維持管理比率というものが含まれている。最近の掘進機は岩盤や砂礫地盤の経験から摩耗性を考慮して製作されているが、残念ながら岩盤や砂礫地盤では万能の機械はまだ存在しないと考えた方が良い。ここでの万能とは、掘進機を現場から引き揚げて、次の工事に整備することなく投入できるということである。そのため、現状の積算上、1現場当たりの点検整備費は掘進機本体の基礎価格の4%を計上するものとなっ

ている。これは本協会の「推進工事事業機械器具損料参考資料」掘進機の供用日当たり損料の他に備考として注意書きしている。しかし、国の場合には、2000年当時の積算基準には具体的に率が示されていたが、現在は示されていない。これも実態に即して設計者の判断で行うのが適切ということかもしれない。いずれにしても、岩盤や礫地盤を終えて戻った掘進機は、維持修理比率や年間管理比率を考慮した供用日当たりの損料からは、整備費は捻出できない。損料から整備費の捻出がかなわないばかりに、カット面板の大規模な修繕や回転動力部やシール関係の大幅な交換整備ができず、他の機械からの借用でその場限りの整備になる状態ならば、本来の積算体系は失われていることになる。岩盤や礫地盤の推進計画において、適切な整備費が計上されないなら次世代の推進はないことを、関係者は強く認識すべきである。

7 おわりに

礫地盤の推進、特に粗石、巨石が主体の礫地盤はある意味では岩盤推進よりも難しい一面がある。しかし、そこでの失敗と挑戦の繰り返しが、現在の技術水準への押し上げとなったのも事実である。しかし、この礫地盤については標準的な設計手法や施工方法の確立までには後一步という感じがある。この礫地盤推進に挑戦している人たちが、長距離そして曲線推進と同様に、世界に誇れる日本の技術として確立できるような建設環境であって欲しいと願う。

【参考文献】

- 1) 砂礫・玉石・岩盤における推進工事
設計・施工上の要点 平成18年10月技術講習会テキスト (社)日本下水道管渠推進技術協会
- 2) 推進工法用設計積算要領
泥水式推進工法編 2006年改訂版
(社)日本下水道管渠推進技術協会
- 3) 下水道用設計積算要領
一管路施設(推進工法)編一
2006年版 (社)日本下水道協会