

解説 きほんのき

掘進管理の基本「泥水式推進工法」

よしだ けいぞう
吉田 桂三

機動建設工業(株)
土木本部技術課課長



1 はじめに

私は常々、現場で推進工事の技術者に求められる管理事項は無数にあるのではないかと感じています。推進工事を設計・計画する際には当然ながら事前に隣接する各企業体との埋設協議、ボーリングによる事前土質調査等を行います。しかしながら、推進工事を施工するための調査に十分過ぎるということはありません。特に事前土質調査ではスポット的な調査を行うことが多く、設計根拠（土質条件等）を導きだすために行っているという感は否めません。経験のある技術者であれば、掘進中の土質変化が大なり小なり頻繁に起こっていることは理解しているはずですが、地中に何が埋まっているかは掘進してみなければ分かりません。強いて言えば、隔壁を持った機械推進では掘進しても実際のところは分からないのです。

そういった環境の中で「安全管理」「現場施工・工程管理」「品質管理」が推進工事の管理技術者には当たり前のように求められます。

推進工事を施工するうえで検討すべきことは数多くありますが、推進管路周辺の「地表面・埋設物への影響」を第

一に考えるのは管理技術者として当たり前のことです。如何に良い仕事をしても事故が起きては元も子もありません。そういった事態にならないように管理することが推進技術者に求められます。しかしながら文字で書くのは簡単ですが容易なことではありません。重複しますが、地中内の事象は目に見えて分かることができないのです。ならば何を根拠に判断するかと言えば掘進を行う過程（掘削土砂、泥水、流量、各種圧力計、機器表示計、推進力等々）において総合判断するしかありません。

推進工事の計算書は経験式であると言われます。私もその意見には賛成です。何故ならば計算式は必ずしも「正」とは言えません。それは、似た条件はあっても全てが同じ条件で施工することが無いからとも言えます。また、推進技術の進歩に計算書が適合していないとも言えます。しかし、掘進管理するうえでは計算書は実施工と比較するための基準となります。

掘進管理の基本「泥水式」として、切羽圧力管理・泥水管理・掘削土量管理について解説するうえで、指針や計画書に書かれている同じ文面を並べるだけでは計算書と同じく基準になるだけ

だと思い、今回はある程度私の主観や現場での経験も踏まえて解説してみたいと思います。熟練した技術者の方々には意に沿わない部分もあるかもしれませんが、ご参考としていただけたらと思います。

2 切羽圧力管理 （土質別の切羽圧力設定）

「泥水式」において切羽圧力とは掘削の過程において最も重要とされる項目です。掘進機隔壁部で密閉されたチャンバ内に環流により泥水圧力を発生させます。そして土圧および自然水圧に対抗します。また、泥水に含まれるコロイド分が切羽面に不透水性の泥水膜（マッドフィルム）を形成して目詰効果となり、地山のせん断抵抗を作用させることで切羽の安定を図ることができます。

泥水加圧の強さの目安は自然水圧＋ $9.8 \sim 19.6 \text{ kN/m}^2$ ($0.1 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$)とします。適正泥水圧力を一定に保持して、掘進機を押し進めながら掘進機面板を回転します。チャンバ内で土砂と泥水の混合攪拌を繰り返しながら坑外へ流体輸送を連続的に行い、泥水プラントで土砂と分離した泥水を再び循環泥

水として使用します。

これが基本となる泥水の切羽保持機構です。「泥水式」の技術者であれば誰でも理解している基本的な項目です。

しかし実際の現場では、全ての地盤で切羽の一定圧力保持が可能かと言えば私はNOと答えます。そして、切羽圧力を自然水圧+9.8~19.6kN/m²に保てば掘削土量は同じかと問われればこれもNOです。

何が言いたいかと言えば、「泥水式」の切羽圧力管理は、掘進中に自然水圧に対抗する一定圧力を保持していれば良いという考えを私は持っていません。切羽圧力は循環泥水ポンプの機械的操作用（回転数）で高くすることもできれば低くもできます。また、元押ジャッキスピードによってもある程度の切羽圧力保持は可能です。

要するに「泥水式」の切羽圧力管理では、泥水の性状（比重・粘性・添加材等）、流体速度（流量）、推進速度、掘進機の機構（面板開口率、回転速度等）も関係しているからです。透水性の高い砂層や、砂礫層、盛土層では泥水濃度を調整しなければ圧力保持は不可能なのです。

崩壊性が高い砂層や面板開口率が大きい掘進機では、流量が多いか少ないかで取込土量は変化します。流体計算のうえでは沈殿限界流速を基準として掘進を行うことが基本となっていますが、掘進中の取込土量が多ければ流量を調整するか泥水を調整するべきです。確かに多少の取込過多であれば、滑材等の一次注入で補填することが可能であり、目に見える影響は少ないものです。しかしながら管路周部の地山を緩めることは、後々の推進抵抗力増加の原因になるものだと考えます。

適正な推進速度で掘進することが取込量に大きく影響します。特に砂質・シルト層・軟弱粘土層では掘進中に切

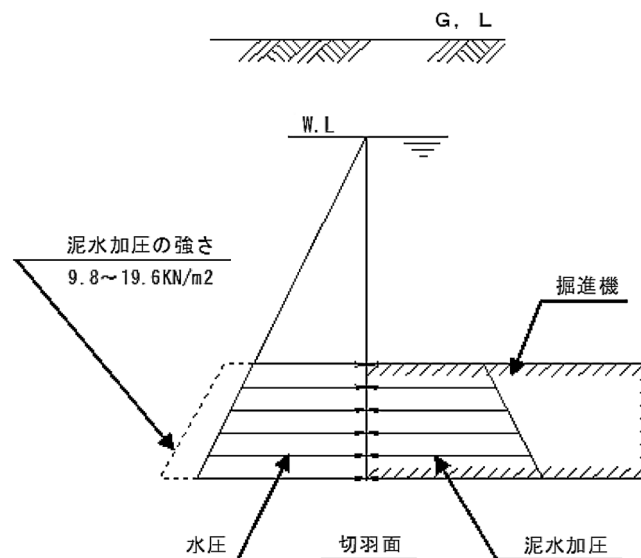


図-1 切羽の安定機構

削抵抗値が低くなることがあります。切削抵抗値が低いということは単に切削面の地盤が柔らかいだけではなく、切羽のバランスが崩れている現象であると感じます。それでも、切羽圧力を一定保持することは可能です。そういった場合は、掘進速度を上げて、ある程度圧密気味に掘進を行う必要があります。これは面板開口率等にも関係してきます。切削抵抗値が低いという判断は幾つかあります。理想を言うならば掘進機後方にシールドジャッキを配置して切削抵抗値を測定することで、切削抵抗の計測および掘進機の動き出し確認が可能となります。しかしそういった設備が無い場合は、単純に元押速度を上げても推進力に変化が無いならば切削抵抗がかかっていない状況と判断できます。逆に粘土層（不透水層）では切削抵抗値が高くなります。切削抵抗が高すぎる場合は掘進速度を低下させなければ、面板閉塞になりかねません。この場合も掘進機的面板開口率が大きく関係します。

このように泥水式掘進機においては、切羽圧力管理という観点から面板開口率が重要になります。基本的な考えは

崩壊性の高い地盤では開口率を小さくして自立性の高い地盤では開口部を大きくするのが一般的です。ただし、砂礫層のような崩壊性が高い地盤ではコーン形状のクラッシャを装備した掘進機が一般的に使用されます。クラッシャを装備した掘進機では、面板部分は一次破碎用の装置と考え、クラッシャ通過部分が実際の面板開口率になると私は考えます。

切羽圧力管理というテーマから少し脱線してしまいました。今回のテーマである土質別の切羽圧力設定という項目に戻りたいと思います。

2.1 粘土地盤での切羽圧力設定 （自然水圧+0~9.8kN/m²）

粘土地盤であっても一概に不透水層であるとは言いきれませんが、基本的には切羽面は自立した地盤です。自立した地盤ではカッターで切削した土砂のみが取込まれます。したがって切羽圧力を高めに設定すれば切削抵抗値は高くなり切羽面の地山も圧密されます。また同時に取込不良となり面板閉塞も懸念されます。面板閉塞気味に掘進すれば適正な掘削余掘りが確保できず推進抵抗力の上昇にも繋がります。切羽圧

力管理値としては不透水層であるならば自然水圧値、仮に被圧水が確認されたとしても $+9.8\text{kN/m}^2$ 程度が妥当です。しかしN値の高い粘土地盤においては流体輸送機器内（排泥ポンプのエンペラー）において瞬間的かつ断続的に閉塞が繰り返されることで掘進中の切羽圧力が安定しないことが予想されますが、切羽保持に影響があるものではありません。またN値が低い粘土地盤では流体輸送中に掘削土（粘土）の大半が泥水内に溶け込みます。泥水濃度が濃くなれば泥水が飽和状態となり取込不足が発生し、面板閉塞や推進抵抗力の上昇が懸念されます。したがって泥水管理が重要となります。

2.2 砂質・シルト地盤での切羽圧力設定（自然水圧 $+9.8\text{kN/m}^2$ ）

砂質・シルト地盤では、砂層にシルト層が混じることで、切羽面に不透水性の泥水膜を形成し易くなり掘進中の切羽が安定します。また粘土や礫が混じらないことで流体輸送機器内での閉塞等も少なくなることから、切羽を安定させた掘進が行えます。

2.3 砂質地盤での切羽圧力設定（自然水圧 $+9.8\sim 19.6\text{kN/m}^2$ ）

砂質地盤と言っても色々で、透水性により切羽圧力管理を変えなければならない場合もあります。透水性の低い砂地盤では適正泥水を使用すれば逸泥が発生することはあまりありませんが、適正な泥水で掘進を行わなければ管路周囲の地山を緩めて後々の推進力にも大きく影響することになります。透水性の高い砂地盤では、掘進中に逸泥が発生することや切羽の安定が図れない場合も稀にあります。その際は泥水の粘性、比重を高めることで切羽圧力を一定に保持します。いずれにしても砂地盤は粒径が揃っている層で崩壊性が非常に高い地盤であるため、取込過多による周辺環境への影響が最も反映され

易い地盤であるとも言えます。崩壊性が高い地盤であることを認識して、掘進中に予期せぬトラブルにより同じ箇所での閉塞を繰り返した場合や計画土量よりも多かった場合は何らかの処置や調査が必要です。

切羽圧力管理値としては自然水圧 $+9.8\sim 19.6\text{kN/m}^2$ 程度が妥当です。また、一般に砂地盤では一次処理機の篩分けにより掘削土量の目視確認ができることから、切羽圧力管理と同様に土量管理も重要になります。

2.4 砂礫地盤での切羽圧力設定（自然水圧 $+9.8\text{kN/m}^2$ 以上を保持）

「泥水式」の場合は、砂礫地盤では切羽圧力を一定に保つことは困難です。これは流体輸送をするために礫を流体輸送機器が通過する径まで破碎する必要がありますからです。礫を破碎する際や流体機器を通過する際に瞬間的な閉塞現象を断続的に繰り返します。そのため、掘進中の切羽圧力は一定圧力を保持することができません。だからといって切羽圧力管理の面で不適正であるということではありません。砂礫層は、透水性が高く粒径が揃っていない地盤ですが、透水性が高い地盤では切羽圧力を多少高く設定しても地表面への奮発等は考えにくいのです。むしろ切羽圧力を比較的高く保持できることは良好な掘進状態であるといえます。したがって瞬間的に切羽圧力が増加することによる影響はほとんどありません。切羽圧力を下げることなく一定の切羽圧力以上を保持することが重要です。

以上、土質別の切羽圧力設定において解説しましたが、実際の現場では一定の土質条件下での施工だけではありません。障害物に遭遇した場合や互層地盤での切羽圧力管理は非常に判断が難しいものです。掘進中はカッタを回転させて押し進めるため、少なからず切羽は不安定になりますが、瞬間的な切

羽圧力の変動は特殊条件下以外では掘進機を推し進めている限りは気にする必要はないと私は考えます。同じ場所で切羽に泥水を送りカッタを回転させていることの方が周辺の地山への影響は大きいものです。したがって、長距離推進時における掘進機の動き出しの管理が重要になります。切羽圧力管理は自然水圧の計測による圧力設定という基準は必要ですが、圧力設定値に固執して数字を追いかけるのでは無く、各々の技術者が土質の性質をよく理解して切羽面の状態を想像することで随時状況判断していくことが重要だと考えます。

3 泥水管理（プラント管理と比重、粘性他）と掘削土量管理（目視等基本的な掘進状況の把握方法）

切羽圧力管理の解説で適正泥水という言葉が何度かありました。「泥水式」では、言葉のとおり泥水管理が非常に重要な要素となります。

泥水管理とは、掘削している地盤と適合した泥水を使用しているかの判断をするのに必要な管理項目です。そのためプラントマンは常に泥水の比重、粘性を測定して適正泥水に調整する必要があります。適正泥水は地盤により異なりますが、基本は切羽圧力を保持して円滑な流体輸送を行うための泥水が必要であるということです。

その他にプラントマンは、泥水量の増減を把握することや一次処理設備で篩分けされた土砂を目視確認することも重要です。掘進中に泥水量に変化が見られた場合や土質の変化を感じた場合は速やかに掘進機のオペレータや管理技術者に報告して相談する必要があります。そして、掘進中は一次処理設備から篩分けされた土量を体積換算して確認することもプラント管理と言えます。掘進中は掘進機オペレータと連絡を密に取り合って1本毎の元押ストロー

ク長を把握しながら土量管理を行うことが必要です。

「泥水式」による掘削土量管理を、掘進機オペレータ室における管理と泥水プラントでの管理に分けて詳述します。

3.1 掘進機オペレータ室での土量管理

掘進機オペレータ室での土量管理とは、掘進速度に換算した「偏差流量値」のことです。「偏差流量値」とは、ご存知の通り[送泥流量値-排泥流量値]のことです。掘進中は掘進オペレータ室に偏差流量換算表(図-2)を用いて、切羽圧力調整、流量調整、掘進速度調整を行う必要があります。偏差流量管理は、砂質シルトや軟弱粘土地盤の場合、取り込み土砂が循環泥水中に溶け込むことで掘削土量の判断が難しくなります。そういった場合では非常に有効な土量換算法だと言えます。しかし、透水性の高く間隙率の高い砂地盤～砂礫地盤の場合では、掘進中に逸泥や土砂中の水分を取り込み希釈されるため

偏差流量値での土量換算は難しくなります。送排泥流量に乾砂密度を乗算して乾砂重量値を換算する土量管理の手法もあります。しかし、偏差流量値での土量換算が難しい地盤の場合では、一般的に一次処理設備で分離排土される地盤がほとんどなので、泥水プラントでの土量管理が可能となります。

3.2 泥水プラントでの土量管理

泥水プラントでの土量管理には、「一次処理設備から篩分けされる土量」と「循環泥水内に溶け込む土量」に分けられます。一次処理設備で篩分けされる土量は掘進中に目視確認が可能となります。土量の目安はダンプ受けの場合、[荷台の体積×何台]で換算します。また、土砂タンクの場合は、[タンクの面積×高さ]で換算します。いずれも現場では体積換算を目安として、事後確認として処分値の重量換算を行います。一次処理設備での篩分けされる土量は、一般的に細砂以上(75 μ m以

上から)とされます。崩壊性の高い砂地盤や透水性の高い砂礫地盤では非常に有効です。測定した土量換算値は1本毎に記録しておけば、目視判断で確認しづらい土質の変化や取込不足、そして取込過多を掘進中に判断することができます。

泥水プラントでの土量管理で厄介なのは、細砂以下(75 μ m未満)のシルト・粘土地盤です。重複しますが、細砂以下の土砂は一次処理の循環泥水内に溶け込みます。溶け込んだ土量を把握するのは容易ではありません。一つの手法としては、掘進開始前後の比重と調整槽内の泥水量を測定して重量差を算出し、重量差を土砂の単位体積重量で割ることで泥水に溶け込んだ推定土量とするものがあります。しかし、こういった土量管理は非常に手間がかかります。そして施工上いくつかの問題点も挙げられます。まず、掘進中に余剰泥水を移送できないために、比較的大きな調整槽を用意する必要があります。そして、掘進中に比重・粘性が高くなっても掘進がストップしない限りは調整槽内の泥水を調整することができません。そして何よりも重量差から土量を換算するということは掘削対象地盤の土の比重を設定する必要がありますが、溶け込んだ掘削対象土の実際の比重は土質調査資料等から推定比重を設定するしかないのです。したがって、あくまでも推定土量換算値となります。

そういった観点からも細砂以下の地盤では、掘進オペレータ室の偏差流量管理が有効です。砂質・シルト地盤の場合、通常の掘進作業を行えば逸泥や地下水の流入は極めて少ないからです。そして、体積換算値で判断することができるので土砂の比重等の設定は必要がなくなります。

このように、泥水管理および土量管理を行うには、泥水プラントと掘進オペ

工事名	工事	仕様2コット能力	415	kgf/cm ²
掘削外径	1.82	推進管延長	2.43	m

ジャッキスピード	掘進時間	掘削体積	偏差流量(排泥・送泥)
10 mm/min	243 min	6.3 m ³	0.026 m ³ /min
20 mm/min	122 min		0.052
30 mm/min	81 min		0.078
40 mm/min	61 min		0.104
50 mm/min	49 min		0.131
60 mm/min	41 min		0.157
70 mm/min	35 min		0.183
80 mm/min	30 min		0.209
90 mm/min	27 min		0.235
100 mm/min	24 min		0.261
110 mm/min	22 min		0.287
120 mm/min	20 min		0.313
130 mm/min	19 min		0.340
140 mm/min	17 min		0.366
150 mm/min	16 min		0.392
160 mm/min	15 min		0.418
170 mm/min	14 min		0.444
180 mm/min	14 min		0.470
190 mm/min	13 min		0.496
200 mm/min	12 min		0.522

図-2 偏差流量換算表

レータ室の両方で行う必要があります。そして掘進中は連絡合図を密に取り合い、計測した数値を定期的に記録（図-3、4）して残しておくことが重要です。そうすることにより、1本毎の掘進前後の相互関係を比較していくことで、掘進中の土質の変化や掘削土量の過不足、推進設備機器の異変（還流設備機器、泥水プラント設備機器等）も感じ取ることができます。また最終の裏込注入作

業計画の参考になります。そして、万が一トラブルに発展した場合にも掘進中の管理記録は必ず有効となるでしょう。

4 おわりに

本稿では、掘進管理の基本「泥水式」として、切羽圧力管理・泥水管理・掘削土量管理について述べました。我々技術者は、基本を理解することが第一

ですが、得られた情報を基に、これから起こることを想像し適切な状況判断を行っていくことが重要だと考えます。冒頭にも述べましたが、私の主観や現場での経験も踏まえて解説しましたので、熟練した技術者の方々と意見を異にする部分があるかもしれませんが、一助といただければ幸いです。

工事名:

泥水プラント管理シート

担当者	フナトマン
-----	-------

管番号 No ()		日付 年 月 日 ()				
1 回目	掘削土量	(t)	掘削土量比値		掘削土量	(t)
2 回目	掘削土量	(t)				
3 回目	掘削土量	(t)				
4 回目	掘削土量	(t)				
合計		(t)				
〔掘削土量 ÷ 掘削土量比値 = 掘削土量〕					修正土量	(m³)
	掘削前	掘削後	水位差	変位量	適用	
調整層内水位					※1	
調整層2内水位					※2	
調整層内比置					掘削前適正比置 1.2	
調整層内粘性					掘削前適正粘性 30S	
※1 : (調整層内内径[11.95 m2]) * (水位差 [m]) = 変位量 [m3]						
※2 : (調整層内内径[11.7 m2]) * (水位差 [m]) = 変位量 [m3]						
ーの場合選定量 十の場合取定量						
掘削中投入作泥水量	粘土 (kg)		(m3)基本配合	粘土 : 280(kg)		
	ベントナイト (kg)			ベントナイト : 45(kg)		
	ゲル化材料 (kg)			ゲル化材料 : 0.7 (kg)		
	ポリプラス (kg)			ポリプラス : 0.3 (kg)		
(m³)						
備考欄						

図-3 泥水プラント管理シート

工事名:

推進特性

担当者	オグー
-----	-----

管番号 No ()	日付	年	月	日 ()
推進距離	掘進時	600	1200	1800
掘進時間	:	:	:	:
掘進速度	m/min			
元押推力	t			
カット力	A			
送泥流量	m³			
排泥流量	m³			
切羽圧力	MPa			
送水圧力	MPa			
排泥圧力	MPa			
P1 回転数	rpm			
() 回転数	rpm			
P2 回転数	rpm			
P3 回転数	rpm			
P4 回転数	rpm			
() 回転数	rpm			
() 回転数	rpm			
ピッチング	度			
ローリング	度			
ジャイロ値	度			
修正	ストローク	左上	右上	右下
精度	水平方向	mm		
	垂直方向	mm		
粘性	砂			
比重				
見掛土量	m³			
材料投入量	1次 (L)		2次 (L)	
自然水圧	(N/m²)		土質	砂・シルト・粘土・礫・玉石
備考欄				

図-4 推進特性管理表