

総論

推進工事における滑材効果の考察

中村 啓

工学博士
岐阜県笠松町 技監
(上下水道・建設担当)



1. はじめに

下水道の整備は大都市から地方の市町村へと裾野を広げているが、大都市で培われた手法をそっくりそのままコピーして地方で使用するには、計画規模、施工時期、道路形態、道路網の整備率、公共交通機関の整備状況等に大きな隔たりがあり難しい。そこで、地方の下水道担当者には、独創性を発揮して各々の規模・実状に適合した効率的な整備手法を具体化することや、費用対効果はいうまでもなく、工事コスト、社会的コストを始めとする総合的なコスト縮減が求められている。これらに応えるには、長距離カーブ推進工法を採用して交通止め期間の短縮や工事中の占用範囲の縮小を図ることが最適であると考えている¹⁾。さらにコスト縮減を進めるには、長距離ほど有利になるので、筆者等は呼び径 $\phi 1,000\text{mm}$ では $1,010\text{m}$ の推進延長を実現している²⁾。本文では、トライボロジーの観点から推進力の効率的な低減方法について述べる。

2. 推進管に働く摩擦抵抗³⁾

(1) 推進力

(社)日本下水道協会は、推進力を推進管に作用する先端抵抗力と周辺抵抗力の和と考え、周辺抵抗力については「下水道推進工法の指針と解説－2000年版－」の中で、管の周囲に等分布荷重が働き、管と土の付着力についても管の周囲に働くものとし、さらに管の重量による管と土の摩擦抵抗が加わるものとしている⁴⁾。

つまり長距離推進工法の推進力を低減するには、周辺抵抗力の減少を図るのが効率的である。

(2) トライボロジー⁵⁾の観点

推進管が軸方向に移動する際の管の側面摩擦に對して、機械の回転軸受の摩擦は同一箇所の回転周辺方向の摩擦であるが、種々の意味で基本的な摩擦現象であり、参考になると考え、以下に若干この観点から考察する。そのベアリング方法は、各種形式の「潤滑法」(自己、固体、境界、流体のそれぞれの潤滑)、転がり接触、磁気浮上、などの方式に分類される。最もよく利用される「流体

潤滑」を基本にしているが、ストライベック曲線⁶⁾で考察されており、軸受の摩擦係数は潤滑油の粘度と回転速度等に関係していて、図-1で表現される。この軸受における回転速度と摩擦係数の関係を、推進速度と摩擦係数の関係と考え、推進速度が遅いと「境界潤滑」、速くなると「流体潤滑」、その過渡領域が「混合潤滑」に相当すると考えている。図によれば、推進管が動き始めると定常的な「流体潤滑」では回転速度に比例する抵抗の発生で済むが、推進管が動き始める瞬時の抵抗は「混合潤滑」、「境界潤滑」に相当する「始発推力」と呼ぶ大きなものとなることが予想される。

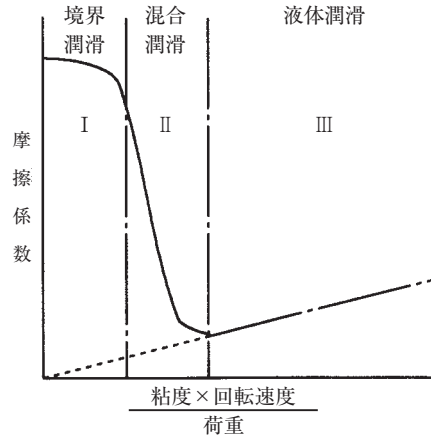


図-1 ストライベック曲線

(3) 推進管に働く摩擦抵抗の分類

推進中に制御する推進力は、ユニット毎に限らず発生し始めて継続的に増加させることは少なく、若干低減させる過程を繰り返しながら抵抗力の急激な発生を押さえる工夫がオペレーターにより経験的になされている。後述する図-3は1サイクルにおける摩擦の流れであるが、それらを考慮して推進力として生ずる「推進工法」における摩擦抵抗を概念的に分類すると図-2のようであると解釈している⁷⁾。図には、「滑材」を使用する前提で描いてある。

①狭義の摩擦抵抗(管・地山の摩擦抵抗)

固体相互が接触に近い状態で変位するときの抵抗で、推進工法では圧入若しくはそれに近い状態で発生すると考える。

②ずり抵抗(管・地山(滑材)の摩擦抵抗)

固体間に流体または塑性体が介在し、固体と流体または塑性体の間は変位せず、流体または塑性

体の内ずり変形により2次的に固体相互間が変位することによって生じるずり変形抵抗で、推進工法では特にセミシールド工法でオーバーカットした管周の空隙を滑材で十分に圧封した場合に発生すると考える。

③かみあい抵抗(管・玉石の摩擦抵抗)

固体の一方が他の固体とかみあいながら変位する抵抗で、多くの場合狭義の摩擦抵抗と複合して生じる。例えば、玉石混じり砂礫地盤内をセミシールド機が取り込みタイプではなく、破碎タイプで切削して推進していく場合等に、地山に取り残した転石等が推進管の外面をこすっていく抵抗に相当する。

①狭義の摩擦抵抗 ②ずり抵抗 ③かみあい抵抗

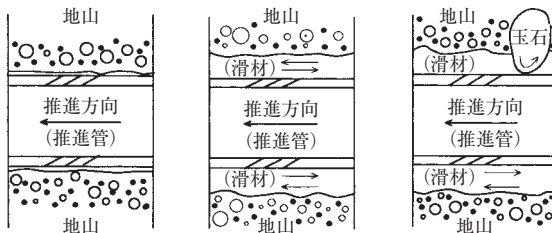


図-2 摩擦抵抗の概念図

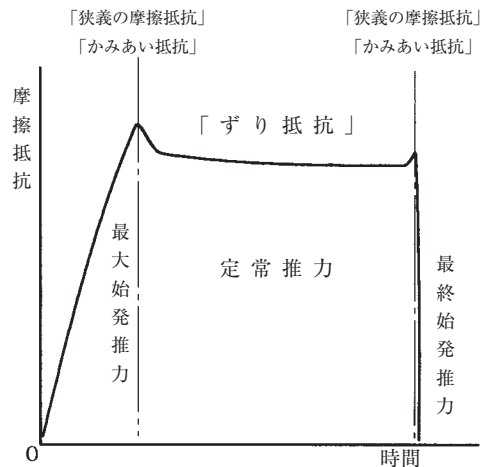


図-3 1サイクル内の摩擦の流れ

(4) 1 サイクル内の摩擦の流れ

昨今の推進工法現場では、特殊な条件下を除き推進作業が昼夜間連続施工されることはないので、推進管は推進工が完了するまでの間、発進立坑から到達立坑に到る地盤中を連日停止・推進の繰り返しである。さらに、予定した工法では急激な地盤の変化に対応しきれず推進不能となり、障害をクリアするまで1週間程度の推進停止がしばしば発生する。したがって、推進中の摩擦抵抗は一律の摩擦抵抗ではなく静と動の二種類の状態において、図-2に示す3種類の摩擦抵抗を組み合わせた周辺抵抗を想定しなければならない。

推進始めあるいは推進終了時に瞬時にかかる大きな推進力を「始発推力」、比較的推進力が一定となって推移する状態を「定常推力」と呼ぶ⁸⁾。

1 サイクル内の摩擦の流れについてまとめたものを、図-3に示す。押し始めは停止から動き出しということで「狭義の摩擦抵抗」が発生し、路線中の曲線部の存在から「かみあい抵抗」が付加され、時間に比例して摩擦抵抗は増加する。そして完全に締め付けられた地山と縁切りでき、推進管の目地幅が最小となり管全体が一体化した時点で、瞬間的にピークを迎え最大始発推力が発生する。これ以降、推進管は地山と完全に縁切りされ「ずり抵抗」に移行し、定常推力となり摩擦抵抗は一定値に収束しながら小さくなる。そして押し終わりには先端を地山に貫入させて止めるので、再度「狭義の摩擦抵抗」「かみあい抵抗」の複合により最終始発推力が突出して瞬時に発生する。

砂質土の場合に、それぞれの推力に対し

最大始発推力(≧最終始発推力) ≧ 定常推力 × 1.30 の関係を得ている^{8) 9) 10)}。

摩擦の発生の流れは、静止摩擦から動摩擦に移行し静止摩擦で停止となる。さらに粒径の大きい礫地盤内では推進中に、特に「かみあい抵抗」の発生により、大きな始発推力が連続して発生する現象を経験している。また停止期間の長い管の押し始めとかローリング発生時には「狭義の摩擦抵抗」と「かみあい抵抗」の混合発生等により大きな始発推力も経験している。つまり推進工法における摩

擦抵抗は、停止から動き出しと動いているとき、さらには停止に至る寸前といった時間の経過とカーブとかローリング修正等の作業内容、さらには地盤の粒径(特に礫地盤の礫径)も考慮しなければならない。したがって、推進工法における摩擦力の低減は変化している各状況を満足する低減方法を合成して考える必要がある。

(5) 推進工法における摩擦抵抗の特殊性

推進工法は、発進立坑底部の側壁から推進管ユニットを地盤内の水平方向に押し込んで、推進力を制御しつつ、ユニットを継ぎ足しながら長距離の管路を形成する施工法である。近年の技術的進歩の結果、1kmを越す推進工事が実施される現状である。当然のことであるが、推進管はこれらの距離を、1本1本管ユニットを継ぎ足しながら進むことになる。

推進工法の摩擦では摺動面となる地山トンネル壁面は、地山の変化に呼応し粘土から玉石までと寸法の大きく異なる粒子により構成されるので、連続する推進管ユニットが対峙する壁面の不陸は大きく、その凹凸はかなり激しい。この不陸部を、何かの材料で整正するとともにトンネル形状を保持し、地山の崩壊を抑えないことには摩擦抵抗は大きくなり、長距離推進工は実現できない。

トンネル形状を保持する方法として、薬液注入により自立性の無い地盤を自立性の有る地盤に改良する方法がある。これには自立性の無い地盤を全線に亘り改良する必要がある、作業に伴う道路占用が短期間ではあるが生じる。そのため開削工法に比べ通行止め等が少なくて済むという推進工法の利点が大きく損なわれてしまう。

薬液注入と異なる切羽保持方式として、泥水式(面板式)、高濃度泥水式、土圧式等の方法が実用化され、各自の理論に基づき地山の崩壊を防ぐ工夫をしている。何れの方式も、あくまで先端切羽の崩壊を防いでトンネル掘削を進めることが主眼であり、セミシールド機に後続する管路部が対峙する掘削した地山の形状保持までは対応できない。

いかにしてセミシールド機の掘削したトンネル形状を推進管が到達立坑に達するまで持続させる

かが、摩擦抵抗を抑え長距離推進工を可能にするキープポイントとなる。そこで経済性と施工性を重点に、現在の施工方法に大きな変更を伴わない摩擦低減方法を考える。有利な潤滑法は、「流体潤滑」であり、推進工法では「ずり抵抗」が相当するので、推進中の主抵抗である「ずり抵抗」の抑制には、摺動面である地山と推進管の間に第三の物質を介在させること、つまり滑材の圧封を考える。

次に動き始めあるいは停止寸前に発生する始発推力に対しては、「境界潤滑」に相当する「狭義の摩擦抵抗」「かみあい抵抗」を減少させるために「自己潤滑」として、推進管のマニキュア加工（外面加工）を考える。この滑材とマニキュア効果の複合効果により推進中に発生する静・動摩擦が抑制され、定常推力・始発推力の減少が可能となる。

3. 「ずり抵抗」を満たす滑材

前述の3分類した摩擦抵抗の中で最小となる「ずり抵抗」が、仮に具体化できれば、低推進力で地盤土質の種類に影響されない長距離推進が可能になると考えている。以下に「ずり抵抗」の実現を

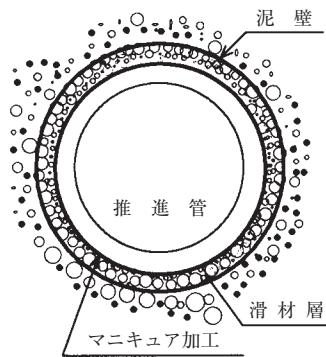


図-4 「ずり抵抗」の模式図

図る観点から、滑材を見直してみる。図-4に、「ずり抵抗」の模式図を示すが、「ずり抵抗」の成立には、管周の余掘部に滑材層を確実に形成しなければならない。したがって、「ずり抵抗」を満たす滑材は、余掘部へ直ちに圧封され掘削地山の解放時間を短くすることと、余掘部の容積を変化させないという従来の滑材にはなかった裏込材としての性格も要求される。余掘部に注入して推進力を低減させる効果は同じであるが、従来の滑材では注入後の体積変化まで言及していないので、名称は同じであるが「ずり抵抗」を満たす滑材は、従来の

滑材とは敢えて区別する必要がある。「ずり抵抗」を満たす滑材には、地下水に溶けて流失しないことと、注入後に体積変化を起こさない性質も必要となる。さらに地下環境を汚染せず、推進完了時に充填する裏込材（粘土エアーモルタル）と共に固結し、固結後は長期的に安定性を保つ材料でなければならない。これらの条件に適する材料として、自然地盤中にあり安価で化学的に安定している粘土を主材にすべきと考えている。この滑材の圧封により、管と滑材の「ずり抵抗」が具体化され、推進力の低減が期待できると考えている。礫地盤の実施例として、写真-1に推進管底部における滑材の状況を、写真-2にマニキュア管の到達状況および滑材の状況を示す。



写真-1 推進管底部の滑材状況



写真-2 マニキュア管の到達状況

4. おわりに

1992年11月号に滑材の特集号が組まれてから、今年で10年が経過しました。私見になりますが、当時は中大口径で管径(m)の200倍程の推進延長を超えると長距離推進と呼んでいたように記憶しています。近年では、小口径も含め管径(m)の300倍を超えると長距離推進の領域となり、夢の延長であった1kmを超える超長距離推進も実現され、この間の推進工法の進歩には隔世の感があります。セミ・シールド機、管材の開発は基より、滑材の開発が果たした効果が大きいと思われます。こうした中、摩擦抵抗の低減理論の必要性を感じ、機械・化学系の学問分野の一つであるトライボロジーの観点から、推進工法における摩擦の低減について筆者なりの考察を述べました。本文が、推進工法の更なる発展に寄与できれば幸いと考えております。

●参考文献

- 1) 中村 啓、宇野尚雄：超長距離推進工法を活用した下水道(污水)管路の整備計画、第12回非開削技術研究発表会論文集、pp.81-90、2001。
- 2) 中村 啓、宇野尚雄：推進延長1,000mを超える長距離推進工法の施工、第11回非開削技術研究発表会論文集、pp.133-142、2000。
- 3) 中村 啓、宇野尚雄：推進工法における滑材とマニキュア加工の効果、土木学会論文集、No.679/VI-51、pp.101-110、2001。
- 4) 下水道推進工法の指針と解説－2000年版－、(社)日本下水道協会、2000。
- 5) 木村好次、岡部平八郎共著：トライボロジー概論、(株)養賢堂、1999。
- 6) 田中久一郎：摩擦のおはなし、日本規格協会、pp189～pp191、1997。
- 7) Nakamura, S. and Uno, T.: Effect of Lubricants and Manicure Method on Reduction of Propulsion Force, Proc. of 15th INTER-NATIONAL NO-DIG'97 TAIPEI ,TAIWAN,pp2-1-1～2-1-15、1997。
- 8) 中村 啓：長距離推進の管軸方向安全率に対する一考、第3回非開削技術研究発表会論文集、pp5～pp10、1992。
- 9) 中村 啓：推進施工管の長期安定性まで捉える推進力管理方法、第4回非開削技術研究発表会論文集、pp3～pp9、1993。
- 10) 中村 啓：泥水式セミシールド工法における泥水圧管理方法、第5回非開削技術研究発表会論文集、pp72～pp81、1994。