

推進工法における滑材とマニキュア加工の効果

中村 啓¹・宇野 尚雄²

¹正会員 工修 笠松町役場 水道課 (〒501-6181 岐阜県羽島郡笠松町司町 1)

²フェロー会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

本論文は、下水道等の地下管路の敷設方法として長距離化が要望されている「推進工法」の推進力低減のために、まず施工時の計測に基づいて、「始発推力」や「定常推力」の発生特性を分析・究明した。次に、開発が進んでいる「滑材」や「マニキュア加工」の各効果を施行事例のデータ等に基づいて分析した結果、かなりの低減効果が認められたことを報告する。

Key Words : pipe-jacking-method, lubricant, manicure method, propulsion force

1. 序論

(1) 推進工法の現状

我が国の下水道等の地下管路を新たに敷設する施工環境や施工条件は、交通量の増大、地下埋設物の輻輳、狭隘な施工箇所が多くなる等、開削工法の適用困難な条件が増加し、推進工法が増えている。

推進構造物は工事終了後直ちに使用でき、工事に必要な仮設備もコンパクトで、地下管路の埋設方法として推進工法は経済的に優れている。さらにコスト削減を図るには、推進工法では長距離ほど有利となるので、立坑数を極端に減らせる長距離推進工が増加している。しかし、推進力の算定を始めとした理論面での整備が追い付いていない傾向にあり、理論に裏打ちされた合理的設計・施工体制を確立することが必要である。

(2) 推進工法の課題

推進工法では、理論分析並びに実証分析を通じた研究が必要であり、研究すべきテーマを箇条書きにすると次のようになる。

- ①推進力算定式の確立
 - ②推進力の計測・管理
 - ③推進力低減方法の開発
 - ④推進構造物の止水性の向上
 - ⑤推進管の長期安全性の確保
- 各々のテーマの現状を述べると、

①の推進力算定式には下水道協会式¹⁾を基本として種々の式^{2)・3)・4)}が提案されているが、何れの式を用いて推進力を算出しても現場施工延長、到達点までの多くの過程で最大推進力値を大きく上回ることがあり⁵⁾、長距離推進工における推進力の実績値を的確にカバーできていない。

②の推進力は押し始めと押し終わりに発生する「始発推力」と、ほぼ一定値で推移する「定常推力」の2種類に大きく分類でき、前者が後者より高い値を示す傾向にある。この2種類の推進力の刻々と変化する状況を、簡易な計測器類を用いてリアルタイムにグラフ化することにより把握し、推進力管理に取り込む方法を著者の1人は開発しているが、推進工法の一般的な施工管理項目として取り上げられるまでには到っていない。

③の推進力の低減方法は本論文の主題であるが、滑材の低減効果の欠点を補完する目的で開発した推進管のマニキュア加工が、副次的効果として④の推進管の止水性の向上に寄与すると考えられる。

④の止水性の向上については、継手部の漏水防止として2本のゴム輪を使用するWジョイント推進管が(社)日本下水道協会のⅡ類団体規格として認定され改善が進んでいるが、管全体の止水性の向上までには到っていない。

⑤の管の安全性については、実際の長距離複数カーブ推進工事において、予め管内部に貼り付けた静的ひずみ計による現場計測を実施し、得られたデー

タを現在解析中であり、いずれ明らかにする予定であるが、今のところ判明していること⁹⁾を以下に列記する。

- ①推進力によるひずみ分布は、先端を頂点とする三角形に近い形状を示す。
- ②カーブ部では内側にひずみが増加し外側が減少するひずみ分布の平行移動を示す。
- ③カーブ部でも始発推力時および定常推力時ともほぼ同一のひずみ分布を示す。

このように推進工法には解明すべきテーマが多いが、本文では推進力の効率的な低減方法について述べる。

推進力が基本的に推進管に作用する先端抵抗力⁷⁾と周辺抵抗力の和であると考えた(社)日本下水道協会は、このうち周辺抵抗力について「下水道推進工法の指針と解説-1988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¹⁾。推進延長が大きくなるにつれて、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. 推進管に働く摩擦抵抗

(1) 機械軸受け部の摩擦抵抗

推進管が軸方向に移動する際の管の側面摩擦に対して、機械の回転軸受け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、参考になると考えられるので、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⁸⁾で考察されている。それによれば、軸受け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。この軸受け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」とも呼ぶべき大きなものとなることが予想される。「流体潤滑」は流体膜の圧力支承を期待して固

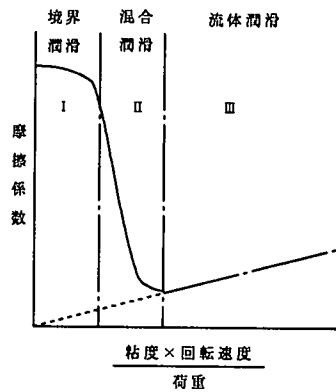


図-1 機械軸受けの摩擦抵抗に関するストライベック曲線

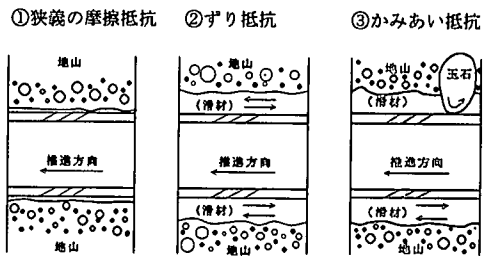


図-2 摩擦抵抗の概念図

体表面を相互に接触させない潤滑法であり、「境界潤滑」は油膜の厚さが固体表面の粗さ以下にまで小さくなって、固体表面の摩擦が生じている限界状態の潤滑である。

(2) 推進管に働く摩擦抵抗の分類

推進工事では、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、図-4は筆者らが計測した「推進力の発生・制御」の1サイクルにおける抵抗力の発生状況であるが、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⁹⁾。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

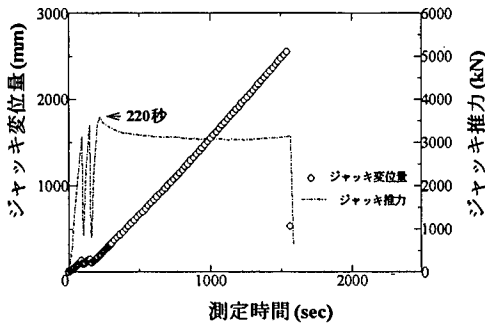


図-3(a) 推進経過時間とジャッキ変位量, ジャッキ推力の関係 (第1回計測)

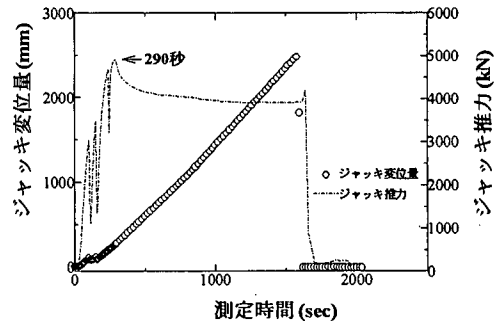


図-4(a) 推進経過時間とジャッキ変位量, ジャッキ推力の関係 (第2回計測)

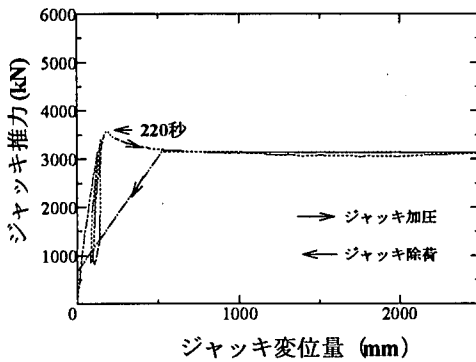


図-3(b) ジャッキ変位量とジャッキ推力の関係 (第1回計測)

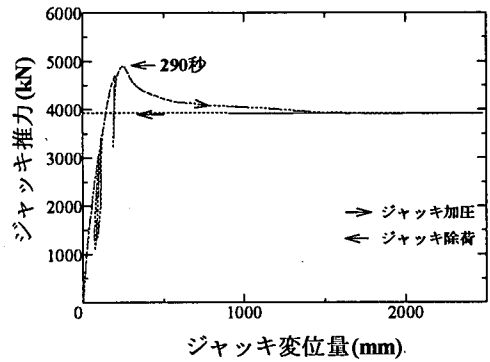


図-4(b) ジャッキ変位量とジャッキ推力の関係 (第2回計測)

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部のずり変形により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周をこすっていく抵抗に相当する。

(3) 摩擦抵抗の発生・制御サイクル

a) 推進力の計測

昨今の推進工法現場では, 一般的に推進作業が昼夜連続施工されることは少ないので, 推進管は推進

工事が完了するまで, 発進立坑から到達立坑に到る地盤中で, 連日停止・推進を繰り返す。ときには, 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発生する。したがって, 推進中の摩擦抵抗は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る考えねばならない。

この件に関して, 筆者らは長距離推進事例におけるジャッキ油圧等の計測結果を報告⁹⁾している。1996年に岐阜県の笠松町で下水道本管の埋設工事として実施した延長 $L = 480\text{m}$ (197ユニット使用), 管径 $\phi = 1,000\text{mm}$ の長距離カーブ推進工事において, 推進開始から推進終了迄の1ユニットにおける1サイクル内のジャッキ油圧等を, 2回計測した実例を図-3~図-4に示す。図-3はNo.139ユニットの貫入データ, 図-4はNo.190ユニットの貫入データである。

推進始めあるいは推進終了時に瞬時にかかる大き

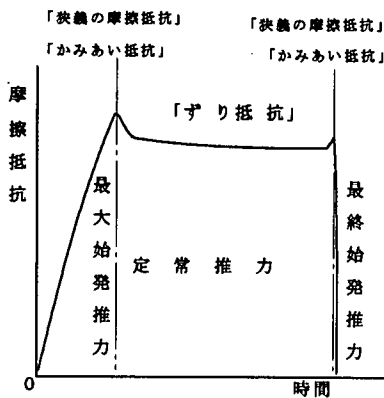


図-5 1サイクル内の摩擦力変化

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ものを「定常推力」と呼ぶ¹⁰⁾。図-3(a)、図-4(a)からは、第1回計測、第2回計測共に、押し始めに最大始発推力がそれぞれ220秒後、290秒後に発生し、これ以降は定常推力に移行し、押し終わりに最終始発推力の発生がみられる。最終始発推力は突出して、第2回目に発生している。

b) 1サイクル内の摩擦力変化

1サイクル内の摩擦力変化についてまとめたものを、図-5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j得ている^{10), 11), 12)}。

摩擦は静止摩擦から動摩擦に移行する。推進中に粒径の大きい礫地盤内では、「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や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やローリング修正等の作業内容、さらには地盤土質の粒径(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作業状況を満足する低減方法を合成して考える必要がある。

(4) 推進工法における摩擦抵抗の特殊性

推進工法は、発達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、数百メートルから一キロメートル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り、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、軸受けでは「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させること、つまり滑材の圧封を考える。

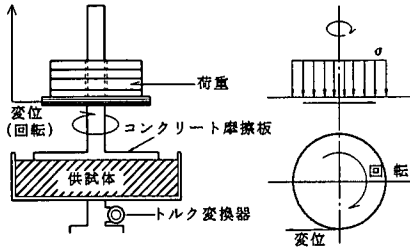


図-6 試験機概念図

表-1 室内土質試験結果一覧

		粘土	砂	砂礫
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.648	2.641	2.663
自然含水比 ω_n (%)		43.3	7.3	15.2
粒度 (%)	レキ分	0	12	80
	砂分	3	88	16
度 (%)	シルト分	33	0	} 4
	粘土分	64	0	
分類	分類名	粘土	粒度の悪い砂 (SPu)	粒度の良いレキ (GW)
	分類記号	(C' H)		

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. 滑材の効果

(1) 滑材の室内試験効果

本項では、滑材の減摩効果を定量的に調べるために、室内試験と現場施工事例(次項で)の観点から加えた検討結果を述べる。

a) 試験方法・対象土質

試験に用いた試験機概念図を図-6に示す。試験機は供試体の上にコンクリート摩擦板(ドーナツ状)を載せ、摩擦板には6段階の垂直荷重(157,265,373,481,588,696N)を加え、面圧(垂直圧) σ を変化させることができる構造で、変位は摩擦板を回転することにより与える。垂直荷重を増加または減少させながら変位と摩擦力の関係を試験機下方に取り付けたトルク変換器によって測定する。滑材は上記供試体と摩擦板の間に試験前に薄く挟む。一供試体の体積は約1,200cm³である。なお、本試験機

表-2 滑材の配合(10g当り)

混合物	単位	滑材 S	滑材 I	滑材 K
S	kg	0.45	—	—
I	kg	—	1.0	—
K (A剤)	g	—	—	1.2
水	g	—	—	3.8
K (B剤)	g	—	—	0.7
水	g	—	—	4.7
水	g	9.5	9.5	—

表-3 摩擦試験結果一覧表

ケース	土質	滑材	湿潤密度 ρ_i (t/m ³)	摩擦角 ϕ (度)	粘着力 c (kPa)	摩擦係数 $\mu = \tan \phi$
1	粘土	無し	1.86	14.7	6.86	0.263
2			1.79	12.7	2.94	0.226
3			1.81	12.7	0.98	0.226
4		S	1.81	9.4	0	0.165
5		I	1.86	6.2	0	0.109
6		K	1.87	0.7	1.96	0.012
7	砂	無し	1.74	24.6	0	0.458
8			1.63	17.4	0	0.313
9			1.65	20.3	0	0.371
10		S	1.74	21.0	0	0.383
11		I	1.75	12.0	0	0.213
12		K	1.74	19.1	0	0.348
13	砂礫	無し	2.29	17.9	0	0.323
14			2.34	20.4	0	0.382
15			2.26	29.9	0	0.576
16		S	2.25	18.1	0	0.328
17		I	2.30	23.8	0	0.442
18		K	2.30	25.0	0	0.467

は摩擦係数の傾向を把握することを主眼とし、実施工での滑材の密封状態までは再現できていない。

試験に供した試料は、A市に分布する大阪層群中から採取したもので、土質毎にそれぞれ種類である。各土質の室内土質試験結果を表-1に示す。

粘土の液性限界(w_L)は57%、塑性限界(w_p)は28%、塑性指数(I_p)は30%であり、三軸試験(UU)より求めた粘着力(c)は44.1(kPa)、内部摩擦角(ϕ)は6°であった。

b) 使用した滑材

滑材はいろいろと研究開発^{13), 14)}されているが、一般に広く用いられるものは250メッシュ以上の良質のベントナイトに添加剤を混合したものである。試験には代表的な一体型混合タイプ(滑材 S)、粒状タイプ(滑材 I)、固結タイプ(滑材 K)の3種類を使用した。また、滑材の効果を確認するために、滑材注入を行わない場合についても試験した。試験に使用した滑材の配合を表-2に示す。

c) 試験結果

試験から得られた18ケースのコンクリート摩擦板と供試体との間の摩擦係数試験結果の一覧表を表-3に示す。また、各ケースの垂直応力と摩擦力の

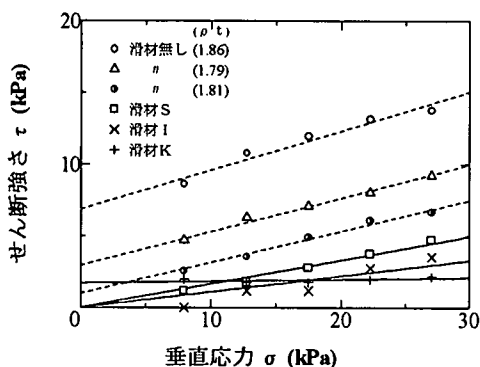


図-7 垂直応力とせん断強さ (粘性土)

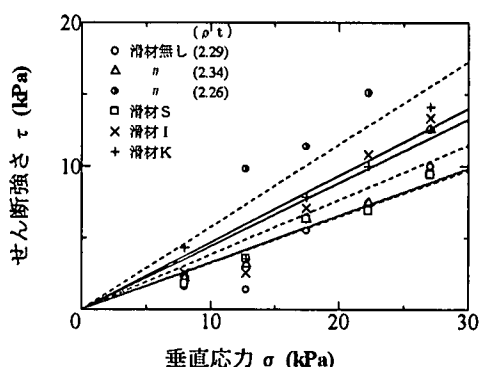


図-9 垂直応力とせん断強さ (礫質土)

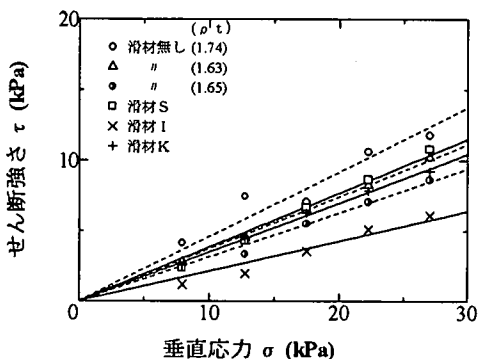


図-8 垂直応力とせん断強さ (砂質土)

表-4 土質別工事数

土質名	有滑材	無滑材	工事数計
粘性土	180	40	220
砂質土	71	17	88
礫質土	66	2	68
計	317	59	376

擦係数の比率は、47%～68%の低下である。粒状系滑材は、フィルター材となるような粒子径を持つので、滑材層が供試体表面に確実に形成され摩擦低減効果が得られたと考えられる。

礫質土は図-9から、3種類の滑材すべてに摩擦力の低下に効果が認められない。礫質土のように大きな粒子になると、試験に用いた滑材の粒径ではフィルター材となりきれず、供試体表面に滑材層が形成できないので、3種類の滑材すべてに摩擦低減効果は得られなかったと考えられる。

土粒子の粒子径が大きくなるにつれて、単に滑材だけでは低減効果が期待できない結果となっている。

(2) 滑材効果の現場施工事例

推進工法の滑材注入による周辺摩擦抵抗力の低減効果について、定量的な解析事例はあまり多くない。これは、滑材の低減効果は有効であると評価されているが、実態は使用する滑材の種類と注入量、土質、セミシールド機の構造等種々の要因から摩擦抵抗力が構成されているため、低減効果がどの程度のものであるか解析が難しい点にある。室内試験では、市販の滑材で土質によっては相当の低減率が得られたが、滑材が最終推進力に及ぼす影響との対応関係については明確化されていない。このような状況を踏まえつつ、大阪地区の下水道推進工事の実績(1989.4～1991.3)に対し調査表によるアンケートが実施¹⁹⁾され、結果は次のようであった。

関係図を図-7～図-9に示す。図-7の粘性土については、直線性もよく粘着力がよく表れている。ただ滑材Kはせん断強さが一定となり他と異なっている。図-8の砂質土および図-9の礫質土については、粘着力がゼロとなるべき観点から原点を通るように処理を行った。それぞれには直線回帰して得られた直線を記入した。

粘性土は図-7から、3種類の滑材すべてに摩擦力の低下効果が認められる。無滑材に対する滑材使用による摩擦係数の比率は、滑材Sの場合は63%～73%、滑材Iの場合は41%～48%、滑材Kの場合は4.6%～5.3%に低下している。粘性土は透水性が悪いことより、コンクリート摩擦板と供試体との間に滑材層が形成され、「ずり抵抗」となり摩擦低減効果が発揮されたと考えられ、低減率は37%～95%である。なかでも滑材Kは散布後すぐにゲル化して供試体中に溶け込まないので、確実に滑材層が形成され著しく高い効果が得られたと考えられる。

砂質土は図-8から、滑材Iのみ摩擦力の低下に効果が認められ、無滑材に対する滑材使用による摩

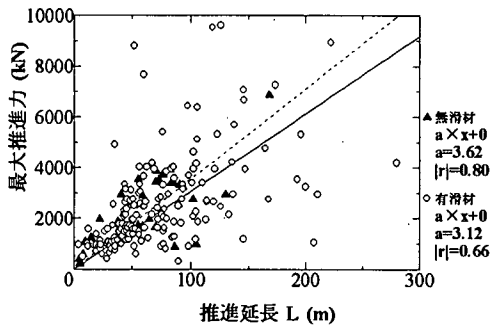


図-10 最大推進力と推進延長 (粘性土)

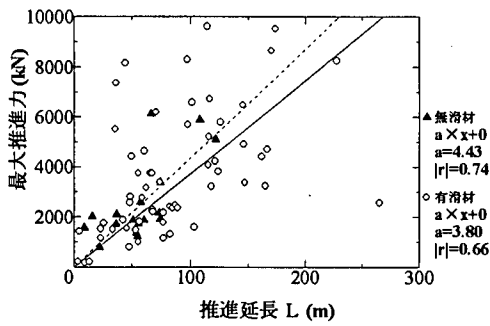


図-11 最大推進力と推進延長 (砂質土)

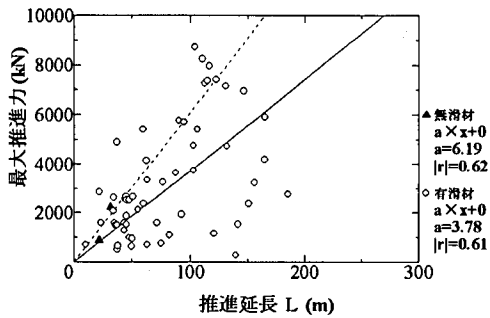


図-12 最大推進力と推進延長 (礫質土)

収集した工事数は376で、土質、滑材の要因とも一覧表にしたのが表-4である。

図-10～図-12は、推進延長と実績推進力関係を示すものである。「推進延長と最大推進力」の関係は、推進延長の増加につれて推進力が增大せざるを得ない実態の中で、到達延長近くで生じる最大推進力との関係として整理したものである。それぞれには原点を通る回帰直線、および直線の傾き a (推力延長比)、相関係数等の各数値も記入した。

粘性土は図-10から、無滑材の $a=3.62$ に対し、有滑材の推力延長比は、 $a=3.12$ と 14%減少している。砂質土は図-11から、無滑材の $a=4.43$ に対し、有滑材の推力延長比は、 $a=3.80$ と 14%減少している。礫質土は図-12から、無滑材の $a=6.19$ に対し、有滑材の推力延長比は、 $a=3.78$ と 39%減少する結果になっているが無滑材のデータは2個であるので信頼性は少ない。

無滑材の推力延長比の比率は、粘：砂：礫 = 1:1.22:1.71 であり、有滑材は、粘：砂：礫 = 1:1.22:1.21 であった。

現場事例では室内試験と異なり、3種類の地盤すべてに対し、滑材注入による低減効果は 14%～39%となっている。使用滑材は、前述の3種類に対し古いタイプのベントナイト系滑材の実施例によるものである。無滑材のデータ数は少数で信頼度は低いですが、室内試験では効果が期待できない結果となった礫質土に、39%の低減効果が得られている。ただし現場事例では、シールド方式を用いた場合には必ず余掘りを伴い、シールド機周辺の空隙に泥水、高濃度泥水を充填しつつ、後続管と地山の空隙にはさらに滑材を圧封するので、単純に滑材のみの低減効果であるとは断言できない事実やばらつきの大いデータの整理結果であることを考慮し、低減率については割り引いて考える必要がある。

4. マニキュア加工の効果

(1) マニキュアの開発

a) マニキュアの由来

滑材は、掘進中の「ずり抵抗」を主とする定常推力の抑制に効果のあることが判明したが、「狭義の摩擦抵抗」「かみあい抵抗」の複合である始発推力の抑制については、滑材単独では効果は薄い。さらに、滑材として一般に使用されるベントナイト系滑材では、滑材中の水分が管材の吸水により脱水され、塑性変形を起こした粘土分が管外面に固着し、推進力上昇の原因となることがあり、管外面の吸水防止加工が必要である。そこで、滑材を補完し「狭義の摩擦抵抗」を小さくする「自己潤滑」としての管材の外表面平滑加工が有効と考え、管材の外表面を遮水性に優れたエポキシ樹脂によりライニングした管材を使用した推進工事を、1991～1992年に実施した。この加工は爪の装飾に喩え『マニキュア加工』と呼ばれている。その後、この管材は『マニキュア管』として実用化され、使用量も増えている。

表-5 市販されている常温乾燥（硬化）型塗装剤（ライニング材）の特徴

種 類	型	価格	特 徴
エポキシ樹脂系	2液型	中	着性良好・耐水摩耗性に難
ターレポキシ系	〃	安	面硬度不足・黒色のみ
ウレタン樹脂系	〃	中	薄塗りに難
〃	1液型	安	面硬度不足
ビニール系	〃	安	密着性が劣る
不飽和ポリエステル系	3液型	中	塗工性に難・臭気大
ポリアクリル樹脂系	〃	中	塗工性に難・臭気大・性能良好
ポリシロキサン系	2液型	高	性能は最適・特に揮発性
シリコン樹脂系	〃	高	上記に比べ硬度不足
フッ素樹脂系	1液型	高	常温硬化が不可

※価格の基準（1998） 安：安価＜1,000円/kg
 中：中間価格 1,000円/kg～2,000円/kg
 高：高価＞3,000円/kg

b) マニキュア材料に必要な性質と効果

マニキュア材料には、コンクリート表面に密着し、容易に剥げ落ちず、滑材中の水分が推進管に吸収されないように遮断できる材質が要求される。

安全性の面からは、推進構造物は地中構造物として半永久的構造物となるので、推進管コンクリートに害のある化学反応を起こしたり、地下水に溶けて地下水を汚染しないことも必要である。

作業性からは、常温で、塗布作業でき乾燥する材料であることが必要となる。

経済性の面からは、材料価格および塗布手間とも安価であることが要件となる。

実用面からは、砂礫地盤等の土粒子径の大きい地盤中を掘進しても削り取られない表面硬度として、マニキュア硬化後の表面硬度は、F.Mohsの硬度計の6（正長石）程度が望まれる。

マニキュア加工から得られる副次的効果は、管外面の遮水性の改善により止水性能が発生し、侵入水の防止能力が高まることである。さらに、マニキュア加工により表面が滑らかとなり、管外周に接する土砂が推進に伴って管と共に前方に引きずられることを防ぐ。もし土砂が前方に引きずられると、管外周に圧封された滑材がこの土砂と混合されて、滑材の滑性が下がることになる。つまり、滑り面を滑材層中に引き留め、滑材の減摩効果の持続性を保つ効果が得られる。

c) マニキュアとして使用可能な塗装剤

今のところ経済性優位の観点から、現場施工事例ではエポキシ系樹脂が採用されているが、表面硬度の面からは撥水性無機ポリシロキサン樹脂の方が優れている。推進管は永久的に地中に埋設されるので、有機質の材料より無機質の材料を使用した方が環境に優しく、環境ホルモン流出の懸念等の点からも望

表-6 外水圧試験結果

供試管	塗り回数	試験結果	備 考
T-0	無塗装	内面発汗	255kPaにて3分後管内に発汗
T-1-1-A	1	変化なし	T-0の供試管を使用127～255kPa×24時間
T-1-1	1	変化なし	127～255kPa×24時間
T-1-2	2	変化なし	127～255kPa×24時間
T-1-3	3	変化なし	127～255kPa×24時間
T-2-1	1	変化なし	127～255kPa×24時間
T-3-1	2	変化なし	127～255kPa×24時間(グライマー塗装有)
T-3-2	1	変化なし	127～255kPa×24時間(グライマー塗装有)
T-3-3	2	変化なし	127～255kPa×24時間(グライマー塗装無)

T-1 ポリアミド系エポキシ樹脂
 T-2 アミドアダクト系エポキシ樹脂
 T-3 撥水性無機ポリシロキサン樹脂

ましいので、積極的に無機質の材料の採用を心がける必要もある。今後はマニキュア材料の耐久性・耐摩耗性の解明と、樹脂の経済性の改善の探求が課題であると考えている。

一般に市販されている塗装剤の中から、マニキュアとして使用可能と考えられる材料の主な特徴等を、表-5に示す。

d) マニキュア加工による止水性の向上

マニキュア加工の主目的は、管外面を遮水加工することであるが、副次的効果として、管内面への侵入水の浸透防止が期待できる。これは、水密性が要求される推進工法による永久地中構造物としては願ってもない効果である。マニキュア加工の副次的効果である止水性の向上の程度を確認する目的で、材質と塗り重ね回数を変えて外水圧試験機を用いた試験を実施した。これは継手部の水密性試験の水圧を0.127MPaで止めて3分間の漏水状況を調べたものであり、その結果が表-6に示されている。マニキュア材料として、ポリアミド系エポキシ樹脂、アミドアダクト系エポキシ樹脂、撥水性無機ポリシロキサン樹脂の3種類を用いている。

試験に使用したすべての材料が、1回塗りで複数塗りに比べて遜色のない効果と、経済的にも優れた結果が得られた。当然これらの結果は地山に貫入以前のものであり、実際には摩耗を受けるのでこのままの効果が期待できるとは限らない。現場施工事例からは、礫の無い砂質地盤では滑材を十分に注入していれば、エポキシ系のマニキュアで約500m（笠松町事例）摩滅せずに効果を持続している。さらに礫破碎型の推進では、角張った碎石状態の破碎礫の一部を推進管外周に充填していくので破碎礫がマニキュアを削り、エポキシ系マニキュアは進進から70

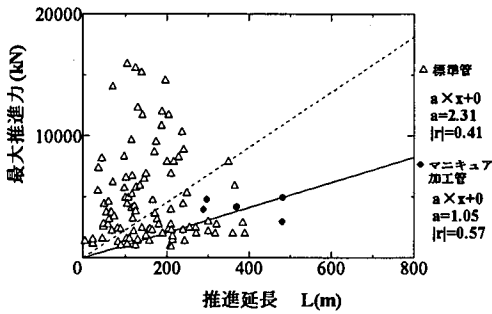


図-13 最大推進力と推進延長の関係(砂質土 管径1,000mm以上, 標準管・マニキュア加工管)

～80m(山梨県流域幹線事例)位しか残存していない。ポリシロキサン樹脂マニキュアの耐摩耗性については、山梨県の転石地盤で施工される推進工事により耐摩耗実績が判明する予定である。シルト質砂地盤では、このポリシロキサン樹脂マニキュアは約1,006m(笠松町事例)摩滅せずに残存している。

(2) 砂質土におけるマニキュア加工の効果事例

前章の大阪地区の事例収集に加えて、最新の工事データ、特に長距離推進事例を追加して「延長～最大推進力」関係の分析を試みた。しかも、推進管が巨大化する傾向にあるために、1,000mm以上の管径事例を、マニキュア加工管のときと標準管のときに分けて分析した結果が図-13である。滑材有りのデータのみを使用しているが、滑材の種類を区別するデータが不明なので無関係に整理している。それぞれには原点を通る回帰直線、および直線の傾き(a)、相関係数(|r|)等の各数値も記入した。以下では直線の傾き(a)を推力延長比、直線を推力延長比線と呼ぶ。他地区での推進事例を加えた結果、推力延長比の値は図-11の3.80から2.31へ低くなったが、これは追加データの施工年代の新しさにより長距離化が進んだことによるものと推論、解釈している。109例の内、マニキュア加工管は5例のプロットであるが、標準管と比較して推力延長比線から大きくはずれた範囲に推進力値は見られず、マニキュア加工管の推力延長比の値は1.05で標準管の2.31に較べて約55%だけ小さくなった。

(3) 礫質土におけるマニキュア加工の効果事例

砂質土の場合と同様の趣旨で、礫質土に対しても大阪地区34例、他地区57例の計91例を加えて「延長～最大推進力」関係のマニキュア加工の効果調べるために描いたのが図-14である。他地区で

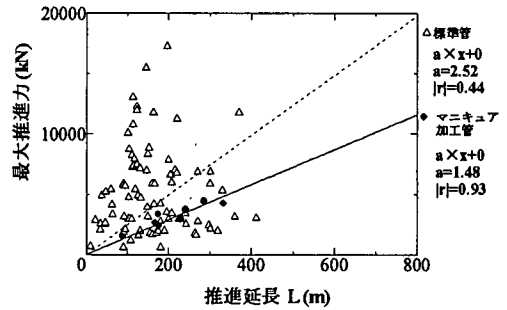


図-14 最大推進力と推進延長の関係(礫質土 管径1,000mm以上, 標準管・マニキュア加工管)

の推進事例を加えた結果、推力延長比の値は図-12の3.78から2.52へ低くなった。砂質土と同様に、追加データの施工年代の新しさにより長距離化が進んだことによるものと推論、解釈している。マニキュア加工管は8例のプロットであるが、標準管と比較して推力延長比線から大きくはずれた範囲に推進力値は見られず、マニキュア加工管の推力延長比の値は1.48で標準管のときの2.52に較べて約41%だけ小さくなり、ばらつきが小さい関係に集約されてきている。

5. 結論

本論文では、はじめに推進工法の現状を基に解明されるべき課題を整理し、推進1サイクルでの推進管に発生する摩擦抵抗を計測・分析した。そして最近の長距離化に向けた推進力低減方法として、「滑材効果」、「マニキュア効果」について検討した結果を述べた。得られた結果を纏めると次のようである。

- (1) 推進管に働く摩擦抵抗は、機械の軸受けの摩擦抵抗に対比させながら考察して、「狭義の摩擦抵抗」、「ずり抵抗」、「かみあい抵抗」に分類して、解釈できる。
- (2) 計測事例によれば、推進力は初期に発生する大きな「始発推力」、その後若干低減して安定して推移する「定常推力」に大別され、初期の最大始発推力が最大であることが判明した。
- (3) 概略的な試験条件であるが、滑材の摩擦抵抗の低減効果を調べる室内試験の結果、滑材による低減効果は粘性土に対する場合が最大の37%～95%だけあり、また砂質土では47%～68%あった。

(4) 施行事例の滑材による低減効果は、ばらつきが大きいけれども無滑材のときに対して 14%～39% になり、86%～61%だけ低減した。

(5) マニキュア加工による推進力の低減効果は、標準管（無加工）に対して、砂質土地盤で約 55% だけ、礫質土地盤で 41% だけ認められている。

(6) マニキュア加工は副次的に止水効果が期待できるが、加工部の摩滅の懸念に対して、シルト質土で 1,006m、砂質土で 500m の効果持続性が確認され、礫質土でも 70～80m の持続性が認められる状況にある。

謝辞：現場計測事例の収集にあたり、多大なるご協力を頂いた高槻市 乾 充氏、(株)推研 本間良治氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 下水道推進工法の指針と解説—1988版—, 日本下水道協会, 1997.
- 2) 長距離中押し式セミシールド工法—技術指針(改訂版)—, 関東推進工事業協会, 1979.
- 3) 下水道用管路施設設計積算要領—泥水加圧型セミシールド工法編—, 全国推進工事業協会, 1983.
- 4) 推進工法用設計積算要領—土圧式推進工法編—, 日本下水道管渠推進技術協会, 1983.
- 5) 中村啓, 宇野尚雄: 推進力に及ぼす地盤土質と管径の影響, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集,

pp.106-107, 1996.

- 6) 中村啓, 宇野尚雄: 長距離カーブ推進における管体応力分布の研究, 第8回非開削技術研究発表会論文集, pp.53-60, 1997.
- 7) 田中壬子也, 松下邦次郎: シールド工法の手引き, 土木工事施工例集, トンネル・地下鉄道編, 山海堂, 1967.
- 8) 田中久一郎: 摩擦のおはなし, 日本規格協会, pp.189-191, 1997.
- 9) 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*, pp.2-1-1-2-1-15, 1997.
- 10) 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, pp.5-10, 1992.
- 11) 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, pp.3-9, 1993.
- 12) 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, pp.72-81, 1994.
- 13) 日本推進工法協会編: 特集 推進工法における滑材の活用, 月刊推進技術, 第2巻, 第5号(通巻10号), pp.1-72, 1988.
- 14) 金成英夫, 川口直能: 遅硬性滑材の特性について, 第8回非開削技術研究発表会論文集, pp.13-20, 1997.
- 15) 高槻市下水道部工務課: 推進工法実態調査, 全4巻, 1992.

(2000. 4. 20 受付)

EFFECT OF LUBRICANTS AND MANICURE METHOD ON PIPE JACKING METHODS

Satoru NAKAMURA and Takao UNO

Recent demand for pipe-jacking method is to make possible long distance construction of water and sewage conduits in the local underground. It requires the reduction of propulsion force by decrease in friction of soils acting on outer pipe-wall. In this paper, the occurring characteristics of propulsion force are effectively measured during a cycle among field propulsion works, and friction data are analyzed based on laboratory experiment also. In order to decrease propulsion force, the lubricant effect and the "manicure" method are developed and evaluated on many execution works through sand, silt and clay ground respectively. As a result, expected effect is reported as satisfactory achievement.