

総論

1スパン・1kmを超える時代の 推進力算定式の考え方について

中村 啓

環境創成リサーチ 所長
博士（工学）



1. はじめに

1975年、発注者の現場監督として、大学では学ばなかった刃口式推進工法に初めて出会った。

薬液注入工法による地盤改良で切羽を自立させ、作業員は切羽に入ってストラット分の長さ（概ね30cm）を心抜きと称する人力掘削にて先掘りを行う。掘削土は、刃口後方の推進管内に設置したベルトコンベアを使ってナベトロと呼ぶ台車に投入し、後部の発進立坑までウインチにて引き込み、門型クレーンで地上に吊り上げ、トラックに積み替えて排出していた。同時に掘削した長さだけ立坑に設置した油圧ジャッキで推進管を地中に押し込む作業の連続で、日を迫う毎に地中に管路が設計図面の勾配通りに築造されていく様は圧巻であった。当時の1スパンの延長は、管径800mm以上で50m程度が限界であった記憶である。

2. 長距離化・1スパンの延長の変遷

1990年頃には、切羽の制御方式が刃口開放型から機械密閉型に移行し、粒状滑材や高強度推進

管等の開発やロングストローク油圧ジャッキの登場と相まって1スパンの延長を伸ばし、管径（m）の200～250倍程度までは可能となった。

しかし、これを超える延長になると、到達近くで突然の推進不能に陥ることがあり、“600mを超えると魔物が住む”などと囁かれていた。筆者等は1999年6月～2000年3月末にかけて、推進工法では夢と言われた延長1,010mを、管径1100mmにおいて、新開発の長距離推進システムを駆使し、難なく計画通りに完工した^{1), 2)}。

それから約8年経過した2007年11月には、愛知県内で延長1,447m、管径1100mmが、同システムを用いて完工している。

3. 推進力とは

3.1 既往の考え方

推進力は新たな管を地盤に推進するたびに発生し、推進した管の総本数、つまり推進延長に呼応して増増することが知られており、（社）日本下水道協会はこの推進力を、推進力は先端部先端部の地山への貫入あるいは掘削による抵抗と外周面が地

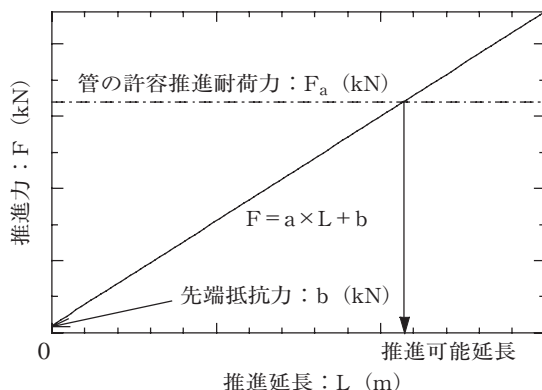


図-1 一般に用いる推進力と推進延長

山と接触する際の摩擦や付着力、管の自重による管と土の摩擦の和に見合う力で、推進諸抵抗値の総和とすると定義している³⁾。これを整理すると推進力は式(1)で表され、推進管の許容推進耐荷力は、式(2)で求めるとしている。

$$F = a \times L + b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_a = \sigma_b \times A_e \times 1000 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、F：推進力 (kN)、a：係数 (推進力延長比)、L：推進延長 (m)、b：先端抵抗力 (kN)、 F_a ：推進管の許容推進耐荷力 (kN)、 σ_b ：推進管の許容圧縮強さ (N/mm²)、 A_e ：推進管の有効断面積 (mm²)

推進力と推進延長等の関係を、図-1に示す。推進力は、傾き (a) と切片 (b) をもつ一次直線で表現され、推進可能延長は、この直線と管の許容推進耐荷力との交点の横座標で表されるが、この関係を1kmを超えるスパン長で使うには実際の工事での計測事例がないために不安がある。

3.2 筆者の考える総推進力

推進工法は、発進立坑内に設置した元押しジャッキの推進力により、推進管を連続して地中に圧入しながら掘削して敷設する工法であり、この推進力を元押し推進力と呼んでいる。長距離推進では推進力を推進管の軸方向耐荷力や支圧壁反力の許容範囲内に抑える必要があり、元押しジャッキに加えて管と管の間に中押装置を挿入し、交互にこれらを作動させる中押工法を併用して、総推進力を元押し推進力と中押推進力に分割するのが一般

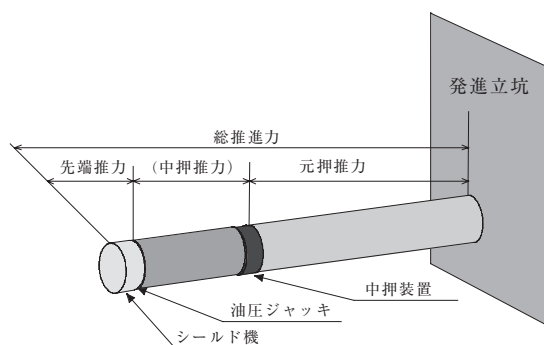


図-2 総推進力のイメージ図

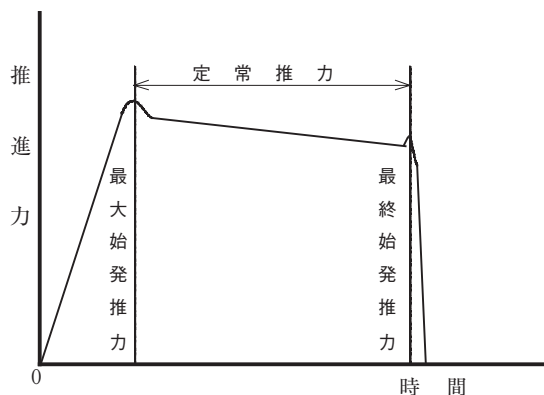
的である。図-2に総推進力のイメージ図を示す。

筆者等は、長距離推進における推進力低減の特別な工夫として元押し推進に先端推進を加えている。先端推進はシールド機の後部と先頭管との間に挿入したジャッキを作動させ、シールド機を予め地山に圧入するものであり、この時の推進力を先端推進力と呼ぶ。先端推進は総推進力を低減する意図から常に行っているが、中押装置は長距離の安全確保のために設置しており、中押推進力として使わないようにしているので、総推進力は、先端推進力と元押し推進力の和となる。

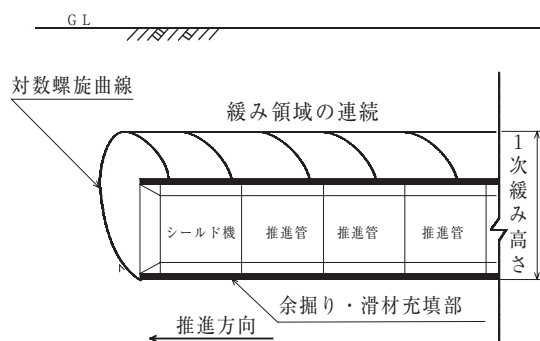
3.3 推進1サイクルにおける推進力

筆者は、推進管1ユニット全量を推進する1サイクルにおける推進力に時間のファクタを取り入れ、その特性から始発推進力と定常推進力に大きく2分類している⁴⁾。1サイクル内の推進力変化を図-3に示す。始発推進力を捕捉するにはそれなりの装置が必要であり、一般に推進力の管理指標に用いる元押しジャッキ油圧計の読みからは、定常推進力が得られるだけで始発推進力は確認できない。つまり、通常、推進力として取り扱われているのは定常推進力であり、式(1)で求める推進力も定常推進力である。

各推進管1ユニットの推進時に発生した最大始発推進力を結ぶと、図-1に示されるような一次直線とはならず、鋸状に増減を繰り返しながら推進延長に応じて階段状に通増し、到達近くで急激に上昇する結果が得られる。ちなみに定常推進力



図ー3 1サイクル内の推進力変化



図ー4 推進方向における緩み領域の連続

を結ぶと鋸状の増減は始発推進力に比べ小幅にはなるが、推進延長に応じて階段状に増加する傾向は変わらないという結果^{5)、6)、7)、8)}を得ている。

3.4 推進管上部の緩み領域と推進期間

トンネル掘削において、刃口やシールド機を地山に圧入した時に、切羽に対数螺旋曲線による緩み領域が形成されることが知られている。

この時、推進管路のクラウン部後方では先頭管から発進抗口に至るまで、この緩み領域が連続して形成される。この領域の総体積を、鉛直・水平方向に小さく収めながら推進して到達を迎えることが、総推進力を低減して長距離推進を可能にする絶対条件であると筆者は考えるが、この存在については注視されることは少ない。これらのイメージを図ー4に示す。図中の緩み領域は、地山の土質種類、施工法で異なる余掘厚さの違い、推進技術の差等により実際は不連続となるが、便宜上、直線で表示している。

図中で1次緩み高さ并表示したのは、1ヶ月程度で到達できるような1スパン延長であれば、緩み領域が鉛直方向に2次から3次へと更に拡大していくことは余程ないと経験的に知られているが、1スパン・1kmを超える推進延長では3ヶ月を優に超えるような推進期間も想定され、この限りではないとの意味合いからである。

図中の対数螺旋曲線の形状は、図ー3の最大始発推進力の発生形状に支配を受けると考えている。つまり、最大始発推進力の発生が緩やかで数

値も低く抑えられる推進システムであれば、推進管クラウン部の緩み高さも低くすることができるだけでなく、水平方向スプリット部においても緩み領域を抑制できるということを意味している。

始発推進力の発生回数に応じて発生する緩み領域は、連続して推進方向に累加・積分されていくので、この総体積を減らすには、1スパンにおける始発推進力の発生回数を減らす工夫が必要である。

時に推進作業途中で予期せぬ事故に遭遇し、当初計画以上に長期間を要した推進工事においては、到達間近で推進不能となる事例が発生する。これは各ユニット推進時に発生した緩み領域が1次緩みの領域内に収まらず、地上に向けて2～3次と拡大し、推進管を带状に包み込んでしまい、推進不能に陥れたことによるものと考えている。

3.5 始発推進力の発生回数を減らす工夫

1サイクルの推進工においては、押し始めに大きな最大始発推進力が発生し、次第に定常推進力に収束する形で小さくなり、終了時には最終始発推進力が発生することは図ー3に示した。この始発推進力は推進サイクルの回数に応じて発生し大きさも累増していくので、その低減にはサイクル回数を減らす工夫が必要である。

そこで、発進立坑における管ユニットの1回当たりセット数を、通常の1本から2本に増量し、サイクルタイム面の効率化を図り、始発推進力の発生回数も半分に減らすことを推奨している。仮に3,000mmストロークの油圧ジャッキやロングス

トラットを使えば、管ユニット2本であっても、1連の作業が1本の時と大差なく連続してできるようになる。

4. 摩擦抵抗を低減する滑材

4.1 「推進工法」における摩擦抵抗の分類

推進力は推進抵抗の総和とし、推進抵抗として次の要素を考えている。

- ①管外周面にかかる地山からの等分布荷重
- ②管の自重による管と地山との間の摩擦係数
- ③管外周面と地山との付着抵抗
- ④推進に伴う先端抵抗

中でも、先端抵抗よりも周辺抵抗の占める割合が推進延長の増加につれて大きくなるのが、施工経験からは知られている。主たる推進抵抗の①～③のイメージを図-5に示す。

推進工法における摩擦抵抗を概念的に分類すると図-6のようであると筆者は解釈している。図には滑材を使用する前提で描いている。

- ①狭義の摩擦抵抗（管・地山の摩擦抵抗）
- ②ずり抵抗（管・地山（滑材）の摩擦抵抗）
- ③かみあい抵抗（管・玉石の摩擦抵抗）

狭義の摩擦抵抗は押し始め・押し終わりに大きく発生する始発推進力やカーブ部分での摩擦抵抗であり、ずり抵抗は定常推進力における摩擦抵抗をイメージしている。

因みに総推進力の算出は、図-5に示す推進抵抗を、図-6に示す摩擦抵抗と組み合わせ、それぞれにおける滑材効果を加味して求めている。

1スパン・1kmを超える工事における推進力の制御は、今のところ、刃口工法での経験豊富なオペレータの技量に助けられている部分が多々ある。彼らは、推進力を管ユニット毎に限らず発生し始めて継続的に増加させないように、若干低減させる元押しジャッキ操作を繰り返しながら抵抗力の急激な発生を抑える工夫を心がけている。

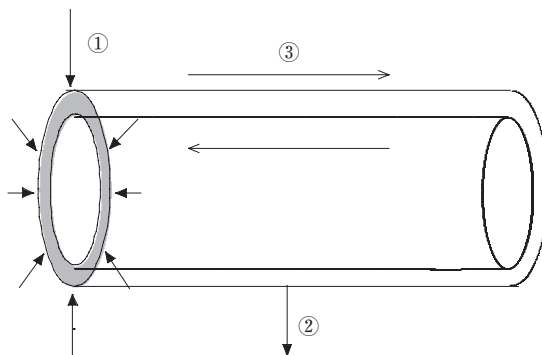


図-5 摩擦抵抗のイメージ図

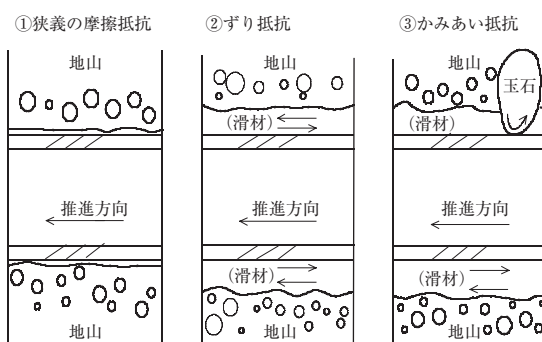


図-6 摩擦抵抗の概念図

4.2 ずり抵抗を具現するビンガム塑性体

有利なトライボロジー⁹⁾は流体潤滑であり、推進工法における摩擦抵抗ではずり抵抗が該当するので、摺動面である地山と推進管の間に第3の物質を介入させる、つまり滑材を圧封する。

滑材は余掘りした掘削地山のトンネル形状を到達するまでそっくりそのまま維持させ、余掘り部の体積形状を変化させない役目を担う。この余掘り部に塑性状の材料を充填すれば、管クラウン部・水平方向スプリット部の緩み領域の拡大が抑えられる。

従前からの泥水等のニュートン流体では適用地盤が限定され確実性に問題があるため、ビンガム塑性体、例えばシュークリームのカスタードのようなイメージを持つ滑材が必要になる。これらの滑材は、狭義の摩擦抵抗を、ずり抵抗への置換も可能にする。

さらに、推進管をマニキュア加工⁴⁾することにより自己潤滑が成立するので、合成された潤滑により、摩擦抵抗は減少する。特に撥水製マニキュア加工は効果が大である。マニキュア加工の副次的な効果になるが、管内面が乾燥することにより、内面に結露が発生しないので、管内での不明水撲滅に有効な結果が得られている。

5. 今後に望まれる事項

5.1 施工者の倫理

1スパン・1kmを超える推進工法を確固たるものにしていくには、工事に携わることに誇りを持つことは当然だが、施工者の倫理として

- ・良心でことにあたり、駆け引きはしない
- ・間違いは素直に認め、嘘を嘘で固めない
- ・できないことは、できないと言う勇氣
- …を心掛けたい。

5.2 保険的費用の評価

以下について、費用計上を望みます。

- ・単発で発注される高度な施工内容に応えるために必要な優秀な人材確保にかかる費用
- ・予め準備している不測の事態に対応するための保険手当ての費用
- ・精度確保のための方向修正手間、管内測量経費や精度確保システム費用

5.3 維持管理のメンテナンスフリー化

推進管路のマンホール間延長が1,000mを超えて長くなっているので、光や風力発電等の自然エネルギーで動くCCDカメラ等を使い、何時でも必要な時に、地上部から内部確認ができるような究極の維持管理の具体化を考えている。

清掃方法等の工夫については割愛するが、別途方法を講じメンテナンスフリー対策を具体化している。

6. おわりに

地方発信の1スパン・1kmを超える長距離カーブ推進システムを、広く世間に認知された安全・確実な工法にしていくために一層努力する所存ですので、先輩・諸氏のご指導の程よろしくお願い申し上げます。

【参考文献】

- 1) 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設計、第10回非開削技術研究発表会論文集,pp.3-10,1999.
- 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) 下水道推進工法の指針と解説－2000年版－、日本下水道協会, pp. 38-46, 2000.
- 4) 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.
- 5) 松原 憲昭、中村 啓：推進管路に発生する応力とその解析、第2回非開削技術研究発表会論文集、pp.83-86, 1991.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 山本 雄二、兼田 楨宏共著：トライボロジー、理工学社、pp.8-9,1999.