

泥濃式推進工法における曲線推進時の推進力の評価

Estimation of Thrust in Curved Jacking Area Using Slurry Pipe-jacking

島田英樹*・井上雅文**・久保田士郎***・松井紀久男****

Hideki SHIMADA, Masafumi INOUE, Shiro KUBOTA and Kikuo MATSUI

Slurry pipe-jacking is generally accepted as a good ground technique for short crossing in roads, railways, rivers and so on. Basically, the system involves the pushing or thrusting of the drive machine through concrete pipes ahead of jacks. The method utilizes the mud slurry which is formed around the pipes for stability of surrounding soil / sedimentary rock. The difference of the thrust between linear jacking and curved jacking is due to the frictional force of outside components of the curved area of thrust. It is considered that if the use of mud slurry on the face and over-cutting area is successful, lower increased ratio of the thrust is obtained in the curved jacking by in-situ data. However, in order to establish a more useful prediction equation in the curved jacking, more research and field data are needed. From this point of view, the purpose of this paper is to discuss the prediction equation in order to better explain the characteristics of the thrust and the friction resistance in the curved jacking by using field data.

Key Words : slurry pipe-jacking, thrust, prediction equation, curved jacking area, frictional force

1. はじめに

一般的な推進工法は、掘削に伴う地盤の緩みによる土荷重を推進管自体の剛支保作用により保持しているため、これの長距離推進あるいは曲線推進の際、推進抵抗が急増する傾向にある。そこで、このような問題点の解決を可能にしたものが泥濃式推進工法である¹⁾。この工法は、推進管外周の余掘り箇所へ泥水を注入し、泥水圧を作用させながら掘削壁面とその近傍に泥膜を形成させることにより地盤の土荷重を保持し、その中で推進管を推進させ、推進抵抗の低下を図るという点で従来の推進工法と異なっている¹⁾。そこで筆者らは、わが国の都市開発事業のひとつとして利用されてきている泥濃式推進工法への種々の要求に応えるために、本工法の安全かつ効果的な施工を対象とした研究を行い、いくつかの成果を挙げてきている²⁾。

泥濃式推進工法における管路の設計では、管種を選択や推進設備の検討の際、管に作用する荷重や外力を正確に評価することが極めて重要である。特に、推進管を安全かつ効果的に推進させるためには、あらかじめ施工に必要な推進力を精度良く算定する必要がある。このため、日本下水道協会等では、いくつかの推進力算定式を提案しているが、曲線推進に関して理論的な算定式が未だ構築されていないのが実状である³⁾。

以上のような観点から、本報告では泥濃式推進工法における曲線推進部の適切な推進力算定式を得るために、現場実績データを用いて種々検討し、新たな推進力算定式を提示する。

2. 泥濃式推進工法の概要

本報告で取り扱う泥濃式推進工法は、掘削機前方切羽部に高濃度泥水が充填され、地下水圧にバランスさ

* 正会員 博士(工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門
** 非会員 九州大学大学院工学府 地球資源システム工学専攻
*** 非会員 博士(工学) 九州大学大学院助手 工学研究院地球資源システム工学部門
**** 正会員 工学博士 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門

せながら掘進する1工程式である。一般に、推進長が200 m以上の推進は長距離推進と呼ばれ、曲率半径が50 m以下の推進は曲線推進と呼ばれている。本工法では、種々の特性を有する地山に対しても、上記の推進距離および曲率半径を補助工法なしで施工できるという実績が得られている¹⁾。

本工法では、推進管の先端に取り付けられた掘進機の推進力を元押しジャッキによって、推進管であるヒューム管の耐荷力の範囲内で与えて掘削が行われる。本工法では、推進管径よりも常に30~60mm程度大きく地山が掘削される。そして、掘進機と地山の間に生ずる余掘り部に、掘削対象地山に適合した高濃度の泥水が加圧充填される。この泥水は、粉末粘土、CMC、逸泥防止剤等を混合させたものであり、その機能は次のとおりである。すなわち、余掘り外周部に泥水を加圧充填させることにより、余掘り部に泥膜が、その近傍地山に泥水浸透層が形成される。その結果、これらの存在と加圧泥水の作用により地下水の流入防止および地山の土粒子の移動崩落が抑えられ、地山の安定性の確保等の効果が得られる²⁾。また、形成された泥膜と推進管の間隙に泥水を充填することにより、推進抵抗の低減を図ることができる。

3. 曲線推進時における推進力算定式の検討

曲線推進において、曲線外側方向に生じる推進力の分散力により、推進管と地山が接触している場合の推進力算定式を導く。図-1に曲線部における推進モデルを示す。ただし、この図は推進管を平面的に見た模式図である。この図において、 F_1 は曲線部に前方より作用する力、 F_2 は曲線部後端に作用する力、 F_3 は管外周面抵抗力、すなわち地山反力と推進することにより生じるせん断抵抗力の和を表している。また、曲線部の埋設では、推進管そのものが円筒形であるため、隣接する推進管の間ではある角度を持って連結している状態であるが、推進管の1本あたりの長さより曲率半径の方が極めて大きいため、推進時には推進管が曲線状に埋設されると仮定した。このような仮定の下で、曲線区間で地山と接触することにより生じる地山反力 f を図-2のように曲線推進外側の左半分に一樣に作用すると仮定すると、微小曲線区間で作用する力は図-3に示すようになると思われる。そこで、この図における接線方向および法線方向の力の釣り合いから、地山反力を考慮した曲線部での推進力算定式を求める。

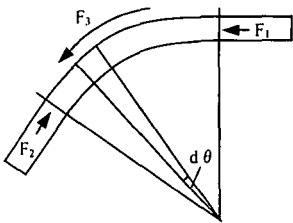
① 接線方向の力の釣り合い

$$(F + dF) \cos \frac{d\theta}{2} - F \cos \frac{d\theta}{2} = \mu \cdot f \cdot D \cdot Rd\theta + \pi \cdot B_c \cdot \tau \cdot Rd\theta$$

$$d\theta \rightarrow 0 \text{ ならば } \cos \frac{d\theta}{2} \rightarrow 1 \text{ となるので上式を整理すると、 } dF = \mu \cdot f \cdot D \cdot Rd\theta + \pi \cdot B_c \cdot \tau \cdot Rd\theta$$

単位長さ当たりの外周面抵抗力 $\rho = \pi \cdot B_c \cdot \tau$ (kN/m) とおくと、

$$dF = \mu \cdot f \cdot D \cdot Rd\theta + \rho \cdot Rd\theta \quad (1)$$



F_1 : 曲線部前方より作用する力 (kN)
 F_2 : 曲線部後端に作用する力 (kN)
 F_3 : 管外周面抵抗力
 = 地山反力 + せん断抵抗 (kN)
 $F_2 = F_1 + F_3$

図-1 曲線推進モデル

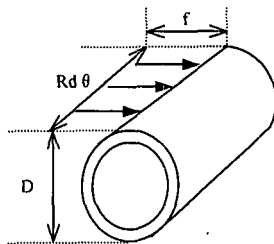


図-2 地山反力モデル

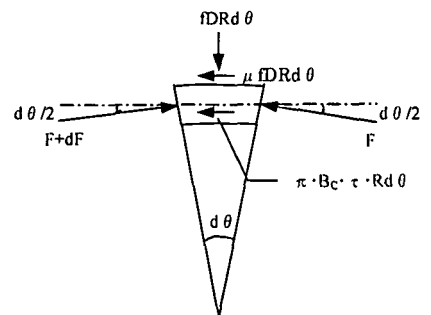


図-3 微小区間で作用する力の関係

ただし、 μ : 管と地山の摩擦係数、 D : 管と地山が接触する幅 (m)、 B_c : 管外径 (m)、 τ : 管と地山のせん断抵抗 (kPa)、 f : 地山反力 (kPa) である。

② 法線方向の力の釣り合い

$$(F + dF) \sin \frac{d\theta}{2} + F \sin \frac{d\theta}{2} = f \cdot D \cdot R d\theta$$

$d\theta \rightarrow 0$ ならば $\sin \frac{d\theta}{2} \rightarrow \frac{d\theta}{2}$ となるので上式を整理すると、 $F d\theta + dF \frac{d\theta}{2} = f \cdot D \cdot R d\theta$

$dF \frac{d\theta}{2}$ は微小であるので無視し、両辺を $d\theta$ で割ると、

$$F = f \cdot D \cdot R \quad (2)$$

③ 曲線部の推進力算定式

(2) 式を (1) 式に代入し整理すると、 $dF = (F + \rho \cdot R / \mu) \mu \cdot d\theta$ となり、これを变形すると、

$$\frac{1}{F + \rho \cdot R / \mu} dF = \mu \cdot d\theta$$

となる。曲線区間の角度 $0 \sim \theta$ に対応する推進力 $F_1 \sim F_2$ で積分すると、

$$\left[\log \left| \frac{F + \rho \cdot R / \mu}{F_1} \right| \right]_{F_1}^{F_2} = \mu \cdot \theta \quad \text{となり、これを整理すると、} \quad \frac{F_2 + \rho \cdot R / \mu}{F_1 + \rho \cdot R / \mu} = e^{\mu \theta}$$

したがって、 $F_2 = (F_1 + \rho \cdot R / \mu) e^{\mu \theta} - \rho \cdot R / \mu = F_1 \cdot e^{\mu \theta} + \frac{e^{\mu \theta} - 1}{\mu \cdot \theta} \cdot \rho \cdot CL$ となり、 $\lambda = (e^{\mu \theta} - 1) / \mu \theta$ とおくと曲率

半径 $R = CL / \theta$ より、

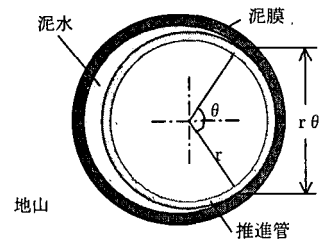
$$F_2 = F_1 \cdot e^{\mu \theta} + \lambda \cdot \rho \cdot CL \quad (3)$$

ただし、 F_1 : 曲線部に前方より作用する力 (kN)、 F_2 : 曲線部後端に作用する力 (kN)、 μ : 管と地山の摩擦係数、 R : 曲率半径 (m)、 CL : 曲線の長さ (m)、 $\theta (= CL / R)$: 曲線区間の中心角 (rad) である。

この (3) 式では、推進管の外側半分が一様に地山反力を受けると仮定しているが、実際には推進管の曲線外側の全面が地山と接触するとは考えられない。そこで、曲線部において推進管に曲線の外側方向への分散力が生じ、推進管が地山と接触している場合、推進管に作用する自重はある一定の範囲に等分布されるという Terzaghi の土荷重理論考え方⁴⁾を適用することにより推進管に作用する分散力を求める。この場合、地山と推進管の面接触によって推進管に地山反力が作用すれば、曲線部外側方向に生じる分散力による管と泥膜との接触面積は図-4のような状態で表され、推進管の弧 $r\theta$ の範囲が地山と接触すると考えられる。すなわち、図中の中心角 $\theta = 120^\circ$ の範囲にわたって地山と推進管の接触により地山反力が推進管に作用することになる。したがって、図-4により推進管円周の1/3が地山、2/3が泥水と接触することから、推進管と地山とが接触する場合の推進管周面せん断抵抗は (4) 式で表される。

$$\tau = \frac{2\tau_a + \tau_b}{3} \quad (4)$$

ただし、 τ_a : 管と泥水のせん断抵抗 (kPa)、 τ_b : 管と地山のせん断抵抗 (kPa) である。この (4) 式で表されるせん断抵抗を (3) 式に代入すると、



r : 推進管の半径 (= $B_c / 2$) (m)
 $r\theta$: 推進管と地山が接触する幅 (m)
 $\theta = 120^\circ$ とすると、

$$2\pi \cdot \frac{120}{360} = \frac{2}{3} \pi = \frac{B_c}{3} \pi$$

図-4 曲線部における推進管周辺の模式図

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\mu \theta} + \frac{f \cdot R}{\mu} \cdot (e^{\mu \theta} - 1) = F_1 \cdot e^{\mu \theta} + \lambda \cdot f \cdot CL$$

$$= F_1 \cdot e^{\mu \theta} + \lambda \cdot \frac{\pi \cdot B_c}{3} (2\tau_a + \tau_b) \cdot CL \quad (5)$$

ただし、 F_1 ：曲線部に前方より作用する力(kN)、 $e^{\mu \theta}$ ：前面抵抗の管後端での割増率、 F_2 ：曲線部後端に作用する力(kN)、 λ ：曲線抵抗と直線抵抗の比率、 μ ：管と地山の摩擦係数、 R ：曲率半径(m)、 CL ：曲線の長さ(m)、 $\theta (= CL/R)$ ：曲線区間の中心角(rad)である。したがって、(5)式は曲線推進による曲線外側方向に生じる分散力による増分に加えて、地山接触によるせん断抵抗をも考慮に入れた推進力算定式となる。

この推進力算定式(5)式を用いて推進力を算定する場合、管と泥水のせん断抵抗および管と地山のせん断抵抗がどの程度の値を取るかについて把握する必要がある。まず、管と泥水のせん断抵抗については、前報の0.3kPaを用いる⁵⁾。また、管と地山のせん断抵抗については、日本下水道協会指針⁶⁾による表-1の値を用いた。これらの値は、現場地山の土質調査から得られる最大礫径と推進管径の比および礫率により決められたものである。なお、礫が存在しない地山のせん断抵抗は1.2kPaを用いた。

表-1 管と地山のせん断抵抗(単位:kPa)

① \ ②	1/50	1/30	1/20	1/10	1/8	1/6	1/5	1/4	1/3
≤5%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0
≤10%	1.5	1.5	1.7	2.0	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0
≤20%	2.0	2.0	2.0	2.2	2.2	2.5	2.7	2.9	3.1
≤30%	2.0	2.0	2.2	2.5	2.5	2.7	2.9	3.0	3.3
≤40%	2.0	2.0	2.2	2.5	2.5	2.7	2.9	3.1	3.5
≤50%	2.1	2.1	2.3	2.6	2.6	2.8	3.0	3.2	3.6
≤60%	2.2	2.2	2.5	2.7	2.7	2.9	3.1	3.3	3.7
≤70%	2.3	2.3	2.5	2.8	2.8	3.0	3.2	3.6	3.8
≤80%	2.4	2.4	2.8	2.9	2.9	3.1	3.3	3.7	3.9
≤90%	2.5	2.5	2.9	3.0	3.0	3.2	3.4	3.8	4.0
≤100%	2.6	2.6	3.0	3.1	3.1	3.3	3.5	3.9	4.0

*①：最大礫径/管径 ②：礫率

4. 曲線推進における推進力算定式による種々の現場実績データの検討

表-2に地山条件の異なる現場の地山特性と施工条件を、図-5(a)~(c)にはこの3現場における推進距離と推進力の関係を示す。ここでは、(5)式における地山条件の適用範囲について検討するため、曲率半径および曲線長などの施工条件が類似している現場を取り挙げている。なお、発進立坑および到達立坑付近では薬液注入などの補助工法により地盤改良が施されているため、各現場実績推進力の評価の際にはこれらの箇所は省いた。

表-2 地山特性および施工条件

(a)	(b)	(c)
土質:砂礫層 土被り:4.56~5.82m 地下水位:G.L.2.10m程度	土質:細砂層 土被り:4.75m 地下水位:G.L.1.90m程度	土質:砂混りシルト層 土被り:3.50~5.49m 地下水位:G.L.0.80~1.50m程度
管径 800mm 標桿管 54本 推進延長 130.64m 曲線長 52.343m R 100m 泥水圧 83kPa レキ率 40% 最大レキ径 100mm	管径 800mm 標桿管 33本 推進延長 78.35m 曲線長 37.59m R 75m 泥水圧 80kPa	管径 800mm 標桿管 66本 推進延長 160.32m 曲線長 31.53m R 90m 泥水圧 83kPa

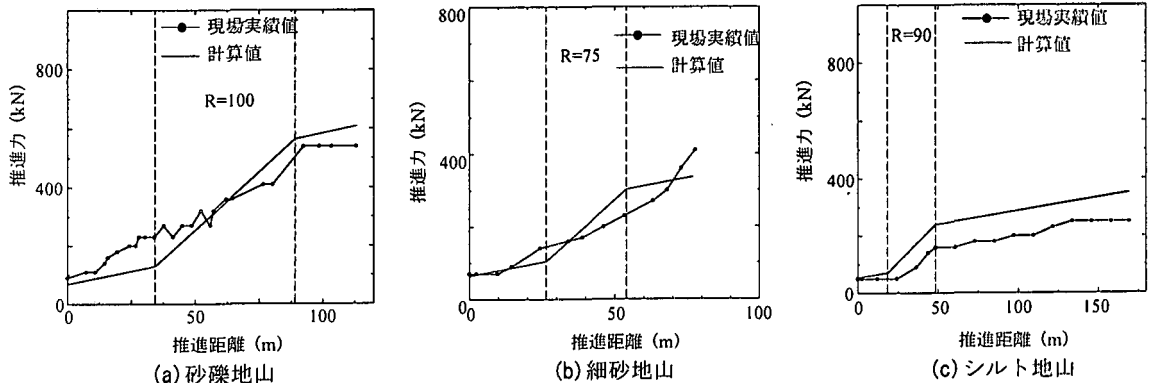


図-5 (a)~(c) 推進距離と推進力の関係

まず、図-5(a)~(c)から、推進力の現場実績値と計算値を比較する。砂礫層の現場である(a)において、(5)式による計算値と現場実績値を比較すると、曲線部における計算値の傾きと現場実績値の傾きがほぼ一致していると言える。このことから、曲線部における推進力の増加は、推進管の地山接触の影響によるものと考えられる。この現場では、前掲表-1の最大レキ径と推進管径の比および礫率により、地山のせん断抵抗値を2.5kPaとした。したがって、(5)式における管周面せん断抵抗値は(4)式より1.03kPaという値となり、これによって曲線部における推進力の急増を捉え得たということを示している。また、細砂層現場である(b)においても、砂礫地山と同様に曲線部における計算値の傾きと現場実績値の傾きがほぼ一致しており、精度よく推進力を評価していると考えられる。

一方、(c)のシルト地山では、曲線部における計算値の傾きが現場実績値よりも大きい。これはシルト地山における推進力の増加が、地山接触による増大よりも曲線部外側方向に生じる分散力による増大が原因であると考えられる。すなわち、この両現場は礫が含まれていない地山であるため、前述のように管と地山のせん断抵抗値を1.2kPaとした。したがって、(5)式で用いた管周面せん断抵抗値は(4)式より0.6kPaという値となるが、これが大きかったことに起因している。このことから、この現場では、推進管周辺に作用させる泥水の影響により推進管と地山の接触が認められず、推進管が泥水中を浮遊した状態で推進が行われたために^{7) 8)}、(5)式では精度のよい評価ができなかったと考えられる。しかしながら、シルト地山における推定値は現場実績値より高い値を取るため、安全性を考慮した管路の設計という意味では本算定式を利用できると思われる。また、本算定式を用いて精度よく推進力を算定するためには、前述の管と地山のせん断抵抗値1.2kPaを用いず管と泥水のせん断抵抗を採用するなどの手法により推進力を評価できると考える。

以上のことから、砂礫や細砂地山のように泥水の逸泥により推進管と地山が接触する場合には本算定式を適用することにより、曲線部の推進力のより適切な評価が可能であると思われる。また、推進管と地山が接触しないと考えられるシルト地山においても、推進力算定式中の地山のせん断抵抗を調整することにより推進力が評価できると思われる。

5. まとめ

本報告では泥濃式推進工法における曲線推進部の適切な推進力算定式を得るために、現場実績データを用いて種々検討し、その妥当性について検討した。本研究により得られた結果を要約すれば以下のようである。

- (1) 推進管周辺に作用させる泥水の逸泥現象により推進管周辺に理想的な泥膜が形成されず、推進管と地山が接触し易い砂礫や砂礫分の多い地山に対しては、本算定式を用いることで適切な推進力が評価できる。
- (2) 推進管周辺に加圧充填させる泥水が逸泥することなく、推進管が泥水中を浮遊した状態で推進が行われるシルトのような地山に対しては、算定式中の地山せん断抵抗の調整により推進力の評価が可能である。

参考文献

- 1) 井上雅文・島田英樹・松井紀久男：第10回非開削技術研究発表会論文集，pp11-19，1999
- 2) 例えば、島田英樹・松井紀久男：下水道，Vol.35，No.426，pp.121-131，1998
- 3) 日本プロジェクトリサーチ：最近の推進工事にみる技術課題と対応，1993
- 4) 例えば、関根生一：下水道，Vol.26，No.299，pp.70-80，1989
- 5) 島田英樹・松井紀久男：資源と素材，Vol.114，No.2，pp.93-99，1998
- 6) 日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，共和印刷，2000
- 7) 島田英樹・久保田士郎・松井紀久男：岩の力学連合会，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.269-274，1998
- 8) 島田英樹・久保田士郎・松井紀久男：下水道，Vol.36，No.442，pp.145-155，1999