

推進工法におけるカーブ推進に関する研究

THE STUDY ON THE CURVING METHOD IN PIPE-JACKING

南野 輝久*

By Teruhisa NANNO

The most concerned problem in pipe-jacking remained to be solved is to establish a stable and economical method of curving.

The author has devised a new curving method, which has solved practically, theoretically and economically the difficulties that may be involved in the technical processes of curving and proved the fact by the results of 15 works performed, after having shown how this method excels the conventional ones.

Keywords : the curving method in pipe-jacking

1. 概 説

都市トンネル工法として、推進工法の無公害性と経済性は早くから着目されており、推進工法による長距離曲線施工の技術面での確立が強く望まれている。すなわち、刃口またはシールド（以下先導管とよぶ）を方向調整するだけで、管列を曲線軌道に誘導しようとする現在の曲線施工法では、1) 軟弱な地盤では曲線管列が曲線軌道より大きく外側へ振れて修正が効かなくなり、開削工法に切り替えたり、路線を変更して到達立坑を新たに掘削したりして莫大な手間と費用をかけた工事例が多発した。

このような事態を避けるため最近はあらかじめ曲線軌道に沿って大量の薬液を注入して圧入埋設管路の周辺の地盤を強化している。非常に不経済である。2) さらに、曲線部では先行管と後続管の接合面がV字形に開口し、推力が曲線の内側の管端面に集中するため、推進管が簡単に破壊する。いったん管が破壊すると推力を先行管列に伝達することができないので推進は不可能となる。このように推進工法による曲線施工は施工業者にとっては施工管理の良し悪しにかかわりなく多大のリスクを抱え

ており、非常に難しいものであると一般に認識され今日に至っている^{1)~7)}。

本論文は、現行カーブ推進工法がなぜ不安定で不経済なのか、その原因を理論的に解析し、これらの原因を除いた新しいカーブ推進とその実績について論じており、その構成内容は次のとおりである。

1) 先導管を方向調整するだけで管列を曲線軌道に誘導しようとする現行カーブ推進工法による曲線管列が、なぜ曲線軌道の外側へ振れようとするのか、その原因を曲線部において先導管に直続する推進管（以後1号管とよぶ）に発生するモーメントと、1号管の側面を支持する水平支圧力とのつり合い関係より力学的に解明した。

2) 曲線部において各推進管に発生するモーメントおよび水平力を最小限にとどめ、軟弱地盤などで管の側面を支持する支圧力が非常に小さい場合でも、曲線管列が精度よく曲線軌道に沿って推進できるような工法を理論的に誘導した。次いでこの工法に必要で経済的な機材を開発し、実用的な施工手順を確立した。この工法をここでは人為開口式カーブ推進工法という。

3) 本工法の施工例はすでに15例を数え、いずれも良好な結果を得ている。本論文ではそのうちの最近の施工例を取り上げて、その施工成果を実証している。

* 正会員 工博 南野建設(株)専務取締役
(〒530 大阪市北区芝田2-2-1)

2. 現行カーブ推進工法（自然開口式カーブ推進工法）の問題点

現行カーブ推進工法は先導管に装備された方向調整ジャッキによって、先導管を曲線軌道に乗せたのち、後続管列を誘導している。推進工法はヒューム管など工場で製造された既製管を土中へ圧入するため、シールド工法の場合と異なり、曲線部においては管と管の接合面がV字形に開口し、後方推力が曲線の内側の管端面に集中する。そのため、1) 曲線管列がたえず曲線軌道の外側へ振れようとして不安定で高精度の曲線施工が望めない。2) 推進管の曲線の内側の管端面に推力が集中するため、推進管は破壊し推進は不可能となる。3) 管側面の水平支圧力を大きくするため、薬液注入など補助工法を必要とし施工面で手間がかかり不経済である。

この節では現行カーブ推進工法による曲線施工に際して生ずる上述の問題点のうち、自明のことである2)を除き、1)と3)について理論的に考察している。

(1) 難しい方向制御⁸⁾

管列の先頭にセットされた先導管が方向調整ジャッキによって、始曲点を経て曲線軌道に沿って進み、やがて1号管が始曲点に達する。管列はさらに推進され1号管は先導管によって先導された曲線軌道の土中壁（以下曲線先導坑とよぶ）に沿って進み、2号管との接合面は自然にV字形に開こうとする。そのとき問題が発生する。

この時点での1号管の土中での挙動を図-1に基づいて説明すると次のようになる。

1号管が曲線先導坑に沿って進み、2号管との接合面がV字形に開こうとすると、今まで1号管の後端面に等分布していた推力がただちに曲線の内側の管端面に集中する。1号管の曲線の内側の管端面に集中した後方推力 P_1 は推力 P_{N1} と水平分力 $P_{h1} = P_{N1} \tan \delta$ とに分かれる。水平分力 P_{h1} は図-1に点線で示されているように、1号管の長さを l とすると、1号管の中心点Oにおいて $(P_{h1}l)/2$ の左回りのモーメントと管を曲線の外へ押し出そうとする水平力 P_{h1} として作用する。しかし、水平分力 P_{h1} は非常に小さな値であるので、これが管に与える影響は無視することができる。すなわち $P_{h1} = P_{N1} \tan \delta$ である。曲線部における管と管の接合面の曲線の内側と外側の開口差 S および偏角 δ は、管の外径を B_c 、 $r = B_c/2$ とすると、 $S = 2 B_c \sin(\delta/2)$ 、 $\delta = 2 \sin^{-1}(S/2 B_c)$ と求められる。開口差 S は管の端面に接着されたゴム輪と継手カラーとの水密性を考慮すれば30 mmを限度とし、カーブ推進用設計管は管内の作業性から最低1.20 mの内径を必要とする。カーブ推進が採用される最も厳しい条件として、内径1.20 m、外径1.43 mのヒューム管で接合面の開口差が30 mmの場合の P_{h1} と P_{N1} との力の対比をすると、 $\delta = 1.202^\circ$ 、 $P_{h1} = 0.021 P_{N1}$ となり、 P_{h1} は P_{N1} の1/48でしかない。 P_{N1} は1号管の前端面に作用する P_o と管周面にかかる

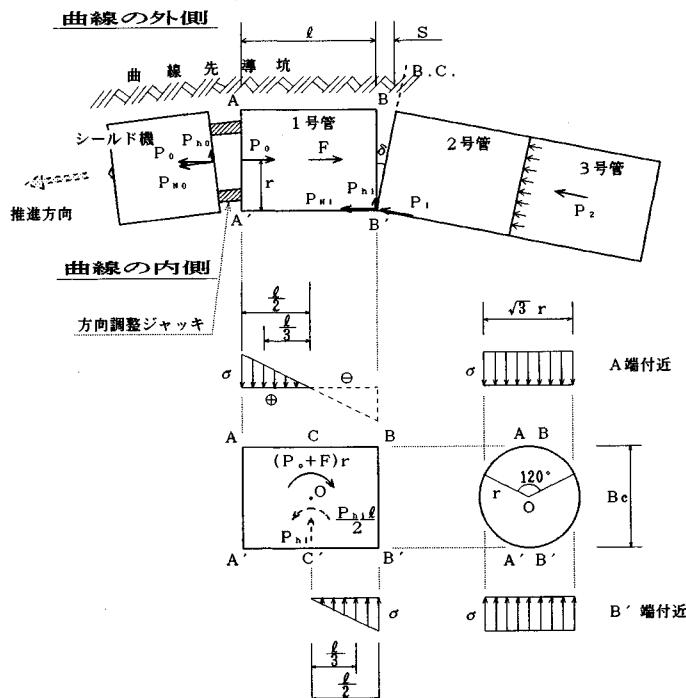


図-1 1号管に働く側面水平支圧力

荷重の法線圧に対する摩擦抵抗 F の合力にはほぼ等しい。これが1号管と2号管の接合面 B' を支点として働く右回りのモーメント $(P_0+F)r$ は P_{h1} による上述の諸力と比較して相対的に非常に大きな値であり、1号管を計画曲線から外へ戻そうとする力の検討は $(P_0+F)r$ のみを対象として差し支えない。

管周面に作用する摩擦抵抗 F は管推進に必要な推力の大部分を占め、その大きさは次のように求められる。なお、図-1では F をその合力の位置である管の中心軸に沿って示している。

管周面に働く法線圧 Q_r は管にかかる鉛直荷重を q (tf/m^2)、主働土圧係数を K_a 、側圧を qK_a (tf/m^2)、管外径を B_c (m)、 $r=B_c/2$ (m) とすると、

$$Q_r = r \int_0^{2\pi} (q \cos^2 \theta + qK_a \sin^2 \theta) d\theta = \pi r q (1 + K_a)$$

となる。したがって、管周面に作用する摩擦抵抗 F はピューム管長を l 、管と土との摩擦係数を μ とすると

$$F = \pi r q (1 + K_a) \mu l$$

と求められる。

次に1号管に働くモーメント $(P_0+F)r$ とそれに対抗する側面水平支圧力の関係について考察する。

図-1より、管の回転に対して変形する変位に水平支圧力が比例するものとして、

AC部分のO点を中心とするモーメントは

$$\frac{1}{2} \sigma \times \frac{l}{2} \times \frac{l}{3} \times \sqrt{3} \cdot r = \frac{\sqrt{3}}{12} r l^2 \sigma$$

同様にB'C'部分のO点を中心とするモーメントは $\sqrt{3} r l^2 \sigma / 12$ 。この2つを合計すると、 $\sqrt{3} r l^2 \sigma / 6$ となる。これが1号管を元へ戻そうとするモーメント $(P_0+F)r$ とつり合うことから

$$\frac{\sqrt{3}}{6} r l^2 \sigma = (P_0+F)r$$

したがって、 σ は次のように求められる。

$$\sigma = \frac{6(P_0+F)}{\sqrt{3} l^2}$$

たとえば、ピューム管の場合 l は 2.43 m であるから

$$\sigma = \frac{6(P_0+F)}{\sqrt{3} \times 2.43^2} = 0.587(P_0+F)$$

ただし、 P_0 ：シールドにかかる後方推力 (tf)

F ：ピューム管1本当たりの摩擦抵抗 (tf)

すなわち、 $0.587(P_0+F)$ tf/m² の側面水平支圧応力が管側面に働くなければ、1号管は曲線先導坑に沿って安定して進まない。軟弱な地盤では管の側面抵抗土圧応力がこの側面水平支圧応力より小さいため、1号管は元の位置へ戻ろうとして曲線先導坑から大きく外へ振れる。つまり、1号管と2号管の接合面は所定の開口差までV字形に開かない。くさびなどを接合面に挿入するの

は、管が外へ振れた後に行われる手遅れの措置である。

(2) 不経済な薬液注入⁹⁾

1号管が曲線部に入り2号管との接合面が少しでも開けば、1号管に $(P_0+F)r$ のモーメントが発生し、1号管を曲線先導坑に沿って推進するためには (P_0+F) の0.587倍の側面水平支圧応力を必要とすることがわかった。

この件について、後述する(6)の施工例「トーメン滝沢住宅団地造成工事に伴う推進工事」の施工実績によって検討すると、 $(P_0+F) \neq P_{h1}$ すなわち、1号管圧入時の推力は42 tf(412 kN)であった。したがって、この施工がもし現行カーブ推進工法で行われていたとする、1号管を曲線先導坑に沿って安定して進めるためには、曲線の外側の管の側面水平支圧応力は推力の0.587倍の24.65 tf/m²(241.82 kN/m²)が必要である。他方この工事の推進管であるピューム管の外径 B_c は1.43 m、曲線路線の最低土被り z は4.44 mである。土質調査の結果に基づいて設定された地山の諸条件から、管側面に働く抵抗土圧応力は図-2に示すように10.73 tf/m²(105.26 kN/m²)と求められる。すなわち、自然状態の地山の中で現行カーブ推進工法で曲線施工を行えば、管側に必要とする水平支圧応力24.65 tf/m²(241.82 kN/m²)に対して管側に働く抵抗土圧応力は10.73 tf/m²(105.26 kN/m²)であるから、1号管は曲線の外側へ振れ、1号管に誘導されて後続管列も設計曲線軌道より外側へ大きくずれることになる。

そこで、曲線先導坑に沿って安定した状態で曲線管列を推進していくためには、施工に先立って薬液注入等によって管側面に土中壁を作り、管側の支承面を120°と仮定すると、土中壁背後の抵抗土圧が

$$24.65 \times \sqrt{3} \times \frac{B_c}{2} = 30.57 \text{ tf/m (299.89 kN/m)}$$

以上となるようにしておかねばならない。そのために曲線部の全推進路線に必要とされる薬液注入範囲は図-3に示されたようになり、その費用は大きなもので、現行カーブ推進が不経済といわれるゆえんである。

管側面に働く抵抗土圧応力

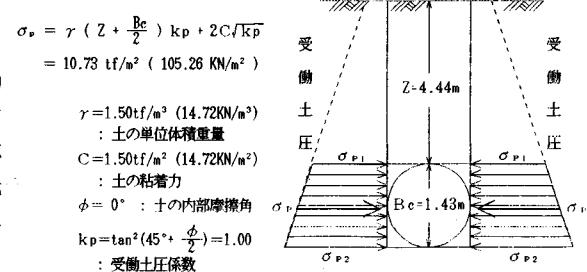


図-2 管側面に働く抵抗土圧応力

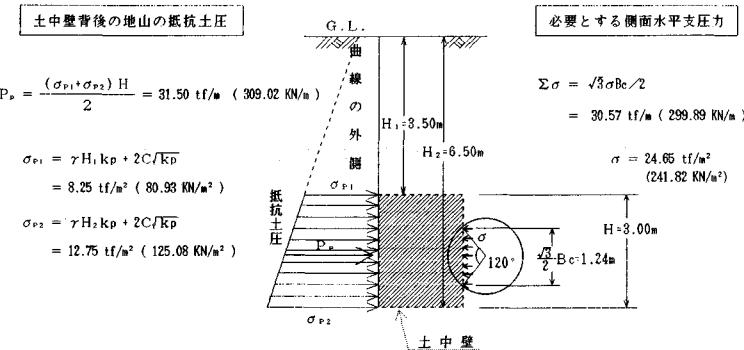


図-3 必要とする側面水平支圧力と土中壁背後の抵抗土圧

3. 人為開口式カーブ推進工法

前節で考察したように、先導管を方向調整するだけで管列を曲線軌道に誘導していく現行カーブ推進工法の不安定で不経済な原因是、各推進管の接合面が曲線部においてV字形に開口したとき、推力が曲線の内側の管端面に集中することにある。

この点に着目し、各推進管の管端面に開口調整材を図-4に示すように上下左右対称に4点設置して、1) 各推進管に作用する後方推力が推進管の中心軸の近くに集中するようにして、曲線部において各推進管に働く諸力を2.(1)では無視した管端面に働く水平分力 P_h によって生ずる小さなものにとどめ、軟弱地盤での小さな管側の抵抗土圧応力でも推進管を十分支持できるように工夫し、2) 各開口調整材にはクッション材を配し、開口調整材を介して前後の推進管に伝達される推力の等分布応力が推進管の許容耐荷応力以内になるようにして推進管の破壊を防ぎ、3) 開口調整材をmm単位で作動させ、曲線軌道の曲線半径に応じて算出された開口量を正確に調整し、各推進管を推進単位として正確に曲線軌道に乗せて推進していくこととした。

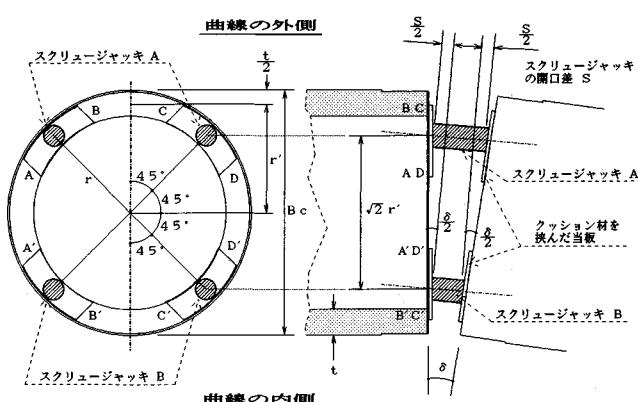


図-4 管端面にセットされた開口調整材

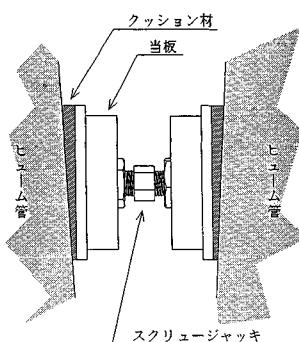


図-5 開口調整材

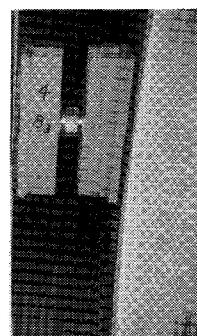


写真-1

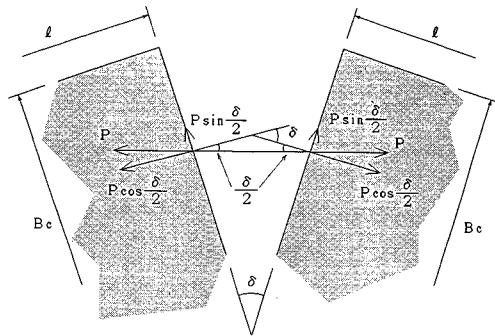


図-6 推力の伝達

平支圧応力 (σ_2)

$$\sigma_2 \times \frac{l}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} \times \frac{l}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} B_c \times 2 = \frac{(P_{hn} - P_{hn-1})l}{2}$$

$$\sigma_2 = \frac{6(P_{hn} - P_{hn-1})}{\sqrt{3} B_c l}$$

2) $P_{hn-1} + P_{hn}$ により管側面に発生する水平支圧応力 (σ_1)

$$\sigma_1 \times l \times \frac{\sqrt{3}}{2} B_c = P_{hn-1} + P_{hn}$$

$$\sigma_1 = \frac{2(P_{hn-1} + P_{hn})}{\sqrt{3} B_c l}$$

3) A端付近およびB端付近の側面水平支圧応力

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{4(2P_{hn-1} - P_{hn})}{\sqrt{3} B_c l} \quad (\text{A端付近})$$

$$\sigma_4 = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{4(2P_{hn} - P_{hn-1})}{\sqrt{3} B_c l} \quad (\text{B端付近})$$

4) 側面水平支圧力

$$\frac{\sqrt{3}}{4} B_c (\sigma_3 + \sigma_4) l = P_{hn-1} + P_{hn}$$

ただし、 B_c : 管外径 (m), l : 管長 (m) P_{hn-1} : n 号管の前端面に発生する水平分力 (tf) P_{hn} : n 号管の後端面に発生する水平分力 (tf)(2) 側面水平支圧応力と地山の抵抗土圧応力との関係¹¹⁾図-7より、曲線部において推進管に作用する側面水平支圧応力で最も大きいものはB端面付近に作用する σ_4 である。推進管列が曲線軌道に沿って逐次土中に圧入されいくと、その推進延長とほぼ比例して管端面に作用する推力および水平分力は大きくなっていく。しかし、水平分力により管を曲線からはずらそうとする力に対抗する側面水平支圧応力 σ_4 が管側面の地山の最大抵抗土圧応力 σ_p より小さいときは、推進管は曲線軌道に沿って安定した状態で推進される。曲線部における管列の推進過程において n 号推進管に作用する推力 P_{hn} と n 号推進管の側面に発生する水平支圧応力 σ_4 との関係は次式より求められる。

$$\sigma_4 = \frac{4(2P_{hn} - P_{hn-1})}{\sqrt{3} B_c l}$$

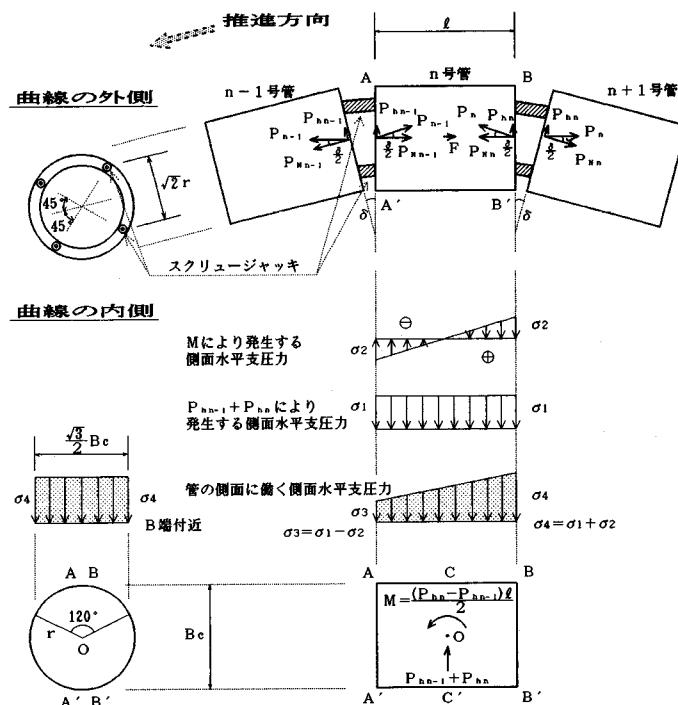


図-7 人為開口式カーブ推進の場合の側面水平支圧力

$$P_{hn} = P_{nn} \tan \frac{\delta}{2}$$

$$P_{hn-1} = P_{nn-1} \tan \frac{\delta}{2} = (P_{nn} - F) \tan \frac{\delta}{2}$$

$$\sigma_4 = \frac{4 \left[2 P_{nn} \tan \frac{\delta}{2} - (P_{nn} - F) \tan \frac{\delta}{2} \right]}{\sqrt{3} B_c l}$$

一例として、後述する（6）の施工例「トーメン滝沢住宅団地造成工事に伴う推進工事」の設定条件および施工実績に基づいて計算すると次のように求められる。

$$B_c = 1.43 \text{ m} : \text{管外径}, \quad l = 2.43 \text{ m} : \text{管長}$$

$$F = 1.671 \text{ tf/m} \times 2.43 \text{ m} = 4.1 \text{ tf} (40.22 \text{ kN}) : \text{第1曲線部における管1本当たりの平均摩擦抵抗 (表-1参照)}$$

$$R = 160 \text{ m} : \text{曲線半径}, \quad \delta = 180 l / \pi R = 0.870^\circ : \text{管と管の接合面の偏角}$$

$$P_{n42} = 196 \text{ tf} (1922.76 \text{ kN}) : 42\text{号管に作用する曲線管列の最高推力}$$

$$\begin{aligned} \sigma_4 &= \frac{4[2 \times 196 \times \tan(0.870^\circ/2) - (196 - 4.1) \tan(0.870^\circ/2)]}{\sqrt{3} \times 1.43 \times 2.43} \\ &= 1.009 \text{ tf/m}^2 (9.898 \text{ kN/m}^2) \end{aligned}$$

すなわち、本施工例の場合、曲線管列のうちで最大水平分力の生ずる42号管でも側面に必要とする水平支圧応力は1.009 tf/m²(9.898 kN/m²)にすぎない。それに対して管側面に働く最大抵抗土圧応力 σ_p は、図-2で10.73 tf/m²(105.26 kN/m²)と求められているから、42号管は管側面の抵抗土圧に十分支持されて安定した状態で計画曲線上を推進されることができる。

従来の曲線施工法では、2.(2)で検討したように1号推進管の側面水平支圧力として常に24.65 tf/m²(241.82 kN/m²)を必要とするのに対して、本工法で施工した場合は最高で1.009 tf/m²(9.898 kN/m²)しか必要としないことは、いかに本工法が安定した曲線施工法であるかを理論的に示している。

4. 開口調整の要領¹²⁾

スクリュージャッキは開口調整部材としては最適であるが、スクリュージャッキ自体は先行管列を動かして管と管の接合面に開口差をつけるような推力を発揮することはできない。先行管列を動かして管と管の接合面にV字形の開口差をつけるためには、ヘッド可傾式油圧調整ジャッキが必要である。すなわち、ヘッド可傾式油圧調整ジャッキを作動して、曲線の外側の接合面を所定の開口差だけ押し広げて、その後でスクリュージャッキを伸長してヘッド可傾式油圧調整ジャッキと代替することになる。そしてヘッド可傾式油圧調整ジャッキは推進管端面から取り外され、後続の推進管端面に取り付けられて開口調整を行う。以下同様の作業を繰り返す。ヘッド可傾式油圧調整ジャッキは50 tf(490.5 kN) 50 mm

ストロークのものを用いるとよい。

5. 本施工法によるカーブ推進の推力の算定式と直線推進の推力との比較¹³⁾

（1）側面水平支圧力によって起くる法線圧力

図-7に示すように、曲線部にある推進管列のn号管の両端面に働く水平分力 P_{hn-1} と P_{hn} は、n号管の側面に作用する水平支圧力 $(P_{hn-1} + P_{hn})$ によって支持、つまり合いを保つ。この水平支圧力は中心角120°の部分に等分布に働くものと仮定すると、この水平支圧力によって管周面に作用する法線圧力は

$$\frac{2(P_{hn-1} + P_{hn})}{\sqrt{3} r} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \cos^2 \theta r d\theta = 0.85(P_{hn-1} + P_{hn})$$

となり、管周面に対する法線圧力は側面水平支圧力の0.85倍となり、これに管と土との摩擦係数 μ を乗じた摩擦抵抗が、直線推進の推力と比べて、本施工法によるカーブ推進の場合の推力の増分となる。

（2）本施工法によるカーブ推進の推力の算定式

図-7より、曲線上にあるn号管の推力 P_n は次のように求められる。

$$\begin{aligned} P_n \cos \frac{\delta}{2} &= P_{n-1} \cos \frac{\delta}{2} + F + 0.85 \mu (P_{hn-1} + P_{hn}) \\ &= P_{n-1} \cos \frac{\delta}{2} + F + 0.85 \mu (P_{n-1} + P_n) \sin \frac{\delta}{2} \\ \therefore P_n &= \frac{\cos \frac{\delta}{2} + 0.85 \mu \sin \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\delta}{2} - 0.85 \mu \sin \frac{\delta}{2}} P_{n-1} \\ &\quad + \frac{F}{\cos \frac{\delta}{2} - 0.85 \mu \sin \frac{\delta}{2}} \\ &= \frac{b}{a} P_{n-1} + \frac{F}{a} \\ n=1 \text{ のとき } P_1 &= \frac{b}{a} P_0 + \frac{F}{a} \\ n=2 \text{ のとき } P_2 &= \left(\frac{b}{a}\right)^2 P_0 + F \left(\frac{b}{a^2} + \frac{1}{a}\right) \\ n=3 \text{ のとき } P_3 &= \left(\frac{b}{a}\right)^3 P_0 + F \left(\frac{b^2}{a^3} + \frac{b}{a^2} + \frac{1}{a}\right) \end{aligned}$$

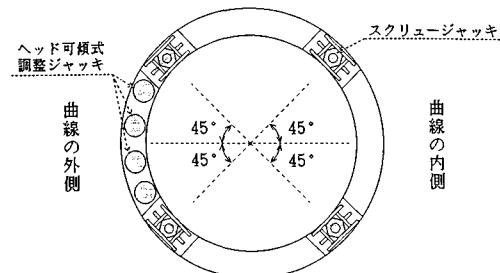


図-8 ヘッド可傾式油圧調整ジャッキおよびスクリュージャッキのセット図

となり、 n 号管の推力 P_n は

$$P_n = \left(\frac{b}{a}\right)^n P_0 + F \left\{ \frac{(b/a)^n - 1}{b-a} \right\}$$

と求められる。

ただし、 P_0 ：初期抵抗（シールドの摩擦抵抗含む）(tf)

n ：曲線上のヒューム管の推進本数

$$a = \cos(\delta/2) - 0.85\mu \sin(\delta/2)$$

$$b = \cos(\delta/2) + 0.85\mu \sin(\delta/2)$$

δ ：管と管の接合面の偏角

μ ：管と土との摩擦係数

$$F : \text{管と土との摩擦抵抗 (tf)}$$

(3) 本施工法におけるカーブ推進の推力と直線推進の推力との比較

推進管 n 本の直線推進の場合の所要推力の算定式

$$P = P_0 + Fn$$

に対して、本施工法によるカーブ推進の場合の所要推力の算定式は

$$P_n = \left(\frac{b}{a}\right)^n P_0 + F \left\{ \frac{(b/a)^n - 1}{b-a} \right\}$$

と求められた。すなわち、本施工法によるカーブ推進の所要推力は、直線推進の所要推力と比較して、初期抵抗比は $(b/a)^n$ 、摩擦抵抗比 (m) は $1/n \cdot [(b/a)^n - 1]/(b-a)$ 大きくなる。

(6) の施工例の設定条件で算定すると、 $\delta = 0.870^\circ$ 、ヒューム管と土との摩擦係数 μ は M. Sherle によると湿った土の場合コンクリートと粘土は $0.3 \sim 0.4^{[4]}$ 、成山によるとシルト質粘土 $0.2^{[5]}$ と与えているので、 $\mu = 0.3$ と仮定すると、

$$a = \cos \frac{0.870^\circ}{2} - 0.85 \times 0.3 \times \sin \frac{0.870^\circ}{2} = 0.9980$$

$$b = \cos \frac{0.870^\circ}{2} + 0.85 \times 0.3 \times \sin \frac{0.870^\circ}{2} = 1.0019$$

第1曲線部の場合 $n=16$ 本であるので、ヒューム管 16 本の直線推進の推力と比べて、初期抵抗比 $(b/a)^n$ と摩擦抵抗比 m は次のように求められる。

$$\left(\frac{b}{a}\right)^n = \left(\frac{1.0019}{0.9980}\right)^{16} = 1.064$$

$$m = \frac{1}{16} \left\{ \frac{(1.0019/0.9980)^{16} - 1}{1.0019 - 0.9980} \right\} = 1.026$$

すなわち、初期抵抗で 6.4%，摩擦抵抗で 2.6% の推力増にすぎない。

第2曲線部では n が 14 本であるので、同様に求めると、

$$\left(\frac{b}{a}\right)^n = \left(\frac{1.0019}{0.9980}\right)^{14} = 1.056$$

$$m = \frac{1}{14} \left\{ \frac{(1.0019/0.9980)^{14} - 1}{1.0019 - 0.9980} \right\} = 1.026$$

となり、初期抵抗で 5.6%，摩擦抵抗で 2.6% の推力増となる。

6. 人為開口式カーブ推進工法の方向精度の施工成果と実測推力の実態動向の考察

人為開口式カーブ推進工法による施工例はすでに 15 例あるが、いずれも良好な成績を挙げている。ここでは最近の施工例を取り上げて、その方向精度の施工成果を示し、合わせて本施工法による曲線施工の推力の実態動向について考察する。

当工事は岩手県岩手郡滝沢村で行われた、トーメン住宅団地造成工事の排水管築造に関するもので、泥水式推進工法により、推進管は内径 1.20 m、外径 1.43 m のヒューム管で推進距離は 119.665 m の S 字形曲線施工であった。施工は平成 2 年 1 月から 2 月にかけて行われ、その工事概要は図-9 に示すとおりである。

当地域の土質は図-10 に示すように、茶褐色を呈した火山灰質粘性土の二次堆積と思われ、 N 値が 2 のローム質で軟らかいが粘着性のある土である。団地造成調査の設計土性値は次のように与えられている。

$$\gamma = 1.50 \text{ tf/m}^3 (14.72 \text{ kN/m}^3) : \text{土の単位体積重量}$$

$$C = 1.50 \text{ tf/m}^2 (14.72 \text{ kN/m}^2) : \text{土の粘着力}$$

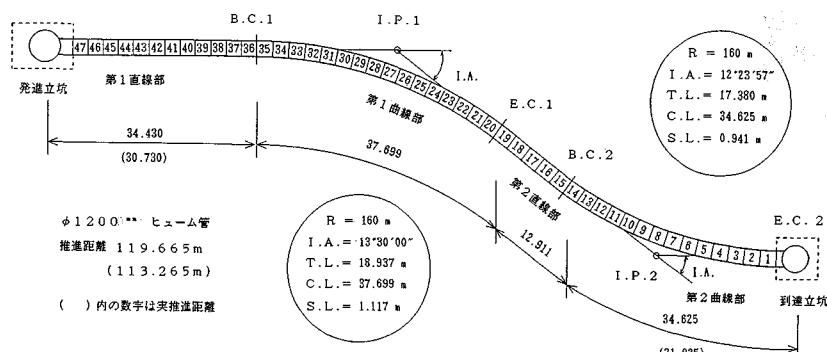


図-9 トーメン滝沢住宅団地造成工事に伴う推進工事概要および S 字曲線の推進管列と推進管番号



図-10 土質柱状図

$\phi=0^\circ$ ：土の内部摩擦角

S字形曲線施工は従来のカーブ推進工法では至難のもとのと考えられており、人為開口式カーブ推進工法においても本工事が最初であった。しかし、施工はきわめて順調に進捗し、推進日数は昼夜施工で11日、42号管の推進途次にシールド機は到達立坑に達した。到達立坑の土留壁（シートパイル）を切開し、推進を再開した。到達立坑からシールド機は引き上げられ、管と管の間に設置された開口調整材は逐次取り外され、その都度、後続管列が推進されて接合面が密着された。そして47号管の推進で本工事は完了した。曲線部における方向精度誤差は最大右33mmという立派な施工成果を挙げた。

次に本施工例の推力の実態動向について検討する。(5)で考察したように、本施工法のカーブ推進による推力増は直線推進の推力と比べて算定上数%にすぎない。

表-1 実測推力の直線部、曲線部の推力係数

	初期抵抗 (tf)	実測推力 (a) (tf)	推進長 (b) (m)	推力係数 (a/b) (tf/m)	備考
第1直線部	42		2.00		※シート管の取扱 シートの切入歯 による摩擦低減
第1曲線部		49	28.73	1.706	
第2直線部		63	37.70	1.671	
第2曲線部		15	12.91	1.162	
合 計	42	154	31.93	0.846	※シート長

表-1は本施工例の直線部、曲線部の実測推力の推力係数(単位長さ当たりの摩擦抵抗)を求めたものである。算定上は第1直線部と第2直線部の推力係数は同じで、第1曲線部と第2曲線部の推力係数は等しく、かつ、直線部の推力係数より2.6%上回っていなければならぬ。

しかし、推力の実態動向は、直線部、曲線部にかかわりなく、推進延長が長くなるに従って推力係数は低減している。

推進長が長くなるにつれて、推力係数が低減していくのは一般によく認められている推進工法における推力の実態動向である。

算定式にて求められる主要推力は、管周面に働く法線荷重に管と土との摩擦係数を乗じた推力係数 k (単位長当たりの摩擦抵抗、定数) に推進長 L を乗じて算出されているが、実際は推進長が長くなるに従って、推力係数が低減している。この現象は比較的安定した地盤での推進によくみられ、その原因は先行管列の擦り動推進の繰り返しが坑道を安定した状態にして、後続管列が通過するときは泥水または滑材が有効に働いて管と土との摩擦係数が小さくなり、その結果、全管列の推力の増加率が低減しているのではないかと考えられる。特に、最近は滑材の活用によって、管と土との摩擦係数が著しく軽減することが報告されている。たとえばバントナイトを潤滑材として使用した場合、H. Lorenz が 32%¹⁶⁾、L. Ebner が 44%¹⁷⁾、W. Löcher が 30%¹⁸⁾、M. Scherle が 50%¹⁹⁾、竹下が 20%²⁰⁾それぞれ減らすことができる報告しており、滑材の減摩効果による推力減は 20~50% と非常に大きくなれたその変動域も大きい。

一方、推進工法はヒューム管等の既製管を土中へ圧入埋設する工法であるから、シールド工法と異なり、立坑背後の最大抵抗土圧に基づいて算定された設計推力が実推力より小さければ長蛇の管列が途中から推進不能となるので、算定推力は変動域の大きい滑材の減摩効果を最小限に考慮して安全側に算出するのが一般的である。このことが算定推力と実測推力との大きな乖離原因となつ

ている。「滑材の減摩効果による推力減の土質別帰納的解析」は今後の推進工法の重要な研究課題である。

7. 結 論

管列の先頭にセットされた先導管の方向調整だけで、管列を計画曲線軌道に誘導しようとする現行カーブ推進工法の問題点は、直線部では管と管の接合面の全断面に等分布していた推力が、曲線部においては接合面がV字形に開口するため、曲線の内側の管端面に集中することである。そのため、①管は簡単に破壊して推進不能となったり、②1号管に大きなモーメントが働いて、軟弱な地盤では曲線の外側へ大きく振れたり、③この1号管の振れを防ぐため、推進工法の施工に先立って管側の抵抗土圧を人為的に作るべく、計画曲線軌道に沿って大量の薬液注入などをしておかねばならない。

著者は上述のような現行カーブ推進工法の不安定で不経済な原因を理論的に究明し、その原因を取り除いた人為開口式カーブ推進工法を開発した。すなわち、曲線部に圧入される各推進管の管端面に上下左右対称に4基の開口調整材を取り付け、それらによって、①曲線部においてmm単位の精度で管と管とのV字形開口の調整を行い、②後方推力を4点に分散して先行管に伝え、それにより、④後方推力の分散応力を管の許容耐荷応力以内に抑えて、管の破壊を完全に防ぎ、⑥上下左右対称に取り付けられた4基の開口調整材を介して伝達された分散推力の合力は、先行管の中心軸を通り、そのため、曲線部において先行管に発生する水平力とモーメントは管の両端面に働く微小な水平分力によるものだけとなり、管を曲線部からはずそうとする動きを最小限にし、軟弱な地盤の管の側方抵抗土圧でも十分対抗できるように理論的に解決した。

この人為開口式カーブ推進工法すでに15件の工事

が施工されているが、いずれも薬液注入などの補助工法を用いず、推進管列は計画曲線に沿って精度よく施工されている。このことは、従来、推進工法では困難とされていたカーブ推進工法の問題点が確実に解決されたことを実証している。

参 考 文 献

- 1) 斎藤健次郎・石橋信利：絵でみる下水道の推進工法，山海堂，p.75，昭和60年11月。
- 2) 土質工学会：推進工法の調査・設計から施工まで，p.239，昭和61年1月。
- 3) 石橋信利・田中王子也共編：推進工法の実際，鹿島出版会，pp.110～111，昭和62年3月。
- 4) 高根 昇：推進工法，森北出版，pp.193～194，1982年10月。
- 5) 中本 至編著：最新の推進工法のすべて，理工図書，pp.213～214，昭和61年10月。
- 6) 高根 昇・秋元謙治：カーブ推進工法の実験体験から得た教訓，全国推進工事業協会，推進，第8号，昭和58年7月。
- 7) 藤原嘉彦：実施例よりみた最新の推進工法，日本プロジェクトリサーチ，pp.97～98，昭和59年7月。
- 8) 南野輝久：推進工法におけるN値に基づく推力算定式と坑内設備推力およびカーブ推進に関する研究，京大学位論文，pp.71～73，昭和63年5月。
- 9) 同上，pp.73～75。
- 10) 同上，pp.92～94。
- 11) 同上，pp.94～96。
- 12) 同上，pp.81～82。
- 13) 同上，pp.96～99。
- 14) 竹下貞雄：中掘り式推進工法における推力と切削トルクに関する土質工学的研究，鉄道技術研究所，p.23，1985年3月。
- 15) 同上，p.25。
- 16), 17), 18), 19) 同上，pp.49～51。
- 20) 同上，p.50。

(1989.10.6・受付)