

## 曲線推進工法における推進管列の推力伝達機構のモデル化

Modeling of the Jacking Force Transfer Mechanism of Pipes in a Curvilinear Pipe Jacking Method

木村勝彦 Katsuhiko KIMURA (機動建設工業(株))  
 西田広治 Hiroharu NISHIDA (機動建設工業(株))  
 建山和由 Kazuyoshi TATEYAMA (京都大学大学院工学研究科)

推進工法は、発進立坑に設置した油圧ジャッキにより管列全体を推進するため、直線推進が基本であったが、近年はシールド工法の領域とされていた曲線半径 15m といった急曲線推進が設計・施工されるようになった。このような曲線推進においては、1) 掘進機による設計曲線の形成、2) 形成された曲線への推進管の忠実なトレース、3) 推進管列間の適切な推力の伝達、の 3 点が重要な課題となる。本論文では、掘進機が形成した曲線を推進管列が追従する過程における推力伝達機構のモデル化を試みた。最終的には、掘進機の方角制御モデルと組み合わせ、曲線推進の設計段階から施工完了までの過程を精密にシミュレートすることのできる曲線推進制御システムの確立を目指している。

キーワード：推進工法，曲線施工，推進力伝達，側方土圧，シミュレーション (IGC : H-5)

## 1. はじめに

推進工法は、管渠計画ラインの両端に発進立坑と到達立坑を設け、発進立坑の油圧ジャッキにより到達立坑に向かって推進管を順次継ぎ足しながら押し込んでいくことにより地中に管渠を構築する施工法である<sup>1)</sup>。推進管には、通常、コンクリート製のヒューム管や鋼管、塩ビ管が使われ、推進管同士は継輪(カラー)接続でつなぎ合わされて使用される。施工では、先頭の推進管の前部に取り付けられた掘進機が空洞を掘削し、この中に推進管を順次押し込んでいくことにより地中管渠を設置していく。近年は、推進工法の技術の進歩と相まって、曲線施工の需要が高まり、これまでシールド工法の領域とされていた曲線半径 15m 以下の急曲線施工も増えつつある。

しかしながら、覆工リングを地中に構築し、これに反力をとって掘進機だけを前進させるシールド工法と異なり、推進工法では、発進立坑から推進管の継ぎ足しと押し込みを繰り返して推進管列全体を動かすことにより先端の掘進機を前進させるため、掘進機の制御のみならず、管列全体の挙動をも考慮に入れた施工を行わなければならない。すなわち、推進管列には、1) 掘進機により形成される曲線線形を正確にトレースして推進すること、2) 曲線線形を保持すること、3) 発進立坑の元押ジャッキの推力を前方管を通じて掘進機に適切に伝達すること、などが要求され、これらの条件が満たされるように、施工を進めていかなければならない。

これまでの研究で、推進管列の推進抵抗や推進時に管に作用する荷重の推定を行う計算式が提案されている<sup>2)</sup>。これらの計算式は、直線推進部では推進管列には周囲の地盤からゆるみ土圧が、曲線推進部では推進管の曲線外側側面に受働土圧が作用するという仮定と管渠の敷設線

形から決まる幾何学的な関係から定式化されたものである。現在の曲線施工では、これらの計算式で支障を来す事例は多くはないが、実際には、地盤との相互作用に起因して発生する曲線部における側面土圧を受働土圧として一律に扱うため、推進管の構造を決める際、過度な設計になる場合があることや、あるいは推力の事前見積りにおける曖昧さから、必ずしも最適な推進施工が行えているとは限らないという課題を有していた。

このような状況の中で、著者らは現在の曲線推進工法において推進管と地盤との相互作用とそれを利用した曲線推進のメカニズムを明らかにすることで、事前に曲線推進施工を詳細に検討することのできる推力伝達機構モデルを構築した。本研究は、最終的には、掘進機の方角制御モデルと組み合わせ、曲線推進の設計段階から施工完了までの過程を完全にシミュレートすることのできる曲線推進制御システムの確立を目指しているが、本論文では、このうち推進管の推進機構のモデル化とその妥当性の検証結果を説明する。

## 2. 曲線推進における推力伝達方法と課題

## 2.1 曲線推進における推力伝達方法の変遷

日本において計画的に施工された曲線推進としては、昭和 40 年に熊本市において施工された事例が挙げられる<sup>3)</sup>。この工事は推進路線途中にある電話地中線マンホールを曲線半径約 79m で円弧状に推進することで回避したものである。このときの曲線形成方法は、図-1 に示すように、ヒューム管の継輪の羽根板の厚さを調整して対処するものであった。羽根板とは、継輪が前後に移動することを防止するために、4~10 枚程度のフランジを

継輪に溶接したものであり、この施工では敷設管路の線形形状から幾何学的に算定し、羽根板の厚さに左右で約36mmの差を設ける方法が採用された。

この曲線推進は、発進から到達まで単一円弧上の推進であったが、その後の推進工事においても、推進管接続部に厚さの異なる挿入物を入れた曲線推進の実績が増え、推進管接続部左右の目地の開きを適切に保持することによって折れ線形状の曲線を形成できることが実証された。このような曲線推進工法の進展において、本論文の主要課題である推力伝達方法は以下のように変遷している。

### (1) くさびの挿入

推進管の接続はその施工性の容易さから継輪方式が一般的で、曲線推進においては、接続部左右の目地に開口差を設けることで施工できることが実証された。最初の頃の開口調整材としては、木製あるいは鋼製のくさびが用いられてきた。ただし、くさびでは推力の伝達面積が限られ管端部に部分的に推力が負荷されるため、推力が大きくなると管の破損を招くことが多かった。

### (2) ジャッキによる開口調整

くさびの挿入による方法の短所を解消するものとして、上下左右45°の4点に開口調整ジャッキを配置し推力を伝達する方法が採用された。この方法の利点は、理論的には図-2に示すように、A-BとC-Dの組み合わせで上下方向、A-CとB-Dの組み合わせで左右方向と何れの方角にも開口を調整し推力を伝達させ得るところにある。しかしながら、推進管の姿勢は推進中に刻々と変化するため、結局は左右のいずれかに推力が集中することになり、推力を4点に均等に伝達することは困難であった。

### (3) ピンによる伝達

図-3に示すように上下2点のピン（ヒンジ構造）で推力を伝達する方法で、左右方向は自由に折れ曲ることができる。この方法は、少なくとも左右方向の必要な折れ角を形成・維持して推力を伝達するという目的においては、4点伝達方式より安定しており、施工事例も少なくない。しかし、推進管の接続部ごとにヒンジ構造の装置を配置するためには設置空間を確保するための長い継輪が必要になり、また到達後にこれらの装置を撤去しなければならない。曲線推進における主要な推力伝達方法とはならなかった。同様の問題は、ジャッキによる開口調整方法にもいえることである。

### (4) 曲線推進用管の開発

推力伝達方法の開発が進む中、昭和50年半ばには図-4に示すように、それまで個別のものであった継輪を推進管後端部に埋め込んで一体化し、管接続部端面に合板を接着した埋め込みカラー方式の推進管が開発され曲線推進に利用された。合板はゴム板と異なり、圧縮により変形しても推進管端面に引っ張り力が発生しないため、目地開口差の保持および推力の伝達という点では理想的であり、いくつかの曲線推進工事において管の破損を防止できることが実証された。このように合板は理想的な推

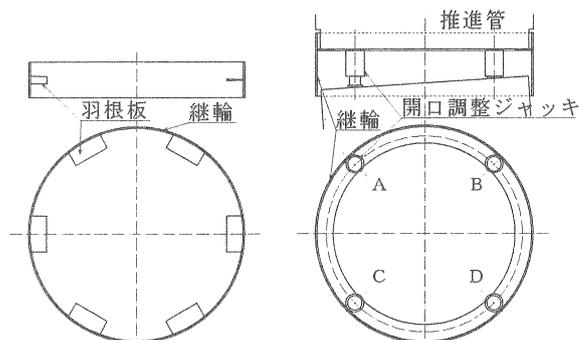


図-1 羽根継輪

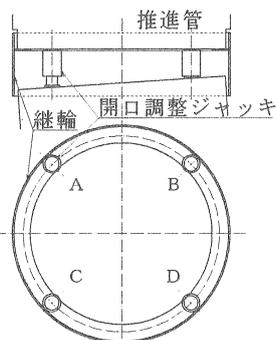


図-2 開口調整ジャッキ

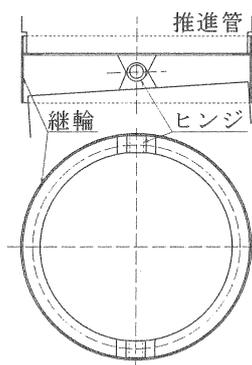


図-3 ヒンジ構造

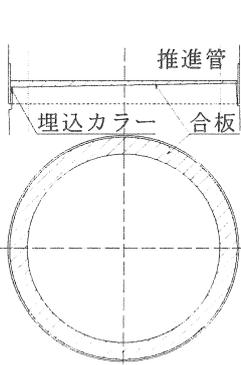


図-4 曲線推進用管

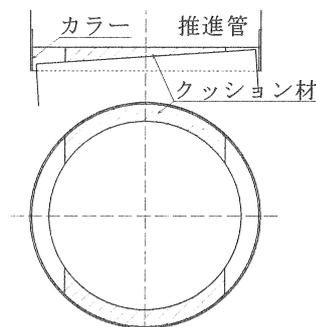


図-5 クッション材

力伝達材であったが、腐食することが懸念され、管渠を構成する材料としては問題があった。

### (5) クッション材による推力伝達

前記(1)~(4)のような課題を受けて、低発泡のスチレンフォームをクッション材として利用する方法が開発された。低発泡のスチレンフォームは、ポリスチレンにブタン、プロパンなどの発泡剤を添加したもので、塑性領域が広く、発泡倍率を変えることにより弾性限界応力を変化させることができる。この方法は、図-5に示すようにこのクッション材を推進管接続部端面の上下に挿入し、クッション材の応力一定領域（後述）を利用することで開口差を保持し推力を均等に伝達するもので、合板の持つ理想的な推力伝達の利点と腐食に対する高耐久性等の利点を併せ持っている。また、取り扱いやすく施工性が良い等の利点も併せ持つため、現在の曲線推進工法における主要な推力伝達材となっている。

### 2.2 クッション材による推力伝達の原理

低発泡スチレンフォームは、その圧縮特性の調整により推進管接続部端面で偏りの少ない推力を伝達することができる。低発泡スチレンフォームは、図-6に示すように、発泡倍率により異なる応力-歪み曲線を持っている。この応力-歪み曲線は、応力の小さい領域では歪みが比例的に増加していくが、ある値からは歪みの増加にかかわらず応力がほぼ定常となる領域（応力一定領域）があることを示している。この応力一定領域を利用すると、クッション材の変形モードによらず推進管接続部端面にほぼ均等に圧縮力を負担させ推力を伝達することができる。

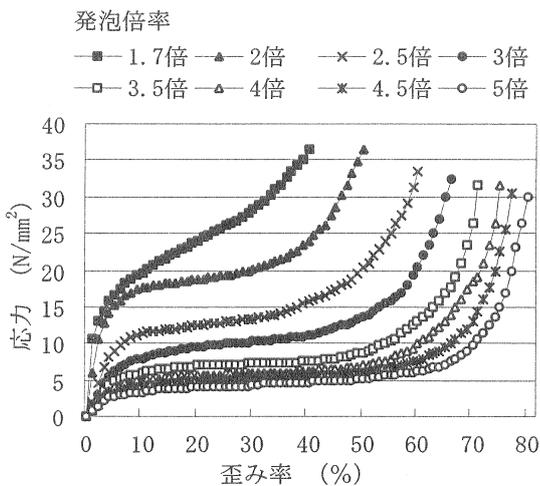


図-6 クッション材の応力-歪み曲線<sup>4)</sup>

### 2.3 曲線推進施工における課題

クッション材による推力伝達方法は、前述のように推進管の間にほぼ均等な推力を発揮させることができるが、実施工においては課題も残されている。すなわち、近年の曲線推進では、計画路線に複合曲線（複数の曲線、左向き・右向き）を含むことが常態化しており、この場合には、クッション材の選択によっては推力を負担する断面が著しく偏ってしまう場合もあり得る。

図-7はこのような複合曲線の典型的な例を表したものであり、また図-8は図-7の複合曲線におけるクッション材の変形状況と応力の発生状況を示したものである。ただし、クッション材の変形を見やすくするため、図-8では縦軸と横軸の縮尺は変えて表示している。図-7より明らかなように、クッション材は曲線線形に合わせて左右に圧縮され変形していく。スムーズな推進制御には、施工に伴うクッション材の圧縮量を適切に保つことが求められる。このためには、各推進管間に働く推力を詳細に予測し、適切な変形に収まるようクッション材の発泡倍率を選択しなければならない。

各推進管に作用する推力を正確にある程度の精度を持って予測するには、推進管の推進メカニズムを把握する必要がある。推進管の推進メカニズムについては、ある程度は解明され、既に設計にも取り入れられているが、地盤と管との相互作用については簡略化され、必ずしも実現象を表現し得ているとは言えない。そこで、本研究では、地盤と管との相互作用を考慮した推進管の推進メカニズムの物理モデルを構築し、より現実に近い推進シミュレーション手法の開発を目指していく。

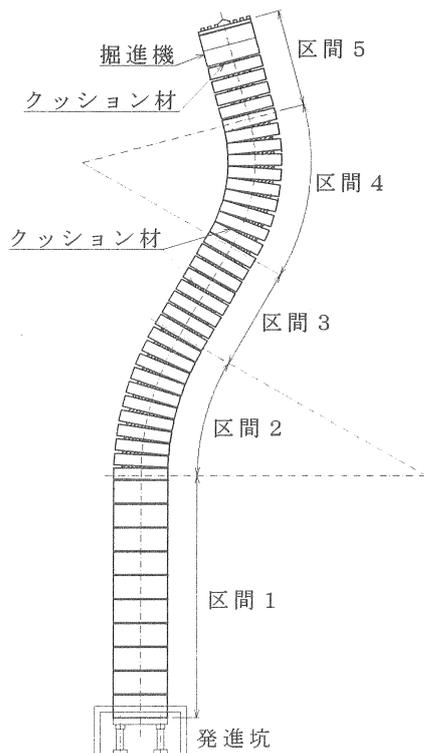


図-7 複合曲線推進における設計線形の例

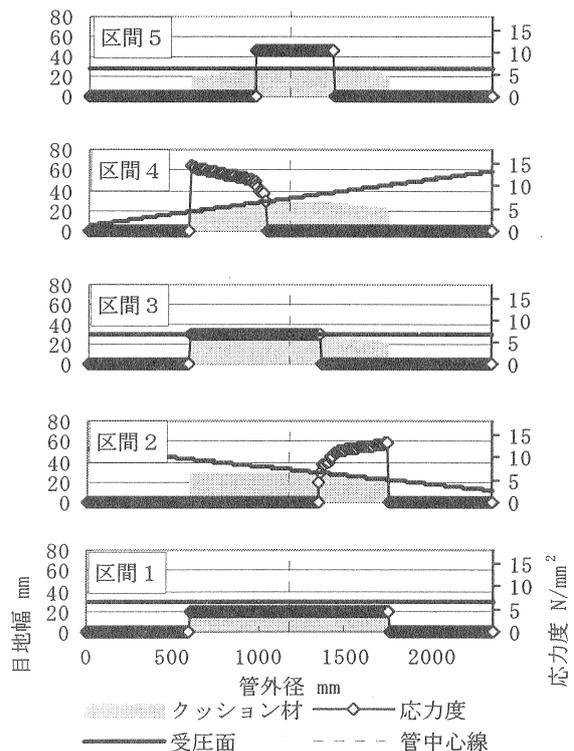


図-8 クッション材の曲線線形による変形状況

### 3. 推進管列の推力伝達モデル

#### 3.1 推進機構の既往の取り扱い

図-9(a)は、曲線線形に沿って推進中の管列に作用する力を模式的に表したものである。例えば、推進管 No. n+1 には後続の推進管 No. n+2 から推力  $F_{n+1}$  が伝えられるが、その方向は後続管 No. n+2 の管軸方向を向いている。この推力  $F_{n+1}$  もまた、推進管 No. n+1 の側面の地盤から作用する土圧  $P_{n+1}$  により推進管 No. n+1 の管軸方向に方向を変化させられ、推力  $F_n$  として推進管 No. n に伝えられる。このように、図-9(c)に示す推力  $F_{n+1}$  と  $F_n$  及び土圧  $P_{n+1}$  が平衡状態にある場合は、推進管列は掘進機により掘られた空洞をスムーズに進んでいくことができる。

推進管の側面に作用する土圧は、推進管と地盤との相互作用により決まると考えられるが、地盤が軟らかい場合には、この土圧を発揮することができないため、推進管は地盤側に大きく変位する形で変形し、図-9(b)に示すように、いわゆる管の「張り出し」を生じることになる。推進工法の設計では、張り出しにより管の敷設位置がずれないように、事前に地盤改良で地盤の剛性や強度を高める等の対応策が検討される。

ここで、前述のように推進管の側面に作用する土圧は各推進管が伝える推力の方向を曲線線形に沿って変えていく働きをするが、この土圧は、図-9(c)の推力間の関係より明らかなように、推力の大きさに依存して決まる。すなわち、推力が小さければこの土圧も小さくてすむことになり、推力を低く抑えることができれば地盤改良などの対応策も施すことなく、曲線施工を行うことが可能になる。最近の推進工法では、掘進機による掘削径を管路径より若干大きくすることにより推進抵抗を下げる工法（オーバーカット工法）や推進管と地盤との間に摩擦低減用の滑材を注入して管と地盤との間の摩擦をごく小さな値まで落とすことにより推力を低減することができ、必ずしも地盤改良に頼らない曲線施工の可能性が拡大してきた。この意味から、推力の正確な予測は施工の事前検討で非常に重要な役割を果たすことになる。さらに、従来、この土圧の算定においては、管が地盤を押すことにより発生する受働土圧に相当すると考えて、各種の設計を行ってきた。しかしながら、軟弱な地盤では受働破壊状態になることもあるが、通常は、推進管と地盤との相対変位に応じた土圧が作用するものと考えられる。従来の推進管の設計では、受働土圧に耐えるように構造設計が行われるため、安全側の設計ではあるが、過大な設計になっている場合もあると考えられる。

このため、本研究では、推進管に作用する土圧は、管と周辺地盤との相対変位に応じて発生すると考え、より実状に近い推力伝達機構のモデル化を行う。

#### 3.2 推力伝達機構のモデル化

前節に述べた理由から、本研究の推力伝達機構モデル

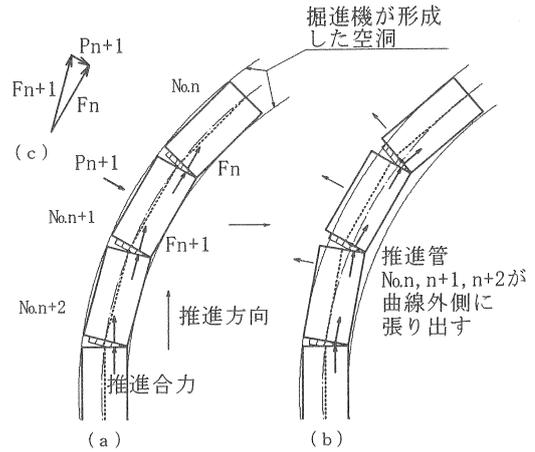


図-9 推進管列の張り出し現象の模式図

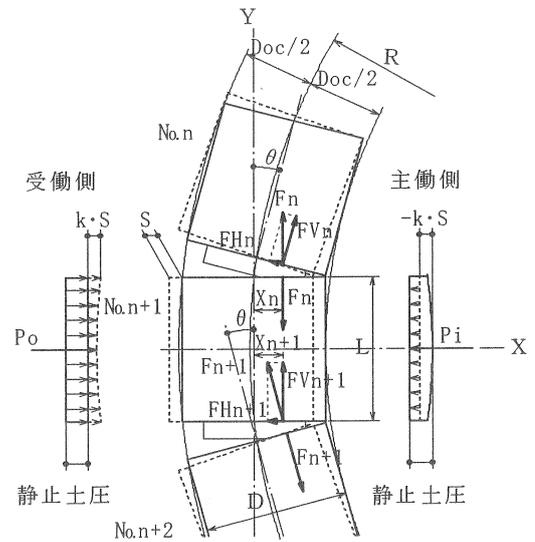


図-10 推力伝達機構モデルと座標系

には推進管の変位による地盤反力の考えを取り入れた。

#### (1) 推力伝達機構のモデル化と座標系

図-9(b)は推進管列が曲線外側に張り出した状態を模式的に表した図である。張り出し現象は2本以上の管列の変位を伴い発生すると考えられるが、ここでは、変位が最大になると想定される中間部分の推進管（図-9(b)の推進管 No. n+1)を対象としてモデルを構築する。図-10に推力伝達機構モデル及び座標系を示す。具体的には、推進管 No. n+1 の重心軸を原点とし、推進方向をY方向、これに垂直な水平方向をX方向（旋回方向を正）、鉛直方向をZ方向（上向きを正）とした。

推進管列が先頭の掘進機により掘られた空洞を進むとき推進管は曲線外側に変位し、推進管外側面の前・後端は掘進機が形成した曲線外側の掘削線に接しながら移動すると考える。ただし、ここで用いる座標系は曲線中の任意の推進管ごとに定められるローカルな座標系である。また、本論文では推進管の変位をX方向のみで考え、Z方向の変位は生じないものとして考えた。

ここで、図-10の各符号は以下の通りで、図中の各符

号の添字 n は n 本目の推進管の各符号に対応している。

- R : 曲線半径 (m)
- D : 推進管外径 (m)
- $D_{oc}$  : 余掘りを含めた掘進機による掘削外径 (m)
- L : 推進管の長さ (m)
- $\theta$  : 曲線区間における前後の推進管の折れ角 (rad)
- $F_n$  : n 本目の推進管に作用する推力 (kN)
- $F_{Vn}$  : n 本目の推進管の推進方向の分力 (kN)
- $F_{Hn}$  : n 本目の推進管の推進方向に直交する方向の分力 (kN)

$x_n$  : 管中心軸から  $F_n$  の作用点までの距離 (m)  
 ただし,  $F_n$  の作用点は, 図-6 のクッション材の応力-歪み曲線で示される圧縮特性と管路線形から幾何学的に計算される推進管列間の折れ角で決まる応力分布 (図-8 参照) から求めた。

- S : 推進管の外側への変位量 (m)
- k : 地盤反力係数 (MN/m<sup>3</sup>)
- $P_o$  : 曲線外側への変位による曲線外側 (受働側) の地盤反力の合力 (kN)
- $P_I$  : 曲線外側への変位による曲線内側 (主働側) の地盤反力の合力 (kN)

(2) 推進管の変位により推進管側面に作用する土圧の算定に関する仮定

1) 推進管の変位により発生する地盤反力を算定するにあたり, 以下に示す仮定を設定した。推進管側面に作用する土圧は, 推進管の曲線外側方向への張り出しに伴う推進管と周辺地盤間の相対変位により決まり, 両者の関係を擁壁に作用する土圧を参考に図-11 で与えることとする。この図で, 土圧が変位に応じて増加する範囲の直線の傾きを地盤反力係数  $k$  値と定義する。なお, 推進管と地盤との相対変位に  $k$  値を乗じた土圧が受働土圧以上になった場合には, 地盤の中で受働破壊が生じたと考えて, これ以上の相対変位では受働土圧が作用すると考える。同様に, 主働状態も, 計算される土圧が主働土圧以下になる相対変位を収束変位と定義し, 相対変位がこの変位を越えた場合には, 主働土圧が作用すると仮定した。

2) 推進管は円筒体であり, 作用する地盤反力は推進管外周面で一様には増減しない。そこで, 海老原らにより提案された地盤反力を用い, 図-12 に示すように推進管-地盤間の相対変位量  $S$  と地盤反力の関係を仮定した<sup>5)</sup>。ただしここでは, 計算を簡単にするため図-12 の左側の土圧分布と合力が同じで大きさが  $k \cdot S$  の均一土圧で置き換えた (図-12 右側)。このとき土圧の作用範囲を  $D_e$  とすると,  $D_e$  は次式で表される。

$$D_e = D \cdot \left[ \left( 1 - \sin \frac{7\pi}{18} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} + \left( \sin \frac{7\pi}{18} - \sin \frac{2\pi}{9} \right) \cdot \left( \frac{2}{3} + 1 \right) \cdot \frac{1}{2} + \sin \frac{2\pi}{9} \right] \quad (1)$$

$$= 0.9103D$$

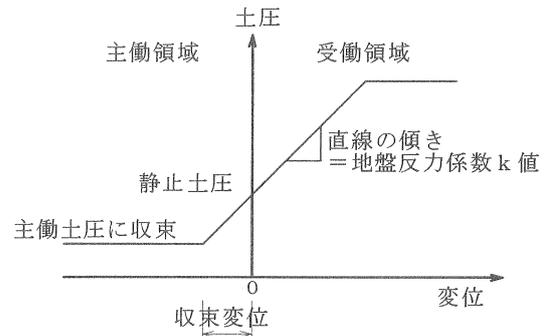


図-11 推進管の変位と土圧の関係

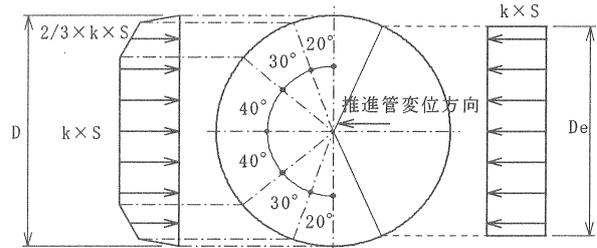


図-12 推進管変位と地盤反力の分布<sup>5)</sup>

(3) 地盤反力の算定

前述のように, 推進管側面に作用する土圧は, 直進する場合は静止土圧が作用すると考えられるが, 曲線区間中では推力の分力により曲線外側に押しつけられ, 受働状態になる部分と主働状態になる部分の両者が生じるため, それぞれを分けて算定を行う。

[受働側 (曲線外側) の算定]

図-13 を基に, 推進管-地盤間の相対変位量  $S$  から受働側の地盤反力を求める。ここで,  $\delta_o$  を推進管の相対変位が発生する前の外側掘削線 (曲線半径  $= R + D_{oc}/2$ ) と推進管外側面中央部のクリアランスと定義すると, 図-13 に示すように,  $S$  が  $\delta_o$  より小さい範囲では推進管外側面の前・後部は部分的に地盤に貫入するため, この部分に地盤反力を受けることになる。一方,  $S$  が  $\delta_o$  を超えると地盤反力を受ける範囲は推進管全長に及ぶことになる。したがって, 算定においては相対変位量  $S$  の場合分けを行い,  $S > \delta_o$  の場合には  $\alpha_{os} = 0$  と置くこととする。推進管の外側面に作用する土圧の合力  $P_o$  は, 静止土圧を  $p_o$  とすると, 次式により表すことができる。

$$P_o = D_e \cdot \left\{ p_o \cdot L + k \cdot [S \cdot L - (R + D_{oc}/2)^2 / 2 \cdot (\alpha_o - \sin \alpha_o - \alpha_{os} + \sin \alpha_{os})] \right\} \quad (2)$$

ここで,  $\alpha_o$  は, 図-13 に示すように回転中心と推進管の回転外側の前後端を結んだ線がなす角,  $\alpha_{os}$  は, このうち, 推進管の回転外側が地盤と接する境界の両端を結んだ直線がなす角で, 次式で表される。

$$\alpha_o = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{L/2}{R + D_{oc}/2} \quad (3)$$

$$\alpha_{os} = 2 \cdot \cos^{-1} \frac{\sqrt{(R + D_{oc}/2)^2 - (L/2)^2} + S}{R + D_{oc}/2} \quad (4)$$

また、 $\delta_o$  は曲線半径とオーバーカット量で規定され次式により求めることができる。

$$\delta_o = (R + D_{oc}/2) - \sqrt{(R + D_{oc}/2)^2 - (L/2)^2} \quad (5)$$

【主働側（曲線内側）の算定】

受働側と同様に、推進管—地盤間の相対変位量  $S$  から主働側の地盤反力を求める。ただし、主働側は静止土圧  $p_o$  の作用線となるオーバーカットラインが図-14 のように位置しており、推進管内側面の前・後部には静止土圧よりも小さい主働土圧  $p_A$  に近い土圧が作用していると考えられる。ここで、 $\delta_i$  を推進管の相対変位が発生する前のオーバーカットライン（曲線半径  $= R - D_{oc}/2$ ）と推進管内側面中央部のクリアランス、 $h_{oA} = (p_o - p_A)/k$  を収束変位量と定義すると、推進管内側面への静止土圧及び主働土圧の作用範囲は、 $\delta_i$  と  $h_{oA}$  の大きさの関係により、図-14 (a) 又は (b) の状態にあると考えられる。したがって、推進管の相対変位前の状態を考慮し、図-15 (a)、(b) に示すように、 $\delta_i$  と  $h_{oA}$  及び相対変位量  $S$  と  $h_{oA}$  の大きさにより場合分けを行うことで、次式により表すことができる。

なお、相対変位量  $S$  が図-11 に示す収束変位を超えると全管長に主働土圧が作用することになり、以降相対変位が進んでも定常となる。

$0 \leq S \leq h_{oA} - \delta_i$  かつ  $\delta_i \leq h_{oA}$  の場合、 図-15(a) 参照

$$P_i = D_e \cdot \left\{ p_A \cdot L + k \cdot \left[ (h_{oA} - \delta_i - S) \cdot L + (R - D_{oc}/2)^2 / 2 \cdot (\alpha_i - \sin \alpha_i) \right] \right\} \quad (6)$$

ここで、 $\alpha_i$  は、推進管の内側の両端と回転中心とを結んだ直線のなす角度、 $p_A$  はランキンの主働土圧で、それぞれ次式で表される。

$$\alpha_i = 2 \cdot \sin^{-1} \frac{L/2}{R - D_{oc}/2} \quad (7)$$

$$p_A = (\gamma \cdot h + \gamma_i \cdot h_w) \cdot K_A - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_A} \quad (8)$$

なお、(8)式の各符号は表-1 にパラメーターとして定義している。

$h_{oA} - \delta_i < S \leq h_{oA}$  の場合

$$P_i = D_e \cdot \left[ p_A \cdot L + k \cdot \frac{(R - D_{oc}/2)^2}{2} \cdot (\alpha_{is} - \sin \alpha_{is}) \right] \quad (9)$$

ここで、 $\alpha_{is}$  は、図-15 に示すように推進管の内側で収束土圧が作用している境界の両端と回転中心とを結んだ直線のなす角度であり、次式で表される。

$$\alpha_{is} = 2 \cdot \cos^{-1} \frac{(R - D_{oc}/2) - h_{oA} + S}{R - D_{oc}/2} \quad (10)$$

$S > h_{oA}$  の場合

$$P_i = D_e \cdot p_A \cdot L \quad (11)$$

なお、 $\delta_i$  は曲線半径とオーバーカット量で規定され次式により求めることができる。

$$\delta_i = (R - D_{oc}/2) - \sqrt{(R - D_{oc}/2)^2 - (L/2)^2} \quad (12)$$

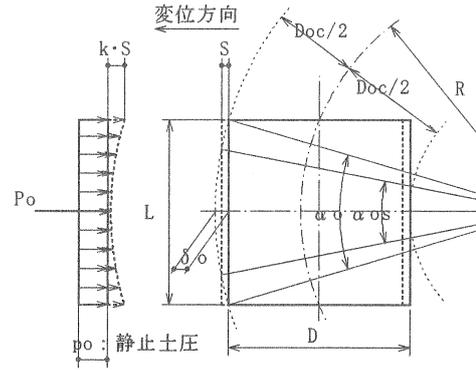


図-13 受働側（曲線外側）地盤反力

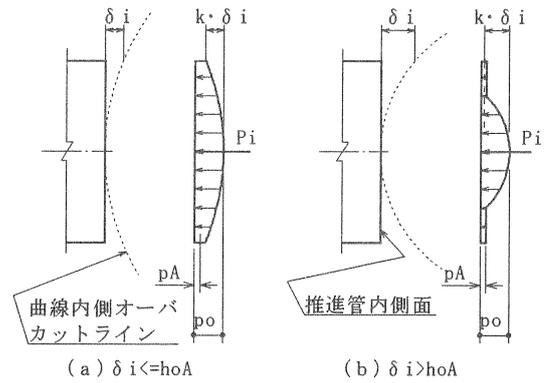


図-14 相対変位前の静止土圧・主働土圧の作用範囲

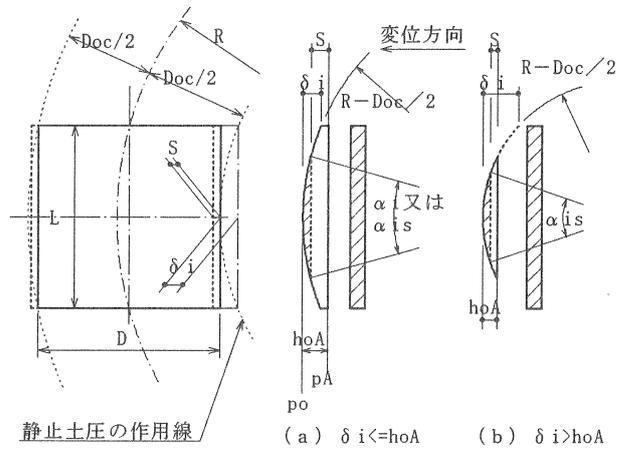


図-15 主働側（曲線内側）地盤反力

4. 推力伝達モデルの検証

4.1 推進管と地盤反力の釣り合い

曲線区間にある推進管が外側に張り出そうとする力は当該推進管に作用している推力（図-10 に示す  $F_{n+1}$ ）の分力として  $F_{Hn+1} = F_{n+1} \cdot \sin \theta$  で求めることができる。したがって、X方向の釣り合い（旋回方向を正とする）は次式により求めることができる。

$$P_o - F_{Hn+1} - P_i = 0 \quad (13)$$

4.2 推力伝達モデルによるシミュレーション

前記釣り合い式と前節で導いた推力伝達モデルを用い、

地盤の物性値、曲線半径及び推進管の諸元を一般的な場合を想定して表-1のように設定し、推進管が外側に張り出そうとする力と推進管の相対変位による地盤反力との釣り合いの試算を行った。

図-16はその試算結果で、推進管と地盤との相対変位の大きさとそれにより地盤から推進管に作用する土圧（曲線外側と内側）との関係を表している。また、この図には、推力の分力  $F_{Hn+1}$  と(13)式の左辺で表されるX方向の力の合力も併せて示している。X方向の力の合力が0の状態での釣り合いが保たれるため、実際の推進はこの状態で生じると考えられる。

このグラフからは、以下のことがわかる。

- 1) 推進管の変位により発生する外側地盤反力は約20mm変位した時点で受働土圧状態になる。
- 2) 内側地盤反力は、相対変位によらずほぼ主働土圧の状態で作作用している。
- 3) 推進管の外側への相対変位が約6mmの時点（図-16中の○印）でX方向の力が釣り合い、実際には、この状態で旋回していく。

また、図-17は、表-1の設定を標準として、曲線半径、地盤反力係数、内部摩擦角、粘着力、推力及び管長の各パラメーターを個別に変化させた場合の試算結果である。これらの図からは、推進管の相対変位と地盤反力の釣り合いにおける各パラメーターの影響度が分かる。ここで、相対変位が大きくなるということは、推進管が外側地盤

表-1 シミュレーションにおけるパラメーター

|                      |                                 |                       |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| 曲線半径                 | $R$ (m)                         | 100                   |
| 土被り                  | $h$ (m)                         | 8.0                   |
| 地下水位                 | $h_w$ (m)                       | GL-1.5                |
| 土の単位体積重量             | $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 20                    |
| 土の水中単位体積重量           | $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )  | 10                    |
| 水の単位体積重量             | $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 10                    |
| 土の内部摩擦角              | $\phi$ (deg)                    | 15                    |
| 土の粘着力                | $c$ (kN/m <sup>2</sup> )        | 5                     |
| 地盤反力係数 <sup>6)</sup> | $k$ (MN/m <sup>3</sup> )        | 10                    |
| 静止土圧係数               | $K_0$                           | $1 - \sin \phi$       |
| 主働土圧係数               | $K_A$                           | $\tan^2(45 - \phi/2)$ |
| 受働土圧係数               | $K_P$                           | $\tan^2(45 + \phi/2)$ |
| 推進管外径                | $D$ (m)                         | 1.60                  |
| 推進管長さ                | $L$ (m)                         | 2.43                  |
| 余掘りを含めた掘進機による掘削外径    | $D_{oc}$ (m)                    | 1.62                  |
| 対象管に作用する推力           | $F_{n+1}$ (kN)                  | 6000                  |

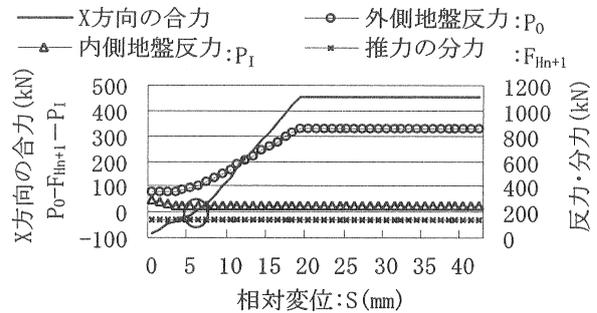


図-16 シミュレーション結果

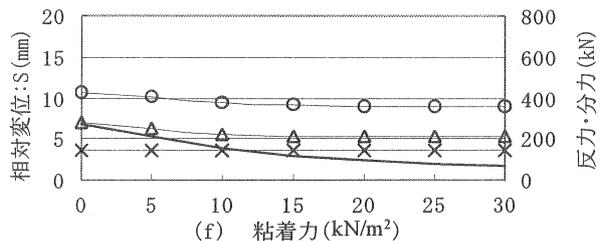
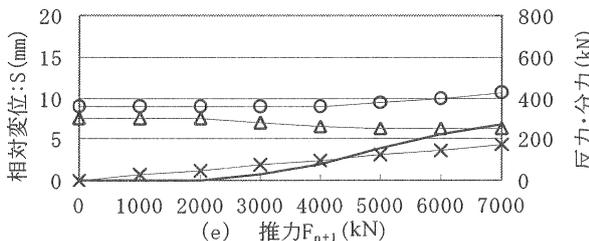
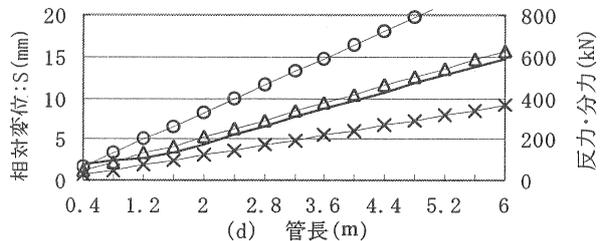
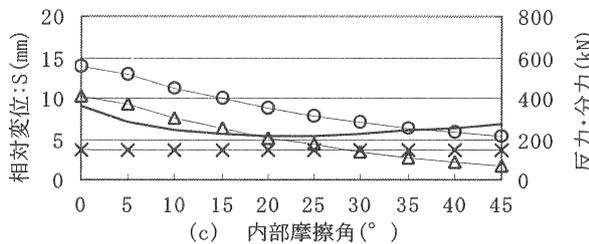
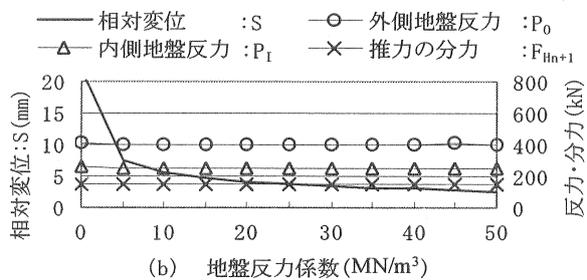
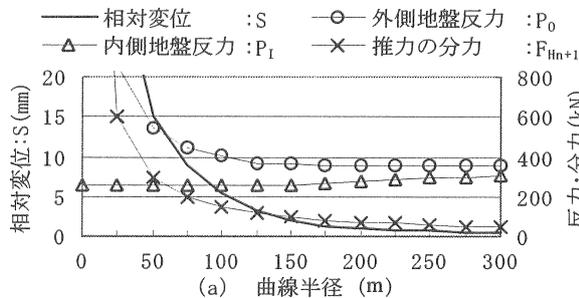


図-17 各パラメーターを変化させた場合のシミュレーション結果

に貫入し、所定の曲線線形からの誤差が大きくなるということがある。したがって、スムーズで正確な推進を行うためには、相対変位を極力小さくする必要がある。この観点で、試算結果における各パラメーターの影響度の分析を行う。

(a) 曲線半径の結果より 曲線半径は曲線施工の成否に大きな影響を与える。試算例の条件では、 $R=150\text{m}$ 以下で相対変位量が急速に拡大する。図-18(a)は $R=25\text{m}$ で他のパラメーターは表-1の値を用いた場合の結果である。この場合には、最大受働土圧に達してもX方向は釣り合い状態にならず(合力が0にならない)、地盤は受働破壊状態を起こすことが予測される。

(b) 地盤反力係数の結果より 地盤反力係数は、一定値以上(試算例では $5\text{MN/m}^3$ )有れば、相対変位を抑えることができることが分かるが、以降大きくなってても相対変位量への影響はあまり見られない。

(c) 内部摩擦角の結果より 内部摩擦角は受働土圧の大きさを決定する要素であるが、相対変位には大きな影響を及ぼさない。

(d) 管長の結果より 試算結果に示すように、相対変位量は管長に比例して増加する。すなわち、短い管長の推進管を使うことは曲線推進において有利であることが分かる。

(e) 推力の結果より 推力が大きくなると、管列の地盤に対する相対変位は大きくなる。このことは、推力を低減すれば、相対変位を抑え、スムーズな推進が可能であることを意味している。したがって、推進管と地盤との空隙に潤滑材(滑材)を満たし、推力を低減する方法は合理的な工法であるといえる。例えば、図-18(b)は同図(a)から、推力を $2000\text{kN}$ に低減させた場合の計算結果である。この図に示すように推力を低減することができれば、相対変位量を一定値に抑えることができ、曲線推進施工が可能になると考えられる。

(f) 粘着力の結果より 粘着力は式(6), (9), (11)における主働土圧の算定に用いられている。軟弱粘性土地盤において推進管が地盤中に張り出すことを防止するために地盤の粘着力を上げる地盤強化方法が用いられるが、図-18(c)は同図(b)において粘着力を $30\text{kN/m}^2$ に増強した場合の計算結果である。これにより相対変位量が抑えられていることが分かる。

## 5. おわりに

本論文では、推進工法において、掘進機が形成した曲線空洞に推進管を押し込む過程での推進管列と周辺地盤の相対的な関係から、推進管の挙動を力学的に取り扱うモデルの構築を試みた。このモデルでは、擁壁に作用する土圧の考え方を参考に、推進管と地盤との相対変位に応じて土圧の発生モデルを仮定した。推進管が掘進機の

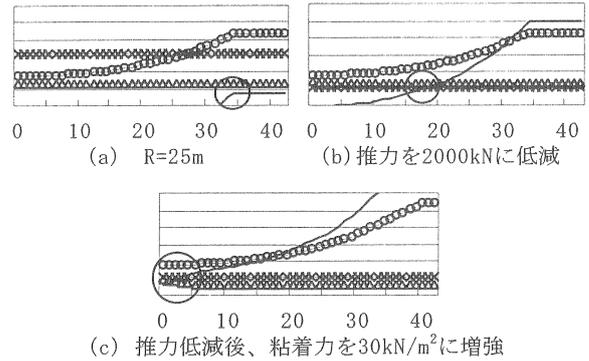


図-18 推力低減効果による相対変位量の減少  
(縦軸と横軸は図-16と同じ)

形成した曲線軌道を追従することを想定すると、推進管の地盤に対する相対変位量を計算することができるため、先の土圧モデルと組み合わせることにより、推進中に推進管側面に作用する土圧分布を予測することができる。

今回のモデルでは、推進管に作用する推力の分力と相対変位により発生する土圧分布との間の釣り合いを調べることにより、推進モデルの構築を行った。次にこのモデルの妥当性を検証するため、曲線半径、推進管の長さ、地盤条件をパラメーターとして推力伝達シミュレーションを実施した。既往の研究では、推力の分力に対して一律的に受働土圧を対抗させ施工可否の判断がなされ、相対変位等の推進管の挙動は全く把握されていなかったが、今回のモデルにより、曲線半径、土質条件をパラメーターとして曲線中における推進管の相対変位量が予測できることが確認された。このことから、ここで構築したモデルは曲線施工の可否のより詳細な判定方法として有用であるとともに、地盤から推進管に作用する土圧をより実状に近い形で予測することができるため、推進管の構造設計の高度化に寄与することが期待される。現在このモデルをベースに、余掘りの効果、推進合力の作用点の遷移に対応するシステムの開発に取り組んでいる。

## 参考文献

- 1) 日本下水道管渠推進技術協会：推進工法講座，基礎知識編，pp.1-7，2003.
- 2) 日本下水道管渠推進技術協会：推進工法講座，工法法令編，pp.100-117，2003.
- 3) 木村宏一：曲線推進工法の現状と課題，月刊推進技術，Vol.2，No.10，pp.2-9，1988.
- 4) センプラカーブ推進研究会：設計マニュアル，pp.11-12，2001.
- 5) 海老原哲朗，足立紀尚，建山和由，内海知彦：掘進中のシールド機に作用する土圧に関する考察とその掘進制御への応用，第33回地盤工学研究発表会平成10年度発表講演集，No.975，pp.1955-1956，1998.
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説，pp.43-44，1996.