

# 推進工法の推力算定方法の改良

地盤工学研究室 佐藤 寛之  
指導教官 杉本 光隆

## 1. はじめに

推進工法における推力は、先導体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山と接触する際の摩擦や付着力、管の自重による管と土との摩擦の和に見合う力で、推進諸抵抗値の総和となる。推進工法は管を地中に押し込んで管路を形成するため、これらの推進諸抵抗の中で推進力に最も影響を与える要因は、管と地山との摩擦抵抗であると考えられる。推進工法では、先導体による掘削は管外形よりも大きくする。これによりできる管と地山との隙間を余掘りという。地山に管を圧入するという推進工法の機構上、この余掘りが推進力へ与える影響は非常に大きいと考えられる。しかし、推進力算定の従来モデルにおける土圧の考え方は、地盤とトンネルの間に隙間が無く、静止土圧がかかるものと仮定している。そのため、摩擦抵抗と付着力に大きな影響を与えると考えられる余掘りを考慮することができない。その代わりに、土圧としては緩み土圧を用い、推進力低減係数 $\beta$ を土質別に与えている。

そこで、本研究では既往の研究において開発した余掘りを考慮できる全周地盤ばねモデルを用いて解析モデルを開発し、解析結果と理想データを比較検討することで、提案する推力算定モデルの妥当性を検証する。

## 2. 推進力算定モデル

### 2.1 モデル構成要素

図-1 に本解析のモデル構成要素を示す。本研究の解析モデルは、推進管を半径方向 16 本の地盤ばねによって支えられる曲面シェル、推進管継手部を圧縮ばねとせん断ばね、先端抵抗(マシンコネクション)を圧縮ばねとせん断ばねとしてモデル化した。また、管周面抵抗を表現するために、管と地盤の間にインターフェイス要素(Mohr-coulombモデル)を設定した。<sup>3)</sup>

### 2.2 解析モデルについて

図-2、図-3 に解析モデル作成手順を示す。推進工法は、既成管を坑口からのジャッキの推進力により管を地中に圧入して管路を布設する工法である。そのため、解析を行うにあたり、曲線部の推進管は初

期の状態で曲げモーメントが発生していなければならない。この状態を表現するために、曲線部分の推進管を後続管の延長線上に設定し、掘削領域が計画線形となるように地盤ばね外側に強制変位を与えた。推進管が地盤ばねに支えられているため、地盤ばね外側に強制変位を与えることにより地盤ばねと推進管の力のバランスにより推進管が曲がる。この手法により曲線部の推進管を 1 管ずつ設定していくこととした。

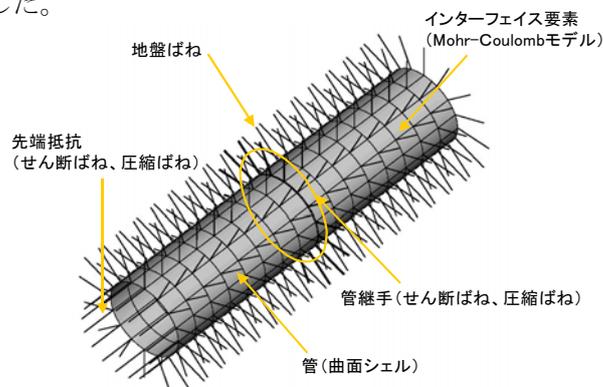


図-1 解析モデル(要素分割図)

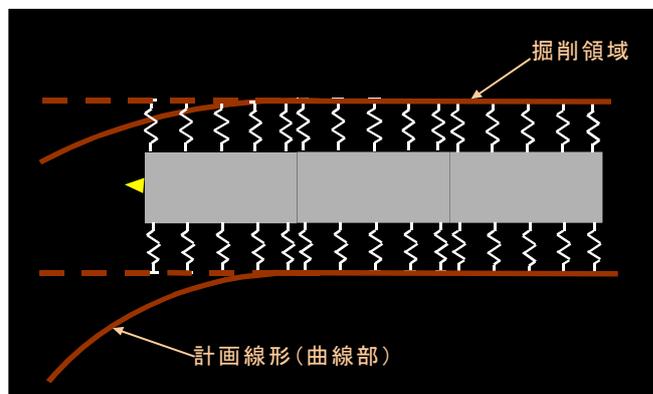


図-2 推進管と地盤ばねの設定(強制変位導入前)

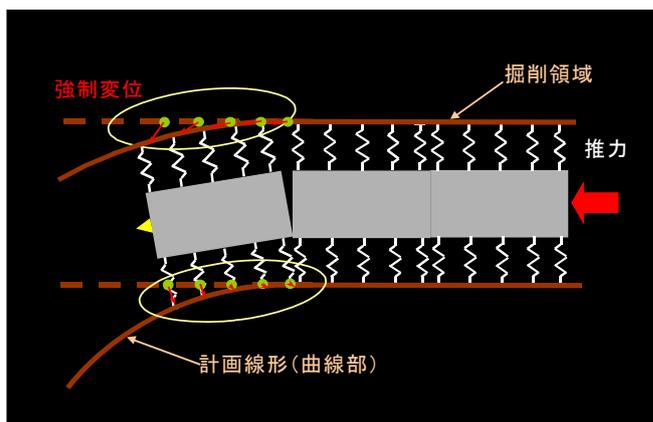


図-3 推進管と地盤ばねの設定(強制変位導入後)

### 2.3 解析モデル作成手順

図-4 に解析手順のフローチャートを示す。モデルの設定は Phased analysis を使用して行うこととした。以下、曲線部でのモデル作成手順を述べる。

- 1) 1 本目の Pipe を設定し、初期土圧を地盤ばねにプレストレスとして作用させる。
- 2) 1) で作成した Pipe の延長線上に 1 Pipe を新たに設定し、初期土圧を地盤ばねにプレストレスとして作用させ、地盤ばね外側の節点に計画線形となるような強制変位を入れる。また、Pipe の先端にも計画線形に合わせて強制変位を入力する。このとき、インターフェイス要素はまだ設定せず地盤ばね内側と管の節点をタイイングする。
- 3) 前 Pipe のインターフェイス要素を設定する。これは、強制変位により管が曲がった後の状態で、インターフェイス要素となる地盤ばね内側の節点と管の節点と同じ位置となるようにするためである。
- 4) 曲線最後の Pipe にインターフェイス要素を設定する。
- 5) 先頭にマシンコネクションを設定し、最終管の後方からジャッキ力を働かせる。

### 2.4 解析モデルの特徴

本研究で提案する解析モデルは 1) 最終状態での作用荷重の地盤変位依存性の有無、2) 周辺地盤による作用荷重の分担の有無を統一的に表現できるモデルである。さらに、本研究で提案する解析モデルは以下の特徴を有する。

- 1) 余掘りの影響を評価できる。
- 2) 管と地盤の間にインターフェイス要素を用いることにより、動的な周面摩擦を考慮できる。
- 3) 管の全周にわたり応力再配分を評価できる。
- 4) 設計土圧の作用方向を法線方向とすることにより、初期状態においてせん断力が生じない。
- 5) 地山によるトンネル掘削部分の鉛直方向作用力の分担を表現し、最終状態における荷重変化を評価できる。

### 2.5 本研究の改良点

藤井が開発したモデル(2004)<sup>3)</sup>では曲線部が長くなると、解が発散してしまう問題があった。このため、本研究では、曲線部でも解が安定的に求まるように強制変位計算法を修正した。

### 3. 解析条件

図-5 に計画線形を示す。表-1 に解析条件を示す。開発した推進力算定モデルの妥当性を検証するために、図-5、表-1 に示すような仮想の現場を設定して検討を行った。推進延長は推進管 72 管分で第 1 直線部 8.55m、曲線部 40.335m、第 2 直線部 7.3275m、 $R=100m$ 、中心角 $=90^\circ$ 、曲線始点は Pipe4 の中心、曲線終点は Pipe69 端部とした。

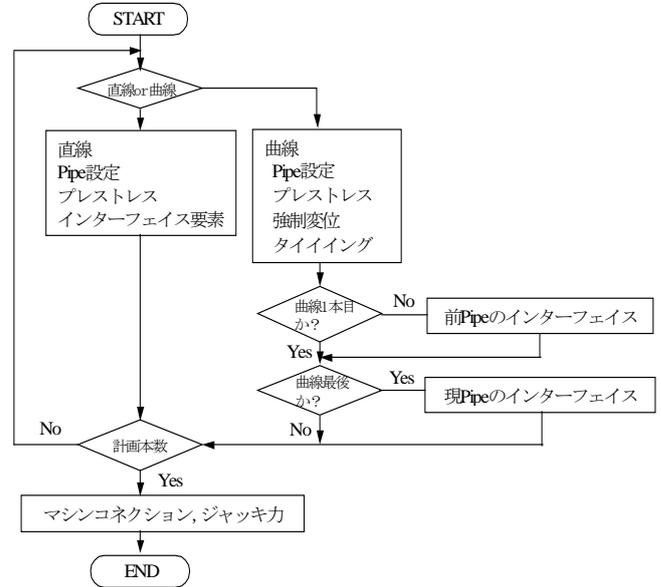


図-4 解析手順フローチャート

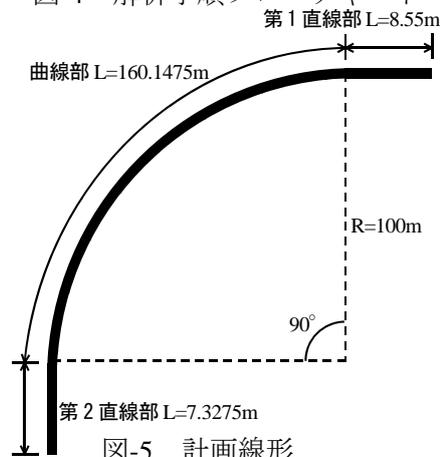


図-5 計画線形

表-1 解析条件

地盤条件	土質 土被り 土の単位堆積重量 管と土の付着力 管と土の摩擦係数 N値 地下水位	粘性土 H=8.7(m) $\gamma = 15.62(kN/m^3)$ $C'=0(kN/m^2)$ $\mu '=0.1$ N=5 GL-0(m)
施工条件	推進延長 曲線半径 余掘り量	L=176.025(m) R=100(m) $\delta_0=0.0074(m)$
管の仕様	呼び径 管長 管厚 管外径 管の単位重量 緩衝材厚 カラー厚	D=1000(mm) L=2430(mm) t=100(mm) Bc=1200(mm) W=8.303(kN/m) $t_a=15(mm)$ $t_a=9(mm)$

#### 4. 解析結果

##### (1)地盤変位・地盤反力分布

図-6 に法線方向地盤変位・地盤反力分布を、図-7 に法線方向地盤変位・地盤反力分布の坑口部拡大図を示す。これらの図より、次のことがわかる。1)曲線始点部 Pipe5 の中央部曲線内側でトンネル外側への地盤変位が発生している。2) Pipe5 以降、管端部曲線外側でトンネル外側への地盤変位が発生している。3) 切羽に近づくにしたがってトンネル外側への地盤変位は小さくなっている。4)地盤反力分布と地盤変位分布がきれいに対応している。5)曲線内側スプリングライン付近の管中央部では曲線始点部以外は、ほぼ初期土圧が作用している。これらは次のように考えられる。1)推進管継手部の剛性が高いため曲線始点部で内側に変位している。2) 曲線を通過する場合、管の剛性が高いために曲線外側では管端部が地山にあたり中央部で隙間ができるため管端部に土圧が集中する。3) 管の周面抵抗により、切羽に近づくにつれて推力が減少し、管を曲線外側に押し込む力が弱くなる。4)余掘りの影響により、ある程度の変位がなければ地盤反力が増加しない。以上の結果から本解析の地盤反力分布と地盤変位分布は合理的であるといえる。

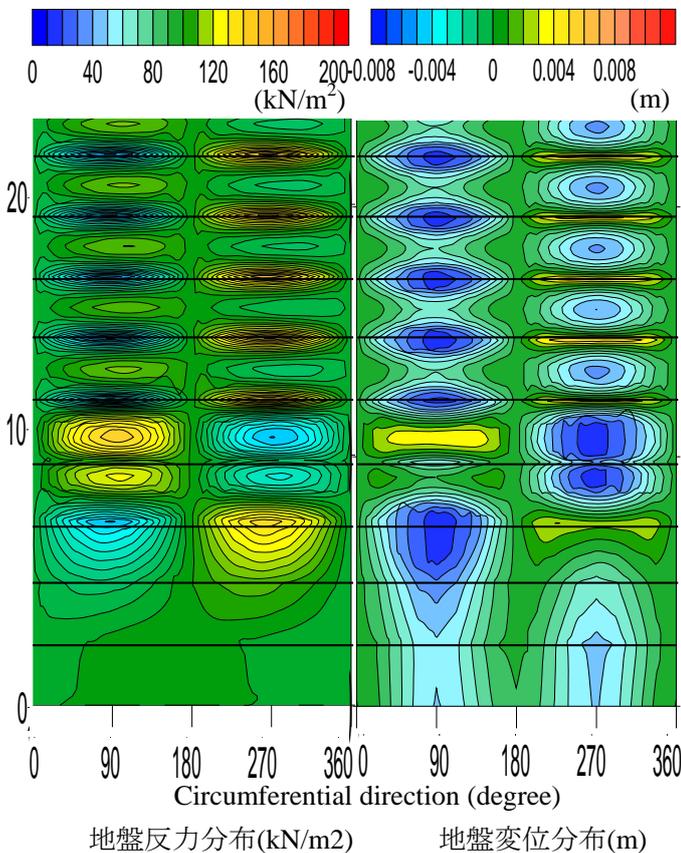


図-7 地盤変位分布と地盤反力分布の坑口部拡大図

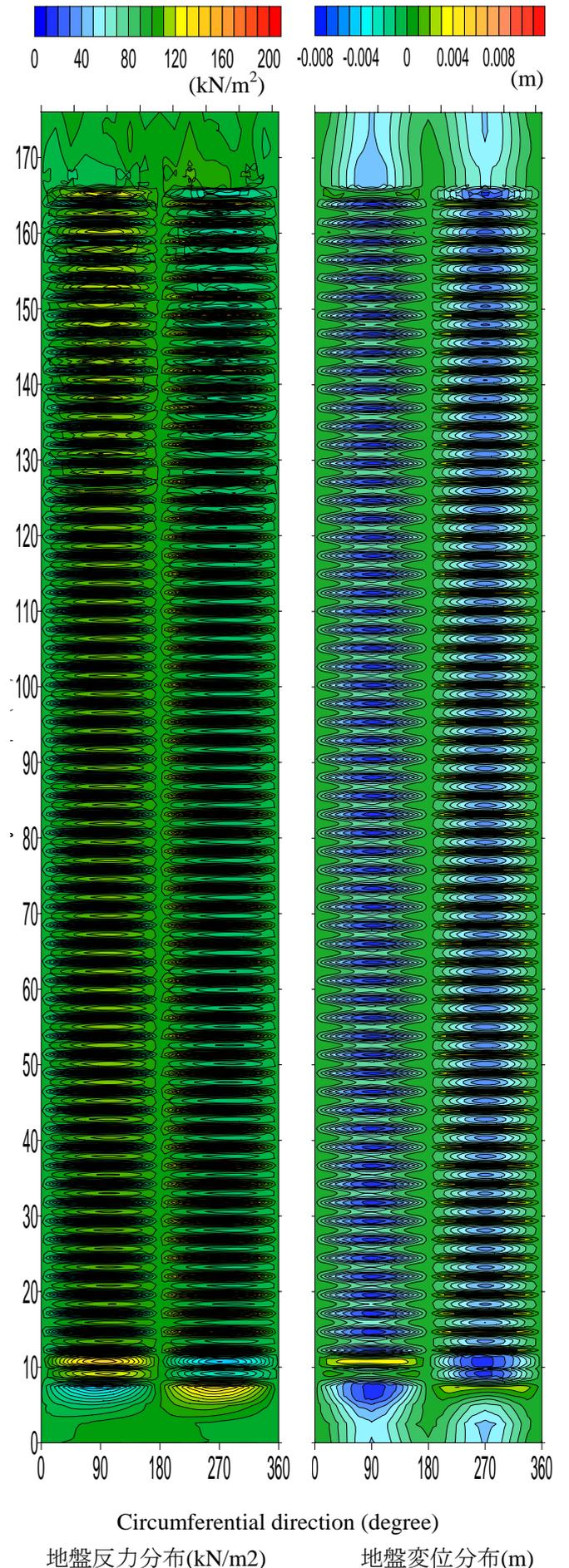


図-6 地盤変位分布と地盤反力分布

(2)管端部土圧分布(曲線最大土圧部)

図-8 に地盤反力が最大となる Pipe7 の推進管の曲線外側管端部の地盤反力分布を示す。図-9 にその拡大図を示す。今回のケースでは、曲線部の管端部にかかる偏圧は、分布範囲が従来設計に用いられている  $L/\eta$  から  $L/3$  に、分布形状が三角形分布から 2 次曲線分布となった。

(3)管周面抵抗力

表-2 に従来モデルおよび本解析モデルで算出した周面抵抗力を示す。推進力低減係数を乗じた従来モデルでは 2695 kN に対し、本解析モデルでは 4503 kN となり従来モデルの約 1.7 倍となった。表-3 に余掘りと滑材への影響の考慮方法について示す。従来モデルは余掘りを緩み土圧と推進力低減係数  $\beta$  で、滑材による摩擦低減を  $\mu'$  と  $\beta$  で評価しているが、本解析モデルでは余掘りを地盤ばねで評価し、滑材による低減を  $\mu'$  のみで評価している。このため従来モデルに比べ大きな周面抵抗力となったと考えられる。また、表-2 より従来モデルにおける推進力低減係数  $\beta$  を考慮しない場合 ( $\beta=1$ ) の周面抵抗力は 7702kN となり、本解析モデルの方が小さくなっていることから本解析モデルが余掘りの効果が表現しているといえる。従って、滑材による摩擦低減を考慮した摩擦係数  $\mu'$  を用いる必要がある。また、実測データを用いた検証を行う必要がある。

5. まとめ

本研究 により以下の結論を得た。

- 1) 合理的な推進力算定解析モデルを開発した。
- 2) 本解析では曲線部の管端部にかかる偏圧は、分布範囲が従来設計に用いられている  $L/\eta$  から  $L/3$  に、分布形状が三角形分布から 2 次曲線分布となった。
- 3) 滑材による摩擦低減を考慮した  $\mu'$  を設定する必要がある。

参考文献

- 1) 社団法人日本下水道協会：下水道推進工法の指針と解説，社団法人日本下水道協会，2000.
- 2) 岡崎麻里・杉本光隆・A.Sramoon：大深度地下シールドトンネル用セグメントの設計方法に関する一考察，第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ,Ⅲ-433,2003.9.
- 3) 藤井良太・杉本光隆：推進工法の推力算定に関する研究，第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ,Ⅲ-382,2004.9.

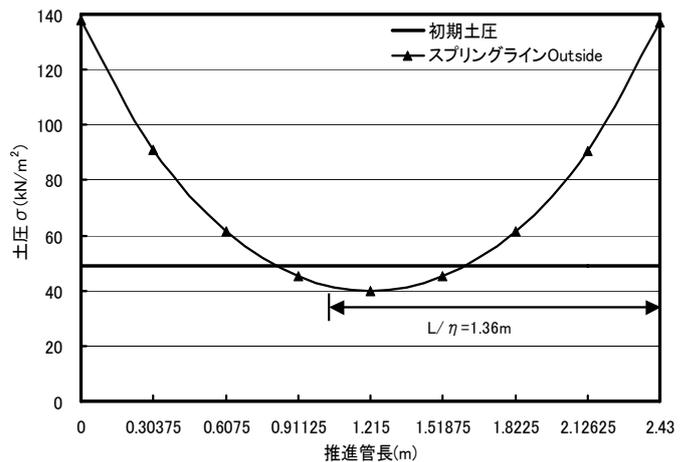


図-8 管端部地盤反力分布

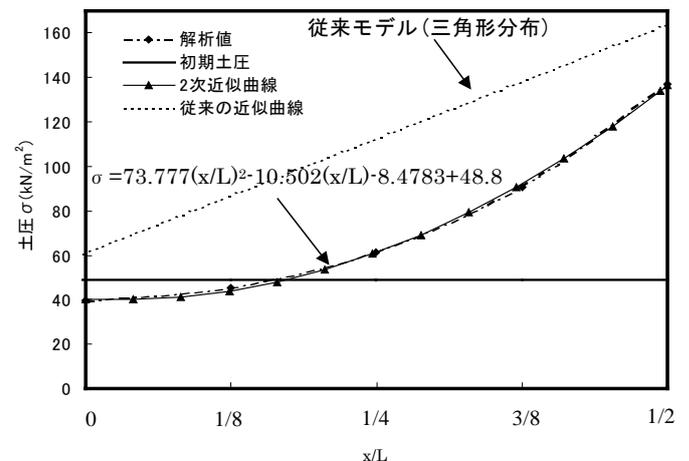


図-9 管端部地盤反力分布(拡大図)

表-2 周面抵抗力

	従来モデル		本解析モデル
	$\beta = 0.35$	$\beta = 1$	
周面抵抗力 $F_2$ (kN)	2695	7702	4503

表-3 余掘りと滑材の影響の考慮

	従来モデル	本解析モデル
余掘り	緩み土圧、 $\beta$	全周地盤ばね
滑材	$\mu'$ 、 $\beta$	$\mu'$