

方向制御可能なトンネル機械の設計と特性

DIRECTIONAL CONTROLLABLE TUNNELLING MACHINE DESIGNING AND CHARACTERISTICS

野村由司彦*・保科 宏**・塩見博司*・梅津孝雄***

By Yoshihiko NOMURA, Hiroshi HOSHINA, Hiroshi SHIOMI and Takao UMEZU

In the small diameter pipe jacking method, a demand for a tunnelling machine, with which long and curved tunnels can be constructed, has grown in recent years. It is necessary for constructing curved tunnels to control the direction of tunnelling machine. This paper describes the design of tunnelling machine for controlling its direction, whose direction control is achieved by both directional control mechanism and position measuring system. The tunnelling machine designed based on this method has been used for constructing 50 meters long tunnels in silty loam deposits whose curvature radiuses were smaller than 200 meters. Experimental results show that this design method can realize long and curved tunnel in small diameter.

1. ま え が き

電気通信ケーブル用管路、上・下水管、ガス管などの埋設工事において、建設公害への住民の要望や埋設物のふくそうなどの理由により、路面を掘削する方法が困難となり、トンネル式に管を埋設する工法が多く用いられるようになってきている。近年、このトンネル工法において、道路の線形に合わせたり、障害物を避けたりする必要から曲線状に管を埋設する技術への要望が高まっている¹⁾。通信ケーブルの分野でも、特に口径30cm以下の小口径に相当する管路5条以下の埋設工事は年間数100件、数10kmあることから、曲線・長距離施工ができる小口径管埋設工法の実用化が待たれていた。

小口径管をトンネル式に埋設する工法としては、発進坑内の元押し装置に設けられた押管ジャッキによって管を推進する推進工法が、ライニング装置・作業が不要であるという大きな利点により、多方面で用いられている²⁾。そして、管が埋設される地表付近の地盤は軟らかく、圧縮性に富む場合が多いことから、圧入無排土式で

トンネルを形成するトンネル機械を用いた推進工法が適用できる。圧入無排土式は排土が不要で高速かつ経済的に施工できること、トンネル機械内部のスペースが広くなり、推進・方向修正・姿勢角位置計測装置の装備が容易であることなどの大きな利点を有している。そのため、多方面で開発が行われ、直線・短距離施工に限られているものの、すでに下水管の分野で年間100件、15kmほどの実績をあげているものもある³⁾。

このような状況をふまえ、著者らは圧入問題について土質工学的に研究を行うとともに⁴⁾、小口径管推進工法において、圧入無排土式にトンネルを形成し、曲線・長距離施工ができるトンネル機械の研究を行ってきた。曲線・長距離施工の達成には、①トンネル機械が確実に高い推進方向の修正性能を有すること、②トンネル機械の姿勢角・位置が計測でき、かつその計測値をもとに方向制御できることが課題である。

第1の課題に対しては、トンネル機械のヘッドを修正すべき方向に傾動し、ヘッドをその方向へ本体部に先がけて圧入推進させ、その後、本体を推進させる方向修正方式により解決をはかった。このような方向修正方式として、短いヘッドを用いた方式があり、直線施工に十分な修正性能を有することが報告されている³⁾。これに対して、本研究は、曲線施工を可能とするため、より確実

* 正会員 工修 日本電信電話公社茨城電気通信研究所通信土木研究室 研究主任
(〒319-11 茨城県東海村白方白根162)

** 正会員 同研究室 調査員(同上)

*** 同研究室 社員(同上)

で高い修正性能を目指したものであり、理論検討と推進実験により、最適なヘッド長さとして外径と同程度の長さを導き出し、くさび効果を利用した傾動機構により、その長大ヘッドの傾動を可能としている。さらに、曲線推進しやすいように、一定の角度範囲内で本体が自由に折れ、トンネル機械の本体の実質的な長さを短くできる機構を考案した。この機構に類似のものとしては、修正をすべき方向にジャッキを用いて強制的にシールド機を折り曲げるといった方式が報告されている⁵⁾。

第2の課題に対応するために、磁界を用いた水平位置計測法“電磁法”⁶⁾ならびに、電磁法の計測回数の削減を目指して、本体の折れ角から方位角、水平位置を推測する方法⁷⁾を適用した。

本論文では、はじめにトンネル機械の設計について説明する。次に、関東ローム実地盤での推進実験により、本機械が設計条件を満足するとともに、実用的であることを明らかにする。

本設計法は掘削式推進工法やシールド工法などについても応用可能であり、トンネル機械の高機能化に役立つものである。

2. トンネル機械の設計

(1) 要求条件および構造の概要

a) 要求条件 機能、性能としては、以下の項目を満足する必要がある。①十分な機械的強度を有していること、特に、圧入無排土方式に起因する大きな管軸方向推力に耐えること。②推進方向を修正できること。③姿勢角、位置を計測できること。④遠隔操作できること。さらに電電公社が、本機械を用いるうえでの条件として、以下の項目が挙げられる。⑤電気通信ケーブルを収容

する管路を5条布設できること。⑥施工速度は2m/hであり、高速なこと。⑦曲率半径200mの曲線を含む、距離100mの施工が可能なこと。⑧N値10以下の粘性土、砂質土に適用できること。⑨電電公社規格3号マンホールの掘削面積(幅1.9m×長さ3.9m)内にトンネル機械を設置できること。このほかに、トンネル機械は、湿度、ほこりなどの環境にも耐えられることはもちろん、作業性、安全性についても考慮しなければならない。

b) 構造の概要 前記の要求条件を満足する機械として、検討の結果、Fig.1に示すトンネル機械を試作した。主要な仕様はTable1のとおりである。

トンネル機械は、ヘッド、本体の前部ならびに後部から構成されている。ヘッドには水平位置計測用の発信コイルが搭載されている⁶⁾。本体の前部には、ヘッド推進用の推進ジャッキとヘッド傾動機構が装備されている。推進ジャッキとそれに固設されたヘッドは、最前の球軸

Table 1 Main specifications.

| Item | | Specification | |
|--------------------|----------------------|---|--|
| Tunnelling machine | Head | Length | 445mm (machine 1) 218mm (machine 2) |
| | | Inclinating angle | 1.5° (max.) in all direction |
| | Driving jack | Thrust | 1 MN (max.) at 70 MPa |
| | | Stroke | 450mm |
| | Body | Bending angle | 1.0° (max.) |
| | Operation | All jacks are controlled remotely. | |
| Outside diameter | 340mm (max.) at head | | |
| Length | 3000mm (machine 1) | | |
| | 3385mm (machine 2) | | |
| Weight | ≈ 8 kN | | |
| Electric power | φ3, 200V, 50A | | |
| Steel pipe | Inside diameter | 302.5mm, ⁵ cables are to be installed. | |
| Construction speed | | 2 m/h | |

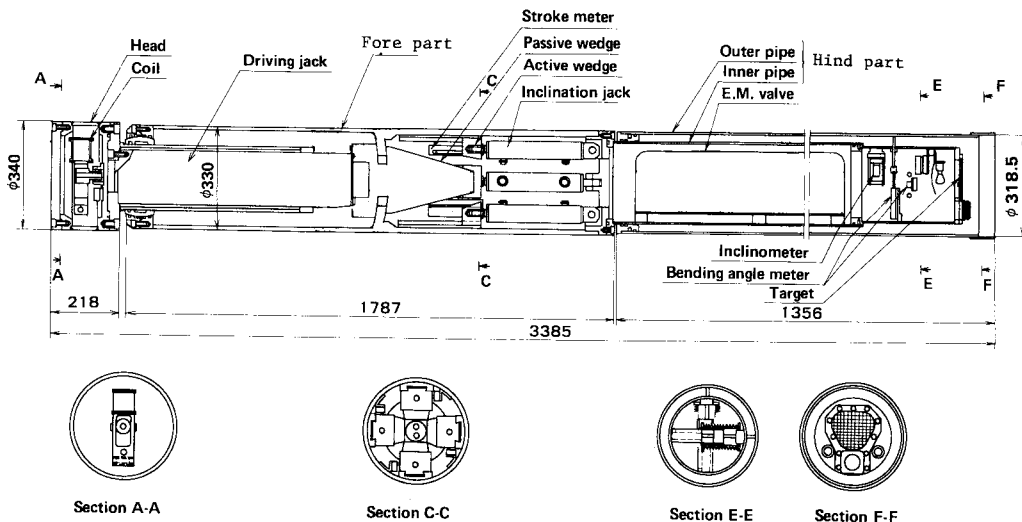


Fig. 1 Structure of tunnelling machine.

受と中央の球面壁を介して、傾動かつ伸縮自在に支持されている。一方、ヘッド傾動機構は、推進ジャッキスピンドルに接続された截頭角錐形状の受動くさびと、互いに90度の角度をもって設置された4本の傾動ジャッキスピンドルに接続された主動くさびからなっている。この4本の傾動ジャッキのストロークを調節することによって、上下左右の組合せ方向にも1.5度の範囲で、ヘッドを傾動できる。そして、本体の後部には、ジャッキ操作作用の電磁弁、傾斜計、回転計、折れ角計測器、直線施工用のターゲット等の機器が搭載されている。

本体の後部は、外管と内管との2重構造となっていることから、両管の隙間が許す範囲で前部と後部は自由に折れることができる。

次に、設計上の重要項目について説明する。

(2) 設計

a) 本体の外径、長さ 圧入無排土方式であることから、外径は小さい方が、圧入による影響領域の点で適している。そこで市場性があり、電電公社管路を5条収容できる最小径、内径302.5 mm、外径318.5 mmの鋼管を埋設管とした。この埋設管の接続は施工性と経済性を考えて、スリーブによる差し込み式とした。そのため、埋設管の最大径はスリーブ部の330 mmとなり、トンネル機械の本体の外径は、それに合わせて、330 mmとした。そして、ヘッドの外径は本体および埋設管周囲の摩擦力を減ずるため、さらに10 mm大きい340 mmとした。

一方、トンネル機械の全長は、立坑の大きさから、3 m程度に制限される。本体の後部は計測・油圧機器を収容するので1 m強の長さが必要であり、そのため、前部の長さ L_B は2 m以下でなければならない。また、1回当たりの推進長、すなわち推進ジャッキのストローク L_S は大きい方が施工効率は高い。さらに、推進ジャッキ長さが L_S の約2倍、傾動機構長さが L_S の約2倍必要であるため、 L_S は、推進ジャッキと傾動機構を収容する本体前部の長さ L_B の1/4が最大である。以上の理由により、たとえば、機械2のように、前部の長さ L_B を1787 mm、推進ジャッキストローク L_S を L_B の1/4の450 mm、後部の長さ L'_B を1356 mmとした。

b) 方向修正機構 方向修正は、Fig. 2に示すごとく、(A)初期状態、(B)くさび効果を利用した傾動機構によって修正する方向にヘッドを傾動する、(C)推進ジャッキを伸ばしてヘッドを地盤内に圧入推進させてトンネルを形成する、(D)推進ジャッキを縮めると同時に元押し装置の押管ジャッキを伸ばし、本体部と鋼管を推進させるという方式によって行われる。

この方式において、ヘッド長さ、ならびにヘッド傾動角度を最適に設計することは重要である。半径方向の変

位は、機械1のヘッド先端で最大となるが、外径340 mmに対してわずか12 mm (=450×tan 1.5°)と微小である。この点に着目して、地盤からの反力が、トンネル機械の半径方向変位に比例し、かつ、トンネル機械が弾性的に支持されているとして、半径方向の力とモーメントのつり合いを考えた線形弾性解析法により方向修正機構の設計を行った。

曲線施工の場合、同一の修正が連続して行われる場合が多い。その場合、1回目の修正においては、操作(B)の修正性能への影響が大きいが、2回目以降は、前回の操作(D)の後で、ヘッドは傾動された状態となっているので、操作(B)は略されて(C)と(D)の繰り返しとなる。そこで、はじめに、操作(B)による反動が生ずる1回目の修正性能を、次に反動が生じない2回目以降の修正性能を検討した。

1回目の修正における操作(B)により、ヘッドと本体の前部はFig. 2左図のように動作し、Fig. 3左図のように半径方向変位に比例する地盤反力を受ける。このヘッドの傾動(角度 η)によって生ずる反動(角度 ξ)を求める。力とモーメントのつり合い式(1)、(2)により、 f_B 、 f_H を得る。

$$(1-2f_B)L_B - (1-f_B)(1-2f_H)L_H / f_H = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{[f_B^2(3-f_B) - (1-f_B)^2]L_B^2}{1-f_B} - \frac{\{(1-f_H)^2(2+f_H) - f_H^2\}L_H^2}{f_H} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

この f_B 、 f_H を用いて、 ξ_1 は式(3)により表わされる。

$$\xi_1 = f_H L_H / \{(1-f_B)L_B + f_H L_H\} \cdot \eta \dots\dots\dots (3)$$

操作(C)、操作(D)による方向修正角度を求める。このとき、Fig. 2右図のように動作し、地盤反力はFig. 3右図のごとく作用する。この状態に対する力とモーメントのつり合い式(4)、(5)より、 g_B 、 τ_2 を得る。

$$(\tau_1 - \tau_2)(g_B^2 L_B - L_{B1}^2 / L_B) + [\tau_2 + \tau_1 - (\xi + \xi_1)L_H L_H] = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{(\tau_1 - \tau_2)(g_B^2 L_B^3 + L_{B1}^3)}{3(1-g_B)L_B} - \int_0^{L_H} \{\tau_2 - (\xi + \xi_1)x\} \{(1-g_B)L_B + x\} dx = 0 \dots\dots\dots (5)$$

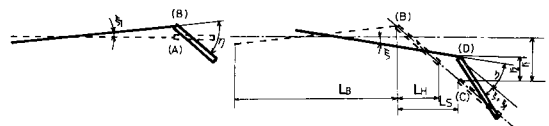


Fig. 2 Movement of tunnelling machine.

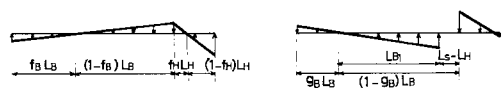


Fig. 3 Forces acting on tunnelling machine.

$$\left\{ \begin{aligned} r_1 &= (\eta - \xi_1)(L_s - f_H L_H) \dots\dots\dots (6) \\ \xi &= (r_1 - r_2)/(1 - g_H)L_B' \dots\dots\dots (7) \end{aligned} \right.$$

この g_H , r_2 を用いて、1 回目の修正角度 ξ は、式 (7) により求められる。上記計算法により、 L_s/L_B を 0.25 に一定にし、 L_H/L_B をパラメータとして、反動の割合 ξ_1/η および 1 回目の方向修正の効率 ξ/η を求め、Fig. 4 に示す。なお、Fig. 4 の実験値は、推進実験の結果であり、詳しくは次章で述べる。

2 回目以降の場合は、ヘッドの傾動は行わないので、式 (4)~(7) において、反動 ξ_1 を 0 として、修正の効率 ξ/η を求め、この ξ/η を 1 回目の効率と区別するために ξ'/η と表わし、Fig. 4 に示す。

Fig. 4 から、 ξ/η に関しては L_H/L_B は約 0.1 が、 ξ'/η に関しては 0.1~0.25 が適していることが結論される。この解析の結果から、 L_H/L_B として、0.12 ($L_H=218$ mm) と 0.25 ($L_H=445$ mm) の 2 種について推進実験を行い、最適長さを決定することとした。

また、ヘッド傾動角度 η は 1.5° とした。Fig. 4 から、 ξ'/η としては約 0.17 であることから、 $\eta=1.5^\circ$ のとき、1 推進 45 cm 当たりの修正性能 ξ' は 0.26° 、すなわち曲率半径 101 m ($=0.45 \cdot 180/\pi/0.26$) 相当となり、目標としている曲率半径 200 m の曲線施工に十分な性能であると推測される。

c) 折れ機構 小口径トンネル機械の場合、本体の長さとお径との比が大きくなるので、曲線推進時に地盤からの抵抗が大きくなる。そこで、Fig. 1 に示されるごとく本体の後部を、内管と外管との 2 重管構造にすることにより、前部と後部が自由に折れ得るようにした。

本構造では、折れ角の最大値の設計が重要である。内管に油圧・計測機器を収納するスペースをとるため、折れ角の最大値は、機能を満たす範囲で小さい方がよい。一方、曲線推進時、前部と後部は Fig. 5 の関係にあることから、前部の長さ L_B 、後部の長さ L_B' 、折れ角 ϕ 、ならびに曲線半径 R は、式 (8) により表わされる。

$$\phi = (L_B + L_B')/(2R) \dots\dots\dots (8)$$

$L_B=1787$ mm, $L_B'=1356$ mm, $R=100$ m のとき、式 (8) から ϕ は 0.9 度となる。よって、折れ角の最大値が 1.0 度となるように内管と外管との隙間を設計した。

d) ジャッキ推力 圧入無排土式であるため、ヘッドを圧入推進させる推進ジャッキの装備推力は、適用土質を決定する重要な要因である。装備推力は、ジャッキの断面積に比例するので、ストローク 450 mm のジャッキを 1.5 度傾動でき、かつ、本体前部に幾何学的に収容可能で、最大径のジャッキ、最高油圧 70 MPa で推力 1 MN のジャッキを選んだ。

ここで、直径 45 mm~320 mm のペネトロメーターを

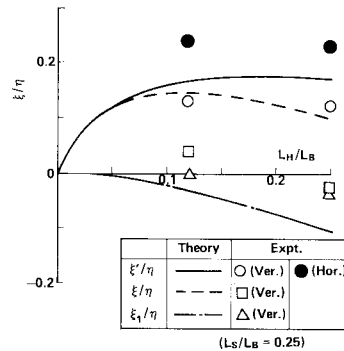


Fig. 4 Directional correction ability.

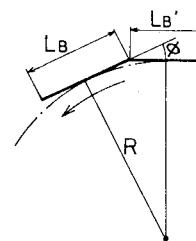


Fig. 5 Relation between fore part and hind part.

用いた Kerisel の垂直貫入実験によれば、2 m 程度より深くなると地表面変位がなくなり、静的コーン抵抗が一定になる⁸⁾。これは局所圧縮変形の場合には、貫入抵抗が地盤に作用する重力によらず、土質により決まることを示している。ゆえに、水平貫入である本工法において、貫入体周辺の地盤を局部的に圧縮していく変形機構の場合、垂直貫入と同程度の貫入抵抗になると考えられる。また、砂地盤における水平貫入模型実験において、上記変形機構の場合、土かぶり等しければ、圧入力が貫入体断面積に比例するという結果⁴⁾を得ている。そこで、静的貫入試験の結果から、目標 N 値 10 の粘性土、砂質土への圧入の可能性を推測する。代表的な Schmertmann の結果⁸⁾によれば静的コーン抵抗 q_c (kPa) と N 値との比 $q_c/(N$ 値) は、土質によって異なり、シルト、砂質では 200、粗砂、砂利の少ない砂では 500~600 である。よって $q_c/(N$ 値) として最大値 600 をとると、 N 値が 10 であれば、 q_c は 6 MPa となる。これにトンネル機械のヘッドの断面積を乗じると、圧入推力は 0.54 MN と推定され、装備推力 1 MN に対して約 1/2 である。適用土質は、圧入推力のみならず、周辺地盤への影響からも検討を行う必要があるが、推力からは、目標としている N 値 10 の地盤に適用できると考えられる。

e) 油圧ホース内径、および油圧油の流量 本工法は 100 m の長距離を目指していることから、油圧ホース内面の摩擦による圧力損失 ΔP が大きい。そこで、

油圧ホース内径 d は圧力損失を小さくするため、70 MPa 用油圧ホースの最大径 1.2 cm とした。一方、油圧油流量 Q は大きいほど、施工速度が大きくなるが、油圧損失も大きくなるので、最適値を設計する必要がある。レイノルズ数 Re は、最大となる条件、すなわち、 $Q=3.3 \times 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)}$ 、動粘性係数 $\nu=3.2 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ の場合でも、 $Re=4Q/(\pi d\nu)=1100$ であり、2100 より小さいので、ホース内の流れは層流と考えられる⁹⁾。層流の場合、 ρ を油圧油の密度、 L をホース長とすると、 ΔP は式 (9) により表わされる⁹⁾。

$$\Delta P = 128\nu\rho LQ/(\pi d^4) \quad (\text{Pa}) \dots\dots\dots (9)$$

よって、全圧力損失は、推進ジャッキの押し・引き推力の比を $m (=3)$ とすると、往路分 ΔP_o 、復路分 ΔP_i (流量は往路の $1/m$) の $1/m$ 倍、ならびに油圧ホースカプラーにおける圧力損失 $\Delta P_c (=kQ^2)$ 、定数 k は実験により 7.3×10^7 の和となり、式 (10) で表わされる。

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_i/m + \Delta P_c$$

$$= 10^{-5} \cdot 128 \cdot \nu \cdot \rho \cdot L \cdot Q / (9\pi d^4)$$

$$+ 7.3 \cdot 10^7 \cdot Q^2 \quad (\text{MPa}) \dots\dots\dots (10)$$

式 (10) において、 L は 10 m 余裕をみて、110 m、 ν 、 ρ は用いた油圧油の 17°C における値 $\nu=1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $\rho=900 \text{ kg/m}^3$ 、そして ΔP は 7 MPa (最高圧力 70 MPa の 10%) とすると、 Q として $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ を得る。

この条件における実験値は 9 MPa であり、理論値 7 MPa にほぼ一致した。

f) 計測 磁界を用いた水平位置計測法⁹⁾によれば、発信コイルの位置を 3 cm 程度の精度で計測できる。この発信コイルをヘッド内に設置し、トンネル機械の最前部の水平位置を直接計測できるようにすることにより、的確に方向修正操作の判断ができるようにした。

一方、トンネル機械の形状が長柱状で、土の拘束が強いため (この傾向は圧入無排土方式であることから、特に大きいと考えられる) トンネル機械は姿勢角方向に進む傾向がみられる。そこで、姿勢角を推進距離に対して積分して位置を求めることができると考え、精度が 0.05 度の傾斜計を本体内に設置し、その傾斜角から垂直位置を求めることとした。なお、この方法は、シールド機において実施例があり、それによれば 110 m の推進に対して、25 cm 以下の精度で垂直位置が決定されている¹⁰⁾。

また、本体後部の内管と外管の隙間を直線変位型ポテンシオメーターにより計測できるようにした。この隙間から水平方向での本体の折れ角を求め、計算により方位角と水平位置を推測する方法⁷⁾も用いた。

3. 推進実験

(1) 実験方法

a) 実験条件

土質：推進する深さではロームであり、発進坑近く (No.1)、および到達坑近く (No.2) における土質試験結果を Table 2 に示す。試料土は深さ 2.5~3.1 m から取り出した。

計画線：推進実験は、前章に述べた機械 1 および機械 2 のおののについて行い、それぞれ実験 1、実験 2 と呼称する。Fig. 6 に示すごとく、実験 1 の計画線は、平面で曲率半径 150 m の S カーブを、縦断でも 2 度の角度変化を有する。一方、実験 2 の計画線は平面で曲率半径 100 m の S カーブを、縦断でも曲率半径 234 m の曲線を有する。

b) 実験装置および方法 実験に用いた管推進工

Table 2 Results of soil testing.

| Item | | No. 1 | No. 2 |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------|----------------------------------|
| | Depth of soil layer m | 1.70 ~ 3.30 | 0.75 ~ 3.30 |
| Grain size analysis | Classification of soil by grain size | Silty loam | Silty loam |
| | Gravel % | 0 | 0 |
| | Sand % | 35.5 | 27.1 |
| | Silt-Clay % | 64.5 | 72.9 |
| | Uniformity coefficient | 2.68 | 4.79 |
| | Effective grain size mm | 0.028 | 0.014 |
| | Moisture content % | 95.49 | 83.99 |
| | Specific gravity | 2.410 | 2.369 |
| | Wet density g/cm ³ | 1.308 | 1.454 |
| | Void ratio | 2.602 | 1.998 |
| | Degree of saturation % | 88.44 | 99.59 |
| Direct shear test | Cohesion kPa | 4 | 9.8 |
| | Friction angle | 21°30' | 18°00' |
| Unconfined compression strength kPa | | 70 | 22 |
| Standard penetration test, N-Value | | 2 | 5 (1.15~1.45m) 1 (2.15~2.46m) |
| Liquid limit % | | 27.85 | 26.40 |
| Plastic limit % | | 11.95 | 11.83 |
| Plasticity index | | 15.90 | 14.57 |

Table 3 Measuring items.

| Item | Measuring method | |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Pitching angle | Inclinometer | |
| Rolling angle | " | |
| Horizontal bending angle | Linear motion potentiometer | |
| Vertical bending angle | " " " | |
| Horizontal position | Electromagnetic method | |
| Tunnelled length | Addition of pusher jack stroke | |
| Inclination jack stroke | Linear motion potentiometer | |
| Thrust | Driving jack | Pressure transducer |
| | Inclination jack | " " |
| | Pusher jack | " " |

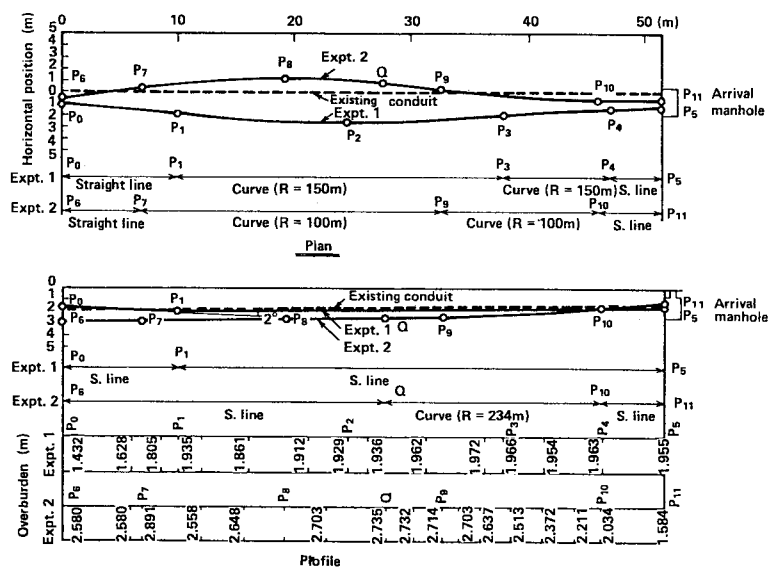


Fig. 6 Planned line of experiment.

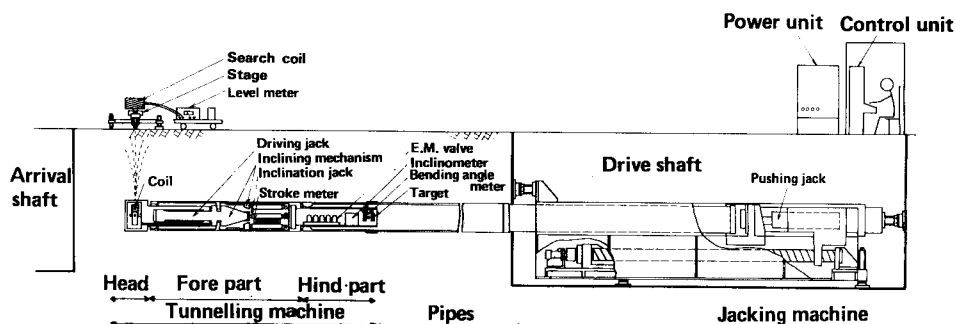


Fig. 7 Pipe jacking method.

法は Fig. 7 に示すごとく、圧入無排土式にトンネルを形成するトンネル機械、それに後続する埋設用の鋼管、鋼管を推進する押管装置、油圧油を供給する動力装置、トンネル機械の姿勢角・位置を表示し各装置を操作できる計測・操作装置、ならびにトンネル機械上方で使用する水平位置計測法（電磁法）受信装置から構成されている。

本実験における計測項目および方法を Table 3 に示す。計測は各推進ごとに行い、電磁法以外は、計測・操作装置に出力される。

推進は次の順に従って行った。

- ① 姿勢角・位置計測：水平方向において、実験 1 は電磁法のみにより、実験 2 は電磁法と折れ角を併用した。
- ② 計測された姿勢角、位置を計画線に比較して、ヘッドの傾動方向と傾動角度を決定する。
- ③ 4 本の傾動ジャッキを伸縮させることにより、

ヘッドを傾動させる。

- ④ 推進ジャッキを伸ばして、ヘッドを圧入推進させる。
- ⑤ 推進ジャッキを縮めると同時に押管ジャッキを伸ばして、トンネル機械の本体と鋼管を推進する。
- ⑥ 鋼管 1 本（6 推進分）、推進されていない場合：押管ジャッキシリンダを前進させ、①～⑤を繰り返す。

鋼管 1 本分推進された場合：押管ジャッキを押管装置後端まで後退させる。次に、油圧ホースと計測ケーブルを次の鋼管に通した後、鋼管を押管装置に設置し、①～⑤を繰り返す。

(2) 実験結果

a) 水平位置および垂直位置：実験 1 における水平位置および垂直位置の結果を Fig. 8 に、実験 2 の結果を Fig. 9 に示す。水平位置の実験値は、電磁法による計

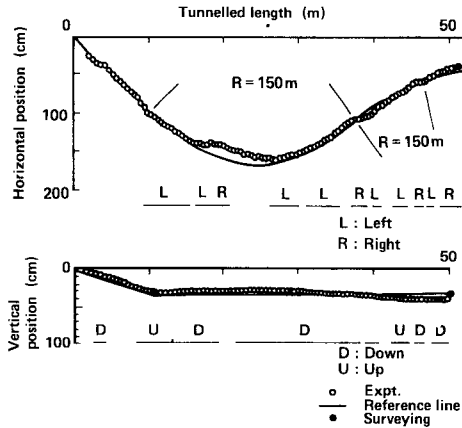


Fig. 8 Experimental results of positions (Expt. 1).

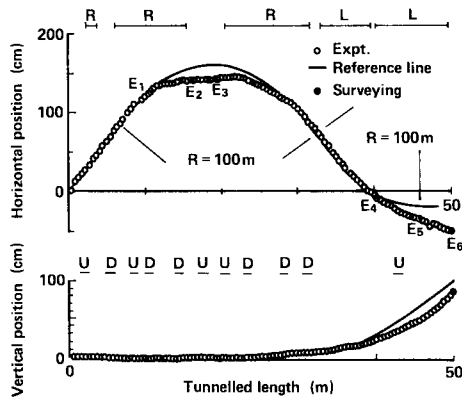


Fig. 9 Experimental results of positions (Expt. 2).

測値であり、垂直位置は傾斜角から計算で求めたものである。トンネル内を見通す、あるいは到達後に開削する方法による光学測量の結果である●印と、両位置計測法による結果である○印との差は、最大でも実験1の垂直位置の8 cmであり、両位置計測法の妥当性が示された。

また、図中の L, R, D, U はそれぞれ左向・右向・下向・上向修正操作を行ったことを示している。実験1ではすべての電磁法計測値に基づき、実験2では $E_1 \sim E_6$ の電磁法計測値と折れ角から求めた方位角・水平位置に基づいて水平方向の方向修正操作を決定した。両図に示されるごとく、水平、垂直いずれについてもトンネル機械が修正操作に応じて方向修正され、曲線も含む複雑な計画線に沿わせられた。この結果から、①トンネル機械が十分な方向修正性能を有していること、②水平方向の計測は電磁法のみ、あるいは電磁法と折れ角を併用、のいずれの方法でも、実用的であることが示された。

b) 方向修正性能：1回目の方向修正操作にお

動角度 ξ などに関して実験結果をまとめ、2.(2), b)での理論値との比較を行った。

ξ', ξ, ξ_1 は、垂直方向については傾斜計によって計

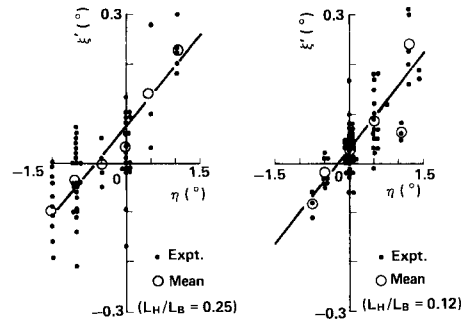


Fig. 10 Relation between ξ' and η in vertical direction.

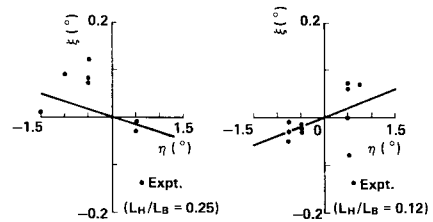


Fig. 11 Relation between ξ and η in vertical direction.

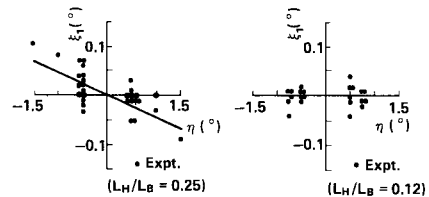


Fig. 12 Relation between ξ_1 and η in vertical direction.

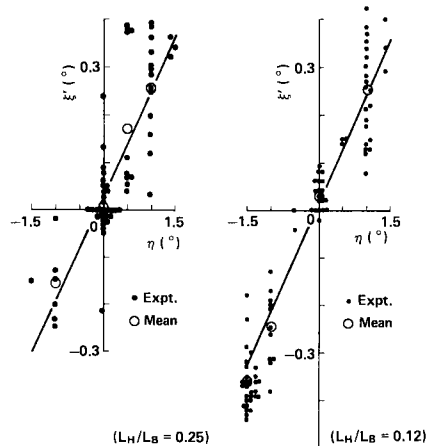


Fig. 13 Relation between ξ' and η in horizontal direction.

る一推進前後の修正角度 ξ 、2 回目以降の方向修正操作における修正角度 ξ' 、1 回目におけるヘッド傾動時の反測した傾斜角から求め、水平方向については折れ角によって計算した方位角から求めた。なお、角度の計測精度は、傾斜角、折れ角ともに 0.05 度である⁷⁾。垂直面における ξ' とヘッドの傾動角度 η との関係を Fig. 10 に、 ξ と η との関係を Fig. 11 に、 ξ_1 と η との関係を Fig. 12 に、そして、水平面における ξ' と η との関係を Fig. 13 に示す。この結果、次のことが明らかとなった。なお、 ξ や ξ' のばらつきは、方向修正操作の履歴によって本体周囲の土壁の状況が変化していること、計測精度が 0.05 度であることなどが原因と考えられる。

① ξ' は η にほぼ比例する。② 垂直面の ξ' は全体に上向きに偏っているが、曲線施工に重要な水平面では偏りはみられず、 $L_H/L_B=0.12$ の機械 2 では ξ'/η の平均値は 0.24 である。このとき、 η を最大値 1.5° とすれば ξ' は 0.366° となり、曲率半径では 70 m ($=0.45 \cdot 180/0.366/\pi$) に相当する。③ ξ は、 $L_H/L_B=0.12$ 、0.25 とともに、 ξ' に比べて小さいが、 $L_H/L_B=0.12$ の方が大きく、優れている。④ ξ_1 は $L_H/L_B=0.25$ では η の 5% 程度みられるが、 $L_H/L_B=0.12$ ではほとんどみられない。

さらに、Fig. 10~13 から、それぞれ、 ξ'/η (垂直)、 ξ/η (垂直)、 ξ_1/η (垂直)、 ξ'/η (水平) を最小二乗法によって求め、Fig. 4 に示し、理論値と比較した。 ξ'/η の実験値●(水平面)は理論値よりやや大きく、実験値○(垂直面)はやや小さい結果となっている。 ξ/η の実験値□(垂直面)は理論値より小さいが、 $L_H/L_B=0.12$ の方が優れているという結果は一致している。さらに、 ξ_1/η の実験値△(垂直面)についても、 $L_H/L_B=0.12$ の方が小さくなるという結果は一致している。このように、線形弾性解析による方向修正性能の理論値は実験値にはほぼ一致し、方向修正機構の設計に有効であることが示された。

c) 折れ角：実験 1 において、曲率半径 150 m にほぼ沿っている 27 m~35 m の区間での折れ角は、 $0.52 \pm 0.28^\circ$ 、また実験 2 において、曲率半径 100 m にほぼ沿っている 23~32 m の区間での折れ角は、 $0.76 \pm 0.16^\circ$ であった。この結果は 2.(2), c) に示した折れ角の設計式(8)による値、 0.6° (曲率半径 150 m のとき)、 0.9° (曲率半径 100 m のとき) にほぼ一致しており、折れ角の設計法が適切であったことが示された。

d) 推力：実験 1 におけるヘッド圧入力(推進ジャッキ推力)、および鋼管推進力(押管ジャッキ推力)を Fig. 14 に、実験 2 における推力を Fig. 15 に示す。ヘッド圧入力が、実験 1 では、100~140 kN、実験 2 では 60~80 kN と異なっているのは、Table 2 の N 値が示すように、本実験地盤は土かぶりの小さい方が硬い傾向と

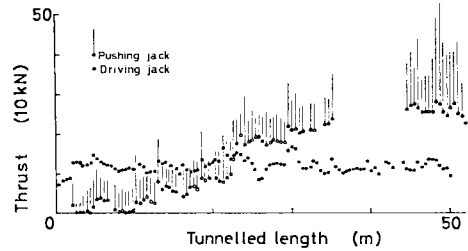


Fig. 14 Thrust in experiment 1.

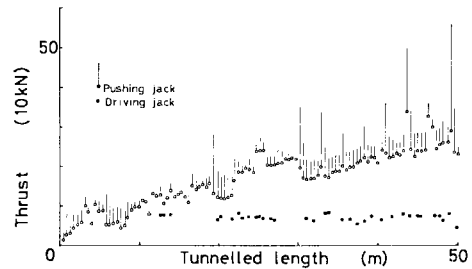


Fig. 15 Thrust in experiment 2.

なっていることに起因していると推測される。一方、Schmertmannによれば、 N 値 2~5 のシルト質ロームの本地盤では、 $q_c/(N$ 値) ≈ 200 、 $q_c=0.4\sim 1$ MPa、推力が 36~90 kN と推測され、本実験結果にはほぼ一致し、2.(2), d) に述べた設計法の実用性が示された。

また、鋼管推進力は推進長とともに増大し、最大値は、実験 1 では 530 kN、実験 2 では 570 kN であった。曲率半径の大小による顕著な差はみられないが、同じ地盤で行った直線施工における最大推力に対しては約 5 割大きい値であった。

4. まとめ

小口径管を曲線かつ長距離に埋設することは、道路の線形に合わせたり、障害物を避けることができるなどの面で有益である。このために、高速施工できるという利点を有する圧入無排土方式を基本として、方向修正性能を有し、立坑から見通す必要のない位置計測装置を適用したトンネル機械を設計、製作するとともに、このトンネル機械による管推進システムを用いて曲線推進実験を行った。推進実験は、シルト質ローム地盤において距離 50 m で 2 回行い、それぞれ曲率半径 150 m ならびに曲率半径 100 m の S カーブを計画線とした。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) トンネル機械において、ヘッドの傾動、ヘッドの推進、本体と鋼管の推進を繰り返しながら推進する方向修正方式は、曲線施工に十分な方向修正性能を有している。方向修正機構の設計は、半径方向の地盤反力がト

ンネル機械の半径方向変位に比例することを前提とした線形弾性解析により行った。解析により、ストローク L_s と本体前部の長さ L_B との比 $L_s/L_B=0.25$ のとき、1 回目の修正効率 ξ/η (本体の修正角度 ξ とヘッド傾動角度 η との比) はヘッド長さ L_H と L_B との比が 0.1 付近で高いこと、2 回目以降の修正効率 ξ'/η は、 L_H/L_B が 0.1~0.25 の間で大差なく、 η を 1.5° とすれば目標曲率半径 200 m の 1/2 に相当する性能 ξ' が得られること等が結論された。この解析結果は、 $L_H/L_B=0.12$ 、0.25 の 2 種のトンネル機械による推進実験結果にはほぼ一致し、本解析がこの種のトンネル機械の設計に有用であることが示された。

(2) 本体の曲線追随性を高めるため、本体を中央部付近で自由に折れ得る構造とした。本体の前部の長さ L_B 、後部の長さ L'_B 、曲率半径 R における、折れ角 ϕ の設計式 $\phi=(L_B+L'_B)/(2R)$ は実験結果にはほぼ一致し、本式が折れ角の設計に有用であることが示された。

(3) 方位角、水平位置計測については、電磁法のみによる方法、および電磁法と折れ角を併用する方法によって行ったが、いずれの方法でも、的確に方向修正操作を決定することができた。

(4) N 値 2~5 のシルト質ローム地盤におけるヘッド圧入力 (推進ジャッキ推力) 60~140 kN は、Schmertmann による静的コーン抵抗と N 値との関係、ならびに圧入力と圧入断面積との比例関係を応用して推定した値 36~90 kN にほぼ一致し、本方法が装備推力の設計に有用であることが示された。

以上の結果により、本トンネル機械の性能は目標を満足し、曲線施工を可能にするとともに、本論文に述べた設計法が、この種のトンネル機械の設計に有用であることが示された。なお、ローム以外の粘土や砂においても実験を行っており、その結果については追って報告する。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、土質工学の面でご助言を頂いた東京工業大学 木村 孟教授、適切なるご教示と激励を頂いた茨城電気通信研究所 山岸康利室長、鶴田秀典調査役、藪田哲郎調査員に御礼申し上げます。

また、未知なることと労苦の多い本研究分野を手掛け、基礎を築かれた有岡良祐調査員、今村宏司前室長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 高根 昇：カーブ推進実用化と推進延長長大化に挑む、月刊下水道、Vol. 6, No. 3, p. 19, 1983.
- 2) 黒野良夫：最近の推進工法の動向、最近の推進工法④、総合土木研究所、pp. 1~8, 1979.
- 3) 中島靖夫・安田幸廣：横浜市における小口径管推進工法による施工、下水道協会誌、Vol. 18, No. 206, pp. 19~26, 1981.
- 4) 野村由司彦：砂地盤における水平貫入体の先端抵抗力に関する研究、土木学会論文報告集、No. 338, pp. 139~147, 1983.
- 5) 松田幸雄：土圧バランス式シールド機による急曲線掘進の実施例、建設の機械化、No. 11, pp. 33~38, 1982.
- 6) 梅津孝雄・野村由司彦・保科 宏：小口径トンネルマシンの水平位置計測法、電子通信学会論文誌、Vol. J 67-B, No. 6, pp. 690~691, 1984.
- 7) 野村由司彦：トンネル機械の方位角・水平位置計測法、電子通信学会論文誌、Vol. J 67-B, No. 6, pp. 615~621, 1984.
- 8) 室町忠彦：貫入試験と地盤調査、鹿島出版会、pp. 145~151, pp. 256~266, 1976.
- 9) 日本機械学会：機械工学便覧、日本機械学会、pp. 8-12~8-13, 1970.
- 10) 杉本禎男・井戸 敏：小断面シールド機の姿勢計測装置、通研実報、Vol. 24, No. 4, pp. 767~784, 1975.

(1984. 3. 19・受付)