

トンネル機械の水平位置計測法

METHOD TO MEASURE HORIZONTAL POSITION OF TUNNELLING MACHINE

野村由司彦*・保科 宏**・梅津孝雄***

By Yoshihiko NOMURA, Hiroshi HOSHINA and Takao UMEZU

In the field of small-diameter tunnelling, one of the biggest factors standing in the way of the realization of constructing long span and curved tunnels has been the difficulty of measuring the horizontal position of a tunnelling machine. This paper describes a measurement method which emits a magnetic field from a coil in the tunnelling machine and detects the source of the transmission by the use of two search coils. A 90-meter long tunnel with a 200-meter radius of curvature was constructed, and it was confirmed that the horizontal position found by this method is accurate to a certain specified centimeter. These results indicate the utility of this simple and precise horizontal position measurement method for tunnel construction work.

1. ま え が き

近年、電気通信ケーブル、上下水道、ガス、電力などの管理設工事に於いて、騒音、振動等の低減への住民の要望、埋設物のふくそうによる大深度化、施工時の安全性の確保などのため、開削工法に代わり、トンネル工法が広く用いられるようになってきている。このトンネル工法において、道路の線形に合わせる、障害物を避ける、経済性を向上させるなどの理由から、長距離かつ曲線に管を埋設する技術の需要が高まっている。この技術の実現には、トンネル機械が推進方向を修正できるとともに、曲線状に推進するトンネル機械の位置を正確に計測できることが条件である。

また、電気通信ケーブルの分野では、広帯域特性、細径性などの特徴を有する光ケーブル伝送方式の実用化により、800 mm以下の小口径管はますます重要になっている。しかしながら、従来、小口径管の場合、人間がトンネル内に入って光学測量できないので、発進地点から、レーザやトランシットによってトンネル機械を直接見通

して位置を計測していた。そのため、小口径のトンネル工法は、30 m～50 mの短距離・直線施工に限られていた¹⁾。

トンネル機械の位置には、推進距離、計画線からの水平位置、そして深さの3要素があるが、推進距離は埋設管の押込量から容易に計測できる。また、深さは重力を利用した傾斜角検出器等からも推定することができるので、計測上の問題となっているのは水平位置である。

従来、地中の物体の絶対位置を計測する技術としては、弾性波法、電磁波法、磁界による方法などがあった。しかし、これらの方法は、いずれも小口径トンネル機械の水平位置計測に要求される条件、適用深さ5 m、精度数cmに及ばず、適用できない。すなわち、弾性波法²⁾は地中での損失が大きく適用深さが1.5 m程度であり、電磁波法³⁾は、深さ5 m程度まで適用できるものの、分解能が深さ3 mで50 cmであり、磁界によってケーブルの水平位置を計測する方法⁴⁾は適用深さが3 m、精度が深さの10%である。

そこで、著者らは、先に、磁界を用いて一定距離ごとに計測される絶対水平位置⁵⁾により、推定方位角から計算で求められる水平位置を較正する方法を提案した⁶⁾。

しかしながら、この磁界による水平位置計測法は、サーチコイルの鉛直度を調整した後、走査するものであり、

* 正会員 工修 日本電信電話株式会社 NTT 茨城電気通信研究所通信土木研究室 研究主任

** 正会員 同研究室 研究専門調査員

*** 東京総支社施設部土木課

(〒319-11 茨城県東海村白方白根 162)

計測に時間と熟練を必要としていた。そこで、本論文は誘起電圧の空間分布を究明し、その特性を応用することによって、サーチコイルの調整や走査を不要にする新しい計測法を提案するとともに、小口径のトンネル機械に適用し、長距離・曲線トンネル施工実験によりその実用性を明らかにしている。

2. 計測方法

(1) 磁界による計測法の基礎

a) 構成 本位置計測法の構成を Fig.1 に示す。軸心が鉛直となるようにトンネル機械内に設けられたコイルへ発進坑内の発振器から、交流電流を給電する。そしてコイルから発せられた交流磁界によって地上のサーチコイルに誘起された電圧を選択レベル計により計測するシステムである。

b) 誘起電圧の空間分布 トンネル機械内のコイル(コイル半径： a 、コイル長： l 、巻数 N_1) に電流 I ($\sqrt{2}I_s \sin 2\pi ft$) が流れることによって発生する磁界 \vec{H} の x, y, z 成分 (H_x, H_y, H_z) と、水平位置 (x, y) および深さ z の間には、 $a \ll \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 、 $l \ll \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ のとき、

$$H_x = \frac{3 N_1 I a^2 (x/z)}{4 z^3 [1 + (x^2 + y^2)/z^2]^{5/2}} \dots\dots\dots (1)$$

$$H_y = \frac{3 N_1 I a^2 (y/z)}{4 z^3 [1 + (x^2 + y^2)/z^2]^{5/2}} \dots\dots\dots (2)$$

$$H_z = \frac{N_1 I a^2 \{2 - (x^2 + y^2)/z^2\}}{4 z^3 [1 + (x^2 + y^2)/z^2]^{5/2}} \dots\dots\dots (3)$$

が成り立つ⁷⁾。

この磁界によって巻数 N_2 のサーチコイルに誘起される電圧 $V(t)$ は、

$$V(t) = -N_2 \mu (\vec{S} \cdot d\vec{H}/dt) \dots\dots\dots (4)$$

となる。ただし、 μ ：コイル間の媒質の誘磁率、 \vec{S} ：サーチコイルの鎖交面の面積 S の大きさを持ち、鎖交面の法線方向を向くベクトル ($S \cos \phi_x \sin \phi_z$, $S \cos \phi_x \cos \phi_z$, $S \sin \phi_x$)

(2) 計測原理

a) 従来法 サーチコイルの鎖交面を鉛直、かつトンネルを築造しようとする計画線 (x 軸) に平行に保持し、計画線に直角な方向 (y 軸) にサーチコイルを移動する場合について考える。このとき、Fig.1 において、 $\phi_x = 0$ 、 $\phi_z = 0$ であり、かつ推進距離は他の方法により知ることができるので $x \ll z$ である。この条件を考え合わせ、式 (1)~(3) を式 (4) に代入すれば、誘起電圧 V (実効値) として

$$V = \alpha y/z^4 (1 + y^2/z^2)^{3/2} \dots\dots\dots (5)$$

を得る。ただし、 α は $3\pi f \mu N_1 N_2 a^2 S I / 2$ であり、一定値となる。また、 z も一定であることから、 V の最小値を示すサーチコイルの位置 ($y=0$) を、走査により求めれば、サーチコイル、すなわちトンネル機械の水平位置が得られる。この方法が著者らがこれまで用いてきたものであり⁵⁾、“計測法 2” と呼称する。

式 (5) の関係を空中での実験により確認した。ここで、周波数 f は近傍金属体による影響が小さい 220 Hz とし¹⁾、入力電圧 V_i は 30 V ないし 45 V とした。Fig.2 に示すように、 $y/z=0.1$ における誘起電圧 $V_{y/z=0.1}$ と、任意の y/z における V との比の理論値 $(y/z)/0.1 / (1 + y^2/z^2)^{2.5}$ と実験値は、深さ $z=1.1, 2.0, 2.8$ m の条件ではほぼ一致した。この結果、 $V_{y/z=0.1} / (1 + y^2/z^2)^{2.5}$ の関係が広範囲の y/z に対して成立する。さらに、 y/z が小さいときは、式 (5) の $(1 + y^2/z^2)^{2.5}$ を 1 として、近似式

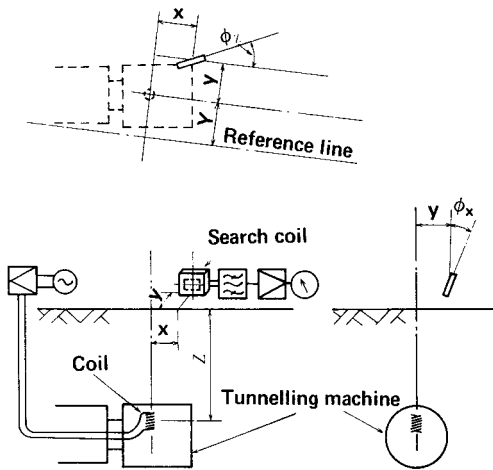


Fig. 1 Fundamental constitution of horizontal position measurement.

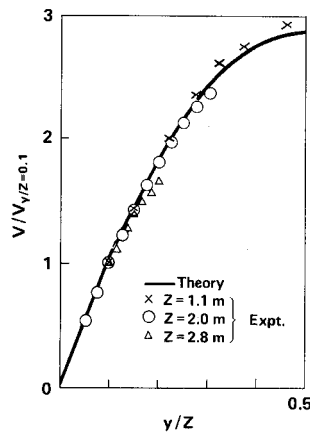


Fig. 2 Relations between induced voltage ratio and ratio of horizontal to vertical position of search coil.

$$V = \alpha y / z^4 \dots\dots\dots (6)$$

を得る。ここで、同じ実験を $z=5\text{ m}$ まで行ったところ、Fig. 3 に示すように、 $5 \leq y \leq 60\text{ cm}$ での V と y との比例関係は、深くなるにつれ広範囲で成立していることがわかる。

また、Fig. 3 の結果から水平変位 y が等しいときの誘起電圧 V と深さ z との関係を求めて Fig. 4 に示す。入力電圧 $V_i=30\text{ V}$ 、 45 V のいずれについても、 V が z の 4 乗に反比例する関係を示した。

以上の結果により、式 (5) の関係が成立していることが示された。

b) 新計測法 Fig. 5 の下図は、地中のトンネル機械と地上に設置した受信器の断面図であり、上図はサーチコイルの水平位置に対応する誘起電圧を示している。装置については、3.(2) において述べる。

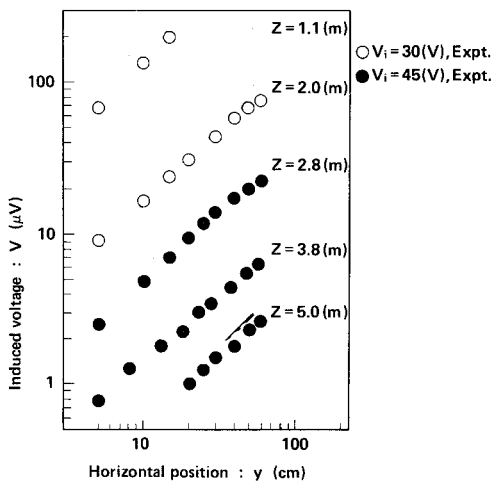


Fig. 3 Relations between induced voltage and horizontal position of search coil ($\phi_x = \phi_z = x = 0$).

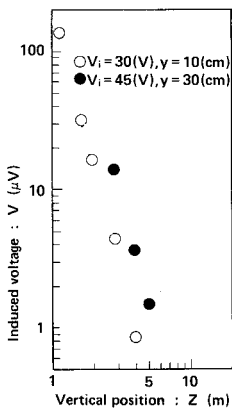


Fig. 4 Relations between induced voltage and vertical position of search coil.

Fig. 5 に示すように同一特性を有する 2 個のサーチコイルを計画線を中心に、鎖交面が離隔 $2L$ をもって正対し、かつ鉛直になるように設置する。このとき発進坑からみて左を正、 $|Y| \leq |L|$ のとき、式 (5) により、左側のサーチコイルへの誘起電圧 V_L 、右側のサーチコイルへの誘起電圧 V_R は、

$$V_L = \frac{\alpha(L-Y)}{z^4 |1+(L-Y)^2/z^2|^{5/2}} \dots\dots\dots (7)$$

$$V_R = \frac{\alpha(L+Y)}{z^4 |1+(L+Y)^2/z^2|^{5/2}} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

また、近似式 (6) によれば、 V_L 、 V_R は、

$$V_L = \alpha(L-Y')/z^4 \dots\dots\dots (9)$$

$$V_R = \alpha(L+Y')/z^4 \dots\dots\dots (10)$$

となる。

式 (9)、式 (10) を、2 個のサーチコイルの対称軸に対するトンネル機械の水平位置の近似値 Y' について解けば、

$$Y' = (V_R - V_L)L / (V_R + V_L) \dots\dots\dots (11)$$

を得る。

一方、式 (7)、式 (8) の 12 次方程式から水平位置 Y を解くことは困難であることから、次の方法で Y を解析的に求めた。 V と y との非線形性に起因する水平

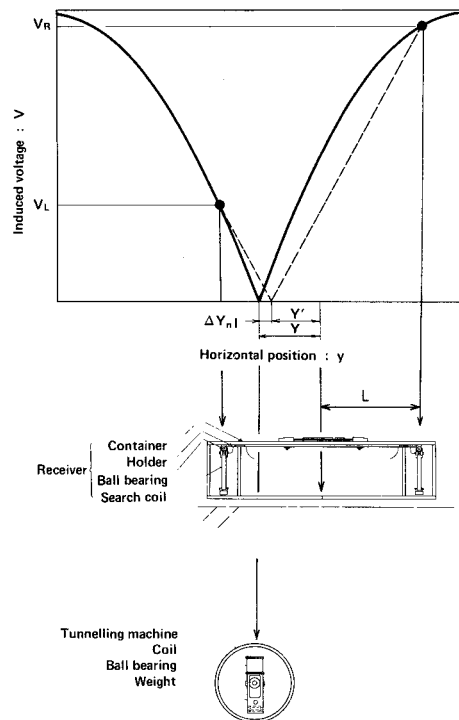


Fig. 5 Method to measure horizontal position of tunnelling machine.

位置 Y と近似値 Y' との差 $\Delta Y_{nl}(Y)$ は、式 (7), 式 (8) を式 (11) に代入して求めた Y' と Y との差をとることにより、

$$\Delta Y_{nl}(Y) = Y - Y' = Y - \left[\frac{\frac{(L+Y)}{|1+(L+Y)^2/z^2|^{5/2}} - \frac{(L-Y)}{|1+(L-Y)^2/z^2|^{5/2}}}{\frac{(L+Y)}{|1+(L+Y)^2/z^2|^{5/2}} + \frac{(L-Y)}{|1+(L-Y)^2/z^2|^{5/2}}}} \right] L \dots\dots\dots(12)$$

のように、 Y の関数として容易に与えることができる。ここで、 Y と Y' とはほぼ等しいので、 $\Delta Y_{nl}(Y) \approx \Delta Y_{nl}(Y')$ とみなし得る。ゆえに、

$$Y = Y' + \Delta Y_{nl}(Y) \approx Y' + \Delta Y_{nl}(Y') = 2Y' - \left[\frac{\frac{(L+Y')}{|1+(L+Y')^2/z^2|^{5/2}} - \frac{(L-Y')}{|1+(L-Y')^2/z^2|^{5/2}}}{\frac{(L+Y')}{|1+(L+Y')^2/z^2|^{5/2}} + \frac{(L-Y')}{|1+(L-Y')^2/z^2|^{5/2}}} \right] L \dots\dots\dots(13)$$

を得る。ここで、 Y' は式 (11) による。
 V と y との非線形性は、 L が大、 z が小であるほど大きくなる。ここでは、 L は装置化した 30 cm、 z は適用範囲 1.5~5 m の中で比較的小さい値 2 m という条件において、式 (12) に示した $\Delta Y_{nl}(Y)$ と Y との関係を実験で確認し、その結果を Fig. 6 に示した。 ΔY_{nl} は、たとえば、Fig. 2 における誘起電圧のたるみ量に深く関係しており、このたるみ量は誘起電圧の絶対値に比べて

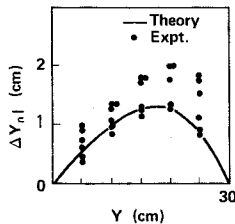


Fig. 6 Relation between difference due to nonlinearity of induced voltage and horizontal position.

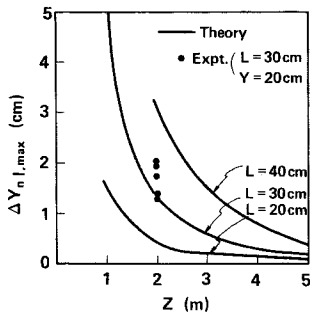


Fig. 7 Relations between maximum difference and vertical position.

小さい。そのため、Fig. 6 のばらつきは Fig. 2 に比べて大きい。理論値と実験値とはほぼ一致しているとみなせる。 $\Delta Y_{nl}(Y)$ は、 $Y \approx 0.6L$ 付近で最大となり $Y=0$ と $Y=L$ で 0 となる。ここで、最大値 $\Delta Y_{nl,max}$ を、 $L=20, 30, 40$ cm のそれぞれに対して、 $z=1\sim 5$ m の範囲で求め、Fig. 7 に示す。たとえば、 $L=30$ cm のとき、 $z > 2.5$ m では、 $\Delta Y_{nl,max}$ は 8 mm 以下ときわめて小さくなる。

水平位置を求める式 (13) の方法は、 $0 \leq Y \leq L$ の範囲で非線形性による誤差は小さいが、たとえば 2. (6) に述べる方法で z を与える必要があるため、迅速性にやや難がある。一方、 z を求める必要のない簡易な式 (11) の方法は、 z が小さいときには計測範囲を絞り、 V と y との非線形性による誤差を小さくすれば、より実用的である。式 (11) の方法を、(2), a) に述べた“計測法 2”と区別するために、“計測法 1”と呼称し、4. に述べる推進実験で実用性を確認した。

(3) 地中伝搬特性

土による磁界の減衰を実験により確認した。

実験場の土質は、深さ 0.6 m 程度までは黒色の表土、それ以下 3.3 m 程度までは、含水比 50~100%、間隙比 2.1~2.8、湿潤密度 1.3~1.5 g/cm³ の茶褐色で均一なローム層である。実験は、Fig. 1 において、 $x=y=0$ 、 $\phi_x = \pi/2$ の条件で行った。この条件は、サーチコイルの角度、位置設定精度が悪くとも、 V と z との関係を精度よく計測できることが特徴である。

このとき、理論値は、式 (1)~(4) から、

$$V = \pi f \mu N_1 N_2 a^2 S I_1 / z^3 = 2\alpha / z^3 \dots\dots\dots(14)$$

となる。式 (14) により得られた理論値、ならびに種々の条件における実験値は Fig. 8 のようになる。コイル単

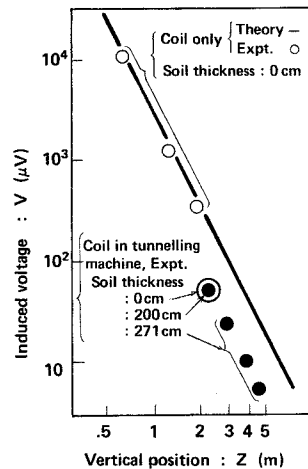


Fig. 8 Relations between induced voltage and vertical position of search coil ($\phi_x = \pi/2, x=y=0$).

体で、空中という条件では、白丸が示すように V が理論値どおり z の 3 乗に反比例した。同様に、コイルがトンネル機械内に設けられ、土中にあるという条件でも、黒丸が示すように、 V が z の 3 乗に反比例した。また、コイルがトンネル機械内に設けられた状態で、土の厚さが 0 cm, 200 cm のいずれの場合も、誘起電圧は等しかった。これらの結果から、周波数 220 Hz という低周波の場合、ロームでの減衰は空中での減衰と同様であると結論される。

また、本装置では、 $z \approx 2$ m でのデータが示すごとく、コイル単体の場合に対して、トンネル機械内に設けられた場合は約 3 分の 1 に減衰した。ここで、コイルを包むケース（厚さ 3 mm）、ならびにコイルが收容されるトンネル機械のヘッド（外径 340 mm, 厚さ 12 mm）の材質には、磁界の減衰を少なくするために、非磁性体で低導電率のステンレス鋼を用いている。なお、ケースにベークライトを用いた場合は、減衰はヘッドのみにより生じ、2 分の 1 であった。

(4) 最大計測深さ

最大計測深さ z_m は、選択レベル計の最小検出可能電圧 V_{\min} 、あるいは騒音レベル V_n によって制限される。コイル間隔 $L=30$ cm, 計測範囲 $L'=10$ cm とすれば、誘起電圧は $Y=L'$ のとき最小となる。さらに、コイル搭載部での減衰率 $\beta_1=1/2$, フェライト磁芯による増幅率 $\beta_2=4.1$ を式 (6) に考え合わせ、 V_{\min} は、

$$V_{\min} = \beta_1 \beta_2 \alpha (L-L') / z_m^3 \quad (15)$$

となる。

式 (15) から入力電圧 $V_i=50$ V (定格) で、 $z_m=5$ m を可能とする V_{\min} として、 $0.6 \mu\text{V}$ を得る。 $0.6 \mu\text{V}$ は、高感度の選択レベル計を用いれば計測可能な値であるとともに、騒音レベルが $0.1 \mu\text{V}$ 程度であったことから、本計測方法は目標の 5 m まで適用できると結論される。

(5) 自動車による磁界騒音

自動車のエンジン部は、幅広い周波数帯域をもつ電磁界を放出し、本計測に用いる 220 Hz も含まれている。そこで、2 車線、車線幅員 3.75 m の国道の傍らにて、路肩から 1.4 m の位置に、サーチコイルの鎖交面を鉛直かつ道路に平行に設置して、騒音レベルを計測し、水平位置計測への影響を確認した。

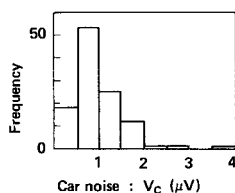


Fig. 9 Amount of scatter in car noise.

その結果、Fig. 9 に示すように、129 台のうち 85 % が $0.5 \mu\text{V}$ 以上の騒音レベルであり、Fig. 3 に示した誘起電圧に比較すると、土かぶりが多い場合には、誘起電圧の計測に対して影響が大きい。ゆえに、誘起電圧計測は、自動車を受信器の直前を通っていないときに行う必要がある。また、2. (2), a) に述べた計測法 2 の場合でも、このノイズは誘起電圧の最小値の探索を困難にする。

しかしながら、3. に述べる施工実験の結果では、“計測法 1” の場合、電圧の実計測時間は、片側のサーチコイルに対して約 10 秒であり、自動車の通行が途切れたときに計測することが十分可能である。一方、計測法 2 の実計測時間は約 40 秒であり、“計測法 1” に比べると適用性は劣る。

(6) 深さ計測

2. (2), b) の条件と同じく、 $\phi_x = \phi_z = x = 0$ における一対のコイルへの誘起電圧 V_L と V_R を加えると、すなわち、式 (9) と式 (10) の辺々を加算すると、未知数 Y が消去され、深さ z を一義的に与える式、

$$z = 2\alpha L / (V_L + V_R)^{1/4} \quad (16)$$

を得る。

また、2. (3) の条件と同じく、 $x=y=0$, $\phi_x = \pi/2$ とすれば、サーチコイルの水平位置、角度によって誘起電圧が大きく変化しないように、たとえば、 $L=30$ cm, $z=2\sim 5$ m のとき、誘起電圧は 2. (2), b) の条件における $(V_L + V_R)$ に対して 2.2~2.6 倍となるのでノイズの影響を受けにくくなる、などの理由から深さをより精度よく知ることができる。2. (3) の条件のとき、深さ z は式 (14) から

$$z = (2\alpha/3/V)^{1/3} \quad (17)$$

となる。

式 (16) あるいは式 (17) から、任意の z において、 α を実験的にあらかじめ校正しておけば、誘起電圧から容易に深さ z を求めることもできる。

3. トンネル施工実験

(1) トンネル工法の概要

本水平位置計測装置を適用したトンネル工法のシステムを Fig. 10 に示す。このシステムは、推進方向を修正しつつトンネルを圧入無排土式に形成するトンネル機械⁹⁾、トンネル機械に後続する埋設用鋼管、鋼管を押し押管装置、トンネル機械と押管装置に設けられた油圧ジャッキを作動させる高圧油を供給する動力装置、トンネル機械の姿勢角などを表示しオペレーターがそれに基づいて機械を操作することができる制御盤、そして本論文に述べている水平位置計測装置から構成されている。

トンネル機械は次のごとく推進される。はじめに、ヘッ

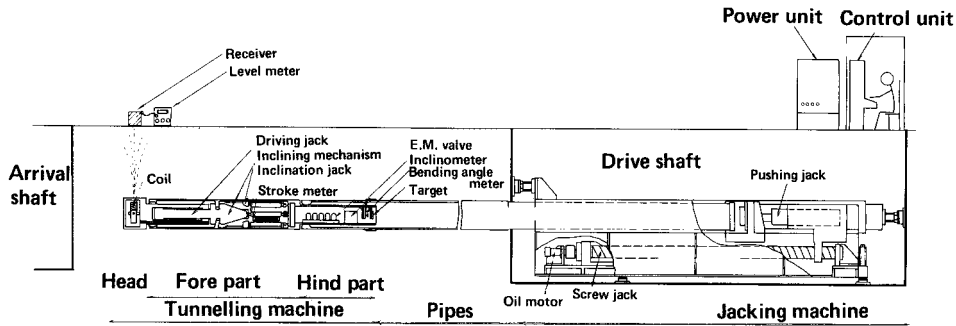


Fig. 10 Pipe jacking method.

ドを方向修正する方へ傾けた後、前部の推進ジャッキを伸ばしてヘッドを土中に圧入推進させる。次に、推進ジャッキを縮めると同時に、押管装置の押管ジャッキを伸ばして、トンネル機械の前部と後部、ならびに鋼管を同時に推進させる。この過程を繰り返すことにより、鋼管は逐次埋設される。

(2) 水平位置計測装置

2.(3)に述べた、“計測法1”において発信用のコイルと一対のサーチコイルに要求される幾何学的条件を調整することなく満足できるように、Fig. 5 下図に示した装置を製作した。

発信用のコイルは、連結された重りの重力作用により軸心が鉛直となるように、回転と傾斜に対応できる2軸のボールベアリングを介して、トンネル機械のヘッドに取り付けられている。また、1対のサーチコイルは、その鎖交面が正対し、かつサーチコイル自身の重力作用により鉛直となるようにボールベアリングを介して受信器のホルダーに取り付けられている。したがって、埋設管の押込量から知られる推進地点において、サーチコイルの鎖交面が推進計画線とほぼ平行になるように受信器を単に置くのみで、計測の準備は終了する。

また、サーチコイル間隔 $2L$ は次のように決めた。それまでの軌跡を延長することにより、 $Y < 0.1$ m 程度の精度で受信器を設置することができる。このとき、サーチコイルと発信コイルとの水平距離 y は、一方が $(L-0.1)$ m、他方が $(L+0.1)$ m となる。そして、本工法の適用深さが $1.5 \sim 5$ m であることから、 $y = (L+0.1)$ m、 $z = 1.5$ m の場合に、 y/z は最大値となる。一方、Fig. 2 から、誘起電圧 V と y との線形性が高いのは、 $y/z \leq 0.25$ の範囲である。ゆえに、 $(L+0.1)/1.5 \leq 0.25$ の条件式が得られ、 $L \leq 0.3$ m となる。ここで、 L が大きいほど、誘起電圧が大きくなり、ノイズによる影響も小さくなるので、 L を 0.3 m とした。

発信用のコイルは、フェライト棒 ($\phi 10$ mm $\times 70$ mm) を磁芯とした巻数 1500 回のチョークコイル (コイル内

径 14 mm、外径 40 mm、 $L_1 = 97$ mH、 $R_1 = 5.4 \Omega$) であり、サーチコイルは、有効断面積 32 cm²、巻数 2000 回の空芯ループコイル ($L_2 = 256$ mH、 $R_2 = 205 \Omega$) である。

なお、磁界への影響を少なくするため、発信用のコイルを搭載しているヘッド同様に、受信器についても、サーチコイルを支持する部材にはステンレス鋼を用いるとともに、ケース全体はデルリン樹脂を用いた。

(3) 計測結果

前節に述べた実験装置を用い、深さ約 2.5 m で、曲率半径 200 m の曲線を含む距離 90 m のトンネル施工実験を行った。この実験において、2. に述べた計測法1、ならびに計測法2によって、トンネル機械が 2.5 m 進むごとに推進計画線からの位置を計測し、方向修正を実施した。そして、水平位置計測の精度を確認するため、推進終了後、埋設部全体を開削し、埋設管の水平位置を光学測量した。

実験場の土質は、深さ 0.2 m 程度までは暗褐色の表土、それ以下 1.8 m 程度までは、含水比 $80 \sim 120\%$ 、間隙比 $2.3 \sim 3.9$ 、湿潤密度 $1.3 \sim 1.5$ g/cm³ の茶褐色のローム、それ以下 2.5 m 程度までは、含水比 $55 \sim 60\%$ 、間隙比 $1.5 \sim 1.6$ 、湿潤密度 $1.64 \sim 1.67$ g/cm³ の灰色粘土である。

計測結果を Fig. 11 に示す。光学測量値を実線で、計測法1による値を○印で、計測法2による値を□印で表わしている。光学測量値、すなわちトンネル機械に後続する鋼管の位置は、完全には本水平位置計測法による値、すなわちトンネル機械のヘッドの通った位置と同一のものではないが、本水平位置計測法による値は光学測量値によく一致した。ここで、光学測量値との差の度数分布をとり、Fig. 12 に示す。計測法1は、計測法2よりばらつきが少ない結果となり、標準偏差 σ は 1.36 cm であった。また、差の最大値は両計測法とも約 4 cm であった。なお、両計測法とも平均値が 0 でないのは、発信側、もしくは受信側のコイルの鉛直度の誤差に起因すると考えられる。なお、ここでは約 1 m の粘土層を含

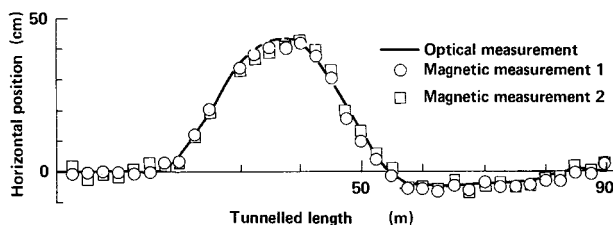


Fig. 11 Measured horizontal positions of tunnelling machine.

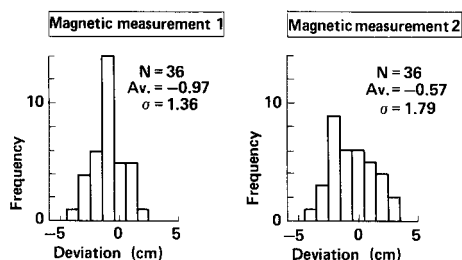


Fig. 12 Amount of scatter in measured values.

んでいるが、ほとんどがロームの場合⁵⁾、砂の場合⁹⁾についても磁界による計測法の有効性は確認されている。

また、計測時間は、計測法1の場合、サーチコイルが静止するまで10~20秒、両オサーチコイルへの誘起電圧を読み取る時間10秒×2回、合計30~40秒であった。一方、計測法2の場合、サーチコイルの鉛直度の調整に約50秒、走査に約40秒、合計約90秒であった。この結果、計測法1が計測法2より迅速に計測できることが示された。

4. まとめ

従来、トンネル機械の絶対水平位置計測は、トンネル機械の長距離・曲線施工を妨げていた大きな問題の1つであった。これに対して、本論文では、土による減衰や近傍金属体による影響が少ない低周波の磁界を媒介とし、安価で感度の高いコイルを磁界測定センサとする方法において、サーチコイルへの誘起電圧の空間分布特性と振り子構造における重力作用を応用することにより、サーチコイルの位置・角度の調整や走査が不要で、高速かつ高精度な計測法を提案した。さらにトンネル機械に適用して、トンネル施工実験を行った結果を示した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 発信コイルの中心軸、ならびにサーチコイルの鎖交面が鉛直、かつ深さが一定のとき、サーチコイルの誘起電圧は、サーチコイルと発信コイルとの水平距離にほぼ比例する。

(2) 間隔 $2L$ なる一対のサーチコイルにおいて、左側の誘起電圧を V_L 、右側の誘起電圧を V_R とすれば、

サーチコイルの対称軸からの発信コイルの水平位置 Y は次式で与えられる。

$$Y = (V_R - V_L)L / (V_R + V_L)$$

(3) 本実験で選定した周波数220 Hzの場合、ロームでの減衰は空中での減衰と同等であった。また、発信コイルを収容するトンネル機械による減衰は $1/2 \sim 1/3$ であった。

(4) 自動車による磁界騒音レベルは、本位置計測に対して影響を及ぼすが、本位置計測法の実計測時間が約10秒であることから実用上は問題ない。

(5) 一対のサーチコイルを、鎖交面が正対する位置にて、ステンレス製のホルダーにボールベアリングを介して取り付け、これらをデルリン樹脂製のケースに収めることにより、サーチコイルに要求される幾何学的条件を、調整することなく満たす、操作性のよい受信器を実現した。

(6) 深さ約2.5 mのトンネル施工実験において、トンネル施工後の開削による光学測量値と、本水平位置計測値との差の最大値は約4 cm、差のばらつきの標準偏差は1.36 cmであった。また、計測時間は、サーチコイルが静止するまで10~20秒、両サーチコイルの誘起電圧を読み取る時間が10秒×2回、合計30~40秒であった。

(7) 簡易かつ高精度な本水平位置計測装置の開発により、曲率半径200 mの曲線を含む、距離90 mの長距離・曲線施工を実現できた。

今後は、深さ、発信コイルへの入力電圧、選択増幅器の計測精度、などに起因する計測誤差、ならびに近傍金属体による計測誤差について研究を進める。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、適切なるご教示と助言を頂いた茨城電気通信研究所 小島伸哉部長、内田直也統括役、山岸康利室長、ならびに森光武則調査役に感謝する。

また、本研究の基礎を築かれた有岡良祐調査員、森純男社員に感謝する。

参考文献

- 1) 開田生一：小口徑推進工法，土木施工，Vol. 22, No. 6,

- pp. 27~36, 1981.
- 2) 本岡誠一・奥島基良：インパルス音源による地下埋設物の探査実験，音学誌，Vol.33，No.6，pp.311~318，1977.
 - 3) 荒井郁男・鈴木 務：地中レーダシステム，電子通信学会論文誌，Vol.J66-B，No.6，pp.713~720，1983.
 - 4) 金子隆司・山崎 智・長谷川将・楠 迪彦・貝津良輔：心線給電法による地下埋設物探知，信学技報，CS 80-82，1980，08.
 - 5) 梅津孝雄・野村由司彦・保科 宏・塩見博司：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.J67-B，No.6，pp.690~691，1984.
 - 6) 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.J67-B，No.6，pp.615~621，1984.
 - 7) 副島輝積・堀内和男：電磁気学，電子通信学会編，コロナ社版，pp.212~216，1964.
 - 8) 野村由司彦・保科 宏・塩見博司・梅津孝雄：方向制御可能なトンネル機械の設計と特性，土木学会論文集，No.352，pp.99~107，1984.
 - 9) Nomura, Y., Hoshina, H., Shiomi, H. and Umezu, T. : Pipe jacking method for long curve construction, Jour. of Construction Division (ASCE), Vol.111, No.CO2, 1985.

(1984.6.30・受付)
