

36. 電磁式地中位置探査システムの開発

東亜建設工業(株) : ○松島 弘樹

1. はじめに

近年、既設構造物直下やタンク基礎などの液状化対策として薬液注入工法を用いた地盤改良工法が開発され、その需要は高まりつつある。

計画削孔路線に対して精度の高い曲線削孔を実現するには、ロッド先端の位置・姿勢を的確かつ迅速に捉える必要がある。

こうした計測の手法として、従来は削孔法線鉛直上から地中位置・深度を計測する方法や、ジャイロと呼ばれる計測器をロッド内に挿入して計測する方法が多く採用されてきた。

しかしながら、削孔法線延長上に構造物がある場合には計測そのものが不可能になること、あるいは計測器をロッド内に挿入するために削孔作業を一時中断しなければならないという短所も見られる。

そこで当社ではより効率的で汎用性に優れた削孔管理を行うために、ロッド先端に取り付けた発信器から発信される磁界信号を、3次元的にかつロッド継足し時間程度の短時間で検出できるシステムを開発した。以下にその概要を報告する。

2. システムの特長

本システムの特長を以下に示す。(図-1 参照)

(1) リアルタイム性

オペレータが先端位置情報をリアルタイムにモニタ画面で確認しながら誘導削孔作業ができるため、到達目標地点に対して高精度の削孔が実現可能である。

(2) 削孔時間の短縮化

計測器をロッド内に挿入する必要がなく、削孔を中断させることなく計測が可能であることから削孔時間も短縮される。

(3) 構造物直下にも対応

ロッド先端に取り付けた発信器からの磁界信号を地上に設置した受信器で受信するため、構造物など前方にある障害物の影響を受けずに、先端位置情報を検出することが可能である。

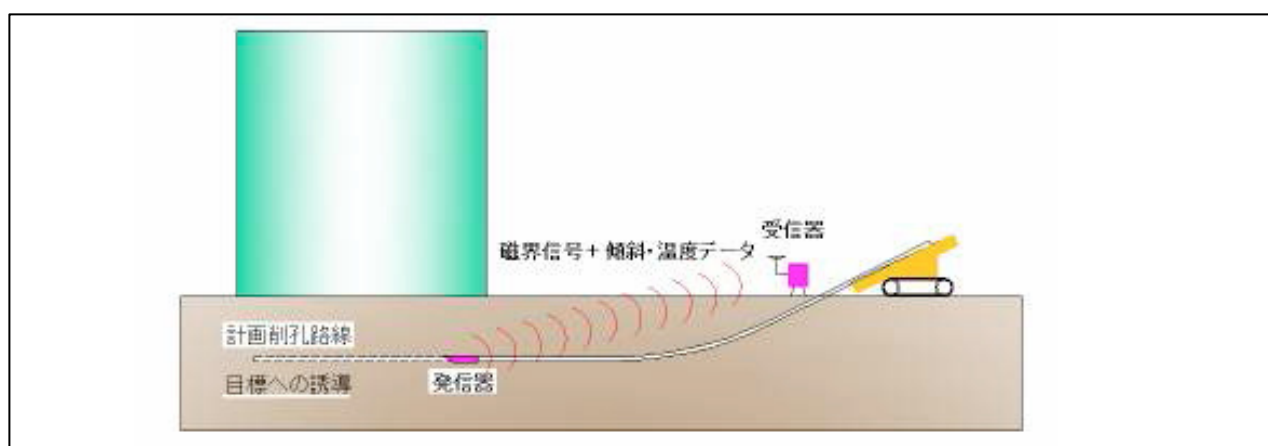


図-1 計測イメージ図

3. システムの概要

3-1 機器構成

本システムは、ロッド先端に接続される‘発信器’と、発信される磁界信号データ（ロール角・ピッチ角および温度データ）を事前測量による既知点に設置した3台の‘受信器’により受信し、これらの位置情報を上位パソコンに伝送し、表示する。（図-2）

受信する磁界信号の強さから、地中にある発信器の位置、すなわちロッド先端位置を検出するものである。

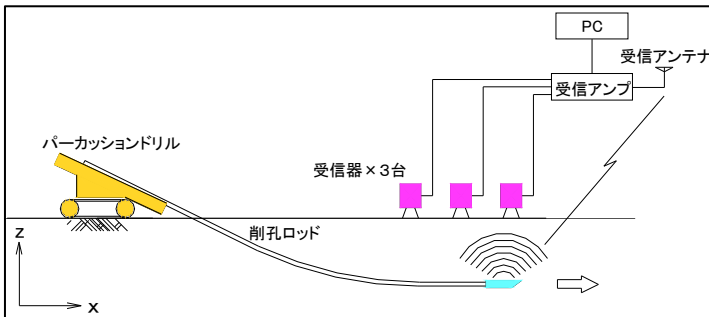


図-2 システム構成図

(1) 発信器

‘発信器’（写真-1）は単管構造で、外径はφ120[mm]、内径はボーリングロッドと同一のφ50[mm]であり、また継手構造もロッドと同一である。外周には耐摩耗性に優れた送信コイルが巻かれておりセラミック外装で保護されている。内部にはピッチ角とロール角の2軸が計測できる傾斜計・温度センサ及びこれらと無線送信器などへの電源を供給するための電源装置が取り外し可能な構造で埋め込まれている。



写真-1 発信器

(2) 受信器

受信部は受信アンプ（写真-3）とデータ受信アンテナ及び測定用アンテナ×3台（以下‘受信器’と称す）から構成される。（写真-2、図-3）

受信した傾斜データ、温度データおよび発信器から発生する無変調磁気信号の受信強度を測定して表示するとともに、RS-232Cで接続された上位コンピュータに受信データを転送する。（写真-4）



写真-2 受信器

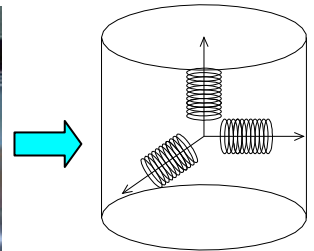


図-3 受信コイル



写真-3 受信アンプ

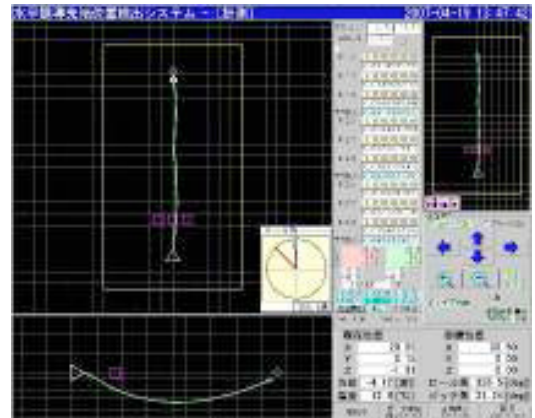


写真-4 モニタ画面例

3-2 システムの仕様

本システムは、発信器～受信器間の距離が10[m]～40[m]の範囲内において計測が可能となる。また適応については液状化対策における削孔との観点から相応の耐衝撃性を考慮して設計されている。

表-1 に発信器の基本仕様を示す。

表-1 発信器の基本仕様

項目		仕様	
発信器	測定レンジ	傾斜角(ピッチ計)	±45°
		回転角(ロール計)	±180°
	温度計	測定範囲	-10°C～+110°C
		温度精度	±2°C以内
	寸法	外径	φ120mm
		長さ	800mm
耐衝撃性		30Grms	

3-3 電磁誘導現象を利用した地中位置探査法の理論

本システムは既に述べてきたように地中の発信器より発信される磁界信号を地上の受信器にて受信し、その磁界強度から位置を求めるものであるが、これは電磁誘導現象を利用した地中位置探査法¹⁾の理論に基づくものである。

以下に理論を紹介する。

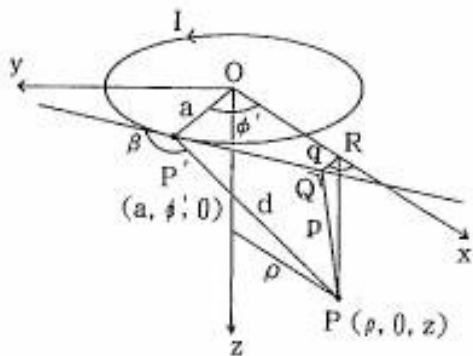


図-4 円形コイルの作る磁界

図-4 に示す座標系において、円周上の点 $P'(a, \phi', 0)$ における電流素片 dS による任意の点 P の微小磁界を dH とする。 PP' の距離を d 、 P' における円周への接線と PP' のなす角 β とすると

$$dH = \frac{I \sin \beta}{4\pi d^2} dS$$

であり、方向は $\triangle PQP'$ 面に垂直である。 dH の水平分力 dH_h および垂直分力 dH_z は

$$dH_h = dH \times z/p \quad dH_z = dH \times q/p$$

$$dH_\rho = dH_h \times \cos \phi'$$

ここで、 $dS = a \cdot d\phi'$ と置き $\sin \beta = p/d$ 、 $q = a - \rho \cos \phi'$ の関係を用いると

$$dH_\rho = \frac{aI z \cos \phi'}{4\pi d^3} d\phi'$$

$$dH_z = \frac{aI (a - \rho \cos \phi')}{4\pi d^3} d\phi'$$

ただし、

$$d = \sqrt{a^2 + \rho^2 + z^2 - 2a\rho \cos \phi'}$$

さらに変形して

$$d = \sqrt{(a + \rho)^2 + z^2} \sqrt{1 - k^2 \cos^2(\phi'/2)}$$

$$k^2 = 4a\rho / \{(a + \rho)^2 + z^2\}$$

$$\cos \phi' = (a^2 + \rho^2 + z^2 - d^2) / 2a\rho$$

とし、 $\phi' = \pi - 2\theta$ とすると次式のように楕円積分であらわすことができる。

$$H_\rho = \frac{I}{2\pi} \frac{z}{\rho \sqrt{(a + \rho)^2 + z^2}} \times \left[\frac{a^2 + \rho^2 + z^2}{(a - \rho)^2 + z^2} E(k) - K(k) \right]$$

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\rho \sqrt{(a + \rho)^2 + z^2}} \times \left[\frac{a^2 - \rho^2 - z^2}{(a - \rho)^2 + z^2} E(k) + K(k) \right]$$

ただし、 K 、 E は完全楕円積分であり、次のような関数である。

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}}$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

以上により、コイルの中心 ($z=0, \rho=0$) における磁界は $H_\rho=0$ となり、また $E(0)=K(0)=\pi/2$ の関係から

$$H_0 = I/2a$$

と表すことが出来る。

一方、受信器に誘起される電圧 e はコイル面内

の磁界が一様であるとする次式で表わされる。

$$e = 2\pi f \mu_0 N_r A H \sin \theta \quad [\text{V}]$$

ただし、

- f : 周波数
- μ_0 : 真空（空気中）における透磁率
- N_r : コイル巻数
- A : コイルの面積

従って、受信器に誘起される磁界強度すなわち電圧を測定することで発信器の地中における位置探査が可能となる。

4. 実証実験

本システムの検出動作確認及び検出精度を確認するために、発信器をロッド先端に装着して削孔実験を愛知県甚目寺で行った。

(1) 概要

① 実験用地の土質条件 (図-5)

耕作前の田圃地であるが、地表から 50[cm] 以深は細砂層となる。削孔予定深度 (GL-4[m] 程度) までは N 値 10 程度である。

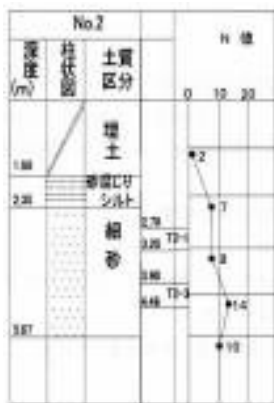


図-5 土質柱状図

② 削孔機械及びロッド

削孔機械	クローラ式パーカシヨンドリル
ロッド	曲線削孔用 $\phi 75 \times L3.0[\text{m}]$
	最小半径 R25[m]

③ 曲線削孔形状

地表面に対して 25 度の角度で削孔を開始し、その後半径 30[m] の単円を描くように削孔した。

(図-6)

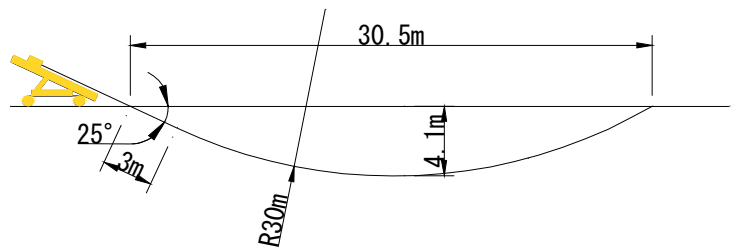


図-6 実証実験図

(2) 結果

N 値 10 程度の飽和砂地盤における検出動作の有効性について確認することができた。検出精度についても、削孔距離に対して約 2[%] と概ね良好な結果が得られた。今後はより現場条件に則した条件での削孔実験を重ねていくことでさらにシステムの完成度を一層高めていく所存である。

5. おわりに

我が国は世界でも有数の地震国家とも言われており、能登や中越地方でも多大なる被害を蒙ったことは記憶に新しい。こうした背景を受けて、空港施設や発電施設などの重要構造物はもとよりライフラインの確保について整備を進めることが急務であり、地盤改良に伴う削孔技術のニーズは今後ますます高まることが予測される。

最後になりますが、本システムの開発・製作ならびに現場での実証実験にご協力いただいた関係各位に紙面をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 楠見晴重・谷口敬一郎・加々美幸一：「電磁誘導法による推進管の探査方法について」, 物理探査第 46 巻, 1993