

シールド掘削機用マルチアンテナ地中レーダシステムの開発

Development of Underground Radar with Multiple Antennas for Shield Machine

神戸造船所 谷本 公正*¹
 技術本部 松永 聖*² 有川 究*³

シールド掘削機において、掘削機前方の杭（くい）、転石等の存在は施工上大きな問題となり、これら障害物をできるだけ早く検知し最善の処置をとる必要がある。これらの障害物の探査にはシールド掘削機のカッタ前面に設けられた地中レーダが使用されているが、地中を伝搬する電磁波は急速に減衰し、長距離の探査は困難である。この長距離の探査を目的として、地中レーダアンテナを複数化（マルチアンテナ）し、電磁波伝搬シミュレーション及び地盤実験により、機能の確認及び改良を行った。その結果、探査信号は約 17 dB 増幅でき、単アンテナに比べて 1.5~2 倍遠方の探査が可能であることが検証できた。

Using a shield machine in tunneling involves problems such as piles and rocks, which must be located and dealt with as quickly as possible. Underground radar on the front of the shield machine is used to do so. The radar radiates an electromagnetic wave ahead of the shield machine and the reflected wave is checked. This is, however, difficult to do over a long distance because electromagnetic waves attenuates rapidly. To compensate, we multiplied the number of antennas, confirmed performance in ground experiments, and strengthened electromagnetic waves. We also checked and improved function. The resulting exploratory signal was increased to 17 dB, enabling detection at a distance.

1. ま え が き

主に土砂地盤中を掘進するシールド式トンネル掘削機が、土砂の崩壊を防ぎながら、その内部で完全に掘削作業・覆工作業を行いトンネルを構築していく工法をシールド工法という（図 1 参照）。近年都市トンネルは、ふくそうする地下空間での施工が多くなり、既設の構造物に影響を与えずに安全な工事を行うことは重要な要素である。そこで、掘削中の切羽前面の監視は、施工上有効な管理項目である。地中又は泥水中で、地盤を乱さず非接触で地中を探査する技術は、主要なものとして、電磁誘導法、電磁波法（地中レーダ）、比抵抗法、衝撃弾性波法がある。これらの現有技術の中で、切羽前面に位置する杭（くい）、転石等の地中障害物を探査するためには、これまでの種々の調査と実験により、地中レーダが最も有効な手段であることが確認された。

本研究はシールド掘削機のカッタ前面に地中レーダを設け、電磁波による地中探査を目的としたものである。また、シールドトンネル掘進機用地中レーダの高度化を図るために、電磁波伝搬シミュレーションによる伝搬挙動を把握し、また探査距離の延長を目標として、送信アンテナを複数化（マルチアンテナ）した地中

レーダシステムを創案・作成し、そのシステムの地盤実験による検出性の確認を実施した。

2. 探 査 原 理

一般的な地中レーダの探査原理を図 2 で説明する。送信アンテナより地山に向けて放射された電磁波パルスは、シールドトンネル掘進機周辺の泥水、加泥剤の層や緩み、崩壊により発生する空洞や密度の低い領域を通過してこれらと比誘電率の異なる地山との境界面で一部反射し残りは透過する。この反射波を受信することにより、地山境界面までの距離が求められ、その変化により、緩みや崩壊の発生を検知することができる。

同様に、地山中の障害物も地山と比誘電率が異なるため反射波が生じ、それを受信することによりその存在を知ることができる。

3. 長距離探査のための技術的課題

3.1 地山による電磁波の減衰

電磁波は空中ではほとんど減衰しないが、土などの電波吸収物体中を通過するときは急激に減衰する。減衰は各土質の導電率と

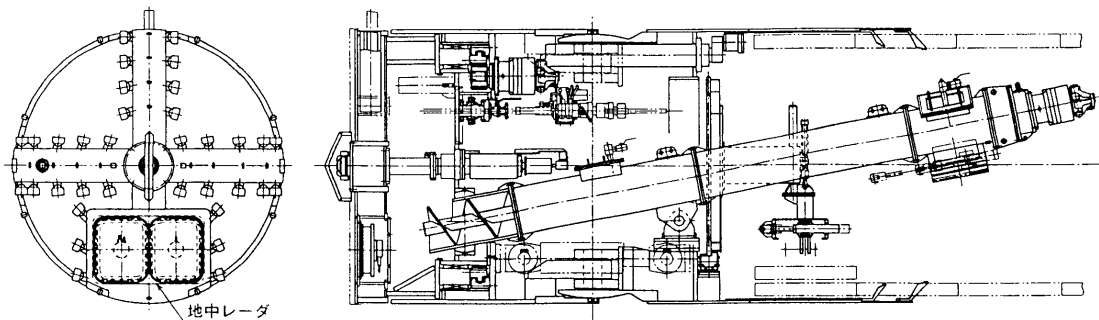


図 1 シールドトンネル掘削機の概要 地中レーダシステムを搭載したシールドトンネル掘削機の概要を示す。
 Schematic of shield machine

*¹ 建設機械部設計課
 *² 高砂研究所構造研究室主務
 *³ 高砂研究所建機研究推進室

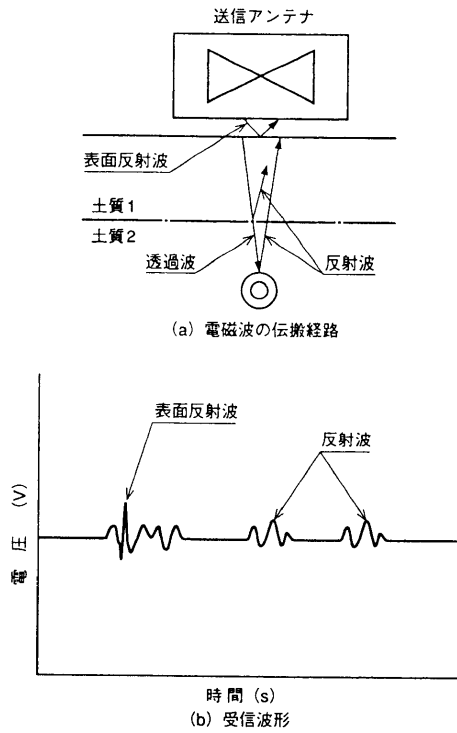


図2 地中レーダシステムの原理 送信アンテナより放射された電磁波は地中で反射しその反射波を受信アンテナで受信することで地中の状態を探査できる。
Principle of underground radar system

比誘電率によって式(1)のように表される⁽¹⁾。

$$E_L = E_0 \exp(-\alpha L) \tag{1}$$

ここで、

- E_0 : 初期電界強度
- E_L : 距離 L を通過した後の電界強度
- L : 距離
- α : 減衰定数

減衰定数 α は式(2)により求められる。

$$\alpha = 60\pi \sqrt{\epsilon_r} / \rho \tag{2}$$

ここで、

- ρ : 比抵抗 (導電率の逆数)
- ϵ_r : 比誘電率

3. 2 従来の地中レーダシステムの限界

長距離探査を実現するには前記式(1)により E_0 (初期電界強度) を大きくすれば良い。その方法として送信アンテナへの印加電圧を上げる方法が考えられるが、送信回路中のトランジスタの耐圧に限界があり、現状以上に送信アンテナへの印加電圧を上げることは困難である⁽²⁾。

4. マルチアンテナによる長距離探査

3章に示した理由により、アンテナ単体の性能を上げることは困難である。そのため、アンテナの個数を増やし、複数のアンテナから同時に電磁波を放射する(マルチアンテナ)こととした。

このことを可能とするために、電磁波を放射するタイミングを制御する装置を開発した。

マルチアンテナの効果を以下に示す。

- (1) アンテナの個数が増えるため全体の送信電力が大きくなることにより、 E_0 (初期電界強度) が大きくなる。

- (2) 1個のアンテナから放射される電磁波は球面波に近く、減衰が大きい。複数のアンテナから放射された電磁波は互いに重なり合って平面波に近づく。平面波は球面波に比べ減衰が少ない。本方式の効果をシミュレーションで検証したうえで、実験機を製作し、地盤実験による地中レーダ長距離化の確認を実施した。

5. 電磁波搬シミュレーションによるレーダ反射波挙動把握

電磁波の波動現象は、MAXWELLの回転方程式で表される。K. S. Yeeにより提案されたFD-TD (finite-difference-time-domain) 法⁽³⁾はMAXWELLの回転方程式を微分原理により差分方程式に変形し、電場 H と磁場 B 差分方程式に変形し、電場 E と磁場 H を時間と空間で計算していくものである。二次元モデルでは以下の式(3), (4), (5)で表される。

$$H_z^{n+1/2}(i, j+1/2) = H_z^{n-1/2}(i, j+1/2) + c1\{E_y^n(i, j+1) - E_y^n(i, j)\} \tag{3}$$

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) = H_z^{n-1/2}(i+1/2, j) + c1\{E_x^n(i+1, j) - E_x^n(i, j)\} \tag{4}$$

$$H_y^{n+1/2}(i, j) = c2E_x^{n-1}(i, j) - c3\{E_y^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_z^{n+1/2}(i, j-1/2) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j) + H_z^{n+1/2}(i-1/2, j)\} \tag{5}$$

ここで、

i, j : 空間座標

n : タイムステップ数

$c1 \sim c3$: 媒質定数や $\Delta s, \Delta t$ から成る係数

($\Delta s, \Delta t$ はそれぞれ空間と時間の増分)

ここではFD-TD法を用いて二次元モデルを解析するシミュレーション方法を開発した。

5. 1 電磁波の伝搬挙動

図3は不飽和砂中の空洞による伝搬挙動を解析したものである。空洞による反射の様子を把握することができる。図4は同じモデルで発信源(アンテナ)を移動することにより走査画像(Bスコープ表示)を求めたものである。また表1は本ケースにおける実験結果を示している。

5. 2 アンテナ間隔の検討

図5は2個の発信アンテナをそれぞれ $\lambda, 1/2\lambda, 1/4\lambda, 1/8\lambda$ の間隔に併設した場合のシミュレーション結果を示す(λ は電磁波の波長を示す)。この結果、アンテナの個数を増やすと電磁波反射伝搬レベルが高くなるのが分かる。また、同じアンテナ個数でも間隔 $1/2\lambda$ 及び $1/4\lambda$ の場合、電磁波反射伝搬レベルが高く

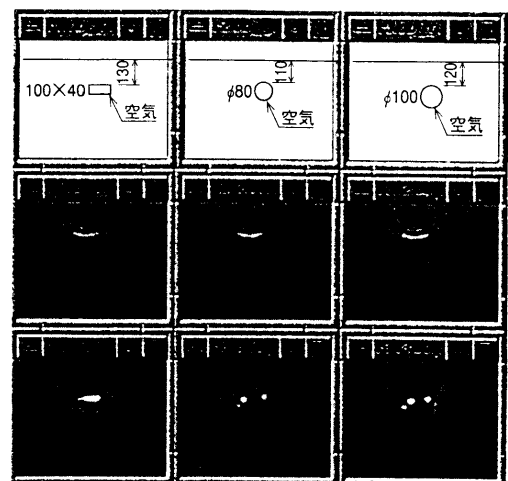


図3 空洞による電磁波伝搬挙動 不飽和砂中の空洞による伝搬挙動のシミュレーション結果を示す。
Propagation of electromagnetic waves from cavity



図4 空洞による電磁波 B スコープ表示 不飽和砂中の空洞による伝搬挙動 (B スコープ表示) のシミュレーション結果を示す。
B scope display of prospecting cavity

なり、本間隔でのアンテナ併設が有効であることが分かる。

6. マルチアンテナの検証実験

前記電磁波の伝搬シミュレーションから、複数個の送信アンテナの併用により受信電波レベルが高くなることが確認されたため、送信アンテナを複数化 (マルチアンテナ) し、地盤実験による地中レーダ長距離化の確認を実施した。

送信アンテナ 4 台を同時に制御できるマルチアンテナ制御装置を開発し、送信アンテナと受信アンテナを組合せて実験を行った。この実験により、単アンテナに比べてマルチアンテナの有効性を検証した。

6.1 マルチアンテナ制御装置

アンテナ配置の 1 例として、送信アンテナを 4 台、受信アンテナを 1 台とした場合のアンテナ配置を図 6 に示す。

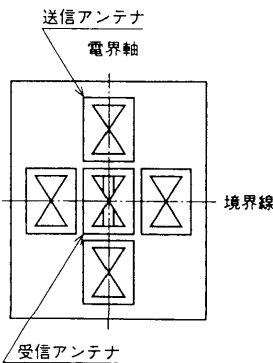


図6 アンテナ配置 (4 送信) 送信アンテナを 4 台、受信アンテナを 1 台とした場合のアンテナ配置を示す。
Layout of antennas (4 transmission)

表1 空洞による実験結果
Experimental result of prospecting cavity

B スコープ			
備考			
容器表面積	$A=14 \times 11 = 154 \text{cm}^2$	90° 中心から 45° ずつ受けると仮定すると $A=6 \times 15 = 90 \text{cm}^2$	90° 同左条件とすると $A=7.8 \times 15 = 117 \text{cm}^2$

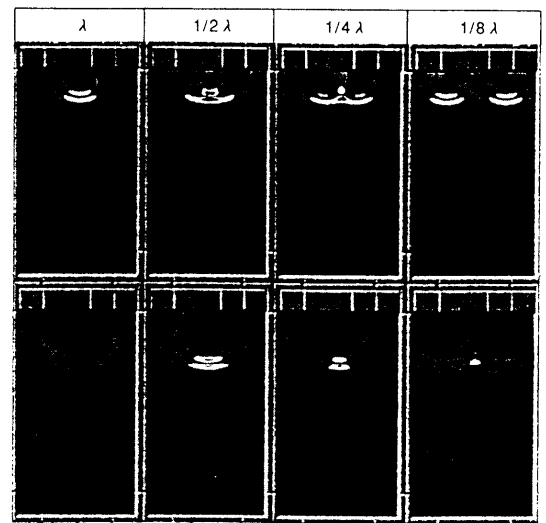



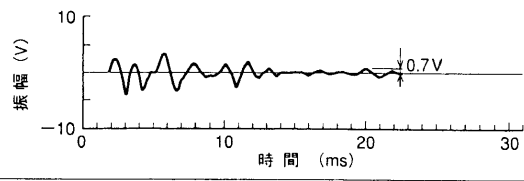

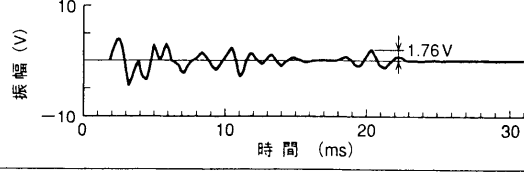
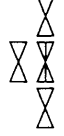
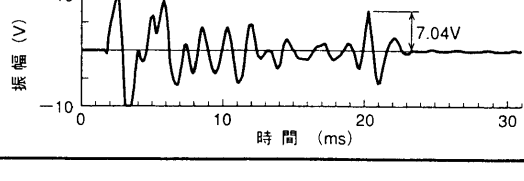
図5 アンテナ配置の検討 2 個の発信アンテナをそれぞれ λ , $1/2 \lambda$, $1/4 \lambda$, $1/8 \lambda$ の間隔に併設した場合のシミュレーション結果を示す。
Study for activating antennas

表2 地盤実験でのマルチアンテナ及び単アンテナによる探查結果
Experimental result of multiplied antennas and single antenna in field test

テストヤード	単アンテナ	マルチアンテナ (4 送信)
単位: m		

表3 地中レーダ探査信号比較

Comparison of exploratory signals according to underground radar system

送信アンテナ 個数	アンテナ配列	反射波 振幅 (V)	反射波振幅の比 アンテナ1個を基準 (dB)	A スコープ 波形
1		0.7	0	
2		1.76	8.0	
4		7.04	17.0	

アンテナは大型地中レーダアンテナ (350 MHz, インパルス方式) を使用し, 送信アンテナ4台, 受信アンテナ1台までの組合せを可能とするマルチアンテナ制御装置を試作した。この装置は, 送信アンテナを2, 3, 4台に切替えて使用可能である。

6.2 実験方法

地下に鉄パイプ ($\phi 100$ mm, $L=5.5$ m) を, 深度を変えて5本埋設し, 地表面よりアンテナを走査, 探査した。

マルチアンテナの送信アンテナの個数や偏波面を変えて, 地下に埋設した鉄パイプの反射強度を単アンテナと比較した。

6.3 実験結果

- (1) 表2に単, 4送信アンテナでの鉄パイプの探査結果 (B スコープ表示) を示す。その結果, 送信アンテナ1個では検出できなかった地下2.5mの鉄パイプを, 送信アンテナ4個でははっきりと検出できている。
- (2) 表3にアンテナの個数と受信信号波形 (A スコープ波形) の関係について示す。鉄パイプからの反射波の振幅を比較し, アンテナ1個の場合を基準とした増幅率をグラフで表した結果を図7に示す。これらのことより以下が分かる。

- 埋設物の反射強度を比較するとアンテナの個数が多くなるほど大きくなる。
- 鉄パイプの深度が大きいほど, 増幅率のばらつきが小さくなっている。
- アンテナの個数が2倍になると, 一定の割合で増幅率が増加する。

7. ま と め

- (1) EWSによる電磁波伝搬シミュレーション手法を確立したが, 今後パソコンレベルでの解析が可能なダウンサイジングを実施し, さらに実験データや現場データとの定量的解析も必要である。

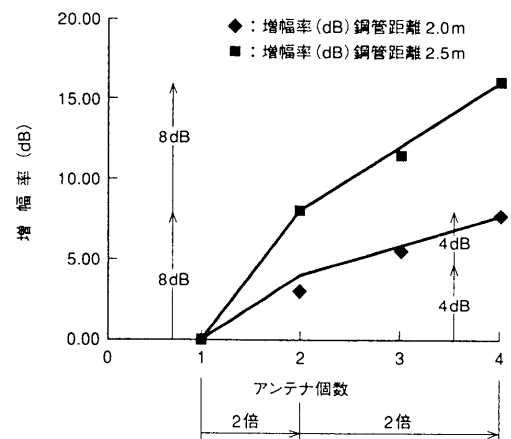


図7 マルチアンテナによる増幅率 アンテナの個数が2倍になると, 一定の割合で増幅率が増加する
Amplification factor of multiplied antennas

- (2) マルチアンテナにより, 単アンテナに比べて1.5~2倍の長距離化のめどがついた。今後, 実機レベルの実証機により性能を確認する。
- (3) 本技術はシールド掘削機以外の適用が可能であり, 他用途での適用についても検討する。

参考文献

- (1) 谷口ほか, 戸田建設技術研究報告 Vol.16 (1989) p.109~120
- (2) 東京電力, 土木技術情報 No.10, (1989) p.48
- (3) Kunz, K. S. et al., "The Finite-Difference Time-Domain method for Electromagnetics," CRC Press, (1993) pp.163-183, ISBN 0-8493-8657-8.