

掘進中にシールド機外周部の介在砂層をリアルタイム探査

比抵抗センサーを用いた介在砂層探査技術

大 木 智 明

シールド工事向け探査技術として、シールド機外周部の砂層を高精度に検出する砂層探査システムを開発した。本技術は、シールドマシンのカッター側面に【比抵抗センサー】を設置することで、シールド掘進中にシールド機外周部の介在砂層を連続的に測定・探査できるものである。【比抵抗センサー】は、土質調査でよく行われる比抵抗検層（電気検層）と同じ原理を用いたものである。本技術により、掘進中に掘削断面全周の土質状況をリアルタイムに把握し、精度の高い土質情報を取得することで、施工の安全性と効率のよい掘進管理が可能となる。

キーワード：シールド、土質調査、地中探査、リアルタイム、比抵抗値、介在砂層、表示システム

1. はじめに

シールド工法によるトンネル築造工事では、地上からのボーリング調査等から得られた数百 m おきの土質情報を基に、掘削領域全体の土質分布を想定して計画・施工にあたるのが一般的である。そのため、調査地点間の土質は想定した土質と違う場合がある。

密閉型シールド工事においては、掘削中の土質を直接目視で確認できない。そのため、想定通りの土質かどうかの判断は、掘削残土やシールド機の計測機器等の数値から間接的にを行い、泥水・泥土の調整をして施工管理を行っている。間接的な土質判断しかできないので、実際には想定と違う土質であるのに気づくのが遅れ、掘進遅延等のトラブルが起こる場合がある。

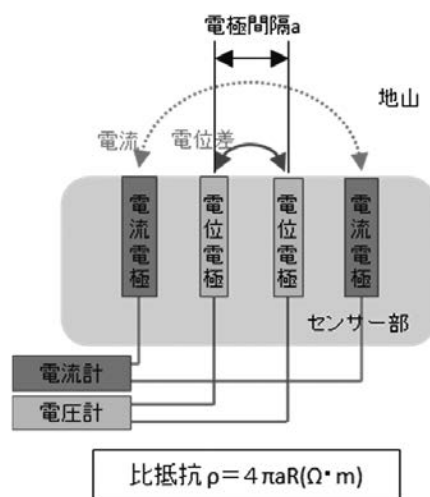
特に、施工断面が大断面の場合には複数の土質を跨いだ掘進（砂層と粘土層の互層を掘進など）となる場合がある。しかし、掘削残土は各土質が混合された状態であり、実際の土質構成の推定はできない。そのため、泥水・泥土の調整などの掘進管理を適正に行うために、掘進中において直接土質を把握できる技術が望まれていた。

そこで、シールド工事向けの探査技術として、シールド機のカッターヘッド側面に「比抵抗センサー」を装備してシールド機外周部の砂層を高精度に検出する「介在砂層探査システム」を開発した。本システムの特長は、シールド掘進中に、カッターヘッドの回転と合わせて「比抵抗センサー」が回転して、掘削断面外周の土質状況をリアルタイムに探査できることであ

る。これにより、精度の高い土質情報に基づく掘進管理が可能となる。

2. 探査原理

本技術の測定原理は、電気を地中に流すことでその電位差（抵抗値）を測定し比抵抗値を求め、この比抵抗値の値により土質を判別するものである。図—1に測定原理を示す。

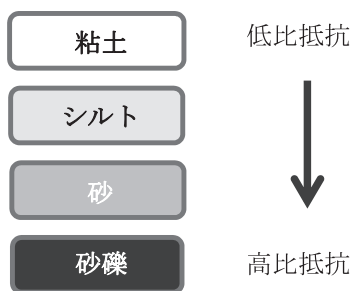


図—1 測定原理

ここで測定される抵抗値は、同じ地層を測定しても、電極間隔を広くするか狭くするかにより測定される抵抗値に差が出る。これは、電流の流れる範囲が変化するためである。そこで、この抵抗値を標準化する

ため、1 m 真四角の立方体の両端の抵抗値に換算した数値を「比抵抗 ρ (ロー)」と定義して使用する。比抵抗の単位は「 $\Omega\cdot\text{m}$ 」(オーム・メートル)で、均質な土質なら、測定する電極間隔に影響されず同一の値になる。

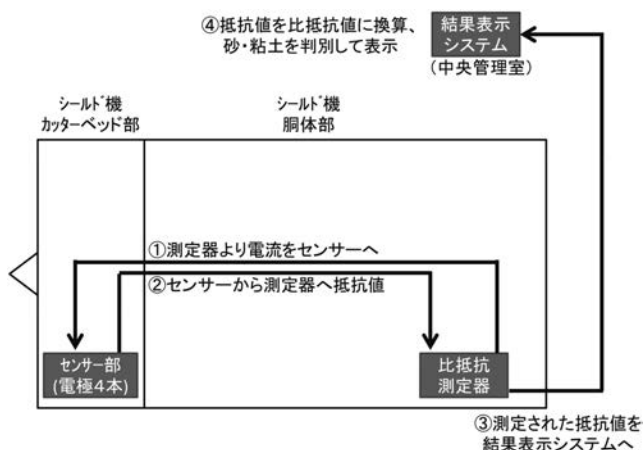
比抵抗は土質の違いによって異なることが知られているため、測定された比抵抗値の違いにより土質を判別するものである。図一2に土質と比抵抗の関係を示す。これは、土質調査でよく行われる比抵抗検層(電気検層)と同じ原理である。



図一2 土質と比抵抗の関係

3. 探査システム概要

本システムは、センサー部、比抵抗測定器、結果表示システムの3つからなる。図一3に探査システム概要図を示す。



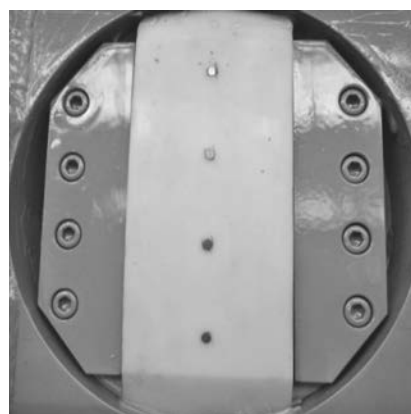
図一3 探査システム概要図

(1) センサー部

センサーは、シールド機カッターヘッド部側面に設置する。後述する実証実験時の設置状況を写真一1、2に示す。このセンサーは電極が4本で構成されており、外側2本の電極から電気を地山に流し、中側2本の電極で抵抗値(電位)を測定する。本センサーはカッターヘッド側面に埋め込まれている。シールド掘進時



写真一1 センサー設置状況



写真二 センサー部拡大

には、カッターヘッド回転とともに本センサーは回転し、シールド機掘削外周面を測定する。

(2) 比抵抗測定器

比抵抗測定器は、シールド機機内に設置され、センサー部電極へ電気を流す役割とともに、センサー部で測定された抵抗値(電位)を結果表示システムに渡す役割を持つ。

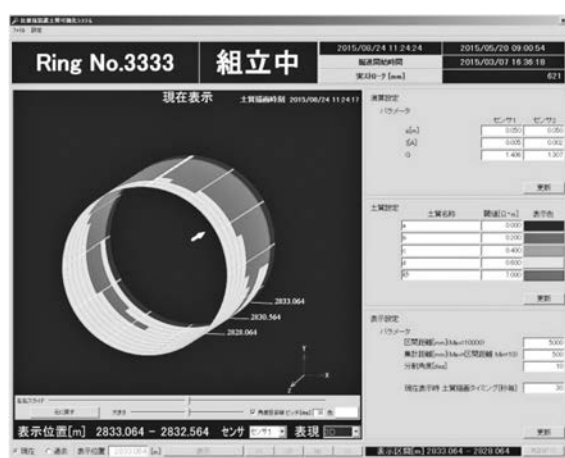
(3) 結果表示システム

結果表示システムは原則として中央監視室に設置し、比抵抗測定器から受け取った抵抗値を比抵抗値に換算、砂・粘土の判別結果をリアルタイムに表示するシステムである。後述する実証時の表示状況を写真一3に示す。なお、写真中砂層と判定した部分は赤、粘土層と判定した部分は青で表示されている(システムとしては5色表示まで可能である)。

この表示システムは、その後改良を行い、3D表示が可能となっている(写真一4)。これにより土質の経時変化も視覚的に把握することが可能となっている。



写真—3 2D表示システム



写真—4 3D表示システム

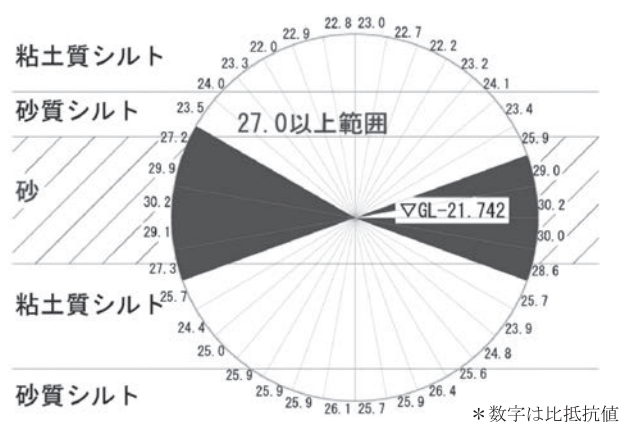
4. 実証実験概要

要素実験を経て、比抵抗センサーの性能確認・実証を目的として、実工事に適用した。比抵抗センサーをシールド機に装備し、掘進中に常時測定を行った。比抵抗センサーはシールド機カッターヘッド側面に2箇所設置した（内1箇所は予備）。

砂層と粘土層を判別するためには、比抵抗値の境界値（以後しきい値と呼ぶ）を設定する必要がある。そのために測定初期段階において、測定された比抵抗値に対して実際の土質がどうだったかの対比（キャリブレーション）が必要となる。これは、同じ土質であっても、生成年代等の諸条件により比抵抗値に相違があり、対象土質の固有値を把握する必要があるからである。本実証においては、実際の土質分布を把握するため、地上からボーリングを行ってコアを採取し、土質分布を調査した。キャリブレーション用として1箇所、設定したしきい値が正しかったかを検証するために2箇所の合計3箇所のボーリング調査を実施した。

5. キャリブレーション

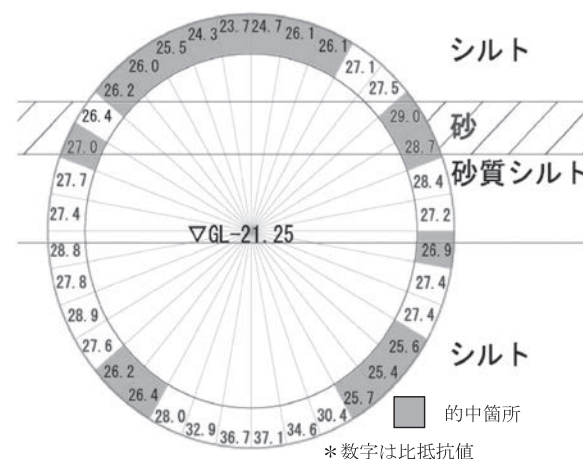
掘進延長約440 m地点（調査ボーリング1）にて、キャリブレーション用の調査ボーリングを実施した。得られた土質柱状図と、測定された比抵抗値との比較を行い、しきい値を設定した。結果を図—4に示す。なお、比抵抗値は連続で測定されているため、掘進方向0.5 m分のデータを使用し、断面方向に36分割（10度毎）して集計、分割角度毎に平均値を算出し比較した。比較の結果、比抵抗値27 $\Omega \cdot m$ 以上を砂層、27 $\Omega \cdot m$ 未満を粘土層と区分すると柱状図の土質と合致した。この結果により、しきい値を27 $\Omega \cdot m$ とした。



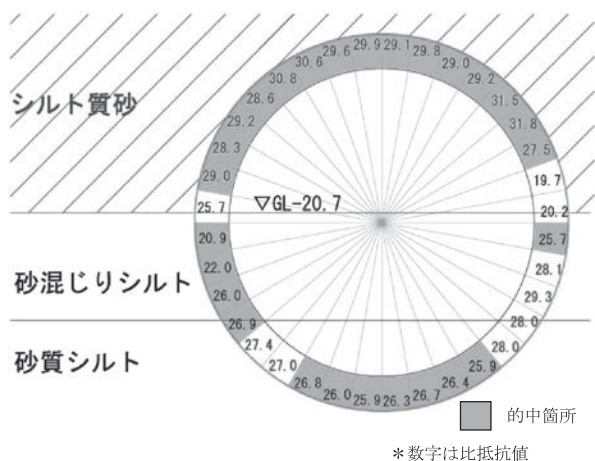
図—4 キャリブレーション

6. 検証結果と考察

掘進距離約880 m地点（調査ボーリング2）と約1100 m地点（調査ボーリング3）の2箇所において調査ボーリングを実施し検証を行った。結果を図—5, 6に示す。調査ボーリング3では約8割の的中率であったが、調査ボーリング2では約5割程度であった。的中率一覧を表—1に示す。



図—5 調査ボーリング2結果



図—6 調査ボーリング3結果

表—1 的中率一覧

	調査ボーリング2	調査ボーリング3
全体	47% (17/36)	75% (27/36)
砂層	75% (3/4)	83% (15/18)

砂層については、実際の砂層を、比抵抗値により砂層と判定した的中率はいずれも約8割と高い精度である。

誤差の原因としては、探査範囲にあるオーバーカット分の掘削泥土の影響及び、泥土中の砂分が下方に堆積した状態であると推測される。したがって、今後の改善案としては、オーバーカット分の泥土の比抵抗を

別途測定する補正センサーを搭載し、泥土分の影響を排除すれば、的中精度は向上すると考えられる。

7. おわりに

本技術の特長は、掘進中にリアルタイムかつ連続測定が可能な点である。したがって、密閉型シールドの掘進中においてもシールド機周辺の土質分布状況の変化を的確に把握できることから、掘進中の加泥材の選択や泥水管理等といった掘進管理においても非常に有効な情報を提供できるものとなっている。

今後は、補正センサーを追加装備した比抵抗センサーを実工事において展開・検証し、さらに精度向上を図っていく所存である。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) 大木智明他：比抵抗センサーを用いた介在砂層探査技術の開発，土木学会第70回年次学術講演会，VI-103, 2015.

【筆者紹介】

大木 智明（おおぎ ともあき）
清水建設㈱
土木技術本部 開発機械部 技術開発グループ
課長

