

土工の生産性向上に向けた電気特性による盛土の全量品質管理

Development of Full Quality Control System for Compaction Using its Electrical Characteristics to Improve Earthwork Productivity

松本 聡 碩 小林 一 三 岡本 道 孝
小原 隆 志 米丸 佳 克 福島 陽

要 約

土工においては、ダム建設現場を中心に重機施工の自動化などに関する技術開発が進んでいる。一方で、施工後の品質管理については、依然として人力での離散的な計測が行われている。筆者らは、土工全体の生産性向上のために、盛土の電気特性を計測することによる全量品質管理手法の開発を進めている。本報では、電気特性に着目した経緯や、開発手法の概要およびその有効性確認のために行った小規模盛土試験結果、そして現場への適用に向けた技術開発の取り組み状況について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 開発中の品質管理手法における代替物性
- III. 比抵抗の計測による盛土の乾燥密度の評価
- IV. 比誘電率の計測による盛土の体積含水率の評価
- V. 電気特性の盛土品質管理への適用
- VI. おわりに

I. はじめに

建設業における労働者不足への対応は喫緊の課題であり、土工分野では、ダム建設工事や造成工事を中心に、重機の自動化や遠隔操作などの技術開発が進められている。一方で、施工後の品質管理試験に関しては、依然として人力での離散的な計測がなされている状況である。Fig.1 に示す土工の流れを鑑みると、品質管理を施工と同時に瞬時に技術があれば、土工を無人で進められる“土工の工場化”が実現できる。また、盛土全面で品質管理のための計測を実施すれば、これまで抽出されていなかった可能性のある施工不良個所の発見につながり、より高品質な施工にもつながる。

筆者らは、盛土の電気特性を計測することによる全量品質管理手法の開発を進めている。本報では、電気特性に着目した経緯や、開発手法の概要およびその有効性確認のために行った小規模盛土試験結果、そして現場への適用に向けた技術開発の取り組み状況について報告する。

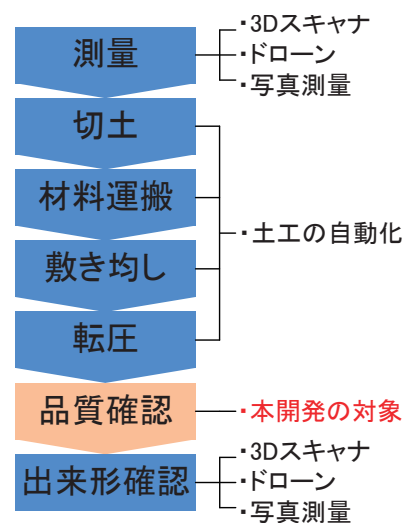


Fig.1 土工の流れ (Process of Earthwork)

II. 開発中の品質管理手法における代替物性

盛土の品質は、乾燥密度と含水比の2つの物性で管理される。現行の品質管理手法では、砂置換法やRI法などで多大な手間と時間を掛けて、離散的にこれらを計測している。この現状をふまえて、新たな品質管理手法が達成すべき要件として、次の4つを挙げた。

キーワード : 土工, 比抵抗, 比誘電率, 電気特性, 品質管理, 地理情報システム

Keywords : earthwork, resistivity, relative permittivity, electrical characteristics, quality control, geographic information system

- ① 計測時間：全量管理のために計測が瞬時かつ連続的
- ② 計測深度：計測深度（範囲）が制御可能
- ③ 計測環境：粉塵，振動，ノイズなどに対して鈍感
- ④ 適用土質：幅広い地盤材料に適用可能

盛土の品質を表す指標である乾燥密度と含水比を求めるために，何らかの代替物性を計測しなければならない。そこで，乾燥密度や含水比と相関がある力学，電気，水理，熱などの各特性とその計測技術について，文献調査や簡易実験によって Table 1 に示す評価を行い，上記要件を達成可能な代替物性として2つの電気特性（比抵抗と比誘電率）を抽出した。

Table1 代替物性候補に対する評価
(Evaluation of Physical Characteristics)

代替物性の候補		①計測時間	②計測深度	③計測環境	④適用土質
変形・硬さ		△	△	○	○
強度		×	△	○	△
振動特性		○	×	△	△
電気特性	比抵抗	◎	◎	△	◎
	比誘電率	◎	◎	△	◎
放射線		△	○	○	△
宇宙線		○	×	△	○
サクシオン・透水・透気性		×	○	○	△
熱特性		×	×	△	○

Ⅲ. 比抵抗の計測による盛土の乾燥密度の評価

1. R~ρd 関係の取得

比抵抗 R から乾燥密度 ρ_d を算出するためには，両者の関係を表す R~ρ_d 関係を取得する必要がある。Fig.2 に，砂と粘土を 8:2（乾燥重量比）で混合した試料の検量線を示す。ρ_d の増加に従い，R が減少することが分かる。R は，地盤を構成する土粒子や岩石，間隙水などの電気的特性の影響を受けるため，R~ρ_d 関係は盛土材料やその含水比の変化に合わせて取得する必要がある。

R~ρ_d 関係の取得のために，モールド状の比抵抗計測装置（サンプルホルダー（以下，SH））を作製した。Fig.3 に，SH 内部への試料の締め固め状況を示す。

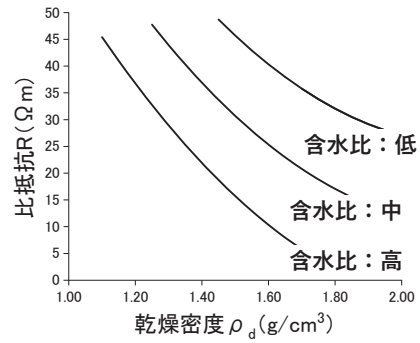


Fig.2 検量線の例

(Relationships between Resistivity and Dry Density of Soil)



Fig.3 SH 内での試料の締め固め (Compaction in SH)

SH は，内径 300mm，内部高さ 575mm であり，ジュラコンを内貼りすることで絶縁した。SH へ試料を投入し，所定の乾燥密度まで締め固めた後，底部と蓋に取り付けた電極から試料に電流を流して，側面の電極で両電極間の電位差を計測することで比抵抗を算出した。電極間隔を L，SH の内空断面積を A，流した電流を I，計測した電位差を V としたとき，比抵抗 R は次の式（1）で表される。

$$R = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \dots \dots \dots (1)$$

これまでに，SH を用いて，砂や粘土から最大粒径 80mm の礫質土まで様々な材料の検量線を取得した。

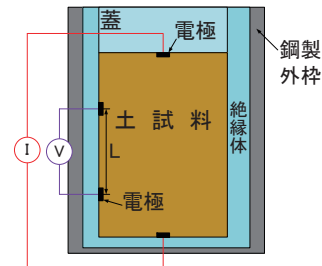


Fig.4 SH による検量線取得のイメージ
(Test Procedure to Obtain Relationship between Resistivity and Dry Density using SH)

2. 盛土の比抵抗計測

盛土の比抵抗は、4極法（ウェンナー法）²⁾により計測することとした。4極法の電極配置を Fig.5 に示す。

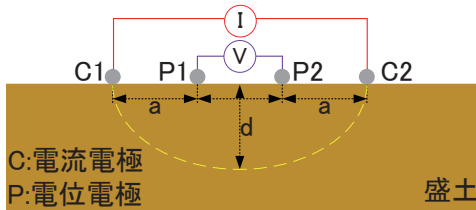


Fig.5 4極法の電極配置
(Electrode Placement in Wenner's Method)

4極法による比抵抗計測は、4つの電極のうち両端の電極（C1, C2）から交流電流を流した際の中央の2つの電極（P1, P2）間の電位差を計測するものである。例えば、交流電流の周波数を1kHzに設定すれば、1秒当たり1000回電位差を計測可能であり、全量管理に十分な空間分解能で比抵抗を取得できる。また、4極法では、電極間隔 a と計測深度 d は一致しており、電極間隔 a を変更することで計測範囲を制御可能である。

本研究では、土工現場における4極法での比抵抗計測装置として、車輪型電極（Fig.6）を試作した。これは、移動しながら盛土の転圧面全面で比抵抗計測を行うことを考慮して、車輪の全周が電極となっている比抵抗計測装置である。



Fig.6 車輪型電極
(System Integration for Soil Resistivity Measurement using Wheel Type Electrodes)

3. 開発手法（比抵抗計測）と従来法の比較実験

(1) 試験概要

開発手法の計測精度を確認するために、同一地盤において比抵抗法およびコアカッター法（JGS 1613）によって乾燥密度を計測した。計測対象は、Fig.2で $R \sim \rho_d$ 関係を示した、砂と粘土を乾燥重量比で8:2に混合した試料を締め固め度90%相当に締め固めた幅2.0m×奥行0.9m×高さ0.4mの模擬地盤である。Fig.7に示す7つの測点①～⑦（赤丸）を通過するように車輪型電極を定速（0.80km/h）で移動させながら計測（動的計測）した後に、同測点でコアカッター法による密度計測を行った。比抵抗は進行方向に約5.5cmごとの平均値として算出した。

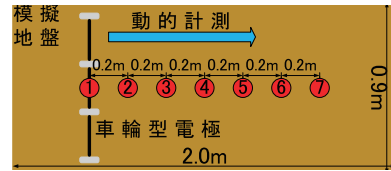


Fig.7 試験ヤード模式図
(The Arrangement of Resistivity Measurement)

(2) 計測結果

動的計測した比抵抗から、Fig.2の $R \sim \rho_d$ 関係と材料製造時の含水比を用いて求めた乾燥密度の平面分布を Fig.8 に示す。測点②と③の間に、やや乾燥密度が小さい（比抵抗が大きい）箇所がある。この原因として、実際の乾燥密度の大小とは別に、地表面の乾燥によって電極と地盤の接触面の抵抗が増加した影響が考えられる。また、比抵抗から算出した乾燥密度と、コアカッター法で計測した乾燥密度を比較した結果を Fig.9 に示す。いずれの測点でも、コアカッター法で計測した乾燥密度がやや大きくなった。これは、比抵抗の計測深度が20cmであるのに対し、コアカッター法の計測深度は10cmであり、締め固めエネルギーの伝わりやすい表層近くの乾燥密度がやや大きいことが影響していると考えられる。ただし、両者の差は最大でも 0.059g/cm^3 （測点④）であり、砂と粘土の混合土から成る地盤において、比抵抗計測による乾燥密度の計測技術は、含水比が十分な精度で計測できれば、実用可能であるといえる。

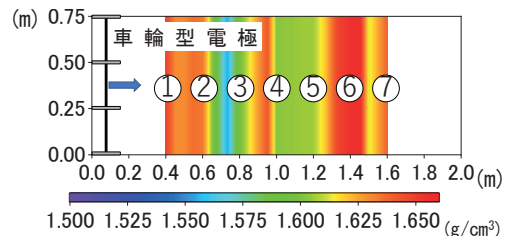


Fig.8 比抵抗計測から得られた乾燥密度の平面分布
(The Dry Density Distribution Acquired by Resistivity)

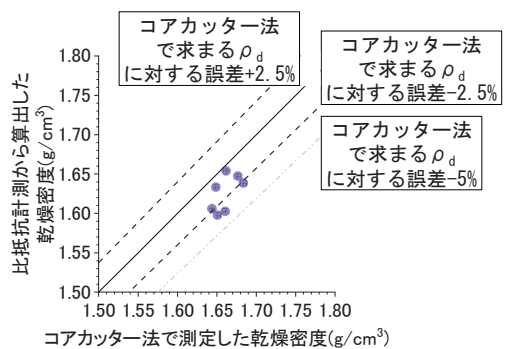


Fig.9 動的計測結果とコアカッター法の結果の比較
(Comparison of Dry Densities Obtained from Resistivity and Conventional Method)

IV. 比誘電率の計測による盛土の体積含水率の評価

1. 地中レーダによる ϵ_r の取得

比誘電率 ϵ_r は、媒質の誘電率と真空の誘電率の比と定義され、土質材料では磁性を無視できるため次の式 (2) で表される。

$$\epsilon_r = (c/v)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 c は真空中の電磁波速度 (3.0×10^8 m/s)、 v は媒質中の電磁波速度である。

一般に、電磁波は ϵ_r が異なる物質の境界面で反射することが知られている。また、 ϵ_r は乾燥密度に依存するため、転圧面から電磁波を照射すると前層との層境 (転圧層の下面) で電磁波が反射される。

そこで本研究では、市販の地中レーダによって照射された電磁波が転圧層内を往復する時間から v を求めて盛土の ϵ_r を面的に計測することとした。

具体的な計測原理を Fig.10 に示す。まず、地中レーダで転圧面上を走査し、電磁波が転圧層内を往復する時間 t を計測する。さらに、光波測量などで計測した層厚 H から v を求めることにより、式(2)から ϵ_r が算出できる。

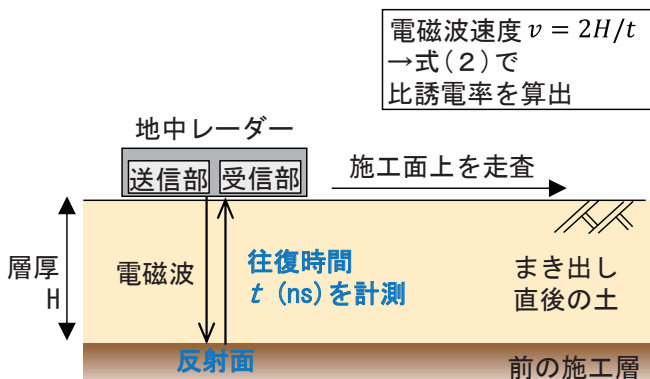


Fig.10 地中レーダによる ϵ_r の計測原理
(Principle of Measurement of Relative Permittivity by Ground Penetrating Radar)

ここで、砂と粘土を乾燥質量比で 4:1 に混合した試料 (Case1) を、締め固め度 85%相当に締め固めた供試体を対象とした地中レーダの計測結果を Fig.11 に示す。この図は、反射波強度をコンター図で表示したもので、白色部分が反射面を表す。このように、地中レーダによって締め固め層境を明確に検出し、電磁波の往復時間を計測できる。

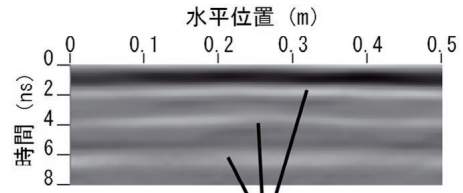


Fig.11 地中レーダの計測結果
(Contour Diagram Measured by Underground Radar)

2. $\epsilon_r \sim \theta$ 関係の取得

土質材料の ϵ_r は、既往の研究から、体積含水率 θ と相関が高いことが知られている。例えば、Topp et al. (1980)³⁾は、広範な土質材料に関する $\epsilon_r \sim \theta$ 関係として、次の式 (3) を提案している。

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3 \dots \dots \dots (3)$$

一方、有機物や細粒分を多く含む土では、Topp 式の評価精度が低下することが指摘⁴⁾されている。そこで、砂と粘土を乾燥質量比で 4:1 (Case1)、および 1:1 (Case2) に混合した試料を対象に、地中レーダによって $\epsilon_r \sim \theta$ 関係を取得した。細粒分含有率は、Case1 で 19.1%、Case2 で 45.7%である。取得状況を Fig.11 に示す。供試体は、各試料を締め固め度 85%相当に締め固めた幅 0.8m x 奥行 1m x 高さ 0.3m (1層 0.1m x 3層で作製) に締め固めたものである。

取得した $\epsilon_r \sim \theta$ 関係を、Fig.13 に示す。図中には、Topp 式を併記した。Case1 では Topp 式と概ね一致したが、Case2 は Topp 式よりも ϵ_r が小さくなった。このように、細粒分含有率の違いによって $\epsilon_r \sim \theta$ 関係が異なる可能性を示唆する結果が得られた。従って、Topp 式は盛土の ϵ_r から θ を概算するには有効であるが、開発手法が目指すところの盛土品質 (含水比) 全量管理のための θ 取得にあたっては、より正確性を向上させるために、盛土材料ごとに $\epsilon_r \sim \theta$ 関係を取得することが望ましいと考えられる。

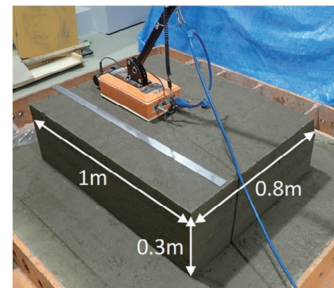


Fig.12 地中レーダを用いた ϵ_r の計測
(Measuring Relative Permittivity by Ground Penetrating Radar)

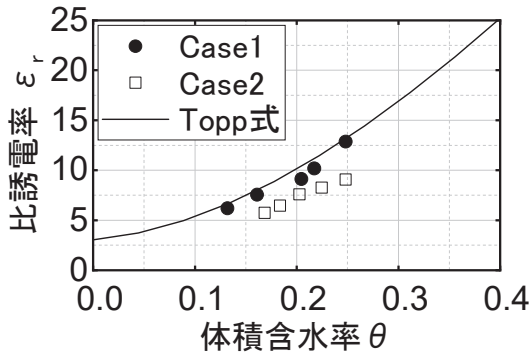


Fig.13 取得した $\epsilon_r \sim \theta$ 関係

(Relationships between Relative Permittivity and Volumetric Water Content)

V. 電気特性の盛土品質管理への適用

1. 電気特性による乾燥密度および含水比の管理

本節では、電気特性（比抵抗および比誘電率）による盛土の品質管理の流れを改めて取りまとめる。

まず、地中レーダによる計測で比誘電率 ϵ_r を取得し、あらかじめ取得した体積含水率 θ との関係式（例えば Fig.13）に当てはめる。

次に、車輪型電極による計測で比抵抗 R を取得し、あらかじめ取得した乾燥密度 ρ_d との関係式（例えば Fig.2）に当てはめる。ここで、III章における実験では、材料調整時の含水比 w に基づき、適用する比抵抗 R と乾燥密度 ρ_d の関係式を決定した。CSG（Cemented Sand and Gravel）やコア材の場合は、単位水量や含水比が厳格に管理されており w が既知であると取り扱うことができるため、 R をあらかじめ取得した ρ_d との関係式にあてはめ、 ρ_d を求める（Fig.14(a)）。

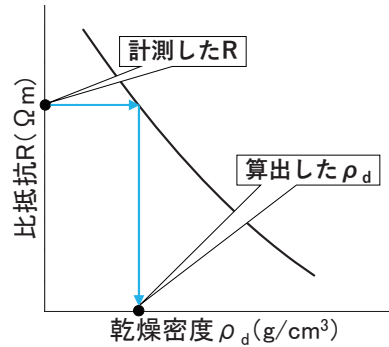
しかし、一般の土工では、施工時の天候や施工位置毎の粒度分布の違いなどで w のばらつきが生じるため、適用すべき $R \sim \rho_d$ の関係式の設定が難しい。

そこで、含水比 w 毎に存在する $R \sim \rho_d$ 関係において、地中レーダによる計測で取得した θ に対応する点を、 w と ρ_d および θ の関係を表す式(4)により求めプロットする(Fig.14(b))。

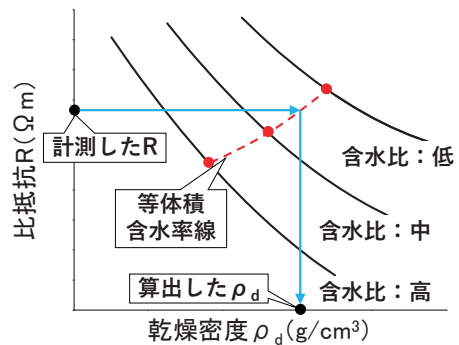
$$w = (\rho_w / \rho_d) \theta \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 ρ_w は水の密度を表す。

このプロットを連ねた曲線を、等体積含水率線と称する。そして、車輪型電極による計測で取得した R を等体積含水率線に当てはめ、 ρ_d を求める。最後に、取得した θ および ρ_d を式(4)にあてはめ、 w を求める。



(a) w が既知の場合



(b) その他の場合

Fig.14 $R \sim \rho_d$ 関係による ρ_d の算出
(Calculation of Dry Density by Resistivity)

2. 開発手法の現場への適用に向けた取り組み

本節では、GNSS 等による測位システムを用いて、電気特性（比抵抗および比誘電率）と位置情報の三者を同時に計測することを、ハイブリッド計測と称する。ハイブリッド計測によって、位置情報とともに得られる ρ_d や w を地理情報システム（GIS）上にて可視化することで、再転圧が必要な位置を容易に表示することが可能となる。あるいは、拡張現実（AR）上でハイブリッド計測によって得られた ρ_d をコンター表示（暖色に近いほど ρ_d が大きく、寒色に近いほど ρ_d が小さい）することで、再転圧が必要な位置を施工箇所にながらにして容易に把握することが可能となる。AR 上でのコンター表示のイメージ図を Fig.15 に示す。



Fig.15 AR 上における ρ_d の表示のイメージ
(Imaginary Diagram Display of Dry Density on Augmented Reality)

一方で、転圧面全体でハイブリッド計測を行うことで、膨大なデータが取得されるとともに、それら进行处理する必要がある。比抵抗 R を例にとると、あらかじめ取得した $R \sim \rho_d$ 関係により、計測されるであろう R の範囲が推測可能である。しかし、計測した全データの中には、その範囲を大きく上回る R (仮に外れ値と称する) が若干含まれる。その原因として、地表面の乾燥などによって電極と地盤の接触面の抵抗が増加したことや、不陸により一時的に電極と地盤の距離が変化したことなどが挙げられる。もちろん、局所的に ρ_d が小さい箇所が存在する場合も考えられる。外れ値を含んだまま R から ρ_d を算出することは、盛土の品質を過小評価することに繋がりがねないが、ハイブリッド計測で得られたデータから、 ρ_d の大小以外を原因とする外れ値を棄却する理論的手法は現時点で確立できていない。今後は、膨大なデータの処理手法や評価手法も確立する必要がある。

このような、計測結果の表示方法および処理方法の開発も同時に進めることで、施工の効率化や品質保証の確実性向上へのさらなる寄与が期待される。

VI. おわりに

本報告では、電気特性に着目した経緯や、開発手法の概要およびその有効性確認のために行った小規模盛土試験結果、

そして現場への適用に向けて GIS や AR 上に計測結果を表示する技術開発の取り組み状況について述べた。

最終的には、当社が開発を進めている次世代の建設生産システム A⁴CSEL[®] を搭載した転圧機械に、ハイブリッド計測に必要な計測機を装備する。そして、従来行われてきた人力による離散的な品質管理試験を廃止する一方で、施工と同時かつ迅速に自動で転圧面全体の品質管理を行うことで、土工現場のさらなる生産性向上に寄与することを目指す。

参考文献

- 1) 財団法人災害科学研究所トンネル調査研究会；地盤の可視化と探査技術，鹿島出版会，2001.
- 2) 小林ら；土工の工場化に向けた電気特性による盛土の全量品質管理 I：盛土の全量品質管理の要件，土木学会第76回年次学術講演集，2021，pp.111-112.
- 3) G. C. Topp, et al. ; Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines , Water Resources Research, Vol.16, No.3, 1980, pp.574-582.
- 4) 宮本ら；土壌の体積含水率-比誘電率関係への混合誘電特性モデルの適用，農業土木学会論文集，No.206, 2000, pp.193-198.

Development of Full Quality Control System for Compaction Using its Electrical Characteristics to Improve Earthwork Productivity

*Akihiro Matsumoto, Ichizo Kobayashi, Michitaka Okamoto
Takashi Obara, Yoshikatsu Yonemaru and Yo Fukushima*

Recently, unmanned earthwork technology using automated machinery has been progressing rapidly. However, manual sampling inspection is still performed to evaluate the quality of earthwork.

To improve the productivity of earthwork, rapid automated procedures for quality evaluation need to be developed. Such new procedures could enable complete (100%) inspection. Thus, a procedure has been progressing for evaluating the quality of compaction by monitoring the electrical characteristics of soil. To confirm the effectiveness of this new inspection procedure, a laboratory test with prototype equipment was performed.

In this paper, the procedure for estimating compaction quality using electrical resistivity and relative permittivity measurement is first described. Then, the results of laboratory tests and the future prospects of this research are discussed.