

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

Ⅲ：比誘電率の計測による盛土の体積含水率の評価

鹿島建設(株) 正会員 ○福島 陽 小林一三 米丸佳克 松本聡碩
岡本道孝 小原隆志

1. はじめに

既報¹⁾²⁾のとおり、盛土の全量品質管理を目的とした本研究では、電気特性のうち比抵抗および比誘電率に着目した。本報では、このうち比誘電率 ϵ_r を用いた盛土の体積含水率 θ （間隙水体积/かさ体積）の計測について述べる。

2. 土質材料の比誘電率 ϵ_r と体積含水率 θ

ϵ_r とは媒質の誘電率と真空の誘電率の比として定義され、土質材料の場合には磁性を無視できるために以下の式で表せる。

$$\epsilon_r = (c/v)^2 \quad (1)$$

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。

土のマクロな ϵ_r は構成物質の体積割合によって決まり、特に θ の変化に応じて変動する。これに関して、Topp et al. (1980)³⁾は、広範な土質材料を対象とした ϵ_r - θ 関係として以下の経験式を提案している。

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

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されている（例えば宮本ら、2000⁴⁾）。したがって、盛土の ϵ_r から θ を概算するのには有効であるが、本研究の目的である盛土品質（含水比）全量管理での含水比取得にあたっては、より正確な含水比を求めるために盛土材料ごとに ϵ_r - θ 関係（以下、検量線）を取得することが望ましい。

3. 地中レーダによる比誘電率 ϵ_r の計測

土の ϵ_r を計測するには様々な方法があるが、本研究では非破壊で地盤の ϵ_r を面的に計測できる地中レーダによる方法を選定した。地中レーダの計測原理を図-1に示す。地中レーダはパルス波を地盤内に照射する送信部と、反射波を計測する受信部を有する。電磁波は ϵ_r の異なる物質同士の境界面で反射するため、地中内の既設構造物や空洞の検出などに用いられている。比誘電率は乾燥密度にも依存するため、本研究の目的の場合、転圧層境が反射面となる。図-2に砂と粘土を4:1で混合した盛土材を、締固め度Dc=85%相当に締め固めた場合の地中レーダの計測結果を示す。図は計測波を白黒濃淡のコンター図で表示しており、この場合、白色部分が反射波強度の強いこと、すなわち反射面であることを意味する。図-2に示すように反射面は3層分検出されており、これは転圧面に相当すると推定される。このように転圧面が明確な反射面となることから、実際の盛土においても同様に反射面を検出できる可能性が示唆される。

具体的な計測フローを述べる。まず、地中レーダで地盤上を走査し、各空間座標において照射されたパルス波が反射面（前層の転圧面）で反射して戻ってくるまでの時間（ナノ秒オーダー）を計測する。その際、別途まき出し層厚を測定し、これと電磁波の往復時間から電磁波速度 v を取得して、式(1)を用いて ϵ_r を算出する。さらに検量線を用いて ϵ_r から θ に換算すれば、盛土の θ 分布を面的に取得できる。

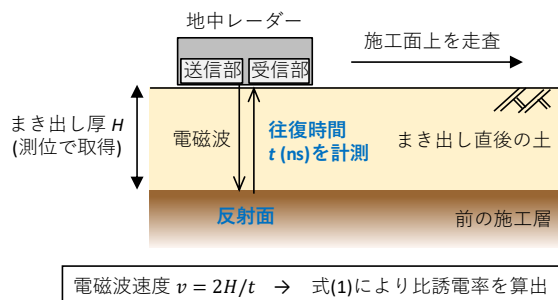


図-1 地中レーダによる比誘電率の計測原理

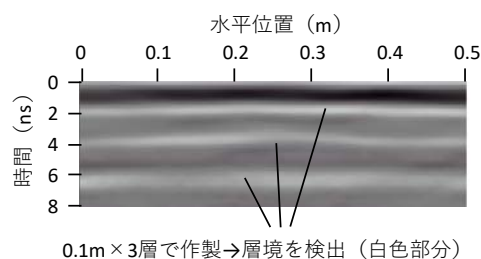


図-2 地中レーダの計測結果例

キーワード：土工、品質管理、電気特性、比誘電率、体積含水率

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-8503

得られた θ 分布と、既報 ²⁾ の比抵抗探査で取得した乾燥密度 ρ_d 分布から、式(3)を用いて含水比 w の分布を取得でき、これによって盛土の品質を面的に全量管理できる。

$$w = (\rho_w / \rho_d) \theta \tag{3}$$

ここで、 ρ_w は水の密度である。なお、含水比が転圧過程でほぼ一定と考えれば、 ϵ_r 計測は例えばまき出し直後に 1 回実施すればよく、転圧過程では比抵抗計測のみで盛土品質を評価することができる。

4. 検量線取得実験

前述の図-2 は、写真-1 に示す 1m×0.8m×0.3m (0.1m×3 層で作製) の供試体上を、地中レーダで走査した結果の例である。供試体は、より高い乾燥密度まで締め固めた基礎地盤の上に作製されており、これとの層境が明確な反射面となる。面的に得られた電磁波の往復時間と層厚 0.3m から電磁波速度 v に換算し、 ϵ_r 分布を取得した。

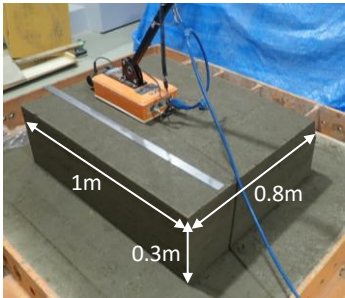


写真-1 検量線取得実験概観

表-1 材料の締め固め特性 (A-c 法)

ケース名	Case1	Case2
砂・粘土混合 乾燥重量比	4:1	1:1
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.814	1.702
最適含水比 w_{opt} (%)	14.6	17.7

試料は砂と粘土を乾燥重量比で 4:1 (Case1)、および 1:1 (Case2) で混合したものを用いた。材料の締め固め特性を表-1 に示す。各試料に対し、締め固め度と含水比をそれぞれ変化させることで、全体として θ の異なる 5 つの供試体を作製した。各供試体の条件を表-2 に示す。

得られた ϵ_r - θ 関係を図-3 に示す。図には、式(2)の Topp による式も併記した。Case1 は Topp 式と概ね良好な一致を見せるが、Case2 は Topp 式よりも低い ϵ_r が計測された。これは細粒分含有率の違いによるものと推測され、既往の研究 ⁴⁾ で報告された傾向とも一致する。

5. おわりに

本報では、土工の工場化に向けて開発した盛土の全量品質管理手法のうち、比誘電率計測による体積含水率評価手法について述べ、技術の有用性を示した。なお、一般土を用いた造成工事などでは含水比計測を要するが、例えばダム土工における CSG (Cemented Soil and Gravel) や放射性廃棄物処分に用いられる土質材料などでは、材料の製造過程で含水比が厳密に管理されるため、比抵抗計測のみで品質評価できると考えている。その検証結果について、別報 ⁵⁾ で報告する。

表-2 供試体諸量

Case	ρ_d (g/cm ³)	Dc (%)	w	$\theta = (\rho_d / \rho_w) \times w$
Case1	1.451	80	0.09	0.13
	1.451	80	0.11	0.16
	1.451	80	0.14	0.20
	1.542	85	0.14	0.22
	1.542	85	0.16	0.25
Case2	1.19	70	0.14	0.17
	1.19	70	0.15	0.18
	1.19	70	0.17	0.20
	1.28	75	0.17	0.22
	1.28	75	0.19	0.24

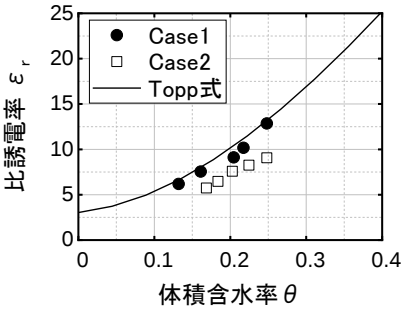


図-3 比誘電率-体積含水率関係

参考文献

1) 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。（投稿中）
2) 松本ら：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 II:比抵抗の計測による盛土の乾燥密度の評価，土木学会第 76 回年次学術講演集，2021。（投稿中）
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.
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, pp.193-198. 2000.
5) 米丸ら：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 IV:CSG への適用事例，土木学会第 76 回年次学術講演集，2021。（投稿中）