2. 盛土の締固めの新しい管理方法の開発

Development of a new Management Method for Compaction of Soil

落合裕正*　湊　太郎*

－概要－

本研究では、土の電気的性質から土の締固め度をリアルタイムで判定する方法を検討した。これまでに実施した現場計測の結果、土の締固め過程で土の構造が変化することにより、電気的性質（比抵抗値または導電率）が変化することが確認された。また、土の締固めが進むにつれて、測定値は土の立体構造モデル（**図 1**）で定義された理論曲線に近似した（**図 2**）。このとき、土は所定の締固め度に達したと判断できた。さらに、締固めた土の乾燥密度は、土の比抵抗値と土の立体構造モデルで定義された構造特性値から推定することが可能になった（**図 3**）。

－技術的な特長－

本研究では複合的な土質特性を有する建設発生土などを使用した盛土の締固め管理に、土の電気的性質を利用することを考えた。土を締固めると、間隙中の空気が押し出され、間隙を占める水の量が増える。これは、単位面積当たりの導電体（水）の面積が増えることを意味しており、土が締固められるのに伴い土全体の電気的性質が変化するものと考えられる。このような土の電気的性質を経時的に把握することで、土の締固め度をリアルタイムに確認できる方法を検討している。

地盤の構造特性を定量的に評価する立体構造モデル（**図 1**）は、土粒子の配向性や緻密性、間隙および間隙水の分布や連続性といった土の微視的構造の違いや変化を、並列部分と直列部分の割合によって表現している。立体構造モデルで定義している構造特性値は土の微視的構造により値が決まるため、土の締固め過程において、構造特性値が変化しない状態にある場合、それ以上土が締固められず構造が変化しない所定の締固め度に到達したと判断できる。また、乾燥密度の推定においても、この構造特性値を利用している。

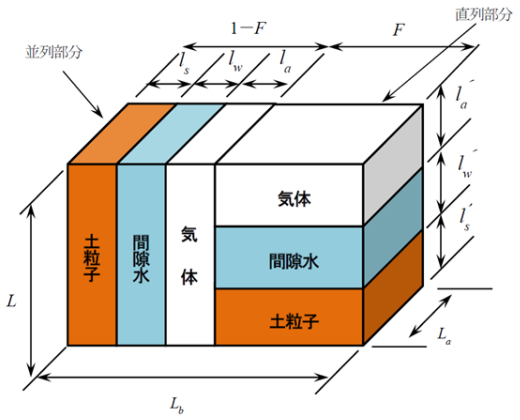

図 1　土の立体構造モデル

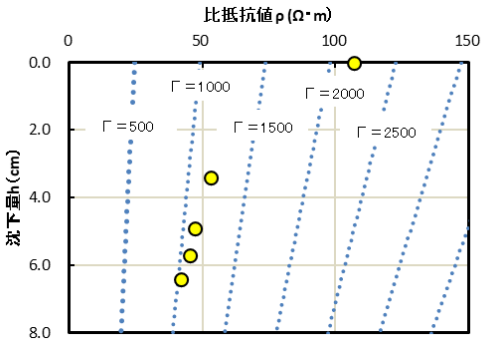

図 2　比抵抗値と沈下量の関係

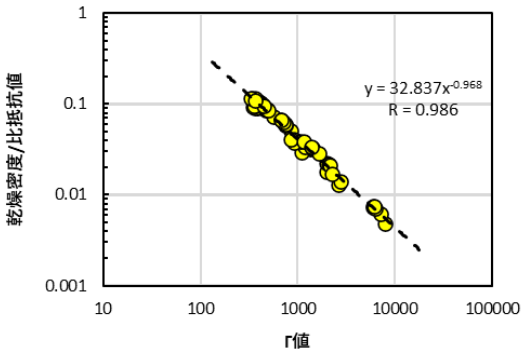

図 3　乾燥密度、比抵抗値および構造特性値の関係（85%≦S_r≦95%）

*技術研究所 材料研究部

盛土の締固めの新しい管理方法の開発
Development of a new Management Method for Compaction of Soil

○落合　裕正*　　湊　太郎*
Hiromasa OCHIAI　　Taro MINATO

ABSTRACT　A method for determining the degree of soil compaction in real time was investigated from the electrical properties of the soil in this study. From the field measurement, it was observed that the electrical properties (electrical resistivity or conductivity) changed during a compaction, because the degree of saturation of soil changed. Also, as the soil was compacted, the measured values approximated a theoretical curve which defined with soil structure model. At this time, it was determined that a designated degree of compaction has been reached. Furthermore, it was found that the dry density of the compacted soil was probably calculated with this theoretical curve.

Keywords：土の締固め，電気的性質，乾燥密度，土の立体構造モデル
Compaction of soil, Electrical properties, Dry density, Soil structure model

1．はじめに

環境意識の高まりを受けて、盛土等における建設発生土の再利用が進められている一方、様々な土質特性を有する土を盛土材料に使用することで、不安定な盛土の流出災害等も生じるなど、その締固め管理の重要性が増している。令和 4（2022）年 5 月 27 日、「宅地造成および特定盛土等規制法」（通称「盛土規制法」）が公布され、令和 5（2023）年 5 月 26 日から施行されている。この規制法は、盛土等を行う土地の用途やその目的にかかわらず、危険な盛土等を全国一律の基準で包括的に規制するものである。この規制法により、規制区域内で盛土等を行う場合には、より厳格な盛土の締固め管理が求められることになる。盛土の「締固め」は、一般的な土工の各工程の中で、唯一その品質が問われる作業であり、造成された土構造物の全共用期間を通じた安定性や要求される支持性能を左右する重要な工程である。

そこで本研究では、このような複合的な土質特性を有する建設発生土などを使用した盛土の締固め管理に、土の電気的性質を利用することを考えた。土を締め固めれば、間隙中の空気が押し出され、間隙を占める水の量が増える。これは、単位体積当たり導電体（水）の体積が増えることを意味しており、土が締固められるのに伴って、土全体の電気的性質が変化するものと考えられる。本研究では、このような土の電気的性質を経時的に把握することで、土の締固め度をリアルタイムに確認できる方法を検討した。また、土の電気的性質から、締固め度の指標となる乾燥密度を算出することも試みた。

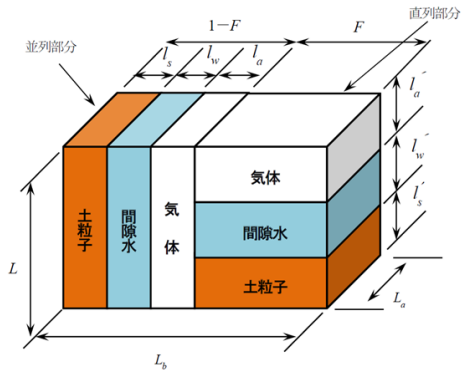

図 1　地盤の立体構造モデル [1)]

2．地盤の立体構造モデルの概要

地盤の構造特性を定量的に評価するモデルとして、図 1 に示す土の立体構造モデルが提案されている [1)]。この立体構造モデルでは、土粒子の配向性や緻密性、間隙および間隙水の分布や連続性

*技術研究所　材料研究部

といった土の微視的構造の違いや変化を、並列部分と直列部分の割合によって表現している。詳細な説明は既往の文献 [1]を参照されたい。測定される導電率の逆数として求められる比抵抗値は、この構造モデルによって**式** (1) のように定義される。

$$\rho = \frac{R}{\left(\frac{w}{100}\right) Gs \left(1-\frac{n}{100}\right)} \frac{\rho_{wa}}{(1-F)} = \frac{100}{\theta} \cdot R \cdot \Gamma \quad (1)$$

ここで、ρは比抵抗値（Ω･m）、wは含水比（%）、G_sは土粒子の比重、nは地盤の間隙率、ρ_{wa}は間隙水の比抵抗値（Ω･m）、Fは構造係数（m）、θは体積含水率（%）である。Rは測定方法によって決まる測定範囲の形状係数（m）であり、4 極法の場合は電極間隔を r（m）として $R = \sqrt{2\pi} \cdot r$となる。式中のΓは、間隙水の比抵抗値ρ_{wa}と構造係数Fに関するパラメータ（Ω）であり、**式**（2）として改めて示しておく。ここでは構造特性値と呼ぶことにする。

$$\Gamma = \frac{\rho_{wa}}{(1-F)} \quad (2)$$

一般的に、盛土材料の間隙水の比抵抗値ρ_{wa}は、締固め作業中に変化しないと考えられる。そのため、構造特性値Γ は、**図**1に示すモデルに示すように、並列部分を表す$(1-F)$の値によって決まり、土の微視的構造の特性を定量的に表すものである。

さらに、**式**（1）を**式**（3）のように変換することで、転圧に伴う沈下量と比抵抗値の関係が定義される。ここで、Hは単位面積当たりの層厚（cm）、Sは単位面積（1cm^2）、V_0は間隙水の体積（cm^3）hは沈下量（cm）、H_0は締固め前の層厚（cm）、である。

$$\rho = \frac{100}{\theta} \cdot R \cdot \Gamma = \frac{HS}{V_w} \cdot R \cdot \Gamma = \frac{(H_0 - h)S}{V_w} \cdot R \cdot \Gamma \quad (3)$$

３．比抵抗値と沈下量の傾向

3.1 試験方法

盛土を転圧した際の比抵抗値と沈下量の傾向を確認するために、4 つの施工現場において、比抵抗値と沈下量を測定した。また、採取した盛土材料の土質試験結果などから体積含水率を算出した。比抵抗値は、市販の導電率計（Spectrum EC メーター2266FS）を用いて 1 箇所あたり 5 点の導電率を測定し、その平均値の逆数として求めた。沈下量は盛土に水糸を張り水糸から盛土までの下がりを計測、または盛土上のある点をオートレベルで計測することで求めた。なお、導電率および沈下量の測定は同一箇所にて巻き出しおよび各転圧回数毎に行った。

3.2 試験結果

各盛土で測定した比抵抗値ρと沈下量hの関係を**図** 2～5 に示す。図中には、**式**（3）による理論曲線も構造特性値Γと共に示しておく。これらの図から、転圧が進み沈下量hが増加するにつれて、比抵抗値ρが減少していることがわかる。これは、転圧が進むにつれて、間隙中の空気が排出され、盛土材料全体の飽和度が高まった結果であると考えられる。また、転圧が進むにつれて、比抵抗値ρが徐々に特定の構造特性値Γを有する理論曲線に漸近していることが認められる。それぞれの理論曲線の構造特性値Γを見ると、巻き出し時に比べて、転圧完了時の方が小さな値となっている。先述したように、構造特性値Γは、ある状態の土の微視的構造を定量的に示す値として定義されている。一般的に、盛土材料の間隙水の比抵抗値ρ_{wa}は、電解質や非電解質などが添加されない限り、締固め作業中に変化しないと考えられる。そのため、構造特性値Γは、**図** 1 に示すモデルに示すように、並列部分を表す$(1-F)$の値によって決まる。つまり、土の微視的構造に何らかの変化が起きた

時に、構造特性値Γも変わることになる。このことから、巻き出し時に比べて、転圧完了時の理論曲線の構造特性値Γが変化しているということは、締固めに伴う土の微視的構造の変化が起きていることを定量的に表現していると考えられる。また、転圧完了付近で、特定の構造特性値Γを有する理論曲線に漸近していることから、この時には土の微視的構造に大きな変化が起き難くなっており、一定の構造になりつつあることを示していると思われる。したがって、土の締固めの過程において、比抵抗値ρと沈下量hのプロットが、ある構造特性値Γの理論曲線への漸近を確認することで、盛土材料は、それ以上締固められず構造が変化しない所定の締固め度に到達したと判断できる。

導電率の測定

沈下量の測定

写真 1　現場測定状況

4．乾燥密度の推定

4.1 試験方法

比抵抗値と乾燥密度の関係を確認するために、複数の盛土施工現場において比抵抗値と乾燥密度を測定した。また、現場で採取した盛土材料から、体積含水率を求めた。比抵抗値は、市販の導電率計（Spectrum EC メーター2266FS）を用いて 1 箇所あたり 5 点の導電率を測定しその平均値の逆数として求めた。乾燥密度は、RI 法または砂置換法により求めた。また、現場で採取した盛土材料を用いて、JIS A 1210「突き固めによる土の締固め試験」に準じた室内試験を実施し、乾燥密度と体積含水率を求めた。このとき、作製した供試体においても、市販の導電率計を用いて 1 供試体あたり 5 点の導電率を測定し、その平均値の逆数を

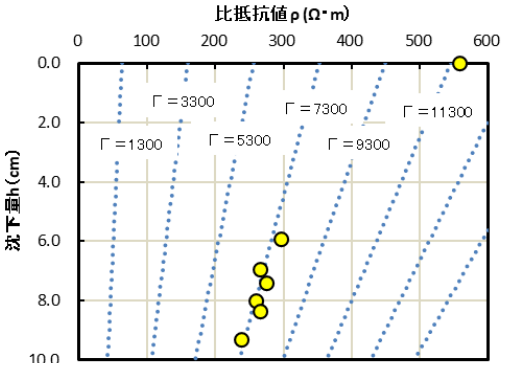

図 2　比抵抗値と沈下量の関係（盛土 1）

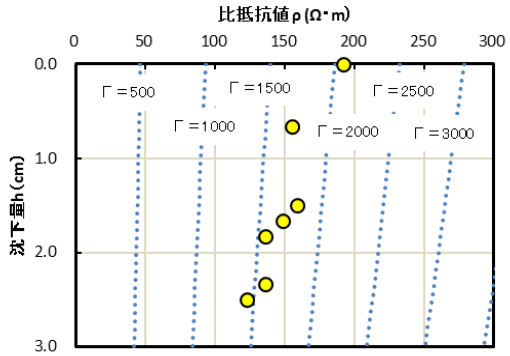

図 3　比抵抗値と沈下量の関係（盛土 2）

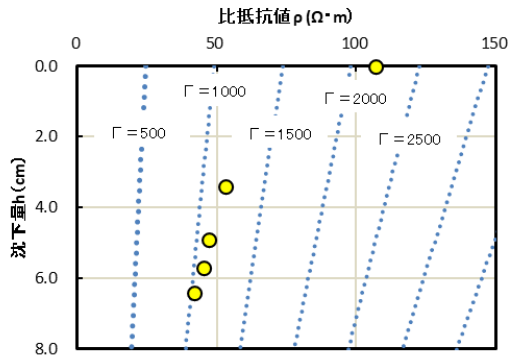

図 4　比抵抗値と沈下量の関係（盛土 3）

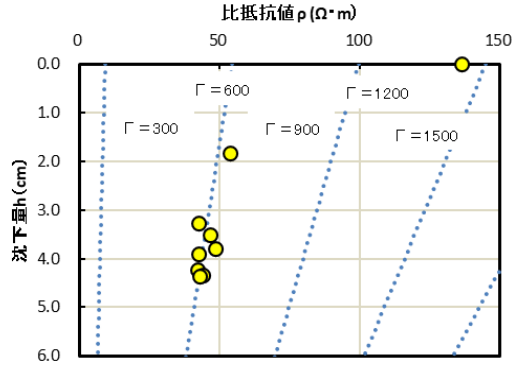

図 5　比抵抗値と沈下量の関係（盛土 4）

比抵抗値として求めた。

4.2 試験結果

複数の盛土または室内試験において求めた比抵抗値ρ、乾燥密度γ_d及び**式**（1）から求めた構造特性値Γの関係を**図** 6 に示す。また、**図** 7 は、種々の土質の最適含水比の状態における土全体に対する土粒子の体積率V_s/Vと含有水分の体積率V_w/Vとの関係を表した図である [2)]。この図には、飽和度S_rと空気間隙率v_aが一定の値の線も記載している。飽和度S_rは、土中の間隙が水で満たされている体積の割合（%）である。**図** 7 を見ると、締固め曲線がピークを示す最適含水比の状態（図中の点群）は、飽和度 90%（図中の赤線）あたりに多く分布していることがわかる [2)]。国土交通省によって定められた「品質管理基準及び規格値」では、河川土工及び道路土工での現場密度の測定において、粘性土の場合、飽和度 S_r の範囲 $85\% \leqq S_r \leqq 95\%$ を規格値としている。

以上のことから、**図** 6 に示す測定結果について、飽和度 S_rが $85\% \leqq S_r \leqq 95\%$ の範囲を満たす値のみを抽出すると**図** 8 のようになり、相関係数の値が $R = 0.986$となり、極めて強い相関性を示す結果となった。この関係を用いると、乾燥密度の推定式が次式のように求められた。

$$\gamma_d = (\alpha\Gamma^{-\beta})\rho \qquad (4)$$

導電率の測定　　測定後の供試体

写真 2　室内試験状況

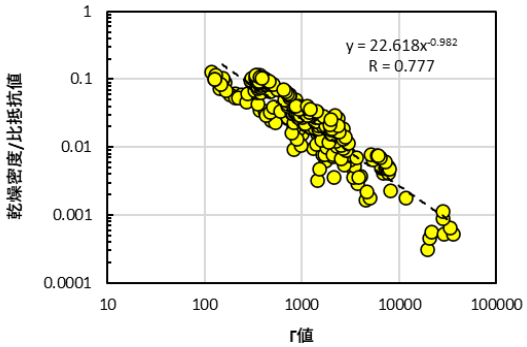

図 6　乾燥密度、比抵抗値
および構造特性値の関係

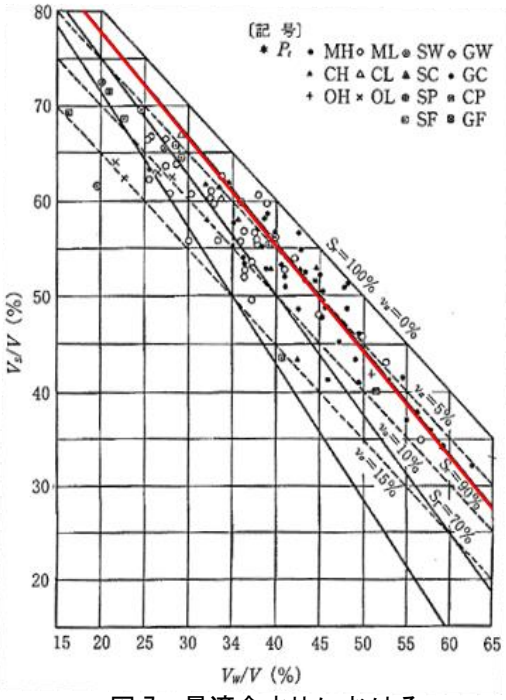

図 7　最適含水比における
空気間隙率と飽和度の分布 [2)]

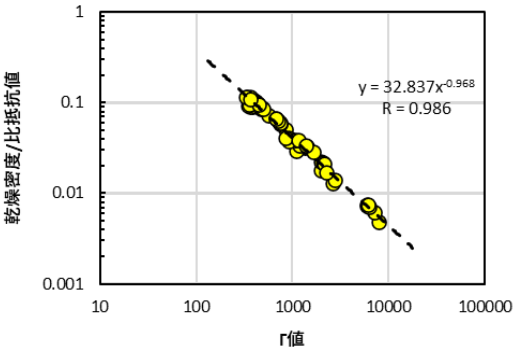

図 8　乾燥密度、比抵抗値
および構造特性値の関係
（$85\% \leqq S_r \leqq 95\%$）

ここに、γ_dは算出した乾燥密度（g/cm^3）、Γは土の構造特性を示す構造特性値（Ω）、ρは地盤の比抵抗値（Ω･m）、α及びβはこれまでの測定結果から求められる係数であり、現状では$\alpha = 32.837$、$\beta = 0.968$ という値を得ているが、今後の測定結果によりこれらの定数の値は変化するものと思われる。

以上のことから、**式（4）**を用いることで、比抵抗値および構造特性値から、より高い精度で乾燥密度を推定することが可能になったと考えられる。また、推定した乾燥密度から、密度比による盛土の品質管理も可能となると思われる。

５．まとめ

5.1 本報の知見

本報で得られた知見を以下に示す。

(1) 盛土の締固め過程における比抵抗値と沈下量を測定した結果、これらが土の立体構造モデルで定義する理論曲線に漸近することを確認した。このことから、ある土の構造を示す理論曲線に達したとき、盛土は所定の締固め度に到達したと判断出来ると考えられる。

(2) 盛土の比抵抗値と乾燥密度を測定した結果、乾燥密度の推定式である**式（4）**を得た。**式（4）**を用いることで、測定した比抵抗値、それが漸近する理論曲線の構造特性値から、乾燥密度が算出でき、密度比によるによる盛土の品質管理が可能となると思われる。

５．２ 今後の展開

今後は考案した乾燥密度の推定式の精度向上を目的として盛土の測定を継続して行っていく。また、既存の技術である RI 法や砂置換法などを用いた盛土の管理方法と本技術との比較を行い計測にかかる時間やコストの優位性を確認する。

【参考文献】

1) 福江正治，田屋直美，堀部 浩：粘土の微視的構造と比抵抗の関係，第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.385-386、1998.

2) 久野悟郎：土の締固め，技報堂全書，pp.77-85，1963