

【建設工学研究所論文報告集第62号〔論文〕2020年11月】

## 盛土の簡易動的コーン貫入試験による Nd 値と 電気抵抗特性に関する初歩的検討

### Elementary Study on Nd Value by Portable Dynamic Cone Penetration Test and Electrical Resistance Properties of Embankment

野 並 賢      今 川 峻 平      上 野 怜 風      鳥 居 宣 之  
Satoshi Nonami      Shumpei Imagawa      Reo Ueno      Nobuyuki Torii

#### 1. はじめに

インフラ構造物の維持管理の観点から、既設盛土の経済的な安定性評価手法の検討が行われている。既設盛土は無数に存在するため、詳細調査対象となる盛土を絞り込めるよう、現地点検<sup>1), 2)</sup>～簡易調査<sup>3)</sup>～詳細調査を効率よく進める必要がある。この際、作業労力や経済性の観点から、現地点検と並行して実施可能な調査手法が望まれており、その一つとして簡易動的コーン貫入試験<sup>4)</sup>の適用が挙げられる。

一方、簡易動的コーン貫入試験と同じ原理でやや大型の動的コーン貫入試験<sup>5)</sup>から得られる  $N_d$  値は、締固め度および粒度特性と含水比の影響を受けることが確認されており、最適含水比における粒度特性と締固め度の関係が定量的にまとめられている<sup>6)</sup>。簡易動的コーン貫入試験の盛土への適用性を高めるには同様の検討が望まれるが、これを系統的に調べた事例はあまり見られない。また、簡易動的コーン貫入試験のようなサウンディングは一般に試料採取機構がついておらず、試験時に含水比を直接的に評価することが困難である。

以上を背景に本研究では、密度や含水比の設定が比較的容易な室内土槽を対象に、数種類の盛土材料を用いて締固め度と含水比を変化させて簡易動的コーン貫入試験を実施した。あわせて、原位置で簡易に計測可能な盛土の電気抵抗特性と含水量の関係を実験的に求めた。得られた結果に基づき、簡易動的コーン貫入試験から得られる  $N_d$  値および電気抵抗特性の傾向や、今回の実験条件の適性および課題の抽出を行った。

#### 2. 試料および試験方法

##### 2. 1 試料および室内土槽作製

試料の粒径加積曲線を図1に、粒度特性を表1に示す。用いた盛土材は細粒土1種類、砂質土2種類、礫

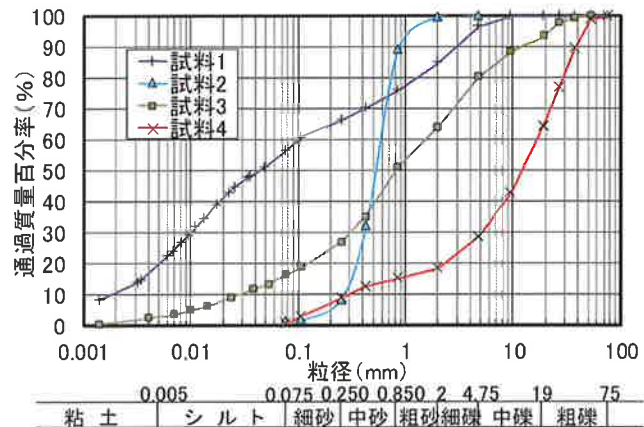


図1 試料の粒径加積曲線

表1 試料の粒度特性

	試料1	試料2	試料3	試料4
礫分(%)	14.9	0.2	35.9	81.4
砂分(%)	28.6	98.4	47.8	18.0
細粒分(%)	56.5	1.4	16.3	0.6
$U_c$	55.3	2.29	53.2	55.5
$U_{c'}$	0.56	1.06	2.12	5.22
$D_{50}$	0.043	0.53	0.81	12.0

質土 1 種類で、砂質土は粒度分布が異なる試料を選んだ。標準エネルギーによる締固め曲線を図 2(a)~(d)までに示す。図中の○印のプロットは実験を行った条件を表しており、締固め度  $D_c=80\%$ 、 $90\%$ 、 $100\%$  とし含水比を 3~4% 間隔で変

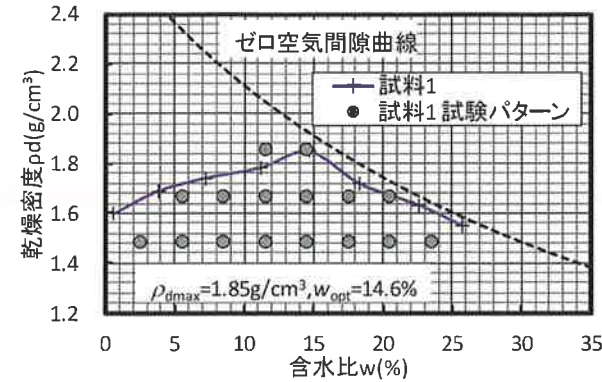


図 2(a) 試料 1 の締固め曲線

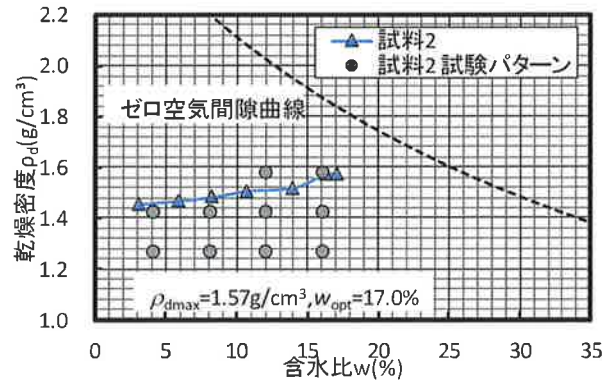


図 2(b) 試料 2 の締固め曲線

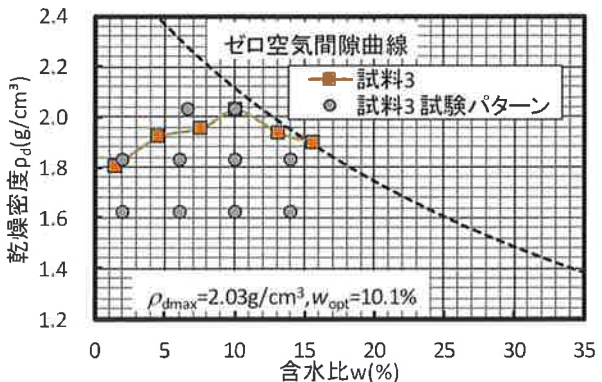


図 2(c) 試料 3 の締固め曲線

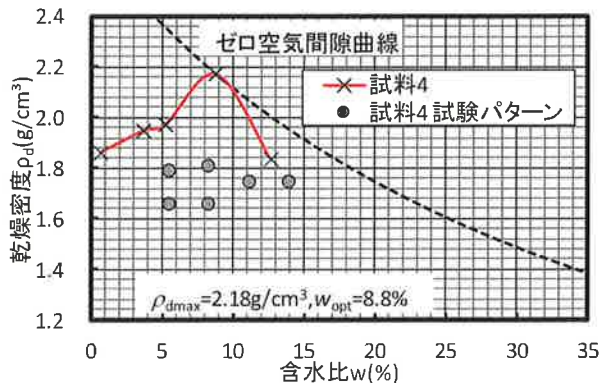


図 2(d) 試料 4 の締固め曲線

えて実験を行った。ただし、試料 4 は容器の剛性が小さく締固めエネルギーが適切に伝達できず、目標とした締固め度に到達しなかったため、設定した締固め度は 73%~83% の値となった。

室内土槽は試料 2 と試料 1 の一部は高さ 30cm、容量 37.0L のプラスチック製容器、それ以外は高さ 33cm、容量 19.53L のステンレス製ペレー缶を用いた。所定の締固め度となるよう、コンクリート製のハンマーを用いて厚さ 10~12cm で 3 層毎に締固めた。含水比は蒸留水に pH 調整剤 (観賞魚用のカルキ抜き) を混ぜて比抵抗を 30mS/m とした水を用意し、加水しながら調整した。

## 2. 2 簡易動的コーン貫入試験

図 3 に簡易動的コーン貫入試験の模式図を示した。質量 5kg のドライブハンマーを高さ 50cm から自由落下させ、直径 16mm のロッド先端に装着した直径 25mm のコーンを 10cm 貫入する打撃回数  $N_d$  を求める試験である。ハンマーを入れても 10~15kg と軽量で携帯性に優れており、取り扱いも簡単であるので、斜面の表層層厚や建築物の簡易な支持力判定に用いられている。地表面から 10cm までは地表の緩みの影響を受けると考えられるので、この影響を避けるため、深度 10~20cm と 20~30cm を 2 回計測した平均値を採用した。ただし、試料 2 の簡易動的コーン貫入試験結果はハンマー落下高さを誤って実施したため、結果整理時には採用していない。

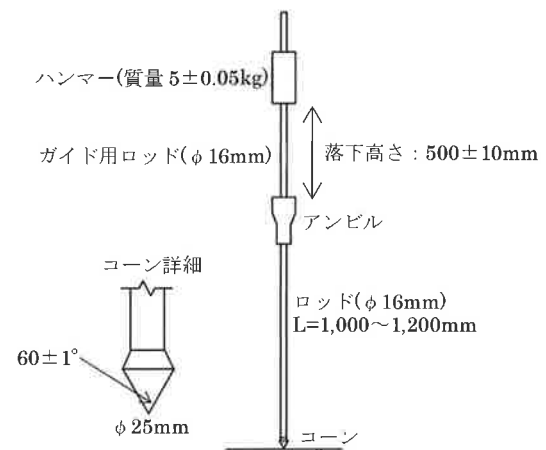


図 3 簡易動的コーン貫入試験模式図

### 2. 3 電気抵抗特性の測定

盛土の電気抵抗特性の計測では今回、土壌の誘電特性を測る土壌水分計と、土中水の電気伝導率を測る電気伝導率計を用いた。以下に計器と計測方法の概要を示す。なお、試料4は粒径が大きく、電気抵抗特性を計測するプローブが挿入できなかった。

#### 2. 3. 1 土壌水分計

盛土は水、空気、土粒子から構成されているが、水の比誘電率が80なのに対し、空気は1、土粒子は2~5程度と圧倒的に小さいため、水の割合で土壌全体の比誘電率が決まる。このことを利用して盛土の誘電率を測定することで水分量を換算する手法が実用化されている。本研究ではADR法によって誘電率を測定する土壌水分計(大起理化工業製DIK-311F)を用い、地表面3箇所計測しそれらの平均値を採用した。写真1に計測状況を示す。

#### 2. 3. 2 電気伝導率計

土粒子と空気の電気抵抗は水と比べて非常に大きいため、土の比抵抗値は主に水分量に比例することが想定される。そこで、電極間の液体の電気抵抗を計測する電気伝導率計の適用性を検討した。本研究では交流二電極法によるポータブル電気伝導率計(東亜DKK製CM-31P)を用いた。本計器は土壌水分計と比べ安価であるのが特徴である。締固め時にプローブの直径と同じロッドを地表面に挿入しておき、計測時にプローブと入れ替えて計測を行った。土壌水分計と同じく、地表面3箇所計測しそれらの平均値を採用した。なお、計測値は時間と共に変化する傾向がみられたため、測定開始から5秒、10秒、30秒、60秒、120秒、180秒後の値を計測した。写真2に計測状況を示す。

## 3. 結果および考察

### 3. 1 簡易動的コーン貫入試験

#### 3. 1. 1 含水比と締固め度が $N_d$ 値に与える影響

各盛土材の締固め度毎の  $N_d$  値と含水比の関係を図4に、各盛土材の締固め度毎の  $N_d$  値と飽和度の関係を図5に示した。図4より、同一試料、同一締固め度の  $N_d$  値に着目すると、ほとんどの含水比で平均粒径の大きい試料4、試料3、試料1の順番に  $N_d$  値が大きくなっていることがわかる。最適含水比における動的コーン貫入試験の  $N_d$  値は80%通過粒径に比例する<sup>6)</sup>ことを踏まえると、貫入力に拘らず  $N_d$  値は粒径に依

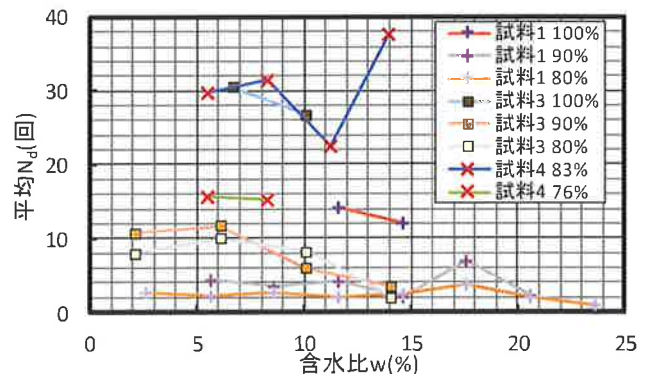


図4 各盛土材の締固め度毎の含水比と  $N_d$  値の関係



写真1 土壌水分計の計測状況



写真2 ポータブル電気伝導率計の計測状況

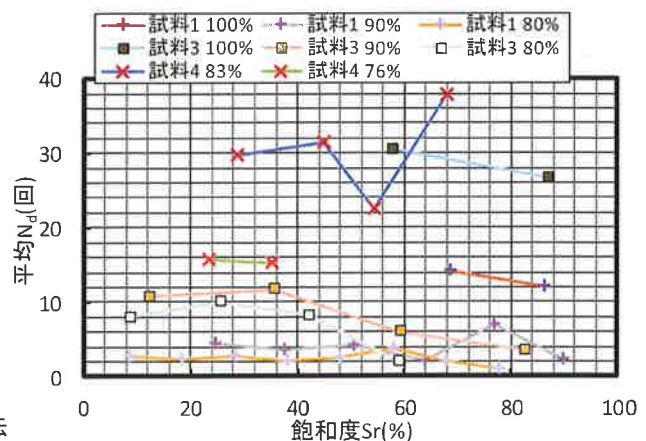


図5 各盛土材の締固め度毎の飽和度と  $N_d$  値の関係



存する傾向がわかった。

次に、同一試料で締固め度毎に含水比が  $N_d$  値に及ぼす影響について、粒径の小さい試料 1 は、含水比と  $N_d$  値に一定の傾向は現れず、 $D_c=90\%$ では  $w=17.5\%$ の結果が他の含水比よりもかなり大きくなった。これは含水比を調整する際に団粒状態になり、含水量を均一にすることが困難であったこと、試験途中で使用する容器を変えたことなども影響している可能性がある。

砂質土を主体とし、多くの盛土材と類似の粒度特性を有する試料 3 は、含水比が 6%から 3%に減少すると締固め度に拘らず  $N_d$  値は減少した。これはコラプス現象により試料の粘着力が急激に低下したことが主因と考えられる。 $w=6\%$ より湿潤側においては、いずれの締固め度でも含水比の増加に伴い  $N_d$  値が減少する傾向が確認できた。したがって、 $N_d$  値から締固め度を評価するにあたっては、粒度のみならず含水比の影響を考慮する必要があると考えられる。

一方、礫分主体の試料 4 は  $N_d$  値のばらつきが他の試料に比べて大きく、含水比が  $N_d$  値にもたらす影響は把握できなかった。このことは、貫入力の小さい簡易動的コーン貫入試験は、 $N_d$  値で評価可能な最大粒径に限界のあることを示唆するものと考えられる。図 5 は X 軸を飽和度にしたものであるが、含水比と同様の傾向であった。

図 6 は最適含水比の  $N_d$  値 ( $N_{dopt}$  値と称する) で正規化したものと、最適含水比との差 ( $w-w_{opt}$ ) との関係を示した。試料 1 は均質に含水比調整をできなかったことの影響が、試料 4 については礫打ちの影響で明確な傾向を把握することができなかったが、試料 3 は  $D_c=90\%$ の方が  $D_c=80\%$ よりも  $N_d/N_{dopt}$  は大きくなる傾向が確認できた。

### 3. 1. 2 締固め度と $N_d$ 値の傾き

同一の含水比における各盛土材の締固め度と  $N_d$  値の関係を図 7(a)~(c)に示した。各試料とも最適含水比からの差が同じ試料のプロットを揃えている。最適含水比付近の試料の傾向を整理した図 7(a)に着目すると、締固め度が大きくなるにつれて  $N_d$  値が大きくなっていることがわかる。

試料 1 と試料 3 については  $D_c$  が 80%→90%に変化するときよりも 90%→100%に変化する時の方が  $N_d$  値の増加割合が大きくなることが確認できた。なお、試料 4 については  $D_c=100\%$ の試験を実施していないものの、 $D_c$  が 80%→90%で  $D_c$  の増加による  $N_d$  値の増加量は他の試料よりも大きい。同様の傾向は動的コーン貫入試験でも確認されており<sup>6)</sup>、 $D_c \sim N_d$  値の勾配は粒径に依存するものと考えられる。

図 7(b)、(c)は  $w_{opt}$  より湿潤側および乾燥側の結果を示しているが、 $D_c$  が 80%→90%のときの増加量は

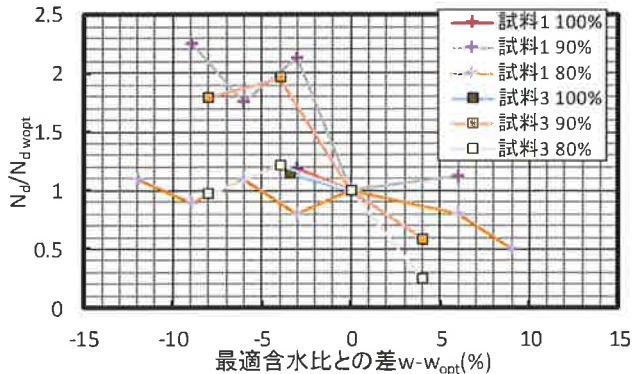


図 6 最適含水比との差  $w-w_{opt}$  と  $N_d$  値を正規化した  $N_d/N_{dopt}$  の関係

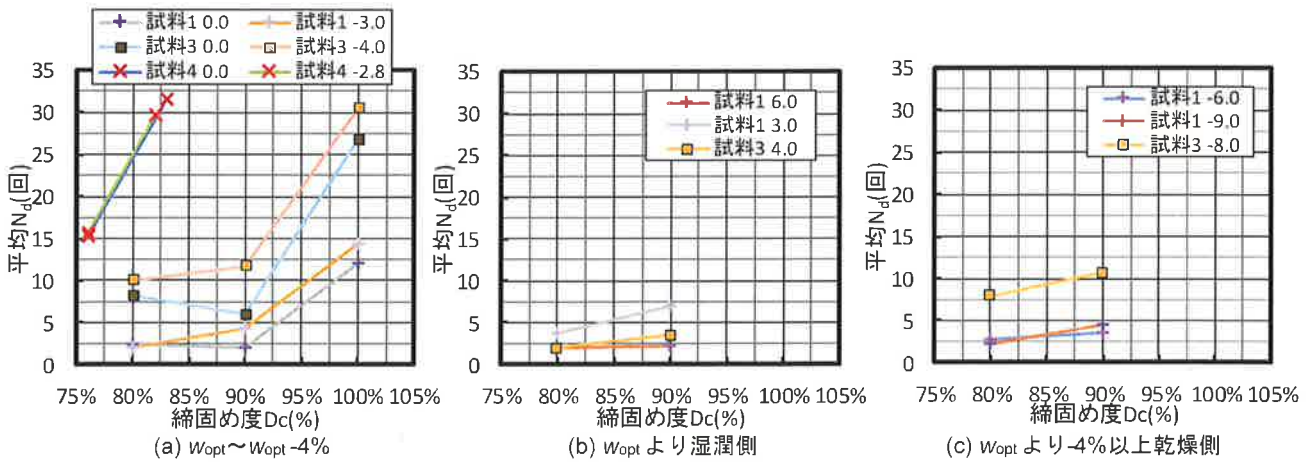


図 7 各盛土材の含水比毎の締固め度と  $N_d$  値の関係

$w_{opt}$  の傾向に類似している。

### 3. 2 電気抵抗特性

#### 3. 2. 1 土壌水分計の計測結果

土壌水分計は計測値である出力電圧から体積含水率を求める経験式が用意されているが、今回は計測結果と設定値との関係を把握するため、出力電圧を用いて整理した。図 8(a)~(c)に締めめ度毎に整理した各試料の出力電圧と体積含水率の関係を示す。(a)は試料 1、(b)は試料 2、(c)は試料 3 である。これより、ばらつきは見られるもののいずれの試料も概ね体積含水率に比例し出力電圧も大きくなっており、土壌水分計の測定原理の適性が伺える。また、試料 1 と試料 3 の出力電圧の取幅に対して試料 2 が比較的小さい。これより、貧粒度の試料は体積含水率に対する誘電率の変化が生じにくい結果となった。また、試料 1 と試料 3 の体積含水率~出力電圧の値が同程度なことから、粒径の影響は明確でなかった。一方、体積含水率が 15%以下の範囲における出力電圧と体積含水率の関係はどの試料も似た値をとっており、試料の違いによる傾向は読み取れなかった。

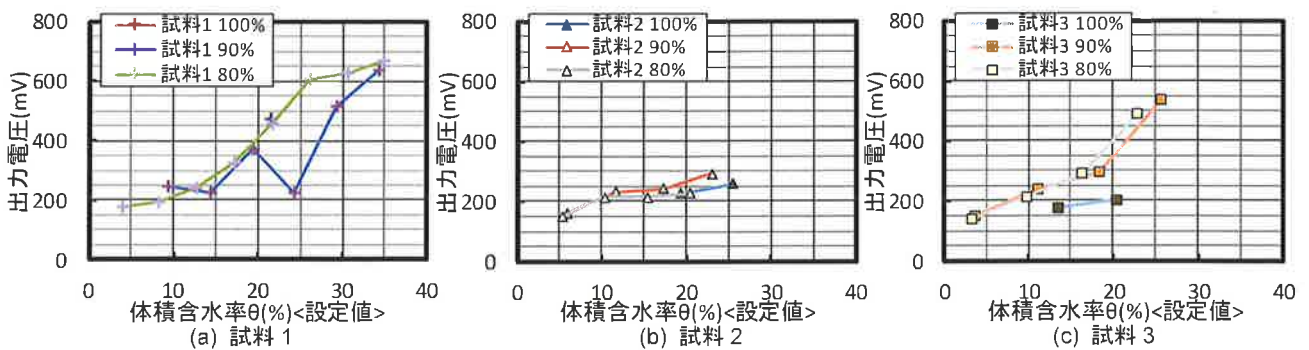


図 8 締めめ度毎の土壌水分計の体積含水率と出力電圧の関係

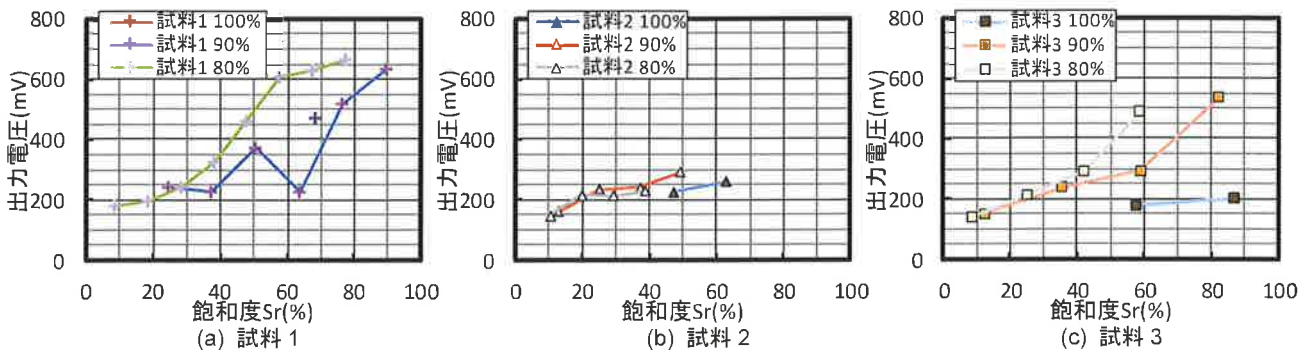


図 9 締めめ度毎の土壌水分計の飽和度と出力電圧の関係

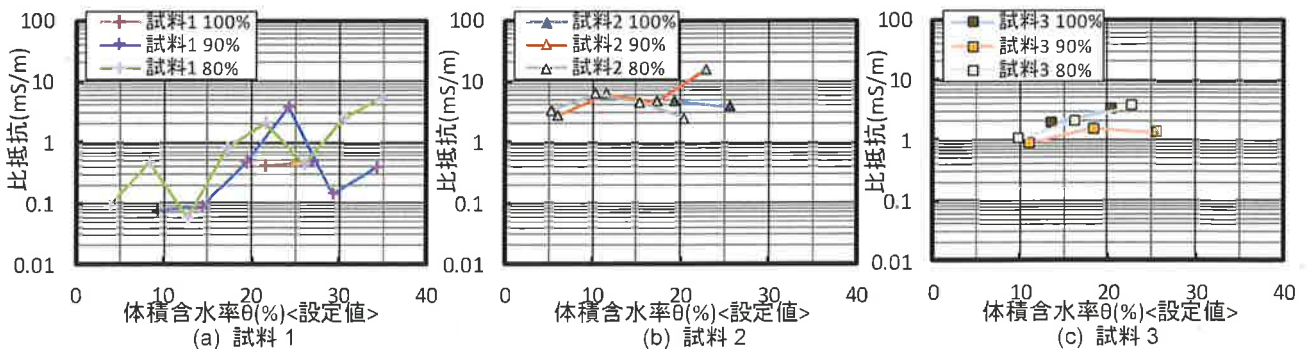


図 10 締めめ度毎の電気伝導度計の体積含水率と比抵抗の関係

図 9(a)~(c)には出力電圧と飽和度の関係を示す。値のばらつきはあるものの、どの試料も締固め度が 80% の試料の方が概ね出力電圧が高い値をとっている。このことは、締固め度の影響を評価に組み込む場合、飽和度を指標にするのが適当であることを示唆している。

3. 2. 2 電気伝導率計の計測結果

図 10(a)~(c)に各試料の締固め度毎の比抵抗と体積含水率の関係を示す。どの試料の比抵抗もばらついており、その程度は土壌水分計と比べて大きい。全体的に土の比抵抗値と体積含水率の間の相関は明確でなく、実用化に至るような結果は得られなかった。横軸を飽和度としても同様であった。比抵抗を同じ体積含水率毎に見ると、試料 2 が一番高く試料 1 が一番小さい値をとった。締固め度に着目すると、どの試料もかなりばらついているものの  $D_c=80\%$  が一番高い値となった。図 11 に各試料の締固め度毎の電気伝導率計による比抵抗値と土壌水分計による出力電圧の関係を示したが、両者に明確な相関は見られなかった。

比抵抗値は計測値が経時変化したため、その傾向を計測した。一例として、図 12 に試料 1 の最適含水比における締固め度毎の比抵抗と経過時間の関係を示す。図中には 3 回行った結果を示している。これより時間の経過によって値が小さくなるものもあれば、その逆の傾向を示すものも見られた。それよりも同条件における測定結果のばらつきの方が大きく、測定結果の不安定さが指摘できる。

4. おわりに

本論文は経済的、簡便に盛土の品質を評価する手法を検討するため、室内土槽を用いた簡易動的コーン貫入試験と、土壌水分計と電気伝導率計による盛土の電気抵抗特性を計測した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 簡易動的コーン貫入試験の  $N_d$  値は、試料の粒径に比例して大きくなる。また、締固め度が大きくなると  $N_d$  値は大きくなり、その傾きは締固め度と粒径に比例し大きくなる。
- 2) 良粒度の砂質土はコラプス現象を生じる含水比の領域を除き、含水比に反比例し  $N_d$  値は小さくなる。ただし、礫分を多く含む試料と細粒分主体の試料は、ばらつきの影響の方が大きく、明確な結果は得られなかった。
- 3) 土壌水分計の出力電圧は体積含水率と良好な相関があるが、貧粒度の試料は変化の程度が鈍い。一方、粒径の影響は確認できなかった。ただし、体積含水率が 15% 以下では試料に拘らず両者の関係は同一の傾向となった。
- 4) 締固め度の違いによる土壌水分計の出力電圧の影響を評価するには、飽和度による整理が適当であることが示唆された。
- 5) 電気伝導率計による計測結果はばらつきが非常に大きく、盛土の含水量と電気伝導度間に明確な相関は見られなかった。

次に、本研究の結果を踏まえた課題を以下に示す。

- a) 今回用いた室内土槽の容器は剛性が小さいため、試料の締固め時の衝撃による変形が避けられなかった。この影響で、特に粒径の大きな試料では設定した締固め値が得られない土槽があった。したがって締固め度~ $N_d$  値の定量的

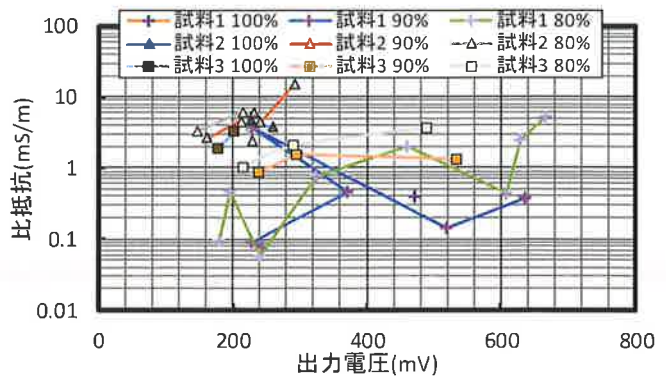


図 11 土壌水分計による出力電圧と電気伝導率計による比抵抗の関係

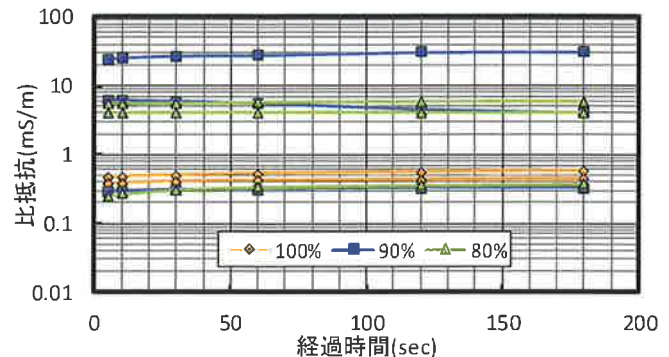


図 12 試料 1 の最適含水比における計測経過時間と比抵抗の関係

な関係を得るためには、剛性の高い容器を用い、原位置と室内土槽の  $N_0$  値の違いを補正したうえで評価を行う必要がある。

- b) 簡易動的コーン貫入試験は貫入力小さいため、試料の粒径が大きくなるとかなりばらつきが大きくなることが確認された。したがって、本試験の  $N_0$  値の信頼性を高めるためには、粒径の適用範囲に関する検討を行う必要がある。
- c) 今回用いた土壌水分計のプロープは、粒径が大きな試料では挿入が困難であった。また測定装置の構造上、動的コーン貫入試験孔を活用して、試験実施深度を対象とした測定はできない。このため、動的コーン貫入試験でできる孔へ挿入可能なプロープを用いた検討が望まれる。
- d) 動的コーン貫入試験の結果のばらつきを考慮すると、 $N_0$  値と粒度特性および土壌水分計によって盛土の締固め度と含水量を定量的に評価するためには、今後多くの試料に対して実験を行い、それらを反映した回帰式を見出す必要がある。

### 参 考 文 献

- 1) 野並 賢, 大村 宜史, 中西 典明, 澁谷 啓, 片岡 沙都紀: 既設道路盛土の現地点検による地下排水工点検フローの検討, 第 54 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1093-1094, 2019.
- 2) 野並 賢, 大村 宜史, 小田 高幸, 澁谷 啓, 片岡 沙都紀, 芥川 真一: 既設道路盛土の現地点検によるのり面排水工点検フローの検討, 第 54 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1095-1096, 2019.
- 3) 野並 賢, 戎 剛史, 片岡 沙都紀, 澁谷 啓, 谷 和夫, 千野 克浩: 沢埋め盛土を対象とした簡易安定性評価手法の提案とその検証事例, 地盤工学ジャーナル, Vol. 13, No. 4, pp. 269-281, 2018.
- 4) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説 第 3 章 簡易動的コーン貫入試験, pp. 317-324, 2013.
- 5) 地盤工学会: 地盤工学会基準・同解説 動的コーン貫入試験方法 (JGS 1437-2014), 2014.
- 6) 野並 賢, 澁谷 啓, 片岡 沙都紀, 鳥居 宣之, 千野 克浩: 動的コーン貫入試験と粒度特性を用いた既設盛土の締固め度推定方法の検討, 土木学会論文集投稿中, 2020.

### 著 者

野並 賢	神戸市立工業高等専門学校准教授, 博士 (工学), 地盤工学
今川 峻平	大阪メトロ株式会社, 地盤工学 (元神戸市立工業高等専門学校学生)
上野 怜風	西日本高速道路株式会社, 地盤工学 (元神戸市立工業高等専門学校学生)
鳥居 宣之	所員 (非常勤), 神戸市立工業高等専門学校教授, 博士 (工学), 斜面防災工学