

# 迅速な設置が可能な地盤比抵抗測定における 打込み電極管の開発

打込み電極管の適用性と最近の開発状況

池上 浩樹\*<sup>1</sup>・藤原 齊郁\*<sup>1</sup>

Keywords : driving-pipes, resistivity measurement, high strength, ground improvement, construction management

打込み管, 比抵抗測定, 高耐力, 地盤改良, 施工管理

## 1. はじめに

近年、地盤改良工事に対する要求項目や要求品質レベルの高度化に伴い、改良地盤の評価の重要性が高まりつつある。背景の一つとして、既存施設の耐震補強や都市部での構造物構築・改修工事に伴う地盤改良工事のような特殊条件での施工需要の増加が挙げられ、これらは一般的な機械攪拌工法での対応は難しいとされている<sup>1)</sup>。既存構造物や狭隘部に対応した工法としては薬液注入工法や高圧噴射攪拌工法があり、施工機械が小型である点や、注入ロッドを介した固化材供給など小型装置による地中アプローチである点などが共通している。ただし、これらの工法は発現強度や出来形が地盤条件に左右されやすい傾向があり、出来形の把握は品質を評価する上で重要な項目の一つであると考えられる。つまり、出来形を正確に把握することができれば、改良地盤に対する品質保証の精度向上が見込まれることになる。従来、地盤改良工事における施工管理としては、施工中の固化材の注入圧や注入量のモニタリング、事後のコアボーリングを用いた観察・試験などが行われ、いずれも出来形の確認に関しては間接的な情報に留まっていた。すなわち、改良地盤の品質評価の精度が限定的となることから、実務的には目標強度の割増しや高い改良率などにより品質の不確実性を補う現実があったと考えられる。

一方で、これまでも出来形確認に関する様々な取り組みが行われている。小峯<sup>2)</sup>は薬液注入工法を対象に薬液や地盤・地下水の比抵抗値に制約はあるものの、

比抵抗トモグラフィによる改良範囲評価の適用性を示している。また、実務での大規模な薬液注入施工を対象とした比抵抗トモグラフィとして、小川ら<sup>3)</sup>による事例などがあり、いずれも注入改良体の出来形確認法としての比抵抗トモグラフィの適用性が示されている。また、高圧噴射攪拌工法では音波による方法<sup>4)</sup>や高圧水の切削音を計測する方法<sup>5)</sup>など様々な取り組みが行われている。

著者らは、これまで地盤改良施工における施工時管理として比抵抗トモグラフィを用いた地盤改良体の出来形確認法に着目し、電極設置手段として打込み式の電極管（以降、打込み電極管）の適用を検討している。電極の設置に関しては、測定精度の向上には測定対象に近接することが望ましく<sup>2)</sup>、電極数も多い方が望ましい。従来実施されているボーリング孔を用いた電極設置では、コスト面も含め電極設置箇所や設置数が限られ、更にボーリング孔の構築、電極周囲の埋戻し・養生等が必要であり、多大な手間を要する。これに対し、打込み電極管は、これらの課題を解決する手段として期待されるものである。

打込み電極管に類似しボーリング孔を用いることなく地中に電極を設置する方法については、いくつかの既往事例がある。Kiflu<sup>6)</sup>は地表面電極と打込み方式により設置した地中電極で探査領域を挟みこむ探査方式「MERIT (Multi-Electrode Resistivity Implant Technique)」によって従来の地表面だけに電極設置する方式と比較して探査精度が向上することを室内実験、解析、現場での実測・解析で示している。Pidlisecky ら<sup>7)</sup>はコーン

\* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

貫入試験用の車載型打込み装置にて4極法のプローブを打込み、比抵抗測定を行っている。Moreyら<sup>8)</sup>は鋼鉄ロッドで事前削孔した後に打込み方式により電極設置を行っている。これらはいずれも管1本あたりの電極数は限られており、比抵抗トモグラフィを実施するためには、地表面に多くの電極を設置するか、管の打込み本数を増やす必要がある。さらに、計測装置が大規模であったり管構造が複雑であるなどの課題がある。

本報では、これまで開発した打込み電極管の概要と比抵抗トモグラフィへの適用性を示すとともに、最近の開発状況として、新たに試作した高耐力多点電極管を用いた施工試験の結果について述べる。

## 2. 打込み電極管の概要

本報で扱う打込み電極管は、土壌浄化や液状化対策において簡易に地中に薬液<sup>9), 10)</sup>や空気<sup>11), 12)</sup>を供給する手段として開発されたもの<sup>13), 14)</sup>をベースとしている。注入管としての打込み管は堅固な鋼管を用いていたのに対し、電極管とするには絶縁性と耐久性を両立させる必要がある。すなわち、電極部以外を絶縁する必要があり、絶縁性を確保しながら打込みに耐え得る耐久性が必要となる。

表-1に本章で示す打込み電極管の一覧を示す。打込み電極管は管1本あたりの電極数により区分しており、複数の電極部を有するものを「多点電極管」、電極部が1点のものを「単点電極管」と称している。対象地盤はN値10以下としており、打込み限界はあるものの、一般に改良を必要とする地盤は軟弱であり、打込み限界が問題となる状況は少ない。打込み電極管により電極設置を行うことで、従来実施されているボーリング孔内に電極を挿入しCBモルタル等で埋め戻す方法に比べ、設置作業の手間が低減され、設置後に養生期間を設ける必要がなく打込み施工後直ちに測定が可能である。

### 2.1 多点電極管

図-1(a)に多点電極管の概要を示す。多点電極管は電極部である鋼管と絶縁部である塩ビ管を接合した構造である。そのため、地中深度方向に複数の電極を配することができ、これまで開発した打込み電極管の中で標準型に位置付けている。図-2には、多点電極管の施工手順を示す。(A)電極管内に打込み用の芯材を挿入した状態で打込みを行い(芯材打込み)、(B)打込み完了後に芯材を抜き取り、(C)測定プローブを挿入して測定を行い、(D)測定完了後に再び芯材を挿入し引き抜くことで電極管を残置することなく撤去出来る。写真-1に、

表-1 打込み電極管の一覧

Table 1 List of driving-pipes

名称	測定点数 (事例)	対象地盤	直径 mm
多点電極管	複数 (12点/本)	N値 ≤ 10	40~60
単点電極管	1点		

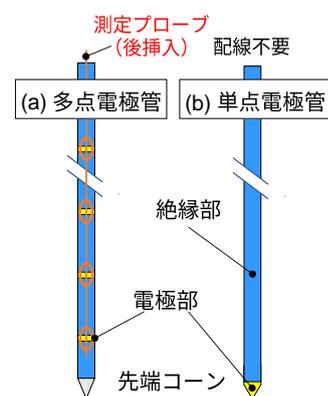


図-1 打込み電極管の概要

Fig.1 Overview of the driving-pipes

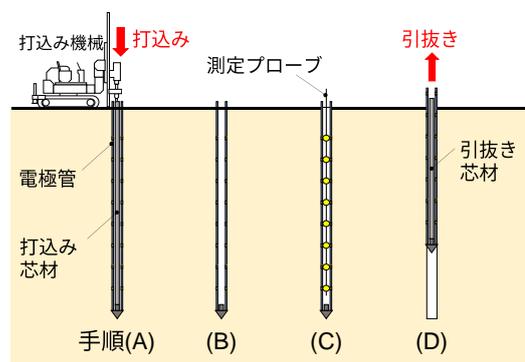


図-2 多点電極管の施工手順

Fig.2 Installation procedure of the multi electrodes driving-pipe

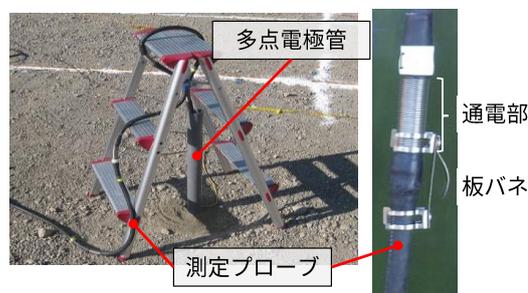


写真-1 測定プローブ

Photo.1 Measuring probe

測定プローブを示す。測定に当たっては、前述の通り、打込み芯材を抜き取った後に測定プローブを挿入する。

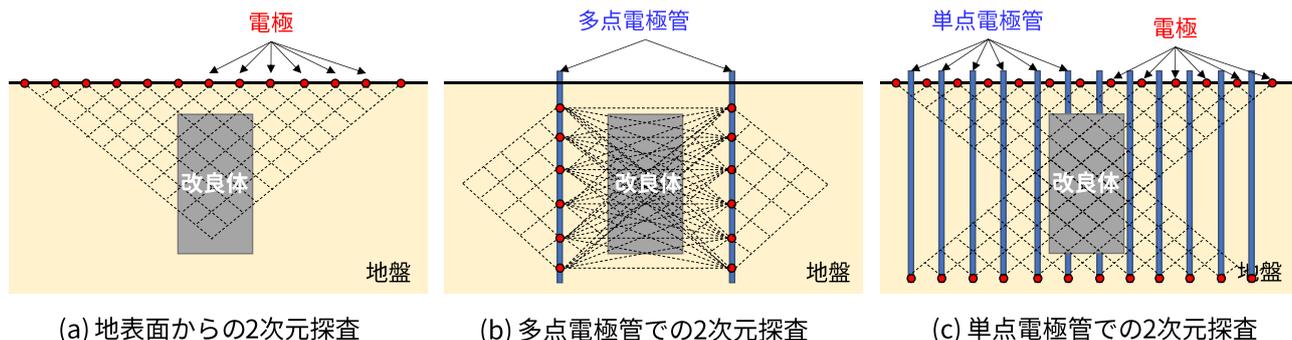


図-3 電極配置の例

Fig.3 Example of electrodes arrangement

測定プローブの通電部と電極部は板バネを介して電氣的に接続され、通電が可能となる。そのため、打込み時の多点電極管の継ぎ足しに際して、配線作業を行う必要がなく、施工手間の低減にも大きく寄与している。

2.2 単点電極管

図-1(b)に単点電極管の概要を示す。単点電極管は堅固な鋼管を樹脂により被覆処理した構造である。そのため、多点電極管と異なり打込み芯材が必要なく、標準長さ1mの管を継ぎ足しながら打込み機械にて直接打込むことが出来る。また、測定完了後の回収も可能である。複数本の打込みを行うことで地中に複数の電極を設けることができ、急遽補助的に電極を増やしたい時などでの使用を想定している。

3. 比抵抗トモグラフィへの適用性

図-3 に地盤改良体の出来形確認を想定した場合の電極配置の例を示す。同図(a)は、地質構造や地下空洞などの調査で一般的に用いられる電極配置であり、地盤改良体の出来形確認においては、電極から改良体間の距離が長くなってしまふ。そのため、最適な電極配置とは言い難い。同図(b)は、多点電極管を用いた場合の電極配置例である。地盤改良体に近接して電極を設置することが可能であり、(a)よりも高い測定精度が見込まれる点は容易に想像される。また、鉛直斜め方向に多点電極管を打込むことで、斜め一列に電極を配置することも可能である。同図(c)は、単点電極管を用いた例である。この場合、地中電極の数だけ打込み施工が必要となるが、地表面から地中内に水平一列に電極を配置することも可能である。斜め一列や地中内の水平一列は、打込み電極管を駆使した電極配置であり、測定条件や測定対象物に応じて柔軟な電極配置とそれによる測定精度の向上が見込まれると考えられる。

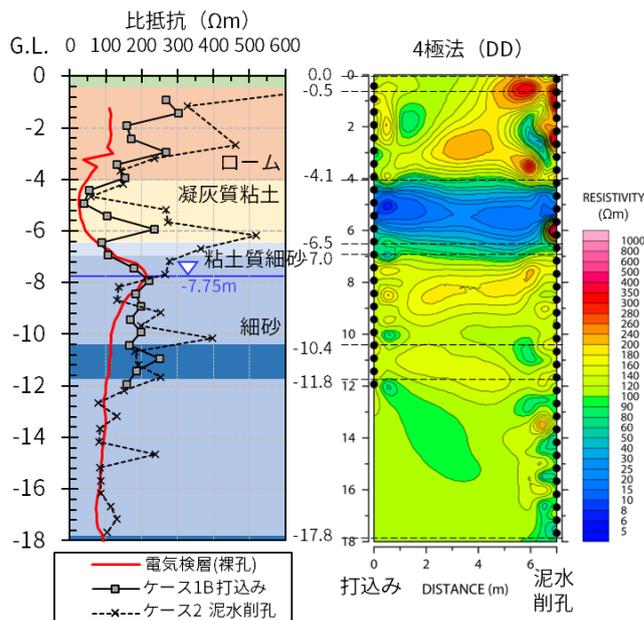


図-4 多点電極管による比抵抗トモグラフィ結果<sup>15)</sup>

Fig.4 Resistivity distribution from tomography using multi electrodes driving-pipes

図-4 に、多点電極管を用いた接地抵抗測定と比抵抗トモグラフィの結果<sup>15)</sup>を示す。測定対象は地盤改良体ではなく自然地盤ではあるものの、接地抵抗測定の結果より打込み方式で設置した電極の通電性に問題はなく、比抵抗トモグラフィ結果より G.L.-4.1m から-6.5m の粘土層の境界が明確に捉えられている。本結果より、打込み電極管の比抵抗トモグラフィへの適用性が示された。

4. 高耐力多点電極管を用いた施工試験

4.1 概要

打込み電極管に関する最近の開発状況として、適用範囲の拡大を目的とした検討について述べる。ここで

は、地表面からの探査や調査が困難な大深度のトンネル周囲の地盤判別や地盤改良の出来形確認へ打込み電極管を適用するために、新たに管構造と施工方法の検討を実施した。前節までに述べた地表面からの電極設置と異なり、大深度のトンネル孔内からの電極設置を想定した場合、①対象地盤は硬質・高水圧地盤となること、②水平から鉛直上向き方向への打込みを行うことへの対応が必要となる。ここでは、①に対して高耐力化を図った高耐力多点電極管を試作し、①・②に対してボーリング削孔とグラウト注入を併用する施工方法を採用することとした。ボーリングを実施することから従来実施されているボーリング孔を用いた手順で電極設置を行うことも考えられるが、打込み可能なグラウト強度を把握することで、グラウト注入と打込み電極管の打込みを同日に実施する必要がなくなり、施工工程を柔軟に調整することができる点がメリットとなる。

#### 4.2 試験条件

写真-2 に電極管の外観を示す。今回試作した高耐力多点電極管の基本構造は前述の多点電極管を踏襲しているものの、先端部分を鋼管とすることで高耐力化を図っている。施工手順や測定手順は多点電極管と同様である。

図-5 に施工試験ヤードの地盤条件の概要を示す。実験ヤードは、G.L.-1.8~9mがN値10以下の軟弱地盤であり、G.L.-4~6mにN値0~1の超軟弱地盤を介する。硬質地盤へグラウトを注入した上での打込みを想定した場合、打込みに伴うグラウトの側方変位は硬質地盤により拘束されることが考えられるが、本実験ヤードはN値10以下の軟弱地盤を含んでおり、側方変位の拘束を十分に再現できないことが懸念された。そこで、円柱のセメント改良体中にボーリング削孔とグラウト注入を行うことで硬質地盤による拘束の再現を試みた。セメント改良体の直径は1.6mであり、G.L.-15mまで施工されている。その強度は一軸圧縮強さで500kPa以上(Terzaghi & Peckの換算式<sup>16)</sup>によりN値に換算するとN値40以上)であった。

表-2 に試験ケースを示す。本施工試験では、打込み時のグラウト材齢を変化させることで、グラウト強度を変化させた。グラウト強度は、グラウト注入時の打ち上がり試料により作製した円柱供試体を用いた一軸圧縮試験により評価した。同表中には、Terzaghi & Peckの換算式により算定した換算N値も示す。いずれのケースにおいても打込み後に、打込み電極管の電極の通電性確認のために接地抵抗の測定を行った。接地

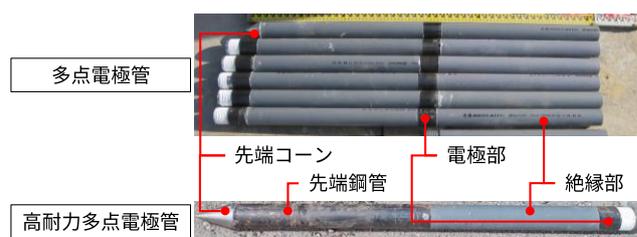


写真-2 打込み電極管の外観

Photo.2 Appearance of driving-pipes

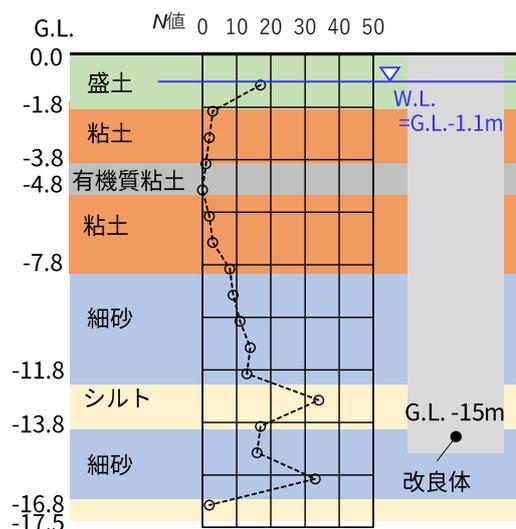


図-5 地盤条件の概要

Fig.5 Schematic of ground conditions

表-2 試験ケース

Table 2 Test cases

ケース	グラウト	グラウト強度 (kPa)	換算 N 値
1	σ3	281.7	22
2	σ6	511.3	40

抵抗の測定においては、通電部が1か所の測定プローブを使用し、この通電部を上下させながら各電極を順番に通電する手順とし、2往復分の測定を行った。

#### 4.3 試験結果

図-6 に施工試験結果を示す。ケース1は目標としていたG.L.-15mまでの打込みを完了した。打込みに要した時間は過去の事例と相違なく概ね1分/m以内であり、N値22までのグラウトであれば打込み電極管により電極を設置可能であることが確認された。一方で、ケース2については、G.L.-7.2mで先端鋼管と絶縁部の接合部分で高耐力打込み電極管が破壊し、打込み不能となった。ケース1と比較して、グラウト強度が増加しており、今回試作した高耐力打込み電極管の耐力の

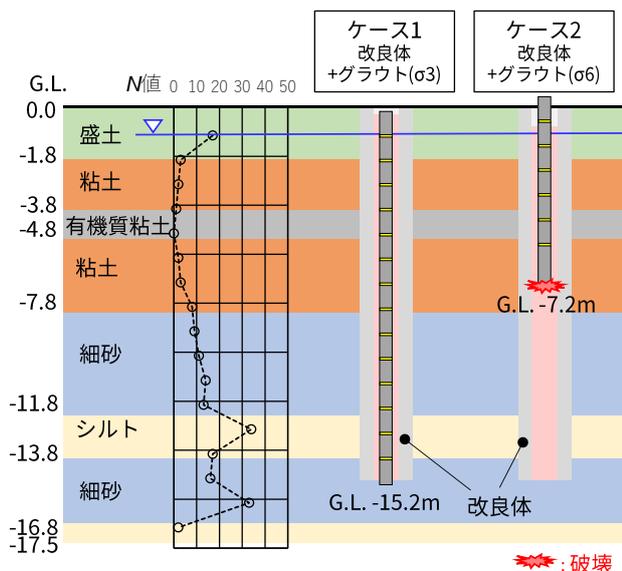


図-6 施工試験結果

Fig.6 Results of trial installation

限界が示されたと考えている。

図-7 に接地抵抗と深度の関係を示す。両ケースとも接地抵抗を測定することができ、電極の通電性に問題がないことが確認された。接地抵抗は深度方向によらず、同程度の値を示しており、いずれの電極もグラウト中に設置できたと考えている。

## 5. おわりに

本論では、比抵抗トモグラフィによる地盤改良体の出来形確認を念頭に、これまで開発した打込み電極管の概要とその適用性を示した。打込み電極管を用いることで、従来実施されているボーリング孔を用いる方法に比べ、ボーリング孔構築のための資機材類が不要となり、設置後に養生期間を設ける必要がなく打込み施工後直ちに測定が可能であることから電極設置の時間やコストの低減に寄与できるものと考えている。さらに、最近の開発状況として新たに試作した高耐力多点電極管を用いた施工試験結果を示した。ボーリング削孔とグラウト注入を併用する方法により打込みを行い、打込み可能なグラウト強度の限界が示されたものの、グラウトの配合や材齢によりグラウト強度を調整することで硬質地盤に対しても打込み電極管による電極設置が行えることを確認した。

比抵抗トモグラフィの施工時管理での活用に向けては結果の提示までの時間も重要であると考えている。今後は、改良体の条件に合わせた最適な電極配置検討およびデータ分析時のノイズ除去の効率化など、施工

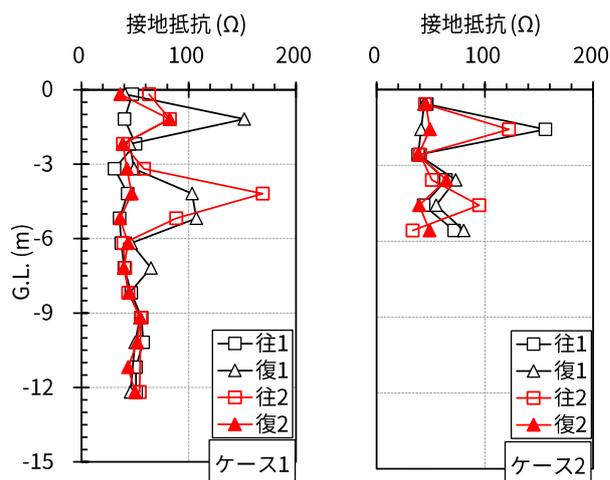


図-7 接地抵抗と深度の関係

Fig.7 Relationship between ground resistance and depth

時管理としての比抵抗測定システムを完成させるべく検討を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 藤原齊郁, 石井裕泰, 小林真貴子: 地中拡翼型地盤改良工法における施工形態拡張の取組み, 大成建設技術センター報 第54号, 23, 2021.
- 2) 小峯秀雄: 比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の適用範囲, 土木学会論文集 No.561 / III-38, pp.89-98, 1997.
- 3) 小川渉, 高島哲朗, 清水智明: 比抵抗トモグラフィによる薬液注入範囲の評価, 第46回地盤工学研究発表会, pp.57-58, 2011.
- 4) 西尾竜文, 足立有史, グェンホンソン, 榊原淳一, 高田一: 音波探査による高圧噴射攪拌工法の改良体形状計測試験, 第14回地盤改良シンポジウム論文集, pp.615-620, 2020.
- 5) 島野嵐, 山崎淳一: 切削状態モニタリング技術を用いた高圧噴射攪拌工法の高効率施工, 平成25年「建設施工と建設機械シンポジウム」論文集・梗概集, pp.151-154, 2013.
- 6) H. G. Kiflu: Improved 2D and 3D resistivity surveys using buried electrodes and optimized arrays: The multi-electrode resistivity implant technique (MERIT), Graduate Thesis and Dissertations, Univ. of South Florida, 2006.
- 7) Pidlisecky, A., Knight, R., Haber, E.: Cone-based Electrical Resistivity Tomography, GEOPHYSICS, Vol.71, No.4, pp.G157-G167, 2006.
- 8) Rexford M. Morey, Susanne M. Conklin, Stephen P. Farrington, James D. Shinn II: Tomographic site characterization using CPT, ERT and GPR, Innovative Technology Summary Report, 2000.
- 9) 地盤工学会: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp.99-102, 2008.
- 10) 平田健正, 中島誠 監修: 最新の土壌・地下水汚染原位置浄化技術, シーエムシー出版, pp.179-184, 2012.

- 11) 岡村未対, 武林昌哉, 西田克司, 藤井直, 神宮司元治, 今里武彦, 安原英明, 中川恵美子: 空気注入による地盤不飽和化の現場実験とそのモニタリング, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.3, pp.756-766, 2009.
- 12) United States Environmental Protection Agency: How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites, Chapter VII Air sparging, EPA 510-B-94-003, 1994.
- 13) 高畑陽, 松井秀岳, 石井裕泰, 堀越研一: 土壌浄化・地盤改良に用いる打込み式注入管の開発, 大成建設技術センター報, 第 45 号, 52, 2012.
- 14) 藤原斉郁, 高畑陽, 小林真貴子, 青木智幸, 宇野浩樹: 地盤不飽和化工法への打込み式注入管の適用性検討, 大成建設技術センター報, 第 48 号, 09, 2015.
- 15) 忠野祐介, 藤原斉郁, 安藤大, 矢島徹: 打込み電極管を用いた比抵抗探査による地盤判別手法の検討, 第 57 回地盤工学研究発表会, 20-2-4-06, 2022.
- 16) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会, pp.308-309, 2013.