

東海大学大学院平成 27 年度博士論文

電気比抵抗を利用した土の判別手法に
関する研究

指導 藤井 衛 教授

東海大学大学院総合理工学研究科

総合理工学専攻

高 元浩

電気比抵抗を利用した土の判別手法に関する研究

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	2
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の意義	4
1.4 本論文の構成	5
参考文献	
第2章 スウェーデン式サウンディング試験と電気検層法に関する既往の研究	8
2.1 スウェーデン式サウンディング試験について	9
2.2 電気検層法について	22
参考文献	
第3章 電気比抵抗と土の細粒分含有率との関係	38
3.1 研究目的	39
3.2 比抵抗と土の性質に関する既往の研究	40
3.3 比抵抗による土の細粒分含有率の評価に関する実験	41
3.4 測定孔の大きさが比抵抗に与える影響	46
3.5 原位置における検証実験	47
3.6 実験結果および考察	51
3.7 まとめ	62
参考文献	
第4章 電気検層法による土の判別	64
4.1 研究目的	65
4.2 実験概要	66
4.3 実験結果および考察	72
4.4 まとめ	82
参考文献	

第5章 本論文の結論	84
研究実績	86
査読付論文	87
口頭発表等	89
研究歴	91
謝辞	

第 1 章
序 論

1.1 本研究の背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により、約 25,000 棟を超える戸建住宅が液状化の被害を受けた¹⁾。これにより、液状化対策や戸建住宅の液状化評価手法の検討が重要な課題とみなされ、液状化地盤における対策工法の必要性が社会的に関心を高めている。このような状況下で、特に問題になったのは宅地地盤の液状化を正確に判別出来る地盤調査法の活用である^{2), 3)}。

既往の宅地地盤を評価する調査法としては、一般的に標準貫入試験よりも、簡便性、経済性及び迅速性を重視したスウェーデン式サウンディング試験（以下、SWS 試験と呼ぶ）が広く用いられている。この調査法は、1954 年スウェーデンから日本国内に導入されて約 60 年の歴史がある試験法であり、建築業界の宅地地盤の調査法として広く普及している^{4), 5)}。特に、1988 年に発行された「小規模建築物基礎設計の手引き」をきっかけとして、約 25 年前から急速に国内に広まった⁶⁾。また、1976 年から JIS A 1221 において試験機および試験方法が制定され、さらに 2001 年には、SWS 試験から宅地地盤の許容応力度を算定する方法が、国土交通省告示第 1113 号に示されたことにより、宅地地盤の標準的地盤調査法として確立された感がある。

SWS 試験の長所は、宅地地盤の支持力の評価が可能であり、連続した測定が可能であることや、比較的容易に地層の境界を捉えることができる点にある⁷⁾。一方、SWS 試験の短所としては、土質判別が難しい点が挙げられる。これまで、土の判別に関しては、操作者が試験時にロッドを介して伝わる音やハンドルの手の感触によって判定しているのが現実である。すなわち、土質の判別は、試験者の経験で決定される場合が多い。さらに最近では、ロッドに土の採取器を取り付けるなど改良が加えられているが、連続採取はまだ難しい状況にある。このように SWS 試験結果のみから得られる情報だけでは、宅地地盤の評価は不十分であり、これらを補填する調査手法の開発が望まれている。もし、SWS 試験孔を利用した電気比抵抗（以後、比抵抗と呼ぶ）によって土の判別を推定することができれば、これまで以上に、より多くの宅地地盤の地盤情報が得られることになる^{8), 9)}。

以上の背景をもとに、本研究では、SWS 試験孔に電極を挿入し、比抵抗により、土の判別に関する研究を着手するに至った。

1.2 本研究の目的

本研究は、SWS 試験孔に電極を挿入し、電気検層法により土の比抵抗を計測し、その値と SWS 試験孔から採取した地下水の比抵抗との比から、地層内の土の細粒分含有率を求め、細粒分含有率が 50%以下の土（砂質土）と 50%を上回る土（粘性土）を判別できる手法を開発することを目的としている。

1.3 本論文の意義

建築宅地地盤の地盤調査法は、通常 SWS 試験が一般的であり、経済的な面から標準貫入試験を実施することはほとんどない。SWS 試験から得られる情報は地盤の硬軟のみであり、土の判別は操作者のハンドルの感触や音などの感覚的なものにゆだれられており非常にあいまいである。特に、これからは液状化地盤の判定が社会的に要求されるが、現状の調査ではかなり難しい。最近では SWS 試験機に土を採取する機構を装備した試験機も開発されてきたが^{10), 11)}、現段階ではその信頼については十分とはいえない。このように、SWS 試験は、簡単ではあるものの、土の判別ができないという決定的な問題を有する。一方、地盤の物理探査法の一つに電気検層法と呼ばれる方法がある。これは、比抵抗が砂粒子のような絶縁物に敏感に反応することに着目して、地層内の薄い砂層を発見することを目的に利用されているが、あくまでも比抵抗の地層内の変化のみに着目した定性的判断に基づくものにすぎない。

本研究は建築宅地地盤の地盤調査として広く普及している SWS 試験法に電気検層法を組み合わせ、土の細粒分含有率の評価による土の判別手法を開発したものであり、液状化の判定手法だけではなく、軟弱層厚の把握など、これからの建築基礎工学の分野に多大なる貢献を寄与するものである。

1.4 本論文の構成

本論文は 5 章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、本研究の目的、本研究の意義及び本論文の構成が述べられている。

第 2 章では、本研究で対象としている SWS 試験の方法や問題点を指摘するとともに、電気検層法の原理や既往の研究について紹介している。

第 3 章では、比抵抗と土の細粒分含有率との関係を明らかにすることを目的に、3 種類の実験とその成果について述べている。1 つ目の実験は、室内にて各種の濃度を有する塩化カリウム溶液を間隙水として、48 種類の人工配合土と自然土について電気伝導度計により土の比抵抗を計測している。その結果、土の比抵抗と間隙水の比抵抗及び土の細粒分含有率の 3 者の間には、密接な関係があることを見出している。そして、これらの結果をもとに、間隙水の比抵抗に対する土の比抵抗の比率から土の細粒分含有率を推定する式（推定式）を提案している。2 つ目の実験は、現場実験を想定したものであり、測定孔の大きさに対する電極径の比率が比抵抗に与える影響を検討している。その結果、試験孔の大きさが電極径に与える影響は極めて大きく、電極径はほぼ孔径に相当する大きさが必要であることを明らかにしている。3 つ目の実験は地下水が存在しない原地盤において実際に SWS 試験を行い、JIS K 8121:1995 で定められた 0.1 規定の塩化カリウム溶液で満たした孔中に電極を挿入して土の比抵抗の測定を行っている。比抵抗の測定は SWS 試験機の先端のスクリーに電極を埋め込んだものであり、電極間隔を 30mm としてウェンナー法によって深さ 3.5m まで計測している。この結果、計測地盤は粘性土地盤であったが、推定式による細粒分含有率は実測値と深さに関係なくほぼ一致する結果を得ている。

第 4 章では、砂質地盤も含めた推定式の妥当性を実地盤で検証することを目的に、埼玉県比企郡、茨城県取手市、埼玉県春日部市、千葉県市原市、神奈川県横浜市、岐阜県羽島市の 6 地点において標準貫入試験、SWS 試験及び室内試験で使用した計測機を利用して電気検層を行っている。そして、標準貫入試験により採取した 49 種類の試料土の細粒分含有率を求め、室内試験から導いた推定式による結果と比較している。なお、地下水の比抵抗は地下水採取器を用いて採取し、室内試験で使用した電気伝導度計で計測している。その結果、それぞれの測定地点において、比抵抗の分布曲線は、細粒分含有率の大小を反映して変化する結果となり、推定式によって求めた細粒分含有率は、実測細粒分含

有率と標準偏差 5.9%の範囲で対応することを明らかにしている。また、94%の確立で土の判別ができることを示している。以上から、本研究により、SWS 試験孔において実施した電気検層による比抵抗から、土の細粒分含有率、及び土の判別は十分に可能であるとの結論を示している。

第 5 章では、本論文の総括的な結論を示している。

参考論文

- 1) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：浦安市液状化対策技術検討調査結果，<http://www.city.urayasu.chiba.jp>，2012.
- 2) 地盤工学会編：地震時における地震災害の課題と対策，2011.
- 3) 藤井 衛，田村昌仁，伊集院博：小規模建築物の地盤を対象としたスウェーデン式サウンディング試験方法の評価と問題点，日本建築学会構造系論文集，第 557，pp. 121～128，2002.7
- 4) 住宅地盤品質協会：住宅地盤の調査・施工に関わる技術基準，2011.
- 5) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，Vol.8，No.1，pp.13～18，1960.
- 6) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針，2008.
- 7) 藤井 衛：スウェーデン式サウンディング試験法の有効活用，建築技術，No.757，pp.88～91，2013.
- 8) 山下大蔵，足立由紀夫，山本裕輔，藤井 衛，廣瀬清，千葉原敦，久保豊，伊集院博，井上博：スウェーデン式サウンディング試験孔を利用した電気検層法による土質判別の可能性，日本建築学会大会学術講演概要集(東北)，pp.629～630，2009.
- 9) 田村昌仁，川村政史，枝広茂樹，水谷羊介，藤井 衛，小口和郎：スウェーデン式サウンディングによる地盤調査法と現状の課題，土と基礎，Vol.52，No.4，pp.8～10，2004.
- 10) 松下克也，藤井 衛，金 哲鎬，岡野泰三，久保 豊，千葉原敦：スウェーデン式サウンディング試験孔を利用した地下水位測定と土質判定の適用性に関する検証事例，地盤工学会誌 58 (8)， pp.38～48，2010.
- 11) 藤井衛，金哲鎬，小川正宏：スウェーデン式サウンディング試験孔を利用した地盤調査技術（特集:小規模建築物の安全・安心），基礎工，pp.41～45，2011.

第2章
スウェーデン式サウンディング試験と
電気検層法に関する既往の研究

2.1 スウェーデン式サウンディング試験について

1) スウェーデン式サウンディング試験の変遷

スウェーデン式サウンディング試験（以下、SWS試験と呼ぶ）は、1954年スウェーデンから国内に導入されている。当初の状況については、1954年の室町の論文から知ることができる¹⁾。当時では、SWS試験機はペネトロメータに分類され、スウェーデン式ペネトロメータと呼ばれていた。当時の、各国のペネトロメータは図2.1に示すように分類されていた。

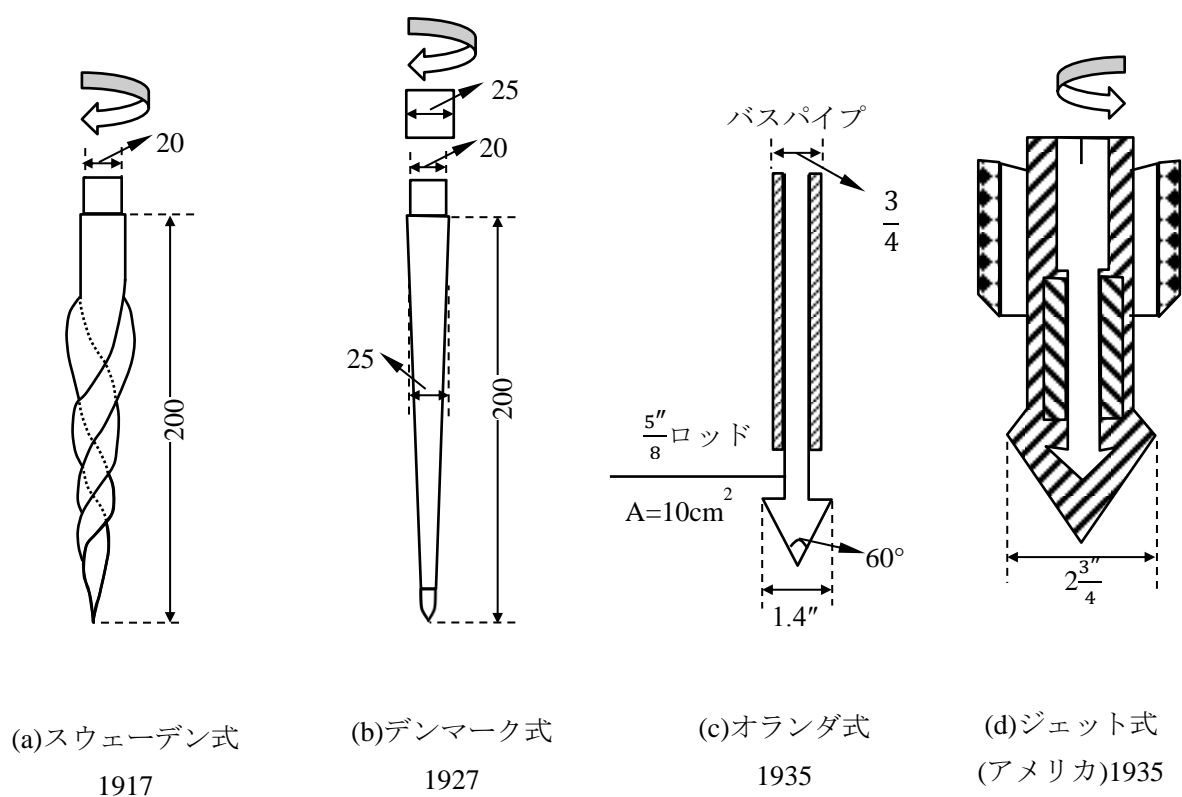
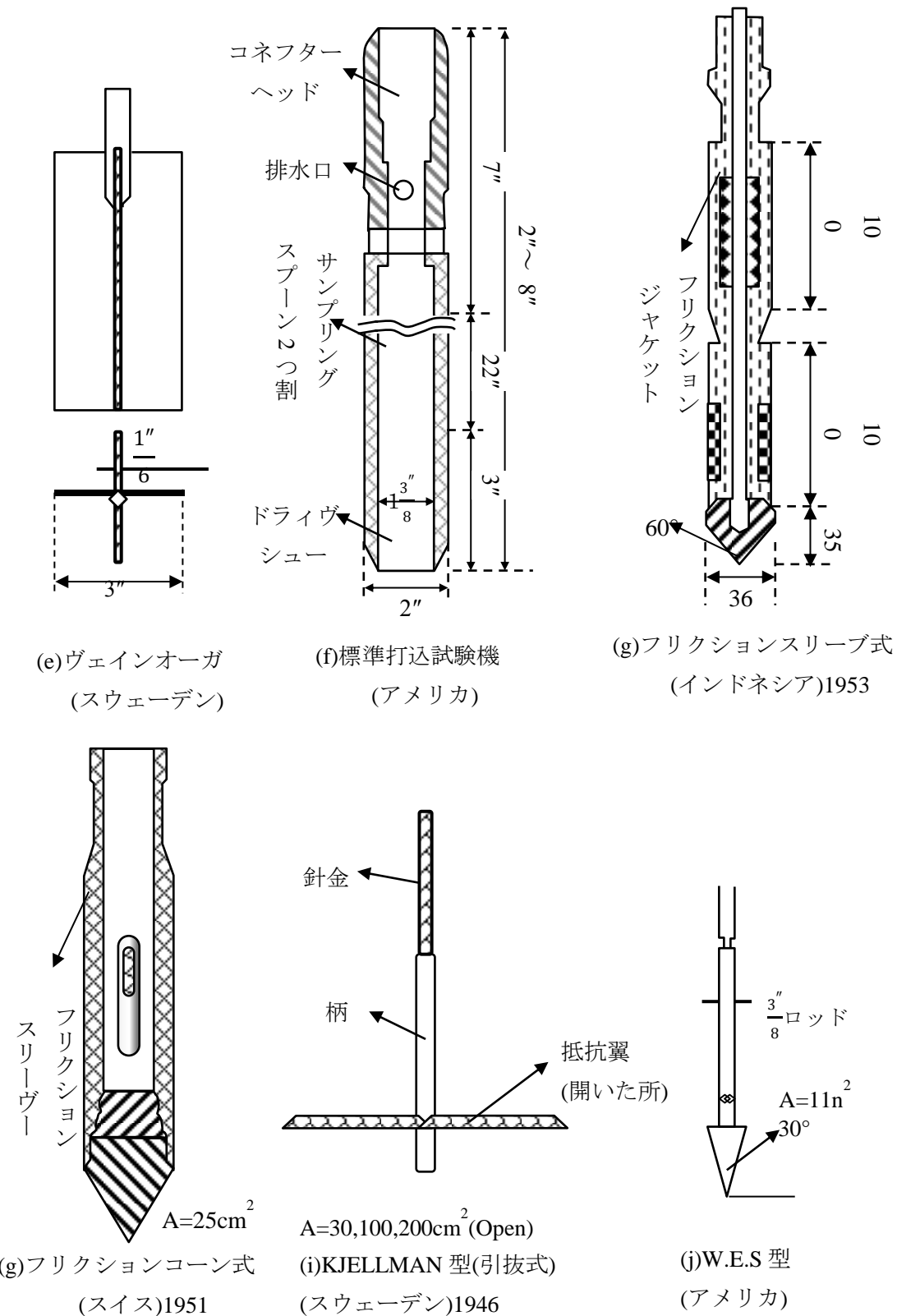


図 2.1 各種のペネトロメータ（その1）¹⁾



(e) ヴェインオーガ
(スウェーデン)

(f) 標準打込試験機
(アメリカ)

(g) フリクションスリーブ式
(インドネシア)1953

(g) フリクションコーン式
(スイス)1951

(i) KJELLMAN 型(引抜き式)
(スウェーデン)1946

(j) W.E.S 型
(アメリカ)

図 2.1 各種のペネトロメータ(その2)¹⁾

スウェーデン式ペネトロメータは1917年にスウェーデン国有鉄道，デンマーク式ペネトロメータは1927年にデンマーク国有鉄道がつくり出したものであり，両者の操作は同じであった．1956年には，同じく室町が専門誌の中で，デンマーク貫入試験機の試験方法を紹介している²⁾．これによると，記録方法は，25回転ごとに貫入量を測定している．この貫入量から図2.2のように地耐力または杭の支持力を推定している．1957年には，福岡が図2.3のように，各種のペネトロメータを紹介しており，その中に(f)としてSWS試験機のスクリーポイントが示されている³⁾．また，ロッド径は19mmになっている．同年の上田の他の論文によると，SWS試験については，土木研究所の福岡技官がスウェーデン留学後に日本に紹介し，現在，この有用性と相まって各地で使用されていると記述されている⁴⁾．

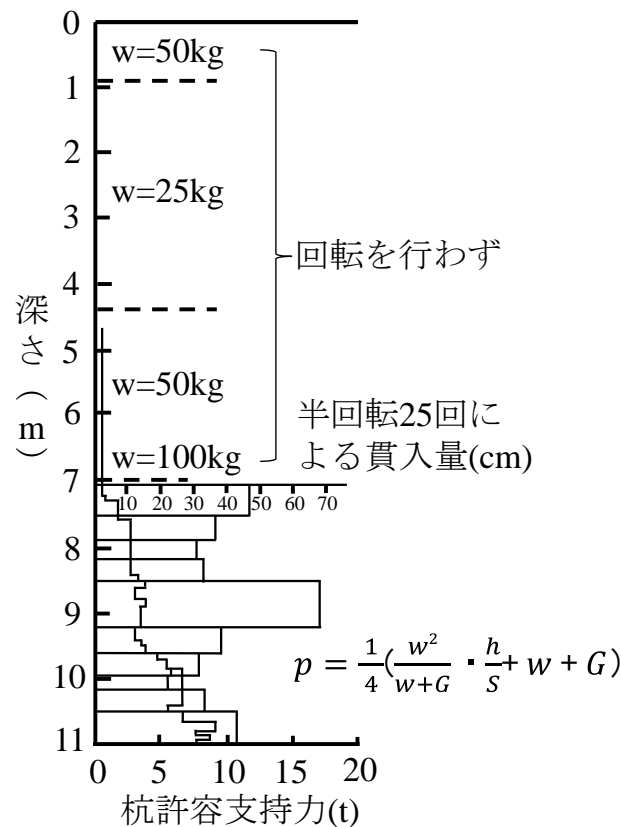
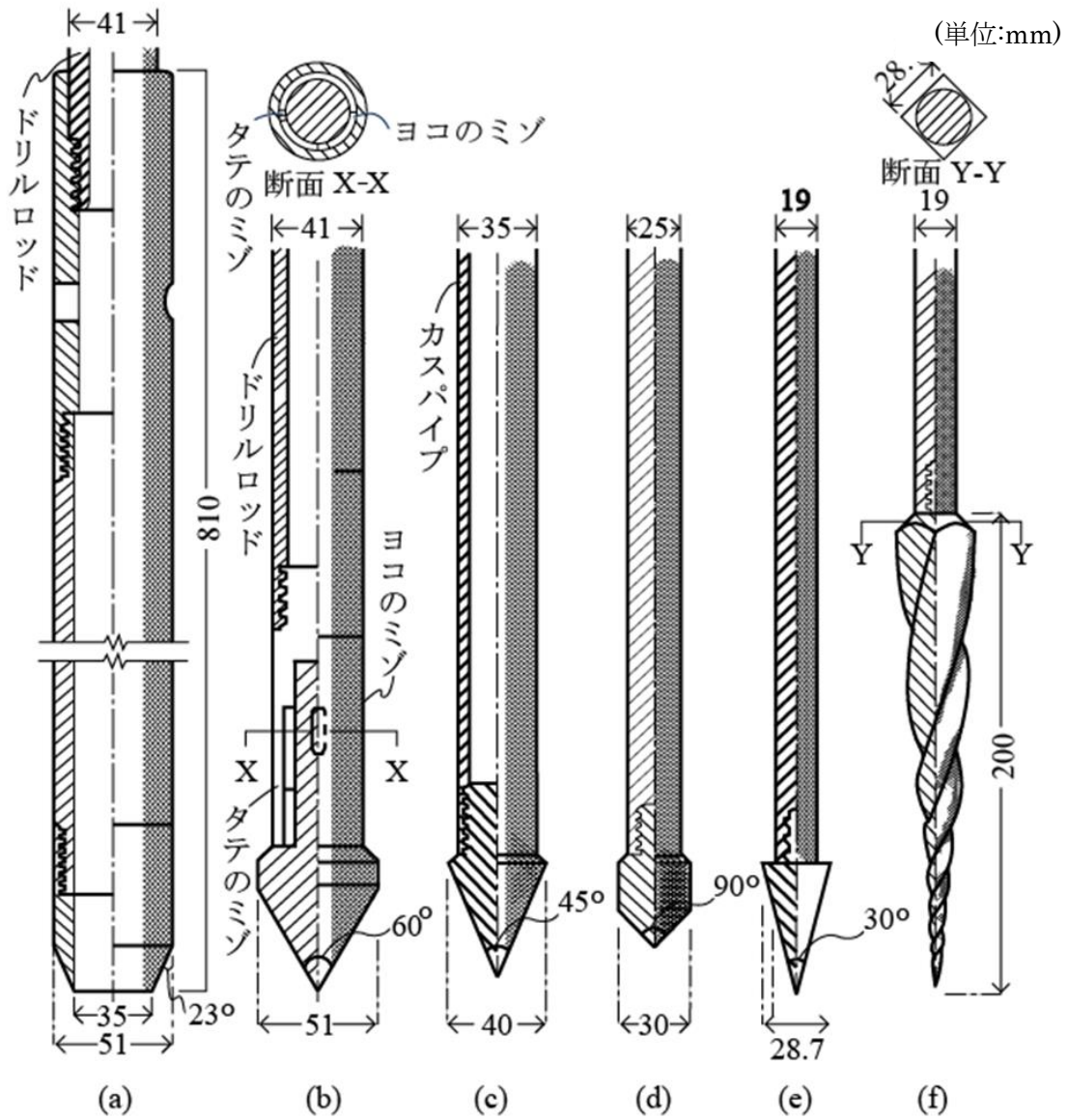


図 2.2 デンマーク式貫入試験機による貫入記録²⁾



以上のように、1957年当時は、25回転ごとに貫入量として評価しており、現在のように25cmごとの回転数の計測と異なっていた。その3年後の1960年には、現在でも一般的に使用されている稻田のN値の換算式の論文が発表されている⁵⁾。この時点で、現在のような計測方法になっている。その後、1963年には社団法人土質工学会（現、地盤工学会）によって、JIS原案が作成され、1976年にJIS A 1221として最初に制定されるに至った。当時のJIS規格では、特にスクリーポイントの形状に注意が払われていたわけではなく、図2.4のように最大径の位置は示されていなかった。ところが、この形状の違いは貫入特性に大きな影響を与えることが次第にわかり⁶⁾、2002年のJISの改正では、図2.5に示すように、例とはしながらもスクリーポイントの最大径の位置を示すことになった。

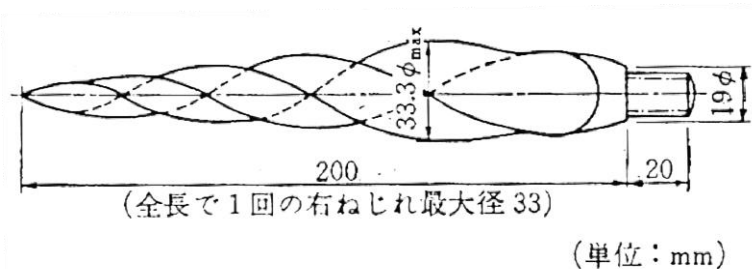


図 2.4 1973年当時のJIS規格に示されるスクリーポイント

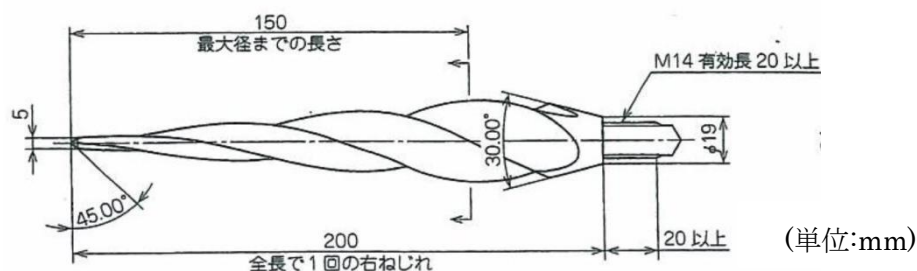


図 2.5 2002年以降のJIS規格に示されるスクリーポイント

以上のように、SWS 試験は、スクリーポイントの形状、調査結果の整理、さらには半自動、全自動試験機も出現し、日本に導入された時期に比較して、まったく変わった試験法に変貌してしまった。SWS 試験は、ISO 規格では、「Weight Sounding」と呼ばれている。この試験法は、もともとスウェーデンで使われている方法を、日本の実情に合うように次第に改められた経緯がある。ISO との規格内容の違いを、表 2.1 に示す。表 2.1 により明らかなように、各称はスウェーデン式であるが、日本独自に規格化された試験方法である。特にロッド径が異なる点とスクリーポイントの形状が異なる。スクリーポイントは図 2.6 のようであり、日本のものと比べてひねり角度がきつく回転推進効果も強い。図 2.7 は、両方のスクリーポイントの貫入状況を表したものである⁷⁾。ISO の方は土のせん断強度をより強く反映しているのに対し、JIS タイプは地盤に押し込むように、貫入しており、JIS タイプのスクリーポイントのひねりは回転推進効果よりも、貫入を容易にする効果の方が強い。おそらく、JIS タイプは、日本の地盤適合するよう、貫入をより容易にすることを優先した結果、形状が変化したものと推察される。

表 2.1 JIS と ISO の規格内容の違い

規格	スクリーポイント	ロッド径	測定法
ISO	1辺が25mmの四角錐を一捻りしているが、先端部の55mmは四角錐の形状である。最大径は35mmである。	22mm	貫入量20cmごとの半回転数を求める。
JIS	1辺が23.4mmの四角錐を一捻りした形状である。最大径は33mmである。	19mm	貫入量25cmごとの半回転数を求め、それを1mに換算した値をN _{sw} として求める。

2) SWS 試験の原理

SWS 試験は宅地地盤の代表的な地盤調査法であり，簡単に地盤の不均質性を調べることができる．また，地盤の支持力の評価も可能である．図 2.8 は SWS 試験装置を示し，図 2.9 はスクリーポイントの寸法を示す．この試験は，図に示すように，外径 $\phi 19\text{mm}$ の鋼製ロッドの先端に最大径が 33mm ，長さ 200mm のスクリーポイントを取り付け，人力によりロッドに最大 1kN の鉛直荷重加え，回転させながら地盤中に捻り込む．そして，その際の回転貫入状況などから，地盤の支持力を判断する．

特に，近年では機械式の試験機も多く使用されている．写真 2.1～写真 2.3 はスウェーデン式サウンディグ試験の種類を示す．写真 2.1 は手動式 SWS 試験機であり，人力による作業で試験を行う．また，写真 2.2 は半自動式 SWS 試験機であり，写真 2.3 は全自動式 SWS 試験機である．

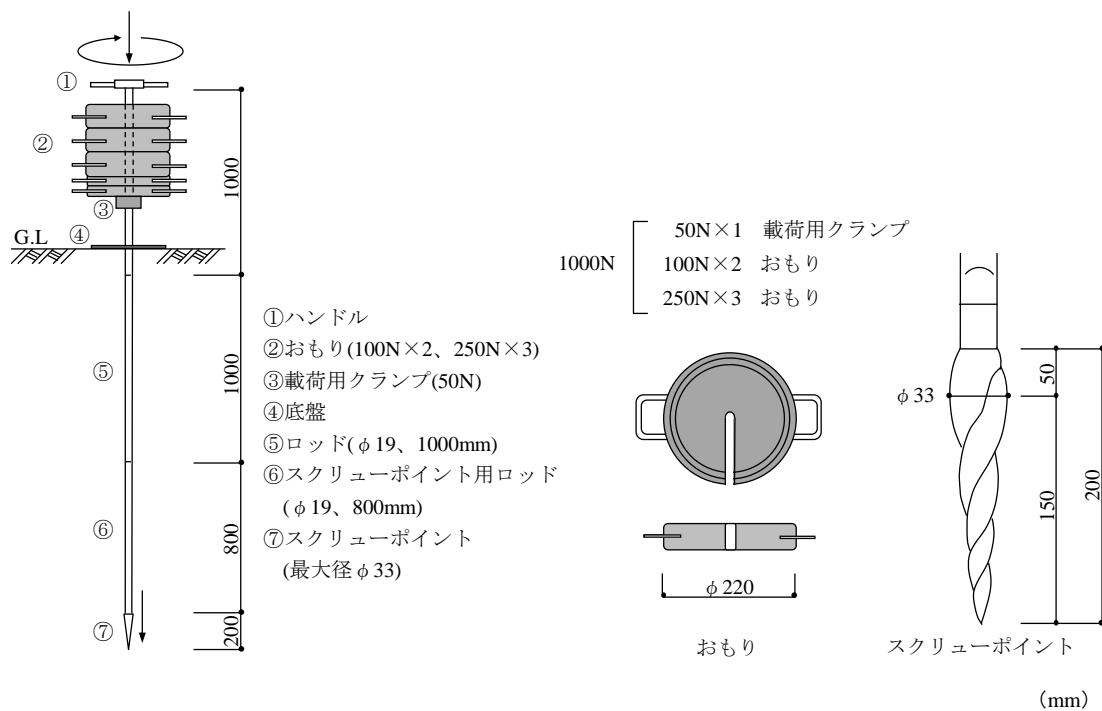


図 2.8 SWS 試験装置

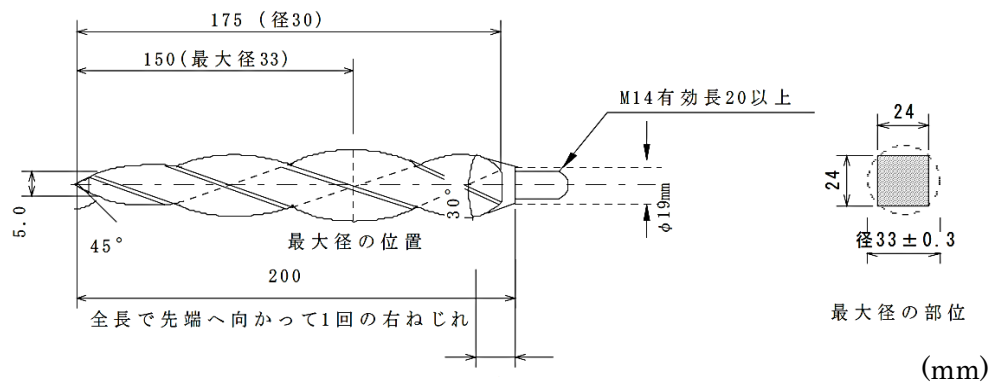


図 2.9 スクリューポイントの寸法



写真 2.1 手動式 SWS 試験機



写真 2.2 半自動式 SWS 試験機

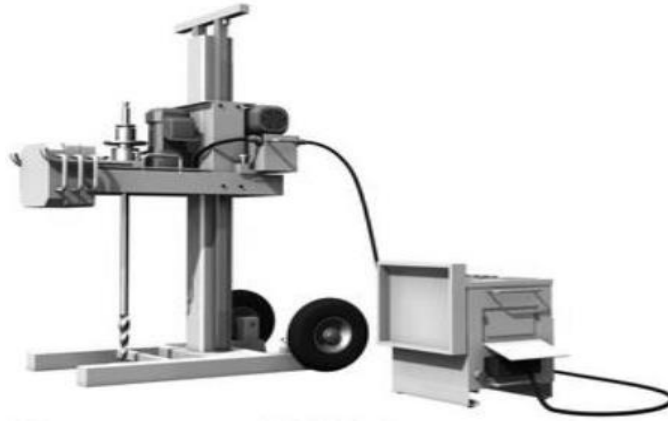


写真 2.3 全自動式 SWS

3) SWS 試験方法

SWS 試験を以下に箇条書きで示す。

- a) 試験前の点検としては、スクリーポイントの最大径(33mm)を計る。最大径が3mm以上摩耗しているものは、試験結果に影響を及ぼすことが報告されている。従って、スクリーポイントの摩耗はリングゲージを用いて確認する。また、自動記録装置を使用する場合には、試験前に機能チェックを行う。
- b) スクリューポイント連結ロッドの先端にスクリーポイントを取り付け、ロッドに载荷用クランプを固定し、ハンドルを取り付けて、調査地点上に鉛直に立てて支える。貫入時に载荷装置が地盤にめり込むおそれのある場合には、あらかじめ底板などを設置し、めり込みを防止する。
- c) 最初に100Nの荷重をクランプへ载荷する。試験の目的に応じて、最初に500Nの荷重を载荷してよい。
- d) 荷重でロッドが地中に貫入するかどうかを確かめ、貫入する場合は強制的に停止せずに貫入が止まったときの貫入量を測定し、その荷重の貫入量とする。また、このときの貫入状況を観察する。

- e) 段階的に荷重を増加してd)の操作を繰り返す. 荷重の段階は, 50N, 150N, 250N, 500N, 750N 及び1000N とする. 試験の目的に応じて荷重段階を500N, 750N 及び1000N としてもよい.
- f) 載荷装置下端が地表面付近に達したら, 荷重を除荷し, ハンドルを取り外し, 鉛直性を確認しながらロッドを継足し, 載荷用クランプを引き上げて固定し, ハンドルを取り付け, c)～e)の操作を行う.
- g) 1000N でロッドの貫入が止まった場合は, その貫入量を測定した後, 鉛直方向に力を加えないようにロッドを右回りに回転させ, 次の目盛線まで貫入させるのに要する半回転数を測定する. その際, 回転速度を1 分間に60 半回転数程度以下とする. なお, これ以後の測定は, 0.25m (目盛線) ごとに行う.
- h) 回転貫入の途中で, 貫入速さが急激に増大した場合は, 回転を停止して, 1000N の荷重だけで貫入するかどうかを確かめる. 貫入する場合はd)に, 貫入しない場合はg)に従って以後の操作を行う.
- i) 測定において, e)の作業の途中で急激な貫入又はh)の作業の途中で回転を与えなくても急激に貫入が生じた場合は, いったん貫入が止まるまでおもりを速やかにおろし, その間の作業内容を記録し, e)の作業から始める.
- j) 以下の状態が確認された場合は測定の終了について検討する.
- 1) スクリューポイントが硬い層に達し, 貫入量0.05m 当たりの半回転数が50 回以上となる場合
 - 2) ロッド回転時の抵抗が著しく大きくなる場合
 - 3) 地中障害物に当たり貫入不可となった場合
 - 4) 記録には測定終了事由及び終了深度を記録する.
- k) 試験終了後, 載荷装置を外し, 引抜き装置によってロッドを引抜き, その本数を点検し, スクリューポイントの異常の有無を調べる.

4) SWS 試験の問題点

SWS 試験の問題点は、まず、地下水位の測定、土質の判別ができない点が挙げられている。SWS 試験の適用上の主な問題点を a~f に示す。

a) 自沈荷重 W_{sw} の信頼性^{8),9)}

回転層から自沈層に達すると、急激に自沈する場合があります、この間の W_{sw} はすべて 1.0kN と評価してしまうことがある。このような場合、次の 25 cm 区間の最初の W_{sw} がより信頼できる値と見なした方がよい。

b) スクリューの摩耗¹⁰⁾

スクリューポイントが摩耗すると、空回りしやすくなるため、硬質な地盤では N_{sw} が大きく評価され、逆に自沈層では貫入しやすくなってしまふ。その影響は、スクリューポイントが 3mm 程度以上摩耗すると顕著である。

c) 操作方法の違い^{11)~13)}

JIS A 1221 では、SWS 試験は手動式以外に半自動式装置と自動式装置が認められている。これまでの比較試験の結果、手動式と半自動式は大きな違いはないが、自動式は手動式に比較して軟弱な地盤では幾分小さな値を示すことが指摘されている。

d) 測定深度¹⁴⁾

SWS 試験の適用深度は 10m と言われているが、調査時にロッド周面の摩擦力の影響により、 N_{sw} を過大に評価してしまう可能性がある。測定深度が深くなればなるほど、摩擦の影響を受けることに注意が必要である。

e) N_{sw} の限界値^{14)~16)}

一般には、 N_{sw} が 100 を超えるあたりから N 値と N_{sw} の対応関係が異なることがわかっている。これは、 N_{sw} が 100 を超えるあたりから、スクリューが空転し始めることが原因と考えられる。支持力や粘着力を N_{sw} から算出する場合は、 N_{sw} は 150 程度を限界値とみなしたほうが良い。

f) 地層境界における N_{sw} の変化^{11), 14)}

上部が軟弱で下部が硬い場合や、上部の土がスクリーに付着したままの場合は、地層境界付近においてスクリーが空回りし、 N_{sw} を過大に評価する恐れがある。空転が認められる場合、または調査の結果 N_{sw} が急激に増大している場合は、その値の信頼性は低いと判断した方がよい。

2.2 電気検層法について

電気検層法とは、ボーリング孔内の地下水中に電極を挿入して、地層の電気比抵抗の値から地層の層厚を把握しようとする方法である。この電気検層法は、電気探査技術から発展したものである。本節では、まず、電気探査の歴史、電気探査の種類を整理した上で、電気検層法について説明する。

1) 電気探査の歴史

電気探査法は、自然電位法、人工電位法および強制分極法の大きく3つに分けられる。まず、自然電位法は、地質構造の分極現象を利用した受動的な探査法である。また、人工電位法は、大地に人為的に電流を流し、地層の比抵抗の違いを利用して地質構造を探査する方法であり、人工電位法は、等電位線法、電圧比法および比抵抗法などと呼ばれる方法の総称である。強制分極法は、自然電位法が地質構造の自然の分極現象を測定するのに対して、大地に電流を流して強制的に分極現象を起こさせて、地質構造を探査する方法である。

電気探査の歴史はイギリス人Foxが1830年にCornwall鉱山において、硫化鉱床付近で自然に電流が流れていることを発見したことに始まる。後に異常な自然電位の分布を指標に、鉱床探査法として発展することになった。

a) 自然電位法

表2.2に自然電位法の変遷を示す。Foxの使用した電極は銅板であり、電極表面での分極電位のため、真の大地の電位の計測が不可能であった。その後、Barnsは、硫酸亜鉛溶液に亜鉛版を浸した非分極性電極を考案し、1882年NevadaのComstock鉱山で試験測定を行い、好結果を得た。また、Schlumbergerは非分極性電極として硫酸銅溶液に浸した電極を考案すると共に、電位差計を作製し、この装置を1913年にBor鉱山で使用して鉱床発見の成果を上げた。このSchlumbergerが開発した探鉱機は、1921年に九州大学小田不二男により、シュランベルジュ式電気探鉱器として日本に輸入され、日本における電気探査の始まりとなった。その後、日本では自然電位法は1960年代前まで鉱山探鉱の主要な方法として使われてきた。自然電位の発生機構については1914年にWellsが硫化鉱物の分極現象としての考え方を初めて示した。その後、Pourbaix、松原厚、中林一孝、柴藤喜平、賀来秀二等により多くの研究が行われた。

表2.2 自然電位法の歴史^{17)~22)}

方法	年	名前	内容
自然電位法	1830	Fox	Cornwall鉱山での自然電位異常の発見
	1882	Barns	硫酸亜鉛溶液に亜鉛版を浸した非分極性電極を考案し、NevadaのComstock鉱山で試験測定を行い、好結果を得た。
	1913	Schlumberger	非分極性電極として硫酸銅溶液に浸した電極を考案すると共に、電位差計を作成し、Bor鉱山で使用して鉱床発見の成果を上げた。
	1914	Wells	硫化鉱物の分極現象としての考え方を初めて示した。
	1921	小田不二男	シュランベルジュ式電気探鉱器として日本に輸入され、日本における電気探査の始まりとなった。

(b) 人工電位法

表2.3は、人工電位法の歴史を示したものである。自然電位法が大地内での分極現象を利用した受動的な探査法であるのに対し、大地に直接人工的に電流を流し、大地の電気伝導度の違いを利用して探査する方法が19世紀の終わり頃から試みられるようになってきた。等電位線法、電圧比法、比抵抗法などと呼ばれる方法がそれである。淵田隆門(1952)は、これらを人工電位法と総称している。等電位線法は人為的に流した電流による地表電位分布が地下の導電体により歪められることに着目した探査法である。Lundbergが平行線電極法を、Schlumbergerが点電極法を提案している。電圧比法は測線沿いの電位を計測する代わりに、等間隔に配置した3点の相隣る2点間の電圧比を直接計測し、導電体による電場の歪みから鉱床を探査する方法である。Broughton and Laby (1931)がそれぞれ測定方法を提案している。しかし、等電位線法、電圧比法ともにいくつかの実施例はあるものの、それほど利用されるには至らなかった。

表2.3 人工電位法の歴史^{17)~22)}

方法	年	名前	内容
人工電位法	1925	Wenner	2個の電極間に電流を通じ、これら電極間の中に置いた2電極で電位を計測し大地の比抵抗を測る方法を考案した。
	1925	Gish and Rooney	Wennerの用いた装置を改良し、GishRooney装置と呼ばれる実用装置を完成させた。
	1928	Lee	メガー式測定器を考案した。この測定器はL-10型として親しまれた大地比抵抗測定器はこの装置を範とするものである。
	1931	Broughton and Laby	電圧比法は測線沿いの電位を計測する代わりに、等間隔に配置した3点の相隣る2点間の電圧比を直接計測し、導電体による電場の歪みから鉱床を探査する方法である。
	1932	Hummel	水平2層、3層構造の $\rho-\alpha$ 曲線を求めた。
	1934	Tagg	2層構造解析法としてTagg法 $\rho-\alpha$ 曲線を考案した。
	1955	清野武	等角写像法による解析により $\rho-\alpha$ 曲線求めている。
	1968	小野寺清兵衛	核関数により水平多層構造での $\rho-\alpha$ 曲線を求めている。
	1969	吉住永二郎 入江恒爾	抵抗を網目状に組み合わせた抵抗網を作製し、アナログ計算機による解析法($\rho-\alpha$ 曲線)を提案した。
	1970	九里尚一ほか	導電紙を用いて比抵抗の測定を行ない、 $\rho-\alpha$ 曲線を求めている。
1972	吉住永二郎 菅野強	電極配置を異常体による応答感度の観点から捉え、感度分布の概念を提唱している。	

(c) 強制分極法

表2.4に強制分極法の歴史を示す。岩石や鉱石の分極に関する研究は1920年に Schlumberger(1920)によって行われ、SP(自然分極)現象とIP(強制分極)現象が同時に発見された。当時の測定技術ではIP現象の測定が難しく、SP現象が探査の対象となり、IP現象は探査の対象として日の目を見ることはなかった。一方、松原厚(1934)は大地に電流を流し鉱石に人為的な分極を起こさせる電解分極式電気探鉱法を考案した。この方法は後のIP法(Induced Polarization Method)と原理的に同一のものである。この松原式IP法は日本、カナダ、米国で特許が取得されたが、日本での研究継続が無く、実用化には至らなかった。その後海外での研究が進み、潜頭鉱床探査手法として最も有効な電気探査法として世界的に活用されるようになった。

表2.4 強制分極法の歴史^{17)~22)}

方法	年	名前	内容
強制分極法	1920	Schlumberger	SP(自然分極)現象とIP(強制分極)現象が同時に発見された。
	1934	松原厚	大地に電流を流し鉱石に人為的な分極を起こさせる電解分極式電気探鉱法を考案した。
	1948	Brant	ボーリングが実施され、新しい硫化鉱床を発見するに至った。
	1949	Seigel	矩形波電流による過渡現象の数学的表現法を初めて開発した。
	1952	Wait J. R.	交流による過渡現象法を開発した。
	1959	Maddenほか	非金属に起因するIP現象についての基礎的研究を行っている。
	1963	Madden and Cantwell	Telluric noise, Electromagnetic Coupling, Capacitive Couplingやフィルタの問題が研究され発表されている。
	1975	Zonge	電磁カップリング除去法を提唱している。
	1978	Pelton, Ward, Hallof	SIP法が鉱山探査に有効であることが示された。
1978	Pelton	電磁カップリング除去法を提唱している。	

2) 電気検層法について

(a) 電気検層法の目的

電気検層法は、ボーリング孔内の地下水中に電極を挿入し、周りの地盤の電気抵抗を測定する技術で、比抵抗検層とも呼ばれている。地下の地質は、掘削時のコアやスライムでも確認できるが、地層の区分を電気抵抗という物理量で計測できるため、ノンコアで掘ることの多い削井工事や、目的の地層を特定する必要がある石油や温泉の掘削、地下水の調査では必須の計測技術になっている。

(b) 電気抵抗の測定および比抵抗の意味

図2.10に電気抵抗測定原理を示す。電気抵抗の測定は、基本的に測定対象物に2本の電極を設置して電流を流し、その電流が流れた経路の電圧（電位差）を測定し、オームの法則により抵抗を求める²³⁾。また、地盤の比抵抗は、地盤の種別、地盤の層構造、割れ目、湿潤状態等によって大きく変化する。例えば、電気検層の場合、電極間隔が広がると、同じ地層でも、電流の流れる範囲が広がり、測定される比抵抗値が小さくなる。均質な地盤なら、測定する電極間隔に影響されず、同一の値になると考えられる。この抵抗値を標準化し、1m真四角の立方体の両端の抵抗値に換算した数値を比抵抗と定義することができる。なお、比抵抗の単位は $\Omega \cdot m$ である。

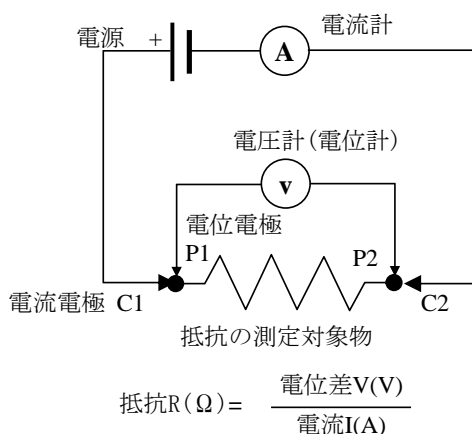


図 2.10 電気抵抗測定原理¹⁹⁾

(c) 地盤の抵抗 R と比抵抗 ρ の関係

電極間隔 a と比抵抗値 R との関係を図 2.11 に示す. 図に示したように電極間隔が 2 倍になると電気の流れる断面積は, 4 倍になり, みかけの比抵抗値 R は, 半分になる. 図 2.12 に, 電極間隔の影響を排除するために, 1m 角の, 土塊の両端に 1 m 四方の電流を取り付け, 1V の電圧を加え, 1A の電流が流れる場合の抵抗値を比抵抗 $\rho = 1$ ($\Omega \cdot \text{m}$) とする定義を示す²¹⁾.

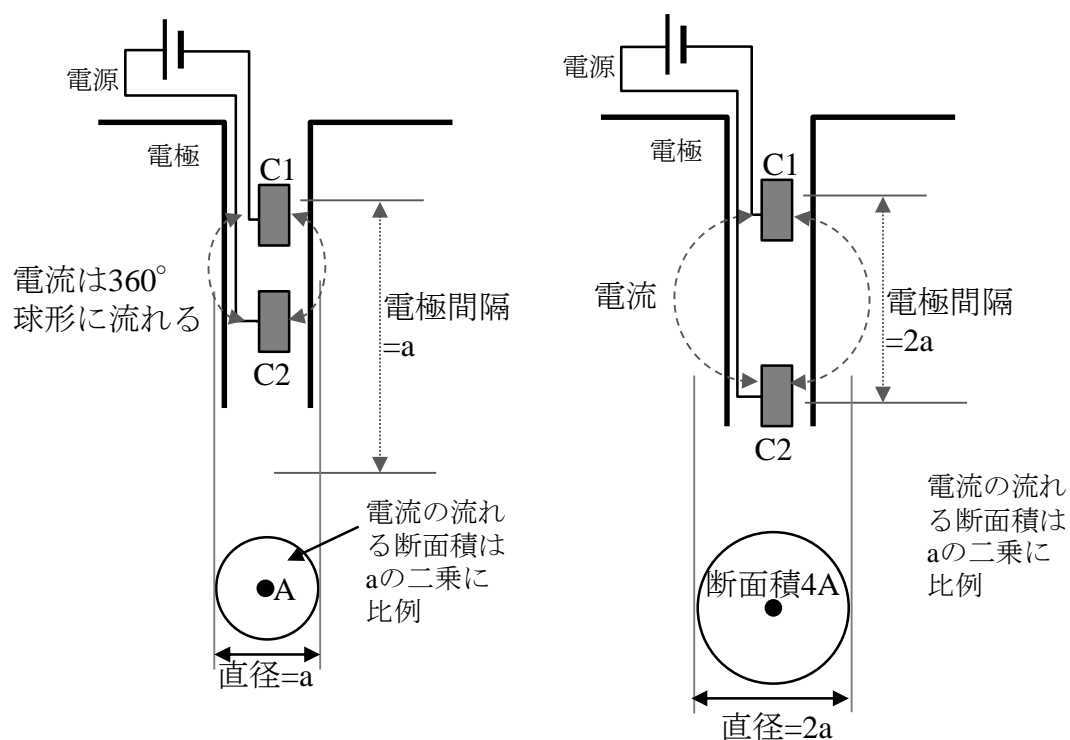


図 2.11 電極間隔 a と比抵抗値 R との関係²⁰⁾

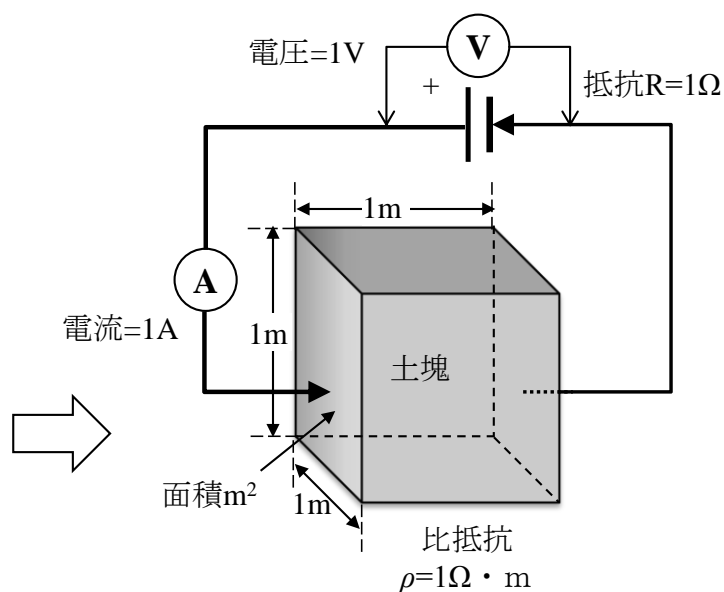


図 2.12 電極間隔の影響を排除するための定義²⁰⁾

(e) 比抵抗値への換算式

実際の電気検層法では、電極が2個の場合、電極と大地の接地抵抗が、測定値に直接上乘せられてしまうため、電流を流す電極と、電圧を測定する電極2本を分けて、4本の電極を用いた4端子法で抵抗測定が行われる。代表的な電極配置には、2極法と4極法があるが、いずれも4本の電極を使っている。また、4極法には孔内電気検層と地表電気探査がある。図2.13に孔内電気検層を示し、図2.14に地表電気探査について示す。これらの方法で測定した見かけの抵抗値Rから地盤の真の比抵抗値ρへの換算を式(1)に示す²²⁾。

$$\text{電気検層の比抵抗値換算式: } \rho (\Omega \cdot \text{m}) = 4\pi aR = 4 \times \pi \times a \times R \dots \dots (1)$$

なお、測定対象物が半分になる「地表電気探査」では、ρは式(2)のようになる。

$$\text{電気探査の比抵抗値換算式: } \rho (\Omega \cdot \text{m}) = 2\pi aR = 2 \times \pi \times a \times R \dots \dots (2)$$

ここで、a: 電極間隔 (m), π: 円周率 3.14 である。

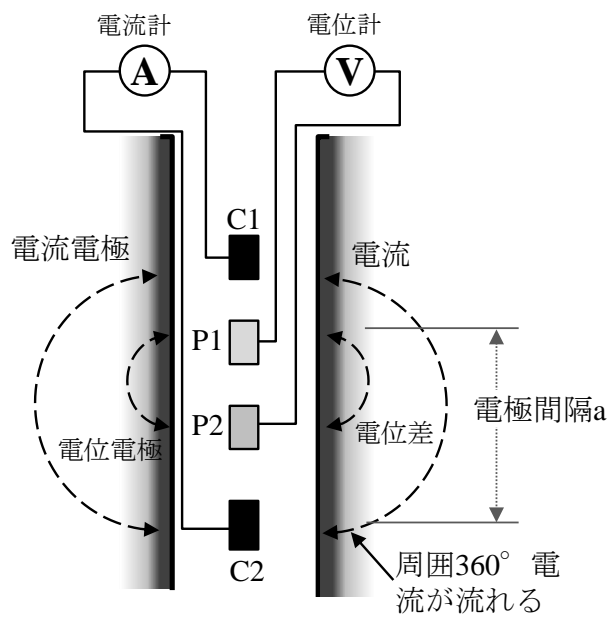


図 2.13 孔内電気検層

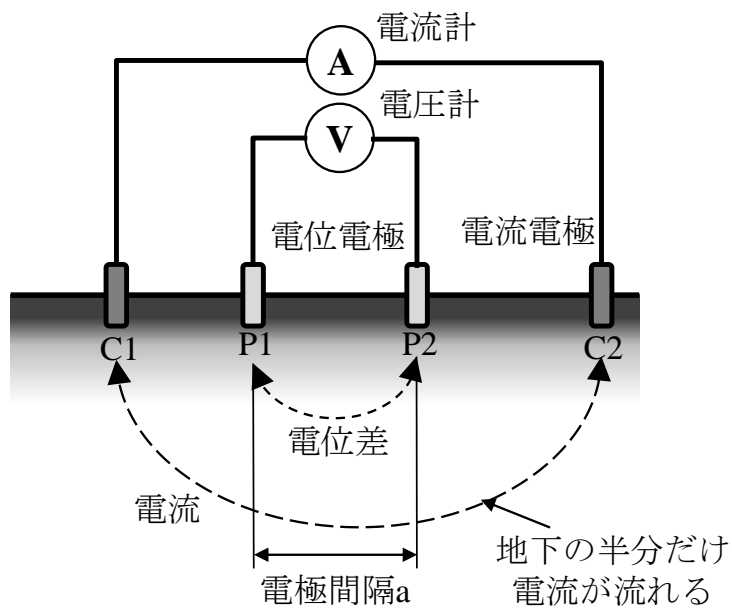


図 2.14 地表電気探査²⁰⁾

(f) 地盤の比抵抗²⁴⁾

地盤の比抵抗と地質の間には、大まかに、図 2.15 に示すような関係がある。粒径が小さいものは低比抵抗となり、粒径が大きいほど高比抵抗になる。



図 2.15 地質と比抵抗の関係

(g) 電気検層の電極配置²⁴⁾

電気検層の電極配置は、基本的に、電流を流す 2 本の電極と、電位を測定する 2 本の電極から成り、計 4 本の電極を使用する。削孔内での電極配置には、2 極法、4 極法と 3 極法の 3 種類がある。図 2.16 に 2 極法を示し、図 2.17 に 4 極法、図 2.18 に 3 極法について示す。このうち、3 極法については、昔は、薄い地層の検出感度が高いなどの理由で使用されたこともあるが、現在ではほとんど使われていない。2 極法と 4 極法は一長一短があり、用途や保有機材、あるいは使用する人の技術の習熟度に応じて、使い分けられる。表 2.5 に、2 極法と 4 極法の違いを示す。一般的な削井や深堀アースの工事では、手動計測に 4 極法が用いられている。調査ボーリングや、石油・天然ガス、温泉の掘削現場では、2 極法が使用されている。日本国内では、電気検層技術の海外からの輸入過程で、電極配置が、さく井工事と調査ボーリングで異なる方式が導入され、さらに、自動検層器を使用するかどうかで、次のように、測定方法が分かれる。

- ・ 300m 以浅の削井現場では、4 極法による手動測定が主流である。
- ・ 300m を越える深度の井戸や温泉では 2 極法の自動検層器が使用されている。
- ・ 地質調査ボーリングでは大部分、2 極法の自動検層器が使用されている。

国内で販売されている主な自動検層器は 2 極法を採用しているため、自動検層器を使用する場合は、必然的に 2 極法になる。逆に手動測定の場合、地表の「遠方電極」の設置トラブルが少なく、測定データのバラつきも少ない 4 極法

が多く利用されている。従って、本実験では、4極法を用いて電気比抵抗試験を行った。

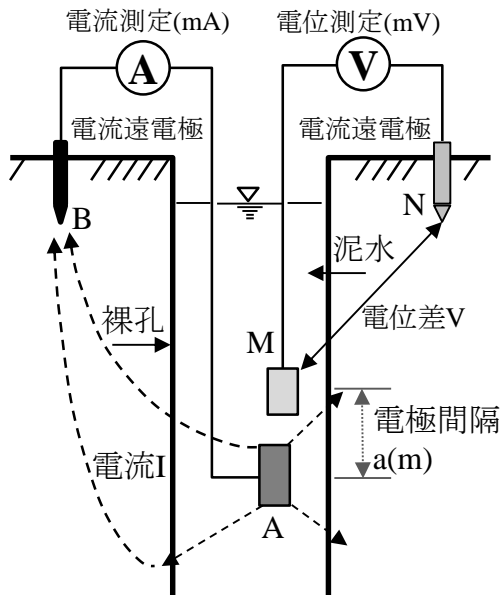


図 2.16 2極法

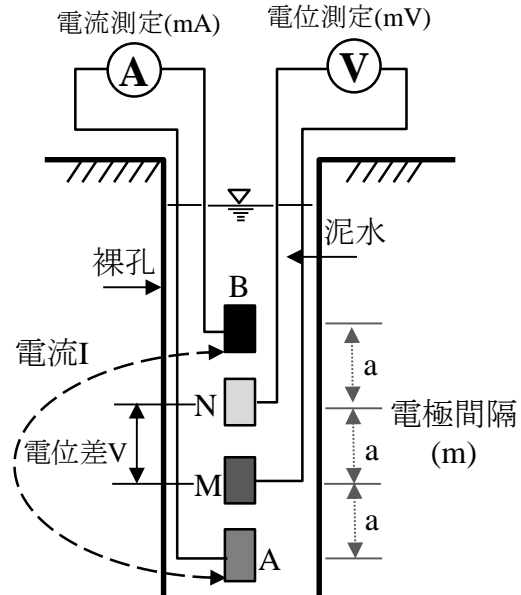


図 2.17 4極法

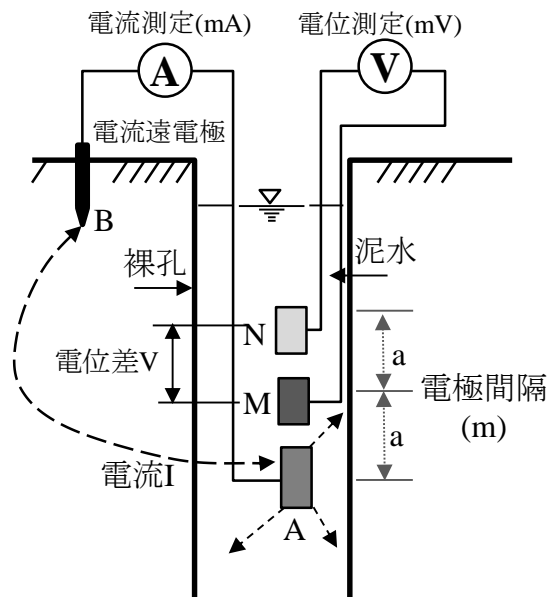


図 2.18 3極法

表 2.5 電気検層の2極法と4極法の違い

電極配置		2極法	4極法
測定 作業	ケーブルの 太さ	○ケーブルが細くて済む (大深度向き)	△ケーブルがやや太くなる (浅層向き)
	電極長さ	○電極が小型化できる(1 m)	△電極部分が長くなる(3m)
	地表電極	△地表電極の設置が必要	○地表電極の設置が不要
	測定トラブル	△地表電極の接地状態が 影響	○腐食・断線がなければ測定 値は安定
	知識・技能	△電気検層の基本知識が 必要	○測定は容易
測定 精度	薄層検出	○薄い地層の検出能力が 高い	△薄い地層の検出能力は低 い
	電極間隔以 下の薄層検 出	△電極間隔より薄い地層 では、抵抗値の反転現象 が(影)発生	△反転現象は少ないが、薄層 の抵抗値は、不明確
	側方の測定 精度	△孔壁より外側の抵抗値 は、孔壁付近の抵抗値の 影響を受け易い	○孔壁より外側の抵抗値は、 孔内の泥水や孔壁の抵抗値 の影響を受けにくい
用途	主な用途	・深度 300mを越える電気 検層 ・薄層検出の必要な小口 径の地質調査ボーリング ・自動検層器	・深度 100~200mの電気検 層 ・薄層検出の不要な、井戸や アース工事などの大口径の ボーリング ・手動検層
	総合比較	電極配置や機器操作に、 若干の経験と知識が必要 なため、地質調査、資源 掘削などに適する。	誰でも測定ができるので、一 般的なさく井やアース工事、 簡易的な調査ボーリングに 適する。

3) 本研究に関連する既往の研究

土の比抵抗を利用した建築の分類における基礎設計に関する研究は、以下の文献に示されているように、藤井がこれまで33年間にわたって18件の研究論文を発表してきた^{25)~42)}。その比抵抗に関する研究分類をまとめて表2.6に示す。

藤井の比抵抗に関する研究のうち、本論文の研究は表2.3の記号Aに属する。記号Bは比抵抗を利用した場所打ちコンクリート杭への適用であり、また、杭記号Cは比抵抗を利用した埋込み杭の先端根固め部への適用である。さらに、記号Dは比抵抗を利用した深層混合処理工法への適用である。

この他、岩の比抵抗によって、岩の孔隙率を推定するアーチーの式もあるが、これについては3章にて記述する。

表 2.6 藤井の比抵抗に関する研究の分類

記号	分類	発表年月	発表者	論文の掲載誌名	発表論文	内容
A	土の物理性質	1978年8月	藤井 衛	①	電気伝導現象を応用した土の物理的性質の調査法に関する基礎的実験(その1)	土の電気伝導現象を利用して土の物理的性質を調査できることが判明した。
		1979年9月	藤井 衛	①	電気伝導現象を応用した土の物理的性質の調査法に関する基礎的実験(その2)	土の電気伝導現象を応用することによって、透水係数の実験式を導き出すことができた。また、地層比抵抗係数の考え方をうければ、土の物理的諸元を把握できる可能性を得ることができた。
		1980年7月	藤井 衛	①	電気検層法による土の物理的性質の調査	室内実験の結果をもとに、現場でその適用性について検討を行い、土の物理的性質の調査に利用できることを明らかにした。
		1981年3月	藤井 衛	②	比抵抗係数による土の毛細管性状調査	比抵抗係数は同じ毛細管構造をもつ土であっても、間隙水濃度によってかなり異なった値を示す。
		1981年9月	藤井 衛	①	比抵抗係数による土の間隙率の測定法について	間隙水の濃度がいかなる値を示す場合でも、土の種類ならびに土の比抵抗、及び間隙水の比抵抗がわかっているれば、間隙率を求めることは可能であるとわかった。
		1982年10月	藤井 衛	②	比抵抗を利用した地盤の不均一性の調査	地盤の不均一性に関する各種の情報を得ることができるとわかった。
		1982年9月	藤井 衛	①	電気検層法による土の間隙率測定法	α は、間隙寸法の大きさによって毛細管の特性を異にする。
B	場所打ちコンクリート杭	1999年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗測定法による場所打ちコンクリート杭孔底部のゆるみ領域探査及び鉄筋の泥膜付着調査	電極を水平に配置して、深度方向の比抵抗を測定すると、孔底堆積物のゆるみ領域を予想できる見通しをつけることができた。
C	埋め込み杭	1998年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗を用いた埋め込み杭の杭先端根固め部の品質管理	電気比抵抗により、杭先端の根固め部の品質がある程度評価できることがわかった。
D	深層混合処理工法	1997年7月	藤井 衛	①	電気比抵抗による現位置造成杭の品質管理に関する研究(その1 泥水及びスライムの比抵抗)	砂分量が2%~10%程度であれば、泥水の p の値に大きい変化はなく p は砂分量よりも泥水の濃度に大きな影響を受けることがわかった。また、 p の測定により、スライムの堆積状況は、明確にとらえることができるとわかった。
		1997年8月	藤井 衛	①	電気比抵抗による現位置造成杭の品質管理に関する研究(その2 ソイルセメントの電気比抵抗)	電気比抵抗によってコラムの攪拌混合度をよく評価できることが確認された。
		1997年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗による現位置造成杭の品質管理に関する研究(その3 噴射攪拌式混合処理改良体の品質に関する現場実験)	電気比抵抗によって改良体の改良範囲をよく評価することができる。
		1998年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗によるソイルセメントの品質評価例	電気比抵抗の測定によって、改良範囲と未改良範囲の境界が判別できることがわかった。
		1998年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗を用いた深層混合処理工法の品質評価に関する基礎実験(その1 目的及び実験概要)	羽根切り回数が特に小さくなる場合に改良体のパラツキが大きくなることが明らかになった。
		1998年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗を用いた深層混合処理工法の品質評価に関する基礎実験(その2 実験結果)	
		1999年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗を用いた改良体の品質評価実験(その1 実験概要)	①改良体の品質は、攪拌装置の性能や攪拌仕様などによってかなり異なる可能性がある。
		1999年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗を用いた改良体の品質評価実験(その2 実験結果)	②未固化段階における改良体の品質管理に比抵抗測定は有効である。
		2010年9月	藤井 衛	①	電気比抵抗による深層混合処理工法の品質管理	まだ固まらない深層混合処理工法による柱状改良体中に電極を挿入し長さ方向の比抵抗の変化を調べることにより、不均質性に関する改良体の情報を得ることができるとわかった。

※ ① 日本建築学会大会学術講演梗概集

② 土質学会論文報告書

参考論文

- 1) 室町忠彦：簡易地耐力調査の一方法について（コーンペネトロメーターの活用），土と基礎2巻7号，pp.34～40，1954.
- 2) 室町忠彦：原位置試験（特にサウンディングについて），土と基礎4巻4号，pp.40～45，1956.
- 3) 福岡 保：簡易で有効適切な土質調査の実例(ロッド埋込試験とスウェーデン式貫入試験)，土と基礎5巻3号，pp.21～25，1957年
- 4) 上田嘉男：スウェーデン式サウンディングロッドについて，土と基礎5巻5号，pp.9～12，1960.
- 5) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎8巻1号，pp.13～18，1960.
- 6) 伊集院博，藤井 衛，田村昌仁，川村政史，若命善雄：スウェーデン式サウンディング試験機のスクリーポイントの形状に関する調査結果について，日本建築学会大会学術講演梗概集， pp.483，484，2001.
- 7) 柿澤賢他：スウェーデン式サウンディング試験のスクリーポイントの形状と貫入特性，第39回地盤工学研究発表会（新潟），pp.93，94，2004.
- 8) 田村昌仁，水谷羊介，川村政史，藤井 衛，枝広茂樹，小口和郎：スウェーデン式サウンディングによる地盤調査法の現状と課題，土と基礎，Vol.52，No.4，pp.8～10，2004.
- 9) 田村昌仁，藤井 衛，安川郁夫，新納秀樹，奥田 悟：スウェーデン式サウンディング試験における自沈層判定の課題と考察，第40回地盤工学研究発表会，pp.213，214，2005.
- 10) 藤井 衛，田村昌仁，伊集院博：小規模建築物の地盤を対象としたスウェーデン式サウンディング試験方法の評価と問題点：日本建築学会構造系論文集，第557号，pp.121～128，2002.
- 11) 公平絵美，藤井 衛，田村昌仁，若命善雄，伊集院博：スウェーデン式サウンディング試験結果に対する2，3の考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.609，610，2002.
- 12) 田村昌仁，藤井 衛，新納秀樹，奥田 悟，安川郁夫，足立由紀夫，安枝政昭：自沈層付近土層の自動試験機における地盤評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.401，402，2003.

- 13) 水谷羊介, 田村昌仁, 藤井 衛, 安達俊夫: 小規模建築物基礎設計に関する研究, (その4 スウェーデン式サウンディング試験による地盤評価に関する研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.583, 584, 2004.
- 14) 新納秀樹, 奥田 悟, 安川郁夫: N 値に代わる調査(スウェーデン式サウンディング試験結果の活用), 基礎工, 2月号, pp.82~86, 2003.
- 15) 片山弘明, 藤井 衛, 品川恭一: スウェーデン式サウンディング試験結果とスクリーポイントを用いた動的サウンディング試験結果の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.485, 486, 2001.
- 16) 品川恭一, 藤井 衛: 戸建住宅基礎の不同沈下に関する不具合事象の原因, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.1, pp.85~92, 2014.
- 17) 物理探鉱技術協会: 本邦に於ける物理探鉱の回顧と展望, 物理探鉱, 12, 1948.
- 18) 物理探鉱技術協会: 10周年特別号, 物理探鉱, 11, 1958.
- 19) 物理探鉱技術協会: IP法特別号, 物理探鉱, 11, 1966.
- 20) 物理探鉱技術協会: 図解物理探査, 物理探鉱, 19, 1989.
- 21) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック(手法編), pp.241~291, 1998.
- 22) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック(ケーススタディ編), pp.945~989, 1998.
- 23) 原康夫: 物理学通論(第19章 19.2), 学術図書出版, 1988.
- 24) 公益社団法人 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, pp.108~114, 2012.
- 25) 藤井衛: 電気伝導現象を応用した土の物理的性質の調査法に関する基礎的実験(その1 日本建築学会大会学術講演梗概集), pp.2007, 2008, 1978.
- 26) 藤井衛: 電気伝導現象を応用した土の物理的性質の調査法に関する基礎的実験(その2 日本建築学会大会学術講演梗概集), pp.1747, 1748, 1979.
- 27) 藤井衛: 電気検層法による土の物理的性質の調査, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.109~112, 1980.
- 28) 藤井衛: 比抵抗係数による土の毛細管性状調査, 土質工学会論文報告集, pp.173~176, 1981.
- 29) 藤井衛: 比抵抗係数による土の間隙率の測定法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2277, 2278, 1981.
- 30) 藤井衛: 比抵抗を利用した地盤の不均一性の調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2163, 2164, 1982.

- 31) 藤井衛：電気検層法による土の間隙率測定法，土質工学会論文報告集，pp.145～151，1982.
- 32) 藤井衛：電機探査による表層地盤調査について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1481，1482，1991.
- 33) 藤井衛：電気比抵抗による現位置造成杭の品質管理に関する研究（その1 泥水及びスライムの比抵抗），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.703，704，1997.
- 34) 藤井衛：電気比抵抗による現位置造成杭の品質管理に関する研究(その2 ソイルセメントコラムの電気比抵抗)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.705，706，1997.
- 35) 藤井衛：電気比抵抗による現位置造成杭の品質管理に関する研究(その3 噴射攪拌式混合処理改良体の品質に関する現場実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.991，992，1997.
- 36) 藤井衛：電気比抵抗によるソイルセメントの品質評価例，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.619，620，1998.
- 37) 藤井衛：電気比抵抗を用いた深層混合処理工法の品質評価に関する基礎実験(その1 目的及び実験概要)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.777，778，1998.
- 38) 藤井衛：電気比抵抗を用いた深層混合処理工法の品質評価に関する基礎実験(その2 実験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.779，780，1998.
- 39) 藤井衛：電気比抵抗測定法による場所打ちコンクリート杭孔底部のゆるみ領域探査及び鉄筋の泥膜付着調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.583，584，1999.
- 40) 藤井衛：電気比抵抗を用いた改良体の品質評価実験(その1 実験概要)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.829，830，1999.
- 41) 藤井衛：電気比抵抗を用いた改良体の品質評価実験(その2 実験結果) 日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.831～832，1999.
- 42) 藤井衛：電気比抵抗による深層混合処理工法の品質管理，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.475，476，2010.

第3章
電気比抵抗と土の細粒分含有率との
関係

3.1 研究目的

本章では、比抵抗と土の細粒分含有率との関係を明らかにすることを目的として3種類の実験を行っている。まず、室内実験によって各種の濃度を有する塩化カリウム溶液（以後、KCL 溶液と呼ぶ）を間隙水として土の比抵抗に対する間隙水の比抵抗の比と土の細粒分含有率との関係を明らかにする。また、測定孔の大きさに対する電極径の比率が比抵抗に与える影響を検討する。さらに、地下水が存在しない原地盤において、SWS 試験を行い、濃度が既知な KCL 溶液で満たした孔中に電極を挿入して比抵抗を計測し、室内実験で提案した土の細粒分含有率の推定式の自然地盤の土における適用性を検証する。

3.2 比抵抗と土の性質に関する既往の研究

比抵抗を利用した地盤調査法の代表的なものとして、電気探査法と電気検層法がある。電気探査法は地下水の位置やマクロ的な地盤構成を調べることを目的とするが^{1), 2)}、電気検層法は図3.1に示すように、ボーリング孔内の孔壁保護の泥水中に電極を降下させ、サンドシーム（薄い砂層）の発見に用いられることが多い³⁾。これは、比抵抗が絶縁体である砂粒子に敏感に反応する特性を有しているからである。藤井はこの点に着目し、砂の毛細管のわい曲度や間隙率の大きさを比抵抗からとらえることを試みてきた^{4), 5)}。この粒子の間隙の大きさは、土粒子の大きさと表裏一体の関係にあり、比抵抗の大きさから土粒子の大きさを推定できる可能性は十分にあると考えられる。ただし、比抵抗は、あくまでも電気化学的な性質であり、土の物理的性質を反映するものの、その値は土粒子間に含まれる間隙水の比抵抗の大きさによっても変化する。

筆者は、上記の特性に着目し、まだ固まらないソイルセメントの柱体に電極を挿入し、その柱体の鉛直方向の比抵抗を計測することによって、柱体の均質性が評価できることを明らかにした⁶⁾。このことから、自然地盤においても、土の比抵抗と間隙水の比抵抗の大きさから、土粒子の大きさを定量的に評価できるのではないかと考えるに至った。

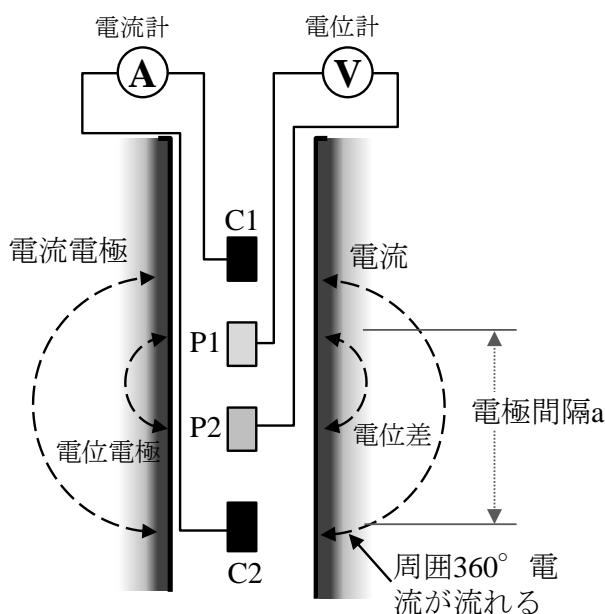


図 3.1 電気検層法の原理

3.3 比抵抗による土の細粒分含有率の評価に関する実験

比抵抗による土の細粒分含有率の評価に関する実験には、48種類の人工配合土と自然土を用いた。人工配合土は、笠岡粘土と珪砂7号を質量比で10:0, 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8, 1:9, 0:10の合計11種類である。これらの物理諸元を表3.1, 人工配合土の粒度分布曲線を図3.2に示す。また、自然土37種類の粒度分布曲線を図3.3(a)～図3.3(d)に示す。室内実験による比抵抗は、 $\phi 5\text{cm}\times 10\text{cm}$ のプラモールド型枠に詰めた試料土に、写真3.1に示すポータブル電気伝導度計を、あらかじめ電極径の大きさに合わせて設けた孔に、写真3.2に示すように挿入して計測した。この場合、電気伝導率計に取り付けてあったキャップはあらかじめはずしている。なお、間隙水としては、0.001規定, 0.005規定, 0.01規定, 0.1規定, 1規定の5種類のKCL溶液の他に水道水と純水も加えて計7種類の間隙水を用いた。表3.2にポータブル電気伝導度計の仕様を示す。また、図3.4にポータブル電気伝導度計の寸法を示す。

表 3.1 1 試料土の物理諸元

No.	試料	土の種類	含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	液塑性限界			粒度組成 (%)					実験種類	
					W _L (%)	W _P (%)	I _p	粗砂分	中砂分	細砂分	シルト分	粘土分		
1	人工 配合土	等面粘土：珪砂7号 100	35.7	2.42	60.0	19.0	41.0	0.0	0.0	0.1	5.0	46.3	48.6	測定孔の大きさが比抵抗に与える影響 (No.1~No.7) 比抵抗による土の細粒分含有率の評価に関する実験 (No.1~No.11)
2		等面粘土：珪砂7号 91	33.9	2.66	61.0	27.7	33.3	0.0	0.0	0.6	0.1	53.4	45.9	
3		等面粘土：珪砂7号 82	31.3	2.72	52.4	19.7	32.7	0.0	0.0	0.8	18.1	42.1	39.1	
4		等面粘土：珪砂7号 73	31.6	2.76	46.5	19.5	27.0	0.0	0.0	1.6	28.7	36.5	33.2	
5		等面粘土：珪砂7号 64	23.3	2.60	41.6	16.1	25.5	0.0	0.0	1.2	35.5	30.2	33.1	
6		等面粘土：珪砂7号 55	23.6	2.75	35.8	14.0	21.8	0.0	0.0	1.9	43.3	26.1	28.7	
7		等面粘土：珪砂7号 46	19.5	2.62	31.4	12.8	18.6	0.0	0.0	3.4	50.1	20.9	25.7	
8		等面粘土：珪砂7号 37	19.7	2.63	27.4	12.9	14.5	0.0	0.0	4.7	58.0	17.0	20.2	
9		等面粘土：珪砂7号 28	24.6	2.54	-	-	-	0.0	0.0	4.6	66.4	13.3	15.7	
10		等面粘土：珪砂7号 19	21.3	2.68	-	-	-	0.0	0.0	6.6	73.9	8.0	11.4	
11		等面粘土：珪砂7号 010	18.3	2.55	-	-	-	0.0	0.0	5.5	85.5	3.9	5.1	
12	自然土	砂質土	22.4	2.72	-	-	-	3.2	4.1	21.4	65.4	-	5.9	比抵抗による土の細粒分含有率の評価に関する実験 (No.12~No.48)
13		砂質土	26.0	2.69	-	-	-	0.0	0.0	13.6	79.3	-	7.1	
14		粘性土	61.0	2.66	-	-	-	0.0	0.0	0.7	22.3	52.2	24.8	
15		粘性土	106.4	2.57	-	-	-	0.8	0.2	0.3	1.8	35.3	61.6	
16		粘性土	52.1	2.64	-	-	-	0.4	0.4	1.0	28.6	48.0	21.6	
17		粘性土	41.4	2.66	-	-	-	0.1	0.1	0.3	62.7	29.4	7.4	
18		砂質土	23.0	2.67	-	-	-	1.6	1.7	36.4	50.2	-	10.1	
19		砂質土	31.6	2.7	-	-	-	0.0	0.0	13.6	79.3	-	7.1	
20		砂質土	32.9	2.72	-	-	-	0.0	0.0	5.4	89.3	-	5.3	
21		砂質土	47.1	2.68	-	-	-	0.0	0.0	4.4	62.3	23.0	10.3	
22		砂質土	30.6	2.72	-	-	-	0.0	0.0	1.2	83.8	9.9	5.1	
23		砂質土	32.7	2.72	-	-	-	0.0	0.1	17.9	76.1	-	5.9	
24		砂質土	44.6	2.69	-	-	-	0.0	0.0	3.9	59.1	25.3	11.7	
25		砂質土	48.2	2.68	-	-	-	0.0	0.0	5.1	55.5	25.3	14.1	
26		砂質土	40.7	2.69	-	-	-	0.0	0.0	12.9	56.1	21.0	10.0	
27		粘性土	27.3	2.7	-	-	-	0.4	0.3	0.2	1.6	88.5	9.0	
28		砂質土	19.7	2.694	-	-	-	0.0	0.0	1.5	30.1	65.8	2.6	
29		砂質土	21.0	2.691	-	-	-	0.0	0.8	27.3	68.3	-	3.6	
30		砂質土	22.8	2.689	-	-	-	0.0	0.2	19.3	76.0	-	4.5	
31		砂質土	24.7	2.687	-	-	-	1.8	5.9	34.7	43.1	9.4	5.1	
32		砂質土	16.7	2.72	-	-	-	8.2	7.6	30.2	42.5	-	11.5	
33		砂質土	28.5	2.72	-	-	-	0.0	0.0	0.8	81.1	12.9	5.2	
34		粘性土	59.6	2.65	-	-	-	5.0	4.4	11.4	26.3	22.5	30.4	
35		砂質土	48.9	2.68	-	-	-	4.4	3.7	9.7	47.5	14.2	20.3	
36		砂質土	39.2	2.68	-	-	-	0.2	0.3	1.1	74.4	15.3	8.7	
37		粘性土	68.6	2.64	-	-	-	2.3	0.7	0.8	8.3	51.3	36.6	
38		砂質土	34.7	2.69	-	-	-	0.0	0.0	5.3	79.4	8.1	7.2	
39		砂質土	31.2	2.69	-	-	-	1.6	1.3	4.0	83.7	-	9.4	
40	砂質土	30.3	2.69	-	-	-	0.3	2.2	6.4	88.1	-	3.0		
41	砂質土	27.4	2.68	-	-	-	0.2	0.6	20.9	71.0	-	7.3		
42	砂質土	21.9	2.83	-	-	-	0.0	0.0	8.7	86.8	-	4.5		
43	砂質土	25.7	2.68	-	-	-	0.2	1.1	28.4	63.6	-	6.7		
44	砂質土	33.1	2.63	-	-	-	0.4	1.5	9.0	65.7	12.2	11.2		
45	砂質土	25.9	2.71	-	-	-	0.4	0.2	13.9	55.0	23.2	7.3		
46	砂質土	21.8	2.8	-	-	-	1.2	1.1	32.7	40.7	16.1	8.2		
47	粘性土	53.3	2.55	-	-	-	0.6	1.3	3.1	4.6	47.9	42.5		
48	砂質土	21.6	2.75	-	-	-	0.0	0.0	40.8	47.2	7.4	4.6		
49	粘性土	40.4	2.4	82.4	61.7	20.7	0.0	6.7	17.8	13.7	48.6	13.1		
50	粘性土	42.2	2.4	108.9	71.5	37.4	0.0	6.1	16.6	11.2	49.0	17.0		
51	粘性土	81.0	2.7	113.9	62.8	51.0	0.0	9.6	20.4	9.1	53.2	7.7		
52	粘性土	99.1	2.8	134.3	83.7	50.6	0.0	1.3	5.7	2.9	71.5	18.6		
53	粘性土	93.9	2.8	133.8	79.4	54.4	0.0	2.4	7.2	7.1	74.1	9.2		
54	粘性土	87.3	2.7	120.3	66.2	54.1	0.0	0.1	0.5	2.0	80.3	17.0		
55	粘性土	84.9	2.7	125.0	67.0	58.0	0.0	0.0	0.2	0.3	85.6	13.9		
56	粘性土	84.0	2.8	116.5	60.3	56.2	0.0	0.0	0.3	1.3	81.3	17.0		

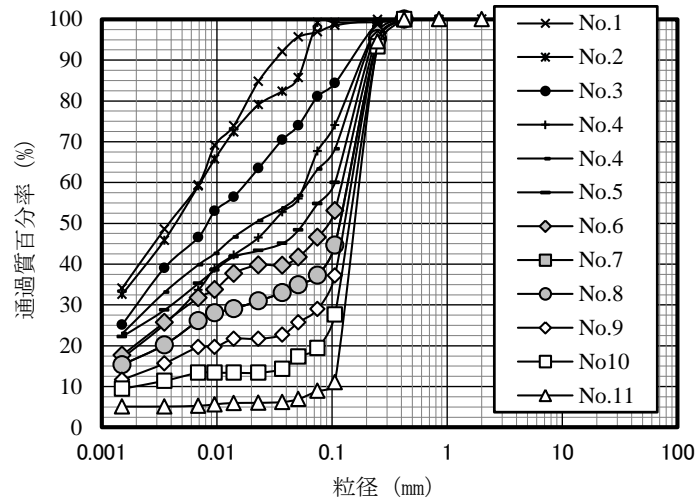


図 3.2 人工配合土の粒度分布曲線

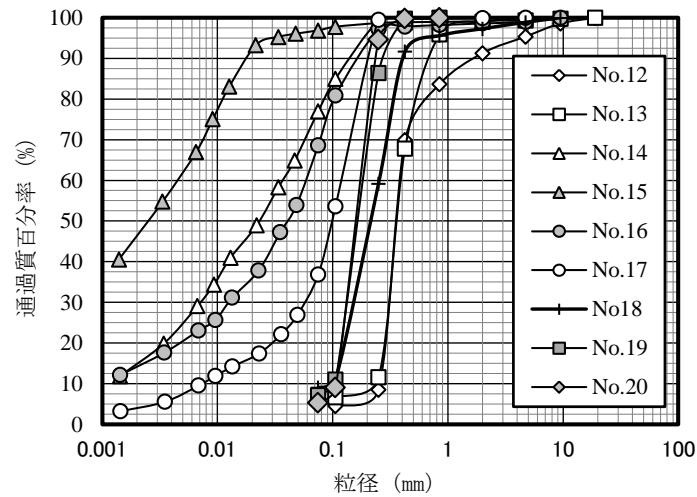


図 3.3(a) 自然土の粒度分布曲線

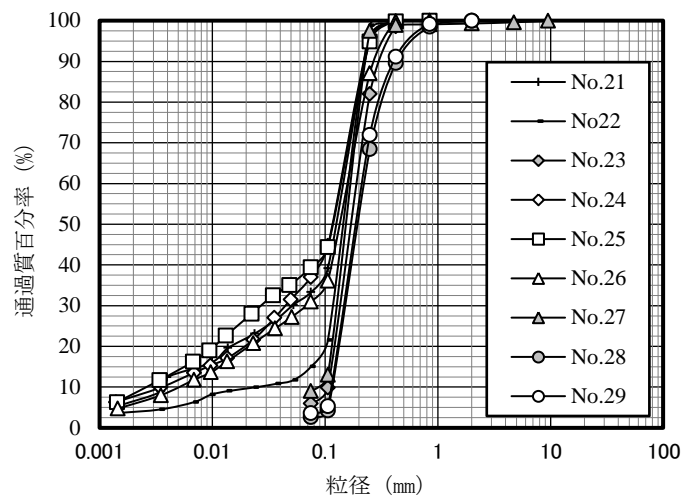


図 3.3(b) 自然土の粒度分布曲線

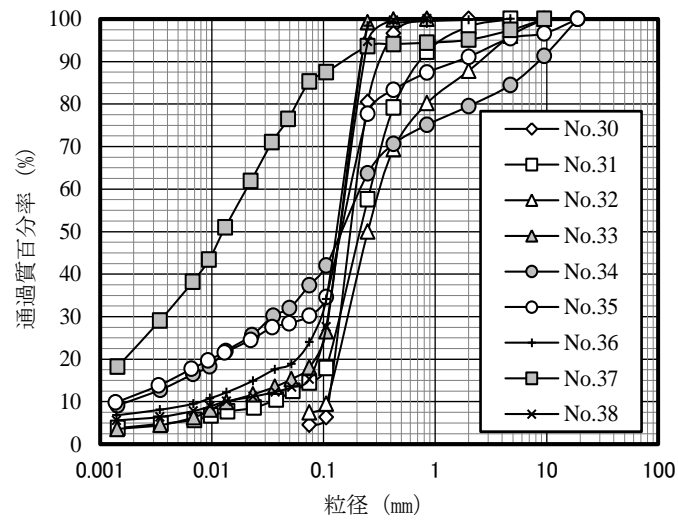


図 3.3 (c) 自然土の粒度分布曲線

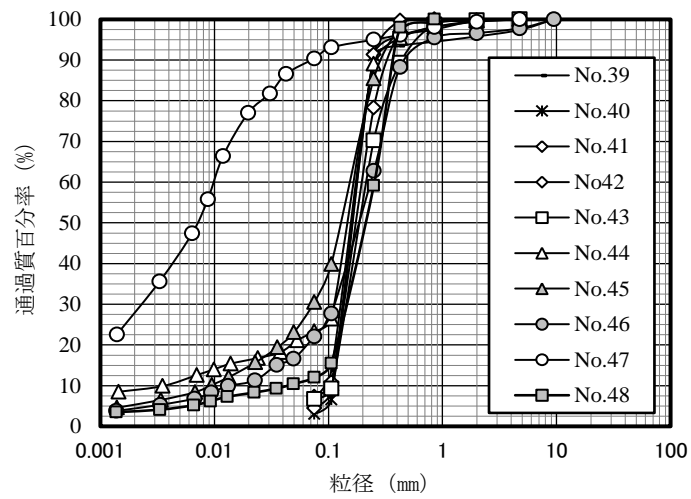


図 3.3 (d) 自然土の粒度分布曲線



写真 3.1 ポータブル電気伝導度計



写真 3.2 比抵抗計測状況

表 3.2 ポータブル電気伝導度計の仕様

型名	CT-27112B
測定範囲	$0.5\Omega \cdot m \sim 10K\Omega \cdot m$
使用温度範囲	$0^{\circ}C \sim 80^{\circ}C$
湿度範囲	$< 95RH\%$

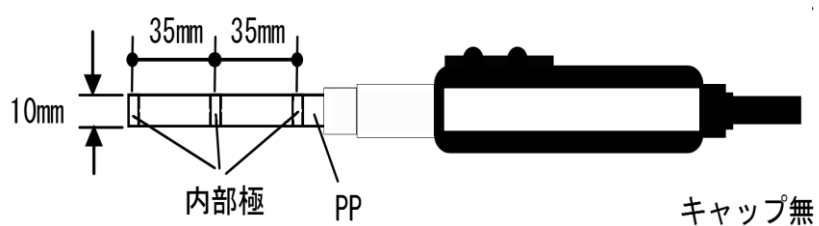


図 3.4 ポータブル電気伝導度計

3.4 測定孔の大きさが比抵抗に与える影響

測定孔の大きさが、比抵抗に与える影響について検討を行うため、7種類の人工配合土(表3.1に示すNo.1~No.7)を用いて実験を行った。試料土の作製は、笠岡粘土と硅砂7号を質量比で変化させたものである。比抵抗の測定にあたっては $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の型枠に試料土を一定の密度になるように締固め、その後、7つの大きさの測定孔(孔径: 10.5, 11.5, 13, 14, 18, 24, 36mm)を設け、その孔中を0.1規定KCL溶液を間隙水として満たし、十分湿潤状態(表面が水分で濡れた状態)になってから比抵抗の測定を行った。なお、KCL溶液に使用した水は、純水を用いており、KCLはJIS K8221に規定する電気伝導率測定用の試薬を用いた。

3.5 原位置における検証実験

原位置試験は神奈川県平塚市北金目4-1-1にある東海大学湘南校舎の敷地内にて行った。敷地は標高約52mの台地上にある。試験に先立ち、地表面から0.5mごとに3.5mまで土の採取を行った。地表面から1.5mまでは砂混じりの黒ボクで、1.5mから3.5mまでは関東ロームである。図3.5は原位置試験で用いた2種類の（表3.1に示すNo. 49～No. 56）自然土の粒度分布曲線である。試験は、まず、G.L.0mから深さ4.5mまで写真2.3に示した自動SWS試験機を用いてSWS試験を実施した。その後、図3.4のポータブル電気伝導率計ではなく、新たに開発した写真3.4に示す原位置測定用電極（以後、電極と呼ぶ）を用いて、これを深さ25cmずつ貫入し、所定の深さまで比抵抗測定を行った。なお、電極は、3.6(b)の測定孔の大きさが比抵抗に与える影響に関する実験結果に基づき、孔壁地盤に密着するようになっている。この点が通常の電気検層法の測定形式とは異なっている。比抵抗の測定回路は図3.6に示すもので、その仕様を表3.3に示す。電極はSWS試験で設けた孔に降ろすことになるが、端部にスクリーが取り付けられているため、スクリーは孔壁に接触しながら、そのピッチに応じて回転して貫入することになり、計測導線も一緒に回転してしまう。これを防ぐために、比抵抗の計測導線は、ロッドの内部を介して、図3.7に示すようにロータリーコネクタに接続してある。このコネクタは、回転側（ロッド側）と固定側（ケーブル側）との間における検出信号の伝達を行う電気部品であり、このコネクタにより、ロッドを回転させてもケーブルを固定させた状態で比抵抗が計測できる機構となっている。また、写真3.5に実験状況を示す。敷地内の地盤の地下水が確認されなかったため、あらかじめSWS試験孔内に溶液を投入して実験を行った。投入した溶液は0.1規定KCL溶液である。

なお、今回の地盤は、粘性土地盤であるため孔壁の崩壊の恐れはなかったが、スクリーの切削により孔壁面の土は乱される可能性はある。ただ、電流電極間隔は9cmであり、電流が半球状に流れることを考えると、少なくとも電流は孔壁から9cmの範囲に及ぶこと、及び今回は土粒子の間隔ではなく、細粒分の含有率を調べることを目的としているので、土の乱れの影響は少ないと判断した。計測にあたっては、まず、孔内にKCL溶液を地表面まで注入し、15分経過後に水位が下がった分を補充し、30分後に再度観測し、水位が下がっていないことを確認した後、比抵抗の計測を行った。

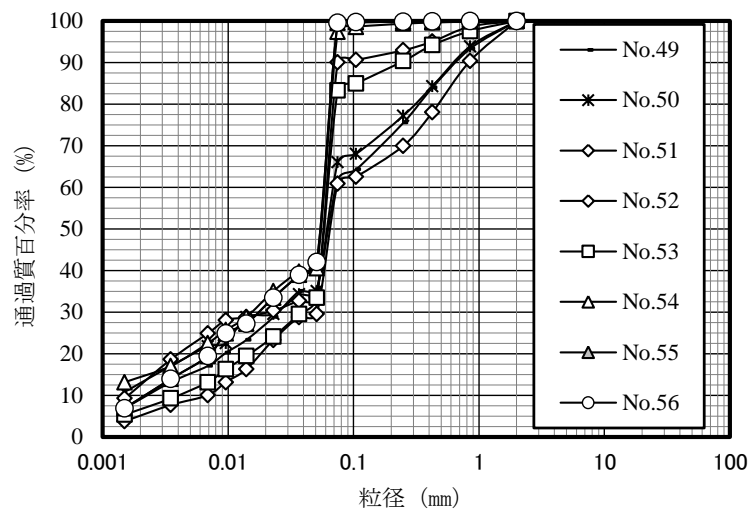


図 3.5 原位置試験における自然土の粒度分布曲線

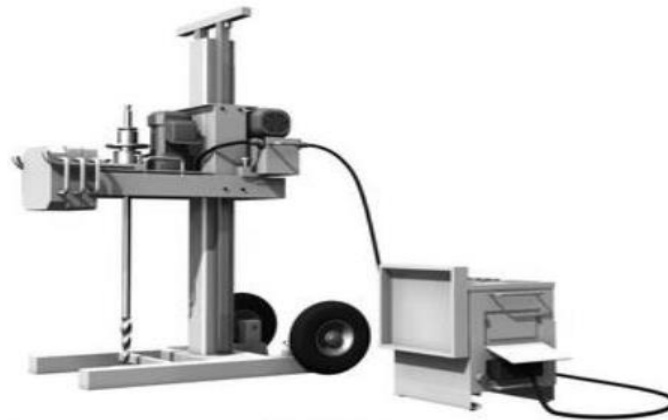


写真 3.3 自動 SWS 試験機

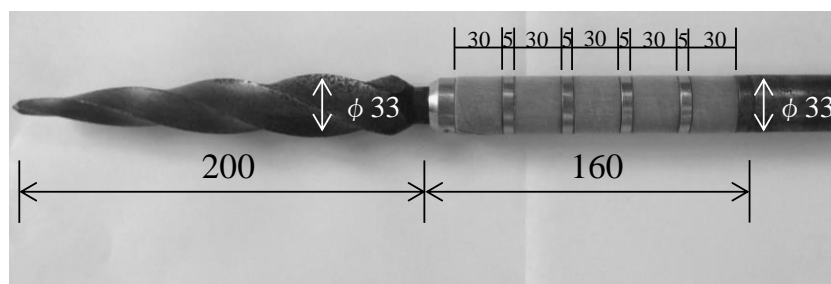


写真 3.4 原位置測定用電極

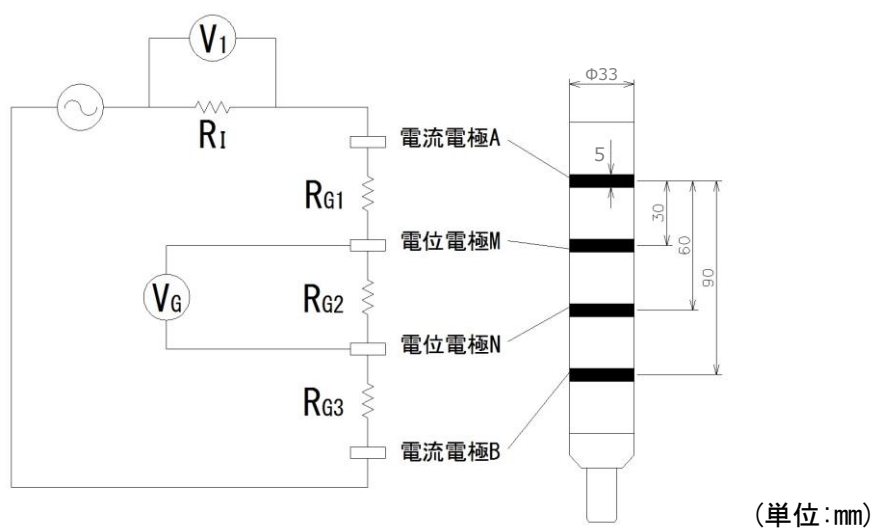


図 3.6 比抵抗の測定回路

表 3.3 原位置測定用電極の仕様

電極間隔	30mm
電極配置方法	ウェンナー法
通電方法	交流法
周波数	60Hz
測定範囲	$0.5\Omega \cdot \text{m} \sim 20 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$

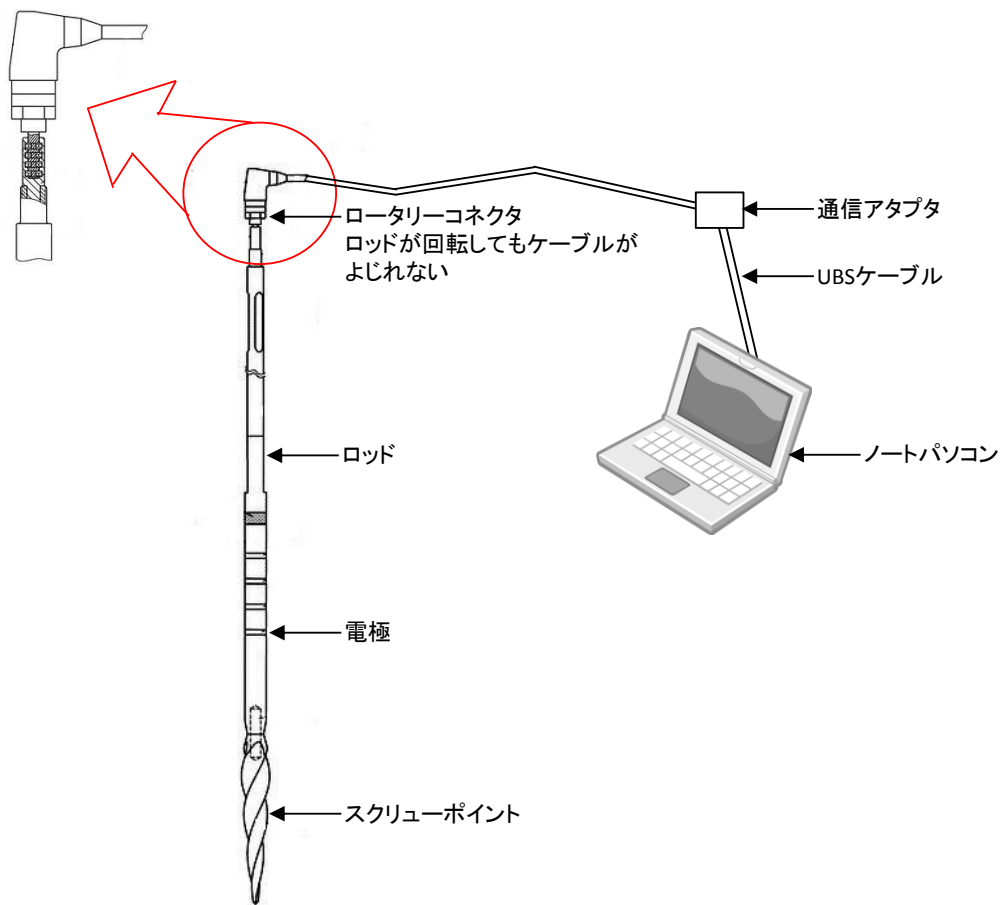


図 3.7 ロータリーコネクタ



写真 3.5 実験状況

3.6 実験結果および考察

(a) 比抵抗による土の細粒分含有率の評価に関する実験

図 3.8 は，人工配合土（表 3.1 の試験 No.1～No.11）の比抵抗と間隙水の比抵抗との関係を示したものである．同一種の土に関して，間隙水の比抵抗が大きいほど土の比抵抗は増大し，両対数紙上で直線になる傾向がある．また，砂の割合が大きいほど直線の傾きは大きくなる．この関係が自然土(No.12～No.48)についても成り立つかどうか調べた．その結果を図 3.9 に示す．図中の破線は図 3.8 に示す粘土:砂=5:5 のラインであり，細粒分含有率 50%のラインである．図から明らかのように，自然土においても人工配合土と同様に，粘性土，砂質土の判別は可能であると考えられる．そこで，土および間隙水の比抵抗から細粒分含有率を推定することを考えた．なお，土の比抵抗から孔隙が 100%水で飽和され岩石の孔隙率の大きさを評価する方法として式(1)に示すアーチーの式がある．^例 えば 7), 8)

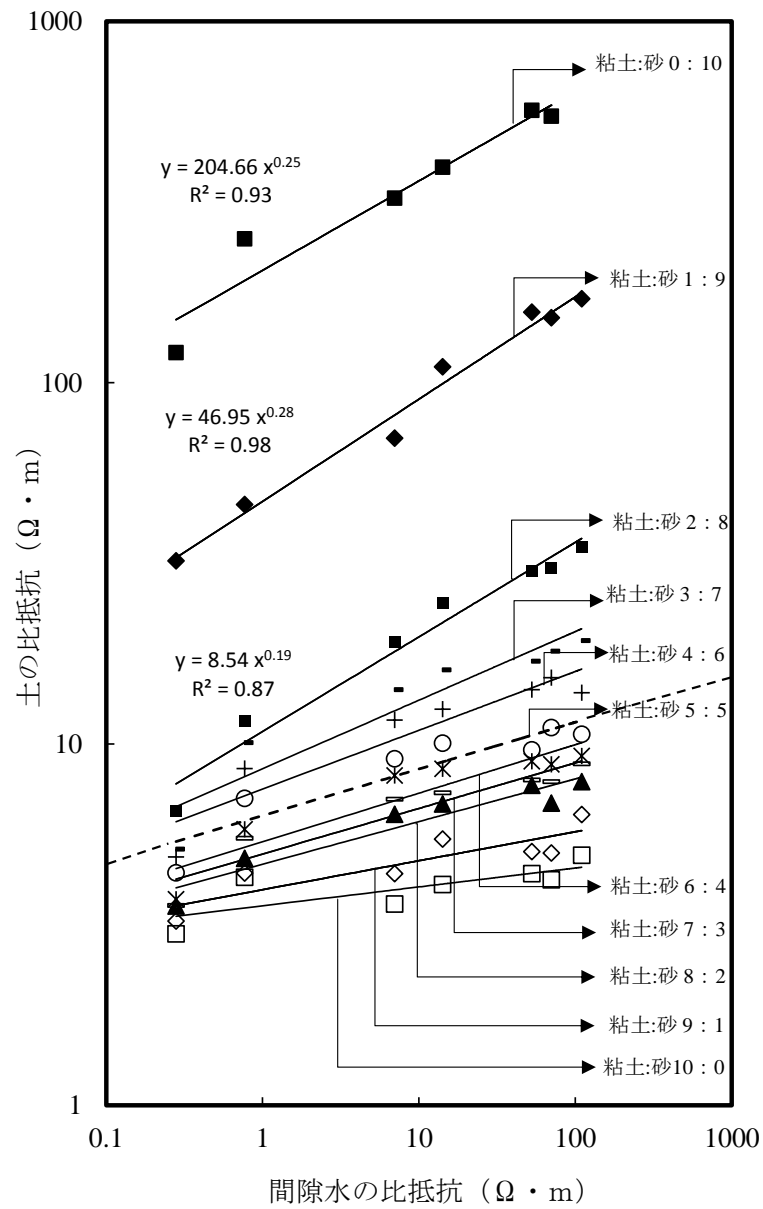


図 3.8 人工配合土の比抵抗と土の間隙水の比抵抗との関係

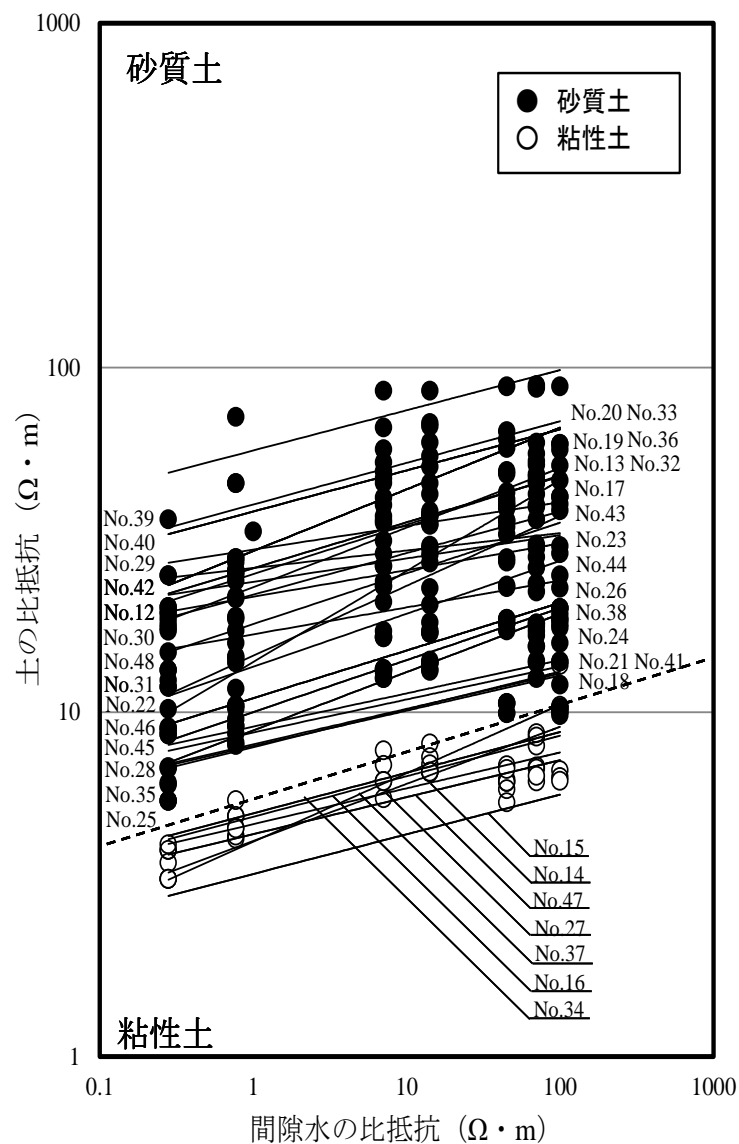


図 3.9 自然土の比抵抗と土の間隙水の比抵抗との関係

$$F=1/\varphi^m \tag{1}$$

F : 地層の比抵抗係数

$$F=R_o/R_w$$

R_o : 岩石の比抵抗($\Omega \cdot m$)

R_w : 岩の孔隙間の水の比抵抗($\Omega \cdot m$)

φ : 地層の孔隙率(%)

m : cementation facfor (通常 2)

アーチーの式は岩を対象にしたものである。岩石の比抵抗は数 $10\Omega \cdot m$ から数 $100\Omega \cdot m$ まで変化するものであり、今回のようなシルト・粘土ではアーチーの式は適用できない。しかし、土粒子間の間隙の大きさは細粒分の含有率の大きさに関係し、間隙が大きい土ほど細粒分含有率が大きい。したがって、間隙水の比抵抗が同じであれば、細粒分含有率が大きい土ほど比抵抗は小さくなると考えられる。

そこで、間隙水の比抵抗(R_w)に対する土の比抵抗(R_o)との比率である F_o と細粒分含有率(A)との関係を、表 3.1 に示す No.1~No.11 土について調べてみた。その結果、両者は間隙水の比抵抗が $0.28\Omega \cdot m \sim 110\Omega \cdot m$ の範囲において、図 3.10 に示したような比例関係が認められ、式(2)のように表すことができた。

$$A = aF_o^b \quad (2)$$

A : 細粒分含有率

a, b : 実験定数

F_o : 間隙水の比抵抗 R_w に対する土の比抵抗 R_o の比率

($F_o = R_w/R_o$)

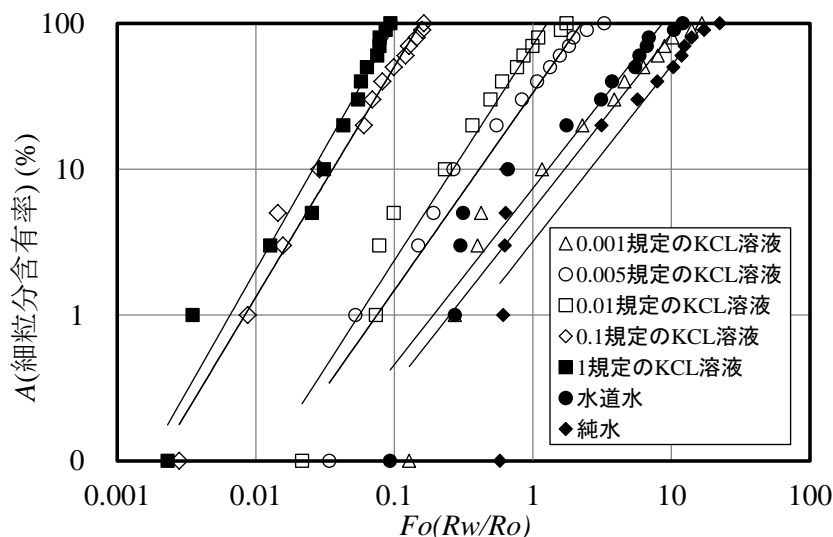


図 3.10 A (細粒分含有率)と F_o (間隙水の比抵抗 R_w に対する土の比抵抗 R_o との比率)との関係

式(2)の a と b の実験定数を求めるため、各種濃度の KCL 溶液と純水及び水道水を用いて表 3.1 に示す No.1~No.11 の土について調べてみた。表 3.4 に a と b の値を示す。表 3.4 より、 a と b は間隙水の比抵抗(R_w)と密接な関係にあることがわかる。そこで、 a と間隙水の比抵抗(R_w)との関係を調べてみると、図 3.11 に示すように密接な関係があり、両者は式(3)のように表すことができた。

$$a = 9.81 R_w^{-1.24} \quad (3)$$

a : 実験定数

R_w : 間隙水の比抵抗($\Omega \cdot m$)

表 3.4 a と b の値

間隙水の種類	比抵抗の値($\Omega \cdot m$)	a	b
1規定のKCL溶液	0.28	44.35	1.62
0.1規定のKCL溶液	0.70	17.7	1.54
0.01規定のKCL溶液	7.01	0.69	1.43
0.005規定のKCL溶液	13.40	0.34	1.33
0.001規定のKCL溶液	70.00	0.05	1.22
水道水	52.80	0.03	1.22
純水	110.00	0.02	1.34

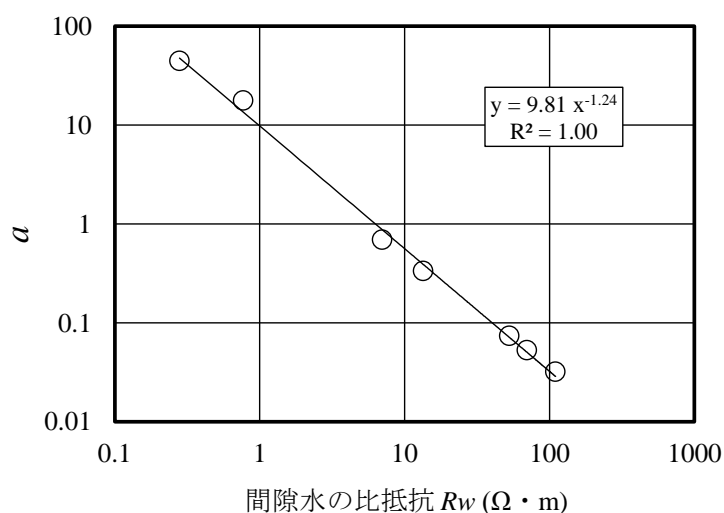


図 3.11 a と間隙水の比抵抗 R_w との関係

また、図 3.12 より、 a と b の関係は式(4)のように表すことができた。図 3.13 は測定値 b と推定値 b を比較した結果であるが、両者はよく一致している。したがって、式(2)は式(5)のように整理することができる。

$$b = 1.41a^{0.03} \quad (4)$$

a, b : 実験定数

$$A = 9.81Rw^{-1.24} \cdot Fo^{1.41} (9.81Rw^{-1.24})^{0.03} \quad (5)$$

A : 細粒分含有率

Fo : 間隙水の比抵抗 Rw に対する土の比抵抗 Ro の比率

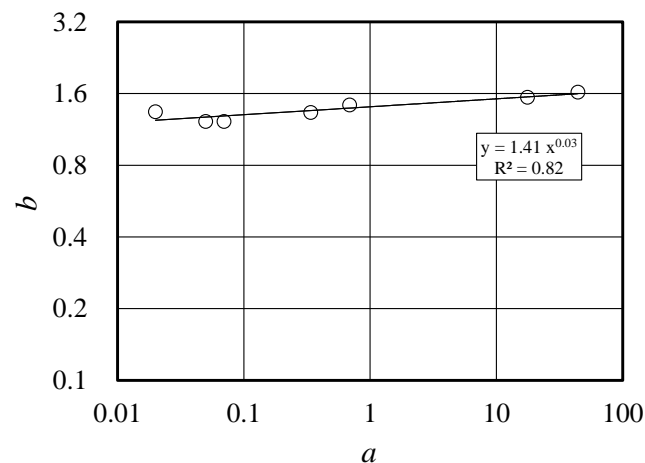


図 3.12 a と b との関係

ここで、再度、式(5)を用いて人工配合土の測定細粒分含有率と計算細粒分含有率とを比較した結果、図 3.14 のように両者は概ね一致することが分かった。図 3.15 は、人工配合土を用いて提案した式(5)を用いて、自然土（表 1 に示す No.12 ~ NO.48）に対する適用性を検討した結果である。自然土についても、両者は概ね一致することがわかる。

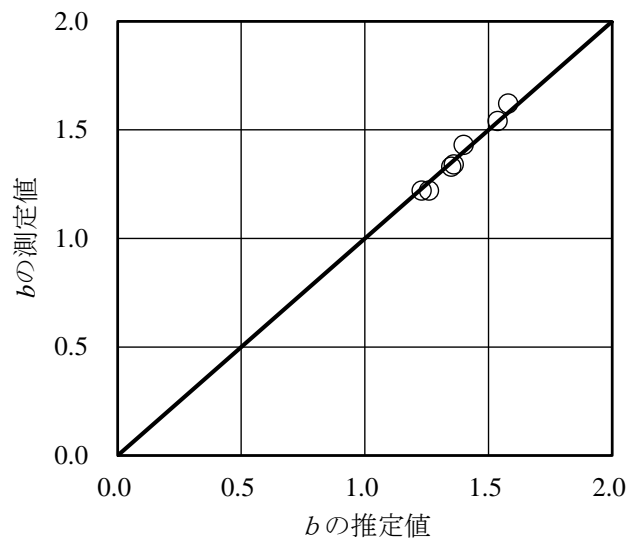


図 3.13 b の測定値と推定値との比較

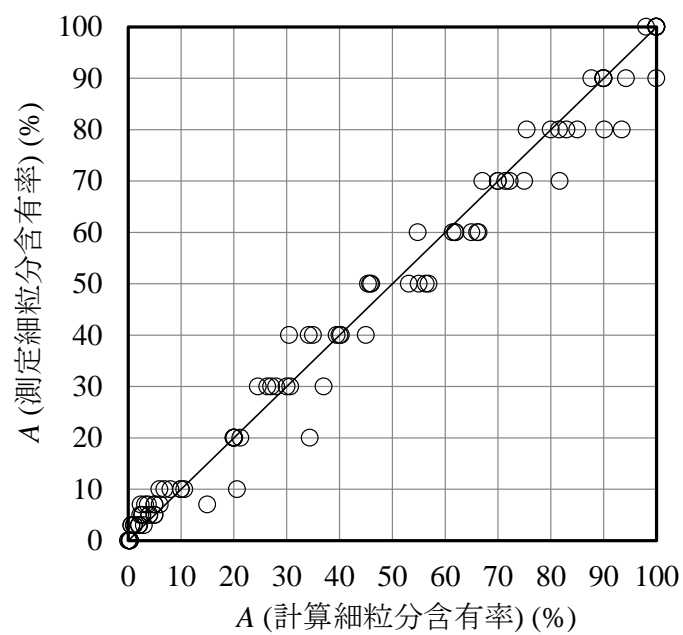


図 3.14 人工配合土の測定細粒分含有率と計算細粒分含有率との関係

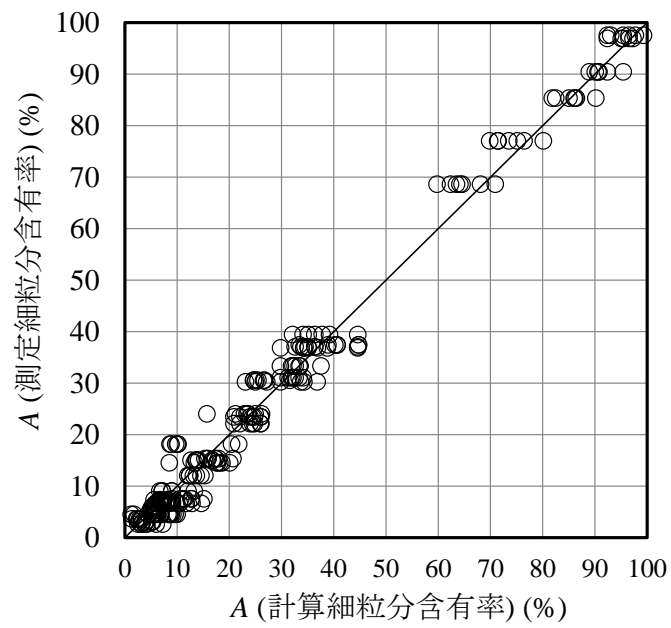


図 3.15 自然土の測定細粒分含有率と計算細粒分含有率との比較

(b) 測定孔の大きさが比抵抗に与える影響に関する実験

図 3.16 は、測定孔の大きさが比抵抗に与える影響をまとめたものである。図 3.16 により、孔径に対する電極径の影響は極めて大きいことがわかる。図 3.17 は孔径と電極径が同一の場合の比抵抗を 100% とし、これと電極径に対する孔径の比率を示したものである。図 3.17 により、電極径に対する孔径の比率が 1.5 の場合は、比抵抗が 5 割以上小さくなることを意味している。したがって、原位置の試験孔においては、試験孔径と電極孔径はほぼ同じであることが必要であると言える。

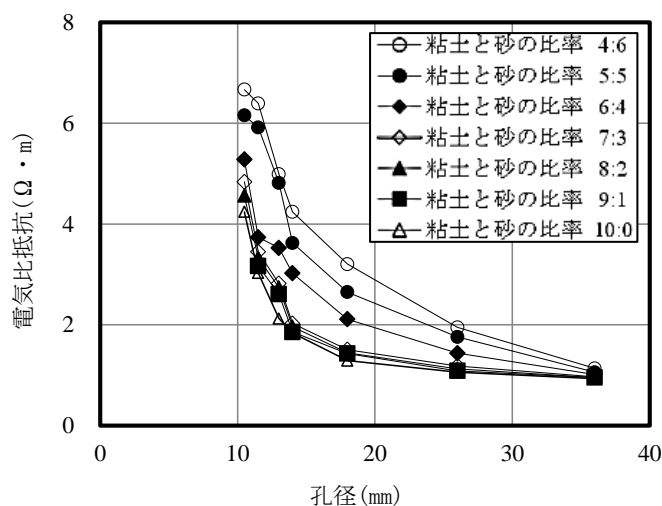


図 3.16 測定孔の大きさが比抵抗に与える影響

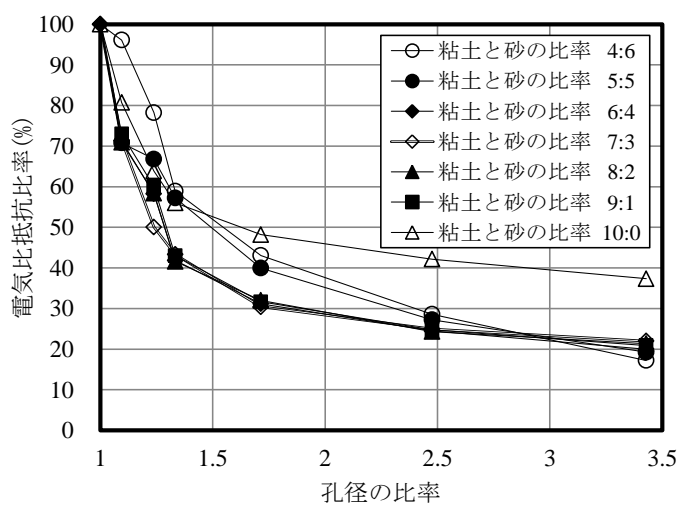


図 3.17 測定孔の大きさが比抵抗に与える影響

(c) 原位置試験

図 3.18 は、0.001 規定、0.005 規定、0.01 規定、0.1 規定の合計 4 種類の KCL 溶液を用いて測定した写真 3.4 に示す電極と、ポータブル電気伝導率計との関係をまとめたものである。図 3.18 に示したように電極の比抵抗は、ポータブル電気伝導率値のほぼ 2 倍の値となった。これは、計測方法の違いや電極の材質などの違いと考えられ、セル定数($1/2.07=0.48$)に相当するものと考えられる。このセル定数 0.48 を用いて、原位置にて地盤の比抵抗を計測した。その結果を図 3.19 に示す。図 3.19 は、SWS 試験の結果と SWS 試験後の孔内を孔口まで KCL 溶液で満たした状態で写真 3.4 の電極を挿入して測定した土の比抵抗の測定結果を示している。また、図 3.19 には細粒分含有率の計測位置も示している。地表面から 1.5m までは砂混じり黒ボクであり、砂粒子の影響を受け比抵抗は $10\Omega \cdot m \sim 50\Omega \cdot m$ まで変化するが、1.5m~3.5m は均質なロームであり、比抵抗はほぼ $10\Omega \cdot m$ の一定の値を示す。

図 3.20 は式(5)を用いて測定細粒分含有率と計算細粒分含有率との比較を行った結果である。サンプリングした試料土は表 1 に示す No.49~No.56 である。この図 3.20 により、両者は概ね一致していることがわかる。これより、今回、粘性土地盤に関しては、式(5)の適用性が認められることが検証できた。

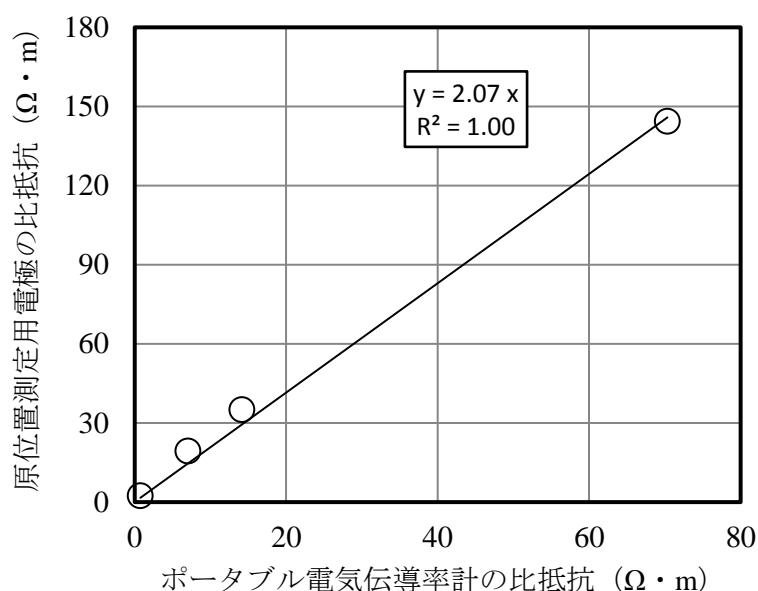
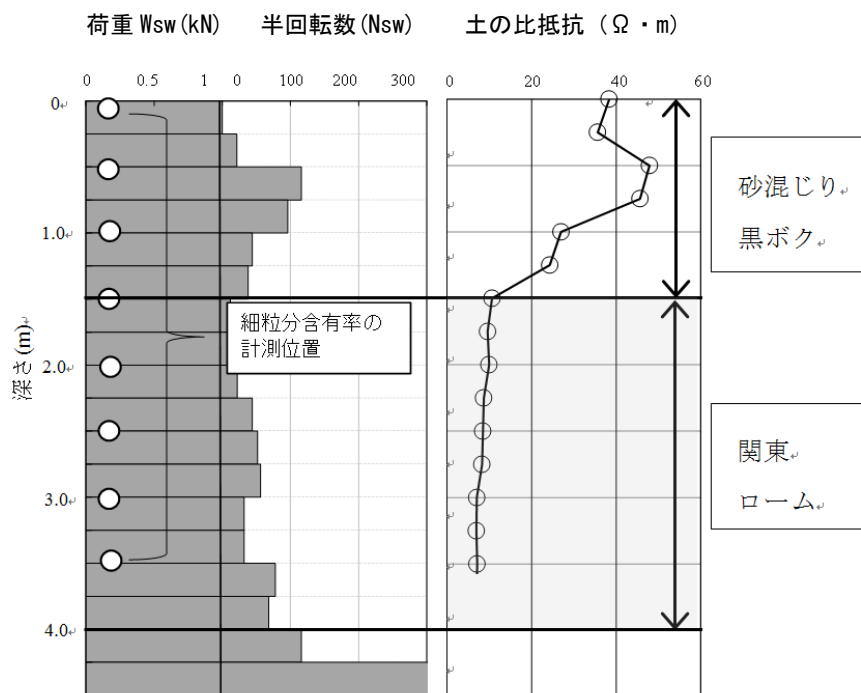


図 3.18 原位置測定用電極の比抵抗とポータブル電気伝導率計の比抵抗との関係



(a) SWS 試験結果 (b) 地盤の比抵抗

図 3.19 SWS 試験結果と比抵抗の測定結果

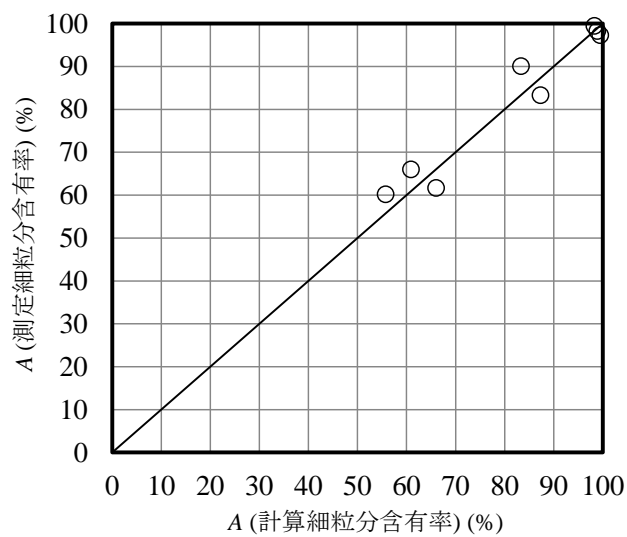


図 3.20 測定細粒分含有率と計算細粒分含有率との比較

3.7 まとめ

本論文の主な結論を箇条書きにまとめると以下のようなになる。

- 1) 土の比抵抗とその間隙に含まれる水の比抵抗の大きさから，砂質土と粘性土を区分することができる。
- 2) 室内試験レベルであるが，式(5)の関係をもとに，土の比抵抗に対する間隙水の比抵抗の比から，土の細粒分含有率を推定する式を提案することができた。
- 3) 試験孔の大きさが電極径に与える影響は極めて大きく，電極径はほぼ孔径に相当する大きさが望ましい。
- 4) 原位置にて計測した地盤の比抵抗と間隙水の比抵抗の大きさをもとに，提案式によって求めた粘性土の細粒分含有率は実測値と概ね一致した。

以上により，土の比抵抗と間隙水の比抵抗の計測ができれば，粘性土の細粒分含有率の評価は可能であるとの見通しをつけることができた。

参考文献

- 1) 山口久之助：鑿泉の電気検層法，昭晃堂版，1962. 10
- 2) 志村 馨：電気探査法，昭晃堂版，1964.
- 3) 島 裕雅：比抵抗映像法古今書院，1995.
- 4) 藤井 衛：比抵抗係数による土の毛細管性状の調査，土質工学会論文報告集 21(1)，pp. 131～138，1981.
- 5) 藤井 衛：電気検層法による土の間隙率測定法，土質工学会論文報告集 22(3)，pp. 145～151，1982.
- 6) 高 元浩，藤井 衛：電気比抵抗を利用したソイルセメントの品質管理に関する研究，東海大学工学部・紀要，Vol. 52，No. 2，pp. 179～186，2012.
- 7) 高橋幸蔵，高田志郎，石川浩示，羽竜忠男：孔内測定を利用した岩壁調査（風化コウ岩の場合）土と基礎，Vol. 21-3，pp. 15～23，1993.
- 8) 伊藤寿恒：石油井検層，計測と制御，第5巻，第11号，pp13～26，1996.

第4章

電気検層法による土の判別

4.1 研究目的

第3章では室内実験によって、土の比抵抗と間隙水の比抵抗及び土の細粒分含有率との間には定量的関係があることを実証し、土の比抵抗に対する間隙水の比抵抗の比から、土の細粒分含有率を求める実験式を提案した。そして、原位置においてこの式の妥当性を実証するため、SWS試験孔を各種の濃度を有するKCL溶液で満たし、比抵抗を計測したところ、十分にその実験式が粘性土地盤において適用できることを実証した。本章では、砂地盤を含む地下水が存在する自然地盤において、提案した実験式の妥当性の検証を行い、土の判別手法としての適用性を検討する。もし、その適用性を実証することができれば、これまでSWS試験の欠点であった土質判別の難しさ^{1)~6)}が解消され、これまでサンドシームの発見手法^{7)~13)}にすぎなかった電気検層法に新たな解析手法が追加されることになる。

4.2 実験概要

(a) 調査位置

SWS試験及び電気検層法による比抵抗試験を実施した場所は、埼玉県比企郡川島町、茨城県取手市谷中字本田、埼玉県春日部市増戸、千葉県市原市菊間、神奈川県横浜市、岐阜県羽島市の合計6地点である。これらの地点から採取した、合計49種類のサンプリング試料土を用いて、室内にて含水比試験、土粒子の密度試験、液性限界及び塑性限界試験及び粒度試験を行った。図4.1 (a)～図4.1 (e)にこれらの粒度試験結果を示し、表4.1に試料土の物理諸元を示す。

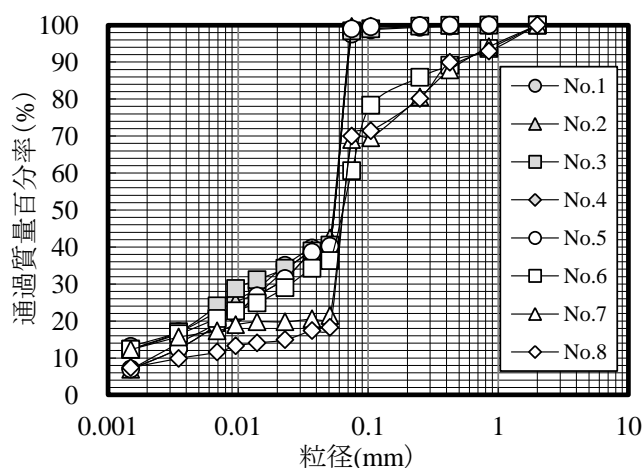


図 4.1 (a) 試料土の粒度分布曲線

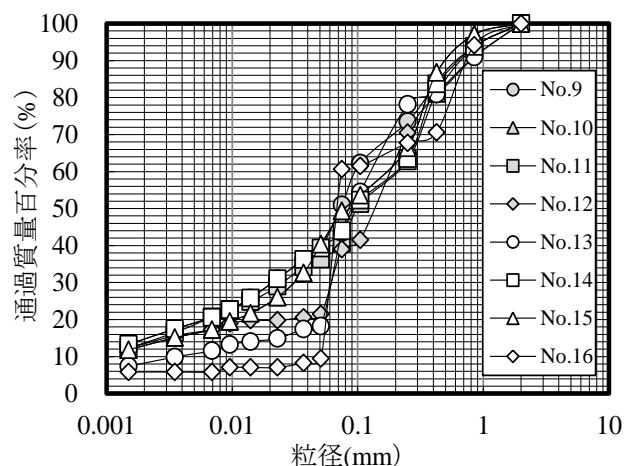


図 4.1 (b) 試料土の粒度分布曲線

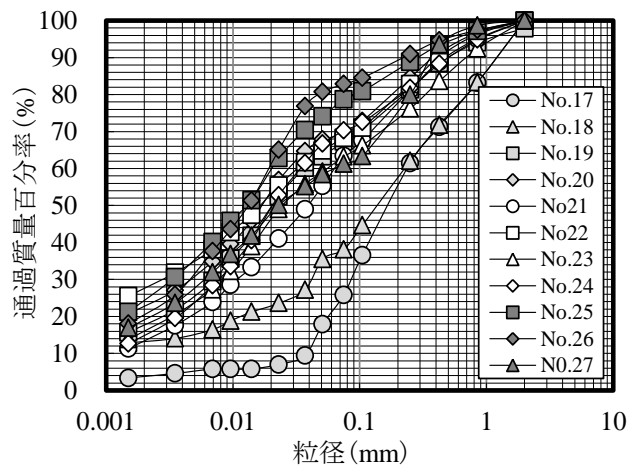


図 4.1 (c) 試料土の粒度分布曲線

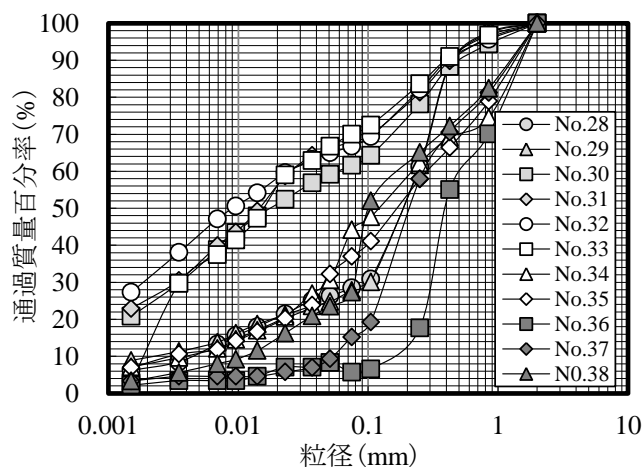


図 4.1 (d) 試料土の粒度分布曲線

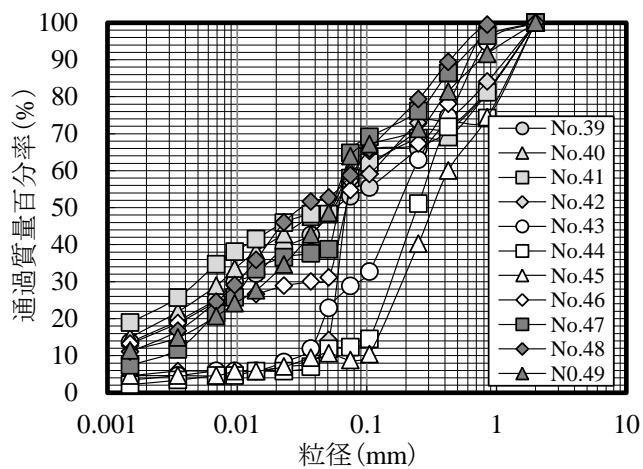


図 4.1 (e) 試料土の粒度分布曲線

表 4.1 試料土の物理諸元

No.	現場名	土の種類	含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	液塑性限界		Ip	粒度組成 (%)				シルト分	粘土分
					W _L (%)	W _P (%)		細砂分	粗砂分	中砂分	細砂分		
1	埼玉県 比企郡 川島町	粘土	48.1	2.59	74.81	53.56	21.25	-	2.2	6.4	6.3	75.4	9.6
2		粘土	52.9	2.76	66.95	38.88	28.07	-	0.1	0.5	1.8	80.5	17.0
3		粘土	56.1	2.20	57.00	35.42	21.58	-	0.0	0.1	0.3	85.5	14.0
4		粘土	58.9	2.75	64.12	41.01	23.11	-	-	0.3	1.3	81.3	17.0
5		粘土	60.0	2.70	57.00	46.30	10.70	-	-	0.2	0.9	86.4	12.5
6	茨城県 取手市	粘土	26.7	2.65	50.74	27.27	23.58	-	6.8	5.3	9.2	66.1	12.7
7		粘土	32.9	2.55	56.82	36.99	20.32	-	5.8	7.0	8.1	68.0	11.1
8		粘土	38.1	2.57	53.91	30.85	22.76	-	3.2	4.7	6.4	71.4	14.3
9		粘土	36.5	2.62	59.52	30.24	29.27	-	0.6	2.0	6.8	75.6	15.1
10		粘土	43.4	2.81	54.36	26.94	28.01	-	0.4	0.8	1.9	85.0	11.9
11	茨城県 春日部市	粘土	76.5	2.59	84.82	52.6	79.55	-	0.6	0.7	2.3	83.7	12.7
12		粘土	141.1	2.39	148.97	59.13	89.84	-	0.1	0.5	1.4	83.0	15.1
13		粘土	139.2	2.40	-	-	-	-	0.6	2.5	4.3	83.2	9.4
14		粘土	77.5	2.44	-	-	-	-	0.2	0.3	2.5	83.5	13.5
15		粘土	60.8	2.90	-	-	-	-	0.4	0.6	7.3	80.6	11.1
16	千葉県 市原市	粘土	24.3	2.67	-	-	-	-	25.9	6.4	7.1	54.8	5.8
17		砂質土	26.4	2.69	-	-	-	-	26.8	11.8	35.6	21.2	4.6
18		砂質土	31.8	2.61	-	-	-	-	26.7	7.0	28.2	24.0	14.1
19		粘土	89.3	2.67	91.00	60.50	30.50	3.4	3.8	12.7	14.1	42.1	25.2
20		粘土	77.8	2.61	79.70	61.60	18.10	-	3.3	12.2	15.2	38.9	30.4
21	神奈川県 横浜市	粘土	77.0	2.61	79.60	61.60	18.00	0.2	4.7	13.9	17.8	43.2	20.2
22		粘土	78.9	2.60	82.20	62.70	19.50	-	3.7	13.5	14.5	33.9	34.4
23		粘土	84.9	2.57	86.60	63.50	23.10	0.2	7.4	16.2	13.0	40.0	23.2
24		粘土	85.3	2.55	88.80	64.90	23.90	0.3	4.9	8.8	11.5	47.3	22.9
25		粘土	102.1	2.52	106.90	75.30	31.60	-	2.8	8.4	10.1	44.0	34.7
26	神奈川県 横浜市	粘土	116.7	2.43	130.30	77.60	51.00	0.2	2.4	6.5	8.1	52.8	30.0
27		粘土	87.0	2.56	104.30	53.30	18.7	-	1.4	18.7	18.7	34.0	27.2
28		粘土	51.8	2.61	58.80	33.90	24.90	-	2.7	36.1	10.5	18.0	32.7
29		粘土	60.8	2.58	67.60	37.50	30.10	-	2.4	35.9	12.2	15.6	33.9
30		粘土	133.9	2.47	157.60	95.20	62.40	-	5.6	16.2	16.6	28.4	33.2
31	岐阜県 羽島市	粘土	121.0	2.62	133.20	79.50	53.70	0.6	3.3	14.8	13.3	32.6	35.4
32		粘土	122.1	2.62	130.30	83.10	47.20	0.4	3.9	13.6	15.3	24.1	42.7
33		粘土	136.7	2.68	147.80	98.10	49.70	0.0	3.2	13.2	13.6	36.2	33.8
34		砂質土	17.8	2.49	-	-	-	-	27.6	10.2	18.0	34.6	9.6
35		砂質土	27.9	2.58	30.88	27.54	3.34	-	30.8	11.3	20.9	26.4	10.6
36	岐阜県 羽島市	砂質土	23.0	2.56	-	-	-	-	29.9	52.4	12.0	2.3	3.4
37		砂質土	28.4	-	-	-	-	-	26.8	15.3	42.8	10.6	4.6
38		砂質土	35.9	2.62	-	-	-	-	27.5	3.4	41.7	21.7	5.6
39		粘土	41.7	2.57	-	-	-	-	28.7	1.4	6.8	43.6	19.5
40		粘土	39.7	-	45.57	20.00	25.57	-	28.3	0.1	1.6	48.1	21.9
41	岐阜県 羽島市	粘土	51.1	-	50.67	26.21	24.46	-	30.8	0.4	0.8	42.3	25.7
42		粘土	27.7	2.51	-	-	-	-	25.9	1.2	15.6	51.5	5.8
43		砂質土	23.9	2.41	-	-	-	-	25.2	11.9	44.1	14.2	4.6
44		砂質土	27.1	2.71	-	-	-	-	25.8	23.1	38.8	8.9	3.4
45		砂質土	25.8	2.56	-	-	-	-	25.6	34.2	31.5	4.2	4.6
46	岐阜県 羽島市	粘土	53.4	-	71.37	47.62	23.75	-	31.3	1.4	2.6	45.9	18.8
47		粘土	64.9	-	80.08	40.24	39.84	-	33.5	0.3	1.4	53.1	11.7
48		粘土	50.8	-	47.00	21.13	25.87	-	30.6	0.1	0.6	52.0	16.7
49		粘土	40.4	-	57.01	21.10	35.91	-	28.5	0.2	7.4	49.1	14.9

(b) 測定装置

第3章の式(5)の適用性にあたっては、原位置のSWS試験孔に挿入した電極による土の比抵抗と採取した地下水の比抵抗の計測が必要になる。原位置の電気比抵抗を測定するため、使用した押し込み装置と室内にて地下水の電気比抵抗を測定するために使用した電極は、3章で使用したのと同じである。地下水は、SWS試験孔の中に図4.2に示す採水器を挿入して汲み上げた。この採水器は、地下水中に浸漬させると、地下水が先端部から浸水し、容器内の球が地下水の浸水に伴って上部に移動する。そして、球は時間の経過とともに自重により落下し、先端の開口部を塞ぐ仕組みとなっている。

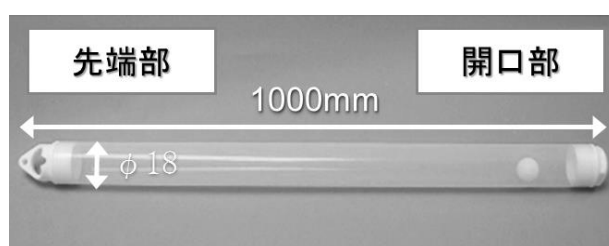


図 4.2 地下水採水器

(c) 実験方法

比抵抗の測定方法を図4.3に示す。比抵抗の測定概念図を図4.4に示す。比抵抗試験では、孔内水を介して電流を流すことによって、比抵抗を測定するので、適用範囲は地下水以深としている。

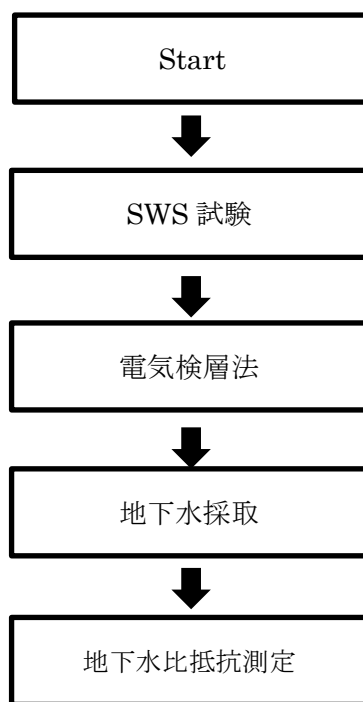


図 4.3 比抵抗測定手法

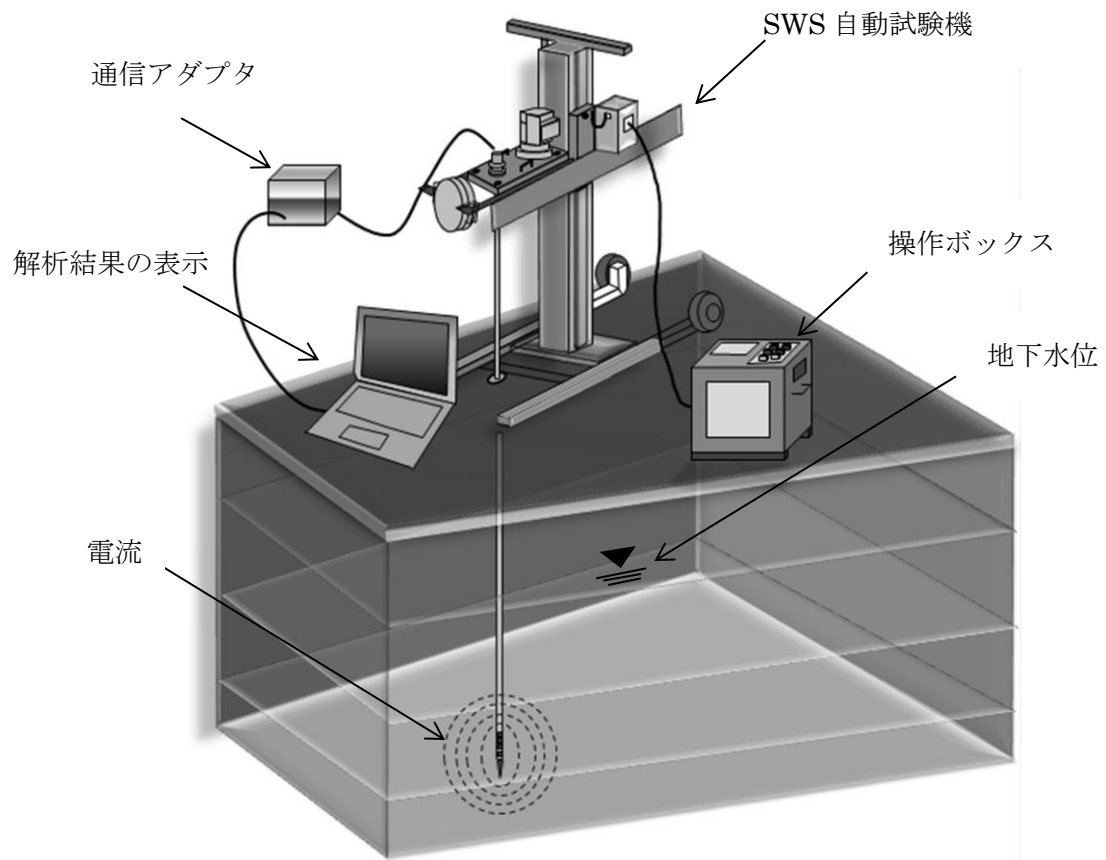


図 4.4 比抵抗測定概念図

4.3 実験結果および考察

図 4.5～図 4.10 は，6 地点の原位置試験における比抵抗の測定結果である．この電気検層法による比抵抗の測定結果に対する考察と，細粒分含有率の評価式である式(5)の適用性について検討する．

(a) 比抵抗測定結果に対する考察

1) 埼玉県比企郡川島町における比抵抗測定結果

図 4.5 は，埼玉県比企郡川島町の比抵抗の測定結果を示したものである．調査対象地盤は G.L.-0.65m までは礫混り粘土を主体とした埋土であり，G.L.-0.65m～-7.40m はシルト質粘土である．比抵抗の測定は G.L.-5.60m まで行った．比抵抗の値が変化したのは G.L.-0.65m～-1.00m の盛土の下部地盤であり，シルト質粘土層の地層の境界のところである．比抵抗は粒子の大きさを反映するものであり，G.L.-0.65m～-1.00m 付近は礫が混じることによって，比抵抗の値が増大したと考えられる．また，G.L.-1.00m 以深の比抵抗の変化は，砂分量の大小を反映しているものと推察されるが，その変化はわずかであることから比較的均質な粘性土層であると推察される．

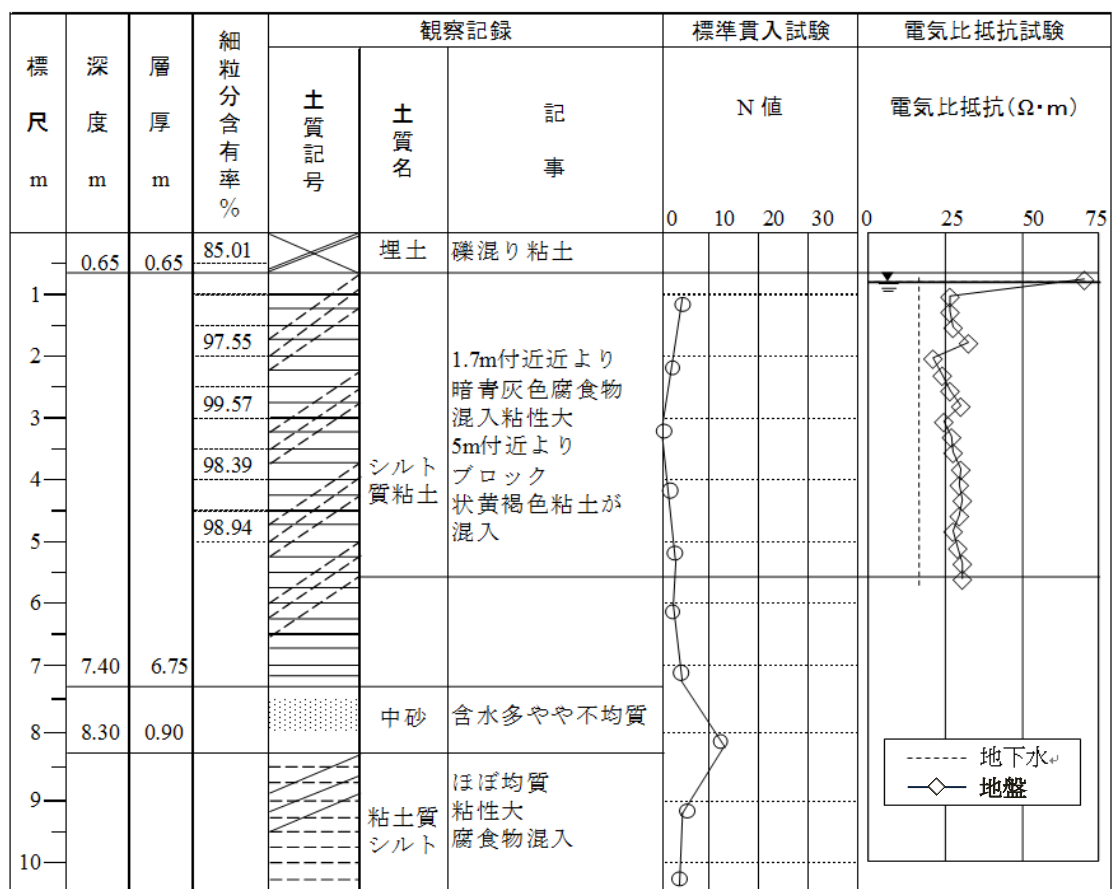


図 4.5 埼玉県比企郡川島町の比抵抗の測定結果

2) 茨城県取手市における比抵抗測定結果

図 4.6 は、茨城県取手市の比抵抗の測定結果を示したものである。調査対象地盤は G.L.-0.90m までは粘土を主体とした埋土であり，G.L.-0.90m～-1.90m はシルトである。また，G.L.- 1.90m～-4.90m までは砂混じりシルトである。比抵抗の測定は G.L.-4.20m まで行った。比抵抗は G.L.-1.90m あたりからほぼ一定になっており，この位置は地層の境界に相当する。G.L.-0.90m～-1.90m のシルト層に比較して，G.L.-1.90m 以深の比抵抗が大きく現われているのは，砂分量が多いことによるものと推察される。

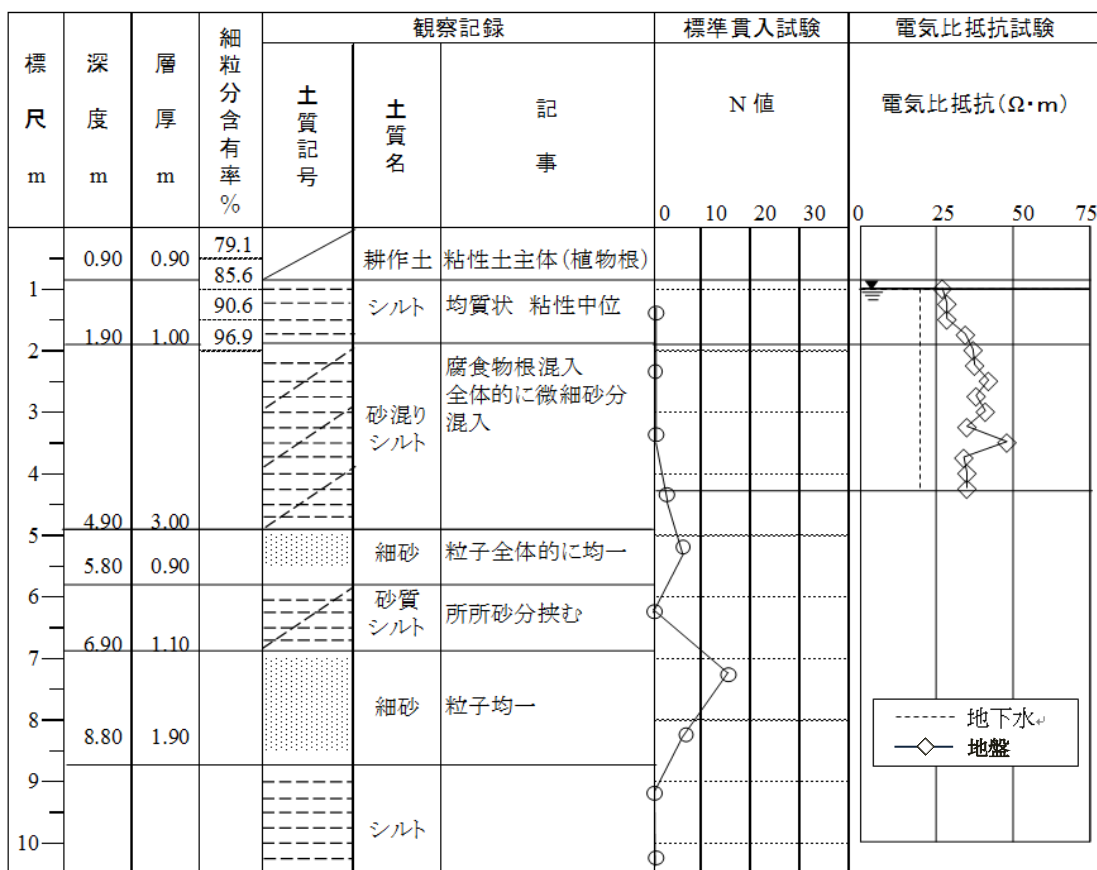


図 4.6 茨城県取手市の比抵抗の測定結果

3) 茨城県春日部市における比抵抗測定結果

図4.7は、茨城県春日部市の比抵抗の測定結果を示したものである。調査対象地盤は G.L.-1.60m までは粘土を主体とした盛土であり、G.L.-1.60m～-1.90m は粘土層である。また、G.L.-1.90m～-3.00m は砂混りシルト、G.L.-3.00m～-5.80m はシルト質粘土、G.L.-5.80m～-6.80m は砂混りシルト、G.L.-6.80m～-8.50m はシルトである。比抵抗の測定は G.L.-8.60m まで行った。これらの地層の境界はほぼ比抵抗の分布の変化位置に対応している。各地層における砂分量の大小が明確に比抵抗の分布に反映されていると推察される。

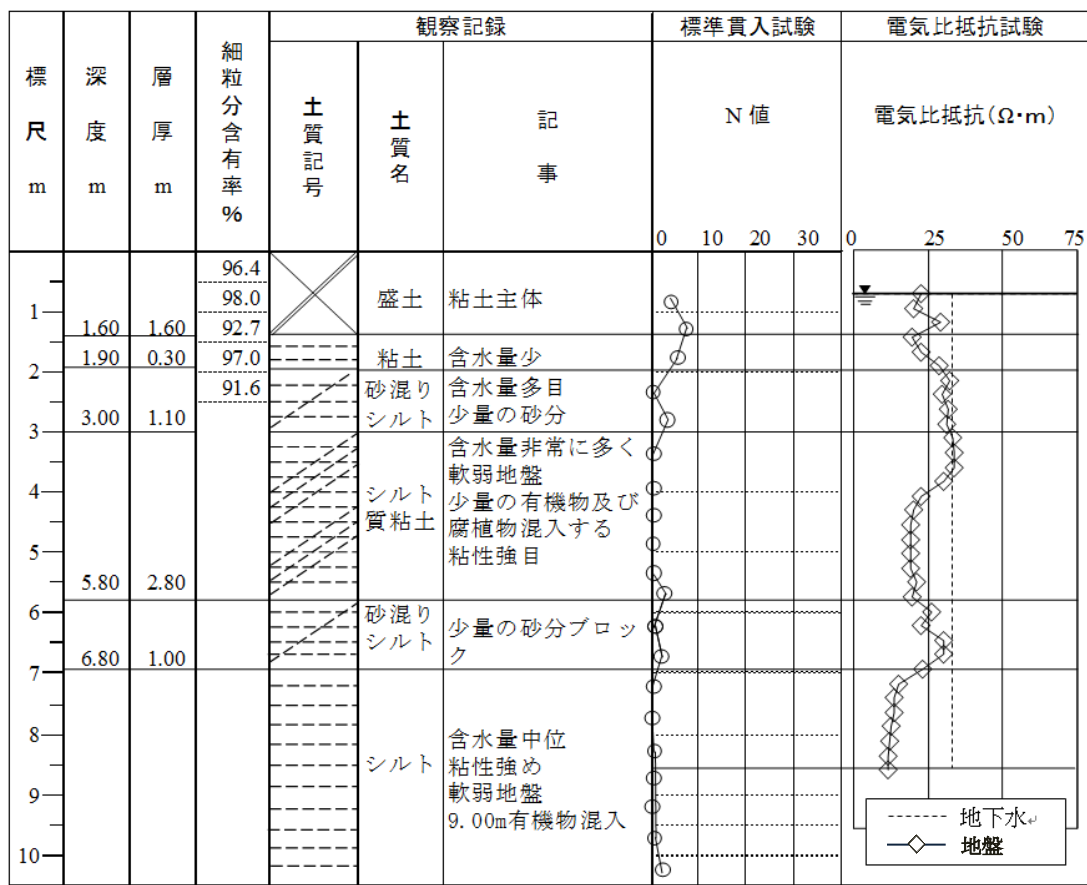


図 4.7 茨城県春日部市の比抵抗の測定結果

4) 千葉県市原市における比抵抗測定結果

図4.8は、千葉県市原市の比抵抗の測定結果を示したものである。調査対象地盤は G.L.-1.50m までは粘土及び砂を主体とした盛土であり、G.L.-1.50m～-1.80m は有機質粘土である。また、G.L.-1.80m～-5.30m は細砂である。比抵抗の測定は G.L.-5.40m まで行った。比抵抗の分布をみると G.L.-3.00m から比抵抗が急激に増大している。ボーリング記録によると G.L. -2.30m 以深に貝殻片が混入しているとのことであり、物性に大きな変化があることを示している。

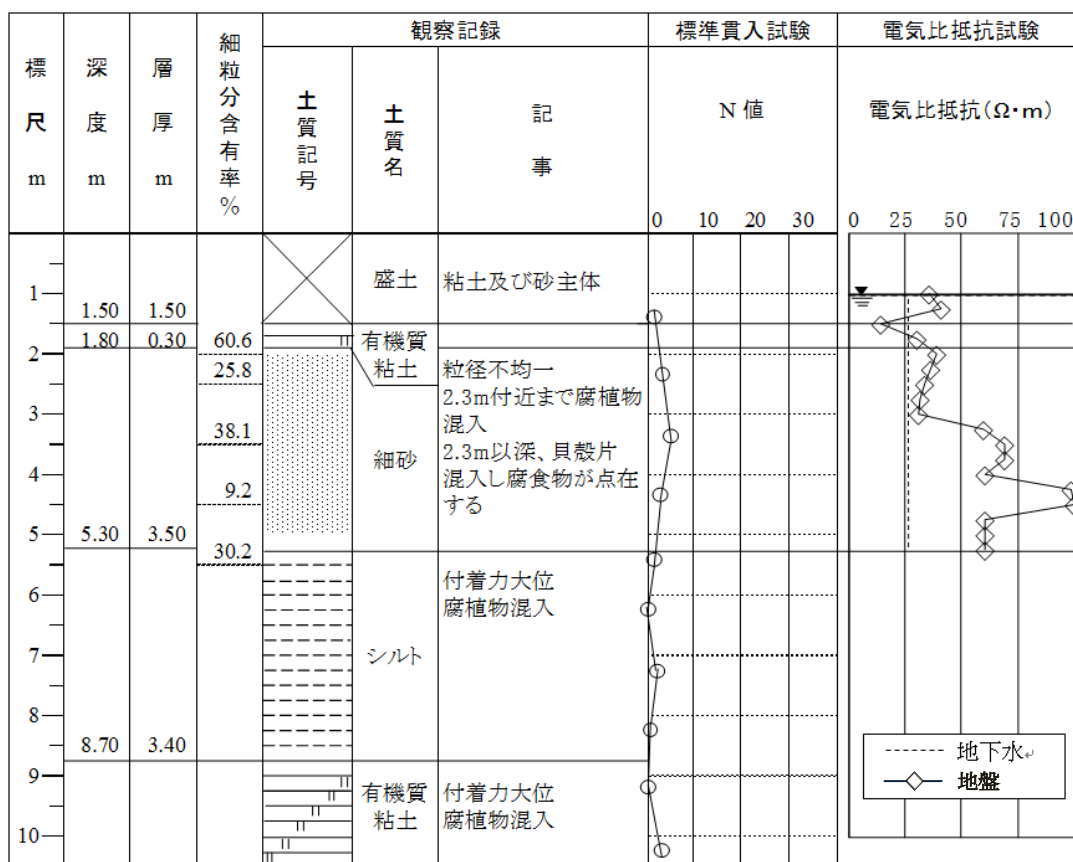


図 4.8 千葉県市原市の比抵抗の測定結果

5) 神奈川県横浜市の比抵抗の測定結果

図 4.9 は、神奈川県横浜市の比抵抗の測定結果を示したものである。調査対象地盤は G.L.-1.10m までは粘土を主体とした盛土であり、G.L.- 1.10m～- 4.85m は砂混りシルト層である。また、G.L.- 4.85m～- 6.25m は砂混り有機質シルト、G.L.-6.25m～-6.80m はシルト砂である。比抵抗の測定は G.L.-6.70m まで行った。比抵抗は G.L.-2.20m～-5.00m 間で大きく変動しており、粘性土と砂が不均質に混在していることが予想される。

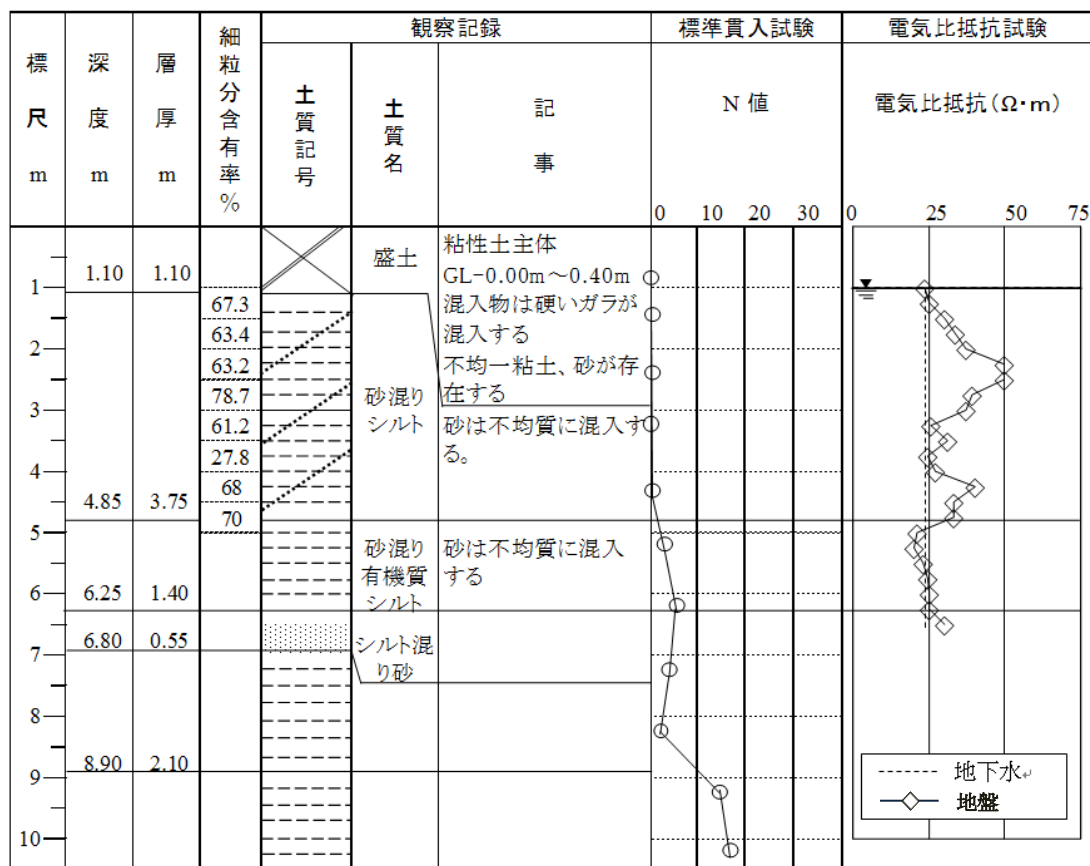


図 4.9 神奈川横浜市の比抵抗の測定結果

6) 岐阜県羽島市の比抵抗の測定結果

図 4.10 は、岐阜県羽島市の比抵抗の測定結果を示したものである。調査対象地盤は G.L.-1.90m までは盛土である。G.L.-1.90m～-3.60m は細砂である。また、G.L.-3.60m～-5.30m はシルト、G.L.-5.30m～-7.00m は細砂、G.L.-7.00m～-9.20m まではシルトである。比抵抗の測定は G.L.-8.50m まで行った。この地盤は砂と粘土の互層地盤であり、比抵抗の分布は互層状況をよくとらえている。

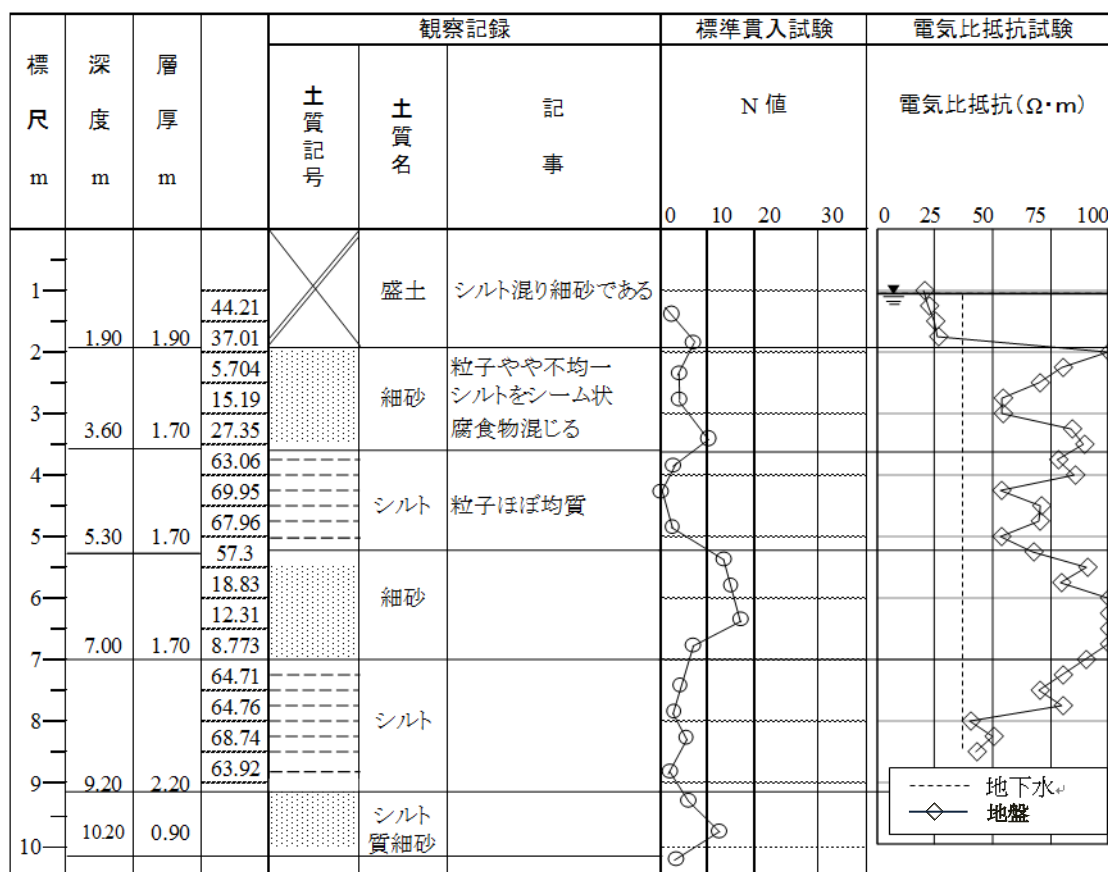


図 4.10 岐阜県羽島市の比抵抗の測定結果

(b) 細粒分含有率の推定式に対する検証

表 4.2 は、第 3 章に示した細粒分含有率の評価をあらわす式(5)を用いて算定した細粒分含有率の値と、今回の粒度分析によって得られた細粒分含有率の値を示したものである。なお、No.34(岐阜県羽島市)の測定においては、測定ポイントが盛土と自然地盤の境界に位置し、粒子が不均一のため、土の判別はできなかったが、それ以外の土に関しては、すべて判別ができた。図 4.11 に表 4.2 の結果を示す。図 4.11 により、両者の標準偏差は $\pm 5.91\%$ であり、細粒分含有率が概ねよく対応している。したがって、原位置においても、地下水の比抵抗が $20\Omega \cdot \text{m} \sim 40\Omega \cdot \text{m}$ の範囲であれば、式(5)は十分に適用性があることが検証された。また、図 4.12 は、図 4.11 の結果を用いて粘性土と砂質土の判別をおこなった結果である。図 4.12 により、土の細粒分含有率が 50%以下の土を砂質土、50%を上回る土を粘性土として土の判別を行なった結果、94%の精度で土の判別ができることが実証された。以上により、SWS 試験孔において実施した電気検層法により、土の判別は十分に可能であるとの見通しをつけることができた。

表 4.2 比抵抗計測および室内試験による解析結果

No.	比抵抗による解析結果		室内試験による解析結果	
	細粒分含有率 (%)	土の分類	細粒分含有率 (%)	土の分類
1	85.1	粘性土	85.0	粘性土
2	97.9	粘性土	97.5	粘性土
3	88.2	粘性土	99.6	粘性土
4	100.0	粘性土	98.4	粘性土
5	89.2	粘性土	98.9	粘性土
6	76.9	粘性土	78.7	粘性土
7	83.3	粘性土	79.1	粘性土
8	82.1	粘性土	85.6	粘性土
9	100.0	粘性土	90.6	粘性土
10	100.0	粘性土	96.9	粘性土
11	94.7	粘性土	96.4	粘性土
12	87.8	粘性土	98.0	粘性土
13	87.3	粘性土	92.7	粘性土
14	87.0	粘性土	97.0	粘性土
15	87.0	粘性土	91.6	粘性土
16	56.9	粘性土	60.6	粘性土
17	13.9	砂質土	25.8	砂質土
18	36.2	砂質土	38.1	砂質土
19	65.7	粘性土	67.3	粘性土
20	74.3	粘性土	69.3	粘性土
21	75.2	粘性土	63.4	粘性土
22	75.1	粘性土	68.3	粘性土
23	79.8	粘性土	63.2	粘性土
24	73.8	粘性土	70.2	粘性土
25	68.2	粘性土	78.7	粘性土
26	59.1	粘性土	82.8	粘性土
27	54.7	粘性土	61.2	粘性土
28	50.1	粘性土	50.7	粘性土
29	45.7	粘性土	49.5	粘性土
30	64.7	粘性土	61.6	粘性土
31	79.1	粘性土	67.0	粘性土
32	56.1	粘性土	66.8	粘性土
33	67.3	粘性土	70.0	粘性土
34	46.6	粘性土	44.2	砂質土
35	20.5	砂質土	37.0	砂質土
36	15.2	砂質土	5.7	砂質土
37	26.5	砂質土	15.2	砂質土
38	36.2	砂質土	27.3	砂質土
39	78.7	粘性土	63.1	粘性土
40	46.2	粘性土	69.9	粘性土
41	69.1	粘性土	68.0	粘性土
42	65.4	粘性土	57.3	粘性土
43	29.0	砂質土	18.8	砂質土
44	16.8	砂質土	12.3	砂質土
45	14.2	砂質土	8.8	砂質土
46	81.4	粘性土	64.7	粘性土
47	81.4	粘性土	64.8	粘性土
48	45.6	粘性土	68.7	粘性土
49	47.8	粘性土	63.9	粘性土

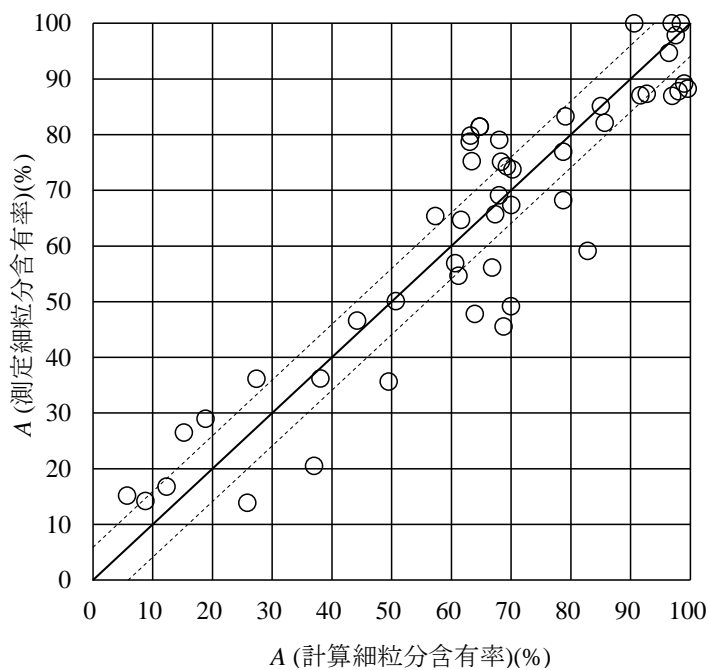


図 4.11 測定細粒分含有率と計算細粒分含有率との比較

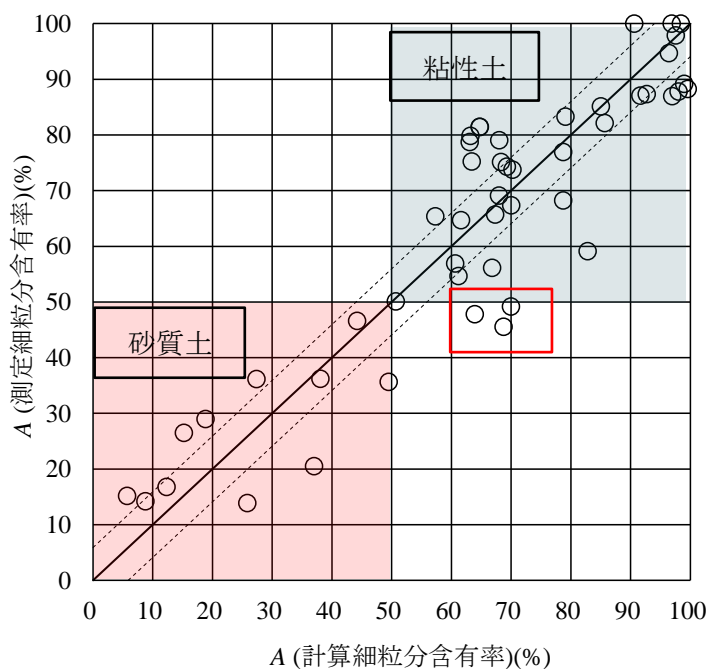


図 4.12 測定細粒分含有率と計算細粒分含有率との比較

4.4 まとめ

本論文の主な結論を箇条書きにまとめると以下のようなになる。

- 1) 原地盤における比抵抗の分布曲線は砂含有量の大小を反映している。
- 2) 室内実験で得られた土の比抵抗による細粒分含有率の推定式は原位置の SWS 試験孔の比抵抗にも十分適用でき、94%の精度で砂質土と粘性土の判別が行えることを明らかにした。

以上により、自然土の比抵抗と地下水の比抵抗の計測ができれば、土の細粒分含有率の評価は可能であり、土の判別が評価できることを実証した。

参考文献

- 1) 藤井 衛, 田村昌仁, 伊集院博: 小規模建築物の地盤を対象としたスウェーデン式サウンディング試験方法の評価と問題点, 日本建築学会構造系論文集, 第 557, pp. 211~128, 2002.7
- 2) 住宅地盤品質協会: 住宅地盤の調査・施工に関わる技術基準, pp. 81~82, 2011.5
- 3) 稲田倍穂: スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, Vol.8, No.1, pp. 13~18, 1960.2
- 4) 日本建築学会編: 小規模建築物基礎設計指針, 第 5 章, pp. 88~92, 2008.2
- 5) 藤井 衛: スウェーデン式サウンディング試験法の有効活用, 建築技術, No.757, pp. 88~91, 2013.2
- 6) 田村昌仁, 川村政史, 枝広茂樹, 水谷羊介, 藤井 衛, 小口和郎: スウェーデン式サウンディングによる地盤調査法と現状の課題, 土と基礎, Vol. 52, No.4, pp. 8~10, 2004.4
- 7) 物理探鉱技術協会: 本邦に於ける物理探鉱の回顧と展望, 物理探鉱, 1, 2-9, 1948.
- 8) 物理探鉱技術協会: 10 周年特別号, 物理探鉱, 11. 1958.
- 9) 物理探鉱技術協会: IP 法特別号, 物理探鉱, 11. 1966.
- 10) 物理探鉱技術協会: 図解物理探査, 物理探鉱, 19. 1989.
- 11) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック (手法編), pp.241~252, 1998.
- 12) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック (手法編), pp.631~711, 1998.
- 13) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック, ケーススタディ編, pp.945~989, 1998.

第5章

本論文の結論

本論文の主な結論を箇条書きにまとめると以下のようなになる。

第3章の電気比抵抗と土の細粒分含有率との関係から得られた結論

- 1) 土の比抵抗とその間隙に含まれる水の比抵抗の大きさから、砂質土と粘性土を区分することができた。
- 2) 1)の関係をもとに、土の比抵抗に対する間隙水の比抵抗の比から、土の細粒分含有率を推定する式を提案することができた。
- 3) 試験孔の大きさが電極径に与える影響は極めて大きく、電極径はほぼ孔径に相当する大きさが必要である。
- 4) 人工的に作製した各種の間隙水の比抵抗とその間隙水からなる土の比抵抗の大きさをもとに、提案式によって求めた粘性土の細粒分含有率は実測値と概ね一致した。

以上により、室内実験の結果から、土の比抵抗と間隙水の比抵抗が計測できると、土の細粒分含有率を評価できることが明らかにされた。そこで、この関係式の適用性を、第4章に示す実地盤において、検証することにした。

第4章の電気検層法による土の判別から得られた結論

- 1) 原地盤における比抵抗の分布曲線は砂の含有量の大小を反映している。
- 2) 室内実験で得られた土の比抵抗による細粒分含有率の推定式は、原位置のSWS試験孔を利用した電気検層法においても94%の精度で砂質土と粘性土の判別を行うことができた。

以上、本研究の方法により、自然土の比抵抗と地下水の比抵抗の計測ができると、土の細粒分含有率の評価は可能であり、土の判別が可能であることを実証した。

研究実績

1. 査読付論文

- 1) 高 元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 武智耕太郎, 足立由紀夫 : 「電気検層法による土の細粒分含有率の評価」, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.557~562, 2015.6.
- 2) 武智耕太郎, 藤井 衛, 高 元浩, 新井 マウリシオ淳 : 「電気比抵抗による未固化深層混合処理土の品質管理に関する研究」, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.545~550, 2015.6.
- 3) 高 元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 武智耕太郎, 足立由紀夫 : 「SWS 試験孔を利用した電気比抵抗による土の細粒分含有率の評価」, 東海大学・紀要工学部, Vol.54, No.2, pp.15~22, 2014.
- 4) 高 元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 武智耕太郎, 足立由紀夫 : 「電気比抵抗を利用した土の細粒分含有率の評価法」, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.299~308, 2014.6.
- 5) Yuanhao Gao, Mamoru Fujii (2014) : “Estimation of Fine Fraction Content in Soil by Electrical Resistivity”, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), pp.723~730, 2014.6.
- 6) 武智耕太郎, 藤井 衛, 高 元浩, 新井 マウリシオ淳 : 「電気比抵抗による深層混合処理土の圧縮強度に関する品質管理」, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.44, pp.89~94, 2014.2.
- 7) Yuanhao Gao, Mamoru Fujii (2013) : “Study on a Soil Classification Using Electrical Resistivity in Residential Sites”, MJIIT-JUC Joint International Symposium (MJJIS), pp.403~406, 2013.11.

- 8) Mamoru Fujii, Yuanhao Gao, Yutaka Kubo, Keizo Minagawa, MauricioJun Arai, Toshifumi Fukaya, Kotaro Takechi (2013) : “Study on Estimation of Quality and Strength of Soil-Cement column Using Elexrical Resistivity”, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), pp.682～686, 2013.6.
- 9) 高 元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 武智耕太郎, 足立由紀夫 : 「電気比抵抗による土の判別分類法に関する研究」, 東海大学・紀要工学部, Vol.53, No.2, pp.57～65, 2013.3.
- 10) 高 元浩, 藤井 衛 : 「電気比抵抗を利用したソイルセメントの品質管理に関する研究」, 東海大学・紀要工学部, Vol.52, No.2, pp.179～186, 2012.3.

2. 口頭発表等

- 1) 高元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 足立由紀夫, 武智耕太郎 : 「粘性土地盤における電気比抵抗を利用した土の細粒分含有率の評価法」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.515, 516, 2014.9.
- 2) 内田貴史, 高元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 足立由紀夫, 武智耕太郎 : 「電気比抵抗調査による埋込み杭の杭周固定液の実施工品質に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.477, 478, 2014.9.
- 3) 高元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 足立由紀夫, 金哲鎬, 武智耕太郎 : 「SWS試験孔を利用した電気比抵抗による土の細粒分含有率の評価法について」, 第49回地盤工学研究発表会発表講演集(北九州), pp.151, 152, 2014.7.
- 4) 武智耕太郎, 藤井 衛, 高元浩, 新井 マウリシオ淳 : 「電気比抵抗による深層混合処理工法の攪拌性能評価に関する研究」, 第49回地盤工学研究発表会発表講演集(北九州), pp.167, 168, 2014.7.
- 5) 高元浩, 藤井 衛, 持田泰秀, 武智耕太郎 : 「電気比抵抗を利用した土の細粒分含有率の評価」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.827, 828, 2013.8.
- 6) 新井 マウリシオ淳, 武智耕太郎, 藤井 衛, 高元浩, 品川恭一, 白波瀬雅史 : 「電気比抵抗による深層混合処理工法の強度推定に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.715, 716, 2013.8.
- 7) 高元浩, 藤井 衛, 新井 マウリシオ淳, 武智耕太郎 : 「電気比抵抗を利用した土の判別分類に関する基礎的実験」, 第48回地盤工学研究発表会発表講演集(富山), pp.289, 290, 2013.7.

- 8) 武智耕太郎, 藤井 衛, 高 元浩, 新井 マウリシオ淳, 品川恭一:「電気比抵抗による深層混合処理工法の強度管理に関する研究」, 第48回地盤工学研究発表会発表講演集(富山), pp.943, 944, 2013.7.
- 9) 高 元浩, 藤井 衛, 金 哲鎬, 新井 マウリシオ淳, 武智耕太郎:「電気比抵抗を利用したソイルセメントの一軸圧縮強さの推定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.573, 574, 2012.9.
- 10) 高 元浩, 藤井 衛, 新井 マウリシオ淳, 武智耕太郎:「電気比抵抗によるソイルセメントの一軸圧縮強さの予測」, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集(八戸), pp.591, 592, 2012.7.
- 11) 高 元浩, 藤井 衛, 渡部 憲, 加藤浩文, 木谷好伸, 西村 裕:「エコセメントの杭周固定液への適用性に関する基礎的研究(その2 電気比抵抗による圧縮強度の予測)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.375, 376, 2011.8.
- 12) 高 元浩, 藤井 衛, 金哲鎬, 武智耕太郎:「電気比抵抗によるソイルセメントコラムの品質管理」, 第46回地盤工学研究発表会発表講演集(神戸), pp.583, 584, 2011.7.

3. 研究歴

- 2010年 10月
～2012年 9月まで 東海大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程にて
「電気比抵抗を利用したソイルセメントの品質管理に
関する研究」に従事
- 2012年 10月
～現在に至るまで 東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻博士
課程にて「電気比抵抗を利用した土の判別手法に関す
る研究」に従事

謝辞

本論文は、筆者が東海大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻博士課程に在学し、東海大学工学部建築学科の藤井衛教授のご指導のもとで行った研究内容をまとめたものであります。藤井衛教授には、本論文の全般にわたり、親切な御指導を賜ると共に、研究の全般の方向性や具体的な内容に至るまで、的確な助言をいただきました。また、研究の課程におきましても、研究者としての心構えなどを長年にわたりご指導をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本論文をまとめる上で貴重なご助言をいただいた東海大学工学部土木工学科の杉山太宏教授におかれましては、主査の立場で論文の審査をしていただきました。また、東海大学工学部建築学科の諸岡繁洋教授、渡部憲教授、山本憲司准教授におかれましても、研究全般の相談に乗っていただき、深く感謝致します。

また、忙しいところ、立命館大学理工学部建築都市デザイン学科の持田康秀教授より、多くのご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます

日東精工株式会社の足立由紀夫氏、システム計測株式会社の新井マウリシオ淳氏、ジャーパンホームシルド株式会社の武智耕太郎氏より、多くのご助言および実験に必要なものを提供していただきました。ここに深く感謝申し上げます

報国エンジニアリング株式会社の金哲鎬氏、一条工務店株式会社の品川恭一氏には貴重なご意見をいただき、ありがとうございます。

東海大学大学院工学研究科の李小橋氏、吉田直人氏、戴舒翼氏、河合良樹氏には、研究のサポートをしていただき、ありがとうございます。

お名前を挙げればきりがありませんが、皆様のご支援とご協力がなければこの博士論文をまとめ上げることはできませんでした。関係していただいたすべての皆様に心より感謝申し上げます。誠にありがとうございます。

末筆であるが、かげながら献身的に支えくれた家族に深く感謝致します。ありがとうございます。

平成27年9月

高 元浩