

平成30年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「地盤改良工事での安心安全な改良杭施工のための比抵抗計測技術を用いた着底・混合判断システムの研究開発」

研究開発成果等報告書

令和元年5月

担当局 九州経済産業局
補助事業者 公益財団法人佐賀県地域産業支援センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景、研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	6
2-1 比抵抗計測技術・伝送技術・表示方法の開発と評価	6
2-1-1 地盤改良翼に組み込んだ比抵抗計測ユニットの開発と評価	6
2-1-2 地盤改良翼から地上へのデータ伝送技術の開発と評価	9
2-1-3 比抵抗データ表示の開発と評価	11
2-2 着底・混合判断技術の開発と評価	12
2-3 着底・混合判断システムの製作と評価	14
最終章 全体総括	15

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景、研究目的及び目標

○市場ニーズ・背景

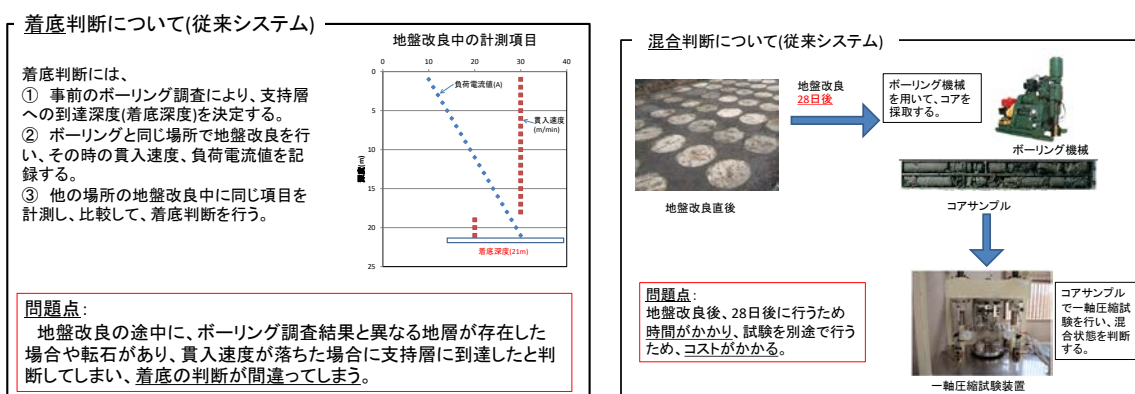
地盤改良工事は建築物や橋などの構造物を建設する際に、地盤に人工的にセメントを混ぜて改良し地盤の安定性を増すために行う工事である。本工事は、東京オリンピックでの建築や熊本地震からの建築物・構造物の復旧において、例えば熊本地震で陥没した高速道路の復旧に直ぐに地盤改良工事が行われたように、重要性が増し震災復興で需要も増えると考えられる。

また、横浜のマンションの傾斜に端を発した杭工事への不信感は、工事を行った施工業者のみならず、業界全体に広まっている。マンション傾斜の直接の原因はデータ改ざんであったが、消費者(施主)にとっては建物を支える安心安全な杭が必要であり、施工業者にとっては間違いようのない安全安心な杭工事を行う技術が必要とされる。

全体として、震災復旧などの社会的要望や施工業者からの要望で、地盤改良工事のニーズが高まっている。

○現状と課題

地盤改良工事は、そもそも目に見えない地盤の工事であり、杭が既定の支持層まで到達したかを把握すること(着底判断)が難しい。また、地盤改良工法の一つの深層混合処理工法は、セメントと土の混合を行い改良杭を作る工法であるが、上述の支持層への着底判断と共に、十分にセメントと土が混合されているかを判断(混合判断)が必要であるが、リアルタイムで把握することができず、時間とコストが課題となっている。



○研究目的・目標

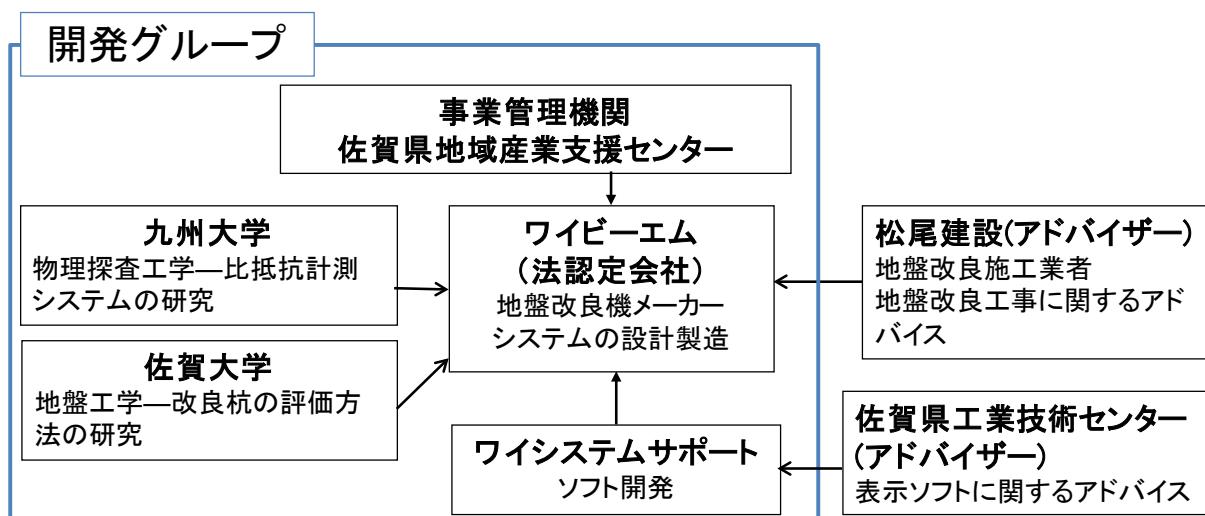
本システムは、計測したデータを地上にリアルタイムにワイヤレスに伝送することで地盤と改良杭の可視化を図るシステムである。

本研究開発では、着底判断の目標は支持層から 1m 以内、混合判断の目標は混合したと判断した改良杭が設計基準強度を満たすこととし、以下の研究テーマ、サブテーマに取り組んだ。

- 【1. 比抵抗計測技術・伝送技術・表示方法の開発と評価】
 - 【1-1】 地盤改良翼に組み込んだ比抵抗計測ユニットの開発と評価
 - 【1-2】 地盤改良翼から地上へのデータ伝送技術の開発と評価
 - 【1-3】 比抵抗データ表示の開発と評価
- 【2. 着底・混合判断技術の開発と評価】
- 【3. 着底・混合判断システムの製作と評価】

1-2 研究体制

研究・管理・協力体制は、以下の図のとおりである。



総括研究代表者(PL)

所属：株式会社ワイビーエム

役職：課長

氏名：大久保 博晃

副総括研究代表者(SL)

所属：国立大学法人九州大学

役職：准教授

氏名：水永 秀樹

1-3 成果概要

以下に研究テーマごとに成果概要を示す。

【1. 比抵抗計測技術・伝送技術・表示方法の開発と評価】

比抵抗を計測するための計測システムを内蔵した共回り防止翼を開発し、着底判断・混合判断のための比抵抗計測を行った。

共回り防止翼から地上の受信装置へデータ伝送するためのシステムを開発した。ただし、共回り防止翼から受信装置へのデータ伝送は条件付きでしか出来なかった。

【2. 着底・混合判断技術の開発と評価】

地盤改良試験中に着底判断用と混合判断用の比抵抗を計測した。また、実証データ数が少ないので、増やしていくことで着底・混合判断技術を普及させることが出来ると思われる。

【3. 着底・混合判断システムの製作と評価】

アドバイザーへ貸し出しが出来なかったが、委員会等の場でアドバイスを頂き、改良を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター

産業振興部 研究開発振興課長 秋吉 盛司

住所：〒849-0932 佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝114

TEL：0952-34-4413

FAX：0952-34-5523

E-mail：s-akiyoshi@mb.infosaga.or.jp

【法認定機関】

株式会社ワイビーエム

技術開発部 課長 大久保 博晃

〒847-0031 佐賀県唐津市原1534番地

TEL：0955-77-1121 FAX：0955-70-6010

e-mail：hookubo@ybm.jp

第2章本論

2-1 比抵抗計測技術・伝送技術・表示方法の開発と評価

2-1-1 地盤改良翼に組み込んだ比抵抗計測ユニットの開発と評価

着底判断のためには攪拌翼で攪拌されていない地盤の比抵抗を計測する必要があり、混合判断のためには攪拌翼で攪拌されている改良杭の比抵抗を計測する必要がある。そこで、図1のように電極、計測用、データ送信用の基板を設置可能な共回り防止翼を検討、製作した。

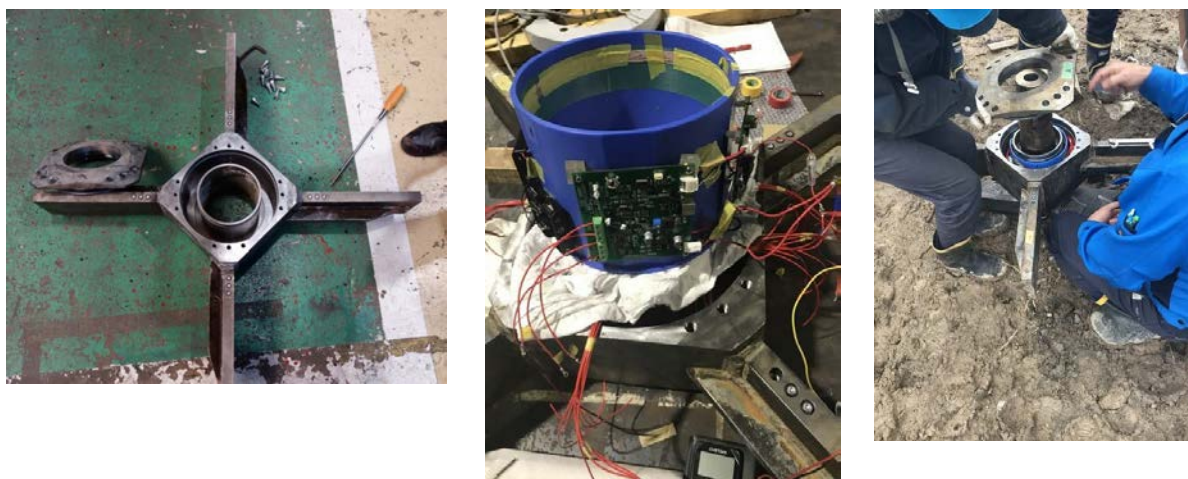


図1 基板、電池ボックス等を内蔵する空間を備えた共回り防止翼(左) 円筒に基板、電池ボックス等を設置した様子(中央)、基板等が格納された様子(右)

共回り防止翼に比抵抗を計測するための電極を設置出来るように検討、製作した。図2に示すように、共回り防止翼の外側の部分と内側の部分に電極を設置できるようにした。また、電極から鉄製の共回り防止翼に直接電気が流れないようにした。

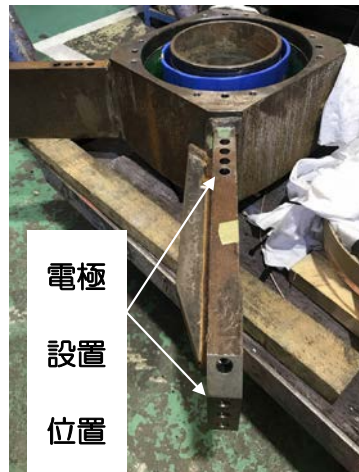


図 2 共回り防止翼上の電極設置位置

比抵抗を計測するためには、地下へ電流を流す電流電極 2 箇所と電圧を計測するための電圧電極 2 箇所が必要であり、図 3 の模式図に示すような配置となる。着底判断のためには外側の電極を用いて計測した比抵抗を計測する必要があり、混合判断のためには内側の電極を用いて計測した比抵抗を計測する必要がある。尚、本配置はスクウェア配置と呼ばれており、九州大学の水永・田中(両名とも本研究開発の担当者)が物理探査学会誌第 50 巻第 1 号 29-37 頁において「多層構造中の電流源による理論電位の計算」を公表しており、この論文において、水平成層構造中の任意の地層中に存在する点電流源及び線電流源による理論電位式を、基礎微分方程式と境界条件から導出している。この理論電位式を、本技術開発の比抵抗計測技術において活用した。

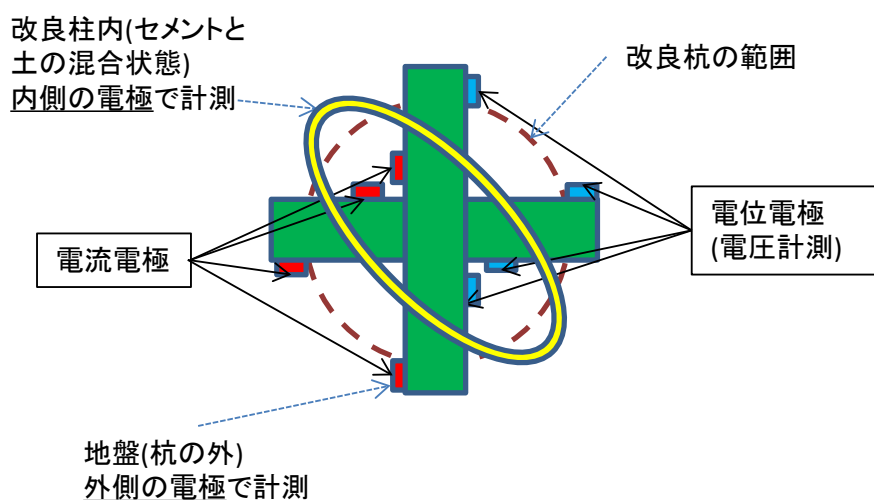


図 3 電極配置模式図

また、比抵抗を計測するために共回り防止翼内に設置する計測基板を開発した。開発した基板の測定精度を確認するため、図4に示すように異なる濃度のNaCl水溶液の比抵抗を測定した結果と、一般の電気探査装置を用いて測定した結果とを比較した。その結果、地盤改良工事を想定した低比抵抗領域における測定誤差は、一般の電気探査装置と比較して1%未満であることが確認でき、精度5%以内の目標を達成した。

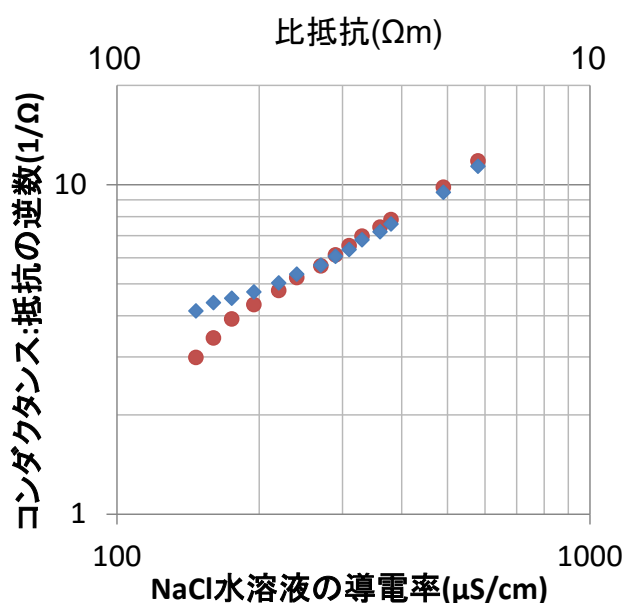


図4 計測基板の確認試験結果

図5は開発した共回り防止翼ユニットを用いて、地盤改良中に比抵抗を計測したグラフである。グラフを見ると、行き(共回り防止翼下降)と帰り(共回り防止翼上昇)で連続して比抵抗を計測出来ていた。

本サブテーマの研究開発目標は「電気探査装置により計測された地盤および改良柱内の比抵抗と本開発ユニットの値を比較し、5%以内の値」としていたが、地盤改良試験を行った場所を電気探査していないために、目標の達成度としては80%程度と考えられる。

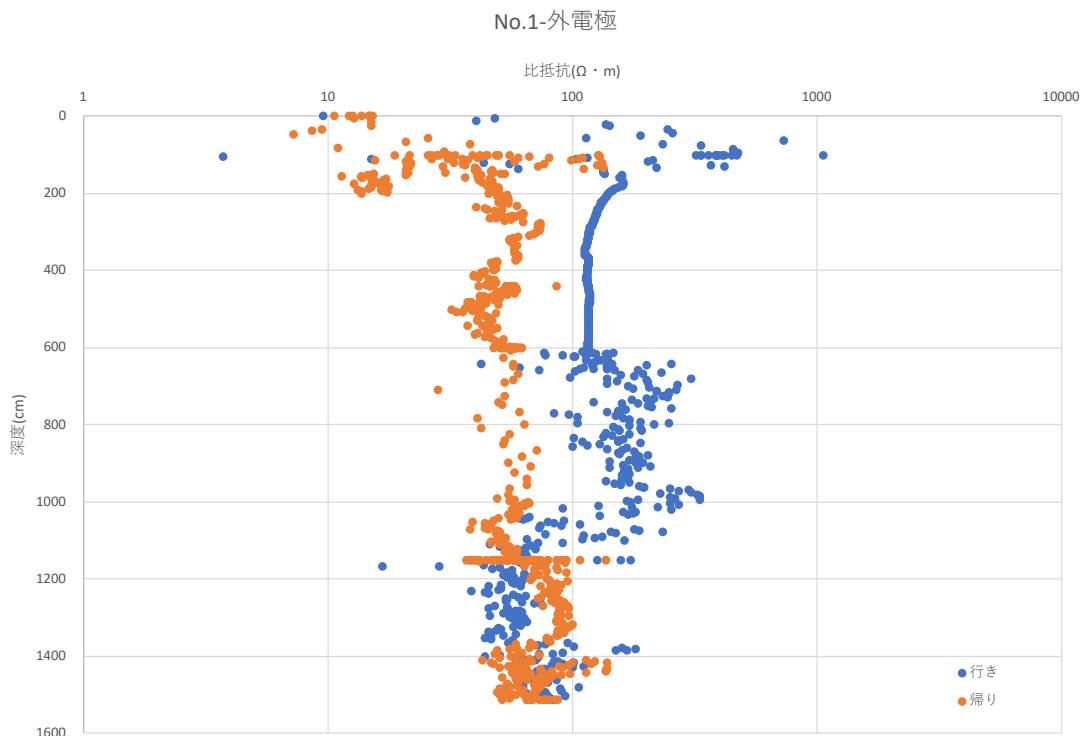


図5 共回り防止翼を用いて計測した比抵抗データ

尚、共回り防止翼にて比抵抗を計測する方法は、特許申請を行っている技術である。

2-1-2 地盤改良翼から地上へのデータ伝送技術の開発と評価

本研究開発項目は、電波が届かない地中から地盤改良翼の動作中に地上へデータ伝送する手法を確立する事を目的としている。データ伝送の手段として、磁界共振結合通信を用いた方法を検討した。磁界共振結合通信とは、図6に示すように送信側のコイルに電気を流して、受信側のコイルで電気を受ける方法であり、非接触型の充電器などで実用化されている技術である。本研究開発では、電気の送電ではロスが大きいため近距離しか出来ていないが、データでは磁場のロスが大きくても鉄製のロッドに沿って磁場が出来て、送受信出来るのではないかという目論見を立てて、研究開発を行った。

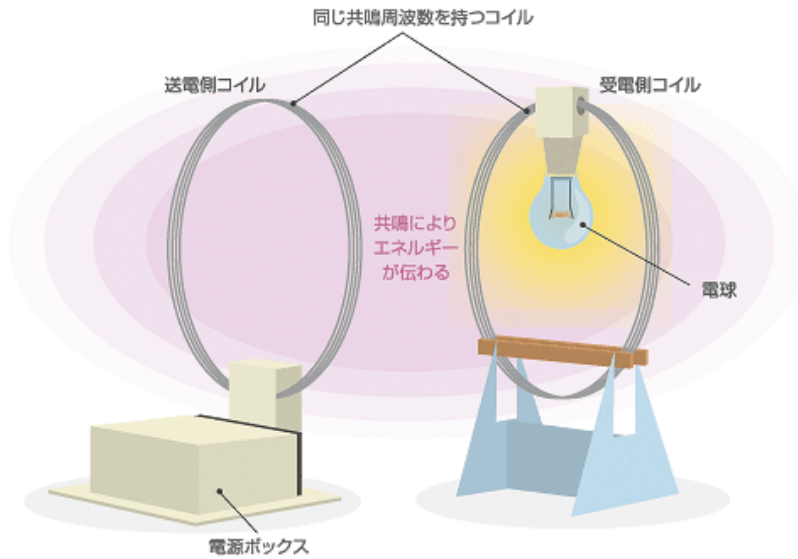


図 6 磁界共振による送電の概要図

最初に図 7 に示すように鉄製のロッドの両端にコイルを設置してデータの送受信が出来るかを確認した。次に、図 8 に示すように地下に埋設したロッドにてデータ伝送できるかを確認した。他に 30m のパイプにてデータの送受信が出来ることが確認した。また、それぞれの方法において受信側のコイルをロッドから外すとデータが受信出来なくことから、ロッドに沿ってデータの送受信が行われていることが確認された。



図 7 鉄製ロッドを用いたデータ送受信試験

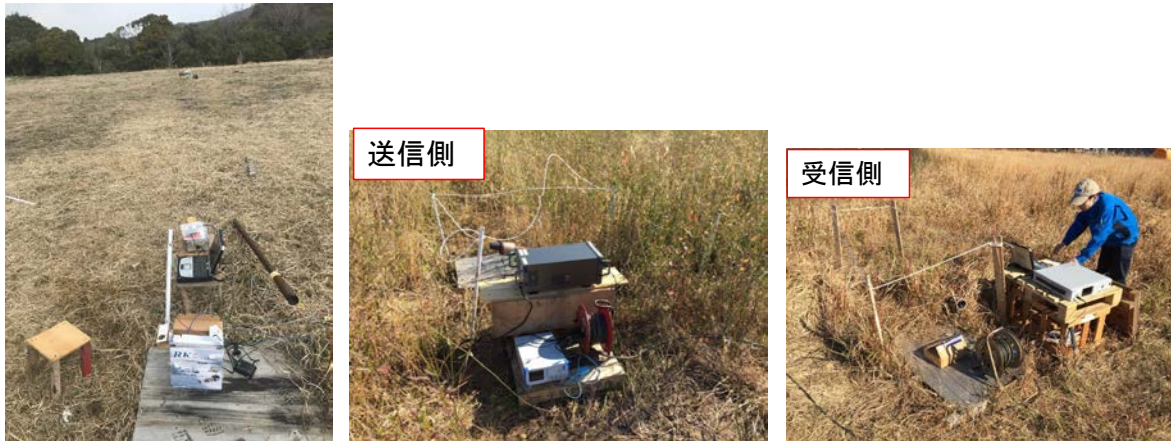


図8 埋設ロッドを用いたデータ送受信試験

前述の基礎実験の結果を基に共回り防止翼内にコイルを設置し、地盤改良試験機に受信コイルを設置してデータ計測が出来るかを実験したが、結果としてデータの送受信が出来なかった。出来なかった理由としては、共回り防止翼の中に送信コイルを設置したため、磁力線が共回り防止翼の外に出なかったためである。また、地面のノイズが大きいことも原因として考えられた。

そこで、共回り防止翼の蓋の外側にコイルを設置して、ノイズ対策を強化するために範囲を絞ったバンドパスフィルターを内蔵した基板を用いて、地盤改良試験中にデータの送受信試験を行った。結果として、改造前よりデータの送受信可能距離は伸びたが、地盤改良中のデータの送受信は出来なかった。

本サブテーマの目標値は伝送速度 9,600bps、伝送距離 30m であり、条件付きだが目標は達成している。しかしながら、着底・混合判断のためには地盤改良工事の時のデータ送受信が必要であるが、その部分は出来ていない。結論としては、本手法では地盤改良中のデータの送受信は難しいと考える。そこで、現在、別の手段でのデータ送受信方法を検討中である。

2-1-3 比抵抗データ表示の開発と評価

- ① 地下ユニットのプログラム調整
- ② 地上ユニットのプログラム調整
- ③ 施工管理装置へ実装（比抵抗データの表示）

地下で計測された比抵抗値測定結果及び、従来の施工管理手法では、計測ができなかった

共回り状況の測定と、計測地点である地下から地上にある施工管理装置へのデータ転送手段の確立と、前記測定結果を、施工管理装置を通じてオペレータに伝える手段を確立した。

施工品質向上のためには欠かせない共回り防止翼の挙動を計測する手段を確立した。施工管理装置に基本的な比抵抗値表示機能を実装した。



図9 施工管理装置での比抵抗値測定結果表示例

2-2 着底・混合判断技術の開発と評価

改良杭施工を想定した3次元の比抵抗シミュレーションソフトウェアを開発した。地盤の比抵抗や改良杭の比抵抗を様々に変化させ、軟弱地盤と良好地盤や改良杭の地盤とセメントの混合状態に対する比抵抗変化の特徴を把握した。

図10はシミュレーション結果の一例である。地表から地中に向けて改良杭を施工しながら共回り防止翼に設置した電極により地盤の比抵抗を連続的に測定する。測定した地盤の比抵抗の変化から着底判断を行い、軟弱地盤にセメントを混合した改良杭の比抵抗から混合判断を行う。シミュレーション結果から、地盤の比抵抗が変化すると、改良杭施工と同時に測定される比抵抗も同様に変化することが確認できた。また、改良杭中の一部にセメントの混合不良が存在すると、測定される比抵抗がばらつくことが確認できた。

以上のことから、地盤改良工事において、改良杭施工と同時に共回り防止翼に設置した電極で比抵抗を測定することで、着底と混合の判断がリアルタイムに可能であることがシミュレーションから確認できた。

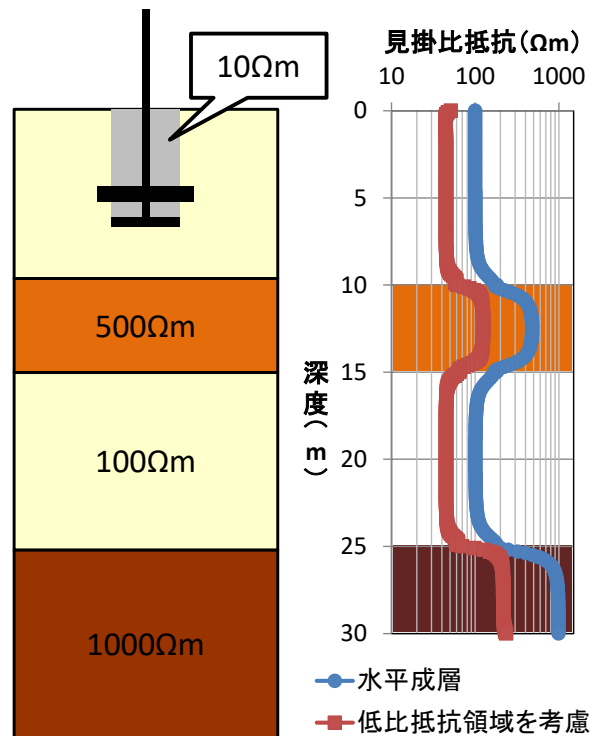


図 10 シミュレーション結果一例

着底判断のためにコアの比抵抗計測方法の開発も行った。これは、着底判断は地盤改良柱の比抵抗の計測データと先に行うコアの比抵抗データとを比較して、着底判断を行うとしているためであり、開発した方法によって、比抵抗の計測可能となった。

混合判断のためにセメント系固化材を用いた地盤改良工事におけるセメント配合量の下限值の見極めについての研究を行った。同研究は、セメントの添加量に応じて混合判断用の比抵抗の値が変わるので、所定の設計基準強度を満足させる添加量を決める必要があった。後述する地盤改良試験での比抵抗計測試験は、この研究に基づいてセメント添加量を決定した。

また、地盤改良工事後の改良体のコアの強度試験に関する研究を行った。これは、比抵抗による混合判断を本研究終了後に実施していく際に、従来のコアの強度試験結果と比較をしていく必要があるが、研究背景にも記載した通り、現状は地盤改良工事後、7日か28日後のコアの強度試験を行う必要がある。しかし、温水による促進養生を行うことでその時間を短縮する可能性があるため、混合判断の実用化に掛かる時間が短くなるということで、研究を行った。研究の結果、促進養生で時間短縮の可能性を示すことが出来た。

最終的には、着底・混合判断技術の開発と評価のために、【1】で開発したユニットを用

いて、YBM 敷地内にて試験工事を行い、データを取得して、着底・混合が出来たかを確認した。試験では、セメント配合量を 50kg/m^2 、 200kg/m^2 と変えて、またセメントを添加しない区間をいれた条件として、比抵抗のデータの違いを確認した。尚、得られたデータとは前述の図 5 に示したデータであり、1 回の試験で他に着底判断用に 1 データ、混合判断用に 1 データ得られている。

2-3 着底・混合判断システムの製作と評価

「着底・混合判断システム」をアドバイザーに確認してもらい、評価してもらうことを目的としていた。ただし、製品として完成せずアドバイザーへ貸し出しが出来なかったが、委員会等の場でアドバイスを頂き、改良を行った。

最終章 全体統括

下記の 3 個のテーマを挙げて、3 年の開発を行った。

- 比抵抗計測技術・伝送技術・表示方法の開発と評価
- 着底・混合判断技術の開発と評価
- 着底・混合判断システムの製作と評価

最初に上げた開発目標に関して達成しており、地盤改良中の比抵抗計測は可能になったと考えるが、前述したように地盤改良中のデータ送受信方法が確立出来なかった。そこで、補完研究としてデータ送受信方法の再検討を行う必要があり、現在、YBM で取り掛かっている状態である。そのデータ送受信方法が確立した場合、表 1 に示すようなスケジュールに基づいて、その後に着底・混合判断の指標づくり、試験データ収集を行っていく予定である。

表 1 事業化に向けたスケジュール

実施内容	H31年度	H32年度	H33年度	H34年度	H35年度
○補完研究 ・データ送受信方法の再検討 ・着底・混合判断の指標づくり ・試験データ収集	→	→			
○サンプルの出荷・評価		→			
○製品等の生産・販売			→	→	→
○NETIS登録申請			→		
○展示会出展			→		

また、図 11 に示すように販売ターゲットはワイビーエムの顧客を想定している。具体的に述べると、アドバイザーに入っていた松尾建設を皮切りに、松尾建設が所属している GI コラム研究会と広げていき、そのたのユーザーまで想定している。

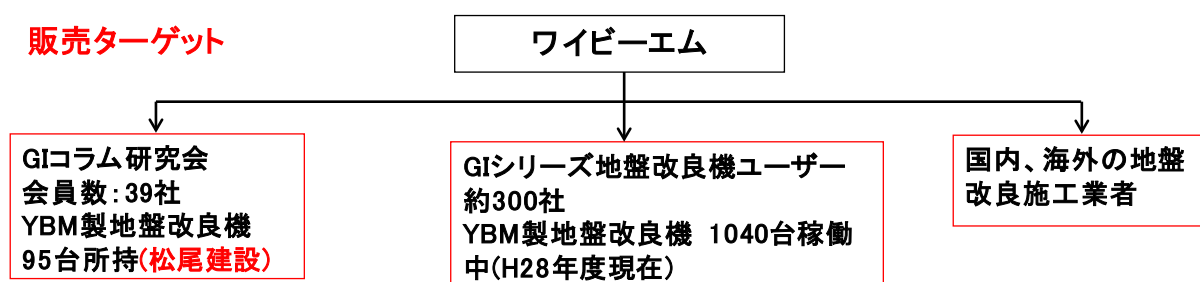


図 11 販売ターゲット