

全自動施工管理制御システム(Y-LINK)の開発試験について

ワイビーエム 非会員 ○平川 真吾
ワイビーエム 非会員 奈須 徹夫

1. はじめに

団塊世代の大量退職などによる建設現場からの熟練作業員の減少あるいは少子高齢化による建設作業員の減少などにより、施工管理や作業技術の伝承の遅れが危惧されている。一方で、建設現場の施工の高度化に伴い情報化施工やコンピュータ制御による自動化・無線化・ロボット化・無人化などの新技術導入が進められている。地盤改良工事においても全自動化や情報化を進めることで、オペレータの技量差が工物品質へ及ぼす影響を低減し、効率の高い施工を行うことを目的として、施工機・グラウトポンプ・ミキシングプラントといった3種類の機械を無線により一括して自動制御できる全自動施工管理制御システム(Y-LINK)を開発した。本報告では、システムの概要を述べ、開発に際して行った電波障害や通信距離などの現場への適用試験結果について紹介する。併せて、緩い砂質土地盤で行った試験施工結果のうち、羽根切り回数および流量制御状況と地盤改良品質の関係について報告する。

2. 全自動施工管理制御システム(Y-LINK)について

2-1 システムの概要

図-1 に従来の地盤改良工事管理システムの形態を示す。これまでの地盤改良工事の施工システムは、施工機・グラウトポンプ・ミキシングプラントといった3種類の機械からなっており、個々の機械の全自動化は進められてきたが、機械相互の関連は無く、機械ごとに配置されたオペレータが相互に連絡しながら地盤改良工事を行う施工形態がとられてきた。全自動施工管理制御システム(Y-LINK)の概要を図-2 に示す。Y-LINK は、これまで別々の機材であった施工機とプラント部を無線により一体化することで施工条件に合わせた全自動運転を可能としたシステムである。攪拌装置の深度・軸回転数・回転トルク・昇降速度・スラリー流量などの施工データは施工機に搭載したセンサーで感知され、無線を通じてグラウトポンプ・ミキシングプラントを制御することで全自動運転が可能となった。

当システムは、インターネットを介在させることで工事現場内あるいは遠隔地からの施工状況の監視や施工データの入手が可能となり、施工現場の見える化を実現し、施工管理の高度化・効率化を可能にしている。全自動運転は、インターネットに接続できない環境でも自動運転を機能させる必要があるため、機械間の無線通信には特定小電力無線を採用した。また、フェールセーフの観点から、無線信号の送受が途切れた場合や CPU に異常が確認された場合に全機械が緊急停止するシステムを実装した。

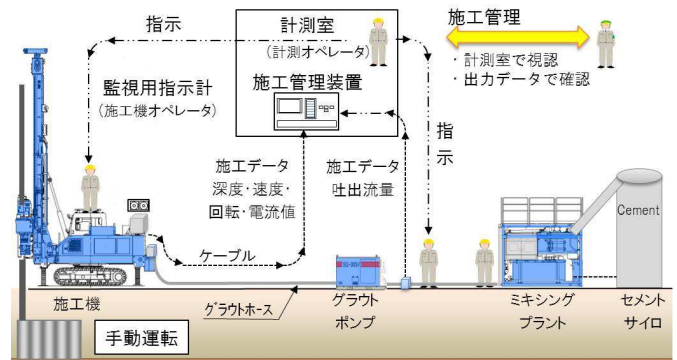


図-1 従来の地盤改良工事管理システムの形態

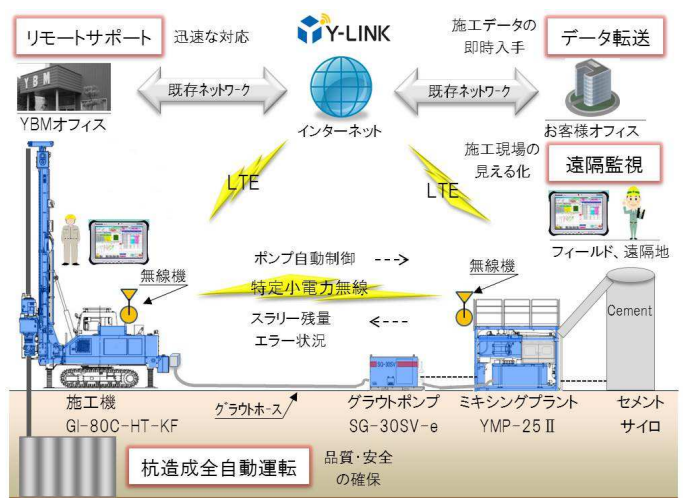


図-2 全自動施工管理制御システム(Y-LINK)の概要

キーワード 自動化、無線化、遠隔監視、データ転送、地盤改良

連絡先 〒847-1211 佐賀県唐津市北波多岸山 589-10 技術本部 TEL:0955-64-3881 E-mail(専用):y-pro@ybm.jp

2-2 自動運転設定ツールによる杭造成全自動運転

地盤改良を行うにあたり、改良体の造成条件(直径、改良長、単位長さ当たりのスラリー流量、羽根切り回数など)、攪拌翼の回転速度・回転トルクおよび昇降速度の制御、セメント系固化材スラリーの供給流量の制御等が必要であり、これらの造成条件や制御条件を地盤の負荷に応じて適切に設定することが必要である。

全自動運転の全体の流れと自動運転設定ツールを図-3に示す。当システムは、自動運転設定ツールを使用し、土質調査データをもとに施工サイクル、羽根切り回数、回転トルク、昇降速度、スラリー流量等の目標値を事前に設定・作成できる。作成した施工パターンは、施工機に搭載した管理装置に読み込んで保存する。オペレータは、施工機を所定の位置にセットし、改良体ごとに事前に保存された施工パターンを選択し、Y-LINKを起動させることで計画どおりの改良体を全自動で造成することが可能となった。

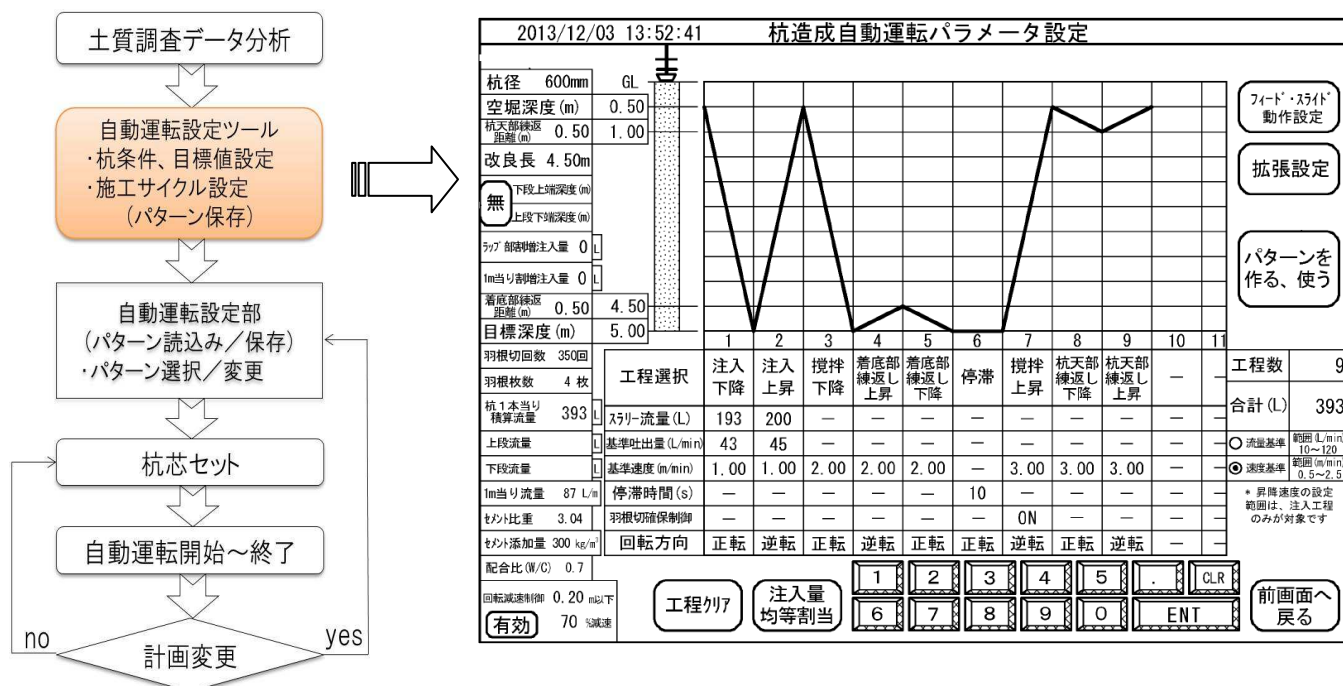


図-3 全自動運転の全体の流れと自動運転設定ツール

品質の良い改良体を造成するためには、単位深度あたりのスラリー流量および、羽根切り回数を満たすように施工機とポンプの操作が必要である。全自動運転のフローを図-4に示す。改良体造成に際して Y-LINK は 1)貫入攪拌時に昇降駆動装置の昇降速度と攪拌駆動装置の回転トルクを地盤負荷に応じて修正する、2) 貫入速度の変化に応じてセメントスラリー吐出量を制御する、3)引抜攪拌時に羽根切り回数が設定値より不足すると予測した場合は昇降速度を落として設定した羽根切り回数を確保する、といった制御を自動的に行うことができる。これらの自動運転制御により、オペレータの技量差が工品質へ及ぼす影響を低減できる。

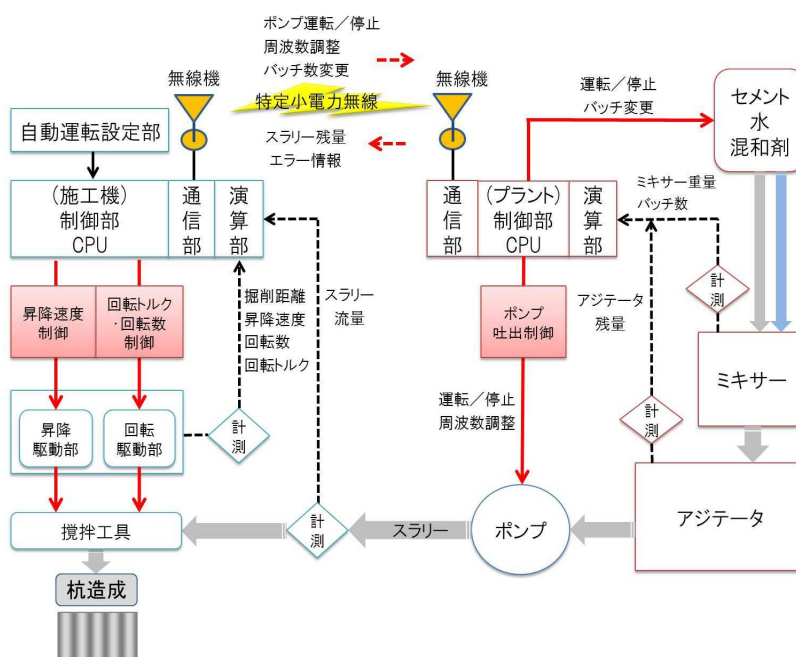


図-4 全自動運転のフロー

3. 現場適用試験

3-1 電波使用状況調査

当システムは、ポンプの吐出制御に特定小電力無線を使用している。無線制御を行うにあたり、無線信号を継続して送受信する必要があり、干渉を受けにくい周波数帯の選定と現場条件ごとに通信の成功確率が確保できる距離の確認を目的として、現場条件を想定した電波使用状況の調査および通信距離の計測試験を実施した。

表-1 に免許及び登録を要しない無線局の特性を示す。特定小電力無線または、小電力無線において免許不要にて利用できる周波数帯には、429MHz 帯・920MHz 帯・2.4GHz 帯等がある。使用可能なチャンネル数はそれぞれ、46 チャンネル・38 チャンネル・13 チャンネルであり、工事現場周辺で使用されているチャンネル数が過密な場合、電波干渉により通信の成功確率が低下し、システムが稼働しないことが危惧された。したがって、地盤改良工事が想定される施工条件の中で最も電波使用状況が過密と思われる住宅地において、スペクトラムアナライザーを用いて3種類の周波数帯の使用数を調査した。図-5 に電波使用状況調査結果から住宅地の例を示す。住宅地の街区道路上で100m 間隔の計4ポイントにて計測した。住宅地では、Wi-Fi などの無線LAN に起因すると思われる2.4GHz 帯の使用チャンネル数が多く、429MHz 帯および920MHz 帯の使用は認められなかった。429MHz 帯および920MHz 帯とも電波干渉の問題が回避でき回折性もあるが、当システムでは占有帯幅が広く、通信速度が速い920MHz を採用することにした。

3-2 通信距離の計測試験

同一周波数帯においても無線モジュールの性能やアンテナの受信感度により無線通信距離は異なる。無線機を選定する際はこれらを考慮し、選定した無線機が現場条件に適合するかを事前に評価することが必要である。

工場敷地内での無線伝搬テスト事例を図-6 に示す。1～5 で示す経路に沿って子機を移動させながら親機から発信される電波を受信し、電波強度(dBm)とパケットエラー率PER(%)を測定した。測定に際しては、構造物と同様に地表面も障害となるため、施工機およびミキシングプラントへの取付けを想定してアンテナ高さを3m とした。無線伝搬測定特性図を図-7 に示す。受信強度が-90dBm 以下になるとパケットエラー率が上昇し始めている。選定した無線モジュールにおいて、受信強度とパケットエラー率の関係から安定した送受信を行うためには、-90dBm 以上の受信強度が必要であることが解った。

表-1 免許及び登録を要しない無線局の特性

項目	特定小電力無線		高度化小電力無線
周波数帯域	429MHz	920MHz	2.4GHz
帯域幅	0.11MHz	13.8MHz	83.5MHz
最大占有帯域幅	8.5kHz	1000kHz	26MHz
最大送信電力	10mW	20mW	10mW/MHz
チャンネル数	46	38	13
占有チャンネル数	1	5	4
問題点	帯域狭い	—	干渉電波多

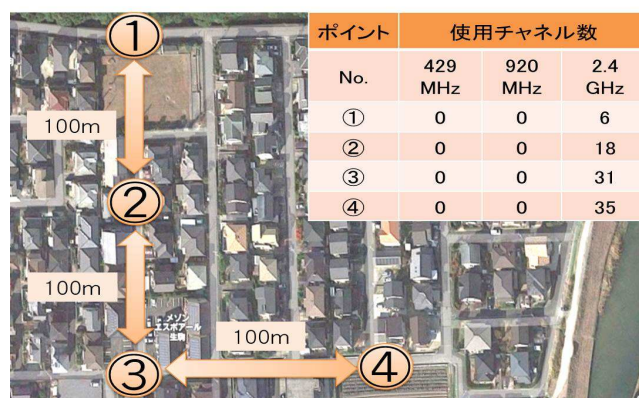


図-5 電波使用状況調査結果(住宅地の例)

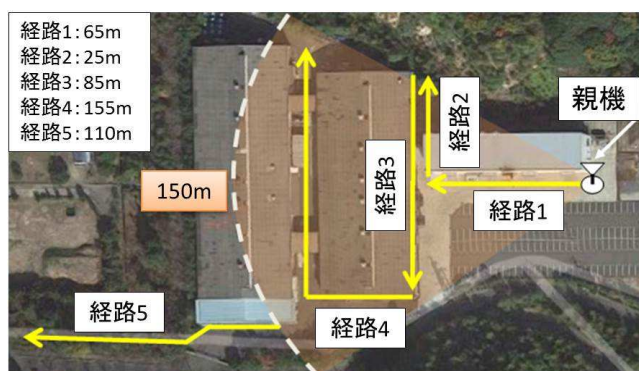


図-6 工場敷地内での無線伝搬テスト

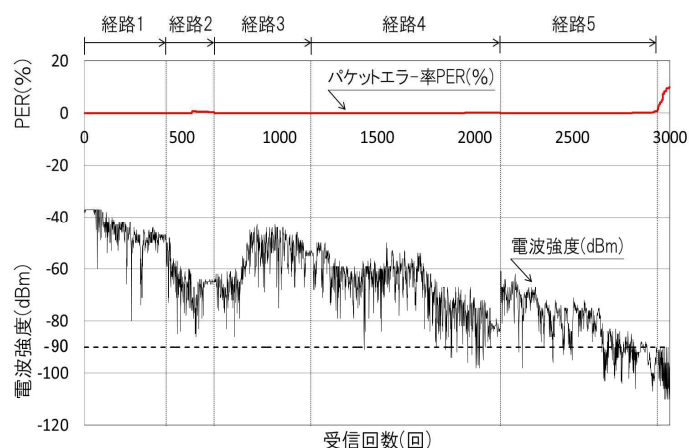


図-7 無線伝搬特性図

図-8 に無線伝搬テスト方法を示す。試験ではミキシングプラント 1 台で施工機 2 台の稼働を想定し、親機 1 台から 2 台の子機へ Y-LINK で扱う実通信量で交互に送受信させ電波強度(dBm)と送受信成功率(%)の関係を調べた。図-9 に住宅地での無線伝搬テスト結果を示す。○印は子機の計測位置を示し、○印内の数値 1～3 は電波強度-90dBm 以上、数値 0.5 は-103～-91dBm、数値 0 は-104dBm 以下を示す。計測結果より、親機から半径 150m の範囲であれば受信強度は-90dBm 以上を確保でき、送受信成功率は 99.9%以上を確保できることが分かった。受信強度が-91dBm 以下になると送受信成功率は 98.6%に低下する。この結果から、住宅地において半径 150mの範囲内であれば安定した無線通信が可能であることが分かった。

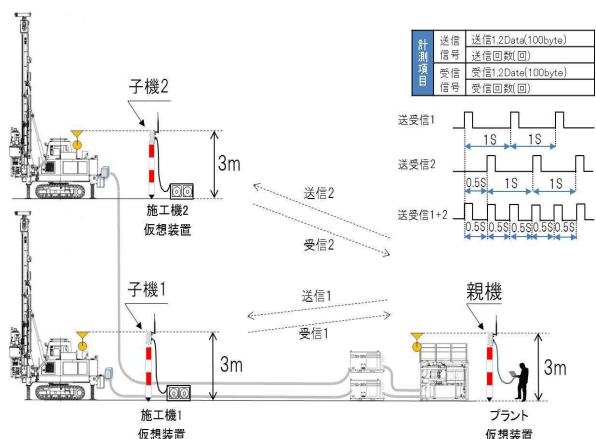


図-8 無線伝搬テスト方法



図-9 住宅地での無線伝搬テスト

図-10 に中継機を使用した住宅地での無線伝搬テスト結果を示す。親機から 150m離れた場所に中継機を設置し、同様に、電波強度を計測した。中継機を使用していない図-9では、半径 200m以上では電波強度が-103～-91dBm と低下したが、中継機を設置することで、-90dBm 以上に改善された。中継用無線機の電源は、モバイル充電式バッテリーから供給可能で、発電機などは必要としない。この結果より、中継機を使用することで、安定した無線通信が行えるエリアを拡大できることが分かった。



図-10 中継機を使用した住宅地での無線伝搬テスト

障害物の高さ、材質、密集度の違いによる無線通信への影響を確認するため、屋外の見通しが利く場合、および工業地帯においても同様の試験を行った。現場環境ごとの通信距離計測の結果を表-2 に示す。この結果より、住宅地や工業地帯において、障害物などの通信条件が厳しい環境下においてもミキシングプラントと施工機の直線距離が 150m の範囲内であれば安定した無線制御が可能であると考えられる。

表-2 現場環境ごとの通信距離

使用環境	中継無し	1段中継
屋外見通し	1000m	—
工業地帯建物越し	150m	200m
工業地帯道沿い	270m	400m
住宅地建物越し	150m	200m
住宅地道沿い	220m	400m

4. 砂質土地盤における試験施工

4-1 試験施工の対象地盤と機械配置

試験施工は、佐賀県唐津市内の造成地において実施した。事前ボーリング調査結果を図-11に示す。当該地区は一級河川松浦川が唐津湾に注ぐ扇状地性の沖積低地で、表層よりN値が3～10の比較的ゆるい貝殻片を含む砂質土層が堆積し、GL-15m付近からはN値>30の強風化花崗岩層が分布する。また、GL-5.9m～GL-6.0mに木片が混入する腐植土の介在が認められた。

写真-1に試験施工状況を、施工状況図-12に機械配置を示す。使用した機械は一般的な地盤改良工事で用いられている油圧駆動式の地盤改良施工機(GL-80C-HT-KF)・グラウトポンプ(SG-30SV)・ミキシングプラント(YMP-25Ⅱ)で、全自動施工管理制御システム(Y-LINK)による制御を適用した。試験施工に際しては電波環境が厳しい住宅地を想定し、施工制御の通信を行うY-LINK送受信機を搭載したミキシングプラントと施工機の間に2階建て相当の小規模建築物を仮設した。



図-11 事前ボーリング調査結果



写真-1 試験施工状況

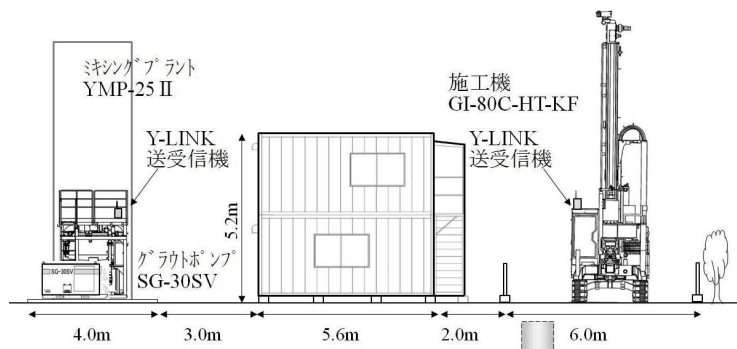


図-12 機械配置図

4-2 試験杭の配置および施工仕様

試験杭の配置および施工仕様を図-13に示す。試験施工では、改良長10.0m(GL-0.5～GL-10.5m)の単杭と5.0m(GL-0.5～GL-5.5m)のラップ杭の2種類とし、前者で全自動施工管理制御システム(Y-LINK)による制御によるスラリー流量および羽根切り回数の制御状況を、後者でラップ施工時の改良体の一体化の状況について確認した。

事前調査結果でGL-5.9m～GL-6.0mに腐植土の介在が認められたことから対象地盤を3層に区分して配合試験により各層の混入量を決定した。また、対象土が緩い砂質土であることから高炉セメントを用い、スラリーの水セメント比はw/c=80%とした。各層の層厚については機械の制御試験の利便性も考慮したため2.5mを1単位とした層分けとした。貫入速度を0.7m/min、引上げ速度を1.0m/minと設定し、回転数を貫入時20rpm、引抜時40rpmと仮定し、目標羽根切り回数は410回/mに設定した³⁾。

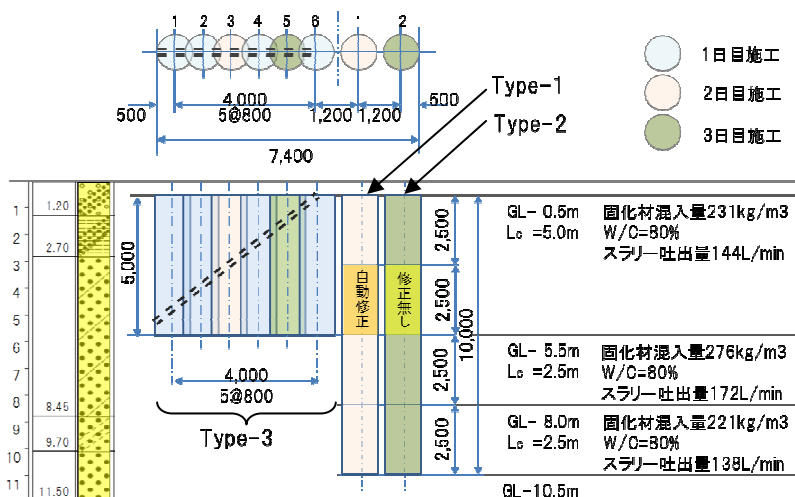


図-13 試験杭の配置および施工仕様

当システムは、羽根切り回数が設定値より不足すると予測した場合、引上げ攪拌時に引上げ速度を落として羽根切り回数を確保する機能がある。その機能を確認するために貫入時に GL-3.0m～GL-5.5m の区間では油圧ポンプの吐出能力を 30%に低下させることで攪拌軸回転数を下げ、擬似的に羽根切り回数が不足する層を設定し、引上げ攪拌時の羽根切り回数の確保状況を確認した(Type-1)。機能を比較するために羽根切り回数が不足する層を Type-1 と同様に設定し、当システムを機能させず、1.0m/min の一定速度で引き上げたケースも実施した(Type-2)。

これら機能が工事品質に及ぼす影響を確認するためボーリング調査を行い、一軸圧縮強さおよび RQD 値⁴⁾の深さ方向の分布を比較した。また、ラップ施工を行う場合、攪拌翼が既設改良体に接することで不規則な回転が発生するが、これに対して当システムを適用した場合のラップ部の改良状況についても確認するため、隣接する既設改良体の材齢を当日、1 日、2 日と変えて施工を行い、斜めボーリングによる改良体コアの観察を実施した(Type-3)。

4-3 試験施工結果

図-14 に Type-1 の経過時間ごとの攪拌装置の深度・昇降速度・軸回転数・セメントスラリー流量の変化を示す。貫入時の 4.5 分～8.0 分に軸回転数が制限を受け、羽根切り回数を確保するために引上げ時の 24.5 分～27.5 分に昇降速度を落としながら施工している状況が見られる。

図-16 に Type-1 の深度ごとの攪拌翼の昇降速度・セメントスラリーの瞬時流量および積算流量の変化を示す。当システムが貫入攪拌時に瞬時流量を調整している状況が見られる。また、実施流量と計画流量は GL-0.5m～GL-5.5m で 1,039.6L/1,029.0L(ロス 1.03%)、GL-5.5m～GL-8.0m で 617.5L/614.2L(ロス 0.54%)、GL-8.0m～GL-10.5m で 495.0L/492.8L(ロス 0.45%)、合計で 2,152.1L/2136.0L(ロス 0.75%)とスラリー流量ロスが少ない施工を行うことができた。積算流量も直線的になっており深度方向の流量のバラツキも少ないことが分かる。

図-16 に Type-1 の深度ごとの昇降速度・軸回転数・羽根切り回数の変化を貫入時と引抜時に区分して示す。GL-3.0m～GL-5.5m で貫入時の羽根切り回数は他の深度より 200 回/m 程度少ない 190 回/m であったが、引抜時に昇降速度を設定の 1.0m/min から最低 0.48m/min まで落とすことで羽根切り回数を確保している。

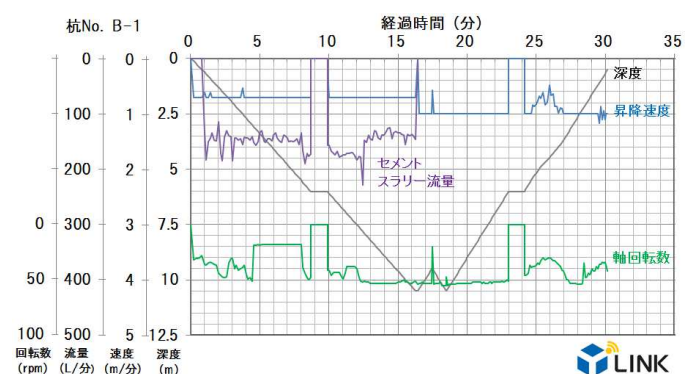


図-14 Type-1 の経過時間ごとの攪拌装置の深度・昇降速度・軸回転数・セメントスラリー流量の変化

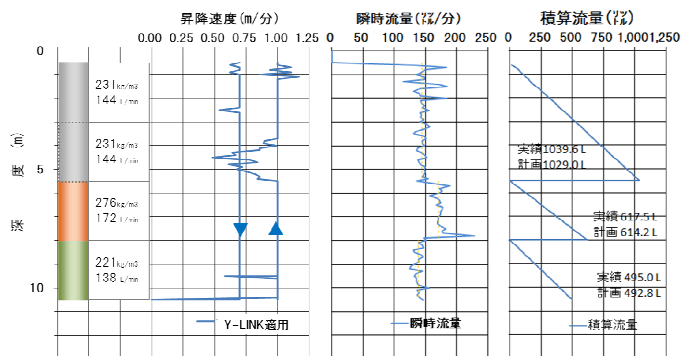


図-15 Type-1 の深度ごとの攪拌翼の昇降速度・セメントスラリーの瞬時流量および積算流量の変化

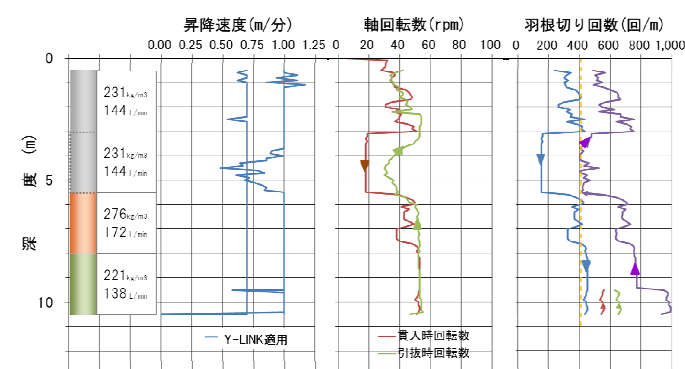


図-16 Type-1 の深度ごとの昇降速度・軸回転数・羽根切り回数の変化

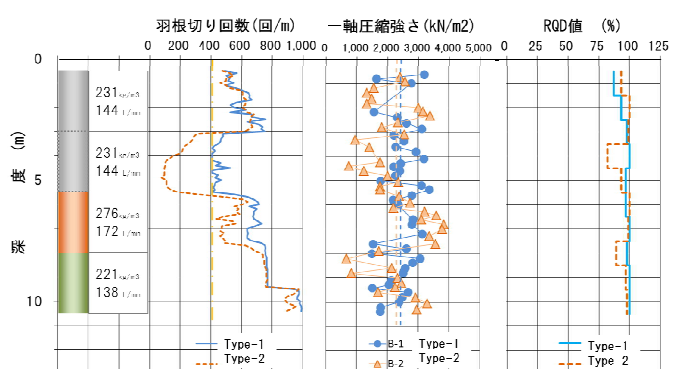


図-17 深度ごとの羽根切り回数と一軸圧縮強さおよび RQD 値

図-17 に深度ごとの羽根切り回数と一軸圧縮強さおよび RQD 値を当該システムで自動制御した場合(Type-1)と制御しない場合(Type-2)を比較して示す。コアサンプリングは 1/4D 点にて材齢 18 日で実施し、コア観察を行い、湿空養生により材齢 28 日で一軸圧縮試験に供した。

GL-3.0m~GL-5.5m での一軸圧縮強さ q_u および変動係数 V_d は、自動制御した Type-1 は $q_u=2,562\text{kN/m}^2 \cdot V_d=18.9\%$ 、制御しなかった Type-2 の $q_u=1,665\text{kN/m}^2 \cdot V_d=34.8\%$ に比べ改良強度が高く均一性に優れた改良品質を確保できた。全長平均でも、Type-1 で $q_u=2,442\text{kN/m}^2 \cdot V_d=21.4\%$ 、Type-2 で $q_u=2,295\text{kN/m}^2 \cdot V_d=37.8\%$ となった。Type-1 および Type-2 の採取コアを写真-2 に示す。コア観察結果から、制御していない Type-2 の RQD=80% に比べ、制御した Type-1 の当該深度の RQD 値は RQD=100% で均質な改良が行われていることが確認できた。

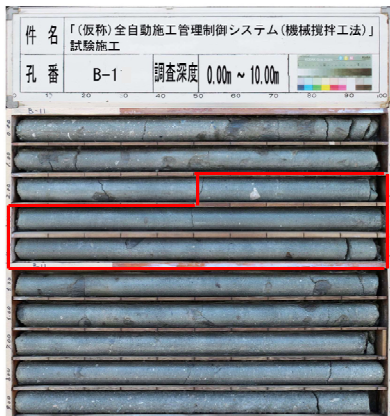


写真-2 Type-1 および Type-2 の採取コア

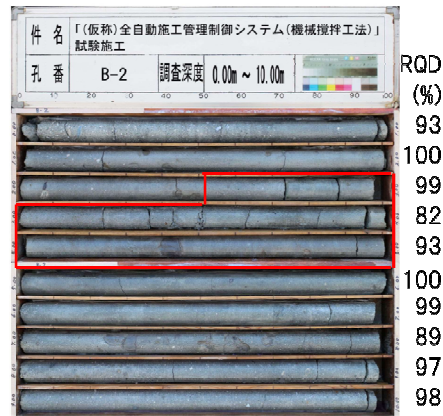


写真-3 Type-3 ラップ杭の斜めボーリングによるコア

写真-3 に Type-3 ラップ杭の斜めボーリングによるコアを示す。隣接する杭の施工日を同日、材齢 1 日、材齢 2 日とずらして施工しましたが採取コアは一体化しており、材齢差 2 日以下でのラップ施工ではラップ部を示すような亀裂を見いだすことはできず、ラップ杭の一体化が確認できました。

住宅地を想定した施工条件下で全自動施工管理制御システム(Y-LINK)を用いた試験施工を実施した。当システムを適用することで、貫入撹拌時の羽根切り回数の不足を引抜撹拌時に補正修正し、目標の羽根切り回数を確保することができた。ボーリング調査の結果、当システムを適用した改良体は適用しなかった改良体に比べ、改良強度および均一性が高く、当システムの適用で工事品質を確保できることが分かった。ラップ杭の施工においては材齢 2 日以下でのラップ施工で改良体が一体化していることが確認された。

5. まとめ

全自動施工管理制御システム(Y-LINK)の開発に際して行った現場適用試験および試験施工から以下の知見を得た。

- ① 住宅地の街区道路上で特定小電力無線を用いて自動運転制御を行う場合、920MHz 帯を用いると電波干渉の回避および回折性の確保が可能であることが分かった。
- ② Y-LINK システムに 920MHz 帯を用いた場合、通信条件が厳しい住宅地や工業地帯ではミキシングプラントと施工機の直線距離が 150m の範囲内であれば安定した無線制御が可能であることが分かった。
- ③ Y-LINK システムを用いた場合、改良時のセメントスラリーロスが 1% 程度に抑制されることが分かった。
- ④ Y-LINK システムを用いた場合、羽根切り回数を制御でき、均質な改良品質を確保できることが分かった。

参考文献

- 1) 一般社団法人電波産業会:920MHz 帯テレメータ用テレコントロール用及びデータ転送用無線設備,pp.1~29.2012.2.
- 2) 著鄭立:スマートセンサ無線ネットワークスマートメータ SUN と ZigBee スマートエネルギー,pp.89~92.2012.7.
- 3) 土木研究センター:陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル,pp.144~146,2004.3.
- 4) 鈴木孝一・他:深層混合処理地盤におけるサンプリングについて,土質工学会サンプリングシンポジウム発表論文集, pp.107~114,1992.11.