

地盤改良工事を全自動で施工管理

ICT を導入した全自動施工管理制御システムの開発 Y-LINK

奈 須 徹 夫・平 川 真 吾・吉 田 哲 雄

地盤改良は土木建設工事の中では機械化あるいはシステム化が早くから進められてきた部門である。しかしながら、昨今の土木建設工事の IT 化はめまぐるしい進歩を遂げており、これまで施工管理がシステム化されていた地盤改良といえども新規性が失われつつある。一般的な工種では、独立した機械の作業を工程調整して施工を進めるが、地盤改良では施工機、グラウトポンプ、ミキシングプラントという3種類の異なる機械が密接に連携して1つの工程が完了するという点で特異性があり、システム化も高度なものになる。

今回、開発した全自動施工管理制御システム Y-LINK（以下「本システム」という）は、これら3種類の機械を一括して自動運転制御し、あわせて施工データの転送と施工の見える化を実現しており、土木建設工事の IT 化を推し進めることができるシステムである。

キーワード：地盤改良、スラリー攪拌工法、施工管理システム、ICT、無線、自動化、見える化

1. はじめに

団塊世代の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化による建設作業員の減少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。一方では、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、オペレータの技量の差が工事品質へ及ぼす影響を低減し、施工管理や作業技術の伝承を補完することを目的として、施工機、グラウトポンプ、ミキシングプラントを一括して自動制御できる全自動施工管理制御システムを開発した。

本稿では、本システムの概要を述べ、開発に際して行った通信能力試験結果および砂質土地盤で行った試験施工結果について紹介する。

2. 開発の背景

従来の地盤改良工事の管理システムの形態を図-1に示す。地盤改良工事では、セメントと水を混練してスラリーを製造し、スラリーを必要量ごとに圧送し、スラリーと対象深度の土を地中で混練するといった工程を経て地盤中に円柱状の固結体を造成する。この3

つの工程ごとにミキシングプラント、グラウトポンプ、地盤改良施工機といった機械が用いられている。これらの機械はそれぞれで自動化あるいは遠隔操作機能などを有しているが、それぞれ独立した機械であり、従来は機械ごとに配置されたオペレータが相互に連絡を取り合いながら地盤改良工事を行うという施工形態がとられてきた。また、地盤改良工事では、地層ごとのセメントスラリーの注入量や羽根切り回数¹⁾などが工事品質を左右するが、これらは、オペレータが施工機械に取り付けられた施工管理装置に表示されるデータから判断して機械を操作している。また、工事品質を高めることを目的に施工データの監視と各機械オペレータへの運転指示を専門に行う集中管理室を装備した工法なども開発されたが、いずれの場合もオ

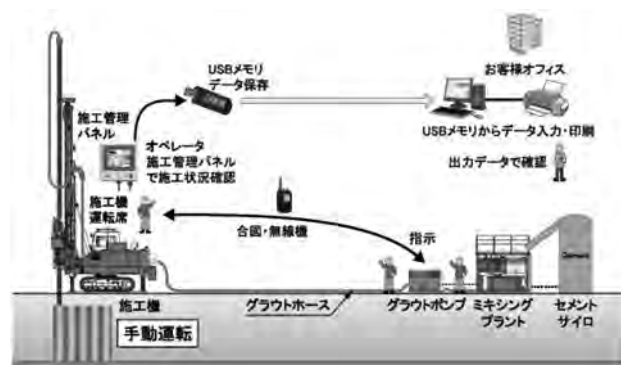


図-1 従来の地盤改良工事管理システムの形態

オペレータの技量差が工事品質に与える影響を無視できなかった。

一般に施工データはUSBなどの外部メモリに保存され、施工終了後にパソコンなどへデータ入力し、印刷され、工事管理者は印刷された施工データにより施工管理を行うことになり、施工状況をリアルタイムに監視するケースは極めて少なかった。

3. 本システムの概要

(1) 本システムの形態

本システムの形態を図-2に示す。本システムはこれまで個々に運転されていた施工機とプラント部を特定小電力無線で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。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されたセンサーで感知され、無線を通じてプラント部にあるグラウトポンプおよび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。

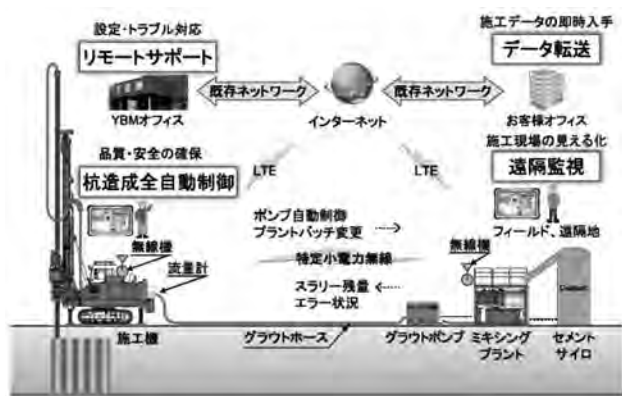


図-2 本システムの形態

全自動運転に際しては、フェールセーフの観点から、無線信号の送受中断やCPU異常といった無線通信異常が発生した場合、あるいは施工機に過大傾斜が派生した場合、攪拌軸に過大なトルクが発生した場合、ポンプに異常が発生した場合などに全機械が緊急停止するシステムとした。

本システムは、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もオペレータと同様に施工状況を監視することが可能となり、地盤改良工事の見える化を実現し、施工管理の高度化・効率化が可能となった。施工データはインターネット回線を通じて任意の複数のパソコンに送信されるため、施工データの信頼性が高まり、施工データ紛失等の事故も防止

することができる。

(2) 本システムの機能

本システムを用いた場合の全自動運転のフローを図-3に示す。全自動運転を行う場合には、自動運転設定ツールを用いて、施工サイクル、羽根切り回数、回転方向、昇降速度、スラリー流量等の目標値を事前に設定・作成し、施工パターンを本システムの管理装置に読込んで保存する。オペレータは、施工機を所定の位置にセットし、事前に設定保存された施工パターンを選定し、本システムを起動することで計画どおりの改良体を造成することができる。

図-4に全自動運転の制御フローを示す。本システムは、①貫入攪拌時に昇降駆動装置の昇降速度と回転トルクを地盤負荷に応じて修正する。②施工機で計測された深度からその深度における施工パターンを選定し、昇降速度の変化に応じてポンプを制御してスラ

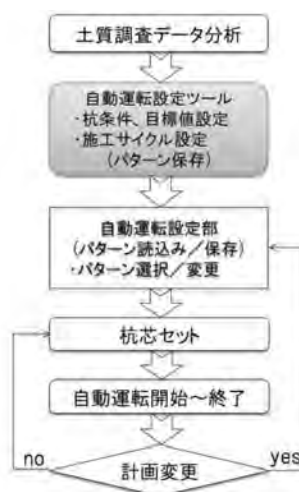


図-3 全自動運転のフロー

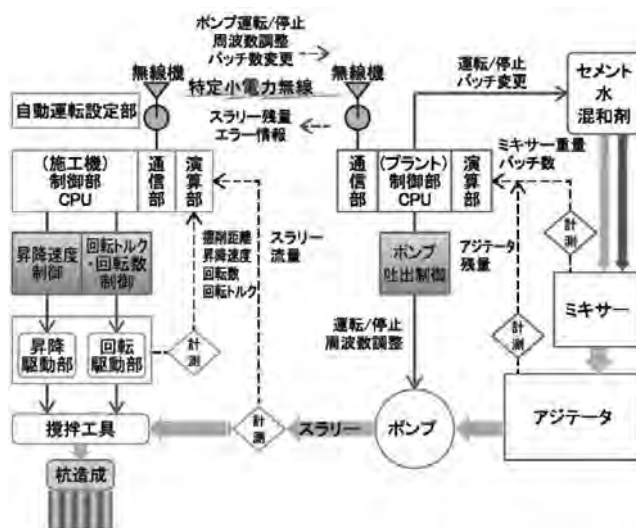


図-4 全自動運転の制御フロー

リー吐出量を加減する。③貫入時の羽根切り回数を計測記憶しておき、引抜き時に羽根切り回数が不足すると判断した場合は昇降速度を減じ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。これらの稼働状況は図-5に示した管理装置のディスプレイに表示され、オペレータは全機械の運転状況を確認することができる。



図-5 管理装置ディスプレイ

(3) 通信能力

施工機とプラント部間での特定小電力無線による通信試験のうち、遮蔽物が広域に連続する住宅地における通信試験結果を図-6に示した。試験では、ミキシングプラント1台に対して施工機2台での施工を想定し、それぞれ親機、子機として、本システムで扱う実通信量で交互に送受信させ電波強度と送受信成功率の関係を調べた。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-90 dBm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解った。受信強度が-91 dBm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



図-6 住宅地における通信試験結果

が可能であることが解った。

4. 試験施工による検証

(1) 試験施工方法

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-7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。

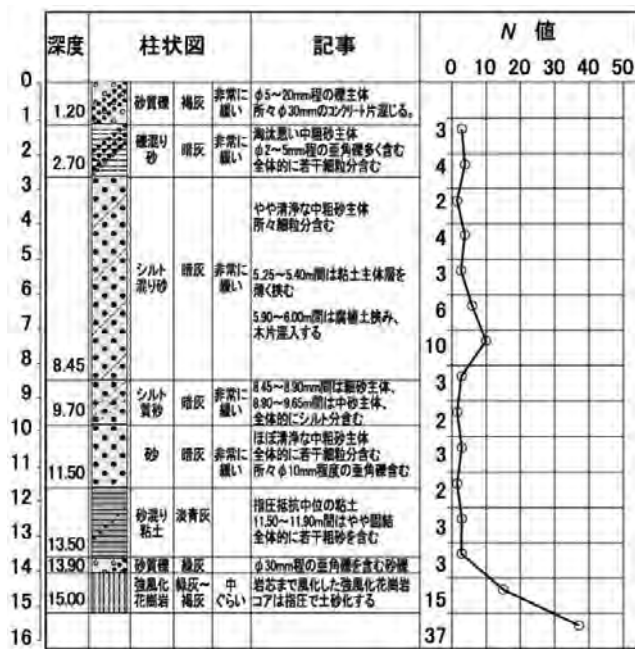


図-7 事前ボーリング調査結果

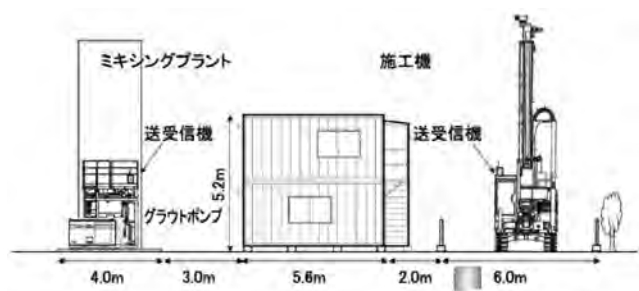
写真-1に試験施工状況を、図-8に機械配置を示す。使用した機械は一般的な地盤改良工事で用いられている油圧駆動式の地盤改良施工機、グラウトポンプ、ミキシングプラントで、本システムによる制御を適用した。試験施工に際しては電波環境が厳しい住宅地を想定し、送受信機を搭載したミキシングプラントと施工機の間に2階建て相当の小規模建築物を仮設した。

(2) 試験杭の配置と施工仕様

試験杭の配置および施工仕様を図-9に示す。試験施工では、改良長10.0m (GL-0.5m~GL-10.5m)の単杭を2本打設し、本システムの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について確認



写真—1 試験施工状況



図—8 機械配置



図—9 施工仕様

した。

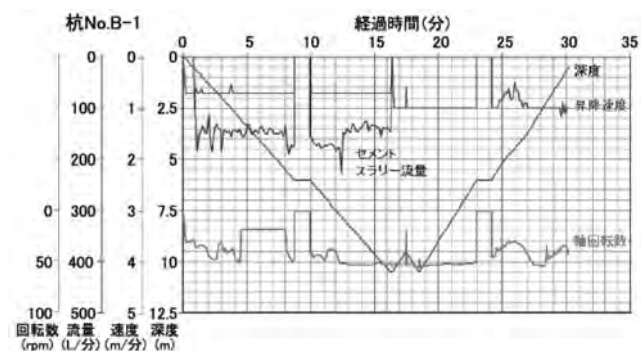
事前調査結果で GL-5.9 m ~ GL-6.0 m に腐植土の介在が認められたことから対象地盤を 3 層に区分して配合試験により各層の混入量を決定した。また、対象土が緩い砂質土であることから高炉セメントを用い、スラリーの水セメント比は $w/c = 80\%$ とした。各層の層厚については機械の制御試験の利便性も考慮したため 2.5 m を 1 単位とした層分けとした。貫入速度を 0.7 m/min, 引上げ速度を 1.0 m/min と設定し、回転数を貫入時 20 rpm, 引上げ時 40 rpm と仮定し、目標羽根切り回数は 410 回 / m に設定した。

本システムは、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-3.0 m ~ GL-5.5 m の区間では施工機の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、本システムを機能させず、1.0 m/min の一定速度で引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²⁾の深さ方向の分布を比較した。

(3) 試験施工結果

図—10 に Type-1 の経過時間ごとの攪拌装置の深度と昇降速度、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て施工している状況が見られる。



図—10 経過時間ごとの攪拌装置の深度と昇降速度、軸回転数、セメントスラリー流量の変化

図—11 に Type-1 の深度ごとの攪拌翼の昇降速度とセメントスラリーの瞬時流量、積算流量の変化を示した。当該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うかがえる。また、実施流量と計画流量は 2,152.1 L / 2,136.0 L (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分布しておりスラリー混入量のバラツキも少ないことが解る。

図—12 に Type-1 の深度ごとの攪拌装置の昇降速度と軸回転数、羽根切り回数の変化を貫入時と引抜時に区分して示した。GL-3.0 m ~ GL-5.5 m 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、引上げ時に昇降速度を設定の 1.0 m/min から最低 0.48 m/min まで落とすことで羽根切り回数を確保している。

図-13に深度ごとの羽根切り回数と一軸圧縮強さおよびRQD値を本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)を比較表示した。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。

一軸圧縮試験の結果、制御したType-1では $q_u = 2,442 \text{ kN/m}^2$ ・変動係数 $V_d = 21.4\%$ で、制御していないType-2の $q_u = 2,295 \text{ kN/m}^2$ ・ $V_d = 37.8\%$ に比べ、

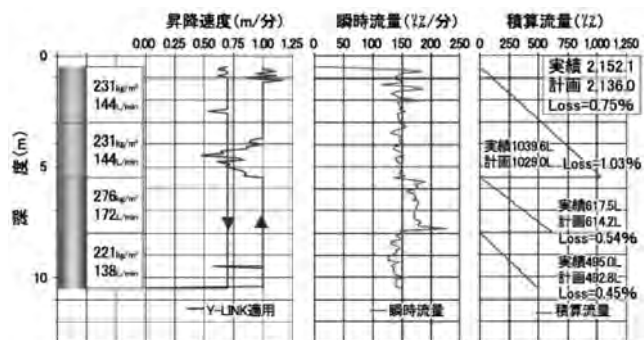


図-11 深度ごとの攪拌装置の昇降速度とセメントスラリーの瞬時流量、積算流量の変化

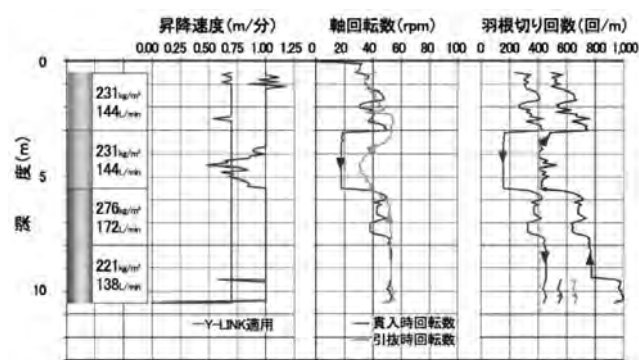


図-12 深度ごとの攪拌装置の昇降速度と軸回転数、羽根切り回数の変化

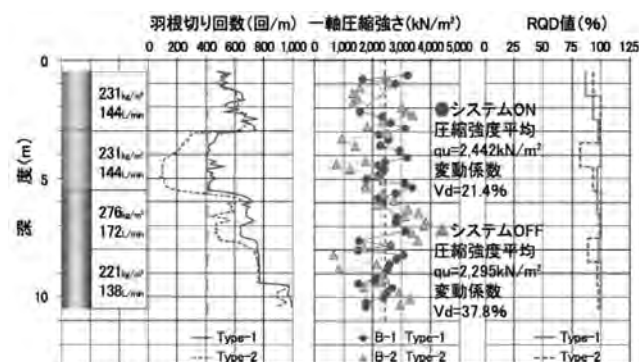


図-13 深度ごとの羽根切り回数と一軸圧縮強さおよびRQD値の比較

高強度でバラつきの少ない改良が確認された。コア観察結果からも、制御していないType-2のRQD = 80%に比べ、制御した場合の該当深度の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。

5. おわりに

今回紹介した本システム全自動施工管理制御システム(Y-LINK)は、市場へ開放しており、納入実績も増加中である。実施工からはセメントスラリーロスの低減報告が多数寄せられており、工事品質についてもクレームの報告はない。今後、施工実績を収集し、様々な地盤での制御状況を把握し、制御プログラムのバージョンアップを進めることで、より一層の高度化を進めていく必要がある。

本システムが、土木建設分野・住宅建築分野などで導入され、既存の地盤改良工法がさらに高度な工法に発展する一助になれば幸いである。

J C M A

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 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.

【筆者紹介】

奈須 徹夫 (なす てつお)
 (株)ワイビーエム
 開発本部 企画部
 企画部長



平川 真吾 (ひらかわ しんご)
 (株)ワイビーエム
 技術本部
 技術開発部 開発5グループ
 グループ長



吉田 哲雄 (よしだ てつお)
 (株)ワイビーエム
 代表取締役会長
 工学博士

