4．深層混合処理機方向制御システムの実施工への適用

㈱竹中土木：○廣渡　智晶、大西　常康
㈱竹中工務店：山本　光起

1．はじめに

軟弱地盤にスラリー状のセメント系固化材を添加し、深層混合処理機により原位置で地盤と混合撹拌する深層混合処理工法は、早期に改良効果が期待でき、低振動・低騒音であることから土木分野で数多くの施工実績を重ねている。また、兵庫県南部地震において液状化防止効果が確認されてからは、建築分野にもその適用範囲に拡がりを見せている。筆者らは一昨年、深層混合処理機の先端位置をリアルタイムに検出する軌跡管理システムと、油圧ジャッキとワイヤを用いて処理機の先端位置を自在に制御する方向制御システムの開発について報告した。本報では、これらシステムの概要とシステムを実施工に適用した結果および精度検証を行った結果について報告する。

2．開発の目的

深層混合処理工法で杭状に形成される改良体(以下、改良杭と称す）は、各々が接合（以下、ラップと称す）され連続した壁体として外力に抵抗する設計が一般的に採用されている。本工法の開発は、従来工法と較べ改良杭の鉛直精度を向上させ、ラップ幅を低減させることを目的とする。これより、施工数量および産業廃棄物発生量の削減が可能となる。

3．工法の概要

3．1　深層混合処理工法

深層混合処理工法で使われる深層混合処理機は、1本ないし2本の駆動軸を装備している。簡易式バッチャープラントで製造されたスラリー状のセメント系固化材を攪拌翼の先端から吐出しながら貫入を行い、原地盤と混合・撹拌する。深層混合処理機の全景を**写真－1**に示す。

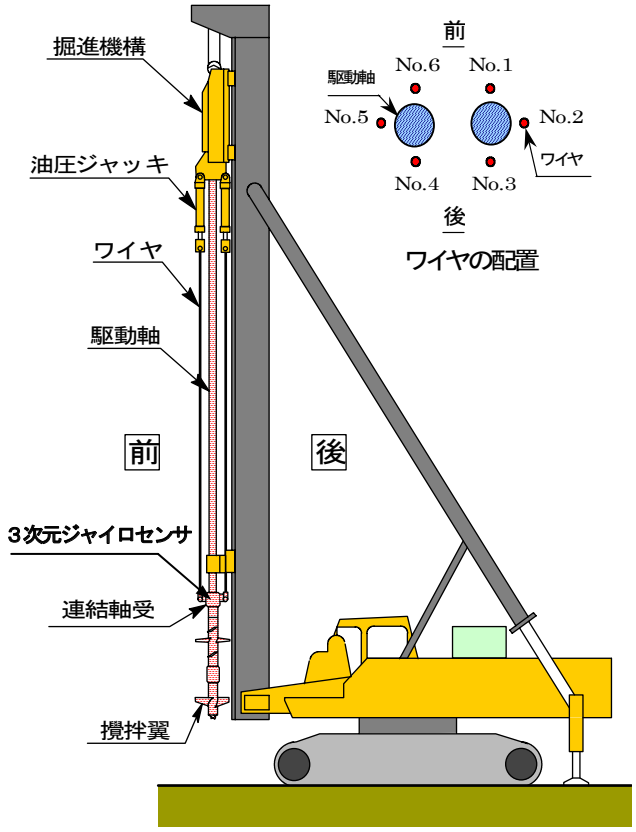
写真－1　深層混合処理機全景

3．2　施工精度の管理方法

ラップ施工による改良杭相互の一体化を確実なものとするため、従来は施工時のバラツキを考慮し、ラップ幅を200mmとして施工を行っている。また、処理機先端位置の直接的な制御方法が確立されていないため、ラップ幅や鉛直性を確保する手段として施工スピードを慎重にコントロールする等の工夫が行われている。これより、深層混合処理機を運転するオペレータには、高度な技量と多大な作業負荷が要求されるのが実情である。

４．方向制御システムの概要

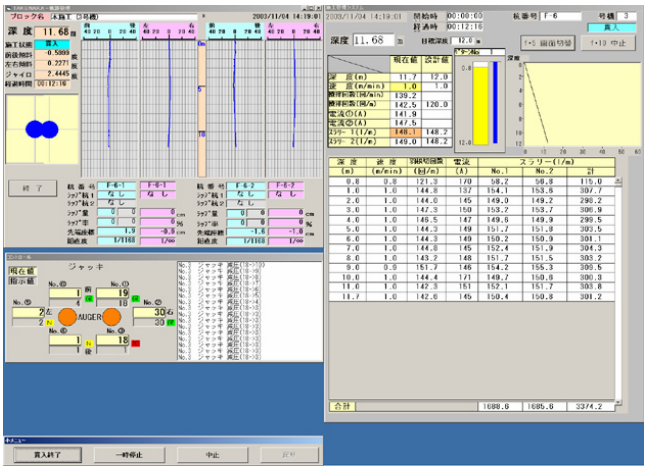
方向制御システムの全体図を**図－１**に、油圧ジャッキとワイヤの仕様を**表－１**に示す。方向制御システムは、掘進機構下端に取付けられた油圧ジャッキ、油圧ジャッキの引き力を連結軸受部に伝達するワイヤ、地中における処理機先端位置をリアルタイムに検出する３次元ジャイロセンサを納めた連結軸受および管理室内に設置する施工管理システムから構成される。方向制御は、施工管理システムのモニタ画面にリアルタイムに表示される処理機先端位置の軌跡にもとづき、油圧ジャッキを適宜操作することで行う。施工中のモニタ画面の一例を**図－２**に示す。画面左上側に先端位置の軌跡を、左下側に現在の油圧ジャッキの操作状況を、画面右側に注入量や撹拌回数などの施工管理状況を表示している。



図－１　方向制御システム全体図

表－１　油圧ジャッキとワイヤの仕様

油圧ジャッキ	前後方向	本数	前後各2本、計4本
		引き力	Max 200kN
	左右方向	本数	左右各1本、計2本
		引き力	Max 340kN
ワイヤ	前後左右	外径	φ35.6mm



図－２　施工中のモニタ画面

４．１　油圧ジャッキ

油圧ジャッキは、前後方向に各々2 本、左右方向に各１本の計６本を装備した。油圧ジャッキの引き力は、撹拌翼先端での横方向力が約 2.0kN となるよう設定した。また、駆動軸が２軸であるため、前後方向に較べ左右方向の剛性が大きくなることから、左右方向は前後方向より引き力の大きい油圧ジャッキとした。油圧ジャッキの取付け状況を**写真－２**に示す。油圧ジャッキの操作用回路は、高圧（25MPa）と低圧（7MPa）の２系統とした。これは、以前行った制御手法確認実験において、油圧ジャッキを操作して引き力を与えたところ、操作した油圧ジャッキとは反対側のジャッキにワイヤを介して引き力が生じ、制御の抵抗となる現象が確認されたためである。これより今回使用する深層混合処理機では、制御に使用しない油圧ジャッキに、常時低圧の引き力を発生させ、ワイヤを介し生じた引き力が 7MPa を上回ると、ロッドが引き力に追従して伸びる構造とした。

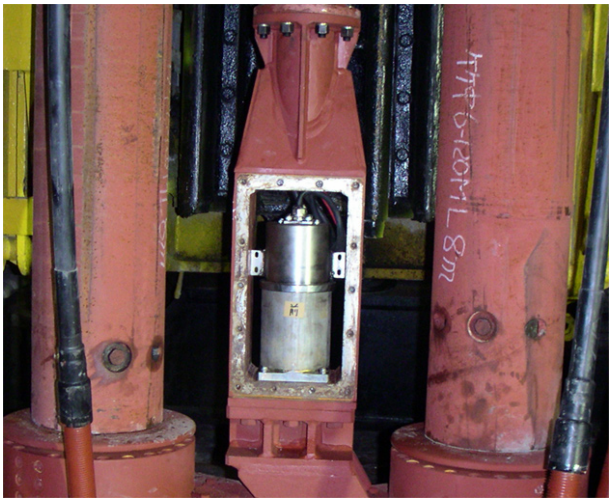
写真－２　油圧ジャッキ

４．２　ワイヤ

油圧ジャッキの引き力を連結軸受に伝達するワイヤは、引張り荷重による伸びが生じない PC 鋼より線を採用した。また、腐食対策として、ワイヤの外周はポリエチレンで被覆されたものとし、太さは最大引張り力を考慮してφ35.6mm とした。

４．３　軌跡管理システム

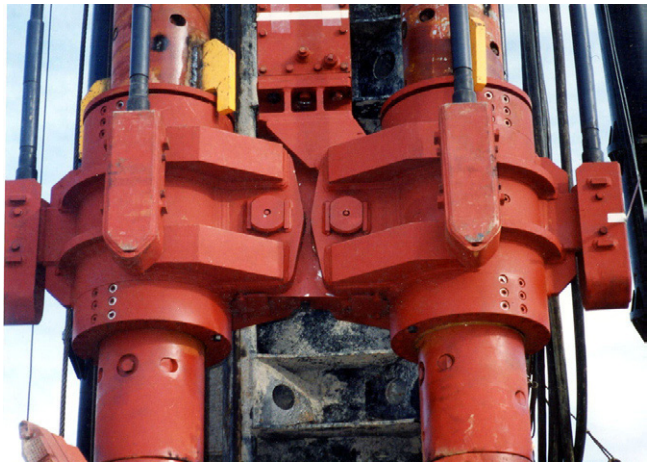
軌跡管理システムは、連結軸受直上の保護ケース内に設置された３次元ジャイロセンサと管理室内に設置された管理システムより構成される。３次元ジャイロセンサは、光ファイバージャイロ１基および傾斜計２基で構成されており、施工時の天頂軸方向の回転角（ヨウ角）と水平２軸の傾斜角（ロール角、ピッチ角）を検出し、そのデータをもとに貫入中の処理機先端位置の座標をリアルタイムに演算する。連結軸受の直上の保護ケース内に設置した３次元ジャイロセンサを**写真－３**に示す。



写真－３　３次元ジャイロセンサ

４．４　連結軸受

２本の駆動軸は、軸間距離を規定値に保つため軸間に連結軸受を設けている。連結軸受は、ワイヤの定着部も兼ねており、貫入に伴い土中に入るためベアリング支持構造になっている。掘削軸の剛性は前後方向に較べ左右方向が高くなるが、構造上左右方向には油圧ジャッキが１本しか装備できないことから、油圧ジャッキの能力を大きく設定するだけでなく、リンク機構を設けて剛性を下げる工夫を取った。**写真－４**に連結軸受部のリンク機構を示す。



写真－４　リンク機構

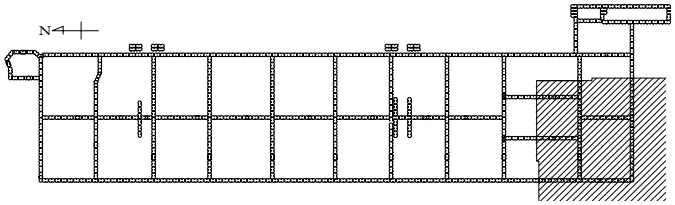
４．５　自動制御

方向制御システムの操作は、処理機オペレータもしくは施工管理者が行うことを想定している。しかし、オペレータや施工管理者が操作する場合、方向制御に対する熟練度が必要となることや、施工中の処理機やプラントの運転、施工管理と並行作業となることより作業が煩雑化し、人的ミスによる問題の発生も考えられた。そこで、実施工に適用するに当たり、改良杭のラップ状況などの施工条件と施工中の処理機先端位置の変位に応じて、油圧ジャッキを自動的に制御する機能を試験的に採用し、その適用性の検証を計画した。また、各深度における熟練者の油圧ジャッキ操作を自動的に記録し、各深度に応じて再現させる機能も追加した。

５．実施工への適用結果

５．１　工事概要

実施工への適用は、平成 15 年 10 月に自社ビル新築工事の基礎部地盤改良工事で実施した。基礎工事には、「TOFT 併用パイルド・ラフト基礎」という複合基礎工法が採用され、方向制御システムは、同工法を構成する「TOFT 工法（耐液状化格子状深層混合処理工法）」で適用した。対象工事の杭配置を**図－３**に、施工条件を**表－２**に示す。施工位置は工事区域の南西部（網掛部）で、施工総本数は 73 本である。



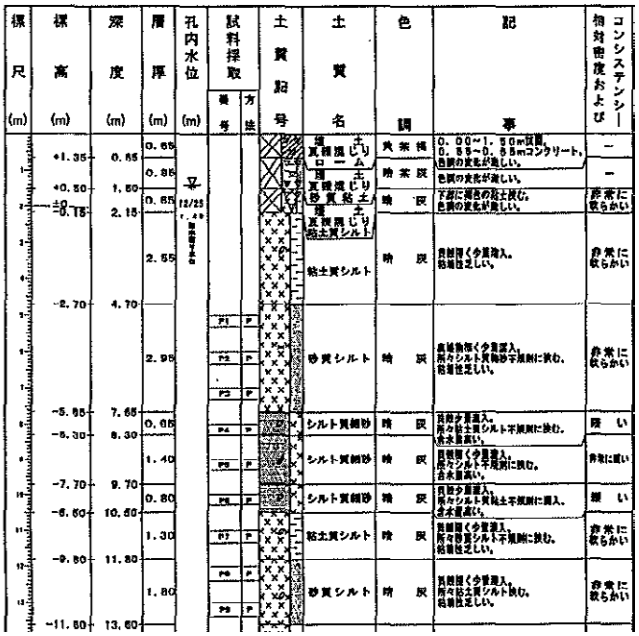
図－３　杭配置図

表－２　施工条件

改 良 長	L=11.2m
設計基準強度	1,800kN/m^2
セメントの種類	高炉セメントB種
セメント添加量	175kg/m^3
水セメント比	80%

施工場所の土質は、表層に瓦礫混じりの埋土、GL-9m 付近までは含水比の高いシルト質細砂、それ以深は粘着性に乏しい粘土質シルトと砂質シルトの互層である。**図－４**に工事区域の土質柱状図を示す。

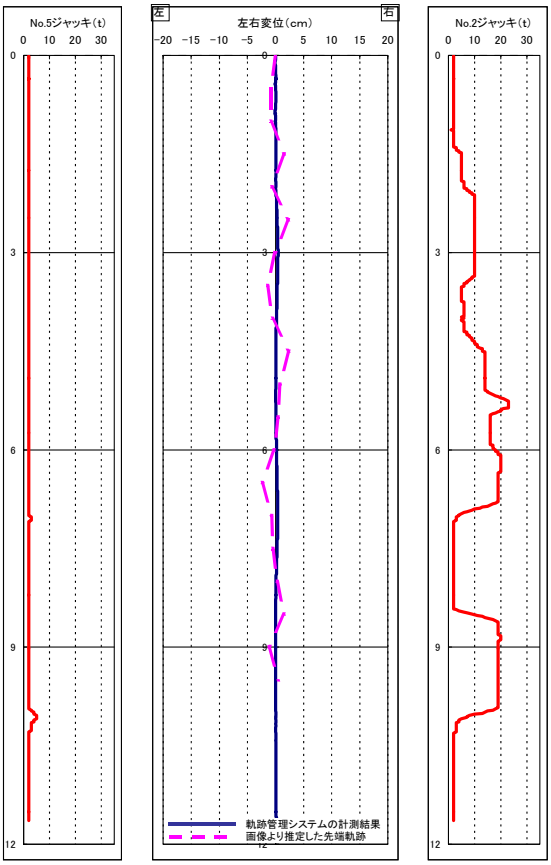
改良杭の１本に対し、施工完了後に大口径ボーリングを実施するため、セメントに着色材（ベンガラ）を混ぜて施工した。



図－４　土質柱状図

５．２　方向制御

油圧ジャッキの操作は、管理室から軌跡管理システムのデータを参照しながら、適宜施工管理者が行った。油圧ジャッキの操作は貫入時のみ行い、目標深度に到達した段階ですべての油圧ジャッキは中立（低圧側）に切替えた。左右方向（ラップ方向）における、油圧ジャッキの操作状況と軌跡管理システムの計測結果の一例を**図－５**（青色実線）に示す。図より、軌跡が左方向へ変位するのを抑えるため、右ジャッキ（No.2）を操作した結果、処理機先端位置がほぼ鉛直に制御されたことが判る。また、油圧ジャッキの最大引き力は 230kN であった。これより、本方向制御システムにより処理機先端位置を自在に操れることが確認できた。



図－５　計測結果と推定した先端軌跡

５．３　鉛直精度

表－３は処理機先端位置の各深度における変位量の平均値と着底深度の平均値を施工日別に示す。

表－３　改良杭深度別変位量

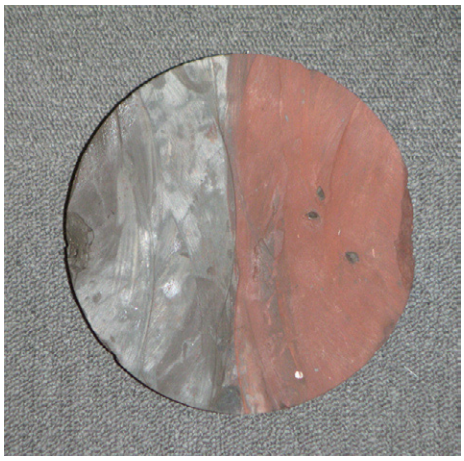
施工日	深度別変位量(cm)				着底深度
	3m	6m	9m	着底	(m)
10月27日	0.59	0.78	2.56	4.40	11.6
10月28日	0.40	0.76	0.91	1.88	11.6
10月29日	0.53	0.91	1.99	3.12	11.7
10月30日	0.96	0.94	1.59	1.72	11.7
10月31日	0.72	0.84	1.78	2.45	11.6
11 月 1 日	0.86	0.80	1.38	1.94	11.6
11 月 4 日	0.70	1.21	2.74	3.68	11.6

この表より、初日は方向制御に不慣れなこともあり、着底時の変位量が大きくなっていることが分かる。しかし、２日目以降は方向制御にも慣れ、変位量が小さくなっている。また、深度が深くなるに従い、変位量は多少大きくなるが、従来の深層混合処理工法と比較すると小さい値である。最終日に着底時の変位量が多少大きな値を示しているが、これは試験的に行った自動制御の結果を含むことに影響を受けている。

また、施工完了後、鉛直精度確認のため着色材を添加した改良杭のラップ部に大口径ボーリングを行った。大口径ボーリングには、外径 220mm のサンプラを使用した。ボーリング孔では、鉛直精度を検証するため孔曲がり測定器による鉛直変位の計測およびボアホールカメラを用いた孔壁撮影を行った。ボアホールカメラの画像より推定した先端軌跡を**図－５**（赤色破線）に示す。軌跡管理システムの計測結果と画像より推定した先端軌跡を比較すると、両者はほぼ±3cm 以内で一致しており、大口径ボーリングの結果からも改良杭の鉛直精度を確認することができた。

５．４　施工品質

採取したボーリングコアを用いて、改良杭の一軸圧縮強度を確認した。一軸圧縮強度の平均値は、3,000kN/m² と設計基準強度を上回ったことから、方向制御を行う装置類（ワイヤ、連結軸受、信号線保護管）は、改良杭の施工品質に悪い影響を与えないと考えられる。GL-10m 付近のコアを**写真－５**に示す。向かって右側が着色材により赤色を呈した杭、左側が通常の地盤改良杭である。



写真－５　GL-10m のボーリングコア

５．５ 施工効率

施工対象杭 73 本のうち、連続的に施工したのは 72 本、施工期間は計 7 日間であった（1 本は載荷試験用に離れた位置に施工）。1 日当たりの施工本数は最大で 13 本/日、施工日当りの平均で 10.3 本/日であった。施工日別の施工本数と通常施工を行った 1、2 号機の平均施工本数を**表－４**に示す。

表－４　施工日当りの施工本数

施工日	施工本数	1、2号機平均
10月27日	8本	14本
10月28日	11本	13本
10月29日	11本	14本
10月30日	9本	13本
10月31日	13本	13本
11月1日	12本	14本
11月4日	8本	14本
小計	72本	－

改良杭１本当たりの施工時間は、最長で 35 分/ 本、最短で 28 分/本、平均で約 29 分/本であった。標準施工時間が 28 分/本（貫入・引抜き 1.0m/分、先端処理 0.5m/分）であることから、方向制御を行っても従来工法と殆ど施工効率に差違の無いことが確認できた。また、貫入時の油圧ジャッキの操作が、処理機の運転・操作に影響していないことをオペレータより確認した。

５．６　自動制御

施工中、自動制御手法の検証を行った。検証の結果、改良杭のラップ条件と先端変位に応じて油圧ジャッキを自動制御した場合、左右ラップの条件では、強度が発現していない杭側に大きく変位する傾向が見られた。これは、修正指示のタイミングに問題があると考えられたため、タイミングについて再検討を行っている。また、３次元ジャイロセンサの方位角を判断基準に加えることも検討している。

６．まとめ

今回行った実施工への適用の結果、開発した本システムは、改良深度に関わらず処理機の先端位置を少なくとも 5cm 以内で制御できることが実証できた。今回は改良長が比較的短いケースではあったが、改良長は長くなっても本システムの対応は可能であると考えられる。しかし、現状での適用可能深度は、継杭施工に未対応であることから最大 GL-25m 程度と考えている。

本システムの適用により、鉛直精度の向上、ラップ幅の低減が可能となり、施工数量および産業廃棄物の削減が可能となりコスト低減が期待できる。一方、方向制御の効果は、地盤条件や施工条件に影響を受けると考えられることから、今後、実施工データの蓄積と制御の自動化を進め、作業の省人化、施工品質の安定化を図って行きたい。また、今後は汚染土壌の封じ込め対策や止水性の高い土留め壁など、新しい分野への適用も視野に入れていきたい。

最後に、本システムの開発にご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 藤井、大西 他：深層混合処理機の施工精度制御装置の開発、第 9 回建設ロボットシンポジウム論文集、2002
2) 藤井、山本 他：深層混合処理機の建入れ精度制御システムの開発（その 1、2)、日本建築学会、学術講演会梗概集、2002
3) 大西、廣渡 他：深層混合処理工法の方向制御システムの開発（その 1、2)、土木学会、第 59 回学術講演会梗概集、2002
4) 太田、大西　他：深層混合処理機の施工精度管理システムの開発、日本建設機械化協会、建設機械と施工法シンポジウム、2002
5) 大西、山本　他：深層混合処理機の施工精度制御装置の実用化 第 11 回建設ロボットシンポジウム論文集、2004