

# 30. 深層混合処理機の施工精度 管理システムの開発

株竹中土木：\*太田 恵智、森田 英仁、

株竹中工務店：山本 光起

Development of direction control system for Deep Cement Mixing Machine

\* Yoshitomo Ohta Hideyoshi Morita Mitsuoki Yamamoto

軟弱地盤にスラリー状の固化材を添加し、深層混合処理機によって原位置で地盤と混合攪拌する深層混合処理工法は、従来工法と比較して早期の改良効果が発揮できるとともに、低騒音・低振動工法であることから多くの土木・建築分野で施工実績を積み重ねている。

本報では、従来システムに処理機の先端位置をリアルタイムに演算する軌跡管理システムと、施工時に処理機先端位置を能動的に制御できる機構を付加することにより、処理機の先端位置を方向制御できるシステムの開発事例を報告する。また、本システムの制御効果は、先端軌跡管理システム、実験後の改良杭への大口径ボーリング調査、孔曲がり測定器による測定およびボアホールカメラによるボーリング孔の撮影にて検証した。このシステムを用いれば、建て入れ精度の確保が容易になるばかりではなく、施工品質の向上によるコストダウンも期待することができる。

キーワード：地盤改良、深層混合処理機、方向制御、施工精度、施工品質、施工実験

## 1. はじめに

軟弱な地盤に、スラリー状のセメント系固化材を原位置で混合・攪拌する深層混合処理工法（DCM-L工法）は、早期に改良効果が期待できる、低振動・低騒音工法であることから多くの施工実績がある。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が拡がっている。

本報では、油圧ジャッキとワイヤを用いて処理機の先端位置を能動的に制御し、従来より鉛直精度の向上を可能としたシステムの概要と施工実験および検証結果について述べる。

## 2. 工法の概要

### 2.1 深層混合処理工法

一般的に深層混合処理機は、1または2本の掘削軸を有しており、簡易式バッチャープラントで製造

したスラリー状のセメント系固化材を掘削軸の先端から吐出しながら貫入を行い、攪拌翼で原地盤とセメント系固化材を混合・攪拌する。一方、施工される改良杭は、各々が接合（以下、ラップと称す）した連続した壁体として外力に抵抗する設計が採用されるのが一般的であり、そのため改良体のラップは、鉛直精度とともに重要な管理項目である。

### 2.2 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に、通常は施工時のバラツキを考慮してラップ巾を200mmとして処理機を位置決めして施工を行っている。しかしながら、従来は処理機先端位置の直接的な制御手段が確立されていないため、ラップ量や鉛直性を確保するために施工スピードを慎重にコントロールする等の工夫が必要とされ、処理機を運転・操作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ていた。

### 3. 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。方向制御は、攪拌翼上部に取り付けたワイヤに油圧ジャッキで引き力を与えることで行う。先端位置は、軌跡管理システムにてリアルタイムで検出されており、この計測結果にもとづき油圧ジャッキを適宜操作する。

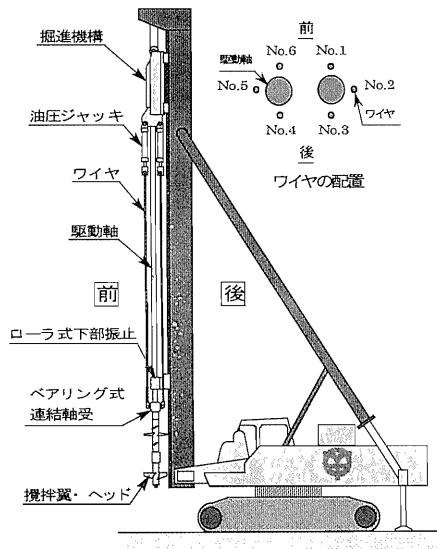


図-1 方向制御システム

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
PC鋼より線	前後左右	外径	Φ 35.6mm

#### 3.1 油圧ジャッキ

油圧ジャッキは、処理機の下端に前後方向に各々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、攪拌翼先端での横方向力が約2.0kNになるよう設定した。また、駆動軸が2軸であるため、前後方向に比べて左右方向の剛性が大きくなる。よって、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-1に示す。油圧ジャッキの操作用油圧回路は、高圧(25MPa)と低圧(7MPa)の2系統

とした。これは、事前の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場合、操作した反対側の油圧ジャッキにワイヤを介して引き力が生じ、結果として制御の抵抗となる現象が確認されたためである。実機においては、制御に使用しない油圧ジャッキは、低圧側で常に加圧されておりワイヤを介して生じる引き力に対しては、ロッドが自動的に伸びて引き力を打ち消す。

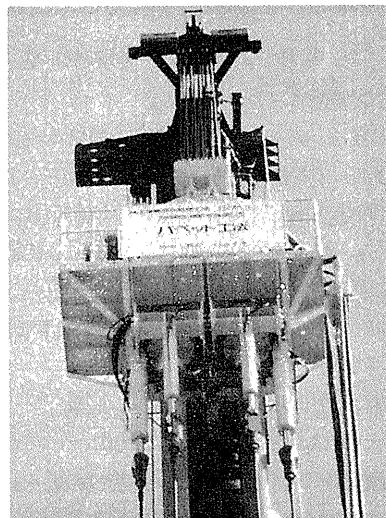


写真-1 油圧ジャッキとワイヤ

#### 3.2 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ことからPC鋼より線を採用した。ワイヤの太さは、最大引張り力を考慮してΦ35.6mmとした。また、腐食対策として、ワイヤの外周がポリエチレンで被覆されたものを採用した。

#### 3.3 軌跡管理システム

軌跡管理システムは、攪拌翼直上の保護ケース内に設置する3次元ジャイロセンサと施工管理用パソコンで構成される。保護ケース内に設置した3次元ジャイロセンサを写真-2に示す。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攪拌翼の先端位置座標をリアルタイムで演算する。

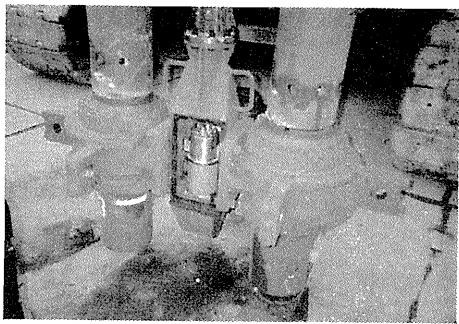


写真-2 3次元ジャイロセンサ

### 3.4 リンク機構

処理機は、2本の掘削軸の軸間距離を規定値に保つために、2軸間を連結部材で固定している。このため、前後方向に比較して左右方向の剛性が高くなる。一方、左右方向には油圧ジャッキが構造上1本しか装備できないことから、油圧ジャッキを大きくする他に、左右方向の剛性を下げる対策を施した。

- ① 連結軸受の軸間部は、固定されていたために左右方向の剛性が高くなる要因となっている。よって、軸間部をリンク機構とし左右方向の剛性を下げた。リンク機構を写真-3に示す。
- ② 方向制御の変位は、軸継手があそび分だけされることから生じる。よって、変位を起こしやすくするために、短い駆動軸( $L=1m$ )を接続し継手を増やした。

装置の設計にあたっては、油圧ジャッキ操作時の処理機変形が、軸受や軸継手の許容変形範囲内に収まるように設定した。

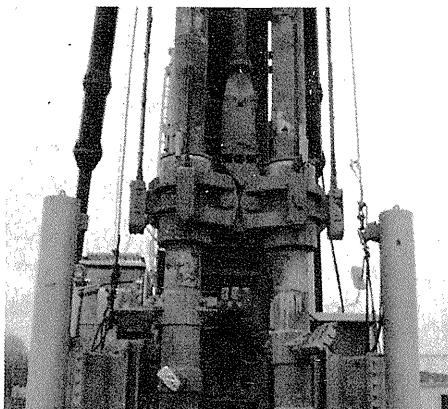


写真-3 リンク機構を組み込んだ連結軸受

## 4. 実証実験

### 4.1 実験概要

実証実験は、2001年12月、千葉県内で実施した。実験場所の土質は、GL-7mまでがN値1~3の粘土、それ以深はN値10~15の細砂層である。土質より、改良目標深度は、N値50のGL-19mとした。また、実験後に実際の改良杭出来型形状を確認するために、大口径ボーリングを行なうこととした。ボーリング調査を行なう実験杭は、ラップ形状を明確にするために固化材に着色材(ベンガラ)を混ぜて赤く着色した。実験場所の土質柱状図を図-2に、実験時の杭配置を図-3に示す。

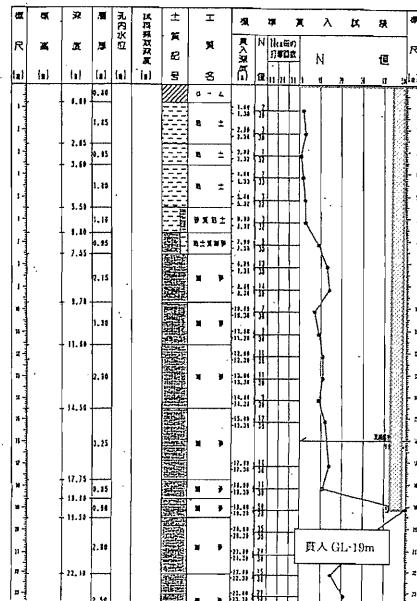


図-2 土質柱状図

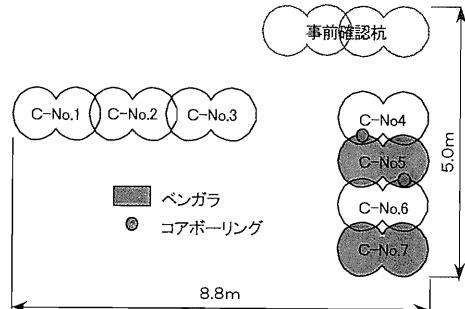


図-3 実験時の杭配置

## 4.2 実験方法

実証実験は、貫入速度や傾斜などを全く制御せずに先端軌跡の変位を放置した「無制御」、処理機先端軌跡が鉛直を維持するようにした「鉛直制御」に加え、制御効果を顕在化するために、貫入途中で制御方向を反転させて、先端軌跡が“くの字”を描くように制御した「くの字制御」を実施した。

## 4.3 「無制御」での軌跡

制御操作を加えなかった「無制御」の結果を図-4に示す。ラップせずに原地盤に貫入させたが、前後左右とも深度とともに変位が増大している。実際の工事では、変位が発生すると貫入速度を抑えたり、一度引き抜いて再貫入などの修正を行なうので、実験のように先端変位が増加するまま施工を続けることはないが、放置しておくと先端変位は深度とともに増大する傾向があることが判る。

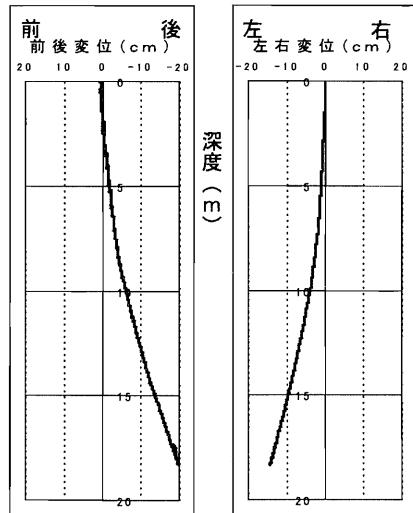


図-4 「無制御」での先端軌跡

## 4.4 「鉛直制御」での軌跡

先端軌跡が鉛直を維持するように制御した「鉛直制御」の結果を図-5に示す。ラップ条件は、当日施工の改良杭と右側をラップさせた。図より、前後方向の軌跡は、GL-6m付近で後方向に変位したが、油圧ジャッキの操作により位置を修正されて鉛直を維持していることが判る。左右方向においても、GL-10m付近では、左に3cm程度変位しているが、軌跡は修正されており制御効果を確認できた。

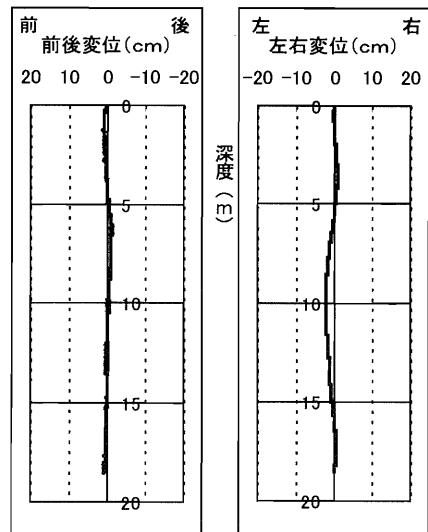


図-5 「鉛直制御」での先端軌跡

## 4.5 「くの字制御」での軌跡

貫入中に制御方向を反転させ、先端軌跡が“くの字”を描くように制御した「くの字制御」の結果を図-6に示す。ラップ条件は、前日施工した改良杭と前側をラップさせた。前方向に変位していた軌跡に対して、GL-3m～5mの間で後ジャッキを操作して後方向に変位させた後、GL-6m～13m間では前ジャッキを操作して、先端軌跡を前方向に8cmまで変位させている。GL-14mからは、再度後ジャッキを操作して変位を修正し、最終深度のGL-19mでは、変位がほぼゼロに修正されていることが判る。

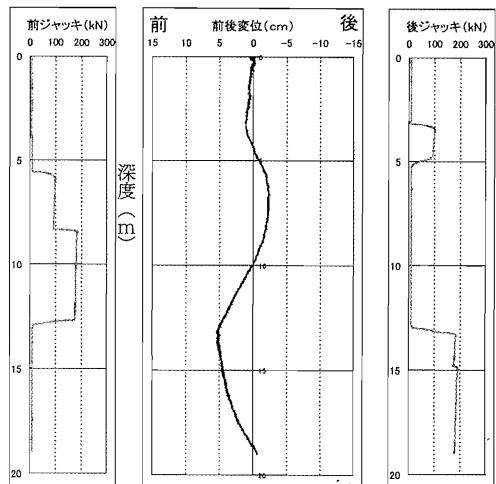


図-6 「くの字制御」での先端軌跡

## 5. 実験後の調査

### 5.1 調査項目

実験終了後、方向制御の状況を確認するため、大口径ボーリング（図-3参照）を行なった。ボーリングは、「くの字制御」の制御状況を確認するために C-No.4 桁と C-No.5 桁のラップ部および「鉛直制御」の制御状況を確認するために C-No.5 桁と C-No.6 桁のラップ部の 2 カ所を行った。ボーリングには、外径 220mm（内径 195mm）のサンプルを使用した。ボーリング終了後、ボーリング自体の鉛直性を確認するために、傾斜計と方位角センサを装備した孔曲がり測定器を用いてボーリング孔の傾斜を測定した。また、ボーリング孔の内壁を観察するために、ボアホールカメラにて孔壁の撮影を行った。ボーリング状況を写真-4に示す。

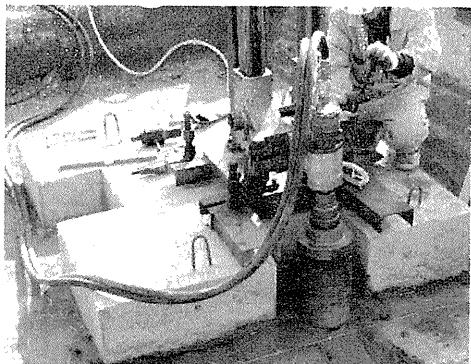


写真-4 大口径ボーリング

### 5.2 孔曲がり測定結果との比較

「くの字制御」を行なった実験杭における、実験時の先端軌跡とボーリング孔の孔曲がり測定結果を図-7に示す。図中の実線は、実験時の先端軌跡である。破線は、孔曲がり測定器で求めたボーリング孔自体の変位である。図より、採取されたコアサンプルは、地上部ではほぼ中央に色の境界があるが、GL-11m 付近まで赤く着色された部分が増加傾向になっており、その後は全体が赤色になっていると想定される。

実際に採取されたコアサンプルを、写真-5～7 に示す。写真-5は、GL-5m 付近のコアで、着色した部分は改良体のほぼ半分であることが判る。写真-6は GL-6.5m～8.5m のコアである。写真-5と

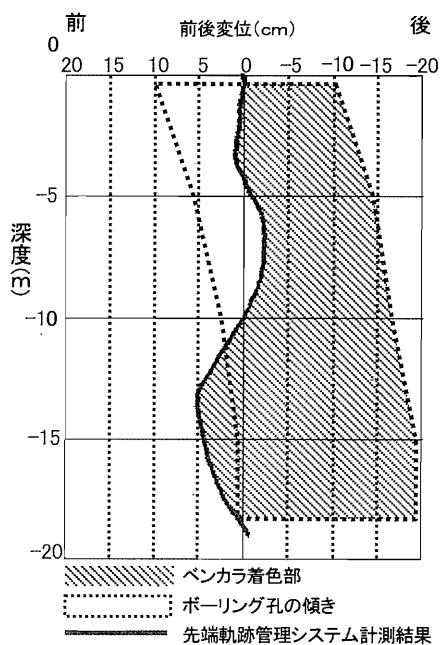


図-7 先端軌跡とボーリング孔の位置関係

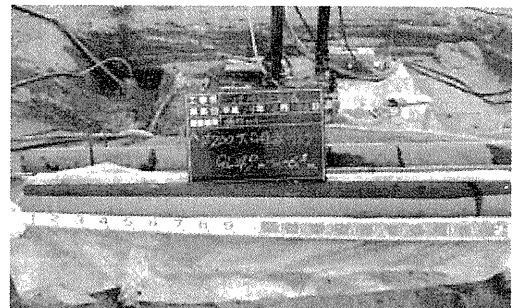


写真-5 GL-5m 付近のコアサンプル



写真-6 GL-6.5m～8.5m 付近のコアサンプル

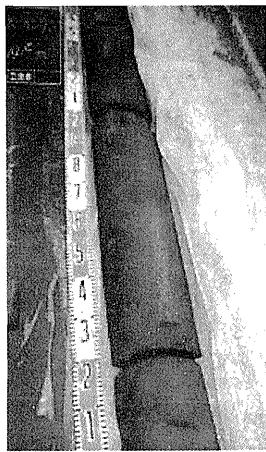


写真-7 GL-11m～14m付近のコアサンプル

比較して着色した部分が増加しており、GL-8.5m付近では無着色部分が非常に小さくなっている。写真-7は、GL-11m～14mのコアで、サンプル全体が着色されている。以上のことから、軌跡管理システムと孔曲がり測定器による測定結果は、実際に採取されたコアサンプルとよく一致しており、軌跡管理システムは攪拌翼先端の動きを正確に検出しているとともに、本手法による方向制御が有効であることが裏付けられた。

### 5.3 ボアホールカメラでの撮影結果との比較

次に、ボアホールカメラにて撮影した画像から計算した軌跡と、軌跡管理システムの演算結果の比較を行った。攪拌翼の中心位置は、図-8に示すようにボーリング孔を直径220mmの円と仮定し、ボーリング孔の展開図から着色部と無着色領域の境界点1と2を取り、その中心から鉛直方向に500mmの位置に孔曲り測定の変位量を加味して求めた。

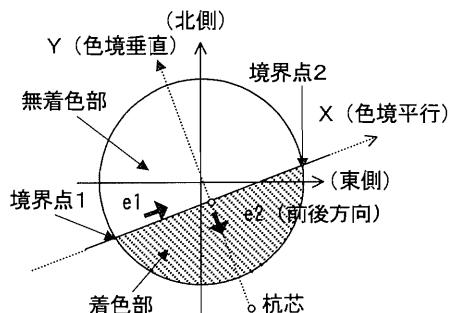


図-8 攪拌翼中心位置の計算方法

先端軌跡の比較したグラフを図-9に示す。図より、両データに良好な近似が見られることから、方向制御は有効であることが裏付けられた。

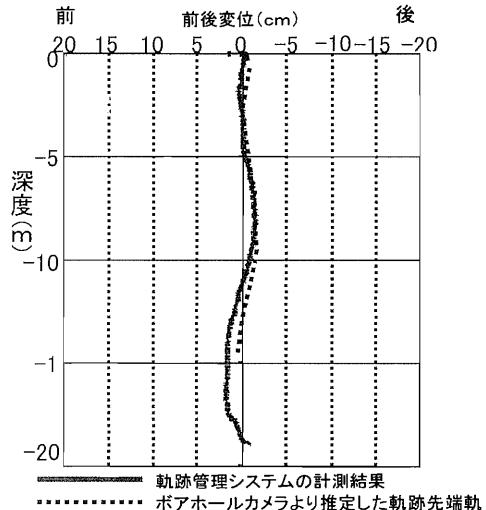


図-9 先端軌跡の比較

## 6. まとめ

本システムの開発により、深層混合処理工法における先端軌跡の制御手法を確立することができた。制御効果としては、施工深度にかかわらずに処理機先端変位を3～5cmの範囲であると考えている。今後、この制御システムにより、建入れ精度の確保が容易・確実になるばかりでなく、オペレータの作業負荷軽減、施工能率向上等の付随的な効果も期待できる。また、制御効果は地盤条件やラップ条件により影響を受けると考えられるので、今後、実施工データを蓄積して制御方法の確立したい。制御方法が確立し、ラップ幅のバラツキが低減されれば、ラップ量を低減することができ、コスト低減と産業廃棄物の抑制が期待できる。

システムの運用については、処理機またはスラリープラントのオペレータが制御操作を行なうことが可能と考えられるが、将来的には、制御装置の自動化を図り、作業の省人化、施工品質の安定を図っていきたいと考えている。

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。