

複合噴射攪拌式深層混合処理工法の出来形確認ならびに 環境負荷低減に関する検証

三信建設工業株式会社
三信建設工業株式会社
三信建設工業株式会社
株式会社エヌ、アイ、テイ

○山口 洋
島野 嵐
熊田 大地
中西 康晴

1. はじめに

スラリー攪拌工法に代表されるセメント系固化材を用いた深層混合処理工法は、我が国で開発された代表的な軟弱地盤対策工法であり、多くの実績を有している。近年の建設市場における工期短縮や工費削減といったニーズの増加に伴い、改良径の大口径化が求められている。これを実現するためには、ベースマシンやスラリープラントの大型化、セメントスラリーの注入時間や攪拌時間の増加などが課題となっている。筆者らはこれらを鑑み小型地盤改良機に高圧噴射攪拌工法の技術を応用し、大口径・高速施工による施工効率の向上を可能とした複合噴射式大口径深層混合処理技術のHCM工法（Hybrid Control Mixing Method）を開発した。本稿では実大実験での改良体の出来形確認結果を述べると共に、地盤改良体造成に伴うCO₂排出量を従来工法と比較し、大口径化ならびに高速施工による排出量低減効果を示す。

2. 工法概要¹⁾

本工法は、写真-1に示す25tクラスの小型地盤改良機にて、固化材スラリーを高圧噴射できる特殊ノズルと攪拌翼を組み合わせた写真-2に示す攪拌装置を用いて噴射攪拌を行うことで、φ2,000mmクラスの大口径改良体を造成可能な深層混合処理工法である。また、本工法はこの攪拌装置を用いることで、図-1に示す2タイプ（M1、M2）を選択できる。M1タイプは、2段の攪拌翼（上段φ1,600mm、下段φ1,200mm）を有し、下段翼下部に位置した噴射ノズルから下段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。さらに下段翼外周から上段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。M2タイプは、2段の攪拌翼（上段φ1,600mm、下段φ1,200mm）を有し、下段翼下部に位置した噴射ノズルから下段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。さらに下段翼外周から上段翼外周部に向けて固化材スラリーを噴射する。上段翼

の外周部には外側に噴射できるノズルを装備して、最大2,400mmでより大きな改良体の造成ができる（拡張施工）。各タイプの改良体出来形を写真-3に示す。

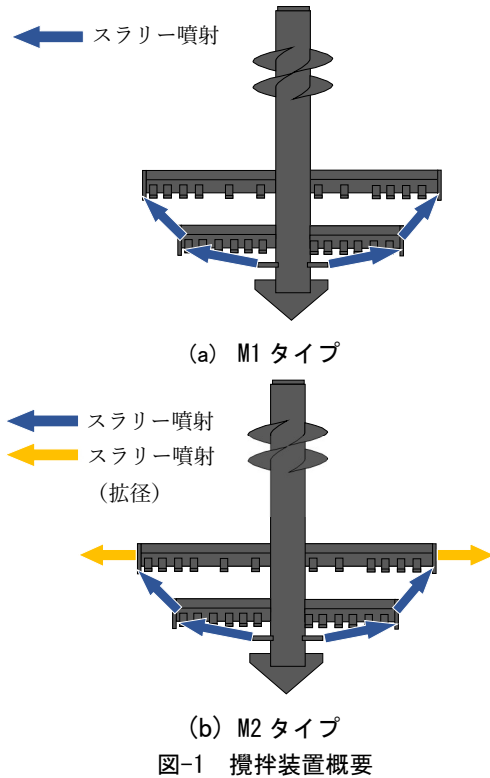
次に本工法の施工時の周辺環境への影響を、孔内傾斜計および地表面の動態観測により測定した結果を図-2に示す。測定位置は図-2(a)に示す通りで孔内傾斜計の下端は硬質粘性土に固定し不動点とした。地中変位は図-2(b)に示す通り、M1・M2タイプともに改良体の外周から1.0m離れた位置で最大4mmであった。図-2(c)に示す地表面変位についてはM1タイプは改良体外周部から2.0m離れた位置で3mm、M2タイプは変位は見られなかった。これは攪拌装置上部に装備した排土を促すパイラルスクリー、さらには固化材スラリーの高圧噴射により土の細粒化・土の泥濁化などにより、盛上り土がスムーズに排出されたことによるものであり、地中や地表面の変位が少ない低変位工法であることが確認されている。



写真-1 施工機全景



写真-2 攪拌装置全景



(a) M1 タイプ



(b) M2 タイプ

写真-3 改良体出来形

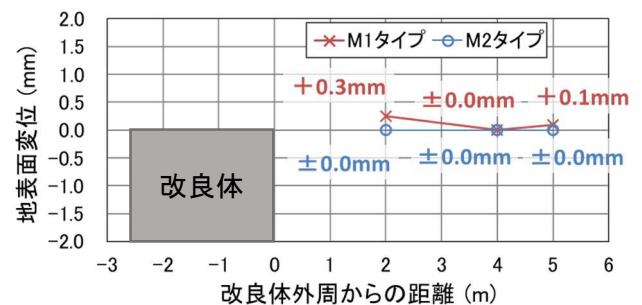
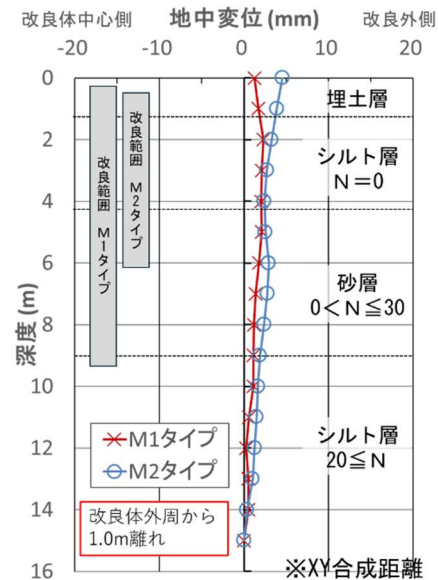
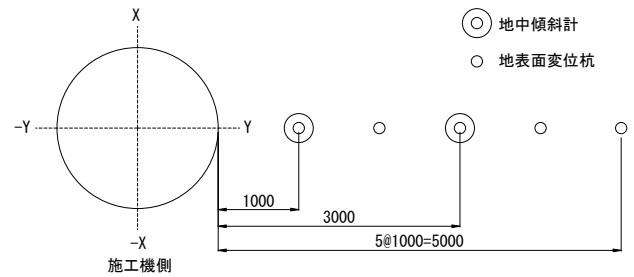


図-2 地中・地表面変位 測定結果

3. 実大実験による出来形確認²⁾

3.1 実大実験概要

実大実験では、実験土槽内に人工的に作製した地盤にて、改良体の造成を行い、養生後に改良体を掘り出し、改良体出来形・品質を確認した。出来形確認では、3D スキャナーを用いて改良体の点群データを取得し、改良径を計測した。品質確認では、改良体の断面に対して針貫入試験を実施し、換算一軸圧縮強さを計測した。本実験で用いた実験土槽の寸法は、平面 6 m×8 m、深さ 4.5 m である。作製した人工地盤の土質は火山灰質粘性土であり湿潤密度 1.43 g/cm³、含水比 33%、SWS 試験結果からの換算 N 値は 2<N≤4 であった。施工仕様は表-1 に示す通り本工法の標準仕様¹⁾と固化材添加量より、貫入時間を 1.7 分/m とし、引上時間は概

ね下限値である 2.1 分/m と上限値の 3.0 分/m を採用し、上下 1 m で施工仕様を変更とした。

表-1 実大実験 施工仕様

施工タイプ		M2 タイプ
改良径	外径	φ 2,400 mm
	内径	φ 1,600 mm
攪拌翼径		φ 1,600 mm
改良長		2,000 mm
改良材噴射圧力		35 MPa
改良材吐出量		320 L/分
水セメント比		80%
貫入時間		1.72 分/m (0.58 m/分)
引上時間	上部	3.03 分/m (0.33 m/分)
	下部	2.13 分/m (0.47 m/分)
回転数 (貫入)		25 rpm
回転数 (引拔)	上部	35 rpm
	下部	25 rpm

3.2 実験結果

改良体の出来形確認では、掘削により改良体を露出させ、3D スキャナーにより改良体をスキャンし、点群データを取得した。掘削後の改良体を写真-4、改良体の点群データを図-3 に示す。取得データは点群処理ソフトを用い、深度方向に 10 cm 間隔の断面を作成した。各深度の改良径は、等角度で 8 分割した箇所を中心から外周までの距離を計測し、その最小値を半径とした。各深度の改良径の計測結果から描いた改良体概形を図-4 に示す。

計測結果より、改良径は上部 1 m の区間：φ 2,412 ~ 2,616 mm、下部 1 m の区間：φ 2,408 ~ 2,588 mm で、計画改良径 φ 2,400 mm 以上であり、引上時間の長い方が若干大きく、いずれの深度も設計径に対して、+10%以内で制御することができた。



写真-4 掘削した改良体（側面）

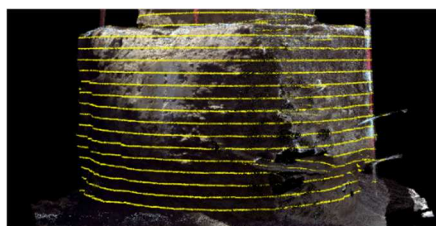


図-3 改良体の点群データ（側面）

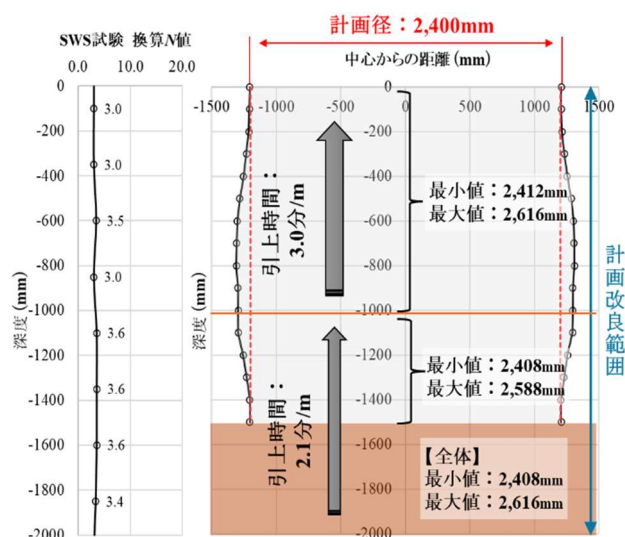


図-4 改良体概形図
(左：SWS 試験，右：改良体断面)

3.3 品質確認

改良体の品質確認では、ワイヤーソーを用いて、掘削した改良体を深度方向に垂直に切断し、改良体断面を露出させた。

この断面において、同一仕様にて施工した上部 1 m 区間の改良上端から -200 ~ -600 mm の深度にて、改良体断面を縦横 200 mm × 200 mm で 15 分割し、写真-5 に示すように軟岩ペネトロ計を用いて針貫入試験を実施し、換算一軸圧縮強さを測定した、試験結果および換算一軸圧縮強さの変動係数を表-2 に示す。また、換算一軸圧縮強さと改良体中心からの距離との関係を図-5 に示す。

換算一軸圧縮強さは 1,500 ~ 3,500 kN/m² の範囲に分布しており、内径部と拡張部の平均値は同程度であった。また、換算一軸圧縮強さの変動係数は、31.1% (内径部：33.2%，拡張部：27.8%) であり、一般的なスラリー攪拌工法の変動係数 25 ~ 35% の範囲³⁾と同等の品質を有していることを確認した。

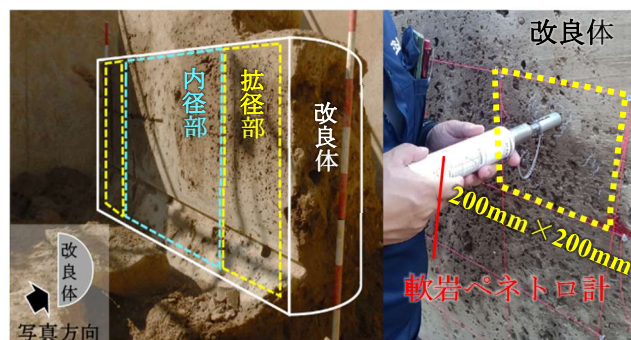


写真-5 改良体断面と針貫入試験状況

表-2 針貫入試験結果と変動係数

箇所	検体数 (個)	換算一軸圧縮強さ (kN/m ²)		変動 係数
		平均値	標準偏差	
全体	90	2,517	783	31.1%
内径部	54	2,501	830	33.2%
拡張部	36	2,542	706	27.8%

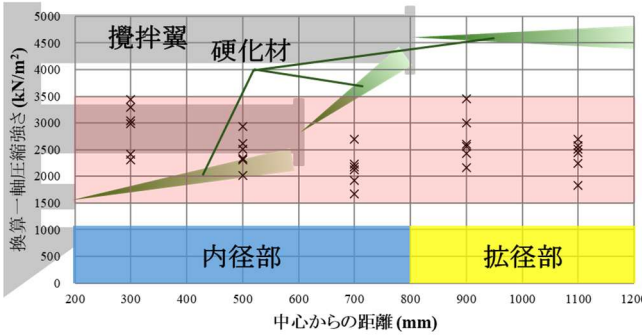


図-5 換算一軸圧縮強さと改良体中心からの距離の関係

4. 環境負荷低減に関する検証

本工法は、従来のスラリー攪拌工法と比較して低出力の小型施工機適用と大口径化・高速施工による施工プロセスの最適化により CO2 排出量を削減できる。本章では表-3 に示すように改良径の異なる従来のスラリー攪拌工法と本工法の M1、M2 タイプの 5 タイプによる改良長 15 m とした場合の改良土量 1 m³ あたりの燃料消費量を比較した。表-3 に示す通り施工機械の機関出力が同程度なので燃料消費量に大きな差はないが、表-3 および図-6 に示す通り 1 日当り施工土量が最大で 4 倍程度になることから改良土量 1 m³ 当り燃料消費量は図-7 に示す通り従来工法と比較して M1 タイプで最大で 1/3 程度、M2 タイプで最大で 1/4 程度となり環境負荷低減に寄与していることを確認した。

表-3 施工能力・燃料消費量比較表

工法種別		スラリー攪拌工法			HCM工法	
					M1	M2
改良径	(m)	1.00	1.60	2.00	1.60	2.40
機関出力	(kw)	90×1	90×1	90×2	92×1	92×1
機械質量	(t)	76.8	76.8	129	25.5	25.5
改良面積	(m ²)	0.79	2.01	3.14	2.01	4.52
施工本数 ^{1) 4)}	(N/日)	5	5	4	6.5	3.4
施工土量	(m ³ /日)	59	151	189	197	231
燃料消費量 ^{1) 4)}	(L/日)	52	52	83	51	51
	(L/m ³)	0.88	0.34	0.44	0.26	0.22

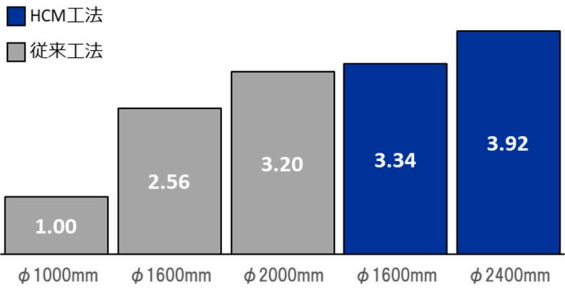


図-6 1日当り施工土量の比較

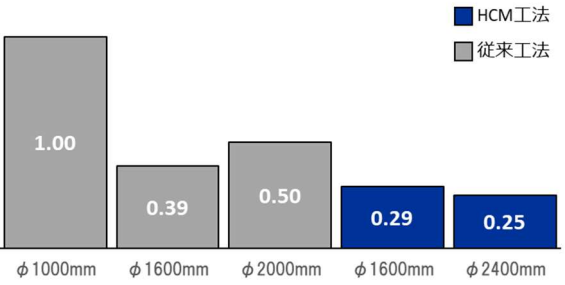


図-7 改良土量 1m³ 当り燃料消費量の比較

5. まとめ

複合噴射式大口径深層混合処理技術の HCM 工法 (Hybrid Control Mixing Method) は最大 φ2,400 mm の大口径改良体を造成可能であり、地盤変位は少なく周辺環境への影響が少ない工法である。実大実験による出来形確認ならびに環境負荷低減に関する検証を実施した結果、出来形確認では、造成した改良体は計画改良径 φ2,400 mm 以上であり、設計径に対して、+10%以内で制御できることを確認した。品質確認では、換算一軸圧縮強さは 1,500~3,500 kN/m² の範囲に分布し、内径部と拡張部の平均値は同程度であり、変動係数については一般的なスラリー攪拌工法と同等の品質を有していることを確認した。環境負荷低減に関する検証として改良土量 1 m³ 当り燃料消費量の比較を行った結果、従来工法と比較して、M1 タイプで最大で 1/3 程度、M2 タイプで最大で 1/4 程度となり環境負荷低減に寄与していることを確認した。

参考文献

- 1) 複合噴射攪拌協会：HCM工法技術・積算資料（第1版）.2024.
- 2) 熊田大地，山口洋，中西康晴：複合噴射攪拌式深層混合処理工法の施工性および改良体出来形・品質確認，第60回地盤工学研究発表会，p.23-3-1-04，2025.
- 3) 地盤工学会：地盤改良効果の予測と実際，pp.215-216，2000.
- 4) （一財）建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準，pp.48-56，2025.