

22. スラリー揺動攪拌工法の適用拡大への取り組み

—多層地盤への適用, 着底層の管理—

WILL 工法協会 ○島野 嵐
市坪 天士
蔵谷 誠二
中馬 忠司

1. はじめに

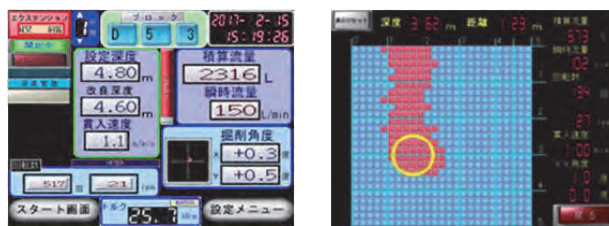
中層混合処理工法の一つであるスラリー揺動攪拌工法（WILL 工法）はスラリー状の固化材や改良材を地盤中に注入しながら、バックホウ型ベースマシンの先端に取付けたリボンスクリー型攪拌翼で、固化材と原位置土を強制的に上下左右に立体的に攪拌混合することにより安定した改良体を形成する地盤改良工法である。本工法は小型機による高い機動性、硬質地盤に適応可能な掘削性能、矩形改良体による効率的な改良体配置が可能ることから数多くの現場で採用されており深度 10 m 程度の深さを改良対象に施工が行われてきた。最近では大型機を用いる深層混合処理工法では適用が難しい「狭隘地施工」や「近接施工」といった建設市場のニーズに対し、本工法のさらなる高深度化や深層混合処理工法と同等の施工管理手法への対応が望まれている。

本稿では、深度 13m 迄適用可能な改良機の開発を行い、施工性および改良体品質の確認を行った結果を報告する。また、従来の中層混合処理機が不得手であった、異なる土層に各々適量の固化材を添加する「多層地盤への対応」や「改良下端層の着底管理」について、高性能施工管理システムを用いた適用例について述べる。

2. 工法概要（施工管理システム）¹⁾

バックホウをベースマシンとした改良機は、施工性・機動性に優れる反面、攪拌軸の鉛直性および攪拌翼移動速度（貫入・引抜速度）の定速性を確保しづらいことが短所であった。そのため従来の施工管理ではマシンのオペレータの熟練度が要求された。本工法では、これらをリアルタイムに表示される図-1(a)に示す施工管理システムを施工機運転席内に設置しており、オペレータはリアルタイムな施工管理が可能である。管理項目は、深度・

時間・攪拌機掘削角度・攪拌翼回転トルクであり、これらが画面上に表示される。また、画面の切り替えにより図-1(b)に示す攪拌翼位置（円形部）と既改良部（濃色部）・未改良部（薄色部）とに色分け表示する攪拌翼軌跡のナビゲーションシステムを表示できる。これにより、さらなる品質管理の信頼性向上を図ることを可能とした。



(a) 標準表示画面

(b) ナビゲーションシステム

図-1 WILL 管理装置画面表示例

3. 高深度対応改良機の開発²⁾

本技術はバックホウ型ベースマシンを用いることで機動性を向上させたものであるが、反面、大型三点支持式を用いたスラリー攪拌機のように長大なリーダーの装着や攪拌ロッドを継ぎ足すことにより高深度化をはかることが困難である。従来のバックホウのダンピングリーチ（アーム先端部の振り上げ時の高さ）は 1.4 m³クラスで 8~9m 程度であり、本技術にて装着可能な攪拌装置の長さも 10m 程度に限定されていた。

そこで、攪拌装置の軽量化やベースマシンの強化を図り、安全かつ 13m の高深度に対応可能な 3 タイプの改良機の開発を行った（写真-1 参照）。

- type1: 従来型 1.4 m³クラスベースマシン+屈曲可能攪拌装置(上部 4m+下部 9m=13m)
- type2: ブーム・アーム延長強化型 1.4 m³クラスベースマシン+13m 攪拌装置
- type3: 2 ピースブーム 1.9 m³クラスベースマシン+13m 攪拌装置



(a) 従来機(10mクラス)

(b) 高深度型 type1

(c) 高深度型 type2

(d) 高深度型 type3

写真-1 揺動攪拌工法改良機

3. 実大実験による施工性および品質の検証²⁾

高深度改良機の実用化に先立ち、実大実験により施工性および品質の検証を行った。

改良機は3つのタイプの内、最も掘削能力が劣ると推測される type1 改良機を用い、N値0の貝殻混じり粘土を主体とした地盤で実施した。

掘削能力は従来の施工深度10m迄の施工機と比較し同程度の施工能力であり作業効率の低下は確認できなかった。

図-2に改良後の全長コアボーリングを示す。採取したボーリングコアは、設計改良長13mに対して同値の13mの改良体が確認でき、コア採取率も97%と連続性も高いことが確認できた。一軸圧縮強さもすべてのコアで設定した改良強度以上であり、本改良機が実用レベルの施工が十分可能であると判断した。

掘削長 (m)	コアの状況 (cm)										対象土	掘削長 (m)	採取長 (m)	採取率 (%)
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100				
1	[Core Image]										貝殻混じり粘土	1.00	0.98	98
2	[Core Image]											1.00	0.99	99
3	[Core Image]											1.00	1.00	100
4	[Core Image]											1.00	1.00	100
5	[Core Image]											1.00	1.00	100
6	[Core Image]											1.00	0.97	97
7	[Core Image]											1.00	0.95	95
8	[Core Image]											1.00	0.95	95
9	[Core Image]											1.00	0.95	95
10	[Core Image]											1.00	0.96	96
11	[Core Image]											1.00	0.95	95
12	[Core Image]											1.00	0.97	97
13	[Core Image]											1.00	0.98	98
											合計	13.00	12.65	97

図-2 実大実験全長ボーリングコア

4. 多層地盤への適用

4.1 上下2層改良

深層混合処理工法では多層地盤へ適用する場合、強度発現しにくい土層に着目し2~3土層(1層厚3m程度以上³⁾⁴⁾に分け、各層ごとに必要な材料添加量を決定しているが、浅層・中層混合処理工法では、全深度を同一添加量で施工を行っている例

が殆どである。その理由として、改良対象深度が6~7m程度までの比較的浅い地盤を対象とした現場が多く、強度発現しにくい土層を安全側に境界設定しようとする各層3m以上で層分けを明瞭に行うことが難しいことや、各々の層へ計画添加量が混合されたかを記録をする手段がなかったこと等が挙げられる。

本工法は施工機先端部に攪拌翼を持ったロータリー式中層混合処理工法であり、施工中の攪拌混合深度と材料吐出深度を明確にできること、前述の高性能管理システムにより深度ごとの注入量を記録できることから、従来の深層混合処理工法と同様に層分けをした管理が行える。13mの最大改良長に対して改良層を上下2層に分け管理を行った施工事例を以下に示す。

4.2 適用例⁵⁾

(1) 地盤概要および施工仕様

最大改良長13mに対して上部7mがN値0の含水量が多い腐植土混じり粘土および泥炭(以下、泥炭土とする)。下部6mがN値2~3の粘性土であった。事前の土質調査および室内配合試験の結果を基に土質境界の不陸や攪拌翼径を考慮し、上部8.3mまでを120kg/m³、下部8.3~13.0mを85kg/m³の2種類の添加量にて施工するものとした。各々の層への添加量(スラリー注入量)は前述の専用管理装置を使うことにより図-3に示すような帳票への記録が可能である。なお、施工は写真1(c)に示す type2 高深度対応改良機を用いて行った。

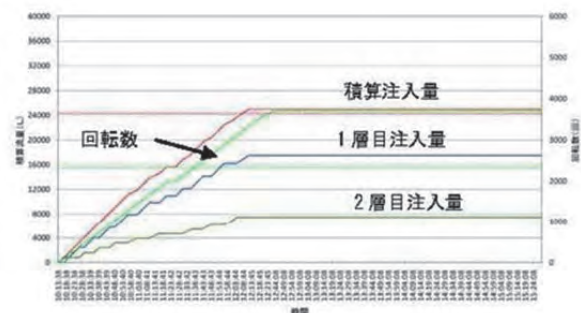


図-3 注入量・回転数チャート帳票例

(2) 品質確認

品質確認試験の確認項目は①改良深度②改良体のコア採取率③改良体の一軸圧縮強度の3項目とし、それぞれの確認方法は①全長コアボーリングによる採取長を確認②全長コアボーリングにおけるコア採取率を確認③25検体以上の供試体について一軸圧縮試験を行い、所定の強度の確認およびそのバラツキを確認、とした。

(3) 改良体のコア採取率および改良深度

全長ボーリングによるコア採取率測定結果を表-1 および図-4 に示す。改良長は設計改良長 13m に対して 13m の改良体を確認した。コア採取率は泥炭土で 93.3%(1m 最低値 86.0%)、粘性土で 97.2%(1m 最低値 87.0%)であり、泥炭土、粘性土共に日本建築学会の指針に示されている全長で粘性土 90%以上・砂質土 95%以上(1m 当たりの採取率は 5%減)⁶⁾ の値を満足しており、従来の深層混合処理工法同様に連続性の高い改良体が造成されたことを確認した。

(4) 改良体の一軸圧縮強度およびそのバラツキ

改良体の一軸圧縮強度およびその変動係数 CV の評価は同仕様で施工した 2 つの施工ブロックの試験値を合算し行った。一軸圧縮強度およびその変動係数 CV を表-2 に示す。改良体の一軸圧縮強度の変動係数 CV は 19.2%であり、本工法の従来機の変動係数 CV が 10.2~33.7%の範囲⁷⁾、一般的なスラリー攪拌工法の変動係数 CV が 25~35%の範囲⁷⁾であることから、本工法の従来攪拌機や他の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。さらに異なる土質に各々適量の固化材を添加することにより固化材低減の効果が確認できた。

表-1 コア採取率一覧

土質	泥炭土	粘性土	合計
掘削長 (m)	21.00	18.00	39.00
採取長 (m)	19.60	17.51	37.11
コア採取率	93.3%	97.2%	95.2%
(1m 最低値)	(86.0%)	(87.0%)	(86.0%)

※掘削長は 3 箇所のボーリング長の合計

掘削長 (m)	コアの状況 (cm)										対象土	掘削長 (m)	採取長 (m)	採取率 (%)	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100					
1	[Image]										泥炭土	1.00	0.95	95	
2	[Image]											1.00	0.98	98	
3	[Image]											1.00	0.99	99	
4	[Image]											1.00	0.97	97	
5	[Image]											1.00	0.99	99	
6	[Image]											1.00	0.98	98	
7	[Image]											1.00	0.98	98	
8	[Image]											1.00	0.95	95	
9	[Image]											1.00	0.96	96	
10	[Image]											粘性土	1.00	1.00	100
11	[Image]												1.00	0.99	99
12	[Image]												1.00	0.98	98
13	[Image]												1.00	0.97	97

図-4 全長ボーリングコア抜粋

表-2 一軸圧縮強度と変動係数

土質	全長コア		合計
	泥炭土	粘性土	
固化材混合量 (kg/m ³)	120	85	---
検体数 (検体)	16	10	26
設計強度 (kN/m ²)	100	100	100
平均強度 (kN/m ²)	156.4	176.9	164.3
標準偏差	---	---	31.48
変動係数 CV	---	---	19.2%

5. 改良下端層の管理⁹⁾

5.1 着底管理

地盤改良の施工目的が沈下抑制や盛土のすべり破壊防止の場合、改良地盤の支持方式として改良地盤を良質地盤に着底させる方式である「着底型」が用いられることが多い。着底型改良において、改良下端が設計上必要とされる支持地盤に到達していない場合、支持力不足や不同沈下等の要因となり上部構造物に影響を及ぼす可能性がある。そのため、着底管理基準の精度向上は非常に重要な課題である。

一般的に着底管理は貫入速度・攪拌翼回転速度および施工機械の状態等により定性的に判断をし、さらに、これらは支持地盤の性状により変化するため、土質・地質関連資料との整合性を確認し施工初期段階に現場ごとの着底管理基準を設けている。現行の本工法の管理基準は、以下の事象が複数項該当した場合に改良下端が所定の支持地盤に着底したと定性的に判断している。

- ① 貫入速度が 0m/min となる
(掘削能力を超える硬質地盤等)
- ② 貫入速度が低下する
(掘削能力内の未固結層等)
- ③ 掘削音や振動に変化が生じる
(砂礫層・風化岩等)
- ④ 攪拌翼回転速度が低下する
(掘削能力内の未固結層等)
- ⑤ 攪拌翼回転速度が著しく速くなる若しくは回転不能となる
(掘削能力を超える固結粘土、岩盤等)

5.2 実現場における計測

(1) 計測手法

実施工において、既存の標準貫入試験の実施位置の近傍にて、施工機の攪拌トルク値と貫入速度を計測し、地盤強度 (N 値の深度分布) との関連性について整理した。データ収集は、地盤構成の異なる 3 現場の 5 地点において計測を行った。

施工中は、図-1 に示す画面を施工マシン運転席内に備え付けられたモニターで確認しながら管理を行う。この専用管理装置にて記録されたデータは施工記録として図-5 に示すようなアウトプットが可能であり、施工深度と攪拌トルクの軌跡を確

認することができる。このうち、支持地盤上部 50cm 部を中心に、攪拌トルクの平均値と攪拌機貫入速度の平均値を抽出し、土質データとの検証を行った。

(2) 現場データの検証

各項目における検証結果について以下に述べる。

1) N値と攪拌トルク値の関係

N値と攪拌トルク値の関係について、図-6 に示す。数値のバラツキは大きいですが、粘性土・砂質土それぞれN値の増加に伴い攪拌トルクは上昇しており比例関係にあることが分かった。また、同一N値の位置で攪拌トルクと貫入速度の関係を見ると、貫入速度が速いほど攪拌トルクが大きくなっており比例関係にあることが分かった。

2) 攪拌機貫入速度と攪拌トルク値の関係

攪拌機貫入速度と攪拌トルク値の関係を図-7 に示す。攪拌機貫入速度と攪拌トルク値はバラツキがあるものの、N値の大きさによりトルク値の分布を領域分けすることができた。これより施工時の攪拌機貫入速度と攪拌トルク値により改良対象地盤の概ねのN値が判断できると考える。

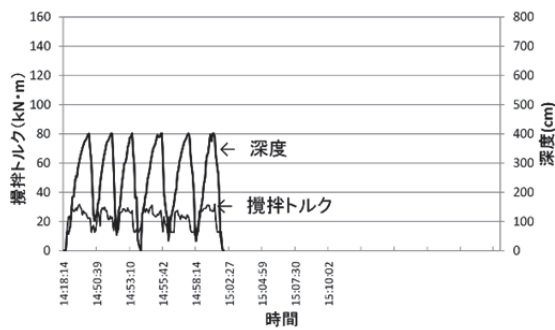


図-5 施工記録アウトプット例

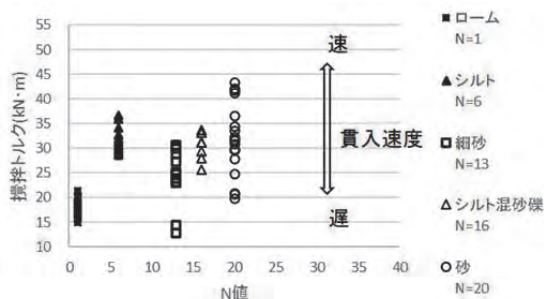


図-6 N値と攪拌トルク値の関係

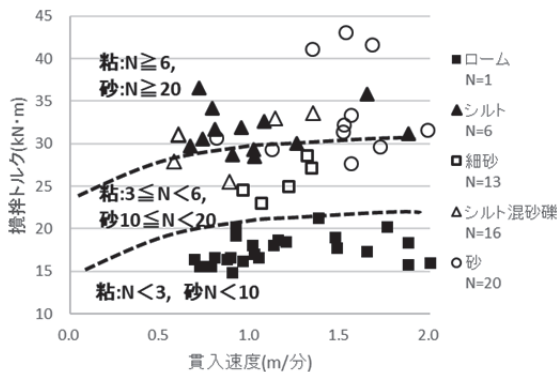


図-7 攪拌機貫入速度と攪拌トルク値の関係

6. まとめ

実大実験によりスラリー揺動攪拌工において深度 13m までの改良体造成が可能でありその品質が従来工法と同等以上であることが確認できた。

また、高性能施工管理システムを用いることにより、従来の中層混合処理機が不得手であった、異なる土質に各々適量の固化材を添加する「多層地盤への対応」や、地盤改良の下端が支持地盤に到達したか否かを判定する「改良下端層の着底管理」に対して、十分ではないが施工管理が可能であることを確認した。

今後はさらに実現場でのデータ収集、検証結果を蓄積することにより管理手法の確立をしていきたいと考える。

参考文献

- 1) 島野ら：幅広い土質に対応可能とした高性能管理システムを用いた中層混合処理工法，基礎工 Vol. 42, pp. 28-31, 2014.
- 2) 市坪ら：中層混合処理工法における高深度改良機の開発およびその品質確認試験(その 1)，土木学会第 73 回 年次講習会，投稿中，2018.
- 3) (財)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・施工マニュアル改訂版，p181, 2004.
- 4) DJM 工法研究会：DJM 技術マニュアル，p63, 2014.
- 5) 島野ら：中層混合処理工法における高深度改良機の開発およびその品質確認試験(その 2)，土木学会第 73 回 年次講習会，投稿中，2018.
- 6) 日本建築センター：改訂版建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，p241, 2009.
- 7) (一社)日本建設機械施工協会：建設技術審査証明報告書 WILL 工法，2013.
- 8) 地盤工学会：地盤改良効果の予測と実際，pp215-216, 2000.
- 9) 島野ら：中層混合処理工法における地盤評価手法の検討，第 52 回地盤工学研究発表会，pp. 669-670, 2017.