

中層混合処理工法における混合性能および掘削性能の向上 —スラリー揺動攪拌工（WILL 工法）—

市坪天士・島野 嵐・金丸宗弘

経済性追求や環境配慮の観点から地盤改良機の小型化およびこれに伴う性能向上が求められている。このような情勢下、WILL 工法はバックホウタイプベースマシンの先端に攪拌翼を取り付けた小型機械でありながら、リボンスクリュー攪拌翼による揺動攪拌機構と特殊掘削補助装置（ブームランプレート）を組み合わせることで、粘性土から硬質砂質地盤（N 値 40 未満）まで幅広い土質に対応可能とした中層混合処理工法として開発された。

本文では、揺動攪拌の混合性能と特殊攪拌翼装置の効果について報告するとともに、さらなる改善事例について紹介する。

キーワード：軟弱地盤，地盤改良，中層混合処理，揺動攪拌，スラリー，粉体，小型機械，振動騒音，土壌汚染，リボンスクリュー攪拌翼，ブームランプレート

1. はじめに

WILL 工法とは、バックホウタイプベースマシンの先端に取付けた特殊な攪拌翼より、スラリー状の固化材を注入しながら、固化材と原位置土を強制的に攪拌混合し、安定した改良体を形成する中層混合処理工法である。

本工法の特徴は以下のとおりである。

- ①攪拌効率の高い揺動式リボンスクリュー型ロータリー攪拌翼を持つ。
- ②高トルク仕様と特殊掘削補助装置（ブームランプレート）の装着とにより、N 値 30 を超える締まった砂質地盤の掘削が可能（表—1）。
- ③深度、瞬時流量、積算流量、回転数、積算回転数、傾斜角度など高度な施工管理が可能。
- ④施工機本体がバックホウ型ベースマシンであるた

め、機動性に優れる（写真—1）。

- ⑤深度 8.0 m までの改良が可能。
- ⑥小型機械であるため、振動騒音抑制効果が高い。
- ⑦先端攪拌方式のため、改良材・改良土の地上部への飛散が抑制される。



写真—1 WILL 工法施工機

2. 攪拌混合性能の向上

(1) 攪拌混合性能の向上（揺動攪拌機構）

本工法の攪拌機はチェーン駆動によって改良機先端に装着された攪拌翼を縦回転させて攪拌混合するロータリー攪拌機である。ロータリー攪拌機の欠点として、改良対象土の移動方向が上下方向に支配されやすいことが挙げられる。その課題を解消するためにリボンスクリュー攪拌翼を開発した。

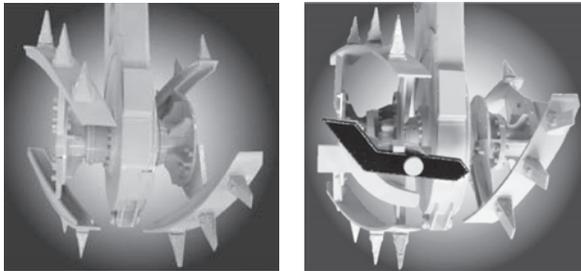
本攪拌翼は斜めに装着されていることから、改良対

表—1 WILL 工法の適用範囲

ベースマシン	最大改良深度	適応土質 (N 値)	
		粘性土	砂質土・砂礫
0.8 m ³ クラス	5.0 m	N < 10	N < 30
1.0 m ³ クラス	6.0 m	N < 10	N < 30
1.4 m ³ クラス	8.0 m	N < 15	N < 40

* 礫径はφ 100 mm 以下を標準とするが、礫率等を考慮する必要あり。

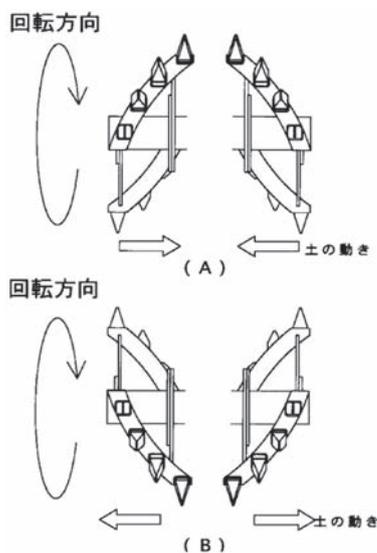
象土を上下方向だけでなく、左右方向に揺動させることが可能となった。また、リボンスクリュー攪拌翼は主に粘性土地盤の供廻り現象防止に適したT型および締まった砂質地盤・砂礫地盤の掘削に適した箱型の2タイプを使い分けることとした（写真—2）。



写真—2 リボンスクリュー型攪拌翼
(左: T型リボンスクリュー, 右: 箱型リボンスクリュー)

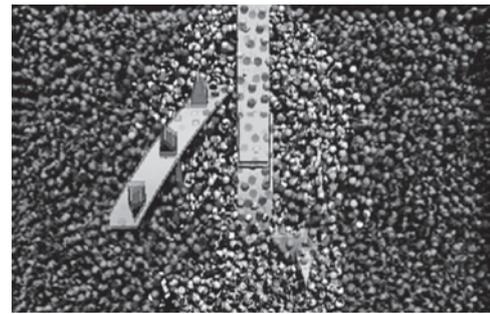
(2) 揺動攪拌機構の概要

図—1 (A) に示す斜めのリボンスクリュー型攪拌翼によって、攪拌翼の回転に伴い土は外側から内側へ強制的に移動させられる。逆に、攪拌翼が (B) に示す状態で回転すると、土は内側から外側へ強制的に移動させられる。これらの動作が攪拌翼の回転によって連続的に発生し、改良対象土を左右交互に動かす（揺動運動）ことにより、高い攪拌効率を得られる。



図—1 揺動攪拌のしくみ

図—2 はリーダ部および両攪拌翼の中心までの範囲に白色粒子を配置し、二色の粒子がリボンスクリュー攪拌翼により左右に揺動する様子をシミュレーション解析した動画の静止画像である。図—2 をみれば両攪拌翼の中心より外側に配置した赤色（図内暗色）粒子が両攪拌翼中心より内側の白色粒子部に取り込まれていく様子がわかる。



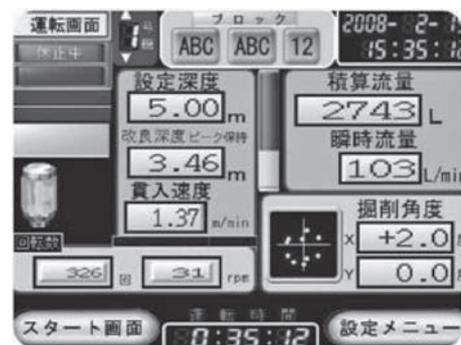
図—2 揺動攪拌のシミュレーション解析図

また、白色粒子は攪拌翼の外側までは移動していないことがわかる。これらのことから、揺動攪拌は両攪拌翼内で行われており、改良範囲外への影響は小さいと判断される。

(3) 専用管理装置

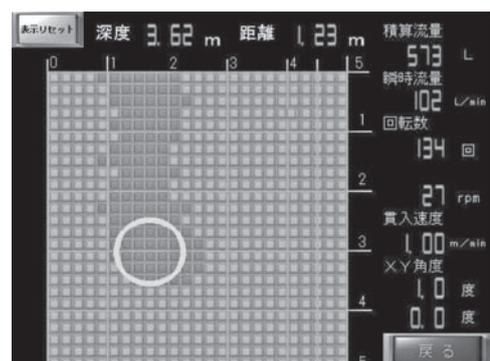
本工法では施工時のヒューマンエラー防止策として専用管理装置を搭載するものとした。

施工時における攪拌軸の鉛直性および攪拌翼移動速度の定速性は、マシンオペレータの技量に差があり品質に影響を及ぼしていた（図—3）。



図—3 WILL 管理装置画面表示例 (1)

また、攪拌翼の軌跡を表示させることにより、既改良部と未改良部をリアルタイムで確認しながらの施工を可能とした（図—4 参照）。



図—4 WILL 管理装置画面表示例 (2)

(4) 改良体の品質

揺動攪拌機構による改良効果を評価する要素となる一軸圧縮強さ・変動係数・現場/室内強度比・チェックボーリングコア・改良体掘削確認の事例を紹介する。

①一軸圧縮強さと変動係数

WILL 工法で施工された改良地盤より得られた一軸圧縮強度 (σ_{28}) と変動係数を表一 2 に示す。

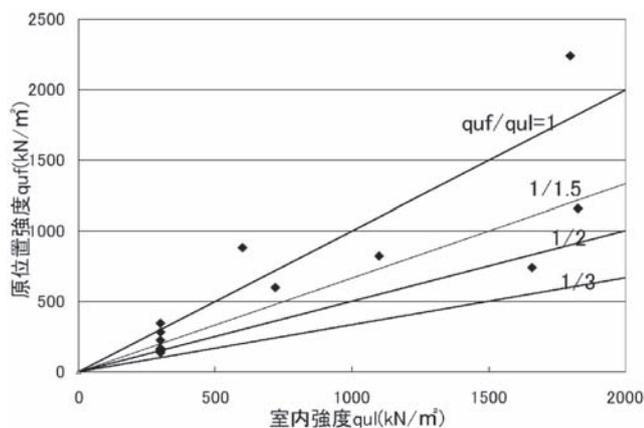
表一 2 一軸圧縮強さと変動係数

事例	土質	標準偏差	平均値 (kN/m ²)	変動係数
事例 1	ローム	668	2,515	27%
事例 2	軽石混じりローム	889	4,254	21%
事例 3	粘土	57	180	32%
事例 4	砂質シルト	328	1,298	25%

WILL 工法の変動係数は $C_v = 21 \sim 32\%$ の範囲にある。スラリー系の深層混合処理工法の変動係数は $C_v = 30 \sim 50\%$ の範囲であることから¹⁾、スラリー系の深層混合処理工法と同等の品質を有している。

②原位置改良強度と室内強度の相関

室内配合試験で得られた一軸圧縮強さ q_{ul} と現場で得られた一軸圧縮強さ q_{uf} の関係を図一 5 に示す。



図一 5 原位置改良強度と室内強度の関係

スラリー系深層混合処理工法においては、室内配合試験で得られた一軸圧縮強度 q_{ul} と現場で得られる一軸圧縮強度 q_{uf} との関係が $q_{uf}/q_{ul} = 1 \sim 1/2$ の範囲にある傾向が多い²⁾。一方、WILL 工法における q_{uf}/q_{ul} の関係は概ね $1/1.5$ 以上の強度発現が認められている。

③改良体確認事例

写真一 3 にチェックボーリングの採取事例を、写真一 4 および写真一 5 に改良体掘削状況を示す。

これらの結果、スラリー系の深層混合処理工法と比



写真一 3 改良体のチェックボーリング



写真一 4 改良体の掘削状況 (1)



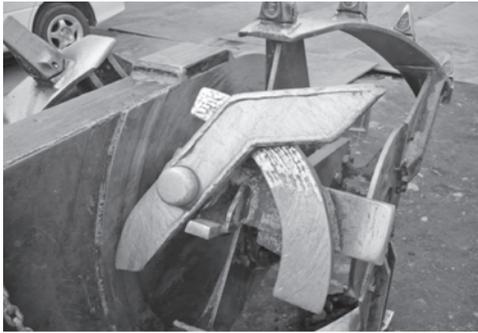
写真一 5 改良体の掘削状況 (2)

較し同等もしくはそれ以上の攪拌効率が得られたものと評価している。

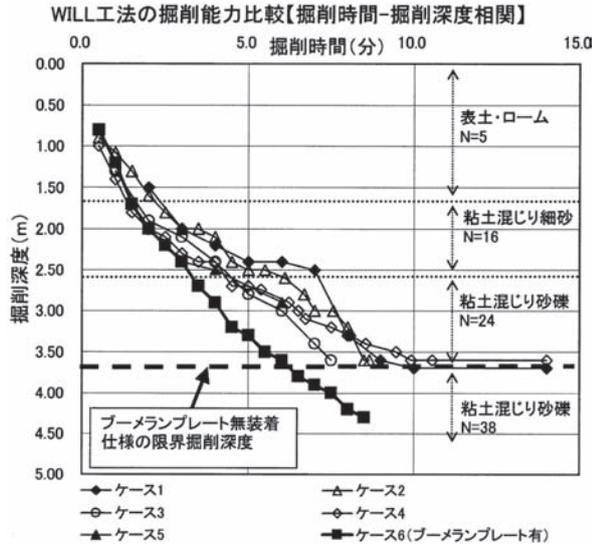
3. 掘削能力の向上

従来の中層混合処理工法の適応土質は概ね砂質土で $N < 10$ 、粘性土で $N < 5$ である。特に中間層や一部高 N 値を示す地盤の掘削において、攪拌装置本体に当たるチェーン駆動直下部が攪拌翼による掘削ができず、その部分が障害となり硬質地盤の掘削が困難であった。

これを解消するために、本工法では、攪拌翼の回転に伴いチェーン駆動直下部を切削できる特殊掘削装置 (プーメランプレート、写真一 6) を装着したことにより掘削能力を格段に向上させることができ、高 N 値の掘削が可能となった。



写真一六 ブームランプレート装着図



図一六 掘削能力比較実験結果

図一六に掘削能力の検証試験結果を示す。

攪拌翼仕様毎に複数のケースについて試験を行ったが、ブームランプレートを装着した場合のみ、N = 38の砂礫層の掘削が可能であった。これにより、バックホウ型ベースマシン (0.8 m³クラス) の小型改良機を用いてN値30以上の掘削を可能とする上で、ブームランプレートによる掘削の効果を検証することができた。

4. 環境側面に対する配慮

①周辺地盤の変位

本工法は縦撈拌であることから、地中内応力は上方に開放する。また、スラリー注入が噴射方式ではないため、周辺地盤へ与える変位は比較的小さい。

②汚染土壌の飛散

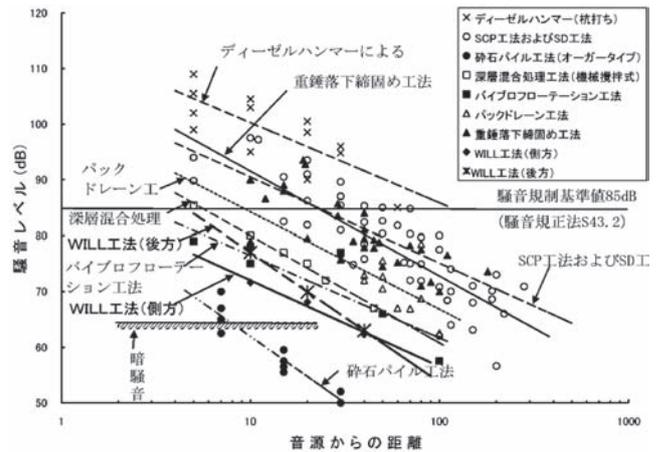
汚染土壌浄化などに適用される場合、本工法は攪拌機の先端部に取り付けられた攪拌翼のみが回転するため、地上部への汚染物質の飛散を最小限に抑制することが可能である。

③産業廃棄物の発生

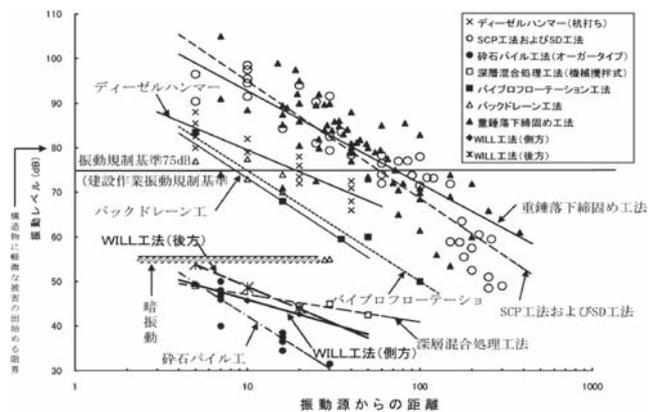
スラリー攪拌工は一般に盛上り土が発生する可能性が高い。また、盛上り土内には改良材が混入されることが少なくない。本工法は矩形改良であるため、施工条件によっては事前にスキトリすることで産廃を軽減することが可能である。

④振動・騒音

小型機械を用いる本工法の騒音・振動に対する環境負荷低減効果を検証すべく、実際に現場計測を実施した。図一七、八に計測された振動・騒音レベルを示す。



図一七 騒音源からの距離と騒音レベルの関係³⁾に加筆



図一八 振動源からの距離と振動レベルの関係³⁾に加筆

今回の計測(写真一七、八)により、振動・騒音ともに規制値以下であることを確認できた。また、騒音・振動ともにベースマシン後方が大きく、側方が小さい値を示している。これは、騒音・振動の発生要因が攪拌機自体ではなく、ベースマシン排気装置部が主体であることを示している。この結果は、民家が隣接する場合等の施工管理において有効に生かしたいと考えている。

⑤温室効果ガスの排出

小型機械であること、機動性が高く工期が短縮でき



写真一七 騒音・振動測定状況



写真一八 粉体攪拌状況

ること等から、CO₂の排出量抑制効果が期待できる。

5. 新たな取り組み

小型機械を使用することによる課題を克服すべく改良改善を積み重ねてきた一応の成果は得られたものと判断している。しかしながら、さらなる発展に向け、新たな取り組みを始めている。

そのひとつとして改良深度の延伸が挙げられる。ベースマシンを大型化することなく現在の改良深度8mから10m程度まで適用範囲を拡げるべく実験開発を進めている。その結果、特殊延長部材を装着することで改良深度10mまでの実用化に近づいている。今後、土質条件や施工条件を明確化するためのデータ集積が必要である。

また、本工法はその名のとおり、スラリー状の固化材を注入しながら、固化材と原位置土を強制的に攪拌混合し改良体を構築する工法として開発された。しかし、コスト縮減策としての固化材添加量抑制や汚染土壌浄化への適用などのニーズが増加しており、添加材の形状・性状も多種多用化している。そこで粉体攪拌への適用化を図った。これについても、今後さらなる改善、データ蓄積により、対応可能条件の範囲を明確化していく所存である。

JCMA

《参考文献》

- 1) CDM Q&A 集 平成17年2月 CDM 研究会
- 2) 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 平成16年3月 (財)土木研究センター
- 3) 軟弱地盤対策工法 pp.28～29 土質工学会
- 4) 建設施工と建設機械シンポジウム論文集 平成20年度 (社)日本建設機械化協会
- 5) WILL 工法 技術積算資料 H20 年度版
- 6) 基礎工 2009 Vol.37, No.5 報文 総合土木研究所

【筆者紹介】



市坪 天士 (いちつぼ たかし)
WILL 工法協会 技術委員長
技術士 建設部門



島野 嵐 (しまの あらし)
WILL 工法協会 技術副委員長



金丸 宗弘 (かなまる むねひろ)
WILL 工法協会 技術委員