

障害物回避・斜め施工が可能な機械攪拌式原位置地盤改良工法（WinBLADE 工法）

大成建設(株) 正会員 ○藤原 斉郁

1. はじめに

我が国の社会インフラ整備は成熟期を迎え、新設工事に代わり維持・改修の比率が高まる状況にある。各種構造物に対して劣化診断やモニタリング、更にこれらの対応策が広く求められるのと並び、地盤についても既存施設の維持・改修に伴う補強や強化が求められるようになっている。具体例としては、度重なる巨大地震の発生を受けた耐震基準の見直しに伴う耐震補強工事や、既存建物の有効活用を図るべく行うリニューアル工事に伴う地盤強化などが挙げられる。今後は、国土強靱化や広義には SDGs にも関わる対応としてこうした位置付けの地盤補強・強化技術がより多くの場面で要求・活用が見込まれる。ここで取り上げる地中拡翼型地盤改良工法は、これまで述べてきた地盤改良技術に対する技術的要求の変遷を踏まえて、開発・実用化されたものである^{1)~3)}。原位置で行う地盤改良の原理・手法には数多くのものが存在する中、機械的に地盤とセメントを攪拌混合して固化体を形成する手法を採用する。この種の技術は、地域性に富んだ多種・多様な地盤を扱う技術として確実性と信頼性の高い改良原理に位置付けられながら、これまでは既存施設の維持や改修向けには適用が困難であった。そこで、一般的な攪拌装置に対して障害物回避が可能な機能を備えた方法を開発し、併せて攪拌装置の小型化が図られた利点を活用して斜め施工を実現する独自の施工方法を実用化した。

本論では、この地中拡翼型地盤改良工法の概要を説明すると共に、最大の特徴である地中で拡径・縮径が可能な小型の攪拌翼について、地中における攪拌性確保のための独自の考え方や、改良体の品質を支えるモニタリング・自動制御システムやこれを用いた施工方法について述べる。また、地中で攪拌翼を開閉する独自の機構に関し、施工時において想定外の事象が発生した場合の対応について、その設計思想と施工時における手順についても言及する。更に、地中拡翼型工法の施工形態について、これまで施工実績を有する形態と共に、直近の開発成果である汎用地盤改良機による新たな方法を含め、継続的な施工形態拡張の取組みについて述べる。

2. 工法の概要

(1) 開発の経緯

図-1 に地中拡翼型地盤改良工法（WinBLADE 工法、以下「本工法」と称す）の施工機械と小型の攪拌翼の外観を示す。機械攪拌系の地盤改良工法の特徴としては、出来形が確実であり、要求強度や地盤性状などに応じ固化材量を調整することが可能、施工時の周辺への影響が比較的少ない、排土が少ないなど様々な利点を有している。一方で、従来の固定式攪拌翼の場合、深度方向に攪拌径の変更が出来ず、表層舗装や配管類などの障害物や、建物直下地盤など既設構造物を回避した施工には不適とされている。本工法は、前述の成熟期を迎えた社会的ニーズを受け、機械攪拌系工法の特徴を有しつつも、地中で拡径・縮径が可能な機能を有する小型の攪拌翼を開発することで実現したこれまでに無い地盤改良工法である。本節では、小型攪拌翼及びこれを用いた施工管理について述べる。



図-1 標準施工機及び攪拌翼

(2) 小型攪拌翼

本工法の最大の特徴は、地中で拡径・縮径が可能な小型の攪拌翼を用いている点にある。図-2 に攪拌翼の概要を示す。一対の攪拌翼を取り付けた本体ケースの直径は 125mm で、内部はピストン構造になっている。拡径時にはピストン背面に加圧水を供給することで、攪拌翼を振り上げて攪拌径として最大 1,200mm を確保する。

キーワード 地盤改良, 機械攪拌, 障害物回避, 斜め施工, 汎用地盤改良機

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7221

また、固化材として供給するセメントミルクは、二重管構造になったロッドの内管を通してピストン内に供給される。ピストンが押し出されて拡張が完了すると、攪拌装置側部に向けたノズルへの経路が連通して初めてセメントミルクが吐出される仕組みとなっている。地中で拡張ができていることが所定の改良体形状を確保する上で不可欠となるが、複雑な計器を取り付けることなく、セメントミルクの供給量や供給圧に基づき拡張完了が確認できる。

本工法の攪拌翼は一般的な機械攪拌系地盤改良工法に比べ非常にシンプルな形状であり、改良体造成時の地中での攪拌性が懸念された。この点については、施工試験や実施工を通じ、造成改良体の強度分布のバラつき等から従来工法と遜色のないことは確認している⁴⁾。ただし、攪拌性を確保するため、後述のモニタリング・自動制御システムに加え、攪拌に関する独自の考え方をベースに施工管理を行っている。ここではその考え方について説明する。

図-3 に地中での攪拌性に関する説明図を示す。固定式攪拌翼による一般的な機械攪拌系工法では、攪拌翼の羽根形状を様々工夫し、攪拌性の向上と地盤の供回り現象^{注1)}を回避する工夫がなされている。攪拌時の地盤の動きとしては、羽根近傍の地盤を上下左右に移動させながら、固化材を均等に混ぜようとする動きが基本と想定される。一方で、本工法の攪拌翼は幅 50～60mm 程度のシンプルなロッド状であり、同様のメカニズムによる攪拌性は期待できない。そこで、攪拌時における引上げ・押し下げ速度（以下、「フィード速度」と称す）に留意することとしている。具体的には、攪拌時の標準回転速度 40rpm に対し、標準のフィード速度を 0.5m/min としている。すなわち、攪拌翼が 1 回転する間、フィードに伴う攪拌翼に移動距離は 12.5mm となり、攪拌翼の幅（50～60mm）を超えない範囲で少しずつ移動させている。これにより、ロッド形状の攪拌翼で地盤を少しずつ削りながら、削った箇所に固化材を添加しており、従来法ほど地盤の大きな動きはないものの、固化材添加の偏りを防止し一定の攪拌性を確保している。

(3) モニタリング・自動制御システム

攪拌翼に地中での開閉機能を持たせるためにシンプルな形状としたことから、攪拌翼に過大な回転力をかけられないこと、従来の機械攪拌改良に比べると小型になったベースマシンから十分な反力をとることができないことが課題として残り、攪拌翼の回転やフィード動作に変動が生じ易くなる点が懸念された。その結果、対象土に対する攪拌回数やセメントミルクの添加量にばらつきが生じ、品質の不均一性やセメントミルクの供給量の過不足が生じ易くなることになる。そこで、**図-4** に示す攪拌翼の回転、フィード動作、セメントミルクの供給速度を監視・自動制御するシステムを開発した⁵⁾。本システムでは、例えば硬めの地盤に遭遇して攪拌翼の回転量が低下した場合、①単位延長あたりに計画した攪拌回数が確保できるようにフィード速度を低下させる、②さらに単位延長あたりのセメントミルク供給量が計画値を保つよう供給ポンプの吐出量を低下させる。こうした制御は攪拌翼の回転速度に基づきフィード速度、セメントミルク吐出量を PID 制御^{注2)}することで実現した。

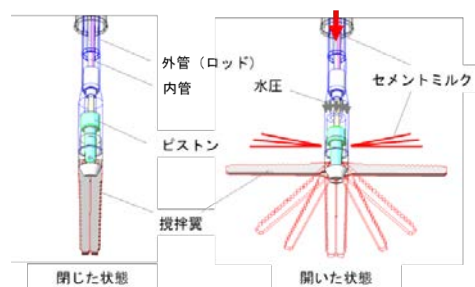


図-2 攪拌翼の概要

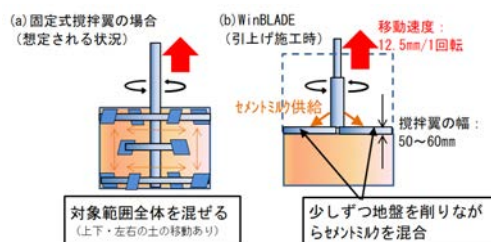


図-3 攪拌性に関する説明図

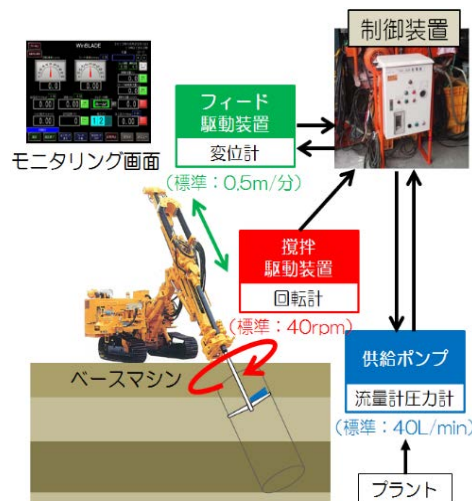


図-4 モニタリング・制御システム

(4) 施工手順

図-5 に改良体造成時の基本的な施工手順を示す。攪拌翼は削孔により予め地中に挿入したケーシング内に挿入することで所定深度に設置される。次にケーシング撤去に伴い攪拌翼が地中に露出された状態で拡径し、その後、改良体の造成に移ることになる。拡径後の手順としては、**図-6** に示すように攪拌翼を造成予定の改良体の最深部に移動させ、次に「1 パス目」としてセメントミルク供給を開始し攪拌翼を回転・引上げながら造成、上端部に達した後に「2 パス目」で下方に押下げ、再び下端に達した後に「3 パス目」で引上げながら造成を行い、1つの施工単位が完了する。この施工単位を下から積み上げることで、1本の改良体の造成が完了する。なお、施工単位の長さは施工機毎に異なり、後述の**表-1**内「内管・外管セット作業」欄の「1.5m, 2.0m 単位」が相当し、c) 汎用地盤改良機については最大 18m の範囲で任意の長さとする事が可能である。

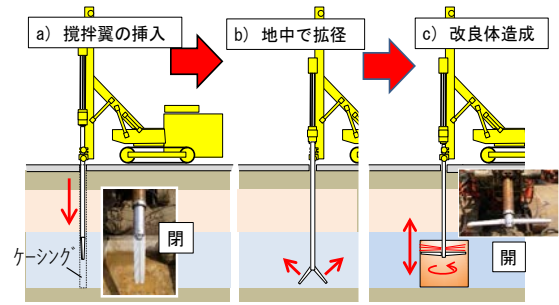


図-5 施工手順

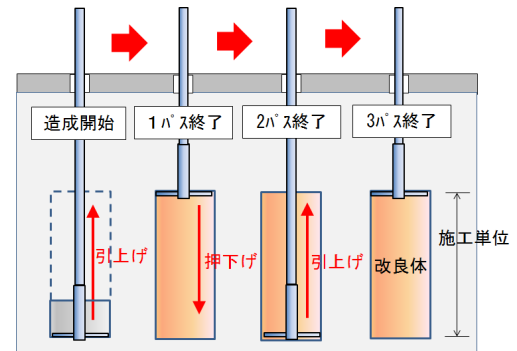


図-6 拡径後の改良体造成手順

3. 施工形態ラインナップ

(1) 概要

表-1 に本工法の施工形態のラインナップとして、施工機械のバリエーションを示す。本工法では、施工機毎にそれぞれの特徴を活かした施工形態があり、障害物回避や既設構造物対応、従来よりも施工効率を向上させた形態など、以下にそれぞれについて説明する。

(2) 標準施工機による施工形態

本工法の標準的な施工形態に位置付けられ、ロータリーパーカッションドリル機(**図-1**)を使用する。施工方向は施工マシン本体の前方と左右に角度が調整でき、特に斜め施工に適している。また、クローラが装備されているため、場所移動が容易で機動性に優れる。施工をしながら継ぎ足す内管・外管の上端部に、回転・推進装置を取り付ける「トップドライブ方式」での制御で、攪拌装置に効率的に回転・推進力を伝達できる。

図-7 に標準施工機を用いた施工事例を示す⁶⁾。改良対象は民家に隣接した緩い堆積状態の谷埋め盛土で、盛土天端の平地では従来工法による改良を行うものの、斜面部においても地震による崩壊が想定され、固化改良が必要となった。検討対象工法としては、掘削・置き換え工法、高圧噴射攪拌工法、法面アンカーなどが挙げられたが、施工中の土砂崩壊の懸念、費用高、隣接民家への騒音・振動影響等が採用への障害となった。そこで、本工法の斜め施工の特徴を活かし、コスト削減も見込まれたため採用に至った。改良体は法面背面部に約 35～50° の角度で直径 1.2m, 最大長さ 7m の改良柱を配置し、必要一軸圧縮強度 600kN/m² を設定した。

表-1 施工機械のバリエーション

施工機	a) 標準施工機	b) 小型施工機	c) 汎用地盤改良機 (効率重視)
機種	RPD-150C (鎚研工業)	TNW-15 (東亜利根ボ-リンク)	GI-130C (YBM)
本体の 占有寸法※	幅2,500mm 長さ7,600mm 高さ8,000mm	幅1,900mm 長さ4,900mm 高さ4,500mm	幅2,600mm 長さ6,800mm 高さ9,700mm
回転・推進 機構	トップドライブ 方式	センターホールタイプ・ スピンドル方式	センターホールタイプ・ スピンドル方式
自走機構	クローラ	スライド移動	クローラ
内管・外管 セット作業	造成作業中 1.5m単位	造成前に必要長さ分 2.0m単位	造成前に必要長さ分 (仕様上、最大18m)
主たる 利用形態	斜め施工	建物内	鉛直・屋外

※：占有寸法「高さ」は、ブームを鉛直に立ち上げた際の概略高さ

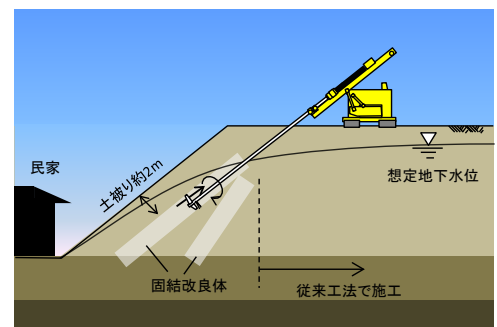


図-7 斜め施工事例

施工は、機械、設備をすべて盛天端部に設置し、施工中に民家側から盛土のり面上部を見上げても施工の様子はほとんど視界に入らないこと、部分的にレベル測定して確認したのり面表層の変状は数 mm の誤差範囲に収まることを通して、隣接域の影響を抑制した独自の施工方法を提供できたことを確認した。合計 150 本の改良体造成を完遂後、事後の品質確認では改良柱の長手方向にコアドリリングで試料を 3 か所で採取した。各箇所得た 3 試料、合計 9 試料にて、必要一軸圧縮強度を満足する強度を確認した。

(3) 小型施工機による施工形態

標準機よりも施工機が小型のため、比較的狭隘な場所での施工を特徴とする。施工方向は、鉛直に加え前方斜め方向に角度調整が可能であり、鉛直施工時における必要作業空頭は 5m であり、工場など産業施設関係において建屋内での施工を可能とした。

図-8 に当該施工機による施工事例での状況を示す⁷⁾⁸⁾。ベタ基礎構造建物の改修工事において、一部が緩いローム土層（N 値 ≤ 5 ）上に位置し、上載荷重の増加に伴い設計上支持力不足となり何らかの対応が必要になったことから、既設床スラブを介し直下地盤に改良体の造成を行った。検討工法としては、床スラブを一旦撤去して置き換える方法や高圧噴射攪拌工法が挙げられたが、前者については既存ストックの有効活用・建設廃棄物の抑制が十分図られず、後者については高圧噴流で地盤を切削・攪拌して土砂を輩出する改良原理により産廃を多く排出すること、併せて出来上がる改良径を直接確認できないことが採用の障害となった。図に示すように、建物内の限られたスペース内にて、柱や梁による作業空間制約を受けながら、ベースマシンを配置しながら施工し、品質確認としては、施工後にコアコアボーリングを行い、一軸圧縮強さを確認した。



図-8 建物内での施工事例

(4) 汎用地盤改良機による施工形態

汎用地盤改良機を用いた施工形態であり、施工機は「センターホールタイプ・スピンドル方式」を採用しており、回転・推進機構の可動範囲長が大きいこと、屋外利用を前提に内管・外管は予め 18m まで継ぎ足すことができることから、施工効率の大幅向上が期待できるものである。本機は、一般的な攪拌翼を装備した施工で近年広く普及しているもので、本工法では最も新しい施工形態ラインナップである。実現に当たっては、対象となる汎用施工機に、独自のモニタリング・制御システムを移植するとともに、専用の着脱機構の装備を装備し、回転制御機構の改造を行った。これにより、従来の固定式攪拌装置を装着した一般的な機械攪拌地盤改良を行いつつも、必要に応じて本工法の小型攪拌機に付け替えることで障害物回避などの対応が可能となる（図-9）。

本機の導入にあたり、動作確認及び品質確認を目的として施工試験を行った⁹⁾。試験は、自然地盤を掘削後に遮水シートの敷設、及びシート内を山砂により埋め戻し・水飽和させた地盤を造成し、この地盤に対し同一の地盤改良機にて従来の固定式攪拌翼と拡翼型攪拌翼に切替え、それぞれで改良体造成を行った。造成はいずれも GL. -0.5 ~ -2.5m 間で実施し、地表面から GL. -0.5m までの間は固定式では未改良、拡翼型では未改良で攪拌翼を閉じた状態とした。図-10 に改良体造成時の状況、図-11 に施工後の事後調査状況、図-12 に強度確認



図-9 汎用地盤改良機による施工形態

の結果を示す。強度確認については、コア採取試料により材齢 61 日での一軸圧縮試験結果、及び針貫入試験¹⁰⁾ (材齢 130 日)の結果を示している。この結果より、施工性を含め両攪拌翼による差異は特になく、問題なく切替え施工可能であることを確認した。



(a) 固定式攪拌翼 (b) 拡翼型攪拌翼

図-10 試験施工時の状況



図-11 事後掘削調査による改良体の状況

国土強靱化など沿岸部の既存産業施設の補強として液状化対策工事を行う場合、周辺に地盤改良施工に障害となる施設や設備のない「一般部」と、表層舗装や配管などの障害物を回避する必要がある「特殊部」の施工が必要となる場合が想定される(図-13)。このときの対応を表-2 に示すが、「従来の地盤改良工法」では、「一般部」については固定式攪拌翼による施工、「特殊部」は高圧噴射攪拌工法など別工種による施工が行われるのが一般的であった。高圧噴射攪拌工法は、施工時の排土が多く、出来形が地盤性状に依存する傾向があるものの、小型機械と細径ロッドにより障害物回避の施工が可能で、代替工法が無いことから広く採用されていた。一方、表中「WinBLADE 活用」では同一施工機による攪拌翼の切替えのみで「一般部」と「特殊部」施工が可能となり、汎用機による施工効率向上効果もあり、従来法よりもコストダウンを図ること期待される。また、別工種の対応ではセメントミルク供給プラントを工種毎に準備する必要があったが、共通利用が可能な点もコストダウンに寄与する。

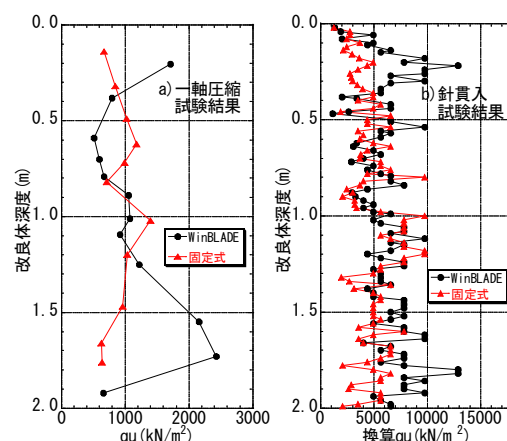


図-12 改良体強度の分布

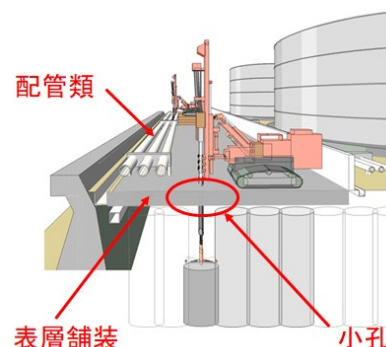


図-13 障害物回避施工のイメージ

5. おわりに

本論では、機械攪拌系工法の特徴を有し、障害物回避などこれまでに無い工法である地中拡翼型地盤改良工法 (WinBLADE 工法) について、工法の概要を説明するとともに地中での攪拌に関する基本的な考え方や、それに伴う施工管理の考え方、障害物回避施工におけるトラブル対応に関する対処法などについて詳述した。更に、開発当初からの施工形態に加え、継続的な施工形態拡張の取組みとして新たに開発した汎用地盤改良機による方法を紹介した。本論で示した攪拌に関する新たな考え方は、機械攪拌系工法の今後の進化の可能性を示すものと考えており、積極展開を図ると共に、今後も施工形態の拡張の取組みを進めて行きたいと考えている。

注釈

1) 攪拌時において、改良対象土と固化材が混合することなく一体となって回る現象。地盤改良以外では、ボルトを締める際にナットが同時に回転してしまい締まらなくなる現象なども指す。

表-2 障害物回避を含む施工条件での対応

施工法	従来の地盤改良工法	WinBLADE活用
一般部施工	機械攪拌式工法 (固定式攪拌翼)	機械攪拌式工法 (固定式攪拌翼)
特殊部施工 (障害物回避)	高圧噴射攪拌工法	機械攪拌式工法 (WinBLADE攪拌翼)
施工機・ 施工プラント	一般部、特殊部に 各々必要	一般部、特殊部とも 共通利用

- 2) 目標値との差に比例(Proportional)して誤差修正を加えるとともに、経過時間に対する積算値(Integral)、差分値(Differential)に応じて修正の度も調整する方法。

参考文献

- 1) 石井裕泰, 藤原斉郁, 小林真貴子, 松井秀岳, 青木智幸, 立石章, 菅浩一, 三上登, 佐藤潤: 地中拡翼型の地盤撈拌改良工法の開発, 大成建設技術センター報 第 45 号, 2012.
- 2) 窪塚大輔, 菅浩一, 三上登, 佐藤潤, 石井裕泰, 青木智幸, 藤原斉郁, 小林真貴子, 松井秀岳, 立石章: 地中拡翼型の地盤撈拌改良工法の開発 ～その 2 施工実験の概要～, 第 67 回土木学会年次学術講演会, pp. 607-608, 2012.
- 3) 三上登, 佐藤潤, 石井裕泰: 拡翼型機械撈拌工法による地盤改良 - WinBLADE 工法 -, 基礎工, pp. 32-35, 2014. 8.
- 4) 小林真貴子, 石井裕泰, 藤原斉郁, 青木智幸, 立石章, 遠藤堅一, 広川郁夫, 菅浩一, 三上登, 佐藤潤: 地中拡翼型の地盤撈拌改良工法の開発 監視・自動制御システムの開発および施工実験に基づく検証, 大成建設技術センター報 第 46 号, 2013.
- 5) 藤原斉郁, 石井裕泰, 小林真貴子, 渡邊徹, 阪井由尚, 調浩朗: 機械撈拌工法による既存建物直下地盤での固化改良体の造成-地中拡翼型工法「WinBLADE」による地盤補強, 大成建設技術センター報第 51 号, 2018.
- 6) 小林真貴子, 青木智幸, 藤原斉郁, 石井裕泰, 松井秀岳, 立石章, 窪塚大輔, 菅浩一, 三上登, 佐藤潤: 地中拡翼型の地盤撈拌改良工法の開発 ～その 3 固結改良体の発現強度～, 第 67 回土木学会年次学術講演会, pp. 609-610, 2012.
- 7) 石井裕泰: 地中拡翼型の地盤撈拌改良工法の開発, 斜面崩壊対策技術 - メカニズム・センシング・監視システム・新施工法 第 1 章斜面の最新安定化工法, pp. 274-282, 2014.
- 8) 藤原斉郁, 石井裕泰, 小林真貴子, 渡邊徹, 阪井由尚, 調浩朗: 機械撈拌系工法による既設スラブ直下地盤での固化改良体の造成, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp. 849-850, 2018.
- 9) 藤原斉郁, 石井裕泰, 小林真貴子, 三上登, 佐藤潤: 機械撈拌系地盤改良工法における施工形態拡張の取組み, 第 76 回土木学会年次学術講演会, III-87, 2021.
- 10) 小林真貴子, 石井裕泰, 藤原斉郁, 青木智幸: セメント改良地盤を対象とした次世代型品質評価法の開発, 大成建設技術センター報 第 53 号, 2020.