

機械攪拌工法による既設建物直下地盤の補強

WinBLADE[®]による固化体の造成

藤原 斉 郁・石井 裕 泰

既設建物のリニューアル工事に伴う直下地盤の支持力向上を目的とし、機械攪拌式の地盤改良工法 WinBLADE（以下「本工法」という）による補強を行った。本工法は、地中で開閉可能な小型の攪拌翼を特徴とし、当初は主に液状化対策を目的として開発されたものである。今回の適用にあたっては、建物内での施工用に標準機よりも小型の施工機械を導入し、粘性土地盤対応として攪拌翼の改良や施工手順の見直しなどを行った。試験施工では、施工性や改良・見直し効果を確認し、本施工ではφ 800 mm、最大長さ 8 m の円柱状の改良体を 8 本造成した。施工後の調査結果から、砂地盤よりも強度発現しにくいとされる粘性土地盤に対しても所定の強度を満足することを確認した。

キーワード：地盤改良，機械攪拌，既設建物，支持力，粘性土

1. はじめに

度重なる災害の発生などを背景に、地盤補強の一手段として地盤改良工法の果たすべき役割は益々重要となっている。地盤改良工法は改良原理などにより様々な分類され^{1), 2)}、それぞれで適用可能な地盤の性状や施工条件などの特徴を活かした適用が求められる。固化改良³⁾を例に挙げると、固化材を添加・混合する方法として攪拌翼など機械的な方法、薬液を注入する方法、固化材自身を高圧で噴射する方法などが代表的であり、強度などの要求品質レベルや出来形の確実性、施工機械の大きさなど、それぞれで得意とする範囲や条件がある⁴⁾。一方、地盤改良に対する最近のニーズの一つとして、既設構造物の近傍や直下など狭隘部での施工が求められている。これは、東日本大震災における都市部での耐震対策の重要性や^{5), 6)}、老朽化に伴うインフラの再生や建物リニューアルの必要性の高まり⁷⁾を背景としたものであり、施工条件に関するキーワードとしては施工機械の小型化が挙げられる。

本稿では、既設構造物の直下地盤において、構造物を撤去することなく機械攪拌工法により改良体を造成した事例について述べる。一般的に、機械攪拌工法は、施工機械の小型化については、固化材の混合・攪拌時において反力が必要なことから不利と考えられる。これに対し、今回用いた工法は、地中で開閉可能な独自の小型攪拌翼により小型機械にも対応し、地中障害物の回避や斜め方向など様々な施工形態が可能な、これ

までに無い位置付けのものである^{8), 9)}。機械攪拌工法を狭隘部へ適用するメリットとしては、砂や粘性土など地盤条件に左右されることなく適用可能であり、施工時の地盤変状や周辺への影響が少なく、出来形など施工の確実性が高い等、従来からの機械攪拌工法としての特長が活かされる点が挙げられる。ここでは、本工法の概要を紹介するとともに、リニューアル工事において既設建物内の床スラブに設けた小孔より直下地盤に改良体を造成した事例について紹介する。

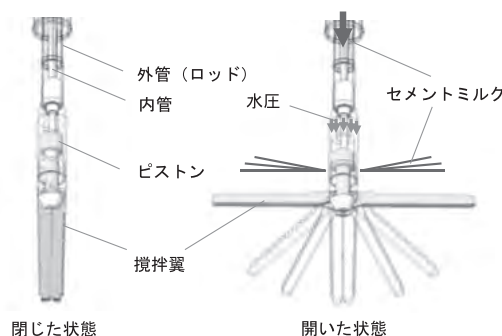
2. 本工法の概要

(1) 施工機械及び施工形態

本工法は、地中拡張翼型の工法として主に液状化対策を想定し、従来の機械攪拌式では難しいとされた箇所での適用を目指し開発された。最大の特徴は地中で開閉可能な小型の攪拌翼であり、地中障害物の回避や斜め方向などの施工のバリエーションを有している。写真 1 に本工法の標準施工機械の外観を示す。本機は汎用のボーリングマシンであり、一般的な大型の機械攪拌式施工機械では幅 20 m 以上の施工エリアが必要と想定されるのに対し、本機の設置に必要なエリアは約 4 m × 8 m と小さい。施工は、鉛直施工以外にも前方や左右側方に向けた斜め施工にも対応している。この場合、機械攪拌式で斜め施工を想定すると、従来の大きく重い攪拌翼では先端の攪拌翼の重さにより施工ロッドがたわむ恐れがあり、軟弱な地盤で施工ロッド



写真—1 標準施工機械



図—2 攪拌翼の機構

を回転させながらの位置管理が難しい。すなわち、改良体の出来形管理に影響することから、施工は事実上困難であった。これに対し、本工法の攪拌翼は軽量であることから、ロッドのたわみの影響はほとんどなく、施工試験例¹⁰⁾や施工実績¹¹⁾から様々な角度での施工性を確認している。施工形態としては、図—1に示すように、表層の舗装や配管などの地中障害物を回避した施工、建物内や構造物近傍での施工など、攪拌翼の小型化や地中での開閉機構を活用した様々な形態が想定されるものである。

(2) 攪拌翼

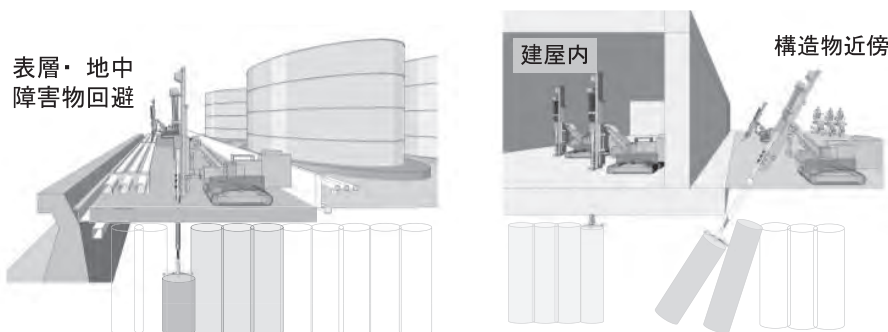
攪拌翼は、図—2に示すように、小型・軽量化に加え地中での開閉性を重視しシンプルな形状としている。また、攪拌部の寸法により、円柱状の改良体直径(φ600 mm から最大φ1,200 mm)が選択される。開閉機構は、攪拌翼内部のピストンに水圧を作用させることにより拡翼し、圧力開放状態でロッドを引き上げることで縮翼される。地中拡翼型の事例では攪拌翼が大きく重くなりがちであったが¹²⁾、本工法ではシンプルな形状と水圧式の機構により大幅な小型・軽量化が図られた。セメントミルク吐出のための供給経路については、完全拡翼の状態においてのみ開通する構造としており、供給圧力と流量のモニタリングにより地中での確実な拡翼状態の確認が可能となっている。

一方で、シンプルな形状から造成時の攪拌性や攪拌

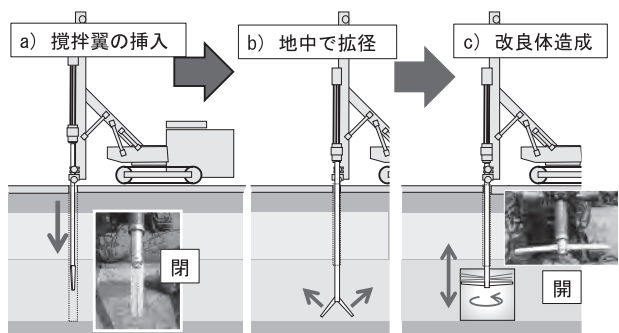
翼の耐久性が懸念された。攪拌性については、既往の工法よりも劣ると推察されたが、開発当初の対象を液状化対策としていたことから、砂地盤については攪拌回数などの管理を確実にを行うことにより、改良体の強度分布のパラツキは他工法と同等であることを確認している¹³⁾。耐久性については、これに関連する事項として、施工可能な地盤性状の目安を砂地盤でN値20以下、粘性土地盤でN値3以下と定めている。更に、攪拌時において地盤状況が変化した場合、例えば途中で硬い地盤に遭遇した際には、無理に回転速度を維持しようとすると攪拌翼が破損する恐れがあった。そこで、攪拌翼に過度の負荷を掛けられないよう地盤状況による回転速度の変化を許容した上で、この変化に応じた攪拌翼の移動速度やセメントミルクの供給量を監視・自動制御するシステムを開発し施工管理を行っている¹⁴⁾。

(3) 施工手順

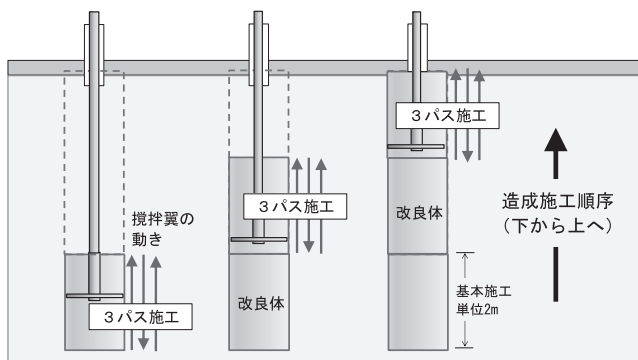
図—3に地中での攪拌翼開閉に関する基本手順を示す。手順は、a) 先行削孔したケーシング内に閉じた状態の攪拌翼を挿入し、ケーシングを引き上げることで攪拌翼を地中に露出させ、b) 所定深度にて拡翼し、c) 拡翼状態でセメントミルクを吐出しながら回転・前後させ円柱状の改良体を造成する。造成完了後は縮翼され、最終的に孔壁保護のためのケーシング内に収められ回収される。造成サイクルとしては、施工機械から遠方(改良体の下端)側より手前側(上



図—1 施工形態例



図—3 攪拌翼開閉の基本手順



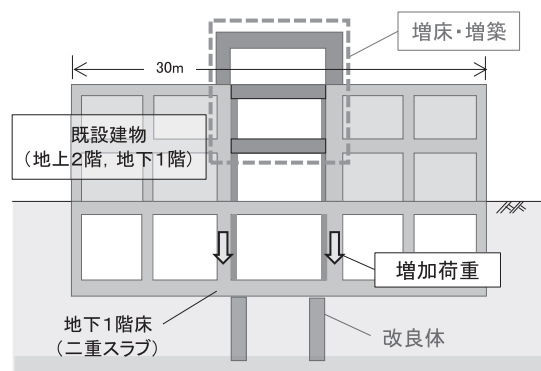
図—4 施工手順（従来法、砂質土地盤対応）

端)に向け順に行うことを基本とする。この際、攪拌翼に繋がる施工用ロッドの長さ（標準は2m）を施工単位とし、それぞれで「(手前側への)引き上げ→(遠方側への)押し下げ→引き上げ」動作（3パス施工）をしながら順に造成を行っている（図—4）。

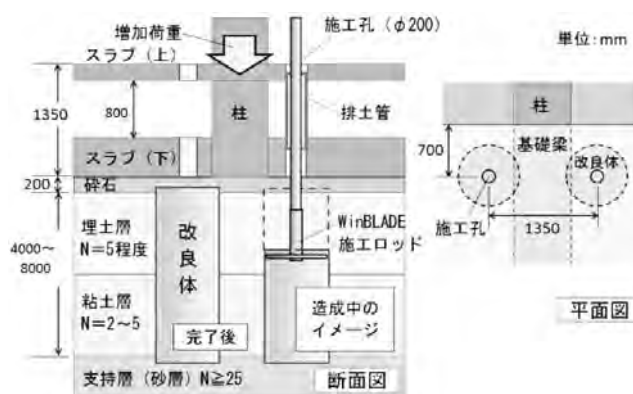
3. 既設建物改修工事への適用

(1) 概要

既設建物のリニューアル工事に伴い直下地盤での改良体造成を行った。図—5に改良体の配置概要を示す。対象は地下1階・地上2階の建物で、増床に伴う建物荷重の増加に対応し地盤支持力を向上させるものである。なお、本件は荷重増加の見込まれる箇所が局部的である点が特徴的で、改良体はこれに対応した配置としている。代替工法としては、二重スラブである地下室床面を一旦全撤去し地盤改良を行う方法や、床面を含む建物底部を全面的に補強する方法などが考えられたが、拡翼機構を活かした施工が可能と判断し本工法の採用に至った。図—6には改良体配置の詳細を示す。改良体の造成は、地下室床面を含む二重のスラブに施工孔（ $\phi 200$ mm）を設け、地中に挿入した攪拌翼を拡翼することにより行った。対象地盤はN値2～5の粘性土、及びN値5程度の埋土であり、スラブ直下からN値25以上の支持層（砂層）までの間に



図—5 建物及び改良体配置の概要（断面図）



図—6 改良体配置の詳細と造成方法

$\phi 800$ mmの円柱状の改良体を建物内の壁近傍にて柱を挟む配置で造成した。またこれに対応し、建物側については近傍の柱の増し打ちなど補強を行っている。本工法の適用にあたっては、地中拡翼の特徴を最大限活かしつつも、初めての建物内での施工事例であり、比較的硬質な粘性土への対応、更に目的が従来の液状化対策ではない点など、技術的な課題も多い状況であった。

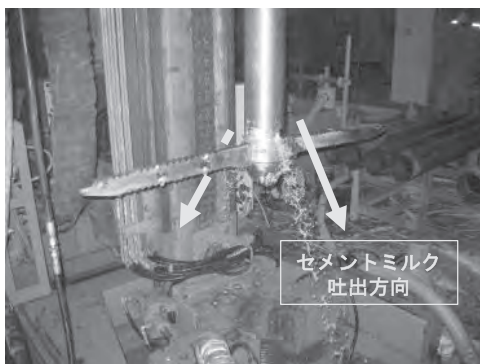
(2) 試験施工

本工法の適用にあたり、前述の課題を克服すべく改良を行い、その効果を確認するための試験施工を実施した。まず、建物内での施工については、空頭約5mの地下室内を想定し、標準機より小型のスキッド式施工機械（必要設置エリア:2m×4m）を導入した（写真—2）。試験施工では、地下室において既存の柱や壁の近傍での施工性を確認した。

次に、粘性土地盤への対応については、砂地盤よりも削孔性や攪拌性が劣ることが想定されたため、攪拌翼形状の一部変更と施工手順の見直しを行った。写真—3は改良型の攪拌翼であり、超硬チップの増設、セメントミルクの吐出方向を従来の水平方向から斜め下方とするなどした。施工手順については、従来の3



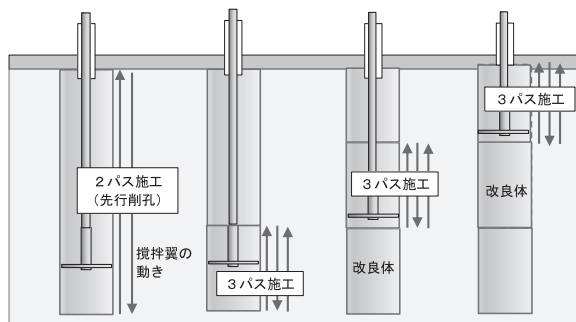
写真一2 建物内での施工状況



写真一3 改良型の攪拌翼

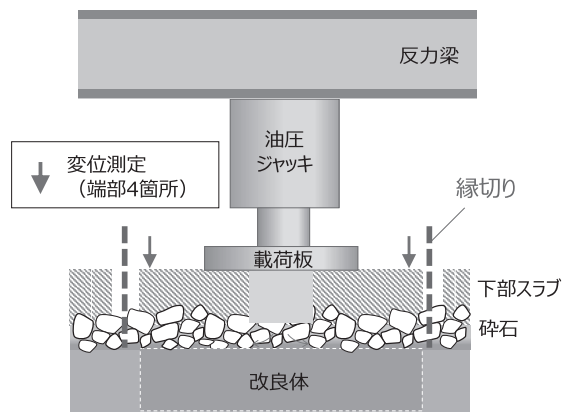
バス施工に対し、今回は最初の段階で全深度に渡り水吐出のみで先行削孔を行い、その後にセメントミルクを吐出し造成を行う2段階方式とした(図一7)。すなわち、粘性土の場合、削孔の段階で小さな粘土塊を許容すると、固化材の均一性が損なわれ、かつ目詰まりにより排土が阻害されることが懸念されたため、削孔と造成過程を切り離し丁寧な削孔を行う必要があると考えた。このため、従来よりも施工過程が増すことになるものの、攪拌翼に掛かる負荷の軽減や、削孔初期に見られた供給セメントミルクが地中に残留することなく直接排出される状況の回避など、全体として施工性や品質の向上に繋がる状況を確認した。

また、二重スラブ直下には碎石層があり機械攪拌で



図一7 施工手順（粘性土地盤対応）

の施工が難しいことから、建物荷重の伝達すなわちスラブと改良体頭部との密着性が懸念された。そこで、改良体造成後に碎石層に向けセメントミルク注入を施し、密着性の向上を図った。注入は岩盤亀裂などを対象とした止水注入法を参考に、セメントミルク濃度を $W/C = 150, 100, 50\%$ と段階的に変化させ実施した。図一8に注入効果を確認するため試験施工1ヶ月後に実施した載荷試験の概要を示す。試験は、上部スラブの一部を撤去し、改良体形状に合わせ $\phi 800\text{ mm}$ の円形状に下部スラブ及び碎石層を改良体上端のレベルまで縁切りし、改良体頭部に向けジャッキにて載荷試験を実施した。得られた荷重～変位関係から、載荷当初より荷重増加が見られるなどスラブと改良体頭部間に緩みの存在を示す傾向は見られず、密着性に問題の無いことを確認した。

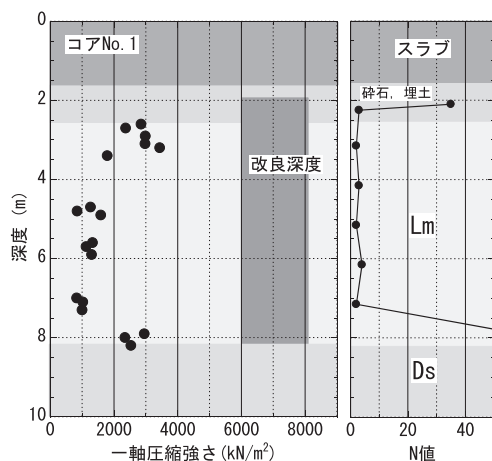


図一8 載荷試験の概要

(3) 本施工

試験施工の結果を受け、リニューアル工事における改良体造成の本施工を実施した。配合試験の結果から固化材添加量は 180 kg/m^3 （特殊土用セメント系）とし、建物内の壁近傍にて最大長さ8 m、計8体の改良体造成を大きなトラブルなく完遂出来た。施工に当たっては、上下スラブ間に薄肉の鋼製スパイラル管を設置し(図一6内の「排土管」、施工後に撤去)、排土も滞りなく処理できた。なお、今回の一連の施工による排土量はセメントミルク投入量と概ね一致していた。

図一9に事後のチェックボーリングによる改良体強度分布の一例を示す。設計基準強度 $F_c = 900\text{ kN/m}^2$ に対し、品質管理指針¹⁵⁾に従い実施したコア供試体による一軸圧縮強度平均値 $2,689\text{ kN/m}^2$ （材令54日、 $N=21$ ）で、バラツキを考慮した合格判定基準 $1,823\text{ kN/m}^2$ （変動係数33.9%）を満足することを確認した。



図—9 事後調査結果の一例

4. おわりに

今回、地中拡翼型の機械攪拌式の地盤改良工法 WinBLADE によりリニューアル工事に伴う既設建物直下地盤への改良体造成を行った。本施工では、建物内での施工や粘性土対応など従来実績とは異なる条件ではあったものの、小型機械の導入や施工手順の見直しにより、新たな施工のバリエーションが確立できたものと考えている。一方で、今回は建屋内ではあるが空頭 5 m と施工面で比較的恵まれた空間環境であったことから、今後は更に低空頭で狭隘な箇所での施工対応を進めていきたい。

本工法は、機械攪拌式の特長を持ちつつ施工形態に関する自由度の高い工法として開発されたものであり、独自の攪拌翼により新たな施工形態の可能性が考えられる。今後も様々なニーズに合わせた改良を行う予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 土木学会建設研究委員会：地盤改良工法技術資料，<http://committees.jsce.or.jp/sekou05/system/files/11-3%20%E5%9C%B0%E7%9B%A4%E6%94%B9%E8%89%AF%E5%B7%A5%E6%B3%95.pdf> (2018 年 12 月アクセス)。
- 2) 産業施設の強靱化に関する研究会：臨海部産業施設の強靱化ガイドライン，2016。
- 3) 公益社団法人地盤工学会編：地盤工学ハンドブック，p.1202，1999。
- 4) 日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針，pp.302-312，2012。
- 5) 国土交通省関東地方整備局，公益社団法人地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態説明報告書，2011。
- 6) 公益社団法人地盤工学会：地震時における地盤災害の課題と対策—2011 年東日本大震災の教訓と提言（第二次），2012。
- 7) 国土交通省：平成 27 年度国土交通白書，pp.37-38，2016。
- 8) 小林真貴子，石井裕泰，藤原斉都，青木智幸，立石洋二，遠藤堅一，広川郁夫，菅浩一，三上登，佐藤潤：地中拡翼型の盤攪拌改良工法開発 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。
- 9) 三上登，佐藤潤，石井裕泰：拡翼型機械攪拌工法による地盤改良—WinBLADE 工法一，基礎工，pp.32-35，2014。
- 10) 佐藤潤，菅浩一，三上登，石井裕泰，藤原斉都，小林真貴子，青木智幸，立石洋二：地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発～斜め方向改良体の造成～，第 68 回土木学会年次学術講演会，pp.593-594，2013。
- 11) 株式会社・ティー・エス：地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発，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。
- 12) 小寺秀則，川崎宏二，矢倉哲夫：拡幅式地盤改良工法 -SWING 工法- の開発，大成建設技術研究所報，pp.179-185，1985。
- 13) 小林真貴子，青木智幸，藤原斉都，石井裕泰，松井秀岳，立石洋二，窪塚大輔，菅浩一，三上登，佐藤潤：地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の開発～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。
- 14) 三上登，佐藤潤，石井裕泰：拡翼型機械攪拌工法による地盤改良—WinBLADE 工法一，基礎工，Vol.42，No.8，pp.32-35，2014。
- 15) 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，2001。

〔筆者紹介〕

藤原 斉都 (ふじわら ただふみ)

大成建設㈱

技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室
主席研究員

石井 裕泰 (いしい ひろやす)

大成建設㈱

技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室
チームリーダー