浅層・深層併用型地盤改良技術の開発に関する研究

研究予算:運営費交付金 研究期間:平31~令3 担当チーム:先端技術チーム 研究担当者:森川博邦、山口崇、新田恭士、 服部達也、山田充

【要旨】

浅層・深層併用型地盤改良工の浅層改良工の施工方法について、現場条件に応じた適切な施工機械、施工方法 を選択するために必要な施工機械の混合能力、施工方法の特性等の評価情報を調査した。実験により、バックホ ウ、スタビライザの性能や特徴を明らかにした。また、地盤内部の混合状況を個別要素法による解析的手法によ り明らかにした。

キーワード:地盤改良工、浅層改良工、施工機械

1. はじめに

軟弱地盤上に道路盛土等を構築する場合、深層改良 工法等の地盤改良が適用されることがある。近年、コ スト縮減のために深層改良体の改良率を低減させる 様々な工法が開発されてきている¹⁾。本テーマでは、 深層改良体と併せて上部に浅層改良体を構築すること で、深層改良体の改良率を低減させる「浅層・深層併 用型地盤改良工法」(以下、併用型地盤改良工法)につ いて調査研究を行った(図-1)。

併用型地盤改良工法の施工方法について考察すると、 深層改良体については、求められる設計基準強度、ば らつきは一般的な深層改良体と同等であると考えられ、 既存の深層改良工法を適用することが可能と考えられ る。また、深層改良工法は、適用条件が明らかにされ た数多くの工法があり 2)、様々な現場条件に応じて適 切な深層改良工法を選択し、確実な施工を行うことが 可能と考えられる。一方、浅層改良体については、一 般的な浅層改良体と比較して、高い設計基準強度と、 少ないばらつきが求められる場合が多いと考えられる。 セメント系固化材を用いた地盤改良では、必要な強度、 ばらつきの少ない改良体を構築するためには、土と改 良材をよく混合することが重要とされている³⁾。土と 改良材をよく混合するためには、現場条件に応じて適 切な施工機械、施工方法を選定することが重要と考え られる。しかし、浅層改良工について、適切な施工機 械、施工方法を選択するための十分な評価情報が見受 けられないようである。そこで本研究では、併用型地 盤改良工の浅層改良工を施工する際に、適切な施工機 械、施工方法を選択するための施工機械の混合能力、

施工方法の特性等の評価情報を調査するものとした。

浅層改良工の施工には、バックホウ、スタビライザ、 自走式土質改良機等が用いられるが⁴、本研究では現 場で比較的多く適用されていると考えられるバックホ ウ、スタビライザを対象として調査を行った(図-2)。 バックホウについてはバケット種類、施工方法、オペ レータ技量を調査した。スタビライザについては、機 種間の比較検討を行った。また、バックホウとスタビ ライザの比較検討を行った。さらに、個別要素法を用 いた解析により、地盤内部の混合状況について検討を 行った。



図-1 浅層·深層併用型地盤改良工法



バックホウ



スタビライザ

図-2 調査対象施工機械

2. バックホウの調査

2.1 バケットタイプの実験調査

バックホウには数種類の混合専用バケットがある。 一般に混合専用バケットはノーマルバケットにくらべ 良好な混合が行えると考えられている。しかし、混合 専用バケットの有効性について定量的に評価した研究 はあまり見受けられない。そのため、ノーマルバケッ トを用いて混合作業が行われる場合も多いようである。 本研究では代表的な3種類のバケット(ノーマルバ ケット、スケルトンバケット、ミキシングバケット) について混合能力を定量評価する基礎的実験を行った。 実験に用いた3種類のバケットの外観を図-3~5に示 す。

2.1.1 実験方法

地盤改良の混合作業は、セメント粒子と土粒子の「混 合」及び、「土塊破砕」の二つからなる現象と考え、「混 合」と「土塊破砕」について調査する実験を別々に行っ た。実験は茨城県つくば市の土木研究所構内の関東 ロームを主体とする地盤で実施した。

2.1.1.1 混合状況調査

幅 2.0m×長さ 2.0m×深さ 0.5m に表土を剥ぎ取り、 さらに深さ 0.5m まで、よく混合し均一な実験地盤を 造成した。実験地盤の上に白色の石灰を模擬改良剤と して散布した。10回の混合作業を行い、回数毎の混合 状況を写真撮影した(図-6)。

2.1.1.2 土塊破砕状況調查

幅 2.0m×長さ 2.0m×深さ 0.5mの表土を剥ぎ取り実 験地盤を露出させた。実験地盤は事前に混合等は行わ ず地山のままとした。5回の混合作業を行い、混合 1回 目と 5回目について、50mmのふるいにかかる土塊の重 量を測定した(図-7)。



図-3 ノーマルバケット



図-4 スケルトンバケット(80mm メッシュ)



図-5 ミキシングバケット



図-6 混合状況調査方法



図-7 土塊破砕状況調査方法

2.1.2 実験結果および考察

2.1.2.1 混合状況調査

図-8に撮影した混合状況写真を示す。図-8より、3 種類の全てのバケットタイプにおいて、混合1回目で 多くの石灰の白色が見受けられなくなり、混合5回目 では大半の石灰の白色が見受けられなくなった。混合 10回目では混合5回目と大きな変化は見受けられな かった。また、バケット種類により混合状況に明確な 差異は見受けられなかった。

1回あたりの混合作業時間を測定し10回の平均値を 算定した。バケット刃先が地盤面に挿入されてからバ ケット内の土が全て排土されて空になるまでを混合作 業時間とした。その結果、ノーマルバケットが24.8秒、 スケルトンバケットが22.1秒、ミキシングバケットが 16.2秒となった。3種類のバケットは混合能力に明確 な差異は見受けられなかったが、ミキシングバケット を用いると施工効率が向上する場合があることがわ かった。本実験は関東ロームを主体とする一種類の土 質での結果であり、他の様々な土質について調査を行 う必要があると考えられる。

2.1.2.2 土塊破砕状況調查

図-9に50mmのふるいにかかった土塊の重量、およ び重量比率を示す。図-9より、混合1回では、土塊残 留率はノーマルバケットで最も大きく、ついでスケル トンバケット、ミキシングバケットの順となった。混 合5回ではバケット種類により土塊残留率に明確な差 異は見受けられなかった。ある一定回数以上の混合を 行うと、バケット種類で土塊破砕能力に明確な差異は 無くなる場合があることがわかった。ただし、「2.1.2.1 混合状況調査」と同様、ミキシングバケットは他の二 種類のバケットにくらべ施工効率が高い。

ミキシングバケットは他の二つのバケットにくらべ、 混合作業の速度が速い場合が多いと考えられる。ただ し、バケット背面に比較的大きな空隙を有しているた め、掘削などの他の作業が施工不能となることが多い と考えられる。バケット交換作業は一般に 30 分~1 時 間程度の時間がかかるため、現場に調達できるバック ホウの台数が限られている場合、バケット交換時間を 確保できる工程を考慮する必要等があると考えられる。



図-8 各バケットの混合状況

	混合	全試料	残留土塊	土塊
	回数	重量(kg)	重量(kg)	残留率(%)
ノーマル	1回	449	96	21.4%
	5回	541	33	6.1%
スケルトン	1回	600	93	15.5%
	5回	490	33	6. 7%
ミキシング	1回	572	72	12.6%
	5回	516	18	3. 5%



2.2 施工方法の実験調査

バックホウによる浅層改良施工では、置換え工法、 原位置混合工法などの施工方法があり、現場条件に応 じて適切な施工方法を選択することが良好な混合施工 を行うために重要と考えられる。しかし、工法の選択 に十分な定量的な評価情報が見受けられないようであ る。また、高含水状態の地盤では「ダマ」が生じやす いため、一般にバックホウでは十分に混合できないと 考えられている。しかし、高含水状態の土に対するバッ クホウの混合能力を定量的に評価した研究は見受けら れないようである。さらに、一般に、バックホウ混合 作業では、オペレータ技量により改良体の品質に差異 が生じると考えられているが、客観的根拠はあまり見 受けられないようである。そこで、本実験では、バッ クホウによる浅層改良工について、置き換え工法、原 位置混合工法、高含水地盤での混合、およびオペレー タ技量の差異について実験により調査を行った。

2.2.1 実験方法

実験は土木研究所(茨城県つくば市)の構内で実施 した。実験地盤の基本物性値を表-1に示す。実験は表 層地盤を 50cm 剥ぎ取った地盤で実施した。5 ケース の実験条件で試験施工を実施した。各ケースの詳細を 表-2に示す。混合作業はノーマルバケットを装着した 12t級の油圧ショベルを用い実施した。混合時間はオペ レータの任意とした。改良材は六価クロム溶出量低減 型の汎用固化材を使用した。配合量は100kg/m³とした。 試験施工後、内径100mmのコンクリートコアカッター を用いコア試料を採取した(図-10)。コア採取作業は 水を供給しながら行った。各ケースで1試料ずつ採取 した。施工から8日後にコアを採取し、ラップ養生し 室内保管した後、施工より 14 日後に一軸圧縮試験を 実施した。供試体寸法は外径 100mm、長さ 200mm と した。ただし Case4 は試料が損傷したため、残存した 外径 100mm 長さ 120mm の試料で測定を実施した。測 定終了後、試料の含水比、乾燥密度を測定した。また case4、case5 について、施工より約3か月後に実験地 盤をバックホウで掘削し、改良地盤の断面の状況を観 察した。

表-1 実験地盤の基本物性値

	数値	
自然含水比(%)		96.6
	2mm以上(%)	0.0
粒度分布	$2 \text{mm} \sim 75 \mu \text{mm}(\%)$	14.8
	75μmm以下(%)	85.2
最大乾燥密度	0.715	
最適含水比(%)		94.3
175 µ mm以下(%) 最大乾燥密度(g/cm ³) 最適含水比(%)		85. 0.71 94.

※締固め試験はA-c法を用いた。

表-2 実験ケース一覧

	改良範囲寸法 (m)	オペレータ	施工方法
case1	幅2.0×長さ5.0	熟練	改良範囲を掘削し、地上でセメントと土を
	×深さ1.0	(職歴30年)	攪拌混合した後、埋め戻し。3層に分けて
			敷均し、振動コンパクタで締固め。
case2	幅2.0×長さ5.0	熟練	改良範囲の地盤上に改良材を散布し、バッ
	×深さ1.0	(職歴30年)	クホウで地盤と攪拌混合。
case3	幅2.0×長さ5.0	熟練	事前に水を投入、攪拌し軟弱地盤を形成。
	×深さ1.0	(職歴30年)	改良範囲の地盤上に改良材を散布し、バッ
			クホウで地盤と攪拌混合。
case4	幅2.0×長さ2.5	初心者	改良範囲の地盤上に改良材を散布し、バッ
	×深さ1.0	(実工事経験	クホウで地盤と攪拌混合。
		無)	
case5	幅2.0×長さ2.5	熟練	改良範囲の地盤上に改良材を散布し、バッ
	×深さ1.0	(職歴30年)	クホウで地盤と攪拌混合。



図-10 コア試料採取状況

2.2.2 実験結果および考察

表-3 に各試料の含水比、乾燥密度を示す。表-3 よ り、各ケースで含水比、乾燥密度に大きな差異は見受 けられなかった。本実験ではコンクリートコアカッ ターを用い、水を供給しながら試料採取を行ったが、 概ね同条件で試料採取を行うことができたと考えられ る。

一軸圧縮試験の結果を図 11~13 に示す。図 11~13 より、Caselは、一軸圧縮強さ、変形係数とも、比較的 大きな値となった。地上の広いヤードで良好な混合作 業ができたためと考えられる。Casel の施工時間は、 混合が約1時間、埋め戻し(敷均し、締固め)が約3 時間だった。Case2 は一軸圧縮強さ、変形係数とも、比 較的小さな値となった。原位置での混合作業だったた め、混合が不十分になった可能性が考えられる。施工 時間は約1時間だった。Case3は、一軸圧縮強さはCase1 の次に大きな値となったが、圧縮ひずみが大きく変形 係数が比較的小さい。Case3 の施工前に加水攪拌し作 成した軟弱地盤の含水比は127.7%であった。最適含水 比を上回る軟弱地盤状態だったため、元々の強度が低 かったこと、ダマの発生しやすい土質状況だったため 混合が容易でなかったことが要因として考えられる。 施工時間は約1時間だった。Case4は、初心者オペレー タにより混合が不十分だったため、一軸圧縮強さ、変 形係数が比較的小さな値となったと考えられる。施工 時間は約 30 分だった。Case5 は Case2 と比較して施工 範囲が小さかったため、十分混合され、一軸圧縮強さ、 変形係数が比較的大きな値となったと考えられる。施 工時間は約30分だった。

置換え工法である Casel は地上の広いヤードで良好 な混合作業を行いやすいため、強度および剛性の高い 改良体が構築されやすいと考えらえるが、埋め戻し作 業が必要となる。Case2~5 は原位置混合であり、埋め 戻し作業は不要であるが、混合作業がしづらく、混合 が不十分になり、改良体の強度および剛性が比較的低 くなる可能性がある。Case2~5は、実験状況の目視観 察では改良材はよく混合されているように見受けられ たが、さらに混合時間を長くとれば強度および剛性が 増加する可能性があると考えられる。全てのケースで 1 試料のみの一軸圧縮試験の測定結果であるため、今 後、追加調査が必要と考えられる。

Case4、case5 について、掘削して露出させた改良体 の代表断面を図-14 に示す。断面にフェノールフタレ インを噴霧し改良材の分布状況を観察した。初心者オ ペレータにより施工された case4 では施工範囲内に フェノールフタレインが発色しない比較的広い部位が 見受けられる一方、局所的に塊状の改良材も見受けら れた。熟練オペレータにより施工された Case5 では、 施工範囲内のフェノールフタレインが発色しない面積 は比較的小さく、改良材の塊等の不均一な混合状況は 見受けられなかった。バックホウ混合作業では、オペ レータ技量により混合状態に差異が生じる場合がある ことがわかった。

表-3 試料の含水比および乾燥密度

	含水比	乾燥密度
	(%)	(g/cm ³)
Case1	83.0	0.693
Case2	93.2	0.675
Case3	99.0	0.693
Case4	89.1	0.622
Case5	91.0	0.699



図-11 試料の含水比および乾燥密度





Case4 (初心者オペレータ)



Case5 (熟練オペレータ)

図-14 開削断面状況

3. スタビライザの調査

スタビライザは浅層改良工専用の施工機械であり、 一般にバックホウにくらべ、良好な混合作業が行える と考えられている。しかし、スタビライザとバックホ ウの混合能力や特徴について定量的に評価した研究は あまり見受けられないようである。また、一般に広く 流通しているバックホウにくらべ、専用機であるスタ ビライザは台数が少なく、調達費用が余計にかかった り、工事繁忙期には調達が難しい場合もあると考えら れる。そのため、スタビライザが適した現場条件にお いても、バックホウを用いて施工されている場合もあ ると考えられる。また、スタビライザには施工深さ、 混合翼形状の異なる数種類の機種があり、施工条件に よって適切な機種を選定することが良好な混合作業を 行うために重要と考えられる。しかし、スタビライザ の機種と施工条件の関係性を定量的に評価した研究は あまり見受けられないようである。本実験では、バッ クホウとスタビライザの混合能力や特徴を比較検討す ると共に、スタビライザの3機種の比較検討について 実験調査を行った。

3.1 実験方法

茨城県つくば市の土木研究所構内に幅約10m×長さ約40mの実験用地盤を造成した。図-15に造成した実 験用地盤の概況図を示す。造成した実験用地盤には4 つの試験レーンを設定した。4つの試験レーンの概要 を表-4に示す。実験用地盤は既設の低盛土を掘削後、 試験に使用する土をダンプトラックで搬入し、排土板 付きのミニバックホウ(3t級)を用い、厚さ20cmで 敷均し、転圧して造成した。土の盛り立ては南西側か ら北東側の順番で行った。土は茨城県内で採取された 関東ロームを用いた。2021年9月27日~10月4日に 土搬入、敷均し、転圧の作業を行った。

造成した実験用地盤において 2021 年 10 月 6 日~10 月 8 日に浅層改良工の試験施工を行った。六価クロム 溶出量低減型セメント系改良材を用い、表-4 に示す 3 機種のスタビライザとバックホウを用い、土とセメン ト改良材の混合作業を行った。その後にタイヤローラ を用い、一層 0.6m の厚さで転圧を行った。試験施工後 にレーン 1~4 について表-5 に示す測定、調査を実施 した。





全景画像 図-15 実験用地盤概況図

	機種	寸法	締固め条件
	スタビライザA		
$ u - \nu 1$	(最大施工深さ1.2m)		
	スタビライザB		
レーン2	(最大施工深さ0.7m)	幅2.0m×長さ16.0m	タイヤローラ
	バックホウ	×深さ0.6m	1層0.6m
レーン3	(スケルトンバケット使用)		
	スタビライザC		
レーン4	(最大施工深さ1.0m)		

表-4 各レーン施工条件

表-5 測定・調査項目一覧

測定項目	動的平板載荷 試験装置	一軸圧縮試験	粒径調査	断面調査
測定値	地盤反力係数	一軸圧縮強さ	粒度分布	目視調査
測定箇所	深さOcm、3Ocm	深さOcm、3Ocm	レーン中央部	レーン中央部
測定数	45か所/レーン	6試料/レーン	1試料/レーン	1断面/レーン
		※レーン3は5試料		
計測日	2022/1/18	2022/1/19	2022/1/18	2022/2/22
測定方法	70cm四方の測定範	コンクリートコア	混合施工直後に試料採	バックホウで掘削、
	囲内を任意に15点	カッタによる試料採	取。9.5mm~125mm	フェノールフタレイン
	計測×3か所	取(φ10cm×長さ	のふるいを用い調査。	塗布
		20cm)(2022/1/5)。		
		注水しながら不攪乱		
		状態で採取。ラップ		
		養生。		
測定目的	改良体の地盤反力係	改良体の強度および	各機種の土塊の破砕能	各機種の土とセメント
	数およびばらつきを	ばらつきを調査す	力を調査する。	改良材の混合能力を調
	調査する。	る。		査する。

3.2 実験結果および考察

各測定調査結果を図-16~19、表-6に示す。表-6、図 -19 より、断面調査ではスタビライザにくらベバック ホウで混合ムラが見受けられた。図-16~18 より、地 盤反力係数、一軸圧縮強さ、粒度分布では、バックホ ウとスタビライザ3機種の間に明確な差異は見受けら れなかった。施工速度の設定はスタビライザが 1.5m/ 分、バックホウは0.6m/分とした。バックホウはスタビ ライザにくらべ施工速度を遅くしても、混合ムラが生 じる場合があると考えられる。強度やばらつきに明確 な差異が見受けられなかったのは、強度やばらつきに 影響を与える程の混合度合いの差ではなかった可能性 が考えられる。今後、詳細な追加調査が必要と考えら れる。

スタビライザ3機種のレーン1,2,4 について比較す ると、表-6、図-19より、レーン1,4では、断面調査で 底部に改良材の集中が見受けられた。図16,17より、 レーン1では、深さ0cm(表層)で地盤反力係数、一 軸圧縮強さが比較的小さく、深さ30cmではばらつき が大きくなる傾向が見受けられた。図-18より、粒度 分布においてもレーン1は粒径の大きな土塊が比較的 多く分布した。レーン2のスタビライザBでは最大施 工深さ(0.7m)と施工深さ(0.6m)の差が小さく、断 面調査では比較的良好な混合ができたように見受けら れた。レーン1のスタビライザAでは、最大施工深さ

(1.2m)と施工深さ(0.6m)の差が大きかったことが、 比較的大きな土塊の残留、および改良材が底面に集中 した原因の一つと考えられる。



図-16 地盤反力係数





100.0

表6	断面調杳所見
10	

	断面観察所見(フェノールフタレイン塗布)
	全面的にフェノールフタレインが発色したが、底面に改良材が集中していたよう
$\nu - \nu 1$	に見受けられた。
	全面的に均一にフェノールフタレインが発色し、均一に混合されているように見
レーン2	受けられた。
	フェノールフタレインが発色しない領域が多くあり、混合ムラがあるように見受
レーン3	けられた。
	全面的にフェノールフタレインが発色したが、底面に改良材が集中していたよう
レーン4	に見受けられた。



図-19 断面状況写真

4. 個別要素法による解析

これまでの実験では、地盤内部の混合状態について、 様々な計測機器を用いて改良体の力学的諸数値を測定 し、間接的に評価した。本調査では地盤内部の土粒子 とセメント改良材の混合状況を調査するために個別要 素法による解析を行った。個別要素法(Discrete Element Method, DEM)は、多数の固体粒子の運動を、粒子ごと の並進および回転の運動方程式に基づいて時刻歴に解 き進める解析手法であり⁵⁾、非連続で動的な土の挙動 を取り扱うことができると考えられる。解析対象は バックホウ混合のノーマルバケットとミキシングバ ケット、およびスタビライザ混合の施工最大深さ 1.2m 機種での深さ 1.0m 混合と 0.6m 混合とした。

4.1 実験方法

シミュレータ環境を構築し運用することのできるソ フトウェア「AGX Dynamics」を用い、バックホウ混合 とスタビライザ混合の二つの個別要素法のシミュレー ション環境を構築した。構築したシミュレーション環 境を表-7 に示す。シミュレーション環境内の実験地盤 は、セメント粒子を土粒子の上に配置して作成した。 セメント粒子は白色、土粒子は茶色で表現した。図-20 にシミュレーション環境の概況を示す。

シミュレーションに用いたノーマルバケット、スケ ルトンバケット、スタビライザ混合翼の3Dモデルは、 実物の寸法を基に、曲線の直線補間等、適宜、形状の 簡略化を行い作成した(図-21~23)。バックホウの掘 削軌道、およびスタビライザの混合翼回転速度、並進 速度は、実際の施工を参考に決定した。図-24 にバッ クホウの掘削動作、およびスタビライザの施工動作を 示す。

	バックホウ混合	スタビライザ混合
地盤寸法	長さ2.5m×幅2.0m	長さ6.0m×幅3.5m
	×深さ1.0m	×深さ1.0m
粒子径	25mm	50mm
粒子数	土粒子:494,200	土粒子:237,648
	セメント粒子:36,416	セメント粒子:19,000
セメント	100mm	100mm
粒子敷均		
し厚さ		
粒子間粘	砂-砂:0.6N	砂-砂:10N
着力	砂-セメント:0.3N	砂-セメント:0N
	セメント-セメント:ON	セメント-セメント:ON
機種	バックホウ(ノーマルバケッ	スタビライザ(最大施工深さ
	ト、スケルトンバケット)	1.2m)
作業内容	10回混合	施工深さ:0.6m、1.0m
施工動作	同じ掘削動作軌跡を10回繰り	回転速度:30rpm
	返す。	並進速度:2.2m/分

表-7 構築したシミュレーション環境



バックホウ混合



スタビライザ混合 図-20 構築したシミュレーション環境の概況





図-23 スタビライザ混合翼 3D モデル外観図



※同じ動作軌道で10回掘削



ミキシングバケット



スタビライザ 図-24 施工動作

4.2 実験結果および考察

バックホウの計算結果について、セメント粒子を自 色で示した縦断面方向の投影図を図-25、26 に示す。 白色が濃いほど縦断面方向にセメント粒子が重なり、 セメント粒子が多く分布していることを示す。図-27、 28 には改良範囲の中央部の 0.5m×1.0m の範囲の深さ 方向のセメント粒子数を示す。ノーマルバケットは深 さ 0m~0.5m、ミキシングバケットは深さ 0.2m~0.4m の範囲とした。

図-25~28 より、ノーマルバケット、ミキシングバ ケット共に、混合1回目ではセメント粒子の分布に偏 りが見受けられるが、混合5回目には概ね均一にセメ ント粒子が分布しているように見受けられた。また、 混合5回目と混合10回目では、セメント粒子の分布 に大きな変化は見受けられなかった。「2.1 バケット タイプの実験調査」での、表層からの外観目視と同様 の傾向となった。シミュレーション結果より、地盤内 部も外観目視調査と同様の状況となっていたと推測さ れる。

なお図-25、26 では、ノーマルバケットにくらべ、ミ キシングバケットは白色が濃く見受けられ、セメント 粒子の密度が高い。バケットの掘削軌道がノーマルバ ケットとミキシングバケットで異なっていたため、ミ キシングバケットの掘削体積が小さくなったと考えら れる。また、ミキシングバケットでは手前側への土の 盛りこぼしが多く発生した。そのため、ミキシングバ ケットではノーマルバケットにくらべ、セメント粒子 の密度が高くなったものと考えられる。



図-25 縦断面方向セメント粒子投影図 (ノーマルバケット)



図-26 縦断面方向セメント粒子投影図

(ミキシングバケット)







図-28 セメント粒子数(ミキシングバ ケット、深さ0.2m~0.4m)

スタビライザ混合について、セメント粒子を白色で 示した縦断面方向の投影図を図-29、30に示す。また、 改良範囲の中央部の2m×2mの範囲の深さ方向のセメ ント粒子数を図-31、32に示す。図-29、30では、施工 深さ 0.6m と 1.0m の間に明確な差異は見受けられない が、図-31、図-32より施工深さ 0.6m の場合に、底部 にセメント粒子が比較的多く分布していたことがわ かった。「3. スタビライザの調査」では、ケース1(最 大施工深さ 1.2m 機種、施工深さ 0.6m)の開削断面調 査において、セメント粒子が改良範囲の底面に集中し ているように見受けられ、本シミュレーションと同様 の傾向を示した。施工深さ 1.0m のシミュレーション を観察したところ、直径 1.9m の混合翼の回転中心が 地盤面より低い場所に位置しているため、混合翼後方 の地盤がオーバーハングし、回転する混合翼に連続的 に倒れ込み、倒れ込んだ土粒子が混合翼の回転で前方 に運ばれ、前方でのセメント粒子と土粒子の混合に加 えられているように見受けられた(図-33)。施工深さ 0.6mでは、混合翼の回転中心が地盤面より高い位置に あるため、混合翼後方の地盤はオーバーハングしない ため倒れ込みは比較的少なく、混合翼によって前方に 運ばれる土粒子は比較的少なかった(図-34)。そのた め、施工深さ 0.6m の施工では混合翼前方に元々配置 されていたセメント粒子と土粒子のみの混合となり、 セメント粒子が混ざり込む土粒子の数が比較的少なく なり、土粒子と混ざり切れなかったセメント粒子が底 部に落ち込んだものと考えられる。スタビライザは機 種により混合翼の形状が異なるため、今後、他の機種 で同様の現象が起こるのか、詳細に調査する必要があ ると考えられる。







図-30 縦断面方向セメント粒子投 影図(施工深さ1.0m)



図-31 セメント粒子数(施工深さ 0.6m)



図-32 セメント粒子数(施工深さ1.0m)



後方の土粒子が混合翼で前方に運ばれ ている。

図-33 混合翼による土粒子の前方移動状況 (施工深さ1.0m)



混合翼に運ばれている土粒子が少ない。

図-34 混合翼による土粒子の前方移動状況 (施工深さ0.6m)

5. まとめ

本研究では、浅層・深層併用型地盤改良工の浅層改 良工の施工方法について、現場条件に応じた適切な施 工機械、施工方法を選択するための、施工機械の混合 能力、施工方法の特性等の評価情報を調査した。その 結果、以下の知見を得た。

・バックホウの混合用アタッチメントの比較検討を
 行ったところ、ノーマルバケット、スケルトンバケット、ミキシングバケットで混合能力、土塊破砕能力に
 大きな差異はなかった。施工効率はミキシングバケットが最も高かった。

・バックホウの施工方法について、置換え工法、現位 置混合工法、高含水地盤での混合、オペレータの熟練 度について調査を行った。置き換え工法は一軸圧縮強 さが最も大きかったが、施工時間が最も長く、別途、 混合作業スペースが必要であった。原位置混合工法、 高含水地盤での混合では、置換え工法にくらべ一軸圧 縮強さは小さくなったが、施工時間が短く、混合作業 スペースも不要だった。熟練オペレータと初心者オペ レータを比較したところ、初心者オペレータでは著し い混合状態の偏りが生じた。

 ・バックホウとスタビライザの比較検討を行った。ス タビライザにくらベバックホウで比較的大きな混合ム ラが見受けられた。支持力等の力学的諸数値に明確な 差異は見受けられなかった。

 ・スタビライザ3機種の比較検討を行った。その結果、 最大施工深さに対して施工深さが浅い場合に、セメン
 ト改良材が混合領域の底部に集中する場合があることがわかった。

・地盤内部の混合状況を考察するために、個別要素法 による解析を行った。バックホウでは、表層からの目 視観察結果と同じ傾向が地盤内部でも見受けられた。 スタビライザでは、最大施工深さより浅い施工深さの 場合、混合翼により土粒子が後方から前方に運搬され る量が減少するため、セメント粒子が土粒子に混合さ れきれず、底部に落ち込む場合があると考えられる。

参考文献

1)ALiCC 工法研究会、ALicc 工法マニュアル、2015 2)田中ら、複合型地盤改良技術に要求される建設機械 の性能に関する研究、建設施工と建設機械シンポジウ ム、2018

3)社団法人セメント協会:セメント系固化材による地 盤改良マニュアル,2012,134P

4)国土交通省、令和4年度(4月版)土木工事数量算出 要領(案)、2022

5)松島ら、個別要素法解析の現状と将来展望、土と基礎、2014,11

Research on the development of shallow / deep combined ground improvement technology

Research Period: FY2019-2021 Research Team: Advanced Technology Research Team , Construction Technology Research Department Author: MORIKAWA Hirokuni YAMAGUCHI Takashi NITTA Yasushi HATTORI Tatsuya YAMADA Mitsuru

Abstract: In this study, we investigated the construction machine performance and construction method of the shallow ground improvement among the shallow / deep combined ground improvement technology. As a result, the bucket type of the excavator, the construction method, and the performance of the stabilizer were clarified. We also performed simulation analysis using the Discrete Element Method.

Keywords: Ground improvement, Shallow ground improvement, Construction machine