

9. 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

国立研究開発法人土木研究所 ○ 田中 洋一
国立研究開発法人土木研究所 藤野 健一
国立研究開発法人土木研究所 梶田 洋規

1. はじめに

現在の軟弱地盤対策は、コスト縮減・工期短縮の面からセメントなどの固化材を用いた地盤改良技術の果たす役割が大きくなっている。固化材を用いた地盤改良技術の一つである深層混合処理工法は、改良体の強度を改善することによる高強度化が実現され、低改良率により施工時のコスト縮減が図られてきた。しかし、さらなる地盤改良にかかるコストの縮減や工期短縮を図るために低改良率が進むことで、盛土等の土工構造物による不同沈下量が大きくなり、土工構造物の安定性確保が難しくなる。そのため、軟弱地盤対策を必要とする現場では、深層混合処理工法とあわせて盛土等の土工構造物の下にサンドマット工法やジオテキスタイル工法を組合せることで、不同沈下量を抑制する事例が多くなっている。

本研究では、深層混合処理工法に不同沈下量を抑制するために、表層混合処理工法を組合せた複合型地盤改良技術を提案し、複合型地盤改良技術に対して求められる建設機械の要求性能を明確にする。そして、複合型地盤改良技術に必要となる施工機械および施工方法について明らかにする。

2. 地盤改良技術

地盤改良技術は、求められる効果の違いから、多くの工法が開発されてきた。近年は、全沈下量低減の効果とあわせてコスト縮減・工期短縮の面から固化材を用いた固結工法が多く採用されている。固結工法の中1つである深層混合処理工法は、

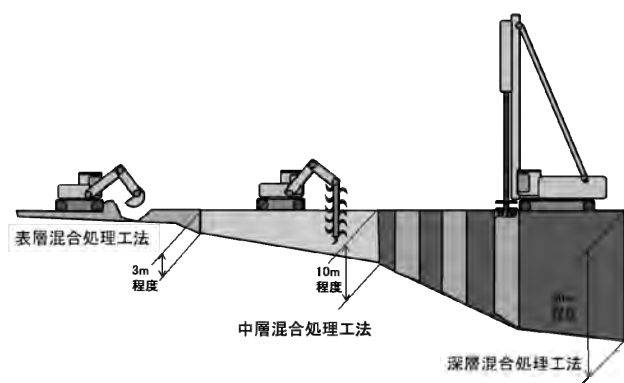


図-1 各混合処理工法の施工深度による違い

軟弱地盤対策において全沈下量低減とあわせて副次的な効果を期待し、採用されることが多い。複合型地盤改良技術では、深層混合処理工法に加えて、表層混合処理工法を組み合わせることで盛土構造物の不同沈下量の抑制を考えている。

ここでは、現在使われている深層混合処理工法・表層混合処理工法とそれら2つの工法の間における施工深度で実施される中層混合処理工法についての現状技術を調査した。3種類の混合処理工法の施工深度における違いを示した概念図を図-1に示す。

2.1 深層混合処理工法

深層混合処理工法は、原位置地盤と固化材を攪拌もしくは固化材を噴射することにより、改良体を構築する技術である。攪拌方法は、攪拌翼を用いた機械式攪拌工法と固化材を噴射する噴射式攪拌工法とそれらを組み合わせた機械式・噴射式攪拌工法の3種類に分類される。噴射式攪拌工法は、スラリー方式の固化材が基本となるが、機械式攪拌方式では粉体方式の固化材も使用することができる。深層混合処理工法における施工方法の概念を図-2に示す。

改良体形状は、柱状となり、杭式改良もしくはブロック式改良により施工¹⁾される。そのため、改良柱体をオーバラップさせるために機械攪拌翼や噴射管を2重もしくは3重にして施工することが多く、施工深度は、おおむね50mまでとなっている。

2.2 表層混合処理工法

表層混合処理工法は、トラフィカビリティを改善することを目的に実施され、原位置地盤を攪拌

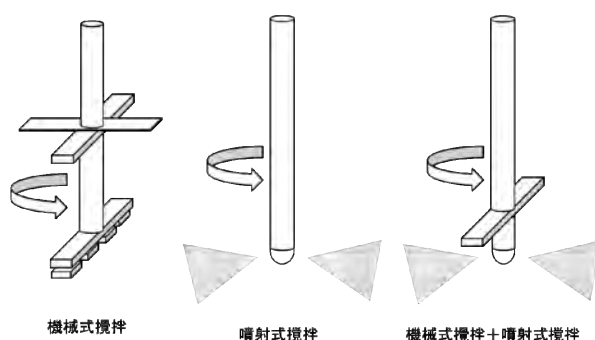


図-2 深層混合処理工法

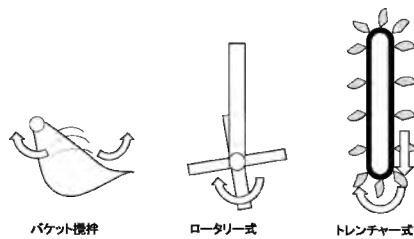


図-3 表層混合処理工法

する原位置混合処理方式，原位置地盤の材料を搬出し攪拌のあと原位置に戻す搬出混合処理に分類される。固化材は，深層混合処理工法と同様にスラリー方式と粉体方式がある。粉体方式は，スタビライザやバックホウのバケット攪拌により混合される。スラリー方式は，主にバックホウに取り付けられたロータリー式およびトレンチャー式によって攪拌される。表層混合処理工法における施工方法の概念を図-3に示す。

2.3 中層混合処理工法

中層混合処理工法は，施工深度をさらに深くするために表層混合処理工法のトレンチャー部分やロータリーを支持する部分を長くすることで対応している技術が見られる。また，深層混合処理工法で実施されていた噴射式攪拌技術を組合せた工法もあり，浅層混合処理工法と深層混合処理工法のハイブリッド工法となっている技術もある。

2.4 工法分類

現状の混合処理技術として使われている工法について，NETISや既存文献から120技術を抽出して調査した。分類方法は，以下の6つの観点について，調査・分類を実施した。

- 改良対象となる地盤条件（土質やN値など）
- 施工機械の分類（ベース機械・改良体作成装置・固化材プラントなど）
- 施工機械に関する技術優位性の比較評価
- 環境条件の整理
- 技術適用範囲の分類
- 施工管理用法および施工コストの評価

表-1 調査項目一覧

調査項目	調査結果の形式等	
混合処理工法区分	深層(3m以内)・中層(10m以内)・浅層(10m以上)・その他(組合せ等)	
工法分類区分	機械攪拌工法・噴射攪拌工法・その他(組合せ等)	
固化材種別	スラリー・粉体・その他(組合せ等)	
適用土質	砂質土	N値<20 20≦N値<50 N値≧50
	礫質土	
	粘性土	N値<4 4≦N値<10 N値≧10
	腐植土	
	ヘドロ	
特記事項	選目可能(○) 選択付否(△) 選目不可(×)	
その他(コメント等)		
改良径(m)	掘削	記述
改良深度(m)	掘削	記述
	特記事項	記述
ベース機械の種類	バリエータリ(ロータリー)・ボーリングマシン(据置型)・クレーン(クレーン付)	
攪拌機の種類	攪拌翼(回転・二軸・三軸)・管式(単管・二重管・三重管)・トレンチャー等	
固化材プラント等 特記事項	記述	
他小作業空間	掘削	記述
	噴	記述
	高圧	記述
	特記事項	記述
工事費	掘削	記述
	高圧	記述
	特記事項	記述
施工管理用法・その他	記述	

調査項目の一覧と調査結果の一部を表-1，表-2に示す。ベースなる建設機械は，深層混合処理ではパイルドライバとボーリングマシン（据置型）にて多く施工されており，表層混合処理工法および中層混合処理工法では，バックホウが多く利用されていた。施工機械の最大施工深度は，パイルドライバが22m~55m，ボーリングマシンが20m~80mが対象となっていた。また，バックホウ（表層混合）は1.8~5m，バックホウ（中層混合）は4~13mが最大施工深度となっていた。調査した混合処理技術における適応土質は，砂質土・礫質土・粘性土・腐植土・ヘドロについても調査した。N値の小さい砂質土（N<20）・粘性土（N<4）すべての技術が施工可能であったが，腐植土・ヘドロについては，半分の60技術が対応可能であり，礫質土については20技術が対応可能であった。

表-2 混合処理技術の調査結果（一部）

No.	混合処理工法区分	工法分類区分	固化材種類	適用土質										
				砂質土			礫質土	粘性土			腐植土	ヘドロ	特記事項	その他(コメント等)
				N値<20	20≦N値<50	N値≧50		N値<4	4≦N値<10	N値≧10				
1	中層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	△	×	×	○	○	△	○	○		
2	浅層・中層混合処理工法	機械攪拌工法	粉体	△	×	×	×	○	○	×	○	○		
3	中層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦70KN/m ²	
4	深層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	○	○	○	○	○	○	○	△		
5	深層混合処理工法	機械攪拌+高圧噴射工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦70KN/m ²	
6	深層混合処理工法	高圧噴射攪拌工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦80KN/m ²	
7	深層混合処理工法	機械攪拌+高圧噴射工法	スラリー	○	×	×	×	○	○	×	○	○	C≦70KN/m ²	
8	浅層・中層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー・粉体	△	×	×	×	○	△	×	○	○		
9	深層混合処理工法	機械攪拌工法	スラリー	○	○	△	○	○	○	○	○	○		
10	深層混合処理工法	機械攪拌+中圧噴射工法	スラリー	○	△	×	△	○	○	○	○	○		

3. 改良体強化技術

改良体の強度を改善することは、地盤改良において低改良率を実現でき、コスト縮減・工期短縮に直接つながる要因となる。そのため改良体の強化技術について、調査した各種混合処理技術からヒアリングにより、改良体の強化に寄与する可能性のある材料、施工方法および施工機械、施工管理方法について調査した。表-3に改良体強化技術の調査結果の一覧を示す。なお、原位置地盤に対する固化材の増加による方法は、改良体強度を上げる方法の調査対象とはしていない。

3.1 材料

材料における改良体の強化方法としては、減水剤と凝結遅延剤を使用する方法により可能であることをヒアリングにて確認した。減水剤は、セメントスラリーのコンクリート配合時に使用する。目的は、セメントの粒子の分散効果によるセメントスラリーの均質化と流動性の向上により、改良体を均質に施工することにある。また、減水剤の使用目的は、単位水量の減少であるが、単位水量を変更せずセメント量を増加させても、同一のスランプ、ワーカビリティを確保したコンクリート配合も可能となる。凝結遅延剤や遅延形の減水剤も、同様にセメントスラリーのコンクリート配合時に使用する。目的は、先行して構築した改良体の強度発現を遅らせ、後から構築する改良体を施工する際に攪拌翼等により先行して構築した改良体を切削し、改良体同士の一体化を図ることにある。そのため、改良体自体の強化ができるものではなく、改良体としての一体性を高めて全体として強度を発現させることが可能となる。

3.2 施工方法および施工機械

施工方法および施工機械における改良体強化方法は、界面活性剤の利用やスラリーの高温化もしくは繊維混合により可能であることをヒアリングにて確認した。界面活性剤を利用した工法は、深層混合処理工法の機械攪拌工法による柱状の改良体の構築に使用される。使用方法は、セメントスラリーに界面活性剤を添加し、界面活性作用によりセメントスラリーの流動化を促進することで高品質な改良体を構築する。建築物のための改良地盤の設計および品質管理指針では、許容応力度設計法による設計基準強度の算定に使用する変動係数の値²⁾は、実績データに基づき0.2~0.45の範囲で適切な値を設定するようになっている。界面活性剤を使用することで、低い変動係数の値を設定することが可能となる。

スラリーの高温化による工法は、セメント系固化材の特徴としての養生温度が高いほど水和反応が活発になるところに着目している。施工方法は、ボイラで発生させた高温蒸気とセメントスラリーと合流させて、施工機械により原位置地盤と攪拌

混合して改良体の温度上昇を図る工法である。スラリーの高温化工法は、変位抑制のために原位置地盤における強度の早期回復が必要となる鉄道営業線近接工事や改良体の強度が発現しにくい寒冷地における施工実績がある。また、低温条件下での試験施工が行われており、冬期施工における改良の地盤表層部での強度増加についても、効果が確認されている。

スラリーへの繊維混入する方法は、特殊プラントで短繊維混合セメントスラリーを製造し、特殊混合機にて原位置地盤と混合攪拌して、層厚1~2m程度の短繊維混合処理土を造成する工法である。短繊維を混入した場合は、一軸圧縮強さが多少増加するとともに、ピーク強度後の残留強度が維持されていることから靱性の向上が見受けられ、曲げ強度の増加も確認されている。短繊維混合による地盤改良工法は、高圧の噴射攪拌工法であり、

表-3 改良体強化技術の調査結果

分類	材料・方法等	目的
材料	減水剤 凝結遅延剤 (遅延形減水剤)	品質の安定 改良体同士の一体化
施工方法および 施工機械	界面活性剤の利用 スラリーの高温化 スラリーへの繊維混入	品質の安定 一軸圧縮強さの増進 (初期および長期) 一軸圧縮強さ・靱性および曲 げ強度の増進、引張強度の増 進
施工管理方法	設計基準強度の設定 (変動率の把握)	品質の安定

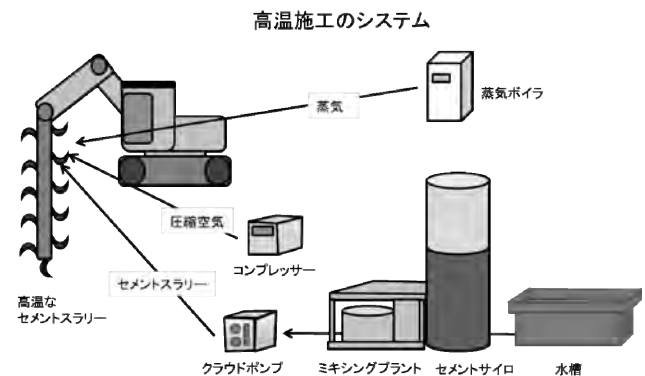


図-4 スラリー高温化の事例

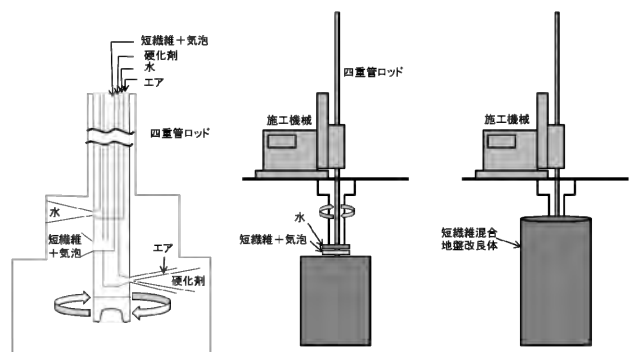


図-5 繊維混合の事例

気泡に混合した短繊維を土中に充填させ、セメントスラリーの超高压噴射により土を切削し地盤中に円柱状の改良体を構築する噴射工法となっている。

3.3 施工管理方法

設計基準強度の設定（変動率の把握）は、許容応力設計法による実績データに基づき、適切な変動係数を設定することを利用し、施工管理の値から常時の荷重に対する設計強度を設定することで、設計基準強度を上げる方法である。変動率の把握は、施工管理時に得られる強度試験結果等のデータから変動係数を把握し、品質のバラツキを抑制することで、改良体の設計強度を高く評価することが可能となる。

4. 複合型地盤改良に要求される性能項目

複合型地盤改良は、深層混合処理に表層混合処理を組合せた施工を実施するため、必要となる建設機械としては、深層混合処理工法にて使用されているパイルドライバと表層混合処理工法にて使用されているバックホウが有力になると考えられる。建設機械は、深層混合処理工法から表層混合処理工法までを1種類の施工機械でこなせることがコストや施工時の運用面から望ましいと考えられるが、縦方向の施工である深層混合処理工法と横方向に広く施工する表層混合処理工法を同じ建設機械にて施工するには、何らかの技術開発が必要であると考えられる。また、建設機械の技術開発により深層混合部分と表層混合部分が一体となった施工が可能になれば、改めて改良体の強度設計における評価方法についても見直す必要があると考えられる。

改良体強化技術に関する調査からは、強度強化（圧縮および曲げ）に有効な方法として、減水剤と凝結遅延剤を使用、界面活性剤の利用、セメントスラリーの高温化、改良体に繊維を混入する方法が確認できた。ただ地盤改良工法は、原位置地盤の影響を大きく受けるため、実験により施工性を確認するとともに、様々な条件下においても出来形品質や材料品質などの施工品質について、期待する効果を確認する必要がある。くわえて、繊維を混入する方法は、従来の材料強度とは異なるため、新たな設計手法・材料の評価手法を確立する必要がある。また、従来の改良体の構築に必要なコストと比べて高価になることから、適用場面や従来の地盤改良との相違点を明確にし、技術の展開を図る必要があると考えられる。

施工管理方法としては、施工時に得られるデータから設計強度の評価を変更できることがわかった。設計強度の評価を変更するためには、施工時のバラツキを抑制すること重要となる。複合型地盤改良技術における表層混合部分は、土工構造物

の荷重を受けるため曲げ荷重が作用するようになる。浅層混合部分は、できるだけ均質な状態に施工することが求められ、改良体の強化にも繋がる。改良体を均質な状態にするためには、現在の表層混合処理工法で使用実績のあるロータリー式やトレンチャー式の施工位置とあわせて攪拌翼の回転状態等を計測し、管理していくことが重要と考える。深層混合処理工法でも、表層混合処理工法と同様に施工位置をあわせて攪拌翼の回転状態や噴射の状況等を計測し、施工時のバラツキを管理することで強度試験等の設計強度と関連させた施工管理手法を提案していくことが不可欠と考える。

5. まとめ

複合型地盤改良技術に対して求められる建設機械の要求性能を明確にするため、現状の地盤改良技術から調査を実施した。複合型地盤改良は、現在実施されている深層混合処理工法に表層混合処理工法を組合せることで実現が可能となると思われる。また、改良体強化技術を取入れた建設機械について、実際の施工現場と同様の条件を設定した実験により、改良体に求められる強度や耐久性に加えて、コストや工期などの効果を検証していく必要がある。今後は、実験により効果を確認し、建設機械の施工管理方法を決めることで、複合型地盤改良の施工方法について提案していきたいと思う。

参考文献

- 1) 道路土工—軟弱地盤対策工指針（平成24年度版），pp.302～306, 2012
- 2) 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，pp.37～43, 2006