

複合型地盤改良技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 30

担当チーム：地質・地盤研究グループ（施工技術）

技術推進本部（先端技術）

寒地基礎技術研究グループ（寒地地盤）

研究担当者：宮武裕昭、近藤益央

藤野健一、茂木正晴、山口武志、橋本毅

林 憲裕、林 宏親、橋本 聖、山木正彦

【要旨】

軟弱地盤対策において、セメントなどの改良材を用いた地盤改良の果たす役割が大きくなり、地盤改良のコスト縮減、工期短縮のニーズが高まった。深層混合処理工法については攪拌性能の向上、供回りの防止により改良体強度が改善され、高強度化、低改良率化により、コスト縮減が図られてきている。

しかし、地盤改良のコスト縮減や工期短縮を図るために低改良率化が進むと盛土等の土工構造物に不同沈下量が大きくなったり、盛土等の土工構造物の安定性確保が難しくなったりする。しかし、軟弱地盤対策を必要とする現場では様々な対策工法が提案され、深層混合処理工法と浅層混合処理工法やジオテキスタイル工法と組合せことで、不同沈下量の抑制を図っているが、工学的判断に基づく照査方法が確立されないまま施工されている事例が多い。

本研究では、浅層混合処理工法と深層混合処理工法と組合せた複合型地盤改良技術に対して求められる要求性能を検討し、その要求性能を満足しているか否かを照査する項目、照査基準を明確にすることで、複合型地盤改良に関するガイドラインを提案することを目的とする。

キーワード：軟弱地盤対策、複合型地盤改良、浅層混合処理、深層混合処理、ガイドライン

1. はじめに

軟弱地盤対策において、セメントなどの改良材を用いた地盤改良の普及が進む中、地盤改良のコスト縮減、工期短縮のニーズが高まった。深層混合処理工法については、攪拌性能の向上、供回りの防止により改良体強度が改善され、高強度化、低改良率化により、コスト縮減が図られてきている。しかし、地盤改良のコスト縮減や工期短縮を図るために低改良率化が進むと盛土等の土工構造物に不同沈下量の増加や盛土等の土工構造物の安定性確保が難しくなるといった課題が発生している。

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浅層混合処理工法やジオテキスタイル工法との組合せ等といった様々な対策工法が提案され、不同沈下量の抑制を図っている。一方、現場で採用・活用されている様々な対策工法は、工学的判断に基づく照査方法が確立されないまま施工されている事例が多く、土木構造物等の適切な品質確保・維持管理の観点から、使用されている技術性能は要求性能を満足しているのかといった点が課題として残されている。本研究では、浅層

混合処理工法と深層混合処理工法と組合せた複合型地盤改良技術に対して求められる要求性能を検討し、その要求性能を満足しているか否かを照査する項目、照査基準を明確にすることを目的としている。

本年度は、浅層処理改良体の強度評価、複合型地盤改良による動的安定性、複合型地盤改良技術に対して求められる要求性能について検討した。

2. 複合型地盤改良に求められる要求性能の検討

2.1 浅層処理改良体の強度評価に関する検討

浅層地盤改良については、“セメントをスラリー状にして、高含水比の軟弱土と均一に攪拌する工法が昭和 40 年頃から各地で試験的に実施”¹⁾と記述されている。昭和 50 年頃より多くの研究成果が発表され、曲げ耐力を用いた浅層改良盤の設計法の提案もみられた。昭和 60 年には表-2.1 の「セメント系固化材による地盤改良マニュアル」一版が発行され、現在（第四版）においても設計・施工を行う上での技術マニュアルとして広く用いられている。

表-2.1 浅層混合処理工法に関する基準・マニュアル

番号	図書の内容	発行者	発行日
(1)	土木建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック	株式会社産業技術サービスセンター	昭和57年1月
(2)	土質工学ハンドブック	社団法人土質工学会	昭和57年11月
(3)	セメント系固化工材による地盤改良マニュアル(一版)	社団法人セメント協会	昭和60年4月
(4)	セメント系固化工材による地盤改良マニュアル(二版)	社団法人セメント協会	平成6年8月
(5)	地盤調査法	社団法人地盤工学会	平成7年9月
(6)	移動式クレーン、杭打機等の支持地盤養生マニュアル	社団法人日本建設機械化協会	平成12年3月
(7)	国土交通省告示第1113号	国土交通省	平成13年7月
(8)	セメント系固化工材による地盤改良マニュアル(三版)	社団法人セメント協会	平成15年9月
(9)	セメント系固化工材による地盤改良マニュアル(四版)	一般社団法人セメント協会	平成24年10月

最近では軟弱地盤対策の工費・工期の縮減策として、浅層地盤改良及び中層地盤改良にトレンチャー方式による施工方法が普及している。さらには、深層混合処理工法と浅層改良工法やジオテキスタイルを組み合わせて用いる工法も提案されているが²⁾³⁾、浅層改良盤を併用する場合にはその曲げ耐力の評価が必要と考えられる。しかし、特殊な場合を除き、押し抜きせん断の照査を行えば、過去の経験から浅層改良盤の曲げ照査を省略する場合が多い。

そこで、浅層改良盤の設計法について調査を行い、設計時に照査する項目の整理と、照査項目及び照査方法を決めた根拠について整理した。

2.1.1 各種基準類の整理

浅層混合処理工法に関するもの代表的な資料を表-2.1に示す。同表(1)と(2)では、吉田信夫^{4),5)}や宇野尚雄⁹⁾等による研究結果が引用されており、一軸圧縮強度 q_u と曲げ強度 σ_b の関係を、 $\sigma_b = (0.33 \sim 0.75) \cdot q_u$ としている(図-2.1)。設計法としてはモデルを二つに区分

(図-2.2)し、浅層改良地盤と未改良地盤の二層系地盤において地盤係数法、多層弾性体の層構造法、有限要素法の3つをあげるとともに、地盤係数法の詳しい記述がなされている。

また(5)では、土のせん断強度が 0.1 kgf/cm^2 以下では未改良地盤の変形係数とポアソン比の測定が困難としている。

(一社)セメント協会による地盤改良マニュアル((3)、(4)、(6)、(7))では浅層改良の設計法について述べられており、土のせん断強度 10 kN/m^2 にて地盤係数法ほかと極限設計法とに設計法を区分する記述がみられる。その他の固化工材系地盤改良工法では、深層混合処理工法や高圧噴射攪拌工法の図書に曲げ強度に関する記述がみられる。

深層混合処理工法では、改良体の形状において改良幅 B と改良長 D の関係を $B/D = 0.5 \sim 1.0$ 以上とする記述⁹⁾があり、曲げ強度照査の必要がない形状とされている。

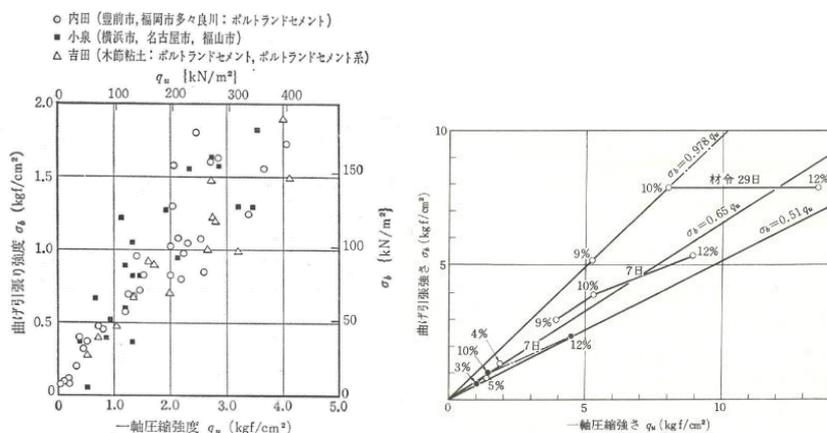


図-2.1 一軸圧縮強さと曲げ強さの関係

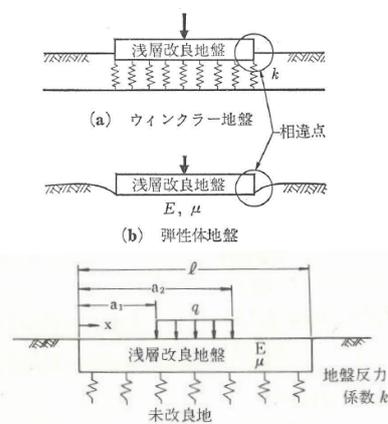


図-2.2 浅層混合処理の設計モデル

表-2.2 固化系地盤改良工法での一軸圧縮強度と曲げ強度との関係例

資料の名称	一軸圧縮強度と曲げ強度との関係
セメント系固化材による地盤改良マニュアル（一版）	$\sigma_b = (0.33 \sim 0.75) \cdot q_u$, $\sigma_c = (0.51, 0.65, 0.978) \cdot q_u$
陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版	$\sigma_{ts} = 0.15 \cdot \sigma_{cs}$
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	$S_i = 0.192 \cdot q_u$
建築基礎のための地盤改良設計指針案	引張は圧縮応力度の20% かつ 200kN/m ² 以下
DJM Q&A集 DJM工法技術マニュアル	$\sigma_t = 0.2 \cdot q_u^{0.76}$
ジェットグラウトQ&A, ジェットグラウト工法 技術資料（第23版）	砂質土で $\sigma_t = 0.1 \cdot q_u$, 粘性土で $\sigma_t = 0.2 \cdot q_u$

コンクリートの図書¹⁰⁾¹¹⁾には圧縮強度と曲げ強度の記述がみられ、「2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]」（(公社)土木学会)ではコンクリート単体の引張強度 f_{tk} と圧縮強度 f'_{ck} との関係を $f_{tk} = 0.23 \cdot f'_{ck} / 3$ としているが、設計には原則反映しない扱いとしている。また、繊維補強土としては、短繊維混合補強土、法面保護用連続繊維補強土、ジオテキスタイルを用いた補強土などがあるが、設計は圧縮強度またはせん断強度にて行われており、曲げ強度を用いた設計は行われていない。

2.1.2 既往の研究結果の整理

昭和 50 年頃より多くの研究成果が発表され、表-2.1の(1)や(5)に用いられている。また、同時期に小泉泰通¹²⁾等によって同様の研究が発表されている。

(公財)鉄道総合技術研究所では、セメント改良土をスラブに用いたコラムネット工法の研究がなされており、曲げ強度を用いるものがうかがえる。繊維補強材を用いるものもみられ、ビニロン繊維を高圧噴射攪拌工法に用いるもの¹³⁾、同様にビニロン繊維を等厚式ソイルモルタル壁に用いるもの¹⁴⁾が報告されている。

2.1.3 曲げ耐力の照査方法に関する検討

固化系地盤改良工法における、一軸圧縮強度と曲げ強度の関係を表-2.2に整理した。すべての資料が一軸圧縮強度との関係によって曲げ強度を求めている。一軸圧縮強度はその簡便性に加え、施工現場管理に広く用いられている「土木工事施工管理基準及び規格値」関東地方整備局（平成 27 年 4 月）の運用による影響も大きいと考えられる。

3. 地盤改良機に求められる要求性能の検討

複合型地盤改良に求められる要求性能を検討するうえで、図-3.2の研究フローに基づき既往地盤改良技術の性能に関する調査を行い、主に施工深度の違いによる技術体系を整理した。

既往地盤改良技術に関しては、現場での活用若しくは技術提案されている浅層混合処理及び深層混合処理の地

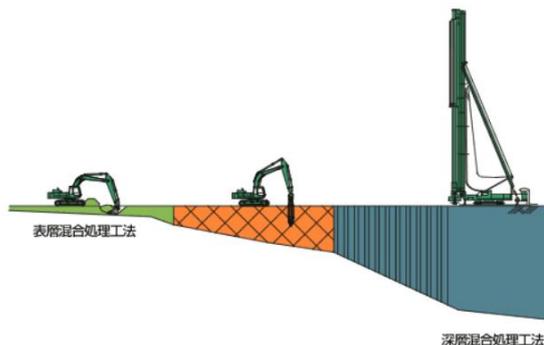


図-3.1 各種地盤改良技術

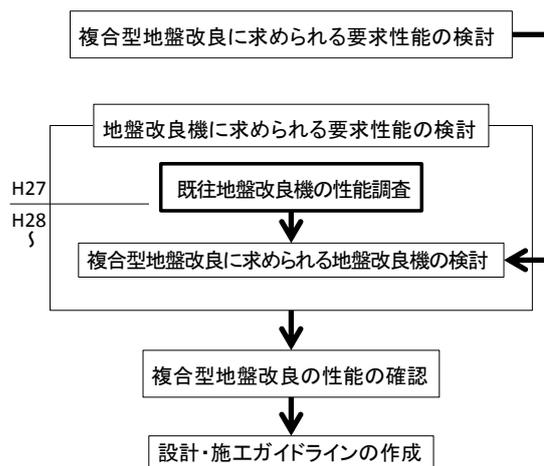


図-3.2 研究フロー

盤改良機について実態を調査した。

3.1 地盤改良技術

現場での地盤改良は、改良前の地盤状況や改良範囲となる面積や深度によって適切な地盤改良技術や工法が選択されている。

地盤改良技術は軟弱地盤に固化材を添加し、地盤の土粒子と固化材を一体化することによって改良する技術を行い、多くの工法が開発されている。

土木学会「地盤改良工法技術資料」では、表-3.1に示す体系の大分類として、固化工法と注土工法とに大別されている。固化工法には、改良する施工深度毎によって浅層混合処理工法、中層混合処理工法、深層混合処理工

法に分類されている。注入工法に関しては、軟弱地盤中に薬液を注入若しくは浸透させ、地盤の止水性や強度を確保することを目的とした工法となっている。

複合型地盤改良技術を検討するうえでは、既往改良工法の適用範囲を把握するほか、構成機器等を把握したうえで、具体的な施工手法の提案を進める必要がある。なお、地盤改良対象となる土粒子等の性状特性に関しては、研究対象から除外した。

3.1.1 浅層混合処理

処理対象層の深さは、概ね3m以内の工法を対象としている。油圧ショベル等をベースマシンとして改良対象となる地盤を掘削し、石灰・セメント・セメント系固化材等を攪拌しながら埋め戻しを行う。埋め戻し時には、巻き出し厚 30cm～40cm でローラ等の転圧機械によって締固めを行う。

深度によって、施工費用が増大してしまうが、平面的

表-3.1 地盤改良分類表

大分類	中分類	小分類
固化工法	浅層混合処理工法	原位置固化処理工法
	中層混合処理工法	機械攪拌工法
		機械攪拌+高圧噴射工法
	深層混合処理工法	機械攪拌工法
		機械攪拌+高圧噴射工法
		高圧噴射工法
その他		
注入工法	薬液注入工法	多重管注入工法
		浸透固化工法
		その他

※土木学会：地盤改良工法技術資料より引用

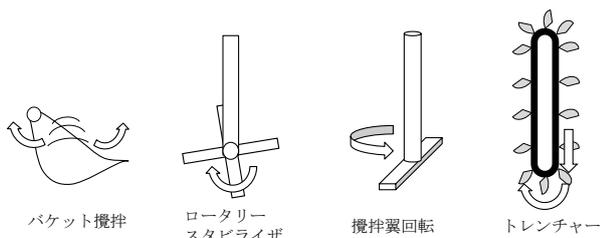


図-3.3 浅層改良における攪拌機構



http://www.chemico.co.jp：小野田ケミコより引用

写真-3.1 バケットによる攪拌

な改良によって地盤表面の安定性は高い。

攪拌機構は、主に図-3.3、写真-3.1、3.2、3.3、3.4に示すような油圧ショベルのバケットによる攪拌やロータリー・スタビライザーを回転させながら攪拌する機構、攪拌回転翼による攪拌、トレンチャーのような複数の小型掘削バケット等を回転させながら掘削・攪拌を行う機構がある。

3.1.2 深層混合処理工法

軟弱地盤の改良深度が概ね10m以上の工法を対象としており、セメントや石灰などの固化材と地盤内の土を攪



http://www.tokiwakogyo.co.jp：常磐工業より引用

写真-3.2 スタビライザーによる攪拌



http://www.kokashori.jp：固化処理工法研究会より引用

写真-3.3 攪拌回転翼による攪拌



http://www.power-blender.com /：パワーブレンダー工法協会より引用

写真-3.4 トレンチャーによる攪拌

拌混合するものである。柱状若しくは壁状に固結改良させる工法で、現場では、一般的に湿式が多く採用されている。

グラウトポンプやスラリープラントと施工機械（ベアスマシン）との組合せとなっている。先端部の掘削ドリルからスラリー状のセメントを吐出させ、施工機械を掘進、グラウトポンプからのセメントを地盤内の土と攪拌混合させ柱状に改良する。壁状に改良する場合には、ラップ施工により壁面を繋げていくものである。深層改良は面的な改良ではなく柱状体に改良配置している。

深層混合攪拌技術は、固化材の種類・攪拌機構等によって、これまでに多くの工法が開発されている。攪拌機構については、**図-3.4**に示すように一般的に機械攪拌と機械攪拌+高圧噴射、高圧噴射の3つの小分類に分けられ、機械攪拌に関しては、先端部の掘削と攪拌翼によってスラリープラントで製造された固化材スラリーが攪拌される機構である。攪拌翼に関しては、**写真-3.5**に示すような横回転の他に鉛直回転するものもある。高圧噴射に関しては、**写真-3.6**に示す貫入掘削後にグラウトポンプにて固化材スラリーを噴射する。

3.2 既往地盤改良技術

既往地盤改良技術を調査するうえで、実現場での活用実績若しくは今後の現場での活用レベルにある技術を把握する必要がある。現場での実態を把握することを目的に国土交通省において新技術の活用のため、新技術に関わる情報の共有及び提供している新技術情報提供システム (NETIS) に登録されている 196 件 (検索キーワード「地盤改良」) の登録技術の中から混合処理工法について工法の分類、適用土質、施工深度を整理した。

3.2.1 浅層混合処理工法

浅層混合処理工法に関しては、原位置固化処理工法として分類されており、**表-3.2**に示すように適用土質は、砂質土 $N \leq 10$ 、粘性土 $N \leq 3$ 程度、施工深度は、3m 以下程度となっている。

3.2.2 深層混合処理工法

深層混合改良処理工法に関しては、**表-3.3**に示すように高圧噴射工法、機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法、機械攪拌工法に分類される。

高圧噴射工法に関しては、適用土質は、砂質土 $N \leq 15 \sim 150$ 、粘性土 $N \leq 3 \sim 10$ 程度、施工深度は、10~70m となっている。

機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法は、適用土質は、砂質土 $N \leq 20$ 、粘着力 $C \leq 50 \sim 70 \text{ kN/m}^2$ 程度 (N 値以外の指標)、施工深度は、20~40m 程度となっている。

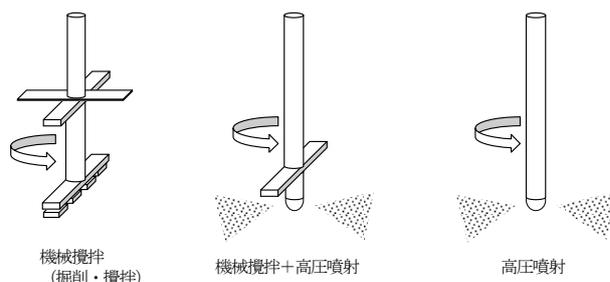


図-3.4 深層改良における攪拌機構



<http://www.cdm-gr.com> : CDM研究会より引用

写真-3.5 機械攪拌 (横回転+鉛直回転)



<https://www.raito.co.jp/index.html> : ライト工業 RMP-MST 工法より引用

写真-3.6 機械攪拌+高圧噴射

機械攪拌工法に関しては、適用土質は、砂質土 $N \leq 20 \sim 50$ 、粘性土 $N \leq 6 \sim 20$ 程度、施工深度は、2~50m 程度となっている。

3.2.3 その他の処理工法

その他の処理工法として、浅層・中層混合処理工法と中層混合処理工法に大別されており、機械攪拌工法と機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法がある。

(1) 浅層・中層混合処理工法

浅層・中層混合処理工法に関しては、**表-3.4**に示すように機械攪拌工法と機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法分類となっており、機械攪拌工法の適用土質は、砂質土

表-3.2 浅層混合処理工法

混合処理工法	主な改良技術	工法分類	適用土質			施工深度
			砂質土	粘性土	その他	
浅層混合処理工法	1 浅層軟弱地盤安定処理機械 スラリー	原位置固化処理工法		$N \leq 3$		1.0~2.0m
	2 浅層軟弱地盤安定処理機械 粉体	原位置固化処理工法		$N \leq 3$		0.6~1.2m
	3 浅層混合処理工	原位置固化処理工法	$N \leq 10$	$N \leq 4$		3m以下
	4 セメント系機械攪拌式浅層改良工法 スラリー	原位置固化処理工法	砂質土・粘土・ローム			5m以下
	5 セメント系機械攪拌式浅層改良工法 粉体	原位置固化処理工法	砂質土・粘土・ローム・シラス			2m以下

表-3.3 深層混合処理工法

混合処理工法	主な改良技術	工法分類	適用土質			施工深度
			砂質土	粘性土	その他	
深層混合処理工法	1 中圧噴射機械攪拌工法	高圧噴射工法	$N \leq 15$	$N \leq 10$		23m以下
	2 超大口径改良体を瞬時に造設可能な高圧噴射攪拌工法	高圧噴射工法	$N \leq 100$	$N \leq 7$		70m以下
	3 大径・高速化対応の高圧噴射攪拌工	高圧噴射工法	$N \leq 20$	$C \leq 70kN/m^2$		35m以下
	4 中圧（珪砂）噴射流体切削攪拌工法	高圧噴射工法	$N \leq 15$	$C \leq 50kN/m^2$		20m以下
	5 自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法	高圧噴射工法	$N \leq 150$	$N \leq 7$	砂礫土 $N \leq 50$	10m以下
	6 挿動式複流線固化材スラリー噴射攪拌工法	高圧噴射工法	$N \leq 30$	$N \leq 3$		10~17m
	7 大口径化と高速施工を可能にした高圧噴射攪拌工法	高圧噴射工法	$N \leq 150$	$N \leq 7$		$0 < L \leq 30m$
	8 低変位高圧噴射攪拌工法	機械攪拌+高圧噴射工法	$N = 10 \sim 20$ の中間の砂質土			20m以下
	9 超高圧ジェット噴射攪拌工法	機械攪拌+高圧噴射工法	$N \leq 20$	$C \leq 70kN/m^2$		20m以下
	10 超高圧ジェット攪拌工法	機械攪拌+高圧噴射工法	$N \leq 20$	$C \leq 50kN/m^2$		20m以下
	11 大口径型高速変位深層混合処理工法	機械攪拌+高圧噴射工法	$N \leq 20$	$C \leq 70kN/m^2$	腐植土 $w \leq 500\%$	25m以下
	12 大口径二軸式トルネード攪拌工法	機械攪拌+高圧噴射工法	$N \leq 20$	$N \leq 6$		40m以下
	13 大口径地盤改良工法	機械攪拌工法	$N \leq 50$	$N \leq 20$		25m以下
	14 大口径機械攪拌深層混合工法	機械攪拌工法	$N \leq 50$	$N \leq 20$		50m以下
	15 スラリー式機械攪拌工法	機械攪拌工法	$N \leq 25$	$N \leq 12$		6m~16m
	16 高品質深層混合処理工法	機械攪拌工法	$N \leq 30$	$N \leq 15$		55m以下
	17 機械攪拌式スラリー工法	機械攪拌工法	砂質土・粘土・ローム・シルト・有機質 $N < 25$			21m以下
	18 低改良率セメントコラム工法	機械攪拌工法	$N \leq 20$	$N \leq 6$		33m以下
	19 軟弱地盤処理工（スラリー攪拌工）	機械攪拌工法	$N \leq 15$	$N \leq 8$		20m以下
	20 セメント系固化材安定深層混合処理	機械攪拌工法	都度検討			10m以下
	21 機械攪拌地盤改良	機械攪拌工法	$N \approx 20$	$N \approx 10$		13m以下
	22 大口径相対攪拌深層混合処理工	機械攪拌工法	$N \leq 35$	$C \leq 100kN/m^2$		$2m \leq L \leq 24m$
	23 締固めによる高強度・高支持力地盤改良工法	機械攪拌工法	砂質土・粘土・ローム・有機質			12m以下
	24 杭・壁併用変位抑制型低改良率地盤改良工法	機械攪拌工法	$N \leq 30$	$N \leq 10$		40m以下

表-3.4 浅層・中層混合処理工法

混合処理工法	主な改良技術	工法分類	適用土質			施工深度
			砂質土	粘性土	その他	
浅層・中層混合処理工法	1 浅層・中層混合処理工 A	機械攪拌+高圧噴射工法	$N \approx 32$	$N \approx 17$		13m以下
	2 浅層・中層混合処理工 B	機械攪拌+高圧噴射工法		$N \leq 1$		6m以下
	3 浅層・中層地盤改良工法 A スラリー	機械攪拌工法	$N \leq 10$	$N \leq 5$		10m
	4 浅層・中層地盤改良工法 A 粉体	機械攪拌工法	$N \leq 10$	$N \leq 5$		2m
	5 浅層・中層地盤改良工法 B スラリー	機械攪拌工法	$N \leq 15$	$N \leq 5$		2m
	6 浅層・中層地盤改良工法 B 粉体	機械攪拌工法	$N \leq 15$	$N \leq 5$		1m

表-3.5 中層混合処理工法

混合処理工法	主な改良技術	工法分類	適用土質			施工深度
			砂質土	粘性土	その他	
中層混合処理工法	1 中層混合処理工法	機械攪拌工法	$N \leq 15$	$N \leq 5$	腐植土 $w \geq 100\%$	13m程度
	2 中層混合処理工法	機械攪拌工法	$N < 40$	$N < 15$		8m以下
	3 高品質変位低減型中層混合処理工法	機械攪拌工法	$N \geq 50$ の地盤や硬い地盤と柔らかい地盤			20m以下

$N \leq 10 \sim 15$ 、粘性土 $N \leq 5$ 、施工深度は、1~10m 以下程度と考えられる。

機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法の適用土質に関しては、粘性土系を適用範囲となっている。施工深度は、6~13m 以下程度となっている。

(2) 中層混合攪拌工法

中層混合攪拌工法に関しては、表-3.5 に示すように機械攪拌工法による改良技術となっており、適用土質は、砂質土 $N < 40$ 、粘性土 $N < 15$ 程度といった実態だが、使用する技術によっては、 $N \geq 50$ の硬い地盤から柔らかい地盤といった広範囲な地盤への適用が可能となる。施工深度は、20m 以下程度と考えられる。

4. 複合型地盤改良による性能の確認

4.1 複合型地盤改良による動的安定性の検証

軟弱地盤上に道路盛土の安定検討を行う際には、一般的に地震時の検討は実施されない。この理由として、文献21)によると、軟弱粘性土地盤上の盛土は、地震によって致命的な被害を被った事例が稀であることが背景にあるとしている。つまり、盛土施工中に地震が発生する確率は低いことや、常時の照査項目において、様々な安全裕度（安全率）が重層的に設けられる可能性が多く、現実的に安全側の設計がなされているためと思われる。

一方、昨今の大規模地震の経緯を踏まえた形で平成 27

年に道路土工構造物技術基準²²⁾が策定された。この中で、道路土工構造物の設計は、使用目的との適合性および構

造物の安定性について、作用（常時、降雨、地震時、その他）およびこれらの組み合わせを、道路土工構造物の重要度に応じて、求められる要求性能（性能1～3）を満足するように行われなければならないと記載された。

表-4.1 被災パターンの分類表²³⁾

被災パターン	被災模式図	被害形態
I型		のり面の流出、崩壊または亀裂の段差の発生が道路車線まで及ばず、のり肩にかざられるもの。
II型		盛土のすべり崩壊または亀裂、段差の発生が道路車線まで及ぶもの。
III型		破壊が基礎地盤におよび盛土形状が原型をとどめないもの。
IV型		盛土の様な沈下に伴って、盛土形状をある程度保ちつつ変形したもの。
V型		構造物背面の盛土が沈下および亀裂を起こしたものの。

これは、地盤改良上の盛土の安定性を評価するためには、具体的な目標性能（使用限界、修復限界、終局限界）を定めた上で、その目標性能に対して検討すべき作用力を設定して照査することが明確に示されたといえる。

このような背景を踏まえて、軟弱地盤に構築した複合型地盤改良による盛土の耐震効果を検討する。軟弱地盤の盛土挙動などを遠心力模型実験で把握する場合、まず実験において事象（ここでは、盛土や軟弱地盤の変形モード）を忠実に再現することが重要である。

表-4.1 は平地盛土の被災パターンと被災度分類を示したものである²³⁾。文献²³⁾では、被災パターンIV型は基礎地盤が軟弱粘性土地盤、有機質土地盤に多くみられるとして、盛土が押し潰されたような変形モードを呈するとしている。動的遠心力模型実験（遠心場：50G）では、改良体を設けないケースで盛土や軟弱地盤の変形モードを再現した。併せて、その再現ケースを基本として、複合型地盤改良を施した軟弱地盤上盛土の地震時挙動に及ぼす改良効果を明らかにする実験を行い、改良体の有無による変形抑制効果の比較を行った。

表-4.2 実験条件一覧

		ケース 1	ケース 2
軟弱地盤	強度(地表面)		$\tau_v = 3kN/m^2$
盛土	高さ		60mm(3m)
	天端幅		60mm(3m)
	のり面勾配		1:1.0
	締固め度		90%
改良体	浅層改良	-	改良高 40mm(2.0m) 改良幅 180mm(9m)
	深層改良	-	改良径 20mm(1.0m)、改良長 90mm(4.5m)、改良率 8.7%、正方配置
加振条件	加振波		正弦波 40 波
	周波数		75Hz(1.5Hz)
	入力加速度		200gal → 500gal
遠心力			50G

4.1.1 実験手法および実験条件

表-4.2 に実験条件一覧、図-4.1 にケース1、2の模型断面を示す。ケース1は地震動による盛土の破壊を再現

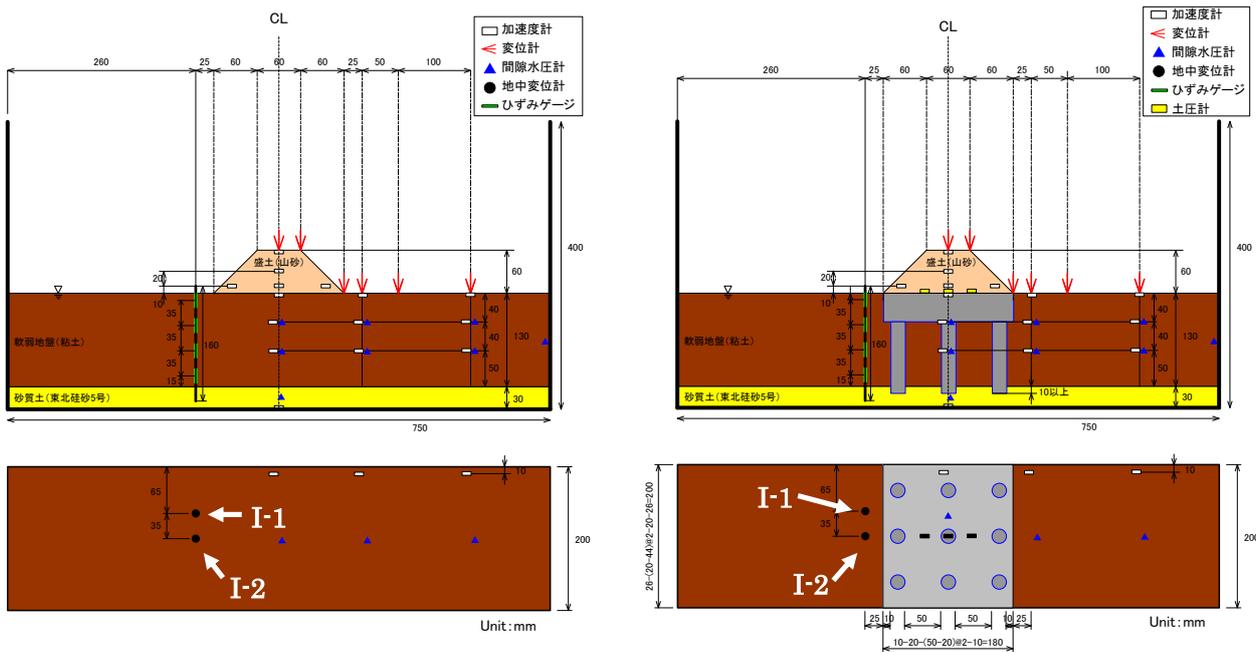


図-4.1 模型断面図 (左図：ケース1、右図：ケース2)

表-4.3 盛土材の物性値

土粒子の密度 (g/cm ³)	最大乾燥密度 (A-c法) (g/cm ³)	最適含水比 (%)	50%粒径 (mm)	細粒分含有率 (%)
2.629	1.5	15.9	0.3	6.5

表-4.4 粘性土地盤の物性値

土粒子の密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	細粒分含有率 (%)	最大粒径 (mm)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
1.991	0.3	100	0.075	50.6	28.2	22.4

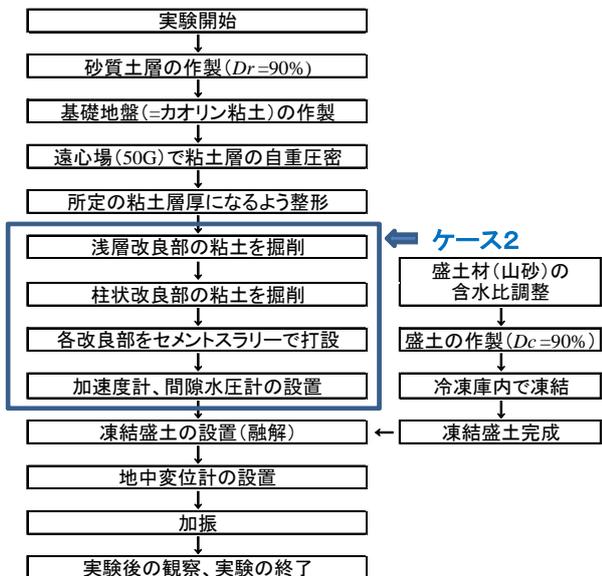


図-4.2 実験手順

することを目的とした無対策のケース、ケース2は複合型地盤改良を施したケースである。

試料の主な物性値を表-4.3、4.4に示す。使用した盛土材は北海道内で採取した山砂、軟弱地盤はシルト分を多く含む、カオリン粘土 (ASP-400) を使用した。

ケース2を例に実験手順を示す(図-4.2)。軟弱地盤層下部の砂層(東北硅砂5号)は、排水層として機能することを目的として、所定の厚さ(30mm)となるよう空中落下法により相対密度 $D_r=90\%$ で作製した。砂層は土槽下部からポーラスストーンを介し、脱気水を供給して飽和させた。次いで、軟弱地盤は予め液性限界の1.5倍に含水比調整したカオリン粘土を1日以上養生し、養生した材料は、真空ミキサーで脱気しながら攪拌し均質な状態で土槽に投入した。その後、遠心場(50G)で8時間遠心自重圧密させて、3t法により沈下収束を確認した。軟弱地盤地表面の目標せん断強度は $\tau_f=3\text{kN/m}^2$ とし、事前に一次元圧密計算により遠心自重圧密時の粘土層厚さを決定した後、所定の厚さとなるよう自重圧密後に表面を整形した。以上の手法で軟弱地盤を作製した後、複合型地盤改良を作製した。なお、改良体が無いケースは

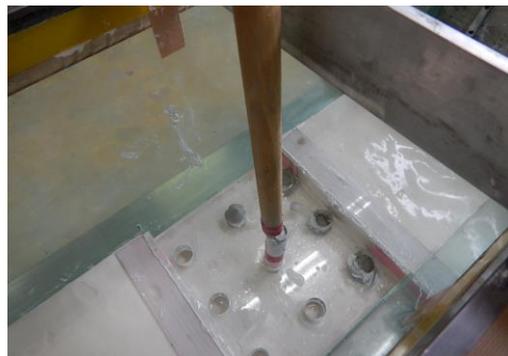


図-4.3 深層改良体の打設



図-4.4 浅層改良体の打設

後述の盛土作成となる。

複合型地盤改良は、浅層改良体が設置される軟弱地盤を掘削し、深層改良体の打設箇所を器具により掘削した。深層改良体打設箇所の掘削は、軟弱地盤に外径20mmのアルミニウム管(外管)を挿入し、その内側に外径18mmのアルミニウム管(内管)を挿入した。その後、軟弱地盤内から内管、外管の順に引抜いて掘削孔を作製した。砂層部はハンドドリルを用いて掘削した。

深層改良体の打設は、カオリン粘土と早強ポルトランドセメントを水セメント比 $W/C=1.0$ にて攪拌、混合したセメントスラリーを掘削孔内に充填した(図-4.3)。養生期間は5日材齢とし、設計基準強度 $q_{\text{uck}}=1\text{MN/m}^2$ となるセメント添加量(246.6kg/m³)は地盤工学会基準(JGS 0821-2009)に従って決定した。

浅層改良体は、所定のサイズ(厚さ40mm、幅180mm、奥行き200mm)に掘削した箇所において設計基準強度 $q_{\text{uck}}=300\text{kN/m}^2$ (5日材齢)を満足させるセメント添加量(114.2kg/m³)を、深層改良体と同様の手法によりセメントスラリーを打設した(図4)。

各改良体の諸元は文献24)に従って、深層改良体は改良体頭部に作用する集中荷重、浅層改良体は押し抜きせん断による破壊が生じない値として、浅層改良厚および各改良体の設計基準強度を設定した。改良率($a_p=8.7\%$)は文献24)が認める最低値とした。

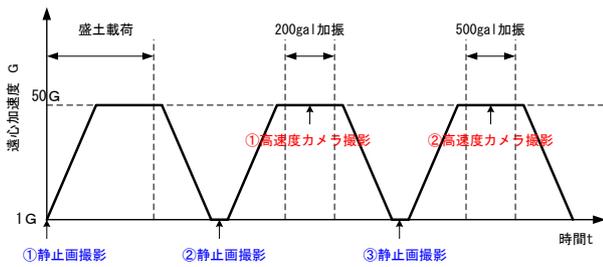


図-4.5 動的遠心力载荷実験の流れ

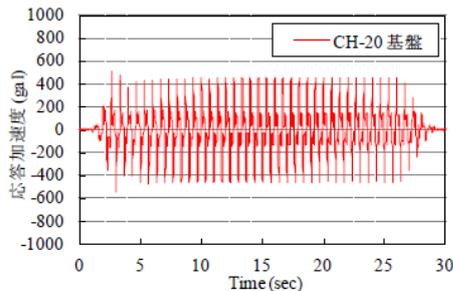


図-4.6 入力加速度波形 (ケース2 500gal)

各観測機器は図-4.1に記載した位置に設置した。地中変位計は稲垣ら²⁵⁾の方法に準拠して、薄いリン青銅板 (t=0.3mm) にひずみゲージを4ヶ所貼ったものである。

盛土は、盛土型枠内で最適含水比に調整した山砂を、締め度 $D_c=90\%$ になるよう締めめによって作製した。作製後に冷凍庫内で凍結させ、凍結したことを確認してから盛土型枠を脱形し軟弱地盤上に設置した。加振実験は、盛土が完全に融解してから実施した。

動的遠心力载荷実験の流れを図-4.5に示す。まず、重力場の状態から5Gごと段階的に50Gまで加速度を増加させた。各重力場に到達した後、3分間荷重を保持した。50G遠心力場における静的な盛土载荷、200gal加震後および500gal加震後の盛土、軟弱地盤の変形状態の確認は、土槽を50G遠心力場から重力場に戻してから土槽内(静止画)を撮影した。なお、加振中の変形状況に関しては高速度カメラで撮影した。

図-4.6はケース2を500galで加振した際に、土槽底部に設置した加速度計(図-4.1参照)で計測された加振加速度を実物換算した値である。設定した加速度波形は、入力周波数75Hz(実物換算1.5Hz)の正弦波(40波)とした。目標入力加速度は、レベル1、レベル2地震動を想定して200gal、500galとした。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 実験後の観察

図-4.7に各ケースの加振前後の状況を示す。図-4.7 a)、b)は各加振前、図-4.7 c)、d)は200gal加振後、図-4.7 e)、f)は500gal加振後の軟弱地盤および盛土の変形状

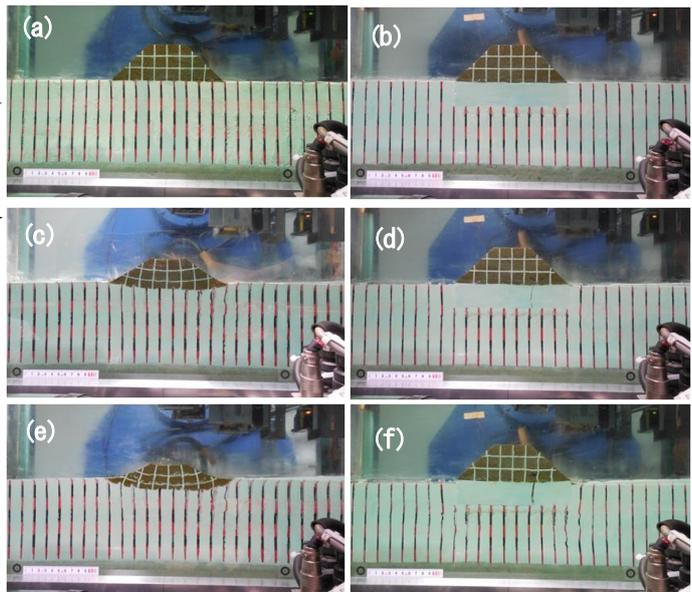


図-4.7 加振前および加振後の状況
(左図：ケース1、右図：ケース2)

態を示している。まず、ケース1の盛土の変形モードについて考察する。図-4.7 a)、c)、e)の盛土のメッシュに着目すると、200gal、500galと加振するに従って盛土全体は押し潰されるように沈下し、盛土下幅が側方に広がる傾向が確認された。これは、加振によって軟弱地盤の強度が軟化したことで、盛土の自重で鉛直方向に沈下したと考えられる。北詰ら²⁶⁾は、カオリン粘土に繰り返し応力を作用させた場合、発生するせん断ひずみが大きくなるに伴って、カオリン粘土中の間隙水圧が上昇してせん断剛性が著しく低下すると指摘している。本実験においても北詰らの実験と同様の傾向によるものと思われる。

以上より、本実験で得られた盛土の変状は、2. で述べた文献²²⁾の被災パターンIV型と類似しており、ケース1は軟弱地盤上盛土の地震時破壊モードを再現できたといえる。

次いで、複合型地盤改良を施したケース2について述べる。ケース1と同様に加振前および加振後の盛土メッシュに着目すると、ケース1のように盛土が押し潰されるような変形モードは確認されず、盛土の安定化が図られていることがわかる。

次に各改良体の健全性について述べる。200gal加振後の浅層改良体(図-4.7 d))をみると、縦方向にクラックが生じていることがわかる。しかしながら、ここでは図示していないが、静的盛土载荷後(図-4.5 ②静止画撮影)の段階で既にクラックが確認されていることから、加振の影響ではないと思われる。クラックが生じた要因

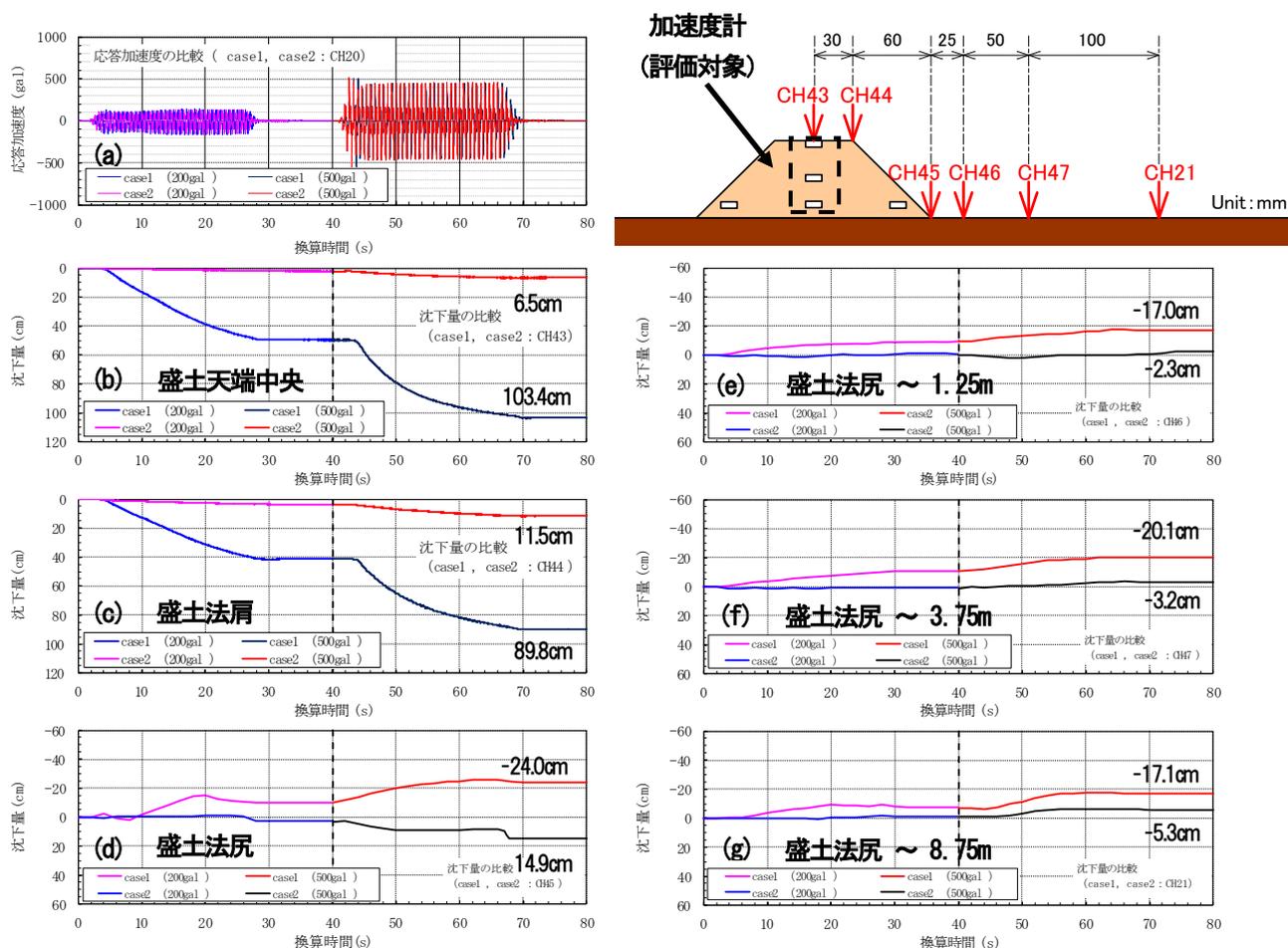


図-4.8 各加振レベルによる盛土天端および地表面変位量

として、破壊した浅層改良板の位置が深層改良体間のちょうど真ん中付近であること、浅層改良板の諸元は押し抜きせん断のみで決定したことを踏まえると、曲げ引張り破壊によるものと推測される。一方、500gal加振後の深層改良体を実験後に観察(図-4.7(f)右下)すると、一部、水平方向に亀裂が生じている改良体が見えるが、これは、実験後に深層改良体を軟弱地盤から取り出す際に生じたものである。従って、深層改良体は本実験の地震動レベルに対して健全性が確保されたといえる。

4.2.2 盛土および軟弱地盤地表面の変状

各ケースの加振による盛土の鉛直変位、法尻からの離れにおける地表面変位を図-4.8に示す。鉛直変位は盛土天端中央と法尻および法尻の地表面に設置したレーザー変位計により、50G遠心場で計測した値である。なお、変位量は実物換算した値で示している。図の横軸は、各入力加速度の加振開始から加振終了10秒後までを表記した。実際は200gal加振後に一度、重力場に戻して静止画を撮影してから、再度50G遠心場に戻しているが、図の整理上、換算時間40sを500gal加振開始としてい

る。

図-4.8(a)は各ケースの入力加速度を示している。200gal、500galの入力波形は、いずれも同程度であることがわかる。次に、盛土天端中央と法尻の沈下量に関して述べる(図-4.8(b)、(c))。なお、変形量は実物換算値である。

ケース1では200gal、500galの加振中に大きく沈下が生じており、500gal加振後の累積沈下量は盛土天端で103.4cm、同じく法尻で89.8cmであった。これに対して、ケース2では200gal加振後における盛土天端中央と法尻の沈下量はいずれも3cm前後、同じく500gal加振後では、同様に6.5cm、11.5cmとケース1と比較して9割前後の沈下低減が図られた。

次に、各ケースの法尻からの離れにおける地表面変位量について考察する。いずれのケースも加振レベルが大きくなるに従って、地表面変位量は隆起する傾向にあるが、両ケースを比較するとケース2はケース1より7~9割程度の変形抑制効果が確認された。法尻(図-4.8(d))の変位量は、他の位置の変形モードと大きく異なる。こ

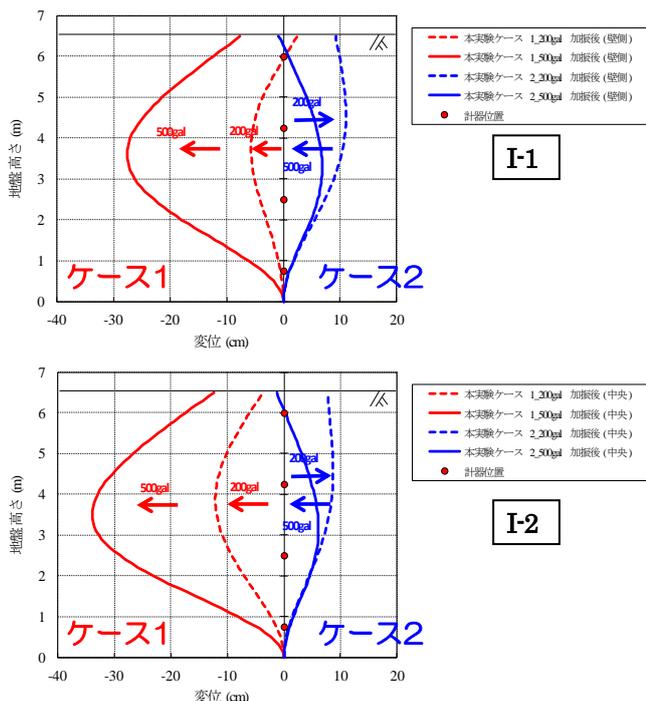


図-4.9 各加振レベルによる地中変位量

これは、設置したレーザー変位計のターゲットが加振によって盛土下幅が側方に広がり、大きく移動したためと考えられる。

図-4.9 は各ケースの加振直後の地中変位モードおよび変位量(実物換算値)である。横軸の変位量はマイナス側では盛土から離れる方向へ、プラス側は盛土側へ変形することを示す。地中変位計の位置(I-1、I-2)は図-4.1を参照されたい。地中変位量は、リン青銅に貼ったひずみゲージ(4ヶ所)から各加振直後に得られる曲げひずみ(ε)より曲げモーメントを求め、これを深度方向に2回積分することで、ひずみゲージ設置箇所の水平変位量を算出した。ひずみゲージ間の水平変形量は3次スプライン補間法⁷⁾により外挿した。

I-1、I-2をみると、ケース1ではいずれも軟弱地盤層厚中央部付近を最大変位として、盛土から離れる方向に弓状の変形モードを呈しており、加振レベルが大きくなるのに従って、水平変位量は大きくなる傾向を示した。これは、加振によって盛土が沈下し、それに伴って軟弱地盤が側方へ押し出されたと考えられる。これに対して、ケース2はケース1とは反対に盛土側へ引込まれるような変形モードであったが、変形モードおよび水平変位量はI-1、I-2に大きな差異はみられなかった。

深層改良体の改良率が $a_p=8.7\%$ と低改良率であるにも拘わらず、改良体背面部と改良体間の変形モードや水平変位量に大差が無いことは、改良体と未改良地盤は一体

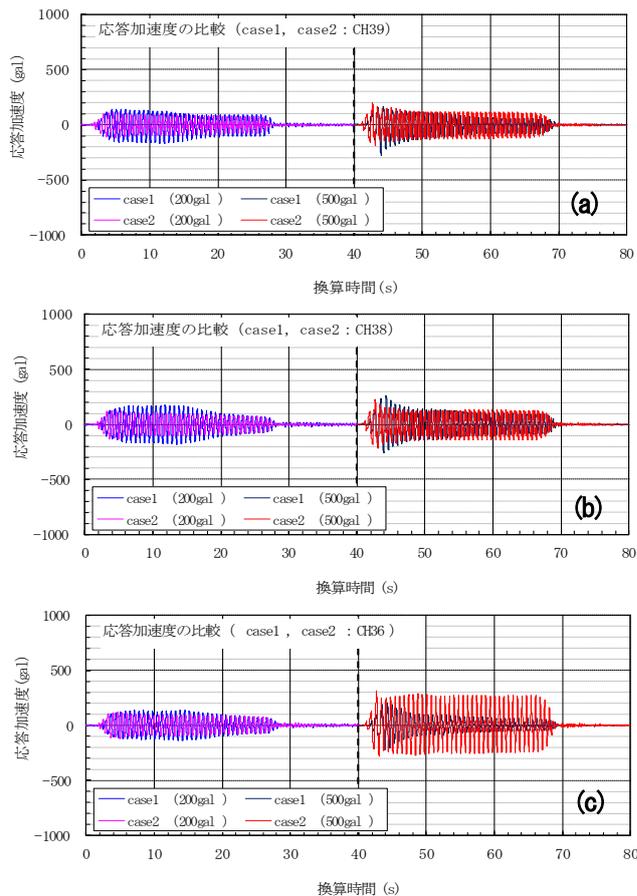


図-4.10 各加振レベルによる盛土内の応答加速度

的に挙動する、いわゆる複合地盤として機能することを示唆している。

以上より、複合型地盤改良は200gal、500galの加振レベルに対して、無対策と比較して大幅な変形抑制効果が得られることが明らかとなった。

4.2.3 盛土内の応答加速度

図-4.10は各加振レベルにおける盛土内の応答加速度を示している。計測された応答加速度は、図-4.10(a)、(b)、(c)の順に盛土上部から下部に設置したものである(図-4.8_横断面図参照)。図の横軸は3.2と同様に整理した。

各ケースの応答加速度は、盛土の位置に拘わらず、ケース1では加振後の時間経過に従って、応答加速度は減衰しているのに対して、ケース2ではさほど大きな減衰は認められなかった。特に、盛土下部ではそれが顕著に表れた(図-4.10(c))。

既往の研究²⁸⁾では、盛土下の地盤の剛性が高いと、盛土の応答加速度は大きくなる傾向にあることが報告されている。本実験では、文献²⁸⁾で報告されているような盛土内の顕著な応答加速度の増加は認められないが、明

らかに減衰しにくくなる傾向が確認されている。これは、複合型地盤改良によって、盛土下部の軟弱地盤を含む改良形式が剛な複合地盤として機能する、すなわち剛性が大きくなることで、複合型地盤改良内を応答加速度が減衰することなく、盛土内部へ応力が伝播したためと考えられる。

5. まとめ

平成 27 年度の研究内容から次のことが明らかになった。

- ・弾性床土の梁理論とも称される地盤係数法は、曲げ強度の評価が可能な面からは有効と考えられる。しかし、原地盤の地盤反力係数の評価が難しい場合も多く、施工現場にでも利用できる簡便な設計方法が必要と考えられる。
- ・極限設計法については明確な曲げ強度の評価方法はみられなかったが、あらためて整理する必要があると考えられる。
- ・有限要素法は広く普及しつつあるが、簡便な設計法が用いられている浅層改良盤の設計においては、ソフトウェア操作の熟練や入力条件への理解などを考慮すると、施工現場への適用は難しく、周辺地盤への影響を考慮する等の限られた場合になると考えられる。
- ・浅層改良盤の曲げ評価においては、調査した結果などを参考として、 q_u を用いた簡便な照査方法の構築が必要と考えられる。
- ・既往地盤改良機の性能について実態を把握し、土木学会「地盤改良工法技術資料」で一般的に大別されている浅層混合処理工法と深層混合処理工法の適用施工深度の範囲が合致していることを確認することができた。
- ・適用土質に関しては、土木学会「地盤改良工法技術資料」において具体的に定義されていないが、本調査によって、主に砂質土・粘性土における N 値を指標に適用範囲を示していることが把握できた。浅層混合処理工法に関しては、砂質土 $N \leq 10$ 、粘性土 $N \leq 3$ 程度となっており、深層混合処理工法に関しては、高圧噴射工法、機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法、機械攪拌工法といった工法に大別され、適用土質は、砂質土 $N \leq 150$ 、粘性土 $N \leq 20$ 程度と広範囲な適用範囲となっている。
- ・浅層混合処理工法は、バケットやスタビライザー等の機械機構により表層 3m 程度を面的に地盤改良す

ることが作業効率や品質確保の観点から既往技術として提案・活用されているものと考えられる。

- ・深層混合処理工法に関しては、高圧噴射工法、機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法、機械攪拌工法といった工法が地盤改良対象となる現場の地盤構成やプラン等の敷地確保等の制約によって工法選択がされるものと考えられるが、NETIS に登録されている工法技術に関しては、特定の現場での実績をベースに改良が施されているものと考えられ、適用範囲は比較的広範囲なものとなっているものと考えられる。
- ・その他の技術として提案活用されている、浅層・中層混合処理工法や中層混合処理工法に関しては、浅層・深層の中間層という曖昧な深度を補う工法として、開発されたものと考えられるが、機械攪拌工法と機械攪拌と高圧噴射を組合せた工法分類となっており、技術的には深層混合処理工法に近いものと考えられる。
- ・特に浅層・中層混合処理工法に関しては、N 値及び施工深度は中層混合処理工法に比べて浅層混合処理工法に近い値となっているが中層混合処理工法における機械攪拌工法の適用土質に関しては、砂質土 $N < 40$ 程度、粘性土 $N < 15$ 程度、施工深度は、20m 以下程度となっており、深層混合処理工法に分類されるものと考えられる。
- ・無対策地盤上の盛土は、加振によって押し潰されるような変形挙動を示し、軟弱地盤上盛土の被災パターンIV型を再現できた。
- ・複合型地盤改良は、盛土の沈下、周辺地盤の隆起および軟弱地盤内の水平変位を抑制する効果があることを確認した。
- ・盛土内の応答加速度に着目すると、複合型地盤改良によって盛土下部の剛性が大きくなったことで、盛土内の応答加速度は減衰しにくくなった。

参考文献

- 1) 土質工学ハンドブック：土質工学会,1982
- 2) 地盤改良のための ALiCC 工法マニュアル：独立行政法人土木研究所編,鹿島出版会,2007
- 3) ALiCC 工法マニュアル 低改良率セメントコラム工法：国立研究開発法人土木研究所監修,ALiCC 工法研究会編,鹿島出版会,2015
- 4) 超軟弱地盤（ヘドロ）の土質改良と載荷試験・解析：吉田信夫,土と基礎 VOL.22, No5, pp43-49,1974

- 5) 超軟弱地盤の地盤反力係数と改良土の変形係数について：吉田信夫,土木学会第33回年次学術講演会講演概要集,第3部,III-162,1978
- 6) 固化土の圧縮強度と曲げ強度：吉田信夫,土木学会中部支部研究発表会講演概要集,019,1980
- 7) 地盤改良マニュアル(一版)：セメント協会,1985
- 8) 地盤調査法：地盤工学会,1995
- 9) 陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版：土木研究センター,2004
- 10) 改訂新版コンクリート技術100講：村田二郎,山海堂,1993
- 11) 建設材料学(第五版)：樋口芳朗ほか,技報堂出版,1997
- 12) セメントスラリーの軟弱地盤への適用について：小泉泰通ほか,第12回土質工学研究発表会講演集,p1289-1292,327,1977
- 13) 繊維補強した地盤改良体の静的力学特性に関する基礎的検討：山田淳夫ほか,土木学会第65回年次学術講演会,2010
- 14) 高性能繊維補強固化体の改良強度：田中俊平ほか,第37回地盤工学研究発表会,823,2002
- 15) 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：(財)日本建築センター,pp46-47,2002
- 16) 建築基礎のための地盤改良設計指針案：(社)日本建築学会,p35,2006
- 17) DJM工法技術マニュアル：DJM工法研究会,p18,2010.
- 18) ジェットグラウト工法 技術資料(第23版)：日本ジェットグラウト協会,p21,2015
- 19) 土木学会建設技術研究委員会「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>
- 20) 国土交通省 新技術情報提供システム
<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Explanation/MainExplanation.asp?TabType=1>
- 21) (社)日本道路協会：道路土工—軟弱地盤対策工指針、pp.104-105、2012
- 22) 国土交通省大臣官房技術調査課：道路土工構造物技術基準(pdf版)、2015
- 23) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編)平成18年度改定版、pp.66-69、2007
- 24) 国立研究開発法人土木研究所：ALiCC工法マニュアル(低改良率セメントコラム工法)、2015
- 25) 稲垣太浩、福島勇治、野津光夫、李黎明：深層混合処理広報に求めるニーズに応じた設計・施工体系の構築として 杭式改良地盤の変形挙動～遠心模型実験結果～、第36回地盤工学研究発表会 pp.1079-1080、2001
- 26) 北詰昌樹、菅野高弘、河又洋介、西田直人、石丸一宏、中山義紀：SCP改良地盤の動的応答特性に関する遠心模型実験、港湾空港技術研究所資料 No.1029 pp.1-17、2002
- 27) 例えば、松本英敏：3次スプライン補間法、
<http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/matsu/spline.pdf>
- 28) 橋本聖、西本聡、林宏親：鉄筋挿入式補強による盛土の耐震性向上効果に関する検討、第12回日本地震工学シンポジウム pp.718-721、2006

A Research on Hybrid Application of Ground Improvement Technology

Abstract : Cost reduction of the soil improvement is demanded at the construction site. In the deep mixing stabilization method, a new soil improvement technology is developed, and cost reduction has been planned. When an improved rate lowers, differential settlement of the road embankment, and stability is lost.

In this study, we examine the hybrid application of ground improvement technology that we combined with shallow soil stabilization method and deep mixing stabilization method. Furthermore, a purpose of this study are to establishing verification items and verification standard.

In this year, we considered about strength evaluation of shallow soil improvement body, dynamic stability for the hybrid application of ground improvement, and a performance requirement for hybrid application of ground improvement technology.

Key words : soil improvement, hybrid application of ground improvement, shallow stabilization, deep mixing stabilization, guideline