

無機系吸水性材料を用いた土の改質技術に関する手引き
(暫定版－PS 灰系改質材編－)

2021年3月31日

公益社団法人地盤工学会関東支部

無機系吸水性材料を用いた土の改質技術の利活用に関する研究委員会

無機系吸水性材料を用いた土の改質技術の利活用に関する研究委員会名簿

委員長	早野 公敏	国立大学法人横浜国立大学
幹事	望月 美登志	株式会社サステナブルエコ
委員	石原 雅規	国立研究開発法人土木研究所
委員	泉 明良	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
委員	遠藤 和人	国立研究開発法人国立環境研究所
委員	太田 敏則	石膏再生協同組合
委員	大森 慎哉	東亜建設工業株式会社
委員	片桐 雅明	株式会社日建設計シビル
委員	高橋 英紀	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
委員	武井 俊哉	一般財団法人水源地環境センター (WEC)
委員	田中 真弓	鹿島建設株式会社
委員	藤原 斉郁	大成建設株式会社
委員	水野 健太	若築建設株式会社
委員	宮下 和紀	基礎地盤コンサルタンツ株式会社
委員	莫 嘉麟	国立研究開発法人国立環境研究所
委員	森下 航希	株式会社フジタ
委員	山内 裕元	domi 環境株式会社

■本手引きに関する問い合わせ先

地盤工学会関東支部事務局 jgskantou@jiban.or.jp

無機系吸水性材料を用いた土の改質技術に関する手引き

(暫定版－PS 灰系改質材編－)

【 目 次 】

はじめに.....	- 1 -
1. 無機系吸水性材料とは.....	- 7 -
2. PS 灰系改質材の物理化学特性.....	- 11 -
2.1 粒子密度とかさ密度.....	- 11 -
2.2 粒度.....	- 12 -
2.3 成分組成と pH.....	- 13 -
3. PS 灰系改質材の吸水特性と吸水比 W_{AB} の評価.....	- 15 -
3.1 吸水特性.....	- 15 -
3.2 吸水比 W_{ab} の評価.....	- 16 -
4. PS 灰系改質土の物理特性・締固め特性.....	- 23 -
4.1 コンシステンシー特性.....	- 23 -
4.2 粒度特性.....	- 25 -
4.3 締固め特性.....	- 26 -
5. PS 灰系改質土の力学特性.....	- 31 -
5.1 コーン指数.....	- 31 -
5.2 三軸圧縮強度.....	- 35 -
5.3 長期安定性.....	- 38 -
6. 配合設計方法.....	- 45 -
6.1 配合設計で対象とする品質評価.....	- 45 -
6.2 配合設計の流れ.....	- 49 -
6.3 室内配合試験による方法.....	- 51 -
6.4 シリンダー法の吸水比 W_{ab} を利用する方法.....	- 54 -
6.5 ふるい法の吸水比 W_{ab} を利用する方法.....	- 57 -

7. 施工方法と品質管理方法	- 65 -
7.1 施工方法	- 65 -
7.2 品質管理方法.....	- 72 -
8. 瞬時改質技術の適用例	- 77 -
8.1 改質原理と対象土質.....	- 77 -
8.2 適用事例	- 78 -
9. ほぐし養生を併用した PS 灰系改質材による改質技術の適用例	- 89 -
9.1 改質原理と対象土質.....	- 89 -
9.2 適用事例	- 90 -
おわりに	- 103 -

【用語の定義および解説】

本手引きで取り扱う用語のうち主なものについて、以下に解説する。

吸水性材料

土中に存在する自由水を物理的あるいは化学的に吸水するなどして拘束する機能を持つ材料。

無機系吸水性材料

成分に有機化合物を含まない吸水性材料。

有機系吸水性材料

成分に有機化合物を含む吸水性材料。

改質処理工

原土に吸水性材料を添加し改質土とする一連の処理工程。現位置混合処理の場合には、改質処理工と改質土を用いた工事が一体的に行われる。

改質土

吸水性材料により、性状を改善して品質や機能を高めた土。

ペーパースラッジ灰（PS 灰）

ペーパースラッジを焼却した際に出る残さ。

PS 灰系改質材

ペーパースラッジ灰を加工処理などした材料を主な成分とする吸水性材料。

PS 灰系改質土

PS 灰系改質材によって改質した土。

発生土

建設工事で発生する土。

原土

吸水性材料による改質の対象となる土。改質土における母材。

余剰水分

良質な状態となる含水比量に対する余剰な水分量。

自由水

土中にある水分の中で、土粒子間の間隙を自由に移動できる水。

拘束水

物理化学的に土粒子に吸着した水（吸着水）および結合した水（結合水）など、何らかの束縛を受けている水。

見かけの含水比（補正含水比）

拘束水分を水分ではなく固体分として補正した含水比。

吸水比

物理的吸水および化学的吸水による改質材の拘束水量。対象となる改質材 1 g あたりの「拘束水量 (g)」を評価するために用いられる。

物理的吸水

土粒子内の間隙に存在し、一定の条件下で改質材粒子内に水が吸着されること。

化学的吸水

改質材粒子それ自体に化学的に水が結合すること。

系外排出

改質しようとする土中の外に自由水を排出すること。

系内改質

改質しようとする土中の中に自由水を残して改質すること。

シリンダー法

メスシリンダーに一定量の水を張り、そこに PS 灰系改質材を投入して沈降堆積した時の体積から吸水比を求める方法。

ふるい法

PS 灰系改質材の周りに存在する自由水分を加振してふるい落とすことにより、PS 系改質材に吸着した拘束水を分離して吸水比を求める方法。

瞬時改質

改質材の高い吸水性を利用して添加直後に改質すること。締固めが適切に実施でき、必要なコーン数も満足できる。

ほぐし養生改質

瞬時改質したものを解きほぐして拡大した土塊群の表面から水分の蒸発を促す改質。時間の経過とともに効果が向上するもの。

封緘養生

供試体の表面から水分の出入りがない状態に保って行う供試体の養生方法。密封養生ともいう。

開封養生

供試体に袋をかぶせない状態で気中にさらす養生方法。

半開封養生

穴をあけた袋をかぶせた状態で暗所に保管する養生方法。

気中養生

供試体を気中で保管する養生方法。

水浸養生

供試体を水中において保管する養生方法。

前養生

室内配合試験において、吸水性改質材を添加・混合した改質土のほぐし養生する場合のときほぐし前の養生のこと。なお、養生条件は現場条件を考慮する。

中養生

ほぐし養生する室内配合試験において、改質土を解きほぐしてから締め固めるまでの期間の養生のこと。なお、養生条件は現場条件を考慮する。

後養生（モールド養生）

ほぐし養生する室内配合試験において、解きほぐした改質土をモールド内に締め固めたあとの養生のこと。なお、養生条件は現場条件を考慮する。

（現場／室内）強度比

現場での強度と室内配合試験での強度との比。吸水性改質土では、強度をコーン指数で評価することが標準である。

長期安定性

改質土を用いる土構造物の供用期間中に、強度や環境基準を性能値以上に保てること。

かさ密度

一定の容積の容器に粉体を十分に充填し、質量を容器の体積で除した値。

複合粒子密度

無機系吸水性材料を用いた改質材で土を改質した改質土の土粒子密度。

合成粒度

原土と改質材の粒度を合成して得られる改質土の粒度。

添加率

原土に対して改質材を乾燥質量比で添加する割合。

添加量

原土 1m³あたりに改質材を添加した質量。

カラム溶出試験

溶出特性を評価する試験。試験装置は、溶媒タンク、ポンプ、カラム（円筒）、採水タンクで構成されており、純水や塩化カルシウム溶液を試料に通水する。通水した水に対して pH や有害重金属等を計測し、化学的安定性を評価する試験。

はじめに

吸水性材料の特徴をひと言で表すとすれば、**余分な水を奪い取る(拘束する)**ことである。では土のなかの余分な水(余剰水分)を奪い取ると、品質の良くない土(不良土)のどのような問題が解決されて、品質のよい土(良質土)に生まれ変わるのか？ また、土の品質を改善できる効果(土の改質効果)はどのように発揮されるのか？

この2点について、池の堤内に堆積した浮泥を例に説明したい(図-1)。

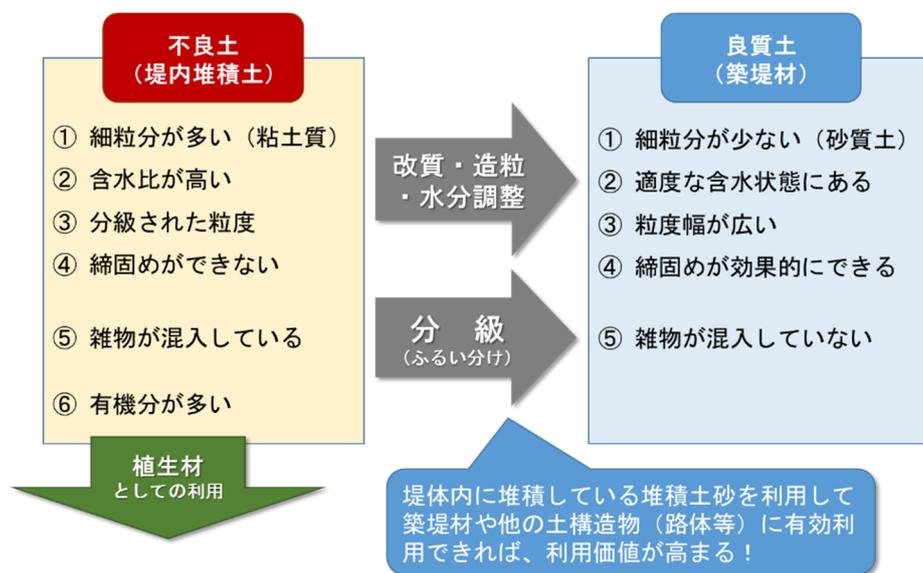


図-1 吸水性材料が果たす役割のイメージ(池の堤内に堆積した浮泥を例として)

池に堆積する浮泥は、

- ①細粒分が多い, ②含水比が高い, ③粒径幅がせまい, ④締固めができない,
- ⑤雑物が混入している, ⑥有機分が多い

といったように、建設工事に使用する地盤材料としてはマイナスの特徴があり、不良土とされる。このうち、①～④の問題は、吸水性材料を用いることで、泥の中の余剰水分が吸水性材料に吸い取られ、築堤材などの建設材料として適した良質土に甦らせることができる。この良質土を改質土(品質や機能が改善された土)と呼ぶ。ではどうして土の品質や機能を改善できるのか？

図-2は、粘性土の状態変化の境界を表すコンシステンシー限界を、土の含水状態(含水比)との関係で示したものである。同じ土でも含水比の低下に伴い、泥のように液体状だった土が塑性化し、さらに含水比の低下が進むと半固体状になる。その段階で土はボロボロとほぐれる。図-2は、土の水分(自由水)を蒸発させることで土の状態を変化させた場合を

示したものであるが、土中の自由水を拘束水として固定する場合でも状況は同じである。その概念図を示すと図-3のようになる。吸水性材料を用いて、土の中に存在する自由水を拘束すると、その拘束水は自由水ではなく、土粒子と同様に固相のようにふるまう。そのため見かけの含水比（補正含水比）は低下し、液体状の土を塑性体や半固体にすることができる。そして吸水性材料で改質した土を**ポロポロとほぐす**ことで扱いやすい土にすることができる。こうして吸水性材料は、図-1の①～④の課題の解決に貢献できる。

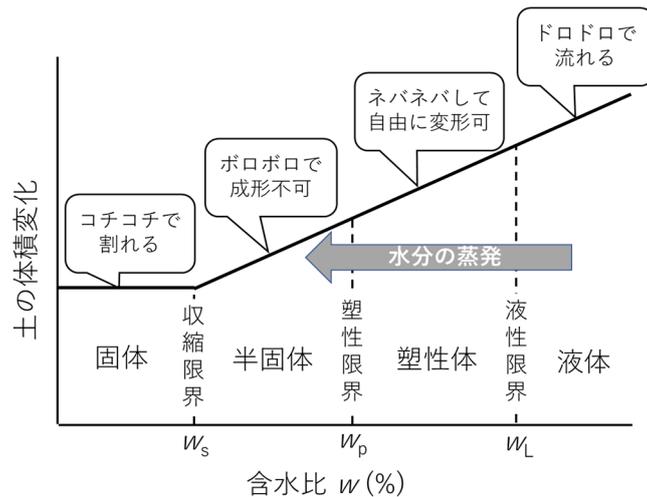


図-2 粘性土の状態変化とコンシステンシー限界

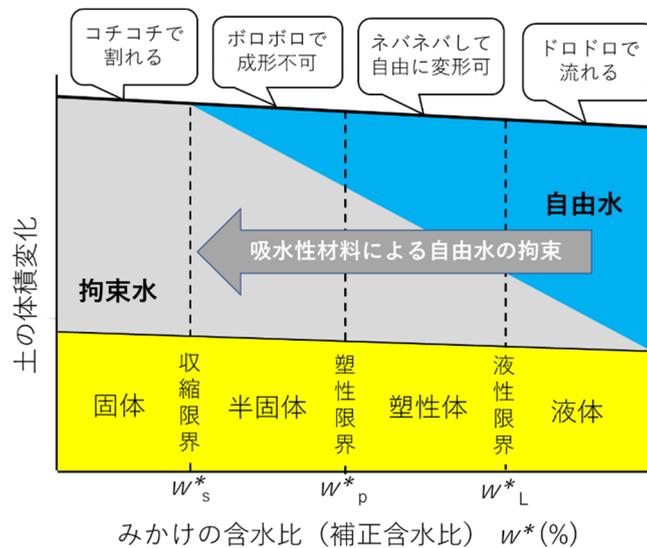
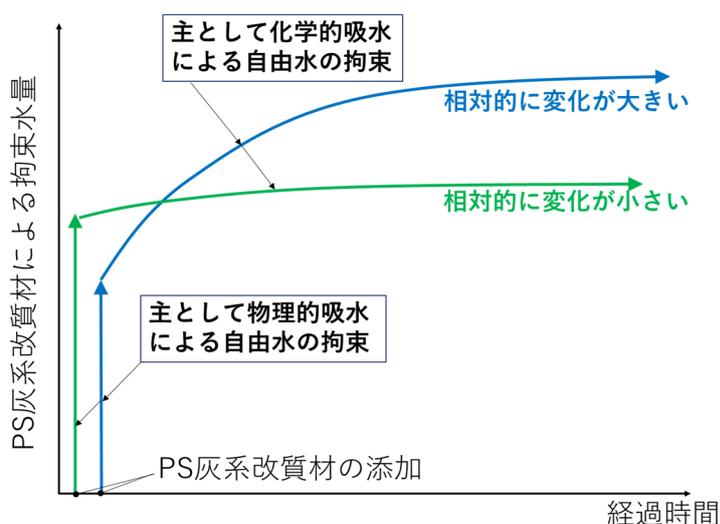


図-3 自由水と拘束水の割合変化に伴う土の状態変化とコンシステンシー限界

また、⑤の課題については、吸水性材料を添加して泥の余剰水分を調整し、ふるい分けを実施することで解決できる。さらに⑥の課題である有機分の多い底質については、中性域で

の改質を施すことにより植生基盤材として再利用できる。このように河川や湖沼、ため池などに堆積した不良土を無機系吸水性材料で改質し、河川やため池の堤体補強や湖沼の植生帯の整備、あるいは水質浄化といった周辺環境の改善に役立つ具体的な手法を明示することが、本手引きの目指すところである。

現時点では上記のすべての手法を体系的かつ網羅的に明示するまでには至っていない。しかし、まずは上記の内①～④の課題解決に向けて、本手引きでは**無機系吸水材料の一つであるペーパースラッジ灰（PS 灰）を用いた改質材（PS 灰系改質材）に着目し、PS 灰系改質材による土の改質技術**を暫定版としてまとめた。



図－４ PS 灰系改質材による拘束水量の経時変化

PS 灰系改質材は、**メカニズムの異なる 2 種類の吸水**（①PS 灰粒子の多孔質性を生かした物理的吸水，②改質材に含まれる化学的成分により生成する化学的吸水）により、**土中の自由水を拘束する特徴をもつ**。図－４は、PS 灰系改質材による拘束水量の経時変化を模式的に示したものである。PS 灰系改質材を土に添加した直後には、主として**物理的吸水**による自由水の拘束が生じ、その後、時間経過とともにゆるやかに**化学的吸水**による自由水の拘束が生じる。また同じ PS 灰系改質材でも、母材・主成分である PS 灰などの違いにより、拘束水量の経時変化が相対的に大きいものや小さいものが存在する。本手引きでは、このような PS 灰系改質材の物理化学特性や吸水特性を説明するとともに、PS 灰系改質材による拘束水量の評価方法を提示する。

PS 灰系改質材により改質した土（**PS 灰系改質土**）の物理特性、締固め特性、力学特性についても、それぞれ代表的な実験結果を用いて紹介する。PS 灰系改質土が地盤材料として利用される際には、多くの事例において**改質土の締固め**が実施されている。そのため、本手引きでは、改質土の品質の評価を「締固めた土のコーン指数試験」で行うことを基本としている。図－５に示すように、締固めにおける改質土の最適含水比 w_{opt} は、改質対象の土（原

土) のものより大きくなり、締固めが適切に実施できる含水比 w に調整しやすい特徴がある。

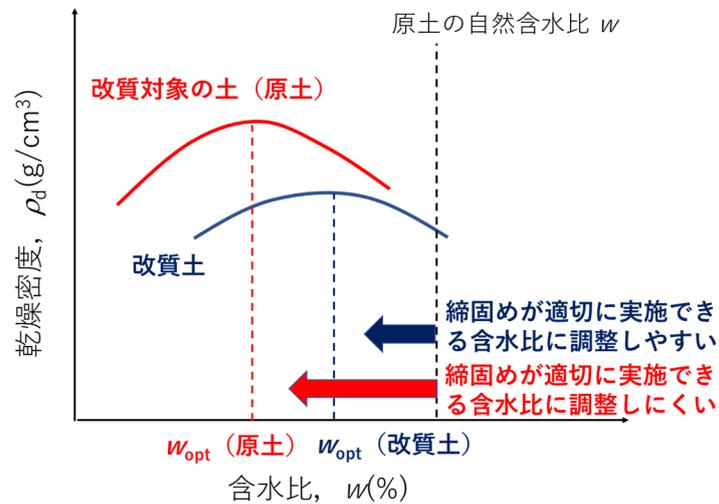


図-5 PS 灰系改質土と改質対象の土 (原土) の締固め曲線

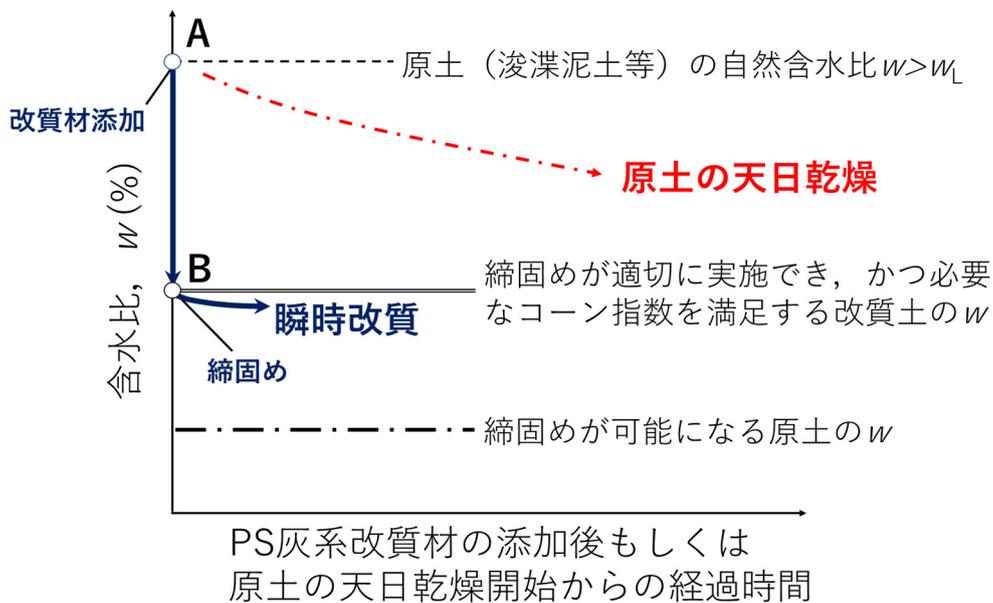


図-6 PS 灰系改質材を利用した瞬間改質

本手引きの後半では、PS 灰系改質土の配合設計・施工・品質管理方法を説明する。また **PS 灰系改質材を利用した改質技術の適用例** を2つ紹介する。一つめは、自然含水比が液性限界を上回る状態の浚渫泥土等を対象とする。図-6 に示すように「PS 灰系改質材の添加直後の高い吸水性」を利用して、添加直後から締固めが適切に実施でき、かつ必要なコーン指数を満足するように改質するものである (**瞬間改質**)。原土をそのまま天日乾燥する場合

よりも早く必要な品質・機能を持つ土を得られる。二つめは、高含水状態にある細粒分混じり砂礫等に対して、PS 灰系改質材を添加した後も土と同様に解きほぐせることを利用して改質するものである（ほぐし養生改質）。図-7に示すように「解きほぐして養生させる」ことで水分の蒸発を促し、かつ時間とともにゆるやかに高まる改質材の吸水により、少ない添加率で効果的に締固めができる状態に改質できる。

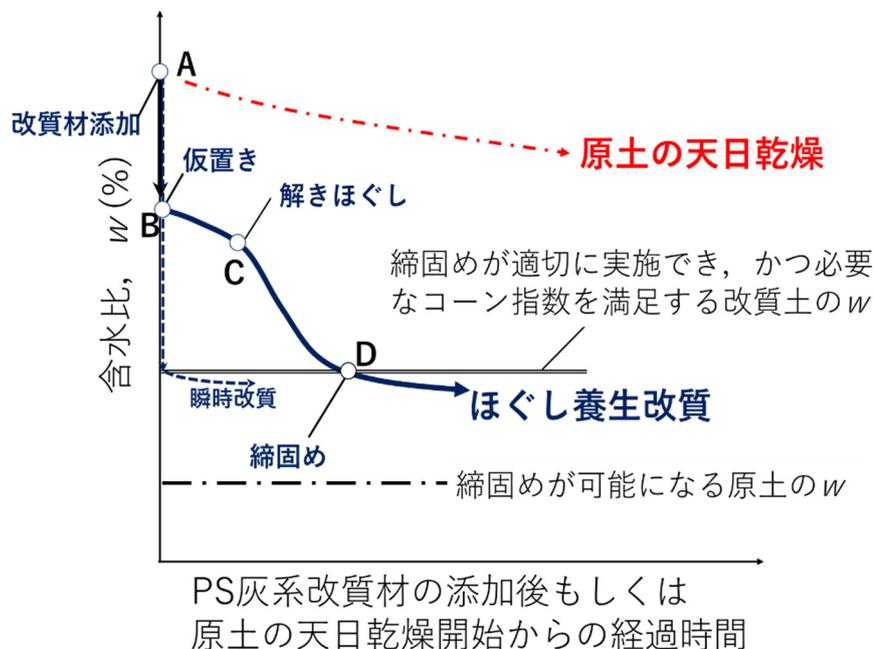


図-7 PS 灰系改質材を利用したほぐし養生改質

PS 灰系改質土の特徴を一言で言えば、「土とほぼ同様に扱うことができる」である。したがって、PS 灰系改質土を地盤材料として合理的に活用するためには、土の特徴であるコンシステンシーや締固め特性などを組み込んだ調査・設計・施工の検討が必要不可欠であり、この点を強く意識して本手引きを整備している。PS 灰系改質材のみならず、他の無機系吸水性材料を用いた改質材の利活用の際にも、本手引きをぜひ活用していただければ幸いである。

無機系吸水性材料を用いた土の改質技術の利活用に関する研究委員会
委員長 早野 公敏

1. 無機系吸水性材料とは

「吸水性材料」とは、土中に存在する水分（自由水）を何らかの方法で（物理的、あるいは化学的に）吸水するなどして拘束する機能を持つ材料のことを指す。本手引きでは無機系吸水性材料を対象とし、高分子（ポリマー）等を利用した有機系吸水性材料は対象としない。また本暫定版では、無機系吸水材料の一つであるペーパースラッジ灰（PS 灰）を用いた改質材（PS 灰系改質材）による土の改質技術のみを取り扱う。

本手引きでは、地盤材料の性状を改善して品質や機能を高めることを「土の改質」と呼ぶ。また改質された土を「改質土」、改質の対象となる土を「原土」という。吸水性材料を用いた土の改質では、土中の「自由水」を「拘束水」として固定し、土中内の自由水量を相対的に減らすことで原土の性状を変化させ、地盤材料としての品質や機能を向上させる。

表 1.1 は、自由水の処理方法という観点から土の改質原理を分類し、代表的な工法・材料、自由水の処理形態、改質土のコンシステンシー特性について整理したものである。従来の乾燥、圧密、脱水、凍結といった改質原理に対して、本手引きでは、**余分な水分（余剰水分）**を吸水性材料でコントロールする、すなわち「吸水」という異なる改質原理を扱う。

表 1.1 土の改質原理と自由水の処理方法からみた分類

原理	・代表工法 【材料（改質材の母材・主成分）】	自由水の処理形態		改質土の コンシステンシー特性	
① 乾燥	・天日乾燥工法	系外排出	気化	塑性体～半固体	
② 圧密	・ドレーン工法		液体		
③ 脱水	・機械脱水工法		液体		
④ 凍結	・凍結工法	系内改質	固体化	固結（固体化）	
⑤ 吸水 (化学的吸水) (物理的吸水)	【セメント系】	無機系	系内改質	固体化	塑性体～半固体, 固結（固体化）
	【石灰系】【酸マグ系】 【半水石膏系】			固体化	
	【PS 灰系】【2 水石膏系】		拘束	塑性体～半固体	
	【吸水性ポリマー】	有機系	系内改質	拘束	塑性体
	【水溶性ポリマー】			ゲル化	

※網掛け内の**ゴシック体の強調部分**が本手引き（暫定版）で扱う対象範囲

表中の①～④は施工方法に特徴がある改質原理であり，⑤は材料を利用した改質原理である。土の改質に用いる材料を，本手引きでは「改質材」という。同表の⑤のうち【吸水性ポリマー】や【水溶性ポリマー】以外が無機系吸水性材料を用いた改質材の範囲になり，【セメント系】や【石灰系】の材料をはじめ，【石膏系】や【酸化マグネシウム系】の材料も無機系吸水性材料を用いた改質材の範疇にある。従来，【セメント系】や【石灰系】の材料は固化材として知られているが，土中の水分を**化学的に吸水する**としてとらえることができる。一方，多孔質な粒子で構成される【PS 灰系】は，土中の水分をその粒子内に**物理的に吸水する**という機能も持つ。

また，ここで記述する【 $\cdot\cdot$ 系】の材料とは，改質材の母材や主成分を明示するものであり，他の無機系吸水性材料の添加混合を否定するものではない。例えば，PS 灰に他の無機系吸水性材料を添加するといった複合材料からなる改質材の利用は，現状でも汎用的に行われている。したがって**実際には一つの改質材で，化学的吸水と物理的吸水の両方の機能をもつ場合もある**。異なる無機系吸水性材料の複合的な利用は，改質材の発展・高度化を考えれば，むしろ歓迎すべき方向性といえる。

一方，高分子（ポリマー）等の有機系吸水性材料は，原土の改質・造粒や混合廃棄物の分別等で近年急速に利用が拡大している材料である。しかしながら材料の特性が多岐にわたり，また有機系吸水性材料は添加率が1%未満とわずかであっても，改質効果に及ぼす影響は著しく大きい。したがって，有機系吸水性材料を添加して改質効果を向上させた改質材については，現時点では扱うことが困難であると判断し，本手引きの検討の対象外とする。



図 1.1 PS 灰系改質材の全景写真と拡大顕微鏡写真

本手引き（暫定版）では，表 1.1 に示した無機系吸水性材料を用いた改質材のうち，PS 灰系改質材のみについて取り扱うものとする。PS 灰系改質材を添加・混合し，土中の自由水分を拘束することで不良土である原土が，良質土である改質土に改質される技術について言及する。

製紙製造工程から発生する汚泥（ペーパーラッジ（PS））を焼却した残さである PS 灰を加工処理することで，安定かつ安全な改質材として製品化したものが，PS 灰系改質材である．**図 1.1** は，PS 灰系改質材の全体写真と改質材粒子の拡大写真である．PS 灰系改質材の粒子は，表面が凹凸に富む多孔質体であり，メニスカスによって水を強く保持し放さないため，高い吸水性を示すという特徴がある．

2. PS 灰系改質材の物理化学特性

2.1 粒子密度とかさ密度

土粒子の密度は、土の固体部分の単位体積質量であり、締固めの程度を求める際などに利用される。無機系吸水性材料を用いた改質材で土を改質する場合、改質土の粒子密度は、土粒子と改質材粒子との混合割合に応じた、複合粒子密度になることを考慮する必要がある。PS 灰系改質材では母材である PS 灰の粒子密度が土粒子密度に近いので、原土と改質土の粒子密度の違いは小さい。しかし PS 灰粒子は多孔質であるため、かさ密度は小さく、そのため改質土の湿潤密度や乾燥密度に影響する。

無機系吸水性材料を用いた改質材の粒子密度および土粒子密度の例を、表 2.1 に示す。化学的な吸水性を示す石灰・セメント・酸化マグネシウムの粒子密度は、 3g/cm^3 以上ある。一方、物理的吸水性も示す PS 灰系改質材では 2.8g/cm^3 以下となっており、粒子密度に違いがある。無機系吸水性材料を用いた改質材により改質した土の粒子密度を求める場合、改質土の粒子密度を直接試験で測定するか、あるいは改質材の配合割合に応じて、土粒子と改質材粒子の複合粒子密度に換算して求める必要がある。

表 2.1 無機系吸水性材料を用いた改質材の粒子密度および土粒子密度

材料名	粒子密度	材料名	粒子密度
土粒子	2.5~2.8	普通セメント	3.15~3.16
PS 灰系改質材	2.4~2.8	早強ポルトランドセメント	3.13~3.14
生石灰	3.34	高炉 B 種セメント	3.04~3.05
二水石膏	2.23	酸化マグネシウム	3.58
半水石膏	2.6~2.8		数字の単位は g/cm^3

表 2.2 4 種類の PS 灰の粒子密度¹⁾

項目	PS 灰 A		PS 灰 B		PS 灰 C		PS 灰 D	
	サイクロン炉		ストーカー炉		流動床炉			
分類	範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均
粒子密度 (g/cm^3)	2.59~ 2.63	2.61	2.29~ 2.56	2.42	2.64~ 2.74	2.67	2.65~ 2.74	2.66

PS 灰系改質材の母材となる PS 灰の粒子密度を表 2.2 に示す。焼却炉の違いによって粒子密度に若干違いが認められるものの概ね土粒子密度と同じような値を示す。また、各 PS 灰における粒子密度のばらつきも比較的小さい。したがって、PS 灰系改質土については改質前後の粒子密度の差は小さい。

しかし PS 灰粒子は多孔質であるため、かさ密度は小さく、そのため改質土の湿潤密度や乾燥密度に影響する。表 2.3 に全国の PS 灰について調べたかさ密度の調査結果を示す。

表 2.3 PS 灰 (88 種類) のかさ密度¹⁾

項目	全 PS 灰(範囲)	平均値	標準偏差 σ
かさ密度(g/cm ³)	0.450~1.01	0.690	0.156

2.2 粒度

改質材の粒度は、改質した土のコンシステンシー特性、締固め特性や力学特性に影響する。原土および改質材の粒度を事前に確認することにより改質土の特性をおおまかに把握することができる。PS 灰系改質材の場合、シルト質粘土～粗砂に相当する粒度を示す。

無機系吸水性材料を用いた改質材の粒度は、改質土の性状に影響するため、事前に把握することが必要である。PS 灰および PS 灰系改質材の粒度の例を図 3.1 に示す。平均粒径で 0.005~1.1mm の広範囲に分布しており、シルト質粘土～粗砂に相当するさまざまな粒度を示す。粒度の確認方法として、地盤工学会「土の粒度試験方法」を適用できるが、化学的吸水（水和反応）を伴う場合には必ずしも適用できない。その場合には、例えば無水エタノールを溶媒に用いたレーザー回折による粒度測定などにより確認できる。

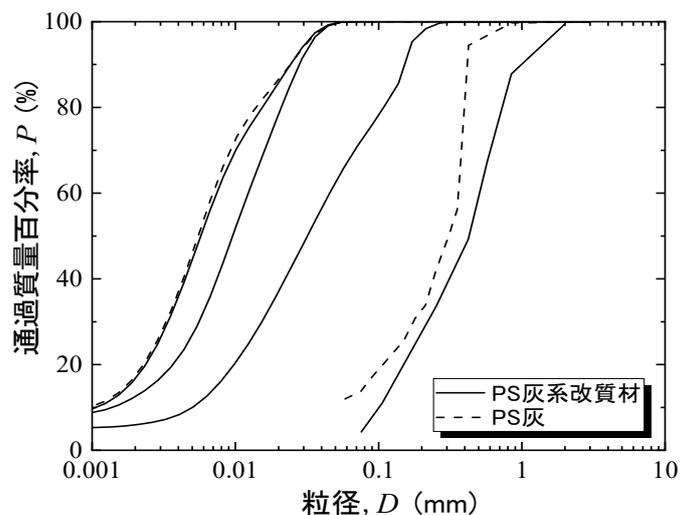


図 2.1 PS 灰および PS 灰系改質材の粒度の例

2.3 成分組成と pH

改質材の成分組成は、改質土の物理特性や力学特性に影響を与える。また、改質材の pH（水素イオン濃度指数）は、改質土の化学特性に影響を及ぼすだけでなく、力学特性にも影響する。したがって、改質材の成分組成や pH を事前に確認することは、改質土の性状を把握する上で有効な手段である。なお、改質材の特性は、主成分・母材である無機系吸水性材料のものと必ずしも同じとは限らないが、無機系吸水性材料の成分組成と pH を知ることも有益である。

図 2.2 は各種の PS 灰系改質材の成分含有率を蛍光 X 線分析法で調べた結果の一例であり、酸化物換算するとその主要成分は Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO の 3 成分である。表 2.4 は PS 灰系改質材の pH について、既往文献に記されたデータをリストにしたものである^{2)~4)}。pH が 11 以下と比較的低アルカリのものから 12 以上と高アルカリを呈するものまで、さまざまな改質材があることがわかる。材料の成分組成と pH を調べることで、改質効果の概略を把握することが可能である。

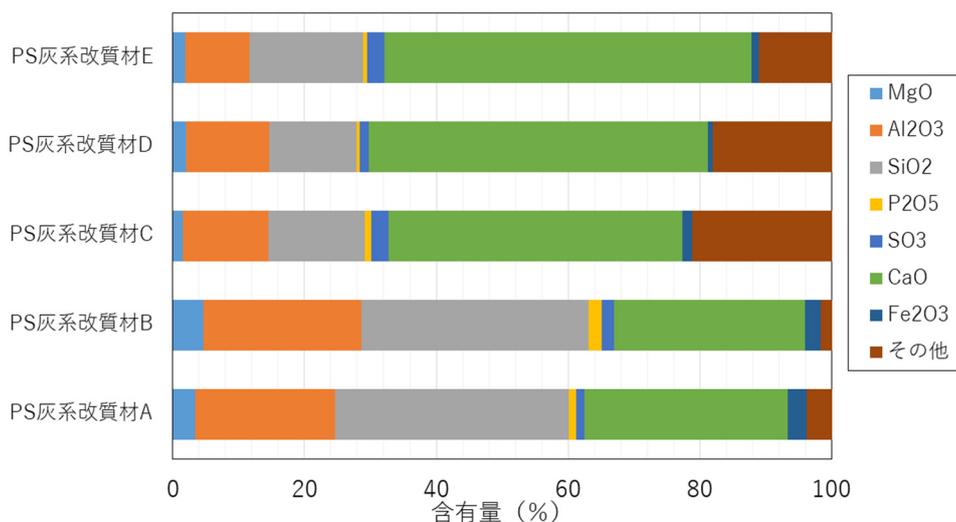


図 2.2 PS 灰系改質材の成分含有率の例

表 2.4 PS 灰系改質材（5 種類）の pH の測定例^{2)~4)}

項目	改質材 a	改質材 b	改質材 c	改質材 d	改質材 e
pH	10.8	11.7	12.6	12.8	12.9

日本全国の製紙工場から採取した 88 種類の PS 灰について、その成分含有率を蛍光 X 線分析法で求めた結果を表 2.5 に示す。成分含有率の分布範囲は非常に幅広いが、主要成分は PS 灰系改質材と同様に Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO の 3 成分であることがわかる。

表 2.5 PS 灰 (88 種類) の成分含有率¹⁾

項目	成分含有率(%)		
	全 PS 灰(範囲)	平均値	標準偏差 σ
Al ₂ O ₃	9.00～54.2	25.0	11.8
SiO ₂	9.10～57.1	31.7	11.0
CaO	2.30～60.3	22.7	17.0
MgO	0.800～11.8	4.40	3.45
Fe ₂ O ₃	0.800～3.30	1.80	0.875

また、PS 灰の pH を土懸濁液の pH 試験方法 (JGS 0211) に準拠して求めた結果を表 2.6 に示す。中性域のものから強アルカリを呈するものまで、さまざまな PS 灰が存在する。pH は CaO の含有率と強い相関があり、CaO 成分を多く含有する PS 灰ほど、pH が高くなる傾向がある。さらに CaO 成分が多いほど、化学的吸水効果が生じやすくなると考えられる。

表 2.6 PS 灰 (88 種類) の pH¹⁾

項目	全 PS 灰(範囲)	平均値	標準偏差 σ
pH	7.20～13.2	11.3	1.28

参考文献

- 1) 望月美登志：焼却方法が異なる各種 PS 灰の吸水性評価と泥土改質への適用性，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol. 75, No. 2, pp. 155-166, 2019.
- 2) 望月美登志：PS 灰改質材による浚渫処理土の強度改善効果について，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 75, No. 2, pp. 205-210, 2019.
- 3) 水野健太：各種改質材を用い高含水底泥の改良効果に関する研究，第 14 回地盤改良シンポジウム論文集，日本材料学会，pp.11-18, 2020.
- 4) 小笠原誉也，早野公敏，山内裕元：二酸化炭素と PS 灰系改質材を用いたアルカリ建設汚泥の中性化促進手法の提案，第 55 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1489-1490, 2020.

3. PS 灰系改質材の吸水特性と吸水比 W_{ab} の評価

3.1 吸水特性

本手引きでは、土中にある水分の中で、粒子間の間隙を自由に移動できる水のことを「自由水」と呼ぶ。一方、粒子に吸着した水（吸着水）および結合した水（結合水）など、何らかの束縛を受けている水を総称して「拘束水」と呼ぶ。間隙水は自由水に拘束水を加えたものである。

無機系吸水性材料を用いた改質材により土の中に存在する自由水を拘束すると、その拘束水は自由水ではなく、土粒子と同様に固相のようにふるまう。PS 灰系改質材がもたらす「拘束水」の要因には、物理的吸水と化学的吸水がある。

水分の種類については、既往の粉体研究の中で言及されている¹⁾。表 3.1 は文献 1) に示された水分の種類を PS 灰系改質材に適合するように加筆したものである。

表 3.1 水分の種類¹⁾に加筆

水分の種類	特 徴
自由水分	粒子間の間隙に存在し、単に PS 灰系改質材粒子に付着している水分 (PS 灰粒子の吸水特性とは直接関係ない)
物理的拘束水分	粒子内の間隙に存在し、一定の条件下で PS 灰系改質材粒子内に吸着されている水分 (PS 灰粒子の吸水特性と直接関係がある)
化合的結合水分	PS 灰系改質材粒子それ自体に化学的に結合している水分 (PS 灰粒子の吸水特性と直接関係がある)

表中の物理的拘束水分が物理的吸水による水分に相当する。PS 灰系改質材の粒子は粒子内に多くの微小な間隙を有する。粒子内の間隙は粒子内で閉塞するものもあるが、多くは粒子表面で開口している(図 3.1(a))。すなわち多孔質性を示す。そのため、この開口した微細孔への毛細管現象により物理的に吸水し、メニスカスによって粒子内に水を強く保持する。一方、表中の化学的結合水分が化学的吸水による水分に相当するもので、PS 灰系改質材に含まれる化学的成分によって生成される結合水がそれにあたる。図 3.1(b)には PS 灰系改質材粒子に結合したエトリンガイトを示している。

また、表 3.1 には PS 灰系改質材粒子に付着している自由水分の存在も記している。これは粒子間の間隙に存在する水であり、PS 灰系改質材の吸水特性によって拘束されるものではない。

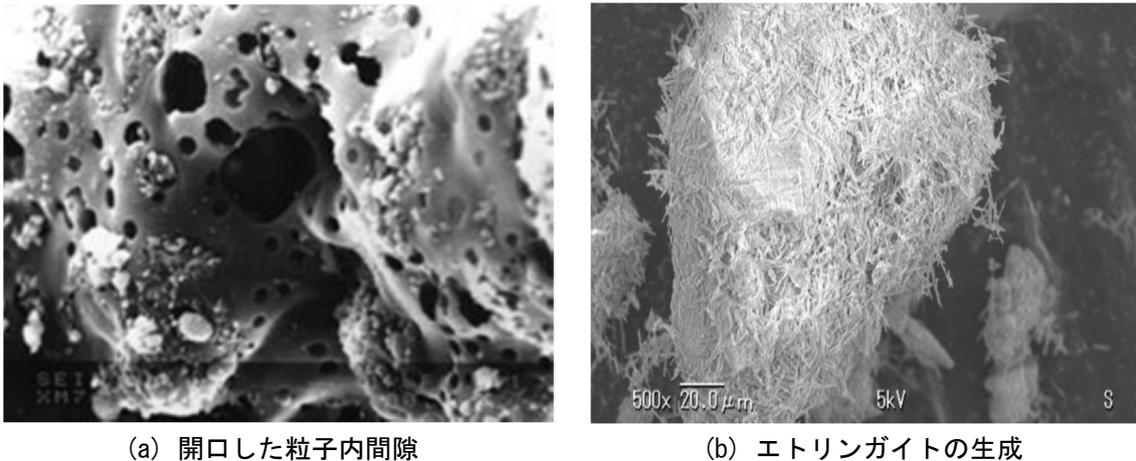


図 3.1 PS 灰粒子の粒子内間隙とエトリンガイトの生成

3.2 吸水比 W_{ab} の評価

改質材による拘束水の総量を「拘束水量」とよぶ。無機系吸水性材料を用いた改質材の利活用に際しては、改質材による拘束水量の程度を評価することが重要である。ここでは物理的および化学的吸水による、PS 灰系改質材の「拘束水量」の程度として吸水比 W_{ab} を評価する試験方法を 2 つ提示する。

吸水性材料に水分を加え続けていくと、あるところで吸水能力が限界に達し、それ以上は水を拘束できなくなる。本項では、**物理的および化学的吸水による、PS 灰系改質材の拘束水量の程度を評価する 2 つの試験方法**を示す。各々の方法で求められる**吸水比 $W_{ab}(\%)$** は、対象となる PS 灰系改質材 1g あたりの「拘束水量」(g)の程度を評価するために用いられる。ただし、「拘束水量」のみを直接測定できる試験方法は、現時点では確立されておらず、試験方法の違いにより吸水比 W_{ab} の評価に違いが生じる。そのため、配合設計などに際しては評価試験方法の特性に留意することが必要である。

(1) シリンダー法による評価

比較的簡便に PS 灰系改質材による拘束水量の程度を評価する方法としては、加藤ら²⁾が提案した方法がある。この方法は、メスシリンダーに一定量の水を張り、そこに PS 灰を投入して沈降堆積した時の体積から吸水比 W_{ab} を求めるという方法である (図 3.2)。

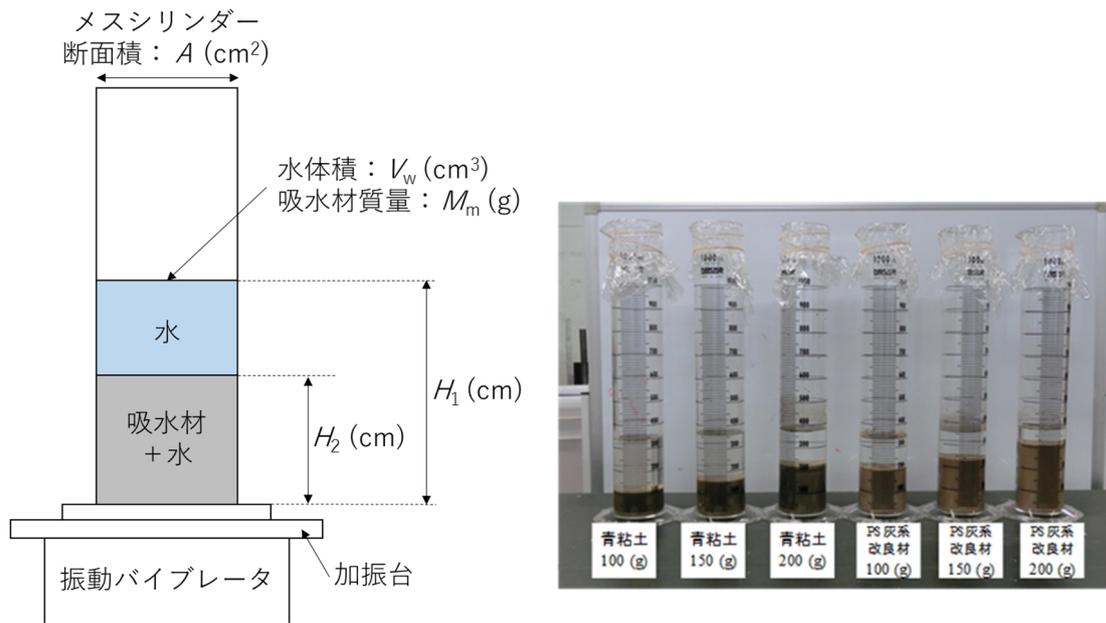


図 3.2 メスシリンダーを利用した吸水性能評価試験（シリンダー法）の概要³⁾

シリンダー法の試験手順

- ① 500 ml用メスシリンダー($\phi=50\text{mm}$)に体積 $V_1(\text{cm}^3)$ （試験に用いるのは270 ml）の水を入れてから、ロートを用いて乾燥質量 $M_m(\text{g})$ （たとえば100 g）のPS灰系改質材を入れる。
- ② メスシリンダーにラップでふたをして、泡がたたないように逆さにしたり戻したりする操作を1分間続け、メスシリンダーの内容物が均一な懸濁液になるようにした後、素早くメスシリンダーを静置する。内容物は損失のないよう注意する。
- ③ ラップを外して、ラップとメスシリンダー表面に付着したPS灰系改質材を洗浄ビンに入った体積 $V_2(\text{cm}^3)$ （試験に用いるのは30 ml）の水で洗い流す。
- ④ 60分静置する。
- ⑤ 10分間バイブレータにより振動を加え、締固める。
（バイブレータの振動数、3000回/分、振幅1mm）
- ⑥ 振動後は、静置する。
- ⑦ 水の高さ水位 $H_1(\text{cm})$ 、PS灰の高さ $H_2(\text{cm})$ を測定する。
（ H_1 、 H_2 ともメジャーで4か所測定して平均化）
- ⑧ 以下の式より吸水比 $W_{ab}(\%)$ を求める。

$$W_{ab} = \frac{\{V_m - A(H_1 - H_2)\} \times \rho_w}{M_m} \times 100$$

V_m : 加えた水の体積 ($V_m = V_1 + V_2$)

V_1 : 最初に入れておく水の体積

V_2 : メスシリンダー表面に付着した PS 灰系改質材を洗い流す水の体積

A : 吸水比測定容器の断面積

H_1 : PS 灰系改質材を加えた後の水の水位

H_2 : PS 灰系改質材の高さ

ρ_w : 水の密度

M_m : PS 灰系改質材の質量

シリンダー法を利用して PS 灰系改質材と石炭灰の吸水比 W_{ab} の経時変化を測定した結果を **図 3.3** に示す⁴⁾。同図によると吸水比は振動後 10 分程度で一定値に推移している

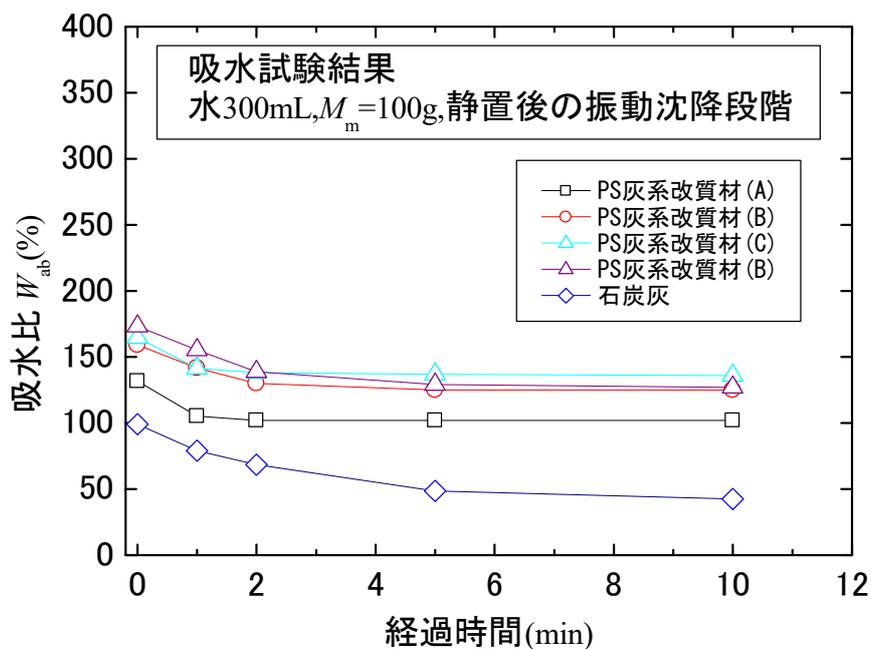
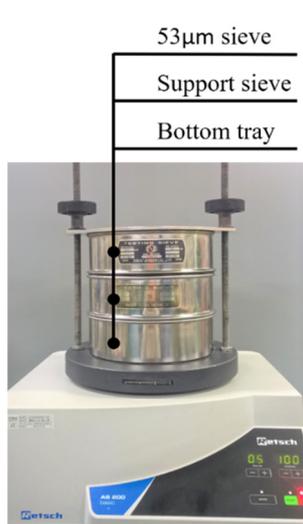
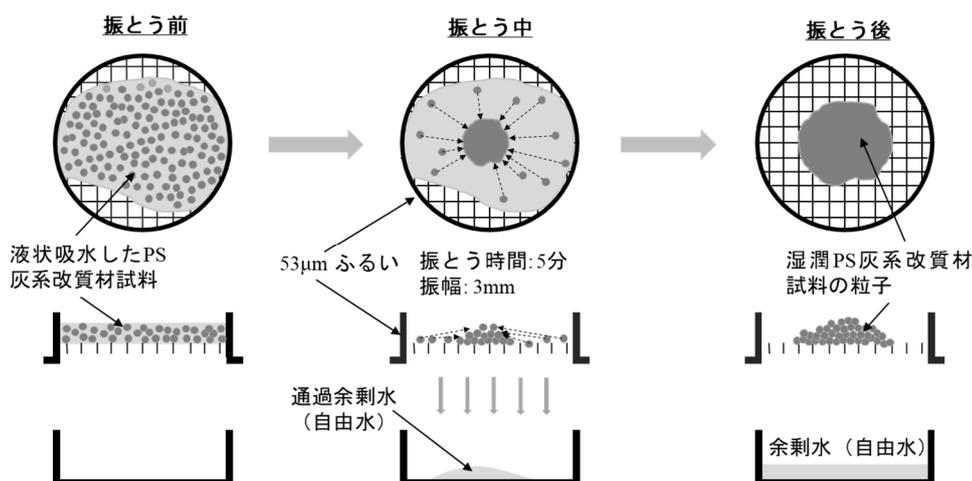


図 3.3 シリンダー法による吸水比 W_{ab} の測定例⁴⁾

(2) ふるい法による評価

ふるい法は、Phan らが提案した方法である (**図 3.4**)⁵⁾。この方法では、PS 灰系改質材の周りに存在する自由水分を加振してふるい落とすことにより、PS 灰系改質材に吸水された拘束水と分離する点に特徴がある。振とうを加えることにより、PS 灰系改質材に吸収されなかった余分な水は、細かいふるい目を介して下に自由落下する。PS 灰系改質材によって吸水された水は、そのまま保持されるという原理である。



(b) 10 分間封緘養生した湿潤改質材 (振とう前)



(c) 24 時間封緘養生した湿潤改質材 (振とう前)



(d) 振とう後の湿潤改質材



(e) ふるいを通過した余剰水

(a) 電磁式ふるい振とう機, 受け皿, ふるい

図 3.4 ふるいを利用した吸水性能評価試験 (ふるい法) の概要⁵⁾

ふるい法の試験手順

- ① PS灰系改質材と水を所定の割合 (たとえば1:4の割合) で混合し, 封緘養生する。PS灰系改質材と水の割合は, 予想される吸水比 W_{ab} (%)の2倍以上とする。
- ② PS灰系改質材の粒径を考慮して, PS灰系改質材のほとんどが通過しない程度に十分に目が細かいふるい (たとえば $53\ \mu\text{m}$ のふるい) を用意し, 受け皿のう上にセットする。なお, 受け皿と目の細かいふるいの干渉を防ぐために, 目の粗いふるい (例えば 4.75mm) を挿入するとよい。

- ③ 所定の期間（たとえば0.5, 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72時間など）封緘養生した湿潤PS灰系改質材を取り出し，ふるいのうえに広げる。
- ④ 電磁式ふるい振とう機などで受け皿とふるいを振とうさせる。湿潤PS灰系改質材から受け皿に落ちる水がなくなるまで十分に振とうさせる。
- ⑤ 振とう後，ふるいの上に残った湿潤PS灰系改質材をJIS法により炉乾燥させて含水比 w を測定する。
- ⑥ 粒子間の間隙に存在し単にPS灰系改質材粒子に付着している水分を補正するために，以下の式より吸水比 W_{ab} を求める。

$$W_{ab} = w - 22\% \quad (\text{ここで } 22\% \text{ は付着水分})$$

なお，22%の補正は吸水性のない砂やガラスビーズなどの評価試験結果に基づくものである。

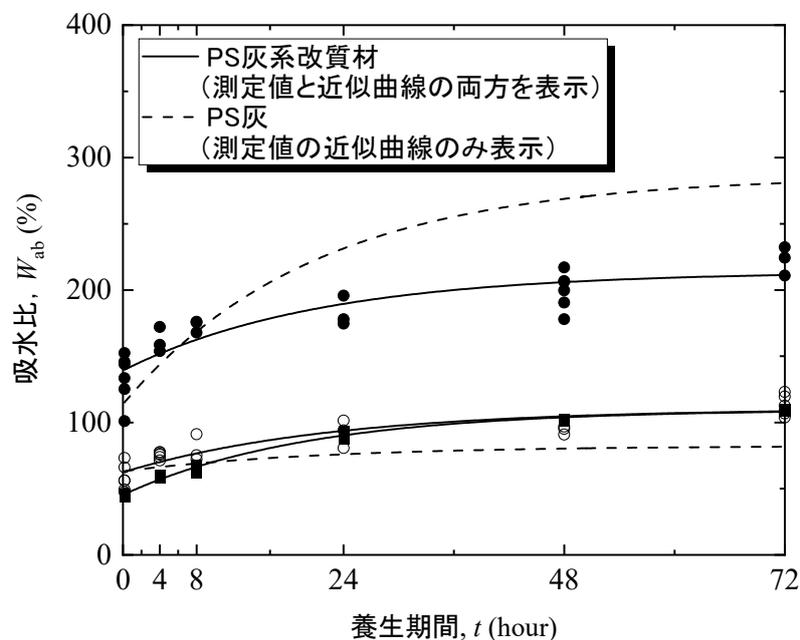


図 3.5 ふるい法による吸水比 W_{ab} の測定例

所定の期間，封緘養生した PS 灰系改質材や PS 灰に対してふるい法で測定した吸水比 W_{ab} の一例を図 3.5 に示す。吸水比 W_{ab} は，養生期間の経過とともに増加している。これは，時間経過とともに PS 灰系改質材が水和反応により水分を吸収・保持し続けるためである。

(3) 吸水比 W_{ab} の特徴と留意点

シリンダー法による各種 PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} の測定結果を表 3.2 に示す⁴⁾。3 種類の形式の異なる焼却炉で焼却された PS 灰 A (サイクロン炉)，PS 灰 B (ストーカー炉)，PS 灰 C・D (流動床炉) を製品化した各 PS 灰改質材 (A)～(D) の物性や吸水比 W_{ab} の測定範囲や平均吸水比 W_{ab} を記載している。流動床炉，ストーカー炉，サイクロン炉の順で平均吸水比が大きくなる。

なっている。また、いずれのPS灰系改質材においても大きなばらつきもなく吸水比 W_{ab} を安定して測定できることが確認されている。

シリンダー法で求めたPS灰系改質材の吸水比 W_{ab} は概ね表3.2に示す範囲にあるものと考えてよい。

表 3.2 各種 PS 灰系改質材のシリンダー法による吸水比 W_{ab} の範囲と平均値⁴⁾

項目	PS 灰系改質材			
	改質材(A)	改質材(B)	改質材(C)	改質材(D)
焼却炉の形式	サイクロン炉	ストーカー炉	流動床炉	
製品化の処理方法	再焼成	造粒	混合	
吸水比 W_{ab} (%)範囲	100~105	113~132	129~148	116~138
吸水比 W_{ab} の平均値(%)	102	125	136	127

図 3.6 は、PS 灰を含む各種の材料についてシリンダー法による吸水比 W_{ab} と細孔容積を測定した結果をまとめたものである⁴⁾。PS 灰系改質材については細孔容積が大きい材料ほど吸水比 W_{ab} が大きくなる傾向があり、細孔容積が吸水性能に大きく依存することがわかる。ただし、同図によるとほとんど吸水性のないガラスビーズでは、細孔容積はゼロであるにも関わらず、吸水比 W_{ab} は有意な値を示す結果となっており、シリンダー法による吸水比 W_{ab} の中には一部付着水（自由水分）が含まれていることに留意する必要がある。

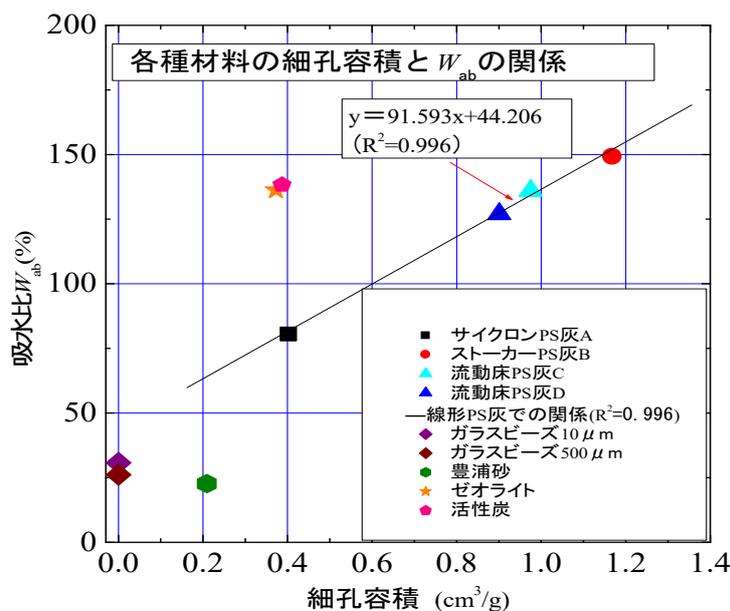


図3.6 シリンダー法による吸水比 W_{ab} と細孔容積の関係⁴⁾

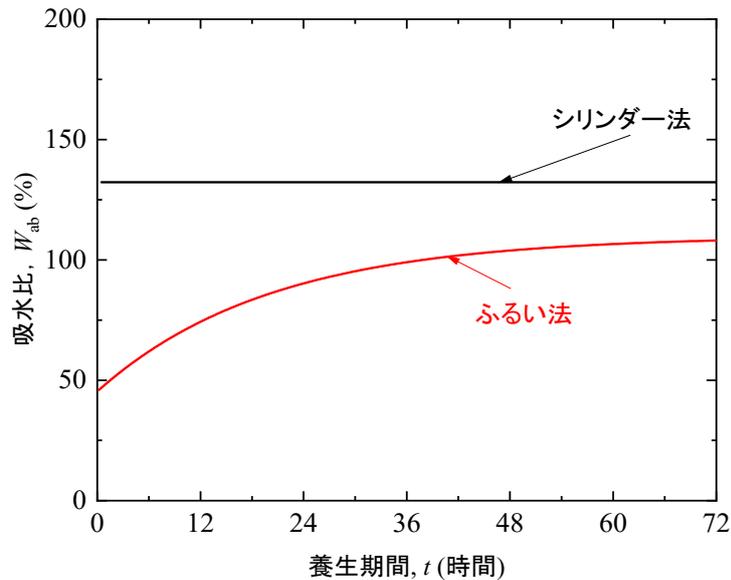


図 3.7 同一 PS 灰改質材に対するふるい法とシリンダー法の吸水比 W_{ab} の違いの例

図 3.7 は、同一の PS 灰系改質材に対してシリンダー法とふるい法により吸水比 W_{ab} を測定したものである。シリンダー法では付着水（自由水分）の補正を行わないため、吸水比 W_{ab} がふるい法によるものより大きくなる。また、ふるい法では封緘養生中に改質材の体積変化が拘束されない一方、シリンダー法ではシリンダー側壁により体積変化が制約されるために、養生に伴う吸水、特に化学的吸水の変化が少ない形で評価されることに留意する必要がある。

参考文献

- 1) 室井要：粉体測定方法について，粉体工学研究会誌 6 巻 1 号，pp.39-48，1969.
- 2) 加藤雄介，今井五郎，大向直樹，望月美登志，斎藤悦郎，吉野広司：PS 灰添加による泥土の改良に関する研究，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.677-678，2005.
- 3) 川合彩加，早野公敏，山内裕元：PS 灰系改良土の強度特性に及ぼす養生効果とその要因に関する基礎的検討，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.74，No.3，pp.306-317，2018.
- 4) 望月美登志：焼却方法が異なる各種 PS 灰の吸水性評価と泥土改質への適用性，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 75，No. 2，pp. 155-166，2019.
- 5) N. B. Phan, K. Hayano, Y. Mochizuki and H. Yamauchi : Mixture design concept and mechanical characteristics of PS ash–cement-treated clay based on the water absorption and retention performance of PS ash. *Soils and Foundations*, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.02.006>, 2021(in press).

4. PS 灰系改質土の物理特性・締固め特性

4.1 コンシステンシー特性

原土は、一般的には細粒分を多く含み、液状を呈することもある。このような細粒分を多く含む原土に、無機系吸水性材料を用いた改質材を添加・混合することで、改質土のコンシステンシー特性をコントロールすることが可能になる。PS 灰系改質材の場合、吸水効果により土の流動性は失われ、改質により半固体にした土塊状の改質土をポロポロとほぐすことで扱いやすい土にすることができる。

PS 灰系改質土のコンシステンシー変化を調べた試験の結果の一例を示す¹⁾。含水比を液性限界 w_L の 40.7% に調整した青粘土に、PS 灰系改質材を乾燥質量比 A の添加率で 5, 10, 15, 20, 25% 添加した試験の実施例である。その後、それぞれの供試体をファスナー付きのプラスチック・バッグのなかで、室温 20°C で 3 時間、3, 7, 28 日間封緘養生し、液性限界・塑性限界試験および含水比試験を行っている。PS 灰系改質材を添加した直後の改質土の様子を図 4.1 に示す。

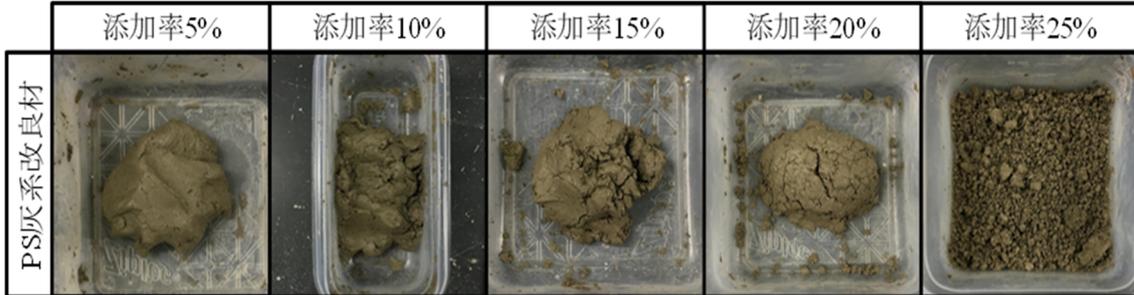


図 4.1 PS 灰系改質材添加直後の改質土の状況¹⁾

改質土の流動性は PS 灰系改質材の添加率 A の増加とともに減少している。これは PS 灰系改質材を添加することで青粘土中の水分を拘束するため、固体分に対する自由水量が相対的に減少したことによるものである。PS 灰系改質材を 25% 添加したケースでは、改質材添加直後に土は半固体状となり、解きほぐしを行うことができる。

添加率 A と養生期間にともなう液性限界 w_L 、塑性限界 w_P の変化を図 4.2 に、塑性指数 I_P の変化を図 4.3 に示す。養生条件は封緘養生である。図 4.2 から w_L 、 w_P は添加率 A とともに増加する傾向がある。 w_L 、 w_P には自由水だけでなく PS 灰系改質材による拘束水が含まれるためである。一方、図 4.3 を見るとばらつきが見られるものの、添加率 A の増加に対して I_P はあまり変化していない。この理由として原土である青粘土の粒度が PS 灰系改質

材のものによく似ており PS 灰系改質材を添加しても粒度変化が少ないことが考えられる。

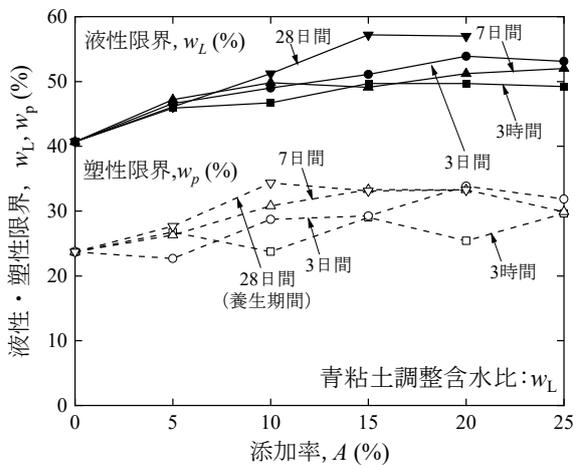


図 4.2 添加率・封緘養生に伴う
液性・塑性限界の変化¹⁾

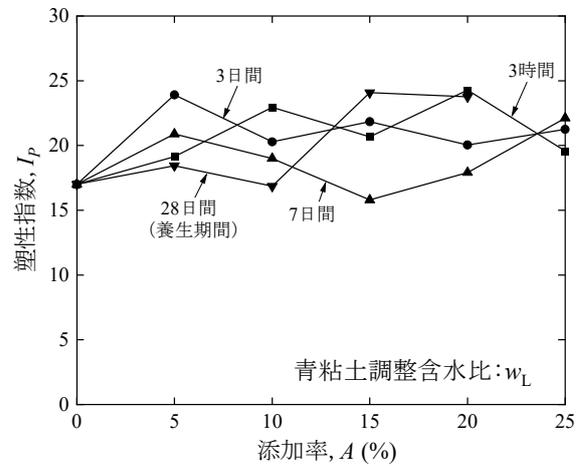


図 4.3 添加率・封緘養生に伴う
塑性指数の変化¹⁾

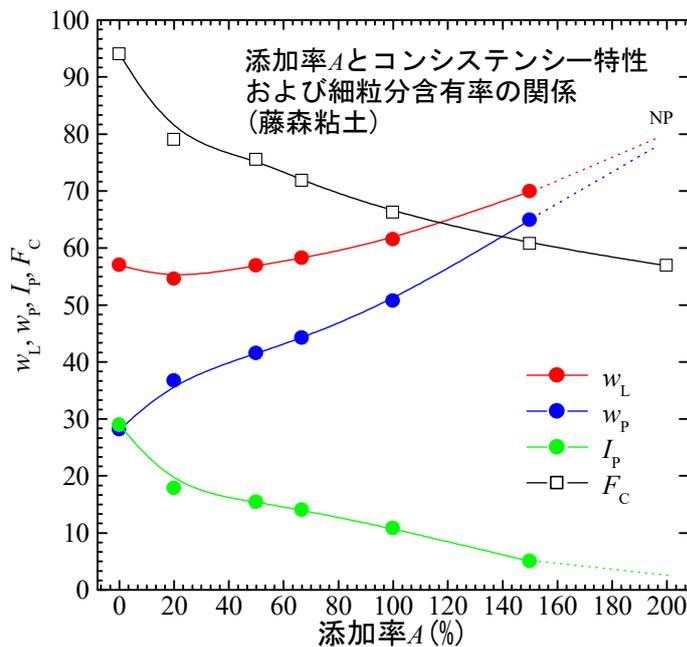


図 4.4 粗粒状の PS 灰系改質材により改質した粘土のコンシステンシー特性

図 4.4 は藤森粘土（液性限界 w_L ; 57.0% , 塑性限界 w_P ; 28.1% , 塑性指数 I_P ; 28.9）に比較的粗粒の PS 灰系改質材を添加した場合の改質土のコンシステンシー特性 (w_L , w_P , I_P) と細粒分含有率 F_c の変化を示したものである²⁾。添加率 A が大きくなるに従い、 I_P および F_c は小さくなり、改質土が砂質土化していくことがわかる。粗粒の PS 灰系改質材を添加し

た図 4.4 では、添加率の増加に伴って I_p が減少傾向にあるのは、粘土（原土）と添加する改質材の相対的な粒度特性の違いが影響しているものと考えられる。すなわち、原土に対して粗い粒子の改質材を添加すれば、砂質土化するので、塑性指数は低下する。原土に対してより細かい改質材を添加すれば、逆に粘土化するため、塑性指数は増加すると考えるとわかりやすい。

4.2 粒度特性

改質土の粒度は、コンシステンシー特性、締固め特性や力学特性に影響する。PS 灰系改質材の場合、改質土の粒度は、原土と改質材の合成粒度として示すことができる。ただし、【セメント系】や【石灰系】の改質材でも知られているように、化学的吸水（水和反応）を伴う場合には必ずしも合成粒度通りにはならない点に留意する必要がある。

PS 灰系改質材の場合、改質土の粒度は、原土と改質材の合成粒度として示すことができる。例えば、粗粒分を多く含む PS 灰系改質材で、細粒分を多く含む粘性土を改質すると、塑性指数が減少するとともに砂質土的な挙動を示す。したがって、原土と PS 灰系改質材の粒度を事前に調べることで、改質土の特性をおおまかに把握することができる。ただし、化学的吸水（水和反応）を伴う場合には必ずしも合成粒度通りにはならない点に留意する必要がある。

図 4.5 は、原土（浚渫泥土）と PS 灰系改質材の粒度、およびその混合土（改質土）の合成粒度を示したものである。原土 1m^3 あたりの PS 灰系改質材の添加量 a は、S 底泥土で $380\text{kg}/\text{m}^3$ 、R 底泥土で $300\text{kg}/\text{m}^3$ である。PS 灰系改質材添加による粒度改善効果を確認できる。

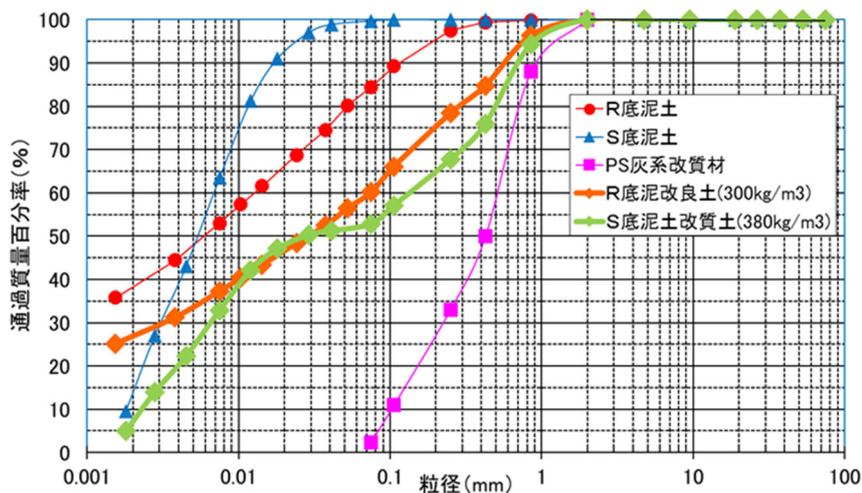


図 4.5 原土（底泥土）、PS 灰系改質材、改質土の粒度

4.3 締固め特性

土の締固め特性は、土粒子の粒度や密度、そして土の含水状態に依存することが知られている。改質土は、原土と改質材の複合材料となることから、その締固め特性は、土のみならず改質材の粒度・密度および吸水特性などに依存する。PS 灰系改質材の場合、最適含水比 w_{opt} よりも湿潤側にある原土に添加することで、その吸水効果により改質土は締固めの効く状態になる。

藤森粘土に対して、PS 灰系改質材の添加率 A をさまざまに変えて改質した土の締固め試験(A 法)の結果を図 4.6 に示す²⁾。原土の藤森粘土では、低い最適含水比 w_{opt} で凸型の締固め曲線であるが、PS 灰改質材の添加率 A が増加するにつれて最適含水比 w_{opt} は、図に示すように右側へ移行していく。

締固めが効かない含水状態の粘性土は、コンシステンシーの視点で見ると液性限界 w_L 付近か、それ以上の含水状態にあると考えられる。一方、塑性限界 w_p 付近か、それ以下の含水状態にある土はよく締固めができる。図 4.7 は、土の状態変化とコンシステンシー特性を模式的に示したものである。図中には塑性限界 w_p 付近が最もよく締め固まり、最大乾燥密度 ρ_{dmax} が発現する範囲に一致することが示されている。したがって、施工管理における**含水比の管理とは、塑性限界 w_p 付近の含水比を確保すること**である、とされている³⁾。同じことが PS 灰系改質材による改質土でも当てはまる。最適含水比 w_{opt} よりも湿潤側にある粘性土に PS 灰系改質材添加することで改質土は、塑性状から半固体状へと性状変化する。改質土が塑性限界 w_p 付近の含水状態になったタイミングで解きほぐしすることで**締固めが効く状態になる**ことがわかる。

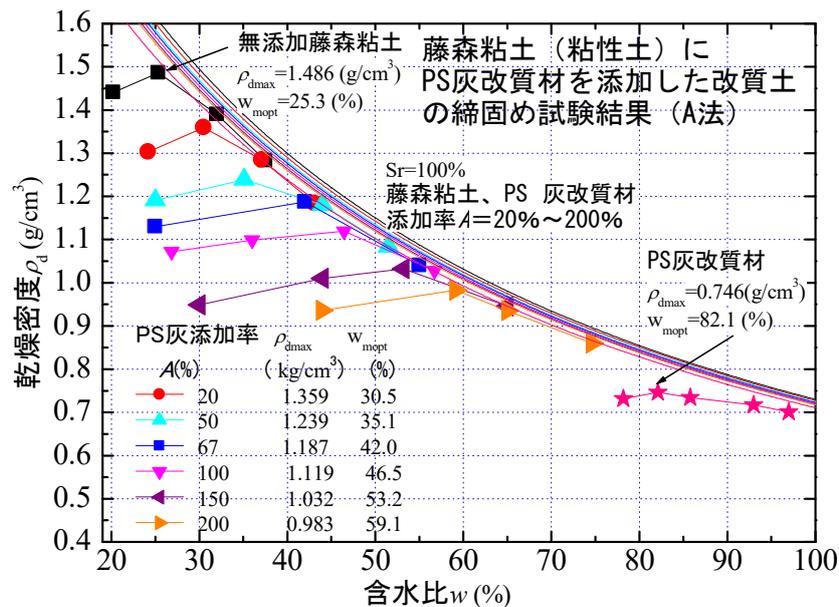


図 4.6 PS 灰改質材により改質した藤森粘土の締固め特性²⁾

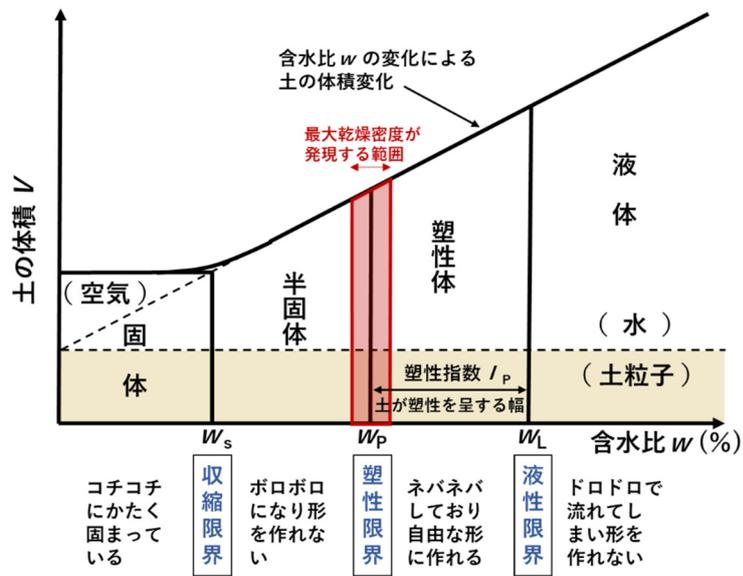


図 4.7 土の状態変化とコンシステンシー限界³⁾

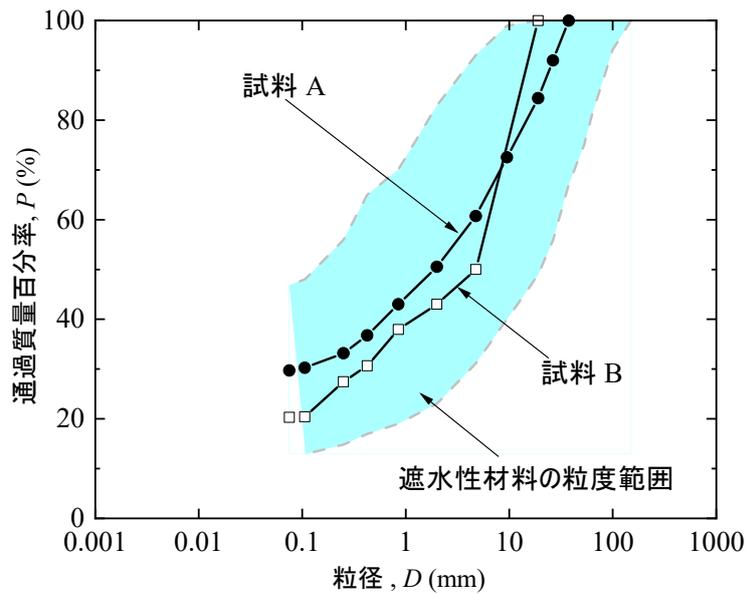
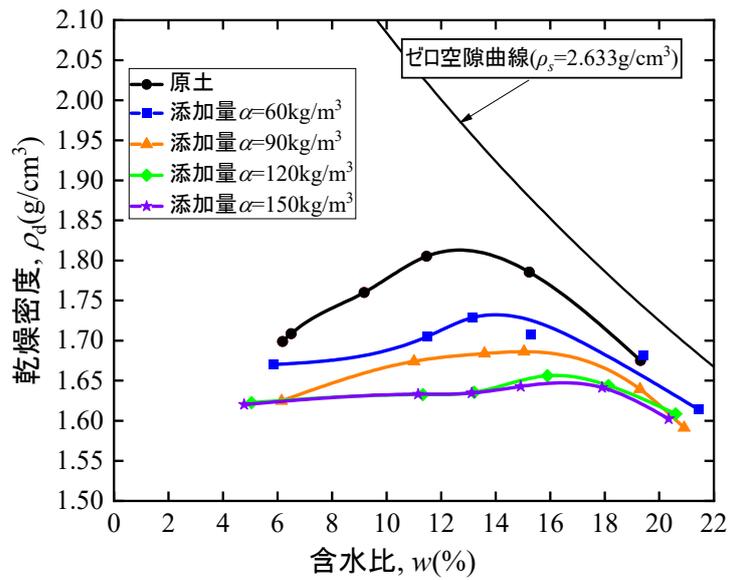


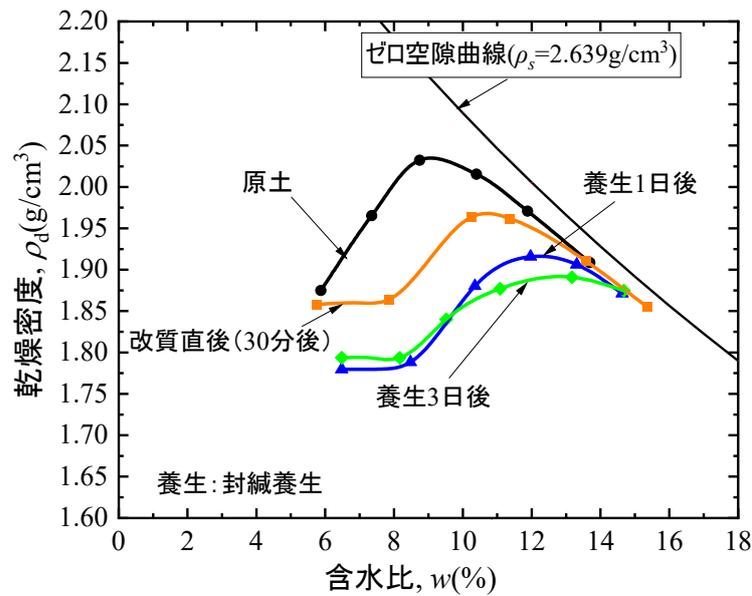
図 4.8 粘性土混じり粗粒土の粒度⁴⁾

表 4.1 締固め試験のための配合条件⁴⁾

	試料 A	試料 B
試験方法	B-b	A-b
添加量 α (kg/m^3)	60, 90, 120, 150	60
養生期間 $t_{\text{pre-compaction}}$	直後(30分)	直後(30分), 1日, 3日



(a) 試料 A (養生期間 $t_{\text{pre-compaction}}=30$ 分)



(b) 試料 B (添加量 $\alpha=60\text{kg/m}^3$)

図 4.9 PS 灰改質材により改質した粘性土混じり粗粒土の締固め特性 ^{4),5)}

同様の効果は粘性土混じりの粗粒土についても期待できる。図 4.8 に示す粘性土混じりの粗粒土 2 種類に対して、表 4.1 に示す条件で PS 灰系改質材により改質した場合の締固め試験結果を図 4.9 に示す ^{4),5)}。添加量 α が増加すると最適含水比 w_{opt} が大きくなるとともに最大乾燥密度 ρ_{dmax} は小さくなっている。同様に添加してから締固めるまでの養生期間 $t_{\text{pre-compaction}}$ が増加すると w_{opt} が大きくなり、 ρ_{dmax} が小さくなる傾向がある。なお養生条件は封緘養生である。

なお、乾燥密度 ρ_d は締固め管理において重要な管理指標である。一般的に乾燥密度 ρ_d が

大きいほど密詰め状態にあり、よく締まった良好な地盤材料とみなされる。しかし PS 灰系改質材のように多孔質な無機系吸水性材料を母材・主成分とする改質材を混合して締固め試験を実施すると、原土よりも最大乾燥密度 ρ_{dmax} が小さくなる。これは多孔質な PS 灰粒子の空隙の大きさ（細孔容積）に依存するためで、**改質土の乾燥密度 ρ_d が小さいからといって必ずしも土粒子や改質材粒子の充填状況が悪いことにはならない。**

また締固めによる改質土中の PS 灰系改質材の粒子破碎は少ない。藤森粘土と PS 灰系改質材を添加率 $A=100\%$ で混合した改質土を用いて E 法による締固め前後の粒度を比較した結果を図 4.10 に示す⁶⁾。E 法のエネルギーを加えても混合状態の試料では粒度に有意な変化は認められず、改質土では粒子破碎の影響がないことが確認されている。

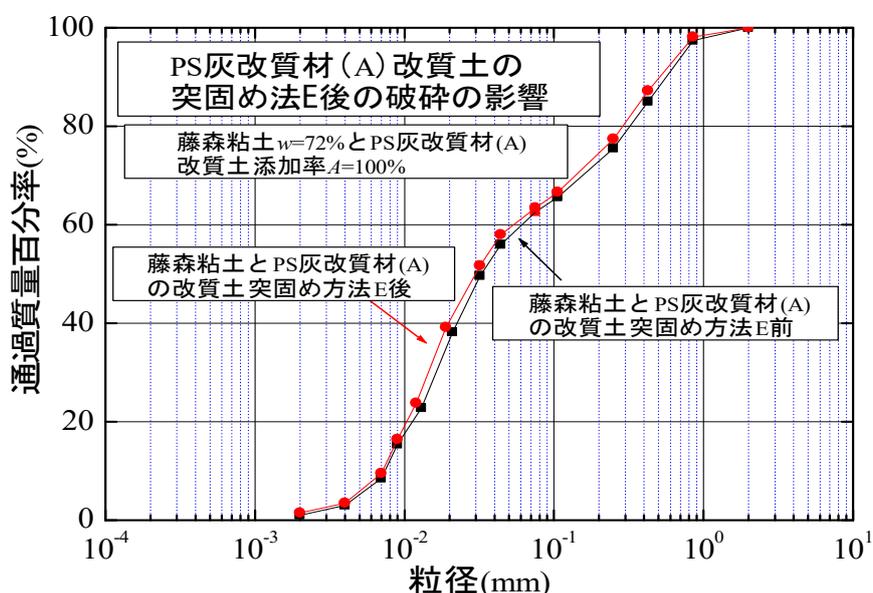


図 4.10 改質土の突固め方法 E による破碎の影響⁶⁾

参考文献

- 1) 川合彩加, 早野公敏, 山内裕元: PS 灰系改良土の強度特性に及ぼす養生効果とその要因に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.74, No.3, pp.306-317, 2018.
- 2) 望月美登志: PS 灰改質材による浚渫処理土の強度改善効果について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. 205-210, 2019.
- 3) 宮崎県農村振興技術連盟: 事例にみる老朽ため池の現状と設計・施工時の留意点, 平成 27 年度宮崎県農村振興技術連盟研修会, pp.42, 2016.
- 4) 渡邊悠樹, 早野公敏, 山内裕元, 望月美登志: 築堤材に対する吸水性改質土の配合設計手法の提案, 第 55 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 681-682, 2020.

- 5) 渡邊悠樹, 早野公敏, 山内裕元, 藤原斉郁 : PS 灰系改質材を利用した発生土の養生にともなう締固め特性の変化と強度特性, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演集, III-143, 2019.
- 6) 望月美登志 : 焼却方法が異なる各種 PS 灰の吸水性評価と泥土改質への適用性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 75, No. 2, pp. 155-166, 2019.

5. PS 灰系改質土の力学特性

5.1 コーン指数

改質土の力学特性を把握するうえで、改質材の吸水特性（物理的吸水、化学的吸水）や改質土の適用条件などを踏まえた試験を実施することが必要である。PS 灰系改質材による土の改質効果を調べる試験としては、締固めた土のコーン指数試験（JIS A 1228）が適用されるのが一般的である。コーン指数試験は、目標とする品質の地盤材料に改質する上で必要となる適正添加量を設定するための試験として用いられる。改質土のコーン指数には、原土の性状、改質材の添加量、養生条件等が影響する。

土を締固める場合、コーン指数を測定することで土質性状を把握するという考え方は、広く一般に認知された方法であり、無機系吸水性材料を用いた改質土でもこの考え方を準用することができる。そのため、PS 灰系改質材で改質した土の改質効果を調べる試験としては、締固めた土のコーン指数試験（JIS A 1228）が適用されるのが一般的である。また、この試験で得られた結果はそのまま国土交通省の定めた土質区分基準等¹⁾にも適用できるので、目標とする品質の地盤材料に改質する上で必要となる適正配合量を設定するための試験として用いられる。

締固めた PS 灰系改質土のコーン指数には、原土の土質性状、PS 灰系改質材の吸水特性や添加量、養生日数、養生環境の違い等が影響を与える。

(1) 原土の性状と PS 灰系改質材添加量の影響

全国各地のさまざまな土に対して、1 種類の PS 灰系改質材で実施した配合試験の結果の一例を図 5.1 に示す²⁾。配合直後の改質土で締固めを行い、速やかにコーン指数を測定した結果である（瞬時改質効果の確認）。

同図に示すように、土の種類や性状（含水状況）によって、要求品質を満たすための改質材の添加量が大きく異なっている。例えば、第 3 種建設発生土相当のコーン指数 ($q_c = 400\text{kN/m}^2$) に改質するための必要添加量 α は、粘性土で $180\sim 500\text{kg/m}^3$ の範囲にあり、砂質土でも $130\sim 300\text{kg/m}^3$ の範囲に及んでいる。したがって、適切な添加量を決定するためには、改質対象土の土質性状を事前に把握することが極めて重要である。

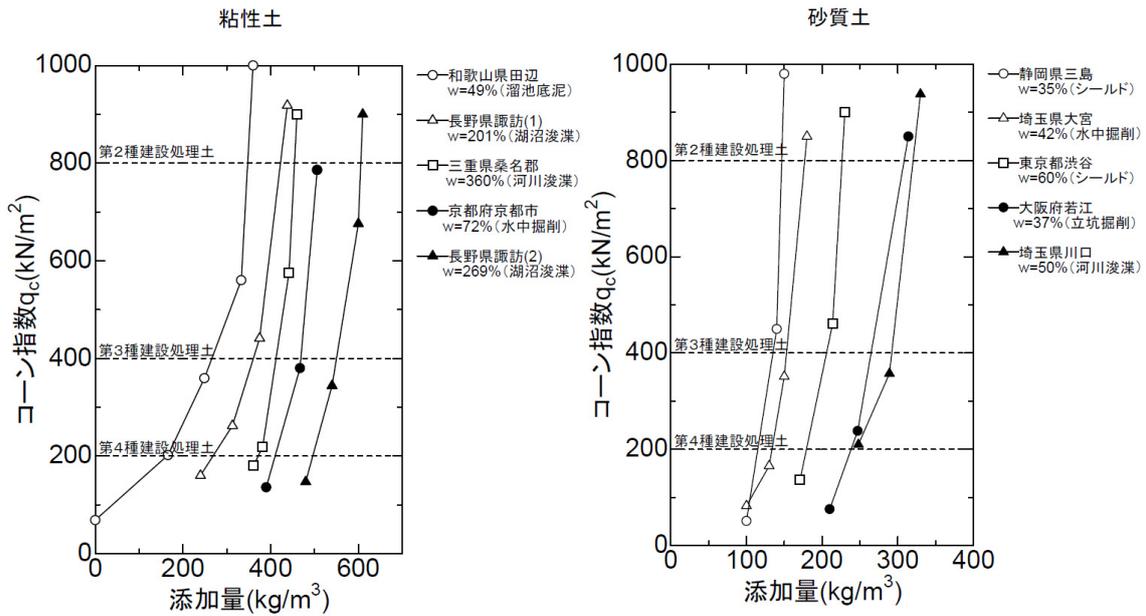


図 5.1 PS 灰系改質材による各種地盤材料の改質効果の例²⁾

(2) 原土の含水比と PS 灰系改質材添加量の影響

図 5.2 は、河川敷に堆積したシルト質土（平均粒径： $D_{50}=0.010\text{mm}$ ，細粒分含有率： $F_c=95.9\%$ ，液性限界： $w_L=53.6\%$ ，塑性指数： $I_P=22.2$ ）を用いて，含水比を $w=0.9w_L$ ， $1.5w_L$ ， $2.0w_L$ に含水比調整した試料での配合試験の結果を示したものである．試験では，改質材の添加後 7 日間封緘養生したのちにコーン指数を測定している．

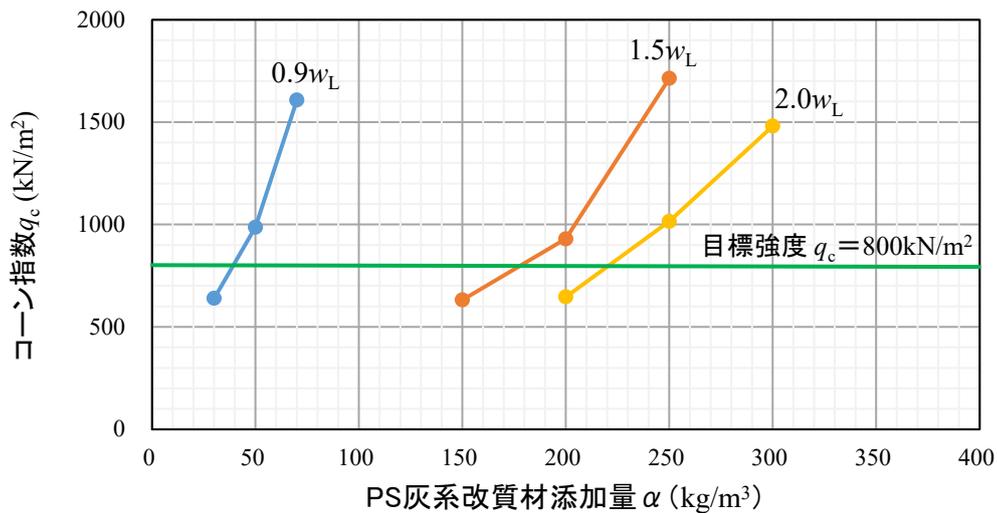


図 5.2 初期含水比の異なるシルト質土の PS 灰系改質材による改質効果の例

目標強度の第 2 種建設発生土相当のコーン指数 ($q_c=800\text{kN/m}^2$) に改質するための必要添

加量 α は、 $0.9w_L$ で 40kg/m^3 、 $1.5w_L$ で 180kg/m^3 、 $2.0w_L$ で 220kg/m^3 となる。このように、同じ地盤材料でも含水状態（すなわちコンシステンシー特性）の違いによって、要求される品質の地盤材料に改質するための必要添加量 α は大きく異なることがわかる。

(3) PS 灰系改質材の種類の違いと養生日数の影響

青粘土（土質区分 CL，液性限界： $w_L=40.7\%$ ）を $1.2w_L$ に含水比調整した試料について 3 種類の PS 灰系改質材による改質効果を比較した例を図 5.3 に示す。同図に示す試験では、PS 灰系改質材の添加量 α を 100kg/m^3 とし、配合試験 3 時間後、3 日後および 7 日後にその都度、配合試料を解きほぐしてコーン試験を実施している。配合試料はトレイの上に載せ、開封状態で養生としたものである。

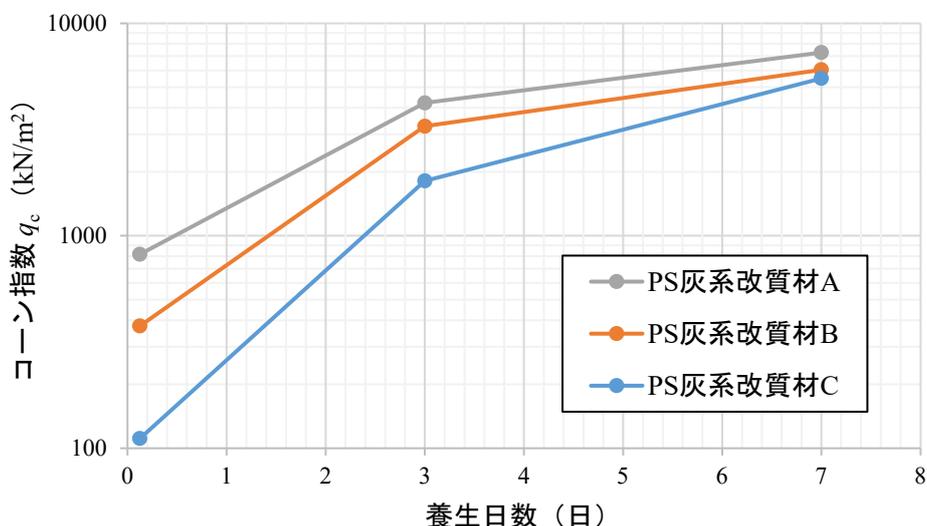


図 5.3 異なる PS 灰系改質材 A・B・C による青粘土の改質効果の確認例

添加直後のコーン指数 q_c を比較すると、PS 灰系改質材 A の強度発現が最も大きく ($q_c=818\text{kN/m}^2$)、改質材 B ($q_c=377\text{kN/m}^2$)、改質材 C ($q_c=111\text{kN/m}^2$) の順となる。この時点での改質効果を改質材 C に対する強度比で比較すると、改質材 A が 7.4、改質材 B が 3.4、改質材 C が 1 となり、実に 7 倍以上の改質効果の差が出ている。PS 系改質材 A は図 3.5 に示した PS 灰系改質材のうち吸水比 W_{ab} が初期より最も大きな値を示す吸水性能の高い改質材であることから、初期の改質効果が際立つ結果になったと考えられる。一方、初期強度の低い改質材 C においても 7 日後の q_c は、 5508kN/m^2 まで強度発現している。これは PS 灰系改質材 C の化学的吸水効果と開封養生に伴う水分の蒸発の影響と考えられる。このように PS 灰系改質材の種類によって改質特性が異なるので、改質材の選定にあたっては、3.2 に示すような吸水比の評価試験等を実施して改質材の吸水性能を事前に調べておくことが好ましい。

(4) 養生環境の違いの影響

PS 灰系改質材による改質では、土中の自由水の増減が改質効果に大きな影響を及ぼす。したがって、改質後の養生環境の違いによる影響も大きい。図 5.4 は青粘土(土質区分 CL, 液性限界: $w_L=40.7\%$) を $1.2w_L$ に含水比調整した試料に PS 灰系改質材を配合し、養生環境を変えて改質効果を比較したものである。PS 灰系改質材の添加量 α を 200kg/m^3 とし、配合試験 3 時間後、3 日後および 7 日後にその都度、配合試料を解きほぐしてコーン試験を実施している。ただし、配合試料について、①トレイの上に載せ、開封状態したケース、②ポリ袋の中で封緘養生したケース、③1 日 1 回試料を練り返しポリ袋の中で封緘養生したケースの 3 ケースで養生環境を変えている。

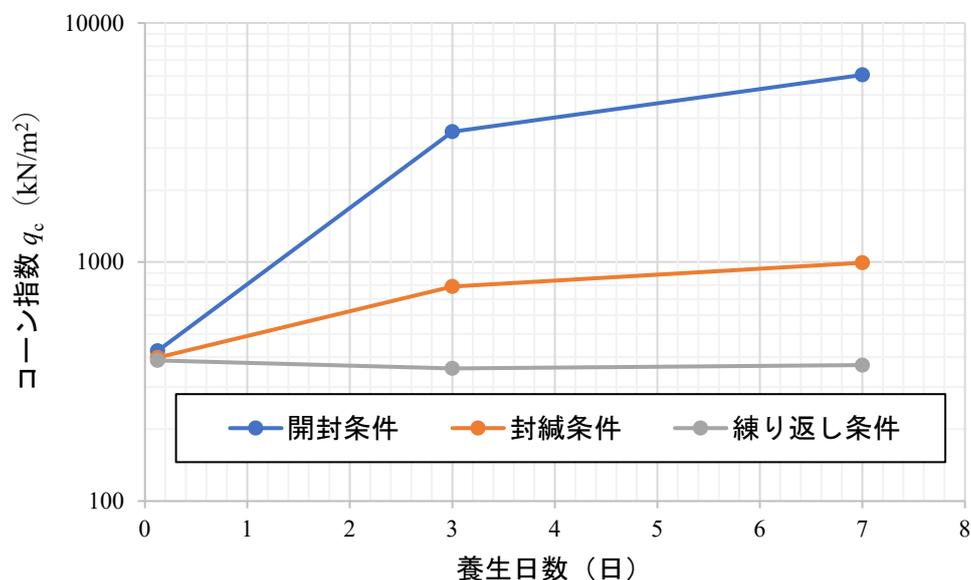


図 5.4 異なる養生条件下における PS 灰系改質土の養生効果の確認例

同図に示すように、開封養生としたケースでは、強度発現効果が著しく、3 日後には q_c が 3509kN/m^2 となり、3 時間後の強度 ($q_c=525\text{kN/m}^2$) の 8.3 倍まで強度発現している。これに対して、封緘条件としたケースでは、3 日後の q_c が 790kN/m^2 、7 日後の q_c 値が 993kN/m^2 と 3 時間後の強度 ($q_c=399\text{kN/m}^2$) に対して 2.0 倍、2.5 倍の強度発現にとどまっている。このように配合後の強度発現特性は、養生環境に大きく依存することがわかる。

③の練り返しで封緘養生としたケースでは、養生に伴う強度発現は認められず、若干ではあるが強度が低下している。これは強度発現の初期段階で練り返すことにより、改質土の骨格構造が乱されてしまったものと考えられる。したがって、実際の施工現場において強度発現途中にある養生中の PS 灰系改質土地盤上を、建設機械等の重機が練り返し走行するとオーバーコンパクションを引き起こすことになるので留意する必要がある。

(5) 液性指数とコーン指数の関係

PS 灰系改質材による改質土のコーン指数 q_c が原土や改質土のコンシステンシー特性と密接に関係することは図 5.2 の結果からも類推できる。

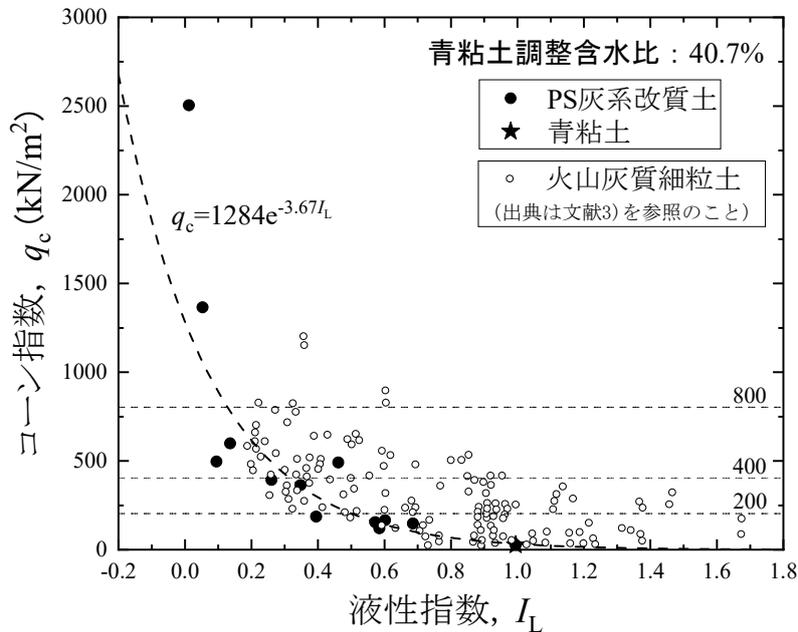


図 5.5 PS 灰系改質土のコーン指数と液性指数の関係³⁾

図 5.5 は含水比を w_L に調整した青粘土に PS 灰系改質材を添加率 A で 5, 10, 20% 配合した上で養生期間を変えた改質土のコーン指数 q_c と、別途実施して得られた同じ改質土試料による液性限界 w_L ・塑性限界 w_P ・含水比 w の測定結果から算出した液性指数 $I_L(=(w-w_P)/I_P)$ との相関性を調べた結果である³⁾。PS 灰系改質土の液性指数 I_L とコーン指数 q_c に良い相関が認められる。すなわち、PS 灰系改質材の添加率や養生期間にともない改質土の強度は変化するものの、両者は一義的な関係があると考えられる。また $I_L < 0.3$ あたりから急激に q_c が大きくなる。このように PS 灰系改質材を添加することにより I_L が低下し、強度を確保しやすくなる。

5.2 三軸圧縮強度

土のせん断強さには土の密度や含水比、また拘束圧、排水条件などが影響する。改質土の場合、それらに加えて改質材そのものの強度や吸水特性、また添加率、養生条件なども複雑に影響する。

PS 灰系改質土の場合、同じ密度管理手法で締固めた原土よりも非排水せん断における過剰間隙水圧の発生が抑制され、粘り強い強度特性を示す。

(1) 藤森粘土を改質した土の三軸圧縮強度・変形特性

PS 灰系改質材で改質した藤森粘土の圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸試験結果の例を図 5.6 に示す⁴⁾。図 5.7 には PS 灰系改質材の添加率 A と、 \overline{CU} 試験から得られる c' 、 ϕ' の関係を示す。改質材の添加率の増加に伴い、 c' 、 ϕ' ともに増加して強度改善効果が認められる。また図 5.6 に示すように、PS 灰系改質材の添加率 A の増加にともない、過剰間隙水圧の発生が抑制される。

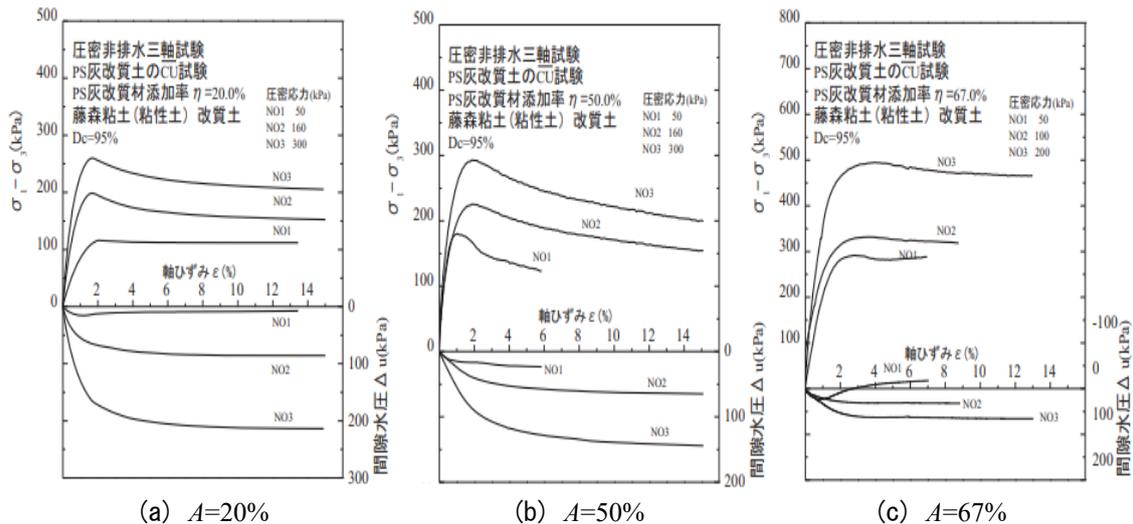


図 5.6 PS 灰系改質材により改質した藤森粘土の三軸 \overline{CU} 試験結果⁴⁾

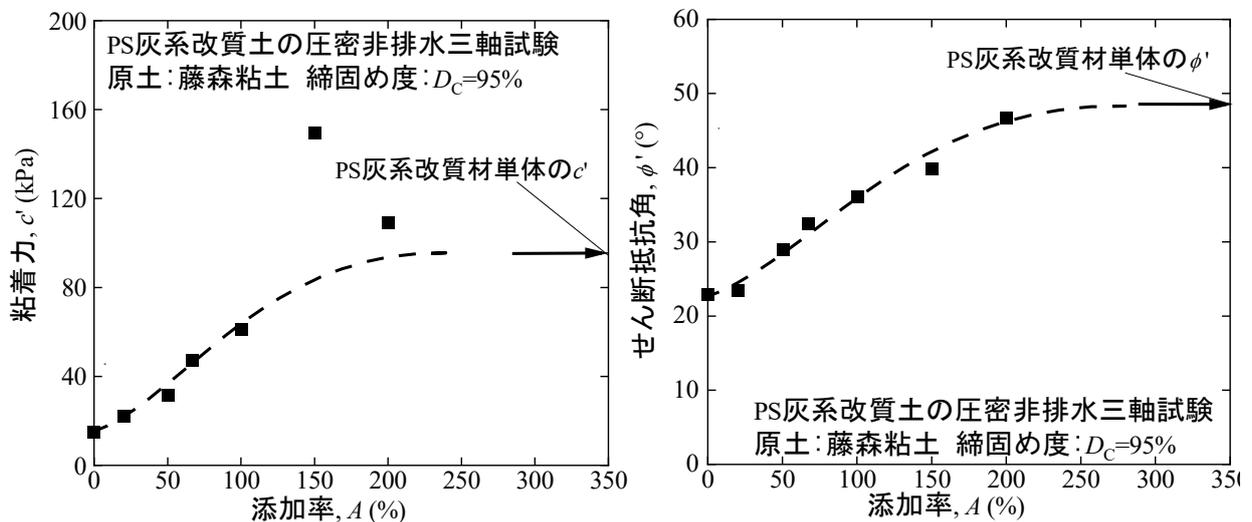


図 5.7 PS 灰系改質材により改質した藤森粘土の粘着力 c' とせん断抵抗角 ϕ' ⁴⁾

同様の効果は粘性土混じりの粗粒土についても期待できる。PS 灰系改質材を改質した粘性土混じりの粗粒土について、表 5.1 に示す条件で圧密非排水 (\overline{CU}) 三軸試験を実施した結果を図 5.8 に示す⁵⁾。図 5.9 は \overline{CU} 試験から得られる有効応力経路を示している。同じ軸ひずみで比較すると改質土のほうが原土と比較して高い軸差応力を示す。また、改質土の有

効応力経路は原土にくらべて右側に位置しており、改質によりせん断中の過剰間隙水圧の発生が抑制されている。特に圧密応力 50kPa では、**正のダイレイタンスーの傾向が強く、負の過剰間隙水圧が著しく発生し、過圧密的挙動を示している。**

表 5.1 PS 灰系改質材により改質した粘土混じり粗粒土の三軸供試体条件⁵⁾

	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	締固め度 D_c (%)
原土	1.93	13.0	95
改質土	1.87	14.0	95

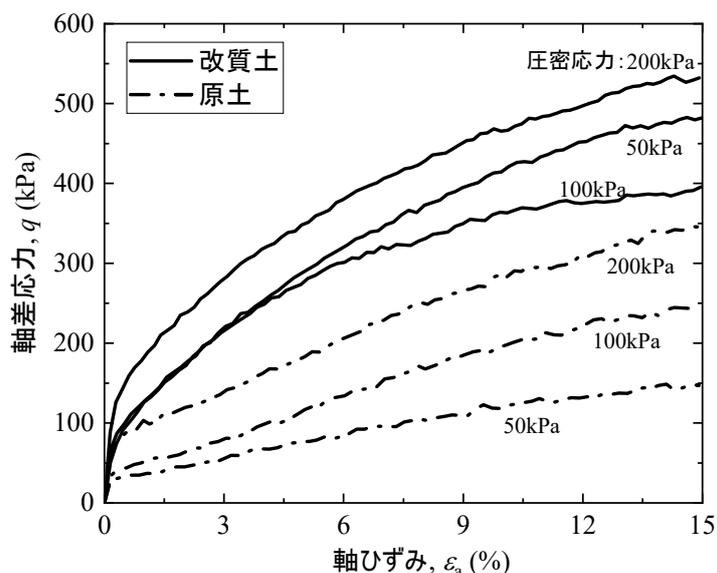


図 5.8 PS 灰系改質材により改質した粘土混じり粗粒土の三軸 \overline{CU} 試験結果 (軸ひずみと軸差応力の関係)⁵⁾

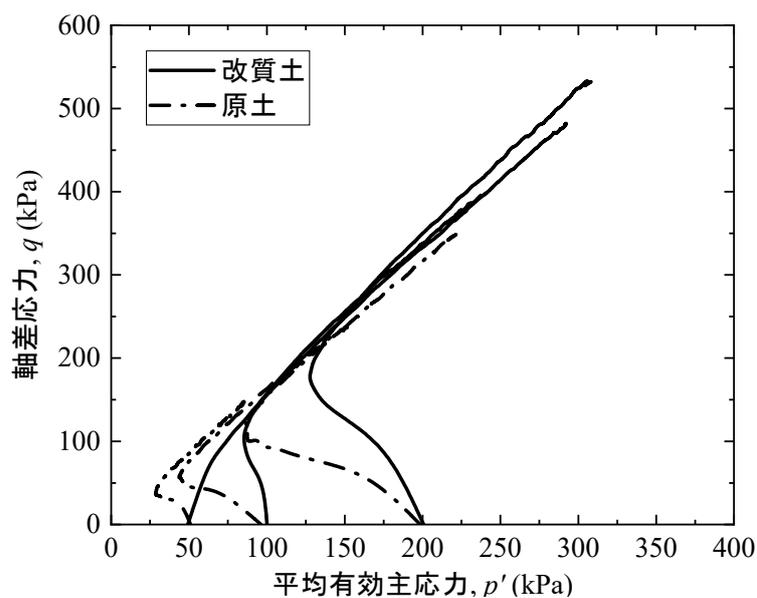


図 5.9 PS 灰系改質材で改質した粘土混じり粗粒土の三軸 \overline{CU} 試験結果(有効応力経路)⁵⁾

5.3 長期安定性

改質土が土構造物に利用される場合は、長期的に安定している必要がある。PS 灰系改質土の場合、過去 10～20 年の間に開発・適用されていることから、室内試験などによる検証を除けば長期安定性に関する事例の蓄積は限定的である。しかし PS 灰粒子の多孔質性が損なわれないう限り、改質材の物理的吸水効果は失われず、エトリンサイトなどの生成による化学的吸水効果は【セメント系】や【石灰系】の改質材などと同様に持続するものと考えられている。

改質土が地盤材料として土構造物などの永久構造物に利用される場合は、長期的に安定している必要がある。たとえば【セメント系】や【石灰系】の改質土の場合には、開発・適用されてから長期安定性に関するデータや知見が積み重ねられている。一方、PS 灰系改質土の場合、過去 10～20 年の間に開発・適用されていることから、室内試験による検証を除けば長期安定性に関する事例の蓄積は限定的である。しかし無機系吸水性材料である PS 灰粒子の多孔質性が損なわれないう限り、改質材の物理的吸水効果は失われない。また、エトリンサイトなどの生成による化学的吸水効果³⁾は【セメント系】や【石灰系】の改質材などと同様に持続するものと考えられている。

本項では、現時点で得られている長期安定性に関する室内試験の検証データを示す。

(1) 改質した湖沼浚渫土の強度の経時変化⁶⁾

湖沼で採取した浚渫土(原土)に PS 灰系改質材を $\alpha=100, 200, 300\text{kg/m}^3$ 添加して改質し、ほぐして締固めた試料を水中養生した際の強度の経時変化を調べた例を示す。試料は改質から 3 日後もしくは 8 日後にスコップで解きほぐした上で転圧をおこない(転圧 3, 転圧 8)、さらに 2 週間気中養生した後に、水中に投入したものである。浚渫土の物性は、平均粒径 $D_{50}=0.015\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=96.8\%$ 、強熱減量 $L_i=14.9\%$ 、含水比 $w=290\%$ である。図 5.10 は転圧 3, 転圧 8 のポータブルコーン貫入試験の経時変化を示したものである。どの添加量 α においても水中養生開始時の強度を概ね保持する形で推移している。

上記と同じ浚渫土に PS 灰系改質材を 300kg/m^3 添加した土で作製した盛土供試体を水中で長期間放置し、盛土の長期安定性を確認している。図 5.11 は、その水槽試験の状況写真を示したものである。試験を開始から約 5 年以上経過した段階でも盛土の形状がそのまま保持されることが確認されている。

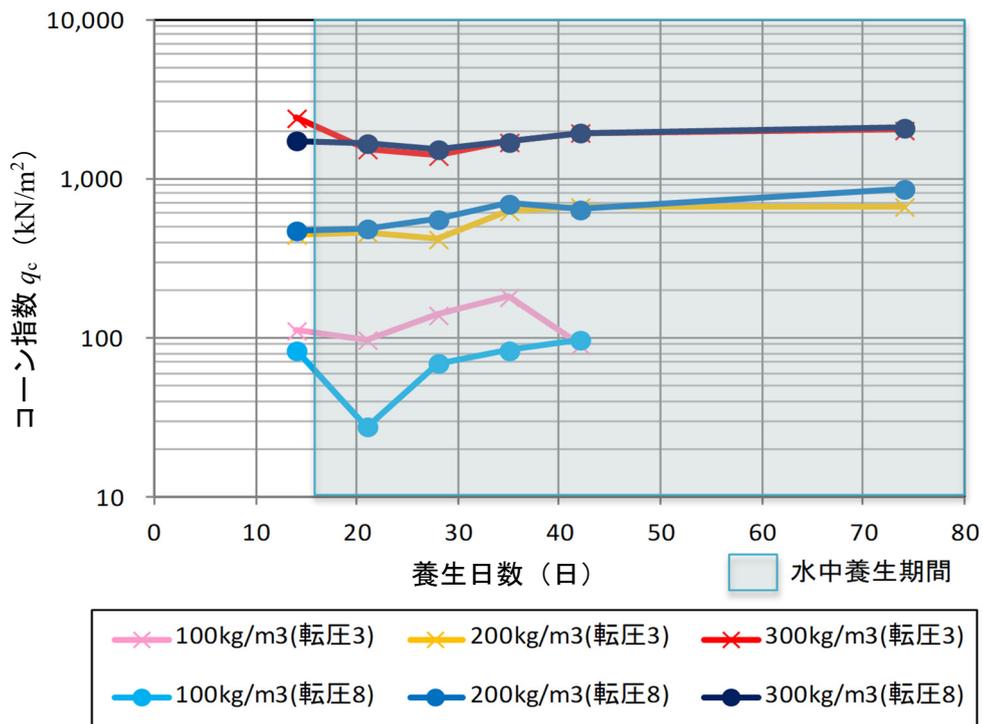


図 5.10 水中養生試料によるコーン指数の経時変化⁶⁾

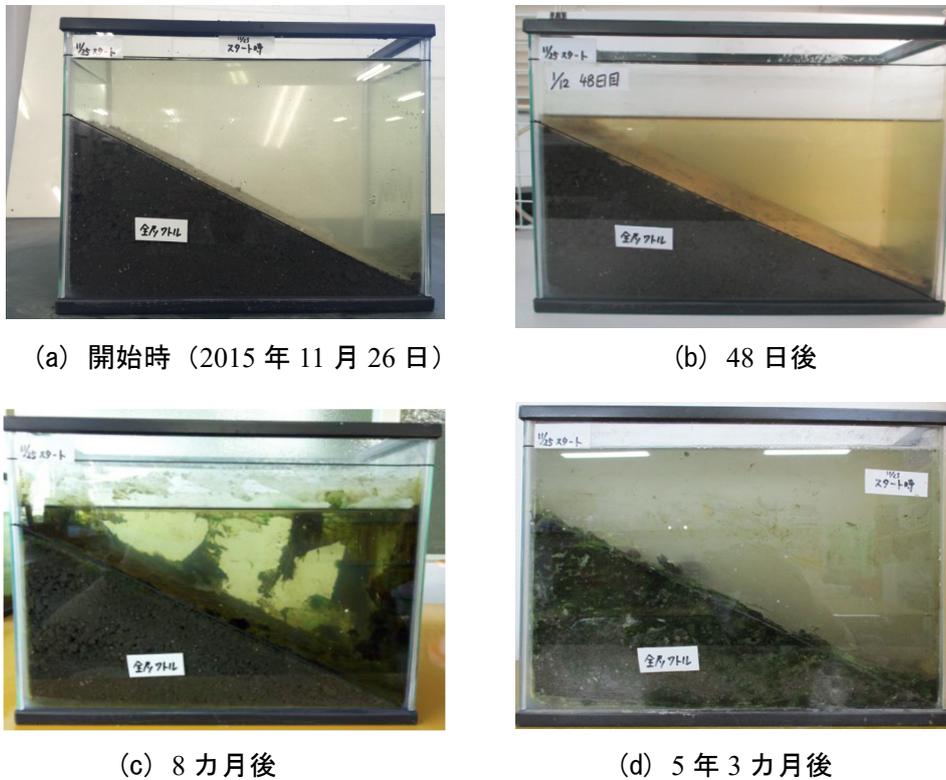


図 5.11 静穏環境での水中安定性の確認(水槽実験)

(2) 改質した粘性土まじり粗粒土の強度の経時変化

岩石の劣化促進試験である乾湿繰返しによる「岩石の促進スレーキング試験方法（JGS 2125-2009）」を参考に、改質した粘性土まじり粗粒土を用いた乾湿繰返しによる耐久性試験の実施状況を図 5.12 に示す。内径 15cm の CBR 試験用モールドで締固めた PS 灰系改質土の供試体を 2 つ用意し、そのうちの一つのモールド供試体はポリ袋内で封緘養生した。もう一つのモールド供試体は水浸養生した。これら 2 つの供試体について、締固め直後、1, 3, 7, 14, 28 日後にコーン試験を実施した。一連の試験終了後、同じ供試体を反転させ、JGS 2125-2009 を参照して、3 回の乾湿繰返しを行った。その後、再び封緘養生および水浸養生をそれぞれ実施しながら、コーン試験を実施した。



図 5.12 長期耐久性試験の実施状況

図 5.13 は各段階で得られたコーン指数を示したものである。1～2 週間程度の養生期間を経て、コーン指数は収束に向かっている。その後の乾湿繰返し試験では、乾湿繰返しの影響によりコーン指数が数%から 20%程度低下している。しかしながら 100 日以上経過した時点でも著しい劣化はいずれも認められず、乾湿繰返しによる耐久性もセメント改良土での検討結果⁷⁾と同程度である。

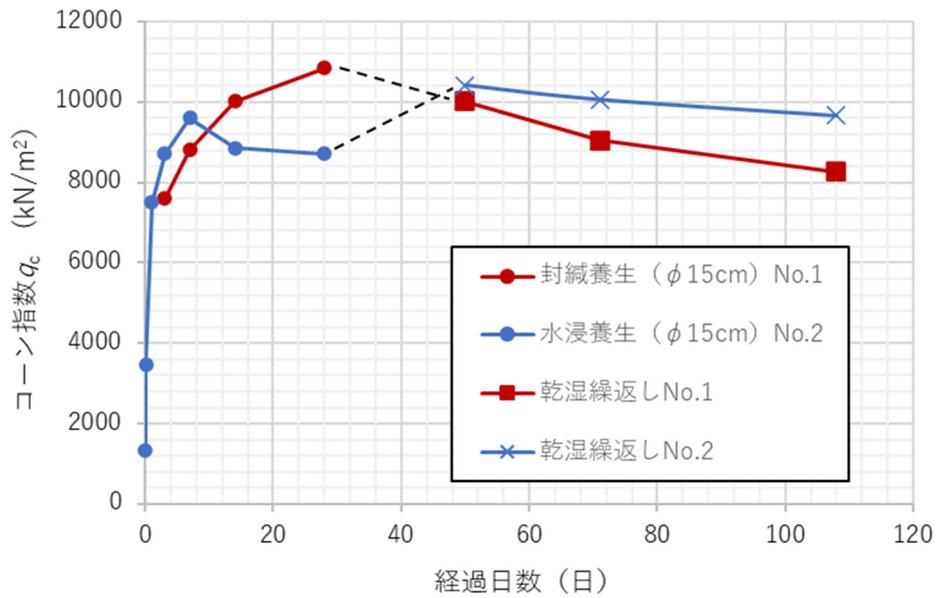


図 5.13 長期安定試験および乾湿繰返しによる耐久性試験の結果

(3) 改質した粘性土まじり粗粒土の pH と浸漬水の変化

化学的作用に対する安全性を評価する試験としてはカラム溶出試験やシリアルバッチ試験が、また促進試験としては土壤環境センターが提案している硫酸添加溶出試験・消石灰添加溶出試験などが知られている。



(a) 突固めて作製した改質土



(b) 脱型後封緘養生中の改質土



(c) 2018年7月17日スタート時点



(d) 2021年3月10日時点

図 5.14 タンクリーチング試験用改質土の作製とその実施状況

ここでは、締固めた PS 灰系改質土を水中に浸漬させるタンクリーチング試験を実施して、化学的安全性および安定性を確認するとともに、そのままの状態でも長期間放置し、改質土が再泥化することがないことを確認した結果を示す。

粘性土まじり粗粒土を用いて PS 灰系改質材を $\alpha=60\text{kg/m}^3$ の割合で添加し、締固めた改質土をモールド内で 1 週間封緘養生した後に、固液比 1 : 10 で水浸させ、タンクリーチング試験を開始した。タンクリーチング試験の実施状況を図 5.14 に示す。

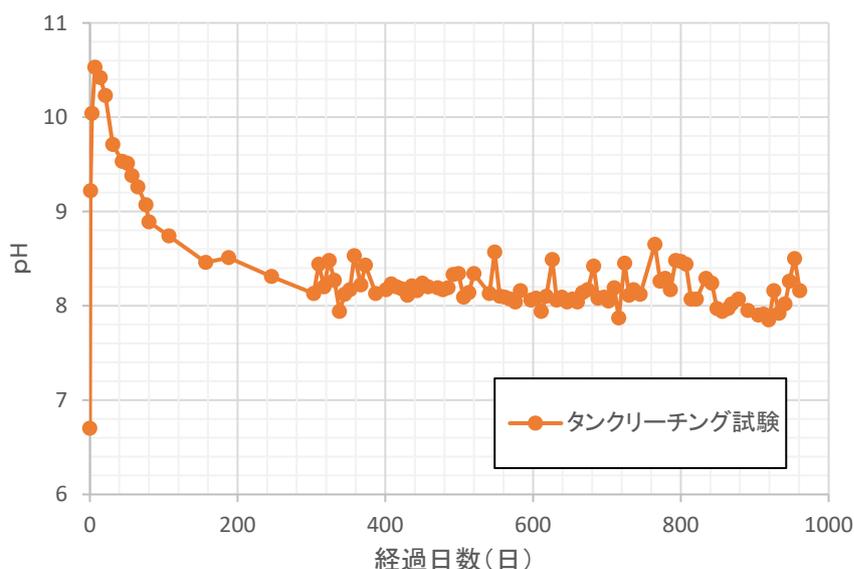


図 5.15 浸漬水の pH の経時変化

pH の経時変化を図 5.15 に示す。タンクリーチング試験では、試験開始直後に pH が急速に上昇し、7 日後にピークを迎えた (pH=10.5)。その後、pH は徐々に低下し、300 日経過以降は概ね pH=8 前後の中性域で安定している。図 5.14 に示すように約 2 年半経過した時点でも、改質土の再泥化は認められず、安定した形状を保っている。タンクリーチング試験で 28 日経過時に採水したサンプルについて、有害重金属等 (カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、セレン、ホウ素、フッ素等) の濃度を測定した。いずれの値も環境基準を下回っていることを確認している。また、約 1 年経過時点で再度採水サンプルの有害重金属の濃度を測定したが、いずれも環境基準値以下という結果であった。

参考文献

- 1) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル (第 4 版)，pp.104-105，丸善，2013。
- 2) 株式会社フジタ FT マッドキラー工法パンフレット

- 3) 川合彩加, 早野公敏, 山内裕元 : PS 灰系改良土の強度特性に及ぼす養生効果とその要因に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学) , Vol.74, No.3, pp.306-317, 2018.
- 4) 望月美登志 : PS 灰改質材による浚渫処理土の強度改善効果について, 土木学会論文 B3 (海洋開発) , Vol.75, No.2, pp. 205-210, 2019.
- 5) 渡邊悠樹, 早野公敏, 山内裕元, 藤原斉郁 : PS 灰系改質材を利用した発生土の盛土材への適用性に関する基礎的検討, 第 54 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1033-1034, 2019 .
- 6) 加島史浩, 竹山佳奈, 浜谷伸介, 和栗成樹, 山内裕元, 鶴飼亮行, 岩本裕之 : PS 灰系改質材の水域利用における性状の把握および施工方法の提案, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, I_935-I940, 2017.
- 7) 福島伸二, 北島明, 石黒和男, 池田康博, 酒巻克之, 谷茂 : 固化処理したため池底泥土の盛土材への適用性の研究, 土木学会論文集, No.666/III-53, pp.99-116, 2000.

6. 配合設計方法

6.1 配合設計で対象とする品質評価

本手引きでは、発生土（建設発生土および建設泥土・汚泥等）を原土として改質対象とする。改質の際に発生土の種類を選別したり、性状のばらつく土を拒んだりすることは難しい。一方、改質土は、地盤材料として土構造物等に利用されるため、その品質は安定したものでなければならない¹⁾。ばらつきのある原土から安定した地盤材料へと改質する上で、改質土に要求される品質を満足するための添加量を決定する方法が配合設計である。

PS 灰系改質材を用いる場合、改質土の品質の評価を「締固めた土のコーン指数試験」で行うことを基本とする。

一般に固化処理における配合設計では、一軸圧縮強さで品質評価されることが多い。しかし無機系吸水性材料を母材・主成分として用いた改質では、土の固化ではなく吸水による改質に着目するため、その品質評価もそれに見合ったものとする必要がある。特に PS 灰系改質材を用いる場合、物理的吸水および化学的吸水の効果を正確に把握するために、改質土の品質の判定は、「締固めた土のコーン指数 q_c 値」で行うことを基本とする。ただし、コーン指数以外の品質評価が適用される土構造物もあり、PS 灰系改質土の品質評価として、ここでは以下の3項目に着目する。

- ① コーン指数による品質評価
- ② 締固めによる品質評価
- ③ 強度定数などによる品質評価

(1) コーン指数による品質評価

改質土の品質は、改質土の適用対象構造物によって性能数値が決められている。一般的には表 6.1 に示す発生土の土質区分²⁾と表 6.2 の適用用途³⁾を参考に品質目標となるコーン指数 q_c （目標強度）を決めることが多い。この場合に適用するコーン指数 q_c 値は、「締固めた土のコーン指数試験（JIS A 1228）」によって決定される。

また、仮設道路などで建設機械のトラフィカビリティを確保するための目標強度として表 6.3 を品質目標とすることもある⁴⁾。この場合のコーン指数 q_c は、地盤に直接ポータブルコーンを貫入して求める「ポータブルコーン貫入試験方法（JGS1431）」によって判定することもある。

表 6.1 土質区分基準²⁾

区分 (国土交通省令) ^{*1)}	細区分 ^{*2), 3), 4)}	コーン 指数 q _c ^{*5)} (kN/m ²)	土質材料の工学的分類 ^{*6), 7)}		備考 ^{*6)}	
			大分類	中分類 土質 {記号}	含水比 (地山) w _n (%)	掘削 方法
第1種建設発生土 (砂、礫及びこれらに準ずるもの)	第1種	-	礫質土	礫 {G}、砂礫 {GS}	-	*排水に考慮するが、降水、浸出地下水等により含水比が増加すると予想される場合は、1ランク下の区分とする。 *水中掘削等による場合は、2ランク下の区分とする。
	第1種改良土 ^{*8)}		砂質土	砂 {S}、礫質砂 {SG}		
第2種建設発生土 (砂質土、礫質土及びこれらに準ずるもの)	第2a種	800 以上	人工材料	改良土 {I}	-	
	第2b種		礫質土	細粒分まじり礫 {GF}	-	
	第2種改良土		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	-	
第3種建設発生土 (通常の施工性が確保される粘性土及びこれに準ずるもの)	第3a種	400 以上	人工材料	改良土 {I}	-	
	第3b種		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	-	
	第3種改良土		粘性土	シルト {M}、粘土 {C}	40%程度以下	
第4種建設発生土 (粘性土及びこれに準ずるもの(第3種建設発生土を除く))	第4a種	200 以上	火山灰質粘性土	火山灰質粘性土 {V}	-	
	第4b種		有機質土	有機質土 {O}	40~80%程度	
			人工材料	改良土 {I}	-	
	第4種改良土		砂質土	細粒分まじり砂 {SF}	-	
泥土 ^{*1), *9)}	泥土 a	200 未満	粘性土	シルト {M}、粘土 {C}	80%程度以上	
	泥土 b		火山灰質粘性土	火山灰質粘性土 {V}	-	
			有機質土	有機質土 {O}	80%程度以上	
	泥土 c		高有機質土	高有機質土 {Pt}	-	

* 1) 国土交通省令(建設業に属する事業を行う者の再生資源の利用に関する判断の基準となるべき事項を定める省令 平成13年3月29日 国交令59、建設業に属する事業を行う者の指定副産物に係る再生資源の利用の促進に関する判断の基準となるべき事項を定める省令 平成13年3月29日 国交令60)においては区分として第1種~第4種建設発生土が規定されている。

* 2) この土質区分基準は工学的判断に基づく基準であり、発生土が産業廃棄物であるか否かを定めるものではない。

* 3) 表中の第1種~第4種改良土は、土(泥土を含む)にセメントや石灰を混合し化学的安定処理したものである。例えば第3種改良土は、第4種建設発生土または泥土を安定処理し、コーン指数400kN/m²以上の性状に改良したものである。

* 4) 含水比低下、粒度調整などの物理的な処理や高分子系や無機材料による水分の土中への固定を主目的とした改良材による土質改良を行った場合は、改良土に分類されないため、処理後の性状に応じて改良土以外の細区分に分類する。

* 5) 所定の方法でモールドに締め固めた試料に対し、コーンペネトロメーターで測定したコーン指数(表一2参照)。

* 6) 計画段階(掘削前)において発生土の区分を行う必要があり、コーン指数を求めるために必要な試料を得られない場合には、土質材料の工学的分類体系((社)地盤工学会)と備考欄の含水比(地山)、掘削方法から概略の区分を選定し、掘削後所定の方法でコーン指数を測定して区分を決定する。

* 7) 土質材料の工学的分類体系における最大粒径は75mmと定められているが、それ以上の粒径を含むものについても本基準を参照して区分し、適切に利用する。

* 8) 砂及び礫と同等の品質が確保できているもの。

* 9) ・港湾、河川等のしゅんせつに伴って生ずる土砂その他これに類するものは廃棄物処理法の対象となる廃棄物ではない。(廃棄物の処理及び清掃に関する法律の施行について 昭和46年10月16日 環整43 厚生省通知)

・地山の掘削により生じる掘削物は土砂であり、土砂は廃棄物処理法の対象外である。(建設工事等から生ずる廃棄物の適正処理について 平成13年6月1日 環産産276 環境省通知)

・建設汚泥に該当するものについては、廃棄物処理法に定められた手続きにより利用が可能となり、その場合「建設汚泥処理土利用技術基準」(国官技第50号、国官総第137号、国営計第41号、平成18年6月12日)を適用するものとする。

表 6.2 主な用途と目標強度（コーン指数）³⁾

項目	土質区分	第1種 建設発生土	第2種 建設発生土	第3種 建設発生土	第4種 建設発生土
	コーン指数 q_c (kN/m ²)		800 以上	400 以上	200 以上
主な用途	水面埋立	◎	◎	◎	◎
	公園緑地造成	◎	◎	◎	○
	宅地造成	◎	◎	◎	○
	一般堤防	◎	◎	◎	○
	高規格堤防	◎	◎	◎	△
	道路路体用盛土	◎	◎	◎	○
	土木構造物裏込め	◎	◎	○	○
	道路（路床）盛土	◎	◎	○	△
	工作物の埋戻し	◎	◎	△	△

（凡例） ◎：そのまま利用可能，

○：施工上の工夫で利用可能

△：再度改質処理や施工上の工夫をすれば利用可能

表 6.3 建設機械の走行に必要なコーン指数⁴⁾

建設機械の種類	コーン指数 (kN/m ²)
超湿地ブルドーザ	200 以上
湿地ブルドーザ	300 //
中型普通ブルドーザ(15t 級程度)	500 //
大型普通ブルドーザ(21t 級程度)	700 //
ダンプトラック	1200 //

(2) 締固めによる品質評価

道路の路床，河川堤防，あるいはため池の堤体といった土構造物では，その品質を確保するために締固め規定による品質管理が設けられている．ここでは，河川堤防における締固め規定を例に示す⁵⁾．品質を規定する方式には次のような種類がある．

① 乾燥密度規定

締固め度 D_c が規定値以上になっていること，および施工含水比がその最適含水比 w_{opt} を基準として規定された範囲内にあることを規定する方法である．**図 6.1** に乾燥密度規定の適用範囲を，また**表 6.4** に締固め度の規定値を示す．

② 空気間隙率または飽和度規定

締固めた土の性質を恒久的に確保する条件として、空気間隙率または飽和度を表 6.4 のように規定し、一方締固めた土の強度・変形特性が設計を満足する範囲に施工含水比を規定する方法で管理するものである。この方式は乾燥密度規定が適用しにくい土質、特に高含水比の粘性土に対して利用されている。

上記のように改質土を転圧して土構造物に適用する場合には、締固め規定に基づく品質目標が設計時に設定される。なお、(1)に示すコーン指数 q_c やここに示す締固め規定による品質管理では、改質土の基本的な物理特性の把握が極めて重要である。特に、発生土（原土）の**粒度**、**含水比**、**コンシステンシー特性**、**有機分含有量**といった特性は、改質土の品質に大きな影響を及ぼすため、事前の調査で詳細に調べておくことが望ましい。

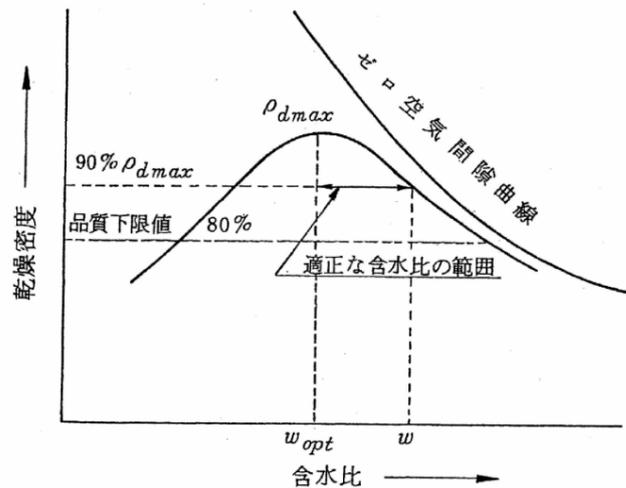


図 6.1 土の突固め曲線⁵⁾

表 6.4 締固め度の規定⁵⁾

土質分類 名称	粗粒質	砂質土 {SF} (15% ≤ -74 μm < 25%)	砂質土 {SF} (25% ≤ -74 μm < 50%)	粘性土 C _s
締固め度(D _c)	$\overline{Dc} = 90\%$	$\overline{Dc} = 90\%$	—	—
施工含水比(ω _n)	—	—	トラフィカビリティーを確保しうる範囲	トラフィカビリティーを確保しうる範囲
空気間隙率(V _a)	—	—	V _a ≤ 15%	2% ≤ V _a ≤ 10%
飽和度(S _r)	—	—	—	85% ≤ S _r ≤ 95%
品質合格率(%)	—	—	90%	90%
品質下限値	$Dc = 80\%$		—	—

(3) 強度定数などによる品質評価

地盤材料として土構造物に適用する場合，設計に必要となる強度定数により品質が規定されることがある．例えば，ため池の改修堤体では三軸圧縮試験等の室内試験を実施し，試験から求め強度定数(c , ϕ)を用いて堤体の安定解析を行い安全率が規定値を満足することが求められる⁶⁾．

さらに強度定数以外でも設計に必要となる土質定数として，CBR，一軸圧縮強さ q_u ，透水係数 k 等によって地盤材料の品質が規定されることがある．必要に応じてこうした品質が満足することを設計時に確認する必要がある．ただし，PS 灰系改質材で改質した土は固化処理による改良とは改質原理が異なるため，一軸圧縮強さ q_u による品質評価が適用しづらい点に留意すべきである．これまでの適用事例では， $q_c=5q_u$ なる関係式⁷⁾を用いて q_u の代わりに q_c で評価するといった対応がとられている．同様に，品質目標として粘着力 c を求める際， $c=q_u/2$ で規定されるケースでは， $c=q_c/10$ で c を求めるといった対応が望ましい．

表 6.5 ため池改修堤体における試験法と安定解析の適用⁶⁾

安定解析のケース	試験法	計算斜面	安全率
完成直後	非圧密・非排水(UU)試験 圧密・非排水(CU)試験、又は 圧密・排水(CD)試験	上下流側	1.2以上
常時満水位	圧密・非排水(CU)試験、又は 圧密・排水(CD)試験	〃	〃
設計洪水位	圧密・非排水(CU)試験、又は 圧密・排水(CD)試験	〃	〃
水位急降下	圧密・非排水(CU)試験、又は 圧密・排水(CD)試験	上流側	〃

6.2 配合設計の流れ

改質土に必要な品質仕様が決まると，原土となる発生土に対して配合設計する段階になる．配合設計にあたっては，事前調査，配合設計手法の選択とその実施，要求品質を満足する配合の検討という手順を踏んで添加量を決定する．PS 灰系改質材を用いる場合，配合設計手法として室内配合試験のほかに，シリンダー法またはふるい法による吸水比 W_{ab} を利用した手法もある．

原土となる発生土が決まり，改質土の品質仕様が決まると，改質材の添加率 A あるいは添加量 α を設計する段階になる．PS 灰系改質材を用いる場合の配合設計の流れを図 6.2 に示す．

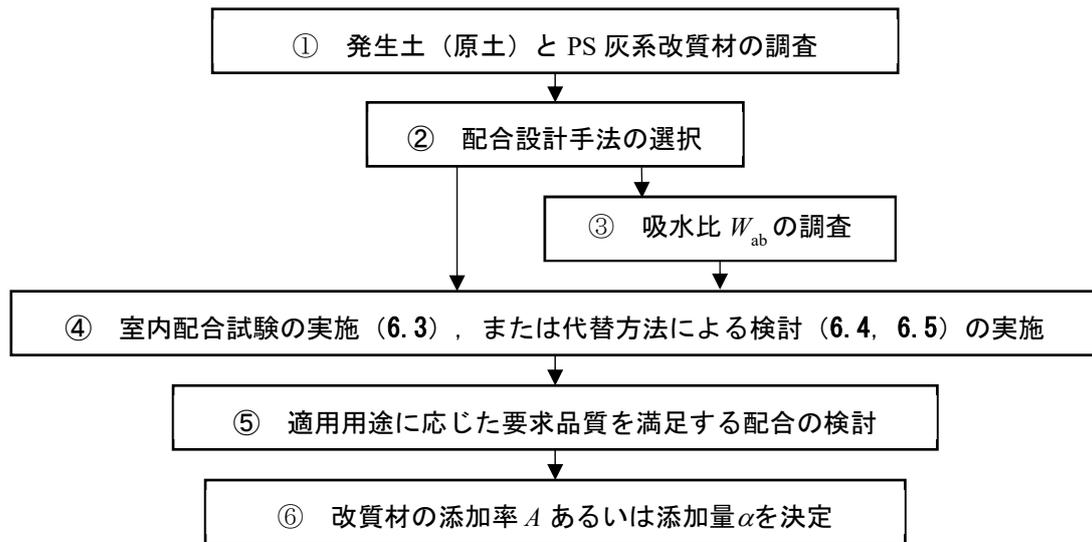


図 6.2 配合設計の流れ

配合設計においてまず実施すべきことは、改質の対象となる発生土（原土）の性状把握と配合設計で必要となる基礎データを得ることである（図 6.2①）。実施すべき基本的な試験項目を以下に示す。

原土の調査

- ・ 物理試験：土の湿潤密度，土粒子密度，含水比，粒度，液・塑性限界
- ・ 安定化試験：突固めによる土の締固め試験，締固めた土のコーン指数試験
- ・ 化学試験：pH 試験，強熱減量試験，必要に応じて土壤溶出量・含有量試験

PS 灰系改質材の調査

- ・ 物理試験：粒子密度，必要に応じて粒度・かさ密度等
- ・ 化学試験：pH 試験

上記の試験を実施した上で PS 灰系改質材の添加率 A あるいは添加量 α を設定するための室内配合試験を実施するのが基本的な流れである。室内配合試験については 6.3 で説明する。また、事前に採取できる発生土（原土）の量が限定されていたり、施工までの検討期間が限られていたり、あるいは改質の対象となる発生土（原土）の種類が多数になるなど、室内配合試験の実施が困難なケースも考えられる。その場合には 6.4 または 6.5 に示す PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} を利用した配合設計手法の適用が合理的である。どの配合設計手法を適用するのを選択し（図 6.2②）、必要に応じて吸水比 W_{ab} の調査を実施したうえで（図 6.2③）、配合設計を実施する（図 6.2④）。

吸水比 W_{ab} の調査

- ・ シリンダー法またはふるい法による吸水試験 (3.2 参照) :

実測による W_{ab} , もしくは製品カタログの W_{ab}

次に, 試験や計算で得られた必要添加率 A あるいは必要添加量 α に対して, 適用用途に応じた要求品質を満足する配合について検討する (図 6.2⑤). 具体的には, コーン指数 q_c のほかに, 締固め度 D_c , CBR 値, $c-\phi$, 透水係数 k 等が満足するかどうかの確認といった作業が該当する.

上記の検討結果を踏まえ, 改質材の添加率 A あるいは添加量 α を最終決定する (図 6.2⑥).

6.3 室内配合試験による方法

室内配合試験は, 所要の品質目標を満足する添加率 A あるいは添加量 α を適切に決定する手法のひとつである. 室内配合試験を行う際は現場での施工条件を把握し, できるだけ現場の環境に近い条件で配合試験を実施することが重要である.

PS 灰系改質材を用いた場合の配合試験の標準的な手順を以下に示す.

(1) 原土試料の採取と試料調整

原土試料はできる限り施工時の状態に近い代表的なものを採取する. 原土の初期含水比が大きく異なる場合は, 室内配合試験で決定した改質材の添加量が過大 (または過小) となる場合があるので注意を要する.

採取した原土試料中の雑物を除去した上で, 施工時に想定される含水比に試料調整する. また, 試料調整の際には, 試料をほぐすなどして均質になるようにする.

(2) 配合試験

改質材添加量を 3~5 水準に設定して, 配合試験を実施する. 試験は JIS A 1228 に準拠し, **締固めた土のコーン貫入試験を標準**とする. 表 6.6 に室内配合仕様の一例を, 図 6.3 に配合試験の標準的なフローを示す. 安定処理土の突固めによる供試体作製方法 (JGS0811) など参考に, 利用用途, 改質方法, 施工方法に見合った供試体の作製方法, 養生方法を設定することが重要である. .

表 6.6 室内配合試験仕様例

試験項目	締固めた土のコーン指数試験 (JIS A 1228)
材料の添加量	3~5水準
含水比	自然含水比または施工時の含水比
養生日数	1日, 3日, 7日 (現場条件に合わせる)
前養生	封緘養生 (現場条件に合わせる)
試料の解きほぐし	施工条件に応じて複数回実施する場合がある
中養生	開封養生または封緘養生 (現場条件を考慮)
モールド養生 (後養生)	気中または水浸養生 (現場条件を考慮)
1 試料の試験体数	1 供試体以上

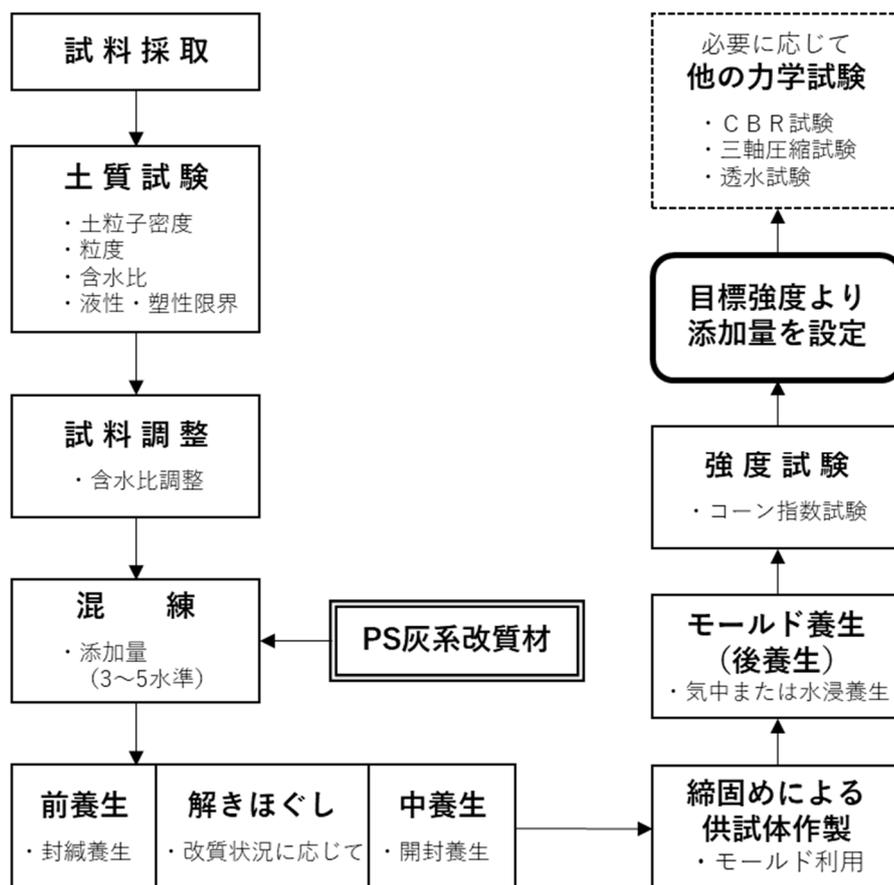


図 6.3 室内配合試験のフロー

(3) (現場/室内) 強度比 R の設定

PS 灰系改質材の添加量は、現場で要求される品質（必要強度）に対して図 6.4 に示すフローに基づいて決定する³⁾。

配合試験では、通常、現場目標強度 q_{cF} を（現場/室内）強度比 R で除して室内試験の目標強度 q_{cL} を求める。表 6.7 は固化材を粉体として原土に混合し浅層改良する場合によく用いられる（現場/室内）強度比 R の例を示したものである⁸⁾。PS 灰系改質材を改質に用いる場合も、粉体として原土に混合し、添加量の範囲もセメントに類似しているため、表 6.7 の強度比の設定による配合量の割増しを見込むことを基本とする。バックホウ施工する場合の強度比の目安は 0.5 とすることが多く、プラント混合方式における強度比は 0.7~0.8 とすることが多いようである。

改質土の（現場/室内）強度比 $R=0.5$ （バックホウ混合の場合）

改質土の（現場/室内）強度比 $R=0.7\sim 0.8$ （プラント混合の場合）

実際の施工にあたっては設定した強度比が適切かどうか、現場施工の初期段階で試験施工を実施して確認することが望ましい。また表 6.7 は原位置混合方式における（現場/室内）強度比 R の例である。プラント混合方式における（現場/室内）強度比 R の設定についても十分に確認することが望ましい。

なお、改質材の最小添加量 α_{\min} は、セメント系固化材と同様に 50kg/m^3 程度を目安とする⁸⁾ ケースが多い。ちなみに石灰による地盤改良では最低添加量を 30kg/m^3 としている⁹⁾。

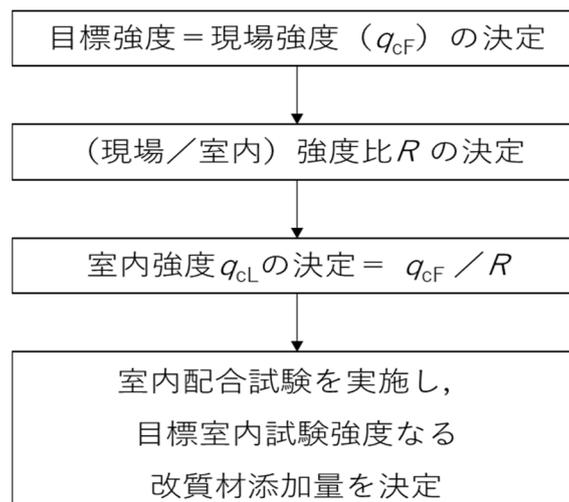


図 6.4 改質材添加量の決定フロー³⁾

表 6.7 浅層改良（粉体方式）における（現場/室内）強度比 R の一例⁸⁾

固化材の 混合方式	改良の対象	施工機械	(現場/室内) 強度比
粉体	軟弱土	スタビライザ バックホウ	0.5~0.8 0.3~0.7
	ヘドロ 高含水有機質土	クラムシェル バックホウ	0.2~0.5

6.4 シリンダー法の吸水比 W_{ab} を利用する方法

本手法はコーン指数による品質評価に着目し、シリンダー法で得られる吸水比 W_{ab} を利用して、PS 灰系改質土の配合設計を行うものである。原土（浚渫泥土等）の余剰水分と PS 灰系改質材の配合直後の吸水性能をそれぞれ適切に評価することが重要である。原土の余剰水を PS 灰系改質材により吸水し、改質土の必要な強度に応じて原土の流動性を低下させる、という考え方にに基づき配合設計を実施する。

(1) 原土の余剰水分と PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} の評価

配合設計を行う上で、原土（浚渫泥土等）の余剰水分と、PS 灰系改質材の吸水性能を適切に評価することが必要である。本手法において原土の余剰水分は原土の含水比 w から液性限界 w_L を差し引いた値 $(w - w_L)$ により求める¹⁰⁾。なお非塑性(NP)の場合には、 $w_L = 0$ とする。

また、PS 灰系改質材の吸水性能については、瞬時の改質効果がポイントになることから、配合直後の吸水性能を適切に評価することが重要である。特に物理的吸水による吸水比 W_{ab} の評価が必要であり、次のようにシリンダー法により評価する。

【吸水比 W_{ab} 】

改質材の吸水性能は、3.2(1)に示したシリンダー法で測定した吸水比 W_{ab} により評価する（表 3.2, 表 6.2）。

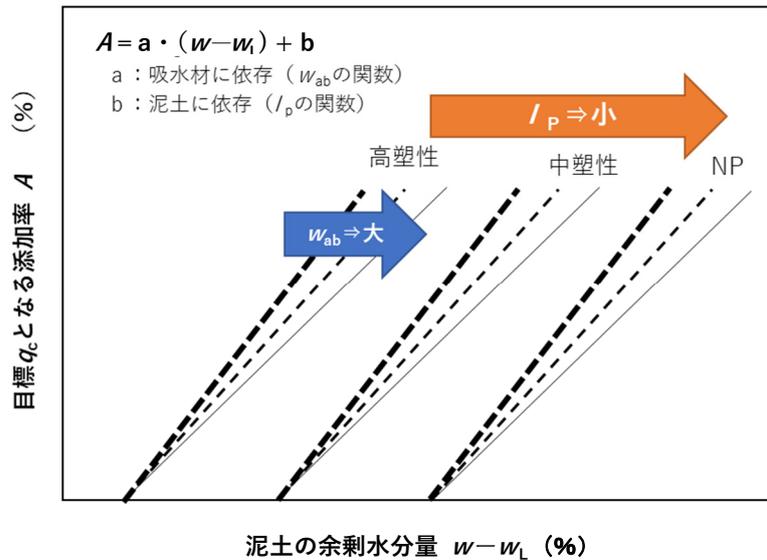


図 6.4 原土の物理特性 (w , w_L と I_P) と改質材の吸水比 W_{ab} に基づく添加率 A の設定

(2) 添加率 A の設定の考え方

本手法では、原土の物理特性 (w , w_L と I_P) と PS 灰系改質材のシリンダー法による吸水比 W_{ab} により、必要な改質材の添加率 A を求める。図 6.4 は、配合設計の考え方をイメージとして示している。この図の意味するところは、以下のとおりである。

- ① 原土の塑性指数 I_P が同じかつ PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} も同じであれば、目標のコーン指数 q_c の改質土を得るために必要な改質材の添加率 A は、 $(w - w_L)$ を用いて次のような一次関数で決定できる

$$A = a \cdot (w - w_L) + b \quad (6.1)$$
- ② b は原土の塑性指数 I_P に依存する変数で、 I_P が大きいほど、 b は大きな値をとる。すなわち、相対水分量が同じであれば、高塑性粘土ほど改質材の添加率 A は大きくなる。また、 b は吸水比 W_{ab} に依存しない。
- ③ a は吸水比 W_{ab} に依存する変数で、吸水比 W_{ab} が大きいほど、 a は小さい値をとる。すなわち、 $(w - w_L)$ が同じであれば、吸水性能が高い改質材ほど、添加率 A は少ない量で済む。また、 a は原土の物性に依存しない。

図 6.5 は、実際に様々な原土に対して、室内試験における目標強度 $q_c=200\text{kN/m}^2$ の改質土を得るために必要な同一の PS 灰系改質材の添加率 A と $(w - w_L)$ の関係を示している¹¹⁾。また、図 6.6 は同一の原土に対して、 $q_c=200\text{kN/m}^2$ の改質土を得るために必要な各種 PS 灰系改質材の添加率 A と $(w - w_L)$ の関係を示している¹¹⁾。図 6.7 は図 6.6 の直線の傾き a を吸水

比 W_{ab} に対してプロットしたものである¹¹⁾。これらの結果は、**図 6.4** にイメージとして示した配合設計の考え方を裏付けるものである。**図 6.5** に示した結果を用いると、室内試験の目標強度を第4種発生土 $q_c=200\text{kN/m}^2$ とした場合の式(6.1)の A の算定式は、以下の通りとなる。

$$A = a((w-w_L) + c \cdot \log I_p - d)$$

$$= a((w-w_L) + 37.8 \log I_p - 33.5) \quad (6.2)$$

他の目標強度に相当する添加率 A の推定式は、**表 6.8** に示す。なお、室内試験における目標強度の設定に際しては、(現場/室内)強度比 R を適切に考慮する必要がある。

図 6.7 の結果を用いて、PS 灰系改質材(A)の場合は、式(6.2)において $a=1.4$ となる。他の PS 灰系改質材を使用する場合には、各々の吸水比 W_{ab} に対して傾き a を読み取る。

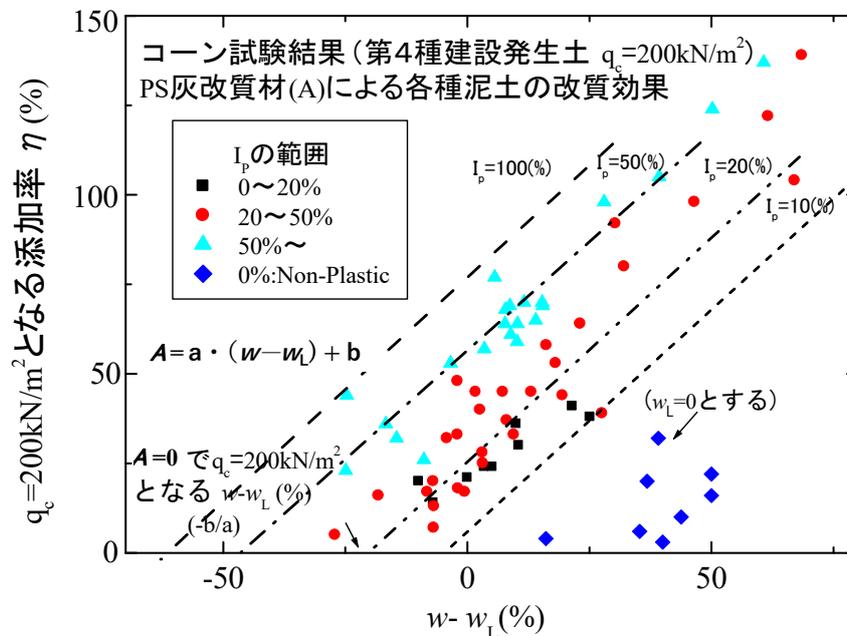


図 6.5 $(w-w_L)$ と $q_c=200 \text{ kN/m}^2$ を満たす添加率 A の関係¹¹⁾

表 6.8 各種目標強度の添加率 A の推定式

改質土の目標強度	各推定式
第4種建設発生土	$A = a((w-w_L)+37.8\log I_p-33.5)$
第3種建設発生土	$A = a((w-w_L)+46.1\log I_p-41.6)$
第2種建設発生土	$A = a((w-w_L)+56.8\log I_p-52.3)$

法ではPS 灰系改質材の吸水による拘束水量を考慮した見かけの含水比（補正含水比）を用いる。締固めに適正な補正含水比の範囲について、原土と改質土に違いがない、という考え方で配合設計を実施する。

(1) 含水比の補正

PS 灰系改質材を土に添加すると、自由水の一部が改質材に取り込まれ、拘束水としての挙動を示す（**図 3.1**、**図 6.8**）。一方 JIS A 1203 による含水比測定では、乾燥炉で $110 \pm 5^\circ\text{C}$ の温度に調整して水分を蒸発させて含水比を測定するので、拘束水は自由水とともに蒸発（消失）してしまう。PS 灰系改質材では水和結晶構造を有するエトリンガイトの生成が確認されており（**図 3.1(b)**）、自由水の一部が水和結晶形態の拘束水として取り込まれる。エトリンガイトは、温度が 60°C 以上になると水和結晶が消失することが知られており、拘束水分を補正しないと含水比に対応する土の挙動が実態と合わないことになる（**図 6.9**）。そこで、JIS A 1203 による方法で測定された含水比を実測含水比 w とし、拘束水分を水分としてではなく固体分として含水比の補正を行う。その含水比をここでは「補正含水比 w^* 」と呼ぶ。

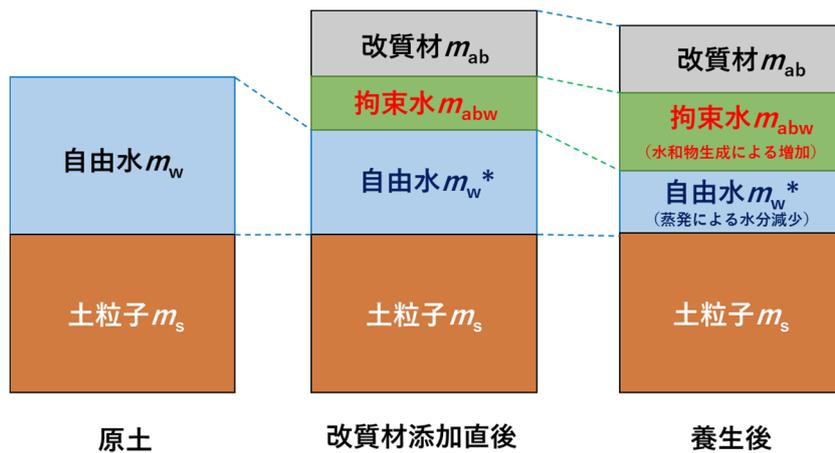
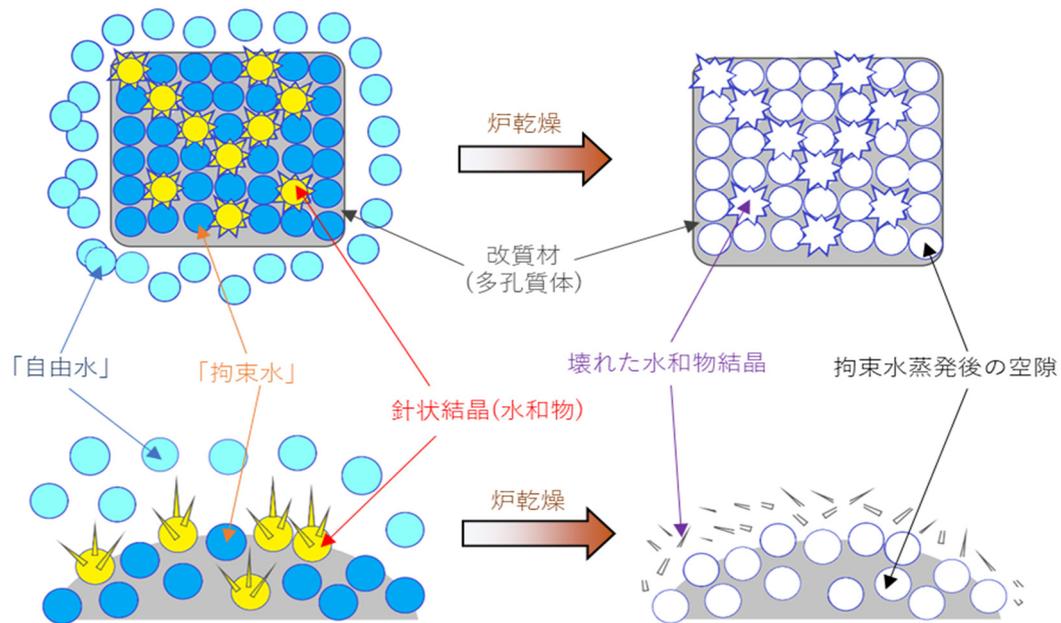


図 6.8 PS 灰系改質材の吸水による拘束水量変化のイメージ

実際に改質土を適用する環境では、拘束水が蒸発することはない。そこで、JIS A 1203 の 110°C で水分を蒸発・乾燥させることにより測定される実測含水比 w に対し、拘束水分を水分としてではなく固体分とした含水比の補正を行う。その含水比を補正含水比 w^* とすると w 、 w^* はそれぞれ次式のように表せる。

$$w = \frac{m_w^* + m_{abw}}{m_s + m_{ab}} \times 100 \quad (6.3)$$

$$w^* = \frac{m_w^*}{m_s + m_{ab} + m_{abw}} \times 100 \quad (6.4)$$



- ・土の性状は改質前後で大きく異なる.
- ・拘束水は自由水とともに炉乾燥で蒸発する. 水和物結晶も消失するので, JISA1203 による実測含水比は改質後の性状に一致しない.
(見かけの含水比はより低下している)
- ・改質土のコンシステンシー特性や力学特性は, 自由水と固体成分(土粒子, 改質材, 拘束水)の比率に大きく依存する.
- ・水和物を含む拘束水を固体と見なし, 自由水と区別する必要がある.
⇒補正含水比の導入が必要である

ここで, m_s は土粒子の質量, m_{ab} は改質材の質量である. また m_w^* は JISA 1203 により測定される水分量 m_w から改質材により拘束される水分量 m_{abw} を除いたものである. このとき改質材添加率 A , 改質材の吸水比 W_{ab} は次式のように表せる.

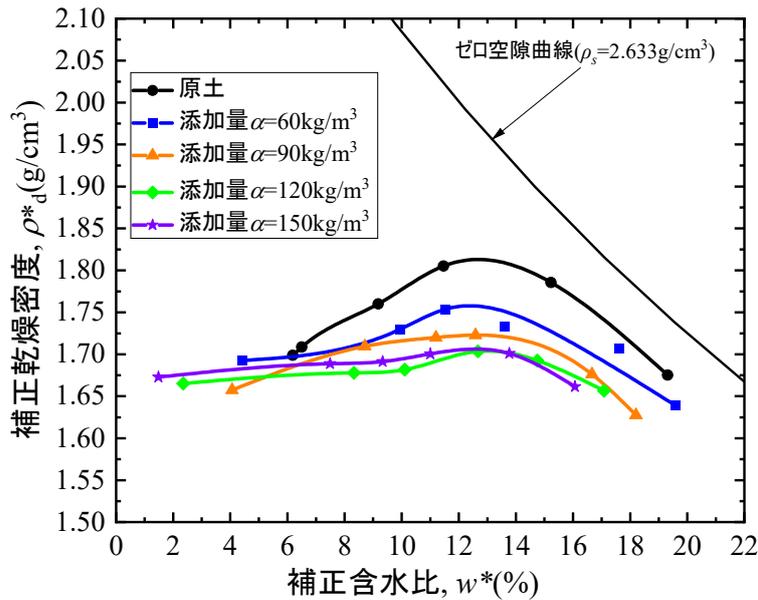
$$A = \frac{m_{ab}}{m_s} \times 100 \quad (6.5)$$

$$W_{ab} = \frac{m_{abw}}{m_{ab}} \times 100 \quad (6.6)$$

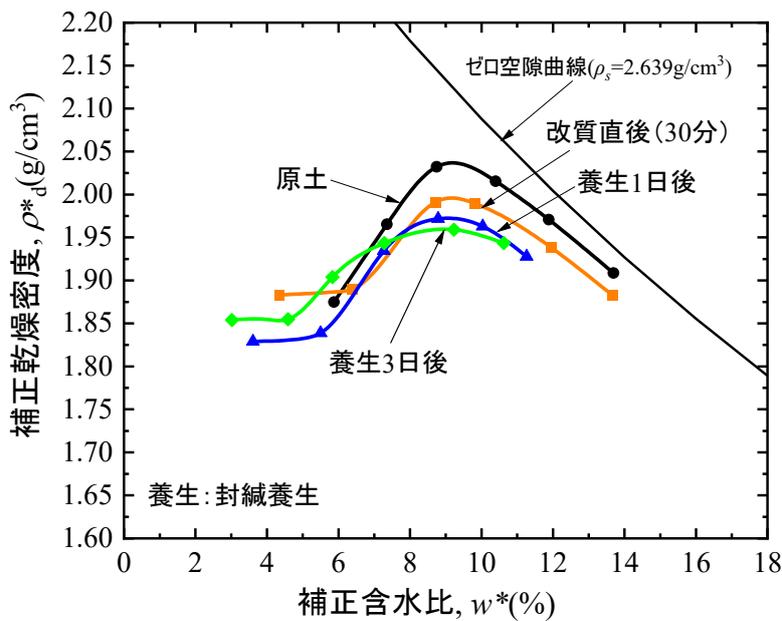
式(6.3)~(6.6)を用いて, w^* は実測含水比 w , 改質材の添加率 A および吸水比 W_{ab} から次式により求められる.

$$w^* = \frac{w\left(1 + \frac{A}{100}\right) - \frac{A}{100} \cdot W_{ab}}{1 + \frac{A}{100}\left(1 + \frac{W_{ab}}{100}\right)} \times 100 \quad (6.7)$$

(6.7)式で表されるように補正含水比 w^* は、添加率 A と吸水比 W_{ab} を考慮して導き出される含水比の補正であることから、物理的な吸水による拘束のみならず化学的な吸水によって拘束される水分量も考慮されている。



(a) 試料 A (養生期間 $t_{pre-compaction}=30$ 分)



(b) 試料 B (添加量 $\alpha=60\text{kg/m}^3$)

図 6.10 PS 灰系改質土の含水比補正後の締固め特性¹²⁾

(2) 吸水比 W_{ab} による含水比補正の有効性の検証

図 4.8 に示す粘性土混じりの粗粒土の締固め試験について吸水比 W_{ab} から求められる補正含水比 w^* を用いた場合の締固め曲線を示すと図 6.10 のようになる。なお乾燥密度も w^* を用いて算出するので、同図では補正乾燥密度 ρ^*_d とした。

図 6.10 において補正した最大乾燥密度 ρ^*_{dmax} が小さくなる傾向は、図 4.8 と定性的に同じであるが、補正した最適含水比 w^*_{opt} は、添加量 α や締固めるまでの養生期間 $t_{pre-compaction}$ によらずほぼ一定で、原土の w_{opt} にほぼ等しい。

図 6.11 には各試料の ρ^*_d / ρ^*_{dmax} と w^* の関係を示す。原土の場合は上記に示す式(6.7)で $A=W_{ab}=0\%$ としている。同図より改質材添加量 α あるいは養生期間 $t_{pre-compaction}$ の増加に伴い、曲線はなだらかになっている。しかし、補正した最適含水比 w^*_{opt} より湿潤側の ρ^*_d / ρ^*_{dmax} と w^* の関係は、改質材添加量 α あるいは養生期間 $t_{pre-compaction}$ の違いの影響をあまり受けず一義的である。これを利用すると、原土の例えば $D_c=95\%$ のときの補正含水比 w^* を用いれば、改質土においても $D_c=95\%$ を下回らないことが期待される。

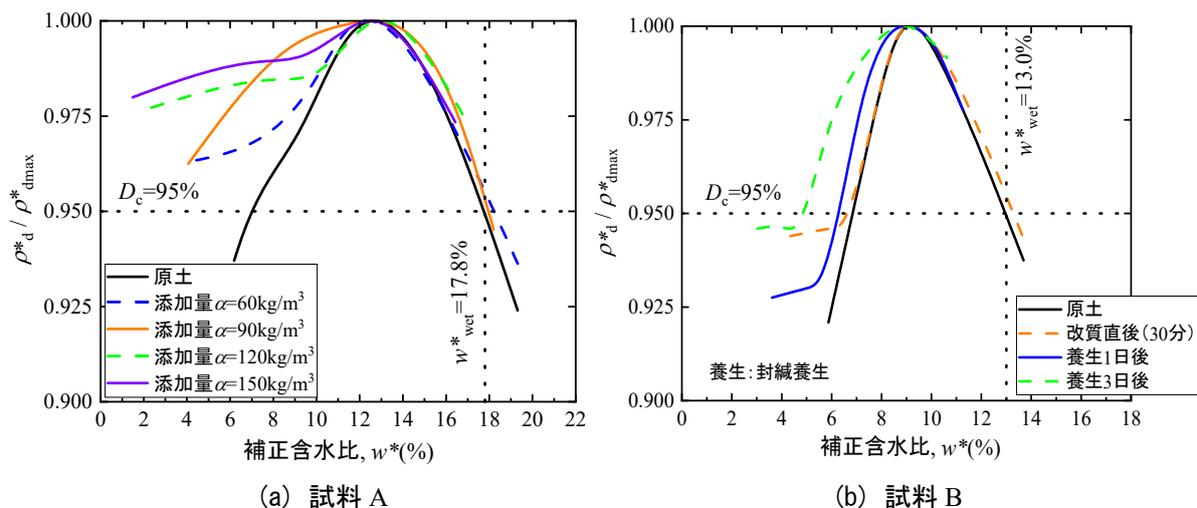


図 6.11 各試料の w^* と ρ^*_d / ρ^*_{dmax} の関係¹²⁾

(3) 配合設計手法

実務では、改質材の添加率 A は、改質対象土（原土）の単位体積 1m^3 当たりの添加材の質量 α で換算されることが多い。 A と α の関係は以下に示すとおりである。

$$A = \frac{\alpha}{\rho_t} \left(1 + \frac{w_0}{100} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (6.8)$$

ここで ρ_t は原土の湿潤密度である。

一方、PS 灰系改質材は乾燥状態であるため、拘束水（PS 灰系改質材により拘束された自由水）がすべて蒸発すると仮定すると改質土の含水比 w は、原土の初期含水比 w_0 および改質材の添加率 A を用いて、次式で求めることができる。

$$w = \frac{w_0}{1 + \frac{A}{100}} (\%) \quad (6.9)$$

式(6.9)を式(6.7)に代入すると、改質試料の補正含水比 w^* は初期含水比 w_0 を用いて次式のよう
に表すことができる。

$$w^* = \frac{\frac{w_0}{100} \frac{A \cdot W_{ab}}{100 \times 100}}{1 + \frac{A}{100} \left(\frac{W_{ab}}{100} \right)} \times 100 (\%) \quad (6.10)$$

式(6.10)より、初期含水比 w_0 と補正含水比 w^* の関係は次式のように表すことができる。

$$w_0 = w^* + A \left(\frac{w^*}{100} + \frac{W_{ab}}{100} + \frac{w^* \cdot W_{ab}}{100^2} \right) (\%) \quad (6.11)$$

式(6.8)を式(6.11)に代入すると、初期含水比 w_0 と補正含水比 w^* の関係は α を用いると次のよ
うになる。

$$w_0 = \frac{w^* + \frac{100\eta\alpha}{\rho_t}}{1 - \frac{\eta\alpha}{\rho_t}} (\%) \quad (6.12)$$

$$\text{ここに } \eta = \frac{w^*}{100} + \frac{W_{ab}}{100} + \frac{w^* \cdot W_{ab}}{100^2}$$

式(6.12)から PS 灰系改質材の添加後に目標の補正含水比 w^* を満たすことができる添加量 α
は、原土の初期含水比 w_0 に対して、次式によって評価することができる。

$$\alpha = \frac{w_0 - w^*}{\eta(100 + w_0)} \cdot \rho_t \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (6.13)$$

$$\text{ここに } \eta = \frac{w^*}{100} + \frac{W_{ab}}{100} + \frac{w^* \cdot W_{ab}}{100^2}$$

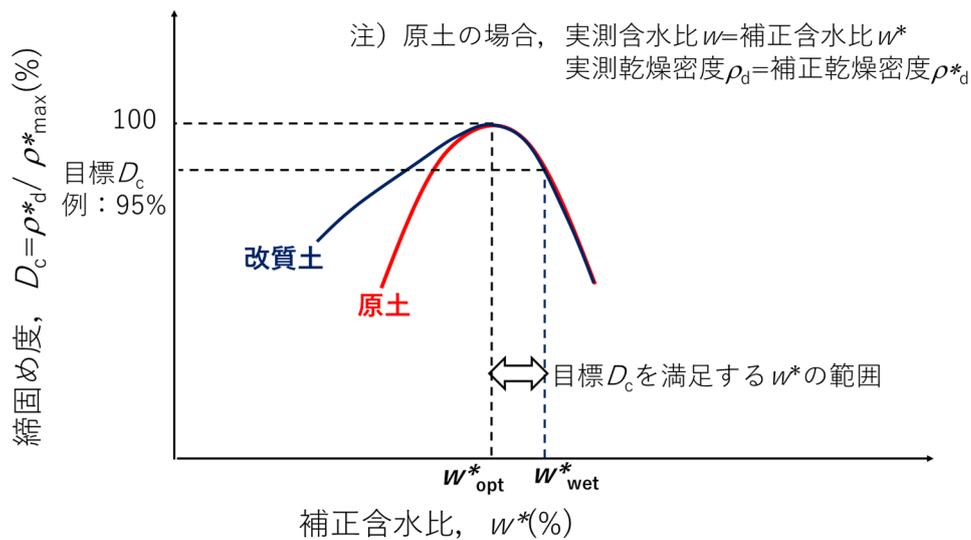


図 6.12 原土と改質土の $w^* \sim D_c = \rho_d^* / \rho_{dmax}^*$ の関係

ここで図 6.12 に模式的に示すように、補正した最適含水比 w_{opt}^* より湿潤側の補正含水比 w^* と締固め度 $D_c = \rho_d^* / \rho_{dmax}^*$ の関係は、原土と改質土にあまり違いがない(図 6.11 参照)。例えば締固め度 $D_c = 95\%$ を目標として、この締固め度 D_c を満足する補正含水比 w^* の範囲は原土と改質土でほぼ同じで $w_{opt}^* \sim w_{wet}^*$ である。ここで原土の場合は、実測含水比 w と補正含水比 w^* は同じである。そこで式(6.13)に $w^* =$ 原土試料の湿潤側管理値の最大含水比 w_{wet} を代入し、さらに養生時間に対応する PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} を代入する。その結果、最適含水比 w_{opt} よりも高い初期含水比 w_0 を持つ原土について、改質後に目標の締固め度 D_c を満足する添加量 α の最小値を求めることができる。すなわち PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} が既知であれば、原土試料の締固め試験を行うだけで、必要な添加量 α を推定することができる。

上記のように、最適含水比よりも湿潤側にあり、締固めによる施工が困難な地盤材料に吸水性材料を添加し、原土の締固めに適正な含水状態と同じような含水状態(補正含水比)に揃えてやることで、**従来の締固めと同様に含水比と乾燥密度による締固め管理ができる**ことになる。

W_{ab} を考慮した配合設計の手順

- ① PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} をふるい法で求める。
- ② 原土の改質前の含水比 w_0 および湿潤密度 ρ を測定する。
- ③ 原土の締固め試験を実施して、締固め曲線を求める。
- ④ 締固め曲線より締固め管理目標 D_c を満足する w_{wet}^* を設定する。

(例えば図 7.7(a)では $w^*_{\text{wet}}=17.8\%$, 同図(b)では $w^*_{\text{wet}}=13.0\%$ とする)

- ⑤ 式(6.13)に上記 w_0 , w^* , W_{ab} および ρ を代入して, 同式を満足する添加量 α を求める.
- ⑥ この添加量をもって設計添加量とする.

現時点では, 締固めによる品質評価に着目した当該手法を用いた配合設計の適用事例はまだ少ない. またコーン指数などの強度の確認も必要である. したがって, 当面は室内配合試験を実施するとともに吸水比 W_{ab} を用いた配合設計をクロスチェックとして実施し, 現場での適用実績を蓄積することが望まれる.

参考文献

- 1) 久野悟郎, 流動化処理工法研究機構, 流動化処理工法技術管理委員会: 土の流動化処理工法[第二版], 建設発生土・泥土の再生利用技術, 第4章 配合設計, pp. 89-118, 技報堂出版, 2007.
- 2) 国土交通省: 発生土利用基準について, 2006年8月.
- 3) 建設省大臣官房技術調査室 監修, 建設発生土利用促進検討委員会編: 発生土利用促進のための改良工法, 土木研究センター, pp.37-45, 1997.
- 4) 日本道路協会: 道路土工要綱 (平成21年版), 2009.
- 5) 財団法人 国土技術研究センター: 河川土工マニュアル, 第3章 河川土工の設計, pp. 59-79, 2009.
- 6) 農業農村工学会: 土地改良事業設計指針「ため池整備」, p14-19, 2015.
- 7) 地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説, pp.293, 2004.
- 8) 一般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第4版, 技報堂出版, pp.111, 2012.
- 9) 日本石灰協会: 石灰による地盤改良マニュアル第7版, 2016.
- 10) 今井五郎, 加藤雄介, 望月美登志, 吉野広司, 斎藤悦郎: 泥土改良方法および泥土改良材の添加率評価方法, 特開 2006-326422 号公報, 2006.
- 11) 望月美登志: 焼却方法が異なる各種 PS 灰の吸水性評価と泥土改質への適用性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 75, No. 2, pp.155-166, 2019.
- 12) 渡邊悠樹, 早野公敏, 山内裕元, 望月美登志: 築堤材に対する吸水性改質土の配合設計手法の提案, 第 55 回地盤工学研究発表会講演集, pp.681-682, 2020.

7. 施工方法と品質管理方法

7.1 施工方法

改質処理工において最も重要なポイントは、改質の対象となる原土（発生土）の性状に合わせて改質材を所定量均質に混合することである。

PS 灰系改質材を用いた改質処理工には、セメント系や石灰系による地盤改良工法のうち、粉体混合方式と呼ばれる方法が適用される。またセメント系や石灰系の材料と同様の取り扱いができることから、改質処理における施工上の違いはほとんどない。ここでは、従来から汎用的に用いられている浅層混合処理や発生土の安定処理等で用いられる施工方法を紹介する^{1)~4)}とともに施工上の留意点を示す。

改質処理工は、原土（発生土）を改質材により要求される品質・機能を満足する地盤材料に改質し、改質土を用いて盛土・埋戻し・裏込め等の工事を実施することである。本項では、PS 灰系改質材を用いて原土（発生土）を改質する施工方法の流れと施工の核心部分である攪拌・混合処理方法の特徴について概説する。

(1) 施工の流れ

改質の対象となる原土は「発生土」である。したがって、原土の性状は液状のものから塑性状のもの、あるいは泥土状のものから粘土塊状のものまで、さまざまである。こうした多様な発生土を改質する場合、その目的や施工規模に応じた適切な処理方法を適用する必要がある。発生土の改質では改質材の混合位置によって攪拌機械を移動させながら施工する「**原位置混合処理**」と、混合プラント等により攪拌後の改質土を使用する場所に運搬する「**プラント（事前）混合処理**」とに区分することができる¹⁾。

図 7.1 は、「原位置混合処理」と「プラント（事前）混合処理」の標準的な施工の手順を示したものである。同図に示すように原位置で処理するか、あるいは別途ヤードを設けてプラントで事前に処理するかの違いによって施工手順にも違いがでてくる。しかしながら、基本的な流れは2つの処理方法とも類似しており、共通する項目も多い。そこで同図に示す施工の流れ全体を俯瞰しながら、各項目の着目ポイントをまとめると以下のようなになる。

現地踏査・確認・方針検討

現地踏査では現場の施工位置や周辺状況を確認し、作業スペースが確保できるか検討する。また、施工数量、工期、施工箇所のボーリング資料、地形、地質、地下水、地下埋設物の有無、周辺への影響など、さまざまな情報を入手した上で、「原位置混合処理①」か「プラント（事前）混合処理②」のどちらの方式を採用するか、適切に選択する。

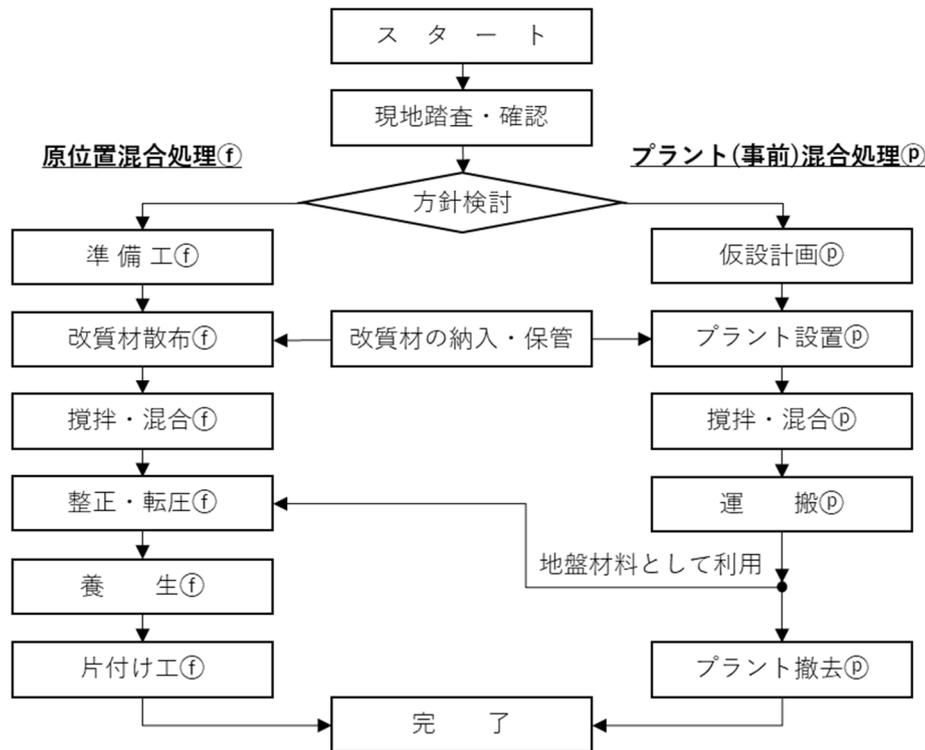


図 7.1 標準的な施工の手順

準備工①

原位置混合処理における準備工では、改質範囲のマーキングや区画割、改質材の仮置き保管場所の位置出し等を行う。また、発生土中に草木根やガラ等、改質材の混合に支障をきたす夾雑物がある場合には予め除去する。さらに不陸整正や仮排水による水切り処置も必要に応じて事前に実施する。

仮設計画②

安全かつ確実に作業を行うため、周辺環境にも十分配慮しながら仮設計画をたてる。仮設計画の中で検討する項目としては、①仮囲い、②仮設道路、③保安要員の配置、④安全通路の確保、⑤振動・騒音対策などがある。

改質材散布①

改質材の散布では、配合設計で設定された添加量に基づき、準備工で実施した改質対象範囲の区画割にしたがって所定量を散布した上で均一になるように敷き均す。なお、散布時の改質材の飛散や粉じんの発生に注意する。

プラント設置②

改質材の混合プラントは、処理能力や規模に応じて設置に要する占有面積も異なる。また

プラント配置の良し悪しは、施工性や作業効率に多大な影響を及ぼす。したがってプラント配置を検討する際は、施工条件に応じた運搬車両の動線や発生土（原土）・改質材および改質土のストックヤードの配置等、作業効率の良い配置計画を入念に練ることが重要である。

攪拌・混合①②

攪拌・混合に用いる施工機械はさまざまである。原位置混合処理では、バックホウやスタビライザによる攪拌・混合が主流である。プラント（事前）混合処理では、バックホウ以外に定置式プラント方式や自走式プラント方式が採用される。表 7.1 に代表的な攪拌・混合工法の分類例を示す。

表 7.1 攪拌・混合工法の分類

方式	混合位置	主な工法名	工法の概要
粉体 混合 方式	原位置 ・事前 混合処理 (両用)	バックホウ 混合	<ul style="list-style-type: none"> 汎用型のバックホウによる混合処理で、原位置混合またはストック等での事前混合のどちらでも適用できる。 攪拌用アタッチメントの切り替えで混合性の向上をはかることもあり、フレキシブルな対応が可能である。 混合精度や施工中の粉塵の発生に留意する必要がある。
	原位置 混合処理	スタビライザ 混合	<ul style="list-style-type: none"> スタビライザを用いて所定の深さまで攪拌混合する。 専用機による混合のため、混合精度は高い。
	プラント (事前) 混合処理	定置式 プラント混合	<ul style="list-style-type: none"> 定置式のプラントで改質材の添加・攪拌・混合を行う。 混合精度高い連続混合処理が可能である。
		自走式 プラント混合	<ul style="list-style-type: none"> 自走式のプラントで改質材の添加・攪拌・混合を行う。 自走式なので現場内の任意の場所で施工ができる。

運搬③

改質土の運搬は、主にダンプトラックで行われる。ダンプ運搬する際の経路に公道が含まれる場合は、所管官庁との協議の上、経路を決定する。運搬時間の制限や運搬速度の厳守、散水等による粉じん対策、土のこぼれ落ち防止など、地元住民に配慮することも重要である。

整正・転圧④

原位置混合の場合は、改質後にその場の不陸を整正する。また運搬された改質土の場合は、施工箇所ダンプアップされた改質土の撒き出しと敷均しを行う。いずれの場合も、ブルドーザやグレーダーによる施工が一般的である。施工量が少ない場合には、バックホウが用いられることもある。

転圧は、改質土の地盤強度を確保する上できわめて重要な作業である。適切な転圧を施す

ことにより、はじめて改質土の地盤強度が目標品質を満足する。なお、土の締固めに関する施工の詳細、転圧機械の選定、過転圧防止等については、別途専門書を参考にいただきたい。

養生①

化学的吸水による改質効果のある材料を採用した場合は、転圧が完了した後だけでなく、攪拌・混合後も所定の改質効果が得られるまで必要に応じて養生期間を設ける必要がある。また、物理的吸水による改質材を適用したケースでも、転圧直後は土の骨格構造が乱されているため、構造が安定するまで養生期間を設けることが望ましい。転圧直後に重荷重を通行させるといったことは避けるべきである。

片付け工①・プラント撤去②

片付け工、プラント撤去とも共通するのは、原形復旧をしっかりと行うことである。作業完了時には発注者立会いの下で現地確認をした上で現場を引き渡すことが原則である。

(2) 各種の施工機械による攪拌・混合方法の特徴

表 7.1 に示す代表的な施工機械による攪拌・混合方法の適用土質や適用範囲、長所・短所等を以下に示す。

バックホウ混合

発生土の改質において最も汎用的に利用される機械は、バックホウである。簡便な方法であり、さまざまな土質、工事規模に対応できる柔軟性がある。少量の発生土を現場で改質する場合、その大半はバックホウ混合で施工される（原位置混合処理、**図 7.2(a)**）。また、発生土を一時的にストックヤードに仮置きして、バックホウにより発生土と改質材を混合して改質する場合もある（事前混合処理）。さらに、貯泥ピット内に搬入した高含水泥土に改質材を散布し、バックホウによる攪拌・混合を行うことも頻繁に行われている（**図 7.2(b)**）。

バックホウ混合は、特殊な機械を用いる必要がないため混合に要する費用が安くなる反面、混合が不均一になりやすく目標強度が得られにくいという短所がある。したがって、入念な混合や改質材添加量の割増し等で目標品質を確保するように配慮するなどの措置がとられる。また、特殊なバケットを用いたりして混合性をよくする方法が採用されることもある。**図 7.3(c)** にアタッチメント式ミキシング装置を、**図 7.3(d)** にバケット内に攪拌翼を装着したミキシングバケットの例を示す。

バックホウ混合のもうひとつの難点は、改質材散布および混合初期の粉じんの発生である。フレキシブルコンテナバック（フレコン）詰めされた改質材を発生土に散布し、攪拌・混合する際、粉じんの舞い上がりに注意を要する。



(a) 原位置混合



(b) 貯泥ピット内での混合



(c) アタッチメント式ミキシング装置



(d) バケツミキシング装置

図 7.2 バックホウ混合の例

(2) スタビライザ混合

浅層混合処理工法の代表として、スタビライザを用いた混合処理がある。対象土の上に改質材を散布し、スタビライザを用いて所定の深さまで掘り起こし、攪拌・混合を行う。スタビライザは混合専用機であり、混合精度は高く、高塑性粘性土に対しても効率的な施工が可能となる。中規模から大規模（1 万 m^2 以上）の工事に適するが、浅層混合処理のため改質深さは限定される（1.2m 程度まで）。また軟弱地盤に対応する特殊なスタビライザもあるが一般的には機械の自重が大きいため、液状を呈するような超軟弱地盤の改質には適さない。

図 7.3 にスタビライザ混合処理の例を示す。



図 7.3 スタビライザ混合の例

(3) 定置式プラント混合

定置式プラント混合は、処理能力の大きな混合プラントを使用するものであり、大規模工

事に適する。定置式プラントでは改質材はサイロで貯蔵され、改質材の添加・攪拌・混合は密閉された空間で行われるため、粉じんは発生しない。また、精度の高い連続混合処理が可能であるなどの利点がある。一方、機械設備の設置場所および原土や改質土のストックヤードも必要であり、広い作業エリアを必要とする。定置式プラント方式の例を図 7.4 に示す。



(a) 現場内に設置されたプラント

(b) 専用ヤードに設置されたプラント

図 7.4 定置式プラント混合の例

(4) 自走式プラント混合

定置式プラントのように広い作業エリアの確保が困難な場合や現場が散在する工事では、自走式プラント混合方式が採用される。この方式は、ストックヤードを設けなくてすむように、施工場所の近くにプラントが移動してその場所で攪拌・混合による改質を行うものである。自走式なので現場内の任意の場所で施工ができることが最大の利点である。また、密閉型の構造となっていることから粉じん対策が必要な都市部での工事に適する。密閉内部での均一な攪拌混合により、粉じんの発生を抑制するとともに混合ムラの少ない安定した品質の改質土に仕上げることができる。攪拌方式は、2軸のパドルミキサーおよびソイルカッターと3軸ロータリーハンマーの併用方式等がある。改質土量および使用改質材量は、コンピュータで管理するシステムであり、品質管理も比較的容易である。自走式プラント混合の例を図 7.5 に示す。



図 7.5 自走式プラント混合の例

(5) 施工上の留意点

改質処理工では対象となる発生土の発生場所や改質土の利用先での要求品質に見合う施工方法を選定する必要がある。以下では発生土の土質、改質土量、作業ヤードの広さ、改質材の混合管理、周辺環境への配慮等、現場の諸条件を考慮する際の留意点を示す²⁾。

発生土の土質や現場条件に適合する機種を選定

発生土が流動性を呈する液状泥土の場合、原位置での改質は困難となるため、通常は貯泥ピットを設け、そこで改質するのが一般的である。また原位置での改質では、原位置での走行性（トラフィカビリティ）が確保できる機械を採用する必要がある。

一般的に単位時間当たり処理能力が大きい機械のランニングコストは低いが、機械の運搬・組立・解体などに要するイニシャルコストは高くなる。また、混合精度の悪い方法を採用した場合、貧配合での混合処理は適さない。したがって、改質土量や目標品質確保の観点からの機種を選定が重要である。

改質材の混合管理

発生土と改質材との混合性は、発生土の土質や改質材添加量、混合方式、機械の混合性能や使用方法などによって異なる。特に改質材添加量の管理は、改質土の品質を左右する上で重要なファクターである。

プラント混合において連続供給方式の混合機械を採用した場合は、改質材供給量の確認として、サイロ、計量器、ミキサー等の性能と動作状況を日常的に確認する。さらに、キャリブレーションによる適正配合量の事前確認も重要である。

バックホウやスタビライザ等で攪拌・混合する場合には土の容積に換算して改質材を添加する。その際、併せて改質材の使用数量と改質土量の確認を行う。また、改質土の色むらを日常的に目視することも混合精度が得られているかどうかの確認に有効な手段のひとつである。

周辺環境への影響

施工時の騒音・振動、改質材からの粉じん発生、排出水の pH 等については、周囲に影響をもたらすことがあり、十分に注意して施工する必要がある。

特に PS 灰系改質材は、かさ比重が小さいことから、粉じんの発生について細心の注意を払わねばならない。前述のように、都市部での工事など粉じん対策が不可避の現場では、密閉型の混合機械を用いて改質することが望ましい。また、粉じんが舞い上がりやすいバックホウ混合を採用する場合は、粉じんの発生を抑制するために、ハイウォッシャーの噴霧やスケルトンバケットによる混合が適用されることがある。図 7.6 はその事例を示したもののだが、こうしたひと手間や作業における気遣いによって粉じんの発生を大きく抑制すること

ができる。施工時の公衆衛生安全教育や作業員への指導徹底など、周辺環境への影響を最小限に抑える日常的な心掛けは、施工管理の重要事項のひとつである。



(a) ハイウォッシャーによる方法

(b) スケルトンバケットによる方

図 7.6 粉じん対策の例

7.2 品質管理方法

改質土の品質管理の目的は、適用用途の目標に応じた要求品質を満足することである。本項では、①改質材の品質、②改質材の数量管理、③施工管理および④品質検査等について解説する。

(1) 改質材の品質

改質材の品質は、材料の試験成績表および SDS（安全データシート）等で確認する。材料の品質管理上の留意点を以下に示す。

改質材保管上の留意点

改質材の母材・主成分である吸水性材料は、湿気や水分の吸収によって品質が劣化する。したがって、できるだけ湿気を避け、乾燥状態で保管することが望ましい。また、現場でフレコン梱包の状態では、水が侵入しないように嵩上げし、直接地面につけないようにした上でシート養生を行う（図 7.7）。また現場に納入した改質材はできるだけ速やかに現場で使用するよう、納入計画をたてることも重要である。



図 7.7 現場における PS 灰系改質材の保管例

改質材使用上（施工時）の留意点

- ① 手袋や長袖の服の着用とマスクおよび防護メガネを使用する。
- ② フレコン詰め改質材を使用する場合、粉じんの発生に注意する。
- ③ 十分に均一になるまで、攪拌混合を行う。
- ④ 対象土の水分は、予め極力切る。
- ⑤ 改質土は、降雨時に雨水が溜まらないように転圧する。

(2) 改質材の数量管理

納入量

改質材はバラ、フレコン等で納入される。納品数量は納品伝票、納入車両および使用後の空袋数量等で管理する。

添加量（使用量）

原位置混合処理では、単位面積あたりの散布量を算出し、散布面積と改質材の数量をチェックして管理する。また施工にあたっては均一になるように散布する。プラント（事前）混合では、計量器等で測定・管理する。また、定期的にキャリブレーションを実施して適正な配合量になっていることを確認する。

(3) 施工状況の管理

混合度合い

改質土に色むらがないことなど、目視による確認を常時実施する。

転圧状況

事前の試験施工等で設定された転圧回数を標準とする。また、含水比の変化等に応じて転圧回数の調整を行う。

(4) 品質検査

現場における改質土の目標品質の可否判断は、コーン指数（JIS A 1228）を指標として判定することが一般的である。現場で処理した改質土を採取し、含水比や粒度を測定するとともに供試体を作製して CBR 試験や三軸圧縮試験等により強度の確認を行う場合もある。

改質土は用途ごとに要求品質を満足していなければならない。改質土の品質を定期的に管理する必要がある。品質管理は用途に応じて管理項目や管理頻度が異なる。用途別品質管理の目安を表 7.2 に示す³⁾。

表 7.2 用途別品質管理の目安 (例) ^{2), 3)}

用途	目標土質区分	管理項目	管理頻度
工作物の埋戻し	第2種発生土以上	含水比, 粒度 設計 CBR, コーン指数	1日 または 1,000m ³ に1回
土木構造物の 裏込め	〃	含水比, 粒度 設計 CBR, コーン指数	1日 または 1,000m ³ に1回
道路用盛土 (路床)	〃	含水比, 粒度 設計 CBR, コーン指数	1日 または 1,000m ³ に1回
道路用盛土 (路体)	第3種発生土以上	含水比, 粒度 コーン指数	1日 または 1,000m ³ に1回
河川築堤 (高規格堤防)	〃	含水比, 粒度 コーン指数	3,000m ³ に1回
河川築堤 (一般堤防)	〃	含水比, 粒度 コーン指数	3,000m ³ に1回
土地造成 (宅地造成)	〃	含水比, 粒度 コーン指数	3,000m ³ に1回
土地造成 (公園・緑地造成)	〃	含水比, 粒度 コーン指数	3,000m ³ に1回
水面埋立	第4種発生土以上	当事者間の協議	当事者間の協議

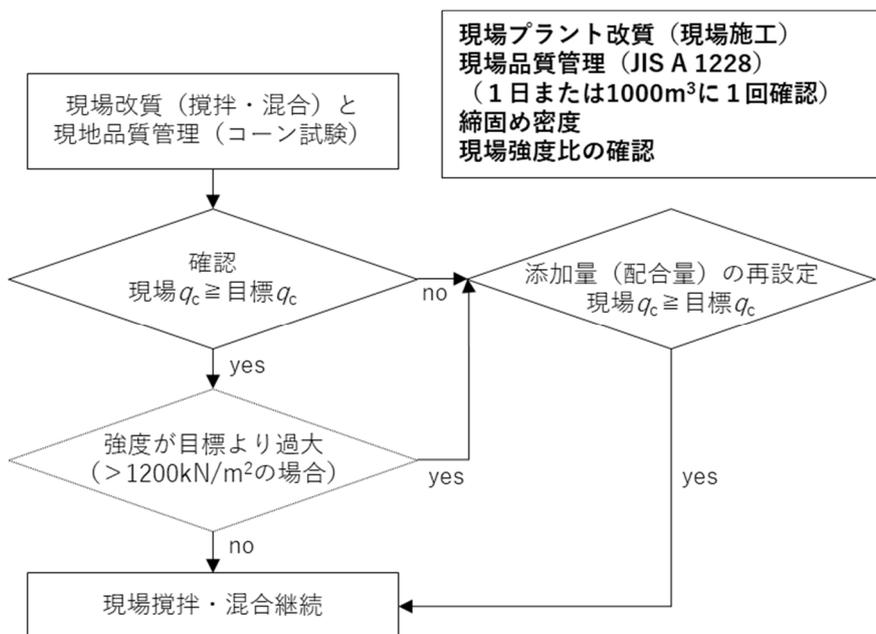


図 7.8 現場における品質管理フローの例

品質管理の結果を現場の施工管理にフィードバックした例を**図 7.8**に示す。同図に示す品質管理フローのように、現場で得られるコーン指数値を目標強度 q_c と比較管理しながら必要添加率 A （あるいは 1m^3 あたりの必要添加量 α ）を日々の施工管理の中で調整して施工することで一定品質を確保した改質処理が可能となる。

(5) 改質土の締固めにおける品質検査

改質土の締固めにおける品質検査は、安定性の高い盛土や築堤を施工する上で重要である。締固め規定には、品質規定と工法規定の2つの方式があるが、ここでは品質規定方式における締固め管理について説明する。

実際の工事における締固め管理は、土構造物の種別に対応して締固めの程度や方法が異なっているので、土構造物の適用分野に応じた品質規定に従う必要がある⁵⁾。いずれの分野でも基本的には Proctor が提案した施工管理の考え方に準拠した方法が適用されている。すなわち、室内の突固め試験により対象とする土の締固め特性を把握し、それに基づいて施工管理基準を設定し、現場ではその基準が満たされていることを計測で確認・検査するという手順である⁶⁾。この流れは**一般の地盤材料でも PS 灰系改質土を地盤材料とした場合でも全く同じ**である。ただし、現場での締固め管理を RI 法で実施する際に留意する点がある⁷⁾。以下にその概略を説明する。

RI 法における締固め管理の留意点

盛土の含水比測定方法として、炉乾燥法（JIS A 1203）と RI（放射線同位体）法がある。RI 法で含水比を測定する場合、含水比の測定原理が炉乾燥法と異なるため、事前に対象土の炉乾燥法による含水比を測定し、その含水比に合わせるための補正係数を RI 計器で設定する必要がある。

図 7.9は2種類の異なる盛土材料（原土 A と原土 B）と2種類の異なる PS 灰系改質材を用意し、原土と改質土の含水比を RI 法と炉乾燥法で測定し、RI 試験機の補正係数の設定値の違いを室内試験で調べた結果である。試料 A については原土が+10.2、改質土が+8.1 となり、また試料 B については原土が+0.0、改質土が-2.5 となり、いずれのケースでも原土と改質土で補正係数に若干の違いが認められる。これは PS 灰系改質材を添加したことで水分の状態（特に化学的吸水による拘束水の状態）が変化したことによるものと考えられる。

この結果を踏まえ、改質土から求めた補正係数を用いて現場で測定した RI 含水比と同一地点で採取した改質土の炉乾燥含水比の比較結果を**図 7.10**に示す。同じ改質土で補正係数を適切に設定すれば炉乾燥含水比と RI 含水比は概ね一致する。以上のことから、RI 法を用いて現場で締固め管理を実施する際は、必ず同じ改質土を用いて補正係数を設定することに留意する必要がある。

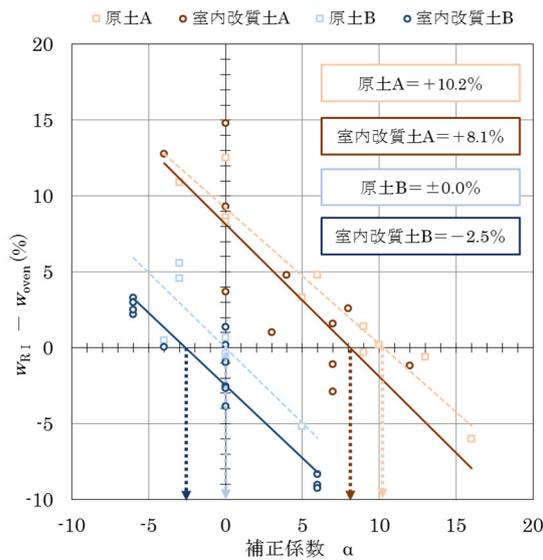


図 7.9 補正係数と含水比の関係
(室内盛土供試体での試験)⁷⁾

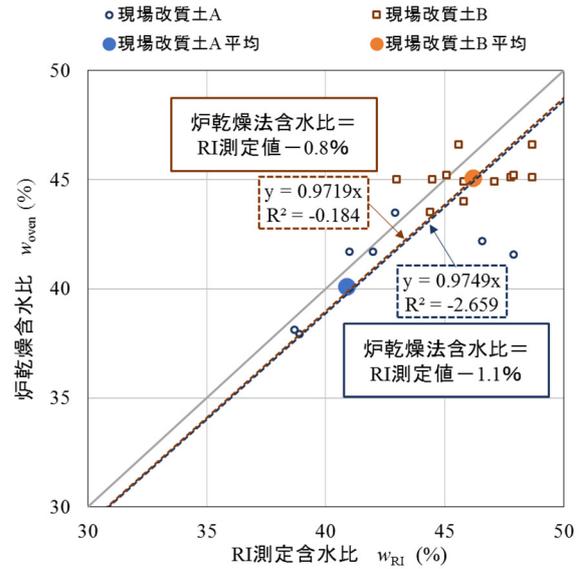


図 7.10 RI 法と炉乾燥法による
含水比測定結果の比較⁷⁾

参考文献

- 1) 一般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第4版，技報堂出版，pp.132-142，pp.250-254，2012.
- 2) 建設省大臣官房技術調査室 監修，建設発生利用促進検討委員会編：発生土利用促進のための改良工法，土木研究センター，pp.37-45，1997.
- 3) 独立行政法人 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル 第4版，丸善出版，pp.110-116，2013.
- 4) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル第7版，2016.
- 5) 地盤工学会編：土の締固めと管理，土質基礎工学ライブラリー37.，pp.281-343，1991.
- 6) 地盤工学会編：土の締固め，地盤工学・実務シリーズ 30，2012.
- 7) 仁平学，山内裕元：PS 灰系改質土の RI 法による締固め管理と現地適用性の検討，第 56 回地盤工学研究発表会に投稿中，2021.

8. 瞬時改質技術の適用例

8.1 改質原理と対象土質

無機系吸水性材料を用いた改質材のうち、配合直後の吸水性能の高いものを用いると、液性限界を上回るような浚渫泥土等を瞬時に吸水改質することが可能になる。「瞬時」とは、改質材の配合直後から数時間程度を指す。PS 灰系改質材の場合、PS 灰粒子の多孔質性による物理的吸水を主に利用することにより、浚渫泥土等を瞬時に改質して盛土材や埋立柱等として使用できる。また原土と異なる粒度の PS 灰系改質材（粒径の大きい細砂径の改質材など）により改質することで改質土の粒度調整が図れる。

(1) 改質原理

PS 灰系改質材の場合、改質材粒子が多孔質であるため、改質材を泥土に添加すると泥土中の自由水分を改質材粒子の内部に拘束水として取り込む。すなわち瞬時に物理的に吸水することで泥土中の余剰水分が減少し、**締固めが効く改質土**となる。さらに高含水比で乾燥質量の小さい対象泥土に PS 灰系改質材の中でも粒径の大きい細砂径の改質材を使用すると **図 4.5** に示すとおり盛土材として利用できない高含水浚渫泥土の粒度を調整できる。

この適用技術において、配合直後における吸水性能が低い改質材を使用すると（長期的な吸水性能には優れていても）、改質材の添加量が多くなり、費用が著しく増大したりあるいは改質土量が増大したりするので留意する必要がある。

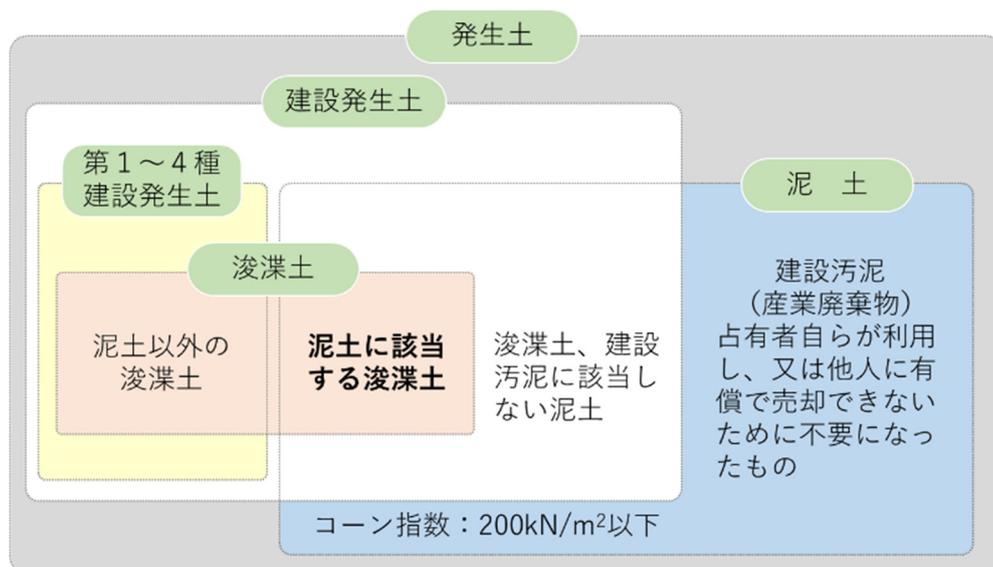


図 8.1 建設汚泥、泥土、浚渫土の位置づけ¹⁾と本技術の対象土質

(2) 対象土質

本瞬時改質技術で対象となる土質は、**図 8.1**の「泥土に該当する浚渫泥土」に相当する、液性限界 w_L を上回るような細粒分を多く含む泥土である。具体的には、河道掘削や港湾の航路浚渫等によって発生する土砂（浚渫土）である。

8.2 適用事例

PS 灰系改質材による瞬時改質の事例として、湖の高含水浚渫泥土を原土とした瞬時改質と、その改質土による湖内傾斜護岸盛土の構築工事を示す。

(1) 工事概要

図 8.2 に示す、湖の水質浄化事業の第 2 期浚渫区域から発生する湖底浚渫土の改良工事に本技術が適用された。第 2 期浚渫区域では**図 8.3** に示すように、表層 50cm の底泥部分がポンプ浚渫され、圧送方式で陸上部の囲繞堤（いぎょうてい）内へ搬送された。ポンプ浚渫土は、非常に高含水状態にあるため、囲繞堤内で天日乾燥を行い、ある程度含水比を下げてから搬出して PS 灰系改質材による瞬時改質を行った。また PS 灰系改質土を用いて湖内に傾斜護岸盛土を構築した（**図 8.4**）。



図 8.2 湖浄化事業の計画²⁾

施工概要図

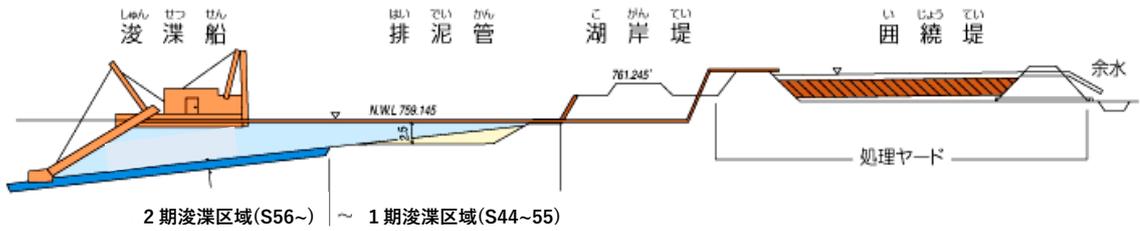


図 8.3 浚渫工事の概要と囲繞堤内における天日乾燥³⁾

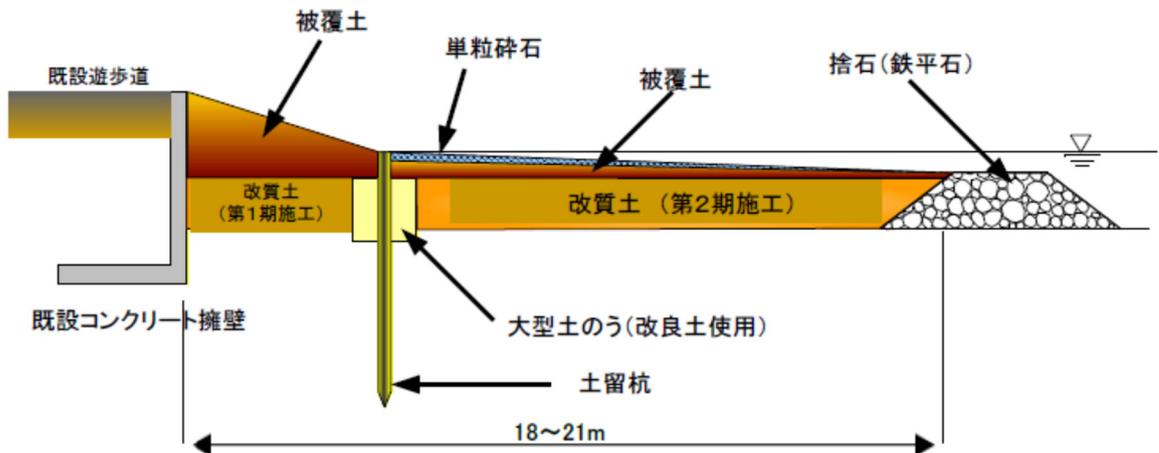


図 8.4 改質土による湖内傾斜護岸盛土の構築^{4)加筆}

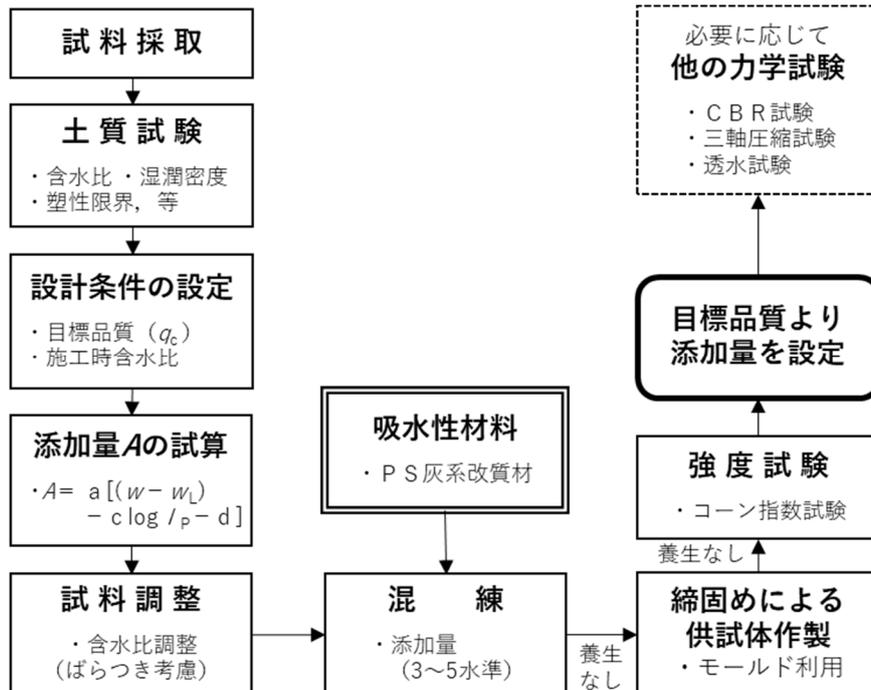


図 8.5 配合試験のフロー

(2) 配合試験

配合試験のフローを図 8.5 に示す. 配合試験用に採取した圍繞堤内浚渫土の物性を表 8.1 に, 平均値に近い代表例試料の粒径加積曲線を図 8.6 に示す. 表 8.1 には各物性の最大値, 最小値, 平均値を示す. 対象となる原土は, 粘土分 40%, シルト分 60%, 塑性指数 $I_p=96.4$, 液性限界 $w_L=181\%$, 液性限界を超える自然含水比 $w=204\%$, $pH=6.1$, 窒素・リン等の栄養塩類を含有する有機分の高い高含水泥土である.

表 8.1 原土 (浚渫土) の物理特性²⁾

試験項目	平均値	最少値	最大値
自然含水比 w_n (%)	204.6	179.3	269.0
土粒子の密度(g/cm^3)	2.489	2.347	2.576
液性限界 w_L (%)	181.0	160.8	195.0
塑性限界 w_p (%)	84.7	73.1	98.9
塑性指数 I_p	96.4	87.4	107.2
pH	6.1	5.6	6.5

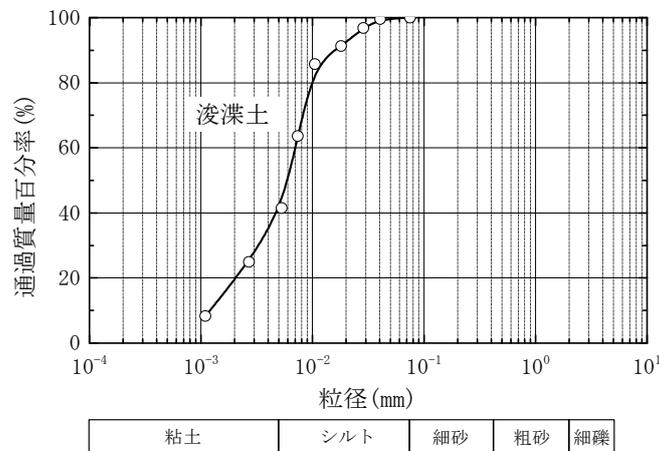


図 8.6 原土 (浚渫土) の粒度²⁾

本工事の目標強度は, 第 3 種建設発生土基準より高い $q_c=500kN/m^2$ とした. 最終的に改質土は, 湖内の水中傾斜護岸に活用することが目標にあり, その際の強度比についても正確に判断するため, そこまでの全泥土の改質について (4) に示す品質管理を行って強度比 R を検討している.

配合設計では, 室内配合試験を実施する前に 6.4 に示す方法^{5),6)}で必要添加率 A を推定した. 推定に際しては, 表 8.1 に示した塑性指数 $I_p=96.4$, 液性限界 $w_L=181\%$ を採用した. また施工では 3 種類の PS 灰系改質材を併用するため, 各改質材の W_{ab} をシリンダー法によ

り求めて、それらの平均値に対応する傾き a を、**図 6.7** の吸水比 W_{ab} ～傾き a の関係から求めた (**表 8.2**)。そして**表 6.8** に示した**目標強度の推定式**から、含水比 $w=200\%, 250\%, 300\%$ の場合を想定して、 $q_c=200, 400, 800\text{kN/m}^2$ それぞれを満足するための必要添加率 A を算定した。**図 8.7** に得られた必要添加率 A を▲の記号で示す。たとえば $w=200\%$ を想定した場合、 $q_c=200, 400, 800\text{kN/m}^2$ を満足する必要添加率 A は 75.6%, 86.2%, 98.0% となり、湿潤密度を考慮してそれぞれ添加量 $\alpha=314, 359, 408\text{ kg/m}^3$ であった。

次に採取した原土試料 (含水比 $w=189\%, 240\%, 269\%$ の 3 種類) を用いて、室内配合試験結果を実施して添加量 α ～コーン指数 q_c の関係を求めた。**図 8.7** に得られた関係を■の記号で示した。**表 8.1** に示した平均含水比 205%に近い $w=189\%$ の室内配合試験結果は、**6.4** に示す方法で推定した $w=200\%$ の結果におおむね一致する結果が得られた。そこで平均含水比 205%に対して**図 8.7** の結果から、必要添加量 α は 380kg/m^3 程度になった。

表 8.2 平均吸水比 W_{ab} と平均 a 値

使用吸水材	PS灰系改質材A,B,D
平均 W_{ab}	114
平均 a 値	1.25

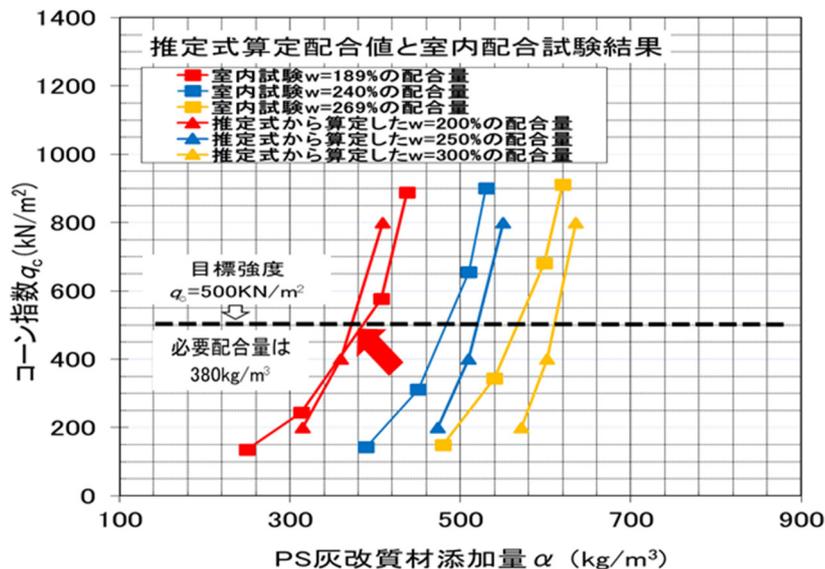


図 8.7 吸水比 W_{ab} に基づく推定添加量と室内配合試験による添加量の比較

(3) 施工方法

本工事では、PS 灰系改質材を用いて連続的に改質できるシステムで施工を行った (**図 8.8**)。本システムは、単軸式の連続スクリーミキサーを採用し (**図 8.9** 参照)、原土 (浚渫土) と PS 灰系改質材の十分な攪拌混合により改質土の安定した品質を確保した。



図 8.8 瞬時改質プラント全景⁴⁾

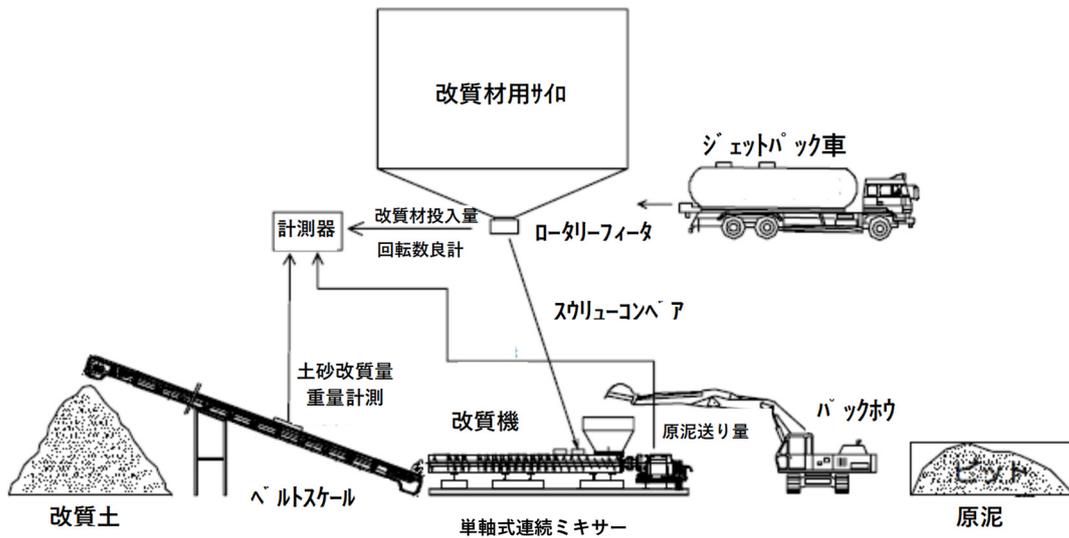


図 8.9 自動スクリー式改質機の全体概略⁷⁾

次に改質土の活用としては、田畑や校庭の嵩上げといった構造物自体の強度より環境基準の適合性が重要となるものから始め、**図 7.8**による品質管理フローに従い、現場においてコーンペネトロメータを用いて改質土の品質を確認しながら宅地造成や盛土に対しての構築工事を実施した。



(a) 大型土のうの設置



(b) 改質土投入，片押し排水ブル転施工



(c) 被覆土後，第1期施工完了



(d) 第2期施工状況



(e) 土留め壁による拘束と表面流出対策

図 8.10 施工状況

改質土の最終目標として湖内傾斜護岸施工を行った。図 8.10 に施工状況を示す。図 8.10(a) に示すように、まず既設護岸に近い約 3m 部分までの位置に大型土のうで仕切を設けて盛土長手方向の両サイドを拘束条件とした第 1 期施工を行った。ここでは、湖水の仕切り内に改質土を投入し、ブルドーザによる片押し施工(図 8.10(b))で排水させながらブル転圧して盛土のトラフィカビリティを確保している。

最終的に表面は、図 8.10(c) に示すように被覆土で覆い第 1 期施工を完了した。その後数

か月の間、盛土周囲の仕切りから処理土の再泥化流出は認められず、盛土上を重機運行することで安定性低下も生じていないことから湖岸盛土に十分適用できるものと判断して第 2 期施工へ移行した。第 2 期施工 (図 8.10(d)) では、既設護岸から約 12m の長手方向に捨石、盛土周囲にも土留め壁による仕切を設け、被覆土、砕石による表面流出対策 (図 8.10(e)) も行いながら、処理土の仕切り内投入、片押し排水によるブル転圧造成方法を採用した。

図 8.11 に改質土による湖内傾斜護岸の完成状況を示す。



図 8.11 改質土で構築した湖内傾斜護岸(渚護岸)⁸⁾

(4) 品質管理と水中安定性の検証

1) 品質管理

図 8.12 は、2003 年 3 月～2006 年 2 月までの湖内傾斜護岸構築前の 2 年半の間に 20 回実施した事前室内配合試験結果 ($q_c=500\text{kN/m}^2$ を満足するのに必要な添加量と浚渫土の含水比の関係) と、同期間中にプラントで改質した $80,000\text{m}^3$ の浚渫土に対して 59 回実施した現場品質管理試験としての $q_c=500\text{kN/m}^2$ 以上を満足するのに必要な添加量と浚渫土の含水比の関係である。また同図には、式 (6.1) の推定式から試算した含水比と必要添加量の関係も直線で示している。

図 8.12 に示すように室内配合試験結果の必要添加量と式 (6.1) による推定式から求めた必要添加量は概ね同じ値である。一方、現場品質管理試験の必要添加量は、室内配合試験結果の必要添加量や式 (6.1) による必要添加量より若干少ない。試料数の多い含水比 $w=175\sim 225\%$ の範囲では、現場品質管理試験の必要添加量が、室内配合試験結果の必要添加量や式 (6.1) による推定式から求めた必要添加量より 10%～20%程度少ない。この事実から改質土の(現場/室内)強度比 $R=1.0$ で十分と判断した。6.3(3)強度比 R の設定に記載したようにプラント施工の場合、均一混合性能も高いことから強度比 R は一般の 0.5 より大きい 0.7

～0.8 を用いられることが多く、さらに瞬時改質用の自動スクリー式改質システムでは、目標強度 q_c を満足するための日常の品質管理 (図 7.8) においても迅速なフィードバックが可能となること、さらに実際の施工では養生効果などが加味されるため、図 8.12 のような結果になったものと考えられる。

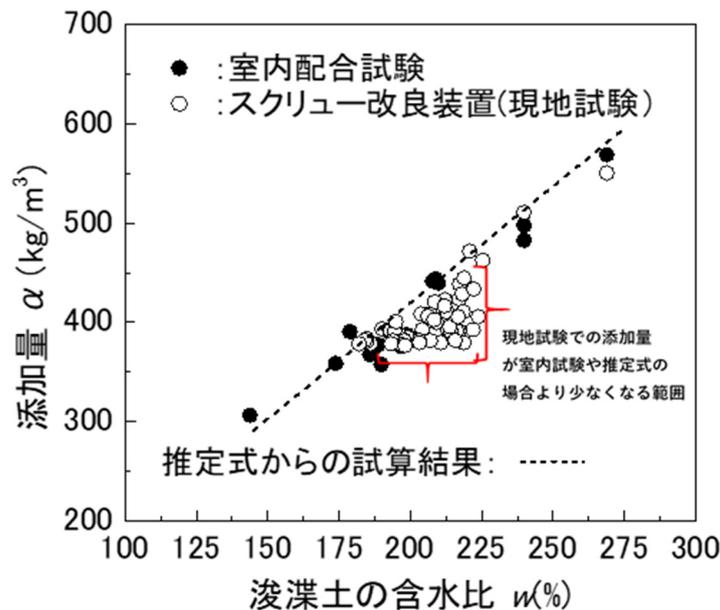


図 8.12 現場品質管理結果と室内試験結果による必要添加量の比較 ⁸⁾に加筆

2) 水中安定性の検証

本工事のような水中盛土に PS 灰系改質土を使用することは、初めての試みであった。そのため、瞬時改質土の再泥化が起きないことをまずは室内試験で確認した。傾斜護岸に使用する改質土は、水中でも拘束状態のモールド内であれば再泥化せず水中 14 日養生頃から強度は安定して 28 日養生の間に 1.27 倍の強度で落ち着いた (図 8.13)。

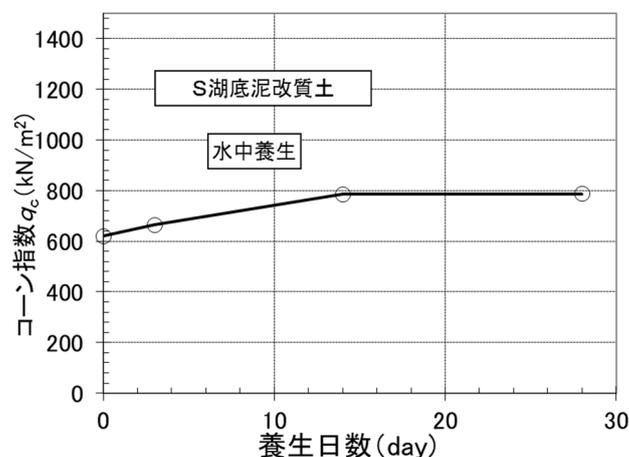


図 8.13 室内試験による改質土の水中安定性の検証

改質の対象とした湖内底泥は、元々湖内に浮泥として存在し、その環境浄化対策として実施した浚渫工事で発生した泥土である。改質土を湖内に戻すとなると環境問題に関する富栄養化対策はもとより、改質土の再泥化が起きず長期耐久性のあることを確認する必要があった。室内試験と実施工の水中条件での大きな違いは、拘束条件にある。実施工では、大型土のうや土留め壁による仕切りを設け、被覆土、砕石による表面流出対策を行うことで改質土の水中条件化での再泥化を防いだが、室内試験のように完全な拘束条件が再現されているわけではなく、再泥化による改質土の流出が懸念された。

改質土砂の再泥化流出有無の短期的な検証は重機走行による盛土のトラフィカビリティ確保と盛土周辺の目視確認により実施した。また長期的には護岸完成半年後に実施した追跡調査により検証した。対象部を第1期の斜面部、第2期の平坦部とし、それぞれの水中安定性を検証するため、追跡調査は図 8.14 に示す地点 No.1~30 で行った。各地点でスウェーデン式貫入試験とコーンペネトロメータを併用して実施して q_{cs} の深度分布を求めるとともに、改質土の層厚確認を行った。また各地点の q_{cs} をコーン指数 q_c に換算した。追跡調査の結果を表 8.3 に示す。同表では各地点について深度 10cm 間隔で求めた換算コーン指数 q_c' の平均値を表している。No.19 地点を除きいずれも所定の $q_c=500\text{kN/m}^2$ を確保しており、PS 灰系改質土は、水中でも再泥化せず、安定していることが確認できた。

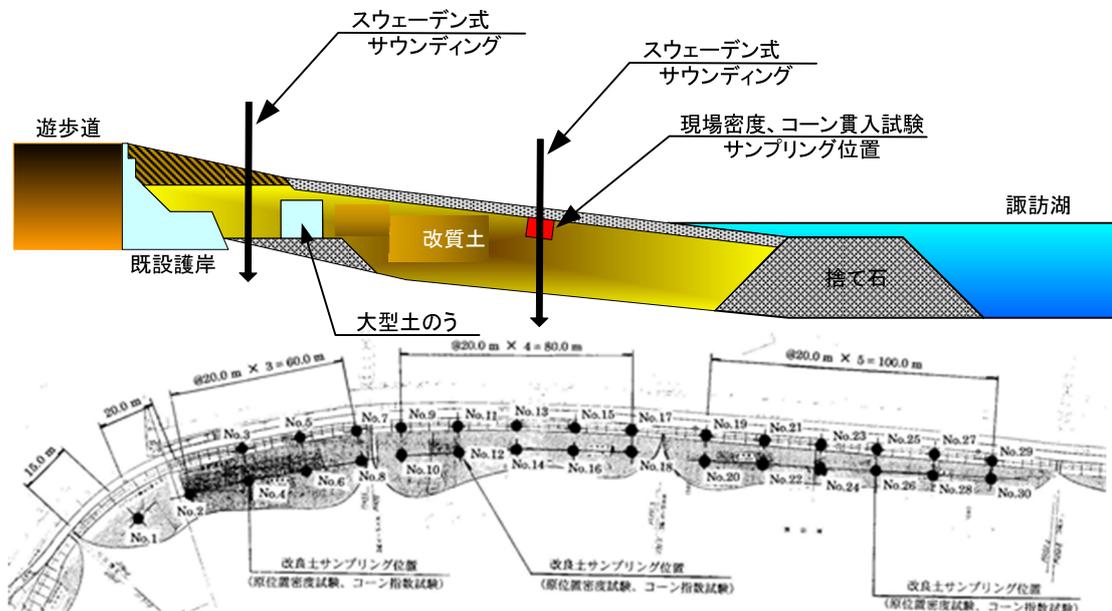


図 8.14 傾斜護岸の調査位置図³⁾

表 8.3 護岸完成半年後の改質土のコーン指数測定結果³⁾

位置		q_{cs} KN/m ²	q_c' KN/m ²	
平坦部	西の島	NO.1	788	1733
		NO.2	666	1465
		NO.4	660	1452
		NO.6	561	1235
		NO.8	368	809
	中の島	NO.10	315	693
		NO.12	368	809
		NO.14	355	781
		NO.16	336	739
		NO.18	467	1026
	東の島	NO.20	279	615
		NO.22	264	582
		NO.24	295	649
		NO.26	259	635
		NO.28	386	850
	NO.30	348	766	
傾斜部	西の島	NO.3	294	647
		NO.5	268	589
		NO.7	280	615
	中の島	NO.9	337	740
		NO.11	416	916
		NO.13	488	1073
		NO.15	493	1085
		NO.17	379	833
	東の島	NO.19	212	466
		NO.21	445	979
		NO.23	335	737
		NO.25	308	679
		NO.27	323	711
	NO.29	371	815	
平均値			857	

参考文献

- 1) 泥土リサイクル協会：<http://www.deido-recycling.jp/recycle/recycle03.htm>, 2021.
- 2) 畑野俊久, 斎藤悦郎, 石山雄三：諏訪湖におけるしゅんせつ土の有効利用, 雑誌 HEDORO NO.91, pp.43-50, 2004.
- 3) 株式会社フジタ FT マッドキラーの技術資料および使用事例 ver3.1, pp.1-37, 2012.4
- 4) 望月美登志, 斎藤悦郎, 吉野広司, 谷和夫, 大向直樹, 久保田元也：地盤工学会地盤環境賞を受賞して, 土と基礎, 55-8, 2007.8, pp.64
- 5) 今井五郎, 加藤雄介, 望月美登志, 吉野広司, 斎藤悦郎：泥土改良方法および泥土改の材の添加率評価方法, 特開 2006-326422 号公報, 2006.
- 6) 望月美登志：焼却方法が異なる各種 PS 灰の吸水性評価と泥土改質への適用性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 76, No. 2, pp. 155-166, 2019.

- 7) 望月美登志, 中野浩之 : PS 灰の利活用の現状と課題, 基礎工, Vol. 45, No.9, pp.31, 2017.
- 8) 吉野広司, 畑野俊久, 斉藤悦郎, 望月美登志, 石山雄三 : 湖沼底泥の改良と有効利用, 河川技術論文集, 第 12 卷, pp. 353-358, 2006.6

また、含水比の高い原土に改質材を添加すると乾燥状態にある改質材の固体分だけ含水比が低下する（図中の②の工程）。加えて原土の余剰水分を物理・化学的吸水により拘束することで土が改質され、ボロボロとほぐれやすくなる。この改質土を解きほぐすことで土粒子表面の水分の乾燥が促進され（図中の③の工程）、そのまま仮置きすることで曝気効果により含水比がさらに低下して締固めが有効な状態になる（図中の④の工程）。このようにPS灰系改質材の吸水効果とほぐし養生効果を併用することで、原土を天日乾燥する場合のような大きな労力と長い養生時間を必要としない改質が可能となる。

(2) 対象土質

河川堤防やため池の築堤に利用される土質材料は、粒径幅の広い締固めが有効な良質土を用いるのが一般的である。しかしながら、近年こうした良質土の入手が困難になり、現地発生土を改質して利用する機会が増えている。発生土を築堤材料として利用する際、自然含水比が最適含水比付近にあれば、そのまま締固めを行うことができる。一方、発生土に比較的多くの細粒分（シルト・粘土分）が含まれる場合、自然含水比が最適含水比よりも大きく湿潤側にずれているケースが見受けられる。このような発生土では、掘削や運搬、あるいは敷均し・転圧によって土が乱されて軟弱化し、締固めによる施工が困難になる。

本章では、粒径幅は比較的広く粒度としては適切であるが、含水比が高いため、締固めによる施工が困難な**細粒分混じり砂礫や砂礫質細粒土**などを改質の対象とする。

9.2 適用事例

PS 灰系改質材によるため池改修工事の例を示す。対象の原土は現地で発生する砂礫質細粒土であり、改質土はため池堤体の補強に利用されている。

(1) 工事概要

- ・ ため池の改修土量（改質対象土量） 約6,000m³
- ・ 土質性状 砂礫質細粒土
- ・ 要求品質 施工時： $q_c \geq 500 \text{ kN/m}^2$
ため池完成時： $c' = 9 \text{ kN/m}^2$ 以上、 $\phi' = 34^\circ$ 以上

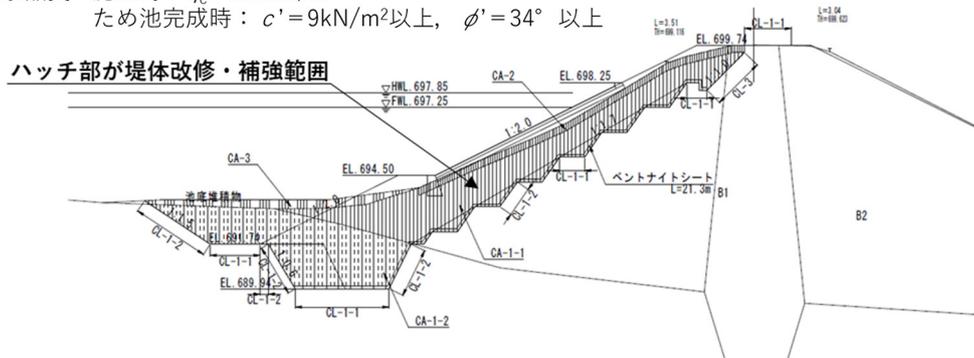


図 9.2 ため池堤体改修計画図

老朽化したため池を改修し、破堤による下流域への被害を未然に防止するため、ため池堤体の改質補強に PS 灰系改質材が適用された (図 9.2)。築堤材として選定された砂礫質細粒土は高含水状態にあり、天日乾燥で締固めのできる含水比まで低下させることは困難であると判断され、高い吸水性を有する PS 灰系改質材が採用された。また、土の高 pH 化を回避することも採用要件のひとつとなった。

(2) 室内配合試験

堤体補強に供する土質材料の試料採取から堤体の安定計算に必要な強度定数 (c' , ϕ') を三軸試験で求めるまでの作業の流れを図 9.3 に示す。

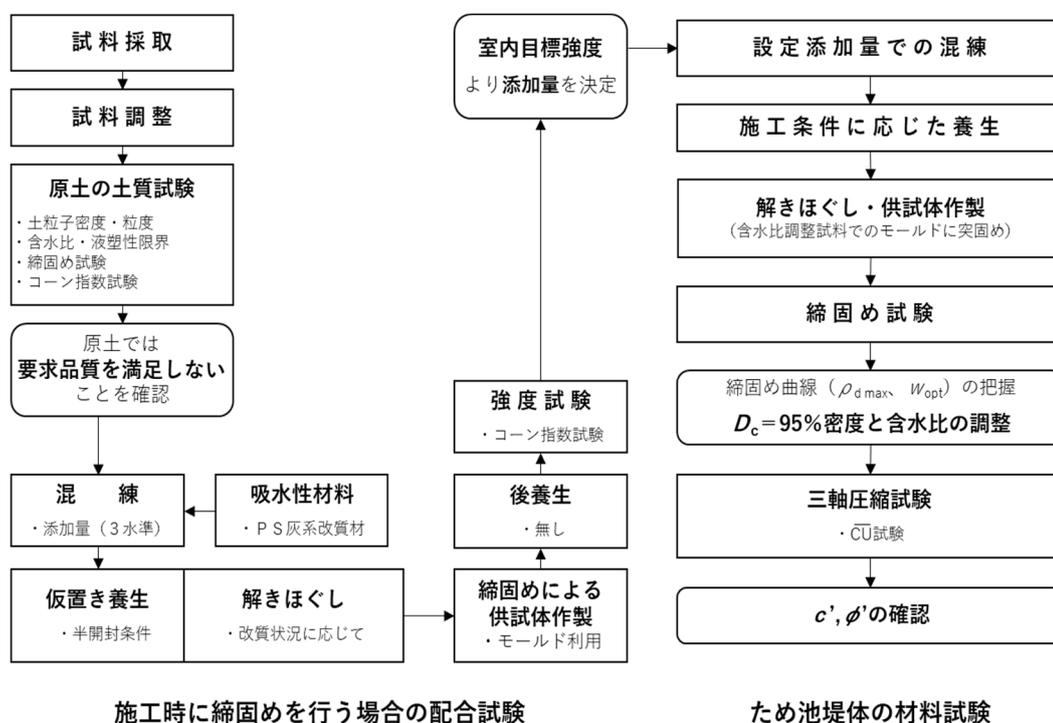


図 9.3 配合試験と改質土の材料試験 (強度試験) の流れ

1) 採取試料と未改質土の土質試験

現地にて堤体の改修に使用する原土 (発生土) の確認を行ったところ、ザラザラした塑性状の土 (低含水試料) と、ドロドロした泥土状の土 (高含水試料) の 2 種類が同程度の割合で存在したため、両方の試料を採取した。採取試料は含水状態が異なるものの同一の原土であると判断し、混合試料で土質試験を実施した。ただし、含水比、湿潤密度、コーン指数試験については低含水試料と高含水試料のそれぞれで試験を実施した。土質試験の結果を表 9.1 および図 9.4 に示す。液性限界 w_L は 73.4%、塑性限界 w_p は 42.0% であり、高含水試料は液性限界付近の試料であった。対象土はシルト粘土分を 55.3% 含む、砂礫質細粒土である。

表 9.1 採取試料の土質試験結果

区 分		採取試料
含水比		65.0~73.5
湿潤密度 (g/cm ³)		1.55~1.57
土粒子密度 (g/cm ³)		2.791
粒度組成 (%)	礫	3.0
	砂	40.7
	シルト	24.7
	粘土	31.6
液性限界 (%)		73.4
塑性限界 (%)		42.0
塑性指数		31.4
コーン指数 (kN/m ²)		12~38

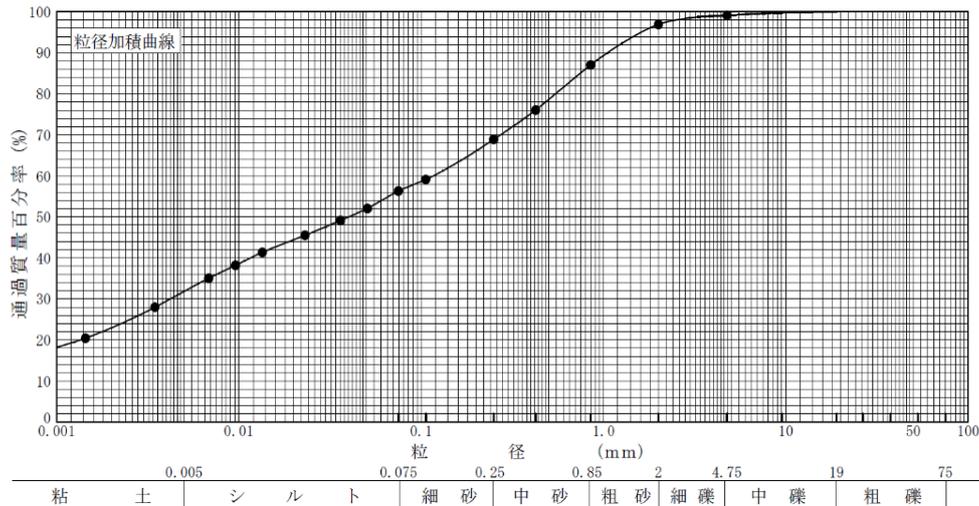


図 9.4 採取試料の粒径加積曲線

改質土との締固め特性を比較するため、原土による土の締固め試験 (A-c 法) を実施した。また、試料の強度を確認するため、突固めた試料を用いたコーン指数試験 (JIS A 1228) も併せて実施している (図 9.5)。

最適含水比 w_{opt} は 40.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.231g/cm^3 である。塑性限界 w_p は 42.0% であるからそれよりも 1.5% 低下した値が最適含水比となっている。現場で採取した原土の含水比は、65.0%~73.5% と液性限界に近い含水状態であり、コーン指数も 200kN/m^2 を大きく下回っている (図 9.5 の ● 印の範囲)。また原土のコーン指数が 200kN/m^2 となる含水比は 47.5% であり、これ以上の含水比では締固めによる施工が困難である (図中の黄色の網掛

け部の施工不良範囲)。この原土を締固めのできる含水比に調整するには、含水比を約 20% 下げる必要がある。

同図に示す含水比とコーン指数の結果から、原土のままではため池の築堤補強材料として使用することができないとの判断に至った。

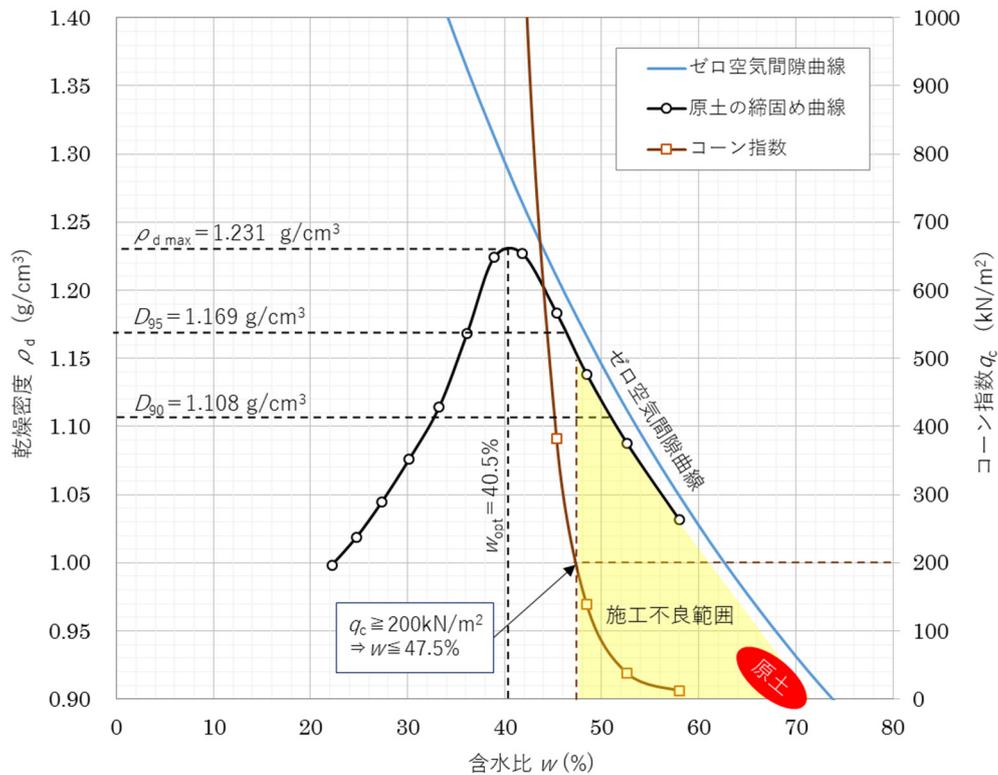


図 9.5 原土の締固め特性と各含水比におけるコーン指数測定結果

2) 室内目標強度の設定

対象土をため池の築堤材として利用するにあたり、締固めの効果が高い材料に改質する必要がある。当該工事では、施工中の重機のトラフィカビリティを確保するため、施工時の目標強度を表 6.3 に示す 15t 級中型普通ブルドーザ相当が作業できる強度とし、**コーン指数 $q_c=500\text{kN/m}^2$ を現場目標強度**に設定した。配合試験では、通常、現場目標強度を（現場／室内）強度比で除して室内試験の目標強度を求める。改質材を粉体で添加し**バックホウ混合することを考慮し、（現場／室内）強度比は 0.5 に設定した**。したがって、室内試験における目標強度は、以下のとおりとなる。

室内目標強度：コーン指数 $q_c=500/0.5=1000\text{kN/m}^2$

表 9.2 配合試験の試験条件

項目	仕様・規格・条件等
配合試験料	高含水試験料 ($w=73.5\%$)
改質材添加量	50, 100, 150kg/m ³
配合後の養生条件	半開封 (穴をあけた袋をかぶせ, 暗所に保管)
配合後の養生日数	1, 3, 7日後
解きほぐしと曝気	養生期間中に1回のみ実施 (曝気はしない)
強度の確認	コーン指数試験 (JIS A 1228)
含水比の確認	土の含水量試験 (JIS A 1203)

3) 添加量と養生条件の設定

採取した原土は高含水試験料と低含水試験料の2種類であるが、条件の悪いケースを想定して高含水試験料を用いて表 9.2 に示す条件で配合試験を実施した。なお、コーン試験は締固めた直後に実施した。

4) コーン指数試験結果

締固めた土のコーン指数試験結果を図 9.6 に示す。コーン指数が 1000kN/m² となる条件は、養生日数 7 日で添加量 $\alpha=109\text{kg/m}^3$ となった。現場での施工条件も 7 日程度の仮置き養生期間を確保することは可能であることから設計添加量 α は 109kg/m³ とした。

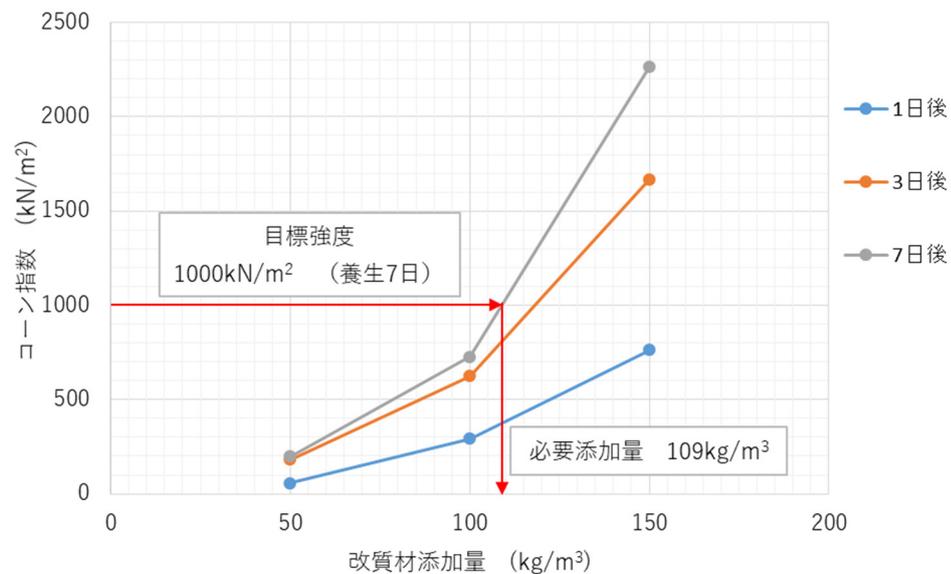


図 9.6 添加量とコーン試験の関係

表 9.3 W_{ab} を考慮した配合設計による必要配合量の算出結果

項 目	単 位	計 算 値
原土の改質前の当初含水比 w_0	%	73.5
改質後の含水比 w	%	64.8
原土の改質目標含水比 w_{wet} ($D_c=95\%$)	%	46.0
湿潤密度 ρ_t	g/cm ³	1.55
PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} (養生 3 日後)	%	109
PS 灰系改質材の添加率 A	%	13.41
改質土の補正含水比 w^*	%	46.0
配合計算から求まる必要添加量	kg/m ³	120
室内配合試験で決定した設計添加量 α	kg/m ³	109

5) ふるい法の吸水比 W_{ab} による配合設計結果との比較

室内配合試験で得られた設計添加量 α が適切な設定となっていることを確認するため、6.5(3)に示す吸水比 W_{ab} を考慮した配合設計手法で必要添加量を求めた。その結果を表 9.3 に示す。

改質目標含水比を $D_c=95\%$ で締固めのできる湿潤側の最大含水比 $w_{wet}=46\%$ (図 9.5 参照) に設定した。また、PS 灰系改質材のふるい法による試験から求まる吸水比 W_{ab} を 109% とした (図 3.7 の 72 時間養生後の値を採用)。PS 灰系改質材による含水比 w の低減効果を補正含水比 w^* で表し、 $w^*=w_{wet}$ となる改質材の添加率 A より必要添加量を算出した。

表 9.3 に示すように、必要添加量は 120kg/m³ となった。室内配合試験で決定した設計添加量 $\alpha = 109\text{kg/m}^3$ と概ね一致する結果となり、 W_{ab} による配合設計手法との整合性が確認された。

表 9.4 土質試験の項目と改質材の配合条件

試験項目	試料の含水比	改質材添加量	養生条件	養生日数
土粒子の密度試験	66.7%	109kg/m ³	開封養生	7 日
締固め試験				
三軸圧縮試験($\bar{C}U$)				

(3) 改質土の締固め・強度特性評価

配合試験により決定した設計添加量 α と養生日数 7 日をもとに、改質材配合後の改質土で土質試験を実施した。現場では高含水比原土は低含水比原土と混合するという施工条件を考

慮し、土質試験に供する試料は高含水と低含水の混合試料を使用した。試験項目とPS灰系改質材の配合条件を表9.4に示す。また、「ほぐし養生」状態を模擬するため、試験用の試料は改質材配合後に「解きほぐす」とともに袋をかぶせない状態で気中にさらす「開封養生」とした。

1) 改質土の締固め試験結果

改質土の土粒子密度は 2.699 g/cm^3 であった。原土の土粒子密度は 2.691 g/cm^3 であり、改質材を添加しても変化量は 0.008 g/cm^3 とわずかである。

締固め試験用の試料は A-c 法で試験を実施した。改質土の締固め試験結果を図9.7に示す。改質土の最適含水比 w_{opt} は 44.8% 、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.144 g/cm^3 であり、原土と比較すると w_{opt} が 4.3% 増加し、 ρ_{dmax} が 0.087 g/cm^3 低下した。原土に比べて w_{opt} が増加する一方で ρ_{dmax} が低下し、吸水性材料を用いた改質材の特徴が表れた結果となっている（図中の①の改質効果）。また、改質土の締固め試験では最も湿潤側の試料 ($w=58.9\%$) でも、締固めができる状態になるまで改質による改善効果が確認されており、施工可能な含水比の上限値が原土に比べて 11.4% 以上も高くなっている（図中の黄色網掛けの施工不良範囲）。さらに、 66.7% の原土に対して、 $D_c=95\%$ での湿潤側の含水比 $w_{\text{wet}}=52.7\%$ まで含水比が低下すれば締固めの管理基準を満足することになる（図中の②+③の部分、図9.1参照）。

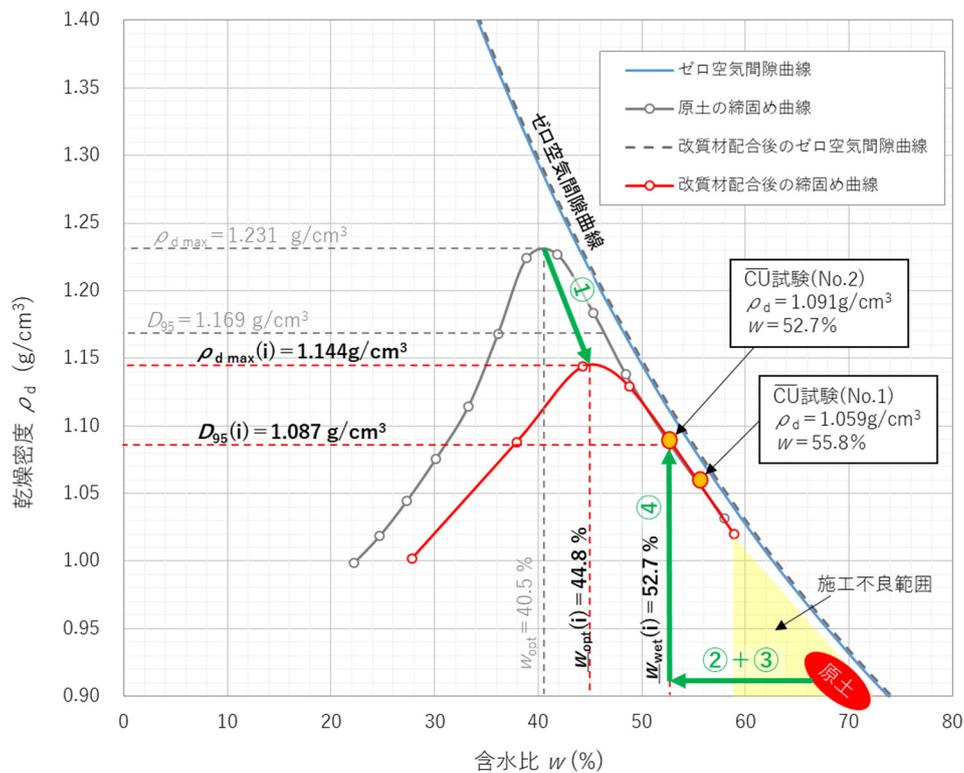


図 9.7 改質材土の締固め曲線と改質効果の説明図

2) 改質材配合後の三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験の供試体は、改質土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} に対して湿潤側で $D_c=95\%$ とする必要がある (図 9.8)¹⁾。そこで、締固め度の異なる 2 つの供試体 ($D_c=92.7\%$; No.1 および $D_c=95.4\%$; No.2, 図 9.7 参照) を準備し、圧密非排水三軸圧縮試験 (CU) に供した。

その結果を図 9.9 に示す。No.1 供試体では有効粘着力 $c'=1.5\text{kN/m}^2$ 、有効せん断抵抗角 $\phi'=38.9^\circ$ となり、No.2 供試体では $c'=17.2\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'=33.1^\circ$ という結果が得られた。2 つの三軸試験の結果と設計強度の破壊包絡線を比較すると図 9.10 のようになる。 D_c 値がより大きい No.2 の方が大きなせん断強度を発揮することが同図からわかる。また、No.2 の破壊包絡線は広範囲な応力レベルでせん断強度が設計値を上回っており、実際の安定計算でも安全率 1.2 以上を確保できる結果となった。これに対して、No.1 の結果による c' と ϕ' を用いた安定計算では、安全率 1.2 をわずかながら下回る結果であった。

また、図 9.9 に示す No.1 と No.2 の応力～ひずみ関係や有効応力経路を比較しても、No.2 の方が No.1 よりも過剰間隙水圧の発生が抑えられつつ、延性的な挙動を維持していることがわかる。

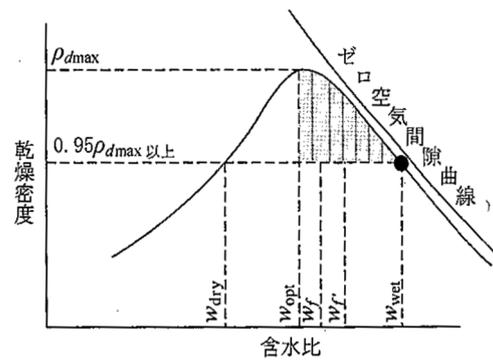


図 9.8 三軸供試体の作製条件¹⁾

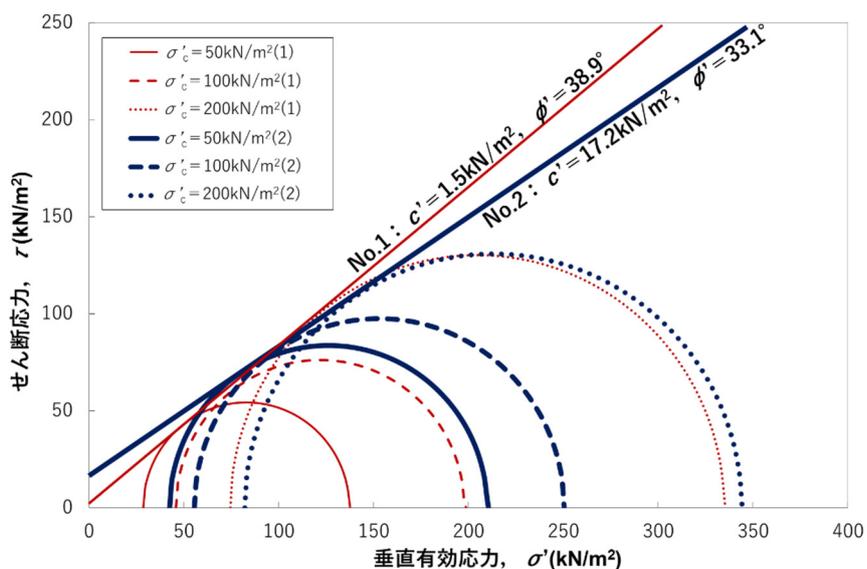
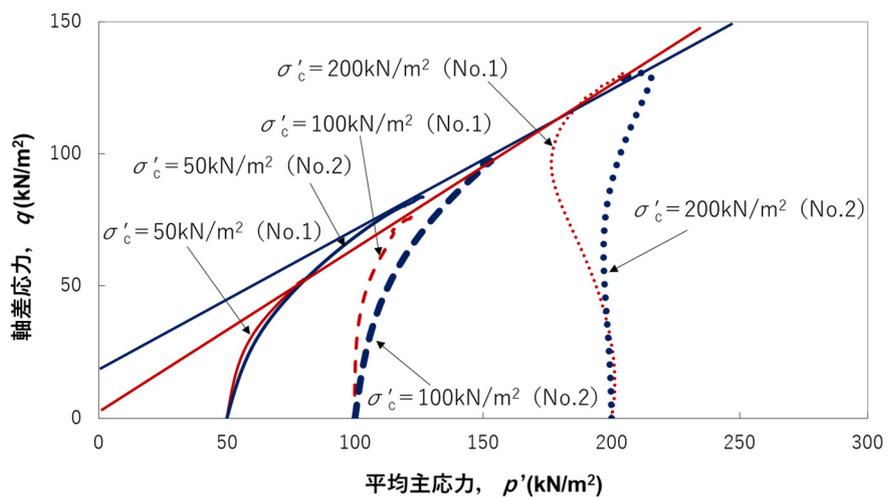
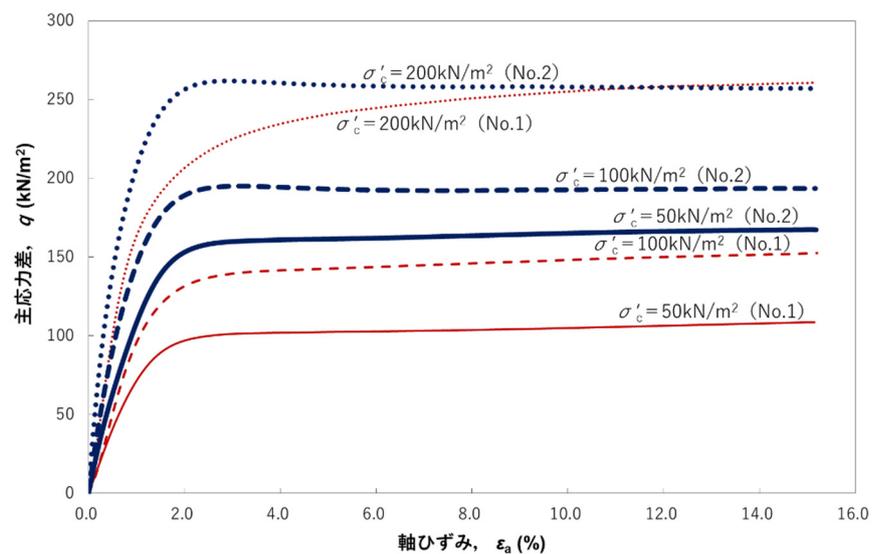


図 9.9 CU試験の結果 (No.1 と No.2 の比較)

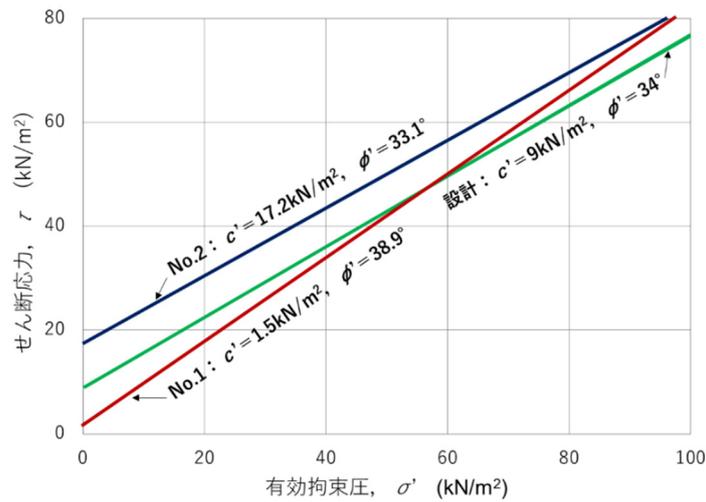


図 9.10 破壊包絡線の比較

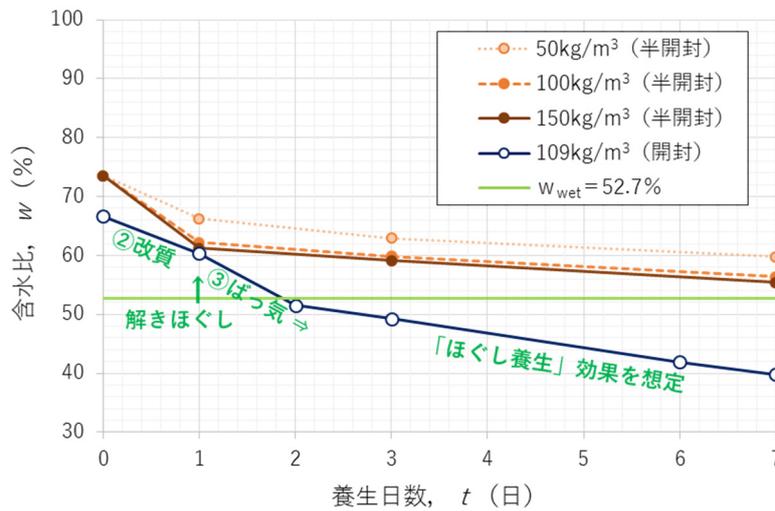


図 9.11 改質土（配合試料）の養生日数と含水比の関係

3) 改質土の養生条件等の違いによる含水比低減効果の比較

表 9.2 および表 9.4 に示す配合試験に供した試料を用いて、養生条件（半開封と開封）の違いによる含水比の経時変化を比較した（図 9.11）。

初期含水比 73.5% の高含水試料では半開放養生としているため、養生日数の経過に伴う含水比の低下量が少なく、改質材添加量が 150 kg/m³ のケースでも含水比は管理目標値 w_{wet} の 52.7% 以下に至らない。この条件で含水比を 52.7% 以下にするためには、養生日数を伸ばすかさらに改質材の配合量を増やす必要がある。

一方、改質材を 109 kg/m³ を配合した場合は、わずか 2 日足らずで含水比が 52.7% 以下となった。このケースでは、配合 1 日後に固まりの解きほぐしをおこなうとともにそれ以降は試料の曝気攪拌を 1 日 1 回行う、「ほぐし養生」を模擬した「開封条件」での養生としている。すなわち、仮置き養生中に、現地で晴天が続く乾燥状態をねらって天地返しなどの作業

を行うことを想定したものである。また初期含水比は 66.7%であり、他の試料よりも小さい。初期含水比を下げるとともに養生環境を良くすることで含水比の低下が促進されることがわかる。

図中には**図 9.7** に記した**②改質材の添加に伴う含水比の低下**+**③曝気による水分の蒸発**に対応する含水比の変化傾向も併せて示している。配合直後は改質材添加（固体分の増加）により含水比が低下し、時間経過とともに曝気による乾燥が促進される。特に、解きほぐしと曝気攪拌による含水比低下の寄与分が大きい。仮置きヤードのスペースが確保でき、仮置き養生の期間が確保できる場合には、積極的な解きほぐしを兼ねた曝気攪拌が有効である。



(a) バックホウによる改質



(b) シート養生



(c) 撒き出し・敷均し



(d) 振動ローラによる転圧



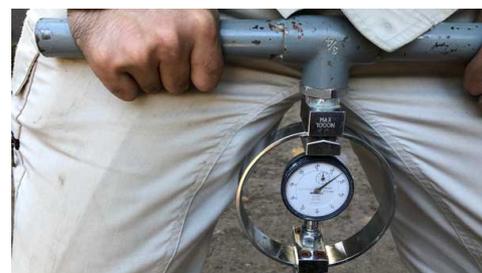
(e) 仕上がり



(f) RI 計器による締固め管理



(g) ポータブルコーン貫入試験



(h) 地耐力の確認 $q_c=1080\text{kN/m}^2$

図 9.12 試験施工および施工管理の状況

(4) 施工と品質管理

図 9.12 に現場で実施した試験施工とその後の施工管理の状況を示す。

試験施工に先立ち原土に PS 灰系改質材を所定量 (109kg/m^3) 添加し、バックホウ混合で改質を施した (図 9.12 (a)). その改質土を約 7 日間仮置き養生した (同図 (b)). 試験施工当日は、改質土を層厚 23cm (仕上がり厚 20cm) で撒き出しながら敷均し (同図 (c)), 10t 級振動ローラー (起振力 26t) で 4 回, 6 回, 8 回転圧して沈下量、締固め度、含水比等を測定した (同図 (d) ~ (f)). その結果、転圧回数 5 回以上で地表面が乱され過転圧となることが判明したため、転圧機械 (10t 振動ローラ) 使用時の転圧回数は 4 回とした。また狭隘部で転圧後にポータブル貫入試験を実施した (同図 (g)). その結果、コーン指数 $q_c=1080\text{kN/m}^2$ が得られており、施工中のトラフィカビリティ確保のための目標強度 $q_c=500\text{kN/m}^2$ を十分満足することが確認された (同図 (h)).

現場で実施した RI 測定データを締固め曲線上にプロットすると図 9.13 のような結果が得られた。各測定点の平均値は、締固め度 $D_c \geq 95\%$ 、空気間隙率 $v_a \approx 2\%$ 、飽和度 $S_r \approx 95\%$ であり、適切な密度管理が行われているものと考えられる。

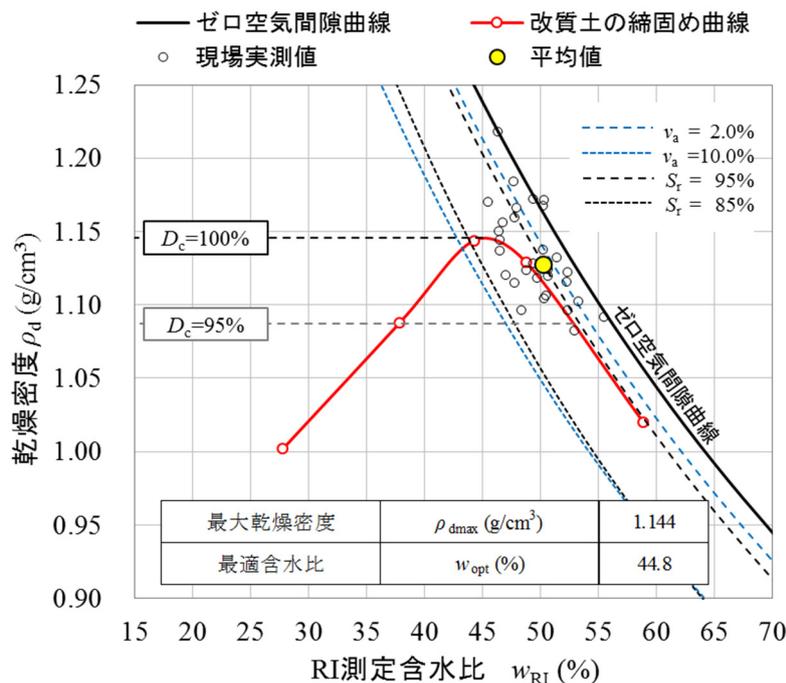


図 9.13 現場改質土の締固め管理図²⁾

参考文献

- 1) 農業農村工学会：土地改良事業設計指針「ため池整備」, p14, 2015.
- 2) 仁平学, 山内裕元：PS 灰系改質土の RI 法による締固め管理と現地適用性の検討, 第 56 回地盤工学研究発表会に投稿中, 2021.

おわりに

「無機系吸水性材料を用いた土の改質技術の利活用に関する研究委員会」は、(公社)地盤工学会関東支部の研究委員会として令和2年度に発足しました。研究委員会では、PS灰のような焼却灰あるいは石膏などの無機系吸水性材料を利用した改質材を取り上げ、改質土を地盤構造物に利活用する際の課題を研究・実務の両面から行い、その成果を現場に還元することを目的としております。初年はPS灰を用いた改質材(PS灰系改質材)に着目し、委員会の成果報告として、この「無機系吸水性材料を用いた土の改質技術に関する手引き(暫定版—PS灰系改質材編—)」を取りまとめました。

私の恩師であり、またこの分野に導いてくださった故今井五郎教授(横浜国立大学)が「PS灰の土質材料開発研究検討委員会」委員長として「土質材料としてのPS灰有効利用ガイドライン(案)」を上梓されてから早や27年もの歳月が過ぎました。この間に、PS灰を含めて産業廃棄物に関する世の中の取り組み姿勢や流れが大きく様変わりしました。製紙自体の質の向上に伴い、PS灰の性状も徐々に変化して吸水性材料としての機能が向上するとともに、吸水性能を適切に把握するための調査方法やその活用方法などが精力的に検討されてきました。その結果、上述の有効利用ガイドライン(案)の「PS灰の土質材料としての広範な活用」という目標に対して、本手引き(暫定版)が整備されたことは、PS灰系改質材の開発当初からこの分野に継続的に関わってきたものとして大変な感慨があります。

研究委員会では、PS灰のみならず他の無機系吸水性材料を用いた改質材についても検討をさらに行い、いろいろな無機系吸水性材料に対して、より多くの利活用のケースを想定した「無機系吸水性材料を用いた土の改質技術に関する手引き」に向けて、本手引き(暫定版)を発展させていく所存です。最後に、本手引きが世の中に広く普及し、事例や知見が蓄積されることで、無機系吸水性材料を利用した改質技術の更なる発展に資することを期待いたします。

令和3年3月31日

無機系吸水性材料を用いた土の改質技術の利活用に関する研究委員会
幹事 望月 美登志

