

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
(案)

2024年12月6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

近年, 吸水性材料を用いた改質処理の利用機会が急速に増えてきている. 吸水性材料とは, ペーパースラッジ(PS)灰系改質材のように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ものである. 泥土の搬出・運搬のハンドリング性向上を目的とするだけでなく, 吸水性材料を主成分とした改質材で改質した土(改質土)を, ため池や河川の築堤改修・補強, 廃棄物処分場の延命化, 湖沼生態系の環境修復・改善, などの目的で, “利用できるのであれば積極的に利用したい”というニーズが高まってきている.

しかし改質土を地盤構造物に適用する際には, ①改質材の吸水性能評価と合理的添加率の決定方法, ②設計における改質土の強度の考え方, ③改質土の環境親和性・安全性の評価手法, などの課題が現場で生じている. 改質土を地盤構造物に合理的に活用するためには, 従来の固化処理手法との違いを明確にし, 改質効果の検討などが必要不可欠である.

そこで, 2020年度に地盤工学会関東支部に, 「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」が発足した. PS灰のような焼却灰系改質材, 石膏系改質材などを無機系吸水性材料として取り上げ, 吸水性改質土を地盤構造物に利活用する際の課題解決を研究・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に活動を開始した. 産官学からの意見・情報・知識を集めるとともに, 室内試験・原位置調査を行い, 改質土の物性評価・設計の考え方などを盛り込んだ, 改質土に関する技術の手引き(案)の編集にも取り組んだ.

2021年度には「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—)」の公開を行った. また, 成果普及活動の一環として, 地盤工学会関東支部研究発表会(GeoKanto2021)にて Discussion Session を開催した. 2022年度からはPS灰系改質材から再生石膏系改質材やパーム椰子殻(PKS)焼却灰を用いたバイオマス系改質材へ, 無機系吸水性材料の対象を拡大した. 委員会期間を2024年3月まで1年延長し, ワーキンググループを①共通, ②PS灰系改質材, ③バイオマス(PKS)灰系改質材, ④再生石膏系改質材として, 各吸水性材料や改質土の物性, それらを利活用した現場の事例や課題についてデータ蓄積や情報収集に取り組んだ. それらの委員会活動を通して得られた知見をまとめたものが, 本手引き(案)である.

手引き(案)では, 改質材の吸水機構として物理的吸水と化学的吸水を説明し, さらに改質材の吸水性を評価する手法を紹介している. 含水比の高い土に対して改質材の吸水が土の締め固めしやすさを如何にして向上させるか, また締め固めた改質土の強度や耐久性をどのように合理的に評価するかなどを示している. 無機系吸水性材料を利用した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め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手引き(案)を整備している.

改質材を実際の工事で利用する際に、改質材の吸水特性に応じた工夫ができることも手引き(案)にまとめている。例えば、

①添加直後から締固めが適切に実施でき、かつ必要な性能を満足するように改質する場合（瞬時改質）

②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水分の蒸発を促し、より少ない添加率で締固めができる状態に改質する場合（ほぐし養生改質）などを紹介している。

現場の状況を反映させるために、解きほぐしや締固めを工程の節目とした“前養生”、“中養生”、“後養生”を考慮した室内配合試験のフローや、拘束条件を反映させた乾湿繰返し試験などにも言及している。環境安全性の観点からは、改質土を対象として利用用途の要求事項への適合性を確認することを示している。

持続可能や脱炭素といった社会要請のなかで多様な改質技術が発展しており、限られた委員会活動期間のなかで、当然ながらすべてを手引き(案)に網羅することには至っていない。手引き(案)は、無機系吸水性材料を用いた改質材のうち、PS 灰系改質材、バイオマス(PKS) 灰系改質材、再生石膏系改質材を中心に取り扱い、

【用語の定義および解説】

【共通編】

【PS 灰系改質材編】

【バイオマス(PKS)灰系改質材編】

【再生石膏系改質材編】

で構成される。全体を通してなるべく体系的に改質技術を明示するように努めた。なお、PS 灰系改質材に関する情報の蓄積が先行した関係で、【共通編】で紹介するデータは PS 灰系改質材が中心になっている。今後、PS 灰系改質材以外の改質材についても同様に情報が蓄積されていくことが望まれる。

無機系吸水性材料を用いた改質材の利活用に際して、本手引き(案)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

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
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	前田建設工業株式会社
委員	田中 真弓	鹿島建設株式会社
委員	西川 美穂	一般社団法人泥土リサイクル協会
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	諸富 鉄之助	株式会社大林組
委員	山内 裕元	domi 環境株式会社

■本手引き（案）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

用語の定義および解説

本手引き（案）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

土中の自由水を物理的あるいは化学的に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ること。強度を増加させて土木用改質土を得ることや、コンシステンシーや 3 相状態を改善させて土壌用改質土を得ることなどが改質の目的に含まれる。

改質材

土の改質に用いる材料

改質土

改質材により、性状を改善して品質や機能を高めた土。

改質処理工

原土に改質材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。

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。

バイオマス灰

木質バイオマスを焼却した際に出る残さ。

バイオマス(PKS)灰

パーム椰子殻(PKS)を焼却した際に出る残さ。

再生石膏

建設現場から排出される石膏ボード(廃石膏ボード)を処理したもの。

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改質材。

バイオマス系改質材

バイオマス灰を加工処理などした材料を主な成分とする改質材。

バイオマス(PKS)灰系改質材

パーム椰子殻(PKS)焼却灰を加工処理などした材料を主な成分とする改質材。

再生石膏系改質材

再生石膏を加工処理などした材料を主な成分とする改質材。

PS 灰系改質土

PS 灰系改質材によって改質した土。

バイオマス灰系改質土

バイオマス灰系改質材によって改質した土。

バイオマス(PKS)灰系改質土

バイオマス(PKS)灰系改質材によって改質した土。

再生石膏系改質土

再生石膏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

改質材の周りに存在する自由水分を機械的に加振してふるい落とすことにより、改質材に吸水された拘束水を分離して吸水比を求める方法。

吸引ろ過法

改質材の周りに存在する自由水分を吸引することにより、改質材に吸水され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。

共通編

【 目 次 】

1. 無機系吸水性材料を用いた改質材の用途と適用.....	共通-2
2. 無機系吸水性材料を用いた改質材の種類と特徴.....	共通-8
2.1 改質材の種類.....	共通-8
2.2 粒子密度.....	共通-13
2.3 粒度.....	共通-13
2.4 成分組成と pH.....	共通-15
3. 改質材の吸水特性の評価.....	共通-19
3.1 吸水特性.....	共通-19
3.2 吸水比 W_{ab} の評価.....	共通-21
4. 改質土の特徴.....	共通-31
4.1 コンシステンシー特性.....	共通-31
4.2 粒度特性.....	共通-33
4.3 締固め特性.....	共通-33
4.4 コーン指数.....	共通-38
4.5 三軸圧縮強度と液状化抵抗性.....	共通-46
4.6 透水係数.....	共通-51
4.7 長期安定性.....	共通-54
5. 配合設計の考え方.....	共通-64
5.1 配合設計で対象とする品質評価.....	共通-64
5.2 配合設計の流れ.....	共通-68
5.3 室内配合試験による方法.....	共通-70
5.4 シリンダー法の吸水比 W_{ab} を利用する方法.....	共通-73
5.5 ふるい法の吸水比 W_{ab} を利用する方法.....	共通-77
6. 環境安全性の考え方.....	共通-85
6.1 環境安全性に関する要求品質と検査方法.....	共通-85
6.2 重金属等の溶出特性.....	共通-87
6.3 重金属等の溶出抑制対策例.....	共通-89

1. 無機系吸水性材料を用いた改質材の用途と適用

無機系吸水性材料を用いた改質材の特徴をひとことで表すとすれば、**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 1.1**）。

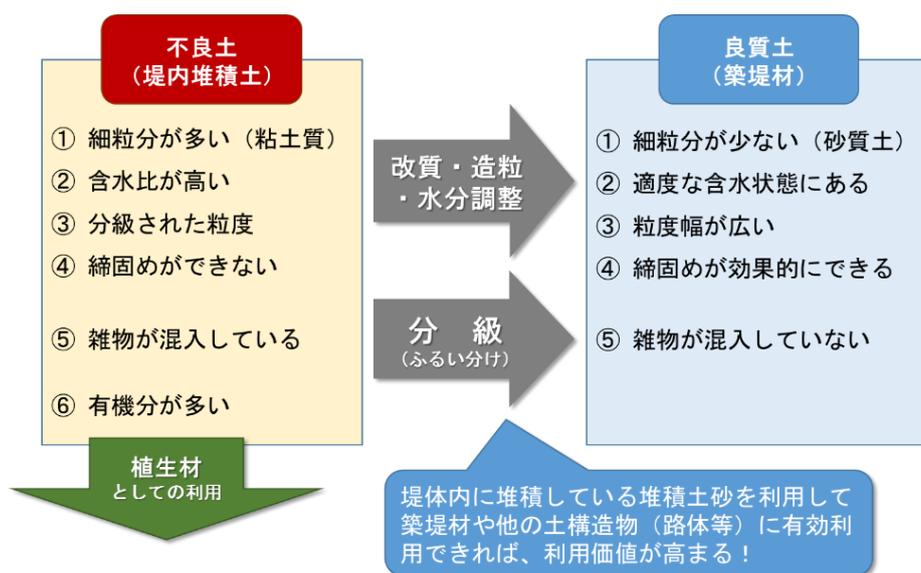


図 1.1 無機系吸水性材料を用いた改質材が果たす役割のイメージ
(池の堤内に堆積した浮泥を例として)

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、無機系吸水性材料を原料・主成分とする改質材を用いることで、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 1.2 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 1.2** 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 1.3 のようになる。改質材に含まれる無機系吸水性材料により、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。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。

図 1.4 と図 1.5 は、含水比を液性限界 w_L に調整した粘土に、ペーパーラッジ(PS)灰を原料・主成分とする PS 灰系改質材を添加した直後の改質土の様子を示している。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。そして、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。図 1.5 は、パーム椰子殻焼却灰を原料・主成分とするバイオマス(PKS)灰を添加した場合であり、同じように土の状態変化が生じている。このように無機系吸水性材料を用いた改質材は、図 1.1 の①～④の課題の解決に貢献できる。

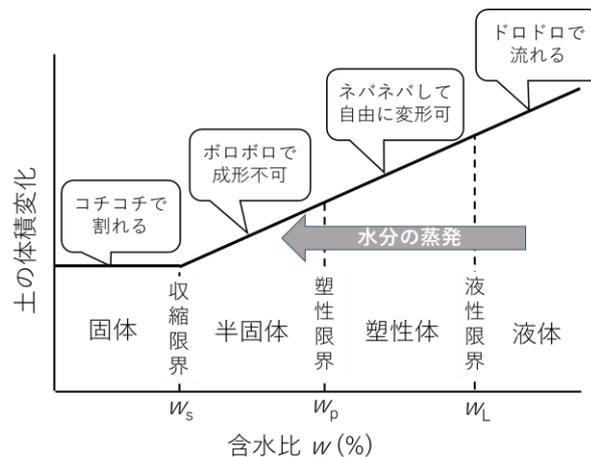


図 1.2 粘性土の状態変化とコンシステンシー限界

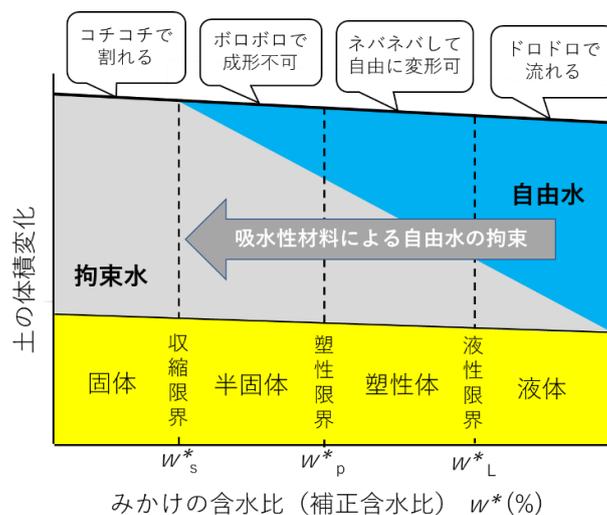


図 1.3 自由水と拘束水の割合変化に伴う土の状態変化とコンシステンシー限界

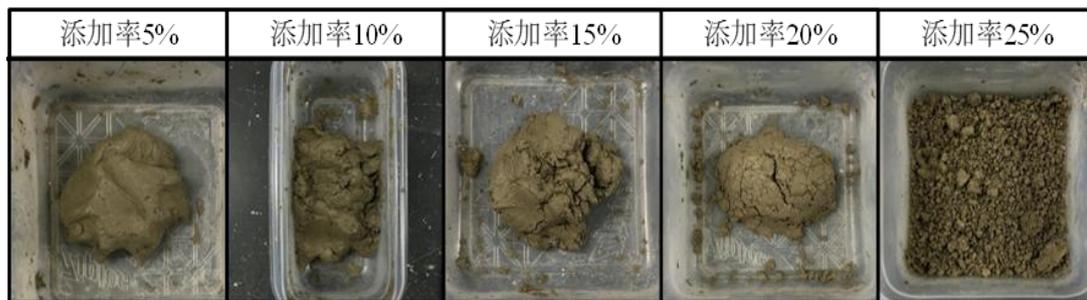


図 1.4 PS 灰系改質材添加直後の改質土の状況¹⁾

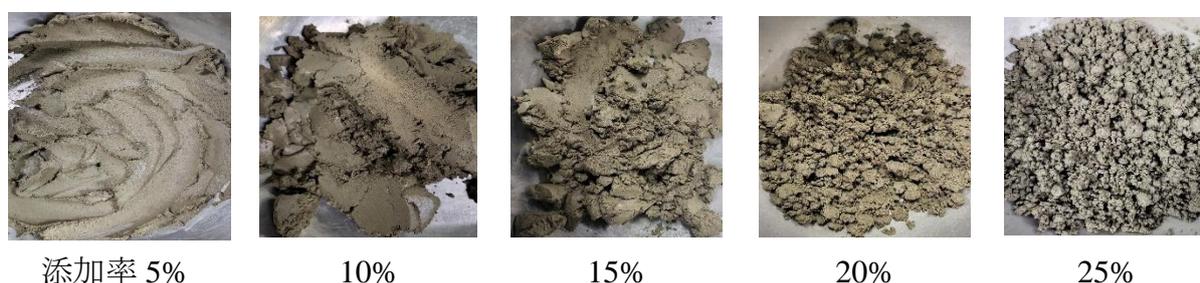


図 1.5 パケイマス(PKS)灰添加直後の改質土の状況²⁾

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(案)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(案)では**無機系吸水材料を用いた改質材に着目し、土の改質技術とその利活用方法をまとめている**。具体的には手引き(案)の共通編では、無機系吸水性材料を用いた改質材の種類と特徴、改質材の吸水特性の評価、改質土の特徴、配合設計や環境安全性の考え方を紹介している。ここでは改質材の吸水メカニズムについて少し触れる。

無機系吸水材料を用いた改質材は、メカニズムの異なる 2 種類の吸水（①改質材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 1.6 は、PS 灰系改質材を例として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。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。また改質材の母材・主成分である無機系吸水材料の違いなどにより、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(案)の共通編では、このような無機系吸水材料を用いた改質材の物理化学特性や吸水特性を説明するとともに、改質材による拘束水量の評価方法を提示する。

無機系吸水材料を用いた改質材により改質した土(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共通編で紹介する。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(案)の共通編では、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 1.7 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。

本手引き(案)の各改質材編では、改質土の配合設計・施工・品質管理方法を詳しく説明し

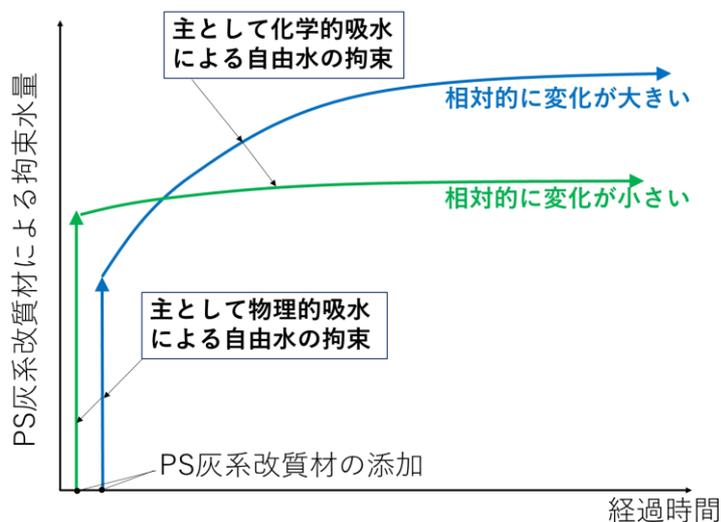


図 1.6 改質材による拘束水量の経時変化

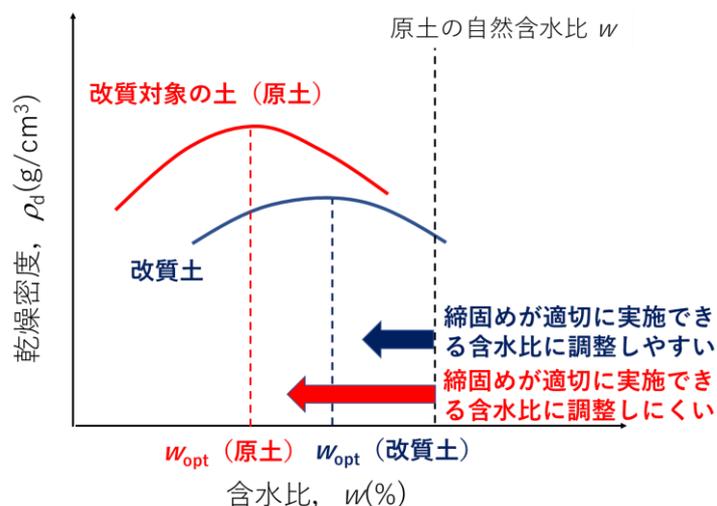


図 1.7 改質土と改質対象の土(原土)の締固め曲線

ている。また**改質材を利用した改質技術の適用例**を紹介する。ここではPS灰系改質材の適用例の中から特徴的なものを二つ紹介したい。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1.8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（**瞬時改質**）。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1.9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。

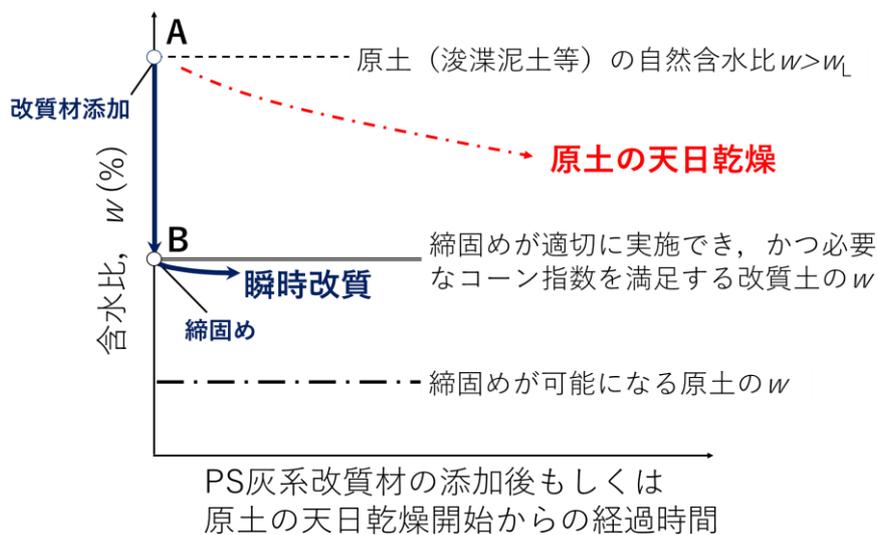


図 1.8 PS 灰系改質材を利用した瞬時改質

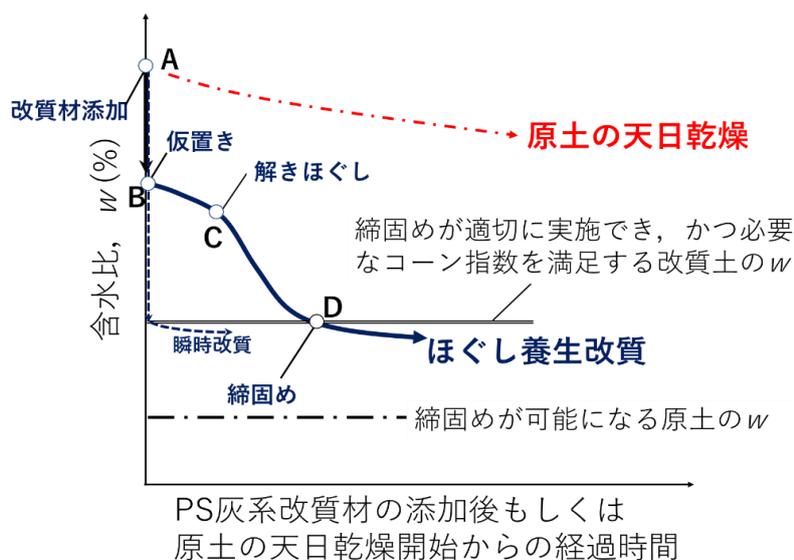


図 1.9 PS 灰系改質材を利用したほぐし養生改質

上記の適用例のように、無機系吸水性材料を母材・主成分とする改質材を用いた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、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次章以降の内容を整備している。

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) Jamil, M. A. B., Hayano, K., Kassa, A., Sekine, R., & Mochizuki, Y. (2024). Curing effects on geotechnical properties of clays treated with palm kernel shell ash and rice husk ash: Insights from water absorption characteristics of stabilizers. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02947.

2. 無機系吸水性材料を用いた改質材の種類と特徴

2.1 改質材の種類

「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(案)では無機系吸水性材料を原料・主成分とする改質材を対象とし、高分子（ポリマー）、セルロース等を利用した有機系吸水性材料を用いた改質材は対象としない。

本手引き(案)では、吸水性材料を用いて地盤材料の性状を改善し品質や機能高めることを「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。

図 2.1 は、本手引き(案)でイメージする、建設発生土を対象とした**処理**、**改質処理**、**安定処理**、またそれらに対応する**処理土**、**改質土**、**安定処理土**の分類を示している。処理には、吸水性材料を用いる方法以外に、脱水、乾燥、圧密、粒度調整などの方法が含まれる。一方、改質処理は化学的・物理的に吸水する材料を用い、【セメント系】や【石灰系】の材料を用いる安定処理を含む。すなわち、吸水性材料を用いた土の改質では、土中の「自由水」を物理的あるいは化学的に「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。強度を増加させて**土木用改質土**を得ることや、コンシステンシーや 3 相状態を改善させて**土壌用改質土**を得ることなどが改質の目的に含まれる。

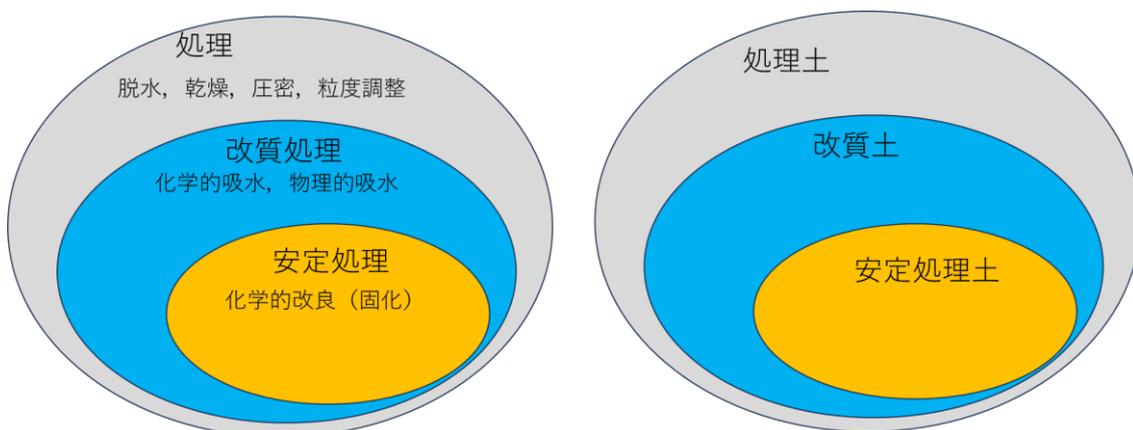


図 2.1 建設発生土を対象とした処理、改質処理、安定処理

表 2.1 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(案)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 2.1 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】【石灰系】 【スラグ系】【酸化マグネシウム系】	無機系	系内改質	固体化	塑性体～半固体, 固結（固体化）
	【石炭灰系】【PS 灰系】 【ハイマス灰系】【再生石膏系】			拘 束	
	【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（案）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、【再生石膏系】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（水和する）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【・・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 灰を主材として他の無機系吸水性材料を助剤として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）¹⁾²⁾、セルロース³⁾⁴⁾⁵⁾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(案)

の検討の対象外とする。

本手引き(案)では、表 2.1 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、バ イマス(PKS)灰系改質材、再生石膏系改質材を中心に扱うものとする。

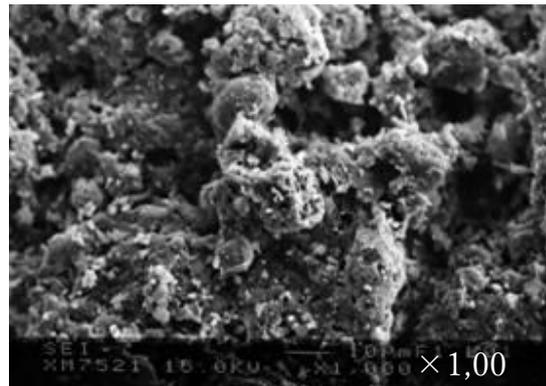
製紙製造工程から発生する汚泥(ペーパーラッジ(PS))を焼却した残さである PS 灰を加工処理することで、安定かつ安全な改質材として製品化したものが、PS 灰系改質材である。図 2.2 は、PS 灰系改質材の全体写真と粒子の拡大写真である。PS 灰系改質材の粒子は、表面が凹凸に富む多孔質体であり、メニスカスによって水を強く保持し放さないため、高い吸水性を示すという特徴がある。

図 2.3 は、火力発電所から発生するバ イマス灰(パーム椰子殻(PKS)の燃焼灰)を原料・主成分とするバ イマス(PKS)灰系改質材の全体写真と粒子の拡大写真である。図 2.4 は、石膏ボードの廃棄物である廃石膏を原料・主成分とする再生石膏(二水石膏)の全体写真と粒子の拡大写真を示している。図 2.2~図 2.4 からわかるように、母材・主成分である無機系吸水性材料が異なれば、当然のことながら粒子の構造に違いが見られ、細孔による物理的吸水による拘束水量にも違いが生じる。一方、図 2.5 は PS 灰系改質材、バ イマス(PKS)灰系改質材、半水石膏を主成分とする再生石膏の水浸前後を対象に、X 線回折法(XRD)で結晶性物質を調べたものである。水浸により PS 灰系改質材、バ イマス(PKS)灰系改質材でエトリンサイトが、再生石膏では二水石膏が生成され化学的に水を拘束することが分かる。

本手引き(案)では、各改質材を添加・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。



(a) PS 灰系改質材

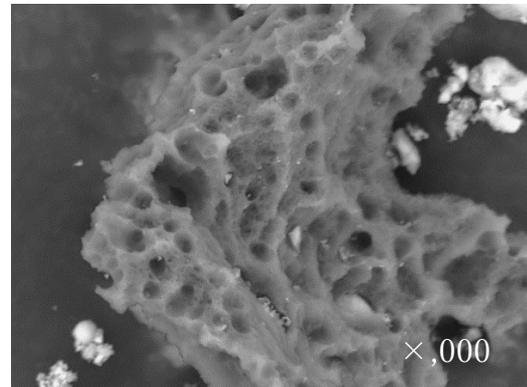


(b) 粒子の拡大写真

図 2.2 PS 灰系改質材の全景写真と拡大顕微鏡写真

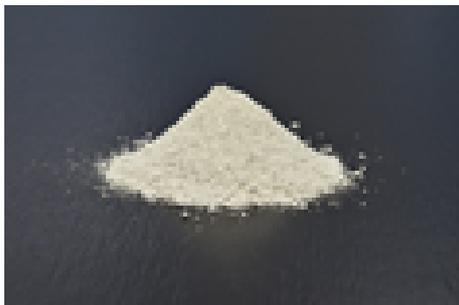


(a) ﾊﾟｲｸｽ(PKS) 灰系改質材

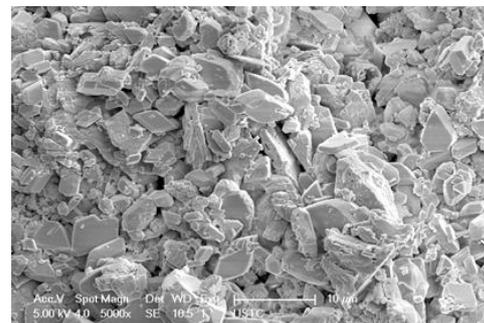


(b) 粒子の拡大写真

図 2.3 ﾊﾟｲｸｽ(PKS) 灰系改質材の全景写真と拡大顕微鏡写真

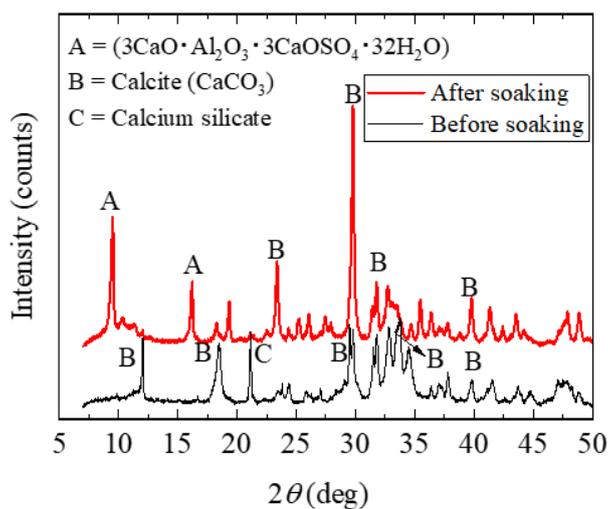


(a) 再生石膏(二水石膏)

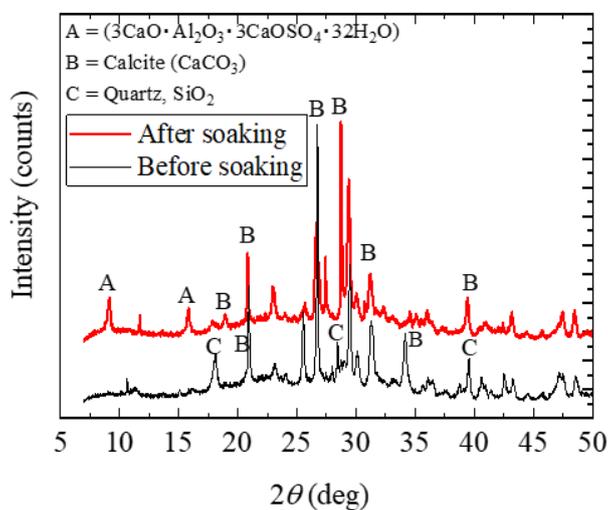


(b) 粒子の拡大写真

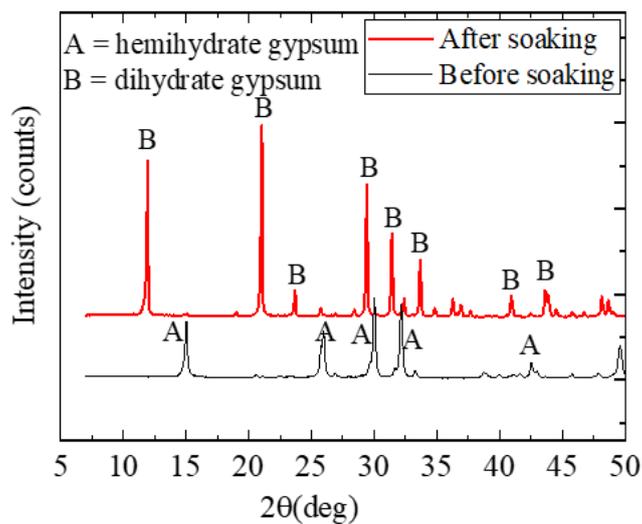
図 2.4 再生石膏(二水石膏)の全景写真と拡大顕微鏡写真



(a) PS 灰系改質材



(b) PKS(ペケス)灰系改質材



(c) 再生石膏(半水石膏)

図 2.5 各改質材の水浸前後の XRD 分析結果⁶⁾

2.2 粒子密度

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。

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 2.2 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 灰系改質材やバイオマス(PKS)灰系改質材では $2.3\sim 2.8\text{g/cm}^3$ 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 2.2 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測定例

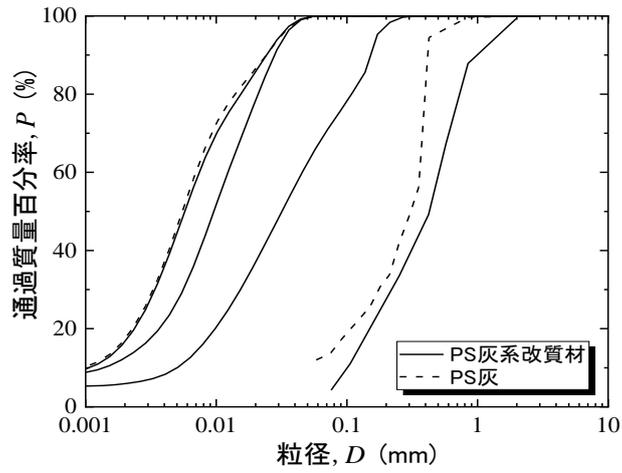
材料名	粒子密度	材料名	粒子密度
土粒子	2.5~2.8	普通セメント	3.15~3.16
PS 灰系改質材	2.4~2.8	早強ポルトランドセメント	3.13~3.14
生石灰	3.34	高炉 B 種セメント	3.04~3.05
二水石膏	2.23	酸化マグネシウム	3.58
半水石膏	2.6~2.8		数字の単位は g/cm^3
バイオマス(PKS)灰系改質材	2.32		

2.3 粒度

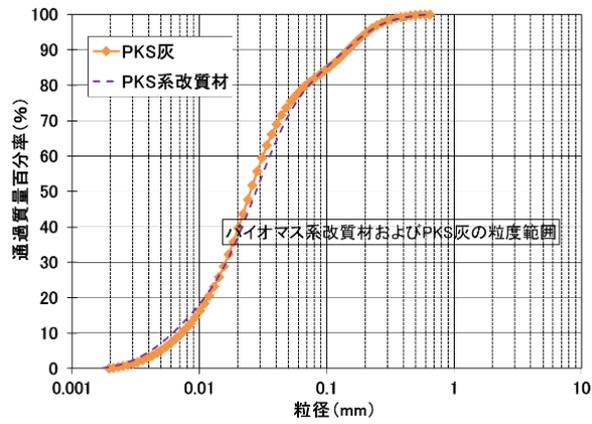
改質材の粒度は、改質した土のコンシステンシー特性、締固め特性や力学特性に影響する。原土および改質材の粒度を事前に確認することにより改質土の特性をおおまかに把握することができる。

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。図 2.6 に、PS 灰および PS 灰系改質材、バイオマス(PKS)灰およびバイオマス(PKS)灰系改質材、再生石膏(二水石膏)系改質材、の粒度の例を示す。平均粒径で $0.005\sim 1.1\text{mm}$ 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。バイオマス(PKS)灰系改質材では、シルト質分の高い粒度を示している。

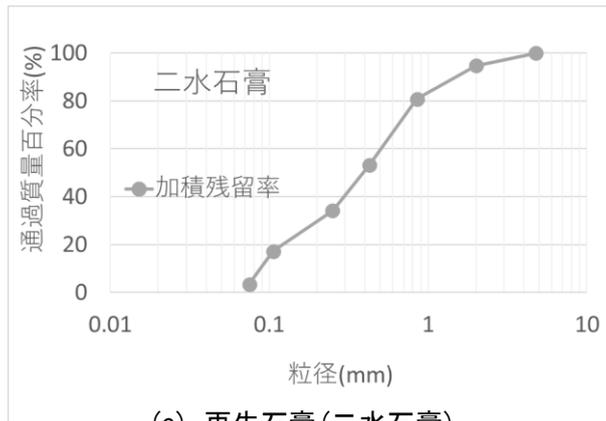
粒度の確認方法として、地盤工学会「土の粒度試験方法」を適用できるが、化学的吸水(水和反応など)を伴う場合には必ずしも適用できない。そのため、無水エタノールを溶媒に用いたレーザー回折による粒度測定などを実施することがある。



(a) PS 灰および PS 灰系改質材



(b) バイオマス(PKS)灰およびバイオマス(PKS)灰系改質材



(c) 再生石膏(二水石膏)

図 2.6 無機系吸水性材料および改質材の粒度の例

2.4 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 2.7 は異なる 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 2.3 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^{6)~9)}。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。

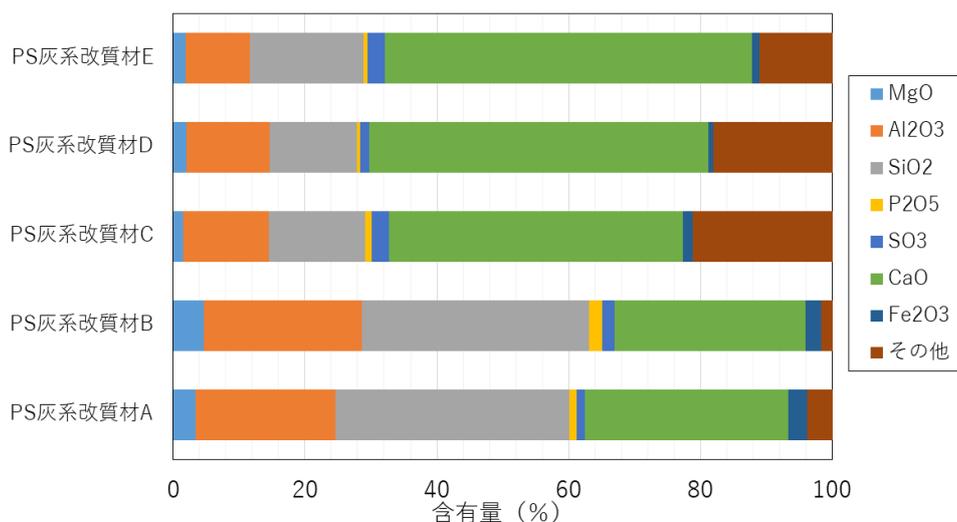


図 2.7 PS 灰系改質材の成分含有率の例

表 2.3 PS 灰系改質材（5 種類）の pH の測定例^{7)~10)}

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

表 2.4 PS 灰（88 種類）の成分含有率の測定例⁷⁾

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

表 2.5 PS 灰（88 種類）の pH の測定例⁷⁾

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

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 2.4 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 Al₂O₃、SiO₂、CaO の 3 成分であることがわかる。

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 2.5 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。

次にバ イマス(PKS)灰およびバ イマス(PKS)灰系改質材の成分含有率の例を表 2.6 に示す。バ イマス(PKS)灰系改質材では、原料・主成分であるバ イマス(PKS)灰に PS 灰を混合することで Al₂O₃、CaO の成分割合をあげている。加えて石膏も混合することで、エトリンガイトが生成しやすい配合となっている。バ イマス(PKS)灰およびバ イマス(PKS)灰系改質材の pH の測定例を表 2.7 に示す。

表 2.6 ハ イマシ(PKS)灰及びハ イマシ(PKS)灰系改質材の成分含有率の測定例

ハ イマシ(PKS)灰		ハ イマシ(PKS)灰系改質材	
SiO ₂	50%	SiO ₂	36%
CaO	29%	CaO	42%
K ₂ O	4.4%	K ₂ O	3.4%
SO ₃	4.3%	SO ₃	4.6%
P ₂ O ₅	1.8%	P ₂ O ₅	2.0%
MgO	2.6%	MgO	2.8%
Fe ₂ O ₃	1.8%	Fe ₂ O ₃	1.7%
Al ₂ O ₃	3.6%	Al ₂ O ₃	5.5%

表 2.7 ハ イマシ(PKS)灰及びハ イマシ(PKS)灰系改質材の pH の測定例

項目	ハ イマシ(PKS)灰	ハ イマシ(PKS)灰系改質材
pH	11.6	11.3

参考文献

- 1) 田中真弓, 大橋麻衣子, 河合達司, 小澤一喜: 除去土壌(中間貯蔵施設を)を対象とした選別補助剤の開発とその展開(2018), 鹿島技術研究所年報第 66 号.
- 2) 稲積真哉, 三浦俊彦, 井出一貴, 高田尚哉, 光本純, 守岩孝祐: 物理分析による速効型中性系土質改良材の改良機構・改良効果の検証. 土木学会論文集 G (環境), 74(4), 165-175, 2018.
- 3) 木田翔平, 澤村康生, 矢野隆夫, 木村 亮: 古紙を原料とする微細粉体を用いた高含水泥土処理における強度と運搬性の変化, 第 13 回地盤改良シンポジウム論文集, No.93, pp.443-450, 2018.
- 4) 澤村康生, 矢野隆夫, 木村 亮: 古紙を原料とする微細粉体による粘性土地盤の特性変化, 第 13 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, No.11-4, pp.371-376, 2019.
- 5) 高橋弘: 軟弱泥土を高機能性地盤材料に再資源化: ボンテラン工法の原理と特徴. 建設の施工企画, (757), 50-55, 2013.
- 6) Kassa, A., Sekine, R., Dorji, T., Pathak, G. K., Hayano, K., Yamauchi, H., & Mochizuki, Y. : Insights into water absorption characteristics of various waste-based inorganic additives and their application for soil stabilization. Journal of Cleaner Production, 141470, 2024.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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. 改質材の吸水特性の評価

3.1 吸水特性

本手引き(案)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。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、無機系吸水性材料を用いた改質材に適合するように加筆したものである。

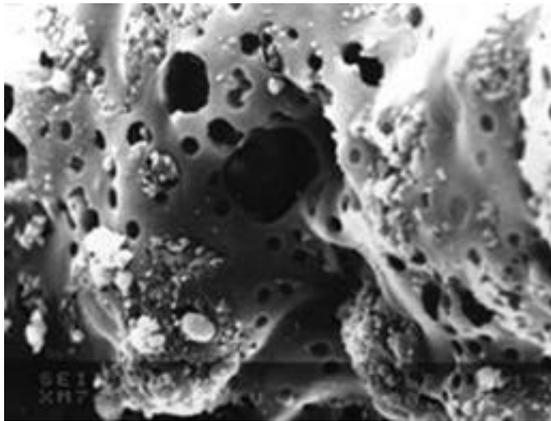
表 3.1 水分の種類^{1)に加筆}

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

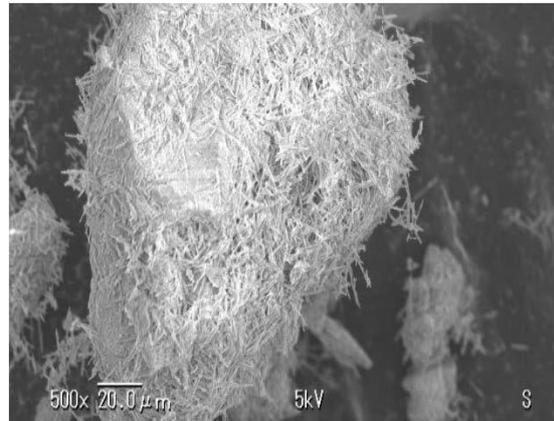
表中の物理的吸着水分が物理的吸水による水分に相当する。改質材のなかには PS 灰系改質材やバ イマス(PKS)灰系改質材のように、原材料・主成分である無機系吸水性材料の粒子内に多くの微小な間隙を有するものがある。この場合、粒子内の間隙は粒子内で閉塞するものもあるが、多くは粒子表面で開口している(図 3.1(a), 図 3.2(a))。すなわち多孔質性を示す。そのため、この開口した微細孔への毛細管現象により物理的に吸水し、メニスカスによって粒子内に水を強く保持する。表 3.2 は水銀圧入式ポロシメーターにより、PS 灰系改質材やバ イマス(PKS)灰の細孔容積(cc/g)と気孔率を測定した結果の一例である。粘土や岩石破砕物に比べて細孔容積(cc/g)が多い。

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、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), 図 3.2(b)には PS 灰やバ イマス(PKS)灰の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、改質材の吸水特性によって拘束されるものではない。

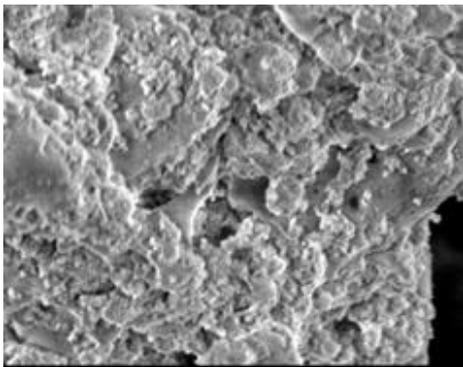


(a) 開口した粒子内間隙

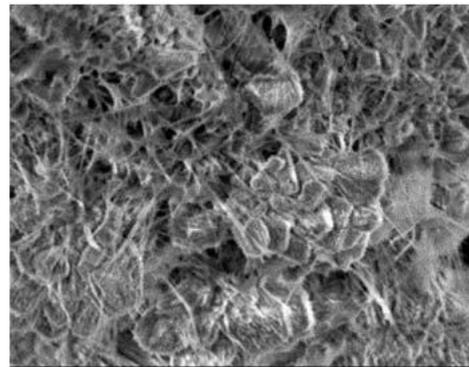


(b) エトリンガイトの生成

図 3.1 PS 灰粒子の粒子内間隙とエトリンガイトの生成



(a) 開口した粒子内間隙



(b) エトリンガイトの生成

図 3.2 パイマス(PKS)灰粒子の粒子内間隙とエトリンガイトの生成

表 3.2 水銀圧入式ポロシメーターによる細孔容積・気孔率の測定例

測定対象	細孔容積 (cc/g)	気孔率(%)
PS 灰系改質材	0.783	60.8
パイマス(PKS)灰	0.864	63.5
再生石膏(半水石膏)系改質材	0.832	61.0
青粘土	0.457	55.7
玄武岩粉砕物(425 μ m 以下)	0.264	43.4
石灰岩粉砕物(425 μ m 以下)	0.337	44.5

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、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3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、改質材の拘束水量の程度を評価する3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、そこに改質材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 3.3)。

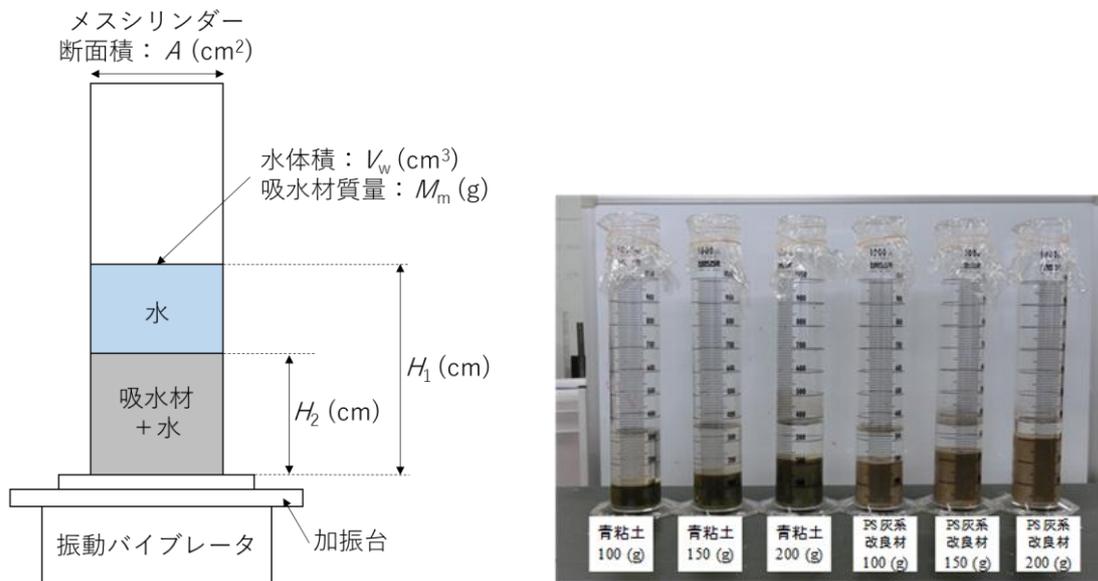


図 3.3 メスシリンダーを利用した吸水性能評価試験 (シリンダー法) の概要³⁾

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 $H_1(\text{cm})$, 改質材の高さ $H_2(\text{cm})$ 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 : 改質材を加えた後の水の水位

H_2 : 改質材の高さ

ρ_w : 水の密度

M_m : 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 3.4** 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 3.5** には、シリンダー法によるバ イマス(PKS)灰, バ イマス(PKS)灰系改質材, 再生石膏(二水石膏)の吸水比 W_{ab} の測定例を示す。ここで示したバ イマス(PKS)灰や二水石膏の吸水比 W_{ab} は、PS 灰改質材と比べて低い。バ イマス(PKS)灰系改質材は、原料・主成分であるバ イマス(PKS)灰に PS 灰を混合したものであり、PS 灰系改質材同等の吸水比 W_{ab} が測定されている。

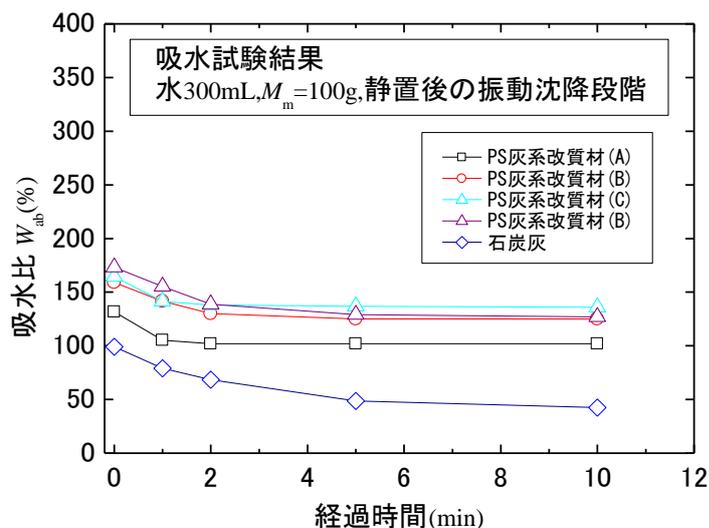


図 3.4 シリンダー法による PS 灰系改質材の吸水比 W_{ab} の測定例⁴⁾

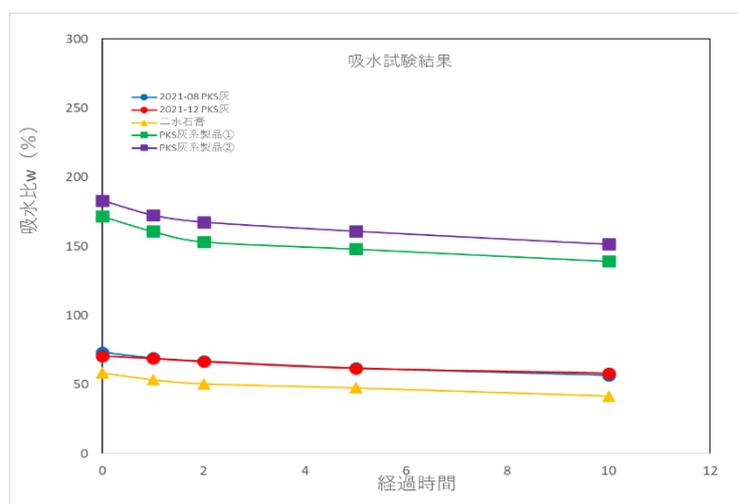


図 3.5 シリンダー法によるパ 仔ス(PKS)灰, パ 仔ス(PKS)灰系改質材, 再生石膏(二水石膏)の吸水比 W_{ab} の測定例

(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 3.6)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.

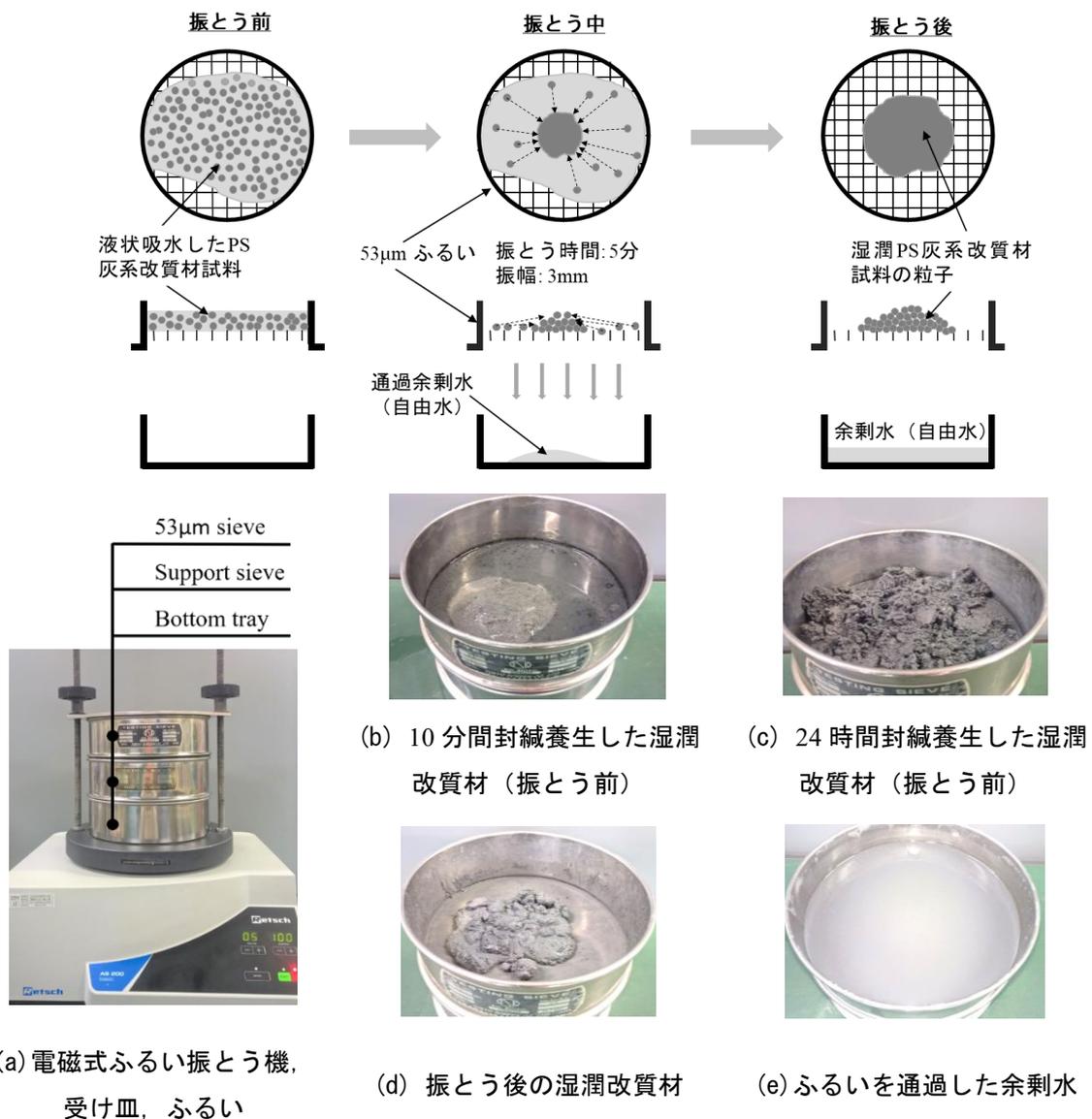


図 3.6 ふるいを利用した吸水性能評価試験 (ふるい法) の概要⁵⁾

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, ふるいのう上に広げる。

- 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。

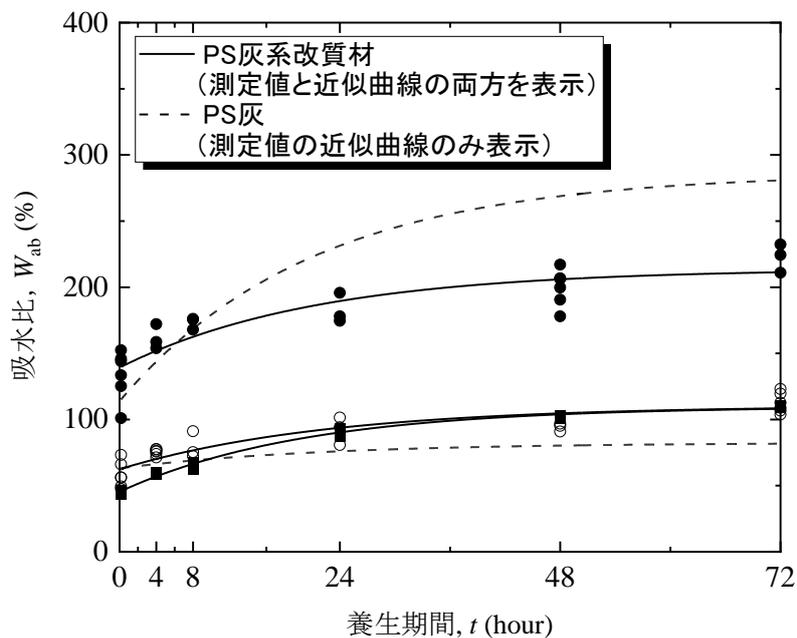


図 3.7 ふるい法による吸水比 W_{ab} の測定例

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 3.7 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) 吸引ろ過法による評価

この方法では吸引することにより、改質材の周りに存在する自由水分を、改質材に吸水された拘束水と分離する (図 3.8)。化学的吸水による改質材の固化を防ぐために、吸引する前の改質材を常に振とうにより攪拌した状態にしておくことに特徴がある。また、シリンダー法と同様に、改質材の炉乾燥を実施せずに吸水比 W_{ab} を求める。そのため、幅広い改質材に適用可能である。ただし、作業がやや複雑であるので、作業途中における改質材の消失を防ぐなどに注意を要する。

吸引ろ過法の試験手順

- ① 0.45 μmメッシュのメンブレンフィルタ (φ=90mm) の質量を測定する。通常, 0.31～0.33gの範囲にある。
- ② 改質材の吸水性能に応じて, 分取量を変えても良いが, 標準として改質材5.00gを測定・準備する ($M_0=5.00$ g)。
- ③ 100mL(g)の純水 (または水道水) を250mLのガラス瓶 (蓋をして封がしっかりできる容器) に入れる。ガラス容器に準備した改質材を全量投入し, 容器に蓋をした後, 振とう機 (200ppm) で所定時間攪拌する。
- ④ 吸引ろ過装置を組み立て, 100mLの純水 (または水道水) を吸引ろ過する。
- ⑤ 通水後, ファンネルを外し, メンブレンフィルタをピンセットで挟みとり, ろ紙の上に乗せる。10分経過後にメンブレンフィルタの質量 M_1 を測定する。(概ね1.00～0.85gの範囲であればOKである)。また, その時の室内の温度と湿度も測定する。(室温20～25°C, 湿度40～60%程度ならOKである)
- ⑥ 所定時間経過したあと, 振とう機からガラス瓶を取り出し, 瓶内にある水と改質材を洗浄瓶や指を使って残らず掻き落としながらファンネル内にすべて投入し, 吸引ろ過する。
- ⑦ ろ過中にファンネルに付着した改質材を洗浄瓶で洗い落とす。最後に, ファンネルとフィルターの底面接触境界部分に沿って洗浄瓶の水を勢いよく流し, ファンネルに付着している改質材の縁切りをする。吸引ろ過で水滴が落ちなくなったら, 吸引ポンプのスイッチを切り, ファンネルを外す。
- ⑧ ファンネルに付着した改質材をティッシュペーパーでふき取る。(予め, ティッシュペーパーの質量 M_2 を測っておく)
- ⑨ 改質材をふき取ったティッシュペーパーやフィルターを含め, フィルターベースから速やかに取り上げ, ろ過で残留した改質材を残すことなく大判のろ紙の上に置いて, ストップウォッチをスタート。10分後にその質量 M_3 を測定する。(ファンネルに付着した改質材のふき取りから, ろ紙に試料を置くまでの時間は約1分程度)
- ⑩ 以下の式より吸水比 $W_{ab}(\%)$ を求める。

$$\text{吸水比 } W_{ab} = (M_3 - M_1 - M_2 - M_0) / M_0 \times 100 - (W_{ab})_{\text{cor}} \quad (\%)$$

ここで, $(W_{ab})_{\text{cor}} = a \times (D_{50})^b \quad (\%) \quad (a=3.92, b=-0.546)$

D_{50} は改質材の平均粒径(mm)であり, $(W_{ab})_{\text{cor}}$ の補正は吸水性のないガラスビーズなどの評価試験結果に基づくものである。

吸引ろ過法で測定した吸水比 W_{ab} の一例⁶⁾を図3.9に示す。



(a) 振とうによる攪拌



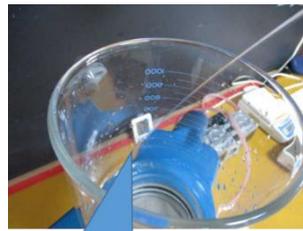
(b) 組み立てた吸引ろ過装置



(c) 改質材のファンネルへの投入



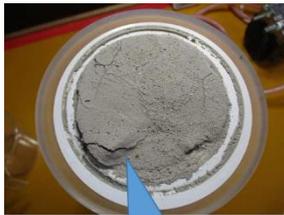
(d) 吸引ろ過



(e) 改質材の洗い流し



(f) ファンネルとフィルターの縁切り



(g) 吸引ろ過の改質材



(h) 改質材のふき取り



(i) 改質材・ティッシュペーパー・フィルターの計量

図 3.8 吸引ろ過を利用した吸水性能評価試験（吸引ろ過法）の概要⁵⁾

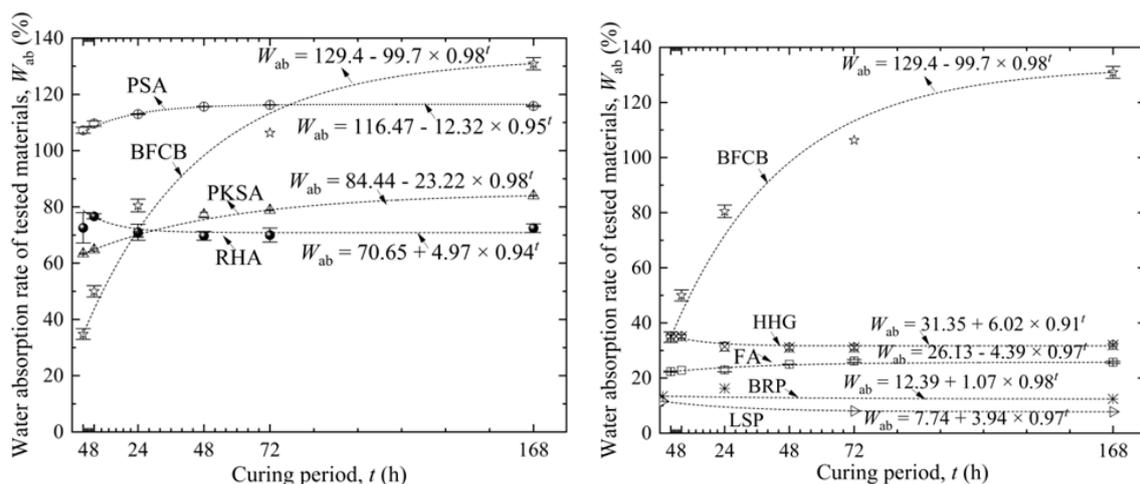


図 3.9 吸引る過法による吸水比 W_{ab} の測定例⁶⁾

(PSA:PS 灰系改質材, PKSA:パケイア(PKS)灰, RHA: もみ殻焼却灰, BFCB: 高炉セメント B 種, HHG: 再生石膏系改質材, FA: 石炭灰, BRP: 玄武岩粉砕物, LSP: 石灰岩粉砕物)

(4) 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 3.3 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 3.3 に示す範囲にあるものと考えてよい。

表 3.3 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 3.10 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。

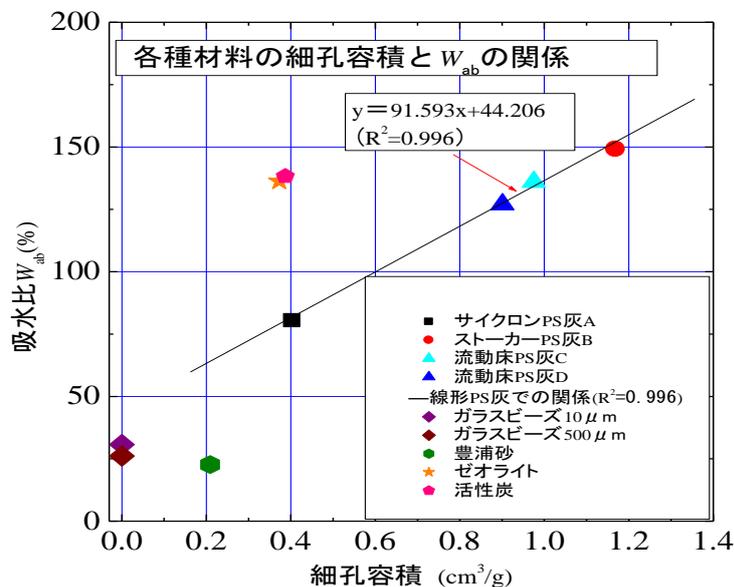


図3.10 シリンダー法による吸水比 W_{ab} と細孔容積の関係⁴⁾

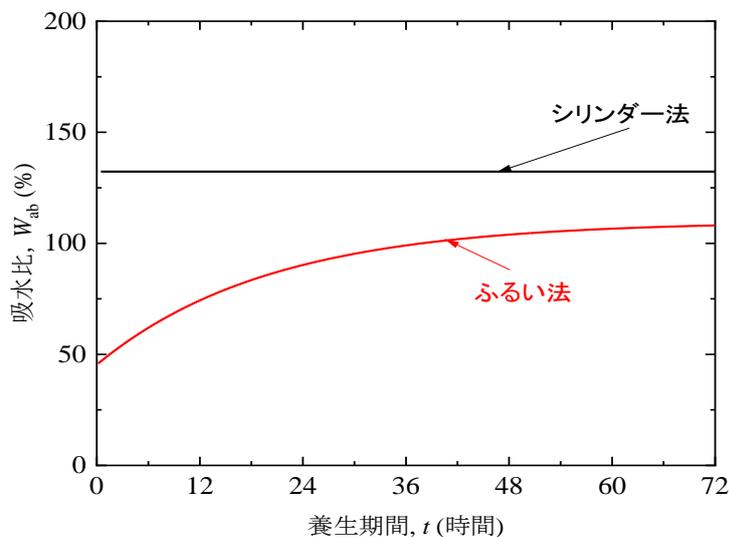


図 3.11 同一 PS 灰改質材に対するふるい法とシリンダー法の吸水比 W_{ab} の違いの例

図 3.11 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) Phan, N. B., Hayano, K., Mochizuki, Y., & Yamauchi, H. (2021). 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*, 61(3), 692-707.
- 6) Kassa, A., Raihan, S., Hayano, K., Phan, B. N., Yamauchi, H., & Mochizuki, Y. (2023). Novel method for evaluating water absorption and retention of waste-based stabilizers using suction filtration to predict treatment effects on soft clay soils. *Soils and Foundations*, 63(4), 101334.

4. 改質土の特徴

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。改質材の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 灰系改質材およびバ イマス(PKS)灰を用いた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、バ イマス(PKS)灰を乾燥質量比 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・塑性限界試験を行っている。PS 灰系改質材、バ イマス(PKS)灰を添加した直後の改質土の様子を図 4.1, 図 4.2 に示す。

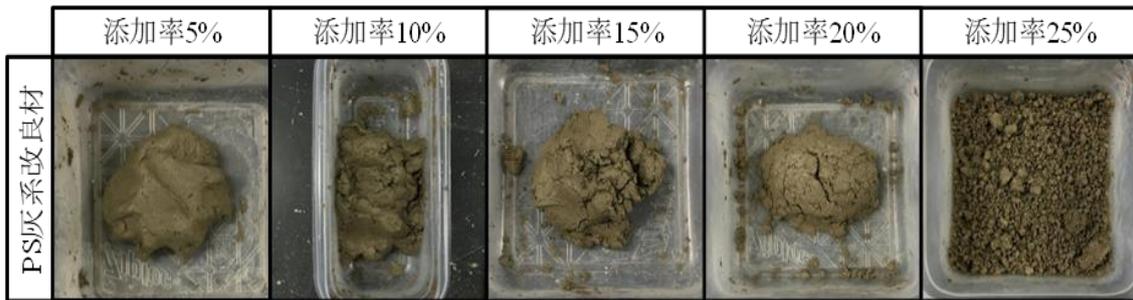


図 4.1 PS 灰系改質材添加直後の改質土の状況¹⁾

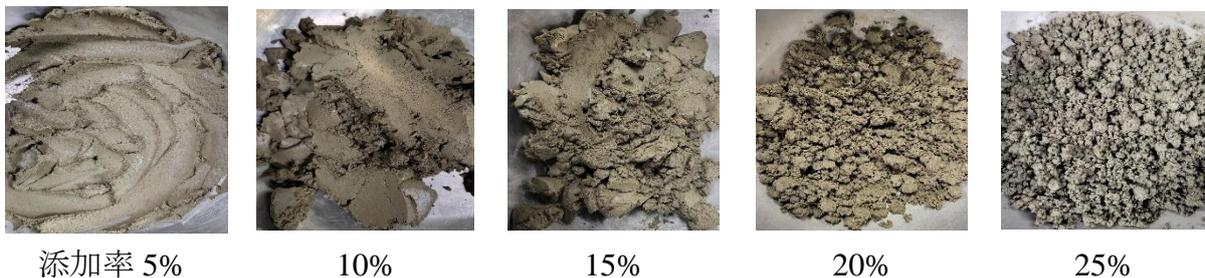


図 4.2 バ イマス(PKS)灰添加直後の改質土の状況²⁾

改質土の流動性はどちらも添加率 A の増加とともに減少している。これは PS 灰系改質材やバ イマス(PKS)灰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 4.3 に示す。養生条件は封緘養生である。 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拘束水が含まれるためである。

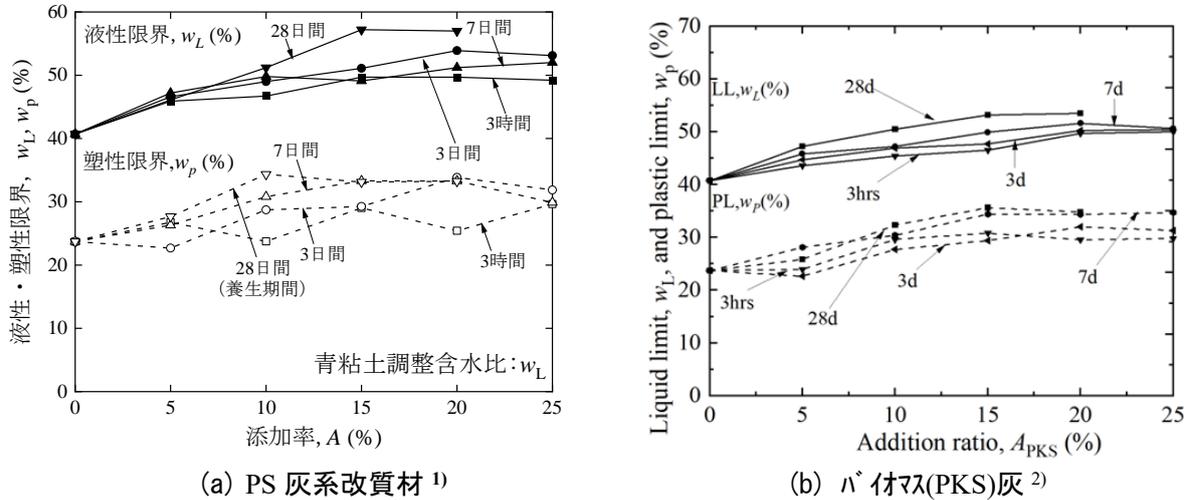


図 4.3 添加率・封緘養生に伴う液性・塑性限界の変化

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³⁾。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。

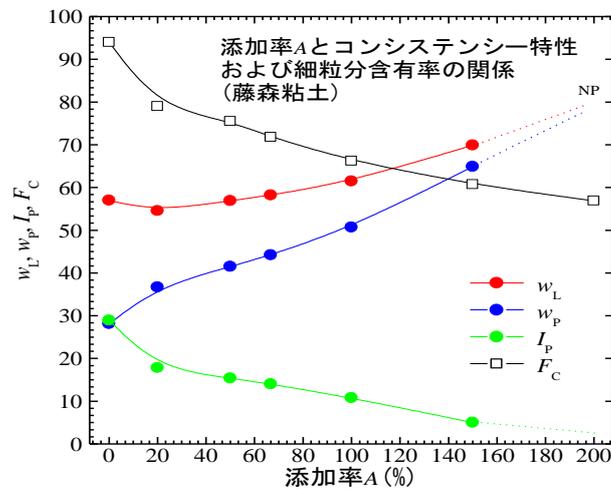


図 4.4 粗粒状の PS 灰系改質材により改質した粘土のコンシステンシー特性³⁾

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。化学的吸水（水和反応）を伴わない場合、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。

化学的吸水（水和反応）を伴わない場合、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1m³あたりのPS灰系改質材の添加量 a は、S底泥土で380kg/m³、R底泥土で300kg/m³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。

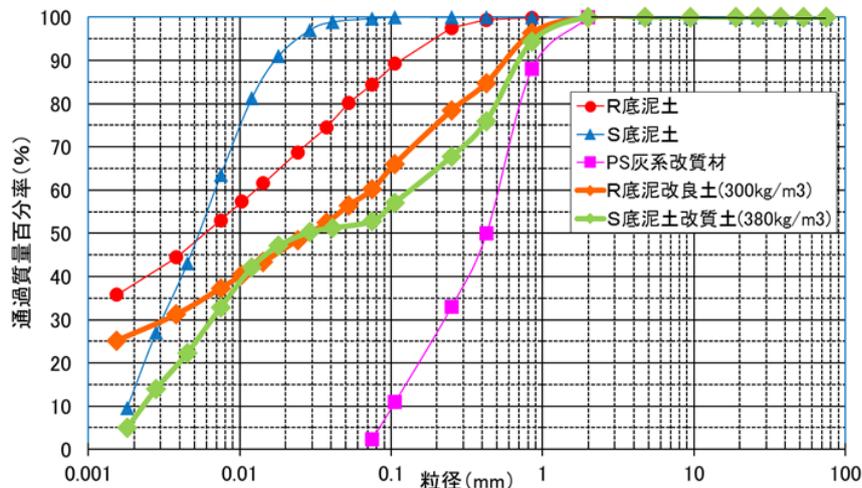


図 4.5 原土（底泥土）、PS 灰系改質材、改質土の粒度

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。最適含水比 w_{opt} よりも湿潤側にある原土に改質材を添加することで、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。**図 4.7** は、青粘土にバ イマス(PKS)灰の添加率 $A(=A_{PKSA})$ をさまざまに変えて改質した土の締固め試験(A 法)の結果である。PS 灰系改質材と同様に、添加率 A が増加するにつれて最適含水比 w_{opt} は、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 4.8** 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⁴⁾。

同じことが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改質材を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。

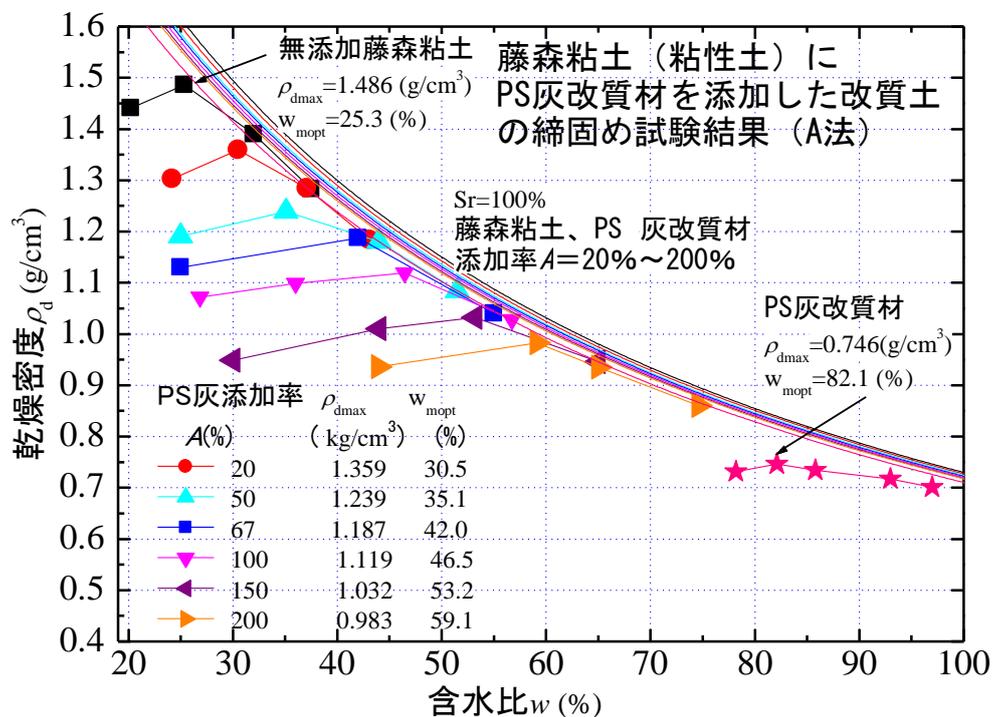


図 4.6 PS 灰改質材により改質した藤森粘土の締固め特性³⁾

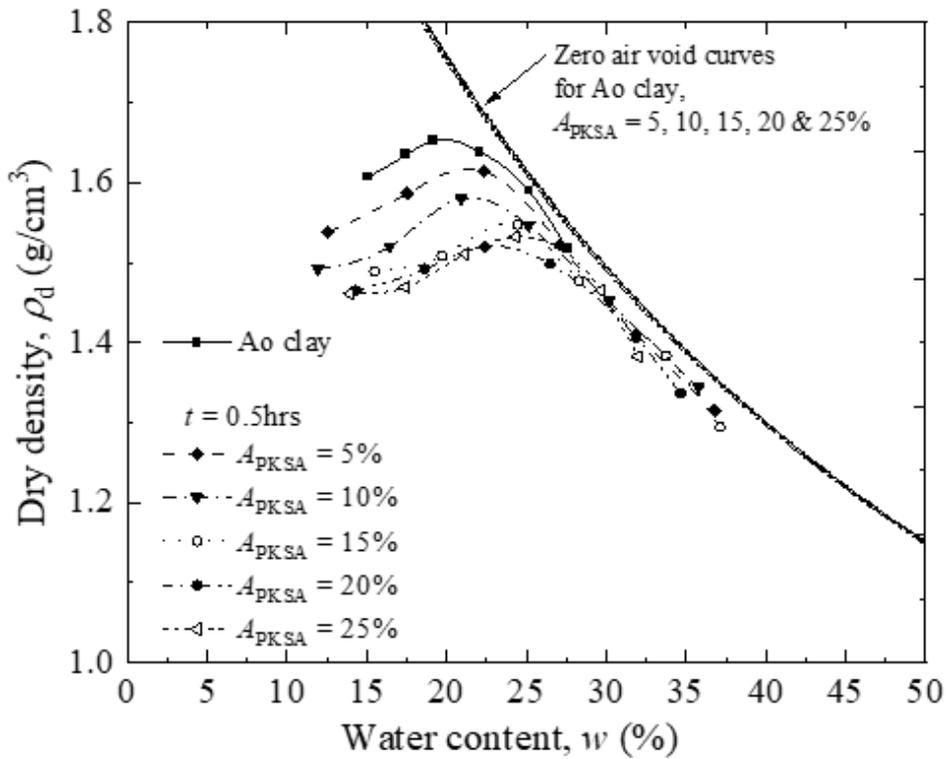


図 4.7 パイマス(PKS)灰により改質した青粘土の締固め特性²⁾

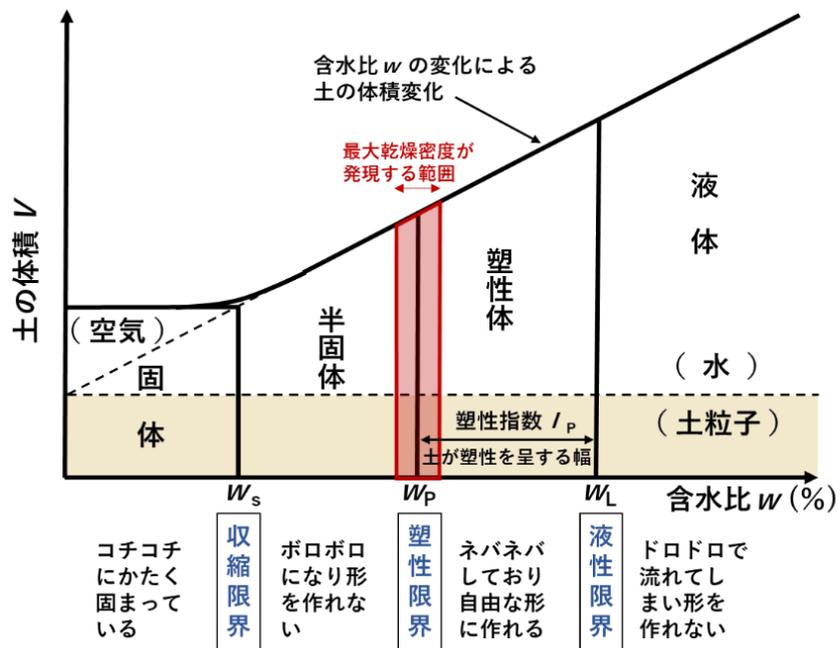


図 4.8 土の状態変化とコンシステンシー限界⁴⁾

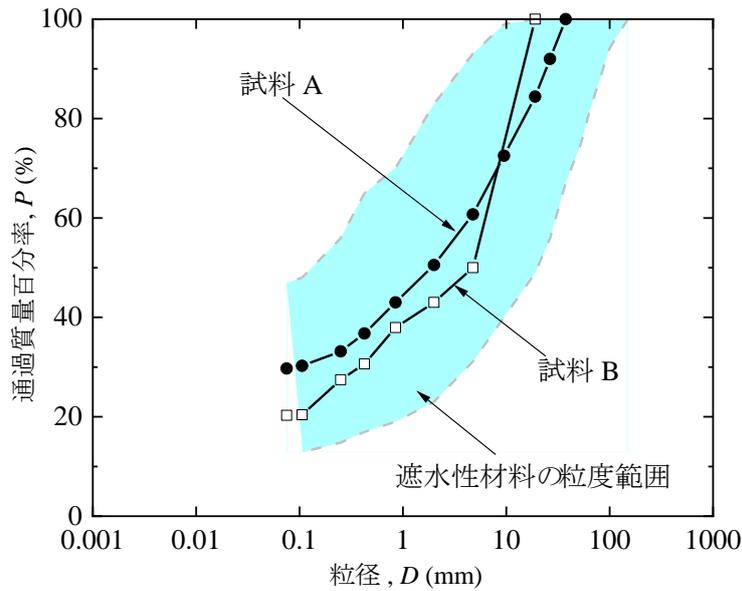


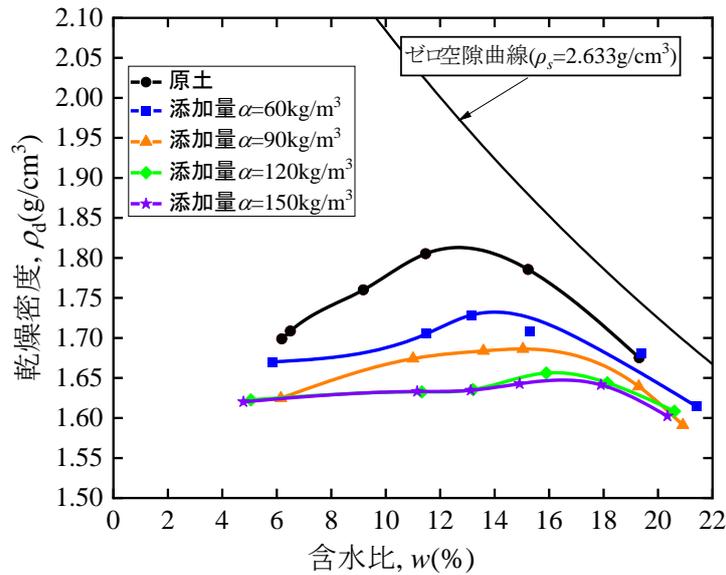
図 4.9 粘性土混じり粗粒土の粒度⁵⁾

表 4.1 締固め試験のための配合条件⁵⁾

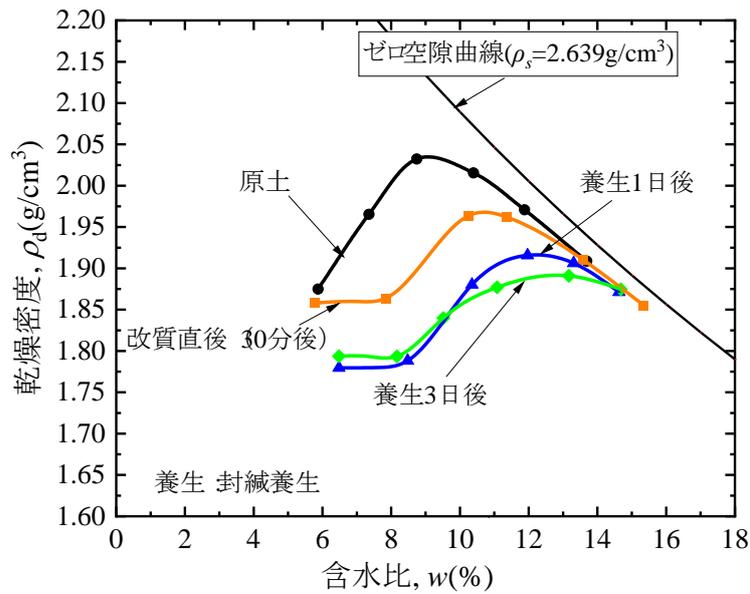
	試料 A	試料 B
試験方法	B-b	A-b
添加量 α (kg/m ³)	60, 90, 120, 150	60
養生期間 $t_{\text{pre-compaction}}$	直後(30分)	直後(30分), 1日, 3日

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^{5),6)}。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} が小さくなることがある。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、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。



(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^{5),6)}

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⁷⁾。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。

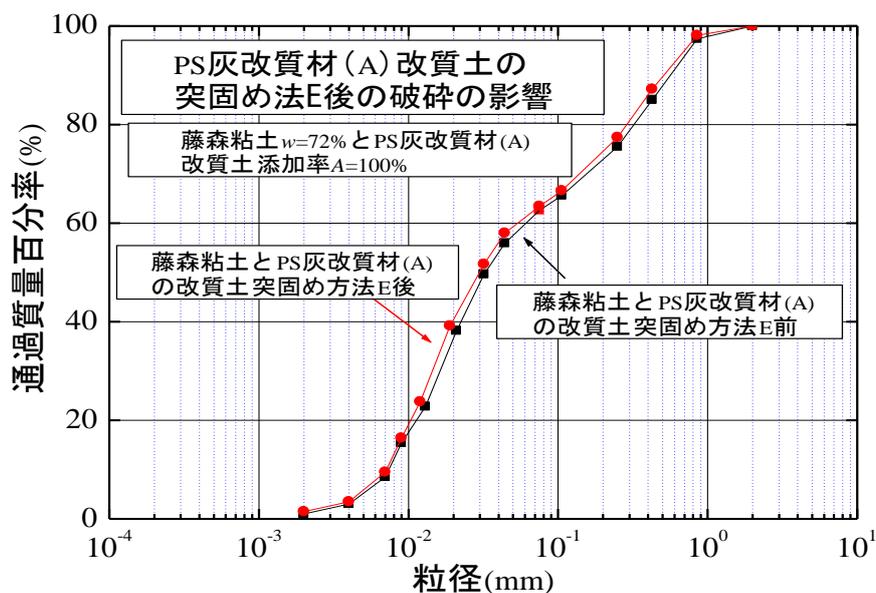


図 4.10 改質土の突固め方法 E による破碎の影響⁷⁾

4.4 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。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、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⁸⁾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，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 4.11 に示す⁸⁾。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。

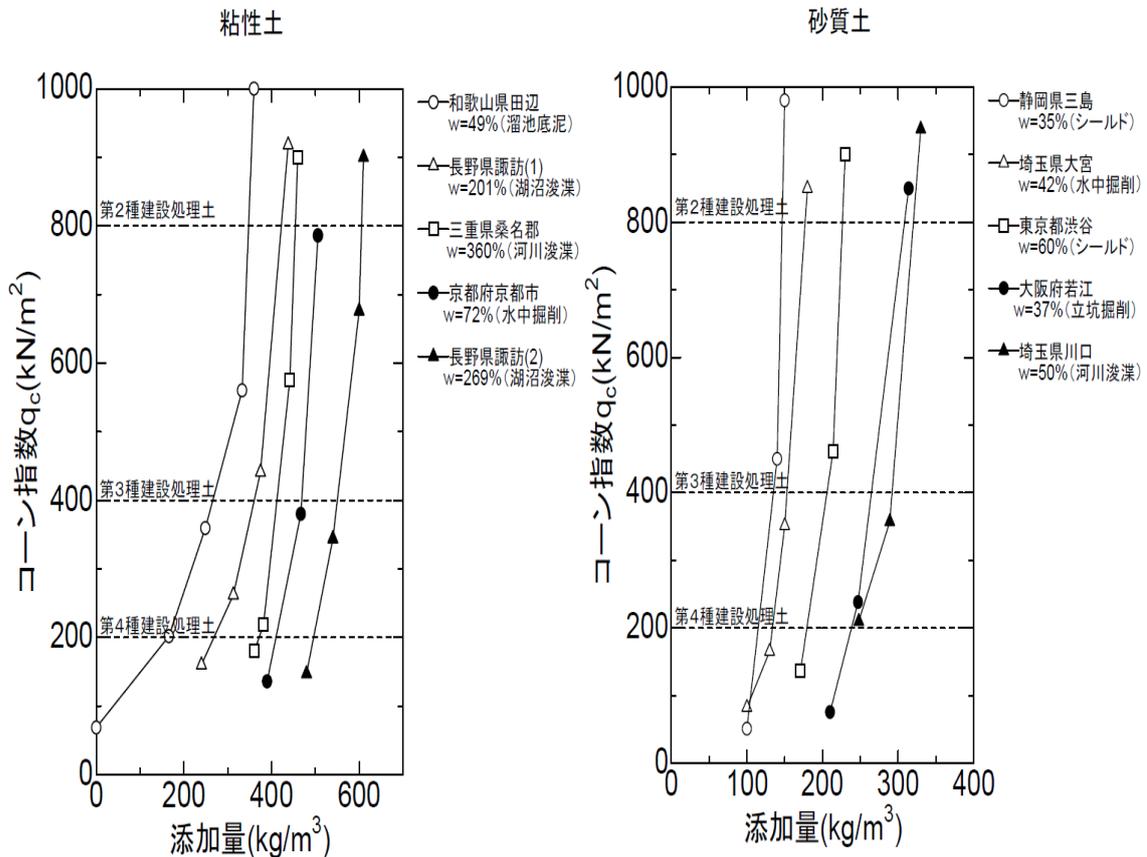


図 4.11 PS 灰系改質材による各種地盤材料の改質効果の例⁹⁾

(2) 原土の含水比と改質材添加量の影響

図 4.12 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、PS 灰系改質材の添加後 7 日間封緘養生したのちにコーン指数を測定している。

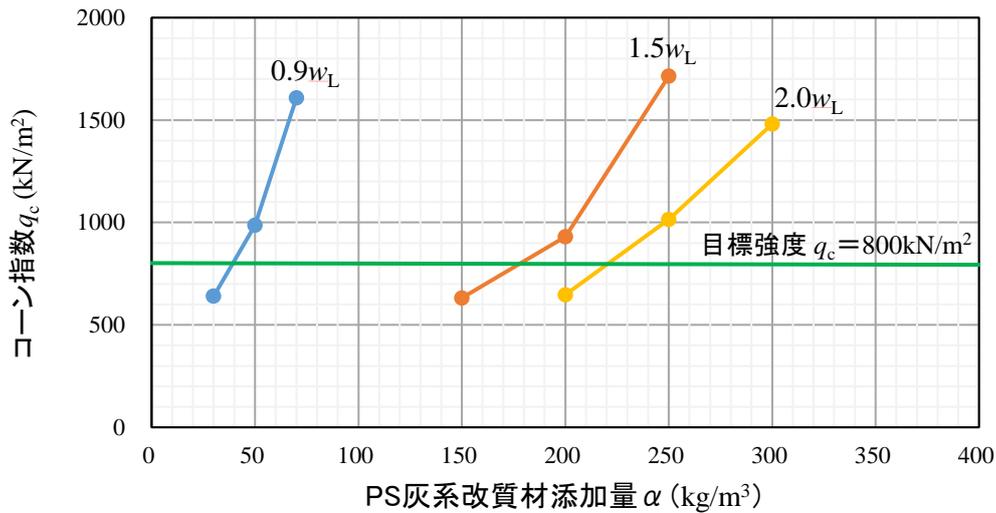


図 4.12 初期含水比の異なるシルト質土の PS 灰系改質材による改質効果の例

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) 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 4.13 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。

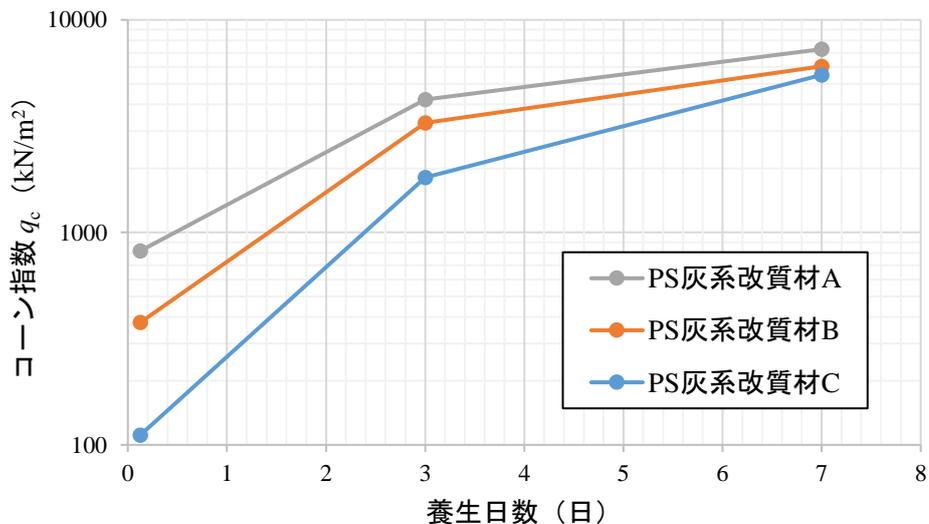


図 4.13 異なる PS 灰系改質材 A・B・C による青粘土の改質効果の確認例

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 3.7 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。

図 4.14 は青粘土を $1.0w_L$ に含水比調整した試料について、バ イマス(PKS)灰を添加して、添加量と養生期間の影響を比較した例である。所定の添加率でバ イマス(PKS)灰を添加後、密閉養生して 3 時間後、3 日後および 7 日後にコーン試験を実施している。同じ添加率でも、養生にともないコーン指数が増加している。図 4.15 は、青粘土を $1.0w_L$ に含水比調整した試料に、PS 灰系改質材、バ イマス(PKS)灰、再生(半水)石膏系改質材を乾燥質量比でそれぞれ 30% 添加し 24, 48, 72, 168 時間密閉養生した後に締固めて得られたコーン指数 q_c を示したものである¹⁰⁾。また横軸は、24, 48, 72, 168 時間養生後に吸引ろ過法により測定した各改質材の吸水比 W_{ab} を示している。吸水比 W_{ab} の増加にともないコーン指数 q_c が増加する。

このように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。

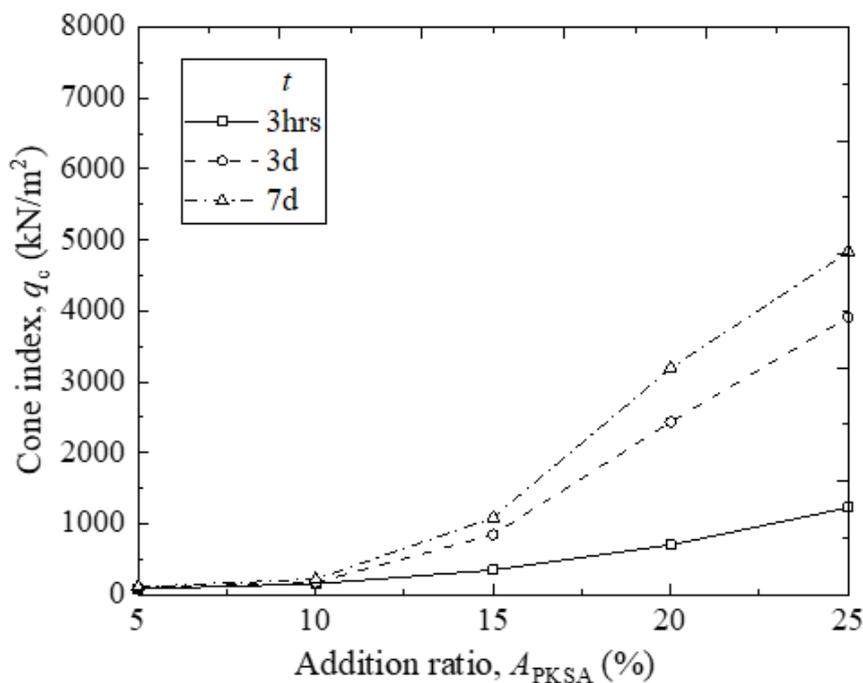


図 4.14 バ イマス(PKS)灰で改質した土のコーン指数の確認例²⁾

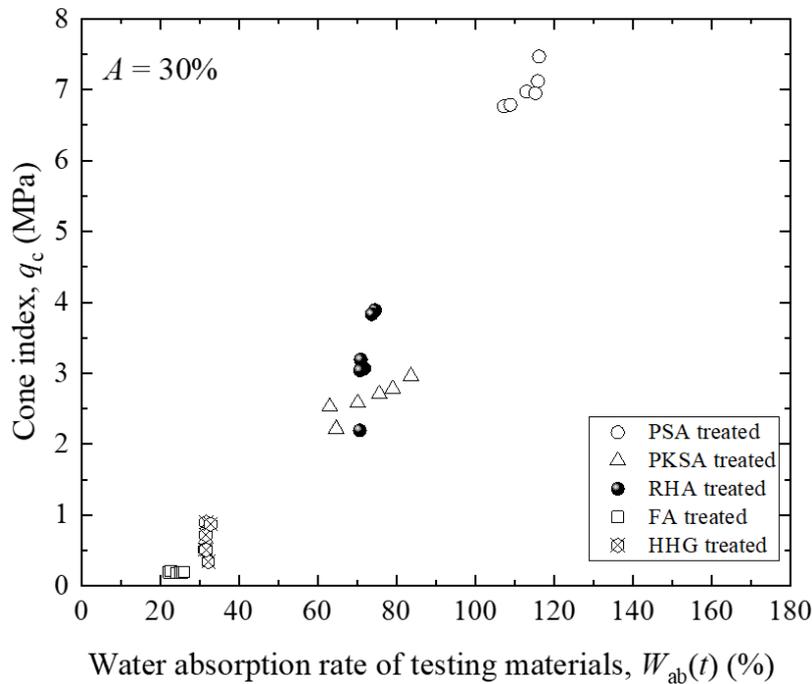


図 4.15 PS 灰系改質材(PSA), パケマス(PKS)灰系改質材(PKSA), 粉砕灰系改質材(RHA), 再生石膏系改質材(HHG)で改質した土のコーン指数と吸水比 W_{ab} の関係 (添加率 $A=30\%$, 養生時間 $t=24, 48, 72,$ and 168 h) ¹⁰⁾

(4) 養生環境の違いの影響

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 4.16 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トレイの上に乗せ、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。

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。

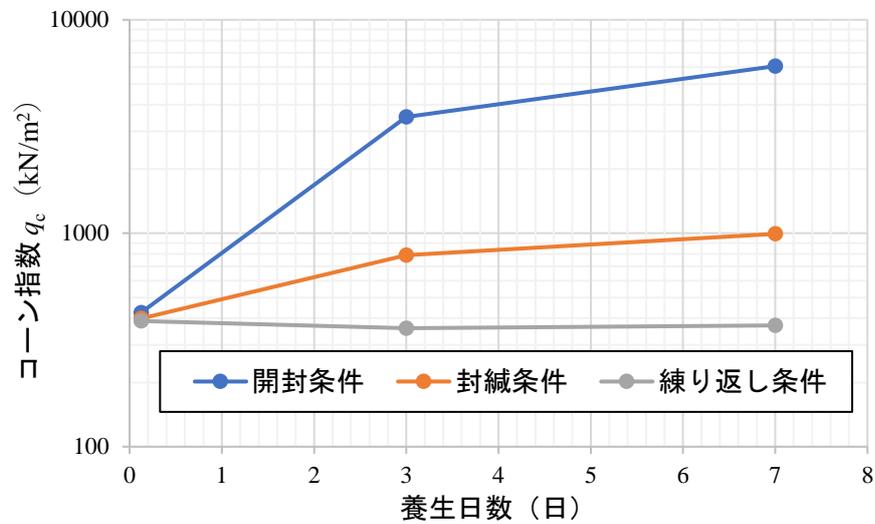


図 4.16 異なる養生条件下における PS 灰系改質土の養生効果の確認例

(5) 液性指数とコーン指数の関係

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 4.3 の結果からも類推できる。

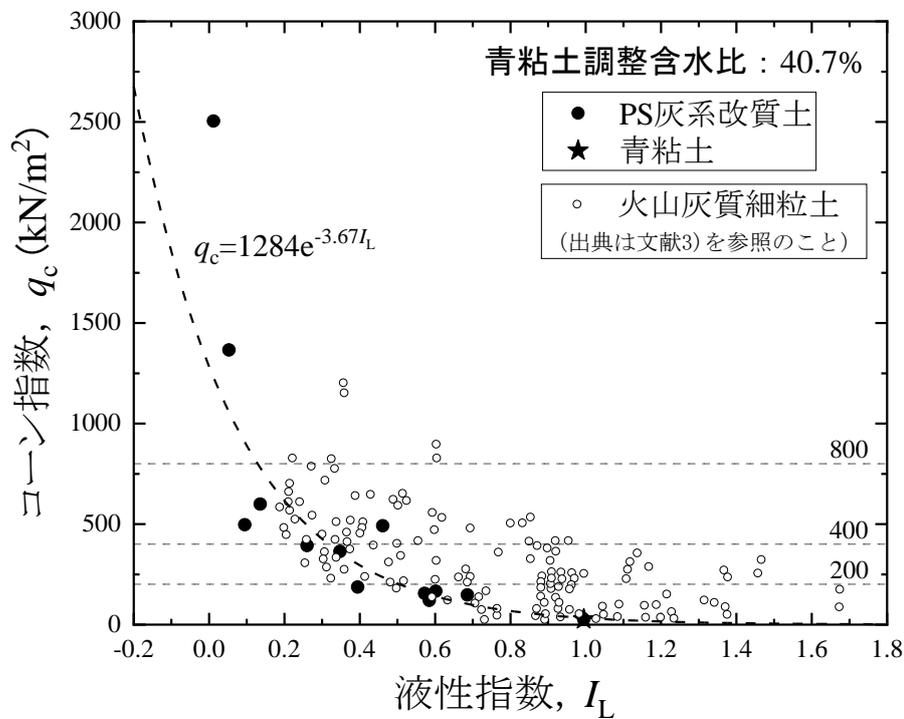


図 4.17 PS 灰系改質土のコーン指数と液性指数の関係¹⁾

図 4.17 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。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。図 4.18 はバイオマス(PKS)灰を青粘土に添加した改質土のコーン指数 q_c と液性指数 I_L の関係であり、図 4.17 と同様の傾向がみられる。なお、同図には籾殻焼却灰焼却灰(RHA)を青粘土に添加した改質土の関係も示している。このように無機系吸水性材料やそれを原料・主成分とする改質材を泥土に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。

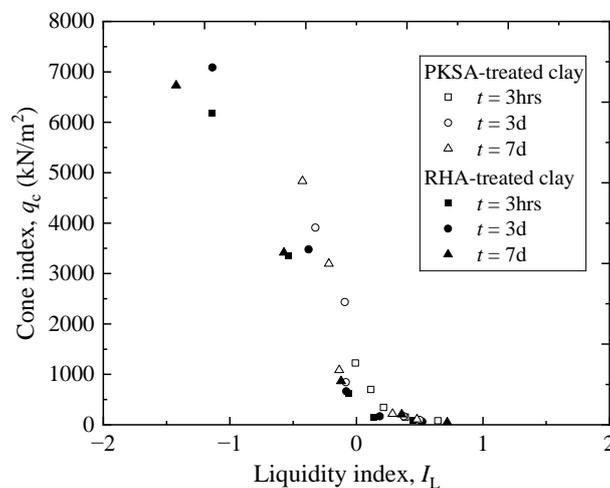


図 4.18 バイオマス(PKS)灰で改質した土のコーン指数と液性指数の関係²⁾

(6) 締固めた土の土壌硬度試験による指標硬度とコーン指数の相関

JGS 1431 ポータブルコーン貫入試験方法によって得られる q_c は一軸圧縮強さ q_u との相関性があることが知られているが、 q_u と山中式土壌硬度計の硬度指数目盛(指標硬度目盛)の相関性も報告されており、これらから土壌硬度計による指標硬度と q_c との相関性が示唆される。

図 4.19 は、液性限界 w_L もしくは $1.25w_L$ に調整した青粘土に、バイオマス系(PKS)改質材、籾殻焼却灰、ペーパーラッジ(PS9 灰系改質材を乾燥質量比で 5~35%の範囲で添加した試料のコーン指数と指標硬度の関係を示したものである。コーン指数は、JIS A 1228「締固めた土のコーン指数試験方法」により得られたものである。一方、指標硬度は土壌硬度計により得られたものである。具体的には直径 5cm, 高さ 10cm のモールドに試料を投入し、ランマー質量 1.5kg, 落下高 20cm, 各層の突固め回数 12 回, 層数 3 層の条件で締固めを行った。1 層突固めごとに土壌硬度計で 5 点測定し、5 点の測定結果のうち最大値と最小値を除いた 3 点を平均し、3 層分測定した結果の平均値を指標硬度として用いた。同図に示すよ

うに、土壌硬度計による指標硬度と q_c との相関性が確認できる。

図 4.20 は、4 種類の原土を PS 灰系改質材で改質した土のコーン指数と指標硬度の関係を示したものである。なお、粒径調整として混合土は礫分が含まれているため、JIS A 1228 の規定に従って 4.75mm ふりを通過した試料を使用している。指標硬度と q_c について、細粒土である笠岡粘土・青粘土・脱水ケーキ改質土は高い相関関係がみられる一方で、粗粒土である混合土は高硬度側になるにつれてコーン指数が高くなる傾向を示している。 $q_c \leq 5,000 \text{kN/m}^2$ とした場合、粗粒土の試験結果を除けば指標硬度が 2mm から 27mm 程度までの範囲で相関性が確認された結果といえる。

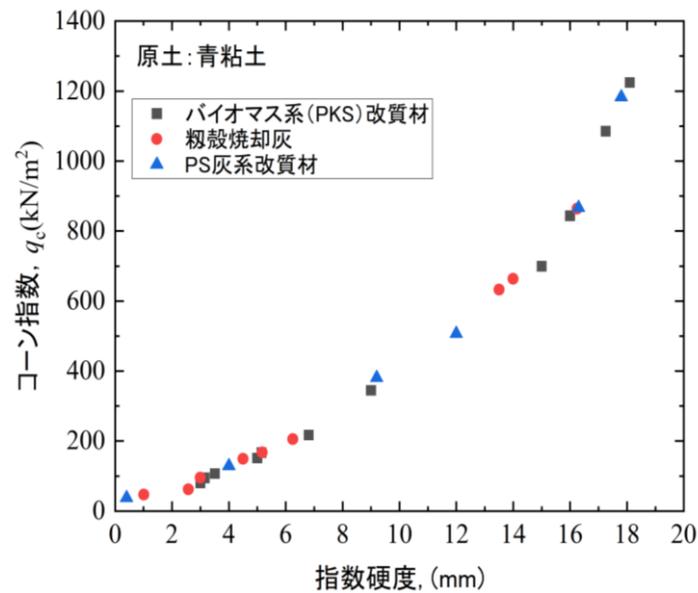


図 4.19 青粘土を改質した土のコーン指数と指標硬度の関係

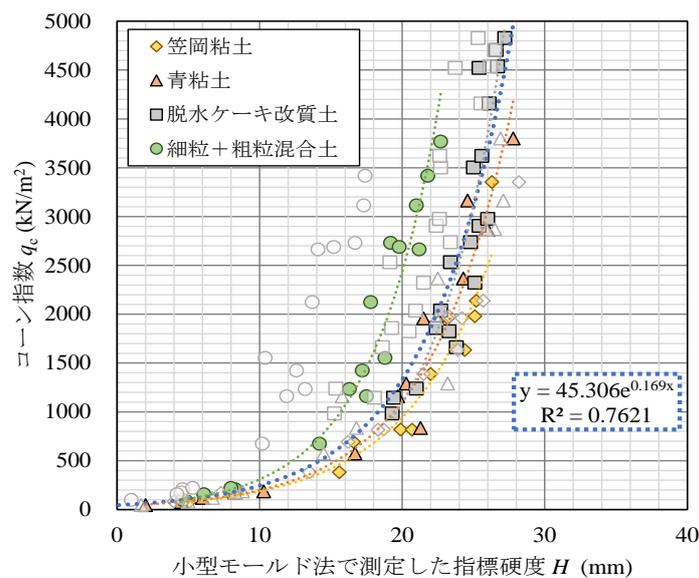


図 4.20 4 種類の原土を PS 灰系改質材で改質した土のコーン指数と指標硬度の関係¹²⁾

4.5 三軸圧縮強度と液状化抵抗性

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。一般に改質土の場合，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（CU）三軸試験結果の例を図 4.21 に示す³⁾。図 4.22 には PS 灰系改質材の添加率 A と，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 4.22 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。

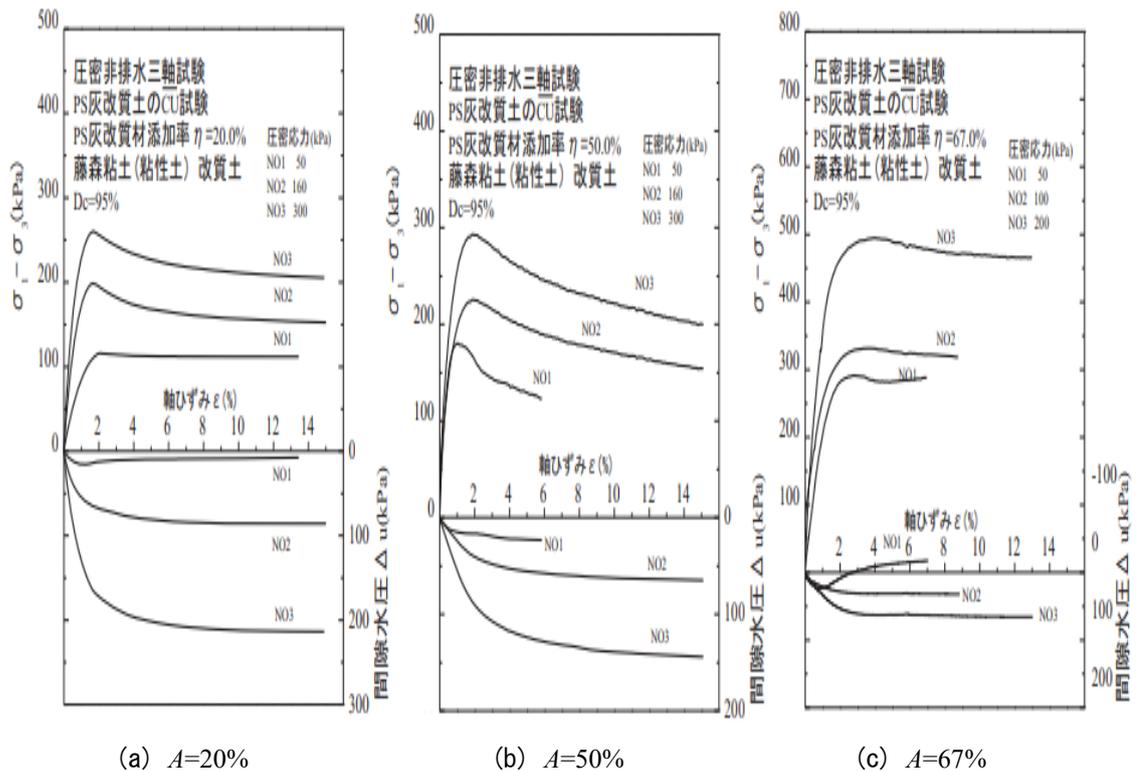


図 4.21 PS 灰系改質材により改質した藤森粘土の三軸CU試験結果³⁾

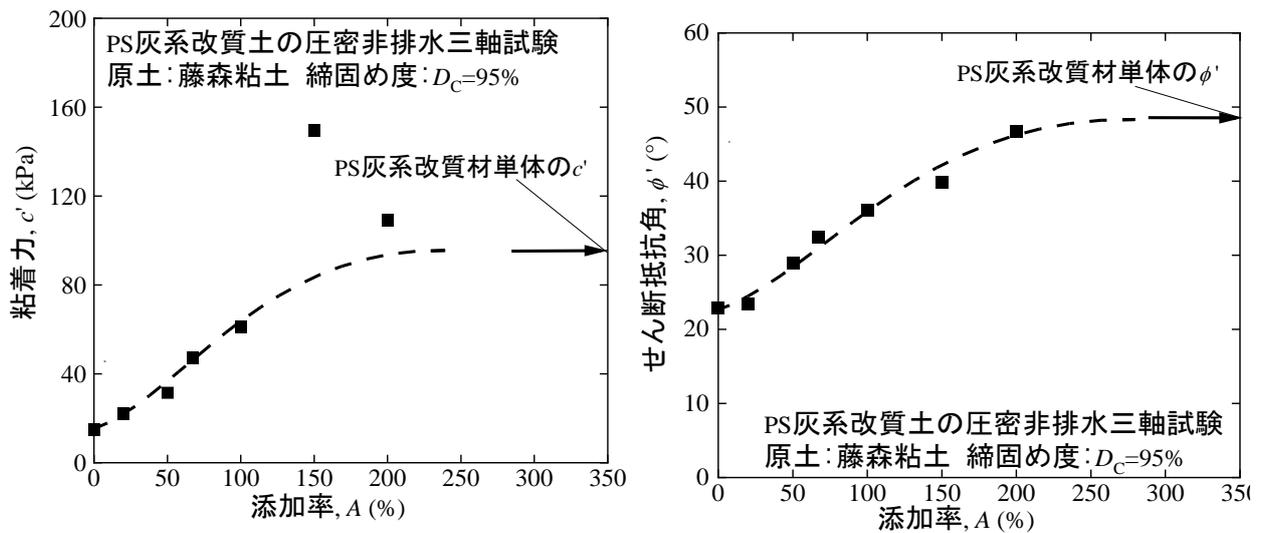


図 4.22 PS 灰系改質材により改質した藤森粘土の粘着力 c' とせん断抵抗角 ϕ' ³⁾

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 4.2 に示す条件で圧密非排水 (CU) 三軸試験を実施した結果を図 4.23 に示す⁶⁾。図 4.24 は 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。図 4.25 は得られた強度定数を示している。原土にくらべて改質土は、有効応力の整理の場合に高いせん断抵抗角を、全応力整理の場合に高い粘着力を示している。

なお、供試体に働く応力状態が実際の土構造物の挙動をどの程度再現しているか、そして強度定数をそのまま設計に用いてよいかどうかについて、依然として不明確な点が残されている。特に本手引きで対象とする改質土の場合、有効応力法を用いる場合の間隙水圧の求め方について現場の実測値や既往の資料が少ないため、状況に応じて有効応力法と全応力法を使い分けることが望ましい。

表 4.2 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⁶⁾

	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

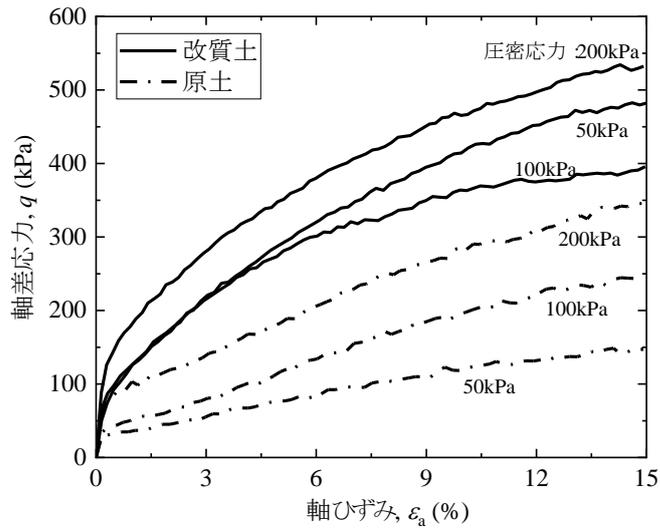


図 4.23 PS 灰系改質材により改質した粘土混じり粗粒土の三軸CU試験結果（軸ひずみと軸差応力の関係）⁶⁾

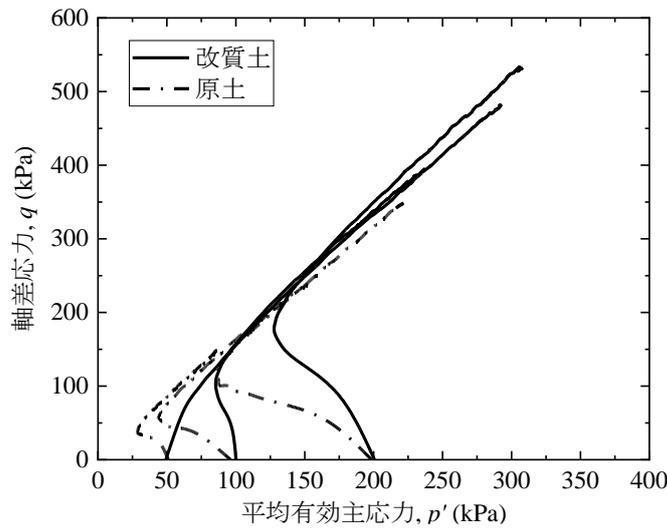


図 4.24 PS 灰系改質材で改質した粘土混じり粗粒土の三軸CU試験結果(有効応力経路)⁶⁾

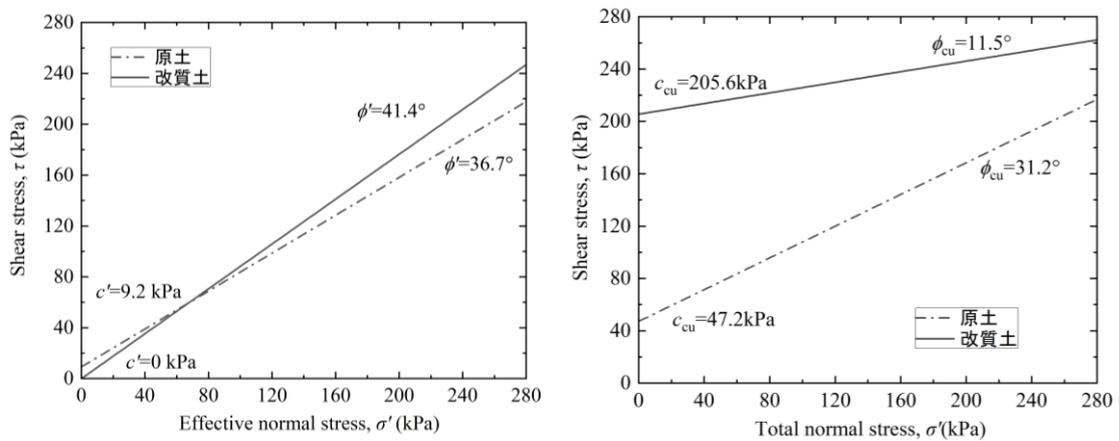


図 4.25 PS 灰系改質材で改質した粘土混じり粗粒土の三軸CU試験による強度定数

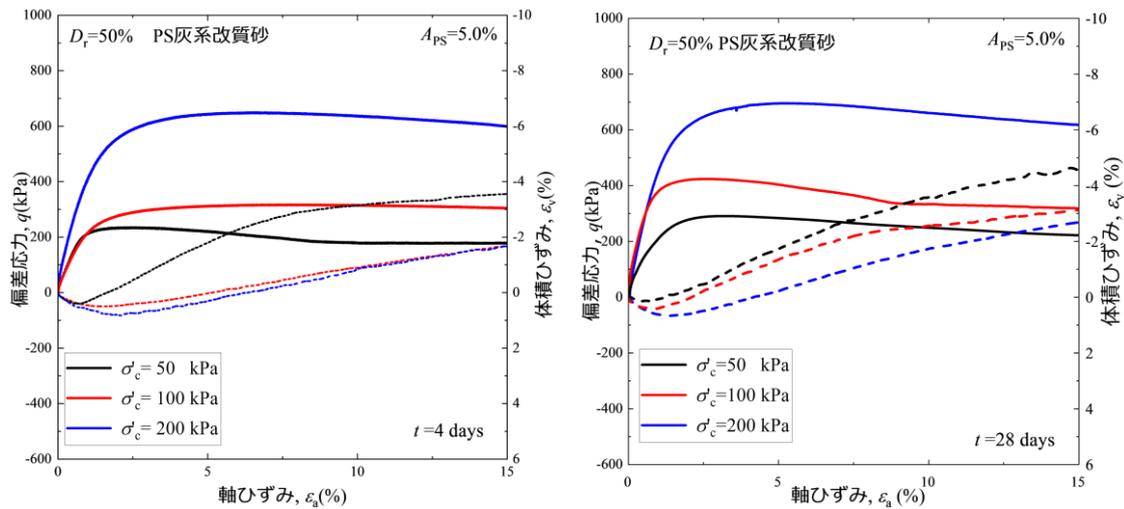
(2) 豊浦砂を改質した土の三軸圧縮強度・液状化抵抗性

PS 灰系改質材で改質した豊浦砂の三軸試験結果を紹介する¹³⁾。図 4.26 は、表 4.3 の供試体条件で実施した圧密排水(CD)三軸試験結果の例である。養生期間、添加率、密度の増加に伴い、最大偏差応力が増加し、正のダイレイタンスの傾向が顕著になることが確認された。図 4.27 は、 $D_r=50\%$ の供試体の圧密排水(CD)三軸試験結果より得られた c_d 、 ϕ_d である。PS 灰系改質材の添加率増加に伴い PS 灰系改質砂の c_d 、 ϕ_d が増加する。

図 4.28 は、表 4.3 の供試体条件で実施した繰返し非排水三軸試験結果の例である。PS 灰系改質砂では過剰間隙水圧の発生が顕著に抑制されている。すなわち PS 灰系改質砂は液状化しないことが確認された。これにはエトリンタイトの生成などが寄与しているものと考えられる。図 4.29 は両振幅ひずみ 0.1%に必要な繰返し載荷回数を示している。豊浦砂に比べて、PS 灰系改質砂の繰返し回数が顕著に大きくなり、また養生期間の増加に伴い、両振幅ひずみ 0.1%に必要な繰返し載荷回数は増加し、変形が抑制されている。

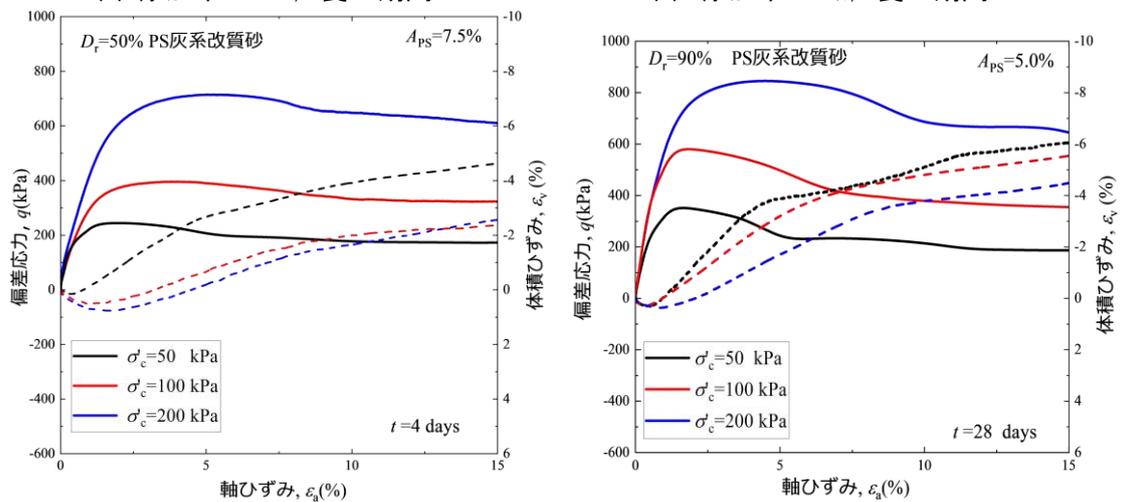
表 4.3 三軸試験供試体の作製条件¹³⁾

	添加率, A_{ps} (%)	相対密度, D_r (%)	養生期間, t (days)
圧密排水三軸圧縮試験	0	50, 90	4, 8, 15, 28
	5.0	50, 90	4, 8, 15, 28
	7.5	50	4
	10.0	50	4
繰返し非排水三軸試験	0	50	4, 8, 15, 28
	5.0		



(a) 添加率 5.0%, 養生期間 4 日

(b) 添加率 5.0%, 養生期間 28 日



(c) 添加率 7.5%, 養生期間 4 日

(d) 相対密度 90%, 養生期間 28 日

図 4.26 PS 灰系改質材で改質した豊浦砂の圧密排水(CD)三軸試験結果¹³⁾

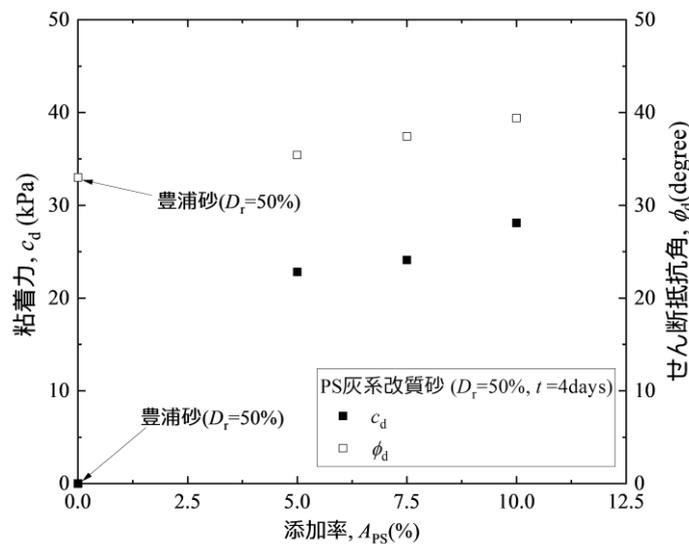


図 4.27 PS 灰系改質材で改質した豊浦砂の強度定数の変化($D_r=50\%$)¹³⁾

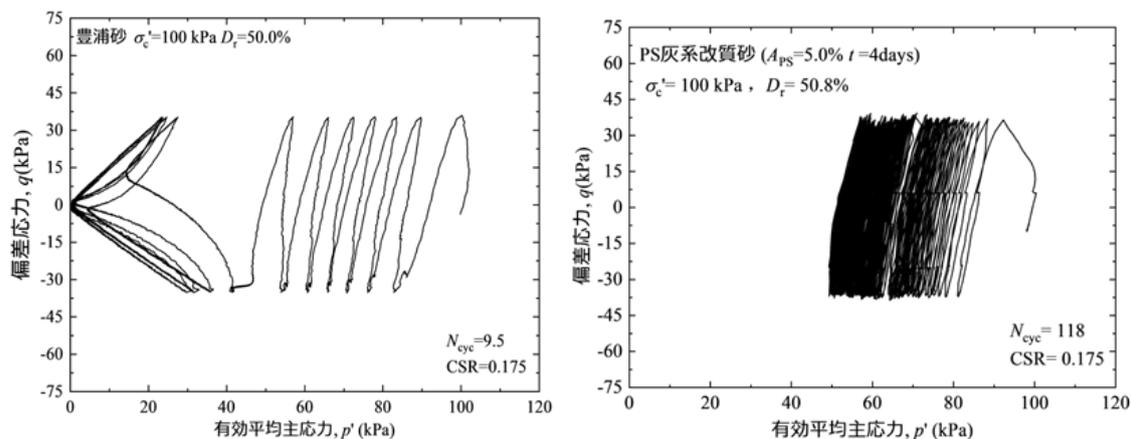


図 4.28 豊浦砂と PS 灰系改質材で改質した豊浦砂の繰返し非排水三軸試験結果¹³⁾

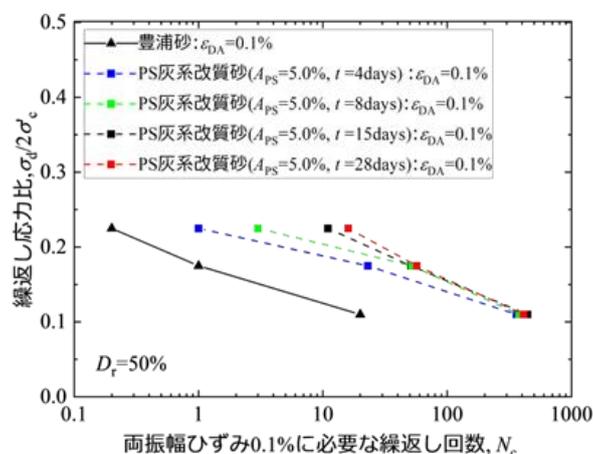


図 4.29 繰返し非排水三軸試験における両振幅ひずみ 0.1%に必要な繰返し回数の関係¹³⁾

4.6 透水係数

PS 灰系改質材で改質した粘性土の透水試験結果を紹介する¹⁴⁾。試験では青粘土の含水比 w を $1.5w_L$ に調整し、PS 灰系改質材を乾燥質量比で 15, 20, 25% 添加し 24 時間密封養生した。図 4.30 は用いた青粘土と PS 灰系改質材の粒度である。密封養生後に解きほぐしを行って A 法により改質土を締固め、それから 72 時間水浸養生を行った。養生終了後に変水位透水試験を実施し、試験後の供試体を用いてコーン指数試験も実施した。図 4.31 は、PS 灰系改質材により改質した青粘土の透水係数、コーン指数の変化を示している。同図では、添加率 A の増加に伴い k は低下し、 q_c は増加したことが認められる。

続いて青粘土を $w = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5w_L$ に調整し、PS 灰系改質材を 15% 添加した。24 時間密封養生したのちに、締固めエネルギー $2.0E_c, 1.0E_c, 0.5E_c$ で改質土を締固め、さらに図 4.30 の供試体と同じ条件で水浸養生した後、変水位透水試験とコーン指数試験を実施した。図 4.32 は、各 E_c の締固め曲線を示している。図 4.33 には締固め時の PS 灰系改質土の w に対する透水係数 k とコーン指数 q_c をそれぞれ示した。いずれの E_c においても透水係数 k は最適含水比 w_{opt} より湿潤側で最小値を示し、コーン指数 q_c は w_{opt} より乾燥側で最大値を示し、自然土と同じような傾向である。

なお、改質土の透水係数やコーン指数には、原土の含水比、改質材の化学的組成、原土や改質材の粒度、締固め前後の養生環境や期間などが影響するので注意が必要である。図 4.34 には、比較的粒径の大きい各種 PS 灰の粒度と、その PS 灰で改質した藤森粘土の透水係数 k をそれぞれ示した¹⁵⁾。透水試験供試体は、最適含水比で最大乾燥密度の 90% の乾燥密度となるよう静的締固めにより作製されたものである。図 4.31 の傾向は異なり、添加率 A の増加に伴い k は増加しており、PS 灰の粒度や化学的組成などが影響していると考えられる。

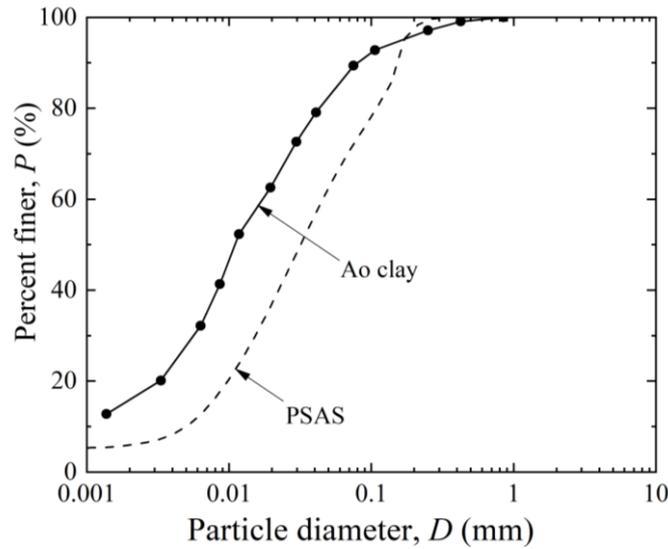


図 4.30 青粘土と PS 灰系改質材(PSAS)の粒度

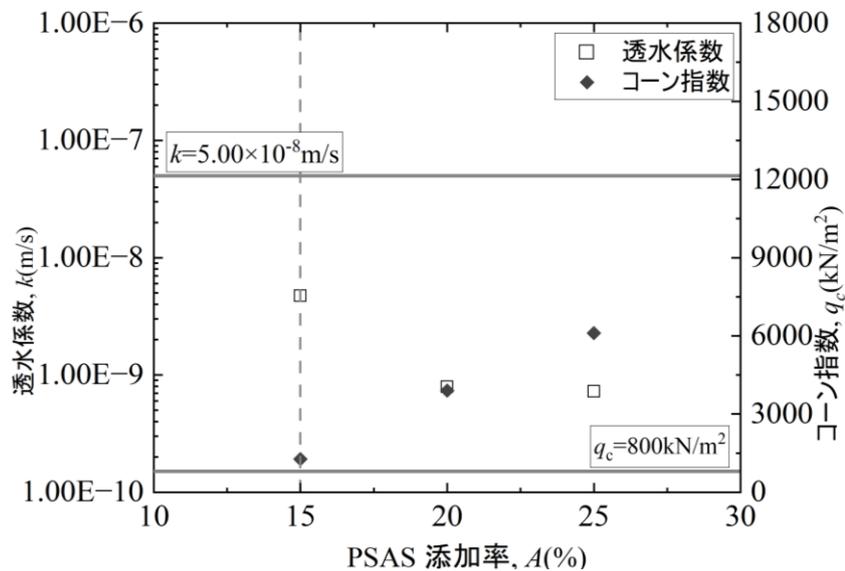


図 4.31 PS 灰系改質材により改質した青粘土の透水係数, コーン指数の変化¹⁴⁾

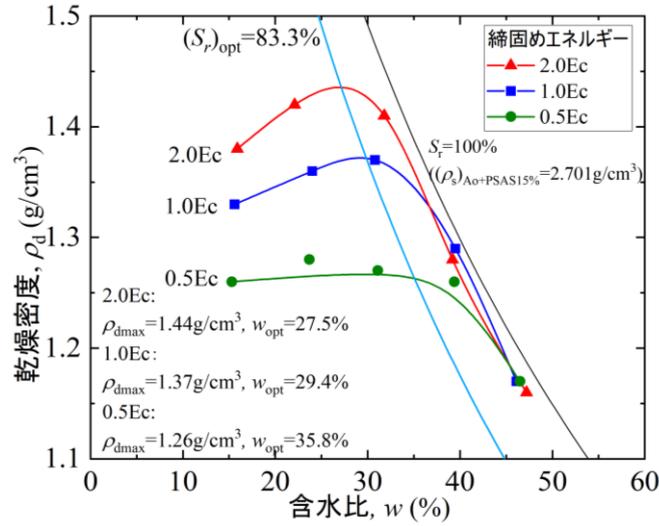


図 4.32 PS 灰系改質材により改質した青粘土の異なるエネルギーに対する締固め曲線¹⁴⁾

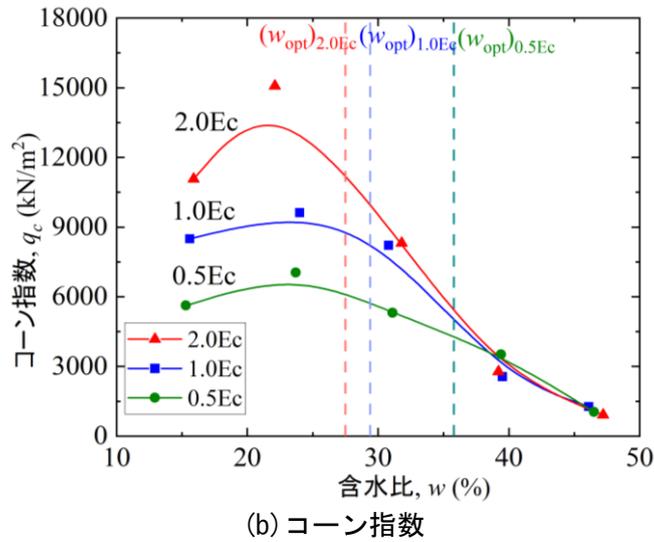
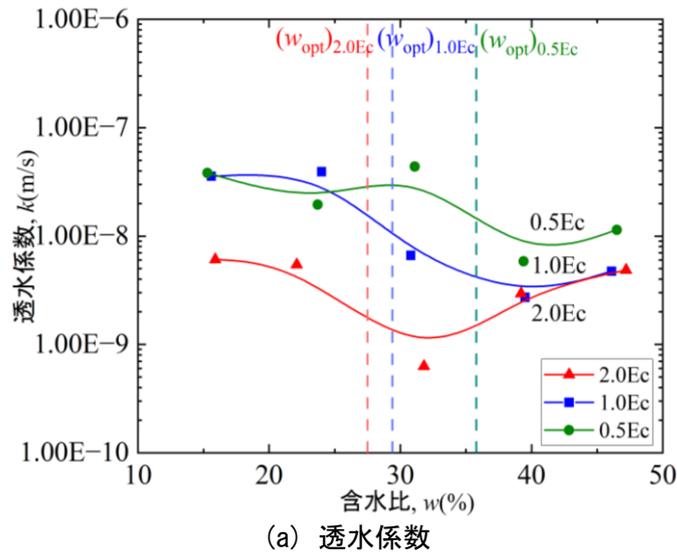
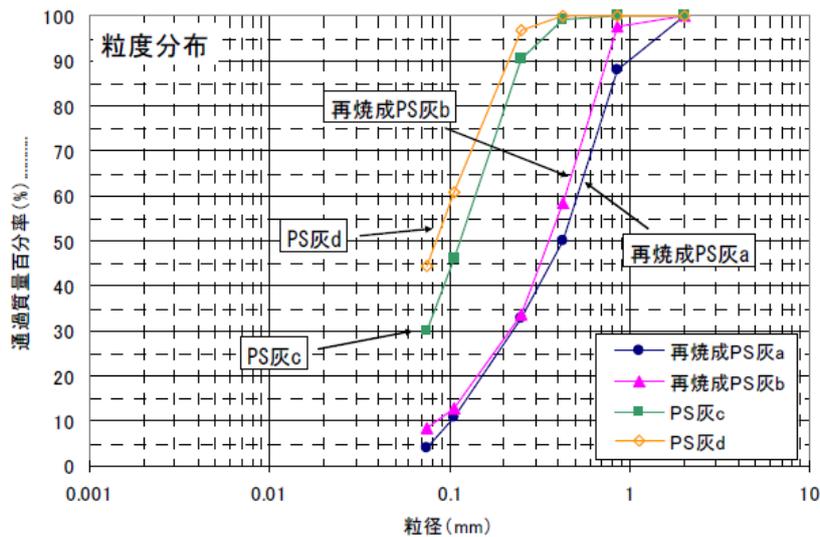
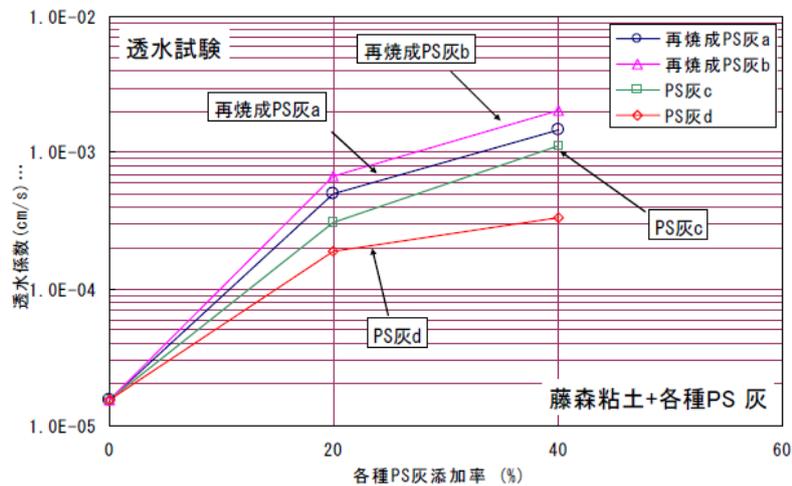


図 4.33 PS 灰系改質材により改質した青粘土の含水比に対する透水係数とコーン指数¹⁴⁾



(a) 各種 PS 灰の粒度¹⁵⁾



(b) PS 灰改質土の透水係数

図 4.34 PS 灰系改質材により改質した青粘土の含水比に対する透水係数とコーン指数¹⁵⁾

4.7 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。本手引き(案)で対象とする改質土の場合、近年に開発・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。しかし改質材粒子の多孔質性が損なわれない限り、改質材の物理的吸水効果は失われず、エトリンガ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。また、必要に応じて室内試験などにより、事前に長期安定性を検証することも有効である。検証方法は現場条件を反映している必要があり、特に供試体の拘束条件は重要である。

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、本手引き(案)で対象とする改質土の場合、近年に開発・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の粒子の多孔質性が損なわれない限り、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。

また、必要に応じて室内試験などにより、事前に長期安定性を検証することも有効である。検証方法は現場条件を反映している必要があり、特に供試体の拘束条件は重要である。現場で想定されないような無拘束の状態、たとえば一軸圧縮試験供試体を無拘束の状態での長期安定性の検証に用いると、実際の安定性と乖離が生じる恐れがある。

本項では、現時点で得られている PS 灰系改質土の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¹⁶⁾

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4.34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4.35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。

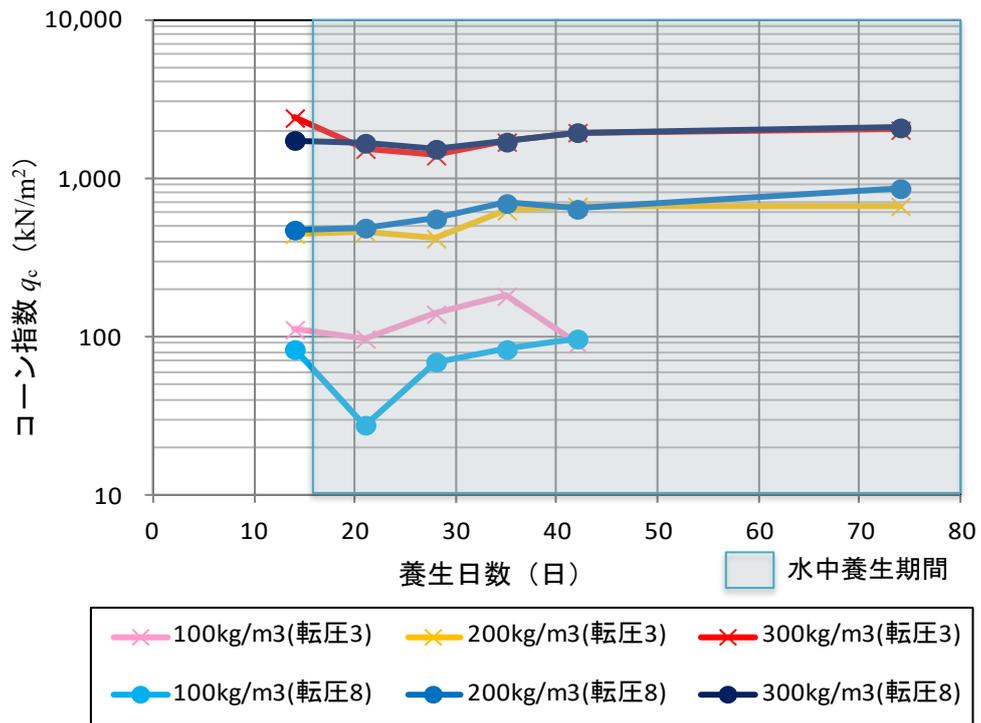


図 4.34 水中養生試料によるコーン指数の経時変化¹⁶⁾

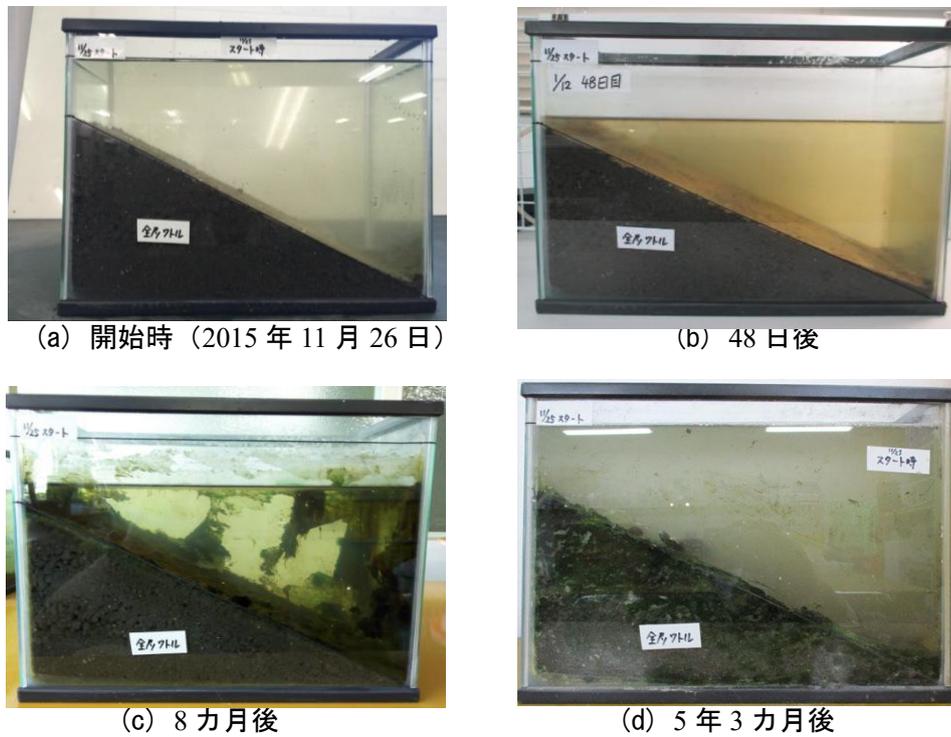


図 4.35 静穏環境での水中安定性の確認(水槽実験)

(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、PS 灰系改質材で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 4.36 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。

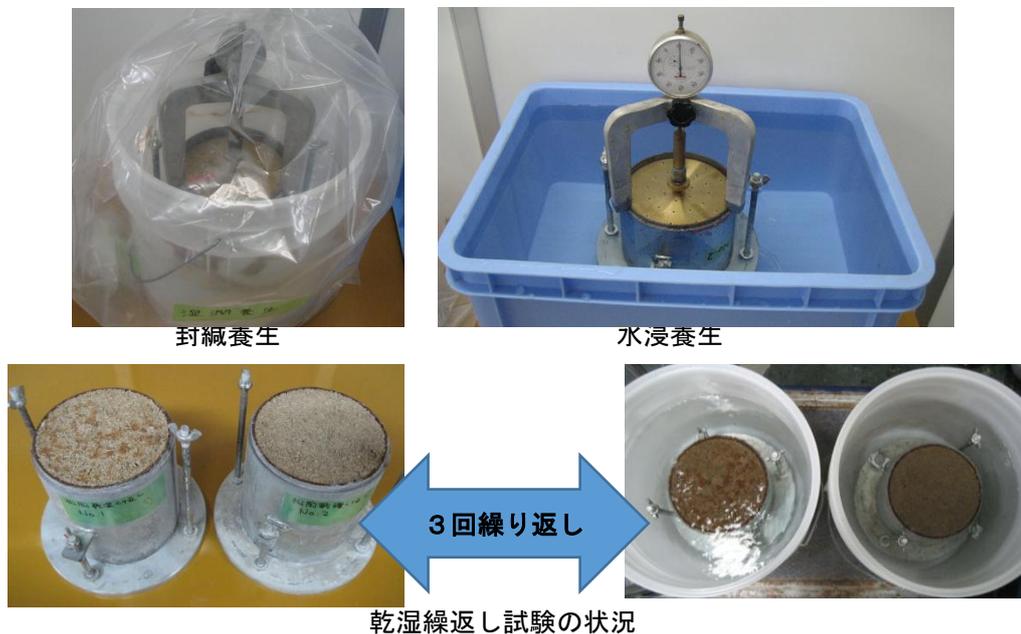


図 4.36 長期耐久性試験の実施状況

図 4.37 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¹⁷⁾と同程度である。

図 4.38 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 20%配合した上でコーン指数供試体を作製し、その供試体を「乾燥炉による乾燥」と「水浸による湿潤」の環境で養生している様子を示している¹⁸⁾。表 4.3 は、乾湿繰返し養生条件を示している。乾燥時の温度を 40℃あるいは 80℃に設定し、所定の乾燥期間(2, 5, 8, 14 日)を与えた後 1 日の湿潤(水浸)養生を行ってコーン指数試験を実施している。なお、乾燥期間が 2 日の場合は、1 日の湿潤(水浸)養生後に再び同じ条件の乾湿を繰返すことも実施した。繰返し回数は最大

で15回で、所定回数の乾湿養生を繰返し後、コーン指数試験を実施した。また乾湿養生の結果と比較するために、水浸養生のみさせた供試体のコーン指数試験も実施している。

図4.39は、乾湿養生および水浸養生を行った供試体のコーン指数を、養生日数および積算温度に対してプロットしたものである。なお積算温度 M は下記の式で評価している。

$$M_2 = \Delta t * (2.1)^{(T-T_0)/10}$$

ここで T は養生温度(°C)、 T_0 は参照温度(-10°C)、 Δt は養生期間(日)である。図4.39では、乾湿養生の供試体が水浸養生の供試体より大きなコーン指数 q_c を示している。そして両者のコーン指数 q_c は積算温度に対して相関が認められる。

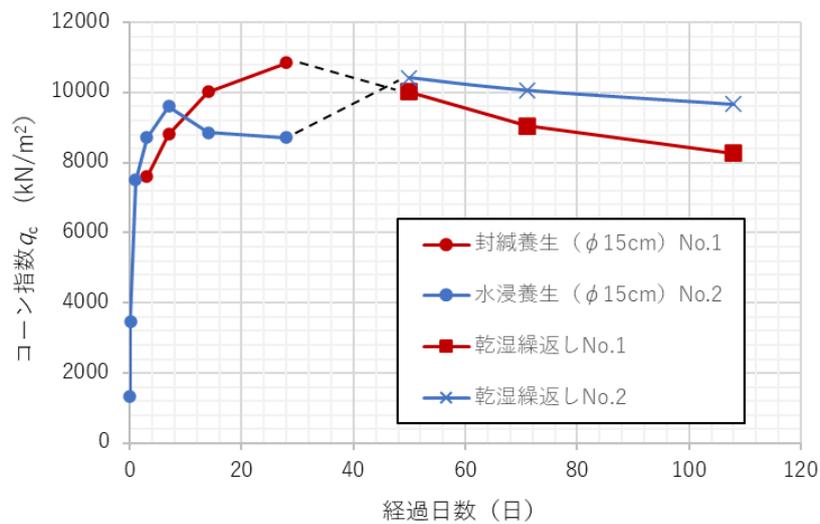


図 4.37 長期安定試験および乾湿繰返しによる耐久性試験の結果

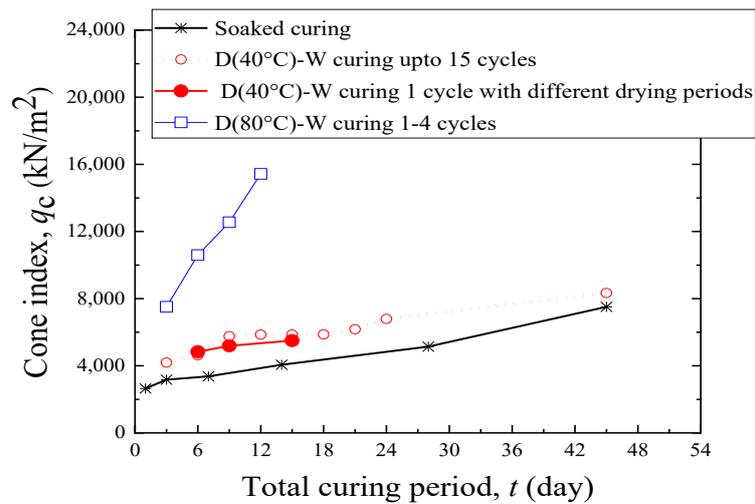


(a) 乾燥 (b) 湿潤(水浸)

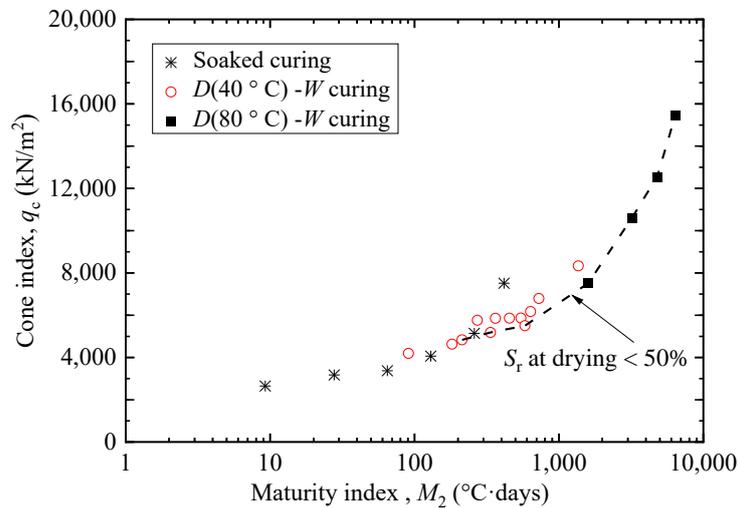
図 4.38 コーン指数供試体の乾湿繰返し¹⁸⁾

表 4.3 PS 灰系改質土のコーン指数供試体の養生条件¹⁸⁾

養生方法	40°C 乾燥期間 (日)	80°C 乾燥期間 (日)	湿潤(水浸)期間 (日)	繰返し回数
水浸	---	---	1, 3, 7, 14, 28, 45	---
乾湿	2	---	1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 15
	5, 8, 14			1
	---	2		1, 2, 3, 4



(a) 養生日数



(b) 積算温度

図 4.39 コーン指数供試体の乾湿繰返しによる耐久性試験の結果¹⁸⁾

(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。

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 4.40 に示す。

pH の経時変化を図 4.41 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 4.41 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。



(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 4.40 タンクリーチング試験用改質土の作製とその実施状況

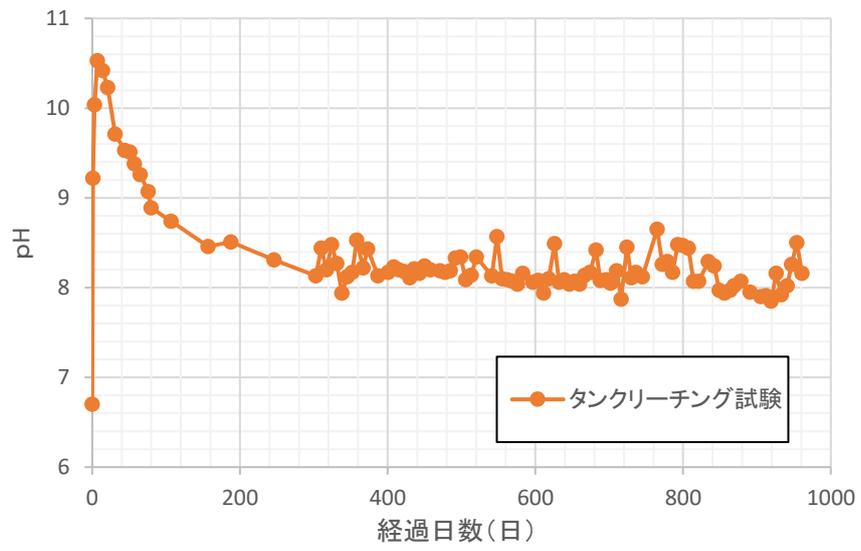


図 4.41 浸漬水の pH の経時変化

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) Jamil, M. A. B., Hayano, K., Kassa, A., Sekine, R., & Mochizuki, Y. (2024). Curing effects on geotechnical properties of clays treated with palm kernel shell ash and rice husk ash: Insights from water absorption characteristics of stabilizers. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02947.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 株式会社フジタ FT マッドキラー工法パンフレット
- 10) Kassa, A., Sekine, R., Dorji, T., Pathak, G. K., Hayano, K., Yamauchi, H., & Mochizuki, Y. (2024). Insights into water absorption characteristics of various waste-based inorganic additives and their application for soil stabilization. *Journal of Cleaner Production*, 141470.
- 11) セメント協会標準試験方法:セメント系固化材による改良体強さ試験方法, JCALL-01, 2006.
- 12) 仁平学, 山内裕元, 早野公敏: 小型モールドと土壤硬度計を利用したコーン指数推定方法の適用性検討, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 13) Liu Yinglong, Maliki Otieboame Djandjieme, 早野公敏, 山内裕元: 三軸試験によるペーパースラッジ灰系改質材を添加した砂の強度変形特性, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 14) 飯田理紗子, 早野公敏, 山内裕元, 山崎昌平: ペーパースラッジ灰系改質土の締固め・透水・強度特性と締固め管理に関する考察, 第 59 回地盤工学研究発表会, 2024.
- 15) 望月美登志, 齊藤悦郎, 土開健義, 小野健司, 吉野広司: PS 灰で改良した土の透水性について, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 3-069, 2005.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) Tabassum, N., Sekine, R., Hayano, K., Phan, B. N., & Yamauchi, H. (2023). Insights into durability assessment for compacted soils treated with paper sludge ash-based stabilizers. *Soils and Foundations*,

63(6), 101399.

5. 配合設計の考え方

5.1 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、改質土の品質評価として、ここでは以下の4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
- ④ 環境安全性による品質評価

なお、コンシステンシーや三相状態の改善を目的として改質材を用いる場合には、再生石膏の適用例の記述を参照されたい。

(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 5.1 に示す発生土の土質区分²⁾と表 5.2 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 5.3 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 5.1 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 環廃産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 5.2 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 5.3 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 5.1** に乾燥密度規定の適用範囲を，また**表 5.4** 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5.4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。

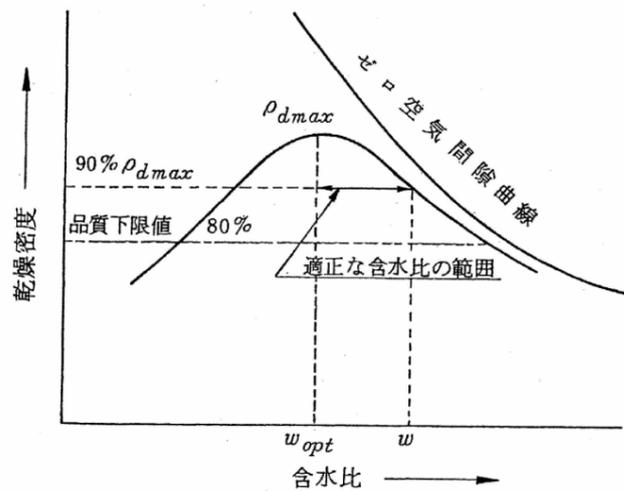


図 5.1 土の突固め曲線⁵⁾

表 5.4 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を確保しうる範囲	トラフィカビリティを確保しうる範囲
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、 $c=q_u/10$ で c を求めるといった対応が望ましい。

表 5.5 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	〃

5.2 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 5.2 に示す。

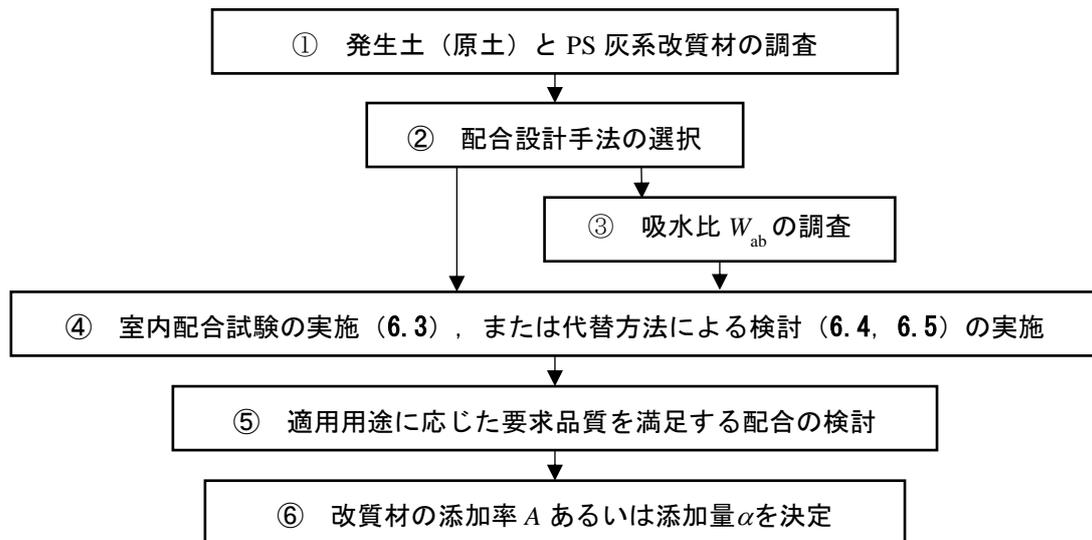


図 5.2 配合設計の流れ

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 5.2①）。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，原則として環境安全性に関連する試験

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 5.3 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 5.4 または 5.5 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かが選択し（図 5.2②），必要に応じて吸水比 W_{ab} の調査を実施したうえで（図 5.2③），配合設計を実施する（図 5.2④）。

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 5.2⑤). 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 5.2⑥).

5.3 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.

強度増加などを目的として改質材を用いる場合の配合試験の標準的な手順を以下に示す. なお, コンシステンシーや三相状態の改善を目的として改質材を用いる場合には, 再生石膏の適用例の記述を参照されたい.

(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 5.6 に室内配合仕様の一例を, 図 5.3 に PS 灰系改質材を例とした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) などを参考に, 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 5.6 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

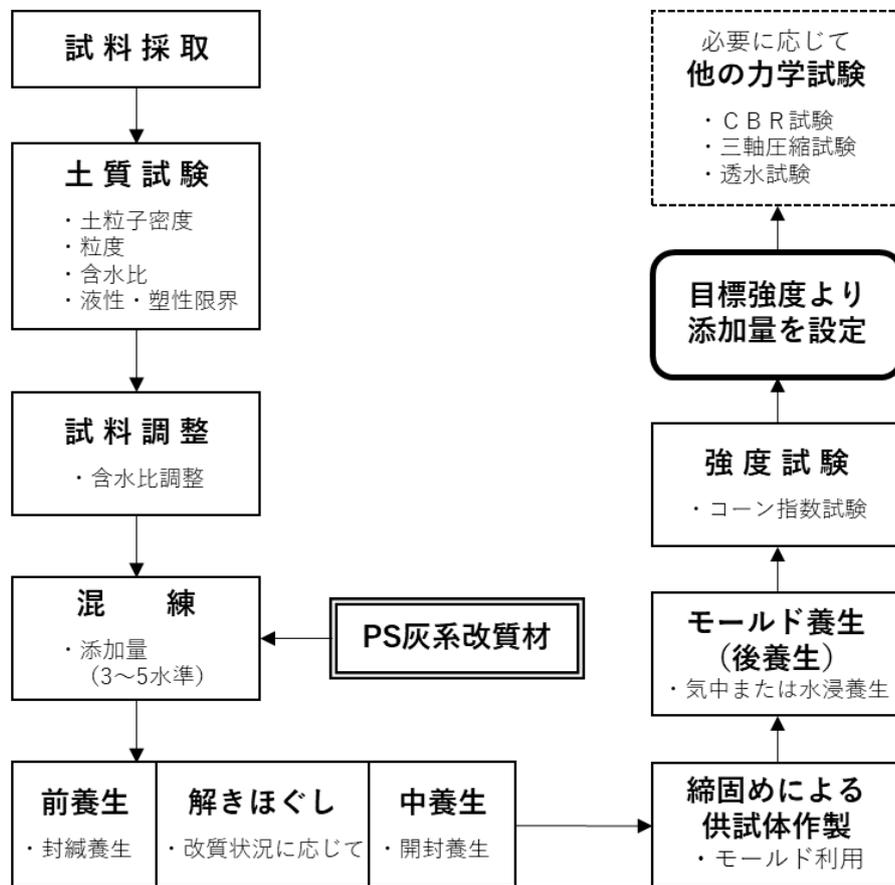


図 5.3 PS 灰系改質材を例とした室内配合試験のフロー

(3) (現場/室内) 強度比 R の設定

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 5.4 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 5.7 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 5.7 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 5.7 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 a_{\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⁾。

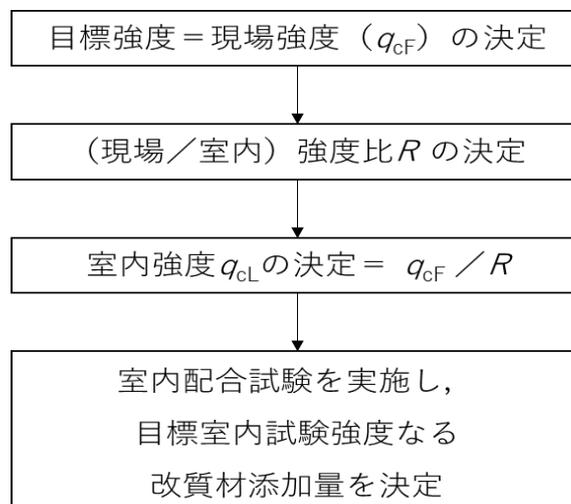


図 5.4 改質材添加量の決定フロー³⁾

表 5.7 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	クラムシエル バックホウ	0.2~0.5

5.4 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 5.2）。

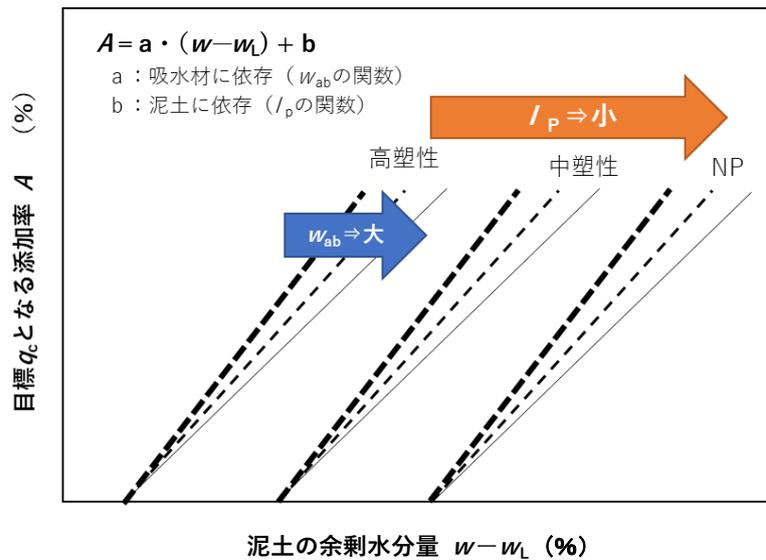


図 5.4 原土の物理特性 (w , w_L と I_P) と改質材の吸水比 W_{ab} に基づく添加率 A の設定

(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 5.4 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

$$A = a \cdot (w - w_L) + b \quad (5.1)$$
- 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 5.5 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¹⁾。また、図 5.6 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¹⁾。図 5.7 は図 5.6 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¹⁾。これらの結果は、図 5.4 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 5.5 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。

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

$$= a((w-w_L) + 37.8 \log I_p - 33.5) \quad (5.2)$$

他の目標強度に相当する添加率 A の推定式は、表 5.8 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 5.7 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。

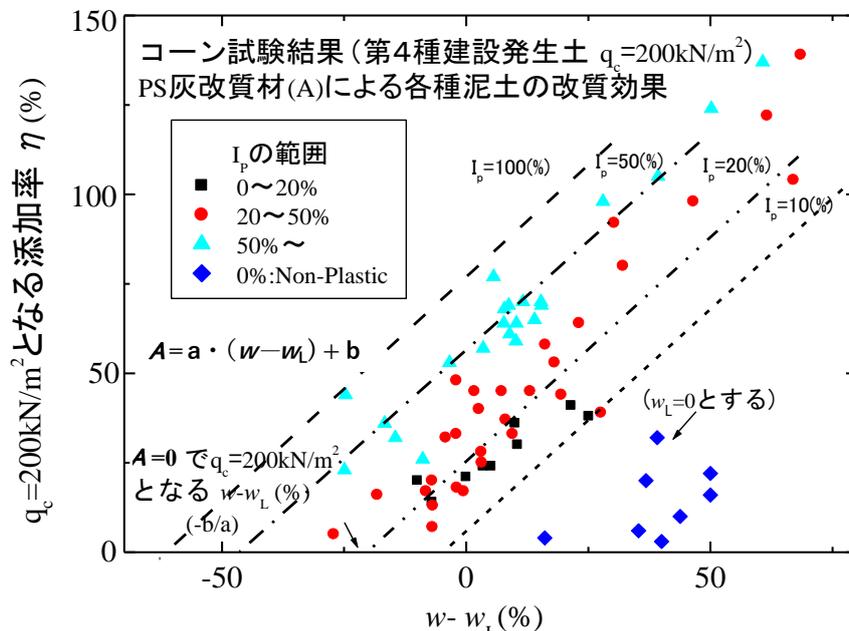


図 5.5 $(w-w_L)$ と $q_c=200 \text{ kN/m}^2$ を満たす添加率 A の関係¹¹⁾

表 5.8 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	$A = a((w-w_L)+56.8\log I_p-52.3)$

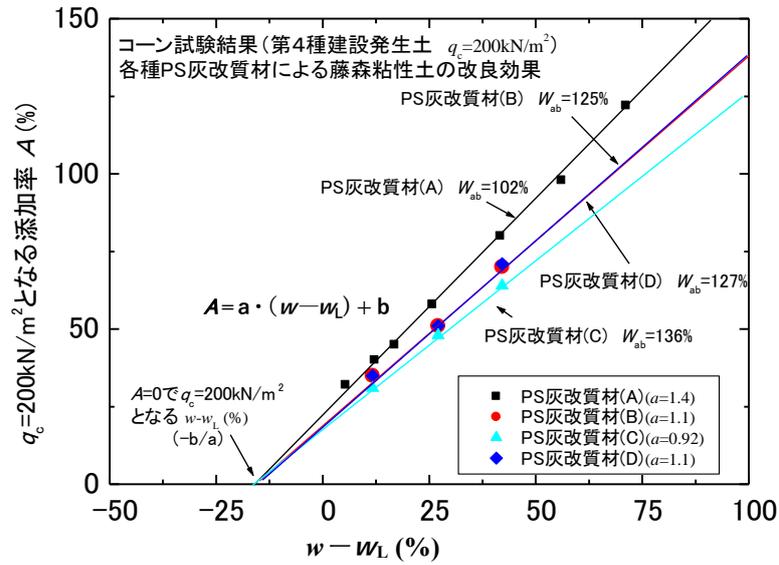


図 5.6 $(w-w_L)$ と $q_c=200 \text{ kN/m}^2$ を満たす添加率 A の関係¹¹⁾

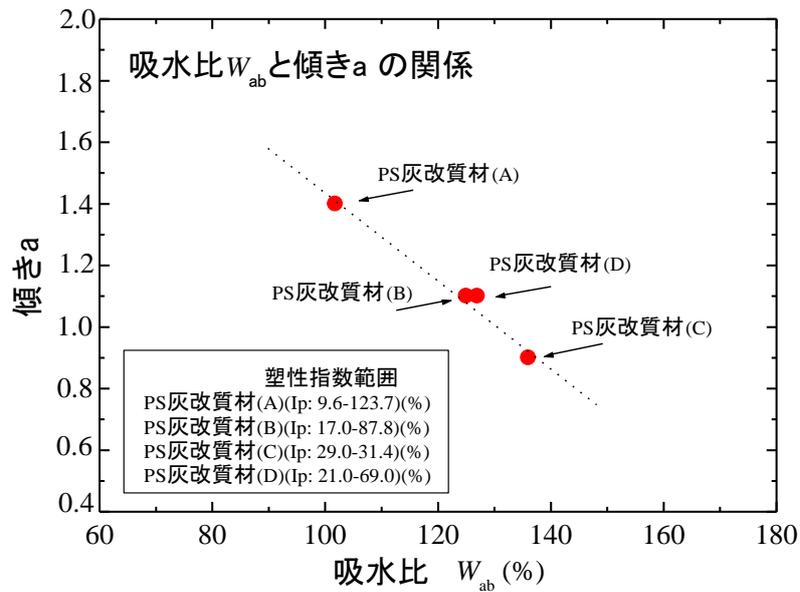


図 5.7 吸水比 W_{ab} と傾き a の関係¹¹⁾

5.5 ふるい法の吸水比 W_{ab} を利用する方法

本手法は締固めによる品質評価に着目し、ふるい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（粘性土混じり砂礫等）の締固め曲線と、養生に伴う PS 灰系改質材の吸水性能の変化をそれぞれ適切に評価することが重要である。締固め曲線の整理に一般に用いられる JIS A 1203 による実測含水比に対して、本手法では 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（3.1, 図 5.8）。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グタ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。エトリングタイトは、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 5.9）。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。

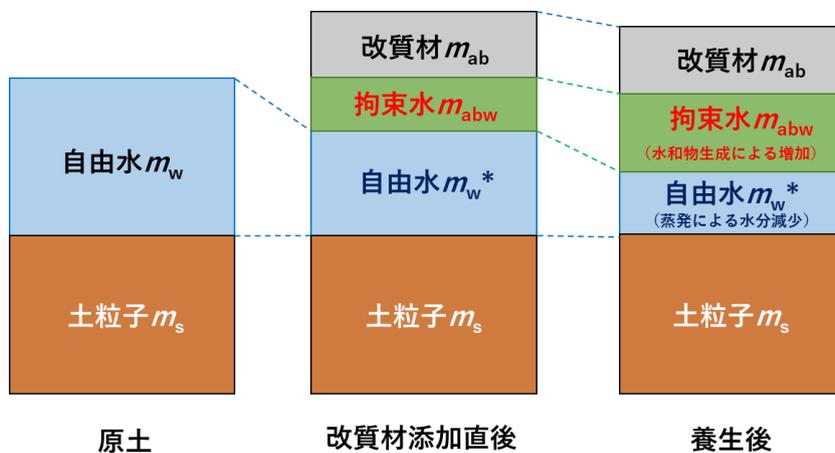
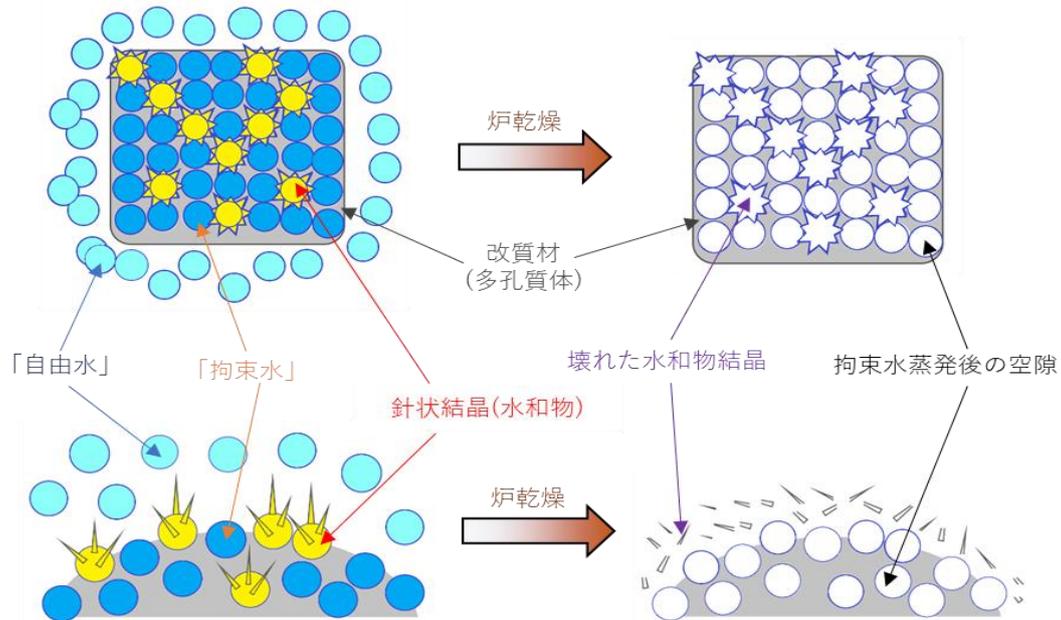


図 5.8 PS 灰系改質材の吸水による拘束水量変化のイメージ

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。

$$w = \frac{m_w^* + m_{abw}}{m_s + m_{ab}} \times 100 \quad (5.3)$$

$$w^* = \frac{m_w^*}{m_s + m_{ab} + m_{abw}} \times 100 \quad (5.4)$$



- ・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。

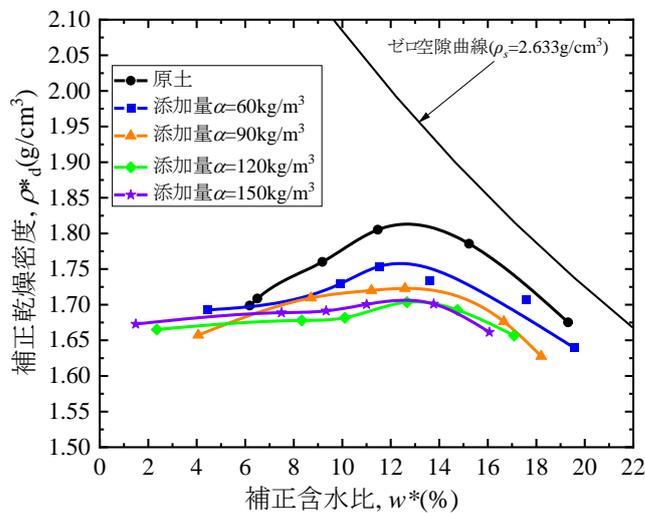
$$A = \frac{m_{ab}}{m_s} \times 100 \quad (5.5)$$

$$W_{ab} = \frac{m_{abw}}{m_{ab}} \times 100 \quad (5.6)$$

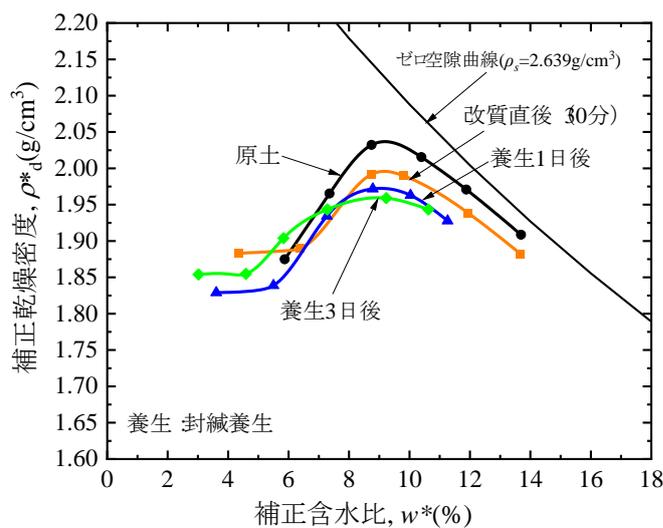
式(5.3)~(5.6)を用いて、 w^* は実測含水比 w 、改質材の添加率 A および吸水比 W_{ab} から次式により求められる。

$$w^* = \frac{w \left(1 + \frac{A}{100}\right) - \frac{A}{100} \frac{W_{ab}}{100}}{1 + \frac{A}{100} \left(1 + \frac{W_{ab}}{100}\right)} \times 100 \quad (5.7)$$

(5.7)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 5.10 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 5.10 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 5.10 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 5.11 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。

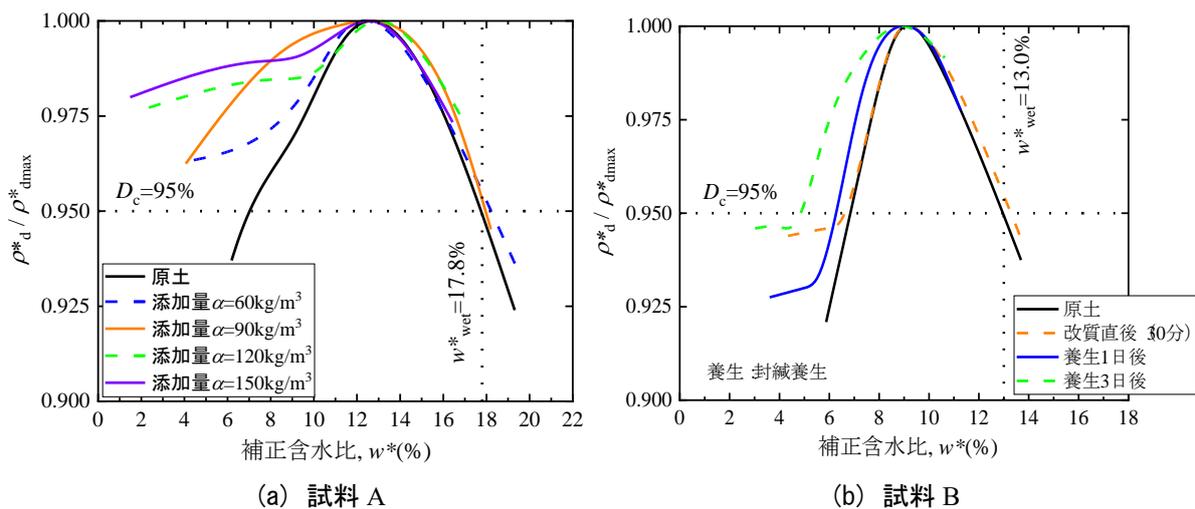


図 5.11 各試料の w^* と ρ^*_d / ρ^*_{dmax} の関係¹²⁾

(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。

$$A = \frac{\alpha}{\rho_t} \left(1 + \frac{w_0}{100} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (5.8)$$

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.

$$w = \frac{w_0}{1 + \frac{A}{100}} (\%) \quad (5.9)$$

式(5.9)を式(5.7)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.

$$w^* = \frac{\frac{w_0}{100} - \frac{A \cdot W_{ab}}{100 \times 100}}{1 + \frac{A}{100} \left(\frac{W_{ab}}{100} \right)} \times 100 (\%) \quad (5.10)$$

式(5.10)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.

$$w_0 = w^* + A \left(\frac{w^*}{100} + \frac{W_{ab}}{100} + \frac{w^* \cdot W_{ab}}{100^2} \right) (\%) \quad (5.11)$$

式(5.8)を式(5.11)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.

$$w_0 = \frac{w^* + \frac{100\eta\alpha}{\rho_t}}{1 - \frac{\eta\alpha}{\rho_t}} (\%) \quad (5.12)$$

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

式(5.12)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.

$$\alpha = \frac{w_0 - w^*}{\eta(100 + w_0)} \cdot \rho_t \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (5.13)$$

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

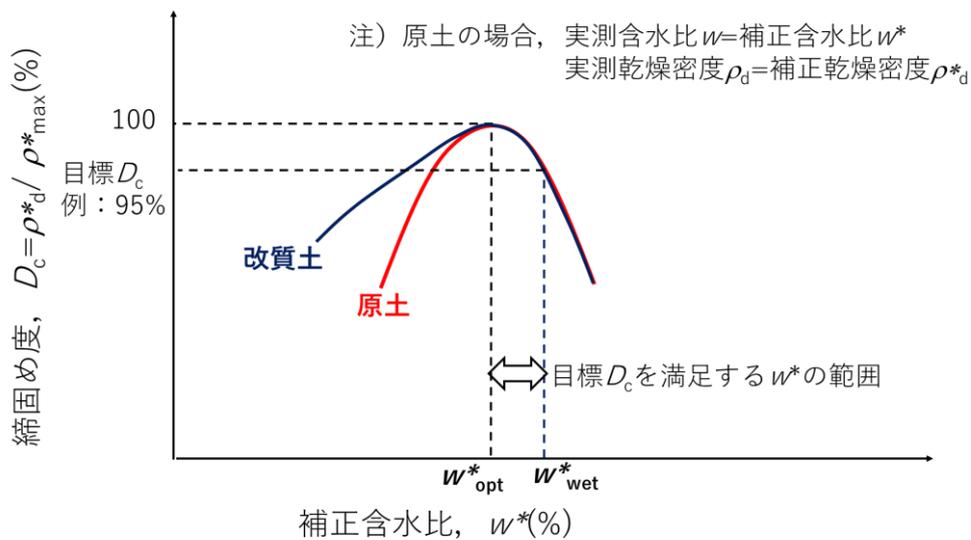


図 5.12 原土と改質土の $w^* \sim D_c = \rho_d^* / \rho_{dmax}^*$ の関係

ここで図 512 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 5.11 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。
- ⑤ 式(5.13)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.

6. 環境安全性の考え方

6.1 環境安全性に関する要求品質と検査方法

吸水性材料で改質した発生土を再生利用する場合は、改質後の土を対象として、重金属等の環境安全性が、利用用途の要求事項に適合していることを確認する必要がある。

改質土の環境安全性に関する基本的な考え方は、「再生石膏粉の有効利用ガイドライン(第1版)」¹⁾に示されており、本手引きでも「再生石膏粉の有効利用ガイドライン」を準用する。本節では、重金属等の環境安全性について、同ガイドラインから引用する形で解説する。

(1) 重金属等の環境安全性の考え方

重金属等に関する環境安全品質検査方法の概要を表 6.1 に示す。

吸水性材料による改質土の環境安全性は、適用現場の発生土等を用いて室内配合試験を行い確認する。建設発生土等と混合して改質を行う場合は、平成 13 年環境省通知の考え方に従い、改質後の土に対して、土壤環境基準（農用地関係は除く）への適合性を判定する H3 環告 46 号を適用する。なお、建設発生土等の原土については、土壤環境基準が満足していることを予め確認した上で利用することを原則とする。また、処分場への運搬の前処理として改質を行う場合は、管理型産業廃棄物処分場等への受け入れのための判定試験「産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法」(S48 環告 13 号)を行う。

ただし、環境安全性に係る試験項目等については、条例や他法令等への適合が求められる場合があるため、受入れ先の条件等を確認する必要がある。

表 6.1 環境安全品質検査方法（重金属等）の概要¹⁾に加筆

利用形態	工種・用途	試験方法	測定項目	養生期間
土構造物への利用	盛土材・覆土材、埋立材	H3 環告46号	水銀，鉛，カドミウム，六価クロム，ヒ素，セレン，フッ素，ホウ素	混合後7～28日程度
	路床，路盤材			
その他の利用	廃棄物混じり土等の土と廃棄物の分別・分球	S48 環告13号	水銀，鉛，カドミウム，六価クロム，ヒ素，セレン	混合直後
	処分場以外への運搬時の前処理			
	処分場への運搬時の前処理			

(2) 試料調整

室内配合試験に用いた改質土を対象とし、参照する各試験方法の試料調製方法に基づき試料調製を実施する。室内配合試験で養生が行われる場合、養生の日数は目安として 7 日以上 28 日以内とする。

(3) 試験方法

参照する各試験方法に基づく。

(4) 検査項目

検査項目を**表 6.1** に示す。

土壤環境基準に含まれる項目のうち、重金属等（農用地関係は除く）を検査項目とする。

(5) 基準値

基準値を**表 6.2** に示す。

基準値は、土壤環境基準と同等とする。ただし、再利用が想定されない港湾施設の構造物を構成するセメント固化体（助剤として再生石膏粉を用いる場合）については、総合報告書²⁾の考え方にに基づき、同報告書の港湾用途基準と同等とする。また、処分場運搬時の前処理としての改質の場合は、管理型処分場受入基準（S48 環告 13 号）と同等とする。

表 6.2 環境安全品質基準（重金属等）¹⁾に加筆

項目	一般用途溶出量基準 ^{注1)} (mg/L)	管理型処分場受入基準 ^{注2)} (mg/L)
水銀（化合物を含む）	0.0005以下	0.005以下
鉛（化合物を含む）	0.01以下	0.3以下
カドミウム（化合物を含む）	0.003以下	0.09以下
六価クロム（化合物を含む）	0.05以下	1.5以下
砒素（化合物を含む）	0.01以下	0.3以下
セレン（化合物を含む）	0.01以下	0.3以下
ふっ素（化合物を含む）	0.8以下	-
ほう素（化合物を含む）	1以下	-
試験方法	H3環告46号	環告13号
参考とした基準等	土壤環境基準	金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準

注1) 再利用が想定されない港湾施設の構造物を構成するセメント固化体，ならびに処分場運搬時の前処理としての改質は対象としない。

注2) 管理型処分場受け入れ時の前処理としての改質の場合のみを対象とする。

6.2 重金属等の溶出特性

無機系吸水性材料のうち、PS 灰、バイオマス灰、再生石膏粉等からは、ふっ素、六価クロム、砒素、鉛といった有害重金属等の溶出が検出されることがあり、その一部の溶出量は土壌環境基準を上回ることが知られている。

一方、このような材料でも使用量を限定するなど、適切な方法で対処することにより、改質土から有害重金属等の溶出量を土壌環境基準以下に抑制することができる。

(1) 吸水性材料の溶出特性

PS 灰、バイオマス灰および再生石膏粉の主要成分の一例を図 6.1 に示す。これらの材料は、いずれも吸水性材料の原料になり得るものであるが、廃棄物由来の副産物の性状や含有成分は異なっている。

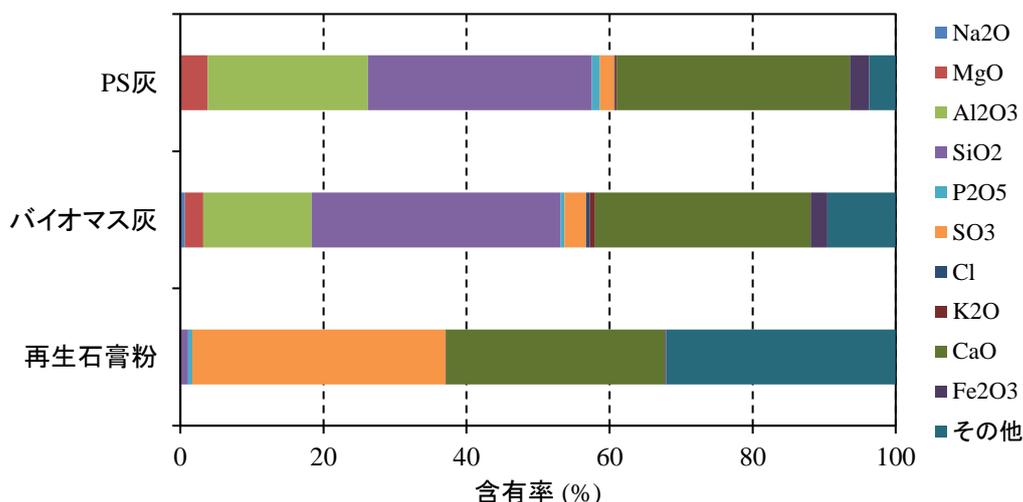


図 6.1 廃棄物由来副産物の主要成分の一例

これらの副産物には土壌環境基準で規定されている有害物質(重金属等)が含有しており、場合によっては土壌環境基準を上回る溶出量が検出される。例えば、PS 灰や再生石膏粉ではふっ素溶出量が環境基準の 0.8mg/L を上回るケースがあり、また BB 灰では六価クロム、鉛、ふっ素の溶出が高いケースが散見される。これらの副産物からの重金属等の一般的な溶出挙動を表 6.3 に示す。

吸水性材料としてこれらの材料で軟弱土を改質する場合、改質土は地盤材料として土壌に利用されることから、汚染の拡散防止など、環境安全性を確保することが必然的に求められる。

表 6.3 焼却系廃棄物からの重金属類の一般的な溶出挙動

項 目	ふっ素	六価クロム	砒素	セレン	鉛	カドミウム	ほう素
PS 灰	▲	△			△		
バイオマス灰	△	▲	△		▲		
再生石膏粉	▲		△				
<p>【備考】 △：溶出量が土壤環境基準を上回ることが稀にある ▲：溶出量が土壤環境基準を上回ることが頻繁にある ×：溶出量が第二溶出基準（廃棄物埋立基準）を上回ることがある</p>							

(2) 吸水性材料で改質された土の溶出特性

PS 灰、バイオマス灰、再生石膏粉などを吸水性材料として利用し、建設発生土等に混合して改質し、地盤材料として利用する場合、土壤環境基準を満足させる必要がある。

吸水性材料を建設発生土などの土壤に添加した場合、希釈効果や土壤への吸着効果³⁾等により、改質土からの重金属等の溶出量は吸水性材料からの溶出量よりも低減されるのが一般的である。また、母材となる土（原土）に対する吸水性材料の添加率は、数%～10%程度の場合が多く、土壤環境基準をわずかに上回るような吸水性材料を添加したケースでは、土壤環境基準を下回る場合も多い。

その一方で、母材となる土壤によってはアルカリ性の高い吸水性材料を添加することで pH が上がるとともにふっ素の等陰イオンが土壤吸着されず、改質土壤の溶出量が土壤環境基準を上回って検出されることも散見される。このように土壤に吸水性材料が混合された場合、重金属等の溶出挙動は複雑であり、一律に評価することは困難である。したがって、吸水性材料を建設発生土等に混合して改質を行う場合は、平成 13 年環境省通知の考え方に従い、改質後の土に対する土壤環境基準への適合性を判定する必要がある。

6.3 重金属等の溶出抑制対策例

無機系吸水性材料のうち、PS 灰およびバイオマス灰からの有害重金属等の溶出を抑制する技術を一例として紹介する。

(1) 有害重金属等の溶出抑制原理

前項に示すように、吸水性材料には微量の有害重金属等含まれているため、吸水性材料からこれらの有害物の溶出を抑制する取り組みが各所でなされている。ここでは、その一例として PS 灰やバイオマス灰を再資源化する技術³⁾を紹介する。

本技術は焼却灰に薬剤を添加・混合することにより、焼却灰に含まれる有害重金属等を不溶化することで建設資材として有効利用を図ろうとする取り組みの一例である。薬剤の主要成分は、カルシウム、硫黄および鉄の3成分である（以下 CSF 系薬剤と称す）。CSF 系薬剤の一例として石膏と硫酸第一鉄（あるいは硫酸アルミニウム）の混合物を挙げることができる。これらの薬剤はいずれも無機系の化合物として市場に広く出回っている材料である。

本技術の最大の特徴は、焼却灰の成分自体が重金属等の不溶化の一端を担う点にある。焼却灰に含まれるカルシウム・シリカ・アルミニウム成分と薬剤の相互反応により難溶性のアルカリ鉱物塩等が形成され、重金属類の不溶化が達成される。さらに、時間経過にとも水和水による固化強度が高まり、軟弱土の改質効果を高めることができる。有害重金属等の不溶化イメージを図 6.2 に示す。

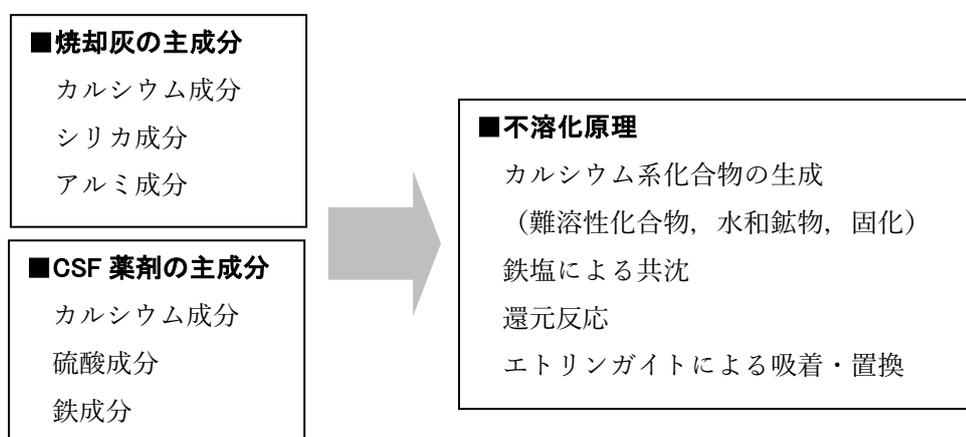


図 6.2 薬剤による重金属等の不溶化

この不溶化処理技術で効果が確認されている重金属等の項目は、ふっ素、六価クロム、砒素、セレン、鉛、カドミウム、ほう素の7種類である。それぞれの項目の不溶化原理の対応表を表 6.4 に示す。

表 6.4 不溶化原理一覧表

項目	ふっ素	六価クロム	砒素	セレン	鉛	カドミウム	ほう素
カルシウム系化合物の生成*1	○	○	○	○	◎	◎	◎
鉄塩による共沈, 不溶化	○		◎	◎	○	○	
還元反応		◎					
エトリンサイトによる吸着・置換	◎						○
アパタイト鉱物の生成*2	△						
備考 ◎：主要な不溶化原理 ○：付加的な不溶化原理 △：条件によっては付加される不溶化原理 補足説明 *1 カルシウム系薬剤による不溶化原理の内訳 ① 水酸化物等の難溶性化合物の生成 ② ケイ酸カルシウムやアルミン酸カルシウムによる吸着・置換 ③ 硬化体組織の緻密化による物理的な封じ込め *2 下水汚泥焼却灰に含有するリン成分を利用した場合の反応							

(2) PS 灰からのふっ素溶出抑制例

高濃度のふっ素を含有する排水処理の分野では、カルシウム塩を添加して難溶性の化合物を生成・沈殿分離する方法が取られている。しかしながら、この方法だけでは排水基準以下に処理することは困難と言われており、高度処理としてアルミニウム塩やマグネシウム塩を添加して吸着・共沈させる共沈法が併用される場合が多い。本項に示す CSF 系薬剤による不溶化原理も上記の共沈法を基本とするものである。PS 灰にはカルシウム成分を多く含有するが、化合していないふっ素（イオンや錯体）を薬剤成分で難溶性の化合物に改質させる。生成されたふっ素化合物は、微細なコロイド状態で存在すると考えられるため、薬剤成分によって吸着・共沈されるとともにエトリンサイト（針状結晶）が生成され、水中への流出が抑制されるという原理である（図 6.3）。

PS 灰に CSF 薬剤を少しずつ添加すると、pH が減少するとともに、ふっ素溶出量も減少し、ある一定の pH（9～10 付近）に収束していく（図 6.4）。これは薬剤添加により、溶出試験中にエトリンサイトが生成され、ふっ素が固定される現象を反映している。その pH の減少にともなうふっ素の溶出抑制経路（過程）に着目すると、pH が 11 以下になると F 溶出量が確実に土壤環境基準（0.8mg/L）以下になることがわかる。

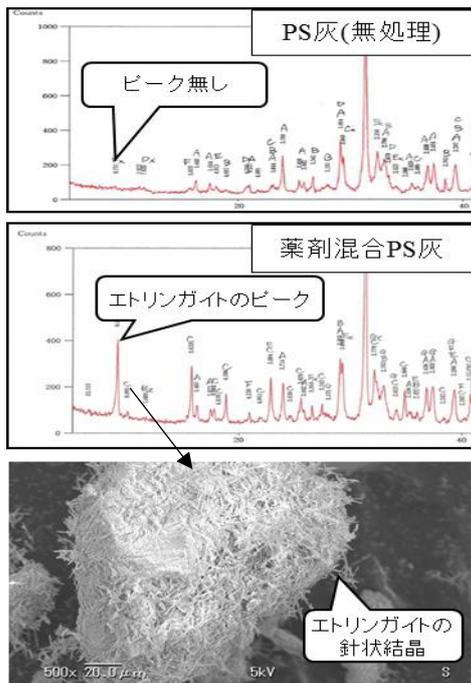


図 6.3 XRD と SEM の結果

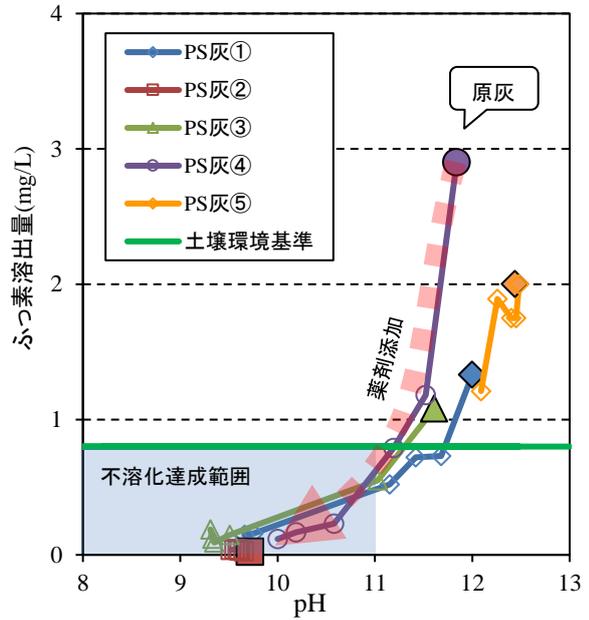


図 6.4 薬剤添加した PS 灰のふっ素溶出挙動

5種類 PS 灰 (a 灰, b 灰, c 灰, d 灰, e 灰) について, CSF 系薬剤添加によるふっ素溶出量の抑制効果を確認した結果を図 6.5 (左図) に示す. 土壤溶出基準 (0.8mg/L) を上回る溶出量を示す a, c, d 灰についても CSF 系薬剤を適量添加することで確実に基準値以下になる. 図 6.5 (右図) は採取日を変えて採取した a 灰について, 原灰と CSF 系薬剤を 10% 添加した処理灰のふっ素溶出量を調べた結果である. 原灰の溶出量は採取日によって大きく異なるが, いずれの灰も CSF 系薬剤を添加することで土壤溶出基準以下に低減されている.

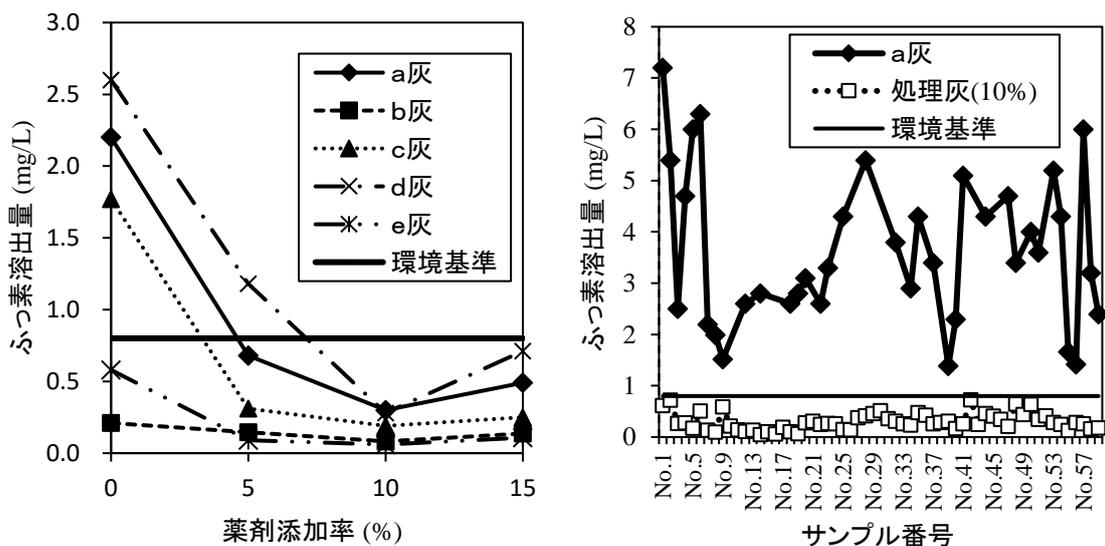


図 6.5 PS 灰の CSF 系薬剤添加によるふっ素溶出抑制効果

(3) バイオマス灰からの六価クロム・鉛溶出抑制例

六価クロムの不溶化処理の方法のひとつである還元処理法について説明する。還元剤として硫酸第一鉄を用いた場合、還元反応により六価のクロムは、硫酸鉄により還元され三価クロムとなる。一方、硫酸鉄は酸化されて酸化鉄となる。実際の処理では還元処理を行なうと同時にカルシウム系材料をもちいて、土壌のpHを適した値に調整する。この際、三価のクロムイオンは、難溶性の水酸化クロムとして不溶化される。水酸化クロムの溶解度は 9.1×10^{-4} mg/Lであり、難溶性である。

2種類のバイオマス灰（以下BB灰①灰、②灰）について、CSF系薬剤添加による六価クロム溶出量の抑制効果を確認した。また、採取時期の異なるBB灰（③）について六価クロム溶出量のばらつきを確認するとともにそのサンプルに5%薬剤を添加した処理灰の溶出量も併せて調べた。それらの結果を図6.6に示す。これらの結果が示すように、六価クロムについて良好な溶出抑制効果が認められる。

鉛については、セメント系改質材と同様に水和固化による緻密化が不溶化寄与するものと考えられる。BB（灰④、⑤灰）での結果を図6.7に示す。

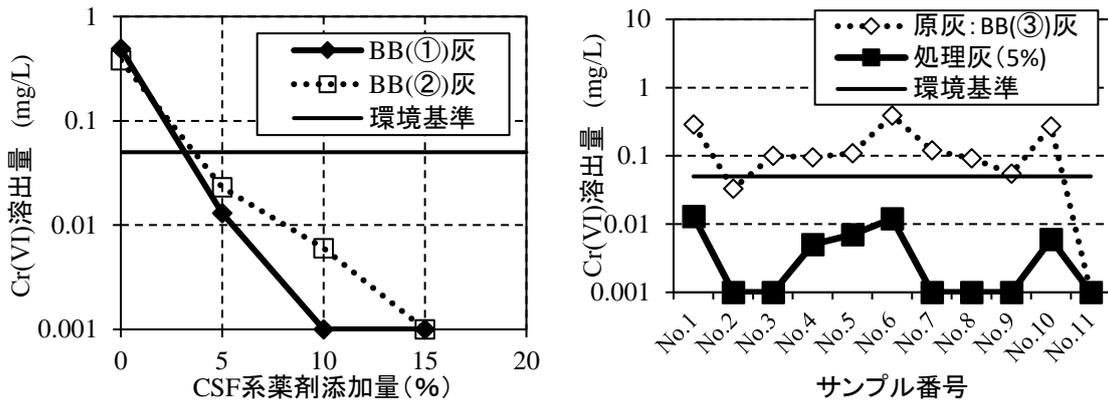


図 6.6 BB 灰の CSF 系薬剤による 6 価クロム溶出抑制効果

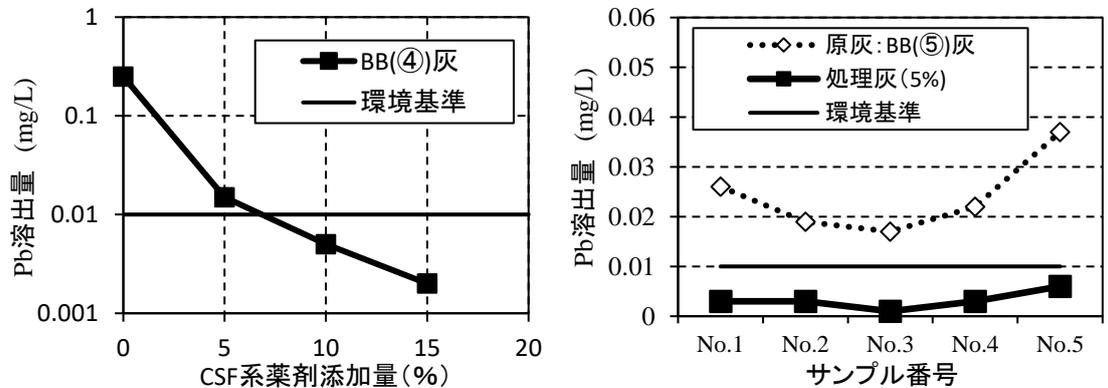


図 6.7 BB 灰の CSF 系薬剤による鉛溶出抑制効果

(4) 吸水性泥土改質材の溶出抑制効果

PS 灰を主材とした吸水性の泥土改質材を軟弱な泥土状の模擬汚染土壤に添加することで、改質するとともにセメント系固化材と同様の不溶化効果⁴⁾が確認されている（表 6.5）。

表 6.5 模擬汚染土の不溶化処理による効果の確認³⁾

		単位:mg/L					
項目	六価クロム	砒素	ふっ素	ほう素	鉛	カドミウム	
初期濃度	0.42	0.044	1.10	5.1	0.437	0.237	
薬 剤 添 加 量	50kg/m ³	0.11	0.020	-	1.0	<0.001	<0.001
	75kg/m ³	-	-	0.66	-	-	-
	100kg/m ³	0.015	0.010	0.72	0.95	<0.001	<0.001
	150kg/m ³	-	0.006	0.60	0.73	-	-
	200kg/m ³	<0.005	-	0.47	-	-	-
土壤環境基準	≤0.05	≤0.01	≤0.8	≤1.0	≤0.01	≤0.003	

参考文献

- 1) 国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター：再生石膏粉の有効利用ガイドライン（第一版），pp.42-46，2019.
- 2) 経済産業省産業技術環境局産業基盤標準化推進室：コンクリート用骨材又は道路用等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会 総合報告書，2012.
- 3) 山内裕元：地盤環境問題におけるカルシウム系材料の利用技術，無機マテリアル学会誌，Vol.18，pp.351-356，2011.
- 4) 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.270-277，2012.

PS 灰系改質材編

【 目 次 】

1. PS 灰系改質材とは.....	PS-2
1.1 PS 灰の発生量の動向と焼却炉から排出される PS 灰の特性.....	PS-2
1.2 PS 灰系改質材の薬剤配合と品質管理の一例.....	PS-3
2. 改質原理と対象土および利用用途.....	PS-6
2.1 改質原理.....	PS-6
2.2 対象土.....	PS-7
2.3 利用用途.....	PS-8
2.4 改質材の物理化学特性と改質土の力学特性.....	PS-11
3. 設計・施工方法と品質管理方法.....	PS-12
3.1 設計方法.....	PS-12
3.2 施工方法.....	PS-12
3.3 品質管理方法.....	PS-19
4. PS 灰改質土の環境親和性・環境負荷低減特性.....	PS-25
4.1 生物に対する毒性.....	PS-25
4.2 植生への影響.....	PS-28
4.3 硫化水素の発生抑制と消臭効果.....	PS-31
4.4 アルカリ泥土の中性化.....	PS-34
5. 改質技術の適用例.....	PS-41
5.1 瞬時改質技術の適用事例.....	PS-41
5.2 ほぐしを併用した改質事例.....	PS-49
5.3 簡易手法による品質管理の適用事例.....	PS-60

1. PS 灰系改質材とは

PS 灰系改質材とは、製紙製造工程から発生する汚泥（ペーパースラッジ，PS）を焼却した残渣の製紙汚泥灰（PS 灰）を主材とし、これに各種の重金属不溶化剤，吸水性向上のための助剤などを配合したものを言う。

1.1 PS 灰の発生量の動向と焼却炉から排出される PS 灰の特性

製紙製造工程から発生する PS 灰の流れを図 1.1 に示す。PS の発生源となる紙の生産量は、近年減産傾向にある。一方、廃棄物となる PS の発生量は、製紙生産減になっても一定量の値で発生し続けている（図 1.2）。PS の発生量が減少しない理由として、古紙再生の利用率拡大と耐久性向上のための中性抄紙化が挙げられる。中性抄紙化では、使用する填料が増加するため、PS の減少に歯止めがかかることになる。図 1.2 に示す PS の有効利用の動向を見ると従来はセメント原料に用いられる割合が高かった PS が半減しているのに対し、土木分野への有効資源化率が上昇し、その優先順位が入れ替わっている。この要因は、近年、急激に減少したセメント生産量に対して減少しない PS をセメント原料以外の土木分野の多様なニーズに転用した結果と考えられる。また、填料の割合が高くなった PS 灰の吸水機能の向上も、土木分野への利用が高まる一因になっている。

一方、一口に PS 灰といってもその焼成方法も様々である。PS 灰が副産物として生成される代表的な炉には、サイクロン炉、ストーカー炉、流動床炉があり、排出される PS 灰の特性も異なったものとなる。したがって、PS 灰を吸水性改質材として利用する際は、活用条件に見合ったものを選別する必要がある。

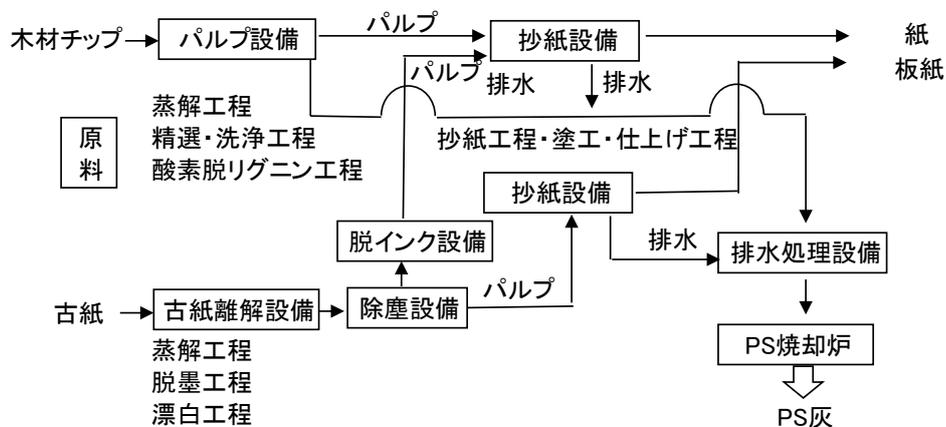


図 1.1 製紙工場における PS 灰発生の流れ¹⁾

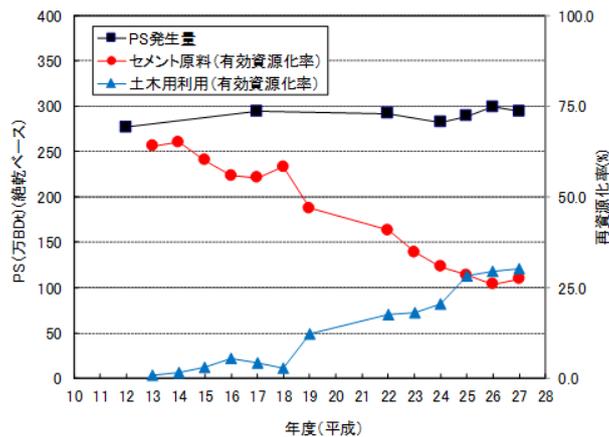


図 1.2 PS の発生量と有効利用の動向¹⁾

例えば、サイクロン式焼却炉の燃焼機構は、炉上部より自然可能な焼却用スラッジと燃焼空気の混合物を流入させ、800～850℃の焼成旋回流を伴って落下させるものである。クリンカーの発生はなく、サイクロン炉から排出される PS 灰粒子自体の粒径は大きめで、粒度も安定している。

ストーカー式焼却炉では長時間かけて安定燃焼を行うため、炉下 PS 灰には、無数の微細孔が存在する材料となる。ただし、粒子密度、かさ密度等の物性がばらつく傾向がある。ストーカー式焼却炉は、大規模ごみ焼却施設などのごみ変動にも適した焼却炉であり、製紙工場の PS 焼成にも用いられるが、大量の PS を一度に燃焼すると未燃焼残渣や飛灰が大容量の灰中に混入し、物性がばらつく要因となる。そのため、ストーカー炉から排出される PS 灰を活用する際は、別途品質の安定化処理が必要となる場合がある。

PS 灰の焼成炉として最も使用頻度の高い方法が流動床式焼却炉によるものである。製紙工場内ではスラッジ以外の焼却物はなく、短時間・高熱焼却方式による流動床炉が使用される。流動床炉では、炉内の流動構造により飛灰やクリンカーの発生量も多いため、幅広い物性範囲を示す場合がある。しかしながら近年、集塵機やサイクロンの活用などから流動床炉の構造的も改善され、物性のばらつきの範囲も縮小傾向にある。

1.2 PS 灰系改質材の薬剤配合と品質管理の一例

PS 灰を受け入れ、リサイクル材料（吸水性の改質材）を製造・販売する上でその用途先で要求される性能を満足するために必要な品質を確保することは必須である。そのために管理基準を定め、検査等を実施して品質を担保することが求められる。

1.2.1 焼却灰の受入管理

(1) 基本原則

基本原則として、受入基準を超過する可能性のある PS 灰は受け入れない。その判断基準

の一例を以下に示す。

- ・ 焼却物質が一定である
- ・ 重金属類溶出・含有量が受入基準内にあり，安定している
- ・ 組成成分が受入基準を満足している
- ・ 重金属類の不溶化が可能である
- ・ 吸水性材料としての性能が確保できる

(2) 受入基準と検査頻度

受入可能と判断された PS 灰について，受入基準を設けるとともに受入検査（例えば，簡易的な検査）を日常的に実施して，受入基準を満足することを確認する．また，定期的に第三者機関等による公定試験を実施することが望ましい．

1.2.2 製品製造と品質検査の流れ

PS 灰に薬剤を配合して PS 灰系改質材を製品化するまでの流れの一例を**表 1.1**に示す．

表 1.1 品質検査の流れの一例

検査の流れ	検査内容【頻度】	判定基準	NG 時の対応
1) 事前確認	<ul style="list-style-type: none"> ■基本原則 受入基準を超過する可能性のある焼却灰は受け入れしない。 ■受入可否判定検討 ・トリータビリティ試験 【受入開始3カ月前までに】 	<ul style="list-style-type: none"> → 焼却物質が一定 → 重金属類溶出・含有量が受入基準内 → 組成成分が受入基準を満足 → 重金属類の不溶化が可能 → 地盤改良材としての性能を確保 	製紙灰を受け入れない
2) 受入検査	<ul style="list-style-type: none"> ■日常受入検査 ・蛍光 X 線分析 【受入日毎】 ■定期検査 ・第三者機関による公定分析 【3カ月に1回以上】 	<ul style="list-style-type: none"> → 製紙灰の組成成分が基準値を満足 CaO\geq●%, SiO$_2$$\geq$▲%, Al$_2O_3$$\geq$■% かつ, 上記3項目の合計が◆%以上 → 重金属等の溶出・含有量が受入基準を満足 	排出事業者に返却する
薬剤配合処理	PS 灰および所定の薬剤を計量して、配合し、均一になるように攪拌混合		
3) 処理終了検査	<ul style="list-style-type: none"> ■日常検査 ・簡易溶出試験 【1回/処理日毎】 	<ul style="list-style-type: none"> → 土壌環境基準以下 	再処理を行う
4) 製品検査	<ul style="list-style-type: none"> ■日常検査【1回/週】 ・コーン貫入試験による改質効果の確認 ■定期管理【2回/月】 ・土壌溶出・含有試験 ・標準泥土改質物の土質試験一式【1回/年】 	<ul style="list-style-type: none"> → 標準泥土に製品を所定量添加した改質土のコーン指数 400kN/m2 以上 (第3種建設発生土相当) → 基準値以下を満足 → 地盤材料として、所定の品質を確保していること 	再処理した上で再度試験を実施 ↓ それでも NG の場合は、外部委託処理を行う。
出荷	試験成績表および SDS (安全データシート) 等を販売先に提出		

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. 改質原理と対象土および利用用途

PS 灰系改質材のうち、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配合直後、「瞬時に」良質土として吸水改質することができる。

また、高含水比の原土を締固めする際、PS 灰系改質材を添加することで締固めが有効となる含水比に調整しやすくなる。加えて、改質土を「解きほぐして養生させる」ことで水分の蒸発を促し、より効果的な締固めが可能な含水状態に改質することができる。

PS 灰系改質材を用いた土の改質方法として、上記の「瞬時改質」と「解きほぐしを併用した改質」の2つの方法について解説する。

2.1 改質原理

(1) 瞬時改質技術の改質原理

「瞬時」とは、改質材の配合直後から数時間程度を指す。多孔質な PS 灰粒子の物理的吸水特性を主に利用することにより、高含水状態の浚渫泥土等を瞬時に改質し、盛土材や埋立柱等として使用することができる。また、原土より粒径の大きい細砂径の PS 灰系改質材を適用することで改質土の粒度調整が図れる。

ただし、配合直後の吸水効果が低い改質材を使用すると（長期的な吸水性能は優れていても）改質材の添加量が著しく多くなり、費用が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。

(2) ほぐしを併用した改質技術の改質原理

図 2.1 は、ほぐしを併用した改質技術の適用原理を示したものである。締固めをしようとする原土の含水比が最適含水比よりも大きく湿潤側にあり、そのままでは締固めが困難な状況を想定する（図中の●の状態、 $q_c < 200\text{kN/m}^2$ ）。この原土を最適な状態で締固めるためには、まず天日乾燥などで含水比を最適含水比付近にまで下げ（図中の㉞の工程）、その上で締固める（図中の㉟の工程）のが従来の方法である。しかしながら、高含水比状態にある土は塊状（塑性状）を呈し乾きにくいため、㉞の乾燥作業は非常に手間暇がかかる。

これに対して、改質材を添加すると締固め曲線がスライドする（図中の㉠の効果）と同時に含水比が低下する（図中の㉡の効果）。すなわち両者は近くなり、低下させるべき含水比の幅が小さくなる。さらに改質によりほぐしやすくなることで乾燥も促進する（図中の㉢の効果）。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。

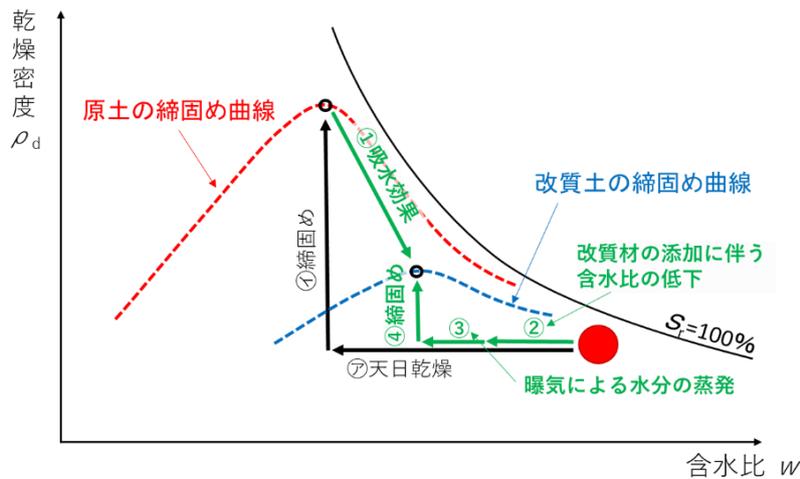


図 2.1 無機系吸水性材料による改質原理の概念図

2.2 対象土

(1) 瞬時対象土質

本瞬時改質技術で対象となる土質は、図 2.2 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。

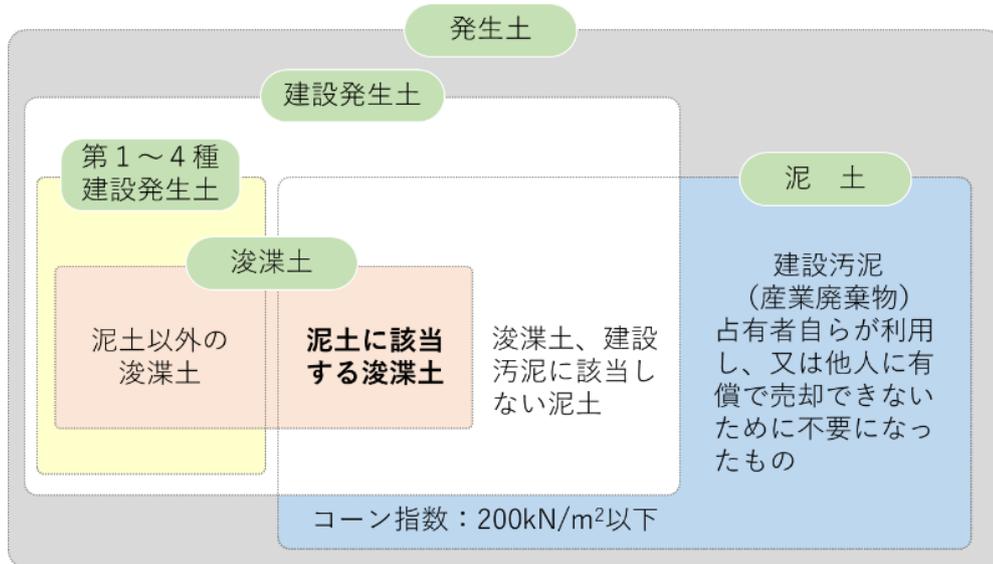


図 2.2 建設汚泥、泥土、浚渫土の位置づけ¹⁾と本技術の対象土質

(2) ほぐし対象土質

河川堤防やため池の築堤に利用される地盤材料は、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多く見受けられる。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。

ほぐしを併用した改質技術では、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**などの改質効果が高い。

2.3 利用用途

PS 灰系改質材は、セメントや石灰などの固化材の代替品として高含水比泥土等に添加することで、地盤改良効果、土質安定処理効果が期待でき、改質土は土木などの地盤材料（土木用改質土）として用いることができる。PS 灰系改質材で改質した泥土（改質土）の適用事例は近年急速に増加しており、ここでは、適用工事の一例²⁾を紹介する。

(1) 農業用ため池工事への適用

- ① ため池底泥土砂の搬出
- ② 仮設道路・重機作業エリアの確保



図 2.3 農業用ため池工事での適用例（土砂搬出・仮設工事）

- ③ 工事内・他工事での造成盛土・堤体盛土等への再利用



図 2.4 農業用ため池工事での適用例（盛土・堤体工事）

(2) 水路工事・排水路工事への適用

- ① 堆積土砂の搬出
- ② 工事内で掘削土の再利用



図 2.5 水路工事・排水路工事への適用（土砂搬出・再利用）

(3) 港湾工事への適用

- ・ 港湾浚渫土の再利用



図 2.5 港湾浚渫土の再利用（圍場嵩上げ利用）

(4) 河川工事への適用

- ① 河川浚渫土の再利用
- ② 河川敷内の工事用仮設改良
- ③ 築堤基礎掘削土の改質
- ④ 河床掘削土の改質利用

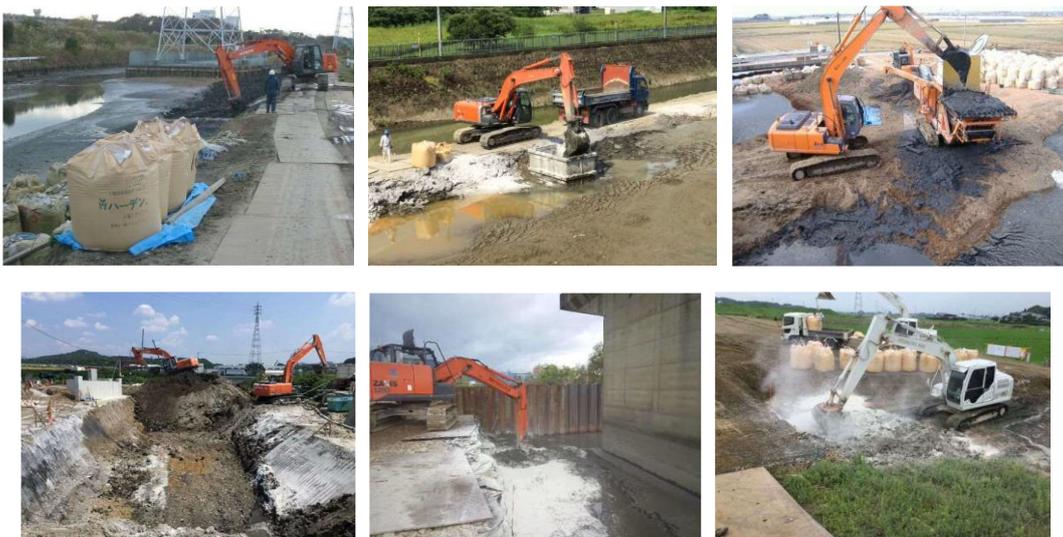


図 2.6 河川工事への適用例

(5) 道路工事への適用

- ・ 路体の改質利用



図 2.7 道路工事への適用例

(6) ダム・雨水調整池・沈砂池への適用

- ① ダム堆積土の除去・運搬
- ② 雨水調整池の池底堆積土の安定処理
- ③ 沈砂池の流出水対策



図 2.8 ダム・雨水調整池・沈砂池への適用例

(7) 造成工事への適用

- ① 高 pH 流出水の防止
- ② 構造物設置のための後から再掘削想定
- ③ 造成盛土の改質
- ④ 公園整備



図 2.8 造成工事への適用例

(8) 砂防・林道・地すべり対策工事への適用

- ① 補強土壁盛土の改質
- ② 未舗装林道のぬかるみ対策

③ 地すべり対策



図 2.9 砂防・林道・地すべり対策工事への適用例

(9) 杭工事への適用

- ① 杭打機の作業足場の改質（大型重機転倒防止のための作業エリア表層の改質）
- ② 杭抜き発生泥土処理
- ③ 杭掘削泥土の改質・盛土利用



図 2.10 杭工事への適用例

2.4 改質材の物理化学特性と改質土の力学特性

本項については、共通編（2章～4章）に示されているのでそちらを参照されたい。

参考文献

- 1) 泥土リサイクル協会：<http://www.deido-recycling.jp/recycle/recycle03.htm>. 2021.
- 2) アグロジャパン：ハーデン使用工事 事例集(3.10).

3. 設計・施工方法と品質管理方法

3.1 設計方法

PS 灰系改質材を用いた改質土の配合設計の考え方は、共通編（5章）に記載されている。

3.2 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て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、改質材の混合場所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 3.1 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、作業スペースを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。

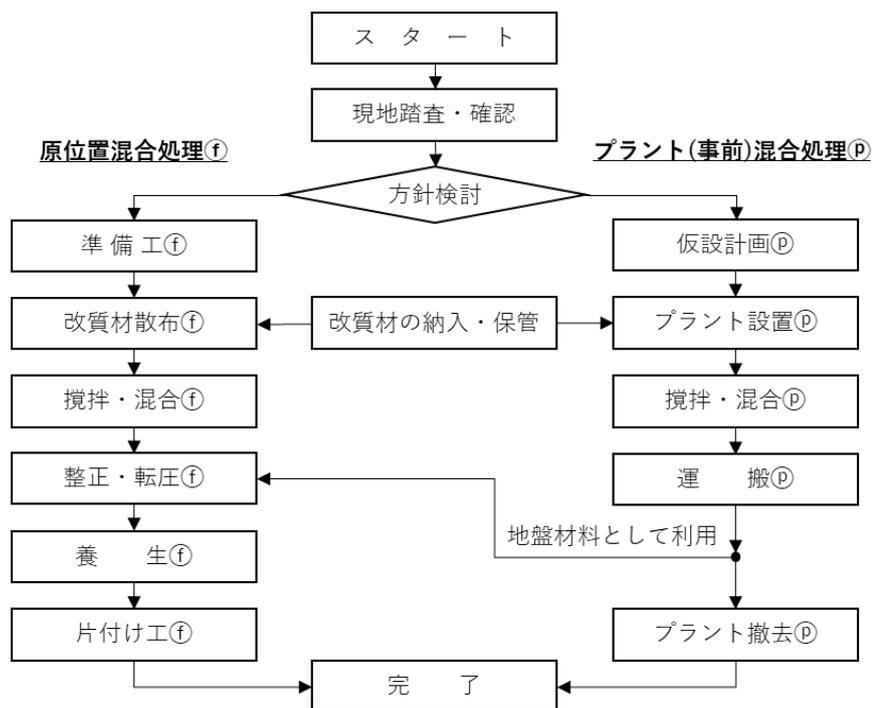


図 3.1 標準的な施工の手順

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適切に実施する。

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

圃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⑨

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⑩⑪

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 3.1 に代表的な攪拌・混合工法の分類例を示す。

表 3.1 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。 現場内の任意の場所で施工ができる。

運搬⑫

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⑬

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、施工箇所で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 3.1 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 3.2(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 3.2(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 3.3(c) にアタッチメント式ミキシング装置を、図 3.3(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) バケットミキシング装置

図 3.2 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 3.3 にスタビライザ混合処理の例を示す。



図 3.3 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、粉じんの発生は抑制される。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 3.4 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 3.4 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済むように、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。自走式の利点は、現場内の任意の場所で施工ができることである。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 3.5 に示す。



図 3.5 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。また原位置で改質する場合は，トラフイカビリティの確保が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の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には適さない。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，改質材の供給量を確認する上で，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ことが重要である。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実施する必要がある。

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 3.6 はその事例を示したものであるが，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。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法

図 3.6 粉じん対策の例

3.3 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，工事現場における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 PS 灰は，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

ン梱包の状態で保管する場合は、水が侵入しないようにパレット等で嵩上げし、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 3.7**）。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 3.7 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 予めトレンチを設けるなど対策を施し、対象土の水切りを行う。
- 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。また、改質材がアルカリを呈する場合はフェノールフタレイン溶液による着色具合で改良むらを判定することも有効な手段のひとつである。

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、原位置でのポータブルコーン貫入試験やコーン指数（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 3.2 に示す³⁾。

表 3.2 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

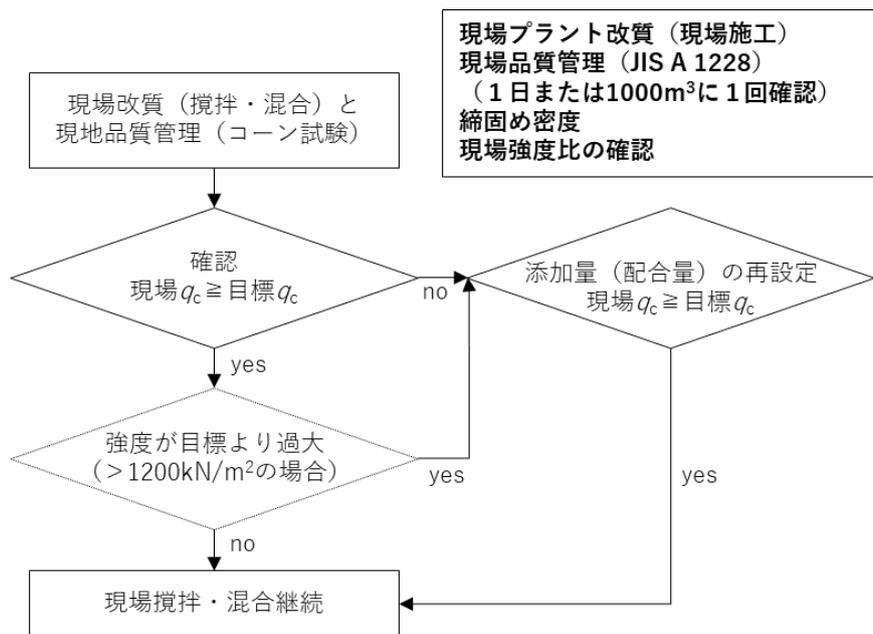


図 3.8 現場における品質管理フローの例

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 3.8 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目標品質を満足する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 3.9 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 灰系改質材を用い、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 3.10 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。

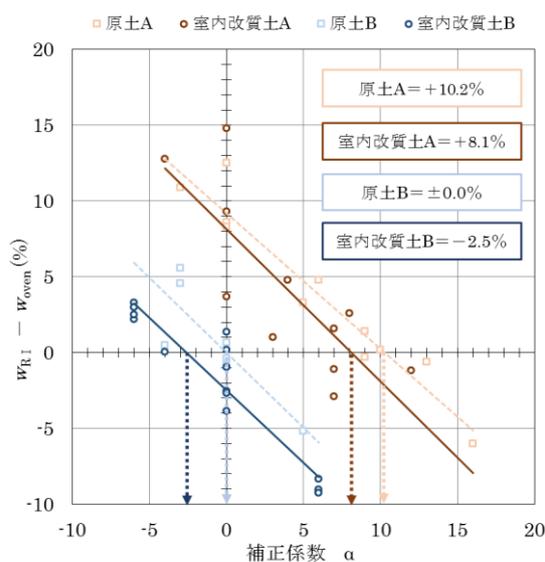


図 3.9 補正係数と含水比の関係
(室内盛土供試体での試験)⁷⁾

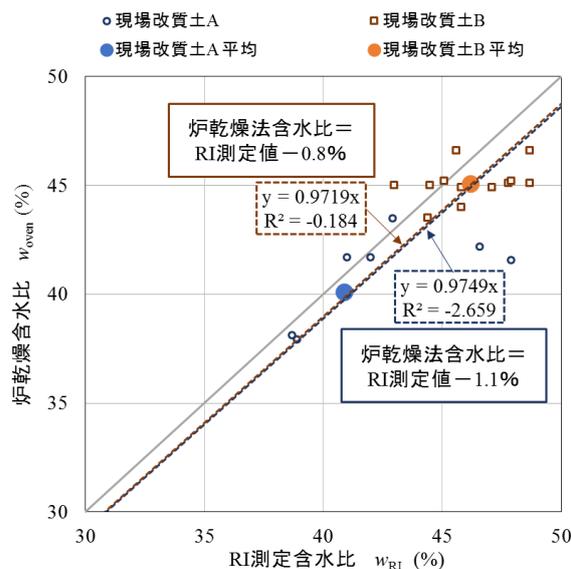


図 3.10 RI 法と炉乾燥法による
含水比測定結果の比較⁷⁾

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，2021.

4. PS 灰改質土の環境親和性・環境負荷低減特性

4.1 生物に対する毒性

吸水性材料を水域で使用する場合、周辺生物への安全性の確認を求められることがある。使用材料の環境安全性を確認するための試験として、化学物質の生態影響試験がある。

(1) 急性毒性試験と慢性毒性試験

化学物質の生態への影響を調べる試験として、OECD の定めたテストガイドラインがあり、藻類、甲殻類、魚類あるいは底性生物に関する毒性試験の方法が示されている¹⁾。このうち水系食物連鎖における高次消費者として、魚類では「ヒメダカ」が、また甲殻類では「ミジンコ」が使用される。ここでは、PS 灰系改質材やその改質土を対象として実施された、ヒメダカによる魚類の急性毒性試験とミジンコによる甲殻類の急性毒性試験および慢性毒性試験（繁殖試験）の事例を示す。

魚類の急性毒性試験は、対象とする化学物質を 96 時間曝露した際の魚類に及ぼす影響を評価するものである。図 4.1 に PS 灰系改質材を対象とした試験の実施状況を示す。ガラス製の水槽(31.5 cm×18.5 cm×H24.0 cm)を用意し、各水槽にヒメダカを 10 個体ずつ投入し、2 週間の馴致後に試験を開始する。止水状態でエアレーションをかけ、照明は 12 時間～16 時間/日、水温 21℃～23℃、試験中は無給餌という試験条件である。試験区は急性毒性試験の上限値 100 mg/L およびその半量の 50 mg/L、対照区では 0 mg/L の 3 試験区を設定し、各試験区 3 水槽ずつ試験に供した結果、全試験区において試験期間中にへい死した個体はゼロという結果が得られるとともに、試験期間中に抱卵したメダカが各水槽 1～2 個体確認されている²⁾。

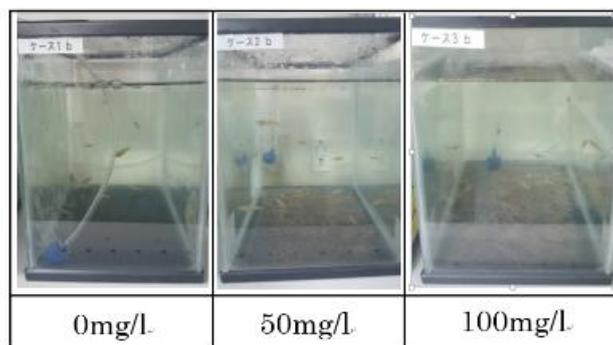


図4.1 急性毒性試験実施状況²⁾

ミジンコ急性遊泳阻害試験は、検査対象物質に48時間ばく露した際のミジンコの遊泳に及ぼす影響を、半数遊泳阻害濃度（EC₅₀）として評価する試験である。またミジンコ繁殖試験は、対象物質に21日間ばく露した際のミジンコの繁殖に及ぼす影響を把握するものであり、この試験は慢性毒性試験として位置付けられている。

ミジンコ繁殖試験は、①コントロール（対照）、②池の水のみ、③泥土入り池の水（底泥と池の水）、④改質泥土（底泥の改質土）入り池の水の4通りの水で実施された³⁾。試験に用いた泥は、池の底泥から採取されたものを試料として使用し、改質土についてはコーン指数 $q_c=800\text{kN/m}^2$ となる配合量（約 500kg/m^3 ）でPS灰系改質材を添加して作製された。試験時の飼育状況を図4.2に示す。



ミジンコ入りの試験水



インキュベータでの飼育

図4.2 ミジンコ飼育状況³⁾

試験結果を表4.1と図4.3に示す。急性毒性試験では毒性なしという結果が得られている。また、慢性毒性（繁殖）試験では、②使用した池の水のみ単独で試験を行うと86%と高い繁殖阻害率となり、親個体の死亡率も60%と高い結果を示した。これに対して③未改質泥土では繁殖阻害率が57%に、さらに④改質土では10%まで改善されている³⁾。

表4.1 試験結果一覧表³⁾

確認項目	急性毒性	平均産仔数	親個体死亡率(%)	繁殖阻害率(%)
①コントロール	なし	21.7	0	-----
②池の水のみ	なし	3.0	60	86
③泥土+池の水	なし	9.4	0	57
④改質泥土+池の水	なし	19.8	0	10

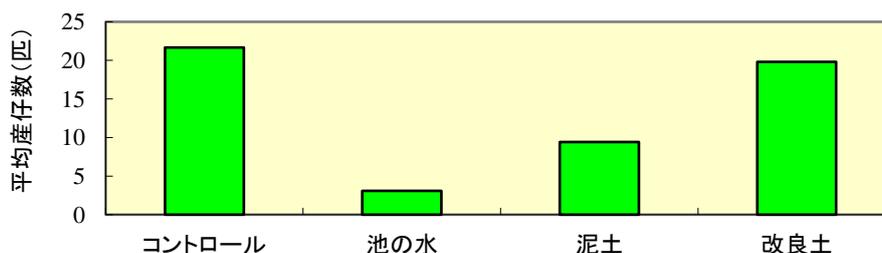


図4.3 ミジンコの繁殖試験結果³⁾

(2) タンクリーチング試験水によるヒメダカの急性毒性試験

PS 灰系改質材を添加して改質した青粘土について、28 日間のタンクリーチング試験を行った後にヒメダカによる急性毒性試験を実施し、96 時間後の致死数を確認した例がある。

【試験方法】

- ① 含水比 50%の青粘土に PS 灰系改質材を 300kg/m^3 添加した改質土試料を JIS A 1210 の A 法で突固め、モールドから脱型し、3 日間気中養生した試料を供試体として固液比 1:10 でタンクリーチング試験⁴⁾を実施する。改質材の 300kg/m^3 添加としたのは、富配合条件を想定したものであり、3 日間の気中養生は現場での仮置き期間を想定したことによる。
- ② 所定時間経過後に上澄み水を採水し、Ca・Al・Si の各濃度を測定して、各濃度が概ね収束するまでタンクリーチング試験を継続する。
- ③ Ca・Al・Si の各濃度は概ね収束した時点で、濃度測定用とは別に同一条件で作製したタンクリーチング試験水を用いてヒメダカによる 96 時間の暴露試験を実施する。試験数は 3 水槽とし、試験水はエアレーションをかけ、溶存酸素濃度を十分高めてから飼育を開始する。対照試験として、馴致に使用した飼育水を使用し、同様の試験を併せて実施する。

【試験結果】

タンクリーチング試験で得られた Ca・Al・Si の各溶出濃度の経時変化を図 4.4 に示す。いずれの溶出量も 28 日後には概ね収束した。また、魚類急性毒性試験¹⁾に示された化学物質（ここでは PS 灰系改質材）の上限濃度（ 100mg/L ）条件における溶出濃度を化学分析により測定した結果と比較すると、収束した濃度はいずれも魚毒試験条件での濃度（図中の赤線）を上回る結果となった。したがって、魚類急性毒性試験条件よりも本タンクリーチング試験の方が過酷な条件にあると判断し、28 日間のタンクリーチング試験で得られた試験水でヒメダカを供試魚とし、96 時間の曝露試験を実施した。

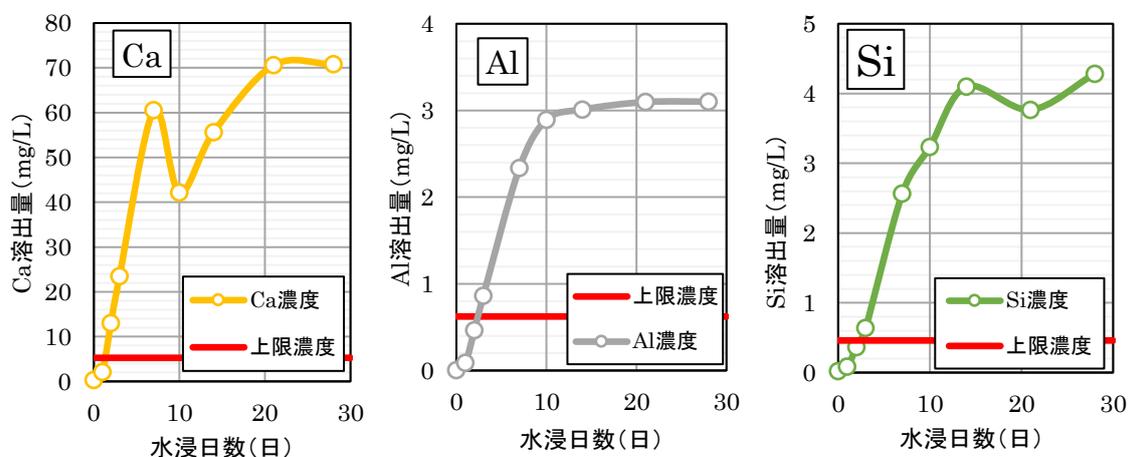


図 4.4 タンクリーチング試験における溶出量の経時変化

結果は表 4.2 のとおりであり、全試験区において、試験期間中にへい死した個体は 0 個体という結果が得られた。

表 4.2 ヒメダカによる急性毒性試験の結果

試験日数	①投入直後			②24時間後			③48時間後			④72時間後			⑤96時間後		
	pH	温度(°C)	メダカの数	pH	温度(°C)	メダカの数	pH	温度(°C)	メダカの数	pH	温度(°C)	メダカの数	pH	温度(°C)	メダカの数
対照区1	6.8	21	10	6.8	22	10	6.6	20	10	6.9	21	10	6.9	20	10
対照区2	6.6	21	10	6.9	22	10	6.7	20	10	7.0	20	10	7.0	20	10
対照区3	6.8	21	10	6.9	22	10	6.6	20	10	6.9	20	10	6.8	20	10
改質土1	6.8	22	10	6.9	22	10	6.6	21	10	6.7	21	10	6.8	21	10
改質土2	6.8	21	10	6.8	22	10	6.6	20	10	6.7	21	10	6.8	20	10
改質土3	6.7	21	10	6.9	22	10	6.8	20	10	6.8	20	10	7.0	20	10

4.2 植生への影響

PS 灰系改質材で改質した土は保水性があり、また適度な硬度を有する土壌になるなど良い影響も期待できる一方、土壌がアルカリ化するという懸念もある。こうした植生への影響を確認するための試験を実施した事例を示す。

(1) 発芽試験

吸水性材料の生態親和性を確認するための試験として、コマツナを用いた発芽試験の実施例³⁾を示す。コマツナの発芽試験は、肥料の効力や問題のある土壌に対する改質効果の評価を行うための一般的な土耕ポット栽培法に基づいたものである。試験に用いた培養土は、諏訪湖より採取した底泥とこれを PS 灰系改質材で改質したもの、およびコマツナ栽培に適している市販の黒土である。

図 4.5 に示す植物の生育状況において発芽率の結果を見ると、4 日養生では泥土以外のポットで発芽が確認できる。5 日目以降は黒土・泥土・改質土による効果の差はほとんど無いという結果である。また、平均茎高を比較すると、全てのポットにおいて生長率に大きな差は見られない。7 日目を最終的な平均高さとする平均茎高が一番高いのは黒土で、反対に一番低いのは泥土である。5 種類のポットを、黒土の茎高が 100 として比較すると、泥土が 0.70、改質土 200 が 0.86、改質土 400 が 0.85、改質土 800 が 0.77 となり、改質土を富配合にするほど茎高が小さくなる傾向が認められた。

同様の種からの発芽試験は、アルファルファ(マメ科)、はつか大根、チモシー(イネ科)、ヨモギ等でも実施されており、原土と PS 灰系改質土で有意な差がないという結果が得られている。

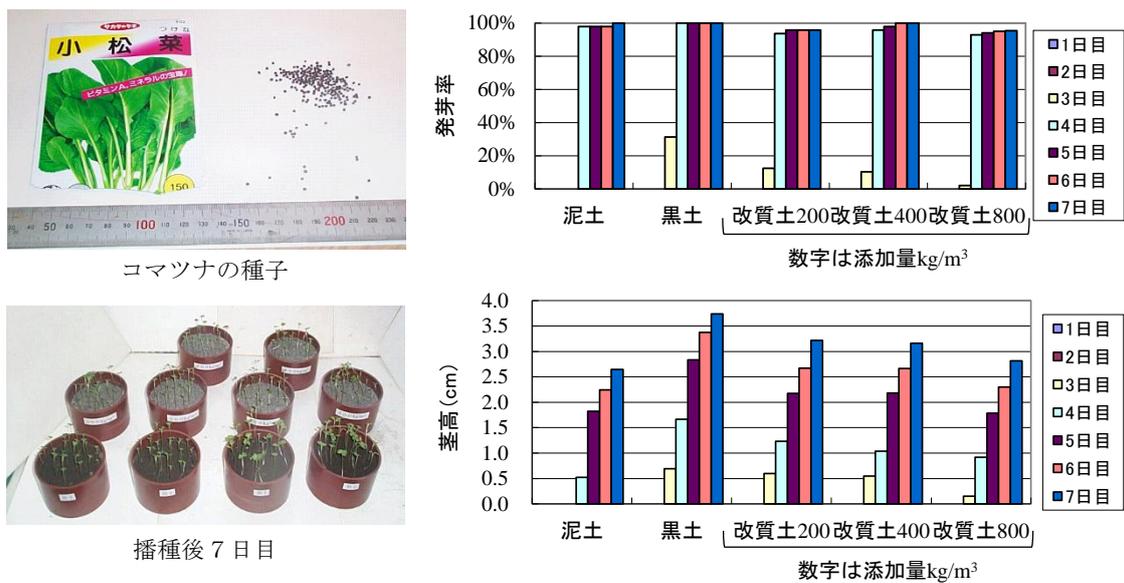


図 4.5 コマツナによる植生試験³⁾

(2) 植栽試験

PS 灰系改質材を添加した改質土による植栽試験を行い、供試土壌の強度、pH 変化、および供試植物の地上部の本数と草丈等を調査した事例を示す⁵⁾。

淡水条件の土は千葉県印旛沼から採取した試料（細粒分 96.8 %，強熱減量 14.9 %，含水比 290 %）を、また海水条件の土は兵庫県尼崎市臨海部から採取した試料（細粒分 43.0 %，強熱減量 6.5 %，含水比 290 %）を用いている。この泥土に PS 灰系改質材を湖沼浚渫土では 500 kg/m³，海域浚渫土では 300 kg/m³ を添加・混合した後、所定の気中養生期間を設け、その後スコップで解きほぐして直径数 cm の顆粒状にした試料で試験に供している。供試植物にはヨシが、また淡水条件の試験ではこれに加えてヒメガマが用いられた。

淡水条件および海水条件の植栽試験ケースを表 4.3 に、植栽試験状況を図 4.6 に示す。

表 4.3 植栽試験ケース⁵⁾

条件	試験場所	試験ケース	供試土壌		供試植物	試験容器
				PS灰改質材		
淡水	実験室	対照区 (ヨシ)	川砂	-	ヨシ 購入物1株/鉢 ×各ケース3鉢	鉢 直径 15cm 深さ 11.5cm
		改質土区 (ヨシ)	湖沼改質土 (*)	500 kg/m ³		
		対照区 (ヒメガマ)	川砂	-	ヒメガマ 購入物1株/鉢 ×各ケース3鉢	
		改質土区 (ヒメガマ)	湖沼改質土 (*)	500 kg/m ³		
海水	実海域の運河内に整備された実験水路	対照区	川砂区	川砂	ヨシ 地下茎4本/プランター ×各ケース1プランター	プランター 幅 23cm 長さ 50cm 深さ 18.3cm
		浚渫土区	海域浚渫土	-		
		改質土区	海域改質土 (**)	300 kg/m ³		

*) 14 日気中養生後に解砕して直径数 cm までの粒状にしたものを、1 層毎に高さ 3cm から 25 回の自由落下で振動を加えて 3 層に分けて充填。

**) 13 日気中養生後に解砕して直径数 cm までの粒状にしたものを、1 層毎に高さ 3cm から 25 回の自由落下で振動を加えて 3 層に分けて充填。

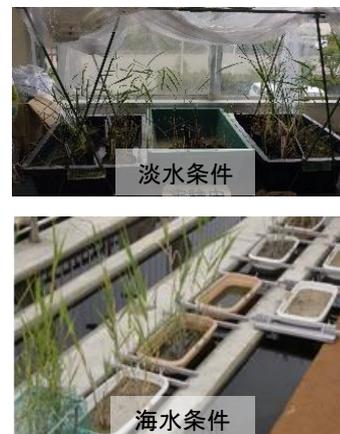


図 4.6 植栽試験状況⁵⁾

淡水条件、海水条件の試験開始後、それぞれ425日目、280日目に植栽試験で用いた供試土壌の強度をポータブルコーンで測定した結果が図4.7（左図）である。淡水条件では、対照区と改質土区とも概ね200 kN/m²でほぼ同程度の値である。一方、海水条件では、川砂区240kN/m²、浚渫土区0 kN/m²、改質土区614kN/m²であり、PS灰添加による改質効果が大きく、川砂よりも強度が増大する結果となっている。土壌pH測定結果を図4.7（右図）に示す。淡水、海水条件ともに試験開始直後はpH 10程度であったが、その後pHは漸減し、2ヶ月程度で対照区と同等の中性域になっている。

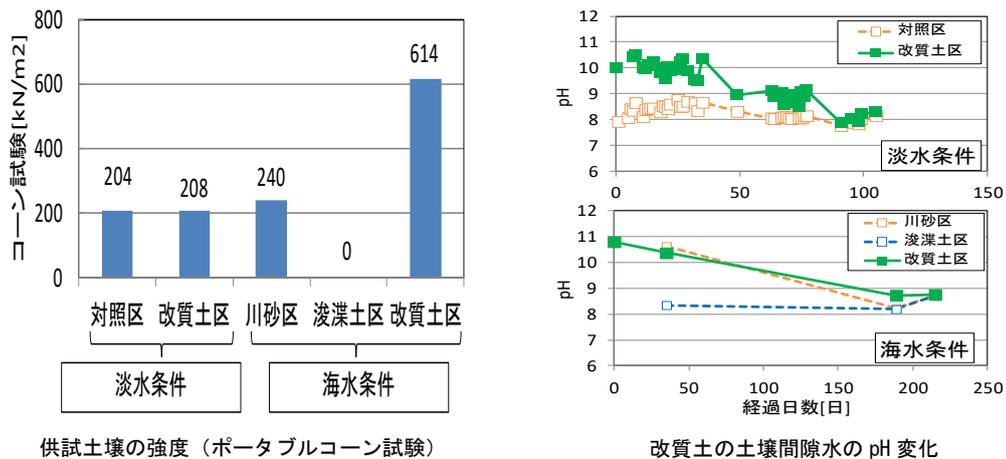


図 4.7 植栽試験における供試土壌の強度・pH 特性⁵⁾

植生試験の結果を図4.8に示す。淡水条件および海水条件ともに対照区と改質土区の草丈の平均値の間で有意差は見られず、改質土でも植物が生育可能という結果が得られた。

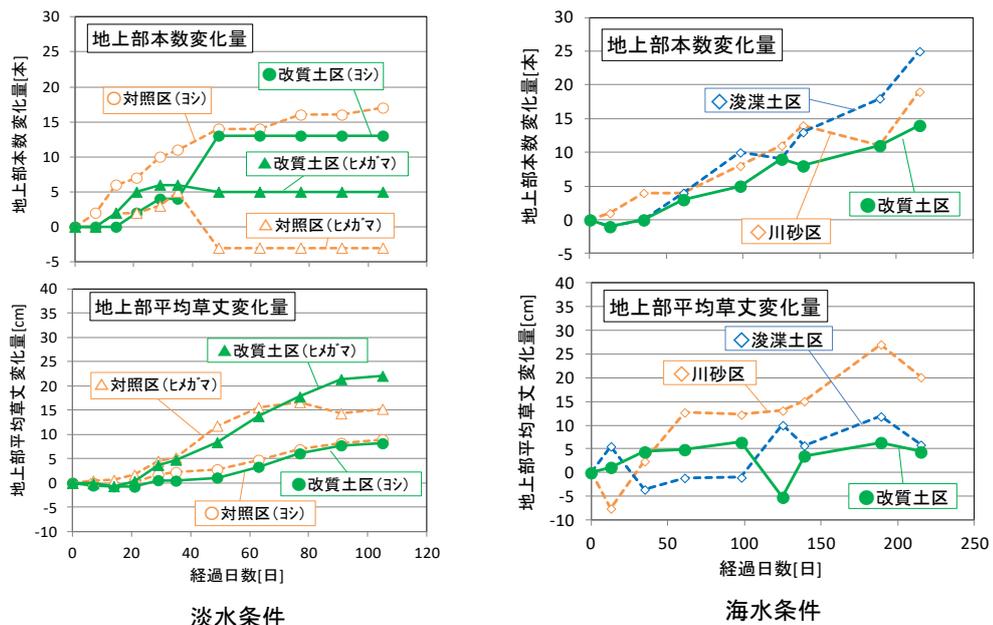


図 4.8 植栽試験結果⁵⁾

地力増進基本方針等⁶⁾に示された水田土壌の目標の強度を参考に、植栽実験の供試土壌強度を比較すると図 4.9 のようになる。水田土壌の主要根群域の強度目標値がコーン指数換算値で 980 kN/m² 以下となっており、淡水試験および海水試験ともに改質土の供試体強度は植物生育に適した範囲あることが示されている。

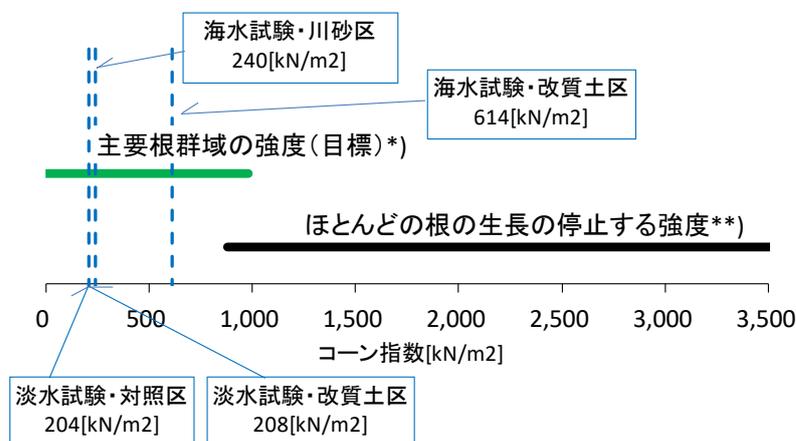


図 4.9 植栽試験に用いた改質土の強度と水田土壌の目標強度の比較

*) 文献⁶⁾及び山中式土壌硬度計の目盛から作成

***) 文献⁷⁾及び山中式土壌硬度計の目盛から作成

4.3 硫化水素の発生抑制と消臭効果

河川や湖沼、あるいは漁港に堆積する底泥は、有機物の腐敗成分を多く含有するため、浚渫して陸揚げすると硫化水素等による強い臭気を放つことが知られている。このような土に PS 灰系改質材を添加することで悪臭発生の抑制効果が期待される。

(1) 底質浚渫土等からの悪臭発生メカニズムとその対策

硫酸イオン (SO₄²⁻) と有機物 (C) が豊富な条件で嫌氣的雰囲気形成されると、硫酸塩還元菌の働きにより「硫化水素 (H₂S)」が発生する。



このため、湖沼や漁港の底質を浚渫した際、あるいはヘドロが干出した際に、硫化水素臭の発生が問題となる場合がある。また、こうした底質をセメントや石灰等により固化処理した場合には、pH が上昇し「硫化水素臭」に代わって「アンモニア臭」が発生することが知られている。



セメント系固化材や石灰を添加した土には反応式(2)に基づく高 pH の水溶液が存在する。この水溶液によって土中の窒素化合物が加水分解され、水溶性のアミン化合物やアンモニウムイオンが発生する。アンモニウムイオンとアンモニアとは以下の平衡状態にある。



$$K = \frac{[\text{NH}_4^+][\text{OH}^-]}{[\text{NH}_3]} \quad (4)$$

平衡定数 K は 25°C で 1.77×10^{-5} であり、 NH_3 は NH_4^+ の約 5,600 倍存在すると試算されることから、容易にガス状のアンモニアが発生する。

上記のように底質の pH の変化に伴い、臭気濃度が著しく変化することが知られている⁸⁾。すなわち、酸性側に振れると硫化水素の発生が、またアルカリ側に振れるとアンモニアの発生が急激に増大する。pH が中性域付近では臭気濃度が比較的低レベルで推移する。

硫化水素の抑制方法には硫化鉄 (Fe_2S_3) として固定する方法があり、浚渫泥土に適用する場合には鉄塩をはじめとする薬剤を添加する方法が一般的である。薬剤添加による代表的な硫化水素発生抑制方法を表 4.4 の上段に、アンモニア臭の対策として提案されている方法を表 4.4 の下段に示す。表中にも記されているが、アンモニアには酸による中和が有効な方法である。表中にある硫酸第一鉄や硫酸アルミニウムといった硫酸塩類はエトリンガイトを生成させるための薬剤として PS 灰系改質材に添加することがある。多孔質な PS 灰による吸着に加え、こうした硫酸塩の働きで、PS 灰系改質材が底泥の悪臭対策として利用されるケースが増えている。さらに、嫌気状態にある泥土に吸水性材料を添加して改質し、解きほぐすことで土を好気状態になり、悪臭の散逸促進させる効果も期待できる。

表 4.4 硫化水素とアンモニアの臭気抑制方法

臭気	名称	特徴	留意点
硫化水素	過酸化水素 (H_2O_2)	・速効性がある	・持続性が無い ・劇物のため取扱いが必要
	塩化第二鉄 (FeCl_3)	・持続性がある	・pH が低下する ・腐食性あり
	硫酸第一鉄 (FeSO_4)	・持続性がある	
	ポリ硫酸第二鉄 (ポリ鉄) [$\text{Fe}_2(\text{OH})_n(\text{SO}_4)_{3-n/2}]_m$]	・持続性がある ・水酸基を持つため pH の低下幅が小さい	・やや高価
アンモニア	気泡等による被覆	・ステアリン酸・オレフィンスルホン酸等を発泡させて散布し表面からの臭気発生を抑制する	・持続期間は散布厚により異なるが、～24時間程度
	酸による中和・分解	・希塩酸等を添加または散布する	・固化体の強度が低下する ・酸の取扱いが必要
	塩化物化	・塩化第一鉄 (FeCl_2) 等を添加または散布する	・生成した塩化アンモンは酸化しやすく大気汚染につながる
	硫酸塩形成	・硫酸アルミニウム等を添加または散布する。アンモニアを硫酸塩として固定する	・硫酸アルミニウム単体では強酸となり硫化水素を発生するため、PS 灰などを緩衝剤として使用する
	吸着	・多孔質な PS 灰、ゼオライト・活性炭等を添加または散布する	

(2) 吸水性材料による漁港堆積泥土の臭気対策

漁港に堆積する底泥は、有機物の腐敗成分を多く含有するため、浚渫して陸揚げすると硫化水素等による強い悪臭を放つことが知られている。ここでは、漁港底泥についてPS灰系改質材による室内臭気試験を行い、臭気抑制メカニズムの解明を試みた事例を示す⁹⁾。

A 漁港より採取した原泥および配合条件を変えた改質土について、テドラーバッグで1日密封養生した試料の臭気を三点比較式臭袋法にて測定し、改質材添加によるにおい全般の消臭効果を確認した。配合条件は、PS灰系改質材を300kg/m³添加し、さらにPS灰系改質材の添加量に対して硫酸第一鉄を0, 2, 4, 8%追添加したケースで比較している。図4.10のとおり、高濃度の腐敗臭を発生する底泥に対して、PS灰系改質材を添加することで悪臭が大幅に低減でき、硫酸第一鉄を追添加することで臭気強度が一層低減できる。

さらに、配合条件を多数変えた一連の臭気試験で得られた土壌pHと検知管法で測定した硫化水素およびアンモニアの臭気濃度の関係を整理すると図4.11のようになる。図中pHが10を上回る改質土のケースもあるが、これはPS灰系改質材ではなく、その原料となるPS灰(原灰)を添加したケースである。pHが9.0~9.7付近で臭気発生濃度が最も低い領域にあり、pHをコントロールすることが臭気対策に有効である。

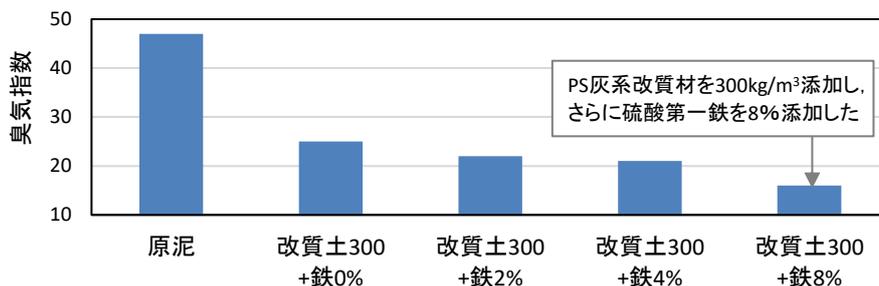


図 4.10 三点比較式におい袋による分析結果¹³⁾

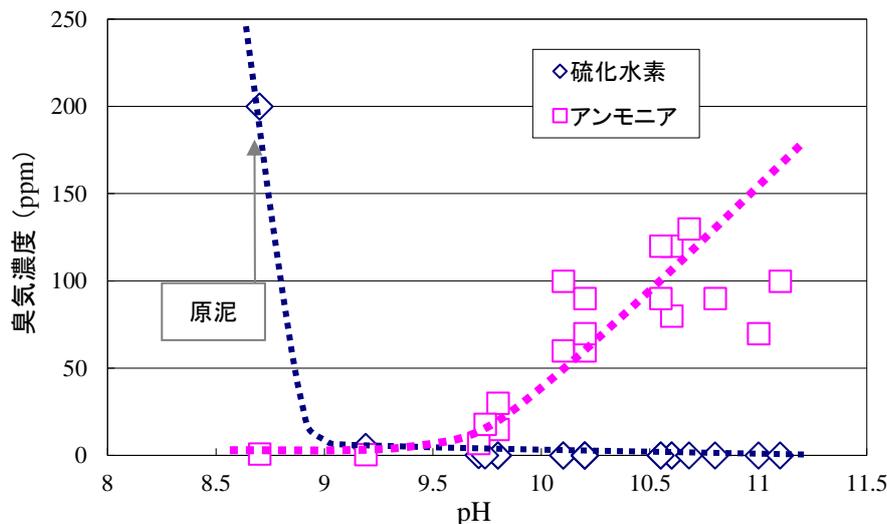


図 4.11 pH と臭気濃度との関係¹³⁾

上記のように臭気の強い漁港底泥の臭気対策を兼ねた有効活用工事の一例として B 漁港での PS 灰系改質材による改質処理工事の状況を図 4.12 に示す。改質土は陸上の盛土材と利用された。



図 4.12 B 漁港での改良工事の施工状況

4.4 アルカリ泥土の中性化

セメントや石灰を混合処理した建設汚泥等の軟弱泥土は、アルカリ性を呈するため、再生利用する際の用途が限られることがある。アルカリ土壌を中和する技術としては、酸性の中和薬剤を添加する試みも一部ではなされているが、中和後の再生土としての品質が確保できないなどの理由で利用は限定的である。

このような課題に対して、吸水性を有する PS 灰系改質材と炭酸ガスを組み合わせることで、アルカリ性の建設泥土を中性の再生土に改質する技術が開発され、実用化されている。本項では、中性再生土に改質する上での吸水性材料の果たす役割を示す。

(1) 改質土の中和特性

陸域の軟弱泥土を各種の改質材で改質処理して地盤材料として活用する事例が徐々に増えている。その際、改質土の高い pH が周辺環境に悪影響を及ぼす懸念事項として指摘されることがある。代表的な吸水性材料である PS 灰系改質材は、セメント系や石灰系改質材と同様にアルカリ性を呈するが、その改質土は養生中に空気中の二酸化炭素により緩やかに中性化することが知られている。ここでは、これらの改質材を添加したアルカリ改質土の空気中の二酸化炭素による中和特性を示す¹⁰⁾。

改質の対象とした原泥は I ダムの湖底から採取した試料 ($w=79.3\%$, $w_L=64\%$, $w_p=36.7\%$, $pH=7.0$) である。この原泥に PS 灰系改質材、セメント系 (高炉セメント B 種) および石灰系 (生石灰) を所定量添加した改質土を開封養生した。養生中に改質土の性状が塑性状から半固体状になった段階で、土塊を解きほぐすとともに、空気に触れるようにばっ気した。

図 4.13 に pH の測定結果を示す。凡例の PS は PS 灰系を、C はセメント系を、L は石灰

系の改質材を示し、数字は添加量 (kg/m³) を表記した。同図に示すように、L や C に比べて PS の pH が初期段階から低く、添加量の少ない PS100 のケースでは、17 日後に飲料水の水質基準内にあたる pH ≤ 8.6 に到達した。L は 28 日経過しても pH が高い状態であり、C は L と C の中間に位置する。

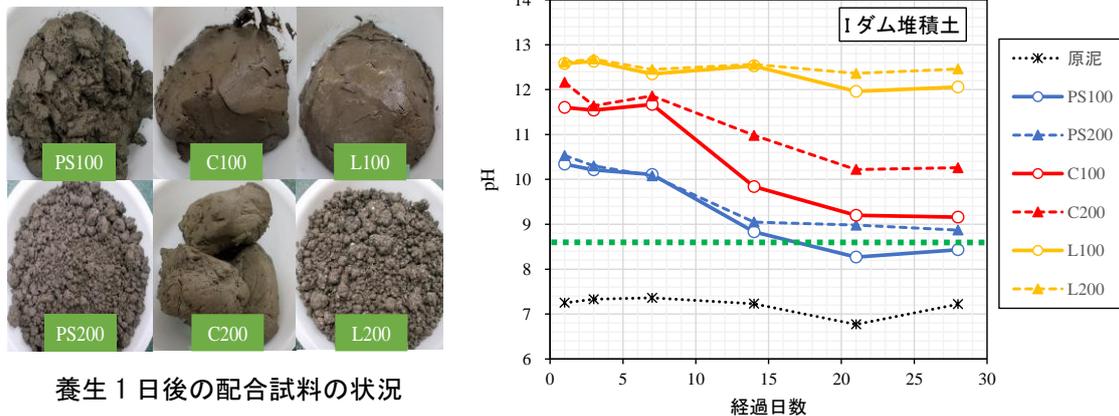


図 4.13 pH の経時変化 (I ダム堆積土)

図 4.14 は、日本全国の各地から採取した軟弱泥土を各種の改質材で改質した上で、開封養生したケースの pH の経時変化をまとめたものである。全体的な傾向として PS 灰系、セメント系、石灰系の順に pH が低い傾向がある。PS 灰系の分布範囲の中央値に着目すると初期 pH が 10.5 程度の改質土が、30 日後 (約 1 ヶ月後) には概ね 8.6 の中性域に達する傾向を俯瞰することができる。

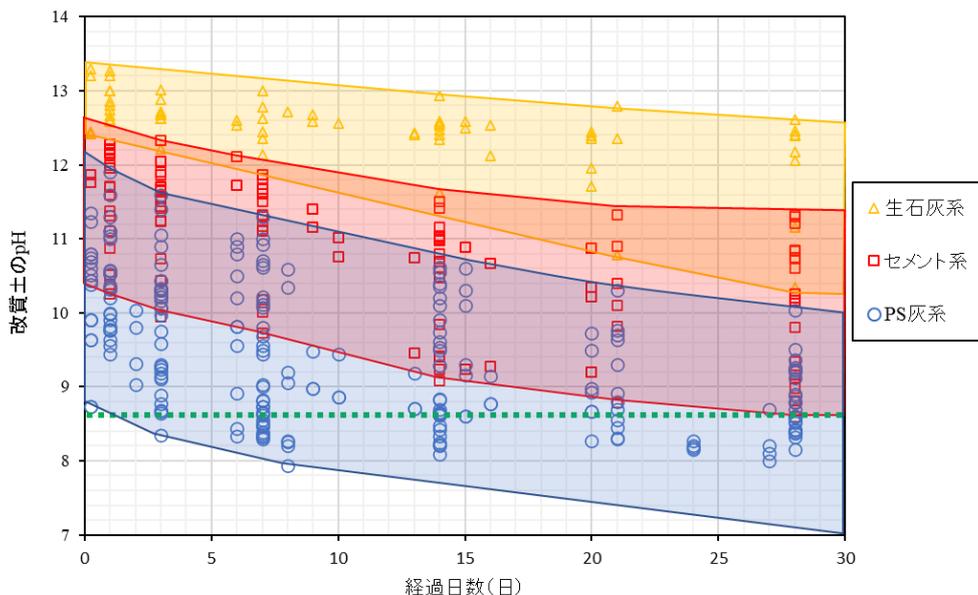


図 4.14 各種改質土の pH 特性の分布範囲

(2) アルカリ泥土の CO₂ による中和特性

アルカリ泥土の CO₂ による中和特性を調べるために、養生条件や初期 pH、CO₂ 濃度、初期含水比が中性化速度に及ぼす影響に関する基礎研究が行われている¹¹⁾¹²⁾。

pH=9~12 を目標としたアルカリ泥土を、青粘土に高炉セメント B 種、生石灰を添加して作製し、初期含水比を $w=1.0w_L$ に調整した後、密閉あるいは気中養生を行った試料の pH の経時変化をまとめると **図 4.15** のようになる。密閉養生では pH の変化はほとんどみられないが、気中養生では pH が徐々に低下し中性化が進行する。また、初期 pH が高いほど経過後に収束する pH が高くなり、中性化に時間がかかる。中性化の完了目標を pH8.6 とすると、初期 pH が高い汚泥では約 100 日養生しても中性化は完了しない。

次に **図 4.16** に示す CO₂ インキュベーターを用いて CO₂ 濃度増加による中性化の促進の可能性について検討した結果を示す。アルカリ泥土の初期 pH の目標値を 11 とし、初期含水比を $w=1.0w_L$ に調整した後、CO₂ 濃度 2.5、5.0、10% の環境下で養生したところ **図 4.17** に示す結果が得られた。CO₂ 濃度を高めると気中養生の結果と比べて著しく中性化が促進する一方、CO₂ 濃度が 2.5、5.0、10% の 3 ケースを比較するとその速度の違いはほとんどなく、CO₂ 濃度増加による中性化の促進には限界があることがわかる。

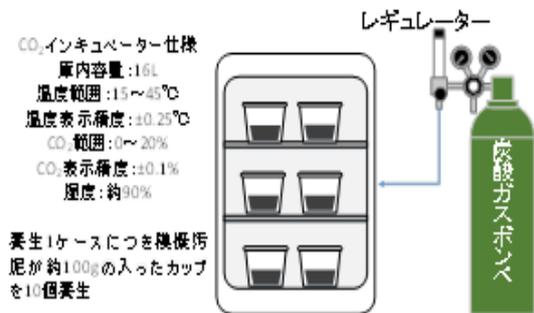
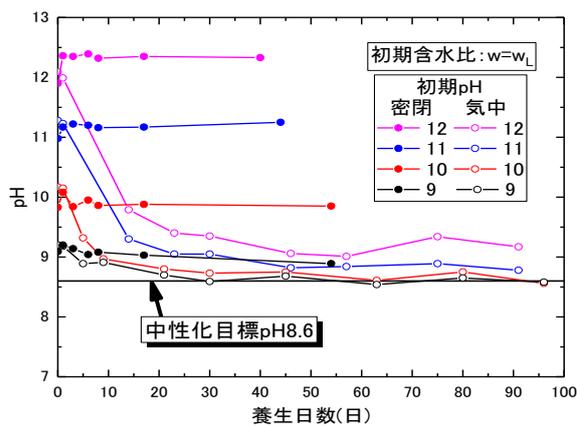


図 4.16 CO₂ インキュベーターを利用した試験

図 4.15 密閉・気中養生における pH の変化¹¹⁾

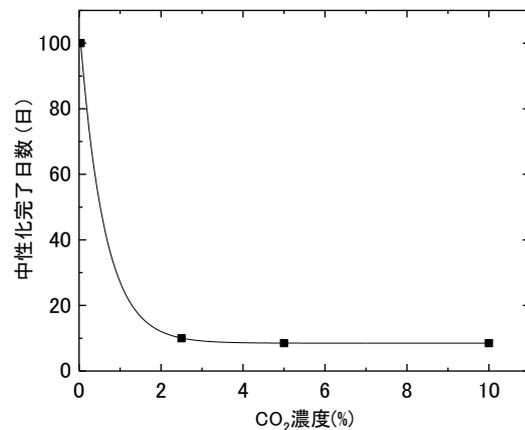
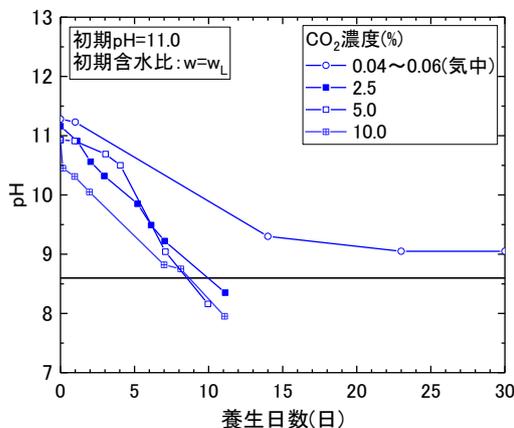


図 4.17 CO₂ 濃度を変えた試験の結果¹¹⁾

同じく CO₂ インキュベーターを用いてアルカリ泥土の初期 pH の目標値を 11 とし、初期含水比を w_L の 0.0, 0.2, 0.6, 1.0, 1.4 倍として CO₂ 濃度 2.5% で養生を行った結果を図 4.18 に示す。含水比によって中性化完了日数が異なり、初期含水比を小さくすることで中性化完了にかかる時間が短くなる。ただし乾燥しすぎると逆に中性化完了に時間がかかる傾向が認められ、 $w=0.2w_L$ のケースが最も中性化が早く進行し、5 時間程度で中性化が完了した。

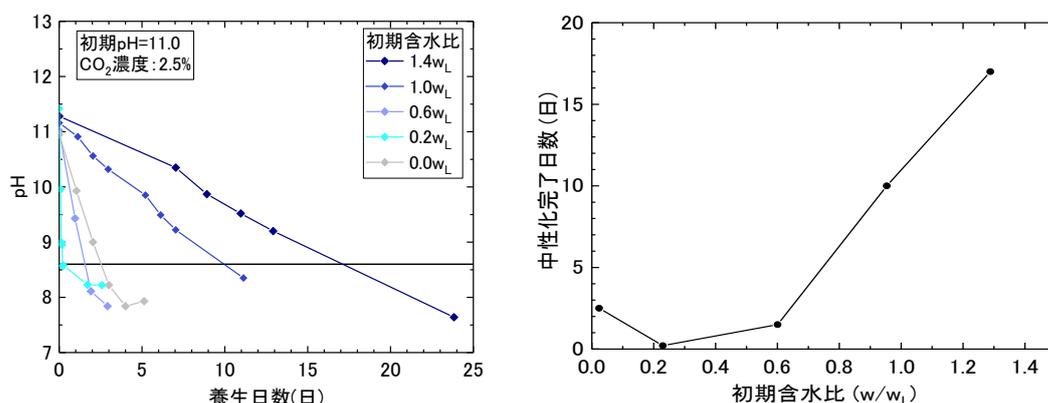


図 4.18 泥土の初期含水比を変えた試験の結果¹¹⁾

(3) 吸水性材料による中和促進効果

(2) では、アルカリ泥土の中性化を試みたが、土塊状の泥土では CO₂ 濃度を増加させても中性化の促進には限界がある一方、泥土の含水比を下げると中性化が著しく促進する効果があることがわかった。そこで、PS 灰系改質材のような吸水性の高い材料で高含水状態にある泥土の余剰水を吸い取るとともに、泥土塊を解きほぐして細粒化させることで中性化を促進できるのではないかと考え、実験で確かめた結果を示す^{13~15)}。

初期含水比 w が 0.5, 1.0w_L 青粘土に高炉セメント B 種を添加して pH ≒ 11.0 になるようにアルカリ泥土を調合し、さらに PS 灰系改質材の添加率を 0~最大 70% まで変えた改質土試料を作製し、粒度を調べた。その結果、PS 灰系改質材の添加量の増加とともに粒径が小さくなる傾向が認められた。作製した各試料を、直径 82mm のプラスチックカップに層厚 30mm になるよう緩詰めにして供試体とした。それらを CO₂ 濃度 1.3~10%, 温度 25°C, 湿度 90% 以上の条件下で図 4.16 に示す CO₂ インキュベーター内に静置養生し、適宜 pH を測定した。また、pH が 8.6 を下回った時点が中性化完了とみなし、中性化完了時間 t_N と定義した。

図 4.19 に結果を示す。左図は改質材添加率を変えたケースでの中性化完了時間 t_N を比較したものである。 $w=0.5w_L$, 1.0w_L とともに、PS 灰系改質材を添加すると t_N が大幅に減少し、添加率が 20~30% で t_N が最小になり、それ以上の添加率では増加傾向を示す結果となっている。CO₂ 濃度を変えたケースで比較すると右図のようになる。いずれの CO₂ 濃度レベルでも、PS 灰系改質材を添加することで、中性化する時間を著しく短くすることができる。

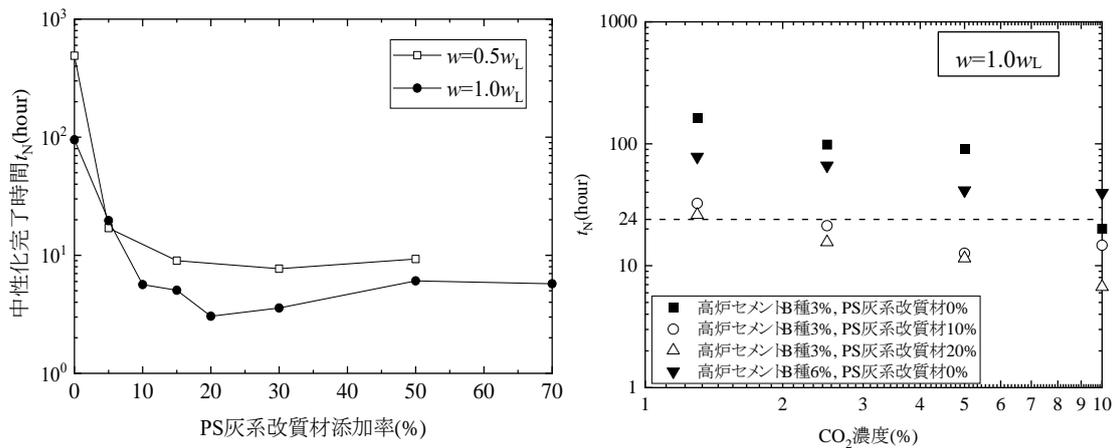


図 4.19 改質材添加率を変えた試験の結果¹³⁾¹⁴⁾

図 4.20(左図)に供試体の乾燥密度 ρ_d と中性化完了時間 t_N の関係を示す. ρ_d の減少に伴い, t_N が減少する傾向がある. すなわち, 緩詰めにするほど中和時間が短くなる. また同右図に供試体の飽和度 S_r と中性化完了時間 t_N の関係を示す. S_r の減少に伴い, t_N も減少傾向を示すが, S_r が 40%程度を下回ると, 反対に t_N が増加する傾向を示した. すなわち中性化にはある程度の水量が必要という結果である.

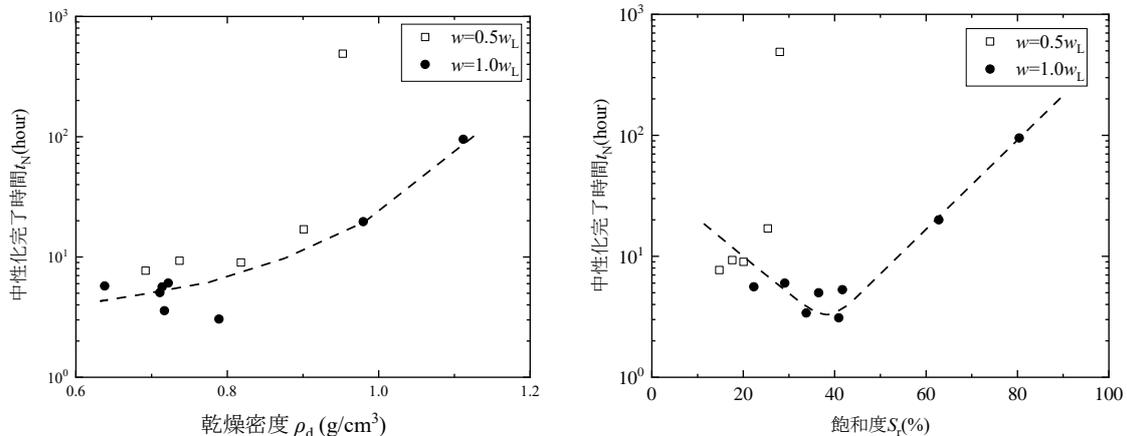


図 4.20 乾燥密度 ρ_d および飽和度 S_r と中性化完了時間 t_N の関係¹³⁾

粒径の影響について調べた結果を次に示す. 初期含水比 $w=30, 40, 50\%$ の笠岡粘土 (液性限界 $w_L=60.4\%$, 塑性限界 $w_p=26.0\%$) に高炉セメント B 種と PS 灰系改質材それぞれ乾燥質量比で 3%, 10% 添加し, アルカリ泥土の改質試料を作製した. その改質試料を解きほぐしてふるいで分級し, 各ふるい通過分の試料を用いて CO_2 濃度 10% でインキュベーター養生し中性化した. 図 6.21 に結果を示す. 粒径の小さな改質土ほど中性化完了に要する時間 t_N が短くなることが確認され, PS 灰改質材添加による解きほぐしの効果も, 中性化促進に寄与することがわかる.

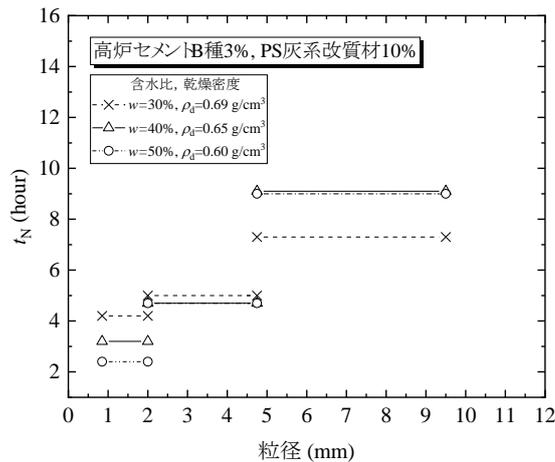


図 4.21 粒径と中性化完了時間 t_N の関係¹⁵⁾

(4) PS 灰系改質土への CO₂ の固定

近年，世界中で地球温暖化の問題がますます強く認識される中，日本においても「2050 年にカーボンニュートラルを目指す」ことが宣言された．こうした動向を踏まえ，二酸化炭素の排出削減やカーボンリサイクルに関する技術開発の取り組みが積極的に行われている．

上記に示した CO₂ ガスによるアルカリ建設汚泥の中性化の取り組みも，見方を変えれば二酸化炭素を炭酸塩としてアルカリ泥土に固定する技術に他ならない．すなわち，PS 灰系改質材で改質した泥土中の水酸化物イオンに二酸化炭素が接触して中和反応が起きると同時に，二酸化炭素が同じく土中に溶存するカルシウムイオンと化合して炭酸カルシウムとして固定化されるという原理である．化学式で表すと，以下のようになる．



現在，アルカリ泥土へ効率的な CO₂ 固定技術の開発も行われている^{14),16)~19)}．

参考文献

- 1) 環境省：保健・化学物質対策：化学物質の生態影響試験について
<https://www.env.go.jp/chemi/sesaku/01.html>
- 2) 竹山佳奈，浜谷信介，加島史浩，和栗成樹，山内裕元，岩本裕之，鶴飼亮行：PS 灰系改質材および浚渫土を活用した改質土による環境改善技術の提案，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.73, No.2, 1947-952, 2017.
- 3) 財団法人 エンジニアリング振興協会：平成 20 年度ペーパースラッジ灰利用浚渫泥土リサイクル技術に関する調査研究報告書，第 5 章 生態親和性，pp103-122, 2009.

- 4) 国土交通省大臣官房技術調査課：タンクリーチング試験について，
<https://www.mlit.go.jp/tec/kankyoku/kurom02.html>
- 5) 浜谷信介，加島史浩，竹山佳奈，和栗成樹，山内裕元，岩本裕之，山中亮一，上月康則：PS 灰改質材を用いて改質した浚渫土の水域の植物生育基盤への適用性，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.73,No.2，1953-958，2017
- 6) 農林水産大臣：地力増進基本指針，2008.
https://www.maff.go.jp/hokkaido/suishin/kankyohozen/attach/pdf/dojo_tiryoku-2.pdf
- 7) 山根一郎編：水田土壌学，(社)農山漁村文化協会，pp100，1982.
- 8) 漆原知則：消臭剤散布および気泡散布による固化へどろの臭気対策試験，第 32 回地盤工学研究発表会，pp.105-106，1997.
- 9) 望月美登志：PS 灰改質材による臭気底泥の消臭改善効果，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.76,No.4，pp.331-339，2020.
- 10) 仁平学，山内裕元：開封条件下でばっ気養生した PS 灰系改質土の pH 特性，土木学会第 77 回年次学術講演会論文集，2022.
- 11) 佐伯拓哉，早野公敏，山内裕元：アルカリ建設汚泥の中性化に関する基礎研究，第 53 回地盤工学研究発表会講演集，pp.559-560，2018.
- 12) 今井健太郎，早野公敏，山内裕元：アルカリ建設汚泥の中性化速度に及ぼす諸要因の影響，第 54 回地盤工学研究発表会講演集，pp.567-568，2019.
- 13) 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.
- 14) 坂口綾，早野公敏，山内裕元：廃ガス利用を想定した CO₂ 濃度がアルカリ建設汚泥の pH 中性化・CO₂ 固定化に及ぼす影響，第 57 回地盤工学研究発表会講演集，2022.
- 15) Trung,D.,N., Hayano,K., Yamauchi,H. : EFFECTS OF CRUMBLING AND PARTICLE SIZE ON PH NEUTRALIZATION OF CONSTRUCTION SLUDGE TREATED BY PAPER SLUDGE ASH AND CO₂ CURING，土木学会第 77 回年次学術講演会論文集，2022.
- 16) 稲坂昂樹，早野公敏，山内裕元：アルカリ建設汚泥の中性化に伴う二酸化炭素固定化量の評価，第 55 回地盤工学研究発表会講演集，23-2-4-07，2020.
- 17) 稲坂昂樹，早野公敏，山内裕元：CO₂ 養生によるアルカリ建設汚泥の中性化および CO₂ 固定化に密度が及ぼす影響，第 57 回地盤工学研究発表会講演集，2022.
- 18) 稲坂昂樹，早野公敏，山内裕元：CO₂ 養生によるアルカリ建設汚泥の中性化および CO₂ 固定化に流量が及ぼす影響，第 57 回地盤工学研究発表会講演集，2022.
- 19) 早野公敏，稲坂昂樹，坂口綾，山内 裕元：アルカリ建設汚泥の中性化における CO₂ 固定量に改質材が及ぼす影響に関する基礎的分析，土木学会第 77 回年次学術講演会論文集，2022.

5. 改質技術の適用例

5.1 瞬時改質技術の適用事例

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

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 (図 5.1)。第 2 期浚渫区域では図 5.2 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た後から搬出して PS 灰系改質材による瞬時改質を行った。その 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 5.3)。

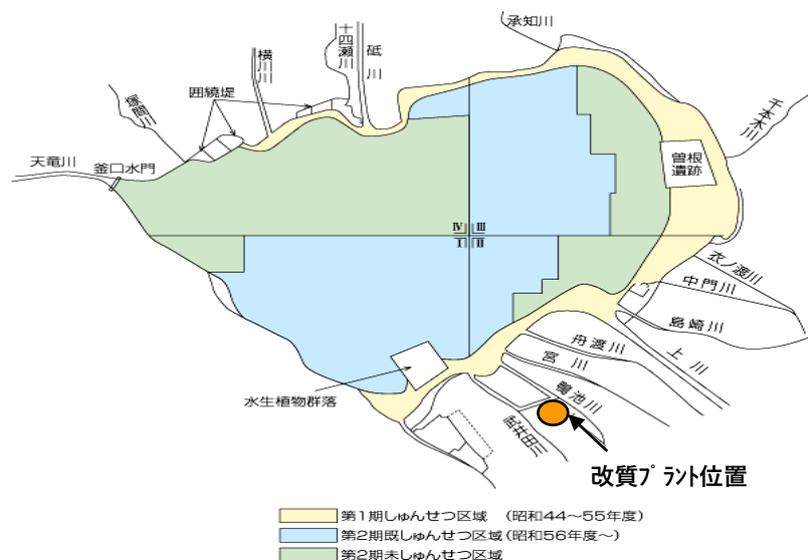


図 5.1 湖浄化事業の計画¹⁾

施工概要図

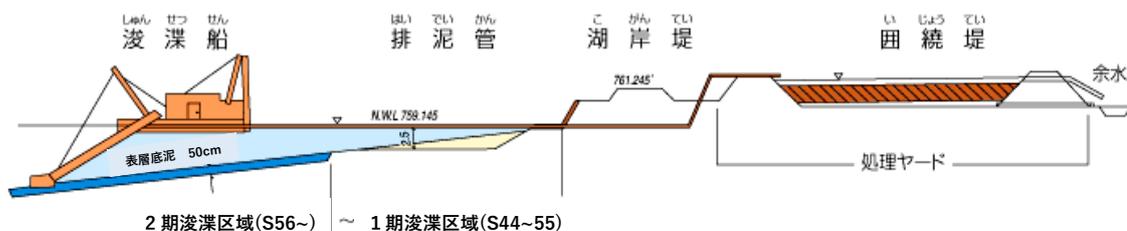


図 5.2 浚渫工事の概要と囲繞堤内における天日乾燥⁵⁾

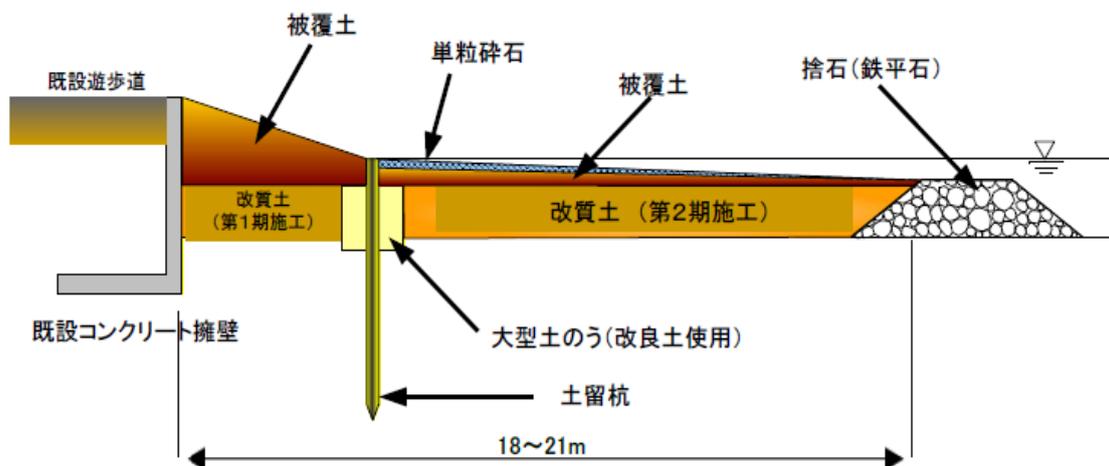


図 5.3 改質土による湖内傾斜護岸盛土の構築³⁾に加筆

(2) 配合試験

配合試験のフローを図 5.4 に示す。配合試験用に採取した圍繞堤内浚渫土の物性（最大値，最小値，平均値）を表 5.1 に，代表的な試料の粒径加積曲線を図 5.5 に示す。改質の対象となる原土は，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。

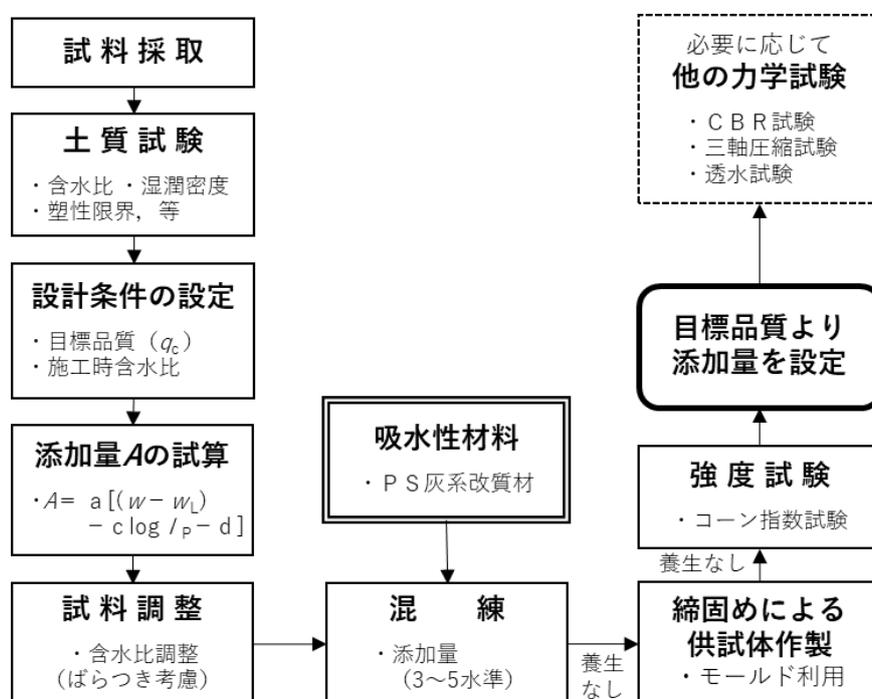


図 5.4 配合試験のフロー

表 5.1 原土（浚渫土）の物理特性¹⁾

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

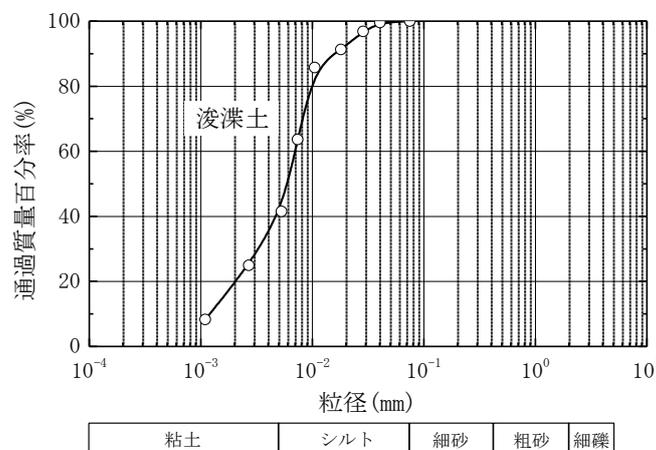


図 5.5 原土（浚渫土）の粒度¹⁾

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。配合設計では、室内配合試験を実施する前に共通編 5.4 に示す方法^{4),5)}で必要添加率 A を推定した。推定に際しては、表 5.1 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、共通編の図 5.7 の吸水比 W_{ab} ～傾き a の関係から求めた(表 5.2)。そして共通編表 5.8 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、 $q_c=200, 400, 800kN/m^2$ それぞれを満足するための必要添加率 A を算定した。図 5.6 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、 $q_c=200, 400, 800kN/m^2$ 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 $\alpha=314, 359, 408 kg/m^3$ 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 5.6 に得られた関係を■の記号で示した。表 5.1 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、共通編 5.4 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 5.6 の結果から、必要添加量 α は 380kg/m³程度になった。

表 5.2 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

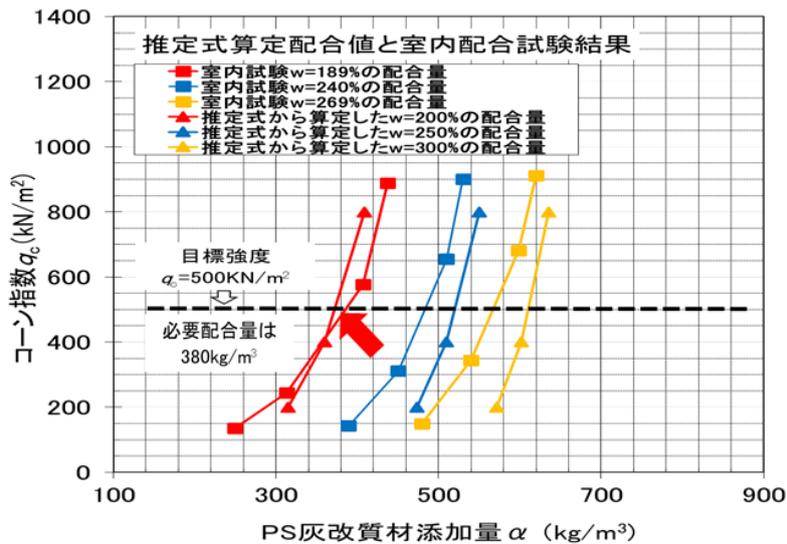


図 5.6 吸水比 W_{ab} に基づく推定添加量と室内配合試験による添加量の比較

(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 5.7）。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 5.8 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。

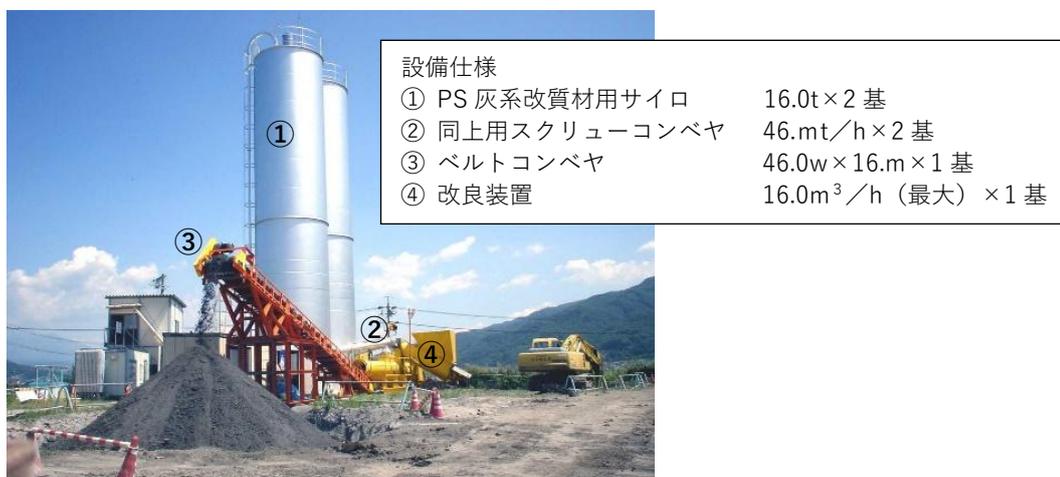


図 5.7 瞬時改質プラント全景³⁾

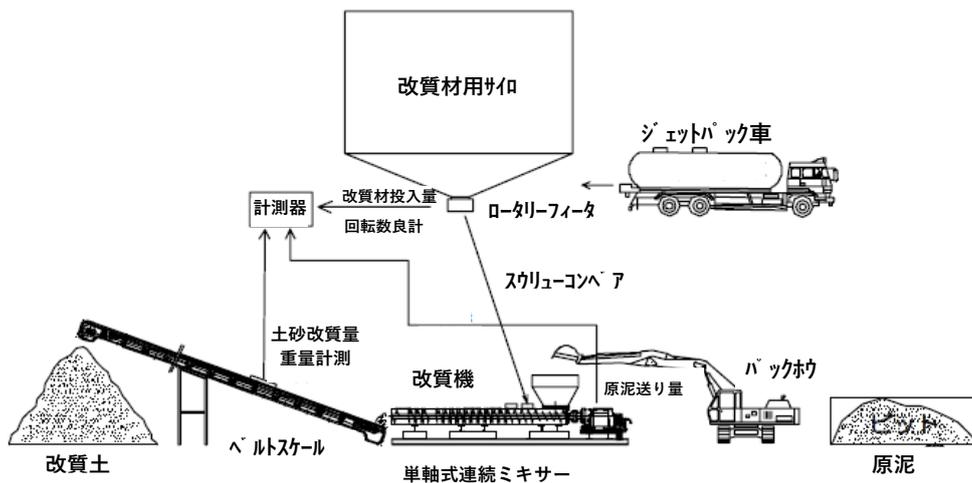


図 5.8 自動スクリー式改質機の全体概略⁶⁾



(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 5.9 施工状況

湖内傾斜護岸施工状況を図 5.9 に示す。図 5.9(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 5.9(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 5.9(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 5.9(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、碎石による表面流出対策（図 5.9(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 5.10 に改質土による湖内傾斜護岸の完成状況を示す。



図 5.10 改質土で構築した湖内傾斜護岸(渚護岸)⁷⁾

(4) 品質管理と水中安定性の検証

1) 品質管理

図 5.11 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、共通編式(5.1)の推定式（以下推定式と略記）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 5.11 に示すように室内配合試験結果の必要添加量と推定式から求めた必要添加量は概ね一致した。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推定式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、室内試験の必要添加量や推定式の添加量より 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。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においても迅速なフィードバックが可能であり、さらに実際の施工では養生に伴う強度発現効果などが加味されたため、**図 5.11** のような結果になったものと考えられる。

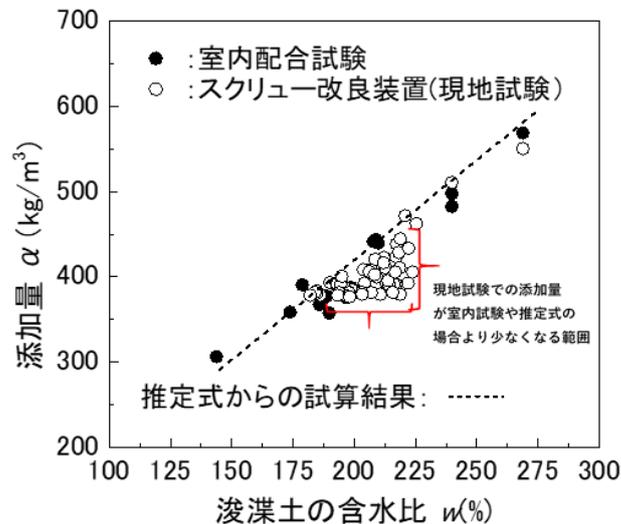


図 5.11 現場品質管理結果と室内試験結果による必要添加量の比較 7)に加筆

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 5.12**)。

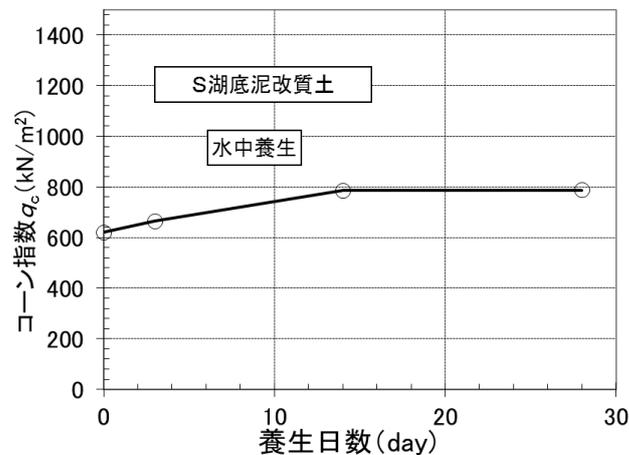


図 5.12 室内試験による改質土の水中安定性の検証

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 5.13 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 penetrometer 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 5.3 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。

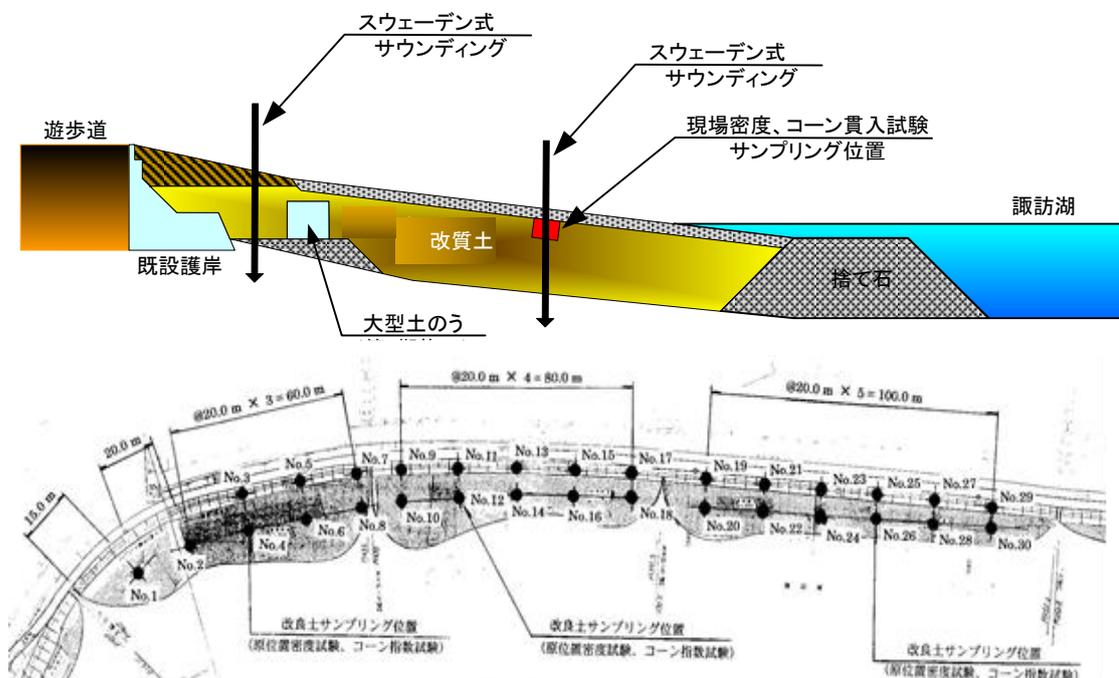


図 5.13 傾斜護岸の調査位置図³⁾

表 5.3 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
	東の島	NO.18	467	1026
		NO.20	279	615
		NO.22	264	582
		NO.24	295	649
		NO.26	259	635
		NO.28	386	850
傾斜部	西の島	NO.30	348	766
		NO.3	294	647
		NO.5	268	589
	中の島	NO.7	280	615
		NO.9	337	740
		NO.11	416	916
		NO.13	488	1073
	東の島	NO.15	493	1085
		NO.17	379	833
		NO.19	212	466
東の島	NO.21	445	979	
	NO.23	335	737	
	NO.25	308	679	
	NO.27	323	711	
	NO.29	371	815	
平均値			857	

5.2 ほぐしを併用した改質事例

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た。

(1) 工事概要

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 5.14)。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 5.15 に示す。

- ・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

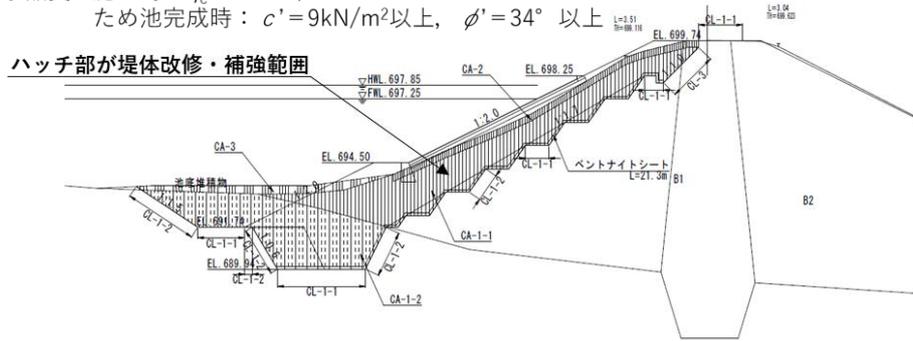
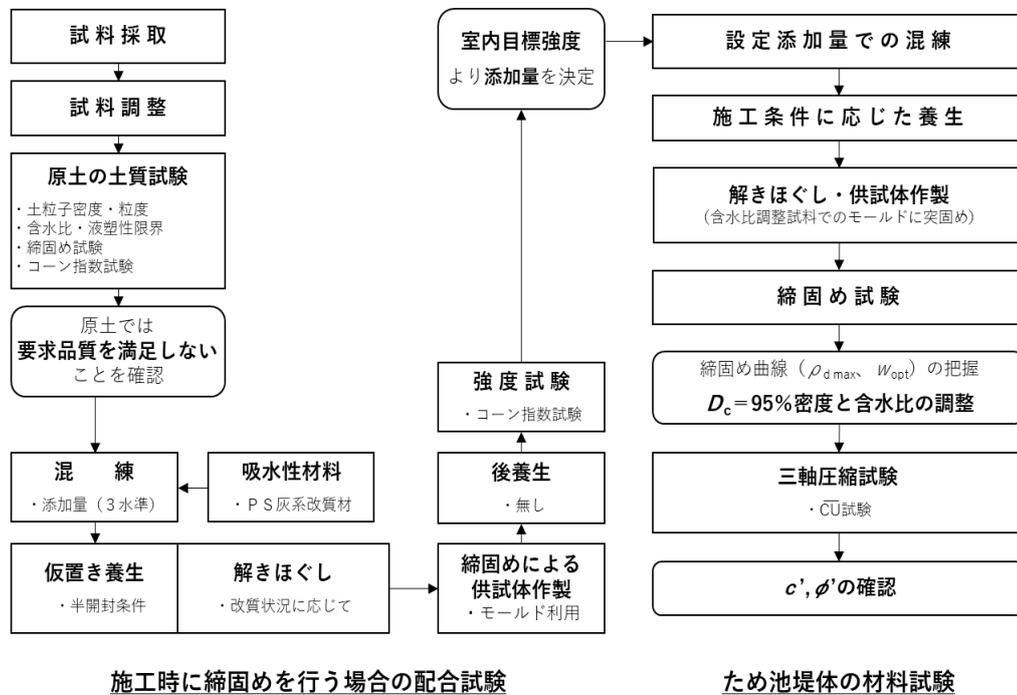


図 5.14 ため池堤体改修計画図



施工時に締固めを行う場合の配合試験

ため池堤体の材料試験

図 5.15 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 5.4 および図 5.16 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 5.4 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

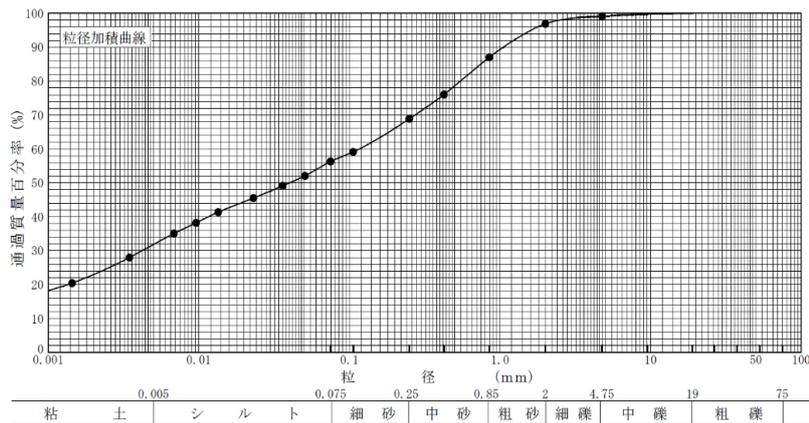


図 5.16 採取試料の粒径加積曲線

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 5.17)。

最適含水比 w_{opt} は 40.5%，最大乾燥密度 ρ_{dmax} は 1.231g/cm³ 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/m² を大きく下回っている (図 5.17 の ● 印の範囲)。また原土のコーン指数が 200kN/m² 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が施工不良範囲)。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。

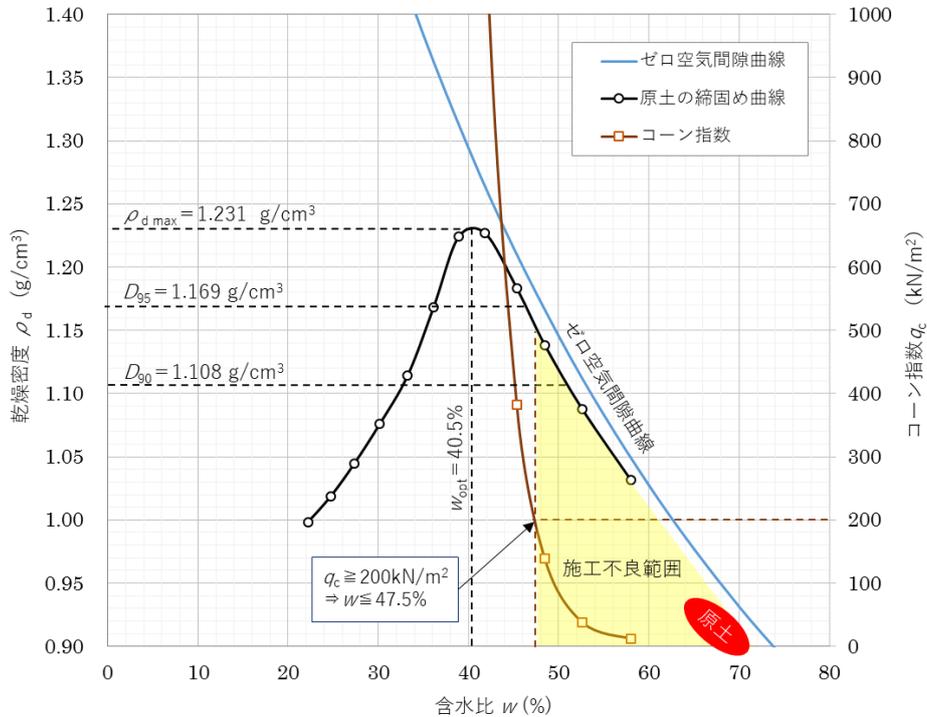


図 5.17 原土の締固め特性と各含水比におけるコーン指数測定結果

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 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 $q_c = 500 / 0.5 = 1000 \text{ kN/m}^2$

3) 添加量と養生条件の設定

採取した原土は高含水試料と低含水試料の 2 種類であるが、条件の悪いケースを想定して高含水試料を用いて表 5.5 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。

表 5.5 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, 150 kg/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)

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 5.18 に示す。コーン指数が $1000\text{kN}/\text{m}^2$ となる条件は、養生日数 7 日で添加量 $\alpha=109\text{kg}/\text{m}^3$ 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 $109\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

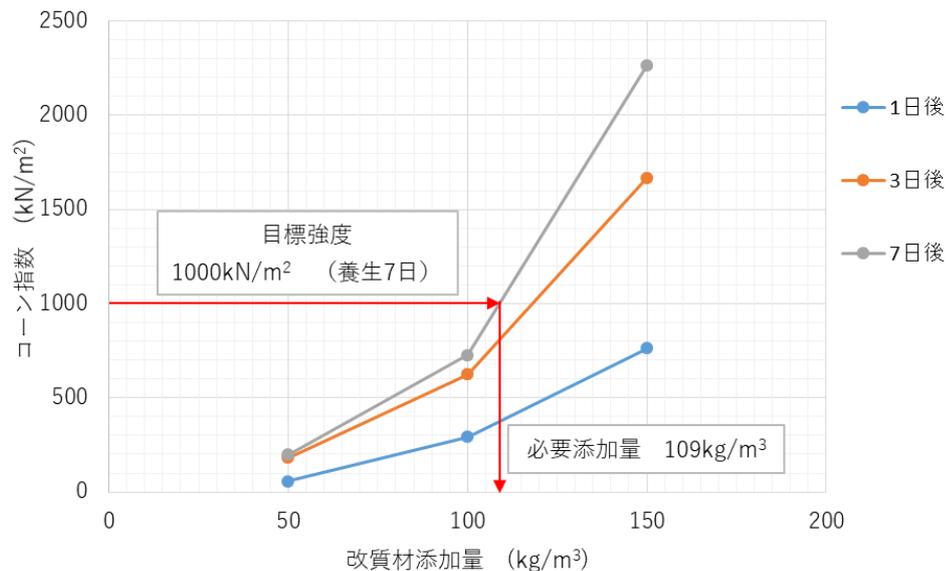


図 5.18 添加量とコーン試験の関係

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、共通編 5.5(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 5.6 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 5.17 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。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 5.6 に示すように、必要添加量は 120kg/m^3 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 5.6 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

(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 5.7 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。

表 5.7 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(\overline{CU})				

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 5.19 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 2.1 参照）。

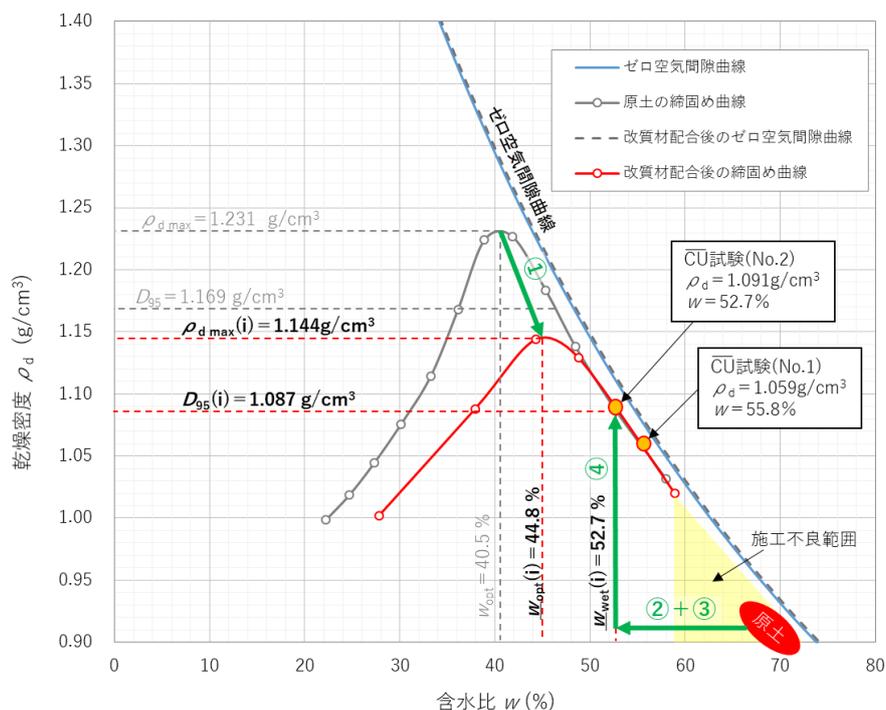


図 5.19 改質材土の締固め曲線と改質効果の説明図

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 5.20）⁸⁾。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 5.19 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 5.21 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 5.22 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

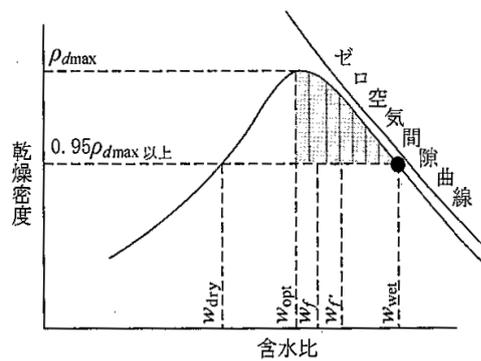


図 5.20 三軸供試体の作製条件⁸⁾

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 5.21 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。

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 5.5 および表 5.7 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 5.23）。

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/m^3 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/m^3 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 5.19 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。

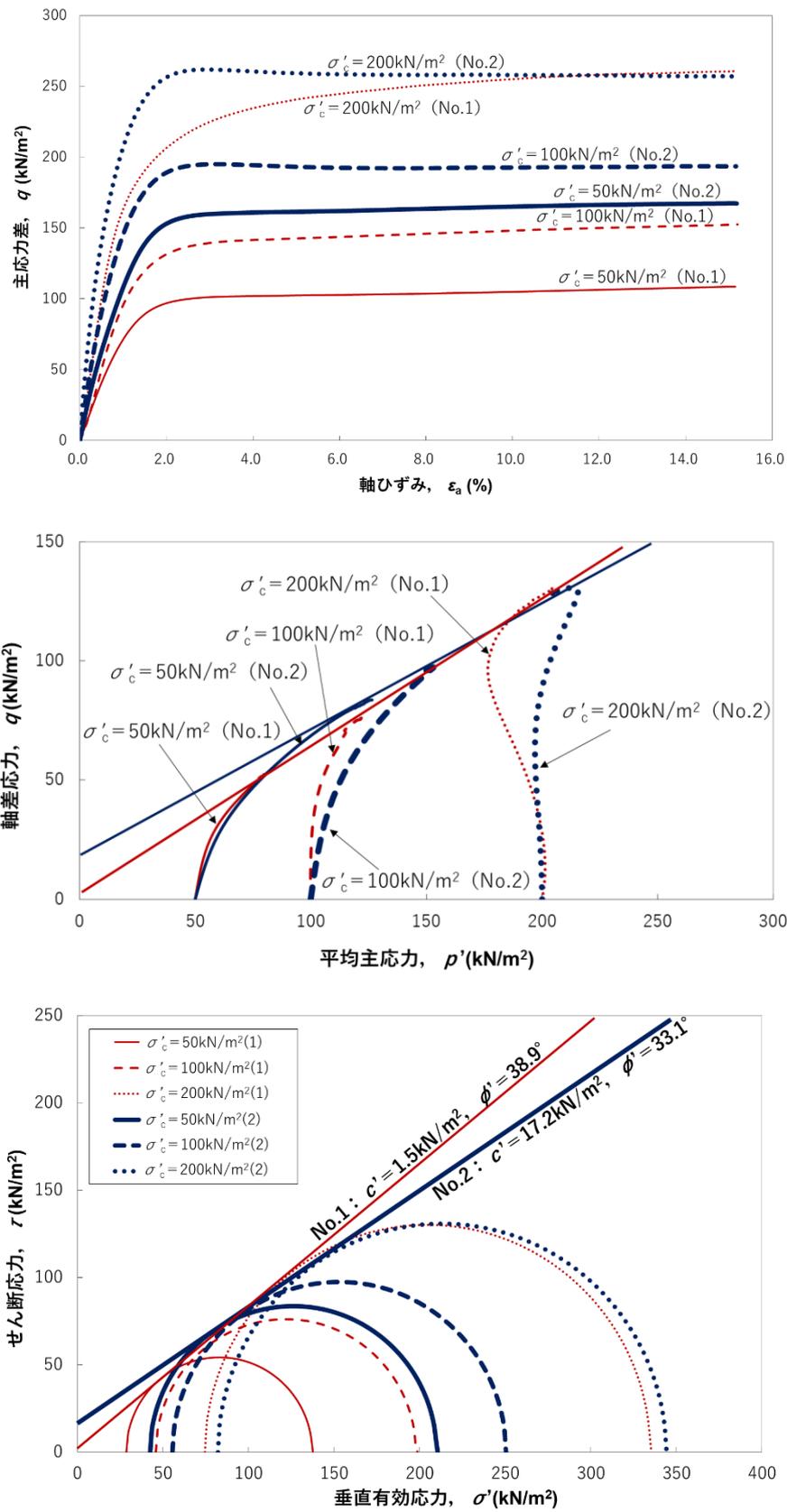


図 5.21 CU試験の結果 (No.1 と No.2 の比較)

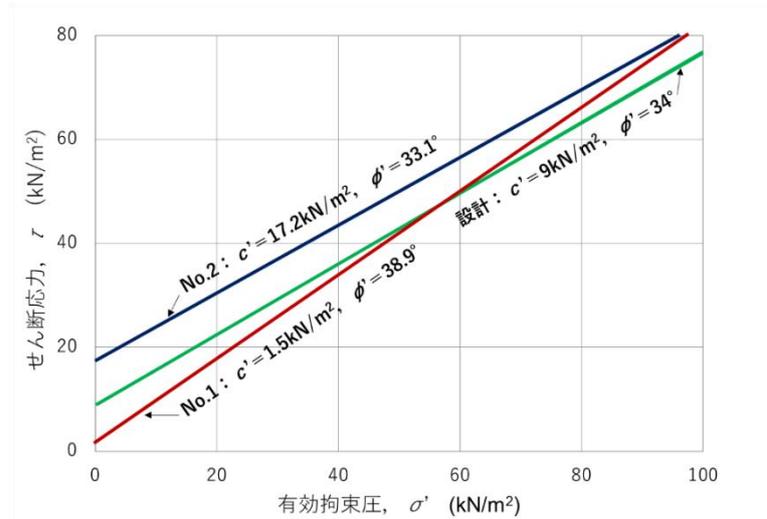


図 5.22 破壊包絡線の比較

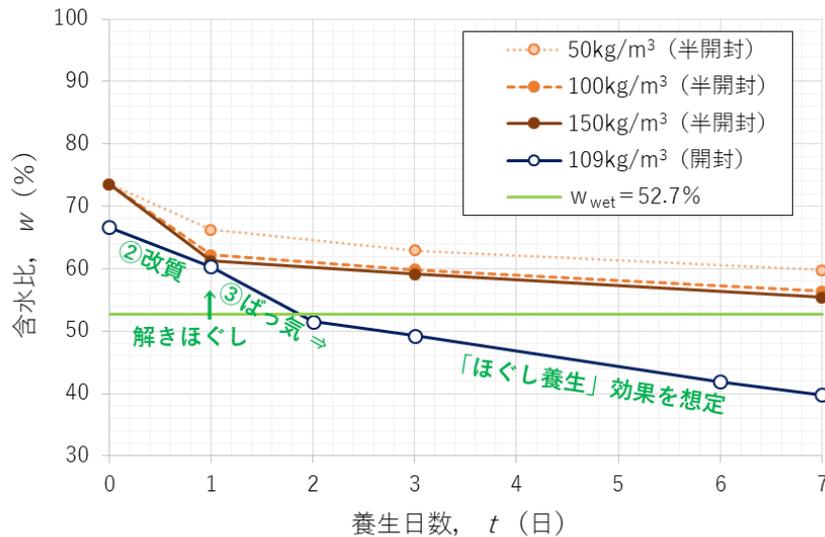


図 5.23 改質土（配合試料）の養生日数と含水比の関係

(4) 施工と品質管理

図 5.24 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/m³）添加し、バックホウ混合で改質を施した（図 5.24 (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)).



(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 5.24 試験施工および施工管理の状況

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 5.25 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。

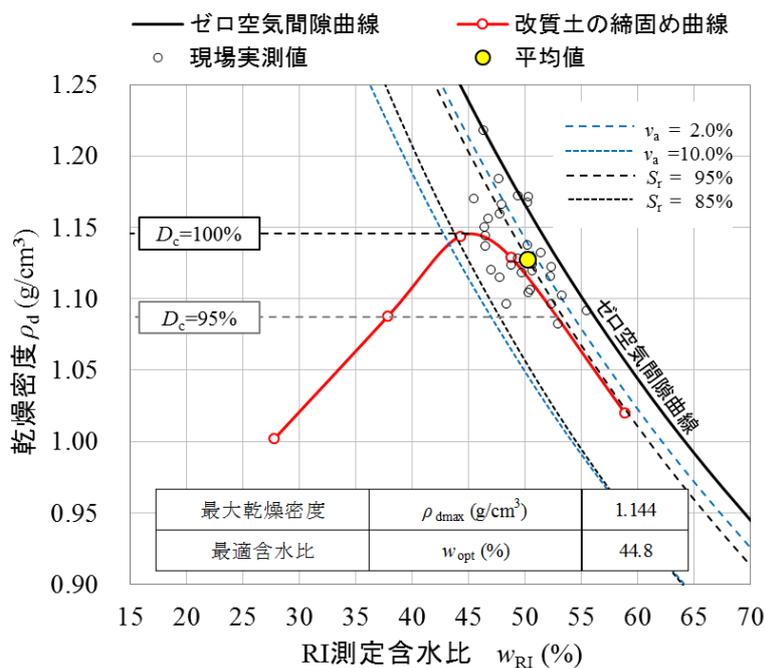


図 5.25 現場改質土の締固め管理図⁹⁾

5.3 簡易手法による品質管理の適用事例

PS 灰系改質材による砂利洗浄脱水ケーキ改質土の品質管理の事例を示す。対象の原土は、砂利採取時に複数の砕石工場から副産物として発生する細粒分を多く含む脱水ケーキであり、改質土は道路盛土の路体に利用される計画である。

(1) 脱水ケーキ（原土）の地盤材料特性

5つの砕石工場から発生する脱水ケーキは、図 5.26 に示すように土塊状のものから簡単にほぐれて顆粒状になるものまで、さまざまな性状を呈している。この脱水ケーキ地盤材料の特性を整理すると表 5.8 のようになる。同表に示すように、いずれの試料も細粒分含有率が 83~99% と非常に高い細粒土である。また、自然含水比 w_n は最適含水比 w_{opt} よりも高く、湿潤側にあるため、含水比の管理には十分留意する必要がある。

図 5.27 および図 5.28 は、各脱水ケーキの粒度特性と締固め特性を示したものである。5種類の脱水ケーキの粒度特性は、比較的類似している。一方、締固め特性は、さまざまであり、最大乾燥密度や最適含水比の値にも違いがある。このような締固め特性の異なる材料で盛土を行った場合、それぞれの脱水ケーキに対して、別々の密度や含水比の管理値が必要となり、管理が煩雑になるため、その点も留意が必要である。

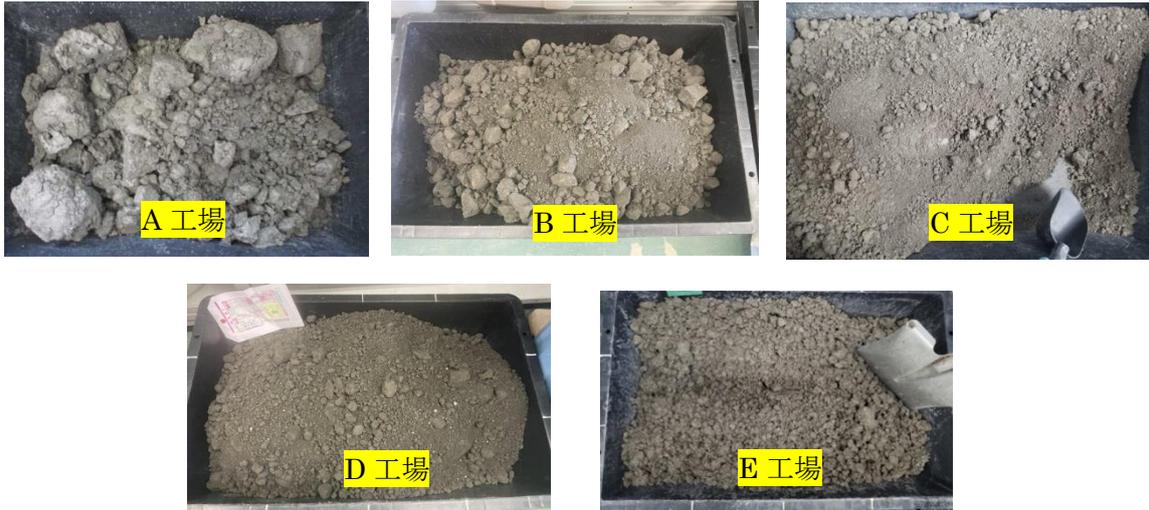


図 5.26 各工場の脱水ケーキの性状

表 5.8 脱水ケーキ（原土）の土質試験結果一覧

試験項目		A工場	B工場	C工場	D工場	E工場	
一般	土粒子密度 ρ_s	g/cm ³	2.753	2.739	2.760	2.731	2.756
	自然含水比 w_n	%	23.7	26.7	28.1	22.4	28.4
粒度	礫分	%	0.0	0.1	0.3	4.8	0.2
	砂分	%	4.7	9.1	1.1	12.3	2.6
	シルト分	%	54.4	56.6	44.1	40.6	56.5
	粘土分	%	40.9	34.2	54.6	42.3	40.7
	細粒分含有率	%	95.3	90.8	98.7	82.9	97.2
	50%粒径 D_{50}	mm	0.008	0.012	0.004	0.009	0.008
	最大粒径	mm	4.75	9.5	9.5	19	9.5
締固め	試験方法	-	A-c	A-c	A-c	A-c	A-c
	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	1.685	1.694	1.638	1.772	1.528
	最適含水比 w_{opt}	%	20.1	16.6	22.2	16.9	22.2
分類	地盤材料の分類	-	細粒土	砂まじり細粒土	細粒土	砂まじり細粒土	細粒土
	分類記号	-	(F)	(F-S)	(F)	(F-S)	(F)

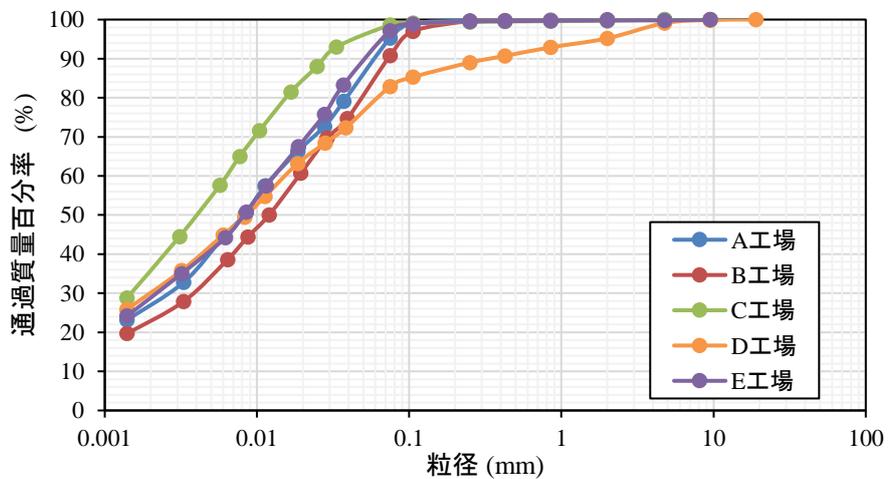


図 5.27 脱水ケーキの粒度特性

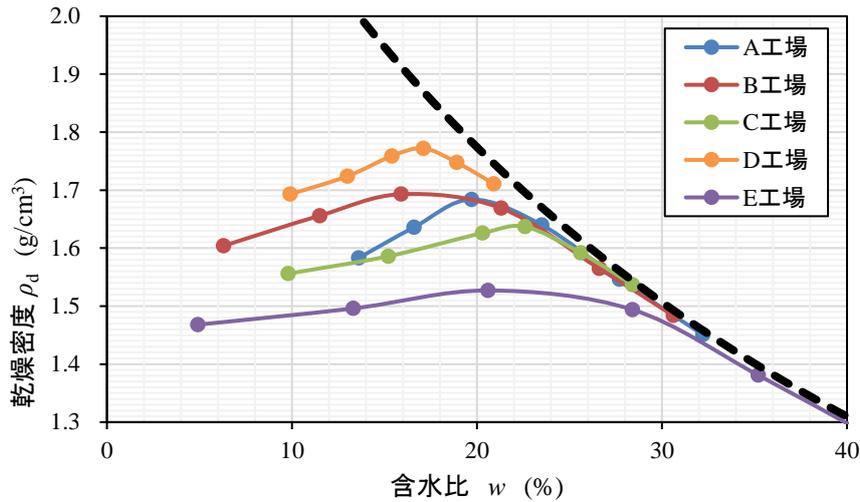


図 5.28 脱水ケーキの締固め特性

(2) 盛土材に要求される品質とそれを満足するための方策

盛土の設計に用いる物性値として、単位体積重量 $\gamma_t \geq 19 \text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c \geq 0 \text{kN/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi \geq 30^\circ$ を満足することが求められた。この設計項目を満足するための品質管理条件を別途定めた。具体的には、盛土材の品質は、盛土時のトラフィカビリティに大きく依存することから、コーン指数で品質を規定することとし、現場でのコーン指数 $q_c = 400 \text{kN/m}^2$ 以上（第3種建設発生土相当）を目標値として定めた。そこで、(現場) / (室内) 強さ比 = 0.5 とし、室内土質試験における目標強度 q_{cL} は、 800kN/m^2 とした。

$$\text{室内試験の目標強度 } q_{cL} = \text{現場での目標強度 } q_{cF} / 0.5 = 800 \text{kN/m}^2$$

この目標強度を満足した材料で土質試験を実施して、上記の物性値（設計条件）を満足することを確認することを基本方針とした。既往の試験結果によれば、細粒分を多く含む土であっても締固め度 $D_c \geq 90\%$ を確保すれば、単位体積重量とせん断抵抗角の設計条件は満足していることから、現状の脱水ケーキの含水比を上げないようにして盛土材として利用することが望ましい。しかしながら、降雨等により含水比が高くなり、脱水ケーキが軟弱化することが懸念されるため、脱水ケーキの品質を確実に確保する目的でPS灰系の吸水性材料を添加して原土中の自由水分を拘束し、締固めのできる状態に改質することで上記の目標品質を確実に満足することとした。

(3) 品質管理方法の基本方針

(1) に示したように各工場の脱水ケーキは、それぞれ別の地盤材料特性を示す。特性の異なる複数の材料をひとつの盛土に使用する場合、それらを個別に管理することは作業が煩雑となり、実際の現場での品質管理や施工管理への適用が難しい。そこで、工場側での盛土

材料の簡易的な品質管理を統一的に実施することにより、現場での施工管理の煩雑化を回避するための基本方針を表 5.9 のように定めた。すなわち、5 つの異なる工場の脱水ケーキを空気間隙率または飽和度により日常的に管理することで、できるだけ同じ仕様で品質管理を行うこととした。

表 5.9 品質管理・施工管理の基本方針

課 題	懸念事項	解決方針	具 体 策
5工場の盛土材料の特性が異なる	乾燥密度や含水比による締固め管理では煩雑になる	できるだけ、同じ仕様で品質管理を行えるようにしたい	空気間隙率または飽和度による日常管理を工場出荷側で行う
同じ工場内でも材料特性が異なる	採取場所や天候によって、脱水ケーキの品質が日々変化する	品質の変動を抑制するためにPS灰系改質材を添加する	PS灰系改質材の吸水性を利用して、水分調整を行う
現場ではTS、GNSSによる締固め管理が適用される	盛土材料の締固め特性が大きく異なると、管理が煩雑になる。 (過転圧による強度低下の懸念)	施工性(トラフィカビリティー確保)の観点から、コーン指数 q_c による管理を導入する	コーン指数による日常管理を工場出荷側で行う
JISによる土質試験では時間も手間もかかる。	日常管理のための土質試験が煩雑になると日々の管理へのフィードバックが難しい	簡易手法を導入することで、省力化し、時間をかけずに試験結果を出して品質管理に反映させる	・締固め用モールドの小型化 ・電子レンジ等による含水比測定 ・土壤硬度計によるコーン試験
基本方針	<ul style="list-style-type: none"> 盛土材料の品質管理(確認)を工場側で統一的に行い、現場の施工管理の煩雑化を回避する。 工場(砂利組合)側の土質試験の省力化を図る。 		

一般的な品質管理は、JIS による試験を実施する機会が多いが、十分な施設や専門職員のいない工場では時間も手間もかかり、日常管理のための土質試験が煩雑になると日々の管理へのフィードバックが難しくなる。そこで、簡易手法を導入することで省力化を図り、時間をかけずに試験結果を出して品質管理に反映させる方法が提案されている。具体的には、締固め用モールドの小型化と土壤硬度計によるコーン試験、ホットプレートによる含水比測定等である。図 5.29 に品質管理の流れを示す。

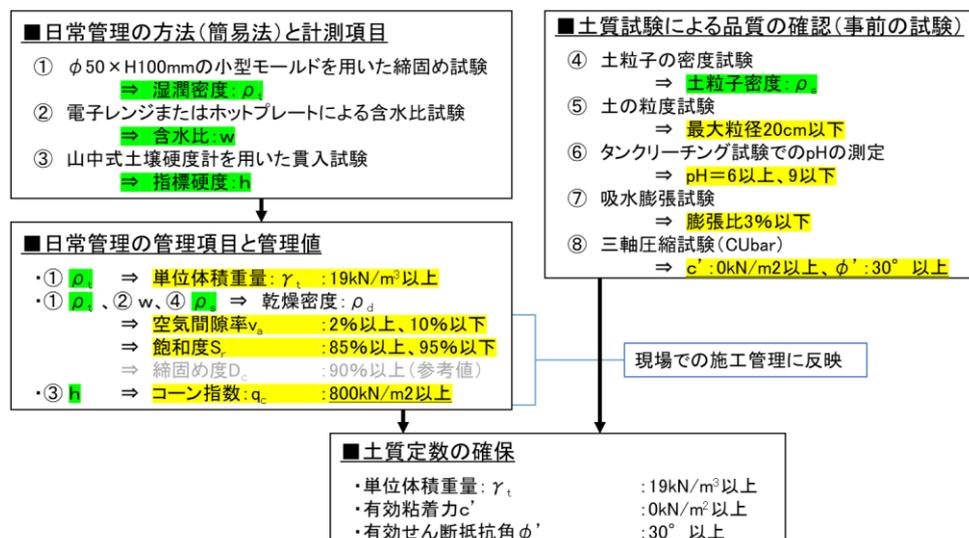


図 5.29 脱水ケーキ改質土の品質管理の流れ

(4) 品質管理の内容

1) 脱水ケーキ改質土の利用計画

現地における利用計画は、表 5.10 に示すとおりである。

表 5.10 改質土の利用計画

	A工場	B工場	C工場	D工場	E工場
改質場所	イ地区	ロ地区	ニ地区	ホ地区	ト地区
	ハ地区				
利用先	道路盛土（路体材）				
概算利用量	600m ³	800m ³	4,000m ³	32,000m ³	3,000m ³
	8,600m ³				
	合計 約 49,000m ³				

■改質方法

自走式土質改良機 : 40～150m³/h : 平均 50m³/h = 300m³/日

改質材 : PS 灰系改質材 20～50kg/m³ (平均 35kg/m³)

2) 品質管理計画

① 材料試験（事前試験）

各工場の材料について、以下の試験が実施されている。

表 5.11 改質土の材料試験（事前試験）

試験項目	仕様	数量
土粒子の密度試験	JIS A 1202	1 試料
土の含水比試験	JIS A 1203	1 試料
土の粒度試験	JIS A 1204	1 試料
突固めによる土の締固め試験	JIS A 1210	1 試料
土の圧密非排水三軸圧縮試験（CUbar）	JGS 0523	1 試料
土の透水試験	JIS A 1218	1 試料
土の吸水膨張試験（CBR 試験）	JIS A 1211	1 試料

② 品質管理（日常管理）

盛土の施工管理は、「TS, GNSS を用いた盛土の締固め管理」に基づいて行う計画である。材表の品質変動を抑制するため、工場側は下記項目を出荷前に実施し、その

結果を表 5.13 に示すシートにまとめ、速やかに現場に伝えるものとしている。

表 5.12 工場における品質管理項目・頻度

試験項目	簡易コーン試験
	含水比試験
	湿潤密度試験
管理項目	コーン指数 800kN/m ² 以上 (指標硬度 20mm 以上)
	空気間隙率 $2\% \leq V_a \leq 10\%$
	または飽和度 $85\% \leq S_r \leq 95\%$
試験頻度	1 日の処理量が 200m ³ を超える場合, 200m ³ ごとに 1 回, 200m ³ 以下の場合, 1 日に 1 回

表 5.13 日常管理データシートの例

試験実施日	2023●●●●		試験開始時間	11:30
試料名	●●工場 脱水ケーキ改質土			
■密度試験				備考
モールド容器質量	g	1592.0		
土+容器の質量	g	1990.0		
土の質量	g	398.0		
土の体積	cm ³	196.3		
湿潤密度	g/cm ³	2.027		
単位体積重量 γ_t	kN/m ³	19.88		19以上
■含水比試験		No.1	No.2	No.3
容器の質量	g	0.25	0.25	0.25
湿潤試料+容器の質量	g	13.25	10.86	10.82
乾燥試料+容器の質量	g	10.97	8.82	8.88
含水比 w	%	21.27	23.80	22.48
平均含水比	%	22.52		
乾燥密度 ρ_d	g/cm ³	1.654		
土粒子密度 ρ_s	g/cm ³	2.752		
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	1.645		
最適含水比 w_{opt}	%	21.6		
空気間隙率 v_a	%	2.6		2以上10以下
飽和度 S_r	%	93.4		85以上95以下
締固め度 D_c	%	100.6		-
■簡易コーン試験		1層目	2層目	3層目
土壌硬度計の読み値	mm	24.5	24.7	25.2
指標硬度(平均値)	mm	24.8		
換算コーン指数qc	kN/m ²	1666		800以上

(5) 当該脱水ケーキにおける簡易方法の適用検討

既往の研究¹⁰⁾を参考に、当該検討対象の脱水ケーキおよびその改質土を用いて、0.2L (φ50×h100mm) 小型モールドと山中式土壌硬度計を利用した簡易法によるコーン指数推定法の適用について検討した¹¹⁾。その結果、当該脱水ケーキについても適用できることを確

認した。

次に大小異なる容量の2種類のモールドを用いて、同じ締固め仕事量 1.0Ec で突固めた試料の締固め特性を比較した。すなわち、5種類の当該地区脱水ケーキと同じサイトから採取した現地発生土に PS 灰系改質材を $20\text{kg}/\text{m}^3$ 添加した改質土を使用して、締固め試験を実施した。試験の実施状況を図 5.30 に示す。



図 5.30 JIS 法 (1.0L モールド : 左) と簡易法 (0.2L モールド : 右)

締固め試験の結果の比較を図 5.31 に示す。1.0L モールドよりも小型モールドの方が若干低めの乾燥密度になる傾向はあるが、その差異はわずかであり、実用的には問題ないレベルの違いで品質管理には十分使えるものと判断した。

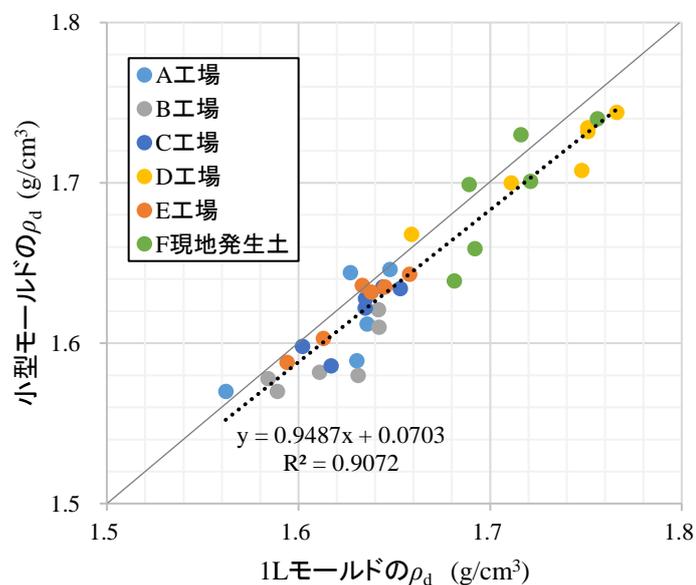


図 5.31 改質土による乾燥密度の比較

(6) 空気間隙率と飽和度による締固め管理の妥当性の検討

(5) に示す簡易手法を利用して、5種類の脱水ケーキ（原材料）の含水比 w ~ 強度 q_c 関係をまとめると図 5.32 のようになり、含水比による締固め管理を一律に設定することが難しいことがわかる。

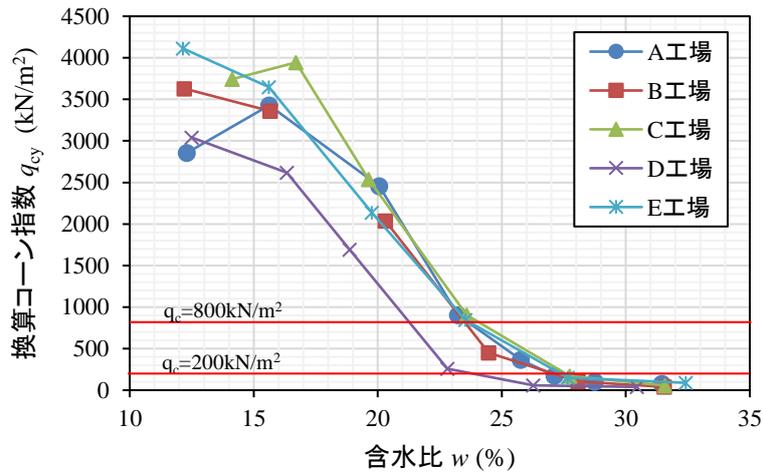


図 5.32 簡易手法で求めたコーン指数と含水比の関係

同様に、簡易手法を用いた締固め試験の結果をまとめると図 5.33 のようになる。同図には、 $v_a=2\sim 10\%$ または $S_r=85\sim 95\%$ での管理とした場合の、管理値内 (OK) となる範囲を緑色の網掛けで示している。同図に示すように、5 種類の脱水ケーキの締固め曲線に違いがあり、 ρ_{dmax} 、 w_{opt} の値も異なっているため、 D_c 管理が煩雑になる。一方、5 つの原材料すべてが締固め曲線のピーク ($\rho_{dmax}-w_{opt}$ になるところ) が v_a または S_r の管理値内にあり、しかも自然含水状態の材料土は、いずれもそのピーク付近にあるため、 D_c 管理よりも合理的な締固め管理が行えることがわかる。

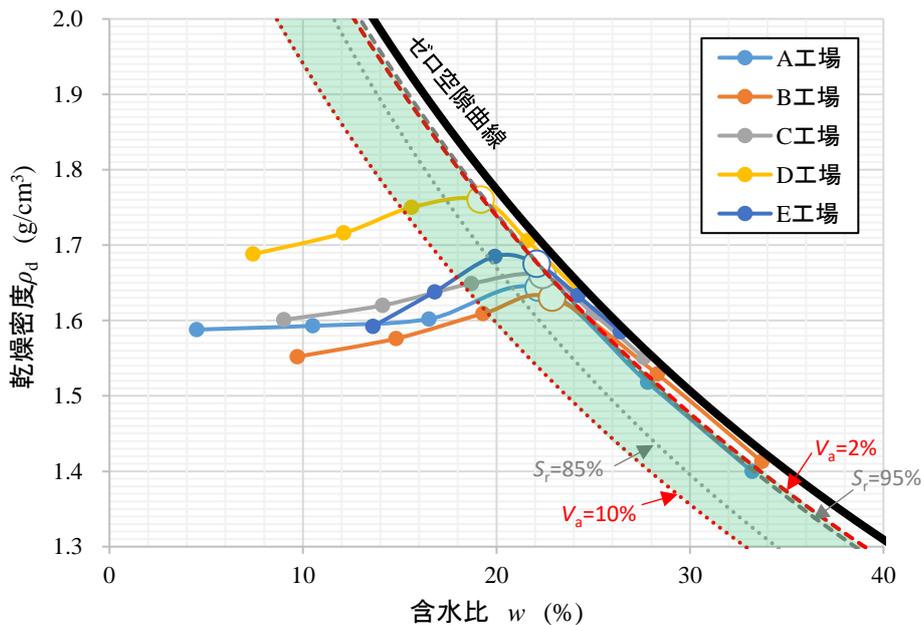


図 5.33 簡易手法で求めた脱水ケーキの締固め特性

図 5.34～図 5.37 は、5 種類の脱水ケーキに関する試験データすべてを q_c との関係性でプロットした結果である。これらのデータには、脱水ケーキの違い、初期含水比の違い、改質材添加量の違い（無しも含めて）がすべて含まれている。

w と ρ_d については、 q_c との関係において原材料と改質土の違いによって分布範囲が異なるため、統一的な管理は難しい。それに対して v_a と S_r は q_c との相関性も高く、材料や改質の有無、あるいは改質材の添加量によらず、一義的な整理が可能である。この関係性を利用すると、山中式の土壤硬度計による指標硬度 $h=20\sim 25\text{mm}$ の値が得られると、コーン指数換算値で $q_{cy} \doteq 1500\text{kN/m}^2$ になる。その結果を図 5.36 および図 5.37 に当てはめると、自ずと空気間隙率 v_a も飽和度 S_r も管理値内に収まることになり、統一的かつ簡便な方法による品質管理が可能となる。

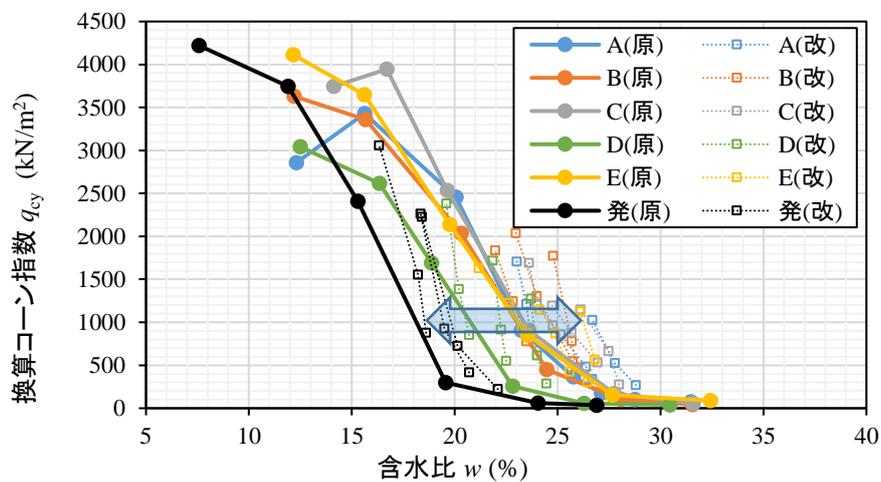


図 5.34 含水比とコーン指数の関係

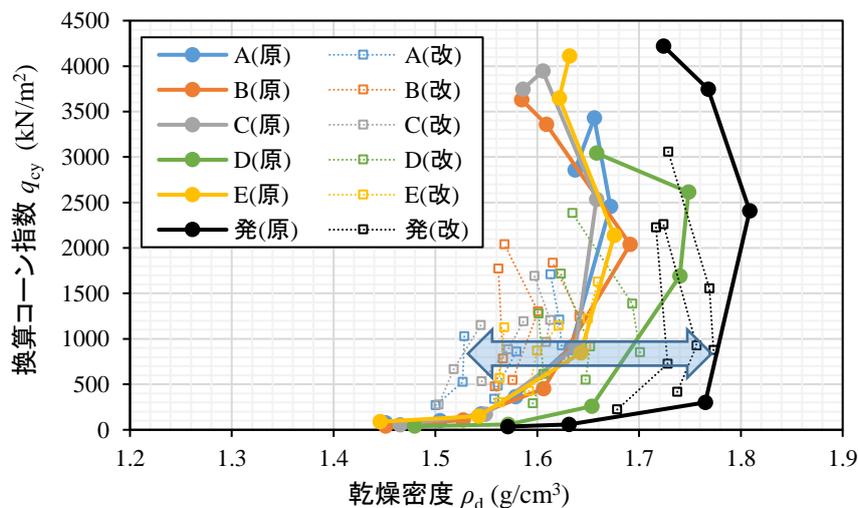


図 5.35 乾燥密度とコーン指数の関係

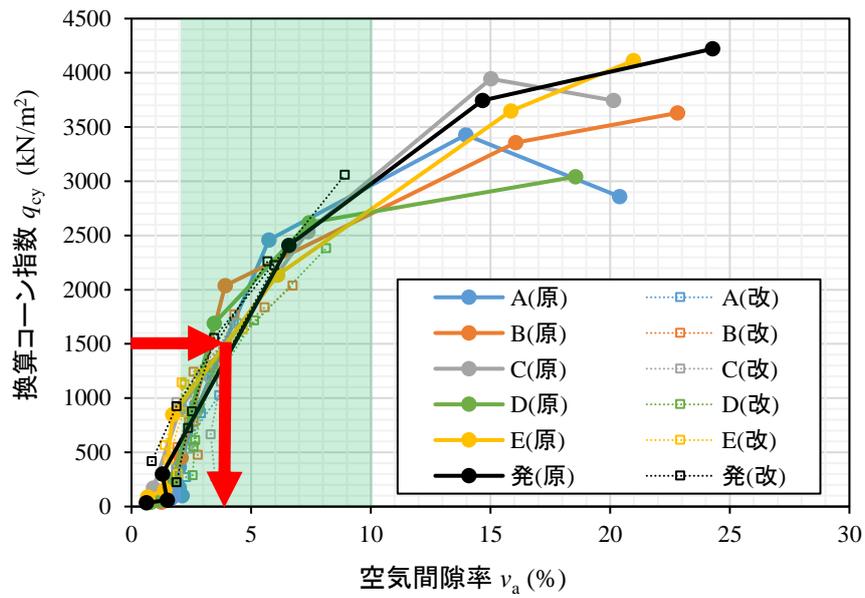


図 5.36 空気間隙率とコーン指数の関係

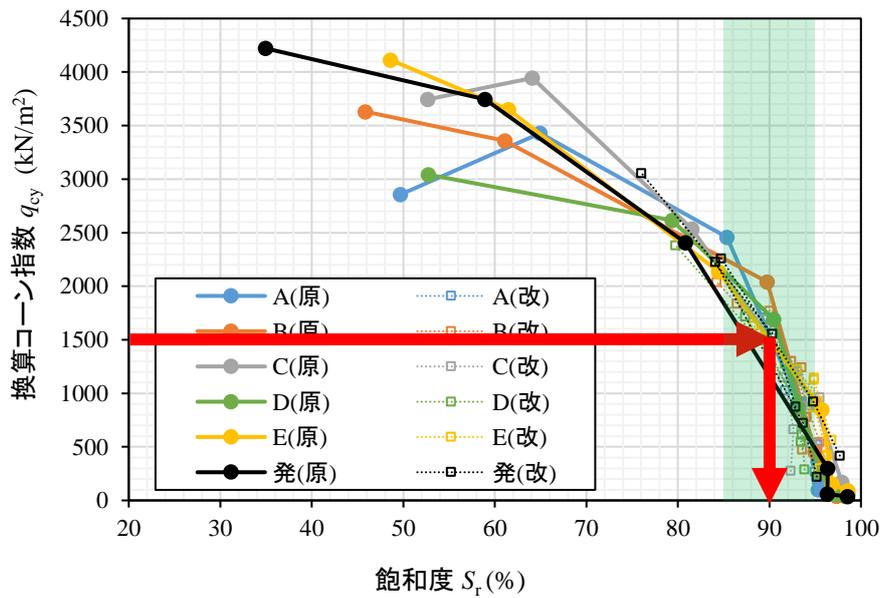


図 5.37 飽和度とコーン指数の関係

参考文献

- 1) 畑野俊久, 齊藤悦郎, 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.
- 2) 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

- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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, pp31, 2017.
- 7) 吉野広司, 畑野俊久, 斎藤悦郎, 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 巻, pp. 353-358, 2006.6
- 8) 農業農村工学会: 土地改良事業設計指針「ため池整備」, p14, 2015.
- 9) 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, 13-3-2-07, 2021.
- 10) 仁平学, 望月美登志, 山内裕元, 早野公敏: 締固めた土のコーン指数を土壤硬度から推定する簡易方法の提案, 第 57 回地盤工学研究発表会, 2022.
- 11) 仁平学, 山内裕元, 早野公敏: 小型モールドと土壤硬度計を利用したコーン指数推定方法の適用性検討, 第 59 回地盤工学研究発表会, 25-3-2-03, 2024.

バイオマス(PKS)灰系改質材編

【 目 次 】

1. バイオマス (PKS) 灰系改質材とは	ハ°イ-2
1.1 木質バイオマス発電について	ハ°イ-2
1.2 バイオマス燃焼灰の発生量推計	ハ°イ-3
1.3 燃料種	ハ°イ-4
1.4 PKS を用いたバイオマス発電	ハ°イ-5
2. 改質原理と対象土および利用用途	ハ°イ-6
2.1 改質原理	ハ°イ-6
2.2 対象土	ハ°イ-6
2.3 利用用途	ハ°イ-7
2.4 地盤材料以外の利用用途	ハ°イ-7
3. バイオマス燃焼灰・バイオマス (PKS) 灰系改質材の物理化学特性 ..	ハ°イ-11
3.1 バイオマス燃焼灰 (未加工材) の物理化学特性	ハ°イ-11
3.2 バイオマス (PKS) 灰系改質材の物理化学特性	ハ°イ-15
3.3 環境安全性	ハ°イ-16
4. 改質土の力学特性と配合設計	ハ°イ-17
4.1 配合設計の基本	ハ°イ-17
4.2 (現場/室内) 強度比 R の設定について	ハ°イ-17
4.3 改質土の力学特性	ハ°イ-18
5. バイオマス (PKS) 灰系改質材の品質管理事例	ハ°イ-26
5.1 改質材における適正管理方法	ハ°イ-26
5.2 バイオマス (PKS) 灰系改質材の品質管理事例について	ハ°イ-27
5.3 改質土の適用用途目標に応じた要求品質	ハ°イ-29
6. バイオマス (PKS) 灰系改質材による改質事例	ハ°イ-30
6.1 バイオマス (PKS) 灰系改質材適用事例①	ハ°イ-30
6.2 バイオマス (PKS) 灰系改質材適用事例②	ハ°イ-33
6.3 バイオマス (PKS) 灰系改質材適用事例③	ハ°イ-35
参考文献	ハ°イ-38

1. バイオマス (PKS) 灰系改質材とは

本手引き（案）においてバイオマス(PKS)灰系改質材とは、木質バイオマス発電所から副産物として排出される燃焼灰（バイオマス燃焼灰と呼ぶ）を主材とし、これに、造粒、固化、重金属不溶化、吸水性向上などを目的とした助剤を添加したものを指す。木質バイオマス発電は燃料種や燃焼炉の形式・規模が多種多様であるため、そこから排出されるバイオマス燃焼灰の物理・化学的性質もさまざまとなり、その多くは産業廃棄物として埋立処分されているのが現状である。本手引き（案）では、主に発電容量が数 10MW クラスで、燃料種として PKS を使用している大規模発電所から排出されるバイオマス燃焼灰のうち、飛灰（フライアッシュ）を使用したバイオマス(PKS)系改質材を中心に扱うものとし、その発電量の推移や燃料種、焼却工程について解説する。

1.1 木質バイオマス発電について

図 1.1 は 2010 年度以降の我が国における電源構成別の年間発電量の推移、図 1.2 は 2010 年度と 2022 年度の発電構成（シェア）を示したものである。木質以外を含む全バイオマスによる発電量は 2010 年度に 152 億 kWh（シェア 1.3%）であったが、2018 年度には 236 億 kWh（シェア 2.3%）、2020 年度には 288 億 kWh（シェア 2.9%）、2022 年度には 371 億 kWh（シェア 3.7%、2010 年度の約 2.5 倍）と堅調に増加しており、太陽光発電と並んで 2010 年代から緩やかにシェアを拡大していることがわかる。

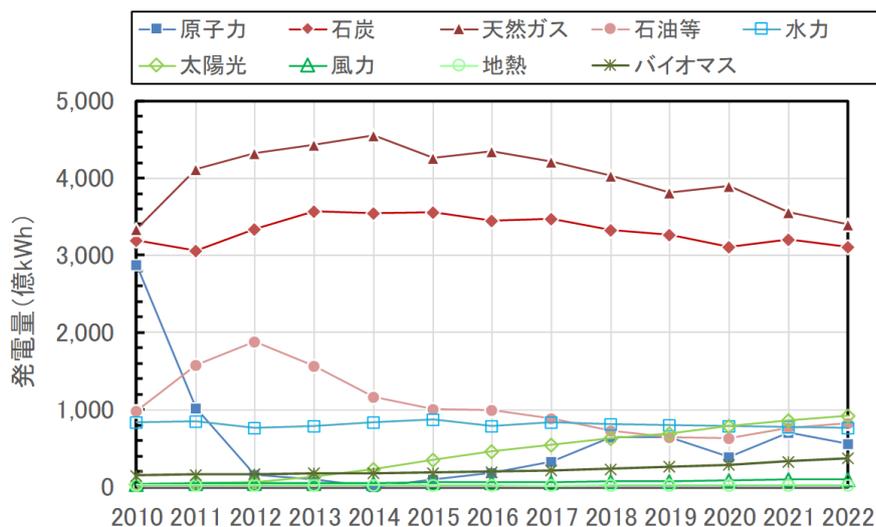


図 1.1 日本国における発電量の推移

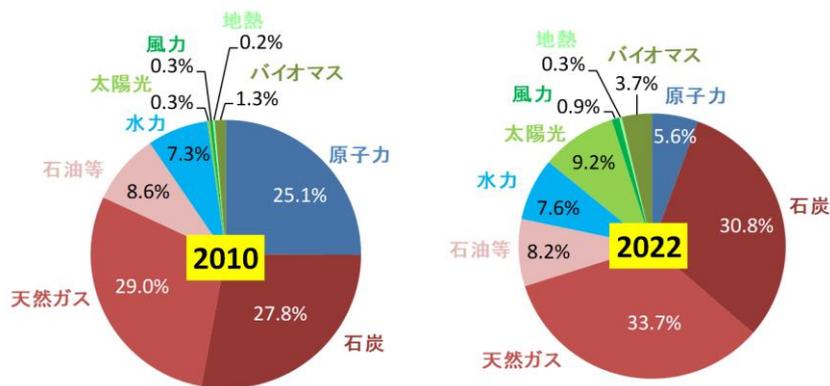


図 1.2 電源構成（左：2010 年度，右：2022 年度）

1.2 バイオマス燃焼灰の発生量推計

バイオマス発電所から排出される燃焼灰に関しては，一般廃棄物や産業廃棄物のような統計的調査データがないため，正確な発生量は不明とされている．池ら²⁾や高岡ら³⁾は，比較的統計データが得られている 1MW 以上の木質バイオマス燃料を主とする FIT 認定施設（191 施設，合計発電容量 5,047MW，主燃料が[木材]または[PKS（パーム椰子殻）]に限定）を対象に，バイオマス燃焼灰の発生量推計を試みている．この研究結果によると，2020 年度の年間発電量は 2,100 万 MWh，2023 年度は同 3,500 万 MWh，2020 年度の年間灰発生量は 11 万～50 万 ton，2023 年度は同 17 万～81 万 ton と推計されており（図 1.3），燃料種別に見ると PKS 起源が 63%であるとしている．ここで，資源エネルギー庁から公表されている全バイオマス発電の年間発電量の実績値（図 1.1）は，2020 年度は 288 億 kWh (=2,880 万 MWh) であるため，推計値 2,100MWh はその 73%に相当する量となる．灰の発生量が幅を持って推定されている理由は，燃料性状（含水率や燃料使用量に対する灰分）の仮定の違い等に起因するが，発電量の増加に伴い灰発生量が増加することは間違いなく，灰の有効利用あるいは適正処理が社会的に重要性を増している状況であると言える．

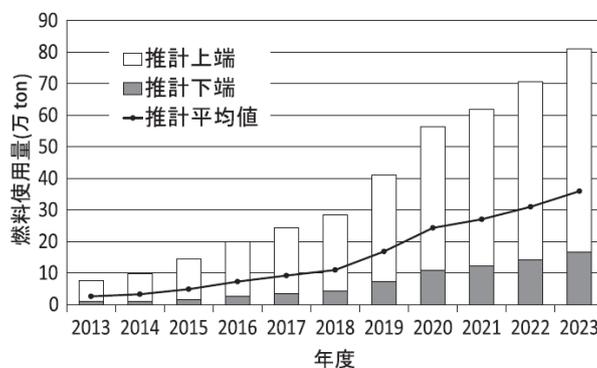


図 1.3 年間灰発生量の推計値²⁾

1.3 燃料種

木質バイオマス発電の燃料種には様々なものがあり、単一燃料による燃焼（専焼）ではなく、幾つかの燃料を混合して燃焼（混焼）する施設が大半を占める。ここで、池らの研究²⁾における日本木質バイオマスエネルギー協会データベースなどに基づく燃料種の分類を示すと、木材燃料は「木材チップ（木くず、未利用間伐材、不明なもの含む）」、「木材ペレット（ホワイトペレット含む）」、「枝葉材（剪定材含む）」、「樹皮材（樹皮、樹皮ペレット）」、「廃木材（建設廃材含む）」の固形5種類に大別され、これに農作物残渣である「PKS（パーム椰子殻）」を加えた6種類が主要な木質系バイオマスである。なお、今後は草本系（ソルガム、オギススキなど）も新たに加わる可能性がある。表 1.1 は池ら²⁾が文献調査した我が国で使用されている木質系バイオマス燃料の性状を示したものである。燃焼種によっても灰分が変化していることがわかる。

前節で示したように、木質バイオマス発電による発電量増加に呼応するように、バイオマス燃焼灰の有効利用に関する研究開発は、近年、様々な産業分野で盛んに行われている。多種多様な燃料種や大きささまざまな発電所、ボイラ種類、燃焼方式が存在するが、限られた公表データの中で灰の特性に関して体系的に整理していくことは非常に難しく、本研究委員会の範疇を大きく超えるものである。本研究委員会では、排出されたままのバイオマス燃焼灰（バージン材や未加工材とも呼ぶ）および、加工あるいは製品化したバイオマス灰系改質材の地盤分野（軟弱地盤改良、改質による土構造物材料化）での利用用途拡大を目的としているため、燃焼灰に関する地盤工学的特性の記述を中心に扱う。このため、文献調査結果に加えて、本研究委員会に参加する委員の取り組み成果に多くの紙面を割く方針とした。具体的には、本手引き（案）に示す各種データは、発電規模として数 10MW クラスの大規模発電所から排出されるバイオマス燃焼灰を主な対象としている。使用されている燃料種は、PKS や木質ペレットであり、燃焼方式は循環流動層ボイラを採用していることが多いことを付記しておく。

表 1.1 国内の木質系バイオマス燃料の性状²⁾

単 位	含水率	灰 分	低位発熱量
	(正規分布) %-wet	(正規分布) %-dry	(正規分布) MJ/kg-wet
木材チップ	39.0±13.7 [18]	1.3±1.8 [18]	11.8±3.1 [4]
木材ペレット	8.7±1.2 [9]	0.8±0.8 [9]	17.2±1.6 [7]
枝葉材	44.3±9.1 [4]	7.4±4.1 [4]	— [0]
樹皮材	36.7±16.1 [6]	2.1±1.0 [6]	9.7±2.3 [3]
廃木材	24.2±13.6 [7]	2.3±1.9 [7]	15.1±0.9 [3]
PKS	18.5±6.1 [6]	2.7±1.5 [5]	16.2±1.6 [4]

1.4 PKS を用いたバイオマス発電

ここで、燃料種として主に PKS(パーム椰子殻, Palm Kernel Shell)を使用しているバイオマス発電所の PKS 焼成と発電工程について例示する。図 1.4 は、発電工程の模式図である。受入れホッパーから計量コンベアを通過した PKS は、循環流動層ボイラで燃焼される。循環流動層ボイラは活発に流動する高温の砂(流動砂)により粒状の燃料を効率よく燃焼させて高温高圧の蒸気を作り、蒸気タービンで発電機を回転させ電気を作る。集塵装置(バグフィルタ)で細粒の飛灰(フライアッシュ)は採取される。一方、循環流動層ボイラの炉底に堆積する灰分が主灰(ボトムアッシュ)と呼ばれ、燃え殻として産業廃棄物処理される。循環流動層ボイラの場合は、主灰には使用された流動砂が多く含まれ、灰としての吸水性はほとんどない。したがって、本研究委員会で対象とするのは、断りのない限りバグフィルタで回収した飛灰である。

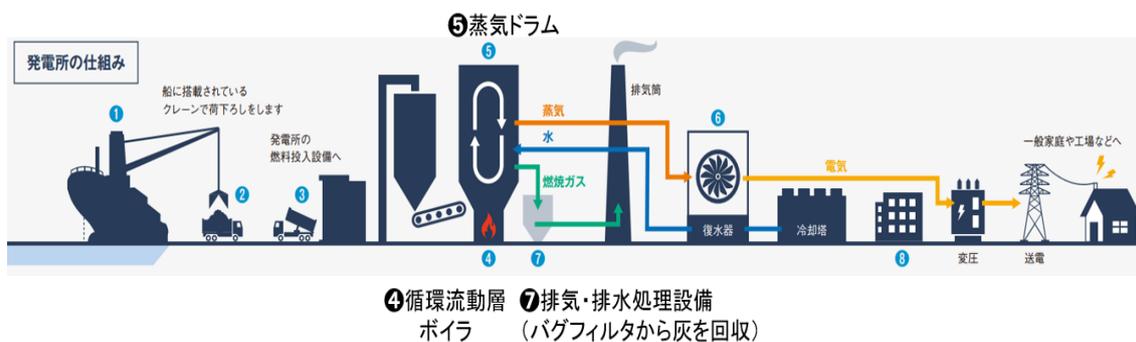


図 1.4 PKS の燃焼と発電工程 4)より作成



図 1.5 PKS, 飛灰, 主灰の外観

2. 改質原理と対象土および利用用途

バイオマス(PKS)系改質材の改質原理は、PS 灰系改質材の場合と同様、改質材粒子構造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み「瞬時に」良質土として吸水改質することができる点にある。バイオマス燃焼灰の物理・化学的性質もさまざまであり、その多くは産業廃棄物として埋立処分されているが、このバイオマス燃焼灰を資源として捉え、有効活用を目的とした技術開発が多くの産業分野で近年盛んに行われている。本章ではその改質原理と農林分野（肥料）、土木資材分野、セメント・コンクリート分野など多方面での適用事例について解説する。

2.1 改質原理

バイオマス燃焼灰もしくはバイオマス(PKS)灰系改質材の改質原理は、PS 灰系改質材の場合と同様、改質材粒子構造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ことが期待できる。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。

また、PS 灰系改質材と同様に、液性限界を超えるような高含水比泥土の瞬時改質に使用するには改質材の添加量が多くなり、費用が著しく増大したり、改質土量が増大したりするので留意する必要がある。なお、バイオマス燃焼灰にはカルシウム成分が多く含まれている場合があり、養生することで弱く固化し、強度増加を期待できる場合もある。これらの特性を十分に理解したうえで、利用用途の選定や配合設計を進める必要がある。

2.2 対象土

改質の対象となる主な土は、**図 2.1** の「泥土に該当する浚渫泥土」に相当す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）であり、浚渫土以外の建設汚泥なども含まれる。

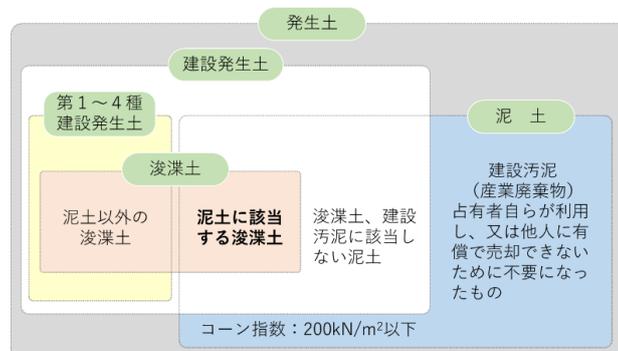


図 2.1 発生土における建設汚泥の位置づけ⁵⁾

2.3 利用用途

バイオマス燃焼灰もしくはバイオマス(PKS)灰系改質材で改質した泥土（改質土）の適用事例は現状では少ないが、締固めが可能な状態となりうるため、土地造成や土構造物（盛土など）用の地盤材料として適用が可能と考えられる。ただし、後述するように、バイオマス燃焼灰には基準値を超える有害重金属成分が含まれることが多いため、利用用途先の環境法規に従い、改質土とした時の環境安全性を確認したうえで使用する必要がある。

2.4 地盤材料以外の利用用途

バイオマス燃焼灰は、地盤材料以外の利用用途を目的とした研究や技術開発が盛んに行われている。その実態についての報告の一つとして、例えば折橋ら⁹⁾は、北海道内の事業者を対象にバイオマス燃焼灰の発生量や利用（用途、利用形態、利用者、理由、利用上の支障の有無）に関するアンケート調査を行い、灰利用に対する事業者の意識や課題を明らかにしている。

ここでは、近年の国内文献を調査し、各産業分野の動向についてレビューする。産業分野別の利用用途を整理した結果を表 2.1 に示す。なお、ここで示すバイオマス燃焼灰は飛灰だけでなく、主灰も含めており、発電規模を問わずあらゆる木質系バイオマス発電を対象としている。

表 2.1 各産業分野のバイオマス燃焼灰の利用用途（泥土改質以外）

分野	用途	着目点
農林	肥料・堆肥原料，林地還元，土壤改良，pH 矯正	窒素・カリウム・リン・カルシウムの抽出。
融雪資材	融雪	灰の明度（暗色）による太陽光の吸収に期待する。
土木資材	路盤材，埋戻材など	セメントなどの固化材を添加し，造粒あるいは礫状にする。
セメント・コンクリート	セメント混和材，セメントクリンカー代替材，コンクリート細骨材代替材など	セメントやコンクリート骨材の代替材としての利用が多いが，バイオマス燃焼灰はアルカリ分が高いため，再利用は限定される。

(1) 農林分野

森林総合研究所では、バイオマス燃焼灰（燃料種は間伐材や一般家庭の庭木などの木質バイオマス）に含まれるカリウムやカルシウム成分に着目し、育苗培地や林地への施用・施肥（林地還元）が苗木や樹木の成長に与える影響や重金属溶出などの環境影響について調べている^{7),8)}。また、近年の研究開発動向や課題についても総括的に報告している⁹⁾。

各自治体の林産試験所や農林水産技術支援センターなどにおいても、バイオマス燃焼灰の肥料効果に関する研究が行われている。例えば、和田ら¹⁰⁾は、スギ、ヒノキの樹皮や製材加工時に生じる切れ端、おがくずなどの製材残材の燃焼灰（主灰：飛灰＝1：1）に含まれるカリウムの肥料効果を、植害試験法に準じた幼植物試験法による栽培実験を行っている。吉田ら¹¹⁾は、燃焼灰をそのまま肥料原料として利用するだけでなく、リンおよびカリウムを燃焼灰から抽出し含有量の高い肥料原料を製造することを試みている。具体的には、混合燃焼灰（竹チップ、牛ふんペレット、下水汚泥ペレット）からカリウムとリンを抽出する効果的な工程の構築を目的とした実験を行い、肥料原料としての適用性を評価している。前田¹²⁾は、燃焼ボイラメーカーの立場から、バイオマス燃焼灰の肥料化プロセス（カリウムの濃縮抽出）の実証研究を行っている。

田島ら^{13),14)}は、木質バイオマス燃焼灰 2 種（燃焼種：未利用木材、ボイラ：循環流動層）および PKS 灰を対象に、灰に含有する肥料成分（窒素、カリウム、リン）に着目した植物の生育試験（コマツナの生育試験）を実施している。また、繁泉ら^{15),16)}は、木質バイオマス燃焼灰のうち主灰に着目し、炭酸化した燃焼灰（Bio-Energy with Carbon Capture and Storage 灰と呼ぶ）と浄水発生土（浄水場から発生する脱水ケーキ）を混練し、緑化資材としての物理特性、環境安全性（重金属類の溶出特性、植物への生育影響）を検討している。ここで、主灰を対象としているのは、浄水発生土の透水性を向上させるためである。さらに、西田ら¹⁷⁾は、肥料元素を含んだバイオマス燃焼灰に大気中の CO₂ を固定化させることによって、植物に養分だけでなく CO₂ も供給できることに着目している。CO₂ を吸着させた木質バイオマス灰を土壌に添加しコマツナの生育試験を実施し、灰からの養分供給の変化やコマツナの生育変化を評価している。

このように、バイオマス燃焼灰の肥料元素に着目した研究・技術開発は、産官学の多くの機関で実施されている。この分野では、バイオマス燃焼灰を未加工の状態でも再利用することを想定しているものが多い。総じて、カリウムの代替資源としてバイオマス燃焼灰は有効であると評価されている。なお、2019 年 12 月に公布された「肥料の品質の確保等に関する法律（旧肥料取締法）」では、草木灰として登録されたバイオマス燃焼灰の「特殊肥料」と「普通肥料」の配合が可能となったため、肥料用途としての利用促進が期待されている。この肥料規格の見直しで燃焼灰の肥料成分が保証できるようになったことを背景に、発電所などから出る木質バイオマスの燃焼灰を肥料原料に使う動きが広がり一部の肥料メーカーが原料に採用した製品を販売している。また、2024 年 1 月からは、国内最大級の木質バイオマス発電所からも肥料メーカーなどへの燃焼灰の販売が本格化している⁴³⁾。

(2) 融雪資材分野

積雪が多い北海道では、バイオマス燃焼灰を融雪資材として活用している事業者が多く存在し⁶⁾、北海道立総合研究機構林産試験場における研究成果^{例えば 18)}を基に、利用法に関する資料¹⁹⁾も発行されている。この資料では燃焼種としては無垢材（塗料や防腐剤等の化

学物質による処理を受けていない材)に限定している。バイオマス燃焼灰は既存の融雪資材(木炭, もみ殻灰, タンカル, 石炭灰)と同等の融雪効果が認められるとしている。なお, 利用にあたっては, 北海道が発行する「焼却灰(天然木由来)の利用の手引き」²⁰⁾による事前確認事項の確認を推奨しているほか, 有害無機元素(重金属)について, 農用地および農用地以外の土地に対して要件を付与している。

(3) 土木資材分野

バイオマス燃焼灰に石灰やセメント等の固化材を混ぜて処理し, ブロック状, 砕石状, 礫状等に粉碎して土木資材(埋戻し材, 造成基盤材, 路盤材等)として有効利用する技術は数多く開発され, 実用化されている。一般にバイオマス燃焼灰はかさ比重が小さいため, プラント設備によって資材化されたものは軽量かつ多孔質である。強度に関しては, CBR値やコーン指数などで十分な強度を発揮する材料であるとの報告が多い。また, セメント等によって固化されるので, バイオマス燃焼灰から溶出する各種重金属成分を不溶化する効果もあるとされる²¹⁾。ただし, 田島らの研究^{13),14)}で指摘されているように, 少量のセメントで造粒固化する場合, 灰の種類によっては土壤環境基準を超過する重金属が溶出することがあるため, 土木資材として利用する際には環境安全性の確保に留意が必要であるとされている。

(4) セメント・コンクリート分野

バイオマス燃焼灰をセメント混和材(セメント容積の内割置換材), セメントクリンカー代替材, コンクリートの細骨材代替材として有効利用する研究開発は, 2010年代後半から数多く実施されている。

佐川ら²²⁾は, 木質バイオマス燃焼灰のセメント混和材(各種セメント[普通ポルトランドセメント, 高炉セメントB種, 高炉セメントC種]をバイオマス燃焼灰に0~30%内割りで置換)としての適用性について調べるため, モルタル供試体による強度評価を実施した。いずれもバイオマス燃焼灰への置換率が高くなるほどモルタル供試体の圧縮強度は低下する結果となった。しかし, 高炉セメントB種およびC種ではこの低下は緩和され, この要因はバイオマス燃焼灰のカルシウム成分がアルカリ刺激剤として高炉セメントの原材料である高炉スラグ微粉末に反応したためと推察している。また, 堀江ら²³⁾も, 普通ポルトランドセメント(OPC)の代替として, バイオマス燃焼灰(燃料:間伐材チップ)を内割りで10%~30%の範囲で置換したモルタル供試体を作成し, 圧縮強度, 六価クロム溶出量, 反応生成物のXRD測定, 電気泳動試験(塩化物イオンの拡散係数の測定)を実施している。佐川ら²²⁾の結果と同様に, 強度はOPCより低下するものの, 塩化物イオンの浸透抵抗性が高く, 耐久性が必要な構造物へ利用できる可能性を指摘している。前川ら²⁴⁾も同様の検討を実施しており(燃料:未利用および一般木材), 置換率を大きくなるほど圧縮強度およびセメントモルタルのフロー値(流動性)いずれも低下することを報告している。また, 前川ら²⁵⁾は, バイオマス燃焼灰(燃料:未利用および一般木材)の使用がポーラスコンク

リート（水／結合材比 21%）の各種特性（強度，重金属溶出，調湿性）に及ぼす影響を調べ，普通コンクリートではバイオマス燃焼灰を 20%混入することにより強度低下が 23%生じるが，ポーラスコンクリートでは置換率によらず強度低下が 10%以内に抑えられること，吸放湿量がわずかに上昇することを示し，用途拡大への可能性を示している。

境ら²⁶⁾や比留間らは²⁷⁾，バイオマス燃焼灰に含まれるシリカ成分（ SiO_2 ）やアルミナ成分（ Al_2O_3 ）に着目し，セメントクリンカー原料（セメント中間製品）として利用することを目的に，コンクリートの耐久性に悪影響を及ぼすカリウム（アルカリ源）の除去プロセスの検討を行っている。溝渕ら²⁸⁾、²⁹⁾は，バイオマス燃焼灰を石炭灰代替材としてセメントクリンカー原料へ利用することを目的に，バイオマス燃焼灰で置換した混合セメントの総アルカリ量がセメントの圧縮強度やアルカリシリカ反応（ASR）の抑制効果へ及ぼす影響を評価している。

また，近年開発が進んでいるセメントフリーのジオポリマー分野についても，石炭灰や高炉スラグ微粉末などの活性フィラーの代替材としてバイオマス燃焼灰を活用した幾つかの実証研究³⁰⁾、³¹⁾が見受けられ，土木学会³²⁾ではこれらの動向について体系的にレビューしている。

(5) 炭酸塩化灰に関する研究動向

上述した繁泉ら¹⁵⁾、¹⁶⁾の研究や西田ら¹⁷⁾の研究の他にも，バイオマス燃焼灰を炭酸塩化処理することで，木質バイオマス発電由来の CO_2 を固定化する研究開発事例が近年盛んに行われている。

一般財団法人電力中央研究所，三菱重工業，東洋建設および一般財団法人石炭フロンティア機構の共同研究グループは，「カーボンリサイクル技術の共通基盤技術開発（技術分野：炭酸塩技術）」として，「石炭灰およびバイオマス灰等による CO_2 固定・有効活用に関する要素技術開発（2020 年度～2022 年度）」を国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託されている。具体的な検討項目は，多種の石炭灰およびバイオマス燃焼灰を対象に，① CO_2 との反応量，反応速度および炭酸塩化に伴う重金属等の動態変化を評価し，プラントに併設した CO_2 吸収装置もしくは処分場を活用した CO_2 固定システムの確立に向けた研究開発，②炭酸塩化に伴う重金属等の動態変化に対する安定処理法の探索，③炭酸塩化灰の利用用途の調査と資材化に向けた製造技術に関する研究開発である³³⁾、³⁴⁾。ここでの炭酸塩化灰とは，スラリー状にした石炭灰・バイオマス燃焼灰に発電所から回収した排ガス（ CO_2 ）を吸収させ，反応後のスラリーを脱水して生成するものである。この炭酸塩化灰に固化材と水を混合して人工石を製造し，土木資材（盛土・埋し立材など）や海洋資材（ブルーカーボン用途の人工基質・礫材）としての利用可能性を検討している。また，農業資材としてゼオライト系土壌改良材の開発にも着手している。

3. バイオマス燃焼灰・バイオマス(PKS)灰系改質材の物理化学特性

本章では製品化したバイオマス(PKS)灰系改質材とその主材となるPKS燃焼灰の物理化学的特性について解説し、無機系吸水性改質材としての有効性を解説する。

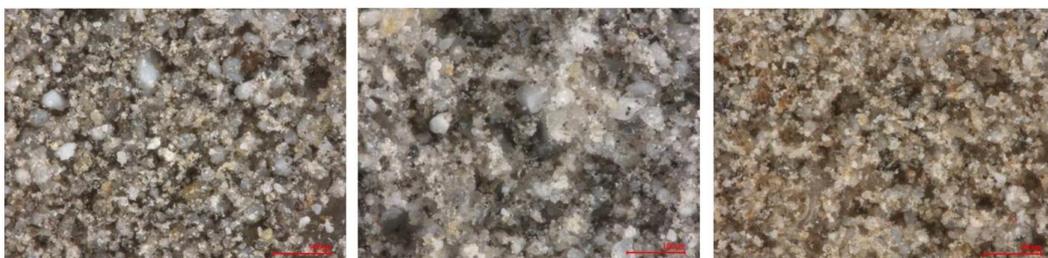
3.1 バイオマス燃焼灰(未加工材)の物理化学特性

(1) 粒子密度とかさ密度

排出されたままのバイオマス燃焼灰(バージン材や未加工材)の粒子密度および最大密度・最小密度の例を表3.1に示す。ここでは、PKS灰の他に、未利用木材を燃料としたバイオマス燃焼灰のデータも示している。バイオマス燃焼灰の粒子密度は高いもので 3.0g/cm^3 程度のももあるが、概ね $2.4\text{g/cm}^3\sim 2.8\text{g/cm}^3$ の範囲にあり、PS灰系改質材³⁵⁾と同様の粒子密度をしている。また、PS灰のかさ密度は $0.45\text{g/cm}^3\sim 1.01\text{g/cm}^3$ と示されているのに対し、バイオマス燃焼灰の最小密度(ここではかさ密度に相当すると考える)は $0.87\text{g/cm}^3\sim 1.25\text{g/cm}^3$ の範囲にあり、PS灰よりも大きな値を示している。図3.1にデジタルマイクロスコープ(キーエンス、VHX-700)によるバイオマス燃焼灰の観察画像(500倍)を示す。

表3.1 バイオマス燃焼灰の粒子密度、最大密度、最小密度の例

本章での名称	A	B	C	D	E
ボイラ	循環流動層	循環流動層	循環流動層	循環流動層	循環流動層
燃料種	PKS	PKS	PKS 木質ペレット	未利用木材	未利用木材
種類	飛灰	飛灰	飛灰	飛灰	飛灰
粒子密度 (g/cm^3)	2.42~2.54	2.46~2.58	2.62~2.73	2.61	3.06
最大密度 (g/cm^3)	0.95	1.09	0.87	1.57	1.25
最小密度 (g/cm^3)	0.68	0.74	0.60	1.23	0.83
出典	36),37) 委員提供	38) 委員提供	38) 委員提供	13),14)	13),14)



バイオマス燃焼灰A

バイオマス燃焼灰B

バイオマス燃焼灰C

図3.1 バイオマス燃焼灰の観察画像(500倍)

(2) 粒度

PS 灰系改質材と同様に，バイオマス燃焼灰の粒度は改質土の性状に影響するため，事前に把握しておくことが重要である．バイオマス燃焼灰の粒度特性の例を表 3.2 に，粒径加積曲線の例を図 3.2 に示す．なお，粒度は土の粒度試験（JGS 0131）により実施したものである．バイオマス燃焼灰の物理特性を報告している既往文献は少ないが，PKS や木材ペレットを燃料種とし，循環流動層ボイラーから排出される飛灰の 50%粒径は，10~50 μm となっており，粒径の幅もやや大きい．

表 3.2 バイオマス燃焼灰の粒度特性の例

本章での名称	A	B	C
ボイラ	循環流動層	循環流動層	循環流動層
燃料種	PKS	PKS	PKS・木質ペレット
種類	飛灰	飛灰	飛灰
50%粒径 (μm)	15.0~52.6	17.8~21.2	11.8~12.3
細粒分含有率 (%)	80.6~81.0	72.3~74.8	91.5~96.0
出典	36),37) 委員提供	38) 委員提供	38) 委員提供

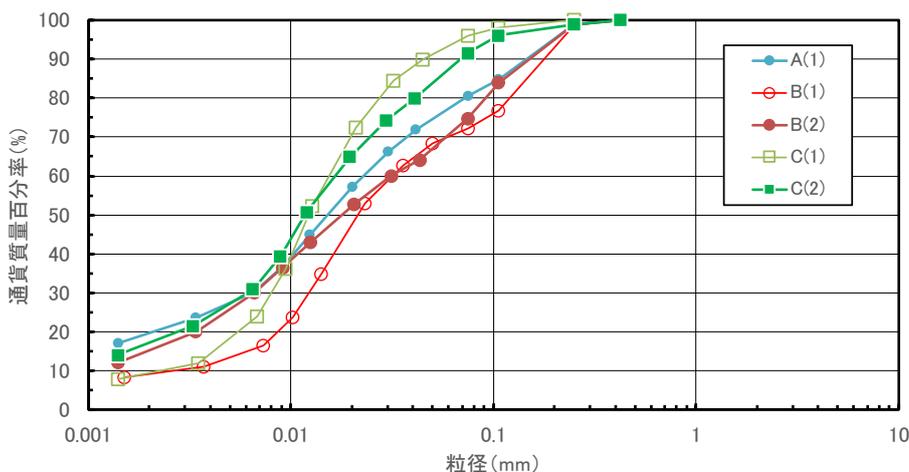


図 3.2 バイオマス燃焼灰の粒径加積曲線の例

(3) 成分組成と pH

バイオマス燃焼灰の成分組成と懸濁液の pH の例を表 3.3 に示す．なお，表 3.3 に示した値は，各文献に示されている値を少数第一位で四捨五入して転記したものであり，「-」は検出されていないか，文献で表記されていないかのどちらかである．組成分析の方法は，蛍光 X 線回析装置を使用していると思われるが，整理方法（炭素分の表記方法など）に若干の違いがある．

木質バイオマス発電は燃料種，燃焼ボイラー，燃焼温度等が多種多様であり，灰成分の割合も変わってくるため一般的な化学組成を論じることは難しいが，大局的にはバイオマ

ス燃焼灰の主要成分（酸化物換算）は、SiO₂、CaO、Al₂O₃、K₂Oであり、MgOやFe₂O₃が高い値を示すものもある。PS 灰系改質材³⁵⁾に比べてK₂Oをやや多く含むことが特徴であり、これが前述したように農林分野において肥料や林地還元用途に使用される所以であると思われる。また、PS 灰系改質材³⁵⁾と同様に、CaOを多く含んでおり、物理的吸水効果だけでなく化学的吸水効果を期待できる材料であることがわかる。SiO₂が50%以上の灰は、循環流動層で使用される珪砂に由来すると考えられる。

バイオマス燃焼灰のpH（JGS 0211）は、強アルカリ（pH=12~13）を呈しており、これもPS 灰やPS 灰系改質材と同様の特長である。

表 3.3(a) バイオマス燃焼灰の成分組成と pH の例

本章での名称		A	B	C	D	E
ボイラ		循環流動層	循環流動層	循環流動層	循環流動層	循環流動層
燃料種		PKS	PKS	PKS 木質ペレット	未利用木材	未利用木材
種類		飛灰	飛灰	飛灰	飛灰	飛灰
組成 (%) (塩素を除き、酸化物換算)	SiO ₂	50.0	50.8	31.5	78.5	20.9
	CaO	29.0	21.5	30.6	7.5	27.8
	K ₂ O	4.4	6.5	4.0	5.2	32.1
	SO ₃	4.3	2.9	3.9	1.4	5.3
	P ₂ O ₅	1.8	2.1	2.5	—	1.1
	MgO	2.6	2.1	3.8	2.2	4.6
	Fe ₂ O ₃	1.8	2.8	4.5	1.1	2.3
	Al ₂ O ₃	3.6	4.1	3.8	1.9	1.9
	Cl	—	—	—	—	1.9
Na ₂ O	—	—	—	—	1.2	
pH		11.6	12.6	12.6	12.2	13.0
出典		36),37)	38)	38)	13),14)	13),14)

表 3.3(b) バイオマス燃焼灰の成分組成と pH の例

本章での名称		F	G	H	I	J
ボイラ		循環流動層	循環流動層	循環流動層	循環流動層	循環流動層
燃料種		不明（専焼）	不明（専焼）	不明（専焼）	不明（専焼）	不明（専焼）
種類		飛灰	飛灰	飛灰	飛灰	飛灰
組成 (%) (塩素を除き、酸化物換算)	SiO ₂	23.8	49.7	37.3	47.7	44.3
	CaO	23.9	23.6	22.5	14.1	12.5
	K ₂ O	16.9	5.4	7.5	2.9	4.9
	SO ₃	3.4	2.7	2.8	3.2	1.5
	P ₂ O ₅	1.6	1.7	1.9	0.5	1.6
	MgO	3.6	2.2	2.8	2.2	2.7
	Fe ₂ O ₃	3.8	2.3	3.2	6.9	8.4
	Al ₂ O ₃	5.1	6.1	7.0	15.1	14.3
	Cl	0.5	0.5	0.7	0.3	0.4
	Na ₂ O	0.7	0.8	1.1	1.7	1.3
TiO ₂	0.2	0.3	0.4	1.0	0.8	
pH		13.3	12.6	12.7	12.4	11.9
出典		34)	34)	34)	34)	34)

(4) 吸水特性

表 3.4 に、加藤らの方法（シリンダー法）³⁹⁾により計測したバイオマス燃焼灰の吸水比の例を示す。未加工のバイオマス燃焼灰（飛灰）の吸水比は 80%~140%程度である。同方法により評価した PS 灰系改質材の吸水比³⁵⁾は、102%~136%の範囲にあり、同程度かやや吸水比が小さい傾向にある。

表 3.4 バイオマス燃焼灰の吸水比の例

本章での名称	A	B	C
ボイラ	循環流動層	循環流動層	循環流動層
燃料種	PKS	PKS	PKS・木質ペレット
種類	飛灰	飛灰	飛灰
吸水比 w_{ab} (%)	84.4~108	103~108	124~138
出典	36),37) 委員提供	38) 委員提供	38) 委員提供

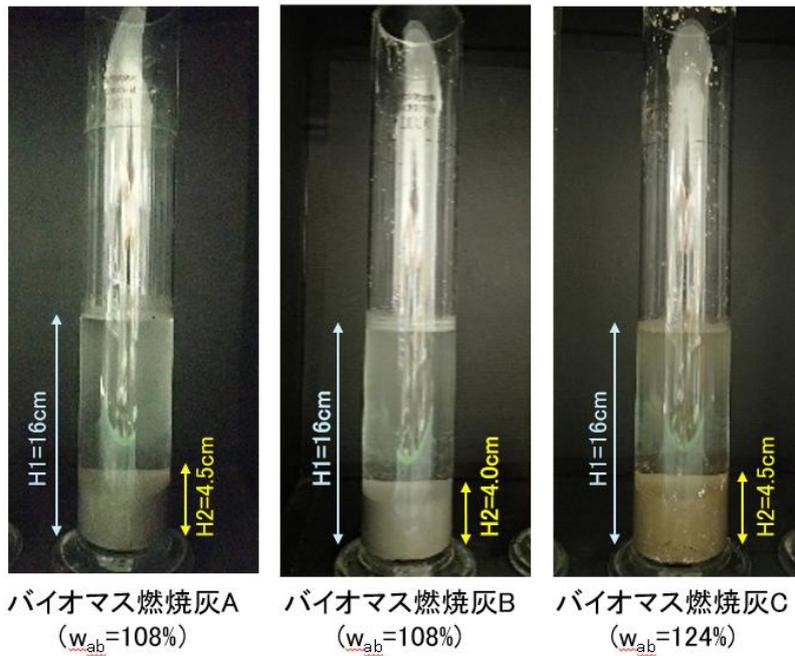


図 3.3 シリンダー法によるバイオマス燃焼灰を対象とした吸水比試験の状況

3.2 バイオマス(PKS)灰系改質材の物理化学特性

バイオマス(PKS)灰系改質材は、吸水性機能や環境安全性が満たされるような品質管理を目指し、PKS 灰を主材として加工・製品化したものである。前節で示したように原料である PKS 灰は物性値にばらつきがあるため、製品品質管理に十分な注意をはらってバイオマス(PKS)灰系改質材を製造する必要がある。

ここでは、前述のバイオマス燃焼灰 A（循環流動層、PKS 灰）とそれを使用したバイオマス(PKS)灰系改質材の物理化学特性の比較を表 3.5、粒径加積曲線の比較を図 3.4 に示す。本バイオマス(PKS)灰系改質材は、高い吸水性を持つ PS 灰を添加し、さらにエトリンガイト生成を目的とした石膏分を追添加した配合となっている。これにより、吸水性が改善され、改質土の団粒化の促進を期待できる³⁶⁾。

表 3.5 PKS 灰とバイオマス(PKS)灰系改質材の比較

名称		バイオマス燃焼灰 A (PKS 灰 A)	バイオマス灰系改質材
粒子密度 (g/cm ³)		2.42	2.32
最大密度 (g/cm ³)		0.95	0.86
最小密度 (g/cm ³)		0.68	0.58
50%粒径 (μm)		52.6	54.2
細粒分含有率 (%)		81	80
吸水比 w _{ab} (%)		84.4	141.7
pH		11.6	11.3
組成 (%) (酸化物換算)	SiO ₂	50.0	36.0
	CaO	29.0	42.0
	K ₂ O	4.4	3.4
	SO ₃	4.3	4.6
	P ₂ O ₅	1.8	2.0
	MgO	2.6	2.8
	Fe ₂ O ₃	1.8	1.7
	Al ₂ O ₃	3.6	5.5
出典		36),37) 委員提供	36),37) 委員提供

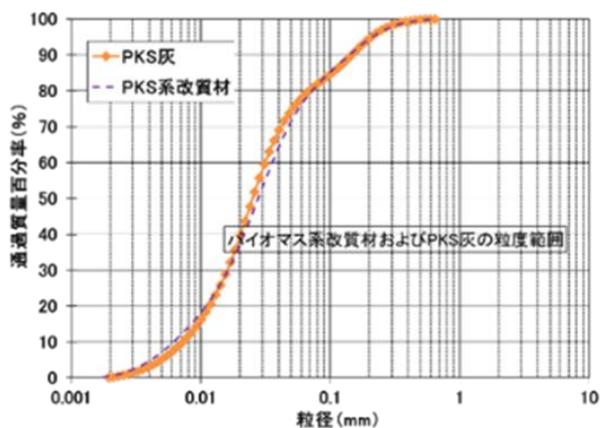


図 3.4 PKS 灰とバイオマス(PKS)灰系改質材の粒径加積曲線の比較

3.3 環境安全性

(1) 基本原則

バイオマス燃焼灰あるいはバイオマス (PKS) 灰系改質材の有効利用を図る上では、その環境安全性を事前に確認しておくことが必須である。特に、未加工のバイオマス燃焼灰からは、有害な金属元素（有害重金属類）が溶出することが多くの研究成果によりわかっており、その扱いは処分先あるいは適用箇所に応じて定められる環境法規に従わなければならない。すなわち、処分場にて産業廃棄物として埋立処分する場合は「金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準（廃掃法に係る埋立処分判定基準）」、地盤材料として何らかの再利用を行う場合（一時的にも人の健康被害を生じる恐れがある場合）は、「土壌汚染対策法」における指定基準（含有量および溶出量）を満足していることを確認しておく必要がある。また、肥料用途として活用する場合は、「肥料の品質の確保等に関する法律（旧肥料取締法）」による各種要件が課せられるため、これらの関連法規を遵守する必要がある。なお、2019年12月に公布された「肥料の品質の確保等に関する法律」では指定混合肥料制度が創設され、届け出された草木灰に登録された化成肥料を混合した肥料（成分保証あり）を生産することが可能となっている⁴²⁾。

本手引き（案）では、バイオマス燃焼灰あるいはバイオマス (PKS) 灰系改質材の地盤材料としての有効利用を図ることが主要な目的であるため、未加工灰や改質材単体ではなく、これを泥土に添加・攪拌した改質土に対して土壌環境基準値を満足していることの確認が基本になっている。

(2) 対策例

バイオマス燃焼灰に含まれる有害重金属類の不溶化あるいは抑制の方法としては、重金属類の除去処理をする、原灰に不溶化効果のある添加材や固化材を配合する^{13),14)}、熔融スラグ化する^{13),14)}、他の材料と混合して見かけの溶出量を抑制させるといった対応などがある。改質土の環境安全性に関して、今後は外的要因（乾燥、乾湿繰り返し、浸潤水のpHなど）の影響や長期特性について、データの蓄積が求められる。汚染土に対する重金属等不溶化処理分野において、これらの影響に対する実験方法や評価方法が示されており⁴⁰⁾、これらを参考に環境安全性に関してさらなる検討が進み、情報が共有されることが望ましい。

なお、5.2 バイオマス (PKS) 灰系改質材の品質管理事例についても参照していただければ幸いである。

4. 改質土の力学特性と配合設計

本章では製品化したバイオマス（PKS）灰系改質材による改質土の力学特性と配合設計について解説する。配合設計の基本は、PS 灰系改質材の配合設計方法と同様、JIS A 1228 に準拠し、締固めた土のコーン貫入試験を基本とする。なお、バイオマス(PKS)灰系改質材による泥土改質土の場外搬出やこれを土構造物として再利用する事例はまだ少なく、対象泥土の改質数量を増やすとともに改質土の力学特性についての知見が蓄積されることが望まれる。

4.1 配合設計の基本

バイオマス(PKS)灰系改質土を地盤材料として使用する場合は、PS 灰系改質材の配合設計方法と同様、改質材の添加量を 3～5 水準に設定して室内配合試験を実施することを基本とする。室内配合試験は 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。

4.2 （現場／室内）強度比 R の設定について

バイオマス(PKS)灰系改質材の現場での添加量は、現場で要求される品質（必要強度）に対して、（現場／室内）強度比を設定する。例えば、浅層改良におけるバックホウ改良では、強度比は 0.3～0.7 となっている（**図 4.1**）。

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。

固化材の添加形態	改良対象	施工機械	（現場／室内）強度比
粉体	軟弱土	スタビライザー	0.5～0.8
	軟弱土	バックホウ	0.3～0.7
	軟弱土	自走式改良機	0.7～0.9
	ヘドロ	クラムシエル	0.2～0.5
	高含水有機質土	バックホウ	0.2～0.5

図 4.1 浅層改良における（現場／室内）強度比

4.3 改質土の力学特性

(1) バイオマス燃焼灰（未加工灰）による改質土の力学特性

前述した表 3.1 に示すバイオマス燃焼灰 A, B, C（未加工灰, PKS 灰）を用いて、高含水比浚渫へドロを改質し、フォールコーン試験により強度を簡易的に評価した事例³⁸⁾を示す。

1) 使用材料

改質の対象とした泥土は、閉鎖性海域から採取した高含水比の浚渫へドロで、前処理として 2mm ふるいを通過させて礫分やごみ等を取り除いたものである。液性限界は $w_L=132\%$ 、塑性限界は $w_p=41.5\%$ 、強熱減量は $IL=19\%$ である。試験時の含水比は 194%（約 $1.5w_L$ ）と 253%（約 $2.0w_L$ ）の 2 通りである。

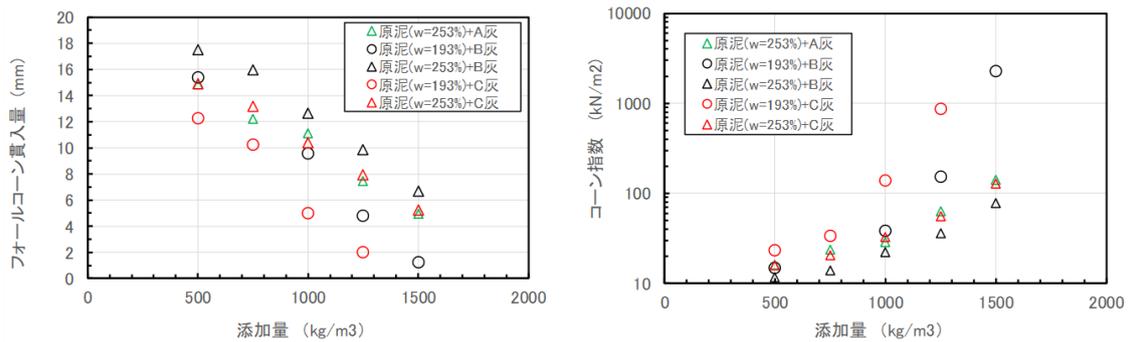
2) 試験方法

所量（ 500cm^3 ）の泥土（含水比 2 パターン）に対して、各バイオマス燃焼灰（A～C）を $500\text{ kg/m}^3\sim 1,500\text{ kg/m}^3$ の範囲で添加し、ゴムヘラおよび手練りで 5 分程度混練して改質土を作製する（灰 A は含水比 253%のみのケース）。この時の改質土の状態変化（ペースト状、団粒状、粒状、固化等）を記録し、乾燥しないうちにフォールコーン試験に供してフォールコーン貫入量（3 回の平均値）と含水比を計測する。試験後の改質土は密閉養生（ポリエチレン製 2 重、養生温度 20°C ）し、混合直後に続けて、材令 3 日、7 日、14 日、28 日で上述の評価試験を実施する。

3) 試験結果

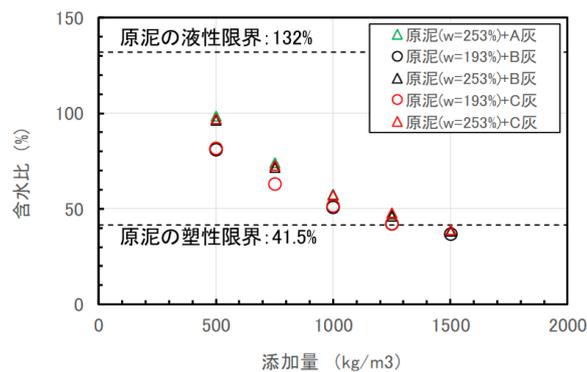
改質材添加量と改質直後の改質土強度の関係を図 4.2 に示す。図 4.2(a) はフォールコーン試験結果の生データであり、図 4.2(b) はあらかじめ泥土を対象に実施したフォールコーン貫入量 d とコーン指数 q_c の関係式 ($q_c=3444.5\times(d)^{1.99}$) を用いて、コーン指数 q_c を推定した結果である。また、図 4.3 は原泥 $w=253\%$ のケースについて、各改質土の状態変化を示したものである。

図 4.2(a), (b) より、泥土の含水比が $w=194\%$ の場合は、B 灰では $1,500\text{ kg/m}^3$ 、C 灰では $1,250\text{ kg/m}^3$ まで大量に添加しないと、改質土はコーン指数 200 kN/m^2 を上回らなかった。また、より泥土の含水比が高い $w=253\%$ の場合は、同量の添加量ではコーン指数 100 kN/m^2 を満足しなかった。これは、改質材が添加直後には物理的な吸水による改質効果しか見込めないためである。図 4.2(c) に示すように、改質土が瞬時に団粒状さらには粒状となる含水比は、元の泥土の塑性限界付近であることから、上記の現象を理解することができる。



(a) 添加量～フォールコーン貫入量

(b) 添加量～コーン指数（推定値）



(c) 添加量～改質土の含水比

図 4.2 改質材添加量と改質土強度の関係（改質直後）

添加量 (kg/m ³)	500	750	1000	1250	1500
A灰	ペースト	ペースト	ペースト	団粒	団粒
B灰	ペースト	ペースト	ペースト	ペースト～団粒	団粒
C灰	ペースト	ペースト	ペースト	団粒	団粒

図 4.3 改質材添加量に応じた改質土の状態変化（泥土 w=253%のケース，改質直後）

次に、改質土の養生日数（密封条件）とフォールコーン貫入量の関係を図 4.4 に示す。

図 4.4(a) は B 灰、図 4.4(b) は C 灰の試験結果である。B 灰、C 灰いずれも改質材の添加量によらず、材令とともにフォールコーン貫入量が小さく（強度が大きく）なっていることがわかる。目視および触診による判断でも、改質土は弱く固化している傾向を確認できている。これは、バイオマス燃焼灰に含まれる主にカルシウム成分が固化に寄与していると考えられる。図 4.5 は、B 灰改質土と C 灰改質土の添加量 $1,250 \text{ kg/m}^3$ のケースで、材令 28 日経過後の改質土の X 線回析結果（0~20 度に着目）と SEM 画像を示したものである。なお、X 線回析図には原泥および各灰の結果も重ねて示し、下段にエトリンガイトの ICDD 値を付記している。図 4.5 より、養生固化した改質土には、エトリンガイト（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaOSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）が生成されていることが明確にわかる。また、SEM 画像においてもエトリンガイト特有の針状結晶を確認できる。すなわち、瞬時改質に必要な添加量の半分程度の添加量でも、材令 3 日程度の養生期間を確保できれば、化学的作用により目標強度を達成できる可能性があることを示している。

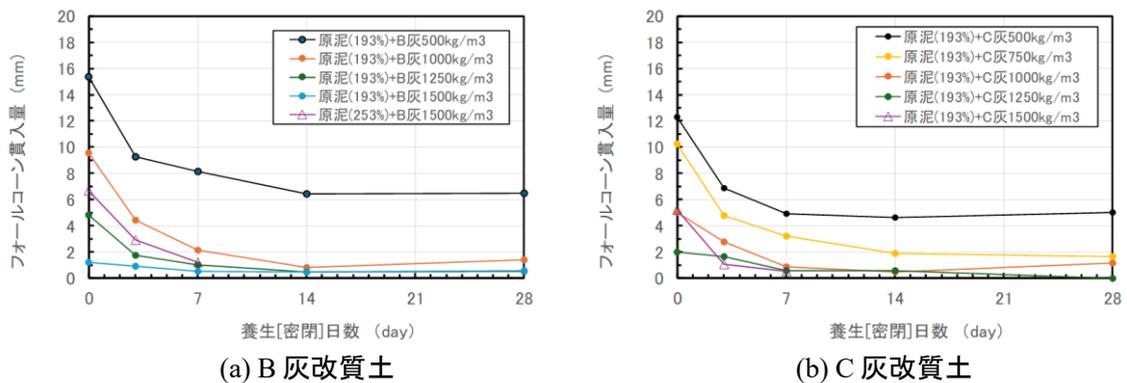


図 4.4 材令と改質土強度（フォールコーン貫入量）の関係

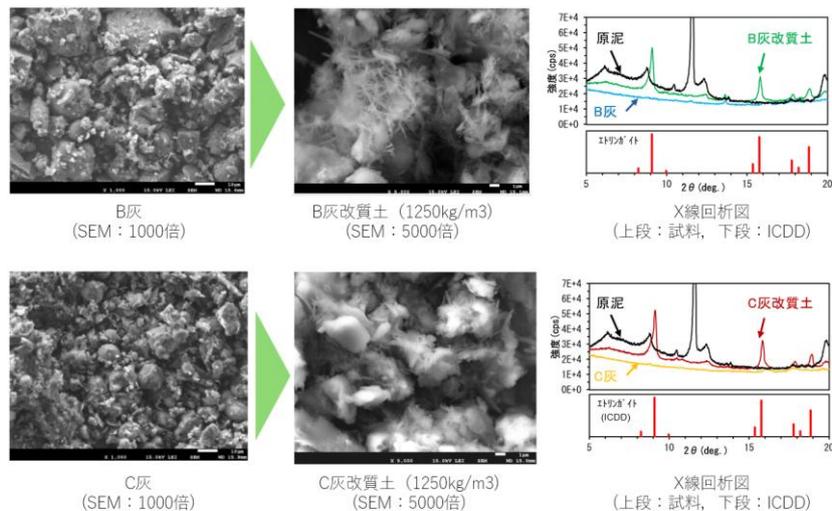


図 4.5 材令と改質土強度の関係

4) バイオマス灰(PKS)灰系改質材による改質土との比較

表 3.1 に示すバイオマス (PKS) 燃焼灰 A を主材とし、これに PS 灰等をブレンドして吸水性や養生固化機能を向上させたバイオマス (PKS) 灰系改質材 (表 3.5) について、前節と同様の試験を実施し、瞬時改質効果および養生効果を評価した。

改質材の添加量と改質直後のコーン指数 (換算値) の関係を図 4.6 に示す。図 4.6 を見て明らかなように、吸水性を向上させたバイオマス (PKS) 灰系改質材は、未加工 A 灰の半分程度の添加量で同じ強度を瞬時に得ることができる。次に、養生 7 日後までの材令とコーン指数 (換算値) の関係を図 4.7 に示す。ここで、未加工 A 灰の添加量は $1,500 \text{ kg/m}^3$ 、バイオマス (PKS) 灰系改質材の添加量は 500 kg/m^3 と 750 kg/m^3 の 2 ケースであり、改質土は密封袋 (シーラーにより気体を排除) に保管し、 20°C のインキュベーター内で養生している。バイオマス (PKS) 灰系改質材 750 kg/m^3 のケースは、材令 3 日で弱く固化しており、コーン指数は 400 kN/m^2 を上回り、その後も強度が増加する傾向にあった。これは、添加量が 2 倍多い未加工 A 灰による改質土の挙動と類似していた。一方、バイオマス (PKS) 灰系改質材 500 kg/m^3 のケースは、材令 3 日で固化は確認されず、コーン指数は 100 kN/m^2 をピークに増加傾向を示さなかった。

以上の結果から、吸水性や養生固化機能を向上させたバイオマス灰 (PKS) 灰系改質材は、未加工のバイオマス燃焼灰と比較して添加量の削減が可能であり、ある添加量を境に養生固化効果も期待できることが分かる。なお、ここで示した実験における養生条件は、外気との接触がない密封条件であるため、団粒化に伴う比表面積の増加による乾燥の影響が含まれていないことに留意する必要がある。実際の施工現場では、改質土をほぐし造粒することで団粒状態までの改質を促進すれば、土粒子表面の水分の乾燥と養生効果により、ここで示した結果よりも少ない添加量・短い材令で必要な強度を得ることが可能となる。【PS 灰系改質材編】5.2 ほぐしを併用した改質事例について参考にいただければ幸いである。

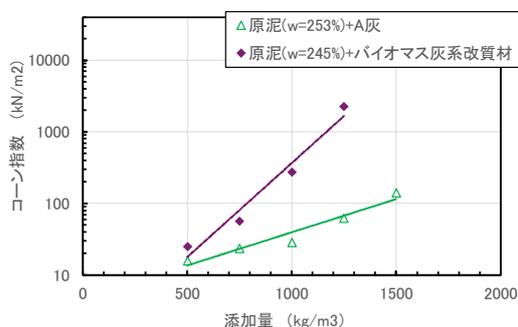


図 4.6 添加量とコーン指数の関係 (改質直後)

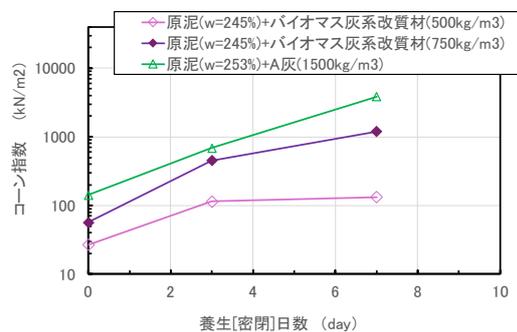


図 4.7 材令とコーン指数の関係

(2) バイオマス (PKS) 灰系改質材による改質土の締固め特性

土の締固め特性は、土粒子の粒度、密度、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、吸水特性などに依存する。バイオマス (PKS) 灰系改質材の場合においても PS 灰系改質材の場合と同様、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。

ここでは、海洋浚渫土である M 港泥土に対して、バイオマス (PKS) 灰系改質材を添加量 150 kg/m^3 で改質した土の締固め試験(A 法)の結果を図 4.8 に示す。原土の M 港浚渫土は、表 4.1 に示すように、低塑性粘性土で最適含水比 w_{opt} は低く凸型の締固め曲線を示すが、バイオマス (PKS) 灰系改質材を添加すると、最適含水比 w_{opt} は図 4.8 に示すように右側へ移行していく。締固めが効かない高含水状態では、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。

PS 灰系改質材における補正含水比で示したのと同様、バイオマス (PKS) 灰系吸水性材料においてもシリンダー法によって得られる吸水比 $W_{ab}(\%)$ より、見かけの吸水比は低く、補正含水比の導入が必要と思われる。

表 4.1 M 港浚渫土の物性

物性	M 港浚渫土
塑性限界 w_p %	18
液性限界 w_L %	37
塑性指数 IP	19

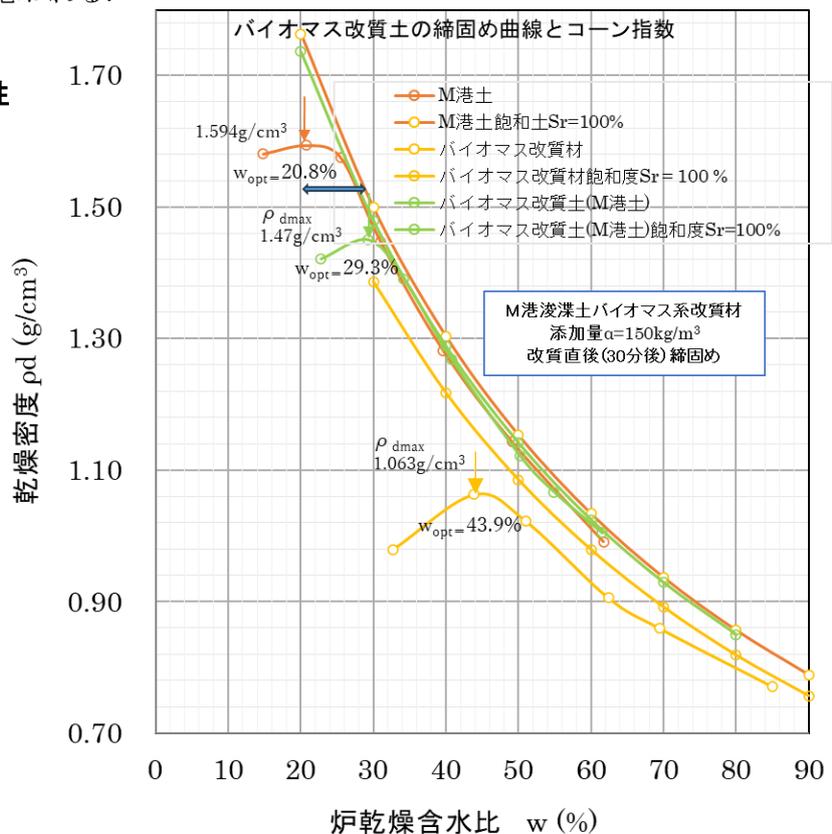


図 4.8 バイオマス (PKS) 灰系改質材により改質した浚渫土の締固め特性の関係

(3) 簡易試験法のバイオマス (PKS) 灰系改質土への活用

上述の M 港浚渫土による改質土に加えて、現地の特種粘土 (K 粘土) による改質土について、通常の 1 L モールドによる標準型コーン貫入試験および小型モールド ($\phi=50\text{mm}$, $h=100\text{mm}$) を用いた簡易試験 (土壌硬度貫入式) を実施した。指標硬度とコーン指数 q_c の関係を **図 4.9** に示す。試験結果より簡易試験で得られた結果は、【共通編】4.4 コーン指数で得られた結果とほぼ同様な傾向になることがわかった。なお、供試体が小さな簡易試験においては、 $q_c > 1500 \text{ kN/m}^2$ 以上の高強度の範囲では若干の強度差が求められるが、改質土の適用範囲となる第 4 種改良土から第 2 種改良土の範囲内では、ほぼ同様な q_c 値を示すことを確認できた。室内配合試験では、一箇所だけから試料を採取するよりも、複数箇所から試料を採取した方が、現場施工時の精度が上がる。いっぽう、標準型の 1 L モールド供試体を使用すると、相当量の試料量を準備する必要があり、試験労力や費用も増大する。このことから、小型モールドを用いる簡易試験で標準 q_c 試験と同等の結果が得られれば、試験効率は向上することが期待できる。ただし、重量のあるランマー締固めによる標準型コーン貫入試験では、粘土の物性によって繰り返し強度低下が認められる水分範囲があること、小型供試体の簡易型コーン貫入試験では、試料の最大粒径は 4.75mm までとなるため、対象泥土に礫分が含まれる場合は試験限界があること、供試体の拘束エリアが狭いことから試料のモールド付着による影響が介在してくることなどにも注意が必要である。

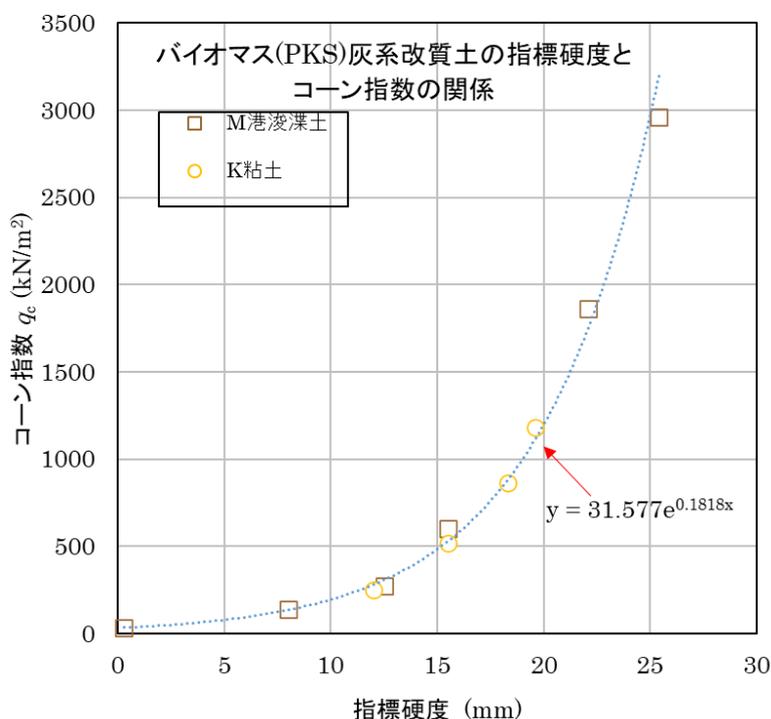


図 4.9 バイオマス系改質土の指標硬度とコーン指数 q_c の関係

(4) 長期安定性について

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。【共通編】でも記載しているが、改質材は過去 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。しかしながらバイオマス(PKS)灰系改質材の多孔質性が損なわれない限り、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。

本項では、現時点で得られている水中養生時の安定性に関する室内試験検証データを示すものとする。PS 灰系改質材で改質した湖沼浚渫土とバイオマス(PKS)灰系改質材で改質した海洋浚渫土を 28 日間水中養生した試験状況を図 4.10, その際の q_c の経時変化を調べた例を図 4.11 に示す。バイオマス(PKS)灰系改質土では、水中養生 3 日後、PS 灰系改質土では 1 週間までは強度増加して 28 日後まで安定した状態になり、いずれも水中での再泥化が発生していないことがわかる。このことから、PS 灰との混合ハイブリッド化したバイオマス(PKS)灰系改質材では、PS 灰系改質材と同様に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などと同様に持続して水中での再泥化は発生しないものと考えられる。



(a) PS 灰改質土

(b) バイオマス(PKS)灰系改質土

図 4.10 水中養生中の試験状況

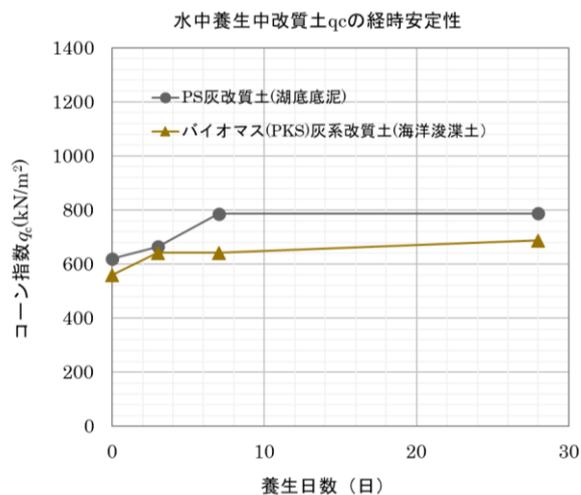


図 4.11 PS 灰改質土とバイオマス(PKS)灰系改質土の q_c の水中養生経時安定性

(5) PS 灰系改質材との比較

吸水性改質材の大きな特徴としては、PS 灰系改質材に代表されるような瞬時物理的吸水性があげられる。バイオマス(PKS)灰系改質材と PS 灰系改質材の吸水性については、3 章ならびに【PS 灰系改質材編】で示した通り、若干の差（吸水比 w_{ab} ：バイオマス燃焼灰 84.4%～138%，PS 灰 100%～148%）があり、PS 灰、バイオマス(PKS)灰それぞれにおいてもばらつきが認められる。吸水機能を優先に考慮する場合には、高吸水性 PS 灰との混合ハイブリッド化が有効である。また、バイオマス燃焼灰には、エトリンサイト機能も有しているため、化学的機能の効率化も適当と考えられる。

また、前項で示した通り、PS 灰系改質材によって改質した湖沼底質改質土（所定強度 $q_c=620 \text{ kN/m}^2$ ）とバイオマス(PKS)灰系系改質材によって改質した海洋浚渫土（所定強度 $q_c=560 \text{ kN/m}^2$ ）は、ほぼ同様な水中養生時の経時傾向を示している。

なお、今後は、長期経過時の環境評価（pH や溶出分析結果等）などについても比較検討を行う必要がある。

5. バイオマス (PKS) 灰系改質材の品質管理事例

本手引き(案)での品質管理の目的は、改質土の適用用途の目標に応じた要求品質を満足することにある。本章では、改質材のような化学製品の適正管理方法(化学物質安全データシート)とバイオマス(PKS)灰系改質材製品の品質管理事例ならびに適用用途の目標に応じた要求品質について整理する。

5.1 改質材における適正管理方法

改質材製品の品質は、SDS（安全データシート）等で確認することが一般的である。

(1) MSDS と SDS

化学物質排出把握管理促進法(以下、化管法)⁴⁹⁾では SDS(安全データシート)や製品ラベルを通じて、化学品の特性及び取扱いに関する情報を他の事業者・使用者に提供することを義務づけている。安全データシートは、国内では MSDS(製品安全データシート、化学物質安全データシート)と呼ばれていたが、2012 年に JIS Z 7253 が制定された際に名称も「MSDS」から「SDS」に変更された(国際的整合性の観点から統一化)。

(2) SDS の記載項目

SDS は下記の 16 項目から構成されており、この順番どおりに記載することになっている。

- ①製品及び会社情報 - 製品名称， SDS を提供する事業者の名称， 住所及び連絡先化学品及び会社情報
- ②危険有害性の要約 - GHS 対応の絵表示や注意喚起語を使用
- ③組成， 成分情報 - 含有する指定化学物質の名称， 指定化学物質の種別， 含有率（有効数字 2 桁）
- ④応急処置 - 化学製品をばく露された場合の応急措置
- ⑤火災時の措置 - 火災が発生した際の対処法。 消火に使用する消火剤， 消火の方法など
- ⑥漏出時の措置 - 人体や環境に対する注意事項， 浄化や回収方法など
- ⑦取り扱い及び保管上の注意 - 安全に取扱うための注意点や適切な保管条件
- ⑧ばく露防止及び保護措置 - ばく露限界値などの情報やばく露を軽減するための設備対策や適切な保護具の種類（マスク， 保護メガネ， 手袋など）
- ⑨物理的及び化学的性質 - 化学品の外観（物理的状態， 形状， 色など）， 沸騰， 引火点， 自然発火温度， 蒸気圧， 比重， 溶解度等
- ⑩安定性及び反応性 - 化学品の安定性及び特定条件下で生じる危険な反応
- ⑪有害性情報 - 化学品の人に対する各種の有害性について
- ⑫環境影響情報 - 化学品の環境中での影響や挙動について
- ⑬廃棄上の注意 - 廃棄の方法や容器・包装の適正な処理方法など

⑭輸送上の注意 - 輸送に関する国際規制によるコード及び分類など

⑮適用法令 - 化学品に適用される法令についての情報が記載

⑯その他の情報 - 上記までの項目以外で必要と考えられる情報，引用文献など

整理すると化学品に関する作成者や供給者の情報，基本的な危険有害性情報，安全に扱うための情報が記載されている。SDS の提供方法は「手渡し」が基本であること，SDS の目的は，「化学品を取り扱う際に発生する可能性がある事故を未然に防ぐ」ことであり，化学品を安全に扱うための情報が記載されているもので，安全性を証明するものではない。

5.2 バイオマス(PKS)灰系改質材の品質管理事例について

バイオマス(PKS)灰系改質材の品質管理について，一事例を紹介する。品質管理の内容は大きく分けて，①原材料（PKS 灰）の受入管理，②製品化した改質材の品質管理（製品品質管理と呼ぶ），③製品化した改質材の数量管理及びトレーサビリティの確保である。

3章に記載した通り，バイオマス(PKS)灰系改質材は，PKS 灰を主材として吸水性機能や環境安全性が満たされることを目指して加工・製品化したものである。原材料であるバイオマス燃焼灰（PKS 灰）はその物性値にばらつきがあるため，製品化にあたっては，PKS 灰を含む全原材料の品質に十分な注意をはらった受入管理が重要である。また，PKS 灰単体では，吸水性機能が不十分であるため，高吸水性 PS 灰を助剤として添加して高吸水機能を持たせているため，製品化したハイブリッド複合体バイオマス(PKS)灰系改質材としての改質機能を保証する製品品質管理を行っている。また，PKS 灰は，元々産業廃棄物であり埋立処分されてきた経緯があるため，リサイクル材料として製造・販売する上での要求性能品質の確保，トレーサビリティまで考慮した製品管理体制が必要と考えている。

(1) PKS 灰の受入管理

基本原則として，受入基準を大きく超過する可能性のある PKS 灰は受け入れない。その判断基準は，指定発電所バイオマス焼却灰であること，高吸水機能を有するバイオマス(PKS)灰系改質材製造が可能な PKS 灰であること等が必要となる。受入管理の検討内容としては，以下の項目の確認を行っている。

- ・ 物理的性状（粒子密度，かさ密度，粒度）
- ・ 化学的性状（pH，フッ素，六価クロム）
- ・ 焼却物質（PKS）が一定である。
- ・ 吸水性改質材としての基本性能（改質効果，吸水性能）が確保できる。

(2) 製品品質管理について

製品品質管理としては，トレーサビリティまで考慮した品質管理体制が必要である。製造日ごとの日常品質管理と製品のフレコン搬出にともなう番号記載ならびにサンプルの管

理等が重要になる。表 5.1 に品質管理表の例を示す。

- ・ 重金属類溶出（フッ素・六価クロム）が受入基準内（簡易分析を日々管理）
- ・ 定期的な第3者機関による機関公定分析（年1回，環告46号（全項目））
- ・ 組成成分が受入基準を満足
- ・ 重金属類の不溶化が可能
- ・ 吸水性改質材としての改質機能の確認(製品管理)
- ・ 物性，化学性能の管理(製品管理)

表 5.1 品質管理表

検査状況	内容	基準	注意事項
トレーサビリティまで考慮した品質管理体制	・ 日常管理のための準備 ・ 製品番号整理とフレコンごとのサンプル整理	トレーサビリティ確認のための体制	
材料と処理	・ 材料の日常管理 物性（粒子密度、かさ密度、粒度、吸水性能） 化学分析（pH，フッ素、六価クロム）	粒子密度、かさ密度、粒度（75 μ 残分割合）、吸水率（シリンダー法） ①pH値②フッ素及び六価クロム簡易溶出mg/L	材料品質確保のための確認
製品日常管理	・ 物性 ①粒子密度 ②かさ密度 ③粒度 ④吸水性能 ・ 化学分析 ①pH ②フッ素 ③六価クロム	JIS.JGS 2.3~2.5 (g/cm ³) 最大(0.55前後)最小(0.9前後) 75 μ 残分割合(0.2程度) シリンダー法による吸水率 アルカリ値の確認 基準値0.8mg/L以下 基準値0.05mg/L以下	品質確保のための確認
製品管理	コーン貫入(改質効果確認)	標準泥土（青粘土）で所定量添加時のqc基準(400kN/m ²)確認	製品機能の確認
定期管理年1回	第3者機関による公定分析 年1回	土壤環境基準内の確認：H3 環告46号（全項目）	定期管理

環境安全性にかかわる項目として，表 5.2 に対象となる有害重金属類の基準値を示す。フッ素，六価クロムについては日々の管理，全項目の年一回公的分析以外に，セレン，ホウ素等については，一定間隔での管理を実施している。

表 5.2 環境安全性にかかわる重金属項目

環境安全性にかかわる品質基準（重金属等）

項目	溶出基準 (mg/L)
水銀	0.0005以下
カドミウム	0.01以下
六価クロム	0.05以下
ヒ素	0.01以下
セレン	0.01以下
フッ素	0.8以下
ホウ素	1以下

土壌環境基準：H3環告46号

(3) トレーサビリティの確保

流通経路を生産段階から最終消費段階あるいは廃棄段階まで追跡が可能な状態にすること、現場で使用されている製品のサンプル（日付，製品袋ごと）の確認ができるよう各サンプルの番号管理と各々の品質管理を行う。

5.3 改質土の適用用途目標に応じた要求品質

現場における改質土は，用途ごとの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。目標品質の可否判断は，原位置でのポータブルコーン貫入試験やコーン指数（JIS A 1228）を指標として判定することが一般的であり，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。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は，【PS 灰系改質材編】3.3 品質管理方法の表 3.2 に示す用途別品質管理の目安（例）⁴⁶⁾と同様の品質管理を行う。

施工状況の管理などについても【PS 灰系改質材編】と同じように混合度合いや転圧状況を検討することが望ましい。必要添加量削減のために実施するほぐし造粒などでは，含水比の現地確認等も有効となろう。

6. バイオマス(PKS)灰系改質材による改質事例

本章では、バイオマス(PKS)灰系改質材の適用例として沈砂池浚渫泥土の改質工事、港湾浚渫土砂運搬工事、赤土等流出防止事業についての事例を示す。本手引きの暫定版（－PS 灰系改質材編－）を参考に検討したものである。

6.1 バイオマス(PKS)灰系改質材適用事例①

バイオマス(PKS)灰系改質材による瞬時改質の事例として、沈砂池の高含水浚渫泥土を改質・運搬例を示す。

(1) 工事概要

図 6.1 に示すとおり、沈砂池浚渫工事において発生する底泥を改質するため、バイオマス(PKS)灰系改質材が適用された。浚渫区域では、まず水中ポンプにより可能な限り余剰水を排水させている。その後、表層 50cm の底泥部分を浚渫し、バイオマス(PKS)灰系改質材で改質した。改質土の風乾（ほぐし養生）状況を目視しながら、第 4 種建設発生土相当の強度を発現していることを確認したのち、仮置き場への運搬・仮置きを実施した。

<実施内容>

- ・沈砂池浚渫土の物性試験、バイオマス(PKS)灰系改質材の配合試験を実施した。
- ・目標強度は、運搬可能の目安である第 4 種建設発生土相当 ($q_c=200 \text{ kN/m}^2$) とした。
- ・現地では、改質材添加・攪拌（写真 6.1, 6.2）、敷地内仮置き場に運搬・仮置き（写真 6.3, 6.4）手順で施工を行った。

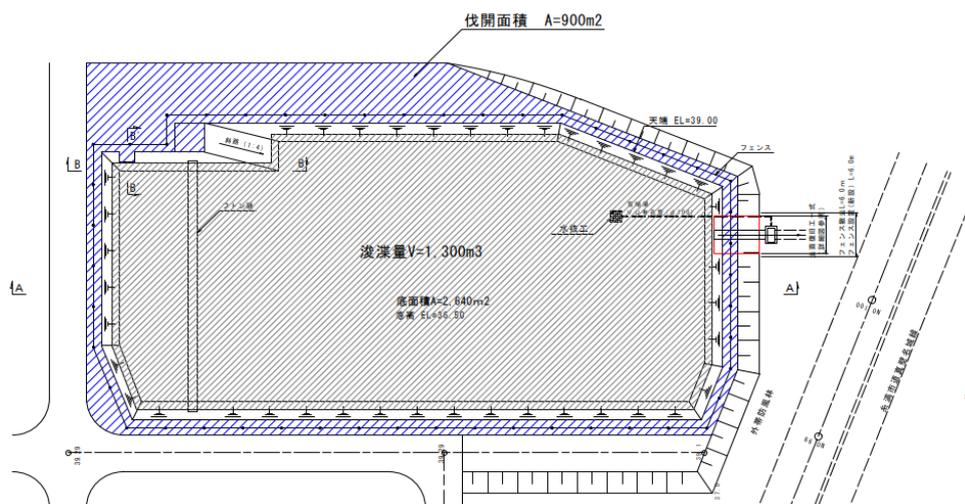


図 6.1 沈砂池平面図



写真 6.1 バイオマス灰系改質材の添加



写真 6.2 浚渫泥土の改質攪拌



写真 6.3 改質土の運搬



写真 6.4 浚渫泥土の仮置き

(2) 改質の方針および室内配合試験

1) 方針

現地浚渫泥土は、設計時においても実際の物性の確認がなされていないため、まず現地浚渫泥土の物性を確認、運搬可能となる（第 4 種建設発生土相当）改質材の必要配合量、養生日数、品質管理方法を確定しなければならない。必要配合量は事前に現地浚渫土砂を用いて室内配合試験で決定した。

2) 対象浚渫泥土の物性と室内配合試験

現地より採取した泥土は、クチャおよび腐泥の 2 種類あり、含水比は、表 6.1 に示すように、腐泥は高い含水比となっている。

表 6.1 採取した泥土の含水比

種類	クチャ	腐泥
含水比 (%)	77.0	210

クチャの室内配合試験結果は表 6.2 に示すとおり、配合後養生 1 時間で第 4 種建設発生土相当の強度が発現した。

表-6.2 配合試験結果（クチャ）

添加量 (kg/m ³)	コーン指数 (kN/m ²)	
	1 時間	12 時間
130	190	220

一方、腐泥の室内配合試験結果は**表 6.3** に示すとおりで、第 4 種建設発生土近くにするためには、300kg/m³ 配合後、養生 12 時間が必要であった。

表 6.3 配合試験結果（腐泥）

添加量 (kg/m ³)	コーン指数 (kN/m ²)	
	1 時間	12 時間
200	20	40
300	90	190

(3) 今後の展開

本浚渫クチャ土の改質適用により現在複数の砂防ダム浚渫土砂の検討が行われている。

6.2 バイオマス(PKS)灰系改質材適用事例②

バイオマス(PKS)灰系改質材による海域浚渫土の改質，改質土の仮設盛土構築並びに改質土による土地開発利用事例を示す。

(1) 工事概要

名称：K 湾港(H 地区)浚渫土砂運搬工事（写真 6.5）

期間：令和 4 年 5 月～8 月

改質対象の浚渫土はコーラル粘土（サンゴ混じり粘土）である。自然含水比 74.9 %，建設発生土 4 種にも満たない軟弱な泥土で重機運行も困難であったため，バイオマス(PKS)灰系改質材による改質を行った。養生日数を 1 日として，配合試験に基づき改質材の添加量 92kg/m^3 と設定した。現地では，バックホウによる攪拌混合，バックホウバケットを用いた転圧締固めを行った。ポータブルコーン貫入試験を行った結果，平均 q_c は $1,069\text{ kN/m}^2$ であり，目標とする第 2 種建設発生土 ($q_c=800\text{ kN/m}^2$) 以上の強度を発現していることを確認した。さらに施工実施場所は，仮置きスペースが確保できたため，改質土の運搬引き受けまで仮置き場で天日養生することにより，2 か月間ほど改質土による土構造物盛土の安定性を確認できた。



(a) 未改良



(b) 改質材の添加



(c) バックホウ攪拌混合



(d) 転圧後



(e) 重機乗り入れ



(f) コーン試験



(g) 未改質土盛土
崩壊部あり（種子吹付け不可）



(h) 改質 1 か月後（吹付実施）
2 か月間安定

写真 6.5 施工状況

(2) 配合試験

事前検討で実施した配合試験結果を表 6.4 に示す。

表 6.4 配合試験結果

添加率	添加量	コーン指数	
		6 時間後	24 時間後
	原泥	測定不能	測定不能
2.5 wt%	46 kg/m ³	172	200
5.0 wt%	92 kg/m ³	501	928
10 wt%	184 kg/m ³	1,671	貫入不可

(3) 現場強度

改質土に対してポータブルコーン貫入試験を実施した。試験結果を表 6.5 に示す。現場コーン指数の平均値 ($q_c=1,069 \text{ kN/m}^2$) は、室内配合試験値 ($q_c=928 \text{ kN/m}^2$) の 1.15 倍となっており、これは、仮置き養生 1 日の気中解きほぐし効果の影響と判断している。浅層改良でのバックホウ混合では、(現場/室内) 強度比を $R=0.3\sim 0.7$ で設定することが一般的であるが、短い養生期間で十分な気中解きほぐしを実施できる条件であれば、現場強度比を高めめの 0.7 程度で設定できる可能性を示していると考えられる。

表 6.5 ポータブルコーン貫入試験結果 (改質後 24 時間)

地点 No.	コーン指数 (kN/m ²)
1	835
2	1,021
3	1,235
4	1,809
5	928
6	974
7	1,067
8	672
平均	1,069

(4) 今後の展開

仮置き場での仮設盛土での安定確認により、同地区での埋立造成が検討されている。

6.3 バイオマス(PKS)灰系改質材適用事例③

バイオマス(PKS)灰系改質材による土壤改良材としての赤土流出防止活用事例を示す。

(1) 工事概要

工 事：赤土等流出防止活動支援事業

内 容：バイオマス系土壤改良材による赤土流出抑制効果の検証

場 所：5か所 ①O村 A②N村 A③N市 H④O村 N⑤O村 O

期 間：令和4年9月2日から令和5年2月28日まで

改質目的：改質の目的は、牧草圃場として活用しているエリアにおいて近隣農地への赤土流出を防ぐこと、および土壤 pH が極めて低い土地の土壤改良である。

実施概要：N村 A の対象圃場約 6,350 m²に対し、バイオマス灰系改質材約 53ton (=6,350m²×深さ 24cm×土の比重 1.8×改質材添加率 2%) を散布した(写真 6.6)。改質材の添加方法は、ホイールローダーのバケットに払い出し、土壤に対して一定の添加量になるよう少量ずつバケットから溢して散布した。その直後に大型耕耘機により土壤への漉き込みを実施した。



(a) 改質エリア (b) 改質材 (c) 攪拌混合 (d) 対策後牧草生育状況
写真 6.6 施工状況

(2) 改質による赤土流出量削減調査と pH 測定結果

散布作業から1週間程度経過後に土壤 pH を測定した結果を図 6.2 に示す。原土の平均値 pH=5.49 に対し、改良土の平均値は pH=8.20 であった。バイオマス(PKS)灰系改質材による pH 矯正効果により酸性土の中和効果が確認されたものの、計測時期が改質直後であったため、やや高めの数値になったと考えられる。また、本圃場において実施した簡易 SPSS (底質中の赤土濃度) の測定結果を図 6.3 に示す。原土と比較すると改質土の SPSS 値は低下しており、改良効果が認められる結果となった。

湿潤状態の赤土にバイオマス(PKS)灰系改質材を混合し、3日間養生し濁度を計測した。濁度の測定結果を図 6.4 に示す。改質土は、造粒・団粒化することで微細な粒子が溶け出し難くなり、SS (浮遊物質量) の顕著な減少が見られる。改質土の一部(改質土 F)で原土と同程度の濁度を示しているものの、浸水直後において原土と改質土では、明らかな濁度の違いが認められた。

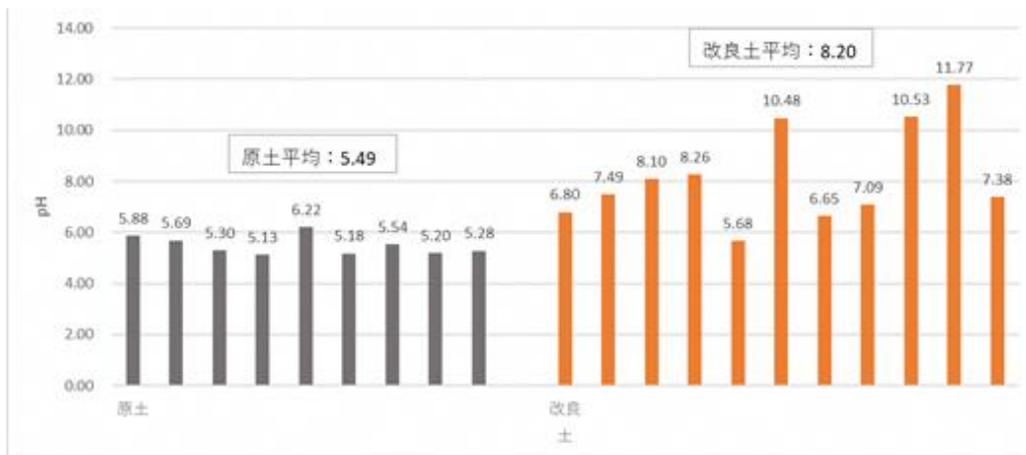


図 6.2 改質した土壤の pH 測定結果（改質直後）



図 6.3 簡易 SPSS の測定結果

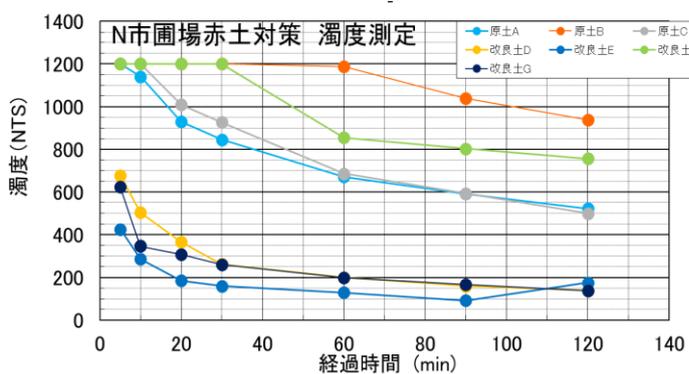


図 6.4 濁度の測定結果
(A~C: 赤土原土, D~G: 改質土)



写真 6.7 濁度試験状況（18 時間後）

(3) 添加率を上昇させた場合

現場施工では、添加率 2%で赤土流出抑制効果を確認したが、添加率を 5%に上昇させた場合の効果を室内試験で確認した。試験状況を**写真 6.8**に、試験結果を**図 6.5**に示す³⁸⁾。改質材の添加率を上げることにより、濁度抑制効果も大きくなることわかる。

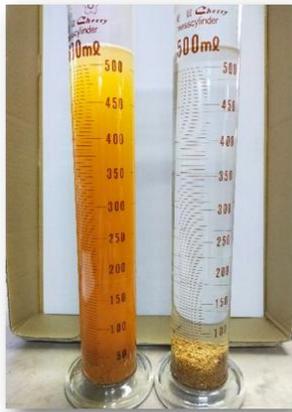


写真 6.8 試験状況（添加率 5%，5 分後）
（左：赤土原土，右：5%改質土）

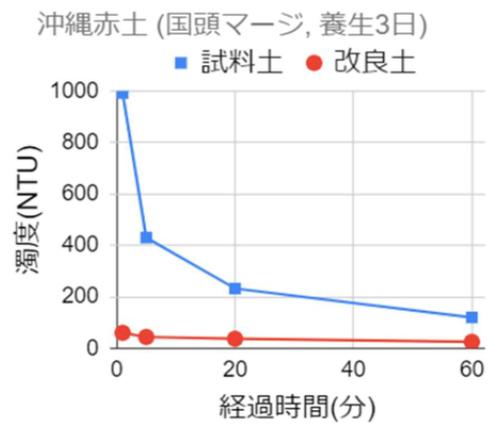


図 6.5 濁度の経時変化

参考文献

- 1) 経済産業資源エネルギー庁：総合エネルギー統計 時系列表（参考表），
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline7，（参照 2024-01-15）。
- 2) 池美乃里・大下和徹・高岡昌輝：国内の FIT 認定木質バイオマス発電施設における燃焼灰発生量推計，廃棄物資源循環学会論文集，Vol.31, pp.169-178, 2020.
- 3) 高岡昌輝・池美乃里：我が国におけるごみ焼却残渣及び木質バイオマス燃焼灰の発生量，日本エネルギー学会誌えねみくす，Vol.100, No.1, pp.40-47, 2021.
- 4) 沖縄うるまニューエナジー株式会社：中城バイオマス発電所パンフレット
<https://www.erex.co.jp/business/power-generation/plant/nakagusuku/>，（参照 2024-01-15）。
- 5) 泥土リサイクル協会：<http://deido-recycling.jp/recycle/recycle03.htm>，（参照 2024-02-05）。
- 6) 折橋健・原田陽・西宮耕栄：木質バイオマスのエネルギー利用に伴う燃焼灰の発生と利用実態 北海道の事例，木材学会誌，Vol.69, No.2, pp.92-101, 2023.
- 7) 長倉淳子・小笠真由美・山田毅・平井敬三：スギ，ヒノキコンテナ苗育苗培地への木質バイオマス燃焼灰混合が林地施用が樹木の成長に与える影響，森林総合研究所研究報告，Vol.17, No.1(No.445)，pp.75-84, 2018.3.
- 8) 大谷達也・酒井寿夫：木質バイオマス発電所燃焼灰の若齢ヒノキ林への施用試験，森林総合研究所研究報告，Vol.17, No.4 (No.448)，pp.317-324, 2018.12.
- 9) 山田毅・平井敬三：木質バイオマス燃焼灰の現状と林地還元に向けた取り組み，日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす，Vol.100, No.1, pp.55-61, 2021.
- 10) 和田健太郎・内山知二：製材残材を燃料とするボイラーから排出された木質燃焼灰の肥料効果，日本土壌肥科学雑誌，第 87 巻，第 1 号，pp.40-44, 2016.
- 11) 吉田俊介・桑原智之・佐藤利夫：バイオマス燃料燃焼灰からのカリウムとりんの連続抽出，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.33, pp.118-127, 2022.
- 12) 前田典生：木質バイオマスボイラ燃焼灰の有効利用法の開発，広島大学学位請求論文，2018.
- 13) 田島孝敏・大島義徳・甚野智子：木質バイオマス発電由来の燃焼灰の有効利用に関する研究，第 29 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.211-212, 2018.
- 14) 田島孝敏・甚野智子・大島義徳：木質バイオマス発電燃焼灰の有効利用に関する研究，大林組技術研究所報，No.84, pp.1-6, 2020.
- 15) 繁泉恒河・久保田洋・高地春菜・正木祥太：CO₂ を固定化した木質バイオマス燃焼灰（BECCS 灰）の資源化技術の開発，フジタ技術研究報告，第 58 号，pp.61-66, 2022.
- 16) 繁泉恒河・久保田洋・高地春菜・正木祥太：CO₂ を固定した木質バイオマス燃焼灰を活用した緑化資材の開発，第 33 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.345-346, 2022
- 17) 西田和樹・大矢好洋・小河篤史・加藤雅彦：CO₂ 吸着させた木質バイオマス灰を添加した土壌からの元素溶出挙動とコマツ菜の生育応答，第 15 回環境地盤工学シンポジウム，pp.378-383, 2023.
- 18) 折橋健・安久津久・原田陽：木質バイオマス燃焼灰の活用に向けた検討(5) 灰の明度と融雪効果，林産試験場報，第 549 号，pp.15-18, 2022.
- 19) 地方独立行政法人 北海道総合研究機構 森林研究本部 林産試験場 環境・地質研究本部 環境科学研究センター：利用者向け資料 木質バイオマス燃焼灰の融雪資材としての利用法，令和元年 5 月。
- 20) 北海道：焼却灰（天然木由来）の利用の手引き～塗料や防腐剤，接着剤などの化学物質を一切使用していない木質バイオマスを 専焼ボイラーで燃焼させて生じた焼却灰について～，平成 29 年 3 月。
- 21) 佐藤研一・藤川拓朗・古賀千佳嗣・福岡大造・今國宏則：工場発電施設から発生する各種灰を用いた再生砕石の基本特性，第 33 回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.209-210, 2022.
- 22) 佐川孝広・北島和樹・丹波広樹：木質バイオマス燃焼灰のセメント混和材への適用，第 70 回セメント技術大会講演要旨，pp.100-101, 2016.
- 23) 堀江亮介・福永隆之・山口明伸・武若耕司：木質系バイオマスボイラー燃焼灰の混和剤利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，

- 24) Vol.40, No.1, pp.1941-1946, 2018.
- 25) 前川明弘・市川幸治・松浦真也・奥山幸俊・坂口貴啓：木質バイオマス焼却灰を混入したモルタル硬化体の各種特性に関する基礎的研究，第29回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.209-210，2018.
- 26) 前川明弘・市川幸治・渡邊卓弥・近藤笑加：木質バイオマス焼却灰を用いたポーラスコンクリートの各種特性に関する基礎的研究，第32回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.185-186，2021.
- 27) 境徹浩・古賀明宏・丸屋英二：木質バイオマス焼却灰のセメント資源化のための改質技術，第32回廃棄物資源循環学会研究発表会，pp.167-168，2021.
- 28) 比留間友亮・辰巳慶展・寺崎淳一：バイオマス灰のセメント資源化に関する基礎研究，第76回セメント技術大会講演要旨，pp.42-43，2022.
- 29) 溝渕裕美・黒川大亮・細川佳史：バイオマス灰を使用したクリンカー中のアルカリが及ぼす混合セメント物性への影響，第75回セメント技術大会講演要旨，pp.110-111，2021.
- 30) 溝渕裕美・Briki Yosra・黒川大亮・細川佳史：バイオマス灰のセメントクリンカー原料への適用化検討ーASR抑制効果への影響評価ー，第76回セメント技術大会講演要旨，pp.40-41，2022.
- 31) 佐川孝広：木質バイオマス焼却灰のジオポリマー活性フィラーへの適用，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.725-726，2017.
- 32) 北九州市立大学（研究代表機関）：ジオポリマーコンクリートに資する木質バイオマス焼却灰の資源化技術の実証開発，独立行政法人環境再生保全機構研究課題データベース（2022.12.26参照）.
- 33) 土木学会コンクリート委員会：2021年度重点研究課題「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究報告書」，2022年3月.
- 34) 河口真紀・田中恒佑：カーボンリサイクル技術，JCOAL Journal, Vol.46, pp.21-23, 2021.6.
- 35) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：2020年度～2022年度成果報告書カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電技術推進事業/カーボンリサイクル技術の共通基盤技術開発/石炭灰およびバイオマス灰等によるCO₂固定・有効活用に関する要素技術開発，2023年3月.
- 36) 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マニュアル（暫定版-PS灰系改質材編-），2021年3月31日.
- 37) 謝花一成・菊池翔・南出拓人・望月美登志：バイオマス(PKS)系複合材的吸水性材料の開発，第57回地盤工学研究発表会講演集，21-3-1-07，2022.
- 38) 謝花一成・菊池翔・南出拓人・望月美登志：バイオマス焼却灰（PKS灰）を活用した赤土対策のための土壌改良材の開発，土木学会全国大会第77回年次学術講演会，III-328，2022.
- 39) 水野健太・松坂昇：バイオマス焼却灰の吸水性と高含水比浚渫泥土に対する改質効果，第58回地盤工学研究発表会講演集，13-5-2-03，2023.
- 40) 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，pp.677-678，2005.
- 41) 秦浩司・大山将・鈴木義彦・片岡昌裕・技術標準化部会：重金属等不溶化処理の適用性確認試験手順（案）の作成および不溶化処理土壌の安定性に関する既往研究事例の調査，第20回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集，S3-08，2014.
- 42) 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.
- 43) 野島夕紀：肥料取締法の改正概要と木質バイオマス焼却灰の肥料利用について，日本エネルギー学会誌えねみくす，Vol.100, No.1, pp.74-80, 2021.
- 44) 日経新聞：日本製紙，バイオマスの焼却灰を肥料へ 国産化後押し

- <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC235PU0T20C24A1000000/> (参照 2024-01-23).
- 45) 経済産業省:化管法 SDS 制度
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/msds/msds.html (参照 2024-09-15).
- 46) 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.

再生石膏系改質材編

【 目 次 】

1. 再生石膏とは	石膏-2
2. 改質原理と対象土及び利用用途	石膏-3
(1) 改質原理	石膏-3
(2) 対象土	石膏-3
(3) 利用用途	石膏-4
3. 改質土の用途別要求品質と判定指標	石膏-5
(1) 土木用改質土	石膏-5
(2) 土壌用改質土	石膏-5
4. 改質材（一次助剤・二次助剤）	石膏-9
5. 再生石膏粉の品質管理	石膏-11
6. 再生石膏による改質事例	石膏-16
(1) 概要	石膏-16
(2) 改質材	石膏-17
(3) 土木用改質土	石膏-19
1) 配合試験	石膏-19
2) 実証試験	石膏-26
3) 機能監視	石膏-30
(4) 土壌用改質土	石膏-31
1) 配合試験	石膏-31
2) 実証試験	石膏-39
3) 機能監視	石膏-41
【参考文献】	石膏-43

1. 再生石膏とは

再生石膏とは、廃石膏ボードを中間処理（ボード紙を剥がし、異物を取り除いて破碎し、所定の粒度に調整）したのち、必要に応じて加熱して再資源化したものをいう。

石膏とは硫酸カルシウム（ CaSO_4 ）の化学組成をもつ鉱物の総称で、結晶水の分子数により二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、半水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ）、無水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）の3種類に大別（細別すると7種類¹⁾）される。

石膏ボードとは、石膏を芯材とし、両面を石膏ボード用原紙で被覆し、板状に成型した建築用内装材料で、防火・耐火性、遮音性、断熱性、施工性及び経済性に優れることから、内壁や天井の下地に使用されている。

廃石膏ボードとは、石膏ボードが廃材となったもので、産業廃棄物（ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず）に分類され、処分する場合には管理型最終処分場で処分することが規定されている²⁾。廃石膏ボードのうち、排出量の約6割を占める、解体或いは改修工事現場から排出された「解体系廃石膏ボード」は、一部はリサイクルされているが、大部分は埋立処分されており、リサイクル率は30%程度³⁾とされており、図-1⁴⁾に示すように今後右肩上がりに増加することが予測されている。しかし、管理型最終処分場の残余容量には限界がある一方で、再生石膏の大量消費用途が確立されていないといった課題がある。このため、再生石膏を大量に消費できる技術開発及び用途の開拓が急務となっている。

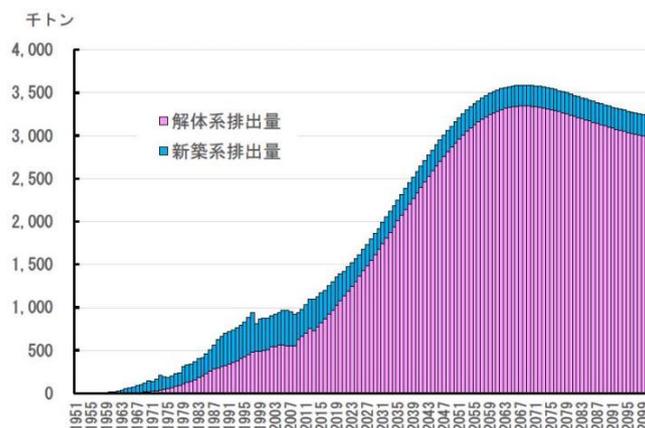


図-1 廃石膏ボード排出量予測⁴⁾

2. 改質原理と対象土及び利用用途

再生石膏を改質材として用いた改質土の最大の特徴は pH が中性域 ($5.8 \leq \text{pH} \leq 8.6$) であることであり、石膏の硬化特性、団粒化促進効果等により、目的用途に適合した改質土を作製することができる。

(1) 改質原理

JIS A 1203 (土の含水比試験方法) により求めた各種石膏の含水比は、自由水だけでなく化合水の一部も定量してしまうが、二水石膏で $w_G \doteq 20$ 数%, 半水石膏で $w_B \doteq$ 数%, 無水石膏で $w_A \doteq 0\%$ である。これに対し、改質を必要とする発生土の含水比はこれらより大きいのが普通である。したがって、発生土に石膏を添加すると、相対的に Solid 分が増加して含水比が低下する。また、湿潤状態にある発生土に半水石膏を添加すると、半水石膏は土中の間隙水を結晶水として取り込んで二水石膏に転化するため、改質土は含水比が低下するとともに、水和反応に伴い改質土中に多数の針状結晶が生成され、互いに交錯し合い凝結硬化して強度を発現する。

一方、酸性電解質の石膏 (CaSO_4) は、Na 型粘土を Ca 型粘土に置き換え、かつ弱塩基性の泥土の pH を低下させることにより、粘土の凝集を促進⁵⁾ し、土を団粒化させる。

(2) 対象土

本改質技術で対象とする土は、含水比が高く粒子が微細な泥状のものを基本とするが、**図-2**⁶⁾ 及び**図-3**⁷⁾ に示す発生土又は土砂及び土砂に準ずるもののうち、そのままでは利用用途に照らし合わせて要求品質を満足しないものを対象とする。但し、環境基本法に基づく土壤環境基準及び土壤汚染対策法に基づく特定有害物質の含有量基準に適合しないものは対象外とする。

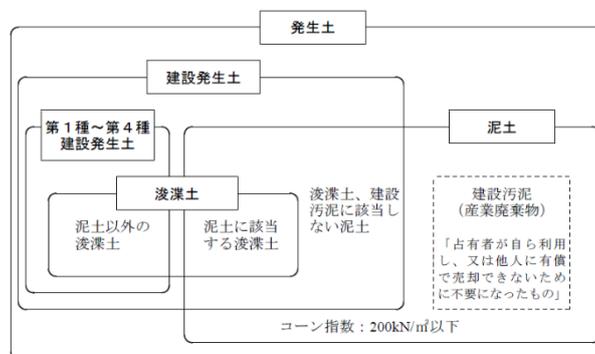


図-2 発生土における建設汚泥の位置づけ⁶⁾

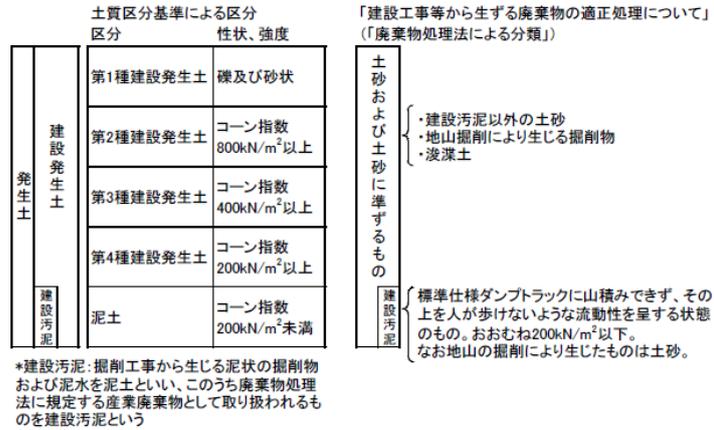


図-3 建設汚泥と建設発生土の関係⁷⁾

(3) 利用用途

再生半水石膏は、セメントや石灰などの固化材の代替品として高含水比泥土等に添加することで、地盤改良効果、土質安定処理効果が期待でき、改質土は土木などの地盤材料（土木用改質土）として用いることができる

一方、再生二水石膏にはカルシウムやイオウなどの必須栄養素が含まれており、団粒化促進効果がある⁸⁾ため、高含水比泥土等に添加することで土を膨軟にし、畑の作土（土壌用改質土）として用いることができる。

3. 改質土の用途別要求品質と判定指標

地盤材料として使用する土木用改質土の品質判定指標は、建設汚泥処理土利用技術基準に準拠してコーン指数とする。

畑の作土を対象とした農地土壌に使用する土壌用改質土の品質判定指標は、土性（粒度）、コンシステンシー及び三相分布とする。

なお、いずれの用途に用いる場合でも、溶出量試験（平成3年環境庁告示第46号）及び含有量試験（平成15年環境省告示第19号又は平成24年環水大水発第120725002号、底質調査法）を行って、改質土が生活環境保全上支障がないことを確認する。

（1）土木用改質土

土木用改質土の利用用途は、埋戻材・盛土材・裏込材・築堤材などがあり、以下に示す特性が求められる。

- ①締固めが容易で、締固め後の密度・強度が大きいこと
- ②圧縮性が少ないこと
- ③雨水などによる侵食及びスレーキングに対して耐力があること
- ④吸水による膨潤性が低いこと
- ⑤敷均し等の施工性が容易なこと

土の地盤工学的特性は、相互に関連性が高い項目が多く、例えばコーン指数はその土が利用用途に求められる品質を満たすか否かの判断が可能となるため、建設汚泥処理土の品質区分や、発生土の土質区分はコーン指数によって判定している。そこで、本改質技術においても、土木用改質土は建設汚泥処理土利用技術基準⁹⁾に準拠してコーン指数を判定指標とし、目的用途に応じた品質区分を選定する。

（2）土壌用改質土

畑の作土を対象とした農地土壌に求められる品質も多岐にわたるが、表-1に示すように、物理特性、理化学特性、生物特性の3つに大別することができる。このうち、本改質技術で改善目標とするのは物理特性である。

表－1 農地土壌（畑作土）の要求品質

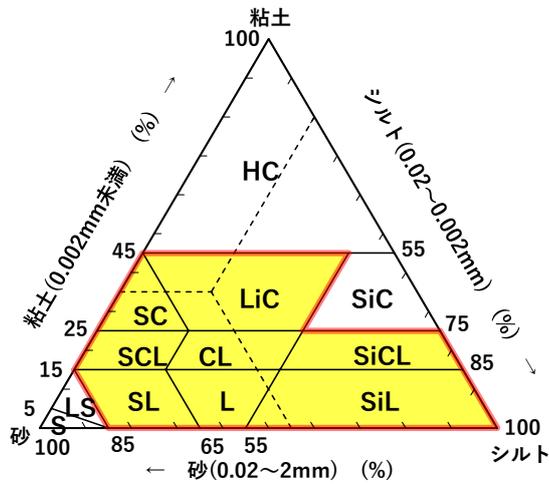
要求品質	改善目標	具体的診断・調査項目
物理特性	<ul style="list-style-type: none"> ・空気や水が入るための隙間を増やす ・土壌の団粒構造の形成を促進し、土壌を膨軟にする 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 水分 2. 土性（粒度組成） 3. 透水性 4. 保水性 5. 通気性 6. 土壌硬度（緻密度） 7. 三相（固相、液相、気相）分布
理化学特性	<ul style="list-style-type: none"> ・好適 pH に保つ ・作物の生育に必要な養分のバランスを保つ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. pH 2. 塩基濃度（電気伝導率；EC） 3. 保肥力（陽イオン交換容量；CEC） 4. 交換性塩基 5. リン酸吸収係数 6. 微量元素
生物特性	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の数や種類を増やす 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 土壌微生物数 2. 腐植 3. 有機炭素含有量

農地土壌のうち、畑の作土に求められる物理特性は、土壌が団粒化して膨軟であることに総括されることから、土性（粒度）、コンシステンシー及び三相分布を判定指標とする。

我が国では普通畑における土性の改良目標は、表－2 に示す国際土壌学会の 12 区分の土性のうち、図－4 に示す SL（砂壤土）～LiC（軽埴土）¹⁰⁾ の 7 区分としていることから、本改質技術により発生土を畑の作土に改質する場合の目標値はこれに倣う。

表－2 土性区分

粘土含量	土性区分	略記号	粘土(%)	シルト(%)	砂(%)
15% 以下	砂 土 (Sand)	S	0～ 5	0～ 15	85～100
	壤 質 砂 土 (Loamy Sand)	LS	0～ 15	0～ 15	85～ 95
	砂 壤 土 (Sandy Loam)	SL	0～ 15	0～ 15	65～ 85
	壤 土 (Loam)	L	0～ 15	20～ 45	40～ 65
	シルト質壤土 (Silt Loam)	SiL	0～ 15	45～100	0～ 55
15 ～ 25%	砂質埴壤土 (Sandy Clay Loam)	SCL	15～ 25	0～ 20	5～ 85
	埴 壤 土 (Clay Loam)	CL	15～ 25	20～ 45	30～ 65
	シルト質埴壤土 (Silty Clay Loam)	SiCL	15～ 25	45～ 85	0～ 40
25 ～ 45%	砂質埴土 (Sandy Clay)	SC	25～ 45	0～ 20	55～ 75
	軽 埴 土 (Light Clay)	LiC	25～ 45	0～ 45	10～ 55
	シルト質埴土 (Silty Clay)	SiC	25～ 45	45～ 75	0～ 30
45%以上	重 埴 土 (Heavy Clay)	HC	45～100	0～ 55	0～ 55



※赤枠範囲は、参考文献10)に基づく普通畑の土性目標値

図-4 土性三角図表

我が国の発生土は含水比が高いものが多いが、これらを畑の作土として利用するにはパラパラな状態、すなわち土のコンシステンシーを改善して半固体状にする必要がある。具体的には図-5に示すように

- ①含水比 w を低下させる
- ②コンシステンシー指数 I_c を 1 に近づける (または $I_c > 1$)
- ③液性指数 I_L をゼロに近づける (または $I_L < 0$)

ことが必要となる。なお、②及び③については、含水比 w を低下させることで付随してくることは言うまでもない。

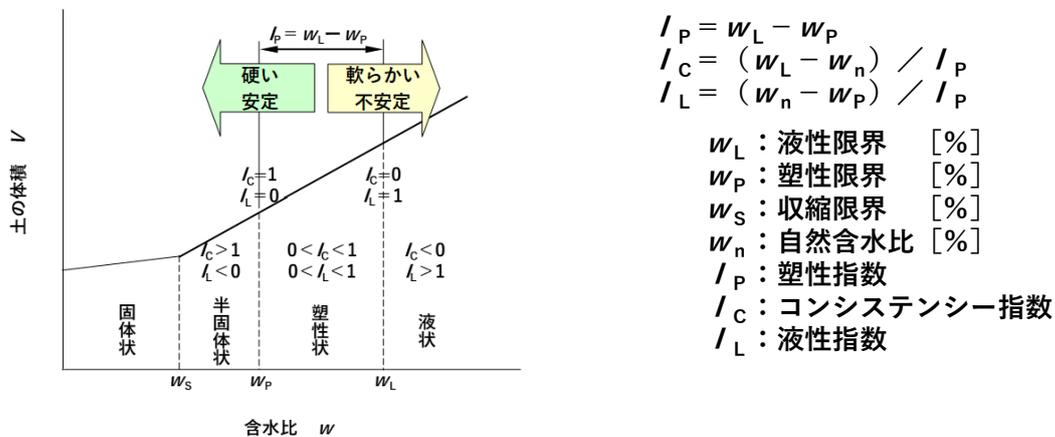


図-5 土のコンシステンシー限界

図-6に示すように、土壌は土粒子、水及び空気から構成されており、それぞれの部分の容積を固相 (V_s)、液相 (V_w)、気相 (V_a)、その構成比率を三相分布という。一般的な三相分布の理想的な比率は、固相が45~50%、液相が20~30%、気相が20%以上¹⁾といわれることから、本改質技術により発生土を畑の作土に改質する場合の目標値はこれに準ずる。

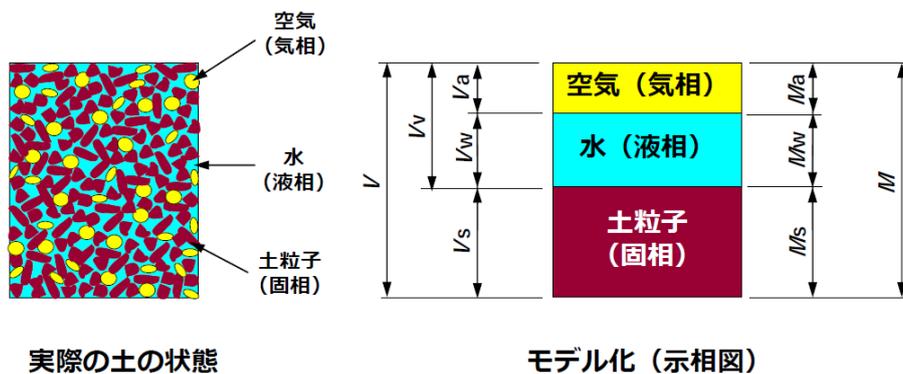


図-6 土の三相分布

なお、土壌用改質土を水田に用いる場合には、農用地土壌汚染防止法に基づき、特定有害物質（銅及びヒ素）についても確認する。

4. 改質材（一次助剤・二次助剤）

再生石膏を主材とする改質材により，対象土を目的用途に適合した物理特性を有する改質土にするための改質材は，配合試験により組成及び添加量を決定するものとする。

改質土に強度や変形抵抗性などの地盤工学的特性を求める場合には，改質主材として硬化特性がある再生半水石膏を用いる。但し，半水石膏が水と反応してできた二水石膏の溶解度は $0.2\text{g}/100\text{gH}_2\text{O}$ ($0\sim 100^\circ\text{C}$) と決して大きくはないが，水に浸漬した改質土が溶解（再泥化）することが報告されている¹⁾²⁾ ことから，水の影響を受ける場所で使用する場合には注意が必要である。

一方，畑作土に適用する，膨軟性を有する土壌用改質土を得るためには，改質主材として硬化特性を有さない再生二水石膏を用いる。

これに加えて，改質土の品質・性能を安定させることを目的に改質一次助剤を，改質土の品質・性能を向上させることを目的に改質二次助剤を，それぞれ添加することで，改質対象土及び改質土の利用用途を拡大することが可能となる。

本改質技術に用いる改質一次助剤及び改質二次助剤の一例を表-3に示す。

表 3-3 改質一次助剤及び改質助材の一例

		一次助剤				二次助剤				
	高炉セメントB種 (BB)	消石灰 (Ca(OH) ₂)	生石灰 (CaO)	石灰炭 (FA) フライアッシュ	石灰炭 (CA) クリンカー	PS 灰	高炉スラグ微粉末 (BFS)	浄水汚泥		
製品概要	<ul style="list-style-type: none"> 高炉において鉄銹を製造する過程で副産される高炉スラグの微粉末をポルトランドセメントに混合したセメント。 	<ul style="list-style-type: none"> 酸化カルシウム(生石灰)に加水・熟成したものを分級篩粒して生成。 	<ul style="list-style-type: none"> 石灰石(炭酸カルシウム)を900℃以上の温度で焼成して生成。 	<ul style="list-style-type: none"> 石灰炭(炭酸カルシウム)を900℃以上の温度で焼成して生成。 	<ul style="list-style-type: none"> 製鉄製造過程で、製品とならずに排水中に流出した繊維、タルク(石粉)などを濃縮脱水し、これを減量化・安定化するために焼却したあとに発生する灰。 	<ul style="list-style-type: none"> 高炉において鉄銹を製造する過程で副産される高炉スラグを急冷して微粉砕したもの。 	<ul style="list-style-type: none"> 海水場の沈殿・濃縮過程において、浮遊物を凝集分離して、濃縮・脱水・乾燥させたもの。 			
硬化特性	<ul style="list-style-type: none"> セメント中のクリンカーが土中水と反応して一価水和物を生成し、間隙を充填して土を緻密化するとともに、土粒子を結合して固化する。 	<ul style="list-style-type: none"> イオン交換反応が先ず短期的に生じ、次いで土中の粘土鉱物とのポゾラン反応による硬化が中長期的に生じて強度増加につながる。 	<ul style="list-style-type: none"> 土中の水分が水和水として取り込まれ、かつ、発熱反応により土中水が蒸発する消化吸水反応が最初起こり、次いでイオン交換反応、ポゾラン反応が中長期的に生じて強度増加につながる。 	<ul style="list-style-type: none"> 石灰炭の主成分であるシリカ(SiO₂)とアルミナ(Al₂O₃)が、セメント水和物である水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)とポゾラン反応を起こし、強度が増加する。自硬性を有するものもあるといわれる。 	<ul style="list-style-type: none"> 石灰炭の主成分であるシリカ(SiO₂)とアルミナ(Al₂O₃)が、セメント水和物である水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)とポゾラン反応を起こし、強度が増加する。 	<ul style="list-style-type: none"> 主成分が石灰炭と類似しているため、自硬性を有すると考えられるが、明確に示された報告はない。 自硬性を有するものもあるといわれる。 	<ul style="list-style-type: none"> それ自体に水硬性はないが、アルカリや硫酸塩の刺激により硬化する潜在水硬性を有する。 セメントの代替材料として、スラグ石膏セメントの主要材料として使われる。 	<ul style="list-style-type: none"> 天日乾燥した浄水汚泥は水分消失に伴って固形成化するが、それ自体には土を固化する特性はない。 		
吸水特性	<ul style="list-style-type: none"> 土中の自由水を結合水として取り込む。 	<ul style="list-style-type: none"> 結合水としては取り込まないが、物理的な吸水能力がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 水和反応により添加した生石灰質量の32%の水分を吸収し、発熱に伴う蒸発により、CaO:1gに対して45%の水が消費する。 	<ul style="list-style-type: none"> 吸水性が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ガラス質であるため、吸水能力はほとんどない。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的な吸水性が高いが、焼成方法によっては低いものもある。 	<ul style="list-style-type: none"> 物理的な吸水能力がある。 			
重金属溶出抑制	<ul style="list-style-type: none"> 水和生成物が重金属を固定化して、溶出を抑制する。 重金属を固定化させ溶出を抑制させる目的で使用された事例多数あり。 	<ul style="list-style-type: none"> 都市ゴミ焼却灰に消石灰を添加することで、重金属安定効果の高いトバモライトが生成され、溶出を抑えた事例あり。 酸性～中性域で溶解しやすい重金属等の溶出を抑えるために、焼却灰に石灰を添加した事例あり。 	<ul style="list-style-type: none"> (知見なし) 	<ul style="list-style-type: none"> エトリンガイトはフッ素不溶性に有効であるが、セメントだけではAl₂O₃成分が不足するため、石灰炭はAl₂O₃成分の補足手段として有効である。 	<ul style="list-style-type: none"> (知見なし) 	<ul style="list-style-type: none"> PS 灰中のカルシウムイオンがフッ素と結びつき、フッ素の溶出抑制効果があるといわれる。 	<ul style="list-style-type: none"> エトリンガイトはフッ素不溶性に有効であるが、セメントだけではCaOが不足する場合、高炉スラグは酸化カルシウムの補足手段として有効である。 	<ul style="list-style-type: none"> エトリンガイトはフッ素不溶性に有効であるが、セメントだけではアルミナが不足する。浄水汚泥には減毒剤であるPACのアルミナ成分が残存しているため、アルミナの補足手段として有効である。 		
pH	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 OPCよりは少ないが、六価クロムの溶出が懸念される。 	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 生石灰より高価(処理工程)。 生石灰と比べると発熱がない分取扱いは容易。 石膏による高含水比泥土改良の研究において、補助添加材として使われた事例多数あり。 肥料取除法におけるアルカリ分の公定規格は60%以上。 	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 消石灰より安価 水と反応すると著しく発熱し膨張する。 石膏による高含水比泥土改良の研究において、補助添加材として使われた事例は少ない。 肥料取除法におけるアルカリ分の公定規格は80%以上。 	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 固化強度増強を目的として、エトリンガイトの生成量を増加させたため、Al₂O₃成分に富む石灰炭を混入した事例あり。 重金属を含んでおり、小さいため浸透性が大きく、転圧に対する抵抗性が大きい(硬くなりやすい)。 	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 多孔質で排水性、通気性、保肥性に優れたため、有機質土にも効果的である。 	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 吸水改善が基本であるため、有機質土にも効果的である。 	<ul style="list-style-type: none"> 強アルカリ性 高炉スラグの潜在水硬性は、セメントのようなアルカリ削減剤によって著しく促進されるとされていたが、硫酸塩によっても急激に発現される。 	<ul style="list-style-type: none"> 弱酸性 土木資材として利用する場合、資材の確保(ストック)が課題となる。 		
その他										

5. 再生石膏粉の品質管理

再生石膏粉は、廃石膏ボードからボード用原紙を剥離し、粉碎・篩い分けをして粒度を調整したものをいう。また、中間処理施設で受入時に金属等の異物除去を行う必要がある。粒度を調整した再生石膏粉は、全て「再生二水石膏粉」であるが、篩い分け前に焼成処理を加えることで「再生半水石膏粉」、「再生無水石膏粉」が製造される。

これら工程を経て再生石膏粉が製造されるため、ボード原紙を含む異物や結晶水、付着水等の品質管理を実施することが必要である。なお、品質管理に係る詳細については「再生石膏粉の有効ガイドライン（第一版）」（令和元年、国立環境研究所）に詳述されているので、ここでは代表的な考え方について述べる。

（1）品質管理

再生石膏粉の品質管理は、中間処理業者等が製造する廃石膏ボード由来の再生石膏粉（二水、半水、無水）を対象としている。なお、品質管理は基準値を設けるものではなく、出荷先への品質保証に資することを目的とするものである。

品質管理のフローを図-7に、品質管理項目を表-4に示す。要求品質自体は、出荷先の受入条件に委ねられるが、製造業者自らが行う自主検査では、製品の原材料としての基本的な特性の把握と品質のバラツキを管理することを目的として、夾雑物の混入状況（目視による種類、量）、水分（自由水および化合水）の量、最大粒径（粒度・寸法）、水素イオン指数（pH）を品質管理項目としている。第三者機関による定期検査では、夾雑物の定量、製品の現在として掲げる石膏種（二水、半水、無水）の含有量に関する定量、水素イオン指数（pH）、重金属等の分析（全含有量）が品質管理項目として挙げられる。

なお、定期検査で行う重金属等の有害物質については、例えば、固化材や農業利用のように土と混合して利用する場合には、土と混合した状態で溶出試験を行う必要があるが、ここでは、製品の原材料として製造される「再生石膏粉」について、そのものの品質を把握することを主眼として重金属等8項目（カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ふっ素、ほう素）の含有量を定期的に検査することとした。含有量は、人の経口摂取によるリスクを評価することが目的で無いことと、コストを鑑みて底質調査法による全含有量分析としている。

ただし、地方自治体のリサイクル品認定制度等に活用する場合においては、固化材等の評価項目に原材料の土壌溶出量（土壌環境基準）を求める自治体もあることから、関係部局に確認する必要がある。

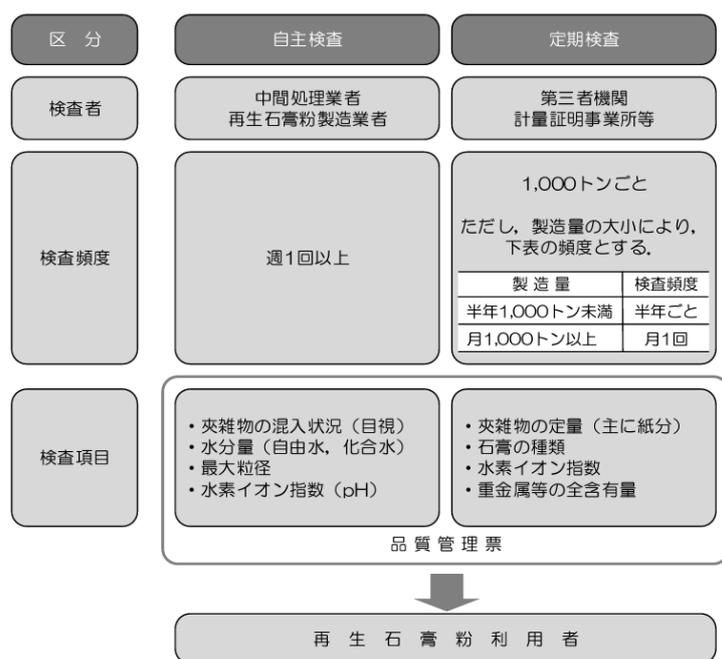


図-7 再生石膏粉の品質管理フロー

表-4 再生石膏粉の品質管理項目

区分	品質管理項目	検査の目的
自主検査	夾雑物の混入状況	・解体系の廃石膏ボードには、針・鋸などの金属、剥離紙、木片、モルタル、ロックウール等の夾雑物が混入する可能性がある。
	水分量（自由水量）	・再生石膏粉の基本的な特性の把握と保管状況の管理のために検査する。
	水分量（化合水量）	・再生石膏粉の基本的な特性を把握するために検査する。なお、化合水量を測定することで製品の原材料として掲げる石膏種（二水、半水、無水）の概略的な含有量を把握することも可能である。
	最大粒径	・再生石膏粉の基本的な特性として、製造工程（中間処理）で行われる「破砕」および「篩分け」設備の性能管理のために検査する。
	水素イオン指数（pH）	・再生石膏粉の基本的な特性を把握するために検査する。 ・通常時からの pH 値の変化により、夾雑物の混入等の品質の変化を把握することができる。
定期検査	夾雑物の定量	・解体系の廃石膏ボードには、針・鋸などの金属、剥離紙、木片、モルタル、ロックウール等の夾雑物が混入する可能性がある。 ・定期管理では、室内試験により、繊維分（主に紙分）と不溶解残渣の含有量を検査する。
	石膏の種類	・焼成処理によって製造される「再生半水石膏」および「再生無水石膏」については、石膏の形態を把握して石膏の種類（半水、無水）を保証する必要がある。
	水素イオン指数（pH）	・再生石膏粉の基本的な特性を把握するために検査する。 ・通常時からの pH 値の変化により、夾雑物の混入等の品質の変化を把握することができる。
	重金属等（全含有量）	・再生石膏粉の有害物質に対する品質を把握するために重金属等 8 項目 ^{※1)} の全含有量 ^{※2)} を検査する。

※1) 重金属等 8 項目：カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ふっ素、ほう素

※2) ここでいう含有量は、土壤汚染対策法の土壤含有量ではなく、全含有量（底質調査方法）である

(2) 固化材や改質材の地盤改良等への利用時における品質管理

再生石膏粉を用いた固化材、改質材の用途は、主に、固化による力学性能等の向上と改質によるハンドリング（搬送性、篩い分け性能）の向上がある。再生石膏粉を単味または他の材料と混合した材料を「固化材または改質材」として使用する場合は想定しており、再生石膏粉単味を地盤材料として用いることは想定していない。

これらの固化材、改質材を使用する際には、用途に応じた要求品質を満たすことを事前の各種試験等により確認する必要がある。なお、ここで固化や改質の対象とする土（原土）は、土壤汚染対策法の溶出量基準と含有量基準に適合した非汚染土を前提としている。そのため、土（原土）について予め溶出量や含有量について調査しておくことが必要である。設計から室内配合試験、施工までの標準的なフローを図-8に示す。再生石膏粉を用いた固化材・改質材の地盤改良等への利用に際しては、用途に応じて必要な力学性能やpH等を設定する。その上で、固化材メーカーと施工業者が協力して、室内配合試験・溶出試験により設定された要求性能と環境安全品質の事前確認を行い、原位置において重機によりまたは土質改良機により均質な攪拌・混合を実施し、品質を確保する。

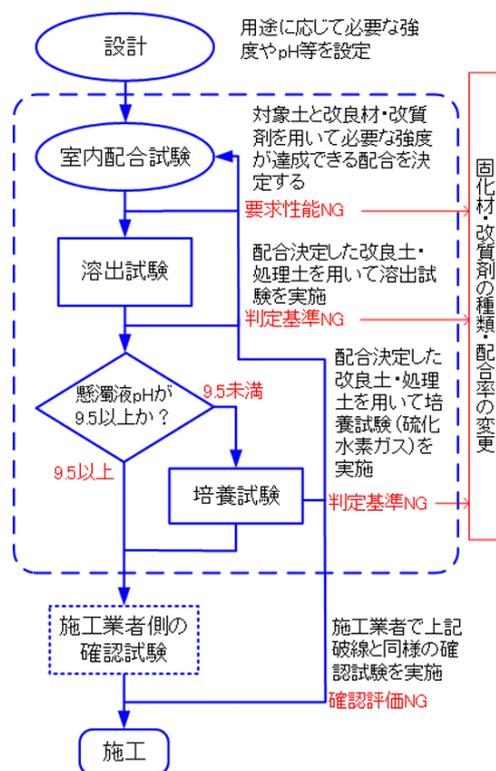


図-8 設計から室内配合試験、施工までの流れ

力学性能に関する要求品質と検査方法について、再生石膏粉を用いた固化材・改質材を建設発生土の利用や建設汚泥の再生利用に用いる場合には、圧縮強さ、コーン指数等について

利用用途の要求品質に適応していることを確認する。

環境安全性に関する溶融品質と検査方法については、固化または改質後の土を対象として、例えば表-5、6に示す環境安全性（重金属等、pH、硫化水素ガスの発生等）が、利用用途の要求事項に適合していることを確認する。

表-5 環境安全性検査方法（重金属等）の概要

利用形態	工種・用途	試験対象 試料	試験方法	測定項目	養生期間	
固化材	主材	地盤改良	混合土	H3 環告 46 号	水銀, 鉛, カドミウム, 六価クロム, ヒ素, セレン, フッ素, ホウ素	混合後 7~28 日程度
		盛土材, 覆土 材, 埋立材	混合土			
		路床, 路盤材	混合土			
	助剤	地盤改良	混合土			
		盛土材, 覆土 材, 埋立材	混合土			
		路床, 路盤材	混合土			
		ソイルセメント	混合土			
		流動化処理土	混合土			
セメント固化 体	混合土	JIS K 0058-1	水銀, 鉛, カドミウム, 六価クロム, ヒ素, セレン, フッ素, ホウ素			
改質剤 (主材・助 剤共通)	廃棄物混じり 土等の土と廃 棄物の分別・ 分級	分別土 ^{注)}	H3 環告 46 号	水銀, 鉛, カドミウム, 六価クロム, ヒ素, セレン, フッ素, ホウ素	混合直後	
	処分場以外へ の運搬時の前 処理	改質土				
	処分場への運 搬時の前処理	改質土	S48 環告 13 号	水銀, 鉛, カドミウム, 六価クロム, ヒ素, セレン		

注) 廃棄物等を除去した後の分別土をいう。

表-6 環境安全性に係る品質基準（重金属等）

項目	一般用途溶出量基準 ^{注1)} (mg/L)	港湾用途溶出量基準 ^{注2)} (mg/L)	管理型処分場受入基準 ^{注3)} (mg/L)
水銀 (化合物を含む)	0.0005 以下	0.0015 以下	0.005 以下
鉛 (化合物を含む)	0.01 以下	0.03 以下	0.3 以下
カドミウム (化合物を含む)	0.01 以下	0.03 以下	0.09 以下
六価クロム (化合物を含む)	0.05 以下	0.15 以下	1.5 以下
砒素 (化合物を含む)	0.01 以下	0.03 以下	0.3 以下
セレン (化合物を含む)	0.01 以下	0.03 以下	0.3 以下
ふっ素 (化合物を含む)	0.8 以下	15 以下	-
ほう素 (化合物を含む)	1 以下	20 以下	-
試験方法	H3 環告 46 号	JIS K 0058-1	S48 環告 13 号
参考とした基準等	土壌環境基準	建設分野の規格への環境 側面の導入に関する指針 附属書 I	金属等を含む産業廃棄物 に係る判定基準

注1) 再利用が想定されない港湾施設の構造物を構成するセメント固化体, ならびに処分場運搬時の前処理としての改質は対象としない。

注2) 再利用が想定されない港湾施設の構造物を構成するセメント固化体のみを対象とする。

注3) 管理型処分場受け入れ時の前処理としての改質の場合のみを対象とする。

硫化水素ガスについては、図-8にも示したが、表-7の考え方で実施の必要性を判断することとする。

表-7 硫化水素ガス発生の試験実施に係る判断基準

		試験実施の判断
懸濁液pHが9.5以上		不要
懸濁液pHが9.5未満	改質土を植生基盤として 50 cm以浅に用いる場合	不要
	上記以外の場合	必要

6. 再生石膏による改質事例

再生石膏を主材とする改質材による発生土の改質事例として、粘性が高いため池底泥土及び流動性が高い貯水池底泥土を土木用改質土（地盤材料）及び土壌用改質土（畑作土）に改質した試験施工の結果を示す。

（1）概要

事例1は、ため池改修工事のため落水干陸したため池よりバックホウで採取した底泥土（以下、「ため池底泥土」と称する。）を、事例2は、施設維持管理のため水位を低下させた貯水池より泥上掘削機で採取した底泥土（以下、「貯水池底泥土」と称する。）を、それぞれ再生石膏により改質して再資源化したもので、試験施工の内容は室内配合試験、実証試験及び機能監視からなる。最初に室内配合試験を行って土木用改質土及び土壌用改質土の配合を決定し、次いでその配合に基づいて実証試験を行い、実機での実現性検証並びに実機処理土の特性を確認した。最後に、実証試験で製造した改質土（実機処理土）を用いて模擬道路及び模擬畑を設置し、改質土特性の経時変化をモニタリングした。

写真－1及び写真－2は、事例1におけるため池底泥土の採取状況及び有姿を、写真－3及び写真－4は、事例2における貯水池底泥土の採取状況及び有姿をそれぞれ示す。



写真－1 ため池底泥土採取状況



写真－2 ため池底泥土有姿



写真－3 貯水池底泥土採取状況



写真－4 貯水池底泥土有姿

(2) 改質材

本事例では、再生半水石膏（土木用改質土）と再生二水石膏（土壌用改質土）を主材とし、表-3に基づき表-8に示す一次助剤及び二次助剤を選定した。

表-8 配合試験に用いた改質材の種類と目的

利用用途	項目	主 材	一次助剤	二次助剤
地盤材料 (土木用改質土)	品 目	半水石膏 (B)	高炉セメント B 種 (BB)	高炉スラグ微粉末 (BFS)
	目的・効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固化・硬化 ・ 含水比低下 (Solid 分増加) ・ 吸水作用 (化合水) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固化・硬化 ・ 含水比低下 (Solid 分増加) ・ 吸水作用 (化合水) ・ 重金属等の固定化 (溶出抑制) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 固化・硬化 (潜在水硬性) ・ 含水比低下 (Solid 分増加)
畑作土 (土壌用改質土)	品 目	二水石膏 (G)	消石灰 (SL)	石炭灰 (CA)
	目的・効果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 土の団粒化促進 ・ 含水比低下 (Solid 分増加) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 吸水作用 (物理的吸水) ・ 含水比低下 (Solid 分増加) ・ 重金属等の溶出抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 粒度調整作用 ・ 含水比低下 (Solid 分増加) ・ 排水性、通気性、保肥性 ・ 転圧抵抗性大 (締まりにくい)

本事例に用いた改質材の化学試験結果を表-9に示す。

一般に、石膏の pH は中性といわれ、再生二水石膏は pH=7.8 とほぼ中性であったが、再生半水石膏は pH=9.3 とアルカリ性を示した。石膏は酸性の硫酸 (H_2SO_4) とアルカリ性のカルシウム化合物 (たとえば CaO) の化合物であるため、条件によっては酸性にもアルカリ性にもなりうる。硫酸カルシウム ($CaSO_4$) は結晶水が多い場合は弱酸性～中性を示すが、結晶水が少なくなるにつれて弱アルカリ性を示すようになるといわれている。なお、水溶性成分は化学成分に応じた値を示した。

表一 9 改質の化学試験結果

区分	項目	単位	主材		一次助剤			二次助剤	
			再生 半水石膏	再生 二水石膏	高炉セメント B種	消石灰	高炉スラグ 微粉末	クリンカ アッシュ	
水素イオン指数	pH	—	9.3	7.8	12.4	12.7	11.2	9.8	
	電気伝導率	—	568	251	665	892	246	4.48	
水溶性成分	ナトリウム (Na)	mg/g	0.16	0.17	0.28	0.017	0.018	0.002	
	カリウム (K)	mg/g	0.099	0.33	1.2	0.016	0.24	0.010	
	カルシウム (Ca)	mg/g	6.5	8.0	11	8.8	6.8	0.11	
	マグネシウム (Mg)	mg/g	0.079	0.094	<0.001	<0.001	0.004	0.014	
	塩化物イオン	mg/g	0.049	0.031	0.088	0.032	0.027	0.001	
	硫化物イオン	mg/g	15	19	9.0	0.54	14	0.012	
	二酸化ケイ素 (SiO ₂)	mass%	1.3	1.1	25	0.37	33	56	
	酸化アルミニウム (Al ₂ O ₃)	mass%	0.32	0.25	8.0	0.16	12	20	
	酸化第二鉄 (Fe ₂ O ₃)	mass%	0.14	0.11	1.7	0.046	0.31	9.2	
	酸化カルシウム (CaO)	mass%	35	31	52	70	41	4.8	
酸化マグネシウム (MgO)	mass%	0.094	0.10	3.1	0.37	5.8	1.9		
三酸化イオウ (SO ₃)	mass%	52.2	45.4	2.1	0.1	2.0	<0.1		
酸化ナトリウム (Na ₂ O ₃)	mass%	0.046	0.039	0.21	0.007	0.21	0.90		
酸化カリウム (K ₂ O)	mass%	0.047	0.064	0.34	0.003	0.33	1.2		
二酸化チタン (TiO)	mass%	0.071	0.022	0.40	0.007	0.51	1.0		
酸化リン (P ₂ O ₅)	mass%	0.07	0.05	0.10	0.02	0.01	0.11		
酸化マンガン (MnO)	mass%	0.003	0.007	0.088	0.004	0.12	0.15		
強熱減量 (ig-loss)	mass%	4.7	9.8	0.6	24.7	<0.1	0.2		
不溶残分 (insol)	mass%	1.8	1.5	0.14	0.32	0.17	90		

改質材の重金属等の溶出量試験結果を表-10に、同含有量試験結果を表-11にそれぞれ示す。改質材単味には土壤環境基準は適用にならないが、再生石膏のふっ素及び高炉セメントB種の六価クロム溶出量が土壤環境基準を超過した。

表-10 改質材の溶出量試験結果

平成3年環境庁告示第46号

項目	単位	基準値 ^{注1)}	主材		一次助剤		二次助剤	
			再生 半水石膏	再生 二水石膏	高炉セメント B種	消石灰	高炉スラグ 微粉末	クリンカ アッシュ
カドミウム	mg/L	(≤ 0.01) ^{注2)}	0.008	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛	mg/L	(≤ 0.01)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/L	(≤ 0.05)	<0.01	<0.01	0.44	0.02	<0.01	<0.01
ひ素	mg/L	(≤ 0.01)	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
総水銀	mg/L	(≤ 0.005)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	mg/L	(≤ 0.01)	0.008	0.002	0.006	0.002	0.002	<0.002
ふっ素	mg/L	(≤ 0.8)	5.5	8.2	0.05	0.05	0.50	<0.05
ほう素	mg/L	(≤ 1)	0.07	0.04	<0.02	0.08	0.04	0.08

注1) 改質材単味には土壤環境基準は適用にならないが、参考値(土壤汚染対策法施行規則第31条第1項、別表第4)を示す。

注2) カドミウムの基準値は、2021年4月1日より0.003mg/Lに強化された(本分析は、2020年10~11月に実施)。

表-11 改質材の含有量試験結果

平成24年度底質調査法(環水大発第120725002号)

項目	単位	基準値 ^{注1)}	主材		一次助剤		二次助剤	
			再生 半水石膏	再生 二水石膏	高炉セメント B種	消石灰	高炉スラグ 微粉末	クリンカ アッシュ
カドミウム	mg/kg	(≤ 150) ^{注2)}	0.87	0.58	2.8	1.6	0.08	<0.05
鉛	mg/kg	(≤ 150)	9.2	8.2	25	1.0	0.76	2.1
六価クロム	mg/kg	(≤ 250)	<2	<2	5	<2	<2	<2
ひ素	mg/kg	(≤ 150)	1.6	1.9	12	<0.4	<0.4	0.7
総水銀	mg/kg	(≤ 15)	0.10	0.081	0.007	<0.005	<0.005	<0.005
セレン	mg/kg	(≤ 150)	0.5	0.3	1.4	<0.1	1.3	<0.1
ふっ素	mg/kg	($\leq 4,000$)	810	640	200	26	430	<15
ほう素	mg/kg	($\leq 4,000$)	<10	<10	60	<10	110	330

注1) 底質調査法では基準値が規定されていないが、参考値(土壤汚染対策法施行規則第31条第2項、別表第5)を示す。

注2) カドミウムの基準値は、2021年4月1日より45mg/kgに強化された(本分析は2020年10~11月に実施)。

(3) 土木用改質土

1) 配合試験

土木用改質土の配合試験は、図-9に示す組成の改質材を底泥土1m³あたり100~300kg添加して実施した。

配合試験における目標とする品質区分は、利用に際して特別な配慮を必要としない第2種処理土($q_c \geq 800$ kN/m²)とした。なお、品質保証材齢は、改質材の反応に要する時間と石膏の膨張収束¹⁾³⁾を考慮して7日とした。

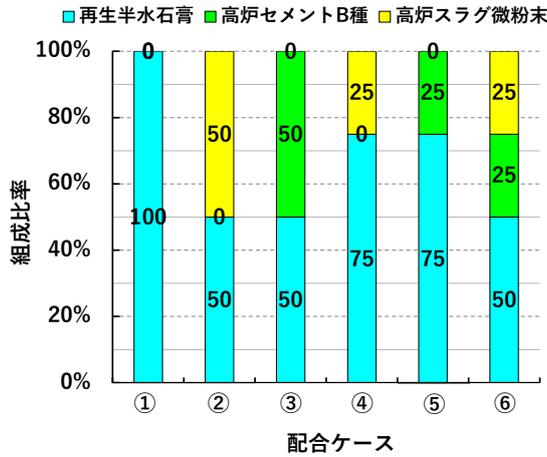


図-9 土木用改質材の組成

◆改質材添加量とコーン指数の関係

図-10は、建設汚泥処理土利用技術基準に基づいて実施した、各々の底泥土に関する土木用改質土の改質材添加量とコーン指数の関係を示す。

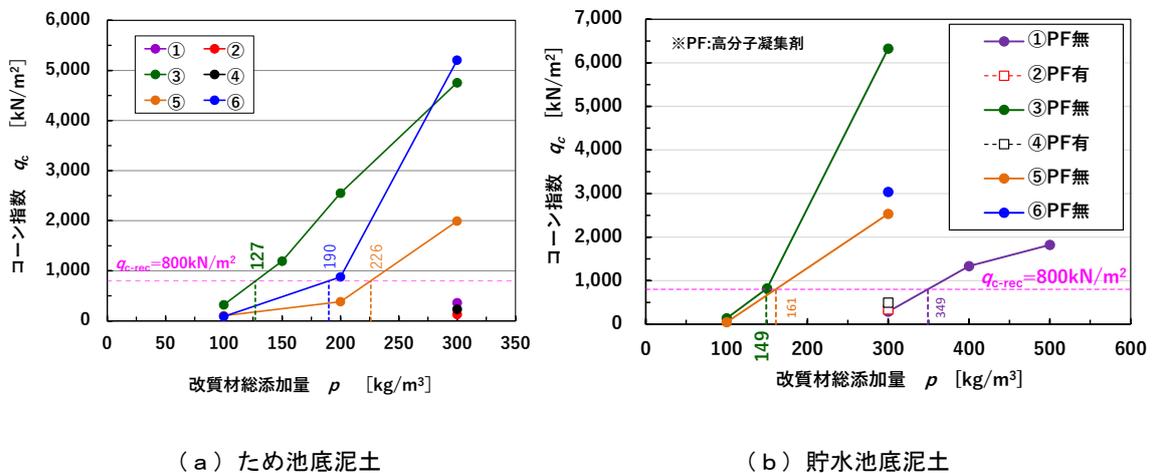


図-10 各底泥における改質材総添加量とコーン指数の関係

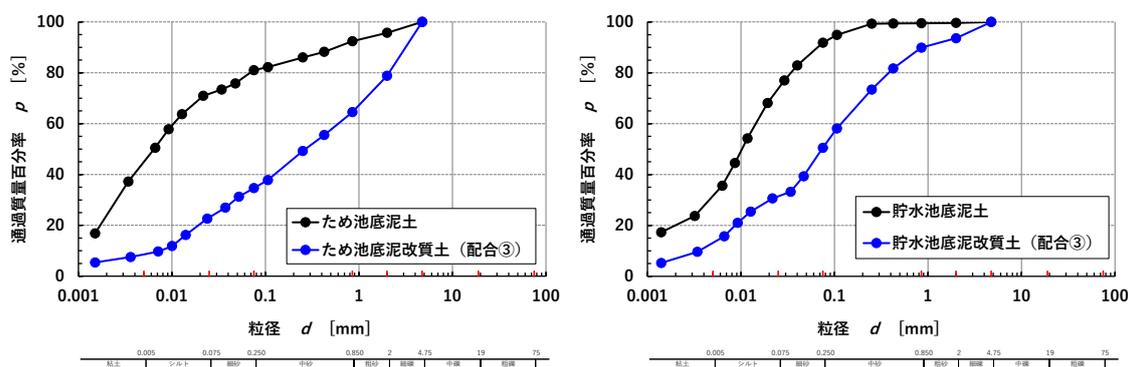
いずれの底泥土も、改質材添加量の増加に伴ってコーン指数が増加しており、高炉セメントB種を添加した配合③、⑤及び⑥が目標品質を満足したが、配合③の添加量が最も少ないことからこれを設計配合として、実証試験における配合のベースとした。なお、室内配合試験における改質土の改質材添加量 p は、ため池底泥土については $p=100\text{kg/m}^3$ （再生半水石膏： $p_B=50\text{kg/m}^3$ ，高炉セメントB種： $p_{BB}=50\text{kg/m}^3$ ），貯水池底泥土については $p=150\text{kg/m}^3$ （再生半水石膏： $p_B=75\text{kg/m}^3$ ，高炉セメントB種： $p_{BB}=75\text{kg/m}^3$ ）とした。

◆改質土の物理特性

土木用改質土の物理試験結果を表-12に、粒径加積曲線を図-11示す。

表-12 各底泥土木用改質土の物理特性

項目			試験値			
区分			ため池底泥土(原泥)	ため池底泥改質土(配合③)	貯水池底泥土(原泥)	貯水池底泥改質土(配合③)
改質材組成 B:BB:BFS			—	50:50:0	—	50:50:0
改質材添加量 ρ Kg/m ³			—	100	—	150
一般	土粒子の密度 ρ_s Mg/m ³		2.620	2.731	2.699	2.716
	自然含水比 w_n %		111.1	88.0	56.7	43.2
粒度組成	礫分 (2~75mm) %		4.3	21.2	0.4	6.4
	砂分 (0.075~2mm) %		14.7	44.2	7.8	43.1
	シルト分 (0.005~0.075mm) %		36.1	26.0	60.3	37.4
	粘土分 (0.005mm未満) %		44.9	8.6	31.5	13.1
	最大粒径 D_{max} mm		4.75	4.75	4.75	4.75
	細粒分 $F_c(0.075mm$ 未満) %		81.0	34.6	91.8	50.5
コンプレクシブ特性	液性限界 w_L %		124.0	96.4	48.8	53.7
	塑性限界 w_p %		46.4	71.1	34.3	37.6
	塑性指数 I_p —		77.6	25.3	14.5	16.1
	コンクレンシブ指数 I_c —		0.17	0.33	-0.54	0.65
	液性指数 I_L —		0.83	0.67	1.54	0.35
水理	透水係数 k m/sec		2.23×10^{-6}	9.73×10^{-8}	1.15×10^{-7}	7.95×10^{-8}
分類	地盤材料の分類名		粘土(高液性限界)	細粒分質礫質土	シルト(低液性限界)	シルト(高液性限界)
	分類記号		(CH)	(SFG)	(ML)	(MH)



(a) ため池底泥土

(b) 貯水池底泥土

図-11 各底泥土木用改質土の粒径加積曲線

◆改質土の化学特性

土木用改質土の化学試験結果を表-13に示す。

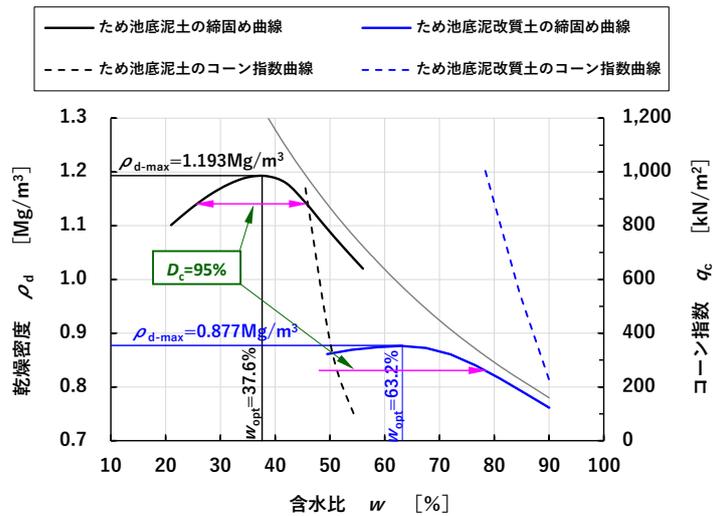
表-13 各底泥土木用改質土の化学特性

項目	単位	試験値				
		ため池底泥土(原泥)	ため池底泥改質土(配合③)	貯水池底泥土(原泥)	貯水池底泥改質土(配合③)	
土懸濁液のpH	-	9.1	11.3	6.9	11.0	
土懸濁液の電気伝導率 EC	mS/m	26.8	211	8.5	140.6	
土の水溶性成分	ナトリウム	mg/g	0.023	0.011	0.009	0.033
	カリウム	mg/g	0.034	0.060	0.020	0.045
	カルシウム	mg/g	0.53	6.7	0.020	6.7
	マグネシウム	mg/g	0.012	0.002	0.006	0.004
	塩化物イオン	mg/g	0.011	0.027	0.004	0.008
	硫化物イオン	mg/g	0.072	8.3	0.039	12

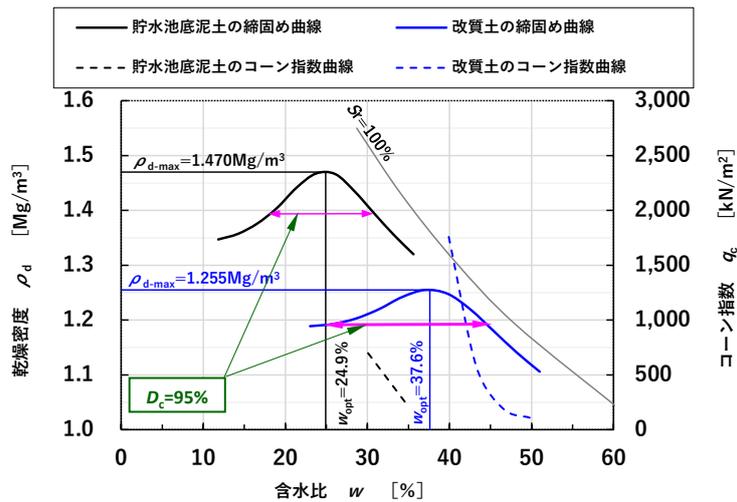
元々水素イオン指数が高くアルカリ性を呈していたため池底泥土、或いはほぼ中性であった貯水池底泥土に pH=12.4 の高炉セメントB種を添加したことで、改質土の pH は 11.3 ないし 11.0 に上昇した。また、カルシウムを主成分とし、塩基濃度が高い再生半水石膏及び高炉セメントB種を添加したことで電気伝導率 EC 及びカルシウムイオン濃度が、イオウを主成分とする再生半水石膏を添加したことで硫化物イオン濃度がそれぞれ上昇した。

◆改質土の締固め特性

図-12はそれぞれの底泥土の土木用改質土の締固め曲線を示す。改質により最大乾燥密度 ρ_{d-max} が減少，最適含水比 w_{opt} が増加し，締固め曲線は右下にシフトして形状がなだらかになった。 ρ_{d-max} の減少については，緻密で重厚な土構造物を築造する際には議論の余地があるが，改質土は構造物に対する側圧が軽減できるため，合理的設計への寄与が期待される。また， w_{opt} が増加したことで，従来は締固めが困難だった含水比でも締固めが可能になるとともに，曲線形状がなだらかになったことは，含水比の広い範囲で所定の締固め度を得ることができ，扱いやすい地盤材料になったことを示唆している。



(a) ため池底泥土

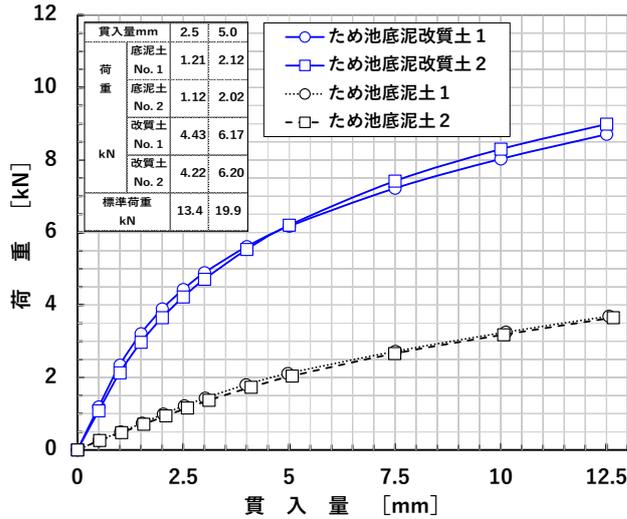


(b) 貯水池底泥土

図-12 各底泥土木用改質土の締固め曲線

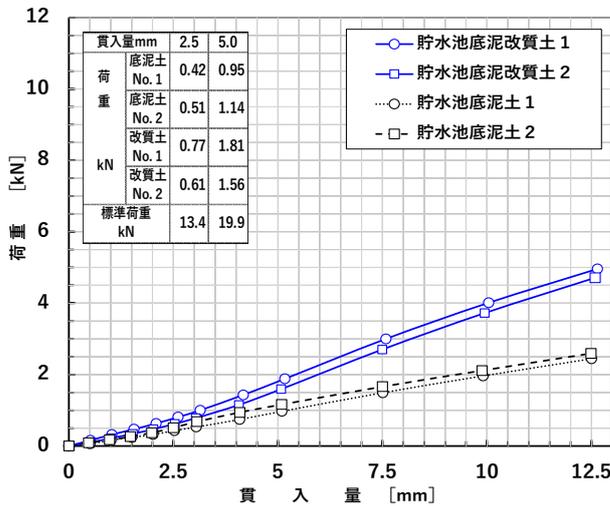
◆改質土の設計 CBR

図-13は土木用改質土の荷重～貫入量曲線を示す、底泥土、改質土とも最適含水比に調整した試料によって供試体を作製しており、改質土の方が含水比が大きく乾燥密度が小さいにもかかわらず、改質土の設計 CBR はため池が底泥土の約 3.1 倍、貯水池が底泥土の約 1.6 倍を示した。



項目	記号・単位	底泥土	改質土
含水比	w [%]	37.7	63.3
乾燥密度	ρ_d [Mg/m^3]	1.250	0.912
設計CBR	CBR [%]	10.5	32.3

(a) ため池底泥土



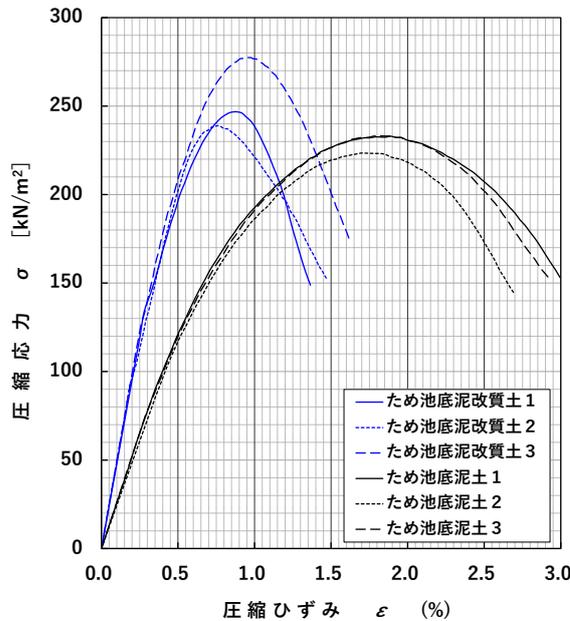
項目	記号・単位	底泥土	改質土
含水比	w [%]	25.0	37.5
乾燥密度	ρ_d [Mg/m^3]	1.537	1.295
設計CBR	CBR [%]	5.3	8.5

(b) 貯水池底泥土

図-13 各底泥土木用改質土の荷重～貫入量曲線

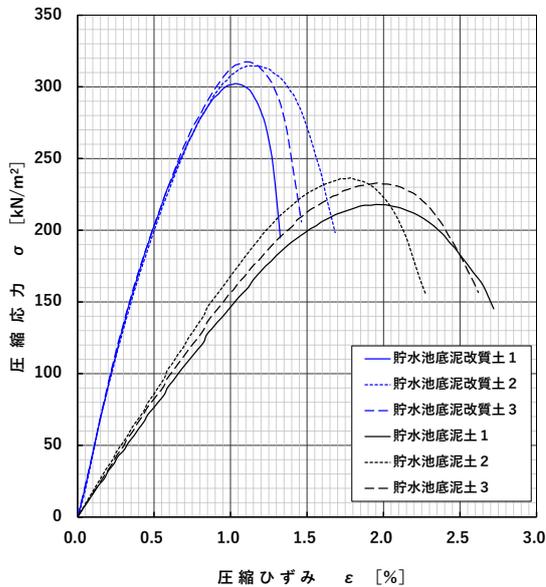
◆改質土の一軸圧縮強さ

図-14は土木用改質土の応力～ひずみ曲線を示す。これも最適含水比に調整した試料によって供試体を作製しており、改質土の方が含水比が大きく乾燥密度が小さいが、改質土の一軸圧縮強さ q_u はため池が底泥土の約1.1倍、貯水池が約1.4倍、変形係数 E_{50} はため池が底泥土の約1.9倍、貯水池が底泥土の約2.7倍になった。



項目	記号・単位	底泥土	改質土
含水比	w [%]	37.5	63.4
乾燥密度	ρ_d [Mg/m ³]	1.193	0.876
一軸圧縮強さ	q_u [kN/m ²]	230	254
変形係数	E_{50} [kN/m ²]	24	46

(a) ため池底泥土



項目	記号・単位	底泥土	改質土
含水比	w [%]	24.9	37.6
乾燥密度	ρ_d [Mg/m ³]	1.471	1.262
一軸圧縮強さ	q_u [kN/m ²]	229	311
変形係数	E_{50} [kN/m ²]	16	43

(b) 貯水池底泥土

図-14 各底泥土木用改質土の応力～ひずみ曲線

◆改質土の環境安全性

表－14は、土木用改質土の重金属等溶出試験結果を示す。ふっ素及び六価クロムの溶出量が土壤環境基準を超過した再生半水石膏及び高炉セメントB種を底泥土に添加したことで、ため池、貯水池とも改質土のふっ素及び六価クロムの溶出量が底泥土と比べて増加したが、いずれも基準値以内であり、高炉セメントB種による重金属等の固定化作用や土壤の吸着作用が機能していると考えられる。

表－14 底泥土木用改質土の重金属等溶出量

平成3年環境庁告示第46号

項目	単位	基準値	ため池底泥土 (原泥)	ため池底泥 改質土 (配合③)	貯水池 底泥土 (原泥)	貯水池底泥 改質土 (配合③)
カドミウム	mg/L	≦0.01	<0.001	<0.001	—	—
		≦0.003	—	—	<0.0003	0.0003
鉛	mg/L	≦0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/L	≦0.05	<0.01	0.02	<0.01	0.03
ひ素	mg/L	≦0.01	0.005	0.007	<0.005	0.008
総水銀	mg/L	≦0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	mg/L	≦0.01	<0.002	<0.002	<0.002	0.002
ふっ素	mg/L	≦0.8	0.25	0.47	<0.05	0.30
ほう素	mg/L	≦1	<0.02	0.04	0.02	0.05

※カドミウムは2021年4月1日より基準値が0.003mg/Lに見直された（ため池の分析は2020年12月に、貯水池の分析は2021年9～10月にそれぞれ実施）。

2) 実証試験

実証試験は、配合試験で得られた知見をもとに、現地において実機を用いて実際にため池底泥土を処理して、システムの実用化に向けた実現可能性（フィジビリティスタディ）の検証と、実機処理土（改質土）の特性確認を目的として実施した。改質目標は配合試験同様第2種処理土（ $q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$ ）とし、判定は材齢7日としたが、現地における処理直後の適否判断目安として、目視によるコンシステンシー確認を実施した。

実証試験は、建設汚泥を地盤材料として再資源化することを目的に開発されたイーキューブシステム（E³システム）¹⁴⁾の処理機を使用して行った。

地盤改良等における現場配合は、室内と現場の条件の違い（室内配合試験用攪拌装置と実機混合性能の違い、改質対象土の土質及び含水比の不均質性、等）を考慮して割増係数¹⁵⁾の概念が導入されるが、今回は割増率を30%と設定¹⁶⁾して改質材の添加量を決定した。表－15に実証試験の配合を示す。

表－１５ 実証試験における底泥土木用改質土の改質材配合

(a) ため池底泥土

(b) 貯水池底泥土

分類	主材	安定剤	助剤
名称	再生 半水石膏	高炉セメント B種	高炉スラグ 微粉末
配合ケース	③		
改質材組成比	%	50	50
配合総添加量	kg/m ³	127	
割増率	%	30	
設計総添加量	kg/m ³	166	
設計添加量	kg/m ³	90	90

分類	主材	安定剤	助剤
名称	再生 半水石膏	高炉セメント B種	高炉スラグ 微粉末
配合ケース	③		
改質材組成比	%	50	50
配合総添加量	kg/m ³	150	
割増率	%	30	
設計総添加量	kg/m ³	195	
設計添加量	kg/m ³	100	100

写真－５はため池底泥土改質の実証試験状況を、写真－６はため池底泥土（原泥）とため池底泥土木用改質土（実機処理土）をそれぞれ示す。



写真－５ ため池底泥土改質実証試験状況



(a) ため池底泥土（原泥）



(b) 実機処理土（ため池底泥土木用改質土）

写真－６ ため池底泥土と実機で処理した土木用改質土

写真－7は貯水池底泥土改質の実証試験状況を、写真－8は貯水池底泥土（原泥）と貯水池底泥土木用改質土（実機処理土）をそれぞれ示す。



写真－7 貯水池底泥土改質実証試験状況



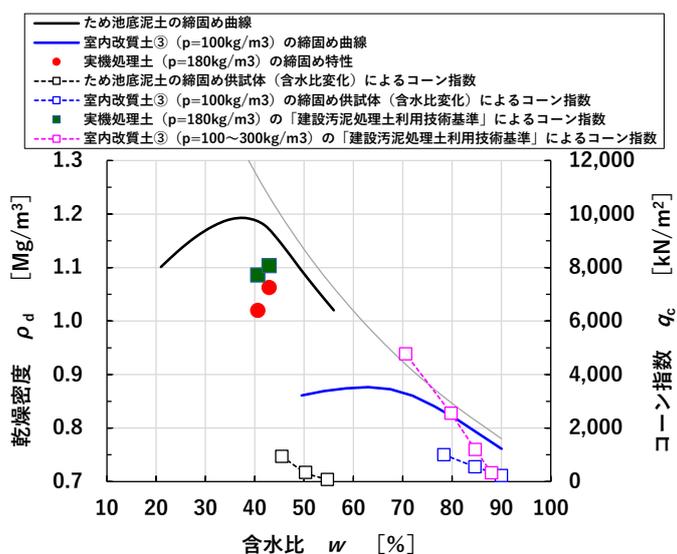
(a) 貯水池底泥土（原泥）



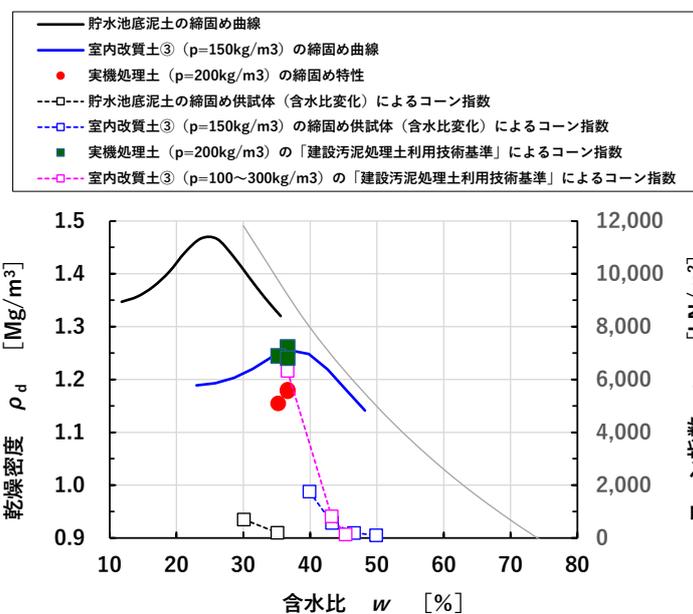
(b) 実機処理土（貯水池底泥土木用改質土）

写真－8 貯水池底泥土と実機で処理した土木用改質土

図-15は、底泥土と室内配合試験及び実機で処理した底泥土木用改質土の締固め特性並びにコーン指数を示す。実機処理土の品質区分は第2種処理土 ($q_c \geq 800 \text{ kN/m}^2$) を目標としたが、実測値は目標の9~10倍の値を示した。これは、室内配合試験時と比べて実証試験時には含水比が低下していたこと、改質材添加量が室内配合試験時より実証試験の方が多かったことによる。



(a) ため池底泥土



(b) 貯水池底泥土

図-15 実機で処理した各底泥土木用改質土のコーン指数

3) 機能監視

実証試験で製造したため池底泥土用改質土を用いて、図-16に示す模擬道路（路体）を築造し、改質土特性の経時変化をモニタリングした。

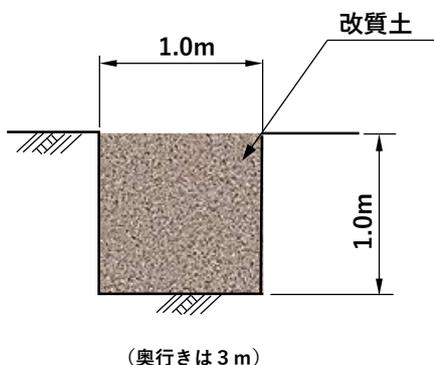


図-16 模擬道路断面図

図-17は、模擬道路における動的コーン貫入抵抗の経時分布を示す。

機能監視期間中降雨もあったが、改質土を用いて築造した模擬道路の動的コーン貫入抵抗は、減少することなくむしろ増加する傾向を示した。

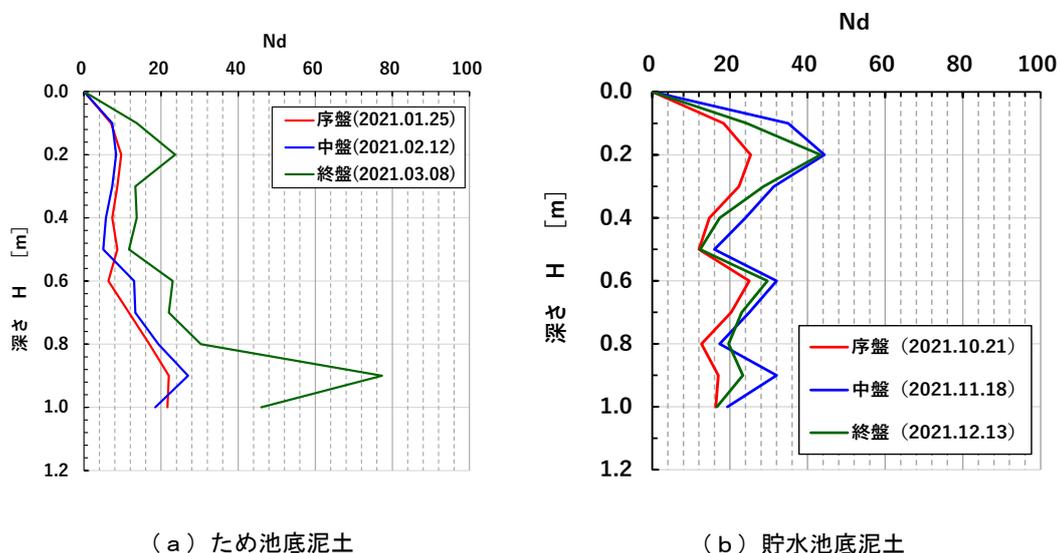


図-17 模擬道路の動的コーン貫入抵抗経時分布図

写真－9は、実機処理土を7日間密封養生したのち、脱気水に浸漬して約1.5か月経過した土木用改質土である。団塊の肌落ちや崩れ、亀裂、軟化、水の濁りといった再泥化現象は見受けられなかった。



(a) ため池底泥土



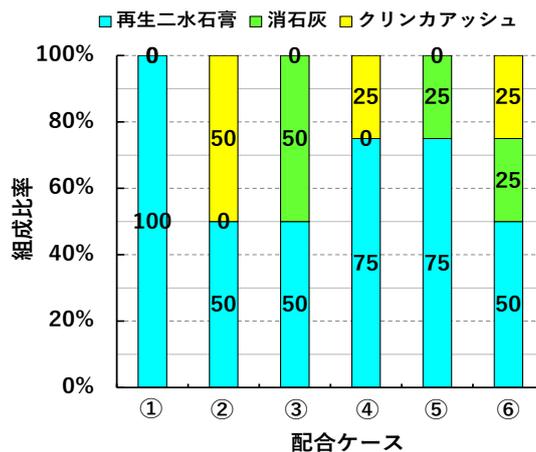
(b) 貯水池底泥土

写真－9 底泥土木用改質土の再泥化試験

(4) 土壌用改質土

1) 配合試験

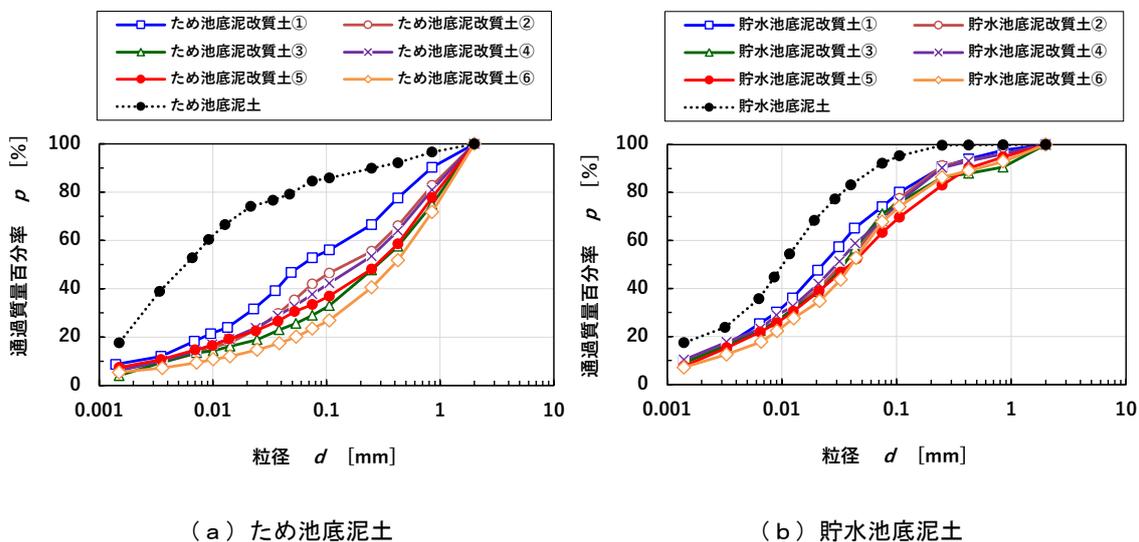
土壌用改質土の配合試験は、図－18に示す組成の改質材を底泥土 1m³ あたり 200kg 添加して実施した。



図－18 土壌用改質材の組成

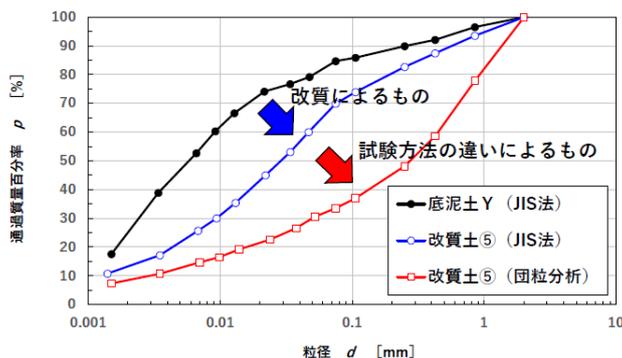
◆改質土の土性（粒度）

図－19は、土壌用改質土の粒度加積曲線を示す。いずれの配合の改質土も底泥土に比べて右下にシフトしており、細粒分が減少して粗粒分が増加（団塊化）したことがわかる。



図－19 各底泥土壌用改質土の粒度加積曲線

なお、底泥土の粒度試験は JIS A 1204（土の粒度試験方法）に基づいて行ったが、改質土の粒度試験は、山田らの方法¹⁷⁾に基づいて実施している。このため、図－20に示すように、改質に伴う粒度加積曲線のシフトは、改質によるものと試験法の違いによるものの複合的なものであることに注意を要する。



図－20 改質及び試験法の違いによる粒度加積曲線のシフト

図-21は土壌用改質土の土性三角図表を示す。ため池底泥土の土性は改質目標範囲外のSiC（シルト質埴土）であったが、改質の結果、配合⑥を除いて改質目標範囲内の土性であるSL（砂壤土）に移行した。また、元々改質目標範囲内だった貯水池底泥土は、いずれの配合の改質土も目標範囲内の土性であるL（埴土）もしくはSL（砂壤土）に移行した。いずれの底泥土も、改質により団粒化（粗粒化）した。

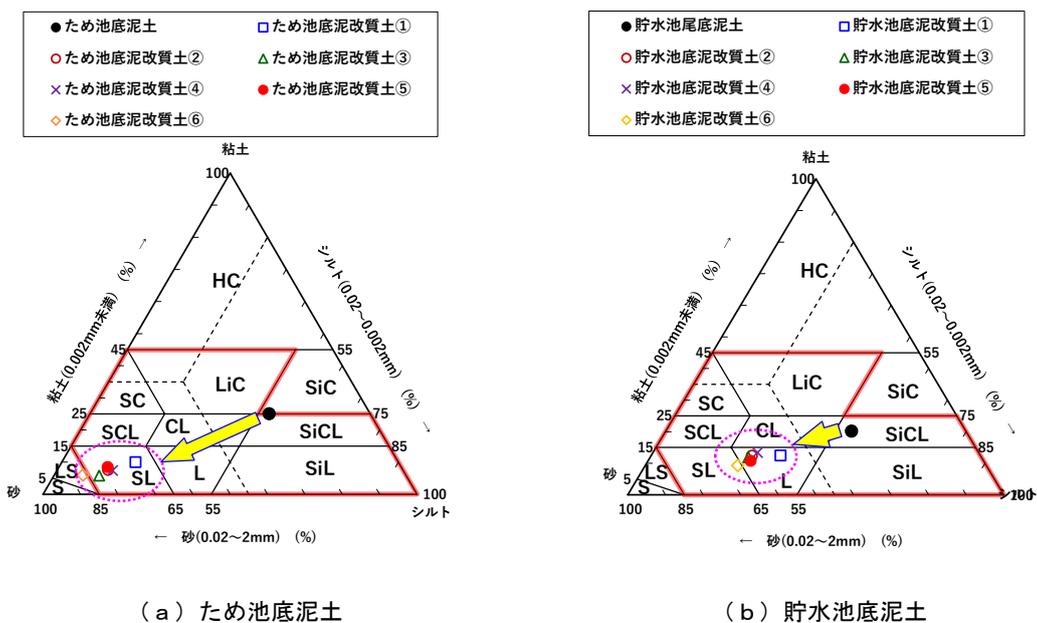


図-21 各底泥土壌用改質土の土性三角図表

◆改質土のコンシステンシー

表－16は土壌用改質土のコンシステンシーを示す。

いずれの配合の改質土も、含水比 w が低下し、コンシステンシー指数 I_c が 1 に近づき、液性指数 I_L がゼロに近づいて、改質により安定状態になったことを示している。

表－16 ため池底泥土壌用改質土のコンシステンシー

(a) ため池底泥土

項目	ため池底泥土	ため池底泥改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA	—	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
ρ_d (Mg/m ³)	0.645	0.637	0.716	0.617	0.651	0.572	0.610
w (%)	111.1	88.9	87.3	84.6	87.3	86.8	85.8
w_L (%)	124.0	125.1	127.9	118.5	122.1	115.3	118.1
w_p (%)	46.4	62.1	59.6	68.7	59.0	62.1	67.9
I_p	77.6	63.0	68.3	49.8	63.1	53.2	50.2
I_c	0.17	0.57	0.59	0.68	0.55	0.54	0.64
I_L	0.83	0.43	0.41	0.32	0.45	0.46	0.36

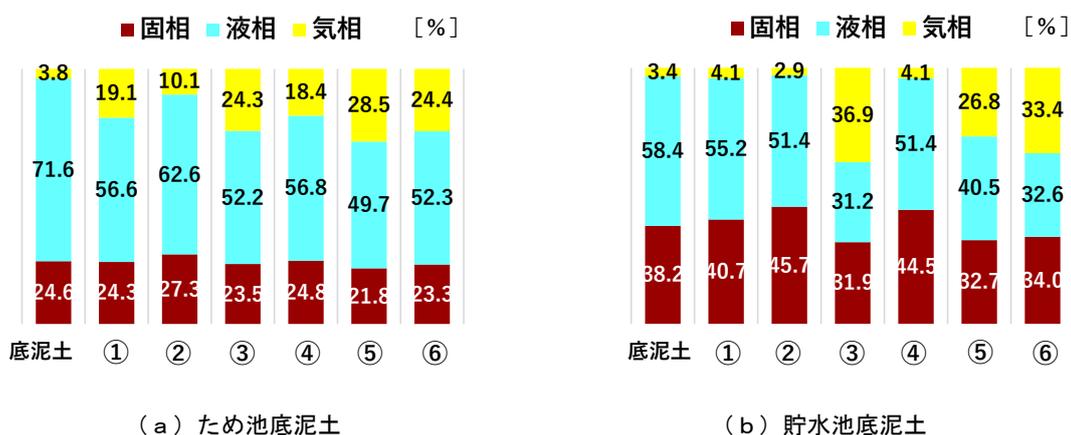
(b) 貯水池底泥土

項目	貯水池底泥土	貯水池底泥改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA	—	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
ρ_d (Mg/m ³)	1.031	1.123	1.237	0.860	1.215	0.892	0.922
w (%)	56.7	49.2	41.5	36.2	42.3	45.4	35.3
w_L (%)	48.8	50.6	49.7	59.4	48.7	62.7	58.8
w_p (%)	34.3	31.8	29.4	42.0	31.1	37.1	35.3
I_p	14.5	18.8	20.3	17.4	17.6	25.6	23.5
I_c	-0.54	0.07	0.40	1.33	0.36	0.68	1.00
I_L	1.54	0.92	0.60	-0.33	0.64	0.32	0.00

◆改質土の三相分布

図－２２は及び表－１７は改質土の三相分布を示す。

一般に、団粒が発達すると土壌の固相率が減少し、乾燥密度が小さくなるといわれる¹⁸⁾。消石灰を添加した配合③、⑤及び⑥は固相率が減少し、乾燥密度が低下するとともに、気相率が20%を超えたことから、改質により団粒化して膨軟な状態になったことを示した。



図－２２ 各底泥土壤用改質土の三相分布

表－１７ 各底泥土壤用改質土の三相分布

(a) ため池底泥土

項目	記号	単位	ため池底泥土	ため池底泥改質土						
				配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥	
含水比	w	mass%	111.1	88.9	87.3	84.6	87.3	86.8	85.8	
湿潤密度	ρ_t	Mg/m ³	1.361	1.203	1.342	1.139	1.219	1.069	1.133	
乾燥密度	ρ_d	Mg/m ³	0.645	0.637	0.716	0.617	0.651	0.572	0.610	
三相分布	固相	V_s	vol%	24.6	24.3	27.3	23.5	24.8	21.8	23.3
	液相	V_l	vol%	71.6	56.6	62.6	52.2	56.8	49.7	52.3
	気相	V_a	vol%	3.8	19.1	10.1	24.3	18.3	28.5	24.4

(b) 貯水池底泥土

項目	記号	単位	貯水池底泥土	貯水池底泥改質土						
				配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥	
含水比	w	mass%	56.7	49.2	41.5	36.2	42.3	45.4	35.3	
湿潤密度	ρ_t	Mg/m ³	1.615	1.675	1.751	1.172	1.729	1.297	1.248	
乾燥密度	ρ_d	Mg/m ³	1.031	1.123	1.237	0.860	1.215	0.829	0.922	
三相分布	固相	V_s	vol%	38.2	40.7	45.7	31.9	44.5	32.7	34.0
	液相	V_l	vol%	58.4	55.2	51.4	31.2	51.4	40.5	32.6
	気相	V_a	vol%	3.4	4.1	2.9	36.9	4.1	26.8	33.4

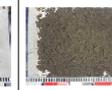
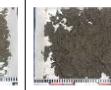
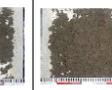
◆配合試験結果

表－１８は、各底泥土壌用改質土の配合試験結果を示す。

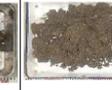
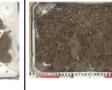
ため池底泥土については配合③及び⑤が、貯水池底泥土については配合③、⑤及び⑥が目標品質を満足したが、本件においては廃石膏ボード由来の再生石膏の活用促進を目的としていることから、石膏使用量が多い配合⑤を土壌用改質土の設計配合とした。

表－１８ 各底泥土壌用改質土の配合試験結果

(a) ため池底泥土

配合ケース		ため池 底泥土	ため池底泥改質土					
			配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA		－	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
判定 結果	土性	×	○	○	○	○	○	×
	コンシステンシー	－	○	○	○	○	○	○
	三相分布	×	×	×	○	×	○	○
	総合判定	×	×	×	◎	×	◎	×
混練直後の改質土								

(b) 貯水池底泥土

配合ケース		貯水池 底泥土	貯水池底泥改質土					
			配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA		－	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
判定 結果	土性	○	○	○	○	○	○	○
	コンシステンシー	－	○	○	○	○	○	○
	三相分布	×	×	×	○	×	○	○
	総合判定	×	×	×	◎	×	◎	◎
混練直後の改質土								

◆改質土の物理特性

土壤用改質土の物理試験結果を表-19に示す。

表-19 各底泥土壤用改質土の物理特性

項 目			試験値			
区分			ため池 底泥土 (原泥)	ため池底泥 改質土 (配合⑤)	貯水池 底泥土 (原泥)	貯水池底泥 改質土 (配合⑤)
改質材組成 B:BB:BFS			—	75:25:0	—	75:25:0
改質材添加量 ρ Kg/m ³			—	200	—	200
一 般	土粒子の密度 ρ_s Mg/m ³		2.620	2.751	2.699	2.729
	自然含水比 w_n %		111.1	86.8	56.7	45.4
粒 度 組 成	砂分 (0.02~2mm) %		27.0	56.8	30.4	61.9
	シルト分 (0.002~0.02mm) %		47.9	29.9	49.4	27.3
	粘土分 (0.002mm未満) %		25.1	13.3	20.2	10.8
	最大粒径 D_{max} mm		2.00	2.00	2.00	2.00
コ ン シ ス テ ン シー 性	液性限界 w_L %		124.0	115.3	48.8	62.7
	塑性限界 w_P %		46.4	62.1	34.3	37.1
	塑性指数 I_p —		77.6	53.2	14.5	25.6
	コンステンシー指数 I_c —		0.17	0.54	-0.54	0.68
	液性指数 I_L —		0.83	0.46	1.54	0.32
水 理	透水係数 k m/sec		2.23×10^{-6}	1.38×10^{-6}	1.15×10^{-7}	1.9×10^{-7}
分 類	土性分類	—	シルト質 埴土	砂埴土	シルト質 埴土	埴土
	分類記号	—	SiC	SL	SiCL	L

◆改質土の化学特性

土壌用改質土の化学試験結果を表-20に示す。

元々水素イオン指数が高くアルカリ性を呈していたため池底泥土、或いはほぼ中性であった貯水池底泥土に pH12.7 の消石灰を添加したことで、改質土の pH は 12.6 ないし 11.8 に上昇した。また、カルシウムを主成分とし、塩基濃度が高い再生二水石膏及び消石灰を添加したことで電気伝導率 EC 及びカルシウムイオン濃度が、イオウを主成分とする再生二水石膏を添加したことで硫化物イオン濃度がそれぞれ上昇した。

表-20 各底泥土壌用改質土の化学特性

項目	単位	試験値				
		ため池底泥土(原泥)	ため池底泥土改質土(配合③)	貯水池底泥土(原泥)	貯水池底泥土改質土(配合③)	
土懸濁液の pH	-	9.1	12.6	6.9	11.8	
土懸濁液の電気伝導率 EC	mS/m	26.8	794	8.5	153	
土の水溶性成分	ナトリウム	mg/g	0.023	0.062	0.009	0.007
	カリウム	mg/g	0.034	0.020	0.020	0.016
	カルシウム	mg/g	0.53	6.8	0.020	6.9
	マグネシウム	mg/g	0.012	0.001	0.006	<0.001
	塩化物イオン	mg/g	0.011	0.026	0.004	0.010
	硫化物イオン	mg/g	0.072	9.2	0.039	11

◆改質土の環境安全性

表-21は、土壌用改質土の重金属等溶出試験結果を示す。ふっ素の溶出量が土壌環境基準を超過した再生二水石膏をそれぞれの底泥土に添加したことで、改質土のふっ素溶出量が底泥土と比べて増加したが、基準値以内であり、消石灰による重金属等の固定化作用や土壌の吸着作用が機能していると考えられる。

表-21 各底泥土壌用改質土の重金属等溶出量

平成3年環境庁告示第46号

項目	単位	基準値	ため池底泥土	ため池底泥土改質土(配合⑤)	貯水池底泥土(原泥)	貯水池底泥土改質土(配合③)
カドミウム	mg/L	≦0.01	<0.001	<0.001	-	-
		≦0.003	-	-	<0.0003	0.0003
鉛	mg/L	≦0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
六価クロム	mg/L	≦0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ひ素	mg/L	≦0.01	0.005	0.01	<0.005	0.005
総水銀	mg/L	≦0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
セレン	mg/L	≦0.01	<0.002	<0.002	<0.002	0.002
ふっ素	mg/L	≦0.8	0.25	<0.08	<0.05	0.18
ほう素	mg/L	≦1	<0.02	<0.02	0.02	<0.02

※カドミウムは2021年4月1日より基準値が0.003mg/Lに見直された(ため池の分析は2020年12月に、貯水池の分析は2021年9~10月にそれぞれ実施)。

2) 実証試験

底泥土を農地土壌（畑作土）に改質する実証試験は、配合試験で得られた知見をもとに、現地において実機を用いて実際に底泥土を処理して、システムの実用化に向けた実現可能性（フィジビリティスタディ）の検証と、実機処理土（改質土）の特性確認を目的として実施した。なお、改質目標は配合試験時と同様に、土性（粒度）、コンシステンシー及び三相分布であるが、現地で判定できる方法として、表-22¹⁹⁾及び表-23²⁰⁾に示す指頭法による土性確認と、目視によるコンシステンシーの確認を実施した。

表-22 指頭法による土性確認（その1）¹⁹⁾

粘土と砂との割合の感じ方	ザラザラとほとんど砂だけの感じ	大部分（70～80%）が砂の感じで、わずかに粘土を感じる	砂と粘土が半々の感じ	大部分は粘土で、一部（20～30%）砂を感じる	ほとんど砂を感じないで、ヌルヌルした粘土の感じが強い
分析による粘土	12.5%以下	12.5～25.0%	25.0～37.5%	37.5～50.0%	50%以上
記号	S	SL	L	CL	C
区分	砂土	砂壤土	壤土	埴壤土	埴土
簡易的な判定法*	棒にもハシにもならない	棒にはできない	鉛筆くらいの太さにできる	マッチ棒くらいの太さにできる	コヨリのように細長くなる
					

表-23 指頭法による土性確認（その2）²⁰⁾

土性	基準
砂土	転がしても粒状のままで固まらない。
砂壤土	多少固まりになるが、転がしても紐状に伸ばすことができない。転がして伸ばすと太紐（>3mm）になるが、さらに細くしようとすると切れてしまう。
壤土	転がして伸ばすと紐（3mm）になるが、さらに伸ばしたり、曲げたりすると切れてしまう。
埴壤土	転がして伸ばすと細い紐（<3mm）になるが、さらに伸ばしたり曲げたりすると切れてしまう。
埴土	転がして伸ばすと細い紐（<3mm）になり、曲げるときれいに輪になる。

実証試験は、土木用改質土同様、建設汚泥を地盤材料として再資源化することを目的に開発されたイーキューブシステム（E³システム）の処理機を使用し、改質材は表-24に示すように、室内配合試験と同じ配合とした。

表－２４ 実証試験における底泥土壌用改質土の改質材配合

分類		主材	安定剤	助剤
名称		再生半二水石膏	消石灰	クリンカアッシュ
配合ケース		⑤		
改質材組成比	%	75	25	0
配合総添加量	kg/m ³	200		
割増率	%	0		
設計総添加量	kg/m ³	200		
設計添加量	kg/m ³	150	50	0

なお、実証試験における処理装置のレイアウトは土木用改質土と同様である。

写真－１０はため池底泥土（原泥）とため池底泥土壌用改質土（実機処理土）の有姿及び指頭法による改質土の土性確認状況を、写真－１１は貯水池底泥土（原泥）と貯水池底泥改質土（実機処理土）の有姿及び指頭法による土性確認状況をそれぞれ示す。



（a）ため池底泥土（原泥）



（b）実機処理土（ため池底泥土壌用改質土）



（c）指頭法によるため池底泥土壌用改質土の土性確認

写真－１０ ため池底泥土と実機で処理した土壌用改質土



(a) 貯水池底泥土（原泥）



(b) 実機処理土（貯水池底泥土壌用改質土）

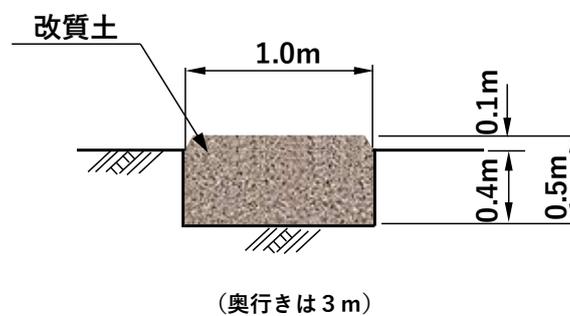


(c) 指頭法による貯水池底泥土壌用改質土の土性確認

写真－11 貯水池底泥土と実機で処理した土壌用改質土

3) 機能監視

図－23は、底泥土壌用改質土特性の経時変化をモニタリングした模擬畑の断面図を示す。



図－23 模擬畑断面図

図-24は、底泥土壌用改質土を用いた模擬畑の土壌硬度経時変化を示す。

ため池底泥土壌の場合、機能監視序盤から中盤にかけて土壌硬度が改良目標範囲²⁾を下回っているが、終盤には目標範囲内に収まっている。なお、いずれの底泥改質土とも時間経過に伴って土壌硬度は漸増しており、中長期的には土壌が締まって土壌硬度が目標範囲を超えることも考えられるが、起耕・耕耘により対処可能と思われる。

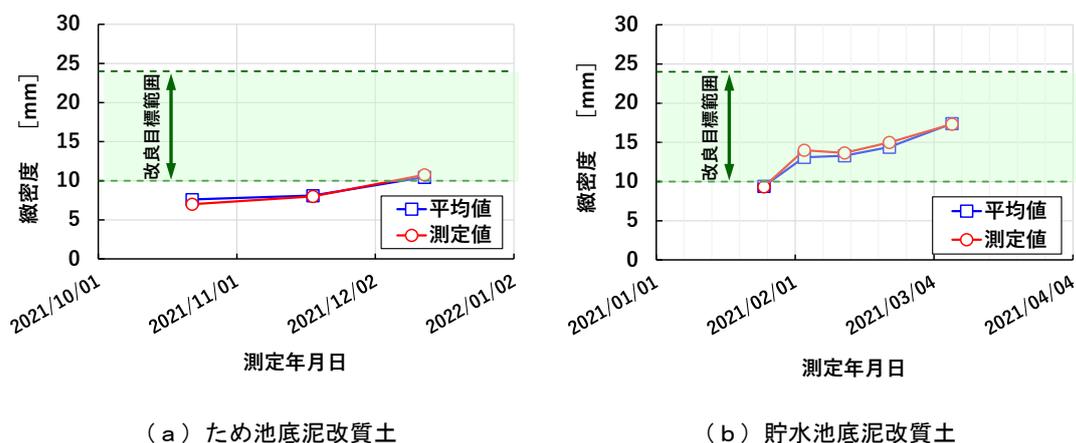


図-24 模擬畑の土壌硬度経時変化

図-25は、ため池底泥土壌用改質土を用いた模擬畑の三相分布経時変化を示す。

全体としては気相が減少し、液相が増加する傾向が見受けられ、経過観察中の降雨が土壌に浸透して保持されたと考えられる。なお、ため池底泥改質土は時間経過に伴い気相が20%を下回っているが、起耕・耕耘により回復可能と思われる。

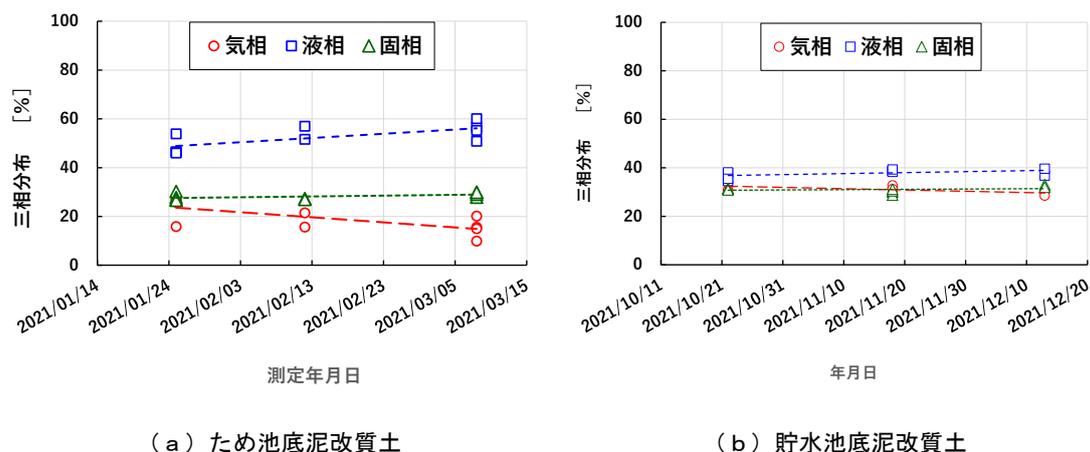


図-25 模擬畑の三相分布経時変化

【参考文献】

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：平成 21 年度 廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務 調査報告書, p.5, 平成 22 年 3 月
- 2) 環境省：廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて (通知), 環廃産発第 060601001 号, 平成 18 年 6 月 1 日, 入手先 <<https://www.env.go.jp/content/900537071.pdf>> (参照 2023.11.20)
- 3) 環境省：廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する報告書 (廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査), p.203, 平成 14 年 12 月
- 4) 国立研究開発法人 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター：再生石膏粉の有効利用ガイドライン (第一版), p.2, 令和元年 5 月
- 5) 久保田徹：化学物質による土壌の物理性改良, 化学と生物, Vol.24, No.11, pp.726-735, 1986
- 6) 中部地方建設副産物対策連絡協議会：建設汚泥利用マニュアル (案), p.5, 平成 17 年 12 月
- 7) 国土交通省 建設汚泥再生利用指針検討委員会：建設汚泥再生利用指針検討委員会報告書, p.3, 平成 18 年 3 月
- 8) 国土交通省都市局公園緑地・景観課：植栽基盤の整備手順 (案), p.18, 平成 24 年 3 月 27 日
- 9) 国土交通省：建設汚泥処理土利用技術基準, 平成 18 年 6 月
- 10) 農林水産省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 計画 土層改良, p.24, 昭和 59 年 1 月
- 11) 青森県「攻めの農林水産業」推進本部：「健康な土づくり」技術マニュアル, p.21, 平成 20 年 12 月
- 12) 伊藤恵輔, 佐藤研一, 押方利郎：再生半水石膏により改良された土質材料の基本特性の検討, 第 45 回地盤工学研究発表会予稿, pp.493-494, 2010 年 8 月
- 13) 重松宏明, 西澤誠, 藪下諒二, 吉村康平, 田中均, 辻要：廃石膏ボード由来の半水石膏を混合した石灰安定処理土の強度発現特性, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.2, pp.272-284, 2013
- 14) (一社) 泥土リサイクル協会：イーキューブシステムとは, 入手先 <<http://deido-recycling.jp/E3system/E3system01.htm>> (参照 2023.11.28)
- 15) 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, pp.110-111, 2012 年 10 月
- 16) 社団法人 日本道路協会：舗装施工便覧 (平成 18 年版), pp.74-76, 平成 18 年 02 月
- 17) 山田宣良, 横瀬広司：団粒分布に基づく団粒の評価法, 農業土木学会誌, 第 59 巻, 第 4 号, pp.378-391, 1991 年 04 月
- 18) 山田宣良：団粒と土壌の理工学性との関係ー土壌の団粒に関する研究 (V) ー, 農業土木学会論文集, 第 130 号, pp.69-74, 1987

- 19) JA 全農 肥料農薬部：土壌診断なるほど！ガイド 読んで，診て，作物イキイキ，平成
20年2月
- 20) 東京都建設局：土木材料仕様書，第6章 造園材料，p.491，令和5年4月
- 21) 前掲 10)，p.24