

ペーパースラッジ灰泥土改質材の開発と実用化

2020 年 3 月

望月美登志

論文要旨

ペーパースラッジ灰泥土改質材の開発と実用化

Development of a paper sludge-based stabilizer for mud and its practical application

望月 美登志

産業廃棄物の最終処分場不足の問題が深刻になっている。特に製紙業界や建設業界は、産業廃棄物の排出量が多い。そこで廃棄物のリサイクル問題をそれぞれの産業内だけで解決しようとせず、相互補完的にゼロエミッション化を実現させようという考えから、両業界に有益となるペーパースラッジ(PS)灰の泥土改質材技術の開発と建設発生土の活用化を目的に研究を進めた。

第1章では、序論として研究の背景と目的、建設発生土とPS灰の現状と課題、製紙業の現状と循環型社会形成に向けた取り組みと課題を整理した。まず、本研究の背景となる課題は、以下のとおりとなる。

- ① 本研究の社会的ニーズ
- ② 先導性・新規性
- ③ 技術的・経済的波及効果

既往研究としては、セメント系固化材を中心に泥土改良材の開発が行われているが、これらは、すべて化学的固化原理に基づく泥土改良で吸水性主体の土質力学的設計に関する研究は行われていない。PS灰活用原理についての研究についても製紙用や構造材用の研究が主体で泥土改質材としての開発は、本研究が初めての試みとなる。製紙工場の廃棄物であるPS灰に着目した吸水性泥土改質材の開発とその改質土による土構造物の活用化を目的とした本研究での具体的な検討事項は、以下のとおりである。

- ① PS灰の物理的吸水性能の客観的評価
- ② 種焼却方法に対応したPS灰改質材の開発
- ③ 吸水機能に着目した配合設計法の提案
- ④ 改質土の力学的改善効果の解明
- ⑤ PS灰の吸着効果を利用した環境浄化性能の解明
- ⑥ コスト縮減・耐久性の検討による実用化

第2章では、PS灰改質材の基本特性と泥土改質への適用性について検討した。

- ① PS灰改質材の基本特性として高吸水性能は、高含水汚泥や建設発生土の効率的な瞬時処理に利用するため、PS灰の吸水性能を簡便かつ客観的に評価できる吸水試験方法を考案した。
- ② そこから得られる吸水比 w_{ab} という性能指標を定義して、焼却炉の異なる各種PS灰の吸水性能の違いやばらつきを評価した。
- ③ 吸水性能にばらつきのあるPS灰を安定した高吸水性能改質材に改善するための処

理方法を対象 PS 灰の条件ごとに確立した。対象となる各種 PS 灰は、各工場で製造している製紙製品の種類や灰の排出条件、処理した品質の管理方法が可能になるよう十分に検討している。

④ PS 灰の吸水配合量を事前に設計できるよう PS 灰の吸水性能と土のコンシステンシー概念をベースにした配合設計手法を提案した。高含水浚渫土を改質させた PS 灰改質土を土構造物に活用する場合、対象構造物に応じた合理的な設計法を確立する必要がある。

第 3 章では、一般の土質材料と同様に PS 灰改質土の締固め特性や拘束圧を加えた三軸試験での力学モデルから設計基準が定められるよう検討を行った。浚渫泥土の固化系改良材では、低品質浚渫泥土の性状を向上させ、土構造物の代替材適用用途を飛躍的に広げる可能性がある反面、一定の養生期間が必要で、品質のバラツキも大きく、改良土を用いる際の基準は、一軸圧縮強さをベースにしているため、対象土の締固め特性や力学的変形特性等土質力学的な検討が測れない欠点がある。本章では、PS 灰改質土の $\overline{\text{CU}}$ 試験を行い、改質土の強度効果を供試体の締固め度 $\text{Dc}95\%$ の供試体で評価している。対象土は、粘性土、シルト、粘土混じり礫質土の 3 区分にした。結果は、

- ① 添加率 η を変化させると粘性土では、強度定数 c' 、 ϕ' とともに増加（改質時の IP の低減の際に強度改善効果が発揮）
- ② シルトでは、NP 状態で添加率 η が 20 % で c' が上昇
- ③ 粘土混じり礫質土では、 ϕ' が改善
（試料中の粘土分 IP の低減で改善効果が発揮）

土構造物には不適な高塑性浚渫泥土でも PS 灰による改質を行うことで改質土の塑性状態が低塑性へと変化し、瞬時に c' ならびに ϕ' の改善効果が認められた。締固めについても幅広い含水比範囲で所定の締固め度 Dc を確保できることが判明した。

第 4 章では、泥土改質材として使用している PS 灰が粒子内に存在する無数の微細孔によって環境浄化機能も発揮することを調べている。PS 灰粒子の構造的特徴は、比表面積や細孔容積といった指標であらわされ、吸水性能のみならず、有害物等の吸着や溶出抑制効果も期待できることがわかった。本章では環境浄化性能のうち、

- ① 吸着性能
- ② 栄養塩（N、P）等の吸着機能、
- ③ 消臭機能について検討を行った。

吸着性能に関しては、いくつかの有害物質や栄養塩に対して吸着性能があることが判明した。栄養塩については、PS 灰改良材を用いて富栄養湖の浚渫土を改質し、TN や TP の溶出速度を低減できることが確認できた。また、琵琶湖の TN の溶出速度も低減できる結果が得られた。消臭機能については、室内臭気試験から有機物の腐敗成分を多く含有する漁港や排水機場の底泥臭気は、底泥自体の硫化水素臭と高アルカリ改良材で改良した際のアンモニア臭によるもので、各臭気濃度は、pH と強い相関性があり、PS 灰改質泥土の最大消臭効果となる最適 pH 範囲は、弱アルカリ範囲内の改質材添加量にすること、力学的改質理由から必要添加量が増えるような高含水泥土改質の消臭対策では、硫酸第一鉄の添加が有効となる場合も明らかになった。最終的に現地での確認臭気試験結果も考慮しながら施工上の対応策として養生期間の設置による PS 灰改質材の添加量削減を検討することで効率的な PS 灰改質土の臭気抑制型適用実績が得られた。

第 5 章では、PS 灰改質工法の施工実績を 4 件紹介している。

- ① 2 章における配合設計手法と建設発生土利用技術マニュアルによる管理方法で実施したシールド排泥改質工事、
- ② 2 章の配合方法に養生効果による添加量削減手法と 3 章の力学特性を活用した荒川下流管内土壌改良工事（河川浚渫土改質土の築堤強度検討）、
- ③ 4 章の消臭効果と同じく添加量削減手法を活用した住宅地エリアの排水機場汚泥臭気対策と改質土築堤構築防災対策工事、
- ④ 富栄養化した諏訪湖浚渫土を PS 灰改質することで浚渫土の栄養塩溶出速度を低減させ、湖内に周景湖岸造成盛土を構築させた後に水中での土構造物長期耐久性まで確認した工事

の実績をまとめている。

第 6 章では、1～5 章での概要を整理した後、本論文の結論を整理した。

- ① 製紙業における PS 灰を活用させて高吸水性改質材を開発、高含水比建設発生土を瞬時に改質して土構造物に適用、産業間をまたがるゼロエミッション化を実現、有効利用率の増加に寄与した。
- ② PS 灰を基材とした高吸水性改質材を開発した。これは、化学的原理の固化材とは異なる物理的吸水原理に基づく改質材料である。
- ③ 各種製紙工場の焼却条件に見合った PS 灰処理方法を確立させ、品質的に安定した PS 灰吸水材を製造、実用化した。
- ④ PS 灰の吸水性能を評価する指標として吸水比 w_{ab} を提案し、本技術独自の試験方法を確立した。
- ⑤ 吸水比 w_{ab} と対象泥土の余剰水（液性限界 w_L 以上の水分）、塑性指数 IP といった土のコンシステンシー概念をベースに PS 灰改質材独自の配合設計手法を確立した。

第4種建設発生土基準(コーン指数 $q_c=200$ kPa)を満たすのに必要な添加率 η の推定式

$$\eta = a \{(w - w_L) + 37.8 \log I_p - 33.5\}$$

*a が吸水比 w_{ab} より求める傾き

- ⑥ PS 灰改質土の土構造物への活用を図るため、一般の土質材料同様 CU 試験を実施して有効応力での強度定数 (c' , ϕ') の改善効果を確認した。PS 灰改質土の強度改善効果は、供試体の締固め度 $Dc95\%$ の供試体で評価し、対象土は、粘性土、シルト、粘土混じり礫質土の 3 区分に対して以下のとおりの改善効果が確認された。
 - ・添加率 η を変化させると粘性土では、強度定数 c' , ϕ' とともに増加
 - ・シルトでは、NP 状態で 添加率 η が 20 % で c' が上昇
 - ・粘土混じり礫質土では、 ϕ' が上昇
- ⑦ PS 灰の吸水原理は、粒子内の微細孔構造にあるが、構造上の特徴より環境浄化機能も有する事がわかった。
- ⑧ PS 灰改質材には、栄養塩や重金属の吸着性能がある（ヒ素以外）。
- ⑨ PS 灰改質材には、TN、TP の溶出量や速度を低減できる。
- ⑩ 有機物の腐敗成分を多く含有する臭気底溶出泥の硫化水素濃度とアンモニア濃度は、pH と強い相関性があり、PS 灰改質土では、弱アルカリが消臭抑制効果の最適領域である。そのため弱アルカリ改質傾向の PS 灰改質材は、消臭機能に優れている。

- ⑪ 瞬時吸水効果が特徴の PS 灰だが、試験施工等の結果から 4～7 日程度の気中養生期間を設けた場合、必要添加率 0.6 η 程度の養生効果發揮できるため、適用事例において添加量削減手法として設計に組み込んで経済性の検討に活用した。
- ⑫ PS 灰改質材の適用事例では、PS 灰改質土による堤防の安定性検討と長期耐久性、湖内水中傾斜護岸の強度耐久性を実施した。
- ⑬ PS 灰改質材の適用実用例は、以下の 4 件である。
- ・ 泥土圧シールド工事排泥処理への適用
 - ・ 河川浚渫土砂の改質と堤防材への適用
 - ・ 湖沼浚渫土の栄養塩溶出低減と湖内護岸適用
(栄養塩溶出低減による環境浄化と湖内構造物の構築)
 - ・ 排水機場浚渫汚泥の消臭と改質土高潮堤への適用 (消臭及び堤防構築)

目次

第1章 序論	1
1.1 背景と目的	1
1.2 建設発生土の現状と課題	4
1.2.1 建設発生土（浚渫土）の有効利用の現状と発生土受け入れ基準	4
1.2.2 災害にかかわる発生土の活用（土砂災害による宅地やため池堤防への被害対策）	14
1.2.3 建設発生土の有効利用に関するまとめ	15
1.2.4 建設発生土の改良と有効利用に関する既往の研究	16
1.3 製紙業の産業廃棄物（ペーパースラッジ(PS)）の現状と課題	18
1.3.1 製紙業の現状	18
1.3.2 PS について	20
1.3.3 PS の発生状況と有効利用の現状 PS について	23
1.3.4 製紙業の循環型社会形成に向けた取り組みと課題	26
1.3.5 土木分野への有効利用と課題	29
1.3.6 ペーパースラッジ(PS)灰に関する既往の研究	30
参考文献	32
第2章 PS 灰改質材の基本特性と泥土改質への適用性	35
2.1 はじめに	35
2.2 PS 灰の各種焼成方法と基本物性	36
2.2.1 PS 灰の物性	36
2.2.2 サイクロン炉による焼却	38
2.2.3 ストーカー炉による焼却	39
2.2.4 流動床炉による焼却	40
2.3 PS 灰の吸水試験方法と各焼成方法による PS 灰の吸水性能	41
2.3.1 PS 灰吸水性能による脱水効果の考え方	41
2.3.2 PS 灰吸水性能指標としての吸水比 w_{ab} の提案	43
2.3.3 PS 灰に対する吸水比 w_{ab} の客観的評価について	44
2.4 各種 PS 灰の吸水品質の改善	45
2.4.1 PS 灰吸水性能による脱水効果の考え方	45
2.4.2 PS 灰吸水性能指標としての吸水比 w_{ab} の提案	47
2.4.3 PS 灰に対する吸水比 w_{ab} の客観的評価について	48
2.5 泥土の改質効果と配合設計の検討	49
2.5.1 試験方法と試料	49
2.5.2 泥土の改質効果と配合設計への検討	50
2.6 PS 灰改質材の配合設計における破碎の影響	54
2.7 PS 灰改質材の吸水性泥土改質性能に関するまとめ	57

参考文献	58
第3章 PS 灰改質材による土の強度改善効果の検討	60
3.1 はじめに	60
3.1.1 各種 PS 灰改質泥土の強度改善について	60
3.1.2 各種対象泥土の物性	60
3.1.3 改質土の強度特性	61
3.1.4 改質土の締固め特性	65
3.2 PS 灰改質粘性土の強度特性と改質効果について	68
3.2.1 各種 PS 灰改質泥土の強度改善について	69
3.2.2 PS 灰および PS 灰改質土の締固め特性締固め試験結果	71
3.2.3 PS 灰改質粘性土の強度試験方法締固め試験結果	72
3.2.4 PS 灰改質土（粘土）の強度特性	73
3.3 対象土の性状と PS 灰による強度改善効果	79
3.3.1 PS 灰改質土（シルト）の基本物性	80
3.3.2 PS 灰改質土（シルト）の締固め特性	82
3.3.3 PS 灰改質土（シルト）の強度特性について	84
3.3.4 PS 灰改質土（礫質土）の基本物性	87
3.3.5 PS 灰改質土（礫質土）の締固め特性	89
3.3.6 PS 灰改質土（礫質土）の強度特性について	90
3.4 PS 灰改質材による土の強度改善効果のまとめと設計方法	95
参考文献	97
第4章 PS 灰による環境浄化性能について	98
4.1 はじめに	98
4.2 改質材の吸着性能	98
4.2.1 試験方法	98
4.2.2 吸着試験結果	99
4.3 栄養塩の溶出抑制機能	100
4.3.1 富栄養化した浚渫土の周景湖岸造成盛土への有効利用	100
4.3.2 湖沼底泥のヨシ植生基盤への有効利用	106
4.3.3 まとめ	110
4.4 消臭機能	111
4.4.1 浚渫泥土の悪臭と調査方法について	111
4.4.2 試験方法	111
4.4.3 泥土における臭気のメカニズム	115
4.4.4 室内試験における臭気分析	117
4.4.5 現場試験結における消臭効果確認消臭効果	123
4.4.6 まとめ	125
4.5 その他の機能と今後の展開	126

参考文献	134
第 5 章 PS 灰改質の施工性と施工実績	135
5.1 はじめに	135
5.1.1 設計施工までの概要	135
5.1.2 PS 灰改質材の吸水性メカニズム	136
5.2 PS 灰泥土改良材の施工性と試験施工	136
5.2.1 施工性の検討	136
5.2.2 試験施工の実施	136
5.3 PS 灰泥土改質材の施工実績	146
5.3.1 東京メトロ 13 号線の大口径泥土圧シールド工事における大量排泥の 処理	146
5.3.2 荒川下流管内土壌改質工事（河川浚渫土改質土の築堤強度検討）	148
5.3.3 諏訪湖の傾斜型周景護岸（渚湖岸）活用と追跡調査まとめ	157
5.3.4 消臭対策の施工実績	159
5.3.5 崩落場所での対策	163
参考文献	164
第 6 章 まとめ	165
6.1 まとめ	165
6.2 今後の課題と展望	166
謝辞	168

第 1 章 序論

1.1 背景と目的

近年，産業廃棄物の最終処分場不足の問題が深刻になっているが，特に製紙業界や建設業界は，産業廃棄物の排出量が多い．そこで廃棄物のリサイクル問題をそれぞれの産業内だけで解決しようとせず，相互補完的にゼロエミッション化を実現させようという考えから，両業界に有益となるリサイクル技術の開発に着手した(図 1.1-1)．建設業においては，「建設工事にかかる資材の再資源化等に関する法律」が施行され積極的な再生利用が図られることとなったが，含水比が極めて高い浚渫泥土のリサイクルはほとんど進んでいない．

一方，製紙産業から排出される PS（ペーパー・スラッジ）灰についても，大半がセメント原材料か産業廃棄物として処分されているのが実情であり，減少傾向にあるセメント生産量や処分場の確保が困難な昨今の状況から，他産業に対しての有効利用の転換が必要な状況にある．そこで製紙業界においてその処分の問題が深刻化しつつある PS 灰を適切に処理することで，従来のセメント系固化材料とは異なる新たな泥土改良材の製品化技術を開発した．これまで最も一般的な改良材であるセメント系あるいは石灰系の固化材は，年間 500 万 t 以上も消費されている．しかし土壤汚染問題（セメントからの六価クロムなどの溶出）や強アルカリによる生態系への悪影響など環境問題が懸念され，改良コストが上昇している．一方，提案する PS 灰を基材としたリサイクル改良材は，環境に優しく水辺環境の浄化機能や生態系の活性化機能も有している．したがって本研究では，単にリサイクルを実施するだけでなく，有効活用を推進することで周辺環境の負荷を低減させ，豊かな街づくりに寄与していくことが重要な目的となっている．さらに現在開発している PS 灰を基材としたリサイクル泥土改良材は，吸水性能主体の改良であるため，吸水限界以上の余剰水分がある高含水比泥土に適用する場合，添加量が多くなり経済的でなくなるという欠点を有していることから，本研究では対象となる泥土の含水比が 200%を超えるような高含水浚渫泥土に対しても効率よく適用し，改良した浚渫泥土を護岸や堤防法面，築堤材に有効利用できるようにすることを目的としている．具体的には，PS 灰を基材としたリサイクル改良材による泥土改良に適切な脱水技術を組み合わせることで含水比が 200%を超える浚渫泥土にまで適用を可能にするものである．

本章では，序論として研究の背景と目的，建設発生土と PS 灰の現状と課題，製紙業の現状と循環型社会形成に向けた取り組みと課題について検討した．まず，本研究の背景となる社会的ニーズ，先導性・新規性，技術的・経済的波及効果は，以下のとおりである．

(1) 本研究の社会的ニーズ

① 産業廃棄物の削減・再利用の推進を図り循環型社会システムを構築することは，持続的発展を実現するためにも社会産業全体の喫緊の課題である．一産業内では，完結するのが困難なゼロエミッション化を産業間をまたがり相互補完的に実現しようとする本研究テーマの社会的ニーズは，極めて高い．

② 一般的な改良材であるセメント系あるいは石灰系の固化材は，六価クロムによる土壤汚染問題や強アルカリによる生態系への悪影響など環境問題の早急な解決が望まれている．PS 灰を基材としたリサイクル泥土改質材は，水辺環境の浄化機能や生態系の活性化

機能も有することから、河川湖沼浚渫底泥、ダム底泥、海洋底泥等の環境浄化改質ならびに改質土の周辺土構造物への活用といった社会的環境浄化ニーズが見込まれる。

(2) 先導性・新規性

① 高含水比(200%以上)浚渫泥土の瞬時改質と改質土の有効活用まで考慮に入れた有効な改良工法は、これまで開発されていない。特に、有機分を含む場合には、セメント系あるいは石灰系の固化材では改良効果が期待できない。超高含水比で有機分を含む浚渫泥土を混合直後瞬時に改質する本技術は、先導性・新規性のある技術開発といえる。

② 化学的な固化原理に基づく改良材は、環境負荷が大きいのに対し、提案する PS 灰改質工法は、吸水原理に基づく物理的吸水改質のため、環境負荷が極めて小さい。これは、PS 灰粒子内に存在する無数の微細孔空隙によるもので、主たる土壤吸水性機能以外に汚泥臭気分の吸着消臭効果、水質汚濁分の吸着浄化機能、湖沼栄養塩であるリンや窒素の抑制、重金属等の土壤内有害物質の吸着不溶化等多岐にわたる環境改善機能を有しており、既存の固化型改良技術には、例のない先導性・新規性に優れた改質技術と考える。

③ 従来の化学的な固化原理に基づく改良工法では、改良土を土構造物へ活用する場合、土質力学的観点から考慮した設計手法が確立されていない。PS 灰には、吸水機能だけでなく、 c 、 ϕ といった力学的改善効果も見込めることから改質土の新たな設計方法を確立するという新規先導性に優れている。

(3) 技術的・経済的波及効果

現在年間 2000 万 m^3 の港湾浚渫泥土が発生していながら 20%程度の自然再生利用率にとどまっている。また、日本国内の農業ため池は、全国に約 17 万箇所存在している。その多くは、江戸時代以前に築造されたもので、近年の集中豪雨や大地震が増加する傾向の中、安価で効率的なため池の改善と修復が強く望まれている。PS 灰改質技術は、港湾浚渫土対策や農業ため池への修繕利用だけでなく、河川堤防や災害時の地滑りに苦しむ急傾斜地の緊急復旧対策まで考えるとその経済の活性化、波及効果は非常に大きいものと考えられる。本開発技術には、PS 灰の無害化処理および品質管理技術が根幹にあり、関連技術として有害物質の不溶化技術や他産業廃棄物の製品化への転用、多岐にわたる環境技術開発と技術的波及効果も経済効果同様極めて大きい。

本研究では、製紙工場の廃棄物であるペーパースラッジ灰に着目した泥土改質材を開発し、その実用化を図ることを目的とする。具体的には、以下のことを検討する。

- ① PS 灰の物理的吸水性能の客観的評価
- ② 種焼却方法に対応した PS 灰改質材の開発
- ③ 吸水機能に着目した配合設計法の提案
- ④ 改質土の力学的改善効果の解明
- ⑤ PS 灰の吸着効果を利用した環境浄化性能の解明
- ⑥ コスト縮減・耐久性の検討による実用化

論文内における各章の位置づけとフローを図 1.1-2 に示した。

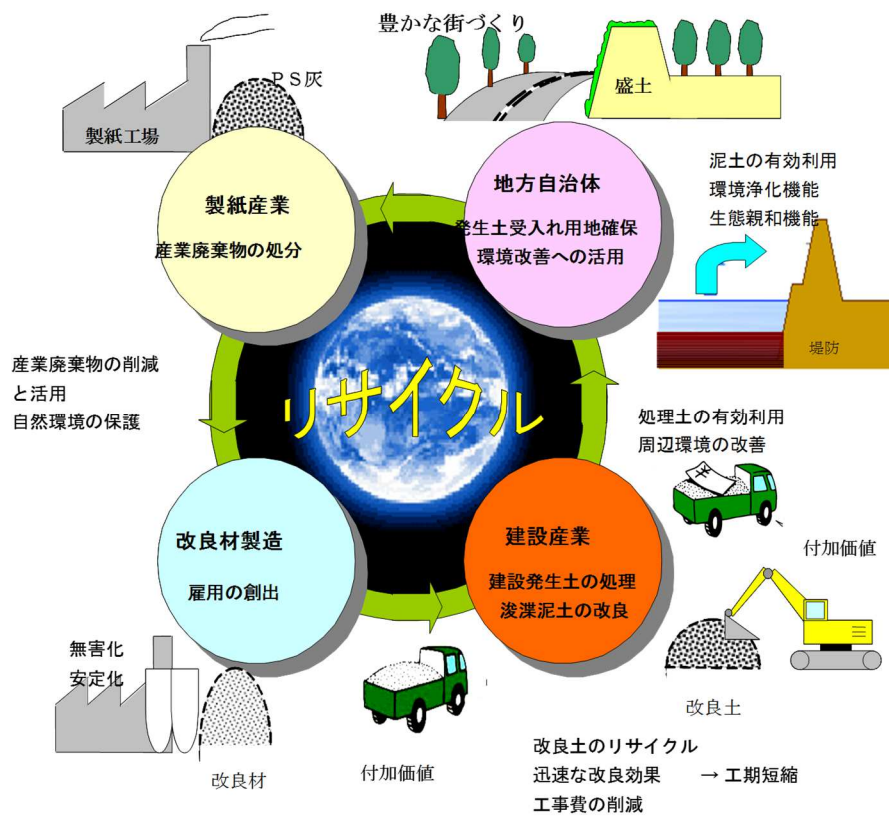


図 1.1-1 PS 灰と泥土のリサイクル

論文の構成



図 1.1-2 各章の構成フロー

1.2 建設発生土の現状と課題

1.2.1 建設発生土（浚渫土）の有効利用の現状と発生土受け入れ基準

21 世紀に入り、「リサイクル」や「環境」というキーワードがますます重要な課題としてクローズアップされている。

建設産業においても、建設リサイクルを推進する各種の施策が講じられている。循環型社会の形成を目指す建設リサイクルに関連する各種の法律（「建設リサイクル法」「グリーン購入法」「資源有効利用促進法」など）が公布され、これらの法律の趣旨を踏まえた新たな施策も打ち出されている。国土交通省は、平成 20 年度に「建設リサイクル推進計画 2008」¹⁾を策定し、建設工事で発生する土砂（建設発生土）の有効利用を推進、平成 26 年には、「建設リサイクル推進計画 2014」²⁾へと策定改善された。

一方、土壤環境関連の施策も矢継ぎ早に打ち出されている。平成 15 年 2 月には「土壤汚染対策法（土対法）」が施行された。この法律では、土壤汚染が与える人体への影響を最小限に抑えるために適切な処置を施すことが定められている。土対法の施行と呼応するように、建設工事において汚染土壤に遭遇した場合に適切な対応をとるため、独立行政法人土木研究所により「建設工事で遭遇する地盤汚染の対応マニュアル（暫定版）」³⁾がまとめられ、現在、改訂版まで書籍として出版されている。さらに、土対法の改正の動きは、活発化しており、第 171 回国会において、「土壤汚染対策法の一部を改正する法律」（以下「改正法」）が成立、改正法附則第 15 条に「政府は、この法律の施行後 5 年を経過した場合において、新法の施行の状況について検討を加え、その結果に基づいて必要な措置を講ずるものとする。」とした。上記のように建設発生土の有効利用は、ますます促進される機運が高まる一方で、有害物質拡散防止というクリアすべきハードルも一層高くなることが予想される。こうした現況を踏まえ、ここでは建設発生土のうち有効利用が遅れている「浚渫された泥土」の現状と課題に言及する。

(1) 発生土の定義と利用基準

「建設発生土」、「発生土」、あるいは「建設汚泥」、「泥土」「浚渫土」など、土に関する各種の名称がさまざまに使われている。一部で用語の使用に混乱もみられるため、ここではまず用語の定義を確認しておく。

「発生土」：建設工事に伴い副次的に発生する土砂や汚泥

「建設発生土」：発生土のうち、建設汚泥以外のもの（建設発生土は廃棄物ではない）

「建設汚泥」：建設工事から生じる泥状の掘削物および汚水のうち、廃棄物処理法に規定する産業廃棄物として取り扱われるもの

「泥土」：発生土のうち、コーン指数が 200kN/m² 未満の土

これらの関係を図示すると図 1.2.1-1 のようになる。同図のように建設発生土と建設汚泥とを合わせて発生土という。なお、建設汚泥に該当しない泥土として、①港湾、河川等の浚渫に伴って生ずる土砂、②泥水などを使用しない地山掘削から発生した泥土、③泥水をそのまま再使用（または再利用）したり、流動化処理土の調整泥水として売却するものなどがある。本調査研究の対象とする浚渫泥土は、廃棄物処理法の対象となる廃棄物ではない。このように浚渫土や地山の掘削泥土はもともと資源であり、そうした資源の有効活用を推進しようとする方針を国土交通省はとっている。

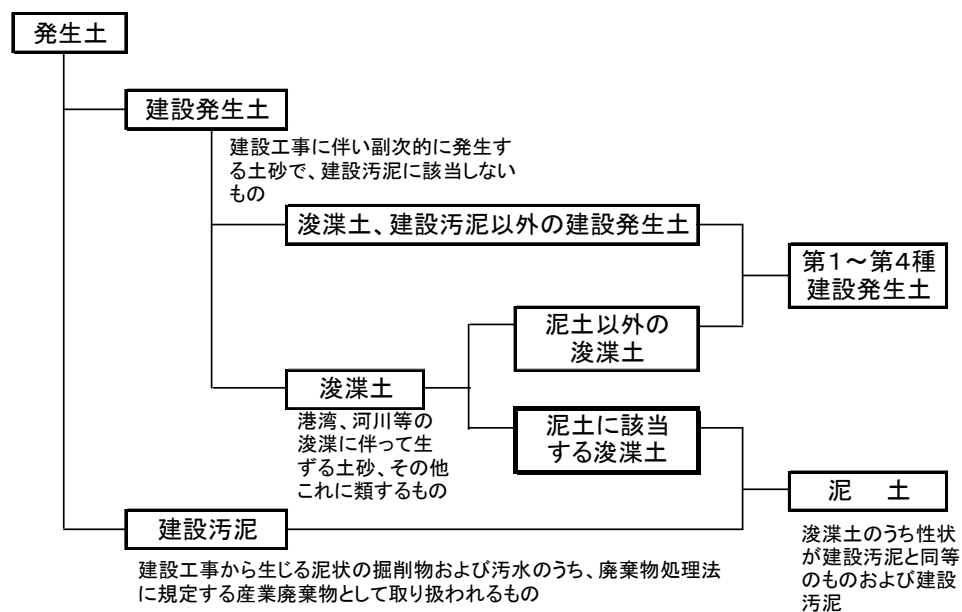


図 1.2.1-1 発生土の構成と各種の名称

出典：「土砂等リサイクル活用技術に関する調査研究報告書⁴⁾

(特定非営利活動法人リサイクルソリューション)」より一部加筆修正

表 1.2.1-1, 表 1.2.1-2 に国土交通省の通達に示された「発生土利用基準」を示す⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

本調査研究の対象となる泥土は、コーン指数が 200kN/m² 未満の浚渫土であり、適用用途基準をみてもそのままでは使用できず、適切な土質改良を行う必要がある。泥土の利用用途の制限が、浚渫泥土の有効利用を阻む一因となっている。

表 1.2.1-1 発生土の土質区分基準

区分	土質区分	コーン 指数 kN/m2	土質材料の工学的分類体系
			大分類
第1種 建設 発生土	第1種	—	礫質土
	第1種改良土		砂質土 人工材料
第2種 建設 発生土	第2a種	800 以上	礫質土
	第2b種		砂質土
	第2種改良土		人工材料
第3種 建設 発生土	第3a種	400 以上	砂質土
	第3b種		粘性土、火山灰質粘性土
	第3種改良土		人工材料
第4種 建設 発生土	第4a種	200 以上	砂質土
	第4b種		粘性土、火山灰質粘性土、有機質土
	第4種改良土		人工材料
泥土	泥土a	200 未満	砂質土
	泥土b		粘性土、火山灰質粘性土、有機質土
	泥土c		高有機質土

出典：「発生土利用基準について（国土交通省通達）」より抜粋

表 1.2.1-2 適用用途標準

区分	土質区分	工作物の 埋戻し 土木構造物 の裏込め	道路用盛土		河川築堤		土地造成		鉄道 盛土	空港 盛土	水面 埋立
			路床	路体	高規格 堤防	一般 堤防	宅地 造成	公園・緑 地造成			
第1種 建設 発生土	第1種	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎
	第1種改良土										
第2種 建設 発生土	第2a種	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	第2b種										
	第2種改良土										
第3種 建設 発生土	第3a種	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎
	第3b種										
	第3種改良土										
第4種 建設 発生土	第4a種	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎
	第4b種	△	△						△		
	第4種改良土	△	△						△		
泥土	泥土a	△	△	○	○	○	○	○	△	○	○
	泥土b	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○
	泥土c	×	×	△	×	×	×	△	×	×	△

◎：そのまま使用が可能なもの。

○：適切な土質改良(含水比低下、粒度調整、機能付加・補強、安定処理等)を行えば使用可能なもの。

△：評価が○のものと比較して、土質改良にコスト及び時間が必要なもの。

×：良質土との混合などを行わない限り土質改良を行っても使用が不適なもの。

出典：「発生土利用基準について（国土交通省通達）」より抜粋

(2) 建設リサイクル推進計画 2014

国土交通省の建設リサイクルの推進に向けた基本的考え方、目標、具体的施策を内容とする最新の計画が「建設リサイクル推進計画 2008」にまとめられている。同推進計画は、「建設リサイクル推進計画 2002（平成 14 年）」と「建設発生土等の有効利用に関する行動計画（平成 15 年）」を統合したものであり、計画の基本的考え方として、「①関係者の意識の向上と連携強化」、「②持続可能な社会を実現するための他の環境政策との統合的展開」、「③民間主体の創造的取り組みを軸とした建設リサイクル市場の育成と技術開発の推進」の 3 つを柱に据え、それに基づき様々な角度から各種施策展開を図った結果、平成 24 年度の建設廃棄物の再資源化・縮減率は 96%と着実に向上した。

しかし、建設副産物のリサイクルが着実に成果を挙げている一方で、3R の第一に掲げられる発生抑制については、平成 24 年度の建設廃棄物の排出量が平成 20 年度より 13.9%増加しており、その取り組みは十分とは言い難い。また、不法投棄に関しては、環境省が公表している「産業廃棄物の不法投棄等の状況」によると、全体としてかなり減少してきており、適正処理の徹底が図られてきているものと評価できるが、不法投棄量・不適正処理量の約 75%（平成 24 年度）を建設系廃棄物が占めていることから、引き続き適正処理の推進が求められる。さらに、今後、2020 年の東京オリンピック・パラリンピック関連工事等の本格化や社会資本の維持管理・更新時代の到来により、建設副産物の発生量の増加が想定されることから、発生抑制、再資源化・縮減、再生資材の利用促進及び建設発生土の有効利用等を更に図っていく必要がある。

以上のような状況を鑑みて、今後、中期的に取り組むべき建設副産物のリサイクルや適正処理等を推進することを目的として、国土交通省における建設リサイクルの推進に向けた基本的考え方、目標、具体的施策を内容とする「建設リサイクル推進計画 2014」が策定された。計画期間は平成 26～30 年度としている。そのなかで現場内完結利用を含む建設発生土の有効利用率の目標値が表 1.2.1-3 のように設定されている。

同表の平成 17 年度の実績値については、国土交通省が実施した建設副産物実態調査⁷⁾にまとめられており（図 1.2.1-2）、建設発生土の建設工事における有効利用率の実績値は、建設リサイクル推進計画 2014 では、平成 17 年度 57.5%、平成 20 年度 53.6%、平成 24 年度 68.5%で建設リサイクル推進計画 2008 年に発表した平成 17 年度 80.1%とは、大きくかけ離れていたことを発表、新たに内陸受入地分の約 1/3 は、採石場跡地復旧や農地受入等が含まれているとみなして平成 30 年度目標値を 80%以上に設定している。

表 1.2.1-3 建設発生土の有効利用率の目標値

H17 年度実績	H20 年度実績	H24 年度実績	H30 年度目標
57.5%	53.6%	68.5%	80%以上
【備考】リサイクル推進計画の修正（建設リサイクル推進計画 2014）			

出典 「建設リサイクル推進計画 2014」より抜粋一部加筆²⁾

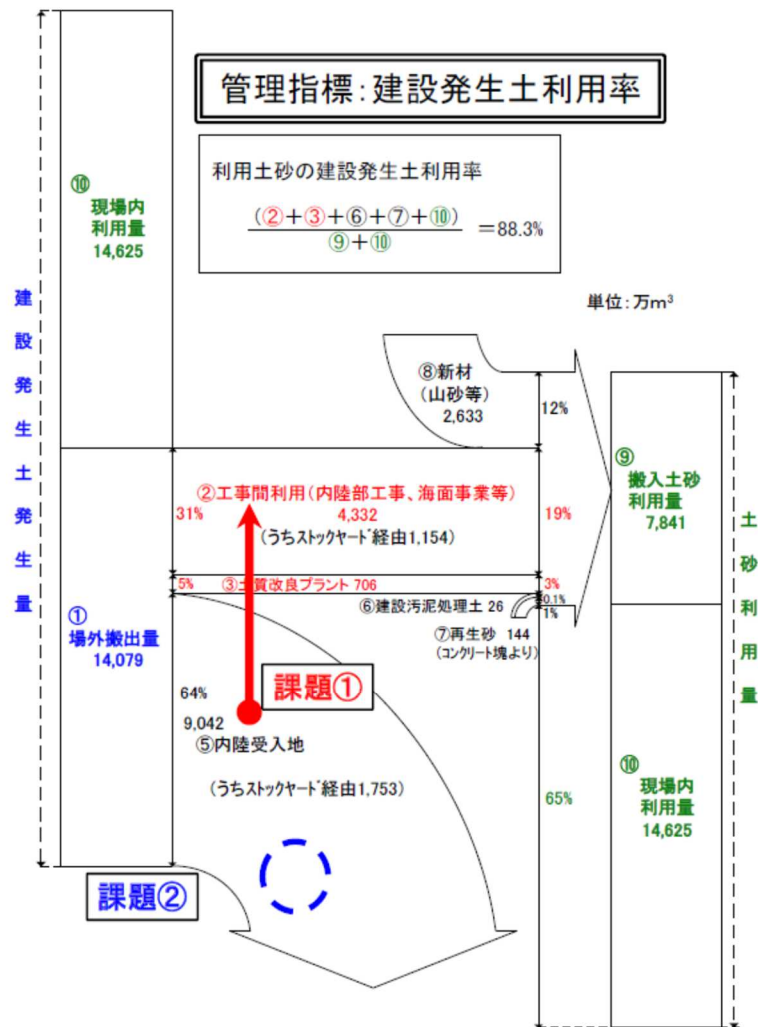


図 1.2.1-2 建設発生土のリサイクルフロー

出典：「建設リサイクル推進計画 2014」より」より抜粋²⁾

建設リサイクル推進計画 2014 では、この課題と要因として以下の課題と要因を上げている。

課題 1：内陸受入地搬出 64%を工事間利用できていない。

課題 2：民間の一時ストックヤード等での不適切な取扱いが一部見受けられる上記課題について、下記要因があるものと考えられる。

要因 1：これまでの工事間利用調整は公共機関のみで実施しており、民間事業者との連携が不十分。

要因 2：発生土利用側の公共工事よりも近距離に民間のストックヤードや土捨て場があり、コスト比較の結果それらへの搬出を選択。

建設リサイクル推進計画 2008 では、課題の解決のため、以下の施策を実施するものとしている。

①官民一体となった発生土の相互有効利用のマッチングを強化するためのシステム

②建設発生土の内陸受入地での不適切な取扱いを抑止のため、情報を把握するための

システムの構築

③建設発生土の不適切な取扱いによる土砂崩落などの公衆災害が生じないように内陸受入地の選定に努める。

④関係者と連携して、自然由来の重金属等を含む土砂等が適正に評価された安全性について一般市民への理解促進を進める。

引き続き継続する施設として

⑤情報管理と物流管理，関係者の連携強化，理解と参画の推進，建設リサイクル市場の育成，技術開発等の推進，発生抑制，現場分別，再資源化・縮減，適正処理，再使用・再生資材の利用

⑥港湾工事で発生する浚渫土砂の有効利用にあたっては，干潟や浅場造成等の自然再生への活用を積極的に推進する。

⑦災害廃棄物及び津波堆積物由来の再生資材について，建設廃棄物由来の再生資材との利用バランスを確保しつつ，建設工事において有効利用が図られるようにする。

このうち，項目⑥から港湾工事での浚渫土砂の有効活用が進んでいない現状を読み取ることができる。さらに近年の新たな課題である災害対策についても将来的には，この分野での活用範囲が広がるように思える。

現在，2020年の東京オリンピック・パラリンピックに向けて関連工事は，ピークになりつつあるといわれている。しかしながらオリンピック以降，関連工事は終了するが2020年予定であった新東名は2023年まで延期，継続中の横環南や2027年開業予定のリニア中央新幹線など大型インフラ投資等は，オリンピック以降も引き続き継続される。

また建設発生土の建設工事における有効利用率の実績値の実態は，表 1.2.1-3 のとおりであり，建設発生土の有効利用率は，今後もまだまだきびしい状況が予測されている。

(3) 港湾工事における浚渫土砂の有効利用の現状

一口に浚渫土といっても，湖沼・河川，港湾，漁港など，さまざまな場所で浚渫土が発生している。しかしながら，それぞれ行政管轄が異なることから，それらを網羅的に把握することは容易でない。そこで，ここでは浚渫土発生量が圧倒的に大きい港湾工事に限定して，公表されているデータから有効利用の現状把握を試みる。

表 1.2.1-4 に全国の特定重要港湾，重要港湾における1990～2004年の15年間の浚渫土の発生状況を示す⁸⁾。同表を概観すると，1998～2000年にピークを迎え2000年には約4,200万 m^3 を記録している。15年平均の全体発生量は約2,700万 m^3 となるものの2003，2004年には2,000万 m^3 を若干下回っている。一方，処分のうち干潟・覆砂・養浜での自然再生のための利用率は，15年平均で約10%，約270万 m^3 にすぎないが，2003，2004年で20%前後まで増加している。

表 1.2.1-4 特定重要港湾，重要港湾及び開発保全航路の
浚渫土発生量と自然再生のための利用量（単位：万 m³）

1990-2004年		自然再生のための利用量			
年	全体発生量	自然再生	(干潟・覆砂)	(養浜)	利用率
1990	2238.0	241.7	19.7	222.0	0.11
1991	2670.4	253.9	11.9	242.0	0.10
1992	2280.2	248.7	24.7	224.0	0.11
1993	2460.2	220.1	149.1	71.0	0.09
1994	2049.2	286.4	224.2	62.2	0.14
1995	2760.5	91.9	69.9	22.0	0.03
1996	2595.4	240.8	123.0	117.8	0.09
1997	2346.8	248.2	180.1	68.1	0.11
1998	3976.9	299.4	227	72.4	0.08
1999	3280.4	415.8	382.5	33.3	0.13
2000	4191.7	174.6	169.8	4.8	0.04
2001	2925.3	159.6	145.3	14.3	0.05
2002	2665.7	325.6	289.5	36.1	0.12
2003	1974.9	440.7	377.6	63.1	0.22
2004	1994.5	350.9	311.7	39.2	0.18
合計	40410.1	3998.3	2706.0	1292.3	0.10
平均	2694.0				

出典：平成 18 年度東京湾の水環境改善を目的とした浚渫土砂を有効利用した
自然再生とその評価の効率的な遂行方策確立業務報告書（WAVE）⁸⁾より

表 1.2.1-5 に 2004 年の地方港湾の実績を示す。これをみると地域によって異なる傾向が認められる。浚渫土発生量が年間 10 万 m³ を超える地域は、北陸・中部・近畿・中国・四国・九州であり、一方 10 万 m³ 以下と比較的浚渫量が少ない地域が北海道・東北・関東・沖縄となっている。地方港湾全体としての浚渫土発生量は約 190 万 m³ で重要港湾の発生量の約 10 分の 1 と少ないものの、自然再生に利用されている割合は 27% と高いようである。また、2004 年の全港湾での浚渫土の発生と処分状況としては、浚渫土発生量約 2,180 万 m³ にのぼり、そのうち約 18% しか自然再生事業で処分（有効活用）されていないことが表 1.2.1-4，表 1.2.1-5 より推計できる⁹⁾。

表 1.2.1-5 地方港湾の浚渫土発生量と自然再生のための利用量（単位：万 m³）

2004年		発生量								自然再生のための利用			
		航路			泊地			床堀	その他	自然再生	(干潟・覆砂)	(養浜)	利用率
場所	全体	新規	維持	全体	新規	維持	全体						
北海道	6.0	0.0	5.0	5.0	0.4	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
東北	0.9	0.0	0.6	0.6	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
関東	1.2	0.0	0.3	0.3	0.0	0.9	0.9	0.0	0.0	1.2	0.4	0.8	1.00
北陸	36.6	10.0	11.0	21.0	2.6	8.0	10.6	0.0	5.0	7.0	0.0	7.0	0.19
中部	14.8	1.0	4.9	5.9	5.6	2.5	8.1	0.8	0.0	9.8	0.0	9.8	0.66
近畿	18.6	0.0	8.6	8.6	1.7	7.7	9.4	0.3	0.3	2.3	1.2	1.1	0.12
中国	33.2	0.7	6.1	6.8	6.6	3.0	9.6	16.8	0.0	4.3	0.5	3.8	0.13
四国	38.3	2.0	11.2	13.2	12.4	0.3	12.7	12.1	0.3	17.1	0.0	17.1	0.45
九州	36.8	3.4	9.7	13.1	8.0	9.5	17.5	3.0	3.2	9.5	7.8	1.7	0.26
沖縄	1.3	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
合計	187.7	17.1	57.4	74.5	38.6	32.2	70.8	33.6	8.8	51.2	9.9	41.3	0.27

出典：平成 18 年度東京湾の水環境改善を目的とした浚渫土砂を有効利用した
自然再生とその評価の効率的な遂行方策確立業務報告書（WAVE）」⁸⁾より

図 1.2.1-3 は、平成 2 年度から平成 13 年度の 12 年間で発生した浚渫土の搬出先を処分場所ごとに示したものである。港湾埋立と土砂処分場への搬出量で約 70%を占めている。港湾埋立による土地造成は土砂の有効活用として位置づけられるものの、近年その需要は著しく低下している。図 1.2.1-3 の中で、浚渫土の有効活用が図れていない項目としては、土砂処分場（34.8%）、沖捨て（4.8%）、内陸処分場（1.9%）が挙げられる。その比率の合計は、41.5%に上り有効利用が遅れている現実が同図より読み取れる。また、浚渫土砂の有効利用を図るため、港湾埋立量の約 24%は土質改良を行った改良土である。

図 1.2.1-4 は、平成 30 年 4 月国土交通省より改定された港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドラインより示された浚渫土砂の搬出量の推移である¹⁰⁾。浚渫土砂は、平成 25 年度には、年間約 1,600 万 m³ の浚渫土砂が搬出、全体量としては減少していることがわかる。そのうち港湾埋立等への搬出は、従来から埋立の材料として利用されているがその割合は、59%（約 940 万 m³）とかなり高いことがわかる。養浜・覆砂等が 25%（約 390 万 m³）、海洋投入処分が 5%（約 70 万 m³）等となっている。

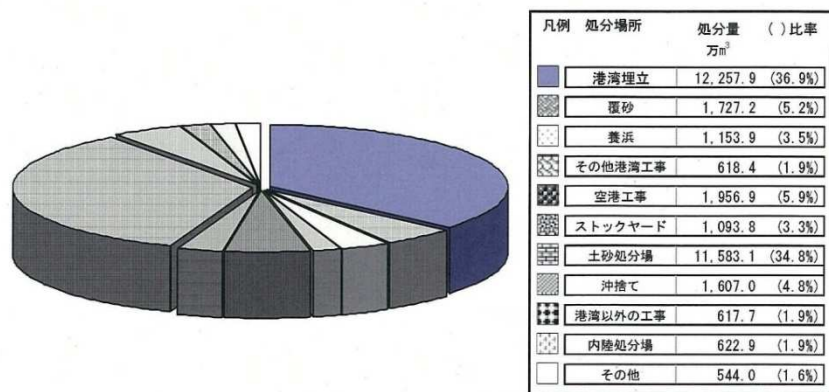


図 1.2.1-3 浚渫土の搬出先（平成 2～13 年度）

出典：「土砂等リサイクル活用技術に関する調査研究報告書
（特定非営利活動法人リサイクルソリューション）」⁸⁾より

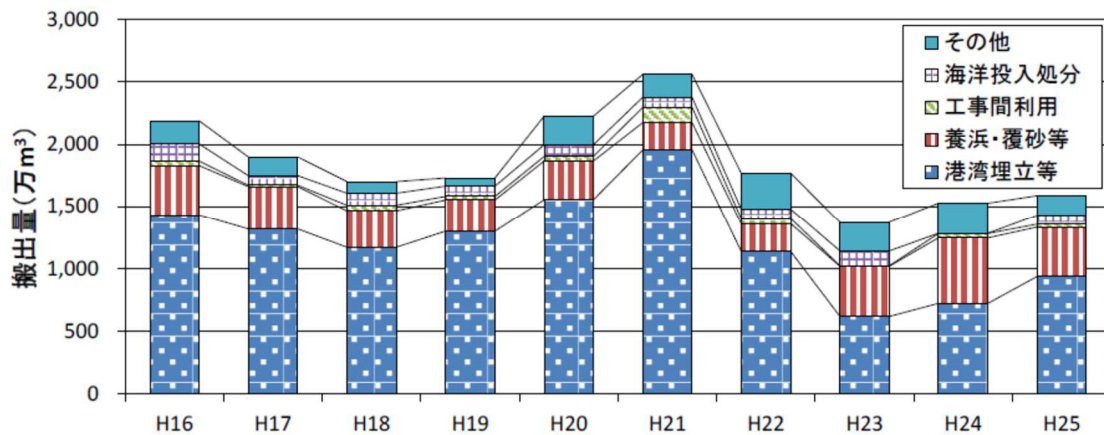


図 1.2.1-4 浚渫土砂の搬出量と搬出先の推移（平成 16～25 年度）

出典：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（改訂）¹⁰⁾

(4) UCR 事業における発生土の受入基準

建設工事から大量に排出される発生土の受け入れは、公共事業や民間事業で営まれている。受入地での利用形態や活用方策の違い等により、受入基準はまちまちであり、現状では全国一律の基準として統一されていない。したがって、発生土の排出者は、受入先ごとに基準を満足するかどうか試験を別途行う必要が生じる。ここでは、全国各地の受入地の基準を網羅的に調査することが本来の目的ではないので、比較的大規模な受入事業を展開している株式会社建設資源広域利用センター(略称 UCR)の事例について紹介し、その現状を把握する¹¹⁾。

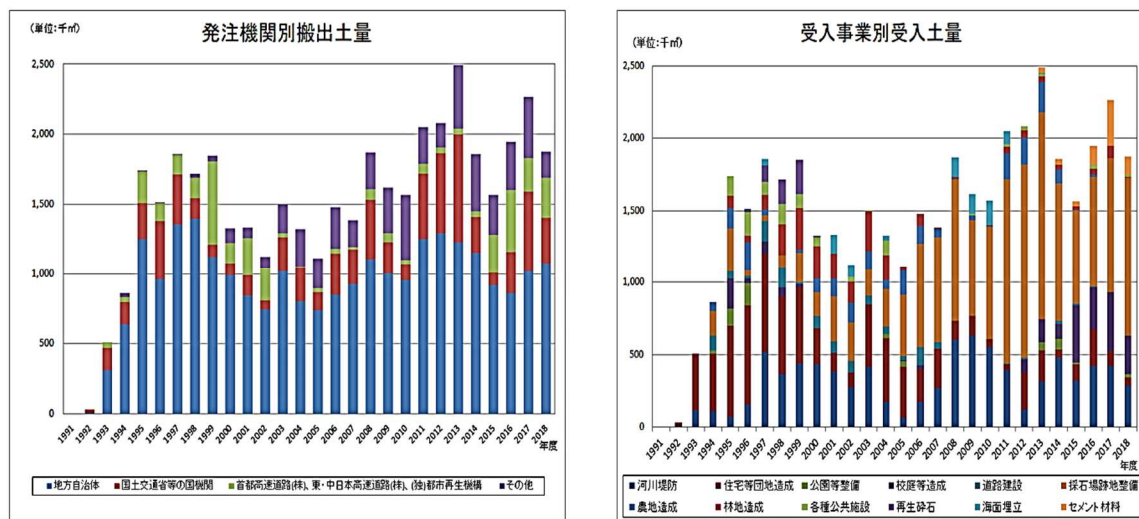


図 1.2.1-5 UCR 首都圏事業の実績（平成 3 年度～平成 30 年度）

出典：上記図表ともに UCR ホームページ¹¹⁾

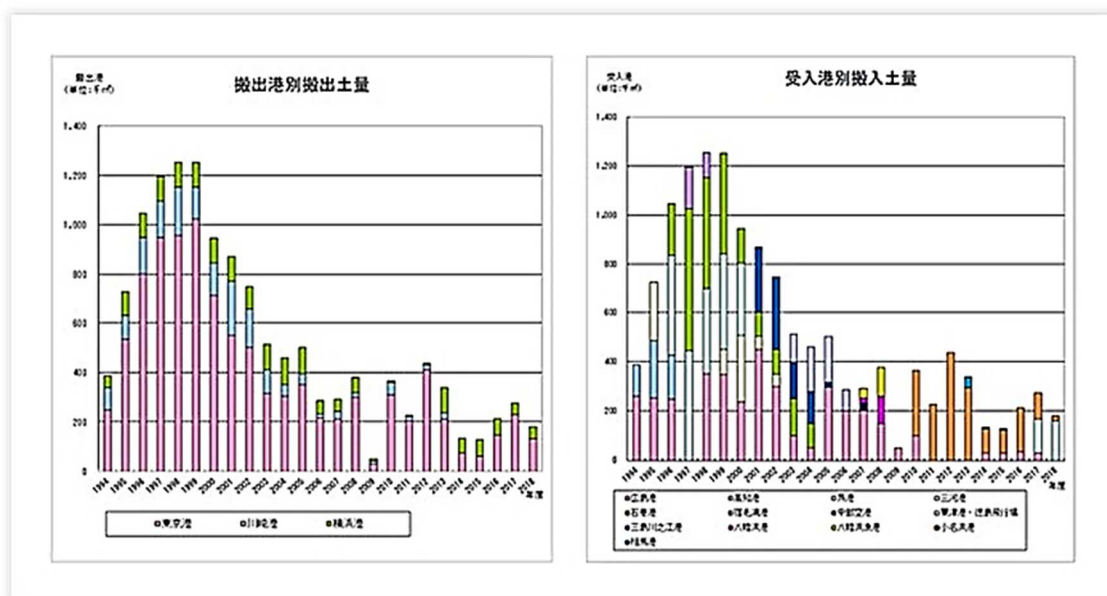


図 1.2.1-6 UCR 海上移送実績実績（平成 6 年度～平成 30 年度）

出典：上記図表ともに UCR ホームページ¹¹⁾

建設発生土に付加価値を与え、新たなイメージのもとでリサイクルすることを目的に、平成 3 年に株式会社首都圏建設資源高度化センター(略称 ACR)が、平成 6 年には株式会社沿岸環境開発資源利用センター(略称 CENDRUC)が設立された。さらに効率的な運営を行うため、平成 14 年 4 月に両社が合併し、株式会社建設資源広域利用センター(略称 UCR)が発足している。図 1.2.1-5 は UCR の首都圏事業の受入先の実績を示したものである。同図に示すように近年河川堤防と採石場跡地整備に利用される量が増加している。

図 1.2.1-6 の海上移送実績実績は、広域利用として、地方の港湾埋立工事等で利用する事業であり、近年その需要が激減する傾向にある状況がうかがえる。こうした受入先の変化が受入基準にも影響しているものと考えられる。

UCR のウェブサイトには、建設発生土の受入地ごとの受入条件(土質条件、試験項目)が示されている。それをみると、多くの受入地で第 1 種から第 3 種の建設発生土の受入が可能であるのに対して、第 4 種の建設発生土は受入不可となっている。受入地によっては、第 1 種建設発生土の受入を不可としているところも見受けられる。これは礫質土や粒径の大きな土を嫌う現場であると推測される。一方、改良土の受入を可とする受入地もわずかながら存在する。ただし、改良土の pH 値は、5.8～8.6 を満足することが求められるなど、ハードルは高い。また、土壤汚染の拡散防止に対する試験項目も多様化している。有害物質に対する土壤環境基準(27 項目の溶出基準)を満足することは必須条件となっており、さらに上乗せ基準として、油分、pH、土壤汚染対策法の含有基準、農用地の銅、ヒ素の含有基準、ダイオキシン類の含有基準などが付加されている。首都圏ではさらに上乗せ基準を設け、受入条件を厳しく制限している自治体も見受けられる。土壤汚染対策法の施行以降、物理性状のみならず、化学性状の受入条件がますます厳しくなっているのが現状である。

1.2.2 災害にかかわる発生土の活用（土砂災害による宅地やため池堤防への被害対策）

近年の課題として取り上げられるようになったのが、災害による被害である。東日本大震災から8年、原子力発電所事故の問題もあり未だにその復旧対策は、完全復旧できていないのが実情である。

平成30年7月に全国各地を襲った豪雨災害¹²⁾では、西日本を中心に広い範囲で記録的豪雨が発生（図1.2.2-1）し、広域的かつ同時多発的に河川の氾濫や土石流等が生じ、甚大な人的被害と社会経済被害が発生した。農地やため池等の農業水利施設にも甚大な被害が発生している¹³⁾（図1.2.1-2）。今年の台風15号も、千葉、横浜を中心にその被害は甚大なものがあり、千葉では、国の激甚災害に指定される見込みになっている。

このように気候変動の影響による水害・土砂災害の頻発・激甚化、南海トラフ巨大地震・首都直下地震等の巨大地震の発生等も懸念されることから、自然災害対策の重要性はますます高まっている。防災・減災対策を抜本的に強化することがうたわれており、こうした災害対策に対する効果的な技術開発が望まれている。

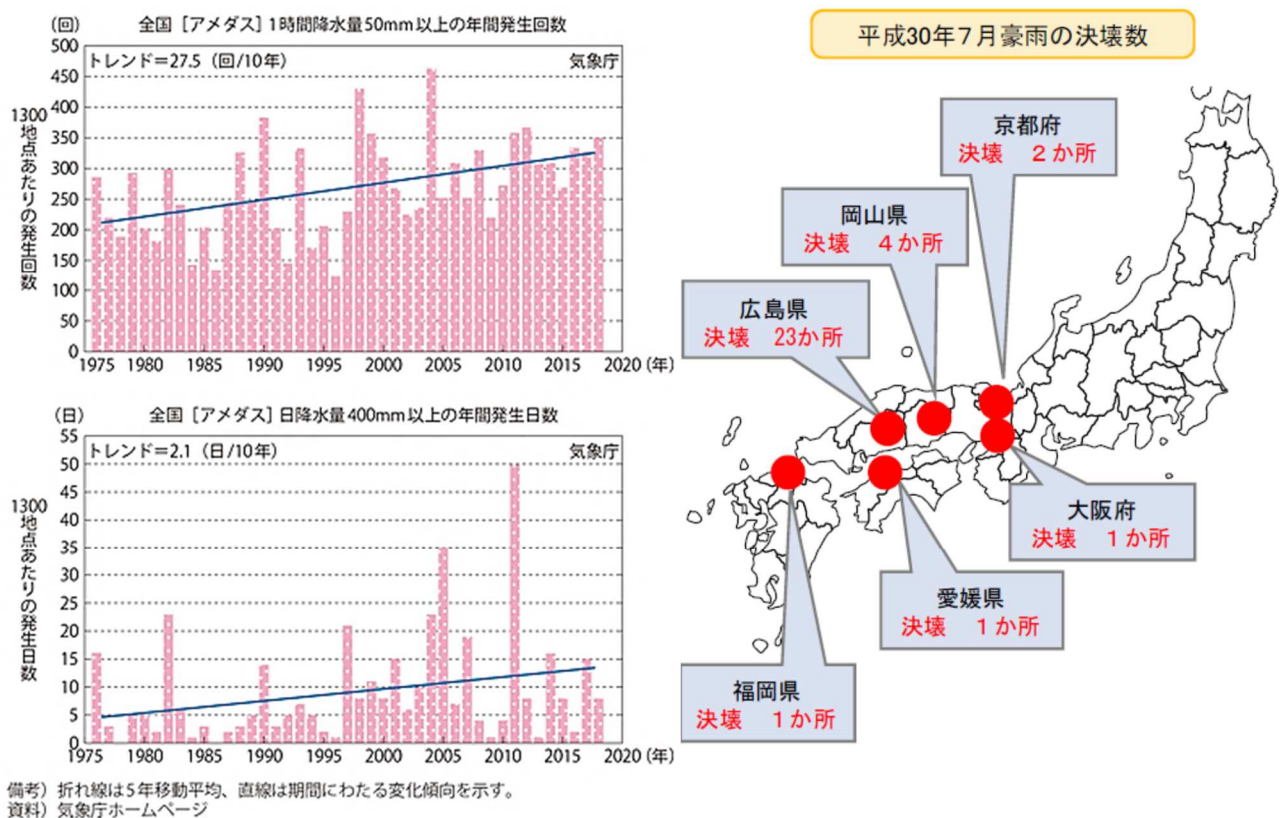


図 1.2.2-1 降水量の経時変化（1976～2018） 図 1.2.2-2 ため池決壊状況（2018, 7 豪雨時）

出典：気象庁ホームページ¹²⁾

出典：農林水産省農村振興局¹³⁾

1.2.3 建設発生土の有効利用に関するまとめ

「建設発生土は貴重な資源である」という理念とは裏腹に、浚渫泥土の有効利用が制限されている実態の把握に努めた。

港湾・空港等の建設工事では、埋立材料として大量に土砂を使用しているが、その一方で都市圏を中心に浚渫土や建設発生土、建設汚泥の処理が最終処分場の逼迫と相まって、大きな問題となっている。近年、浚渫発生砂は、やや減少傾向となっているもののその大半は、港湾埋立てであり、軟弱な泥質の浚渫泥土は、施工上の工夫や事前混合処理や原位置固化処理を施し、トラフィカビリティが確保できる程度に改良しなければ、埋立や盛土材料として利用できないのが現状である。一方、軟泥土を高度に処理し、砂・碎石の代替として利用する技術も開発され、バーチカルドレーン、中詰、裏込材等、これまでの埋立や盛土材料としての利用に加えて幅広い利用の検討が可能となっている。しかしながら、こうした技術は現状ではコストがかかり、必ずしも有効なリサイクル手段として活用されていない。したがって、浚渫された泥土を安価に改良し、第2種～第3種建設発生土に改質処理することができれば、その利用用途は大きく広がることになる。ただし、改質処理された改良土の pH は 5.8～8.6 の中性を示すことが望ましい。さらに有害物質による環境汚染をもたらさないものであることは、必須の条件といえる。

以上のような背景から、浚渫された泥土の安価で安全な改質処理技術の開発が望まれている。さらに本論文では、建設発生土の中の浚渫汚泥以外として災害発生土砂対策を取り上げた。これまでは、東京オリンピック・パラリンピックに向けて建設副産物の発生量増加からその対策を考えてきたが、直近の課題として、天候の変化による集中豪雨や大地震等による土砂災害対策にも目を向けなければならない。

不要かつ海洋埋立てくらいしか活用範囲がなかった泥土に対して同じく廃棄物である PS 灰を安価で環境浄化にも役立つ材料として用いることで、人々の生活を守るための防災対策に役立てていくことは、有効な解決策の一助になるものと考えている。

これまで浚渫泥土の改良には、従来の固化型改良材が使用されてきた。セメント系改良材は、低品質泥土を飛躍的に向上させる反面、一定の養生期間が必要で、品質のバラツキも大きく、改良土の明確な力学的モデルが不在のまま実用化されてきているのが実情である。これに対して、従来の固化型改良材にはない高吸水性による瞬時改質効果と周辺動植物に影響を及ぼさない環境付加機能を有する PS 灰改質材で明確な力学的強度モデルによる配合設計方法を確認することこそ第3の泥土改良工法と考えている。

1.2.4 建設発生土の改良と有効利用に関する既往の研究

建設発生土の有効利用は、現在建設発生土利用技術マニュアル⁵⁾に従って対応されている。同マニュアルは、建設工事に伴い副次的に発生する土砂や汚泥を効率的かつ的確に利用するための技術的な標準を示し、発生土の利用促進を図ることを目的にしている。発生土の利用用途は、土質区分に基づき、各々の区分に定められた駅用用途標準を目安とする。土質区分は、コーン貫入試験によって得られたコーン指数で定められており、当初、PS 灰改質材による改質土の土質基準で活用基準を判定していた。用途別利用は、工作物の埋め戻し、土構造物の裏込め、道路用盛土、河川築堤、土地造成、水面埋立て等の記載が定められている。また、東京都建設泥土リサイクル指針¹⁴⁾によると泥土圧シールド方式では、処理土の貯留内で一体の施工システムが完了する改良であれば活用が可能であるため、瞬時改質が可能な PS 灰改質材による排泥改質が行われている（首都高新宿線や東京メトロ 13 号線シールド工事に活用）。

これまで一般的な泥土改良として活用されてきた代表的な改良材としては、セメント系固化材と石灰があげられる。セメント系固化材や石灰系改質材については、長い年月にわたり、多数の泥土改良に関する研究が行われており、一般的な活用マニュアルとしてセメント系固化材による地盤改良マニュアル¹⁵⁾と石灰による地盤改良マニュアル¹⁶⁾にまとめられている。ともに材料の持つ化学的反応原理によって供用期間中に確保される一軸圧縮強さ q_u や CBR 値、コーン指数 q_c 等の固化強度をもとに設計基準が定められているが、改質土を用いた土構造物の設計としてその変形性や力学強度特性を考慮に入れた設計方法で構成されているものではない。したがって土質力学的な土構造物の設計法が可能となるような改良材とその設計基準が必要になってくるものと思われる。

次に PS 灰と同様、廃棄物材の活用としての考えられる泥土改良材としては、石炭灰や石膏の検討が研究されてきた。石炭灰については、数十年前から研究が進められており、財団法人石炭エネルギーセンターによる石炭灰混合材料有効利用ガイドライン¹⁷⁾が最新の活用技術としてあげられる。石炭灰混合材料とは、石炭灰にセメント、水、土砂、さらには添加剤等を必要に応じて混合した材料であり、破碎材、造粒材、塑性材、スラリー材の 4 種類が適用個所に応じて利用可能となるガイドラインになっている。各材料の施工実績も港湾工事、道路盛土工事を中心に多く利用されており、徐々に社会的な認知度も上がってきている状況である。石炭灰の土木分野での有効利用用途の拡大と推進をはかることを目的に、平成 23 年に港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン¹⁸⁾、平成 26 年に石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（震災復興資材編）¹⁹⁾、平成 27 年に石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（高規格道路盛土編）²⁰⁾、平成 28 年度には、発刊から 5 年を経過した港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン²¹⁾が作成されており、これらのガイドラインでの議論を生かしつつ、石炭灰の活用検討が進められているところである。末次ら²²⁾によって石炭灰のコンシステンシーの評価方法と実験方法が検討されており、石炭灰を埋立て材料として用いる場合に有益となる方法であることが結論づけられている。石炭灰については、これら既存の研究から高機能吸水性に原理を置いた PS 灰改質材とは、基本的に異なる原理の材料として活用していることがわかる。

近年、廃棄物による材料として検討されるものに石膏の活用があげられる。蓬萊²³⁾や亀井²⁴⁾らによって石膏ボードによる地盤改良材としての有効利用方法が検討されるようにな

った。廃石膏ボードの発生量は、年間 200 万トンと PS 灰以上の勢いで増加している。

廃石膏ボードは硫化水素の発生因子となることから、管理型の最終処分場に処分することが廃棄物の処理と清掃に関する法律により厳しく規制されている。しかしながら、最終処分場が逼迫していることから石膏ボードの受け入れを禁じている地方自治体もあり、循環型社会を形成するためにも廃石膏ボードのリサイクル技術の早期開発が待ち望まれている。このような現状を踏まえ、廃石膏ボードから紙を除去、粉砕して得られる廃石膏粉を加熱処理することによって水硬性を有する半水石膏を製造し、軟弱地盤の改良材としての適応性に関する研究が数多く行われている。亀井ら²⁵⁾²⁶⁾は、半水石膏に加え、石炭灰や高炉セメントを添加することにより、エトリンガイトを生成させ、軟弱地盤の強度発現に大きく寄与する泥土改良方法を提案している。さらに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により再生石膏粉のガイドライン²⁷⁾がまとめられている。本ガイドラインは、再生石膏粉ならびに、再生石膏粉を用いた固化材や改質剤に対して、ある一定の評価方法を提示するものであり、処理業者が本ガイドラインに従った品質管理をすることで、自治体や施工業者等への説明を容易にすることを目的にしている。半水石膏には、水分を吸収する機能があるもののその吸水原理は、化学的原理によるもので改質した後の練り返し強度低下等も物理的、粒度調整機能を有する PS 灰改質材とは、異なる性質を有する材料であることがわかる。

1.3 製紙業における産業廃棄物(ペーパースラッジ(PS))の現状と課題

1.3.1 製紙業の現状

製紙産業は、新聞用紙、印刷用紙等の情報用、段ボール原紙・クラフト紙等の包装用、トイレットペーパー、ティッシュ等の衛生用、電気絶縁紙等の工業用の紙・板紙を生産、供給することで各種の産業活動や家庭生活の下支えをしている産業である。

2016年の紙・パルプ・加工品産業の製品出荷額は約7.3兆円と製造業全体の約2.4%、製造業24業種中14番目の規模となっている。従業員数は約19万人、従業員一人当たり出荷額は約3,907万円となっている。

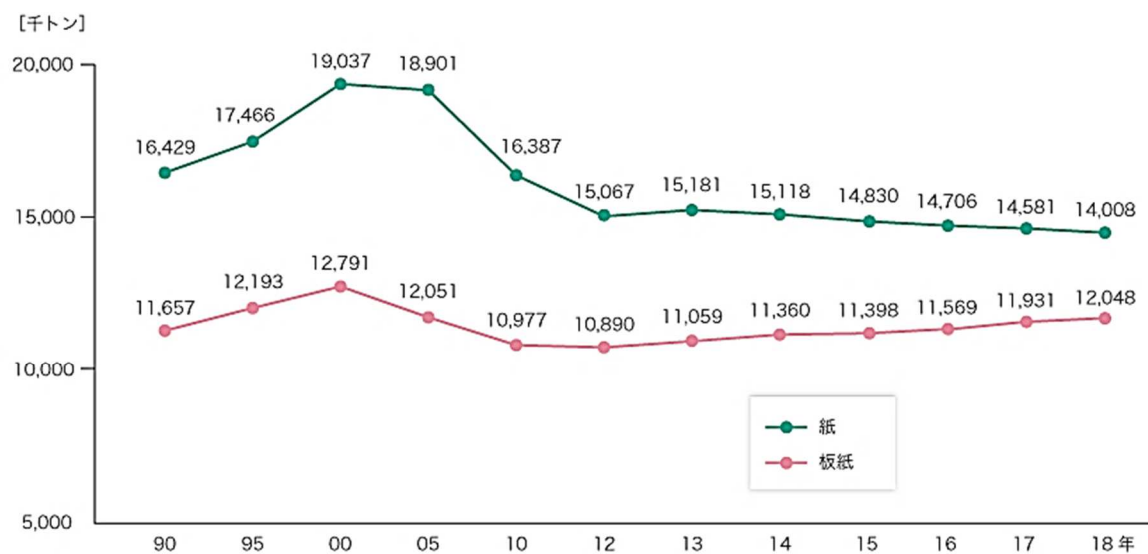
紙・板紙の国内需要は、2008年まで3,000万トン台で推移していたが、リーマン・ショック後の2009年に大きく減少し、それ以降V字回復することなく推移してきた²⁸⁾。

紙については、新聞用紙や印刷・情報用紙等のグラフィック系が人口減少、少子化、ICT化等の構造的な要因の定着により減少を続けている一方、板紙については食品分野、家電向けが堅調なことに加え、eコマースの普及等を背景に増加傾向で推移している。

近年の紙・板紙の生産量は、図1.3.1-1に示すように26,000～27,000千トンとなり、アメリカ、中国に次いで世界第3位を維持している²⁹⁾。

製紙産業では、古紙と木材(パルプ)を原料に、それぞれを単独で用いたり、または配合したりしながら、各種の紙・板紙製品を生産している。原料の内訳は、約6割が古紙、約4割が木材となっている。

2018年の紙・板紙の貿易動向は、輸入は107万トンと5年連続のマイナス、一方で輸出は202万トンと2年連続で過去最高を記録した。



単位：千トン	90年	95年	00年	05年	10年	12年	13年	14年	15年	16年	17年	18年
新聞用紙	3,479	3,098	3,419	3,720	3,349	3,254	3,219	3,134	2,985	2,906	2,779	2,594
印刷・情報用紙	9,251	10,565	11,756	11,503	9,547	8,420	8,576	8,491	8,384	8,309	8,242	7,871
包装用紙	1,185	1,089	1,049	975	904	871	880	905	891	877	896	897
衛生用紙	1,366	1,558	1,735	1,764	1,792	1,767	1,747	1,767	1,766	1,807	1,786	1,776
雑種紙	1,148	1,157	1,078	939	794	756	760	821	804	807	877	870
紙計	16,429	17,466	19,037	18,901	16,387	15,067	15,181	15,118	14,830	14,706	14,581	14,008
段ボール原紙	8,275	9,019	9,676	9,311	8,647	8,637	8,805	9,096	9,187	9,364	9,682	9,765
紙器用板紙	2,242	2,135	2,097	1,891	1,673	1,614	1,597	1,593	1,570	1,576	1,597	1,615
その他板紙	1,140	1,039	1,019	850	656	638	657	672	642	629	652	668
板紙計	11,657	12,193	12,791	12,051	10,977	10,890	11,059	11,360	11,398	11,569	11,931	12,048
紙・板紙計	28,086	29,659	31,828	30,952	27,363	25,957	26,241	26,479	26,228	26,275	26,512	26,056

資料：経済産業省「紙・パルプ統計」

図 1.3.1-1 紙と板紙の生産量推移（1990～2018）

出典：日本製紙連合会ホームページ²⁸⁾

1.3.2 PSについて

図 1.3.2-1 に、①木材チップや古紙から紙をつくる紙製造工程と②副生される廃棄物の発生工程³⁰⁾を示す。

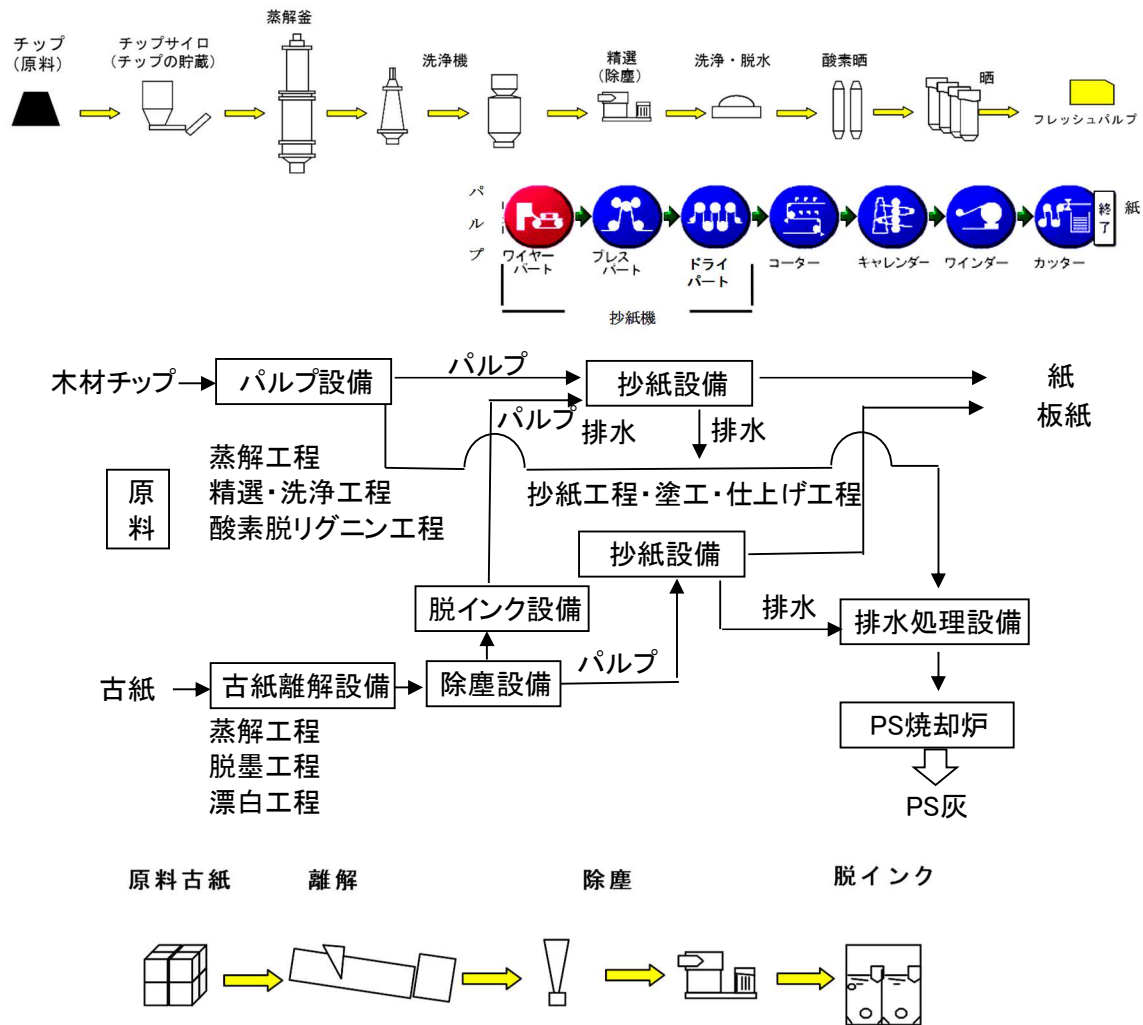


図 1.3.2-1 紙製造工程・廃棄物発生工程

出典：日本製紙連合会内部資料に加筆³⁰⁾

近年、日本において古紙リサイクルの必要性が認識されており、日本の古紙の回収率および利用率は、図 1.3.2-2 に示されるように 2018 年で回収率 78.8%、利用率 64.3 %と世界主要国と比較しても高いレベル（回収率 81.6%、利用率 64.5%:2017 年）になっている（図 1.3.2-3）。このように古紙のリサイクルが増加してきた背景としては、古紙から異物を取り除く除塵技術やインキを取り除く脱インキ技術など図 1.3.2-4 に示すような古紙処理技術が優れていることや古紙の回収システムが整備されていることなどがある。古紙の利用促進は、資源の有効利用の一環として好ましいものであるが、リサイクル率が高まるとペーパー・スラッジ（製紙汚泥：以下「PS」という。）が増加するという問題が生じる。

この PS を焼却した際に副生する産業廃棄物が PS 灰であり、詳細は、2 章に記述する。

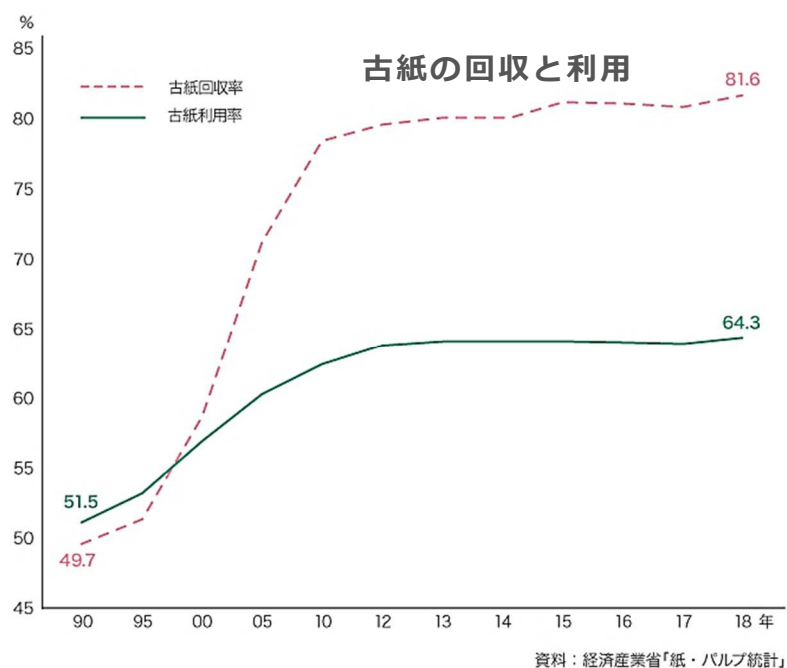
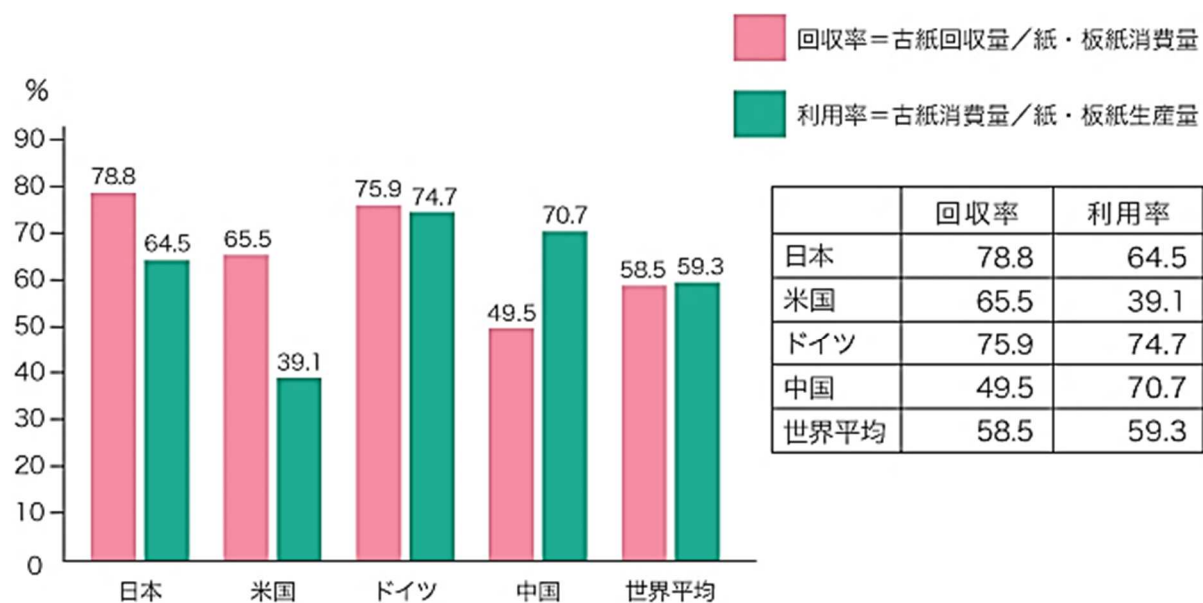


図 1.3.2-2 古紙回収率および利用率の経時変化

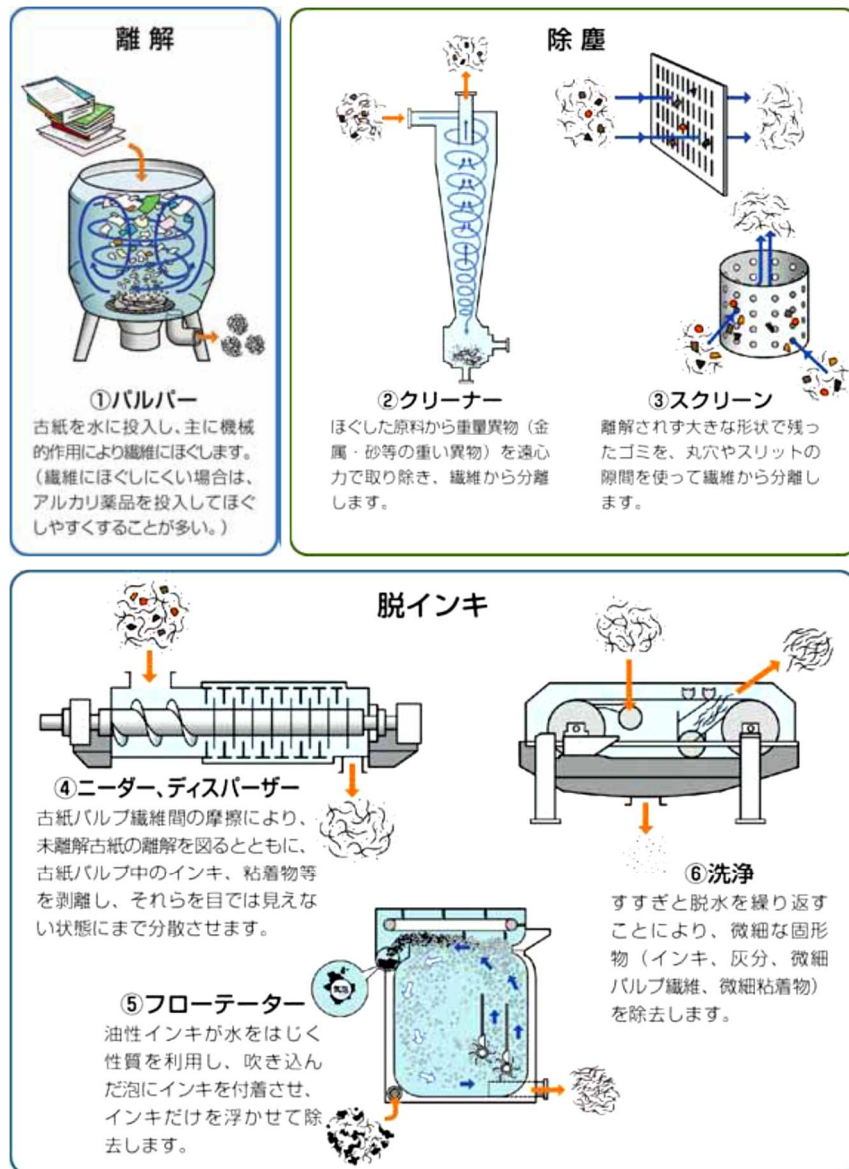
各国の古紙回収率及び利用率 <2017>



資料：RISI アニュアル・レビュー

出典：日本製紙連合会 H P²⁹⁾

図 1.3.2-3 世界主要国の古紙回収率および利用率



- 1) 離解：水の中に古紙を投入して攪拌し、古紙をもみほぐしてパルプ（木質の繊維分をバラバラにしたもの）にする。同時に大きな異物も取除く。バルパーという設備で行う。
- 2) 除塵：古紙中の異物(塵)を除去する設備としてクリーナーとスクリーンがある。クリーナーは遠心力を利用して古紙パルプ繊維より比重の重い石、砂、金属類を除去し、スクリーンはスリットや丸穴の隙間を利用して古紙パルプ繊維よりサイズの大きな異物を除去する。
- 3) 分散：古紙パルプを強力にもみほぐすことにより、古紙パルプに付着しているインキや粘着物等の異物を分離し目視では識別できない大きさまで粉碎・分散する。ニーダーやディスペンダーという設備で行う。
- 4) 漂白：過酸化水素等の漂白剤で古紙パルプを白くする。
- 5) 脱インキ：古紙パルプに洗剤を加え気泡を吹込み、気泡にインキを付着させる。この気泡を浮上させて取除くことによりインキを除去する。フローテーターという設備で行う。
- 6) 洗浄・脱水：すすぎと脱水を繰り返すことにより、微細な異物を除去する。ウォッシャーという設備で行う。

出典：財団法人古紙再生促進センター「日本の紙リサイクルについて」2008.7に内部資料加筆修正³⁰⁾

図 1.3.2-4 古紙の再生処理技術

1.3.3 PS の発生状況と有効利用の現状

製紙業界における環境負荷低減の取り組みは、大きく分けて発生源対策と再資源化対策の2本立てで行われている。

①発生源対策

主体は、PS の削減であり、抄紙工程およびパルプ工程での原料パルプの流出防止に取り組んでいる。

②再資源化対策

今まで原料として使用していなかった異物の混入が多い低品質の古紙についても、原料として利用を増やしているため PS の発生量が増えている。

一方、PS を燃料としてバイオマスボイラー・廃棄物ボイラーで焼却して減容化を図り、併せて熱エネルギーを回収利用している。

日本製紙連合会の「環境行動計画（廃棄物対策）」(2018.10)フォローアップ調査（2017年度実績）結果³¹⁾から日本全国の PS の発生状況を表 1.3.3-1, 1.3.3-2 に示している。

製紙業界としての目標としては、

①2020 年度までに産業廃棄物の最終処分量を有姿量で 13 万トンまで低減する。

②業界独自目標として、有効利用率の現状維持に努める。

③循環資源の質を高める取り組みとして、生産工程の効率改善を図り、原料・燃料に関する技術開発を推進する。

としており、調査対象：39 社 105 工場・事業所（回答：38 社 104 工場・事業所）の結果で、データは、アンケート回答会社の集計結果を基にし、全国生産量ベースに拡大推計されている。

次に図 1.3.3-1 に平成 29 年度の PS 発生量と再資源化量の内訳を、図 1.3.3-2 に PS 発生量と再資源化量の動向を示した。これらの結果からより PS の再資源化率と有効利用率はともに微増傾向にあり、最終処分量は、微減傾向であることがわかった。

再資源化有効利用用途としては、以前はセメント原料向けが主体だったが、土木用途（骨材、路床、路盤材）の利用や燃料へ利用する割合が高くなり、平成 26 年度からは、土木用途がトップになっている。PS の有効利用動向を見ると当初セメント原料に用いられる割合が高かった PS が 15 年間で半分以下に低減しているのに対し、土木分野への有効資源化率が急激に上昇し、その優先順位が完全に入れ替わっているのがわかる。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 灰をセメント原料以外の土木部門の多様な活用ニーズに転用した結果と考えられる。

なお、再資源化率と有効利用率の定義は以下のとおりとなっている。

発生量＝減容化量＋再資源化＋最終処分量

再資源化率＝再資源化量÷発生量×100

有効利用率＝（発生量－最終処分量）÷発生量×100

日本製紙連合会の統計としては、10 年以上前までは、PS 灰の数量を発表していた。しかしながら、中小工場では、自社内で焼却しないところも多く、正確な数量が推計できないため、現在のような PS 発生量での統計に改善されている。

PS 灰改質材の基材となる PS 灰の現状については、次章にて説明する。

表 1.3.3-1 2017 廃棄物の進捗状況（有姿ベース）

	1990年度 実績	2000年度 実績	2005年度 実績	2010年度 実績	2014年度 実績	2015年度 実績	2016年度 実績	2017年度 実績	2020年度 目標
発生量 (万 t)	-	620.3	570.1	530.2	506.3	510.1	505.6	496.2	-
減容化量 (万 t)	-	360.6	312.1	281.3	243.7	243.3	238.0	232.6	-
再資源化量 (万 t)	-	205.6	220.7	222.2	247.2	251.6	254.8	255.6	-
最終処分量 (万 t)	220.5	54.1	37.2	26.8	15.3	15.2	12.9	8.1	13
再資源化率(%)	-	33.1	38.7	41.9	48.8	49.3	50.4	51.5	-
有効利用率(%)	-	91.3	93.5	95.0	97.0	97.0	97.5	98.4	97.0

注) 発生量＝減容化量＋再資源化量＋最終処分量

再資源化率＝再資源化量÷発生量×100

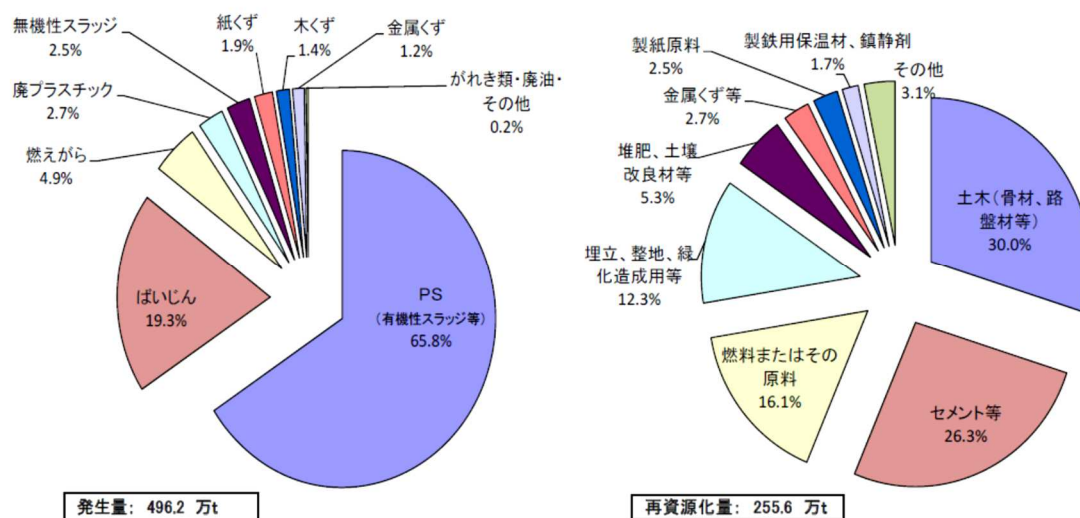
有効利用率＝（発生量－最終処分量）÷発生量×100

出典：日本製紙連合会「環境行動計画（廃棄物対策）」フォローアップ調査結果 2018 年度データより作成³²⁾

表 1.3.3-2 PS の進捗状況（絶乾ベース）

	1990年度 実績	2000年度 実績	2005年度 実績	2010年度 実績	2014年度 実績	2015年度 実績	2016年度 実績	2017年度 実績
発生量 (万BD t)	-	276.6	294.1	291.7	289.5	294.3	290.9	286.3
減容化量 (万BD t)	-	112.4	101.7	92.2	78.9	79.8	76.1	73.0
再資源化量 (万BD t)	-	133.0	169.1	181.9	200.1	204.0	206.2	207.5
最終処分量 (万BD t)	119.1	31.2	23.4	17.6	10.5	10.4	8.6	5.8
再資源化率(%)	-	48.1	57.5	62.4	69.1	69.3	70.9	72.5
有効利用率(%)	-	88.7	92.1	94.0	96.4	96.5	97.0	98.0

PS は有姿において水分の変動が大きいので、参考として絶乾ベースの結果を示す。



出典：日本製紙連合会「環境行動計画（廃棄物対策）」フォローアップ調査結果 2018 年度データより作成³²⁾

図 1.3.3-1 発生量と再資源化量の内訳

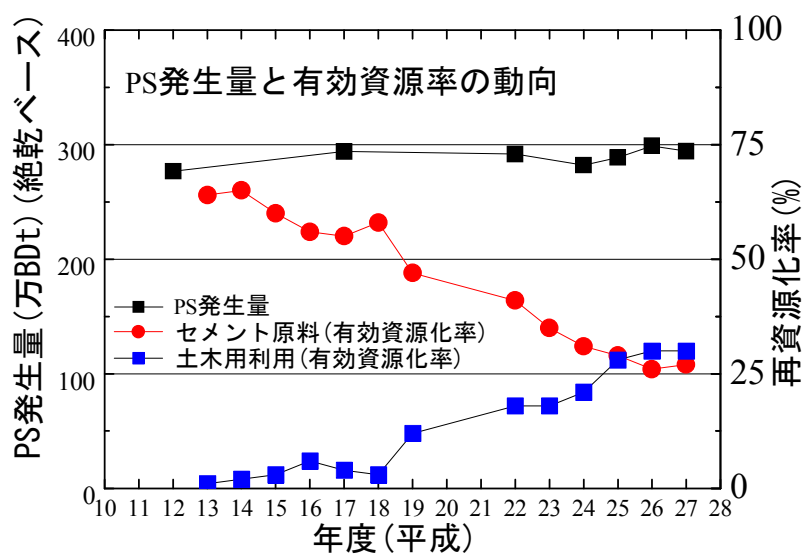


図 1.3.3-2 PSの有効利用状況

(セメント原料と土木材料の比較)

出典：出典：日本製紙連合会「環境行動計画（廃棄物対策）」フォローアップ調査結果 2018 年度データより作成³²⁾

1.3.4 製紙業の循環型社会形成に向けた取り組みと課題

製紙業界では、「環境に関する自主行動計画」に続く取り組みとして、2012年4月に「環境行動計画」を制定している³²⁾。

(1) 低炭素社会実行計画の目標

- ① 2005年度実績を基準として、2020年度において化石エネルギー由来 CO₂ 排出量を BAU 比で 139 万トン/年削減する。
- ② CO₂ の吸収源として、2020年度までに国内外の植林面積を 1990年度比 42.5 万 ha 増の 70 万 ha とする。

(2) 1990年度から 2017年度までの進捗状況

1990年度から 2017年度までの実績生産量と化石エネルギー使用量および CO₂ 排出量の推移を図 1.3.4-1 に示す。また図 1.3.4-2 には、総エネルギー原単位、化石エネルギー原単位および CO₂ 排出原単位の推移について 1990年度を基準とした指数で示す。

国内の紙・板紙需要は 2008 年のリーマンショック以降は少子高齢化や紙以外のメディアとの競合など構造的な要因により減少傾向にあったが、2017 年度の実生産量は 2,346 万 t で、前年 2016 年度実績の 2,334 万 t に比べ 12 万 t (0.5%) の増加となった。

化石エネルギー使用量は前年比 0.3% 減少したが、これは、重油使用量が 2016 年度の 74.0 万 kl から 2017 年度は 71.1 万 kl まで減少したことによるものである。

また、化石エネルギー原単位指数も、1990 年度比で 2017 年度は 2016 年度の 67.4 から 66.8 まで減少した。CO₂ 排出量については、2017 年度は 1,785.3 万 t で前年 2016 年度の 1,799.6 万 t よりも 14.3 万 t 減少した。CO₂ 排出原単位指数も、2013 年度以降は良好傾向にあり、2017 年度は 74.1 となり、2016 年度の 75.1 から 1pt 減少し過去最小値となった。

エネルギー分類別原単位の推移を図 1.3.4-3、化石エネルギー燃料別原単位の推移を図 1.3.4-4、およびエネルギーの構成比率について 2005 年度および 2017 年度を比較したものを図 1.3.4-5 に示した。図 1.3.4-3 で 2016 年度と 2017 年度を比較すると、総エネルギー原単位、再生可能エネルギー原単位、廃棄物エネルギー原単位は増加しているが、化石エネルギー原単位は減少している。図 1.3.4-4 で、重油原単位は 1990 年以降継続的に減少傾向にあり、2016 年度は一時的に増加したものの、2017 年度は再び減少に転じた。

図 1.3.4-5 で 2005 年度と 2017 年度を比較すると、化石エネルギーの構成比率は 58.3% から 46.8% に 11.5pt 減少し、再生可能エネルギーが 37.4% から 43.4% へ 6.0pt 増加している。化石エネルギーの中でも重油の減少が 14.5pt と著しい。

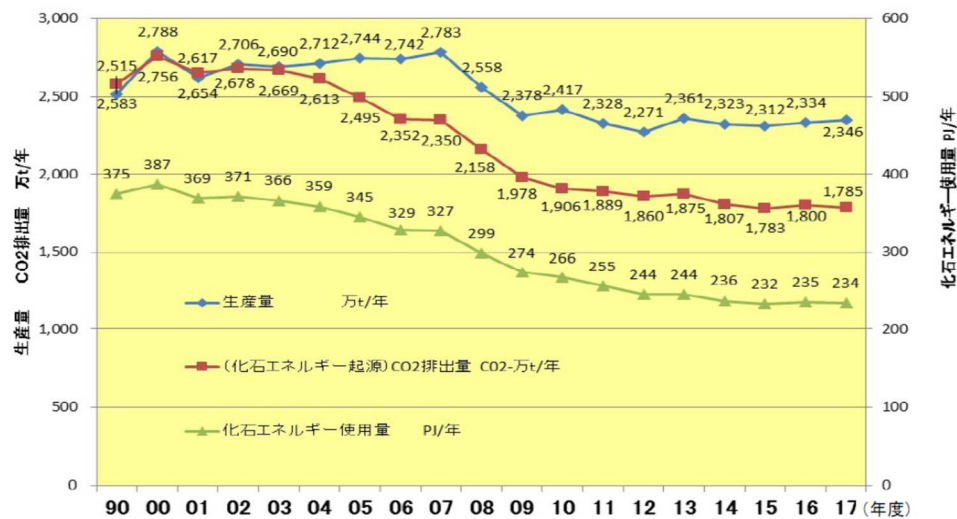


図 1.3.4-1 生産量と CO₂ 排出量および化石エネルギー使用量の推移³²⁾

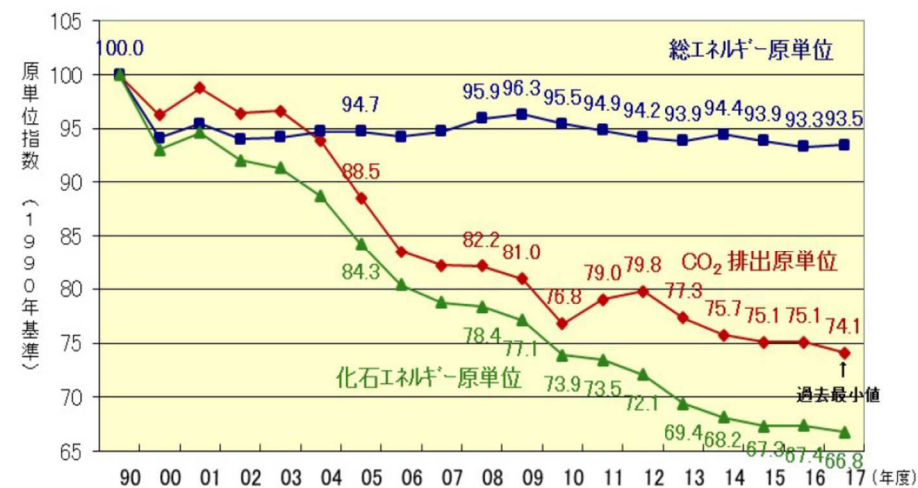


図 1.3.4-2 総エネルギー、化石エネルギー、CO₂ 排出別原単位の推移 (GJ/t. 1990 年度基準=100)³²⁾

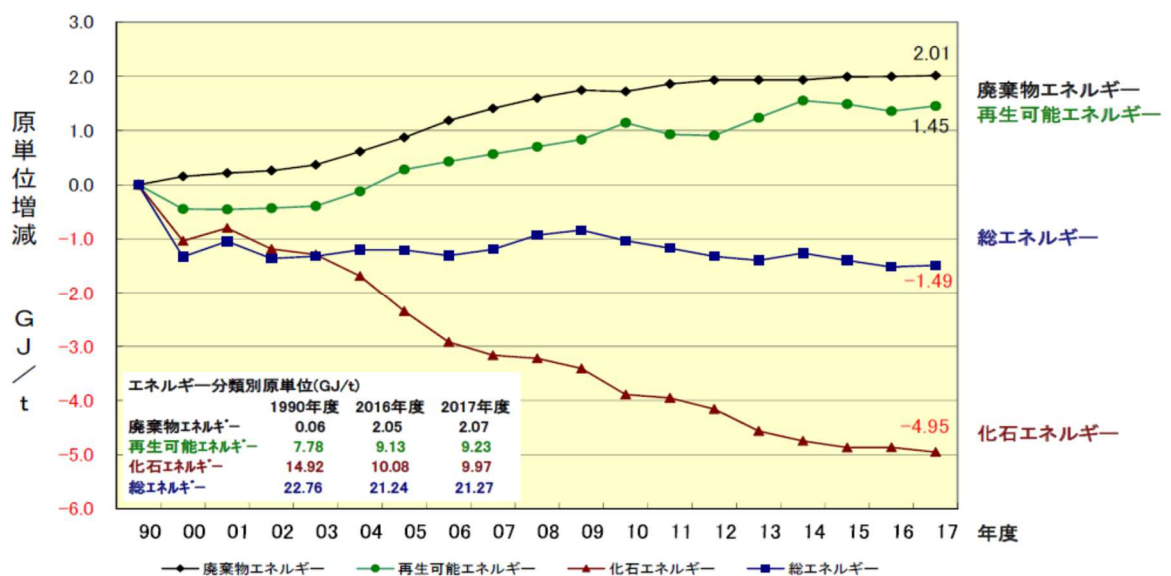


図 1.3.4-3 化石エネルギー別原単位の推移 (GJ/t. 1990 年度基準)³²⁾

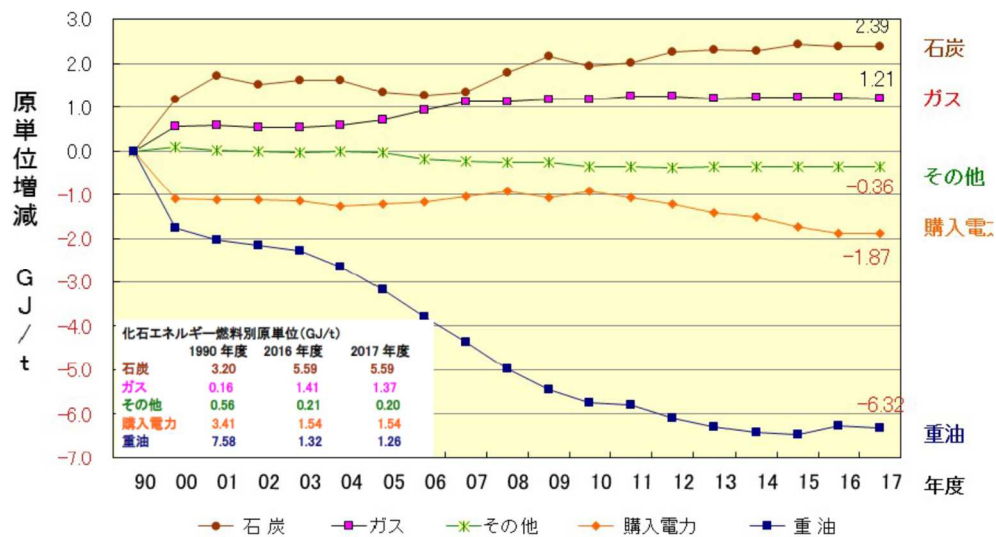
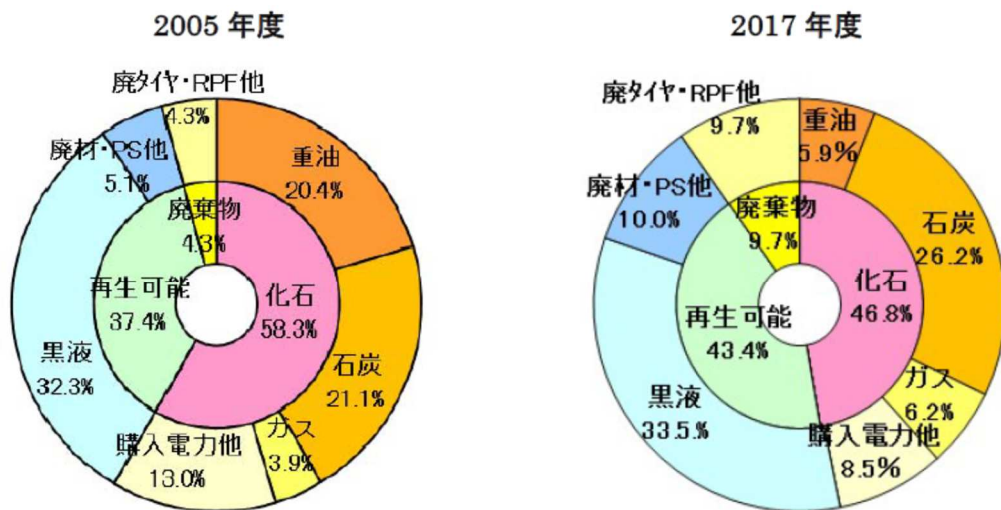


図 1.3.4-4 化石エネルギー別原単位の推移 (GJ/t. 1990 年度基準) ³²⁾



出典：日本製紙連合会 2018 年度「低炭素社会実行計画（温暖化対策）」
フォローアップ調査結果（2017 年度実績）³²⁾

図 1.3.4-5 エネルギーの構成比率 （2005 年度と 2017 年度の比較）

1.3.5 土木分野への有効利用への課題

有効利用先である土木分野としては、PS が増え、土木分野での活用が増えることは良いことであるが、バイオマスボイラー、廃棄物ボイラーから排出される PS 灰には、有害物質（土壤汚染対策で溶出基準が規定されている物質）が多く含まれているため、こうした焼却方法が増えている現状においては、有効利用を検討する際、綿密な灰の選別が必要不可欠となっている。また、そのため、これらの有害物質の抑制技術の開発も進めていく必要がある。

土木分野で利用を進めていく場合には、土木工事に特有な時期的変動のある需要に対応できるよう生産拠点の拡大、大型貯蔵施設の設置、輸送システムの充実などが必要となる。

また、材料となる PS 灰は工場による発生源が多く、性状のばらつきも大きいことから、いかに効率よく処理してコストダウンを図りながら製品品質を確保することが、技術的課題として重要であると考ええる。

さらに積極的に土木分野での利用を推進するためには、産業廃棄物の削減、再利用といった環境改善だけでなく、開発製品および施工行為それ自体に周辺環境の浄化機能を有し、生態系の活性化に寄与できるような技術レベルまで改善していくことが望まれる。

1.3.6 ペーパースラッジ(PS)灰に関する既往の研究

製紙業における産業廃棄物 PS 灰有効利用方法の既往の研究としては、下野ら³³⁾による製紙スラッジの焼却灰の建築用ボードへの利用に関する研究(1982 年)があげられる。これは、建設分野への活用技術であるが PS 灰有効利用初期の頃の活用研究である。本研究は、パルプセメント板への充填剤適用性について詳細に調べた研究であり、目的は、改質材としての活用技術とは原理的に異なる考えの技術開発である。その目的や対象も建築構造物であり、廃棄物の処理コスト費が高騰する以前の開発であったため、実用化レベルには、至らなかったが、廃棄物自体を輩出する製紙業者による研究であり、製品材料にするための廃棄物品質の管理方法が詳細に検討されている。次に PS 灰の土質材料への有効活用技術を提案したのが今井ら³⁴⁾による研究である。PS 灰を含む各種産業廃棄物の埋立て処分場は、年々満杯に近づきつつあり、新設の埋立て処分場の確保は非常に困難な状況となっている。製紙工場の多い地方自治体では、産業廃棄物となる PS 灰の有効利用は、重要な課題になっているが、なかなか効率的な利用方法が見出されていなかったのが実情である。こうした背景の中、今井らの研究は、最も将来を見据えた検討がなされた研究と考えられよう。まず、一般的に廃棄物 PS 灰の検討を行う場合、対象となる材料のターゲットを 1 社に絞って検討する場合が大多数である。今井は、多くの製紙工場が存在する富士市、静岡県の協力を得ながら数多くの製紙工場から発生する PS 灰に対して各々の物理特性を詳細に検討しながら、最も有効な活用方法として一本化させた窓口に PS 灰を集めて土質材料と最終処分場へ振り分け、大量需給に備える方法を念頭に入れた。企業の販売目的ではなく、公共性の高い土質材料への活用を考えた研究になっている。この既往研究方法は、筆者の研究にも非常に大きな影響を及ぼした。ただし、徐々に年代が進み、廃棄物処理費が年とともに高額化していったこと、日本中の PS 灰を調べることにより、泥土改質材料に適用するより、同じく汚泥処理に苦しむ建設業界の泥土を改質することで付加価値の高い有効利用方法に変えていった方がお互いのゼロエミッション化に有効であること、さらに PS 灰の機能には、環境改善効果も優れていることから本論文への開発につながっていった経緯がある。筆者が PS 灰改質材開発に着手してから、谷³⁵⁾ら製紙会社による同様の改質材研究や與儀³⁶⁾や増田³⁷⁾らによる粒状固化体化への活用が実施されるようになった。また PS 灰の改良効果としては、山内ら³⁸⁾による PS 灰を用いた粘性土のほぐし造粒固化処理技術や川合³⁹⁾らによる PS 灰改質泥土の養生効果特性が調べられるようになり、PS 灰の吸水効果以外の泥土改善効果も検討されるようになってきた。環境浄化機能に関しては、海洋環境再生技術の検討が行われ、近年では、浜谷⁴⁰⁾らによる PS 灰改質土の植生生育基盤に対する適用性や竹山ら⁴¹⁾による PS 灰改質材による環境改善技術の開発、加島⁴²⁾らによる水域利用における施工方法の検討等が行われるようになっており、PS 灰泥土改質材は、改質機能だけでなく各種環境負荷低減機能を有する材料として改善されつつある。

ただし、PS 灰の利活用が広がる一方で、JIS・JAS 等の公的基準がないため、品質について統一性が定められていないことも否めない事実である。改質原理にそぐわないミスマッチな利用がおきないように活用性能ごとに明確な設定基準が必要になろう。特に、全国の製紙工場で排出される PS 灰の性質は多岐にわたるため、PS 灰全般において使用段階における有害物質が長期的に溶出しない製造方法を確立すること、期待される環境負荷低減効果は、十分確保できているか、継続的な検討が必要となる。

PS 灰を活用した泥土改質技術の開発は、20 年ほど前から始まった。当時の PS 灰と現在の PS 灰を比較するとその成分も変化しており、改質特性の向上とともに多様な利用用途への活用展開が図られている。現時点では、年間数万トンレベルでの利用にとどまっているが、数年後には 10 万トンを超えるような活用量に拡大することが期待されている。将来的には、本技術を国外へも普及させ、地球環境問題まで踏まえた国際産業間レベルでのゼロエミッション化の取り組みまで推進できる技術になれば幸いである

参考文献

- 1) 国土交通省大臣官房公共事業調査室：「建設リサイクル推進計画 2008」の策定について，2008 年 4 月
- 2) 国土交通省大臣官房公共事業調査室：「建設リサイクル推進計画 2014」の策定について，2008 年 4 月
- 3) 独立行政法人土木研究所編：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル[暫定版]，鹿島出版会，2004 年 5 月．
- 4) 土砂等リサイクル活用技術に関する調査研究報告書（特定非営利活動法人リサイクルソリューション）
- 5) 独立行政法人土木研究所編著：建設発生土利用技術マニュアル第 3 版，丸善，2004 年 9 月．
- 6) 独立行政法人土木研究所編著：建設汚泥再生利用マニュアル，大成出版社，2008 年 12 月．
- 7) 国土交通省総合政策局事業総括調整官室：平成 24 年度建設副産物実態調査結果について，2014 年 3 月，
- 8) （財）港湾空間高度化環境研究センター：平成 18 年度東京湾の水環境改善を目的とした浚渫土砂を有効利用した自然再生とその評価の効率的な遂行方策確立業務報告書，2007 年 3 月．
- 9) NPO 法人リサイクルソリューション：土砂等リサイクル活用技術に関する調査研究報告書，2004 年 3 月
- 10) 国土交通省：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン(改訂)，平成 30 年 4 月
- 11) 株式会社建設資源広域利用センター(略称 UCR)：<http://www.ucr.co.jp/index.html>，2019 年 9 月 30 日
- 12) 国土交通省：平成 29 年全国の土砂災害発生状況(10 月 31 日)：<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/.../hasseijyokyo2910.pdf>，2019 年 9 月 30 日
- 13) 農林水産省農村振興局：全国ため池緊急点検の結果，平成 30 年 8 月
- 14) 東京都建設泥土リサイクル指針，平成 30 年 4 月
- 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 3 版 200710.15
- 16) 日本石灰協会 石灰による地盤改良マニュアル 平成 21 年 12 月
- 17) 財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（統合改訂版）平成 30 年 2 月
- 18) 財団法人石炭エネルギーセンター：港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン 平成 23 年 3 月
- 19) 財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（震災復興資材編）平成 26 年 3 月
- 20) 財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（高規格道路盛土編）平成 27 年 4 月
- 21) 財団法人石炭エネルギーセンター：港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン（改訂版）平成 29 年 2 月

- 22) 末次大輔, 宮田喜壽, 木暮敬二, 落合英俊: 石炭灰のコンシステンシーの評価とその応用に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.111-120, 2004.9.
- 23) 蓬萊秀人, 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀: 半水石膏生産システムの開発とその地工学的意義ー廃石膏ボードの再生地盤工学ジャーナル, Vol. 3, No. 2, 133-142. 2008.
- 24) 亀井健史, 珠玖隆行: 廃石膏ボードから再生した半水石膏を混入したセメント安定処理土の一軸圧縮強さ, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.237-244, 2007.
- 25) 亀井健史, 加藤孝明, 珠玖隆行: 半水石膏の地盤改良材としての有効利用ー廃石膏ボードの再利用ー, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.245-252, 2007.
- 26) 亀井健史, 鵜飼恵三, 珠玖隆行: 廃石膏ボードから再生した半水石膏の地盤改良材としての有効利用, 土と基礎, Vol.55, No.10, pp.26-28, 2007.
- 27) 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: 再生石膏粉のガイドライン
- 28) 日本製紙連合会: 製紙産業の現状, 製紙業に占める紙・パルプ産業の位置, <http://www.jpap.gr.jp/states/brief/index.html>, 2019年9月30日
- 29) 日本製紙連合会: 製紙産業の現状, 世界の中の日本; 各国の古紙回収率及び利用率, <http://www.jpap.gr.jp/states/global-view/index.html>, 2019年9月30日
- 30) 日本製紙(旧日本大昭和板紙)内部資料
- 31) 日本製紙連合会: 環境行動計画(廃棄物対策), フォローアップ調査結果, 2018年度
- 32) 日本製紙連合会 2018年度「低炭素社会実行計画(温暖化対策)」フォローアップ調査結果(2017年度実績)
- 33) 下野健一, 桑原啓至: 製紙スラッジの焼却灰の建築用ボードへの利用に関する研究, 高分子加工, Vol.31, No.3, pp.5-14, 1982.
- 34) 今井五郎, 遠藤恭延, 大滝哲男, 荻谷育男, 村上篤司, 安原一哉: 土質材料としてのPS灰有効利用ガイドライン(案), PS灰の土質材料開発研究検討委員会, pp. 1-46, 1994.
- 35) 谷幸雄: ペーパースラッジ灰の有効利用について, 紙パ技協誌 63巻, 12号, pp. 1465-1469, 2009.
- 36) 與儀兼三, 川元満夫, 三好正忠, 松尾暁: PS灰を原料とした造粒固化体の作業道の路盤材への利用森林利用利学誌 24巻, 34号, pp. 107-110, 2009.
- 37) 増田龍哉, 久保田健, 志村吉彦, 寺澤 一雄, 小野裕司, 福岡大造, 五十嵐学, 滝川清: ペーパースラッジ灰造粒物の現地適用性に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.68, No.2, pp.492-497, 2012.
- 38) 山内裕元, 早野公敏: 吸水性材料を用いた粘性土のほぐし造粒固化処理方法の開発と適用, 基礎工, Vol.45, No.9, pp.64-69, 2017.9.
- 39) 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, Vol. 74, No.3, pp.306-317, 2018.
- 40) 浜谷信介, 加島浩, 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, pp.953-958, 2017.
- 41) 竹山佳奈, 浜谷信介, 加島史浩, 和栗成樹, 山内裕元, 岩本裕之, 鵜飼亮行: 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， pp.947-952， 2017.

42) 加島史浩，竹山佳奈，浜谷信介，和栗成樹，山内裕元，鵜飼亮行，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， pp.935-940， 2017.

第2章 PS灰改質材の基本特性と泥土改質への適用性

2.1 はじめに

製紙（紙、板紙）の製造には、木材チップのバージンパルプを使用する場合と古紙再生による場合の2種類がある。前章において説明したとおり最終排水処理施設からでてくる原料に使用できないパルプ屑が汚泥（ペーパー・スラッジ：PS）となり、これを燃料資源化するために焼却して最終的に残った減量化残渣がPS灰となる。代表的な焼却事例を図2.1-1に示したり、国内市場の拡大とともに増大してきた製紙生産量は、図1.3.1-1に示したように平成20年以降、リーマンショックによる国内需要の激減事情から20%程度の大幅な減産²⁾となったが、図1.3.3-2に示した通り、廃棄物となるPS発生量は、製紙生産低減期間になっても一定量の値で発生し続けていることがわかった。PSの発生量が減少しない理由としては、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^{3),4)}が上げられる。リサイクル処理によって低下した古紙パルプの繊維強度は、填料による中性抄紙化で強度が劣化しない状態になる。中性抄紙化に使用したした填料は、無機成分であるため、紙自体が減産になっても廃棄物となるPSの減量には繋がらない。填料の割合が高くなったPS灰では、従来より吸水性機能が一層向上し、土木分野での活用^{5)~13)}も増え、高含水の浚渫泥土や泥土圧シールド排泥をシステム内において瞬時に改質して再生活用する¹⁴⁾ことが可能となっている。しかしながら、PS灰と一口にいてもその焼成方法やPS灰の物理性状は様々である。本論文では、PS灰の吸水性能に着目し、吸水性能を高める処理方法を確立するとともにその吸水性能を簡便かつ客観的に評価できる試験方法を考案し、そこから得られる吸水性能指標 w_{ab} を利用した泥土改質の配合設計方法を提案した。

なお、現在製紙連合会では、製紙業界で排出される廃棄物の数量をPS灰の前段であるPSの絶乾ベース単位（万BD t）で掲載することになった。以前は、PS灰算定も行われていたが、自社焼却を行わない業者も多いため、正式な数量がまとめられず、廃棄物数量としての正確な算定ができない事が最大の理由である。

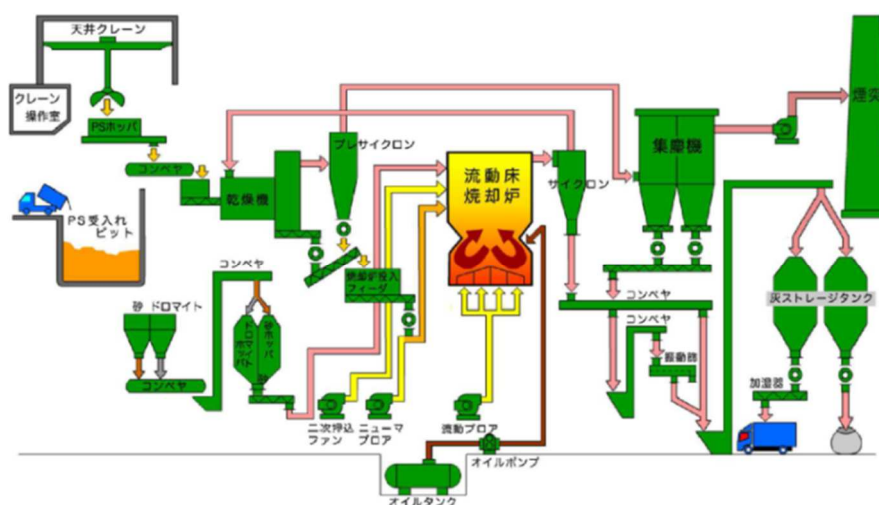


図 2.1-1 PS 灰の焼成状況（代表的流動床焼却炉事例）

出典：富士製紙業組合 HP¹⁾

2.2 PS 灰の各種焼成方法と基本物性

日本全国の製紙工場から採取した90種類ほどのPS灰についてその基本物性である物理化学的特性を調べた。その中には、2000年以前のクリンカー灰や炉底灰のように吸水性能に適さないPS灰も存在する。

以前のPS灰有効利用方法においては、土質材料としてのPS灰有効利用方法¹⁵⁾や建築用ボードへの利用方法¹⁶⁾、20年前の静岡地区でのPS灰有効利用方法¹⁷⁾のように地域や活用方法が限定されたPS灰の焼成方法と基本物性が紹介されていた。

2.2.1 PS 灰の物性

PS 灰の代表的な焼却炉型式は、表 2.2.1-1 に示すとおりである。本章では、日本全国の製紙工場から発生する代表的な PS 灰の中から、加工処理をほどこすことで、安定した吸水品質性能の保証ができるようサイクロン炉、ストーカー炉、流動床炉を選択し、その方法と PS 灰 A～D の 4 種類の基本物性を紹介した。

表 2.2.1-1 PS 灰の代表的な焼却方法

焼却炉の種類	特徴
流動床炉	PS 焼却の主流。バブリング流動層，外部循環，内部循環等があり未燃分が少ない。
ストーカ炉	火格子を組み合わせたもの。歴史は古い。未燃分大
サイクロン炉	乾燥装置と焼却装置で構成されており，乾燥粉体をサイクロンで焼却。起動時を除き，助燃が不要。
ロータリーキルン	内部に耐火物をライニングした横型回転式。未燃分大

まず，1980 年代以降実施した全 PS 灰の成分含有率の範囲を表 2.2.1-2 に，物理化学的性状範囲を表 2.2.1-3 にまとめている。

PS 灰の成分含有率は，蛍光 X 線分析法で求めており，含有率の範囲は，非常に幅広い。物理化学的試験については，粒子密度は，土粒子の密度試験（JIS A 1202），粒度試験は，土の粒度試験（JIS A 1204），pH 試験は，土の pH 試験（JGS 0211），PS 灰の密度は，最小密度試験法（JGS 0161）に準拠して求めた。粒子密度，最小密度，pH は，表 2.2.1-2 の結果に示す通り，平均粒径 D50 についても表 2.2.1-3 および図 2.2.1-1 に示す全 PS 灰の粒度分布範囲のとおりで，どの項目も非常に幅広い範囲にあることがわかる。PS 灰の物性には，発生場所，用いられる製紙の性状，PS の焼成方法ならびに燃焼時に使用される助材の種類，古紙再生割合の状況，近年，耐久性の高い中性抄紙化に伴う填料の使用量など時代背景の要因が大きく影響している。したがって，今回選定した 4 種類の PS 灰と同様の品質が認められる PS 灰には，同様の適用性が可能になるであろう。

表 2. 2. 1-2 PS 灰の全 PS 灰（88 種類）の成分含有率の分類

化学成分	含有率(%), 分類		
	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. 2. 1-3 全 PS 灰（88 種類）の物理化学的性状範囲

項目	全 PS 灰(範囲)	平均値	標準偏差 σ
粒子密度 (g/cm ³)	2.00～3.30	2.52	0.216
最小密度 (g/cm ³)	0.450～1.01	0.690	0.156
平均粒径 D_{50} (μ m)	5.00～1070	207	193
pH	7.20～13.2	11.3	1.28

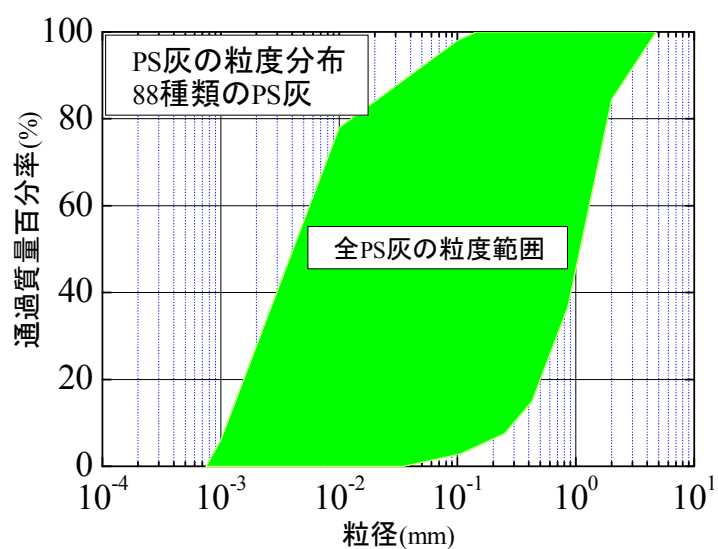


図 2. 2. 1-1 全 PS 灰の粒度分布範囲

2.2.2 サイクロン炉による焼却

代表的な焼却炉としてサイクロン炉の焼成方法を図 2.2.2-1 に、サイクロン炉 PS 灰の拡大顕微鏡写真を写真 2.2.2-1 に示す。サイクロン型焼却炉の燃焼機構は、炉上部より自燃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。クリンカー発生はなく、サイクロン炉 PS 灰粒子自体の粒径は、大きめで粒度も安定しており、PS 灰には 5%程度の未燃カーボンが含まれている。サイクロン炉から発生した PS 灰 A の物理化学的性状範囲については、次のストーカー炉、流動床炉の PS 灰とともに表 2.2.2-1 に整理した。

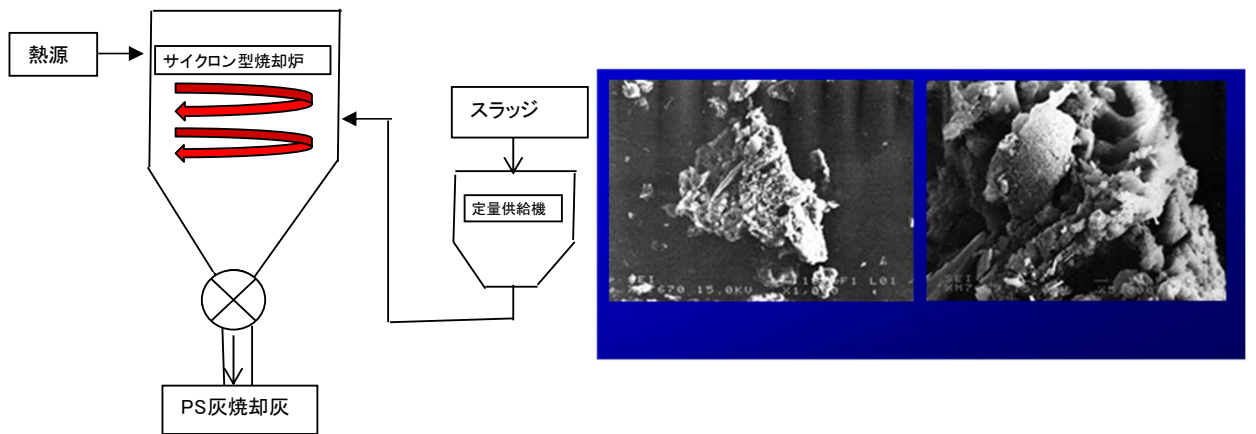


図 2.2.2-1 サイクロン炉による PS の焼成方法

写真2.2.2-1 サイクロン炉によるPS灰

表 2.2.2-1 4 種類の PS 灰の各種物理化学的性状範囲

項目	焼却炉ごとの PS 灰											
	PS 灰 A			PS 灰 B			PS 灰 C			PS 灰 D		
焼却炉	サイクロン炉			ストーカー炉			流動床炉					
分類	範囲	平均	標準偏差 σ	範囲	平均	標準偏差 σ	範囲	平均	標準偏差 σ	範囲	平均	標準偏差 σ
粒子密度 (g/cm ³)	2.59 ～ 2.63	2.61	0.0133	2.29～ 2.56	2.42	0.103	2.64 ～ 2.74	2.67	0.0373	2.65 ～ 2.74	2.66	0.0338
最小密度 (g/cm ³)	0.650 ～ 0.700	0.670	0.0172	0.440 ～ 0.620	0.560	0.0497	0.530 ～ 0.560	0.550	0.0121	0.480 ～ 0.520	0.490	0.0128
平均粒度 D ₅₀ (μm)	280～ 425	367	50.5	27.0～ 120	97.0	18.4	84.0 ～ 110	99.0	9.42	100 ～ 125	108	8.87
pH	7.90 ～ 10.2	9.30	0.866	11.1. ～12.8	12.3	0.454	11.3 ～ 11.9	11.6	0.164	10.8 ～ 11.5	11.2	0.220

2.2.3 ストーカー炉による焼却

二番目にストーカー炉の焼成方法を図2.2.3-2に、ストーカー炉PS灰の拡大顕微鏡写真を写真2.2.3-1に示す。ストーカー炉では、長時間かけて安定燃焼を行うため、炉下PS灰には、写真2.2.3-1に示すように目視確認できる状態の微細孔が生成されている。PS灰粒子内にある細孔状況、細孔径分布は、水銀ポロシメータによって計測を行い、後述2.3.3において細孔容積という客観的結果で比較表現した。ただし、表2.2.2-1からも明確な通り、粒径、粒子密度、かさ密度等すべての物性についてばらつきの範囲幅が広がっている。ストーカー焼却炉は、大規模ごみ焼却施設などの大量ごみ変動焼却には適した焼却炉ではあるが、大規模工場の大量PS焼成に用いた場合、安定燃焼中にも大容量の灰が発生し、若干の未燃焼残渣や飛灰との混入が認められるため、PS灰の均一性が要求される泥土改質材に用いるためには、吸水性能を安定化させる処理方法が不可欠となる。

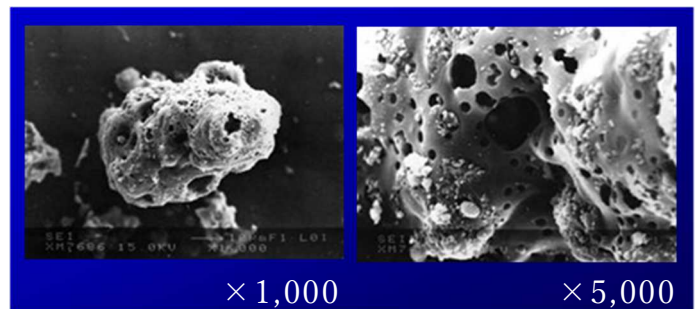
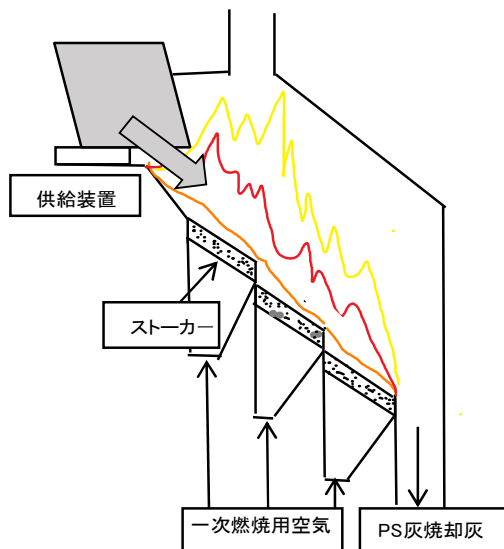


写真2.2.3-1 ストーカー炉によるPS灰

図 2.2.3-1 ストーカー炉焼成方法

2.2.4 流動床炉による焼却

最後にPS灰の焼成炉として、最も使用頻度の高い流動床炉の焼成方法を図2.2.4-1に、流動床炉PS灰の拡大顕微鏡写真を写真2.2.4-1に示す。製紙工場内では、スラッジ以外の焼却物はなく、ごみ施設のような変動も少ないので、短期間的高熱焼却方法となる流動床炉が使用されている。

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かったため、表2.2.1-3や図2.2.1-1に示される幅の広い初期のPS灰物性範囲は、すべて流動床炉PS灰によるものであった。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も改善されており、そのような炉に限定すれば、表2.2.2-1のC及びD灰に示す通り、物性ばらつきの範囲も小さい。

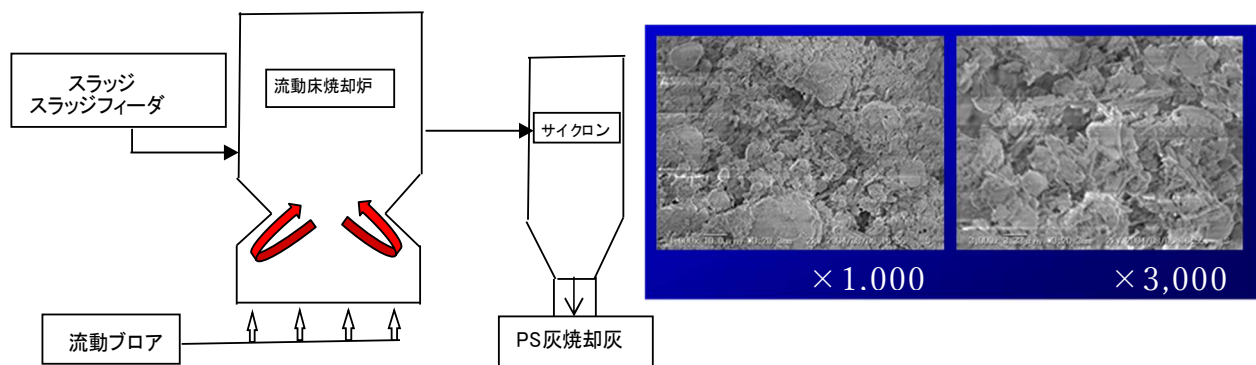


図 2.2.4-1 流動床炉焼成方法

写真2.2.4-1 流動床炉によるPS灰

2.3 PS 灰の吸水試験方法と各焼成方法による PS 灰の吸水性能

2.3.1 PS 灰吸水性能指標としての吸水比 w_{ab} の提案

これまでPS灰に似た石炭灰の埋め立て活用のために石炭灰のコンシステンシー評価方法¹⁸⁾が提案されてきたが、これは、流動限界の評価方法であった。一方、高い吸水性能を示すPS灰粒子では、その表面が複雑な凹凸に富むので、凹凸部分のメニスカスによって水を表面に強く保持し、さらに表面に開口した多数の微細孔内部に水を吸い込んで放さない。これらの保持吸水量を正確に測定することは流動限界評価手法では至難であるので、近似的な値を求める簡易な試験方法を考案した（図2.3.1-1）。

PS 灰吸水性能指標としての吸水比 w_{ab} は、乾燥状態の PS 灰全体に決められた水量を添加して、PS 灰に吸収される水分量を経時的に算定しながら最終的に安定収束した際の PS 灰含水比 w を吸水比 w_{ab} で定義している。

PS 灰に吸水される水分量は、まず PS 灰を水中に投入した際の水の高さ水位 H_1 から水中の PS 灰の高さ H_2 を差し引いて、PS 灰から分離した水分高さを計測する。これに容器の断面積 A をかけた PS 灰分離水分体積を試験開始時の加えた水分体積 V_m から差し引いた後に水の密度 ρ_w をかけることで PS 灰に吸水される水分量を算定している。PS 灰吸水性能試験方法では、できる限り均一で理想飽和状態になるよう試験手順を定めた。

・試験手順

- ① 500 ml用メスシリンダー($\phi=50$ mm)に体積 V_1 cm³ 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 g (試験に用いるのは100 g) の PS灰材料を入れる。
- ② メスシリンダーにふたをして、泡がたたないように逆さにしたり戻したりする操作を約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。その際に内容物を少しも失ってはいけない。
- ③ ラップを外して、ラップとメスシリンダー表面に付着したPS灰材料を洗浄ビンに入った体積 V_2 cm³ (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1 mm)
- ⑥ 振動後は、静置しない。
- ⑦ 水の高さ水位 H_1 、PS灰の高さ H_2 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 (1)より吸水比 w_{ab} を求める。

$$w_{ab} = \frac{\{V_m - A(H_1 - H_2)\} \times \rho_w}{M_m} \times 100 \quad (1)$$

V_m : 加えた水の体積、 V_1 : 最初に入れておく水の体積

V_2 : メスシリンダー表面に付着した PS 灰材料を洗い流す体積量 $V_m = V_1 + V_2$

A : 吸水比測定容器の断面積

H_1 : PS 灰を加えた後の水の水位

H_2 : PS 灰材料の高さ

ρ_w : 水の密度, M_m : PS 灰材料の質量

本方法ではばらつき 2 % 以内の結果が得られることを確認している. 水の体積 V_m は, 最初に入れておく水の水量 V_1 とラップとメスシリンダー表面に付着した PS 灰材料を洗い流す水量 V_2 とを合わせ 300 ml とした. また吸水比 w_{ab} は空気を含まない吸水量であることが好ましいので, 水に PS 灰材料を入れる方がよい. ④ の静置沈降時間は, 一番遅い材料の収束時間が 35 分程度だったため, 余裕を持って 60 分とした. ⑤ の作業で振動させたのは, PS 灰材料全体に伝わるようにするために PS 灰材料は, ④ の静置沈降終了後に ⑤ の振動を開始するものとした.

図 2.3.1-1 より, ⑤ の作業において, 振動時間を 10 分間としたのは, 粗粒の PS 灰材料の場合, 粒子が変化しなくなる振動時間が最大 10 分であること, 細粒 PS 灰材料の場合には, 高さ変化は経時的に少量変化し続けるが, 10 分間の振動で終了状態に近いと判断した. 吸水比 w_{ab} は, PS 灰の粒子径や粒子形状に影響を受ける可能性があるが, 本論文では, 次項(3)で細孔容積という物理的指標と今回提案した吸水比 w_{ab} の相関性を確認することでその妥当性を確認している.

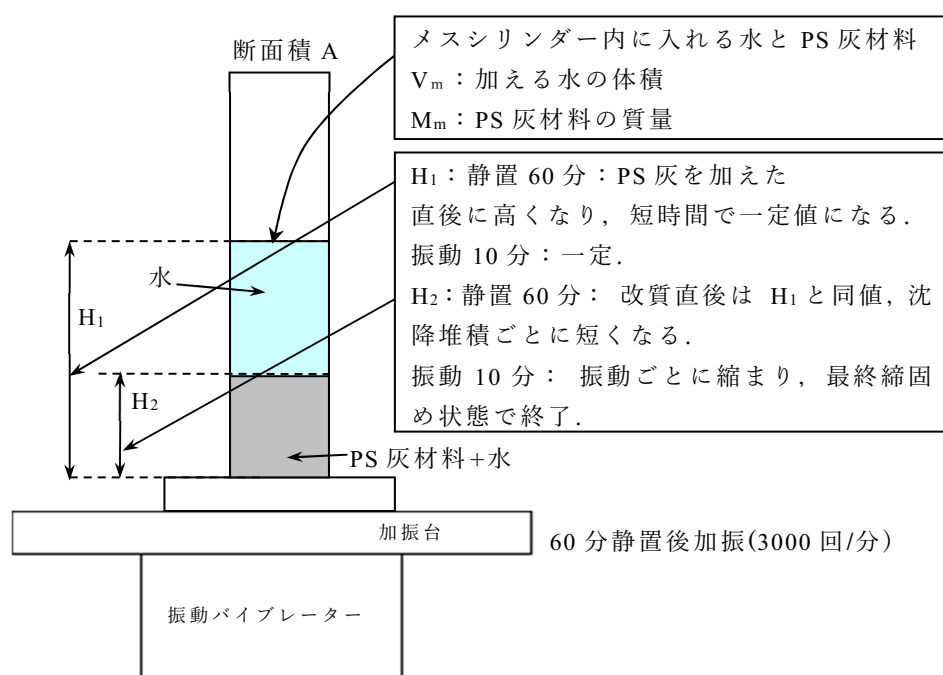


図 2.3.1-1 吸水比 w_{ab} を求める吸水性能試験方法

2.3.2 焼成炉の違いによる各種 PS 灰の性状について

各種PS灰を用いた吸水性能試験結果を図2.3.2-1（静置沈降段階）及び図2.3.2-2（振動段階）に示す．典型的な3種類の炉のPS灰A（サイクロン炉），PS灰B（ストーカー炉），流動床炉PS灰C，D（流動床炉）とPS灰材料との比較として石炭灰を使用した吸水性能試験実施例を記載している．本試験結果より，どのPS灰も石炭灰より吸水性能に優れていること，各PS灰を比較してみるとストーカー，流動床炉，サイクロン炉の順で吸水性が大きくなっていることがわかる．

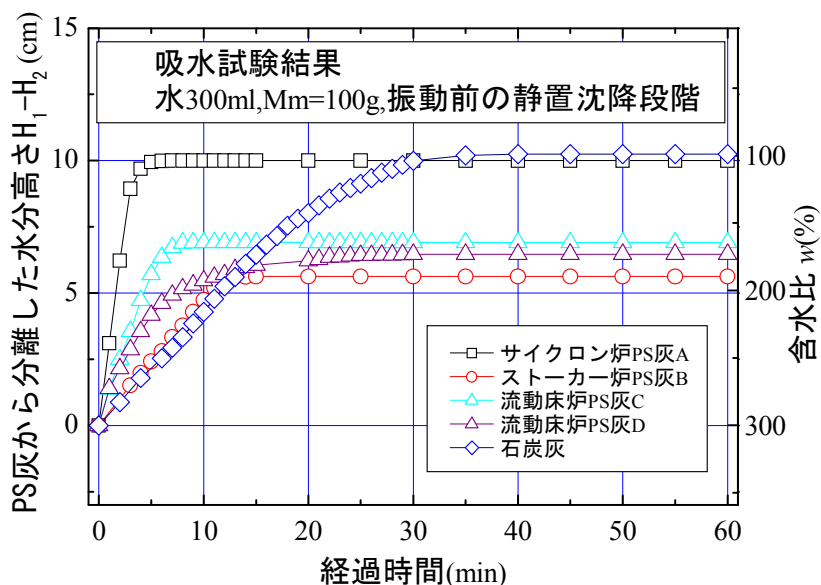


図 2.3.2-1 PS 灰の吸水性能試験結果（静置沈降段階の吸水状況）

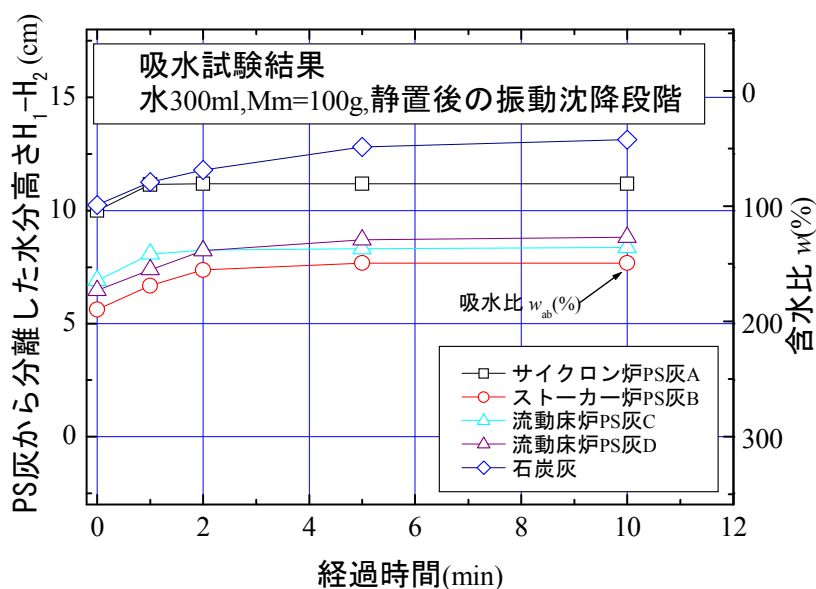


図 2.3.2-2 PS 灰の吸水性能試験結果（振動段階の吸水状況）

2.3.3 PS 灰に対する吸水比 w_{ab} の客観的評価について

今回提案した吸水性能試験結果から得られたPS灰の吸水比 w_{ab} は、堆積粒子間の自由水分をも含むものであって、厳密な意味での吸水率に対応するものではない。そこで吸水比 w_{ab} の客観的な妥当性を判定するためにPS灰4種類、豊浦砂、活性炭、ゼオライト、ガラスビーズ2種(10 μ m, 500 μ m)に対して得られた w_{ab} 値と各材料の細孔容積の関係を図2.3.3-1に示す。PS灰は、細孔性にとんでいることから砂やガラスビーズより吸水性能が高くなる。細孔容積と吸水比 w_{ab} の相関係数もPS灰材料だけの関係で整理すると非常に相関性のいい傾向になっている。吸水比 w_{ab} を求めるための本吸水性能試験方法は、水銀ポロシメータの結果としてPS灰粒子内の細孔容積という物理的指標に基づいた吸水原理確認のための方法であると判断した。今回吸水試験に供した各種PS灰 に対して、長期間にわたって多数の本吸水性能試験を繰り返し実施し、各材料の吸水比 w_{ab} の範囲を調べたものが図2.3.3-2になる。本結果よりストーカー炉PS灰Bの吸水比 w_{ab} の範囲が一番ばらつき範囲が大きい。続いて、流動床炉PS灰D, C, 最も幅が狭いものがサイクロン炉PS灰Aとなった。

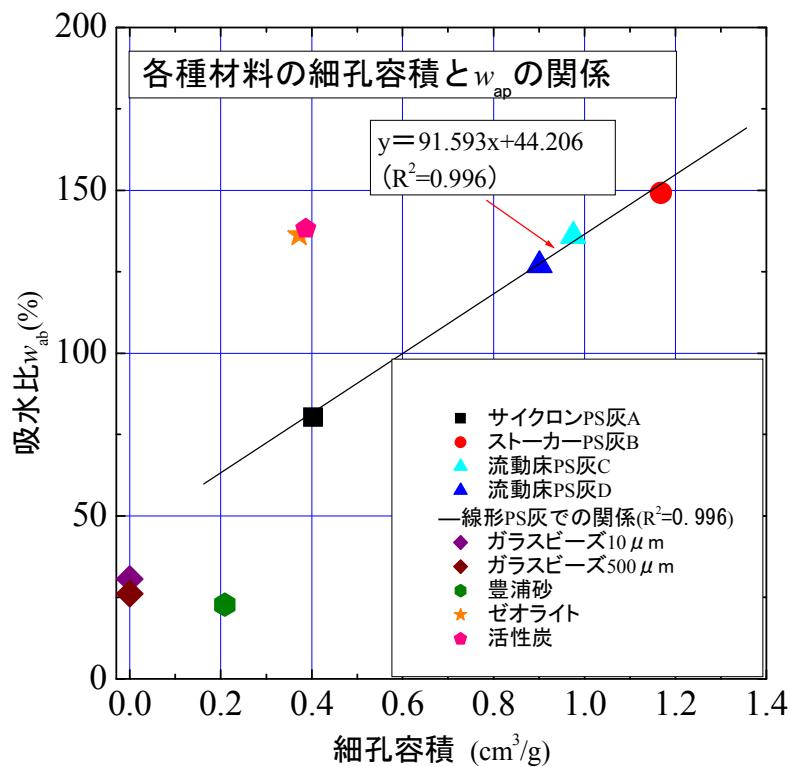


図 2.3.3-1 各種 PS 灰の細孔容積と吸水比 w_{ab} の関係

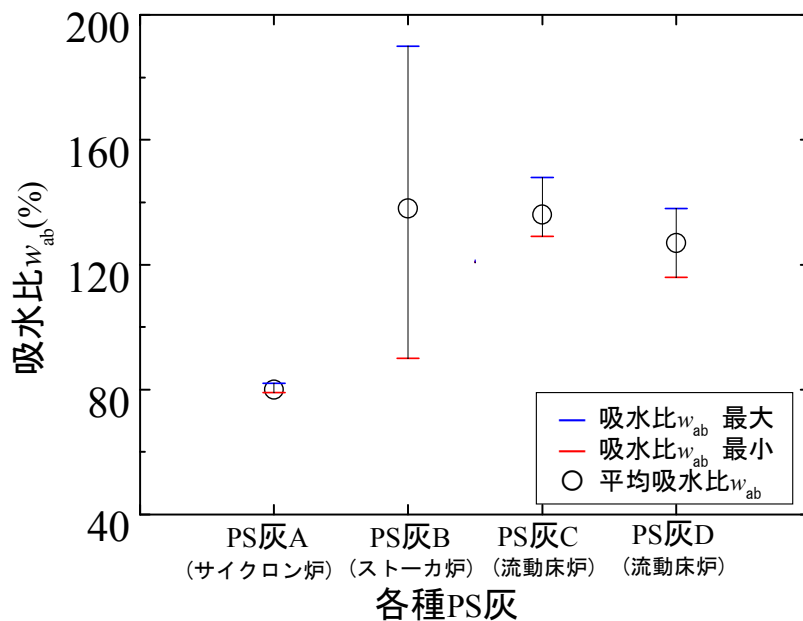


図 2.3.3-2 各種焼却炉 PS 灰の種類と吸水比 w_{ab} の範囲

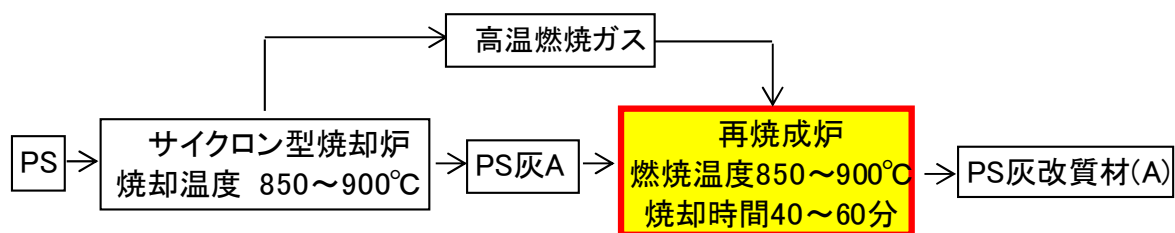
2.4 各種 PS 灰の吸水品質の改善

1990年初期からPS灰の土質材料としての有効利用^{15),17)}や改良材としての検討^{19),20)}が始まり，著者もPS灰の吸水改質材の開発を開始した^{15),21)~24)}．PS灰には，高吸水性機能はあるが，表2.2.2-1や図2.3.3-2に示すよう焼却炉による差がある．そこで製紙工場の設備条件やPS灰の特徴を十分考慮した加工処理をほどこすことで，安定した品質性能を保証する泥土改質材が製造できることを確認した．PS灰の処理方法については，本論文の主題である吸水性にかかわる手法について記載した．

2.4.1 サイクロン炉 PS 灰の再焼成処理による改善効果

サイクロン炉PS灰Aの再焼成処理方法を図2.4.1-1に，処理後のPS灰改質材(A)の拡大顕微鏡写真を写真2.4.1-1に示す．PS灰粒子内には目視確認可能な微細孔が存在しており，これが高吸水機能を発揮する要因となっている．サイクロン炉PS灰Aには，5%の未燃カーボンが含まれており，これをサイクロン焼却炉から850～900℃の燃焼ガスの再燃焼炉へ導き，40～60分程度の滞留時間で保持再燃焼させる．スラッジ中の炭素や水素が再燃焼時に抜け出すことでPS灰粒子内に微細孔を多数作り上げ，材料の高吸水機能を向上させる．

ここでは，補助対策剤は使用していない．吸水性能を示す平均吸水比 w_{ab} は，表2.4.1-1のとおり再焼成前の80%から102%まで上昇し，その性能は非常に安定した．各種PS灰の細孔容積と吸水比 w_{ab} の関係が非常に相関性のいい傾向になっていたように再焼成処理についても表2.4.1-1に示すとおり細孔容積は，0.3cm³/g以上の改善が認められた．物理化学的性状や吸水比 w_{ab} 範囲は，表2.4.1-2に示すとおりである．



*補助対策剤は使用していない

図 2.4.1-1 サイクロン灰の再焼成処理（PS 灰改質材 (A) の製造方法）

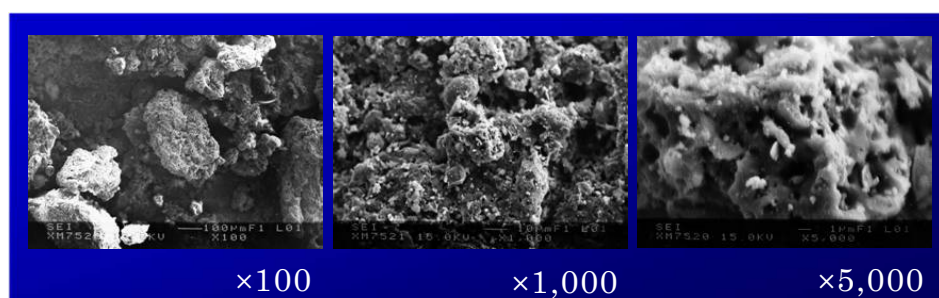


写真2.4.1-1 PS灰改質材 (A)（再焼成処理後）

表 2.4.1-1 PS 灰改質材 (A) の細孔容積と吸水比 w_{ab} の改善効果

処理前後の比較	細孔容積 (cm^3/g)	吸水比 $w_{ab}(\%)$ 範囲
処理前サイクロン PS 灰 A	0.403	78.0~82.0
再焼成処理後 PS 灰改質材(A)	0.723~0.746	100~105

表 2.4.1-2 各種処理 PS 灰の物理化学的性状範囲ならびに
吸水比 w_{ab} 範囲と平均吸水比 w_{ab}

項目	改質材処理			
	PS 灰改質材(A)	PS 灰改質材(B)	PS 灰改質材(C)	PS 灰改質材(D)
焼却炉と処理方法	サイクロン炉再焼成	ストーカー炉造粒	流動床炉混合	
粒子密度(g/cm^3)	2.40~2.45	2.55~2.56	2.64~2.74	2.65~2.74
最小密度(g/cm^3)	0.600~0.650	0.600~0.650	0.530~0.560	0.480~0.520
平均粒度 D_{50} (μm)	280~425	150~350	840~110	100~125
pH	8.00~12.0	9.20~10.3	11.3~11.9	10.8~11.5
吸水比 $w_{ab}(\%)$ 範囲	100~105	113~132	129~148	116~138
平均吸水比 $w_{ab}(\%)$	102	125	136	127

2.4.2 ストーカーPS 灰の造粒処理による改善効果

次に吸水性能のばらつきが高いストーカーPS灰Bでは、逆流式高速攪拌造粒処理による改善効果を確認した(図2.4.2-1)。処理後の造粒状況を写真2.4.2-1、処理したPS灰改質材(B)の拡大顕微鏡写真を写真2.4.2-2に示す。写真では、粒子中にエトリンガイトの生成が確認できる。本処理方法では、セメント系補助対策剤による化学的なエトリンガイト生成が行われるため、強い固結力をもつ均一造粒化処理となっている。処理後のPS灰改質材(B)については、若干の吸水性能低下が認められるが、表2.4.1-2及び図2.4.2-2に示すとおり、品質の均一化が進むことでPS灰材料の安定化とばらつきの削減が確認できた。

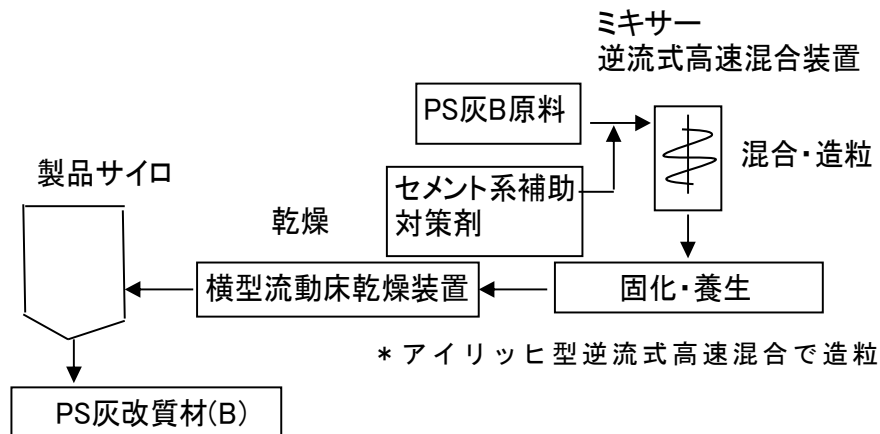


図 2.4.2-1 ストーカー灰の造粒処理 (PS 灰改質材 (B) の製造方法)



写真2.4.2-1 PS灰改質材(B) (造粒処理状況)

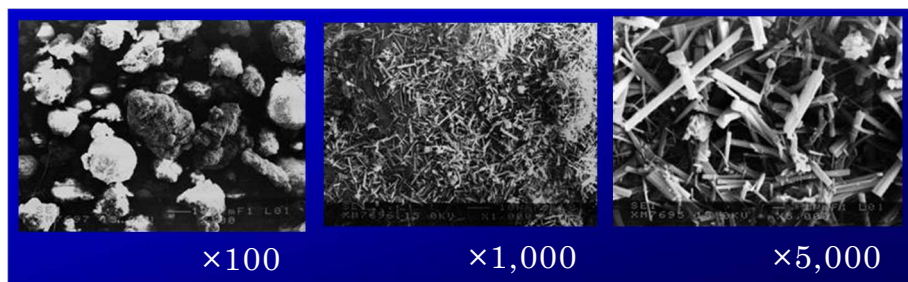


写真2.4.2-2 PS灰改質材 (B)

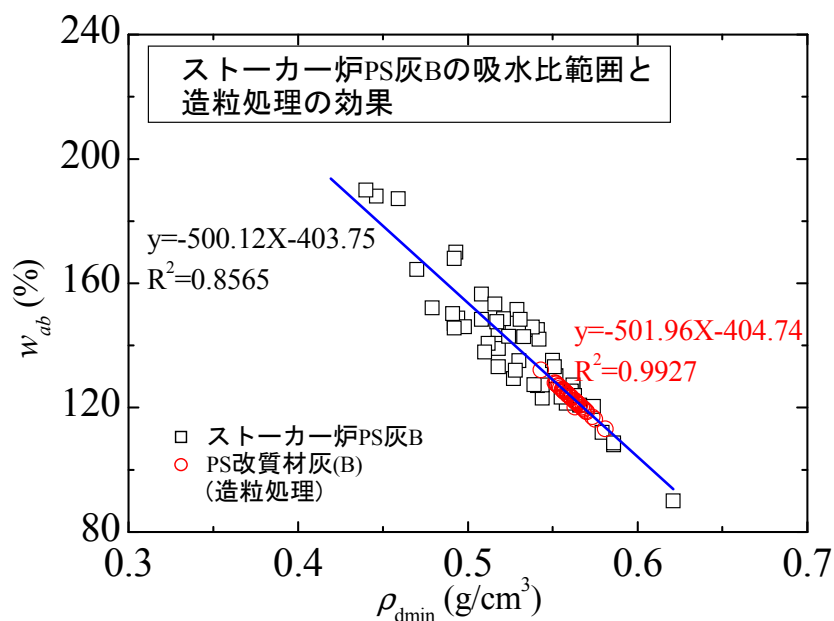


図 2.4.2-2 ストーカー炉 PS 灰 B の吸水範囲と造粒化処理後の改質性状

2.4.3 流動床 PS 灰の不溶化対策材処理による改善効果

流動床 PS 灰 C, D の混合処理方法を図 2.4.3-1 に示す. PS 灰の有する吸水性能には, 何ら変化を与えることのない金属を微量に含有した粉体フッ素不溶化系補助対策剤を PS 灰に数%程度均一混合させて PS 灰改質材(C), (D)を製造した. 本処理方法では, フッ素溶出を土壌環境基準値内(0.8 mg/l)に抑える付加価値を加えた改質材に改善させている. 図 2.4.3-1 内の処理前 PS 灰 C, D の吸水比範囲と表 2.4.1-2 の処理後 PS 灰改質材(C), (D) の吸水比範囲より吸水性能に差がない事が確認できる.

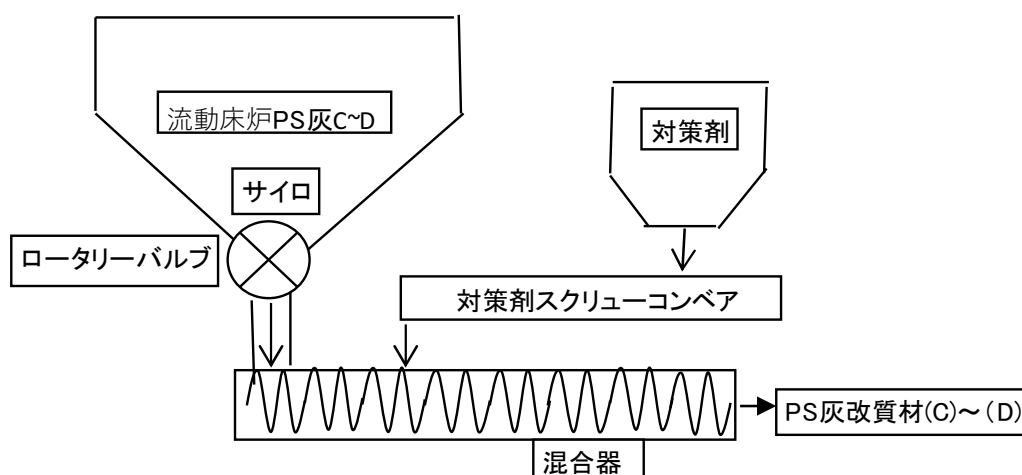


図 2.4.3-1 流動床 PS 灰の不溶化対策混合処理

2.5 泥土の改質効果と配合設計の検討

2.5.1 試験方法と試料

建設発生土を利用する場合，コーン指数によって設定された発生土区分が改良基準となることから，改質効果を調べるための配合試験には，締固めた土のコーン指数試験(JIS A 1228)を用いるのが一般的である²⁴⁾．PS灰による改質方法では，基本的に養生時間は必要ないため，すべて供試体作製直後にコーン貫入試験を行っている．

今回，配合実験に使用した材料は，4種類のPS灰改質材(A)，(B)，(C)，(D)と別途原材料13種類のPS灰試料である．配合設計方法を確立するために，表2.5.1-1に示すとおり，107種類の現場試料と表2.5.1-2に示す改質材配合試験用の基本試料藤森粘土に対して，配合試験を実施した．

表 2.5.1-1 各泥土試料の物理特性試料の物性範囲（107 種類, 188 試料）

項目	全試料(範囲)	平均値	標準偏差 σ
土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.20～2.85	2.62	0.0997
含水比, w (%)	25.6～209	94.1	75.7
液性限界, w_L (%)	32.4～195	89.8	47.1
塑性限界, w_P	15.3～106	43.4	23.1
塑性指数, I_P	7.70～124	46.4	28.6

表 2.5.1-2 藤森泥土の物理特性

土の種類	藤森粘土
土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.67
含水比, w (%)	72.0
液性限界, w_L (%)	58.0
塑性限界, w_P	24.0
塑性指数, I_P	34.0

2.5.2 泥土の改質効果と配合設計への検討

まず吸水性能について整理した4種類のPS灰改質材(A), (B), (C), (D)と13種類のPS灰試料を加えた試料を用いて藤森粘土(設定含水比 $w=72\%$)に対し、配合試験を実施した。図2.5.2-1に吸水比 w_{ab} と必要添加率 η ($q_c=200$ kPa)の関係を示しているが、選定した13種類のPS灰試料の w_{ab} の値が大きい材料ほど添加率 η は小さく、添加量あたりの改質効果は高まる傾向が認められ、4種類の材料以外のPS灰においても同様な客観的評価が得られることがわかった。

次に含水比を変化させた藤森粘土で4種類のPS灰改質材(A), (B), (C), (D)の余剰水分($w-w_L$)と添加率 η ($q_c=200$ kPa)の関係を図2.5.1-2に示す。液・固の限界を示す液性限界 w_L を上回る水分($w-w_L$)と所定のコーン指数($q_c=200$ kPa)を得るための必要添加率 η ($\eta=M_m/M_s$, M_m : 改質材の添加質量, M_s : 泥土の乾燥質量)は、

$$\eta = a(w - w_L) + b \quad (2)$$

といった線型関係、式(2)で示されること、直線の傾き a は、改質材料固有のもので、吸水比 w_{ab} の大きいものほど傾きは小さくなることがわかる。ここでは一つの泥土についての関係式であるため、各々の直線の x 切片は一致している。次に70種の泥土について実施したPS灰改質材(A)についての配合試験結果を図2.5.2-3に整理した。泥土については、塑性指数 I_P の範囲ごとに区分しており、($w-w_L$)と添加率 η の間の線型関係においてその傾き a は、土の I_P に関わらず一定であり、 I_P の大小によって直線が平行移動するため、 I_P と x 切片(添加率 $\eta=0$ の場合の($w-w_L$))の関係を求めれば、PS灰改質材(A)についての η の推定式が求められる。図2.5.2-4に吸水比 w_{ab} と余剰水($w-w_L$)と添加率 η の傾き a ($a=\eta/(w-w_L)$) の関係を提示した。

ここでは、PS灰改質材(A)～(D)までのすべての材料の傾き a を示した。塑性指数 I_P の範囲に対して実施した(B)～(D)の試験数は、(A)よりは少ないが、すべてのPS灰改質材の固有の傾き値 a として、吸水比 w_{ab} と直線関係にあることがわかる。

図2.5.2-5は、塑性指数 I_P と $\eta=0$ で $q_c=200$ kPaを満たす($w-w_L$)の関係を示した。これらの結果から $q_c=200$ kPaを満たすのに必要な添加率 η の推定式は、式(3)のとおりになった。

$$\eta = a \{ (w - w_L) + 37.8 \log I_P - 33.5 \} \quad (3)$$

本推定式の精度を確認するために、式(3)の計算値と実験値を図2.5.2-6にプロットした。

本結果よりある程度の相関が得られていることがわかる。図2.5.2-7は、所定改質強度 $q_c=400$ kPaの場合の推定式の相関性であるが、 $q_c=200$ kPaの場合と同様な結果が得られた。

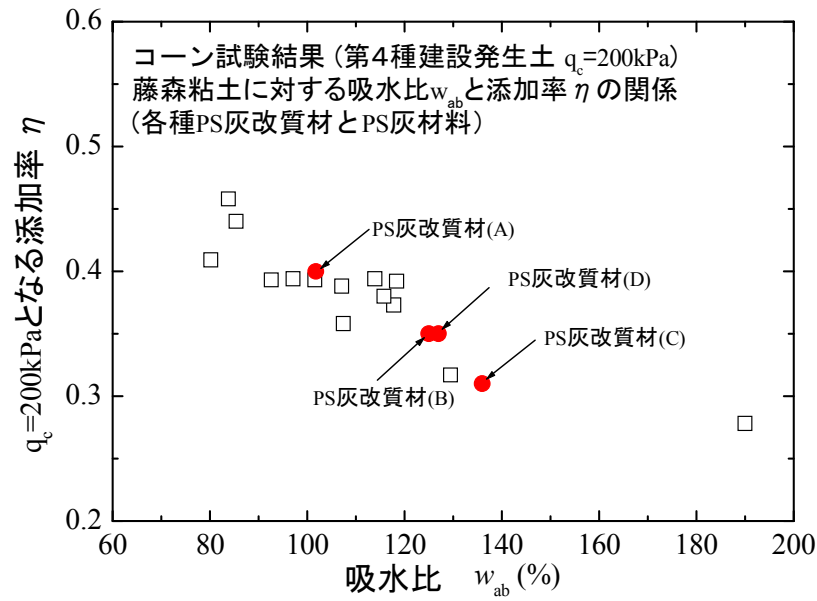


図 2.5.2-1 吸水比 w_{ab} と $q_c=200\text{kPa}$ を満たす添加率 η の関係

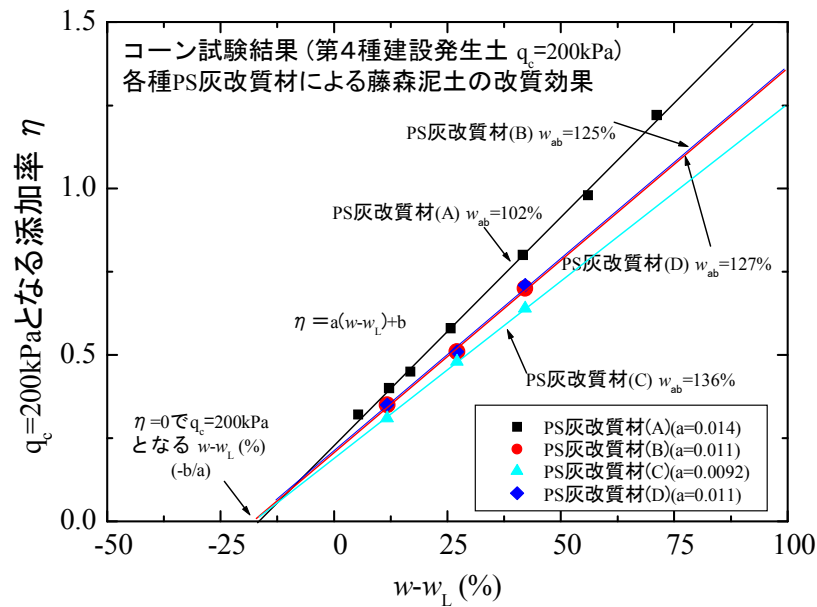


図 2.5.2-2 $(w-w_L)$ と $q_c=200\text{kPa}$ を満たす添加率 η の関係

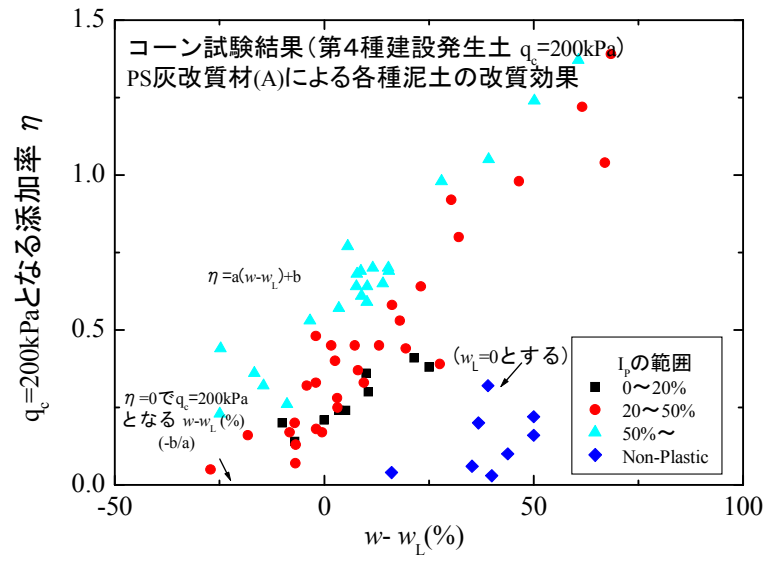


図 2.5.2-3 $(w - w_L)$ と $q_c=200\text{kPa}$ を満たす添加率 η の関係

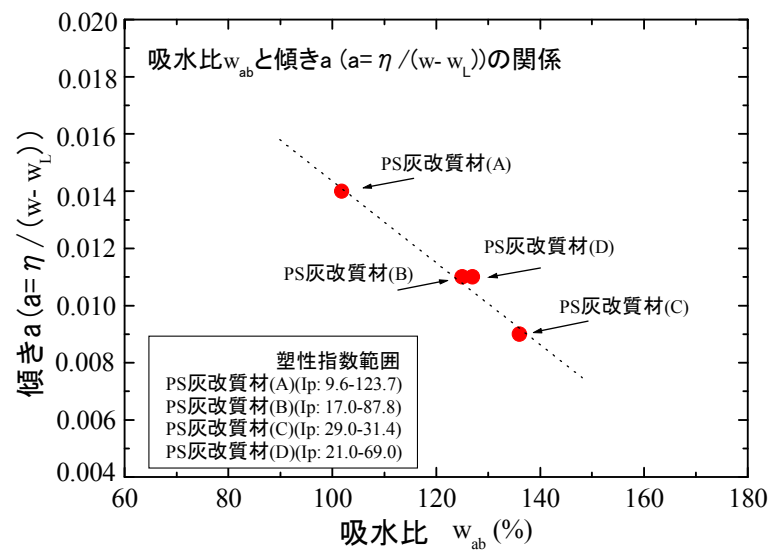


図 2.5.2-4 吸水比 w_{ab} と傾き a の関係 ($a = \eta / (w - w_L)$)

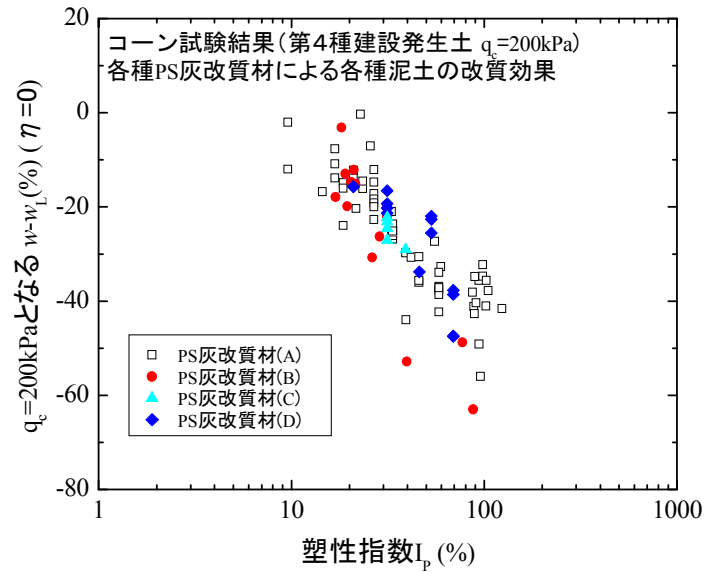


図 2.5.2-5 IP と $\eta=0$ で $q_c=200$ kPa を満たす $(w-w_L)$ の関係

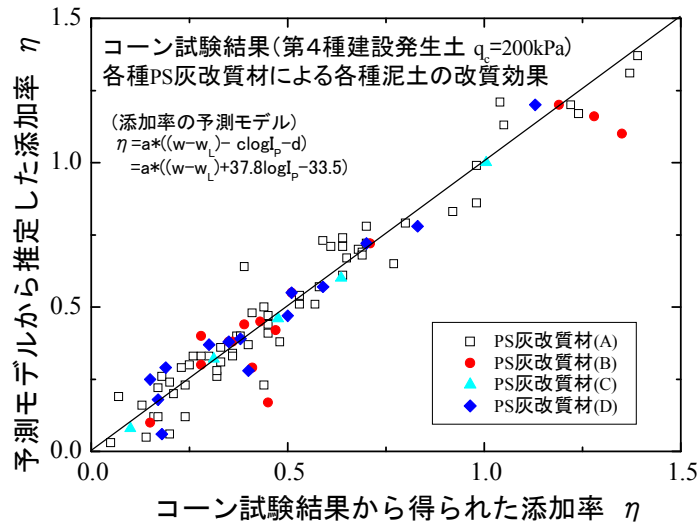


図 2.5.2-6 η の実測値と推定値の関係 ($q_c=200$ kPa の場合)

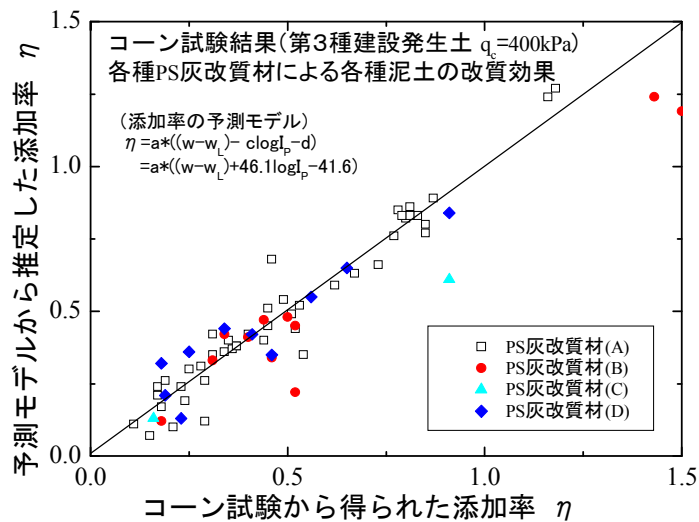


図 2.5.2-7 η の実測値と推定値の関係 ($q_c=400$ kPa の場合)

2.6 PS 灰改質材の配合設計における破碎の影響

PS灰改質材を泥土改質材として施工に用いる場合、使用材料自体の吸水性能やPS灰改質材を対象泥土の吸水改質材として混合、締固めする際の細孔構造の耐久性を確認しておく必要がある。

配合試験を行う場合、締固めた土のコーン指数試験(JIS A 1228)では、突固め方法A、道路などの締固め試験方法では、突固め方法Eが一般的であることから、PS灰改質材の破碎方法として突固め方法A及びEを選択した。さらに破碎の限界方法として粒状体の粒子破碎試験に使用するGMP (good manufacturing products) 仕様の小型衝撃式ミル粉碎装置を用いた。本装置では、破碎終局状態と認識できる粉碎が行われている。材料を締固めるのは、対象土との混合で行うが、材料の破碎状況を確認するためにここでは、想定した各エネルギーを直接材料に加えて破碎している。

PS灰改質材(A)に対して、突固め方法A及びEのエネルギーを加えて粒子破碎したものと小型衝撃式ミル粉碎装置を用いて粉碎させたものの粒子破碎前後の粒度分布を図2.6-1に示している。突固め方法Aでは、粒子破碎を引き起こさないが、エネルギーの大きい突固め方法Eでは、有意な破碎が生じている。さらに強制機械粉碎まで行くと1/15程度の相似率で粒度が細くなり、シルト分の多い粒径になることがわかる。

通常、締固めは、改質対象となる泥土内に添加された状態で締固められるものである。PS灰改質材を泥土改質に使用する場合、添加率 $\eta=1$ を最大限と仮定して、基準である藤森粘土とPS灰改質材(A)を乾燥重量で1:1に混ぜた改質土を破碎確認試料の条件とした。これに施工時改質土の最大条件となる突固め法Eで締固めた前後の粒度分布を比較した(図2.6-2)。その結果、突固め方法E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なかった。

突固め方法Aのエネルギーでも直接締固めで粒子破碎は生じておらず、一般の施工どおり、PS灰改質材(A)を土に混ぜて使用するのであれば、粒子破碎の影響は受けないことを確認した。

PS灰改質材(A)を破碎させた粒子の破碎状況や吸水性能、細孔容積を調べた。この時の破碎状況を撮影したものが写真2.6-1の拡大顕微鏡写真である。写真2.4.1-1で掲載した破碎前のPS灰改質材(A)と比較すると粒子表面に認められていた無数の微細孔が少なくなっていることがわかる。

図2.6-3に示すとおり、強制的に粒子破碎を生じさせたPS灰粒子の細孔容積と吸水比 w_{ab} の値は、ともに小さくなっており、相関性はPS灰の破碎前に検討した時と同様の線形関係が得られている。特に機械粉碎では、吸水比 $w_{ab}=61\%$ で、もとの吸水比 w_{ab} の6割以下の値になった。

最後に今回破碎した各試料を用いて藤森粘土のコーン試験を実施した配合試験結果を図2.6-4に示している。粒子破碎にもあまり影響が認められない突固め法Aの場合、改質効果も破碎前のPS灰改質材(A)とほとんどかわりがない。それに対して突固め法E、機械粉碎と破碎の程度が大きくなるにつれて改質効果が小さくなることがわかる。特に機械粉碎では、図2.6-3より吸水比 w_{ab} も6割以下の値になっていることから、所定強度($q_c=200$ KPa)の改質に必要な添加量も3割増し程度となっている。

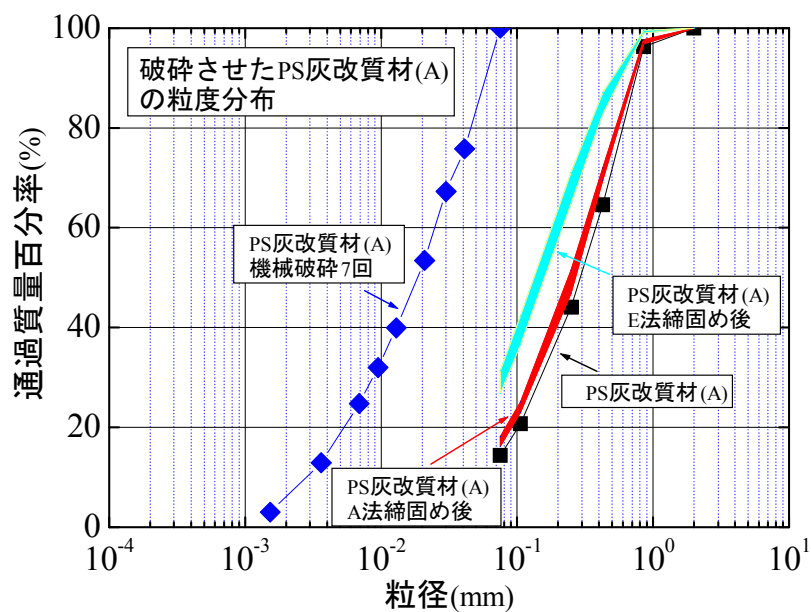


図 2.6-1 PS 灰改質材 (A) の破碎による粒度分布

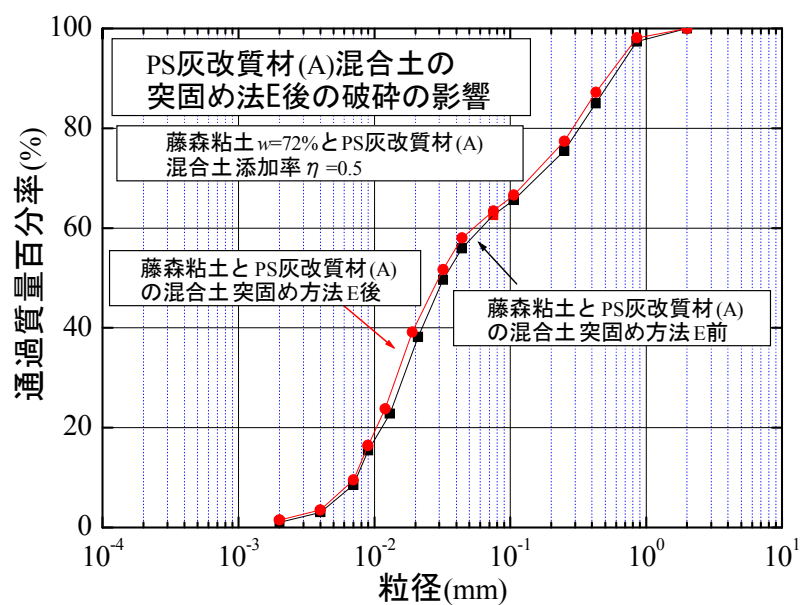


図 2.6-2 PS 灰改質材 (A) 混合土の突固め方法 E による破碎の影響

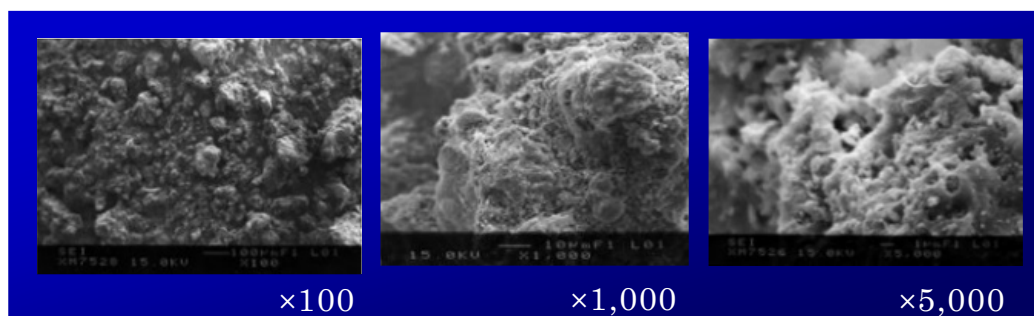


写真2.6-1 衝撃式ミル 粉碎装置で粉碎したPS灰改質材 (A)

以上、今回の結果から意識的に PS 灰改質材(A)に破碎を生じさせると PS 灰改質材(A)の細孔容積と吸水比 w_{ab} の値は、ともに小さくなり、改質効果も減少して必要添加率 η は大きくなる。破碎時の細孔容積と吸水比 w_{ab} 相関性は、破碎前と同様であり、粒子に破碎が生じたとしてもその際の粒状体の細孔容積状態を想定できる吸水比 w_{ab} がわかれば改質効果も本論文に記載した方法で容易に算定可能となる。ただし、図 2.6-2 の通り通常想定する泥土吸水材の適用は、高含水粘性土であり PS 灰改質材に直接破碎エネルギーが加わって破碎を促すことはない。

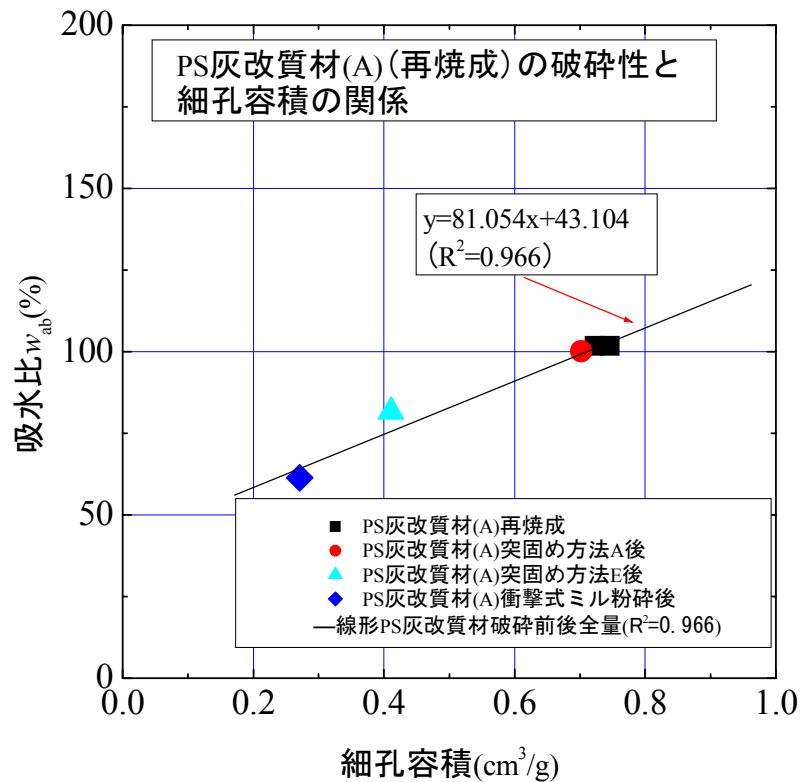


図 2.6-3 PS 灰改質材 (A) の破碎状況が影響する細孔容積と吸水比 w_{ab} の関係

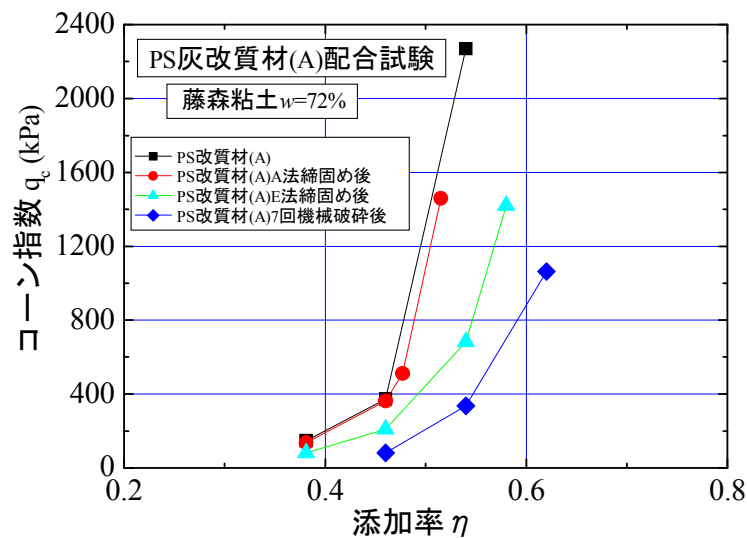


図 2.6-4 PS 灰改質材 (A) 混合土の配合試験結果

2.7 PS 灰改質材の吸水性泥土改質性能に関するまとめ

本論文の結論をまとめると以下のとおりになる。

- ① PS 灰の吸水性能を簡便かつ客観的に評価できる吸水試験方法を考案した。
- ② 吸水試験から得られる吸水比 w_{ab} という性能指標を用いて、焼却炉（形式）の異なる各種 PS 灰の吸水性能の違いやばらつきを評価した。
- ③ 吸水比 w_{ab} を求めるため、今回提案した吸水試験方法は、PS 灰に関しては、細孔容積という物理的な指標に基づく吸水原理確認のための方法であると判断した。
- ④ 吸水性能が相対的に低いサイクロン PS 灰に対して、再焼成方法による処理を施すことで粒子内の微細孔構造を増加させ、PS 灰材料の吸水機能の改善が図れることを確認した。
- ⑤ 吸水性能のばらつきが高いストーカー PS 灰に関しては、逆流式高速攪拌造粒処理を施すことで PS 灰材料の吸水性能を安定化させる方法を提案し、その妥当性を確認した。
- ⑥ 余剰水（液性限界 w_L 以上）と塑性指数 I_p といった土のコンシステンシー概念をベースに PS 灰改質材の配合設計手法を提案した。
- ⑦ PS 灰改質材を土に混ぜてから締固めるのであれば、締固めエネルギーによる粒子破碎の影響は、受けない。

建設発生土マニュアルにある第 4, 3 種発生土基準への PS 灰改質材の必要添加率を求めるため、PS 灰改質材の吸水比 w_{ab} と土のコンシステンシー概念をベースに配合設計手法を確立した。しかしながら、改質土を高規格の土構造物へ活用する場合、必要強度定数確保のための設計が必要となる。3 章では、PS 灰改質材の強度定数効果について検討を行った。

参考文献

- 1) 富士製紙業組合 HP, <http://www.fujiseishi.com/process.html>, 2017.10
- 2) 日本製紙連合会：環境行動計画（廃棄物対策）フォローアップ調査結果, 2017.10.
- 3) 尾鍋史彦, 伊部京子, 松倉紀男, 丸尾敏雄：紙の文化辞典, 220-221, pp. 268-269, 2006.
- 4) 岡山隆之:リサイクルによる古紙パルプの物性変化について, 紙パ技協誌, 第 56 巻第 7 号, p.62～68, 2002.7
- 5) 早野公敏, 山内裕元, 佐々木孝太, 藤嶋恵輔：ほぐしを利用した液状泥土の新しい造粒方法の基礎的検討, 土木学会論文集 C, Vol.70, No.4, pp.424-432, 2014.
- 6) 早野公敏, 山内裕元, 和栗成樹, 富吉俊介：ほぐしを利用した液状粘土の造粒技術, 地盤工学会誌, Vol.63, No.9, pp.38-39, 2015.
- 7) 西茜, 山口誠, 梅山崇, 川原修, 片桐雅明, 早野公敏：簡易多層圧密による凝集剤を添加した北九種浚渫粘土の圧密特性, 第 51 回地盤学研究発表会発表講演集, pp.749-750, 2016.9.
- 8) 近廣祐佳, 山内裕元, 片桐雅明, 早野公敏：凝集剤を添加した浚渫粘土のせん断強度特性, 第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.285-286, 2017.7.
- 9) 川合彩加, 山内裕元, 早野公敏：低温乾燥による PS 灰系改良材混合土の物理特性経時変化の評価, 第 52 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.475-476, 2017.7.
- 10) 山内裕元, 早野公敏：吸水性材料を用いた粘性土のほぐし造粒固化処理方法の開発と適用, 基礎工, Vol.45, No.9, pp.64-69, 2017.9.
- 11) 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, pp.947-952, 2017.
- 12) 加島史浩, 竹山佳奈, 浜谷信介, 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, pp.935-940, 2017.
- 13) 浜谷信介, 加島浩, 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, pp.953-958, 2017.
- 14) 東京都：建設泥土リサイクル指針, pp. 7, 2009.4.
- 15) 今井五郎, 遠藤恭延, 大滝哲男, 荻谷育男, 村上篤司, 安原一哉：土質材料としての PS 灰有効利用ガイドライン (案), PS 灰の土質材料開発研究検討委員会, pp. 1-46, 1994
- 16) 下野健一, 桑原啓至：製紙スラッジの焼却灰の建築用ボードへの利用に関する研究, 高分子加工, Vol.31, No.3, pp.5-14, 1982.
- 17) 長坂勇二, 坂井宏行, 大森啓至, 平田登基男：発生土および廃棄物の地盤工学的処理と有効利用, 産業廃棄物の地盤工学的有効利用 (その 1), 土と基礎, Vol.45, No.5, pp.55-60, 1997.
- 18) 末次大輔, 宮田喜壽, 木暮敬二, 落合英俊：石炭灰のコンシステンシーの評価とその応用に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.111-120, 2004.9.
- 19) 飯尾正俊, 小保方聡, 川人鉄雄：焼成ペーパースラッジを用いた建設汚泥処理とその有効利用, 第 5 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.203-206, 1994.
- 20) 石黒勇次, 塚田幸広, 小川伸吉：PS 灰を利用した建設汚泥処理と処理土の特性, 土木技術資料, 40-1, pp. 62-67, 1998.

- 21) 望月美登志, 今井五郎, 斎藤悦郎, 吉野広司: 製紙スラッジ焼却灰を基材にした泥土改良工法の開発と適用事例, 基礎工, Vol.34, No.2, pp.64-69, 2006.
- 22) エンジニアリング振興協会: ペーパーズラッジ灰利用浚渫泥土リイサイクル技術に関する調査研究報告書, 2009-2010.
- 23) Mochizuki, Y.: Study on subjects and applicability for mud improvement due to mixing with paper sludge ash, *The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop*, pp.105-108, 2016.
- 24) 望月美登志: PS (ペーパーズラッジ) 灰を基材とした泥土改良材の開発, 第 17 回資源循環型ものづくりシンポジウム事例研究発表会, pp.207-214, 2012.12.
- 25) 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.

第3章 PS 灰改質材による土の強度改善効果の検討

3.1 はじめに

PS灰改質材の改質効果は、セメント系固化材や石灰系固化材のような化学的固化ではない。強度を持たず、締固めることもできない液性限界を大きく上回る超高含水比の泥土の余剰水分を吸水し、粒度調整することで改質土を締固められる状態にして強度が発揮できるようにするものである。発生土は、建設発生土利用技術マニュアル¹⁾の基準まで改質する必要があるため、2章ではPS灰改質材の吸水性能による改質効果の定式化²⁾を実施した。

PS灰改質土を土構造物に活用するためには、合理的な設計法を確立する必要がある。本章では、PS灰改質土の力学モデルを検討するため、強度特性について検討を行った。

3.1.1 各種 PS 灰改質泥土の強度改善について

そのままでは、活用できない建設発生土を建設発生土利用技術マニュアルの基準まで PS 灰改質材で改質して土構造物に活用する際の強度改善効果を確認するため、本節では、マニュアル基準と同様にランマーによる突固め方法 A 相当のエネルギーで改質土供試体を作製して三軸強試験を実施した。

3.1.2 各種対象泥土の物性

試験に用いた試料は、代表的な泥鵜手諏訪湖泥土、坂戸泥土、宮崎配水池、関東ローム、荒川粘土の5種類であり、物理特性は、表 3.1.2-1 に示すとおりである。試料には細粒が多く含まれており、10%粒径 D_{10} が求められていないため、均等係数 U_c 、曲率係数 U'_c は判定出来ない。

表 3.1.2-1 各泥土試料の物理特性

試料の種類	PS灰改良材	泥土				
		諏訪湖底泥土	関東ローム	坂戸泥土	宮崎配水池泥土	荒川泥土
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.630	2.526	2.954	2.834	2.289	2.869
$w_L(\%)$	-	136.0	129.4	88.7	480.7	61.4
$w_p(\%)$	-	77.0	65.6	41.6	165.8	37.8
I_p	-	59.0	63.8	47.1	314.9	23.6
$D_{10}(\text{mm})$	0.027	-	-	-	-	-
$D_{50}(\text{mm})$	0.28	0.0087	0.012	0.01	0.0063~0.0081	0.0023
$D_{\max}(\text{mm})$	2.0	0.85	9.5	2.0	0.85	2.0
$F_c(\%)$	17.7	98.5	75.0	74.2	98.5	92.7
U_c	13.0	-	-	-	-	-
U'_c	2.07	-	-	-	-	-
工学的分類	廃棄物 Wa	シルト (高液性限界) MH	火山灰質粘性土(Ⅱ型) VH2	粘土 (高液性限界) CH	有機質粘土 OL	シルト (高液性限界) MH

3.1.3 改質土の強度特性

(1) 試験方法

不純物を除去し，初期含水比 w_{clay} を調整 (w_L の 0.66～1.41 倍)した泥土に対して，PS 灰改良材を所定の添加率 η ($=\text{PS 灰改良材の乾燥質量 } M_m / \text{土の乾燥質量 } M_s$) となるように混合したのち，直径 $D=100\text{mm}$ ，高さ $H=200\text{mm}$ の鋼製モールドを用いて，ランマーによる突固め（突固め層数 6 層，各層 $N_i=25$ ）によって供試体を作製した．

三軸圧縮試験は，図 3.3.1-1 に示す装置を用いた．セル内で飽和させた供試体に対して「土の圧密非排水(CU)三軸圧縮試験」(JGS0523-2000)を行った．改良した泥土を盛土材料に利用する事を想定して有効圧密応力 $\sigma'_c=30, 60, 120, 240\text{kPa}$ とし，圧密終了を確認してからせん断試験を実施している．軸圧縮過程では，軸ひずみ速度を $0.1\%/min$ としている．実施した三軸圧縮試験のケースを表 3.3.1-1 に示す．

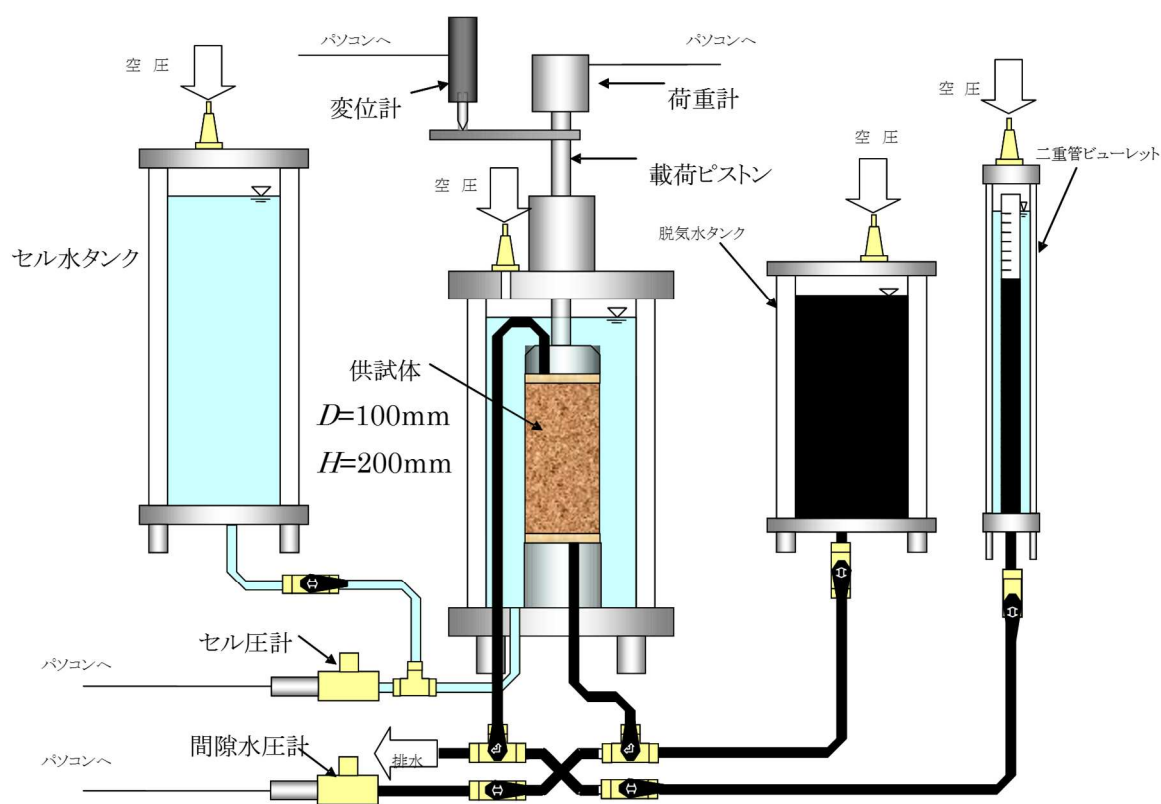


図 3.1.3-1 三軸試験装置

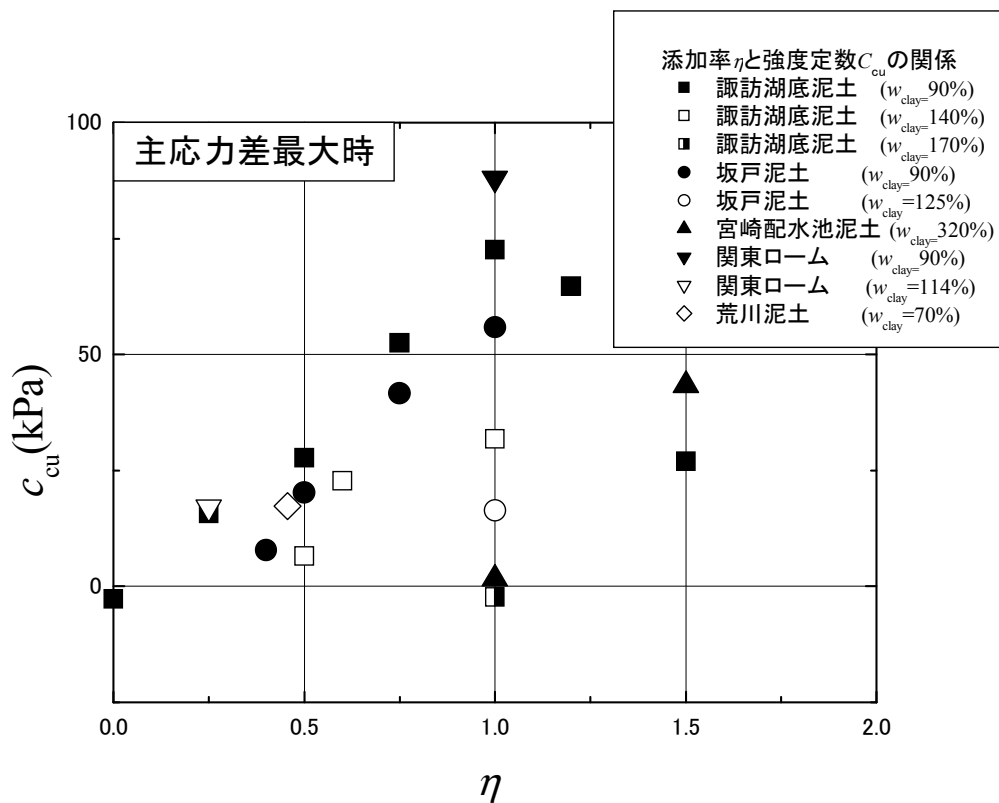
表 3.1.3-1 三軸圧縮試験の実施ケース

試料 条件	諏訪湖底泥	坂戸泥土	宮崎配水池泥土 (ヘドロ状)	関東ローム	荒川粘土
含水比 $w_{\text{clay}}(\%)$	90,140,170	90,125	320	90,114	70
添加率 η	0.0,0.25,0.5,0.6,0.75,1.0,1.5	0.4,0.5,0.75,1.0	1.0,1.5	0.25,0.75	0.456

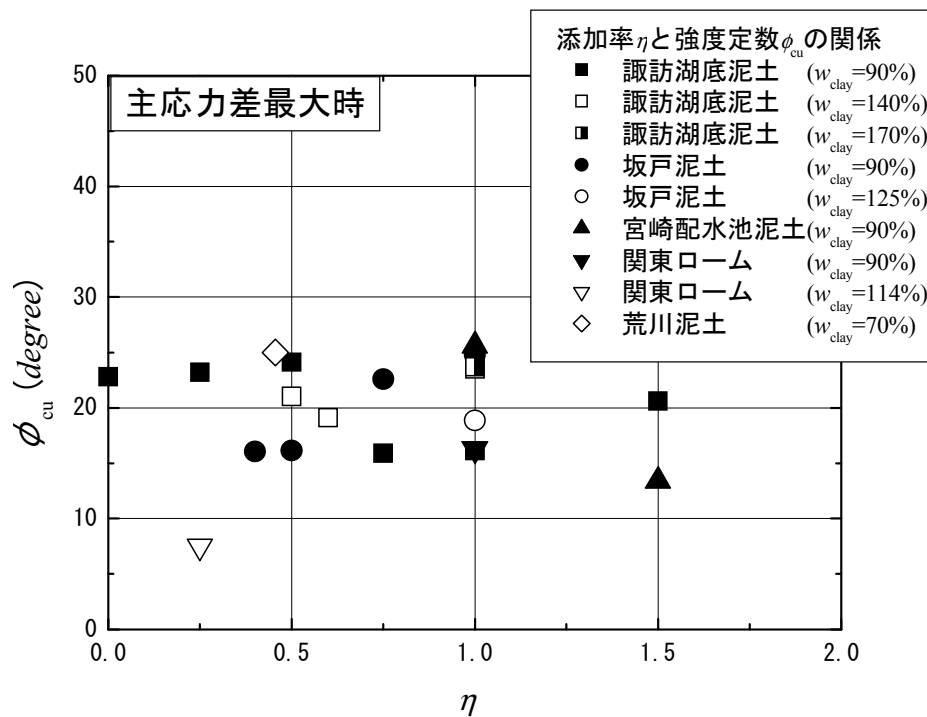
(2) 三軸試験結果

実施した三軸圧縮試験を図 3.1.3-2 および図 3.1.3-3 に示す。図 3.1.3-2 は、主応力差最大時の PS 灰改質材の添加率 η と強度定数 c_{cu} , ϕ_{cu} , 図 3.1.3-3 は、添加率 η と c' , ϕ' の関係である。ここでは同時に実施していないが、PS 灰改質材自身の強度特性は、次節に示す通り内部摩擦角 $\phi_d=48.6^\circ$, 粘着力 $c_d=94.6\text{kPa}$ と粘着力も有する内部摩擦角の大きな ϕ 材である。PS 灰改質による明確な強度改善結果としては、PS 灰改質材の添加率 η を上げると全応力評価での強度定数 c_{cu} が比例的に増加し、 ϕ_{cu} もある範囲内 (20° 近辺) に収まる傾向が認められた。有効応力評価での c' , ϕ' には、全応力にみられるような明確な傾向は確認できず、 ϕ' は、 $30\sim 40^\circ$ の高い範囲値にあることがわかる。ただし最も明確な改善効果となる c_{cu} の増加傾向の中でも、試料の種類や設定含水比の違いによってその増加傾向に違いがあらわれており、諏訪湖底泥土、関東ローム、坂戸泥土とも設定含水比を高含水へ変化させたものは、含水比が高くなるほど c_{cu} の増加傾向は小さくなっており、宮崎配水池泥土の c_{cu} も低めの値である。これらは、改良土が締固め効果の発揮しにくい含水比レベルにあったものと考ええる。

本試験条件では、マニュアルに従って PS 灰改質した泥土を突固め方法 A のエネルギー基準で締固めた供試体の三軸試験結果を検討したもので、PS 灰改質土の施工条件には近いものの未改質泥土の強度は、ほとんど実施できておらず、PS 灰改質土の締固め度も不明確で PS 添加率 η と締固め度が同時に強度改善効果に影響するであろうこと、対象土の明確な種類区分もしていない等の課題がある。そこで強度特性に影響を及ぼす締固め特性について検討した。

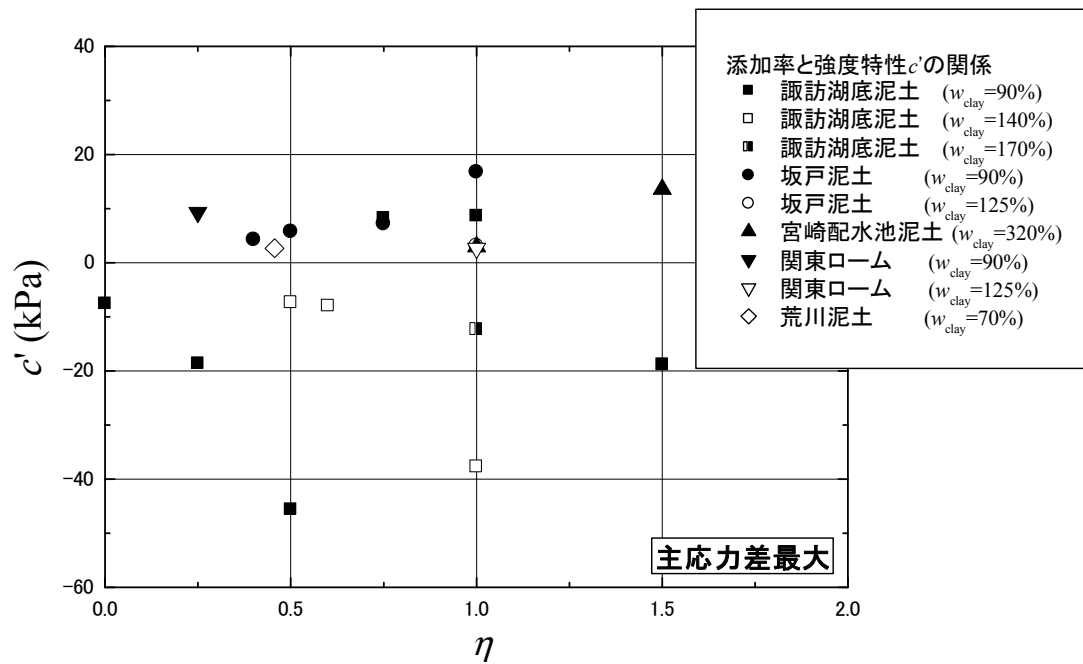


(1) 添加率 η と強度特性 c_{cu} の関係

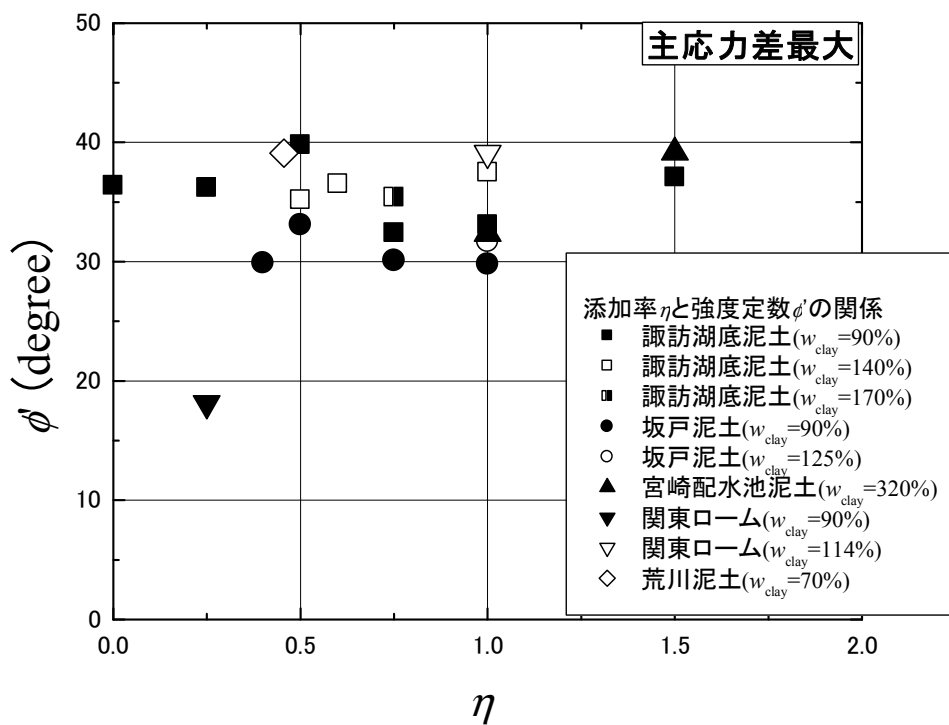


(2) 添加率 η と強度特性 ϕ_{cu} の関係

図 3.1.3-2 主応力差最大時の添加率 η と強度特性の関係
(全応力強度特性 c_{cu}, ϕ_{cu})



(3) 添加率 η と強度特性 ϕ' の関係



(4) 添加率 η と c' の関係

図 3.1.3-3 主応力差最大時の添加率 η と強度特性の関係
(有効応力強度特性 c', ϕ')

3.1.4 改質土の締固め特性

強度特性に影響を与える締固め特性を検討するため、三軸試験に用いた試料に表 3.1.4-1 で示す 2 試料を加え、対象土のグルーピング特性と改質土の締固めの関係を調べた。表 3.1.4-2 に試料の物理特性によるグルーピングを行っている。図 3.4.1-1 に PS 灰改質土の締固め特性を示す。

次節 3.2.2 に PS 灰改良材単体の締固め特性を調べているが、締固め方法 A の締固め曲線は、 w_{opt} が大きく右側で最大乾燥密度 ρ_{dmax} は小さく下部の位置に平坦に近い形状になっている。通常、こうした締固め曲線は、粘性土に見られる特徴であるが、PS 灰改質材は、砂状粒状体でありながら、粒子内に無数の微細孔を有しているため、PS 灰より細粒分の高い粘土以上の吸水性能があり、高含水比で水分が分離せず非塑性状態が保たれている。今回の対象土は、大半が PS 灰改質材より低い最適含水比 w_{opt} で最大乾燥密度 ρ_{dmax} も高いため、締固めることで右下の PS 灰曲線に近づいていき、唯一左側の高めに移行するのは、高含水で w_{opt} が高く、 ρ_{dmax} が極端に低い宮崎配水池泥土の場合だけである。

まず、対象粒度の粘土分が多いケースでは、粒度調整効果が発揮され、強度も改善するものと考えられる。さらに締固め曲線は右下の平坦形状に近づくが、粘土分が多くなって締めにくくなったものではなく、改質土の粒状体成分が増加しながら、高吸水機能で吸着されているため、強度特性の c_{cu} 分が増加するものとする。坂戸泥土、堀江川泥土、諏訪湖流入泥土のように 0.75~2mm の粒径が多く含まれている土の場合、PS 灰改良材の粒度分布と似た形状をした粒径であるため、通常の粒子締固めは生じにくいようであるが、これも土の最適含水比 w_{opt} が低く最大乾燥密度 ρ_{dmax} が高いため、PS 灰添加率に応じて曲線は右下へ移行し、締固め効果が認められている。

諏訪湖底泥 $w_{clay}=170\%$ 、関東ローム 114%、坂戸泥土 125%、宮崎配水池泥土 320%で示す各改質土の締固め曲線では、最適含水比 w_{opt} からかなり湿潤側にあるため締固め度が低く、 c_{cu} 分の増加度合いが低くなっているものと考えられる。

以上、本節における改質泥土の強度特性においては、粒度区分、粒子割合、締固め特性等の要因が絡んでくる。PS 灰改質による強度改善効果としては、強度定数 c_{cu} が添加率 η に比例的に増加することがわかった。後述 5 章の適用例で詳細を説明するが、一般的な土構造物への適用に関しては、粘着力 c の強度改善効果は、盛土の安定性確保に有効であることがわかった。ただし本節での方法では、正確な改善要因を限定していくことは難しく、PS 灰改質材を高規格土構造物に活用するためには、強度改善効果の詳細を把握するため、対象土の分類と締固め基準の特定を行った強度改善効果の確認が必要となろう。次節では、対象土の分類と締固め基準を設定した PS 灰改質土の強度特性を論じる。

表 3.1.4-1 追加泥土試料の物理特性

試料の種類	諏訪湖流入泥土	堀江川泥土
$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.730	2.650
$w_L(\%)$	83.7	45.7
$w_p(\%)$	58.8	26.6
I_p	24.9	19.1
$D_{10}(\text{mm})$	0.0078	-
$D_{50}(\text{mm})$	0.26	0.093
$D_{\max}(\text{mm})$	26.5	2.0
$F_c(\%)$	40.7	49.9
U_c	205	-
U_c^*	0.18	-
工学的分類	細粒分質礫質砂 SF-G	粘土 (低液性限界)CL

表 3.1.4-2 物理特性によるグルーピングの結果

土の種類	土の工学的分類		ρ_s	w_L	D_{50}, D_{\max}	F_c
荒川泥土	シルト(高液性限界)	MH	①	a	d	f
関東ローム	火山灰質粘性土(Ⅱ型)	VHⅡ	①	a	c	g
坂戸泥土	粘土(高液性限界)	CH	①	a	c	g
諏訪湖底泥土	シルト(高液性限界)	MH	②	a	c	f
諏訪湖流入泥土	細粒分質礫質砂	SF-G	①	a	e	h
堀江川泥土	粘土(低液性限界)	CL	①	a	d	h
宮崎配水池泥土	有機質粘土	OL	③	b	c	f

① : $\rho_s=2.60\sim 2.99\text{g/cm}^3$

② : $\rho_s=2.40\sim 2.60\text{g/cm}^3$

③ : $\rho_s \leq 2.30\text{g/cm}^3$

a : $40\% \leq w_L \leq 150\%$

b : $w_L > 300\%$

c : $0.001\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.012\text{mm}, 0.5\text{mm} \leq D_{\max} \leq 9.5\text{mm}$

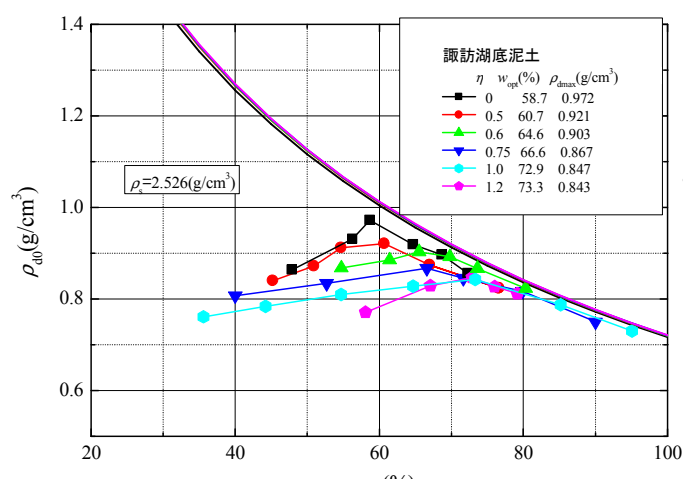
d : $0.01\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.1\text{mm}, 0.5\text{mm} \leq D_{\max} \leq 2.0\text{mm}$

e : $D_{50} > 0.1\text{mm}, D_{\max} > 2.0\text{mm}$

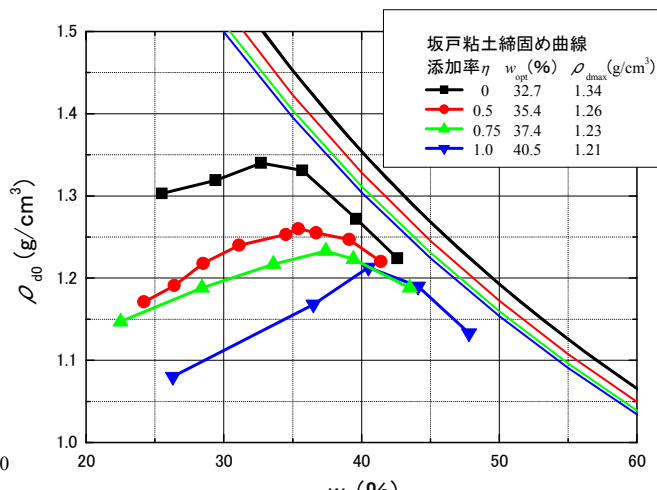
f : $FC > 90\%$

g : $FC > 70\%$

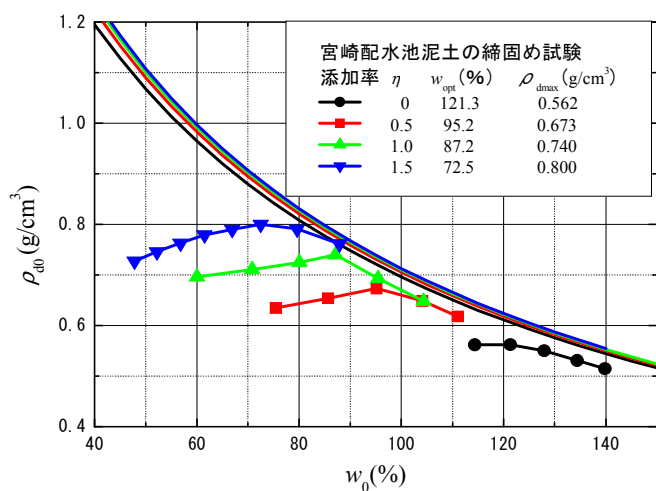
h : $40\% \leq FC \leq 50\%$



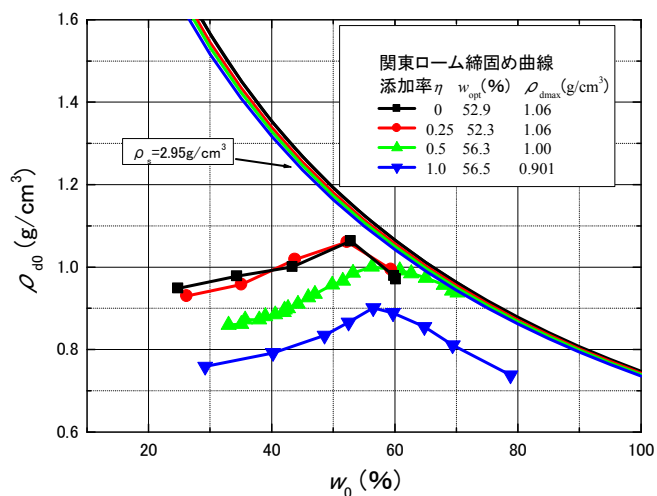
(1) 諏訪湖底泥土



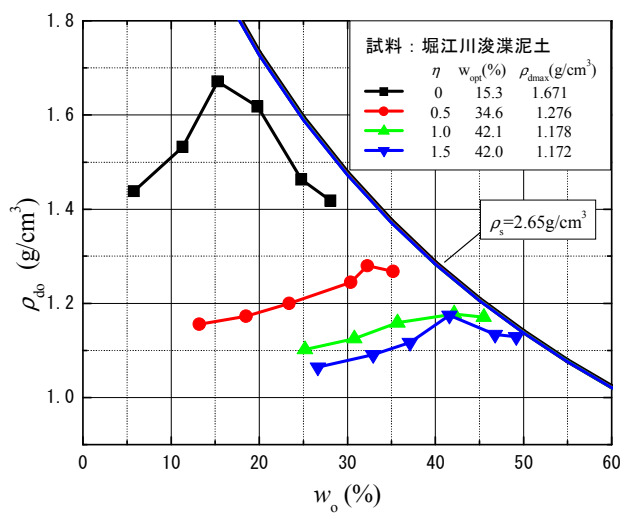
(2) 坂戸泥土



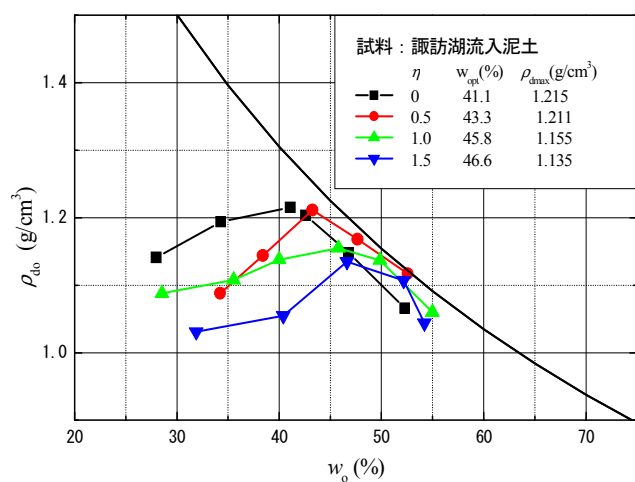
(3) 宮崎配水池泥土



(4) 関東ローム



(5) 堀江川泥土



(6) 諏訪湖流入泥土

図 3. 1. 4-1 各泥土試料の締固め特性

3.2 PS 灰改質粘性土の強度特性と改質効果について

PS 灰には、従来の固化型改良材にはない高吸水性による瞬時改質効果と周辺動植物に影響を及ぼさない環境付加機能がある。従来の固化型改良材では、低品質泥土を飛躍的に向上させる反面、一定の養生期間が必要で、品質のバラツキも大きく、改良土の明確な力学的モデルが不在のまま実用化^{3)~4)}されている。

近年、PS 灰の土木資材への活用⁵⁾も増え、海洋水域での環境改善活用^{6)~11)}が提案されるようになり、2 章では、吸水性能による改質効果の定式化²⁾を実施したが、PS 灰改質土を高機能土構造物に活用するには、合理的な設計法を確立する必要がある。前節では、マニュアルに従って各種 PS 灰改質土を突固め方法 A のエネルギー基準で締固めた供試体の三軸試験結果から強度改善効果を検討したもので、改質土の施工条件には、近いものの未改質泥土の強度が不明であり、PS 灰改質土の締固め度 D_c も不明確で PS 灰添加率 η と締固め度 D_c がともに強度改善効果に影響すること、対象土の明確な種類区分もしていない等の課題がある。そこで、本節では、まず浚渫泥土の改質土活用が望まれている粘土に対して未改質から幅広い PS 灰添加率範囲での強度改善効果を未改質粘土および PS 灰改質材単体とともにすべての締固め度 D_c を 95% と基準化して強度特性を調べた。次節以降の対象土の分類、シルト、粘土混じり礫質土の改質についても締固め度 D_c を 95% と粘性土同様の締固め基準で強度効果を検討している。一般的な土構造物の締固め管理基準としては、締固め度 D_c が基準となっており、大半の場合、90% 以上となっているのが一般的である。

しかしながら、現在の設計・施工管理体系では、 D_c の増加による盛土材料の工学的性質の向上を定量的に評価して反映する事例は少なく、土地改良事業指針「ため池整備」¹²⁾が示すため池堤体の締固め管理基準値 95% を下回るケースも多々見受けられる¹³⁾。締固め度が 90~95% を超えると強度は相当増加し残量変形はかなり小さくなることから、締固めの合理的な施工と管理、並びに締固めの効果を設計に設計に反映させるため、締固め度 D_c 95% を締固め基準として PS 灰改質土の強度を検討している。

浚渫泥土の多い前節での PS 灰改質材土の場合、締固め度 D_c 90% 基準で供試体を作製している訳ではないため、 D_c 値が 90% 以下のケースも多く、強度としては、全応力評価での粘着力効果しか明確には認められなかった。さらに龍岡は、盛土の締固めの合理化¹⁴⁾において締固め度 D_c 95% で管理した領域の中においても強度剛性が低くなったり、締固め不良やオーバーコンパクションが想定されるケースがあるとの指摘があるため、締固め度 D_c 95% の締固め基準で締固め管理した PS 灰改質土の強度改善効果を検討している。

3.2.1 PS 灰改質材と塑性粘性土との基本物性

(1) PS 灰改質材と対象粘質土の基本物性

表3.2.1-1に泥土吸水材として使用した再焼成処理PS灰改質材，表3.2.1-2にPS灰改質材の対象土として，浚渫土を模した購入粘性土(藤森粘土)の物理特性を示す。写真3.2.1-1は，PS灰改質材の全景写真であり，粒子の拡大顕微鏡写真は，前章写真2.4.1-1に記載している。粒子密度 ρ_s は，土粒子の密度試験方法 (JIS A 1202)，液塑性限界 w_L および w_P ，塑性指数 I_P は，土の液性限界・塑性限界試験方法(JGS 0141)，最適含水比 w_{opt} や最大乾燥密度 ρ_{dmax} は，突固めによる土の締固め試験方法(JIS A 1210)，pHは，土懸濁液のpH試験方法(JGS 0211)，最小密度は，砂の最小密度試験方法(JGS 0161)によって求めた。

表 3.2.1-1 試験に用いた PS 灰改質材の物理

材料の種類	再焼成処理 PS 灰改質材
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.40
塑性限界 w_P (%)	NP
塑性指数 I_P	NP
最適含水比 w_{opt} (%)	82.1
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.746
最小密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	0.60～0.65
平均粒度 D_{50} (μm)	102
細粒分含有率 F_c (%)	38.4
pH	10.8
吸水比 w_{ab} (%) 範囲	100～105
平均吸水比 w_{ab} (%)	102

表 3.2.2-2 浚渫土を模した粘性土試料（藤森粘土）の物性

材料の種類（粘性土）	藤森粘土
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.70
細粒分含有率 F_c (%)	94.0
液性限界 w_L (%)	57.0
塑性限界 w_P (%)	28.1
塑性指数 I_P	28.9
最適含水比 w_{opt} (%)	25.3
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.49



写真 3.2.2-1 PS 灰改質材の全景写真

(2) PS 灰改質による粒度特性と塑性状況

表-3. 2. 1-3 に示すとおり，PS 灰改質材の添加率 η ($\eta=M_m/M_s$:後述 3. 2. 4 の式(2)に記載) は， $\eta=20,50,67,100,150,200$ (%)と幅広い範囲の添加率 η とした．PS 灰改質土の粒度は，土の粒度試験方法(JIS A 1204)を実施，図 3. 2. 1-1 の粒度分布には，PS 灰改質材と藤森粘土ならびに PS 灰改質材を添加した場合の改質土の粒度を記載した．写真 2. 4. 1-1 からわかるように PS 灰改質材単体の粒子表面は，複雑な凹凸に富み，凹凸部分のメニスカスによって水を表面に強く保持し，表面に開口した多数の微細孔内部に水を吸い込んで放さない構造になっている．粒子内に多数の微細孔があることから粒子密度は小さく，平均吸水比 $w_{ab}^{2)102}$ (%)と高い吸水性能を示している．図 3. 2. 1-1 の粒度構成より PS 灰改質材は，中砂，細砂，シルトと均一になっており，非塑性(non- plastic) の砂状粒状材料である．一般の土質材料では，塑性粘土分の減少に応じて含水比が低下し，非塑性化が進むが PS 灰改質材は，砂状でありながら，それ自体に粘土同等以上の吸水性能があるため，高含水比で水分が分離せず非塑性状態が保たれている．改質対象の藤森粘土の物理特性は，60 %がシルトで 30%が粘土と高塑性限界と低塑性限界の中間付近に位置している．図 3. 2. 1-1 の粒度構成より藤森粘土から PS 灰改質材まで徐々に粒度分布が右側に移行する．表 3. 2. 1-3 より添加率 η の増加により塑性指数 I_P と細粒分含有率 F_c は，ともに減少して η が 150 %の時， F_c が約 60%で I_P が 5%の最低塑性値となり， η が 200 %から非塑性状態に転じる． $\eta=200$ %でも改質土は，高い吸水比 w_{ab} で水分を吸収するが，PS 灰分の増加，粘土分の減少から高含水で液性限界と塑性限界が近づき，最終的な非塑性限界を迎えている．

表 3. 2. 1-3 藤森粘土に PS 灰改質材を添加した改質土の液塑性指数と細粒分含有率

材料名 添加率	藤森粘土（粘性土）					
	PS 灰改質材添加 添加率 η (%)					
	20.0	50.0	66.7	100.0	150.0	200.0
液塑性状況						
液性限界 w_L (%)	54.5	56.9	58.2	61.5	69.9	NP
塑性限界 w_P (%)	36.7	41.5	44.2	50.7	64.9	NP
塑性指数 I_P	17.8	15.4	14.0	10.8	5.0	NP
細粒分含有率 F_c (%)	84.7	75.5	71.8	66.2	60.7	56.9

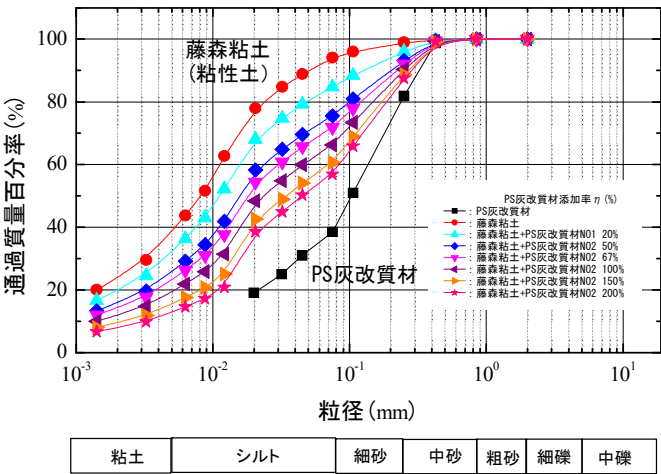


図 3. 2. 1-1 PS 灰改質土の粒度分布

3.2.2 PS 灰および PS 灰改質土の締固め特性

PS 灰改質材単体の締固め特性では、突固めによる土の締固め試験(JIS A 1210)において、締固めエネルギーを突固め方法 A, E に変えて締固めた場合の締固め試験結果を図 3.2.2-1 に示している。PS 灰改質材単体に直接突固め試験を行う場合、破碎の影響があるため、多数の試験回数を実施している。次式で示すマルサルの修正破碎率 $B_M^{14)}$ は、

$$B_M = \frac{(\sum \Delta f_i)}{2} \quad (1)$$

Δf_i : 各篩の残留百分率の基準粒度に対する変化率

突固め方法 A では、 $B_M=2\sim3\%$ 程度のもので、E 方法では、25%まで増加することで、PS 灰改質材の最適含水比 w_{opt} は小さく左側へ、最大乾燥密度 ρ_{dmax} も大きく、A 方法では、平坦に近い形状の締固め特性になっている。再焼成 PS 灰改質材は、突固め方法の違いで粒子の破碎率を大きくすると粒子の細孔容積が減少して吸水性能も小さくなることを確認している²⁾。

次にPS灰改質材による藤森改質土の締固め特性を図3.2.2-2に示す。泥土改質試験の基準材料として用いられる藤森粘土を図3.2.1-1、表3.2.1-3と同様の添加率範囲で改質して突固め方法Aの締固め試験を実施している。無添加の粘土試料では、低い最適含水比 w_{opt} で凸型の締固め曲線になっているが、PS灰改質材の添加率が上昇するにつれて最適含水比 w_{opt} は、右側へ移行し、徐々に平坦でPS灰改質材に近い締固め曲線に移行することが確認できる。突固め方法Aでは、PS灰改質材の粒子破碎率は、わずかであること、たとえ突固め方法Eまで上げたとしても粘性土改質した状態の場合、PS灰の破碎は、生じにくくなることは、改質前後の粒度分布に変化が生じないことから確認²⁾している。粘性土の存在がPS灰への突固めエネルギーの緩衝になるためで、高添加率 $\eta=200$ (%)の締固め曲線でもPS灰改質材に破碎は生じず、吸水性能に問題はない。

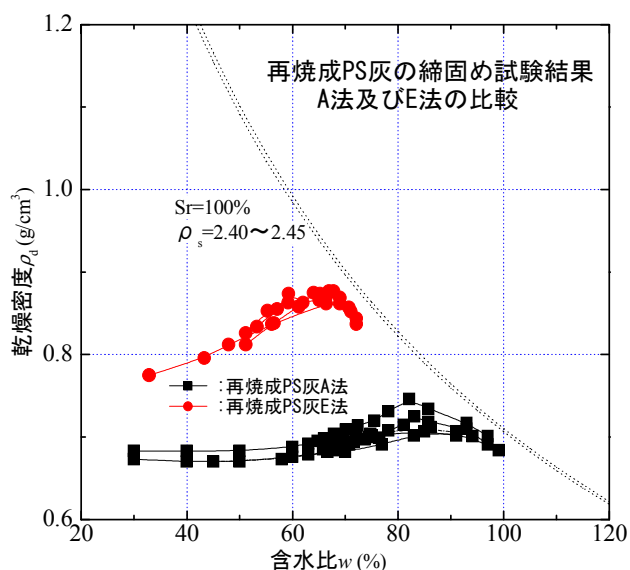


図 3.2.2-1 再焼成 PS 灰の締固め特性

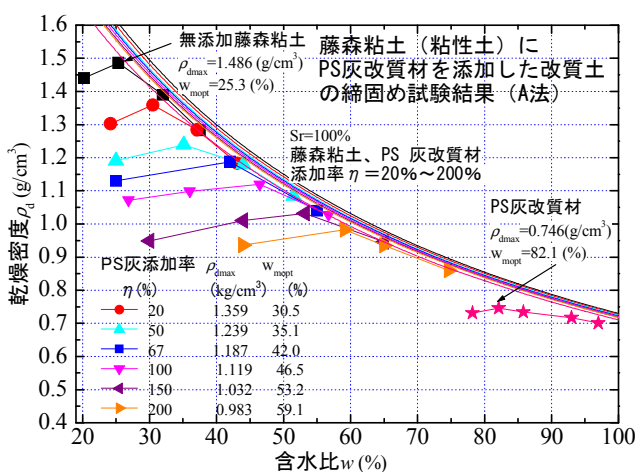


図 3.2.2-2 藤森粘土と PS 灰改質材による PS 灰改質土の締固め特性

3.2.3 PS 灰改質粘性土の強度試験方法

PS 灰改質土のせん断試験に用いた試料土は、藤森粘土に PS 灰改質材を所定添加率で混合させた試料と無添加試料（藤森粘土および PS 灰改質材試料）で供試体を作成している。試料中の砂分が卓越して飽和供試体の吸排水が迅速な PS 灰改質材単体試料については、圧密排水三軸(CD)試験(JGS0524)を実施した。それ以外の無添加藤森粘土と PS 灰を添加した PS 灰改質土では、圧密非排水三軸(CU)試験(JGS0523)を実施した。供試体作製に関しては、無添加（未改良）および PS 灰改質材添加試料ともに図 3.2.2-2 の締固め曲線で得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} を基準に締固め度 $D_c=95\%$ の密度で図 3.2.3-1 に示すような静的締固め法（一層 $h=H/6$ ごと、計六層）を実施して供試体寸法は、直径 75mm 高さ 150mm とした。浚渫泥土の改質は、高含水比状態にあるため、締固め度 $D_c=95\%$ の供試体密度は、湿潤側含水比で作製し、瞬時改質のため養生期間は設けていない。PS 灰の添加率 η は、表 3.2.1-3 と同様である。

PS 灰改質土の盛土転用では、改質土試料を突固め方法 A で締固めて瞬時にコーン試験を実施¹¹⁾して第 3 種発生土 ($q_c=400\text{kPa}$) 以上を基準に適用している。その際の締固め度 D_c は、90% 程度に相当するが、浚渫泥土のような高塑性粘土の場合、改質直後の突固めでは、練り返しの影響を受ける場合があること、低品質な浚渫泥土を高品質な活用材として使用可能にするために供試体の締固めは、静的締固め方法を採用して締固め度 D_c を 95% とした。

三軸試験の設定拘束圧については、適用対象土構造物の応力範囲を考慮して PS 灰単体では、50, 100, 200 kPa の範囲、低強度の藤森粘土では、拘束圧範囲を若干広げて 50, 160, 300 kPa、改質土では、 $\eta=50\%$ まで藤森粘土、 $\eta=67\%$ から PS 灰と同様の拘束圧範囲としている。

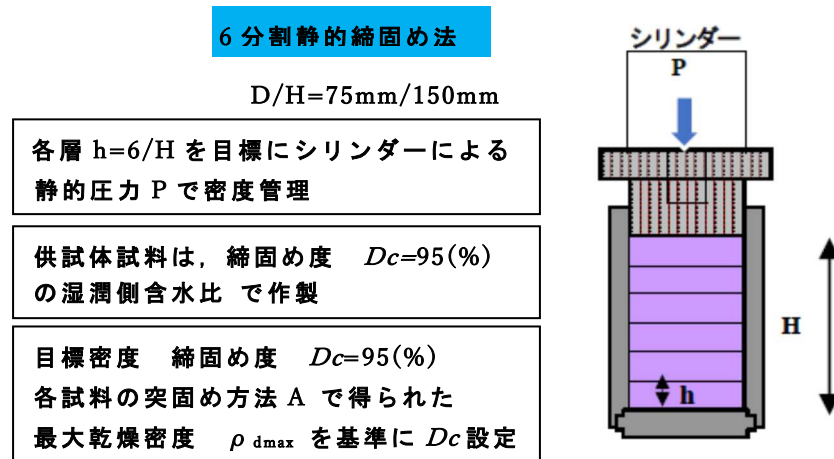


図 3.2.3-1 圧密三軸圧縮試験用供試体作製方法

3.2.4 PS 灰改質土（粘土）の強度特性

(1) 再焼成PS灰改質材と藤森粘土の強度特性

再焼成PS灰改質材単体とPS灰無添加の藤森粘土のせん断特性を確認した。再焼成PS灰改質材自体の三軸試験結果は、図3.2.4-1に応力-ひずみ曲線を示す。PS灰の応力-ひずみ曲線では、軸ひずみ1~2%程度までの低ひずみ領域で応力ピークを示す密詰め砂と同等の強度特性を示した。供試体密度は、締固め度 $D_c=95\%$ 密度であるが、図3.2.2-2の締固め曲線で記載した通り、締固め曲線は、非常にフラットで幅広い含水比範囲で締固まった状態になっている。ピーク強度に関しては、主応力差最大時で記載して定数を確定した(主応力比最大時でも検討している)。PS灰改質土のすべり面を構成する土の残留強度も確認する必要があるが、三軸試験による残留強度測定には、特殊な機構が必要とされるため、残量強度の詳細は求めてない。ただピーク強度以降の性状を確認するため、可能な限り圧縮変形は継続、 $\epsilon_a=15\%$ 付近を最終値とし、一定の残留値と判断された場合には、その段階で試験は終了した。

図3.2.4-2に示すモールの応力円より、PS灰改質材単体の内部摩擦角 $\phi_d=48.6^\circ$ 、粘着力 $c_d=94.6\text{kPa}$ となった。参考文献¹⁵⁾に記載した通り、PS灰改質材の細孔容積が大きいため、比面積や凹凸係数FU値($=4\pi A/L$, A :粒子の断面積, L :粒子周長)も高くなる。参考文献¹⁶⁾では、粒状体の効果として、粒子の凹凸係数FU値が大きくなるほど ϕ_d が大きくなることを指摘している。砂質系材料ではあるが発生した粘着力 c_d に関しても粒子の微細孔による凹凸メニスカスの吸着性能の影響ではないかと考えている。

藤森粘土単体の三軸試験結果は、図3.2.4-3に応力-ひずみ曲線、図3.2.4-4には、モールの有効応力円を示す。藤森粘土単体の締固め度も $D_c=95\%$ の密度で作製しているが、粘土単体の強度は、内部摩擦角 $\phi'=22.9^\circ$ 、粘着力 $c'=15.1\text{kPa}$ と非常に小さいものとなった。

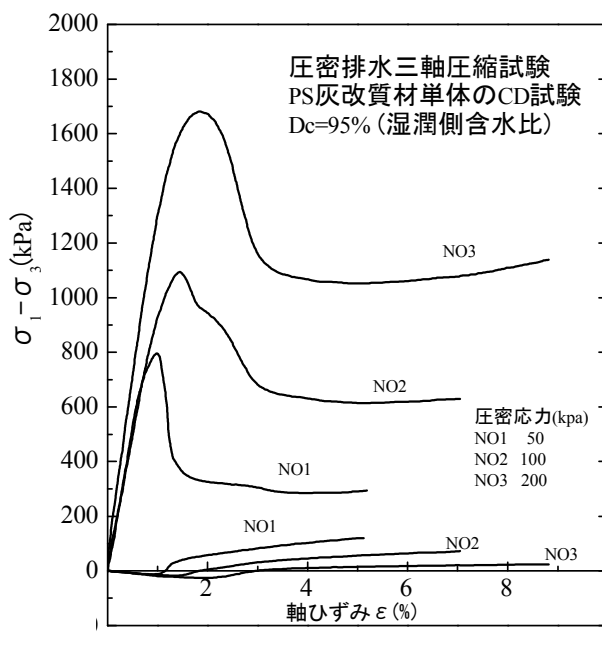


図 3.2.4-1 圧密排水三軸圧縮試験結果
未改質 PS 灰改質材
 $D_c95\%$ の応力-ひずみ曲線

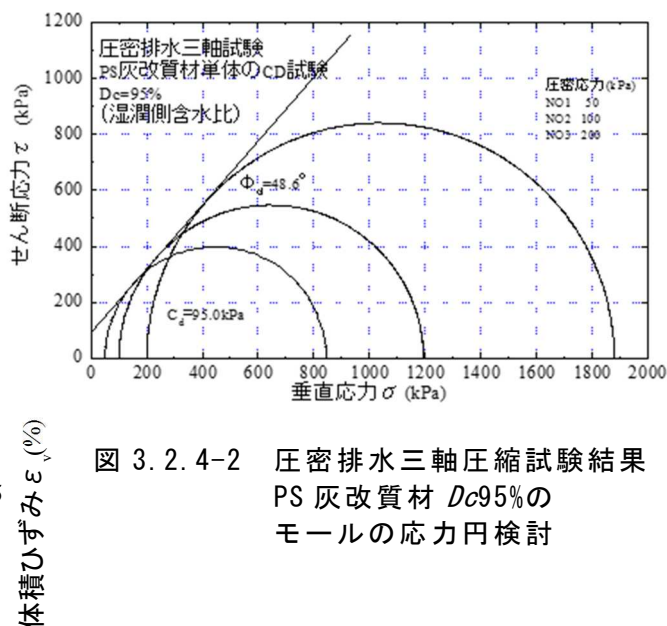


図 3.2.4-2 圧密排水三軸圧縮試験結果
PS 灰改質材 $D_c95\%$ の
モールの応力円検討

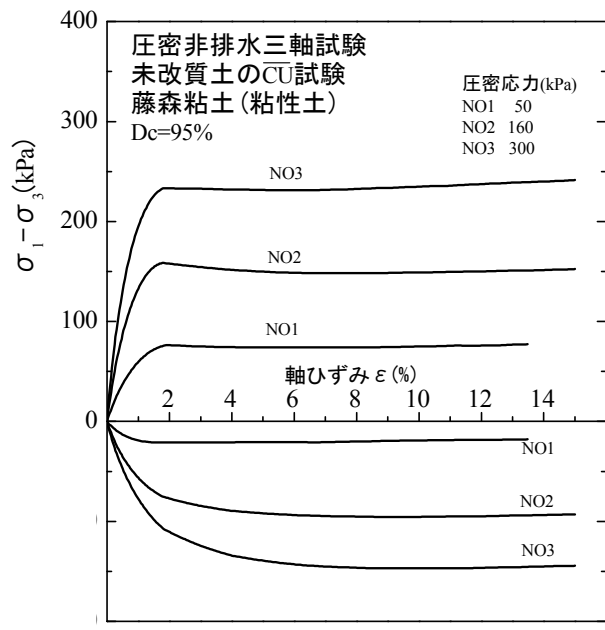


図 3.2.4-3 圧密排水三軸圧縮試験結果
未改質 PS 灰改質材
Dc95%のモールの有効応力円検討

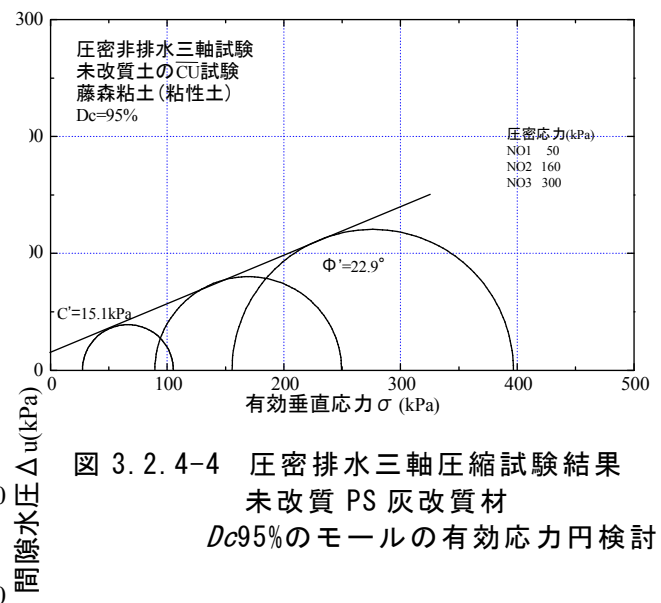


図 3.2.4-4 圧密排水三軸圧縮試験結果
未改質 PS 灰改質材
Dc95%のモールの有効応力円検討

(2) 改質土の強度特性と改善効果について

PS 灰改質土のせん断特性を調べた。PS 灰改質材の添加率 η を 20 %～200 %に変化させた PS 灰改質土の応力-ひずみ曲線を図 3.2.4-5 にまとめて比較した。応力-ひずみ曲線は、無添加藤森粘土単体の図 3.2.4-3 から再焼成 PS 灰改質材単体の図 3.2.4-1 まで添加率 η の増加に伴ない、強度の高い PS 灰改質材側へと改善することがわかる。強度定数 c' (粘着力)と ϕ' (内部摩擦角)は、図 3.2.4-6 のモールの有効応力円から求めて、表 3.2.4-1 に全試料の結果をまとめている。PS 灰改質材の添加率 η の改質状況が無添加の粘土から全体が PS 灰改質材になるまで表現できるよう修正添加率 η^* も下記のとおりに定義した(式(2) (3))。

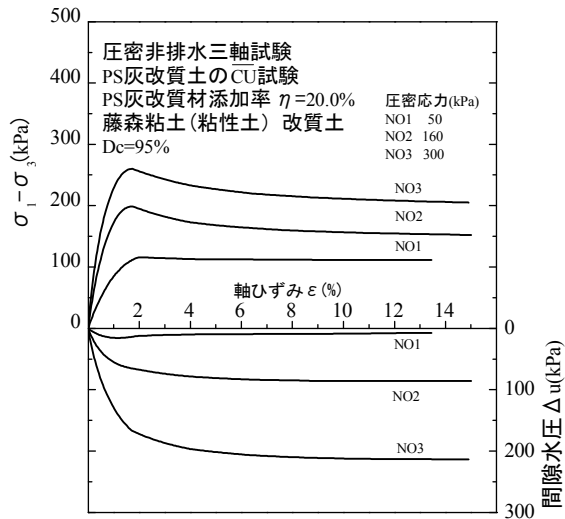
$$\eta = Mm/Ms \quad (2)$$

$$\eta^* = Mm/(Ms + Mm) \quad (3)$$

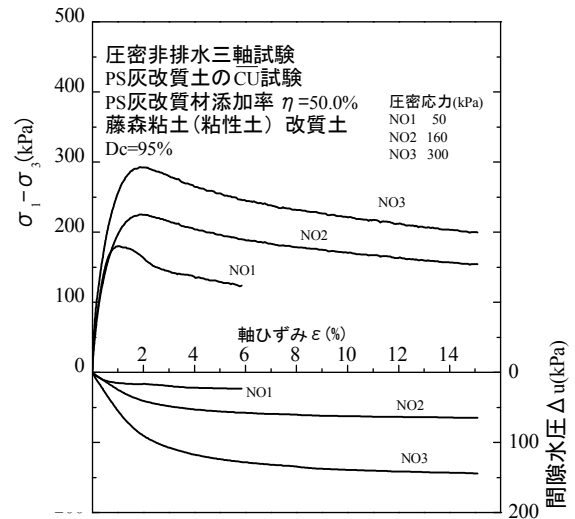
η : 添加率 η^* : 修正添加率

Mm : PS 灰材料の質量 Ms : 藤森粘土の乾燥

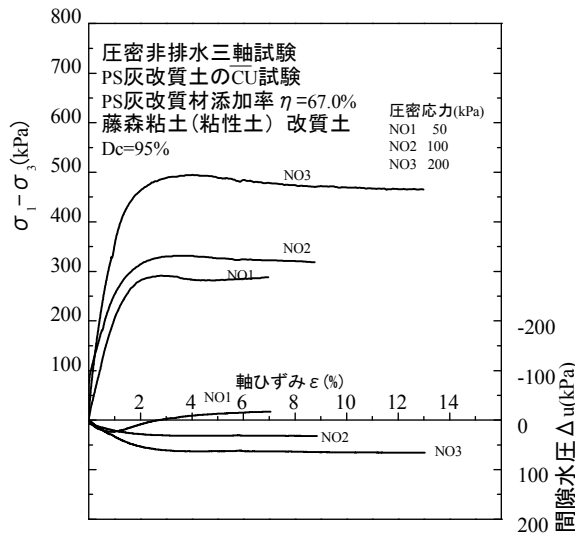
添加率 $\eta=20\% \sim 200\%$ の c' 、 ϕ' 関係を未改質藤森粘土から材料全体がPS灰改質材になるまで $\eta^*=0 \sim 100\%$ でまとめて整理したものが図3.2.4-7と図3.2.4-8である。表3.2.4-1より添加率 $\eta=150(\eta^*=60)\%$ の時、細粒分含有率 F_c は60%まで低下して塑性指数 I_P も最低塑性値5%まで下がる。強度定数 c' 、 ϕ' は、ともに非塑性領域付近まで上昇を続けて非塑性以降は、なだらかな改善傾向に転じた。PS灰改質材の強度改善効果に関しては、改質泥土の塑性状態の変化が影響するものと考えた。



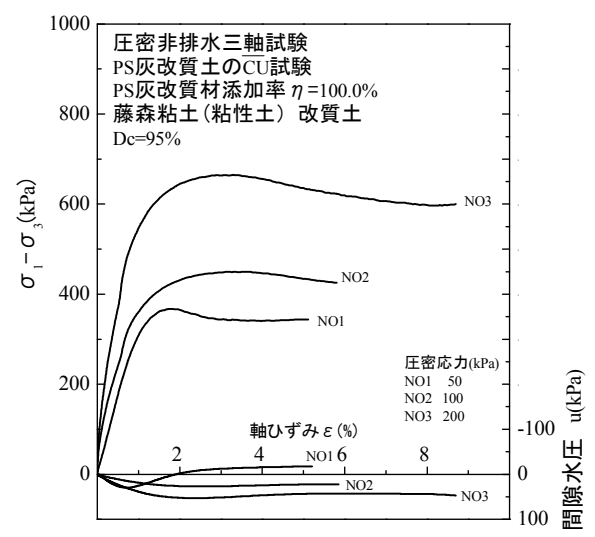
(a) $\eta = 20\%$



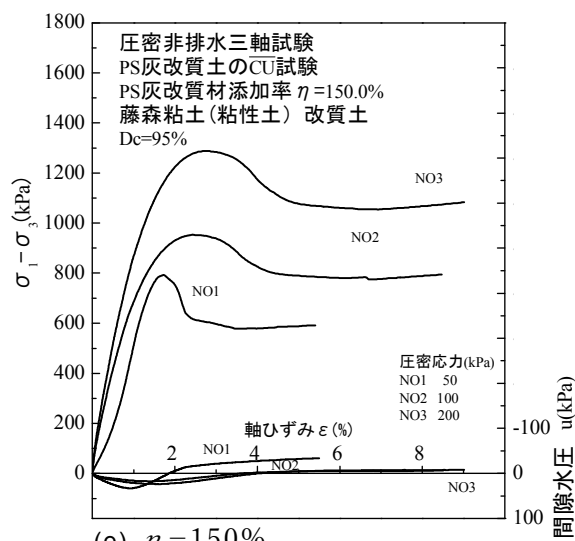
(b) $\eta = 50\%$



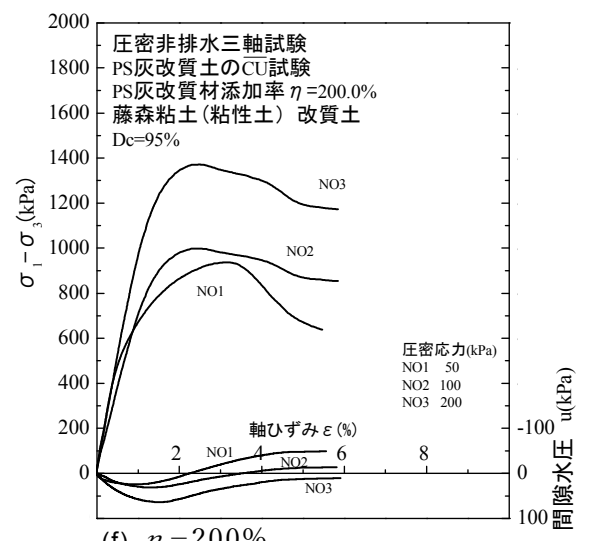
(c) $\eta = 67\%$



(d) $\eta = 100\%$

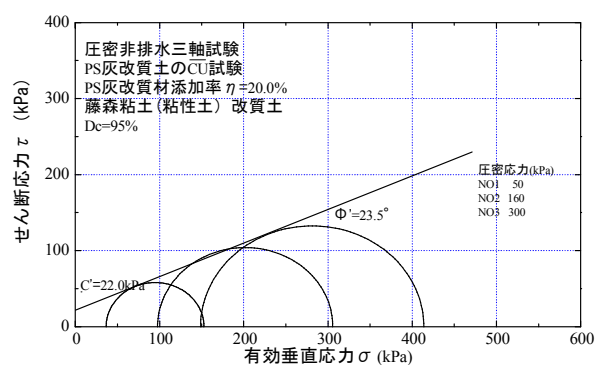


(e) $\eta = 150\%$

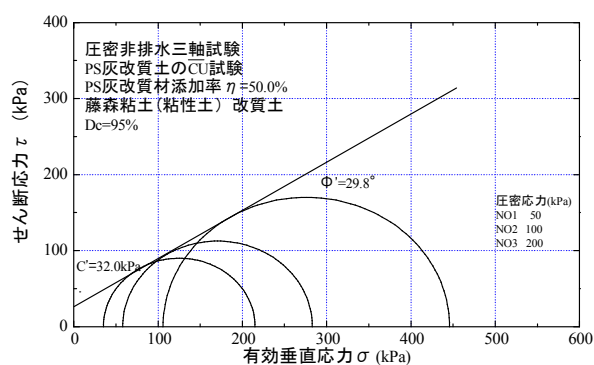


(f) $\eta = 200\%$

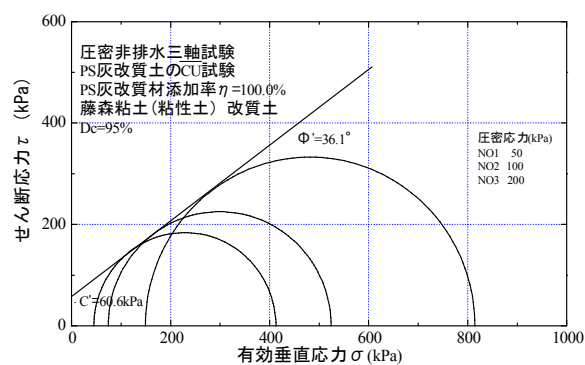
図 3.2.4-5 PS 灰改質土三軸圧縮試験結果 藤森粘土の PS 灰改質土
(PS 灰添加率 $\eta=20\% \sim 200\%$, Dc95%の応力-ひずみ関係)



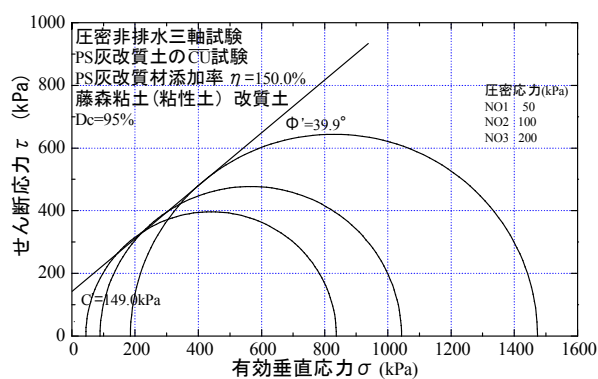
(a) $\eta = 20\%$



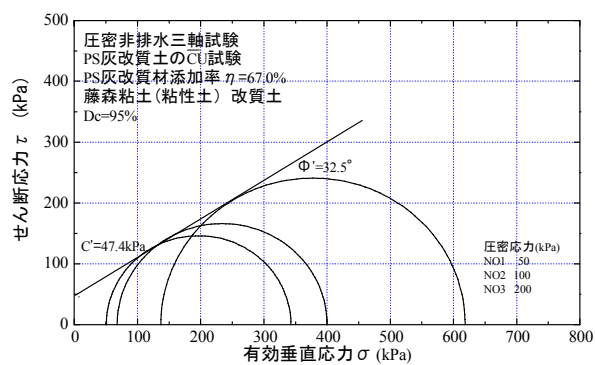
(b) $\eta = 50\%$



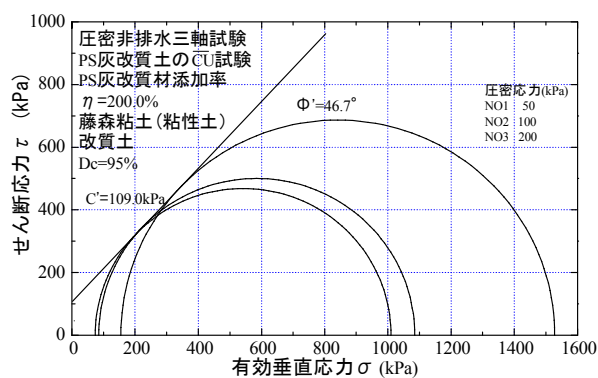
(c) $\eta = 67\%$



(d) $\eta = 100\%$



(e) $\eta = 150\%$



(f) $\eta = 200\%$

図 3.2.4-6 PS 灰改質土三軸圧縮試験結果 藤森粘土の PS 灰改質土
(PS 灰添加率 $\eta=20\% \sim 200\%$, Dc95%のモールの有効応力円検討)

表 3.2.4-1 藤森粘土（粘性土）PS 灰改質土の強度

締固め度 D_c (%)	添加率 η (%)	c' 粘着力 (kPa)	ϕ' 内部摩擦角 (°)
95	0.0(藤森粘土)	15.1	22.9
	20.0	22.0	23.5
	50.0	31.5	29.0
	67.0	47.4	32.5
	100.0	60.6	36.1
	150.0	151.0	39.5
	200.0	109.0	46.7
	PS 灰改質材	94.6	48.6

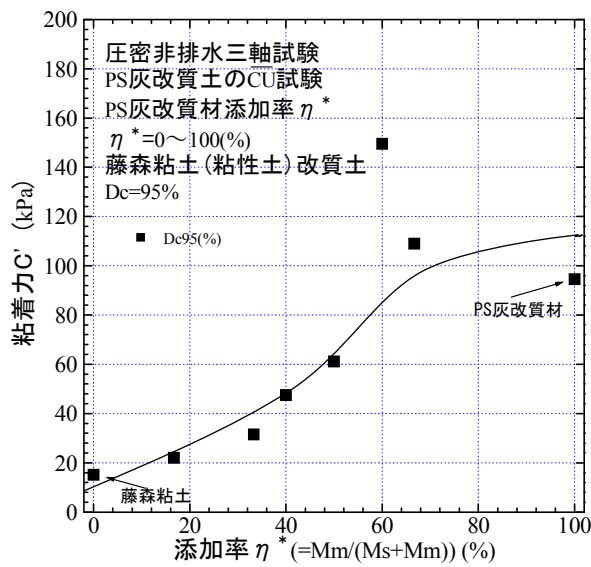


図 3.2.4-7 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰改質土の強度定数(粘着力 c') 効果

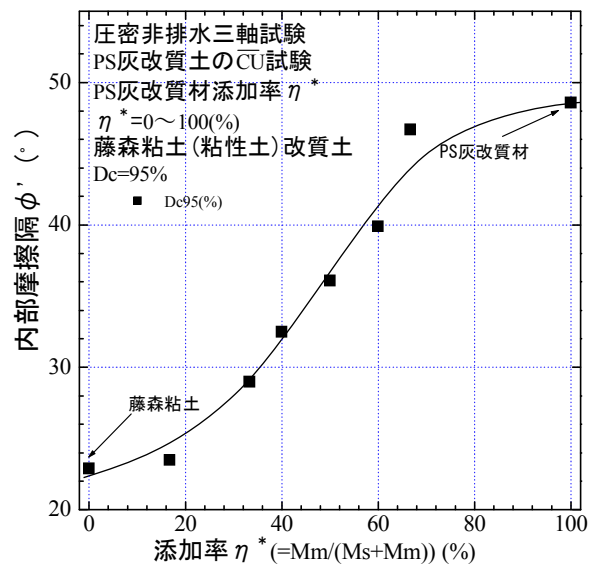


図 3.2.4-8 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰改質土の強度定数(内部摩擦角 ϕ') 効果

3.3 対象土の性状と PS 灰による強度改善効果

前節では、転用不適と考えられてきた高塑性浚渫粘性土に対して、PS灰改質材の強度改善効果を確認してきた。3.1では、対象土の分類と締固め基準の特定を行った強度改善効果の確認が必要となることを考察している。本節では、各種土構造物の対象土材料ごとにPS灰改質材による合理的な設計法を確立するため、シルト質土及び礫質土に対してのPS灰の強度改善効果とその要因について検討を行った。

表3.3-1に代表的な土構造物の要求品質を示す¹⁶⁾。対象土構造物の品質でもわかるように泥土に限らず、シルト質土及び礫質土に対してもPS灰改質は活用できることがわかる。

近年の異常気象による集中豪雨では、宅地や道路周辺地盤の深刻な地滑り崩壊が発生、大規模地震でも斜面崩壊や液状化災害、津波による大規模被害が発生しており、早期災害復旧や港、河川の堤防拡大、ダム、ため池堤防等の災害補強対策などに関してもPS灰改質材の活用は、極めて有用なものと判断する。災害対策まで考えた場合、浚渫泥土に限定せず、様々な種類の土材料への活用を検討しておく必要がある。

従来の固化型改良材では、低品質泥土を飛躍的に向上させる反面、一定の養生期間が必要で、品質のバラツキも大きく、改良土の明確な力学的モデルが不在のまま実用化されてきた。高含水粘土に比べてシルト質土や礫質土では、含水比も低く添加率も少ない量で対応が可能となる。排出目的が第一の高含水粘土系建設発生土に比べてシルト質土及び礫質改質土では、土構造物利活用や崩壊土砂、崩落地山の瞬時復旧が主目的になるため、迅速かつ的確な設計が可能となる土質改質材の活用と設計の確立が望まれる。

表 3.3-1 土構造物の要求品質

用途		工作物の埋戻し	土木構造物の表込め	道路用盛土		河川堤防		土地造成		水面埋立
				路床	路体	高規格堤防	一般堤防	宅地造成	公園・緑地造成	
用途毎の要求品質	材料規定	最大粒径	50mm以下 (100mm以下)	—	—	100mm以下	(150mm以下)	100mm以下 (転石300mm以下)	—	—
		粒度	$F_c \leq 25\%$ (細礫分以下 $\geq 25\%$) ($F_c \leq 25\%$)	—	—	$\phi 37.5\text{mm}$ 以上の混入率40%以下	($F_c = 15 \sim 50\%$)	$\phi 37.5\text{mm}$ 以上の混入率40%以下	—	—
		コンクッション	—	—	—	—	—	—	—	—
		強度	規定のCBR以上	圧縮性の小さ材料	規定のCBR以上	$qc \geq 400\text{kN/m}^2$	—	$qc \geq 400\text{kN/m}^2$ 場合に より $qc \geq 200\text{kN/m}^2$	—	—
	施工管理規定	施工含水比	監督員の指示	最適含水比と $D_c 90\%$ の 得られる湿潤側の含水 比の範囲	最適含水比と $D_c 90\%$ の 得られる湿潤側の含水 比の範囲	最適含水比より湿潤側で、規定の乾燥 密度が得られる範囲	最適含水比と $D_c 90\%$ の得られる湿潤 側の含水比の範囲	最適含水比に近い状態	—	—
		締固め度	$D_c \geq 90\%$	$D_c \geq 90 \sim 95\%$	$D_c \geq 90\%$	RI計器：締固め度平均値 $D_c \geq 90\%$ 砂置換法：締固め度最低値 $D_c \geq 85\%$	RI計器：締固め度平均値 $D_c \geq 90\%$ 砂置換法：締固め度最低値 $D_c \geq 85\%$	RI計器： $D_c \geq 87\%$ 砂置換法： $D_c \geq 85\%$	—	—
		空気間隙率 または飽和度	—	—	粘性土 $V_a \leq 10\%$ $S_r \leq 85\%$ 砂質土 $V_a \leq 15\%$	粘性土 $V_a \leq 2 \sim 10\%$ $S_r \leq 85 \sim 95\%$ 砂質土 $V_a \leq 15\%$	粘性土 $V_a \leq 2 \sim 10\%$ $S_r \leq 85 \sim 95\%$ 砂質土 $V_a \leq 15\%$	RI計器： $V_a \geq 13\%$ 砂置換法： $V_a \geq 15\%$	—	—
		1層の仕上り厚	30cm	20cm以下	20cm以下	30cm以下	30cm以下	まき出し厚：30～50cm	—	—
		その他	—	—	—	$qc \geq 400\text{kN/m}^2$	—	—	—	—
	基準等	建設省：「建設 省総合技術開発 プロジェクト開 発事業への廃棄 物利用技術の開 発概要報告書」 昭和61年11月	社団法人日本道路協 会：「道路土工-施工 指針 改定版」昭和61 年11月	社団法人日本道路協 会：「道路土工-施工 指針 改定版」昭和61 年11月	社団法人日本道路協 会：「道路土工-施工 指針 改定版」昭和61 年11月	財団法人国土開発技術研究センタ ー：「高規格堤防盛土設計・施工マ ニュアル」平成12年3月	—	都市基盤整備公団：「工 事共通仕様書」平成12年 9月	—	—

参考文献：河川土工マニュアル（案）＜建設発生土対策編＞P29¹⁶⁾

3.3.1 PS 灰改質土（シルト）の基本物性

表3.3.1-1にPS灰改質材の対象土として、シルト質土の物理特性を示す。

高含水浚渫土の改良と再利用に関しては、粘性土だけでなくシルト質土についても狭隘な場所での PS 灰改質材の瞬時改質機能は、非常に有効である。改質土の一般堤防への活用を考えて場合でも F_c の適合基準からシルトの活用は高く、シルトに対する PS 灰改質材の改善効果を確認するため、その品質安定性から購入製品である DL クレイを使用した。

DL クレイの粒度は、前節同様土の粒度試験方法(JIS A 1204)を実施、図 3.3.1-1 の粒度分布には、PS 灰改質材と DL クレイならびに PS 灰改質材を添加した場合の改質土の粒度を記載した。図 3.3.1-1 の粒度構成より DL クレイの 90%がシルト分、残りの 10%が粘土分で構成されている。試料と水分との吸着が弱く、低含水比で液性限界および塑性限界は、測定不能につき NP としており、粘土というよりも砂に近い。表 3.3.1-2 に示すとおり、PS 灰改質材の添加率 $\eta=10, 20$ (%)で粒度のシルト分は添加率と同等減少すること、塑性指数は、添加する PS 灰改質材自体 NP のため、塑性状況には変化がない。

* η : 添加率

M_m : PS 灰材料の質量 M_s : DL クレイ（シルト）の乾燥質量

表 3.3.1-1 試験に用いたシルト質土（DL クレイ）の物理特性

材料の種類	シルト質土
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.650
液性限界 $w_L(\%)$	NP
塑性限界 $w_P(\%)$	NP
塑性指数 I_P	NP
最適含水比 $w_{opt}(\%)$	19.4
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.518

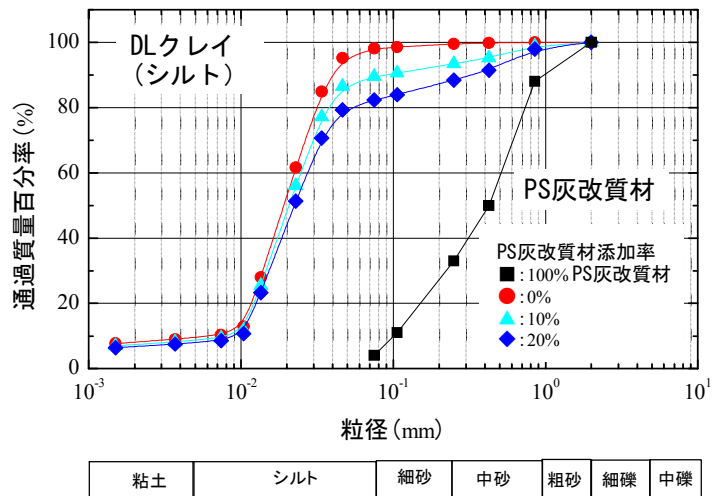


図 3.3.1-1 シルトと PS 灰改質材を添付した改質土の粒度分

表 3.3.1-2 試験に用いたシルトに PS 灰改質材を添加した改質土の液塑性指数

材料の名前	シルト	PS 灰改質材添加率 η (%)	
		$\eta = 10\%$	$\eta = 20\%$
液性限界 $w_L(\%)$	NP	NP	NP
塑性限界 $w_P(\%)$	NP	NP	NP
塑性指数 I_P	NP	NP	NP

3.3.2 PS 灰改質土（シルト）の締固め特性

締固めた土の力学特性の基本的概念としては、Lambe¹⁴⁾が提案する締固め構造の概念を Seed et al¹⁵⁾らが試験結果によって定性的に説明したものや含水比による影響を評価せず、土の粒度分布にのみ依存する土の締固め構造を提案した Yong and Warkentin¹⁶⁾や鬼塚¹⁷⁾ら提案があるが、統一的な考えは確立されていない。本研究では、細砂分の卓越した粒状体構造でありながら粒子に有する有数の微細孔構造から粘土並みの吸水性能を有する PS 灰改質材を各種土質材に添加した場合の締固め特性を調べることで、強度改善効果に及ぼす工学的影響を検討した。

PS 灰改質をしたシルト質土の締固め特性を図 3.3.2-1 に示す。改質試験の対象材料として用いられるシルト質土を図 3.3.1-1、表 3.3.1-2 と同様の添加率範囲で改質して突固め方法 A の締固め試験を実施している。本改質においては、塑性指数を有する粘土分がない状態のシルト質土に砂質系の PS 灰改質材が添加されたため、改質土の塑性は、どの改質状況でも NP のまま締固められる。シルト分は、PS 灰改質材の添加によって減少しながら吸水効果は上昇するため、締固め曲線は、右側に移行。最適含水比 w_{opt} は、上昇して最大乾燥密度 ρ_{dmax} は低減する傾向となる。シルト分の減少から F_c 値も減少していくが、一般堤防の適合基準（15～50%）には、到達していないため、本結果からでは、堤防対策には活用できない。もともと対象がシルト分のみ材料なのでこれを少ない添加量で一般堤防の適合基準に適用させることは困難で図 3.3.1-2 の適正範囲例から検討すると今回の改質土では不透水性部材料領域にあることがわかる。ただクラック危険領域にも入っているのだが、今回の改質土締固め曲線の構造は、特殊な性状を有しているためシルト材料の含水比や吸着性が上がっているため、効率的な性状になる可能性も考えられる。事実 3.3.3 での強度改善効果に粘着力が上昇している。

また、今回実施した改質土の粒度算定は、添加率 η の試算で実施したもので粒度の細かい部分が PS 灰改質材の粒子内部に入り込んだ外観上の粒度については、将来検討方法が必要になるかもしれない。

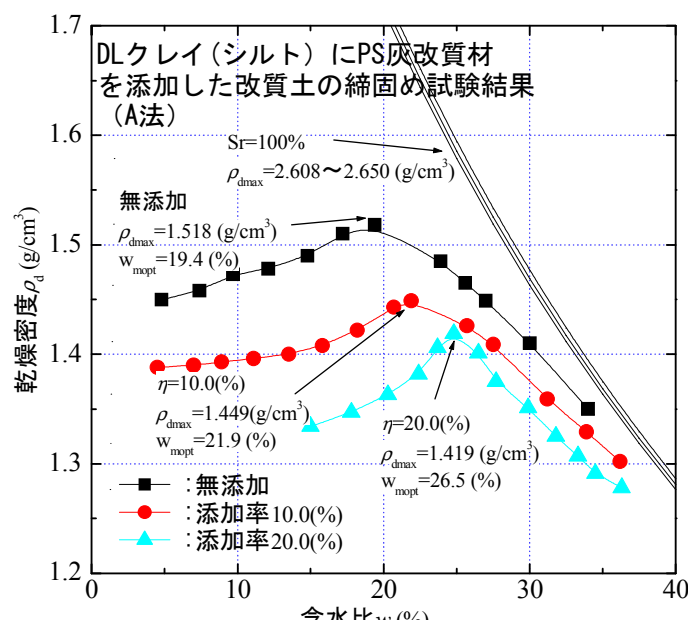


図 3.3.2-1 PS 灰改質材を添加したシルト質土の締固め特性

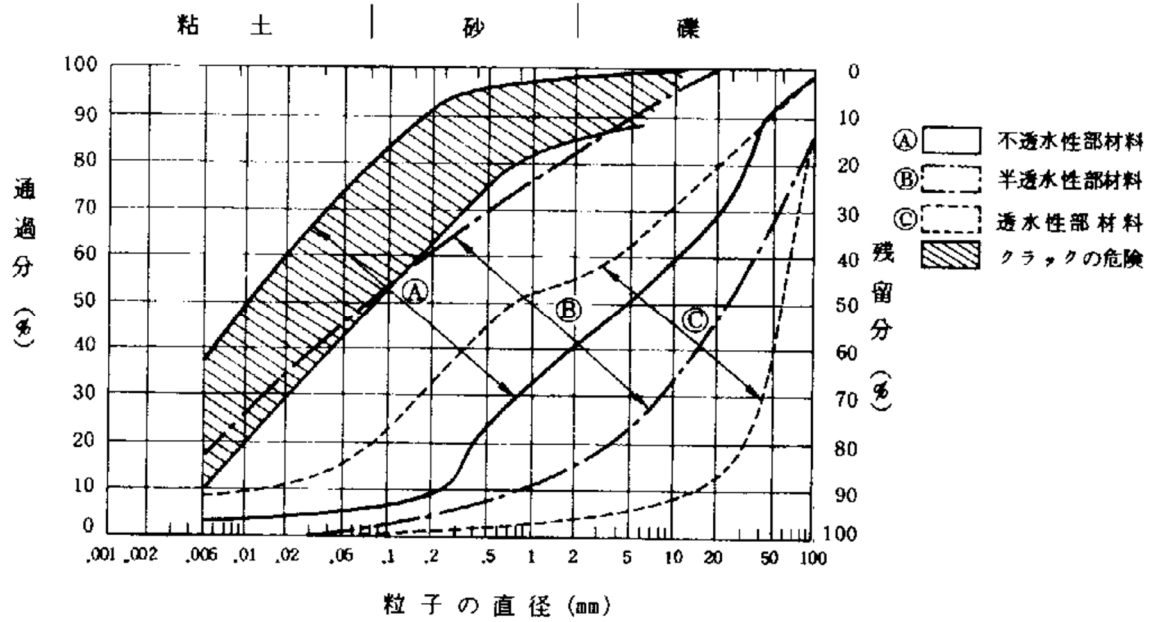


図 3.3.2-2 堤体材料の適正範囲例

* アメリカ開拓局 1974¹⁶⁾

河川土工より抜粋

3.3.3 PS 灰改質土（シルト）の強度特性について

(1) PS 灰改質土の三軸試験と締固め判定基準について

PS 灰改質土のせん断試験に用いた試料土は、粘土混じりの礫質土およびシルト質土に各々 PS 灰改質材を所定添加率で混合させた試料で供試体を作成している。実施した三軸試験は、圧密非排水三軸(CU)試験(JGS0523)を実施した。一般的な土構造物の締固め管理の基準としては、締固め度 D_c が基準となっており、大半の場合、90%以上となっているのが一般的である。しかしながら現在の設計・施工管理体系では、 D_c の増加による盛土材料の工学的性質の向上を定量的に評価して反映する事例は少なく、土地改良事業指針「ため池整備」¹²⁾が示すため池堤体の締固め管理基準地95%を下回るケースも見受けられる¹³⁾。龍岡は、締固め度が90～95%を超えると強度は相当増加し残量変形はかなり小さくなることから、締固めの合理的な施工管理の設計への反映を提言している²¹⁾。3.1の結果でも建設発生土のPS 灰改質材土の締固め基準は、通常の締固め度 D_c 90%かそれ以下になることが多く、その結果、改善強度については、全応力評価では C_{cu} の効果が得られたが、有効応力では、明確な改善効果が認められなかった。そこで明確な締固め条件での土の改善効果とその要因を考察するために締固め度 D_c 95%を供試体の締固め基準として、礫質土及びシルト質土のPS 灰改質強度を検討した。

供試体作製に関しては、3章の締固め曲線で得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} を基準に締固め度を規定して ($D_c=95\%$) 静的締固め法（一層 $h=H/6$ ごと、計六層）により供試体寸法直径75mm高さ150mmで作製した。

(2) PS 灰改質したシルト質土の強度特性

PS 灰改質する対象土としては、シルト質の浚渫土や液状化の可能性のあるシルト質土、改質分級が必要な津波堆積土の造粒化が必要なシルト質土対応のためにシルト質土の三軸試験を実施した。本材料は、粒度試験や締固め試験で使用したものと同様、品質安定性から購入製品であるDLクレイを使用した。供試体作成方法は、3.2の粘性土の場合と同様であるが、供試体については、シルト質土単体の締固め度 $D_c=95\%$ に対して三軸試験を実施して、応力-ひずみ曲線、モールの有効応力円を各々図3.3.3-1、図3.3.3-2に示した。

シルト質土の強度は、締固め度 $D_c=95\%$ に対して、内部摩擦角 $\phi'=30.1^\circ$ 、粘着力 $c'=3.0$ kPa となった。

シルト質土の PS 灰改質に関しても、粒度及び締固め試験同様表 3.3.3-1 に示す通り、PS 灰添加率 $\eta=10, 20\%$ で三軸試験を行った。PS 灰改質土においても供試体の締固め密度は、大きく影響するので、未改質同様締固め度 $D_c=95\%$ として作製した。 $\eta=10\%$ は、ほとんどシルト質土単体と変化がなく、 $\eta=20\%$ の応力-ひずみ曲線、モールの有効応力円を図 3.3.3-3、図 3.3.3-4 に示した。試験結果のまとめとして図 3.3.3-5、図 3.3.3-6 に PS 灰添加率 η による強度定数（粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' ）の効果を示し、表 3.3.3-1 に PS 灰改質土（シルト質土）の強度特性をまとめている。

これらの結果よりシルト質土における PS 灰改質材の強度改善効果は、PS 灰添加率 η を増加させた場合、 $\eta=10\%$ では改善効果が明確に表れないが $\eta=20\%$ まで増加させると粘着力 c' は 9.3Kpa 上昇し、改善効果が発揮されること、また内部摩擦角 ϕ' に関しては、 $\eta=20\%$ まで添加率を増加させた場合、 0.7° 程度の改善効果が認められた。シルト質土に

は塑性指数が存在せず，PS 灰改質材を添加することによる粒調効果分で細粒分含有率 F_c が減少し，PS 灰の吸着性能と $D_c=95\%$ の締固め度で粘着力 c' の改善効果に有効性が認められるようになったものと考えている．

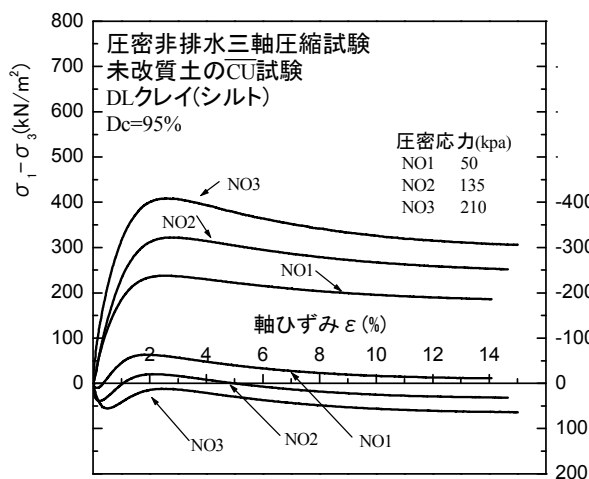


図 3.3.3-1 圧密非排水三軸圧縮試験結果
未改質 DL クレイ $D_c95\%$ の応力-ひずみ曲
線

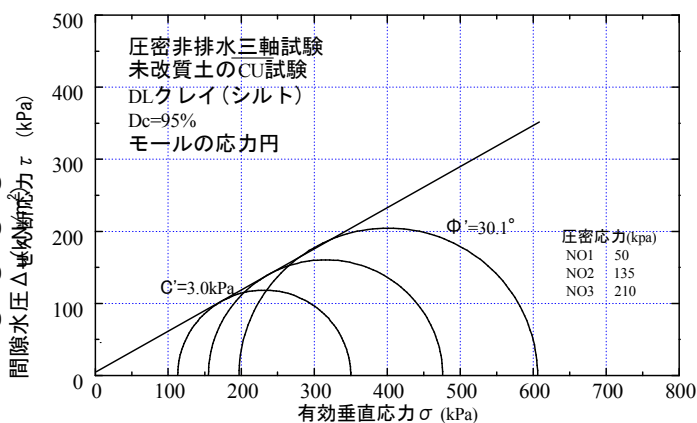


図 3.3.2-2 圧密排水三軸圧縮試験結果
未改質 DL クレイ $D_c95\%$ のモールの有効応力円

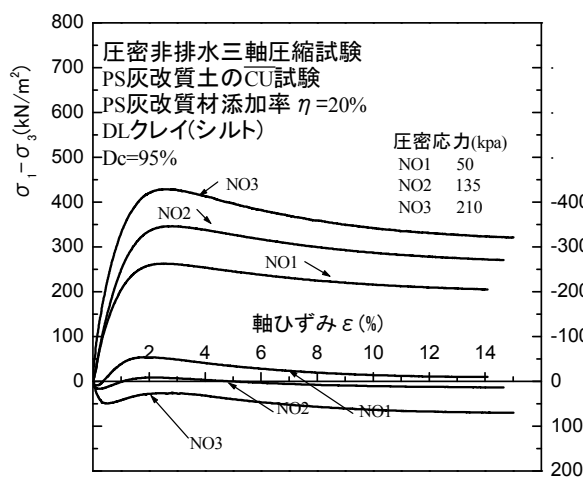


図 3.3.3-3 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰 DL クレイ改質土 ($\eta=20\%$)
 $D_c95\%$ の応力-ひずみ曲線

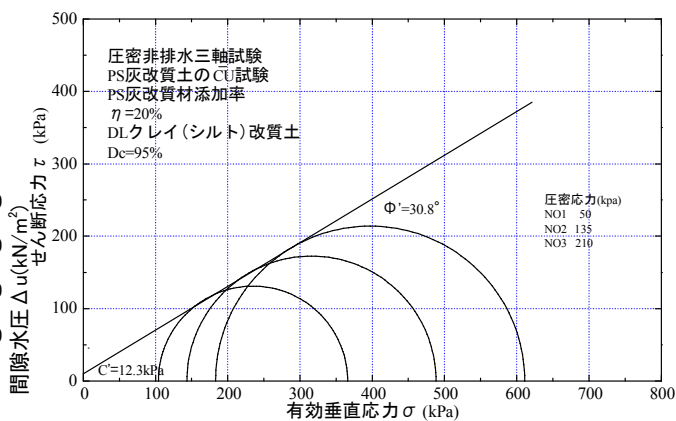


図 3.3.3-4 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰 DL クレイ改質土 ($\eta=20\%$)
 $D_c95\%$ のモールの応力円

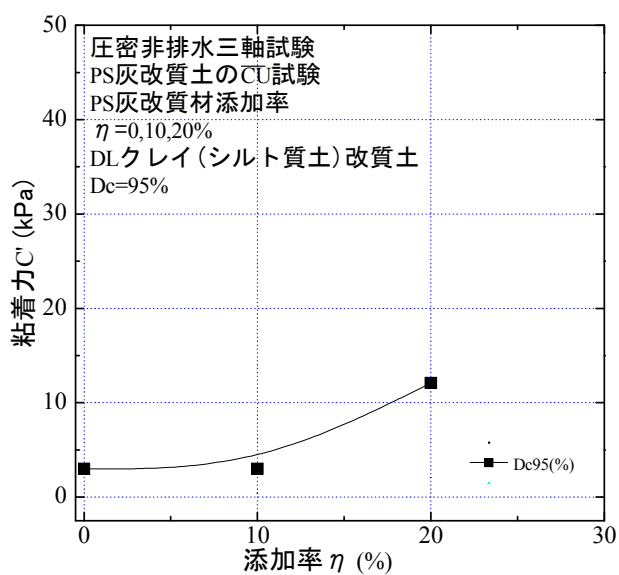


図 3.3.3-5 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰改質土 (DL クレイ) の強度定数
(粘着力 c') 効果

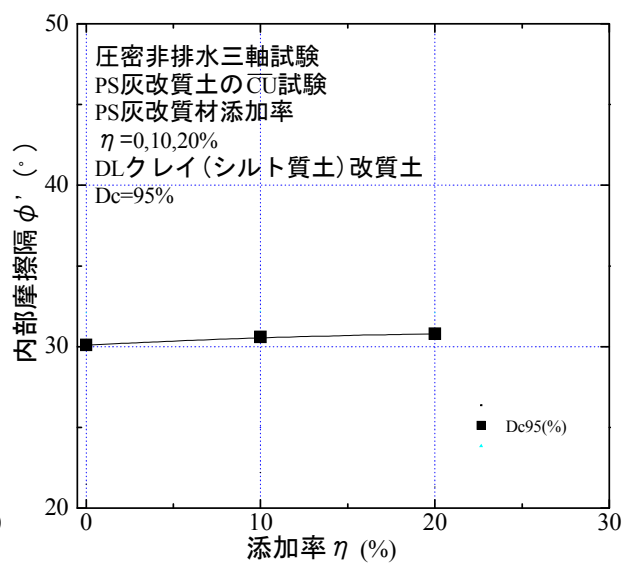


図 3.3.3-6 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰改質土 (DL クレイ) の強度定数
(内部摩擦角 ϕ') 効果

表 3.3.3-1 DL クレイ PS 灰改質土(シルト質土)の強度特性

締固め度(D_c) (%)	添加率 η (%)	c' 粘着力 (kPa)	ϕ' 内部摩擦角(°)
95	0.0	3.0	30.1
	10.0	3.0	30.6
	20.0	12.3	30.8

3.3.4 PS 灰改質土（礫質土）の基本物性

表3.3.4-1にPS灰改質材の対象土として、フィルダムコア用礫質土の物理特性を示す。

フィルダム築造において、高含水比コア材の施工性改善方法の開発は、大きな課題の一つである。通常は、曝気乾燥、強制乾燥、粗粒材のブレンド等により含水比の低下を図ったり、場合によっては対処不能として廃棄し良質材のみの選別採取を行うといった方法が採られている。いずれの方法も多大な時間やコストを要する。粗粒材のブレンドには、コア材の生命線である遮水性の問題が発生する上、廃棄土量が増大することは、環境保全面においてもマイナス要因となっている。

今回使用した礫質土は、高含水比コア材の施工性改善材料であるが、粘土混じり礫質土のPS灰改質材活用の一つとして堤防材への活用もあることから、 F_c の適合基準（15～50%）に向けた堤防材への検討も行っている。PS灰改質土の粒度は、土の粒度試験方法(JIS A 1204)を実施、図3.3.4-1の粒度分布には、PS灰改質材と粘土混じり礫質土ならびにPS灰改質材を添加した場合の改質土の粒度を記載した。図3.3.4-1の粒度構成よりPS灰改質材は、粗砂、中砂、細砂とほぼ砂で構成されており、非塑性(non-plastic)の砂状粒状材料である。

改質対象の礫質土の物理特性は、大半が粗礫分の礫質土60%、25%の砂と15%程度のシルト以下分で構成されている。PS灰改質材の添加率 η は、 $\eta = Mm/Ms$ で定式化*されており、2章や3.2.4で説明したものと同様である。本礫質土に対しては、 $\eta=6.4, 12.7$ (%)とした。

* η : 添加率

Mm : PS 灰材料の質量 M_s : 礫質土の乾燥質量

液塑性試験は、0.425mm篩通過分で実施した。試験結果は、表3.3.4-2に示す。

まず、礫質材の粒度は、不透水性部材の領域にあり、今回の添加率では、それほどの粒度変化は認められず、 F_c に大きな変化は求められないため堤防構造物としての基準以内と考えられる。対象礫質試料の塑性指数 I_p は、28.4%と中塑性レベルで、PS灰改質材の添加率を6.4, 12.7 (%)と増加していくことで塑性指数がほぼ10 (%)程度ずつ減少していくことがわかる。

表 3.3.4-1 試料に用いた礫質土の物性

材料の種類	砂礫土
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.737
液性限界 $w_L(\%)$	71.3
塑性限界 $w_P(\%)$	42.9
塑性指数 I_P	28.4
最適含水比 $w_{opt}(\%)$	23.0
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.610

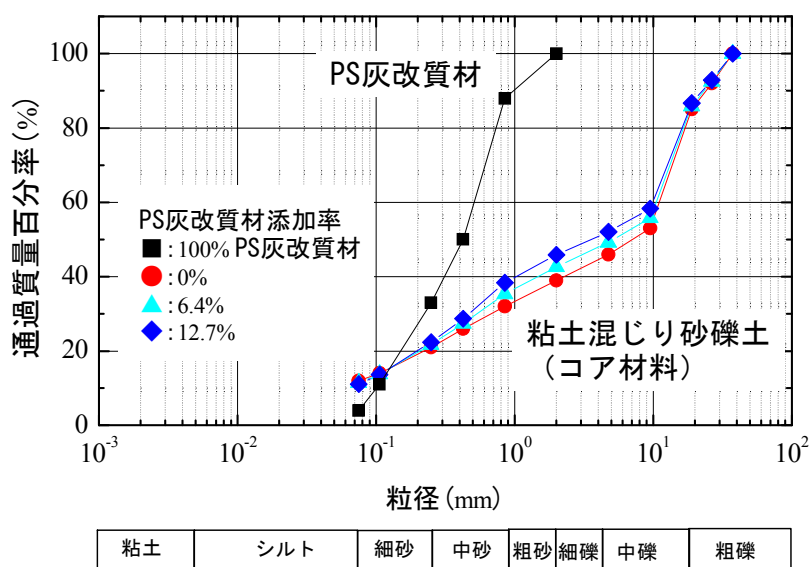


図 3.3.4-1 PS 灰改質土 (礫質土) の粒度分布

表 3.3.4-2 試験に用いた礫質土に PS 灰改質材を添加した改質土の液塑性指数

材料の名前	砂礫土	PS灰改質材添加率 η (%)	
		$\eta = 6.4\%$	$\eta = 12.7\%$
液性限界 $w_L(\%)$	71.3	65.7	62.6
塑性限界 $w_P(\%)$	42.9	46.1	51.4
塑性指数 I_P	28.4	19.6	11.2

3.3.5 PS 灰改質土（礫質土）の締固め特性

PS 灰改質材単体の締固め特性については、3.2.2 のとおりであり、高吸水機能による最適含水比 w_{opt} の高さと平坦に近い形状の締固め特性が特徴である。PS 灰改質をした粘土混じり礫質土の締固め特性を図 3.3.5-1 に示す。改質試験の対象材料として用いられる粘土混じり礫質土を図 3.3.4-1、表 3.3.4-2 と同様の添加率範囲で改質して突固め方法 A の締固め試験を実施している。本改質においては、改質効果の大半が試料の粘土分改質に適用されて、塑性指数の減少変化は明確になったが、粒度傾向には大きな変化は認められず、改質土の締固め特性としては、添加した PS 灰改質材の質量分、最大乾燥密度 ρ_{dmax} が低減するだけで締固め曲線には、大きな変化は認められなかった。

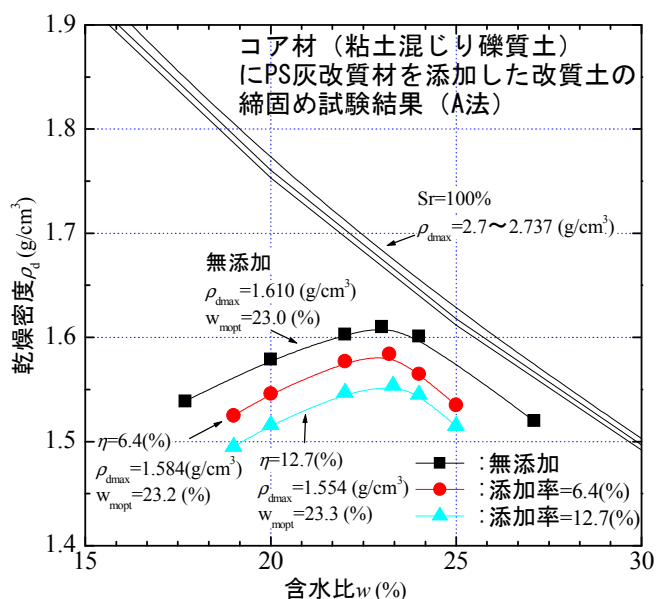


図 3.3.5-1 PS 灰改質材を添付した砂礫土の締固め特性

3.3.6 PS 灰改質土（礫質土）の強度特性について

再焼成PS灰改質材で改質した粘土混じり礫質土試験の強度特性を検討するため、まず対象試料となる未改質の粘土混じり礫質土の三軸試験を実施した。本材料は、高含水比コア材の施工性改善方法の開発として選定したものであるが、近年増加する各種災害対策に関してもPS灰改質材の手軽さと瞬時改質効果から粘土以外の材料への活用が可能となるよう粘土混じり礫質土の強度改善効果を確認した。まずPS灰改質土の前に粘土混じり礫質土単体のせん断特性を確認した。PS灰改質材単体の強度特性に関しては、参考文献⁹⁾のとおりである。粘土混じり礫質土単体の締固め度 $D_c=95\%$ で作成した供試体の応力-ひずみ曲線を図3.3.6-1に示した。図3.3.6-2に有効応力経路、図3.3.6-3には、モールの有効応力円を示す。粘土混じり礫質土の強度は、内部摩擦角 $\phi'=35.1^\circ$ 、粘着力 $c'=25\text{kPa}$ と若干の粘土分で粘着力が発生しているものと考えられる。

PS 灰改質に関しては、粒度及び締固め試験同様図 3.2.3-1 に示す通り、PS 灰添加率 $\eta=6.4, 12.7\%$ として三軸試験を行った。 $\eta=6.4\%$ の応力-ひずみ曲線、有効応力経路、モールの有効応力円を図 3.3.6-4, 図 3.3.6-5, 図 3.3.6-6 に、同様に $\eta=12.7\%$ の場合も図 3.3.6-7, 図 3.3.6-8, 図 3.3.6-9 に示した。試験結果のまとめとして図 3.3.6-10 では、無処理から添加率 $\eta=6.4, 12.7\%$ とした場合の圧密圧力 200kPa の場合の応力-ひずみ曲線、図 3.3.6-11, 図 3.3.6-12 には、PS 灰添加率 η による強度定数（粘着力 c' と内部摩擦角 ϕ' ）の効果を示した。最後に表 3.3.6-1 に PS 灰改質土（粘土混じり砂礫土）の強度特性をまとめている。

これらの結果より粘土質礫質土における PS 灰改質材の改質効果は、塑性粘土の場合⁹⁾と同様、試料中に塑性粘土分が存在する場合、塑性分の改質を行い、塑性指数の減少効果がある間は、内部摩擦角 ϕ' の改善効果が認められる。したがって、ダムコア材だけでなく粘土分の含有率が高い降雨や地震災害時の崖の地滑り土質などに対しても内部摩擦角 ϕ' の改善効果は、有効であり、PS 灰改質材の粘土混じり礫質土への活用は、可能と考える。今回のような粘土混じり砂礫土では、改質効果を発揮させる PS 灰添加率 η が最大でも 12.7% 程度までと少なかったため、粘着力 c' の効果はほとんど認められなかった。ただ高塑性粘性土の場合と同様に塑性分率が高くなっていった場合には、礫質土でも PS 灰の効果によって粘着力 c' も上昇する場合があるものとする。

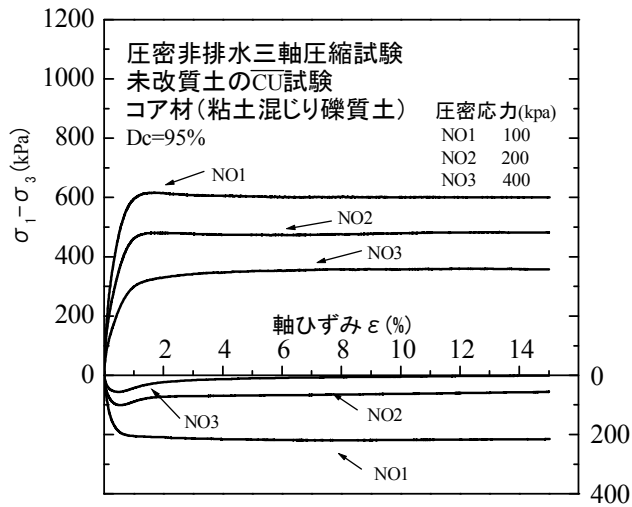


図 3.3.6-1 圧密非排水三軸圧縮試験結果
未改質ダムコア材
($\eta=0.0\%$)の応力-ひずみ曲線

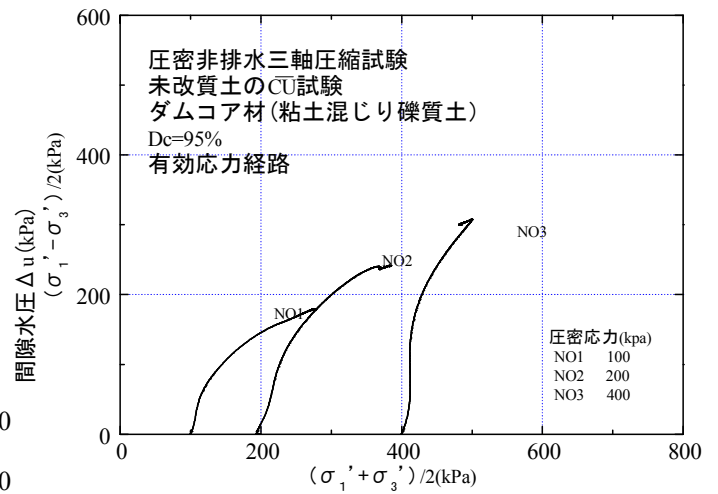


図 3.3.6-2 圧密非排水三軸圧縮試験結果
未改質ダムコア材
($\eta=0.0\%$)の有効応力経路

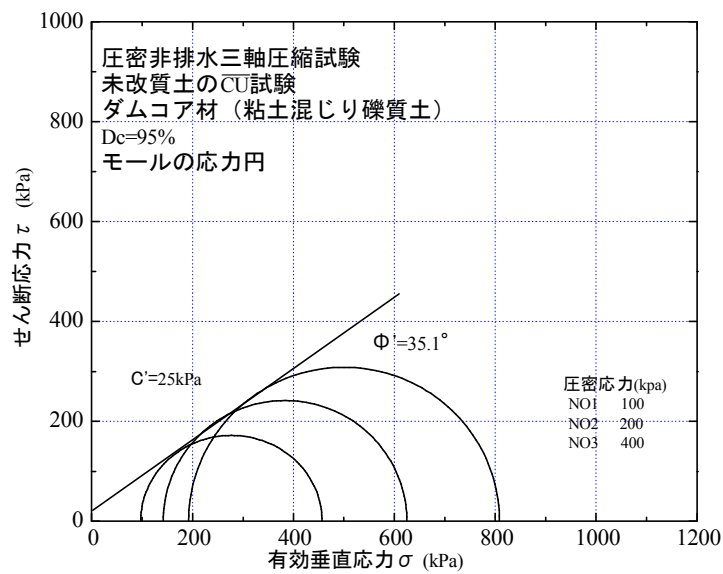


図 3.3.6-3 圧密非排水三軸圧縮試験結果
未改質ダムコア材($\eta=0.0\%$)のモールの応力円

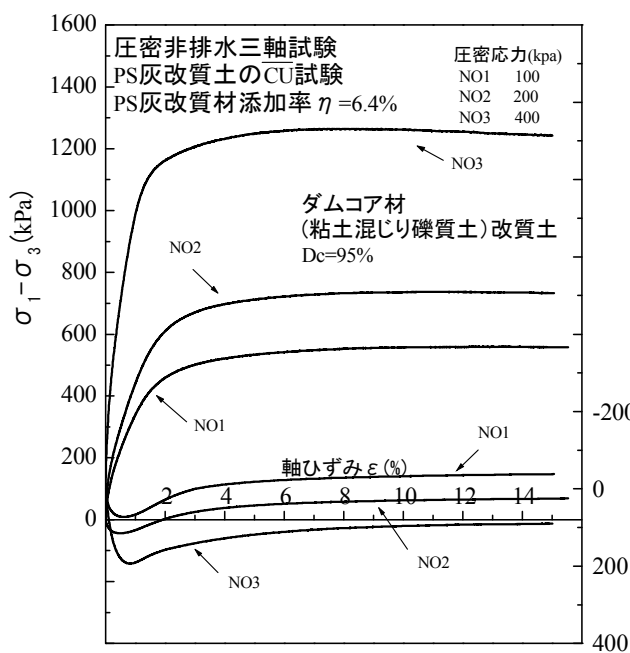


図 3.3.6-4 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土
($\eta = 6.4\%$) の応力-ひずみ曲線

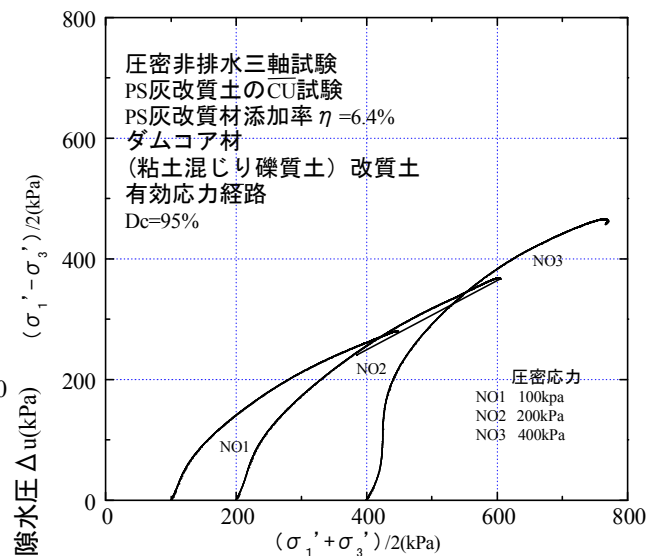


図 3.3.6-5 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土
($\eta = 6.4\%$) の有効応力経路

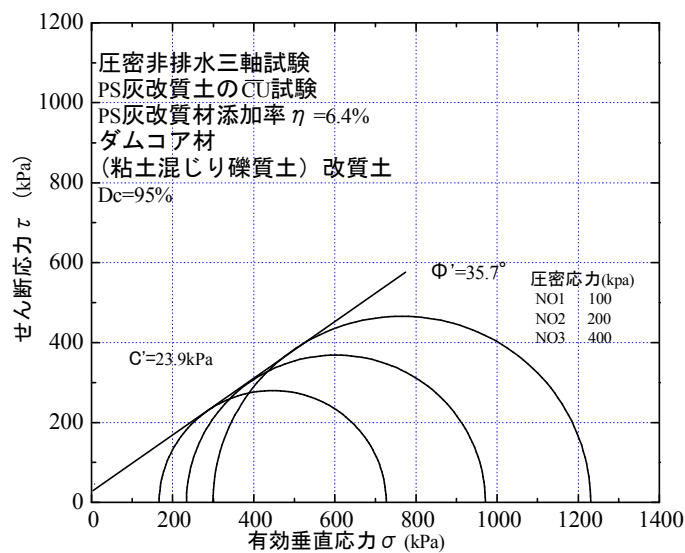


図 3.3.6-6 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土 ($\eta = 6.4\%$) のモールの応力円

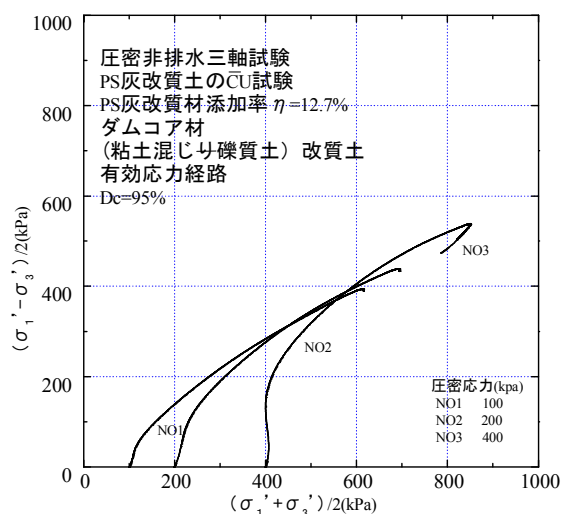
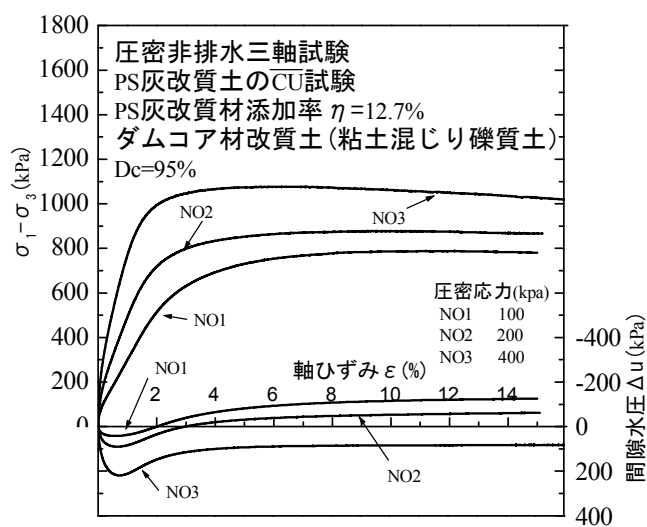


図 3.3.6-7 図-11 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土
($\eta=12.7\%$) の応力-ひずみ曲線

図 3.3.6-8 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土
($\eta=12.7\%$) の有効応力経路

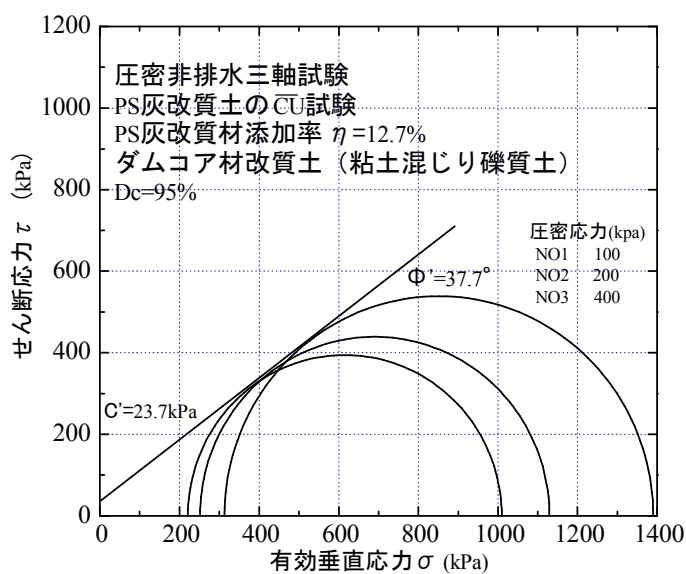


図 3.3.6-9 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土 ($\eta=12.7\%$) のモールの応力円

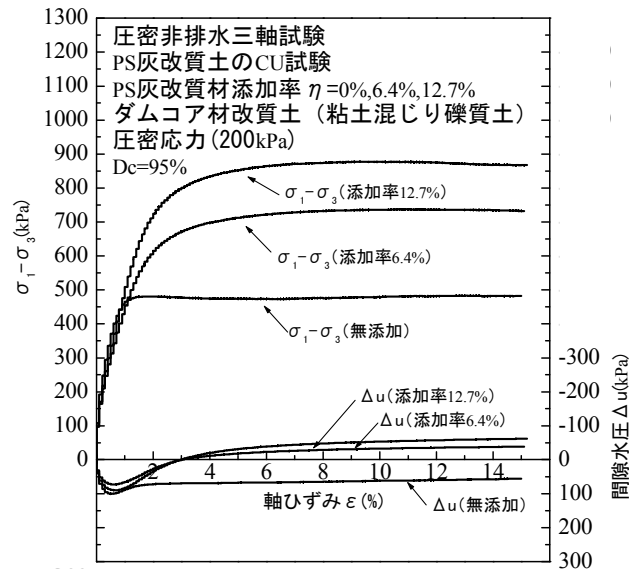


図 3.3.6-10 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土の強度改善効果

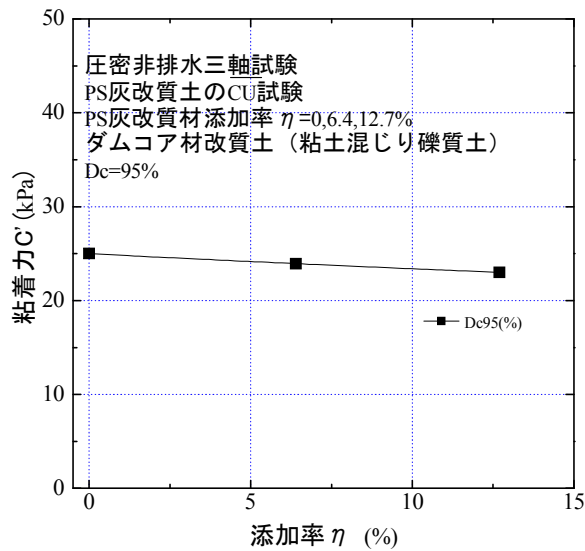


図 3.3.6-11 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土の強度定数
(粘着力 c') 効果

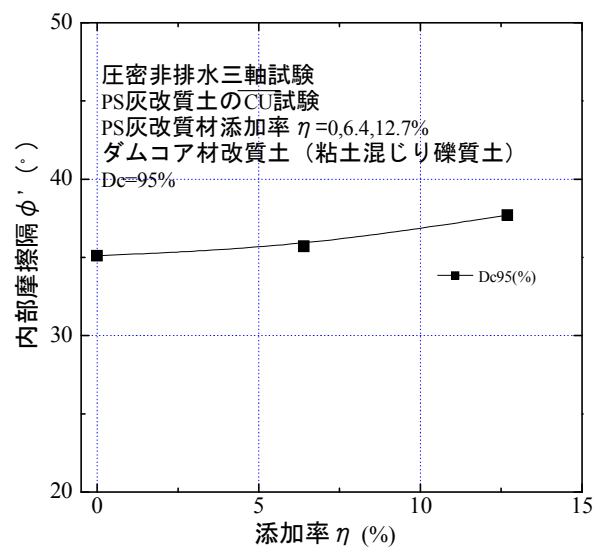


図 3.3.6-12 圧密非排水三軸圧縮試験結果
PS 灰ダムコア材改質土の強度定数
(内部摩擦角 ϕ') 効果

表 3.3.6-1 ダムコア材 PS 灰改質土 (粘土混じり砂礫土) の強度特性

締固め度 (D_c) (%)	添加率 η (%)	c' 粘着力 (kPa)	ϕ' 内部摩擦角 (°)
95	0.0	25.0	35.1
	6.4	23.9	35.7
	12.7	23.0	37.7

3.4 PS 灰改質材による土の強度改善効果のまとめと設計方法

本章では、(1) 建設発生土利用技術マニュアル基準に基づき、ランマーによる突固め方法 A 相当のエネルギーで改質土供試体を作製して改善効果を確認する場合と(2) PS 灰改質土の締固め度 D_c を 95% に基準化し、対象土については、粘土、シルト、粘土混じり礫質土の 3 種類に区分して強度特性を調べる場合の 2 種類で検討した。

(1) 突固め方法 A 相当のエネルギーによる泥土改質締固め時の強度改善効果

① PS 灰改質による強度改善効果としては、全応力評価の強度定数 c_{cu} が添加率 η に比例的に増加する ($c_{cu} \doteq 36.5 \times \eta$)。

② 一般的な土構造物への適用に関しては、粘着力 c の強度改善効果は、盛土の安定性確保に有効である。

③ 本方法では、正確な改善要因を限定することは難しく、粒度区分、粒子割合、締固め特性等の要因が絡んでくる。

④ PS 灰の吸水性能を考慮し、土のコンシステンシー概念と統一した配合設計手法で必要添加率 η を予測しておき、施工時には、マニュアルにある品質管理手法に基づいて定期的なコーン試験で必要添加率 η を管理する。対象土の含水状態を確認しながら必要添加率 η より強度定数 c_{cu} を算定してこれにより適用土構造物の安定性を確認する。

(2) 改質土の締固め度 D_c 95% で基準化した 3 種類の対象土(粘土、シルト、粘土混じり礫質土)の強度改善効果

PS 灰改質材を高規格土構造物に活用するためには、本方法による強度改善効果の確認が必要となる。各材料ごとに確認した改善強度 c' 、 ϕ' 値を用いて対象構造物の安定性確認を実施する。

・粘性土（塑性粘性土）

① PS 灰改質材は、粒子内の微細孔により高吸水性機能を有する非塑性砂質系粒状材料である。

② PS 灰改質材自体の締固め特性は、最適含水比 w_{opt} も高く、平坦な締固め形状となって幅広い含水比範囲で必要締固め度 D_c の確保が可能である。これは、PS 灰粒子の複雑な凹凸形状や吸水機能によるもので、泥土改質土の締固めにも効果を及ぼしている。

PS 灰改質材と粘性土の粒度分布は、粒度調整しやすいレベルであり、ともに吸着効果を有するため、締固まりやすい。

③ 三軸試験の結果より PS 灰改質材には、 c_d を有する高い ϕ_d 材としての特徴が確認できた。これには、粒子表面の複雑な凹凸形状による FU 値関係や微細孔のメニスカス効果によるものと考察する。

④ PS 灰改質土の粒度分布は、添加率 η の変化に応じて無添加の藤森粘土から PS 灰改質材へと変化する。 η が 150 % ($\eta^* = 60\%$) で細粒分含有率 F_c 60%、最低塑性値 I_p 5% 付近まで強度定数 c' 、 ϕ' は、急激に上昇し続け、非塑性領域付近以降からなだらかな改善傾向に転じる。PS 灰改質材の強度改善には、改質土の塑性状態の変化が影響する。

藤森粘土の場合、強度定数 ϕ' は 25.7° 、 c' は、79.5Kpa 程度の改善効果となった。

・シルト

① PS 灰改質材の粒度は、細砂であるが、シルトに近いレベルにあり、ともに粒度分布

が立った状況にあるため、粒調は良好とはいえない。シルト自体砂同等の低含水比所状態で吸着性も皆無である。

② 非塑性状態のシルト質土では、改善要因となる塑性分がないため、内部摩擦角 ϕ' にはわずかな改善効果(0.7°)となった。添加する PS 灰改質材には、吸着力から粘着成に優れており、 η が 20 %に達すると大きな粘着効果(9.3Kpa)が発揮された。

・粘土混じり礫質土

① PS 灰改質した粘土混じり礫質土の締固め特性については、最大乾燥密度 ρ_{dmax} の値が減少するだけで最適含水比 w_{opt} は、変化せず、締固め形状も同様な形状なのでダムコア材などの瞬時の最適含水化管理に適している。

② 礫質土における PS 灰改質材の強度改善効果は、塑性粘土と同様、試料中の塑性分に対して、内部摩擦角 ϕ' の改善効果が得られる。粒子内部の塑性粘土分が PS 灰改質されることにより、改質土全体のダイレイタンス傾向が向上した結果と考えられる。

③ PS 灰改質材の添加率 η が最大でも 12.7 %程度と少なかったため、内部摩擦角 ϕ' の改善効果は、2.6°程度となり、粘着力 c' の値は、ほとんど一定で今回程度の添加率範囲では、粘着力に対する効果は、認められないレベルであった。

(3) PS 改質土の設計方法について

今後の PS 灰改質土の設計方法は、(2)改質土の締固め度 $Dc95\%$ に基準化し、対象土を粘土、シルト、粘土混じり礫質土の 3 区分として対応した強度改善効果と設計方法によって進めていくことが好ましい。3.2 でも記載したが、締固め度 $Dc95\%$ でも設計基準に対応できるか追加確認しておく事項がある。剛性、透水性確認のため、CBR 及び透水試験による PS 灰改質効果、5 章に記載する PS 灰改質養生効果の検討が必要となる。

締固め時の PS 灰の破碎に問題ないことは確認していること、三軸試験についても可能な限り軸ひずみ 15%までは対応している為、せん断中の破碎も発生していないものと考えている。

参考文献

- 1) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル（第4版），pp.104-105，丸善，2013.
- 2) 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.
- 3) 一般社団法人セメント協会：統計データベース セメント系固化材需要推移（会計年），2018.
- 4) 石灰石鉱業協会：需給統計 平成 30 年度石灰石需給中間見直し，2018.
- 5) 日本製紙連合会：環境行動計画（廃棄物対策）フォローアップ調査結果，2017.
- 6) 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, pp.947-952, 2017.
- 7) 加島史浩，竹山佳奈，浜谷信介，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, NO2, pp.935-940, 2017.
- 8) 浜谷信介，加島浩，竹山佳奈，和栗成樹，山内裕元，岩本裕之，山中亮，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, NO2, pp.953-958, 2017.
- 9) エンジニアリング振興協会：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，2009-2010.
- 10) Mochizuki, Y. : Study on subjects and applicability for mud improvement due to mixing with paper sludge ash, *The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop*, pp.105-108, 2016.
- 11) 望月美登志，中野浩之：PS 灰の利活用の現状と課題，基礎工，Vol.45, NO.9, pp.31-35, 2017.
- 12) 農林水産省農村振興局整備部：土地改良事業指針「ため池整備」平成 27 年 5 月
- 13) 原忠，棚谷南海彦，芳本健太，靱山嵩，及川森，中山裕章，西山輝樹，黒川修，栗林健太郎，坂部晃子：ため池堤体の物理的特徴と液状化特性に関する研究，第 54 回地盤工学会，Vol.73, NO2, pp.979-980, 2019.
- 14) 石井武美：粒子破碎の表示尺度のもつ物理的意義，土質工学会論文報告集，Vol.29, NO4, pp.155-164, 1989.
- 15) 吉村優治，小川正二：粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一時性質の影響，土木学会論文集，No.487/III-26, pp.99-108, 1994.
- 16) 財国土開発技術センター：河川土工マニュアル(案) pp29
- 17) Lambe, T.W. : The structure of compacted clay, *Journal SMFD*, Proceeding of ACSE, Vol. 84, SM2, pp. 1655-1-1655-1-35, 1958,
- 18) Seed, H.B., Mitchel, J.K. and Chan, C. (1960): The structure of compacted cohesive soil, ASCE, Research Conf. on the Shear Strength of Cohesive soil, Boulder, Colorado, pp.168-273.
- 19) Yong, R.N. and Werkentin, B.P. (1966): Introduction to soil behavior, 山崎不二夫，山内豊聡，鹿島出版会.
- 20) 鬼塚克忠，吉武茂樹：締固めた混合土の強度異方性について，土質工学会論文報告集，Vol. 23, No. 4, pp. 15-1-1655, Dec. 2011.
- 21) 龍岡文夫：飽和度と剛性の管理に基づく盛土締固め管理の合理化について，土と基礎，Vol.67, NO.11/12, Ser.No.742/743, pp.30-33, 2019.

4 章 PS 灰による環境浄化性能について

4.1 はじめに

泥土の改質材として開発した PS 灰改質材は、2 章において説明したとおり粒子内に存在する無数の微細孔によって高い吸水性機能を発揮する。こうした構造的特徴は、大きな比表面積と細孔容積といった指標であらわされ、吸水性能のみならず、有害物等の吸着や消臭、あるいは溶出抑制効果などが期待できる可能性がある。そこで本章では、PS 灰の環境浄化機能を確認するため、有害物質の吸着性能や湖沼水質悪化の要因となる栄養塩の溶出抑制効果ならびに悪臭に対する消臭効果を確認した。

4.2 改質材の吸着性能

4.2.1 試験方法

汚染物質として鉛、カドミウム、砒素、水銀の 4 項目を対象項目として選定し、模擬汚染水を作成した。さらにその汚染水に塩化ナトリウム、リンを添加してそれぞれの物質の吸着効果を確認した。以下に吸着試験の内容を示す。

まず模擬汚染水 1L に吸着材 100 g を添加し、ガラス棒で 5 分間ゆるやかに攪拌する。攪拌後 1 時間静置した後、上澄みをメンブレンフィルター（孔径 0.45 μ m）でろ過したものを分析用試料とし、各物質の濃度を測定した。今回の試験では、PS 灰改質材と比較するため、市販活性炭、土壌（関東ローム）を吸着材として採用した。

調整した模擬汚染水の試験項目は、表 4.2.1-1 および表 4.2.1-2 に示すとおりである。

表 4.2.1-1 吸着試験測定項目と試験方法

測定項目	試験方法
pH	ガラス電極法
EC（電気伝導度）	電極法

表 4.2.1-2 模擬汚染水の設定濃度と試験方法

項目	模擬汚染水の設定濃度	試験方法
鉛	0.1mg/L	酸分解 ICP 発光分光分析法
カドミウム	0.1mg/L	酸分解 ICP 発光分光分析法
砒素	0.1mg/L	酸分解 水素化合物発生原子吸光光度法
水銀	0.005mg/L	酸分解 還元気化原子吸光光度法
リン	5～6mg/L	モリブデン青吸光光度法
ナトリウム	3900～4000mg/L (NaCl として 1%)	ICP 発光分光分析法
塩素	6000～6100mg/L (NaCl として 1%)	イオンクロマトグラフ法

※鉛、カドミウム、砒素、水銀の 4 項目（設定濃度は環境基準の 10 倍）

4.2.2 吸着試験結果

PS 灰改質材，活性炭，一般土壌の水質中の有害物質の吸着除去効果について表 4.2.2-1 に結果をまとめた．PS 灰改質材は，活性炭と同様に模擬汚染水中の鉛，カドミウム，水銀を吸着する効果が確認された．砒素については，どの吸着材でも吸着効果は認められなかった．EC（電気伝導度），塩素，ナトリウムについても処理前後で大きな変化はなかった．一方，リンについては PS 灰改質材の添加により溶液中濃度が低くなっている．リン等の栄養塩の除去については効果が期待できるものと考ええる．こうした栄養塩類は，湖沼の水質を悪化させる主要因であることから，PS 灰改質材による湖沼の底泥処理は，単に底泥の物理的な改良効果だけでなく，栄養塩類の溶出を抑制する水質浄化機能も有する有効な方法と判断される．

表 4.2.2-1 吸着試験の結果

検体 項目	模擬汚染水 (添加前)	模擬汚染水 PS灰改質材添加 後	模擬汚染水 活性炭添加 後	模擬汚染水 土壌添加後	定量下限値	
pH	4.8	9.9	9.9	7.1	－	－
EC	17500	17500	17700	17300	－	μ s/cm
鉛	0.069	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	mg/L
カドミウム	0.071	<0.001	<0.001	0.013	0.001	mg/L
ヒ素	0.092	0.10	0.13	0.072	0.001	mg/L
水銀	0.0047	<0.0005	<0.0005	0.0016	0.0005	mg/L
ナトリウム	3900	3700	3800	3800	1	mg/L
塩素	6200	6000	6200	6000	1	mg/L
リン	6.0	1.7	9.4	3.1	0.01	mg/L

4.3 栄養塩の溶出抑制機能

富栄養湖における窒素・リンは、湖に注ぐ河川を経由して流入するほか、湖底に堆積した泥に含まれているものが、湖水中に溶出している。夏期にはこれらを栄養分とする植物プランクトン（アオコなど）が異常発生し、水質悪化の大きな原因となっている。湖沼における水質汚濁の防止対策および底質汚濁の防止対策などの水質浄化事業の一環として底泥の浚渫が実施されているが、浚渫土砂は多量に発生し、高い含水比の性状を有することから取り扱いにくく、その有効利用先や受け入れ先の確保ならびに跡地利用が困難である。ここでは、富栄養湖の浚渫土を湖岸へ有効利用することを目的に製品化した PS 灰を用いて湖沼の底泥を改質し、その改質土からの栄養塩類の溶出抑制効果について実験的検証を行った結果を報告する。

4.3.1 富栄養化した浚渫土の周景湖岸造成盛土への有効利用

(1) 湖岸造成盛土への有効利用方法

富栄養化した浚渫土を改質し、湖岸へ利用する方法を写真 4.3.1-1、図 4.3.1-1 に示す。この方法により、受け入れ先がない浚渫土を湖岸盛土に戻しながら、湖沼の水域と陸域の境界が自然な周景湖岸を構築することが可能になる。その際、直ぐに栄養塩類が湖内に戻ってしまわないように、改質土からの栄養塩類の溶出速度を抑えることが必要になる。



写真 4.3.1-1 湖岸造成の盛土への有効利用
(歩行者道、芝、砂利の下層に改質土を用いる)

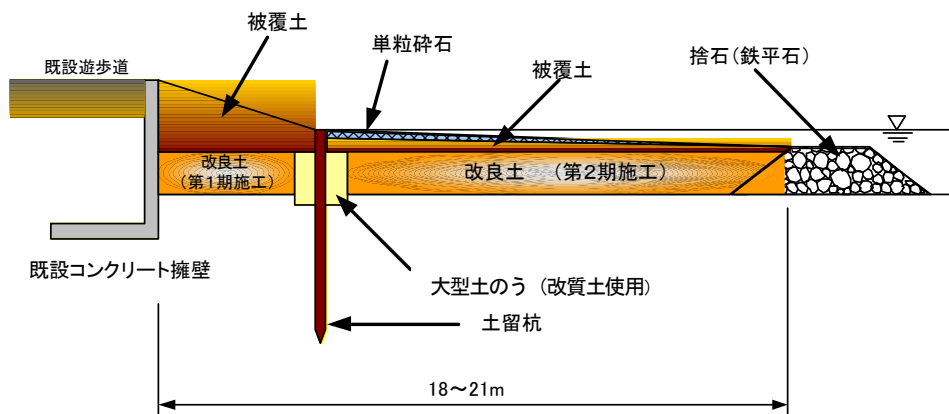


図 4.3.1-1 湖岸造成盛土の断面図

(2) 湖沼の底泥

栄養塩が蓄積している浚渫土として、表 4.3.1-1 および図 4.3.1-2 に示す性状を有する試料を用いた。試料は、富栄養湖に分類される栄養塩類の濃度が高い底泥表層 50cm を浚渫し、囲繞堤内で天日乾燥による含水比の低下を行ったものである。

表 4.3.1-1 浚渫土の性状

土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.489
含水比(%)	204.6
液性限界 w_L (%)	181.0
塑性限界 w_P (%)	84.7
塑性指数 I_P	96.4
pH	6.1

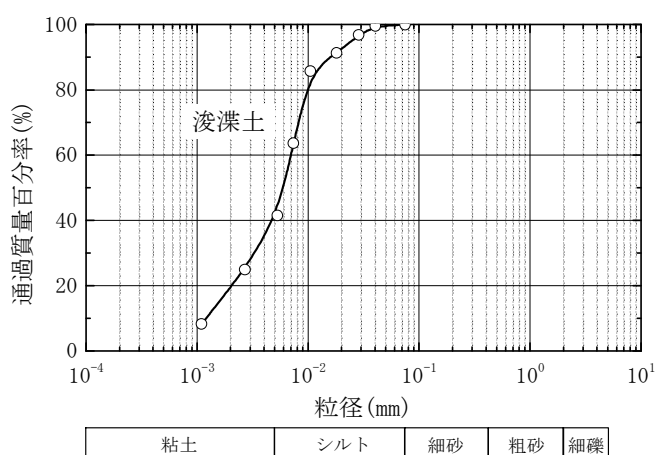


図 4.3.1-2 浚渫土の粒度分布

(3) 栄養塩類の溶出試験方法

溶出試験には、(社)底質浄化協会「底質の調査・試験マニュアル」平成 15 年 3 月¹⁾の栄養塩類の溶出試験（窒素，リン）に準拠したカラム溶出試験方法を採用した。この試験は、湖沼における底泥に含有された栄養塩が液中に溶出する過程を実際の水域環境に近い条件下で再現する方法である。溶出試験装置は図 4.3.1-3 に示す構成とし、円筒形の直径 14cm に浚渫土は静かに投入し、改質土は締固めエネルギー A 法にて厚さ 30cm で作製した。改質土と覆砂の効果も合わせた検討も実施した。改質土は湖岸の造成盛土の地中に埋め戻し、その上に覆土を被せることから、カラム試験における改質土は嫌気条件とした。カラム試験装置での改質土の直上水の高さは 50cm とし、試験中はポンプにて循環した。また、恒温室 20℃内で実施した。この実験ケースを以下に示す。

【実験ケース】 q_c : コーン指数

- ① 浚渫土
- ② 改質土 $q_c=500\text{kN/m}^2$
- ③ 改質土 $q_c=500\text{kN/m}^2$ + 覆砂厚さ 15cm
- ④ 改質土 $q_c=500\text{kN/m}^2$ + 覆砂厚さ 30cm

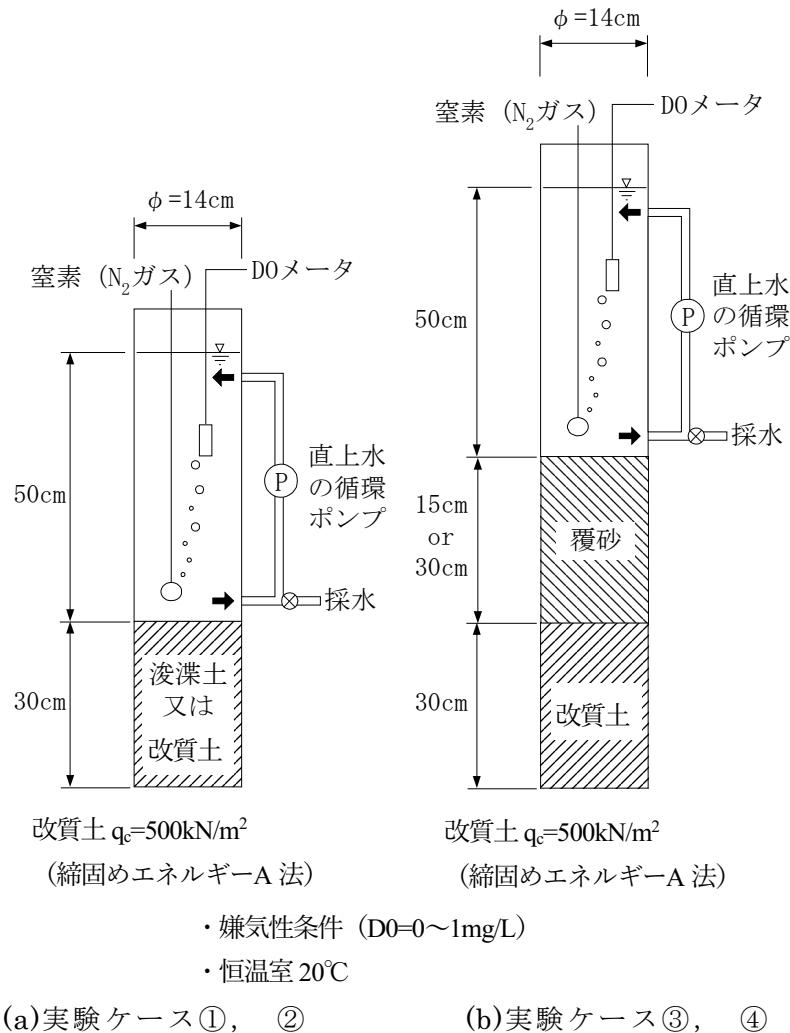


図 4.3.1-3 カラム溶出試験

出典：「社団法人底質浄化協会 底質の調査・試験マニュアル」より¹⁾

(4) 栄養塩類の溶出量

カラム試験の結果、全窒素（以下 TN とする）の溶出量を図 4.3.1-4 に、全リン（以下 TP とする）の溶出量を図 4.3.1-5 に示す。図 4.3.1-4 より、41 日経過後の改質土の TN 溶出量は、浚渫土に対し 33%の溶出量に減少しており、顕著な違いが見られた。また覆砂による抑制効果は、浚渫土に対して覆砂 $t=15\text{cm}$ では 10%に低減、 $t=30\text{cm}$ では 8%に低減している。図 4.3.1-5 の TP 溶出量の結果は、20 日経過まではあまり差が見られないが 41 日経過後を見ると浚渫土に対し改質土は 71%の溶出量に減少し、さらに改質土に覆砂を施した場合では、覆砂 $t=15\text{cm}$ において 57%に低減、 $t=30\text{cm}$ において 62%に低減している。

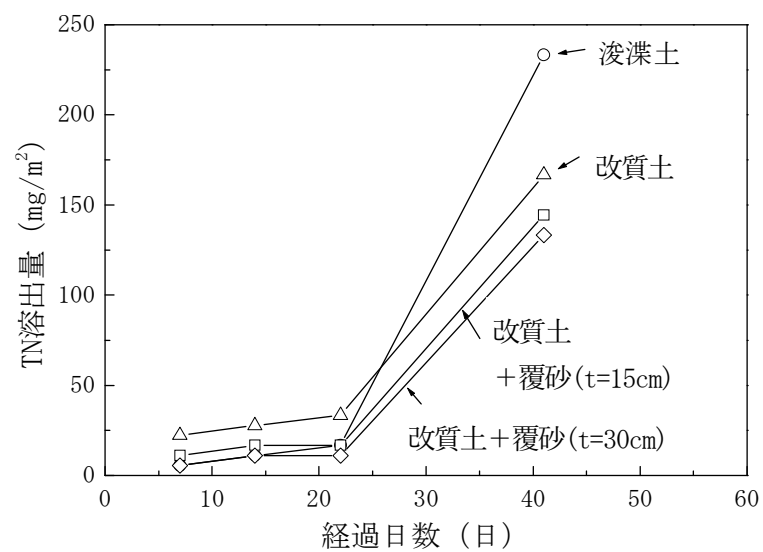


図 4.3.1-4 TN の溶出量結果

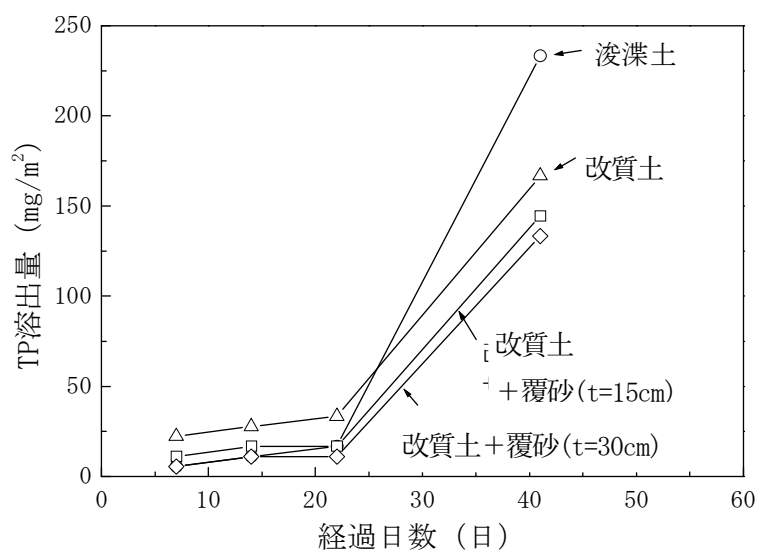


図 4.3.1-5 TP の溶出量結果

(5) 栄養塩類の溶出速度

水域への水質汚濁物質の溶出速度を低減すること，すなわち長期的にゆっくりと溶出させることで，湖沼への負荷を与えることなく浚渫土の有効利用が可能になると考える．ここで，溶出速度は，底質の表面から 1 日当たり，単位面積当たり，何 mg の溶出物質が出てくるかを表す指数 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$) で表され，溶出量曲線の勾配である．浚渫土およびその改質土からの溶出速度を過去の現地測定値と比較した．その結果を図 4.3.1-6，図 4.3.1-7 に示す．図 4.3.1-6 は，浚渫土，改質土とその上部に覆砂を施したものの TN 溶出速度の比較を示している．浚渫土のみの溶出速度は $142\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ となり，諏訪湖にて福原ほか（1981 年）が測定した結果の範囲内である．これに対し，改質土の締固め強度を $q_c=400\text{kN}/\text{m}^2$ （第 3 種建設処理土の q_c ）とした場合では，現地で測定された溶出速度の下限值 45 以下の $32\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ に低減される結果を得た．TP は図 4.3.1-7 に示すように，浚渫土 $15\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ に対し，改質土の溶出速度は現地測定の下限値の $6\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度に低減している．覆砂の効果は，TN では顕著に見られるが，TP では僅かである．

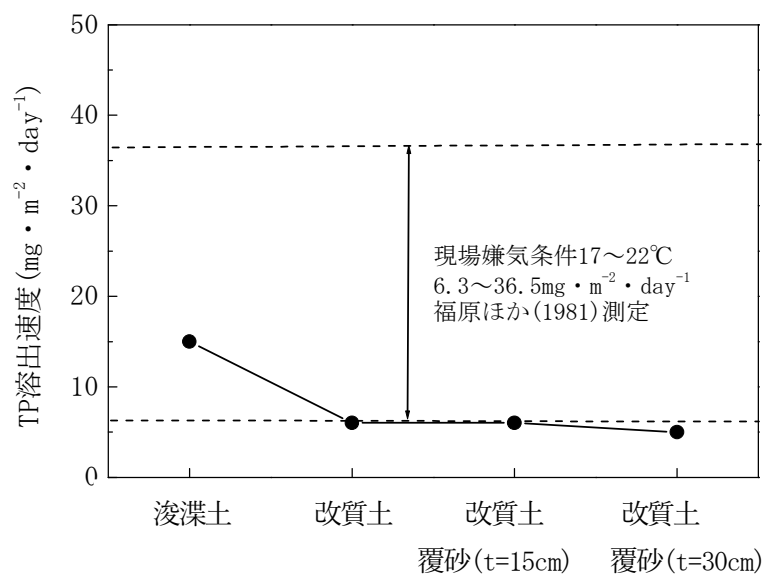
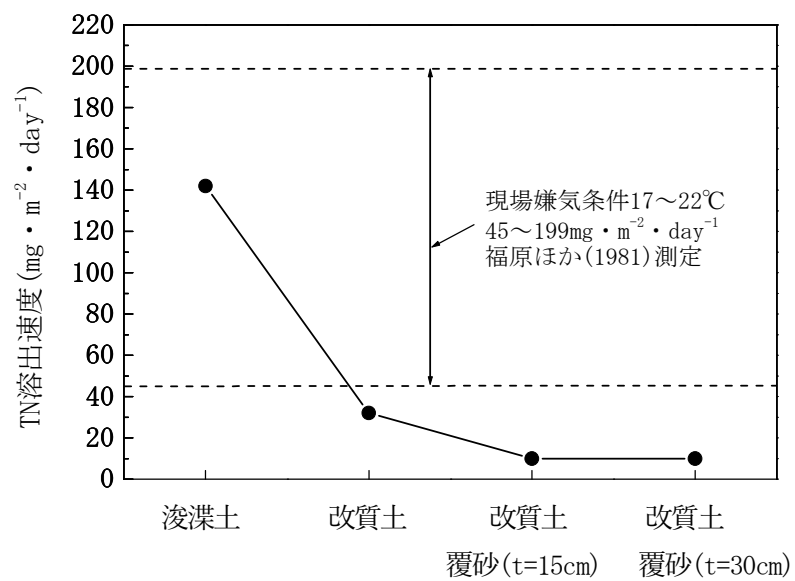


図 4.3.1-7 TP の溶出速度

出典：「西條，三田：新編湖沼調査法，講談社サイエンティフィック，p114」より²⁾

4.3.2 湖沼底泥のヨシ植生基盤への有効利用

(1) ヨシ植生基盤への有効利用方法

琵琶湖周辺は日本でも有数のヨシ群落の生育地であるが、近年の高度成長期による湖岸の建設などの結果、ヨシ群落が減少していると報告されている。ヨシ群落の優れた特徴は、高い増殖速度とともに窒素、リン除去機能を持ち合わせることや、鳥類、魚類、水生動物等の生息地、湖岸の侵食防止や自然景観の保全の観点も有していることである。そこで、減少するヨシ群落の再生のために水質環境改善の重要な施策として調査研究が行われている。ここでは、栄養塩類を含む底泥を、ヨシ群落の再生基盤として有効利用するために適切な改質土の硬さと栄養塩類の溶出特性を検討するための実験を実施した結果を示す。

(2) 湖沼の底泥

底泥は、琵琶湖内湖において底泥採取器を用いて直接採取したものを使用した。この底泥の物理特性と粒径加積曲線を、表 4.3.2-1 および図 4.3.2-1 に示す。

表 4.3.2-1 底泥の物理特性

土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.655
含水比(%)	80.0
液性限界 $w_L(\%)$	52.4
塑性限界 $w_P(\%)$	29.5
塑性指数 I_p	22.9
pH	7.2

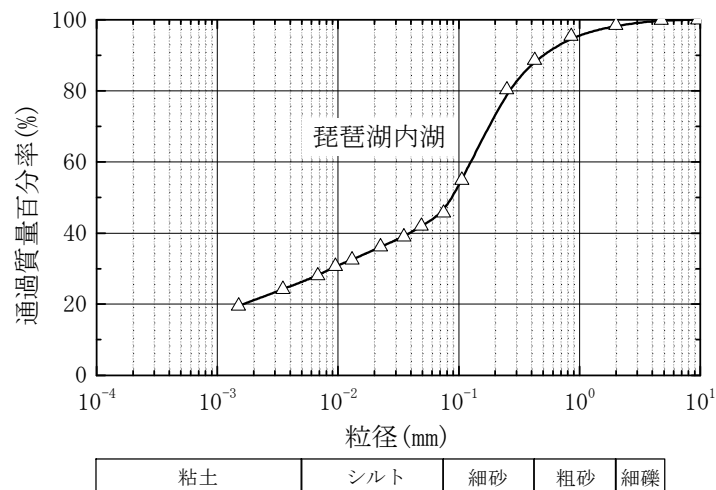


図 4.3.2-1 底泥の粒径加積曲線

(3) 栄養塩類のカラム溶出試験方法

製品化した PS 灰を用いて内湖の底泥を改質し、ヨシ植生基盤として水域へ利用した場合の栄養塩類の溶出特性を把握するために、図 4.3.2-2 に示すカラム溶出試験を実施した。ただし、ヨシは水深の浅い湖岸に根を張り育成するため、ここでのカラム試験条件は、カラム容器の上面を開放した好気状態とした。また、ヨシの育成基盤とするための地盤硬さは、既往の知見から図 4.3.2-3 に示すような $q_c=200\text{kN/m}^2\sim 800\text{kN/m}^2$ を生育範囲と推定し、この範囲の改質土 $q_c=300\text{kN/m}^2$ 、 500kN/m^2 、 800kN/m^2 を作製した。

【実験ケース】

- ① 底泥、②改質土 $q_c=300\text{kN/m}^2$ 、③改質土 $q_c=500\text{kN/m}^2$ 、④改質土 $q_c=800\text{kN/m}^2$

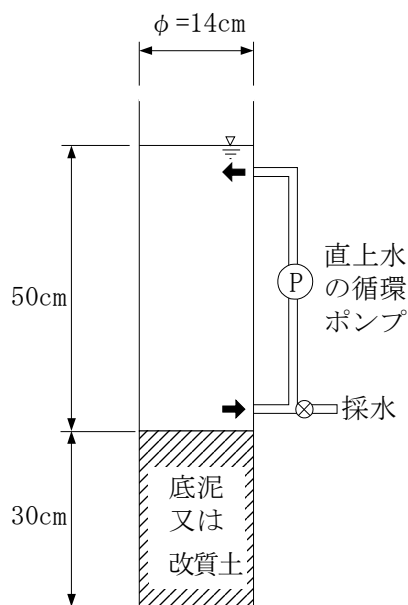


図 4.3.2-2 カラム溶出試験（好氣的条件，恒温室 20°C ）

出典：「社団法人底質浄化協会 底質の調査・試験マニュアル」より¹⁾

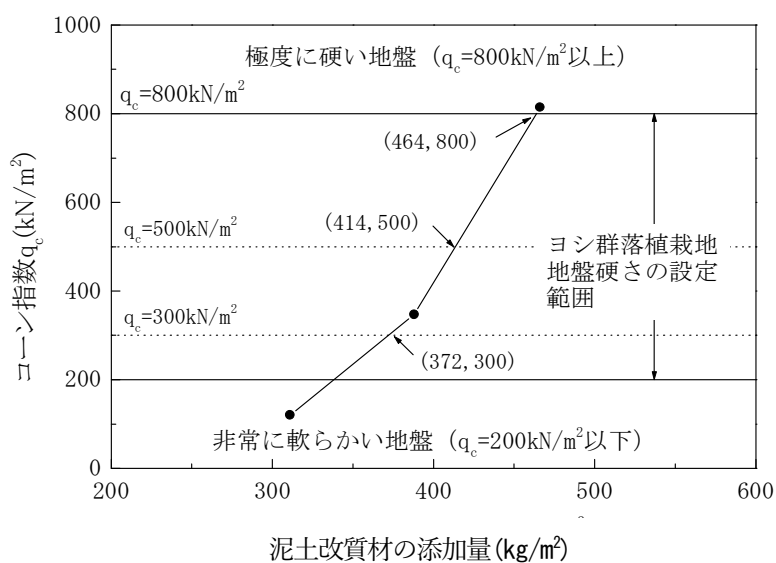


図 4.3.2-3 ヨシ植生基盤のための地盤硬さの設定

(4) 栄養塩類の溶出量

琵琶湖内湖の底泥，およびその改質土からの栄養塩の溶出量の結果を図 4.3.2-4，図 4.3.2-5 に示す．ここで，底泥からの TP 溶出量は僅かであったために，既報の琵琶湖の南湖および，木浜内湖の TP 溶出量³⁾と比較して図示した．図より，TN 溶出量は底泥よりも改質土の方が小さく，添加量を多くし q_c が高いほど，単位面積当たりの溶出量が小さくなる傾向を示す．TP 溶出量は，琵琶湖の南湖全体にて測定されている値よりも底泥からの溶出量は低く，改質土においても同様な結果を示している．

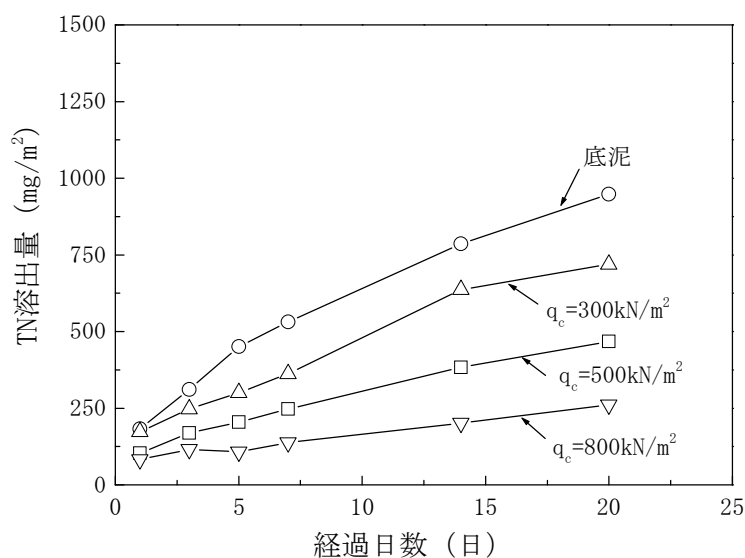


図 4.3.2-4 TN 溶出量

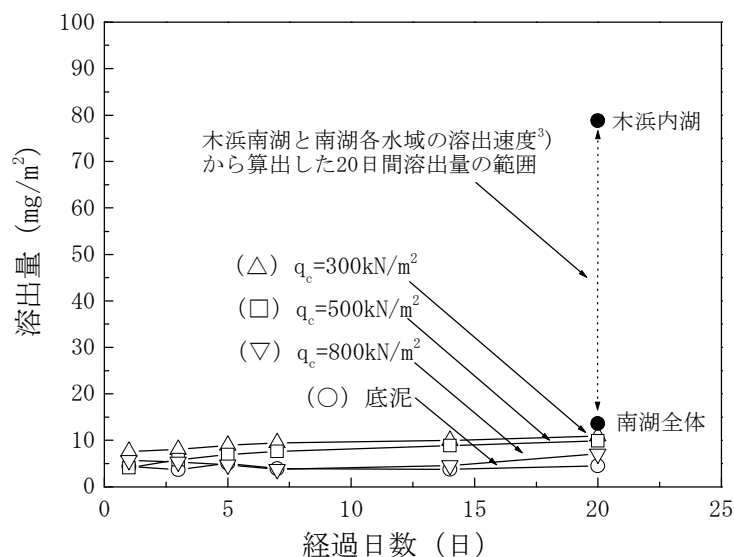


図 4.3.2-5 TP 溶出量

出典：「南湖環境の現況解析・評価報告書，平成4年3月滋賀県」より³⁾

(5) 栄養塩類の溶出速度

琵琶湖内湖の底泥，およびその改質土からの栄養塩の溶出速度の結果を，琵琶湖の南湖および，木浜内湖の溶出速度³⁾とともに図 4.3.2-6，図 4.3.2-7 に示す．底泥からの TN 溶出速度は，図 4.2.2-6 に示すように，南湖全体の測定値 $7.70 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ よりも大きい $33 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ である．これに対し，製品化した PS 灰を添加しながら，コーン指数 $q_c=300, 500, 800 \text{ kN/m}^2$ とした改質土の溶出速度は，一次的な減少傾向が見られた．TP 溶出速度は図 4.2.2-7 に示すように，底泥において $0.25 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ と琵琶湖の測定事例 $0.6 \sim 3.94 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ よりも小さく，改質土も同様に小さい溶出速度となっている．

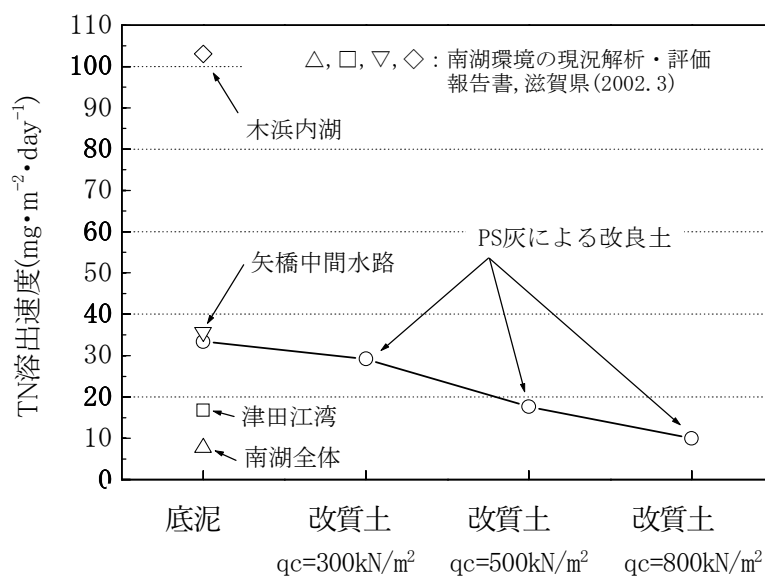


図 4.3.2-6 TN 溶出速度

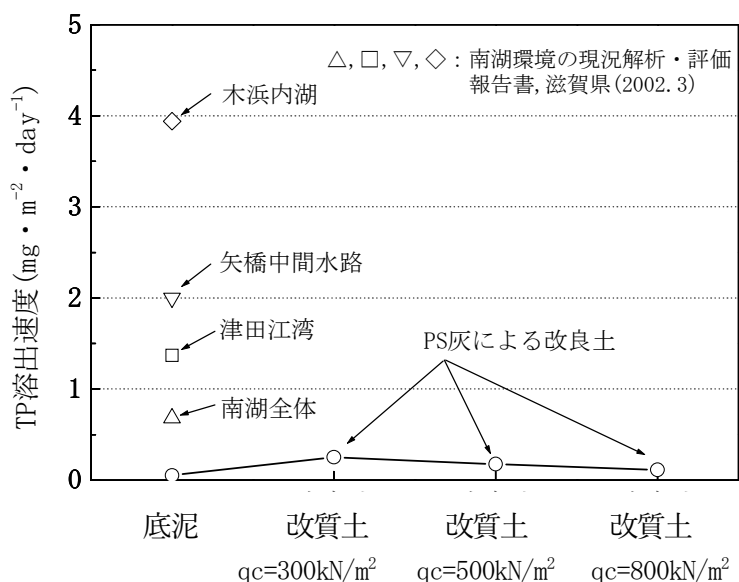


図 4.3.2-7 TP 溶出速度

出典：「南湖環境の現況解析・評価報告書，平成 4 年 3 月滋賀県」より³⁾

4.3.3 まとめ

栄養塩類の蓄積する湖沼等において水質浄化やアオコ等の発生による悪臭防止のために底泥を浚渫するが、その浚渫土は非常に高含水であり、栄養塩類も多く含んでいる。これを化学的な固化材により改質した場合は、湖岸もしくは周辺に有効利用するには、受け入れ先や利用用途が限定されてしまう。本研究では、PS 灰を製品化した改質材を用いて富栄養湖の浚渫土を改質し、TN、TP の溶出速度を低減できる結果を得た。また、琵琶湖内湖の TN の溶出速度が低減できる結果を得た。今後、湖沼や河川等の水域における底泥を湖岸の盛土へ有効利用するための知見として活用できるものとする。

4.4 消臭機能

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悪臭を放つことが知られている．こうした浚渫土に消臭効果のある PS 灰改良材を添加することで悪臭の発生を抑制する消臭対策工が考えられる．

浚渫泥土の悪臭に関する各種の調査方法について検討するとともに，浚渫泥土からの悪臭発生メカニズムについて整理した上で，消臭に関する最適配合条件を把握するための室内試験を実施し PS 灰改質材による漁港底泥改良土の臭気特性について考察を加えた．さらに現場試験として排水機場内の浚渫土改良工事中の臭気モニタリング検討結果も検討した．

4.4.1 浚渫泥土の悪臭と調査方法について

PS 灰には，従来の固化型改良材にない瞬時改質効果⁴⁾があり，PS 灰改質土の土構造物への活用を検討するため，PS 灰改質材による浚渫泥土の強度改善効果⁵⁾を確認した．PS 灰には，高吸水性機能以外に動植物に悪影響を及ぼさない環境付加機能⁶⁾があり，PS 灰の土木資材への活用⁷⁾も増え，環境改善活用^{8)~13)}が提案されるようになった．

河川や湖沼，あるいは漁港や排水機場に堆積する底泥は，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．こうした悪臭泥土に対して，生石灰，セメント系固化材といった既存の固化系改良材で改良すると pH の高アルカリ化によって高濃度のアンモニアが発生してしまう．臭気汚泥の土構造物への活用には，消臭対策が必要不可欠であり，本研究では，PS 灰改質材の臭気改善機能と現場での有効な活用方法を明らかにした．

4.4.2 試験方法

消臭効果を確認した今回の臭気機能確認試験¹⁴⁾では，人間の嗅覚を用いてにおいの程度を数値化する臭気指数規制方式の中の公定法「三点比較式臭袋法」¹⁵⁾，室内試験方法による「テドラーバックー検知管法による臭気試験」¹⁶⁾，施工時の「臭気モニタリング方法」の3種類とした．各試験法は，新たな方法ではないが臭気対策に有用な特殊な試験方法も含まれるため，概要を記載した

(1) 三点比較式臭袋法

原泥および改良土について，三点比較式臭袋法にて測定し，改良材添加によるにおい全般の消臭効果を確認した．三点比較式臭袋法では，臭気の強さを確認するため臭気指数（臭気濃度）を求める．ここで用いた「三点比較式臭袋法」は，人間の嗅覚を用いてにおいの程度を数値化する臭気指数規制方式の中の公定法である．バッグや真空瓶に採取したにおいのある空気は無臭の空気ですら順次希釈して，正常な嗅覚をもつ人間がにおいを感じなくなる希釈倍数を臭気濃度とする．

臭気濃度と臭気指数の関係は，以下の式で表される．

$$\text{【臭気指数】} = 10 \times \log (\text{【臭気濃度】}) \quad (1)$$

臭気指数とは，人間の嗅覚によってにおいの程度を数値化したものであり，人の感覚に合致し，未規制物質や複合臭の判定に対応している数値である．

・試験手順

三点比較式臭袋法は， 1・2・3の番号の付いた臭袋を一組としてパネルに配り，調製した（においのある試料を希釈した）臭袋を判定させる試験である．希釈操作は，基本的に約3倍系列の下降法にて行う．

① 土壌100 g を10Lポリエステル製バッグにとる．

（10cmφのシャーレに入れた時， 1.3m高さの臭気を想定）

② ①のバッグにフレックポンプなどで比較的臭気のない空気を入れる．

③ 30分ほど②のバッグを静置する．

④ バッグ内空気について，三点比較式臭袋法により臭気指数を求める．

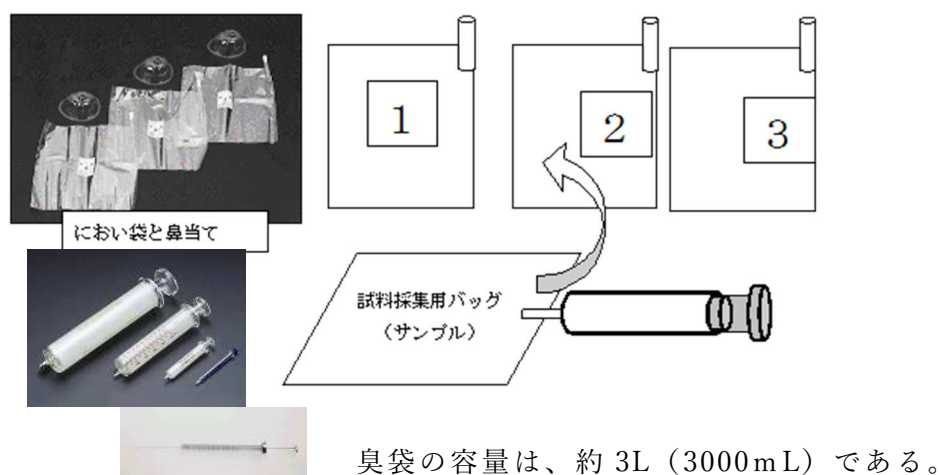


図 4.4.2-1 三点比較式臭袋法の試験手順

(2) テドラーバッグー検知管法による臭気試験

① テドラーバッグ（以下， バッグ）に汚泥を分取し，改良材を添加する．

※ 全ての試料において汚泥量を統一する．

② バッグを密封し，バッグ内を真空にした後，窒素ガスを500ml注入する．

※ 無臭空気として窒素ガスを採用．

③ バッグを手もみにより5分間攪拌し，15分間静置後，ガスを採取する．



写真 4.4.2-1 テドラーバッグ法（試料準備）

⇒検知管による分析（改良中の臭気濃度とする．）

- ④ バッグ内を真空にし， 窒素ガスを500ml注入．
- ⑤ バッグを振とう機により， 1時間攪拌し， 15分間静置後， ガスを採取する．
- ※ バッグを振とうする際， 形を保持するため， 定型容器に試料を入れて振とうする．

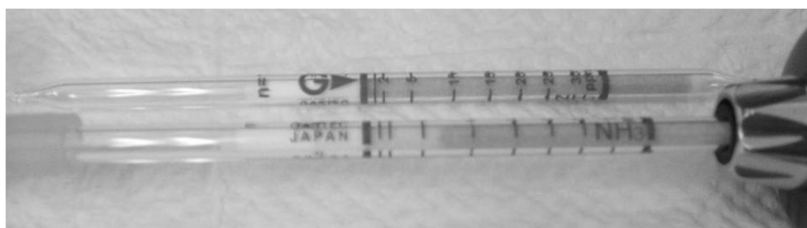


写真 4. 4. 2-2 検知管

⇒ 検知管による分析（改良直後の臭気濃度とする）

- ⑥ 臭気試験後に土のpHを測定する．
- ⑦ 数日間の養生後に④～⑤を実施し， 分析を行う．（養生後の臭気濃度とする）

(3) 施工時の臭気モニタリング方法

排水機場における底泥改質施工時の臭気測定は， 以下の 3 段階で臭気モニタリングを実施した．

- ① 改良前（容器に収集した浚渫土と泥排出口での測定）
- ② 改良中（攪拌混合中のヤード付近での測定）
- ③ 改良後（改良直後の改良土の表面付近）

用いたセンサーは， ハンディーにおいモニター（神栄テクノロジーOMX-SR）およびポータブルマルチガスモニタ（理研計器 GX-2003 TYPE C）の 2 機種である．



① 原泥ピットから採取後、容器に入れた時



② ピット直前排出口での泥土



③ 攪拌作業時時(マルチガスモニタ)



④ 攪拌作業時時(においガスモニタ)



⑤ 改良直後(マルチガスモニタ)



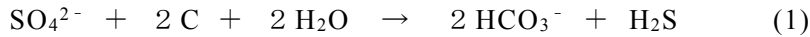
⑥ 改良直後(においガスモニタ)

写真 4.4.2-3 改質施工時の臭気測定状況

4.4.3 泥土における臭気メカニズム

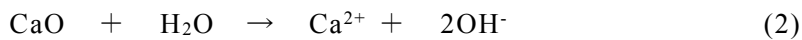
(1) 底質浚渫土からの発生臭気機構

硫酸イオン (SO_4^{2-}) 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 (H_2S)」が発生する。

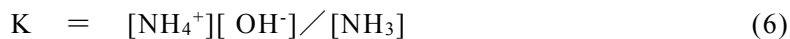
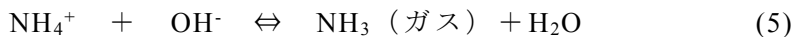


このため、湖沼や漁港の底質を浚渫した際、あるいはヘドロが干出した際に、硫化水素臭の発生が問題となる場合がある。

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。セメント系固化材添加によるアンモニアの発生機構について以下に示す。



セメント系改良土中にはセメントの水和反応式(2)～(4)に基づく高pHの水溶液が存在する。石灰系改良材添加による改良土の場合も上記(2)の反応式は同様であり、高pHの水溶液が存在する。この水溶液によって土中の含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水中で以下の平衡状態にある。



平衡定数 K は 25℃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³⁾。

(2) 硫化水素臭の発生抑制

硫化水素の抑制方法としては、鉄と反応させることにより、硫化鉄 (Fe_2S_3) として固定する方法が知られている⁵⁾。この他に酸素を供給する（好気条件にする）方法もあるが、浚渫泥土に適用する場合には薬剤を添加する方法が一般的である^{6)~9)}。薬剤添加による代表的な硫化水素発生抑制方法を表 4.4.3-1 に示す。参考までに、硫酸鉄と硫化水素との反応式を以下に示す。

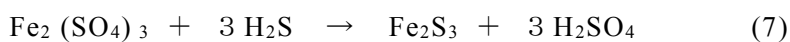


表 4.4.3-1 硫化水素抑制方法

名称	長所	短所
過酸化水素 (H_2O_2)	・速効性がある	・持続性が無い ・劇物のため取扱に注意が必要
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

硫酸鉄は硫化水素以外に、アンモニアを同時吸着する効果も優れており、し尿や下水処理・鶏糞乾燥時の脱臭、魚腸骨処理工場の脱臭等と悪臭公害防止に広く利用されている。

(3) アンモニア臭の発生抑制

浚渫泥土に対してセメント系改良土中にント（高炉B種）を添加した後にアミン化合物やアンモニウムイオンが発生することは、(1)に記載したとおりである。

アンモニア臭の対策として、これまでに提案されている方法を表 4.4.3-2 に示す。同表に示す方法の多くは室内実験での検討結果であり、実際の適応性や処理後のアンモニア濃度や pH の変化、抑制効果の持続性、固化後の強度の変化、底質処理への適用性など必ずしも十分な知見が得られていないのが現状である。

今後、「硫酸塩としての固定」や「ゼオライトや PS 灰改良材による吸着」は有効な対策手法になりうると考えられる^{10~11)} このため、実際の浚渫泥土を用いてこれらの適用性を検討することは有意義である。

表 4.4.3-2 アンモニア抑制方法

名称	概要	留意点
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 酸の取扱に注意が必要
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気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	

4.4.4 室内試験における臭気分析

(1) PS灰改質材と対象漁港底泥土の基本物性

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、3箇所の漁港から採取した底泥について、2種類のPS灰改質材による室内臭気試験を実施することで臭気抑制メカニズムの検討を行った。表4.4.4-1に2種類のPS灰改質材AとEの物理的特性、表4.4.4-2に各漁港で採取した底泥の物理的特性、図4.4.4-1に粒度分布を示す。3漁港底泥に対するPS灰改質時の配合量は、表4.4.4-3に示す瞬時改質条件で実施した第3種建設発生土の添加量¹⁷⁾を基本設定とした。

表 4.4.4-1 試験に用いた PS 灰改質材の物理特

材料の種類	PS灰改質材 A	PS 灰改質材 E
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.40	2.68~2.78
塑性限界 w_P (%)	NP	NP
塑性指数 I_P	NP	NP
最適含水比 w_{opt} (%)	82.1	78
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.746	0.77
最小密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	0.60~0.65	0.60~0.65
平均粒度 D_{50} (μ m)	280~425	100~275
細粒分含有率 F_C (%)	38.4	35 前後
pH	10.0 前後	9.9~12.4
吸水比 w_{ab} (%) 範囲	100~105	105~115
平均吸水比 w_{ab} (%)	102	110

表4.4.4-2 漁港底泥の物理特性

項目	単位	A 漁港底泥	B 漁港底泥	C 漁港底泥
土粒子の密度 ρ_s	g /cm ³	2.631	2.713	2.599
含水比 w	%	74.1	63.1	129.2
液性限界 w_L	%	69.7	—	76.3
塑性限界 w_P	%	37.6	—	36.9
塑性指数 I_P	—	32.1	NP	39.4
土の強熱減量	%	9.7	18.7	16.2
粒 度	礫分 G	%	1.1	0.0
	砂分 S	%	23.9	35.7
	シルト M	%	40.3	37.7
	粘土 C	%	29.0	37.7
均等係数 U_c	—	—	—	—
曲率係数 U'_c	—	—	—	—
平均粒径 (D_{50})	mm	0.029	0.147	0.061
単位体積重量 γ_t	kN/m ³	15.5	15.7	13.5
pH	—	8.8	8.2	8.6

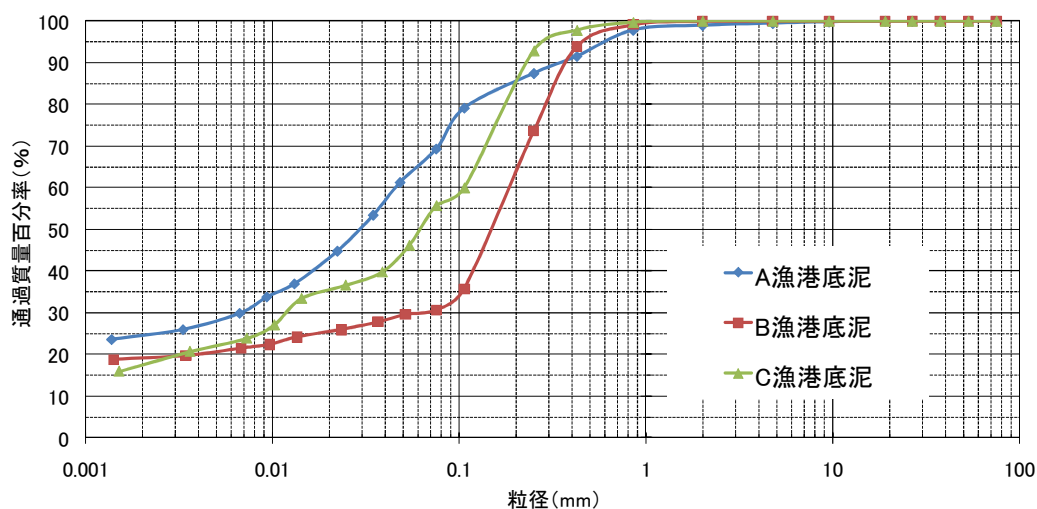


図 4.4.4-1 漁港底泥の粒度分布

表 4.4.4-3 PS 灰改質土の瞬時改質配合量（漁港底泥）

試料	PS灰改質材A添加量(kg/m ³) 瞬時改良		
	第4種建設発生土	第3種建設発生土	第2種建設発生土
	$q_c=200\text{k/m}^2$	$q_c=400\text{k/m}^2$	$q_c=800\text{k/m}^2$
A漁港底泥	297.4	315.7	347.9
B漁港底泥	171.6	212.3	248.7
C漁港底泥	364.4	400.3	438.7

(2) A漁港底泥での臭気試験結果

A漁港底泥とPS灰改質材による改質土について、三点比較式臭袋法にてPS灰改質材添加によるおいの消臭効果を表4.4.4-4に示した。改質材の添加量(300kg/m³)は、表4.4.4-3内の結果から近い数値を選定した。湖沼や漁港の底質を浚渫あるいは、ヘドロが干出した場合、硫化水素が発生するため、表4.4.4-4の結果に示すような下水臭が確認されている。これには、下記(2)の反応式に示される通り、硫酸イオン SO_4^{2-} 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 H_2S が発生するためである。

これまでは、こうした底質を改良する場合、セメント系や石灰系の固化型改良材を使用するのが一般的だったため、表4.4.4-5に他の改良材として高炉Bセメントおよび生石灰と比較検討した結果を示した。本結果からPS灰改質材、セメント、生石灰を添加するといずれのケースでもアンモニアは発生するが、その発生量は、PS灰改質材が最も小さく、消臭効果に優れていること、セメント等により固化処理した場合には、pHが上昇して硫化水素臭に代わってアンモニア臭が発生することが判明した。

表 4. 4. 4-4 三点比較式臭袋法による試験結果 (A 漁港底泥)

項目	A 漁港底泥	PS 灰改質材 A (300kg/m ³) 添加改質土
臭質	下水臭	際立ったにおいなし
臭気濃度	98	12
臭気指数	20	11

表 4. 4. 4-5 検知管によるアンモニア濃度測定の見込みケースと結果

試料名	改良(質)の種類	改良材 添加量 (kg/m ³)	測定項目	
			改良中	改良直後
			アンモニア (ppm)	アンモニア (ppm)
APSA-1	PS 灰改質材 A	300	22	40
ACM-1	高炉セメント	150	70	80
ALM-1	生石灰	150	100	100

(3) B 漁港底泥での臭気試験結果

B 漁港底泥に対しては、PS 灰改質材添加によるにおいの消臭効果をさらに詳細に確認した。原泥および 5 ケースの配合条件を変えた改質土について、改質後テドラーバッグで 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。結果は、表-6 に示す。PS 灰改質材の添加量 300kg/m³ は、強烈な腐敗臭濃度のため、若干多めに設定した。表 4. 4. 4-6 のとおり、極めて高濃度の腐敗臭を発生する原泥 B 漁港底泥に対しても PS 灰改質材を添加することにより、悪臭の発生が大幅に低減できることがわかる。また、PS 灰改質材に加え硫酸第一鉄を添加することにより臭気強度が一層低減できることが判明した。なお、ここでは、2 種類の PS 灰改良材 (PS 灰改良材 A 及び E) を用いて試験を実施したが、当該原泥については、PS 灰改良材 A の方が若干高い消臭効果を示した。本原泥で実施した一連のテドラーバック-検知管法による臭気試験で得られた pH と硫化水素およびアンモニアの濃度の関係を整理すると、図 4. 4. 4-2 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 (原灰) による改良ケースである。pH が 9.0~9.7 付近でアンモニアおよび硫化水素の発生濃度が最も低い最適消臭領域にあることが判明した。改質土の三点比較式臭袋分析結果とアンモニア検知管による濃度の測定の関係について整理すると図 4. 4. 4-3 が得られる。アンモニア濃度と三点におい袋で得られる臭気濃度 (臭気指数) には、高い相関性があり、改質直後はアンモニア濃度は、急増する傾向にあるが、4 日養生では、直線関係になる事が判明した。

表 4.4.4-6 三点比較式臭袋による分析結果

試料名 項目名	B 漁港底泥 (原泥)	BPSA1-2	BPSA2-1	BPSA2-2	BPSA2-3	BPSE2-3
PS 灰改質材の種類	—	PS 灰改質材 A	PS 灰改質材 A	PS 灰改質材 A	PS 灰改質材 A	PS 灰改質材 E
PS 灰改質材添加量(%)	—	300	300	300	300	300
硫酸第一鉄添加率 *1(%)	—	0	2	4	8	8
臭質	腐敗臭	アミン類臭	アミン類臭	アミン類臭	アミン類臭	アミン類臭
臭気濃度	55000	310	170	130	41	73
臭気指数	47	25	22	21	16	19

(* 1) 改質材添加量に対する添加率(質量比)

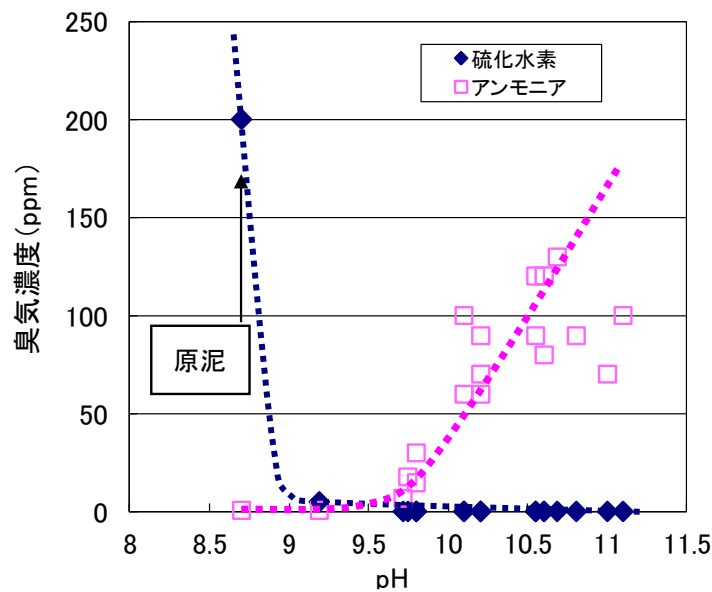


図 4.4.4-2 pH と臭気濃度との関係

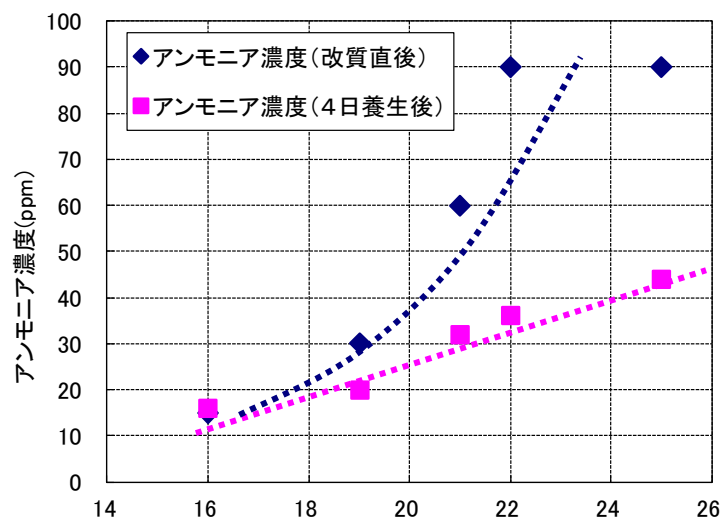


図 4.4.4-3 アンモニア濃度と臭気指数との関係

(4) C 漁港底泥での臭気試験結果

三点比較式臭袋法およびテドラーバックー検知管法によるC漁港底泥の臭気の測定を実施した。試験条件とその結果を表4.4.4-7に示す。原泥については、臭気指数「12」という結果となり強い悪臭が発生しないことが判明した。そこで今回の試験では、原泥に8.5%硝酸を添加して酸性側に振り酸性条件化で発生する硫化水素による臭気指数の判定を試みた。その結果、わずかに硝酸を添加しただけで硫化水素が大量に発生し、臭気指数が「49」という大きな値となった。

次に、改良土1と改良土2については、原泥にPS灰改良材を加えて改良し、日の養生を待って臭気試験を実施した。その結果、PS灰改良材を100kg/m³添加した場合の臭気指数は「12未満」となっているのに対して、同改良材を400kg/m³添加した場合の臭気指数は「19」となり、改良材の添加量が少ない改良土の方が消臭効果が高いという結果が得られた。すなわち、強度のことを無視すれば、100kg/m³以下の貧配合添加による改良土が最も消臭効果が高いことが判明した。しかしながら表4.4.4-3に示される力学的な配合試験の結果では、目標強度にするために必要となる改質材の添加量は400kg/m³となることから、強度と臭気の両者を満足する配合を再度検討した。

そこで改良土3では、PS灰改良材400kg/m³に対してさらに消臭効果の期待できるpH調整剤として硫酸第一鉄（1水和物）を選定¹⁸⁾し、それを改良材に対して4%添加した場合の臭気試験を実施して消臭効果を確認した。ただし、PS灰改良材を添加した場合のアンモニアの濃度は、1～数日経過した時点でピークに達する傾向が認められることが事前の検討で明らかとなったため、本ケースでは改質直後と養生3日後の2回臭気試験を実施した。その結果、三点比較式臭袋法による改良直後の臭気指数は「19」、3日養生後の臭気指数も「16」となった。またテドラーバックー検知管法によるアンモニア濃度の発生もPS灰改良材単独添加の場合に比べて抑制されることを確認した。

上記の結果を補足する目的で、原泥に各種の改良材を添加ケースについてテドラーバックー検知管法による臭気試験を追加実施した。その結果を以下に示す。

図4.4.4-4は、改良材としてPS灰改良材Aと消石灰を添加したケースのアンモニア濃度の測定結果を比較したものである。図中の試料名に記された数字は添加量（kg/m³）を示している。同図によれば、消石灰に比べてPS灰改良材による改良土の方がアンモニアの濃度の発生を小さく抑えることができることがわかる。また、アンモニアの発生は改良中よりも改良直後や1日養生後の方が大きくなる傾向がある。

図4.4.4-5ではアンモニア濃度と臭気指数には相関関係が認められる。このような傾向は、B漁港でのデータでも得られている（図4.4.4-3）。そこでC漁港の結果をB漁港で得られたデータ上にプロットすると、図4.4.4-5のようになる。同図のように、B漁港とC漁港でおおむね同様の結果となっていることがわかる。ただし、重油臭はアンモニア検知管には反応しないため、重油臭がある場合は別の測定法で確認する必要がある。C漁港底泥で実施した数々の試験（予備検討も含む）の結果について、pHとアンモニアおよび硫化水素濃度の関係をプロットすると図4.4.4-6のようになる。同図より臭気発生を抑える最適なpH範囲は、当該底泥では8.5～9.5にあること、泥の性状で若干の差はあるが、弱アルカリが最適領域と言えよう。

表 4.4.4-7 臭気試験の結果

項目 試料名	改質材 の種類	改良材 添加量 (kg/m ²)	添加剤 の種類	添加剤 添加率 (%)	テドラーバック 検知管法			三点比較式臭袋法			
					硫化水素 (ppm)	アンモニア (ppm)	pH	臭気 濃度	臭気 指数	臭質	判定
C 漁港底泥 (原泥)	—	0	—	—	< 0.2	< 1	8.7	17	12	アミン臭	◎
原泥(pH 調整土)	—	0	硝酸	5	116	< 1	8.1 ^(*1)	73000	49	硫化水素臭	×
改質土 1	PS 灰 改質材 A	100	—	—	< 0.2	5	9.5	< 15	< 12	アミン臭	◎
改質土 2		400	—	—	< 0.2	34	10.6	73	19	アミン臭	△
改質土 3 (改質直後)		400	硫酸 第一鉄	4	< 0.2	2	10.1 ^(*2)	73	19	重油臭	△
改質土 3 (養生 3 日後)					< 0.2	21		41	16	アミン臭	○

(*1) 均一に混合した後の pH(参考値)

(*2) 改質直後の試料の値

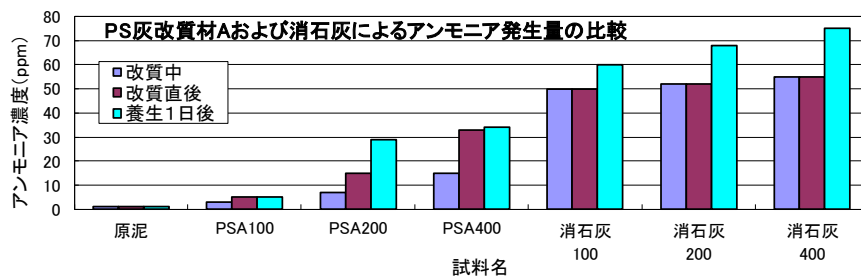


図 4.4.4-4 改良材の違いによるアンモニア濃度の発生

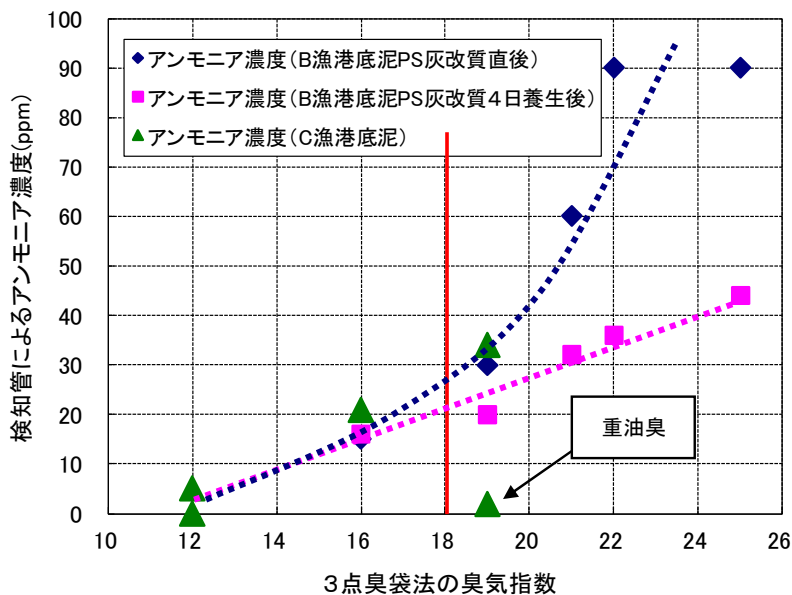


図 4.4.4-5 アンモニア濃度と臭気指数の関係

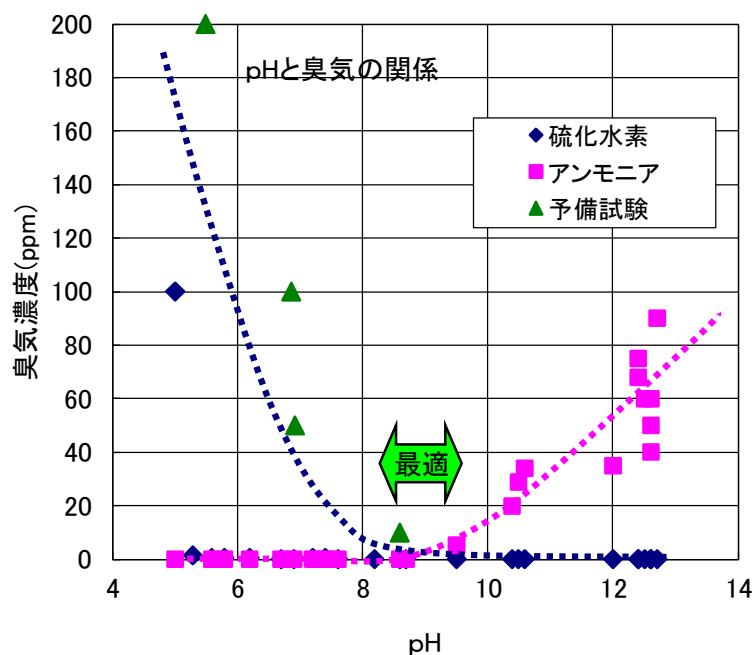


図 4.4.4-6 pH と硫化水素，アンモニア濃度の関係

4.4.5 現場試験結果における消臭効果確認

(1) 対象排水機場底泥土の基本物性

住宅地内排水機場に堆積した臭気の強い高含水底泥を PS 灰改質材で改質し，排水機場わきの河川の高潮対策として築堤工を行うものであり，対象となる高含水底泥の粒度分布を図 4.4.4-7，基礎物性を表 4.4.4-8 に示した．高含水状態の泥土であるため，瞬時改質条件で活用する場合には，表 4.4.4-9 に示すとおり，540 kg/m³ の添加量が必要であり，臭気確認も 550 kg/m³ の添加改質条件で実施した．

(2) 現場試験結果

現場測定結果を表 4.4.4-10 に示す．悪臭は，硫化水素によるものであること，泥土を改質することで臭気は現地計測レベル（大気下の測定方法）では，感知されないレベルまで抑制されることがわかった．現場での観測では，PS 灰改質材の高い消臭効果が確認された．本裏付けを取るため，各種の悪臭泥土による室内臭気試験を行った．

(3) 改質土から発生する臭気(一般改良材との比較)

現場から採取した浚渫泥土を密封状態でラボに持ち帰り，生石灰，セメントおよび PS 灰改質材添加による各改良土のアンモニア濃度を検知管で測定した．その結果を表 4.4.4-11 に示す．生石灰改良土，セメント改良土は少量でもアンモニア検知管により高い値が示されることが再確認された．PS 灰改質材は，550 kg/m³ という高添加量であるにも拘らず，他の 2 種の改良土に比べて測定可能な範囲での低い濃度値を示している．添加量の割に pH 値も中性域レベルで漁港底泥のように添加量の多さでアンモニア濃度が増加する傾向も認められない．

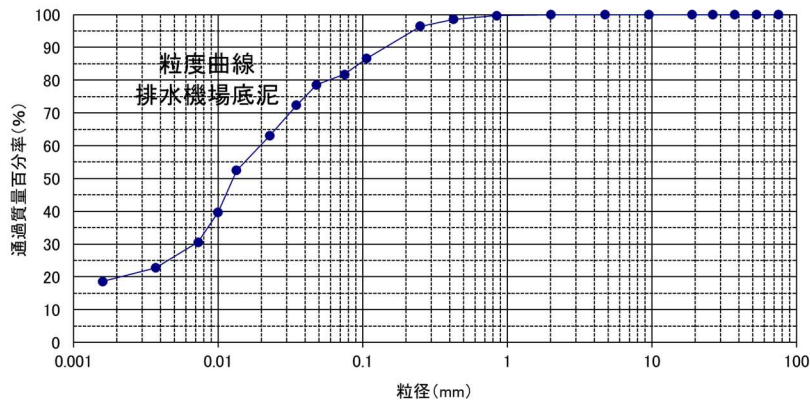


図 4.4.4-7 排水機場底泥の粒度分布

表 4.4.4-8 排水機場底泥の物理特性

項目	単位	排水機場底泥
土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.391
含水比 w	%	242.6
液性限界 WL	%	120.1
塑性限界 WP	%	41.8
塑性指数 IP	—	78.3
土の強熱減量	%	20.6
粒度	礫分 G	% 0.0
	砂分 S	% 18.2
	シルト M	% 56.3
	粘土 C	% 25.5
均等係数 U_c	—	—
曲率係数 U'_c	—	—
平均粒径 (D_{50})	mm	0.017
単位体積重量 γ_t	kN/m^3	1.197
pH	—	8.2

表 4.4.4-9 PS 灰改質土改質土の瞬時改質配合量 (排水機場底泥)

試料	PS 灰改質材 A 添加量 (kg/m^2) 瞬時改良		
	第 4 種建設発生土	第 3 種建設発生土	第 2 種建設発生土
	$q_c=200\text{k/m}^2$	$q_c=400\text{k/m}^2$	$q_c=800\text{k/m}^2$
排水機場底泥	506.8	540.0	566.8

表 4.4.4-10 改良土から発生する臭気の比較

計測条件・測定項目		改質前		改質前	改質後
対象土		浚渫原泥		改質土	
測定位置・条件		容器内	泥排出口	拌混合時の現場付近	改質直後の改質土付近
マルチカスモニタ	硫化水素 (ppm)	10 (*①)	100以上 (*②)	0 (*③)	0 (*⑤)
	臭モニタ	16 (*①)	200~600 (*②)	0 (*④)	0 (*⑥)

表 4.4.4-11 現地における臭気測定結果

試料名	改質材添加量 (kg/m^3)	改良時	
		検知管アンモニア濃度 (ppm)	pH
PS 灰改質材 A	550	12	8.6
高炉セメント	50	>60	11.0
生石灰	30	>60	11.7

4.4.6 まとめ

- ① 有機物の腐敗成分を多く含有する臭気底泥の硫化水素濃度とアンモニア濃度は、pH と強い相関性があり、PS 灰改質土では、弱アルカリが消臭抑制効果の最適領域である事が判明した。
- ② 一般的なセメント系、石灰系改良材では、改良時の高 pH の水溶液によって土中の含窒素化合物が加水分解され、アンモニアガスが大量に発生するので有機物の腐敗成分を多く含有する浚渫底泥の消臭改良には適当でないことがわかった。高アルカリにならない PS 灰改質材の臭気抑制効果は、非常に有効である。
- ③ PS 灰改質材の消臭のための最適弱アルカリ領域は、対象泥土の性状で若干異なる。高配合条件になると最適領域からアンモニア側にわずかに移行する場合と大量配合した場合でも pH がアルカリ側に移行しなければアンモニア臭は発生しない。改質時の消臭目的が必要な場合、改質施工時の最適領域の見極めが重要となる。
- ④ PS 灰改質材の施工目的には物理改質であるため高含水泥土を改質するような場合、大量添加が必要となる。室内試験の結果から硫酸第一鉄のような添加剤の追加が有効となった。
- ⑤ PS 灰改質による施工時の消臭工では、硫酸第一鉄の追添加以外に養生効果による添加量削減評価手法¹⁹⁾も有効であり、次章改質土の消臭活用実績例にて記述した。

4.5 その他の機能と今後の展開

PS 灰の環境浄化機能を確認するため、有害物質の吸着性能や湖沼水質悪化の要因となる栄養塩の溶出抑制効果ならびに悪臭に対する消臭効果を確認した。PS 灰の環境浄化機能としては、(1)有害物不溶化機能、(2)海面埋立て時等の懸濁防止、(3)改質土の野菜、稲活用、(4)油類処理対策、(5)津波堆積土砂の分別・処理等を検討している。

(1) 有害物不溶化機能

泥土改良材として使用している PS 灰改良材は、粒子内に存在する無数の微細孔によって高吸水機能を発揮する。こうした構造的特徴は、比表面積と細孔容積といった指標であらわされ、吸水性能のみならず、有害物等の吸着や溶出抑制効果も期待できる可能性がある。

図 4.5-1 に対策工法のイメージを示す。こうした地盤改良材が As といった汚染物の対策に利用できれば、従来の地盤改良以外への利用用途の拡大につながる。

こうした地盤改良材が汚染物の対策に利用できれば、従来の地盤改良以外への利用用途の拡大につながる。そこで、PS 灰を用いた汚染物の拡散防止方法および封じ込め方法を模索するため、汚染水の PS 灰等への吸着試験や汚染土壌への PS 灰等の添加による溶出抑制試験を実施し、PS 灰の有害物不溶化効果としての適用性を検討中である。

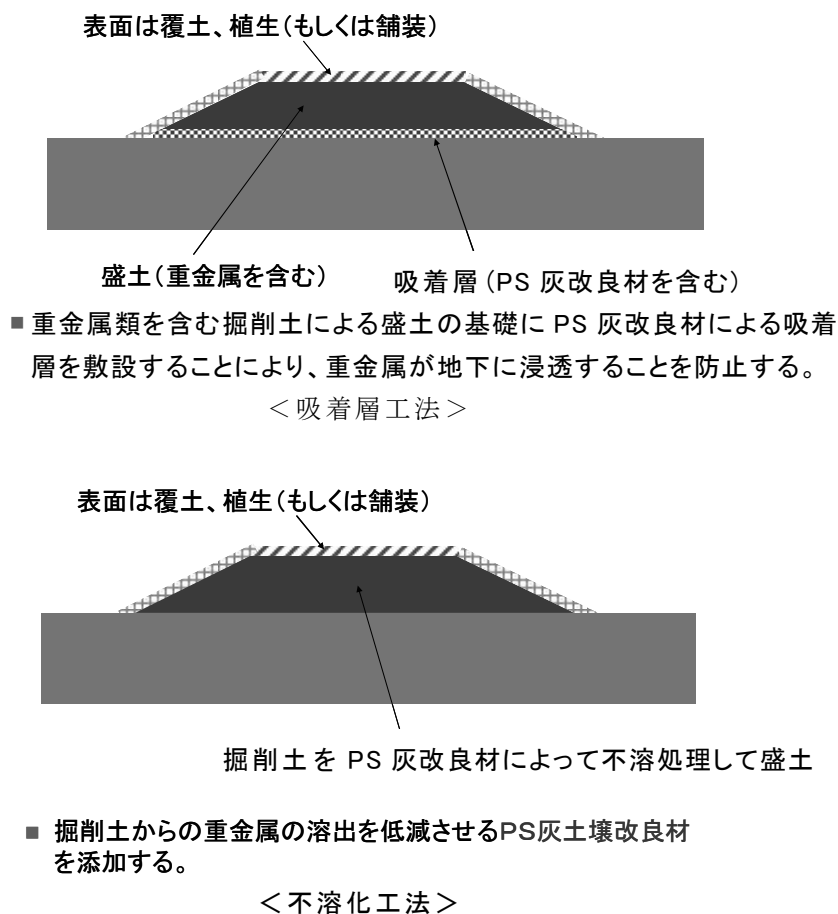


図 4.5-1 対策工法のイメージ

(2) 海面埋立て時等の懸濁防止

海洋埋立て投入については、現場で実施した状況写真 4.5-1 から心配されるように未改質では、かなりの濁りが生じ、時間経過しても濁りがおさまらないが、PS 灰改質土に関しては、分散することなく、形状を維持して懸濁防止していることがわかる(写真 4.5-2).



写真 4.5-1 現場泥投入状況

試料投入から 2 時間後までの状況

投入直後

2 時間後

未改良投入泥と改質泥 (100kg/m³)



未改良投入泥と改質泥 (100kg/m³)



写真 4.5-2 投入懸濁防止

(3) 改質土の野菜、稲活用

有明粘土地盤の樋門工事における PS 灰改質材の野菜適用性を検討した。

PS 灰改質材で改質した有明粘土の掘削排泥について畑作栽培を行ったところ、非常によい栽培状況であることを確認している（写真 4.5-3, 4.5-4）。改質土は、畑作が可能となるほど環境負荷が小さい。



写真 4.5-3 掘削排泥

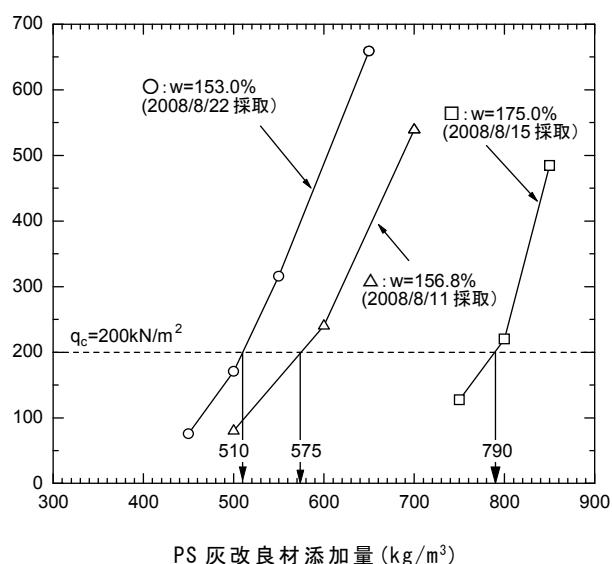


図 4.5-2 掘削排泥配合試験結果



写真 4.5-4 畑作基盤盛土



写真 4.5-5 栽培状況

稲についての浚渫泥土は、諏訪湖底泥であり、物性は表 4.5-1, 図 4.5-3 に示すとおりである。これに対して PS 灰改良材を配合 (380kg/m³ 程度) して改良し、水田耕土に用いた。造成から収穫までの状況を写真 4.5-6～写真 4.5-14 に示す。

表 4.5-1 浚渫土の性状

土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.489
含水比(%)	204.6
液性限界 $w_L(\%)$	181.0
塑性限界 $w_P(\%)$	84.7
塑性指数 I_P	96.3
pH	6.1

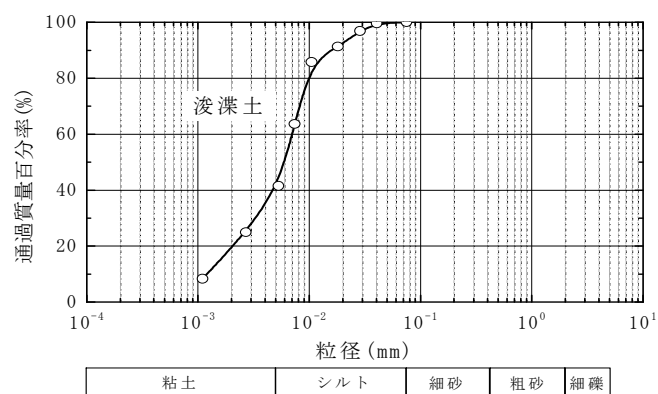


図 4.5-3 浚渫土の粒度分布



写真 4.5-6 水田造成 12 月



写真 4.5-7 水田造成 12 月



写真 4.5-8 田植え 5 月



写真 4.5-9 田植え 5 月



写真 4.5-10 収穫前 9月



写真 4.5-11 稲穂の状況 9月



写真 4.5-12 収穫 10月



写真 4.5-13 収穫した米 10月

・適用結果

PS 灰改良材で改良した土を水田耕土に活用した結果、稲は順調に成長し、無事収穫を迎えた。写真 4.5-11 に稲の状況を示している。写真右側が PS 灰改良土で栽培した稲で左側は、対照として通常の土で栽培している。PS 灰改良土で栽培した稲の方が大きく成長していることがわかる。

収穫した稲の分析した結果（Cd, Cu, Zn）が表 4.5-2 に示すとおりである。米自身の基準は、前述の通り環境基準に記載された Cd しかないため、Cu と Zn は、日本食品標準成分表に記載されている玄米の値と比較した。

- ① Cd の計量結果は、0.1mg/kg 未満で土壤環境基準の 1.0mg/kg 未満を満たす。
- ② Cu の計量結果は、1.0mg/kg 未満で日本食品標準成分¹¹⁾に記載されている玄米の 2.7mg/kg 以下となった。
- ③ Zn Cu の計量結果は、11mg/kg 未満で日本食品標準成分表に記載されている玄米の 18mg/kg 以下となった。

以上、PS 灰改良土は、稲の成長を阻害することなくむしろ成長を促進し、収穫した米の成分にも問題ないことが確認できた。



写真 4.5-14 水稻の比較

表 4.5-2 米の分析結果

計量の対象	単位	結果	計量の方法	環境基準	日本食品標準成分表値
カドミウム	mg/kg	0.1未満	平成3年環境庁告示第46号(昭和46年農林省令第47号別表第1)	1	—
銅	mg/kg	1未満	平成3年環境庁告示第46号(昭和46年農林省令第47号別表第1)に準拠	—	2.7
亜鉛	mg/kg	11	平成3年環境庁告示第46号(昭和46年農林省令第47号別表第1)に準拠	—	18

(4) 油類処理対策

吸着性能は、油類に対しても効果が高く、一般の油吸着材と比較検討した。

油類性能評価試験方法を下記に示すとおり、試験結果もPS灰の効果が一番すぐれている。

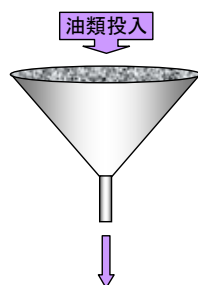
油類処理材の性能評価試験

試験項目

- 1 吸油率試験
- 2 吸油速度試験

吸油率試験について

$$\text{吸油率(\%)} = \frac{\text{処理材が吸収した油の体積}}{\text{絶乾状態の処理剤の体積}} \times 100$$



- 1) 処理材の重量を事前測定する(絶乾状態)
- 2) ロートにろ紙を設置し、対象油類を浸み込ませる
- 3) 事前重量測定した処理材をロートに入れる
- 4) 対象油類をゆっくり流し入れる
- 5) ロート下部から油が漏れ出すまで4)実施
- 6) 油を吸収した処理材体積を測定
- 7) 処理材が吸収した油の体積を計算する
- 8) 吸油率を算出する

吸油速度試験について

試験方法 直径20mmのガラス管に処理材を150mmの高さまで充填し、吸油する高さと時間を計測する
測定時間は、30秒・60秒・3分・5分・10分・20分とする

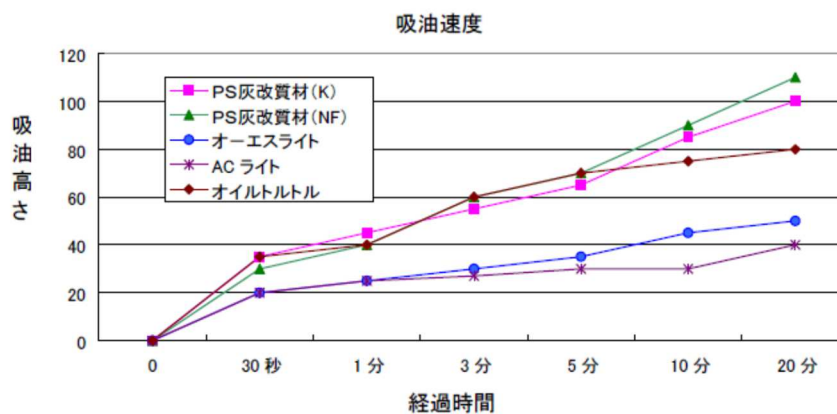
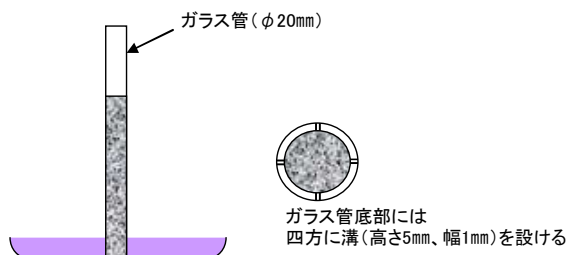


図 4.5-4 吸油速度試験

(5) 津波堆積土砂の分別・処理

東日本震災の際の津波堆積土砂の分別と処理を実施した。

粘土分も含有している粘着の高い堆積土砂が瞬時に分別処理可能となった。



写真 4.5-15 津波他愛席土砂の分別・処理

参考文献

- 1) 社団法人底質浄化協会:底質の調査・試験マニュアル
- 2) 西條, 三田:新編湖沼調査法, 講談社サイエンティフィック, p114
- 3) 南湖環境の現況解析評価報告書, 平成4年3月滋賀県
- 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) 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
- 6) Mochizuki, Y.: Study on subjects and applicability for mud improvement due to mixing with paper sludge ash, *The 6th Japan-Korea Geotechnical Workshop*, pp.105-108, 2016.
- 7) 日本製紙連合会:環境行動計画(廃棄物対策)フォローアップ調査結果, 2019.10.
- 8) 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, pp.947-952, 2017.
- 9) 加島史浩, 竹山佳奈, 浜谷信介, 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, NO2, pp.935-940, 2017.
- 10) 浜谷信介, 加島浩, 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, NO2, pp.953-958, 2017.
- 11) エンジニアリング振興協会: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, 2009-2010.
- 12) 望月美登志: PS (ペーパースラッジ) 灰を基材とした泥土改良材の開発, 第17回資源循環型ものづくりシンポジウム事例研究発表会, pp.207-214, 2012.12.
- 13) 望月美登志:低透水性浚渫泥土の活用を目指した PS 灰改良材による泥土改質について, 第60回地盤工学シンポジウム, pp. 69-72, 2016.
- 14) 環境省環境管理局大気生活環境室監修:嗅覚測定マニュアル 社団法人におい・かおり環境協会
- 15) 環境省:嗅覚測定法マニュアル, 三点比較式臭袋法について, pp.1-41, 2017.3
- 16) 環境省:悪臭物質簡易測定マニュアルに基づく簡易測定法の活用について, 環大特 58 号
- 17) 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
- 18) 丸太浩二, 東俊行:下水処理施設から発生する硫化水素の薬品(ポリ鉄)添加による抑制, 下水道協会誌, Vol.31, No.374, pp.98-106, 1994.
- 19) 望月美登志, 中野浩之: PS 灰の利活用の現状と課題, 基礎工, Vol.45, NO.9, pp.31-35, 2017.

5 章 PS 灰改質の施工性と施工実績

5.1 はじめに

第 1 章では、研究背景となる建設発生土と PS 灰の現状と課題についてまとめ、研究の基盤となる PS 灰を基材とした改良材の基本特性について整理した。

第 2 章では、PS 灰の吸水性能を簡便かつ客観的に評価できる吸水試験方法を考案し、そこから得られる吸水比 w_{ab} という性能指標を用いて、焼却炉の異なる各種 PS 灰の吸水性能の違いやばらつきを評価した。さらに PS 灰の吸水性能を考慮し、土のコンシステンシー概念と統一した配合設計手法を提案している。ここでは、建設発生土利用技術マニュアルに基づく品質管理のための配合設計基準となっている。

第 3 章では、PS 灰改質材で改質した各種対象土の力学特性の把握し、改質土の締固め特性と三軸圧縮試験による強度変形特性を調べた。前章では、吸水性能による改質効果の定式化を実施したが、PS 灰改質土を土構造物に活用するには、PS 灰による土の改善効果を合理的に活用した設計法を確立する必要がある。

第 4 章では、PS 灰改質材が有する有害物吸着性能や栄養塩溶出抑制機能、消臭機能といった環境浄化性能について検討した。

本章では、PS 灰改質材を実施工に用いる際の施工方法の確認と 2 章から 4 章までの成果から検討した設計・品質管理方法を用いて実務に適用した代表的事例をまとめている。

5.1.1 設計施工までの概要

PS 灰改質材を実用化する際の各章のフローを図 5.1.1-1 に記載した。本章の各事例においては、同フローにおける手法で進められている。

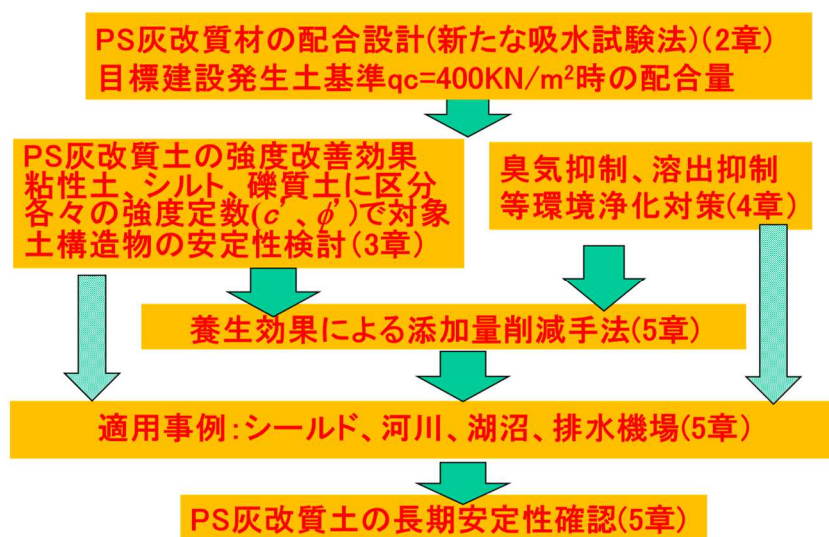


図 5.1.1-1 PS 材改質材の設計施工フロー

5.1.2 PS 灰改質材の吸水性メカニズム

本章では、養生効果における添加量削減手法が用いられている。瞬時吸水効果が特徴の PS 灰だが、試験施工等の結果から 4～7 日程度の気中養生期間にも養生効果が確認されている。養生期間に発揮される吸水性メカニズムを図 5.1.2-1 に示した。瞬時吸水以外、比表面積増加による気中乾燥と PS 灰に含まれる Ca 成分による若干の化学的反応によるものと考えられる。

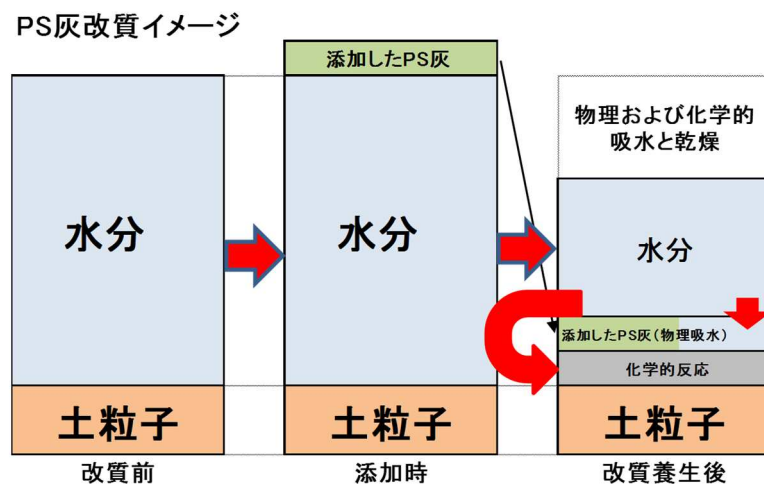


図 5.1.2-1 PS 材改質材の吸水メカニズム

5.2 PS 灰泥土改良材の施工性と試 1 験施工

5.2.1 施工性の検討

製紙業界においてその処分の問題が深刻化しつつある PS 灰を適切に処理することで従来のセメント系固化材料とは異なる新たな泥土改質材を開発した^{1)~4)}。本材料は、PS 灰の高吸水性に着目した物理的吸水原理の改良材であるため、改良時の養生期間が不要で化学的な問題もなく周辺環境にやさしいという特徴を有し、各章において泥土改質に活用できるようその機能を確認してきた。ここでは、PS 灰を用いた泥土改質材を現場工事で使用する場合の課題と試験施工について検討するものである。

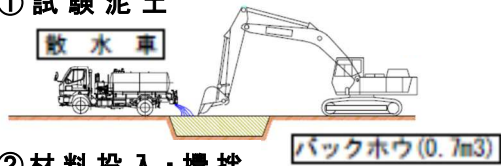
5.2.2 試験施工の実施

(1) 瞬時改質施工

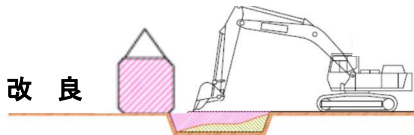
PS 灰を基材とした改良材による泥土改良の施工上の特徴としては、養生期間を必要としない迅速施工と改良ムラの少ない点があげられる。施工方法は、バックホウ攪拌と専用改良装置を用いる場合に大別されるが、施工規模の大きくない場合や都市部のシールド排泥改良以外、前者の方法を選択する 경우가圧倒的に多い。ここでは、バックホウ攪拌の施工性を確認するため実施した試験施工の結果について報告する。試験施工は、図 5.2-1 に示すとおりフィールドに 5×4×1 (m) のピットを掘削して実施している。試験試料は、粘性を有するローム質の材料 (表 5.2.2-1) を使用し、図 5.2-2 に示すように事前に室内配合試験を実施して作泥および配合条件 (目標含水比 50%, 目標配合 200kg/m³)

を決定した．施工性については，施工時間と転圧後のコーン試験，簡易 CBR 試験（12 か所）及び 10 t ダンプの走行試験で確認している．試験結果は，表 5.2.2-2，表 5.2.2-3 に示すとおりである．本試験では作泥含水比がやや高くなり，所定配合から追添加（50 kg/m³）したために施工時間が超過したが，所定配合であれば 20 分程度で 20m³ の攪拌混合ができる（0.7 m³ バックホウ）ことがわかる．試料にはローム分が含まれ粘りがあったが，コーン試験，簡易 CBR 試験結果から改良ムラは認められず，ダンプ走行可能な強度を十分確保し，目立った轍掘れも認められなかった．尚，専用改良装置（一軸式攪拌オーガー）についても現在施工性能の検討を行っているところである．

① 試験泥土



② 材料投入・攪拌



③ 整正・転圧



④ 車両走行による改良土の強度確認



図 5.2.2-1 試験施工の概要

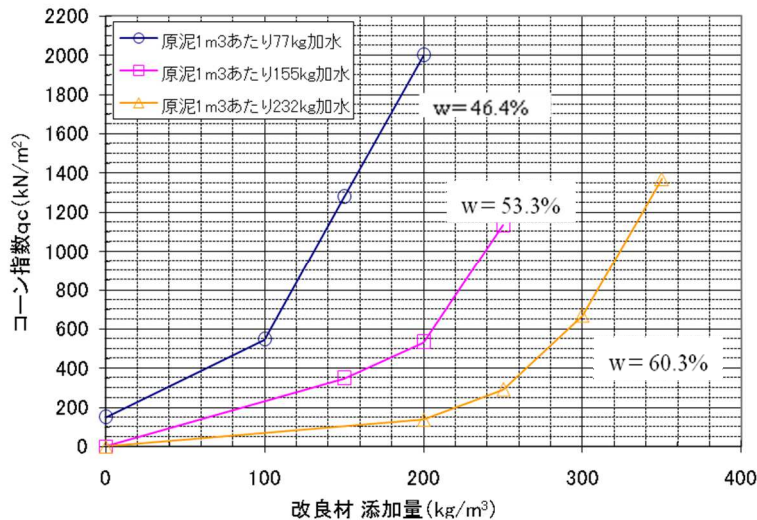


図 5.2.2-2 室内配合試験の結果

表 5.2.2-1 使用試料の基礎物性

試料の基礎物性	
項目	結果
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.705
含水比 w (%)	39.4
液性限界 W_L (%)	69.3
塑性限界 W_P (%)	37.3
塑性指数 I_P	32.0
土の単位体積重量 γ_t (tf/m ³)	1.546

表 5.2.2-2 試験施工結果
(施工時間)

項目	所要時間 (分)
材料投入 全5t(予定4t)	9.3 (7.8*)
攪拌調整	29 (13.5*)
敷き均し・転圧	8
合計時間	46.3 (29.3*)

※: (予定の4tの場合)

表 5.2.2-3 試験施工結果
(改良効果確認)

簡易CBR (%)	コーン指数 (KN/m ²)	走行試験 (10tDT)
6.0~8.0	1300~1500	良好

(* 強度は, 12 か所計測)

(2) 粉塵対策について

本改良においてバックホウ攪拌を採用する場合、大きな課題となるのが粉塵対策である。平均粒径が 0.425mm の標準タイプの改良材では深刻な問題にはなっていないが、細かい粒子分が卓越する PS 灰を用いる場合、粉塵対策が必要となる。そこで、細かい粒子分の多い材料について粉塵対策を施してその改善効果を確認した。まず、材料の有する粉塵特性については、図 5.2.2-3 に示すアクリルの密閉容器内において材料を自然落下で発塵させ、上部アクリル容器内の粉塵を集めて重量を計測することで粉塵濃度を算定している。粉塵対策としては製造プラント内で強制的に粉塵を吸引する方法を採用した。その結果、表 5.2.2-4 からわかるように粉塵は半分になることが確認された。さらにその材料を篩分けして試験に供したところ、0.25mm の篩いで大きな効果が得られることがわかった。粉塵対策の施工時の対応策としては、図 5.2.2-4 の防塵カバーを用いる写真 5.2.2-1 と写真 5.2.2-2 に示す自走式改質材による密閉型施工対策を実施している。

表 5.2.2-4 粉塵測定結果

	対処前	対処後	対処後 0.075mm残	対処後 0.106mm残	対処後 0.25mm残
D50 (mm)	0.095	0.147			
粉塵濃度 (mg/L)	61~68	31~35	21.2	24.1	3.6

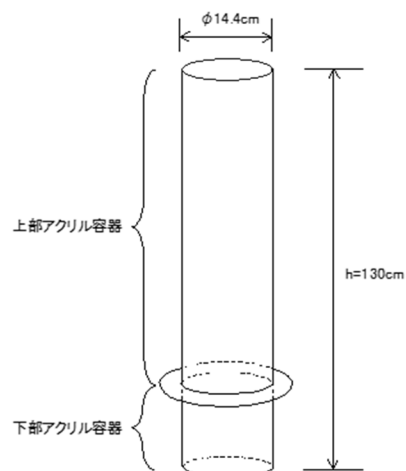
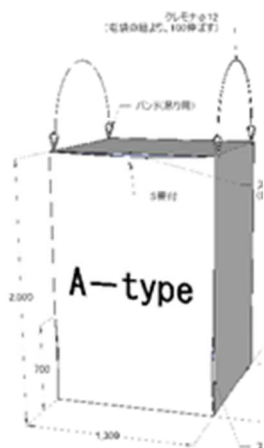
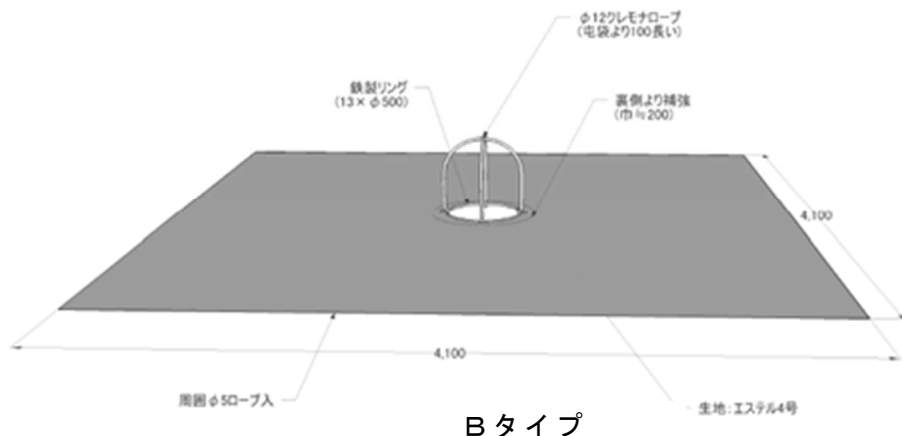


図 5.2.2-3 粉塵測定容器



A タイプ



B タイプ

図 5.2.2-4 防塵カバー



写真 5.2.2-1 防塵カバー使用状況
(Aタイプをバックホウ型で試したケース)



写真 5.2.2-2 自走式改質装置

(3) 道路試験施工

・締固め状況確認のための試験施工

高含水比の軟弱関東ロームを PS 灰改良材で改質して林道道路床材として活用するため、現地において試験施工を実施した。試験施工エリア区分を図 5.2.2-5、試験施工エリア毎の施工条件を表 5.2.2-5、測定項目と測定頻度を表 5.2.2-6、各使用重機の一覧を表 5.2.2-7 に、各エリアの試料物性を表 5.2.2-8 に示す。図 5.2.2-6 は、エリアの配合量を決めるための配合試験結果であり、表 5.2.2-9 に目標強度であるコーン指数 $q_c=1200\text{kN/m}^2$ となるための PS 灰改良材の必要添加量を示している。写真 5.2.2-3 は、試験施工状況を示す。

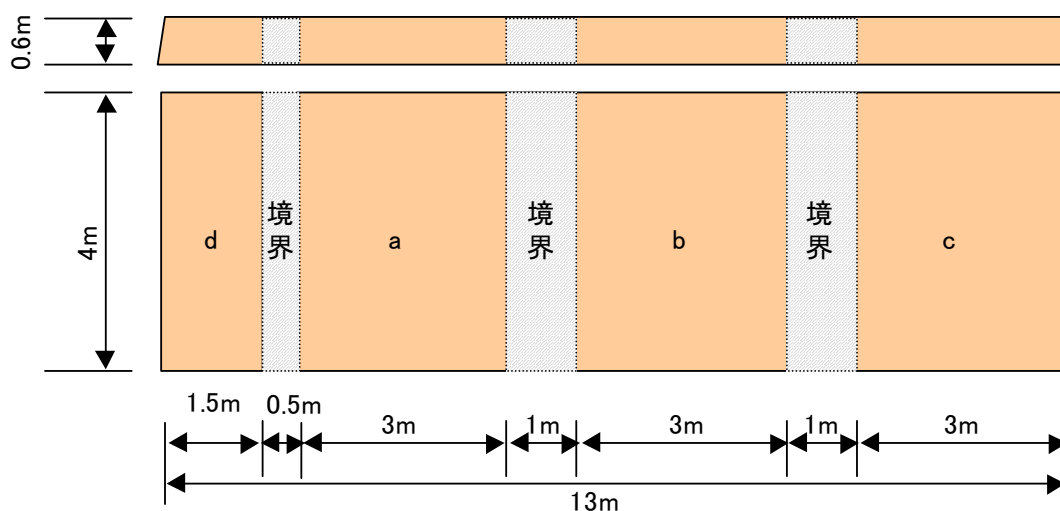


図 5.2.2-5 試験施工エリア区分

表 5.2.2-5 試験施工エリア毎の施工条件

	締固め機械	まき出し厚さ
a	バックホウ(バケット締固め)	30cm
b	バックホウ(バケット締固め)	60cm
c	ブルドーザ(3t)	60cm
d	ブルドーザ(3t)	60cm

表 5.2.2-7 使用重機一覧

使用重機	規格	備考
バックホウ	0.7m ³	掘削・改良混合・締固め
ブルドーザ	3t	転圧
ダンプトラック	10t	ブルーフローリング試験

表 5.2.2-8 各施工エリアの試料物性

項目	単位	aエリア	bエリア	cエリア	dエリア
土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.788	2.784	2.771	2.812
含水比 w_n	%	136.2	132.4	142.5	106.6
液性限界 W_L	%	161.0	158.8	177.0	124.4
塑性限界 W_P	%	82.4	78.0	93.4	68.3
塑性指数 I_P		78.6	80.8	83.6	56.1
土の強熱減量	%	16.3	15.2	16.2	13.4
粒度	礫分 G	18.5	23.5	7.7	11.6
	砂分 S	18.8	8.9	9.9	16.3
	シルト M	44.7	43.6	47.9	44.1
	粘土 C	18.0	24.0	34.5	28.0
均等係数 U_c		-	-	-	-
曲率係数 U'_c		-	-	-	-
平均粒径 (D_{50})	mm	0.0185	0.0215	0.0127	0.0179
土の単位体積重量 γ_t	tf/m^3	1.326	1.338	1.308	1.353

表 5.2.2-6 測定項目と測定頻度

試験項目	試験頻度	試験数	備考
コーン貫入試験	バックホウバケット⇒転圧回数1.2回目 ブルドーザ⇒転圧回数2,4,8,16回目	11点/区画	原位置強度試験
含水比	改良前の地山、転圧	3点/区画	
ダンプ走行	転圧終了後(目標強度確保後)	-	ブルーフローリング

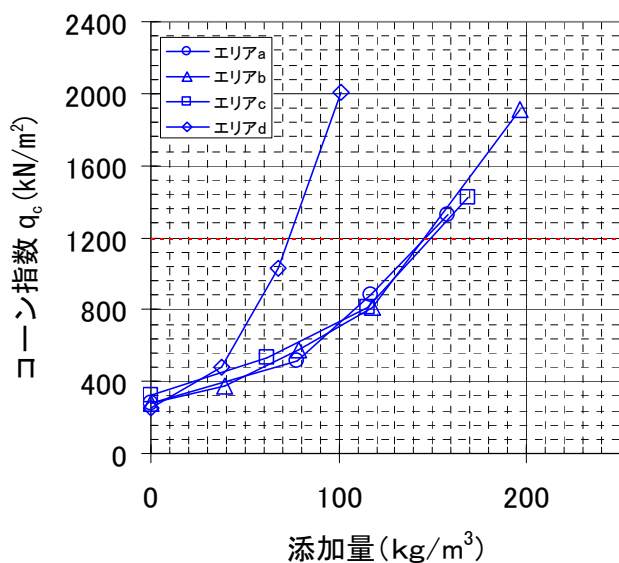


図 5.2.2-6 室内配合試験結果

表 5.2.2-9 使用目標強度の必要添加量

	PS灰改良材添加量(kg/m³)			
	aエリア	bエリア	cエリア	dエリア
目標強度 $q_c=1200\text{kN/m}^2$ に必要な添加量	147	146	150	74



写真 5.2.2-3 試験施工状況

今回実施した試験施工の結果をまとめると以下のとおりになる。

- ① バックホウのバケツを用いた締固めは効果的であり、締固め厚 30cm まき出しの場合では、1セットの締固めで、目標強度 $q_c=1200\text{kN/m}^2$ が得られる。
- ② バックホウバケツの締固めで締固め厚 60cm まき出しを一度に施工する場合、目標強度 $q_c=1200\text{kN/m}^2$ を得るのに 2セットの締固めが必要となる。
- ③ 3t ブルドーザーで目標強度 $q_c=1200\text{kN/m}^2$ を得るためにはかなりの転圧回数が必要となる（dエリアの結果では、16回の転圧が必要）（図 5.2.2-7 参照）。
- ④ 転圧締固めをするなら 3tブルドーザーより 0.7m^3 バックホウの方が効率がよい（図 5.2.2-7 参照）。
- ⑤ プルーフローリング試験の結果より、PS 灰改良材で改良した改良土は、ダンプトラックの走行が可能なトラフィカビリティを確保できることが確認できた。

⑥ 試験施工翌日の霜柱の状況確認から、PS 灰改良材を用いた改良土は、未改良の地盤に比べ霜柱ができにくく、表面の軟弱化も発生しにくくなる。

⑦ PS 灰改良材で改良した土は、目標強度 $q_c=1200\text{kN/m}^2$ を達成しても（目標以上の強度でも）再掘削が困難になるほどの過剰固化にはならないので後日の施工（管敷設等）を考えると都合がよい。

以上の結果から、施工機械、施工方法を適切に選定し管理しさえすれば現地で発生する軟弱ロームを PS 灰改良材で改良し林道路床材として活用する事は十分可能と判断され、実施工で使用した。

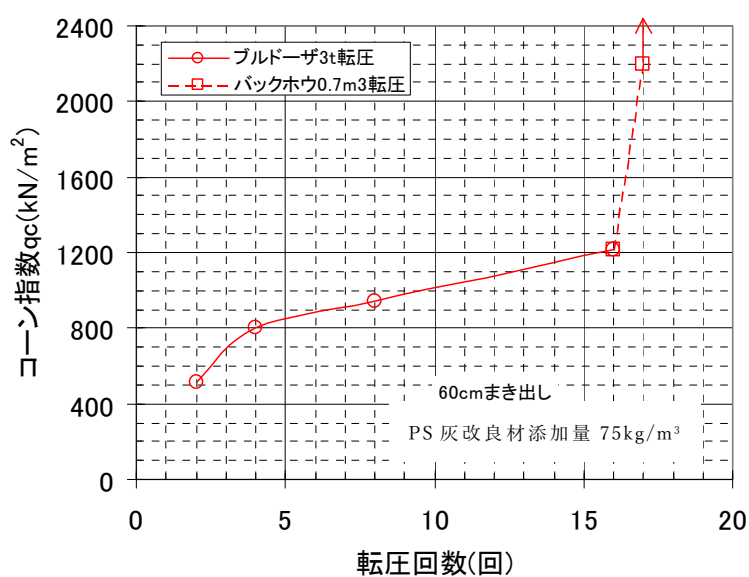


図 5.2.2-7 現地での転圧結果（d エリア）

(4) 高含水泥土の脱水と盛土試験施工⁵⁾

高含水な調整池の浚渫泥土改良に際し、排水性の優れたグラウンドにおいて施工することで泥土の含水比低下を促進させながら経済的な配合量での施工を可能とした。調整池の浚渫泥土は、PS 灰改良材で改良した後、道路の路体へ有効利用した。使用した調整池底泥の粒度分布、物理特性は、図 5.2.2-8 と表 5.2.2-10 に示すとおりである。底泥の含水比は、約 300% と高く、高塑性、高有機質な試料である。目標改良強度は、第 3 種発生土の $q_c=400\text{kN/m}^2$ ある。図 5.2.2-9 に示す締固めた土のコーン試験による配合結果より採取時の状況では、 700kg/m^3 近くの配合量が必要となるため、含水比を調整した場合の添加量についても検討を行い、含水比を 200% 程度まで減少することで配合量を 485kg/m^3 まで減らせることを確認した。調整池底泥の浚渫施工に際し、まず池の水を抜いた時点で含水比は 263.7%、さらに 12 日間放置することで 221.5% まで低下した。しかしながらこの含水比では依然として配合量が多いため、現場そばの排水性に優れるグラウンドへ浚渫泥土を運び、写真 5.2.2-4 に示すようにグラウンド上で余剰水の排水を促進させながら改良を実施した。現場コーン試験にて改良強度($q_c=400\text{kN/m}^2$)を管理しながら施工した結果、最終的に調整池の底泥の平均配合量は、 300kg/m^3 となった。

図 5.2.2-10 の必要配合量と含水比の関係をみると泥土自体については、含水比 135% 程度まで減少していると推定できる。グラウンド上で排水を促進させながら改良を行う方法は、PS 灰改良材が固化するものでないこと、pH 等に影響をおよぼさないものであることから可能となった。なお、本ケースと同様に配合量が多い(500kg/m^3 程度)浚渫後の泥土に対して、貧配合 (300kg/m^3) で改質してから 4 日ほど放置することで同様に所定強度が得られるという施工結果も得られた。施工期間中に養生時間が許容されるような高含水泥土の改質工事では、PS 灰添加量削減化対策として有効な養生期間の設定を設けるような施工方法も検討を進めている。

改質土は、仮置き場へ搬出して写真 5.2.2-5 図 5.2.2-11 示すような仮設盛土を構築した。施工は、ブルドーザーとバックホウのみで、高さ 3.5m、勾配は約 1:1 とし、構築後約 2 か月ほど放置して降雨時の影響を確認した。改質土の締固め試験結果を図 5.2.2-12 に示す。完成した盛土は、表 5.2.2-12 に示すとおり、90% 以上の締固め度(Dc)と $q_c=1500\text{kN/m}^2$ 以上のコーン指数が得られており、放置期間の降雨についても問題が生じることはなかった。2 か月間の調査確認後、盛土は解体され、PS 改質土は本設の盛土材として利用された。

表 5.2.2-10 調整池底泥の基礎物性

項目	単位	結果
土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.351
含水比 w	%	299.4
液性限界 w_L	%	166.8
塑性限界 w_P	%	71.0
塑性指数 I_P		95.8
土の強熱減量	%	21.4
粒度	礫分G	%
	砂分S	%
	シルトM	%
	粘土C	%
均等係数 U_c		—
曲率係数 U'_c		—
平均粒径 (D_{50})	mm	0.012
土の単位体積重量 γ_t	tf/m^3	1.162
pH		6.84

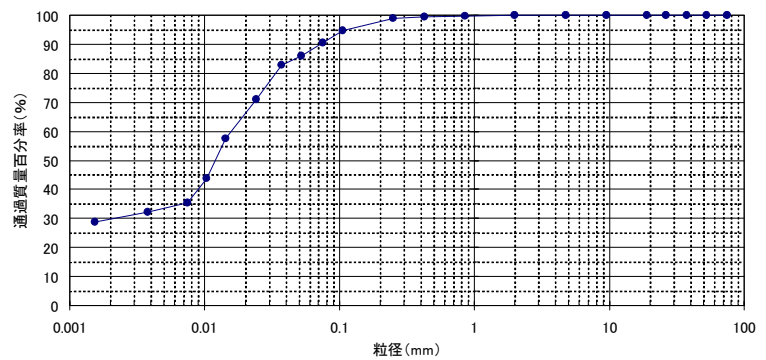


図 5.2.2-8 調整池底泥の粒度分布

表 5.2.2-11 PS 灰改良材の必要配合量

試料	PS灰改良材添加量(kg/m^3)		
	第4種建設発生土	第3種建設発生土	第2種建設発生土
	$q_c=200\text{kN/m}^2$	$q_c=400\text{kN/m}^2$	$q_c=800\text{kN/m}^2$
$w=299.4\%$ (採取時)	660.8	696.3	741.3
$w=253.7\%$	567.7	603.4	654.6
$w=194.7\%$	453.4	485.7	532.6

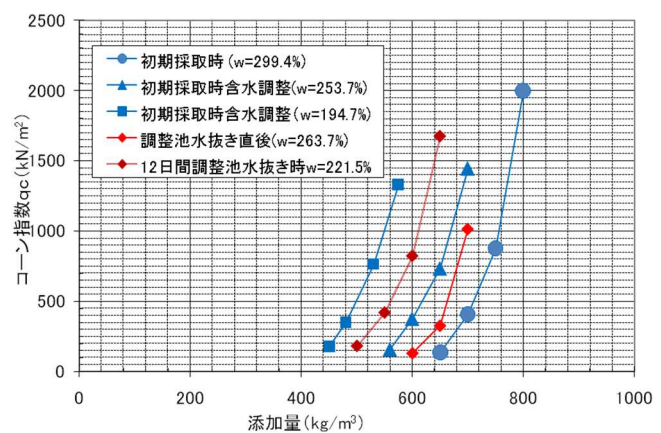


図 5.2.2-9 調整池底泥の配合試験



写真 5.2.2-4 グラウンドでの改良状況



写真 5.2.2-5 PS 灰改良材土の仮設盛土

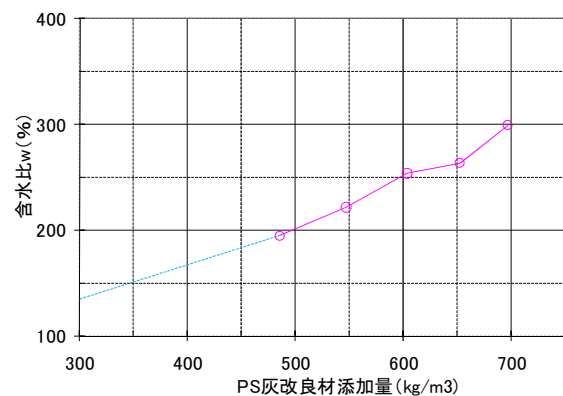


図 5.2.2-10 必要配合量と含水比の関係

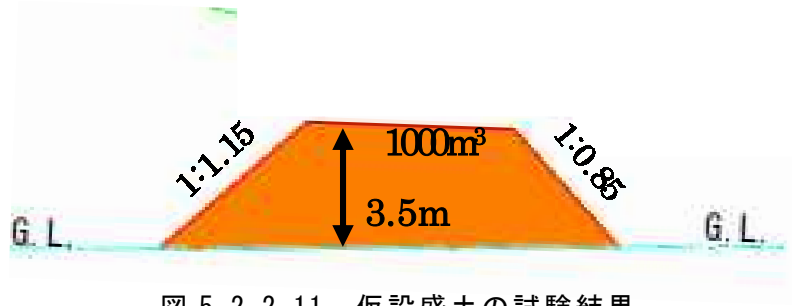


図 5.2.2-11 仮設盛土の試験結果

表 5.2.2-12 仮設盛土の締固め条件

達成締固め度 (密度比(%))	平均コーン指数 q_c (kN/m ²)
90	1500

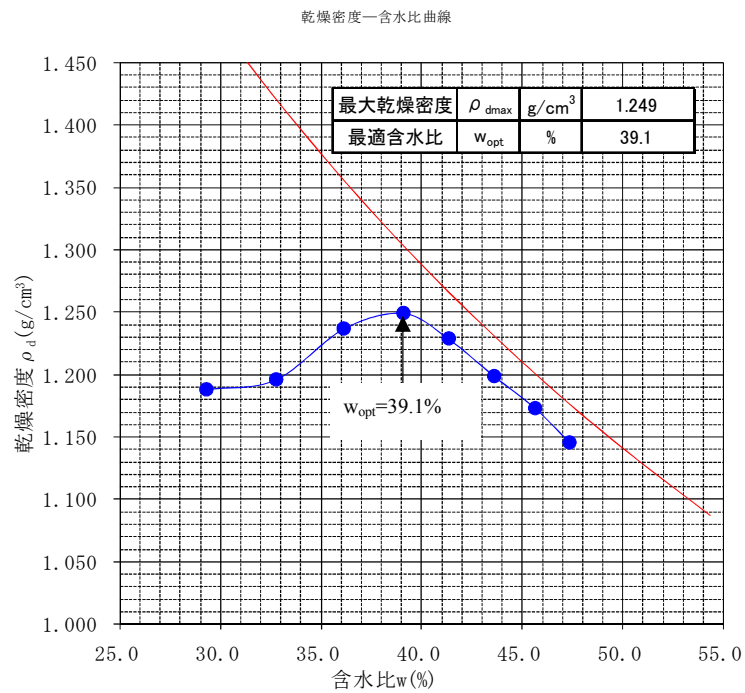


図 5.2.2-12 PS 灰改材で改良した土の締固め曲線

5.3 PS 灰泥土改質材の施工実績

5.3.1 東京メトロ 13 号線の大口径泥土圧シールド工事における大量排泥の処理

(1) 工事概要

本工事は、地下鉄 13 号線の新千駄ヶ谷駅(仮称)より明治通りを南下し千駄ヶ谷小学校交差点、神宮前一丁目交差を経て明治神宮駅前(仮称)に至る複線トンネル 912m を築造するものである。2 章確立した吸水設計手法から配合率を算定し、建設発生土利用技術マニュアルによる品質管理手法で改質土の品質監理を行った。

【シールド工事概要】：泥土圧シールド工法

シールド外径：φ9,980mm，延長：912m，

土質：礫・礫質土（Kag1），粘性土・シルト（Kac2）

【PS 灰改質工法による改良目的】：建設汚泥の発生抑制，狭所施工スペースでの大量の排泥処理と盛土への有効利用(基準第 3 種処理土)

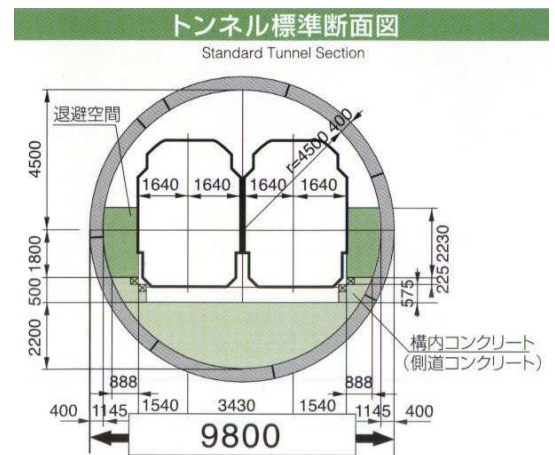


図 5.3.1-1 トンネル標準断面図

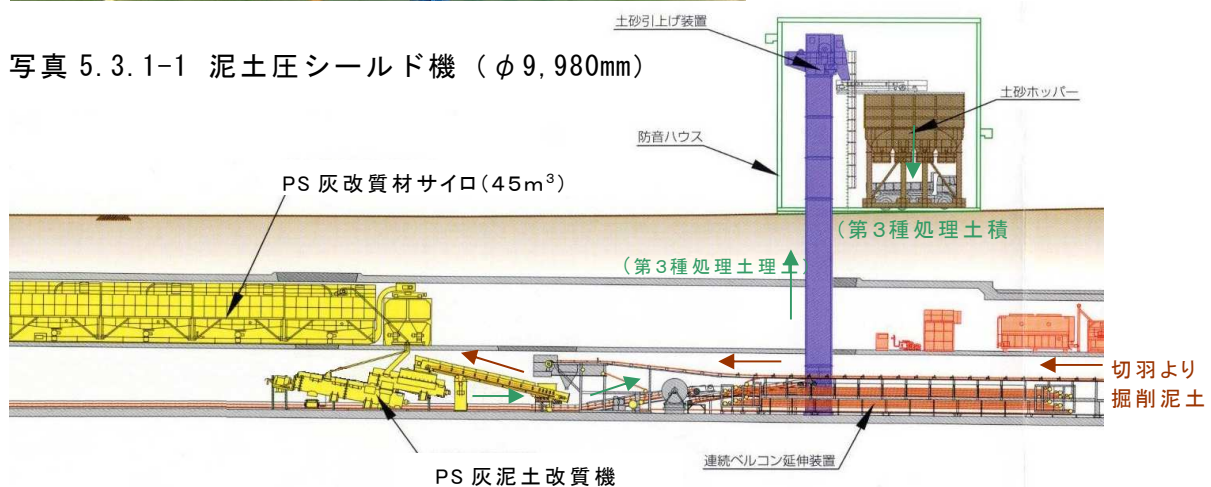


図 5.3.1-2 PS 灰改質材による排泥処理設備概要図

(2) 施工状況



① 地上の発進基地ヤード



② トンネル坑口と連続ベルコン



③ 連続ベルコンの掘削土



④ PS 灰改質材サイロ(45m³×4 基)



⑤ PS 灰改質材改質機



⑥ PS 灰改質材改質機(前方より)



⑦ 改良後の処理土状況(第3種処理土)



⑧ 普通ダンプトラックへ

写真 5.3.1-2 PS 灰改質材改良施工状況

5.3.2 荒川下流管内土壌改質工事（河川浚渫土改質土の築堤強度検討）

(1) 工事概要

本工事は、臨海浚渫工事により浚渫された土砂を土質改良し、盛土材として適用可能にするための工事である。

本工事では、「公共事業等における新技術活用システム(NETIS)の試行現場」として、適用実施している。

工事箇所を写真 5.3.2-1 に示す。

工事名称：荒川下流管内土壌改良工事

工事場所：東京都江戸川区松島二丁目地先

発注者：国土交通省 関東地方整備局 荒川下流河川事務所

主要数量：

浚渫土改良：PS 灰改質材活用工法 7,000m³

堤体盛土：900m³（モニタリング用）



写真 5.3.2-1 PS 灰改質材改良施工状況

(2) 工法のシステム

図 5.3.2-1 に PS 灰改質システムの流れ，図 5.3.2-2 に全体概略図，写真 5.3.2-2 にシステム全体写真を示す。改質は、粉塵対策および均一混合を兼ねて PS 灰改質材専用装置を使用している。

(3) 配合設計と品質管理

改質強度としては、第 2 種建設発生土($q_c=800\text{kN/m}^2$ 以上)を基準として表 5.3.2-1 に示す物性と吸水性より算定した瞬時の必要添加量が大きな数値だったため、図 5.3.2-3 に示すよう添加量削減化対策として養生期間 4 日を設定して 300kg/m^2 の添加量を定めた。

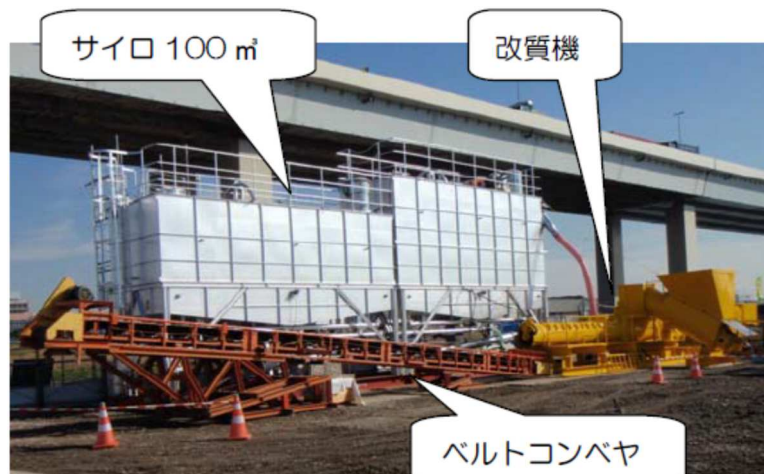


写真 5.3.2-2 システム全体写真

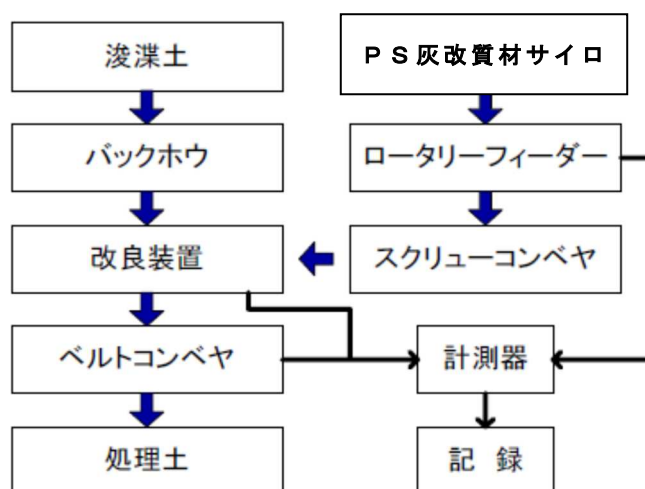


図 5.3.2-1 PS 灰改質材システム

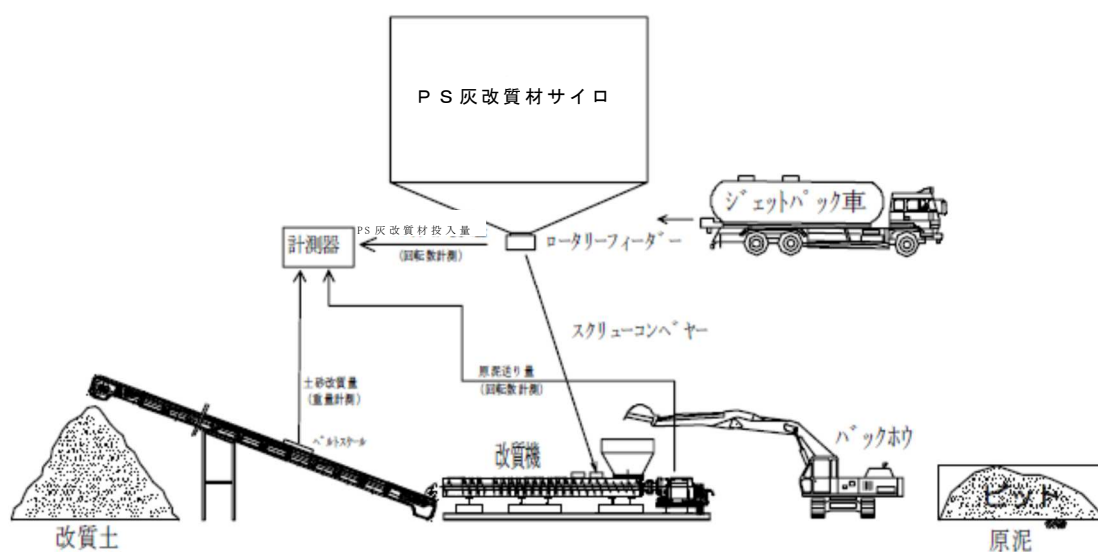


図 5.3.2-2 システム全体概略図

表 5.3.2-1 基礎物理特性

項目	単位	結果
土粒子の密度 ρ_s	g/cm^3	2.664
含水比 w	%	98.4
液性限界 w_L	%	68.1
塑性限界 w_P	%	31.9
塑性指数 I_P		36.2
土の強熱減量	%	7.9
粒度	礫分G	% 0.0
	砂分S	% 15.5
	シルトM	% 35.2
	粘土C	% 49.2
均等係数 U_c		—
曲率係数 U'_c		—
平均粒径 (D_{50})	mm	0.0053
土の単位体積重量 γ_t	tf/m^3	1.436
pH		7.78

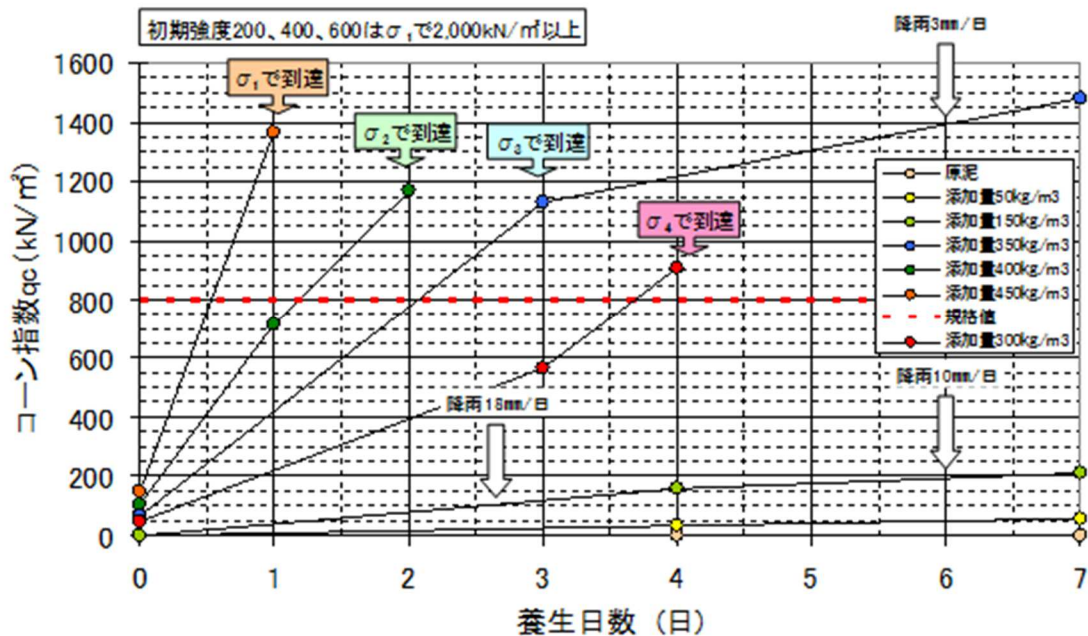


図 5.3.2-3 添加量削減のための養生日数確認試験

(4) 安定計算の確認

PS 灰改良材の改良効果を用いて図 5.3.2-4 に示すような河川堤防の築堤材に PS 灰改良土を用いる場合の安定計算（ビショップ法）を行った．表 5.3.2-2 に盛土材ならび各層の強度定数を示す．まず本条件における安定計算の結果としては，安全率 $F_s=1.6$ で常時の安定性が確保できることがわかった．次に図 5.3.2-5 に盛土材 T_s の c, ϕ を変化させた場合の安定計算結果を示す．さらに築堤材に PS 灰改良土を用いるため，PS 灰改良土における改良材の添加率 η と強度定数 c, ϕ の関係を図 5.3.2-6 で示すように定式化し，盛土の安定に必要な添加率 η について調べた結果が図 5.3.2-7 である．本結果により，盛土の安定性については， $\phi=0^\circ$ でも $c=18\text{kN/m}^2$ で $F_s=1.0$ が確保できるが， $c=0\text{kN/m}^2$ では $\phi=25^\circ$ 以上必要となる．経験的換算式 $qc \doteq 5qu=10cu$ 関係式を用いると c に関しては，第 4 種発生土（ $qc=200\text{kN/m}^2$ ）レベルで安定性が確保できるほど c の影響が大きいことがわかる．添加率 η は， $\phi=0^\circ$ で $\eta=0.5$ ， $\phi=20^\circ$ であれば η は 0.15 で $F_s=1.0$ が確保できる．

以上，盛土の安定性については，強度定数 c に改善効果を有する PS 灰改良材は有効であると判断できる．

表 5.3.2-2 計算条件

Soil layer	Depth (m)	γ_{total} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ (degree)	c_u (kN/m ²)
T_s	0.0 ~ 6.5	16.82	16.98	25	17.3
T_c	-1.0 ~ 0.0	—	14.90	0	7.7
Y_{us}	-8.0 ~ -1.0	—	18.50	31	0
Y_{lc-1}	-15.0 ~ -8.0	—	17.40	0	27.53
Y_{lc-2}	-20.0 ~ -15.0	—	16.70	0	43.65

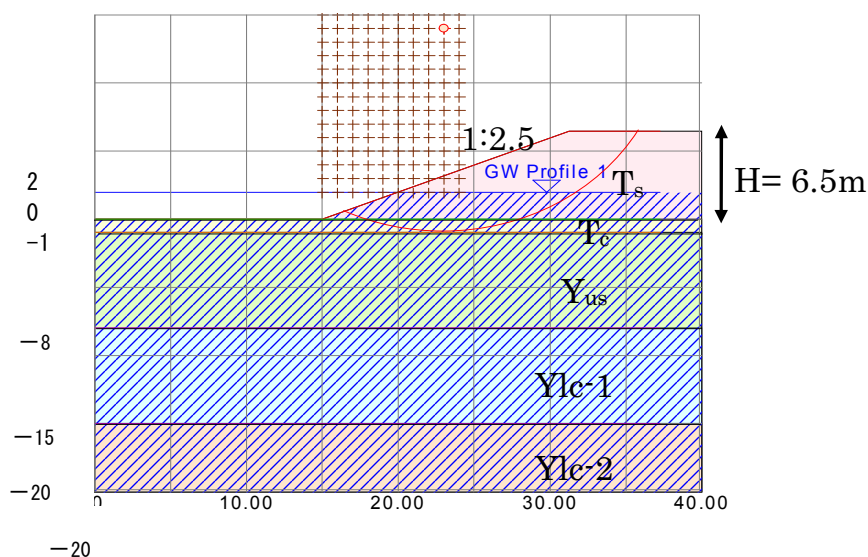


図 5.3.2-4 河川堤防の概要

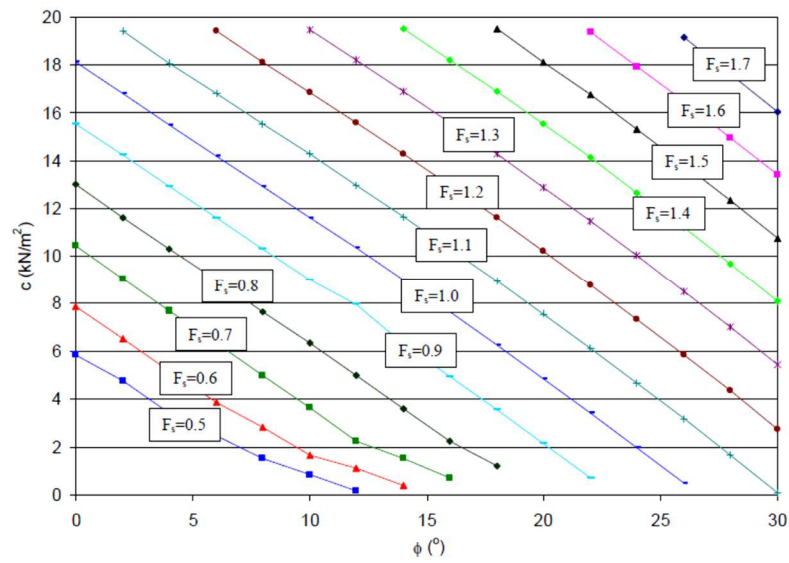


図 5.3.2-5 安定計算の結果

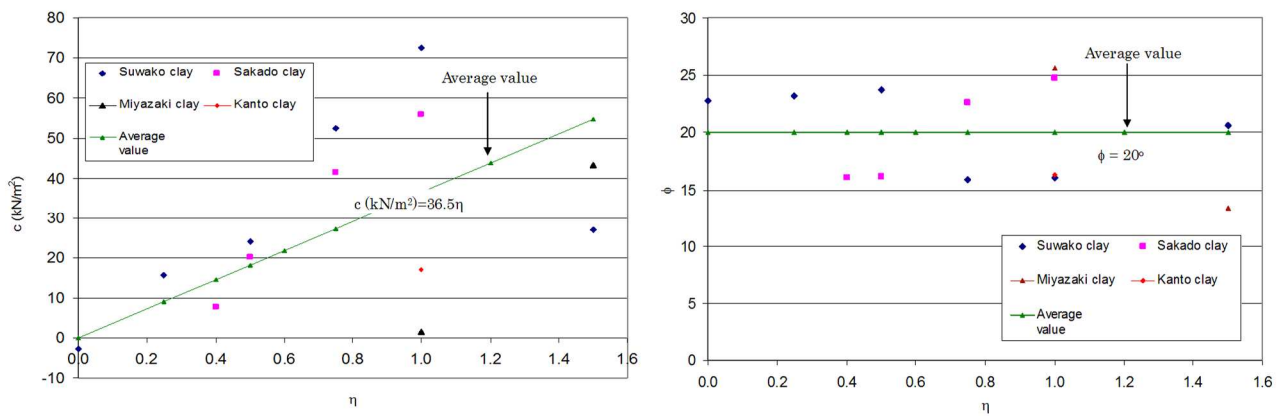


図 5.3.2-6 改質効果の定式化

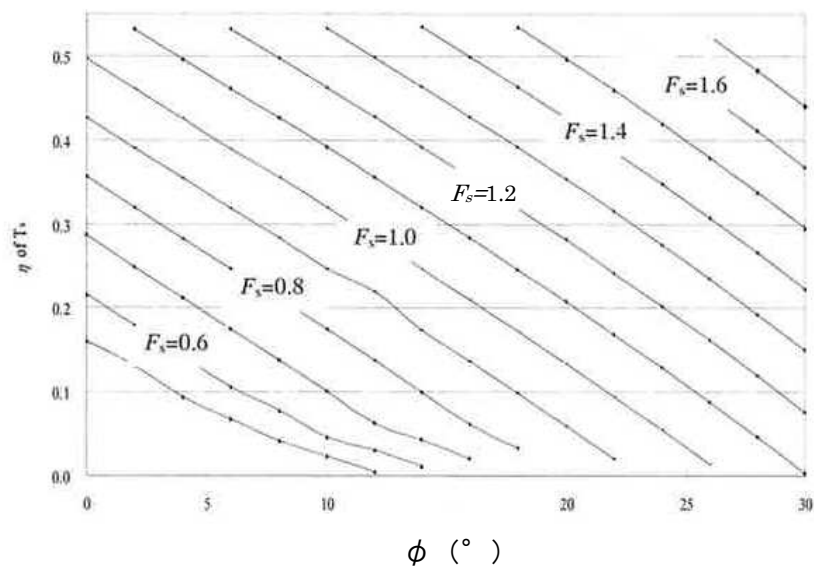


図 5.3.2-7 安定計算の結果

(5) 施工状況

	
<p>浚渫状況（原泥）</p>	<p>浚渫土（原泥）</p>
	
<p>浚渫土の受入れ（原泥）</p>	<p>材料サイロとジェットパック車</p>
	
<p>浚渫土の投入</p>	<p>浚渫土の投入</p>
	
<p>PS 灰改質材による混練処理</p>	<p>PS 灰改質材による混練処理</p>

写真 5.3.2-3 システム施工状況写真



写真 5.3.2-3 (2) システム施工状況写真

(6) 長期耐久性確認試験

盛土の長期安定性を確認するため、施工後1年半後の改良土モニタリング盛土の調査を実施した。写真5.3.2-4は半年後、写真5.3.2-5は1年半後の盛土である。ともに同じ季節である9月の写真であるが植物が増えていることがわかる。図5.3.2-8に示す箇所で現地コーンを実施した。またNO5地点では、盛土内部の状況も確認した。表5.3.2-3、表5.3.2-4の結果から改良盛土は、長期耐久性を有していることが確認された。



写真 5.3.2-4 モニタリング盛土（半年後）



写真 5.3.2-5 モニタリング盛土（1年半後）

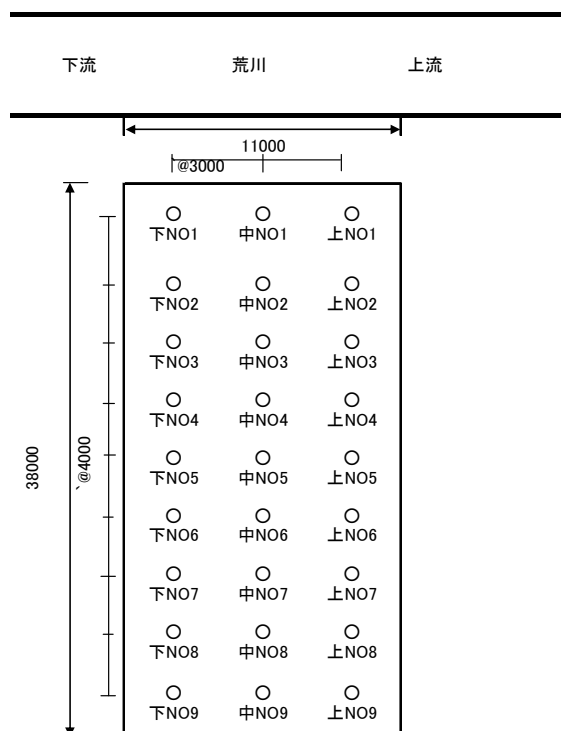


図 5.3.2-8 現地コーン試験実施場所



写真 5.3.2-6 現地コーン試験状況

表 5.3.2-3 現地コーン試験結果

番号	コーン指数(KN/m ²)		
	下流側	中	上流側
NO1	測定不能	測定不能	測定不能
NO2	測定不能	測定不能	測定不能
NO3	測定不能	測定不能	測定不能
NO4	測定不能	測定不能	1988
NO5	1668	測定不能	2321
NO6	測定不能	測定不能	測定不能
NO7	測定不能	1710	1765
NO8	測定不能	測定不能	測定不能
NO9	測定不能	測定不能	測定不能

5.3.3 諏訪湖の傾斜型周景護岸（渚湖岸）活用と追跡調査

(1) 工事概要

諏訪湖では、浄化事業の一環として底質の浚渫を行っているが、この浚渫土を PS 灰改質材で改質し、処理土が中性域であることから、諏訪湖の傾斜型周景護岸（渚湖岸）の盛土材として有効利用を図っている（写真 5.3.3-1）。本調査は、盛土施工後の調査を行い、PS 灰改質工法による「改良効果の継続性」を確認する目的で行ったものである。

(2) 事前試験結果

・配合試験

PS 灰改質材の配合量は、 $q_c=500\text{kN/m}^2$ を標強度として配合設計を行い、配合量を 350kg/m^3 とした。シールドの場合と同様、2 章の吸水設計を元に建設発生土利用技術マニュアルによる品質管理を実施した。

・室内カラム溶出試験

室内カラム溶出試験は、原泥、PS 灰改質材で改良した処理土および覆砂を行った場合の栄養塩類の溶出状況ならびに覆砂の効果を明らかにし、渚湖岸盛土への利用を図るための基礎試験として実施した。なお、試験方法は、(社)底質浄化協会「底質の調査・試験マニュアル改訂第三版（平成 15 年 3 月編）」第 3 章 4 節溶出試験および第 5 節覆砂試験に準拠した。栄養塩類の溶出が、PS 灰改質材による改質で抑制され、さらに覆砂をすることで抑制効果が高まることを確認した。（図 4.3.1-4～図 4.3.1-7 参照の事）

(3) 本施工の実施

PS 灰改質材は、吸水系の改良材であるため、渚湖岸盛土に使用するにあたり再泥化が懸念された。このため、既設護岸に近い約 3m 部分までの 1 次施工、最終計画形状までの 2 次により確認しながら施工を行った。第 1 次施工では、既設護岸から約 3m の位置に大型土のうで仕切を設け、片押し施工で湖水を排水しながら処理土を投入する方法で施工を行った。完了後、処理土の流出はなく、渚湖岸盛土に十分適用できることが確認できたので、既設護岸から約 12m の位置に捨石で仕切を設け、同様に間を処理土で排水しながら投入して造成する方法を採用した。（図 5.3.3-1）



写真 5.3.3-1 諏訪湖渚湖岸

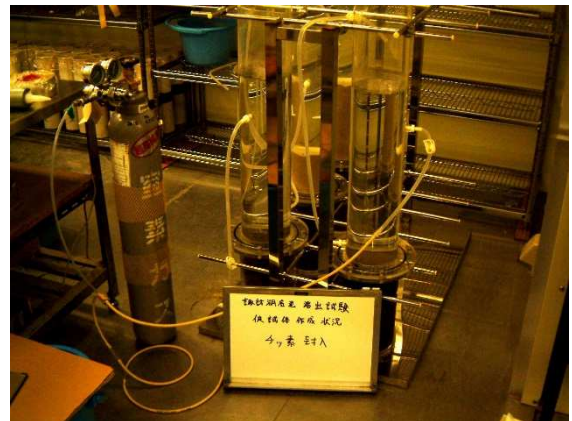


写真 5.3.3-2 溶出試験状況

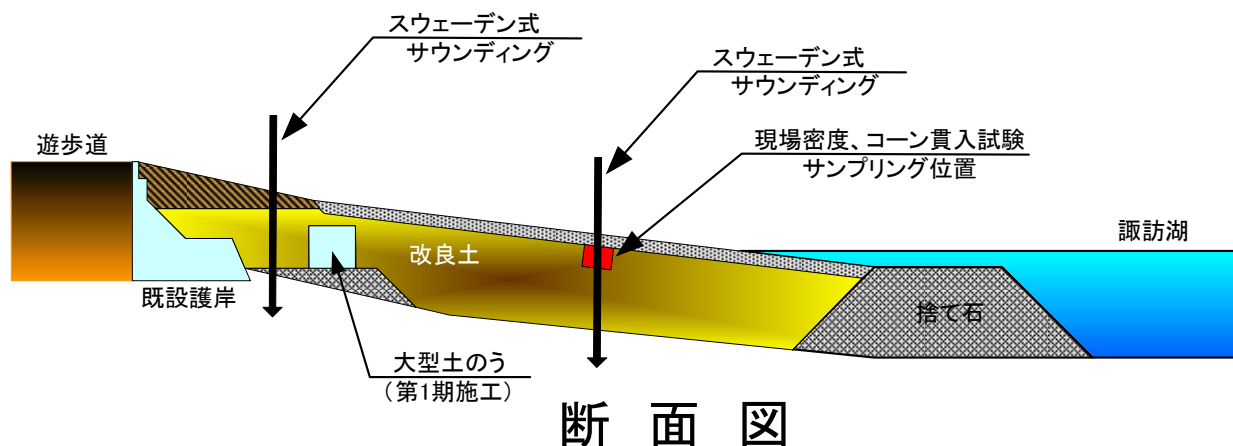


図 5.3.3-1 渚護岸盛土計画断面

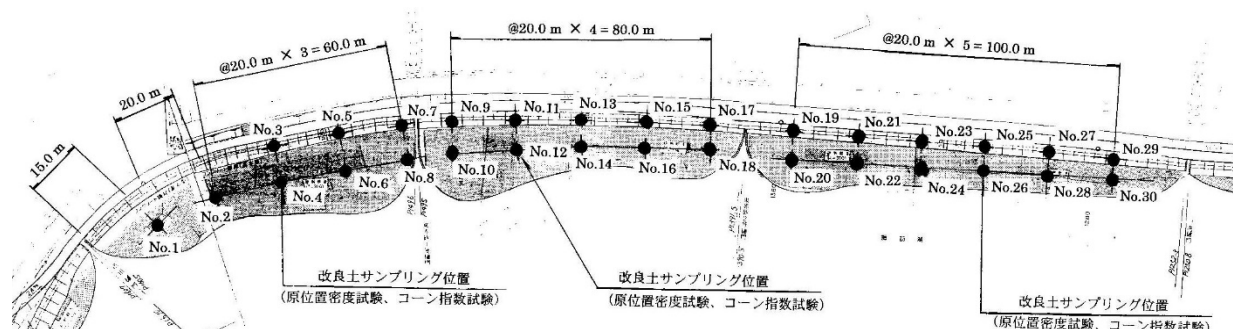


図 5.3.3-2 調査位置平面

表 5.3.3-1 コーン貫入試験結果

盛土の施工は、施工実施開始後、1年間の期間で行い、現地の追跡調査は、施工終了後1年後に行った。

調査では、第1次（斜面部）、2次（平坦部）施工位置をそれぞれを確認するため、約20m間隔、垂直方向10cm間隔で行った。

貫入試験は、コーン試験値に換算するためスウェーデン式コーン貫入試験器とコーンペネトロメータを併用し、処理土の層厚確認と垂直10cm間隔のコーン指数を確認した。

表 5.3.3-1 に各位置の平均換算値を示す。

いずれも所定の $q_c=500\text{kN/m}^2$ を確保しており、改良効果が継続しており盛土として安定していることがわかる。PS 灰改質材による浚渫土の処理土の有効利用方法として、水環境での盛土材にも適用できることが確認できた。

位 置			孔番号	換算qc kN/m ²	位 置			孔番号	換算qc kN/m ²
斜 面 部	西 の 島		No. 3	647	西 の 島		No. 1	1733	
			No. 5	589			No. 2	1465	
			No. 7	615			No. 4	1452	
	中 の 島		No. 9	740			No. 6	1235	
			No. 11	916			No. 8	809	
			No. 13	1073		中 の 島		No. 10	693
			No. 15	1085			No. 12	809	
			No. 17	833			No. 14	781	
	東 の 島		No. 19	566			No. 16	739	
			No. 21	979			No. 18	1026	
			No. 23	737	東 の 島		No. 20	615	
			No. 25	679			No. 22	582	
			No. 27	711			No. 24	649	
			No. 29	815			No. 26	635	
		—				No. 28	850		
	—			No. 30		766			
平 均 値								861	

5.3.4 消臭対策の施工実績

- ・住宅地エリアの排水機場汚泥臭気対策と改質土築堤構築防災対策活用

(1) 工事概要

工事は、H排水機場に堆積した底泥をPS灰改質材で改良し、排水機場わきの河川の高潮対策として築堤工を行うものである(図 5.3.4-1 平面図, 図 5.3.4-2 横断面図)。図 5.3.4-3 に示すようにユニフロートのシステムで浚渫し、送泥管によって河川敷内ピットまで搬送している。

築堤に際しての仕様は、下記のとおり。

①改良土量 1450m³

②改良強度；締固度 85%以上, $q_c=400 \text{ k N/m}^2$ 以上, 本件では, 消臭対策のため, 養生効果による添加量削減評価手法とする。

③環境配慮事項：水質に対して影響をあたえないこと, 改良後, 改良土は中性となること, 土壤環境基準に適合すること

上記仕様に加え, 排水機場泥土には, 硫化水素等の臭気の問題があったため, 消臭機能も有する PS 灰改質材が採用されることになった。

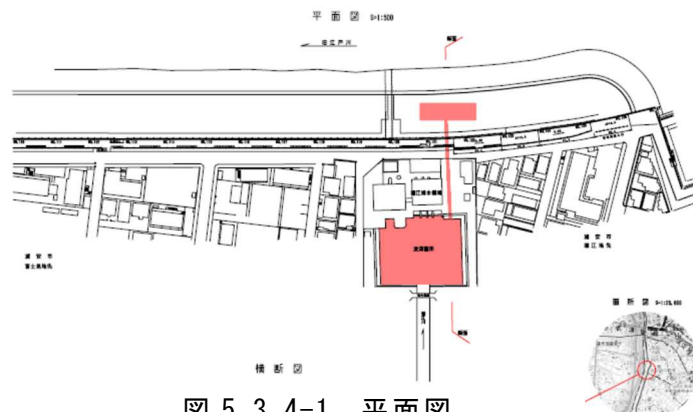


図 5.3.4-1 平面図

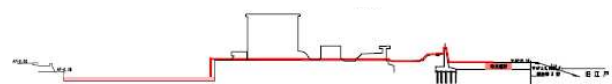


図 5.3.4-2 横断面図

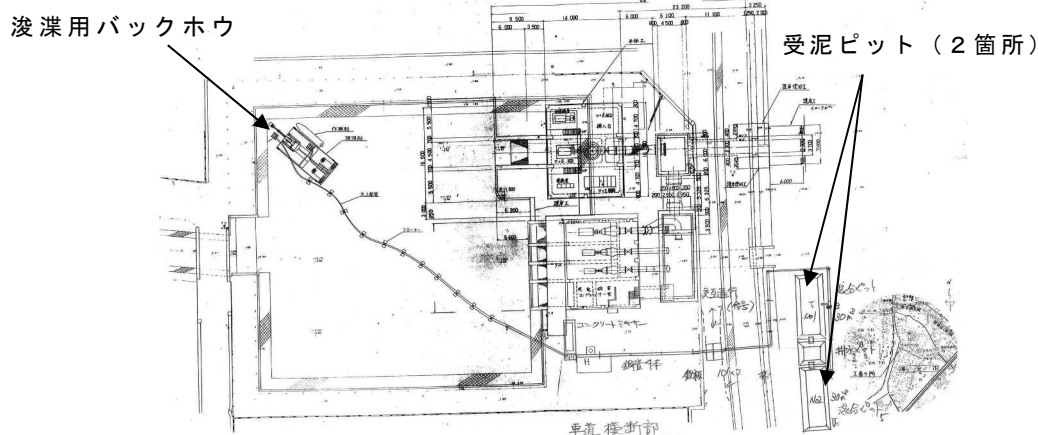


図 5.3.4-3 施工平面図

(2) 配合設計法

消臭に用いた漁港底泥や排水機場底泥は、高含水比でこれを瞬時改質して堤防や盛土に活用する場合、第3種建設発生土基準を満たすための必要配合量大きくなるため、臭気抑制の最適条件にうまく適合させることが重要なポイントになった。室内試験結果から硫酸第一鉄の活用も有効であることが判明したが、経済的課題も大きいこと、急激な酸化は、硫化水素側への移行にも注意しなければならないこと、養生期間を設けることでPS灰改質材の必要添加量が削減できること、アンモニア濃度の発生条件にも有効であることなどから施工許容範囲内の養生期間の設定も有効な対策方法と判断した。

そこで図5.3.4-4及び表5.3.4-1に示すとおり、1週間の養生効果を加味したPS灰改質材3～4割程度の添加量削減評価手法を臭気対策工事にも活用した(図5.3.4-5)。

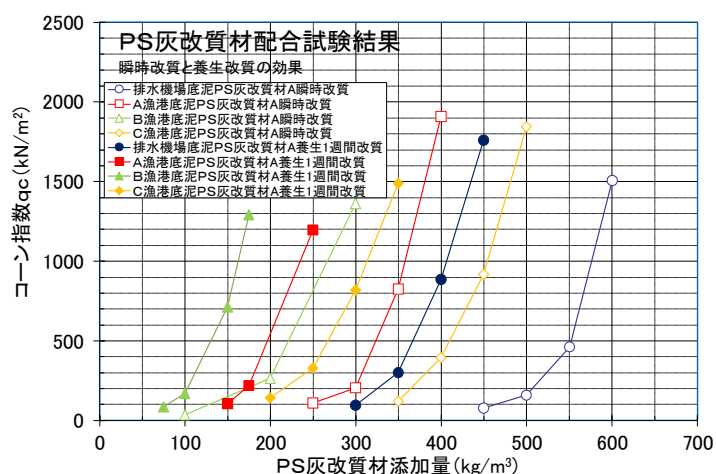


図5.3.4-4 PS灰改質材配合試験

表 5.3.4-1 PS 灰改質土の 1 週養生改質配合量 (排水機場底泥)

試料	PS灰改質材A添加量(kg/m ²) 4日養生		
	第4種建設発生土	第3種建設発生土	第2種建設発生土
	$q_c=200\text{k/m}^2$	$q_c=400\text{k/m}^2$	$q_c=800\text{k/m}^2$
排水機場底泥	326.1	357.9	391.7

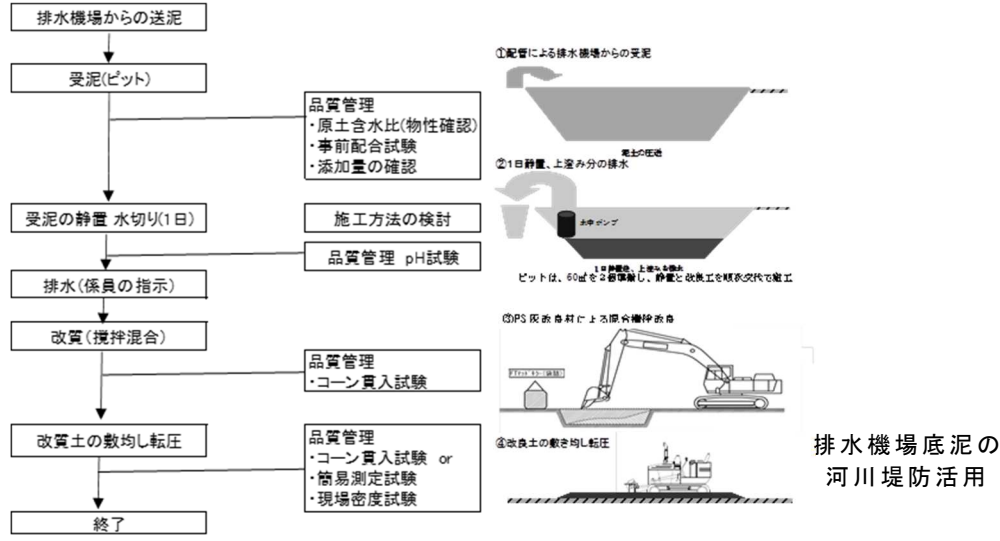


図 5.3.4-5 改質土の施工作業フロー

(3) 施工状況



① バックホウ台船による浚渫



② 浚渫土の送泥管



③ 受泥ピットへの排泥



④ PS 灰改良材の添加



⑤ 攪拌混合



⑥ 改質完了（養生込）



⑦ 敷均し・転圧



⑧ 施工完了

写真 5.3.4-1 改質施工時の状況

- ・臭気対策した漁港底泥改質土による盛土活用

漁港底泥の改質土に関しても排水機場同様，表 5.3.4-2 に示すとおり建設発生土利用技術マニュアル基準を満たし，養生効果を加味した添加量削減評価手法を活用することでアンモニア臭気の発生まで抑制した施工となっている（写真 5.3.4-2）。

表 5.3.4-2 PS 灰改質土の 1 週養生改質配合量（漁区底泥）

試料	PS灰改質材A添加量(kg/m ²) 7日養生		
	第4種建設発生土	第3種建設発生土	第2種建設発生土
	$q_c=200\text{k/m}^2$	$q_c=400\text{k/m}^2$	$q_c=800\text{k/m}^2$
A漁港底泥	171.5	188.8	219.8
B漁港底泥	103.4	120.7	152.8
C漁港底泥	217.1	258.4	297.8

PS 灰改質土の 1 週養生改質配合量（排水機場底泥）



① A 漁港底泥改質



② B 漁港底泥改質



③ C 漁港底泥改質

写真 5.3.4-2 改質施工時の状況(漁港)

5.3.5 崩落場所での対策

発生土受け入れ地における崩落土砂斜面の改質対策活用

(1) 工事概要

工事は、通常改良が困難な崩場土砂斜面を PS 灰改質材で改良し、土砂の再流出を緊急保護した工事である(図 5.3.5-1 平面図)

(2) 施工状況

崩場現場の施工状況 (写真 5.3.5-1 参照)

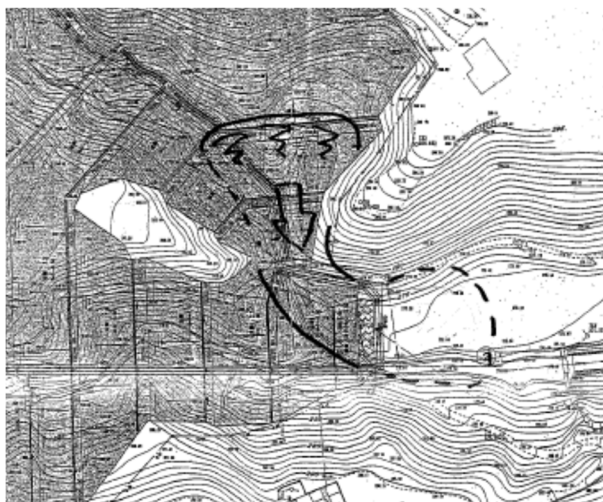


図 5.3.5-1 崩落エリアの状況



バックホウによる材料運搬準備



崩落現場



ユンボによる斜面改質状況



即時斜面改質状況

写真 5.3.5-1 崩落エリアの改質施工状況

参考文献

- 1) エンジニアリング振興協会：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，2009-2010.
- 2) 望月美登志，中野浩之：PS 灰の利活用の現状と課題，基礎工，Vol.45，NO.9，pp.31-35，2017.
- 3) 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.
- 4) 望月美登志：PS 灰を用いた泥土改良の課題とその検討，第41回地盤工学研究発表会，pp.523-524，2007.7.
- 5) 望月美登志：PS 灰を基材にした泥土改良材による高含水泥土の改良について，第43回地盤工学研究発表会，pp.1877-1878，2009.7

第 6 章 まとめ

6.1 まとめ

産業廃棄物の最終処分場不足の問題が深刻になっているが、特に製紙業界や建設業界は、産業廃棄物の排出量が多い。そこで廃棄物のリサイクル問題をそれぞれの産業内だけ解決しようとせず、相互補完的にゼロエミッション化を実現させようという考えから、両業界に有益となる PS（ペーパースラッジ）灰リサイクル技術の開発と建設発生土の活用化に着手した。本章では、本論文各章の内容を吟味し、その結論をまとめた。

第 1 章では、製紙業における PS 灰を活用させて高吸水性改質材を開発、高含水比建設発生土を瞬時に開始して土構造物に適用、産業間をまたがるゼロエミッション化を実現することで産業廃棄物の有効活用に寄与していること示した。

背景としては、下記 3 点があげられる。

- ① 本研究の社会的ニーズ(産業間をまたがるゼロエミッション化)
- ② 先導性・新規性(既存の固化型改良技術にはない高含水物理的吸水性、多岐にわたる環境改善機能、土質力学的観点から考慮した設計手法の確立)
- ③ 技術的・経済的波及効果(泥土を活用した大規模土構造物の構築、災害復旧対応による経済的波及効果、多岐にわたる環境技術開発と技術的波及効果)

本研究では、製紙工場の廃棄物であるペーパースラッジ灰に着目した泥土改質材を開発し、その実用化を図ることを目的とする。具体的には、以下のことを検討する。

- ① PS 灰の物理的吸水性能の客観的評価
- ② 種焼却方法に対応した PS 灰改質材の開発
- ③ 吸水機能に着目した配合設計法の提案
- ④ 改質土の力学的改善効果の解明
- ⑤ PS 灰の吸着効果を利用した環境浄化性能の解明
- ⑥ コスト縮減・耐久性の検討による実用化

第 2 章では、PS 灰改質材の基本特性と泥土改質への適用性について検討した。PS 灰改質材の基本特性として高吸水性能は、高含水汚泥や建設発生土の効率的な瞬時処理に利用するため、PS 灰の吸水性能を簡便かつ客観的に評価できる吸水試験方法を考案した。そこから得られる吸水比 w_{ab} という性能指標を定義して、焼却炉の異なる各種 PS 灰の吸水性能の違いやばらつきを評価した。また、吸水性能にばらつきのある PS 灰について安定した高吸水性能が得られるように条件に適合する製品化処理の方法を確立した。さらに PS 灰の吸水性能を考慮し、土のコンシステンシー概念と統一した配合設計手法も確立した。

第 3 章では、PS 灰による土の強度改善効果について確認した。現在、泥土の改良材として一般的になっている固化系改良材では、浚渫泥土のような低品質土の性状を向上させ、土構造物の代替材適用用途を飛躍的に広げる可能性がある反面、一定の養生期間が必要で、品質のバラツキも大きく、改良土を用いる際のモデルは、 c 、 ϕ による土質力学モデルでなく、一軸圧縮強さをベースにした設計基準が用いられている。PS 灰改質においても、土構造物への活用が目的にあるため、強度に関する設計基準の評価が必要になる。堤防や造成盛土、海洋施設内部の埋め戻し材には不適な高塑性浚渫泥土でも PS 灰による改質を行う

ことで改質土の塑性状態が低塑性へと変化し、瞬時に c' ならびに ϕ' の改善効果が認められた。締固めについても幅広い含水比範囲で所定の締固め度 D_c を確保できることが判明した。さらに PS 灰改質材がダムやため池堤防といった有用土構造物への有効活用が可能になるようシルトや礫質土など対応土質の適用範囲を広げたところ、礫質土における PS 灰改質材の改質効果は、塑性粘土の場合と同様、塑性粘土分の含有率が高い礫質築堤材に対しては、 ϕ' を改善させる効果となった。非塑性状態のシルト材では、強度定数の c' 成分に改善効果が発揮することが確認できた。

第 4 章では、泥土改質材として使用している PS 灰のいし原理子内に存在する無数の微細孔によって環境浄化機能も発揮することを調べている。PS 灰粒子の構造的特徴は、比表面積や細孔容積といった指標であらわされ、吸水性能のみならず、有害物等の吸着や溶出抑制効果も期待できることがわかった。本章では環境浄化性能のうち、①吸着性能②栄養塩（N, P）等の吸着機能、③消臭機能について検討を行った。吸着性能に関しては、いくつかの有害物質や栄養塩に対して吸着性能があることが判明した。栄養塩については、PS 灰を製品化した改良材を用いて富栄養湖の浚渫土を改良し、TN, TP の溶出速度を低減できる結果を得た。また、琵琶湖内湖の TN の溶出速度が低減できる結果を得た。消臭機能については、室内臭気試験から有機物の腐敗成分を多く含有する漁港や排水機場の底泥臭気は、底泥自体の硫化水素臭と高アルカリ改良材で改良した際のアンモニア臭によるもので、各臭気濃度は、pH と強い相関性があり、PS 灰改質泥土の最大消臭効果となる最適 pH 範囲は、弱アルカリ範囲内の改質材添加量にすること、力学的改質理由から必要添加量が増えるような高含水泥土改質の消臭効果では、硫酸第一鉄の添加が有効となる場合も明らかにした。最終的に現地での確認臭気試験結果も考慮しながら施工上の対応策として養生期間の設置による PS 灰改質材の添加量削減を検討することで効率的な PS 灰改質土の臭気抑制型適用実績が得られた。

第 5 章では、PS 灰改質工法の施工実績を紹介している。2 章における配合設計手法と建設発生土利用技術マニュアルによる管理方法で実施したシールド工事、2 章の配合方法に養生効果による添加量削減手法と 3 章の力学特性を活用した荒川下流管内土壌改良工事（河川浚渫土改質土の築堤強度検討）、4 章の消臭効果に改質土の最適 pH 範囲を守るため添加量削減手法を活用した住宅地エリアの排水機場汚泥臭気対策と改質土築堤構築防災対策工事、富栄養化した諏訪湖浚渫土を PS 灰改質することで浚渫土の栄養塩溶出速度を低減させ、湖内の傾斜護岸盛土を構築させ、水中における土構造物の長期耐久性まで確認した諏訪湖改修工事の計 4 件の実績がまとめられている。

6.2 結論

本研究の結論をまとめると以下のとおりになる。

- ① 製紙業における PS 灰を活用させて高吸水性改質材を開発、高含水比建設発生土を瞬時に改質して土構造物に適用、産業間をまたがるゼロエミッション化を実現、有効利用率の増加に寄与した。
- ② PS 灰を基材とした高吸水性改質材を開発した。これは、化学的原理の固化材とは異なる物理的吸水原理に基づく材料である。
- ③ 各種製紙工場の焼却条件に見合った PS 灰処理方法を確認させ、品質的に安定した

PS 灰吸水材を製造，実用化した．

④ PS 灰の吸水性能を評価する指標として吸水比 w_{ab} を提案し，本技術独自の試験方法を確立した．

⑤ 吸水比 w_{ab} と対象泥土の余剰水（液性限界 w_L 以上の水分），塑性指数 IP といった土のコンシステンシー概念をベースに PS 灰改質材独自の配合設計手法を確立した．

第4種建設発生土基準(コーン指数 $q_c=200$ kPa)を満たすのに必要な添加率 η の推定式

$$\eta = a \{(w - w_L) + 37.8 \log I_P - 33.5\}$$

*a が吸水比 w_{ab} より求める傾き

⑥ PS 灰改質土の土構造物への活用を図るため，一般の土質材料同様 \overline{CU} 試験を実施して有効応力での強度定数 (c' , ϕ') の改善効果を確認した．PS 灰改質土の強度効果は，供試体の締固め度 $Dc95\%$ の供試体で評価し，対象土は，粘性土，シルト，粘土混じり礫質土の 3 区分に対して以下のとおりの改善が確認された．

- ・粘性土では，添加率 η を変化させると強度定数 c' , ϕ' とともに増加 (c' は 79.5Kpa, ϕ' は 25.7° 上昇)．
- ・シルトでは，NP 状態にあり添加率 $\eta 20\%$ で c' が上昇 (c' は 9.3Kpa, ϕ' は 0.7° 上昇)．
- ・粘土混じり礫質土では， ϕ' が上昇 (c' は，ほぼ一定, ϕ' は 2.6° 上昇)．

⑦ PS 灰の吸水原理は，粒子内の微細孔構造にあるが，構造上の特徴より環境浄化機能も有する事がわかった．

⑧ PS 灰改質材には，栄養塩や重金属の吸着性能がある（ヒ素以外）．

⑨ PS 灰改質材には，TN、TP の溶出量や溶出速度を低減できる．

⑩ 有機物の腐敗成分を多く含有する臭気底泥の硫化水素濃度とアンモニア濃度は、pH と強い相関性があり、PS 灰改質土では、弱アルカリが消臭抑制効果の最適領域である。そのため弱アルカリ改質傾向の PS 灰改質材は、消臭機能に優れている。

⑪ 瞬時吸水効果が特徴の PS 灰だが，試験施工等の結果から 4～7 日程度の気中養生期間にも必要添加率 0.6η 程度の養生効果が確認されたため，添加量削減手法として設計に取入れ，適用事例において経済性の検討に活用した．

⑫ PS 灰改質材の適用事例では，PS 灰改質土による堤防の安定性検討と長期耐久性，湖内水中傾斜護岸の強度耐久性を実施した．

⑬ PS 灰改質材の適用実用例は，以下の 4 件である．

- ・泥土圧シールド工事排泥処理への適用
- ・河川浚渫土砂の改質と堤防材への適用
- ・湖沼浚渫土の栄養塩溶出低減と湖内護岸適用
(栄養塩溶出低減による環境浄化と湖内構造物の構築)
- ・排水機場浚渫汚泥の消臭と改質土高潮堤への適用（消臭及び堤防構築）

謝辞

本論文は、筆者が前職(株)フジタに在籍している時代より発案から開発、事業化、営業販売まで手掛けた PS 灰改質材の開発実用化技術について取りまとめたものです。本論文を作成するにあたり、多くの方にご指導、ご助言賜りました事この場を借りて厚く御礼申し上げます。主査をお引き受けくださいました横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院早野公敏教授には、ひとかたならぬご指導ご鞭撻いただきました事、心より御礼申し上げます。副査を快くお引き受けいただきました横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院山田均教授、同細田暁教授、同菊本統准教授、同崔瑛准教授の先生方には、貴重かつ適切なご指導、ご助言賜りました事厚く御礼申し上げる次第でございます。

私が本研究の開発から実用化まで実施できたのは、故横浜国立大学今井五郎教授のご指導、ご協力の賜物と心より感謝しております。今井教授からは、あらゆる廃棄物を活用する場合の基本的な考え方をお教えいただいたこと、また対象となる泥土に関しても土は、水が抜ければ固くなるのだという脱水の基本的な考え方をお教えいただきました。心より追悼の意を述べさせていただきます。

今井教授が急逝された後、研究は現東京海洋大学谷教授にお引き継ぎいただき、さらに現在は、横浜国立大にて早野教授のご協力のもと PS 灰に関係する勉強会を開いていただいた関係から、今回の博士論文の主査も早野教授にお引き受けいただいた経緯がございます。谷教授、早野教授におかれましては、どれだけ感謝してもしきれないほどお世話になりました。厚く御礼申し上げます。

前職(株)フジタの池見常務理事、中野土木 ENC 副センター長には、在籍中より大変お世話になりました。池見様には、研究所時代 PS 灰技術の開発準備段階からご協力いただきました。中野様にも、停年退職する時まで本当にお世話になりました。会社人生の半分以上を注ぎこむことができましたのも沢山のご支援いただいたことよるものと厚く御礼申し上げます。

同級生であるジャイワット(株)山内裕元博士には、PS 灰の技術勉強会や環境技術に関するアドバイス、製紙会社とのネットワークなどお世話になっただけでなく、病気入院以降本当に親身なサポートをいただきました。土と廃棄物に関する技術的業務を進めていく中で先を見据えた先見性と鋭い洞察力で切り込む姿勢には、見習うべき点が多く、本技術開発におきましても大変勉強になりました。長い期間、気持ちを振り立たせて頑張ることができましたのも山内氏のおかげと厚く感謝、御礼申し上げます。

二期生である(株)日建シビル片桐博士にもお忙しい業務の中、何度も的確かつ有用なご指摘をいただきましたこと深く感謝いたします。本当にお世話になりました。心より厚く御礼申し上げます。

横国大関係者としては、四期生シンガポール P E の小野寺氏からも研究期間中シンガポールという国外の技術提案に参加できる機会をいただきました。国内だけにどどまらず、広く海外で活躍できるバイタリティーも小野寺氏の魅力であり、是非とも見習わねばならないと考えております。本当にありがとうございました。

またこれまで研究にご協力していただいた横浜国立大学地盤研卒業生、関係者皆様にも厚く御礼申し上げます。どの年代におきましても一緒に研究協力してくれた後輩の皆様が

いた事を忘れることはできません。今でもつい昨日のことのようにな懐かしく思い出されます。皆様、本当にありがとうございました。

本開発技術は、製紙会社様のご協力なくしては、進められないものでした。ここまでの研究開発期間において、数多くの製紙会社様から多大なるご支援、ご協力いただきました。特に丸住製紙(株)堀江取締役には、最新のPS灰状況についてご指導いただきました。初めてお話をさせていただいた時からPS灰活用のお話を親身に聞いていただいた事、私が緊急入院した際には、横浜まで駆けつけていただいたこと、今も忘れることができません。本当にありがとうございました。厚く御礼申し上げます。

(株)環境開発公社寺田様からは、幅広い廃棄物、環境関係の技術対応をお教えいただきました。寺田様も緊急入院の際には、遠方より駆けつけていただきました。本当にご心配おかけいたしました。心より御礼申し上げます。

ジャイワット(株)古野社長、和栗様にも大変お世話になりました。病気入院後は、大変ご迷惑おかけいたしました。技術協力関係を構築できるようこれからも頑張っていく所存です。本当にありがとうございました。厚く御礼申し上げます。

現在、横浜国立大にて技術勉強会にご参加いただいている皆様には、厚く御礼申し上げます。所属を超えた皆様との関係には、感謝してもしきれない気持ちでいっぱいです。本当にありがとうございました。心より御礼申し上げます。

エコラボ(株)守屋社長には、廃棄物関連の技術開発をご指導いただきました。(有)共生関口社長には、技術開発に有用な材料紹介や数多くの技術関係者をご紹介いただきました。

(有)ウェイブ那須社長には、廃棄物活用の方法をお教えいただきました。皆様、本当にありがとうございました。心より感謝いたします。

東京試機工業(株)橋本社長には、実験機械、三洲工業(株)渡辺社長には、プラント施工機械の津におきまして大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力いただきながらお名前を記すことのできなかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に定年退職以降まで筆者の取り組みを寛大な心で見守ってくれた妻、家族に心より深く感謝します。

令和2年3月 望月 美登志