

鉄鋼スラグを活用した
カルシア改質土の実用化に向けた
土質特性の評価と品質管理に関する研究

2022年

赤司 有三

目次

第1章 序論	・・・1
1. 1 はじめに	・・・1
1. 2 浚渫土砂及び鉄鋼スラグの活用の現況と課題	・・・1
1. 3 本研究の背景	・・・4
1. 3. 1 カルシア改質土の開発の歴史	・・・4
1. 3. 2 カルシア改質土の実用化技術の状況	・・・5
1. 4 本研究の内容	・・・8
1. 4. 1 本研究の目的	・・・8
1. 4. 2 本論文の構成	・・・9
第2章 カルシア改質土の特徴と実用化課題	・・・13
2. 1 カルシア改質土の強度発現の原理	・・・13
2. 2 カルシア改質土の強度発現における課題	・・・15
2. 2. 1 化学的強度管理指標	・・・15
2. 2. 2 化学的強度管理指標を求める試験手法	・・・18
2. 2. 3 浚渫土砂の性状改善のメカニズム解明と実用化	・・・19
2. 2. 4 強度発現における粒状材料の混合効果	・・・20
2. 3 研究課題のまとめ	・・・21
第3章 浚渫土砂とカルシア改質材の強度発現に対する相互影響評価	・・・24
3. 1 概要	・・・24
3. 2 実験概要	・・・24
3. 2. 1 溶出試験方法	・・・24
3. 2. 2 材料	・・・26
3. 2. 3 強度発現特性の把握	・・・29
3. 3 試験結果と考察	・・・33
3. 3. 1 浚渫土砂からのシリカ溶出量が強度発現に及ぼす影響	・・・33
3. 3. 2 カルシア改質材からのカルシウム溶出量が強度発現に及ぼす影響	・・・35
3. 3. 3 浚渫土砂からのシリカ溶出量とカルシア改質材からのカルシウム 溶出量が強度発現に与える相互影響	・・・38
3. 4 まとめ	・・・39

第4章 強度発現予測のための原材料の溶出試験方法の提案	・・・41
4.1 概要	・・・41
4.2 カルシウム溶出に対する試験方法の検討	・・・41
4.2.1 実験概要	・・・41
4.2.2 実験結果と考察	・・・43
4.3 シリカ溶出に対する試験方法の検討	・・・48
4.3.1 実験概要	・・・48
4.3.2 実験結果と考察	・・・51
4.3.3 工事での適用検討	・・・53
4.4 まとめ	・・・55
第5章 流動性低下のメカニズム解明と実海域工事への特性活用	・・・57
5.1 概要	・・・57
5.2 流動性低下メカニズムと水中施工時の濁り抑制効果	・・・57
5.2.1 実験概要（使用材料）	・・・57
5.2.2 実験概要（試験内容）	・・・59
5.2.3 試験結果	・・・65
5.3 カルシア改質土の流動性に関する解析的検討	・・・71
5.3.1 カルシア改質土の流動性評価方法	・・・71
5.3.2 実験と解析の比較によるビンガムモデルの適用性検討	・・・73
5.3.3 消波ブロック空隙への充填検討事例	・・・80
5.4 まとめ	・・・82
第6章 強度特性への骨材混合効果の評価を目的とした基礎的研究	・・・85
6.1 概要	・・・85
6.2 実験概要	・・・86
6.2.1 試験材料	・・・86
6.2.2 一軸圧縮強さへの影響評価	・・・88
6.2.3 三軸圧縮試験（CUB試験）	・・・89
6.3 試験結果と考察	・・・89
6.3.1 一軸圧縮強さ	・・・89
6.3.2 三軸圧縮試験（CUB試験）	・・・91
6.4 骨材混合の影響に関する考察	・・・95
6.5 まとめ	・・・96

第7章 研究総括及び結論	・・・98
7.1 得られた成果	・・・98
7.2 今後の展望	・・・99
謝辞	・・・101

第1章 序論

1. 1 はじめに

我が国の社会資本整備において、港湾機能を維持拡大していくためには航路や泊地に堆積した土砂の浚渫が重要課題であり、河口域に港湾設備が存在することも多く、全国で約1,000万 m³/年もの浚渫工事が実施されている¹⁾。この浚渫土砂は一般的には埋立処分されているが、その処分場を建設することで自然破壊を伴う天然材料（石材等）の使用や、海の浄化や魚介類の産卵場等としての機能を保有している干潟・浅場の消失といった、環境破壊を促進させる状況となっている。

一方、我が国の主要産業の多くは、この港湾機能の活用により原材料を輸入して製品を製造することで成り立っている。その製品製造の過程では多くの産業副産物も発生しており、鉄鋼業における鉄鋼スラグは我が国最大の産業副産物である。鉄鋼スラグは、現在、セメント原材料や道路用材等として99%が有効利用²⁾されているが、その活用は公共投資や景気変動の影響を大きく受けることもあり、更なる天然資材に代わる用途開発が期待されている。

このような状況の中、近年、港湾工事で発生する浚渫土砂に鉄鋼スラグを原料としたカルシア改質材を混合することで強度等が改良されたカルシア改質土の実用化が進められ、埋立工事における天然石代替材や浅場造成基盤材等の環境改善事業への適用が進められている³⁾。しかし、カルシア改質土の適用拡大が進む一方、浚渫土砂の固化改良や施工時の流動性低下による濁り抑制等の基本的かつ重要な特性に関して、実用化に向けた品質管理技術が明確化されておらず、現場では都度の配合試験や高い安全率、高頻度の現場管理等で対応している状況である。よって、カルシア改質土の適用拡大に向けては、実用的な特性評価と品質管理技術が望まれている状況である。

1. 2 浚渫土砂及び鉄鋼スラグの活用の現況と課題

我が国における循環型社会形成のための法体系⁴⁾は、環境政策の根幹を定める「環境基本法」のもと、循環型社会形成に向けた基本的な理念や枠組みを定めた「循環型社会形成基本法」が整備されている。また、循環型社会の形成に向けた法律として、廃棄物の排出抑制・廃棄物の適正な処理等により生活環境保全及び公衆衛生の向上を目指す「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃棄物処理法）、資源の有効な利用の確保と廃棄物の発生抑制及び環境の保全を目指す「資源の有効な利用の促進に関する法律」（資源有効利用促進法）、個別の物品の特性に応じて制定された6つのリサイクル法、公的機関が率先して環境負荷低減に資する製品・サービスの調達を推進すること等で持続的発展が可能な社会の構築を目指す「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」（グリーン購入法）が整備されている。この体系を図-1⁴⁾に示す。

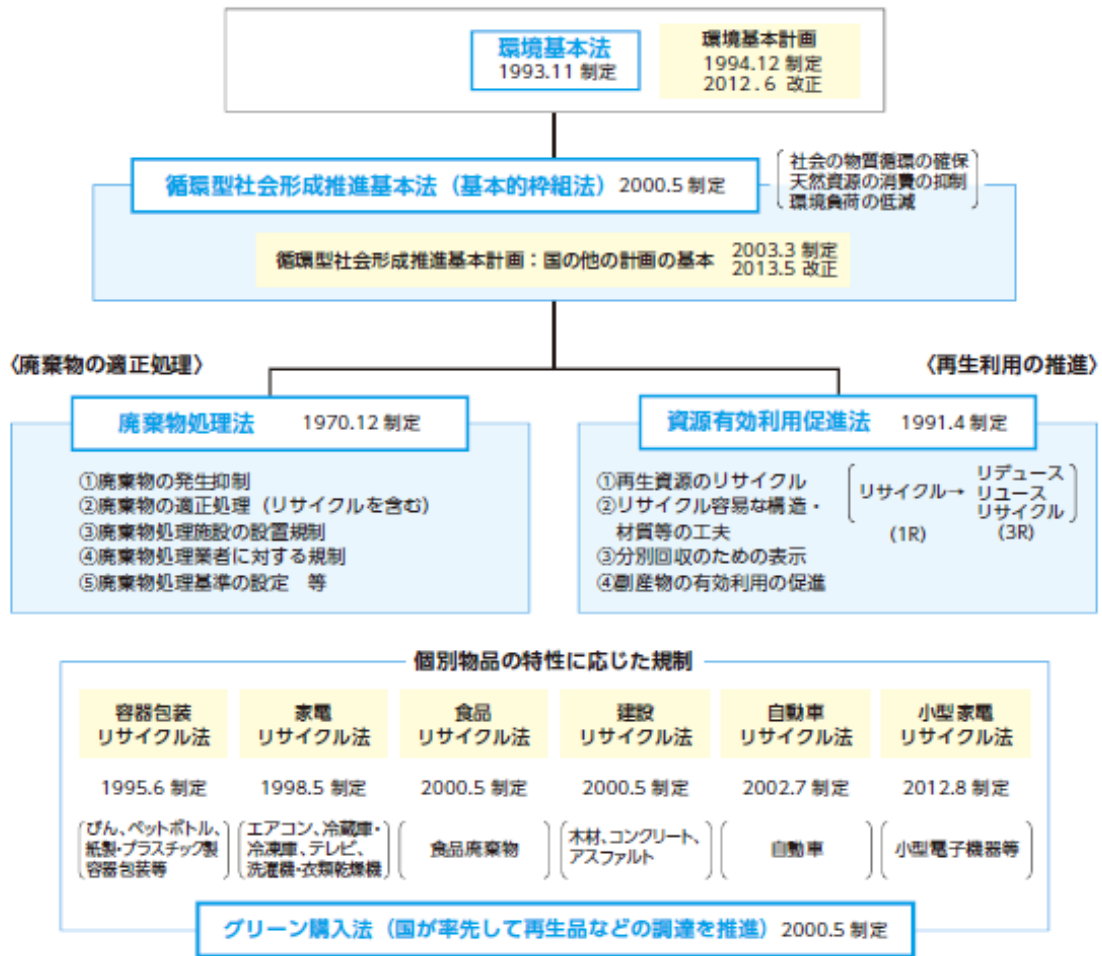


図-1.1 循環型社会形成のための法体系⁴⁾

国土交通省では、建設工事で発生する土全体を発生土といい、そのうち廃棄物処理法で規定された建設汚泥に該当するもの以外を建設発生土と称している。環境省は、建設工から排出される泥状の掘削物を無機性の汚泥として産業廃棄物とし、それ以外を土砂として、土地造成などに利用できる資材であるため、廃棄物処理法から除外している。ここで、海域・河川などの浚渫土砂は、泥状を呈していても土砂として廃棄物処理法の対象外とされている⁵⁾。海域から発生した浚渫土砂は、現在では約 1,000 万 m³/年程度発生している。その活用として、平成 20 年度の実績⁶⁾であるが、港湾埋立に 25%、覆砂・干潟等と養浜に 13%が有効利用されている。一方、廃棄物処理法の対象外であるものの土砂処分場に 40%が搬出され、海洋投入処分が 4%実施されている。土砂処分場は、将来は埋立地として土地利用されるものの、その土砂処分場の用地確保も現在では困難な状況となっており、伊勢湾の事例⁷⁾では、浚渫土砂の処分場を安定的に確保することが困難な状況となり、既設の処分場であるポートアイランドに埋立計画の地盤高を超えた仮置きを実施している。

浚渫土砂の処分方策については国際的にも検討されている^{8),9)}が、我が国においては国土交通省が平成 25 年に「浚渫土砂等の海洋投入及び有効利用に関する技術指針（改定案）¹⁰⁾」を発刊し、平成 30 年に「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（改訂）¹⁾」を整備して、浚渫土砂の有効利用を図っている。しかしながら、土砂処分場の建設による埋立利用ではなく、覆砂・干潟や養浜等への海域環境改善の材料としての軟弱な浚渫土砂の活用の促進は進まない状況である。

一方、スラグ²⁾は、鉱石から金属を還元・精錬する際に特定の成分が熔融・分離してできたものである。スラグは本来金属製造工程起源のものであるが、ごみなどを焼却施設で処分したときに発生する廃棄物加熱熔融起源のものもスラグと呼んでいる。さらに、金属製造工程起源のスラグは鉄鋼スラグと非鉄金属スラグに分けられ、鉄鋼スラグは鉄鋼製品の製造工程で生まれたものを指す。鉄鋼スラグは、鉄鋼石から鋼作り出す還元・精錬段階で生まれるシリカ（ SiO_2 ）などの鉄以外の成分が、石灰（ CaO ）と熔融・結合した副産物である。鉄鋼スラグは 1991 年の「再生資源の利用促進に関する法律」（リサイクル法）で指定副産物に、その改正法である 2000 年の「資源の有効な利用の促進に関する法律」（資源有効利用促進法）で鉄鋼業は特定省資源業種にそれぞれ指定され、鉄鋼製造工程で生成する鉄鋼スラグ製品の「副産物」としての位置づけが明確になされた。なお、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃棄物処理法）では、「汚物又は不要物」が廃棄物とされており、鉄鋼スラグが有用物として用いられる場合は廃棄物に該当しない。近年の鉄鋼スラグの年間生産量は約 3,800 万 t に達するが、約 1% は利用先が無いため「廃棄物処理法」上の廃棄物として適切に処理されているが、約 99% の鉄鋼スラグは廃棄物でなく環境上も問題ないセメント原材料や道路用路盤材等の「鉄鋼スラグ製品」として広く社会で有用な資材として利用されている。また、海外においても、道路用材等に活用されている^{11), 12)}。高炉セメントや路盤材等の一部の鉄鋼スラグ製品については、2001 年に施行された「国等による環境物品等の調達に関する法律」（グリーン購入法）の公共工事における特定調達品目（環境負荷低減に資する製品）に指定されている。我が国での鉄鋼スラグ利用の歴史は約 100 年に及び、鉄鋼生産の拡大とともに鉄鋼スラグの用途開発も同時に推進されてきた。しかしながら、国内公共事業や建設需要の低迷に加え、他の副産物との競合や廃コンクリート等リサイクル材料の適用奨励、環境基準厳格化への適合といった社会的な情勢変化により、市場の需給構造が変化している状況である¹³⁾。このような状況下、現在においても鉄鋼スラグの特徴を活かした新たな社会ニーズに応じた製品開発が進められている。

1. 3 本研究の背景

1. 3. 1 カルシア改質土の開発の歴史

海域で発生した浚渫土砂の改良技術による活用については、海外では副産物の混合活用が検討されており、フライアッシュや石灰生産副産物を用いた固化材料が建設資材として検討されている^{14),15),16)}が、日本においてはセメント固化処理による埋め立て材としての活用^{7),17),18)}が主であり、副産物の混合活用や埋め立て以外の用途への改良技術による浚渫土砂の活用展開は検討されていなかった。このような状況下、(一社)日本鉄鋼連盟は浚渫土砂に鉄鋼スラグを混合して改質したカルシア改質土を、2004年から3年間で実施した経済産業省補助事業「スラグ利用に係る研究開発」で検討・考案した。カルシア改質土の開発の歴史概要を図-1.2に示す。その成果は、「転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き¹⁹⁾」及びその別冊である「転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法 技術資料²⁰⁾」として取りまとめられている。海域利用の手引きでは、カルシア改質土に限らず、鉄鋼スラグ水和固化体や炭酸化スラグといった海域で転炉系製鋼スラグを活用する際にpH上昇や白濁といった海域環境影響を及ぼさない適用方法について技術と安全性の面から整理されている。別冊の技術資料では、カルシア改質土の固化メカニズムや環境影響について、実海域試験の結果も踏まえながら特性が整理されている。

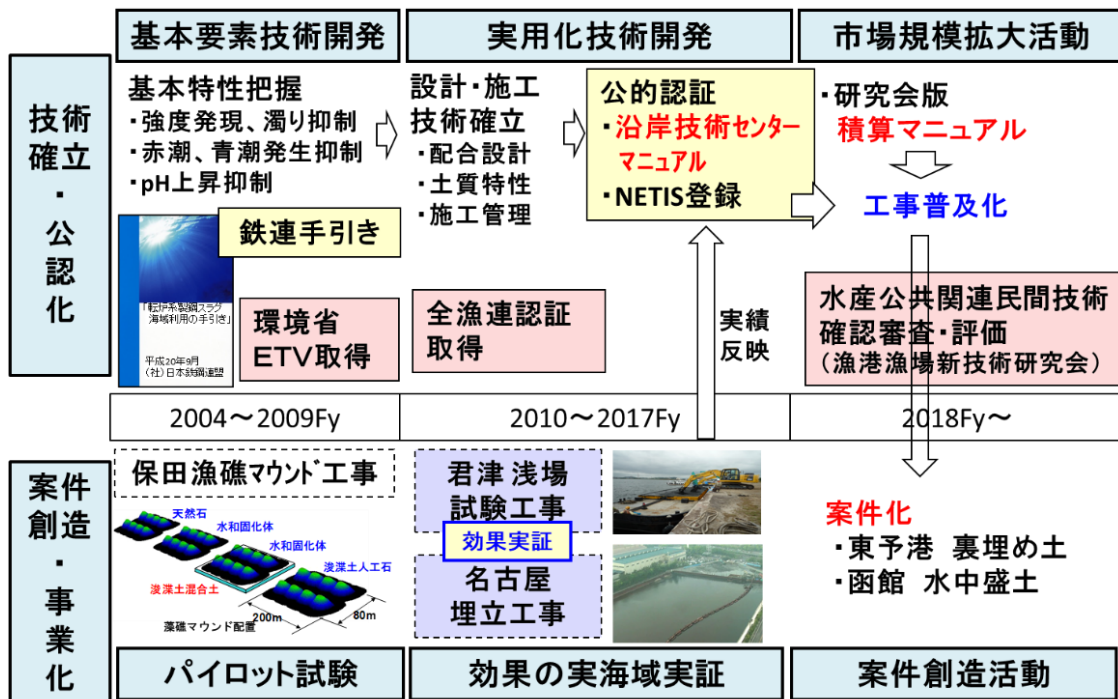


図-1.2 カルシア改質土の開発の歴史概要

その後、鉄鋼会社と建設会社が会員となって2007年に設立されたカルシア改質土研究会にて、基礎研究と実用化研究が行われている。カルシア改質土の圧密等の土質特性や室内配合試験の技術検討に加えて、2010年には千葉県保田沖で藻礁石基盤材として公共工事初採用され²¹⁾、浅場造成²²⁾や埋立て²³⁾といった実海域での施工方法研究を兼ねた実験工事を実施することで実用化のための技術を蓄積し、2017年には(一財)沿岸技術研究センターより「港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル³⁾(以降、マニュアルと記載)」が発刊され、設計と施工に関する技術が整理された。マニュアルでは、カルシア改質土の材料品質・土質特性・設計方法・環境安全性・施工方法及び管理について整理されている。また、カルシア改質土研究会において「積算マニュアル²⁴⁾」が自主発刊され、公共工事への活用としては技術整備が整った状況となっている。

上記の技術整備に加えて、カルシア改質土は安全性に対する評価も実施されている。海域での産業副産物の活用について海域関係者が抱く不安に対して、以下の取り組みがなされている。一つ目は環境省による環境技術実証事業(ETV)での評価取得²⁵⁾である。平成21年度の閉鎖性海域における水環境改善分野において、「転炉系製鋼スラグ製品による沿岸域の環境改善技術」として安全性を含めて環境改善技術としての評価を受けている。二つ目は海産物に対する安全性評価である。日本製鉄は、カルシア改質土を用いて魚類・貝類・藻類に対する毒性試験を行うことで、2010年に(一社)全国水産技術協会から「漁場環境修復技術基本認定」を受けている²⁶⁾。三つめは水産分野での技術評価である。水産分野でのカルシア改質土の活用を目指して、2017年に(一社)漁港漁場新技術研究会による「水産公共関連民間技術 確認審査・評価²⁷⁾」を受けている。

上記の取り組みにより、第19回国土技術開発省の入賞を受賞し、近年ではカルシア改質土は各海域で活用されるようになってきている。例えば、東予港では護岸背面の裏埋め土²⁸⁾に活用され、函館湾では防波堤背面の水中盛土²⁹⁾として活用されている。

1. 3. 2 カルシア改質土の実用化技術の状況

カルシア改質土の主な活用用途を図-1.3に示す。主な用途は、深掘り窪地の埋戻材や浅場造成の基盤材、埋立造成材といった地盤材料である。1.2.1の取り組みにより、カルシア改質土を適用する際には、マニュアルに従って設計・施工を計画して実行することができる。一方、カルシア改質土は図-1.4に示すように浚渫土砂の固化改良技術の一種³⁾であるが、他工法のセメント固化と異なり、強度発現には浚渫土砂の性状の影響を大きく受ける。また、固化材であるカルシア改質材の添加量も容積で30%程度であることから、カルシア改質材の配合量の決定は工事における土砂投入量の土量バランスに大きな影響を与える。そこで、マニュアルでは、図-1.5に示すように計画から工事までの間で3回の配合試験を実施して、対象となる浚渫土砂に対する強度発現の確実性を確認することが示されている。また、マニュアルでは、浚渫土砂のばらつき影響を考慮して、工事中に1回/日のサンプリングにより強度発現を確認する管理方法が示されている。

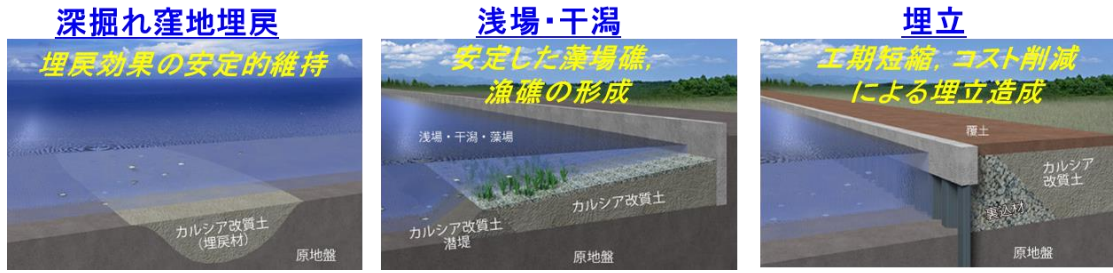


図-1.3 カルシア改質土の主な適用用途

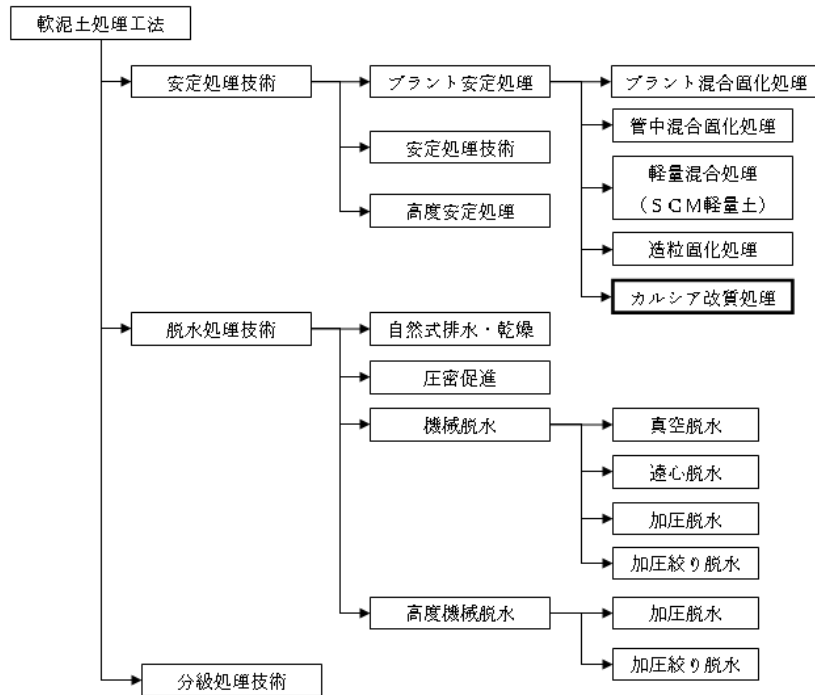


図-1.4 浚渫土砂（軟泥土）改良技術の分類

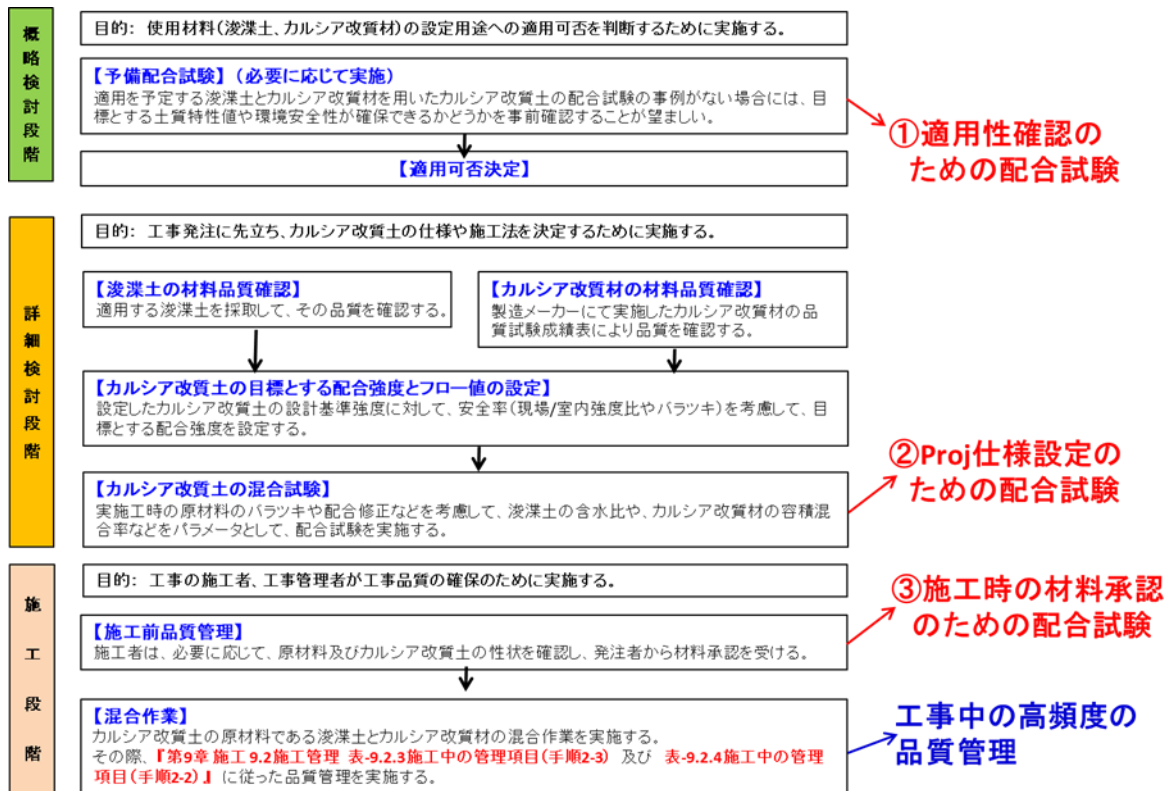


図-1.5 マニュアルで定める配合試験や品質管理

一方、近年では表-1.1 に示すように、様々な機能が要求される用途への適用が検討されており、様々な研究開発も進められている。適用拡大へ向けた実用化研究としては、施工時法面勾配形成^{30), 31)}や地山境界部の摩擦特性³²⁾といった実務的な設計・施工技術に関する研究や、耐震強化岸壁の裏埋め土²⁸⁾や防波堤背後盛土への適用²⁹⁾といった実プロジェクト適用に関する研究が進められている。しかし、特性は明らかとなっても、設計や施工管理には反映されていない状況である。例えば、法面勾配形成については、カルシア改質土の流動性と相関が得られているが、その流動性の制御についてはメカニズムが明らかとなっていない状況である。

上記に示す固化改良と流動性低下による濁り抑制や法面勾配形成は、多くの適用用途やプロジェクトで要求されるカルシア改質土の基本技術である。しかし、現状ではマニュアルに従いながら、プロジェクト毎に多数の試験水準を設定して複数回の配合試験を実施し、また施工時には高頻度での品質管理を行い、時には過剰な安全率を設定することで対応しているのが実状である。

表-1.1 カルシア改質土の機能的用途

分類	用途	効果
港湾設備	水中盛土，浅場基盤材 (護岸前面等抑え盛土， 防波堤等補強盛土)	国土強靱化へ向けた補強やカーボンニュートラルポート施策によるブルーカーボン
	潜堤 (航路埋没対策等)	コンクリートブロック等の代替材
	ケーソン中詰め材	浚渫土砂活用の重量調整
	洗掘防止マット	防波堤等に設置の消波ブロック下面の洗掘防止対策
埋立て	裏込め土，裏埋め土， 埋立て土	液状化防止，早期供用開始
	中仕切り堤	石材代替材（天然資源保護）
	堤防材	国土強靱化へ向けた海岸の堤防材や嵩上げ堤の材料
	空隙充填材	埋立地増設等の際の既設護岸部の消波ブロック埋殺しのための空隙充填

1. 4 本研究の内容

1. 4. 1 本研究の目的

カルシア改質土の実用化に向けた技術整備は，固化特性や設計・施工に関する基礎的な検討が完了しているのみで，様々な土木用途に適用するにあたり，機能的（例：非液状化や濁り抑制効果あり等）な傾向は把握できているものの，多様な浚渫土性状に対して，詳細計画・性能設計・施工管理といった実務レベルでのコントロール技術としては，研究不足の状況である。そこで，本研究の目的は，カルシア改質土の浚渫土砂とカルシア改質材の混合直後の流動性と，固化後の強度発現性能を対象として，浚渫土砂が活用されていない領域にまでカルシア改質土を適用可能とするために，技術のメカニズムから現場施工管理までの一貫の視点で実用化技術を構築することである。本検討を，以下の3つの視点で行う。

- ① 浚渫土砂から溶出するシリカ成分とカルシア改質材から溶出するカルシウム成分が強度発現に及ぼす相互作用を考慮した強度予測手法の研究。
- ② カルシア改質材の混合によるカルシア改質土の流動性低下のメカニズム解明と，その効果の設計・施工技術への適用手法の研究。
- ③ 固化による粘着成分に加えて，粒度改善効果で生じる内部摩擦角を評価した土質特性の研究。

1. 4. 2 本論文の構成

本研究では、1.4.1 に示す①から③の 3 つの視点について、類似の地盤改良工法と考えられる石灰系固化材の特性との比較により課題を整理して、研究を行った。

本論文は、図-1.6 に示す 7 つの章で構成されている。第 1 章では、カルシア改質土技術の研究と実用化の状況を整理して、カルシア改質土の基本技術である固化改良と流動性低下に関する技術に残課題があることを示して、本研究の方向性を設定するとともに、本論文の構成を概説している。第 2 章では、カルシア改質土の既往の知見を整理するとともに、石灰系固化材の地盤改良メカニズムとの比較により、①から③で設定した各研究の視点について、メカニズム解明・評価指標・設計/施工計画・施工管理の観点から詳細な研究テーマの設定を行っている。第 3 章では、研究視点①において、浚渫土砂から溶出してくるシリカとカルシア改質材から溶出してくるカルシウムの相互作用により発現する強度について、これまでに蓄積した実験結果を整理することで、強度予測の評価指標の提案を行っている。第 4 章では、研究視点①における浚渫土砂から溶出してくるシリカとカルシア改質材から溶出してくるカルシウムの定量評価のための実験方法について、工事現場での簡易化も踏まえて提案している。第 5 章では、浚渫土砂にカルシア改質材を混合した際のカルシア改質土の流動性低下について、メカニズムを解明するとともに、実海域の工事現場で濁り抑制効果や法面勾配形成を発揮するための評価指標を提案している。また、法面勾配形成については事前の工事計画時に活用できるシミュレーション技術の構築を行っている。第 6 章では、石灰系固化材等の紛体系の地盤改良材と異なる特徴である固化材が粒状材料であることについて、強度発現への影響に関する基礎的研究を行い、内部摩擦角発揮の可能性について明らかとしている。第 7 章では、第 1 章から第 6 章までの研究内容のまとめを行うとともに、本研究で得られた結論と今後の展望についてまとめている。本論文全体を通して、各検討の結果に基づき、カルシア改質土を実工事で使用する際の強度発現や実海域投入時の濁り抑制及び法面勾配形成について、配合設計や施工品質管理が可能な技術を構築できたことを示している。

	第1章 序論 カルシア改質土技術の研究と実用化、及び残課題の整理
	第2章 カルシア改質土の特徴と実用化課題 石灰系固化材との比較による研究テーマの設定
視点①	第3章 浚渫土砂とカルシア改質材の強度発現に対する相互影響評価 シリカとカルシウムの相互作用による強度予測の評価指標の提案
	第4章 強度発現予測のための原材料の溶出試験方法の提案 浚渫土砂とカルシア改質材に対する溶出試験方法の提案
視点②	第5章 流動性低下のメカニズム解明と実海域工事への特性活用 流動性低下メカニズムの解明と、法面勾配形成に対する解析技術構築
視点③	第6章 強度特性への骨材混合効果の評価を目的とした基礎的研究 固化材が粒状材料であることによる強度増進効果の評価
	第7章 研究総括及び結論 本研究で得られた結論と今後の展望

図-1.6 本論文の構成

【本章の参考文献】

- 1) 国土交通省 港湾局, 航空局：港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（改定）, pp.3-2-1, 2018.
- 2) 鉄鋼スラグ協会：環境資材 鉄鋼スラグ, pp.1, 2021
- 3) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル pp.1-1 - 9-16, 2017.
- 4) 環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 企画課循環型社会推進室：日本の廃棄物処理の歴史と現状, pp.1-30, 2014.
- 5) 阪本廣行：建設業における建設副産物への取組み, 基礎工, Vol.42, No.3, pp.2-5, 2014.
- 6) 国土交通省 港湾局：平成21年度土壌環境に配慮した浚渫土砂活用方策に関する検討業務 報告書（要約編）, pp.1-10, 2010
- 7) 柴田鋼三, 福田浩司：伊勢湾における浚渫土砂の処分と有効活用, 基礎工, Vol.42, No.3, pp.74-79, 2014.
- 8) Fulvio Onorati, Cristian Mugnai, Marina Pulcini, Massimo Gabellini : A framework for the integrated assessment and management of dredged materials in Italy: a case study based on the application of Local Sediment Quality Guidelines, J Soils Sediments, 13, pp.474-487, 2013.

- 9) Matthew E. Bates, Cate Fox-Lent, Linda Seymour, Ben A. Wender, Igor Linkov : Life cycle assessment for dredged sediment placement strategies, *Science of the Total Environment*, 511, pp.309-318, 2015.
- 10) 国土交通省港湾局 : 浚渫土砂等の海洋投入及び有効利用に関する技術指針 (改訂案) , pp.1-88, 2013.
- 11) Giulio Dondi, Francesco Mazzotta, Claudio Lantieri, Federico Cuppi, Valeria Vignali, Celestino Sangiovanni : Use of Steel Slag as an Alternative to Aggregate and Filler in Road Pavement, *materials* 2021, 14, 345
- 12) EUROPEAN STANDARD EN13383-1, Armourstone
- 13) 堤直人, 加藤敏朗, 北野吉幸 : 環境資材としての鉄鋼スラグの有効性について, ふえらむ, Vol.17, No.8, pp.9-19, 2012
- 14) Vsevolod Mymrin, Jacwueline C. Stella, Cristofer B. Scremim, Roberto C.Y. pan, Fillipe G. Sanches, Kirill Alekseev, Daniela E. Pedroso, Andrea Molinetti, Otavio M. Fortini : Utilization of sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material, *Journal of Cleaner Production*, 142, pp.4041-4049, 2017.
- 15) S. Lirer, B. Liguori, I. Capasso, A. Flora, D. Caputo : Mechanical and chemical properties of composite materials made of dredged sediments in a fly-ash based geopolymer, *Journal of Environmental management*, 191, pp.1-7, 2017.
- 16) Yun Tae Kim, J.Ahn, W. J. Han, M. A. Gabr : Experimental Evaluation of Strength Characteristics of Stabilized Dredged Soil, *JOURNAL OF MATERIALS IN ENGINEERING*, 22, pp.539-544, 2010
- 17) 野口孝俊, 渡部要一, 鈴木弘之, 奥信幸, 大和屋隆司, 渡邊雅哉 : 羽田空港 D 滑走路埋立部の施工と維持管理
- 18) Takahashi Tsuchida, Ali Porbaha, Nobuyuki Yamane : Development of a Geomaterial from Dredged Bay Mud, *JOURNAL OF MATERIALS IN ENGINEERING*, 13, pp.152-160, 2001
- 19) 一般社団法人 日本鉄鋼連盟 : 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き, pp.1-114, 2008.
- 20) 一般社団法人 日本鉄鋼連盟 : 転炉系製鋼スラグ 海域利用の手引き 別冊 転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法 技術資料, pp.1-78, 2008.
- 21) 田口博文, 永留健, 高石謙介, 森川正仁, 赤司有三, 上野雅明 : 保田沖海域におけるカルシア系改質材の適用例～藻礁石基盤材としての適用～, 第7回地盤工学会関東支部発表会, pp.78-81, 2010.
- 22) 山越陽介, 赤司有三, 小杉知佳, 横尾正義 : カルシア改質土による浅場造成, 新日鉄住金技報, Vol.399, pp.59-64, 2014
- 23) 田中裕一, 高将真, 今村正, 渋谷貴志, 山越陽介, 赤司有三, 北野吉幸, 菅野浩樹 : カルシア改質土による海面埋立, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) , Vol.70, No.2, pp.I_888-I_893, 2014.

- 24) カルシア改質土研究会：カルシア改質土 積算マニュアル,
- 25) 財団法人 港湾空間高度化環境研究センター：平成 21 年度環境技術実証事業 閉鎖性海域における水環境改善技術 実証試験結果報告書 製鋼スラグを用いた藻場造成・水質改善技術, pp.1-121, 2009.
- 26) 日本製鉄株式会社：NS スラッガーズ®日本製鉄の鉄鋼スラグ製品, pp.18, 2021
- 27) 一般社団法人 漁港漁場新技術研究会：水産公共関連民間技術確認審査・評価 報告書 カルシア改質技術, pp.1-58, 2017.
- 28) 日経コンストラクション：東予港中央地区岸壁(-7.5m)築造工事 鉄鋼スラグ用いたカルシア改質土 耐震強化岸壁の裏埋材としての活用, Vol.12, 2018.
- 29) 林誉命, 水口陽介, 佐々木実歩, 早川哲也, 寺島貴志, 緒方修, 山崎啓介, 赤司有三：浚渫土砂を活用した防波堤背後盛土の築造, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_546-I_551, 2020.
- 30) 赤司有三, 根木貴史, 樋口晃, 春日井康夫, 片桐雅明, 谷山健二, 田中睦, 平松敏和：カルシア改質土の法面勾配制御技術, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No2, pp.I_893-I_898, 2019.
- 31) 竹山佳奈, 泉水めぐみ, 西田浩太, 峯松麻成, 田中裕一, 江口信也, 野口孝俊：カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証～強度・形状特性の把握～, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I_894-I_904, 2019.
- 32) 松村聡, 水谷崇亮, 森川嘉之, 赤司有三, 本田秀樹, 清水雅浩：カルシア改質土と異種材料との境界における摩擦特性, 港湾空港技術研究所報告, Vol.59, No.2 pp.51-83, 2020.

第2章 カルシア改質土の特徴と実用化課題

2.1 カルシア改質土の強度発現の原理

鉄鋼スラグには高炉スラグと製鋼スラグの2種類が存在するが、カルシア改質材は電炉系を除く転炉系製鋼スラグを原料とし、成分管理と粒度調整が実施された材料である¹⁾。製鋼スラグの粒子内部には、製鋼工程の副原料として用いられる生石灰（エチレングリコールで抽出されるCaOで、以降、エチレングリコール抽出CaOと記載）が残存し、数%程度含有している²⁾³⁾。そのエチレングリコール抽出CaOからカルシウム成分がカルシア改質土の中で溶出し、浚渫土砂から溶出するシリカ成分と水和反応（ポズラン反応）を起こすことで、カルシア改質土は固化する⁴⁾⁵⁾⁶⁾。固化メカニズムとしては、軟弱地盤改良に用いられる固化材のうち、石灰系固化材と類似していると考えられる。

石灰系固化材の地盤改良における強度には、施工性の改善による締固め強度と化学的固化による強度の2種類が存在し、5つの反応メカニズムが存在する⁷⁾。その5つのメカニズムを表-2.1に示す。施工性の改善は、“消化吸水反応”と“イオン交換反応”の2つである。消化吸水反応は、生石灰が土中の水分と反応して消石灰が生成される際に水が水和水として取り込まれ、かつ発熱反応により水が蒸発する反応である。イオン交換反応は、土中の間隙水に溶解したカルシウムイオンが、土粒子表面のナトリウムイオン等とイオン交換し、土粒子表面の帯電状態が変わり、団粒化することで土の塑性指数が低下する反応である。カルシア改質土にも短期的な性状改善効果は見られるが、対象とする土が高含水比の浚渫土砂であるため、締固め施工を対象とした施工性の改善では無く、施工時の法面勾配の制御⁸⁾⁹⁾や海中投入時の濁り抑制¹⁰⁾に必要なワーカビリティとしての流動性の改善であり、地盤強度への直接的な寄与は限定的と考えられる。カルシア改質土における流動性改善のメカニズムは、カルシア改質材の吸水とカルシア改質材による粒度改善と言われている¹⁾が、この現象を明確化した実験等の知見は無く、石灰系固化材における2つの反応も寄与していると推察される。なお、カルシア改質土において、材料混練時に発熱反応を感じることは無いため、石灰系固化材のような消化吸水反応による施工改善はメカニズムとして期待できないと想定される。

表-2.1 石灰系固化材の固化メカニズム⁷⁾

分類	反応メカニズム
施工性の改善による 締固め強度	消化吸収反応
	イオン交換反応
化学的固化強度	エトリンサイト反応
	ポズラン反応
	炭酸化反応

一方、石灰系固化材の固化メカニズムにおける化学的固化は、“エトリンガイト反応”と“ポゾラン反応^{11),12),13)}”, “炭酸化反応”の3つに分類される。エトリンガイト反応は、石灰系固化材への石膏系材料の添加によるものであるが、カルシア改質材の反応はカルシウムの反応であり、石膏等の添加・含有は無い。なお、カルシア改質土の間隙水である海水成分の影響によるエトリンガイト等の生成については、固化に寄与している可能性が検討されている¹⁴⁾。ポゾラン反応は、粘土鉱物から溶出したシリカやアルミナと消石灰が化学的に結合し、水和化合物を生成して土粒子を凝結させる反応であり、カルシア改質土の主な反応と考えられている⁴⁾。木曾ら⁵⁾は、カルシア改質土の固化反応がポゾラン反応であることを示し、固化がカルシウム溶出量と含水比の比 Ca/w 及びシリカ溶出量と含水量の比 Si/w と相関があることを示している。Toda ら⁵⁾は、浚渫土砂と製鋼スラグ、及びその混合物のXRD分析から、浚渫土砂から溶出するシリカや製鋼スラグに含まれる消石灰から溶出するカルシウムが固化に寄与していることを示し、浚渫土砂中に含まれる非晶質シリカや混合材料中のpH状態が強度に与える影響を検討している。最後に、炭酸化反応は、長期的に土中に含まれる二酸化炭素又は炭酸ガスによって炭酸カルシウムを生成して固化する反応である。カルシア改質土は海水中で施工・活用されることが多いため、炭酸化による固化反応の寄与は小さいと想定される。

前述した5つの反応メカニズムは石灰系固化材の化学反応による作用であり、カルシア改質土においては、カルシア改質材から溶出するカルシウムによる化学反応である。前述では、石灰系固化材との類似点である化学反応による固化に着目してカルシア改質土の強度増進を分析したが、石灰系固化材とカルシア改質材の相違点としては、石灰系固化材が粉体であることに対してカルシア改質材は粒状材料であることである。つまり、カルシア改質土は、その構成として“固化した浚渫土砂 (= 固化土領域)”と“カルシア改質材 (= 骨材)”の2つに分けることができる。固化土領域の強度が高い場合、図-2.1に示すようにせん断時において、骨材同士の接触が無くても固化土領域に生じるせん断面に存在する骨材が引っ掛かりとなって、内部摩擦角が発揮されて荷重に抵抗すると想定される。

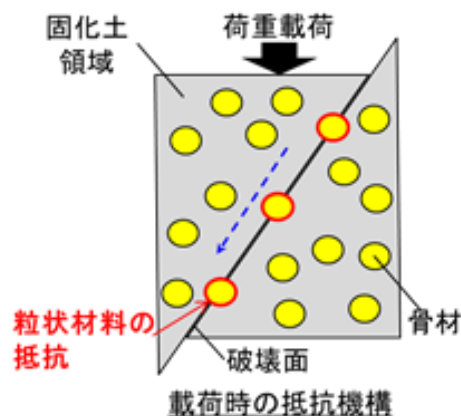


図-2.1 載荷時の骨材抵抗機構の概要図

以上をまとめると、カルシア改質土の強度発現の原理は、表-2.2 で整理される。

表-2.2 カルシア改質土の強度発現メカニズム

分類		石灰系固化材 反応メカニズム	カルシア改質土の 強度発現のメカニズム	視点
化学的 作用	土の 性状改善	消化吸収反応	—	
		イオン交換反応	未確認 (既往知見は粒度改善と吸水)	②
	化学的 固化強度	エトリンガイト 反応	— (海水影響あり)	
		ポゾラン反応	カルシア改質土の主反応	①
		炭酸化反応	—	
物理的作用		—	粒状材料の混合効果は 未確認	③

2. 2 カルシア改質土の強度発現における課題

2. 2. 1 化学的強度管理指標

2.1 より、石灰系固化材による地盤改良は含水比低減等による締固めによる強度発現も含めて 5 つの強度発現機構を有しているが、カルシア改質土はポゾラン反応が主な強度発現機構であり、実用化に向けてはカルシア改質材からのカルシウムと浚渫土砂からのシリカの反応の管理が重要となる。これに対して、前述のように固化メカニズムは明確になってきており、それに応じた必要最低限の材料規定や配合試験ルールは定まっている¹⁾。また、カルシア改質土の発現強度特性も徐々に明らかになってきている。強度発現特性や強度推定としては、以下の研究・知見がある。Cikmit ら¹⁵⁾は、ポゾラン反応による強度発現特性を「前期強度発現期」及び「後期強度発現期」と定義し、セメント固化処理土との比較を交えて、一軸圧縮強さや変形係数等の特性を整理している。佐藤ら¹⁶⁾は、ベンダーエレメント試験結果から、セメント固化処理土と同様にせん断剛性から一軸圧縮強さを推定することを試みている。平井ら¹⁷⁾は、浚渫土砂と製鋼スラグの実務における配合試験の実施方法として、乾燥質量比で一軸圧縮強さを整理することが有効であることを示し、強度発現には製鋼スラグの細粒分含有率が影響を与えることを示している。このような知見も踏まえて、2017 年にはマニュアル¹⁾が発刊され、カルシア改質土の実用化へ向けた固化の管理として表-2.3 に示す規定が定められている。しかし、カルシア改質土を工事として採用するにあたり、実務面では「対象となる浚渫土砂のカルシア改質土への適性判断」や「対象となる浚渫土砂に応じてカルシア改質材に要求される必要カルシウム量や最適配合率の設定」が不明確であり、現在はマニュアルに従い、複数回の配合試験や、配合試験における多数の試験水準の設定、また施工時の高頻度での強度品質管理の実施で対応しているのが実状である。

表-2.3 港湾・空港海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル¹⁾での規定

対象材料	規定内容
浚渫土砂	塑性指数 I_p を有すること。 (粘土鉱物を有することの規定)
カルシア改質材	エチレングリコール抽出 CaO が 1%以上。
カルシア改質土	配合試験による発現強度の確認。 なお、強度発現の不確実性への対応として、概略検討段階での予備配合試験を推奨。

カルシア改質土の強度予測の研究としては、小門ら¹⁸⁾が浚渫土中の Amorphous Silica と製鋼スラグ中の Portlandite が溶解して生成する C-S-H 量を化学反応式と化学平衡から算出し、強度と相関があることを示している。しかし、Amorphous Silica が C-S-H 生成量を支配するケースでは、一軸圧縮強さに対して C-S-H 生成量が高めに評価されることに加え、強度予測として C-S-H 生成量と一軸圧縮強さの相関は得られているものの、カルシア改質土の実用的な強度範囲である 100 kN/m² 近傍においては、予測精度が悪く、実用化には課題がある。また、Portlandite は XRD-Rietveld 解析による鉱物の同定・定量から求められており、工事における品質管理指標として用いることは難しい。

そこで、浚渫土砂から溶出するシリカやカルシア改質材から溶出するカルシウムについて、カルシア改質土の強度発現に対する評価指標を設定することを目的に、複数のシリカ溶出量が異なる浚渫土砂と複数のカルシウム溶出量が異なるカルシア改質材を用い、浚渫土砂から溶出するシリカ量がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を検討するとともに、シリカ溶出量と浚渫土砂の土質性状の関係について考察した。また、カルシア改質材から溶出するカルシウム量がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を、浚渫土砂から溶出するシリカ量との関係も含めて検討し、浚渫土砂の性状に応じたカルシア改質材の選定と配合割合等について考察した。ここで、小門らの取り組みと今回の取り組みの差異を表-2.4 に示す。

化学的強度管理指標の課題のまとめを表-2.5 に示す。表-2.5 中には、次節 2.2.2 で示す課題についても記載している。

表-2.4 小門らの取り組みと今回の取り組みの差異

		小門ら ¹⁸⁾ の取り組み	今回の取り組み
原材料 材料 に 対 す る 評 価	カルシア改質材から溶出するカルシウム量	カルシア改質材に含有する portlandite 量を定量分析して、それが配合における間隙水中に全溶解したと仮定して、間隙水中濃度の相当量を設定。	カルシア改質材から溶出するカルシウム量を溶出試験により求め、配合における間隙水中のカルシウム濃度に相当する量として設定。
	浚渫土砂から溶出するシリカ量	浚渫土砂から溶出するシリカ量を溶出試験により求め、配合における間隙水中のシリカ濃度に相当する量として設定。	
強度評価		設定した間隙水中のカルシウム濃度とシリカ濃度を絶対量として、化学反応式と化学平衡を用いて C-S-H 量を算定し、C-S-H 生成量にて強度を予測。	設定した間隙水中のカルシウム濃度とシリカ濃度を指標として、その一軸圧縮強さと共に多数の試験結果をデータベース化し、目標強度を得るために必要なカルシウム濃度とシリカ濃度を評価。

表-2.5 化学的強度管理指標に関する課題整理

	既往の知見	課題 (赤字は本論文での課題)
メカニズム解明	浚渫土砂: Si, Al成分溶出 カルシア改質材: Ca成分溶出 ⇒ 水和反応(CSH,Afm)で固化	浚渫土砂からのAl等の溶出成分の強度影響
評価指標	浚渫土砂: 塑性指数IPを有すること カルシア改質材: エチレングリコール抽出CaO, 粒度分布	浚渫土砂: Si成分溶出の試験方法 カルシア改質材: Ca成分溶出の試験方法 【2.2.2課題, 4章取り組み】
設計/施工計画	下記項目による配合試験 浚渫土砂: 含水比 カルシア改質材: 混合率	Si成分溶出量とCa成分溶出量による強度発現予測手法 【2.2.1課題, 3章取り組み】
施工管理	1回/日の頻度での強度管理	Si成分溶出量とCa成分溶出量の管理値設定方法

2. 2. 2 化学的強度管理指標を求める試験手法

最近ではカルシア改質土の強度発現の予測や管理を目的とした研究^{6) 18) 19)}も進んでおり、浚渫土砂のシリカ成分とカルシア改質材のカルシウム成分について、その含有量や溶出量と強度発現の関係も明らかとなっており、それらの規定や研究で示されている浚渫土砂のシリカ成分とカルシア改質材のカルシウム成分の測定法を表-2.6 に示す。前述のようにカルシア改質材の原材料である転炉系製鋼スラグには、製鋼工程の副原料として用いられる生石灰（エチレングリコール抽出 CaO）が残存して数%程度含有しており、カルシア改質土の強度発現に寄与している⁵⁾。また、浚渫土砂から溶出するシリカ成分は、地域によって差があるものの生物や火山ガラス由来の非晶質相からの溶出が強度に与える影響が大きいことが判ってきている⁶⁾。

表-2.6 固化成分の測定方法

	カルシア改質材の カルシウム成分	浚渫土砂の シリカ成分
マニュアル ¹⁾	エチレングリコール抽出 CaO が 1%以上。(粒度分布影響あり)	塑性指数 IP を有すること。(粘土鉱物を有することの規定)
Toda らの 研究 ⁶⁾	—	凍結乾燥後に摩砕した浚渫土 50 mg を 50 ml 遠沈管に入れた後、10% H_2O_2 5ml を添加し 30 分静置。1M HCl 5 ml を添加し、10 分間分散した後に、再度 30 分静置。超純水 20 ml を添加し、3000 rpm で 8 分間遠心分離後上澄みを捨て、60°C で 12 時間乾燥。次に 2M Na_2CO_3 40 ml を遠沈管に添加し、分散後に 85°C で 5 時間静置。3000 rpm で 8 分間遠心分離し、上澄みのシリカ濃度を測定。求めたシリカ濃度から浚渫土 1 g-dry 当たりの Amorphous Silica 量を求める。
小門らの 研究 ¹⁸⁾	カルシア改質材に含有する portlandite 量を XRD-Rietveld 解析により定量分析して、それが配合における間隙水中に全溶解と仮定。	

ここで、表-2.6 の試験方法で課題となるのは、実施工における工事品質管理への適用性である。カルシア改質材のカルシウム成分について、マニュアルで定められているエチレングリコール抽出 CaO の測定を分析会社へ依頼すると約 2 週間程度を要する。加えて、もう一つの強度影響因子である粒度分布の測定も必要となる。研究で用いられている XRD-Rietveld 解析も、通常の工事管理や製品出荷管理に使える分析ではない。浚渫土砂のシリカ成分については、マニュアル規定は性状規定のみであり、研究で用いられている方法¹⁸⁾は

手順が多く時間がかかる分析であることから、工品質管理への適用を考慮すると実用的ではない。

そこで、カルシア改質土の強度性能確保を目的として、原材料であるカルシア改質材から溶出するカルシウム成分と浚渫土砂から溶出するシリカ成分について、工事における品質管理を目的とした試験方法について検討を行った。課題のまとめを表-2.5に示す。

2. 2. 3 浚渫土砂の性状改善のメカニズム解明と実用化

カルシア改質土は、浚渫土砂から溶出するシリカ成分とカルシア改質材から溶出するカルシウム成分が水和反応して時間経過と共に固化する性質を有するが、混合直後の水和反応が起こっていないフレッシュな状態においても、カルシア改質材の吸水効果や粒度改善効果等により粘性が増大してフレッシュなカルシア改質土の流動性が低下する特性があることが知られている¹⁾。この特性を活かして、施工時の法面勾配形成^{8), 9)}や濁り抑制^{10), 20)}の実用化研究が進んでおり、最近では濁り抑制が必要となる水中盛土⁶⁾等への適用検討も進んでいる状況である。

過去の研究例^{8), 9), 10), 21)}では、フレッシュなカルシア改質土の流動性低下はスランプ値（JIS A 1106）を指標として表現できることが示されているが、その流動性低下のメカニズムを検討した事例は無く、対象となる浚渫土砂や混合するカルシア改質材が変化したときの流動性低下の挙動は把握できていない。カルシア改質土の材料混合直後の流動性低下のメカニズムとしては、文献1)等でカルシア改質材による吸水効果と粒度改善効果と言われているが、その効果を具体的に確認した事例は無く、表-2.2におけるイオン交換反応も期待されると考えられる。そこで、カルシア改質土の材料混合直後の流動性低下のメカニズムと濁り抑制に関する特性把握について検討することとした。

また、フレッシュなカルシア改質土の流動性低下をスランプ値（JIS A 1106）を指標として表現することについて、その特性が用いられる施工時の形成勾配の検討・管理については、材料である浚渫土砂やカルシア改質材の差異はもちろん、施工時の投入方法（トレミーやグラブバケット等）や規模、投入高さ、グラブバケット形状等の影響も受けると考えられる。しかしながら、現在の知見で明らかとなっているのは“フレッシュなカルシア改質土におけるスランプ値と流動性低下の相関関係”のみであり、施工現場毎の条件に応じた施工検討ができる技術レベルには達していない。そこで、近年に発達している流動解析技術を用いて、カルシア改質土の流動性評価が必要となる施工検討への適用性について検討することとした。

浚渫土砂の性状改善のメカニズム解明と実用化に関する課題のまとめを表-2.7に示す。

表-2.7 浚渫土砂の性状改善のメカニズム解明と実用化に関する課題整理

	既往の知見	課題（赤字は本論文での課題）
メカニズム解明	流動性低下要因 ⇒ カルシア改質材混合による 「粒度改善+吸水」の効果	既往の知見が確認された事例が無い（想定のみ）。 石灰改良等と同様のイオン交換反応の影響は未確認。
評価指標	スランプ値で評価可能 (室内試験, フィールド施工試験)	粘性流体(ビンガム流体)として評価
設計/施工計画	施工計画時に, スランプで濁り抑制を評価。	多種多様な浚渫土砂に対して, 設計や施工計画を実施する方法。 (スランプ~濁り抑制, スランプ~形成勾配※シミュレーション)
施工管理	小規模施工試験での濁り抑制と形成勾配の確認	実規模施工での実証 (濁り抑制, 形成勾配)

【2.2.3課題, 5章取り組み】

2. 2. 4 強度発現における粒状材料の混合効果

これまで、水和固化によるカルシア改質土の強度発現性状について様々な研究^{5), 6), 15), 16), 17)}が実施されており、その中でカルシア改質土は“粘性材料（内部摩擦角=0）”として整理¹⁾されている。この理由は、粘性土の分類である浚渫土砂に対して、カルシア改質材（骨材）の混合率が容積比で30%程度であることから、骨材同士のかみ合わせが無いと判断されているためである。よって、これまでの研究では、カルシア改質土の三軸試験による内部摩擦角評価の事例は少ない状況であったが、最近の研究では柿原ら²²⁾が圧密非排水せん断試験による評価を試みている。

カルシア改質土は、その構成として“固化した浚渫土砂（=固化土領域）”と“カルシア改質材（=骨材）”の2つに分けることができる。固化土領域の強度が高い場合、図-2.1に示すようにせん断時において、骨材同士の接触が無くても固化土領域に生じるせん断面に存在する骨材が引っ掛かりとなって、荷重に抵抗すると想定される。このような考えから、杉村ら²³⁾はピーク強度後の地盤材料の粘り強さを研究している。

一方、カルシア改質土のピーク強度に至る過程において、骨材がせん断強度に与える影響については未解明の状況である。カルシア改質土が適用条件によってc-φ材としての特性を有するのであれば、カルシア改質土の適用用途が更に広がることが期待される。そこで、カルシア改質土における骨材抵抗がせん断強度に及ぼす影響について検討することとした。強度発現における粒状材料の混合効果に関する課題のまとめを表-2.8に示す。

表-2.8 強度発現における粒状材料の混合効果に関する課題整理

	既往の知見	課題（赤字は本論文での課題）
メカニズム解明		カルシウム改質材(粒状材料)を混合することによる内部摩擦角の評価 【2.2.4課題, 6章取り組み】
評価指標	内部摩擦角=0の粘性材料	化学的固化強度と内部摩擦角の関係評価 (例: q_u ~ 圧密降伏応力 ~ 内部摩擦角の関係)
設計/施工計画		多種多様な浚渫土砂に対して, 設計や施工計画を実施する方法。 (内部摩擦角の設計反映, 土圧設計)
施工管理		実規模施工での実証 (実プロジェクトでの土圧計等を用いた評価)

2. 3 研究課題のまとめ

2.2 で整理した研究課題に対するまとめと本論文の章構成を表-2.3 に示す。

表-2.3 検討課題のまとめ

分類		石灰系固化材 反応メカニズム	カルシウム改質土の 強度発現のメカニズム	視点	研究内容と 章構成
化学的 作用	土の 性状改善	消化吸収反応	—		
		イオン交換反応	未確認 (既往知見は粒度改善と吸水)	②	第5章 流動性低下の メカニズム解明と 解析検討の提案
	化学的 固化強度	エトリンサイト 反応	— (海水影響あり)		
		ポゾラン反応	カルシウム改質土の主反応	①	第3章 強度へのCaとSiの 相互影響評価 第4章 評価の試験法提案
		炭酸化反応	—		
物理的作用		—	粒状材料の混合効果は 未確認	③	第6章 粒状材料の 強度影響評価

【本章の参考文献】

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル pp.1-1 - 9-16, 2017
- 2) Yildirim I.Z. and Prezzi M.: Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag, Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering, Vol.2011, Article ID 463638, 13p
- 3) Yi H., Xu G., Cheng J., Wang J., Wan Y. and Chen H.: An overview of utilization of steel slag, The 7th International Conference on Waste Management and Technology, Procedia Environmental Sciences 16, pp.791-801, 2012
- 4) 浅賀喜与志, 亀谷健二, 二塚友也：製鋼スラグと浚渫土の水和反応, 第 35 回セメント・コンクリート研究討論会, pp.7-12, 2008
- 5) 木曾英滋, 辻井正人, 伊藤公夫, 中川雅夫, 五明美智男, 永留健：転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土の固化改良技術, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.327-332, 2008.7
- 6) Toda, K., Sato, H., Weerakoon, N., Otake, T., Nishimura, S. and Sato, T.: Key Factors Affecting Strength Development of Steel Slag-Dredged Soil Mixtures, Minerals, 8(5):174, 16p., 2018
- 7) 黒澤功, 小嶋利司：講座 土を固める技術の動向 2.セメント・石灰で固める, 地盤工学会誌, Vol.67, No.10, Ser.No.741, pp.44-45, 2019
- 8) 赤司有三, 根木貴史, 樋口晃, 春日井康夫, 片桐雅明, 谷山健二, 田中睦, 平松敏和：カルシア改質土の法面勾配制御技術, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No2, pp.I_893-I_898, 2019
- 9) 竹山佳奈, 泉水めぐみ, 西田浩太, 峯松麻成, 田中裕一, 江口信也, 野口孝俊：カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証～強度・形状特性の把握～, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, pp.899-904, 2019
- 10) 泉水めぐみ, 竹山佳奈, 峯松麻成, 西田浩太, 江口信也, 田中裕一, 野口孝俊：カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証～発濁特性の把握～, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, pp.887-892, 2019
- 11) Bell F.G., Lime stabilization of clay minerals and soils, Engineering Geology 42, pp.223-237, 1996
- 12) Akula P. and Little D.N.: Analytical tests to evaluate pozzolanic reaction in lime stabilized soils, MethodsX 7, 2020, 100928, 9p.
- 13) Ghobadi M.H., Abodilor Y., Babazadeh R.: Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters, Bull Eng Geo Environ, 73, pp.611-619, 2014
- 14) 特開2016-204852
- 15) Cikmit A.A., 土田孝, 姜庚吾, 嘉浩靖, 本田秀樹, 湯新, 製鋼スラグを用いて固化処理した浚渫海成粘土の強度特性：地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.35, No.1, 2017
- 16) 佐藤令菜, 西村聡, 戸田賀奈子, 佐藤勉, 新井悠, カルシア改質浚渫土の早期強度・剛性発現特性とその解釈：地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol.56, pp.15-20, 2016.1

- 17) 平井壮, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 川端雄一郎, 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件がその力学特性に与える影響について：港湾空港技術研究所報告, Vol.51, No.3, pp.77-106, 2012,12
- 18) 小門武, 須田大作, 赤司有三:カルシア改質土の強度予測モデルに関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.76.4, pp.405-410, 2020
- 19) 赤司有三, 山越陽介, 小門武, 戸田賀奈子, 勝見武：カルシア改質土の強度発現における浚渫土砂と転炉系製鋼スラグの相互影響の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.3, pp.179-190, 2021.
- 20) 山越陽介, 赤司有三, 小杉知佳, 横尾正義：カルシア改質土による浅場造成, 新日鉄住金技報, Vol.399, pp.59-64, 2014
- 21) 林誉命, 水口陽介, 佐々木実歩, 早川哲也, 寺島貴志, 緒方修, 山崎啓介, 赤司有三：浚渫土砂を活用した防波堤背後盛土の築造, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_546-I_551, 2020.
- 22) 柿原結香, 菊池喜昭, 野田翔兵, 高田明旺, 山口天宗, 降旗咲乃, 吉川友孝, 転炉系製鋼スラグ混合土のせん断強度発現に及ぼす物理・化学的要因：土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.77, No.2, pp.I_463-I_468, 2021.
- 23) 杉村裕二, 篠崎晴彦, 赤司有三, 松村聡, 水谷崇亮, 森川嘉之：製鋼スラグと浚渫土を混合した粘り強い地盤材料の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.77, No.2, pp.I_427-I_432, 2021.

第3章 浚渫土砂とカルシア改質材の強度発現に対する相互影響評価

3.1 概要

浚渫土砂から溶出するシリカやカルシア改質材から溶出するカルシウムについて、カルシア改質土の強度発現に対する評価指標を設定することを目的に、複数のシリカ溶出量が異なる浚渫土砂と複数のカルシウム溶出量が異なるカルシア改質材を用い、浚渫土砂から溶出するシリカ量がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を検討するとともに、シリカ溶出量と浚渫土砂の土質性状の関係について考察する。また、カルシア改質材から溶出するカルシウム量がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を、浚渫土砂から溶出するシリカ量との関係も含めて検討し、浚渫土砂の性状に応じたカルシア改質材の選定と配合割合等について考察する。

3.2 実験概要

3.2.1 溶出試験方法

(1) 浚渫土砂からのシリカ成分の溶出試験方法

浚渫土砂から溶出するシリカ成分は、マニュアルでは粘土鉱物から溶出する前提となっているが、Toda ら¹⁾や Kakihara ら²⁾の研究では、珪藻等に起因する生物由来や火山ガラス由来の非晶質相からのシリカ溶出がカルシア改質土の強度発現に大きな影響を与えていることを示している。そこで、本研究では、文献^{1),3)}に示した方法で溶出するシリカ成分を抽出した。その方法を以下に示す。

- 1) 浚渫土を凍結乾燥。
- 2) 90秒間乳鉢で摩砕した浚渫土 50 mg を 50 ml 遠沈管に入れた後、10% H₂O₂ 5 ml を添加し 30分静置。
- 3) 1M HCl 5 ml を添加し超音波分散機で 10分分散した後に、30分静置。
- 4) 超純水 20 ml を足し、3000 rpm で 8分遠心分離。
- 5) 上澄みを捨てた後、60°Cの恒温炉で一晩放置し湿り気が残る程度に乾燥。
- 6) 翌日、2M Na₂CO₃ 40 ml を遠沈管に添加し、超音波分散機で十分に分散させた後、85°Cの恒温炉に 5時間静置。(2時間後、4時間後に取り出し、攪拌。)
- 7) 5時間経過後、3000 rpm で 8分間遠心分離し、上澄みのシリカ濃度をモリブデンブルー法で測定。

(2) カルシア改質材からのカルシウム成分の溶出試験方法

カルシア改質材の有姿から溶出するカルシウム成分を測定する方法として、環境庁告示第46号で定められている溶出試験方法を参考とし、溶媒を人工海水に、試料を有姿の粒度分布に、振とう時間を30分間へ変更する方法を用いた。有姿の粒度分布で試験を実施するのは、カルシウムが溶出する比表面積を考慮するためである。具体的な試験方法を以下に

示す (図-3.1)。ここで、溶媒に用いた人工海水の成分を表-3.1 に示す。

- 1) 試料調整として、カルシア改質材 5 kg を風乾し、円すい四分法にて縮分し、有姿で約 400g を採取。
- 2) 溶出試験として、コック付き 10L ポリビンに試料と溶媒との重量比が 1:10 の割合となるように人工海水を添加し、調整したカルシア改質材試料を添加した後、振とう機にて 30 分間連続して振とう。
- 3) 試料液の一部を孔径 0.45 μm のメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過し、ろ過液を検液とする。また、試料液の一部を分取し、pH 測定。
- 4) Ca 測定として、ICP 発光分光分析装置を用いて、検液の Ca 濃度を測定し、検液の Ca 濃度から溶媒の人工海水の Ca 濃度を差し引き、溶存 Ca 量を求める。

また、カルシア改質材から溶出するカルシウム成分に加えて、カルシア改質材中に含有する CaO 量の測定も実施した。エチレングリコール抽出 CaO は、日本鉄鋼協会⁴⁾で定められた方法⁴⁾で分析でき、エチレングリコールに抽出されるカルシウムをスラグ中の酸化物濃度に換算したものである。ここで、エチレングリコールで抽出されるカルシウムには、フリーライム (f-CaO) および水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) の 2 種類が存在する。一般に f-CaO は水と反応して速やかに Ca(OH)₂ に変化するため、カルシア改質土における Ca の溶出速度論を議論する際には、カルシア改質材中に含有される f-CaO と Ca(OH)₂ を区別せずに、f-CaO と Ca(OH)₂ の水への溶解性には大きな差異が無いと考え、マニュアル⁵⁾ではエチレングリコールで抽出されたものを広義の f-CaO と定義している。以前はエチレングリコールで抽出されたカルシウムを f-CaO と Ca(OH)₂ に分ける分析方法は無かったが、2014 年に日本鉄鋼協会にて推奨法⁴⁾が確立したことから、本稿では f-CaO と Ca(OH)₂ を区別して示すこととした。なお、日本鉄鋼協会推奨法の分析方法の概要を以下に示す。

- 1) エチレングリコールで試料中のフリーライムおよび水酸化カルシウムを抽出し、カルシウム濃度を ICP 発光分光分析法又はフレイム原子吸光分析法で定量し、フリーライム + 水酸化カルシウムの含有率に換算。
- 2) 試料を熱重量測定分析により、400 °C 付近の質量減少を Ca(OH)₂ の分解に伴う脱水として減量を測定し、Ca(OH)₂ の含有率に換算。
- 3) f-CaO はエチレングリコール抽出のものから Ca(OH)₂ を差し引くことで算出。

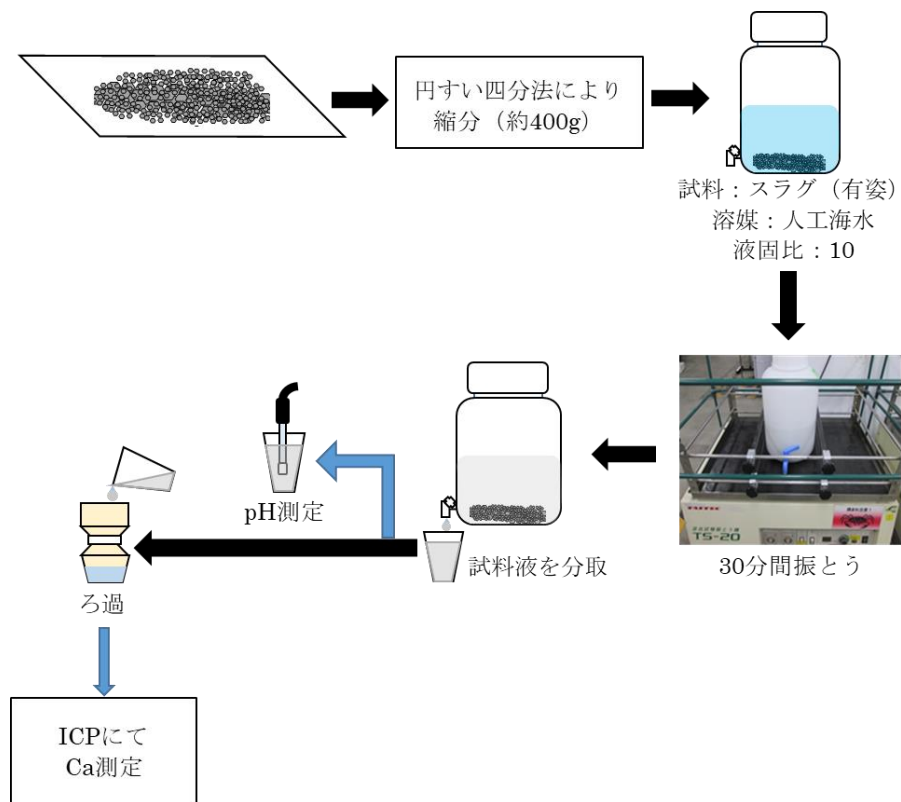


図-3.1 カルシウム溶出試験方法人工海水の成分分析結果

表-3.1 人工海水の成分分析結果

pH	EC μS/cm	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	C ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
8.17	27,900	390	1,300	12,000	420	20,000	2,600

3. 2. 2 材料

(1) 浚渫土砂

11 港湾で採取された 15 種類の浚渫土砂を試験に用いた。土質性状と溶出シリカ量を表-3.2 に示す。試験時の含水比調整については後述する。

表-3.2 浚渫土砂の土質性状

浚渫土 名称	土粒子 密度 (g/cm ³)	原泥 含水比 (%)	液性 限界 (%)	塑性 指数	粒度分布 (%)				強熱 減量 (%)	シリカ 溶出量 (mg/g)
					礫	砂	シル ト	粘土		
HH-1	2.650	59.8	57.5	22.8	0.0	14.5	59.3	26.2	6.5	74
HH-2	2.655	51.2	57.5	22.7	0.0	13.7	62.6	23.7	6.0	58
HH-3	2.647	56.0	53.2	17.2	12.2	14.4	55.3	18.1	—	50
IK-1	2.708	32.1	NP	—	0.5	73.2	17.3	9.0	—	46
CC-1	2.645	57.5	43.4	10.8	0.0	52.5	33.0	14.5	—	48
TA-1	2.685	91.6	69.1	33.2	0.0	17.1	44.2	38.7	—	70
NS-1	2.691	139.3	93.2	59.3	0.0	5.0	60.0	35.0	9.8	66
NN-1	2.676	53.9	43.8	18.7	1.0	13.0	56.0	30.0	5.1	34
WW-1	2.715	41.1	31.1	6.9	0.3	42.5	39.4	17.8	—	25
ST-1	2.810	52.6	37.2	12.0	0.0	6.0	79.3	14.7	—	21
ST-2	—	61.6	—	—	—	—	—	—	—	28
YS-1	2.721	84.7	81.1	47.8	0.2	24.3	27.6	47.9	10.5	65
YS-2	2.697	—	82.9	55.9	0.2	6.5	29.2	64.1	—	56
FH-1	2.671	105.9	82.4	45.1	7.1	7.5	67.2	18.2	11.8	56
ON-1	2.683	43.1	63.4	35.1	2.1	36.3	24.0	37.6	6.5	52

(2) カルシア改質材

試験に用いたカルシウム溶出量が異なる 45 種類のカルシア改質材の性状を、表-3.3 に示す。また、C-1 を除く 44 種類の粒度分布を図-3.2 に示す。

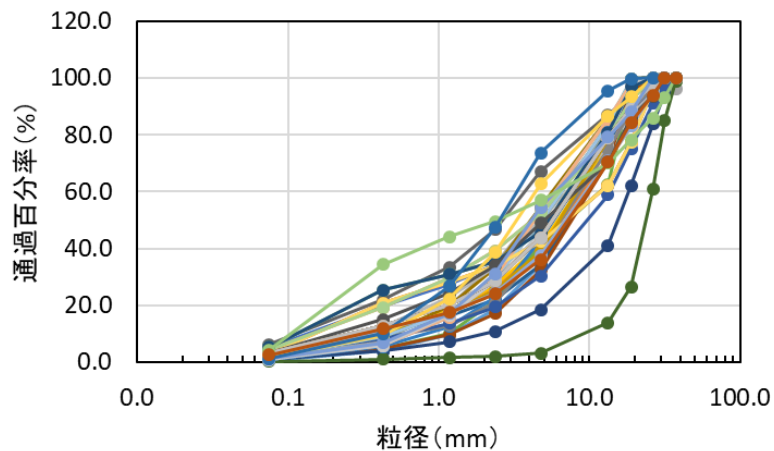


図-3.2 実験に用いたカルシア改質材の粒度分布

表-3.3 カルシア改質材の性状

種類	表乾密度 (g/cm ³)	f-CaO 量 (%)	Ca(OH) ₂ 量 (%)	カルシウム溶出量 (mg/g) ※()は pH
A-1	3.39	0.6	0.2 未満	1.0 (10.24)
A-2	3.44	0.5	0.2 未満	1.4 (10.25)
B-1	3.18	0.7	0.2	1.4 (10.14)
B-2	3.33	4.7	1.9	6.9 (10.28)
B-3	2.89	6.6	1.3	3.9 (10.22)
B-4	3.18	1.0	0.3	1.6 (10.02)
B-5	3.33	5.6	1.8	5.7 (10.22)
C-1	2.80	2.1	5.9	8.4 (10.21)
C-2	3.21	—	—	7.7 (10.20)
C-3	3.19	3.4	2.9	17.5 (10.48)
C-4	3.18	3.2	1.9	6.0 (10.33)
C-5	3.18	4.2	1.4	5.8 (10.23)
C-6	2.97	4.2	1.6	16.5 (11.08)
C-7	2.99	3.4	2.8	20.4 (11.62)
C-8	3.32	2.4	0.2 未満	2.9 (10.11)
C-9	3.23	—	—	6.1 (10.20)
C-10	3.14	—	—	9.7 (10.28)
C-11	3.06	—	—	12.6 (10.42)
C-12	2.97	4.2	1.6	16.5 (11.08)
C-13	2.88	4.8	1.8	20.4 (11.86)
C-14	3.24	3.9	3.6	8.5 (10.27)
D-1	2.92	—	—	2.4 (9.99)
D-2	2.92	1.5	0.3	3.0 (10.26)
D-3	2.92	3.1	0.5	3.2 (10.10)
D-4	3.16	6.4	2.3	11.6 (10.43)
D-5	3.16	5.7	3.2	10.7 (10.23)
E-1	3.15	0.6	0.2 未満	0.9 (10.19)
E-2	3.18	2.3	1.1	5.9 (10.24)
E-3	3.18	6.3	2.3	8.4 (10.31)
E-4	3.09	6.6	2.8	21.3 (12.03)
E-5	3.59	2.2	1.8	9.7 (9.97)
F-1	2.74	—	—	22.3 (12.21)
F-2	3.55	4.2	0.4	2.0 (10.26)
N-1	3.23	3.3	1.4	8.2 (10.15)
N-2	3.27	2.5	0.5	3.4 (10.10)
N-3	3.22	1.5	0.4	4.1 (10.10)
G-1	2.98	—	—	2.2 (10.15)
G-2	3.30	—	—	2.3 (9.97)
G-3	3.27	5.6	0.9	4.9 (10.15)
G-4	3.33	5.7	0.7	2.9 (10.19)
G-5	3.33	3.6	1.0	2.3 (10.15)
G-6	3.20	7.4	0.2	2.6 (10.23)
H-1	3.11	—	—	1.7 (9.84)
H-2	3.30	3.4	0.5	2.4 (10.09)
H-3	2.68	0.2 未満	0.2 未満	0.4 (8.94)

3. 2. 3 強度発現特性の把握

(1) 概要

浚渫土砂から溶出するシリカ成分とカルシア改質材から溶出するカルシウム成分が、カルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を調査するため、表-3.4 に示す 3 シリーズの強度試験を実施した。ここで、試験に用いた浚渫土砂の含水比は表-3.1 に示す人工海水を用いて調整し、カルシア改質材は表乾状態のものを使用して供試体の作製を行った。浚渫土砂とカルシア改質材をハンドミキサーで約 2 分間混合し、直形 100 mm、高さ 200 mm のプラスチックモールドに充填した。1 回の混練作業は約 30 kg で実施した。充填は、3 層に分けてタッピングしながら供試体内に空隙が生じないように行った。試料充填後、モールド上面をラップで密封し、20°Cの恒温室で養生を実施した。一軸圧縮強さの測定は材令 28 日で行い、1つの条件につき 3 本の供試体で試験を行って、その平均値を一軸圧縮強さとした。

表-3.4 実験シリーズ

	検討内容
Series 1	浚渫土砂から溶出するシリカ量がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を検討。
Series 2	カルシア改質材から溶出するカルシウム量やその配合割合がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を、浚渫土砂からの溶出シリカ量の大小に応じて検討。
Series 3	浚渫土砂から溶出するシリカ量と、カルシア改質材から溶出するカルシウム量が、カルシア改質土の強度発現に及ぼす相互影響を検討。

(2) シリカ成分影響に関する強度試験 (Series1)

浚渫土砂から溶出するシリカ量がカルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を調査するために、土質特性や溶出シリカ量が異なる 10 種類の浚渫土砂にカルシア改質材を混合した時の一軸圧縮強さを求める試験を実施した。調泥含水比の幅は、24.6%～139.8%である。カルシア改質材の選定においては、カルシウム溶出量が小 (2.2～3.0 mg/g)・中 (4.9～6.1 mg/g)・大 (6.9～8.4 mg/g) の 3 水準に区分できるように選定した。試験に用いた浚渫土砂の調泥含水比と、その浚渫土砂に対して混合したカルシア改質材の種類を表-3.5 に示す。ここで、カルシア改質土におけるカルシア改質材の混合率は、容積混合率で 30vol%とした。

表-3.5 Series 1 に用いた浚渫土砂性状とカルシア改質材種類

浚渫土 名称	調泥含水比 (%) ※()内は液性限界比	使用カルシア改質材
HH-1	59.8 (1.04 原泥), 74.8 (1.3), 86.3 (1.5)	B-2, C-4, D-2, E-2, G-4, G-6
HH-3	70.4 (1.32)	C-8, C-9
CC-1	59.3 (1.37)	C-8, C-9
NS-1	100.0 (1.07), 139.3 (1.49 原泥), 139.8 (1.5)	C-1, C-2, D-1, G-1
NN-1	99.5 (2.27)	C-1
ST-1	24.6 (0.66), 31.2 (0.84), 83.5 (2.24)	N-1, G-2, G-3, H-2
ST-2	84.3	N-1, G-3, H-2
YS-1	99.9 (1.23), 105.0 (1.3)	B-2, C-1, C-4, D-2, E-2, G-3, G-6
FH-1	100.6 (1.22)	C-1
ON-1	99.8 (1.57)	C-1

(3) カルシウム成分影響に関する強度試験 (Series2)

カルシア改質土の強度発現におけるカルシア改質材からのカルシウム成分供給が強度発現に与える影響を調査するため、表-3.6 に示すように、カルシウム溶出量が異なる 24 種類のカルシア改質材と、含水比 74%~105%程度でシリカ溶出量が異なる 5 種類の浚渫土砂を用いて、カルシア改質土の一軸圧縮強度試験を実施した。なお、浚渫土砂は 3 港湾から採取されたものであり、HH-1 と HH-2、及び ST-1 と ST-2 は同じ港湾から採取された浚渫土砂である。カルシア改質材の混合量は、容積混合率で 30vol%を基本とし、浚渫土砂 HH-2 については容積混合率 20vol%の強度試験を実施した。ここで、カルシア改質土の固化は、セメントの固化反応と同様に含水比の影響を受けることが判っている⁵⁾。また、セメント固化処理土と同様に、土の含水影響の指標として含水比と液性限界の比でも評価される⁵⁾。そこで、YS-1 と HH-1 については、含水比はそれぞれ 105.0%と 74.8%であるが、含水比と液性限界の比を 1.3 としている。また、ST-1 と ST-2 については、実験用に調泥したのではなく、プロジェクトへの適用性判断のために実施した試験のデータを整理した結果である。ST-1 及び ST-2 の浚渫土砂の採取は、ダイバーが水中に潜って採取しているため、海水も一部混ざって採取している。表-3.2 に示す含水比は、採取した浚渫土砂において、容器の中で浚渫土砂と海水が分離していたものから海水を除いて分析した結果である。一方、本試験に用いた表 9 の調泥含水比は、その容器中の海水と浚渫土砂を混合した材料の含水比であり、ST-1 は 83.5%、ST-2 は 84.3%であった。ST-2 の液性限界は未測定であるが、ST-1 の含水比と液性限界の比は 2.2 であった。

表-3.6 Series 2 に用いた浚渫土砂性状とカルシア改質材種類

浚渫土 名称	調泥含水比 (%) ※()内は液性限界比	使用カルシア改質材	
		改質材 30vol%	改質材 20vol%
HH-1	74.8 (1.3)	A-1, A-2, B-1, B-2 B-3, C-4, D-2, D-4 E-1, E-2, F-2, G-6 H-3	
HH-2	74.0 (1.29)		B-4, B-5, C-5, D-3 D-5, E-3, G-5
ST-1	83.5(2.24)	C-3, N-1, G-3, H-2	
ST-2	84.3	C-3, N-1, G-3, H-2	
YS-1	105.0 (1.3)	A-1, A-2, B-1, B-2 B-3, C-4, D-2, D-4 E-1, E-2, F-2, G-6 H-3	

(4) シリカ成分とカルシウム成分の相互影響試験 (Series3)

これまで筆者らが収集した表-3.2 に示す 10 港湾 15 種類の浚渫土砂について調査したカルシア改質土の一軸圧縮強さについて、浚渫土砂からの溶出シリカ量とカルシア改質材からのカルシウム溶出量との関係を整理した。Series3 の整理には、Series 1 及び Series 2 のデータとは別に、表-3.7 に示す試験ケースの結果を加えている。なお、この試験結果の整理には、プロジェクトへの適用性判断のために実施した試験のデータを整理した結果も含んでいる。したがって、調泥含水比はプロジェクトで求められる含水比に応じて調泥したものも含んでいる。その中には、前述のように、現地で浚渫土砂を採取する際に容器内に混ざった海水の混合や、試験タイミングの違いで容器ごとに異なる含水比の違いも含まれている。

表 10 Series 3 に用いた浚渫土砂性状とカルシア改質材種類

浚渫土 名称	調泥 含水比 (%)	使用カルシア改質材			
		改質材 20vol%	改質材 25vol%	改質材 30vol%	改質材 35vol%
HH-1	59.8	G-4	G-4		
	74.8	G-4	G-4		
	86.3	G-4	G-4		
HH-2	65.5	G-5			
	73.8	B-5 , C-5 D-5			
	74.0	B-4 , D-3 , E-3			
	74.3	G-5			
HH-3	69.8			C-6 , C-7	
	70.4			C-10 , C-11 , C-12 , C-13	
IK-1	42.4				N-2 , N-3
CC-1	59.3			C-10 , C-11 , C-12 , C-13	
	59.9	C-6 , C-7		C-6 , C-7	
TA-1	84.5			C-14	C-14
	90.7			C-14	
	96.7			C-14	
	99.5			C-14	C-14
	104.5			C-14	
	114.2			C-14	
	114.8			C-14	C-14
	173.2			C-14	
	201.1			C-14	
NS-1	139.3			F-1 , H-1	
	139.8			F-1 , H-1	
WW-1	42.3			E-4 , E-5	
ST-1	28.1		G-2		

3.3 試験結果と考察

3.3.1 浚渫土砂からのシリカ溶出量が強度発現に及ぼす影響

Series1 の試験について、横軸に浚渫土砂からのシリカ溶出量 (mg/g) にカルシア改質土配合における単位容積当たりの土分乾燥重量を乗じて、含水比影響を考慮するために単位容積当たりの含水量で除したもの（以降、“間隙水に対するシリカ濃度”と記載）を図-3.3 に示す。図-3.3 では、カルシア改質材からのカルシウム溶出量に応じて、溶出小 (2.2~3.0 mg/g)、溶出中 (4.9~6.1 mg/g)、溶出大 (6.9~8.4 mg/g) の3ケースで整理している。ここで、一軸圧縮強さは、28日養生後の試験結果である。図-3.3より、カルシア改質材から溶出するカルシウム量が6.9~8.4 mg/gと大きい溶出大のケースについては、間隙水に対するシリカ濃度が多くなると、発現するカルシア改質土の一軸圧縮強さも大きくなる傾向が確認できる。つまり、カルシア改質土の強度発現は、浚渫土砂から溶出するシリカ量の影響も大きく、その影響程度は3.2.1で示したような溶出試験の値を指標として活用できると考えられる。なお、この特性は小門ら⁶⁾の Amorphous Silica が C-S-H 生成量を支配するケースに相当すると考えられる。一方、図-3.3のカルシウム溶出量が溶出小 (2.2~3.0 mg/g) のケースでは、間隙水に対するシリカ濃度が増加しても Ca 大ほどのカルシア改質土の強度増進は確認できない。これは、カルシア改質土の固化反応であるポゾラン反応において、シリカ量に対するカルシウム不足の状態であると推察される。図-3.3のカルシウム溶出量が溶出中 (4.9~6.1 mg/g) のケースでは、溶出小と同様にカルシウム不足の状態と推察されるが、ばらつきはあるものの溶出中の一軸圧縮強さの平均値 354 kN/m²、標準偏差 146 kN/m² に対して、溶出小の一軸圧縮強さは平均値 162 kN/m²、標準偏差 129 kN/m² であり、標準偏差は同程度で一軸圧縮強さは2倍程度の差異となっている。つまり、溶出小と比較してカルシウム溶出量が大きいことから、一軸圧縮強さも「溶出中>溶出小」の傾向となると想定される。しかしながら、現状のデータ数やばらつきを考慮すると、この傾向を確かなものとして立証するにはさらなる実験データの蓄積が望まれる。

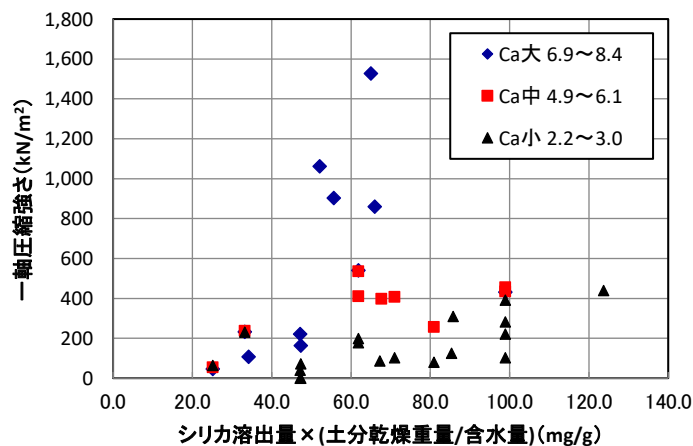


図-3.3 シリカ溶出量が強度発現に及ぼす影響

次に、浚渫土砂から溶出するシリカ溶出量の簡易判定としての指標について考察する。浚渫土砂において、シリカは粒径が細かい粘土分から溶出すると考えられる。第2章の表-2.1で示した石灰改良のポゾラン反応は、粘土鉱物から溶出するシリカ等との反応である⁷⁾。一方、Todaら⁸⁾が示している非晶質相である生物由来からのシリカ溶出について、ナノプランクトンに分類される珪藻類の大きさは2~20 μm程度であるが、珪藻類の死後、その殻は非晶質のため溶解が進み、径も小さくなったことで、粘土粒子に含まれている可能性が考えられる。また、河川からの窒素やリン等の栄養塩流入等により珪藻類を含むプランクトンの発生条件が比較的整っている場合が多い閉鎖性の港湾区域⁸⁾では、海底付近から採取された浚渫土砂には、シリカ成分を溶出する珪藻類等も多く含む傾向があると推察される。そこで、図-3.3の溶出大(6.9~8.4 mg/g)のケースについて、横軸を浚渫土砂の粒度分布における粘土分含有率としたものを図-3.4に示す。図-3.4より、ばらつきはあるものの、粘土分含有率が大きくなると一軸圧縮強さも大きくなる傾向が概ねある。次に、10港湾14種類で採取された浚渫土砂について、シリカ溶出量と粘土分含有率の関係を整理したものを図-3.5に示す。図-3.5より、ばらつきはあるものの、粘土分含有率が大きく液性限界が高いものはシリカ溶出量も大きく、粘土分含有率が小さく液性限界が低いものはシリカ溶出量も小さいことが確認できる。このことから、カルシア改質土に用いる浚渫土砂の強度発現能力について、1次簡易判定としては粘土分含有率を用いることが可能と考えられる。

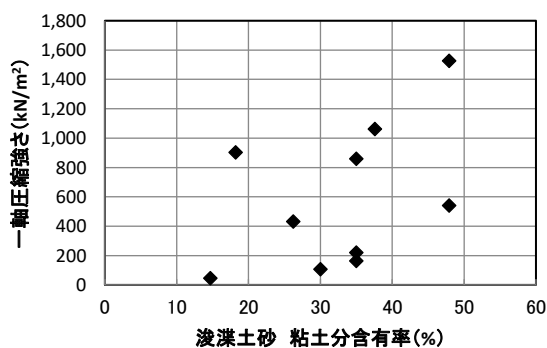


図-3.4 粘土分含有率と強度発現の関係

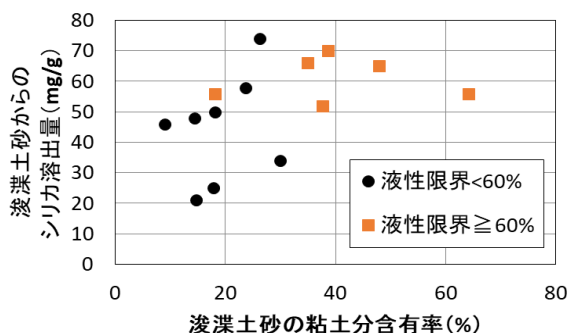


図-3.5 粘土分含有率と溶出シリカ量の関係

3. 3. 2 カルシア改質材からのカルシウム溶出量が強度発現に及ぼす影響

Series2 の試験について、横軸にカルシア改質材からのカルシウム溶出量 (mg/g) にカルシア改質土配合における単位容積当たりのカルシア改質材重量を乗じて、含水比影響を考慮するために単位容積当たりの含水量で除したもの (以降, “間隙水に対するカルシウム濃度”と記載) を図-3.6 に示す。ここで、一軸圧縮強さは、28 日養生後の試験結果であり、凡例は表-3.2 に示す浚渫土砂種類とシリカ溶出量(mg/g) を示す。シリカ溶出量が多い YS-1 及び HH-1 については、間隙水に対するカルシウム濃度の増加とともに、強度が増進していることがわかる。この特性は小門ら²¹⁾の示している Portlandite が C-S-H 生成量を支配するケースに相当すると考えられる。一方、シリカ溶出量が少ない ST-1 及び ST-2 については、間隙水に対するカルシウム濃度が増加しても強度が増進しない状態となっている。これは、反応するシリカ量に対してカルシウム供給量が過多になっている状況と推察される。ここで、ST-1 と ST-2 の強度発現状況を比較すると、シリカ溶出量の大小関係に応じた強度発現量の傾向となっている。浚渫土砂 HH-1 の強度発現については、図-3.6 より間隙水に対するカルシウム濃度の値が 12 mg/g 程度までは YS-1 と同様に線形的に強度増進するが、12 mg/g より大きくなると ST-1,2 と同様に強度増進がみられない。これは、シリカ量に対するカルシウム供給量のバランスとして、カルシウム供給量が 12 mg/g 未満の範囲では供給するカルシウム量に対して溶存するシリカ量が勝っておりカルシウム供給によって固化反応が進むが、カルシウム供給量が 12 mg/g を超えると溶存するシリカ量に対して供給するカルシウム量が過多となり固化反応が進まないためと推察される。ただし、間隙水に対するカルシウム濃度が 12mg/g 以上のデータは 1 点しかないことからばらつきの影響も考えられるため、カルシウムとシリカの供給バランスの影響については今後追加検討が必要である。また、YS-1 と HH-1 の強度発現特性の比較において、YS-1 の方が溶出シリカ量が少ないにも関わらずカルシウム供給に対する強度増進が良好な要因としては、今回のシリカ量とカルシウム量のバランス影響の検討では説明ができず、他の要因が影響していると考えられる。

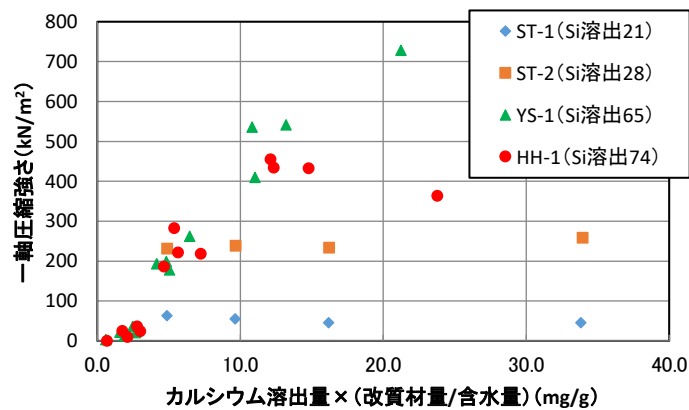


図-3.6 カルシウム溶出量が強度発現に及ぼす影響

次に、カルシア改質材混合量の差異（20vol%と30vol%）が一軸圧縮強さに及ぼす影響について考察する。ここで、確保できた浚渫土砂の量が十分ではなかったため、カルシア改質材の混合量30vol%の実験ケースには浚渫土砂HH-1を、混合量20vol%のケースには浚渫土砂HH-2を用いた。HH-1とHH-2は同一港湾で採取されたものである。その結果を図-3.7に示す。ここで、凡例は表-3.2に示す浚渫土砂種類とシリカ溶出量(mg/g)を示す。カルシア改質土の一軸圧縮強さは、カルシア改質材の混合率の影響を受け、混合率が小さくなると発現強度も小さくなることが知られているが、図-3.7より、カルシウム溶出量を間隙水に対するカルシウム濃度として表現すると、カルシア改質材の混合率の差異無しに一軸圧縮強さと相関を得ることができることがわかる。ここで、カルシア改質土は、飽和した浚渫土砂を構成する土粒子とその間隙に存在する水（以降、“間隙水”と記載）、及び混合するカルシア改質材から構成されている⁵⁾。カルシア改質土の配合として、カルシア改質材の混合割合が減少すると、相対的に浚渫土砂の割合が増加し、カルシア改質土中に存在する間隙水の割合も増加する。その場合、カルシア改質土から溶出するカルシウム量は減って間隙水は増加するため、間隙水に対するカルシウム濃度は小さくなる。図-3.7において、カルシア改質材の混合率の差異無しに一軸圧縮強さと相関を得ることができたのは、改質材混合率の違いによりカルシア改質土中に存在する間隙水の量は異なっても、反応に寄与するカルシウム溶出量やシリカ溶出量を間隙水に対する濃度で表現することで、単位あたりの間隙水に対して生成される水和物の量で表現されるためと推察される。つまり、カルシア改質材混合率が低く間隙水の量が大きいケースであっても、間隙水中の反応因子濃度が混合率高のケースと同様であれば、間隙水中の水和物の生成量も大となり、結果として単位あたりの間隙水中の水和物の生成量で考えると混合率高のケースと同様となるため、発現強度も同様となると推察される。これを図-3.6で示したST-1に当てはめると、浚渫土砂から溶出するシリカ量も少ないが、表-3.6より液性限界に対する含水比も2.24と高いため、間隙水に対するシリカ濃度が小さくなり、強度発現が低くなったと考えられる。

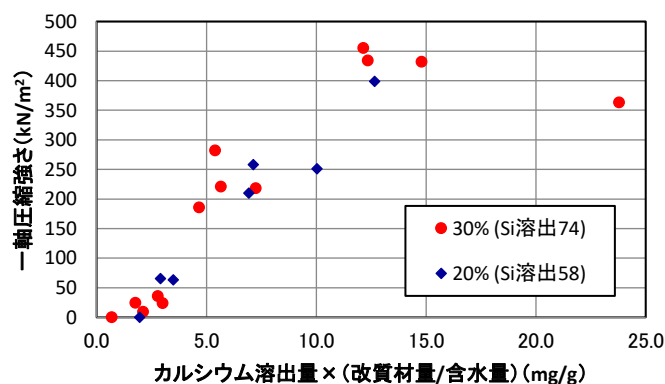


図-3.7 カルシア改質材混合量の違いが強度発現に及ぼす影響

ここで、カルシア改質材から溶出するカルシウムの源について考察する。Toda ら⁹⁾や小門¹⁰⁾らの研究では、カルシア改質土の強度発現に寄与するカルシア改質材のカルシウム成分は消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) であるとしている。そこで、試験に用いた表-3.3 に示すカルシア改質材について、f-CaO 及び $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とカルシウム溶出量の関係を整理したものを図-3.8 に示す。図-3.8 において、相関係数を示すと f-CaO は 0.17, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は 0.40 となるが、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ においてばらつきの大きい溶出量や含有量の高いデータを除くと、相関係数は 0.79 となることから、カルシウム溶出量は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と相関が高いことがわかる。カルシア改質材からのカルシウム溶出は、粒子表面に存在して容易に溶出するカルシウムが対象になると考えられる。カルシア改質材中に含まれる f-CaO は雨水等がひび割れ等から浸入して供給される水と接触することで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ へと化学変化するが、雨水等で容易に化学変化が起きている粒子表面付近の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がカルシウム溶出に寄与していると考えられる (図-3.9)。なお、第 2 章で示した施工性改善における f-CaO が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と化学変化する消化吸水反応において、カルシア改質土の場合、材料混練時に発熱反応を感じる事が無い理由にも関連していると考えられ、消化吸水反応による施工性改善はメカニズムとして期待できない可能性がある。

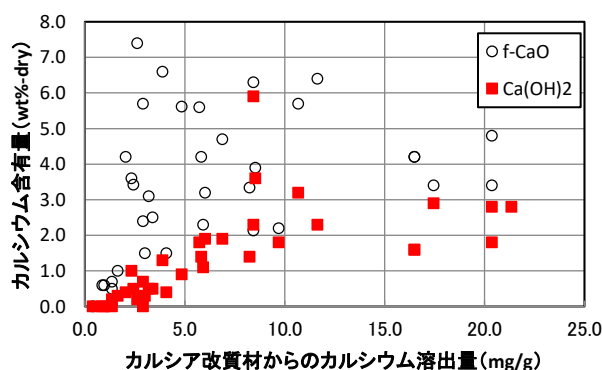


図-3.8 カルシウムの溶出量と含有量の関係

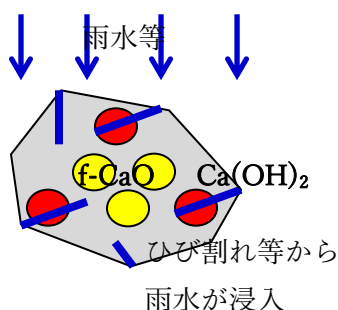


図-3.9 製鋼スラグ表面付近の化学変化の概念図

3. 3. 3 浚渫土砂からのシリカ溶出量とカルシア改質材からのカルシウム溶出量が強度発現に与える相互影響

10 港湾 15 種類の浚渫土砂について、含水比を調泥して実施したカルシア改質土の 28 日養生後の一軸圧縮強さについて、横軸に浚渫土砂からのシリカ溶出量をカルシア改質土の単位容積中の配合における間隙水濃度として表現した指標で、縦軸にカルシア改質材からのカルシウム溶出量をカルシア改質土の単位容積中の配合における間隙水濃度として表現した指標で表したものを図-3.10 に示す。図-3.10 の一軸圧縮強さは、250 kN/m² 以上と以下に区別してプロットした。250 kN/m² は、マニュアル⁵⁾において 100 kN/m² を必要強度としたときの、安全率 (2.5) を考慮した室内配合試験における目標強度相当である。図-3.10 より、浚渫土砂からのシリカ溶出量とカルシア改質材からのカルシウム溶出量において、図-3.11 のような強度発現の領域分けができると考えられる。つまり、領域Ⅰは、シリカ量とカルシウム量が共に不足することで低強度となる領域である。領域Ⅱは、シリカ量は多いがカルシウムの供給不足により低強度となる領域である。領域Ⅲは、カルシウム供給量は十分であるがシリカ量が不足することで低強度となる領域である。領域Ⅳは、シリカ量とカルシウム量が共に十分に供給され、強度発現が良好となる領域である。この考え方で図-3.10 を考察すると、現場強度 100 kN/m² を確保するためには、カルシウム溶出量×(改質材量/含水量) = 5.0 mg/g、シリカ溶出量×(土分乾燥重量/含水量) = 60 mg/g で示した数値近傍が必要溶出量の境界になる可能性があることがわかる。図-3.10 では、250 kN/m² を強度発現の境界としたが、今後、このデータ数を増やして強度境界を細分化することで、対象とする浚渫土砂が目標強度を達成することができるシリカ溶出量を保有しているかどうかの判別や、対象とする浚渫土砂から溶出するシリカ量を踏まえて目標強度達成に必要なカルシア改質材からのカルシウム溶出量の設定ができるようになると思う。

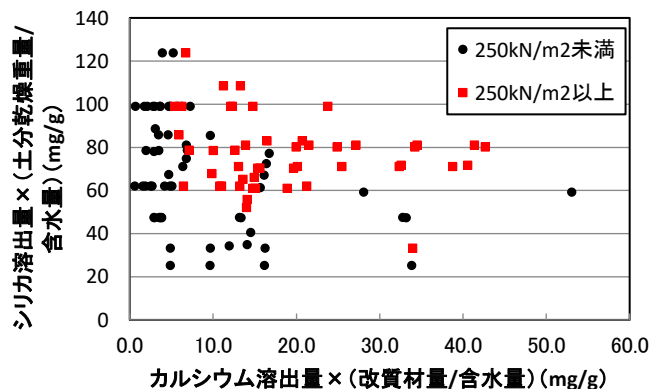


図-3.10 シリカ溶出量とカルシウム溶出量の相互影響

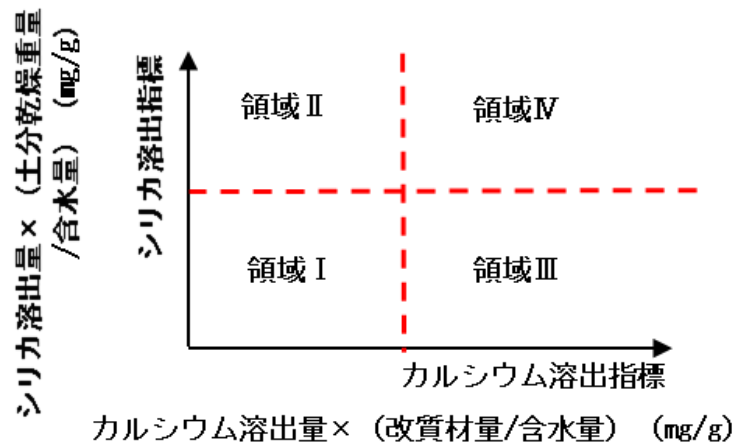


図-3.11 シリカ溶出量とカルシウム溶出量の相互影響の概念図

3. 4 まとめ

本章では、浚渫土砂に製鋼スラグを原料とするカルシア改質材を添加して強度増進したカルシア改質土について、浚渫土砂から溶出するシリカとカルシア改質材から溶出するカルシウムが一軸圧縮強さに及ぼす相互影響について評価した。得られた知見を、以下に示す。

- (1) 浚渫土砂から溶出するシリカ量が、カルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を検討した。浚渫土砂から溶出するシリカ量の測定は、文献で示されている非晶質シリカの計測方法を用いた。カルシア改質材から溶出するカルシウム量の測定は、環境庁告示46号法の変法として、試料を有姿に、溶媒を人工海水に、振とう時間を30分に変更した方法で実施した。試験は、シリカ溶出量が異なる10種類の浚渫土砂と、カルシウム溶出量が異なる3水準のカルシア改質材を用いた。試験の結果、カルシア改質材から溶出するカルシウム量が6.9~8.4mg/gと大きい場合、浚渫土砂から溶出するシリカ成分が大きいほど線形的に強度が増進する傾向が見られた。これは、シリカとカルシウムのポズラン反応の結果と推察される。一方、カルシア改質材から溶出するカルシウム量が2.2~6.1mg/gと小さい場合は、浚渫土砂から溶出するシリカ量が大きくなっても、強度増進は見られなかった。これは、ポズラン反応において、シリカ量に対して反応するカルシウム量が不足状態であることが原因と推察される。また、浚渫土砂からのシリカ溶出が粘土鉱物由来であることを勘案して、浚渫土砂の土質性状である粘土分含有率について、カルシア改質土の強度発現傾向の1次判断指標としての活用を検討した。その結果、1次簡易判定としては活用可能と考えられたが、今後の研究で精査が必要である。
- (2) カルシア改質材から溶出するカルシウム量が、カルシア改質土の強度発現に及ぼす影響を検討した。試験は、シリカ溶出量が異なる5種類の浚渫土砂と、カルシウム溶出量が異なる24種類のカルシア改質材を用いた。その結果、浚渫土砂から溶出するシ

リカ量が 65～74mg/g と大きくカルシウムが律速になって強度が発現すると推定される範囲においては、カルシア改質材から溶出するカルシウムを増加すると、カルシア改質土の一軸圧縮強さも線形的に増加する結果となった。これは、カルシウムとシリカのポゾラン反応と推察される。一方、浚渫土砂から溶出するシリカ量が 21～28mg/g と小さい場合、カルシア改質材から溶出するカルシウムを増加しても、カルシア改質土の一軸圧縮強さに増進は見られなかった。これは、ポゾラン反応におけるシリカ不足と推察される。

- (3) 浚渫土砂から溶出するシリカ量とカルシア改質材から溶出するカルシウム量が、カルシア改質土の強度発現に及ぼす相互影響を評価し、「カルシウム溶出量×(改質材量/含水量)」と「シリカ溶出量×(土分乾燥重量/含水量)」を軸とした図を用いることで、強度発現を評価する指標を提案した。試験結果の整理には、10 港湾の浚渫土砂と 45 種類のカルシア改質材を用いた強度試験データを用いた。今回の検討結果から、現場強度 100 kN/m² を確保するためには、カルシウム溶出量×(改質材量/含水量) = 5.0 mg/g, シリカ溶出量×(土分乾燥重量/含水量) = 60 mg/g が必要であることを明らかとした。なお、この評価指標の完成には、更なる試験データの拡充が必要である。

【本章の参考文献】

- 1) Toda, K., Sato, H., Weerakoon, N., Otake, T., Nishimura, S. and Sato, T.: Key Factors Affecting Strength Development of Steel Slag-Dredged Soil Mixtures, Minerals, 8(5):174, 16p., 2018
- 2) Kakihara, Y., Kikuchi, Y., Noda, S., Yamaguchi, T., Tomimatsu, R., Nakayama, K. and Yoshikawa, T.: Effect of amorphous silica content in clay on mechanical properties of the mixture of clay and converter steelmaking slag, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.8, No.2, pp1-6, 2020
- 3) Mortlock R.A. and Froelich P.N.: A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments, DeepSea Research, Vol.36, No.9, pp.1415-1426, 1989
- 4) 乾道春, 織田正和, 田中龍彦, 鉄鋼スラグ中のフリーCaO 分析方法の標準化, 日本鉄鋼協会会報「ふえらむ」, Vol.19, 2014.8
- 5) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル pp.1-1 - 9-16, 2017
- 6) 小門武, 須田大作, 赤司有三:カルシア改質土の強度予測モデルに関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.76.4, pp.405-410, 2020
- 7) 黒澤功, 小嶋利司：講座 土を固める技術の動向 2.セメント・石灰で固める, 地盤工学会誌, Vol.67, No.10, Ser.No.741, pp.44-45, 2019
- 8) 草野朱音：近年の東京湾における赤潮の発生状況について, 神奈川県水産技術センター研究報告, Vol10, pp.51-56, 2019

第4章 強度発現予測のための原材料の溶出試験方法の提案

4.1 概要

カルシア改質土の強度性能確保を目的として、原材料であるカルシア改質材から溶出するカルシウム成分と浚渫土砂から溶出するシリカ成分について、工事における品質管理を目的とした試験方法について検討を実施する。

4.2 カルシウム溶出に対する試験方法の検討

4.2.1 実験概要

カルシア改質土の強度発現において、カルシア改質材の強度影響因子は、カルシウム成分溶出の源であるカルシウム含有量とその溶出表面積（粒度分布）である¹⁾。ここで、強度品質管理において、2つのパラメータで評価することは管理を難しくすると想定されることから、カルシア改質材から溶出するカルシウム成分を、溶出試験にて直接的に測定する方法を用いることとした。

今回、カルシア改質材の有姿から溶出するカルシウム成分を測定する方法として、環境庁告示第46号で定められている溶出試験方法を参考とし、試料を有姿の粒度分布とする方法を提案した²⁾。具体的な試験方法を以下に示す。

- 1) 試料調整として、カルシア改質材を風乾し、円すい四分法にて縮分し、有姿で約400gを採取する。
- 2) 溶出試験として、コック付き10Lポリビンに試料と溶媒との重量比が10%の割合となるように溶媒を添加し、調整したカルシア改質材試料を添加した後、振とう機にて所定時間連続して振とうする。
- 3) 試料液の一部を孔径0.45 μm のメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過し、ろ過液を検液とする。
- 4) Ca測定として、ICP発光分光分析装置を用いて、検液のCa濃度を測定し、検液のCa濃度から溶媒の人工海水のCa濃度を差し引き、溶存Ca量を求める。

ここで、上記の提案法において、カルシア改質土の強度発現を表現する指標としての適用性については、振とう時間を30分、溶媒を海水として検討した知見³⁾はあるが、その振とう時間や溶媒に関する科学的検討が行われておらず、未確定の状況である。そこで、表-4.1に示すパラメータでカルシウム溶出挙動の検討を行った。試験に用いたカルシア改質材は、表-4.2に示す5種類である。図-4.1に5種類の粒度分布を示す。また、溶媒に用いた人工海水の成分を表-4.3に示す。なお、表-4.2中には、エチレングリコール抽出CaOをf-CaOとCa(OH)₂に分けることが可能な日本鉄鋼協会推奨法⁴⁾による分析結果を示している。その方法を以下に示す。

- 1) エチレングリコールで試料中のフリーライムおよび水酸化カルシウムを抽出し、カル

シウム濃度を ICP 発光分光分析法又はフレイム原子吸光分析法で定量し、フリーライム + 水酸化カルシウムの含有率に換算する。

- 2) 試料を熱重量測定分析により、400 °C付近の質量減少を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の分解に伴う脱水として減量を測定し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率に換算する。
- 3) f-CaO はエチレングリコール抽出のものから $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を差し引くことで算出する。

表-4.1 試験パラメータ

項目	パラメータ
溶出時間	1 min, 3 min, 5 min, 10 min, 30 min 1 hr, 3 hr, 6 hr, 24 hr
溶媒	人工海水, 純水

表-4.2 カルシア改質材の材料性状

カルシア改質材 試料名	f-CaO (wt%-dry)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (wt%-dry)
A	4.8	3.9
B	3.6	3.9
C	3.5	1.9
D	3.7	0.7
E	2.5	1.2
F	0.8	0.5

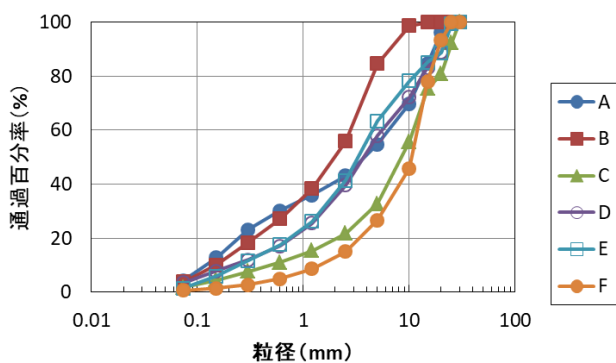


図-4.1 試験に用いたカルシア改質材の粒度分布

表-4.3 人工海水の成分分析結果

pH	EC μS/cm	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
8.17	27,900	390	1,300	12,000	420	20,000	2,600

計測項目は、溶出カルシウム量と pH、電気伝導度とした。また、カルシア改質材 20vol%混合におけるカルシア改質土の一軸圧縮強さ（材齢 28 日）も計測した。試験に用いた浚渫土砂の性状を表-4.4 に示す。ここで、一軸圧縮強さの供試体の作製は、カルシア改質材は表乾状態のものを使用して、浚渫土砂とカルシア改質材をハンドミキサーで約 2 分間混合し、直形 100 mm、高さ 200 mm のプラスチックモールドに充填することで実施した。1 回の混練作業は約 30 kg で実施した。充填は、3 層に分けてタッピングしながら供試体内に空隙が生じないように行った。試料充填後、モールド上面をラップで密封し、20°C の恒温温室で養生を実施した。一軸圧縮強さの測定は材令 28 日で行い、1 つの条件につき 3 本の供試体で試験を行って、その平均値を一軸圧縮強さとした。また、マニュアルでは標準配合は 30vol%混合であるが、浚渫土砂から溶出するシリカ量に対してカルシア改質材から溶出するカルシウム量が過度な供給とならないようにカルシア改質材 20vol%とした。

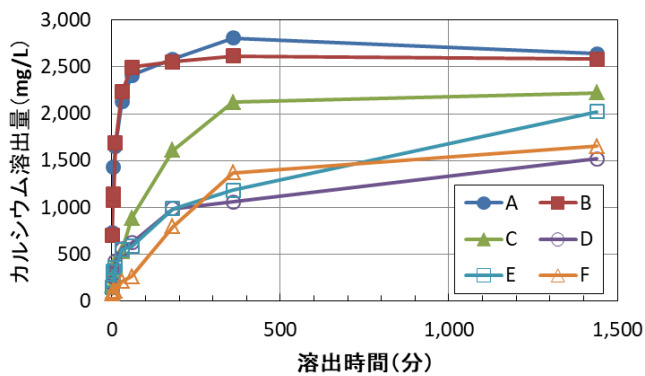
表-4.4 浚渫土砂の性状

項目	数値	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.627	
含水比 (%)	66.6	
液性限界 (%)	51.0	
塑性指数	13.7	
粒度 分布	礫 (%)	0.3
	砂 (%)	27.4
	シルト (%)	53.6
	粘土 (%)	18.7
シリカ溶出量 (mg/g) ※文献法	66	

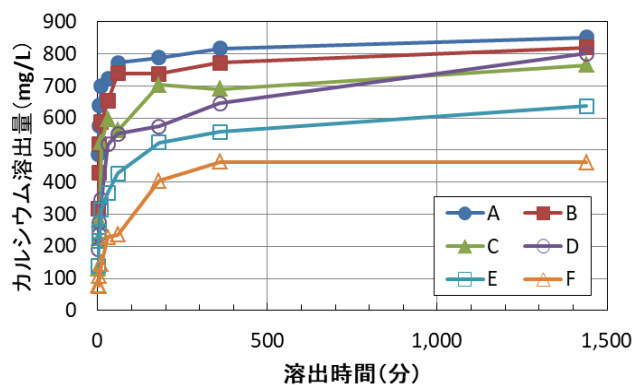
4. 2. 2 実験結果と考察

溶出時間とカルシウム溶出量の関係において、図-4.2(a)に溶媒を人工海水としたケース、図-4.2(b)に溶媒を純水としたケースの試験結果を示す。カルシア改質材 A 及び B のカルシウム溶出量が多いことは共通であるが、その他のカルシア改質材のカルシウム溶出量については違いが生じる結果となった。また、いずれのケースも溶出時間が 1~6 時間でカルシウム溶出量の大半が終了する結果となった。マニュアルにおけるカルシウム量はエチレングリコール抽出 CaO、つまり f-CaO と Ca(OH)₂ の両方を考慮した量で評価することが示されているが、研究事例^{10) 11)}では、カルシア改質土の強度発現には Ca(OH)₂ の影響が大きいことが示されているため、Ca(OH)₂ 量とカルシウム溶出量の関係について、図-4.3(a)に溶媒を人工海水としたケース、図-4.3(b)に溶媒を純水としたケースを示す。また、溶出時間と pH の関係について、図-4.4(a)に溶媒を人工海水としたケース、図-4.4(b)に溶媒を純水とし

たケースの試験結果を、溶出時間と電気伝導度の関係について、図-4.5(a)に溶媒を人工海水としたケース、図-4.5(b)に溶媒を純水としたケースの試験結果を示す。

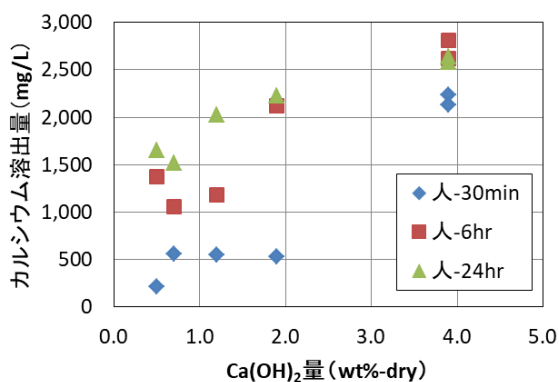


(a) 溶媒：人工海水

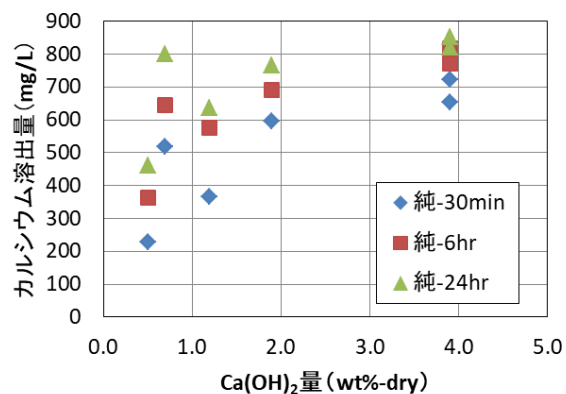


(b) 溶媒：純水

図-4.2 溶出時間とカルシウム溶出量の関係

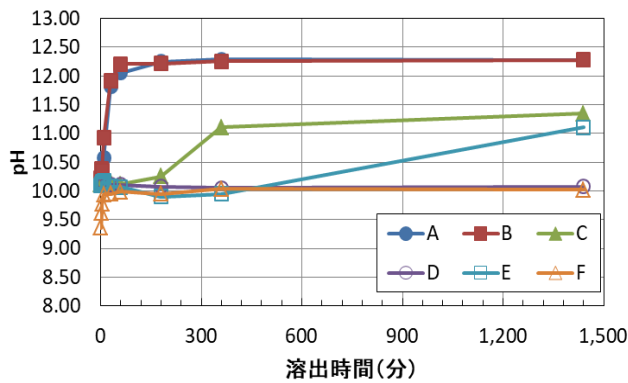


(a) 溶媒：人工海水

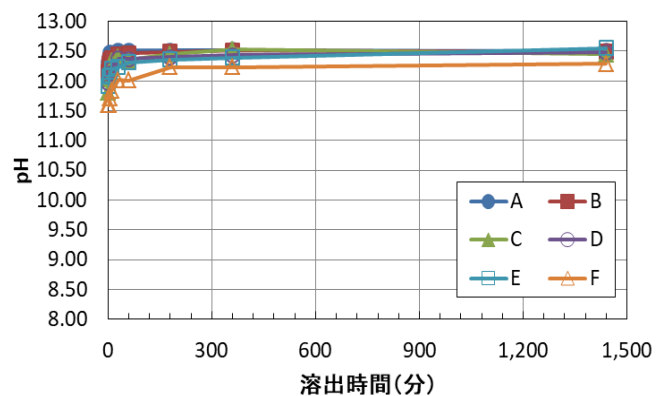


(b) 溶媒：純水

図-4.3 Ca(OH)₂量とカルシウム溶出量の関係

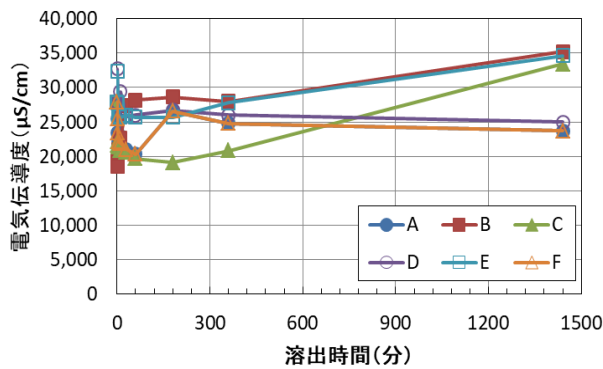


(a) 溶媒：人工海水

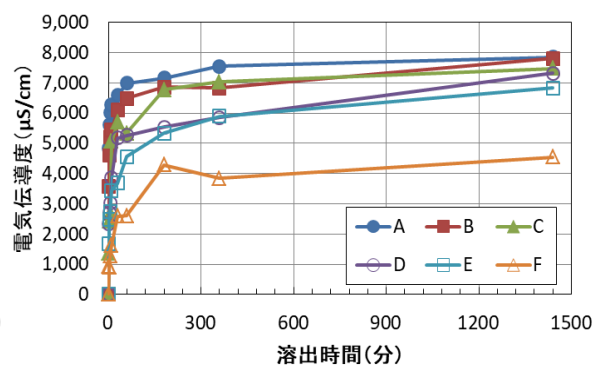


(b) 溶媒：純水

図-4.4 溶出時間と pH の関係



(a) 溶媒：人工海水



(b) 溶媒：純水

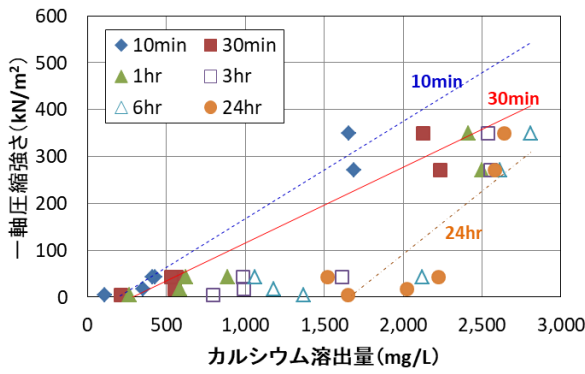
図-4.5 溶出時間と電気伝導度の関係

これらの結果より、溶媒を純水としたケースは、図-4.2(b)に示すように時間経過と共にカルシウムが溶出し、その溶出量は Ca(OH)_2 量が 0.7 wt%-dry の D のデータを除いて Ca(OH)_2 量と概ねの相関関係が見られる (図-4.3(b))。また、そのカルシウム溶出によって、pH (図-4.4(b)) と電気伝導度 (図-4.5(b)) も上昇する挙動を示しており、これは一般的な純水に対する溶出挙動と推察される。一方、溶媒を海水としたケースでは、図-4.2(a)のカルシウム溶出挙動において、純水を溶媒とした結果と比較すると試料 D,E,F が Ca(OH)_2 量の差異に応じた溶出量の挙動となっていないことが観察される。図-4.3(a)の Ca(OH)_2 量とカルシウム溶出量の関係では、強度発現への影響が大きいと考えられる Ca(OH)_2 量に応じてカルシウム溶出量が多くなる相関は見られるものの、図-4.3(b)の溶媒を純水としたケースの方がばらつきの少ない Ca(OH)_2 量とカルシウム溶出量の相関となっている。図-4.4(b)の pH についても、溶媒が純水のケースのように全てのケースにおいて溶出開始直後に pH=12 近傍まで上昇することは無かった。これは、溶媒である海水の pH 緩衝効果と推察される。つまり、試料 A,B のように Ca(OH)_2 量が多いと水酸化イオン OH^- の供給も多くなり海水

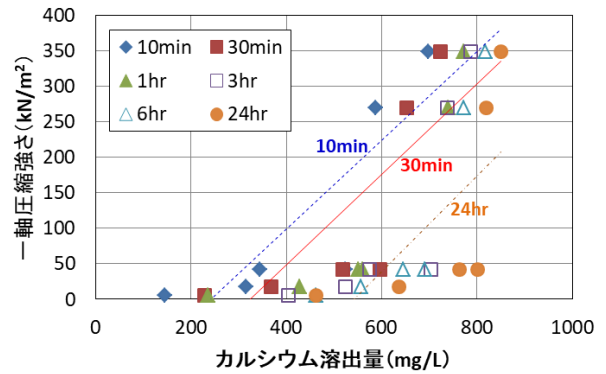
の pH 緩衝能も直ぐに破過するが、他の試料では水酸化物イオン OH^- の供給が少ないために pH 緩衝効果が現れていると想定される。図-4.5(b)の電気伝導度についても、溶媒が純水のケースのように溶出時間経過と共に増加するカルシウム溶出量にしたがって上昇する傾向ではなく、人工海水を溶媒とすると電気伝導度は増減する挙動を示しており、これは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶出によってカルシウムイオン Ca^{2+} と水酸化物イオン OH^- が供給される一方、海水中のイオンと反応して沈殿物が生じている可能性が想定される。

図-4.4 や図-4.5 において上記の pH や電気伝導度で海水との反応が想定されたことから、溶媒を人工海水としたケースでは、カルシウムの溶出に対して、人工海水中の成分との反応が生じることで、溶媒を純水としたケースとの挙動の差異が生じているものと推察される。なお、電気伝導度の挙動から考えると、溶出したカルシウムと人工海水中の成分との反応については、例えば $\text{Mg}(\text{OH})_2$ やフリーデル氏塩、エトリンガイト等²⁾の生成が想定される。

カルシウム溶出量と一軸圧縮強さの関係について、図-4.6(a)に溶媒を人工海水としたケース、図-4.6(b)に溶媒を純水としたケースを示す。図-4.6 中には、10分、30分、24時間に対する回帰線を記載している。なお、前述のように振とう時間 30分（溶媒：人工海水）ではカルシウム溶出量と一軸圧縮強さに相関があることが判っている³⁾。また、図-4.6(a)及び図-4.6(b)において、各溶出時間毎に求めた回帰線の相関係数を表-4.5 に示す。表-4.5 より、発現強度と相関が高いケースは、溶媒を人工海水とし、溶出時間を 10分～1時間としたケースであることがわかる。これは、短時間の溶出では、各材料からの溶出量と、その溶出の容易性である溶出速度を比較できる状態であるが、溶出時間が長くなり溶出の大半が終了した状態では、溶出量（含有量）のみを比較することとなる。表-4.5 より溶出時間が短時間の溶出量が一軸圧縮強さと相関が高いという結果から、カルシア改質土の材令 28日程度での強度発現の傾向は、カルシウム溶出量に加えてそのカルシウム溶出の容易性（溶出速度）も強度発現の影響因子であると考えられる。よって、図-4.6 及び表-4.5 では、溶出時間が長くなるにつれ相関も悪くなる傾向になっているものと推察される。図-4.7 に、図-4.6 の横軸を溶出時間（分）で除して溶出速度とした結果を示す。表-4.6 には、その相関係数を示す。図-4.7 及び表-4.6 より、全体的にはカルシア改質土の発現強度と溶出速度は概ねの相関があることが判る。その中でも、発現強度と相関が高いのは、溶媒を人工海水とし、溶出時間は 1 時間以下である。ここで溶媒について、カルシア改質土に用いる浚渫土砂は海域から採取されたものであり、間隙水は海水であることから、カルシア改質材からのカルシウム溶出挙動は今回の検討における人工海水に近いと想定され、海水中の各成分と溶出カルシウムとの反応も溶出速度に影響を与えられ、と考えられることから、カルシア改質土の発現強度との相関も高くなったものと推察される。



(a) 溶媒：人工海水

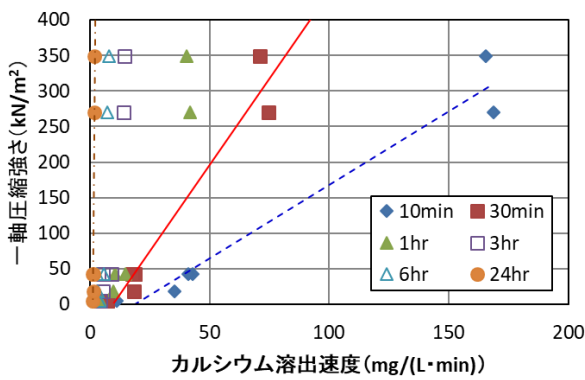


(b) 溶媒：純水

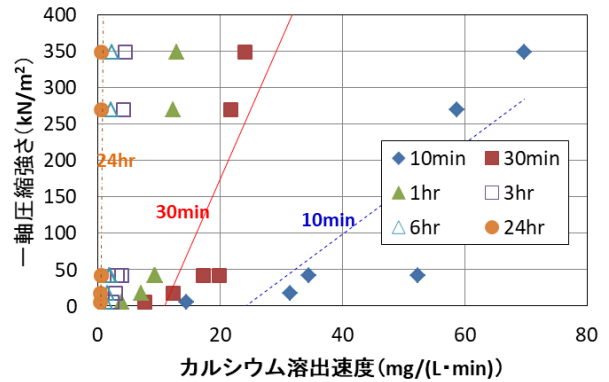
図-4.6 一軸圧縮強さとカルシウム溶出量の関係

表-4.5 一軸圧縮強さとカルシウム溶出量との相関係数

	溶媒：人工海水	溶媒：純水
10 min	0.959	0.725
30 min	0.950	0.631
1 hr	0.946	0.732
3 hr	0.897	0.651
6 hr	0.778	0.739
24 hr	0.708	0.444



(a) 溶媒：人工海水



(b) 溶媒：純水

図-4.7 一軸圧縮強さとカルシウム溶出速度の関係

表-4.6 一軸圧縮強さとカルシウム溶出速度との相関係数

	溶媒：人工海水	溶媒：純水
10 min	0.960	0.725
30 min	0.950	0.631
1 hr	0.946	0.732
3 hr	0.897	0.651
6 hr	0.777	0.739
24 hr	0.708	0.445

以上のことから、カルシア改質材の固化能力を判定するには、溶出試験の溶媒を人工海水とし、振とう時間は10分から1時間程度とすることが良いと考えられる。そこで、4.2.1で示したカルシア改質材からカルシウム溶出量を判断する実験方法について、「溶媒：人工海水、振とう時間30分」とする方法が適当と判断した。

4. 3 シリカ溶出に対する試験方法の検討

4. 3. 1 実験概要

浚渫土砂から溶出するシリカ成分は、マニュアルでは粘土鉱物から溶出する前提となっているが、Todaら⁵⁾やKakiharaら⁶⁾の研究では、珪藻等に起因する生物由来や火山ガラス由来の非晶質相からのシリカ溶出がカルシア改質土の強度発現に大きな影響を与えていることを示している。第2章表-2.5の文献⁵⁾⁷⁾に示されているシリカ成分の抽出方法（以降、文献法と記載）を以下に示す⁸⁾。

- 1) 浚渫土を凍結乾燥する。
- 2) 90秒間乳鉢で摩砕した浚渫土50mgを50ml遠沈管に入れた後、10% H₂O₂ 5mlを添加し30分静置する。
- 3) 1M HCl 5mlを添加し超音波分散機で10分分散した後に、30分静置する。
- 4) 超純水20mlを足し、3000rpmで8分遠心分離する。
- 5) 上澄みを捨てた後、60℃の恒温炉で一晩放置し湿り気が残る程度に乾燥する。
- 6) 翌日、2M Na₂CO₃ 40mlを遠沈管に添加し、超音波分散機で十分に分散させた後、85℃の恒温炉に5時間静置する。（2時間後、4時間後に取り出し、攪拌。）
- 7) 5時間経過後、3000rpmで8分間遠心分離し、上澄みのシリカ濃度をモリブデンブルー法で測定する。

これに対して、工事管理等に使える技術を目指して、簡易な溶出試験方法を試すこととした。この試験方法は、粘土鉱物に含まれる非晶質成分からの溶出を対象とするのではなく、非晶質成分を多く含有してシリカ溶出量も多い浚渫土砂は、浚渫土砂の間隙水中に溶出しているシリカ成分も多いと仮定し、間隙水中のシリカ成分を測定することを想定した

試験である。

その試験方法（以降、提案法と記載）を以下に示す（図-4.8）。

- 1) 試料調整として、浚渫土砂を 50g-wet 程度分取し、凍結乾燥器を用いて凍結乾燥した後、試料をほぐして貝殻や木くず等の異物を除去して、メノウ乳鉢で摩砕する。
- 2) 検液抽出として、試料調整した浚渫土砂を 100ml ビーカーに 10g 分取し、ビーカー内に攪拌子を投入して、試料と溶媒の重量比が 10%の割合となるように超純水を添加した後、pH 計をビーカー内の溶液に浸漬してマグネチックスターラーを用いて pH が安定するまで 7 分間程度攪拌して、孔径 0.45 μ m のメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過したものを検液とする。
- 3) 検液に対して、SiO₂濃度を測定する。ここでは、JIS K 0101 44.1.2 モリブデン青吸光度法に準拠する。その SiO₂濃度を Si 換算する（溶存 Si(mg/L)=SiO₂(mg/L) \times Si/SiO₂）。なお、検液からの溶存 Si 検出は、ICP 発光分光分析装置を用いることも可能である。

ここで、水中での浚渫土砂の攪拌に関して、溶液が安定になる（平衡になる）ことの確認のための指標として、pH を用いた。

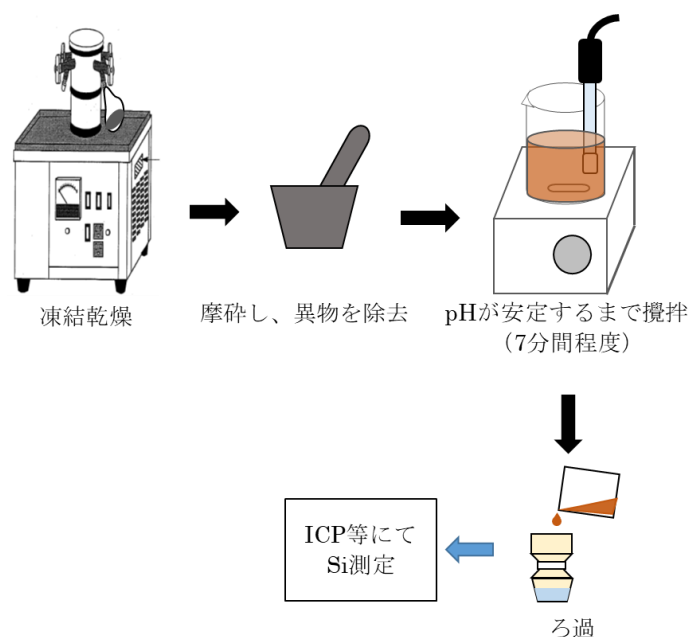


図-4.8 提案法の試験方法

浚渫土砂からのシリカ溶出の試験は、上記の提案法に加えて、比較として文献法も実施した。試験に用いた浚渫土砂を表-4.7 に示す。また、両溶出試験方法について、カルシア改質土の一軸圧縮強さとの関係を確認するため、表-4.8 に示すケースで強度発現状況を確認した。なお、混合するカルシア改質材は、カルシウム溶出量不足とならないように溶出量が多いものを用いて、混合率はマニュアルにおける標準配合の 30vol%、試験材令は 28 日とした。

表-4.7 浚渫土砂の土質性状

浚渫土 名称	土粒子 密度 (g/cm ³)	原泥 含水比 (%)	液性 限界 (%)	塑性 指数	粒度分布 (%)				強熱 減量 (%)	シリカ溶出量 (mg/g)	
					礫	砂	シルト	粘土		文献法	提案法
HH-1	2.650	59.8	57.5	22.8	0.0	14.5	59.3	26.2	6.5	74	0.032
HH-2	2.655	51.2	57.5	22.8	0.0	13.7	62.6	23.7	6.0	58	0.032
HH-3	2.647	56.0	53.2	17.2	12.2	14.4	55.3	18.1	—	50	0.025
IK-1	2.708	32.1	NP	—	0.5	73.2	17.3	9.0	—	46	0.017
CC-1	2.645	57.5	43.4	10.8	0.0	52.5	33.0	14.5	—	48	0.017
TA-1	2.685	91.6	69.1	33.2	0.0	17.1	44.2	38.7	—	70	0.030
NS-1	2.691	139.3	93.2	59.3	0.0	5.0	60.0	35.0	9.8	66	0.031
NN-1	2.676	53.9	43.8	18.7	1.0	13.0	56.0	30.0	5.1	34	0.012
WW-1	2.715	41.1	31.1	6.9	0.3	42.5	39.4	17.8	—	25	0.007
ST-1	2.810	52.6	37.2	12.0	0.0	6.0	79.3	14.7	—	21	0.010
ST-2	—	61.6	—	—	—	—	—	—	—	28	0.021
YS-1	2.721	84.7	81.1	47.8	0.2	24.3	27.6	47.9	10.5	65	0.042
YS-2	2.697	—	82.9	55.9	0.2	6.5	29.2	64.1	—	56	0.044
FH-1	2.671	105.9	82.4	45.1	7.1	7.5	67.2	18.2	11.8	56	0.033
ON-1	2.683	43.1	63.4	35.1	2.1	36.3	24.0	37.6	6.5	52	0.045

表-4.8 一軸圧縮強さの試験ケース

浚渫土砂種別	試験時含水比 (%)	実験に用いた カルシウム改質材の カルシウム溶出量 (mg/L)
HH-2	74.8	710
NS-1	100.0	870
NS-1	139.3	790
NS-1	139.8	790
NN-1	99.5	790
TS-1	83.5	850
YS-1	99.9	870
YS-1	105.0	710
FH-1	100.6	870
ON-1	99.8	870

4. 3. 2 実験結果と考察

浚渫土砂から溶出するシリカ成分の比較として、図-4.9 に文献法と提案法の分析結果を示す。図-4.9 より、提案法は文献法と相関があることがわかる。図-4.10 に文献法によるシリカ溶出量と一軸圧縮強さの関係を、図-4.11 に提案法によるシリカ溶出量と一軸圧縮強さの関係を示す。なお、図-4.10 及び図-4.11 の横軸は、シリカ溶出量 (mg/g) にカルシア改質土配合における単位容積当たりの土分乾燥重量を乗じて、含水比影響を考慮するために単位容積当たりの含水量で除したもの（間隙水に対するシリカ濃度）としている。図-4.10 より文献法は特異点があるもののシリカ溶出量と一軸圧縮強さに相関が見られるが、図-4.11 より提案法であっても同様に一軸圧縮強さとの概ねの相関が確認された。また、シリカ成分は浚渫土砂の粘土分から溶出するが、図-4.10 の文献法及び図-4.11 の提案法のいずれもシリカ溶出量が高いものは粘土分含有率が高い浚渫土砂であることがわかる。

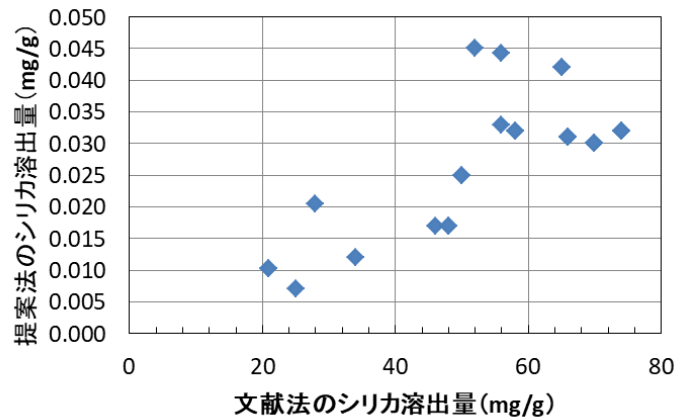


図-4.9 文献法と提案法のシリカ溶出量比較

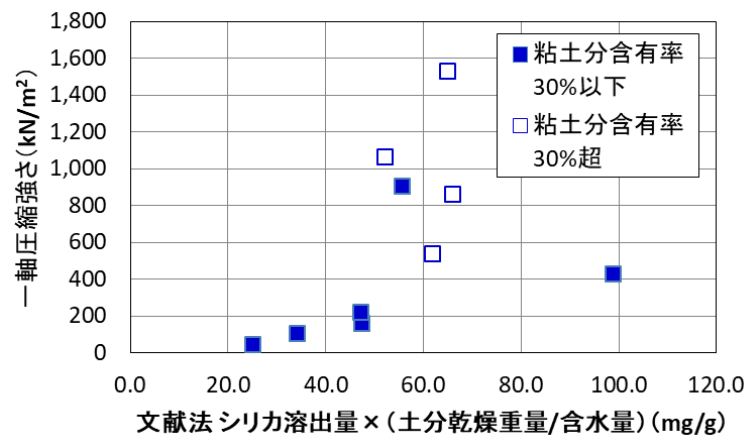


図-4.10 文献法のシリカ溶出量と一軸圧縮強さの関係

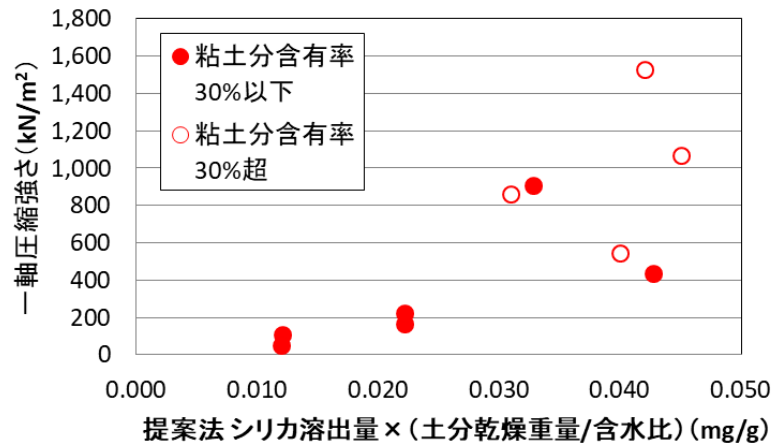
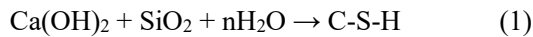


図-4.11 提案法のシリカ溶出量と一軸圧縮強さの関係

ここで、図-4.10 及び図-4.11 においてシリカ溶出量が多くなると一軸圧縮強さが高くなる傾向があるが、強度発現のばらつきも大きくなる傾向が見られる。これは、浚渫土砂の粘土分が多くなると、式(1)に示すポズラン反応の他に、マニュアルに示されているカルシウムアルミネート系化合物の水和反応による水和物（AFm）など他の影響因子も強度発現に寄与している可能性が考えられる。



なお、カルシア改質土の一般的な必要強度は 20～300 kN/m² 程度であり、例えば図-4.10 では特異点を除くと横軸の実験確認範囲が 25～65mg/g となるが、強度予測の範囲として実用に耐えうると考えられる。また、図-4.10 の特異点は表-4.7 の HH-1 であり、今回の試験での文献法によるシリカ溶出量は 74 mg/g であったが、同一箇所での別の機会に採取された浚渫土砂 HH-2 と HH-3 について実施した測定では、文献法によるシリカ溶出量は 58 mg/g と 50 mg/g であった。この特異点について、文献法によるシリカ溶出量を 50 mg/g と仮定すると、図-4.10 の特異点の横軸の値が 67 mg/g となり、関連のデータ群に入ることとなるため、この特異点は浚渫土砂のばらつきの影響と推察される。

浚渫土砂は、採取方法により性状が異なるため、土質性状確認や配合試験においては注意が必要であることが分かっている⁹⁾。また、工事現場での日々の品質管理を想定すると、土運船内の数百 m³ の浚渫土砂から 50g を採取することとなり、採取箇所でのシリカ溶出量がばらつく可能性がある。よって、今回の結果からばらつきを考慮した品質管理を実施するためには、複数採取データの平均化や複数採取試料の縮分による分析等に対応していく必要があると考えられる。このようなばらつきへの対応をすることで、対象とする浚渫土砂について、強度発現傾向の 1 次確認としては、前述のように浚渫土砂中の間隙水に溶出しているシリカ量と想定されるが、ビーカー内での 7 分程度の攪拌で抽出したシリカ溶出量を用いることが可能であることが示唆された。文献法の分析は専門性が高く、工事現場で

容易に日々の品質管理に用いることは困難と思われるが、提案法は SiO_2 濃度の分析等に装置は必要であるものの、工事現場近傍の分析業者に依頼することで短時間に測定が可能と考えられ、今後の SiO_2 濃度分析のパックテスト等による簡易化検討も含めて、カルシア改質技術の発展に現場品質管理面から寄与する技術と考える。

4. 3. 3 工事での適用検討

提案法の工事への適用性を確認するため、文献⁹⁾で示されている工事において、提案法による浚渫土砂からのシリカ溶出量とカルシア改質土の一軸圧縮強さの関係を調査した。この工事（単一現場）におけるカルシア改質土の品質管理は毎日実施されており、浚渫土砂の含水比測定も実施されていたことから、その一部の浚渫土砂 40 試料を受領して提案法によるシリカ溶出量を測定すると共に、工事で実施された一軸圧縮強さとの関係を整理した。

図-4.12 にシリカ溶出量と一軸圧縮強さの関係を示す。図-4.12 の横軸は、シリカ溶出量 (mg/g) にカルシア改質土配合における単位容積当たりの土分乾燥重量を乗じて含水比影響を考慮するために単位容積当たりの含水量で除したもので、つまり含水比で除したもので表している。また、図-4.12 は有機物含有量の指標としての COD の値 (mg/g-dry) について範囲で分類している。ここで、COD は下記で測定している。なお、検液の抽出方法については、今後簡易化を目的とした改善の余地があると考えている。

- 1) 500 ml ポリビンに浚渫土砂 25 g-wet および超純水 250 ml を添加し、NaOH 溶液を用いて pH 12 に調整する。
- 2) 200 rpm で 6 時間振とうし、振とう中は適宜 pH 調整する。振とう後、ろ過し、ろ液を CODcr (JIS K 0102) 分析に供する。
- 3) 分析値を浚渫土砂乾燥重量当たりの有機物抽出量 (mg/g-dry) として算出する。

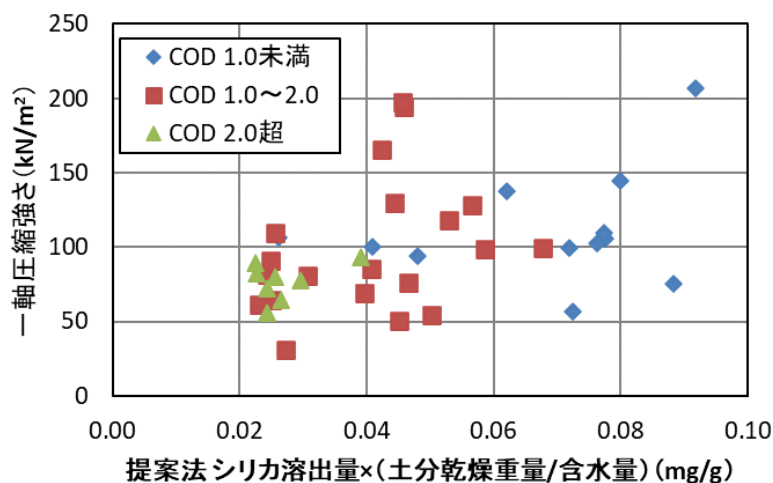


図-4.12 実工事における提案法の適用結果

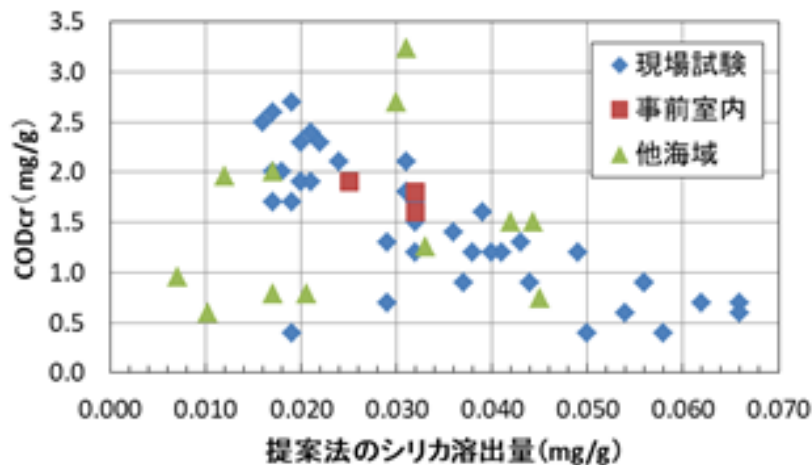


図-4.13 シリカ溶出量と COD の関係

図-4.12 より、ばらつきはあるものの概ねの右肩上がりの相関が見られ、提案法によるシリカ溶出量が少ない浚渫土砂を用いたカルシア改質土の強度発現は小さいことがわかる。ここで、図-4.12 より強度発現は COD の大小の影響も受けていることがわかる。そこで、提案法のシリカ溶出量と COD の関係について、今回の現場試料と本現場において事前にプロジェクトへの適用性を判断するために採取した浚渫土砂試料の試験結果、及び過去のプロジェクトへの適用性判断の調査で得られた他 12 港湾で採取された浚渫土砂試料の試験結果について整理したものを図-4.13 に示す。図-4.13 より、他海域を含む全体としては提案法のシリカ溶出量と COD には明確な相関は見られないが、今回の現場に限っては相関が見られる状況であった。このことも、図-4.12 の結果に影響していると考えられる。図-4.12 におけるばらつきの原因は、有機物含有量の影響が考えられ、土運船内（容量 300 m³）の浚渫土砂に含有される有機物含有量にはばらつきがあるものと推定される。また、混合するカルシア改質材のばらつきも影響因子の一つと考えられる。このようにばらつきはあるものの、工事管理における 1 次評価への活用を想定すると、文献法と比較して検査時間とコストを抑えた本評価方法は有効であると考えられる。つまり、シリカ溶出量が低くて含水比が高い浚渫土砂を適用する場合（図-4.12 の横軸が小さい値の場合）には、浚渫土砂中の含水を脱水することは困難であるため、強度低下への対策としてカルシア改質材の混合率増加やシリカ供給材の添加等の対策が必要という判断が可能になると考えられる。なお、前述のように、浚渫土砂のばらつきに対する複数の採取試料や分析値の平均化等の処置は必要と考える。またシリカ供給材の探索については今後の課題であるが、非晶質シリカを含むという点では火山灰等の活用も可能性があると考えられる。

ここで、想定される工事現場での使用事例を以下に示す。マニュアルでは、カルシア改質土の工事現場での強度管理は、毎日供試体を作成して、養生 7 日の一軸圧縮強さから養生 28 日の一軸圧縮強さを予測して、カルシア改質材の混合率増加等の対処を実施すること

が示されている。しかし、供試体作成は土運船に対して1隻/日しかできず、強度判明まで7日の養生期間も必要となる。そこで、今回の提案法を用いることで、土運船毎に強度発現予測の傾向を短期間に把握することが可能となる。その一軸圧縮強さの傾向予測について、マニュアルに記載の設計強度に対する安全率や不良率を考慮した現場管理強度と比較して、連続して低い一軸圧縮強さが予測される場合は、強度増進対策を検討して実行することと考えている。

4.4 まとめ

本章では、浚渫土砂に製鋼スラグを原料とするカルシア改質材を添加して強度増進したカルシア改質土について、施工時の強度品質管理を目的として、カルシア改質材から溶出するカルシウム量と浚渫土砂から溶出するシリカ量の測定法について提案と評価を行った。得られた知見を、以下に示す。

- (1) カルシア改質材から溶出するカルシウム量の測定として、環境庁告示第46号で定められている溶出試験方法を参考とし、溶媒（人工海水、純水）と溶出時間（1min, 3min, 10min, 30min, 1hr, 3hr, 6hr, 24hr）をパラメータとした試験を行うことで一軸圧縮強さとの関係を整理した。その結果、溶媒の差異としては、pHと電気伝導度の挙動が大きく異なり、影響因子として人工海水中の成分と溶出したカルシウムの反応で生成する $Mg(OH)_2$ やフリーデル氏塩等の生成が影響していると想定された。一軸圧縮強さとカルシウム溶出量及び溶出速度の関係では、相関係数が0.95近傍で高い相関が得られたケースは、溶媒が人工海水で、溶出時間が10min~1hrのケースであった。そこで、カルシア改質材から溶出するカルシウム量を指標化するための測定方法として、試料を有姿の粒度分布とした状態で、溶媒を人工海水に、振とう時間を30分間とする方法を提案した。
- (2) 3章で用いた浚渫土砂から非晶質シリカを溶出させる文献法は、現場管理に活用するには難しい方法であった。そこで、浚渫土砂から溶出するシリカ量の測定法について、試料をビーカー内で7分程度攪拌して検液を作成する方法を考案し、一軸圧縮強さとの相関について既往の文献法との比較を実施することで、その有効性を検討した。試験に用いた浚渫土砂は15種類で、文献法のシリカ溶出量の範囲は21~74mg/gの範囲である。なお、提案法のシリカ溶出量は、その試験形態から、浚渫土砂中の間隙水に溶出しているシリカ量を計測していると推察している。試験の結果、ばらつきはあるものの、文献法と提案法のシリカ溶出量には相関が見られた。また、文献法と同様に、提案法のシリカ溶出量が増加するとカルシア改質土の一軸圧縮強さも増加する傾向が見られた。更に、文献で示されている函館湾でのカルシア改質土工事で採取された浚渫土砂とカルシア改質土の一軸圧縮強さの関係を、提案法で整理することを試みた。その結果、有機分（COD）の影響はあるものの、提案法のシリカ溶出量と一軸圧縮強さに相関があることを示した。これらを考慮して、提案

法のシリカ溶出量を強度管理の1次判断として用いることを提案した。

- (3) 今回の提案法は、まだ実際の工事での活用の実績が少ないため、今後の工事で適用性を検証して、試験方法の改定を含めてデータを積み重ねていく必要がある。また、提案法の SiO₂ 濃度分析には特殊な計測機器が必要なため、工事現場で計測可能な簡易化についても今後の課題である。

【本章の参考文献】

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル pp.1-1 - 9-16, 2017
- 2) 特開2015-74914, 改質土の強度予測方法
- 3) 赤司有三, 山越陽介, 小門武, 戸田賀奈子, 勝見武：カルシア改質土の強度発現における浚渫土砂と転炉系製鋼スラグの相互影響の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.3, pp.179-190, 2021.
- 4) 乾道春, 織田正和, 田中龍彦, 鉄鋼スラグ中のフリーCaO 分析方法の標準化, 日本鉄鋼協会会報「ふえらむ」, Vol.19, 2014.8
- 5) Toda, K., Sato, H., Weerakoon, N., Otake, T., Nishimura, S. and Sato, T.: Key Factors Affecting Strength Development of Steel Slag-Dredged Soil Mixtures, Minerals, 8(5):174, 16p., 2018
- 6) Kakihara, Y., Kikuchi, Y., Noda, S., Yamaguchi, T., Tomimatsu, R., Nakayama, K. and Yoshikawa, T.: Effect of amorphous silica content in clay on mechanical properties of the mixture of clay and converter steelmaking slag, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.8, No.2, pp1-6, 2020
- 7) 小門武, 須田大作, 赤司有三:カルシア改質土の強度予測モデルに関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.76.4, pp.405-410, 2020
- 8) Mortlock R.A. and Froelich P.N.:A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments, DeepSea Research, Vol.36, No.9, pp.1415-1426, 1989
- 9) 林誉命, 水口陽介, 佐々木実歩, 早川哲也, 寺島貴志, 緒方修, 山崎啓介, 赤司有三：浚渫土砂を活用した防波堤背後盛土の築造, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_546-I_551, 2020.

第5章 流動性低下のメカニズム解明と実海域工事への特性活用

5.1 概要

カルシア改質土の材料混合直後の流動性低下のメカニズムとしては、カルシア改質材による吸水効果と粒度改善効果と言われている¹⁾が、その効果を具体的に確認した事例は無く、第2章 表-2.2におけるイオン交換反応も期待されると考えられたため、カルシア改質土の材料混合直後の流動性低下のメカニズムと濁り抑制に関する特性把握について検討する。

また、フレッシュなカルシア改質土の流動性低下をスランプ値 (JIS A 1106) を指標として表現できることが知られている^{2) 3)}が、施工現場毎の条件に応じた施工検討ができる技術レベルには達していない。そこで、近年に発達している流動解析技術を用いて、カルシア改質土の流動性評価が必要となる施工検討への適用性について検討する。

5.2 流動性低下メカニズムと水中施工時の濁り抑制効果

5.2.1 実験概要 (使用材料)

(1) 浚渫土砂

試験に使用した浚渫土砂 5 種類を表-5.1 に示す。今回、イオン交換反応を検討するにあたり、一部の浚渫土砂についてはゼータ電位と陽イオン交換容量(JGS 0261)を測定した。ゼータ電位は、以下の方法で計測した。なお、後述に浚渫土砂以外の試験材としてカルシア改質材及びカルシア改質土のゼータ電位を計測しているが、同様の試験方法で計測している。

- 1) 試験材 100 mg を対象水 (人工海水) で満たしたビーカー (1L) に静かに投入する。
- 2) 投入後静置し、1分経過後、シリンジを用いて上澄みを回収する。
- 3) 採取した上澄み液を用いて、濁度、ゼータ電位を測定する。ゼータ電位は、電圧 2.0V で 100 点程度測定し、その平均値を用いた。

また、今回、海域から採取された天然の浚渫土砂にはばらつきが存在することを考慮して、模擬浚渫土砂を作製して実験に使用した。模擬浚渫土砂の作製は、これまで筆者らが実験に用いた天然の浚渫土砂の平均的な物性である砂分含有率 20%、シルト分含有率 30%、粘土分含有率 50%、含水比 100%を目標として、ベントナイト 85%と標準砂 15%及び人工海水を混合することで作製し、実際の分析値は表 2 であった。

表-5.1 浚渫土砂の土質性状

浚渫土 名称	土粒子 密度 (g/cm ³)	原泥 含水比 (%)	液性 限界 (%)	塑性 指数	粒度分布 (%)				ゼータ 電位 (mV)	CEC (陽イオン交換 容量) (meq/100g-dry)
					礫	砂	シルト	粘土		
HH-1	2.647	56.0	53.2	17.2	12.2	14.4	55.3	18.1	-86	—
HH-2	2.619	67.5	56.1	17.8	0.2	19.7	58.8	21.3	-56	26.0
HA	2.651	249.5	133.3	88.2	0.0	2.3	44.7	53.0	-74	—
CC	2.645	57.5	43.4	10.8	0.0	52.5	33.0	14.5	—	—
模擬	2.616	109	93.3	60.1	0.0	19.6	35.1	45.3	-44	93.6

(2) カルシア改質材

試験に使用したカルシア改質材 6 種類を表-5.2 に示す。今回、カルシア改質材についても、イオン交換反応を検討するために前述(1)の方法でゼータ電位を測定した。表-5.2 中の f-CaO と Ca(OH)₂ は、以下の方法で測定している⁴⁾。

- 1) エチレングリコールで試料中の f-CaO および Ca(OH)₂ を抽出し、カルシウム濃度を ICP 発光分光分析法又はフレーム原子吸光分析法で定量し、f-CaO+Ca(OH)₂ の含有率に換算。
- 2) 試料を熱重量測定分析により、400 °C付近の質量減少を Ca(OH)₂ の分解に伴う脱水として減量を測定し、Ca(OH)₂ の含有率に換算。
- 3) f-CaO はエチレングリコール抽出のものから Ca(OH)₂ を差し引くことで算出。

表-5.2 中のカルシア改質材からのカルシウムイオンの溶出量は、下記で計測した。

- 1) 試料調整として、カルシア改質材 5 kg を風乾し、円すい四分法にて縮分し、有姿で約 400g を採取。
- 2) 溶出試験として、コック付き 10L ポリビンに試料と溶媒との重量比が 1:9 の割合となるように人工海水を添加し、調整したカルシア改質材試料を添加した後、振とう機にて 30 分間連続して振とう。
- 3) 試料液の一部を孔径 0.45μm のメンブレンフィルターを用いて吸引ろ過し、ろ過液を検液とする。
- 4) カルシウム測定として、ICP 発光分光分析装置を用いて、検液のカルシウム濃度を測定し、検液のカルシウム濃度から溶媒の人工海水のカルシウム濃度を差し引き、溶存カルシウム量を求める。

また、今回の試験において、カルシア改質材の粒度改善効果とカルシウムイオン溶出によるイオン交換反応を分離することを目的に、表-5.2 中に示す天然骨材も使用している。その粒度分布を図-5.1 に示す。この天然骨材は、アスファルト用砕石とコンクリート用砂

材を混合したものである。

表-5.2 カルシア改質材の性状

改質材 名称	表乾密度 (g/cm ³)	f-CaO 量 (%)	Ca(OH) ₂ 量 (%)	カルシウム溶出量 (mg/L)	ゼータ電位 (mV)
A	3.34	5.3	1.2	1300	45
B	2.86	6.3	2.3	870	-5
C	3.14	3.4	0.7	1000	—
D	3.06	3.8	1.1	1300	—
E	2.97	4.3	1.4	1700	—
天然	2.71	—	—	—	—

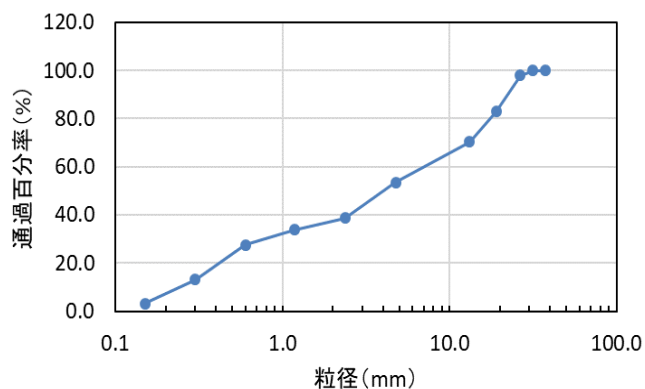


図-5.1 天然石の粒度分布

5. 2. 2 実験概要 (試験内容)

(1) イオン交換反応におけるゼータ電位変化

カルシア改質土において、浚渫土砂にカルシア改質材を混合した際のイオン交換反応を確認するため、原材料と混合材料（カルシア改質土）によるゼータ電位と濁度を計測した。試験ケースを表-5.3 に示す。ゼータ電位と濁度の計測は、5.2.1(1)と同一の方法で実施した。

表-5.3 イオン交換反応におけるゼータ電位変化の試験ケース

分類	試験 ケース	浚渫土砂		カルシア改質材	
		種類	混合割合 (vol %)	種類	混合割合 (vol %)
浚渫土砂 単独	1-1	HH-1	100	—	0
	1-2	HA	100	—	0
混合材 の影響	1-3	HH-1	70	A	30
	1-4	HA	70	A	30
	1-5	HH-1	70	B	30
	1-6	HA	70	B	30
混合割合 の影響	1-7	HH-1	80	A	20
	1-8	HH-1	60	A	40

(2) 流動性抑制のメカニズム把握

カルシア改質土の流動性抑制効果のメカニズムを定量的に把握するため、カルシア改質材の添加で生じる粒度改善効果と吸水効果、イオン交換反応の3要因の寄与度を把握することを目的に、表-5.4と表-5.5に示す改質材混合率、改質材の吸水率、及びカルシウム供給量（カルシア改質材からのカルシウム溶出量）を変化させたケースでスランプ試験を実施した。試験の概要を図-5.2に示す。浚渫土砂としてHH-2と模擬浚渫土砂を用い、カルシア改質材として固化反応に寄与しない天然骨材を使用した。カルシア改質材（天然骨材）の混合率は、20%、30%、40%で変化させた。カルシア改質材が吸水することによる含水比の変動は、カルシア改質材（天然骨材）混合率30vol%を基本として、カルシア改質材の表乾状態の含水比と自然含水比の差を0.91%と設定し、その差と、その1/2倍及び2倍の水分変動をパラメータとした。カルシア改質材からのカルシウム供給効果は、天然骨材に消石灰を添加することで表現した。消石灰の添加量は、一般的なカルシア改質材におけるf-CaOやCa(OH)₂の含有範囲を考慮して、骨材重量に対して0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、1.0%、4.0%とした。

表-5.4 流動性抑制メカニズム把握試験ケース(1)

浚渫土砂	試験ケース	天然骨材混合割合 (%)	吸水分添加 (%)	消石灰添加 (%)
B	2-1-1	0	—	—
	2-1-2	20	—	—
	2-1-3	30	—	—
	2-1-4	40	—	—
	2-1-5	30	0.46	—
	2-1-6	30	0.91	—
	2-1-7	30	1.82	—
	2-1-8	30	—	0.1
	2-1-9	30	—	0.2
	2-1-10	30	—	0.3
	2-1-11	30	—	0.4
	2-1-12	30	—	0.5
	2-1-13	30	—	1.0
	2-1-14	30	—	4.0

表-5.5 流動性抑制メカニズム把握試験ケース(2)

浚渫土砂	試験ケース	天然骨材混合割合 (%)	吸水分添加 (%)	消石灰添加 (%)
模擬	2-2-1	0	—	—
	2-2-2	20	—	—
	2-2-3	30	—	—
	2-2-4	40	—	—
	2-2-5	30	0.46	—
	2-2-6	30	0.91	—
	2-2-7	30	1.82	—
	2-2-8	30	—	0.1
	2-2-9	30	—	0.2
	2-2-10	30	—	0.3
	2-2-11	30	—	0.4
	2-2-12	30	—	0.5
	2-2-13	30	—	1.0
	2-2-14	30	—	4.0

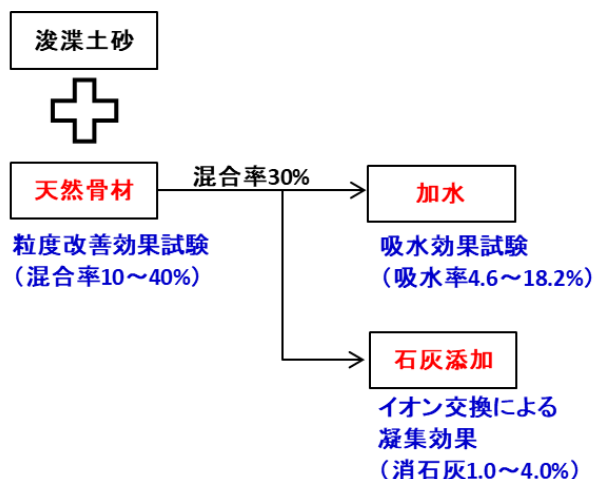


図-5.2 試験概要

(3) 水槽による濁り抑制効果の把握試験

カルシア改質土から発生する濁りの主要因である浚渫土砂の細粒分について、水中投入時の巻き上がりを抑制するためには、カルシア改質土の粘性を大きくすることが効果的と考えられる。泉水ら⁵⁾はスランプ値と濁りの関係を調査し、スランプ値が1~7cmの範囲でSSが減少することを明らかとしているが、カルシア改質材の混合割合は30vol%固定で、混合割合等が変化した場合の知見は少ない。そこで、カルシア改質土の濁り抑制効果について、浚渫土の物性や含水比、及びカルシア改質材の混合率やカルシア改質材からのカルシウム溶出量が異なる場合の影響を把握するために、水槽を用いた検討を実施した。実験は図-5.3に示す横900mm、奥行500mm、高さ500mmの水槽に浚渫土砂とカルシア改質土を平板を用いてスライドさせて投入し、投入から1分後の濁度を計測した。投入量は5kgとし、濁度計は水槽の底から150mmの位置に設置した。濁度値は、別途試験にてSSに換算した。なお、浚渫土砂は表2示すHH-1、HA、CCの3種類を用いて、HH-1については実工事における浚渫土砂含水比の振れ幅を考慮して、液性限界の1.15wL、1.3wL、1.5wLに調

泥して試験に用いた。試験ケースを表-5.6 に示す。カルシア改質材の混合割合の検討は、浚渫土砂 HH-1 を用いて実工事の浚渫土含水比の平均値に近いと想定される 1.3wL に対して 10vol%~40vol%に変化させ、他のケースは 30vol%混合とした。

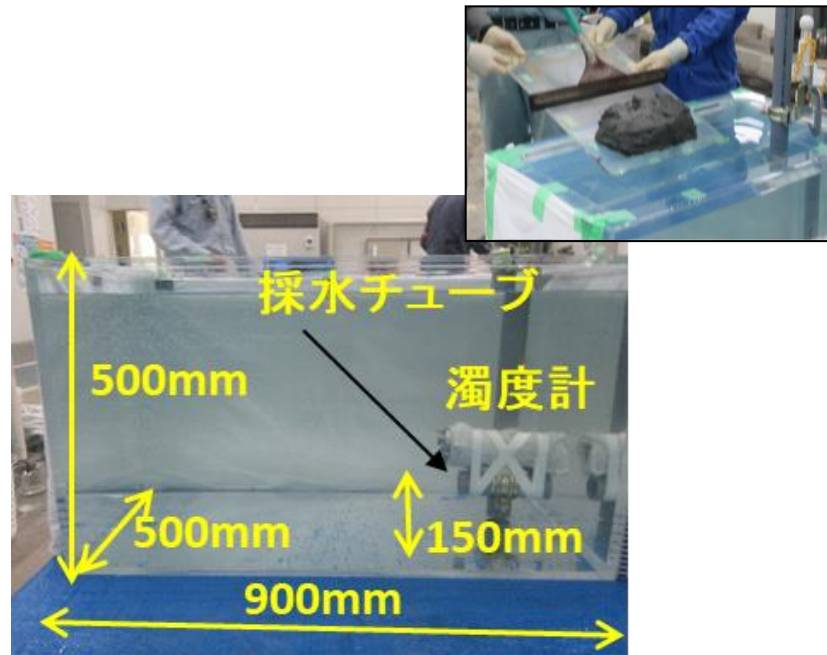


図-5.3 水槽実験の概要

表-5.6 室内水槽試験の試験ケース

試験ケース	浚渫土砂			カルシア改質材		カルシア改質土			
	種類	含水比 (%)	液性限界比	種類	容積混合率 (vol%)	スランプ値 (cm)	含水比 (%)		
3-1-0	HH-1	62.0	1.15	—	0	21.0	61.2		
3-1-1	HH-1			C	30	3.0	28.5		
3-1-2	HH-1			D	30	3.2	28.3		
3-1-3	HH-1			E	30	2.2	29.1		
3-2-0	HH-1	70.0	1.30	—	0	24.5	68.5		
3-2-1-1	HH-1			C	10	16.5	47.0		
3-2-1-2	HH-1			D		15.5	43.5		
3-2-1-3	HH-1			E		10.8	48.0		
3-2-2-1	HH-1			C	20	11.5	35.0		
3-2-2-2	HH-1			D		11.7	37.7		
3-2-2-3	HH-1			E		9.0	37.2		
3-2-3-1	HH-1			C	30	7.0	27.8		
3-2-3-2	HH-1			D		9.5	25.3		
3-2-3-3	HH-1			E		5.0	33.8		
3-2-4-1	HH-1			C	40	5.8	26.0		
3-2-4-2	HH-1			D		5.0	23.3		
3-2-4-3	HH-1			E		3.3	24.8		
3-3-0	HH-1			81.0	1.50	—	0	30.0	79.5
3-3-1	HH-1					C	30	14.5	30.4
3-3-2	HH-1					D		15.2	31.1
3-3-3	HH-1	E	15.5			30.6			
3-4-0	HA	200.0	1.60	—	0	24.3	204.2		
3-4-1	HA			C	30	16.5	45.5		
3-4-2	HA			D		17.5	45.4		
3-4-3	HA			E		17.5	47.7		
3-5-0	CC	57.5	1.32	—	0	21.0	58.6		
3-5-1	CC			D	30	4.0	22.9		

(4) 実海域投入実験

カルシア改質土の流動性低下による濁り抑制効果を実海域で実証するために、浚渫土砂の性状が異なる4種類に対してカルシア改質材混合率30vol%で作製したカルシア改質土を土運船から底開バージで投入した際の濁り発生状況を計測し、スランプ値との比較を実施した。実験ケースと浚渫土砂および作製・投入したカルシア改質土の性状を表8に示す。また、事例としてケース4-3の性状を図-5.4に示す。

濁りの調査は、図-5.5に示すように土砂投入地点から潮流の下流側（濁りが流れ去る方向）の100m地点に測線を設け、この測線上の濁度を多項目水質計にて観測した。また、投入した土砂を用いて別途室内試験を実施し、濁度とSSの相関式を作成した。この調査で得た測線上の断面を通過する濁り(SS)濃度を積算し、この積算値を投入土砂による濁りの発生量とした。具体的方法を以下に示す。

- 1) 各地点・各水深帯での単位時間当たりの断面を通過する濁りのフラックス①を算定。なお、濁りはバックグラウンド濃度を差し引いた値とする。

$$\text{フラックス① (g/m}^2\text{/s)} = \text{各地点・各水深帯での濁り (g/m}^3\text{)} \times \text{断面に直行する流速 (m/s)}$$

- 2) 単位時間当たりの全断面を通過する濁り量②を算定。

$$\text{濁り量② (g/s)} = \text{フラックス① (g/m}^2\text{/s)} \times \text{各地点・各水深帯での断面積 (m}^2\text{)}$$

- 3) 土砂投入による濁りの発生量③ (g) を算定。

$$\text{発生量③ (g)} = \text{濁り量② (g/s)} \times \text{観測時間 (s)}$$

表-5.7 実海域試験のケース

試験 ケース	浚渫土砂			カルシア改質土		
	土質性状	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	スランプ値 (cm)
4-1	粘性土	1.397	—	1.797	28.9	14.5
4-2	粘性土	1.419	50.8	1.803	38.2	11.5
4-3	粘性土	1.453	47.1	1.850	34.4	8.5
4-4	砂質土	1.922	26.4	2.130	27.3	19.0



図-5.4 ケース4-3の性状

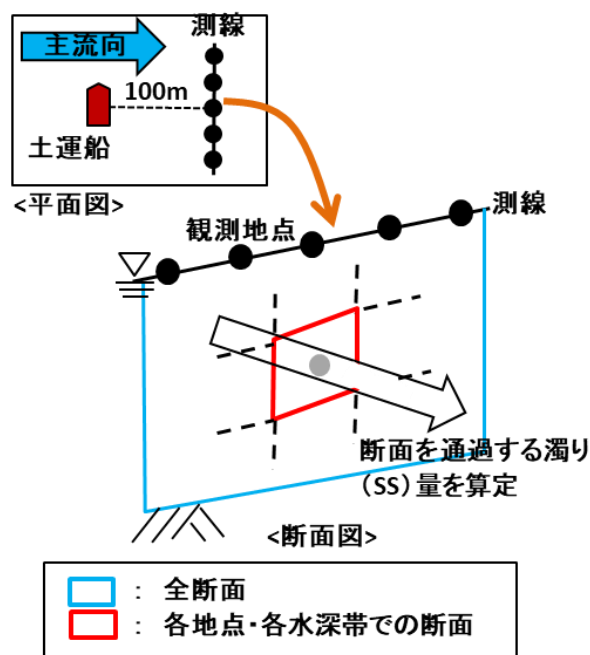


図-5.5 濁り発生量の算定方法の概念図

5. 2. 3 試験結果

(1) イオン交換反応におけるゼータ電位変化

ケース 1-1～1-4 のカルシア改質土におけるゼータ電位と濁度の関係を図-5.6 に示す。図-5.6 中には、表-2.1 で示す各浚渫土砂単独でのゼータ電位と濁度の試験結果も示す。これより、浚渫土砂 HH-1 については、カルシア改質材と混合することで負のゼータ電位がカルシア改質材の種類に因らず小さくなり、濁度が小さくなる傾向にある。一方、浚渫土砂 HA については、カルシア改質材 B を混合したケースではゼータ電位は小さくなるが、カルシア改質材 A を混合したケースでは逆にゼータ電位が大きくなり、結果として濁度の変化も見られなかった。浚渫土砂 HA については、含水比は高いが原泥においても濁度が小さい特性を有しているため、混合で生じたゼータ電位変化による凝集効果の影響が小さかったと推定される。浚渫土砂 HH-1 について、カルシア改質材 B のゼータ電位は表 3 より -5 mV と小さいものの、混合土の負のゼータ電位は浚渫土砂単独と比較して小さくなる傾向が見られた。ケース 1-3 と 1-5, 1-6 の結果を図-5.7 に示す。これより、混合率が小さい 20% 混合においても、負のゼータ電位が小さくなって濁度が減少する効果が見られた。これらの結果から、浚渫土砂に正のゼータ電位を有するカルシア改質材を混合すると浚渫土砂の負のゼータ電位が小さくなり、濁り成分である微粒子同士の静電的反発が弱くなることで凝集沈殿効果が発揮され、濁りが抑制される効果が期待できると推定される。また、その抑制効果は、浚渫土砂の特性で変動することがわかった。

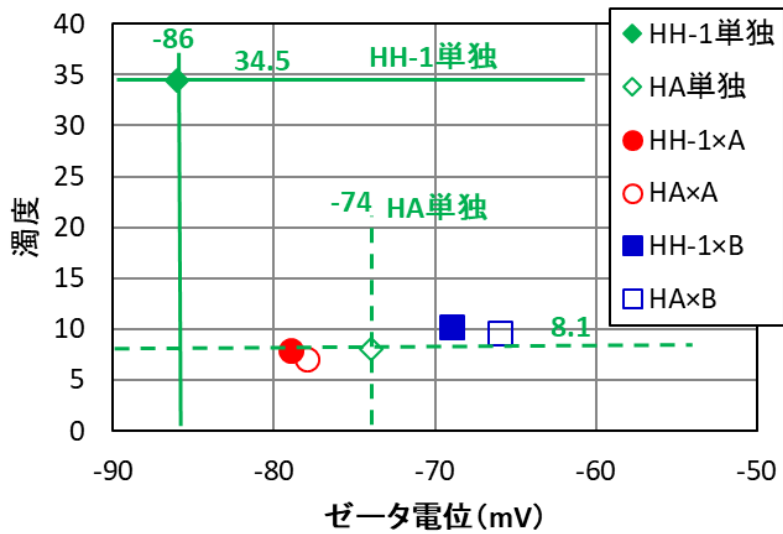


図-5.6 ゼータ電位と濁度の関係 (材料差異)

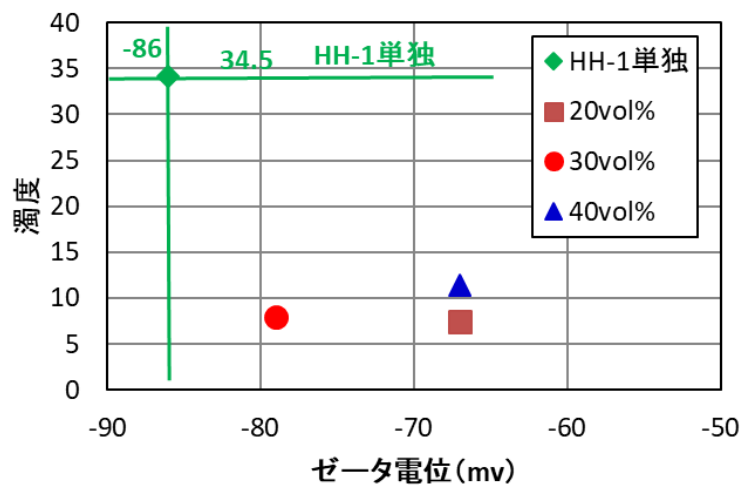


図-5.7 ゼータ電位と濁度の関係 (混合率差異)

(2) 流動性抑制のメカニズム把握

カルシア改質土の流動性抑制効果のメカニズムとして考えられる粒度改善効果, 吸水効果, イオン交換反応の3要因の寄与度について考察する。まず, 粒度改善効果の評価のために骨材混合率を変化させた試験結果を図-5.8に示す。骨材の混合率に応じてスランプ値が低下することがわかる。これは, 流動性の高い浚渫土砂が骨材に置き換えられ, 骨材の混合率増加に従って浚渫土砂の容積が少なくなることが要因であると推定される。この現象は文献1)で示されている粒度改善効果であり, その影響程度はスランプ値で数cm~20cm程度と混合率に応じた効果の幅が大きい。図-5.9に, カルシア改質材の吸水効果(浚渫土砂の減水効果)によるスランプ値の変動を示す。今回の試験では, 加水量をカルシア改

質材の表乾状態の含水比と自然含水比の差の 1/2~2 倍で変動させたが、スランプ値の変動は数 cm 程度であった。これより、文献 1)で示されているカルシア改質材の吸水による流動性改善効果は小さい可能性があると考えられる。図-5.10 に、カルシア改質材からのカルシウム成分供給による凝集効果の試験結果を示す。消石灰添加量が 0.1%でも 10cm 程度のスランプ値低下の効果があり、1.0%程度までその効果が発揮されることが判る。これより、浚渫土砂性状の影響もあると思われるが、濁り抑制に必要なカルシア改質材中の f-CaO と Ca(OH)₂ の量は 1.0%程度であると思われる。この 1.0%は文献 1)で規定されているカルシア改質材に必要なカルシウム量の下限值であり、文献 1)の規定を満足する材料であれば、カルシア改質材の凝集効果としての最低限の機能は保有していると思われる。なお、浚渫土砂の陽イオン交換容量はHH-2 と模擬浚渫土砂で 3.6 倍の差があるが、図-5.10 より今回の実験では明確な影響の差異は確認できなかった。以上より、これまで文献 1)等でカルシア改質土の粒度改善効果のメカニズムは粒度改善効果と吸水効果とされてきたが、カルシウムイオン供給による凝集効果の影響も大きいことがわかった。

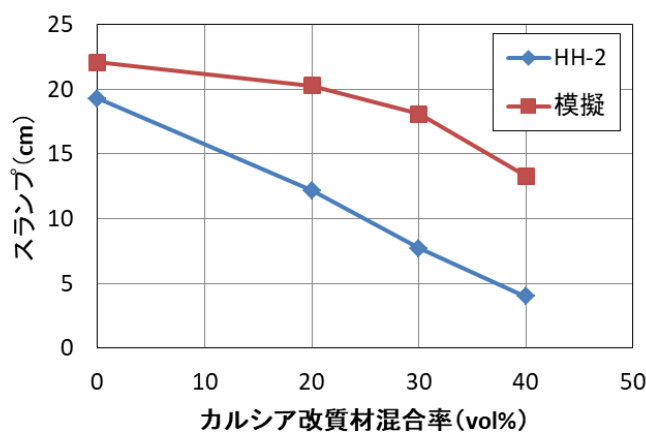


図-5.8 混合率とスランプの関係

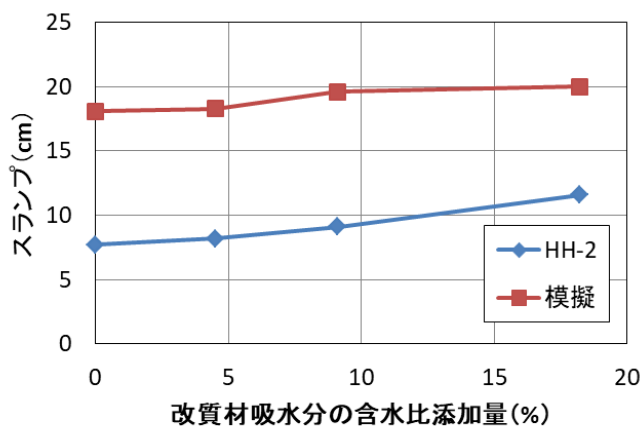


図-5.9 骨材吸水による含水比変化とスランプの関係

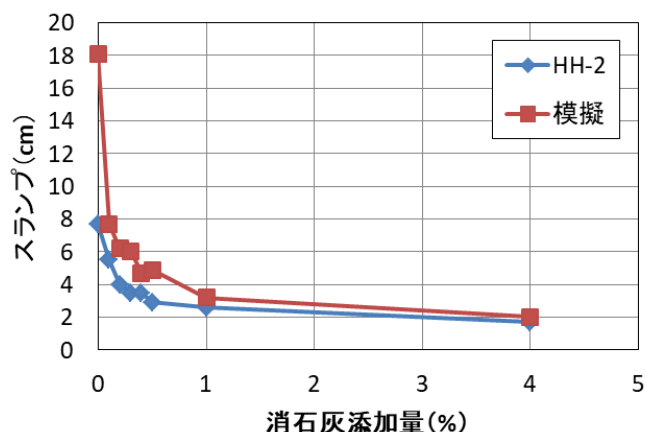


図-5.10 カルシウム添加とスランプの関係

(3) 水槽による濁り抑制効果の把握試験

カルシア改質材 D を用いた場合のカルシア改質材混合率とスランプ値の関係を図-5.11 に示す。カルシア改質材の混合率が上がるとスランプ値が低下することがわかる。図-5.12 に、図-5.11 についてスランプ値と SS の関係で整理したものを示す。全体的にはスランプ値が低下すると SS も低下する傾向にあるが、その低下量は浚渫土砂の性状により異なる。文献 4) ではスランプ値が 1~7cm の範囲で SS が減少するとしているが、例えば図-5.12 中の HH-1 の 1.3 wL や 1.5 wL のように浚渫土砂の性状によってはスランプ値が 15cm 程度でも濁り抑制効果が発揮される結果となった。図-5.13 に浚渫土砂 HH-1 (1.3 wL) についてカルシウム溶出量とスランプ値の関係を混合率毎に整理した結果を示す。ばらつきはあるものの、カルシウム溶出量が上がるとスランプ値は小さくなる傾向が見られた。これは、図-5.10 で示したイオン交換反応の効果と推察される。図-5.14 に、図-5.13 の結果について、カルシウム溶出量と SS の関係で整理したものを示す。これより、カルシウム溶出量が 1000 mg/L から 1300 mg/L に変化すると SS も低下する傾向にあるが、カルシウム溶出量が 1300 mg/L から 1700 mg/L への変化では、SS の低下は小さくなる傾向となった。これより、浚渫土砂に対するカルシア改質材のイオン交換反応による凝集効果には、浚渫土砂毎に効果を発揮するカルシウム溶出の必要量が存在することが示唆される。図-5.15 にカルシウム溶出量と SS の関係について、浚渫土砂の液性限界比毎に整理した結果を示す。これより、同一浚渫土砂 (HH-1) であれば、含水比 (液性限界に対する含水比の比) が上がるとカルシウム溶出量に応じた濁り抑制効果が発揮される状況になることがわかる。一方、HA については、原泥から濁り発生が少ないこともあり、高液性限界比であるにも関わらずカルシウム溶出量が濁り抑制効果に与える影響は小さかった。

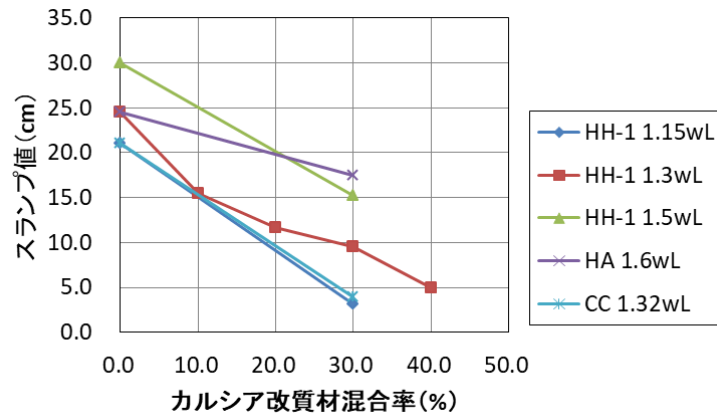


図-5.11 カルシア改質材混合率とスランプ値の関係

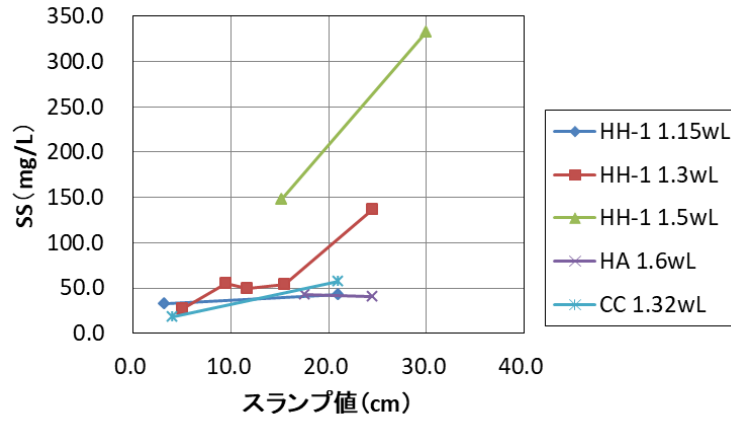


図-5.12 スランプ値と SS の関係

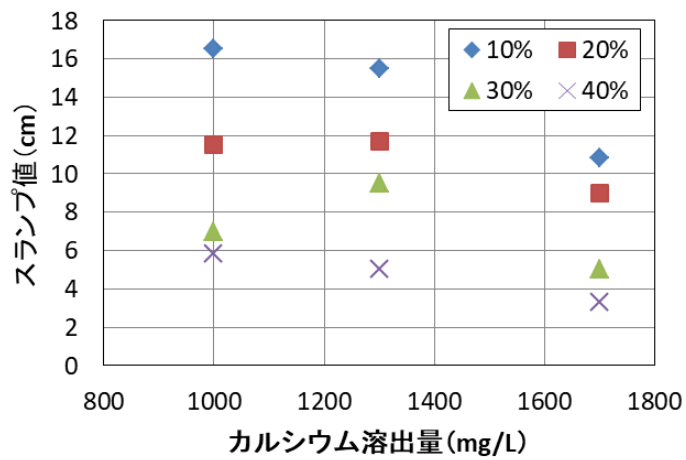


図-5.13 カルシウム溶出量とスランプ値の関係

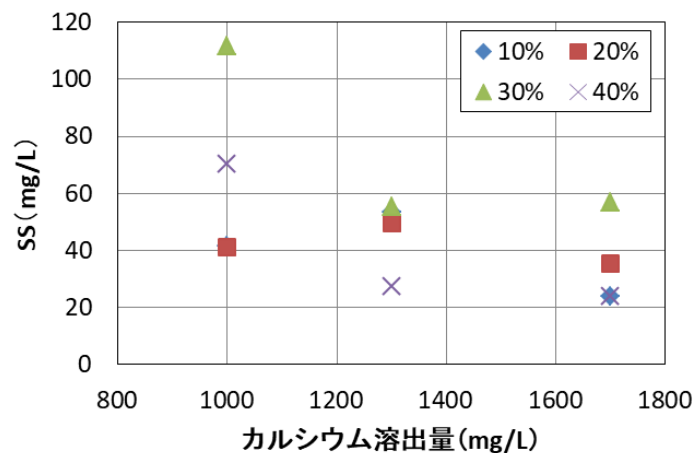


図-5.14 カルシウム溶出量と SS の関係 (混合率整理)

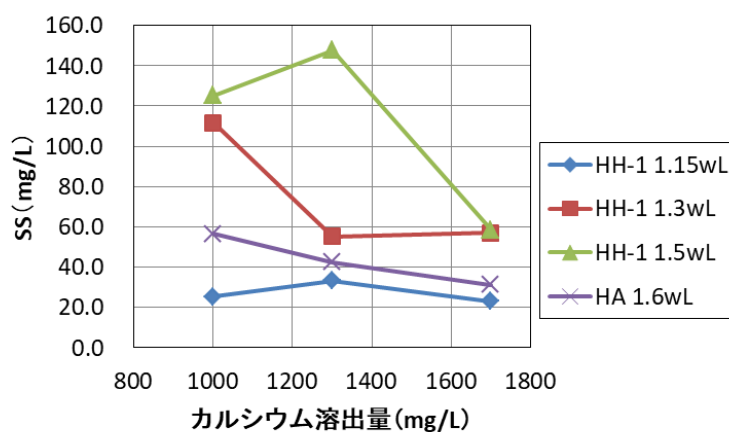


図-5.15 カルシウム溶出量と SS の関係(浚渫土砂整理)

(4) 実海域投入実験

表-5.8 に投入土砂量と濁り発生原単位を、図-5.16 にスランプ値と濁りの発生原単位の関係を示す。なお、濁り発生原単位は、3.2(4)で求めた発生量③を表-5.8 投入土砂量で除したものである。これより、スランプ値の低下に比例して、濁りの発生量も減少する傾向が確認された。また、文献 6)で示されている本調査と同規模の土運船 (250~500m³) での土砂投入工による濁り発生の原単位は $10\sim30\times10^{-3}$ (t/m³) であるのに対して、本調査で得られた濁りの発生原単位は $0.9\sim5.1\times10^{-3}$ (t/m³) であり、カルシア改質土による濁り発生の抑制効果が確認された。

表-5.8 実海域試験の結果

試験 ケース	投入土砂量 (m ³)	スランプ値 (cm)	濁り発生原単位 (t/m ³)
4-1	264	14.5	3.08×10 ⁻³
4-2	268	11.5	1.38×10 ⁻³
4-3	262	8.5	0.89×10 ⁻³
4-4	225	19.0	5.11×10 ⁻³

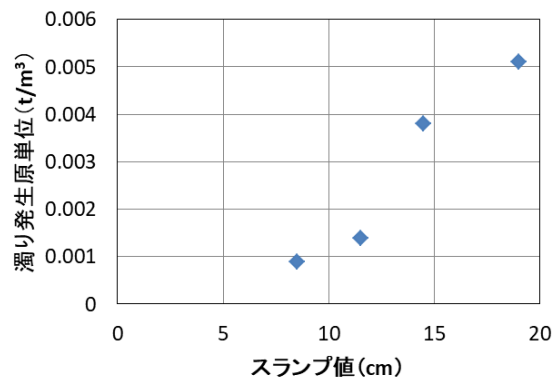


図-5.16 実海域におけるスランプ値と濁り発生原単位の関係

5. 3 カルシア改質土の流動性に関する解析的検討

5. 3. 1 カルシア改質土の流動性評価方法

地盤材料の流動性については、粘性土のレオロジー特性として研究^{7), 8), 9)}が進められてきた。また、粘性土の流動性に関する実用化研究としては、遠心載荷試験による勾配形成研究¹⁰⁾や模型試験を用いた地盤空隙充填性の研究¹¹⁾等が実施されている。一方、カルシア改質土の流動性は、これまでの研究で流動性指標の一つであるスランプ値で表現できることが判っている。スランプ値はフレッシュなコンクリート材料の流動性を評価する指標であるが、フレッシュなカルシア改質土はフレッシュなコンクリートと同様に、流動部分（浚渫土砂）と骨材（カルシア改質材）の2種類の材料から構成されており、同様の評価ができる可能性がある。

フレッシュコンクリートの変形・流動性質の研究では、多くの研究でフレッシュコンクリートはビンガムモデルに近い挙動を示すことが認められている^{12), 13)}。ビンガムモデルとは、図-5.17に示すように、ある応力（降伏値）までは全く変形せず、それ以上の応力に対しては応力に比例した変形速度で流動する性質を表す。ビンガムモデルの物性は、図-5.17示した降伏値と塑性粘度の2つのレオロジー定数で決まる。降伏値は流動し始める応力を示し、塑性粘度は流動後の変形速度を支配する。スランプ試験におけるフレッシュコンクリートの流動の原理を図-5.18に示す。フレッシュコンクリートには、主として自重による

内部応力が作用している。もし、コンクリートのどの位置においても内部応力が降伏値より小さい場合は、コンクリートは流動しない。一方、一部の内部応力が降伏値を超えると、その部分に流動が生ずる。コンクリート内部に作用する応力は自重によるものであるため、流動発生の有無は、主として試料の単位容積質量と形状に関する。流動が進み、コンクリートの底面が広がり、高さが低くなってくると、内部応力は次第に小さくなる。流動がある時点を過ぎると内部応力は全て降伏値を下回り、流動は停止する。この現象は、カルシア改質土によるスランプ試験と同様の挙動であることから、カルシア改質土もフレッシュコンクリートと同様の流動性評価で表現できると考え、ビンガムモデルによる流動解析検討を実施した。なお、本検討では、変形速度の影響はあまり重要ではなく、最終的な流動形状の検討に絞ることから、降伏値をパラメータとした検討とした。また、流動解析には、汎用ソフトANSYS Fluent VOF(Volume of Fluid) モデルを用いた。

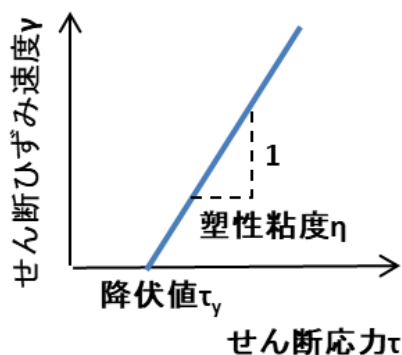


図-5.17 ビンガムモデルの概要

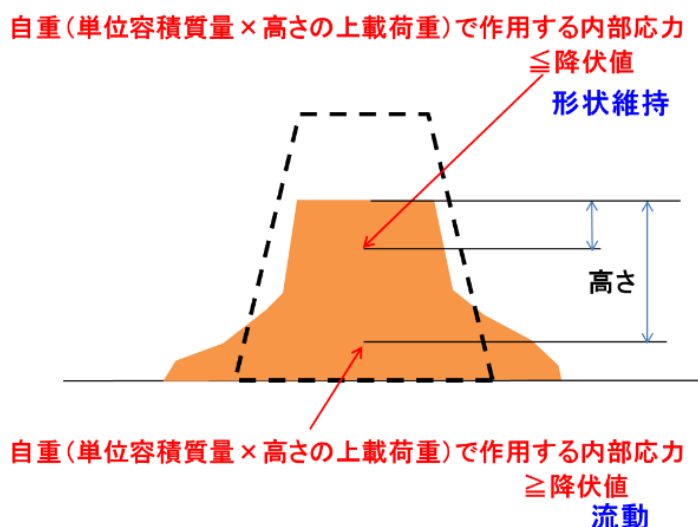


図-5.18 スランプ試験の流動原理

5. 3. 2 実験と解析の比較によるビンガムモデルの適用性検討

(1) スランプ試験による流動性検討

カルシア改質土の流動性検討へのビンガムモデルの適用性を検討するため、スランプ試験による実験値と解析値の比較検討を行った。スランプ試験には、表-5.9に示す浚渫土砂2種類とカルシア改質材2種類を用いた。試験ケースを表-5.10に、その密度を表-5.11に示す。浚渫土砂は、含水比を調泥して試験を実施した。なお、試験①ではスランプ試験を通常の気中に加えて、図-5.19に示すように水中でのスランプ試験を実施した。水中でのスランプ試験は、空の水槽内でスランプコーンにカルシア改質土を詰め、その後に水を張って、水中でスランプコーンを引き上げることで実施した。

表-5.9 使用材料

項目	単位	浚渫土性状		カルシア改質材	
		浚渫土砂A	浚渫土砂B	改質材A	改質材B
湿潤密度	g/cm ³	1.27	1.53	—	—
表乾密度	g/cm ³	—	—	2.41	3.27
含水比	%	201.0	80.3	—	—
細粒分含有率	%	98.3	81.6	—	—
液性限界	%	126.3	62.6	—	—
塑性限界	%	47.2	27.5	—	—
塑性指数		79.1	35.1	—	—

表-5.10 試験ケース

		使用材料		浚渫土砂 調泥含水比 (%)	改質材 混合率 (vol%)	備考		
		浚渫 土砂	カルシア 改質材					
試験 ①	CASE 1-1-気	浚渫 土砂 A	改質材 A	220.0	10	水中試験		
	CASE 1-1-水							
	CASE 1-2-気			220.0	30	水中試験		
	CASE 1-2-水							
	CASE 1-3-気							
CASE 1-3-水	浚渫 土砂 B	改質材 B	97.1	20				
CASE 2-1								
CASE 2-5						122.6	30	
CASE 2-6								
CASE 2-7								
CASE 2-9	110.1	30						
CASE 2-2								
CASE 2-3								
CASE 2-4				97.5	30			
CASE 2-8								
CASE 2-9								
CASE 2-9								

表-5.11 各試験ケースの密度

		カルシア改質土の密度 (g/cm ³)
試験①	CASE 1-1-気	1.44
	CASE 1-1-水	
	CASE 1-2-気	1.84
	CASE 1-2-水	
	CASE 1-3-気	1.82
	CASE 1-3-水	
試験②	CASE 2-1	1.81
	CASE 2-5	1.93
	CASE 2-6	1.96
	CASE 2-7	1.91
	CASE 2-9	2.01

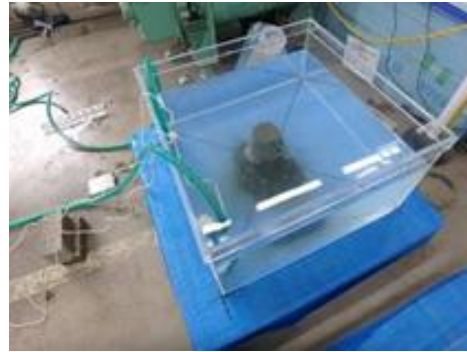


図-5.19 水中スランプ試験の状況

レオロジーモデルにおける降伏値設定には、多くの実験的方法が提案されている¹⁴⁾。これに対して、今回の検討では実験による設定ではなく、表-5.10 で示した各試験ケースに対して降伏値をパラメータとした合わせこみ解析を行い、スランプ値が合致する降伏値を算出することで実施した。解析は、図-5.20 に示すように計算領域を直径 600 mm、高さ 400 mm の円柱とし、流動前のカルシア改質土の初期形状は上底直径 100 mm、下底直径 200 mm 高さ 300 mm のスランプコーン形状を模した円錐台、周囲は水もしくは空気の条件とした。ビンガムモデルでは、せん断応力 τ は式(1)で表される。

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_y \quad \dots (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度 (計算結果)、 η は塑性粘度で文献 12) を参考に 100 Pa・S と設定、 τ_y は降伏値である。合わせこみ解析の事例として、CASE1-2 について検討した結果を図-5.21 に示す。

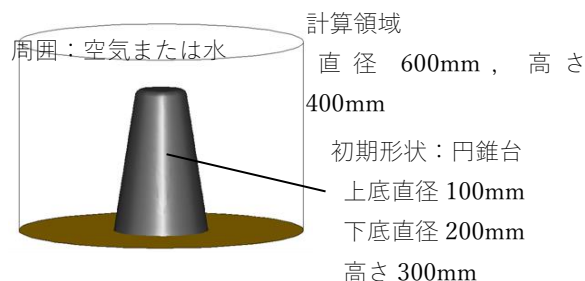


図-5.20 スランプ解析モデル

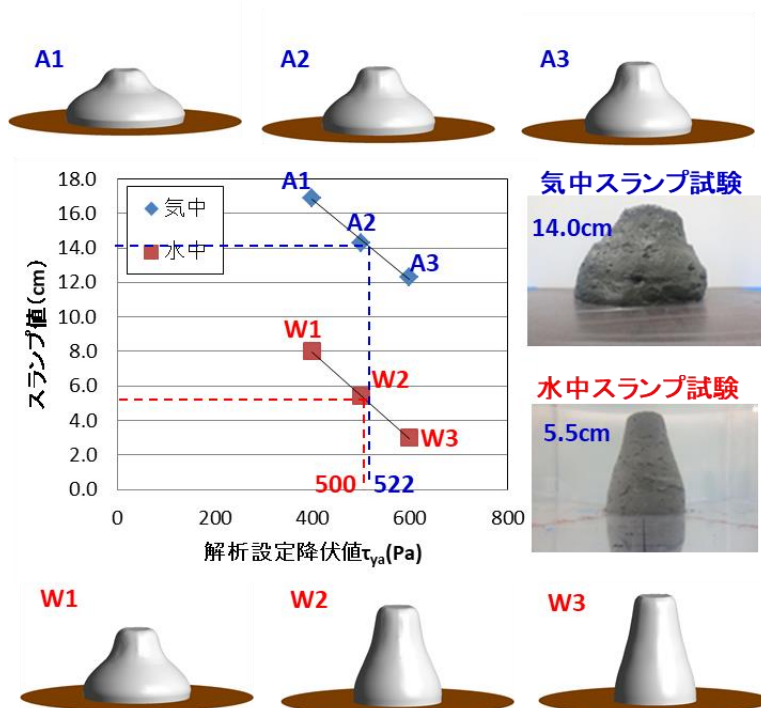


図-5.21 CASE1-2の合わせこみ解析事例

試験①について、実験スランプ値とその値に合わせこんだ解析降伏値の関係を図-5.22に示す。また、この図-5.22に対して、気中と水中の解析降伏値を比較したものを図-5.23に示す。この結果より、気中と水中でスランプ値は大きく異なるものの、概ね降伏値は同一の値で表現できていることがわかる。

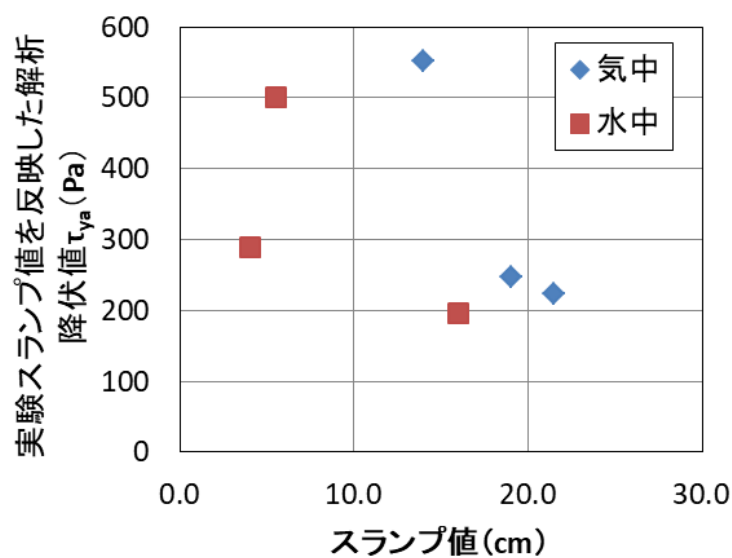


図-5.22 試験①のスランプ値～降伏値関係

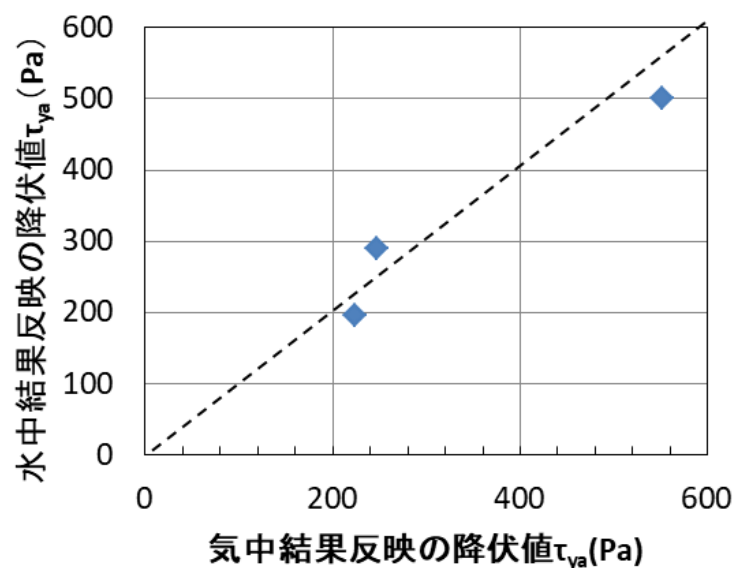


図-5.23 気中と水中の降伏値比較

次に、試験①と試験②の気中の結果に関して、スランプ値とその値に合わせこんだ解析降伏値の関係を図-5.24 に示す。これより、浚渫土砂やカルシア改質材の性状や混合率が異なるにも関わらず、スランプ値と降伏値は良い相関が得られる結果となった。これを式(2)で示す。

$$\tau_{ya} = -71.7 \times SL + 1578 \quad \dots (2)$$

ここで、 τ_{ya} は解析降伏値(Pa)、SLはスランプ値(cm)を示す。図-8より、自重の影響は顕著に見られない結果となった。これは、降伏値の変動幅が200~1600 Paと8倍の差があることと比較して、自重に効く単位容積質量の差が1.3倍程度と小さいことが要因と考えられる。つまり、カルシア改質土の勾配形成の評価指標であるスランプ値において、その変動パラメータである単位容積質量と降伏値のうち、単位容積質量の影響は小さいことから、フレッシュなカルシア改質土の降伏値は、スランプ試験を行うことで求めることができることになる。なお、本検討は流動部分（浚渫土砂）に骨材（カルシア改質材）が混合された状態であることから、カルシア改質材の混合率が増加して、骨材同士の接触による摩擦効果が発揮される領域になると、適用範囲外になると想定される。

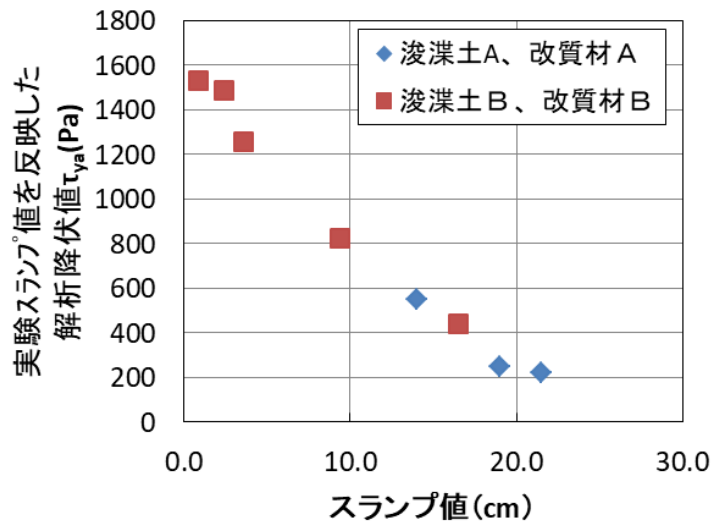


図-5.24 気中試験におけるスランプ値～降伏値関係

(2) 法面勾配試験のシミュレーション検討

前節で、カルシア改質土をビンガムモデルで表現し、降伏値をスランプ値から設定することで、カルシア改質土の流動性を評価できる可能性を示した。そこで、次に施工時の法面勾配実験に関する解析検討を実施した。施工時の法面勾配の実験値は、文献²⁾で実施された実験を対象とした。この実験の状況を図-5.27に示す。材料として表-5.9に示す浚渫土砂Bとカルシア改質材Bを用い、カルシア改質土の性状は表-5.10の試験②に示す5ケースとした。また、それぞれの解析に用いた降伏値は、前節でスランプ値から求めた降伏値とした。解析検討は、グラブバケットからフレッシュなカルシア改質土を水中に投入して、底面上に水中落下して流動することで勾配を形成する状況をシミュレートしたものである。解析では、1ケースの総投入量 5 m^3 を8回に分けて投入した。解析モデルを図-5.28に、1回の投入状況を図-5.29に、解析事例としてCASE2-7の投入時の堆積状況を図-5.30に示す。

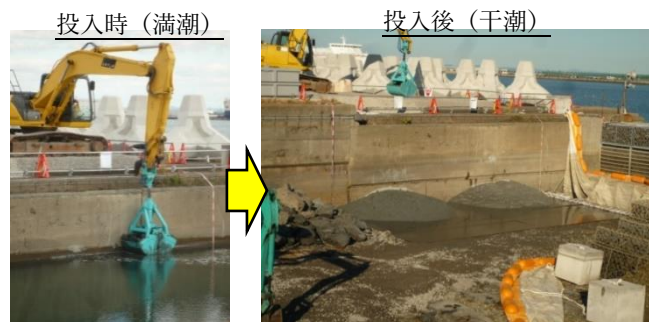


図-5.27 実験状況

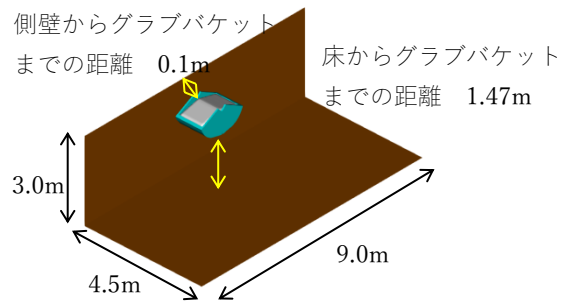


図-5.28 解析モデル

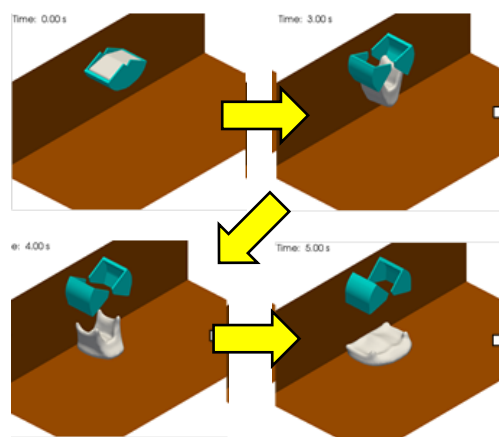


図-5.29 1回の投入状況

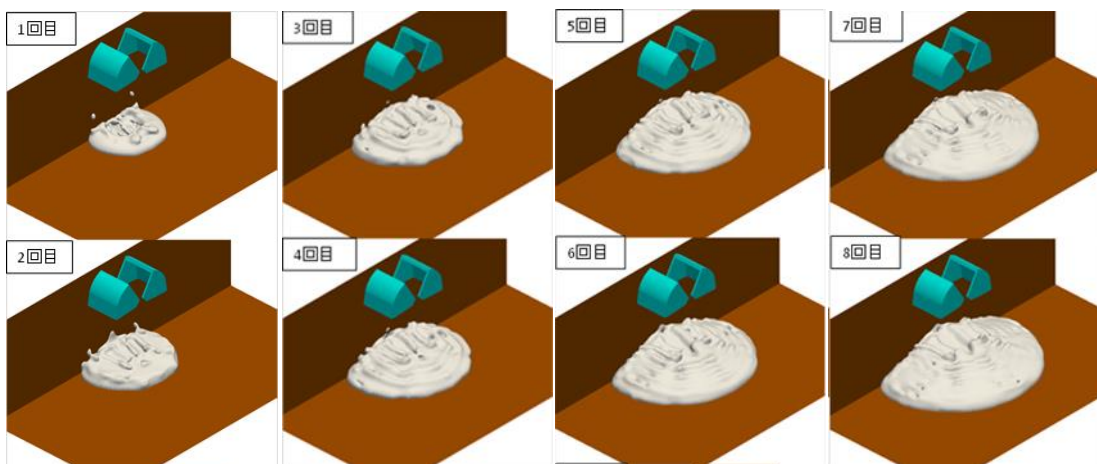


図-5.30 CASE2-7 解析の各回投入による堆積状況

解析検討の結果を図-5.31（グラブバケット開閉方向）及び図-5.32（グラブバケット開閉直角方向）に示す。これより、解析値は実験値と比較して、特にグラブバケット開閉方向で若干小さめであるものの、実験値を概ね表現していると考えられる。CASE2-1については、カルシア改質材 20vol%混合により単位容積質量が軽く、自重で作用する応力が小さいにも関わらず、実験結果が他の実験結果と比較して緩勾配となっていることから、実験値が特異点である可能性がある。これに対して、CASE2-1の解析値は、周囲の 30vol%混合と比較して単位容積質量が軽い分だけ流動が抑制されて急勾配となる想定通りの結果となった。これらの結果から、カルシア改質土の流動性に関する施工検討において、スランプ値から降伏値を算出したビンガムモデルによる流動解析は、机上での施工計画立案における粗検討としては十分に使用できると思われる。

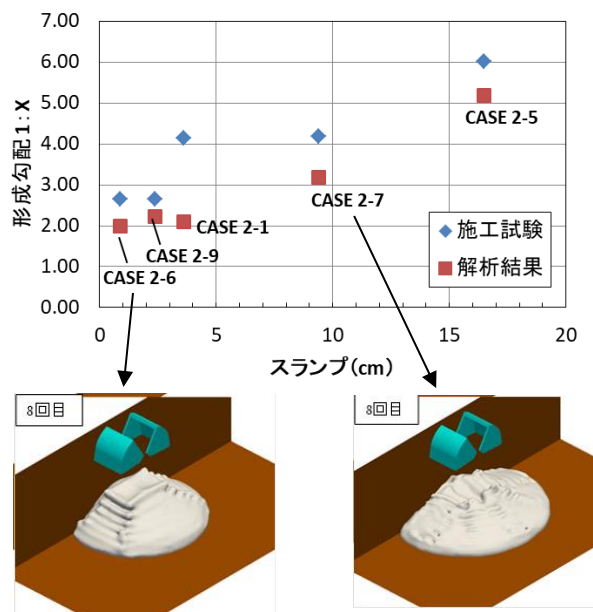


図-5.31 グラブバケット開閉方向の結果

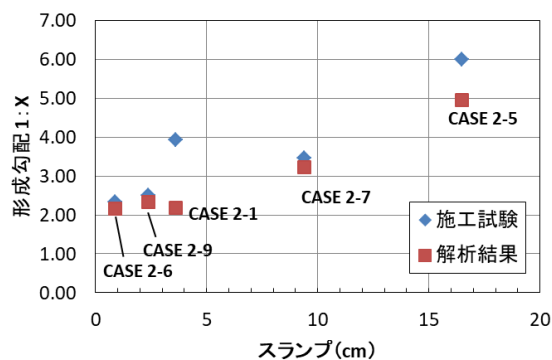


図-5.32 グラブバケット開閉直角方向の結果

5. 3. 3 消波ブロック空隙への充填検討事例

埋め立て地等を新設・拡幅する際に、接続部の既設護岸に設置されている消波ブロックや護岸石材について、その空隙の存在が新設する埋め立て土砂の沈下や吸出し等の原因となることが懸念されることから撤去する必要があるが、撤去には多大な時間と費用が必要となるとともに、多量の撤去処分材料が発生する。これに対して、充填材を用いた空隙充填による消波ブロック等の埋め殺しを実施する方法があるが、材料や工法を選定する際の充填性の確認・検討の方法が、地盤改良のグラウト材¹⁵⁾と同様に課題である。そこで、流動解析を用いたカルシア改質土の消波ブロックの空隙充填検討を実施した。

検討対象の消波ブロックは、(株)不動テトラの6.3t型テトラをモデル化した。下段に3×3個、上段に2×4個を配置し、その中心からカルシア改質土を18m³投入した。なお、投入方法はグラブバケットやトレミー管での打設の他、ポンプ圧送での打設のいずれでも良いが、本検討では上部からの自然流下とした。モデル設定の概要を図-5.33に示す。解析ケースは、カルシア改質土の流動性を変化させた表-5.12に示す3ケースで実施した。表-5.12の降伏値は、図-5.24の結果から設定した。

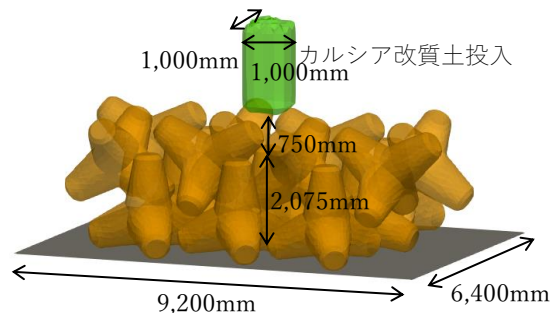


図-5.33 モデル概要

表-5.12 検討ケース

	設定スランプ値 (cm)	カルシア改質土 密度 (g/cm ³)	設定降伏値 (Pa)
Case 1	15.0	1.909	500
Case 2	10.0		785
Case 3	5.0		1,220

Case 1, 2, 3の充填状況を図-5.34, 5.35, 5.36に示す。充填率は、充填率追跡領域3m×3m×高さ1mを設定して検討した。解析の結果、Case 1の充填率は89.2%、Case 2は88.5%、Case 3は84.8%となり、いずれも底部に若干の未充填部分が残る結果となった。この結果より、今回の解析における投入は消波ブロックより上方からの流し込み投入であったが、実施工ではポンプ圧送+筒先の空隙への挿入が確実な充填に必要であることが示唆された。

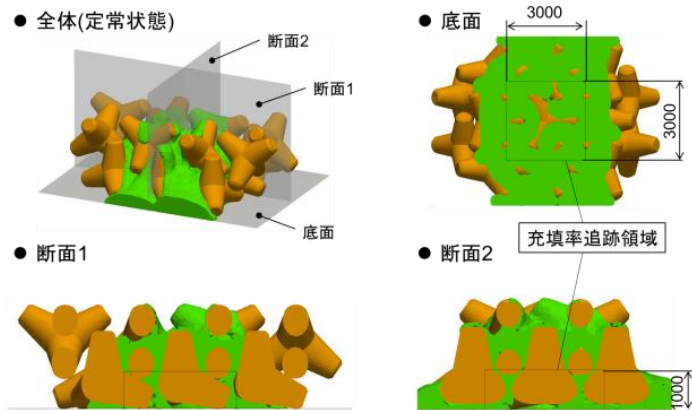


図-5.34 Case1 の解析結果

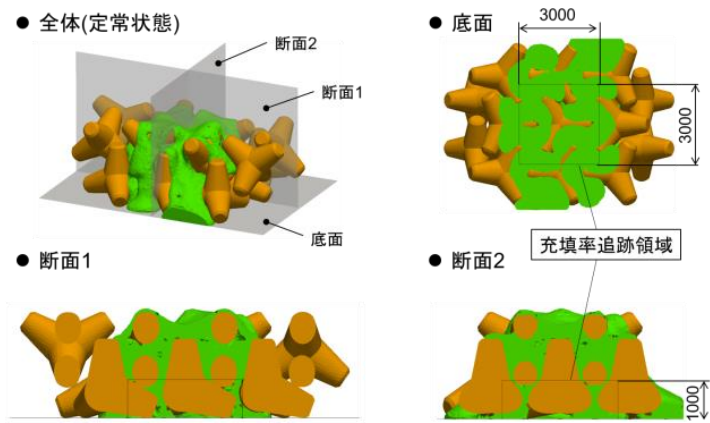


図-5.35 Case2 の解析結果

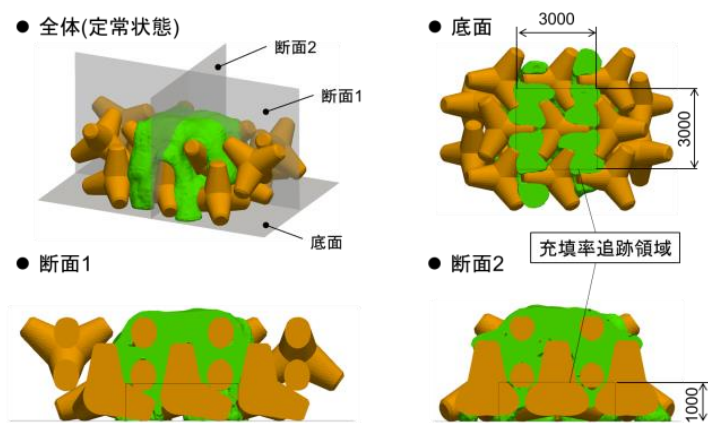


図-5.36 Case3 の解析結果

5. 4 まとめ

本章の前半では、カルシア改質土の濁り抑制効果について、メカニズムから実施工での効果までを検討した。その結論を以下に示す。

- (1) カルシア改質土の濁り抑制効果の源である浚渫土砂とカルシア改質材の混合直後の流動性低下のメカニズムを解明するために、2種類の浚渫土砂と2種類のカルシア改質材を用いて、単材と混合土をビーカー内に投入した時の濁度とゼータ電位の関係を調査した。その結果、浚渫土単独で濁度が34.5と高く負のゼータ電位が-86 mvと大きいケースでは、カルシア改質材を混合することで負のゼータ電位が-65 mv程度まで小さくなり、濁度も10程度まで低くなる傾向が見られた。これは、プラスの電荷を持つカルシア改質材を混合することで、浚渫土砂の土粒子表面の帯電状態を変化させて、凝集効果が発揮された結果と推察される。今回の検討で、カルシア改質土のフレッシュ状態での流動性低下のメカニズムとして、従来示されていたカルシア改質材による粒度改善効果と吸水効果の他に、イオン交換反応による凝集効果が存在することを明らかとした。また、カルシア改質材混合率とカルシア改質材の吸水量及び消石灰添加量をパラメータとしたスランプ値への影響試験により、カルシア改質材の吸水による流動性改善効果は他の2要因と比較して小さい可能性があることがわかった。
- (2) 浚渫土砂にカルシア改質材を混合した際の流動性低下量について、水槽へのカルシア改質土投入試験によりSSとスランプ値、及びカルシア改質材混合量とカルシウム溶出量の関係を整理した。浚渫土砂は3種類、カルシア改質材は3種類を用いた。試験の結果、カルシウム溶出量が大きくなるとスランプ値が低下する傾向が見られた。これは、イオン交換反応が要因と推察される。また、カルシウム溶出量とSSの関係では、カルシウム溶出量が大きくなるとSSは小さくなる傾向はあるものの、その傾向は線形では無く、イオン交換反応による凝集効果には、浚渫土砂毎に効果を発揮する必要カルシウム溶出量が存在することが示唆された。今回の検討では、イオン交換反応による流動性低下の傾向はゼータ電位で区分できる可能性は示されたが、区分値の設定・提案には至らず、今後の課題である。
- (3) カルシア改質土の濁り抑制効果について、実海域実証試験を実施した。250 m³規模の土運船からカルシア改質土を水中投入する際の濁りを計測した。試験として、投入するカルシア改質土のスランプ値は8.5~19.0 cmとした。その結果、一般的な土砂投入時の濁り発生の原単位は $10\sim 30\times 10^{-3}$ t/m³であるのに対して、本調査で得られた濁りの発生原単位は $0.9\sim 5.1\times 10^{-3}$ t/m³であり、水中投入におけるカルシア改質土の濁り抑制効果が確認され、濁り発生原単位とスランプ値の相関も確認された。よって、カルシア改質土の濁り抑制はスランプ値で制御可能であることが実証された。

本章の後半では、カルシア改質土の流動性について、解析的な検討を実施した。その成

果と課題を以下に示す。

- (4) カルシア改質土の流動性に関して、コンクリート分野の知見を参考に、ビンガムモデルによる流動解析検討を実施した。今回の検討では、降伏値をパラメータとして、最終的な流動形状の検討を実施した。降伏値を決めるため、浚渫土砂 2 種類とカルシア改質材 2 種類を用いて、気中と水中のスランプ試験を実施した。それを解析で逆解析し、降伏値を求めた結果、降伏値は式(2) ($\tau_{ya} = -71.7 \times SL + 1578$) で表現できることを明らかとした。つまり、フレッシュなカルシア改質土の降伏値は、スランプ試験を行うことで求めることができる。なお、自重の影響も想定されたが、試験条件下での降伏値の差異が 8 倍に対して、単位容積質量の差異が 1.3 倍と小さいことから、自重の影響は未考慮とした。
- (5) 式(2)で求めた降伏値を用いて、実海域での法面勾配試験を流動解析でシミュレーション検討した結果、スランプ値 (5 ケース) と形成勾配の関係において、スランプ値 1~20 cm 程度の範囲では解析値は実験値を表現している結果となった。これにより、スランプ値から降伏値を算定したビンガムモデルによる流動解析は、机上での施工計画立案における粗検討としては十分に使用できると考える。
- (6) 今回の解析においては、底面および消波ブロックとの接触面に作用するせん断応力を考慮しており、その降伏値はカルシア改質土と同じ値を用いている。この摩擦影響については、今後の課題である。
- (7) 施工時の勾配形成や空隙充填性については、まだデータ数が少なく、妥当性の継続検証やデータ蓄積を今後の実施工等において実施していく予定である。

まだ固化していないフレッシュなカルシア改質土の施工時の勾配形成や空隙充填性は、ビンガムモデルによる流動解析で検討できる可能性がある

【本章の参考文献】

- 1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル pp.1-1 - 9-16, 2017
- 2) 赤司有三・根木貴史・樋口晃・春日井康夫・片桐雅明・谷山健二・田中睦・平松敏和：カルシア改質土の法面勾配制御技術, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No2, pp.I_893-I_898, 2019
- 3) 竹山佳奈・泉水めぐみ・西田浩太・峯松麻成・田中裕一・江口信也・野口孝俊：カルシア改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証～強度・形状特性の把握～, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, pp.899-904, 2019
- 4) 乾道春・織田正和・田中龍彦, 鉄鋼スラグ中のフリーCaO 分析方法の標準化, 日本鉄鋼協会 会報「ふえらむ」, Vol.19, 2014.8

- 5) 泉水めぐみ・竹山佳奈・峯松麻成・西田浩太・江口信也・田中裕一・野口孝俊：カルシウム改質浚渫土を用いた汚濁低減のための潜堤施工手法の検証～発濁特性の把握～, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, pp.887-892, 2019
- 6) 国土交通省港湾局：港湾工事における濁り影響予測の手引き, 2004.4
- 7) 村山朔郎：粘土のレオロジー, 材料, 第 12 巻, 第 113 号, pp.72-78, 1963.
- 8) 村山朔郎, 関口秀夫, 吉田映：超軟弱粘土のレオロジー特性, 京大防災研究所年報, 第 16 号 B, pp.735-752, 1973.
- 9) Widjaja, B., Lee, S.H.H. : Flow box test for viscosity of soil in plastic and viscous liquid states, Soils and Foundations, 53(1), pp.35-46, 2013.
- 10) 鶴ヶ崎和博, 三宅達夫, 角田紘子：粘性土の流動・停止および安定勾配に関する遠心模型実験, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.91-92, 2009.
- 11) 渡邊明之, 板橋利昭：粘性土を主成分とした地盤空隙充填材料の充填性に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, VI-128, pp.255-256, 2002.
- 12) 谷川恭雄, 森博嗣：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価法—スランプ値から何がわかるか—, コンクリート工学, Vol 25, No.5, pp.4-16, 1987.
- 13) 神田亨, 小谷勝昭, 鎌田正孝：スランプ試験の流動シミュレーション, 土木学会年次学術講演会講演概要集, V-10, pp.19-20, 1985.
- 14) 小門武, 宮川豊章：スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, V-45, No.634, pp.113-129, 1999.
- 15) Güllü, H. : A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns, Soils and Foundations, 57, pp.384-396, 2017.

第6章 強度発現への骨材混合効果の評価を目的とした基礎的研究

6.1 概要

カルシア改質土は、そのままでは一軸圧縮強さの試験を実施困難な強度レベルである軟弱な浚渫土砂に、粒状材料であるカルシア改質材を混合して、カルシウムシリケート系水和物を主とする水和反応（ポズラン反応）で固化した浚渫土砂の固化処理土¹⁾の一種である。これまで、水和固化によるカルシア改質土の強度発現性状について様々な研究^{2),3)}が実施されており、その中でカルシア改質土は粘着力 c のみが期待できる粘性土地盤材料として取り扱うことが基本とされており、内部摩擦角は設計として見込まない材料として整理¹⁾されている。この理由は、粘性土の分類である浚渫土砂に対して、カルシア改質材（骨材）の混合率が容積比で10%~40%程度であることから、骨材同士のかみ合わせが無いと判断されているためである。よって、これまでの研究では、カルシア改質土の三軸試験による内部摩擦角評価の事例は少ない状況であったが、最近の研究では柿原ら⁴⁾が圧密非排水せん断試験による評価を試みている。

カルシア改質土は、その構成として“固化した浚渫土砂（＝固化土領域）”と“カルシア改質材（＝骨材）”の2つに分けることができる。この固化土領域と骨材が存在する形態の場合、図-6.1に示すせん断時において、骨材同士の接触が無くても固化土領域に生じるせん断面に存在する骨材が抵抗となってひずみ分布に変化を与え、せん断挙動に影響を与えると思定される。このような考えから、杉村ら⁵⁾はピーク強度後の地盤材料の粘り強さを研究している。

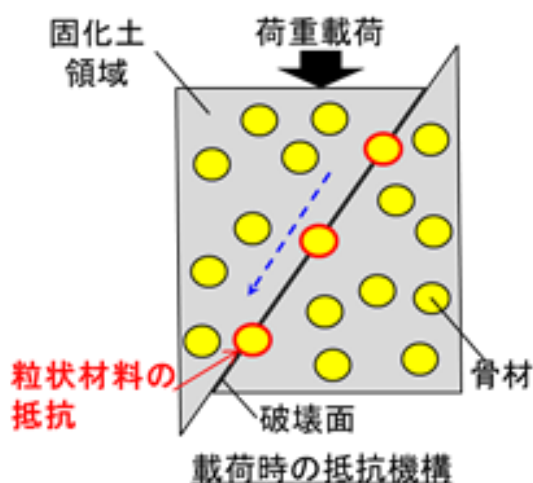


図-6.1 載荷時の骨材抵抗機構の概要図（図-2.1の再掲）

一方、カルシア改質土において、骨材混合により内部摩擦角が発揮されるメカニズムは未解明の状況である。カルシア改質土が適用条件によって c - ϕ 材としての特性を有するのであれば、カルシア改質土の適用用途が更に広がることが期待される。例えば、浚渫土砂に含有される有機物の影響で粘着力 c が低強度となっても、拘束圧の作用により内部摩擦角 ϕ が発揮されると、これまで適用できないと判断していた浚渫土砂に対してもカルシア改質土を適用できることとなり、浚渫土砂の活用範囲が広がると考えられる。そこで、本研究では、カルシア改質土のせん断強度に及ぼすカルシア改質材の混合影響の基礎的研究、つまり固化処理土における骨材の混合影響について検討した。

6. 2 実験概要

6. 2. 1 試験材料

これまでのカルシア改質土の研究における試験材料としての浚渫土砂は、その時々で入手した実海域採取の浚渫土砂を用いてきたが、量に限りがあり、継続的な研究においては浚渫土砂の性状変化を踏まえて評価をする必要があった。そこで、今回の試験では試験用の浚渫土砂材料として、模擬浚渫土砂⁵⁾、笠岡粘土、浚渫土砂Aの3種類を用いることとした。模擬浚渫土砂は、ベントナイト：豊浦砂を重量比85%：15%で混合して作製した。なお、ベントナイトは米国产（25%）と出雲産（60%）を混合して作製している。浚渫土砂の性状を表-6.1に示す。含水比の調整は、表-6.2に示す人工海水を用いて実施した。

表-6.1 試験用浚渫土砂の性状

試料名 ※(%)は重量比		土粒子 密度	含水比	細粒分 含有率	液性 限界	塑性 指数
		g/cm ³	%	%	%	
模擬浚渫土砂		2.564	112.0	81.2	86.0	57.0
原 材 料	ベントナイト 米国产	2.781	10.5	98.3	509.0	464.6
	ベントナイト 出雲産	2.472	8.0	96.0	103.8	69.8
	豊浦砂	2.645	0.1	0.0	-	-
浚渫土砂A		2.627	66.6	72.3	51.0	13.7
笠岡粘土		2.668	48.5	99.8	52.9	30.1

表-6.2 人工海水の性状

pH	EC μ S/cm	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	K mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L
8.17	27,900	390	1,300	12,000	420	20,000	2,600

カルシア改質材は、今回の試験では固化反応に寄与しない骨材を用いた。カルシア改質土は、骨材であるカルシア改質材からカルシウム成分が溶出することで固化する。よって、

骨材の影響を検討するために粒度（カルシウム溶出面積）や混合率を変化させると、固化土領域の発現強度も変化する。よって、本検討では浚渫土砂に消石灰を混合することで固化土領域の発現強度を一定とし、そこへカルシウム溶出が強度発現に影響を与えないと考えられる10種類の骨材を混合することで試験を実施した。今回の試験に用いた骨材を表-6.3に、粒度分布を図-6.2に示す。消石灰には、粉末消石灰試薬（特級）を用いた。

表-6.3 試験に用いた骨材の種類

No	種類	粒径	備考
1	アスファルト用砕石	26.5~0mm	4種類の単粒度砕石とコンクリート用山砂を混合.
2	コンクリート用骨材	20.0~0mm	20.0~5mmコンクリート用粗骨材と5~0mmコンクリート用細骨材を混合.
3	高炉徐冷スラグ	26.5~0mm	コンクリート用骨材に用いられている材料
4	炭酸化製鋼スラグ	26.5~0mm	固化反応に寄与しないように、製鋼スラグ（カルシア改質材）を炭酸化処理したもの。 26.5~5mm製鋼スラグと5~0mmコンクリート用細骨材を混合.
5	玉砂利	26.5~0mm	26.5~5mm玉砂利と5~0mmコンクリート用細骨材を混合.
6	高炉徐冷スラグ	20.0~0mm	No.3の最大粒径を20mm
7	玉砂利	20.0~0mm	No.3の最大粒径を20mm
8	コンクリート用骨材	15.0~0mm	No.2の最大粒径を15mm
9	コンクリート用骨材	10.0~0mm	No.2の最大粒径を10mm
10	コンクリート用骨材	5.0~0mm	No.2の最大粒径を5mm

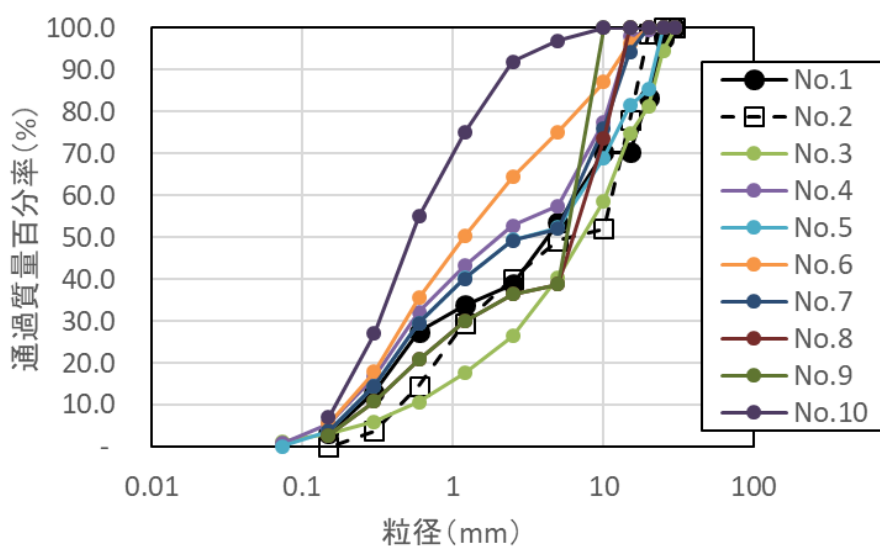


図-6.2 骨材の粒度分布

6. 2. 2 一軸圧縮強さへの影響評価

地盤工学における粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の評価は、対象とする材料（供試体）が均一材料であることが前提となっている。これに対して、カルシア改質土は均一な浚渫土砂の固化処理土に粒子径 25 mm 程度の粗骨材を含む骨材が混入した不均一材料と分類される可能性がある。固化材料に骨材が混合した事例としてはコンクリート材料があり、モルタルに粗骨材を混合した状態が類似していると考えられる。コンクリート分野では、粗骨材の混合が強度発現に与える影響が研究されており、粗骨材粒径が大きくなると強度が低下することが知られている⁶⁾。また、その強度低下には骨材とモルタル部の界面の挙動が影響を与えることが知られており、伊良波ら⁷⁾は解析的アプローチで検討している。そこで、カルシア改質土のように固化処理土に骨材が混合された材料の挙動の考察を行うため、3種類の検討を行った。

一つ目は、骨材混合率を変化させた一軸圧縮強さの検討である。試験ケースを表-6.4に示す。試験には模擬浚渫土砂を用いた。目標強度は3種類とし、埋め立て材や中仕切り堤において地盤強度を要求される場合の配合強度を想定して 400 kN/m²（高強度ケース、養生7日）と 600 kN/m²（高強度ケース、養生14日）、浅場造成用基盤材等の覆砂程度の荷重しか作用しない場合の配合強度を想定して 100 kN/m²（低強度ケース、養生7日）と設定した¹⁾。また、骨材の種類は3種類とし、骨材の容積混合率は、0%、10%、20%、30%、40%の5ケースとした。

表-6.4 一軸圧縮強さの試験ケース

強度水準	骨材種類	骨材混合率
高強度(目標400kN/m ²)	No.1	0%(骨材無),10%, 20%, 30%, 40%
低強度(目標100kN/m ²)	No.1	
高強度(目標600kN/m ²)	No.3	
	No.5	

二つ目は、骨材の最大粒径の影響である。一つ目の試験では、供試体寸法φ100 mm×高さ200 mmに対して、骨材の最大粒径を20 mm～26.5 mmとしていた。一方、安定処理土の地盤材料試験では、供試体直径/最大粒径を粒径幅が広い場合は5程度まで許容されることが示されている⁸⁾。そこで、骨材の最大粒径を表-6.3に示す20 mm (No.2) , 15 mm (No.8) , 10 mm (No.9) , 5 mm (No.10) とした一軸圧縮試験を実施した。目標強度は低強度100 kN/m²と高強度400 kN/m²の2水準としている。ここで、試験に用いた浚渫土砂は笠岡粘土であり、試験までの養生は28日とした。また、本試験の目標強度400 kN/m²のケースについては、消石灰の代わりに高炉セメントを用いている。

三つ目は、骨材の種類である。骨材には表-6.3に示すNo.1～No.5の5種類を用いた。浚渫土砂には、模擬浚渫土砂と実海域で採取された浚渫土砂Aを用いた。骨材の混合率は

30vol%とし、養生14日で一軸圧縮強さの試験を実施した。

ここで、供試体の作製方法及び一軸圧縮強さの試験方法を以下に示す。模擬浚渫土砂は、所定材料を混合して、2週間静置した。その後、試験用浚渫土砂と消石灰と骨材をハンドミキサーで約2分間混合し、直径100 mm、高さ200 mmのプラスチックモールドに充填した。充填は、3層に分けてタッピングしながら供試体内に空隙が生じないように行った。試料充填後、モールド上面をラップで密封し、20°Cの恒温室で目標強度発現まで養生を実施した。一軸圧縮強さの測定は1つの条件につき3本の供試体で試験を行って、その平均値を一軸圧縮強さとした。

6. 2. 3 三軸圧縮試験 (CUB 試験)

拘束圧下でのカルシア改質土において、骨材がせん断挙動に及ぼす影響を評価するため、圧密非排水三軸圧縮試験 (以下、CUB試験) を実施した。

試験ケースを表-6.5に示す。浚渫土砂と骨材は2種類を用いている。強度水準は、一軸圧縮強さの検討と同様に高強度400 kN/m²と低強度100 kN/m²の2水準とした。拘束圧については、表-6.5に示すように設定している。供試体の作製は、一軸圧縮強さのケースと同様に実施した。骨材の容積混合率は30%とした。また、笠岡粘土単体の供試体の作製は、締固め試験を行い、締固め度90%で供試体作製を実施した。

表-6.5 CUBの試験ケース

ケース	強度水準	浚渫土砂	骨材種類	拘束圧
高-模-無	高強度 (目標400kN/m ²)	模擬 浚渫 土砂	無	qu/4, q u/2, qu, qu × 1.5
高-模-有			No.1	
低-模-無	低強度 (目標100kN/m ²)		無	qu/4, q u/2, qu, qu × 2, qu × 3
低-模-有			No.1	
笠岡単体	笠岡粘土のみ	笠岡 粘土	無	50, 100, 200kN/m ²
低-笠-無	低強度 (目標100kN/m ²)		無	
低-笠-有			No.2	

6. 3 試験結果と考察

6. 3. 1 一軸圧縮強さ

図-6.3 に骨材混合率と一軸圧縮強さの関係を示す。100 kN/m²程度では、骨材混合率によって一軸圧縮強さに顕著な変化は見られなかった。一方、400 kN/m²程度では、骨材混合率30%及び40%において若干の一軸圧縮強さの低下が確認された。600 kN/m²程度では、骨材種類に関わらず骨材混合率に応じて強度が低下する傾向が見られた。これらの結果より、固化処理土に骨材が混合されることで、一軸圧縮強さに影響を与える場合が存在することが確認された。

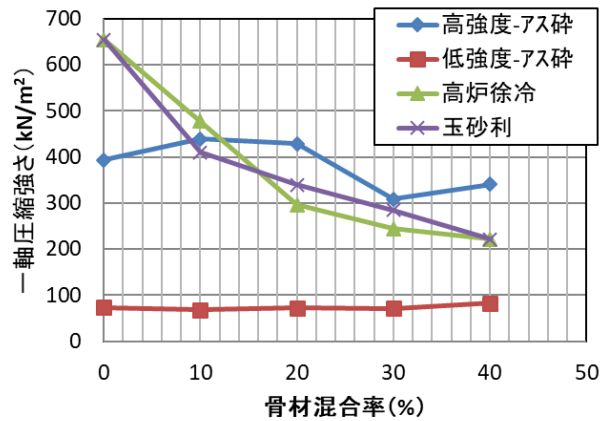


図-6.3 骨材混合率と一軸圧縮強さの関係

図-6.4 に最大粒径の差異と一軸圧縮強さの関係を示す。図-6.3 の骨材混合率の影響では一軸圧縮強さが低下する傾向が見られたが、今回の試験では顕著な強度低下は確認されなかった。本試験では、図-6.3 と傾向は異なり、固化処理土に骨材が混合されることでの一軸圧縮強さへの明確な影響は確認されなかった。なお、図-6.3 との主な条件の違いは、試験用の浚渫土砂が笠岡粘土であることと養生日数が 28 日と長いことである。

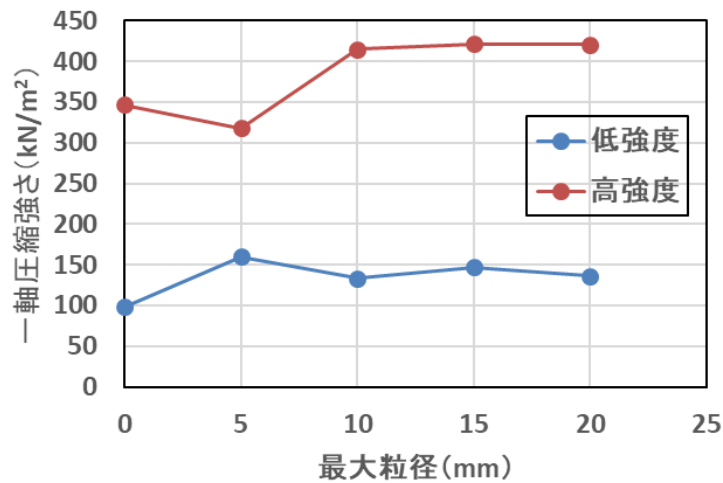


図-6.4 最大粒径と一軸圧縮強さの関係

図-6.5 に骨材種類による一軸圧縮強さの差異の結果を示す。骨材無しの場合の強度発現が 180 kN/m² 程度と低い浚渫土砂 A については、骨材の種類によって顕著な強度低下は見られず、強度が増加するケースも確認された。一方、骨材無しの場合の強度発現が 580 kN/m² 程度と大きい模擬浚渫土砂では、いずれの骨材種類も強度低下していることがわかり、この結果は図-6.3 の結果と同様の傾向であった。なお、今回の試験では、骨材種類による強度発現に顕著

な傾向は確認できなかったが、骨材種類の差異で発現強度が異なる場合が生じることは確認できた。

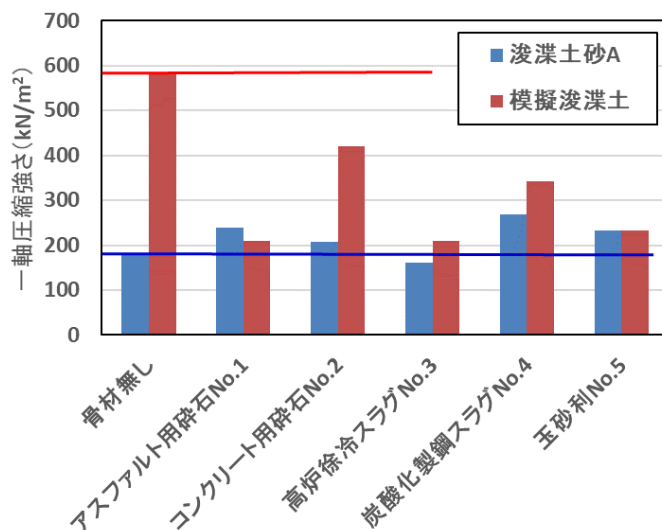


図-6.5 骨材種類差異の試験結果

6. 3. 2 三軸圧縮試験 (CUB 試験)

CUB 試験結果を表-6.6 に、模擬浚渫土砂を用いた低強度の主応力差～軸ひずみ関係を図-6.6 に、模擬浚渫土砂を用いた高強度の主応力差～軸ひずみ関係を図-6.7 に、笠岡粘土を用いた主応力差～軸ひずみ関係を図-6.8 に示す。また、模擬浚渫土砂を用いた低強度の応力経路を図-6.9 に、模擬浚渫土砂を用いた高強度の応力経路を図-6.10 に、笠岡粘土を用いた応力経路を図-6.11 に示し、模擬浚渫土砂を用いた最大軸差応力～圧密圧力（拘束圧）を図-6.12 に、笠岡粘土を用いた最大軸差応力～圧密圧力（拘束圧）を図-6.13 に示す。

表-6.6 CUB 試験結果

ケース	全応力		有効応力	
	粘着力c (kN/m ²)	内部摩擦角φ (°)	粘着力c' (kN/m ²)	内部摩擦角φ' (°)
低-模-無	28.0	15.9	20.5	46.7
低-模-有	31.6	14.9	12.6	44.2
高-模-無	241.7	5.7	212.8	14.4
高-模-有	155.5	12.1	109.7	30.3
笠岡単体	11.6	15.4	12.6	28.5
低-笠-無	33.1	15.3	27.1	31.6
低-笠-有	66.1	13.1	43.1	34.0

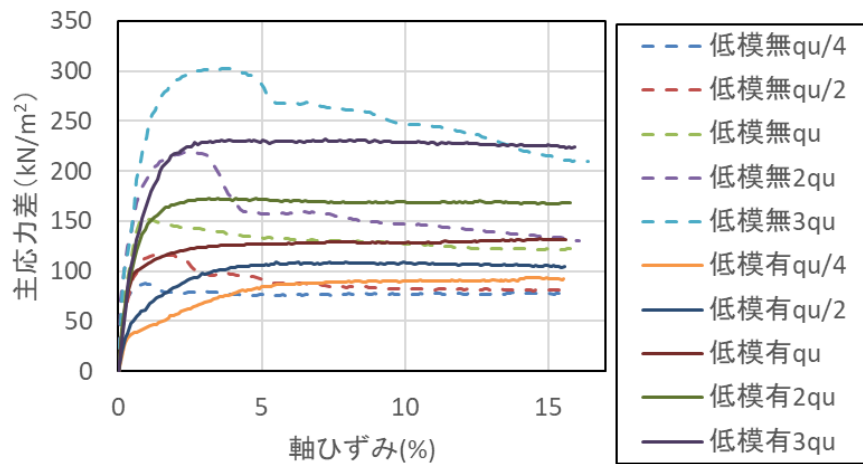


図-6.6 模擬浚渫土砂を用いた低強度の主応力差～軸ひずみ関係

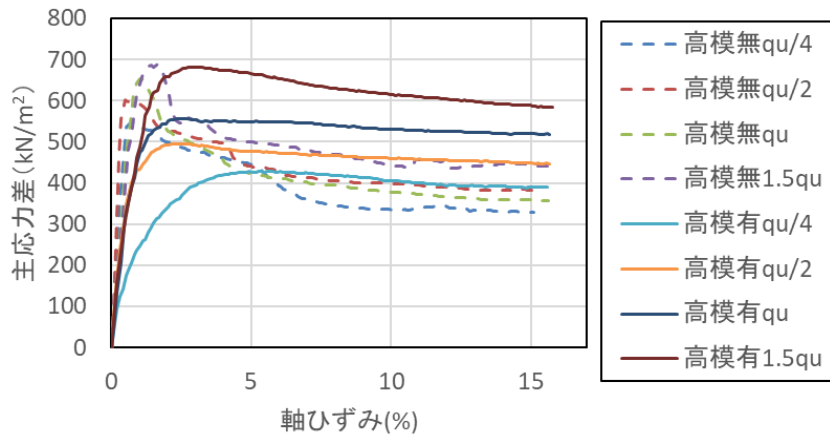


図-6.7 模擬浚渫土砂を用いた高強度の主応力差～軸ひずみ関係

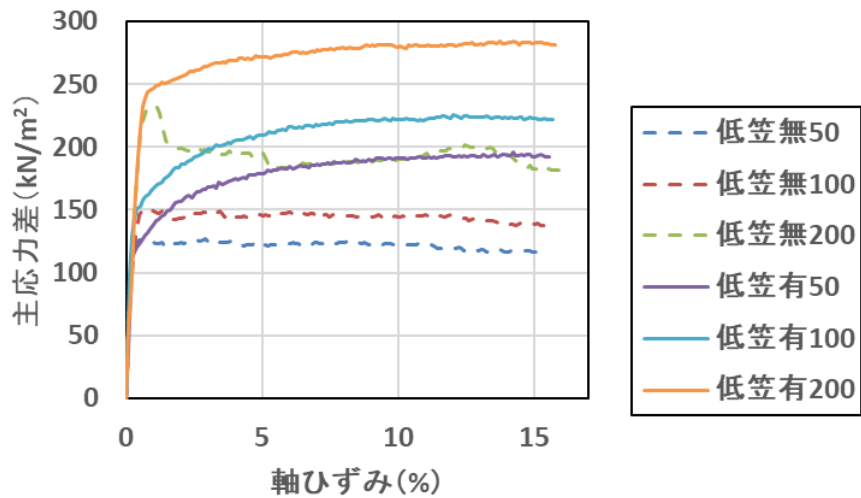


図-6.8 笠岡粘土を用いた主応力差～軸ひずみ関係

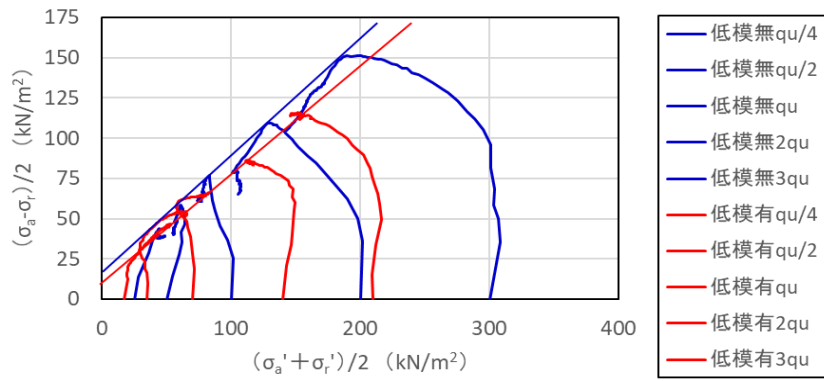


図-6.9 模擬浚渫土砂を用いた低強度の応力経路

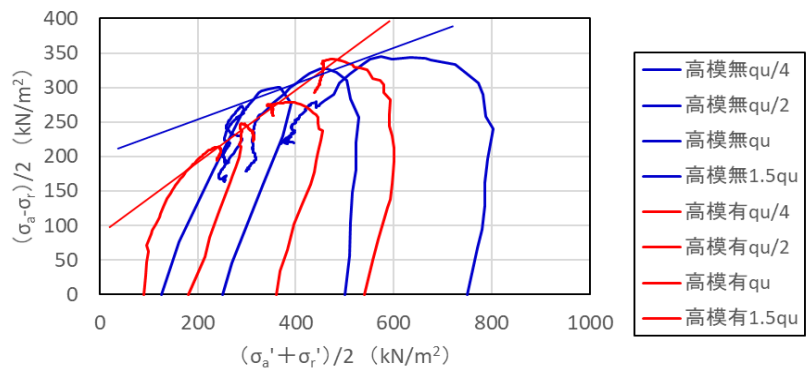


図-6.10 模擬浚渫土砂を用いた高強度の応力経路

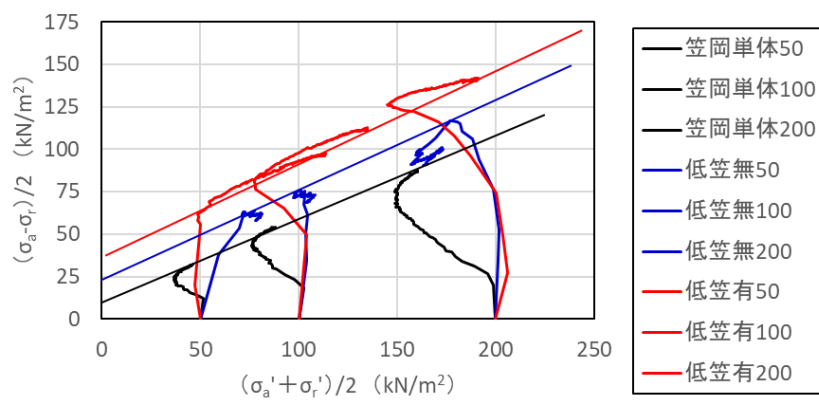


図-6.11 笠岡粘土を用いた低強度の応力経路

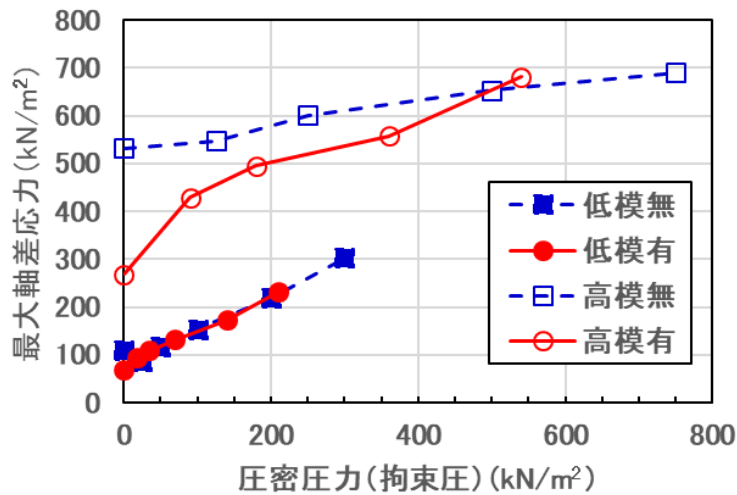


図-6.12 模擬浚渫土砂を用いた最大軸差応力と拘束圧の関係

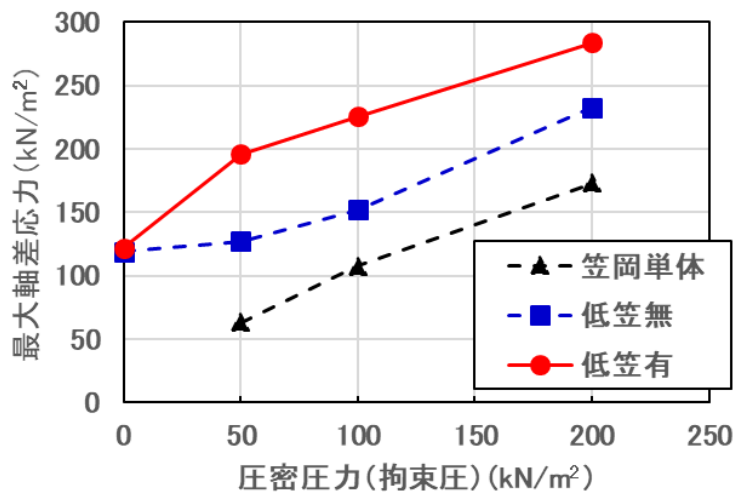


図-6.13 笠岡粘土を用いた最大軸差応力と拘束圧の関係

表-6.6 より，模擬浚渫土砂において内部摩擦角が生じており，特に低強度で顕著である。これは，模擬浚渫土砂に用いた砂分の影響と考えられる。また，笠岡粘土単体においても，内部摩擦角は初期条件として確認されている。図-6.6 と図-6.7 において，骨材無と比較して，骨材有は载荷初期において軸ひずみが大きくなる傾向が見られる。また，拘束圧が大きくなると，骨材有の軸ひずみは小さくなり，骨材無の初期勾配に近づく挙動が確認される。一方，図-6.8 の笠岡粘土については，初期勾配は骨材無のピーク強度までほぼ同一の挙動となり，その後の残留強度の挙動は，骨材無はひずみ軟化で強度低下の傾向となるが骨材有の方はひずみ硬化の傾向となっている。図-6.9 及び図-6.10 の応力経路より，骨材無のケースでは破壊線に近づくると主応力差と有効応力が減じる傾向となるのに対して，骨材有の

方は、破壊線に近づくと有効応力が減じる傾向はあるものの、顕著な主応力差の低下は見られない。図-6.11 の笠岡粘土の応力経路では、笠岡粘土単体は载荷初期から主応力差の増加と共に有効応力が減少する傾向があるが、固化処理土は骨材の有無に関わらず、そのような傾向は見られない。骨材有のケースについては、破壊線に近づくと破壊線に沿って有効応力と主応力差が増加する傾向が見られた。図-6.12 より、骨材有のケースにおいて拘束圧が小さいときは、最大軸差応力が骨材無のケースと比較して低い傾向が見られ、拘束圧が大きくなると最大軸差応力が骨材無のケースと同程度の強度発現となる傾向が見られる。ここで、圧密圧力=0時の最大軸差応力の値は、一軸圧縮強さの値を示している。図-6.13 より、拘束圧が大きくなると最大軸差応力が大きくなるが、その傾向は笠岡粘土単体の傾向でも見られ、これは固化処理の対象土の特性の影響と考えられる。骨材有のケースの最大軸差応力が骨材無のケースより大きくなっている要因は、骨材無のケースではピーク後にひずみ軟化の傾向を示すのに対して、骨材有のケースではひずみ硬化の傾向で残留強度も顕著な低下が見られないためと推察される。なお、笠岡粘土のケースでは、一軸圧縮強さや低拘束圧時の軸差応力の低下は確認されなかった。今回の CUB 試験の強度結果で、骨材無のケースの残留強度は強度低下傾向であるのに対して、骨材有のケースでは著しい残留強度低下は見られないのは杉村ら⁹⁾が示している粘り強さの現象と思われる。

6. 4 骨材混合の影響に関する考察

これまでに実施した一軸圧縮強さと三軸圧縮試験（CUB 試験）の結果より、固化処理土に骨材を混合することが強度発現性状に影響を与えることが確認された。しかし、その影響は一軸圧縮強さの減少や粘着力・内部摩擦角の増減で一定の傾向は今回の試験で確認されず、その影響因子は固化処理対象の土質特性や骨材混合率、骨材性状（材質、形状等）、強度発現レベル、拘束条件等と多様と考えられる。

一方、強度発現レベルに関わらず、内部摩擦角の発揮は期待できる材料であることが確認された。ただし、骨材が混合された影響として、強度が低下する場合が存在することが判った。これは、コンクリート分野の知見⁷⁾から推察すると、载荷時に供試体にひずみが生じた際に、骨材と固化処理土の界面の付着が切れて、ひずみが骨材と固化処理土の界面に集中することにより、骨材無のケースと比較して低強度で供試体が破壊するためと考えられる。よって、低拘束圧条件では骨材と固化処理土の界面の付着切れによる界面部での微細ひび割れ発生が生じやすいために骨材無と比較して骨材有では低強度となるケースが見られ、高拘束圧条件では微細ひび割れが生じにくく、骨材効果による内部摩擦角が発揮されて、骨材有のケースでも骨材無と同等の強度となるケースが見られたと考えられる。また、ピーク強度後のひずみ軟化が確認される骨材無のケースと比較して、骨材有のケースでは顕著なひずみ軟化や残留強度の低下は見られない。これは、骨材と固化処理土の界面の付着切れはあるものの、骨材混合の効果で拘束圧条件に関わらず内部摩擦角が発揮されているものと推定される。なお、図-6.4や図-6.8で強度低下しなかった要因は、小ひずみ

領域で骨材と固化処理土の界面の付着切れが生じなかったためと推察される。よって、図-6.8の骨材有において、付着が切れるまでは粘着力が発揮されて骨材無と同様の主応力差～軸ひずみ関係となり、骨材無において粘着力で耐荷できる限界点のピーク強度になったときに、同様に骨材有でも粘着力で耐荷できる限界点になっていると思われるが、骨材有の場合は更に主応力差が増加してもそこから内部摩擦角が発揮されて小ひずみ領域のピーク強度が増加する可能性も考えられる。一方、今回の試験では強度低下の現象も生じており、この差異が生じる条件の明確化については、今後の課題である。

これらの課題の解明には、FEM や DEM 等の解析的なアプローチに加えて、供試体のせん断時の X 線 CT 画像による検討も有効と考え、今後検討を進める予定である。なお、カルシア改質土の場合、骨材表面からカルシウムが溶出して固化するため、骨材の極近傍の固化程度は良好で、骨材と固化土領域の界面の挙動が今回の試験条件とは異なる可能性も考えられる。

6. 5 まとめ

本章で得られた成果と今後の課題を以下に示す。

- (1) 固化処理土への骨材の混合効果を検討するため、3種類の浚渫土砂と10種類の骨材を用いて、骨材混合率や骨材最大粒径、及び骨材種類が一軸圧縮強さに及ぼす影響を検討した。その結果、 $100 \text{ kN/m}^2 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ 程度の強度発現では、骨材混合率・骨材最大粒径・骨材種類による顕著な影響は見られなかった。しかし、 600 kN/m^2 程度の強度発現では、模擬浚渫土砂では骨材を混合することで一軸圧縮強さが低下する傾向が見られた。しかし、笠岡粘土ではその傾向は見られず、浚渫土砂の性状の影響があることが示唆された。
- (2) 三軸 CUB 試験を、浚渫土砂2種類と骨材1種類で、強度水準は2水準で実施した。その結果、軸ひずみと主応力差の関係では、模擬浚渫土砂のケースでは、骨材無と比較して、骨材有は載荷初期において軸ひずみが大きくなる傾向が見られた。また、拘束圧が大きくなると、骨材有の軸ひずみは小さくなり、骨材無の初期勾配に近づく挙動が確認された。一方、笠岡粘土のケースでは、初期勾配は骨材無のピーク強度までほぼ同一の挙動となり、その後の残留強度の挙動は、骨材無はひずみ軟化で強度低下の傾向となるが骨材有の方はひずみ硬化の傾向となっている。応力経路については、模擬浚渫土砂のケースでは、骨材無のケースでは破壊線に近づくると主応力差と有効応力が減じる傾向となるのに対して、骨材有の方は、破壊線に近づくると有効応力が減じる傾向はあるものの、顕著な主応力差の低下は見られなかった。笠岡粘土のケースでは、笠岡粘土単体は載荷初期から主応力差の増加と共に有効応力が減少する傾向があるが、固化処理土は骨材の有無に関わらず、そのような傾向は見られなかった。骨材有のケースについては、破壊線に近づくると破壊線に沿って有効応力と主応力差が増加する傾向が見られた。これらのことから、浚渫土砂の種類でせん断時の挙動が異なることが

明らかとなった。

- (3) 三軸 CUB 試験の結果，固化処理土に骨材を混合した材料であるカルシア改質土は，内部摩擦角を期待できる材料と考えられる。しかし，内部摩擦角の発揮条件は，骨材形状や拘束圧条件等様々であり，メカニズム解明は今後の課題である。内部摩擦角の発揮は，固化土領域と骨材の境界の付着が関連していると想定される。付着が弱い場合は，載荷初期から付着が切れて内部摩擦角が発揮されていると考えられる傾向が見られた（模擬浚渫土砂の高強度で骨材ありのケース）。一方，付着が強い場合は，ピーク強度までは固化土領域で耐荷し，ピーク後に付着が切れて内部摩擦角が発揮されてひずみ軟化が生じずに残留強度が大きくなる（笠岡粘土の骨材ありのケース）と考えられる。
- (4) 内部摩擦角を見込まずに一軸圧縮強さから判断している現状のカルシア改質土の強度設計は，安全側の評価と考えられる。

【本章の参考文献】

- 1) 一般財団法人沿岸技術研究センター：港湾・空港・海岸等におけるカルシア改質土利用技術マニュアル
- 2) Toda, K., Sato, H., Weerakoon, N., Otake, T., Nishimura, S. and Sato, T.: Key Factors Affecting Strength Development of Steel Slag-Dredged Soil Mixtures, Minerals, 8(5):174, 16p., 2018
- 3) 平井壮，水谷崇亮，菊池喜昭，川端雄一郎，製鋼スラグ混合土の配合・混合条件がその力学特性に与える影響について：港湾空港技術研究所報告，第 51 巻 第 3 号，2012.
- 4) 柿原結香，菊池喜昭，野田翔兵，高田明旺，山口天宗，降旗咲乃，吉川友孝，転炉系製鋼スラグ混合土のせん断強度発現に及ぼす物理・化学的要因：土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.77, No.2, pp.I_463-I_468, 2021.
- 5) 杉村裕二，篠崎晴彦，赤司有三，松村聡，水谷崇亮，森川嘉之：製鋼スラグと浚渫土を混合した粘り強い地盤材料の開発，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.77, No.2, pp.I_427-I_432, 2021.
- 6) 川上英男，粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究（その 1）：日本建築学会論文報告集，第 166 号，pp19-27, 1969.
- 7) 伊良波繁雄，富山潤，松原仁，山城建樹，ボクセル解析による粗骨材を考慮したコンクリートの破壊解析：コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.127-132, 2004.
- 8) 地盤工学会編（2021）；安定処理土の締固めをしない供試体作製方法，地盤材料試験の方法と解説（第 1 回改訂版），pp.445-453

第7章 研究総括及び結論

7.1 得られた成果

第1章では、カルシア改質技術の研究の背景として、設計・施工技術の開発や公認化の歴史について概説するとともに、施工時の法面勾配形成や耐震性能等の実用化技術の開発状況について説明し、今後の技術の発展に向けた3つの視点を整理した。また、その3つの視点に沿った本論文の全体構成を概説した。

第2章では、カルシア改質土の強度発現の原理について、石灰系固化材の固化メカニズムとの比較により考察し、4つの研究課題を設定した。1つ目は、カルシア改質土の強度発現に対するカルシア改質材から溶出するカルシウムと浚渫土砂から溶出するシリカの相互影響評価である。2つ目は、強度発現に寄与するカルシア改質材から溶出するカルシウムと浚渫土砂から溶出するシリカの評価に向けた試験方法の提案である。3つ目は、カルシア改質材の混合直後に浚渫土砂の流動性が低下するメカニズムの解明と、施工検討に活用可能な解析手法の提案である。4つ目は、固化した浚渫土砂に粒状材料としてのカルシア改質材が混合されていることの物理特性が強度に与える影響の評価である。

第3章では、固化成分である浚渫土砂から溶出するシリカ成分とカルシア改質材から溶出するカルシウム成分が強度発現に与える相互影響を検討した。試験の考察の結果、溶出するシリカ成分が大きい浚渫土砂の方が強度発現は大きく、供給するカルシア改質材からのカルシウム溶出量が大きい方が強度発現は大きいことを示した。また、その相互影響には、固化反応に必要な溶出量のバランスが存在し、目標強度に応じた必要溶出量の過不足を評価する方法として、シリカ溶出量とカルシウム溶出量を軸とした4領域の整理で実施できることを提案した。この整理の結果、現場強度 100 kN/m² を確保するためには、カルシウム溶出量×(改質材量/含水量) = 5.0 mg/g, シリカ溶出量×(土分乾燥重量/含水量) = 60 mg/g が必要であることを示した。

第4章では、工事における強度管理を目的とした使用材料の品質管理として、固化成分である浚渫土砂から溶出するシリカ成分とカルシア改質材から溶出するカルシウム成分の定量試験法を提案した。カルシア改質材から溶出するカルシウム量の測定法として、環境庁告示第46号で定められている溶出試験方法を改良し、溶媒を人工海水に、試料を有姿の粒度分布に、振とう時間を30分間へ変更する方法を提案した。浚渫土砂から溶出するシリカ量の測定法は、戸田ら(2018)が提案した方法より短い試験時間で結果を得るために、試料を水中で7分程度攪拌して検液を作製する方法を提案した。これらの溶出結果と、6種類のカルシア改質材と15種類の浚渫土砂の一軸圧縮強さを比較分析した結果、提案した方法で得られた溶出値によって強度発現を予測することができ、実工事における強度管理の1次判断指標として適用しうることを示した。

第5章では、浚渫土砂へのカルシア改質材混合直後のフレッシュな状態での粘性増大による流動性低下のメカニズムについて、従来知見であるカルシア改質材による粒度改善効

果と吸水効果に加えて、イオン交換反応による凝集効果が存在することを明らかとした。その効果を踏えた実海域投入時の濁り抑制効果については、濁り発生量はスランプ値で制御可能であることを実証した。

また、この流動性低下の特徴について、実工事における法面勾配形成等の施工計画検討へ展開することを目的に、流動解析の活用検討を行った。その結果、フレッシュなカルシア改質土の流動性はフレッシュなコンクリートと同様にビンガムモデルとして表現でき、その降伏値はスランプ値から求めることが可能であることを明らかとした。また、その値を用いることで実施工試験の形成勾配の結果をシミュレートできることを示した。施工事例検討では、カルシア改質土の流動性を制御することで、消波ブロック等の空隙充填材への適用の可能性についても示した。

第 6 章では、固化した浚渫土砂に骨材が混合された構成となっているにも関わらず土質特性が粘性材料（内部摩擦角=0）として整理されているカルシア改質土について、骨材の混合がせん断挙動に影響を及ぼす影響を明らかとすることを目的に、一軸圧縮強さと三軸圧縮試験を実施した。その結果、固化処理土に骨材を混合した材料であるカルシア改質土は、内部摩擦角を期待できる材料であることが確認された。しかし、今回の試験では内部摩擦角は発揮されるものの強度が低下するケースが確認され、このメカニズム解明は今後の課題となった。

7. 2 今後の展望

浚渫土砂の有効利用技術であるカルシア改質土は、従来に浚渫土砂が活用されていた埋め立て用途に加えて、これまでは浚渫土砂の活用が困難であった浅場造成の基盤材や天然石材代替としての潜堤等への適用が可能な材料である。つまり、この浚渫土砂の適用拡大によって、自然再生や天然資源保護に寄与できる技術である。加えて、近年では地球温暖化対策としてのカーボンニュートラルへ向けて、藻場造成によるブルーカーボンも注目されており、国土交通省はカーボンニュートラルポータル施策の中で藻場造成の基盤材としてもカルシア改質土に期待を寄せている。一方、これまでカルシア改質土に用いられてきた浚渫土砂は港湾等の海域で採取されたものであるが、近年の異常気象による河川氾濫の豪雨災害に対しては、国土強靱化施策として河川の流量確保のための河床掘削も重要であり、その河川浚渫土砂の有効活用も課題となっている。その河川浚渫土砂へのカルシア改質技術の適用についても、今後の課題と考えられる。

この状況に対して、今後のカルシア改質技術の発展には下記の 3 つの課題が存在すると考える。

① 浚渫土砂から溶出するシリカ成分が不足するときの添加材

本研究で、カルシア改質土の強度発現には、浚渫土砂から溶出するシリカ成分も重要な因子であることが明らかとなった。しかし、実工事においてシリカ成分不足の浚渫土砂が発生した場合の対応については未検討であり、現状では対策不能の状況

となっている。そこで、そのシリカ成分補助材の研究を進める必要がある。

② 浚渫土砂に含まれる有機分による固化阻害の解消

本研究では、試験に用いた浚渫土砂は有機分の含有が少ないものを用いている。一方、港湾工事で発生する浚渫土砂の中には、有機物が高含有のものも存在する。実工事で有機物が高含有の浚渫土砂が発生した場合の対処方法は現状では無いため、研究を進める必要がある。

③ 長期的な土質特性変化の把握

本研究を含めたこれまでのカルシア改質土の研究は、標準養生期間である 28 日後の土質特性として評価されていることが一般的である。一方、一部の研究では実施工地盤の事後調査による長期的な土質特性変化の把握も実施されているが、強度発現を含む土質特性変化のメカニズム解明と定量化という観点からは研究がなされていないのが実状である。基本的には、強度発現が増進すると地盤耐力としては安全側となると考えられるが、長期的に強度が増進した際の土質特性変化が、当初設計検討時の目標特性を満足するかどうかについての評価方法の確立に向けて、今後の研究が期待される状況である。

上記の課題に対して、今回の本研究の残課題を含めて自己の研究を継続するとともに、関係者の研究が発展・拡大していくことを期待する。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、温かいご指導を賜り、京都大学大学院地球環境学舎博士（後期）過程への進学のお機会を与您いただきました京都大学教授 勝見武先生に心から感謝の意を表します。勝見武教授には、コロナ禍で筆者が大学へ伺うことができない中、時には休日返上の web 会議で研究を遂行するにあたっての方向付けやデータ分析の考え方等、示唆に満ちた適切なお指導、ご助言をいただくとともに、本論文をまとめるにあたって常に激励をいただきました。

また、本論文をご審査いただき、貴重なご意見、ご指導を頂戴しました京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻教授 肥後陽介先生、京都大学大学院地球環境学舎准教授 高井敦史先生に厚く御礼を申し上げます。

本論文は、日本製鉄（株）で鉄鋼スラグの利用技術開発を行う中で、筆者が一貫して携わった研究の成果をまとめたものであり、本研究の遂行にあたっては、様々な方よりご協力をいただきました。本研究における化学的固化のメカニズムに関しては、北海道大学工学研究院環境循環システム部門資源循環工学分野教授 佐藤努先生や東京大学大学院工学系研究科原子力専攻原子力安全工学講座助教 戸田賀奈子先生に、試験方法を含めてご助言を賜りました。国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所の森川嘉之地盤研究領域長、基礎工研究グループの水谷崇亮グループ長および松村聡主任研究官には、カルシア改質土の粒状材料効果の開発方針に関して貴重なご助言を賜りました。カルシア改質土の研究や技術の方向性について、東京理科大学理工学部土木工学科教授 菊池喜昭先生、北海道大学大学院工学土木工学部門教授 渡部要一先生、北海道大学大学院工学研究院土木工学部門教授 西村聡先生、一般財団法人沿岸技術研究センター 春日井康夫代表理事・専務理事、五洋建設 中川雅夫顧問には、貴重なご意見やご助言を頂きました。

また、カルシア改質土の研究にあたっては、カルシア改質土研究会や国土交通省の方々にご協力やご助言をいただき、感謝いたします。

そして、今回、社会人として博士後期課程への進学のお機会を与您いただいた日本製鉄（株）スラグ事業・資源化推進部 北野吉幸部長や関西製鉄所資源化推進部 菅原啓介部長に感謝するとともに、研究に協力いただいたスラグ事業・資源化推進部 山越陽介主幹、設備保全技術センター土木建築技術部 篠崎晴彦主幹や杉村裕二主幹、他社内関係者の方々に感謝申し上げます。また、研究を進めるにあたり、試験方法等のご助言を頂いた小門武様や試験協力をいただいた日鉄環境（株）の方々に感謝申し上げます。

最後に、社会人学生としての日々を支えてくれた妻と長男・長女に感謝いたします。

この3年間は筆者にとって有意義なものであったことを今後にお示しすることで、皆様への感謝としたいと思います。本当にありがとうございました。