

連携記事

カルシア改質土の材料特性について

Propterties of the Materials on the Strength Development of Steel Slag-dredged Soil Mixture

日本製鉄（株）
スラグ事業・資源化推進部
部長代理

赤司有三
Yuzo Akashi

日本製鉄（株）
スラグ事業・資源化推進部
主幹

山越陽介
Yousuke Yamagoshi

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。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¹⁾。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^{2,3)}や地山境界部の摩擦特性⁴⁾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⁵⁾や防波堤背後盛土への適用⁶⁾といった実プロジェクト適用に関する研究が実施されている。

そこで、本報では地盤材料の改質において重要な品質管理事項であるカルシア改質土の強度特性の研究状況について紹介する。

2 カルシア改質土の固化特性の概要

2.1 カルシア改質土の固化原理

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が残存し、数%程度含有している^{7,8)}。その生石灰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（ポゾラン反応）を起こすことで、カルシア改質土は固化する⁹⁻¹¹⁾。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¹²⁾。その5つのメカニズムを表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。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収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。イオ

表1 石灰系固化材の固化メカニズム¹²⁾

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 ※カルシア改質土の流動性改善
化学的固化強度	エトリングアイト反応
	ポゾラン反応 ※カルシア改質土の固化原理
	炭酸化反応

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なく、施工時の法面勾配の制御^{2,3)}や海中投入時の濁り抑制¹³⁾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、カルシア改質材による吸水と粒度改善の他に、イオン交換反応による凝集効果も存在することが分かってきている¹⁴⁾。また、この効果を設計的に用いる方法として、カルシア改質土の混合直後の流動性を解析的に表現し、法面勾配の形成や空隙充填材への活用を検討できる状況となってきた¹⁵⁾。

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、“エトリンサイト反応”と“ポゾラン反応¹⁶⁻¹⁸⁾”、“炭酸化反応”の3つに分類される。エトリンサイト反応は、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サ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¹⁹⁾。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⁹⁾。木曾ら¹⁰⁾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¹¹⁾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。

2.2 カルシア改質土の固化研究状況

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、カルシア改質土においては、混合直後のフレッシュな状態では粒度改善・吸水・イオン交換反応による流動性低下が発揮され、長期的にはポゾラン反応により固化する

2つの強度発現機構が主である。イオン交換反応とポゾラン反応において、実用化に向けては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⁾。2017年には「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⁾（以降、マニュアルと記載）」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¹⁾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。

今回、カルシア改質土の混合直後の流動性低下や固化による強度発現について、最新の研究による品質管理方法や活用方法を紹介する。

3 材料混合直後の流動性低下

3.1 実海域での濁り抑制効果¹⁴⁾

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^{2,3,13)}が、今回、海中投入時の濁り抑制について、大規模施工時の検証事例を紹介する。

カルシア改質土の流動性低下による濁り抑制効果を実証するために、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、スランプ値と比較を実施した。濁りの調査は、カルシア改質土投入地点から潮流の下流側（濁りが流れ去る方向）の100m地点に側線を設け、この側線上の濁度を多目的水質計にて観測

表2 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Ip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	f-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。

し、カルシア改質土投入による濁りの発生量を算定した。なお、カルシア改質土の投入量は、約250 m³程度である。

図1にスランプ値と濁りの発生原単位の関係を示す。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²⁰⁾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。

3.2 流動性の解析的検討¹⁵⁾

前述のように、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判っているが、その特性が用いられる施工時の形成勾配の検討・管理においては、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した。ここで、検討において、流動性のモデルにはビンガムモデルを用いた。ここで、最終的な流動形状の検討に絞ることから、降伏値のみパラメータとし、流動解析には汎用ソフトANSYS Fluent VOF (Volume of Fluid) モデルを用いた。

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、浚渫土砂2種類とカルシア改質材2種類を用い、カルシア改質材の混合率は10~30%とした。実験による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2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。これより、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ことが判った。

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。なお、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 m³を8回に分けて投入した。図3に、法面勾配とスランプ値の関係の実験値と解析値の比較を示す。解析値は実験値と比較して実験値を概ね表現していると考えられる。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。

4 ポズラン反応による強度発現特性²¹⁾

4.1 検討概要

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に示す3シリーズの強度試験を実施した。

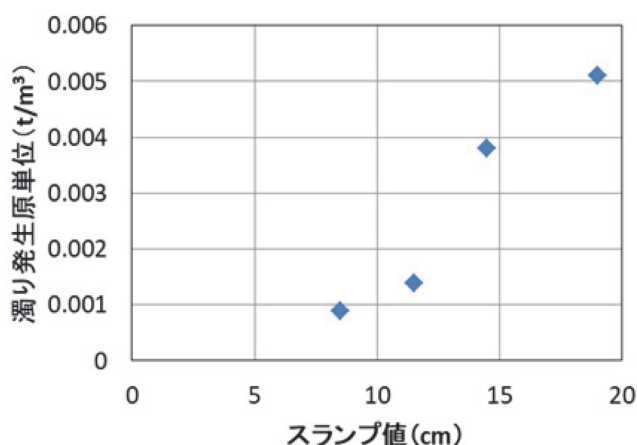


図1 実海域におけるスランプ値と濁り発生原単位の関係
(Online version in color.)

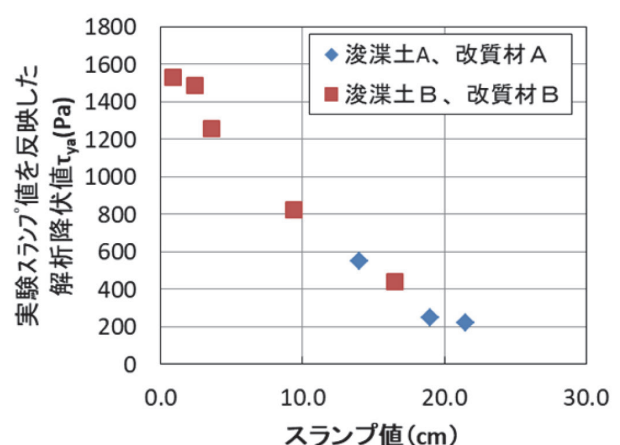


図2 スランプ値と降伏値の関係 (Online version in color.)

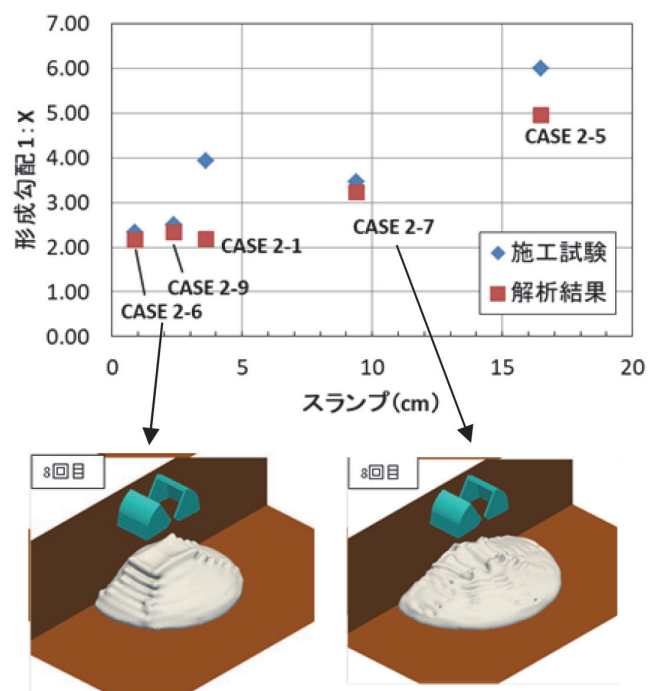


図3 流動解析結果と実験値の比較 (Online version in color.)

(1) シリカ成分影響に関する強度試験 (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。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。

(2) カルシウム成分影響に関する強度試験 (Series 2)

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、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、それぞれYS-1 (シリカ溶出量65 mg/g) とHH-1 (シリカ溶出量74 mg/g)、ST-1 (シリカ溶出量21 mg/g)、ST-2 (シリカ溶出量28mg/g) である。ST-1とST-2は同じ海域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%を基本とした。

(3) シリカ成分とカルシウム成分の相互影響試験 (Series 3)

これまで筆者らが収集した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

表3 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。

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。

4.2 実験概要

試験に用いた浚渫土砂は、11港湾で採取された15種類の浚渫土砂を試験に用いた。試験時の含水比調整については後述する。カルシア改質材は、カルシウム溶出量が異なる45種類のカルシア改質材を用いた。試験に用いた浚渫土砂の含水比は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。

ここで、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¹¹⁾やKakiharaら²²⁾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、文献^{11,23)}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²³⁾。

- 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分間静置。
- 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分間静置。
- 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℃の恒温炉で一晩放置し湿り気が残る程度に乾燥。
- 6) 翌日、2 M 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℃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。

また、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²⁴⁾。

- 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0.45 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。

4.3 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4に示す。図4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4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4.2で示した溶出試験の値を指標として活用できると考えられる。一

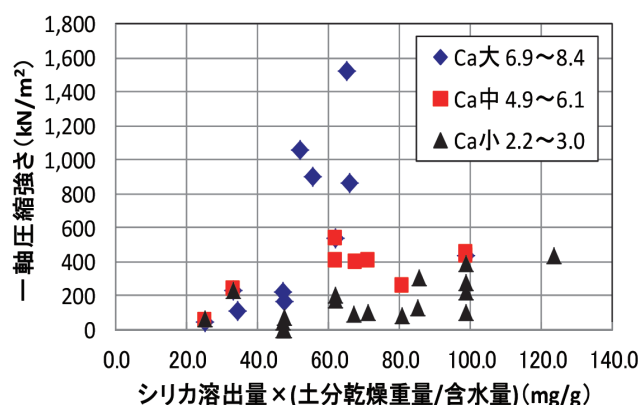


図4 シリカ溶出量が強度発現に及ぼす影響 (Online version in color.)

方、図4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4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況と推察されるが、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」の傾向となっている。

4.4 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5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。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5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

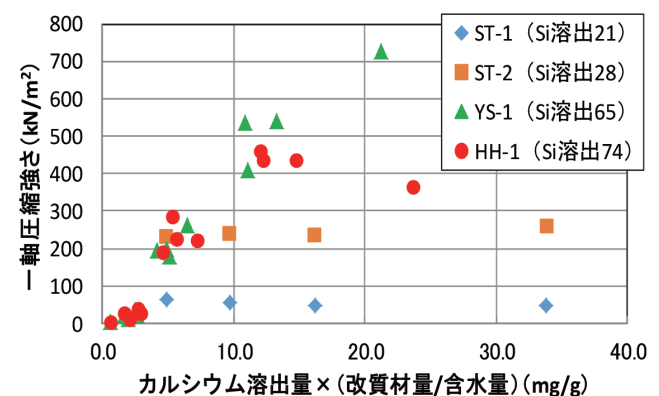


図5 カルシウム溶出量が強度発現に及ぼす影響 (Online version in color.)

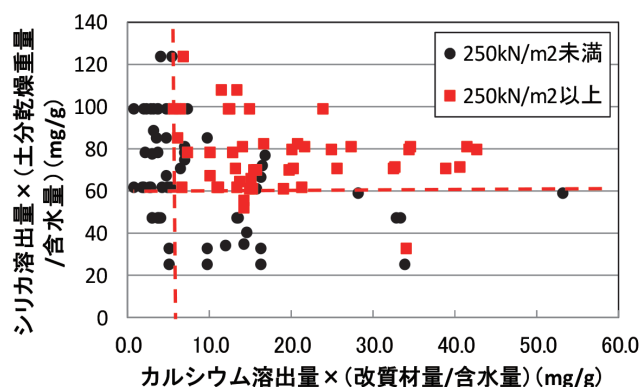


図6 シリカ溶出量とカルシウム溶出量の相互影響 (Online version in color.)

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。なお、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。

4.5 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6に示す。図6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¹⁾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6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7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、シリカ量が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

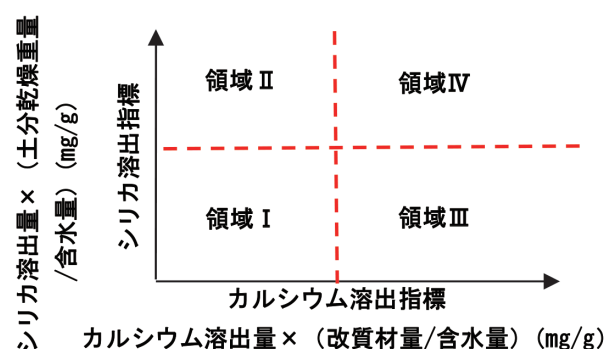


図7 シリカ溶出量とカルシウム溶出量の相互影響の概念図 (Online version in color.)

の考え方で図6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6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われる。

5 まとめ

本報告では、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、その混合直後のフレッシュな状態での流動性低下特性と解析的検討、及び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示した。今後、マニュアル改訂の際に本技術を強度管理技術として反映するため、更なる技術データの蓄積を行っていく予定である。

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) 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：土木学会論文集B3 (海洋開発), 75 (2019) 2, I_893.
- 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：土木学会論文集B3 (海洋開発), 75 (2019), 899,

- 4) 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, 59 (2020) 2, 51.
- 5) 古澤達也, 稲田勉, 伊藤春樹, 政岡和宏: 沿岸技術研究センター論文集, No.20, (2020), 43.
- 6) 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: 土木学会論文集B3 (海洋開発), 76 (2020) 2, 546.
- 7) I.Z.Yildirim and M.Prezzi: Advances in Civil Engineering, Vol.2011, Article ID 463638, 13p, (2011).
- 8) H.Yi, G.Xu, J.Cheng, J.Wang, Y.Wan and H.Chen: Procedia Environmental Sciences 16, (2012), 791.
- 9) 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, (2008), 7.
- 10) 木曾英滋, 辻井正人, 伊藤公夫, 中川雅夫, 五明美智男, 永留健: 海洋開発論文集, 24 (2008), 327.
- 11) K.Toda, H.Sato, N.Weerakoon, T.Otake, S.Nishimura and T.Sato: Minerals, 8 (2018) 5, 174.
- 12) 黒澤功, 小嶋利司: 地盤工学会誌, 67 (2019) 10, Ser. No.741, 44.
- 13) 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: 土木学会論文集B3 (海洋開発), 75 (2019), 887.
- 14) 赤司有三, 山越陽介, 勝見武: 浚渫土砂へのカルシア改質材の混合による流動性低下メカニズムに関する一考察と水中施工時の濁り抑制効果, 第14回環境地盤工学シンポジウム, 9-5 (2021), 305.
- 15) 赤司有三, 山越陽介, 藤井郁男, 勝見武: 土木学会論文集B3 (海洋開発), 77 (2021) 2, I_439.
- 16) F.G.Bell: Engineering Geology, 42 (1996), 223.
- 17) P.Akula and D.N.Little: MethodsX 7, (2020), 100928, 9p.
- 18) M.H.Ghobadi, Y.Abodilor and R.Babazadeh: Bull Eng Geo Environ, 73 (2014), 611.
- 19) 特開2016-204852
- 20) 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).
- 21) 赤司有三, 山越陽介, 小門武, 戸田賀奈子, 勝見武: 地盤工学ジャーナル, 16 (2021) 3, 179.
- 22) Y.Kakihara, Y.Kikuchi, S.Noda, T.Yamaguchi, R.Tomimatsu, K.Nakayama and T.Yoshikawa: Japanese Geotechnical Society Special Publication, 8 (2020) 2, 1.
- 23) R.A.Mortlock and P.N.Froelich: DeepSea Research, 36 (1989) 9, 1415.
- 24) 赤司有三, 山越陽介, 勝見武: 地盤工学ジャーナル, 17 (2022) 2, 1791.

(2023年5月8日受付)