

港湾整備で期待される

# スラグを利用したカルシア改質土

港湾整備においては、リサイクル材および産業副産物等の有効活用が求められている。なかでも、浚渫土と転炉系製鋼スラグを混合した「カルシア改質土」は強度・耐久性に優れ、自然環境の保全にも寄与することから期待が高まっている。

カルシア改質土により大規模な防波堤補強工事が行われた函館港

## 製鋼スラグを港湾整備で有効活用

鉄鋼スラグは鉄の製造過程で生じる石や砂利状の副産物であり、高炉で鉄鉱石を熔融・還元する際に発生する高炉スラグと鉄を精錬する製鋼段階で発生する転炉系製鋼スラグ(以下、製鋼スラグ)の2種類に大別できる。鉄1tを生産する際に高炉スラグは約300kg、製鋼スラグは約100kg生成され、日本国内におけるこれらの年間総量は東京ドーム約15杯分(約4,000万t)に匹敵する。

このうち製鋼スラグは、従来より路盤材、土木資材、農業用肥料等として広く利用されてきたが、近年、新たな用途として港湾の埋立材、浅場・干潟の基盤材、深堀跡の埋戻し、藻場造成材等に活用されている。

一方、国内の港湾整備における課題の一つとして、<sup>しゅんせつど</sup>浚渫土の活用が挙げられる。原料を輸入して製品を輸出する加工貿易が発達した日本では、大型船舶が出入りする港湾の整備は極めて重要である。国内の多くの港湾では、周辺の河川から流入した土砂が海底に堆積することから、海底を掘削して発生した浚渫土を埋立等に利用していた。しかし埋立可能な場所には限りがあり、また、新たな埋立地造成による環境破壊も懸念される。そこで注目されたのが、浚渫土を活用するカルシア改質土の適用であった。

港湾整備においては、2018年に国土交通省の「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」が改訂され、リサ

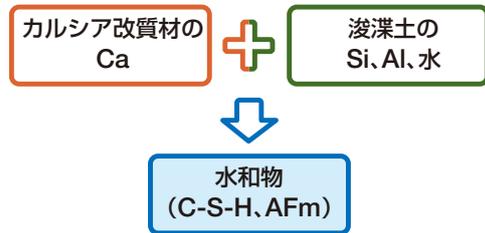
イクル材の利用促進及び産業副産物等を建設資材として利用する方法が示された。このなかでも浚渫土の活用は重要な課題となっており、カルシア改質土への期待が高まっている。

## 浚渫土の強度を改善し環境基準にも適合

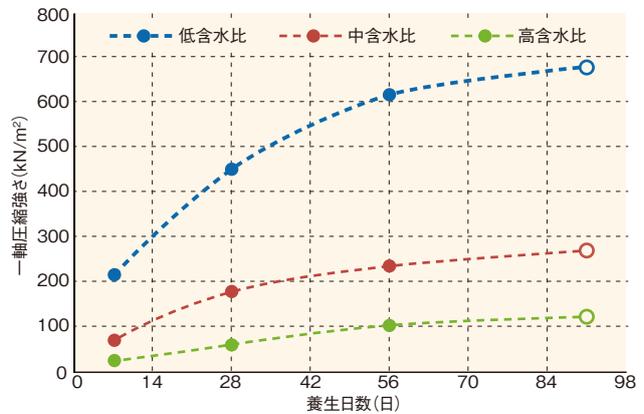
カルシア改質土は、浚渫土に製鋼スラグを原料としたカルシア改質材を混合することで、浚渫土の物理的・化学的性状を改質した材料である。製鋼スラグに多く含まれる遊離石灰(f-CaO)が浚渫土中のシリカやアルミニウム等と水和反応することにより、カルシウムシリケート系水和物(C-S-H)やカルシウムアルミネート系水和物(AFm)が形成されて固化する。こうして軟弱な浚渫土の強度が改善される(図1)。その手触りは、工作用の粘土のようだ。

一般に浚渫土は含水比が高く軟弱であるため、浚渫土のみでは利活用が困難な場合が多い。しかし、製鋼スラグを混合することによって粘性と強度が向上するため、法面勾配の形成が可能となり、耐震性に優れ液状化するおそれがない。混合直後のカルシア改質土を海水中に投入した場合でも濁りの発生を抑制できる(図2)。また、カルシア改質材に含まれるカルシウム分の作用により、浚渫土に含まれるリン酸や硫化物の発生が抑制されることから、水質改善の観点からも期待されている。

製鋼スラグはカルシウム分を多く含むために、水中では高



カルシア改質材は、転炉系製鋼スラグを成分管理・粒度調整した材料。浚渫土のシリカ分およびアルミナ分とカルシア改質材からのf-CaOが水和固化して、カルシウムシリケート系水和物(C-S-H)やカルシウムアルミネート系水和物(AFm)が形成されて固化する。養生時間が長くなるにつれ、強度が向上する。



カルシア改質土の一軸圧縮強さの経時変化

図1 カルシア改質土の強度改善

いpHを呈するが、カルシア改質土では、浚渫土との混合による透水性の低下等により、カルシア改質土付近のpHはほとんど上昇せず、生態への安全性が確認されている。96時間の急性毒性試験においても、マダイ、クロアワビ、クルマエビの死亡や異常行動は見られなかった。また製鋼スラグ活用の課題となっていた重金属等の溶出に対する安全性についても、海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律の水底土砂基準等の環境基準に適合していることが証明されている。

### 鉄鋼及び建設各社が協力して開発

カルシア改質土の開発は、2004年度から2007年度にかけて(一社)日本鉄鋼連盟が実施した経済産業省補助金事業の基礎研究から始まった。以来、海中に開いた窪地の埋戻しや浅場・干潟の復活、軟弱地盤の液状化対策、護岸整備等を行い、2007年には鉄鋼会社と建設会社によるカルシア改質土研究会が設立され、実用化技術の開発が進められた。その後、2017年に(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」が発刊されるなど、公的認証を取得し、環境省や水産庁からもその技術が認証された。2019年には、(一財)国土技術研究センターが募集する第19回国土技術開発賞で、「カルシア改質土による大規模埋立技術」が入賞した。

カルシア改質土の施工数量(2021年まで)は累計150万m<sup>3</sup>以上となり、カルシア改質土の導入は年々増加している(図3)。



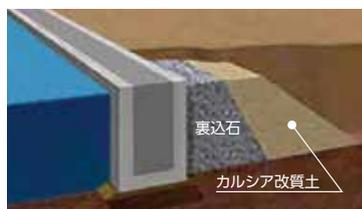
浚渫土とカルシア改質材の混合直後に、カルシア改質材の吸水作用により粘性が増大する。このため、カルシア改質土は、混合直後の水中投入時に、浚渫土単体よりも濁りの発生を抑制することができる。

図2 カルシア改質土投入時にみられる濁りの抑制効果



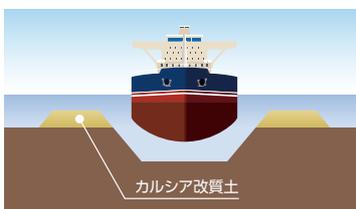
図3 カルシア改質土の施工数量の推移

## ■ 非液化化材料(腹付け材)



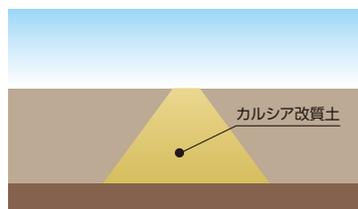
カルシア改質土は難浸透性のため裏埋土の吸出しが生じない。裏埋材に適用すれば安価に施工ができ、液化が抑制される。

## ■ 航路埋没対策用材



航路の浚渫で発生した土砂を潜堤材に活用することで、処分場への搬送が不要となり、航路への土砂流入を防止できる。

## ■ 中仕切り堤材



大規模な埋立工事を区分けて施工するための中仕切り堤にカルシア改質土を使用することで、浚渫土を有効活用できる。

図4 カルシア改質土の主な用途

## 4種類の混合方法に加えて新たな工法も

カルシア改質土の特徴を生かした代表的な用途は、港湾における埋立柱材や、非液化化材料(腹付け材)、航路埋没対策用材、中仕切り堤材などがある(図4)。このほか、浅場・干潟での安定した藻場礁、漁礁の形成など、海域環境の改善材にも最適である。

浚渫土とカルシア改質材の混合プロセスには、「バックホウ混合」「連続式ミキサー混合」「管中混合」「落下混合」の4種類がある。最も加工実績が多いのは、大型の土運船の中に浚渫土を入れた上にカルシア改質材を投入し、重機で一気に混合するバックホウ混合である。500 m<sup>3</sup>/日以下程度の小規模施工に適した方法だが、8~10 m<sup>3</sup>の大容量バケットを採用すれば中~大規模施工にも対応可能である。

連続式ミキサー混合は、ミキサー混合プラントを作業台船に艀装して海上で施工する。混合品質が高く、高強度の人工石・ブロック用生コン混合には最適な工法だが、1基の施工能力は600 m<sup>3</sup>/日程度と小さい。

管中混合は、空気圧送船に浚渫土と改質材を投入し、約300 mの配管内で圧送しながら混合するもので、3,000 m<sup>3</sup>/日程度の大規模施工に適している。

落下混合は、浚渫土と改質材をベルトコンベア及びスプレッターからの落下時の衝撃力を利用して混合するものである。施工は汎用のリクレーマ船<sup>\*</sup>に、改質材供給設備を艀装して行う。3,000 m<sup>3</sup>/日程度の大規模施工に最も適している。

\* 海面の埋立柱工事等において、土運船によって輸送された土砂を揚荷し、コンベア等を介して埋立柱等へ排出する作業船。

また、これらに加えて新たな工法も開発されている。従来の混合方法は、土運船等であらかじめ混合したカルシア改質土を、船で所定の施工エリアへ運搬し、海中投入する事前混合処理が主流である。新工法となる「バッチ式原位置混合工法」は海底地盤の粘土を移動せずに、その場(原位置)で粘土と改質材を混合して地盤を改良する。海底で一定の工程を実施するため、泥土やカルシア改質土の運搬を必要としないことから、低コスト・短納期につながる(連携記事参照)。

カルシア改質土の施工方法は、工事の目的や規模、条件によって、最適なものが選択される。例として、函館港西防波堤背面盛土造成工事(図5)と、横浜新本牧ふ頭中仕切り潜堤築造工事(図6)を紹介する。

## ブルーカーボン生態系への貢献にも期待

港湾周辺の藻場の造成に、カルシア改質土が貢献している例を紹介する。

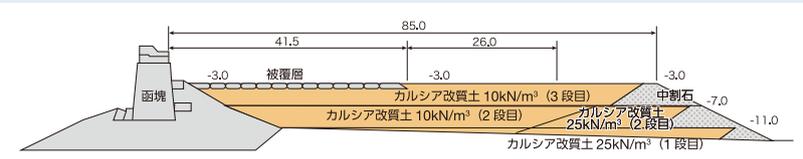
千葉県君津市の沖合には水深9 mの窪地があったが、貧酸素による水産生物の減少が問題となっていた。これを解決する取り組みとして、2013年に地域の行政や漁業者と製鉄業が連携し、窪地に水深3~4 mの浅場造成を行った。カルシア改質土で盛り土を作り、その上に鉄鋼スラグ水和固化体(骨材に製鋼スラグを使用し、結合剤に高炉スラグ微粉末を用いて水と混合し固化させたもの)による藻場造成工と覆砂工を施したことで、魚が居つき、藻が生える浅場が実現した。

カルシア改質土は港湾で発生する浚渫土の有効活用策と

図5 水中盛土としての適用事例 函館港西防波堤背面盛土造成工事

大型クルーズ船の受け入れ環境整備に伴い発生する浚渫土を活用してカルシア改質土を作り、バックホウ工法にて防波堤の補強と窪地の埋戻しを行った。経済性に優れ、産業副産物の利用促進に寄与しつつ、セメント系固化処理にはない浚渫土の濁り抑制効果があることから、道内の公共工事で初めてカルシア改質材が用いられた。

目的	防波堤背面盛土造成、窪地埋戻し
発注者	国土交通省北海道開発局函館開発建設部
施工場所	北海道函館市函館港
施工時期	2019年6月～2022年(2022年3月現在)
施工数量	カルシア改質土40万700m <sup>3</sup> 、カルシア人工石20 m <sup>3</sup>
配合・材料	カルシア改質材混合割合：容積混合率20～22% 浚渫土：函館港若松地区クルーズ船舶地浚渫土 カルシア改質材：粒径0～25 mm (日本製鉄(株)九州製鉄所、名古屋製鉄所)
施工方法	グラブ浚渫・バックホウ混合(一部落下混合・トレミー管投入)



土砂投入箇所標準断面図

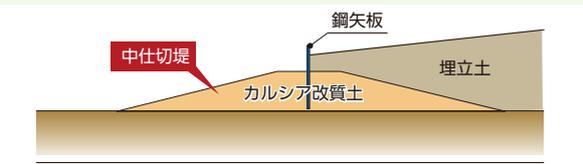
図6 中仕切り堤築堤用材としての適用事例 新本牧ふ頭中仕切り潜堤築造工事

新本牧ふ頭は延長1,000 m、水深18 m以上の大水深・高規格コンテナターミナルと、高度な流通加工機能を有するロジスティック拠点を集約する。一般的なカルシア改質土は航路の水深確保で生じる浚渫土を用いるが、ここでは護岸の地盤改良のために海底で砂杭を打設した際に盛り上がった土を中仕切り堤に活用した。

目的	新本牧ふ頭建設工事 カルシア改質土による中仕切り潜堤築造
発注者	横浜市港湾局
施工場所	横浜市中区本牧ふ頭地先公有水面
施工時期	2021年1月～4月
施工数量	カルシア改質土16万300 m <sup>3</sup>
配合・材料	カルシア改質材混合割合：容積混合率20% 浚渫土：床掘土(SCP盛上り土) カルシア改質材：日本製鉄(株)東日本製鉄所(君津)、 JFEスチール(株)東日本製鉄所(千葉)
施工方法	グラブ床掘・落下混合・グラブ投入



カルシア落下混合船



中仕切り堤部 断面図

して開発され、軟弱な浚渫土が盤石になることから人工干潟や浅場の造成資材、特に嵩上げ材として活用されている。水産生物の生息場としても機能するため、漁業者からの期待も大きい。このような製鋼スラッグの活用は今後、地球温暖化

対策の一つであるブルーカーボン生態系の活用にも貢献していくものと期待されている。

- 取材協力 カルシア改質土研究会、日本製鉄(株)、JFEスチール(株)
- 文 杉山香里