

沿岸海域におけるカルシア改質土の適用例

Application of Dredged Soil with Converter Slag for Coastal Sea Area

永 留 健 (ながとめ たけし)

東亜建設工業株式会社技術研究開発センター
地盤・防災技術グループ 主任研究員

赤 司 有 三 (あかし ゆうそう)

新日本製鐵株式会社
設備・保全技術センター マネジャー

御手洗 義 夫 (みたらい よしお)

東亜建設工業株式会社技術研究開発センター
地盤・防災技術グループ グループリーダー

中 川 雅 夫 (なかがわ まさお)

新日本製鐵株式会社
スラグ・セメント事業推進部 部長

1. はじめに

港湾工事では、航路や泊地の浚渫に伴い、大量の浚渫土砂が発生する。そのため、港湾事業や海域改善事業などにおいては、浚渫土砂を積極的に有効利用されることが期待されている。一方、鉄鋼の生産過程において生成される副産物である鉄鋼スラグは、年間生成量約3 900 万 t (2010年度)¹⁾と我が国で最も大量に発生する産業副産物である。最近の研究では、高含水状態の軟弱浚渫土に、鉄鋼スラグの一種である転炉系製鋼スラグを混合することによって、土砂性状を改良・改質できることがわかっている^{2),3)}。

本稿ではまず、浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合材料であるカルシア改質土の特長について説明する。次に、実海域で試験的に行われた工事事例を紹介して、今後の展開について述べる。

2. カルシア改質土の特長

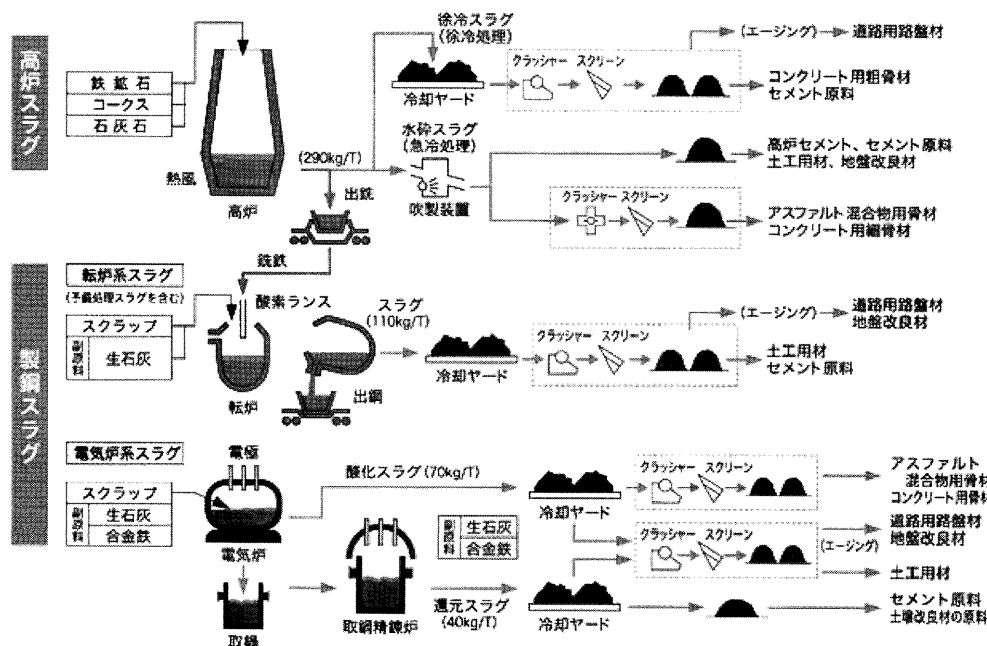
浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合材料（以下、カルシア改質土とする）は、浚渫土の土性を改良するとともに

転炉系製鋼スラグからのアルカリ分の溶出を抑制した材料として海域の土工事に適用されつつある。本章では、その使用材料や特長について述べる。

2.1 転炉系製鋼スラグとは

転炉系製鋼スラグは、鉄鋼スラグの一種である。図—1に、鉄鋼スラグの生成工程を示す⁴⁾。鉄鋼スラグとは、鉄鋼製造工程において副生される各種スラグを総称したもので、それぞれ生産工程や製造法の違いによって性状の異なるものが生成される。各種スラグの特性を表—1に、化学成分の分析結果の一例を表—2に示す^{5),6)}。

このうち、製鋼スラグは銑鉄やスクラップから成分調整を行った鋼を製造する工程において生成され、粗鋼1 tあたり110 kg 程度発生する。転炉系製鋼スラグは溶銑を主原料とする製造法によって発生する粒状体で、主な化学成分として、石灰、二酸化ケイ素、酸化鉄などが挙げられる。また、転炉系製鋼スラグは、粒状の地盤材料として道路用路盤材、地盤改良材、土工用材などに有効利用されているが、そのリサイクル率は高炉スラグなどと比べて低いのが現状である¹⁾。転炉系製鋼スラグを原料とし、粒度調整及び成分管理を行ったものがカルシア

図—1 鉄鋼スラグの生成工程⁴⁾

表一 鉄鋼スラグの種類と特性（文献5）に加筆）

	水砕スラグ	徐冷スラグ	製鋼スラグ ⁶⁾
粒子密度(g/cm ³)	2.6~2.8	2.6~2.8	2.5~3.4
単位体積重量(kN/m ³)	11~14	15~17	20~27
化学特性	溶出水のpH	10~11	11~12
	水硬性	強	弱
	膨張性	なし	あり
主要用途	セメント 細骨材	路盤材 粗骨材	路盤材 SCP材

表二 鉄鋼スラグの化学成分の一例（文献5）に加筆）

化学成分	高炉スラグ (水砕・徐冷)	製鋼スラグ (転炉系)	安山岩	浚渫土 ⁶⁾
CaO	41.7	45.8	5.8	2.6
SiO ₂	33.8	11.0	59.6	45.0
T-Fe	0.4	17.4	3.1	7.6
MgO	7.4	6.5	2.8	2.1
Al ₂ O ₃	13.4	1.9	17.3	13.0
S	0.8	0.06	-	1.5
P ₂ O ₅	<0.1	1.7	-	0.1
MnO	0.3	5.3	0.2	0.1

系改質材（以下、改質材とする）で、本稿で対象としているカルシア改質土の材料である。改質材の写真を口絵写真—18に示す。改質材の粒子密度は概ね2.5~3.4 g/cm³の範囲にあり、粒径0~20 mm、均等係数 $U_c = 3.3 \sim 62.8$ 、曲率係数 $U_c' = 0.1 \sim 2.2$ の範囲程度で条件に応じて調整されている²⁾。

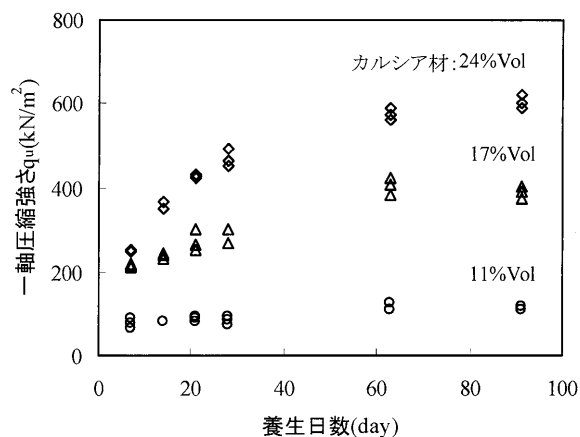
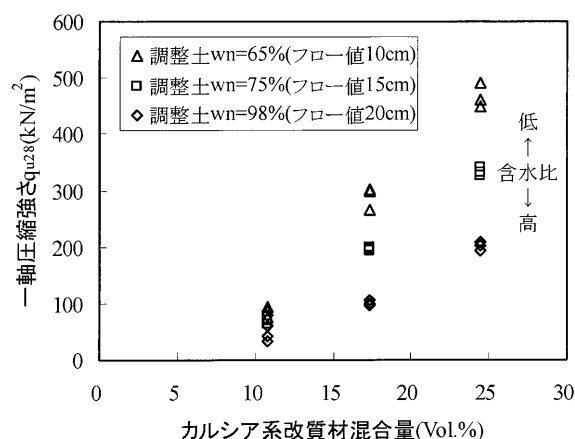
2.2 カルシア改質土とは

カルシア改質土は、軟弱な浚渫土に改質材を混合することで、浚渫土の物理的・化学的性状を改善した地盤材料である。ここで、カルシア改質土に使用する浚渫土は、基本的に高含水でシルト分や粘土分が多く、そのままの状態では使用が困難なものを対象としている。口絵写真—19には、浚渫土及び浚渫土に改質材を全体体積（浚渫土+改質材）比で30%混合した直後のカルシア改質土のシリンダーフロー試験（JHS A313；以下、フロー値とする）の状況を、口絵写真—20には作製直後のカルシア改質土の状態を示すが、改質材を混合することで軟弱な浚渫土が改質されている様子が明らかである。本節では、カルシア改質土の主な特長について述べる。

(1) 強度発現特性

カルシア改質土は、浚渫土に改質材を混合することで、混合直後に浚渫土の土粒子の凝集による粘性増大が生じ、その後の長期養生で強度が発現する特性がある。ここでは、カルシア改質土の強度発現特性について紹介する。

長期的な強度発現の例として、図—2に、浚渫土の含水比 $w_n = 65\%$ （フロー値10 cm、液性限界 $w_L = 61\%$ ）の粘性土に絶乾状態の改質材を全体の体積混合量で11, 17, 24%混合したカルシア改質土の一軸圧縮強さと養生日数の関係⁷⁾を示す。図より、養生日数が経過していくにつれて、一軸圧縮強さが増加しているのが確認できる。強度が発現する理由として、浚渫土に含有されている可溶性シリカと改質材に含有されている遊離石灰（f-CaO）が反応することで、硬化が進行していくとされている⁸⁾。

図—2 一軸圧縮強さと養生日数の関係⁷⁾図—3 カルシア系改質材混合量と一軸圧縮強さの関係⁷⁾

また、図—3にはカルシア改質土の改質材混合量（Vol.%）と材齢28日での一軸圧縮強さの関係⁷⁾を示す。この結果は、図—2で用いた浚渫土を3種類の含水状態に調整した後に、それぞれ所定量の改質材を混合し、作製したカルシア改質土の一軸圧縮試験結果である。この図より、改質材の混合量が多いほど、かつ含水量が少ないほど、改質土の一軸圧縮強さが大きい傾向であることがわかる。このように、改質材混合量や含水量によって強度制御が可能であれば、一般的なセメント系固化処理土と同様な利用方法なども考えられる。

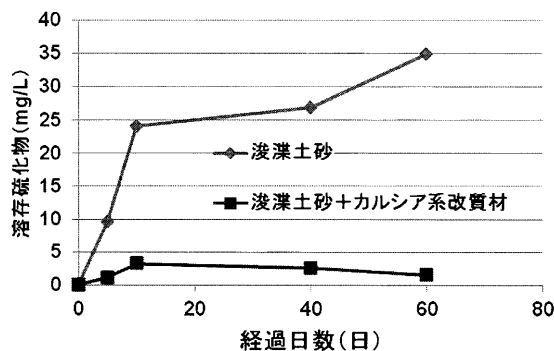
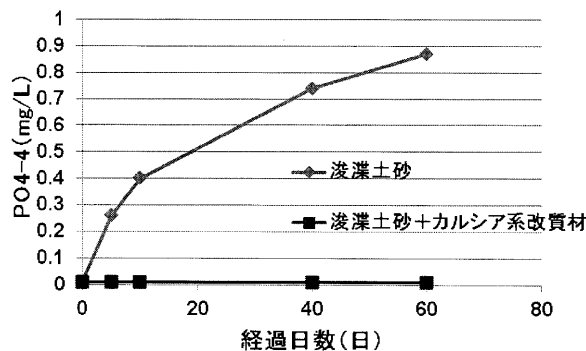
(2) 水中での汚濁抑制効果

カルシア改質土は、混合直後に粘性が増大するため、水中投入時の汚濁を低減できる効果が期待できる。ここでは、カルシア改質土の水中落下時の汚濁抑制効果の確認実験を紹介する。

水中落下実験は水深が内径170 mm、深さ1 mの円筒型水槽に海水を満たし、水面上から浚渫土と混合直後のカルシア改質土をそれぞれ約100 cm³投入し、落下過程での汚濁の発生状況をデジタルビデオで撮影し、投入して落下するまでの材料分離や汚濁発生状況の比較を行った。口絵写真—21には、ほぼ同じ流動性（フロー値13~14 cm）に調整した浚渫土とカルシア改質土試料の水中落下している実験状況を示すが、改質土の汚濁抑制効果が現れているのがわかる。

(3) 富栄養浚渫土の硫化物・リン発生抑制効果

技術紹介

図—4 溶存硫化物の溶出抑制効果⁹⁾図—5 リン酸態リンの溶出抑制効果⁹⁾

改質材は、鋼の製造過程において不要な成分であるリンや硫化物を除去するために投入した石灰が鉱物化せず、一部未反応の状態では遊離石灰として存在している。ここでは、遊離石灰が浚渫土中にある硫化物やリンを吸着して溶出を抑制した実験例⁹⁾を紹介する。

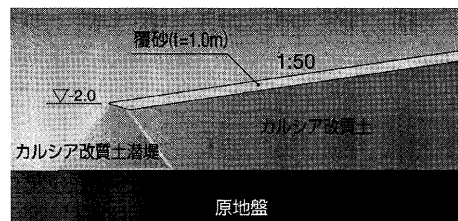
実験は、浚渫土に改質材を外割質量比で50%混合したカルシウム改質土100 gをガラス瓶（容量1 L）に入れた後に人工海水0.9 Lを入れて溶出実験用の試料とした。同様に浚渫土のみのケースも行った。これらの溶出実験用の試料は、密閉、光遮断、室温下の条件で放置した。その後、所定の日数でそれぞれの上澄み液を採水し、溶存態硫化物とリン酸態リンを測定した。図—4に溶存態硫化物の測定結果を、図—5にリン酸態リンの測定結果を示す。これらの図より、改質材を混合したことによる硫化物やリンの発生抑制効果が確認できる。これらの特性によって、赤潮や青潮のもとになる富栄養化底質を改質・浄化する効果などが期待できるものと考えられる。

(4) pH上昇・白濁抑制効果²⁾

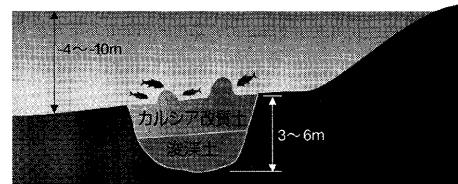
改質材はカルシウム分を主成分とするため、単独での利用では周辺海水のpH上昇を引き起こしたり、海水中のマグネシウムと反応して白濁したりする可能性がある。しかし、浚渫土と適切に混合し、改質材周辺を透水性の低い土砂で覆うことによって、周辺海水に影響を与えるようなpH上昇や白濁を生じることなく、安全に適用できることがわかっている。また、魚介類や藻類などの海生生物に対するカルシウム改質土の安全性についても確認されている。

2.3 カルシウム改質土の適用用途

これまで述べてきたカルシウム改質土は、浚渫土の改質



(a) 潜堤材、埋立材としての利用



(b) 深掘り窪地埋戻し材としての利用

図—6 カルシウム改質土の利用方法の一例¹⁰⁾

や富栄養化物質の発生を抑制できることから、図—6に示すような、干潟・浅場の造成材や深掘り窪地埋戻し材などの海域環境再生用途や港湾・空港での土工用地盤材料としての利用が期待されており、本格的な実用化に向けた検討が進められている段階である。

3. カルシウム改質土の現場適用事例

3.1 堺実海域実験工事¹¹⁾

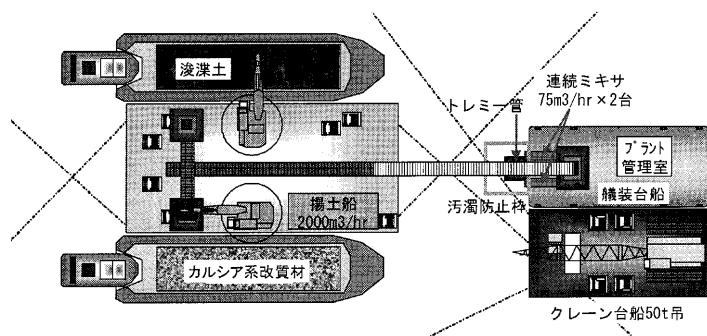
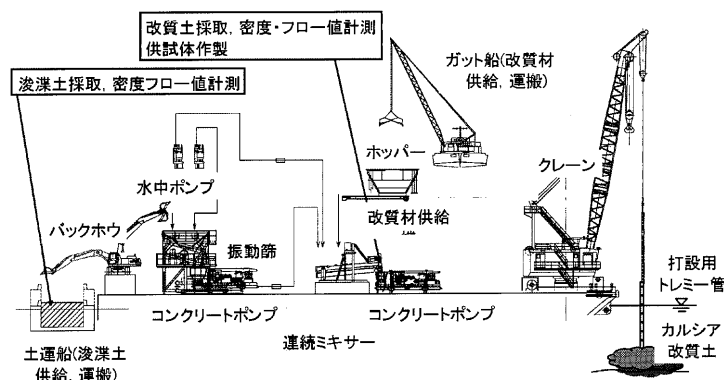
2007年に大阪府堺市堺浜（堺北泊地）にて、ミキサーで混合したカルシウム改質土をトレミー管で連続的に水深約15 mの海底に投入し、3 600 m³（75 m×25 m×h0.7 m、3箇所）のマウンドを造成する実験工事を行った。このときの工事の目的は、①2種類の材料を定量かつ効率的に混合した上で連続的に海域に投入できること、②2種類の材料の混合および投入での施工・品質管理方法を確立すること、③施工時の環境影響を低減することであった。

工事での施工システムを図—7に示す。施工は、2系統の揚土機能を有するリクレーマ船（2 000 m³/hr）によって所定の割合で浚渫土と改質材を連続ミキサー（75 m³/h×2基）に供給してカルシウム改質土を混合・製造した。また、海域への投入に際しては汚濁防止のための汚濁防止枠とトレミー管を組み合わせで行った。施工状況の全景を口絵写真—22に示す。

工事は、連続施工の中、浚渫土や改質材、混合直後のカルシウム改質土の品質（湿潤密度）を逐次確認しながら、改質材混合量を管理するとともに、改質土打設時に水質調査（pH、SS）を行うことで環境への影響を確認しながら施工した。その結果、カルシウム改質土の密度測定による品質管理（配合量管理）の有効性、改質材混合による浚渫土の改質効果、混合材料の強度発現やカルシウム改質土打設時に周辺海域環境に影響を及ぼさないことなどを実海域レベルで確認することができた。

3.2 東京湾藻礁石材設置工事¹²⁾

2009年に千葉県安房郡鋸南町保田沖にて、ミキサーで混合したカルシウム改質土をポンプで圧送し、トレミー管で連続的に水深約10 mの海底に打設し、11 210 m³

図-7 施工システム¹⁾図-8 施工システム²⁾

(215 m×90 m×約 0.5 m) の藻礁石基盤材を試験的に造成する工事を行った。

工事での施工システムを図-8 に示す。カルシウム改質土の製造は、打設能力100 m³/hr 級のプラント施設を台船上に積装したプラント船で行った。所定量の浚渫土と改質材をそれぞれ連続ミキサーに供給し、ミキサーで混合・製造した改質土を所定の位置までコンクリートポンプで圧送し、トレミー管で打設した。施工状況の全景を口絵写真-23に示す。

工事は、連続施工の中、浚渫土や改質材、混合直後のカルシウム改質土の品質（湿潤密度、フロー値）を逐次確認しながら改質材混合量や含水量を管理した。ここでは特に、カルシウム改質土をポンプ圧送し、トレミー管で約 50 cm の薄層で平らに敷設する必要があることから、打設時の流動性を確認するためフロー試験による管理が重要となった。また、改質土打設時の水質調査（pH、SS）を行うことで環境への影響を確認しながら施工した。さらに、改質土試料をモールドに採取して、材齢 28 日後の一軸圧縮試験を行うことで基盤材としての必要強度を確認しながら施工を進めた。これらの品質管理や水質調査を行った結果、-10 m 程度の海底部に所定の品質を満足したカルシウム改質土を打設することができた。

4. おわりに

本稿では、カルシウム改質土の特長や施工事例について紹介した。建設副産物である浚渫土と産業副産物である

転炉系製鋼スラグを混合することで浚渫土の改質や水質の浄化に寄与できる技術となりうるカルシウム改質土であるが、人工地盤材料としての特性は室内実験や実海域実験などである程度明らかになりつつある。しかしながら、こうした材料の利用にあたっては長期的な性状を確認すると同時に施工中や施工後の環境影響を低減しつつコスト競争力のある工法の開発が不可欠であると考えられる。今後は持続可能な循環型社会の形成に向けて、カルシウム改質土の技術開発を進めていく所存である。

謝辞：本報に関する調査結果の一部はカルシウム改質土研究会（新日本製鐵㈱、JFE スチール㈱、㈱神戸製鉄所、住友金属工業㈱、日新製鋼㈱、五洋建設㈱、東亜建設工業㈱、東洋建設㈱、若築建設㈱）によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会（NSA）：平成22年度鉄鋼スラグ需給の概要，<http://www.slg.jp/pdf/fs-123-01.pdf>, 2011.
- 2) ㈱日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグ海域利用の手引き，2008.
- 3) 平井 壮・水谷崇亮・菊池喜昭・中島 晋・井口 薫：製鋼スラグ混合土の混合条件が強度に与える影響，第9回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 103～110, 2011.
- 4) 鉄鋼スラグ協会（NSA）：鉄鋼スラグができるまで，<http://www.slg.jp/slag/process.html>, 2011.
- 5) 松田 博・中川雅夫・篠崎晴彦：建設副産物の地盤工学的有効利用 9. 鉄鋼スラグ，土と基礎，Vol. 53, No. 9, pp. 40～47, 2005.
- 6) ㈱日本鉄鋼連盟：転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法技術資料，2008.
- 7) 永留 健・五明美智男・野崎郁郎・武田将英・木曾英滋・辻井正人：浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを混合することによる強度向上効果，第43回地盤工学研究発表会，pp. 539～540, 2008.
- 8) 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，第24巻，pp. 327～332.
- 9) 三木 理・植木知佳・赤司有三・中川雅夫・畑 恭子・永尾謙太郎・笠原 勉・鈴木輝明：転炉系製鋼スラグを用いた浚渫地埋め戻し時の海域環境改善予測，海洋理工学会誌，2011（投稿中）.
- 10) カルシウム改質土研究会：パンフレット，カルシウム改質土による海域環境修復技術，2011.
- 11) 武田将英・五明美智男・永留 健・辻井正人・木曾英滋・中川雅夫：浚渫土と転炉系製鋼スラグの混合固化改良の実海域実験—連続式混合投入施工—，海洋開発論文集，第24巻，pp. 351～356.
- 12) 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ウム系改質材の適用例～藻礁石基盤材としての適用～，第7回地盤工学関係東支部発表会，pp. 78～81, 2010.

（原稿受理 2011.10.31）