

カルシア改質土による海面埋立

田中 裕一¹・高 将真²・今村 正³・渋谷 貴志⁴
山越 陽介⁵・赤司 有三⁶・北野 吉幸⁷・菅野 浩樹⁸

¹正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Yuichi.Tanaka@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設(株) 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: Chanjin.Ko@mail.penta-ocean.co.jp

³五洋建設(株) 名古屋支店(〒460-8614 愛知県名古屋市中区錦3-2-1 信愛ビル4F)
E-mail: Tadashi.A.Imamura@mail.penta-ocean.co.jp

⁴五洋建設(株) 名古屋支店(〒460-8614 愛知県名古屋市中区錦3-2-1 信愛ビル4F)
E-mail: Takashi.Shibuya@mail.penta-ocean.co.jp

⁵正会員 新日鐵住金(株) 設備・保全技術センター(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)
E-mail: yamagoshi.6kg.yohsuke@jp.nssmc.com

⁶正会員 新日鐵住金(株) 設備・保全技術センター(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)
E-mail: akashi.n9t.yuzoh@jp.nssmc.com

⁷新日鐵住金(株) スラグ・セメント事業推進部(〒110-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1)
E-mail: kitano.b7f.yoshiyuki@jp.nssmc.com

⁸正会員 新日鐵住金(株) 君津製鐵所(〒293-8511 千葉県富津市新富20-1)
E-mail: kanno.7fz.hiroki@jp.nssmc.com

カルシア改質土は、転炉系製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施した材料と浚渫工事で発生する浚渫土を混合することで、浚渫土の物理的、化学的性質を改善した材料であり、強度発現、pH抑制等の特徴がある。

カルシア改質土の強度発現する特性を活かし、約3万 m^3 の海面埋立工事(二期工事)を管中混合方式で施工し、実施状況・配合設計方法・品質管理方法・地盤の強度発現状況等を報告した。その後実施した約43万 m^3 の二期工事では、施工効率の向上とともに新たな落下混合による施工方法を試みた。この過程で、様々なデータを取得し、カルシア改質土について発現強度、強度比、打設時の勾配、圧密沈下量等の知見を得るとともに管中混合方式・落下混合方式の特性を把握した。

Key Words : converter slag, dredged soil, pipe mixing method, drop mixing method, reclamation

1. はじめに

カルシア改質土は、浚渫工事で発生する浚渫土と転炉系製鋼スラグを原料として成分管理と粒度調整を施した材料(カルシア改質材)を混合することで、浚渫土の物理的、化学的性質を改善した材料である。カルシア改質土は、強度発現、pH抑制、海域投入時の濁り発生抑制等の特徴があり、深掘跡の埋戻しや浅場マウンドの造成等に利用されている¹⁾。

我々は、カルシア改質土の強度発現特性に着目して、小規模実験を行い、地盤材料としての特性を把握した上で²⁾³⁾、愛知県東海市において大規模な地盤造成を実施した。約3万 m^3 の海面埋立工事(二期工事)の実施状況・配合設計方法・品質管理方法・強度発現状況等を前

報で報告したが⁴⁾、引き続き実施した約43万 m^3 の二期工事において空気圧送船を使用した管中混合方式の効率向上を図るとともに、新たにリクレーマ船を利用した落下混合方式を適用した。本報では、施工方法の特徴、カルシア改質土の発現強度、各種強度比、打設時の勾配、地盤強度、圧密沈下量等の得られた知見を報告する。

2. 施工概要および調査概要

(1) 施工概要

今回実施した西地区(二期工事)において、43万 m^3 の埋立のうち、29万 m^3 を管中混合工法により、14万 m^3 を落下混合方式により施工を行った(図-1,表-1)。

管中混合方式は、空気圧送過程のプラグ流によって浚渫土とカルシア改質材を混合、サイクロンで減勢させて法肩流下方式で打設する方法である(図-2、写真-1~3)。東地区(二期工事)ではバックホウの8 m³バケットにおいて所定の混合比率を確保した後に空気圧送船のホッパーに投入したが、二期工事では空気圧送船のホッパーに直接浚渫土とカルシア改質材を投入し、ホッパー

内での所定の比率を確保することにより施工効率の向上を図った。

落下混合方式は、リクレーマ船のベルトコンベアの乗継やスプレッドからの落下時等の衝撃により浚渫土とカルシア改質材を混合し、ダンプで運搬・打設する方法である(図-3)。リクレーマ船の甲板ベルコンからスプレッドへの乗継部で2.5 m、スプレッドから貯泥槽への落



図-1 平面図

表-1 東地区、西地区比較表

	西地区(二期工事)	東地区(二期工事)
施工期間	2013年3月~9月	2012年4月~5月
面積	7ha	1.5ha
揚土量	42.7万m ³	3.8万m ³
平均揚土量	3,200m ³ /日	1,200m ³ /日
施工方法	管中混合方式 落下混合方式	管中混合方式

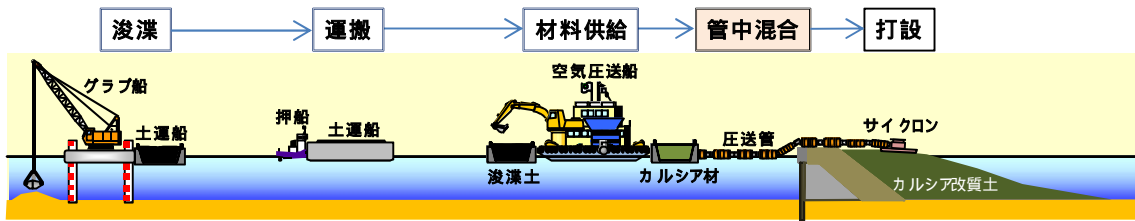


図-2 工事概要図(管中混合方式)



写真-1 空気圧送船ホッパー



写真-2 圧送配管



写真-3 サイクロン

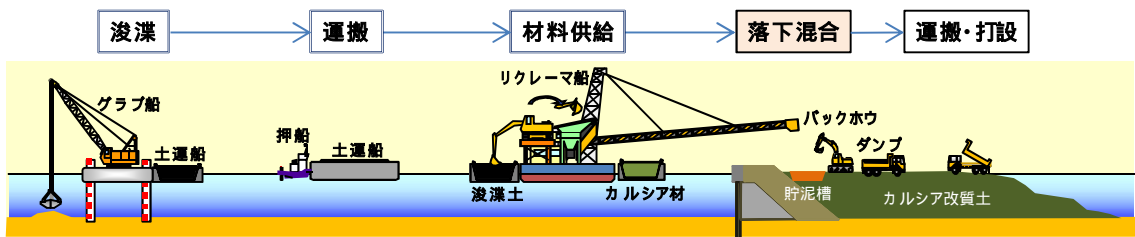


図-3 工事概要図(落下混合方式)



写真-4 リクレーマ船の状況



写真-5 スプレッドからの落下



写真-6 打設地点

下部で約10 m, 貯泥槽からダンプ運搬後のダンプアップ時に約2 mの合計3回の落下混合を行った(写真-4~6)。事前混合処理工法では, ベルトコンベアの乗継部で埋立材料とセメント混合する方法もあるが⁵⁾, カルシア改質土に適用するにあたり, 所定の落下高さの確保, スプレッドから貯泥槽への落下部に45°の角度で衝突板を設置し, 混練性の向上・材料分離を防止を図る等の工夫を行った。

(2) 使用材料

浚渫土は名古屋港周辺の浚渫工事で発生したものを, カルシア改質材はJIS A 5001に規定されているCS-20相当の粒度のものを使用した。浚渫土とカルシア改質材の性状を表-2に示す。浚渫土は45検体(現場で土運船毎に測定した含水比, 湿潤密度は247検体), カルシア改質材は10検体(現場で測定した含水比は137検体)の平均である。また, 密度について, 浚渫土は土粒子密度, カルシア改質材は表乾密度を表す。

カルシア改質土は, 浚渫土:カルシア改質材 = 75 : 25 ~ 70 : 30の容積比で混合して作成した。

3. 調査結果

(1) カルシア改質土の特性

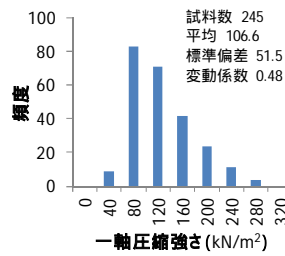
品質管理として土運船毎に一軸圧縮試験を実施し, 平均強度は全体で106.6 kN/m²であった(図-4)。浚渫土の性状の変化, 施工時にカルシア改質材の添加量等の変更等を行ったため, 変動係数が大きい傾向があるが, 管中混合方式よりも落下混合方式の方が, 平均強度・変動係数とも大きくなった。

浚渫土の砂礫分と一軸圧縮強さの関係を図-5に示す。今回の造成地盤の設計基準強度は30 kN/m², 現場目標強度は48 kN/m²であり⁴⁾, 浚渫土の砂礫分の多寡に関わら

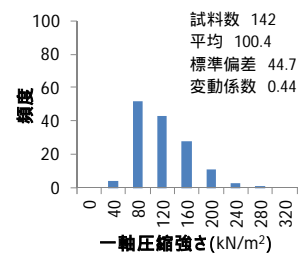
ずカルシア改質土の現場平均強度は目標強度を上回ることを確認した。また, 目標強度以下は, 施工全体で9%, 管中混合方式で10.5%, 落下混合方式で6.3%であり, 管中混合固化処理工法において設定している不良率25%⁶⁾を下回るものであった。

カルシア改質材の密度が大きいので, 浚渫土と比較してカルシア改質土の湿潤密度は大きくなる。そこで, 現場において10 Lの容器にカルシア改質土を充填し, 品質管理に使用した。一方で, 湿潤密度と一軸圧縮強さの関係は必ずしも明確とならなかった(図-6)。

【施工全体】



【管中混合方式】



【落下混合方式】

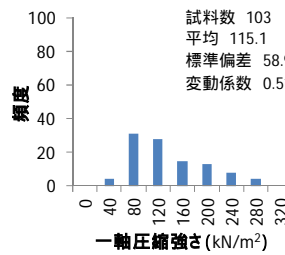


図-4 一軸圧縮強さ(材令28日)

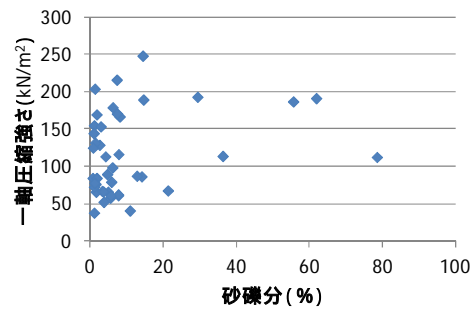


図-5 浚渫土砂礫分と一軸圧縮強さ(材令28日)

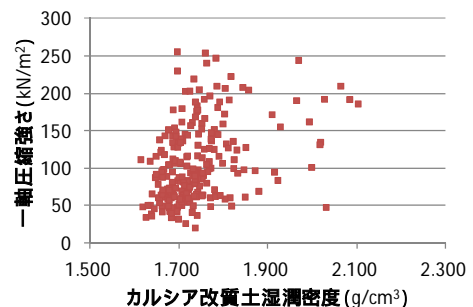


図-6 湿潤密度と一軸圧縮強さ(材令28日)

表-2 浚渫土およびカルシア改質材の性状

項目		単位	浚渫土	カルシア改質材	
密度		s	g/cm ³	2.658	3.01
コンシステンシー	液性限界	wL	%	101.0	-
	塑性限界	wP	%	35.5	-
	塑性指数	IP	-	65.5	-
粒度	礫分	-	%	1.24	63.8
	砂分	-	%	8.50	34.1
	シルト分	-	%	41.95	2.1
	粘土分	-	%	47.82	-
	最大粒径	-	mm	4.02	25
強熱減量	Li	%	12.9	-	
湿潤密度			1.332	-	
含水比	w0	%	159.2	8.1	

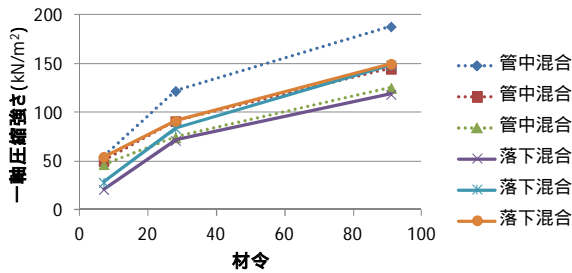


図-7 強度発現状況

表-3 強度比

区分		一軸圧縮強度 (kN/m ²)			強度比	
		7日	28日	91日	qu28/qu7	qu91/qu28
管中混合	気中	54.6	122.2	188.3	2.2	1.5
	水中	-	79.4	128.7	-	1.6
管中混合	気中	50.3	91.2	145.0	1.8	1.6
管中混合	気中	46.8	74.5	125.3	1.6	1.7
落下混合	気中	21.0	71.3	118.7	3.4	1.7
落下混合	気中	28.4	83.7	148.7	2.9	1.8
落下混合	気中	54.5	91.4	150.0	1.7	1.6
平均		-	-	-	2.28	1.65

強度の発現状況を図-7および表-3に示す。材令とともに一軸圧縮強度は増加し、28日強度/7日強度 = 2.3, 91日強度/28日強度 = 1.7となった。また、水中打設/気中打設は、28日強度で79.4/122.2 = 0.7, 91日強度で128.7/188.3 = 0.7となった。

カルシア改質土を法肩流下方式で打設した際の法面勾配は、管中混合方式、落下混合方式とも大きな差は認められず、1:15~1:37 (平均1:21) であった。

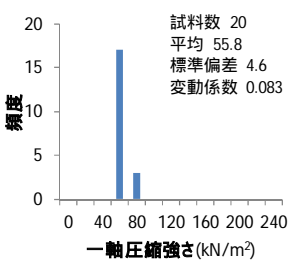
(2) 施工方法の比較

管中混合方式

管中混合方式では、カルシア改質土の平均揚土量は空気圧送船ホッパーへの投入方法の変更により、3,030 m³/日、最大揚土量4,440 m³/日となり、東地区での 期工事 (最大揚土量2,000 m³/日)の2倍以上となった。

圧送距離210 mおよび40 mの場合の一軸圧縮強度のヒストグラムを図-8に示す。圧送距離が40 mと短い場合、変動係数はやや大きくなるものの混練不足による顕著な強度低下は認められなかった。また、圧送配管内での材料分離は認められなかった (写真-7)。

【圧送距離210m】



【圧送距離40m】

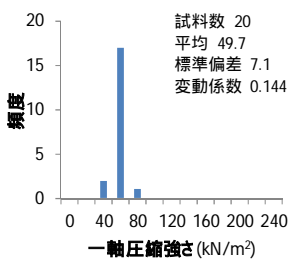


図-8 管中混合方式の28日強度



写真-7 圧送距離40mの配管内の状況

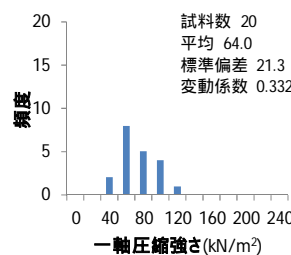
落下混合方式

落下混合方式の平均揚土量は3,420 m³/日、最大揚土量は4,240 m³/日と管中混合方式と同等であった。

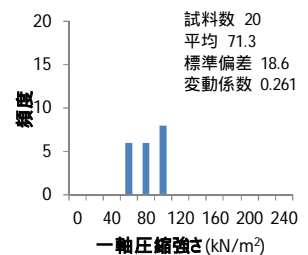
落下混合方式では、甲板ベルコンから2 m落下後のスプレッド上、スプレッドから約10 m落下後の貯泥槽、運搬・ダンプアップ後の打設地点と混練が進むにつれ、発現強度が増加するとともに変動係数が小さくなった (図-9)。

カルシア改質土のCTスキャンの結果を写真-8に示す。カルシア改質材の粒 (写真で白く見える部分) は、甲板ベルコン上では偏りがあるが、打設地点では試料の前面に分散し、均一になっていることが確認できた。

【スプレッド上】



【貯泥槽】



【打設地点】

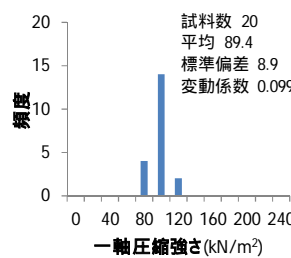


図-9 落下混合方式の28日強度

【甲板ベルコン上】

【打設地点】

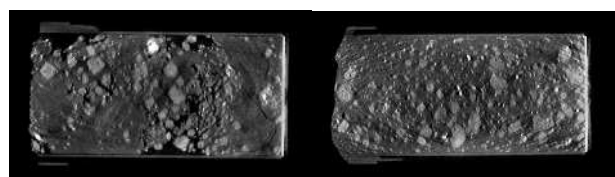


写真-8 CTスキャン結果

(3) 地盤調査結果

2014年2月にオートマチックラムサウンディングを28ヶ所(1ヶ所/2500m²)と電気コーン貫入試験を14ヶ所(1ヶ所/5000m²)実施した(図-10, 図-11)。

補正N値Ndとコーン貫入抵抗qtには、おおよそ $qt=0.5 \times Nd$ (MPa)なる関係が得られた。なお、表層の強度が大きい範囲はダンプ走路としてセメント固化した範囲等であると考えられる。

コーン貫入抵抗と、一軸圧縮試験91日強度(28日強度 $\times 1.65$ より推定)を比較した結果、 $qt=11.3 \times qu$ の関係が

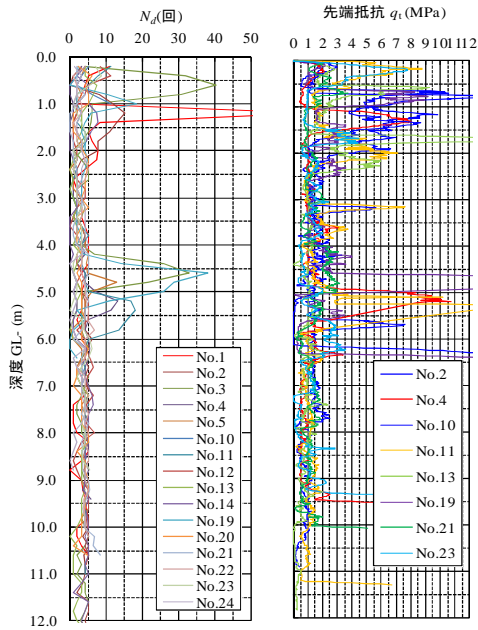


図-10 ラムサウンディング及び電気コーン試験結果
(管中混合方式)

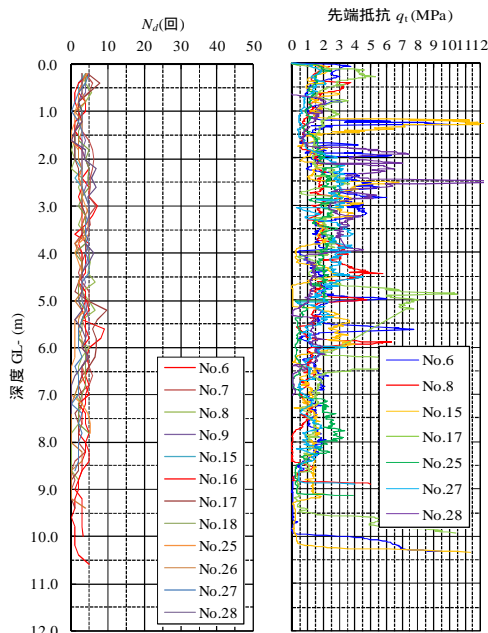


図-11 ラムサウンディング及び電気コーン試験結果
(落下混合方式)

得られた。前述のように一軸圧縮強さは目標強度を上回っていたが、この関係式より地盤全体としてもほぼ目標強度を達成していることを確認した。また、管中混合固化処理工法によって打設されたセメント固化処理地盤の関係式 $qc=8.73 \times qu$ よりもカルシア改質土の関係式の傾きが大きくなった。

カルシア改質土地盤のうち、管中混合方式での施工範囲に1ヶ所、落下混合方式での施工範囲に1ヶ所に沈下板を設置し、沈下状況を確認した(図-12, 図-13)。なお、地点はカルシア改質土厚9.3 m + 覆土0.5 m, 地点はカルシア改質土厚6.9 m + 覆土0.4 mである。

沈下板の設置地点により、原地盤とカルシア改質土地盤の沈下状況に差があるものの、カルシア改質土の圧密沈下量は、最大で層厚の1%(沈下板)であり、通常の正規圧密粘土では層厚の10~15%程度の沈下量が見込まれることを考えると、非常に小さい値となった。また、予測される最終沈下量も最大で層厚の1%(沈下板)程度であり、圧密度についても十分確保される結果となった(表-4)。

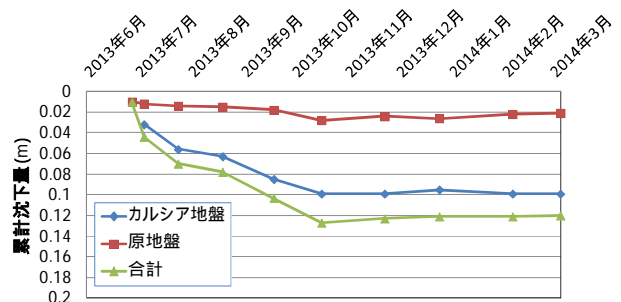


図-12 沈下板の圧密沈下状況
(管中混合方式施工範囲)

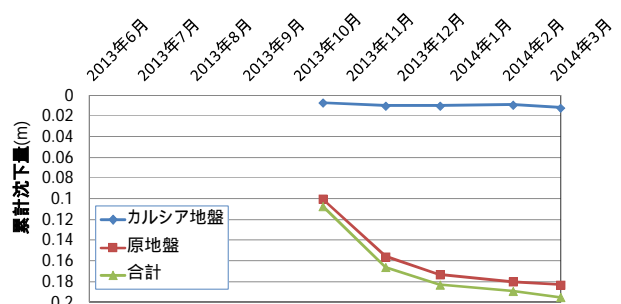


図-13 沈下板の圧密沈下状況
(落下混合方式施工範囲)

表-4 圧密沈下量

No.	カルシア層厚 (m)	圧密沈下量(m)	
		実測値(圧密度 2014年3月時点)	予測最終沈下量(双曲線法)
	9.312	0.099 (92%)	0.108
	6.906	0.012 (100%)	0.012

(4) 環境影響

カルシア改質土について、有害物質等の溶出試験を実施した。ダイオキシン類を除く33項目について8検体（5万m³に1回）、重金属等の9項目（カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、水銀、セレン、フッ素、バナジウム、ホウ素）についての合計43検体（1万m³に1回）の試験を実施したが、水底土砂基準を超過することは無かった。

また、カルシア改質土8検体（5万m³に1回）について実施した9項目（カドミウム、六価クロム、シアン、水銀、セレン、鉛、砒素、ふっ素、ほう素）の含有試験・溶出試験においても、土壤環境基準未満であった。

pHを変化させた硫酸・消石灰添加溶出試験法（GEPC・TS-02）でも同様の結果であり、カルシア改質土について長期的にpH等の環境変化があった場合でも重金属等の溶出が無いことを確認した。

施工期間中毎日、カルシア改質土に10倍量の海水を加えてpH試験（カルシア改質土設計・施工マニュアル⁸⁾に準拠）を実施したが、排水基準のpH 9.0を超過することはなかった（図-14）。

4. おわりに

- ・カルシア改質土を用いた43万m³の埋立工事において管中混合方式とともに新たに落下混合方式を適用し、管中混合方式、落下混合方式ともに4000 m³/日程度の施工が可能であった。

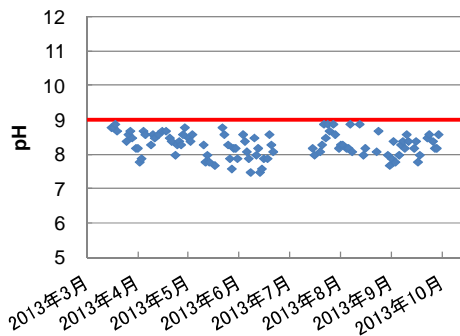


図-14 カルシア改質土（混合直後）のpH測定結果

- ・材令28日の現場平均強度は105.6 kN/m²であり、現場目標強度の48 kN/m²を上まわることを確認した。
- ・管中混合方式では、混練性がよい一方で空気圧送船の軸封水等の加水が必要となる。加水はカルシア改質土の発現強度が低下する要因となるとともに、加水分だけ土砂処分量が減少する点に注意が必要である。
- ・落下混合方式で使用するリクレーマ船の方が空気圧送船よりも安価であるが、落下混合方式ではスプレッタ下部から陸上搬送が必要となる。陸上搬送の距離が長くなると施工費用が高くなるため、埋立地の形状や施工状況等により、適切な施工方法は異なると考えられる。
- ・今回得られた $q_t=11.3 \times q_u$ や $q_t=0.5 \times N_d$ の関係式を用いることにより、コーン貫入抵抗やN値もしくはNd値から一軸圧縮強さを推定することが可能である。浚渫土の性状等により関係式は異なると推測されるが、他地点で実施する際の参考となると考えられる。

参考文献

- 1) 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.24-28，2008
- 2) 田中裕一，山田耕一，大久保泰宏，渋谷貴志，中川雅夫，赤司有三，一村政弘，山越陽介：カルシア改質土を用いた海面埋立と地盤の評価，土木学会論文集 B3，pp.486-491，2012
- 3) 赤司有三，山越陽介，田中裕一，大久保泰宏：カルシア改質土で造成された地盤の特徴，地盤工学会誌，60-11，pp.12-15，2012.
- 4) 山越陽介，赤司有三，中川雅夫，菅野浩樹，田中裕一，辻匠，今村正，渋谷貴志：カルシア改質土の管中混合による海面埋立，土木学会論文集 B3，pp. 952-957，2013.
- 5) 沿岸技術研究センター：事前混合処理工法技術マニュアル(改訂版)，pp.60-62，2008.
- 6) 財団法人沿岸技術研究センター：管中混合固化処理工法技術マニュアル（改訂版），pp18，2008
- 7) 財団法人沿岸技術研究センター：管中混合固化処理工法技術マニュアル（改訂版），pp109，2008
- 8) カルシア改質土研究会：カルシア改質土設計・施工マニュアル，pp.7-10-7-12，2013.

RECLAMATION OF THE ARTIFICIAL GROUND MADE OF DREDGED SOIL AND CONVERTER SLAG

Yuichi TANAKA, Chanjin KO, Tadashi IMAMURA and Takashi SHIBUYA, Yosuke YAMAGOSHI, Yuzo AKASHI, Yoshiyuki KITANO and Hiroki KANNO

We reclaimed artificial ground made of dredged soil and converter slag. And we were confirmed that the mass construction is possible by using pipe mixing method and using drop mixing method.

From the result of survey, features of both method revealed. We also obtained a coefficient values that are necessary for establishing the foundation strength.