

カルシア改質土を用いた海面埋立と地盤の評価

田中 裕一¹・山田 耕一²・大久保 泰宏³・渋谷 貴志⁴
 中川 雅夫⁵・赤司 有三⁶・一村 政弘⁷・山越 陽介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: Koichi.A.Yamada@mail.penta-ocean.co.jp

³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: Yasuhiro.Okubo@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 新日本製鐵(株) スラグ・セメント事業推進部(〒100-8071 東京都千代田区丸の内2-6-1)
 E-mail: nakagawa.masao@nsc.co.jp

⁶正会員 新日本製鐵(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.yuuzou@nsc.co.jp

⁷新日本製鐵(株) 名古屋製鐵所(〒476-8686 愛知県東海市東海町5丁目3番地)
 E-mail: ichimura.masahiro@nsc.co.jp

⁸正会員 新日本製鐵(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.yohsuke@nsc.co.jp

カルシア改質土は、カルシア系改質材と浚渫工事で発生する浚渫土を混合した材料であり、強度発現、pH上昇抑制等の特性がある。カルシア改質土を、埋立材として利用すること、管中混合方式で施工することを想定して室内試験と実験工事を実施し、強度特性の確認と造成地盤の評価を行った。

一軸圧縮試験の結果、気中打設に対する水中打設の強度比は0.63となった。また、事前に実施した室内配合試験から、現場と室内の強度比を求めると1.05となった。カルシア改質土を打設した地盤に対する電気式コーン貫入試験、一軸圧縮強試験等の結果から、深度方向にほぼ均一な地盤が形成されていることを確認した。また、カルシア改質土の一軸圧縮強さ q_u とコーン指数 q_c には、 $p_c = 12.1 \times q_u$ の関係があることを確認した。

Key Words : converter slag, dredged soil, pipe mixing method, subsurface exploration

1. はじめに

港湾の水域施設の増深や水深確保を目的として浚渫工事が行われているが、近年浚渫土の処分場の確保が課題となっている。一方、鉄鋼生産の副産物である転炉系製鋼スラグは、土木資材等への活用が期待されている。

カルシア改質土は、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(カルシア系改質材)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り、強度発現、pH上昇抑制等の特性がある。

カルシア改質土は、浅場・干潟造成材、深堀跡の埋戻材など海域での利用が進められているが、ここでは強度

を発現する特性に着目し、埋立材として利用することを想定して室内試験、実験工事および造成地盤の評価を行った。

浚渫土とカルシア系改質材の混合は、長距離圧送、大規模急速施工が可能のように、管中混合方式で実施することを想定して検討を行った。

2. 実験材料

実験には、名古屋港で採取した浚渫土と新日本製鐵(株)名古屋製鐵所のカルシア系改質材を使用した。浚渫土およびカルシア系改質材の物性を表-1に、粒度分布

を図-1に示す。配合試験には浚渫土①を、実験工事には浚渫土②を用いた。

3. 室内試験

(1) フロー試験

管中混合方式で混合打設する場合、空気圧送時の流動性を確保する必要があるが、フロー値で90~110 mm程度の条件で空気圧送するのが一般的である¹⁾。そこで、カルシア改質土の流動性を確認するために、浚渫土の含水比とカルシア系改質材の混合率を変化させたフロー試験(JHS A 313)を実施した。カルシア改質土のフローの測定結果を図-2に示す。

空気圧送に必要なフロー値を確保するとともに、空気圧送船の軸封水等の加水により含水比が高くなること、カルシア系改質材の添加量が少ない条件では発現強度が小さくなることが予測されること等を考慮して、配合試験の条件を液性限界の1.6倍と1.8倍、カルシア系改質材の添加量をカルシア改質土の体積比で20%、25%、30%とした。

表-1 材料物性

| 項目 | 単位 | 浚渫土① | 浚渫土② | カルシア系改質材 | | |
|--------|-------|-------------------|-------|----------|-------|-------|
| 土粒子の密度 | ρs | g/cm ³ | 2.654 | 2.648 | 3.438 | |
| 液性限界 | wL | % | 96.3 | 74.4 | — | |
| 塑性限界 | wP | % | 38.0 | 30.0 | — | |
| 塑性指数 | IP | - | 58.3 | 44.4 | — | |
| 粒度 | 礫分 | - | % | 0.00 | 0.33 | 83.82 |
| | 砂分 | - | % | 4.79 | 24.34 | 15.6 |
| | シルト分 | - | % | 64.78 | 42.51 | 0.58 |
| | 粘土分 | - | % | 30.43 | 32.82 | |
| | 最大粒径 | - | mm | 2.0 | 4.8 | 25 |
| 強熱減量 | Li | % | 9.38 | 6.58 | — | |
| 懸濁液のpH | - | - | 8.39 | 8.73 | 12.6 | |
| 自然含水比 | w0 | % | 140.8 | 88.6 | 8.6 | |
| 液性限界比 | w0/wL | - | 1.46 | 1.19 | — | |

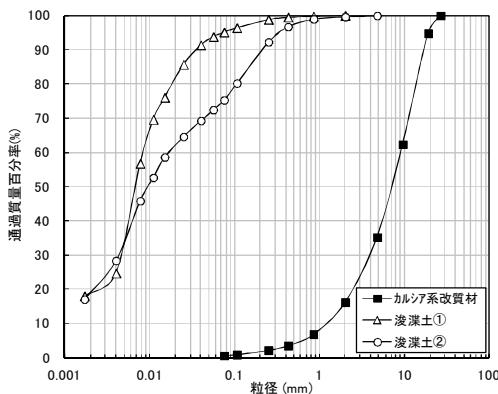


図-1 粒径加積曲線

(2) 配合試験

カルシア系改質材の最大粒径が25 mmであることから、φ100×200のモールドを使用して供試体を作成した。また、強度増進材として、高炉スラグ微粉末を浚渫土の重量に対して1%および3%添加した。

配合試験の結果を表-2に、一軸圧縮試験の結果を図-3に示す。材令とともに強度が増加すること、カルシア系改質材を増やすと強度が増加すること、高炉スラグ微粉末の添加により、強度増加が可能であることを確認した。

カルシア改質土の目標強度を第3種建設発生土 ($q_c \geq 400 \text{ kN/m}^2$) とし、管中混合固化処理工法技術マニュアルの相関式 $q_c = 8.7 \times q_{ck}^2$ を準用すると、設計基準強度 q_{ck} は 46 kN/m^2 となる。同様に管中混合固化処理工法技術マニュアルの不良率 $P_x = 25\%$ 、変動係数 $\alpha = 0.67$ 、強度比 $\beta = 0.5$ (水中)³⁾ を準用すると、現場平均強度 $q_{kf} = 46 / (1 - 0.67 \times 0.25) = 60.1 \text{ kN/m}^2$ 、室内平均強度 $q_{il} = 60.1 / 0.5 = 120.1 \text{ kN/m}^2$ が得られる。これを満たす浚渫土の水分条件を1.6 wL、カルシア系改質材の混合率30%を実験工事の基本配合とした。

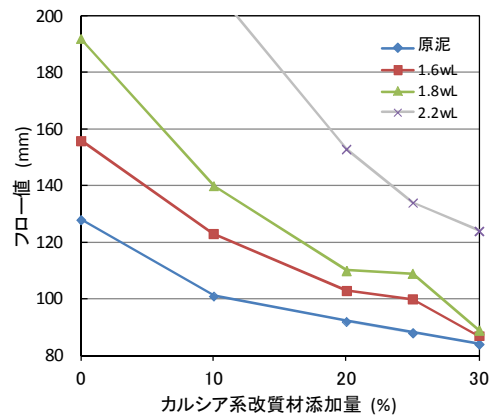


図-2 フロー試験結果

表-2 配合試験結果

| | 配合条件 | | | 一軸圧縮強さ | | 湿潤密度 |
|----|--------|----------|----------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | 浚渫土含水比 | カルシア系改質材 | 高炉スラグ微粉末 | $\sigma_7 (\text{kN/m}^2)$ | $\sigma_{28} (\text{kN/m}^2)$ | $\rho_t (\text{g/cm}^3)$ |
| 1 | 1.6wL | 20 | 0% | — | 5 | 1.726 |
| 2 | | 25 | 0% | 80.3 | 113.7 | 1.840 |
| 3 | | 30 | 0% | 105.0 | 138.7 | 1.898 |
| 4 | | 20 | 1% | 35.3 | 77.0 | 1.747 |
| 5 | | 25 | 1% | 117.3 | 241.3 | 1.826 |
| 6 | | 30 | 1% | 171.7 | 336.0 | 1.916 |
| 7 | | 20 | 3% | 131.0 | 265.7 | 1.731 |
| 8 | | 25 | 3% | 275.3 | 564.0 | 1.826 |
| 9 | | 30 | 3% | 310.7 | 664.0 | 1.913 |
| 10 | 1.8wL | 20 | 0% | 39.7 | 81.0 | 1.750 |
| 11 | | 25 | 0% | 73.0 | 119.3 | 1.869 |
| 12 | | 30 | 0% | 97.7 | 172.7 | 1.942 |
| 13 | | 20 | 1% | 72.0 | 130.3 | 1.737 |
| 14 | | 25 | 1% | 121.7 | 205.3 | 1.842 |
| 15 | | 30 | 1% | 162.7 | 286.0 | 1.927 |
| 16 | | 20 | 3% | 119.0 | 335.0 | 1.736 |
| 17 | | 25 | 3% | 244.7 | 451.3 | 1.823 |
| 18 | | 30 | 3% | 324.3 | 676.3 | 1.900 |

(2) 安全性の確認

カルシア改質土の埋立材への使用，造成地盤の利用を想定し，材令28日試料について水底土砂に係る判定基準への適合状況および土壌汚染対策法への適合状況を確認した。この結果，全ての項目について基準値以下であることを確認した。分析結果のうち，土壌汚染対策法の指定基準への適合状況を表-3に示す。

また，カルシア改質土の材令を0日（混練直後），7日，28日，91日と変化させ，5倍量の人工海水および純水に浸し，30分～3時間後にpHを測定した結果を図-4に示す。

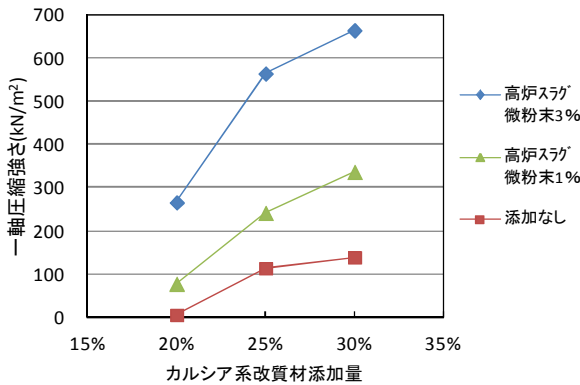


図-3 一軸圧縮強さ (1.6wL, 材令28日)

表-3 土壌環境基準への適合状況

| 項目 | 指定基準 | | カルシア改質土 | | |
|-----------|-----------------|--------------|---------------|-----------|--------|
| | 溶出量 mg/L | 含有量 mg/kg | 溶出量 mg/L | 含有量 mg/kg | |
| 第1種特定有害物質 | 四塩化炭素 | 0.002 以下 | - | 0.0002未満 | |
| | 1,2-ジクロロエタン | 0.004 以下 | - | 0.0002未満 | |
| | 1,1-ジクロロエチレン | 0.02 以下 | - | 0.001未満 | |
| | シス-1,2-ジクロロエチレン | 0.04 以下 | - | 0.001未満 | |
| | 1,3-ジクロロプロペン | 0.002 以下 | - | 0.0002未満 | |
| | ジクロロメタン | 0.02 以下 | - | 0.001未満 | |
| | テトラクロロエチレン | 0.01 以下 | - | 0.001未満 | |
| | 1,1,1-トリクロロエタン | 1 以下 | - | 0.001未満 | |
| | 1,1,2-トリクロロエタン | 0.006 以下 | - | 0.0002未満 | |
| | トリクロロエチレン | 0.03 以下 | - | 0.001未満 | |
| 第2種特定有害物質 | ベンゼン | 0.01 以下 | - | 0.001未満 | |
| | カドミウム及びその化合物 | 0.01 以下 | 150 以下 | 0.001未満 | 0.50 |
| | 六価クロム化合物 | 0.05 以下 | 250 以下 | 0.005未満 | 0.2未満 |
| | シアン化合物 | 検出されないこと | 遊離シアンとして50 以下 | 不検出 | 2未満 |
| | 水銀及びその化合物 | 水銀が0.0005 以下 | 15 以下 | 0.0005未満 | 0.02未満 |
| | セレン及びその化合物 | 0.01 以下 | 150 以下 | 0.002 | 0.05未満 |
| | 鉛及びその化合物 | 0.01 以下 | 150 以下 | 0.001未満 | 35 |
| | 砒素及びその化合物 | 0.01 以下 | 150 以下 | 0.003 | 3.5 |
| | ふっ素及びその化合物 | 0.8 以下 | 4000 以下 | 0.1未満 | 64 |
| | ほう素及びその化合物 | 1 以下 | 4000 以下 | 0.24 | 46 |
| 第3種特定有害物質 | シマジン | 0.003 以下 | - | 0.0003未満 | |
| | チウラム | 0.006 以下 | - | 0.0005未満 | |
| | チオベンカルブ | 0.02 以下 | - | 0.001未満 | |
| | PCB | 検出されないこと | - | 不検出 | |
| | 有機りん化合物 | 検出されないこと | - | 不検出 | |

なお，pHの測定方法は，「転炉系製鋼スラグと浚渫土との混合改良工法技術資料」⁴⁾に準拠した。

海面埋立を想定してカルシア改質土を人工海水に浸した試験では，材令に関わらずpHは8.2前後となり，材令による大きな変化は見られなかった。純水を用いた試験では，混合直後の試料ではpHが10.6まで上昇したものの，材令7日以上での試料ではpHが9.5程度となり，一軸圧縮強さの増加（材令7日で100kN/m²程度）に伴い，pHの上昇は抑制された。

4. 実験工事

(1) 実験概要

2010年9月，愛知県東海市において，管径 100 mm，圧送距離約100 mの条件で浚渫土とカルシア系改質材の管中混合・打設を行った。実験工事のイメージを図-5に示す。

これまでのカルシア改質土の管中混合工法についての報告⁴⁾は，粒径5 mm以下のカルシア系改質材を使用したものであることから，今回25 mm以下の粒径を含む条件での圧送特性の確認を行った。

カルシア改質土の打設方法による強度への影響を比較するため，サイクロンによる気中打設，トレミー管による水中打設を行った。3.0m×4.0m×1.4mDのピットへの気中打設の状況を写真-1に，水中打設の状況を写真-2に示す。各打設ピットにおいて，カルシア改質土の打設直後

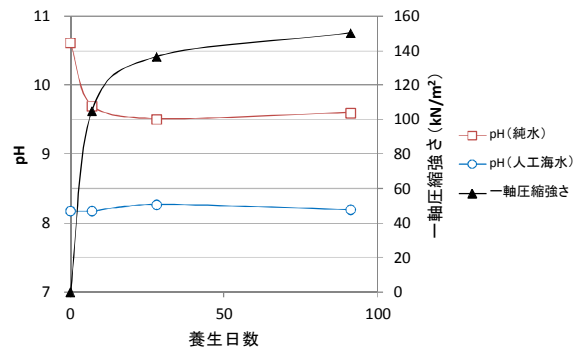


図-4 カルシア改質土の材令とpH

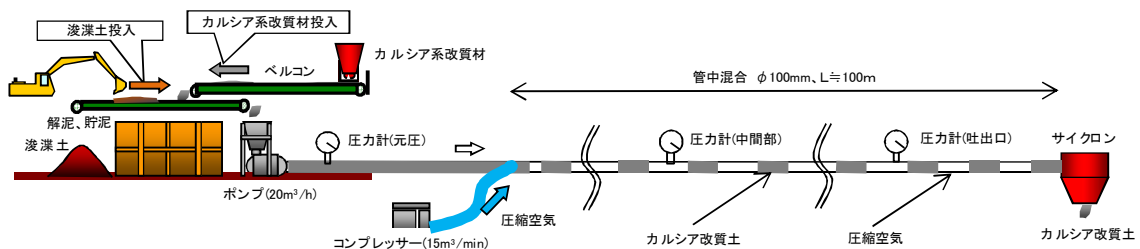


図-5 実験工事模式図

に塩ビ管 (100) を建て込み、これを回収して28日後に一軸圧縮試験を行った。

また、強度の深度分布を確認するために、深さ2mのカルシア改質土地盤 (3.0m×4.0m×2.0mD) を作成し、28日後および6ヶ月後に、コーン貫入試験、標準貫入試験等の調査を実施した。

(2) 実験結果

a) 圧送特性

フロー値と圧力勾配の関係について、今回の結果と文献値⁵⁾⁶⁾を合わせて図-6に示す。空気圧送の管径が大きくなると圧力勾配は小さくなるが、今回実施した管径φ100mmの条件において、カルシア改質土の圧力勾配は、固化処理土と同等であった。



写真-1 打設状況 (気中)



写真-2 打設状況 (水中)

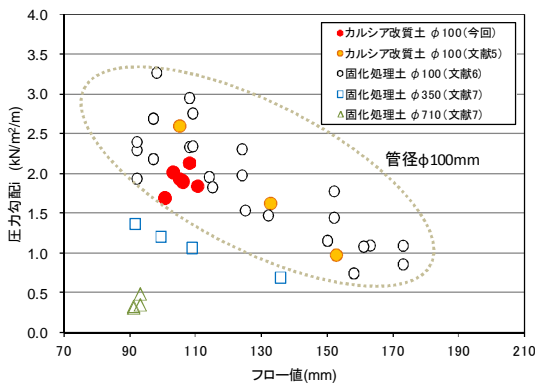


図-6 フロー値と圧力勾配

b) 強度特性

サンプリング試料の一軸圧縮試験の結果 (材令28日) を図-7、図-8に示す。気中打設では平均強度 294.2 kN/m²、変動係数 0.18、水中打設では平均強度 184.6 kN/m²、変動係数 0.23であり、管中混合方式により浚渫土とカルシア系改質材を均一に混合可能であることを確認した。

実験工事で使用した浚渫土②を用いて別途に実施した室内配合試験では、28日強度が279.1 kN/m²であったことから、現場と室内の強度比は294.2/279.1≒1.05と、ほぼ1であった。また、気中打設に対する水中打設の強度比 (水中/気中) は184.6/294.2≒0.63となった。これは、管中混合固化処理工法技術マニュアル³⁾の陸上打設の0.7、水中打設の0.5と比較すると大きな値である。

カルシア改質土を打設・養生後に解砕・撒き出した地盤に対し、材令28日での試料を採取、一軸圧縮強度試験を行った結果、撒き出したカルシア改質土地盤は97.2~119.4 kN/m²となり、解砕までの養生日数に関わりなく100kN/m²程度となった (図-9)。

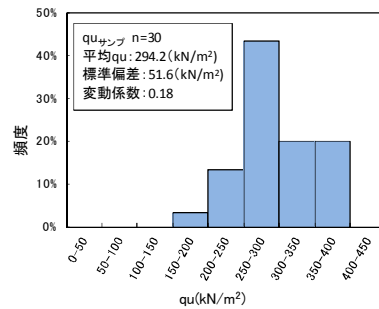


図-7 一軸圧縮強さ (気中打設)

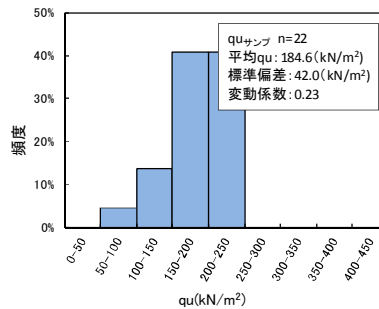


図-8 一軸圧縮強さ (水中打設)

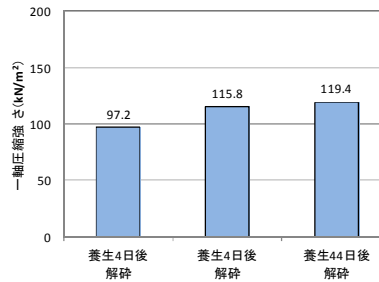


図-9 一軸圧縮強さ (気中撒き出し28日後)

カルシア改質土の圧密試験の結果を図-10に、一軸圧縮強さと圧密降伏応力の関係を図-11に示す。カルシア改質土においても、明確な降伏点が確認でき、圧密降伏応力 p_c と一軸圧縮強さ q_u には固化処理土と同様に $p_c=1.25q_u$ の関係が得られた。

また、カルシア改質土の変形係数 E_{50} と一軸圧縮強さ q_u の間には、固化処理土と同様に $E_{50}=100\sim 350q_u$ の関係が認められた(図-12)。

c) 地盤調査

カルシア改質土を打設した地盤について、電気式コーン貫入試験、標準貫入試験、オートマチックラムサウンディング等の調査を行った。また、シンウォール、ロータリー式2重管等によりサンプリングを行い、一軸圧縮強試験を実施した。

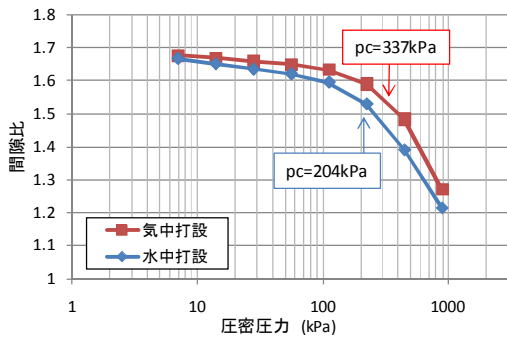


図-10 圧密試験結果

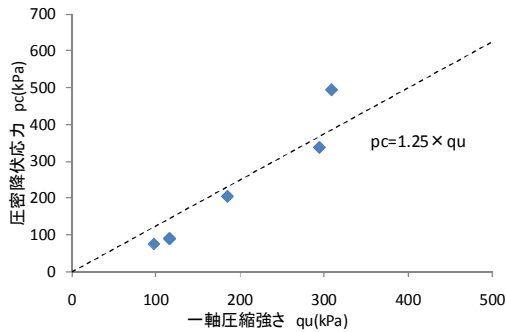


図-11 一軸圧縮強さ-圧密降伏効力

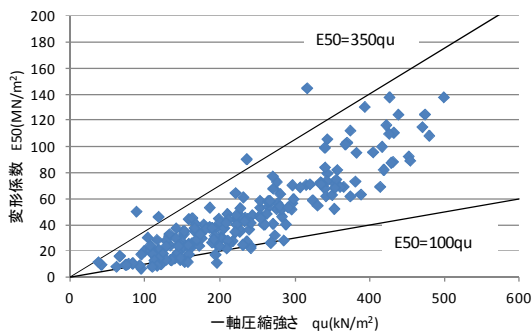


図-12 一軸圧縮強さ-変形係数

打設28日後のコーン貫入試験の先端抵抗 q_t 、一軸圧縮強さ q_u 、標準貫入試験のN値、オートマチックラムサウンディングのNd値の深度分布を図-13に示す。カルシア改質土により造成した地盤では、比重が大きいカルシア系改質材の材料分離が懸念されたが、深度方向に均一な地盤が形成されていることが確認された。

6か月後の地盤調査の結果を図-14に示す。この結果からは、長期養生による顕著な地盤強度の増加は認められなかった。また逆に、乾燥等による表面の劣化は認められず、強度の低下も確認されなかった。

28日および6ヶ月後の調査結果から、カルシア改質土の一軸圧縮強さ q_u とコーン指数 q_c には、 $p_c=12.1q_u$ の関係があることを確認した。

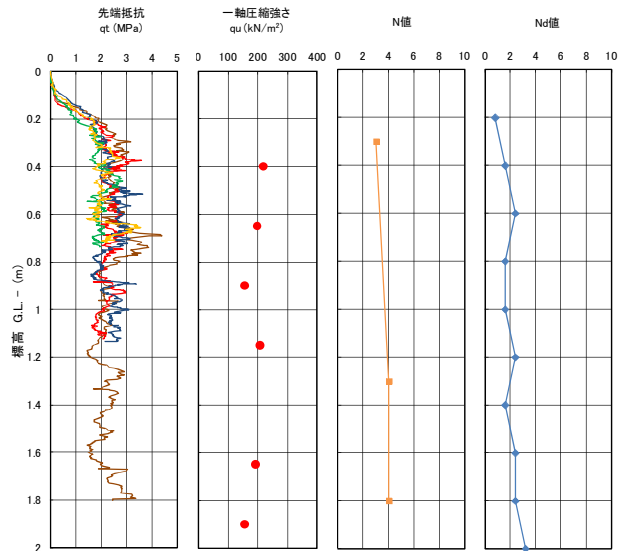


図-13 強度の深度分布 (打設28日後)

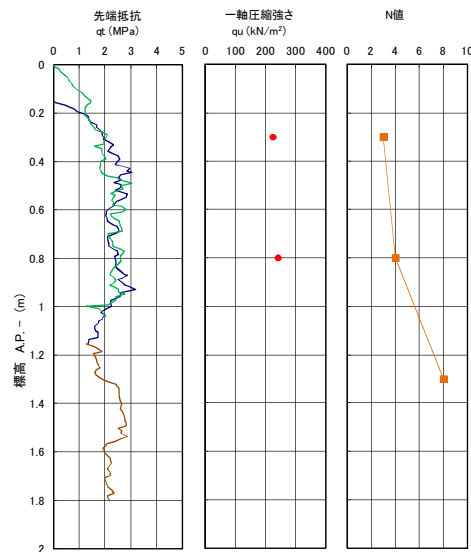


図-14 強度の深度分布 (打設6か月後)

表4 サンプルング方法と一軸圧縮強さ

| サンプルング方法 | 内径(mm) | 一軸圧縮強さ (kN/m ²) | |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|
| | | 28日後 | 6ヶ月後 |
| 固定ピストン式 シンウォール | 75 | 112.0 | - |
| ロータリー式2重管 | 75 | - | サンブラーから 抽出し不可 |
| ロータリー式3重管 | 75 | - | 17.7 |
| コアボーリング | 100 | - | 143.9 |
| 塩ビ管 | 100 | 193.5 | 193.5 |
| ブロック サンプルング | 300×300×300 程度 | - | 234.6 |

サンプルング手法として、シンウォール、ロータリー式2重管、ロータリー式3重管、コアボーリング、ブロックを試みたが、ブロックサンプルング以外の方法では試料の乱れがあり、一軸圧縮強さが小さくなる傾向が見られた(表-4)。カルシア改質土中に粒径の大きな製鋼スラグが、採取試料の乱れに影響したと考えられる。

後日別地点で実施したゲルプッシュサンプルングでは、製鋼スラグ粒子を切断することによって、試料の採取が可能であった(写真-3)。

5. おわりに

一連の実験により、カルシア改質土の材料特性を把握するとともに、設計に必要な強度比、変動係数を得ることができた。また、通常の管中混合方式が適用可能であったことから、施工費は同方式と同等と推測される。

カルシア改質土の室内現場強度比は、ほぼ1.0であった。別の浚渫土、カルシア系改質材で実施した実験でも、強度比は0.83~0.92⁹⁾であることから、カルシア改質土は固化処理土と比較して強度比が大きいと考えられる。また、変動係数については、固化処理土よりも小さくなる傾向が見られた。こうした結果の原因として、固化処理



写真-3 ゲルプッシュサンプルングでの採取試料
(表面に光って見えるのが切断されたスラグ粒子)

と比較してカルシア系改質材の添加量が多いこと等が考えられる。

カルシア改質土地盤では、打設時に設置・回収した塩ビ管やブロックサンプルング等での表層試料の採取は可能であるが、一定深度以上の試料採取は困難であった。このため、地盤の強度を確認する方法としては、表層試料の一軸圧縮強さとコーン指数の相関を求め、コーン指数より深い地点の強度を推測する方法や表面波探査を活用する方法が有効であると考えられる。

使用する浚渫土やカルシア系改質材によってカルシア改質土の特性が異なることから、今後砂質土系の浚渫土を使用した場合の特性や造成地盤についてのデータを取得し、知見を蓄積していくことが重要である。

参考文献

- 1) 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)，pp.55, 2008.
- 2) 文献1)，pp.108-109.
- 3) 文献1)，pp.16-18.
- 4) 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，pp.51, 2008.
- 5) 山田耕一，川崎隆広，赤司有三，伊勢典典，鈴木操，本田秀樹：管中混合工法によるカルシア改質土の特性，土木学会第65回年次学術講演会，pp.549-550, 2010.
- 6) 運輸省港湾技術研究所，日本埋立浚渫協会：管中混合固化処理工法模型実験 実験報告書，pp.21-22, 1999.
- 7) 文献1)，pp.79-80.

RECLAMATION AND EVALUATION OF DREDGED SOIL WITH CONVERTER SLAG

Yuichi TANAKA, Yasuhiro OKUBO, Koichi YAMADA, Takashi SHIBUYA,
Masao NAKAGAWA, Yuuzou AKASHI, Masahiro ICHIMURA
and Yohshuke YAMAGOSHI

In this study, we conducted mix design tests and subsurface explorations in order to understand the characteristics of dredged soil with converter slag. To conduct subsurface explorations, we used the pipe-mixing method to reclaim land.

From the results of explorations and surveys that followed, we found that it is possible to reclaim the land that is uniform. We also obtained a variety of coefficient values that are necessary for establishing the foundation strength.