

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 高圧脱水固化したスラグ石灰混合浚渫粘土の力学特性                                                                                  |
| Title(English)    | STRENGTH PROPERTY OF SLAG-LIME MIXED AND DEHYDRATED CLAY                                                  |
| 著者(和文)            | 竹下 知希, 笠間 清伸, 善 功企, 春日井 康夫                                                                                |
| Authors(English)  | Toshiki Takeshita, Kiyonobu Kasama, Kouki Zen, Yasuo Kasugai                                              |
| 出典(和文)            | 土木学会論文集B3 ( 海洋開発 ) , Vol. 70, No. 2, pp. I_894-I_899                                                      |
| Citation(English) | Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 70, No. 2, pp. I_894-I_899 |
| 発行日 / Pub. date   | 2014, 10                                                                                                  |
| 権利情報 / Copyright  | 本著作物の著作権は土木学会に帰属します。<br>Copyright (c) 2014 Japan Society of Civil Engineers.                              |

# 高圧脱水固化したスラグ石灰 混合浚渫粘土の力学特性

竹下 知希<sup>1</sup>・笠間 清伸<sup>2</sup>・善 功企<sup>3</sup>・春日井 康夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 (〒530-0003 大阪府大阪市北区堂島1-6-20 堂島アバンザ18F)

E-mail:t0t3t1t9@yahoo.co.jp

<sup>2</sup>正会員 九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail:kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー 九州大学大学院工学研究院海域港湾環境防災共同研究部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail:zen@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員(独) 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1番1号)

E-mail:kasugai-y@pari.go.jp

本論文では、セメントの代わりに結合材として高炉スラグ微粉末を、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出すためのアルカリ刺激材として石灰を用いて、高圧脱水固化したスラグ石灰混合浚渫土を作製し、その強度特性を調べた。さらに、最も効率的な配合の作製条件を主成分分析および重回帰分析を用いて検討した。得られた結論をまとめると以下になる。(1)スラグ混合率45%、石灰混合率10%および脱水圧力10 MPaのとき、最も大きい一軸圧縮強さである23 MPaを発現した。(2)一軸圧縮強さを増加させるには、水スラグ石灰重量比を小さくすることが重要である。(3)主成分分析の結果を用いて、細粒分含有率、石灰混合率、スラグ石灰水重量比および間隙比の4つの指標を用いて、スラグ石灰混合浚渫土の一軸圧縮強さを予測するための重回帰式を提案した。

**Key Words :** slag, lime, dredged clay, unconfined compression strength, principal component analysis

## 1. はじめに

河川などから流入する軟弱土は、湖沼や港湾部などの閉鎖性水域に堆積し、船舶航行の支障や周辺環境の悪化を引き起こす原因となるため、定期的な浚渫工事による軟弱土の除去が行われている。この浚渫土は、ウォーターフロントにおける有効な埋立材料として用いられてきたが、近年では、臨海地域の埋立などの事業が飽和状態となるにつれ、土砂処分場の確保が切実な問題となっている。

このような背景から、浚渫土の効果的な減容化や再生リサイクルの方法が多数開発されている。例えば、Tayほか<sup>1)</sup>は、浚渫土のコンクリート骨材としての有効利用法を示し、Netzbandほか<sup>2)</sup>は、浚渫土を処分場のシーリング材として有効利用する方法を報告した。他にも、ElkinsとThompson<sup>3)</sup>は、浚渫土から無害なセラミック顆粒を造る再生利用法を示した。したがって、浚渫土は、ブロックやレンガ、タイルといった建設材として、コンクリート材に匹敵する強度を有する構造物への再生利用が可能であることがわかる。

そこで、筆者らは、浚渫土を有用な材料へとリサイクルするために、「脱水固化処理」という技術の開発を行ってきた。脱水固化処理とは、軟弱な浚渫土の強度増加を目的として、浚渫土に固化材を添加した直後に高圧機械脱水を行う手法である。脱水固化処理の有効性を評価するために、笠間ほか<sup>4)</sup>や佐野ほか<sup>5)</sup>は、脱水固化処理による小型供試体( $f$  5 cm $\times$   $H$  10 cm)を作製し、一軸圧縮試験および耐久試験を行うことにより、湿潤・水中条件で長期的に平均20 MPaの一軸圧縮強さを有する供試体が得られている。

しかし、近年セメントが海洋環境へ与える悪影響が懸念されており、漁業関係者からセメント使用に対する反対の声も挙がっている。本論文では、セメントの代わりに結合材として高炉スラグ微粉末を、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出すためのアルカリ刺激材として石灰を用いて、高圧脱水固化したスラグ石灰混合浚渫土を作製し、その強度特性を調べた。さらに、最も効率的な配合の作製条件を主成分分析および重回帰分析を用いて検討した。

表-1 試料の物理特性

|          | 密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 自然含水比<br>(%) | 液性限界<br>(%) | 塑性指数  | $S_c$ (%) | $F_c$ (%) | $P_c$ (%) | $U_c$ | $U'_c$ |
|----------|---------------------------|--------------|-------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|
| 博多港土砂    | 2.69                      | 68.36        | 68.13       | 32.50 | 48.79     | 51.21     | 17.62     | 56.12 | 0.36   |
| 高炉スラグ微粉末 | 2.88                      | -            | -           | -     | 0.00      | 100.00    | 40.80     | 14.93 | 1.54   |
| 消石灰      | 2.20                      | -            | -           | -     | 0.00      | 100.00    | 50.00     | 4.41  | 1.20   |

$S_c$ : 砂分含有率,  $F_c$ : 細粒分含有率,  $P_c$ : 粘土分含有率

## 2. 実験概要

使用材料: 供試体を作製するために用いた母材は、博多港で浚渫された土砂(以降、博多港土砂と呼ぶ)である。固化材として、結合材には高炉スラグ微粉末、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出すためのアルカリ刺激材には消石灰を使用した。試料の物理特性と粒径加積曲線をそれぞれ表-1および図-1に示す。高炉スラグ微粉末および消石灰は、母材の乾燥重量に対する比率(以降、スラグ混合率および石灰混合率と呼ぶ)で配合し、スラグ混合率、石灰混合率ともに2%~54%の条件で配合した。

供試体作製方法: 母材と固化材を初期含水比が $1.2w_L$ となるように加水調整し、十分攪拌混合させた後、 $f50\text{ mm} \times h250\text{ mm}$ のモールドに試料を充填した。その後、定圧载荷試験機によって5 MPaおよび10 MPaで定圧载荷し、供試体を作製した。排水条件は、上下端面排水とした。载荷中には、沈下量および脱水時間を測定した。圧密終了は3 $\alpha$ 法で決定し、そのときを圧密度100%とした。圧密終了後、モールドから脱型した供試体を28日間恒温湿潤状態で養生し、一軸圧縮試験(JIS A 1216)により一軸圧縮強度を測定した。実験条件を表-2に示す。

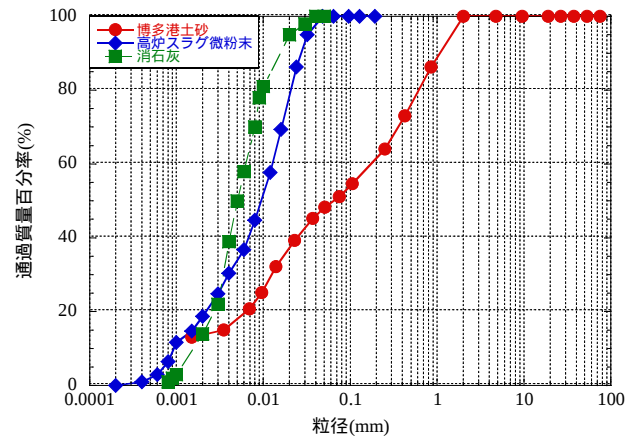


図-1 粒径加積曲線

表-2 実験条件

|         |             |
|---------|-------------|
| 母材      | 博多港土砂       |
| 結合材     | 高炉スラグ微粉末    |
| アルカリ刺激材 | 消石灰         |
| 初期含水比   | $1.2w_L$    |
| スラグ混合率  | 2% ~ 54%    |
| 石灰混合率   | 2% ~ 54%    |
| 脱水圧力    | 5MPa 10MPa  |
| 脱水条件    | 上下端面排水      |
| 養生日数    | 28日間        |
| 養生条件    | 温度20 湿度 90% |

## 3. 一軸圧縮強度特性

脱水圧力10 MPaのときの石灰混合率と脱水終了時間の関係を図-2に示す。図の凡例は、スラグ混合率を示す。石灰混合率を増加しても脱水終了時間に影響がないことが分かった。一方で、ばらつきはあるが、スラグ混合率を増加すると脱水終了時間が短縮することが分かった。特に、スラグ混合率31%以上では脱水終了時間が15分以下まで短縮することが分かった。このことから、脱水をより速く行うためにはスラグ混合率を増加させることが重要であると考えられる。

脱水圧力と脱水終了時間の関係を図-3に示す。図の凡例は母材に配合したスラグ混合率と石灰混合率を示す。脱水圧力の増加に伴い、脱水終了時間が短縮することが分かった。また、同じ脱水圧力および同じ石灰混合率で配合を行ったとき、スラグ混合率が高いほど脱水終了

時間も短縮することが分かった。すべての配合条件の中で、最も短い脱水終了時間は10分であり、そのときの配合条件は、スラグ混合率30%、石灰混合率15%および脱水圧力10 MPaである。図-2および図-3より、脱水終了時間を短縮するためには、スラグ混合率および脱水圧力を増加することが重要であると考えられる。

脱水圧力10 MPaのときの石灰混合率と一軸圧縮強さの関係を図-4に示す。図の凡例は大きさ別のスラグ混合率を示す。石灰混合率の増加に伴い、一軸圧縮強さに増加が小さく見られた。また、スラグ混合率の違いに着目すると、スラグ混合率31%以上では小さい石灰混合率でも一軸圧縮強さがおよそ10 MPa以上と大きく増加することが分かった。このことから、スラグ石灰混合浚渫土の強度発現には石灰混合率およびスラグ混合率が関係していると考えられる。

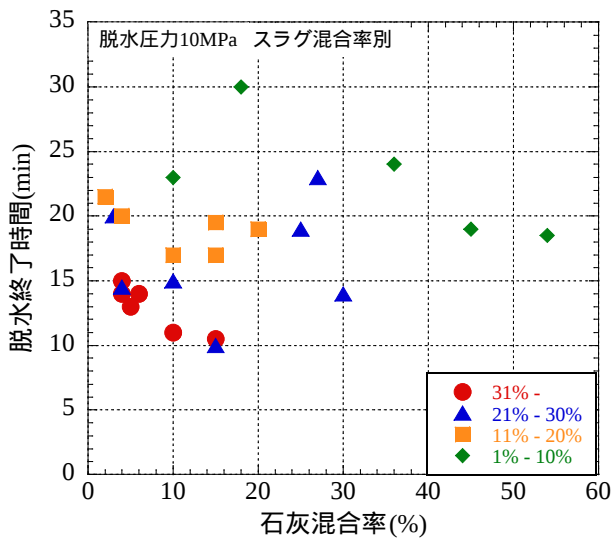


図-2 石灰混合率と圧密終了時間の関係

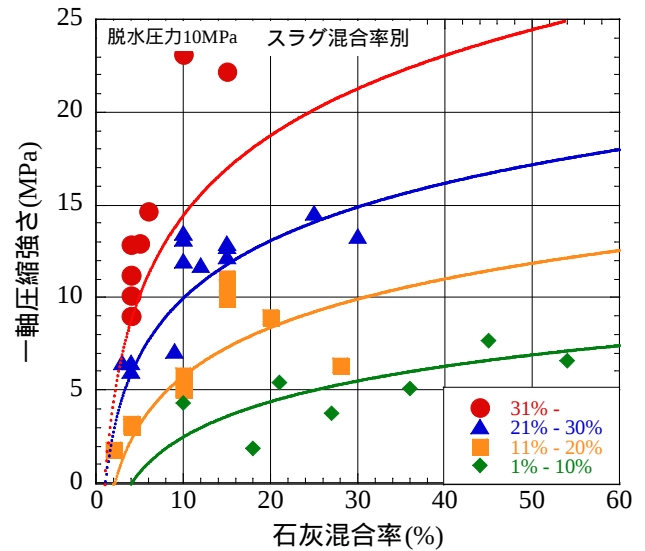


図-4 石灰混合率と一軸圧縮強さの関係

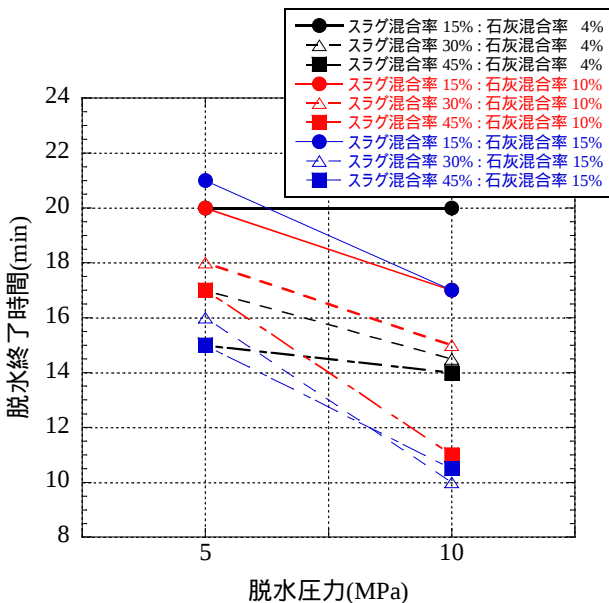


図-3 脱水圧力と脱水終了時間の関係

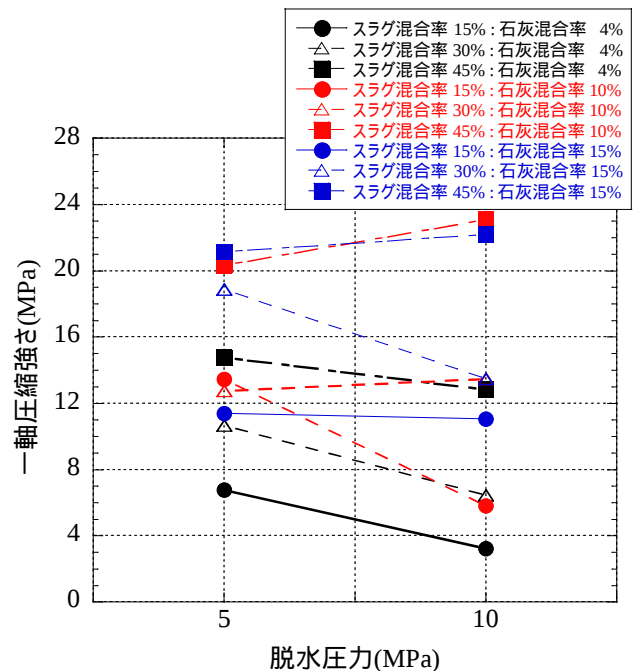


図-5 脱水圧力と一軸圧縮強さの関係

脱水圧力と一軸圧縮強さの関係を図-5に示す。脱水圧力を増加しても一軸圧縮強さの増加には至らなかった。また、脱水圧力5 MPaの場合の方が脱水圧力10 MPaの場合に対して一軸圧縮強さのばらつきが小さいことが分かった。これは脱水圧力の増加により強度発現に必要な量以上の水を脱水したことが原因であると考えられる。よって脱水圧力は5 MPaの方が望ましいと考えられる。すべての配合条件の中で、最も大きい一軸圧縮強さは23 MPaであり、その時の配合条件は、スラグ混合率45%、石灰混合率10%および脱水圧力10 MPaである。

水スラグ石灰重量比と一軸圧縮強さの関係を図-6に示す。水スラグ石灰重量比は、養生後の供試体内の水の重量と高炉スラグ微粉末と消石灰の重量の和の比として定義した。図の凡例は、脱水圧力である。脱水圧力5 MPa

および10 MPaのとき、ばらつきはあるが、水スラグ石灰重量比が減少すると一軸圧縮強さが急激に増加した。さらに、水スラグ石灰重量比がおよそ0.3付近で最も一軸圧縮強さが大きくなった。このことから、スラグ石灰混合浚渫土の強度発現には水スラグ石灰重量比が関係すると思われる。

以上のことから、スラグ石灰混合浚渫土の一軸圧縮強さはスラグ混合率、石灰混合率、脱水圧力および水スラグ石灰重量比など、複数の指標に影響をうけることが明らかとなった。

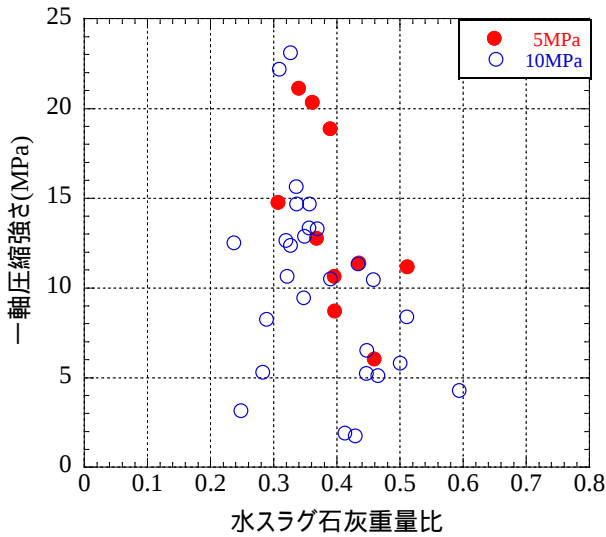


図-6 水スラグ石灰重量比と一軸圧縮強さの関係

#### 4. 一軸圧縮強さに関する主成分分析

スラグ石灰混合浚渫土の強度推定ならびに高強度化に影響する要因分析を行うために、一軸圧縮強さとスラグ石灰混合浚渫土の物理特性および作製条件のうち、22変数を設定し、2変数間の相関係数の把握および主成分分析を行った。

一軸圧縮強さと各変数の相関係数を表-3に示す。浚渫土含有率は配合に用いた浚渫土、高炉スラグ微粉末および消石灰の割合の和に対しての浚渫土の割合の比で表す。水スラグ重量比および水石灰重量比は、養生後の供試体内の水の重量に対する高炉スラグ微粉末の重量および消石灰の重量の比として定義した。スラグ石灰水重量比、スラグ水重量比および水石灰重量比は水スラグ石灰重量比、水スラグ重量比および水石灰重量比の逆数で表す。実験前石灰水比は配合に用いる浚渫土に含まれる水の重量と加える水の重量の和に対する配合に用いる消石灰の重量の比で表す。表-3より、正の相関では $U_c$ および $F_c$ が大きくなった。また、負の相関では $S_c$ および浚渫土含有率が大きい指標であった。しかし、相関係数が0.7以上のものが多いことから、スラグ石灰混合浚渫土の高強度化は、試料の様々な物理特性や作製条件の影響を受けると考えられ、より精度のよい強度推定のためには、2変数以上の指標を用いて強度評価をする必要があると考えられる。

表-4に主成分分析の結果を示す表-4に示す累積寄与率の値により、第1から第4主成分で元の全変数がもつ情報のおよそ90%を評価可能である。各主成分値の大きい変数に着目すると、第1主成分は $U_c$ 、 $S_c$ 、 $F_c$ などとの相関が強く、これはスラグ石灰混合浚渫土の粒度による特性を表す指標であるといえる。第2主成分は、実験前石灰

表-3 一軸圧縮強さと各変数の相関

| No. | 変数                            | 相関係数  |
|-----|-------------------------------|-------|
| 1   | $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 0.25  |
| 2   | $S_c$ (%)                     | -0.78 |
| 3   | $F_c$ (%)                     | 0.78  |
| 4   | $P_c$ (%)                     | 0.67  |
| 5   | $U_c$                         | -0.71 |
| 6   | $U'_c$                        | 0.81  |
| 7   | スラグ混合率(%)                     | 0.71  |
| 8   | 石灰混合率(%)                      | 0.06  |
| 9   | 含水比(%)                        | 0.68  |
| 10  | 浚渫土含有率(%)                     | -0.78 |
| 11  | 湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )      | 0.73  |
| 12  | 乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )      | 0.29  |
| 13  | 水スラグ石灰重量比                     | -0.18 |
| 14  | 水スラグ重量比                       | -0.40 |
| 15  | 水石灰重量比                        | 0.00  |
| 16  | 脱水圧力(MPa)                     | -0.27 |
| 17  | スラグ石灰水重量比                     | 0.08  |
| 18  | スラグ水重量比                       | 0.24  |
| 19  | 石灰水重量比                        | -0.23 |
| 20  | 間隙比 $e$                       | -0.09 |
| 21  | 飽和度 $S_r$ (%)                 | 0.71  |
| 22  | 実験前石灰水重量比                     | -0.02 |

表-4 主成分分析

|           | 成分    |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
|           | 1     | 2     | 3     | 4     |
| 累積寄与率(%)  | 39.62 | 71.51 | 87.01 | 94.17 |
| 成分行列      |       |       |       |       |
| $\rho_s$  | 0.29  | -0.94 | 0.07  | -0.04 |
| $S_c$     | -0.96 | -0.25 | -0.01 | 0.13  |
| $F_c$     | 0.96  | 0.25  | 0.01  | -0.13 |
| $P_c$     | 0.82  | 0.55  | -0.01 | -0.11 |
| $U_c$     | -0.88 | -0.46 | 0.00  | 0.12  |
| $U'_c$    | 0.99  | -0.04 | 0.02  | -0.14 |
| スラグ混合率    | 0.84  | -0.50 | 0.07  | -0.13 |
| 石灰混合率     | 0.11  | 0.98  | -0.07 | -0.03 |
| 含水比       | 0.67  | 0.29  | 0.66  | 0.14  |
| 浚渫土含有率    | -0.96 | -0.25 | -0.01 | 0.13  |
| 湿潤密度      | 0.85  | -0.20 | 0.19  | 0.42  |
| 乾燥密度      | 0.46  | -0.59 | -0.45 | 0.45  |
| 水スラグ石灰重量比 | -0.43 | 0.02  | 0.83  | 0.32  |
| 水スラグ重量比   | -0.42 | 0.73  | 0.01  | -0.13 |
| 水石灰重量比    | 0.22  | -0.73 | 0.24  | -0.07 |
| 脱水圧力      | 0.06  | 0.22  | -0.47 | 0.63  |
| スラグ石灰水重量比 | 0.32  | -0.06 | -0.89 | -0.29 |
| スラグ水重量比   | 0.41  | -0.79 | -0.41 | -0.17 |
| 石灰水重量比    | -0.22 | 0.92  | -0.28 | -0.05 |
| 間隙比 $e$   | -0.28 | -0.28 | 0.64  | -0.60 |
| 飽和度 $S_r$ | 0.74  | 0.29  | 0.54  | 0.27  |
| 実験前石灰水比   | 0.00  | 0.99  | -0.07 | 0.00  |

水比、石灰混合率などと相関が強く、これはアルカリ刺激力を示す指標であると考えられる。第3主成分は、水スラグ石灰重量比、スラグ石灰水重量比などと相関が強く、これは高炉スラグ微粉末の固化特性を示す指標といえる。さらに、第4主成分は脱水圧力、間隙比などと相関が強く、これはスラグ石灰混合浚渫土の骨格の強度を示す指標であるといえる。以上のことから、 $F_c$ 、石灰混合率 $m_c$ 、スラグ石灰水重量比 $w(s+c)$ および間隙比 $e$ の4つを説明変数に選択し、一軸圧縮強さに対して重回帰分析による強度推定が有効であると判断した。得られた重回帰式を以下に示す。

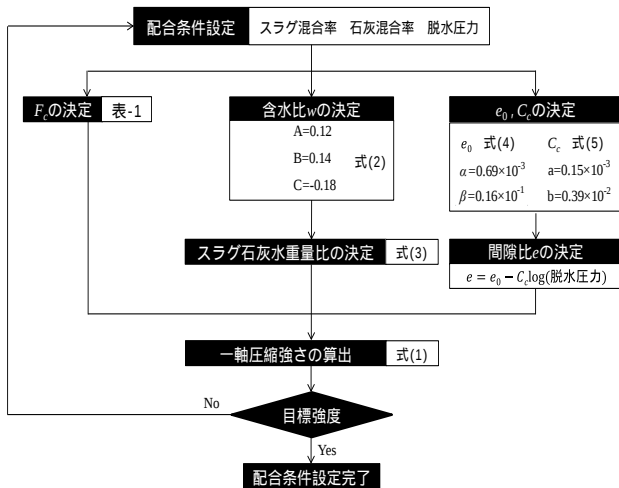


図-7 一軸圧縮強さ予測配合設計フロー

$$q_u = -67.90 + 1.44 \times F_c - 0.14 \times m_s - 1.99 \times w / (s + c) - 16.63 \times e \quad (1)$$

提案する博多港土砂によるスラグ石灰混合浚渫土の一軸圧縮強さの予測配合設計フローを図-7に示す。一軸圧縮強さを予測する際、スラグ混合率、石灰混合率および脱水圧力を設定する。\$F\_c\$について、表-1より各試料の\$F\_c\$が容易に求めることができる。次に含水比を決定する。この含水比は、養生後の供試体に含まれる水の重量と博多港土砂、高炉スラグ微粉末および消石灰の乾燥重量の和の比で表される。含水比は重回帰分析を行い、以下の式が得られた。

$$w = 6.74 + 0.12 \times m_s + 0.14 \times m_c + 0.18 \times p \quad (2)$$

ここで、\$m\_s\$と\$p\$は、それぞれスラグ混合率と脱水圧力である。得られた含水比からスラグ石灰水重量比を決定する。スラグ石灰水重量比は、定義から以下のように表すことができる。

$$\frac{w}{(s+c)} = \frac{100 \times (m_s + m_c)}{w(100 + m_s + m_c)} \quad (3)$$

次に初期間隙比\$e\_0\$および圧縮指数\$C\_c\$について得られた重回帰式を以下に示す。

$$e_0 = 1.08 + 0.00069 \times m_s + 0.016 \times m_c \quad (4)$$

$$C_c = 0.16 + 0.00015 \times m_s + 0.0039 \times m_c \quad (5)$$

式(4)および式(5)より\$e\_0\$および\$C\_c\$を決定し、間隙比\$e\$を求める。以上のようにして得られた説明変数と式(1)より一軸圧縮強さの予測ができる。

一軸圧縮強さの実測値と予測値の関係を図-8に示す。予測値と実測値にばらつきがあるが、0.8程度の重相関

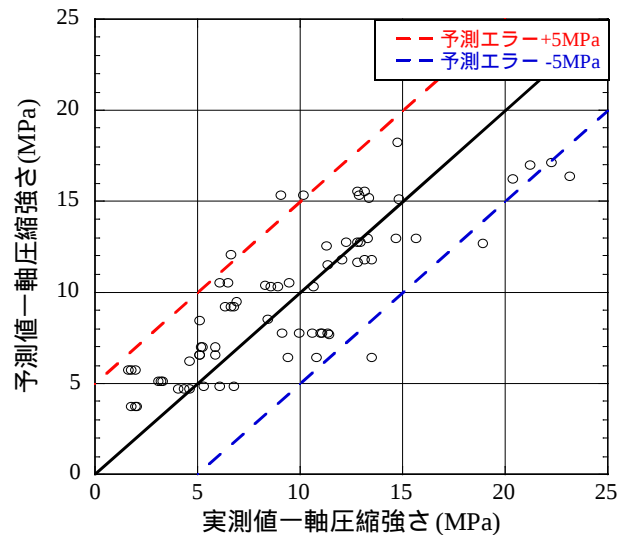


図-8 一軸圧縮強さの実測値と予測値の関係

係数が得られたことから、スラグ石灰混合浚渫土の特性を表す複数の指標を用いて重回帰分析を行うことで、精度の高い強度推定ができるものと考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、セメントの代わりに結合材として高炉スラグ微粉末を、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出すためのアルカリ刺激材として石灰を用いて、高压脱水固化したスラグ石灰混合浚渫土を作製し、その強度特性を調べた。さらに、最も効率的な配合の作製条件を主成分分析および重回帰分析を用いて検討した。得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1)スラグ混合率45 %、石灰混合率10 %および脱水圧力10 MPaのとき、最も大きい一軸圧縮強さである23 MPaを発現した。
- (2)一軸圧縮強さを増加させるには、水スラグ石灰重量比を小さくすることが重要である。
- (3)主成分分析の結果を用いて、細粒分含有率、石灰混合率、スラグ石灰水重量比および間隙比の4つの指標を用いて、スラグ石灰混合浚渫土の一軸圧縮強さを予測するための重回帰式を提案した。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)：研究課題25289149「浚渫土防災ブロックを活用した新形式津波防波堤の開発研究」(研究代表者：笠間清伸)の成果の一部である。また、本研究は、一般財団法人港湾空港総合技術センターの研究開発助成を受けた。記して、関係者各位には深甚の謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) Tay, J.H, Show, K.Y. and Hong, S.Y.: Concrete aggregates made from sludge-marine clay mixes, *Journal of Materials*, 14(5), pp.392-398, 2002.
- 2) Netzband, A, Reincke, H. and Bergemann, M.: The river Elbe a case study for the ecological and economical chain of sediments, *Journals of Soils and Sediments*, 2(3), pp.112-116, 2002.
- 3) Elkins, B.V. and Thompson, T.K.: Recycle dredged materials for beneficial use, *Dredging and Management of Dredged Material*, Geotechnical Special Publication 65, pp.161-176, 1997.
- 4) 笠間清伸, 善功企, 陳光齊, 河野信貴: 高圧脱水固化処理土の強度特性, *材料*, 57 巻, 第 1 号, pp.24-27, 2008.
- 5) 佐野将輝, 善功企, 陳光齊, 笠間清伸: 砂分混合した脱水固化処理土の一軸圧縮強度特性, 第 8 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.151-154, 2009.

## STRENGTH PROPERTY OF SLAG-LIME MIXED AND DEHYDRATED CLAY

Toshiki TAKESHITA, Kiyonobu KASAMA, Kouki ZEN and Yasuo KASUGAI

This paper investigates the effectiveness of slag and lime-mixing and mechanical dehydration method (called “SLMD” in this paper) as one of new recycling technique for dredged soils. Steel slag has been used in geotechnical field to improve soil property because it induces chemical reaction to solidify between soil particles. In the SLMD procedure, soft clay mixed with slag and slaked lime and dehydrated with a high pressure to increase the strength. In order to evaluate the effective of mixing slag and lime instead of cement, the strength property of clay produced by the SLMD (called “SLMD clay”) was investigated and the factors that make up the SLMD clay was investigated by principal component analysis. Soft clays dredged at the Hakata port was used to prepare slag and lime-mixed specimen. The main conclusions obtained from this study are as follows: 1) The highest strength for the specimen is 23MPa, when the SLMD clay includes slag content 45%, lime content 10% and 10MPa of dehydration pressure. 2) The unconfined compressive strength tends to increase sharply with decreasing water-slag and lime ratio, which decreases with the increasing slag content. 3) A new design of the SLMD clay was proposed by focusing on physical properties of Hakata clay, contents of slag and lime, dehydration pressure.