

平成26年7月7日
SCOPE研究開発助成
報告会

浚渫土砂を用いた環境に優しいブロック 製作技術の開発

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
平澤 充成

1

背景・目的

港湾における浚渫必要性

航路・泊地等の維持浚渫

船舶の大型化による航路・泊地等の増深

・地元関係者との合意形成
・環境保護との両立 等

土砂処分場：飽和状態

高炉スラグ微粉末を用いて脱水固化体を製作し
環境に優しいブロック製作技術を開発

浚渫土砂を有効活用する技術の確立を目指す

2

背景・目的

平成24年度の研究成果

- 強度に対する検討
 - ・スラグ混合率と一軸圧縮強さの関係
 - ・水スラグ重量比と一軸圧縮強さの関係
 - ・アルカリ刺激の必要性
- 高炉スラグの混合による効率化
 - ・スラグ混合による排水性の改善効果

平成25年度の研究項目

- 浚渫土スラグ固化体の強度・圧縮特性の検討
- 脱水時間の短縮化の検討

3

小型高圧脱水装置試験

試料の物理特性

	密度 (g/cm ³)	自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性指数
博多港浚渫土	2.69	68.36	68.13	32.5
関門粘土	2.70	152.0	95.0	59.1
高炉スラグ微粉末	2.88	-	-	-
消石灰	2.20	-	-	-

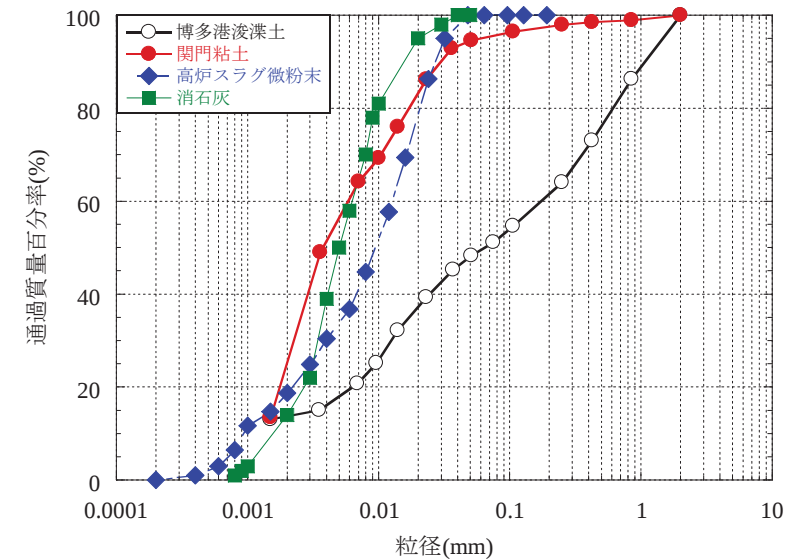
高炉スラグ微粉末(結合材)

消石灰(アルカリ刺激材)



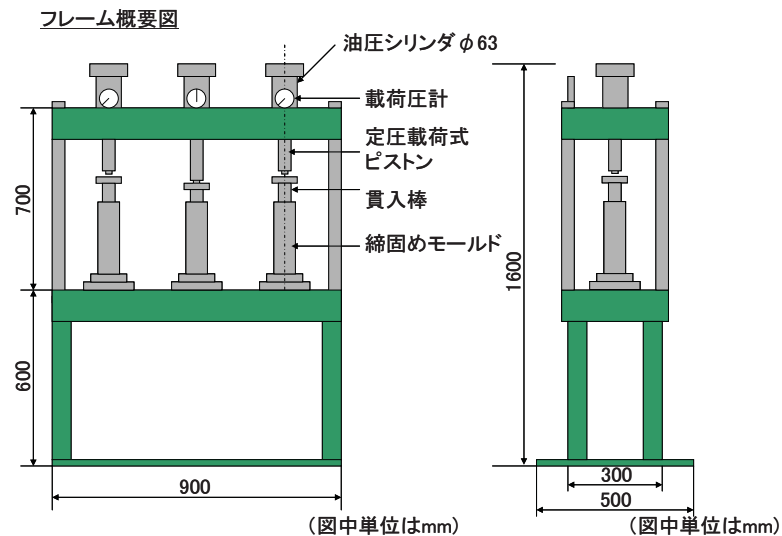
5

試料の物理特性



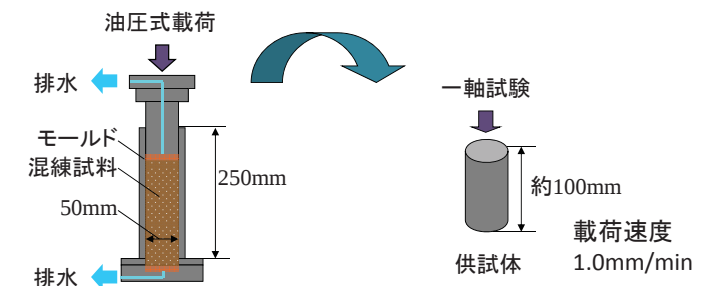
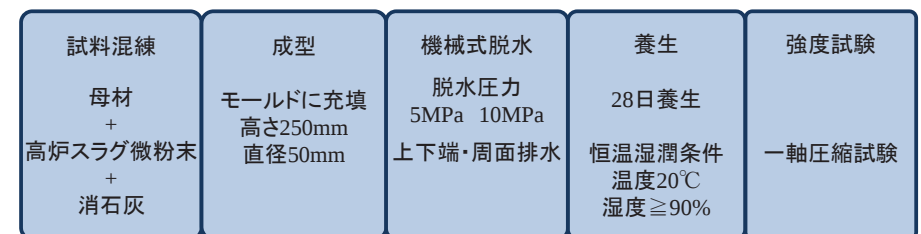
6

実験装置 定圧载荷装置(高压大変位圧密装置)



7

実験手順



8

実験条件

母材	博多港土砂 関門粘土
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%

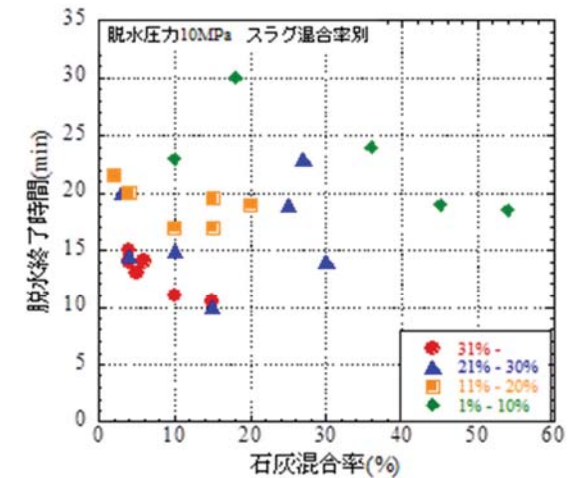
スラグ混合率 = 高炉スラグ微粉末の重量 / 浚渫土の乾燥重量

石灰混合率 = 消石灰の重量 / 浚渫土の乾燥重量

9

結果・考察 石灰混合率と脱水終了時間

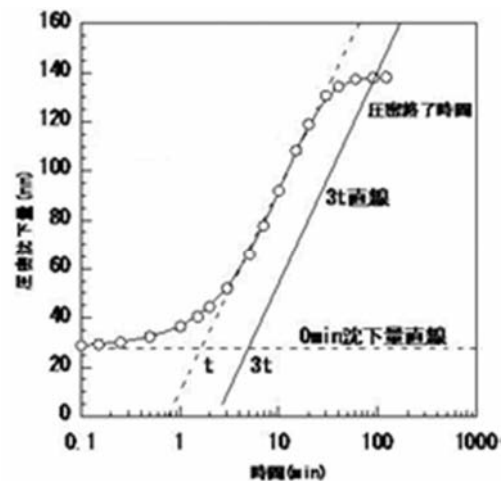
石灰混合率は脱水終了時間に影響しない。



10

脱水終了時間の定義

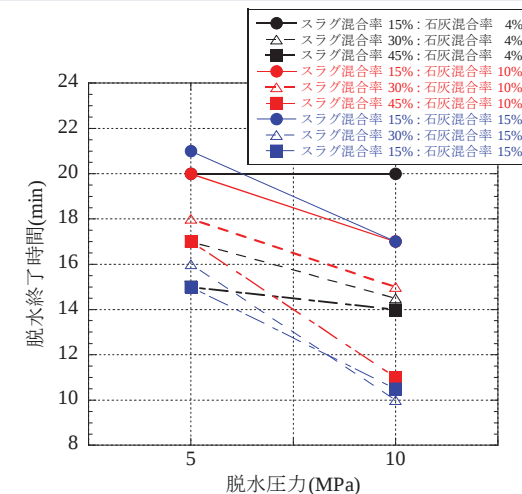
3t法により脱水終了時間を定義



11

結果・考察 脱水圧力と脱水終了時間

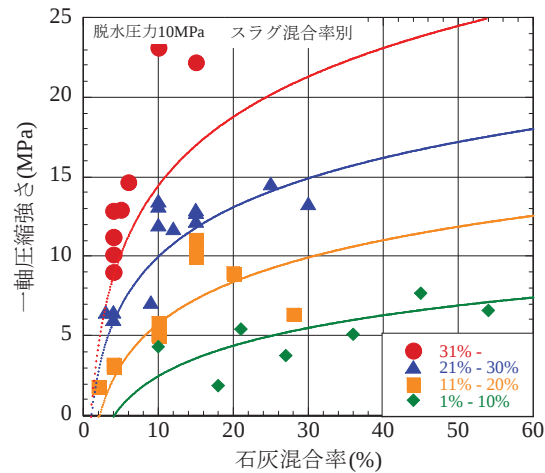
脱水圧力の増加に伴い、脱水終了時間が短縮する。



12

結果・考察 石灰混合率と一軸圧縮強さ

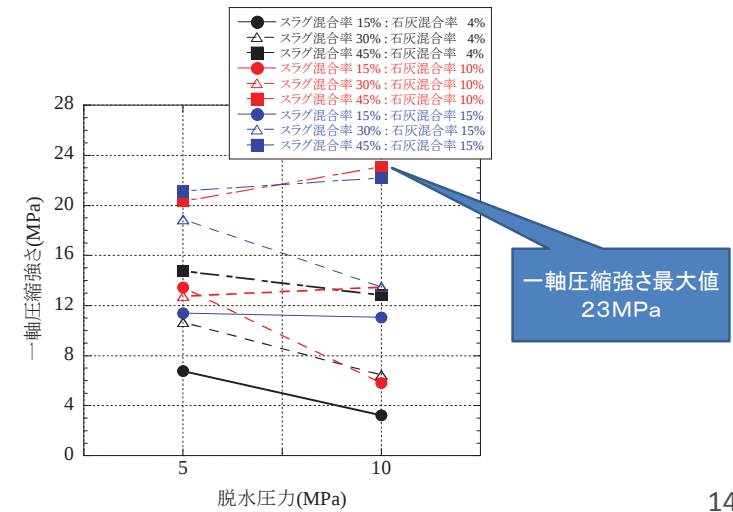
スラグ石灰混合浚渫土の強度発現には、石灰混合率およびスラグ混合率が関係している。



13

結果・考察 脱水利圧と一軸圧縮強さ

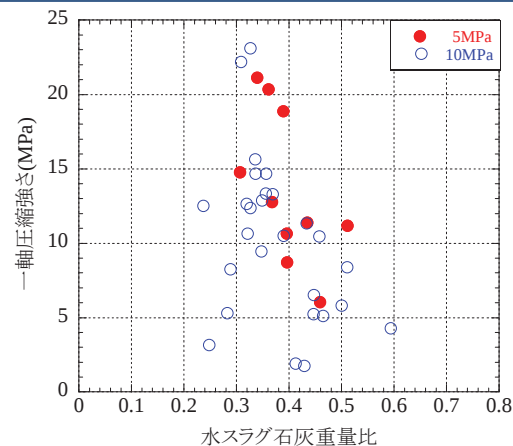
脱水利圧を増加しても、一軸圧縮強さは増加しない。



14

結果・考察 水スラグ石灰重量比と一軸圧縮強さ

- ・水スラグ石灰重量比が減少すると、一軸圧縮強さが急増する(ばらつきは有り)。
- ・水スラグ石灰重量比が概ね0.3付近で一軸圧縮強さは最大値。



15

水スラグ石灰重量比の定義

$$\text{水スラグ石灰重量比} = \frac{W}{(m_{ss} + m_{sl})}$$

W: 養生後の供試体内の水の重量
 m_{ss} : 養生後の供試体内のスラグの重量
 m_{sl} : 養生後の供試体内の石灰の重量

16

小型高圧脱水装置試験のまとめ

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
- ・水スラグ石灰重量比

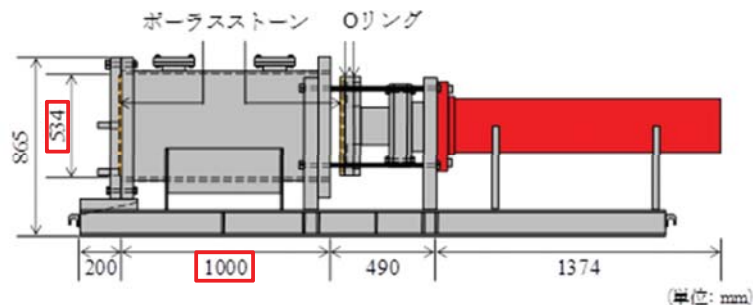
など複数の指標の影響を受ける。

17

大型脱水装置試験

実験装置 大型脱水固化装置

試料充填部：内径53.4cm、高さ100cm



19

実験手順

試料混練	成型	機械式脱水	養生	強度試験
母材 + 高炉スラグ微粉末 + 消石灰	モールドに充填 高さ100cm 直径53.4cm ※バイブレータを 数回かけて脱気	脱水圧力 2MPaで30分間 脱水後、5MPaで 脱水終了まで脱水 両面排水	28日養生 恒温湿潤条件 温度20℃ 湿度 $\geq 90\%$	一軸圧縮試験

20

実験条件

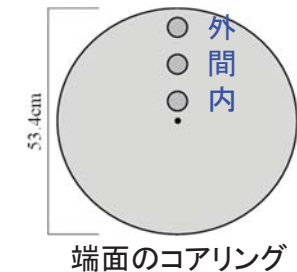
母材	関門粘土
結合材	高炉スラグ微粉末
アルカリ刺激材	消石灰
初期含水比	1.2w _L
スラグ混合率	30%
石灰混合率	10%
脱水圧力	2MPa: 30min → 5MPa: 脱水終了まで
脱水条件	上下端面排水
養生日数	7 14 28日間
養生条件	温度20℃ 湿度≧90%

21

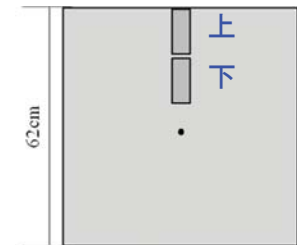
コアリング



作成したスラグ石灰混合浚渫土



端面のコアリング

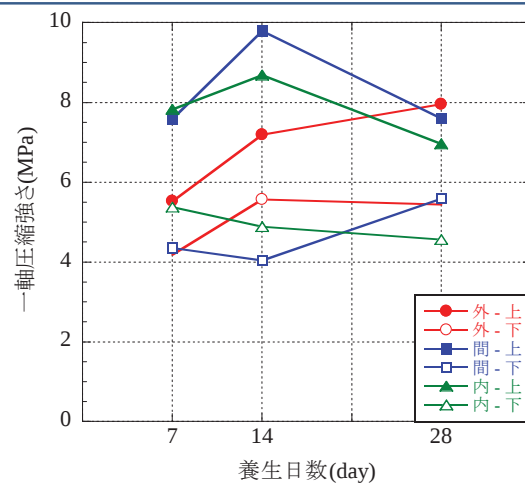


高さ方向のコアリング

22

結果・考察 養生日数と一軸圧縮強さ

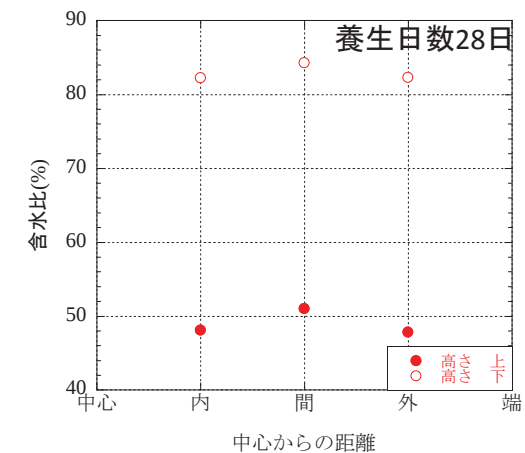
- ・養生日数の増加による強度発現は見られない。
- ・高さ方向の上側と下側で一軸圧縮強さに3MPa程度の差が発生。



23

結果・考察 コアの位置と含水比

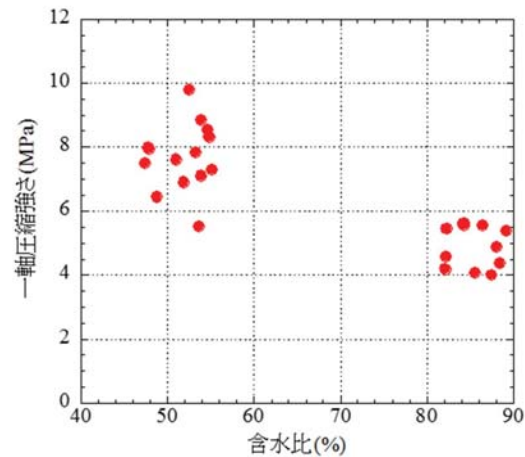
- ・同じ高さ位置では、内・間・外に含水比の違いは見られない。
- ・高さ方向で含水比に大きな違いが見られる。



24

結果・考察 含水比と一軸圧縮強さ

含水比が小さいほど一軸圧縮強さは大きくなる。



25

大型脱水装置試験のまとめ

スラグ石灰混合浚渫土のブロック塊を大型化し、ブロック塊内の位置により脱水状況が異なると、一軸圧縮強さにばらつきが発生する恐れがある。

26

スラグ石灰混合浚渫土の強度分析

目的

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、一軸圧縮強さとスラグ石灰混合浚渫土の物理特性及び製作条件のうち、21変数を設定し、2変数間の相関係数の把握ならびに主成分分析を行った。

28

一軸圧縮強さと各変数の相関

No.	変数	相関係数
1	ρ_s (g/cm ³)	0.15
2	S_c (%)	-0.73
3	F_c (%)	0.73
4	P_c (%)	0.69
5	U_c	-0.70
6	U'_c	0.85
7	スラグ混合率(%)	0.56
8	石灰混合率(%)	0.17
9	含水比(%)	0.68
10	浚渫土含有率(%)	-0.72
11	湿潤密度(g/cm ³)	-0.22
12	乾燥密度(g/cm ³)	-0.53
13	水スラグ石灰重量比	0.42
14	水スラグ重量比	-0.11
15	水石灰重量比	0.07
16	脱水圧力(MPa)	-0.21
17	スラグ石灰水重量比	-0.37
18	スラグ水重量比	-0.10
19	石灰水重量比	-0.32
20	間隙比 e	0.56
21	実験前石灰水重量比	0.00

・正の相関は U'_c および F_c が大きい。
 ・負の相関は S_c および浚渫土含有率が大きい。
 ・他にも0.7程度の相関係数のものがあり、様々な物理特性や製作条件の影響を受ける。

2変数以上の指標を用いた強度評価が必要

ρ_s : 密度、 S_c : 砂分含有率、 F_c : 細粒分含有率、 P_c : 粘土分含有率、 U_c : 均等係数、 U'_c : 曲率係数

29

主成分分析

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率(%)	39.22	72.10	86.85	93.86
成分行列				
ρ_s	0.43	-0.89	0.06	-0.04
S_c	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
F_c	0.91	0.40	0.11	-0.09
P_c	0.73	0.67	0.08	-0.07
U_c	-0.80	-0.59	-0.09	0.08
U'_c	0.98	0.11	0.11	-0.10
スラグ混合率	0.90	-0.37	0.12	-0.10
石灰混合率	-0.04	0.98	-0.02	-0.01
含水比	0.56	0.34	0.70	0.23
浚渫土含有率	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
湿潤密度	0.84	-0.09	0.20	0.46
乾燥密度	0.57	-0.49	-0.48	0.41
水スラグ石灰重量比	-0.49	-0.10	0.76	0.38
水スラグ重量比	-0.52	0.66	0.02	-0.12
水石灰重量比	0.32	-0.70	0.23	-0.04
脱水圧力	0.05	0.24	-0.51	0.60
スラグ石灰水重量比	0.40	0.04	-0.83	-0.36
スラグ水重量比	0.56	-0.69	-0.39	-0.20
石灰水重量比	-0.34	0.89	-0.25	-0.06
間隙比 e	-0.26	-0.33	0.66	-0.54
実験前石灰水比	-0.14	0.98	-0.03	0.01

30

主成分分析 第1主成分

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率(%)	39.22	72.10	86.85	93.86
成分行列				
ρ_s	0.43	-0.89	0.06	-0.04
S_c	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
F_c	0.91	0.40	0.11	-0.09
P_c	0.73	0.67	0.08	-0.07
U_c	-0.80	-0.59	-0.09	0.08
U'_c	0.98	0.11	0.11	-0.10
スラグ混合率	0.90	-0.37	0.12	-0.10
石灰混合率	-0.04	0.98	-0.02	-0.01
含水比	0.56	0.34	0.70	0.23
浚渫土含有率	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
湿潤密度	0.84	-0.09	0.20	0.46
乾燥密度	0.57	-0.49	-0.48	0.41
水スラグ石灰重量比	-0.49	-0.10	0.76	0.38
水スラグ重量比	-0.52	0.66	0.02	-0.12
水石灰重量比	0.32	-0.70	0.23	-0.04
脱水圧力	0.05	0.24	-0.51	0.60
スラグ石灰水重量比	0.40	0.04	-0.83	-0.36
スラグ水重量比	0.56	-0.69	-0.39	-0.20
石灰水重量比	-0.34	0.89	-0.25	-0.06
間隙比 e	-0.26	-0.33	0.66	-0.54
実験前石灰水比	-0.14	0.98	-0.03	0.01

U'_c 、 S_c 、 F_c などとの強い相関

スラグ石灰混合浚渫土の
粒度による特性を表す指標

31

主成分分析 第2主成分

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率(%)	39.22	72.10	86.85	93.86
成分行列				
ρ_s	0.43	-0.89	0.06	-0.04
S_c	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
F_c	0.91	0.40	0.11	-0.09
P_c	0.73	0.67	0.08	-0.07
U_c	-0.80	-0.59	-0.09	0.08
U'_c	0.98	0.11	0.11	-0.10
スラグ混合率	0.90	-0.37	0.12	-0.10
石灰混合率	-0.04	0.98	-0.02	-0.01
含水比	0.56	0.34	0.70	0.23
浚渫土含有率	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
湿潤密度	0.84	-0.09	0.20	0.46
乾燥密度	0.57	-0.49	-0.48	0.41
水スラグ石灰重量比	-0.49	-0.10	0.76	0.38
水スラグ重量比	-0.52	0.66	0.02	-0.12
水石灰重量比	0.32	-0.70	0.23	-0.04
脱水圧力	0.05	0.24	-0.51	0.60
スラグ石灰水重量比	0.40	0.04	-0.83	-0.36
スラグ水重量比	0.56	-0.69	-0.39	-0.20
石灰水重量比	-0.34	0.89	-0.25	-0.06
間隙比 e	-0.26	-0.33	0.66	-0.54
実験前石灰水比	-0.14	0.98	-0.03	0.01

実験前石灰含水比、石灰混合率、石灰水重量比などとの強い相関

アルカリ刺激力を示す指標

32

主成分分析 第3主成分

累積寄与率(%)	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率(%)	39.22	72.10	86.85	93.86
成分行列				
ρ_s	0.43	-0.89	0.06	-0.04
S_c	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
F_c	0.91	0.40	0.11	-0.09
P_c	0.73	0.67	0.08	-0.07
U_c	-0.80	-0.59	-0.09	0.08
U'_c	0.98	0.11	0.11	-0.10
スラグ混合率	0.90	-0.37	0.12	-0.10
石灰混合率	-0.04	0.98	-0.02	-0.01
含水比	0.56	0.34	0.70	0.23
浸漬土含有率	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
湿潤密度	0.84	-0.09	0.20	0.46
乾燥密度	0.57	-0.49	-0.48	0.41
水スラグ石灰重量比	-0.49	-0.10	0.76	0.38
水スラグ重量比	-0.52	0.66	0.02	-0.12
水石灰重量比	0.32	-0.70	0.23	-0.04
脱水圧力	0.05	0.24	-0.51	0.60
スラグ石灰水重量比	0.40	0.04	-0.83	-0.36
スラグ水重量比	0.56	-0.69	-0.39	-0.20
石灰水重量比	-0.34	0.89	-0.25	-0.06
間隙比 e	-0.26	-0.33	0.66	-0.54
実験前石灰水比	-0.14	0.98	-0.03	0.01

スラグ石灰水重量比、水スラグ石灰重量比、含水比などとの強い相関

高炉スラグ微粉末の固化特性を示す指標

33

主成分分析 第4主成分

累積寄与率(%)	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率(%)	39.22	72.10	86.85	93.86
成分行列				
ρ_s	0.43	-0.89	0.06	-0.04
S_c	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
F_c	0.91	0.40	0.11	-0.09
P_c	0.73	0.67	0.08	-0.07
U_c	-0.80	-0.59	-0.09	0.08
U'_c	0.98	0.11	0.11	-0.10
スラグ混合率	0.90	-0.37	0.12	-0.10
石灰混合率	-0.04	0.98	-0.02	-0.01
含水比	0.56	0.34	0.70	0.23
浸漬土含有率	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
湿潤密度	0.84	-0.09	0.20	0.46
乾燥密度	0.57	-0.49	-0.48	0.41
水スラグ石灰重量比	-0.49	-0.10	0.76	0.38
水スラグ重量比	-0.52	0.66	0.02	-0.12
水石灰重量比	0.32	-0.70	0.23	-0.04
脱水圧力	0.05	0.24	-0.51	0.60
スラグ石灰水重量比	0.40	0.04	-0.83	-0.36
スラグ水重量比	0.56	-0.69	-0.39	-0.20
石灰水重量比	-0.34	0.89	-0.25	-0.06
間隙比 e	-0.26	-0.33	0.66	-0.54
実験前石灰水比	-0.14	0.98	-0.03	0.01

脱水圧力、間隙比などとの強い相関

スラグ石灰混合浸漬土の骨格の強度を示す指標

34

説明変数の決定

累積寄与率(%)	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率(%)	39.22	72.10	86.85	93.86
成分行列				
ρ_s	0.43	-0.89	0.06	-0.04
S_c	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
F_c	0.91	0.40	0.11	-0.09
P_c	0.73	0.67	0.08	-0.07
U_c	-0.80	-0.59	-0.09	0.08
U'_c	0.98	0.11	0.11	-0.10
スラグ混合率	0.90	-0.37	0.12	-0.10
石灰混合率	-0.04	0.98	-0.02	-0.01
含水比	0.56	0.34	0.70	0.23
浸漬土含有率	-0.91	-0.40	-0.11	0.09
湿潤密度	0.84	-0.09	0.20	0.46
乾燥密度	0.57	-0.49	-0.48	0.41
水スラグ石灰重量比	-0.49	-0.10	0.76	0.38
水スラグ重量比	-0.52	0.66	0.02	-0.12
水石灰重量比	0.32	-0.70	0.23	-0.04
脱水圧力	0.05	0.24	-0.51	0.60
スラグ石灰水重量比	0.40	0.04	-0.83	-0.36
スラグ水重量比	0.56	-0.69	-0.39	-0.20
石灰水重量比	-0.34	0.89	-0.25	-0.06
間隙比 e	-0.26	-0.33	0.66	-0.54
実験前石灰水比	-0.14	0.98	-0.03	0.01

F_c (第1主成分)、石灰混合率(第2主成分)、スラグ石灰水重量比(第3主成分)、間隙比(第4主成分)の4つを説明変数に選択

一軸圧縮強さに対する重回帰分析による強度推定を実施

35

重回帰分析

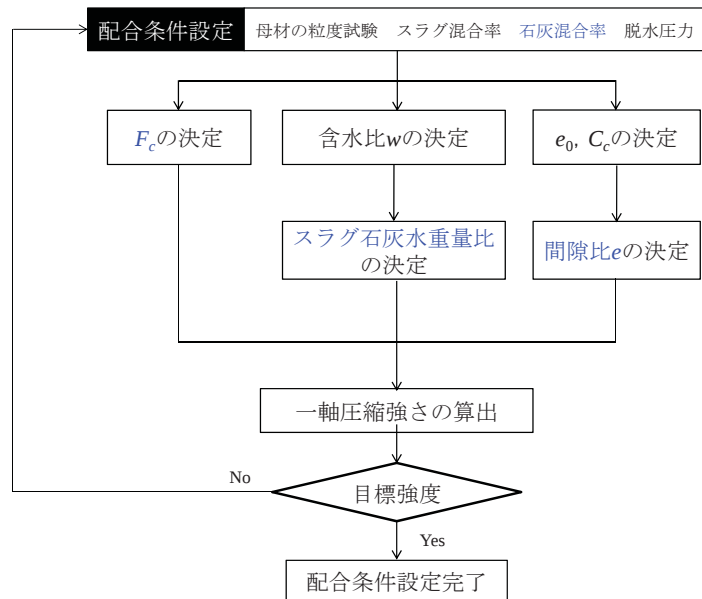
$$qu = qu(F_c, \text{石灰混合率}, \text{スラグ石灰水重量比}, \text{間隙比}e)$$

重回帰分析

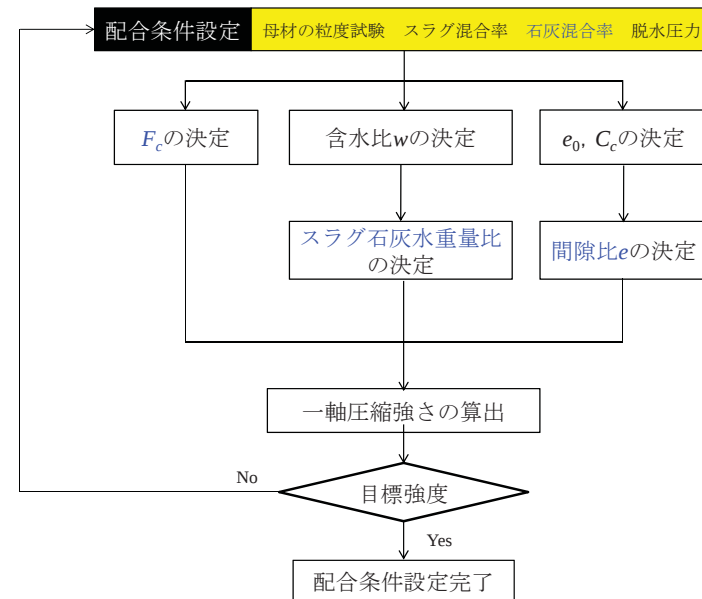
$$qu = -22.17 + 0.88 \times F_c - 0.10 \times \text{石灰混合率} - 0.96 \times \text{スラグ石灰水重量比} - 48.55 \times \text{間隙比}e$$

重相関 $R = 0.83$

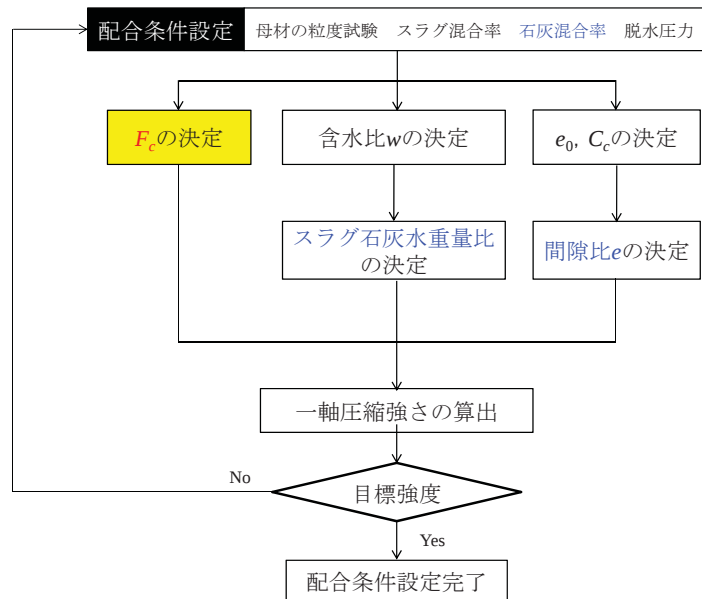
36



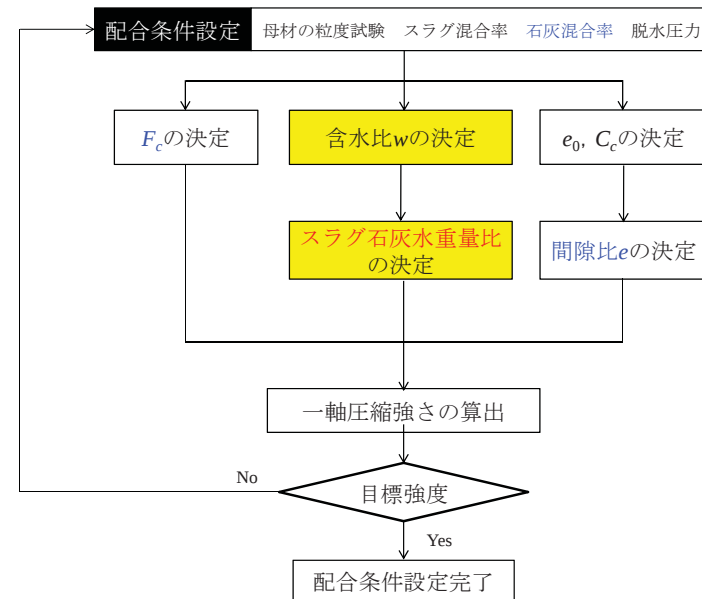
37



38



39



40

スラグ石灰水重量比の決定

・含水比 w の決定

$w = w(F_c, \text{スラグ混合率}, \text{石灰混合率}, \text{脱水圧力})$ で重回帰分析

$$w = -16.91 + 0.48 \times F_c - 0.21 \times 10^{-1} \times \text{スラグ混合率} \\ + 0.15 \times 10^{-1} \times \text{石灰混合率} - 0.46 \times \text{脱水圧力}$$

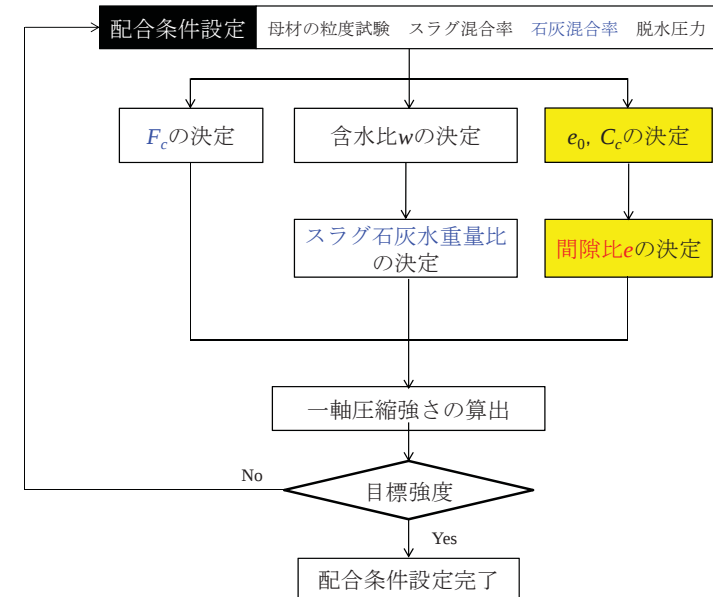
重相関 $R = 0.96$

・スラグ石灰水重量比の決定

スラグ石灰水重量比

$$= \frac{(\text{スラグ混合率} + \text{石灰混合率}) / (1 + \frac{\text{スラグ混合率} + \text{石灰混合率}}{100})}{\text{含水比} w}$$

41



42

間隙比 e の決定

・圧縮指数 C_c の決定

$C_c = C_c(F_c, \text{スラグ混合率}, \text{石灰混合率})$ で重回帰分析

$$C_c = -0.10 + 0.60 \times 10^{-2} \times F_c - 0.38 \times 10^{-2} \times \text{スラグ混合率} \\ - 0.48 \times 10^{-2} \times \text{石灰混合率} \quad \text{重相関 } R = 0.88$$

・初期間隙比 e_0 の決定

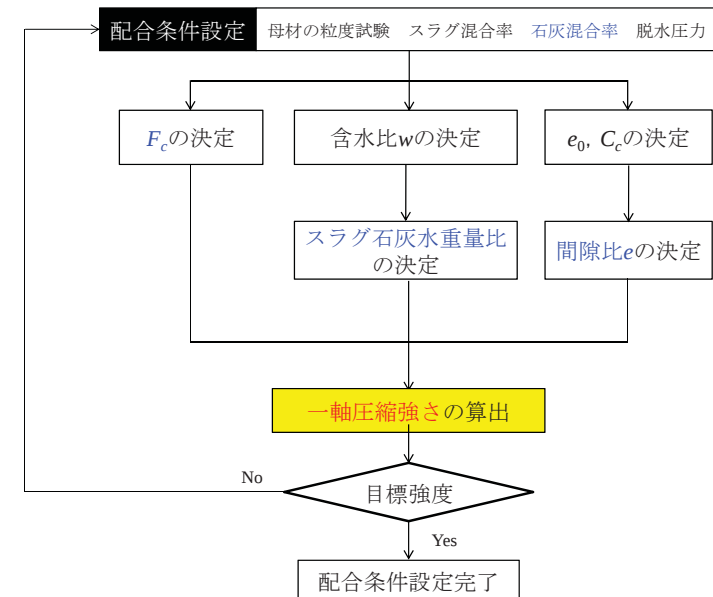
$e_0 = e_0(F_c, \text{スラグ混合率}, \text{石灰混合率})$ で重回帰分析

$$e_0 = -0.37 + 0.18 \times 10^{-1} \times F_c - 0.67 \times 10^{-2} \times \text{スラグ混合率} \\ - 0.84 \times 10^{-2} \times \text{石灰混合率} \quad \text{重相関 } R = 0.99$$

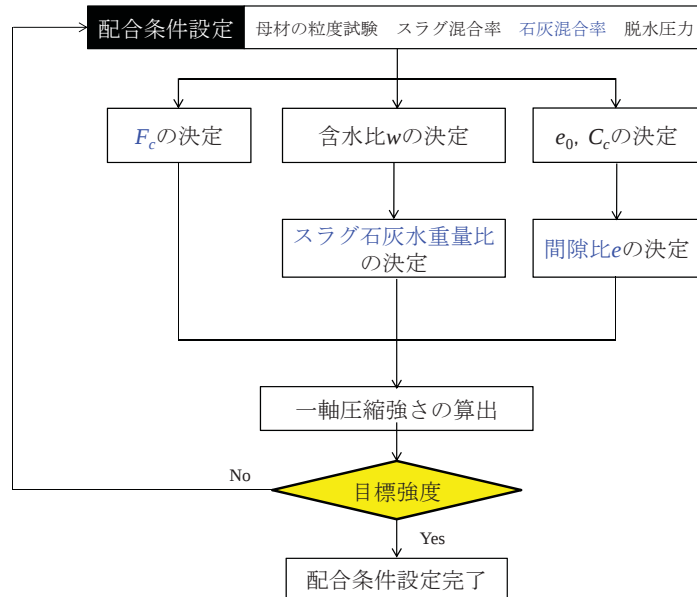
・間隙比 e の決定

$$e = e_0 - C_c \log_{10}(\text{脱水圧力}) \text{に代入}$$

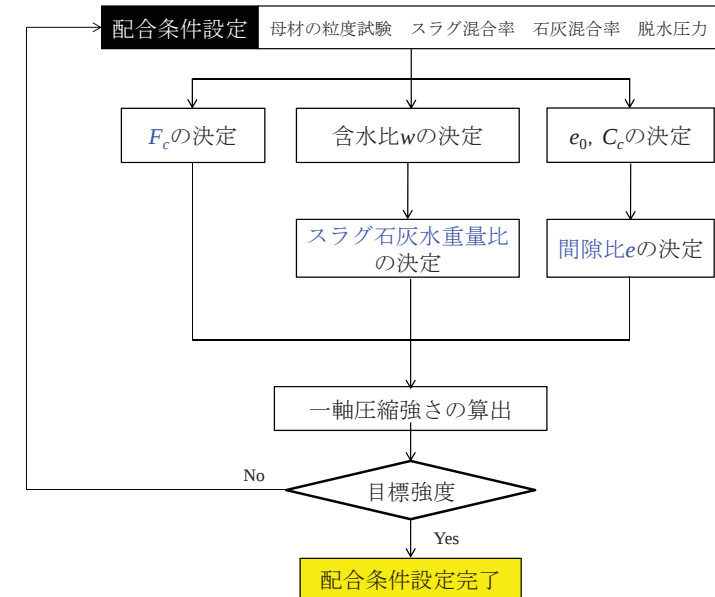
43



44



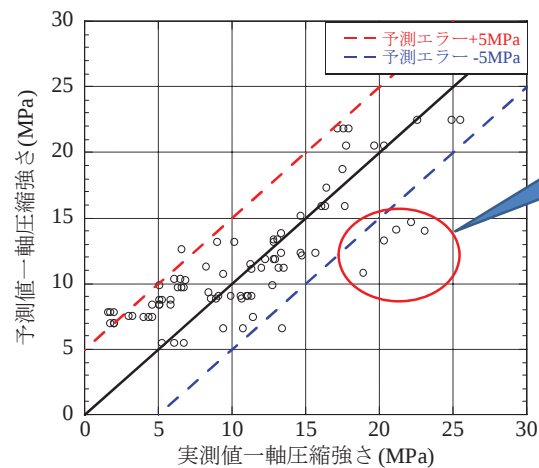
45



46

予測値と実測値の比較

- ・予測値と実測値の差がほぼ±5MPa内に収まる。
- ・予測値と実測値の相関は約0.8。



47

スラグ石灰混合浚渫土の強度分析のまとめ

- ・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。
- ・予測値と実測値にばらつきがあるが、0.8程度の重相関係数が得られたことから、重回帰式は精度の高い強度推定が出来ると考えられる。

48

ご清聴ありがとうございました。