

平成27年7月8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

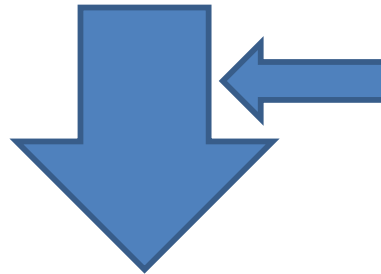
平澤充成
笠間清伸

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



高炉スラグ微粉末等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

背景・目的

平成24年度の研究

1. 強度に対する検討
2. 高炉スラグの混合による効率化



平成25年度の研究

1. 浚渫土スラグ固化体の強度・圧縮特性の検討
2. 脱水時間の短縮化の検討



平成26年度の研究

1. 浚渫土スラグ固化体の強度推定方法の確立
2. 浚渫土ブロックの海洋環境下における長期耐久性と生態学的安定性(浚渫土ブロックの現地適応性)

浚渫土スラグ固化体の強度推定方法

目的

浚渫土スラグ固化体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、一軸圧縮強さと浚渫土スラグ固化体の物理特性及び製作条件のうち、昨年度は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。

しかしながら今年度の研究において飽和度 $S_r(\%)$ について一軸圧縮強さとの相関が高いことが判明し、22変数を設定して強度推定手法の改善を図った。

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	-	-	-

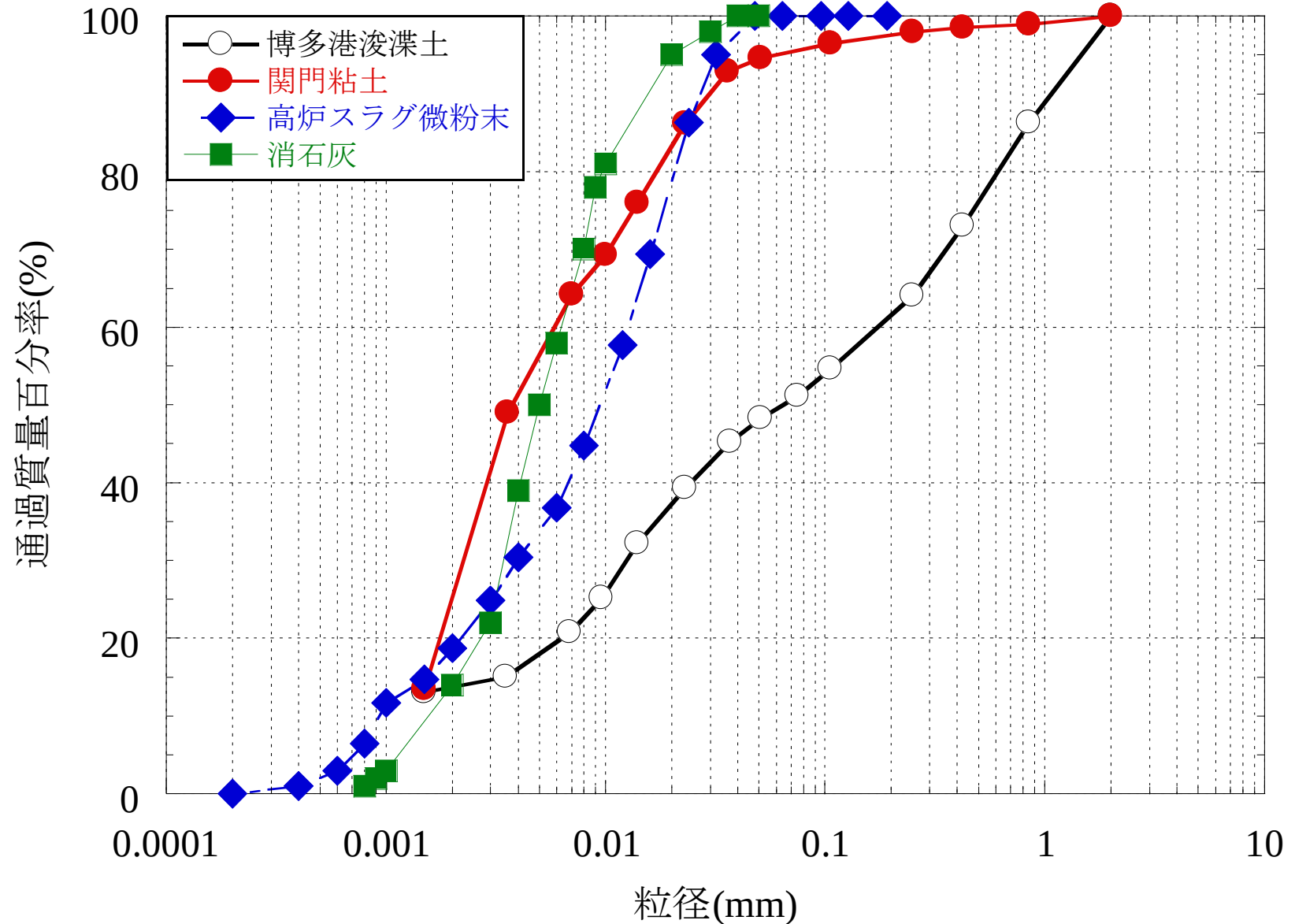
高炉スラグ微粉末(結合材)



消石灰(アルカリ刺激材)

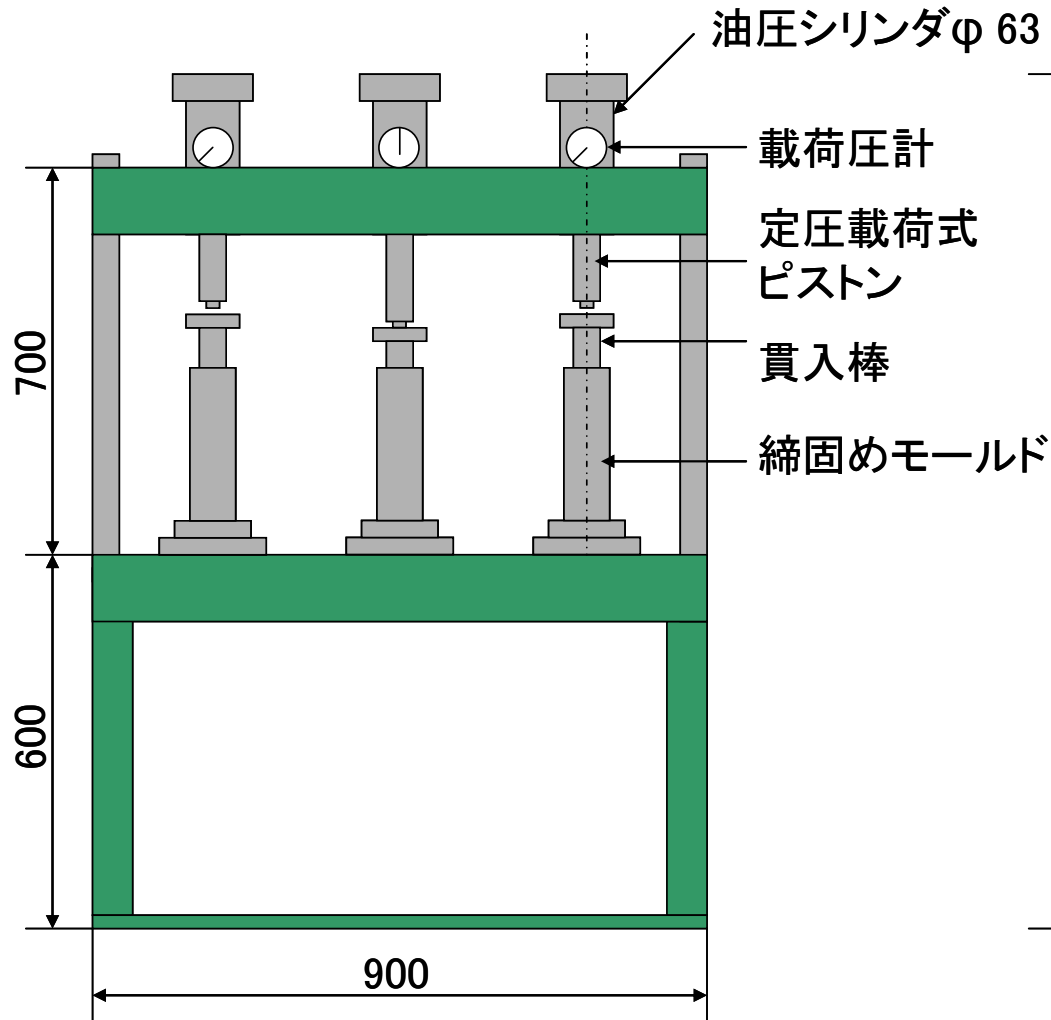


試料の物理特性

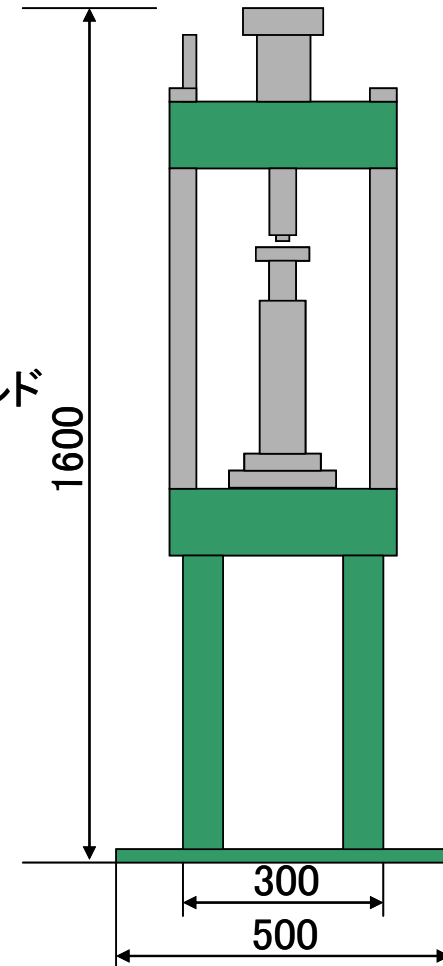


実験装置 定圧载荷装置(高圧大変位圧密装置)

フレーム概要図



(図中単位はmm)



(図中単位はmm)

実験手順

試料混練

母材
+
高炉スラグ微粉末
+
消石灰

成型

モールドに充填
高さ250mm
直径50mm

機械式脱水

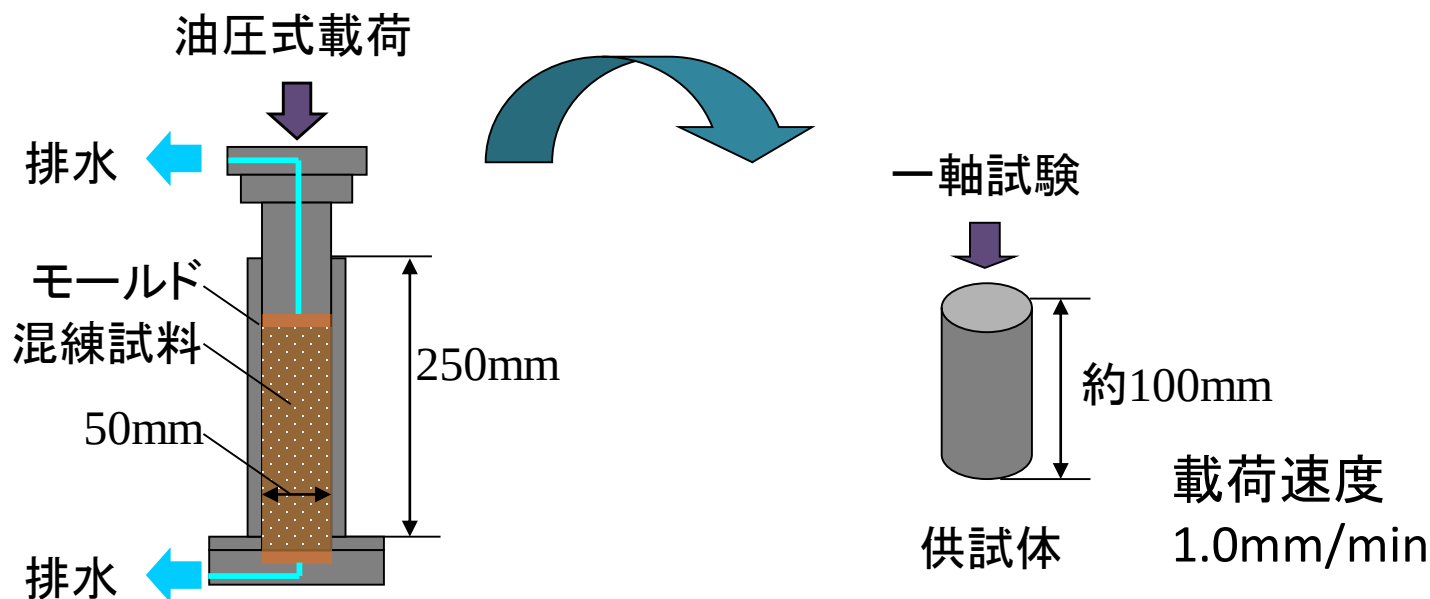
脱水圧力
5MPa 10MPa
上下端・周面排水

養生

28日養生
恒温湿潤条件
温度20℃
湿度 $\geq 90\%$

強度試験

一軸圧縮試験



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	上下端周面排水
養生日数	28日間
養生条件	温度20℃ 湿度 $\geq 90\%$

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

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)	0.25
2	Sc (%)	-0.78
3	Fc (%)	0.78
4	Pc (%)	0.67
5	Uc	-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 ³)	0.73
12	乾燥密度(g/cm ³)	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Sr (%)	0.71
22	実験前石灰水重量比	-0.02

- ・正の相関はU'c、Fc及び湿潤密度が大きい。Srはこれに次ぐ。
- ・負の相関はSc、浚渫土含有率及びUc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、Sc: 砂分含有率、Fc: 細粒分含有率、Pc: 粘土分含有率、Uc: 均等係数、U'c: 曲率係数

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				
ρ_s (g/cm ³)	0.29	-0.94	0.07	-0.04
Sc (%)	-0.96	-0.25	-0.01	0.13
Fc (%)	0.96	0.25	0.01	-0.13
Pc (%)	0.82	0.55	-0.01	-0.11
Uc	-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(g/cm ³)	0.85	-0.20	0.19	0.42
乾燥密度(g/cm ³)	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 (MPa)	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Sr (%)	0.74	0.29	0.54	0.27
実験前石灰水重量比	0.00	0.99	-0.07	0.00

主成分分析 第1主成分

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率 (%)	39.62	71.51	87.01	94.17
成分行列				
ρ_s (g/cm ³)	0.29	-0.94	0.07	-0.04
Sc (%)	-0.96	-0.25	-0.01	0.13
Fc (%)	0.96	0.25	0.01	-0.13
Pc (%)	0.82	0.55	-0.01	-0.11
Uc	-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(g/cm ³)	0.85	-0.20	0.19	0.42
乾燥密度(g/cm ³)	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 (MPa)	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Sr (%)	0.74	0.29	0.54	0.27
実験前石灰水重量比	0.00	0.99	-0.07	0.00

U'c、Sc、Fcなどとの強い
相関



浚渫土スラグ固化体の**粒度**による特性を表す指標

主成分分析 第2主成分

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率 (%)	39.62	71.51	87.01	94.17
成分行列				
ρ_s (g/cm ³)	0.29	-0.94	0.07	-0.04
Sc (%)	-0.96	-0.25	-0.01	0.13
Fc (%)	0.96	0.25	0.01	-0.13
Pc (%)	0.82	0.55	-0.01	-0.11
Uc	-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(g/cm ³)	0.85	-0.20	0.19	0.42
乾燥密度(g/cm ³)	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 (MPa)	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Sr (%)	0.74	0.29	0.54	0.27
実験前石灰水重量比	0.00	0.99	-0.07	0.00

実験前石灰含水比、石灰混合率などとの強い相関



アルカリ刺激力を示す指標

主成分分析 第3主成分

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率 (%)	39.62	71.51	87.01	94.17
成分行列				
ρ_s (g/cm ³)	0.29	-0.94	0.07	-0.04
Sc (%)	-0.96	-0.25	-0.01	0.13
Fc (%)	0.96	0.25	0.01	-0.13
Pc (%)	0.82	0.55	-0.01	-0.11
Uc	-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(g/cm ³)	0.85	-0.20	0.19	0.42
乾燥密度(g/cm ³)	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 (MPa)	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Sr (%)	0.74	0.29	0.54	0.27
実験前石灰水重量比	0.00	0.99	-0.07	0.00

スラグ石灰水重量比、水
スラグ石灰重量比などの
強い相関



高炉スラグ微粉末の固化
特性を示す指標

主成分分析 第4主成分

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率 (%)	39.62	71.51	87.01	94.17
成分行列				
ρ_s (g/cm ³)	0.29	-0.94	0.07	-0.04
Sc (%)	-0.96	-0.25	-0.01	0.13
Fc (%)	0.96	0.25	0.01	-0.13
Pc (%)	0.82	0.55	-0.01	-0.11
Uc	-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(g/cm ³)	0.85	-0.20	0.19	0.42
乾燥密度(g/cm ³)	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 (MPa)	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Sr (%)	0.74	0.29	0.54	0.27
実験前石灰水重量比	0.00	0.99	-0.07	0.00

脱水圧力、間隙比などとの強い相関



浚渫土スラグ固化体の骨格の強度を示す指標

説明変数の決定

	成分			
	1	2	3	4
累積寄与率 (%)	39.62	71.51	87.01	94.17
成分行列				
ρ_s (g/cm ³)	0.29	-0.94	0.07	-0.04
Sc (%)	-0.96	-0.25	-0.01	0.13
Fc (%)	● 0.96	0.25	0.01	-0.13
Pc (%)	0.82	0.55	-0.01	-0.11
Uc	-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(g/cm ³)	0.85	-0.20	0.19	0.42
乾燥密度(g/cm ³)	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 (MPa)	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Sr (%)	0.74	0.29	0.54	0.27
実験前石灰水重量比	0.00	0.99	-0.07	0.00

Fc(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

重回帰分析

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

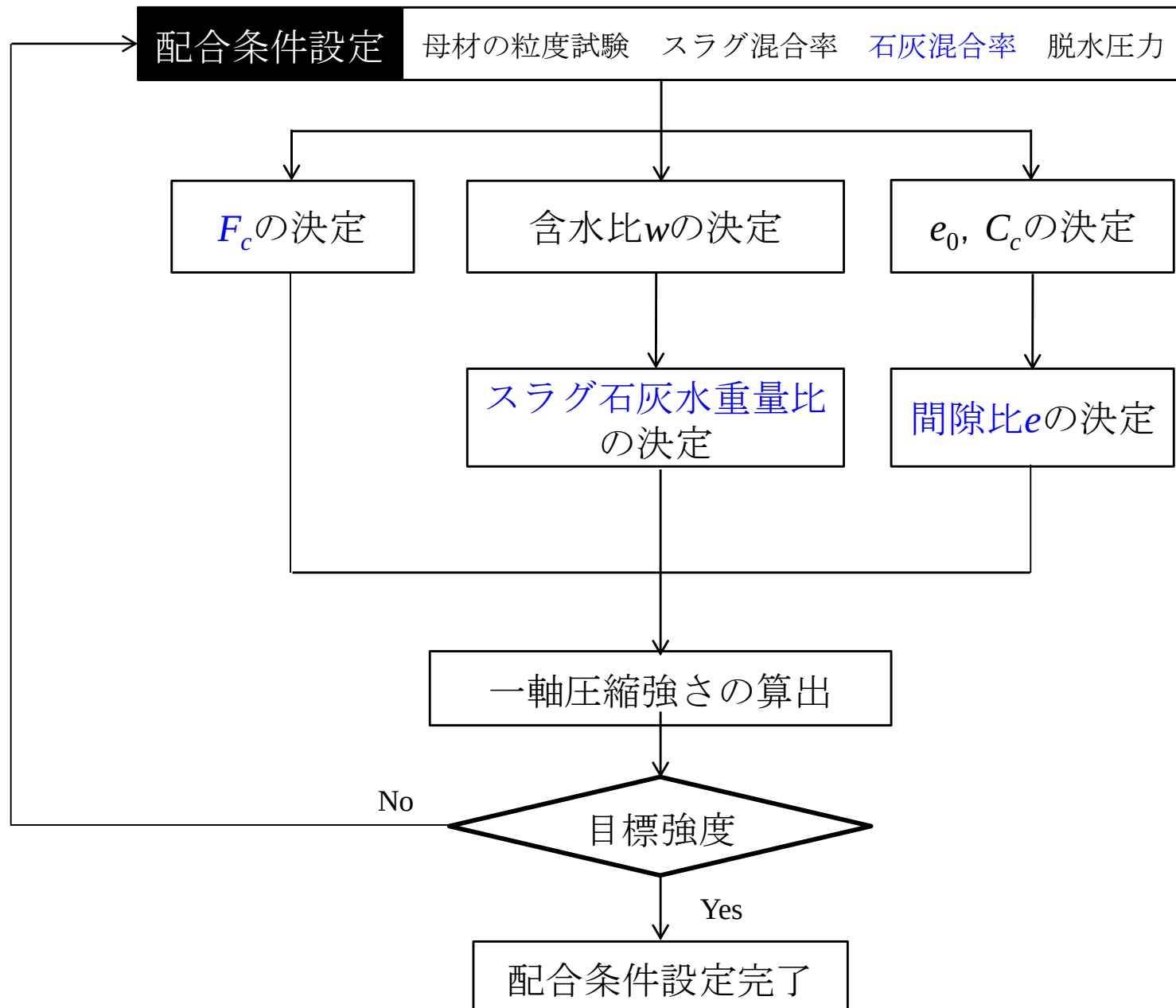


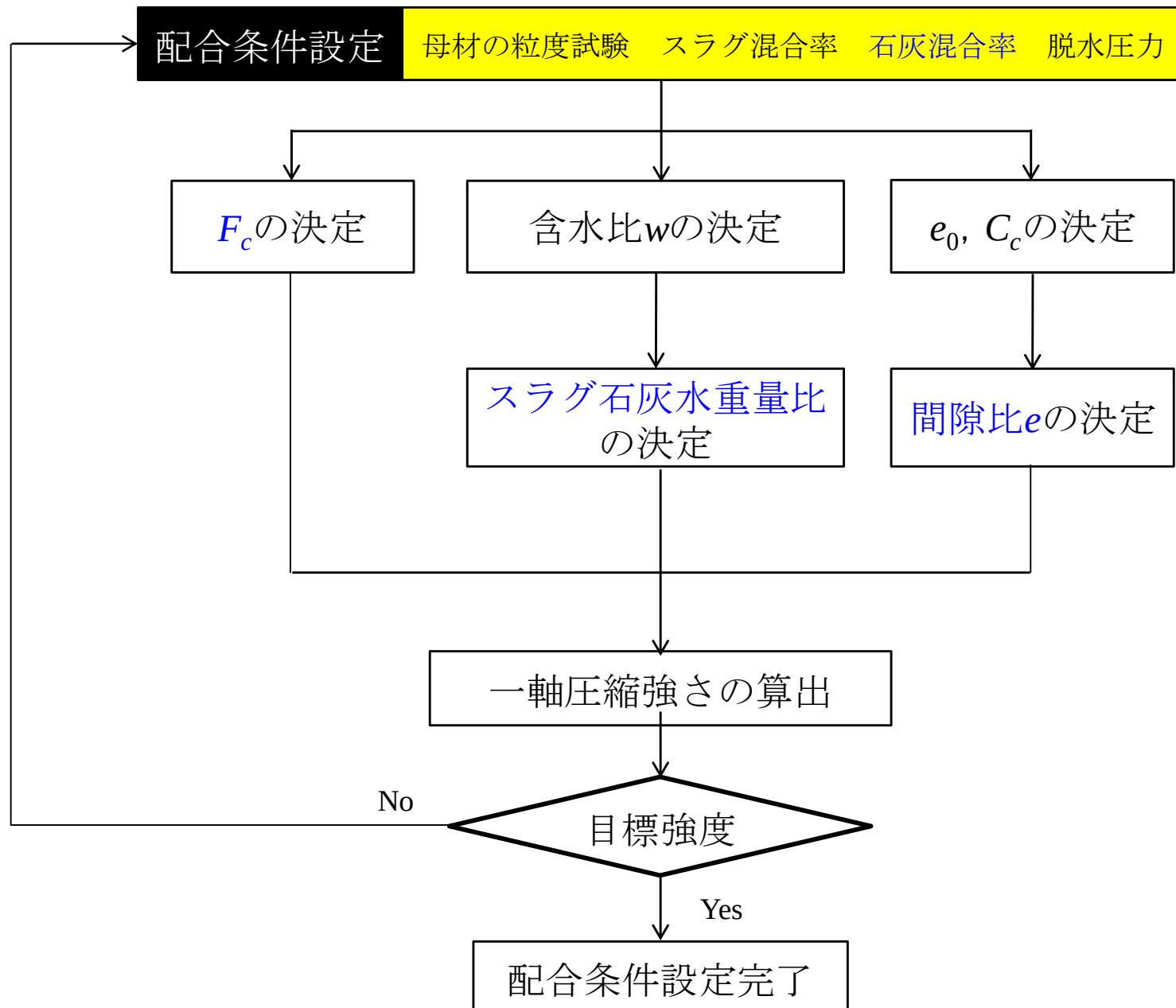
重回帰分析

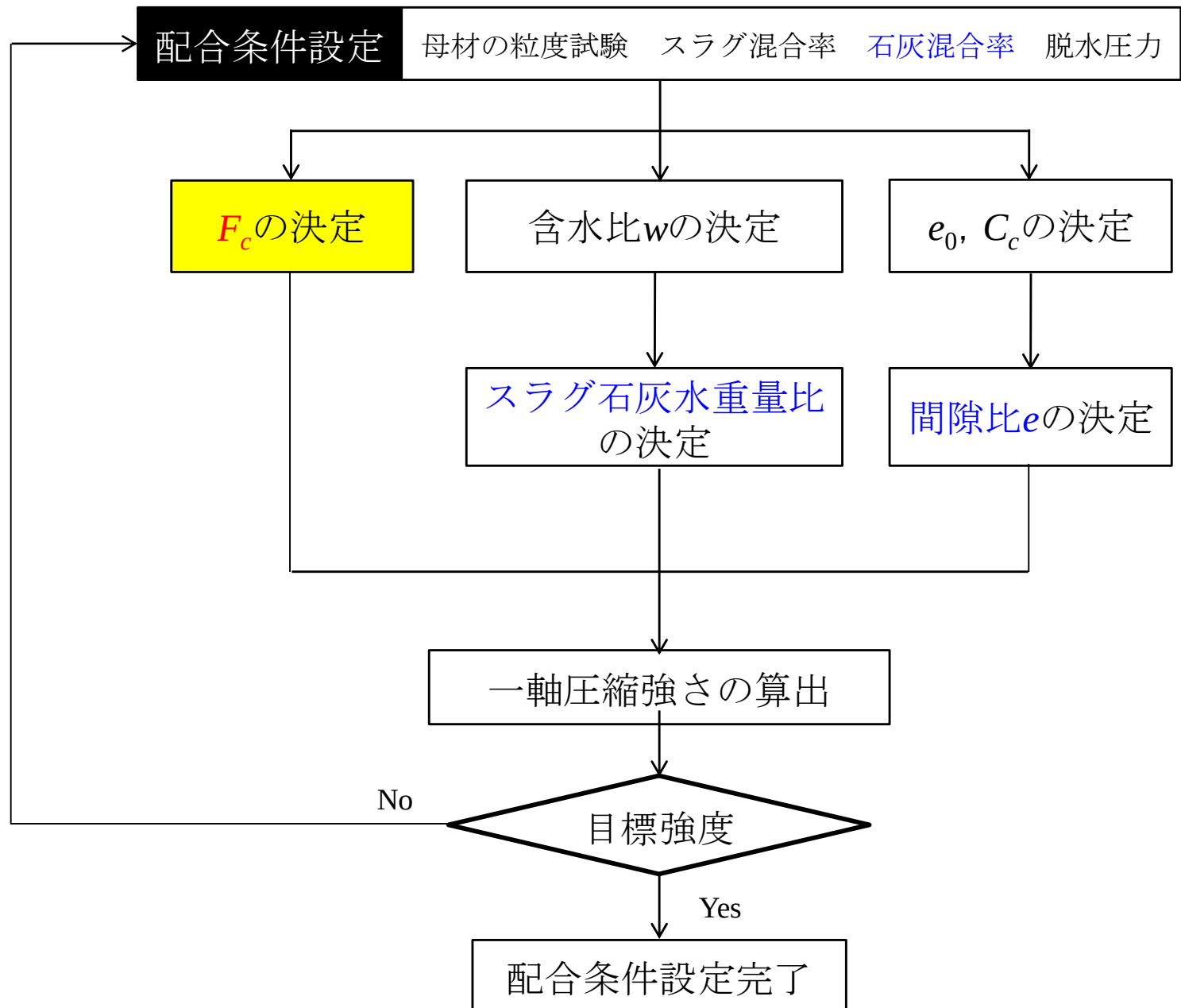


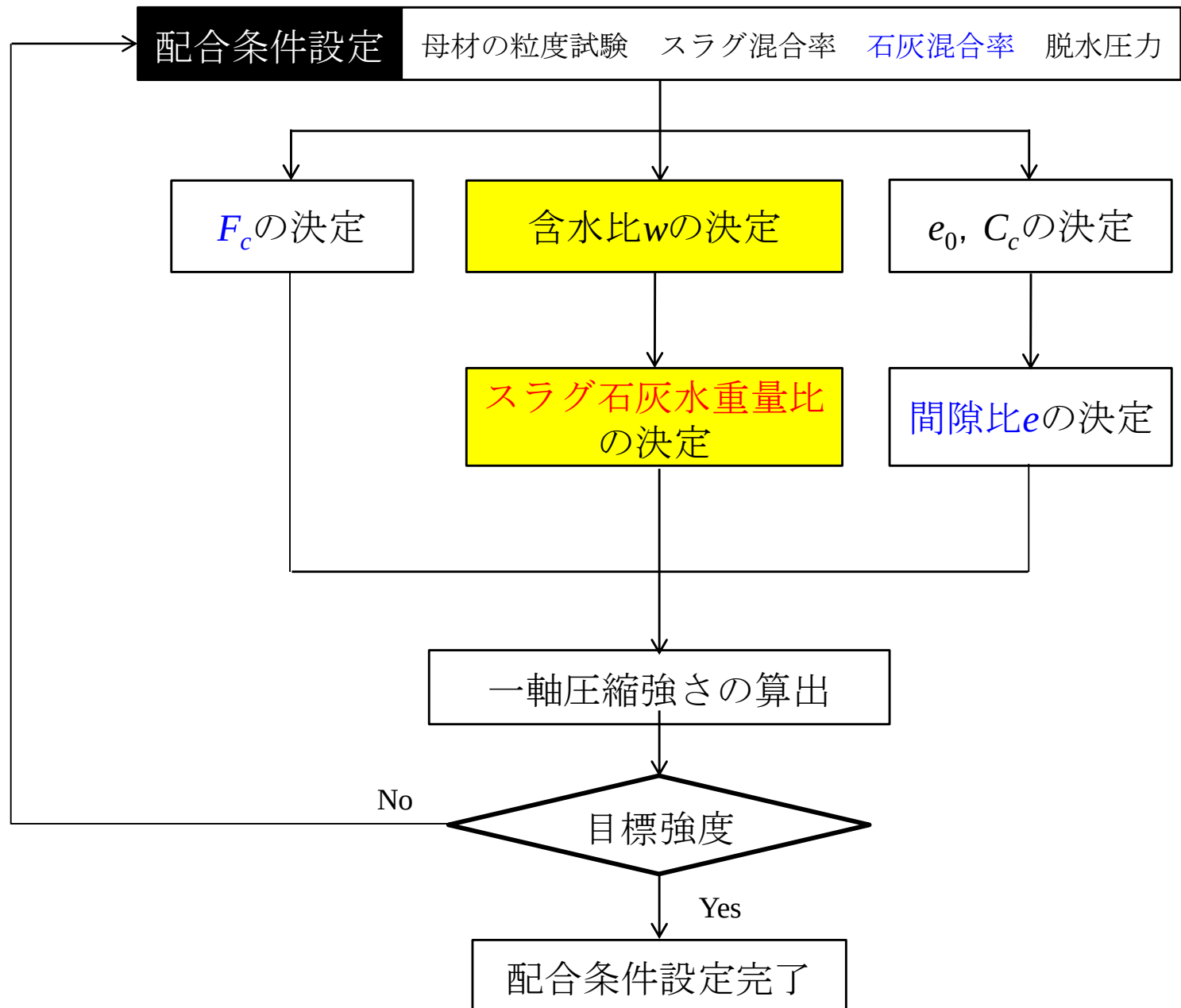
$$qu = -67.90 + 1.44 \times F_c - 0.14 \times \text{石灰混合率} \\ - 1.99 \times \text{スラグ石灰水重量比} - 16.63 \times \text{間隙比}e$$

重相関 $R = 0.8$









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

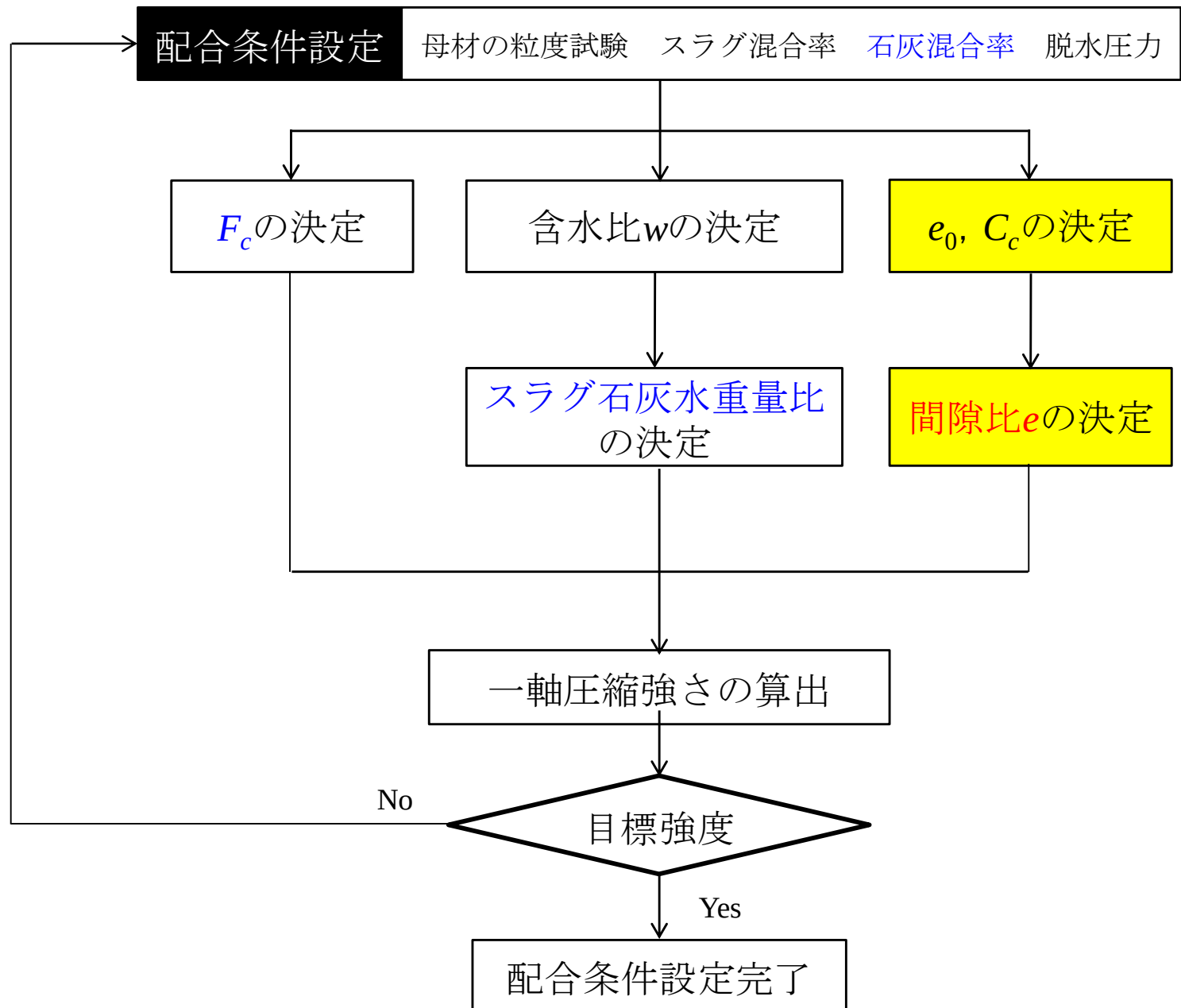
$$w = 6.74 + 0.12 \times \text{スラグ混合率} \\ + 0.14 \times \text{石灰混合率} + 0.18 \times \text{脱水圧力}$$

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

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



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

$$C_c = 0.16 + 0.00015 \times \text{スラグ混合率}$$

$$+ 0.0039 \times \text{石灰混合率}$$

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

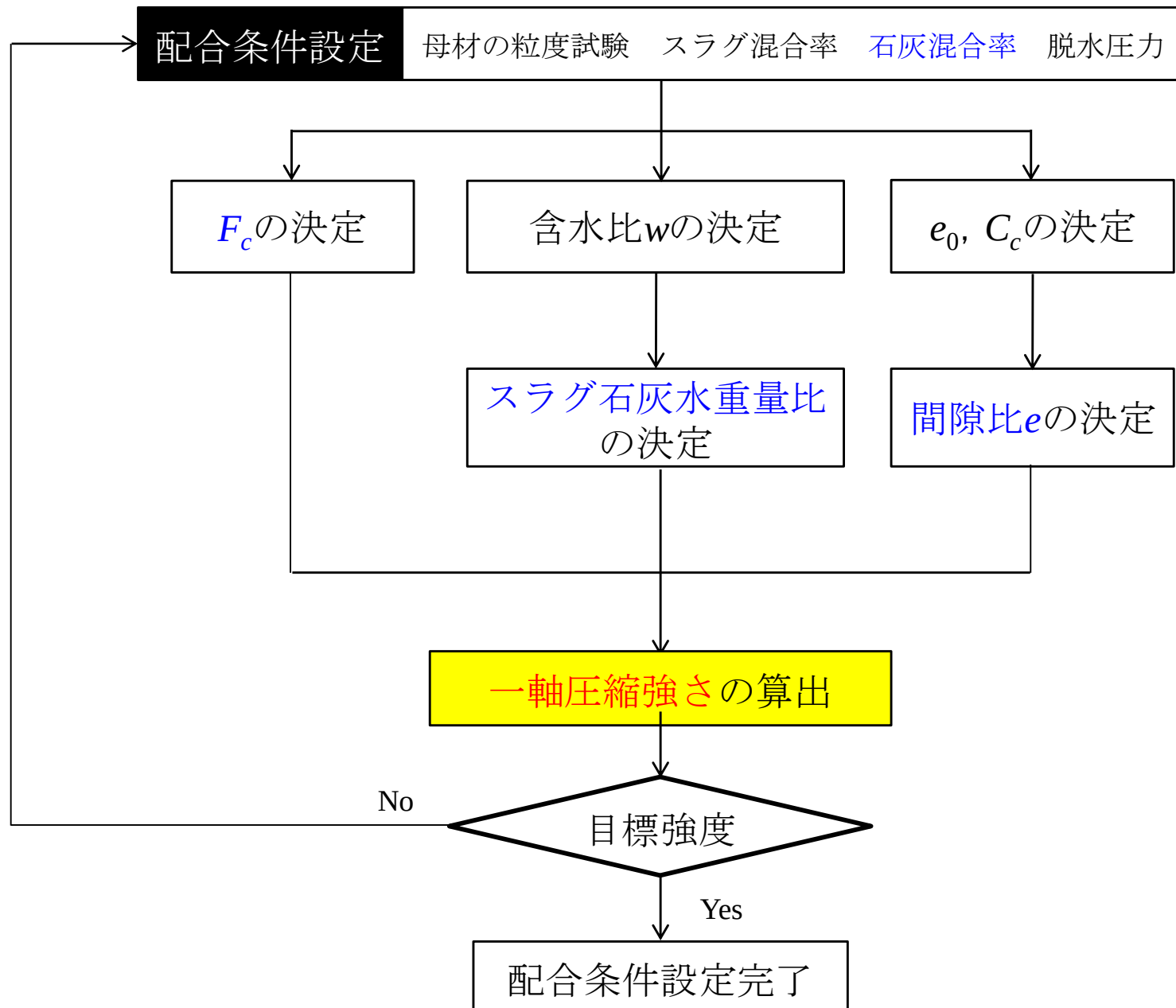
$$e_0 = 1.08 + 0.00069 \times \text{スラグ混合率}$$

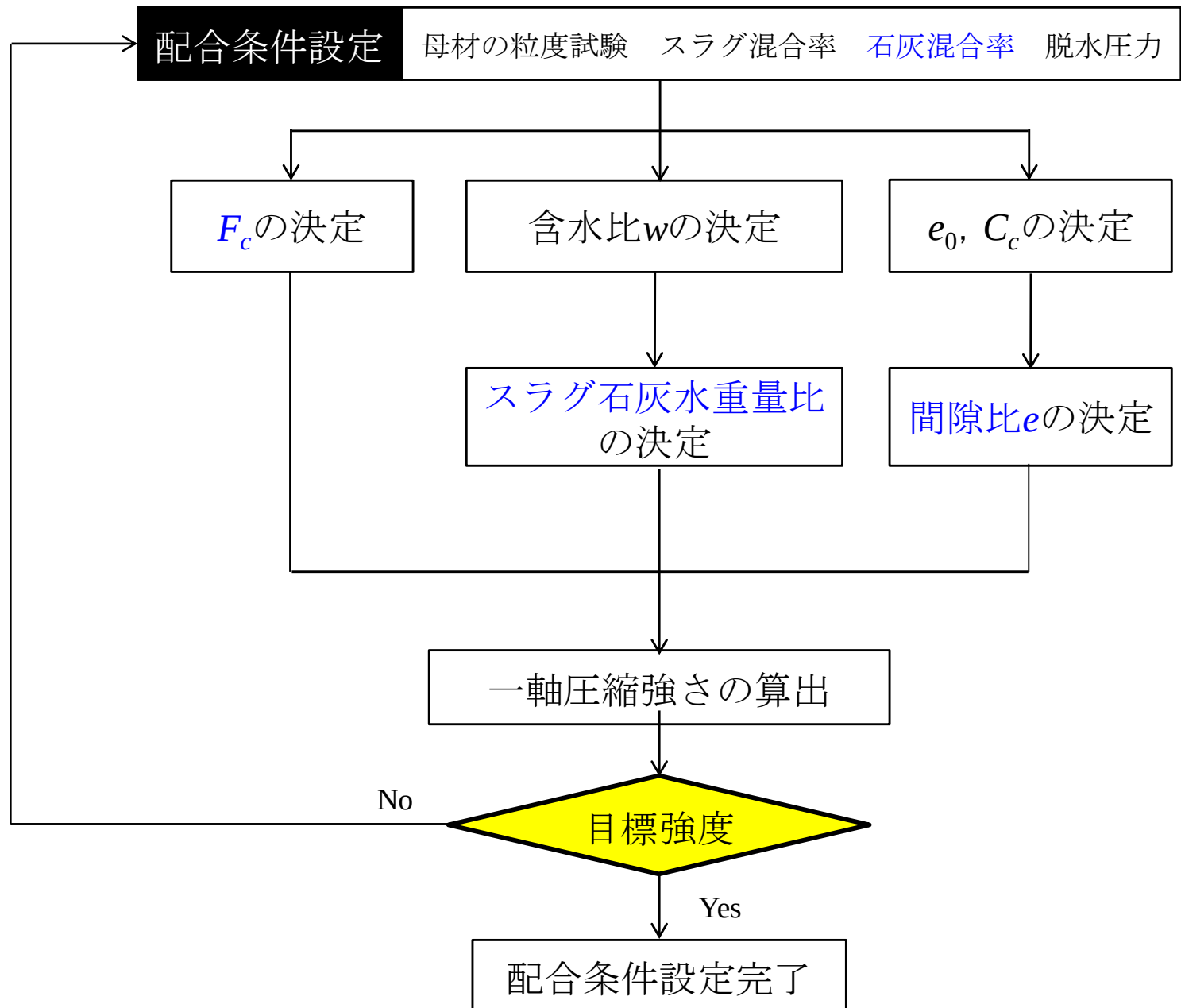
$$+ 0.0016 \times \text{石灰混合率}$$

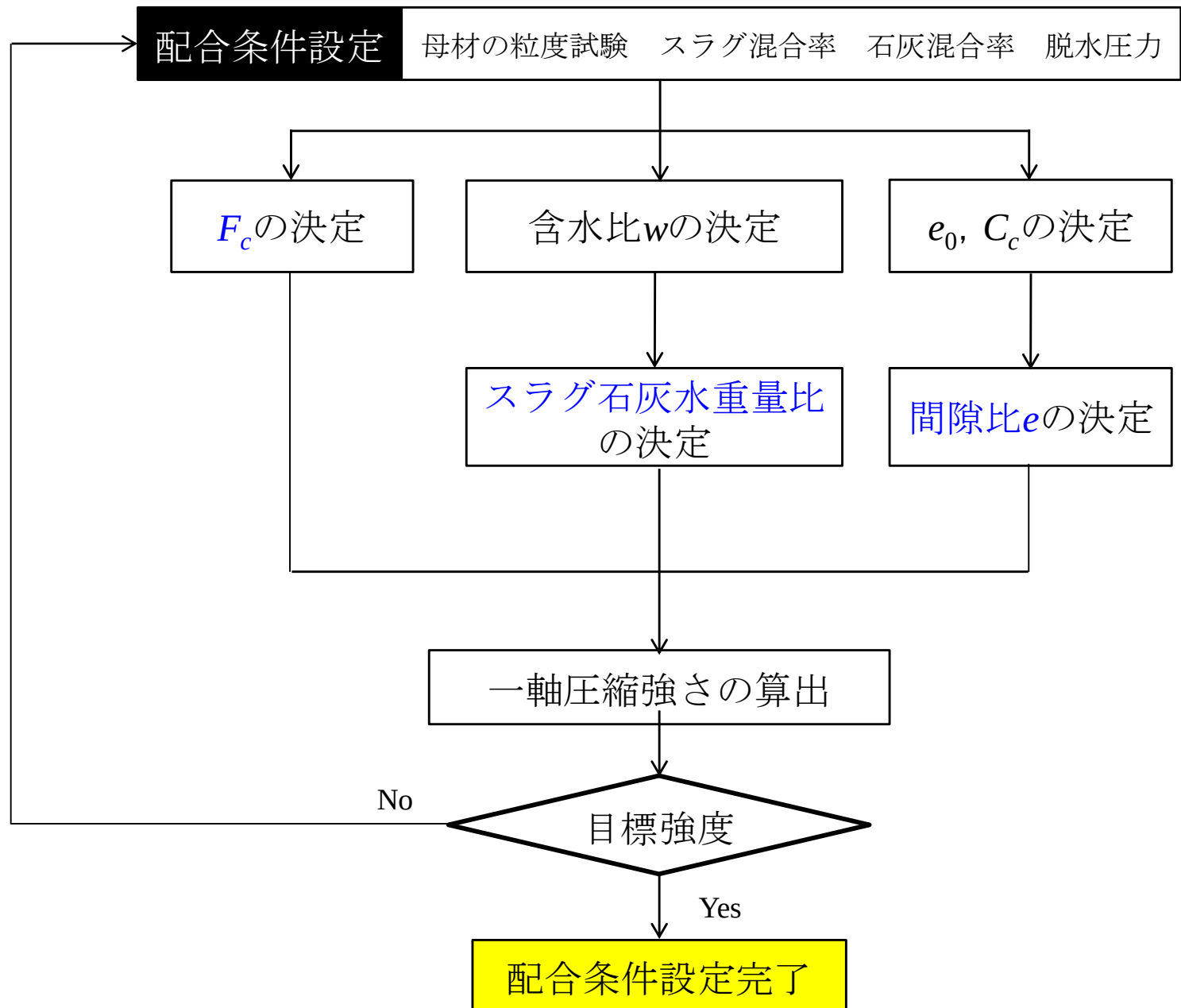
重相関 $R = 0.99$

- ・ 間隙比 e の決定

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

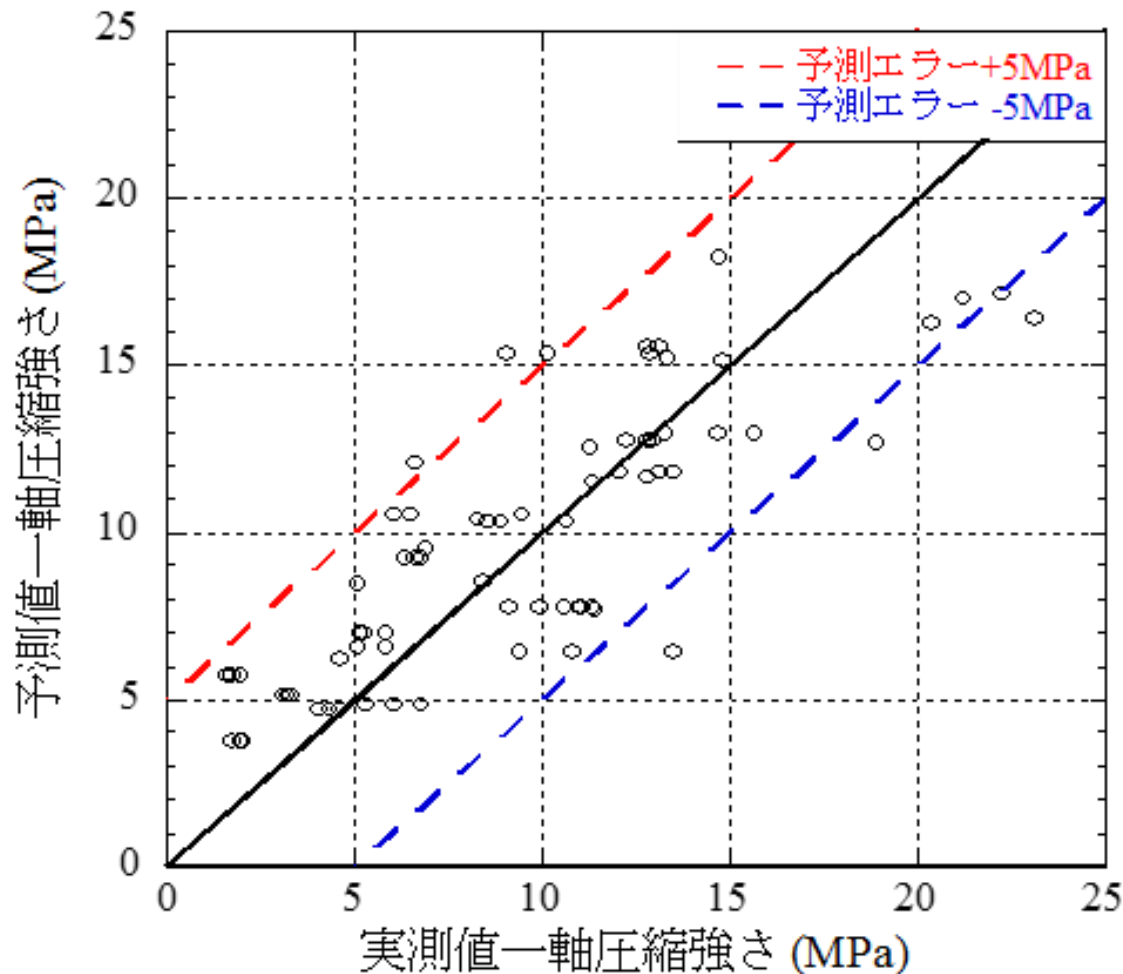






予測値と実測値の比較

- ・予測値と実測値の差がほぼ $\pm 5\text{MPa}$ 内に収まる。
- ・予測値と実測値の相関は約0.8。

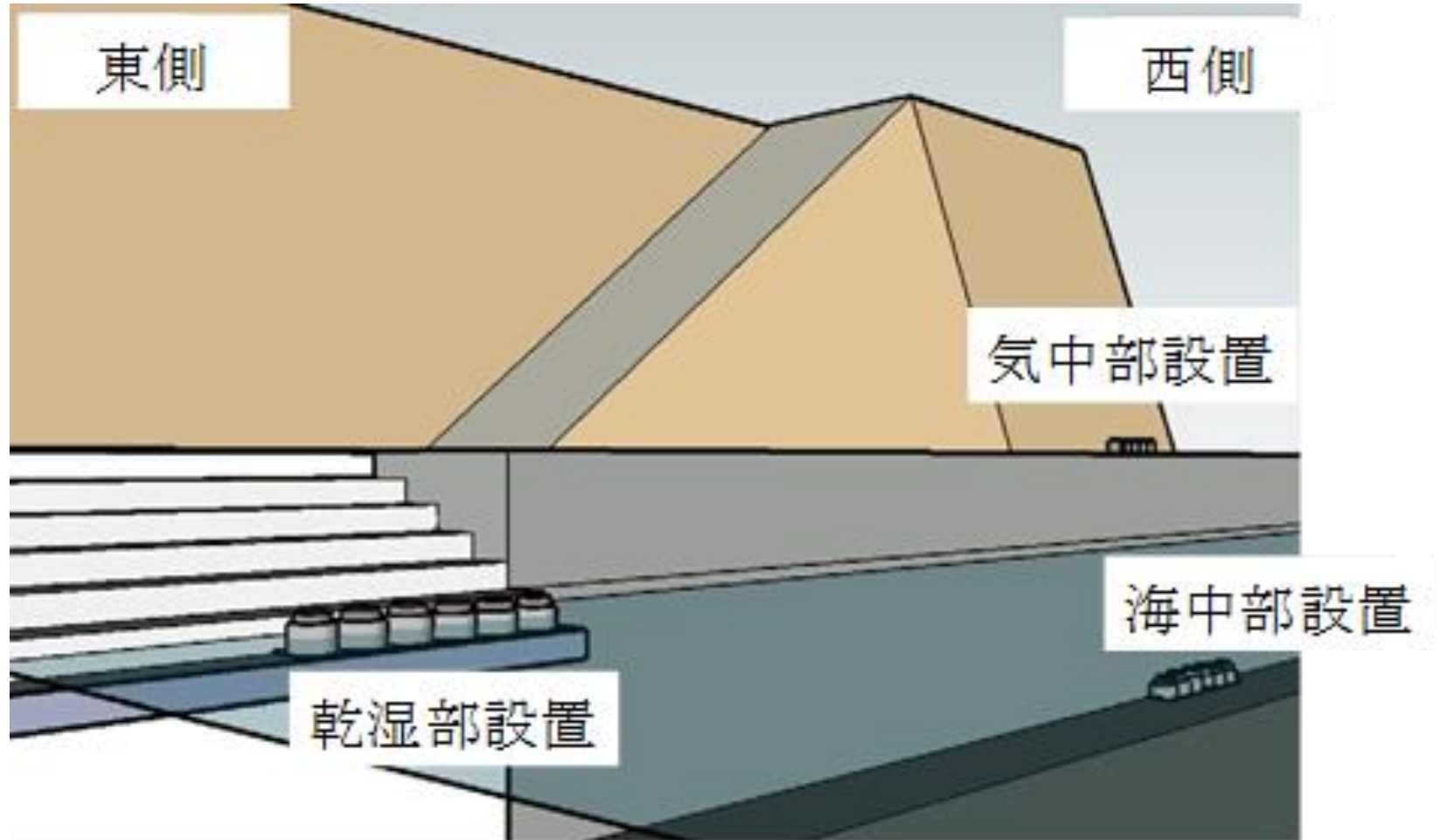


浚渫土ブロックの現地適応性 ～長期耐久性～

暴露実験実施場所

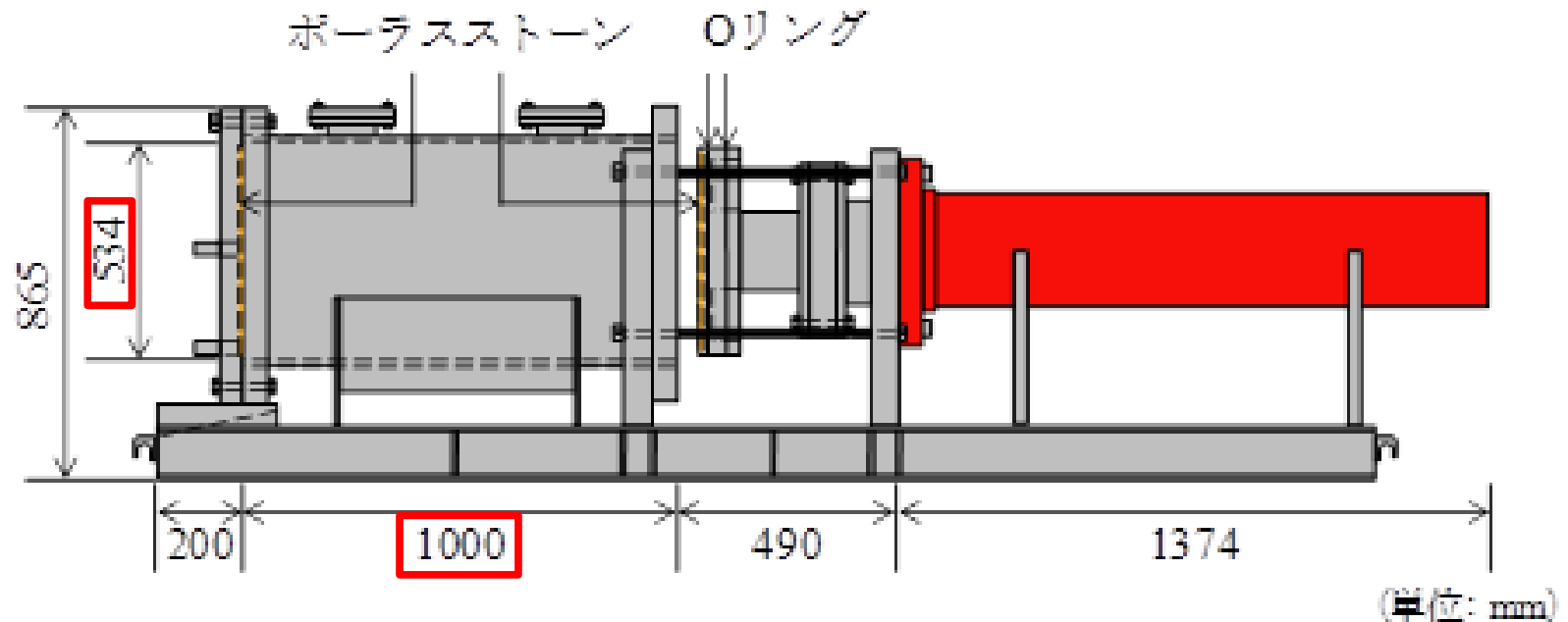


ブロックの設置位置



実験装置 大型脱水固化装置

試料充填部：内径53.4cm、高さ100cm



実験条件

母材	博多港土砂
固化材	高炉セメントB種
固化材添加率(%)	11, 22, 33
初期含水比(%)	60
荷重載荷方式	定圧載荷方式 2Pa: 30min → 5MPa: 300min or 脱水終了
排水条件	両面排水
暴露方法	気中, 乾湿, 海中
暴露期間(Months)	1, 3, 12, 41

暴露実験

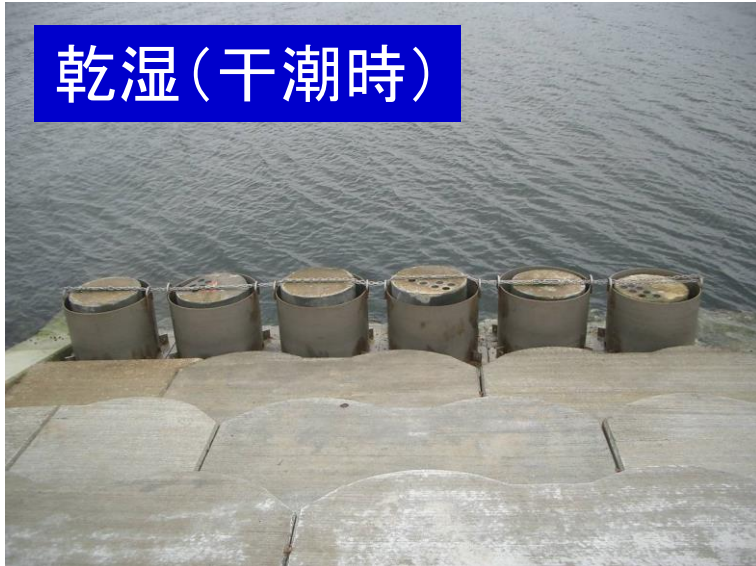
気中



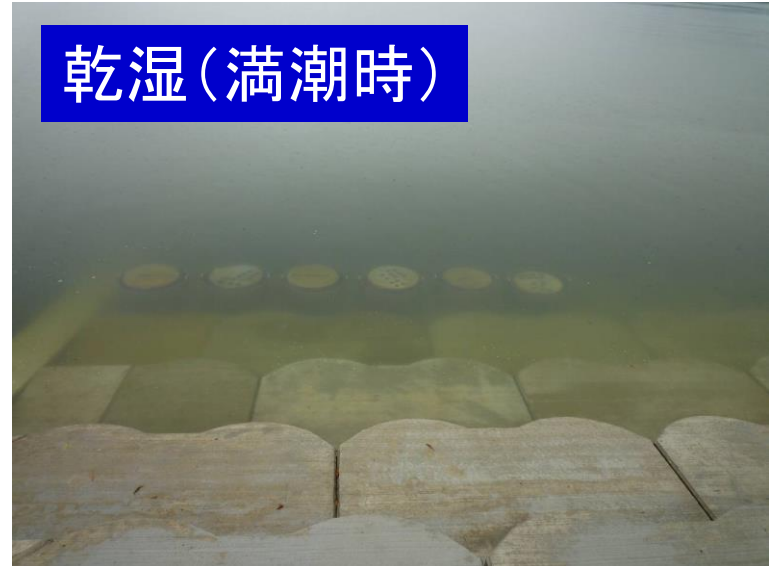
海中



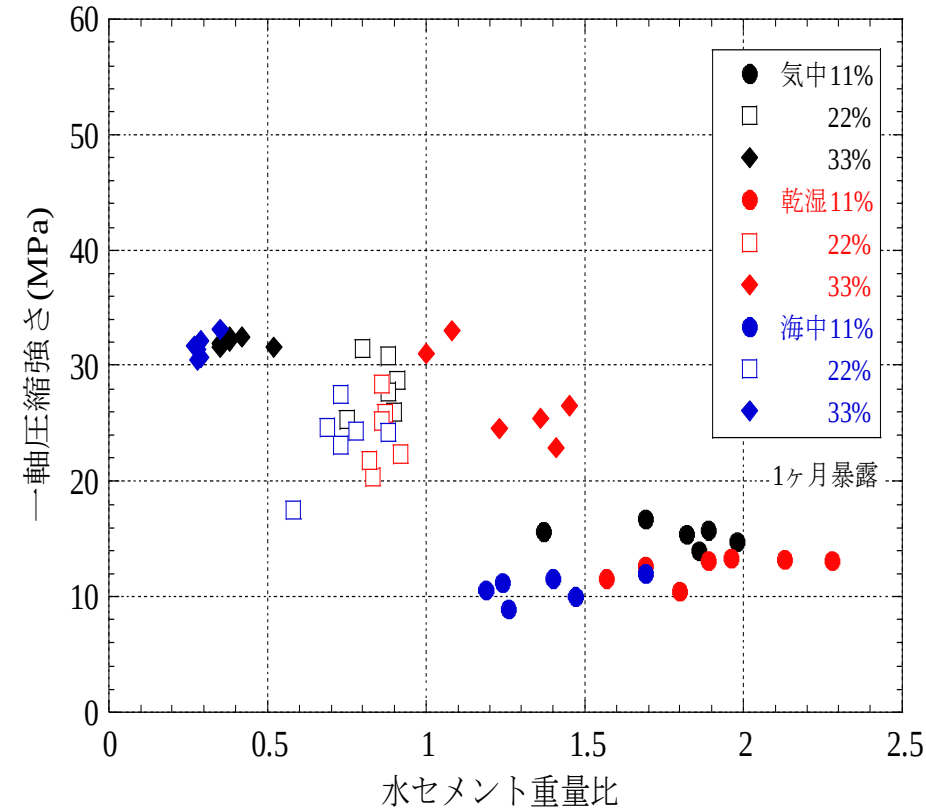
乾湿(干潮時)



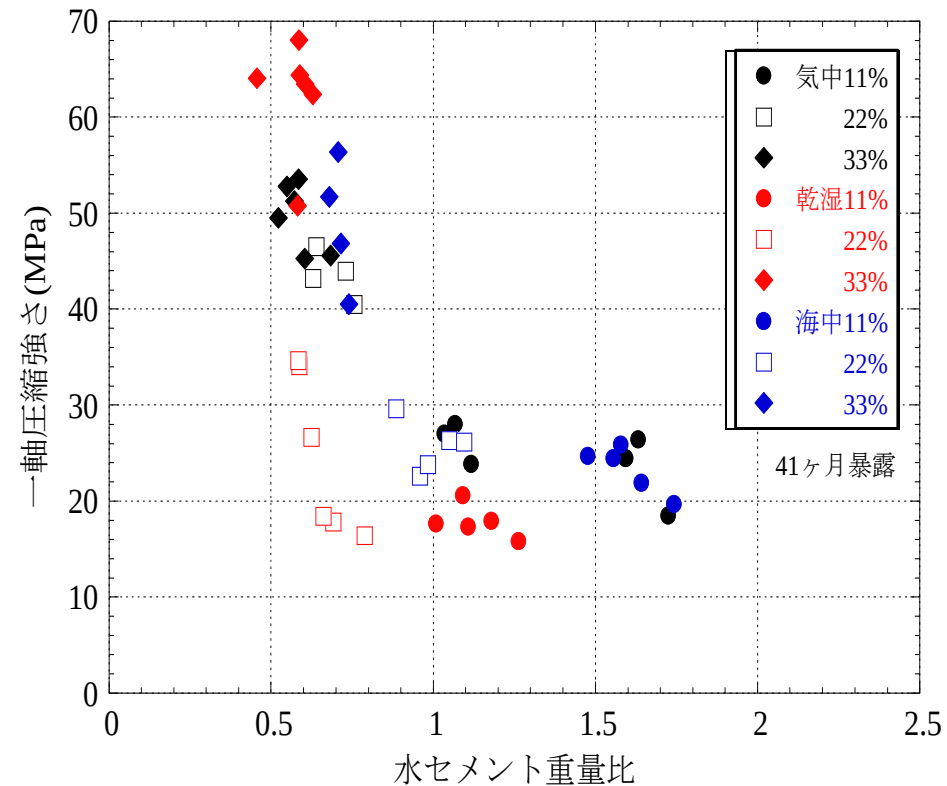
乾湿(満潮時)



水セメント重量比と一軸圧縮強さ

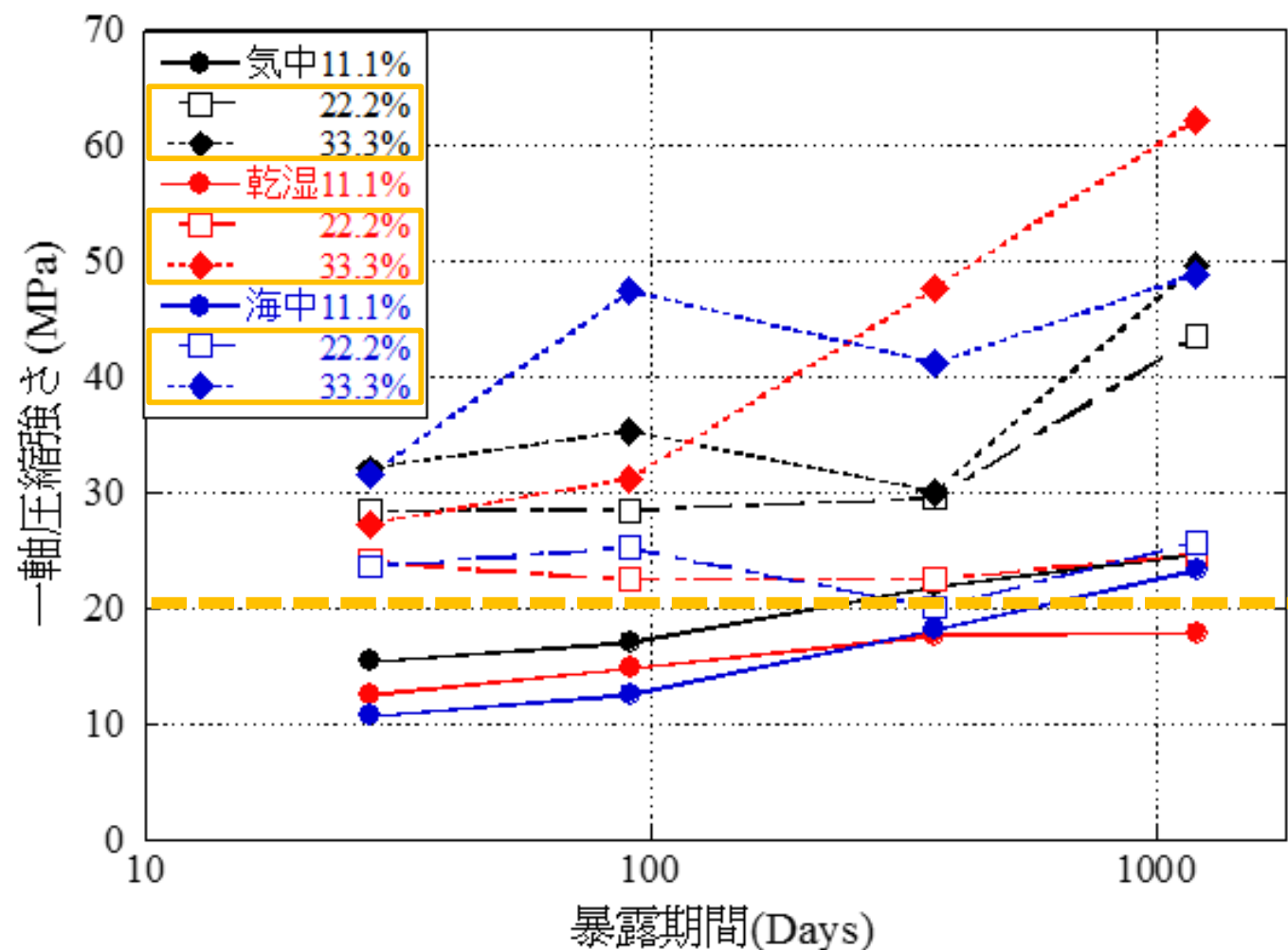


1ヶ月暴露



41ヶ月暴露

暴露期間と一軸圧縮強さ



浚渫土ブロックの現地適応性 ～生物付着～

調査状況

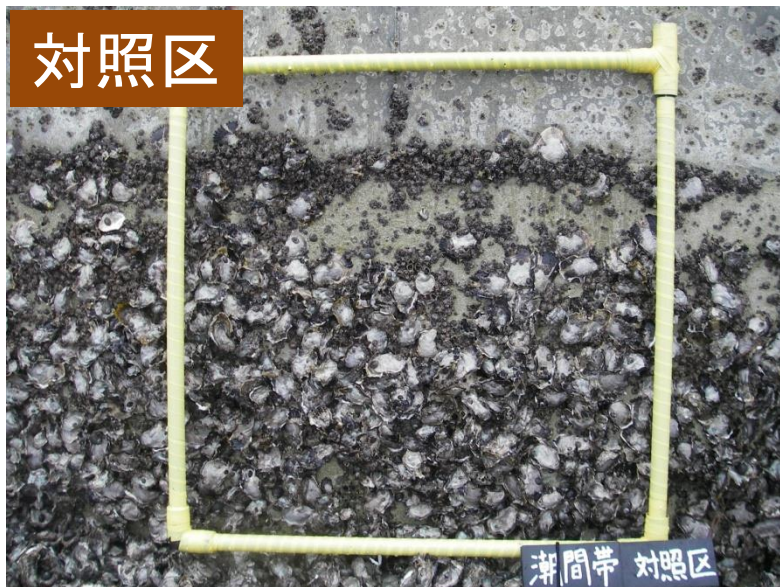
乾湿部



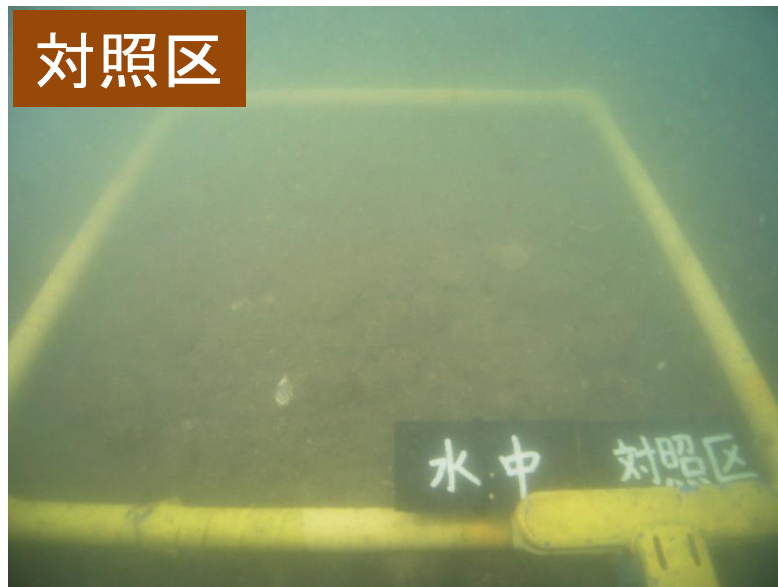
海中部



対照区



対照区

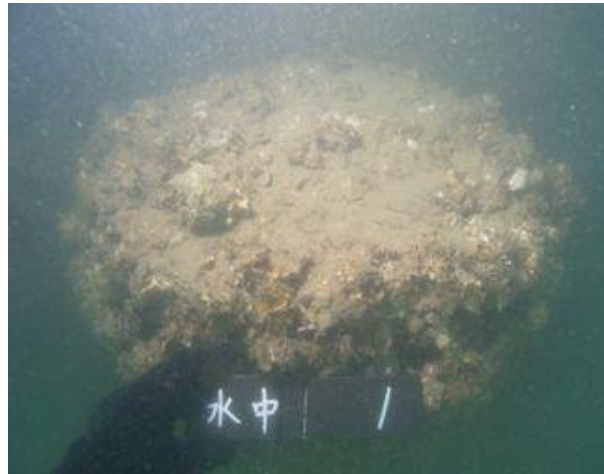


生物付着状況

乾湿部

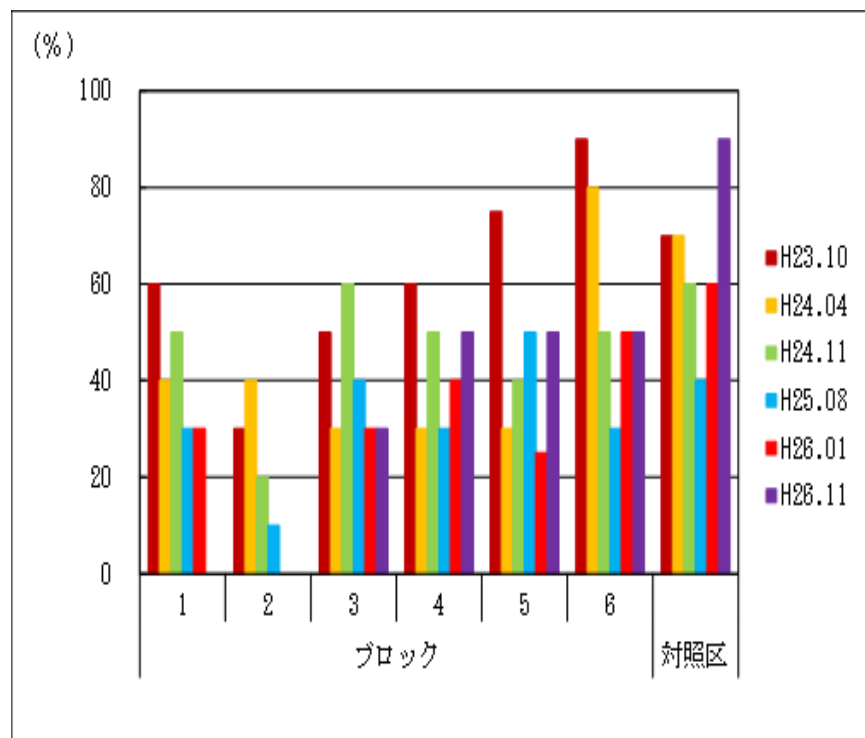
平成 26 年 1 月	付着状況	
	主な出現種	アラレタマキビ マガキ シロスジフジツボ

海中部

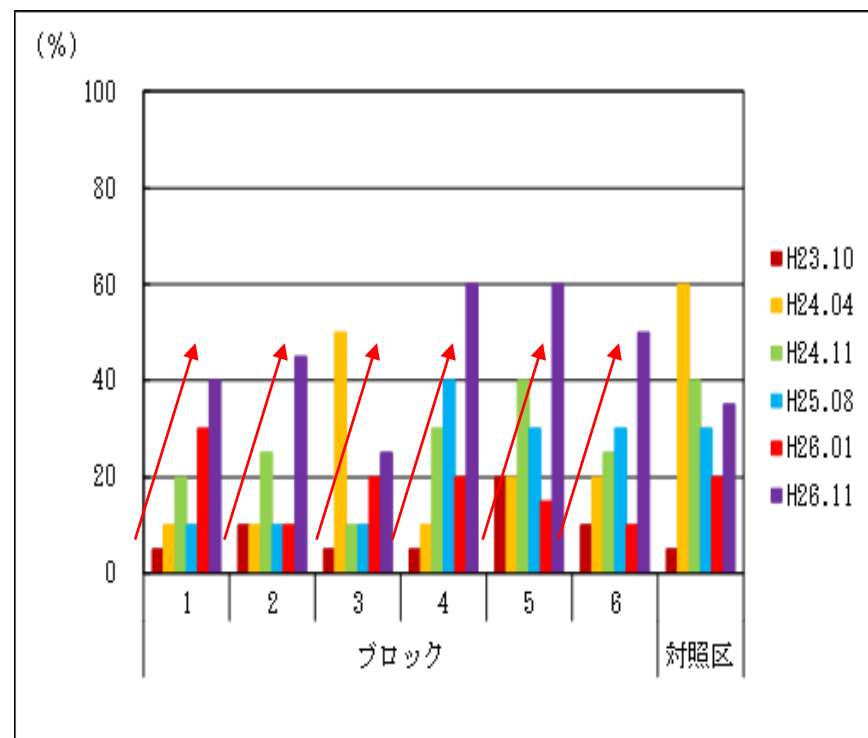
平成 26 年 11 月	付着状況	
	主な出現種	マガキ

被覆率の経年変化

乾湿部



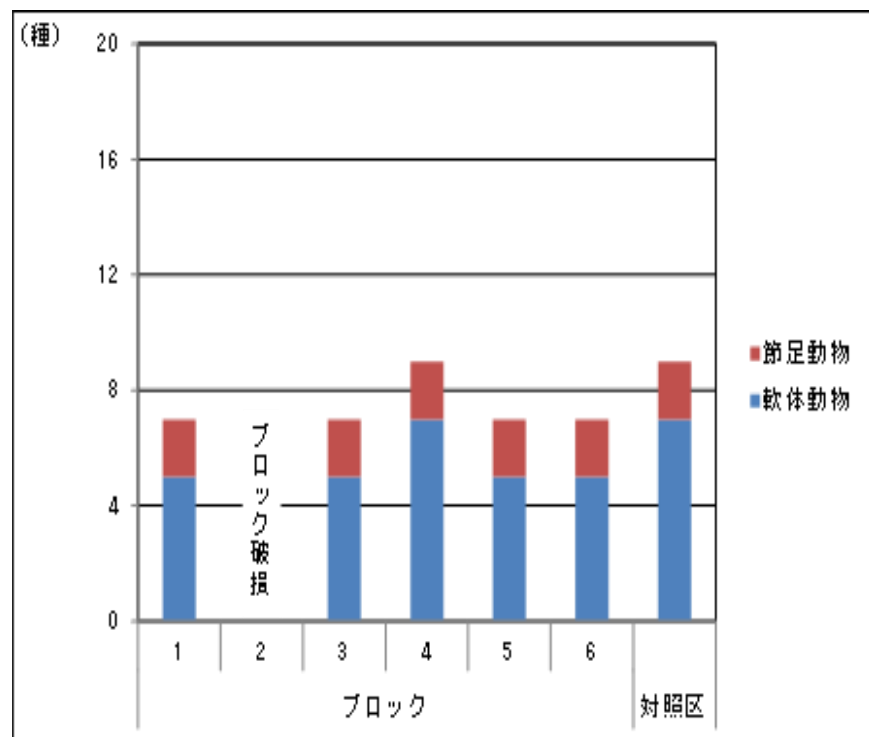
海中部



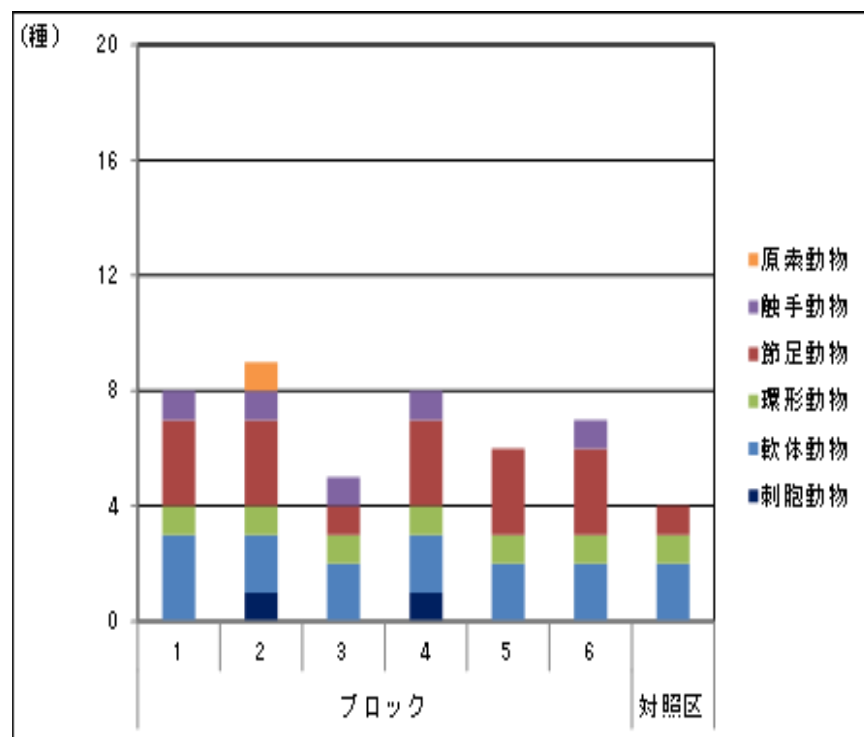
注) H26.11調査時、全てのブロックが転倒

動物の出現種数(H26.1)

乾湿暴露



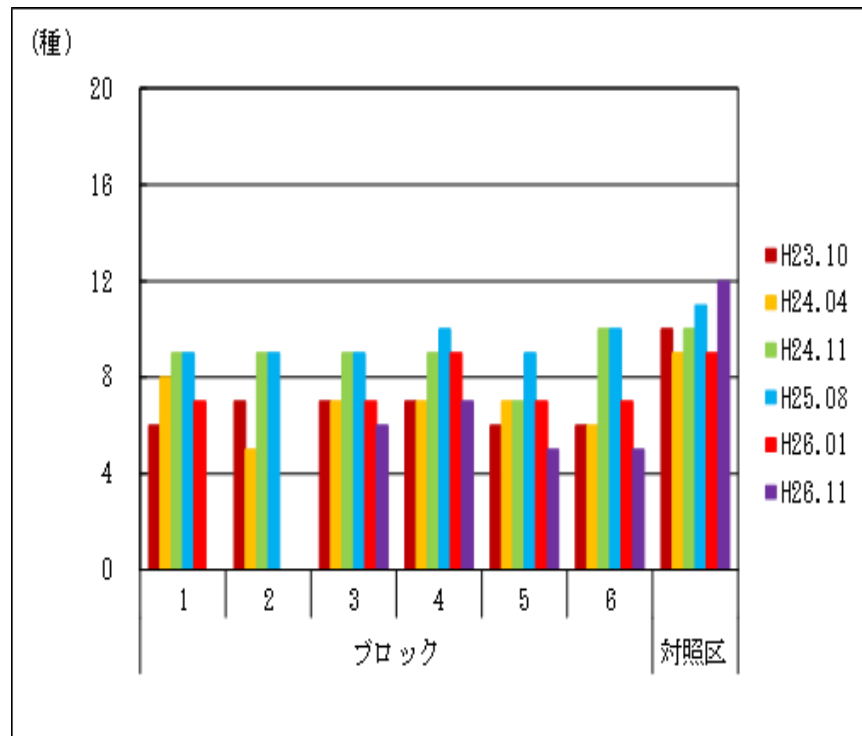
海中暴露



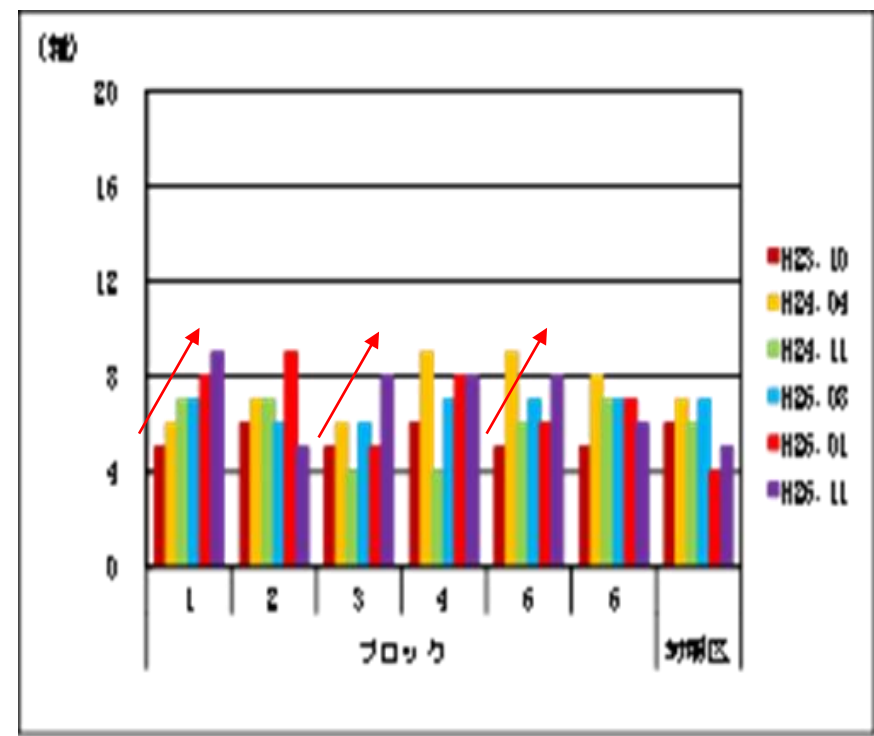
	乾湿暴露	海中暴露
節足動物	シロスジフジツボ	
軟体動物	マガキ、アラレマタキビ	マガキ
原索動物		シロボヤ

動物の出現種数の経年変化

乾湿部



海中部



注) H26.11調査時、全てのブロックが転倒

本研究のまとめ

浚渫土スラグ固化体の強度推定法

- スラグ石灰混合浚渫土の一軸圧縮強さを精度よく予測できる重回帰式を提案した。

浚渫土ブロックの現地適応性(耐久性・生物付着)

- 浚渫土ブロックの一軸圧縮強さは、暴露条件によらず12か月を過ぎると20MPaを超え、コンクリート相当の強度となる。
- 浚渫土ブロックの被覆率・動植物の出現種数はコンクリート材料と同様(海中部は増加傾向)であり、コンクリート製品と同様に使用可能である。