

コンクリート構造物の劣化対策と耐久設計

鹿児島大学学術研究院理工学域工学系
海洋土木工学専攻担当 教授

山口 明伸

1

主な内容

- ・乾式吹付け工法における施工性と品質評価手法
(日本コンクリート工学会九州支部 研究専門委員会)
- ・高温温泉環境下に位置する橋梁基礎杭の補修対策
- ・高アルカリ性環境下における垂鉛めっき鉄筋の防食性能

2

日本コンクリート工学会九州支部 研究専門委員会 乾式吹付け工法における施工性と品質評価手法 研究委員会

材料と工法・機材との相互作用の検討

＜「吹付け」工法、ノズル仕様、圧送システム＞

- ・乾式吹付け工法における「機材」と「材料」のそれぞれの特徴と相性
- ・品質に与える影響要因の整理(材料と機材の相性)

施工および品質を管理・評価する方法

＜影響要因の整理、新しい管理指標と水準、信頼性と経済性＞

- ・施工における品質管理と検査の検討と提案

3

乾式吹付け工法用材料の性能

乾式吹付け工法 = 補修・補強対策の手段

使用する材料（補修材料） = 各種要求性能を有することが必要

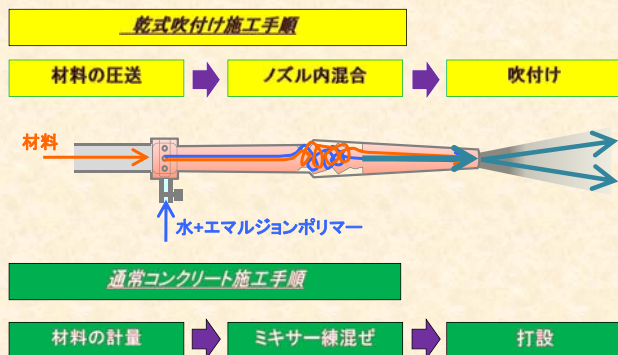
- ・劣化因子の遮蔽効果
- ・付着性の確保
- ・収縮抵抗性など

補修対策では、各機関が材料の要求性能を規定して使用の可否を判断している。

4

乾式吹付け工法用材料の性能 品質に与える影響

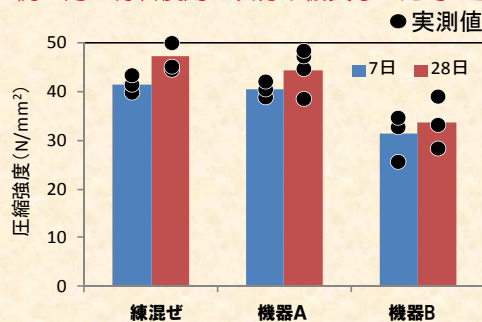
乾式吹付けの品質に与える要因



5

乾式吹付け工法用材料の性能 品質に与える影響

結果の一例：同一材料使用 吹付け機異なった時の圧縮強度



機器B：バラツキ大 かつ 平均強度小

原因：
粉体材料量・混合水量の変動、使用機器と材料のマッチング、使用機器の性能

6

本委員会で検討した試験

- 1) 水量と粉体量の変動が圧縮強度に与える影響
- 2) ノズル形状の違いが圧縮強度と材料の混合性に与える影響
- 3) ノズル先端と対象構造物との吹付け距離が圧縮強度に与える影響

＜試験で使用了材料;プレミックス材料＞

粉体密度 : 2.75g/cm³
 混合水 : アクリル系のポリマーエマルジョン
 W/B : 31% (W:ポリマーエマルジョン水, B:結合材)

7

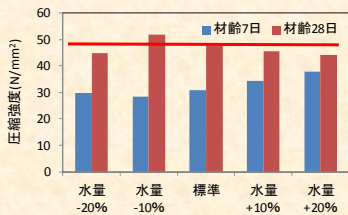
1) 水量と粉体量の変動が圧縮強度に与える影響

「練混ぜ」試験で模擬
(練混ぜ試験・・・モルタルミキサー、テーブルバイブレータ)

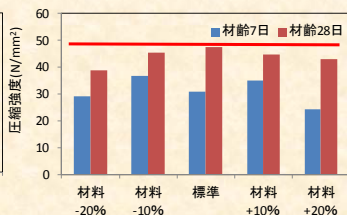


8

水量の変動



材料の変動



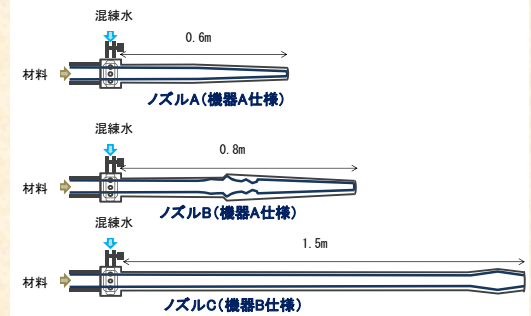
水量: ±20%で約1割強度低下

材料: ±10%で約1割強度低下

今回使用了材料では、±10%程度の材料変動
 ⇒十分に混合されていれば、強度に与える影響は小さい。
 ⇒他の吹付け条件に起因するところが大きい。

9

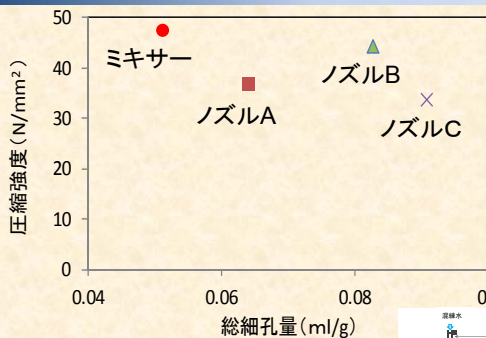
2) ノズル形状の違いが圧縮強度と材料の混合性に与える影響



吹付け距離 : 1m

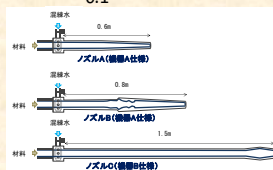
測定 : 圧縮強度, 細孔径空隙(水銀圧入)

10

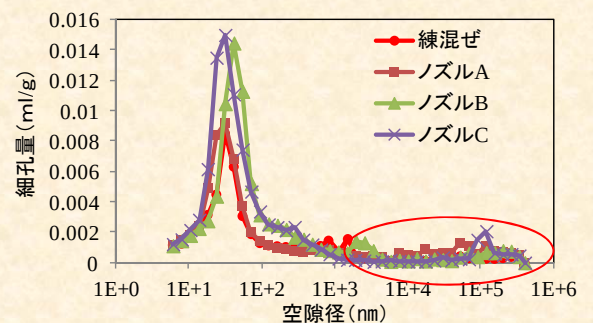


ノズルB:ミキサーとほぼ同等

ノズルA,C:強度低下



11

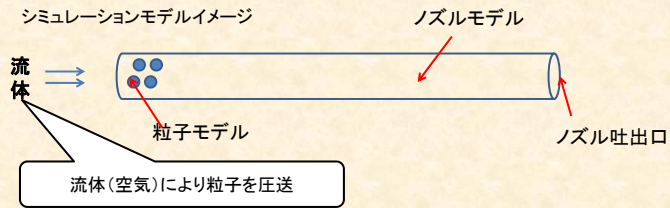


ノズルA,C: μm以上の空隙率が
 練混ぜ(ミキサー)とノズルBと比較して多い

⇒ノズル形状による混合性が影響

12

<個別要素法を用いて混合性を解析>



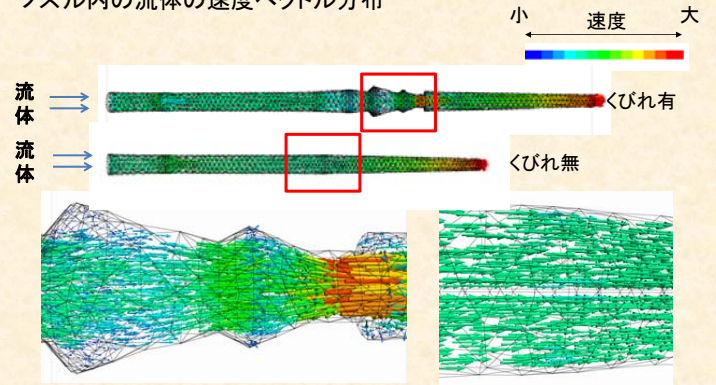
ノズルモデル

くびれ有 直径入口37mm, 吐出口22mm

くびれ無 直径入口37mm, 吐出口22mm

13

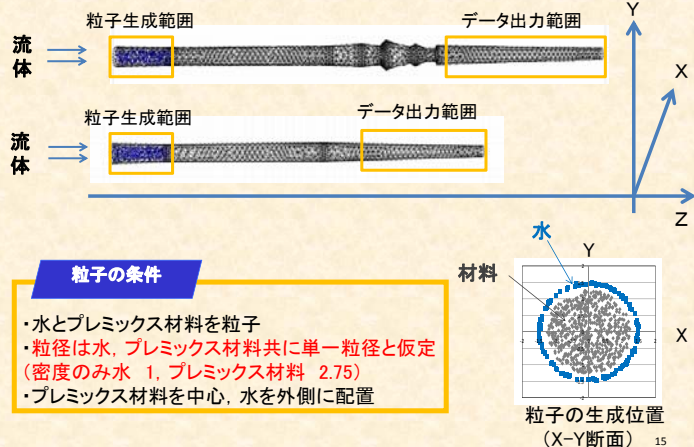
ノズル内の流体の速度ベクトル分布



ノズルの形状が変化することにより、
形状変化部分で速度分布および速度の方向にばらつきが確認

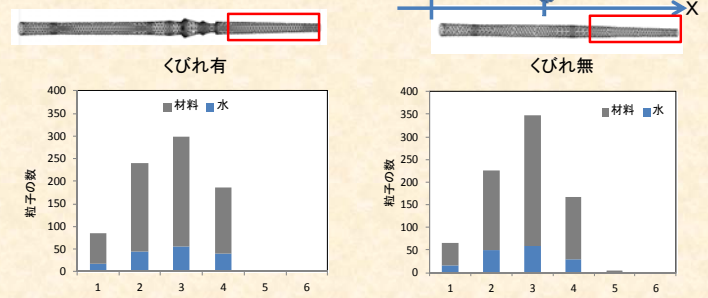
14

ノズル内の流体の速度ベクトル分布



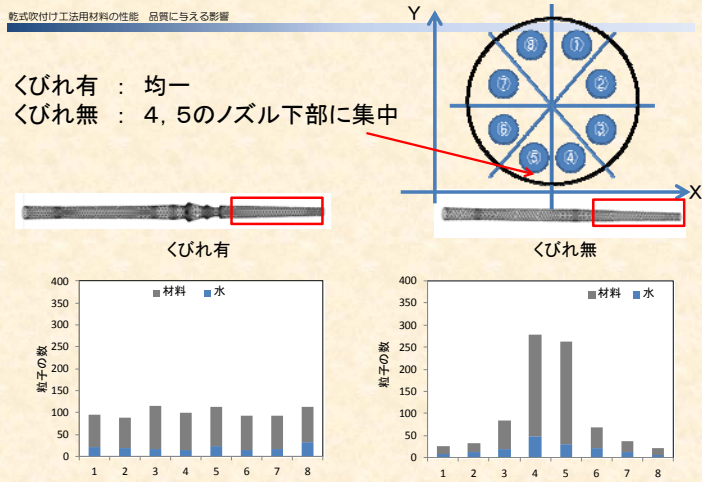
15

ノズルによる大きな違いなし
⇒1~4の中央部にあつまっている。



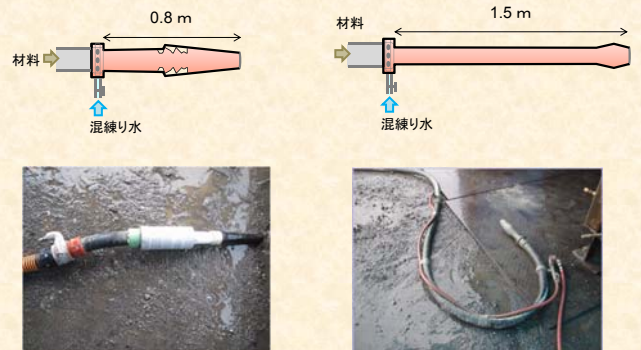
16

くびれ有 : 均一
くびれ無 : 4, 5のノズル下部に集中

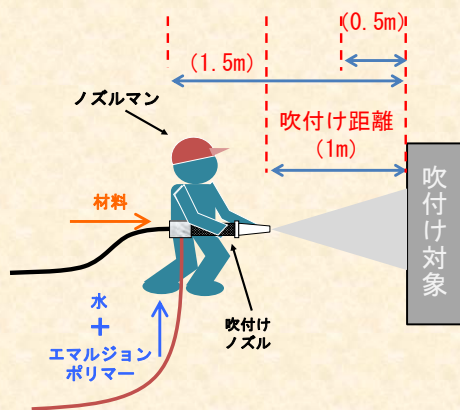


17

3) ノズル先端と対象構造物との吹付け距離が圧縮強度に与える影響

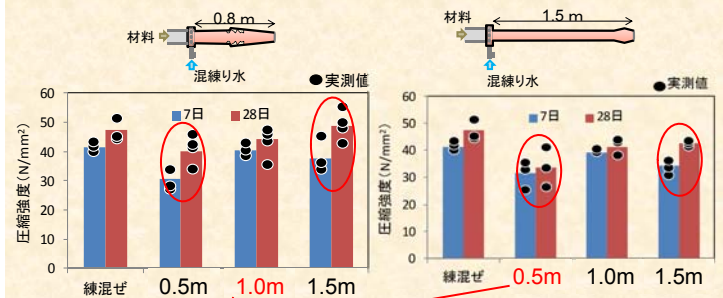


18



吹付け距離を変更して試験を実施

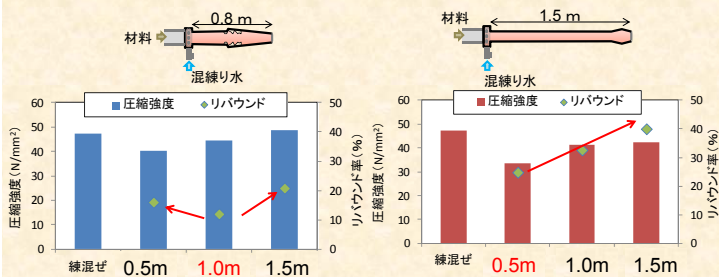
19



熟練ノズルマンが最適と判断した距離

短い : 吹付け圧力大, リバウンド, 空気量が大
長い : 到達圧力小さくなり、分散が大きくなる

20



熟練ノズルマンの判断した距離 = リバウンドが小さい

ノズルマンの感覚は、最適な吹付け距離の一つの参考になるが、ノズルマンは、使用機器と材料に応じた最適な距離を把握することが重要である。

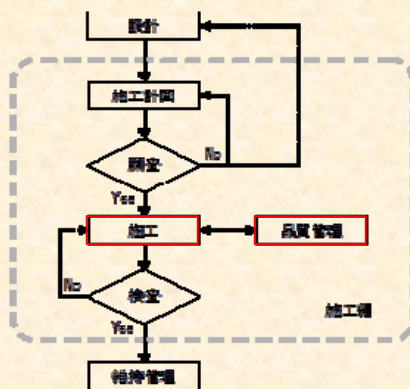
21

施工管理と品質検査の検討と提案

22

施工管理と品質検査の検討と提案

2012年制定 コンクリート標準示方書【施工編】



23

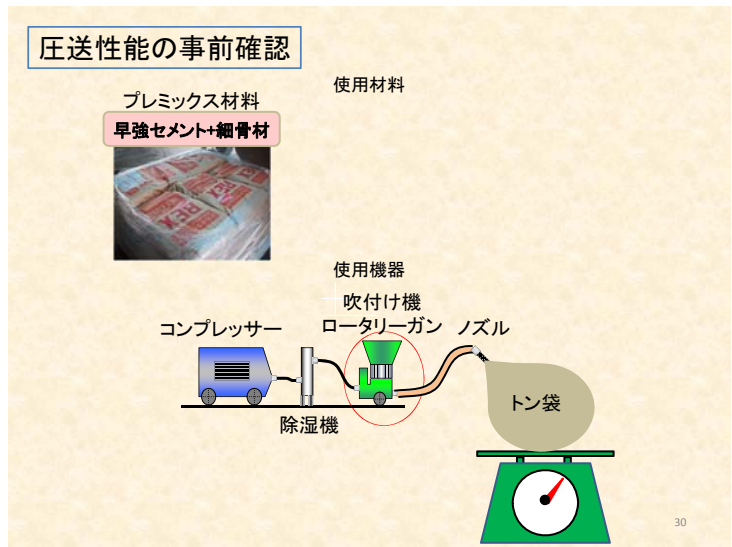
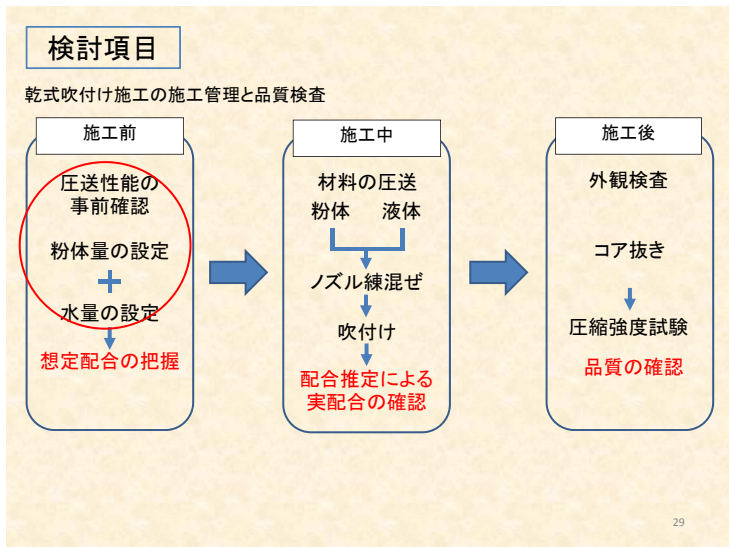
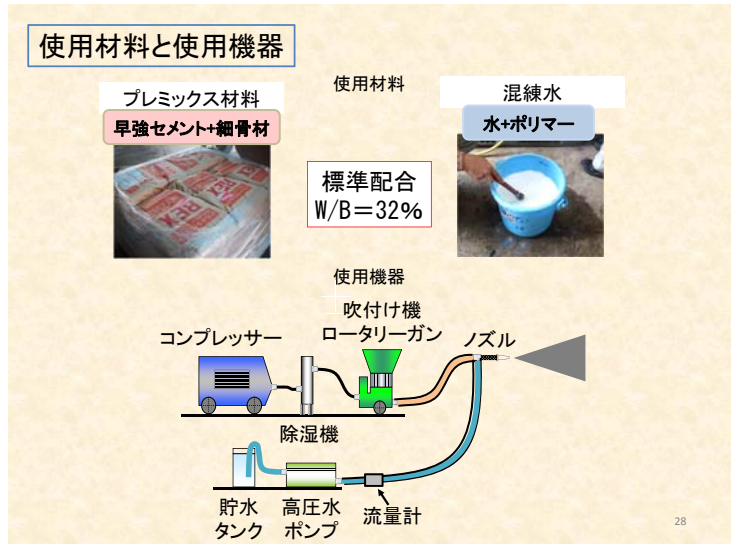
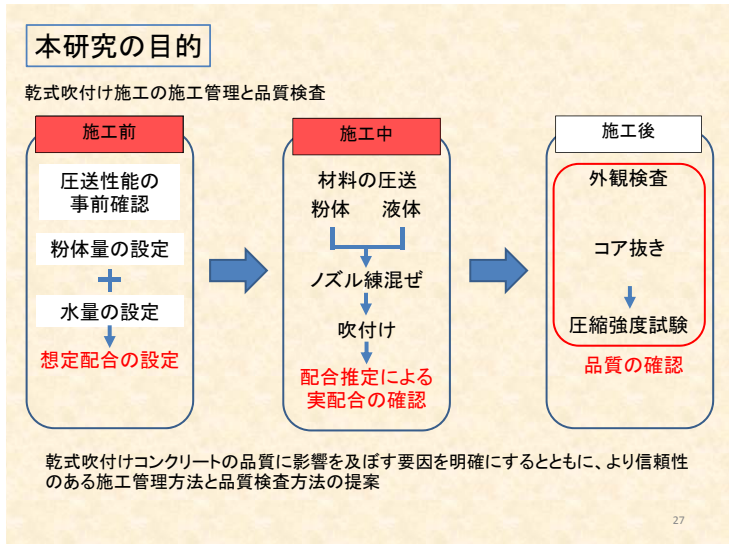
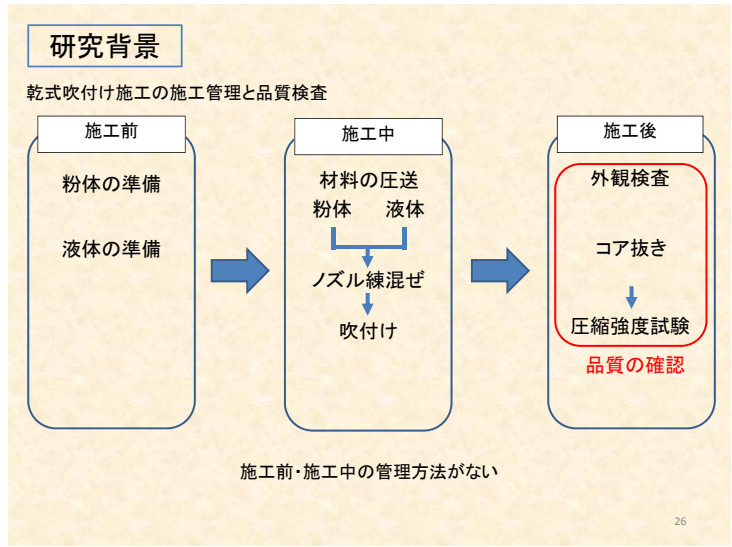
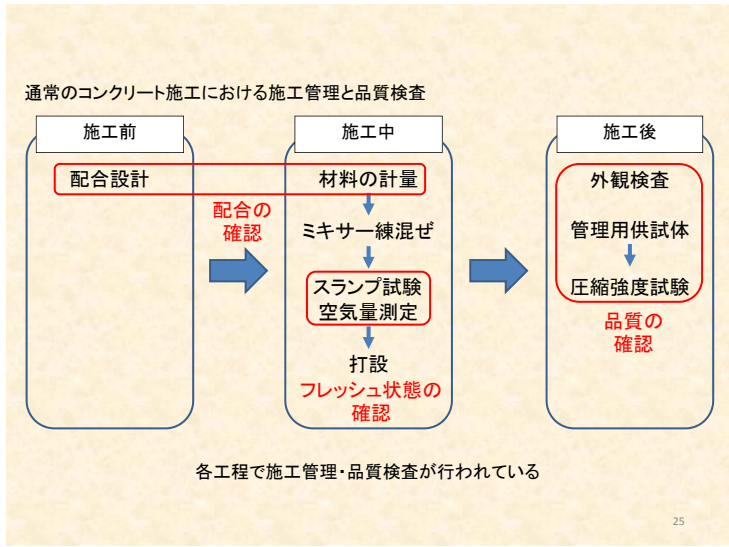
- 品質管理—使用の目的に合致したコンクリート構造物を経済的に構築するために、工事のあらゆる段階で行う品質確保のための行為。

施工における品質管理(施工管理)

- 検査—品質が判定基準に適合しているか否かを判定する行為。

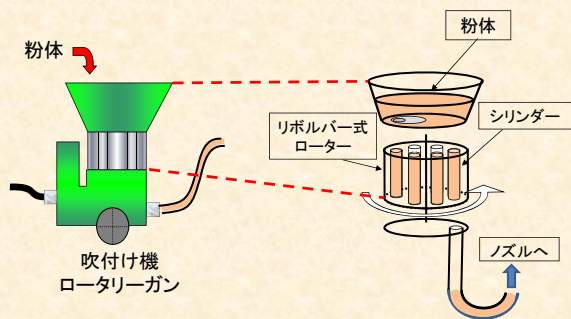
品質検査

24



圧送性能の事前確認

ロータリーガンの仕組み

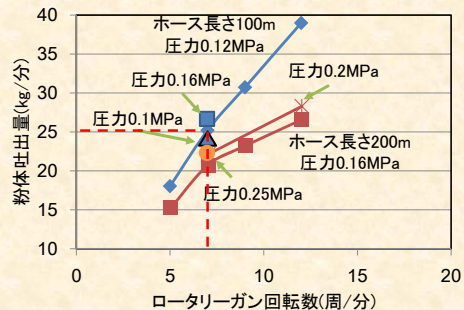


ロータリーガンの回転数、圧送距離および圧力を変化させノズル先端から排出される粉体量の確認を行った。

31

圧送性能の事前確認

ロータリーガン回転数と圧力および吐出量の関係

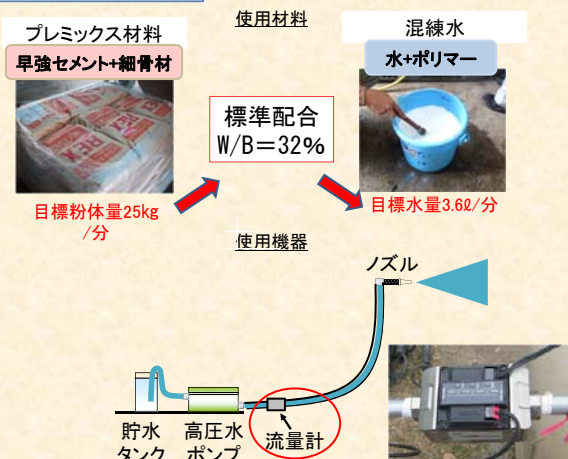


回転数の増加に伴い、粉体吐出量も増加する

材料と機器に応じた事前確認を行うことで粉体量を計算できる

32

圧送性能の事前確認



33

施工管理と品質検査に受けた実験結果

使用ポンプの種類と安定性の検討



ブランジャー式



ダイヤフラム式



スネーク式

試験：検出精度を確認したデジタル流量計を用いて安定性を評価
1秒ごとに流量を測定

34

施工管理と品質検査に受けた実験結果

(1) ブランジャー式ポンプ

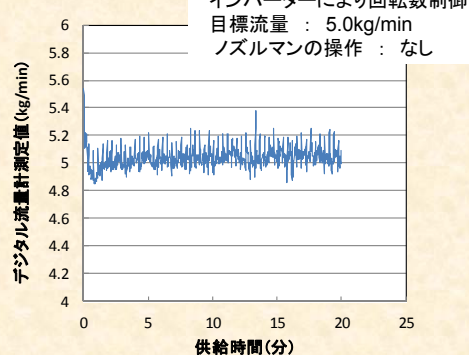


圧力上昇させると流量が一時的に上昇し、その後低減する
⇒ 不安定領域は、ノズルマンが調整することになる。

35

施工管理と品質検査に受けた実験結果

(2) ダイヤフラム式ポンプ



インバーターにより回転数制御
目標流量：5.0kg/min
ノズルマンの操作：なし
目標流量に対して、4.9～5.2kg/minで安定
⇒ ノズルマン操作がなくなるため、混合水量の差が小さくなる。

36

(3) スネーク式ポンプ

インバーターにより制御
目標流量 : 5.0kg/min
圧送圧力 : 0.47 ~ 1.00MPa
ノズルマンの操作 : なし



目標流量に対して、4.9~5.1kg/minで安定
⇒ダイヤフラム式と比較しても精度が向上

37

コスト比較



低 ← コスト → 高

性能とコストは比例
ポンプ性能が向上 = ノズルマンの負担低減

38

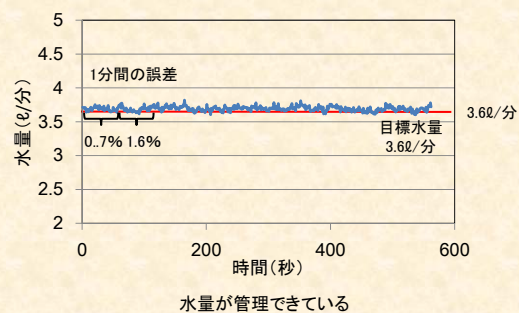
圧送性能の事前確認



39

圧送性能の事前確認

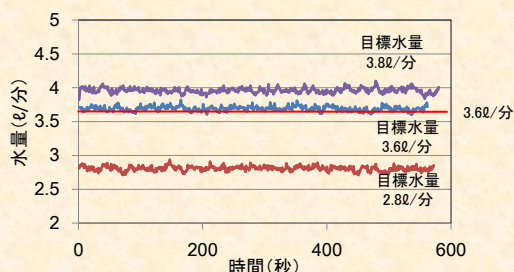
水量の経時変化



40

圧送性能の事前確認

水量の経時変化



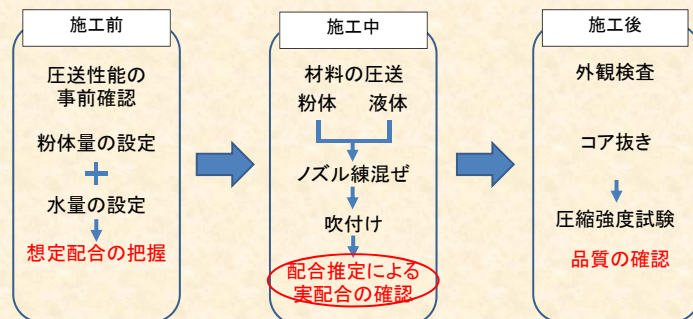
水量が管理できている

目標水量が変わっても管理できる

41

検討項目

乾式吹付け施工の施工管理と品質検査

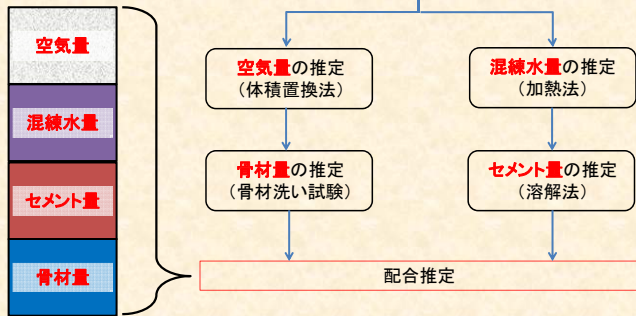


42

配合推定

配合推定概要

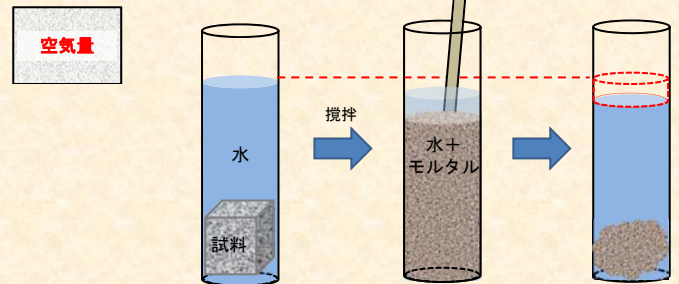
吹付けコンクリート
(吹付け直後)



43

配合推定

体積置換法 (空気量の測定)

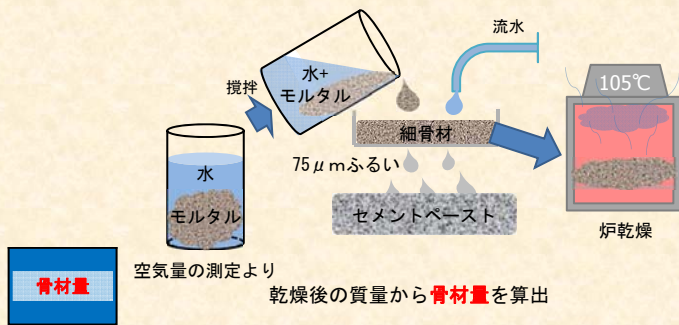


攪拌による体積減少量から**空気量**を算出

44

配合推定

骨材洗い試験(骨材量の推定)



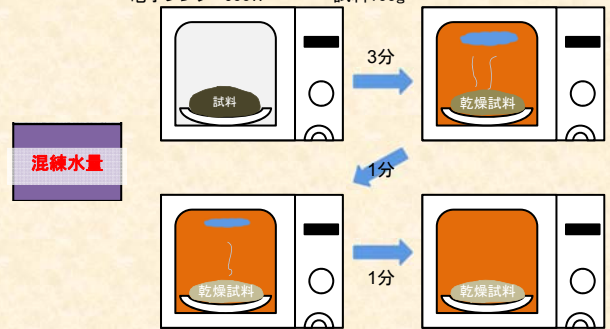
空気量の測定より
乾燥後の質量から**骨材量**を算出

45

配合推定

加熱法(混練水量の推定)

電子レンジ 600W 試料100g

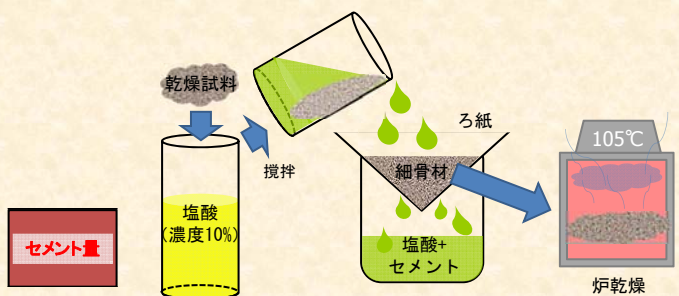


重量の変動がなくなるまで加熱し
乾燥による質量減少量から**混練水量**を算出

46

配合推定

溶解法(セメント量の推定)

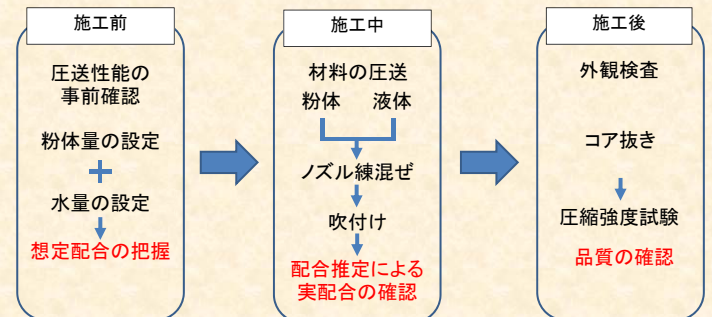


乾燥試料の重量 - 乾燥後の細骨材の重量 = **セメント量**

47

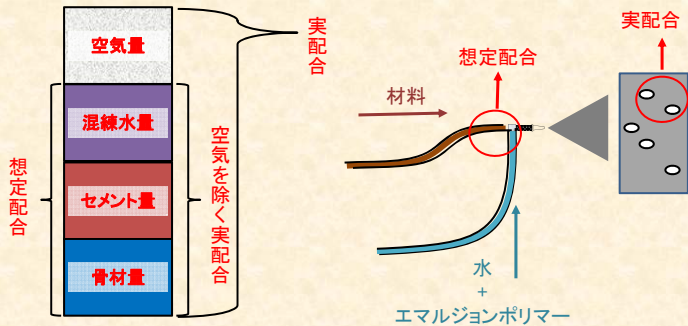
検討項目

乾式吹付け施工の施工管理と品質検査



48

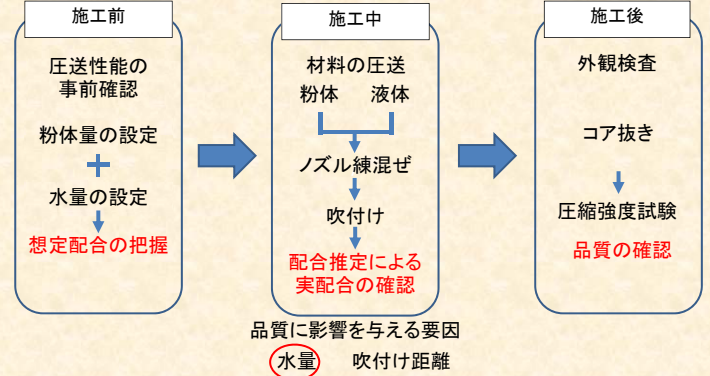
想定配合と実配合



49

検討項目

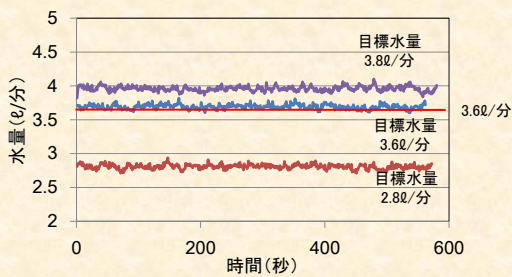
乾式吹付け施工の施工管理と品質検査



50

水量の変動

水量の経時変化

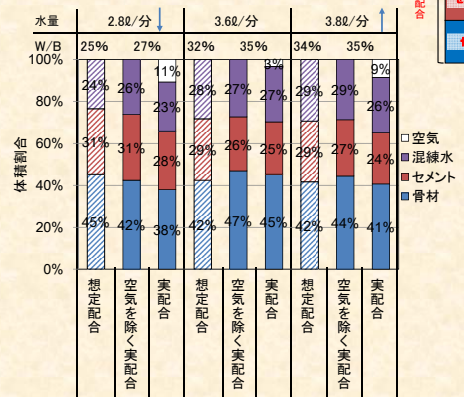


粉体量をそのままに水量3.6ℓ/minを基準とし、
3水準に変化させて吹付けを行った

51

水量の変動

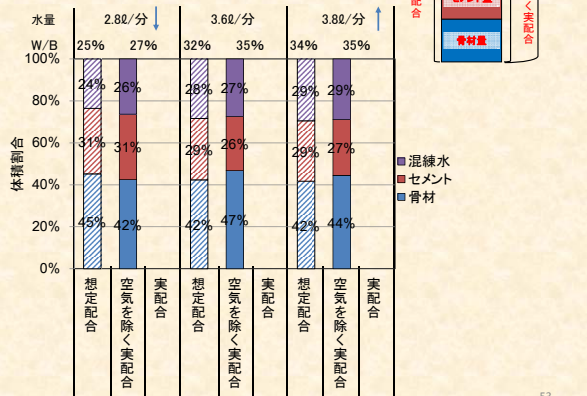
想定配合と実配合の比較
(水量の変動)



52

水量の変動

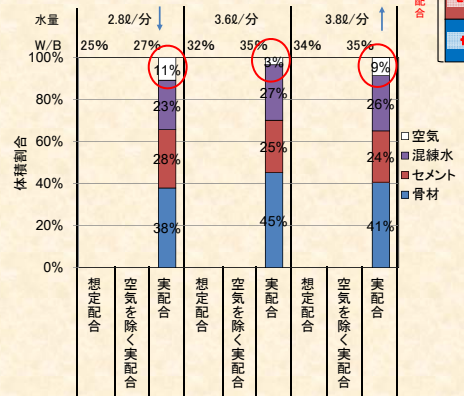
想定配合と実配合の比較
(水量の変動)



53

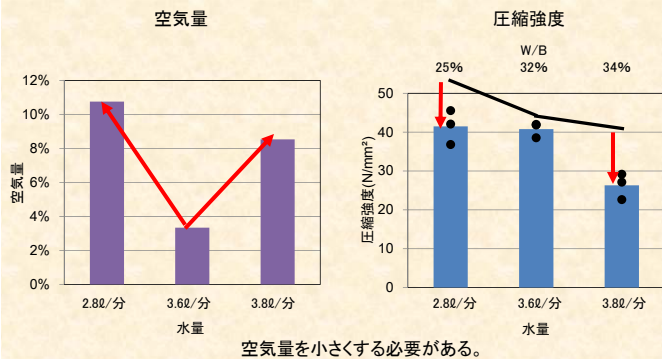
水量の変動

想定配合と実配合の比較
(水量の変動)



54

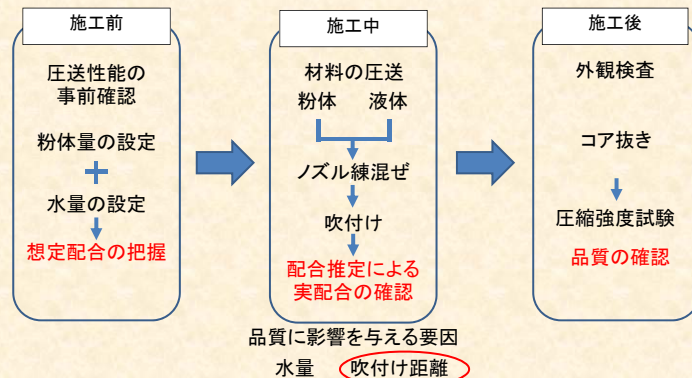
水量の変動



55

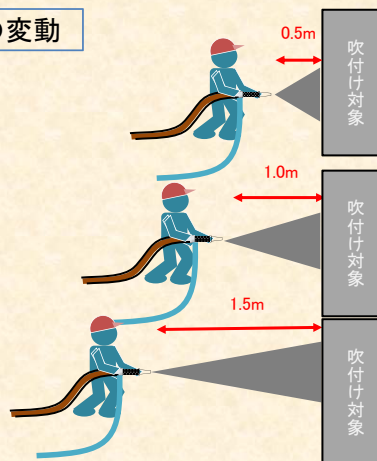
検討項目

乾式吹付け施工の施工管理と品質検査



56

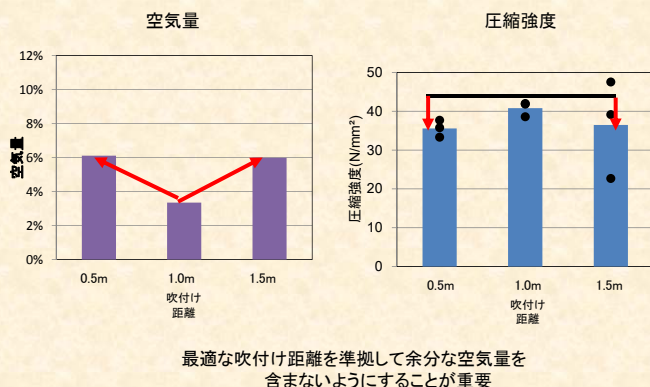
吹付け距離の変動



吹付け距離1.0mを基準とし、3水準に変化させた

57

吹付け距離の変動



58

供試体の寸法



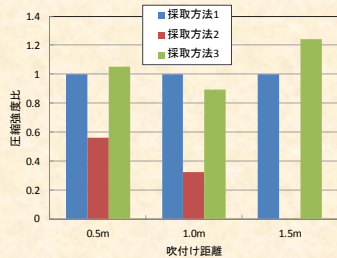
採取方法1



採取方法2



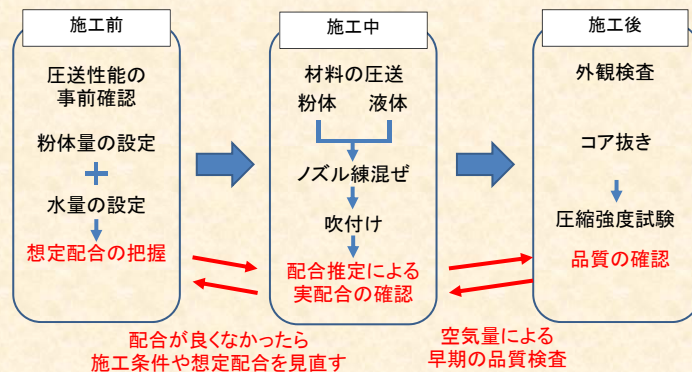
採取方法3



59

まとめ

乾式吹付け施工の施工管理と品質検査



60

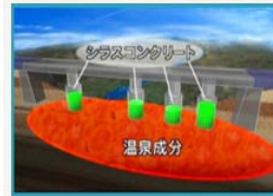
＜今後の課題＞

- 更なる精度向上を目指した管理手法の確立
⇒本委員会で品質検査・施工管理を提案
更に簡便で確実な手段の確立が求められる。
- 狭い作業空間における吹付け方法の確立
⇒吹付け距離が近すぎると材料が吹き飛ばされる
この対策も必要である。（施工現場へのマッチ）
- ノズルマンの育成
⇒最終的には、ノズルマンが施工
施工システムを提供する側での十分な教育が必要
（ノズルマン検定試験など）

乾式吹付け工法が補修・補強対策の手段として
十分にその機能を発揮することを祈念する。

61

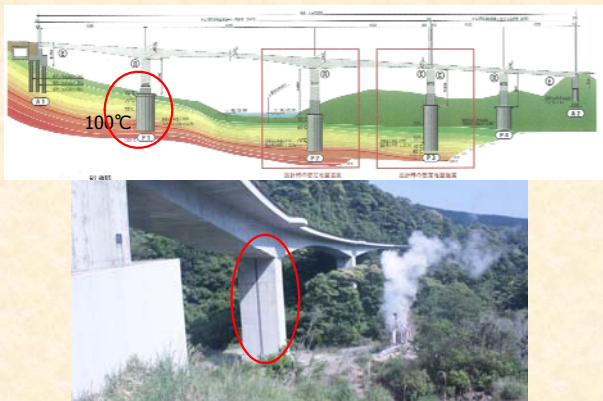
高温温泉環境下に位置する橋梁基礎杭の 補修対策に関する研究



鹿児島大学大学院 理工学研究科
海洋土木工学専攻
博士課程前期 2年
BUI QUANG HAO

研究背景

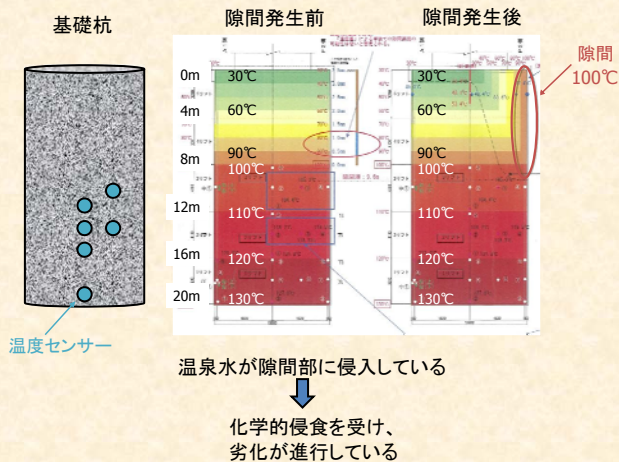
霧島市の丸尾滝橋は100℃を超える高温温泉環境にあるため、
橋脚の基礎部分に国内で初めてシラスコンクリートが使用された



研究背景



基礎杭の想定温度分布



研究目的

摩擦による側面支持力の回復

高温で、且つ、温泉水中の環境で隙間部を充填し、基礎杭と一体化させる必要がある

	注入工法	電着工法
特徴	材料を隙間に注入し、躯体と一体化させる	電解液(海水)に含まれる Ca^{2+} 、 Mg^{2+} を電氣的に躯体に吸着させ隙間を埋める
補修への課題	高分子系材料 水中で接着性が落ちる	セメント系材料 高温で早く硬化し、水中に材料が分散しやすい 高温で、温泉水中の環境で検討実績がない

橋梁基礎杭の補修対策を提案する

ひび割れ注入工法による補修対策

100℃の環境で隙間充填材に要求される性能

フレッシュ性状および可使時間

充填可能な隙間幅: 0.2mm以上
可使時間: 3-4時間

水中不分離性

水中分散: なし

硬化性状

体積膨張または収縮: なし

試験概要

フレッシュ性状試験

ペーストの練り混ぜ

沸騰させた水槽に浸漬

継続的に温度、フロー値、J14ロート流下時間を測定



フロー試験

充填可能な隙間幅: 0.2mm以上

広がりやすさ
目標: 200mm以上

流れやすさ
目標: 2~8秒



ロート試験器具

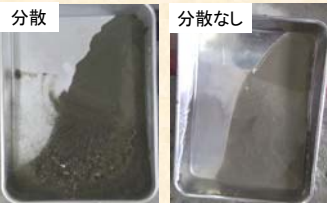
水中不分離性の確認試験

水に充填材を投入

材料が分散するかを目視で確認

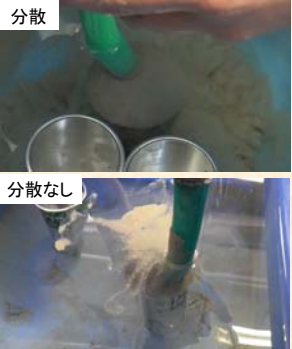
水中打設

水中での施工性を確認



硬化性状の確認試験

100℃の炉乾燥内で封緘養生
体積変化、圧縮強度試験



使用材料

充填材の配合

供試体名	W/C 単用量 (kg/m³)			粉体 (C×%)			
	(%)	C	W	増粘剤	ペントナイト	分散剤	遅延剤
普通セメント	40	1394	558	-	-	-	-
高流動モルタル	40	1346	546	0~0.05	-	-	-
地熱井セメント	50	1200	600	0~0.05	0~3.0	0.3	0~1.0

普通セメントペースト (OPC)

増粘剤

水中分離抵抗性を向上させる

高流動モルタル

ペントナイト

水中で膨潤して粘性を持たせる

間隙充填材として
用いられるプレミックス材料

分散剤

粒子を水に分散させる

地熱井セメントペースト

遅延剤

速硬化性を抑制する

耐熱性に優れる

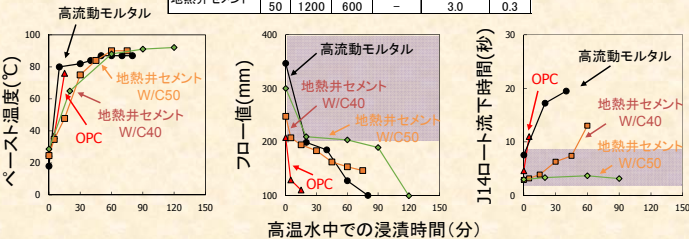
温泉地帯や地熱発電での井戸掘削に使用される 混和割合を変化させて定量的に検討した

最適な配合を提案する

試験結果

フレッシュ性状試験の結果
各充填材のフレッシュ性状

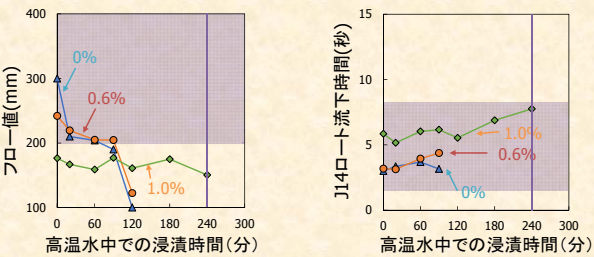
材料	W/C 単用量 (kg/m³)			粉体 (C×%)			
	(%)	C	W	増粘剤	ペントナイト	分散剤	遅延剤
普通セメント	40	1394	558	-	-	-	-
高流動モルタル	40	1346	546	0.05	-	-	-
地熱井セメント	50	1200	600	-	3.0	0.3	-



普通セメント, 高流動モルタル	×	W/C40	△
		フロー値	×
地熱井セメント	△	W/C50	○
		ロート流下時間	×
		可使時間	×

混和剤の添加による品質改善
地熱井セメントペースト

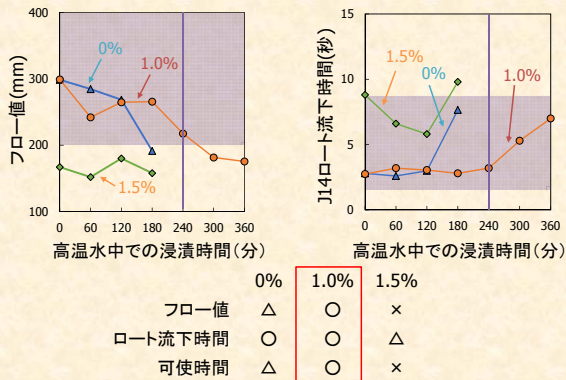
W/C 単用量 (kg/m³)	粉体 (C×%)		
	(%)	C	W
50	1200	600	-
		3.0	0.3
		0~1.0	-



0%	0.6%	1.0%
フロー値	△	×
ロート流下時間	○	○
可使時間	×	○

混和剤の添加による品質改善 地熱井セメントペースト

W/C (%)	単位量(kg/m ³)		粉体(Cx%)			
	C	W	増粘剤	ベントナイト	分散剤	遅延剤



水中不分離性の確認 地熱井セメントペースト

配合名	W/C 単位量(kg/m ³)		粉体(Cx%)			
	C	W	増粘剤	ベントナイト	分散剤	遅延剤

増粘剤添加



増粘剤無添加



水中への分散が激しくない

硬化性状の確認

地熱井セメントペースト

配合名	W/C 単位量(kg/m ³)		粉体(Cx%)				水中不分離性	硬化性状
	C	W	増粘剤	ベントナイト	分散剤	遅延剤		

高温水への浸漬時間	配合-1	配合-2
0分		
60分		
120分		
180分		

模擬隙間注入試験

地熱井セメントペースト

W/C 単位量(kg/m ³)			粉体(Cx%)			
	C	W	増粘剤	ベントナイト	分散剤	遅延剤

環境条件: 100℃の高温水

隙間断面: 1.5m×1.0m

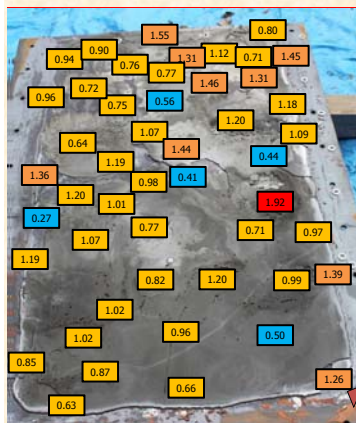
隙間幅: 1.5~3mm程度

注入方法: 右下側から
低圧ポンプで注入

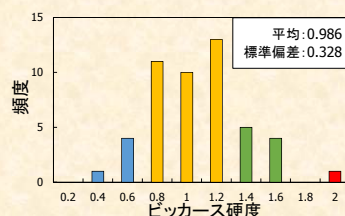


充填状況の確認

材齢28日



ビッカース硬度のヒストグラム



普通セメント(封緘養生材齢28日): 0.932

普通セメントと同程度の硬さ

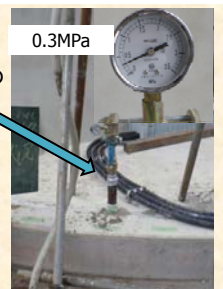
注入口

基礎杭の部分的な施工試験

施工前

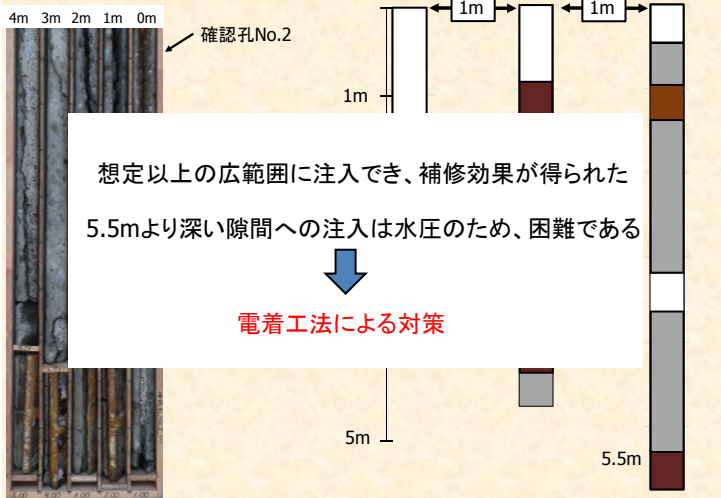


施工後



ペーストが
流れてきた

コア抜きによる充填状況の確認



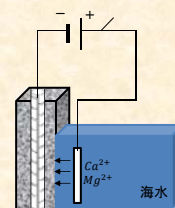
電着工法による補修対策

電着工法とは

0.5~2A/m²程度の直流電流を数ヵ月流す

↓ 電着物

ひび割れや隙間を閉塞



電着物
CaCO₃
Mg(OH)₂

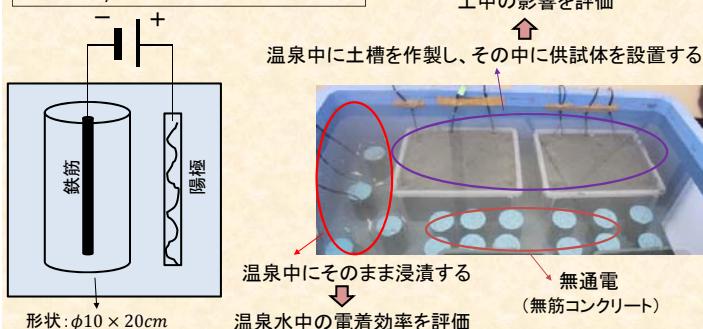
試験概要

供試体配合

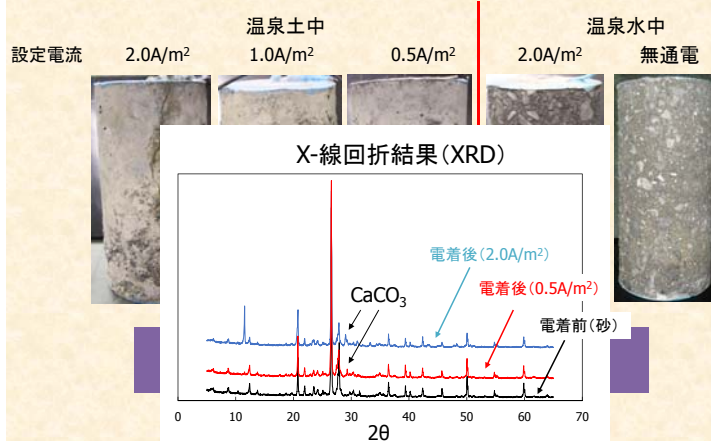
供試体名	W/C (%)	s/a (%)	目標	単位量 (kg/m ³)	目標
シラスOPC	50	34.5	4.5	W C S シラス G	スランプ (cm)
				185 1370 0 498 1103	10.0

供試体形状

0.5~2A/m²程度の直流電流を流す

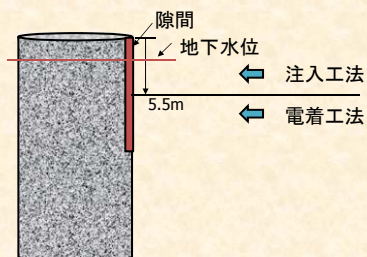


試験結果



結論

- 丸尾滝橋の基礎杭の補修には、以下の対策が提案できた



- 高温温泉環境における他のコンクリート構造物のひび割れ補修にも適用可能である

高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の防食性能



鹿児島大学大学院
鹿児島大学大学院
鹿児島大学大学院
鹿児島大学大学院
○竹下麗華
武若耕司
山口明伸
審良善和

はじめに

溶融亜鉛めっき鉄筋とは

- 溶かした亜鉛の中に鉄筋を浸し
鉄筋の表面に亜鉛の皮膜を施したもの



溶融亜鉛めっき鉄筋

海外での主な施工実績例

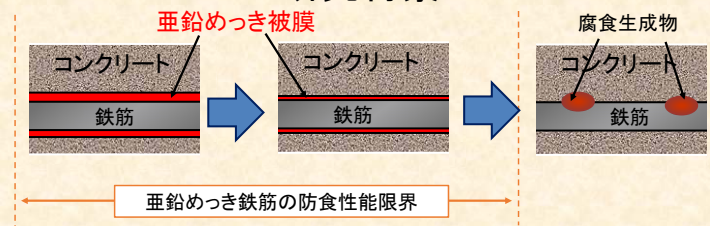


オペラハウス(シドニー)



国会議事堂(ニュージーランド)

研究背景



亜鉛めっき鉄筋の防食性能がどの程度なのか



研究目的

高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の
腐食速度を定量的に評価

検討項目

亜鉛めっき被膜の確認



高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の防食性能

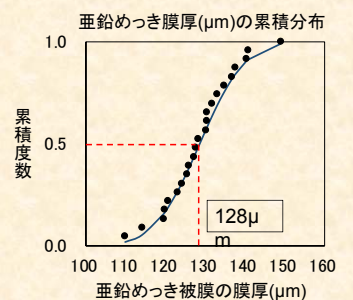
- 高アルカリ性水溶液中における浸漬試験
- 曲げ加工部の亜鉛めっき鉄筋の暴露試験

亜鉛めっき被膜の確認

公称膜厚100 μ mの
亜鉛めっき鉄筋 23本



亜鉛めっき
膜厚(μ m)の測定
(JIS H 0401) に準拠
(間接法)



ばらつきがあるが、全ての亜鉛めっき被膜において
公称膜厚100 μ m以上



公称膜厚100 μ mを亜鉛めっき被膜の性能の限界

検討項目

亜鉛めっき被膜の確認

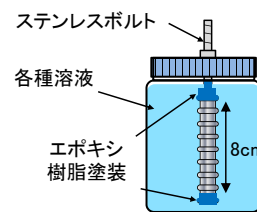


高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の防食性能

- 高アルカリ性水溶液中における浸漬試験
- 曲げ加工部の亜鉛めっき鉄筋の暴露試験

浸漬試験 試験概要

供試体概要



使用した鉄筋

亜鉛めっき鉄筋 普通鉄筋

溶液種類

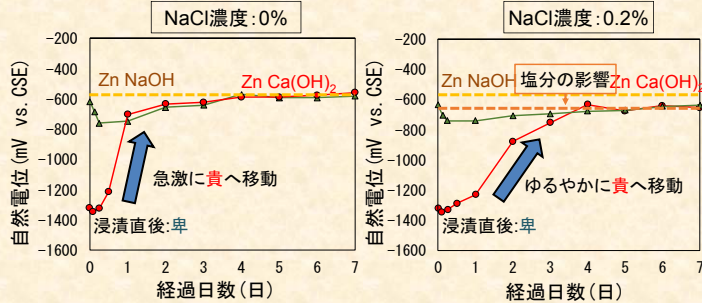
溶液の種類		
溶液	pH	NaCl濃度(%)
蒸留水	—	0
		0.2
飽和Ca(OH) ₂ 水溶液	12.6	0
		0.2
NaOH水溶液	12.6	0
		0.2

試験項目

- 自然電位の経時変化
- 腐食速度の算出(直線分極試験)
- 亜鉛めっき残存膜厚の測定(浸漬期間:0.75年,1年,2年)

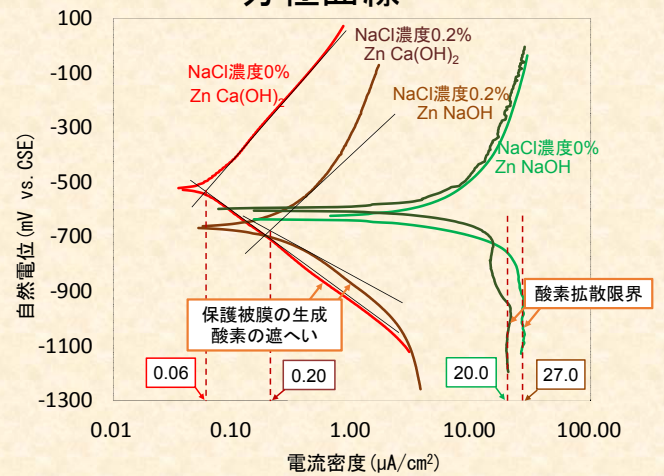
自然電位の経時変化

使用した鉄筋：亜鉛めっき鉄筋

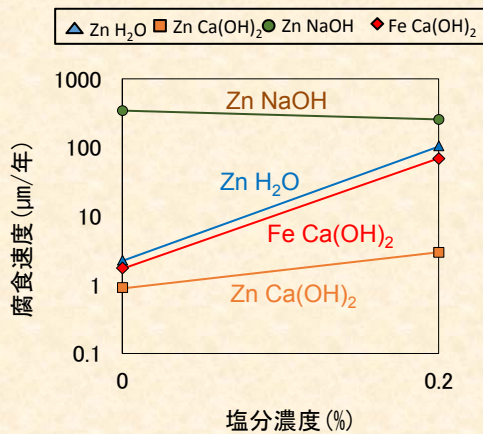


電位が安定した状態 → 分極試験

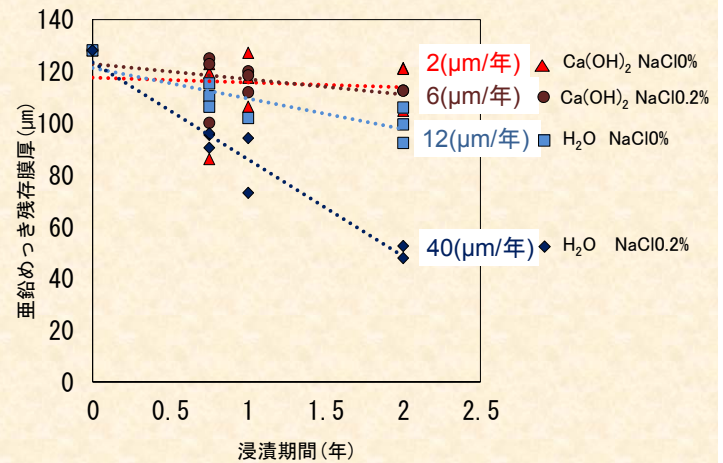
分極曲線



腐食速度

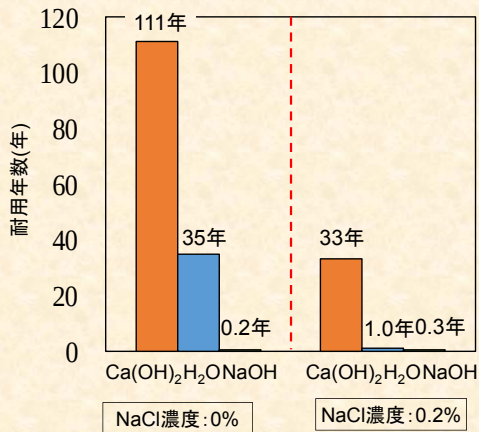


亜鉛めっき残存膜厚の経時変化



耐用年数(分極試験)

亜鉛めっき被膜厚(100μm)が全て溶解するまでの年数



検討項目

亜鉛めっき被膜の確認

高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の防食性能

1. 高アルカリ性水溶液中における浸漬試験

2. 曲げ加工部の亜鉛めっき鉄筋の暴露試験

供試体: コンクリート供試体
期間: 1年 暴露
環境: 干満帯・海上大気中

亜鉛めっき残存膜厚の測定



暴露試験

外観調査

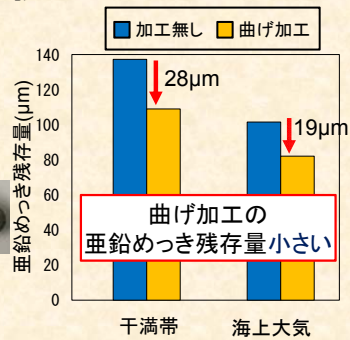
干満帯

剥離



曲げ加工部

加工無し部



曲げ加工の
亜鉛めっき残存量小さい

曲げ加工部において亜鉛めっき被膜の剥離による
ガルバニック腐食が起こる

結論

コンクリート中の空隙水を模擬した飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液中

保護被膜による酸素の遮へい

腐食速度が小さい

亜鉛めっき被膜の推定耐用年数

NaCl濃度 0% ➡ 100年程度

NaCl濃度 0.2% ➡ 30年程度

亜鉛めっき鉄筋はコンクリート中のような
高アルカリ性環境下において防食性能を有する

※注 曲げ加工を行う際は、剥離に注意する