

コンクリートメンテナンス協会
「コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム」

寒冷地におけるコンクリートの長寿命化 —劣化の特徴とその対策—

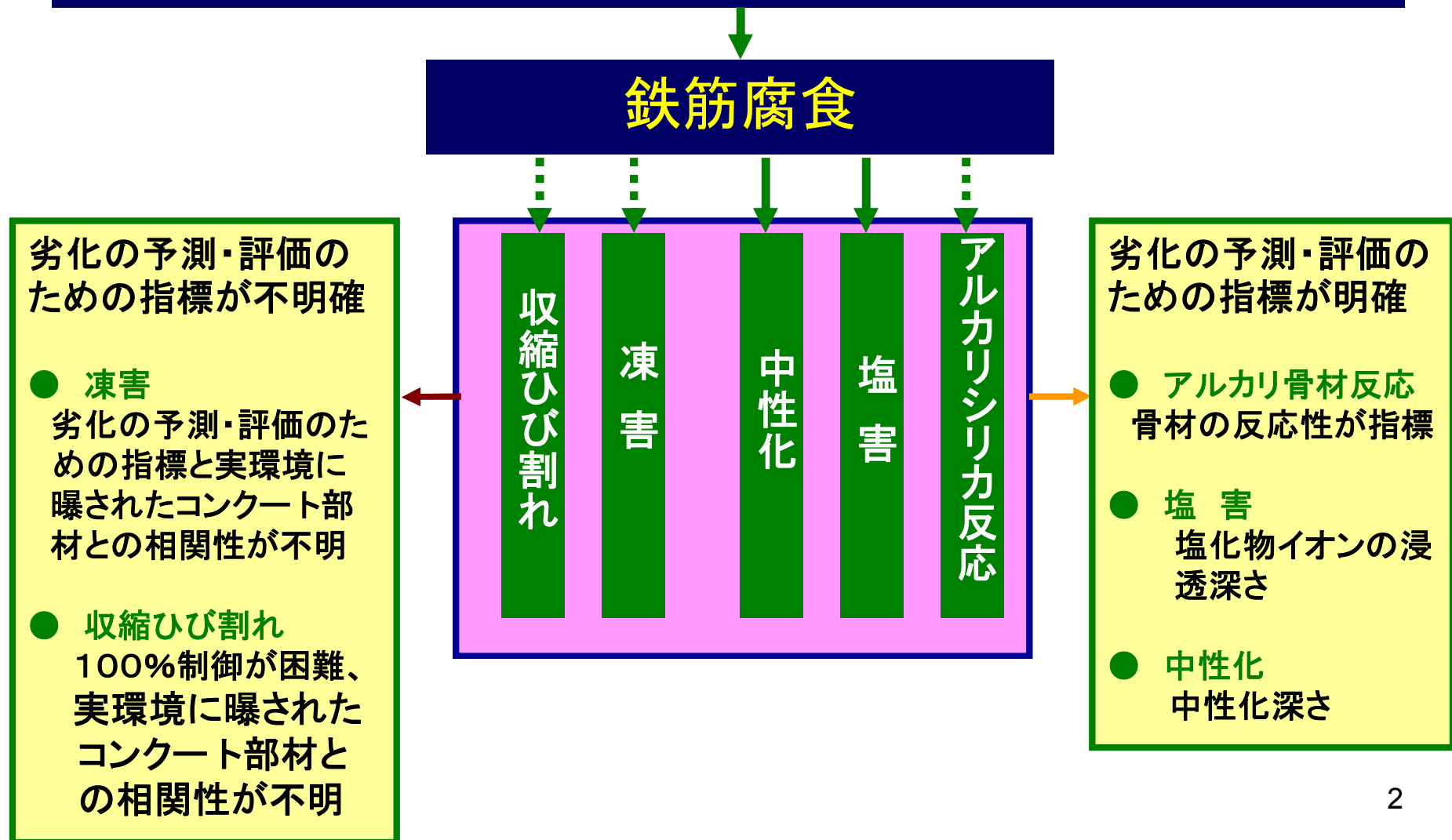
北海道大学 総長

名 和 豊 春

2018年5月21日 札幌コンベンションセンター

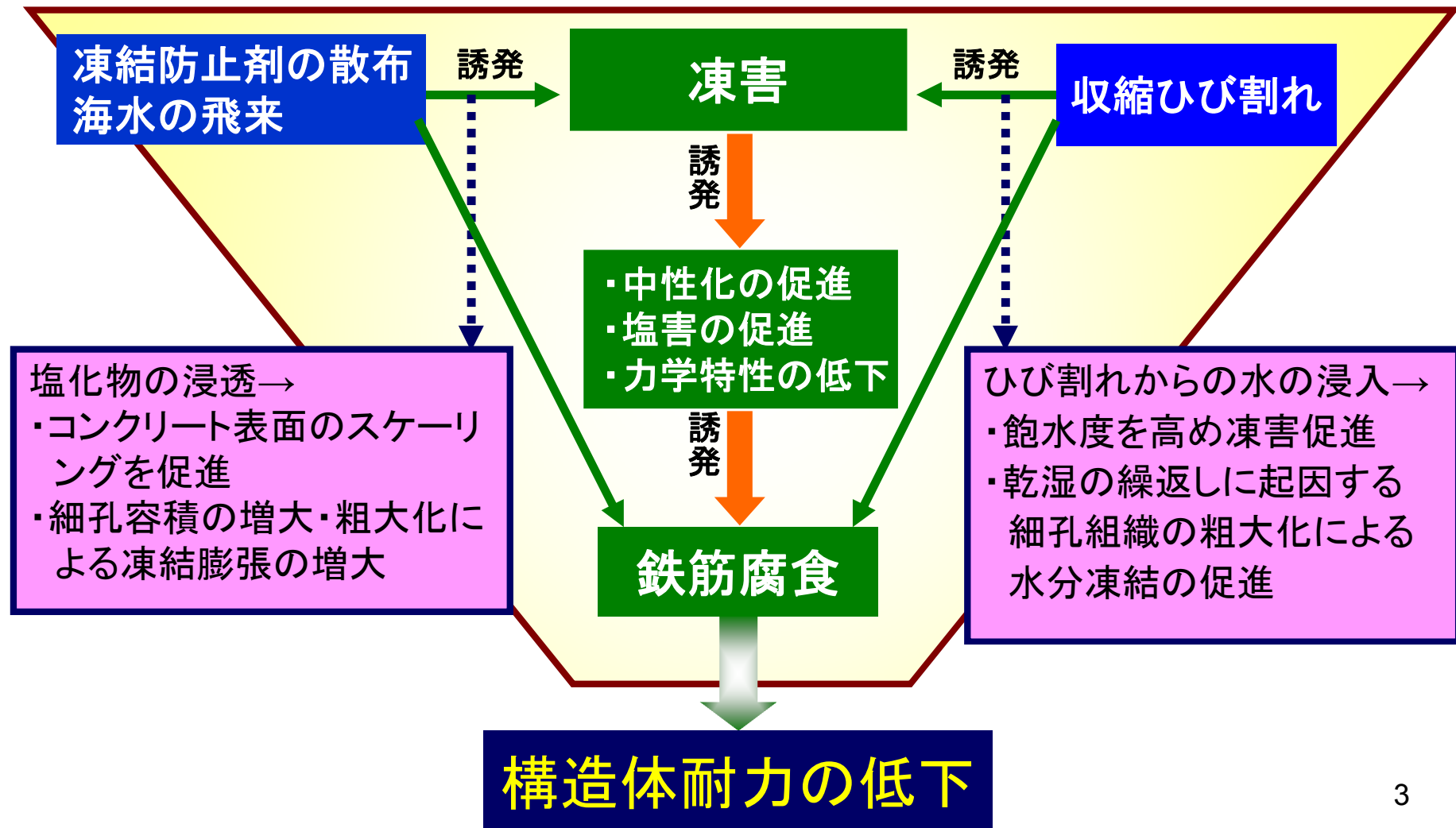
鉄筋コンクリート構造物の劣化

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因（構造的要因を除く）

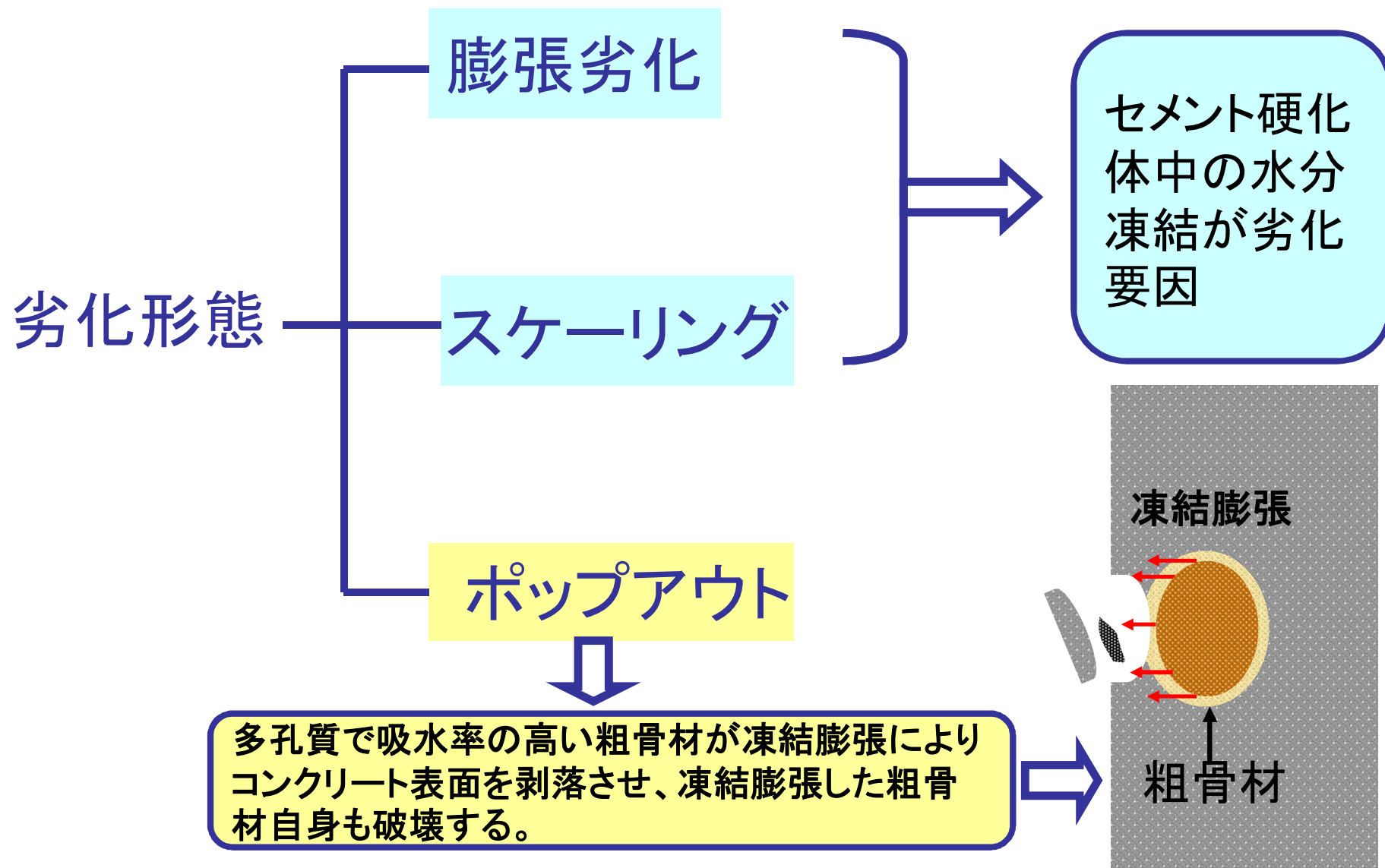


寒冷地におけるコンクリートの劣化

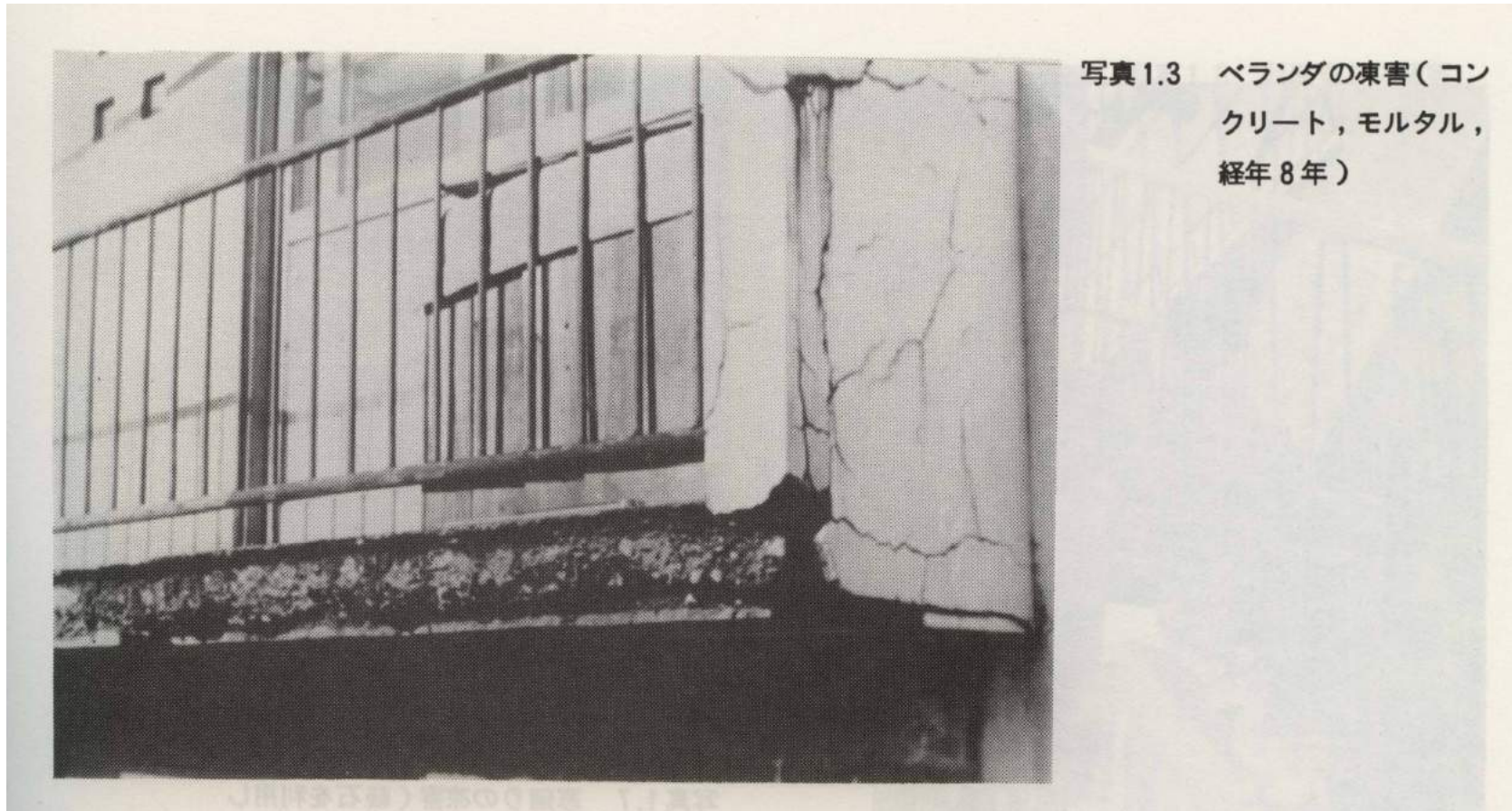
複合劣化形態



凍害の劣化形態



膨張による劣化(基本的な凍害)



ポップアウト

多孔質で吸水率の高い粗骨材が、骨材中に存在する水分の凍結によって膨張し、表面のモルタル層を剥離させる現象

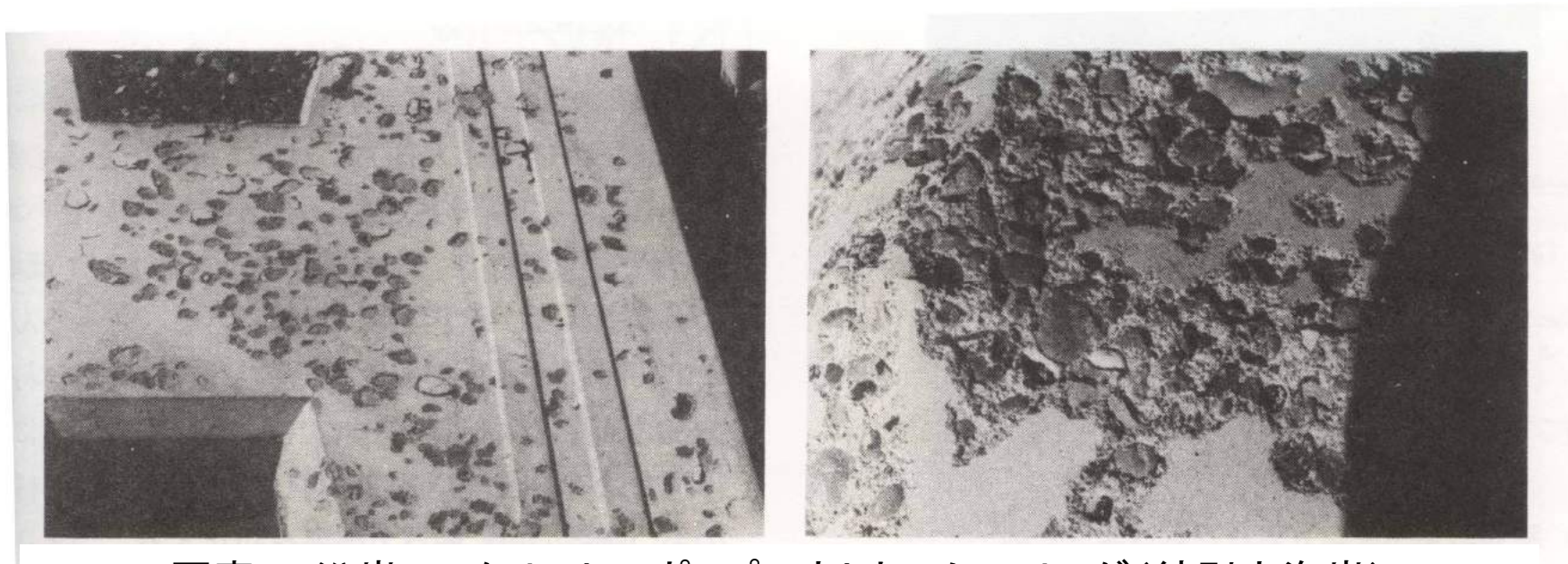


写真4. 沿岸コンクリートのポップアウトとスケール（紋別市海岸）

スケーリング

コンクリートの表面層が徐々に剥離する現象

- 1) 水セメント比の大きいコンクリート
- 2) 海水、融雪剤などに含まれる塩類と凍結融解の複合作用を受けるコンクリート
- 3) 施工が不良でブリーディング水が緻密な仕上げ表面層の直ぐ下に留まったコンクリート



写真3. テトラポットのスケーリングによる劣化

スケーリングの被害(～1980年代)

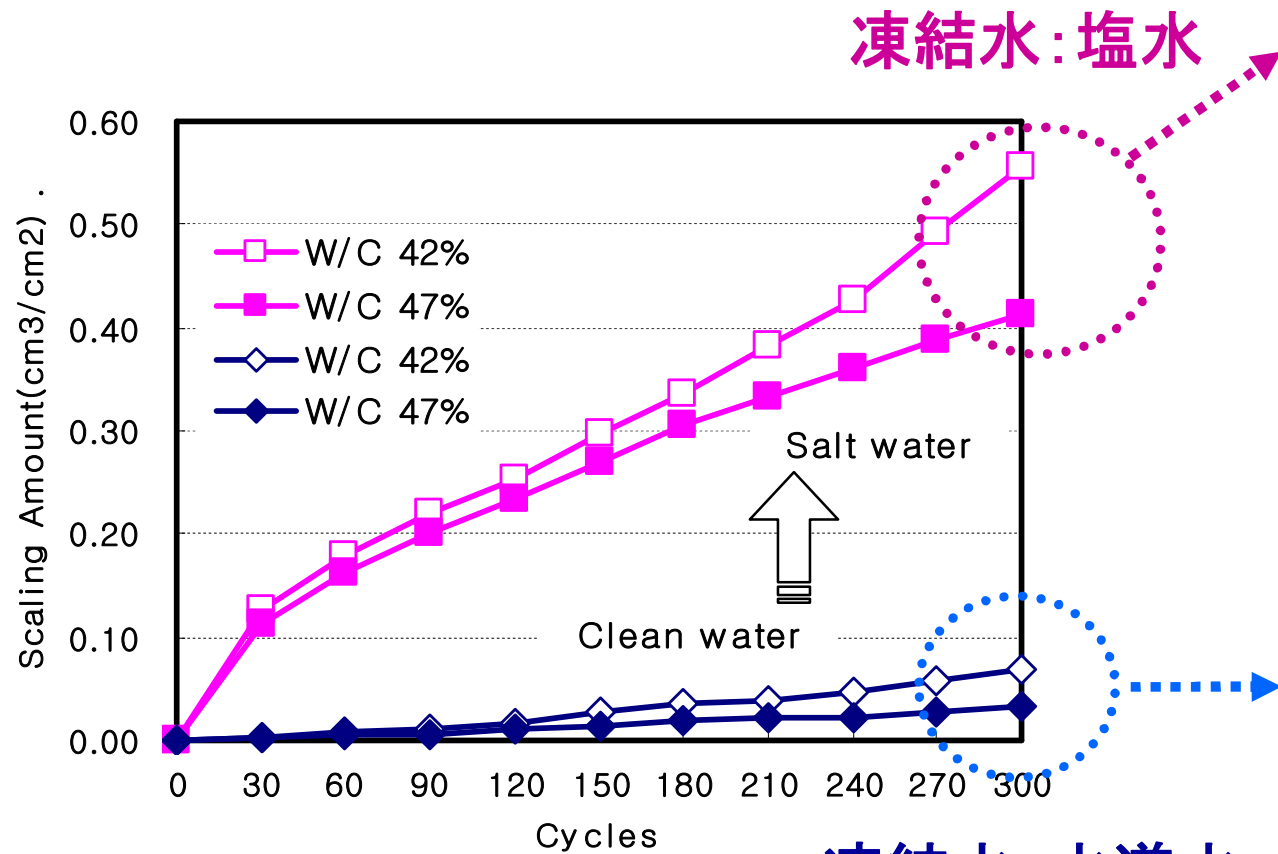
1980年代まで

スケーリングの被害は、
海洋コンクリート構造物に事実上、限定されていた。



構造物の機能低下の影響は、さほど危惧されていなかった

凍結融解の作用による コンクリートの表面劣化 (Scaling)



塩化物イオンの影響

- ・ 凍結膨張圧の増加
- ・ 熱衝撃

スケーリングの被害(1990年代～)

1990年代以降

スケーリングの被害は、海洋構造物だけではなく、道路コンクリート構造物でも、みられるようになった。



構造物の耐久性・機能低下を危惧する声が強まった

スケーリングの被害(1990年代～)

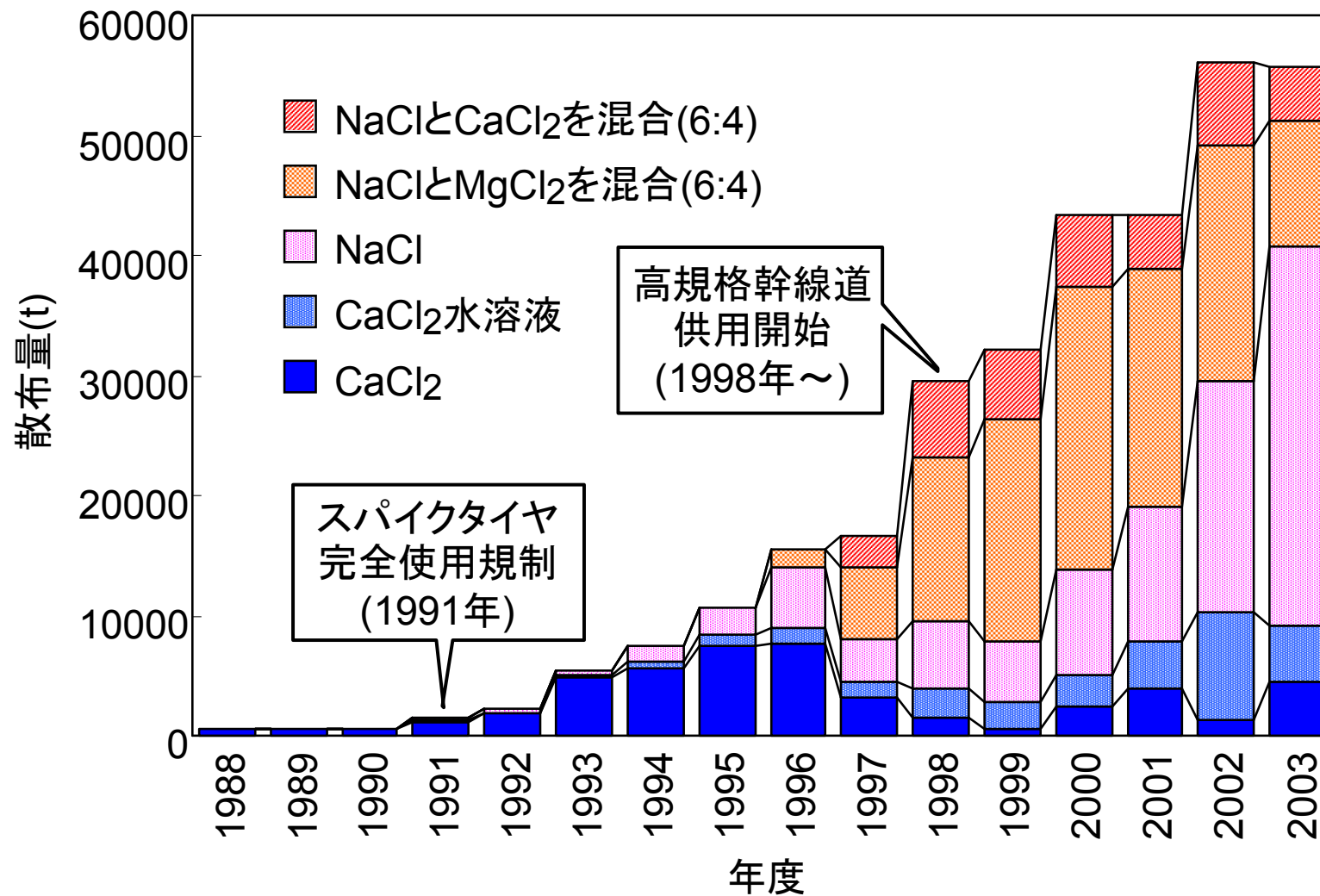


道路構造物におけるスケーリング要因



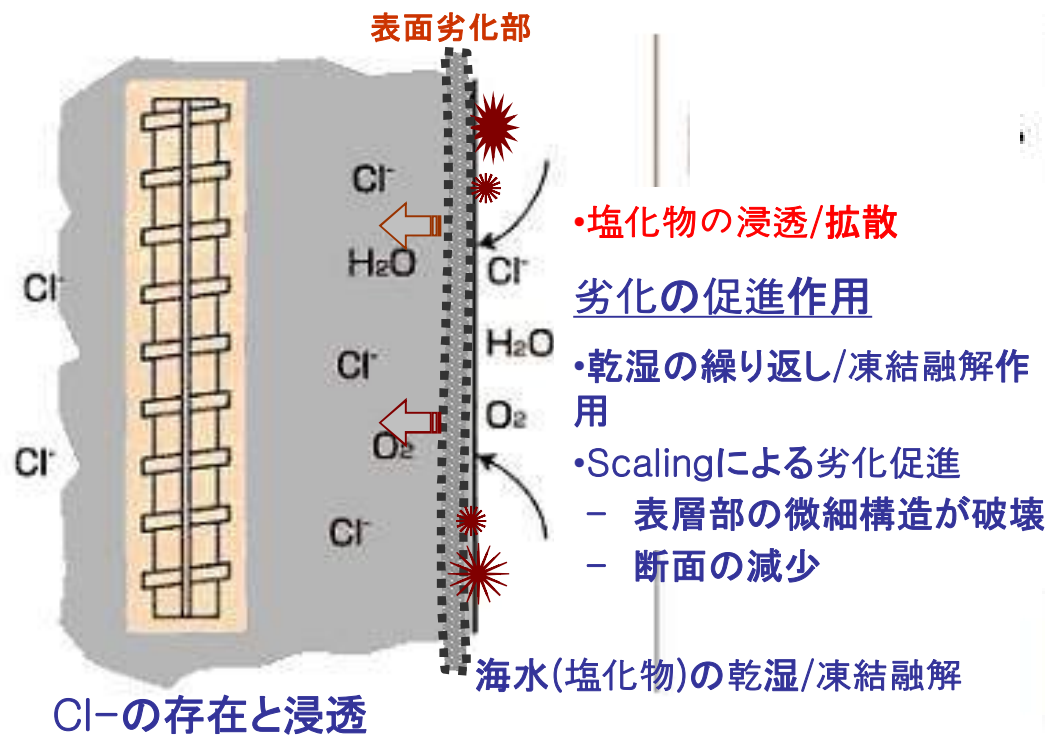
スパイクタイヤの使用規制に伴う
凍結防止剤の散布量増加

凍結防止剤の散布量の推移

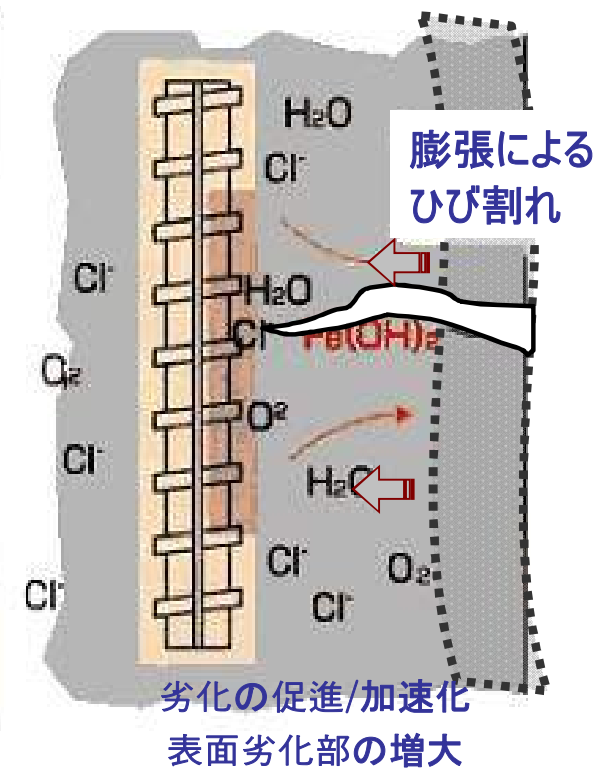


塩化物の浸透及び劣化促進

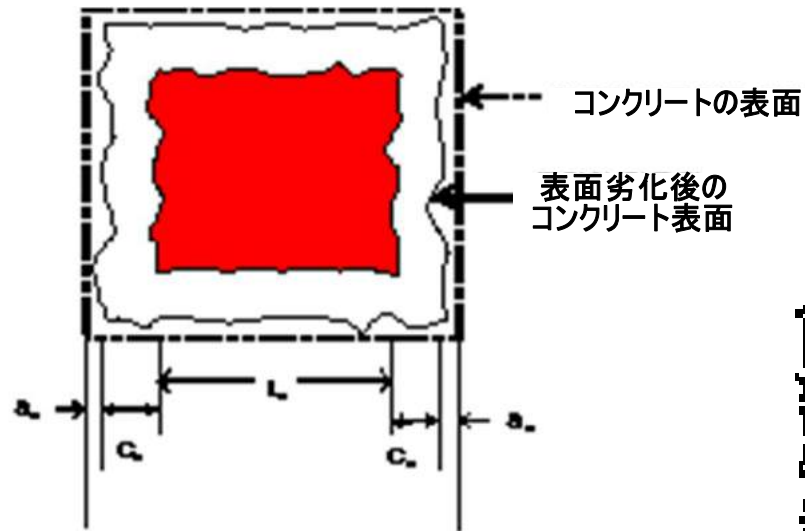
不動態被膜によって保護されている状態



不動態被膜が破壊されている状態



凍結融解作用によるコンクリートの劣化促進



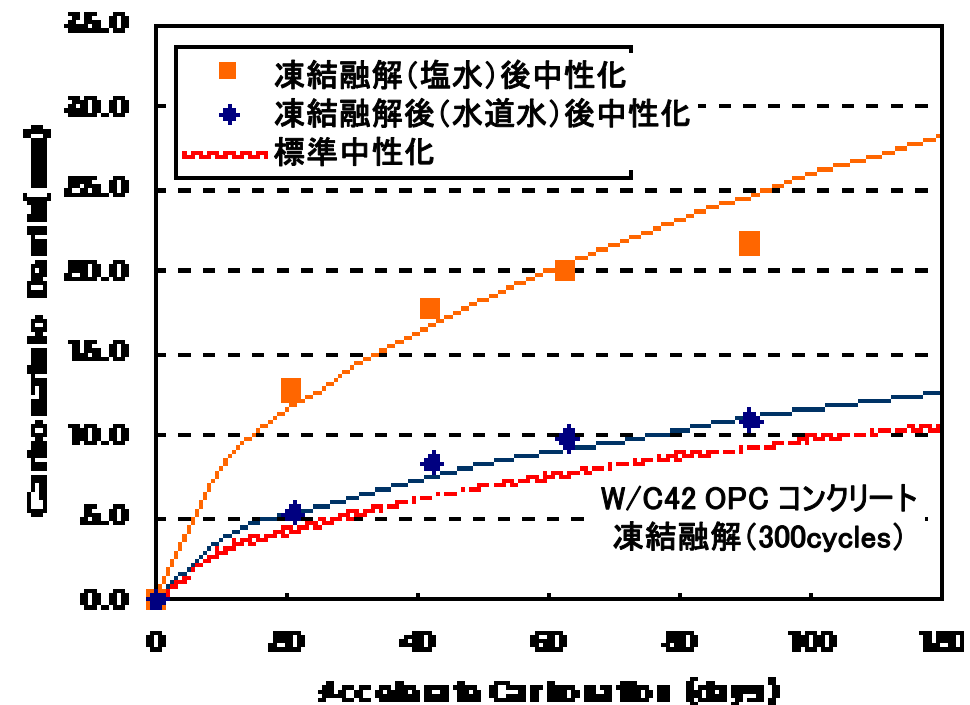
$$C_x = 100 - (L_n + S_n)$$

ここで

C_x : 中性化深さ(mm)

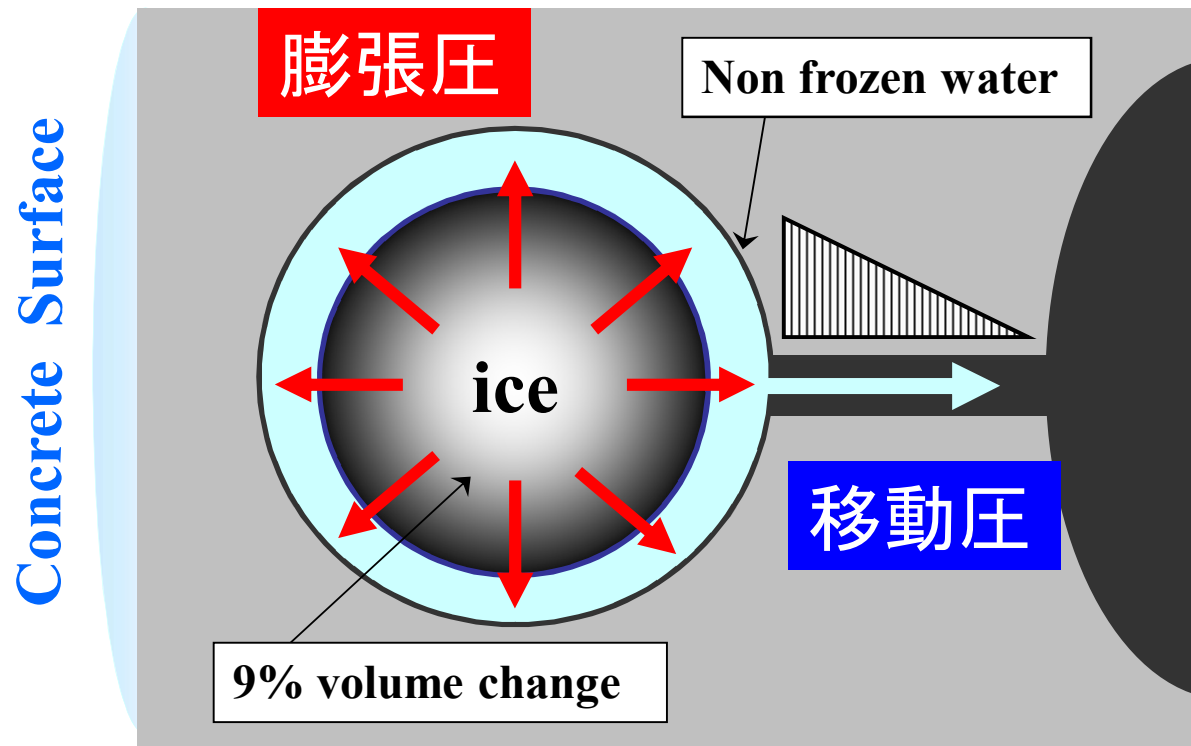
L_n : 中性化されない部分(mm)

S_n : スケーリング深さ(mm)



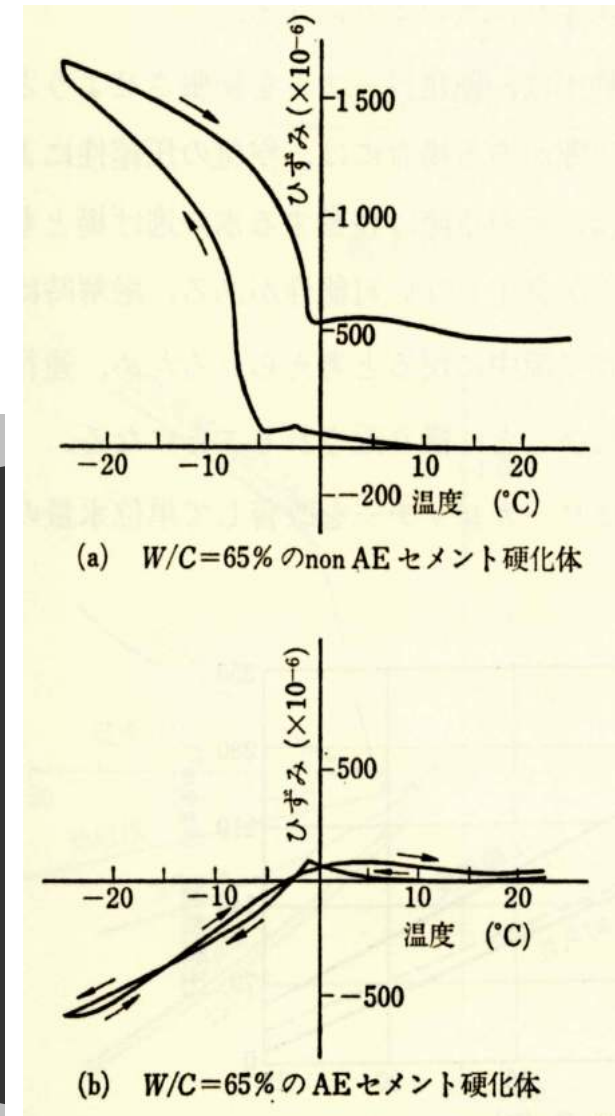
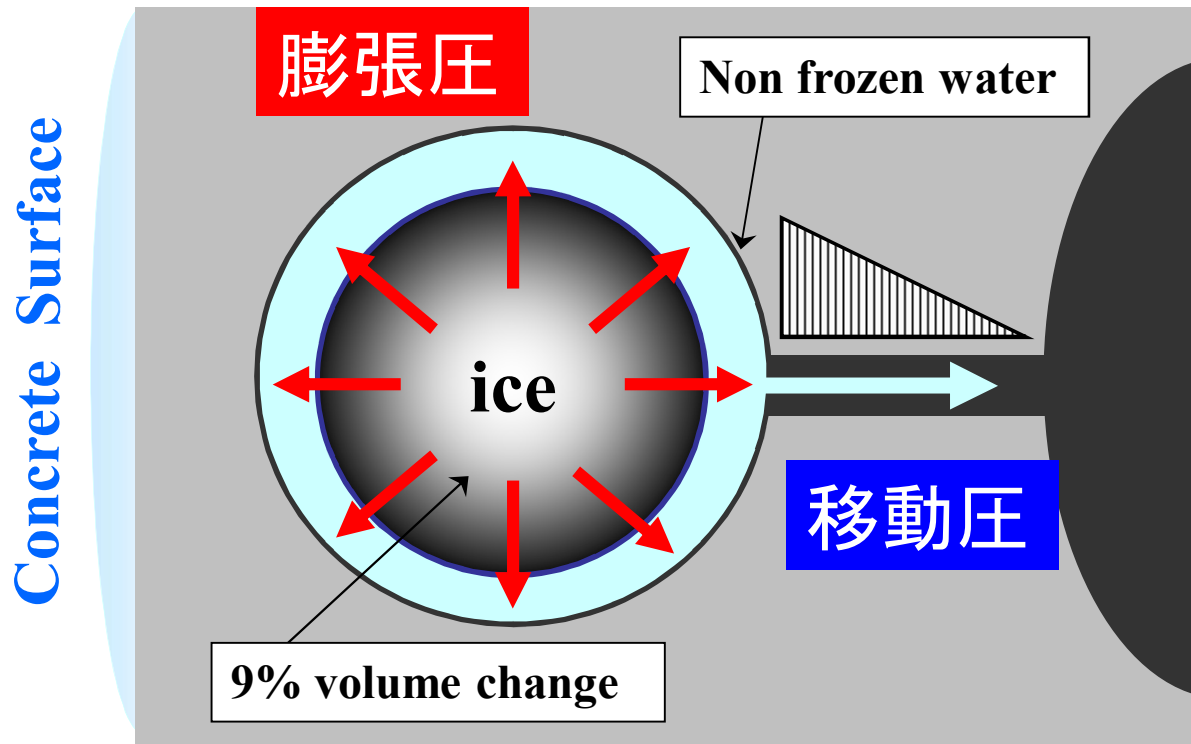
Powersの水圧説 – hydraulic pressure theory –

- ① 最初に表面に最も近い毛管中の水分が凍結。
- ② 凍結に伴う体積膨張分(約9%)だけ未凍結水を外部へと押し出す。
- ③ この水の移動圧がコンクリートの引張強度を超えた段階で劣化が起こる。

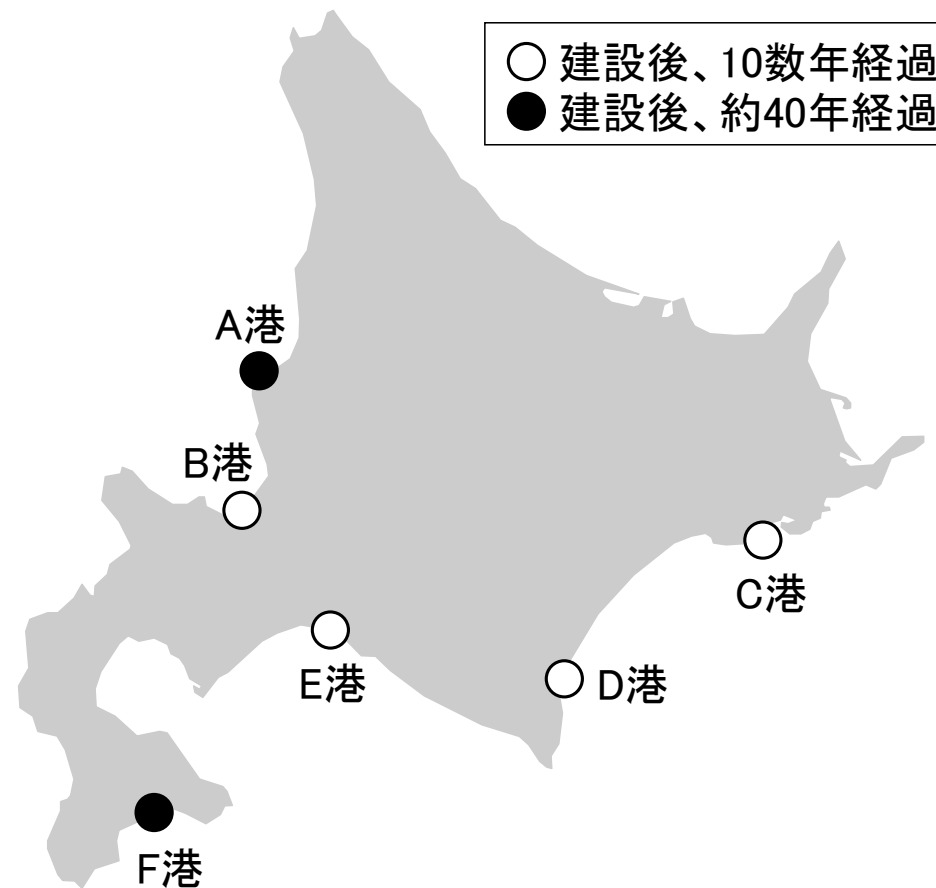


Powersの水圧説 – hydraulic pressure theory –

$$J = -\frac{k}{\eta_L} \nabla p = -\frac{k}{\eta_L} \left(\frac{P_L - P_e}{L} \right)$$

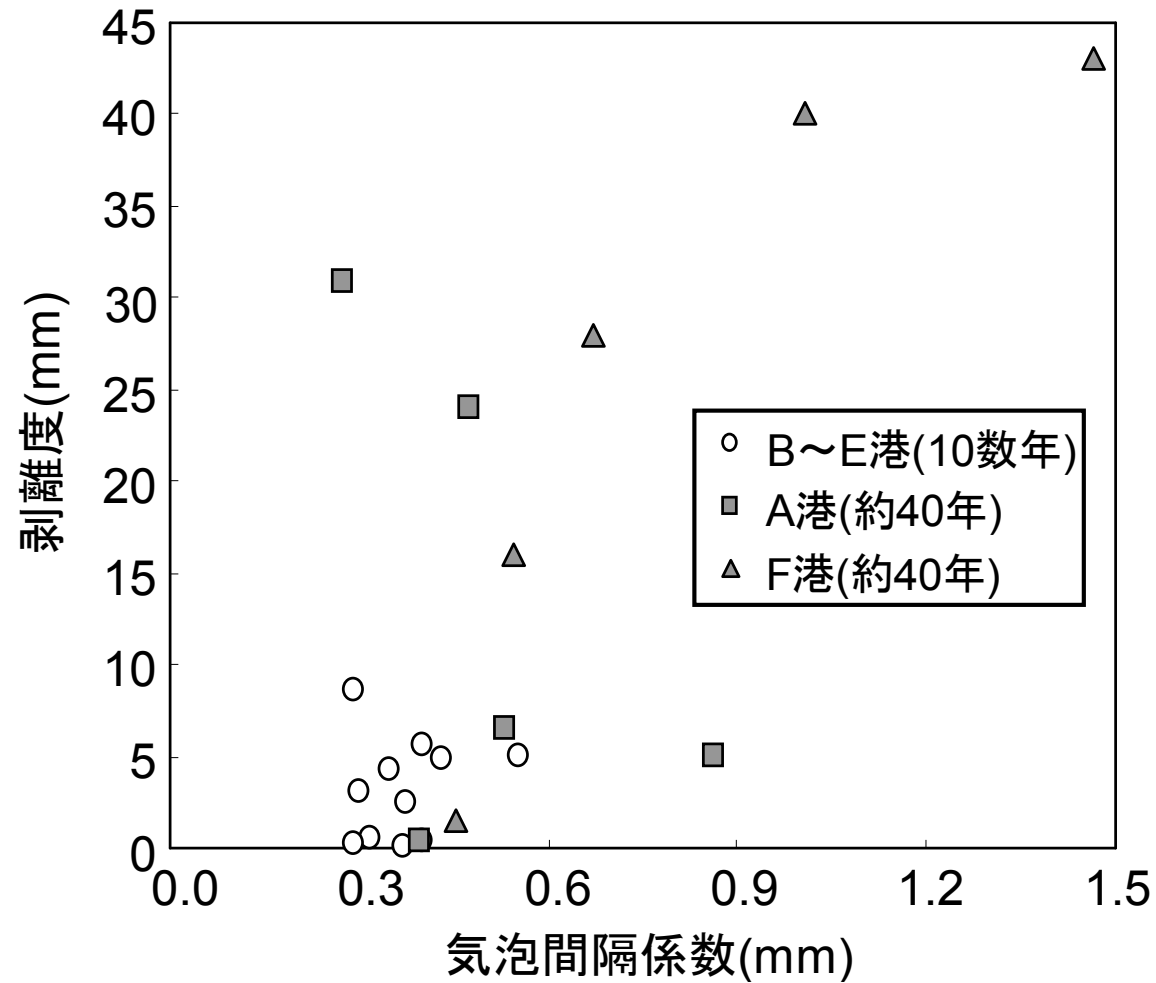


凍害と塩害の複合劣化に関する調査



長年に亘り、純粋な複合劣化（塩水・凍結融解）を受けている
北海道の港湾コンクリート構造物にて調査を実施

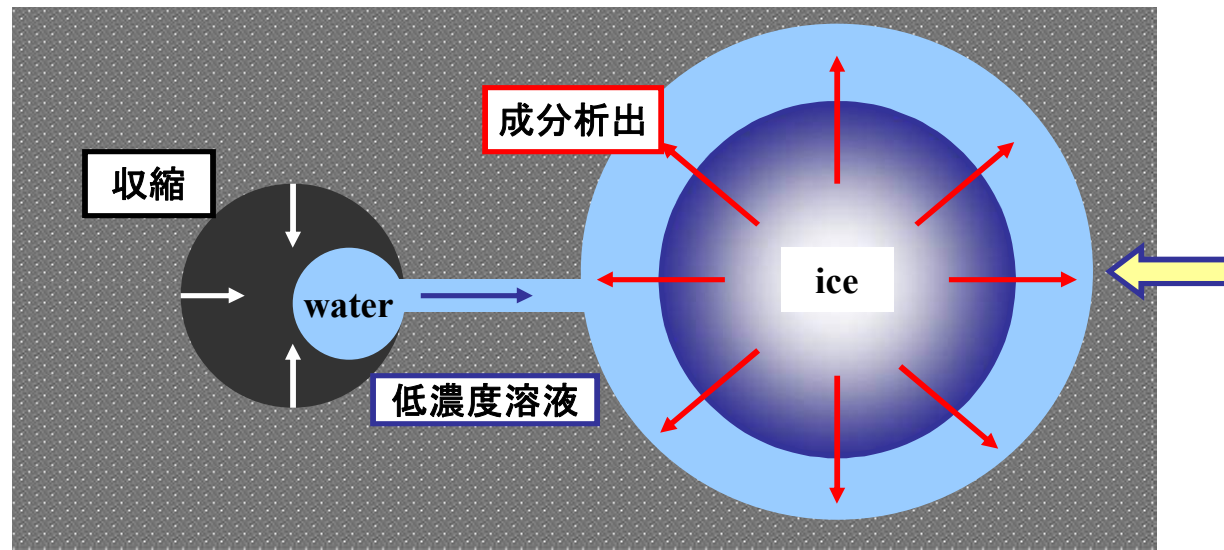
調査結果



剥離度は、気泡間隔係数からは説明ができない 19

浸透圧説

- ・コンクリート細孔中の水分は大きな細孔中の水分から凍結
- ・氷晶に向かって小さな細孔中の水が移動→自己乾燥→収縮
- ・水の移動の推進力: 塩濃度の高い氷晶周辺の不凍結水と小さな細孔中の不凍結水との濃度差による浸透圧



氷晶の拡大に伴う細孔組織の粗大化



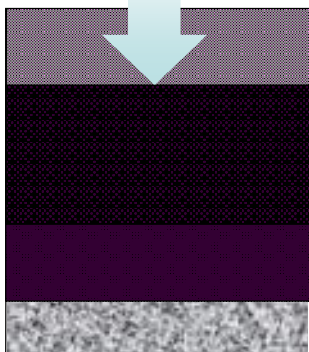
凍結防止剤や海水浸透時のスケーリングの発生・細孔径の粗大化等のメカニズムを説明できる。

【対策】

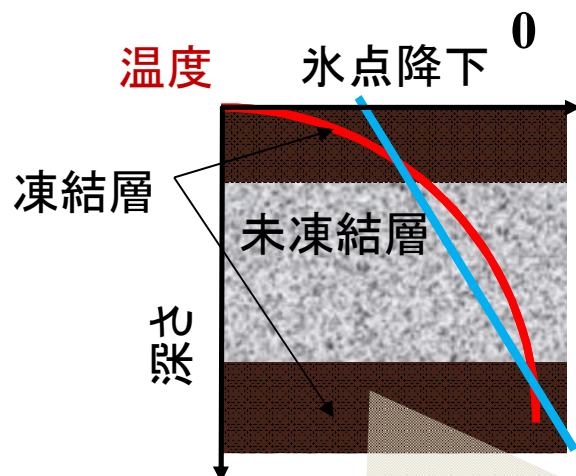
AE剤による気泡の導入だけで対応はできず、水セメント比の低下等によるセメント硬化体組織の緻密化が必要である。

層間凍結説

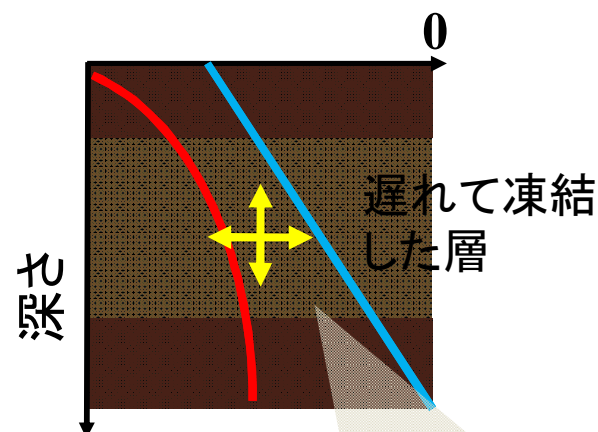
表面から冷却



塩化物濃度分布



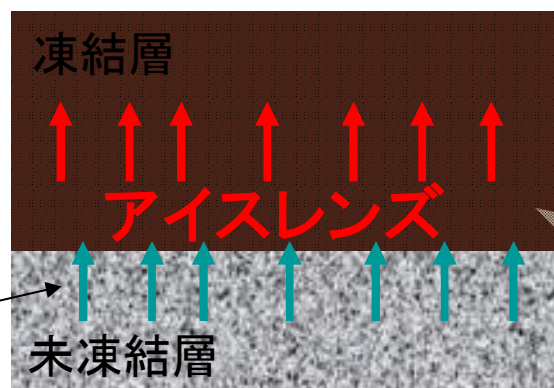
氷点降下と温度勾配の関係から**未凍結層**が**凍結層**の間に形成される



遅れて凍結した層の**組織の膨張圧**によって表面層が剥離する



未凍結水の移動



氷の層(アイスレンズ)として層から析出/分離し、表層を押し上げる

寒冷地の土壌で発生するアイスレンズ



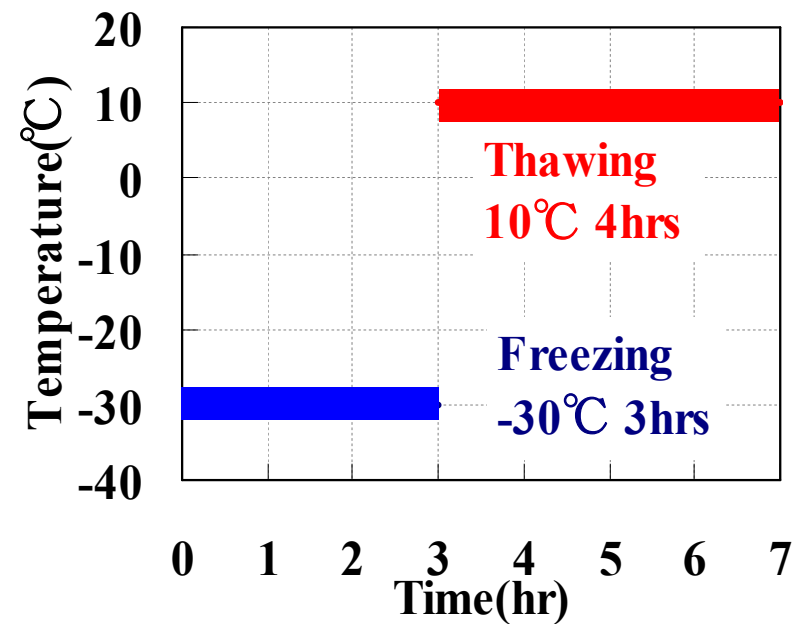
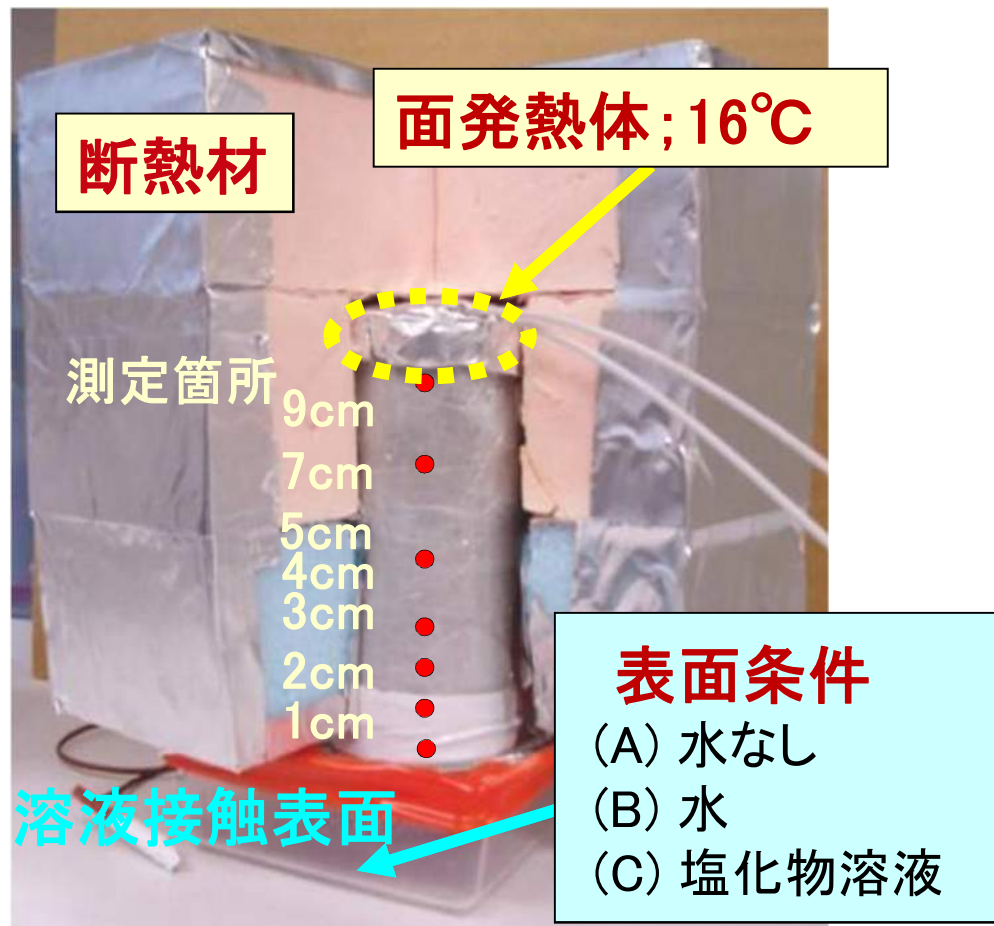
同様の現象がスケーリング劣化でも発生している

映像の提供：北海道大学大学院寒冷地工学研究室 赤川敏教授

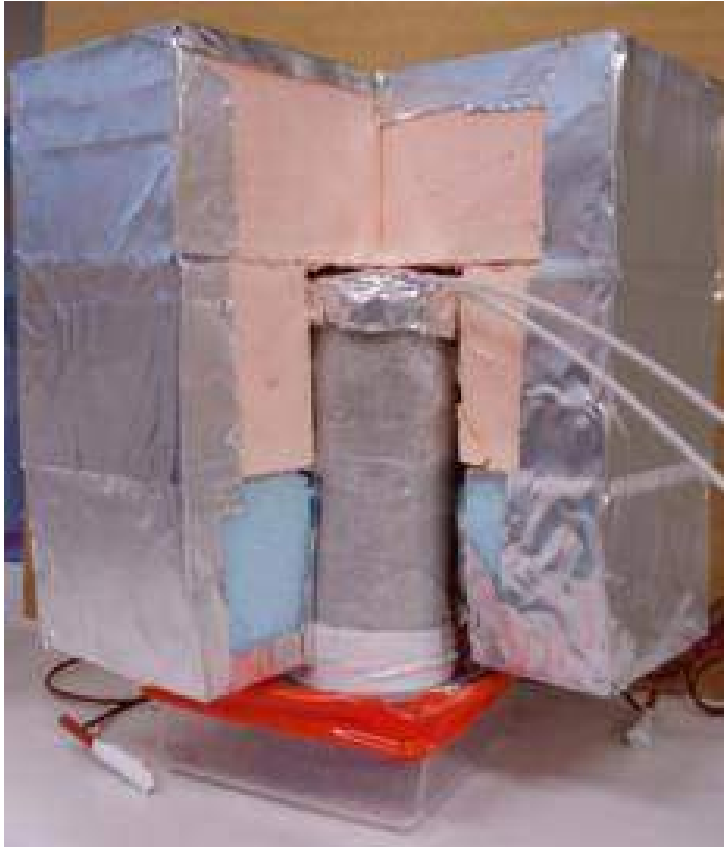
測定条件

OPCのセメントペースト
W/C50%
材齢1日
Φ5 × 10cmの円柱供試体

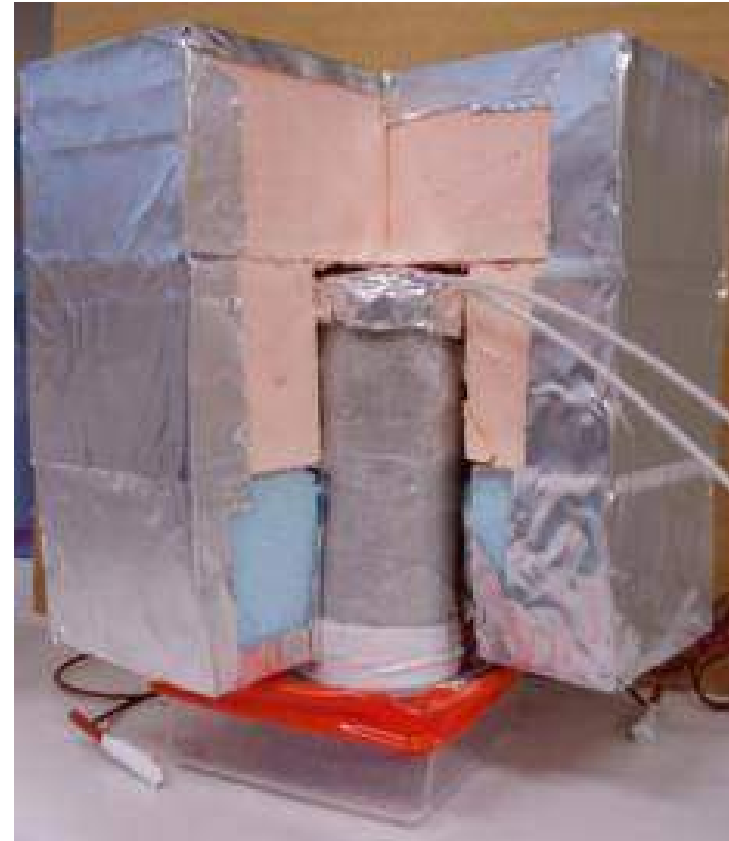
比抵抗値測定 (φ3,25mm steel)
温度履歴(熱伝対)
ひずみ
細孔構造(MIP)
塩化物濃度分布



水分の影響



水なし



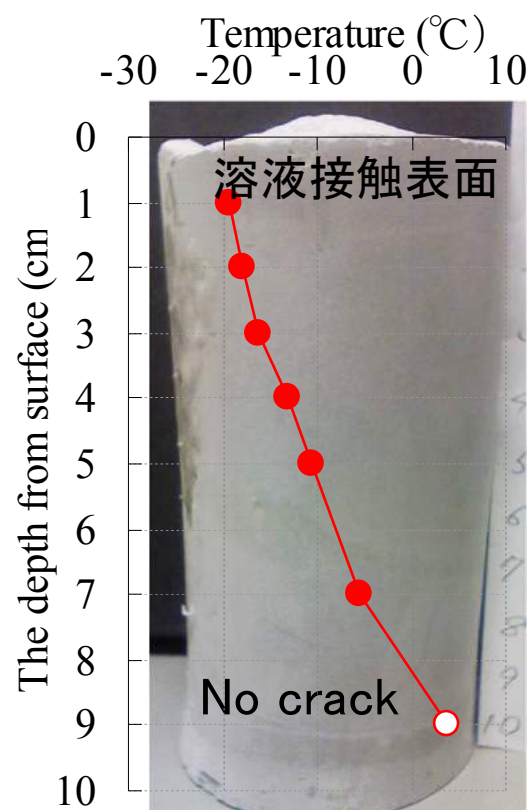
水

凍結融解：8サイクル

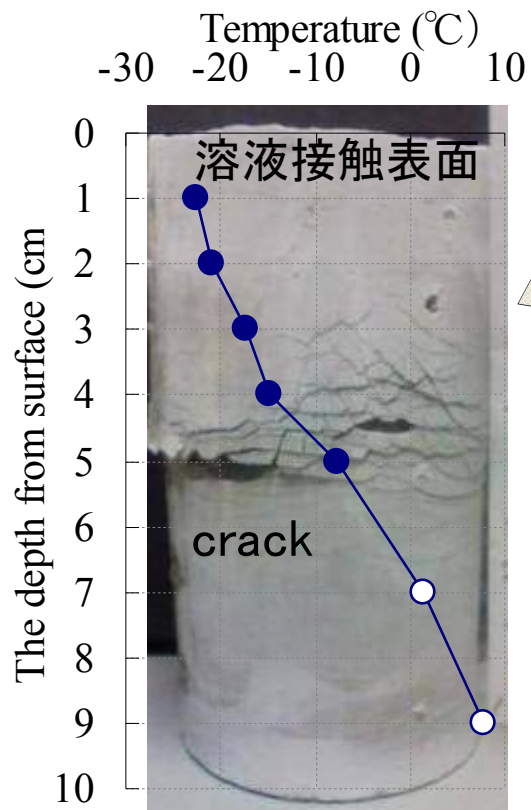
表面条件「水なし」

表面条件「水」

スケーリングの発生なし



亀裂の発生なし



大きな亀裂の発生

溶液接触表面

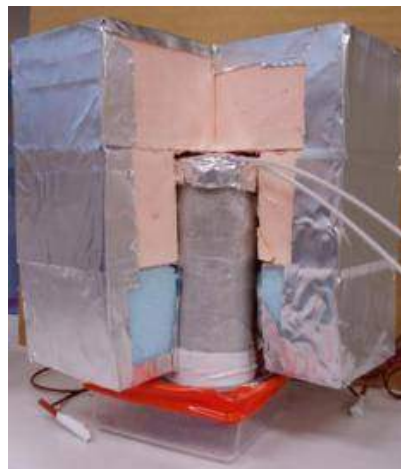
The depth from surface (cm)

微細な亀裂が多く発生

塩化物の影響



1.5%NaCl



3%NaCl



6%NaCl

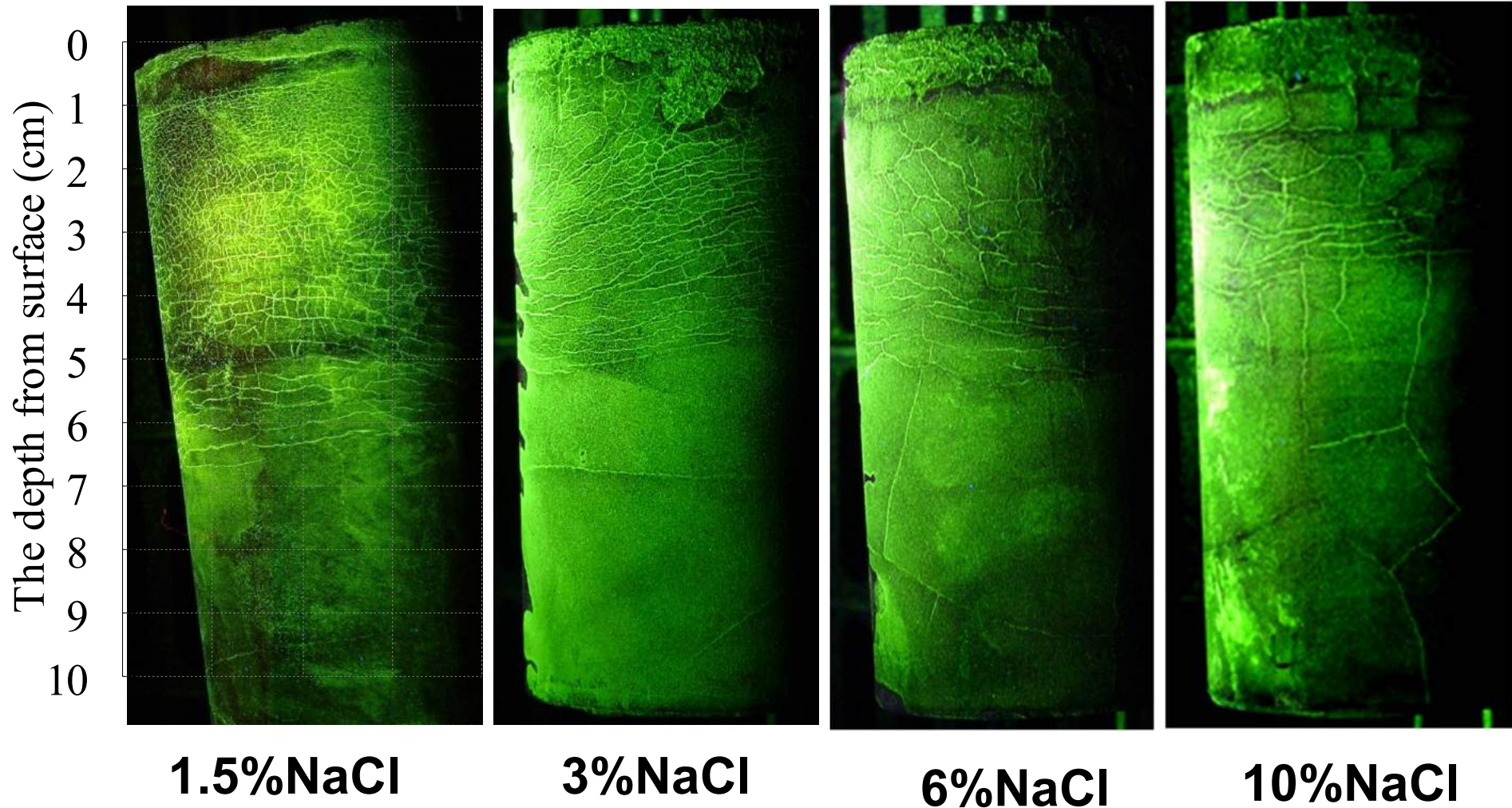


10%NaCl

凍結融解: 5サイクル、20サイクル

凍結融解5サイクル

溶液接触表面



塩化物濃度の増加とともに亀裂が減少

凍結融解20サイクル

スケーリングなし



スケーリングなし



微細な亀裂とスケーリングの発生

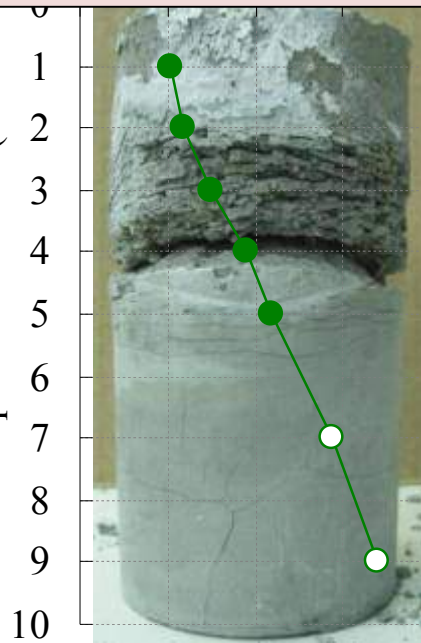


塩化物が含まれると微細亀裂の増加



表面条件「水」

The depth from surface (cm)



1.5%NaCl



3%NaCl

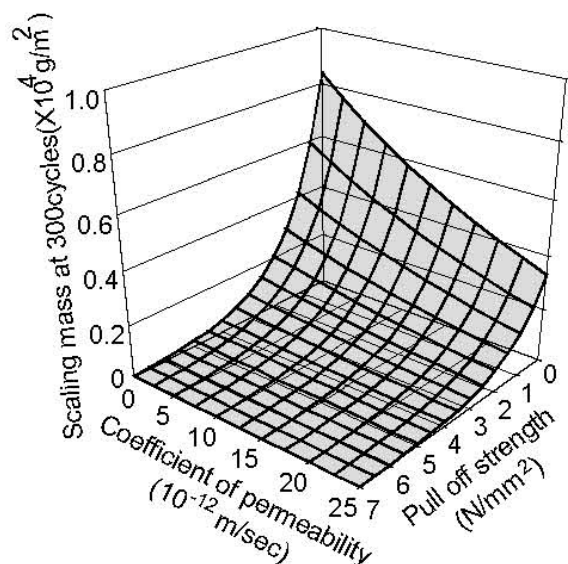


6%NaCl



10%NaCl

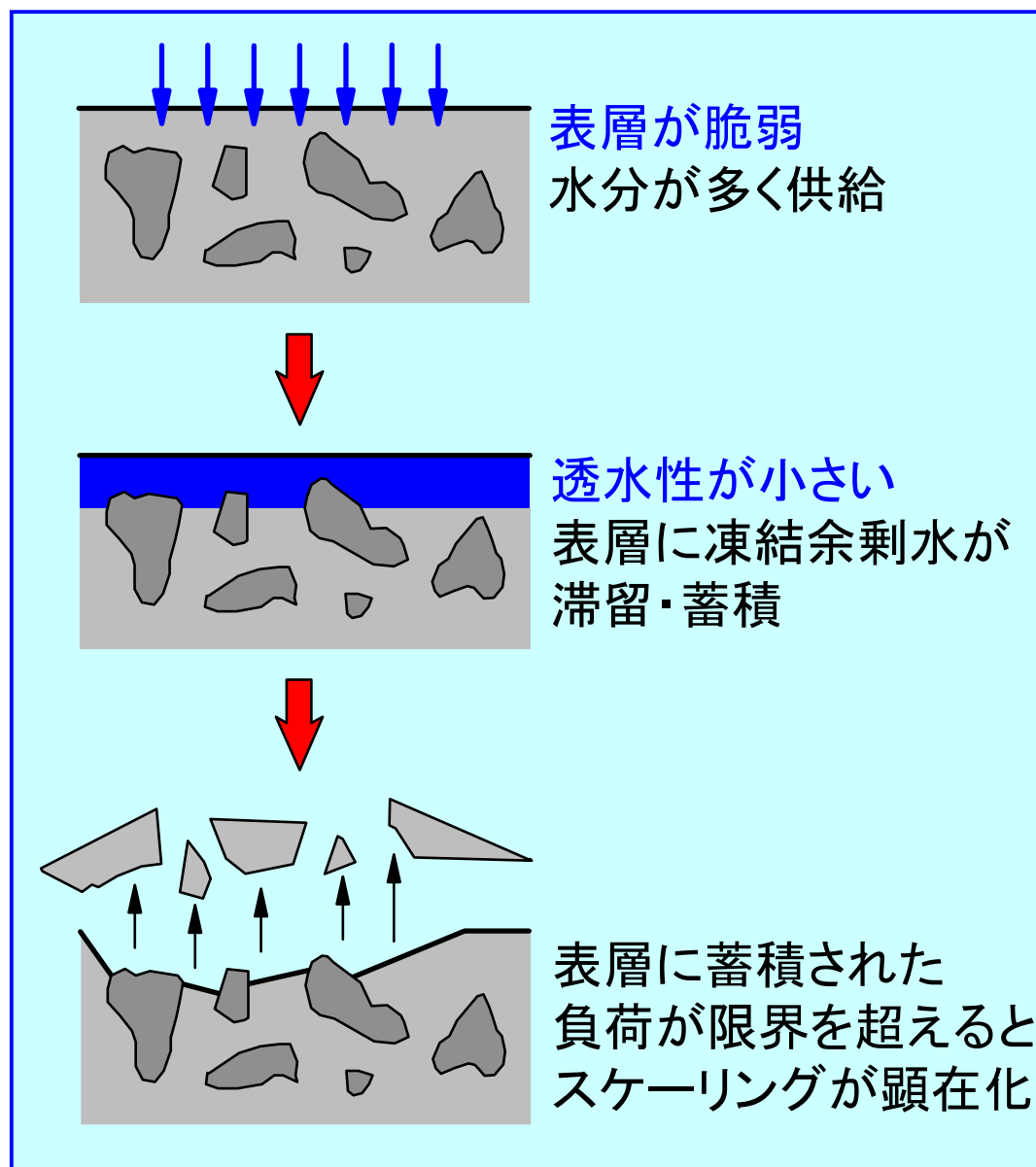
塩化物共存下におけるスケーリングの抑制対策



コンクリート面のプルオフ強度と
コンクリートの透水性が、ともに
小さいほどスケーリングしやすい

期待される抑制対策工

- ① プルオフ強度の向上
- ② 水圧の緩和(負荷の軽減)
- ② 水や塩分の浸透抑制



小樽港防波堤コンクリート 100年以上の耐久性



小樽港防波堤



廣井 勇 博士



100年試験用
モルタルブリケット

凍害と塩害の複合劣化の対策

- 水分の供給を断つ
 - 水切りの適切な設計
 - 低透水性なコンクリートの適用
 - 収縮ひび割れの防止
- 塩分を浸透させない
 - セメントの選定
 - 水セメント比の選定

凍害と塩害の複合劣化の対策

- 適切な施工法の適用

- ◎受身ではだめ

- ブリーディングによる表層コンクリートの品質低下の防止
単位水量の抑制
 - 透水型枠の使用
 - 撥水剤、表面改質剤の使用

劣化した構造物の補修方法の現状

塩害の場合

要求性能	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
劣化因子 の遮断	表面被覆	表面被覆	表面被覆	表面被覆
	曲げ、乾燥収縮 ひび割れ補修	曲げ、乾燥収縮 ひび割れ補修	曲げ、乾燥収縮 ひび割れ補修	曲げ、乾燥収縮 ひび割れ補修
劣化速度 の抑制	電気防食	電気防食	電気防食	電気防食
劣化因子 の除去		脱塩工法	脱塩工法	脱塩工法
		断面修復	断面修復	断面修復
耐荷力、 変形性能 の改善				補強
				打換え

劣化した構造物の補修方法の現状

凍害の場合

要求性能	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
劣化因子の遮断	表面被覆	表面被覆	表面被覆	表面被覆
劣化速度の抑制		ひび割れ補修	ひび割れ補修	ひび割れ補修
劣化因子の除去		断面修復	断面修復	断面修復
耐荷力、変形性能の改善				補強
				打換え

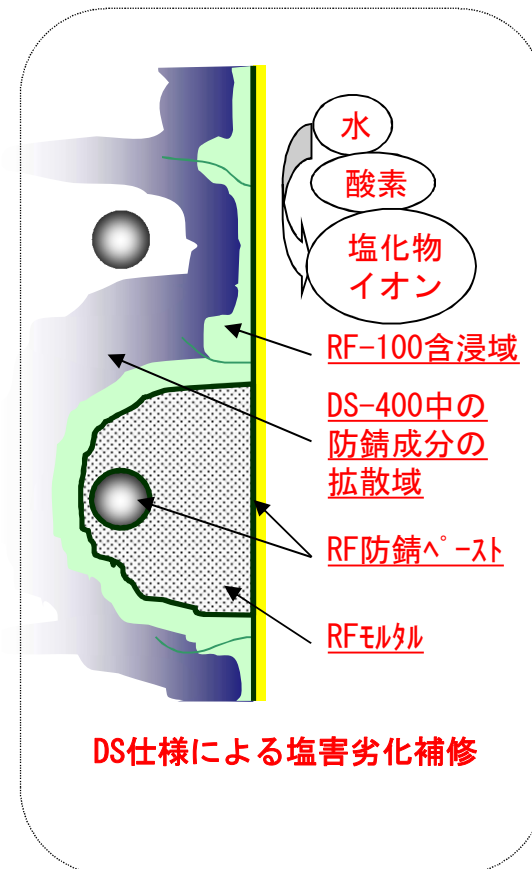
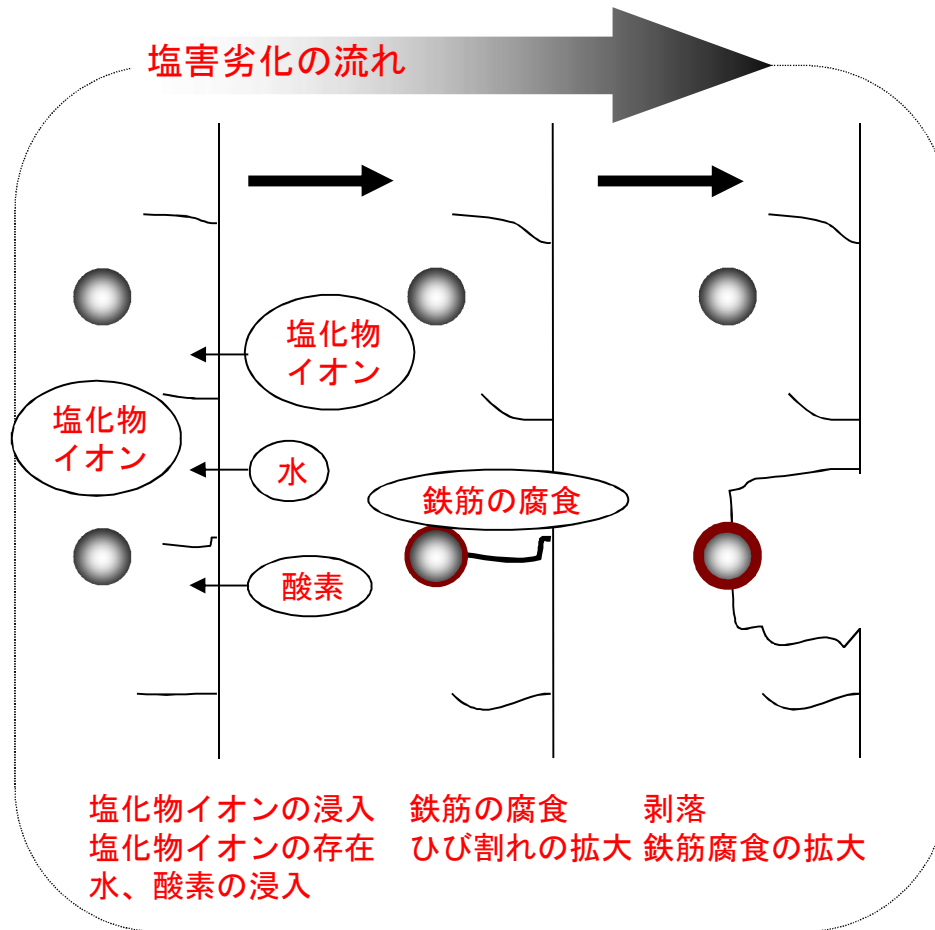
リフリート工法で使用する材料

リフリート工法は、塗布型含浸材、鉄筋防錆材、断面修復材を組み合わせた「総合的・恒久的な補修工法」です。

表ー 「リフリート工法」で使用する材料

一般名称	商品名	概要
塗布形含浸材	R F - 1 0 0	アルカリ性付与・表面固化(ケイ酸リチウム系)
塗布形含浸材	D S - 4 0 0	塗布形防錆材（浸透性防錆材）
鉄筋防錆材	R F 防錆ペース	防錆材入りポリマーセメントペースト
断面修復材	R F モルタル	防錆材入りポリマーセメントモルタル
下地調整材	R F 防錆ペース	防錆材入りポリマーセメントペースト

リフリート工法の施工概要



医療とコンクリート

- 診断

医師・歯科医師が患者の病状を判断するために、質問をしたり体を調べたりすること

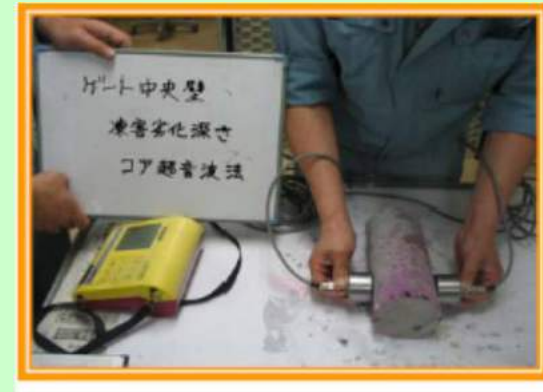
- 予防

病気になってしまったからそれを治すことより、病気になりにくい心身を作ること

- 投薬・手術

- 経過観察・リハビリテーション

- 診断



- 予防

- 補修・補強

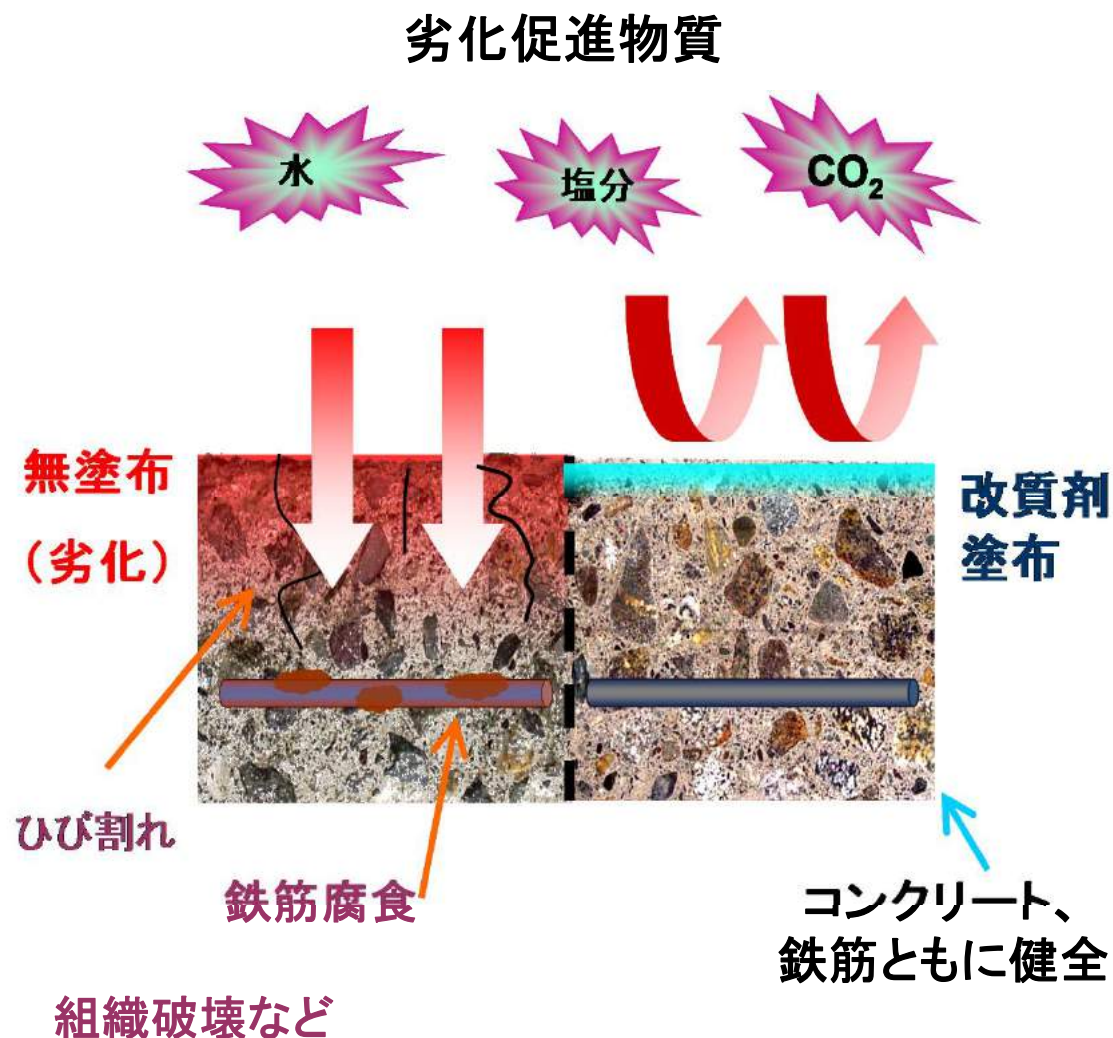
- 維持管理

凍害と塩害の複合劣化の対策

- 水分の供給を断つ
 - 水切りの適切な設計
 - 低透水性なコンクリートの適用
 - 収縮ひび割れの防止
- 塩分を浸透させない
 - セメントの選定
 - 水セメント比の選定
- コンクリート表面の緻密化・遮蔽性向上

今後の補修工法の姿～治療から予防へ

表面含浸・表面改質剤の役割



劣化要因の
遮蔽が重要

コンクリート表面
部分の強化

表面含浸・表面
改質剤塗布

リフリート工法の仕様

リフリート工法の仕様は、鉄筋コンクリートの劣化要因ごとに組み合わせて使用します。

また、予防保全もあります。

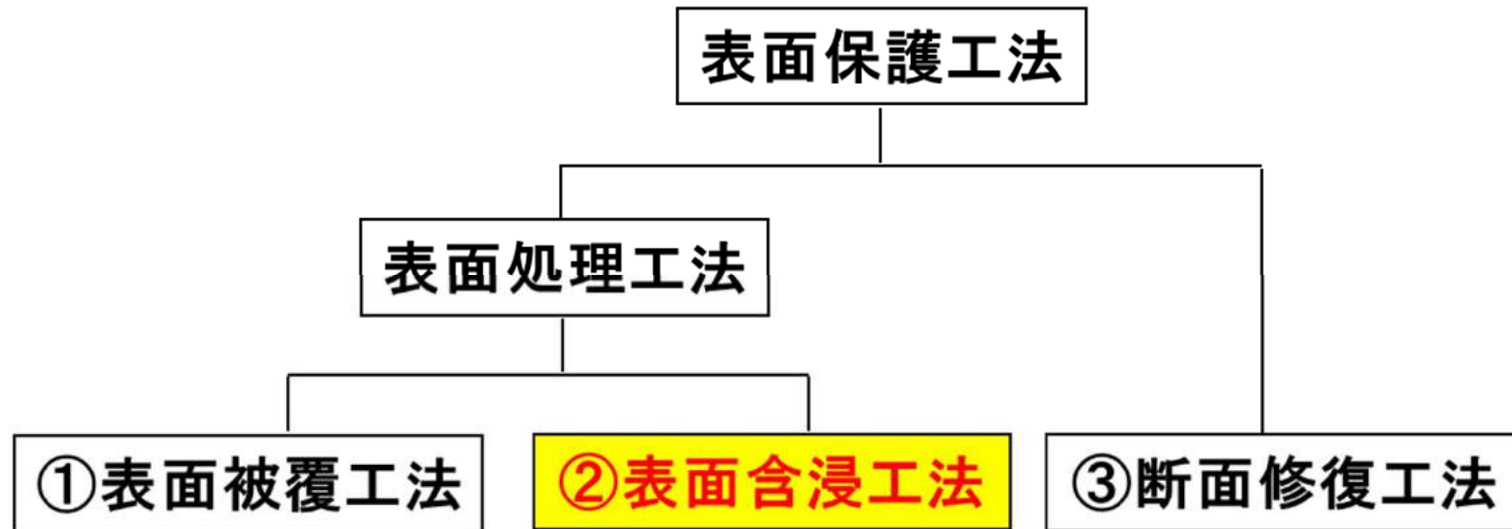
下表に、仕様の概要を示します。

リフリート工法の各仕様と使用材料

目 的	仕様	使用材料
中性化・経年劣化	RF仕様	RF-100,RF防錆ペースト,RFモルタル
塩害・鉄筋腐食	DS仕様	RF-100,DS-400,RF防錆ペースト,RFモルタル
予防保全	DS-HG仕様	DS-400,DS防錆ペースト,RFモルタル

表面保護工法とは

コンクリート構造物の耐久性の向上、劣化の抑制または補修を目的として、コンクリート構造物の表面に被覆または表面近傍断面に含浸層を施し、表面を保護する工法



- ・施工が容易
- ・施工が短期間
- ・安価

浸透性吸水防止材に関する学協会の動向

- ・2004年2月 「コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状」(土木学会)
: 材料の分類や、技術的な課題を整理
- ・2005年4月 「表面保護工法 設計施工指針(案)」
(土木学会): 設計・施工マニュアル、
表面含浸材の試験方法(案)
- ・2006年4月 「コンクリートの表面被覆および表面改質
技術研究小委員会報告」(土木学会)
: 新たな性能評価試験方法の提案など
- ・2012年7月 「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工
指針(案)」(土木学会)

表面含浸工法に期待される性能と適用効果

期待される性能	シラン系	けい酸塩系	
		けい酸リチウム系	けい酸リチウム系
中性化抑制	△	△	○
Cl ⁻ 侵入抑制	○	—	○
凍結融解抵抗性	△	—	△
化学的浸食抑制	—	—	—
アル骨材反応抑制 ²⁾	△	△	—
美観・景観の保全	—	—	—
剥落抵抗性 ³⁾	△	—	△

- 1) 表中の○は適用対象、△は適用する場合検討が必要(他の工法との併用など)、—は適用対象外を示す。
- 2) アルカリ骨材反応抑制は「標準的な遮水性により判定した。
- 3) 剥落抵抗性は付着性を基本に判定した。

表面含浸材の分類

シラン系表面含浸材

ケイ酸塩系表面含浸材

- ・ケイ酸ナトリウム系
- ・ケイ酸リチウム系

いずれの材料も効果を発揮する
ための機構が異なる



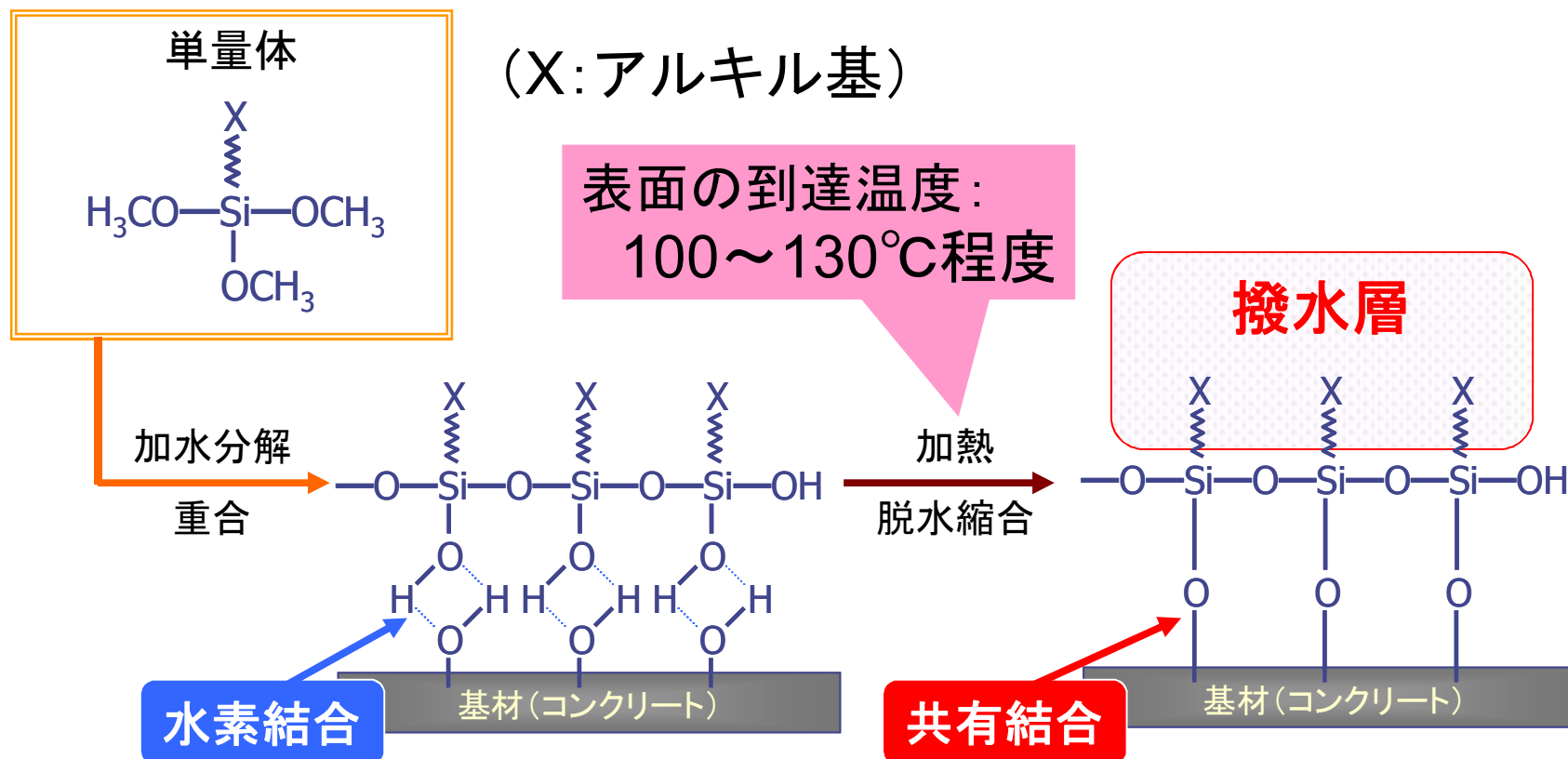
ケイ酸カリウム

ケイ酸ナトリウム・カリウム ➡ ケイ酸複合塩系

シラン系＋ケイ酸塩系 ➡ 撥水＋改質効果

シラン系表面含浸材の改質機構

アルキルアルコキシシランモノマーの反応機構 ※



※B. Arkles Chem. Tech., December, 765 (1977)

吸水防止層



吸水防止層の一例

凍害・塩害の複合劣化環境(北海道)

- 水セメント比:44.3%
- 北海道石狩市の沿岸部に位置し、
塩害と凍害の複合的な作用を受ける環境



・供試体の外観状況



(塗布有り)

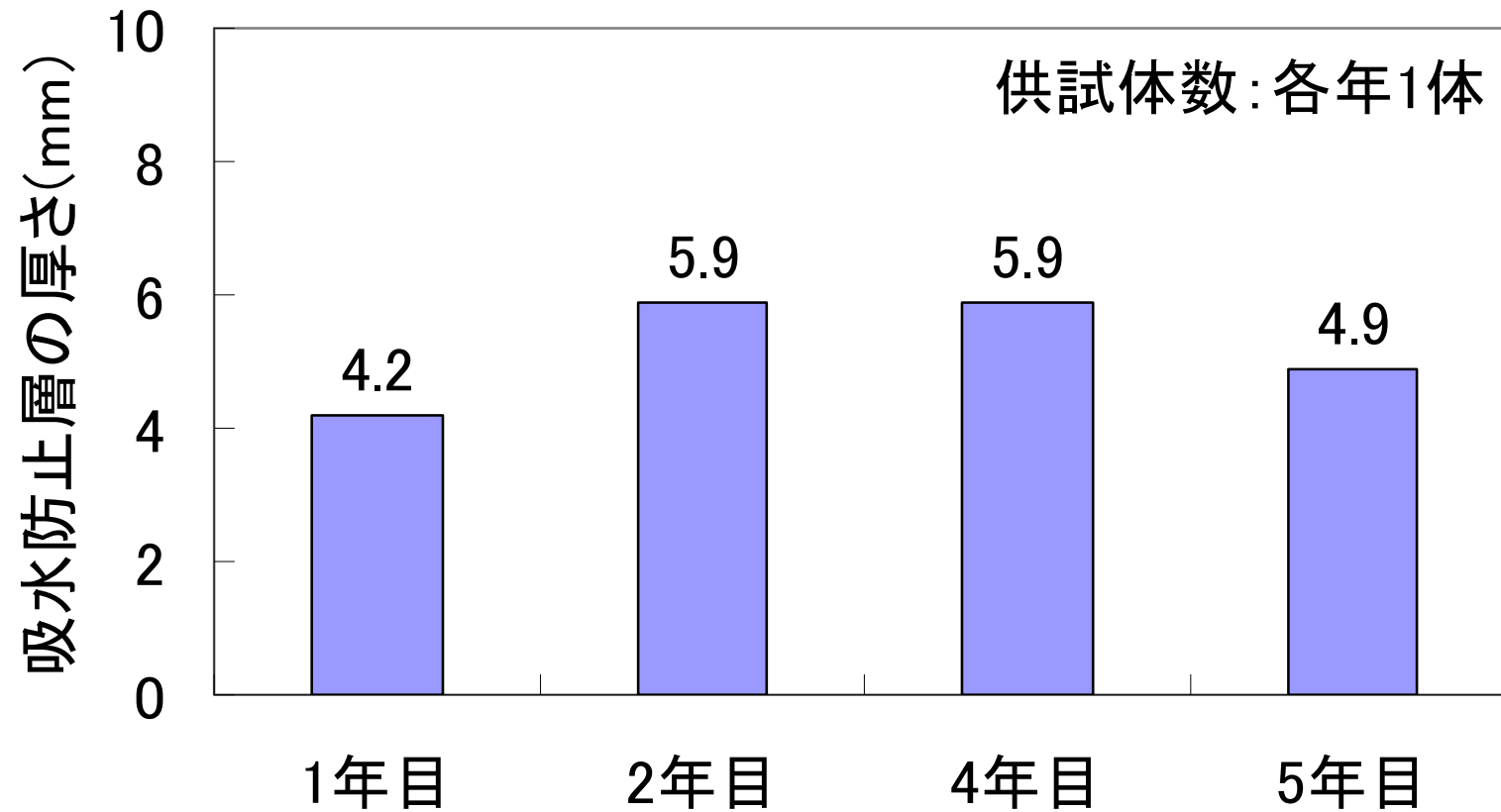


(塗布無し)

・実橋梁の外観状況

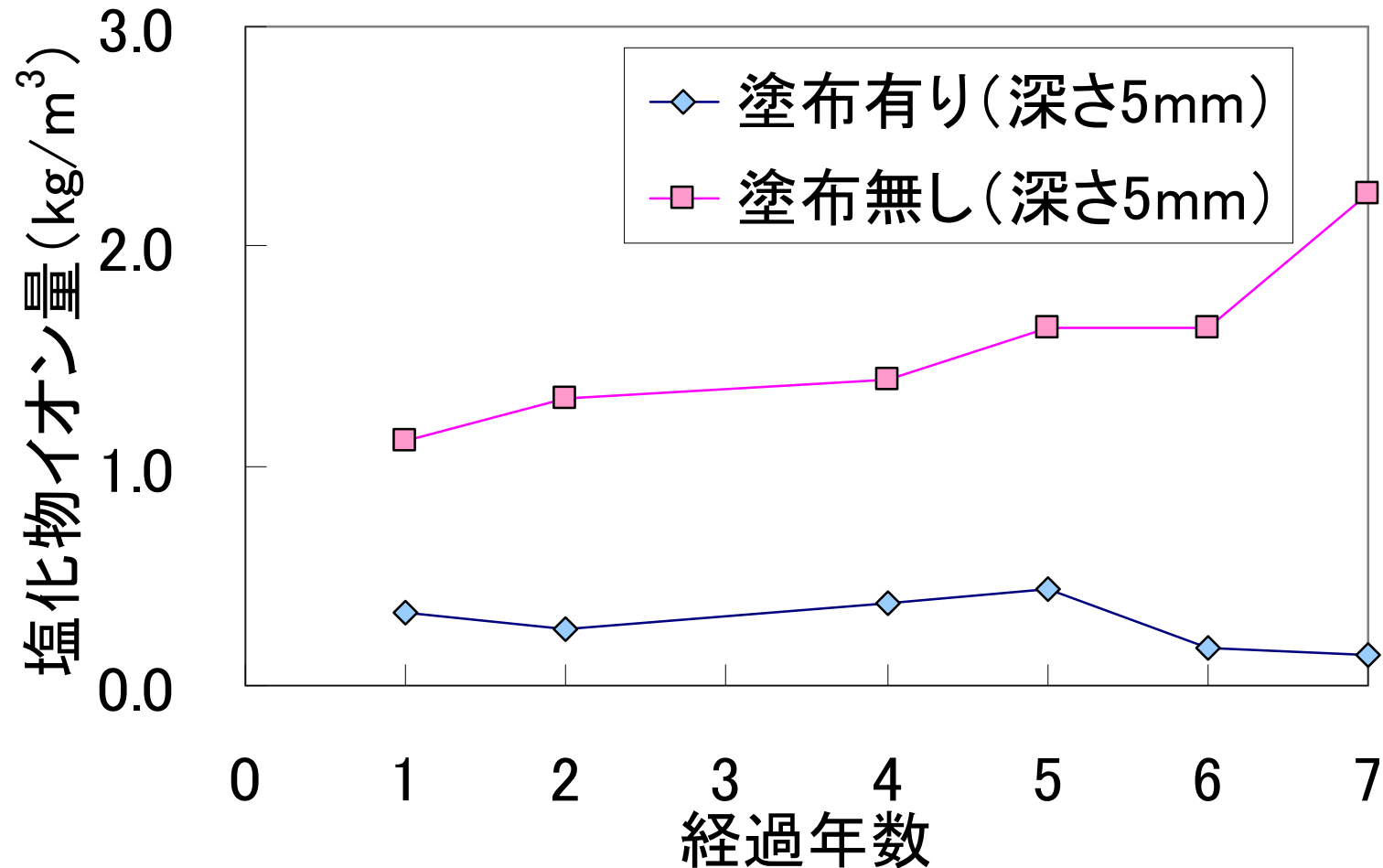


・供試体の吸水防止層



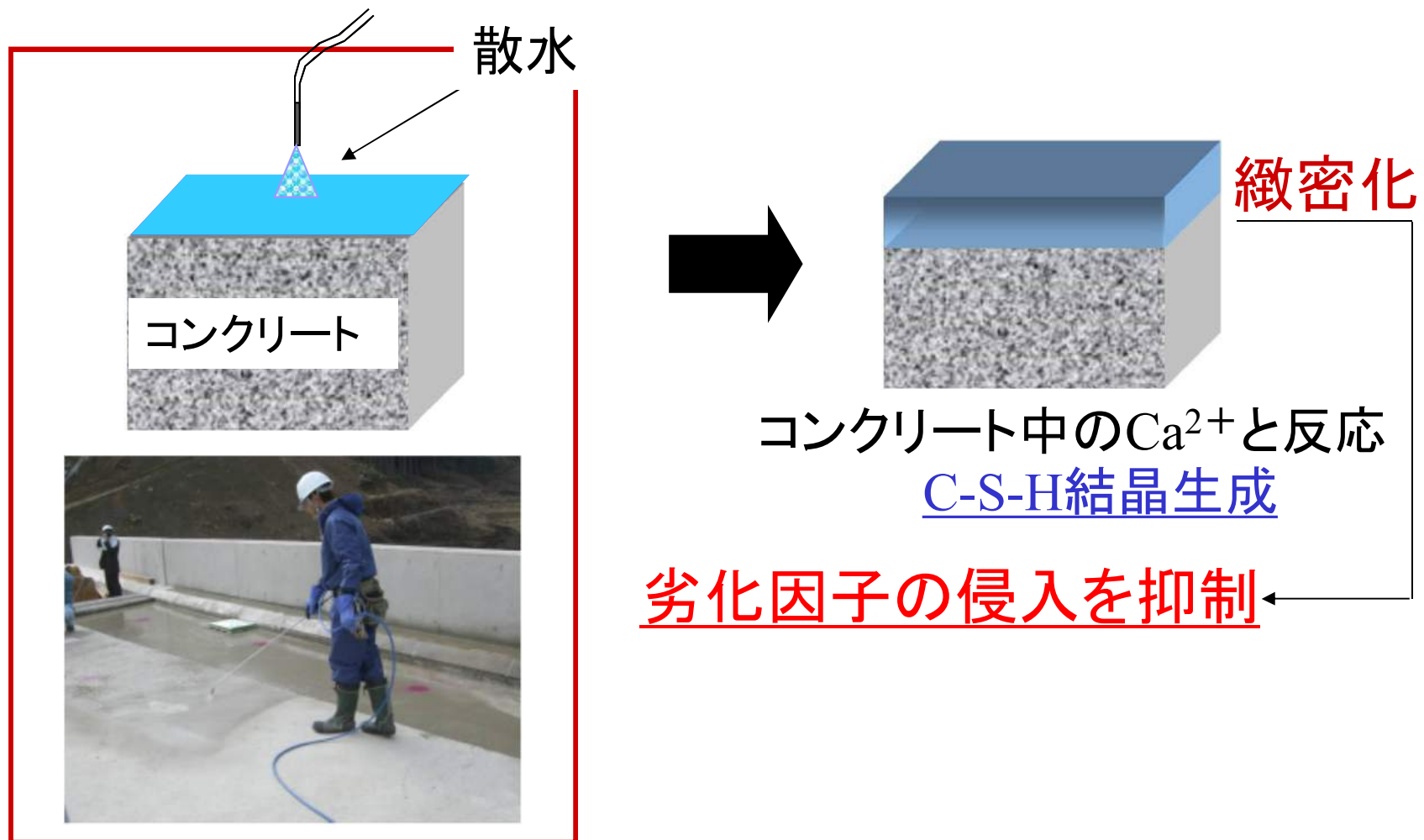
■ 経年に伴う吸水防止層の減少などは確認されず

・供試体の塩化物含有量



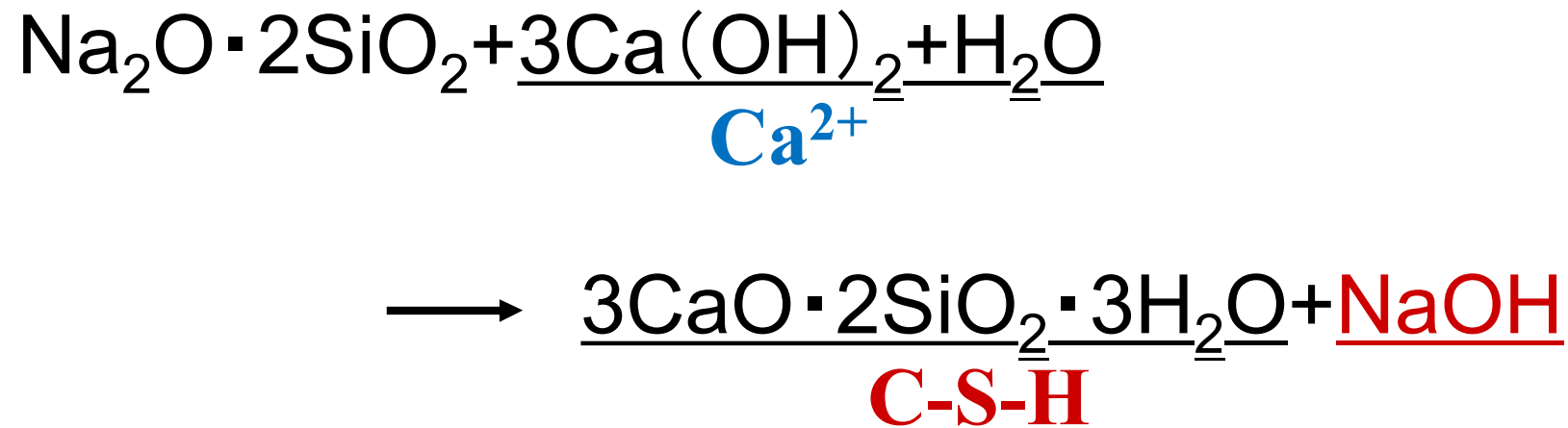
■ 吸水防止効果により、塩化物イオンの浸透を抑制

ケイ酸ナトリウム系表面含浸材の改質機構



ケイ酸ナトリウム系表面含浸材の改質機構

コンクリート内部での含浸材の基本反応形態



ケイ酸塩系表面含浸材

ひび割れ

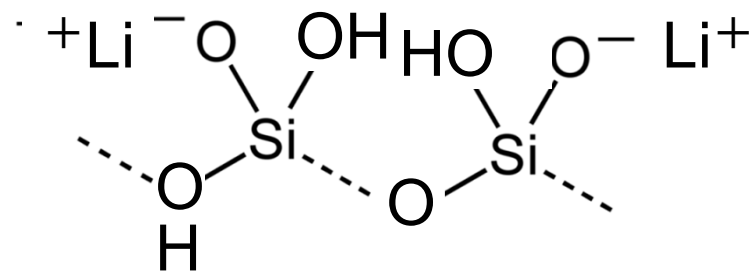
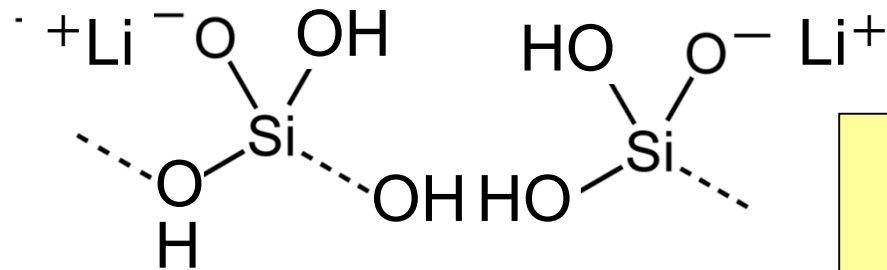
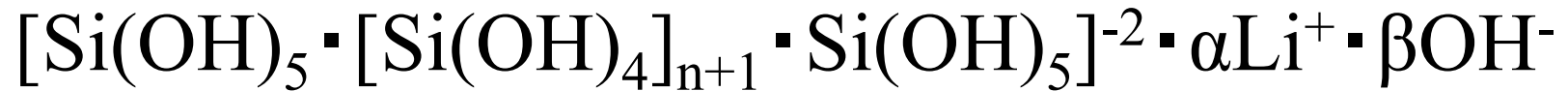


実際に、ひび割れ補修に使用されている

- 止水効果
- 劣化因子侵入抑制効果

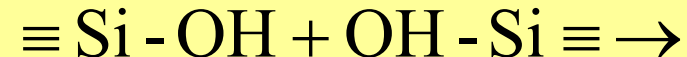
ケイ酸リチウム系表面含浸材の改質機構

水溶液中でのケイ酸リチウムの構造



乾燥すると

シラノール結合

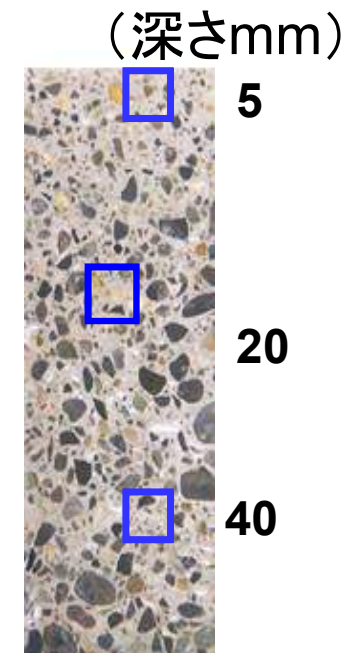
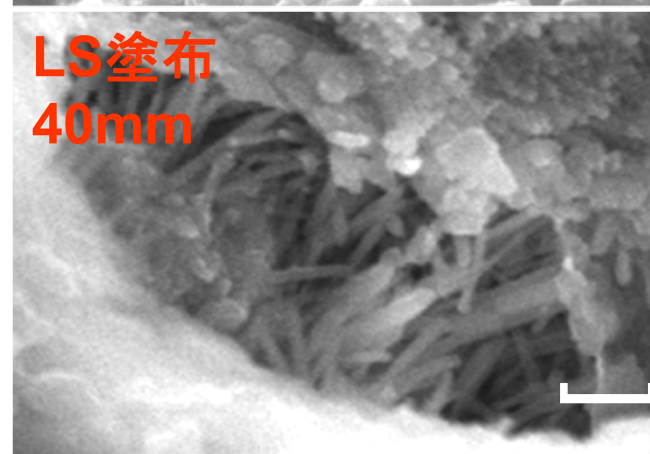
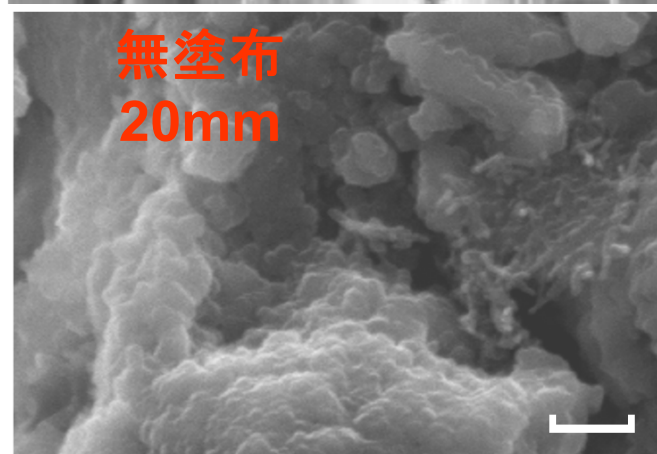
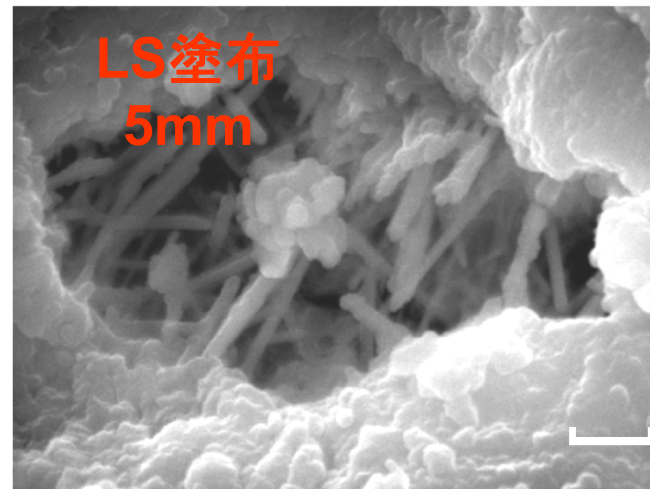
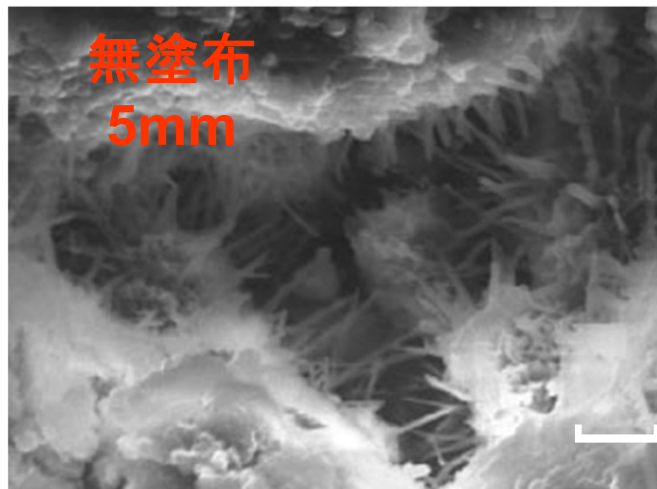


シロキサン結合

ケイ酸リチウム系表面含浸材の改質機構

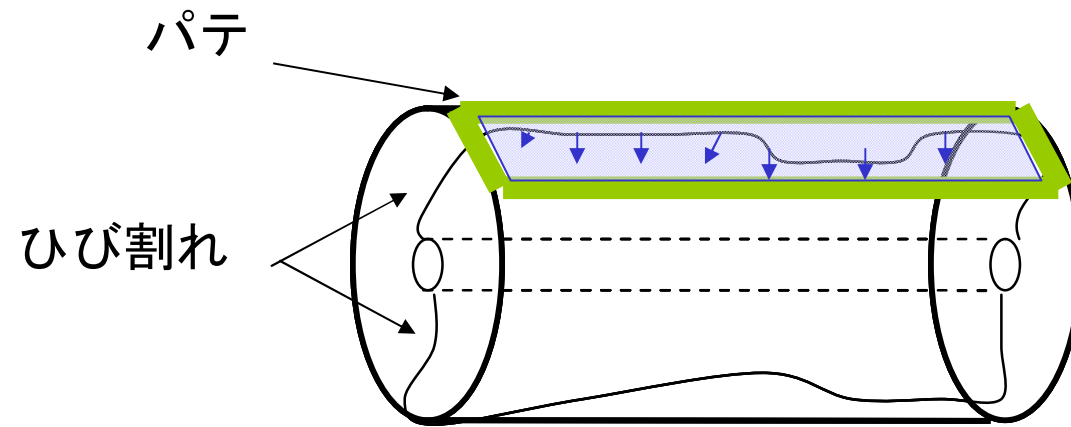
SEM観察結果

※図中└─┘ が1μm

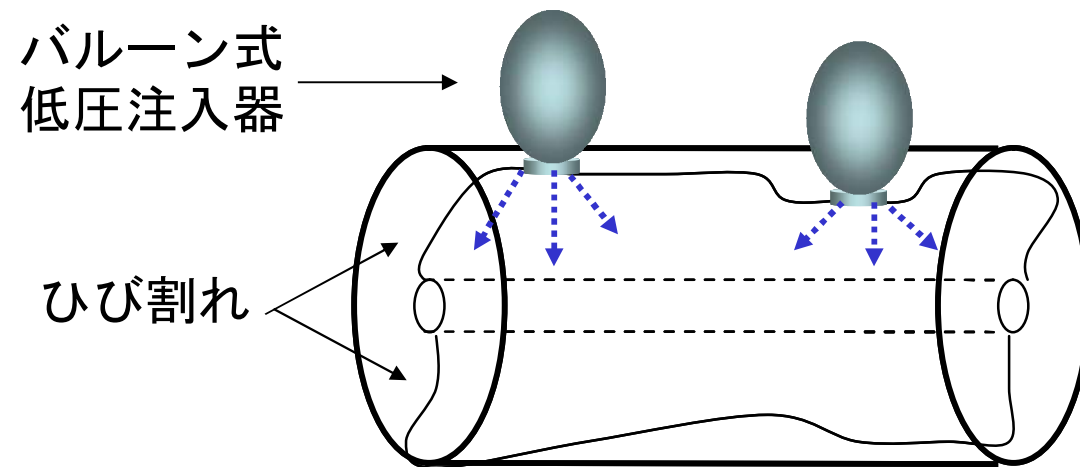


※ 無塗布の5mm部分の針状生成物はエトリンガイトと推察される。 56

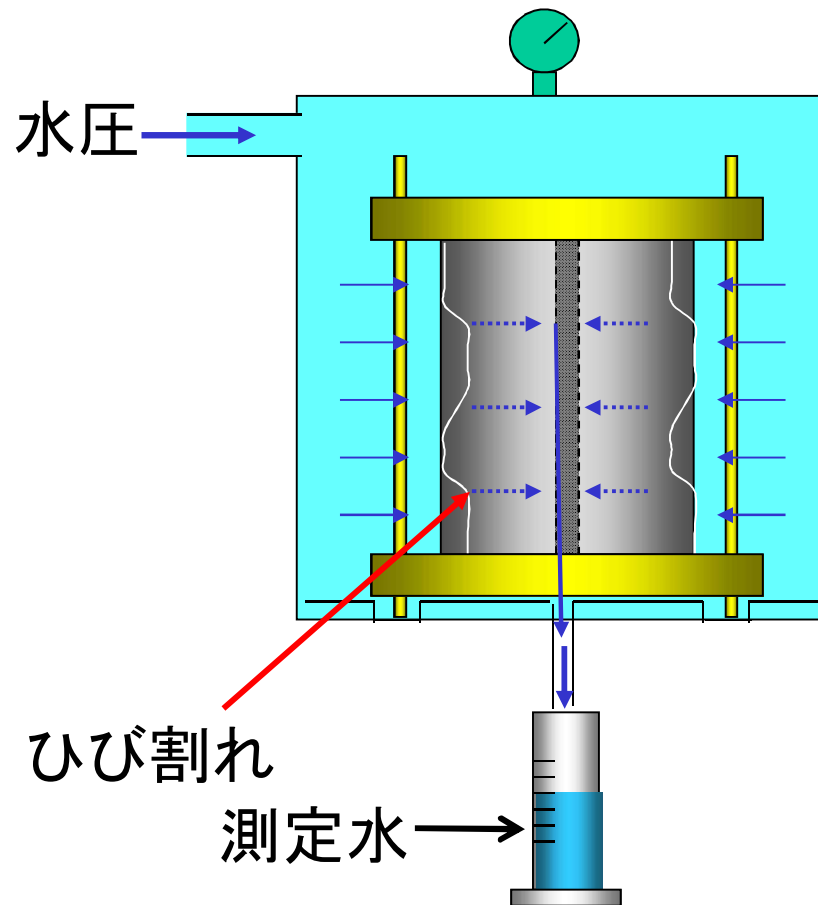
塗布方法



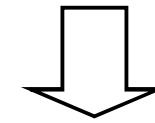
注入方法



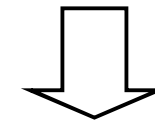
試験方法



測定水

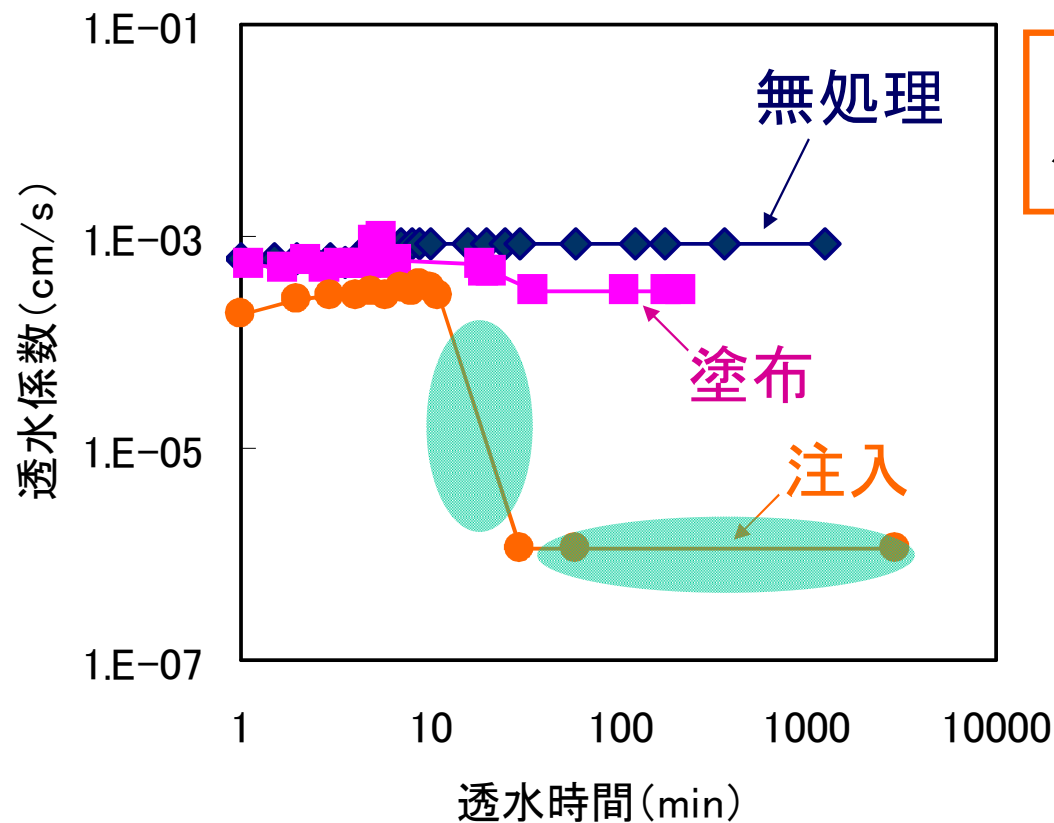


流量を算出



見かけの透水係数の算出

・ひび割れ幅0.26mm・透水圧力0.4N/mm²

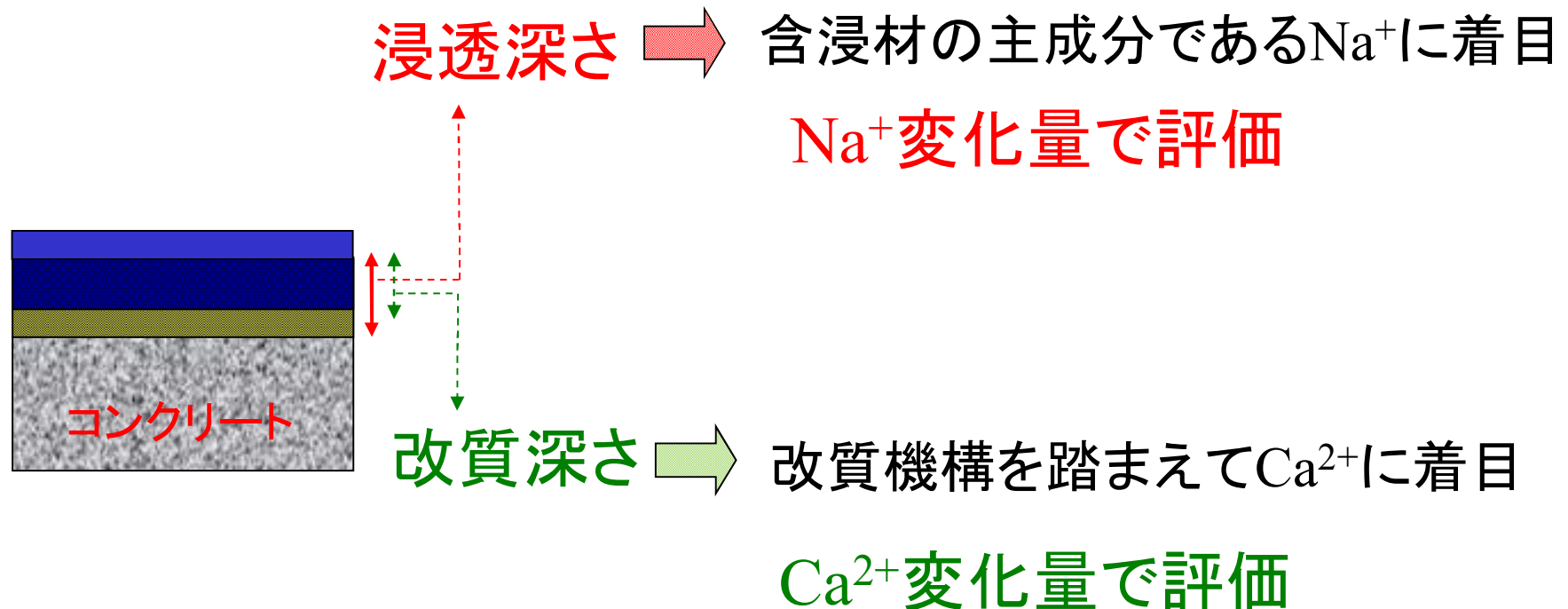


水が供給され、
ゲル化の効果が顕著に現れた

5日経過しても止水効果
は維持されている

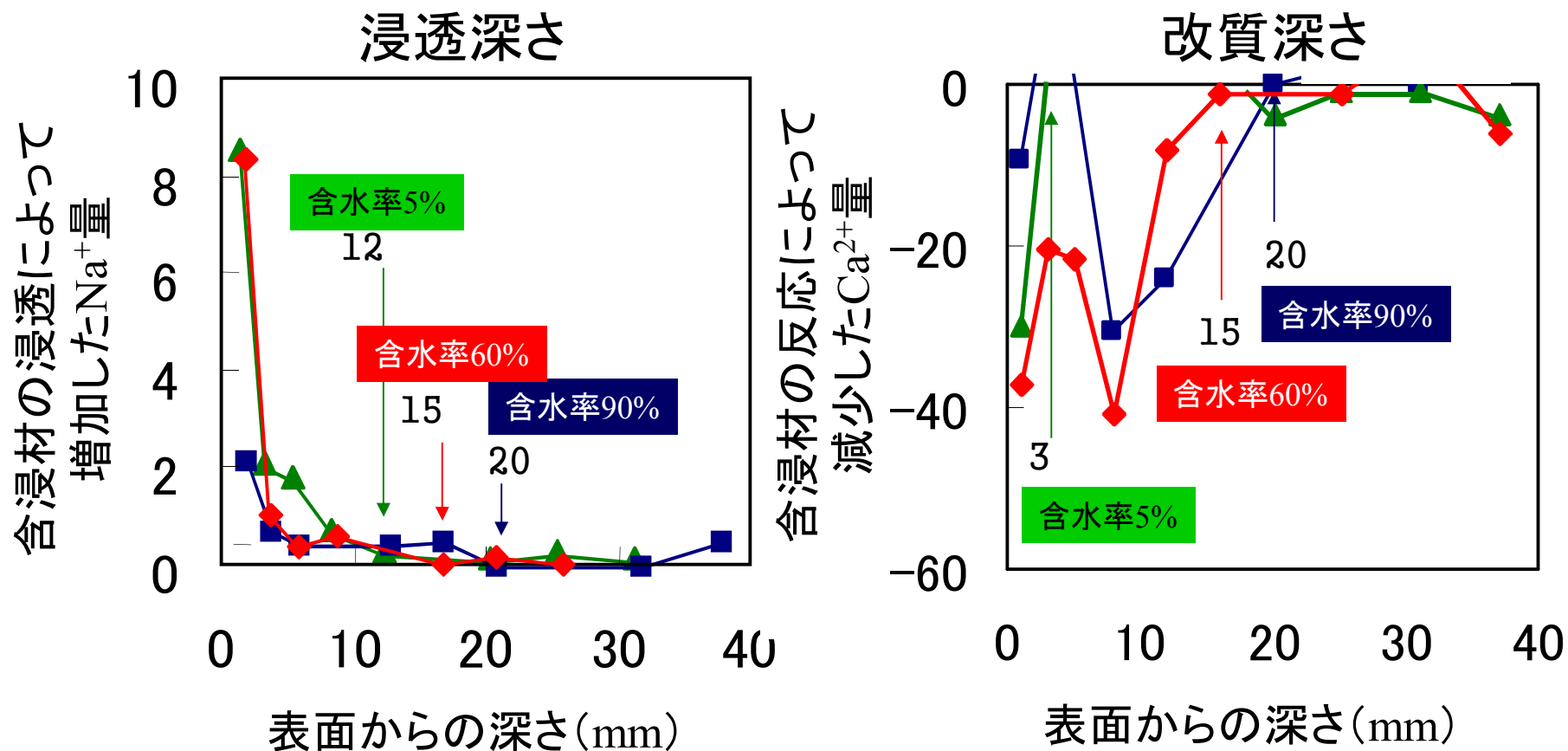
浸透特性と改質度合いの評価方法

- ①浸透した深さ
- ②実際に改質された深さ

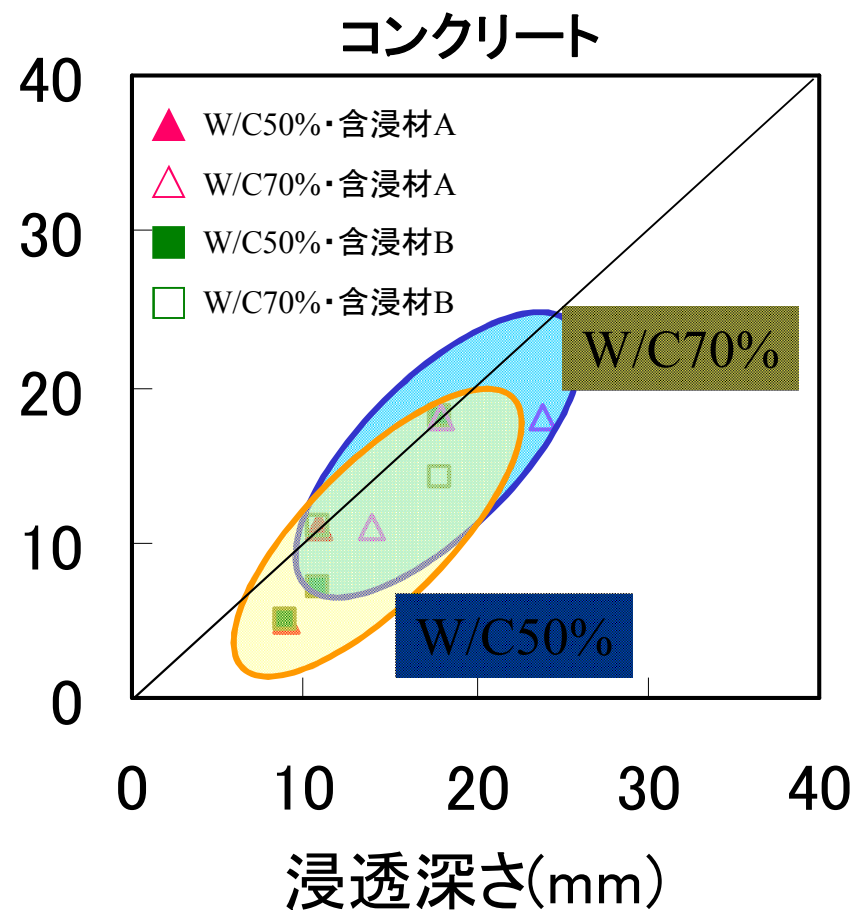
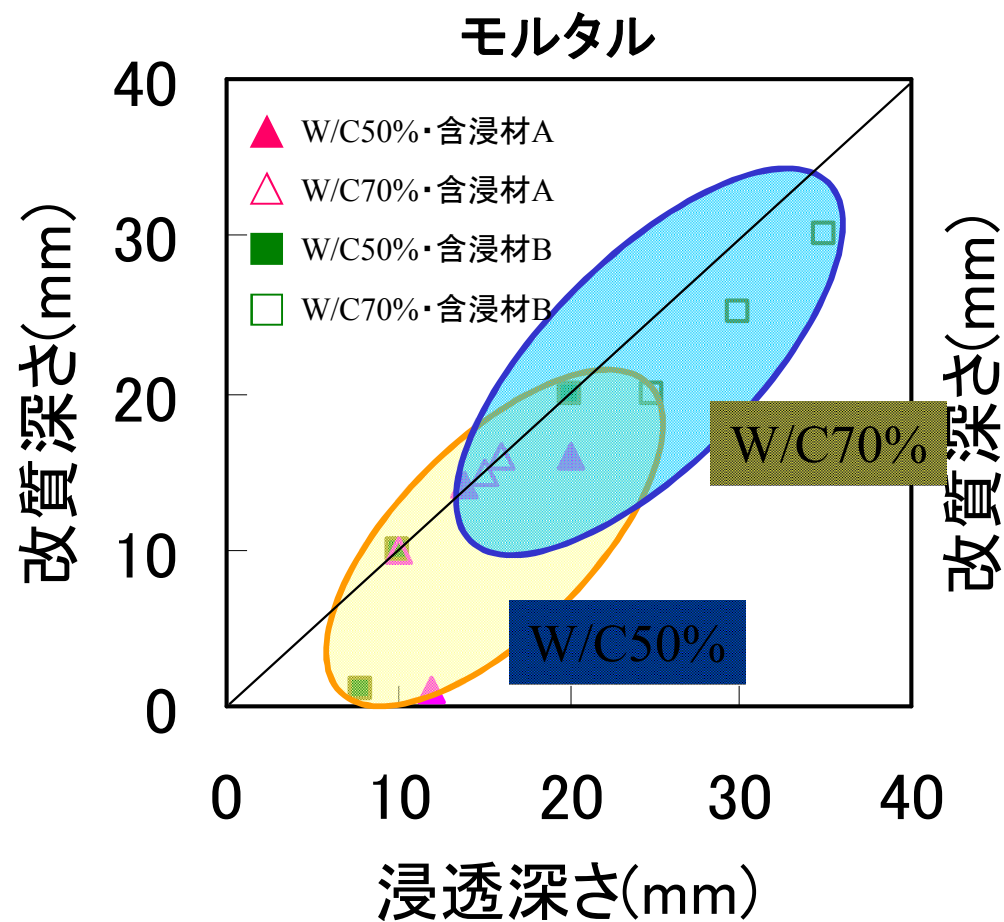


塗布時の含水率の影響

W/C50%モルタル(含浸材A塗布)



水セメント比の影響

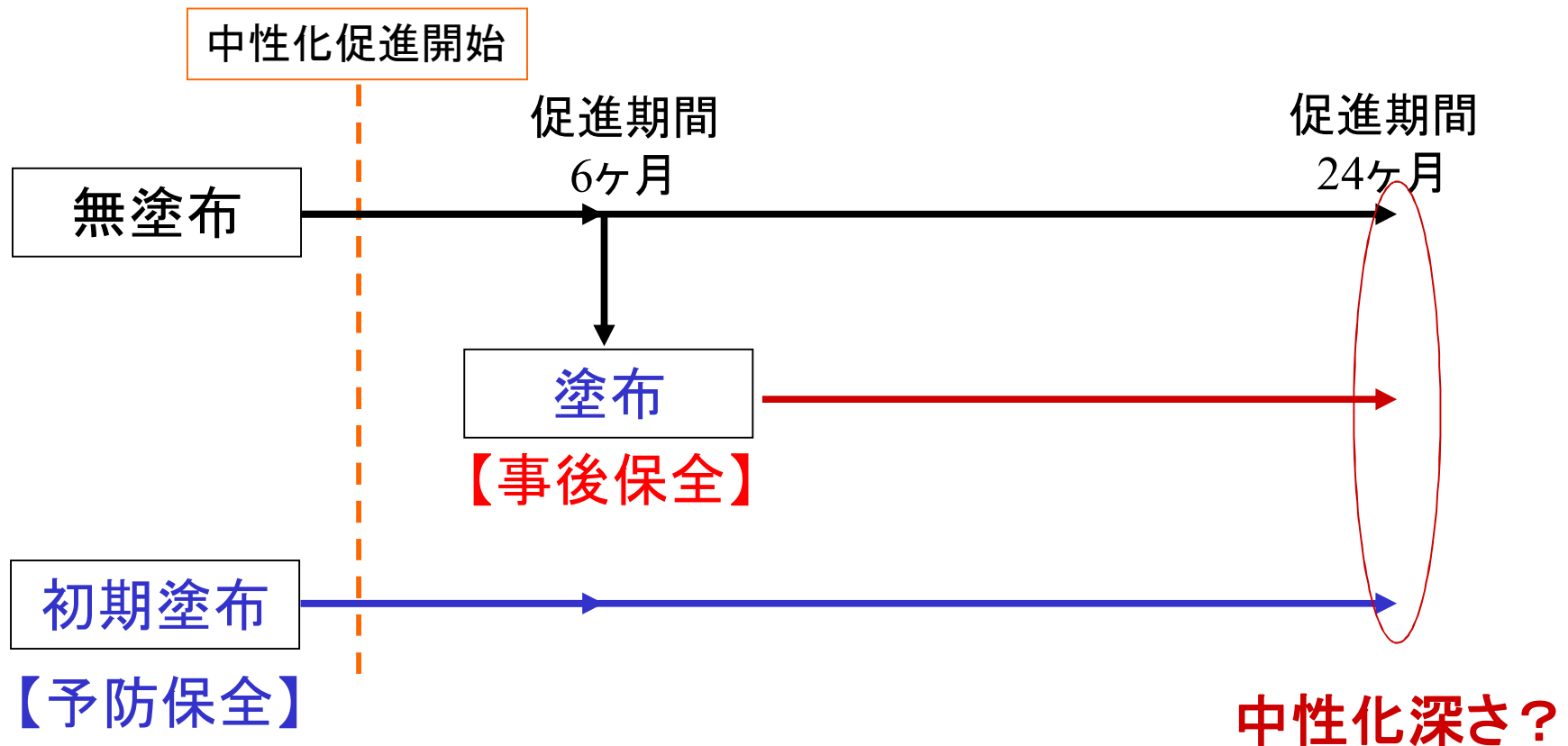


水セメント比が大きいほど、改質深さが大きい

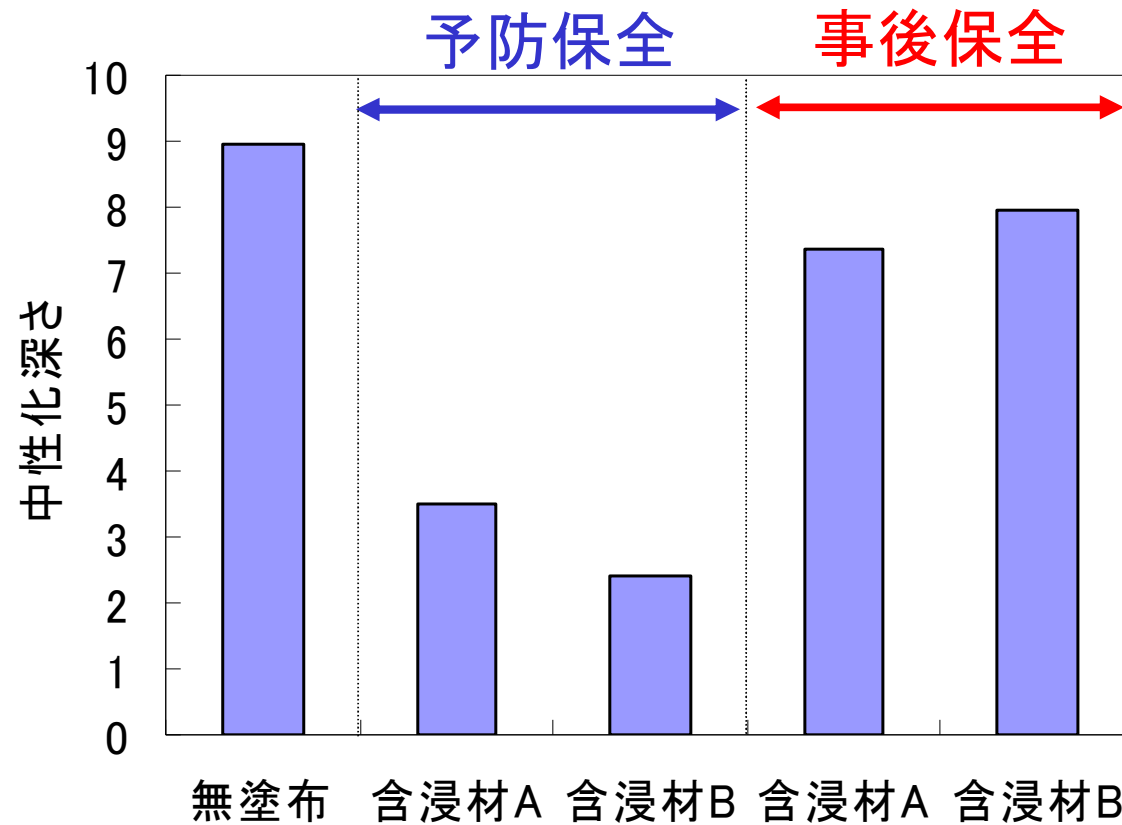
中性化に対する抑制効果

中性化促進環境

CO₂濃度5%, 湿度90%以上

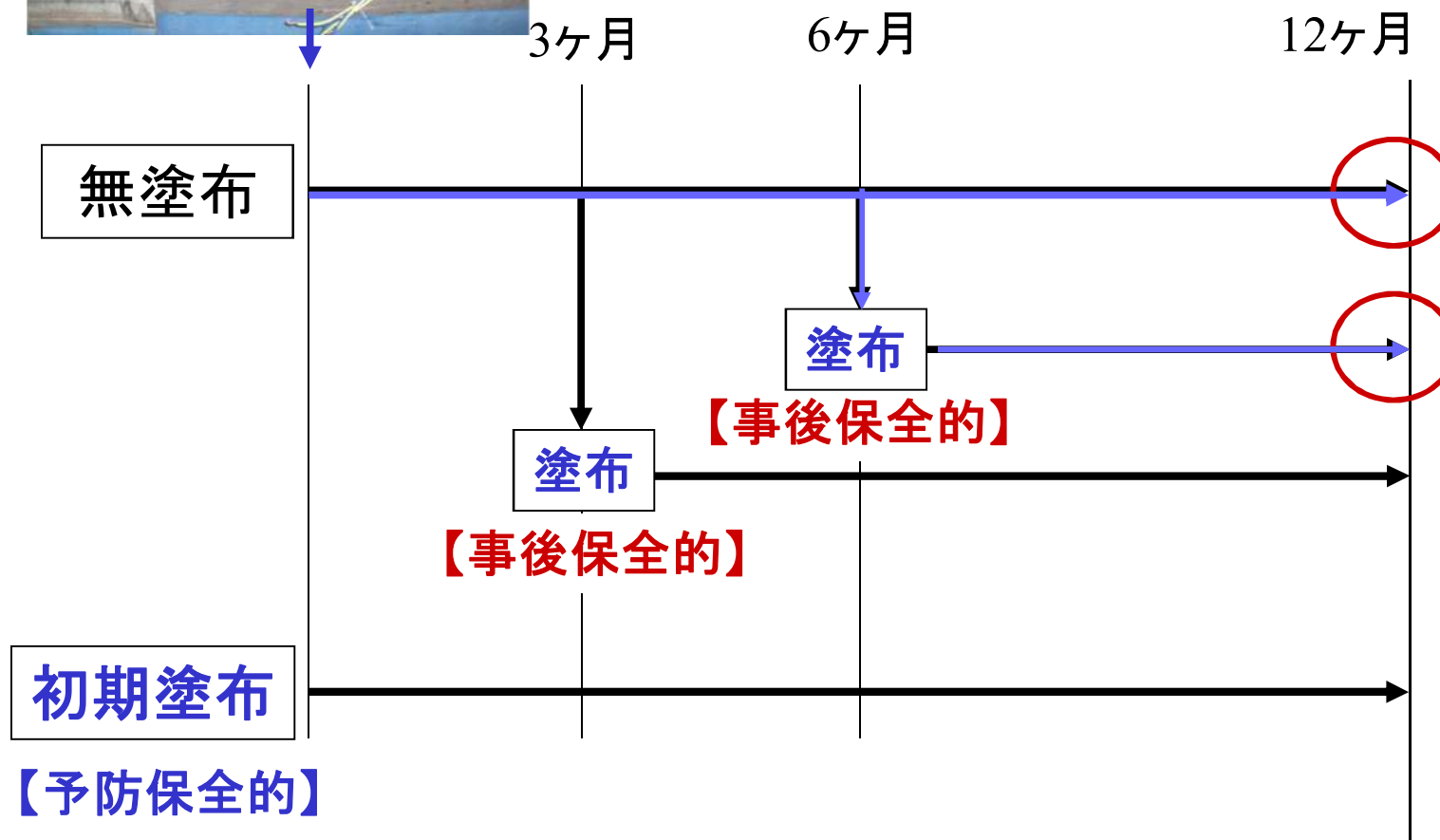


中性化深さ

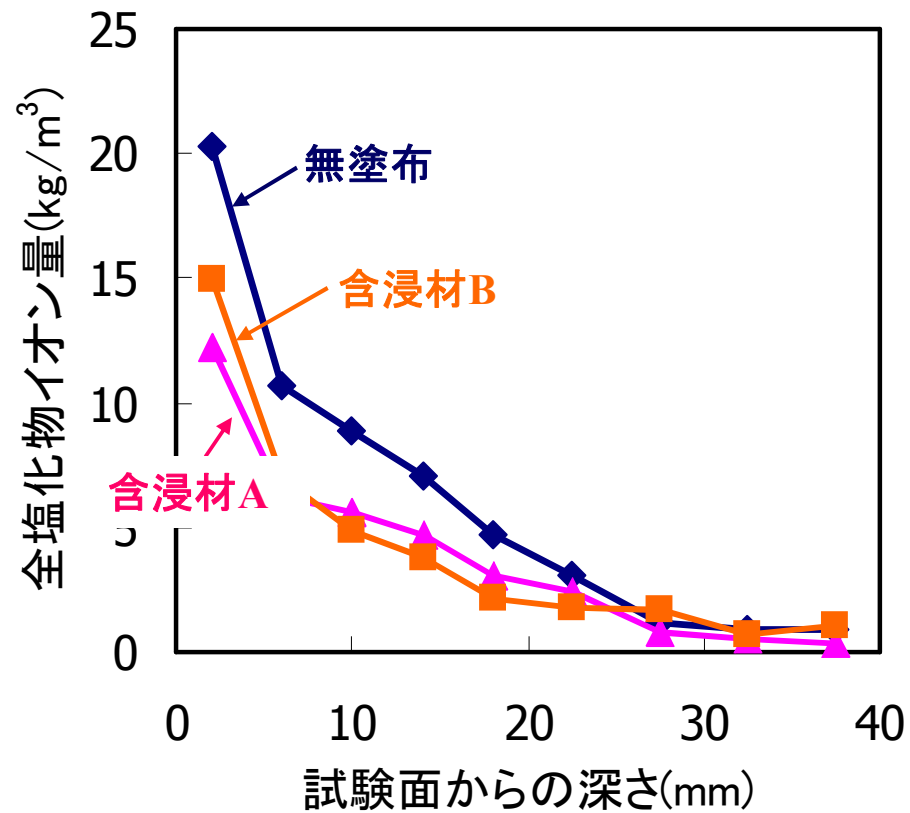


予防保全的に塗布した場合の方が効果は大きい

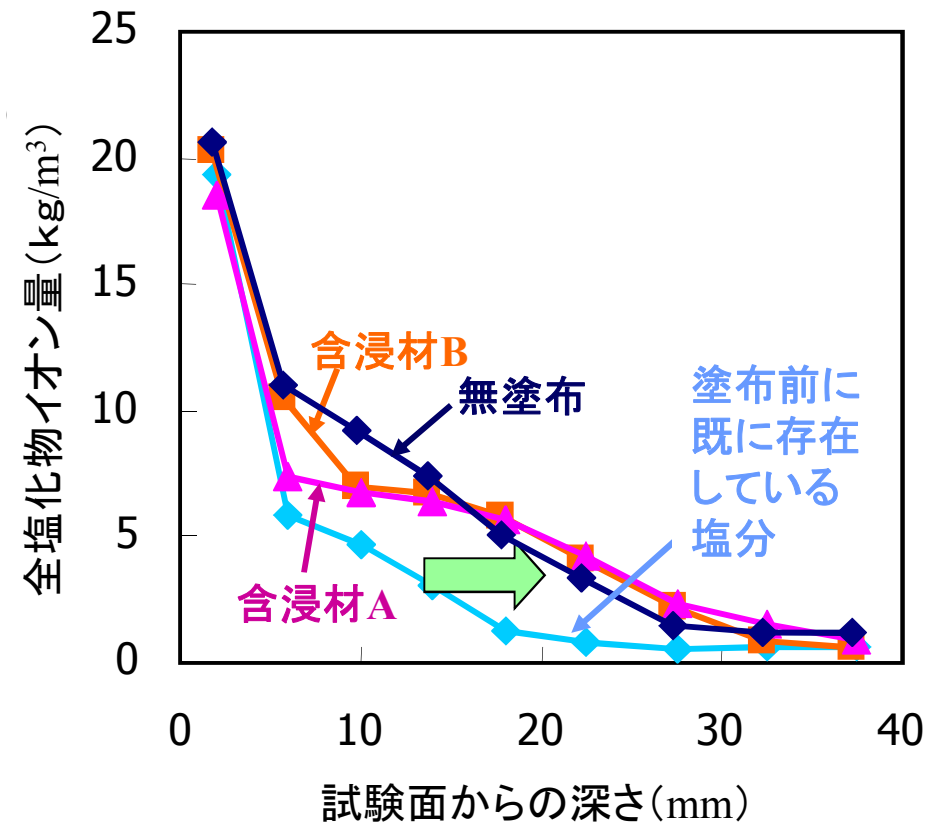
海水浸せき試験の流れ



予防保全的に塗布
～W/C50%～



事後保全的に塗布
～W/C50%～



表面含浸材の材料・施工の問題点

1. 設計

- 含浸材の選択・・・工法と一体で選択
- 新設構造物・・・維持管理を考慮
- 既設構造物・・・劣化進行状況の把握

2. 施工

- 施工時期・・・・・・いつ施工するのか？
- 施工範囲・・・・・・どこまで施工するのか？
- 含浸材の塗布量・・どのように適量を判定するのか？
- 品質管理・・・・・・含浸材の品質管理方法は？

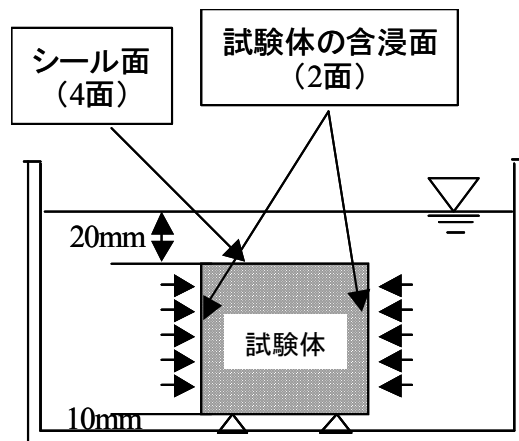
3. 検査

- 完了検査・・・塗布の有無、塗布量の確認方法は？

4. 維持管理

- 劣化予測・・・劣化進行の判定と再塗布時期の決定は？

吸水試験

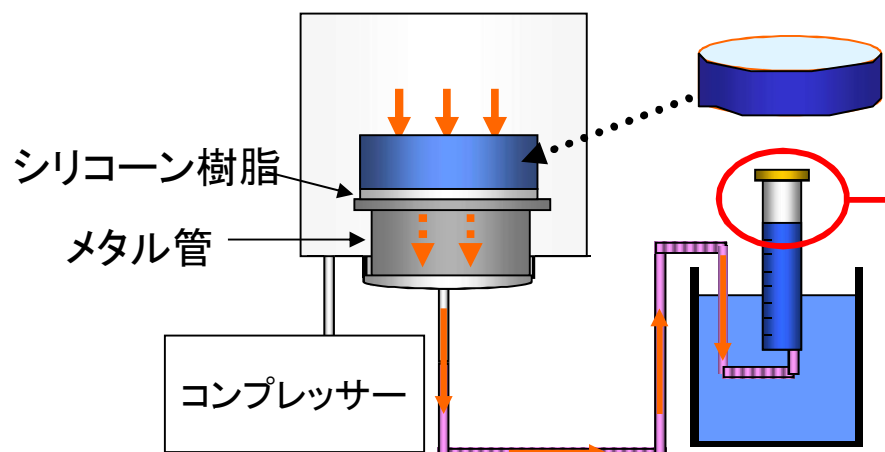


浸せき日数1, 2, 3, 5, 7, 14, 21, 28, 63日で、質量を測定

↓
吸水率
↓

無塗布に対する吸水比

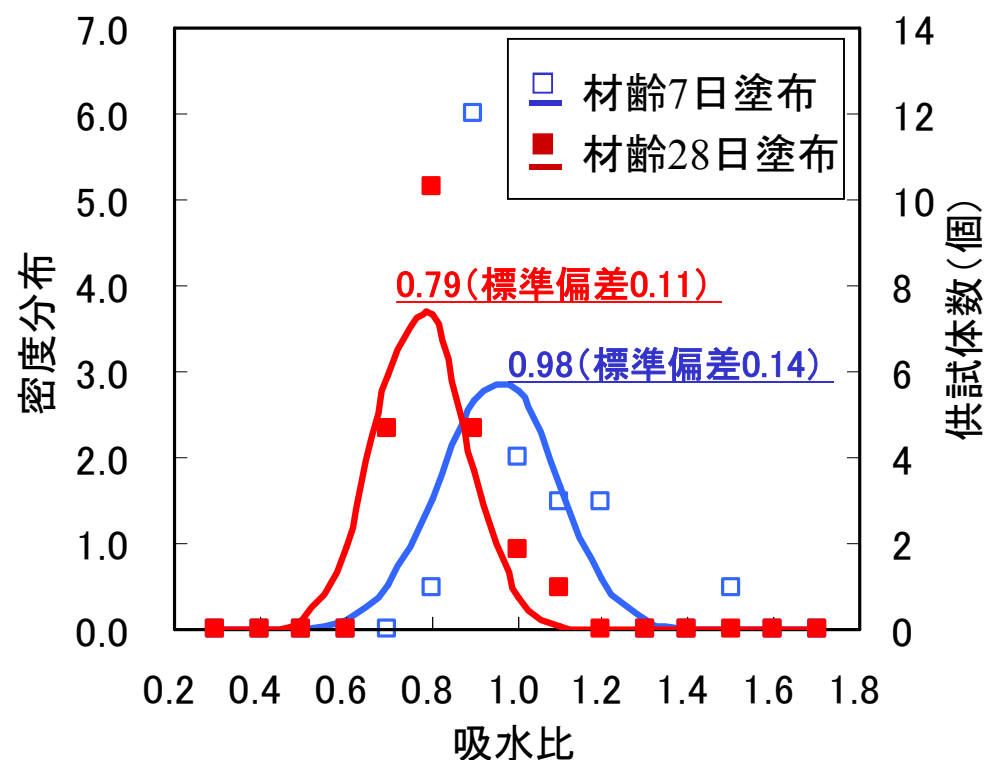
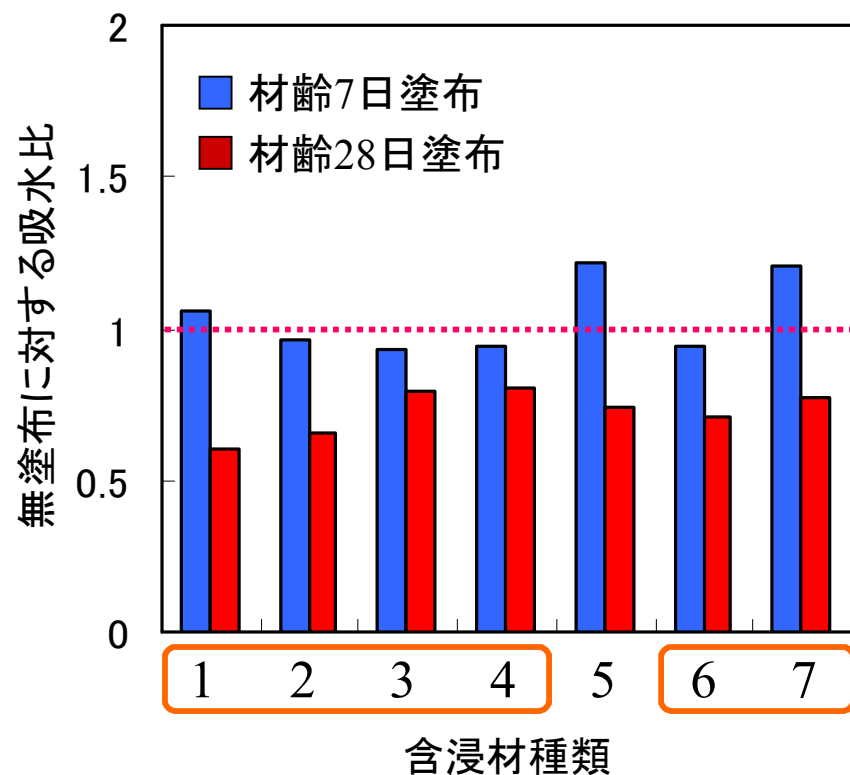
透気性試験



透気量を測定 → 透気係数

無塗布に対する透気係数比

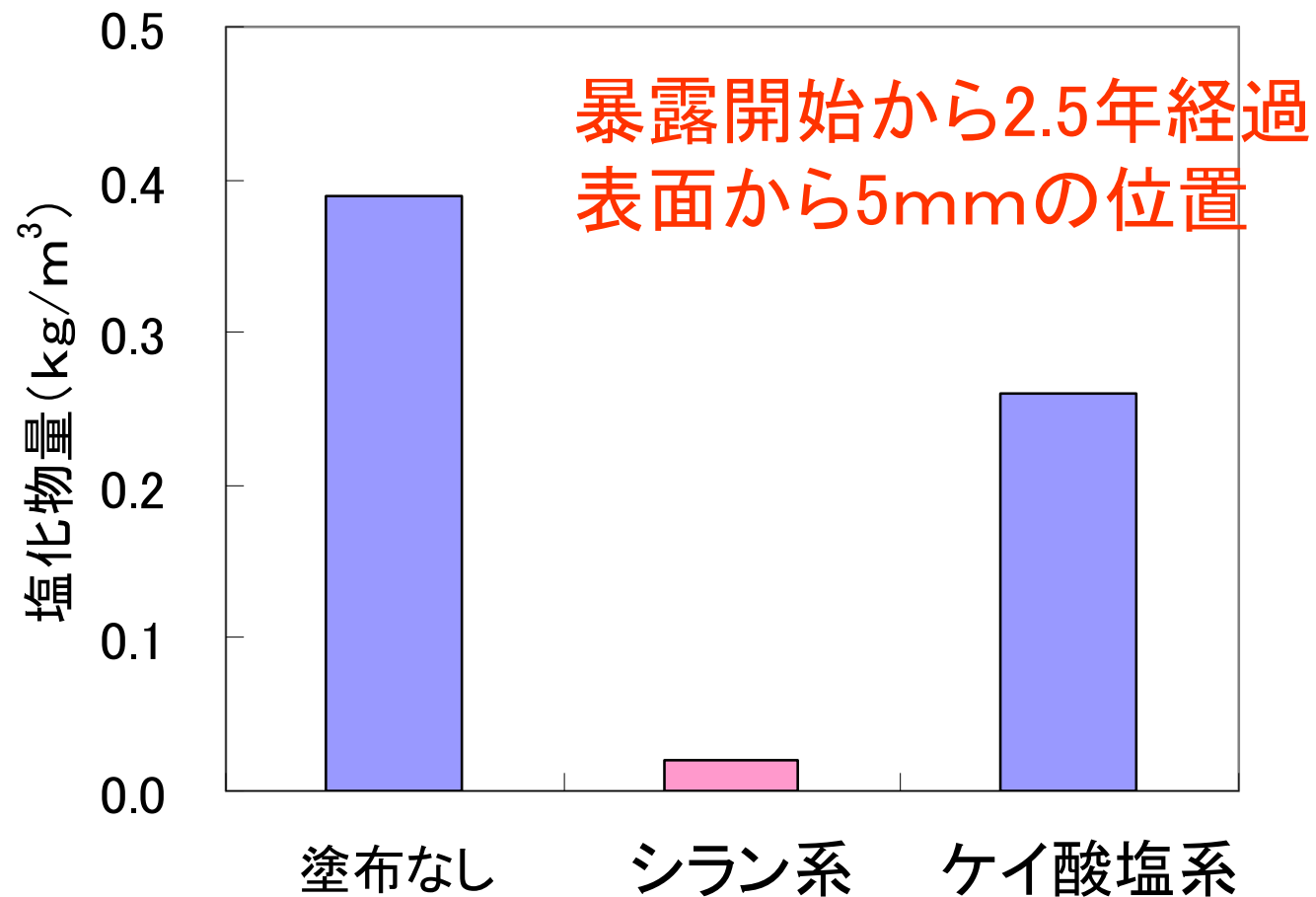
吸水比（浸せき期間63日）



材齢7日程度では、水和反応が十分に進行しておらず、水和反応過程で生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の絶対量が少ない

材齢28日に塗布したものは、含浸材種類ごとのバラツキも小さい

実橋梁と同一コンクリートで作製した 供試体による暴露試験



劣化した既設コンクリート構造物の延命対策

劣化部分を無害化

複層形成による遮蔽

再生可能な補修システム



凍害補修の事例 (けい酸塩系表面含浸材とポリマーセメントモルタルの組合せ工法)

脆弱化しているコンクリートの除去と清掃等



けい酸塩系表面含浸材
(表面強化)

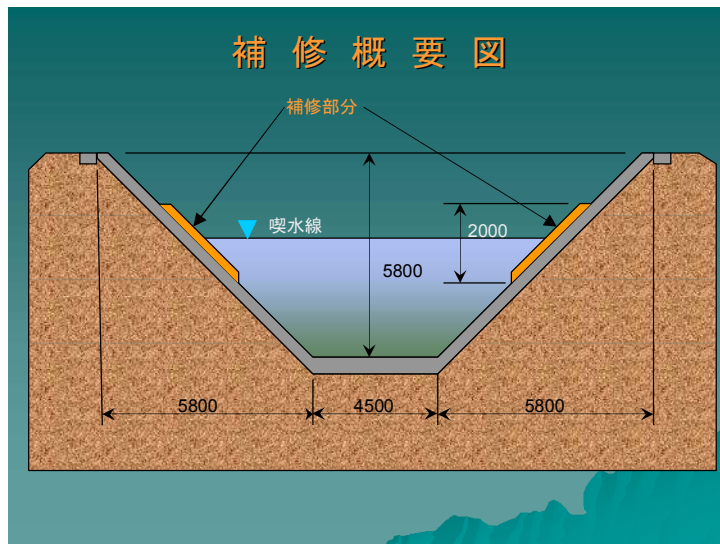
2012年発刊

土木学会『けい酸塩系表面含浸材の設計施工指針(案)』

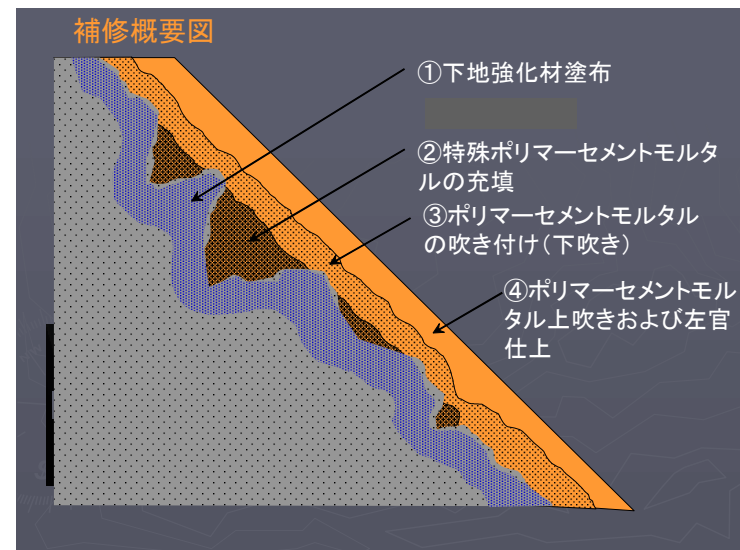
固化型(乾燥固形分は難溶性)に位置付け



ポリマーセメントモルタル(断面修復と表面被覆)



【対象物件の補修箇所】



【補修概要】

凍害補修の事例 (けい酸塩系表面含浸材とポリマーセメントモルタルの組合せ工法)

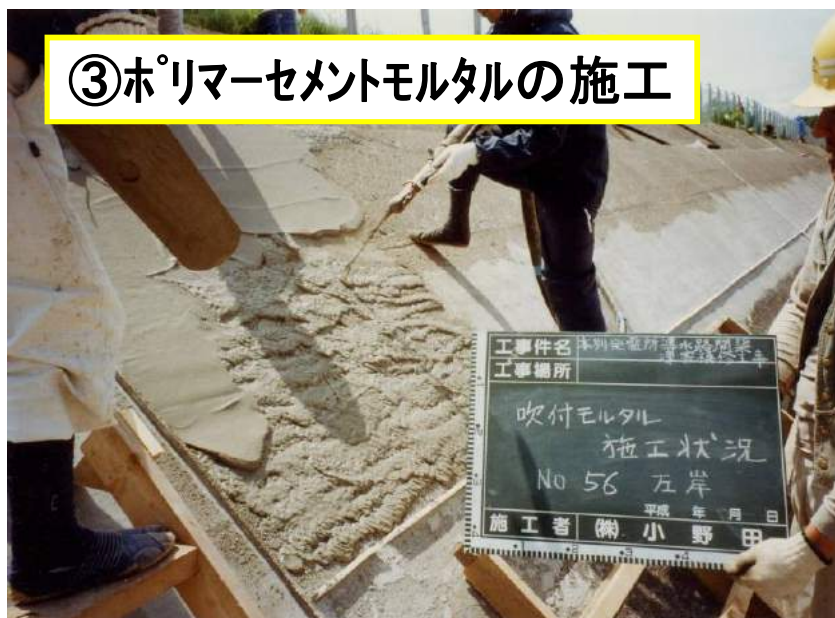
①劣化状況



②けい酸塩系表面含浸材の塗布



③ポリマーセメントモルタルの施工



④ポリマーセメントモルタルの仕上



ご清聴ありがとうございました

