

コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム2026
2026年7月30日（水） 13:20~14:20

コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修技術
ー予防保全としての水切りから亜硝酸リチウムによる高機能補修ー

福岡大学 櫛原 弘貴

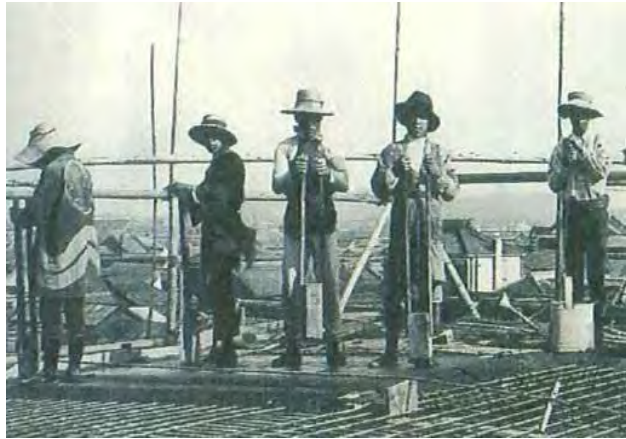
コンクリート施工の変遷

時代背景	施工状況	想定される損傷	想定される要因
昭和20年代 以前	手押車による人力施工 ※日当りのコンクリート打設量が小 床版厚 薄 かぶり 小 丸鋼鉄筋	床版ひび割れ：床版厚不足 鉄筋露出：かぶり不足 漏水 豆板	人力施工
昭和30年代	レディミクストコンクリート普及 競争設計方式導入 →剛性の低下 たわみ規定の緩和 床版厚 薄 かぶり 小 丸鋼鉄筋→異形鉄筋へ	床版ひび割れ：床版厚不足 床版劣化損傷 鉄筋露出 豆板	鉄筋不足 剛性不足 人力施工
昭和40年代	コンクリートポンプ打設 建設ラッシュ 自動車重量の増加 自動車台数の増加 床版厚 厚 異形鉄筋 スランプ 大	床版ひび割れ 鉄筋露出 塩害損傷 アルカリ骨材反応 中性化	剛性不足 不洗海砂の使用 海砂問題の発生
昭和50年代	流動化コンクリートの普及 海外の橋の崩落 床版厚 異形鉄筋	グラウト充填不足によるPC鋼材の腐食 塩害損傷 アルカリ骨材反応 中性化	耐久性を考慮した設計 塩害-アルカリ骨材反応の劣化が顕在化 不洗海砂の使用禁止

劣化・損傷
が集中



昭和初期の施工



引用：コンクリート施工の変遷（施工入門）



川砂利



引用：<http://livedoor.blogimg.jp/tknerima/imgs/7/a/5.jpg>

河川の川砂



- ・ 竹の棒、人力で入念な締固め
- ・ 少ない単位水量、流動性確保

コンクリートの品質が確保

大量に急速なコンクリート構造物の施工

1968年から
川砂利、川砂の採取規制



●機械化



●耐震性→過密配筋

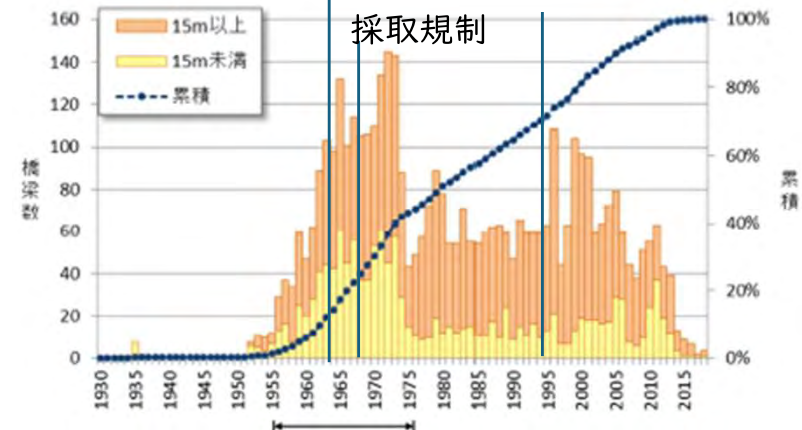


角張った形状の碎石、砕砂が導入



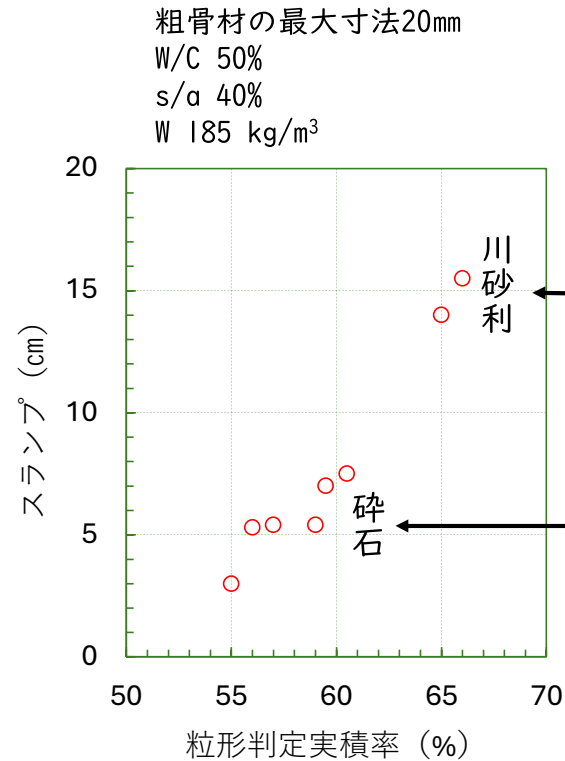
<https://www.pinterest.jp/pin/302374562464392376/>

ポンプ車導入 阪神淡路大震災



流動性確保のため単位水量増加

骨材が単位水量に及ぼす影響



W/C : 50
(スランプ8.0cm)

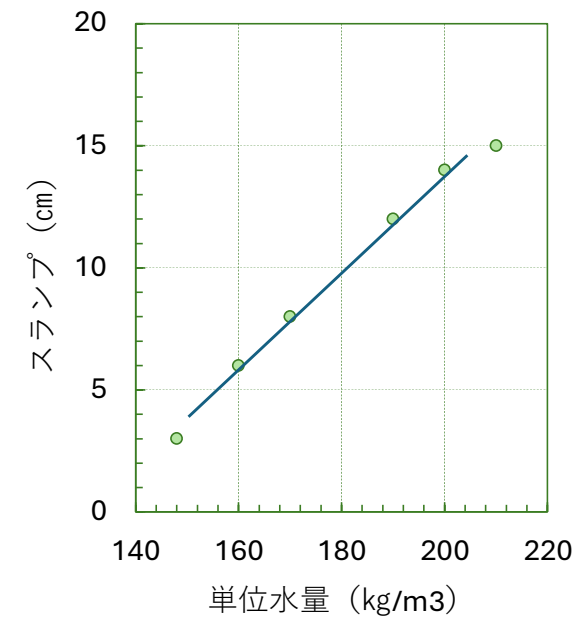
W : 160kg/m³
C : 320kg/m³



W/C : 50
(スランプ8.0cm)

W : 180kg/m³
C : 360kg/m³

スランプ(大) = 単位水量(多)



単位水量が多いと材料分離 → 初期欠陥につながる

九州北部地区の劣化調査を紹介

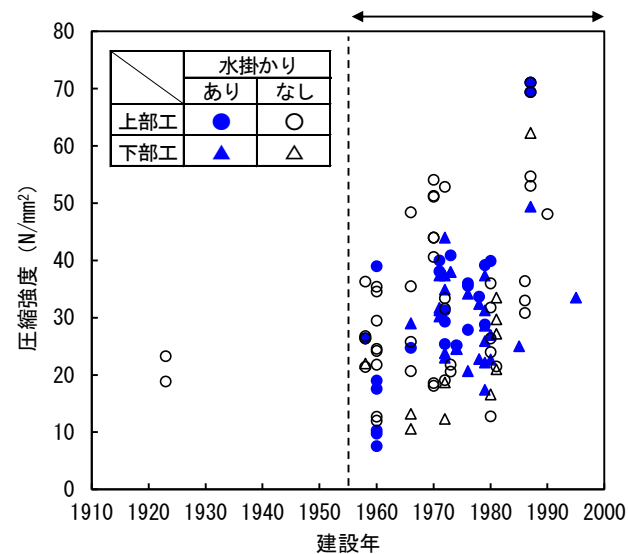
九州北部地区の劣化調査

約280箇所の劣化が顕在化した構造物を調査



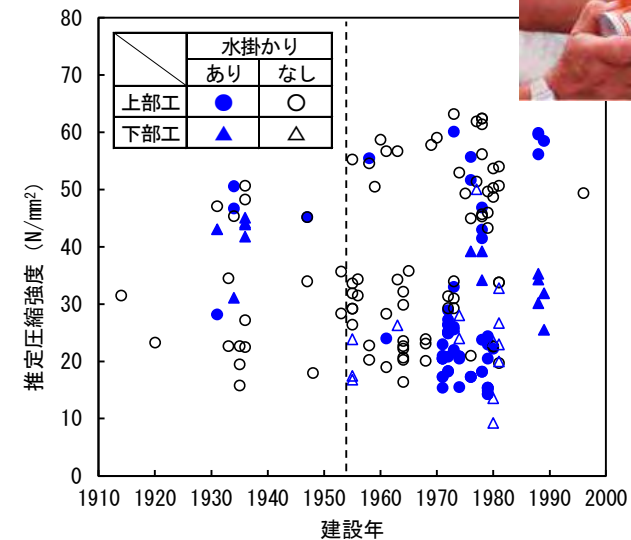
圧縮強度（コア法）

劣化が顕在化



- ・ 近年にかけて圧縮強度が増加傾向
- ・ 水掛かりの有無による違いは見られない

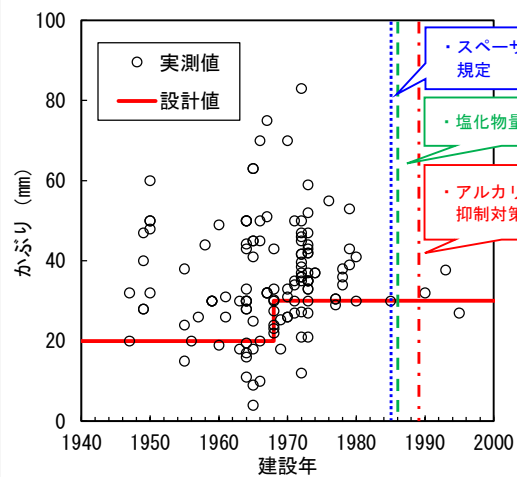
推定圧縮強度 (表面反発度硬度法)



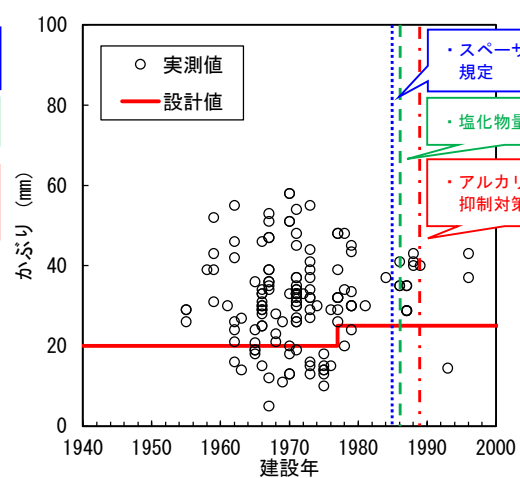
- ・ 建設年度との関係性を見いだせない
- ・ 水掛かりが低くなる傾向
 - 反発度は表層数mmに依存。
 - 50年経過すると水の影響で表層品質が変化

部材ごとの建設年とかぶりの関係

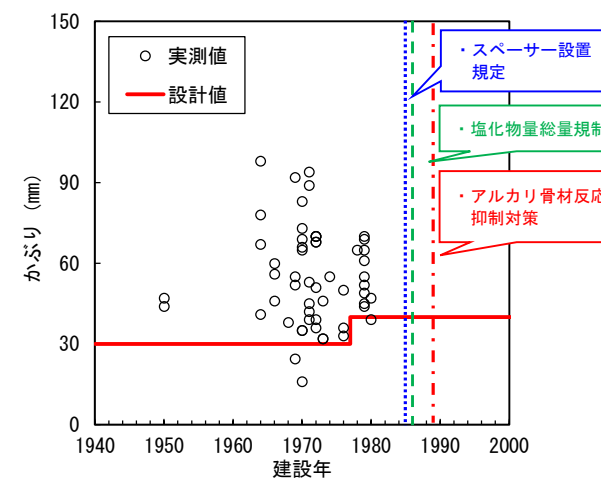
【版・横桁】



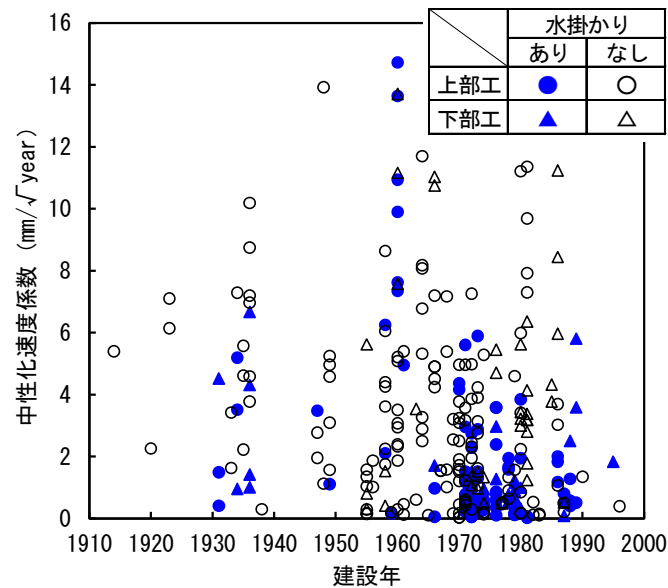
【PC桁】



【柱】



建設年と中性化速度係数



下部工のセメント（九州地区）

1975年以前 普通ポルトランドセメント
1975年以降 高炉セメントが使用され始める。

下部工の中性化速度係数は近年になるに従って、同年の上部工よりも高い傾向。

1950年～1980年代の構造物に集中

中性化速度係数にバラツキが大きい

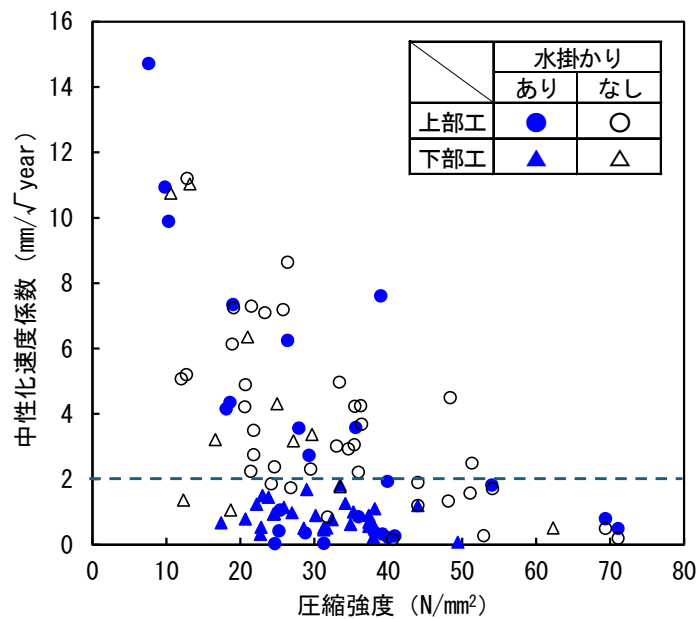
- ・ポンプ車が急速に普及
- ・フレッシュコンクリートの圧送性確保を目的として加水されていた可能性

加水により当初設計で想定した水セメント比よりも大きいことや，材料分離抵抗性の低下により初期品質が低下した可能性。

水掛かりが中性化速度に与える影響

- ・上部工で，「水掛かりあり」の方が「水掛かりなし」よりも小さくなる傾向。
- ・水の供給によって含水率が比較的に高く保たれるため，二酸化炭素が浸入し難い。

圧縮強度と中性化速度係数の関係

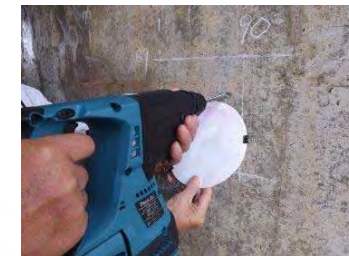


圧縮強度が大きいものほど、中性化速度係数は小さい傾向

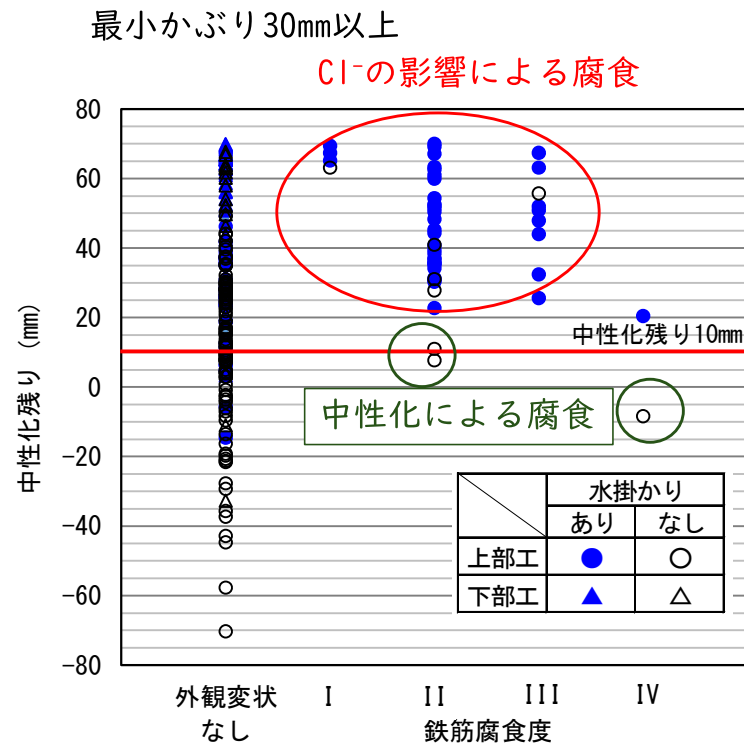
圧縮強度が40N/mm²以上では、中性化速度係数が2.0以下。
100年で20mm程度。



中性化の影響は軽微であり、劣化は顕在化しない。



中性化残りと鉄筋腐食度



外観の状態	
変状なし	変状がコンクリート表面に顕著に現れていない。 軽微な損傷。
鉄筋腐食度	鉄筋の状態
I	黒皮の状態，全体的に薄い緻密な錆び。
II	部分的な浮き錆びがあるが，小面積の斑点状態。
III	鉄筋の周囲または全長にわたって浮き錆びが生じている。
IV	断面欠損を生じている。

- ・劣化が顕在化→上部工「水掛かり有り」
- ・下部工で劣化の顕在化は確認されていない。

「水掛かり無し」

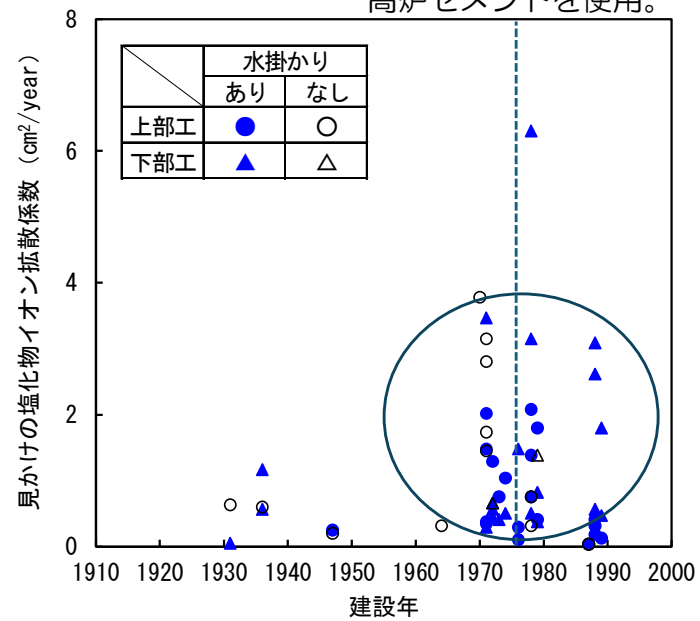
- ・中性化残りがマイナスでも劣化の顕在化はない。
⇒鉄筋の腐食の進展は極めて遅い。

「水掛かり有り」

- ・中性化の進展は遅く，中性化残り10mm以下のものは，
ほぼ確認されなかった。

建設年と見かけのCl⁻拡散係数

下部工1975年以降は
高炉セメントを使用。



1930年～1950年代の構造物に比べて、
初期品質を確保できていない

鉄筋位置のCl⁻量と鉄筋腐食度

常時湿潤状態の汽水域の樋門



「水掛かり有り」・かぶり70mm以上では、腐食発生限界以上であっても劣化が顕在化していない。

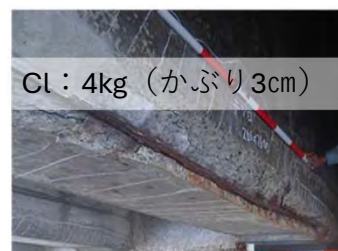
上部工

酸素供給量が多いため、腐食の進行が早い。



定期点検
(うき、判定b)

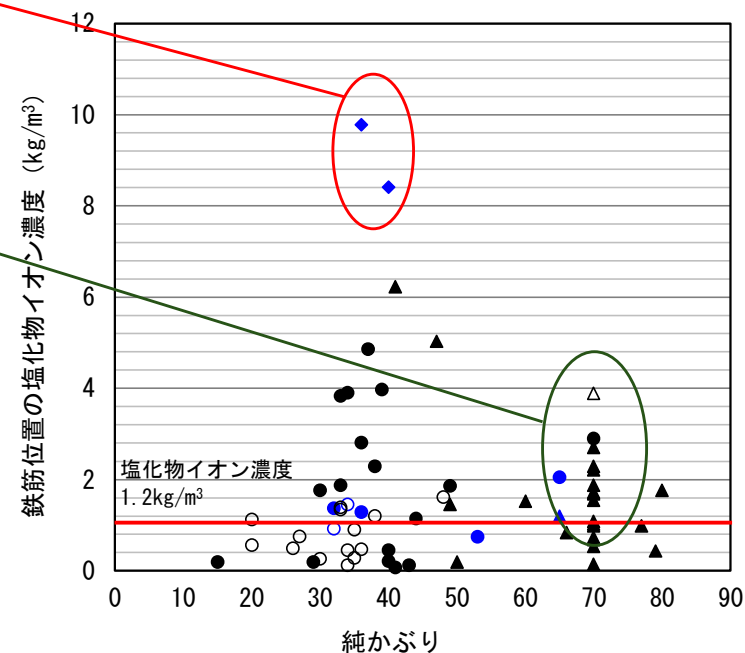
7年後



詳細調査
(鉄筋露出、判定d)

Cl: 4kg (かぶり3cm)

外観の状態 鉄筋腐食度	水の影響		水掛かり	
	あり		なし	
	上部工	下部工	上部工	下部工
外観変状なし	●	▲	○	△
I	◆	◇	◇	◇
II	●	●	○	○
III	▲	▲	△	△
IV	■	■	□	□

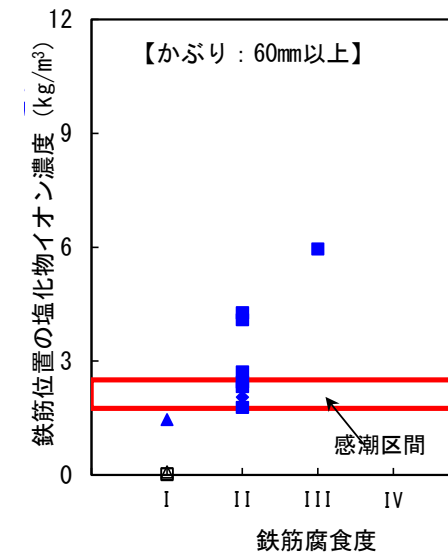
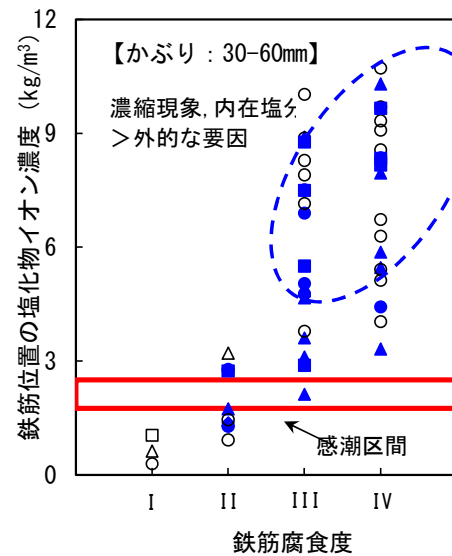
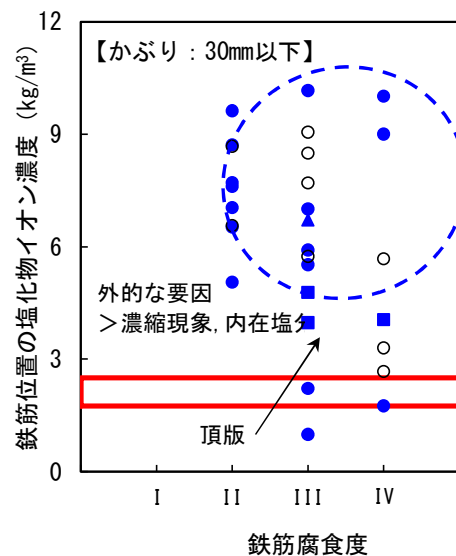


かぶりごとの鉄筋位置の塩化物イオン濃度と鉄筋腐食度の関係

	飛来塩分の影響	水掛りの影響	凍結防止剤の影響	鋼材腐食発生限界 塩化物イオン濃度 (kg/m ³)
橋梁(版・横桁)	受ける	▲ あり △ なし	受ける 受けない	1.75~2.50 (普通ポルトランドセメント)
橋梁(PC桁)	受ける	● あり ○ なし	受けない	
橋梁(BOX: 側壁) 橋梁(BOX: 頂版)	受ける	■ あり □ なし	受けない※	
樋門・樋管	受けない	◆ あり ◇ なし	受けない	

※橋梁(BOX: 頂版)の水掛りの影響がある場合は、凍結防止剤の影響を受ける。

今回の調査の範囲で、かぶり60mm以上で水掛りなしの環境で劣化が顕在化したものは確認されなかった。



これまでのまとめ

- ・かぶり不足の構造物は版・横桁・PC桁で比較的多く存在する。
- ・圧縮強度 ⇒ 1960年代以降から増加傾向。
水掛かりの有無による圧縮強度への影響は確認されなかった。
- ・反発度法による圧縮強度の方が全体的に大きく算出され、バラツキも大きい。
⇒ 長期供用構造物では、表層が変質しており、表層状態に強く影響を受ける。
- ・「水掛かりなし」の箇所は、かぶりよりも深部に中性化が至っていても
腐食ひび割れの発生や錆汁、剥離が生じて外観に変状を発生させない。
- ・かぶりが大きい場合や常時湿潤状態にあるような構造物は、塩化物イオン量だけで
腐食の進展を評価することができない。
- ・かぶりが深い場合、酸素欠乏により腐食発生限界塩化物イオン濃度は高くなる。

引用論文

実際に鉄筋腐食状況を確認することが重要

林亮太, 樋原弘貴, 添田政司, 深見桜: 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性に関する研究, 土木学会論文集, 76巻4号, p.332-348, 2020

実験事例の紹介

実験事例.1

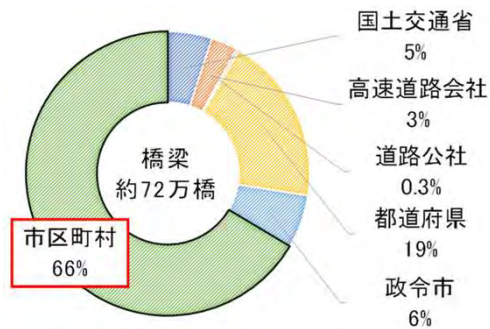
水切り設置による環境改善による長寿命化

実験事例.2

亜硝酸リチウム入り断面修復材の補修効果

① 経緯、背景

■ 全国にある橋梁の約70%は市区町村が管理



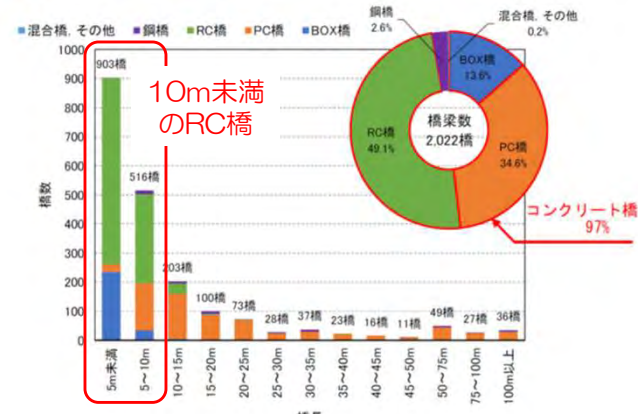
出典：国土交通省ウェブサイト
(Microsoft PowerPoint - 予防保全の取組みv3.pptx (mlit.go.jp))

■ 健全度の把握

I	健全
II	予防保全段階
III	早期措置段階 (5年以内に補修・修繕)
IV	緊急措置段階

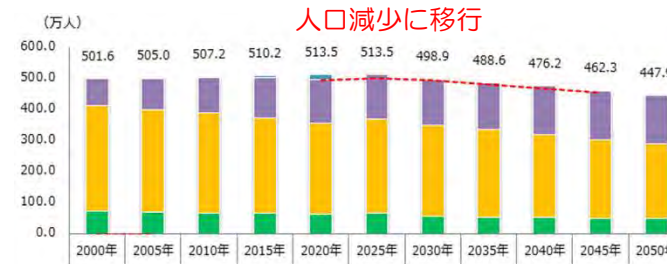
判定区分Ⅲ・Ⅳ橋梁における修繕着手・完了率
市区町村は遅れを取っている

例) 福岡市橋梁別の橋数



引用：福岡市橋梁長寿命化修繕計画[令和2年度～令和6年度]

例) 福岡県内の人口推移



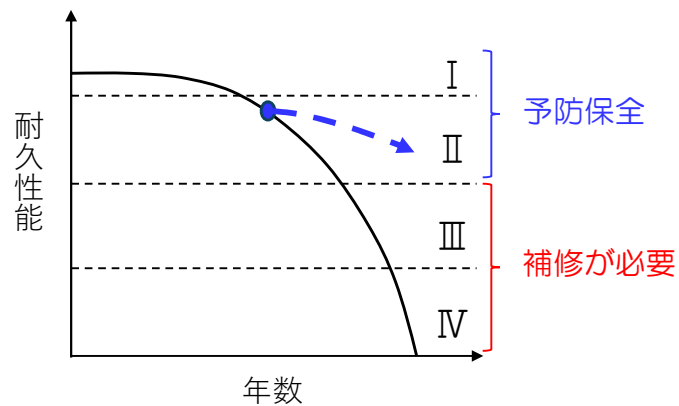
人口減少 ▶ 税収入の低下

① 水切り設置による環境改善による長寿命化

直営による予防保全による長寿命化

健全度Ⅱ段階の補修が必要ではない程度の軽微な劣化箇所に対して、
自治体職員が自らが予防保全（軽微な補修・環境改善）を実施し、健全な状態を長く保つ

■ 予防保全のイメージ



健全度Ⅱ→Ⅲを増やさない（現状維持）

- ・ 将来の維持修繕費の縮減
- ・ 優先順位の高い橋に予算を配分



防錆剤の散布



水切り板の設置



小規模箇所の断面修復

出典：福岡市橋梁長寿命化修繕計画[令和2年度～令和6年度]



福岡県内自治体



玉名市

直営補修（DIY補修）の実践事例



＜使用材料＞



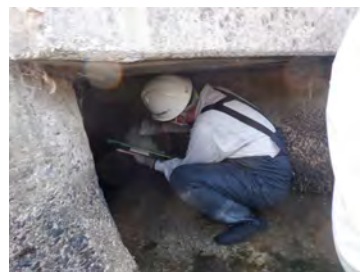
＜叩き落とし＞



＜防錆剤・プライマー塗布＞



＜練混ぜ状況＞



＜断面修復工 施工状況＞

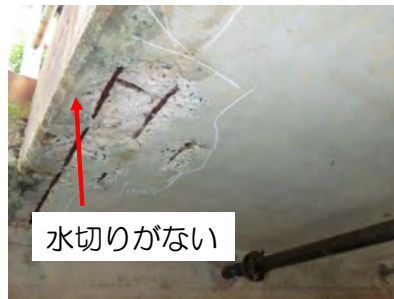


＜水切り設置 施工状況＞

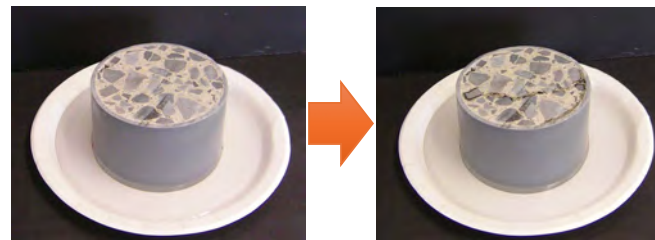
日本コンクリート工学会年次大会_構造診断セミナー_福岡県道路維持課講演資料より

水切りがない構造物

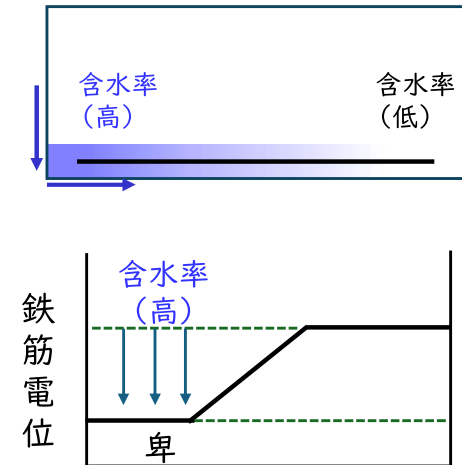
①中性化による鉄筋腐食



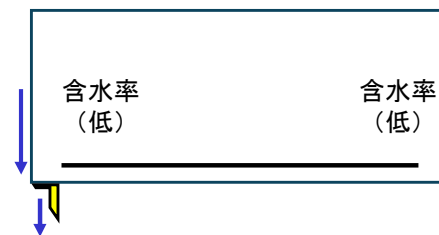
②表面張力による水の吸い上げ



③マクロセルによる腐食促進

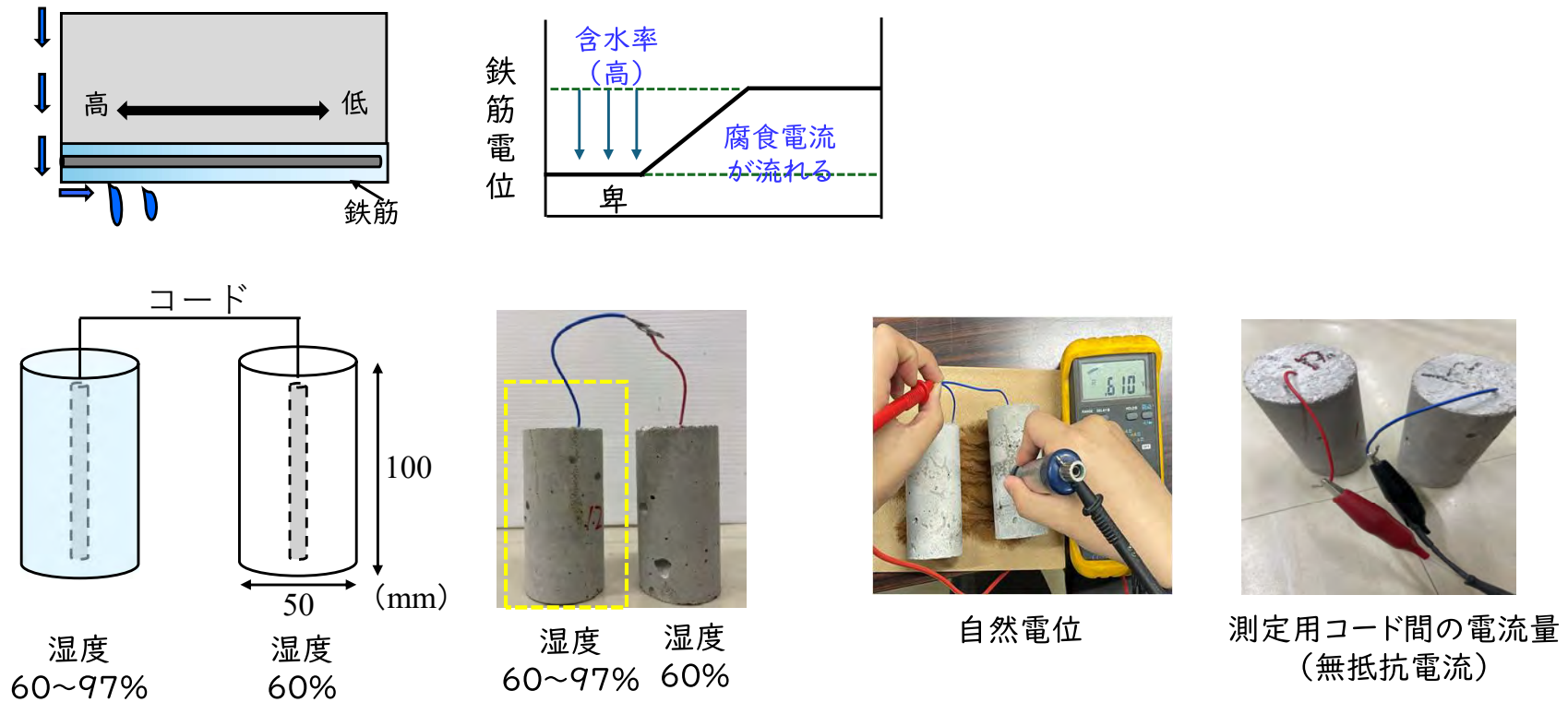


水切りがある構造物



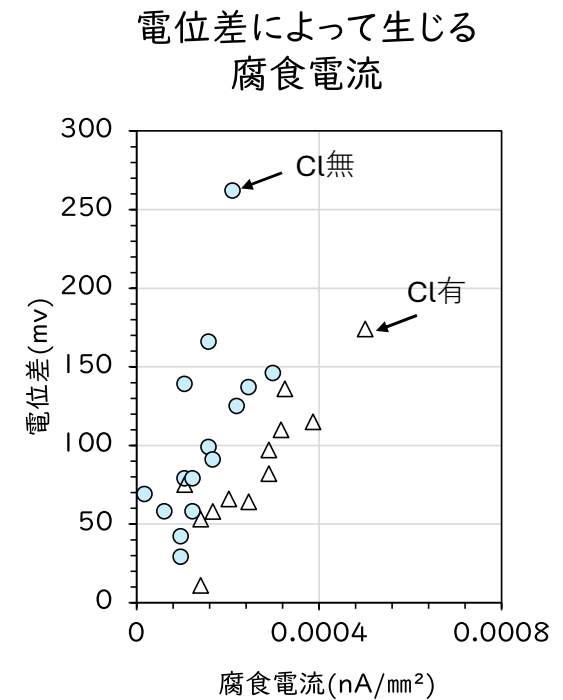
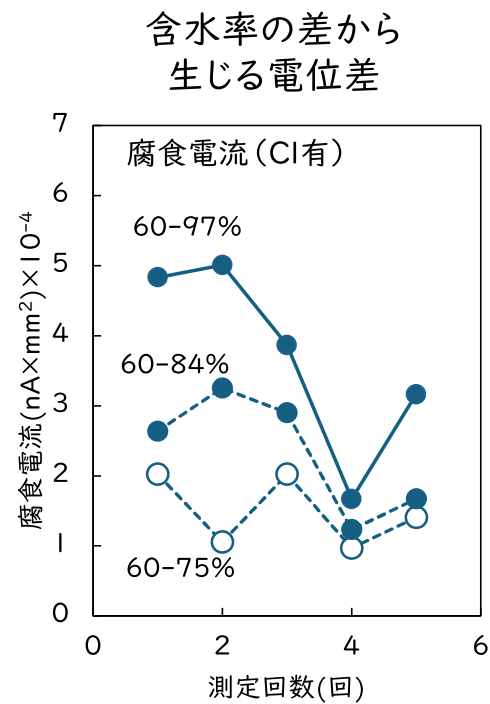
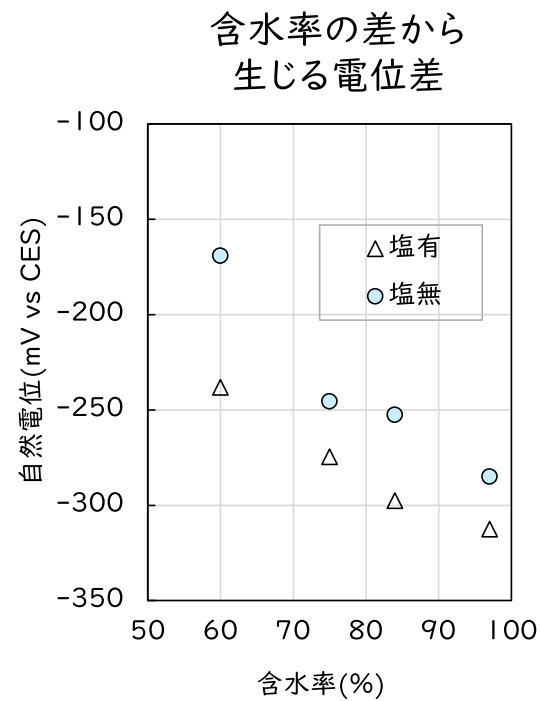
③マクロセルによる腐食に対する水切りによる抑制効果に関する実験事例を紹介

a) 含水率の違いによって生じる電位差と腐食電流の関係を評価



水浸入に伴う含水率の違いで生じる鉄筋の電位差が腐食電流の発生に及ぼす影響を評価

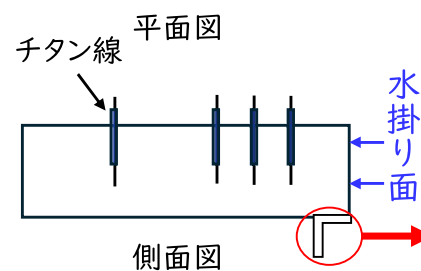
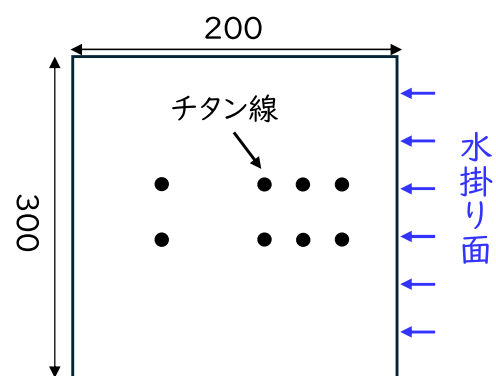
a) 含水率の違いによって生じる電位差と腐食電流の関係を評価



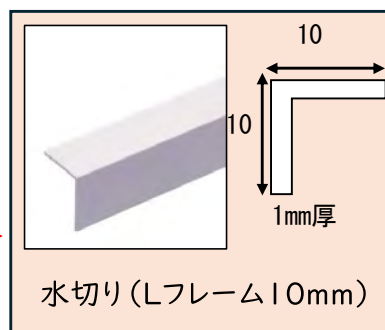
b) 水切り板設置による供試体の含水率分布

供試体概要

- 底面以外はエポキシ樹脂で被覆
- 水掛り面以外からの水浸入を防止

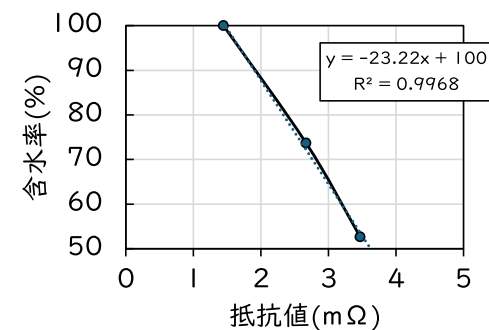
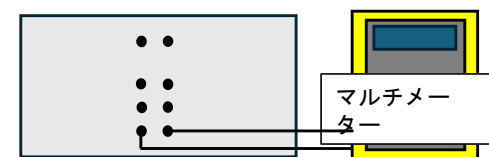


屋外曝露 (地上高70cm)

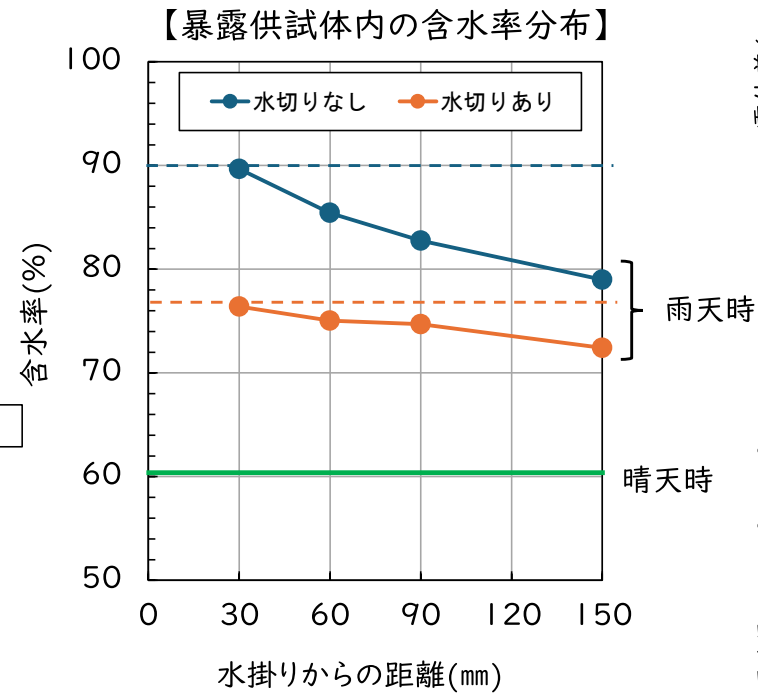
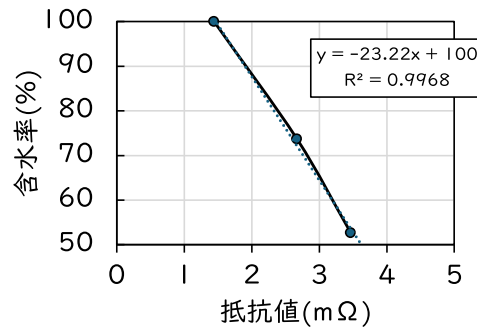
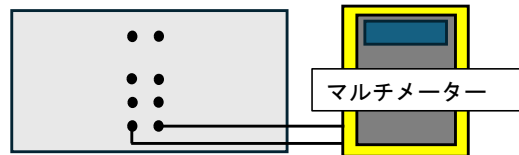


測定項目

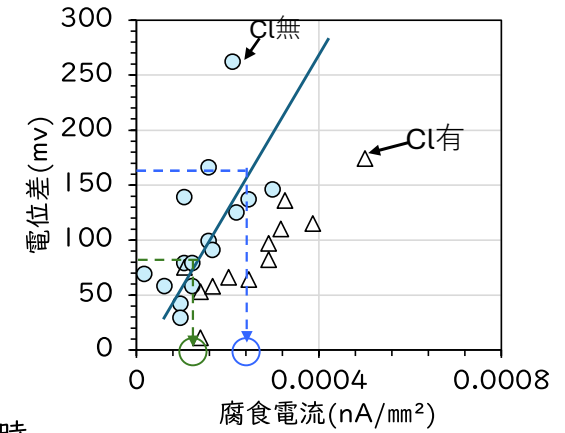
- 雨天時と晴天時に抵抗値を経時的に測定
- 得られた抵抗値を用いて含水率を算出



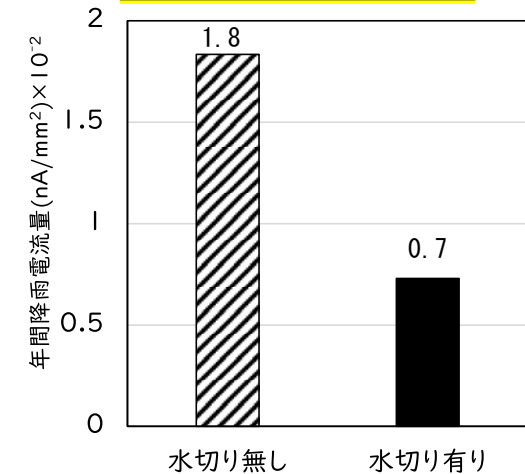
試験結果



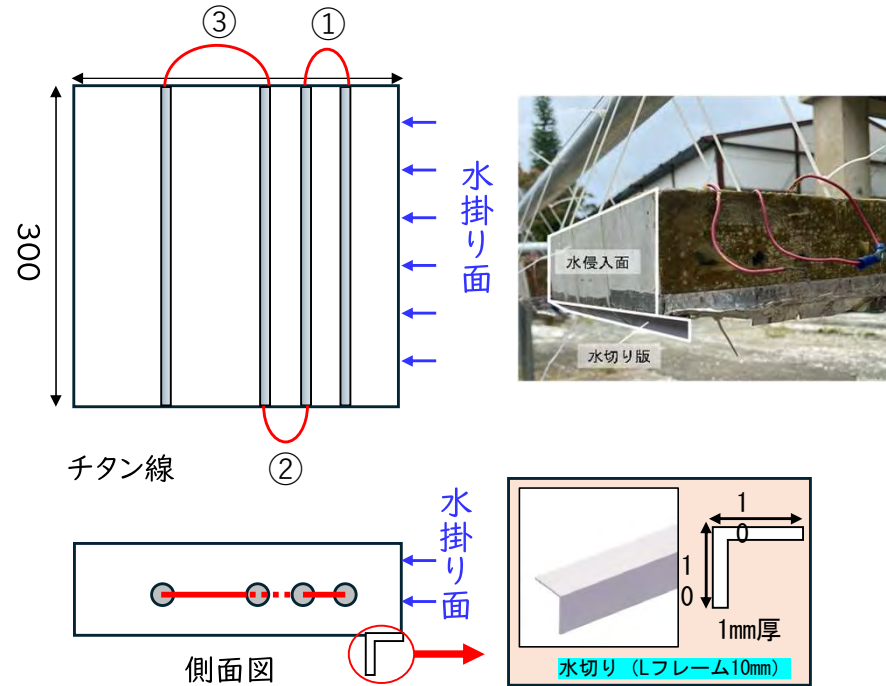
水切りなし → 含水率の差40% → 電位差150mV
 水切りあり → // 20% → // 70mV



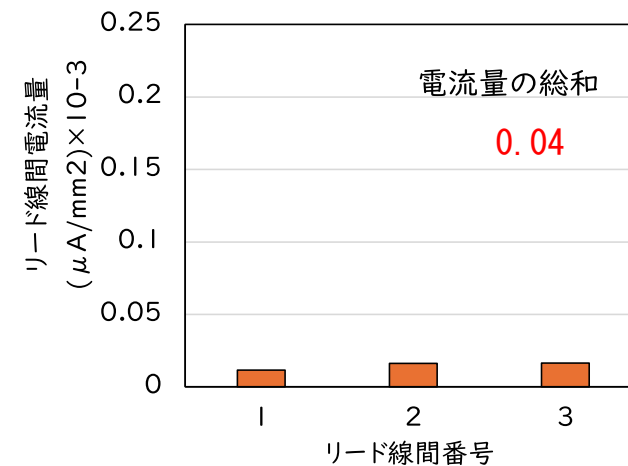
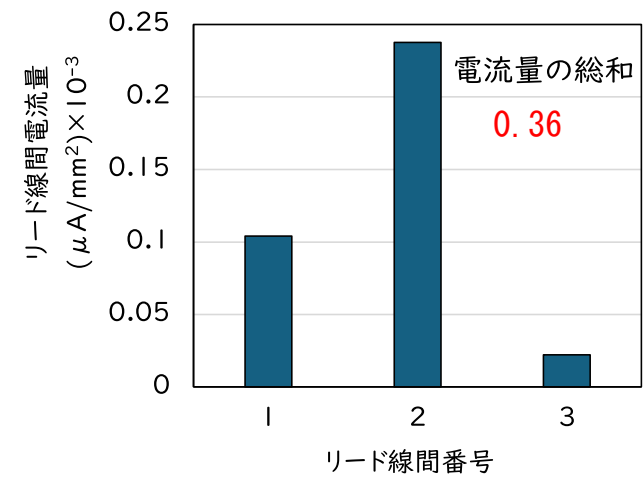
腐食電流量 (5回測定平均) × 福岡県の年間降雨日数 = 年間総電流量



(c)水切り板設置が鉄筋腐食に及ぼす影響



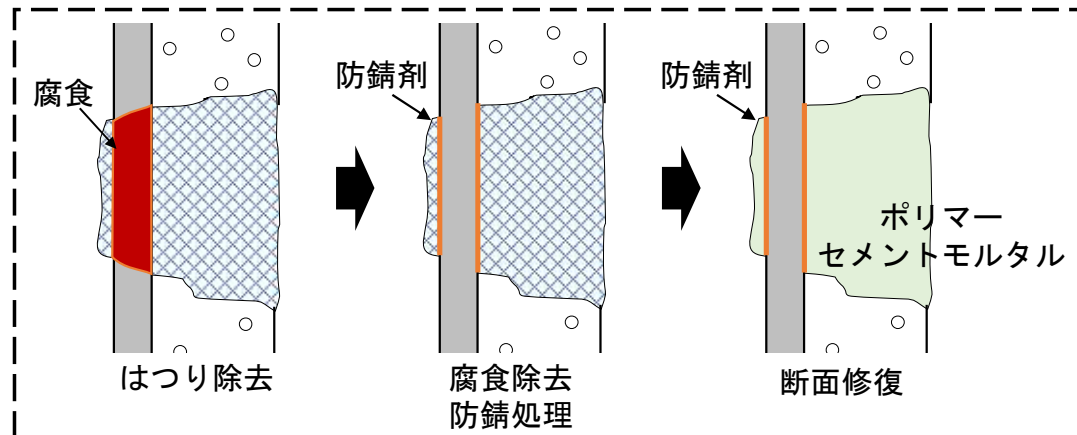
- 4週間ごとに測定
- 無抵抗電流計を用いてリード線間を流れる電流量を測定



これまでのまとめ

- ・水分供給の程度の違いによって生じる電位差がマクロセルを形成して、腐食は進行する。
- ・水切り板による雨水の浸入抑制が有効に作用し、コンクリート内部を低含水状態に維持することで鉄筋腐食の促進を遅延できる。
- ・水切り板の設置はマクロセル腐食に起因する劣化の速度を $1/4 \sim 1/10$ に抑制可能であり、橋梁の長寿命化として有効である。

亜硝酸リチウムを用いた断面修復



はつり除去

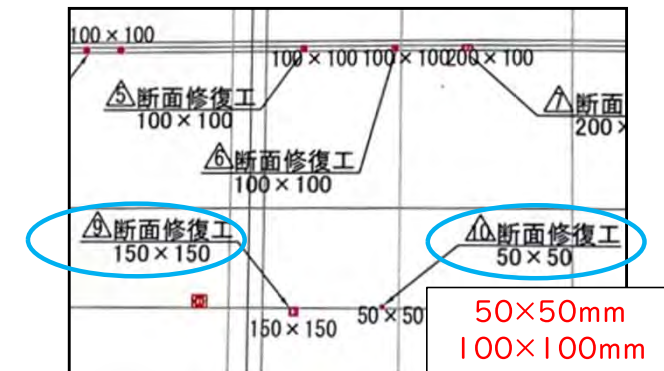


腐食除去



防錆処理

補修設計例
設計上の補修断面が小さい



高密度配筋箇所



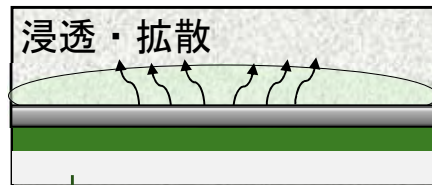
作業の制約



事例.1) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

【本検討】

〈亜硝酸Li併用型〉



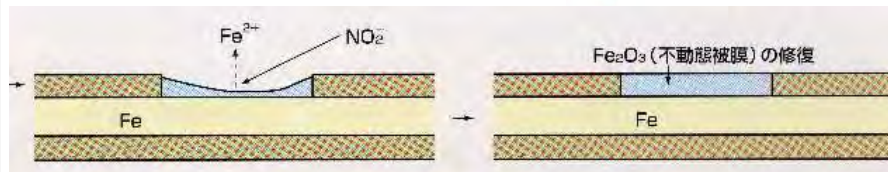
ポリマーセメントモルタル



LiNO₂

亜硝酸リチウム混和
モルタル

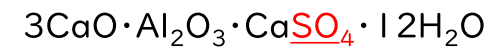
不動態被膜の再形成
➡ 腐食抑制効果



亜硝酸イオンの拡散による鉄筋防錆効果を検討

(付属) 亜硝酸リチウムをモルタルに添加すると・・・

モノサルフェート



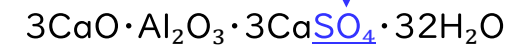
NO₂⁻置換

遊離SO₄²⁻

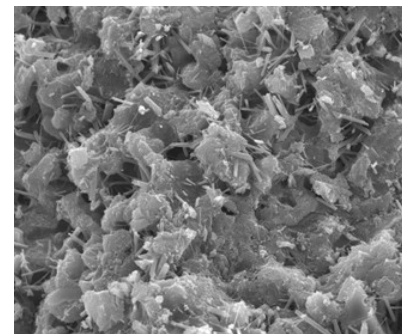
N型ハイドロカルマイト



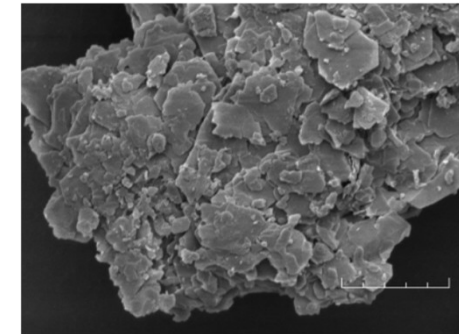
エトリンガイト



モノサルフェートの代わりにN型ハイドロカルマイト
とエトリンガイトが生成される。



エトリンガイト



N型ハイドロカルマイト
(湿度安定性が高い)

・強度増進

・収縮抑制

事例.1) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

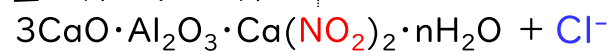
(続き) 亜硝酸リチウムをモルタルに添加すると・・・

モノサルフェート



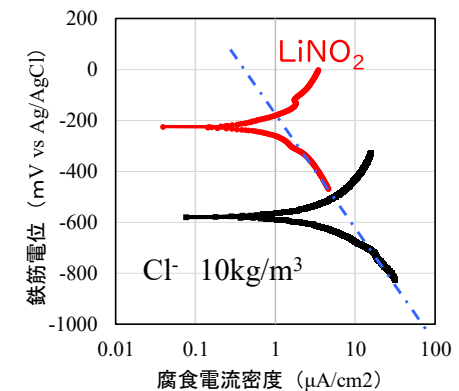
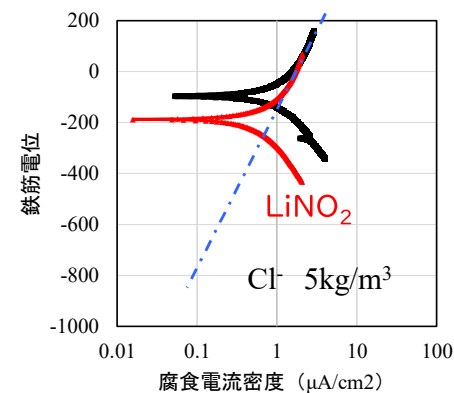
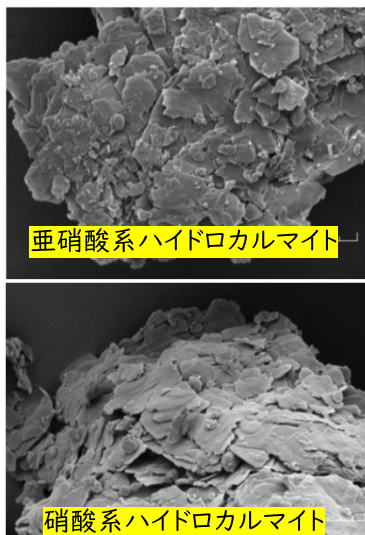
NO₂⁻置換

N型ハイドロカルマイト



フリーデル塩
(Cl固定化)

NO₂⁻ → 鉄筋防錆 (酸化被膜の強化)



NO₂⁻増加による酸素欠乏
Cl⁻の接触抑制によるカソード抑制

Cl⁻の増加に伴ってNO₂⁻の
アノード抑制

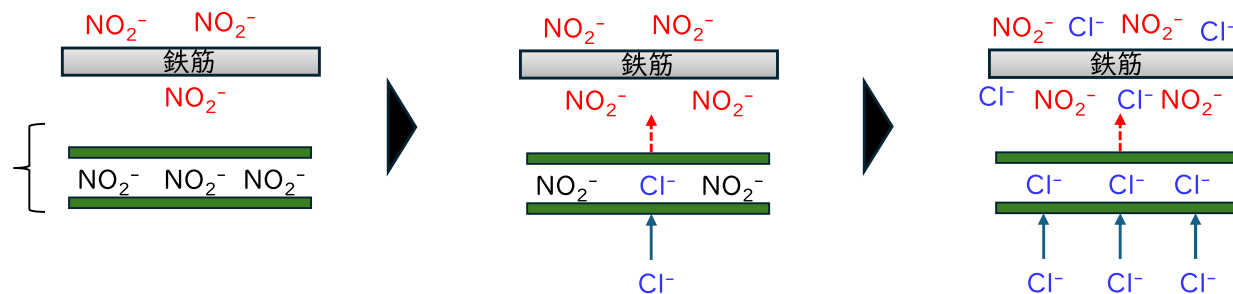
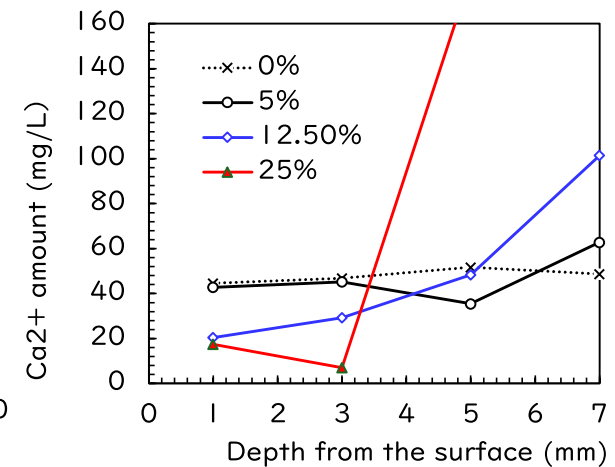
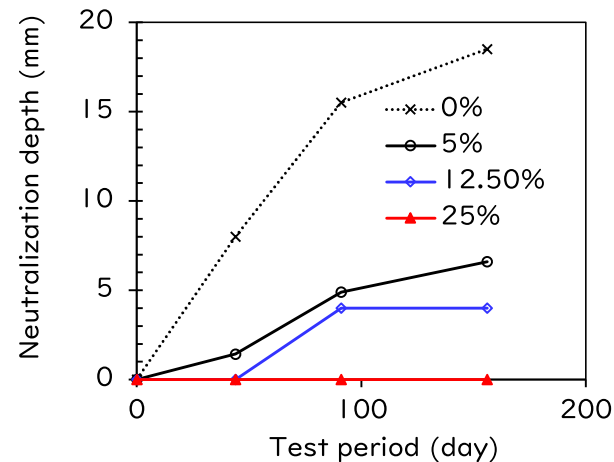
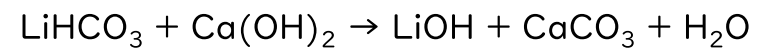
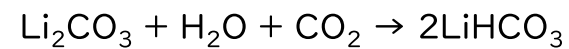
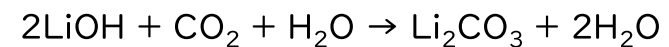
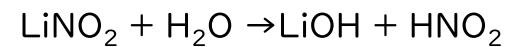


写真) Magdalena Balonis, Influence of calcium nitrate and nitrite on the constitution of Aft and Aft cement hydrates. , Advances in Cement Research, 2011, 23(3), 129-143, doi: 10.1680/adcr.10.00002

事例.1) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

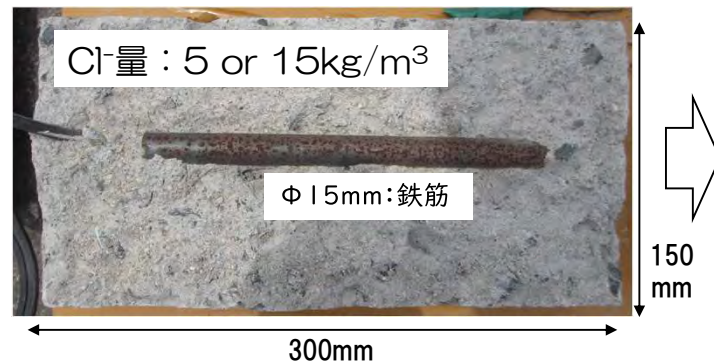


置換率	0%	12.5%	25%
供試体写真			
	8.2mm	4.8mm	0mm

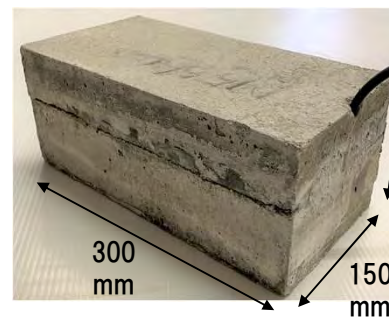


事例.1) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

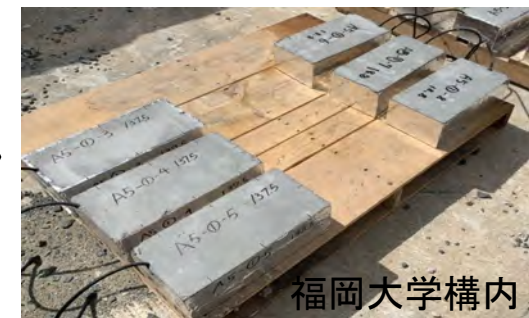
6ヶ月屋外曝露



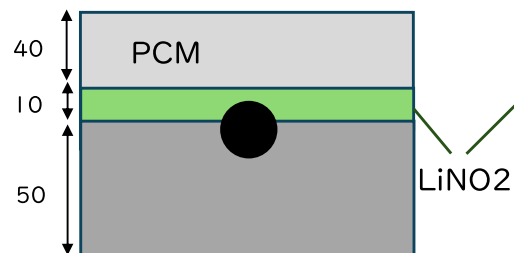
【断面修復】



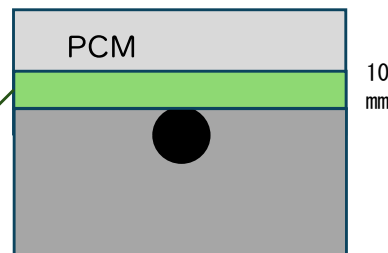
【解体測定】(補修後21,29ヶ月)



【半分はつり】



【表面はつり】



【既設部コンクリート内の塩化物イオン量】

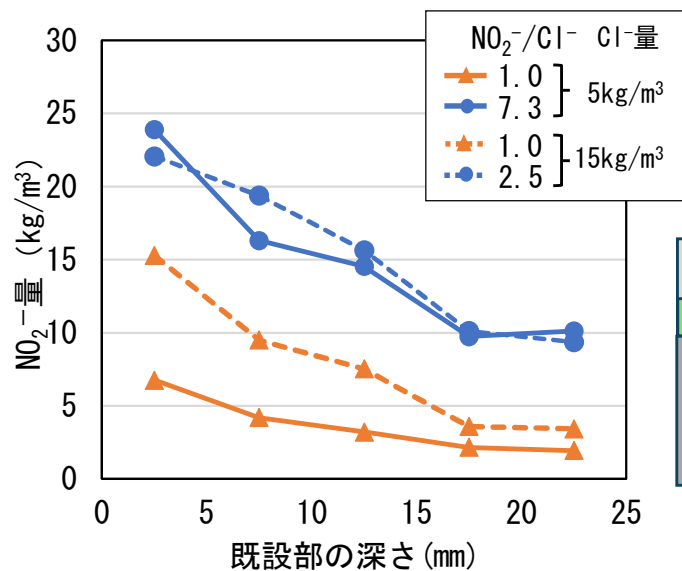
Cl⁻量: 5kg/m³ 10kg/m³

【補修部モルタル内亜硝酸リチウム添加量】

- ・NO₂⁻/Cl⁻: 1.0
- ・固形分 55kg/m³
- ・Cl⁻量: 5kg/m³ → NO₂⁻/Cl⁻: 7.3
- ・Cl⁻量: 15kg/m³ → NO₂⁻/Cl⁻: 2.5

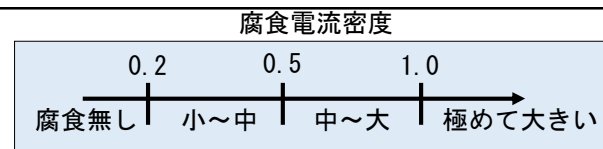
事例.1) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

コンクリート深さごとのNO₂-分布

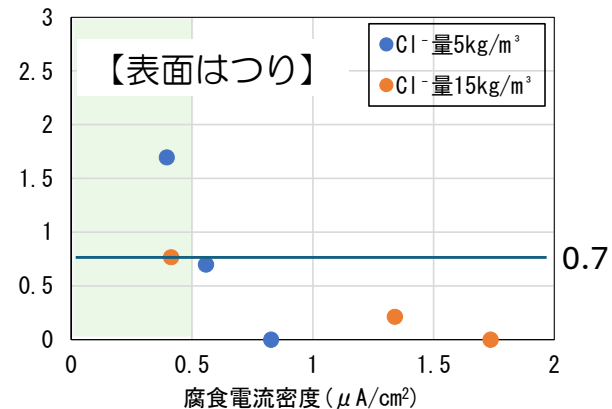
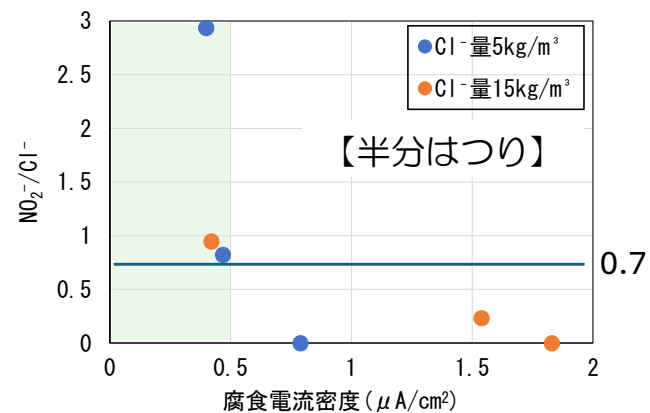


- ・ポリマーセメントモルタル内の NO_2^- が既設コンクリートに濃度拡散している

- ・混和量が大きいものほど拡散量が大きくなる



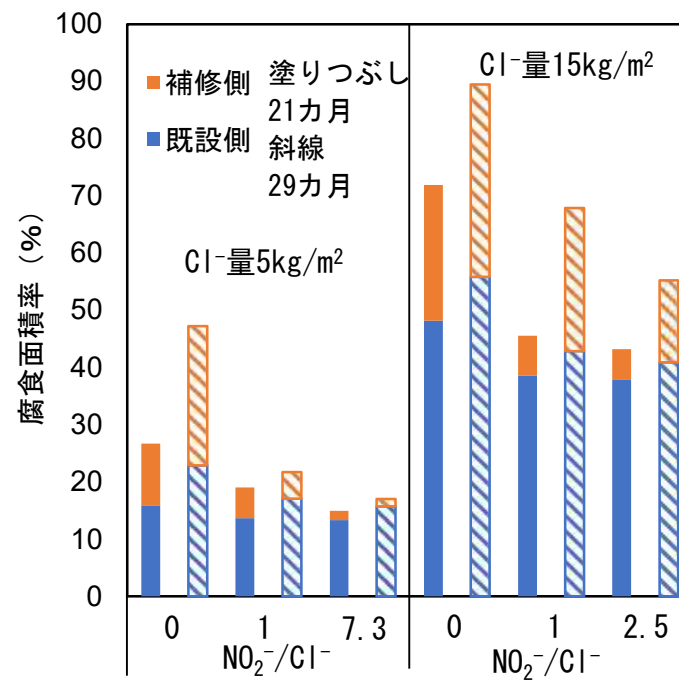
腐食速度



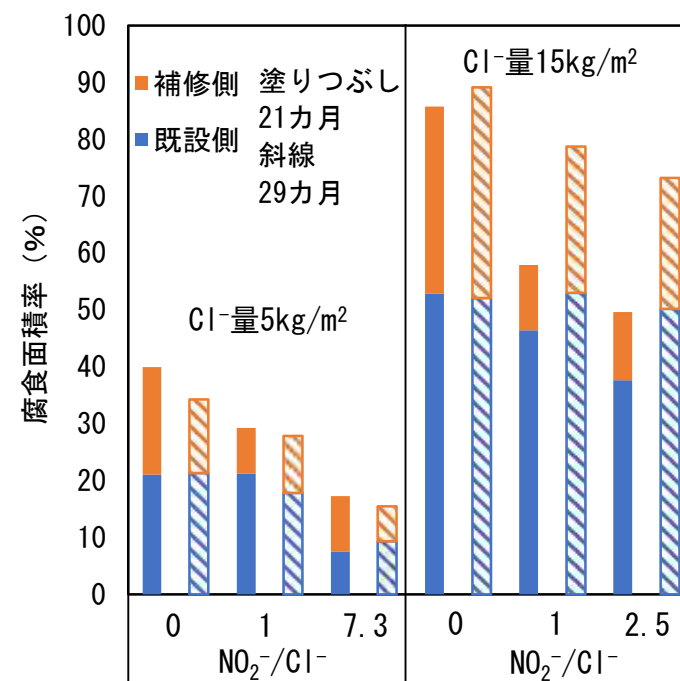
事例.1) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

鉄筋腐食面積率の経時変化

【半分はつり】

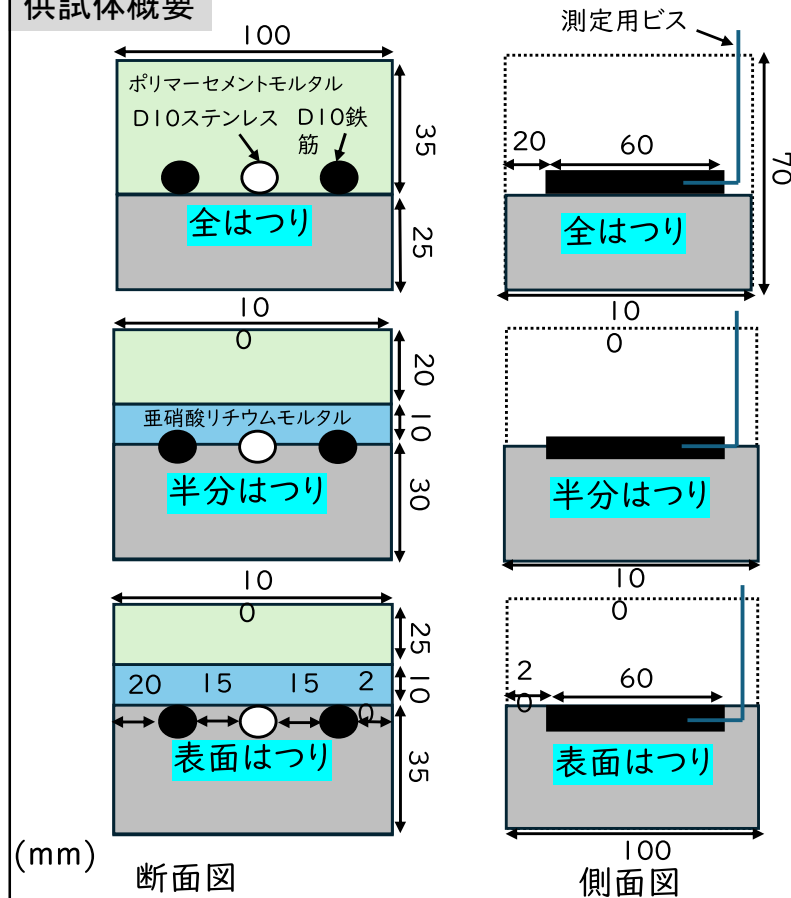


【表面はつり】



事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

供試体概要



供試体の水準及び条件

はつり量	全はつり	半分はつり			表面はつり					
既設部（Cl量）	10kg/m ³	10kg/m ³			5kg/m ³			10kg/m ³		
NO ₂ ⁻ /Cl ⁻	0	0	1.0	2.0	0	1.0	2.0	0	1.0	2.0

- 亜硝酸リチウムの混和濃度の内訳は既設コンクリート内のCl⁻量に対して NO₂⁻/Cl⁻: 1.0、2.0とし、比較用として無混和 (NO₂⁻/Cl⁻: 0) を設けた



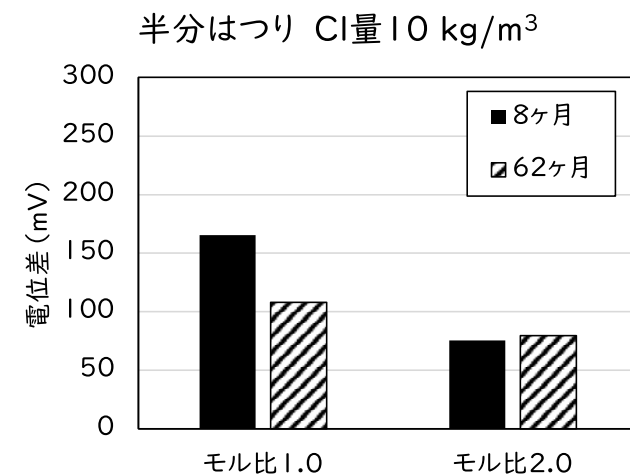
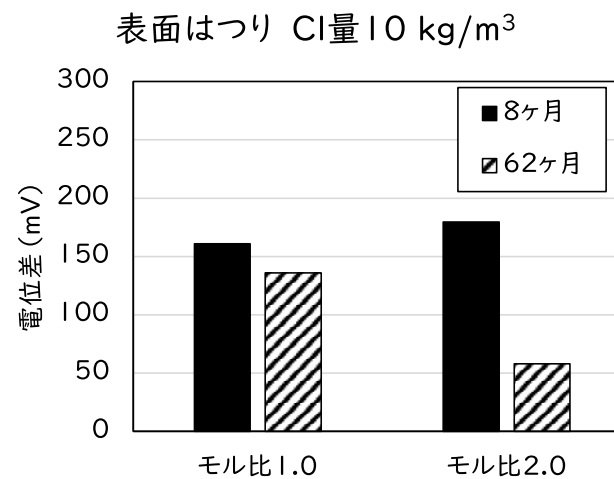
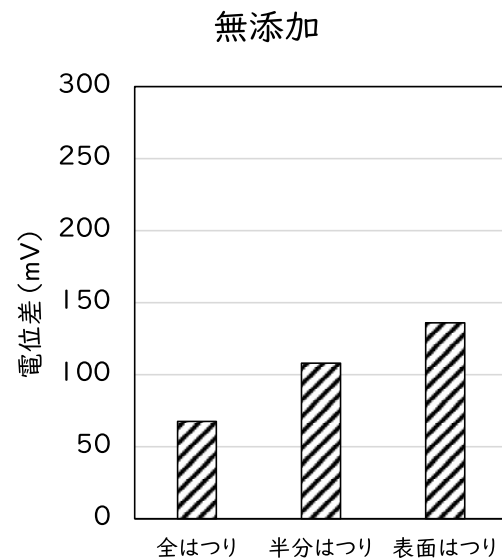
- 既設コンクリートの打設後10日間静置させ断面修復工法を実施
- 補修後は、塩害環境を模擬してCl⁻濃度3%を染み込ませた養生シートで被覆し、湿度90%の環境に静置した

測定項目

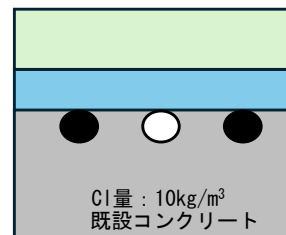
- 自然電位
- 腐食電流密度
- 塩化物イオン量と亜硝酸イオン量
- 腐食面積率

事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

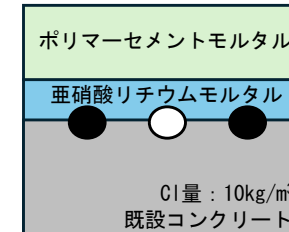
【はつり量の違いによる電位差】



断面図

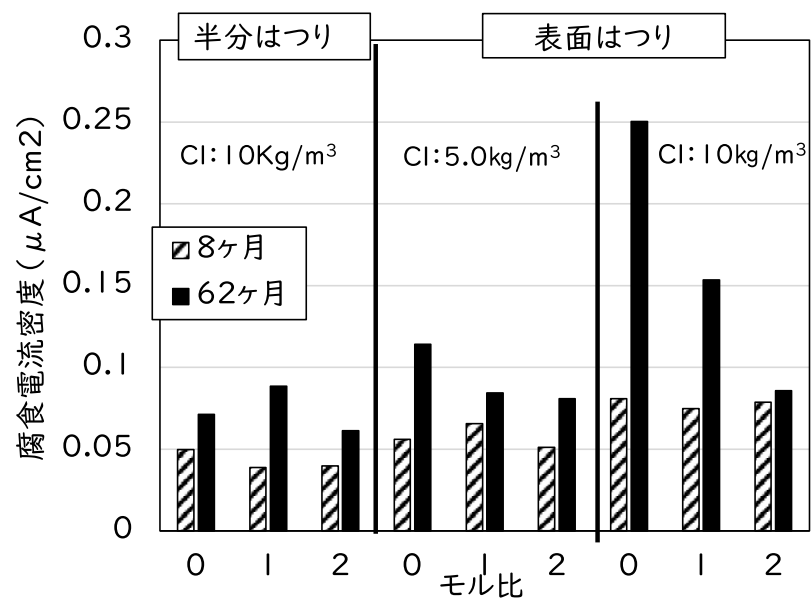


断面図

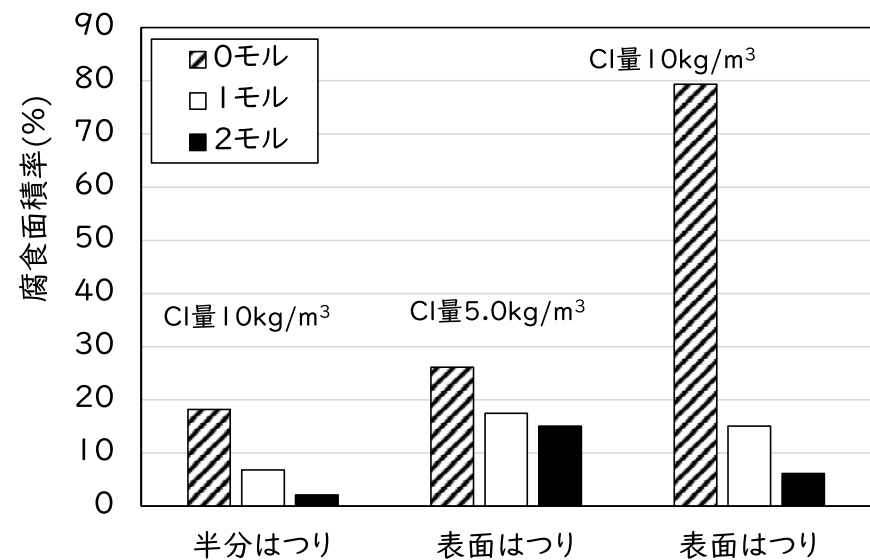


事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

【腐食電流密度による経時変化】

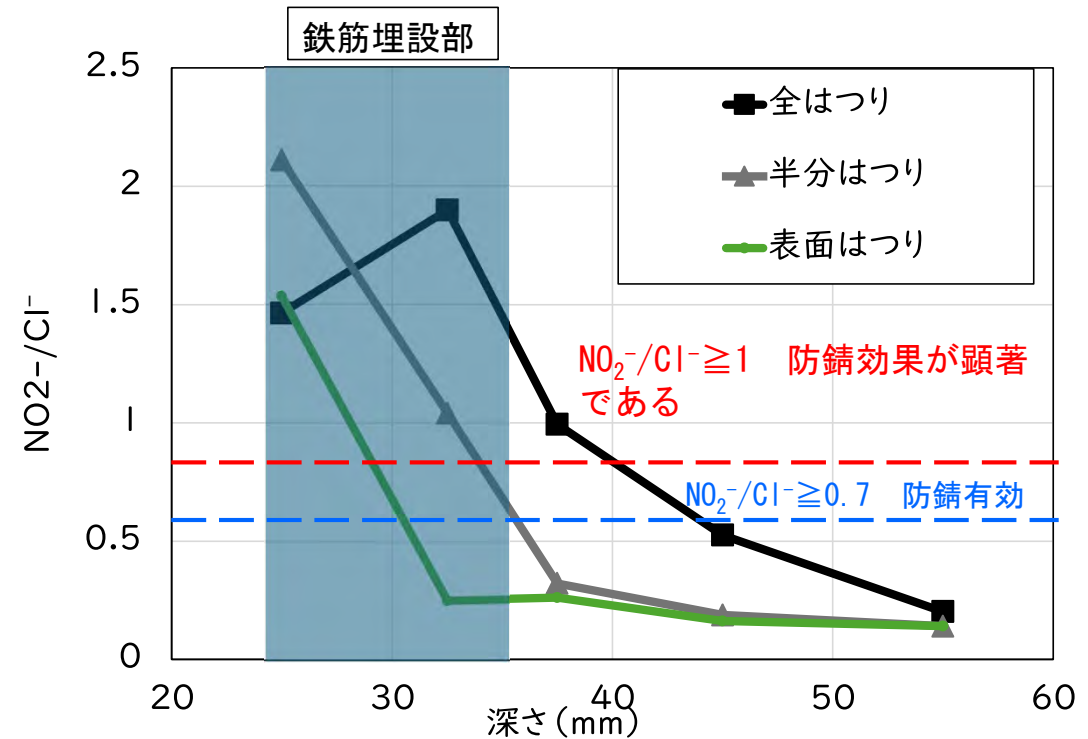
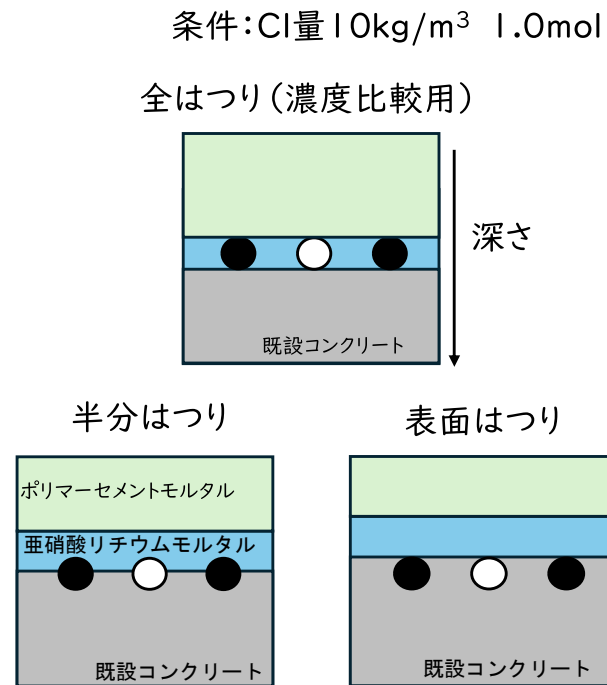


【腐食面積率】



事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

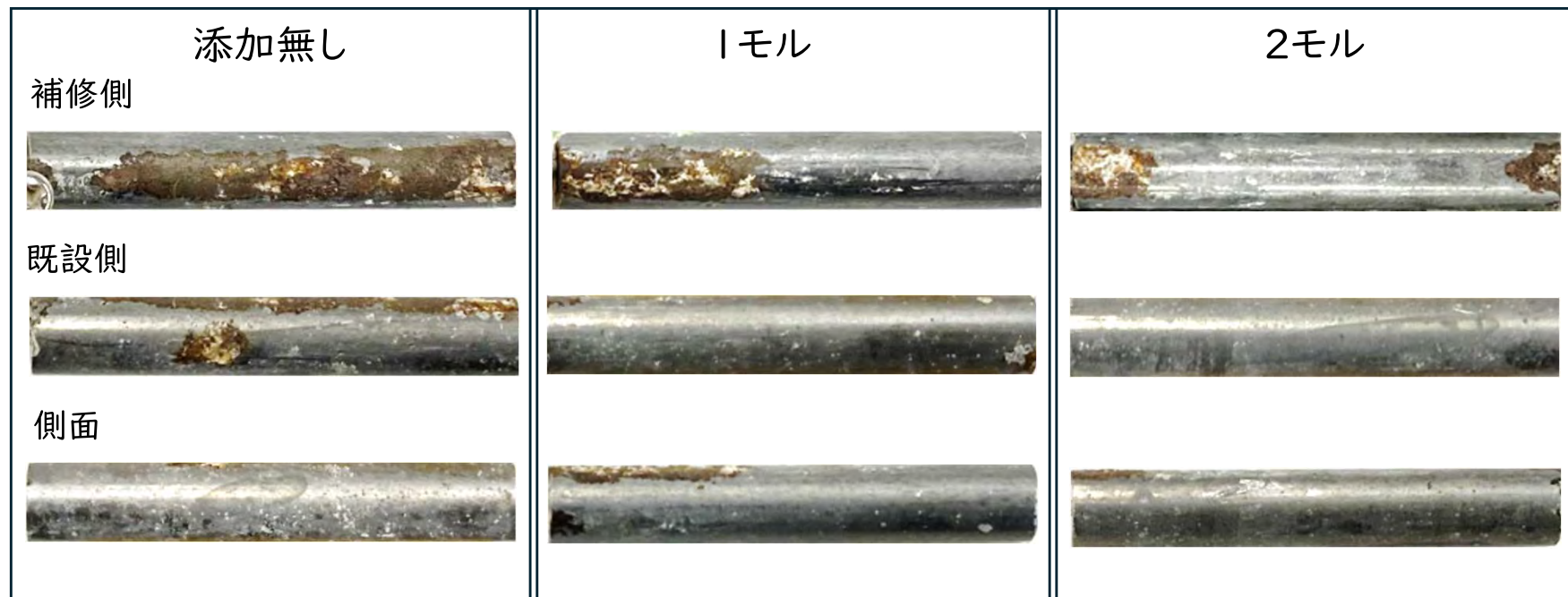
【62ヶ月目のはつり量の違いによる深さ方向の $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ 分布】



$\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ 平均値 (鉄筋埋設部)
全はつり: 1.6 半分はつり: 1.3 表面はつり: 0.7

事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

表面はつり CI 5kg (62ヶ月)



事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

表面はつり CI 10kg (62ヶ月)

	添加無し	1モル	2モル
補修側			
既設側			
側面			

事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

半分はつり CI 10kg (62ヶ月)

	添加無し	1モル	2モル
補修側			
既設側			
側面			

事例.2) 亜硝酸リチウムを用いた断面修復

1. 亜硝酸イオンの拡散により既存側の鉄筋の腐食抑制が可能であった。
2. 塩化物イオン量が少ない場合, 表面はつり状態での補修でも、腐食を抑制できることを確認した。
3. 半分はつりに状態での補修では, 塩化物イオン量が多く存在しても十分な補修効果が期待できた。

ご清聴ありがとうございました。