

長寿命構造物を造るシナリオと メンテナンス技術

広島工業大学 工学部 環境土木工学科
竹田 宣典

長寿命構造物を造るシナリオとメンテナンス技術

1. 維持管理のシナリオ
2. 最近の補修技術
3. 耐久性向上技術
4. 長寿命化のための予防保全技術



何年ぐらいもつ？



1-2年？



1~5年？



10-20年？



1000年,
永遠？

寿命の長いコンクリート構造物

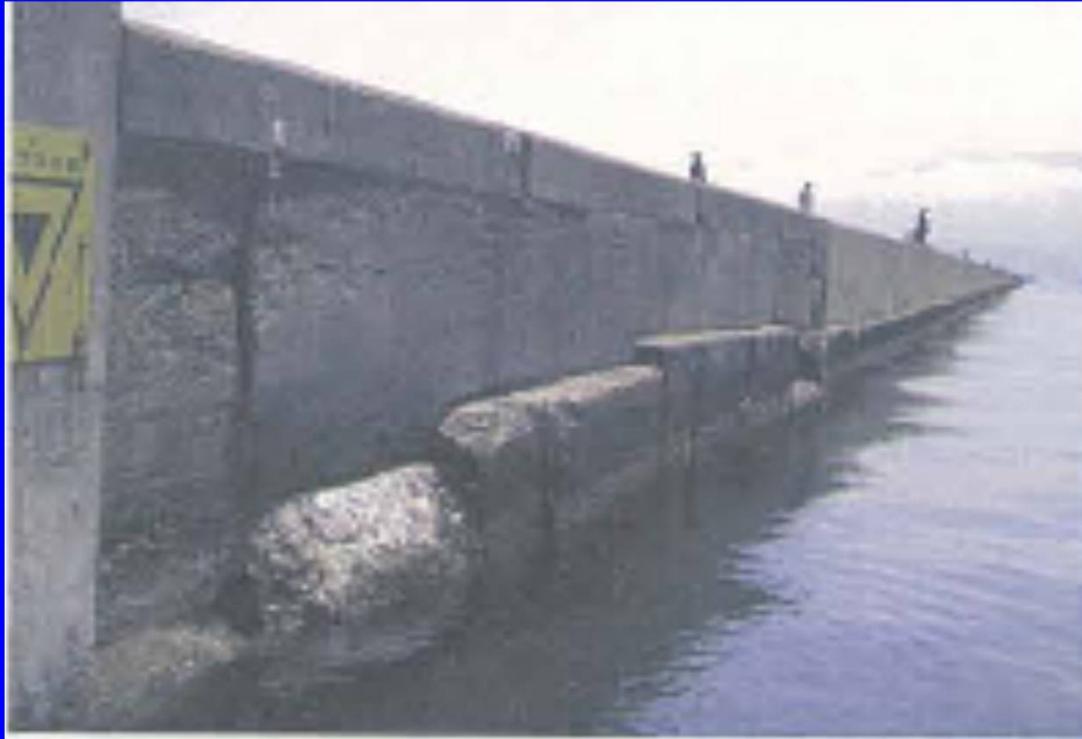


写真-1 明治41年竣工の小樽港北防波堤

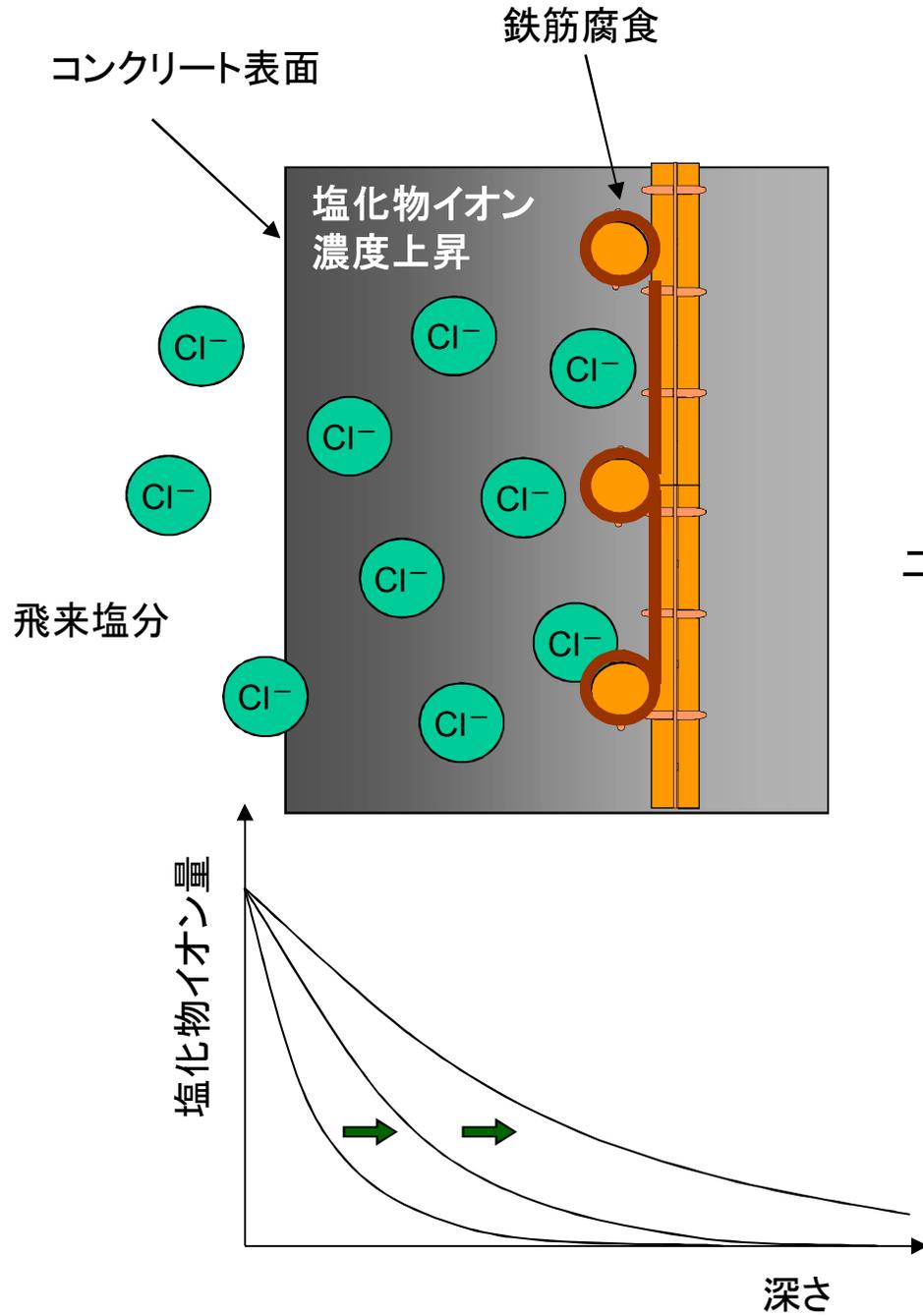
小樽港北防波堤
(明治41年建設) 108歳

56歳

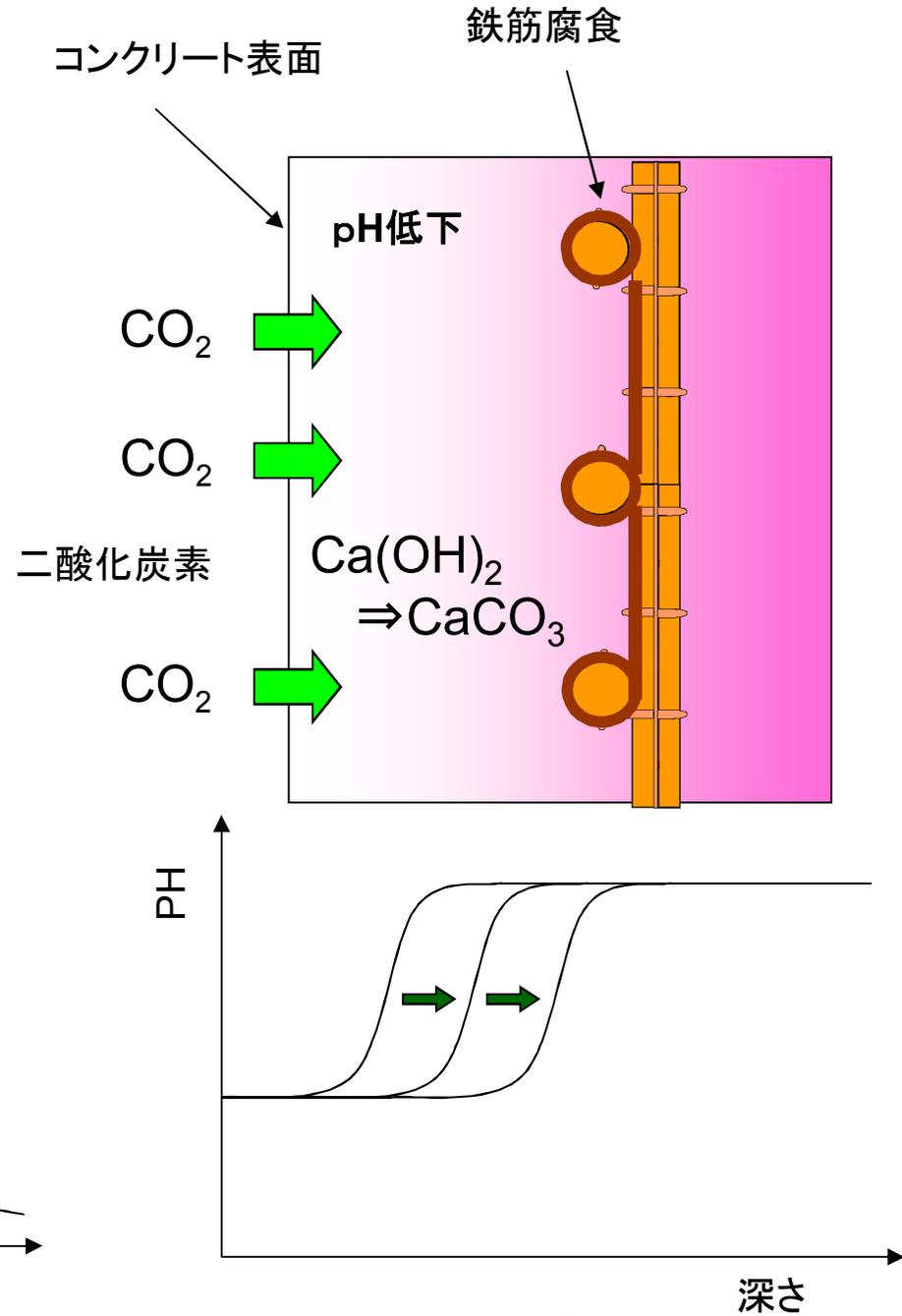
肥前長崎鼻灯台
(昭和35年建設)



劣化因子侵入と劣化現象

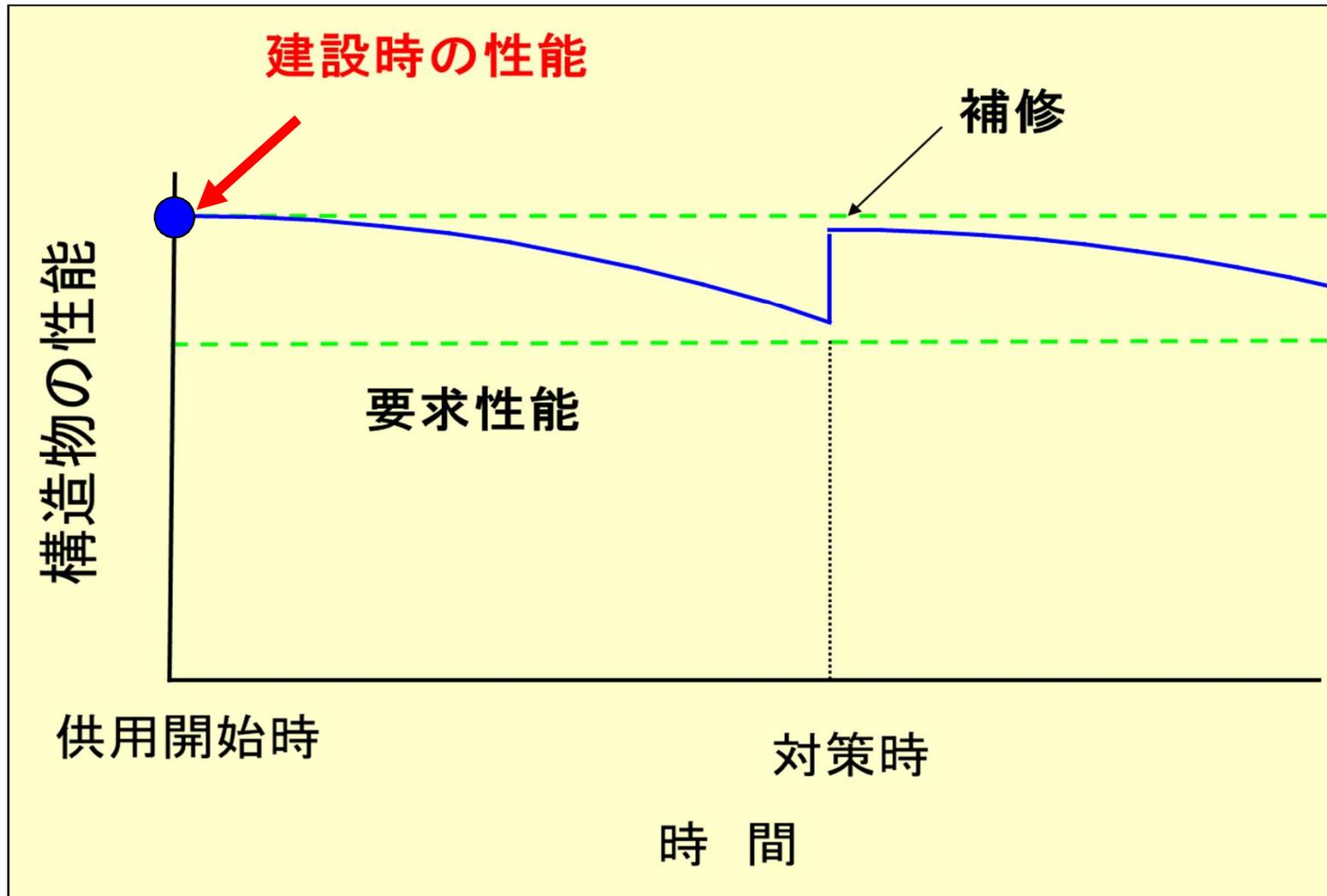


(a) 塩害



(b) 中性化

構造物の性能の時間的变化



維持管理シナリオのパターン

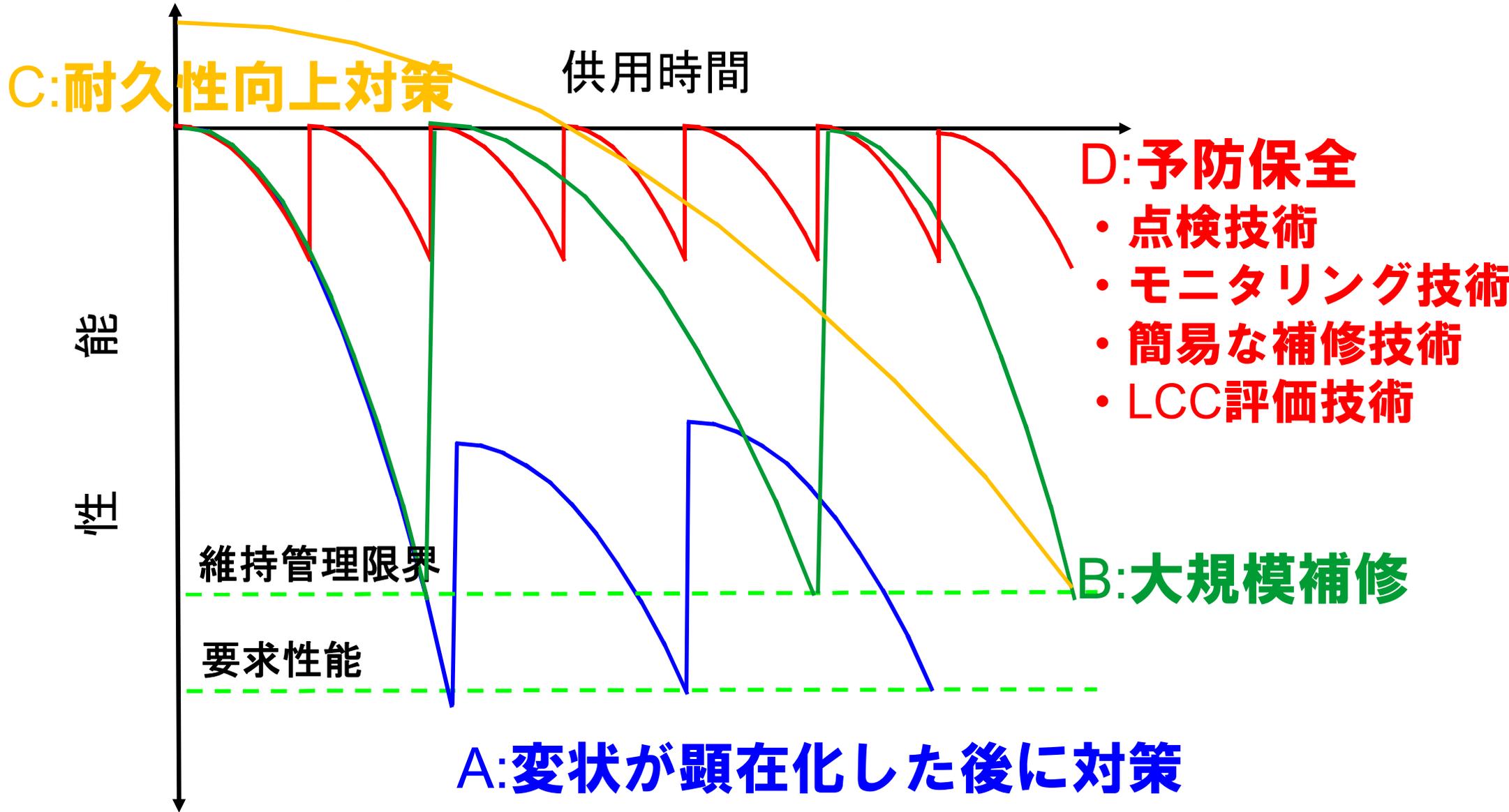
A:劣化が顕在化した後に対策

B:大規模補修で性能回復

C:建設時に耐久性向上対策

D:予防保全

維持管理のシナリオ



要求性能を満たさない構造物



対策

- 供用制限
- 補修
- 補強 など



B：最近の補修技術（大規模、中規模）

ウォータージェットはつり工法を用いた 大規模断面修復工法

はつり状況



ウォージェットはつり状況

**ウォータージェットにより塩分浸透部分を
除去**

はつり後



ウォージェットはつり完了

**塩分の浸透深さによりはつり深さを変更
1.2kg/m³事前調査によりブロック分け**

(比較的広面積 (数千m²以上)ではつり深さ5~10cm程度)

施工手順

下地処理



特殊ジベルアンカー取付け



炭素繊維グリッド取付け

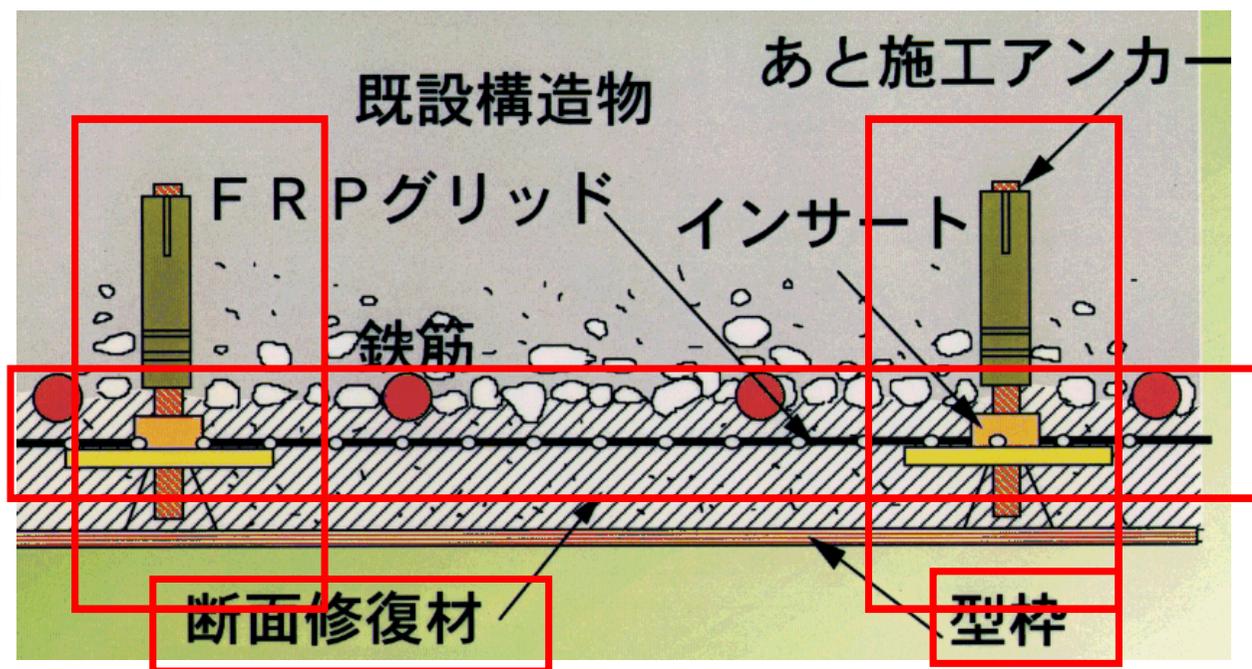


型枠工

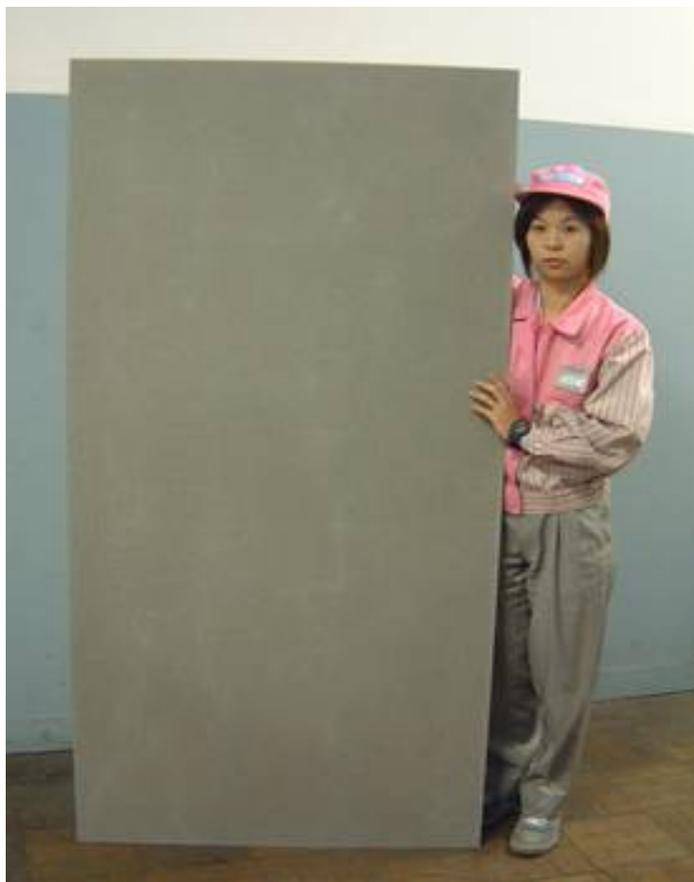


断面修復材注入
(亜硝酸リチウム含有モルタル)

概要図

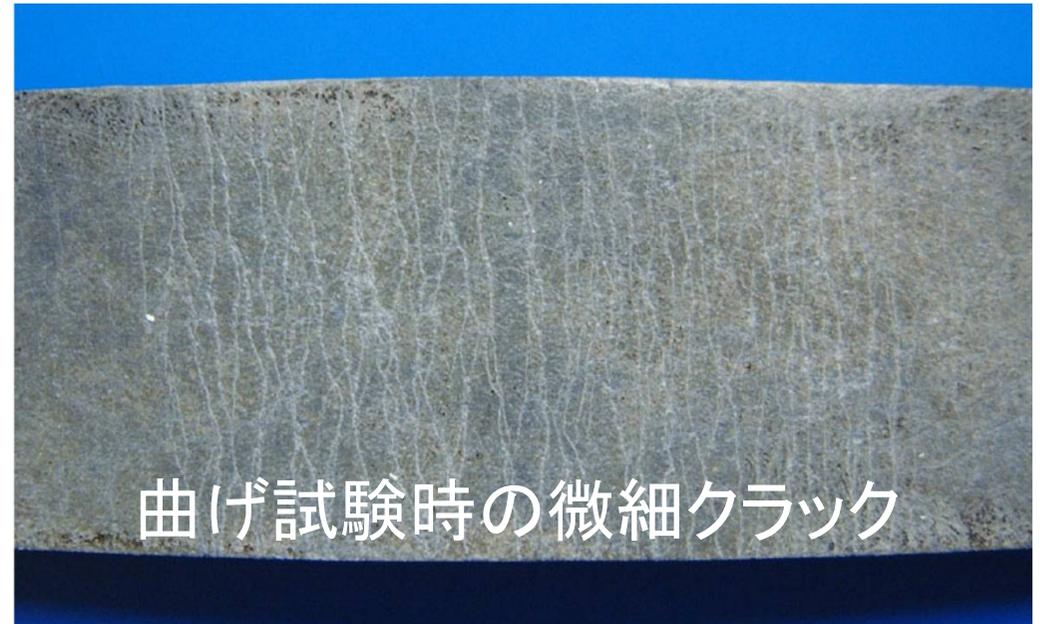
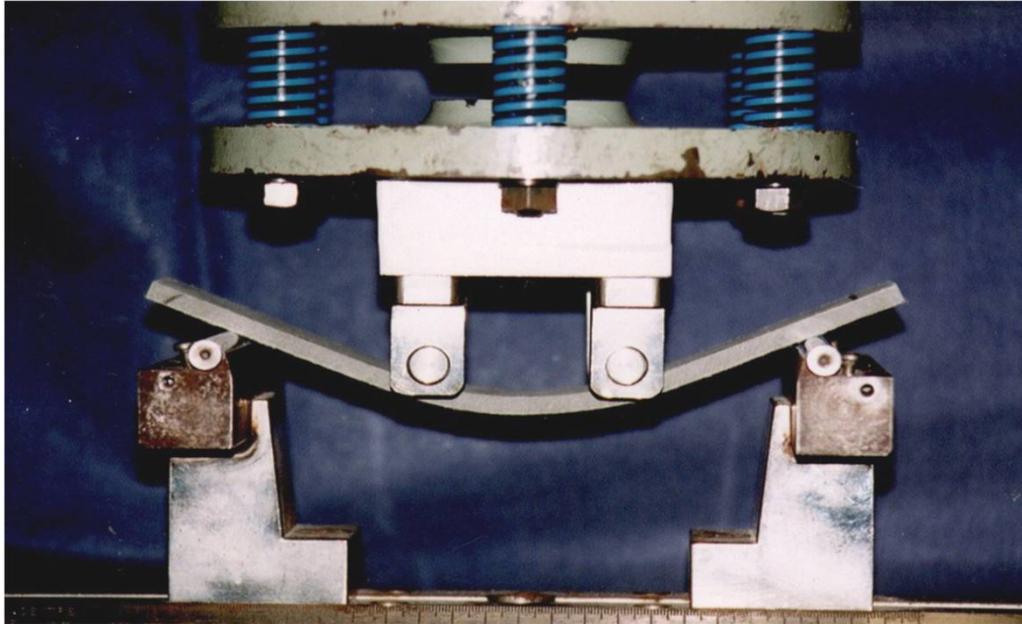


高靱性薄肉セメントボードを用いた埋設型枠工法



幅	91cm	
長さ	182cm	
厚さ	6mm	8mm
重さ	17.0kg/枚	22.5kg/枚

曲げ試験状況



曲げ試験時の微細クラック

		普通コンクリート (一例)
圧縮強度		40 N/mm ²
曲げ強度		5 N/mm ²
引張強度		3 N/mm ²
最大引張ひずみ		0.015
比重		2.3

●特殊な製造方法(抄造法)により、大量生産されるため製造コストがこれまでの埋設型枠より非常に安価。

●高じん性・高曲げ強度のボードなので、薄板で保護材としての機能を十分発揮し、現場での施工性が向上



厚付吹付けコンクリート工法

比較条件（補修厚100mm、鉄筋背面有り）

厚付吹付け工法

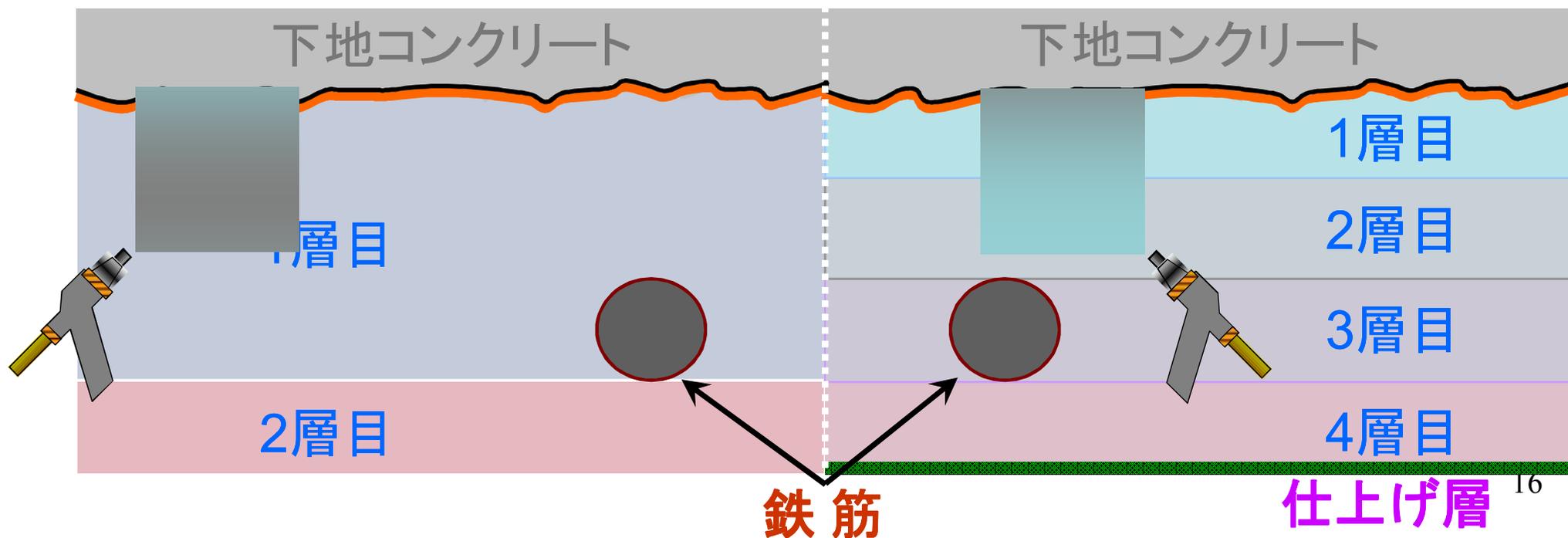
従来工法

1層当りの吹付厚：～100mm/層

1層当りの吹付厚：～30mm/層

段取り替え：2回

段取り替え：4回



厚付けが可能

- 一度に最大厚さ200mm
(工期短縮が可能)

良好なポンプ圧送性

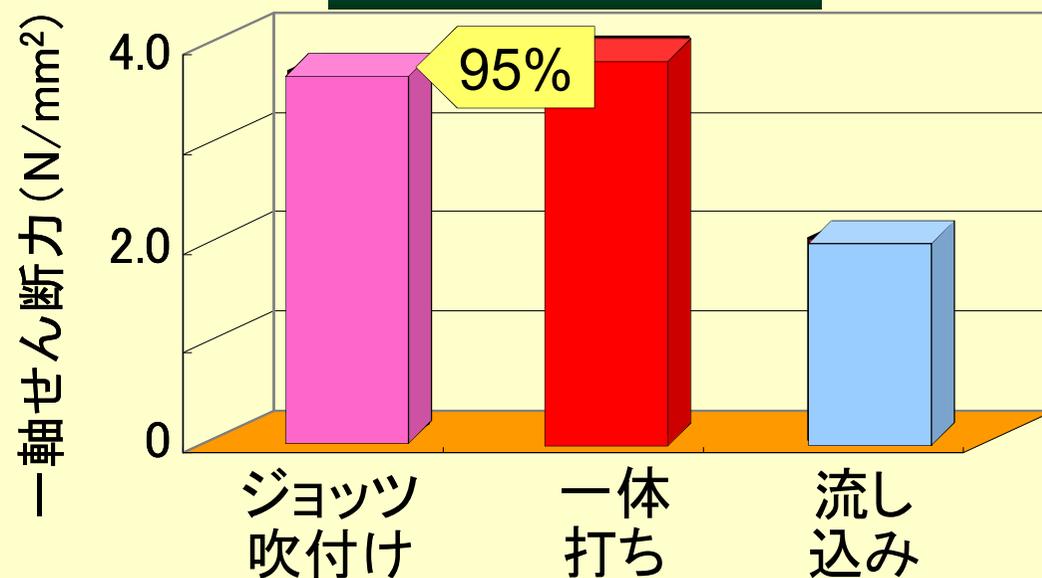
- 揚程15mを含む水平80m
の長距離圧送

優れた付着一体性能

- 一体打設の95%以上の
せん断耐力



一体性



超高強度繊維補強材（UFC）を用いた補修

構成材料と強度性状

UFC (Ultra high strength **F**iber reinforced **C**oncrete)

超高強度モルタル + 超高強度鋼繊維 or 有機繊維

設計・圧縮強度：**180N/mm²以上** (通常の7.5倍)

設計・引張強度：**8.8N/mm²以上** (通常の7倍)

超高強度モルタル



超高強度鋼繊維



有機繊維



材 齢

1日

7日

28日

圧縮強度

40N/mm²

170N/mm²

200N/mm²

施 工

常温硬化型
UFC

常温硬化

現場打設
自由な形状

製造・施工方法

従来UFC

練混ぜ
打設



高温蒸気
養生



大型トラック
による
運搬



大型重機に
よる架設

プレキャスト工場

80℃～90℃の給熱養生

常温硬化型



生コンプラント
での製造



鋼繊維添加
運搬



現場打設

超高強度繊維補強材の施工事例



耐酸コンクリート工法



下水道・返水柵の劣化

施設を20年～30年使用したら、コンクリートがぼろぼろになった。



硫酸イオン劣化

● 5%硫酸溶液 (pH0.5) 浸漬試験

浸漬30日後の供試体 (W/P=30%、20°C養生)



耐酸コンクリート



普通コンクリート

- 劣化速度は普通コンの1/5~1/10

耐酸コンクリートの適用事例



耐酸コンクリート打設 ²³

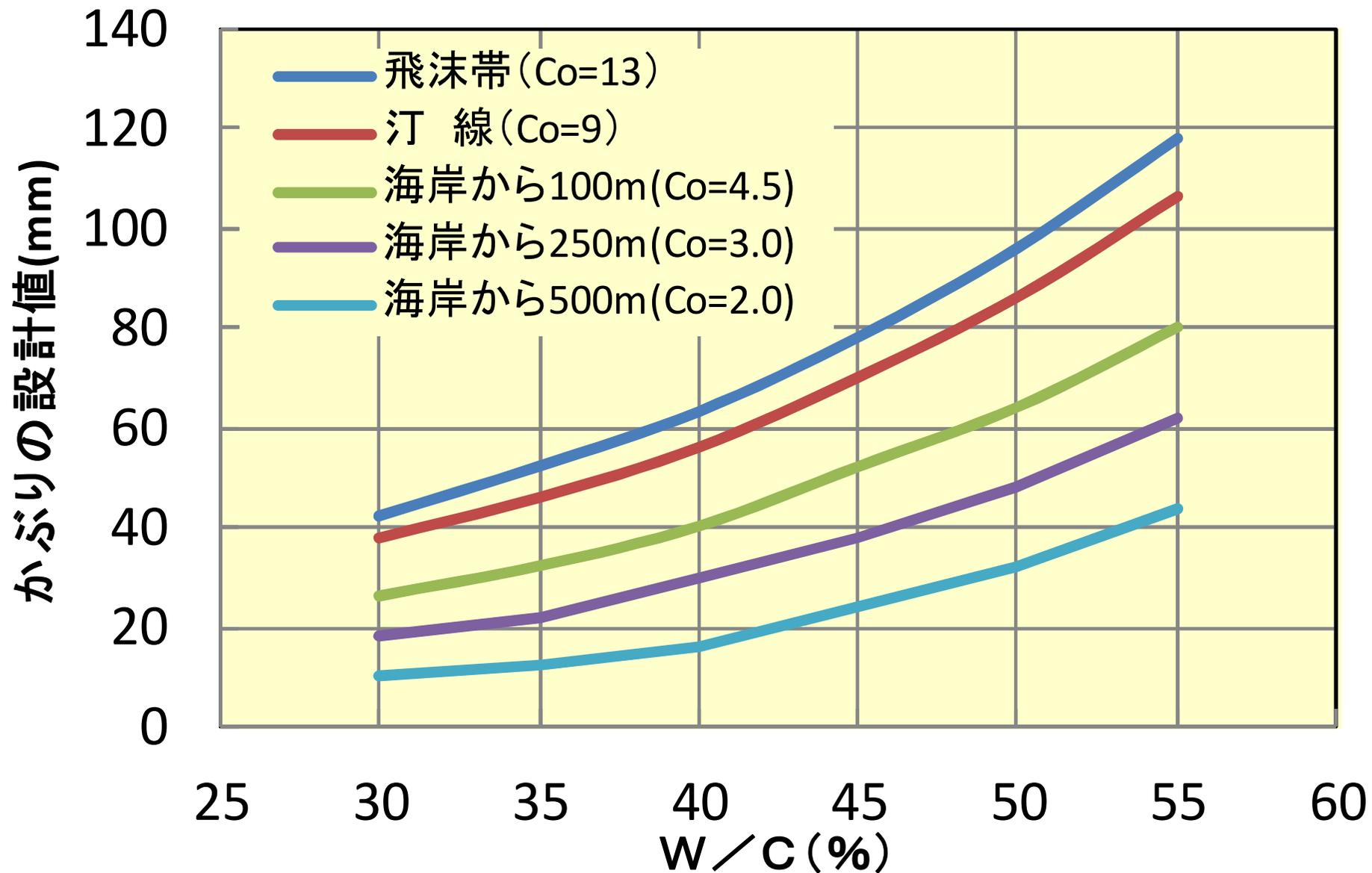
C：耐久性向上技術
(長寿命化技術)

劣化要因に対する耐久性向上対策

劣化要因	基本的な対策	積極的な対策
塩害	<ul style="list-style-type: none"> ・ かぶりの増大 ・ 水セメント比の低減 ・ 混和材料の使用（高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, シリカフェム等） ・ 初期含有塩化物イオンの総量規制 ・ ひび割れの抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面被覆（ライニング） ・ 浸透性防水剤（含浸剤） ・ 防食鉄筋（エポキシ樹脂塗装鉄筋など） ・ 高耐久性プレキャスト型枠 ・ 電気防食工法 ・ 防錆剤（亜硝酸イオンなど） ・ 透水性型枠工法
中性化	<ul style="list-style-type: none"> ・ かぶりの増大 ・ 水セメント比の低減 ・ ひび割れの抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面被覆（ライニング） ・ 防食鉄筋（エポキシ樹脂塗装鉄筋など） ・ 高耐久性プレキャスト型枠 ・ 透水性型枠工法
凍害	<ul style="list-style-type: none"> ・ 骨材の吸水率、安定性試験による確認 ・ 適切な空気量 ・ 初期養生（保温養生） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面被覆（ライニング） ・ 浸透性防水剤（含浸剤） ・ 透水性型枠工法
アルカリ骨材反応	<ul style="list-style-type: none"> ・ 安全と認められる骨材の使用（骨材のアルカリシリカ反応性試験による） ・ アルカリ総量の規制 ・ 混和材料の使用（高炉スラグ微粉末, フライアッシュ） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 表面被覆（ライニング） ・ 浸透性防水剤（含浸剤） ・ リチウムイオンの注入
化学的腐食	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水セメント比の低減 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 耐硫酸塩ポルトランドセメント ・ 表面被覆（ライニング） ・ シートライニング ・ 抗菌剤含有コンクリート

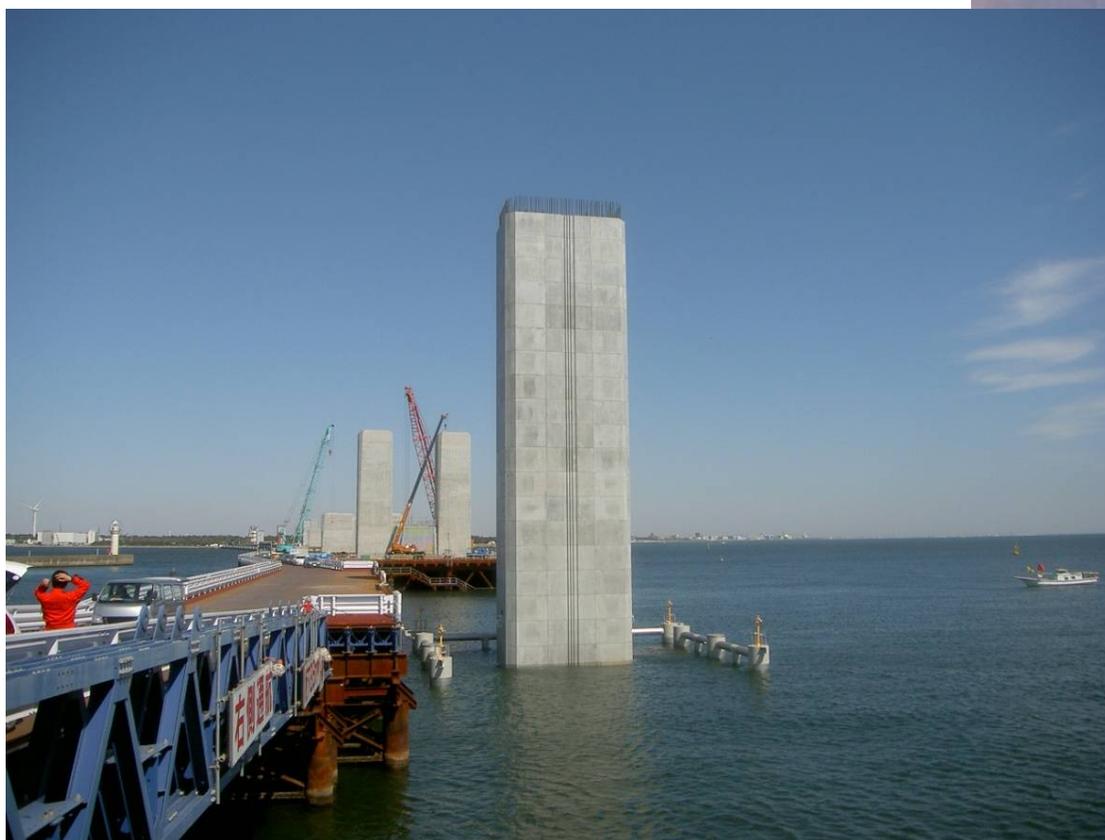
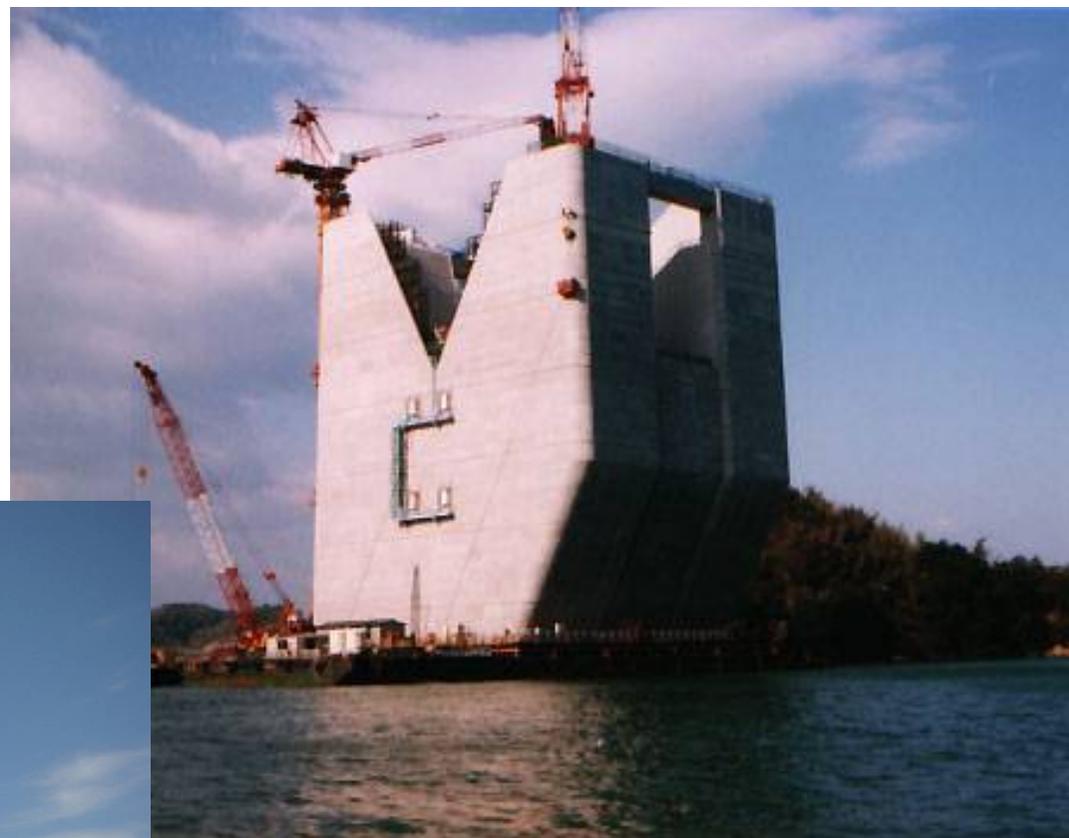
◆塩害に対して耐用年数100年を確保するために必要なかぶり

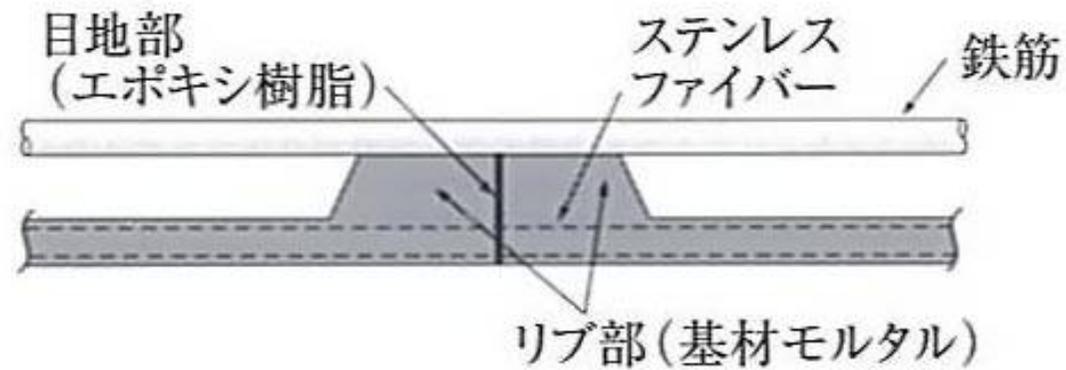
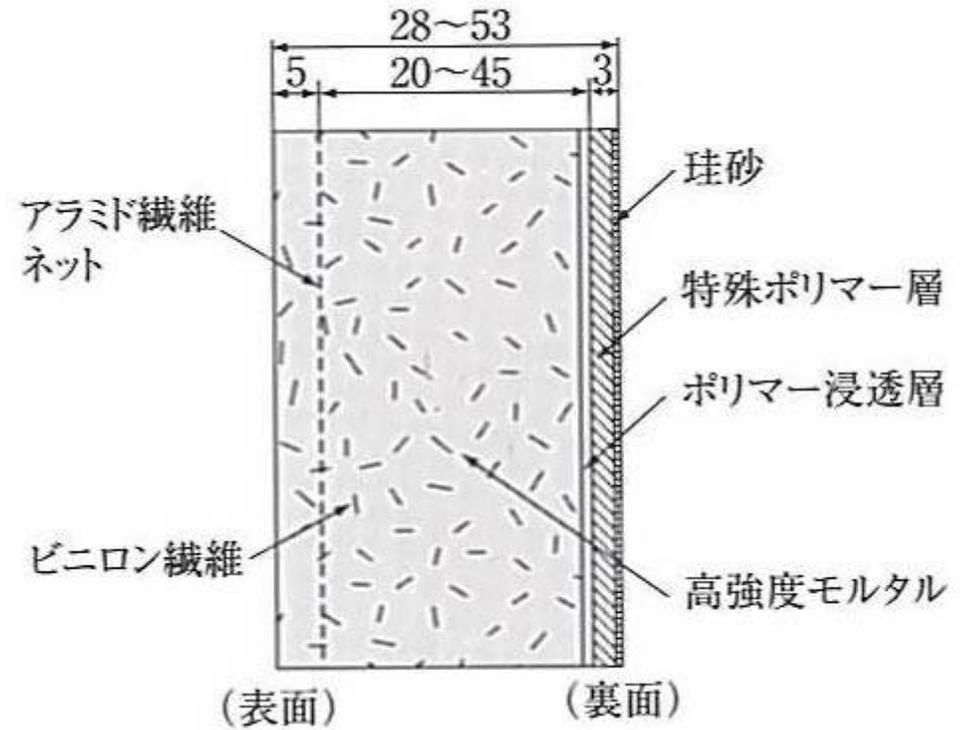
北陸地方, 設計耐用年数:100年間, 高炉セメントB種



高耐久性型枠工法

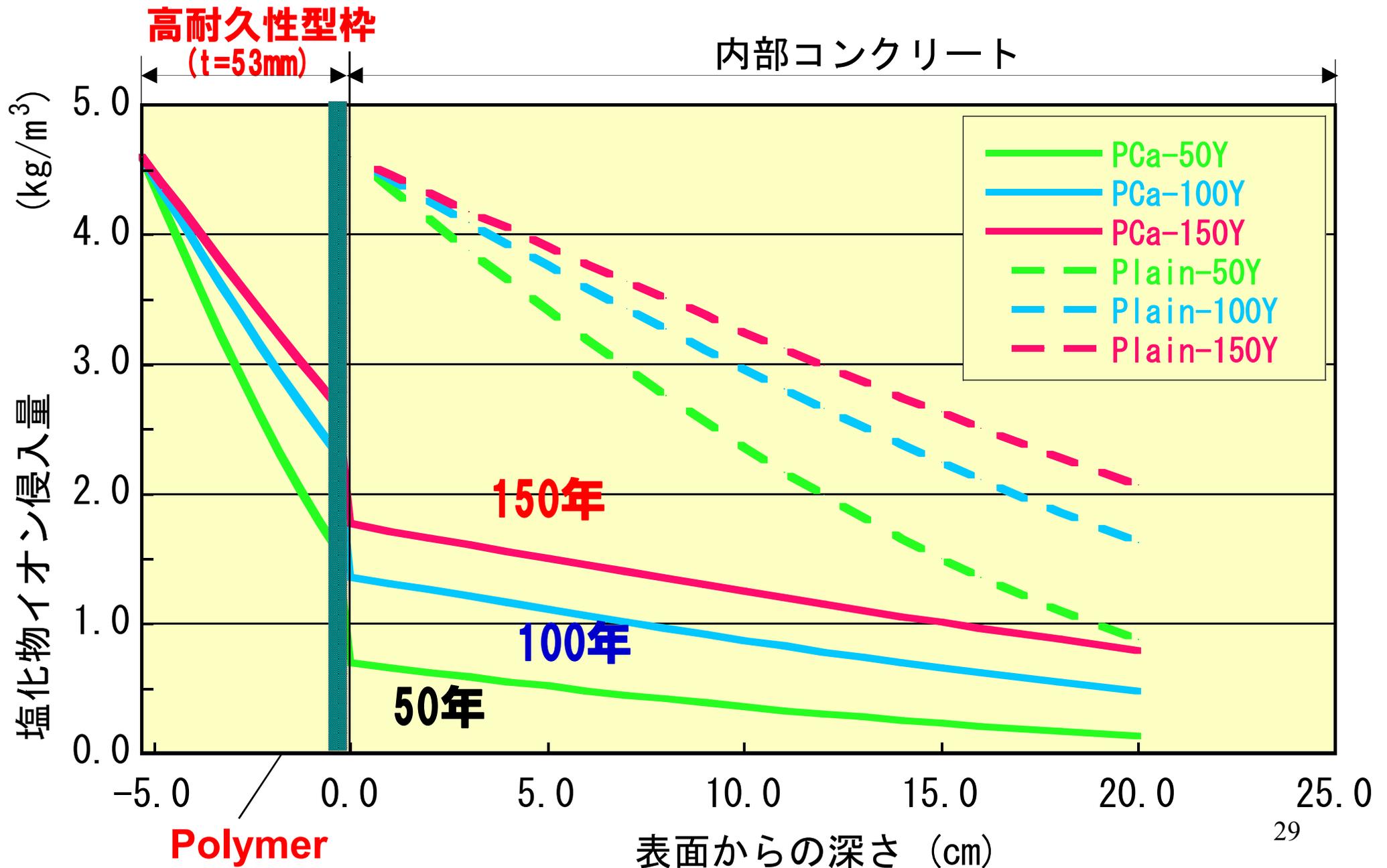
- ・ 高いひび割れ抵抗性
- ・ 優れた美観と耐久性
- ・ 内部鉄筋の長期保護





高耐久性型枠の断面

高耐久性型枠を用いたコンクリート構造物の塩化物イオン浸透予測(150年間)



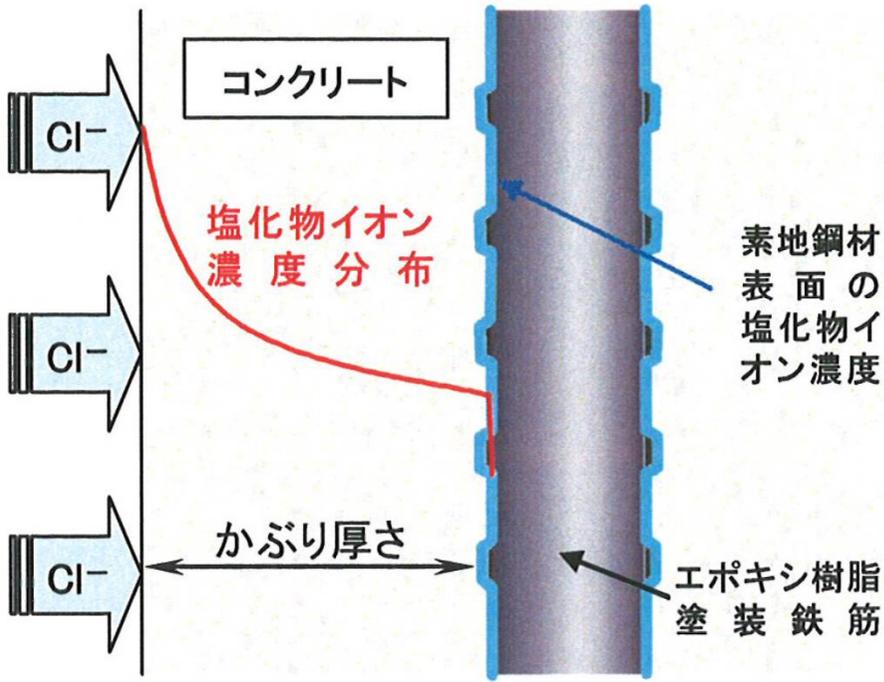
エポキシ樹脂塗装鉄筋



セグメント

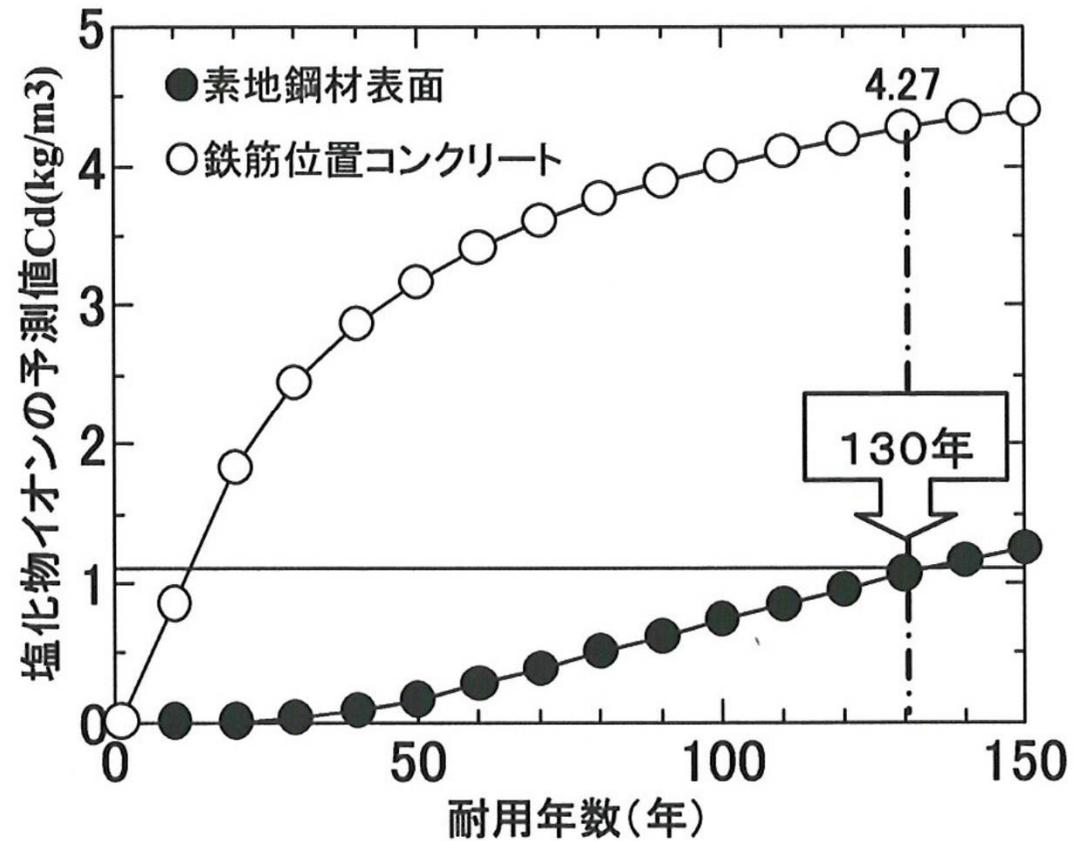
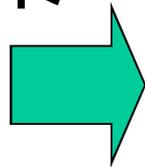
橋梁床版
(凍結防止剤
による塩害対策)

海洋環境

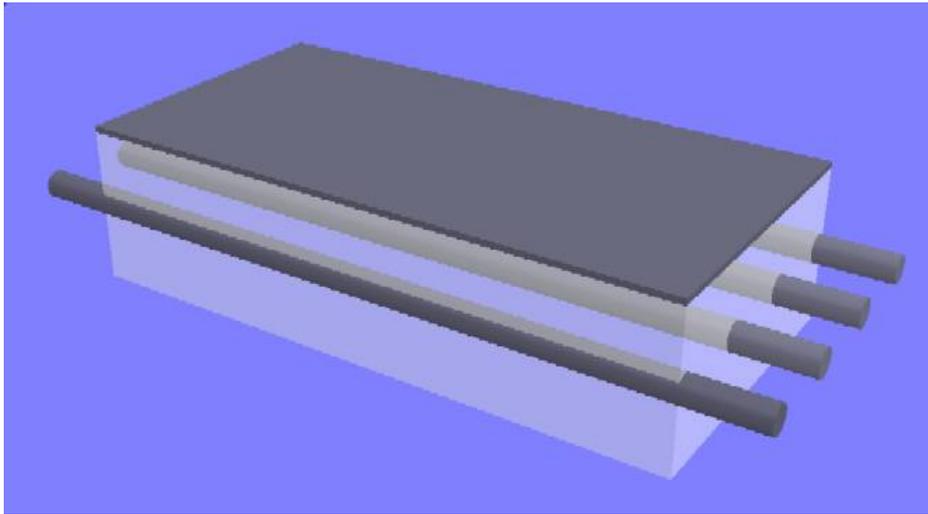


かぶり: 70mm
高炉セメントB種
W/C: 42%

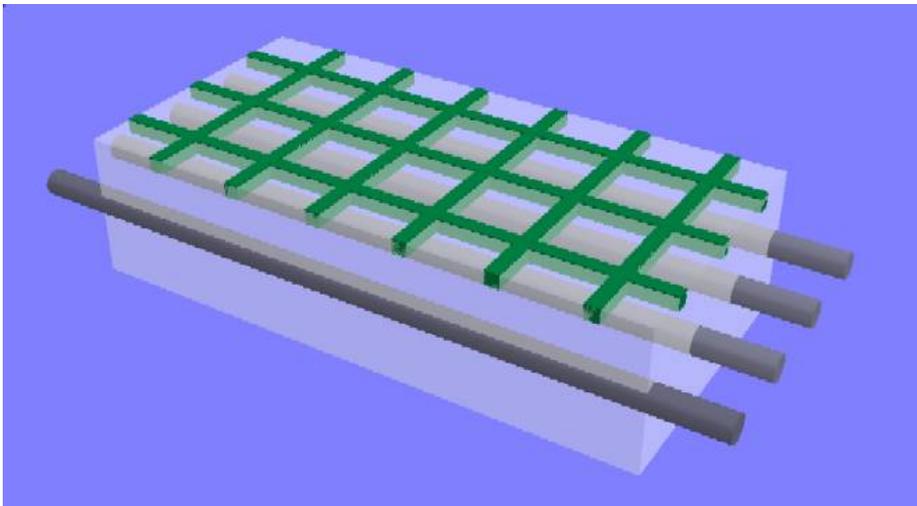
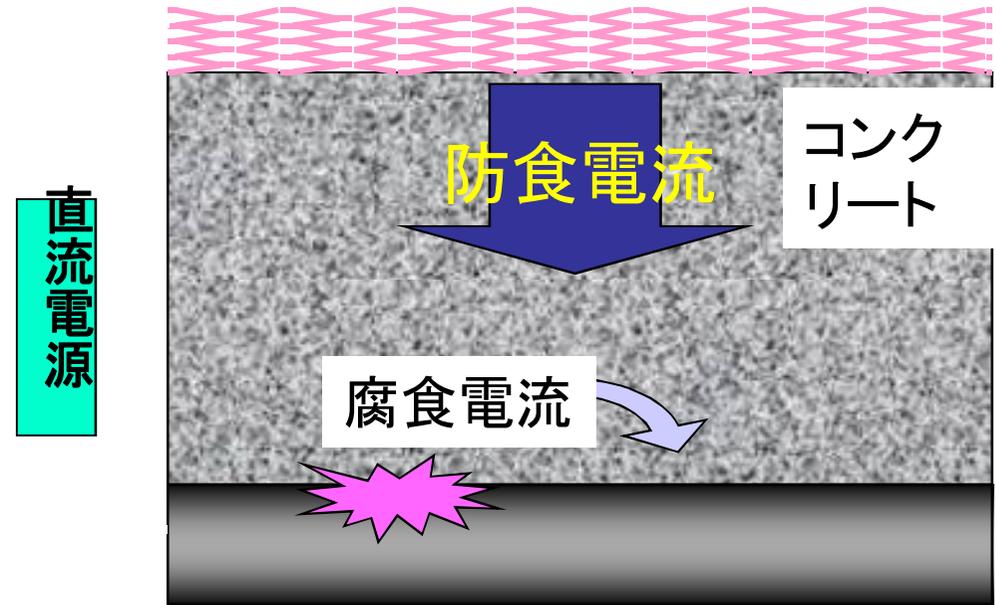
耐久性照査結果



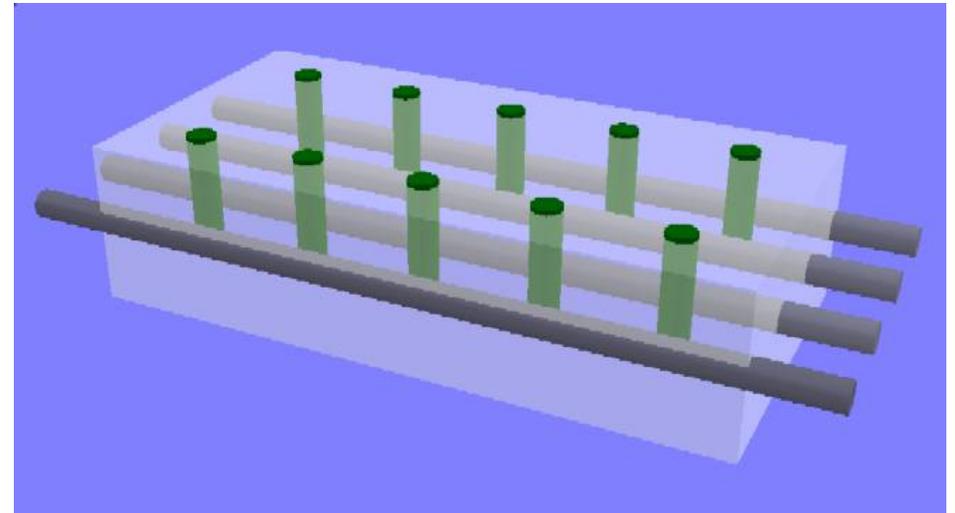
電気防食工法



面状陽極方式



線状陽極方式



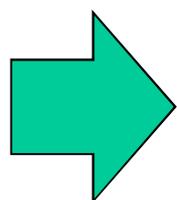
点状陽極方式

表面保護工(塗装)

エポキシ樹脂



ポリマーセメント



塩化物イオンや二酸化炭素の侵入を抑制し、内部の鉄筋腐食を防ぐ。

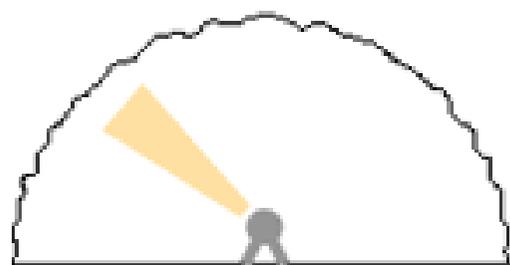


サンマテオ橋 耐久性対策(カルフォルニア州)

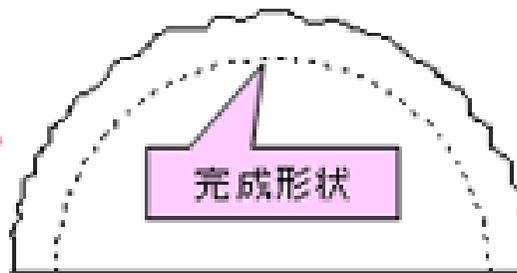
エポキシ塗装鉄筋、表面被覆、プレキャスト型枠、電気防食

D：長寿命化のための予防保全技術

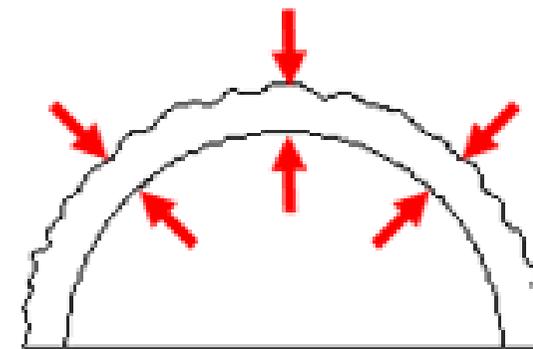
3Dレーザースキャナー



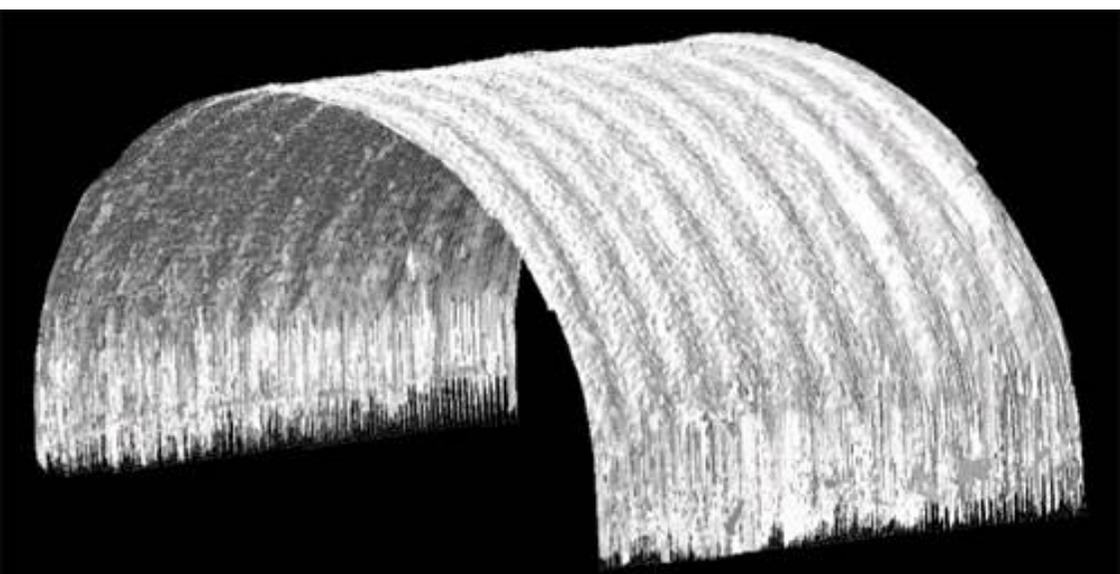
支保工形状計測



設計断面とリンク



巻き厚を算定



トンネル形状の表現

●測定方法

- ・測定対象物に触れることなく、レーザーによって、構造物などの3次元座標(点群)データを瞬時に取得
- ・測定時間は360°回転して5~15分程度
- ・計測精度は20mで2~20mm程度

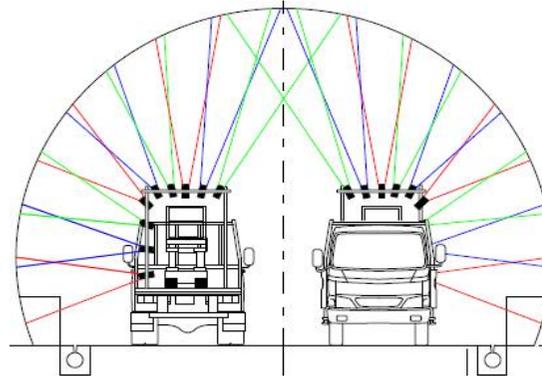
●実施例

- ・トンネル2次覆工の内空変位
- ・構造物の出来形計測

●適応範囲

内空変位, ひび割れ, はく離・はく落

デジタルビデオ



●測定方法

- ・複数台の3CCDデジタルビデオカメラを用いて構造物を撮影し、コンクリート表面の状態を画像化
- ・目視点検と同様な効果
- ・デジタル処理を行うことにより、ひび割れ、漏水等の変状を検出

●実施例

- ・トンネル内空モニタリング
- ・床版下面モニタリング

●適応範囲

内空変位, ひび割れ, 漏水, はく離・はく落

デジタルカメラを用いたひび割れ計測

コンクリート擁壁

- ・長さ：15.3m, 高さ3.4～5.0m
- ・測定面積：64m²

撮影距離 19m

使用カメラ

- ・一眼デジタルカメラ
- ・有効画素数：2400万画素
- ・望遠レンズ：80-400mm



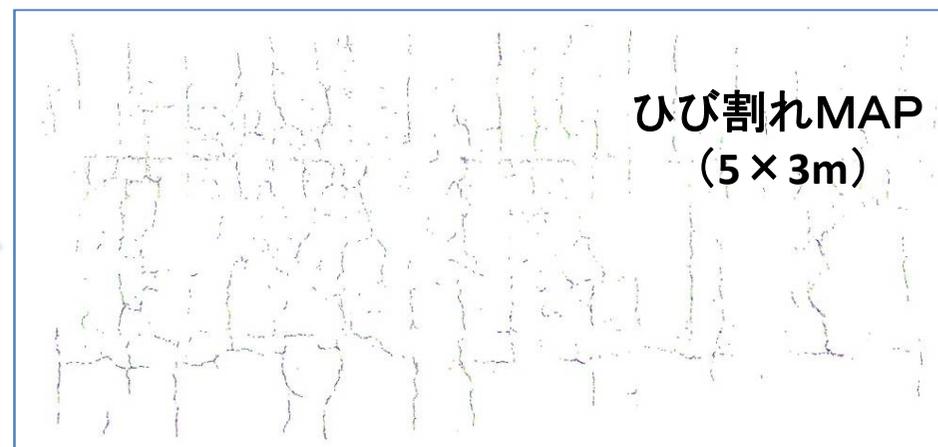


①デジタルカメラ(5,000万画素)と望遠レンズを用いて 床版表面を12分割して撮影

②画像処理により, 幅0.1mmまでのひび割れを抽出(室内作業)



(12区画, 1区画:概ね1.4 × 0.9m)

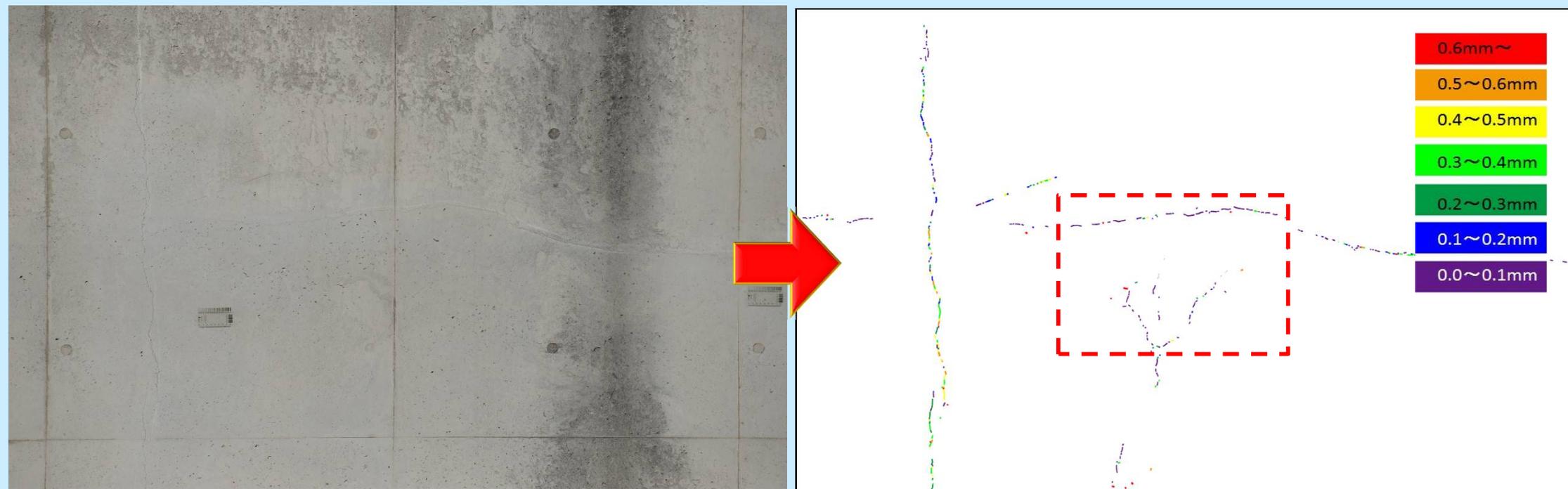


ひび割れMAP
(5 × 3m)

③ひび割れ抽出図を合成し, ひび割れMAPを作成(室内作業)

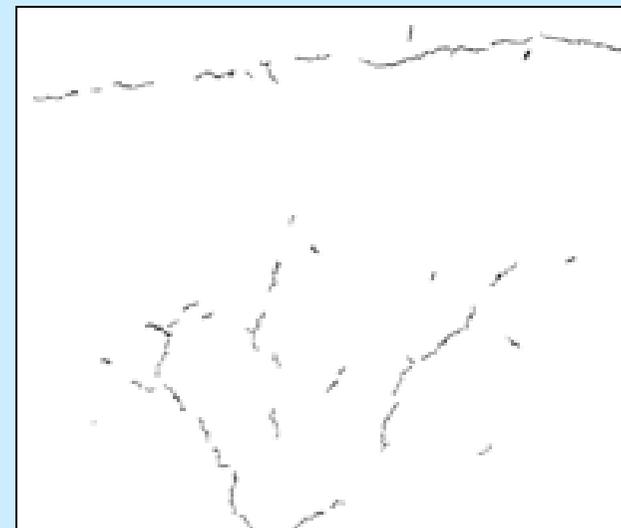
近接することなく, ひび割れの測定が可能 (高所作業車不要)

ひび割れの抽出結果



0.1mmまで識別可能

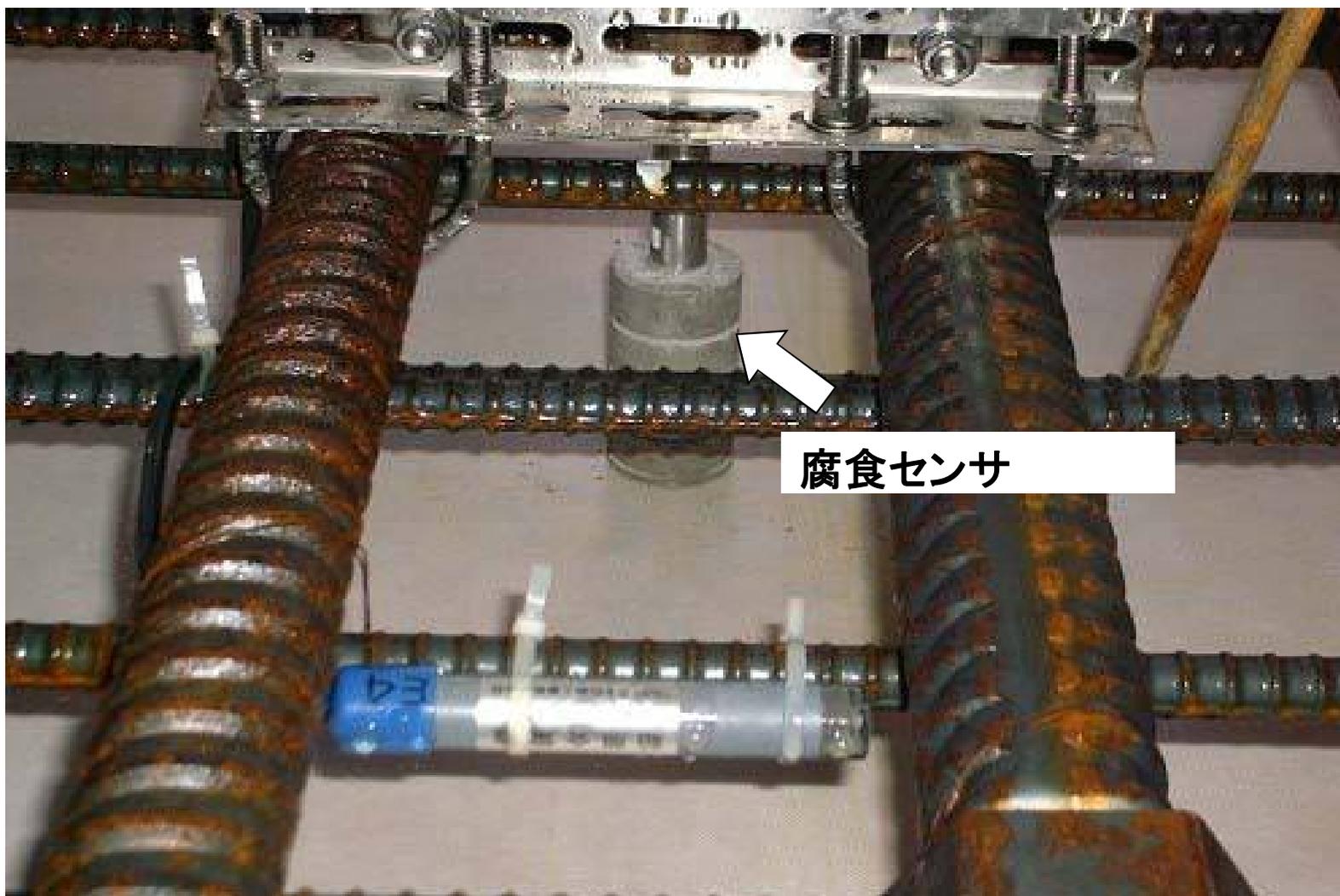
- 元画像とひび割れ抽出画像の比較
- ひび割れ位置の確認
- ひび割れデータベースの作製



拡大

コンクリート構造物のモニタリング技術

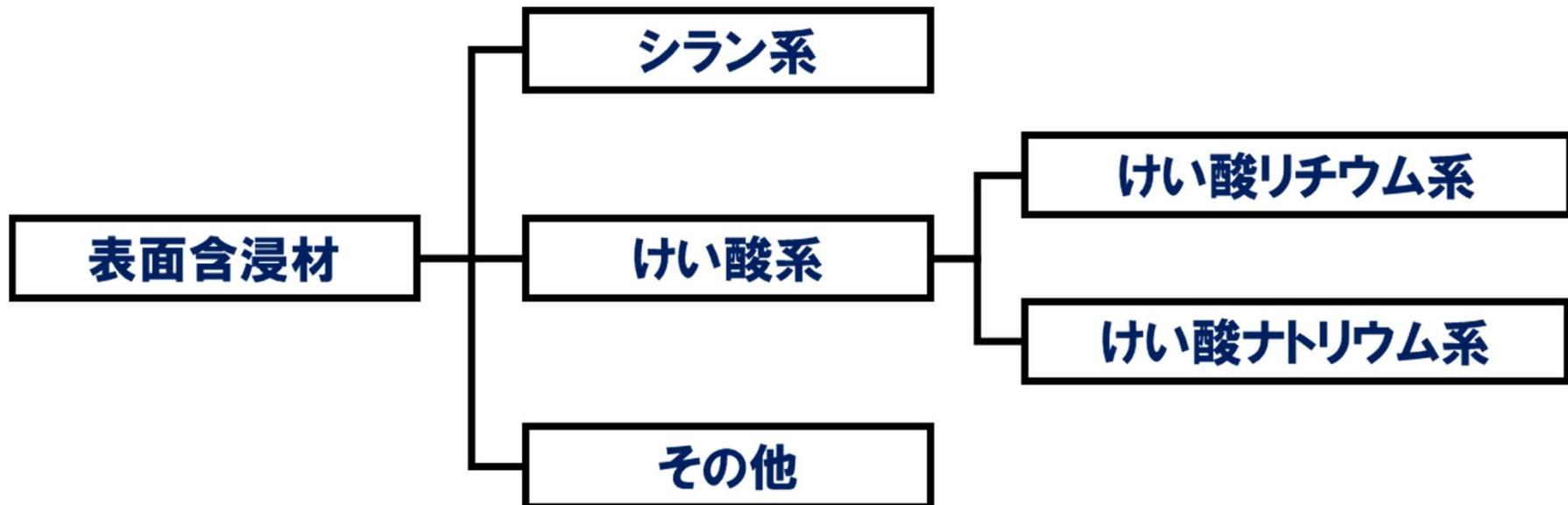
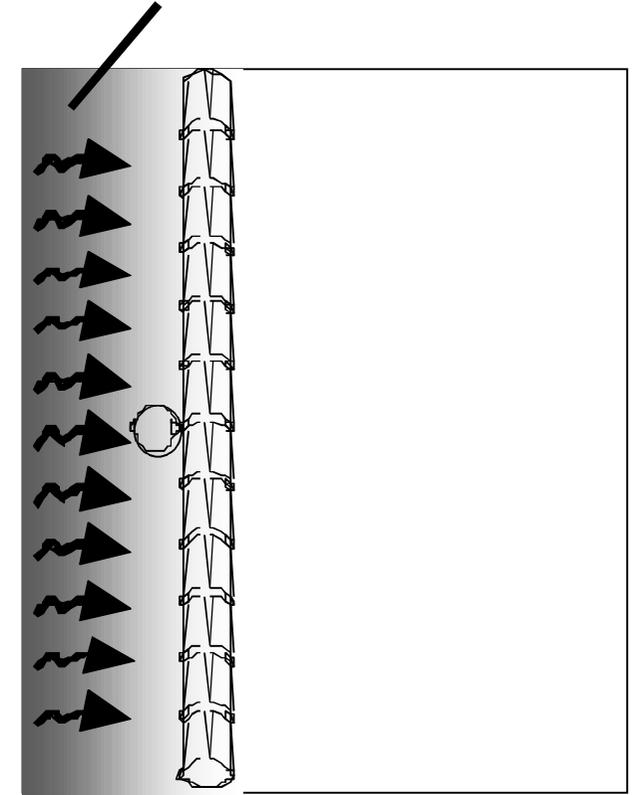
計測項目	モニタリング技術（センサ以外も含む）
コンクリート表面のひび割れ、浮き、剥離など	<ul style="list-style-type: none"> ・目視観察による変状マップ ・高精度デジタルカメラ ・赤外線サーモグラフィ ・レーザー光線による画像計測 ・CCDデジタルビデオカメラによる画像計測
ひずみ、ひび割れ、変位	<ul style="list-style-type: none"> ・光ファイバー計測 ・振動式ワイヤひずみゲージ
コンクリート中の温度	<ul style="list-style-type: none"> ・光ファイバー計測 ・振動式ワイヤひずみゲージ
コンクリートの塩化物イオン量（表面、内部）	<ul style="list-style-type: none"> ・塩化物イオンモニタリングセンサ（内部） ・ポータブル蛍光X線（表面） ・近赤外線法（表面）
コンクリート内部の破壊、劣化	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易AEセンサー ・打音検査システム（FFT解析など波形分析） ・ICタグ付きセンサー
鋼材の応力	<ul style="list-style-type: none"> ・EM（磁歪）センサー
鋼材の腐食	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋腐食ミニセンサー（自然電位、分極抵抗） ・アノードラダー、エキスパンションリング
構造物の挙動、変位	<ul style="list-style-type: none"> ・3Dレーザスキャナー ・ラインゲージ変位計測 ・常時微振動
振動	<ul style="list-style-type: none"> ・FBG加速度計 ・サーボ型加速度計 ・レーザトップラダー加速度計



塩化物イオン計測用腐食センサ

表面含浸工法

コンクリート表面に塗布した表面含浸材がコンクリート内部に含浸して、劣化因子の侵入抑制、または新たな性能を付与する効果をもたらす工法であり、一般に、コンクリート表面に塗膜を形成しないものが多い。



表面含浸工法の特徴

[適用される構造物]

- ・様々な構造形式に対応

[損傷状態および損傷原因の特徴]

- ・脆弱なコンクリート部(比較的軽微)
- ・表面の微細なひび割れ
- ・漏水

[補修目的]

・予防保全

- ・落書き対策(防汚)

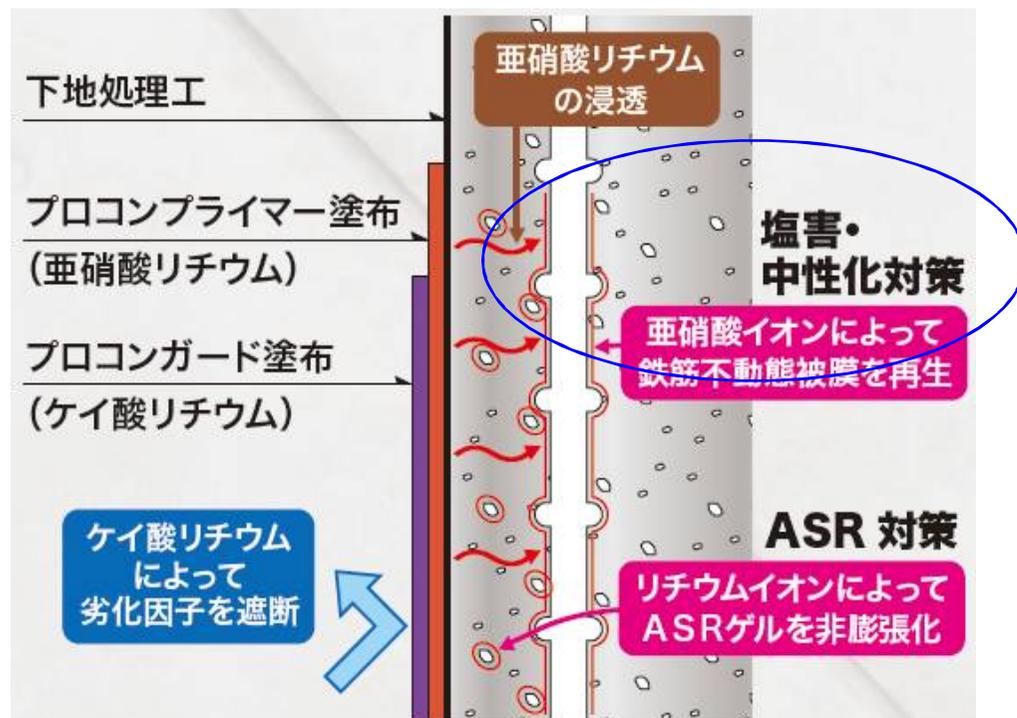
[その他]

- ・塗布量0.1~0.4 kg/m²程度
- ・適用後の外観の変化が少ない
- ・再施工する場合, 前処理が不要(再度含浸可能)

表面含浸工法の例（塩害、中性化の補修の場合）

基本性能 『けい酸リチウム系含浸材による劣化因子の遮断』

付加価値 『亜硝酸イオンによる鉄筋腐食の抑制』を付与



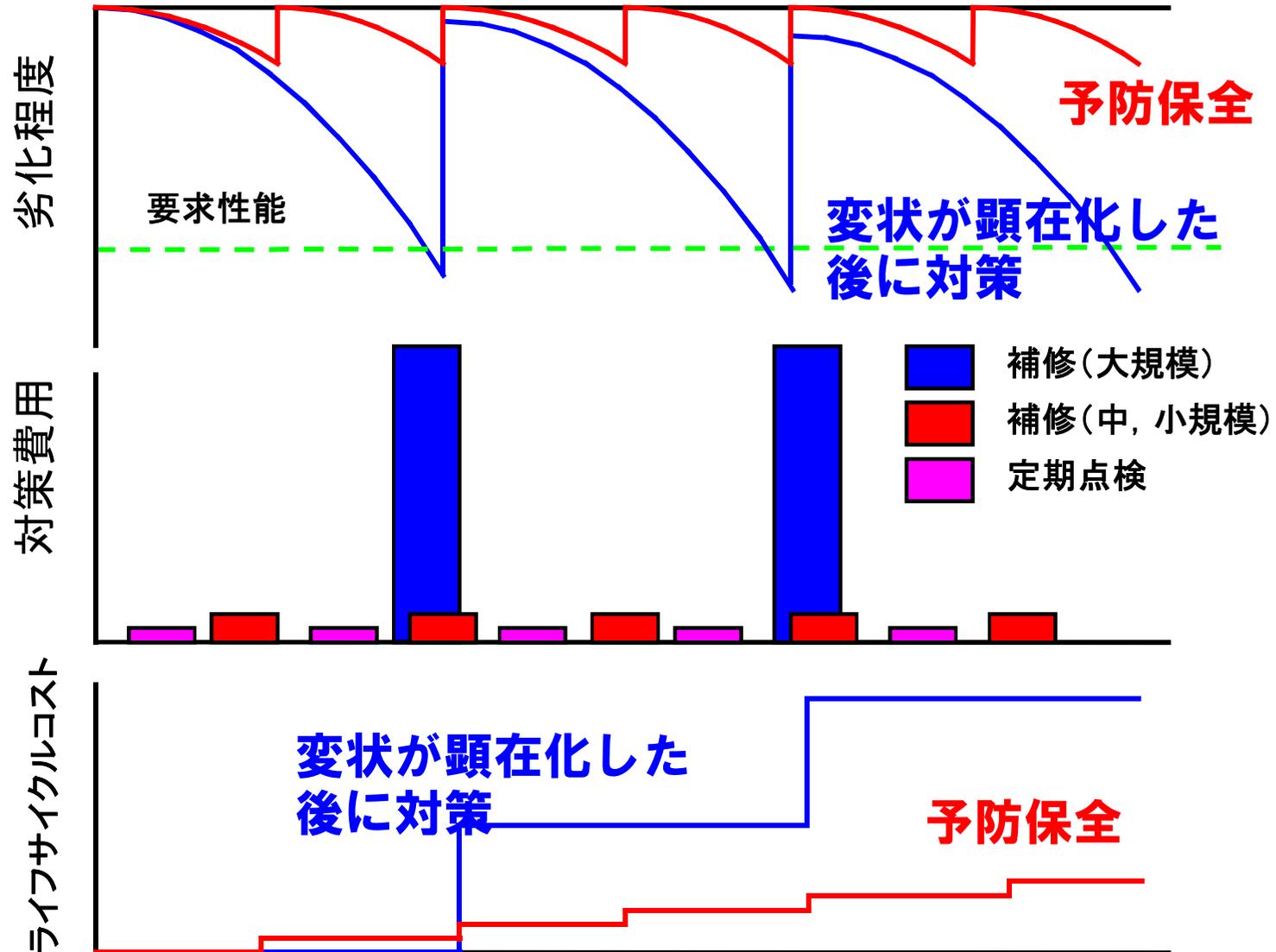
- ①コンクリート表面を下地処理する
- ②亜硝酸リチウム系含浸材を塗布し、内部へ含浸させる ⇒ 鉄筋防錆
- ③劣化因子の侵入を抑制するために、けい酸リチウム系含浸材を塗布する ⇒ 劣化因子の遮断

鉄筋腐食抑制効果(表層部)を併せ持つ表面含浸工法

ライフサイクルコスト (LCC) 評価

維持管理方法の違いによる ライフサイクルコストの比較

供用時間

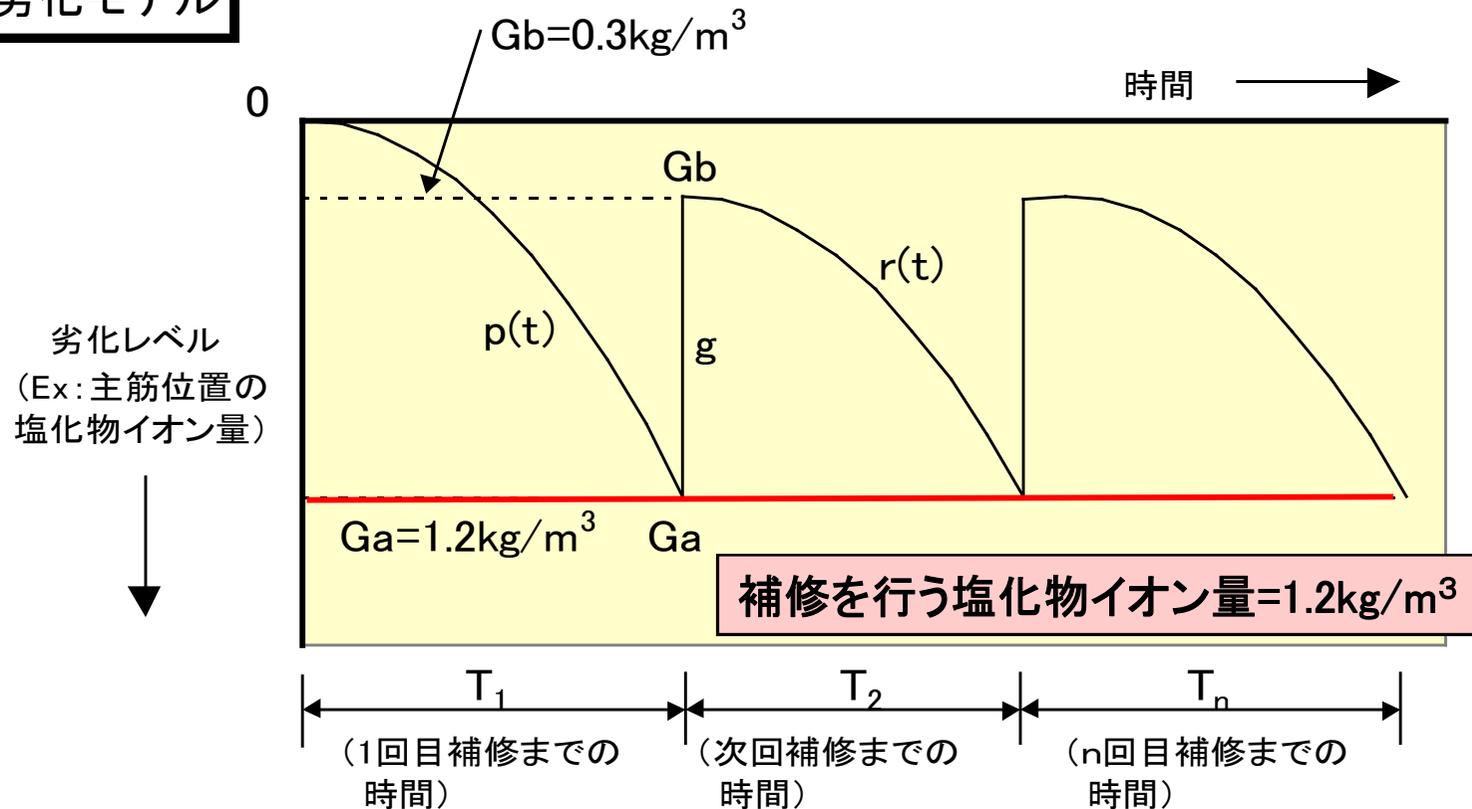


ライフサイクルコスト(LCC)の評価

$$LCC = Z_I + \sum_{i=1}^n Z_{Mi} + \sum_{i=1}^m Z_{Ri}$$

ライフサイクルコスト
初期建設費 補修費 更新費

劣化モデル



LCC評価システムの例



<初期画面>

新設構造物
(設計時)

既設構造物
(リニューアル)

INPUT

- ・設計耐用年数
- ・環境条件, 劣化要因
- ・初期建設工法

+

補修履歴
劣化調査結果

劣化予測

補修後の劣化

OUTPUT

- ・補修の実施時期
- ・ライフサイクルコスト(LCC)
- ・最適メンテナンス計画

INPUT

設計耐用年数

環境条件

照査項目, 限界状態

初期建設工法選択

LCC計算

劣化予測

耐久性照査

補修・更新工法選択

耐用年数

結果出力

繰返し

INPUT

コンクリートLCC評価システム - [C:\Documents and Settings\U30131\Desktop\鹿島石油\バス2.ed]

ファイル(F) 表示(V) ツール(T) ウィンドウ ヘルプ(H)

LCCナビ コンクリート構造物のLCC評価システム

構造物の条件
 構造物の名称: ○○高架橋(△△橋脚)
 建設年(西暦): 1974
 現在年(西暦):

データ作成条件
 施主: ○○○省○○○整備局
 提出年月日: 2012/12/17
 作成者: 早川 智浩
 コメント(特殊条件等):

環境条件
 海岸線からの距離 [km]: 汀線付近
 地域区分: 飛来塩分が多い地域
 腐食に対する環境条件: 特に厳しい腐食性環境
 周囲の湿度: じわじわしている (80%)
 表面塩化物イオン濃度 [kg/m²]: 9.0

LCCを比較するシナリオ
 LCCを比較する各シナリオの内容に対する説明や特記事項等を入力します。

No	説明	特記事項等
1	断面修復(PCM)	
2	断面修復(PCM) + 樹脂塗装	
3	樹脂含浸スーパースポード + 無収縮モルタル	
4	断面修復(スリムグROUT)	

OUTPUT

シナリオ

シナリオ	初期工法および対策の内容	費用累計 [千円]	対策の内容
1	表面融着なし、補修: 断面修復(PCM)	272,440	補修
2	厚膜型エポキシ、補修: PCM + 厚膜型エポキシ	276,800	補修
3	高耐久型プレキャスト型枠、補修: 日地の取替え	650,000	補修

LCC: 塩化物イオン濃度 中性化深さ 鉄筋腐食量 湿度変動

クリック

LCCの経時変化

Y軸: シナリオコスト [千円]
 X軸: 年 (2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080, 2090, 2100, 2110)

Legend:
 - 補修: 表面修復(PCM)
 - 厚膜型エポキシ、補修: PCM + 厚膜型エポキシ
 - 高耐久型プレキャスト型枠、補修: 日地の取替え

Excel出力
 終了

経過年数で表示

既設構造物の健全性調査結果の入力画面

- ▼ 計算条件
 - 基本条件
 - 初期建設工法
 - 現状の推定
- ▼ LCC計算
 - 限界状態の設定
 - 対策方針の設定
 - LCC計算
- ▶ 計算結果

クリック

項目	単位	値
■塩化物イオン濃度		
表面塩化物イオン濃度	kg/m ³	0
塩化物イオン拡散係数	×10 ⁻⁸ cm ² /s	0
■中性化		
中性化深さ	cm	0
中性化速度係数	cm/√年	0
■化学的腐食		
化学的侵食深さ	cm	0
化学的侵食速度	cm/年	0
周囲の酸化水素濃度	ppm	0
■鉄筋及びコンクリート		
鉄筋腐食量	mg/cm ²	0
鉄筋のひび割れ	mm	0
ひび割れ幅	mm	0
周囲の湿度		普通
コンクリート表面の圧縮強度	N/mm ²	0
コアの圧縮強度	N/mm ²	0

塩化物イオン濃度分布の推定方法

- 左表の入力値より計算する
- 測定値の推定値より計算する

推定計算

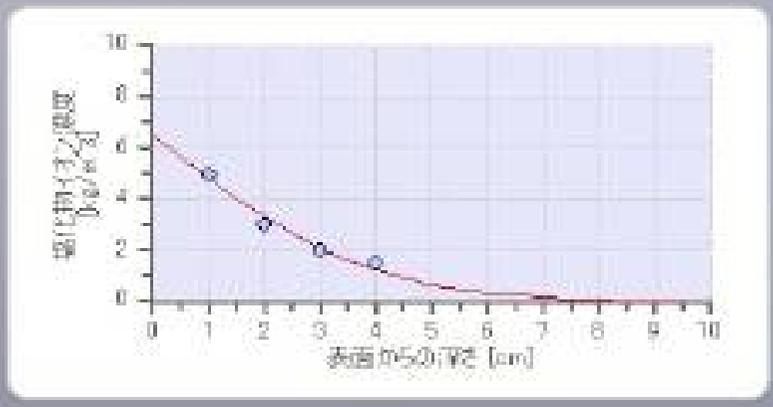
測定結果がすべて不明な場合

表面からの距離 [cm]	塩化物イオン濃度 [kg/m ³]
0.5	
1.0	5
1.5	
2.0	3
2.5	
3.0	2
3.5	
4.0	1.5
4.5	
5.0	
5.5	

塩化物イオン量

現状の推定結果

項目	単位	値
■塩化物イオン濃度		
鉄筋位置での塩化物イオン濃度	kg/m ³	0.01
表面塩化物イオン濃度	kg/m ³	6.50
塩化物イオン拡散係数	×10 ⁻⁸ cm ² /s	1.10
■中性化		
中性化深さ	cm	0.13
中性化速度係数	cm/√年	0.03
■化学的腐食		
化学的侵食深さ	cm	1.36
化学的侵食速度	cm/年	0.14
■鉄筋の腐食・ひび割れ		
鉄筋腐食量	mg/cm ²	0.00
ひび割れ幅	mm	0.00



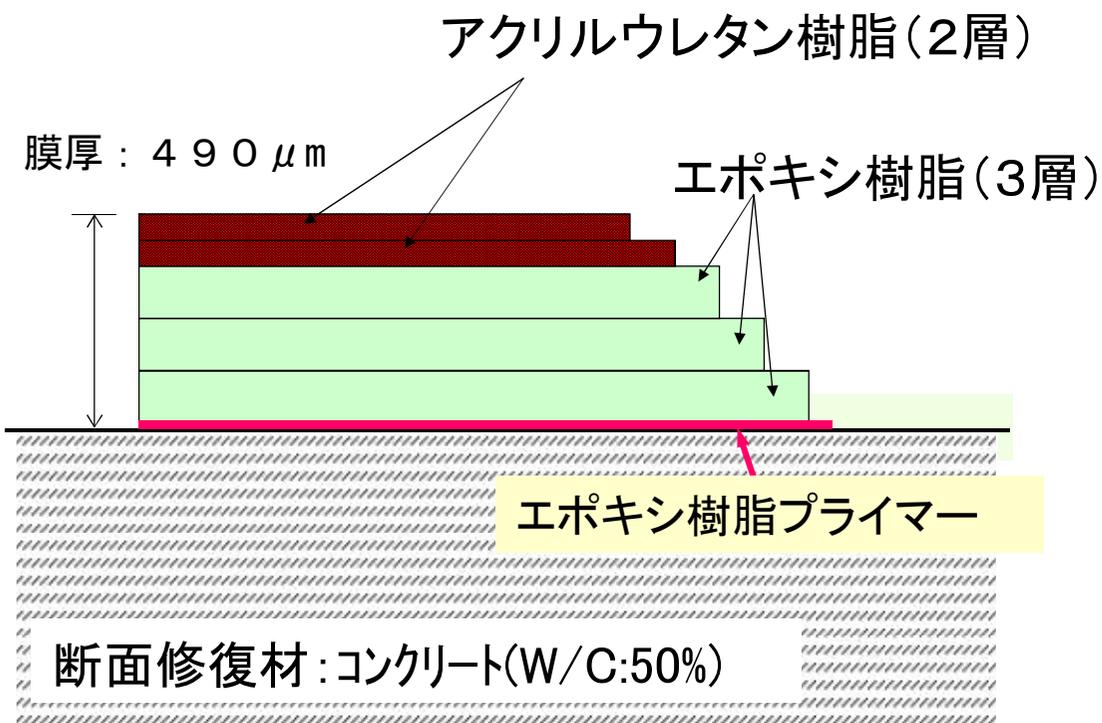
- ・ 中性化深さ
- ・ 鉄筋腐食量
- ・ ひび割れ幅
- ・ 化学的侵食深さなど

解析事例

塩害を受ける道路橋床版のLCC比較

- ・新設構造物(かぶり50mm)
- ・海岸からの距離:100m
- ・設計耐用年数:150年
- ・対象面積:2000m²

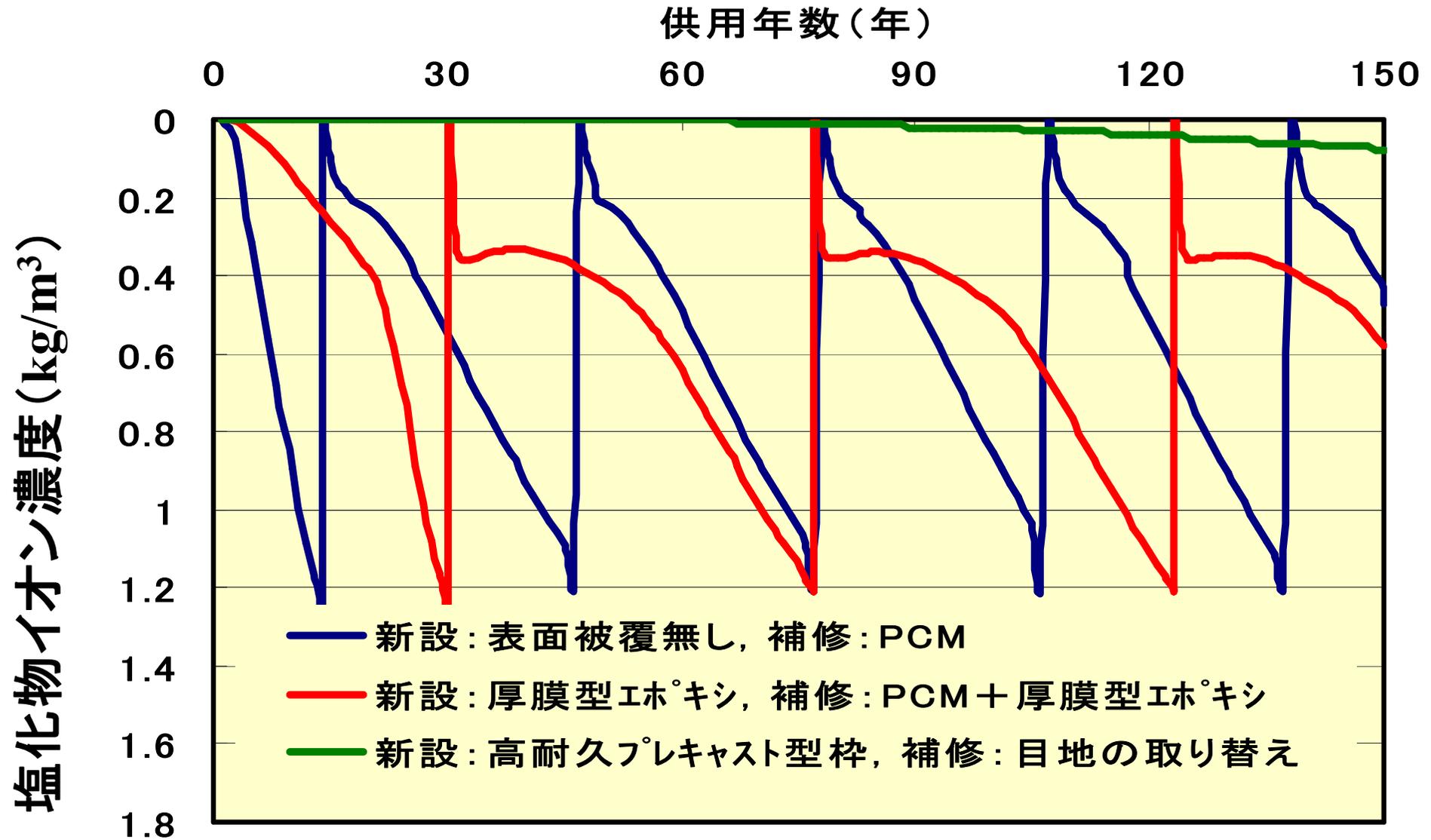
●適用工法

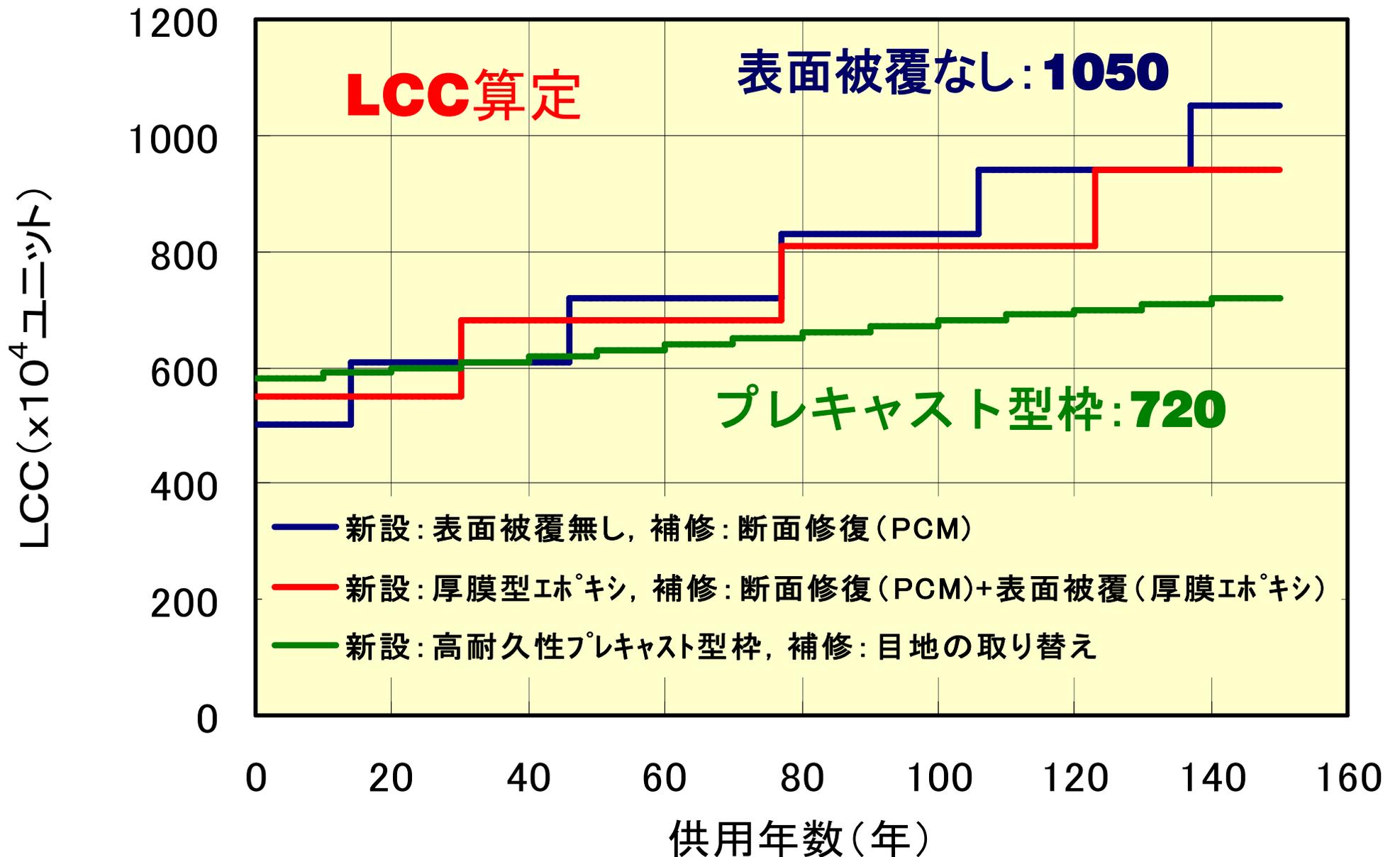


〔A〕表面被覆工法
(エポキシ樹脂塗装)
→補修: ポリマーセメント+再塗装

〔B〕高耐久性プレキャスト
型枠
→補修: 目地取替えのみ⁵²

■ 塩分浸透予測





高耐久性プレキャスト型枠工法を用いると、
 初期コストは約**15%**増加するが、**LCC**は約**30%**低減できる。

ご清聴ありがとうございました。