

長寿命コンクリート構造物を 目指して

～錆びない，朽ちない健康コンクリート～

広島工業大学大学院
工学系研究科 建設工学専攻
竹田 宣典

長寿命コンクリート構造物

1. 寿命の長いコンクリート構造物
2. 鉄筋の防食工法（錆びない技術）
3. コンクリートの劣化防止工法（朽ちない技術）

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)

無筋コンクリート **119歳**

肥前長崎鼻灯台
(昭和35年建設)

鉄筋コンクリート **59歳**



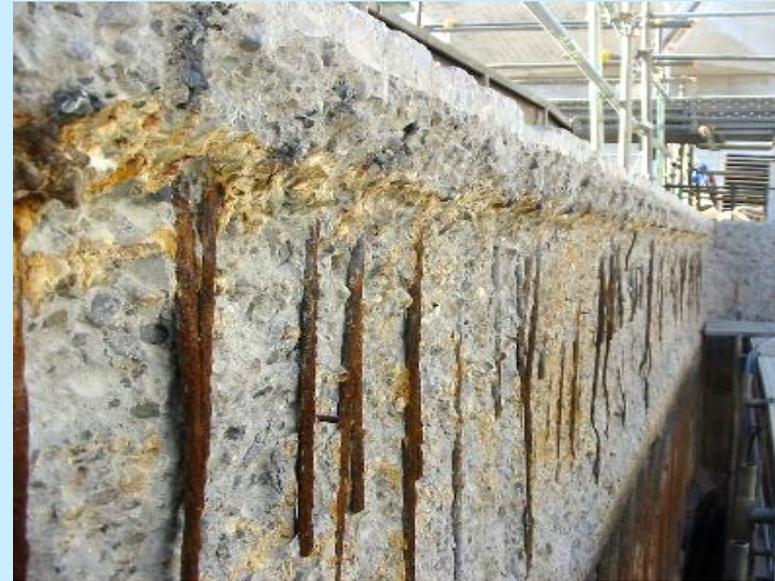
鉄鋼の歴史

- ・紀元前1400年頃:ヒッタイトが鉄を使用(鉄器文化)
- ・1779年:世界初の鉄橋”Coalbrookdale Bridge”建設(英):銑鉄
- ・1856年:ベッセマー転炉の開発による大量生産(英)
- ・1868年:日本初の鉄橋”くろがね橋”建設(長崎県)
- ・1901年:構造用鋼材の製造(八幡製鐵所)
- ・1958年:東京タワー建設、 1968年:霞が関ビル建設
- ・1950～1960年代:耐候性鋼材の開発

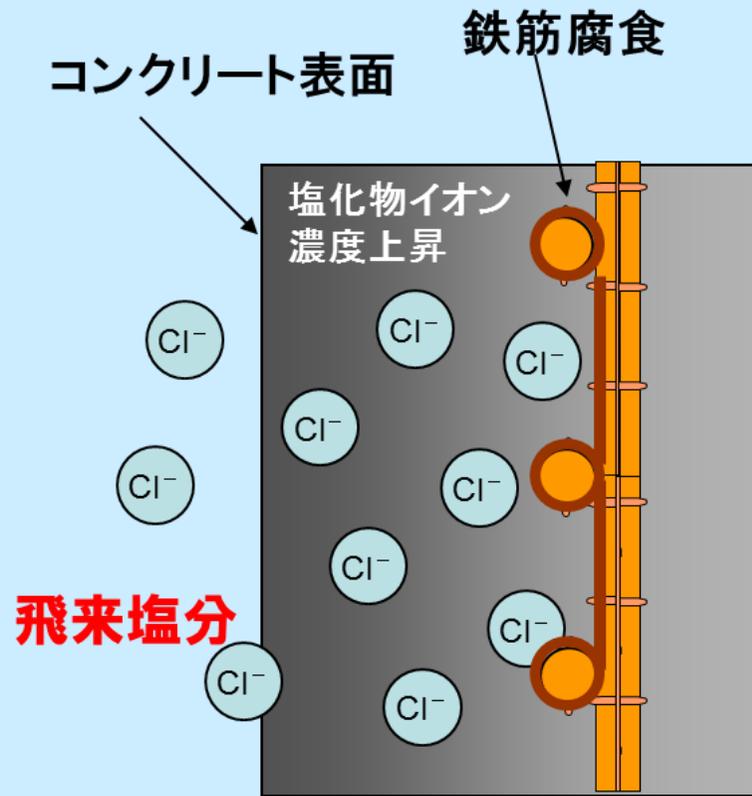
●コンクリート構造物の高耐久化に関する 基準・指針類

- ・1980年:「**亜鉛めっき鉄筋**」 設計施工指針(案)土木学会
- ・1983年:海洋コンクリート構造物の防食指針(案):JCI
- ・1984年:道路橋の塩害対策指針(案):日本道路協会
- ・1986年:「**エポキシ樹脂塗装鉄筋**」 設計施工指針(案)
- ・1991年:コンクリート防食指針(案):下水道事業団
- ・1990年代:高耐久性埋設型枠工法の開発(本四架橋適用)
- ・1996年:「**連続繊維補強材**」 設計施工指針(案) 土木学会
- ・2001年:「**電気化学的防食工法**」 設計施工指針(案):土木学会
- ・2003年:「**エポキシ樹脂塗装鉄筋**」 設計施工指針[改訂版]土木学会
- ・2005年:「**表面保護工法**」 設計施工指針(案):土木学会
- ・2008年:「**ステンレス鉄筋**」 設計施工指針(案):土木学会
- ・2012年:「**けい酸塩系表面含浸工法**」設計施工指針(案):土木学会
- ・2019年:「**亜鉛めっき鉄筋**」 設計施工指針(案)改訂 土木学会

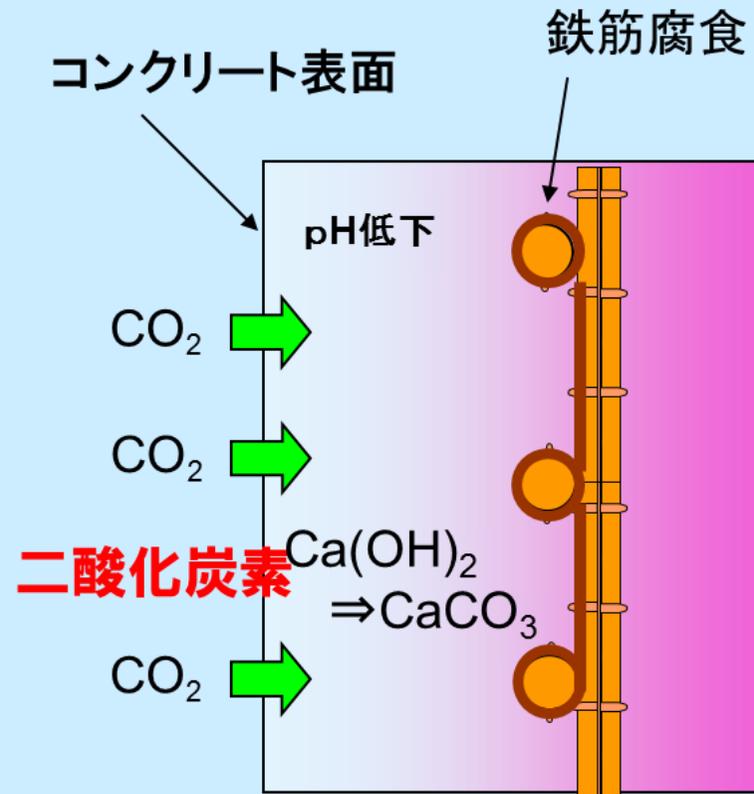
鉄筋腐食による劣化



コンクリート構造物の劣化因子侵入と劣化現象



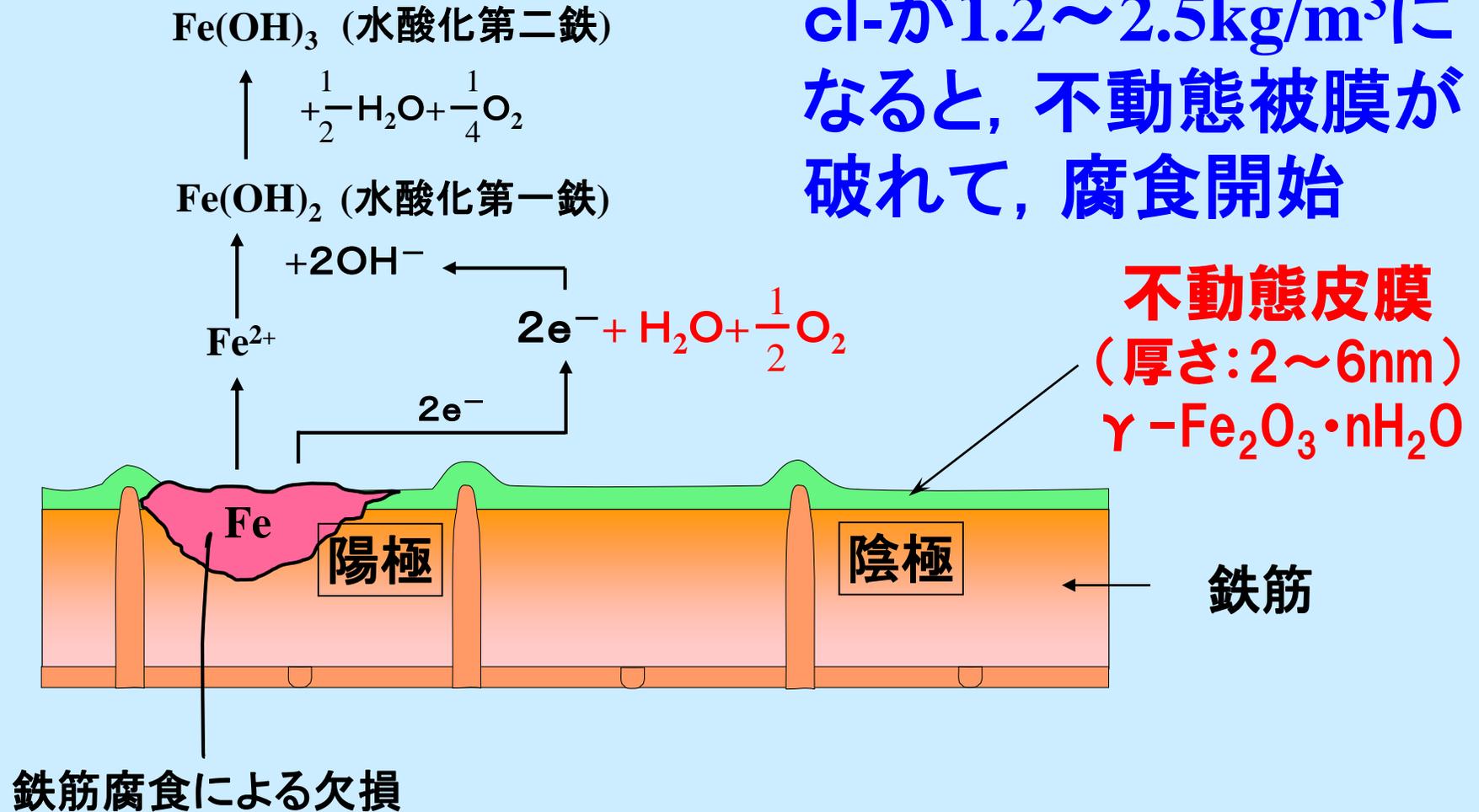
(a) 塩化物イオンの侵入による鉄筋腐食



(b) 中性化による鉄筋腐食

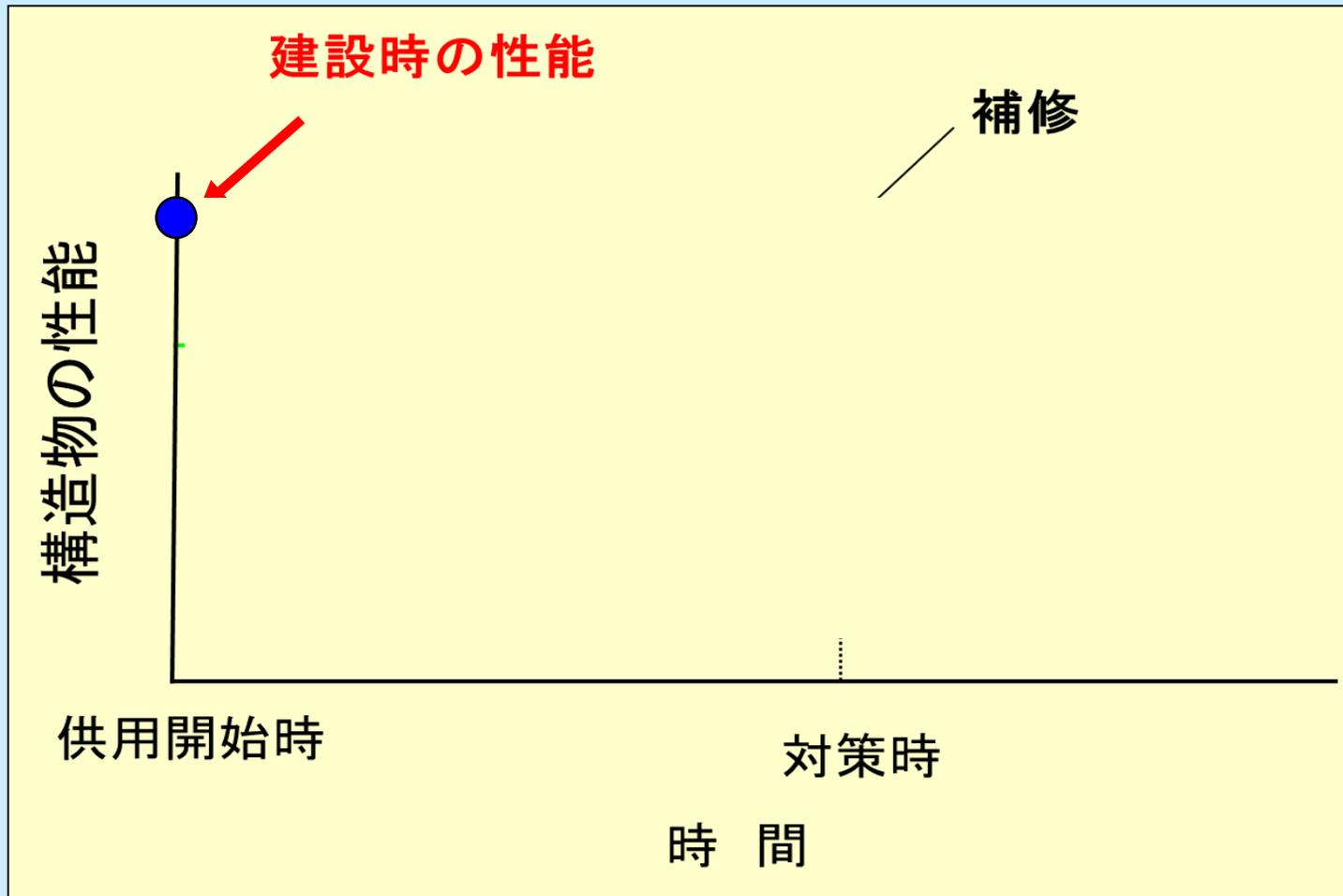
鉄筋腐食のメカニズム

cl-が1.2~2.5kg/m³になると、不動態被膜が破れて、腐食開始



➡ 鉄筋が錆びるには、**不動態皮膜**の破損と**水**、**酸素**が必要

構造物の性能の時間的变化



(1) 鉄筋の防食 (錆びない技術)

a) 防食鉄筋

- 樹脂被覆鉄筋

 - エポキシ樹脂塗装鉄筋

 - PVB樹脂塗装鉄筋

- 亜鉛めっき鉄筋 (Zn)

- ステンレス鉄筋 (Cr、Ni、Mo)

- 非腐食性補強材 (CF)

- 耐塩性鉄筋 (W、Ni、Cu)

- 塗布型防錆剤 (NO₂など)

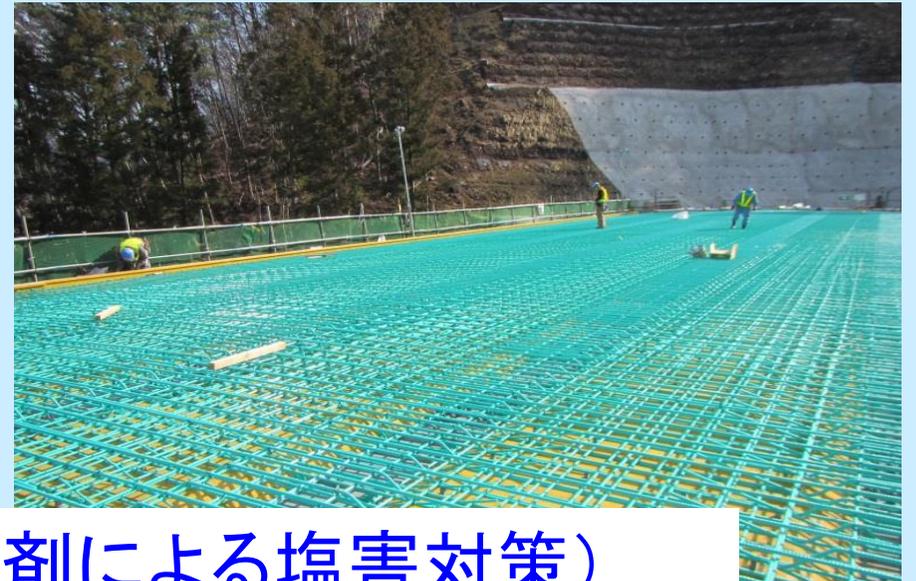
b) 鉄筋の腐食を防ぐ混和剤 (防錆剤など)

c) 電気防食

エポキシ樹脂塗装鉄筋



シールドセグメント



橋梁床版（凍結防止剤による塩害対策）

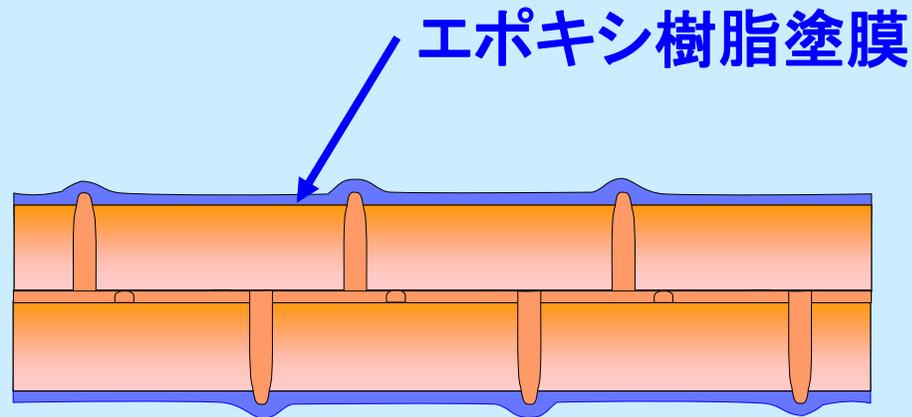
樹脂塗装鉄筋 関連規準・規格

エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針
[改訂版]、土木学会、2003

- ① エポキシ樹脂塗装鉄筋関連の品質規格(5種類)
(土木学会規準)
 - 塗装鉄筋、棒鋼、塗料、補修用塗料、ブラスト処理規準
- ② エポキシ樹脂塗装鉄筋関連の試験方法(13種類)
 - ピンホール、塗膜厚、耐衝撃性、耐食性などの試験方法
- ③ 樹脂被覆鉄筋の試験方法(2種類)
 - ⇒ 対象「樹脂被覆鉄筋」(エポキシ以外の樹脂にも拡張)
 - 樹脂被覆鉄筋の付着強度試験方法(2010年)
 - 樹脂被覆鉄筋の曲げ試験方法(2013年)

エポキシ樹脂塗装鉄筋関連の品質

- ① ピンホール：**5個以下/1m**(D19以下)、**8個以下/1m**(D22以上)
- ② 塗膜厚： **$220 \pm 40 \mu\text{m}$** （かつ、これを超える頻度が10%以下）
- ③ 最大付着応力度：**無塗装鉄の85%以上**
⇒付着強度の特性値は無塗装鉄筋の85%とする。



塩化物イオン侵入に伴う鋼材腐食に関する照査

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_o \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{C}{\sqrt{D_d}} + \frac{C_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right)$$

C_d : 鉄筋の素地における塩化物イオン濃度

D_d : コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数

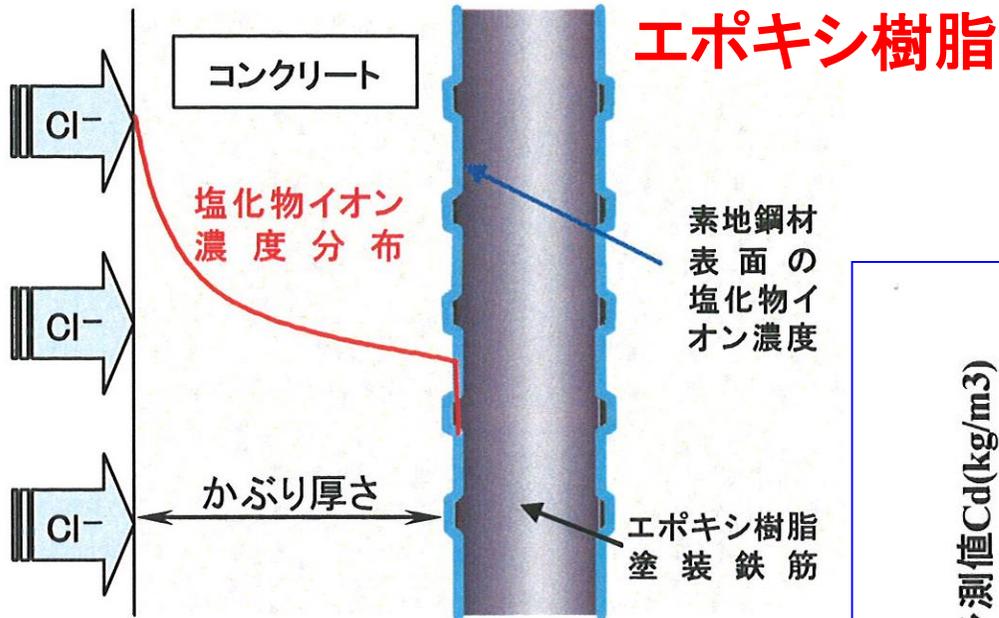
D_{epd} : エポキシ樹脂中の塩化物イオンの拡散係数
($2.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{年}$)

- 鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅: 10%増加 (無塗装鉄筋を用いた場合に対して)
- 水セメント比は55%以下

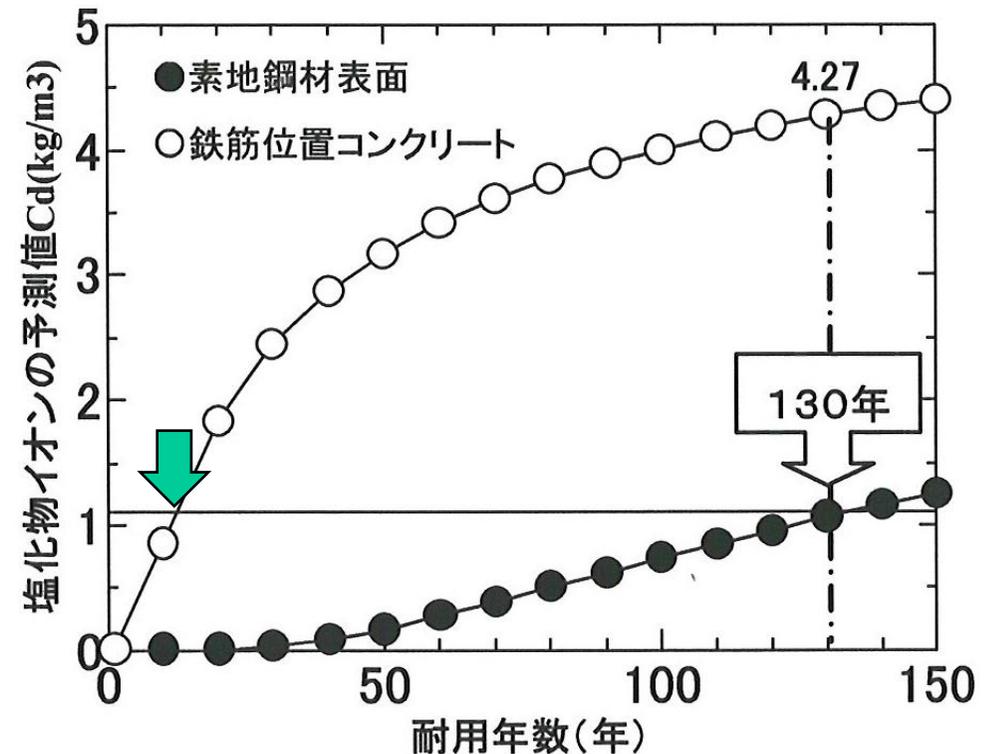
➡ 鉄筋素地における塩化物イオン濃度を計算可能
(照査期間中に $1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 以下であればOK)

コンクリート構造物における耐久性照査事例

海洋環境



かぶり: 70mm
高炉セメントB種
W/C: 42%



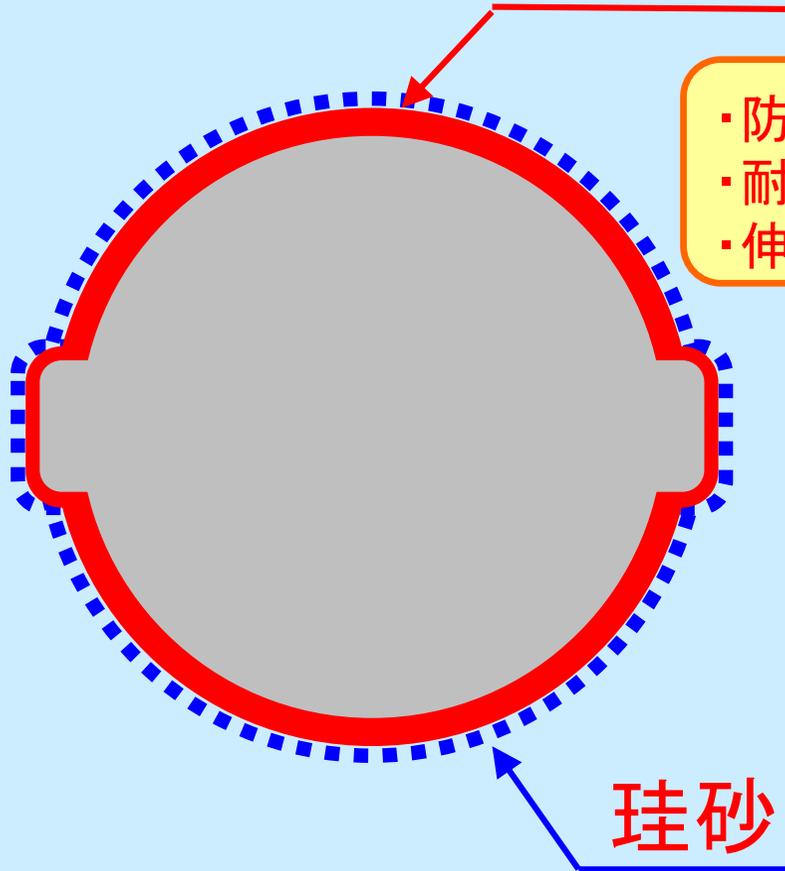
130年後Cl⁻は1.2kg/m³以下
鉄筋腐食しない予測

エポキシ樹脂塗装鉄筋の施工上の留意点

- ① コンクリートとの付着強度の低下
⇒ 重ね継手長さが、普通鉄筋より長くなる
- ② 曲げ加工、組立時に塗膜が傷つきやすい
⇒ タッチアップ補修
- ③ 紫外線劣化の懸念
⇒ 屋外に長期間置く場合、
日射除け養生が必要

PVB樹脂塗装鉄筋

ポリビニルブチラール(PVB)樹脂



- ・防食性の担保
- ・耐アルカリ性
- ・伸び率が高い

柔軟性



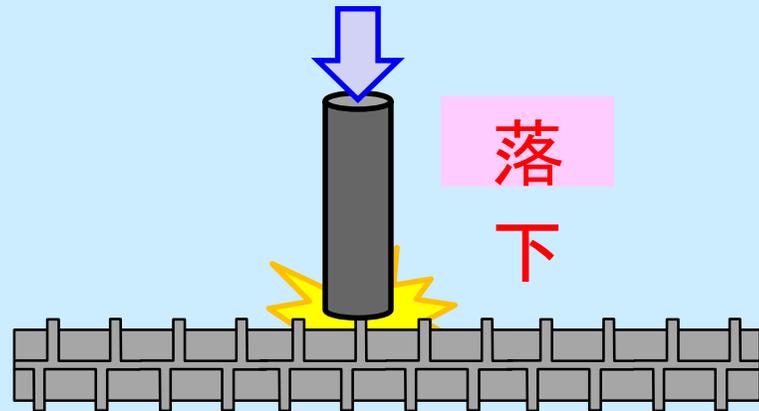
付着性



- ・コンクリートとの
付着強度向上

施工性

【耐衝撃性試験
(JSCE-E 514-2003)】

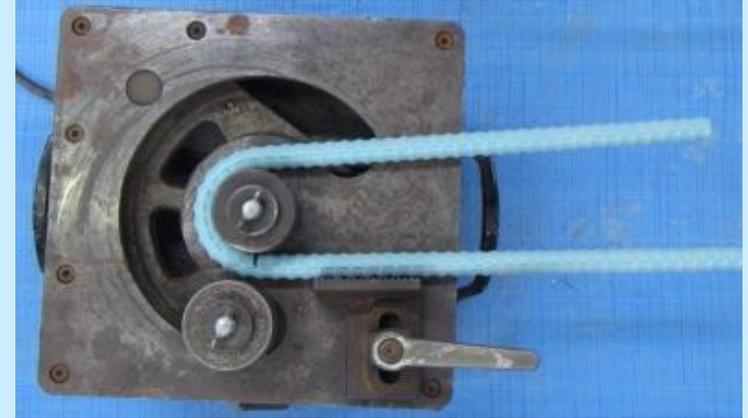


1.8kgのおもりを自由落下



鉄筋素地の露出なし

【曲げ加工性試験
(JSCE-E 514-2003)】

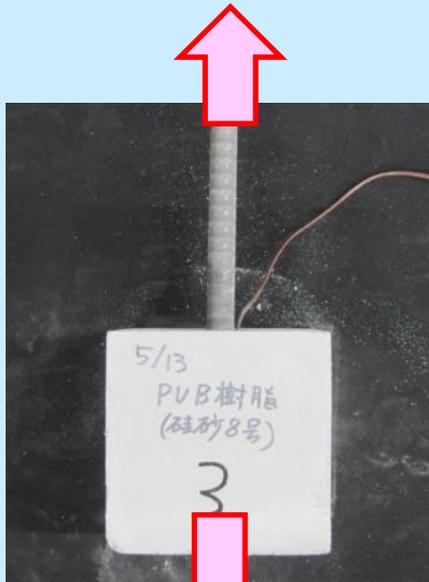


PVB鉄筋の曲げ外周

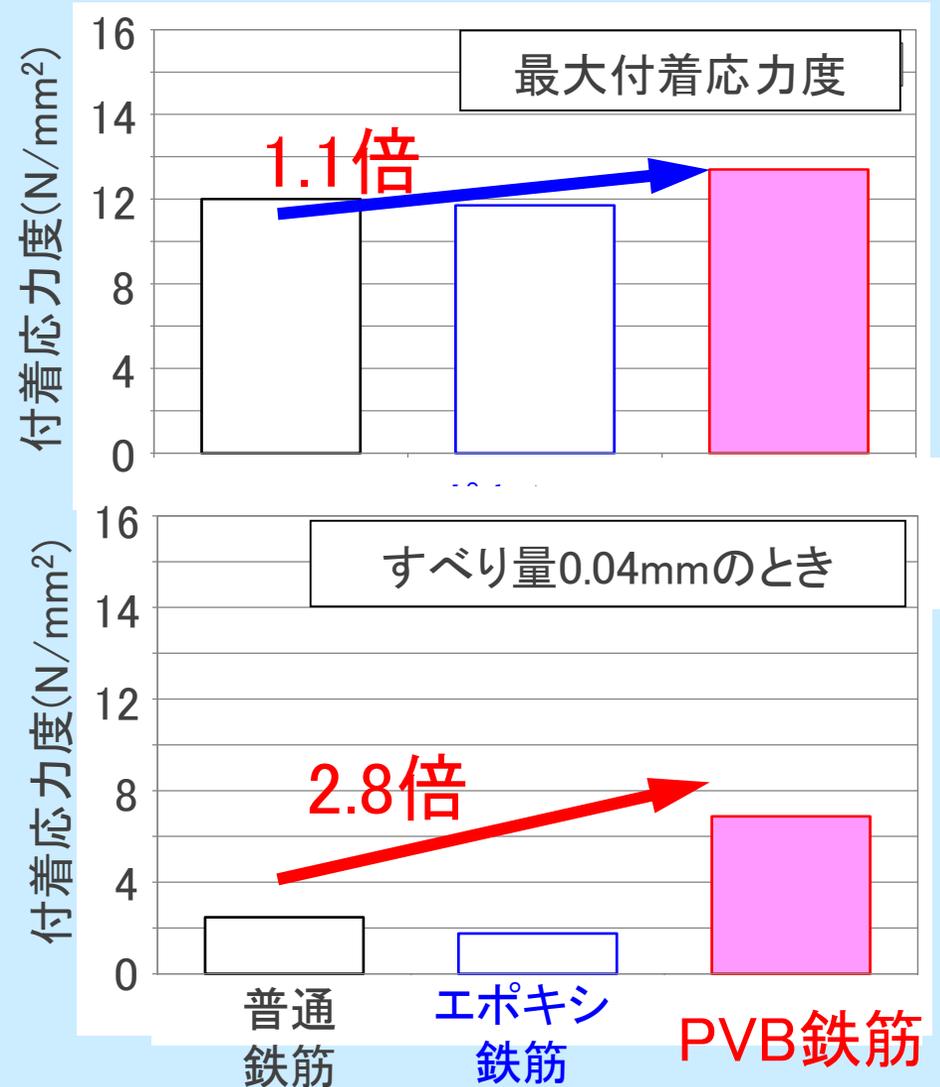
損傷無し(変形に対する追従性)

コンクリートとの付着強度

【引き抜き試験 (JSCE-E 516-2003)】



引抜き試験供試体



珪砂の効果による付着強度の向上

ステンレス鉄筋

ステンレス鉄筋用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)
土木学会、2008

①規 格

JIS G 4322「鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼」
(クロムCr:10.5%以上、鉄Fe:50%以上含有)

- SUS304-SD 18%Cr-8%Ni
- SUS316-SD 16%Cr-10%Ni-2%Mo(耐食性高)
- SUS410-SD 12%Cr、12Cr-LowC

②設計値(土木学会指針案)

- 降伏点が明確でない。
⇒降伏強度=0.2%耐力
- 伸び率、熱膨張係数:若干大
- ヤング係数:200kN/mm²
⇒普通鉄筋とほぼ同等の力学特性

ステンレス鉄筋の腐食

種類	ひび割れ幅の限度(mm)	腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値(kg/m ³)	磁性
SUS304-SD	0.5	15	非磁性
SUS316-SD	0.5	24	非磁性
SUS410-SD	0.005Cと0.5mmの小さい方 (C:かぶりmm)	9	強磁性

* 普通鉄筋と接触する場合、その位置において普通鉄筋の耐久性照査を満足していれば、耐久性上大きな問題にならない²¹

ステンレス鉄筋施工上の留意点

- ①溶接継手、圧接継手を用いてはならない。
- ②鉄筋加工時に、曲げ戻し、溶接をしてはならない。
- ③結束線は、 $\Phi 0.8\text{mm}$ 以上のステンレス鋼線を用いる。

[適用例] 橋桁(能生大橋)

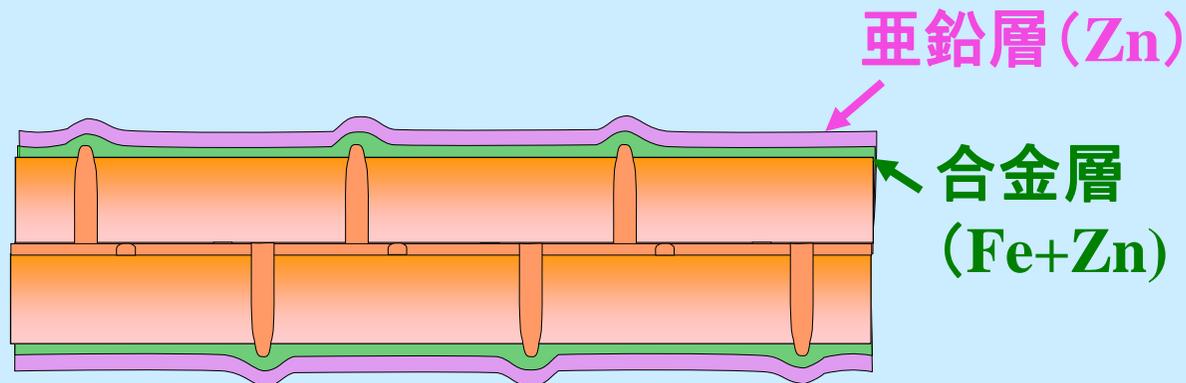
橋梁セグメント(伊良部大橋)

PC床版継目部、壁高欄の地覆部 など

亜鉛めっき鉄筋

亜鉛めっき鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計・施工指針(案)
土木学会、2019

- ・鉄筋中の適切なSi含有量:0.13~0.23%
- ・めっき付着量:550g/m²以上(密度:7.2g/cm³)
(JIS H 8641「溶融亜鉛めっき」2種の55)
⇒めっき膜厚:76μm以上
(例:めっき付着量1000g/m²の時、めっき膜厚140μm)



亜鉛めっき鉄筋の腐食

①強アルカリ環境で腐食するが、保護皮膜形成

高アルカリ下で、表面に保護皮膜(CaHZn :ヒドロキシ亜鉛酸カルシウム)が形成され、消耗速度が低下

②塩化物イオンの影響

⇒亜鉛めっき消耗速度: g ($\mu\text{m}/\text{年}$)

$$g = 0.3\text{Cl} + 1.0 \quad (0 < \text{Cl} \leq 0.3\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$g = 2.0 \quad (0.3\text{kg}/\text{m}^3 < \text{Cl})$$

⇒Cl濃度が増加すると消耗速度が速くなる。

③亜鉛の腐食

体積増加(亜鉛酸化物、亜鉛水酸化物)は少ない

⇒腐食によるひび割れは生じない。

亜鉛めっき鉄筋の施工上の留意点

- ① 曲げ加工を行っていない鉄筋を亜鉛めっきすることが原則
- ② 普通鉄筋と重ね継手を行う場合は電氣的絶縁
- ③ 結束線、スペーサは亜鉛めっきしたもの、絶縁被覆、プラスチック製を使用
- ④ 損傷部は、高濃度亜鉛粉末塗料で補修

[適用例]

オペラハウス(豪)、
海洋構造物補修工事 など

炭素繊維補強材 (CFCC)

物 性	CFCC(特性値)	普通鉄筋 (SD295)
引張強度 (N/mm ²)	2,700	295 (降伏点)
ヤング率 (kN/mm ²)	155	200
伸び (%)	1.7	16
熱膨張係数 ($\mu / ^\circ\text{C}$)	0.6	12.2
密度 (kg/m ³)	1.6	7.8

その他の防食鉄筋

- 耐塩性鉄筋

Cu-W系 (Cu:0.3%以下、W:0.12%添加)

Ni-W系 (Ni:3.5%添加、W:0.012%添加)

⇒鋼の成分調整により、錆の生成、成長を抑制

- ステンレス鋼クラッド鉄筋

内側は炭素鋼、
外側だけステンレス

(2014年(米) :
AASHTO仕様書発行)



塗布型防錆剤

種類	樹脂系	さび転換型	ポリマー セメント系	低級 アルコール系
仕様	エポキシ樹脂、アクリル樹脂等でコーティング	リン酸、有機酸、キレート化剤等を配合したもの	亜硝酸リチウム、アミノアルコール系防錆剤混入	酸化しにくい低級アルコールでコーティング
特長	施工性が良い 電気を通さない	施工性が良い	修復材との付着が良い	施工性が良い アルカリに弱い
外観例				

鉄筋の腐食を防ぐ混和剤

① JIS A 6205「鉄筋コンクリート用防せい剤」

練混ぜ時にコンクリートに添加する。

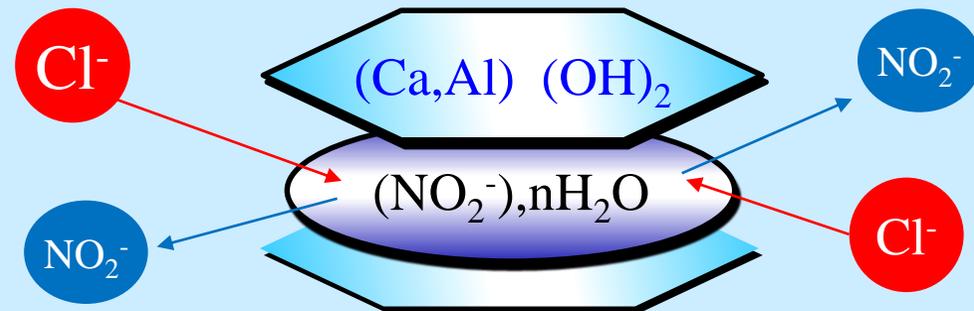
主成分：亜硝酸ナトリウム (NaNO_2)

亜硝酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$)

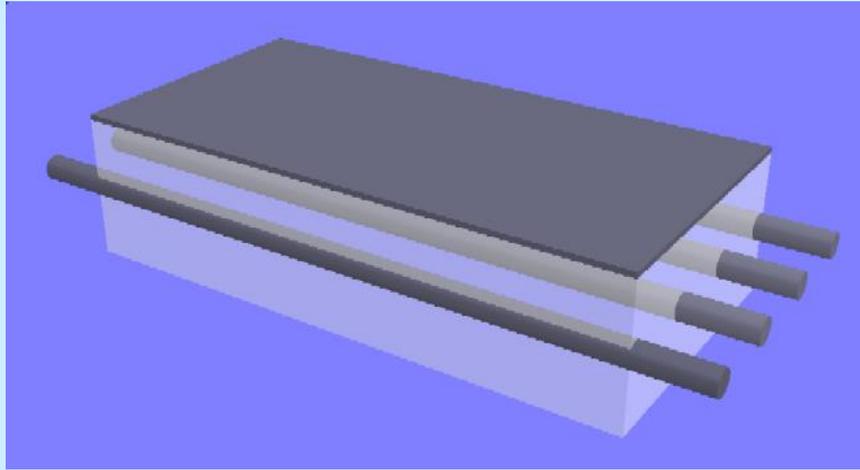
モル比 $[\text{NO}_2^-] / [\text{Cl}^-] > 0.6 \sim 1.0$ で有効

② 塩化物イオン吸着材

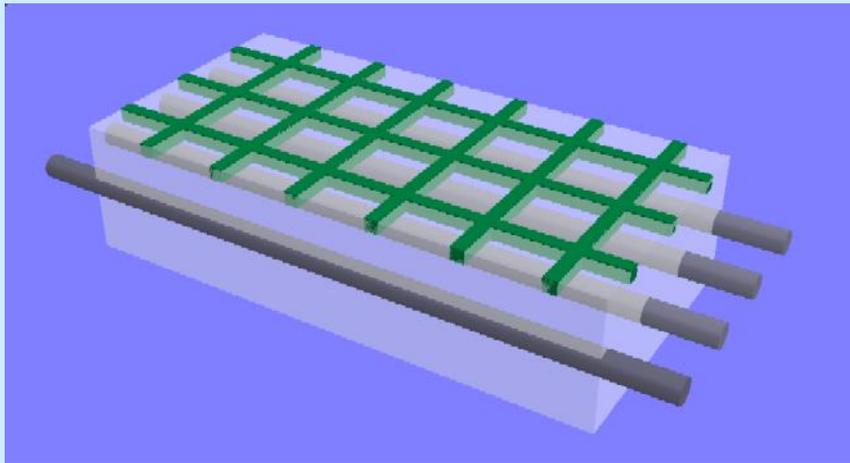
塩化物イオン (Cl^-) と
亜硝酸イオン (NO_2^-) が
置換し、 Cl^- を吸着



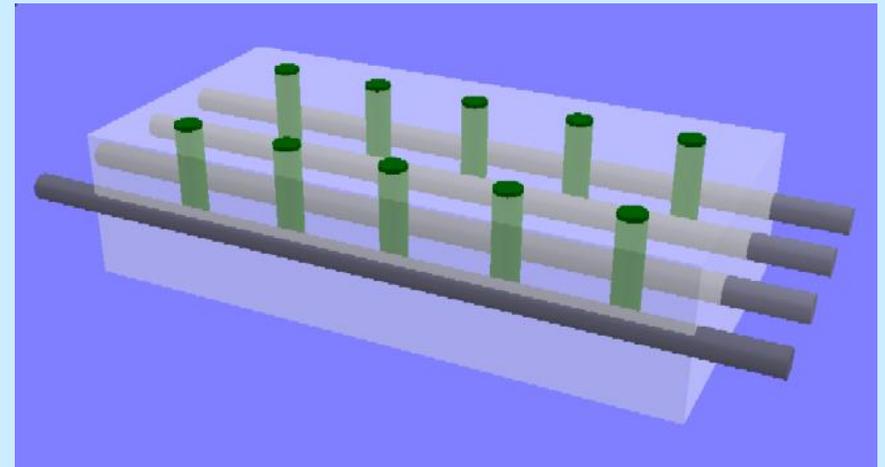
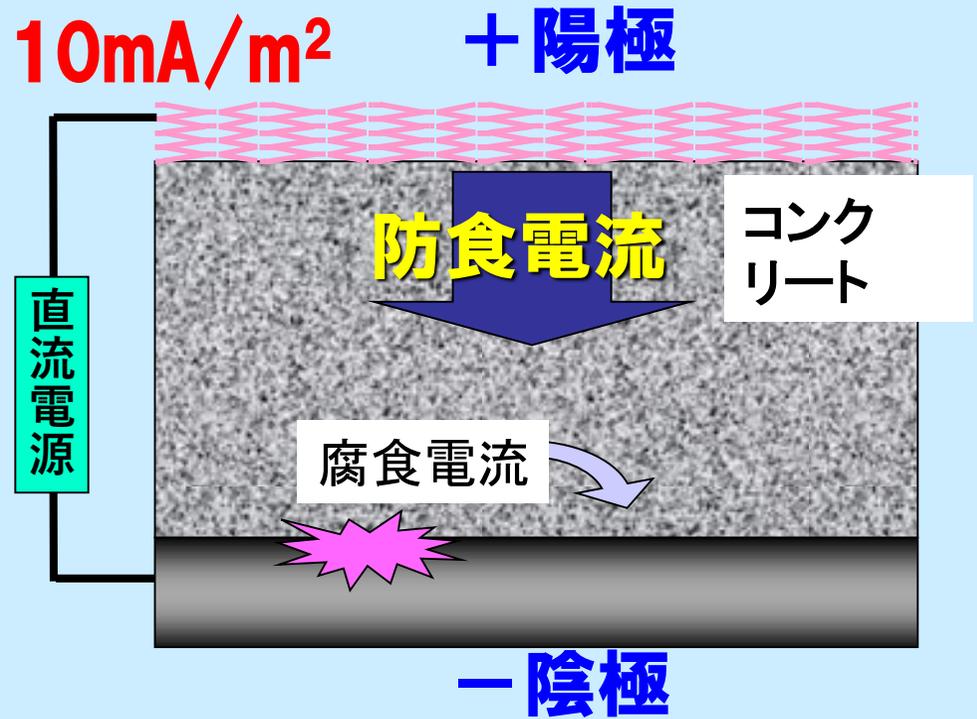
電気防食工法



面状陽極方式



線状陽極方式



点状陽極方式

(2) 腐食因子の侵入抑制

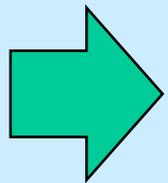
- 表面保護工
表面被覆（有機系、無機系）
含浸材塗布（けい酸塩系、亜硝酸系）
- 型枠工法
高耐久埋設型枠
透水性型枠

表面保護工法（表面被覆工法）

エポキシ樹脂

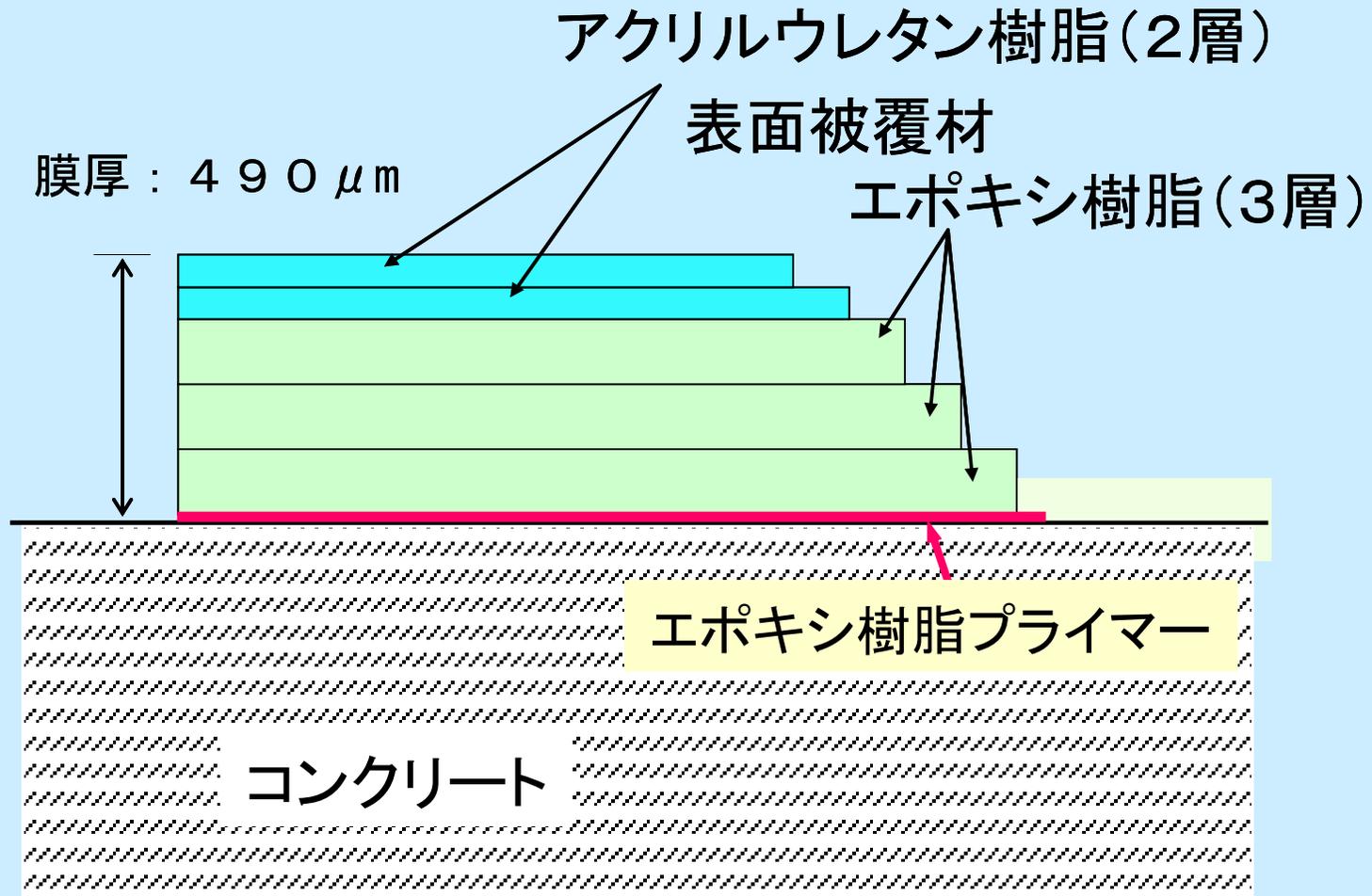


ポリマーセメント



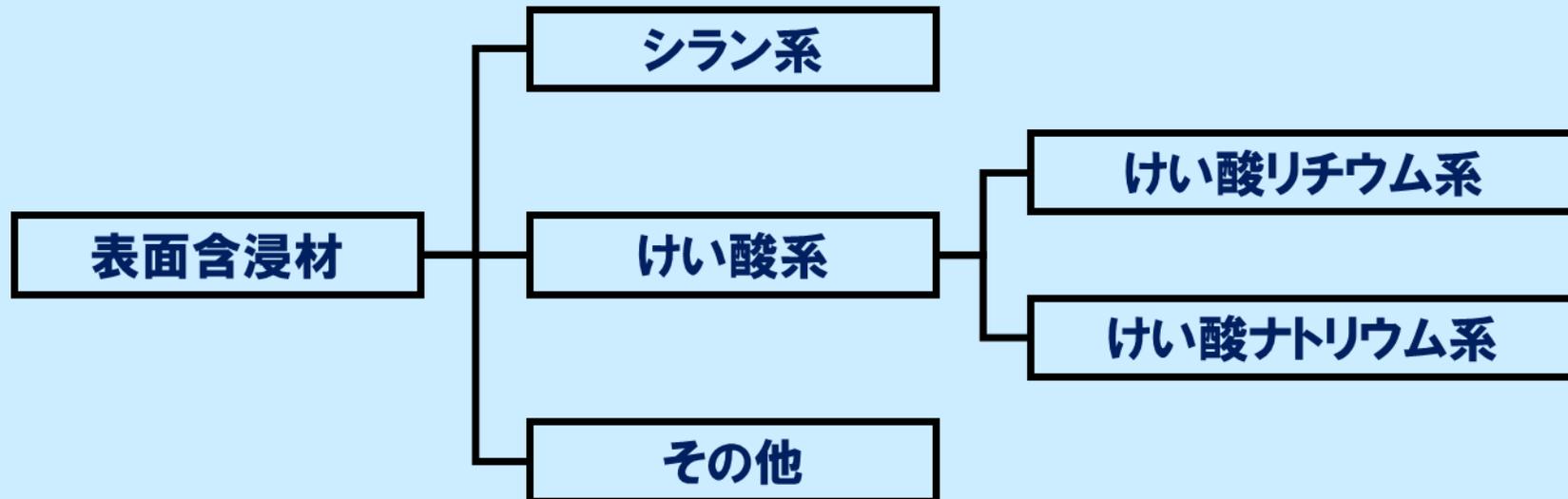
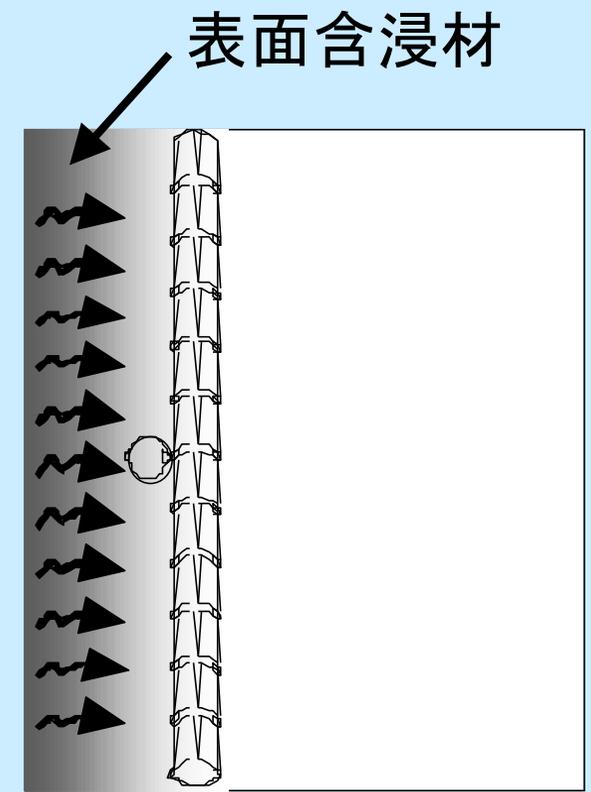
塩化物イオンや二酸化炭素の侵入を抑制し、内部の鉄筋腐食を防ぐ。

表面被覆工法の例(エポキシ樹脂)



表面含浸工法

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。



表面含浸工法の特長

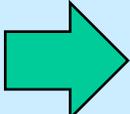
[目的]

・予防保全

- ・落書き対策(防汚)

[特長]

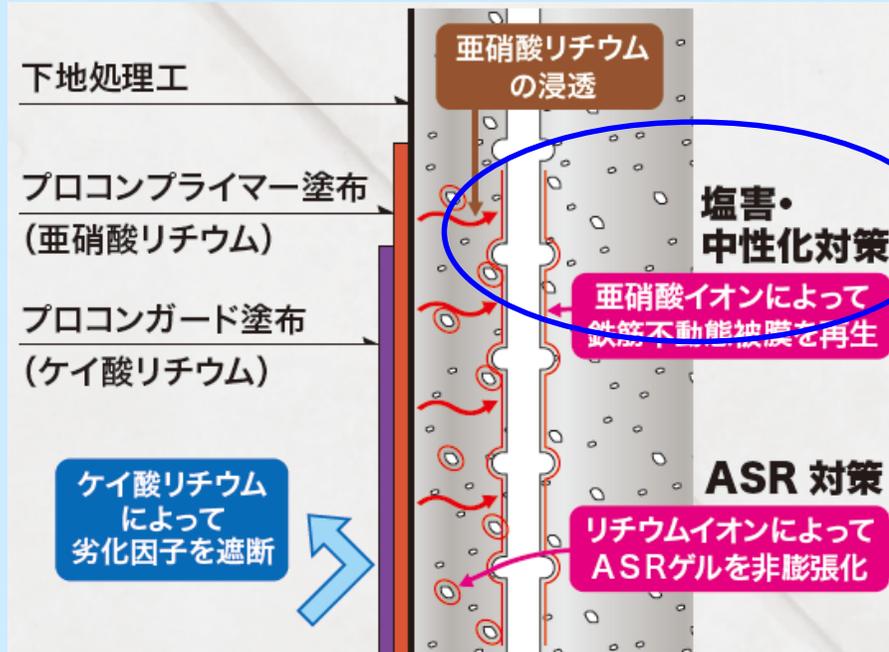
- ・塗布量0.1～0.4 kg/m²程度
- ・適用後の外観の変化が少ない
- ・補修後のコンクリート表面の観察が可能
- ・再施工する場合、前処理が不要（再度含浸可能）

 メンテナンスが容易

表面含浸工法の例 (塩害、中性化の補修の場合)

技術資料P.45

基本性能 『けい酸リチウム (LiSiO_2)系含浸材による劣化因子の遮断』
付加価値 『亜硝酸イオン (NO_2^-)による鉄筋腐食の抑制』を付与



- 亜硝酸リチウム系含浸材を塗布し、内部へ含浸 ⇒ 鉄筋防錆
- 劣化因子の侵入を抑制するため、けい酸リチウム系含浸材を塗布 ⇒ 劣化因子の侵入抑制

鉄筋腐食抑制効果 (表層部) を併せ持つ表面含浸工法

表面含浸工法の例（塩害、中性化の補修の場合）

①使用材料

けい酸ナトリウム系表面含浸材 + ポリマーセメントモルタルによる断面欠損部の修復

②含浸工法の仕様：反応促進養生（水塗布）を数回繰り返す



施工前



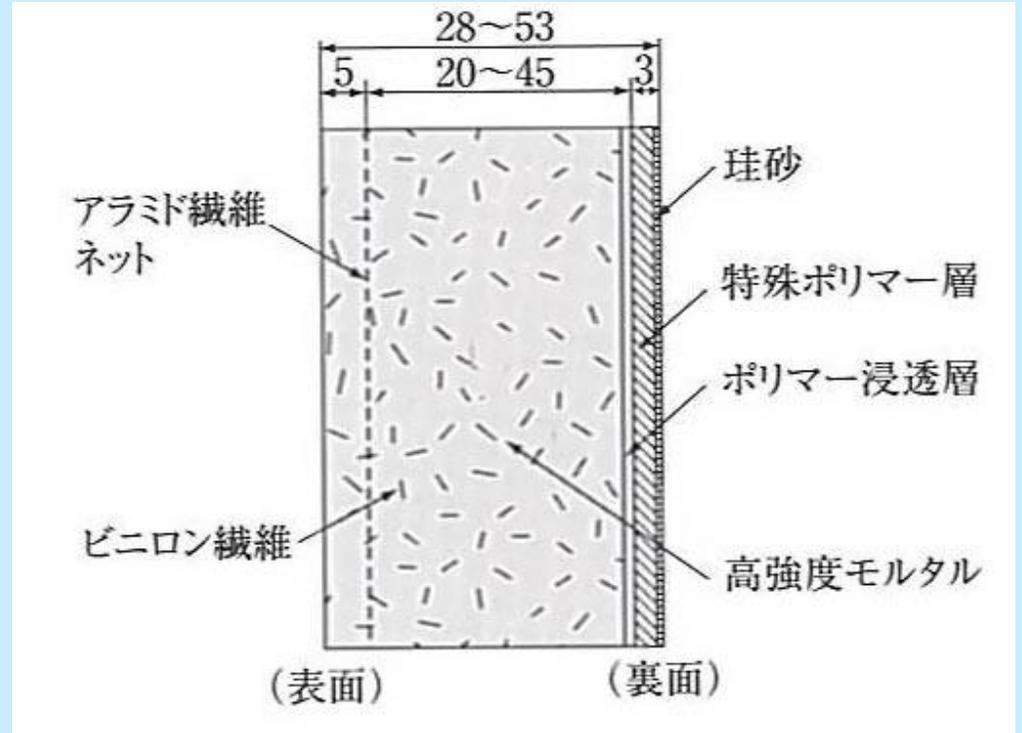
施工後

高耐久性型枠工法

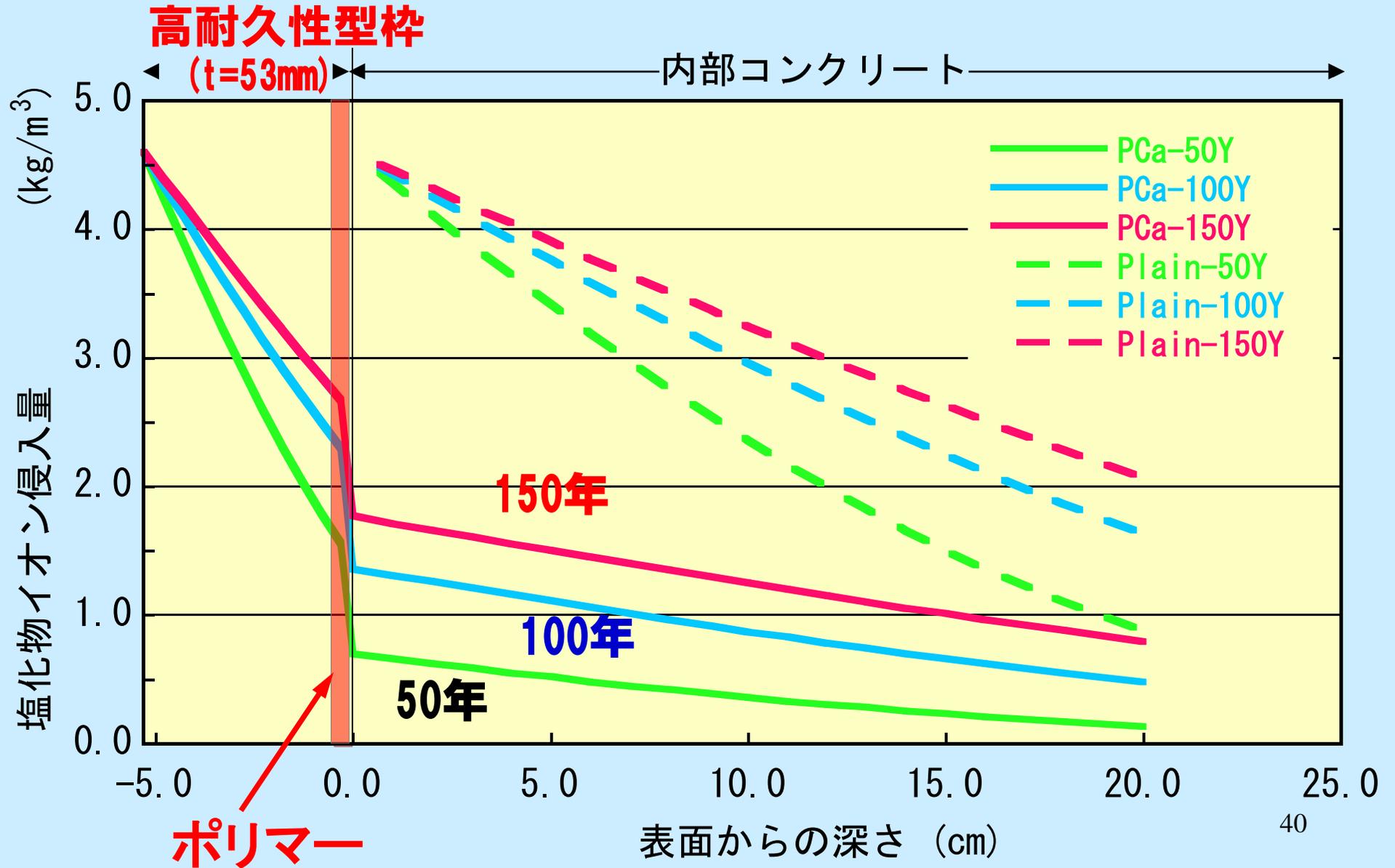
- ・ 高いひび割れ抵抗性
- ・ 優れた美観と耐久性
- ・ 内部鉄筋の長期保護



高耐久性型枠の断面の例



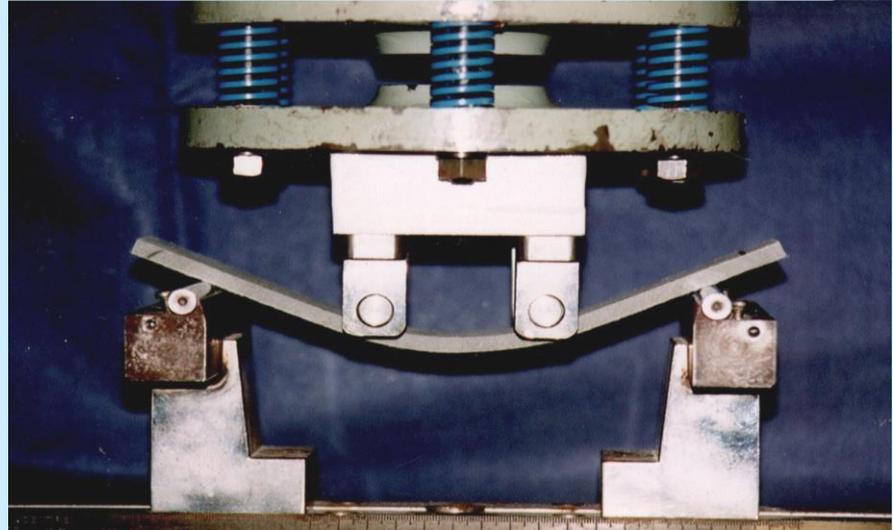
高耐久性型枠を用いたコンクリート構造物の塩化物イオン浸透予測（150年間）



(3) コンクリートの劣化抑制 (朽ちない技術)

- 高靱性セメント型枠
- 超高強度繊維補強材 (UFC)
- 耐酸コンクリート
- 亜硝酸イオン (NO_2) 注入

高靱性セメント型枠（合成短繊維含有）



高靱性セメント型枠の物性

	高靱性セメント 型枠	普通コンクリート (例)
圧縮強度 (N/mm ²)	88	40
曲げ強度 (N/mm ²)	38	5
引張強度 (N/mm ²)	14	3
最大引張ひずみ(%)	1.0	0.015
比重	1.7	2.3

- ・高強度でありながら軽い
- ・内部のコンクリートを保護

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 Fiber reinforced Concrete)

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/mm^2 以上 (通常の7.5倍)

設計・引張強度: 8.8N/mm^2 以上 (通常の7倍)

材 齢	1日	7日	28日
圧縮強度	40N/mm^2	170N/mm^2	200N/mm^2

施 工

常温硬化型
UFC

常温硬化

現場打設
自由な形状

超高強度モルタル



超高強度鋼繊維



有機繊維



耐酸コンクリート

●5%硫酸溶液 (pH0.5)浸漬30日後の供試体

(W/P=30%、20°C養生)



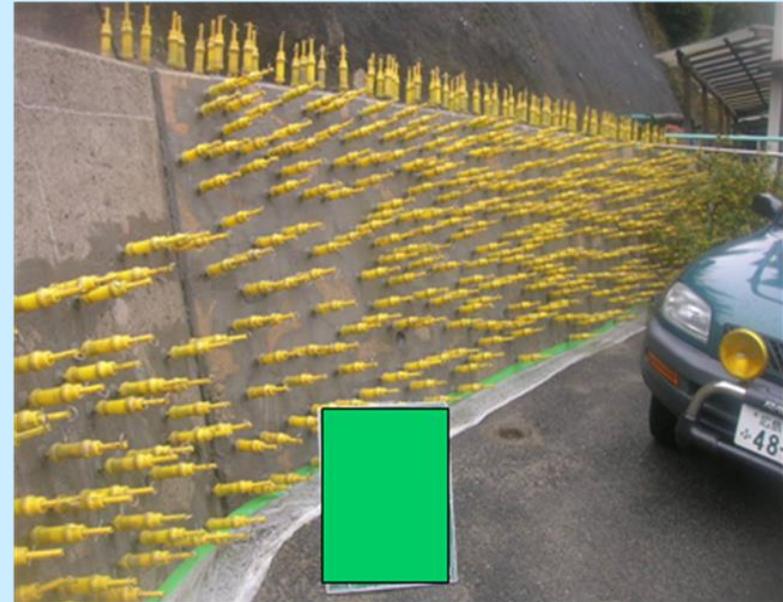
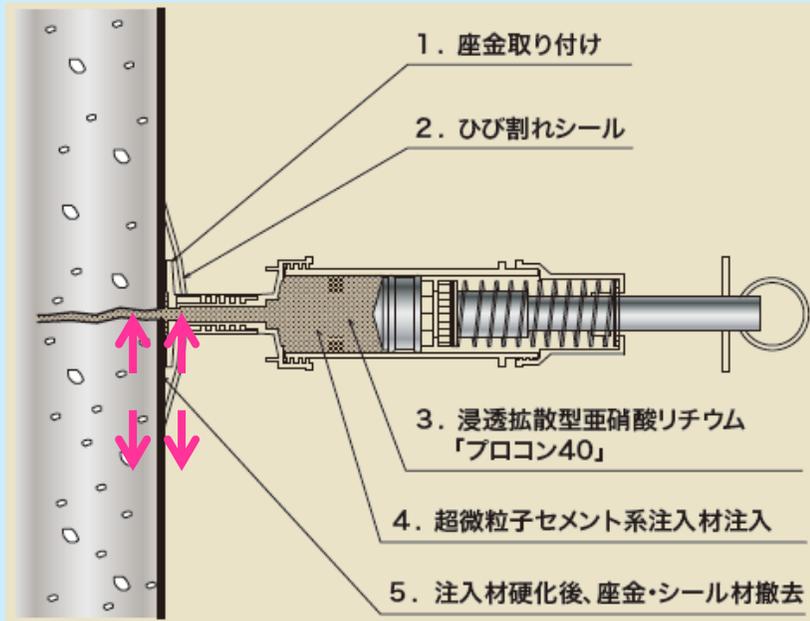
耐酸コンクリート
(質量変化率 +1%)



普通コンクリート
(質量変化率 -18%)

- 劣化速度は普通コンの1/5~1/10

ASR補修（亜硝酸リチウム注入工法）



- ①自動低圧注入器をひび割れに沿って設置する
- ②亜硝酸リチウム水溶液を先行注入する ⇒ ゲルの非膨張化
- ③超微粒子セメント系注入材を本注入 ⇒ ひび割れ閉塞、劣化因子遮断

ASR膨張抑制＋鉄筋防錆を併せ持つひび割れ注入

鉄筋防食による長寿命化

(鉄筋)
防食
鉄筋

(コンクリート)
表面
保護

腐食防止

- ・亜鉛めっき鉄筋
- ・樹脂塗装鉄筋
- ・ステンレス鉄筋
- ・CFCC など

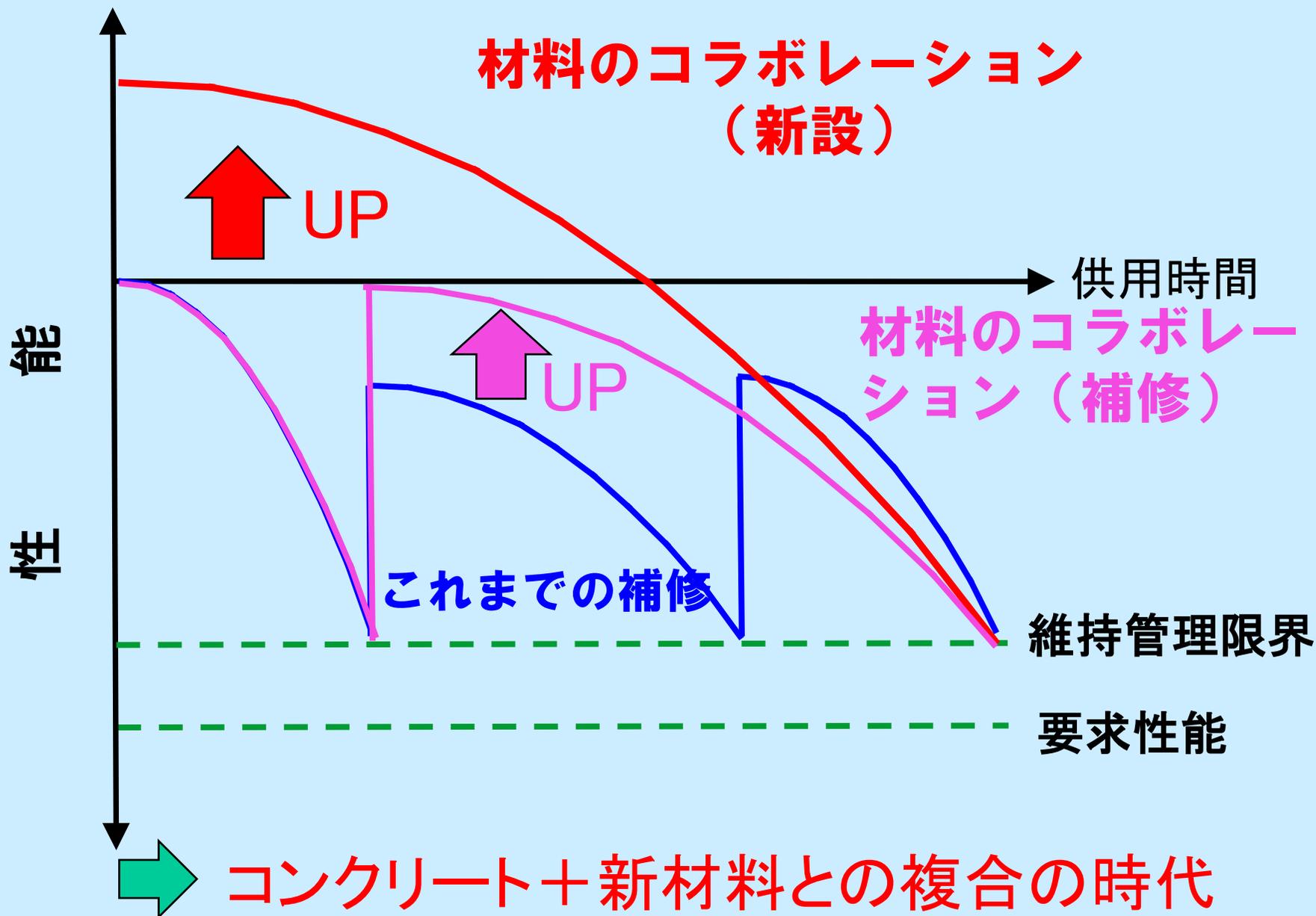
腐食因子
侵入抑制

- ・表面被覆
- ・表面含浸
- ・UFC
- ・高韌性セメント系材料
- ・耐酸コンクリート など

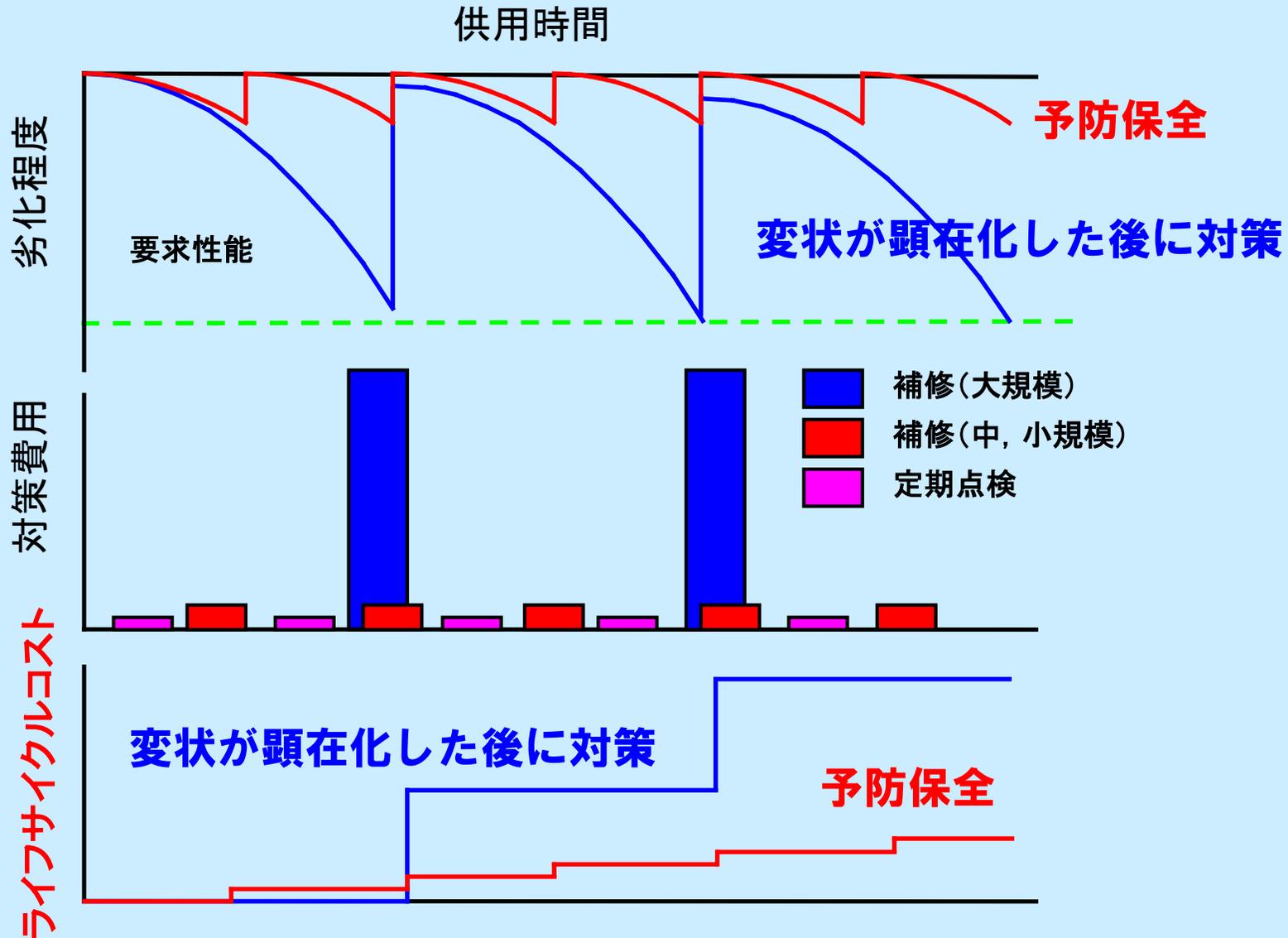
コン
クリート
構造物

長寿命化

メンテナンス計画のシナリオ（例）



予防保全によるライフサイクルコストの低減



ご清聴ありがとうございました。