

広島県コンクリート診断士会 2019.8.22

鉄筋防食によるコンクリート構造物の長寿命化



広島工業大学 大学院工学系研究科
竹田 宣典

1

[経歴] 竹田 宣典
(ただのふみ)

- ・出身地: 福岡県 門司 (1959)
- ・若戸大橋開通 (1962年, 3歳)
- ・関門橋開通 (1973年, 中学2年)
- ・新関門トンネル開通 (1975年, 高校1年)
- ・1984年 九州工業大学 大学院修了
- ・1984年 (株)大林組入社 (技術研究所配属)
 - ・高流動コン、高耐久コン、低炭素コンなどの開発
 - ・現場支援: 本四連絡橋 (1990頃～)、LNGタンク
 - ・現場トラブル支援 (ひび割れ、色々な不具合の補修)
- ・委員会: コンクリート標準示方書改訂委員会 幹事 (2015-2017)
JIS A 5308 改正委員会 委員 (2014～)
JCI予防保全研究委員会 委員長 (2017～)
- ・2017年 広島工業大学 環境土木工学科 教授





2

2

鉄筋腐食と防食鉄筋

1. 寿命の長いコンクリート構造物
2. 鉄筋腐食のメカニズム
3. 鉄筋の防食技術

3

3

1. 寿命の長いコンクリート構造物



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**

写真-1 明治41年竣工の小樽港北防波堤

4

4

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

5

鉄筋コンクリートの歴史

- ・1855年:鉄網入りコンクリート製ボード出展(第1回パリ博覧会)
- ・1867年:鉄筋入り植木鉢の発明(仏)
- ・1880年代:メラン式RC橋梁の発明(豪)
- ・1890年:日本初の鉄筋コンクリート構造物”横浜港岸壁ケーソン”
- ・1903年:世界初のRC造集合住宅(パリ, フランクリン通り)
- ・1903年:日本初の鉄筋コンクリート橋 ”琵琶湖疏水運河11号橋
- ・1952年(昭和27年):日本初のPC橋”長生橋”(石川県)

6

樹脂・塗料の歴史

- ・紀元前5000年頃:うるしの使用
- ・メソポタミヤ時代:アスファルトの使用
- ・1868年(明治元年):築地ホテルの塗装
- ・1881年(明治14年):塗料の工業化(光明社設立)
- ・1885年(明治18年):「堀田式さび止め塗料及び塗装」特許第1号
- ・1905年(明治38年):アスファルト防水(大阪瓦斯本社ビル屋根)
- ・1951年(昭和26年):エポキシ樹脂塗料の開発
- ・1950～1960年代:ポリマーセメントモルタルの研究

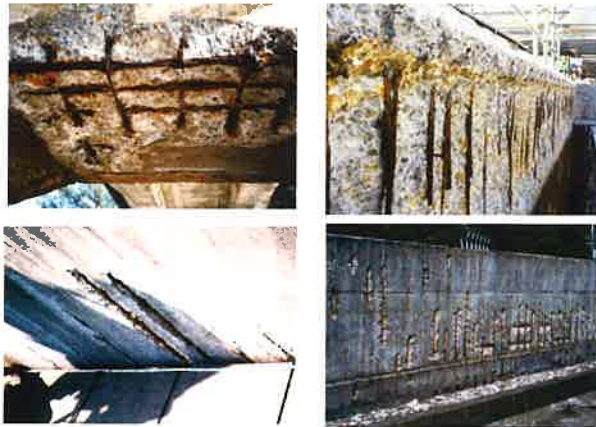
7

●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(案)[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

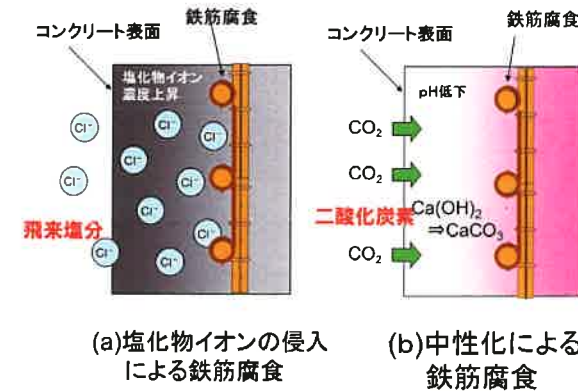
8

鉄筋腐食による劣化



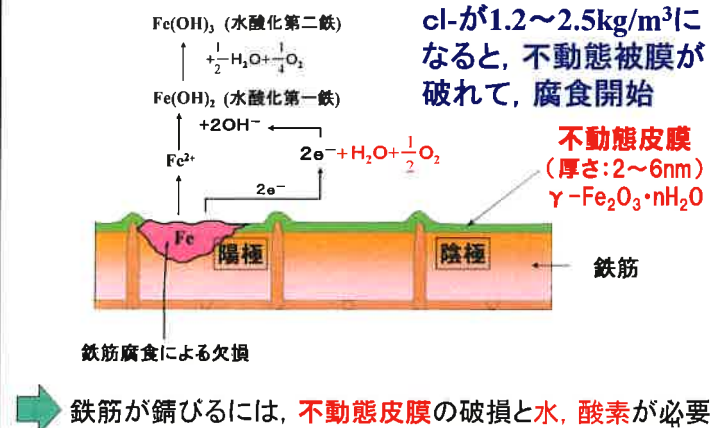
9

コンクリート構造物の劣化因子侵入と劣化現象



10

2. 鉄筋腐食のメカニズム



11

鉄筋腐食メカニズム

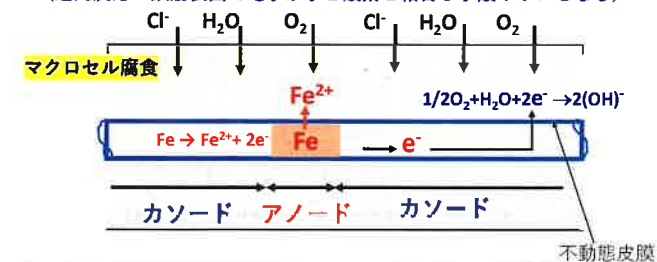
(1) 金属の腐食：アノード部とカソード部ができることが原因

①アノード反応 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

(酸化反応：鉄が電子を失い、鉄イオンになりコンクリート中に溶出、電子は鉄筋内に残り、カソード部に移動)

②カソード反応 $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

(還元反応：鉄筋表面で電子が水と酸素と結合し水酸イオンとなる)

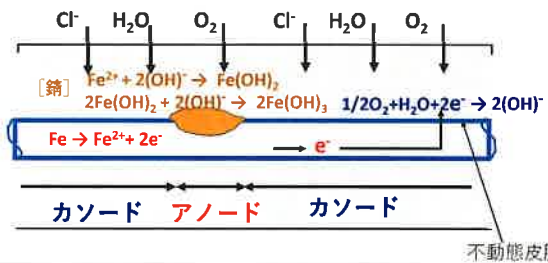


12

(2) 鉄の水酸化物(錆)ができる



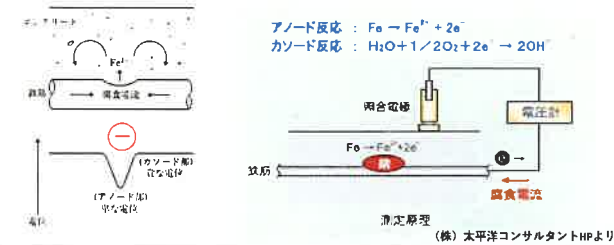
式(1)+式(2)



13

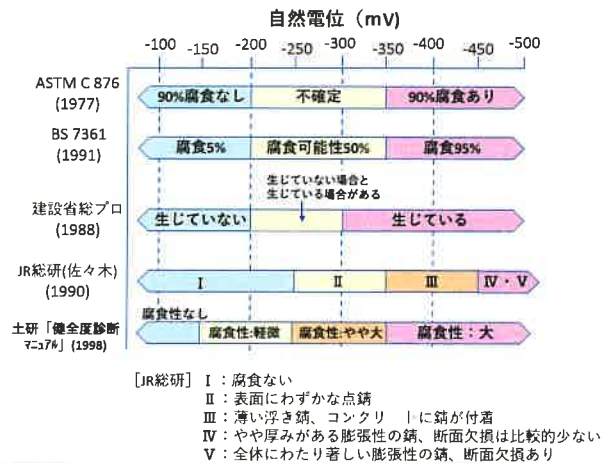
自然電位法

- ・自然電位 : 金属がその存在している環境で維持している金属固有の電位のこと。鉄筋が腐食すると表面に腐食電池(アノード部とカソード部)が形成され、自然電位も変化する。
⇒アノード部は負に帯電し自然電位は卑側(一側)に変化する。
- ・自然電位法 : 電位差計(電圧計)を介して、照合電極に対する鉄筋の電位を計測する方法。
- ・測定原理 : 照合電極と鉄筋の電位差により流れる電流を打ち消すように、逆の極性の電流を発生させ測定する。



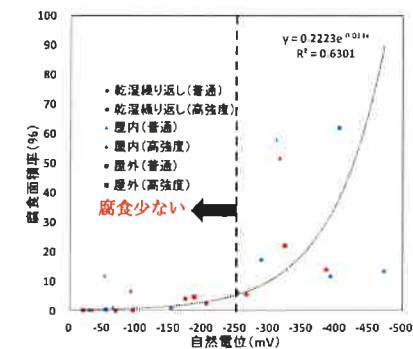
14

自然電位の評価方法



15

自然電位と腐食面積率の関係(暴露8ヶ月後)



16

3. 防食鉄筋

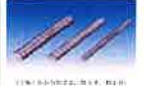
a) 防食鉄筋

- 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)

17

各種防食鉄筋の比較

	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	ステンレス 鉄筋	亜鉛めっき 鉄筋	炭素繊維 ロッド
外 観				
利 点	比較的安価	耐食性優	安価	耐食性優
懸念事項	・施工時の損傷 ・紫外線劣化 ・付着強度低下	・高価 ・溶接、圧接不可	・強アルカリ、高塩 分下の腐厚消耗	・高価 ・曲げ加工不可 (製造時可)
価格 (対普通 鉄筋比)	2倍程度	4～10倍程度	1.5倍程度	(5～10倍程度)

18

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)

19

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

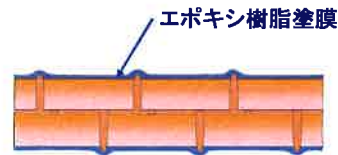
- ① エポキシ樹脂塗装鉄筋関連の品質規格(5種類)
(土木学会規準)
・塗装鉄筋、棒鋼、塗料、補修用塗料、ブラスト処理規準
- ② エポキシ樹脂塗装鉄筋関連の試験方法(13種類)
・ピンホール、塗膜厚、耐衝撃性、耐食性などの試験方法
- ③ 樹脂被覆鉄筋の試験方法(2種類)
⇒対象「樹脂被覆鉄筋」(エポキシ以外の樹脂にも拡張)
・樹脂被覆鉄筋の付着強度試験方法(2010年)
・樹脂被覆鉄筋の曲げ試験方法(2013年)

20

20

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±40μm** (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。



21

塩化物イオン侵入に伴う鋼材腐食に関する照査

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

Cd: 鉄筋の素地における塩化物イオン濃度

Dd: コンクリート中の塩化物イオンの拡散係数

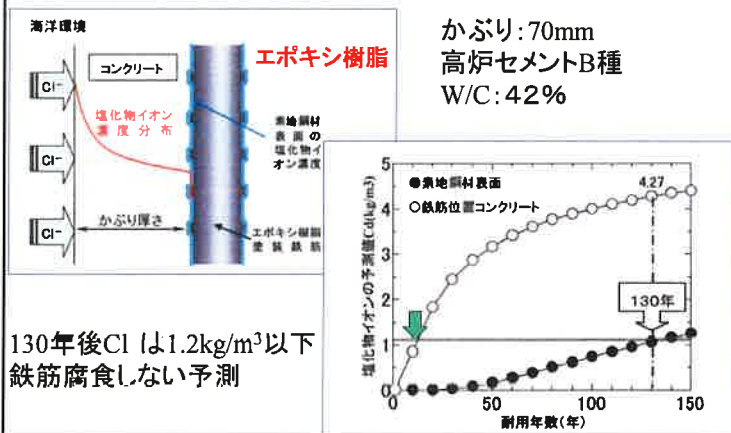
Depd: エポキシ樹脂中の塩化物イオンの拡散係数
($2.0 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{年}$)

- ・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 1.2kg/m^3 以下であればOK)

22

コンクリート構造物における耐久性照査事例

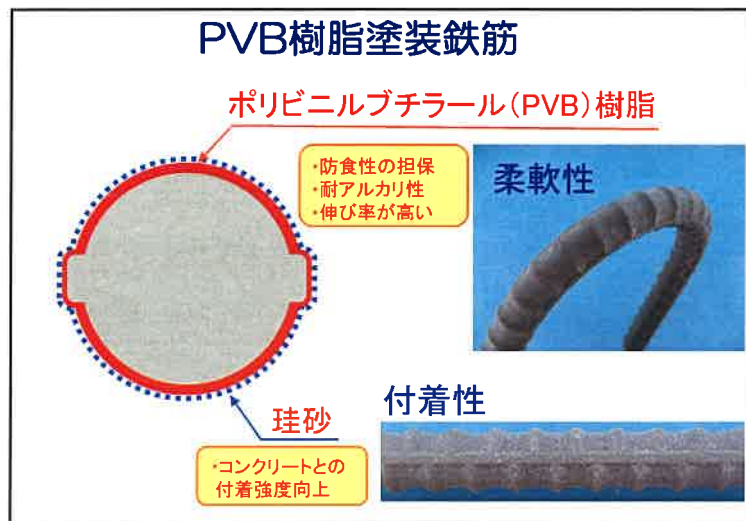


23

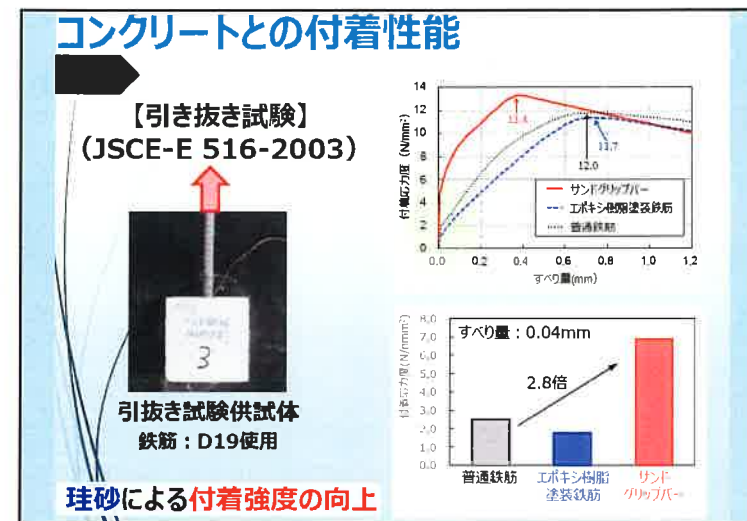
エポキシ樹脂塗装鉄筋の施工上の留意点

- 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**

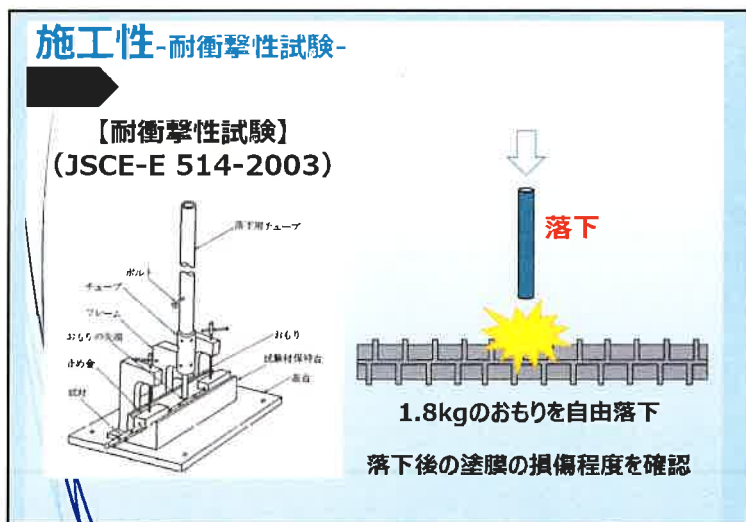
24



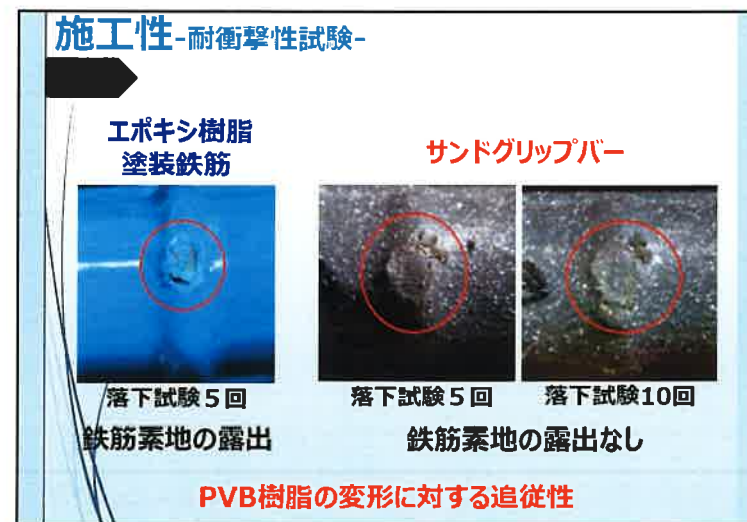
25



26



27



28

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



29

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。

30

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、Φ0.8mm以上のステンレス鋼線を用いる。

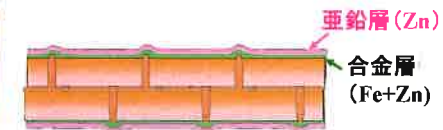
[適用例] 橋桁(能生大橋)、橋梁セグメント(伊良部大橋)
PC床版継目部、壁高欄の地覆部 など

31

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)



32

32

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: $g(\mu\text{m}/\text{年})$

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

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

⇒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。

33

33

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

34

34

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

35

35

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)



ステンレス鋼クラッド鉄筋

36

ECFストランド

(内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線)

①エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案)、土木学会、2010

7本より線
12.7mm
15.2mm




PE被覆型
(ポリエチレン被覆)



②新しい内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線「ECFストランド」に関する技術評価報告書、土木学会、2017

19本より線
(最大21.8mm)

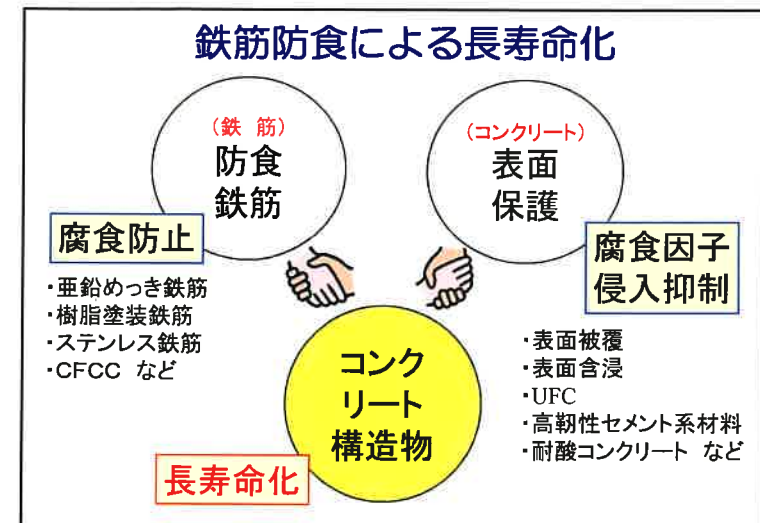


高強度ストランド
(最大21.8mm)

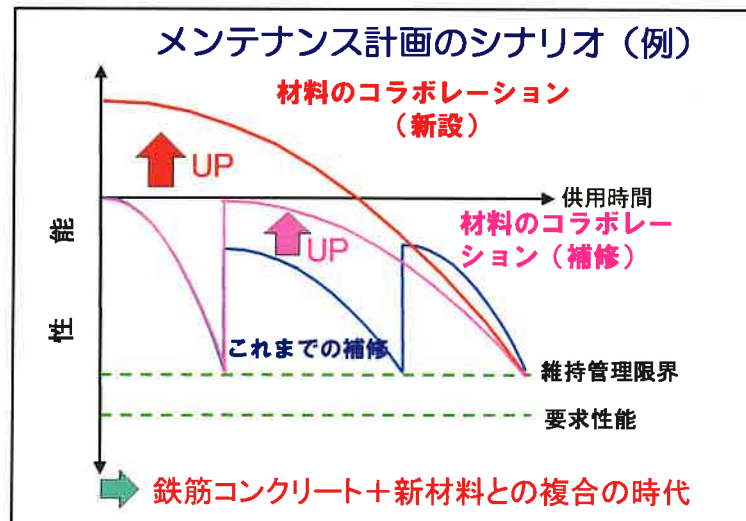


37

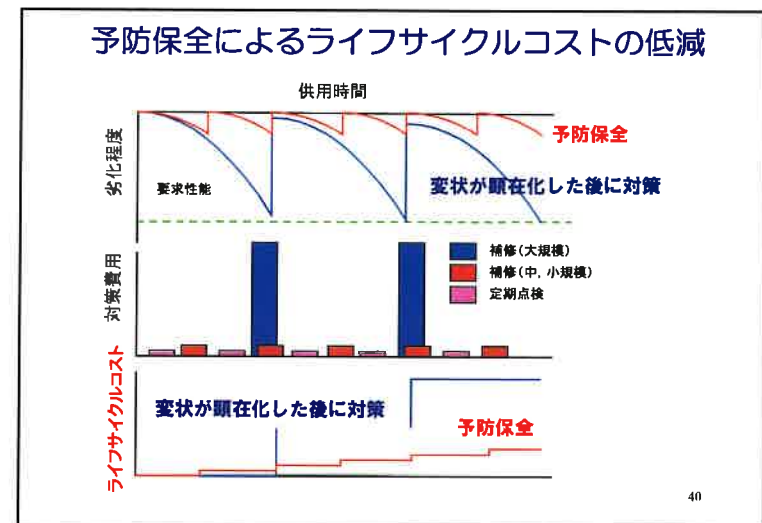
37



38



39



40