

コンクリート構造物の塩害対策 における防食補強材について

鹿児島大学大学院理工学研究科
教授 武若耕司

コンクリート用防食補強材の歴史



コンクリート構造物の塩害問題の歴史

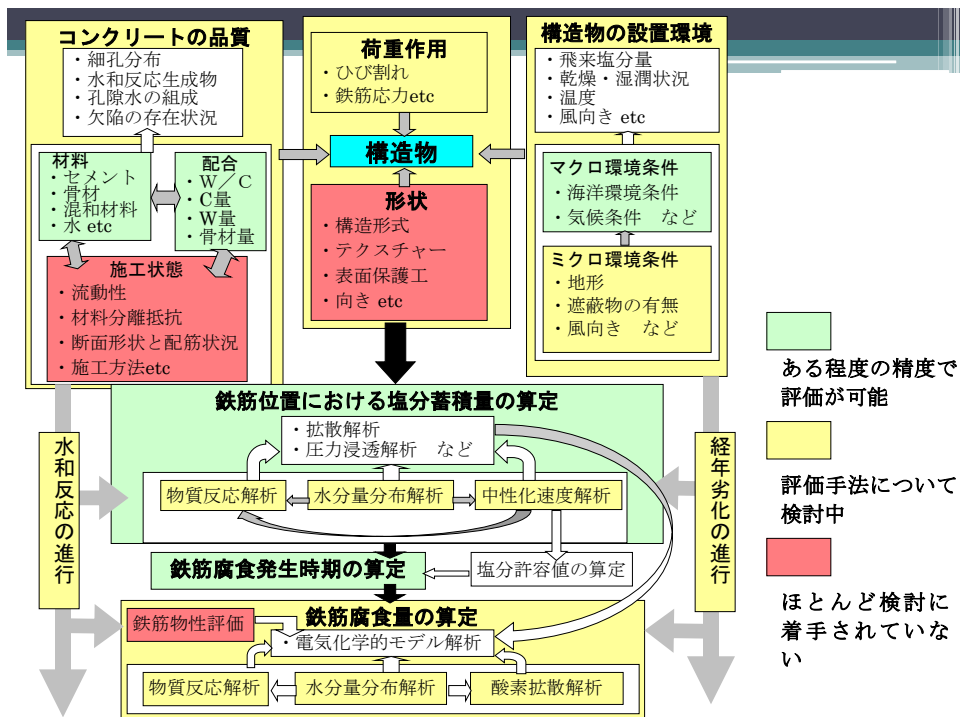
海洋コンクリート構造物の劣化機構

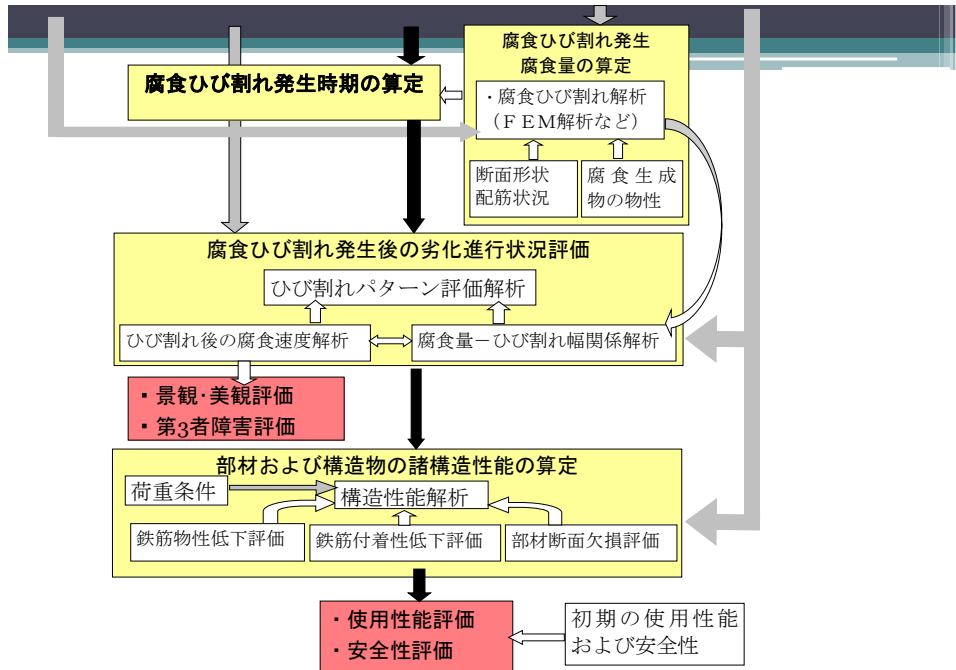


「塩 害」

かぶりの増大

コンクリート品質の改善
(コンクリート表面被覆)



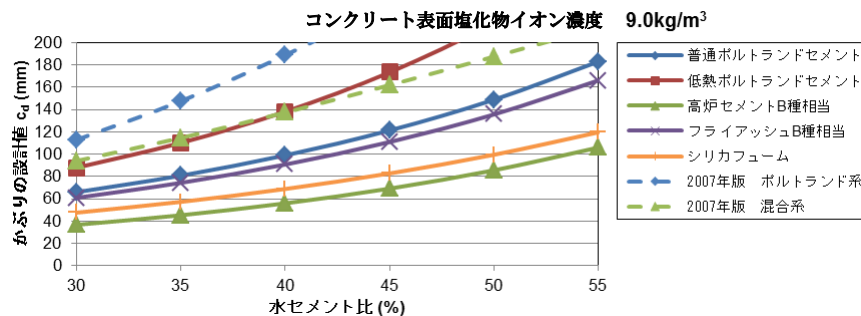


〔設計編：標準〕 2編 耐久性に関する照査

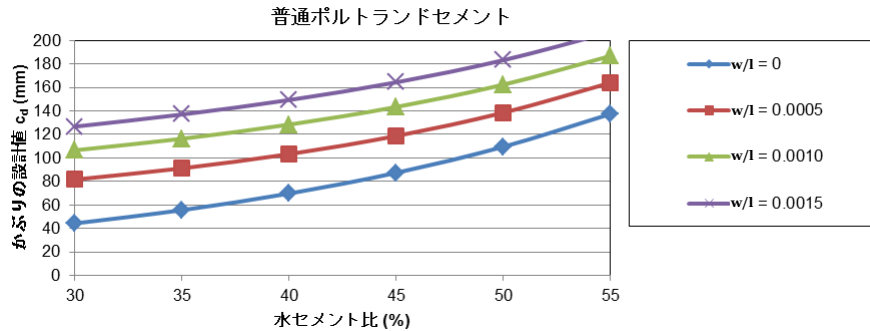
資料 p.87

かぶりの設計値 c_d （ひび割れ無し）

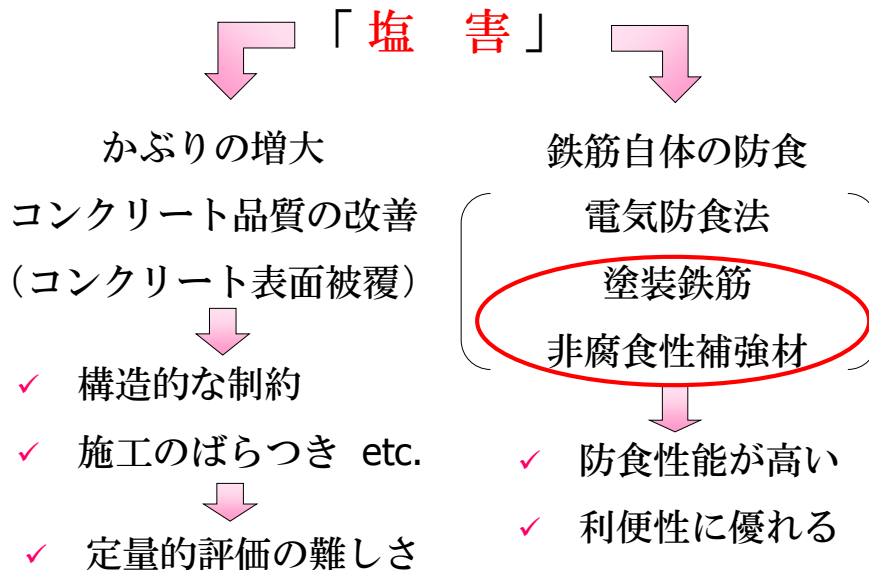
設計耐用年数100年



かぶりの設計値 c_d （ひび割れ有り） 設計耐用年数100年



海洋コンクリート構造物の劣化機構



我が国における防食補強材に関する検討の歴史

年 次	制定された指針等および、その関連事項
1977年	土木学会編：海洋コンクリート構造物設計施工指針(案) (亜鉛めっき鉄筋の開発と利用に言及)
1979年	建築学会編：亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針(案)
1980年	土木学会編：亜鉛めっき鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)
1980年	昭和55年版コンクリート標準示方書の解説書の中に、亜鉛めっき鉄筋の指針の解説を併せて掲載

我が国における防食補強材に関する検討の歴史

年 次	制定された指針等および、その関連事項
1983年	日本コンクリート工学協会編：海洋コンクリート構造物の防食指針(案) (亜鉛めっき鉄筋/エポキシ樹脂塗装鉄筋の有効利用)
1986年	土木学会編：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(案)
1986年	土木学会編：昭和61年版コンクリート標準示方書(以下、示方書)【施工編】に、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用が明記。
1991年	日本コンクリート工学協会編：海洋コンクリート構造物の防食指針(案)「改訂」 (亜鉛めっき鉄筋を削除し、エポキシ樹脂塗装鉄筋のみを掲載)

我が国における防食補強材に関する検討の歴史

年 次	制定された指針等および、その関連事項
1992年	土木学会編：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用(コンクリートライブラリー72)
1995年	土木学会編：コンクリート構造物の耐久性設計指針(案)
1999年	土木学会編：示方書[施工編]耐久性照査型 (防食鉄筋の記述については、「エポキシ樹脂塗装鉄筋，等」)
2002年	土木学会編：示方書〔施工編〕 (防食鉄筋の記述については，エポキシ樹脂塗装鉄筋と亜鉛めっき鉄筋を記述。ただし，亜鉛めっき鉄筋は一般的な使用実績はあまりないとしている。)

我が国における防食補強材に関する検討の歴史

年 次	制定された指針等および、その関連事項
2003年	土木学会編：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】 (エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた鉄筋コンクリートの塩害照査)
2007年	土木学会編：示方書[設計編]「耐久性に関する照査」 (防食補強材としては，エポキシ樹脂塗装鉄筋のみ記載。その他に，電気防食，表面被覆など)
2008年	「JIS G 4322：鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼」制定 (SUS304-SD, SUS316-SD,およびSUS410-SD)
2008年	土木学会編：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)

我が国における防食補強材に関する検討の歴史

年 次	制定された指針等および、その関連事項
2010年	土木学会編：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) ・内部充てん型エポキシ樹脂被覆PCより線 ・プレグラウトPC鋼材
2012年	土木学会編：示方書〔施工編〕 （防食鉄筋の記述については、エポキシ樹脂塗装鉄筋とステンレス鉄筋を記述。）

エポキシ樹脂被覆鉄筋を1つの事例とする防食補強材実用化の道筋

問題の認識

“Fusion Bonded Epoxy Coated Carbon Steel Bars for the Reinforcement of Concrete”

フロリダ「ロングキーブリッジ」の海上橋脚劣化問題

- ・粗悪品質の塗装鉄筋の使用
➡ 塗装前処理不足による密着性低下
- ・施工での粗雑な取り扱い
➡
 - ・ 2 %以上の塗膜剥がれと無補修など
 - ・ 長期の屋外放置（紫外線劣化）
- ・コンクリートの品質が粗悪

フロリダ州ではEP鉄筋の使用を全面的に禁止、現在も継続
(ただし、他州では使用を継続)

米国連邦道路局の対応

キーウエストでの劣化報告を受け、EP鉄筋に関する調査を実施

- **1992：FHWA Memorandum**

各地で使用されているEP鉄筋を調査

- ・ 錆びや汚れの上からエポキシ塗装
- ・ 多数の欠陥の存在



品質管理の徹底の必要性 →

ASTM Spec.の大幅見直し

- ・ 塗膜厚の増大
- ・ 損傷部の全面補修
- ・ 施工上の注意点の加筆

- **1998：FHWA-RD-98-153**

高耐久性防食鉄筋の比較検討

(EP鉄筋の他、ステンレス、亜鉛めっき、クラッド鉄筋など)



耐久性としてはSUS316鉄筋、コスト面を考慮するとEP鉄筋

その後のエポキシ樹脂塗装鉄筋の国際基準
に関連する主な規準制定

1999：ISO 14654

“International Standard for Epoxy-Coated Steel for the Reinforcement of Concrete”

ISO 14656

“International Standard for Epoxy Powder and Sealing Material for the Coating of Steel for the reinforcement of Concrete”

土木学会編：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】

旧指針

- 膜厚： $200 \pm 50 \mu\text{m}$ (150～250 μm)
- 付着強度：無塗装鉄筋の80%以上
- 耐食性：平均発せい面積率1%以下



新指針

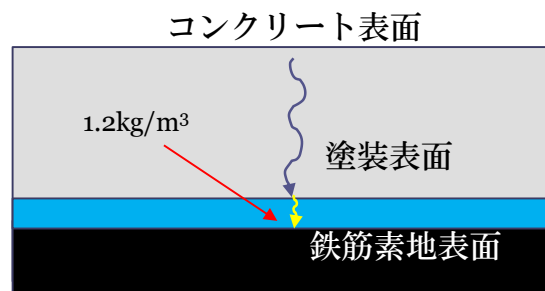
- 膜厚： $220 \pm 40 \mu\text{m}$ (180～260 μm)
- 付着強度：無塗装鉄筋の85%以上
- 耐食性：平均発せい面積率0.5%以下

エポキシ樹脂塗装鉄筋の性能評価のポイント

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査

設計耐
おける
食発生
照査す

ここに
 C_d ：素
に、下

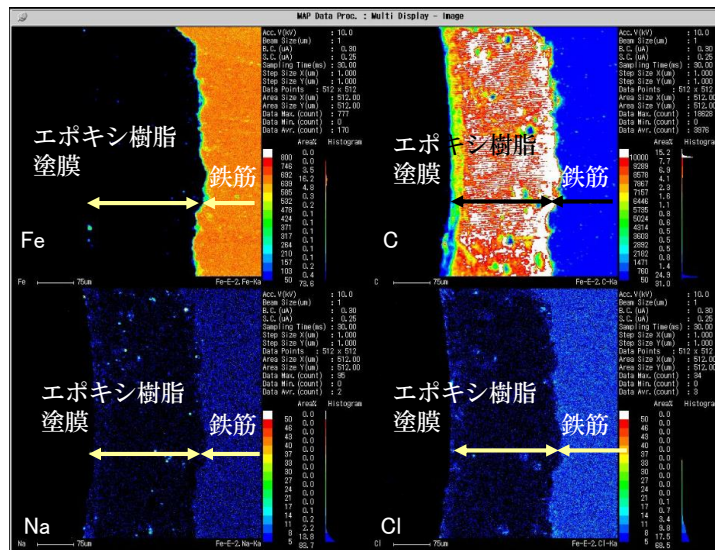


材表面に
を鋼材腐
の期間を

Ⅰ. 一般

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \exp \left(- \frac{C_0}{2\sqrt{t} \left(\sqrt{D_d} + \sqrt{D_{epd}} \right)} \right) \right) \quad (4.1.2)$$

EPMAによる分析結果



米国連邦道路局の対応

キーウエストでの劣化報告を受け、EP鉄筋に関する調査を実施

• 1992：FHWA Memorandum

各地で使用されているEP鉄筋を調査

- ・ 錆びや汚れの上からエポキシ塗装
- ・ 多数の欠陥の存在

品質管理の徹底の必要性

ASTM Spec.の大幅見直し

- ・ 塗膜厚の増大
- ・ 損傷部の全面補修
- ・ 施工上の注意点の加筆

• 1998：FHWA-RD-98-153

高耐久性防食鉄筋の比較検討

(EP鉄筋の他、ステンレス、亜鉛めっき、クラッド鉄筋など)

耐久性としてはSUS316鉄筋、コスト面を考慮するとEP鉄筋

ステンレス鉄筋に関する基準化

海外：

- ・ **BS 6744: 1986(改訂:2001, 2009)**
Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete.(Requirements and test methods)
- ・ **ASTM A955M: 1996 (改訂:2009)**
Standard Specification for Deformed and Plain Stainless-Steel Bars for Concrete Reinforcement
- ・ **ASTM A276:2010**
Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes.

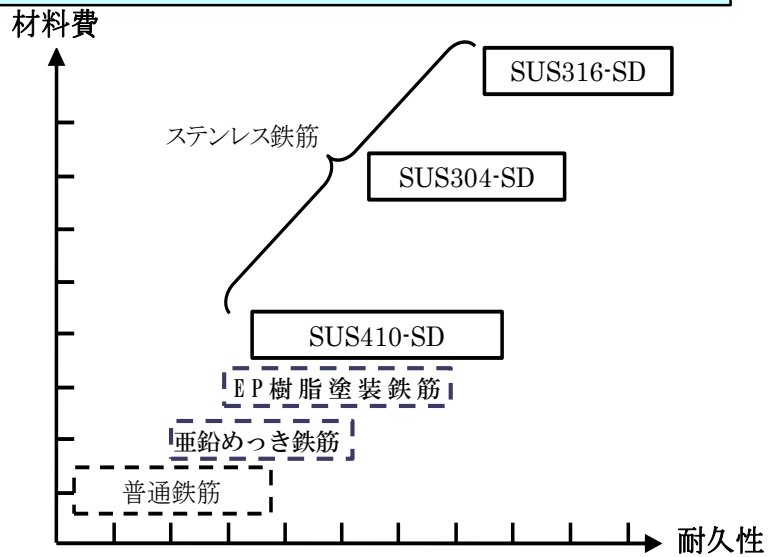
等

ステンレス鉄筋に関する基準化

我が国では,

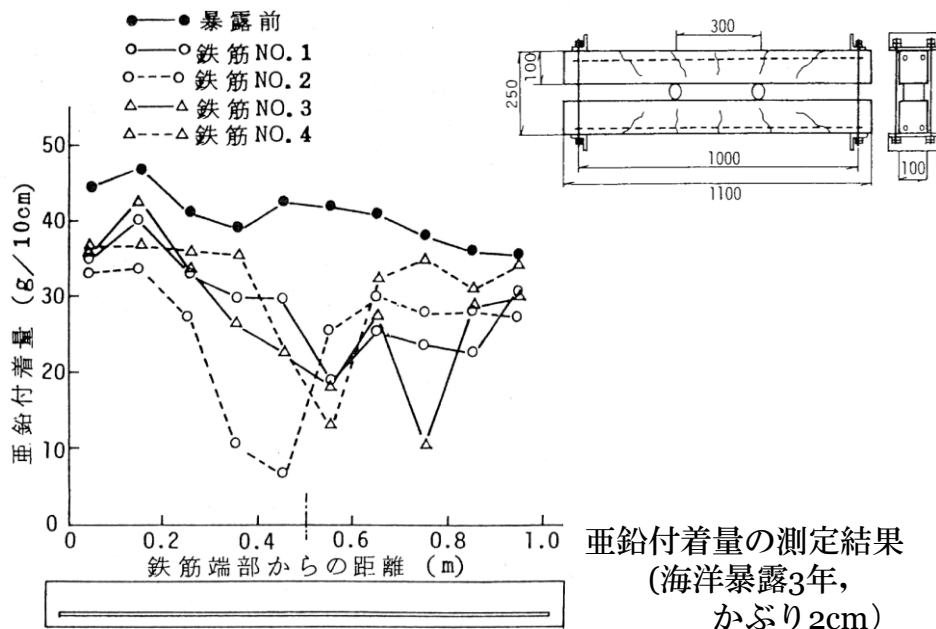
- ・ 2008年3月に「JIS G 4322：鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼」が制定
 - ・ SUS304 (18%Cr-8%Ni)
 - ・ SUS316 (16%Cr-10%Ni-2%Mo)
(いずれもオーステナイ系ステンレス)
 - ・ SUS410 (12%Cr あるいは 12%Cr-Low C)
(フェライト系ステンレス)
- ・ 2008年8月：土木学会でステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針（案）が制定

ステンレス鉄筋に関する基準化



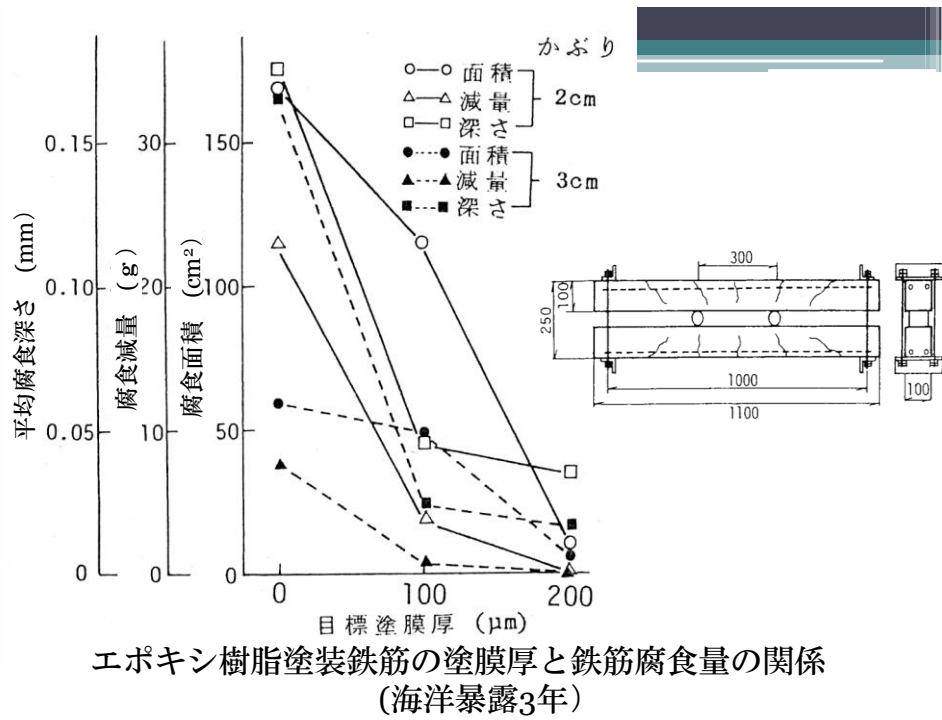
亜鉛めっき鉄筋の今後の道筋

問題の認識



亜鉛めっき鉄筋の腐食量測定結果

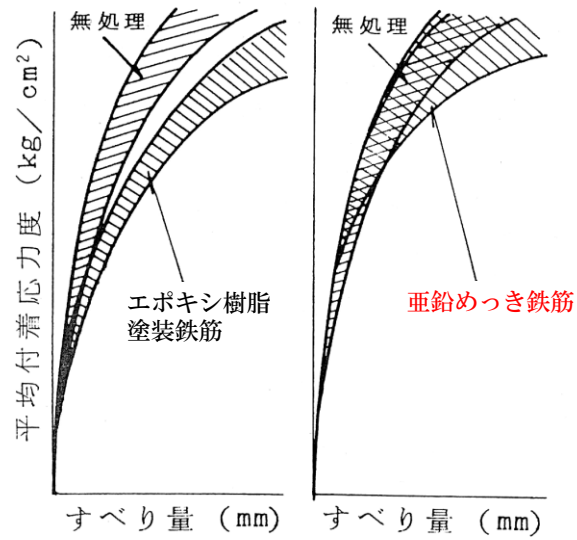
かぶり厚 (cm)	暴露期間	亜鉛腐食 減量 (g)	鉄筋腐食 面積 (cm ²)	鉄筋腐食 減量 (g)	平均腐食 深さ (mm)
2	1年	4.5	1.0	0	—
	3年	11.3	43.1	1.76	0.05
3		6.3	1.0	0	—



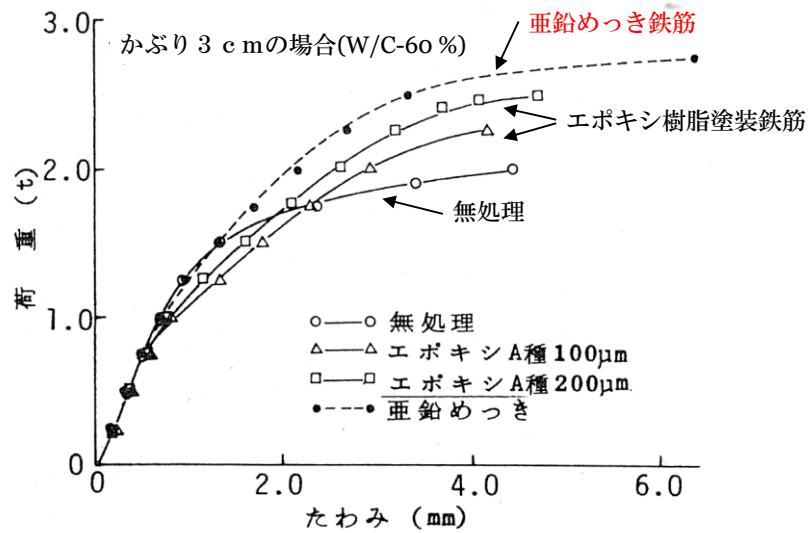
無処理鉄筋

エポキシ樹脂塗装鉄筋
(200 μm)

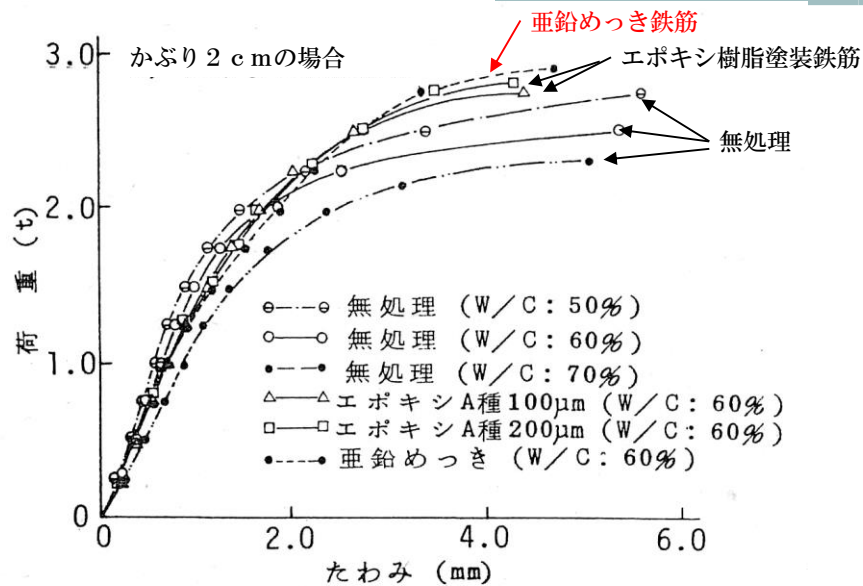
亜鉛めっき鉄筋



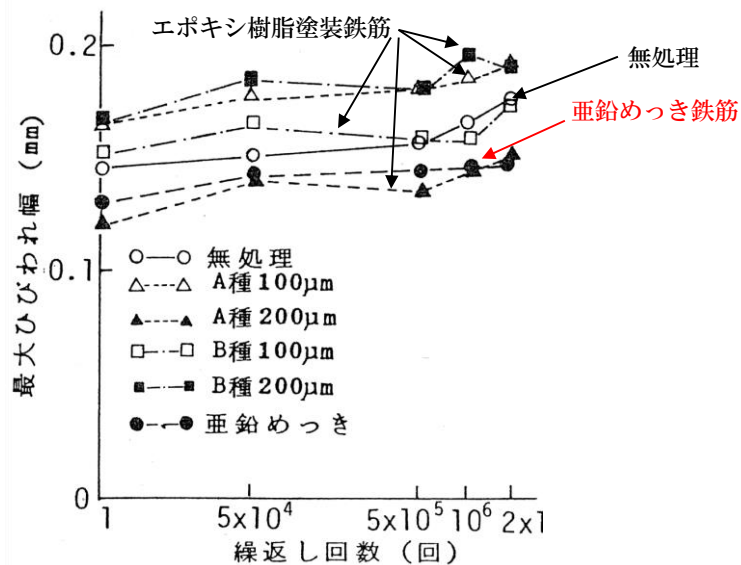
平均付着応力-すべり量曲線におけるばらつき



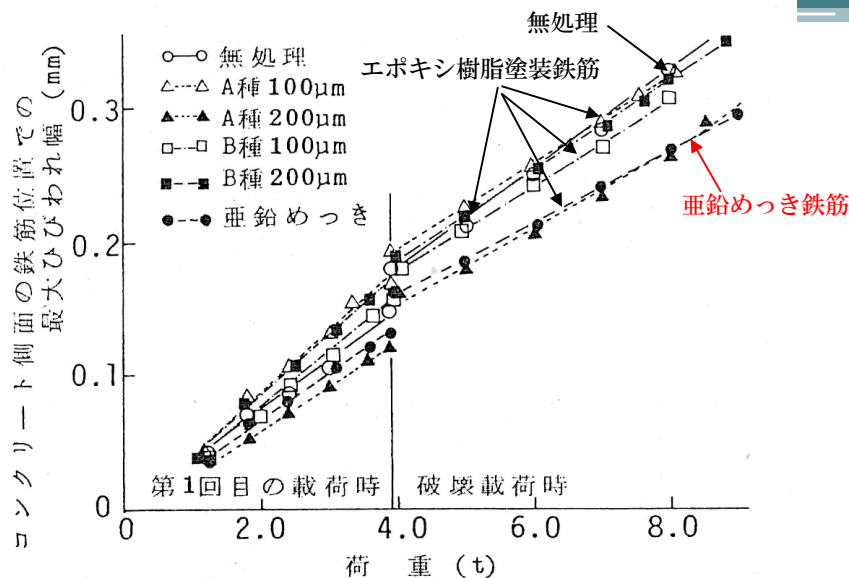
海洋暴露3年後の暴露供試体の荷重-たわみ関係の一例



海洋暴露3年後の暴露供試体の荷重-たわみ関係の一例



疲労試験における上限荷重時の最大ひび割れ幅と繰返し回数の関係 (一般養生環境の場合)



疲労試験後の荷重—最大ひび割れ幅の関係

まとめ

コンクリート構造物の特徴

➡ 経済的で長寿命な構造物

これに新たな性能（例えば高耐久性）
を付与しようとする場合

材料や工法に求められること

➡ 経済的で長く有効に働くこと

しかし、現状では、必ずしもコストパフォーマンス
と性能は両立しない

まとめ



その効果とその継続時間を定量的に捉えること
+
ライフサイクルコストを最小とすること



亜鉛めっき鉄筋の需要拡大に求められること



性能照査型の設計施工指針の制定は重要な要素

まとめ



その効果とその継続時間を定量的に捉えること
+
ライフサイクルコストを最小とすること



鉄筋防食材料の選択肢を増やすこと



ご清聴、感謝申し上げます。