

# 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

# 海洋コンクリート構造物の劣化機構



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)

# 鉄筋コンクリート標準示方書初版本(昭和24年)の 海水の作用を受ける鉄筋コンクリートに関する記述

## 第十二章 海水の作用を受くる鉄筋コンクリート

### 第六十二条 配合

(1) 海水の作用を受くる鉄筋コンクリートにありては、其の  $1\text{ m}^3$  に着き  $330\text{kg}$  以上のセメントを使用すべし。特に、最高最低潮位間及び波の作用を受くる部分は、更に富配合のコンクリートを使用すべし。

(2) 多孔質又は脆弱なる骨材を使用せざる様特に注意すべし。

### 第六十三条 填 充

(1) コンクリートは出来得る限り、水平又は傾斜せる打継ぎ層を生ぜざる様填充すべし。

(2) 最高最低潮位間のコンクリートは出来得る限り一作業にて施工すべし。

### 第六十四条 鉄筋及コンクリートの保護

(1) コンクリートの被厚はコンクリート表面より  $7.5\text{cm}$  以上、隅角部に於て最も近きコンクリート表面より  $10\text{cm}$  以上とすべし。ただし、プレカスト・コンクリート等特別なるものに於てはこの限度を低下する事を得。

(2) 激しき摩損又は腐蝕を受くる箇所に於て、最高最低潮位間のコンクリート表面は、  
適当なる石材、其他責任技術者の承認せる材料以て保護すべし。

# 昭和49年制定【昭和55年版】鉄筋コンクリート 示方書の「29章 海洋コンクリート」の記述

## 29章 海洋コンクリート

### 230条 総則

231条 材料 海洋コンクリートに使用する材料は海水の作用に対して耐久的なものを使用。

【解説】 海洋環境下において、

(a) コンクリートを耐久的なものとするための方法として、以下を示している

- ・セメント：中庸熟，耐硫酸塩，高炉セメント，シリカセメント，  
フライアッシュセメント等の使用
- ・セメント硬化体の代わりにレジンコンクリート，ポリマー含浸コンクリート等。
- ・鉄筋の腐食を最小限にとどめるための方法として、

①鉄筋のかぶりを十分にとる

(a) 海水に接する，海水で洗われる，激しい潮風の影響を受ける部分：7cm

(b) 上記以外の部分：5cm

②ひび割れ幅を小さくする

(a) 感潮部あるいは海面上に位置する部材：0.15mm

(b) 海面上：0.2mm，等が，一応の目安

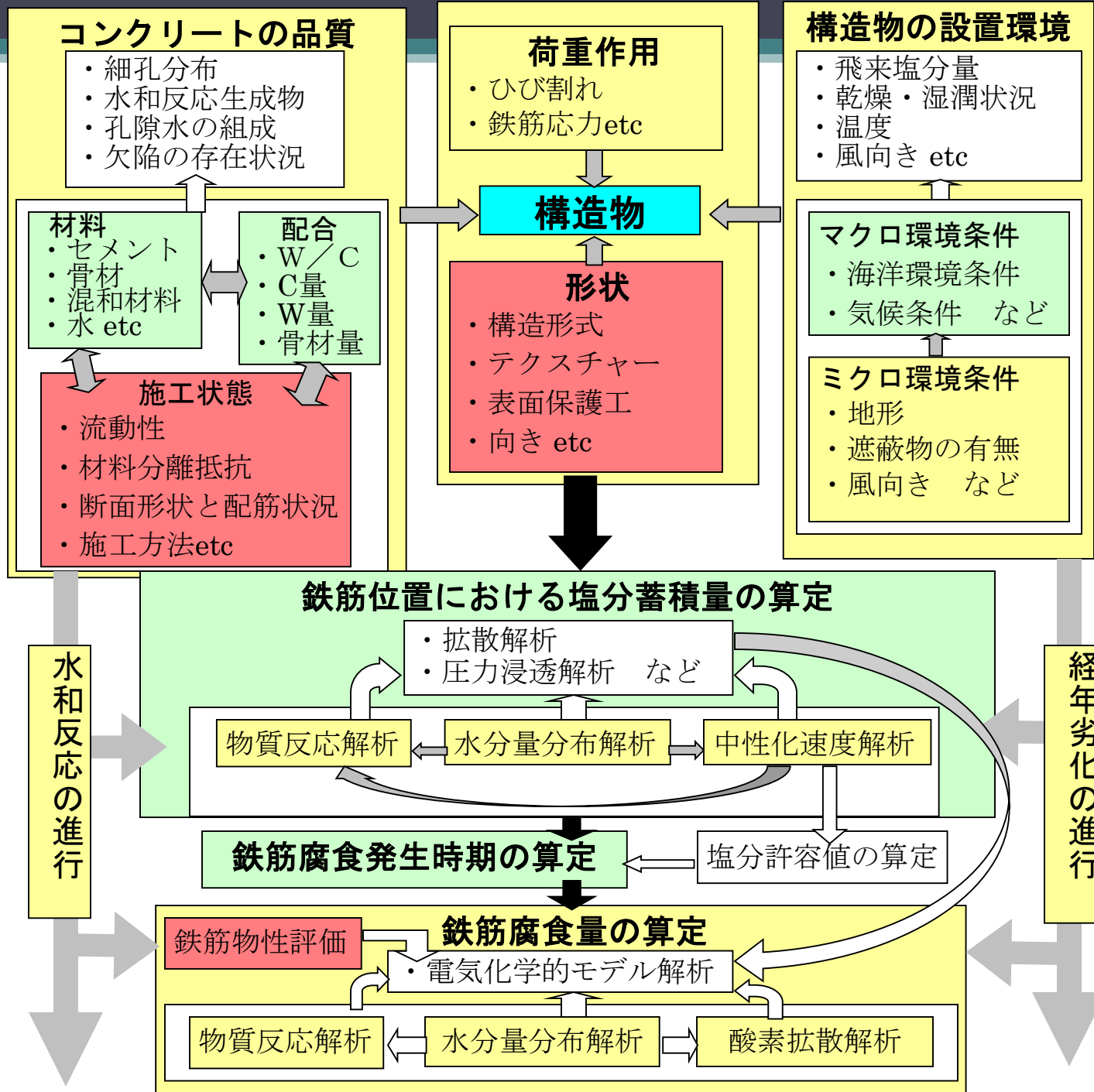
# 昭和49年制定【昭和55年版】鉄筋コンクリート 示方書の「29章 海洋コンクリート」の記述

③水密性の大きいコンクリートの施工，

耐久性から定まる AE コンクリートの最大水セメント比

| 気象条件         | 凍結融解がしばしば繰り返される |    |    | 氷点下以下の気温となることがまれ |    |    |
|--------------|-----------------|----|----|------------------|----|----|
|              | 薄い              | 普通 | 厚い | 薄い               | 普通 | 厚い |
| ・断面の厚み       |                 |    |    |                  |    |    |
| ・潮風を受ける部分    | 50              | 55 | 55 | 50               | 60 | 65 |
| ・波しぶきを受ける部分  |                 |    |    |                  |    |    |
| ・干満の作用を受ける部分 | 45              | 50 | 55 | 45               | 50 | 55 |
| ・海水で洗われる部分   |                 |    |    |                  |    |    |
| ・常時海水中にある部分  | 55              | 60 | 65 | 55               | 60 | 65 |

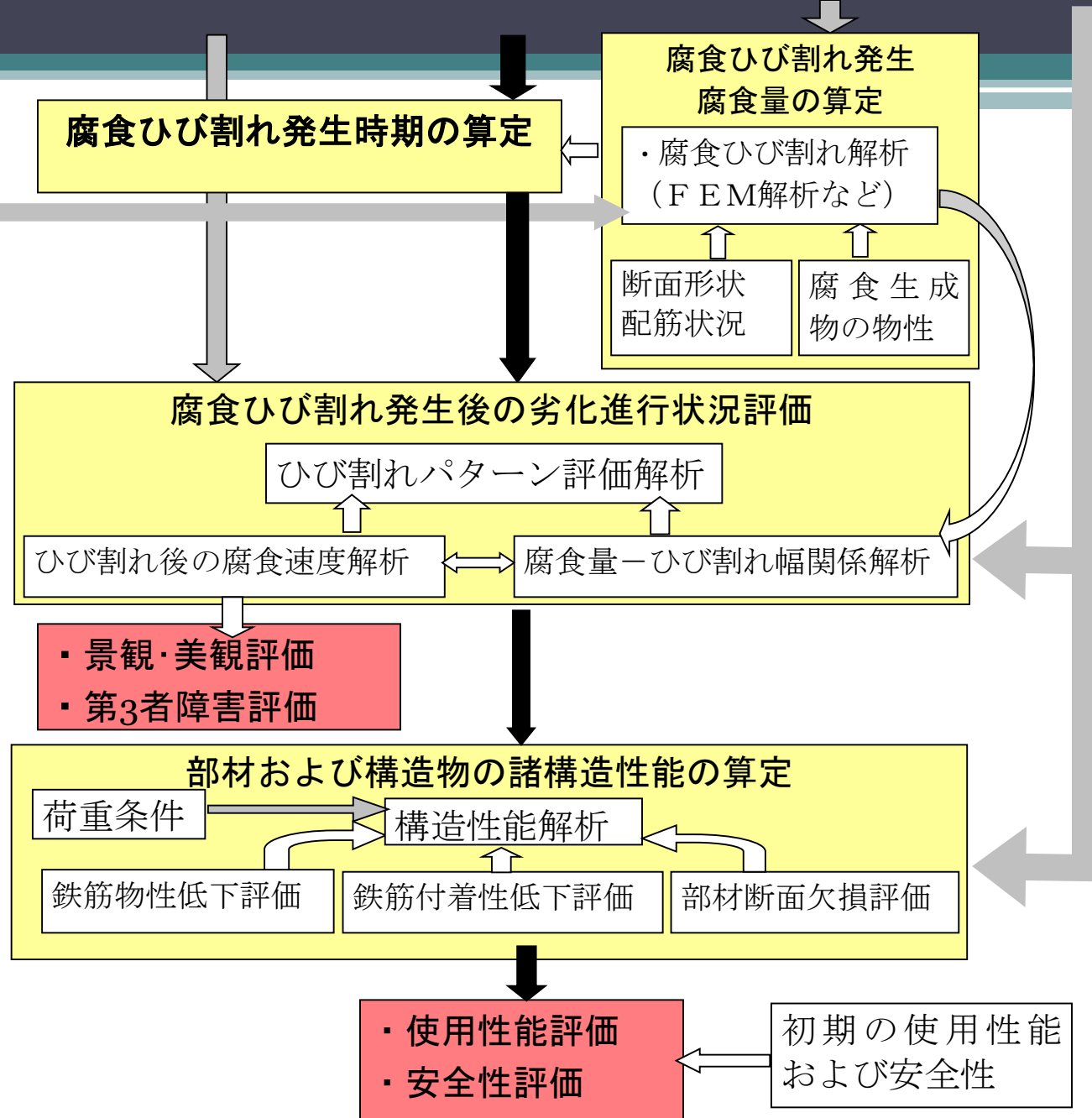
断面厚さについて： 1) 薄い：断面厚さが 20cm 程度以下の部分  
2) 厚い：マッシブな構造物の表面部  
3) 普通：1)，2) 以外



ある程度の精度で  
評価が可能

評価手法について  
検討中

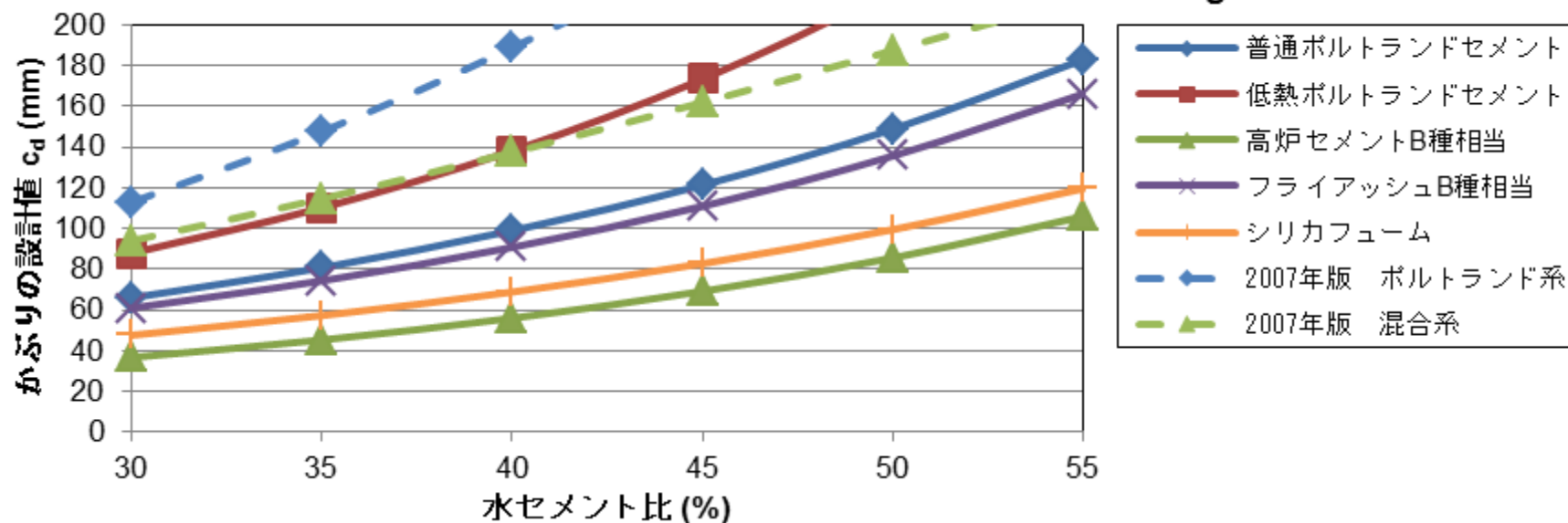
ほとんど検討に  
着手されていない



# ■ かぶりの設計値 $c_d$ （ひび割れ無し）

設計耐用年数100年

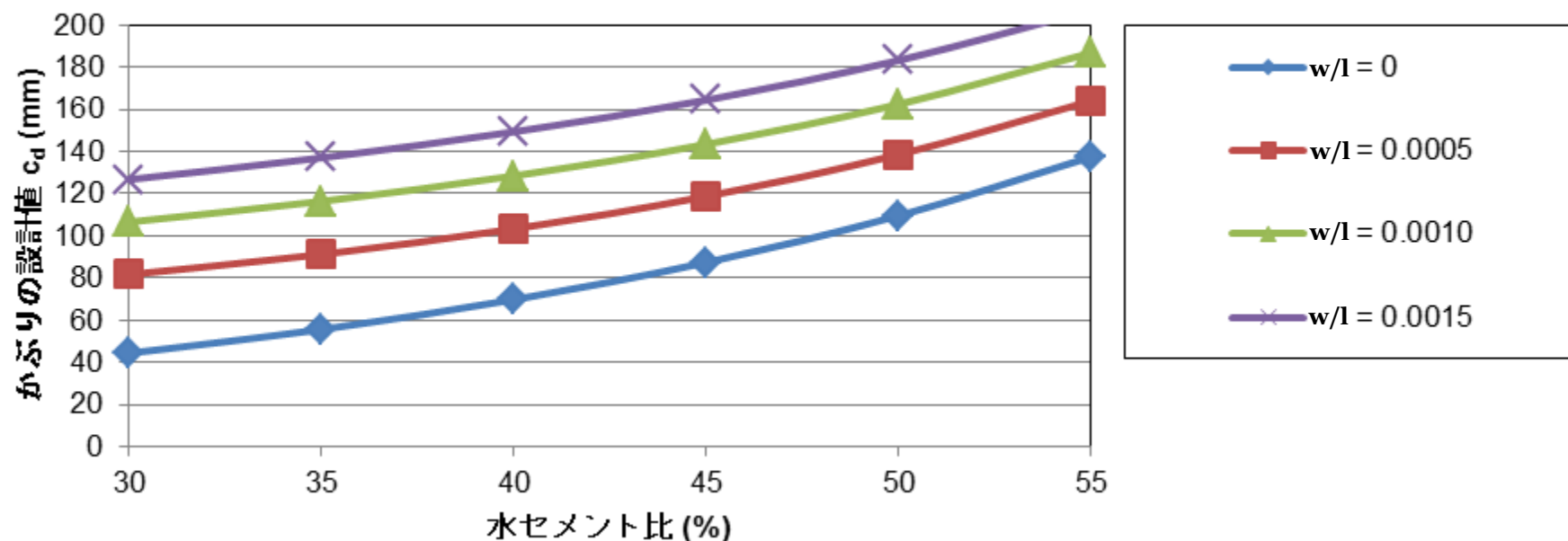
コンクリート表面塩化物イオン濃度  $9.0\text{kg/m}^3$



# ■ かぶりの設計値 $c_d$ （ひび割れ有り）

設計耐用年数100年

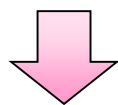
普通ポルトランドセメント



# 海洋コンクリート構造物の劣化機構



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)



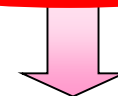
- ✓ 構造的な制約
  - ✓ 施工のばらつき etc.
- ↓
- ✓ 定量的評価の難しさ

鉄筋自体の防食

電気防食法

塗装鉄筋

非腐食性補強材



- ✓ 防食性能が高い
- ✓ 利便性に優れる

# 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                                        |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| 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)<br>( <b>亜鉛めっき鉄筋</b> の開発と利用に言及) |
| 1979年 | 建築学会編： <b>亜鉛めっき鉄筋</b> 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： <b>亜鉛めっき鉄筋</b> 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、 <b>亜鉛めっき鉄筋</b> の指針の解説を併せて掲載     |

# 昭和49年制定【昭和55年版】鉄筋コンクリート 示方書の「29章 海洋コンクリート」の記述

## 29章 海洋コンクリート

### 230条 総則

231条 材料 海洋コンクリートに使用する材料は海水の作用に対して耐久的なものを使用。

【解説】 海洋環境下において、

(a) コンクリートを耐久的なものとするための方法として、以下を示している

- ・セメント：中庸熟，耐硫酸塩，高炉セメント，シリカセメント，  
フライアッシュセメント等の使用
- ・セメント硬化体の代わりにレジンコンクリート，ポリマー含浸コンクリート等。
- ・鉄筋の腐食を最小限にとどめるための方法として、

①鉄筋のかぶりを十分にとる

(a) 海水に接する，海水で洗われる，激しい潮風の影響を受ける部分：7cm

(b) 上記以外の部分：5cm

②ひび割れ幅を小さくする

(a) 感潮部あるいは海面上に位置する部材：0.15mm

(b) 海面上：0.2mm，等が，一応の目安

# 昭和49年制定【昭和55年版】鉄筋コンクリート 示方書の「29章 海洋コンクリート」の記述

③水密性の大きいコンクリートの施工，

耐久性から定まる AE コンクリートの最大水セメント比

| 気象条件         | 凍結融解がしばしば繰り返される |    |    | 氷点下以下の気温となることがまれ |    |    |
|--------------|-----------------|----|----|------------------|----|----|
|              | 薄い              | 普通 | 厚い | 薄い               | 普通 | 厚い |
| ・断面の厚み       |                 |    |    |                  |    |    |
| ・潮風を受ける部分    | 50              | 55 | 55 | 50               | 60 | 65 |
| ・波しぶきを受ける部分  |                 |    |    |                  |    |    |
| ・干満の作用を受ける部分 | 45              | 50 | 55 | 45               | 50 | 55 |
| ・海水で洗われる部分   |                 |    |    |                  |    |    |
| ・常時海中にある部分   | 55              | 60 | 65 | 55               | 60 | 65 |

断面厚さについて： 1) 薄い：断面厚さが 20cm 程度以下の部分  
2) 厚い：マッシブな構造物の表面部  
3) 普通：1)， 2) 以外

④鉄筋自体に防錆処理を行う・亜鉛めっき鉄筋が効果的

# 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)<br>(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」<br>(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<br>(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]<br>(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】<br>(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」<br>(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 | <p>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)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・内部充てん型エポキシ樹脂被覆PCより線</li><li>・プレグラウトPC鋼材</li></ul> |
| 2012年 | <p>土木学会編：示方書〔施工編〕<br/>（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．）</p>                                                                                    |

# 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

# エポキシ樹脂塗装鉄筋に関連する1980年代の海外の主な規準

## 1981: *ASTM A 775-81*

“Standard Specification for Epoxy-Coated Reinforcing Bars”

## *ASTM D 3963-81*

“Standard Specification for Fabrication and Jobsite Handling of Epoxy-Coated Steel Reinforcing Bars”

## 1986: *JSCE* Recommendation for design and construction of concrete structures using epoxy-coated reinforcing steel bars”

(土木学会のエポキシ指針(案)は英訳されていたので海外でもその内容は高く評価され大いに参考とされた。)

## 1990: *BS 7295*

“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

米国フロリダ州キーウエストに建設されていたEP鉄筋使用橋脚の海水面付近に、施工後10年足らずで著しい劣化が顕在化

フロリダ州交通省の調査      1987：中間報告  
                                         1994：最終報告

## 【原因】

- 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： $200 \pm 50 \mu\text{m}$ （ $150 \sim 250 \mu\text{m}$ ）
- 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： $220 \pm 40 \mu\text{m}$ （ $180 \sim 260 \mu\text{m}$ ）
- 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

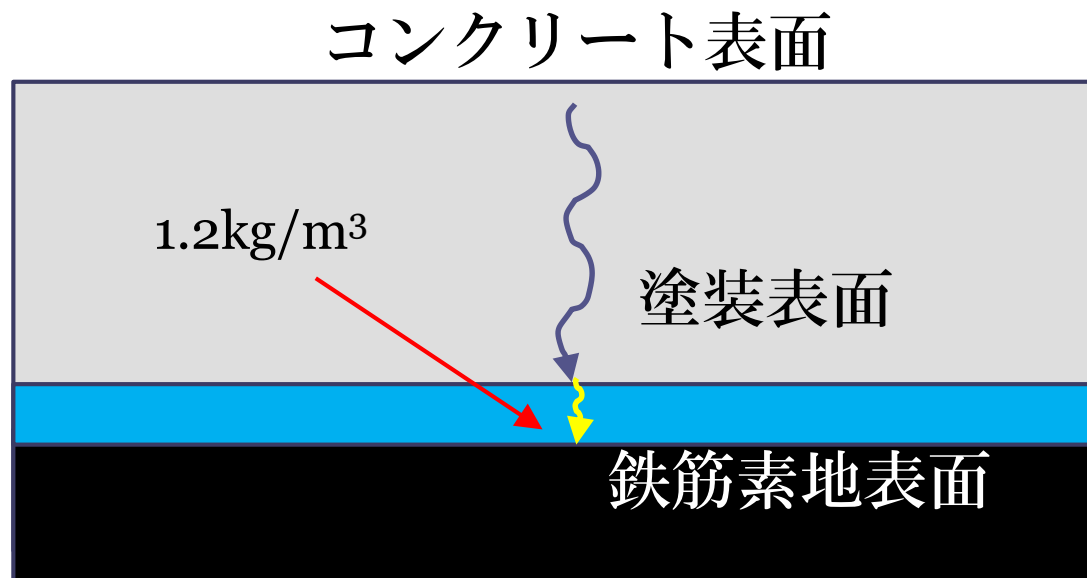
# エポキシ樹脂塗装鉄筋の性能評価のポイント

## 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

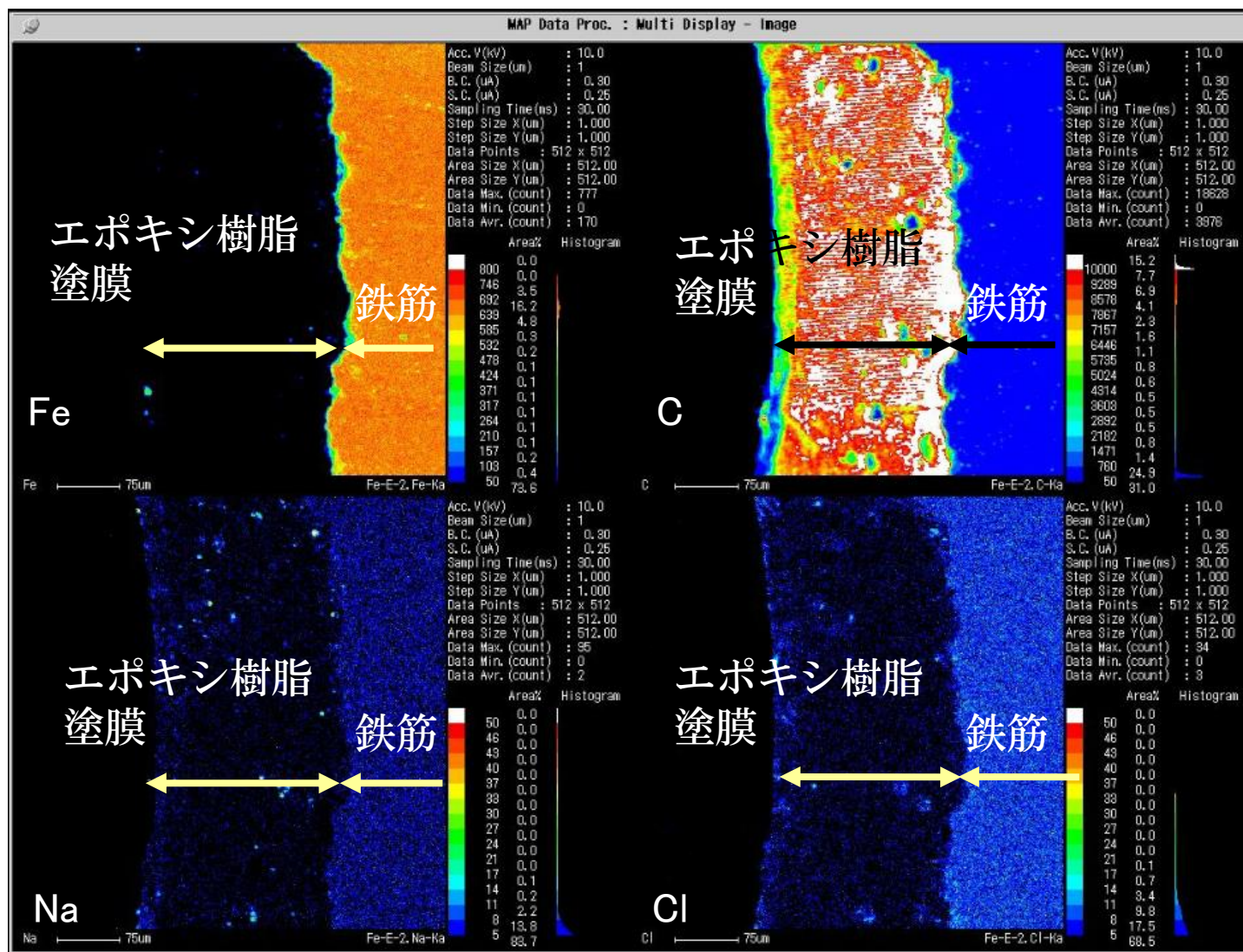


材表面に  
を鋼材腐  
の期間を

1. 一般

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

# 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.**

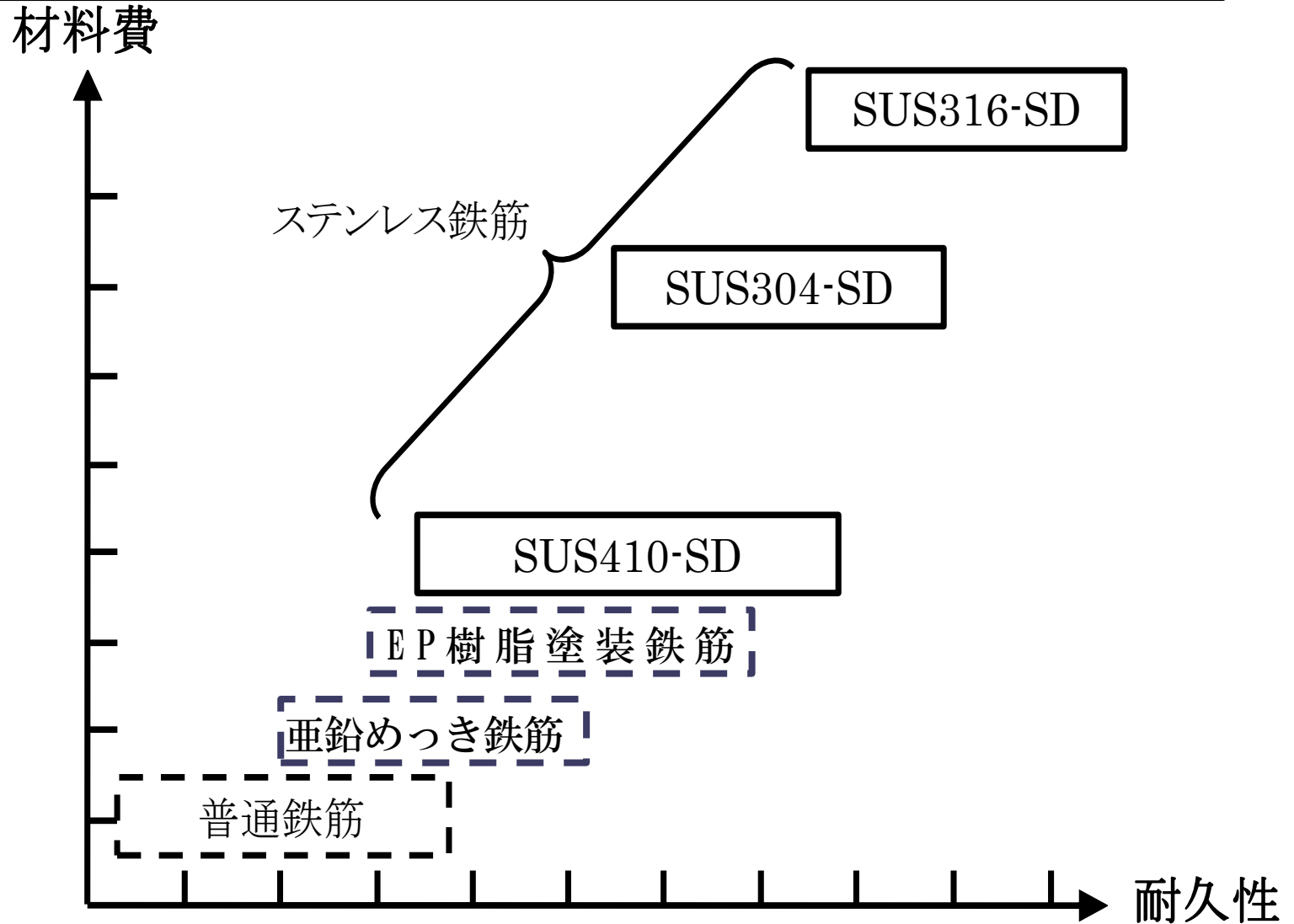
等

# ステンレス鉄筋に関する基準化

我が国では、

- ・ 2008年3月：「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「**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）**」制定

# ステンレス鉄筋に関する基準化



# 連続繊維補強材（FRPロッド）について

1992年：

土木学会編：「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)」 発刊

2008年

ISO 10406-1

Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete  
— Test methods — Part 1: FRP bars and grids

ISO 10406-2

Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete  
— Test methods — Part 2: FRP sheets

2013年

ISO 14484

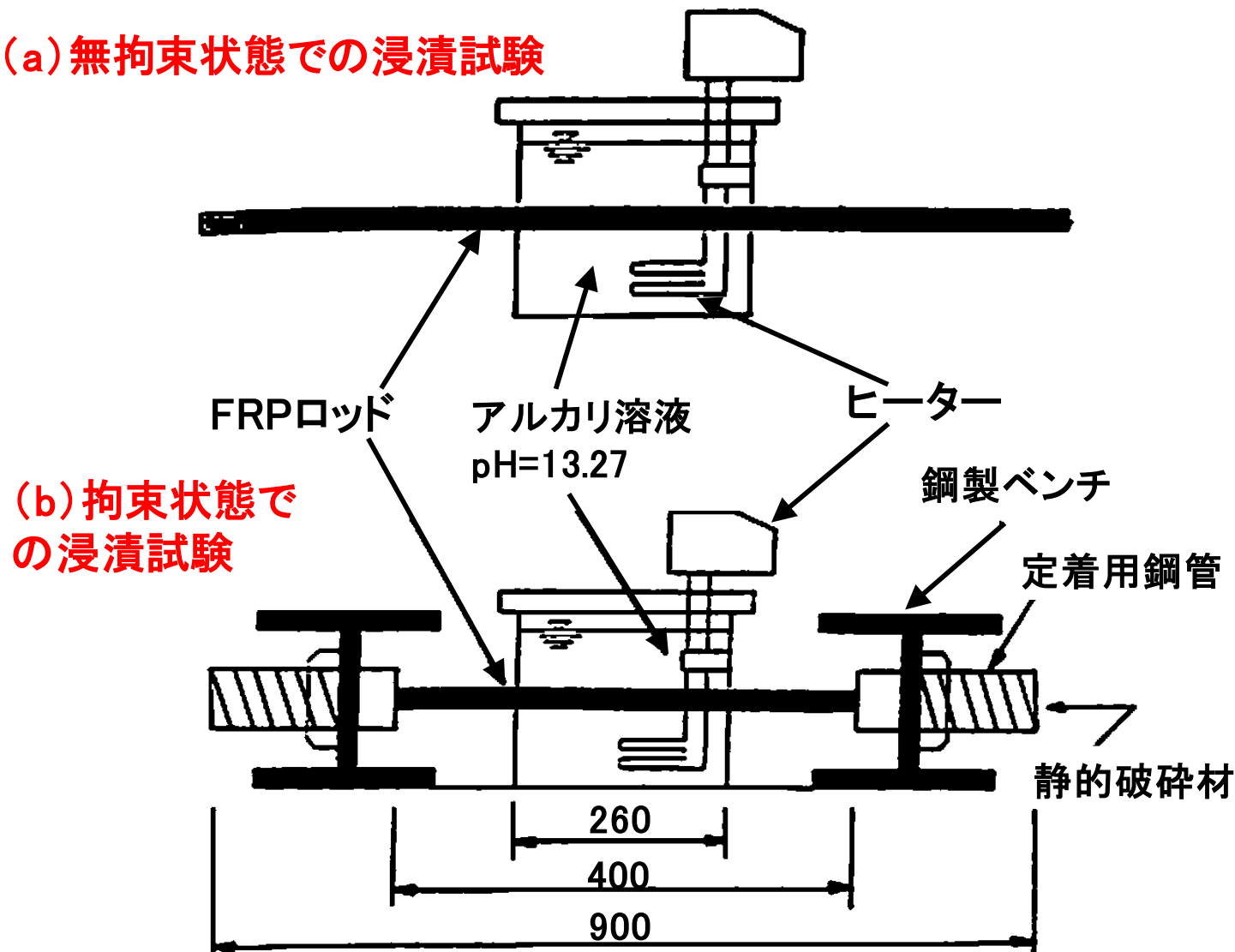
Performance guidelines for design of concrete structures  
using fibre-reinforced polymer (FRP) materials

# FRPロッドの耐久性に関する検討結果の一例

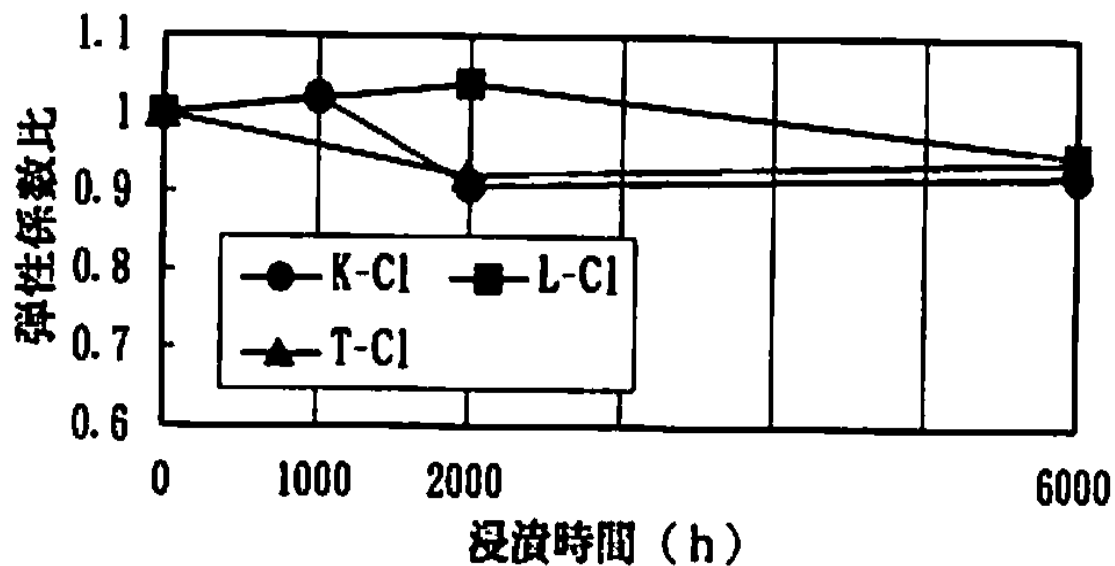
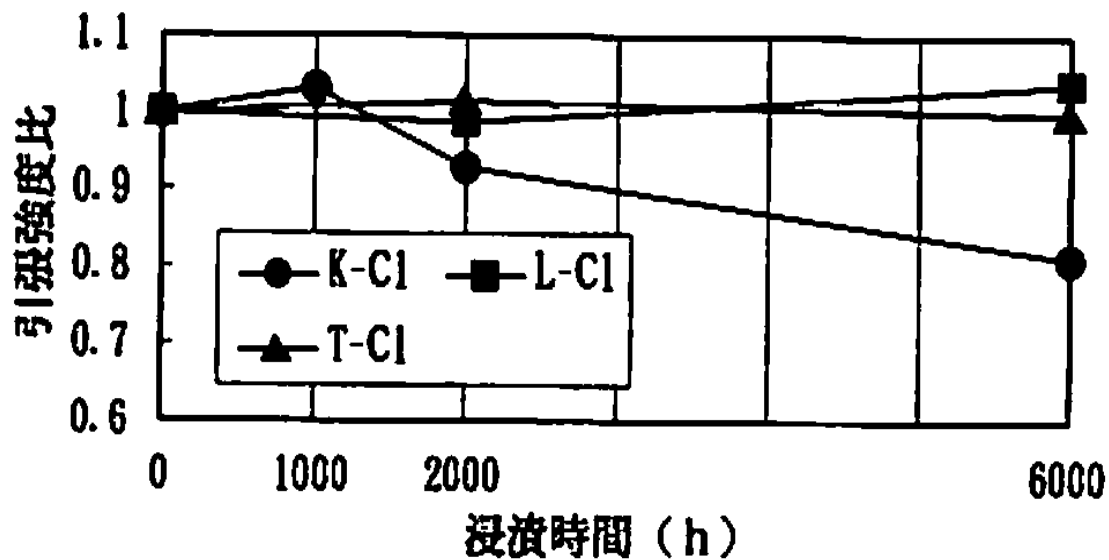
## 検討を行ったロッドの種類

| 繊維系   | ロッド種  | 呼び径<br>(mm) | 繊維種 <sup>*1</sup>  | マトリックス種 <sup>*2</sup>    | 繊維含有率<br>(vol. %) | ロッドの形状 |                                                                                       |
|-------|-------|-------------|--------------------|--------------------------|-------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| カーボン系 | K-C 1 | 6.0         | PAN系<br>(TR-30)    | エポキシ樹脂<br>(ビスフェノール A)    | 61.3              | 丸棒+片巻  |    |
|       | L-C 1 | 5.0         | PAN系<br>(T-300)    | エポキシ樹脂<br>(ビスフェノール A)    | 55.0              | 丸棒+綾巻  |    |
|       | T-C 1 | 5.5         | PAN系<br>(ベスファイト)   | エポキシ樹脂<br>(ノボラック)        | 64.0              | より線    |    |
| アラミド系 | S-A 1 | 6.0         | パラ型アラミド<br>(テクノーラ) | ビニルエステル樹脂<br>(ビスフェノール A) | 65.0              | 丸棒+片巻  |    |
|       | M-A 1 | 6.0         | パラ型アラミド<br>(ケブラー)  | エポキシ樹脂<br>(ビスフェノール A)    | 65.0              | 組 紐    |  |
| ガラス系  | K-G 1 | 6.0         | Eガラス               | エポキシ樹脂<br>(ビスフェノール A)    | 65.0              | 丸棒+片巻  |  |
| ビニロン系 | KR-V  | 6.0         | 高強力ビニロン<br>(7901)  | エポキシ樹脂<br>(ビスフェノール A)    | 69.6              | 丸棒+綾巻  |  |

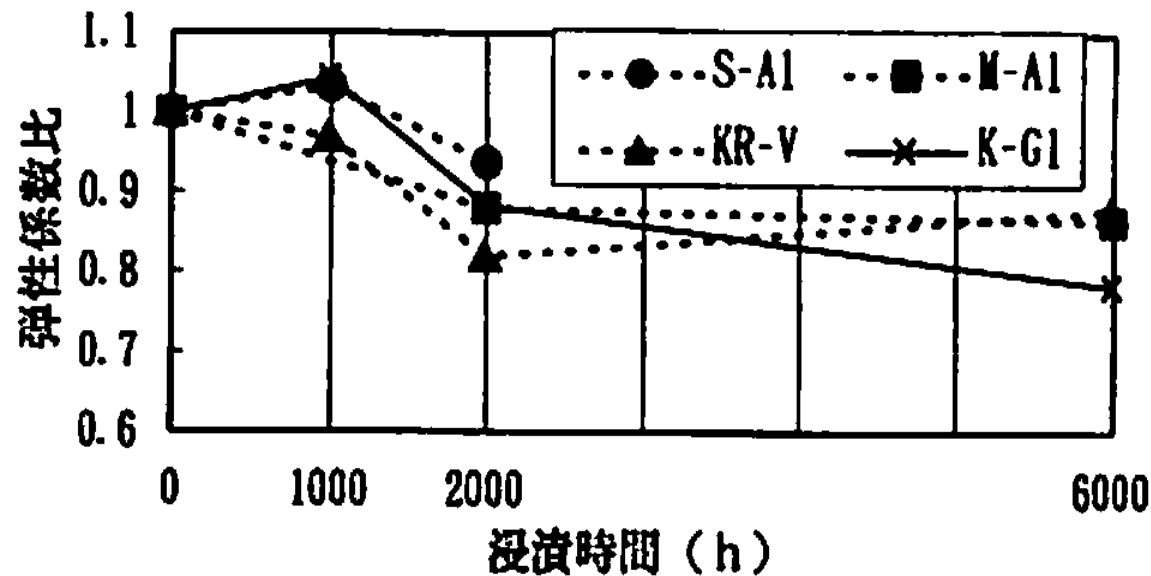
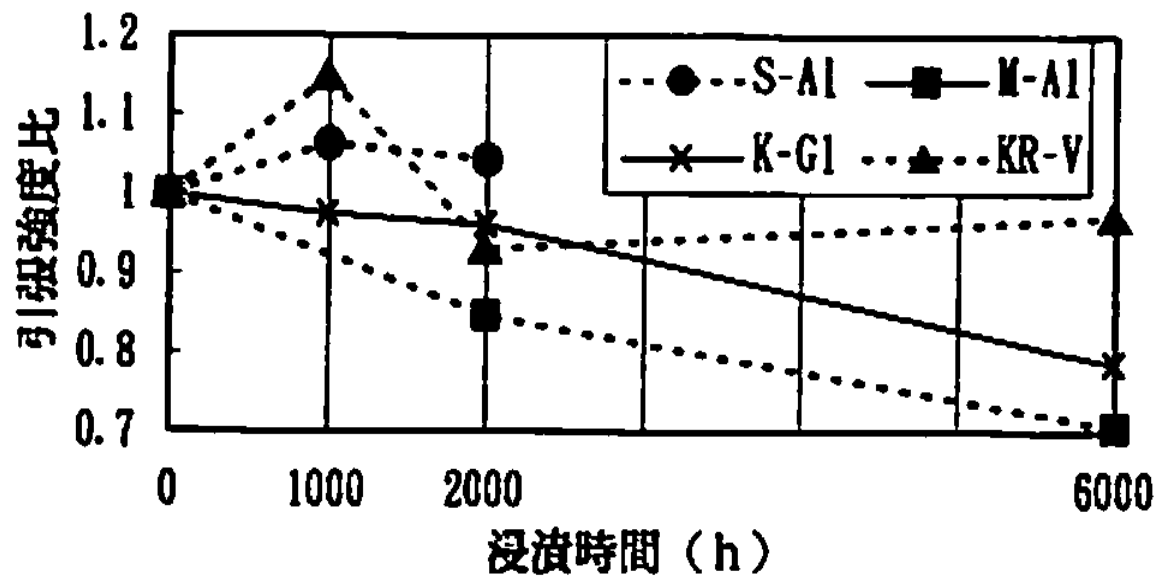
(a) 無拘束状態での浸漬試験



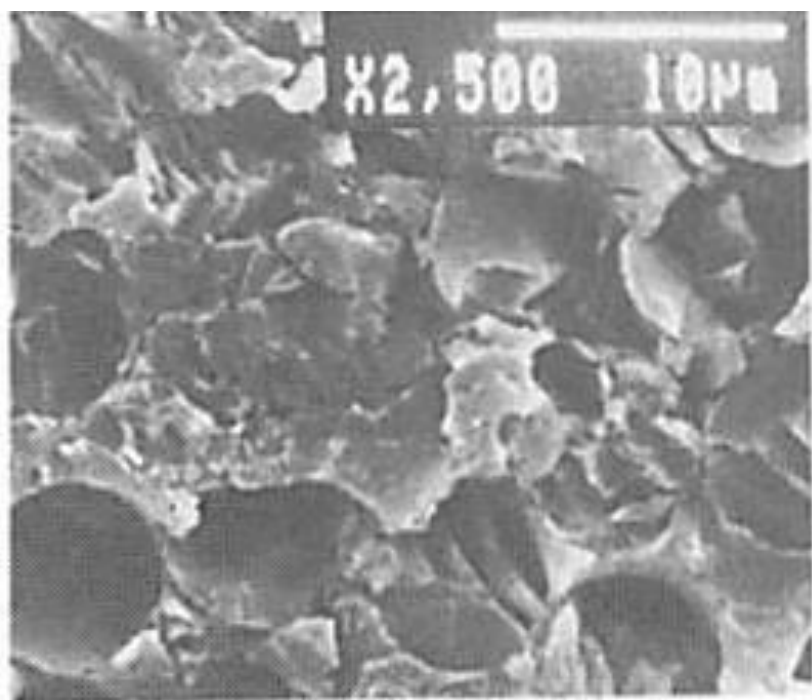
FRPロッドの耐久性期間する検討の一例



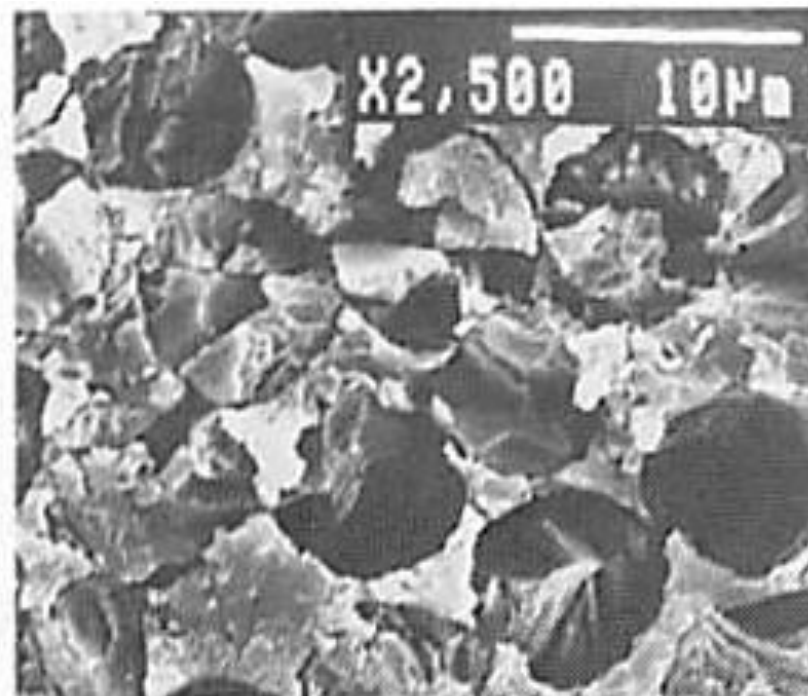
アルカリ溶液中に浸漬された炭素系FRPロッドの力学的性能の経時変化



アルカリ溶液中に浸漬されたアラミド，ガラスおよび  
ビニロン系FRPロッドの力学的性能の経時変化

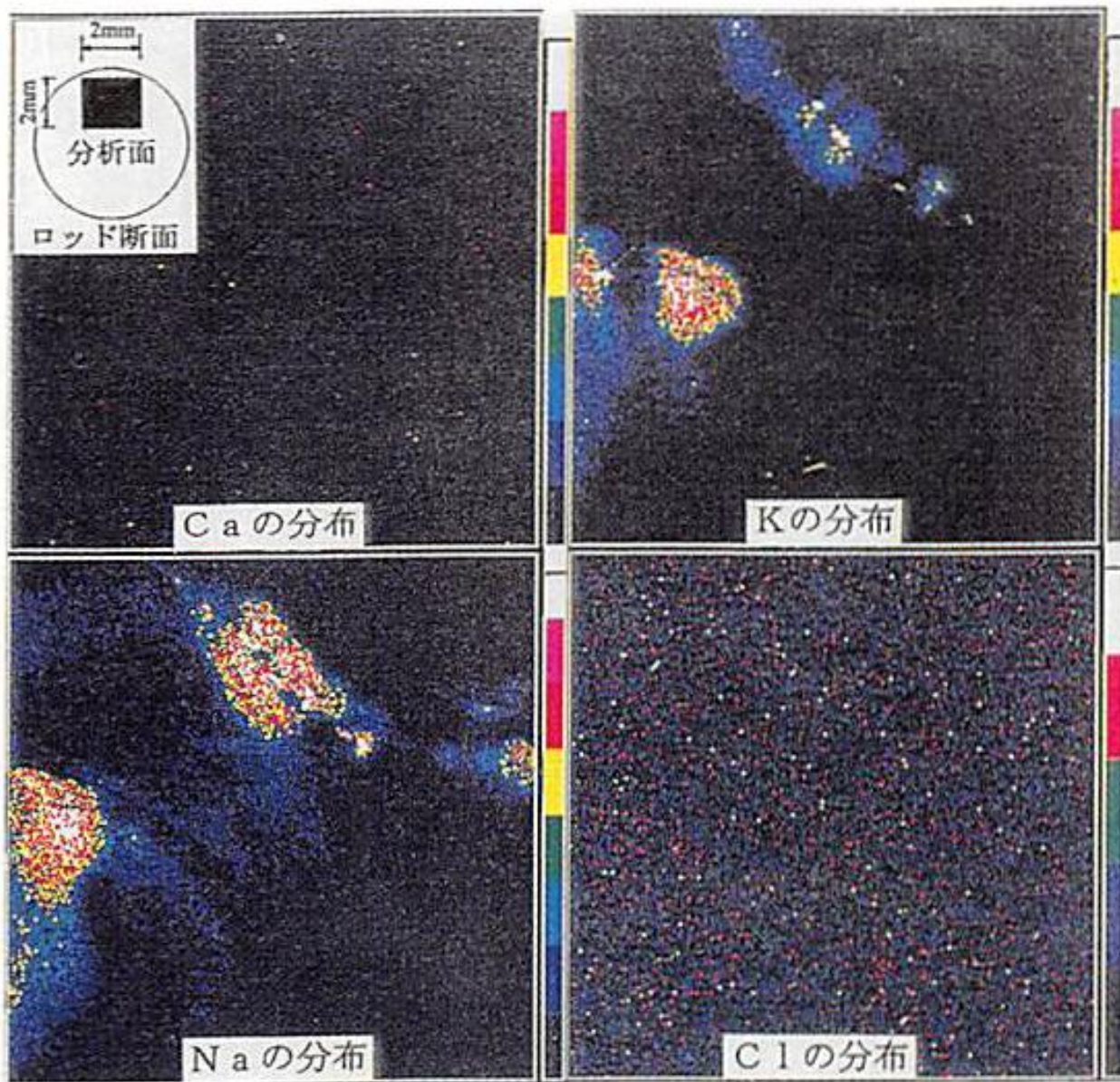


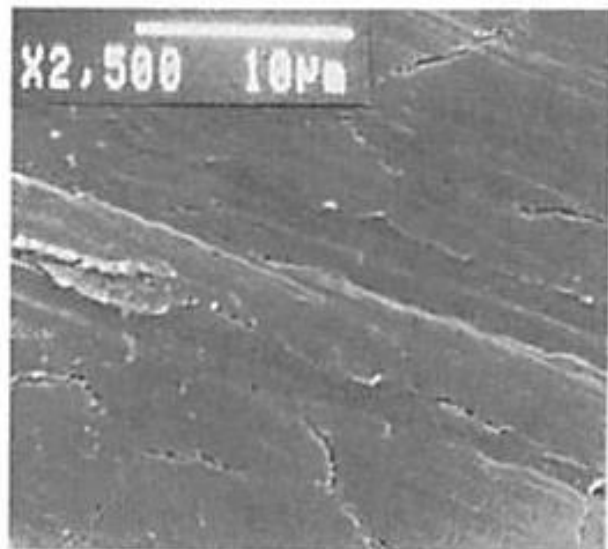
(無拘束，無浸漬)



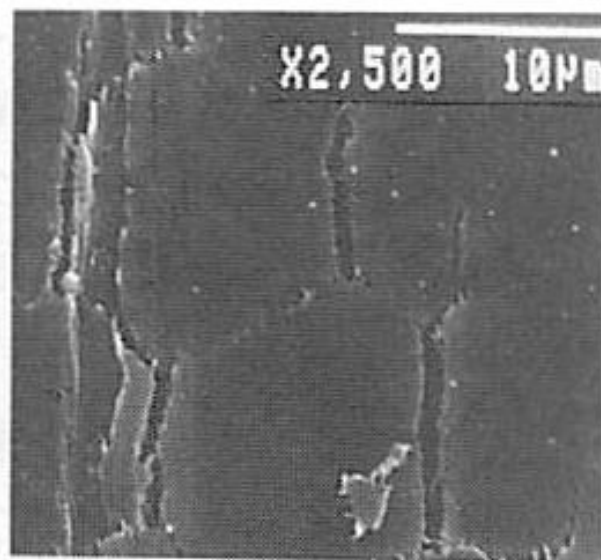
(拘束率70%，浸漬3000時間)

炭素繊維ロッド(K-C1種) のロッド表面から1mm内部の状況





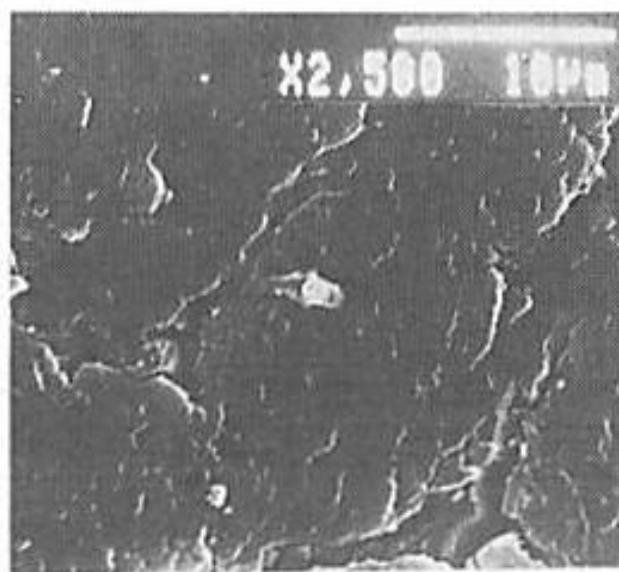
(無拘束、無浸漬)



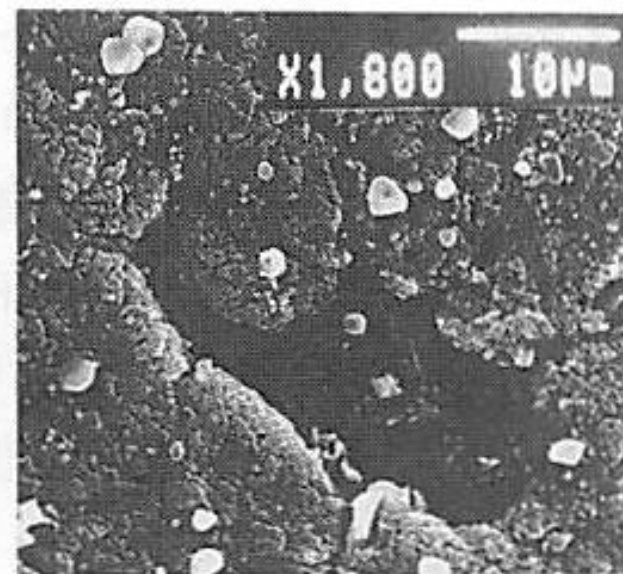
(拘束70%、浸漬3000時間)

アラミド系FRPロッド  
のSEM画像  
(表面から1mm内部)

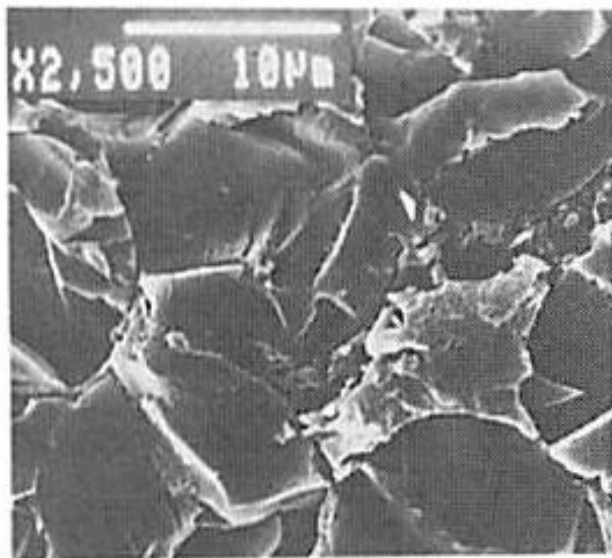
ビニロン系FRPロッド  
のSEM画像  
(表面から1mm内部)



(無拘束、無浸漬)



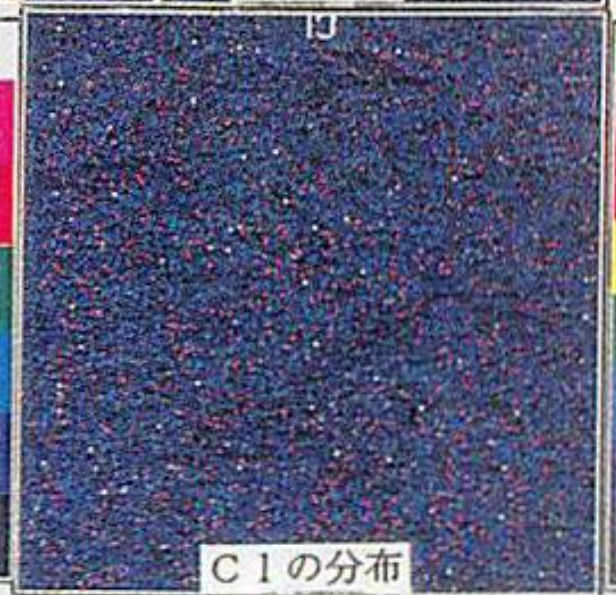
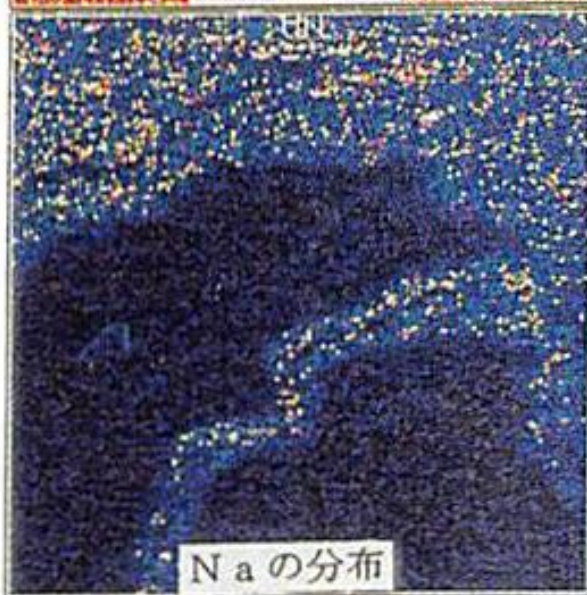
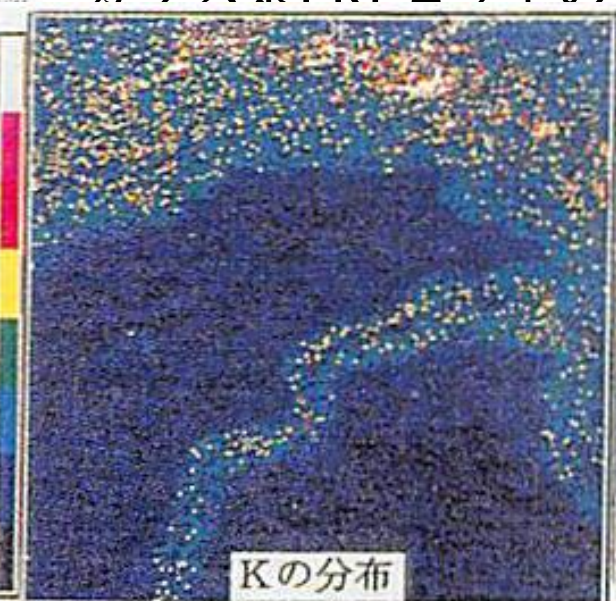
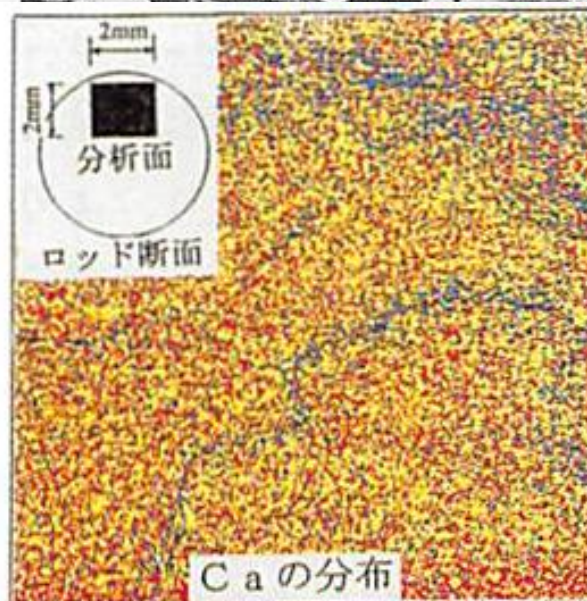
(拘束70%、浸漬3000時間)



(無拘束、無浸漬)



## ガラス系FRPロッドの



ガラス系FRPロッド断面  
内の各種元素の分布例  
(拘束0%,  
溶液浸漬3000時間)

# 亜鉛めっき鉄筋に関する基準化

## 我が国：

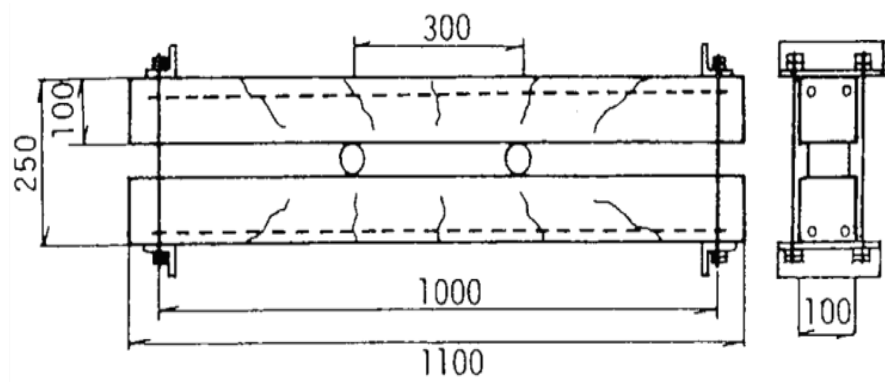
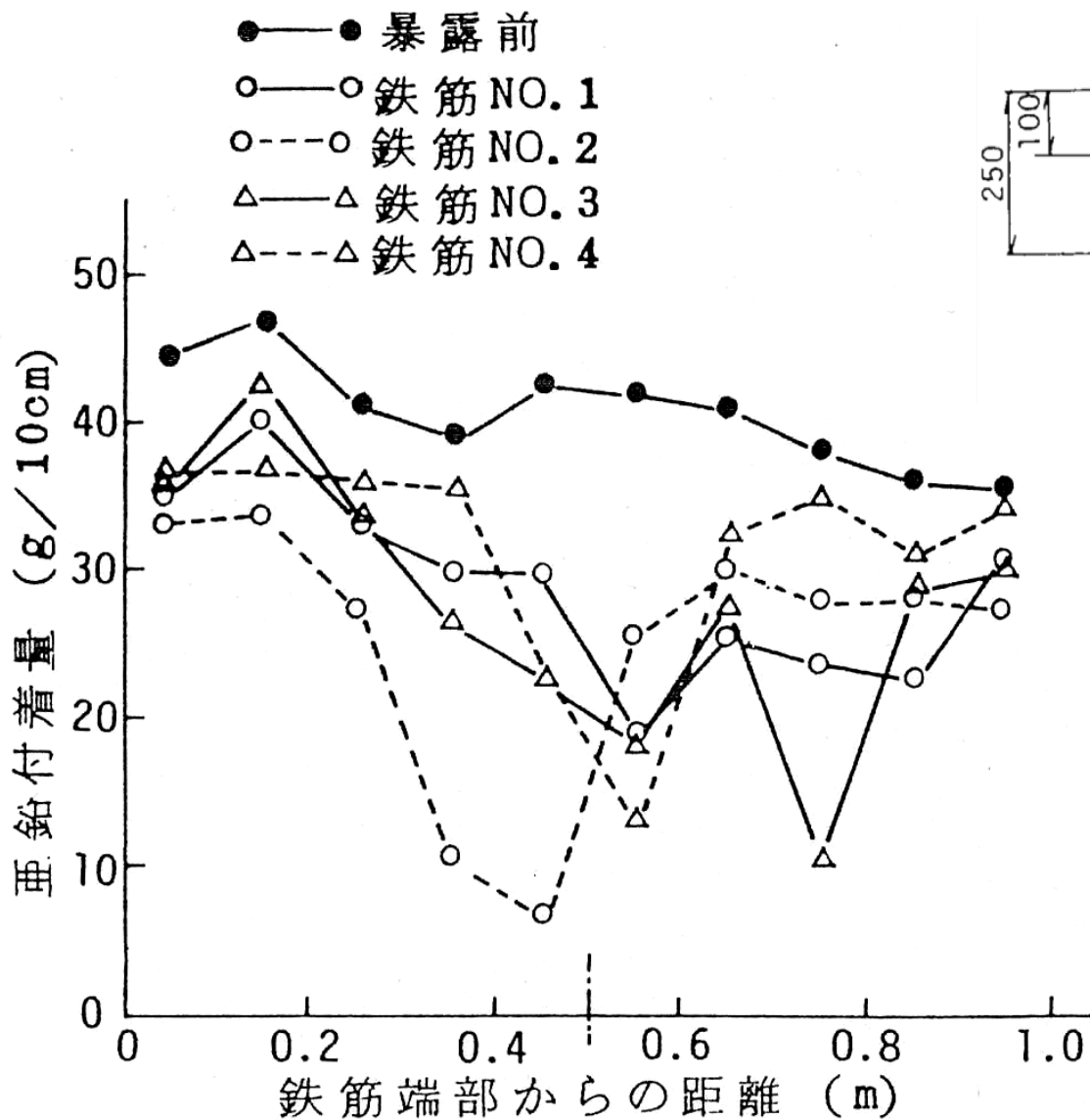
- 1979年：建築学会編：亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針(案)
- 1980年：土木学会編：亜鉛めっき鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)

## 海外：

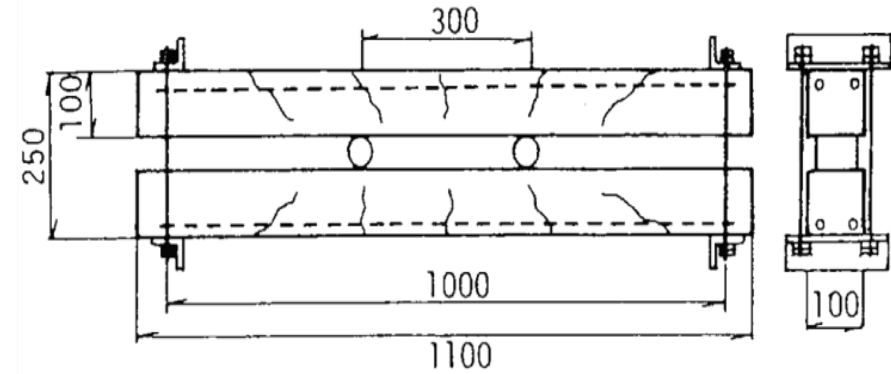
- **ISO 1461:1994(改訂：1999, 2009. 201)**  
**Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles—Specifications and test methods**  
(鋼材及び鋼材加工品に防食の目的で施される溶融亜鉛めっきの仕様と試験方法)
- **ASTM A767 / A767M – 2000 (改訂：2005, 2009)**  
**Standard Specification for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement**

# 亜鉛めっき鉄筋の今後の道筋

## 問題の認識

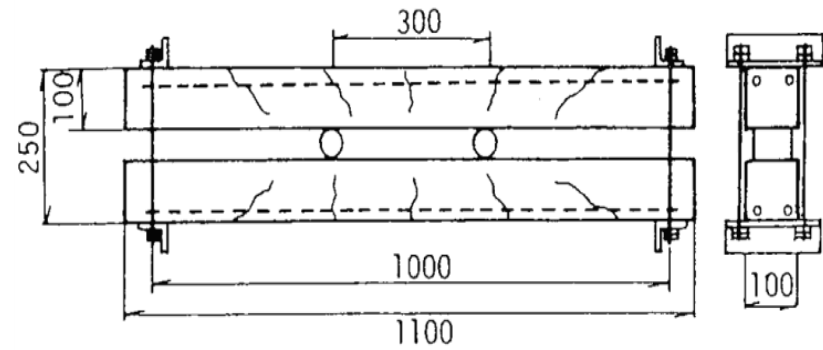
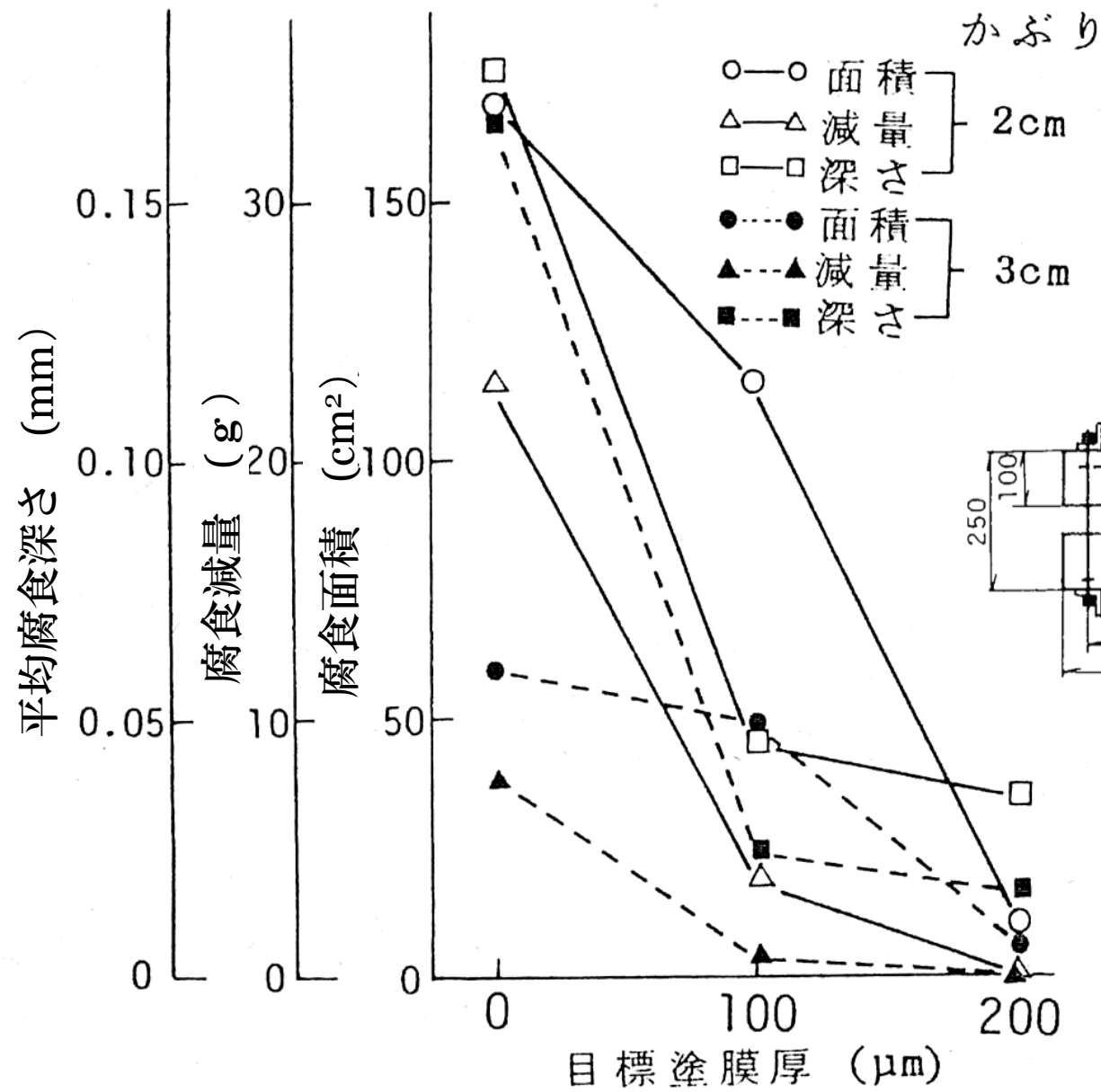


亜鉛付着量の測定結果  
(海洋暴露3年,  
かぶり2cm)



## 亜鉛めっき鉄筋の腐食量測定結果

| かぶり厚<br>(cm) | 暴露期間 | 亜鉛腐食<br>減量<br>(g) | 鉄筋腐食<br>面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | 鉄筋腐食<br>減量<br>(g) | 平均腐食<br>深さ<br>(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                 | —                  |



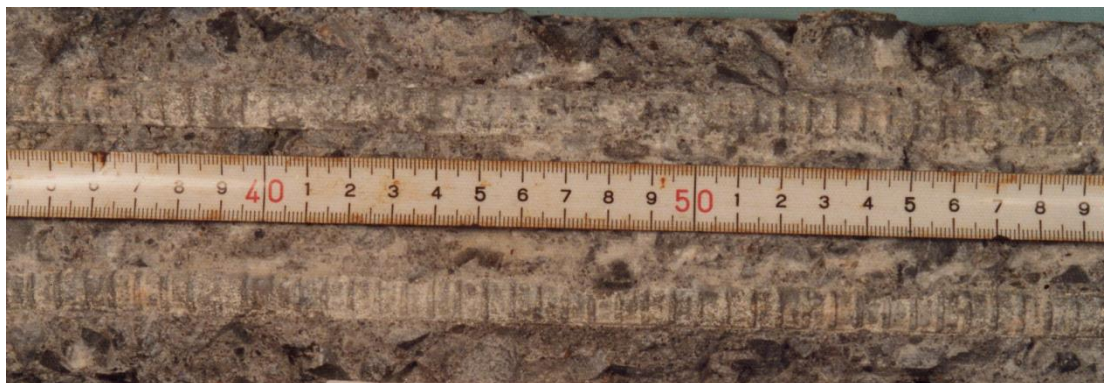
エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜厚と鉄筋腐食量の関係  
(海洋暴露3年)



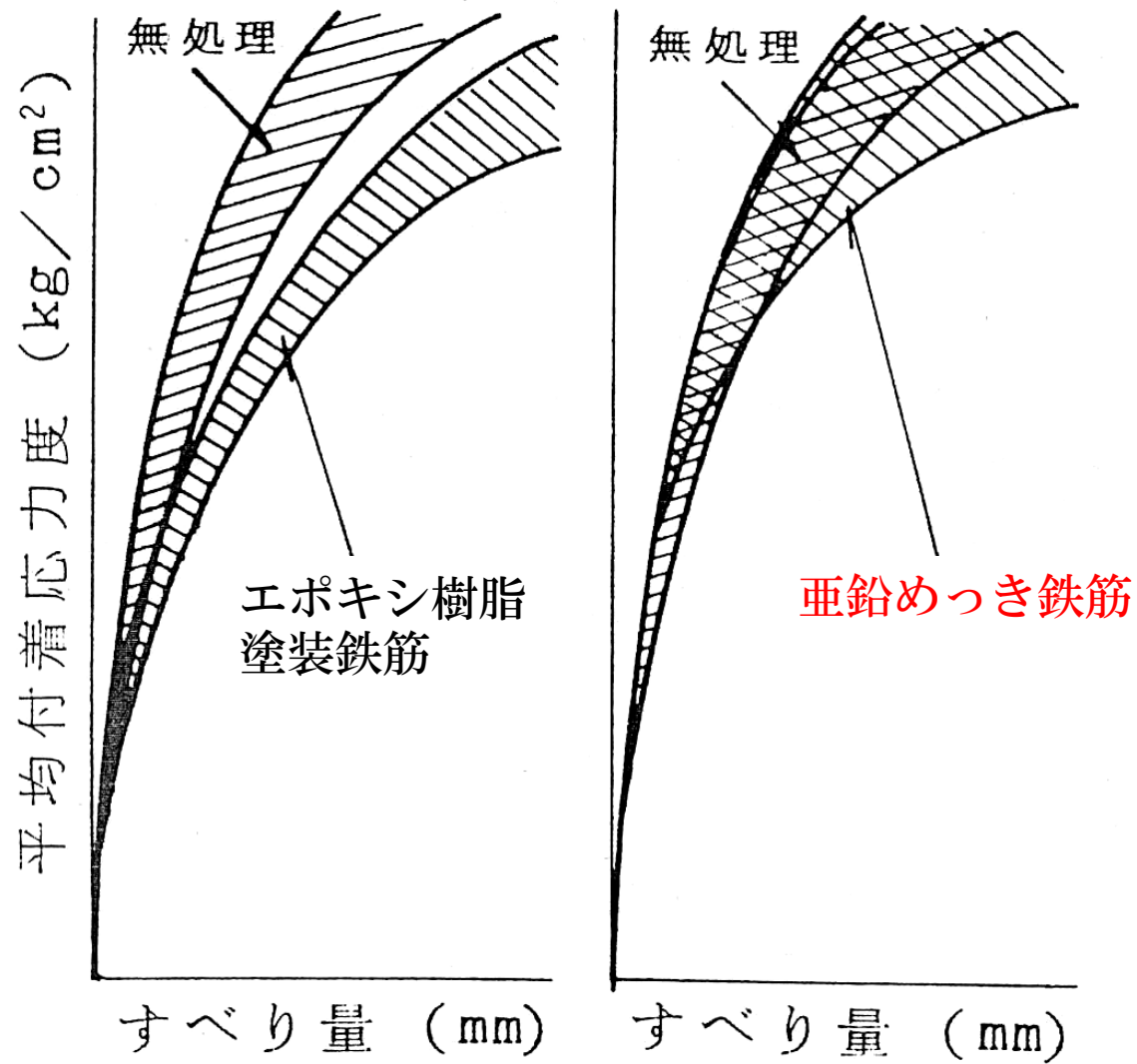
無処理鉄筋



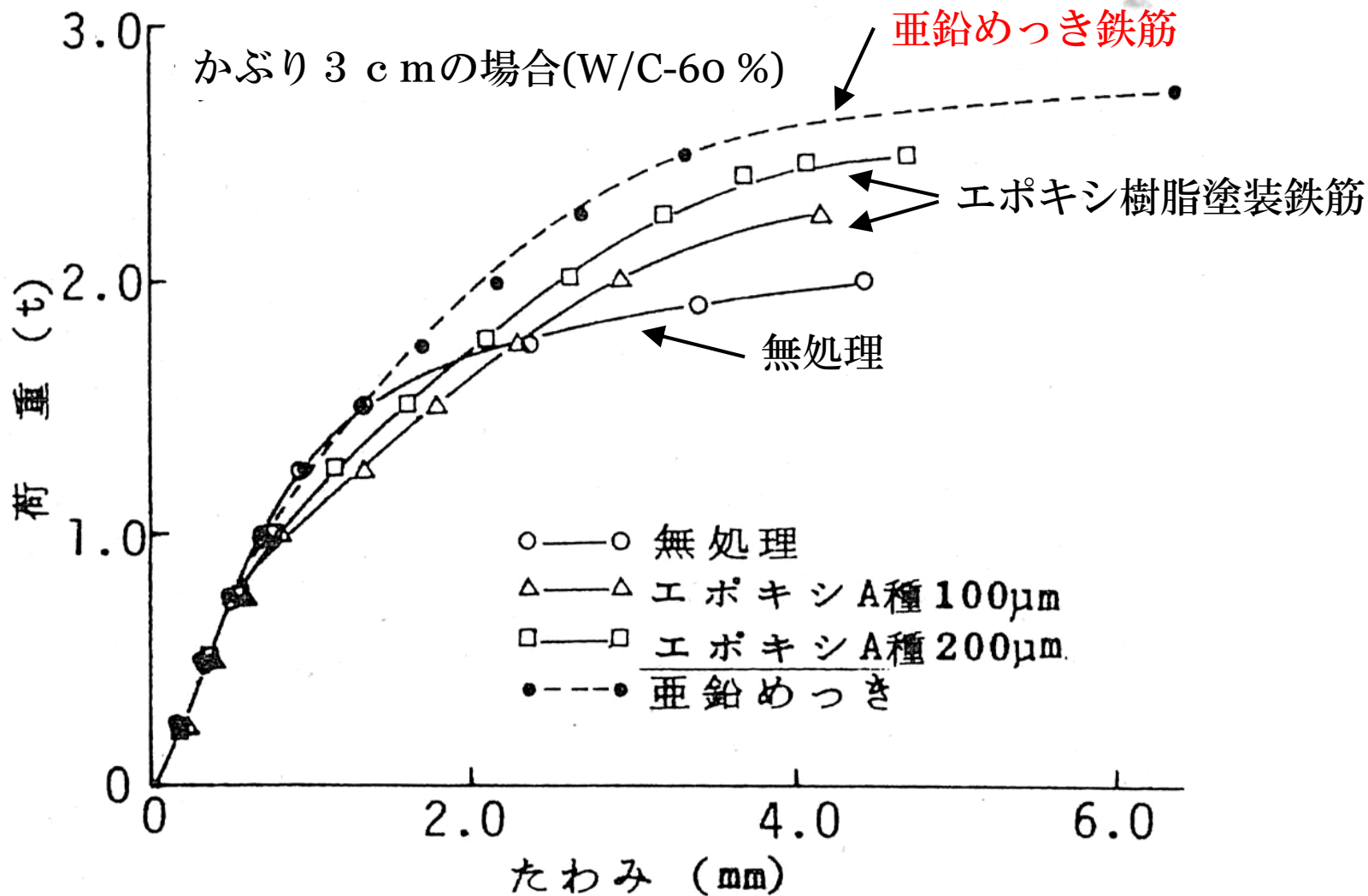
エポキシ樹脂塗装鉄筋  
( $200\mu\text{m}$ )



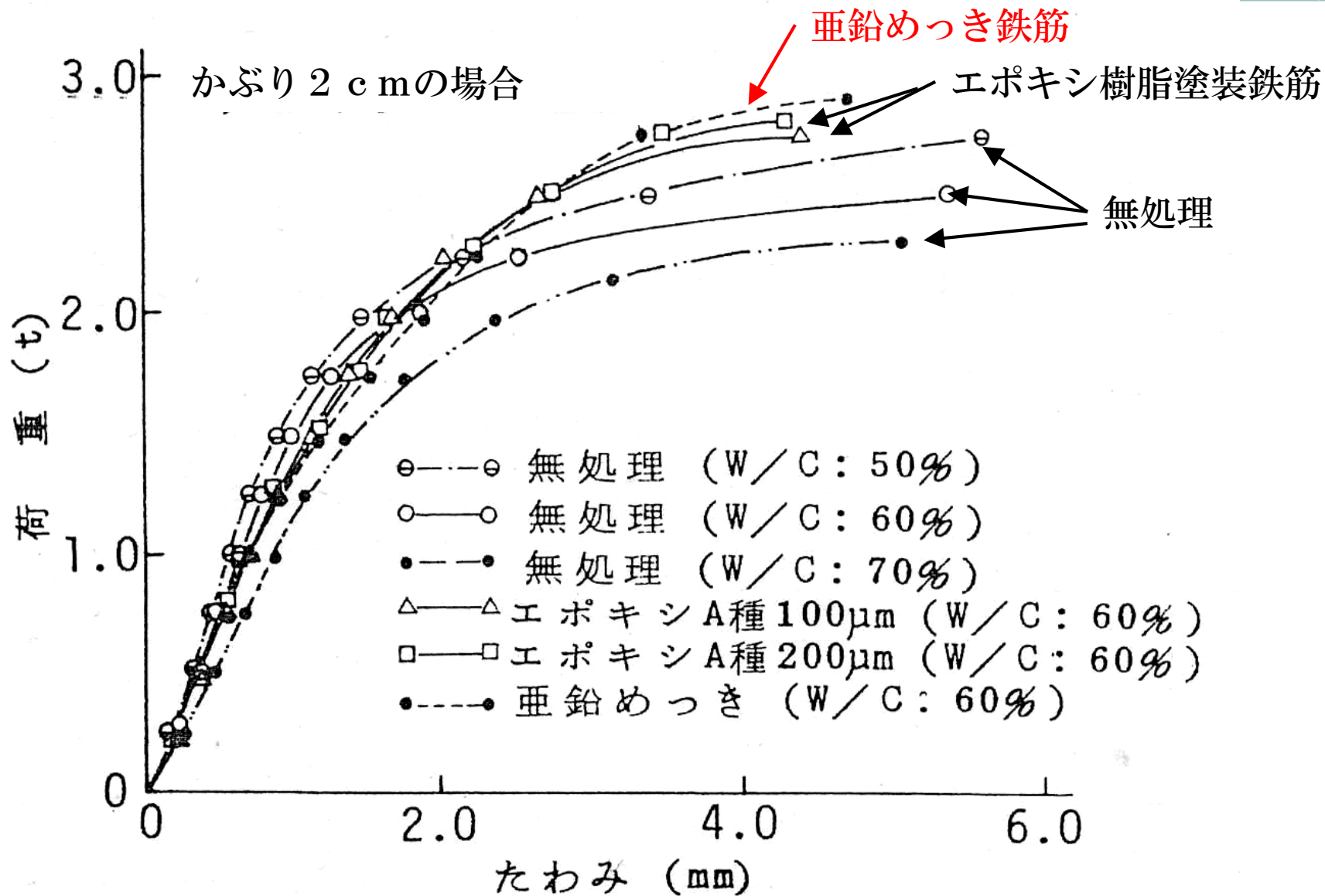
亜鉛めっき鉄筋



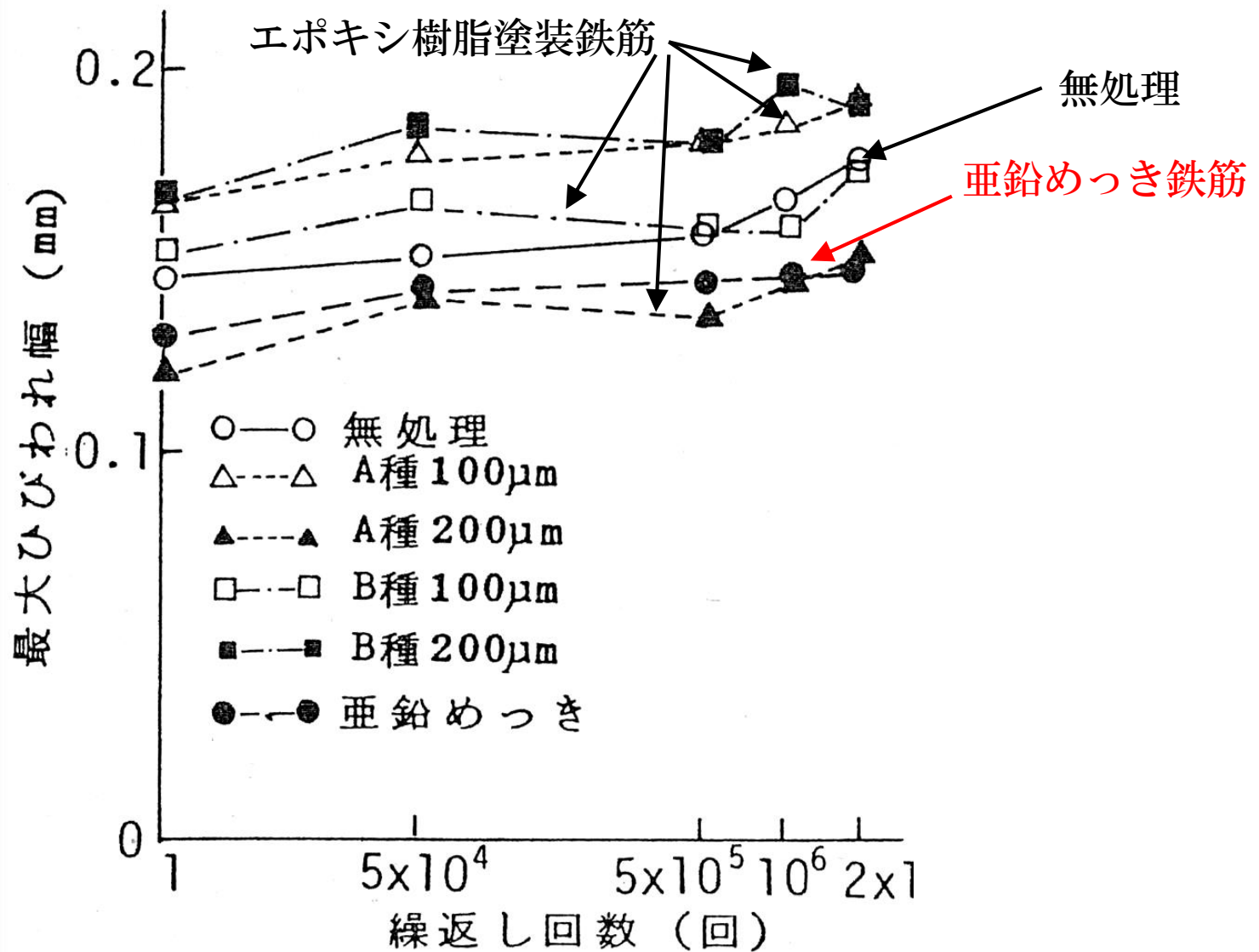
平均付着応力—すべり量曲線におけるばらつき



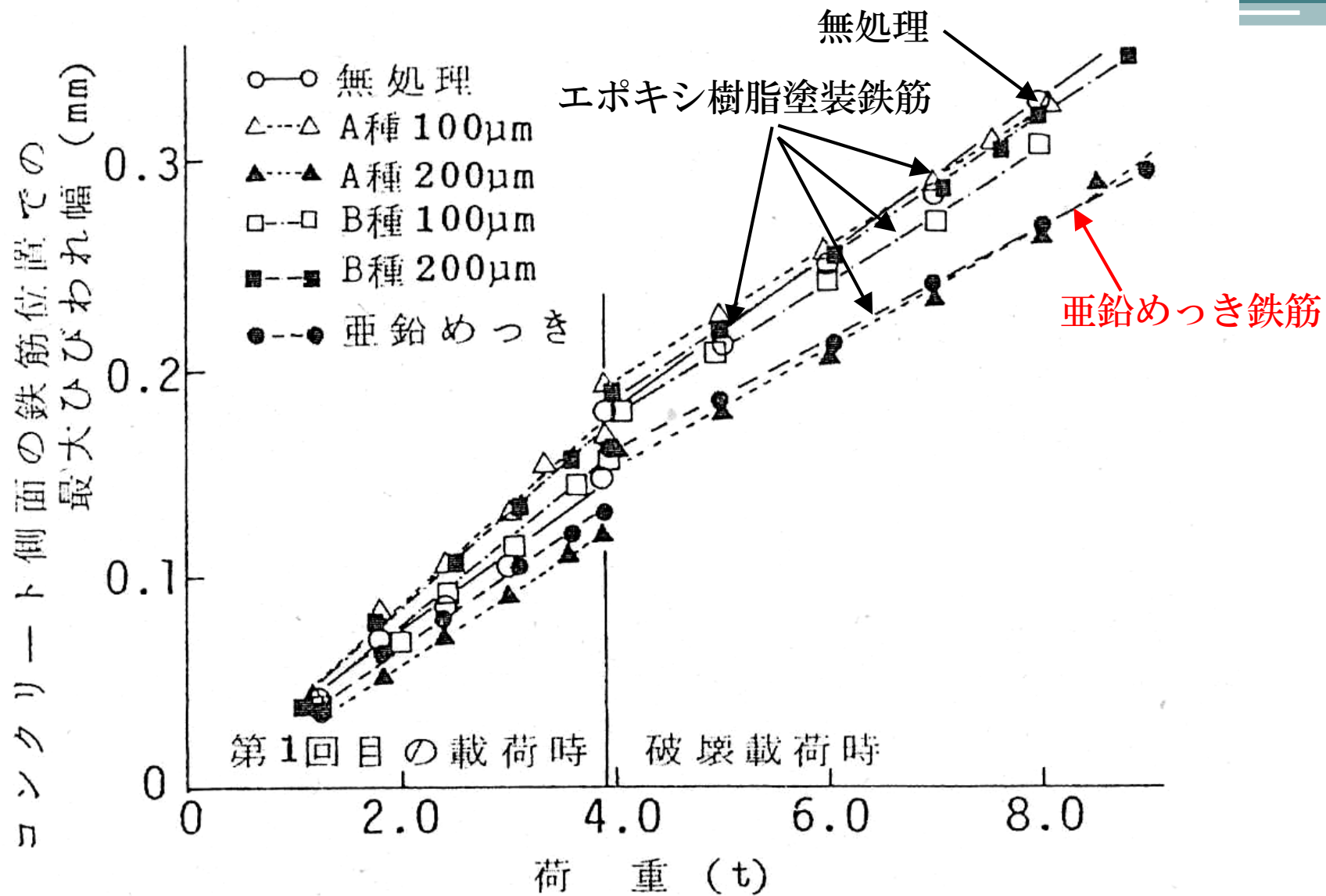
海洋暴露3年後の暴露供試体の荷重-たわみ関係の一例



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

現在の海洋コンクリート構造物における鉄筋防食対策は、  
**エポキシ塗装鉄筋・電気防食**、など



有効な鉄筋腐食対策，  
しかし、施工性やコストパフォーマンスには課題がある



一方，

高アルカリであるコンクリート中では亜鉛被膜は消耗  
且つ

塩化物イオンでも亜鉛被膜は消耗してしまうため  
過酷な塩害環境下での耐久性が保証されない



耐久性確保に対する考え方が「**仕様設計**」であったため  
鉄筋腐食対策から外される

# まとめ

2000年以降「**性能照査型設計**」の体系に変わる  
コンクリート中でめっき厚が減少したことで  
防食性が低下する場合でも



構造物の設計供用期間よりも十分に長ければ  
有効な防食工法と見なせる



さらに、

**亜鉛めっき鉄筋の利点**として

- ・鉄筋の曲げ加工に対する追従性を有する
- ・鉄素地との密着性に優れている
- ・施工中に傷ついても犠牲防食効果によりカバーできる

**取り扱いが非常に楽**

# 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

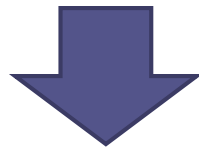


性能照査型の設計施工指針の制定は重要な要素

# まとめ



亜鉛めっき鉄筋を再度，コンクリート  
構造物の塩害対策の土俵に乗せること



鉄筋防食材料の選択肢を増やすこと



適材適所の材料選定に資することになる

# 鹿児島大学での取り組み

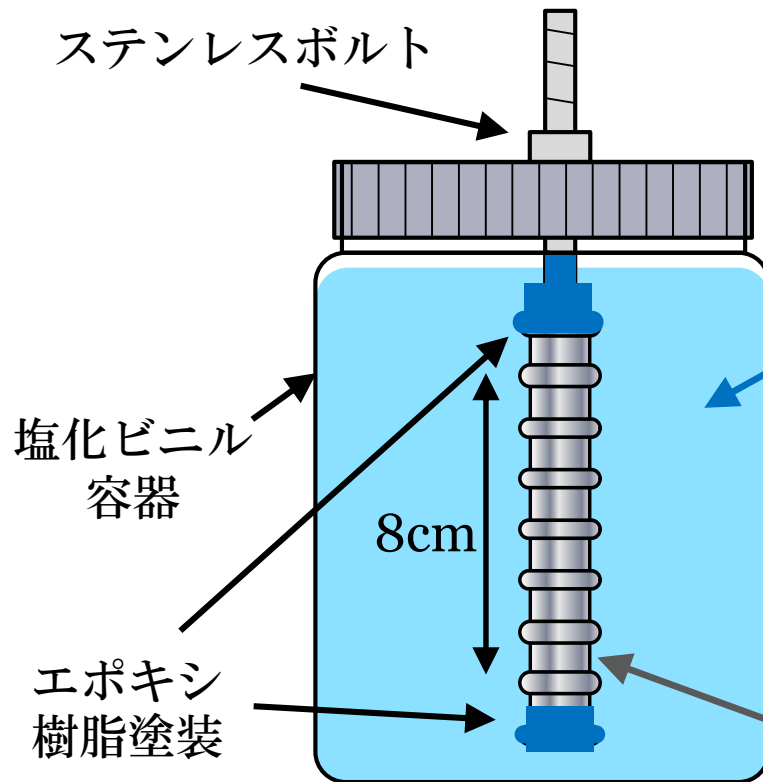
## (1) アルカリ溶液中における亜鉛めっき鉄筋の品質変化確認試験

- ①亜鉛めっき層の腐食に関する検討
- ②マクロセルの形成に関する検討

## (2) 塩害劣化促進環境下におけるコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の性能評価試験

## (3) 海洋暴露環境下におけるコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の性能評価試験

# 試験(1)の概要



| 溶液の種類         |                               |       |
|---------------|-------------------------------|-------|
| 溶液            | 塩化物イオン濃度                      |       |
|               | $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ | (g/ℓ) |
| 飽和水酸化カルシウム水溶液 | 0                             | 0     |
|               | 0.3                           | 0.555 |
|               | 0.6                           | 1.11  |
|               | 1.2                           | 2.22  |
| 蒸留水           | —                             | 0     |
|               | —                             | 0.555 |
|               | —                             | 1.11  |
|               | —                             | 2.22  |
| セメント上澄み水溶液    | 0                             |       |
|               | 0.3                           |       |
|               | 0.6                           |       |
|               | 1.2                           |       |

## 鉄筋の種類

亜鉛めっき鉄筋（膜厚100μm）  
亜鉛めっき鉄筋（膜厚150μm）  
普通鉄筋（比較用）

## 目的

- ・ アルカリ性環境における亜鉛めっきの減少速度を把握
- ・ 塩化物イオン濃度の違いによる腐食速度の変化を確認

# 試験(1)の概要

| 溶液の種類                 |             |       | 試験本数    |   |   |    |    |    |    |
|-----------------------|-------------|-------|---------|---|---|----|----|----|----|
| 溶液                    | 塩化物イオン濃度    |       | 浸漬期間(月) |   |   |    |    | 合計 |    |
|                       | [Cl-]/[OH-] | (g/l) | 3       | 6 | 9 | 12 | 予備 |    |    |
| 飽和水酸化<br>カルシウム<br>水溶液 | 0           | 0     | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 | 60 |
|                       | 0.3         | 0.555 | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|                       | 0.6         | 1.11  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|                       | 1.2         | 2.22  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
| 蒸留水                   | —           | 0     | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 | 60 |
|                       | —           | 0.555 | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|                       | —           | 1.11  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|                       | —           | 2.22  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
| セメント上澄み<br>水溶液        | 0           |       | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 | 60 |
|                       | 0.3         |       | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|                       | 0.6         |       | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|                       | 1.2         |       | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |

各溶液で60本×3種類＝計180本

## 鉄筋の種類

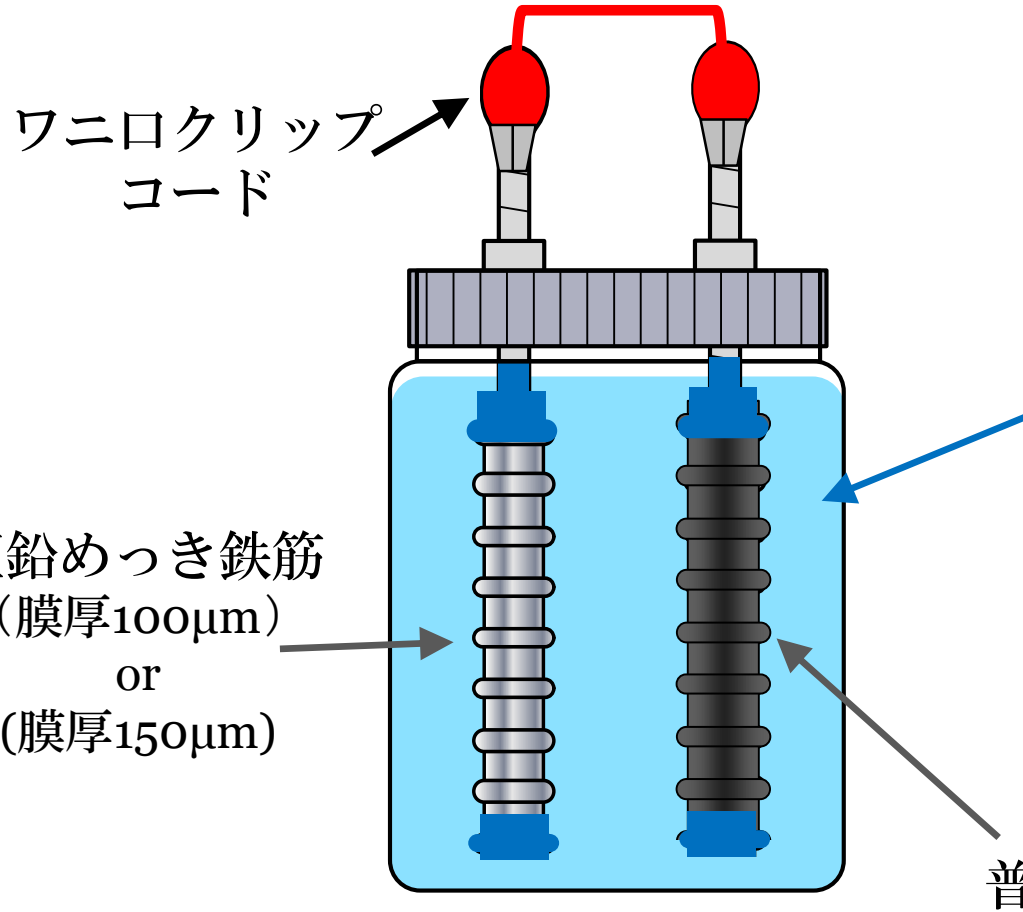
亜鉛めっき鉄筋（膜厚100μm） — 180本

亜鉛めっき鉄筋（膜厚150μm） — 180本

普通鉄筋（比較用） — 180本

= 計540本

# 試験(1)の概要



| 溶液の種類         |                               |       |
|---------------|-------------------------------|-------|
| 溶液            | 塩化物イオン濃度                      |       |
|               | $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ | (g/l) |
| 飽和水酸化カルシウム水溶液 | 0                             | 0     |
|               | 0.3                           | 0.555 |
|               | 0.6                           | 1.11  |
|               | 1.2                           | 2.22  |
| 蒸留水           | -                             | 0     |
|               | -                             | 0.555 |
|               | -                             | 1.11  |
|               | -                             | 2.22  |

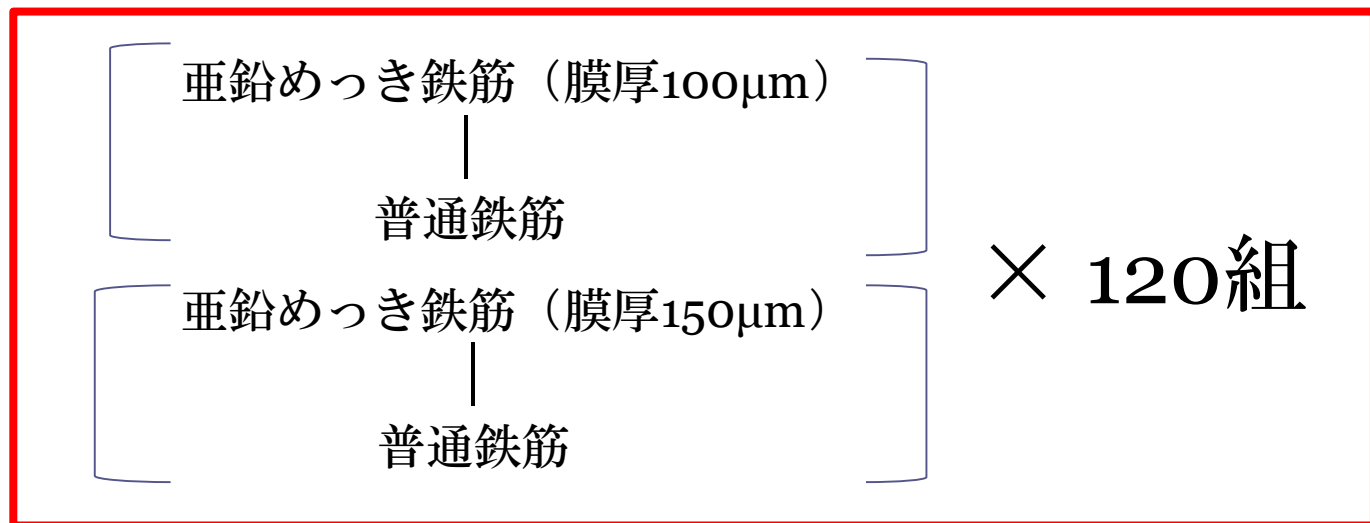
## 目的

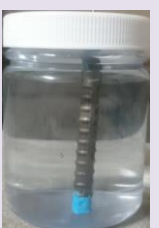
普通鉄筋と亜鉛めっき鉄筋が併用された場合のマクロセルの形成とそれによる亜鉛めっき層の減少について定量的に評価

# 試験(1)の概要

| 溶液の種類         |             |       | 試験本数    |   |   |    |    |    |    |
|---------------|-------------|-------|---------|---|---|----|----|----|----|
| 溶液            | 塩化物イオン濃度    |       | 浸漬期間(月) |   |   |    |    | 合計 |    |
|               | [Cl-]/[OH-] | (g/l) | 3       | 6 | 9 | 12 | 予備 |    |    |
| 飽和水酸化カルシウム水溶液 | 0           | 0     | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 | 60 |
|               | 0.3         | 0.555 | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|               | 0.6         | 1.11  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|               | 1.2         | 2.22  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
| 蒸留水           | -           | 0     | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 | 60 |
|               | -           | 0.555 | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|               | -           | 1.11  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |
|               | -           | 2.22  | 3       | 3 | 3 | 3  | 3  | 15 |    |

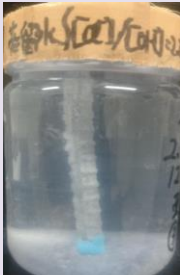
各溶液で60本×2種類の溶液＝計120本



|         | NaCl濃度0<br>飽和水酸化<br>カルシウム                                                         | NaCl濃度2.22<br>飽和水酸化<br>カルシウム                                                      | NaCl濃度0<br>蒸留水                                                                    | NaCl濃度2.22<br>蒸留水                                                                  |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 亜鉛めっき鉄筋 |  |  |  |  |
| 普通鉄筋    |  |  |  |  |

腐食状況外観観察結果  
(浸漬直後)

腐食状況外観観察結果  
(112日後)

|         | NaCl濃度0<br>飽和水酸化<br>カルシウム                                                            | NaCl濃度2.22<br>飽和水酸化<br>カルシウム                                                          | NaCl濃度0<br>蒸留水                                                                        | NaCl濃度2.22<br>蒸留水                                                                     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 亜鉛めっき鉄筋 |   |   |   |   |
| 普通鉄筋    |  |  |  |  |

# 鹿児島大学での取り組み

## (1) アルカリ溶液中における亜鉛めっき鉄筋の品質変化確認試験

- ①亜鉛めっき層の腐食に関する検討
- ②マクロセルの形成に関する検討

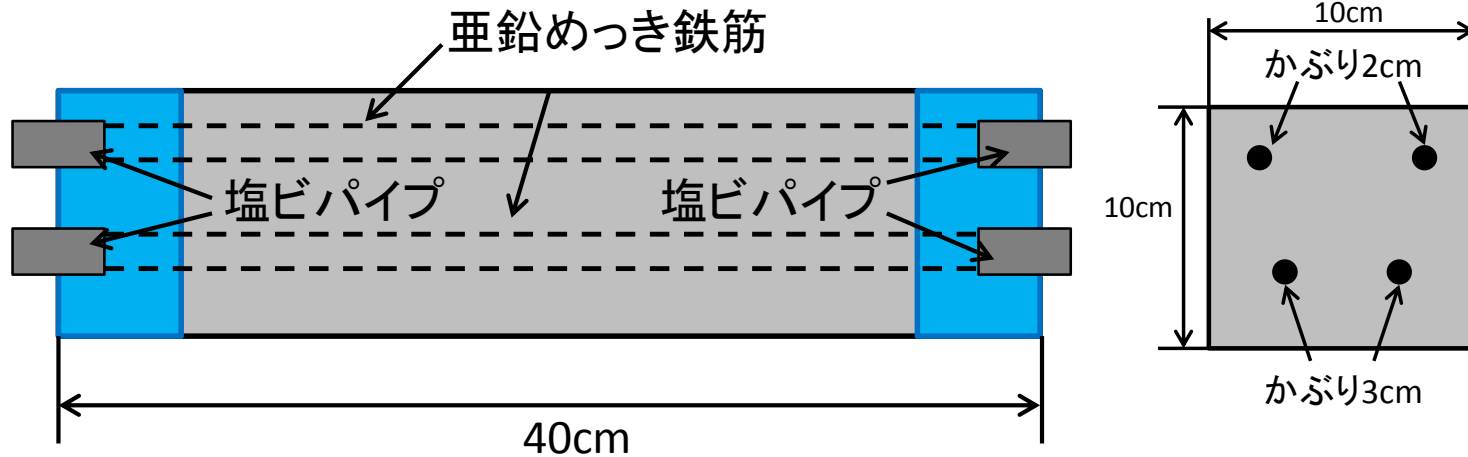
## (2) 塩害劣化促進環境下におけるコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の性能評価試験

## (3) 海洋暴露環境下におけるコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の性能評価試験

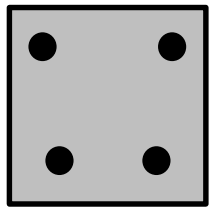
# 試験(2)概要

## 目的

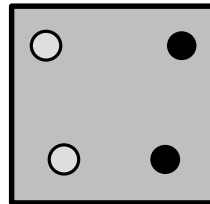
劣化促進環境下において、亜鉛めっき鉄筋のコンクリート中での防食性を早期に確認することを目的とする。



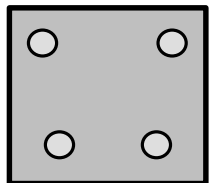
( \* 水セメント比 : 50%, セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント )



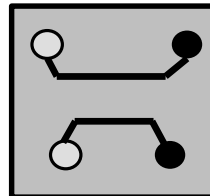
タイプ1:  
普通鉄筋のみ



タイプ3:  
普通鉄筋+亜鉛めっき鉄筋  
(接続なし)



タイプ2:  
亜鉛めっき鉄筋のみ



タイプ4:  
普通鉄筋+亜鉛めっき鉄筋  
(接続あり)

# 試験(2)概要

## タイプ1

普通鉄筋のみ

## タイプ2

亜鉛めっき鉄筋  
のみ

## タイプ3

普通鉄筋  
+亜鉛めっき鉄筋  
接続なし

## タイプ4

普通鉄筋  
+亜鉛めっき鉄筋  
接続あり

**\*タイプ1, タイプ2について(タイプ2は膜厚100  $\mu$ mのみ)**

| 促進試験条件     | 浸漬サイクル数 |    |    |    |    | 合計<br>供試体数 |    |
|------------|---------|----|----|----|----|------------|----|
|            | 10      | 20 | 30 | 40 | 予備 |            |    |
| 塩水浸漬+中性化環境 | 2       | 2  | 2  | 2  | 4  | 12         | 24 |
| 塩水浸漬+気中    | 2       | 2  | 2  | 2  | 4  | 12         |    |

**\*タイプ3, タイプ4について**

| 促進試験条件     | 亜鉛めっき鉄筋の<br>塗膜厚( $\mu$ m) | 浸漬サイクル数 |    |    |    |    | 合計<br>供試体数 |    |
|------------|---------------------------|---------|----|----|----|----|------------|----|
|            |                           | 10      | 20 | 30 | 40 | 予備 |            |    |
| 塩水浸漬+中性化環境 | 100                       | 2       | 2  | 2  | 2  | 4  | 12         | 48 |
|            | 150                       | 2       | 2  | 2  | 2  | 4  | 12         |    |
| 塩水浸漬+気中    | 100                       | 2       | 2  | 2  | 2  | 4  | 12         |    |
|            | 150                       | 2       | 2  | 2  | 2  | 4  | 12         |    |

(24体×2タイプ) + (48体×2タイプ) = 計144体



亜鉛めっき鉄筋



普通鉄筋

(a) 鉄筋の型枠への設置状況



(b) コンクリート打設状況



(c) 供試体の状況

**塩害劣化促進試験に用いる亜鉛めっき鉄筋供試体の作製状況**

# 試験(2)概要



環境シミュレーション装置

## 試験条件

| 乾湿繰り返し環境条件 | サイクル      | 繰り返しサイクル数      | 環境温度および湿度        |
|------------|-----------|----------------|------------------|
| 塩水浸漬+中性化環境 | 3.5日+7.0日 | 10, 20, 30, 40 | 30°C/RH, 70~100% |
| 塩水浸漬+気中    | 3.5日+7.0日 | 10, 20, 30, 40 | 30°C/RH, 70~100% |

# 鹿児島大学での取り組み

## (1) アルカリ溶液中における亜鉛めっき鉄筋の品質変化確認試験

- ①亜鉛めっき層の腐食に関する検討
- ②マクロセルの形成に関する検討

## (2) 塩害劣化促進環境下におけるコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の性能評価試験

## (3) 海洋暴露環境下におけるコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋の性能評価試験

# 試験(3)概要

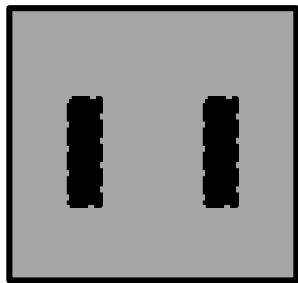
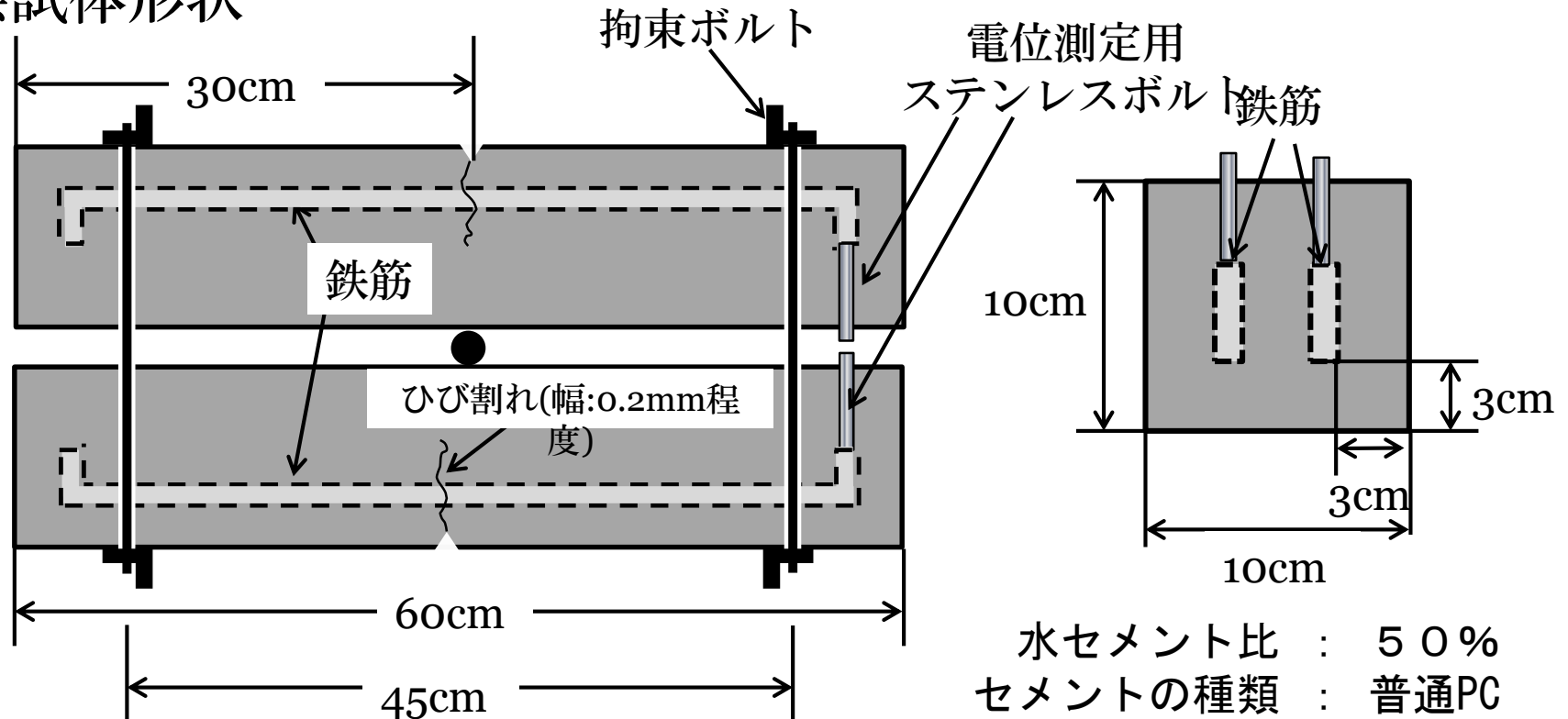


## 目的

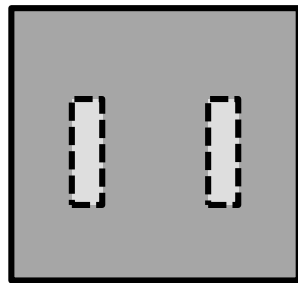
鹿児島大学が管理する海洋暴露実験場の干満帯あるいは海上大気部に、**ひび割れを導入した亜鉛めっき鉄筋入り供試体**を最大10年間暴露し、耐久性を確認する。

# 試験(3)概要

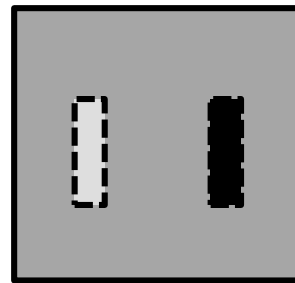
## 供試体形状



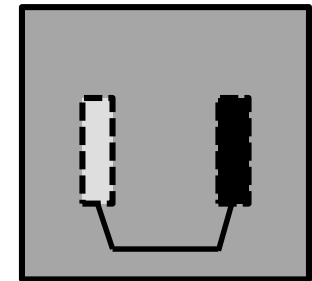
タイプ1:  
普通鉄筋のみ



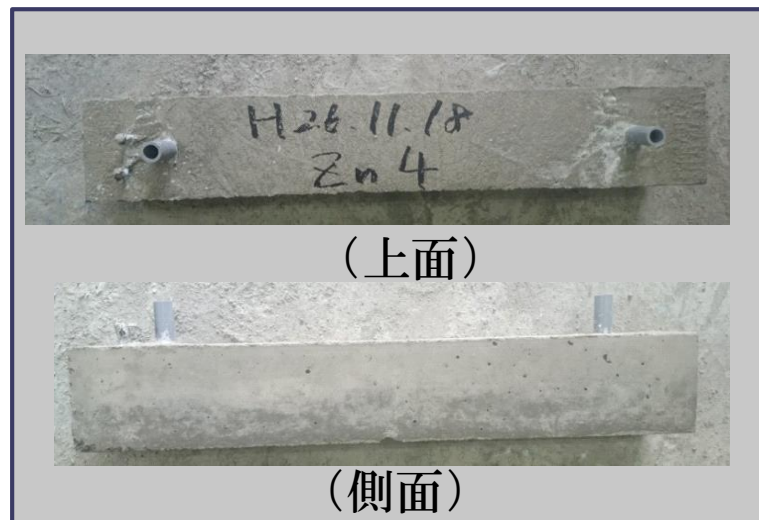
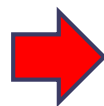
タイプ2:  
亜鉛めっき鉄筋のみ



タイプ3:  
普通鉄筋+  
亜鉛めっき鉄筋(接続なし)



タイプ4:  
普通鉄筋+亜鉛めっき鉄筋  
(接続あり)



供試体の作製状況



ひび割れ拘束供試体の外観



# 試験(3)概要

## タイプ1

普通鉄筋のみ

## タイプ2

亜鉛めっき鉄筋  
のみ

## タイプ3

普通鉄筋  
+亜鉛めっき鉄筋  
接続なし

## タイプ4

普通鉄筋  
+亜鉛めっき鉄筋  
接続あり

### タイプ1について

| 曝露条件  | 曝露年数(年) |   |   |    |    | 合計<br>供試体数 |    |
|-------|---------|---|---|----|----|------------|----|
|       | 1       | 3 | 5 | 10 | 予備 |            |    |
| 干満帯部  | 2       | 2 | 2 | 2  | 4  | 12         | 24 |
| 海上大気中 | 2       | 2 | 2 | 2  | 4  | 12         |    |

### タイプ2, 3, 4について

| 曝露条件  | 亜鉛めっき鉄筋の<br>塗膜厚(μm) | 曝露年数(年) |   |   |    |    | 合計<br>供試体数 |    |
|-------|---------------------|---------|---|---|----|----|------------|----|
|       |                     | 1       | 3 | 5 | 10 | 予備 |            |    |
| 干満帯部  | 100                 | 2       | 2 | 2 | 2  | 4  | 12         | 48 |
|       | 150                 | 2       | 2 | 2 | 2  | 4  | 12         |    |
| 海上大気中 | 100                 | 2       | 2 | 2 | 2  | 4  | 12         |    |
|       | 150                 | 2       | 2 | 2 | 2  | 4  | 12         |    |

$$(24\text{体} \times 1\text{タイプ}) + (48\text{体} \times 3\text{タイプ}) = \text{計}168\text{体}$$

# 最後にもう一言

今後、コンクリート構造物の塩害対策工法を適材適所に適用していくためには、コスト評価も含めた構造物の総合的なライフサイクルマネジメントを行っていくことは不可欠



防食効果の高い技術は、総じてイニシャルコストが高い。しかし、構造物のライフサイクルコストで考えると、十分に安価と見なされるケースも多い



構造物の長寿命化には、構造物の状態を客観的な指標で評価し、その中長期的な状態を予測し、限られた予算の中で、構造物を計画的にかつ効率的に管理することが求められる。



各種防食技術の寿命予測評価ならびにコスト評価を横並びで検討できるシステムを早急に構築することが求められる。

ご清聴、感謝申し上げます。

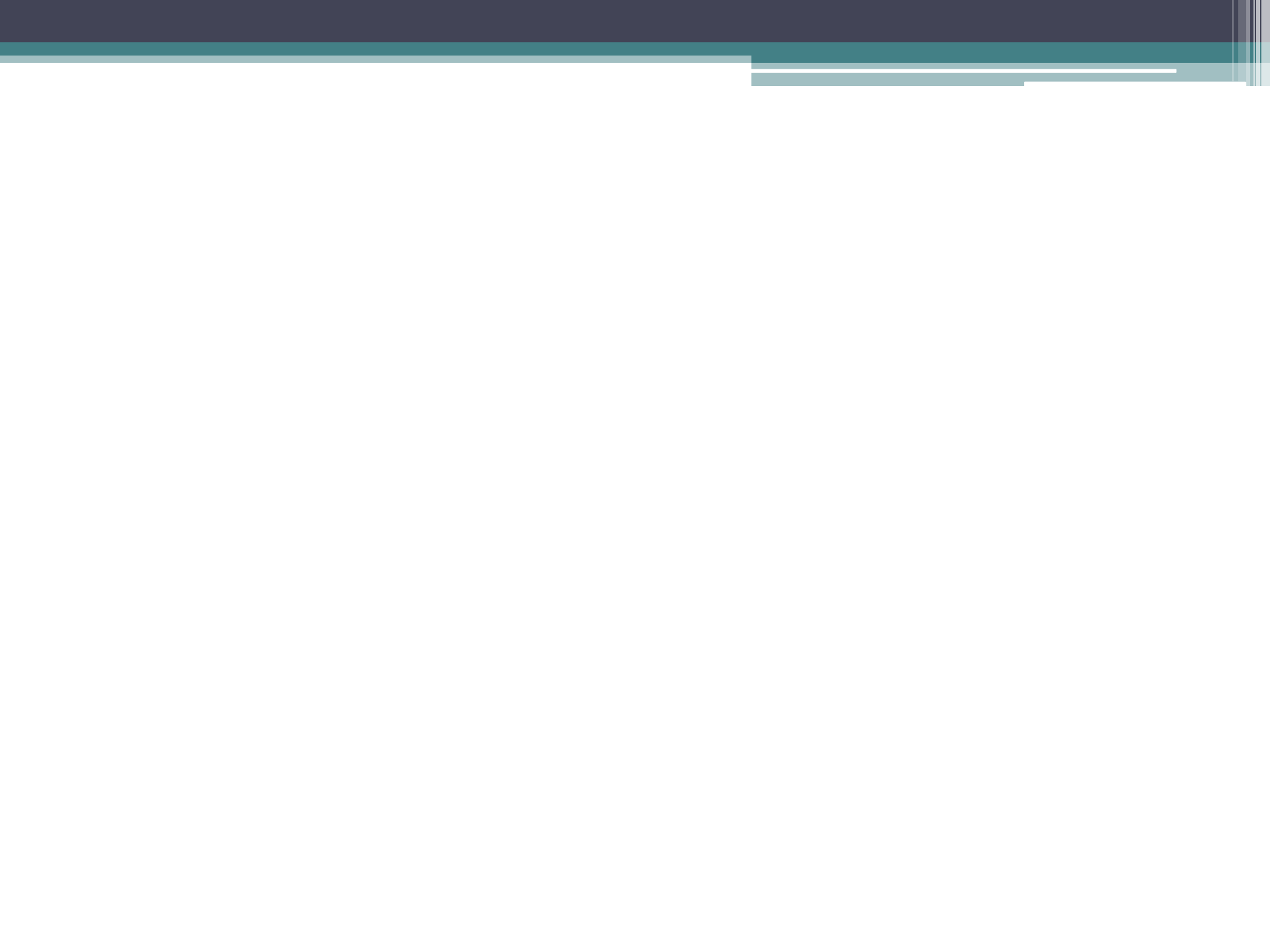


表4.13 暴露供試体の最大耐力

(a) かぶり厚 2 cm の場合

| 防食被覆の種類 |             | W/C<br>(%) | 最大荷重<br>(t) | W/C=60% 無処理<br>のものに対する比 |
|---------|-------------|------------|-------------|-------------------------|
| 無       | 処 理         | 50         | 2.94        | 1.14                    |
| 無       | 処 理         | 60         | 2.54        | 1.00                    |
| 無       | 処 理         | 70         | 2.47        | 0.96                    |
| 亜鉛めっき   |             | 60         | 3.00        | 1.17                    |
| エポキシ    | 100 $\mu$ m | 60         | 2.90        | 1.13                    |
|         | 200 $\mu$ m | 60         | 2.86        | 1.11                    |

(b) かぶり厚 3 cm の場合

| 防食被覆の種類 |             | W/C<br>(%) | 最大荷重<br>(t) | W/C=60% 無処理<br>のものに対する比 |
|---------|-------------|------------|-------------|-------------------------|
| 無       | 処 理         | 60         | 2.30        | 1.00                    |
| 亜鉛めっき   |             | 60         | 2.80        | 1.22                    |
| エポキシ    | 100 $\mu$ m | 60         | 2.54        | 1.11                    |
|         | 200 $\mu$ m | 60         | 2.41        | 1.05                    |

表4.7 コンクリートの配合

| W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単 位 量 (kg/m <sup>2</sup> ) |     |     |       |
|------------|------------|----------------------------|-----|-----|-------|
|            |            | W                          | C   | S   | G     |
| 50         | 45.5       | 196                        | 392 | 808 | 997   |
| 60         | 47         | 196                        | 327 | 859 | 999   |
| 70         | 48         | 196                        | 280 | 896 | 1,000 |

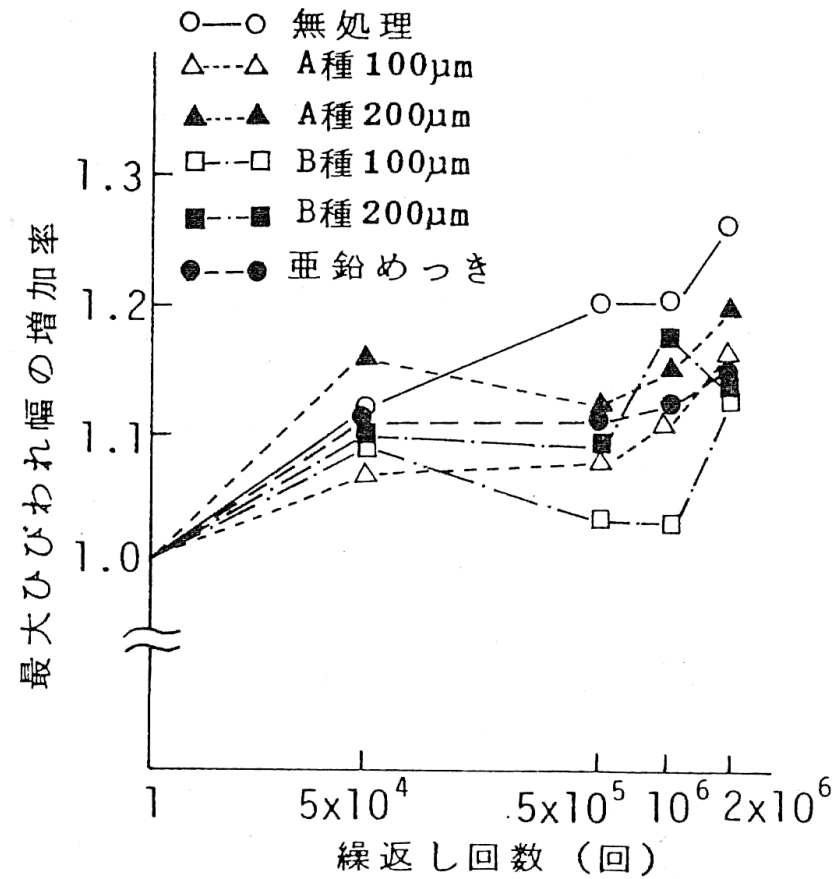


図4.12 疲労試験時の最大ひびわれ幅の増加率

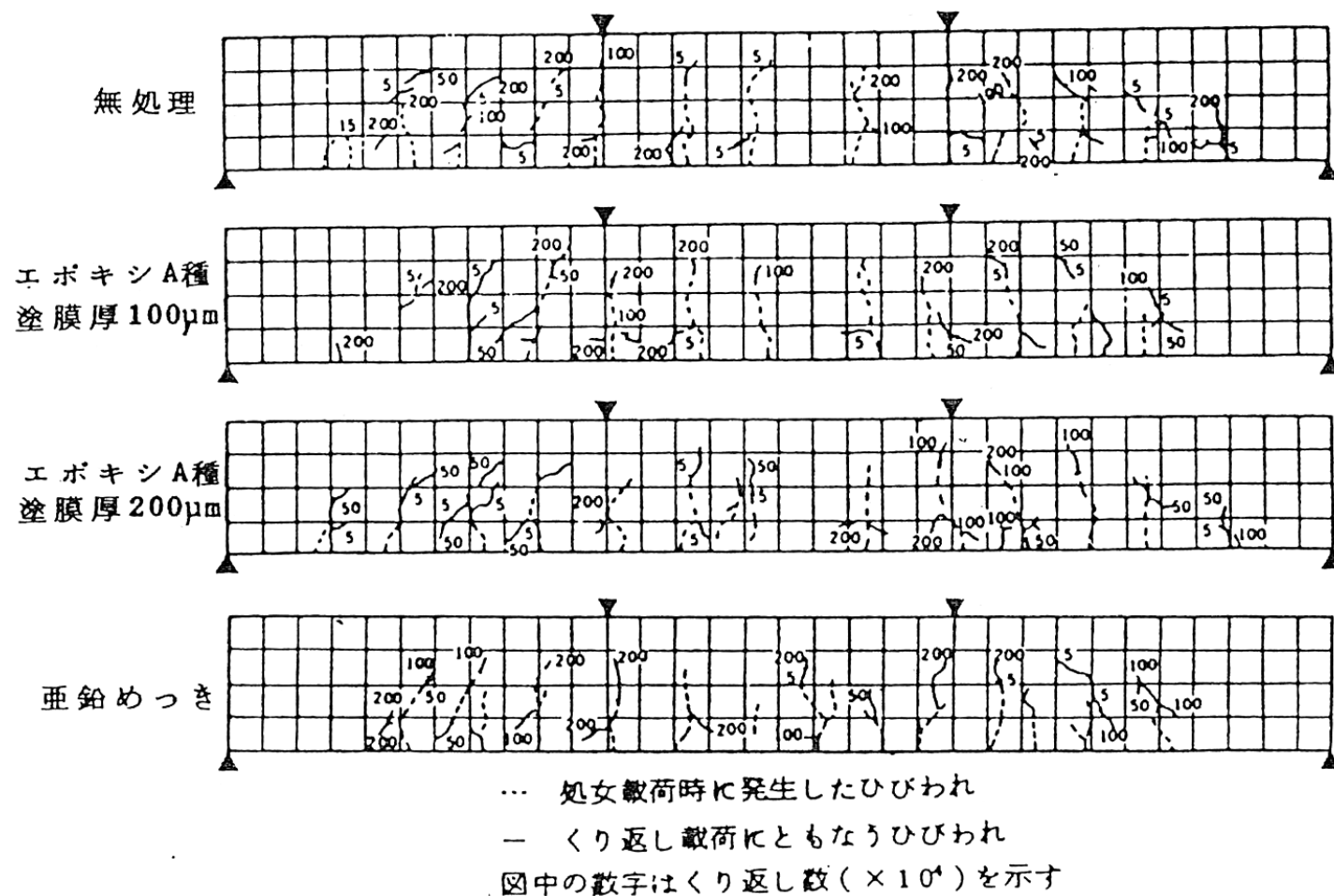


図4.13 200万回の繰返し載荷直後のひびわれ発生状況

表4.5 静的曲げ載荷試験結果

| 防食被覆の種類          |     | 塗 膜 厚<br>( $\mu\text{m}$ ) | ひびわれ<br>発生荷重<br>(t) | 設 計 荷 重 時 の 曲 げ 性 状 |               |               |               |               |               | 破壊モーメント        |                                                             |
|------------------|-----|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
|                  |     |                            |                     | 最大ひびわれ間隔            |               | 最大ひびわれ幅       |               | スパン中央のたわみ     |               | 実 測 値<br>(t・m) | 計算値と<br>の比<br>M <sub>um</sub> /M <sub>uc</sub> <sup>*</sup> |
|                  |     |                            |                     | 測 定 値<br>(cm)       | 無処理の場<br>合との比 | 測 定 値<br>(mm) | 無処理の場<br>合との比 | 測 定 値<br>(mm) | 無処理の場<br>合との比 |                |                                                             |
| 無 処 理            |     | —                          | 0.9                 | 12.1                | 1             | 0.178         | 1             | 2.53          | 1             | 2.82           | 1.23                                                        |
| エ<br>ポ<br>キ<br>シ | A 種 | 100                        | 0.7                 | 16.3                | 1.34          | 0.200         | 1.12          | 2.53          | 1.00          | 2.86           | 1.25                                                        |
|                  |     | 200                        | 0.6                 | 16.0                | 1.31          | 0.195         | 1.10          | 2.71          | 1.08          | 2.84           | 1.23                                                        |
|                  | B 種 | 100                        | 0.7                 | 16.3                | 1.34          | 0.193         | 1.08          | 2.73          | 1.08          | 2.80           | 1.22                                                        |
|                  |     | 200                        | 0.7                 | 13.7                | 1.12          | 0.183         | 1.03          | 2.70          | 1.07          | 2.83           | 1.23                                                        |
| 亜鉛めっき            |     | 150                        | 0.9                 | 16.7                | 1.37          | 0.213         | 1.20          | 2.48          | 0.98          | 2.87           | 1.25                                                        |

$$\bullet M_{uc} = p \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{p \cdot \sigma_{sy}}{0.85 \sigma_{cu}} \right) \cdot b \cdot d^2 \cdot \sigma_{sy} \text{ として求めた.}$$

ここで、p：鉄筋比、 $\sigma_{sy}$ ：鉄筋の降伏応力度、 $\sigma_{cu}$ ：コンクリートの圧縮強度、b：供試体幅、d：有効高さ

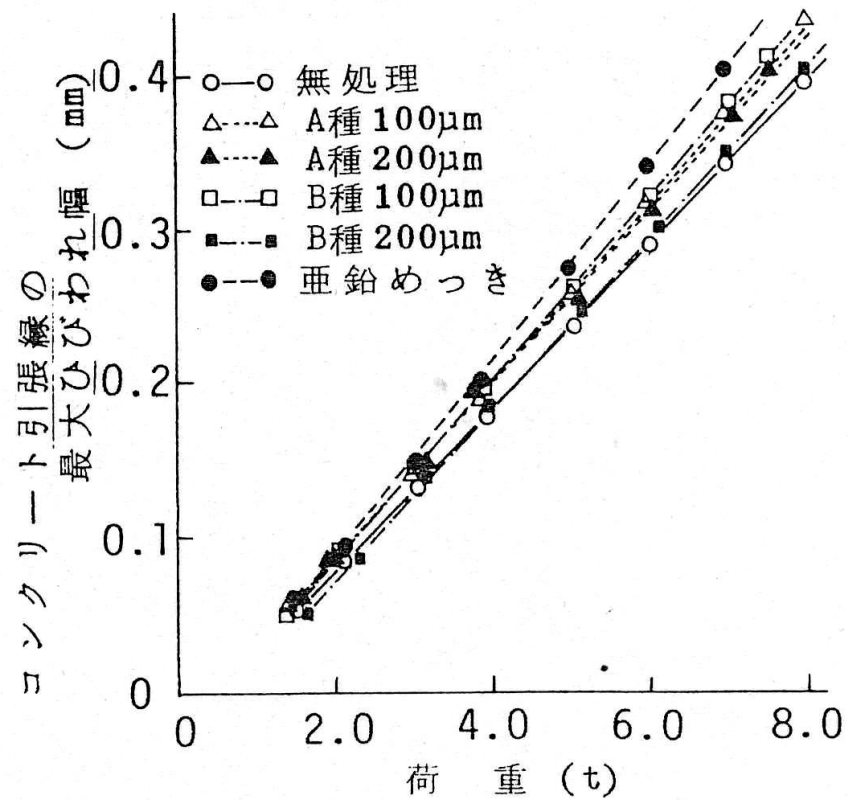


図4.8 最大ひびわれ幅と荷重の関係（静的載荷試験）

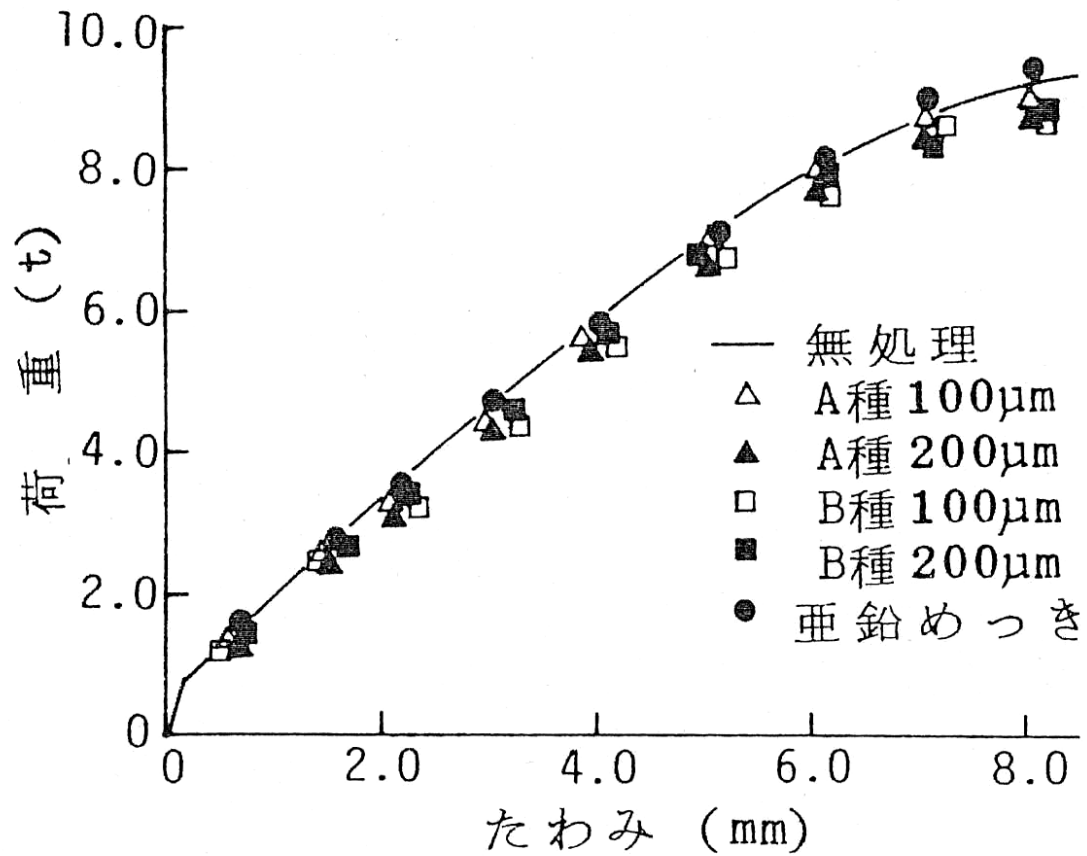
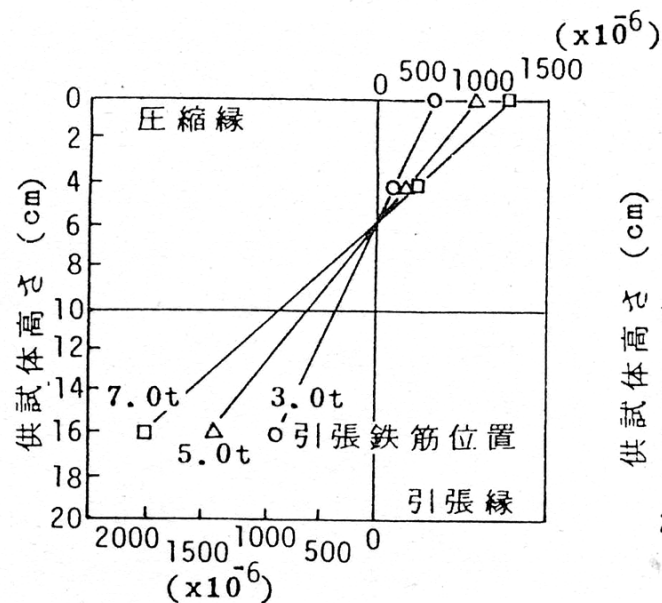
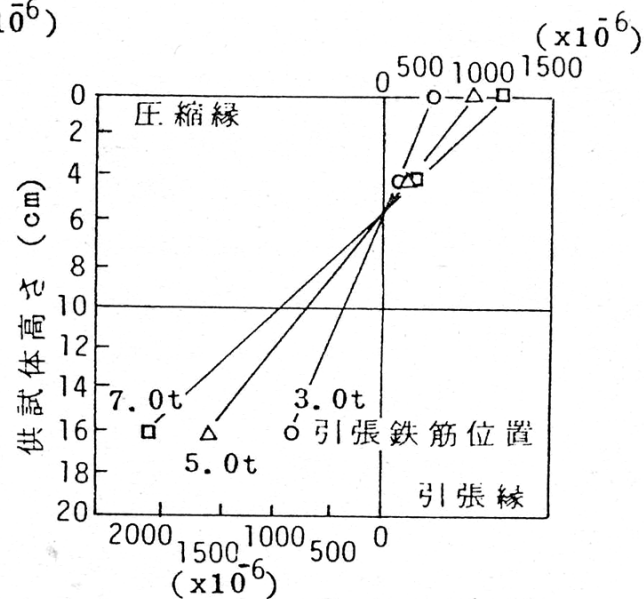


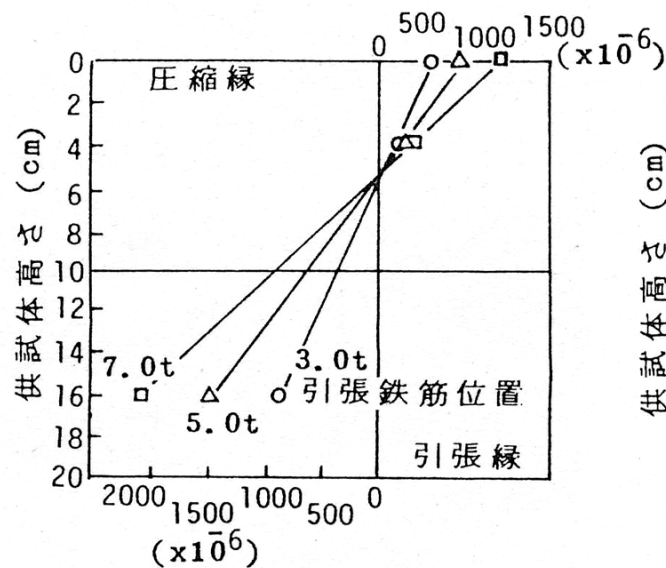
図4.9 梁中央部のたわみと荷重の関係  
(静的載荷試験)



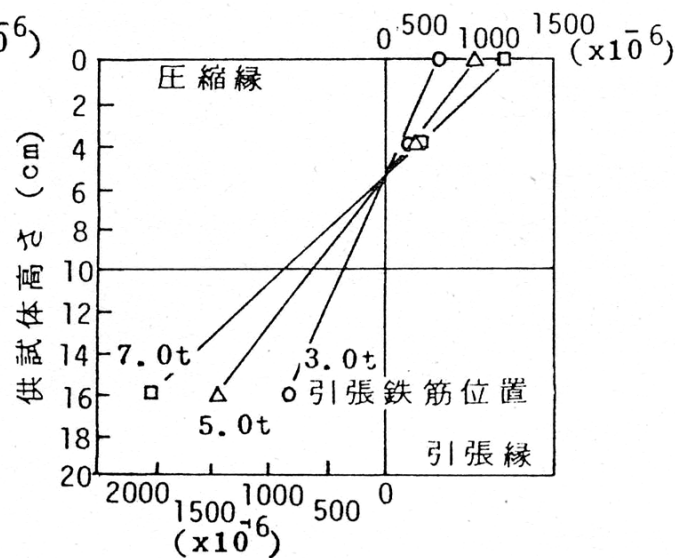
a) 無処理鉄筋



b) エポキシA種, 塗膜厚100 $\mu\text{m}$



c) エポキシA種, 塗膜厚200 $\mu\text{m}$



d) 垂鉛めっき鉄筋

図4.7 梁中央部のひずみ分布の一例

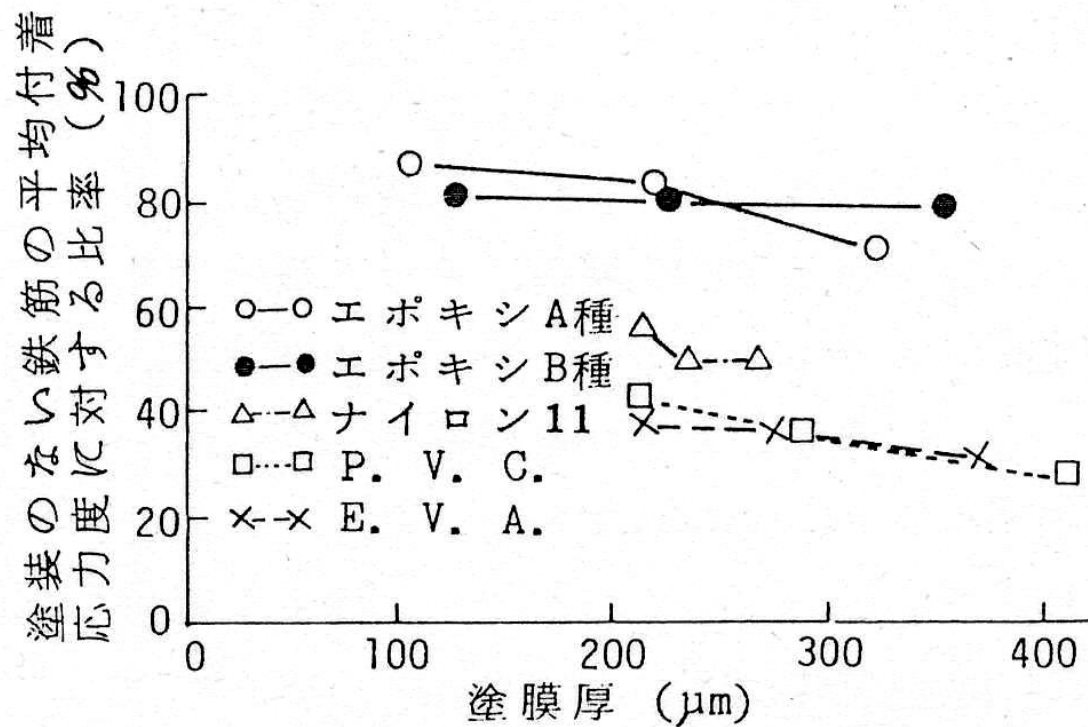
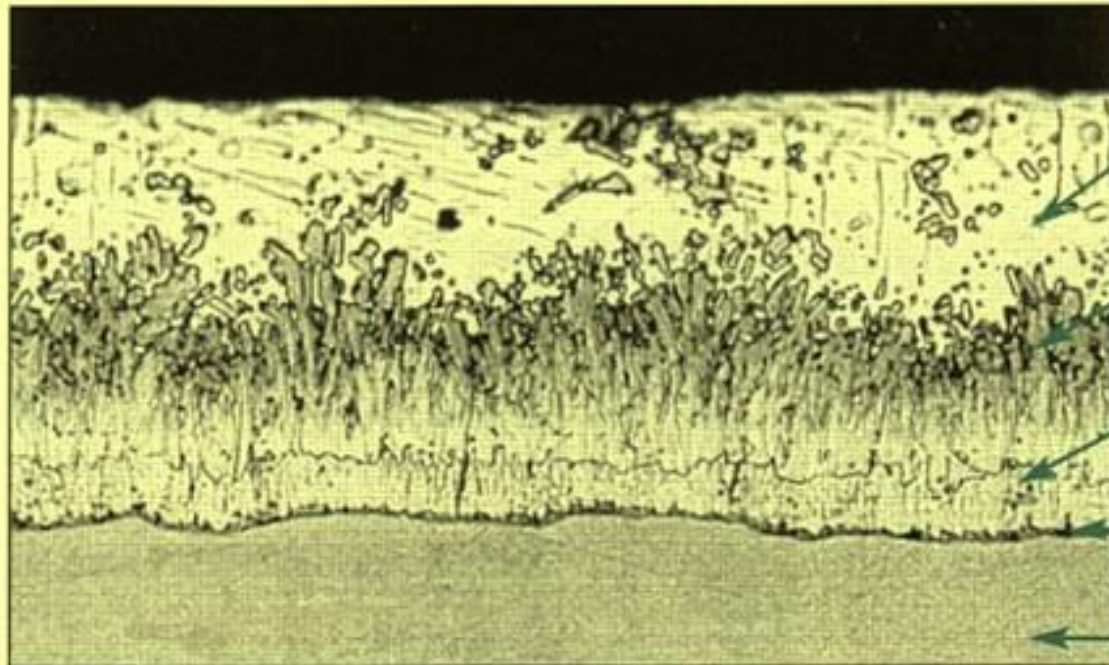


図4.4 滑り量0.032mmにおける平均付着応力度比と塗膜厚との関係



**Eta**

(100% Zn)

70 DPN Hardness

**Zeta**

(94% Zn 6% Fe)

179 DPN Hardness

**Delta**

(90% Zn 10% Fe)

244 DPN Hardness

**Gamma**

(75% Zn 25% Fe)

250 DPN Hardness

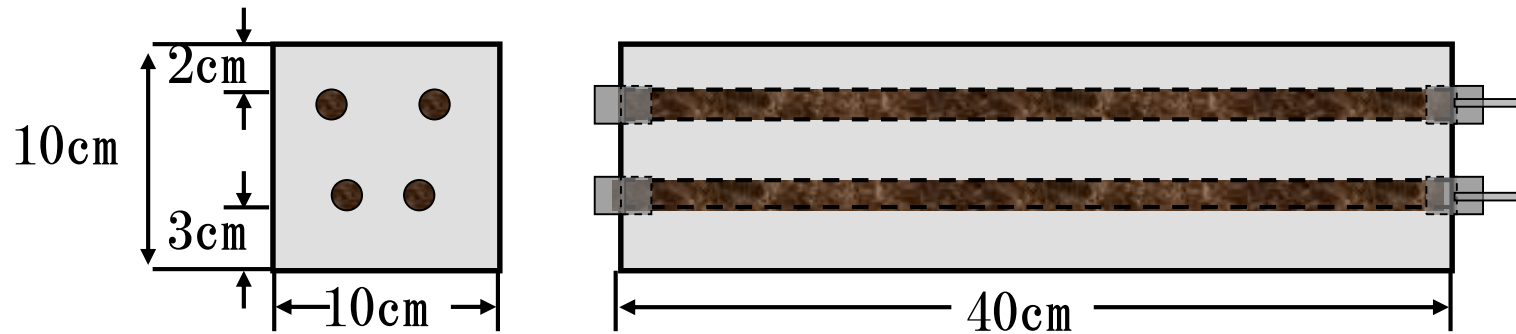
**Base Steel**

159 DPN Hardness

# 供試体概要

鉄筋腐食性

10×10×40cm角柱供試体

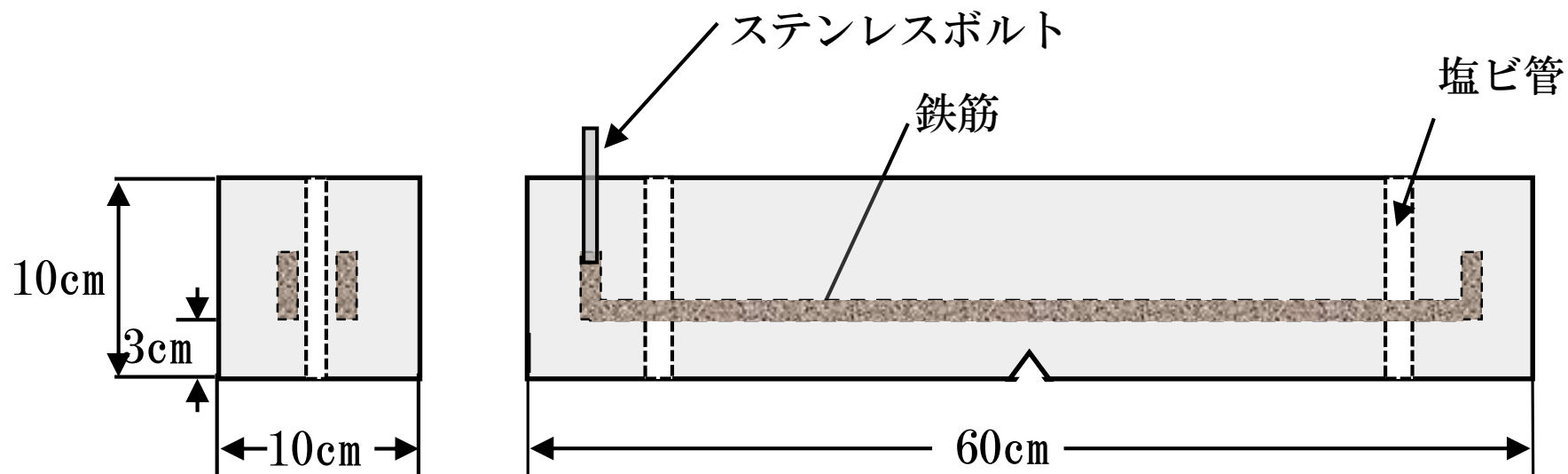


ひび割れなし時の  
鉄筋腐食性について  
検討

# 供試体概要

鉄筋腐食性

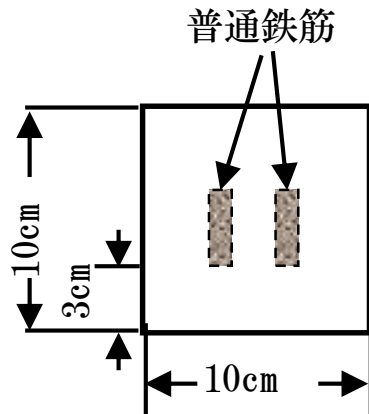
10×10×60cm角柱供試体



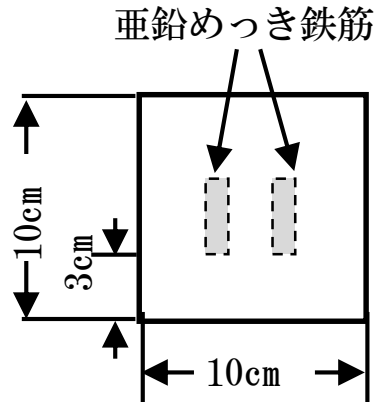
# 供試体概要

## 鉄筋腐食性

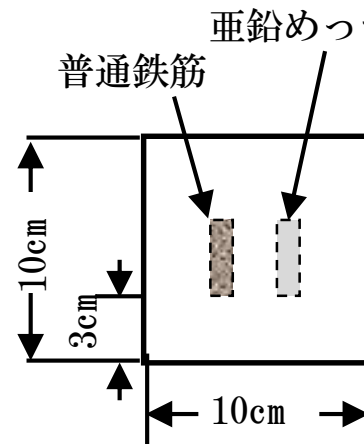
### 10×10×60cm角柱供試体



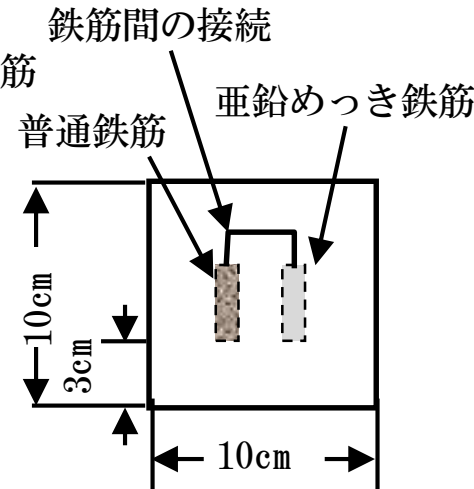
タイプ1  
普通鉄筋のみ



タイプ2  
亜鉛めっき鉄筋のみ



タイプ3  
普通鉄筋＋  
亜鉛めっき鉄筋  
(接続なし)



タイプ4  
普通鉄筋＋  
亜鉛めっき鉄筋  
(接続あり)



10×10×60cm 供試体の拘束図

電位測定用  
ステンレスボルト

## 拘束用ボルト

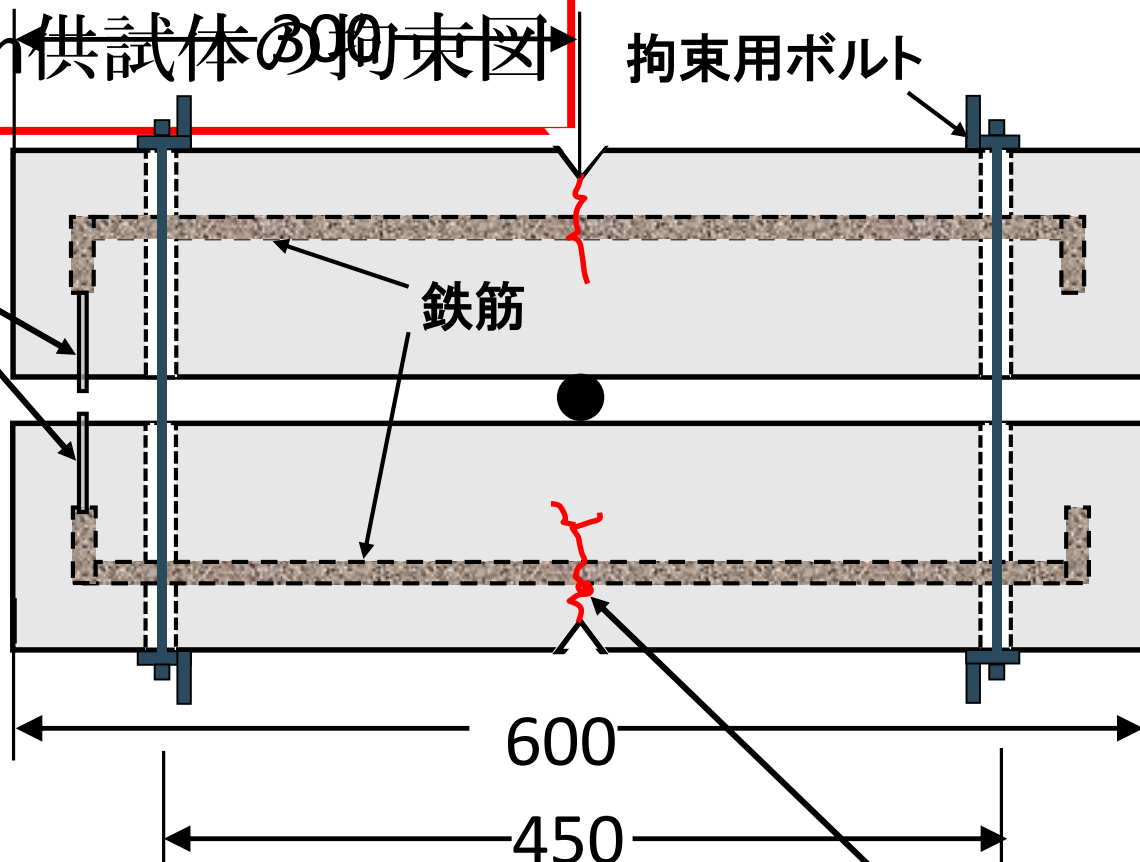
# 鉄筋

時の  
て検討

600-

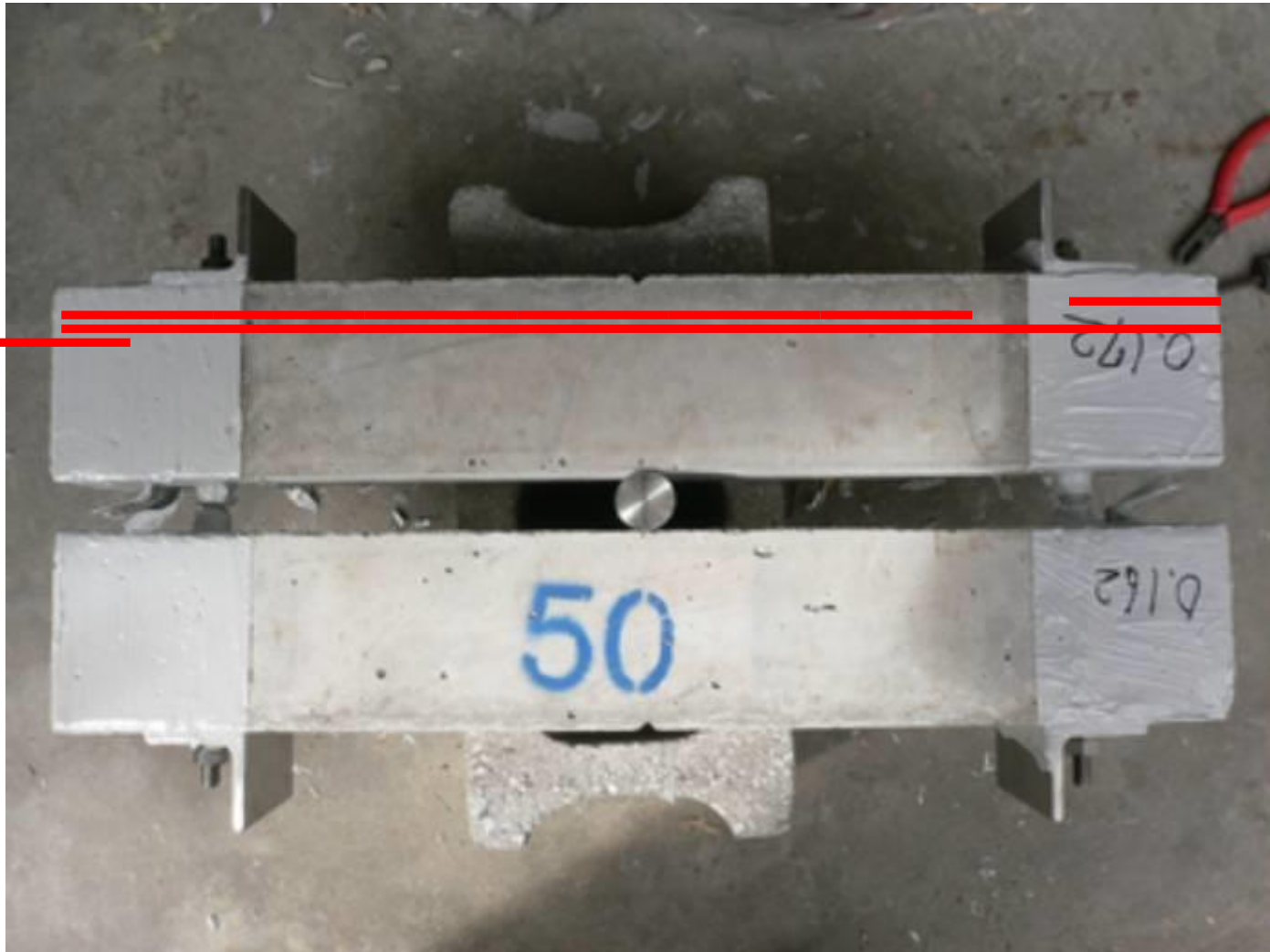
-450

ひび割れ(幅:0.2mm程度)



# 供試体概要

10×10×60cm供試体の拘束終了後の写真



# 自然電位

コンクリート中の鉄筋腐食  
を非破壊的に調査できる

| 自然電位 (E)<br>(mV vs<br>CSE) | 鉄筋腐食の可能性          |
|----------------------------|-------------------|
| $E \leq -350$              | 90%以上の確率で<br>腐食あり |

暴露を開始してから  
2ヶ月おきに測定

