

コンクリート構造物の耐久性、 補修・補強技術

平成24年12月6日

長岡技術科学大学

丸 山 久 一

内 容

- 1．コンクリート構造物の耐久性
 - 2．コンクリート構造物の塩害
 - 3．塩害を受けたコンクリート構造物の
耐荷性能
 - 4．補修・補強方法
 - 5．技術の現状と課題
 - 6．長寿命化へのシナリオ
-

1. コンクリート構造物の耐久性

1.1 コンクリートは何年もつか

1.2 コンクリート構造物の劣化要因

1.1 コンクリートは何年もつか

(A) ローマコンクリート

土木学会：古代ローマコンクリート、コンクリートライブラリー131

(B) 小樽港のコンクリート

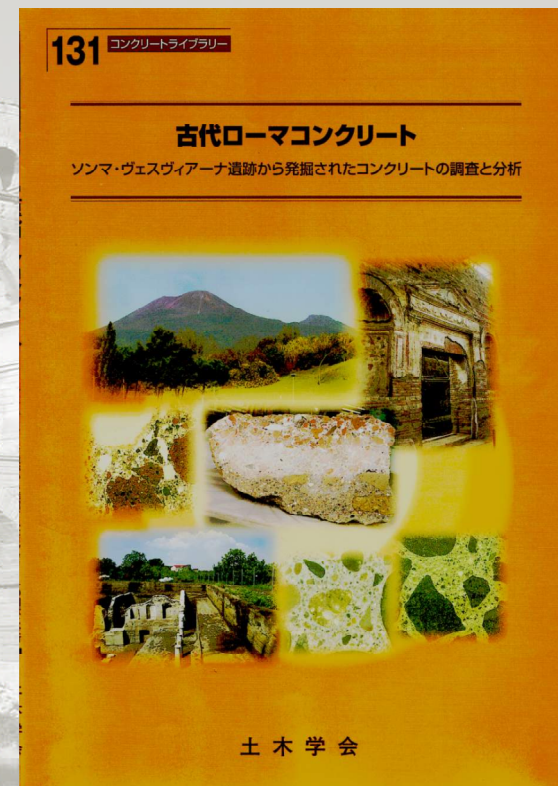
コンクリートの長期耐久性、技報堂出版

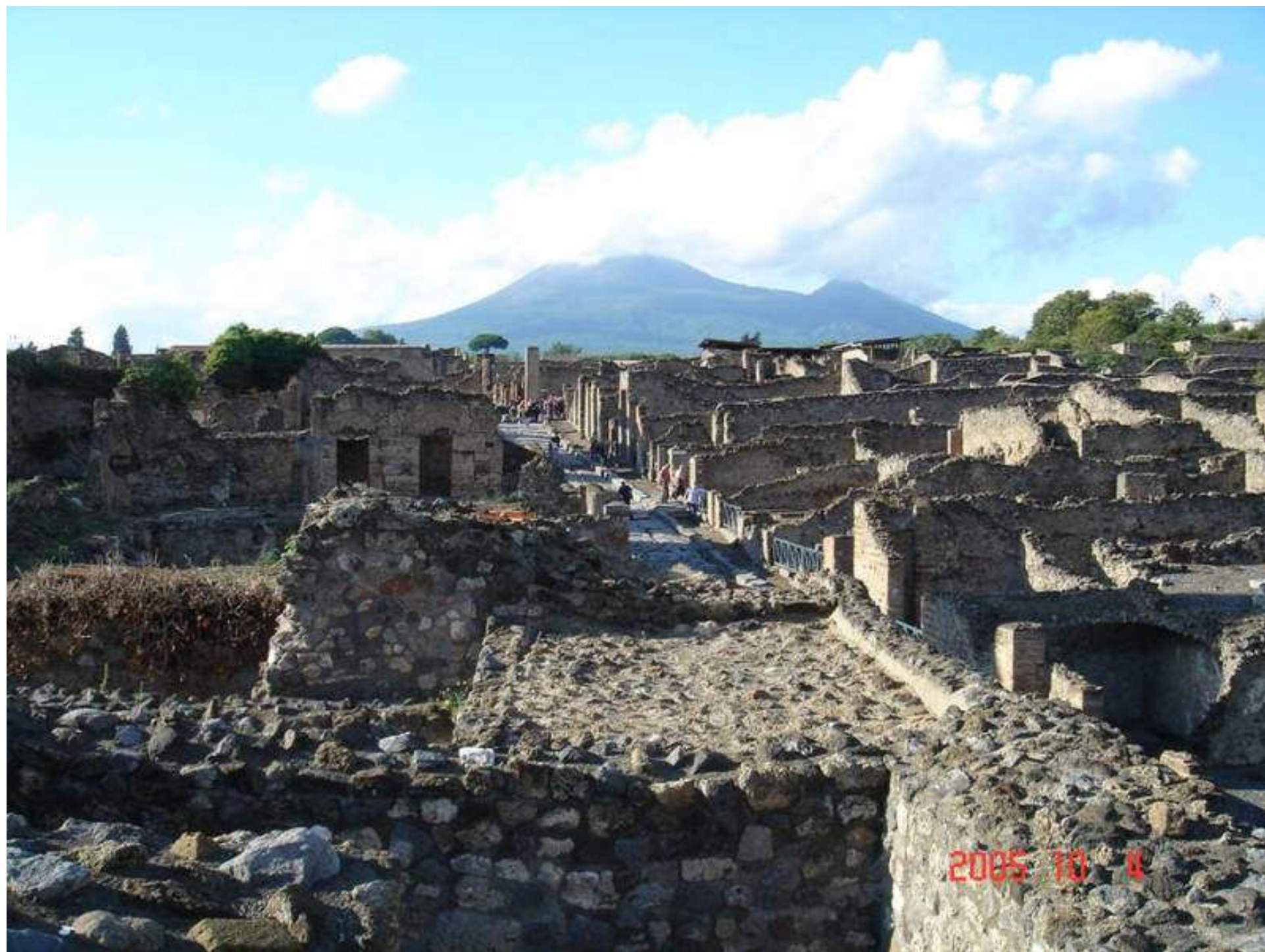
(C) 北陸や沖縄の沿岸のコンクリート構造物

(A) ローマコンクリート（ほぼ2,000年前）

古代ローマコン クリート

ソンマ・ヴェスヴィ
アーナ遺跡から発掘
されたコンクリート
の調査と分析





1. 耐久性

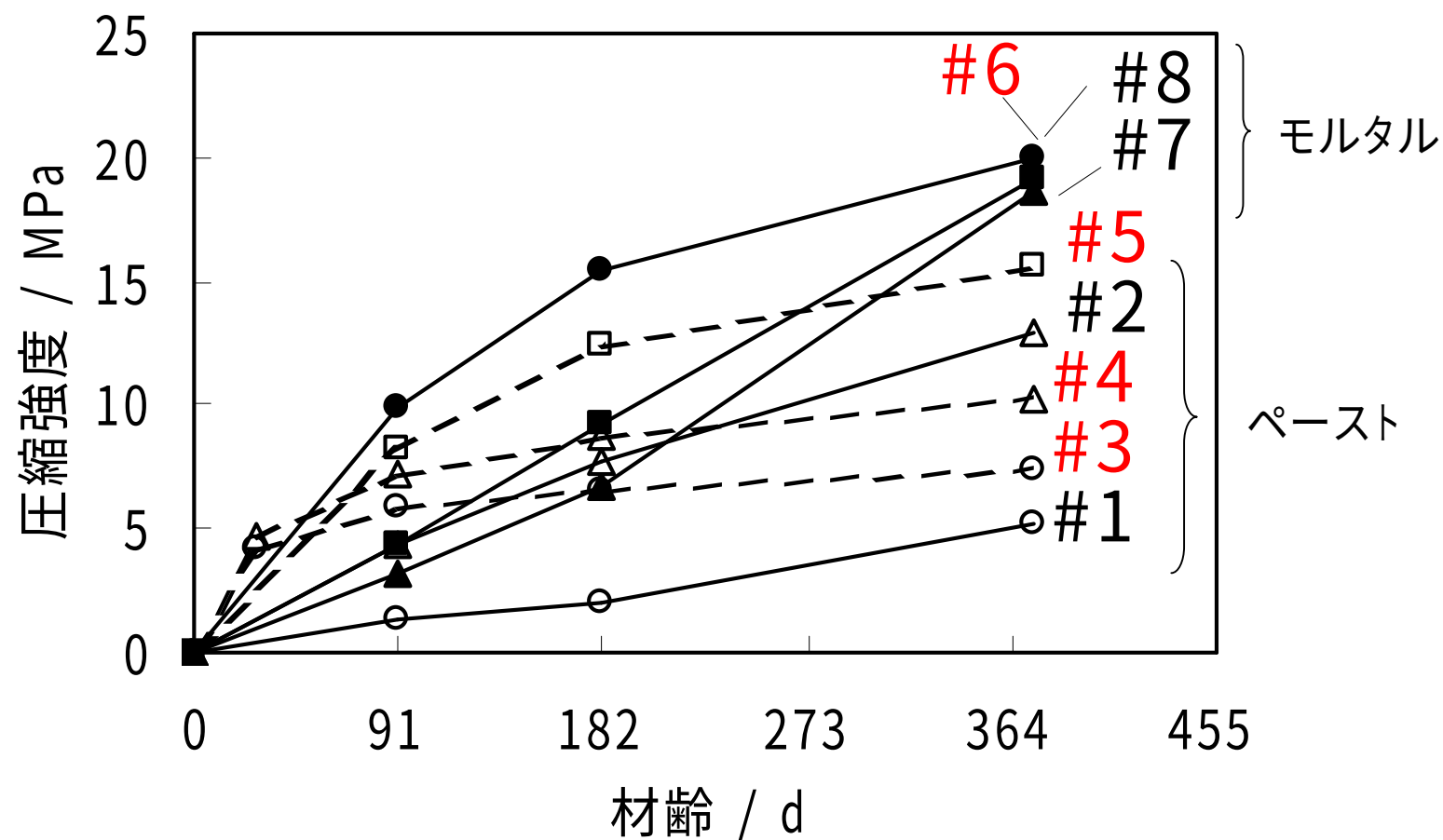
古代ローマコンクリートのコア調査



圧縮強度 (N/mm ²)	動弾性係数 ($\times 10^3$ N/mm ²)
5.6	1.09
5.4	2.85
3.3	1.06

1. 耐久性

再現した配合によるコンクリートの強度性状



- ・半年で10MPa, 1年で20MPaを超える配合物があった
- ・凝灰岩を含む配合は強度発現が早い

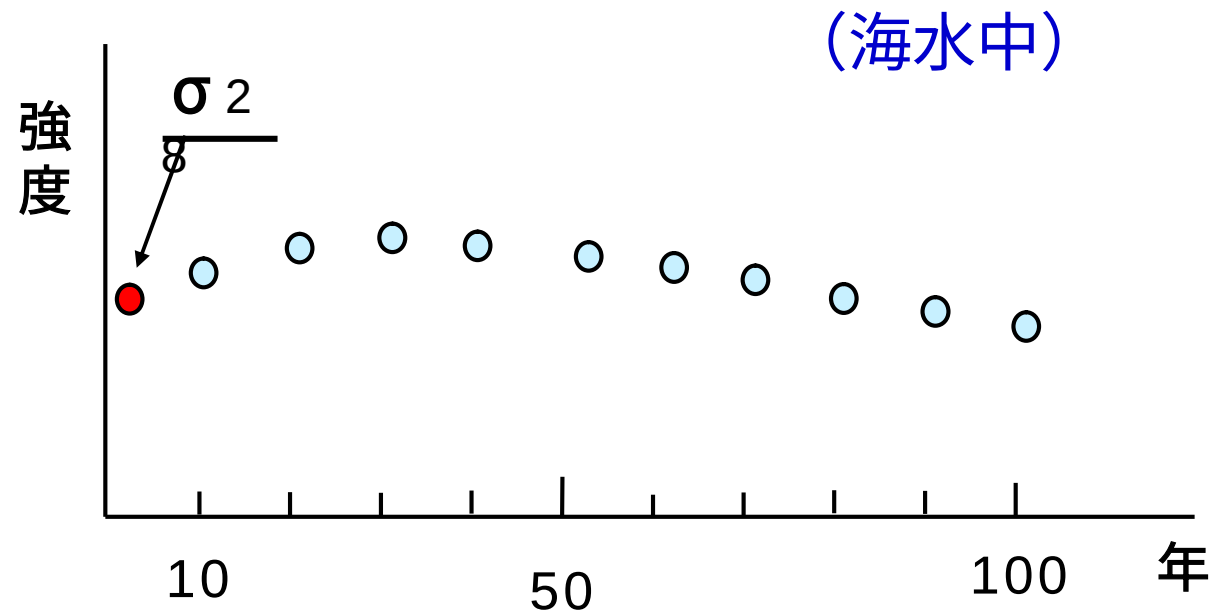
(B) 小樽港のコンクリート（無筋コンクリート）

わが国の無筋コンクリートの略歴

- ・1889年 横浜港の築港着手（1896年完成）
（1892年 多数のひび割れ発生）
- ・1896年 函館港改良工事着手
- ・1897年 大阪港築港着手
（1899年 ひび割れ発生）

- 1897年 小樽港築港着手（廣井 勇）
（100年試験用供試体）

小樽港のコンクリート：強度の経年変化



わが国の鉄筋コンクリートの略歴

- ・1895年頃 鉄筋コンクリートの導入
 - ・1903年 若狭橋 (神戸市) 最古のRC橋
(スパン 3.7m 床版式桁橋)
 - ・1903年 琵琶湖疏水路上の弧形桁橋
(スパン 7.3m 田辺朔朗)
 - ・1929年 万代橋 (新潟市)
(スパン 42.4m アーチ橋)
-

(C) 北陸、沖縄の沿岸におけるコンクリート

1970年代の中頃から、沿岸部に建設された築20年～30年の橋梁構造物の劣化が顕著になってきた。海洋からの飛来塩分による影響と推定され、種々の対策が試みられて現在に至っている。

1.2 コンクリート構造物の劣化要因

材料の劣化

コンクリート：ひび割れ、剥離、変色

鋼材：腐食（錆）、破断

構造物の劣化

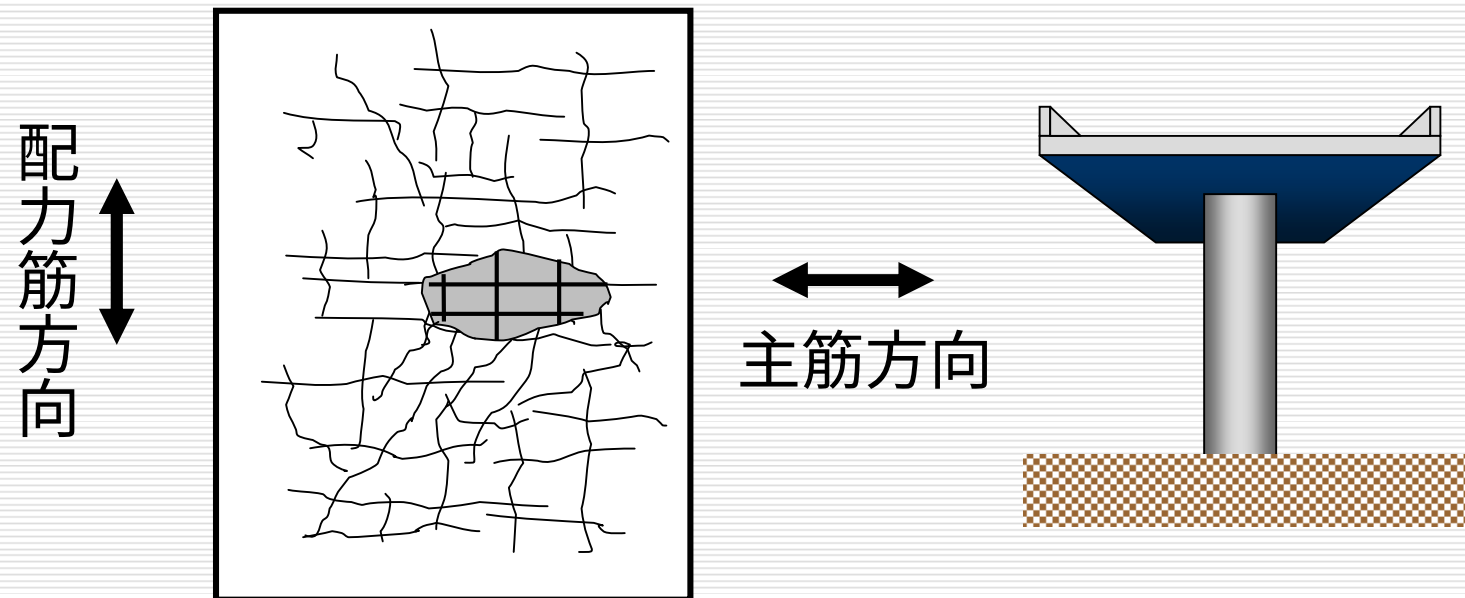
耐荷性能

美観

劣化の原因

	コンクリート	鋼材
力学的	疲労	疲労
物理・化学的	収縮 凍害 アルカリ骨材反応 酸性環境下での腐食 炭酸化・中性化	塩害（発錆） 中性化（発錆）

劣化の実例 - 疲労 -



疲労による床版のひび割れ（下面）

劣化の実例 - 塩害 -

目視による判定区分④
PC桁の軸方向鋼材の腐食に沿ったひび割れ。
部分的に鋼材の露出も見られる。

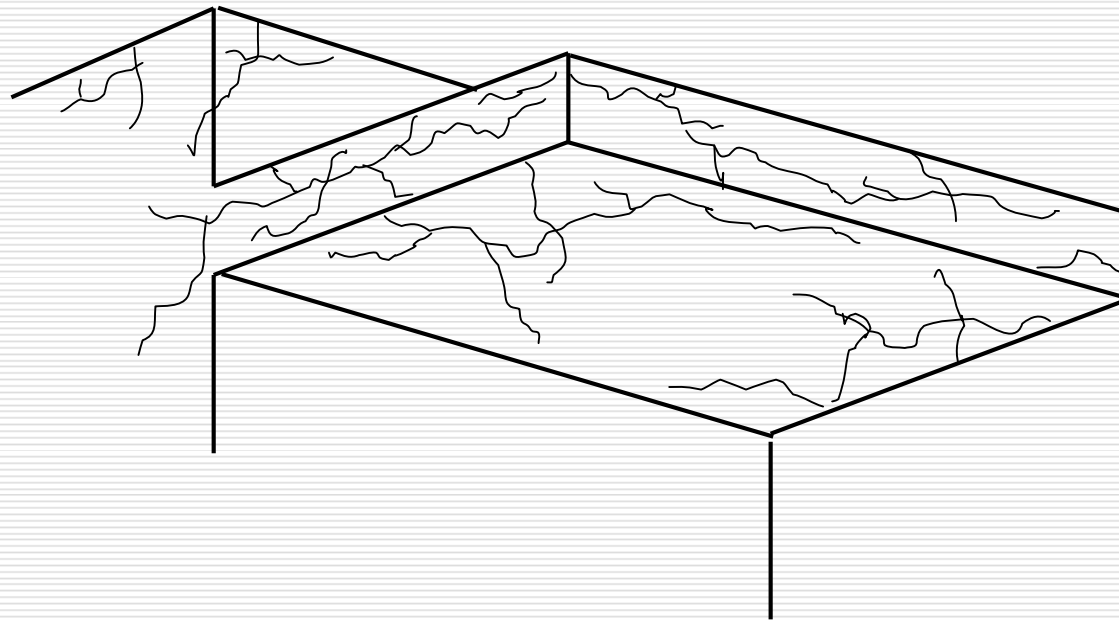


1. 耐久性

劣化の実例 - アルカリ骨材反応 -

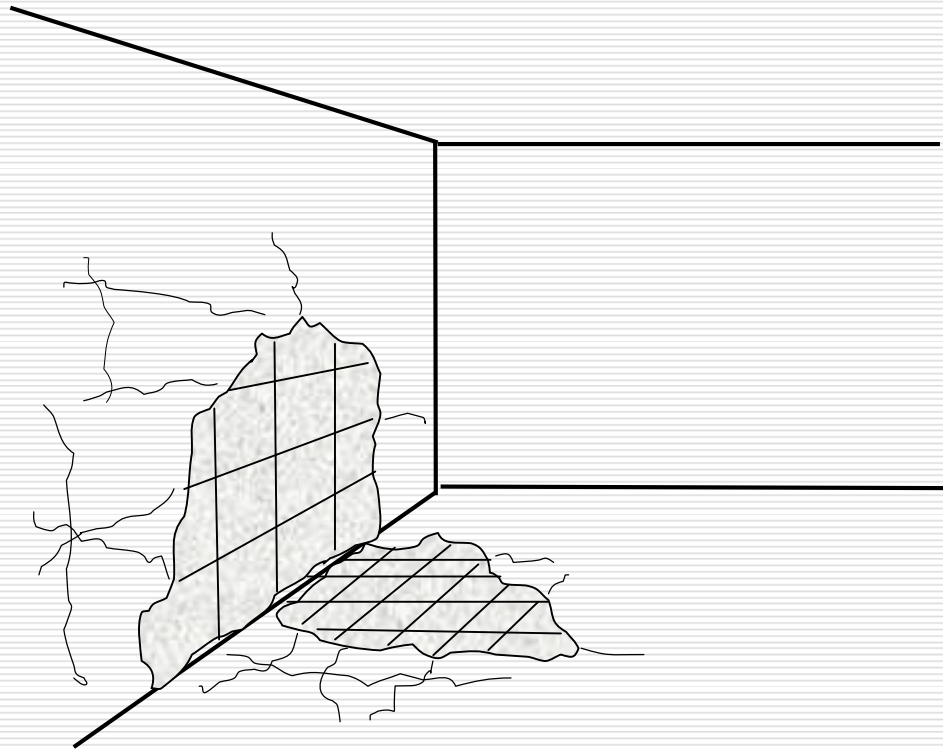


劣化の実例 - 凍害 -



凍害による建造物の
張出し部のひび割れ

劣化の実例 – 化学的腐食 –



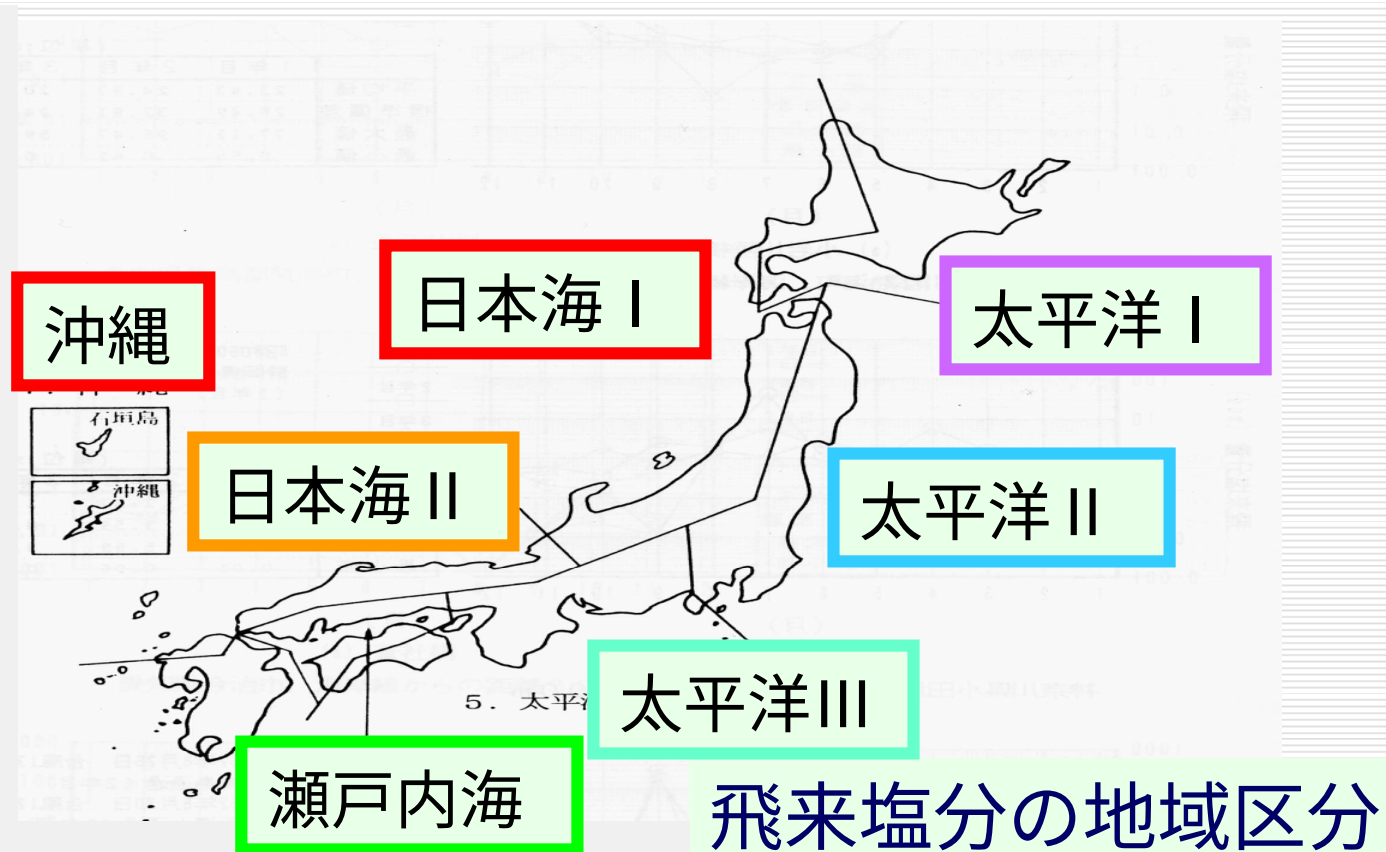
化学的腐食による壁部および床部の損傷

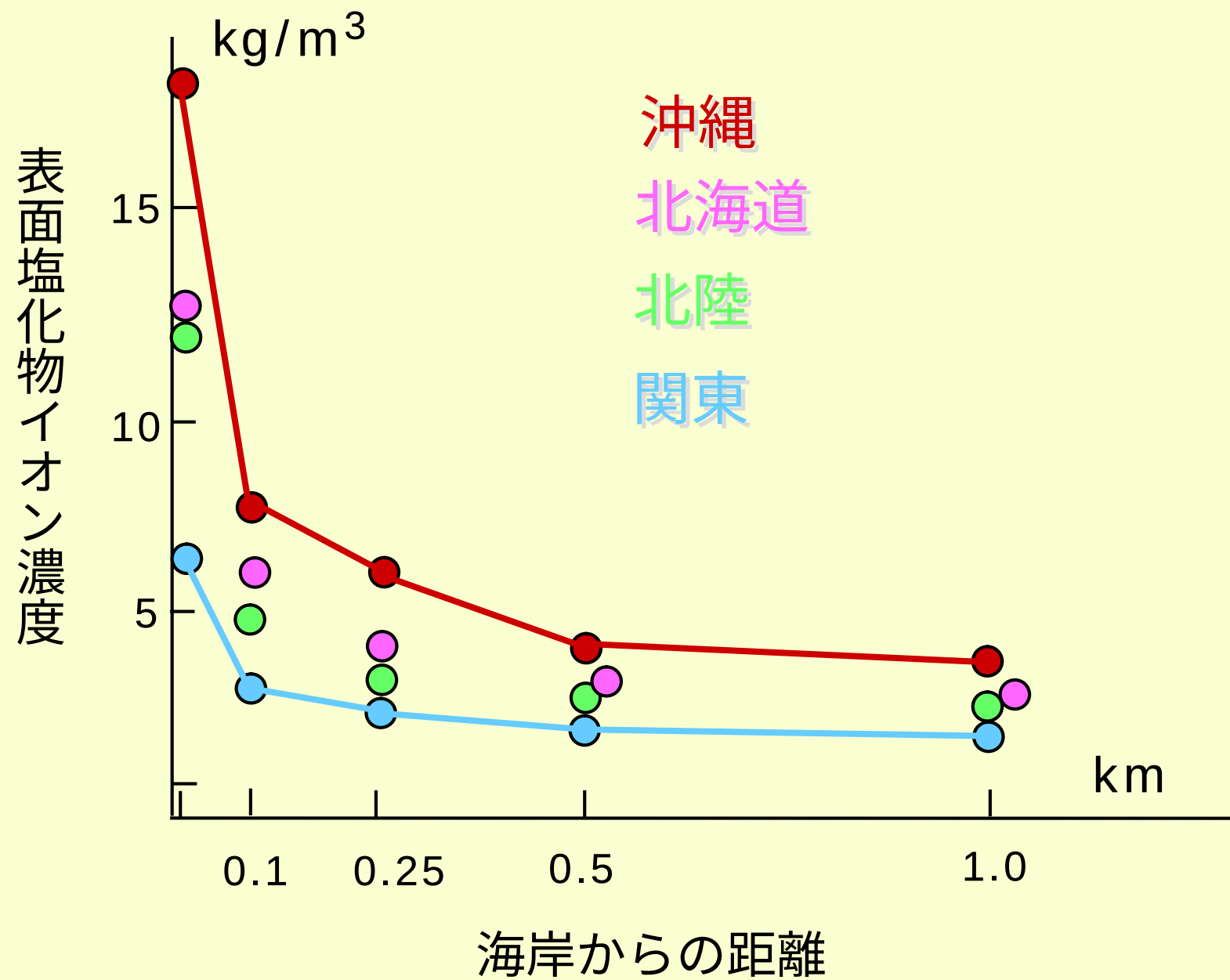
2. コンクリート構造物の塩害

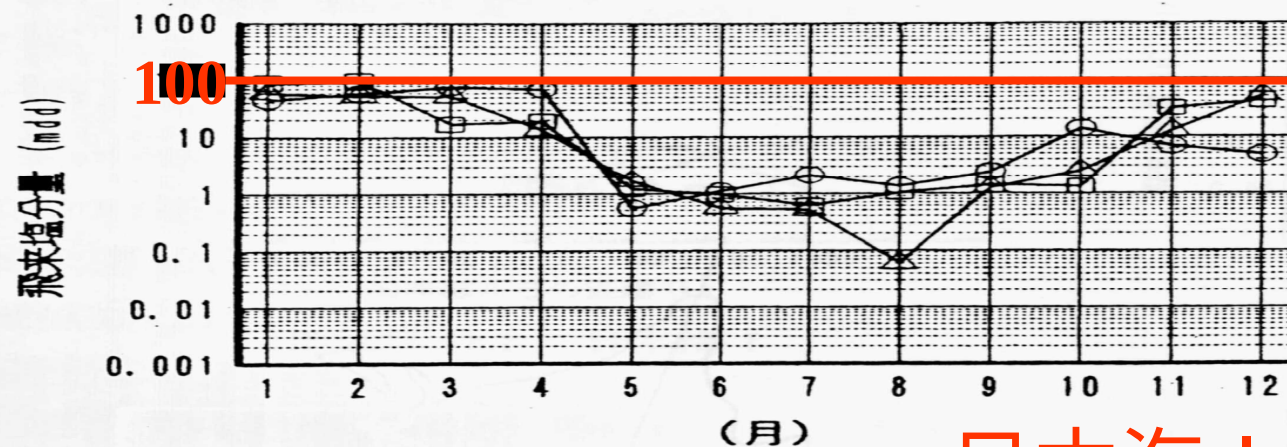
2.1 塩害環境

2.2 塩害による劣化過程

2.1 塩害環境：飛来塩分の地域特性

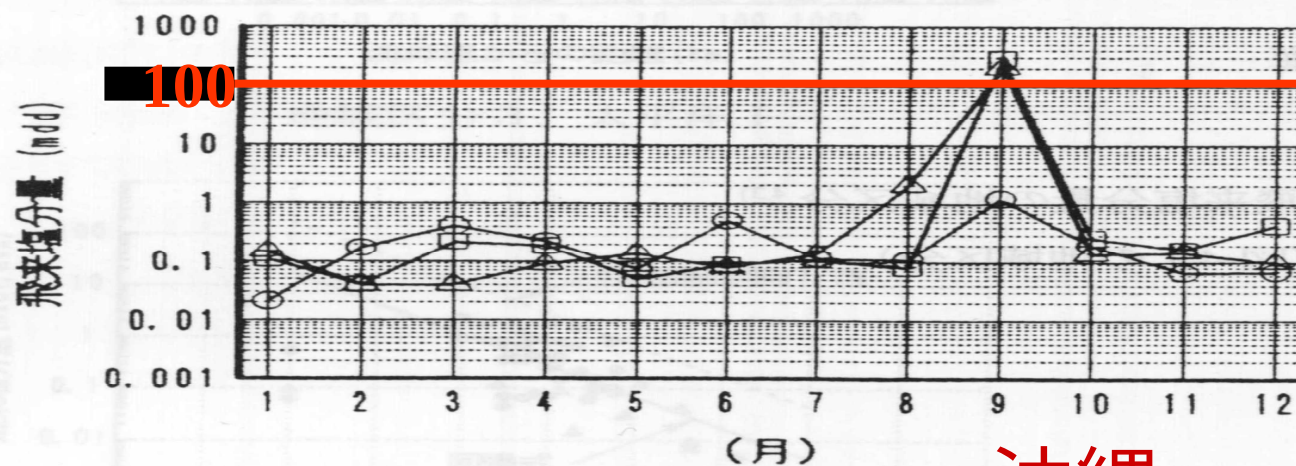






(a) 小岩川陸橋

日本海 I



(c) 潮上橋

沖縄

飛来塩分のパターン (月別)

2.2 塩害による劣化過程

塩害環境

- ・飛来塩分
(沿岸構造物)
- ・凍結防止剤
(寒冷地の構造物)

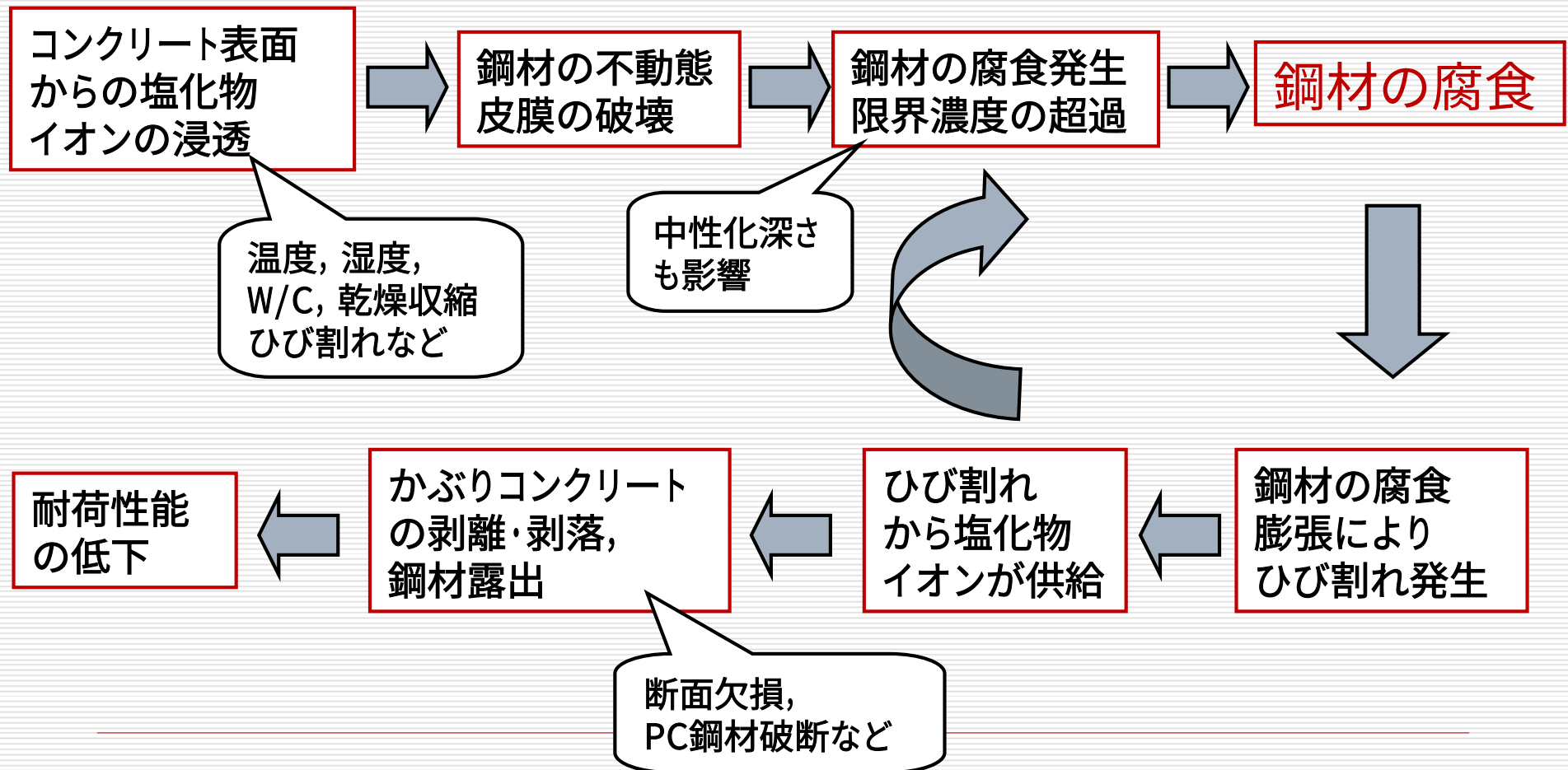
塩化物イオンのコン
クリート中への浸透



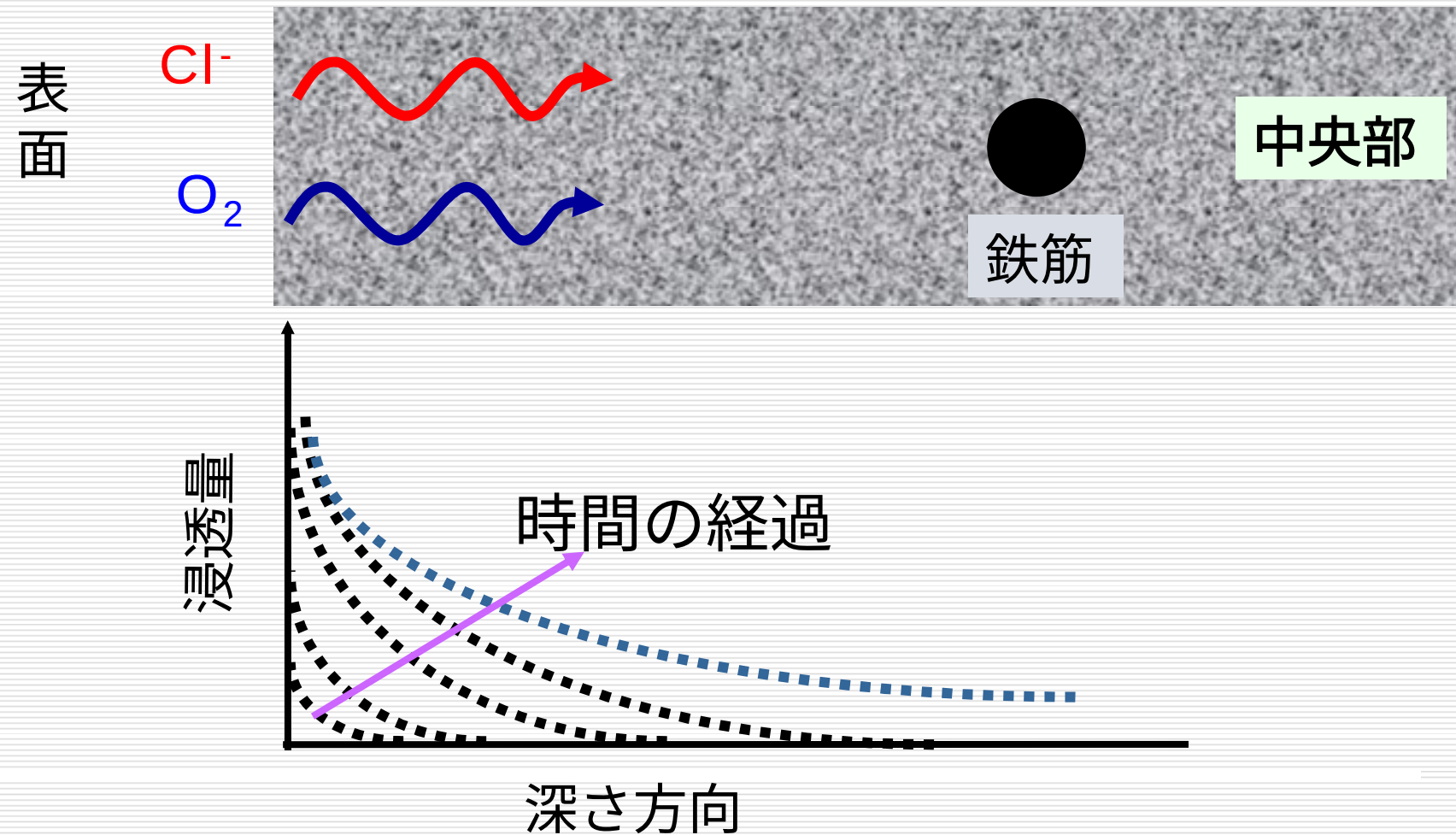
鋼材の腐食

- ・錆汁
(コンクリート)
- ・ひび割れ
- ・剥離、剥落

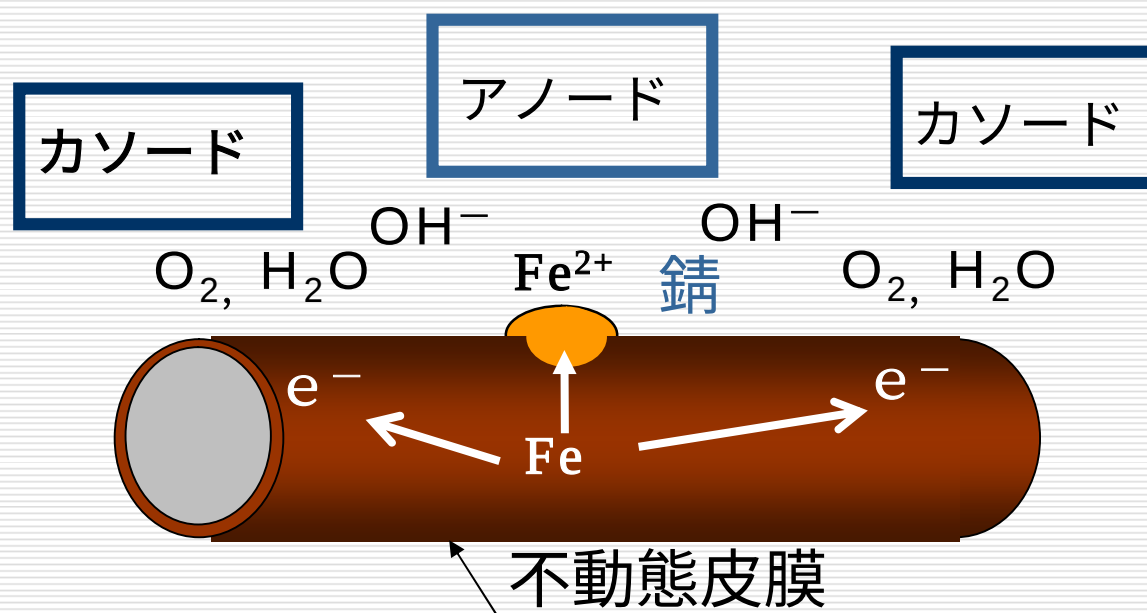
劣化過程の詳細



塩化物イオンの浸透



鉄筋の発錆



鉄筋の表面近傍で電位の差があると腐食電流が発生し、溶け出した鉄イオンが酸素と結合して錆になる。

錆汁



R C 桁下面の点錆

コンクリートのひび割れ



コンクリートのひび割れ（2）



ひび割れ（3）：PC桁

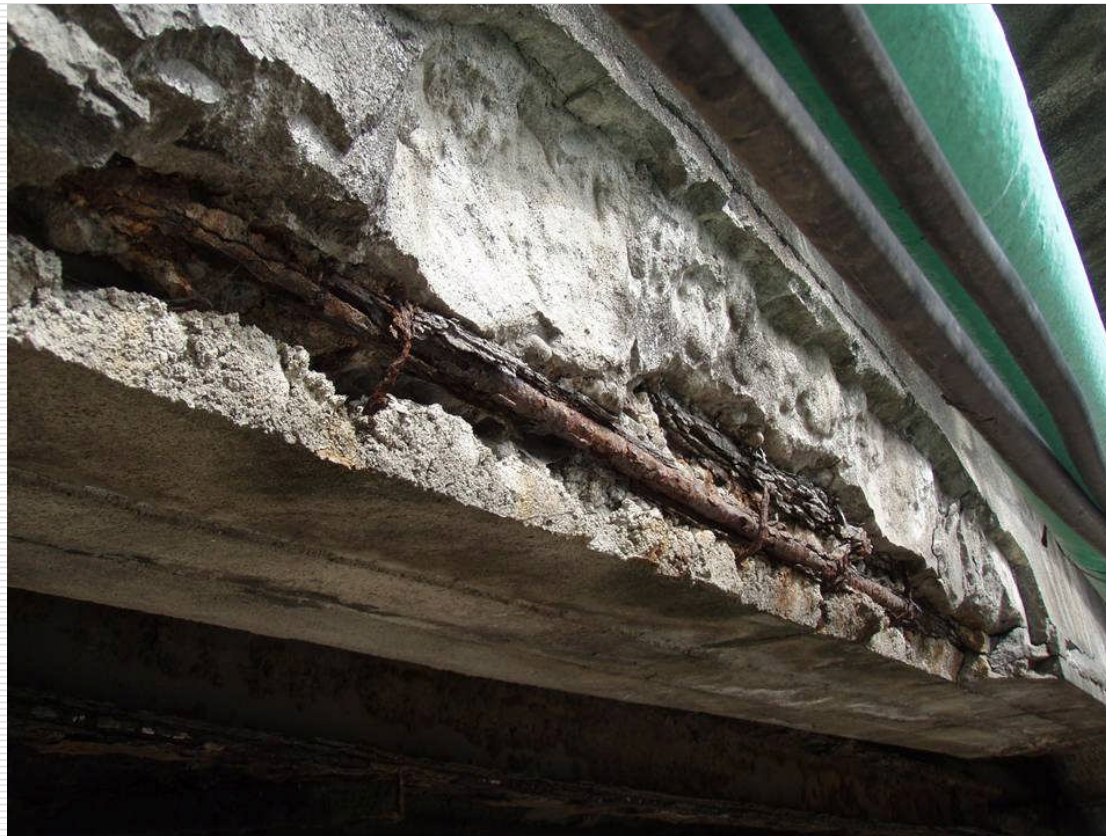
目視による判定区分④
PC桁の軸方向鋼材の腐食に沿ったひび割れ。部分的に鋼材の露出も見られる。



コンクリートの剥離・剥落



剥離・剥落 (2)





吹きつけモルタル剥落

かぶり剥落, 鉄筋露出

3. 塩害を受けたコンクリート構造物の耐荷性能

3.1 載荷試験

3.2 解析

曲げ
せん断
疲労

コンクリート	鉄筋 (PC鋼材)
圧縮力を負担	引張力を負担
鋼材の保護	
打ち替えは容易	取り替えは困難

コンクリート構造物の耐荷性能：基本的には鉄筋に大きく依存

載荷試験

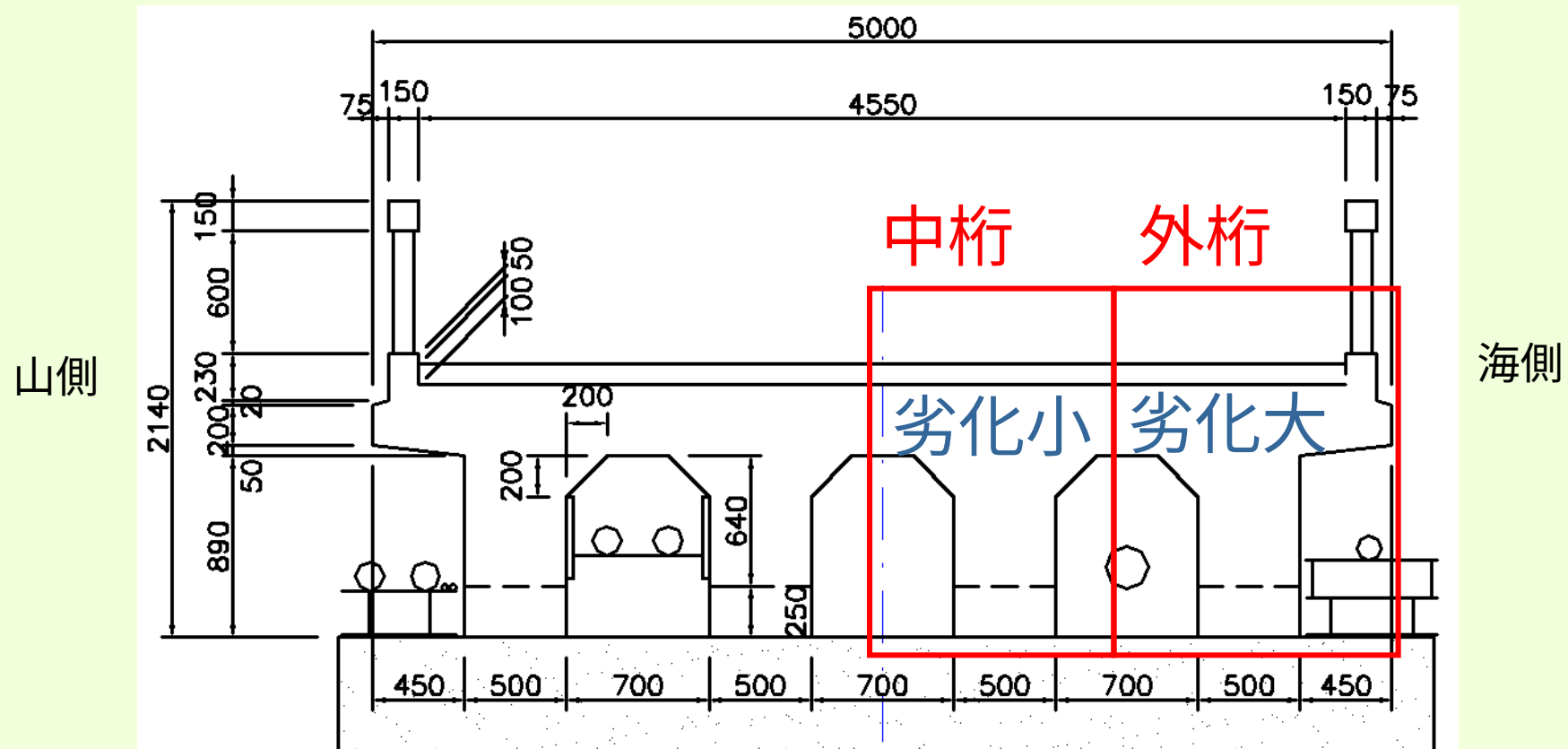
(1) 実橋梁から切り出したRC桁の載荷試験



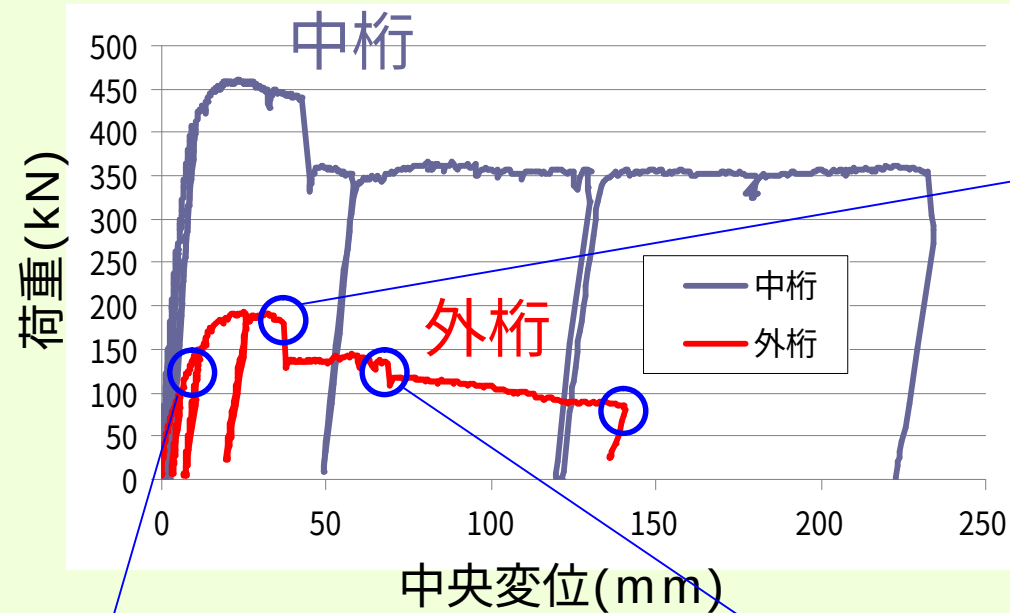
試験体の切り出し箇所

海側の2主桁を切り出した。

試験体は2体。呼称は「中桁」・「外桁」とする。



荷重－中央変位関係

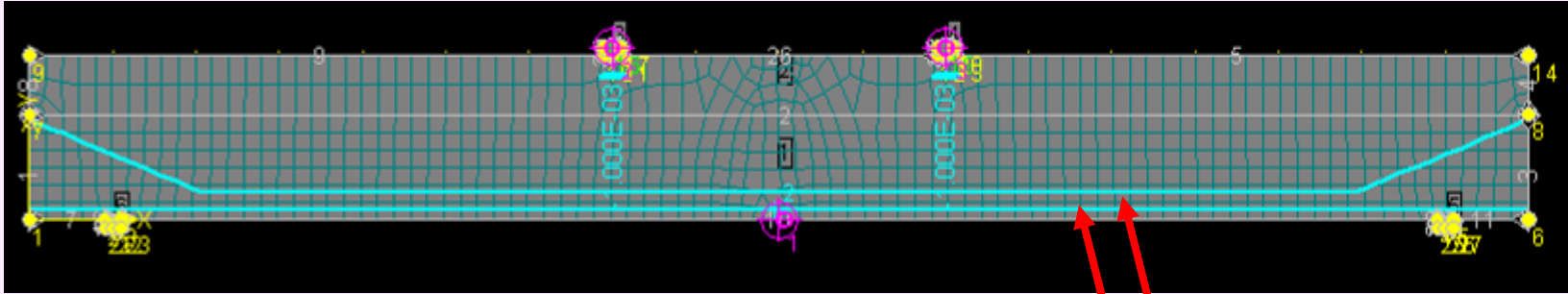


中央変位 = 141 mm
残存耐力が80 kNまで低下したところで
載荷終了



FEM解析

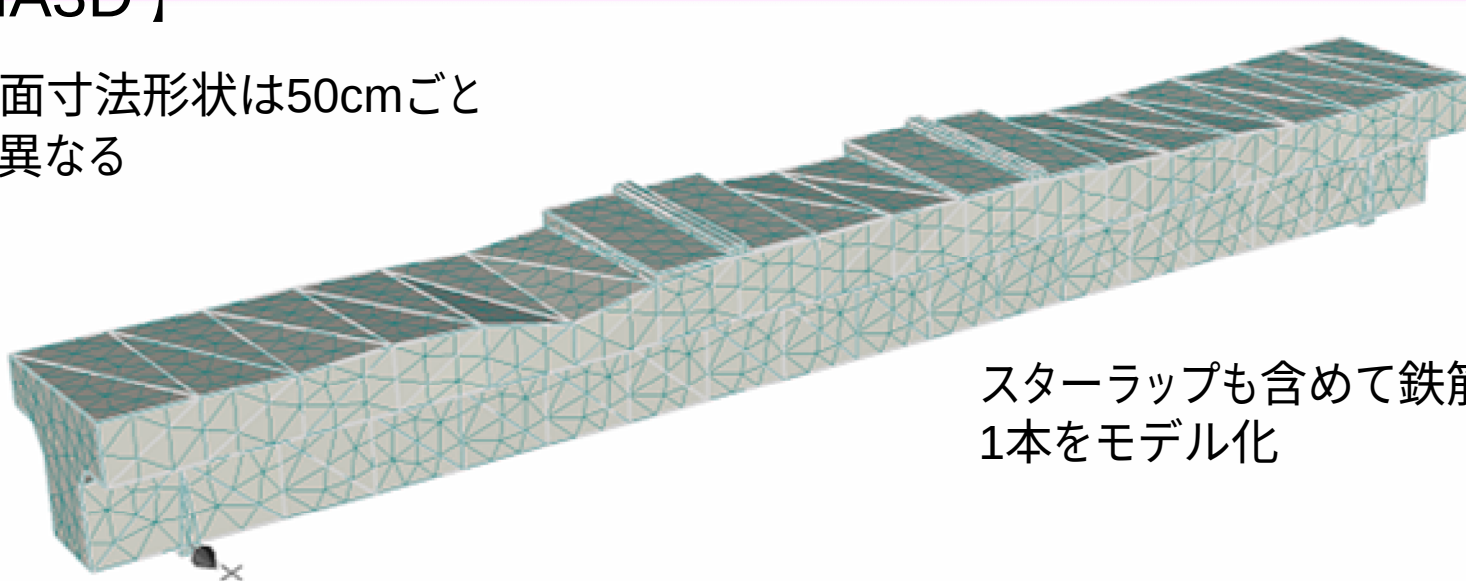
【ATENA2D】



鉄筋単体としてモデル化

【ATENA3D】

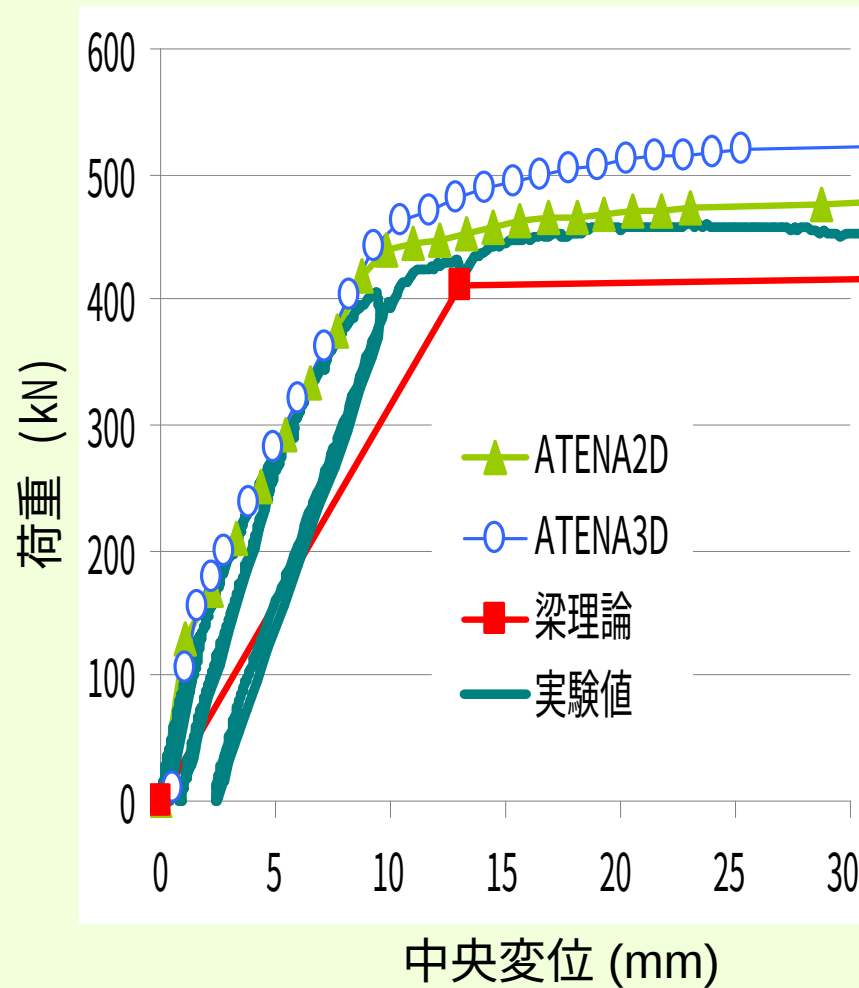
断面寸法形状は50cmごとに異なる



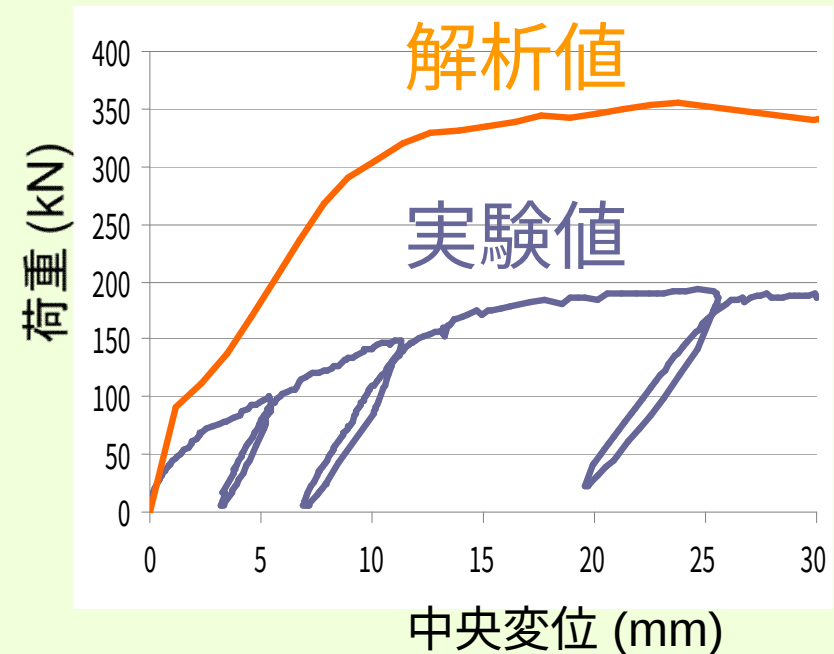
スターラップも含めて鉄筋1本
1本をモデル化

解析モデルを単純化しても差し支えないことを確認

解析結果と実験結果の比較（事前解析）



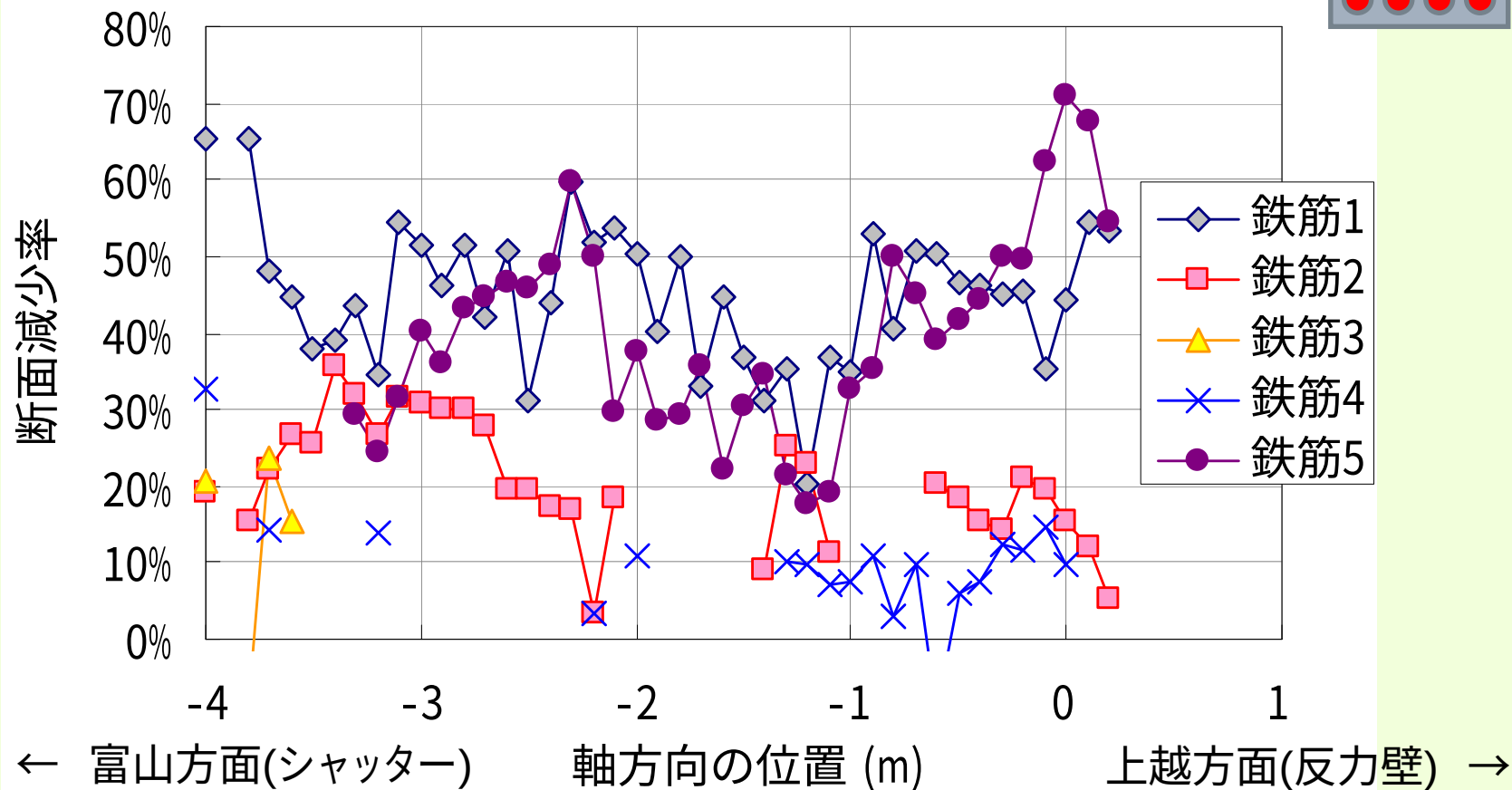
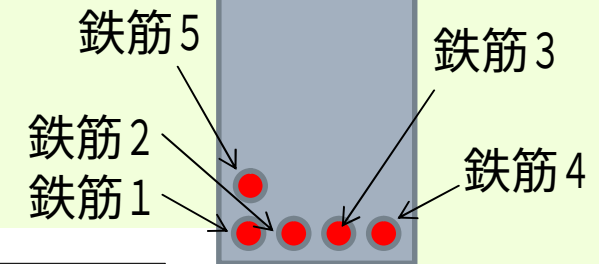
中桁（劣化度は中程度）



外桁（劣化度は大きい）

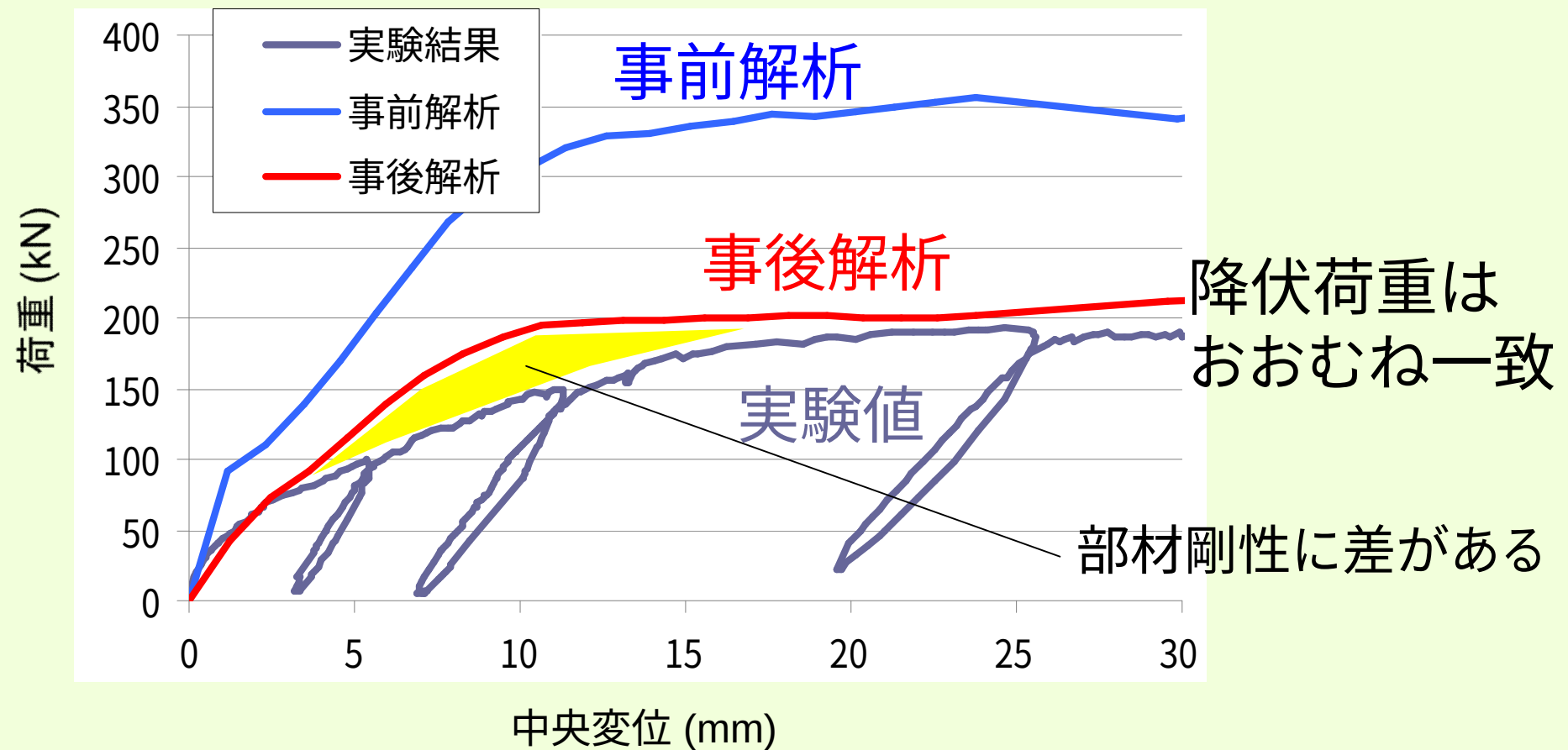
鉄筋の断面減少量

←海側



外桁の実験値と解析値の比較（事後解析）

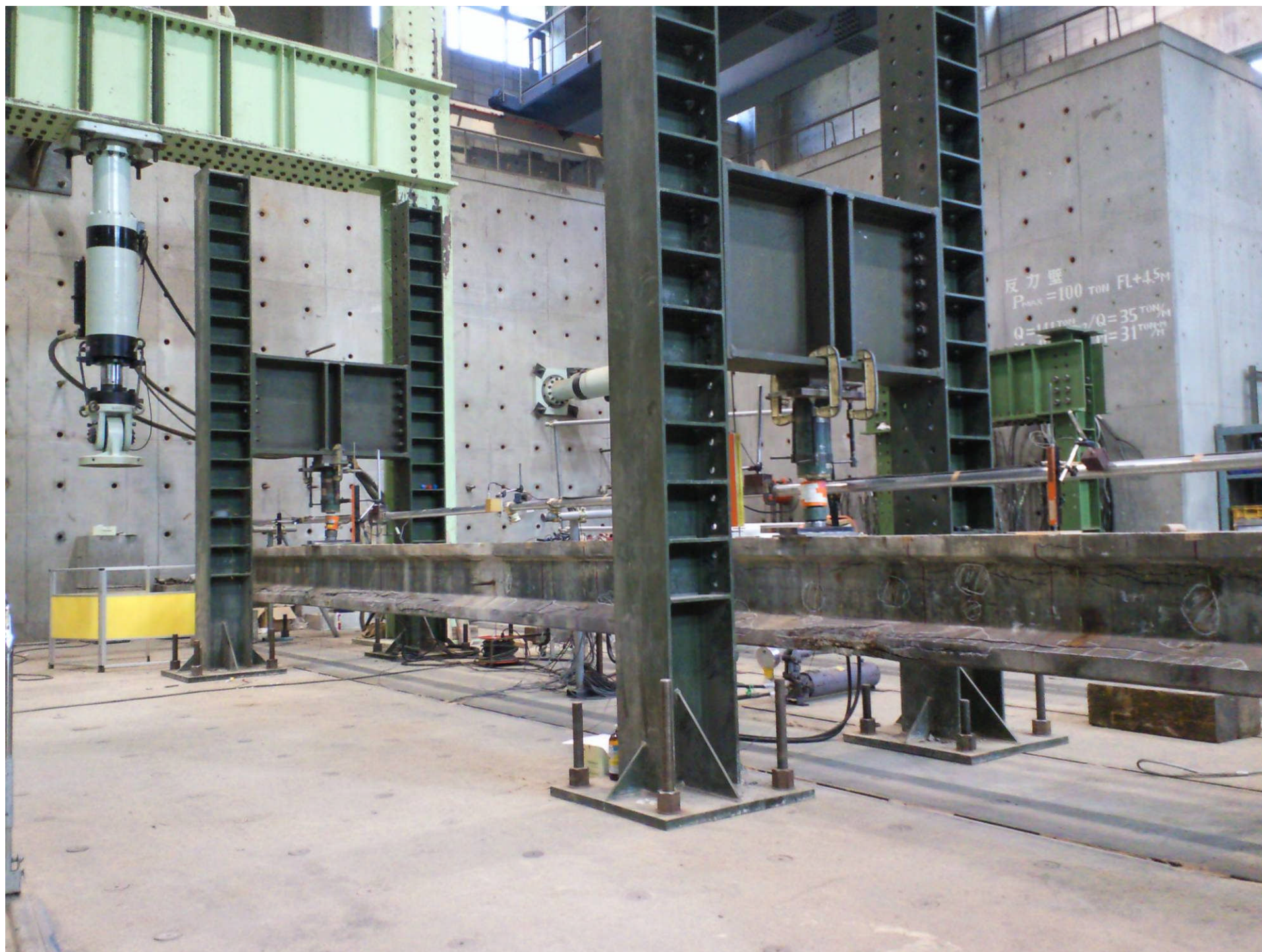
事後解析：継手が露出した鉄筋を除去

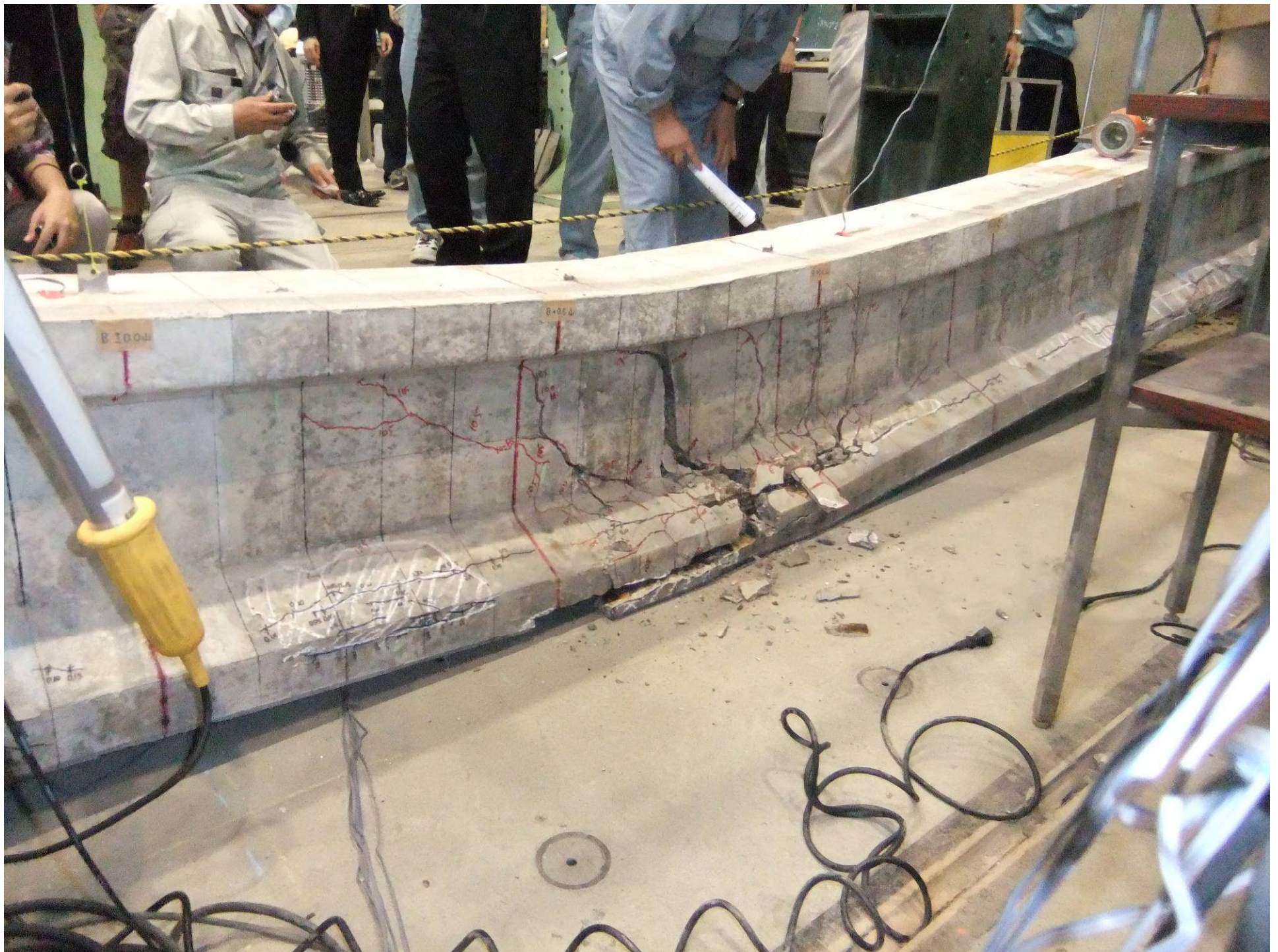


(2) 実橋梁から切り出したP C桁の載荷試験

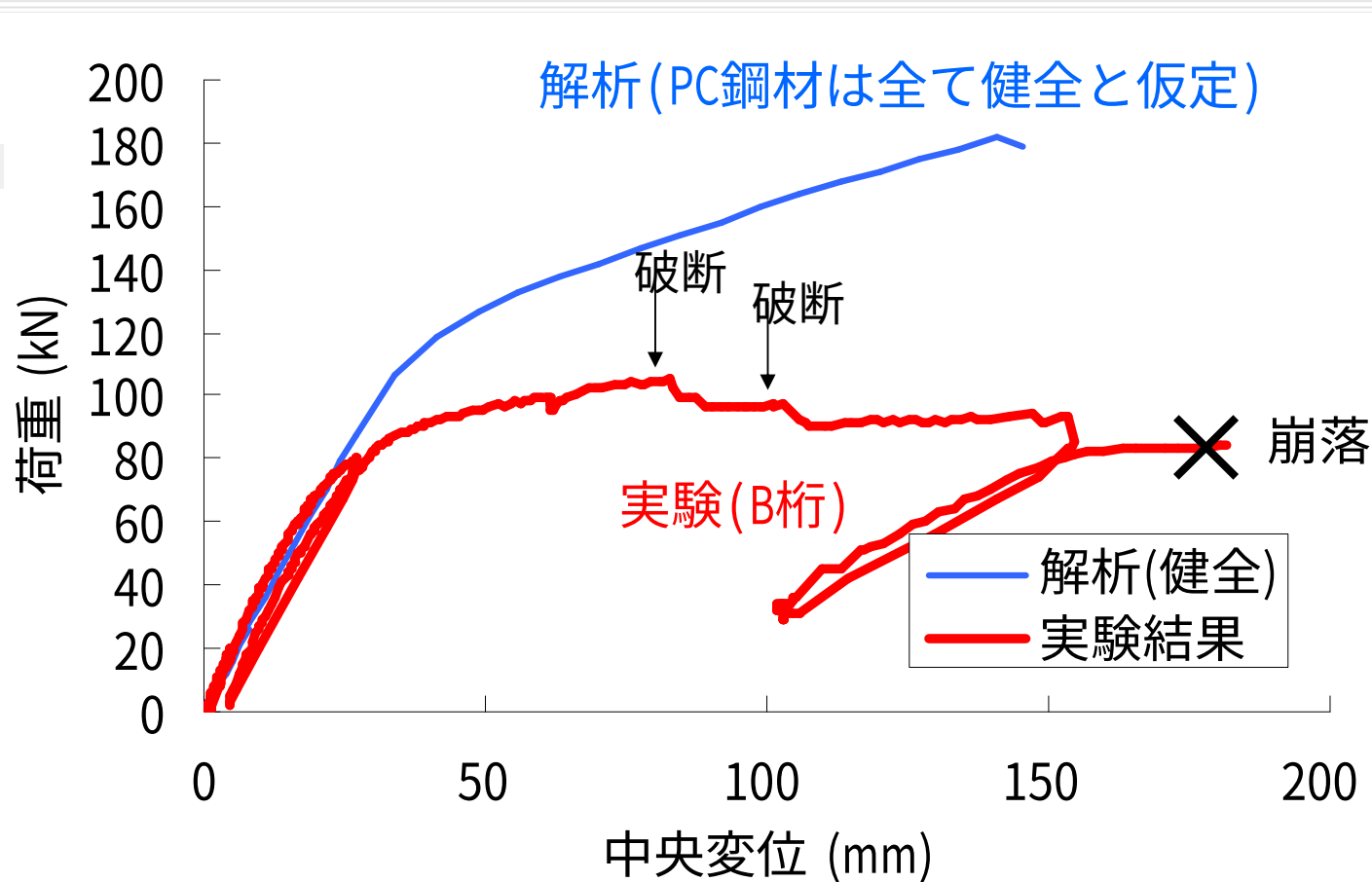






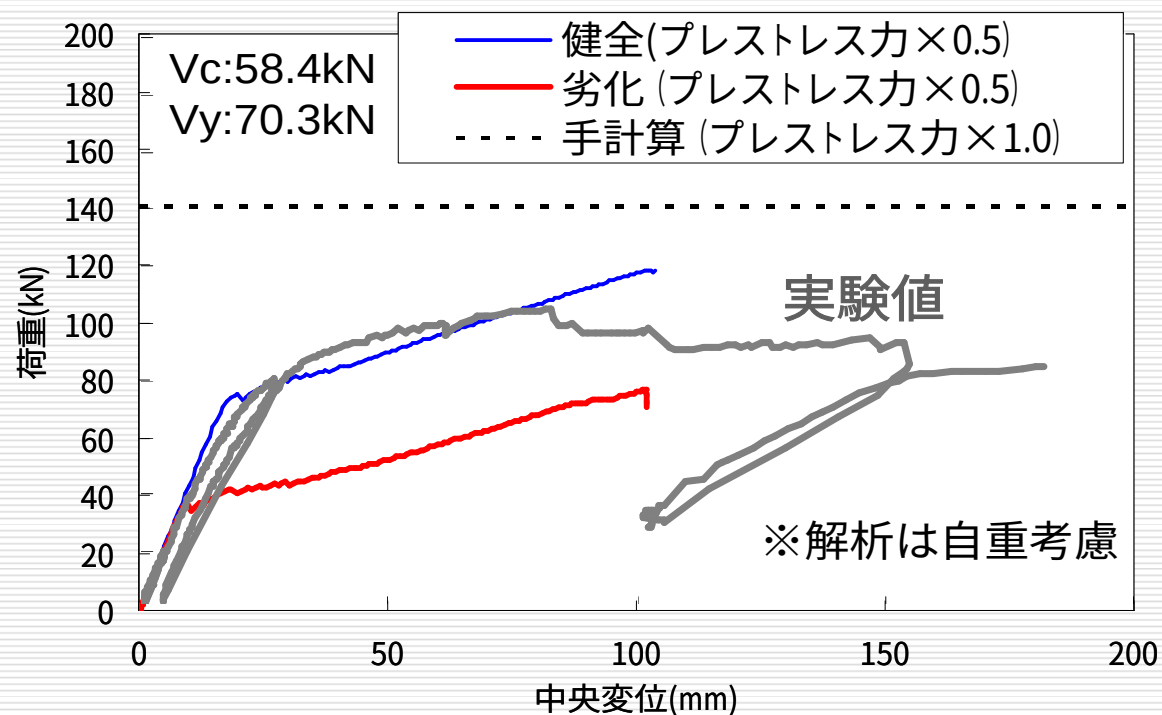


3. 耐荷性能



- ・ prestressは低下していたものの、ある程度は残っていた
- ・ 載荷中に鋼材が1本ずつ破断
- ・ 終局時には断面の大部分の鋼材が一度に破断し、崩落

解析結果（PC鋼材の腐食量を推定）



下フランジの鋼材の腐食減少率: 16 %
プレストレス力の減少率: 50 %
使用プログラム: ATENA

塩害による損傷を受けたコンクリート構造物の耐荷性能は、内部の鋼材（鉄筋あるいはPC鋼材）の腐食量が適切に評価できれば、FEM等の解析手法を用いることで、高い精度で予測可能となっている。

4. 塩害を受けたコンクリート構造物 の補修、補強方法

4.1 補修方法

4.2 補強方法

4.1 補修方法

(1) 劣化因子の遮断

- ・表面被覆
- ・表面改質 (撥水剤、ひび割れ補修を含む)

(2) 劣化速度の抑制

- ・電気防食

(3) 劣化因子の除去

- ・電気化学的脱塩
 - ・断面修復
-

4. 補修、補強

表面被覆他

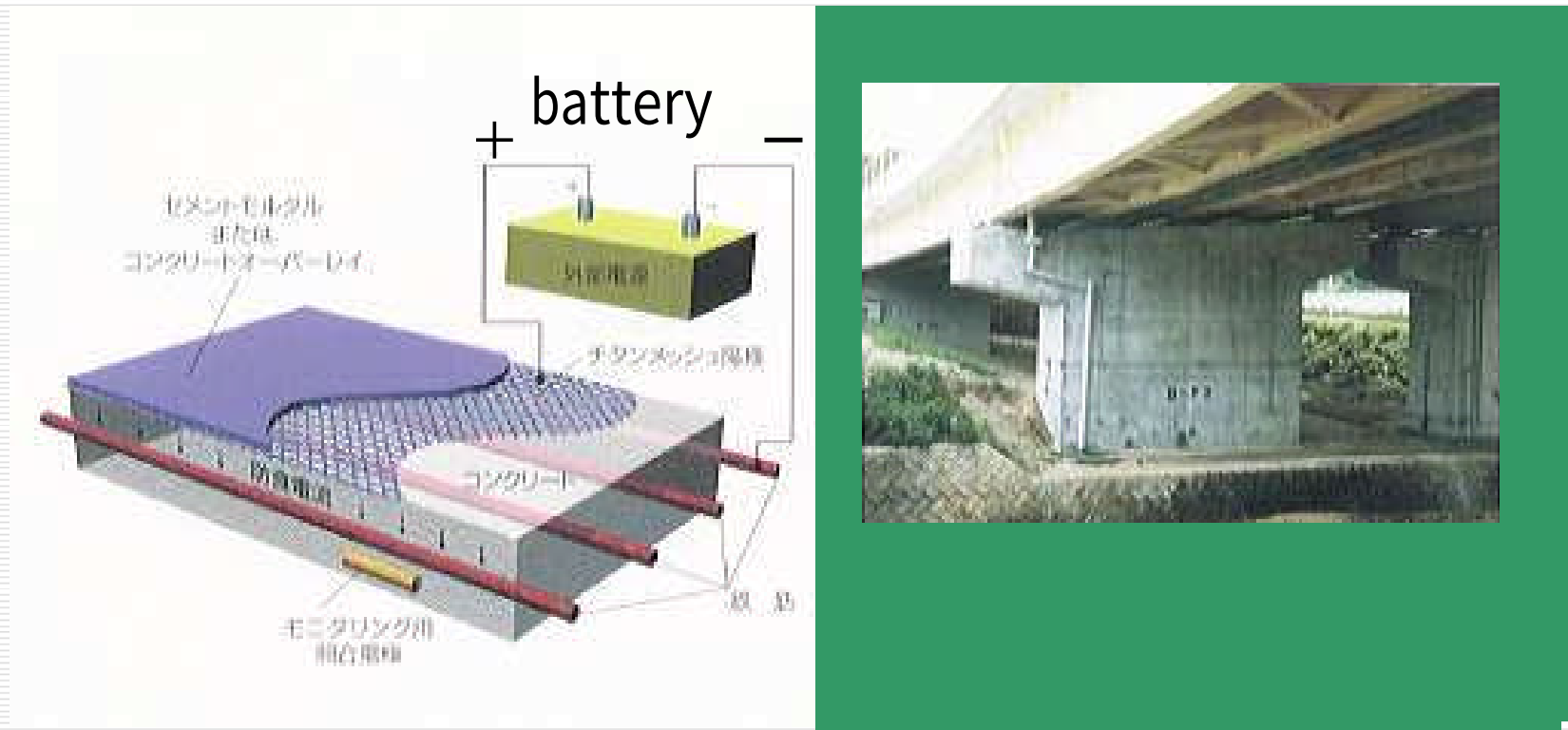


断面修復後



表面塗装後

電気防食工法（チタンメッシュ方式）



4.2 補強方法

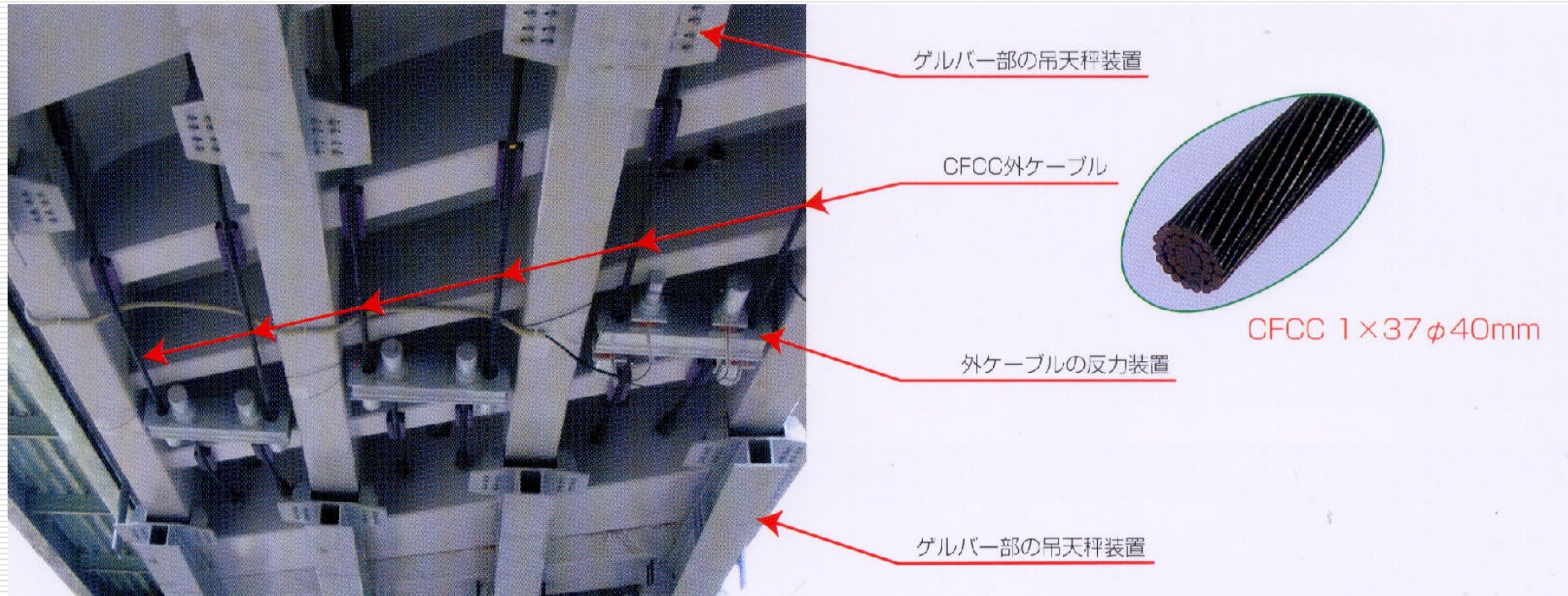
(1) 耐荷性能の改善

- ・腐食した鋼材の取り替え
- ・外ケーブル等による鋼材の追加
- ・RCやPCによる巻き立て

(2) 変形性能の改善

- ・FRPシート等の貼り付け
 - ・FRPロープによる巻き立て
-

外ケーブルによる補強



炭素繊維シートへの接着



FRPグリッドによる補強



橋梁の補修工事全景



桁の底面

塩害を受けたコンクリート構造物の補修、補強については、ここ30年ほどの間でいろいろな工法が開発されている。

ただし、一旦コンクリート内に浸透した塩化物イオンはなかなか除去されないため、補修、補強の効果の持続性については、まだ十分なデータが蓄積されていない。

5．技術の現状と課題

- 5.1 鉄筋の腐食状況の把握
 - 5.2 鉄筋の腐食進行速度の評価
 - 5.3 補修工法の有効性の評価
-

5.1 鉄筋の腐食状況の把握

測定方法と有効性

- 自然電位の測定
- 分極抵抗の測定
- レーダー
- X線
- 中性子

定性的→定量的

局所的→全体的

自然電位の測定

- ・桁の自然電位と腐食速度を測定
- ・測定間隔は, 50cm

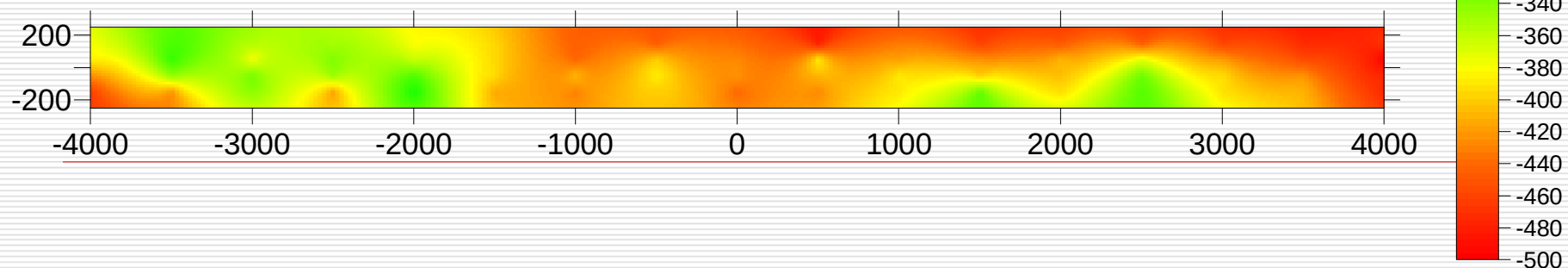
【測定状況】



腐食判定基準 (ASTM-C876)

鉄筋腐食の可能性	自然電位 mV vs C.S.E.	自然電位 mV vs Ag/AgCl
90%以上の確率で腐食なし	$-200 < E$	$-80 < E$
不確定	$-350 < E < -200$	$-230 < E < -80$
90%以上の確率で腐食あり	$E < -350$	$E < -230$

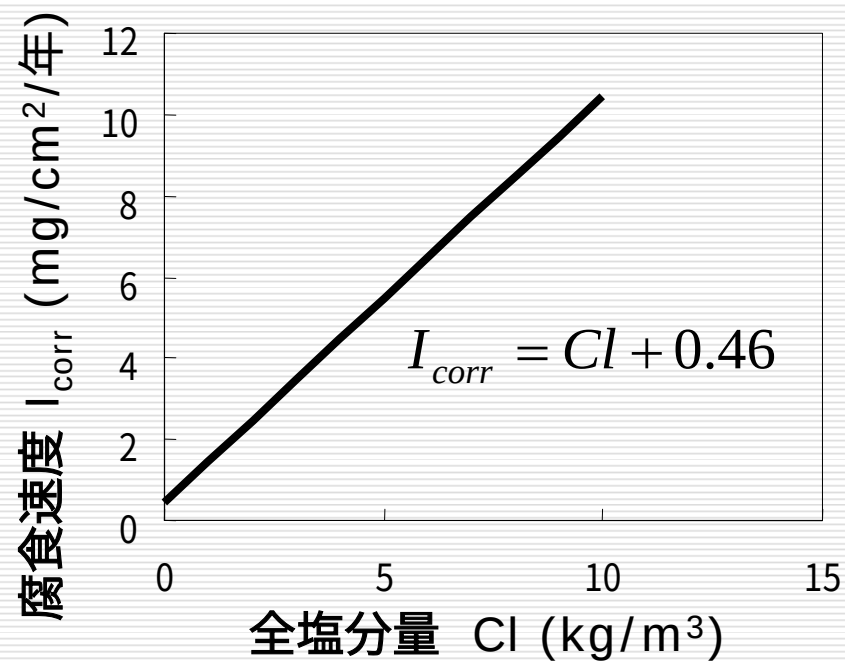
【腐食したRC桁の底面の自然電位分布の例】



5.2 鉄筋の腐食進行速度の把握

腐食速度→全塩分量の式

(土木学会338委員会報告書の実験回帰式)



-
- 実構造物における鉄筋の腐食速度を予測することはまだできていない。



構造物の劣化曲線が描けない

5.3 補修工法の有効性の評価

補修工法

- 表面塗装
- 断面修復＋表面塗装
- 電気防食

有効性

- 補修後の性能の経時劣化
-

電気防食工法

チタンメッシュ方式

チタングリッド方式

チタンリボン方式

チタン溶射方式

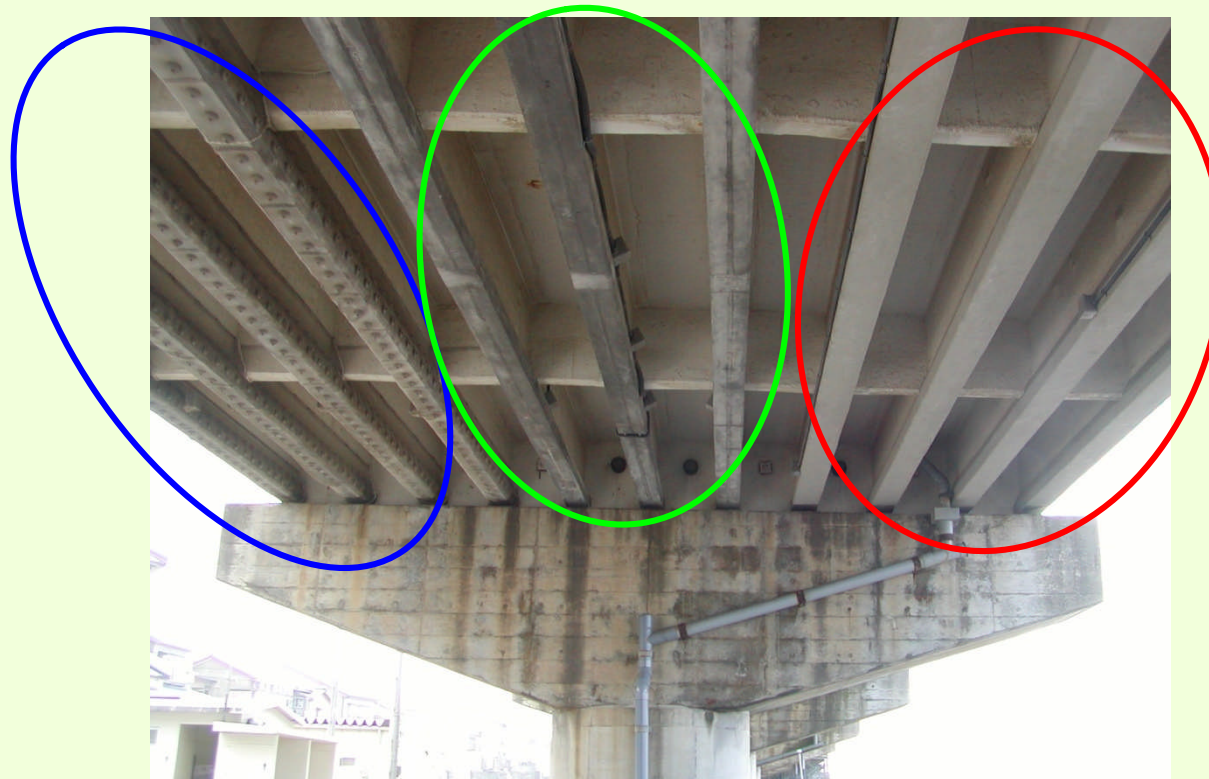
外部電源

流電陽極（亜鉛板）方式

適用工法と防食対象桁 (第8径間)

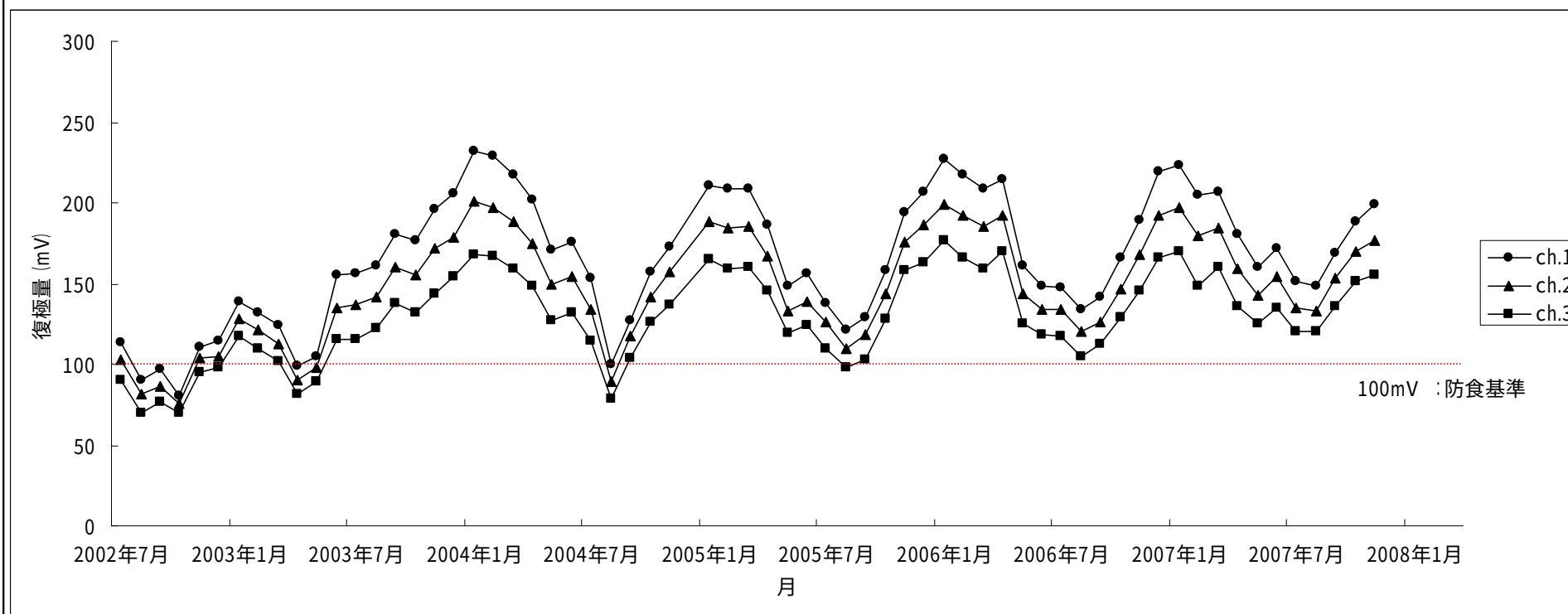
適用後13年

適用工法	陽極の形状	防食対象桁		備考
チタンメッシュ工法	面状陽極	海側	G8, G9, G10, G11	外部電源方式
チタングリッド工法	帯状陽極	中間	G5, G6, G7	
流電陽極工法	面状陽極	陸側	G1, G2, G3, G4	犠牲陽極方式 (亜鉛シート)



復極量の経時変化

暴露供試体 防食回路1 チタンリボンメッシュ方式 復極量 '02.7~'07.11



有効性の評価：長期暴露試験による検証

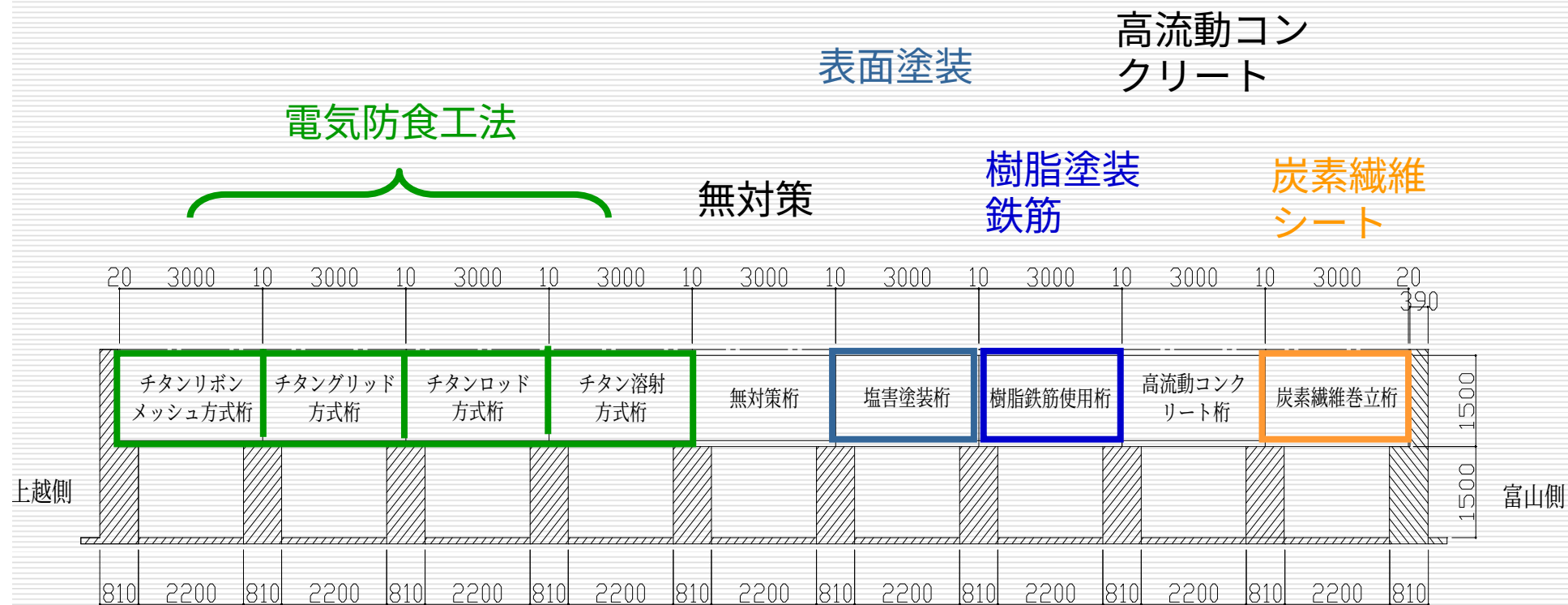


暴露試験体（9体）



5. 現状と課題

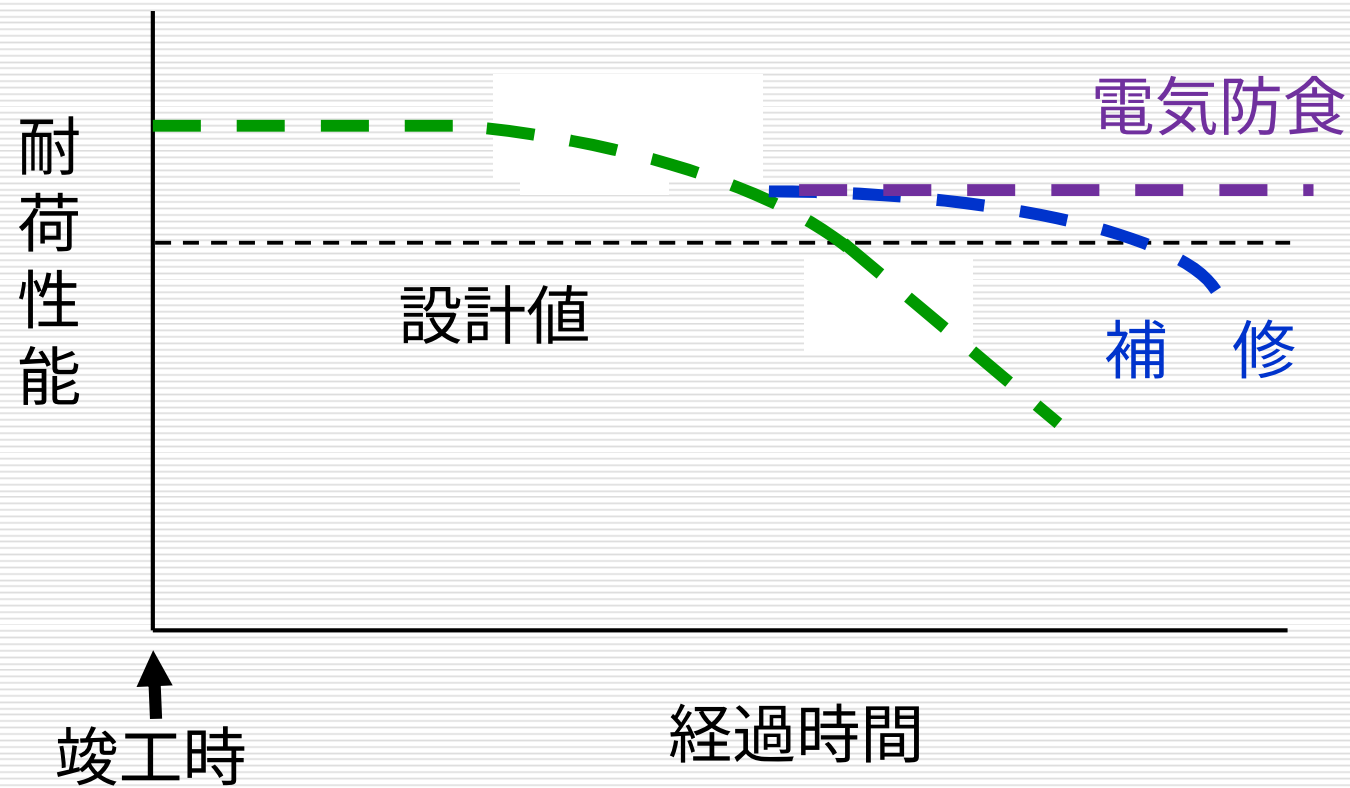
暴露試験体の種類



計測項目

毎 年	環境調査 供試体調査	気象調査 飛来塩分量 付着塩分量 復極量、自然電位、 電流・電圧
五年 毎	供試体調査 (コア採取)	塩化物イオン浸透度 中性化深さ 強度 鉄筋腐食の直接確認

耐荷性能の経時変化



塩害対策の技術の現状として、補強鋼材の腐食量が定量的に把握できれば、耐荷性能は高い精度で予測可能となっている。ただ、補強鋼材の腐食量は、はつり調査で調べるしかなく、非破壊検査で全体的な腐食量を把握することが望まれる。耐荷性能の劣化予測は、鋼材腐食の進行予測が不可欠で、実構造については、まだ、ほとんど知識、情報がないのが現状である。

6. 長寿命化へのシナリオ

□ 計画・設計段階で考慮すべきこと

- ・供用年数
- ・劣化に対する対処方法
- ・解体撤去までのライフプラン (含経費)

□ 維持管理段階で考慮すべきこと

- ・解体撤去までの供用年数
- ・対処方法の有効性と経費
- ・対処後の管理体制

維持管理のシナリオ

(1) 今後の供用年数を設定

＝掛け替え時点を設定

(2) 現状の性能（耐荷性能）を評価

(3) 性能（耐荷性能）の経時劣化を予測

(4) 補修・補強の要否の判定

→ (要) 補修・補強の経時変化の予測



補修・補強工法の選定、実施

有効性確認のための追跡調査

診 断

□ 人間の健康診断と同じ

外見……………全体の様子を把握

一般検査…一般的な定量評価

精密検査…部分的に詳細調査

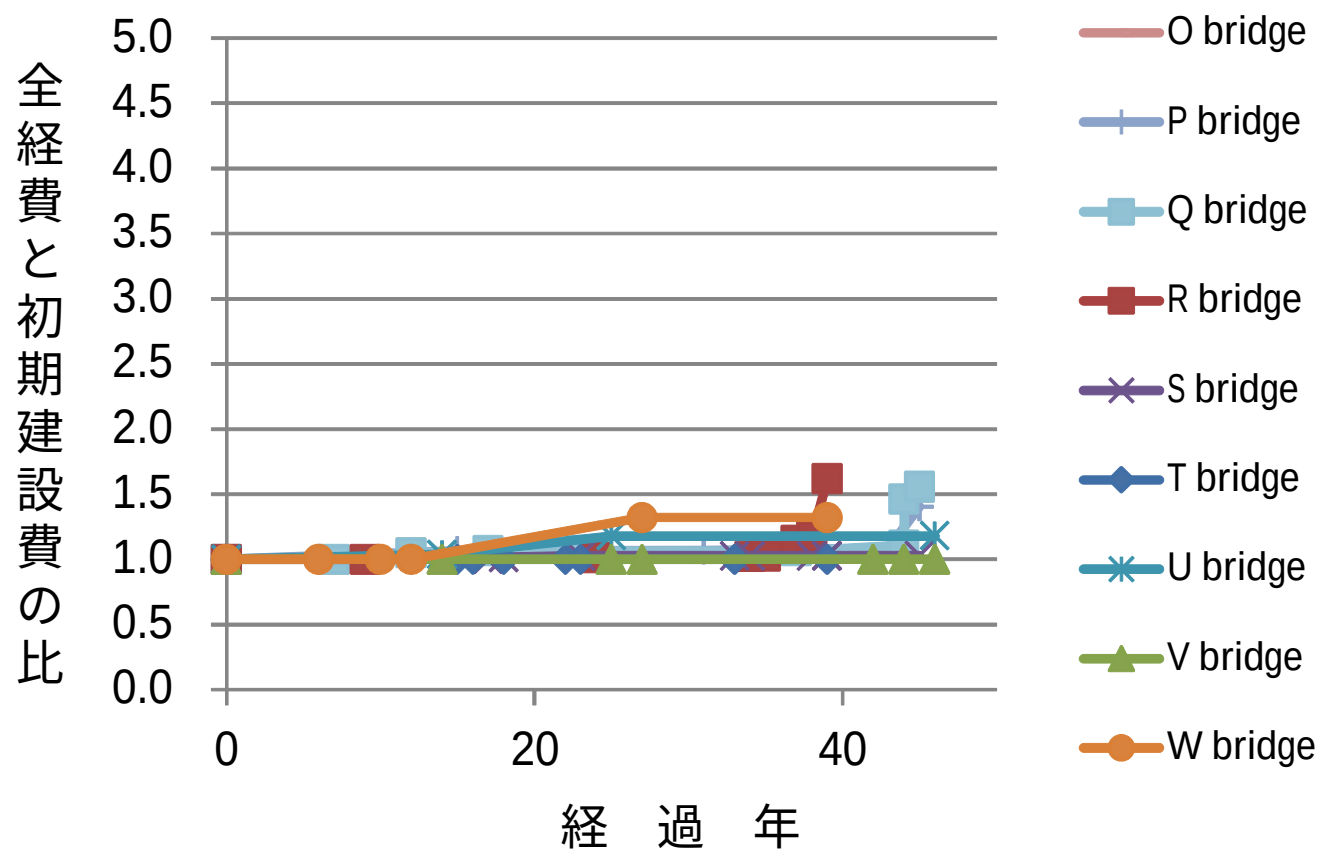
求められる技術開発

- 鋼材の腐食状況の把握
 - はつり (破壊) → 非破壊
 - 定性的 → 定量的
 - 部分的 → 全体
 - 鋼材の腐食速度の推定
 - 補修・補強工法の経時変化
-

構造物は、**供用年数**を具体的に定めることで、計画・設計段階から維持管理において、種々の事項に関する経済性の検討が可能となる。それと同時に、劣化に関する必要な知識、情報も明確になる。

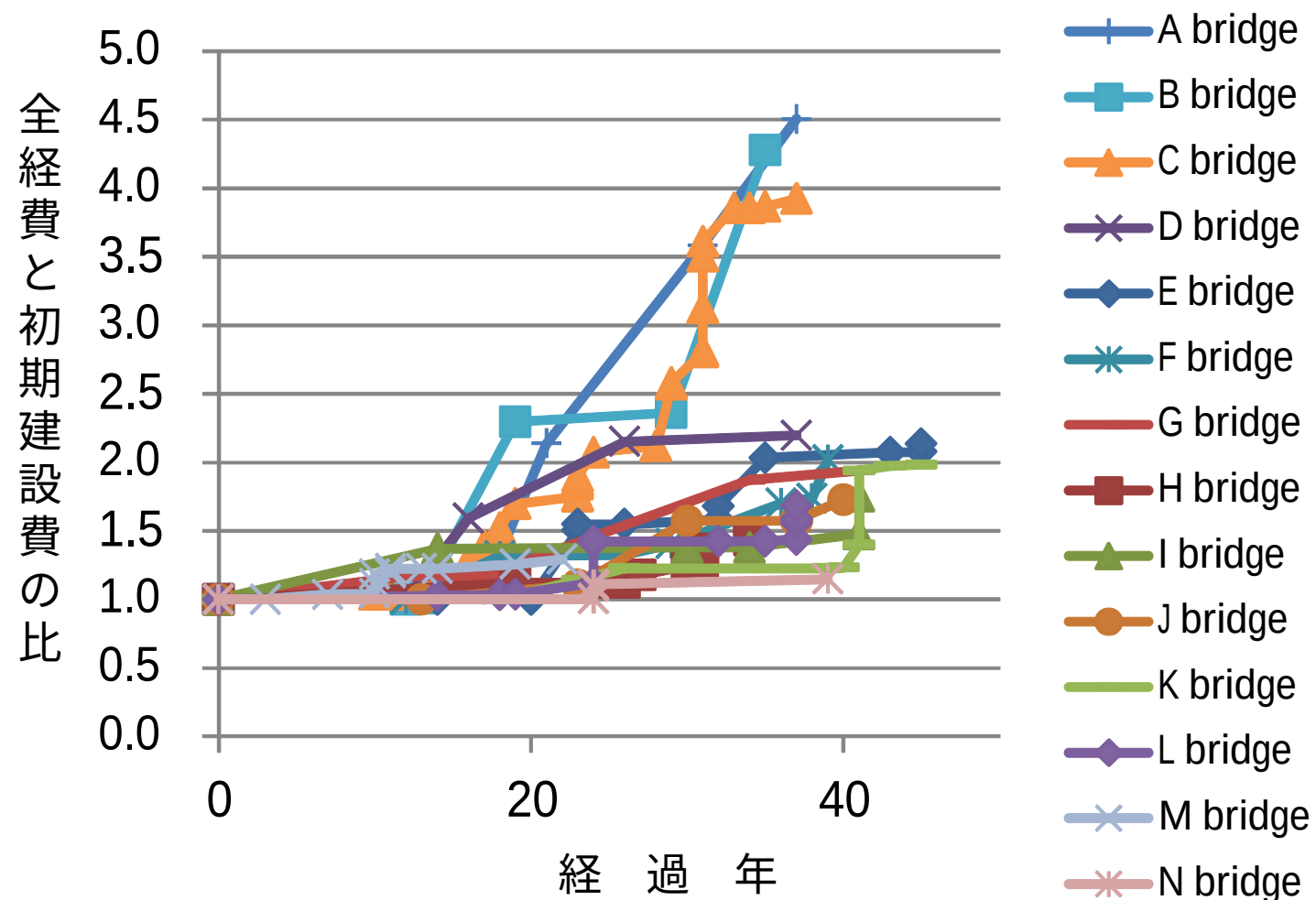
性能の経年劣化については、十分な知識が蓄積されていないが、一般には、**初期段階**で対応すると、経年劣化の効果が高い。

参考：塩害橋の維持管理経費



海岸から500m以上離れている橋梁

海岸から150m以内にある橋梁



補修経費の比較

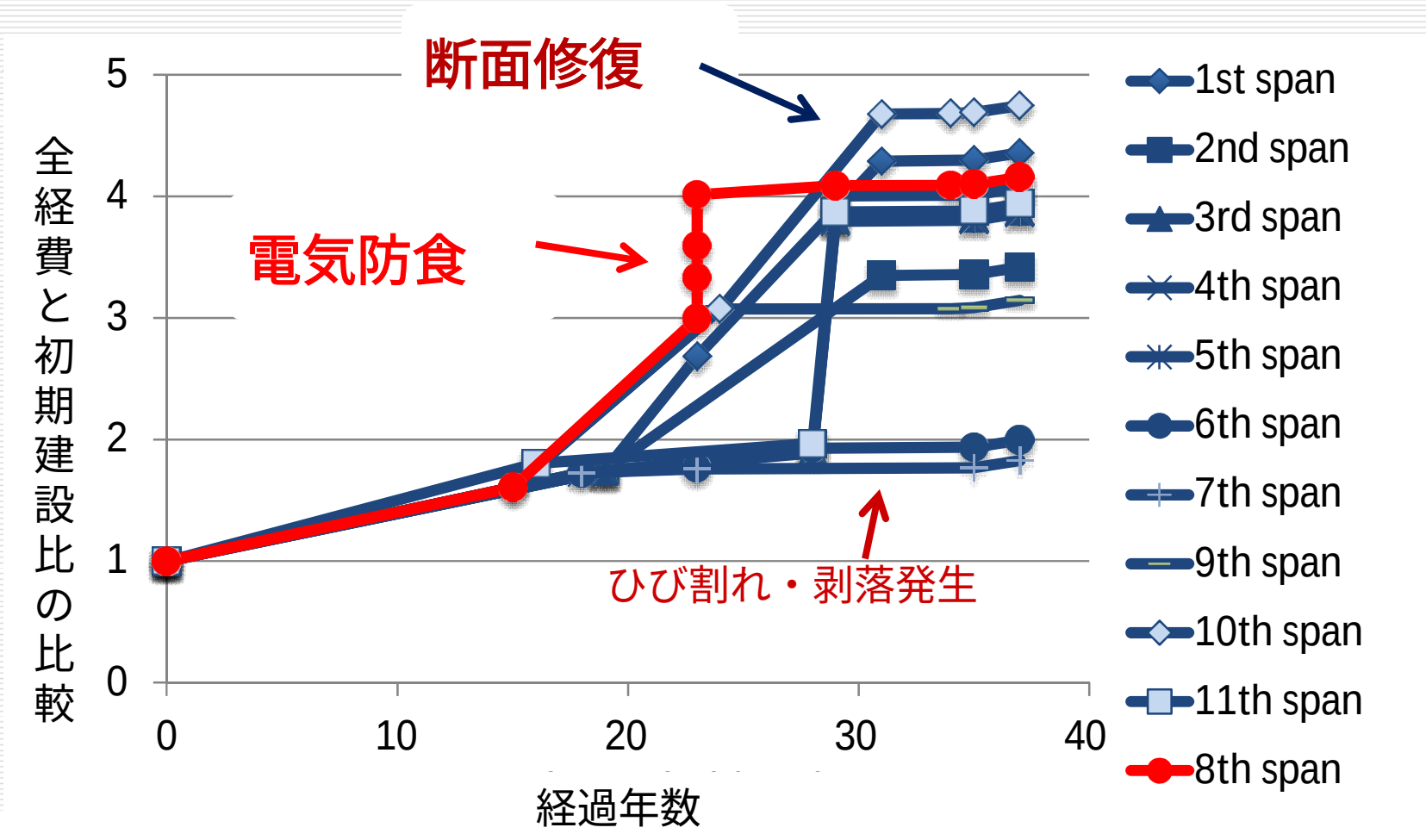
第7径間：断面修復



第8径間：電気防食

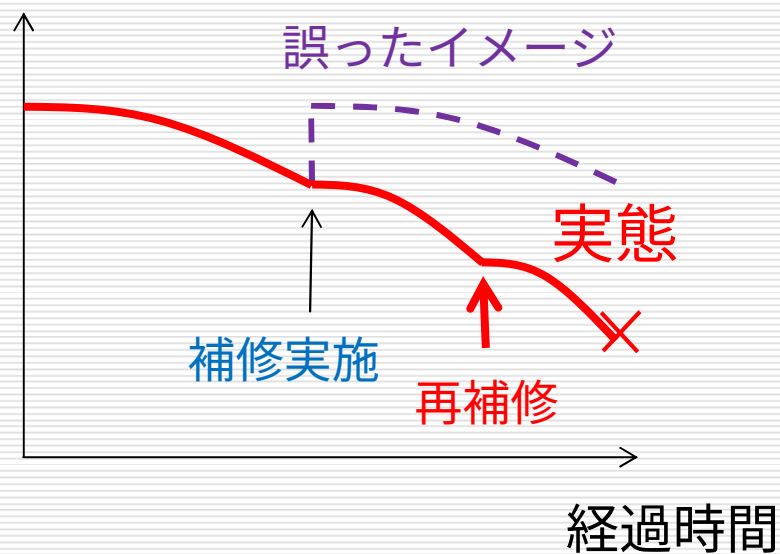


補修後15年経過

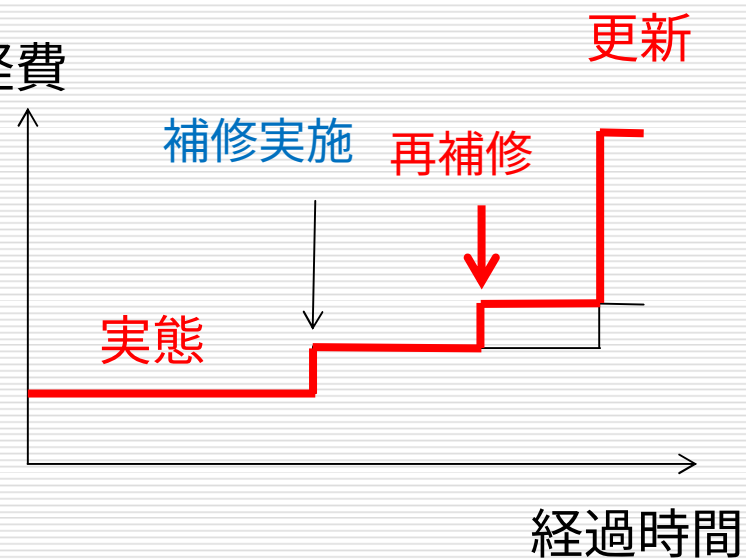


塩害：補修と性能および経費の実態

耐荷性能



経費



ご清聴ありがとうございました
