金沢大学SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）
連携講座「構造物メンテナンス講座」
開設記念シンポジウム

「コンクリート橋の塩害劣化と
電気防食工法による対策事例」

於　2015 年 3 月 27 日

金沢大学自然科学研究科大講義棟レクチャーホール

金沢大学SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）
連携講座「構造物メンテナンス講座」開設記念シンポジウム
「コンクリート橋の塩害劣化と電気防食工法による対策事例」の開催にあたって

平成２６年１１月，内閣府総合科学技術・イノベーション会議(CSTI)の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)[インフラ維持管理・更新・マネジメント技術]にて「コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料･構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発」（申請大学：金沢大学，共同研究グループ：金沢工業大学，石川工業高等専門学校，長岡技術科学大学，福井大学）が採択されました。本プログラムでは，北陸地方の社会インフラに携わる研究者や技術者，施設管理者を中心にして，北陸地方の抱えるコンクリート橋の早期劣化問題（塩害による鋼材腐食とアルカリシリカ反応(ASR)）の現状を正しく認識するとともに，今後の方針を共有するための活動を続けてきました。まず，平成２６年１２月９日の金沢大学 SIP のキックオフシンポジウム（於 KKR 金沢，参加者 96 名）を皮切りに，平成２７年２月４日に福井県越前海岸での塩害劣化橋梁の視察（国道 305 号，参加者１６名），平成２７年２月２４日，２５日の両日に富山県及び石川県の塩害･ASR による複合劣化橋梁の視察（神通川流域橋梁，NEXCO 中日本金沢支社管内北陸自動車道，参加者２５名）を実施してきました。また，平成２７年２月２７日には金沢大学 SIP により建設する大型コンクリート構造物載荷試験装置の基礎コンクリートに使用するフライアッシュ 15%含有 PC スラブの現場打設及び温度ひび割れの計測を公開試験とした際に，フライアッシュコンクリートの有効活用のための講習会（於金沢大学自然科学研究科，参加者 82 名）を開催しました。

北陸地方では，海岸地域での飛来塩分による塩害劣化，凍結防止剤の散布による塩害劣化，ASR による劣化，凍害およびそれらの複合劣化が生じたコンクリート橋が数多く存在しています。それらの早期劣化による劣化現象は，いずれも従来の経年劣化とは異なった，より深刻なものであり，劣化橋梁に対する調査診断から，評価判定，対策（補修･補強，更新）への一連のフローも大きく異なっています。すなわち，土木学会や日本道路協会の示方書により提案されてきた，画一的なマネジメントシステムとは異なった，「メンテナンスマネジメントシステム」を新たに構築することが必要であると考えています。そこで，プレストレストコンクリート技術のパイオニアとして実績があり，国内トップの PC ゼネコンとしてプレストレストコンクリート構造物の企画・設計・施工，土木建築構造物の維持・補修などの分野で高い技術を持つ，ピーエス三菱社と連携し，金沢大学自然科学研究科博士後期課程環境デザイン学専攻に構造物メンテナンスに関する連携講座を設置することになりました。ちなみに，わが国での最初の PC 橋は昭和 26 年に石川県七尾市に架けられた「長生橋」，「泰平橋」であり，これらの橋梁はピーエス三菱社の前身であるピ-エスコンクリートにより架設されたものです。一方，北陸地方では，国道 305 号（福井県）や国道 249 号（石川県）の塩害による再劣化橋梁にて「電気防食工法」が数多く適用されてきており，過酷環境下に曝された塩害劣化橋梁のメンテナンスにおける地方道路橋のモデルケースとして全国的に高く評価されています。そこで，今回の開設記念シンポジウムでは，北陸地方で実施した「電気防食工法」の実績と今後の課題について，実務に携わってきた研究者や技術者より講演をいただきます。

平成２７年４月１日に開設する，連携講座「構造物メンテナンス講座」は，金沢大学 SIP の研究活動の一環として，今後ますます重要になる構造物メンテナンスを担う人材育成とコンクリート構造物の維持管理に必要な基盤技術の構築，さらに長寿命化新技術の開発を目的にしています。当面，客員教授１名（ピーエス三菱，石井浩司氏）と客員准教授１名（ピーエス三菱，青山敏幸氏）の２名により構成され，環境デザイン学専攻の大学院前期課程と後期課程での教育･研究に従事していただきます。現在，金沢大学自然科学研究科の修士･博士課程では，社会人学生を積極的に受け入れており，長期履修（通常年度の倍の年数）での学位取得が可能になっています。金沢大学 SIP の関連分野での学位取得の希望者がおられましたらぜひ申し出ていただきたいと思います。最後に，本講座の開設にあたりご尽力とご支援を賜った，金沢大学の山崎学長，向副学長，加納理工研究域長，青木自然科学研究科長，並びに株式会社ピーエス三菱の森技術本部長に厚く御礼申し上げます。

平成２７年３月２７日
金沢大学 SIP 研究開発代表者
金沢大学教授　鳥居和之

SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）
連携講座「構造物メンテナンス講座」開設記念シンポジウム
「コンクリート橋の塩害劣化と電気防食工法による対策事例」

日時　3 月 27 日（金）14：00～
場所　金沢大学自然科学研究科大講義棟(1F)レクチャーホール

司会 金沢大学　教授　鳥居　和之

14:00-14:05
開会挨拶　金沢大学　教授　鳥居　和之

14:05-14:35
「コンクリート橋の塩害に対する維持管理優先度の考え方」
金沢工業大学　教授　宮里　心一

14:35-15:05
「電気防食工法の原理と経済的、合理的な工法の開発」
㈱ピーエス三菱　石井　浩司

15:05-15:15　休憩

15:15-15:45
「港湾コンクリート構造物における電気防食工法の適用事例」
東亜建設工業㈱　羽渕　貴士

15:45-16:15
「北陸自動車道 大慶寺川橋への電気防食の適用と追跡調査」
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋㈱　橘　吉宏

16:15-16:45
「能登半島（国道 249 号）での塩害とＡＳＲにより複合劣化した
コンクリート橋への適用事例」
アルスコンサルタンツ㈱　麻田　正弘

16:45-17:15
「福井県における電気防食の適用事例」
㈱日本ピーエス　濱岡　弘二

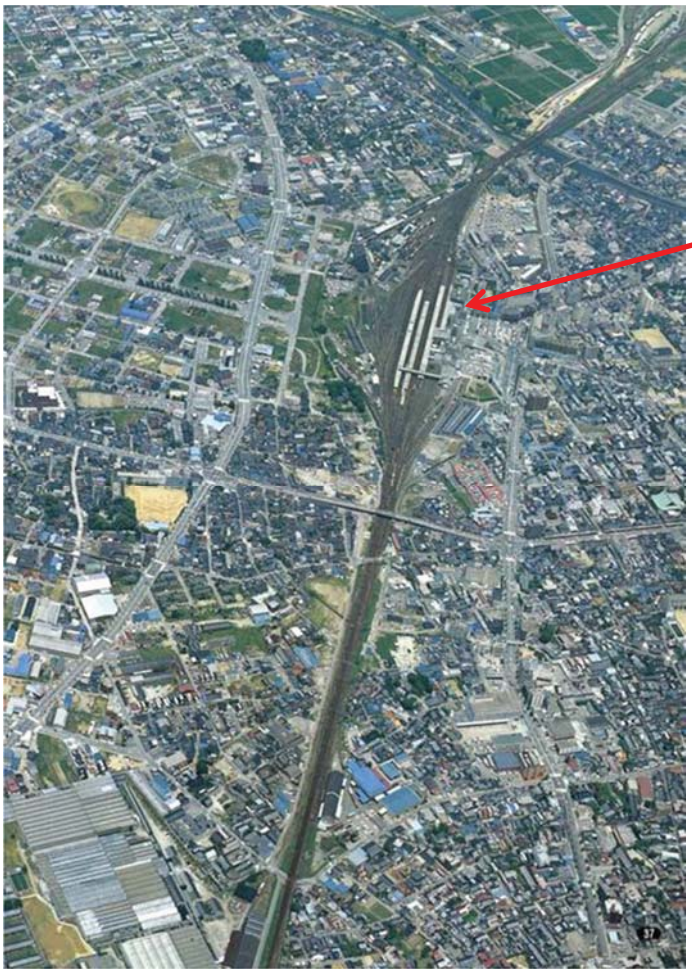
17:15-17:20
閉会挨拶　金沢大学　教授　鳥居　和之

コンクリート橋の塩害に対する維持管理優先度の考え方

WG1主査
宮里心一（金沢工業大学）

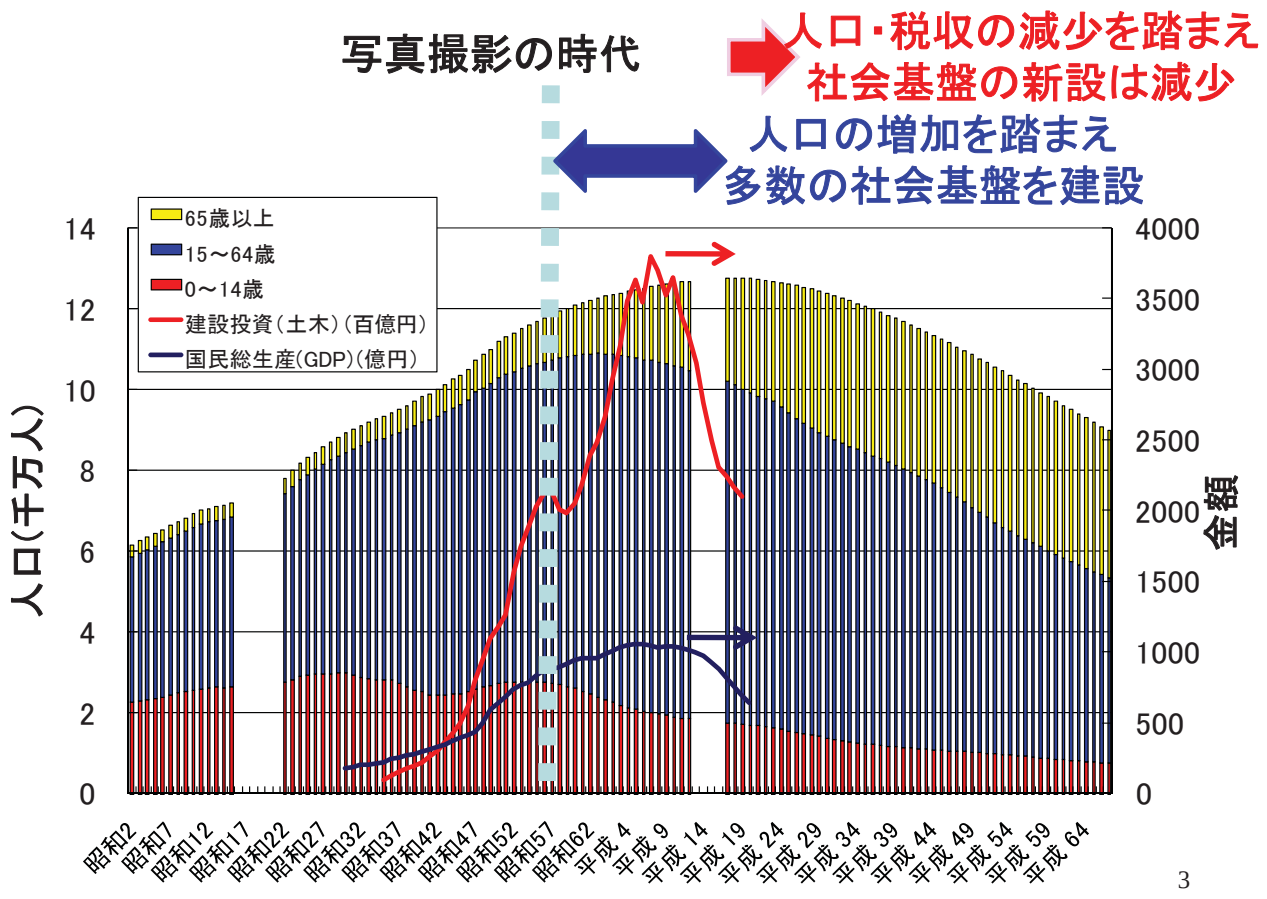
1

昭和58年の
航空写真



出典:「石川　わが山河
石川県航空写真大集」
発行所　北國新聞

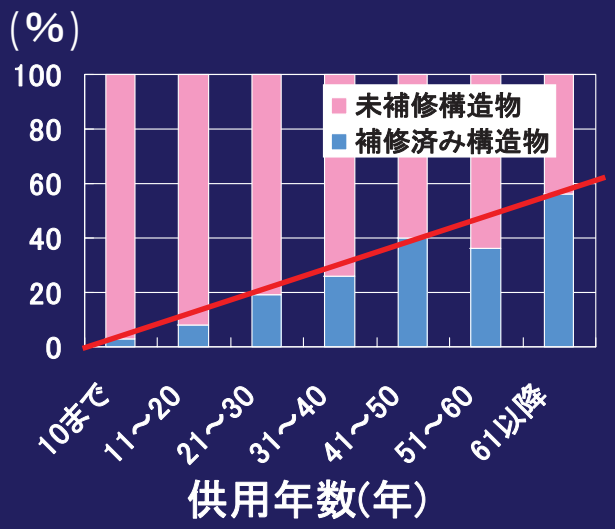
2



3

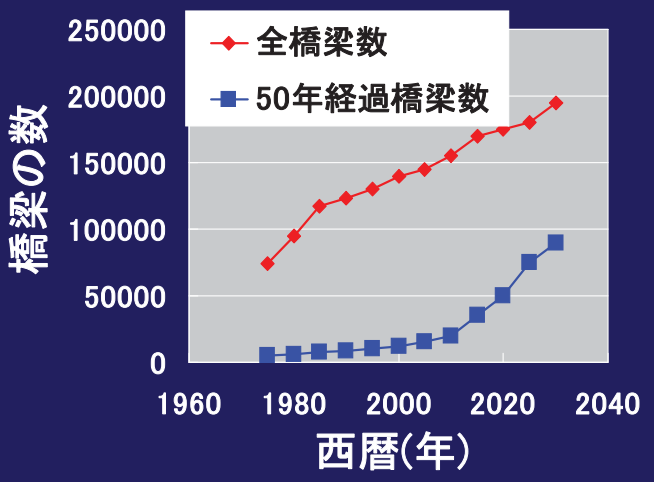
鉄筋コンクリート部材の補修状況

供用年数と補修の有無



出典：土木コンクリート
耐久性検討委員会

全橋梁数と 50年経過橋梁数



出典：メンテナンス産業
委員会提言書

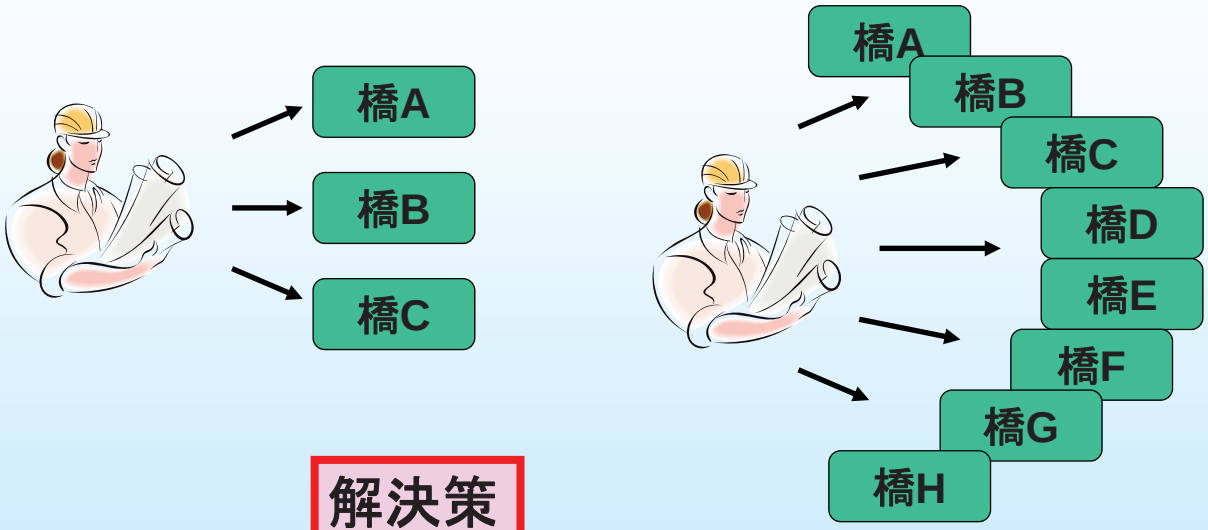
4

「維持管理すべき構造物」と「技術者」の関係

太平洋ベルト：今後

従来

北陸：既に待ったなし



解決策

・技術者を増やす。
・技術を向上させる。

SIPの目的

5

北陸地方におけるコンクリートの劣化

塩害

・冬季の暴風により、多量の塩分が日本海から飛来する。

・凍結防止剤に、塩分が含まれる。

アルカリ骨材反応

・産出される骨材の一部が、アルカリ骨材反応性を有する。

30年間程度の供用で早期劣化

6

発表のフロー

塩害のメカニズム

↓

塩害が生じる構造物の維持管理優先度
土木学会342委員会における研究紹介

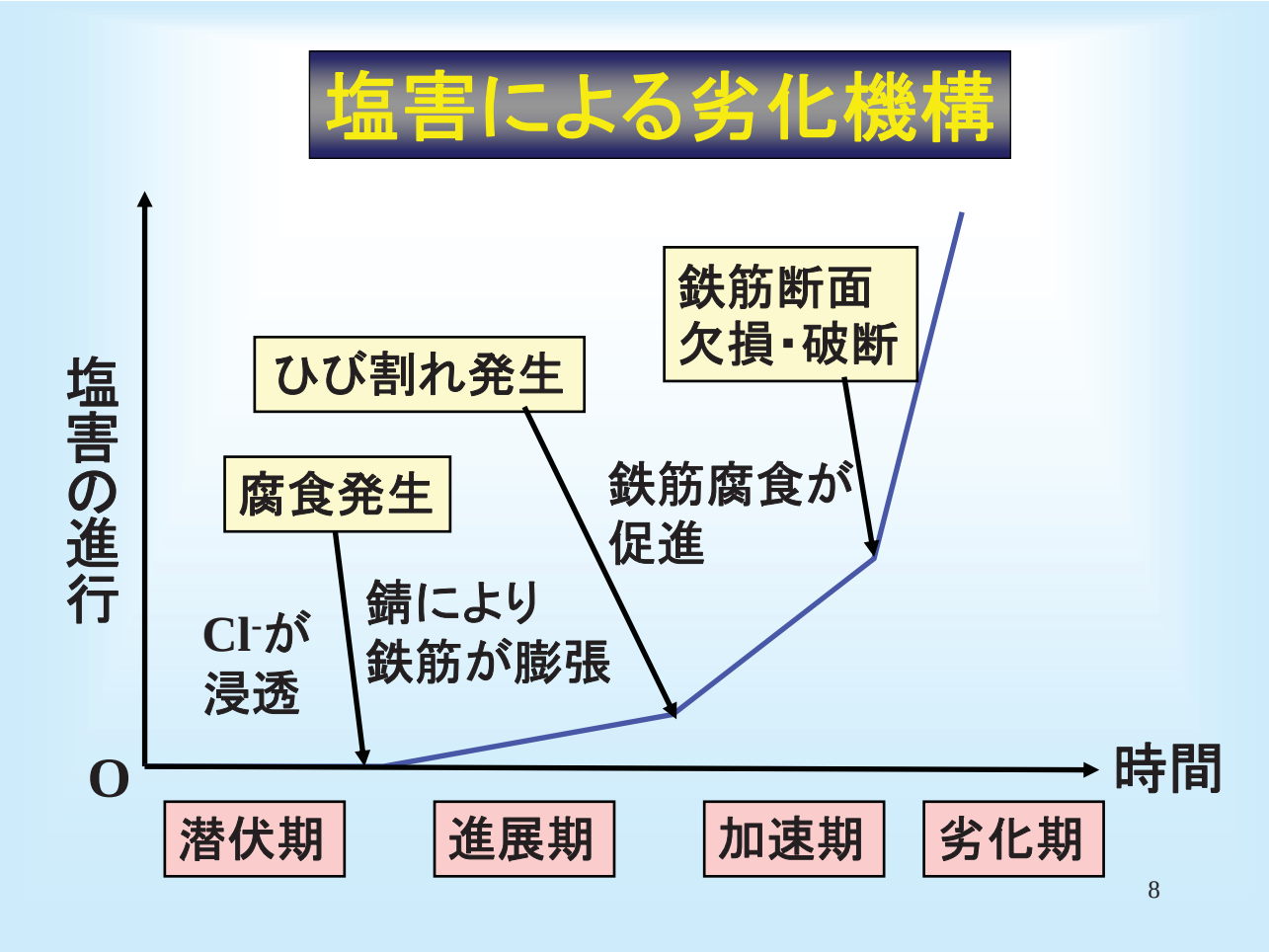
↓

点検も考慮したLCCの試算
土木学会338委員会における研究紹介

↓

電気防食による維持管理

7



潜伏期

塩化物イオンがコンクリートへ浸透する。

$$C_{(x,t)} = C_0\left(1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_d \cdot t}}\right)\right)$$

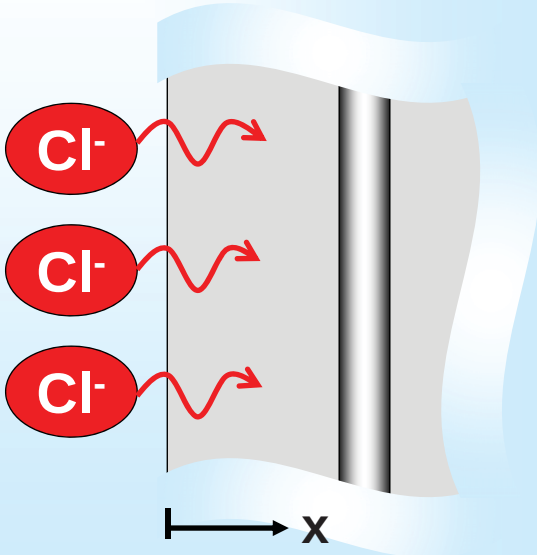
$C_{(x,t)}$：表面からx(cm)における t(年)経過時点の塩化物イオン量

C_o：表面塩化物イオン量

構造物の供用位置

D_d：塩化物イオンの拡散係数

コンクリートの品質

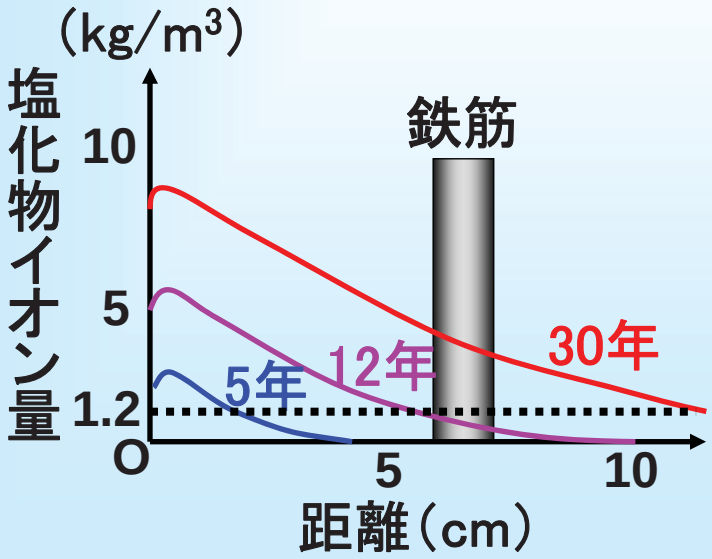


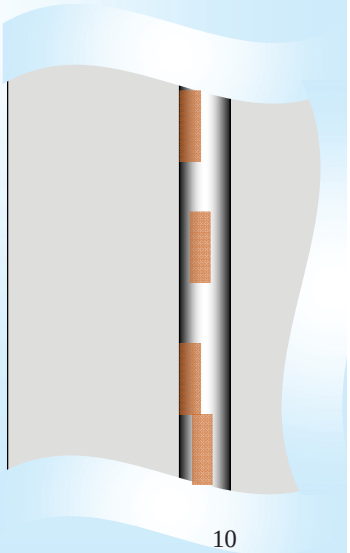
9

進展期

鉄筋が腐食する。

発錆塩化物イオン量＝1.2(kg/m³)





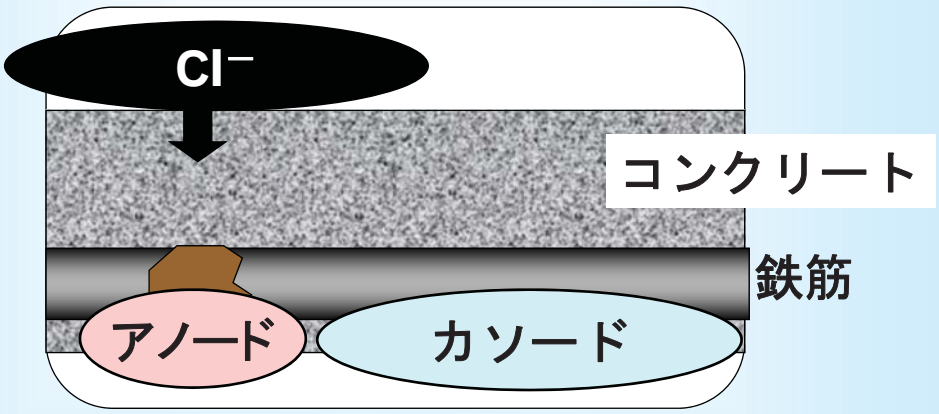
10

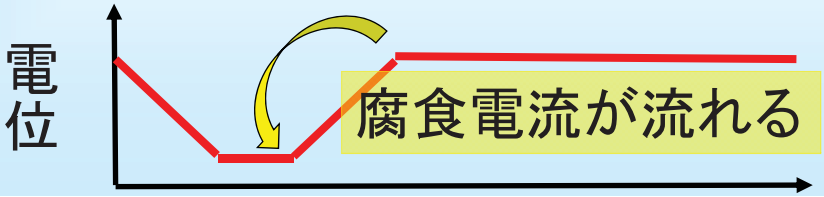
コンクリート中の鉄筋腐食

重要

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

カソード反応 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

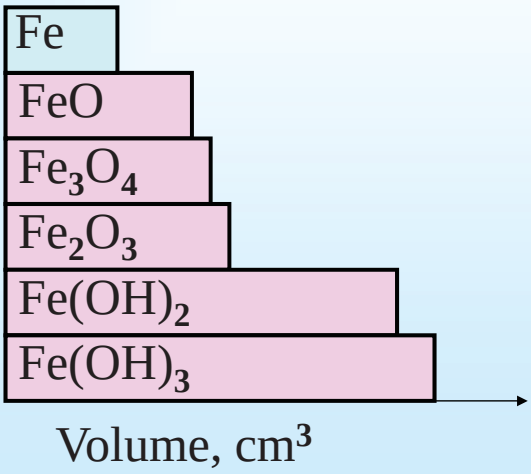


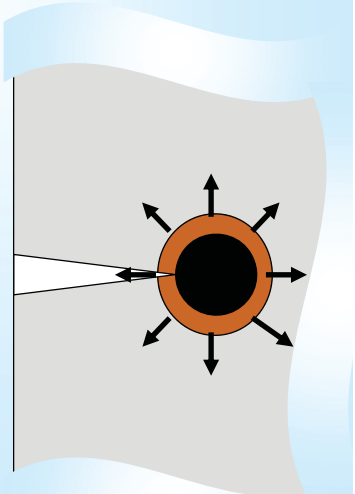


11

加速期

鉄筋が錆びにより膨張する。その膨張圧により、鉄筋軸方向にひび割れが生じる。





12

発表のフロー

塩害のメカニズム

↓

塩害が生じる構造物の維持管理優先度
土木学会342委員会における研究紹介

↓

点検も考慮したLCCの試算
土木学会338委員会における研究紹介

↓

電気防食による維持管理

13

「維持管理を優先すべき構造物」は？

- 未だ劣化していないが、スピードは速そう
- 劣化は始まっているが、進行は遅い
- 人や車の通行量が多く、重要だなぁ
- 他には、迂回するルートが無いなぁ
- 治しにくいなぁ

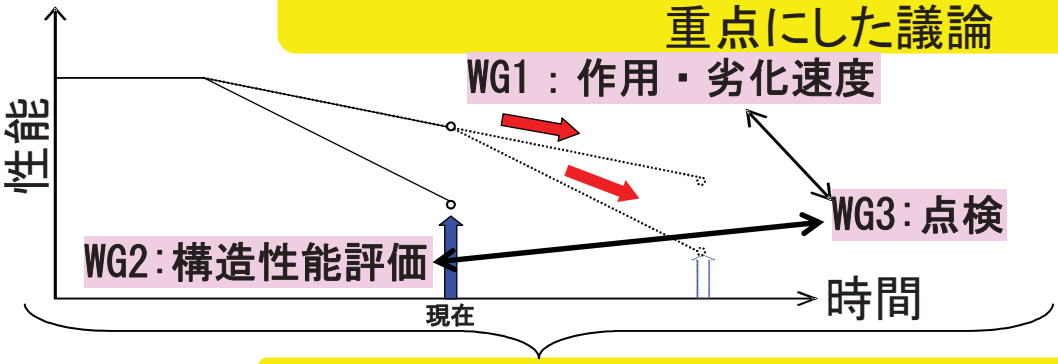
14

材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究委員会

委員長　宮里　心一(金沢工大)　幹事長　山本　貴士(京大)

目的　維持管理優先度の決定およびその先にある予算計画策定の段階において，工学的情報を取り入れることのできる土壌を構築する。

WG1～WG3⇒部材あるいは構造物を重点にした議論



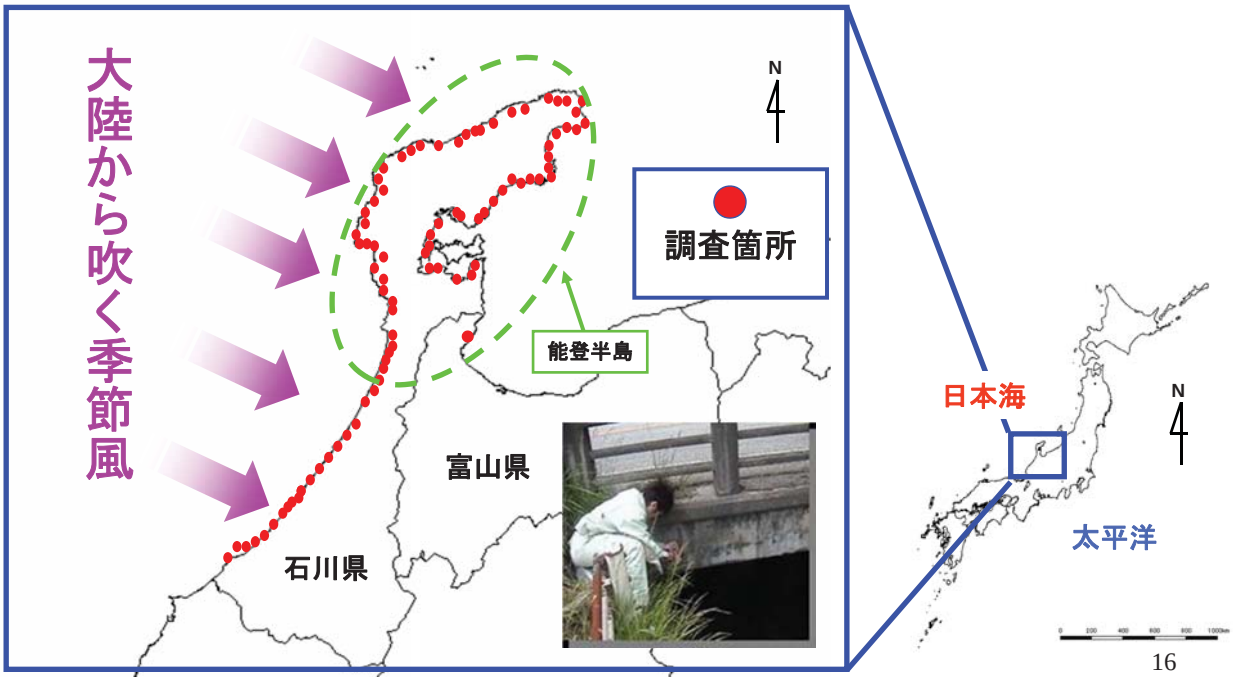
WG4：システム　構造物群を対象としたﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄについて整理

15

2005毛利修論　　WG1

調査概要

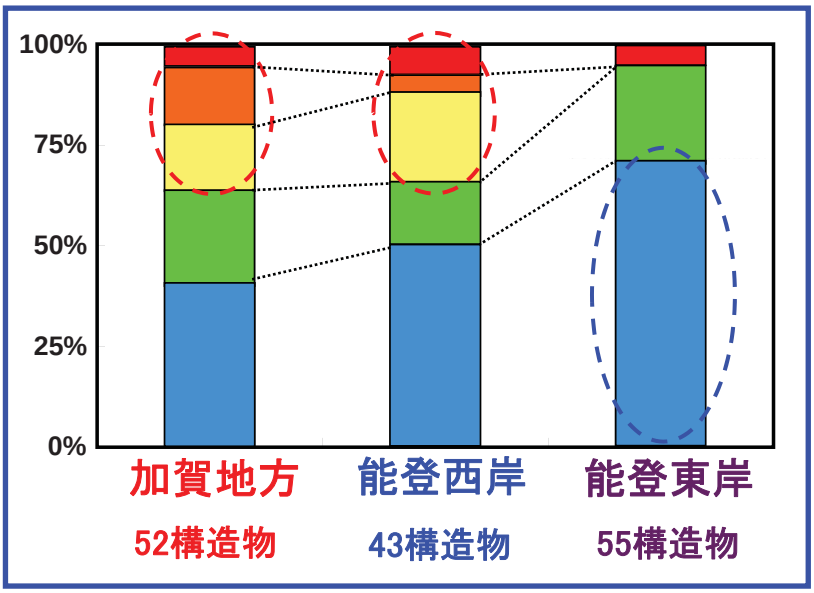
能登半島の海岸近傍における(200m以内)150箇所のコンクリート構造物について、目視やシュミットハンマー等を用いて調査を行った。

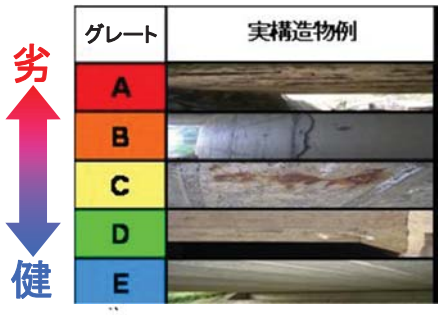


16

WG1

劣化グレードの頻度





劣化グレードの頻度が大きく異なる

17

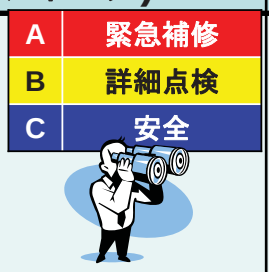
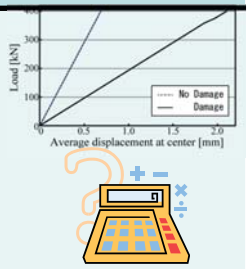
WG1

飛来塩分量を各地で測定（青森県の例）

飛来塩分の作用強度を考慮した
維持管理優先度の策定に活用

18

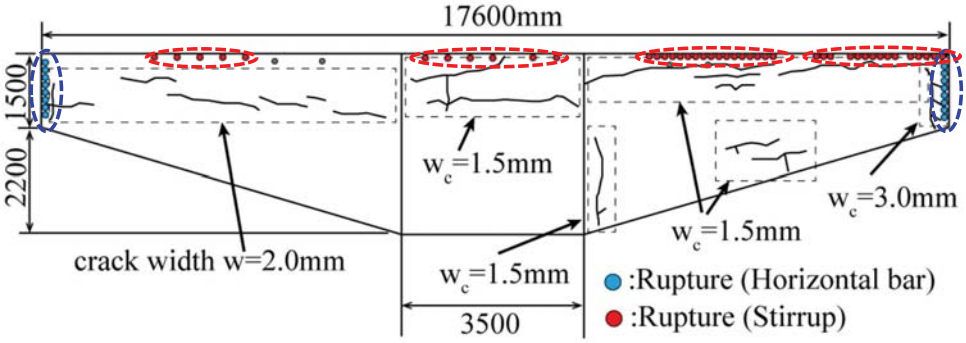
構造性能の評価方法の比較

方法	半定量評価 (グレーディング)	数値解析による定量評価
概要	見掛けの劣化進行の状態を評価する 	要求性能に対する残存耐力の割合を計算する 
長所	多数の構造物のレベルを短時間で評価できる	維持管理戦略に基づく評価を、具体的な数値を踏まえて明確に判断できる
短所	対策あるいは更新の要否の判断が難しい	高いレベルの技術と調査を要する

グレーディングの際の点検データのみを、入力値に用いた構造解析の結果と、グレーディング評価を比較する。

19

ASRにより劣化したT型橋脚の事例



定期点検
ひび割れパターン
→ ASR? →
詳細点検
鉄筋破断

グレーディング評価

道路橋のASRに対する維持管理要領

- 鉄筋はASRにより破断している。
- ASRにより幅2mm以上のひび割れが生じている。

→ 補修が必要

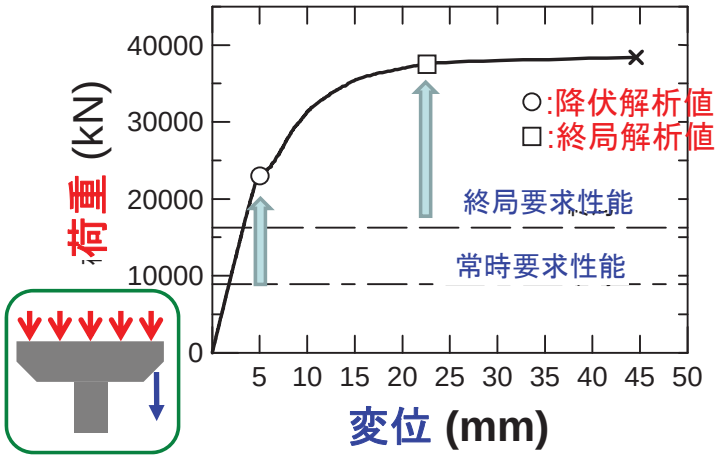
20

3D－FEM解析

解析条件

- コンクリートの強度
  調査データの平均値
- 鉄筋の配置
  離散鉄筋要素
- 破断鉄筋
  不連続

Analysis results



ASRにより主筋が破断しているにも拘らず、要求性能を満足する。

代入値に多くの仮定を含むため、精度は高くない。

↓

数値解析結果は、要求性能と比較できる。

21

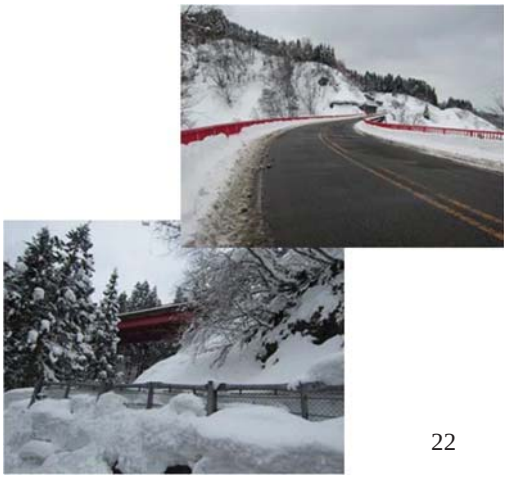
WG3

点検・調査技術の展望

- 対策が必要と診断された構造物に対しては、目視に加えて、精度と頻度を向上させた点検（2次選定）を組み合わせる.
- 構造物形式などの条件ごとに変状傾向を分析して，特有の変状に応じた点検項目と点検間隔を設定する.

PCに注目

- 山間部における足の高い橋梁に対する近接目視の方法を構築する。



22

高速道路の事例

WG4

現行 点検により変状を見つけた段階で，様々な計画が検討・実施される．

図　道路構造物の維持管理サイクル（NEXCO）

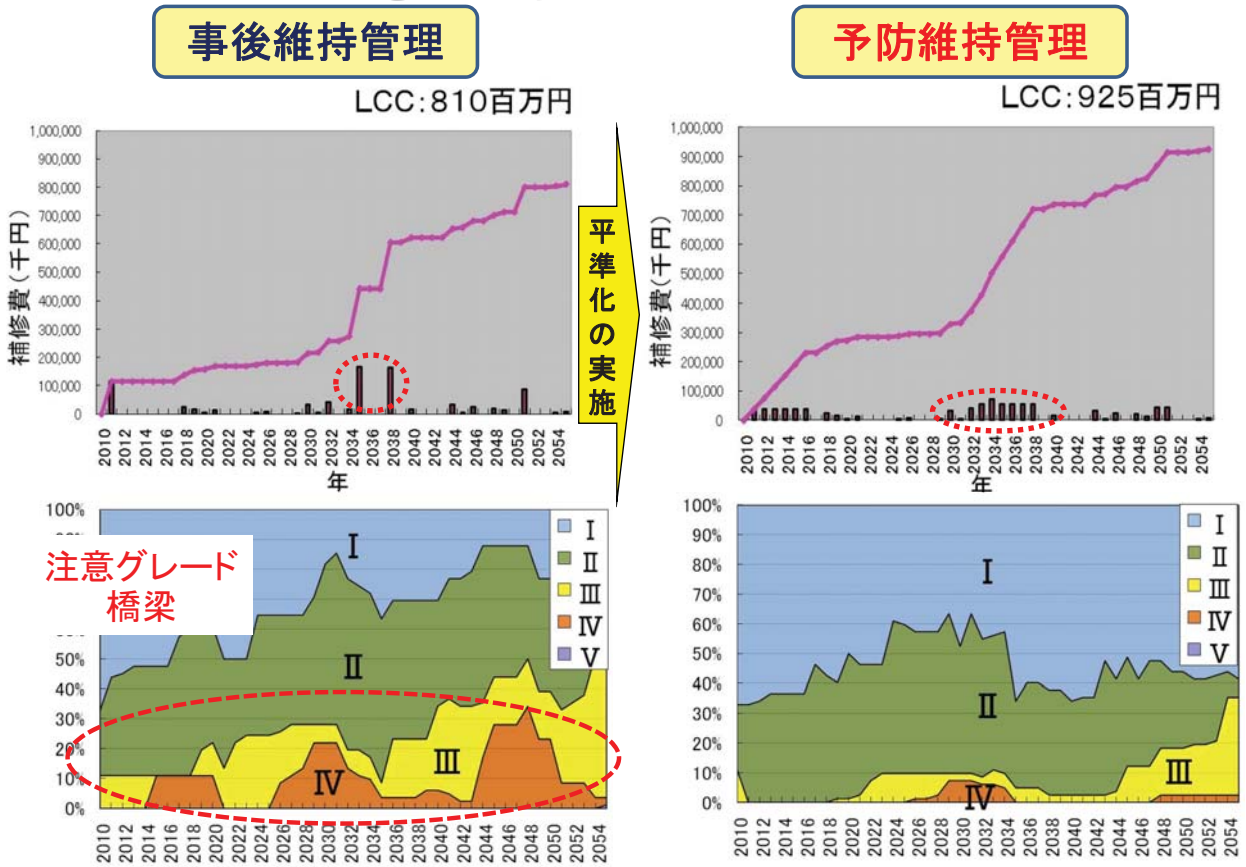
今後 老朽化橋梁が爆発的に増加するなかで，現行の維持管理水準を確保するためには，構造物の中長期的な視点を持った維持管理の構築が課題．

⇒橋梁マネジメントシステム（BMS）の実運用に取り組んでいる．

23

高速道路に対するシミュレーションの例

WG4



24

WG4

中核都市の事例

都道府県・政令都市　平成20年3月～平成24年3月　策定率100%
他　地方自治体(市町村)　～平成26年3月　策定率27%
⇒　初回の定期点検記録

（1）長寿命化修繕計画の内容

（2）橋梁点検
・基礎データ収集要領(案)

（3）評価手法
・総合評価手法

（4）致命的な損傷の有無
・事故・損傷事例との対比

（5）補修補強の要否判定
・区分分け(健全、要補修、緊急)

（6）対策方法の検討

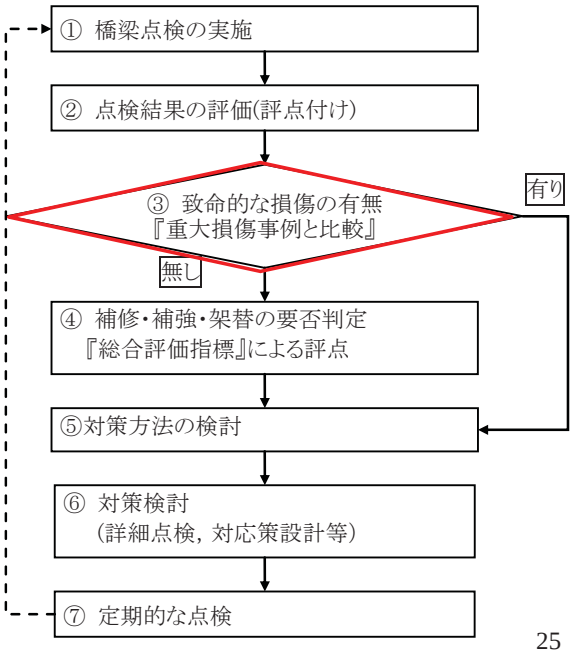


図 2.4.12　計画の流れ

25

WG4

道路橋定期点検要領

平成26年6月　国土交通省　道路局
道路法施行規則第4条の5の2の規定に基づき行なう
点検についての、最小限の方法、記録項目

判定区分

区分		状態
Ⅰ	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
Ⅱ	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
Ⅲ	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を構ずべき状態。
Ⅳ	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

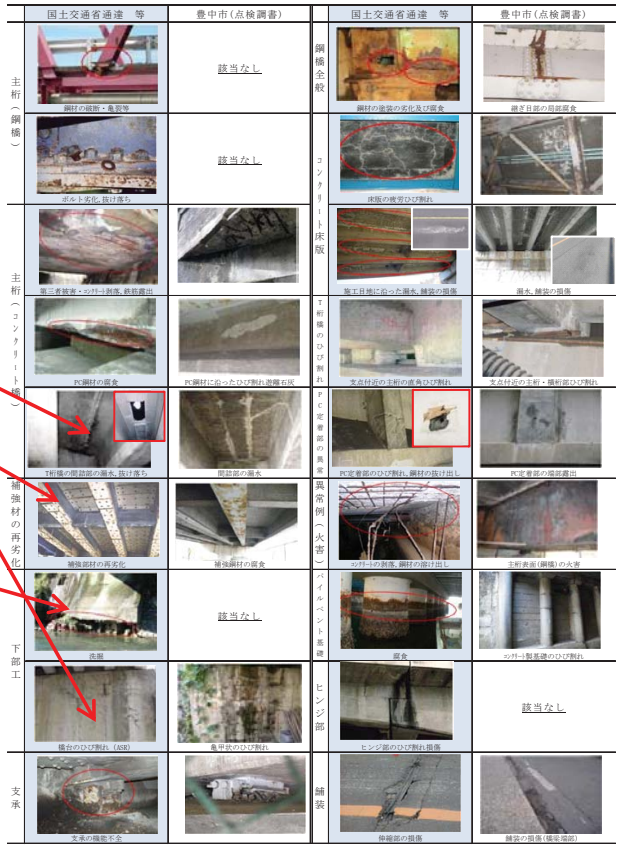
26

WG4

致命的な損傷の例

参考となる資料

計画策定の参考	平成16年3月 国土交通省	橋梁の定期点検要領（案）
	平成19年5月 国土交通省	道路橋に関する基礎データ収集要領(案)
	平成21年4月 国土交通省	平成19年度道路構造物に関する基礎データ集 (道路橋の総合評価指標)
	平成21年3月 国土交通省	道路橋の計画的管理に関する調査研究 -橋梁マネジメントシステム(BMS)
損傷の事例に参考	平成15年1月 国土交通省	PCT桁橋の間詰めコンクリート点検要領(案)
	平成16年3月 国土交通省	橋梁における第三被害予防措置要領（案）
	平成16年12月 国土交通省	道路橋の定期点検に関する参考資料 -橋梁損傷事例集-
	平成20年3月（ASRに関する対策検討委員会）	アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ｶﾞｲﾄﾞﾗｲﾝ（案）
	平成20年4月（橋梁塩害対策検討委員会）	塩害橋梁維持管理マニュアル(案)
	平成21年3月 国土交通省	道路橋の重大損傷　-最近の事例-　[鋼橋(上部工),コンクリート橋(上部工),下部構造,床版,その他]



国土交通省道路局：道路の予防保全の推進，道路橋の重大損傷
ー最近の事例ー　平成21年3月，
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html

27

維持管理の優先度を決定するシステム

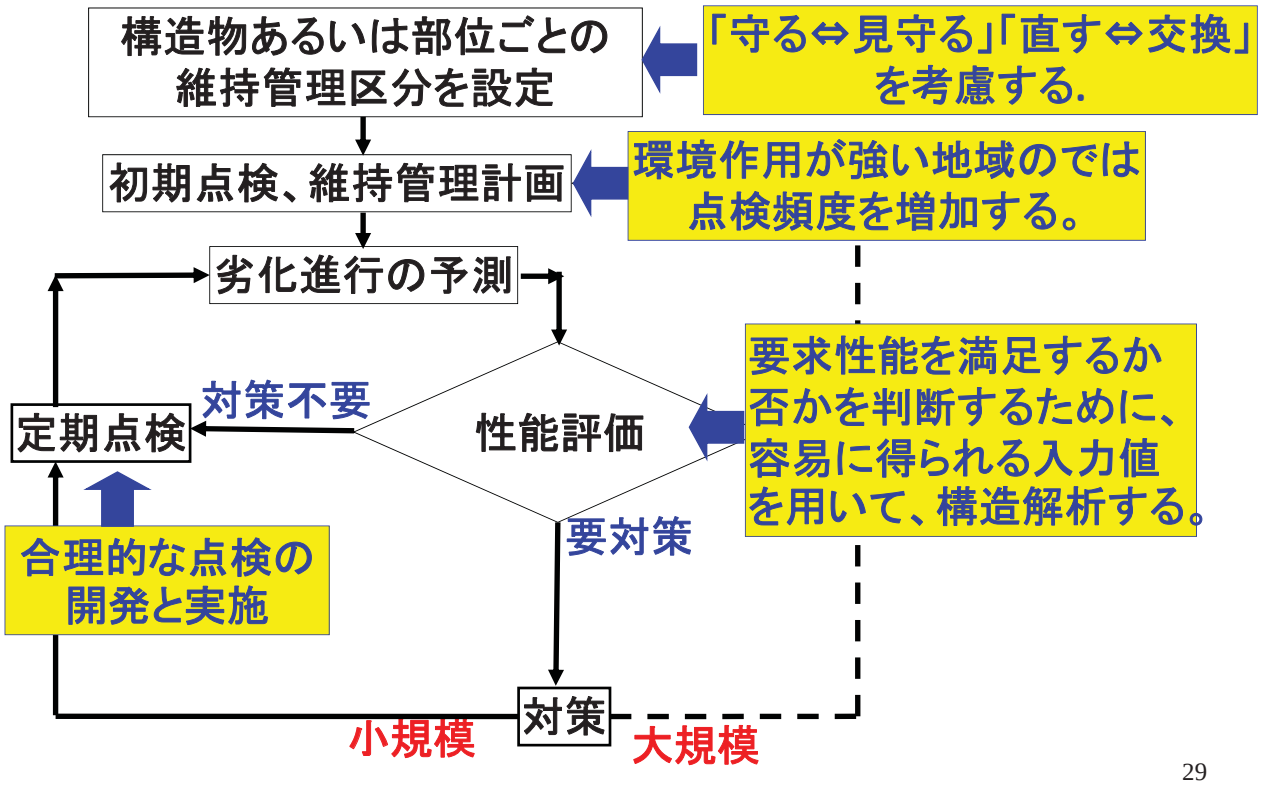
個別の構造物や部位に対しては，従来どおりに「点検」「劣化機構の推定および劣化予測」「性能の評価」「対策の要否判定」「対策」を行う．

「点検」や「対策」の工程前に，**路線や地域の構造物群の内，どの構造物や部位を対象にするかの「優先度決定」を行う流れ**を組み入れる．

必ず守ることに加えて、**見守るだけで「あえて対策しない管理（安楽死）」を選択肢に含める**。

28

優先度を考慮した維持管理フロー(案)



土木学会における関連委員会の流れ

331（H16～20）
材料劣化が生じた構造物の力学性能を調査した.

338（H19～24）
防食技術を調査した.
対策費と点検費を考慮してLCCを算出した.

WG2　　WG4

342（H22～）
構造物群を考慮して、維持管理の実用化に向けた応用問題を調査している.

WG1

348（H25～）
構造物に対する作用環境を調査している.

発表のフロー

塩害のメカニズム

↓

塩害が生じる構造物の維持管理優先度
土木学会342委員会における研究紹介

↓

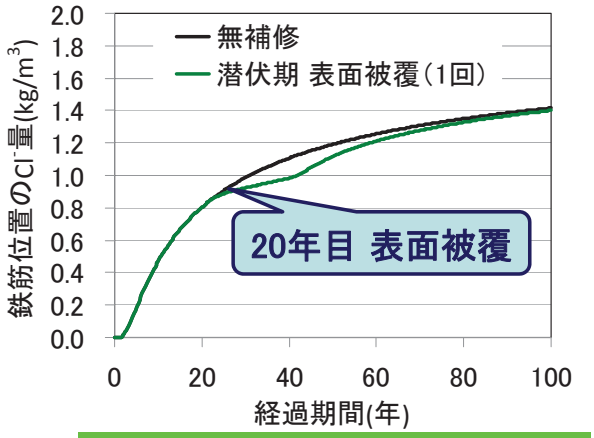
点検（頻度＋費用）も考慮したLCCの試算
土木学会338委員会における研究紹介

宮里心一，上田隆雄，野島昭二：補修費用のみならず点検費用も考慮したLCC の試算，コンクリート構造物の補修･補強･アップグレード論文報告集，12巻，pp.165-172，2012

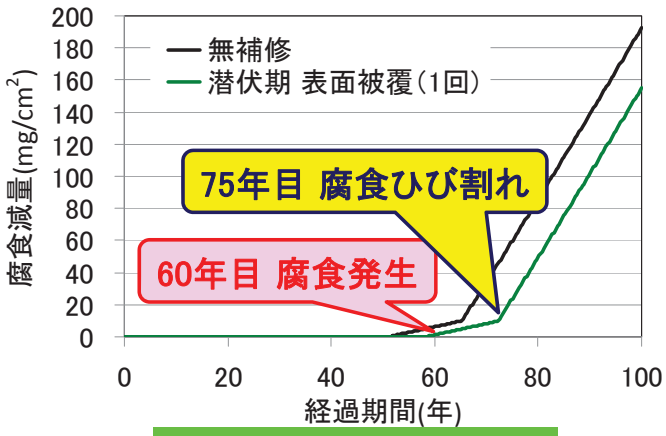
↓

電気防食による維持管理

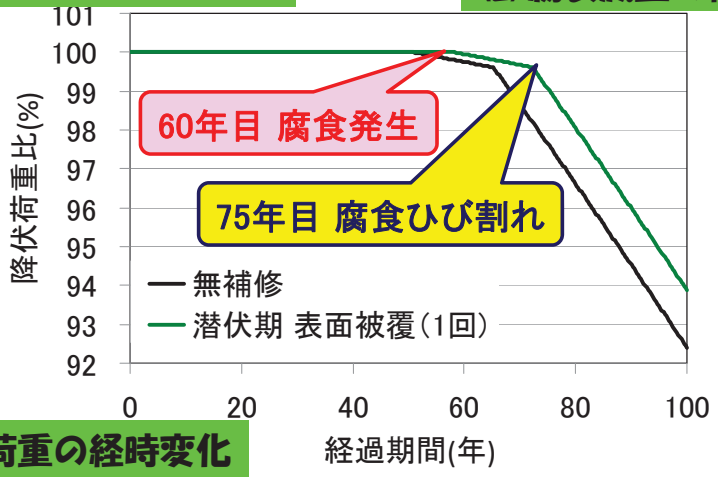
31



(1) 塩化物イオン量の経時変化



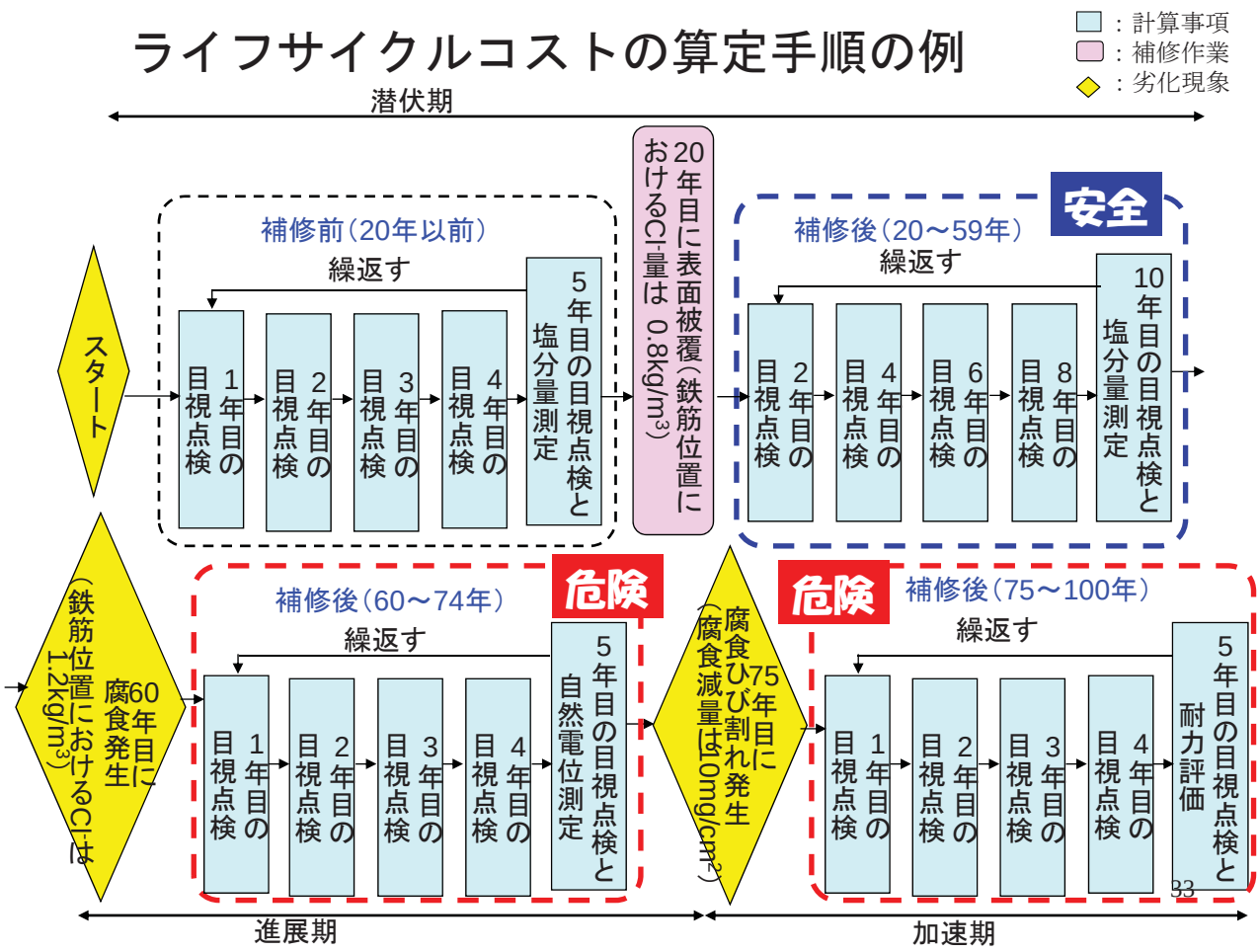
(2) 腐食減量の経時変化



(3) 降伏荷重の経時変化

32

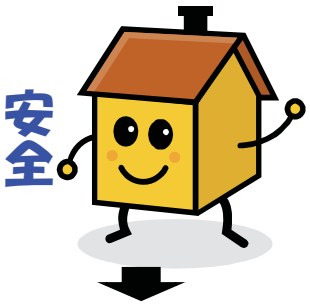
ライフサイクルコストの算定手順の例



33

計算に用いた点検の条件

点検時期	調査項目	点検間隔（年毎）		点検費用
		無補修，補修前	表面被覆後	
潜伏期	外観（目視）	1	2 安全	280(円/m²)
	塩化物イオン量	5	10 安全	22000(円/25m²)
進展期	外観（目視，浮き，はく離）	1	危険	500(円/m²)
	自然電位	5	危険	5900(円/m²)
加速期	外観（目視）	1	危険	280(円/m²)
	耐力	5	危険	250000(円/件)

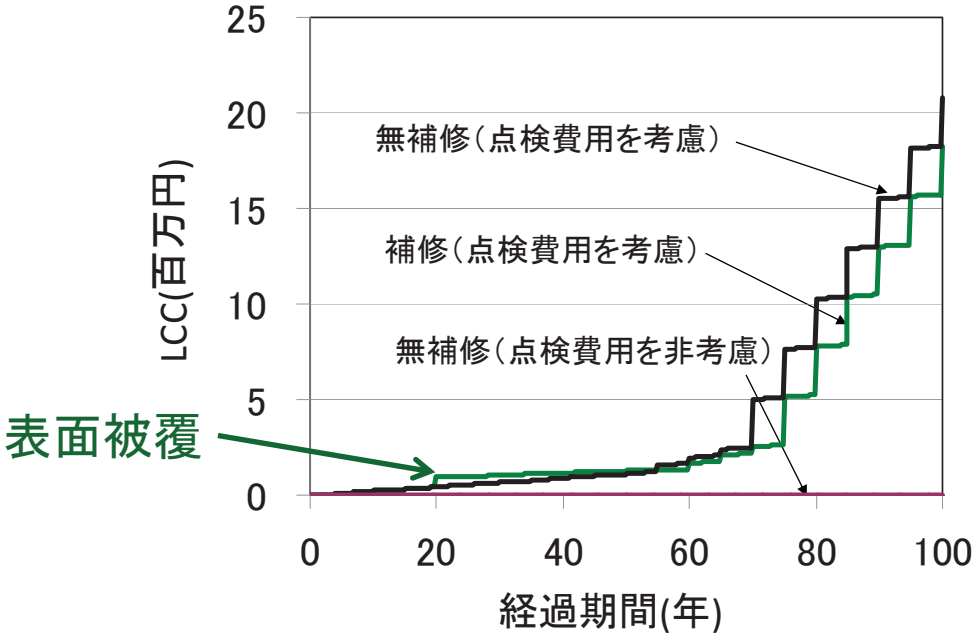


点検頻度が少ない

点検頻度が多い

34

LCCの試算例



計算に用いた補修の費用

補修費用	10000円/m²
再補修前の費用	5000円/m²

65年目の進展期に電気防食工法を適用

計算に用いた点検の条件

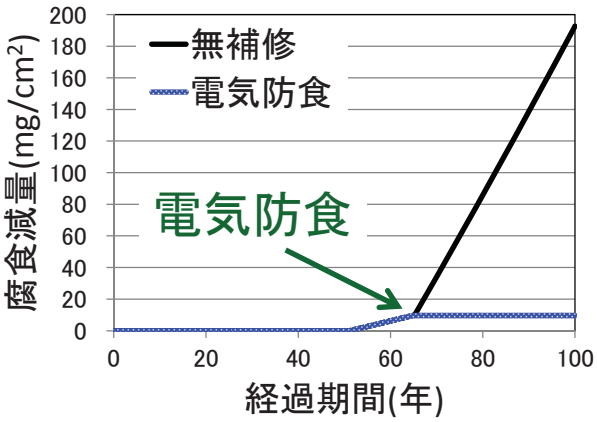
点検時期	調査項目	点検間隔（年毎）		点検費用
		無補修，補修前	電気防食後	
潜伏期	外観（目視）	1	1	280(円/m²)
	塩化物イオン量	5	なし	22000(円/25m²)
進展期	外観（目視，浮き，はく離）	1		500(円/m²)
	自然電位	5		5900(円/m²)
加速期	外観（目視）	1		280(円/m²)
	耐力	5		250000(円/件)

SIPの研究が進み、実績が増せば、2年に増やせる

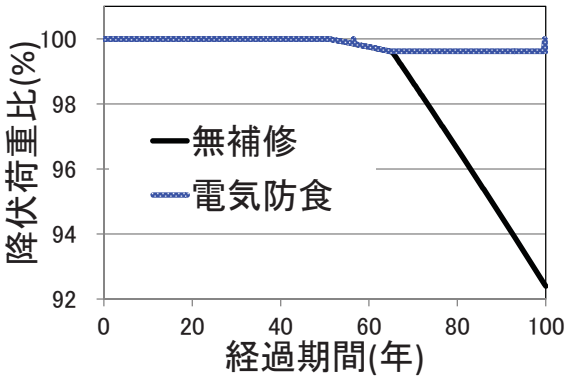
計算に用いた補修の費用

補修費用	120000円/m²
維持管理の費用	600円/m²/年

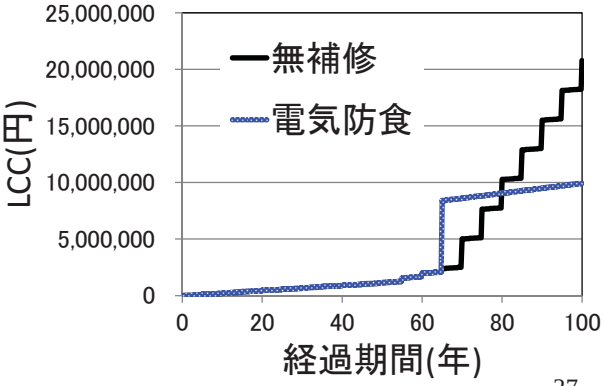
電気防食に対する試算結果



(1) 腐食減量の経時変化



(2) 降伏荷重の経時変化



(3) LCCの経時変化

発表のフロー

塩害のメカニズム

↓

塩害が生じる構造物の維持管理優先度
土木学会342委員会における研究紹介

↓

点検も考慮したLCCの試算
土木学会338委員会における研究紹介

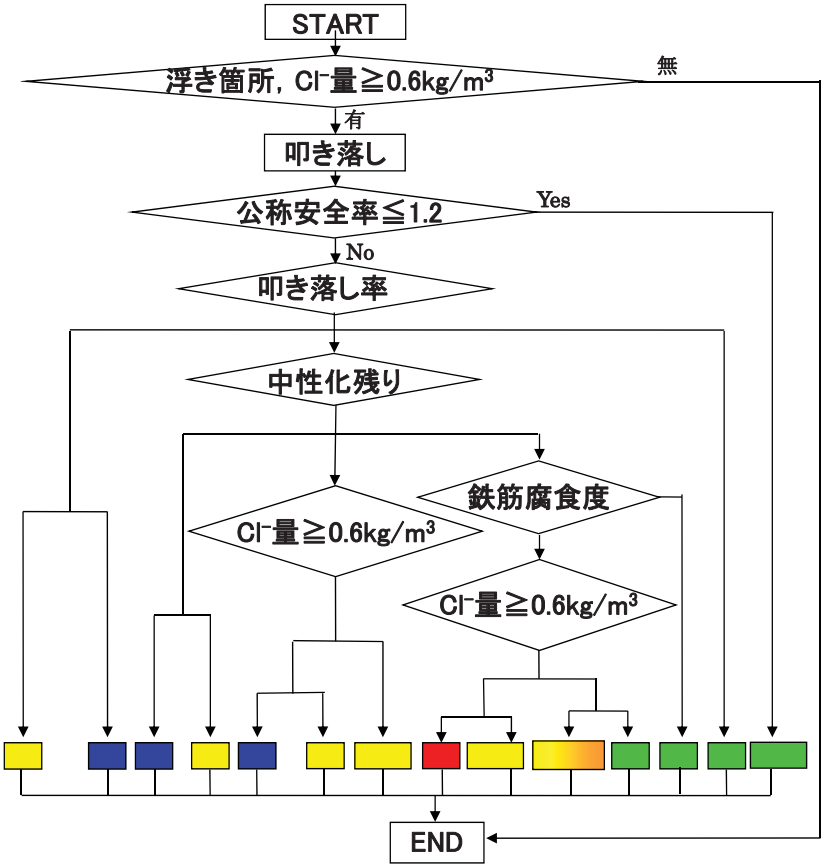
↓

電気防食による維持管理

既存の補修工法選定システムの考え方

対象構造物	対策時期				対策工法						
	潜伏期	進展期	加速期	劣化期	表面処理	断面修復	電気防食	脱塩	樹脂注入	再アルカリ化	FRP接着
鉄道（JR西日本）	○	○	○		○	○	○	○		○	
鉄道（JR東海）	○	○	○		○	○					
港湾（大井埠頭）	○	○	○	○	○	○	○				
コンクリート全般（JCI）	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
建築物（建築学会）	○	○			○				○		

39



電気防食工法は、事後保全に適用

予防保全への転換期に重要

選定される補修工法

- 全面表面処理工法
- 全面断面修復工法
- 部分断面修復工法
- 脱塩・再アルカリ化工法，電気防食工法
- 再アルカリ化工法

JR西日本における補修工法選定の流れ

40

補修対策の中の電気防食

代表的な補修工法

（1）　表面塗装工法

（2）　断面修復工法

（3）　電気防食工法

（4）　脱　塩　工　法

電気防食工法のメリ・デメ

①抜本的な工法

②効果が把握できる

③コンクリートに塩化物が含まれていてもOK

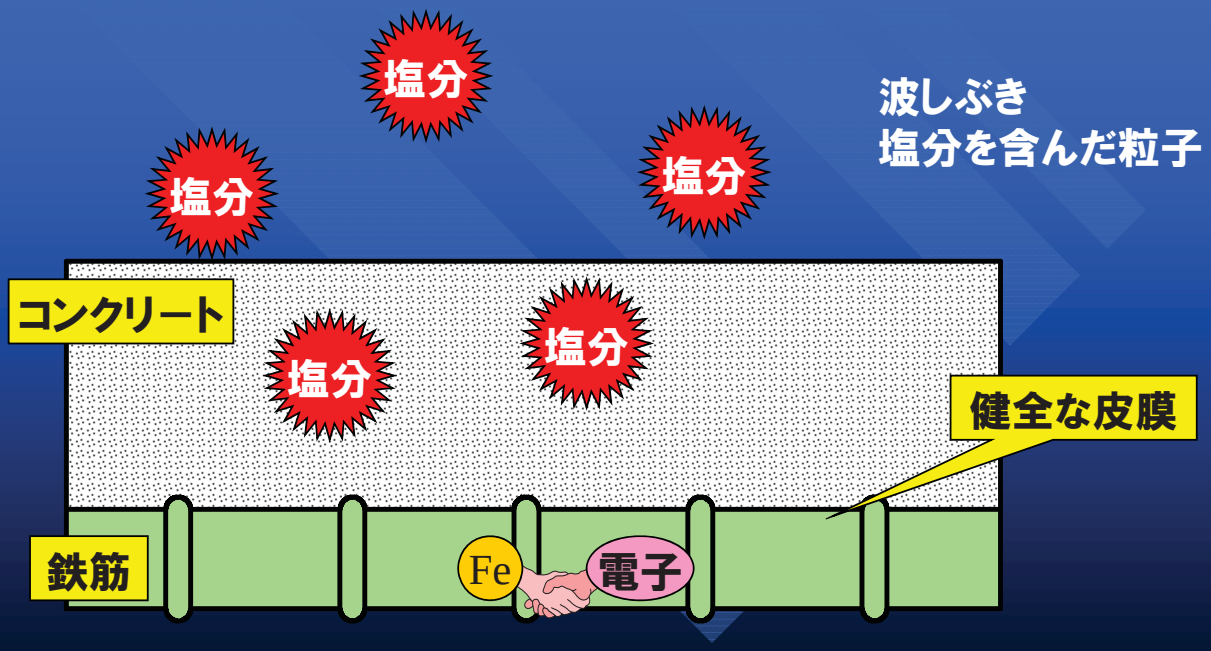
④イニシャルコストが高い

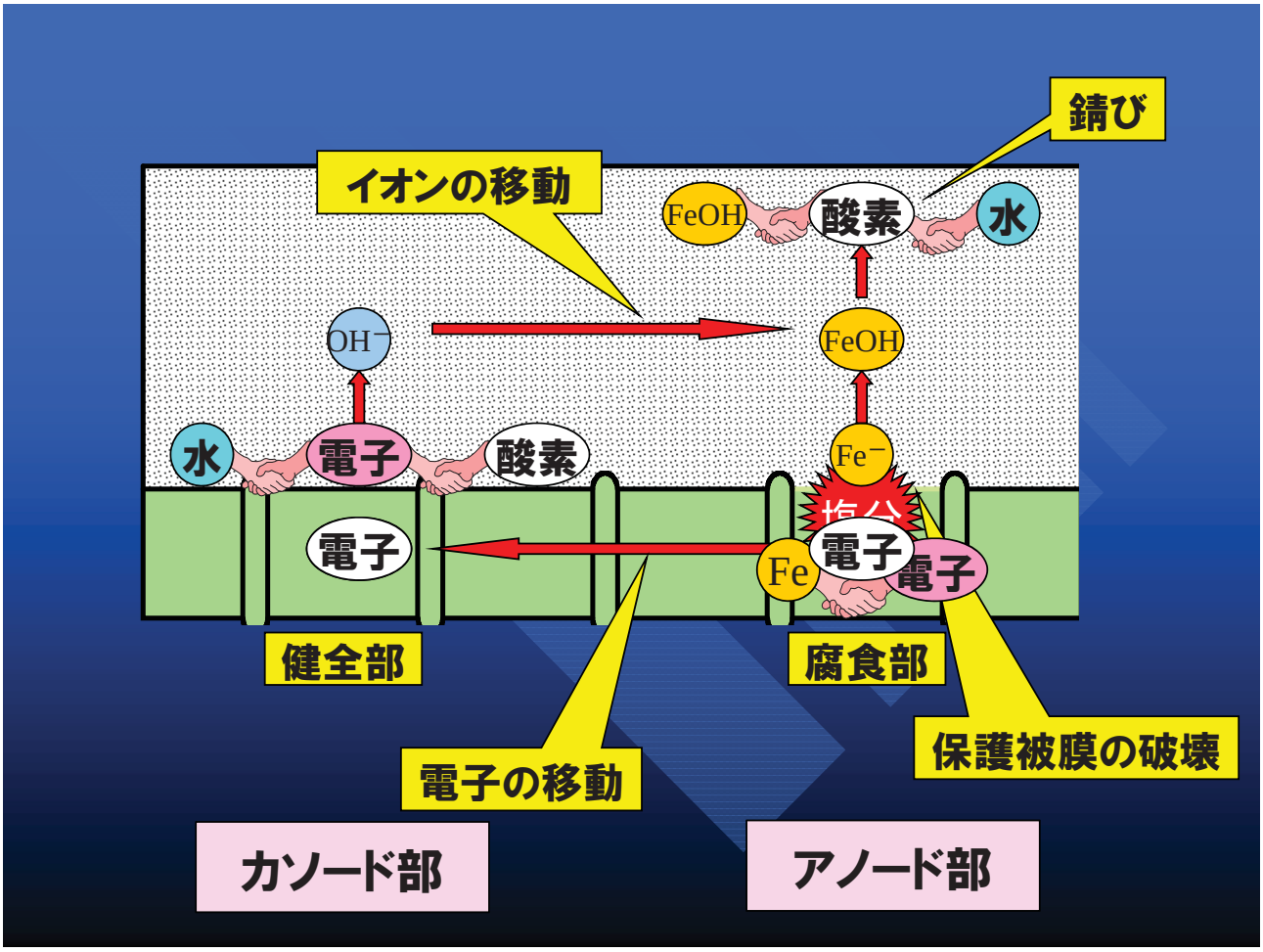
⑤維持管理が必要

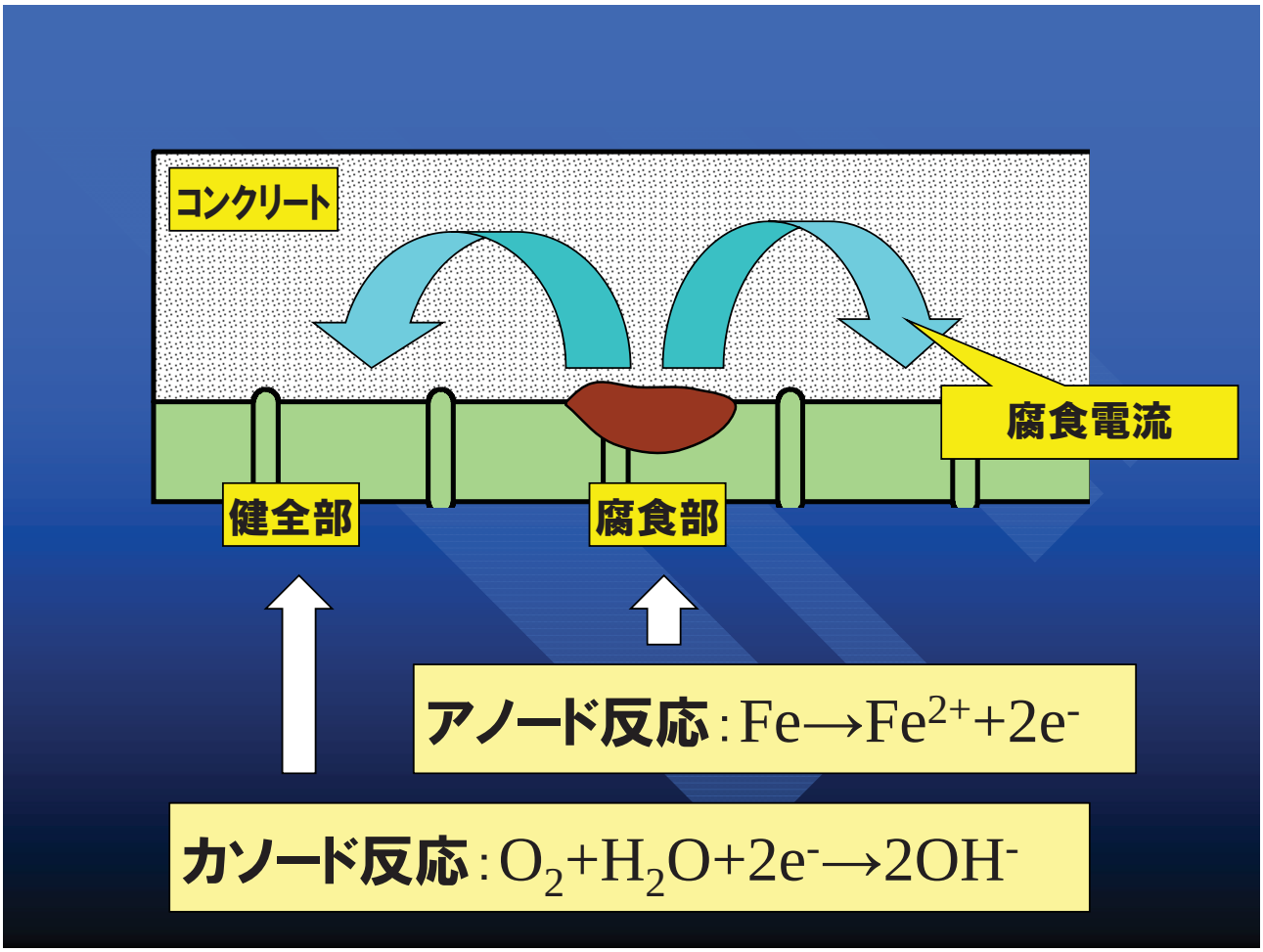
⑥難しい

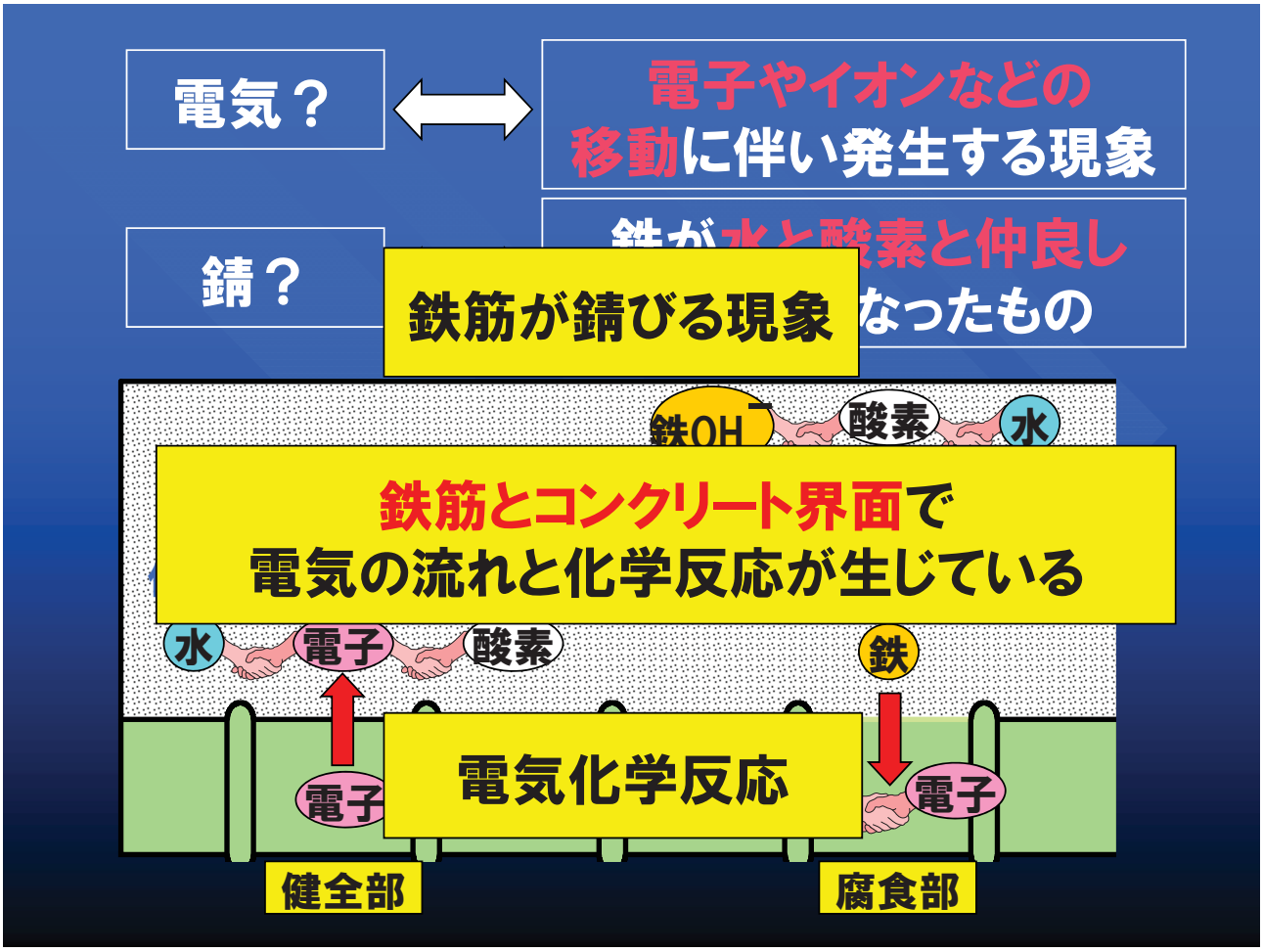
塩害と電気防食のメカニズム

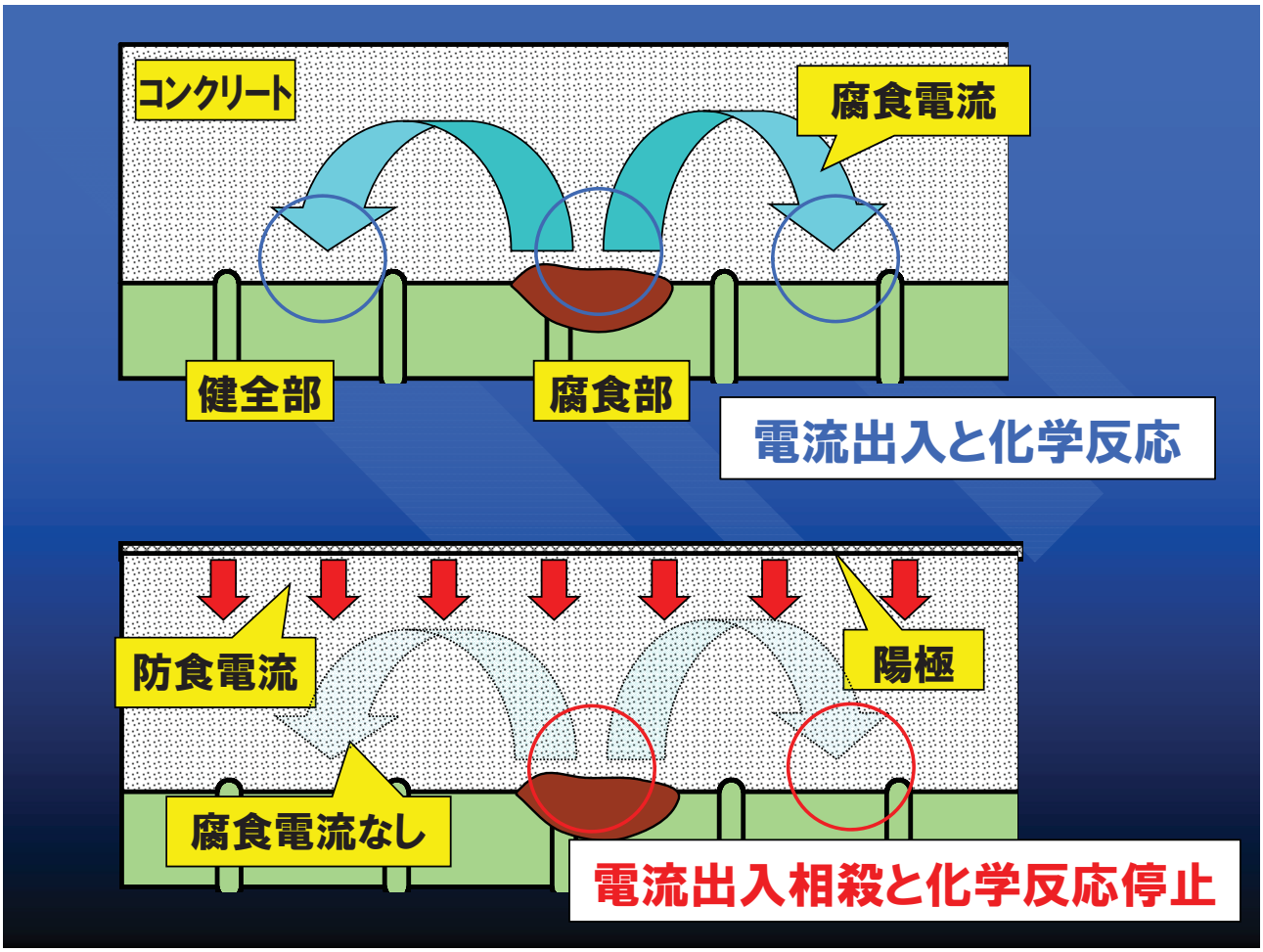
塩害による劣化メカニズム



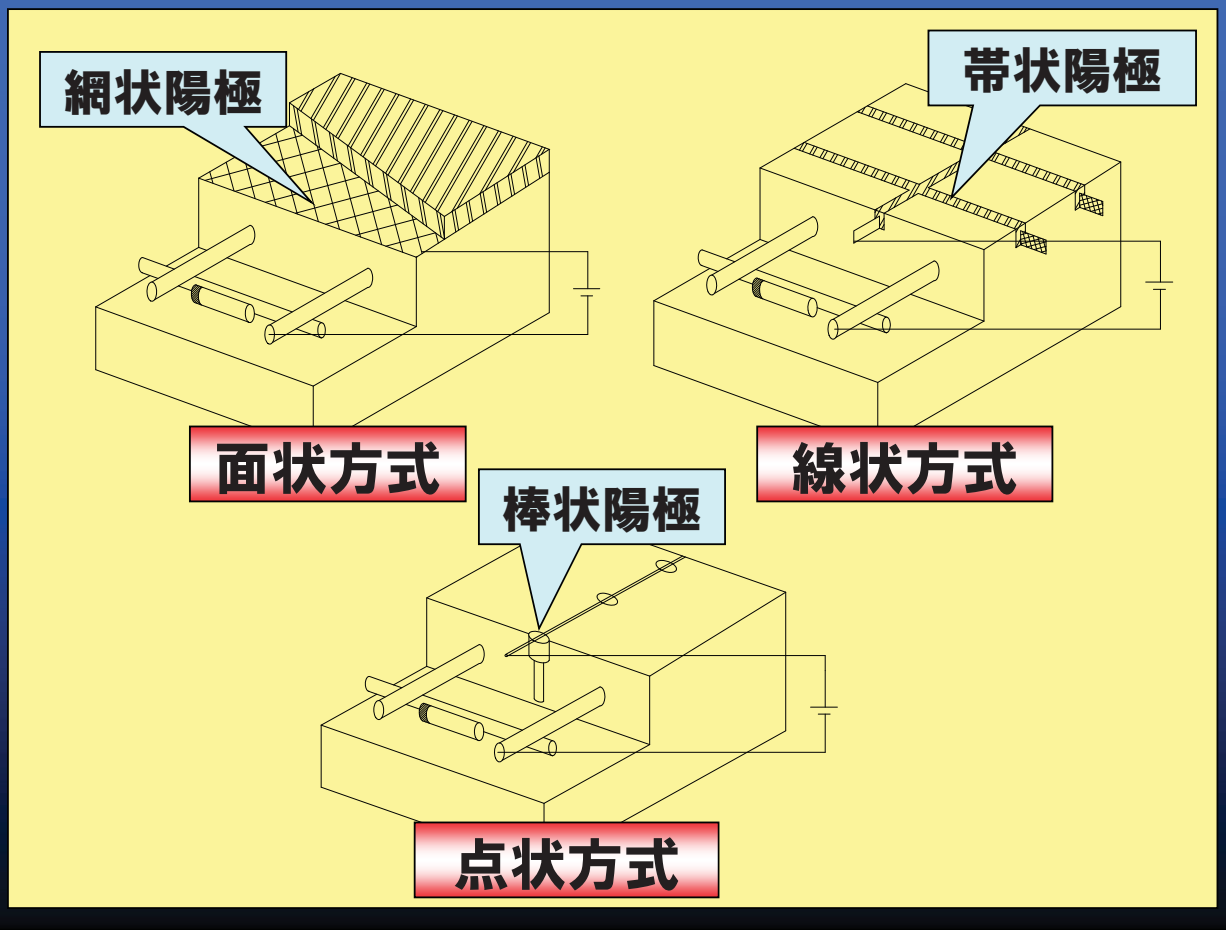

錆び
イオンの移動
FeOH
酸素
水
OH⁻
FeOH
水
電子
酸素
Fe⁻
電子
Fe
電子
電子
健全部
腐食部
保護被膜の破壊
電子の移動
カソード部
アノード部


コンクリート
腐食電流
健全部
腐食部
アノード反応：$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$
カソード反応：$O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$


電気？
電子やイオンなどの
移動に伴い発生する現象
錆？
鉄が水と酸素と仲良し
なったもの
鉄筋が錆びる現象
鉄OH⁻
酸素
水
鉄筋とコンクリート界面で
電気の流れと化学反応が生じている
水
電子
酸素
鉄
電子
電気化学反応
電子
健全部
腐食部

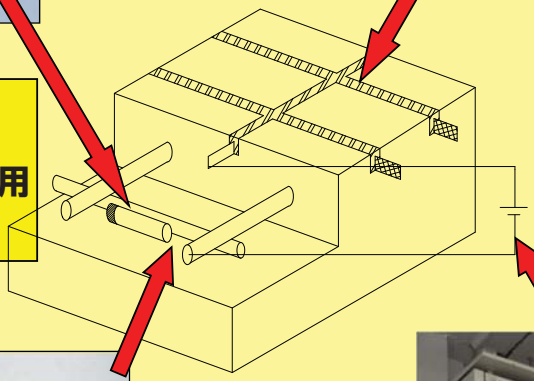

コンクリート
腐食電流
健全部
腐食部
電流出入と化学反応
防食電流
陽極
腐食電流なし
電流出入相殺と化学反応停止

電気防食
どのような種類があるか？
どのように施工するのか？



電気防食工法の構成

各種陽極材



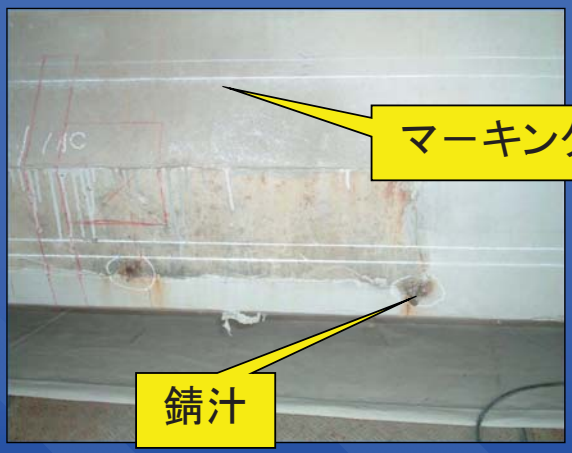
照合電極
鉄筋電位測定用のセンサー

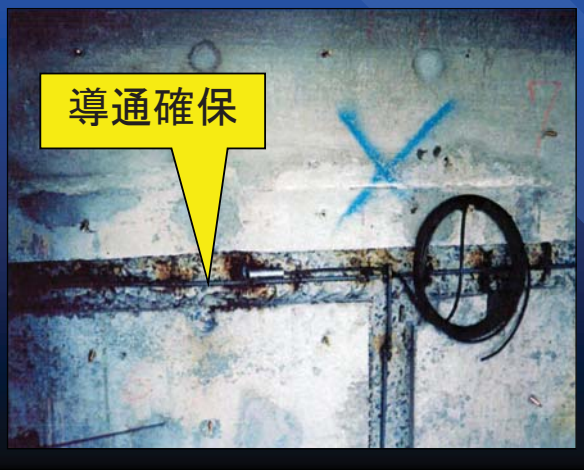
排流端子
電流を吸い出し電源に戻す

直流電源装置

前処理工

- モニタリング装置設置工
- 陽極設置工
- 回路形成工
- 通電調整工
- 維持管理





前処理工

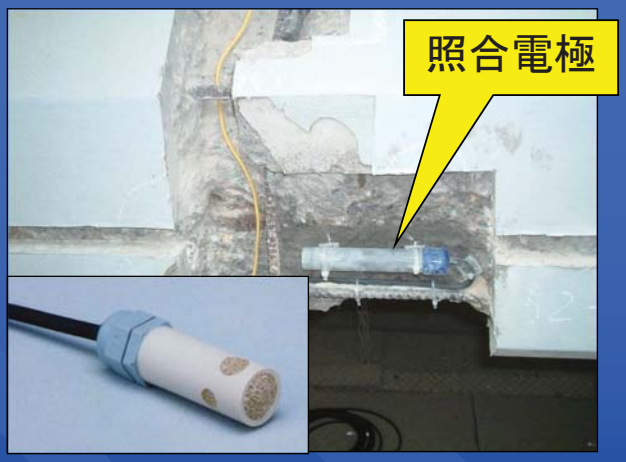
モニタリング装置設置工

陽極設置工

回路形成工

通電調整工

維持管理



前処理工

モニタリング装置設置工

陽極設置工

回路形成工

通電調整工

維持管理

前処理工

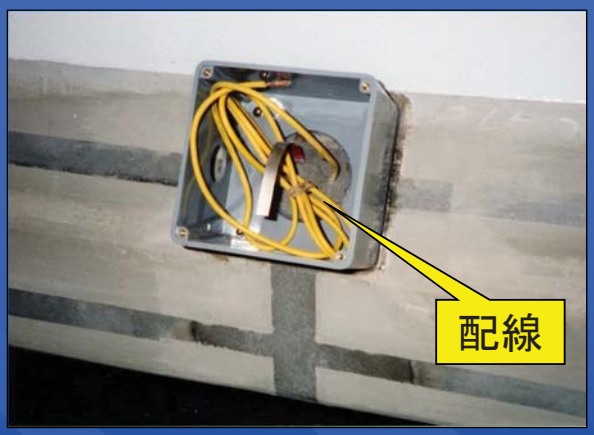
モニタリング装置設置工

陽極設置工

回路形成工

通電調整工

維持管理



前処理工

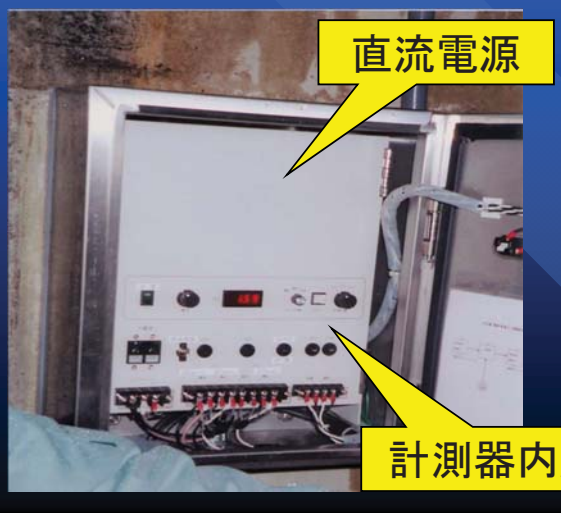
モニタリング装置設置工

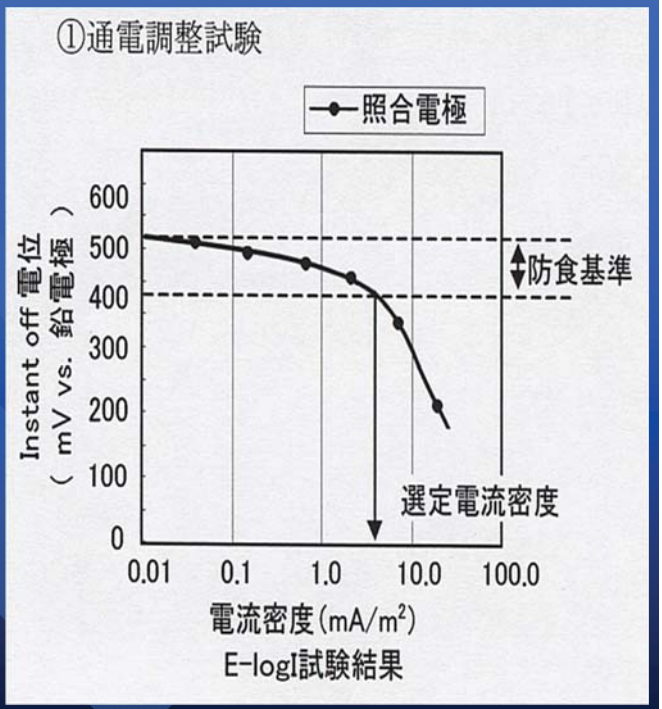
陽極設置工

回路形成工

通電調整工

維持管理





前処理工

モニタリング装置設置工

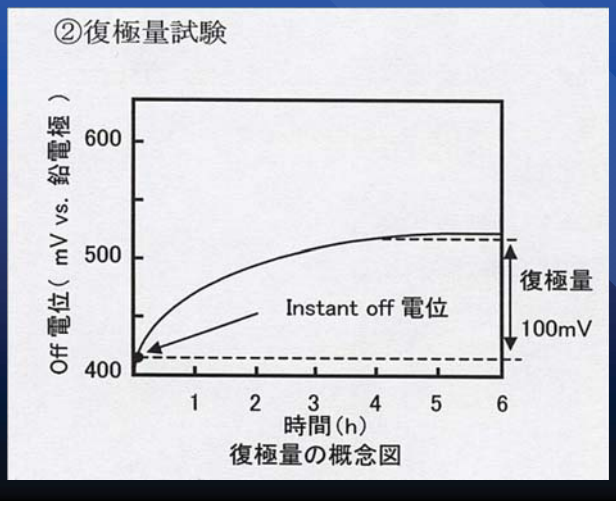
陽極設置工

回路形成工

通電調整工

維持管理

遠隔監視（制御）システム



復極量の概念図

技術者による測定

電気防食工法の種類

外部電源方式

- **面状陽極方式**
  - チタンメッシュ方式、チタントレイ方式
  - 導電性塗料方式、導電性モルタル方式
- **線状陽極方式**
  - チタングリッド方式、チタンリボンメッシュ方式
  - ニッケル被覆炭素繊維方式
- **点状陽極方式**
  - チタンロッド方式

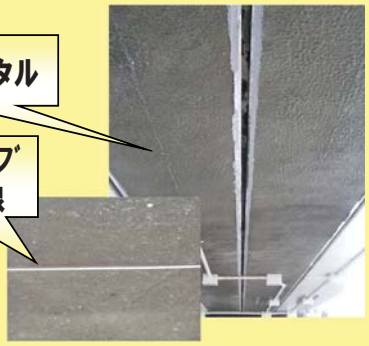
流電陽極方式

亜鉛シート方式、アルミ溶射方式

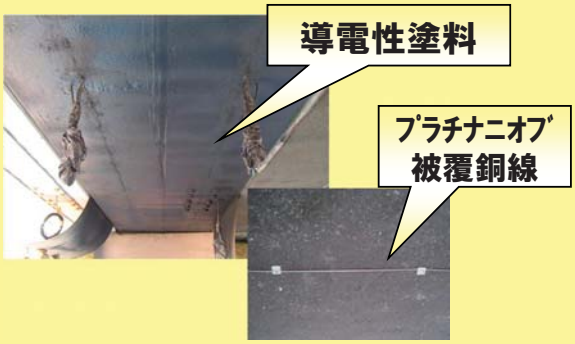
面状陽極方式の構成

チタンメッシュ陽極

導電性モルタル



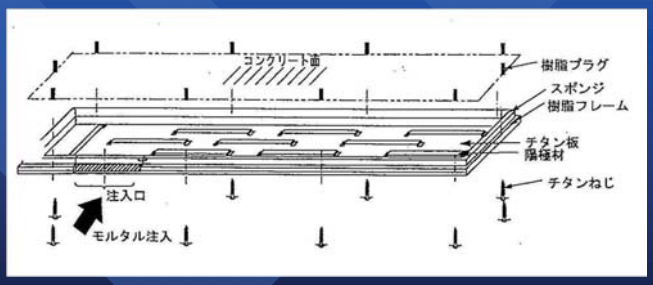
導電性塗料



チタン溶射

チタントレイ方式

チタントレイ



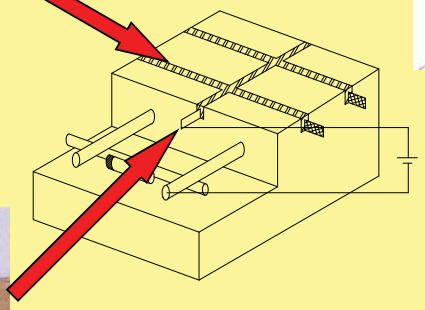
線状陽極方式の構成

チタングリッド陽極 20mm (W) ×1.3mm (t)

リボンメッシュ陽極 13mm (W) ×0.6mm (t)

ニッケル被覆CF

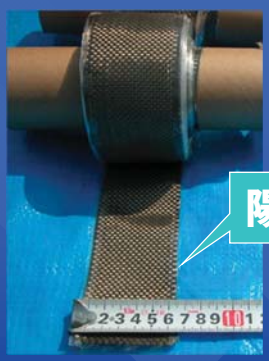
溝切削の有無

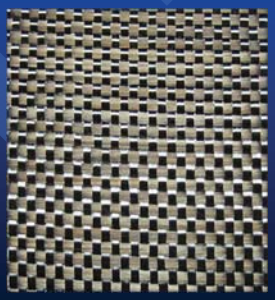


ディストリビュータ

ニッケル被覆CF
＋
高分子吸収ポリマー

ニッケル被覆炭素繊維シート方式

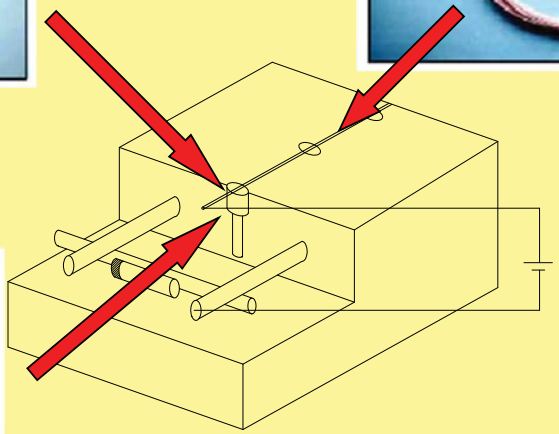




点状陽極方式の構成

チタンロッド陽極

チタンワイヤー



バックフィル

電気防食
本当に錆を止めているのか？

施工後14年
橋梁

施工後15年
桟橋

施工後13年
橋梁

施工後10年
橋梁

電気防食
広範な普及を目指して！

鋼橋のRC床板

・凍結防止剤散布による劣化
・取り替えに多大な費用
・取り替え困難（交通量の多い箇所）

電気防食工法の適用

適用にあたっての検討事項

・安価な施工費
　施工方法の工夫　新しい工法の開発

・確実な防食効果
　ひび割れ　漏水　補修材料　補強

・適用時期の明確化
　RC床板のシナリオ

・床版上面からの施工は規制が必要
→ 施工費の高騰(×)
→ 床板底面からの施工
・床版底面からの施工の効果
→ 床板上面に位置する鉄筋は？
→ 電気が流入？確認実験必要
→ ひび割れ　漏水の影響確認
・補修・補強工法との相性
→ 従来材料・工法の併用時の影響は？
→ 電気が流入？確認実験が必要
・適用時期の明確化
→ どの程度の劣化まで適用可能か検討

5年間のSIPプログラムで検討

ご興味のある方は是非、

「構造物メンテナンス講座」

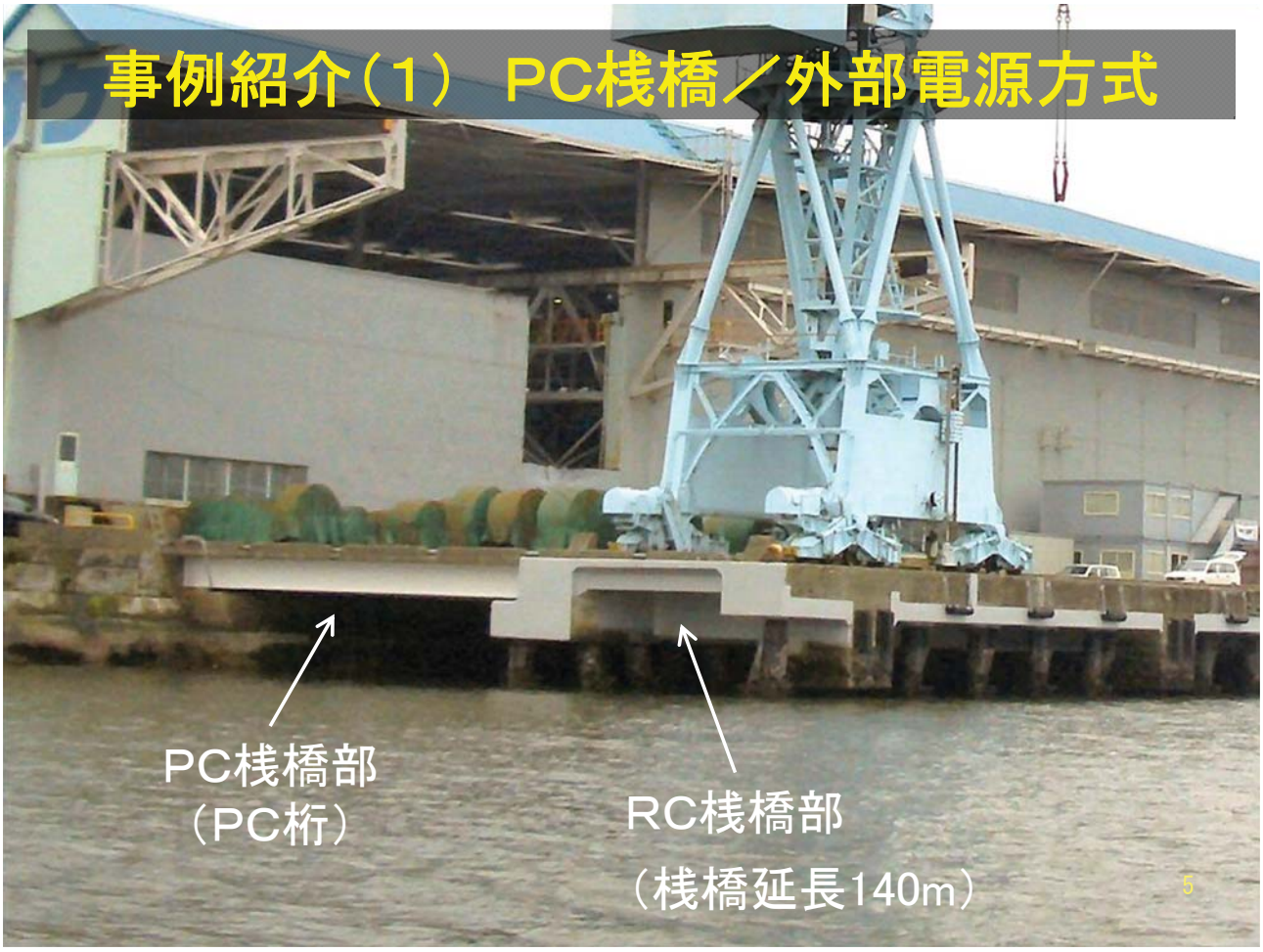
へ　ご入学ください！

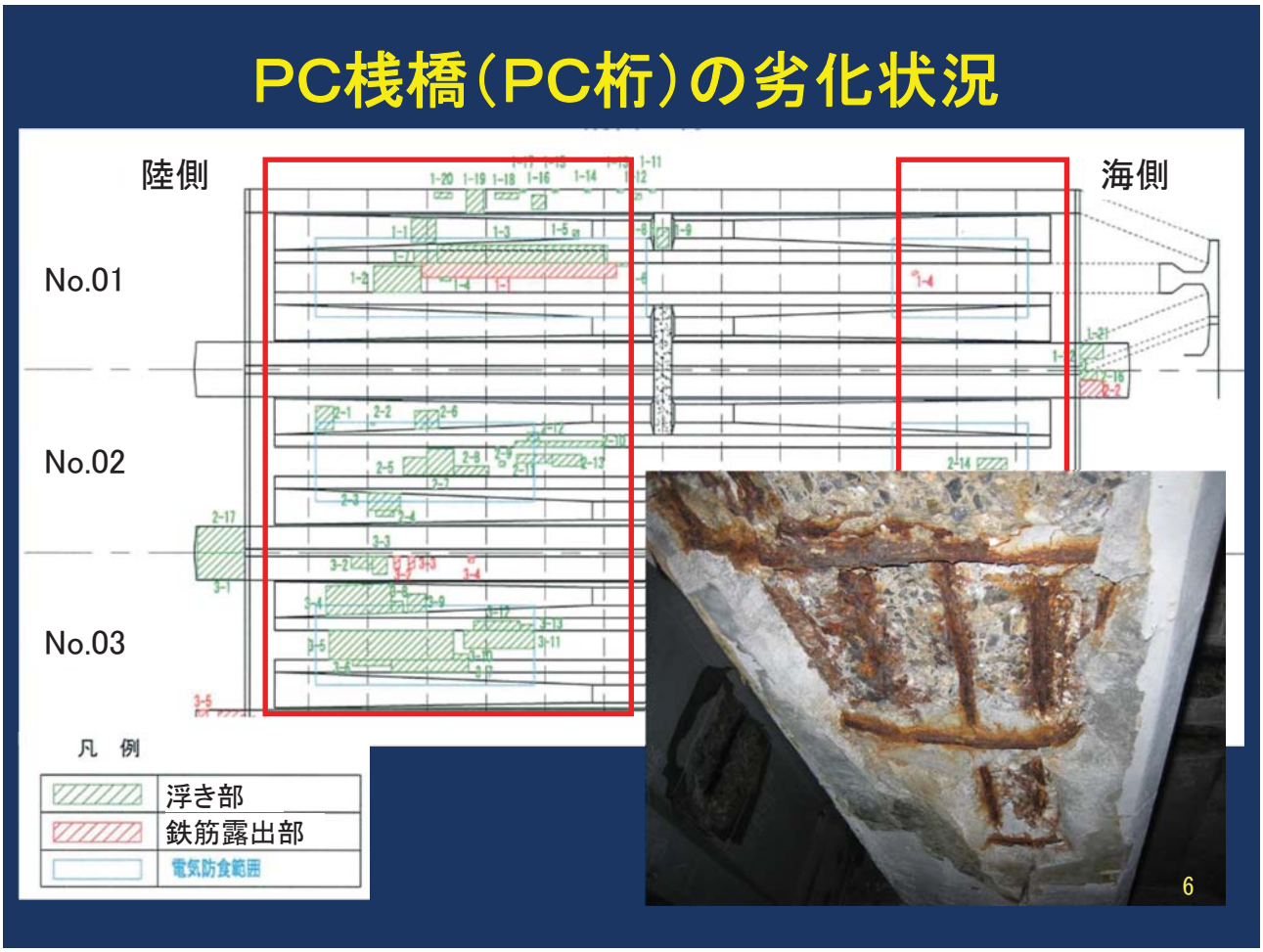
2015/3/27 SIPシンポジウム（金沢大学）
港湾コンクリート構造物における
電気防食工法の適用事例
東亜建設工業（株）技術研究開発センター
羽渕 貴士
1

桟橋前面の一例
2

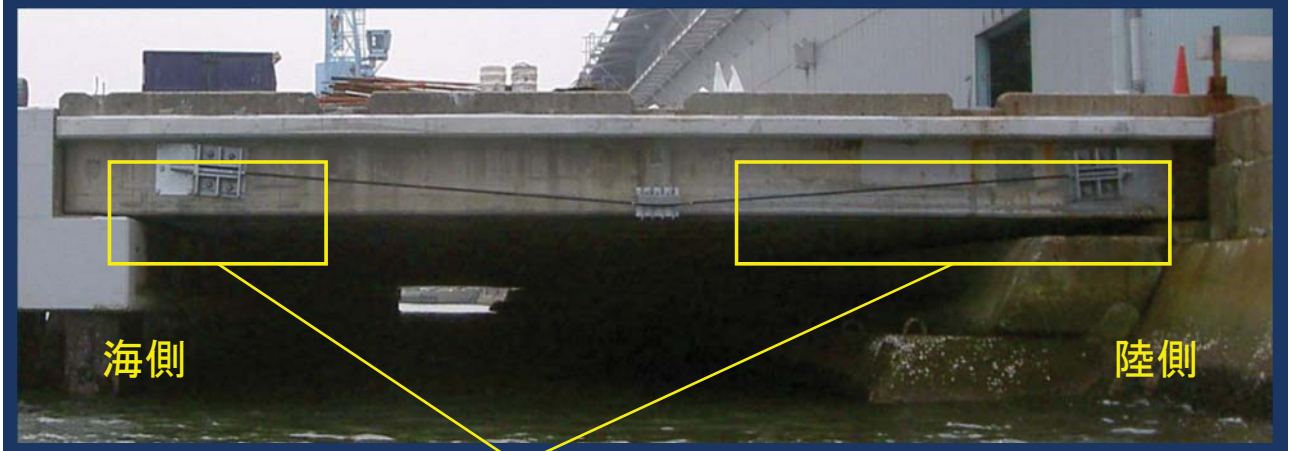
桟橋下面の一例

桟橋下面の一例


事例紹介（1） PC桟橋／外部電源方式
PC桟橋部
（PC桁）
RC桟橋部
（桟橋延長140m）
5


PC桟橋（PC桁）の劣化状況
陸側
海側
No.01
No.02
No.03
凡 例
浮き部
鉄筋露出部
電気防食範囲
6

PC桟橋（PC桁）の電気防食範囲

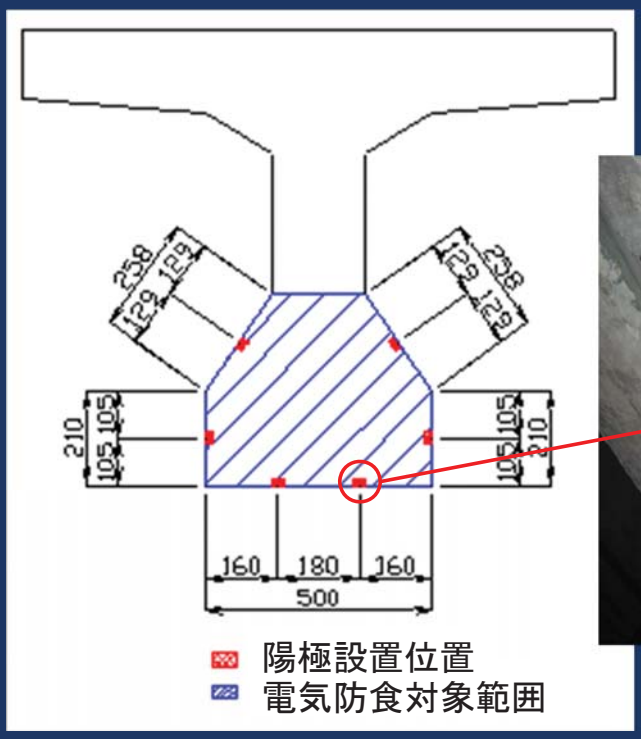


電気防食（断面修復を併用）

線状陽極（チタングリッド陽極）方式
PC桁：77本（全数），電気防食：633m^2（4回路）
（平成18年施工）
※PC破断桁23本は外ケーブル補強を併用

7

PC桟橋（PC桁）の陽極配置



陽極設置状況

8

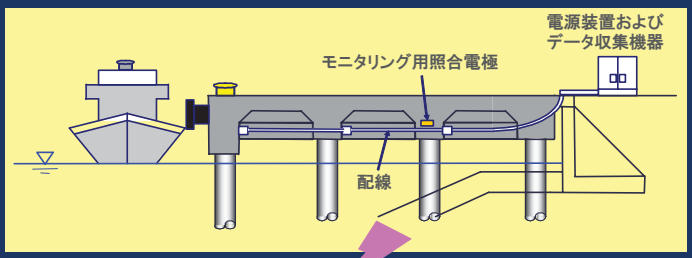
電気防食の施工完了状況

電源・モニタリング装置

※各回路2か所モニタリング

9

開発した電気防食モニタリングシステム



携帯電話などの通信機器

情報管理センター

専門技術者によるコメント

センサー情報

セキュリティ管理

インターネット

構造物の所有者・管理者（ユーザー）

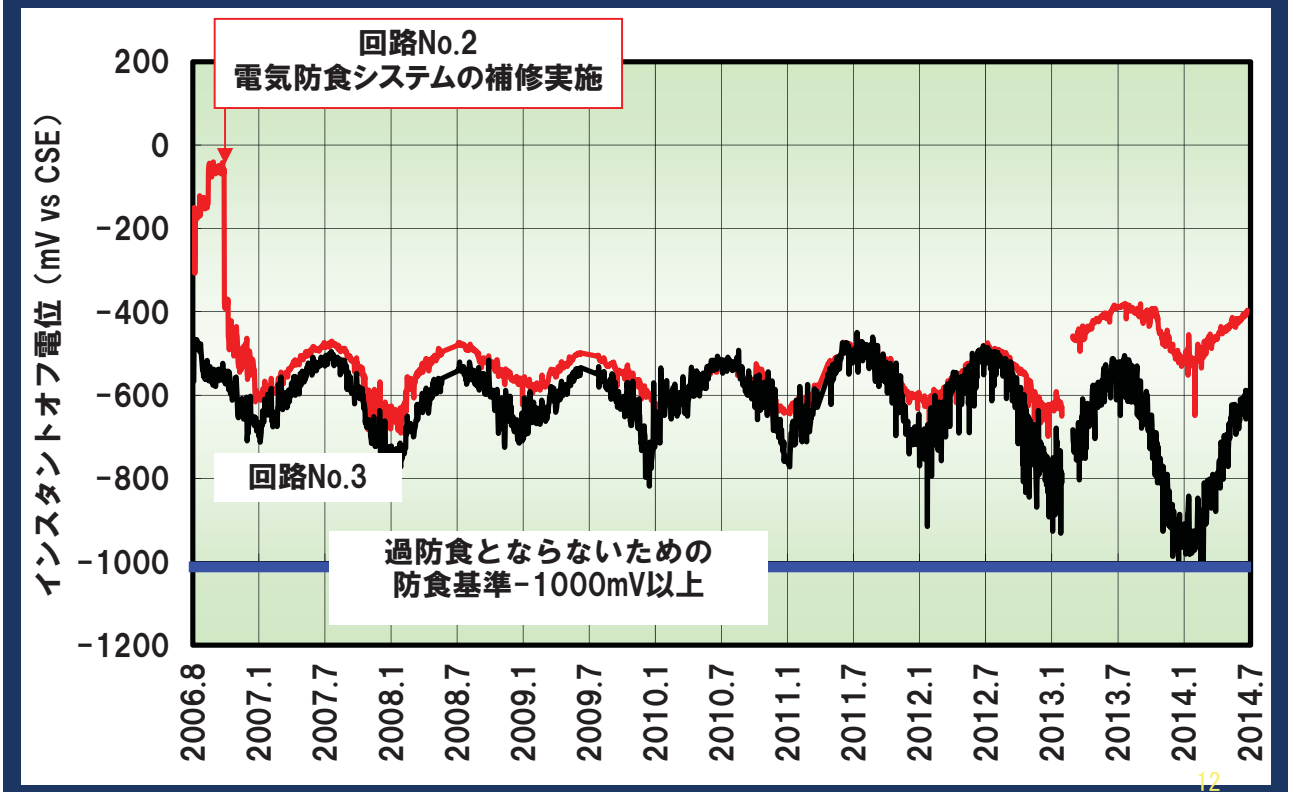
10

電気防食のモニタリング項目と頻度

点検項目	しきい値	点検頻度
遠隔システムと電源装置 （各回路の電流，電圧を測定）	・データ転送の有無 ・定格出力30V	1回／日 12:00計測
照合電極 （各照合電極のオン電位， インスタントオフ電位を測定）	−1000mV vs. CSE 以上	
復極量 （各照合電極において， 電流を24時間停止させて 復極量を測定）	100mV以上	1回／月 毎月1日

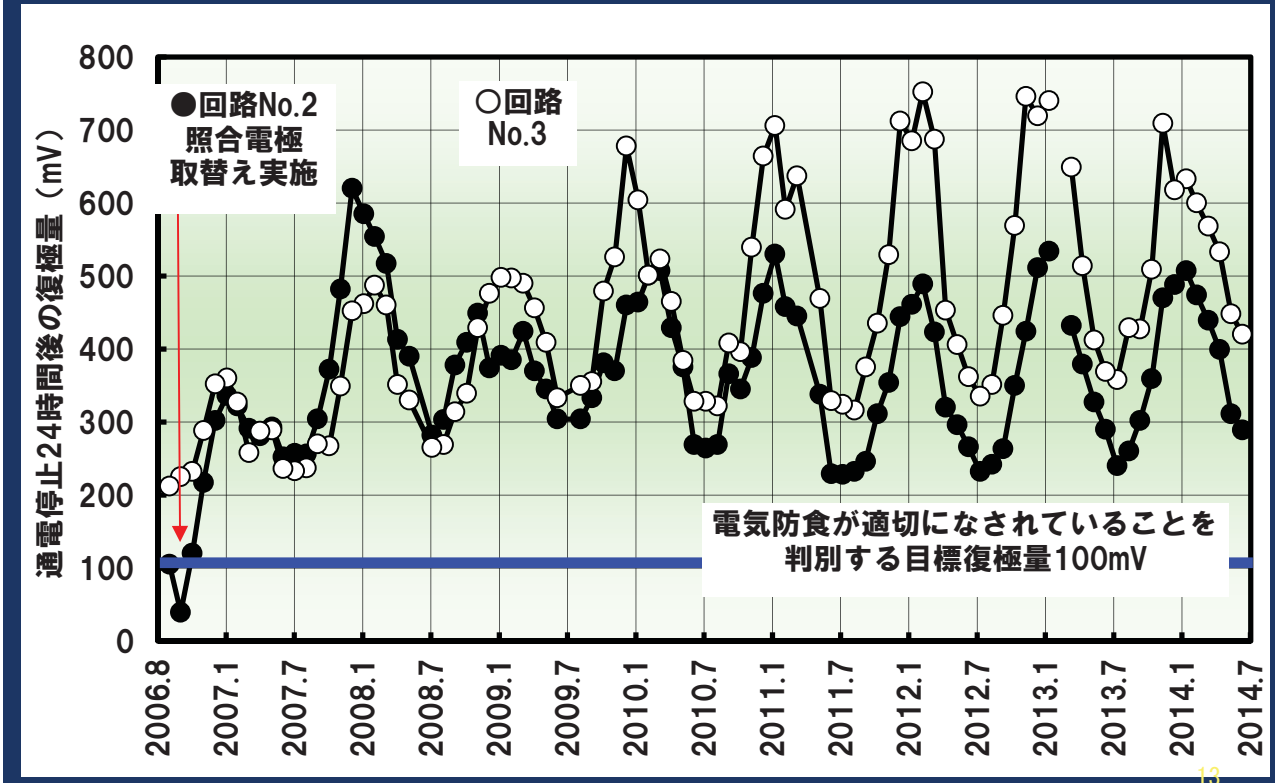
11

インスタントオフ電位モニタリング（8年間）



12

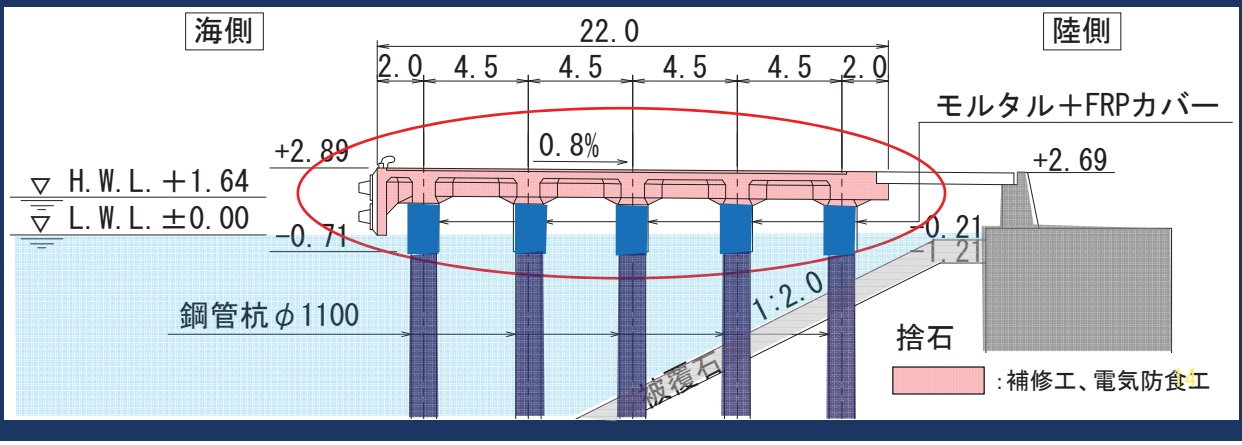
復極量モニタリング（8年間）



13

事例紹介（2） RC桟橋／流電陽極方式

昭和58～63年に建設
延長480m
平成19年度から施工
流電陽極（亜鉛シート）方式



14

施工前後の状況

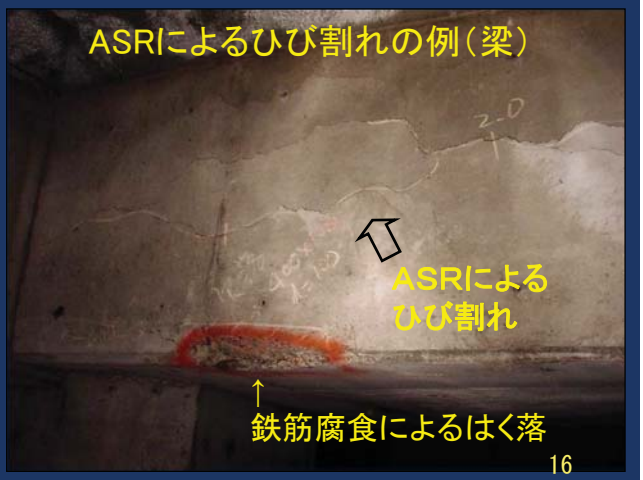
着工前

施工完了

15

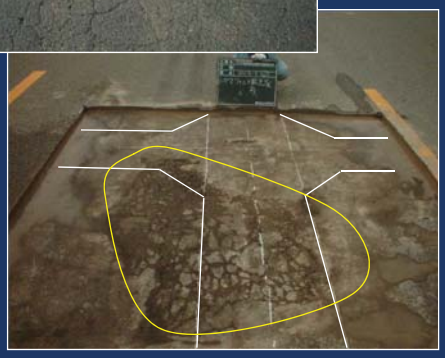
事例紹介（3） RC桟橋／外部電源方式 ＜塩害とASRの作用を受けた桟橋＞

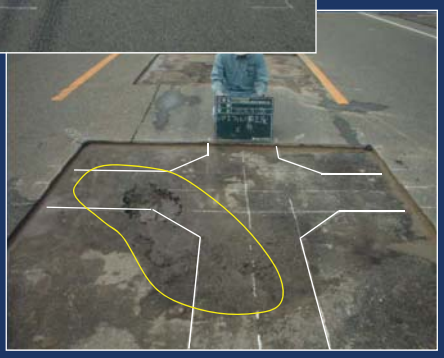
- 1960年代後半～70年代初旬　建設
- 2001年　目視調査・・・塩害とASRの劣化
- 2003年，2007年　詳細調査（塩分，腐食状況，残存膨張量など）
- 2009年　線状陽極（リボンメッシュ陽極）方式で施工



16

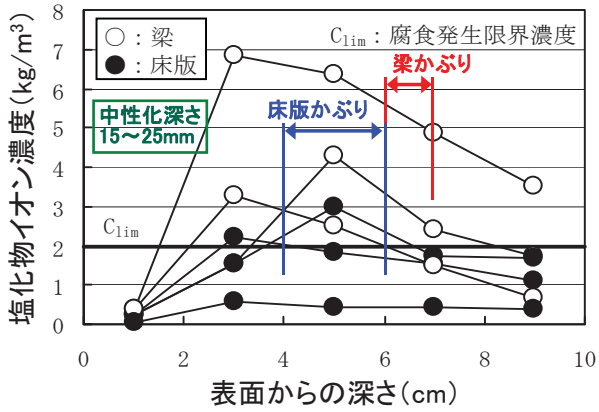
桟橋上部工の上面舗装工の損傷状況

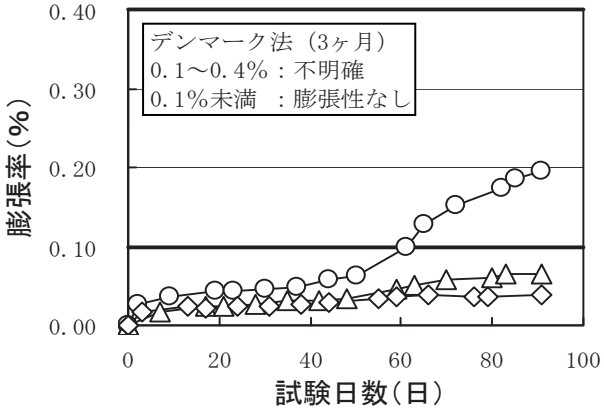




- アスファルト舗装　トレーラー走行路の数箇所に損傷
- 損傷部を除去したところ，床版の損傷が確認
  （ASRひび割れ部への大型車両の繰返し荷重等の作用か・・・）[17]

詳細調査の結果の一例

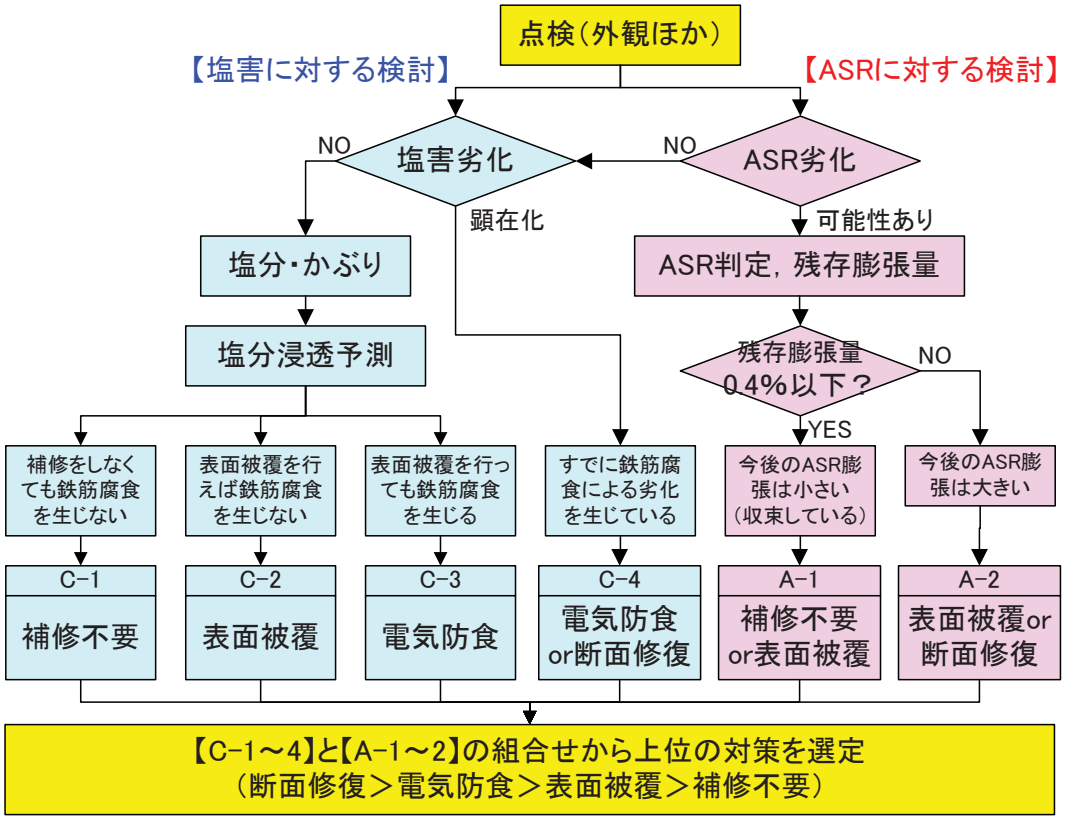




- 塩化物イオン濃度　梁＞床版
- 鉄筋位置での塩化物イオン濃度　梁：2～5，床版：0.5～3kg/m³
- 前垂れの影響により塩化物イオン濃度は小さい
- 鉄筋の腐食　梁：顕著，床版：部分的

- ASR　粗骨材周囲の反応リムや析出物の化学分析等より確認
- 残存膨張試験（デンマーク法）の結果，ASRはほぼ収束と判断[18]

補修工法の選定方法



19

桟橋上部工の補修対策

対象	損傷箇所の対策	対策方針（主に鉄筋腐食対策）
①梁	損傷範囲の断面修復	電気防食による予防保全（梁全面を対象） ●重要な構造部材で，将来の撤去・更新は困難 ●表面被覆では将来の鉄筋腐食を防止できない ●ASR：残存膨張量が0.4%未満 →鉄筋腐食の防止を優先 ◆線状陽極（リボンメッシュ陽極）方式を採用
②床版	同　上	経過観察 （塩分浸透が軽微→当面は補修不要）
③杭頭	同　上	経過観察
①～③共通	―	ひび割れ注入
④舗装工	損傷範囲のコンクリートの撤去・復旧（上面防水を併用） ●ASRひび割れへの雨水浸透の抑制，再損傷の防止 ◆荷役作業の制約→鋼繊維を混入した超速硬コンクリート	

20

梁の電気防食による補修

陽極設置・スポット溶接状況

陽極被覆状況

絶縁確認状況

完了状況

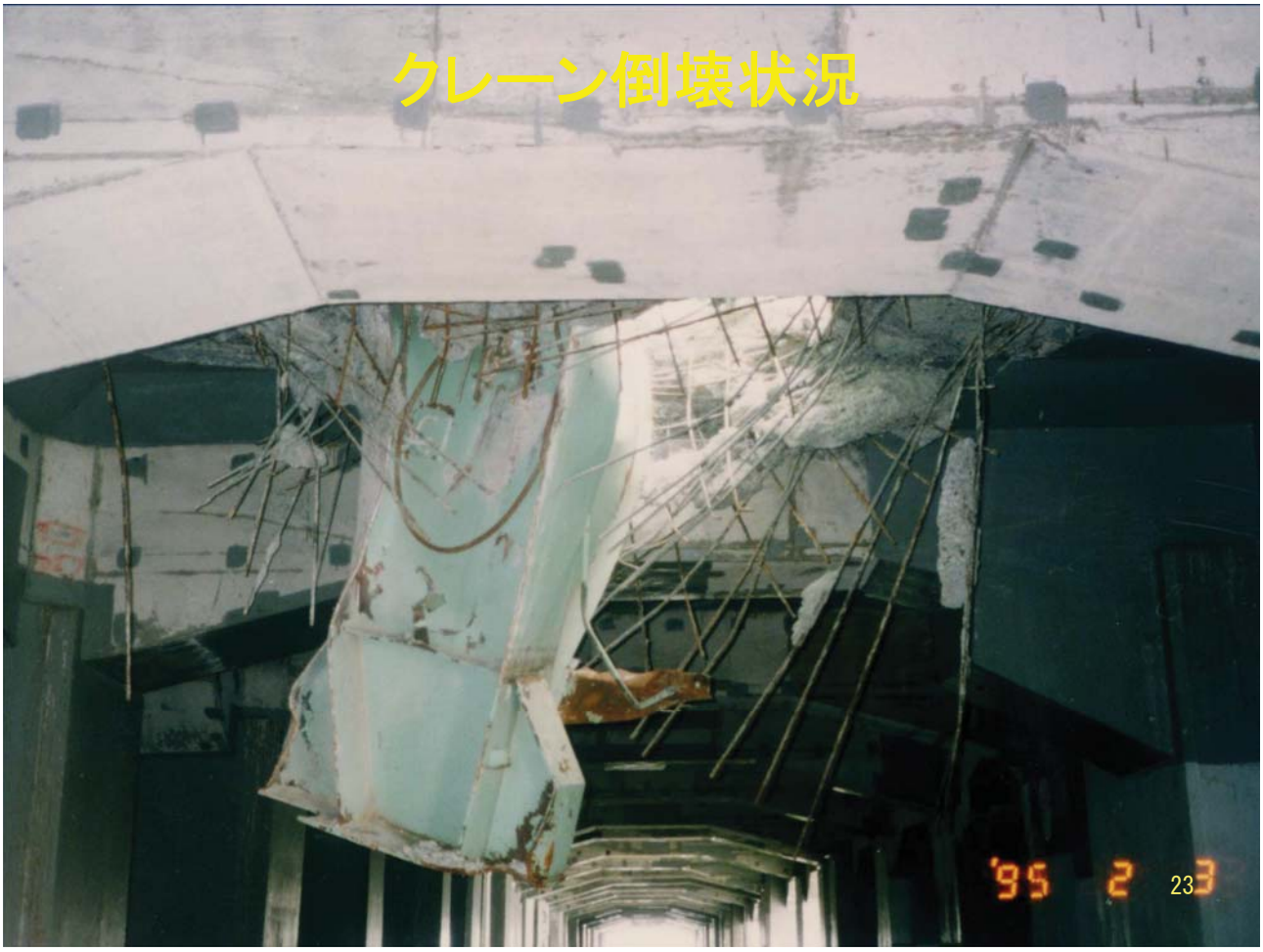
- 竣工時（H22.4）　電流量＝7.2mA/m^2，復極量＝205mV・228mV
- 1.5年後（H23.10）　電流量＝5.2mA/m^2，復極量＝132mV・204mV

21

事例紹介（4）　RC桟橋／点状陽極方式
＜鋼板接着補強された桟橋＞

阪神大震災により被災

22



鋼板接着補強後の鉄筋腐食

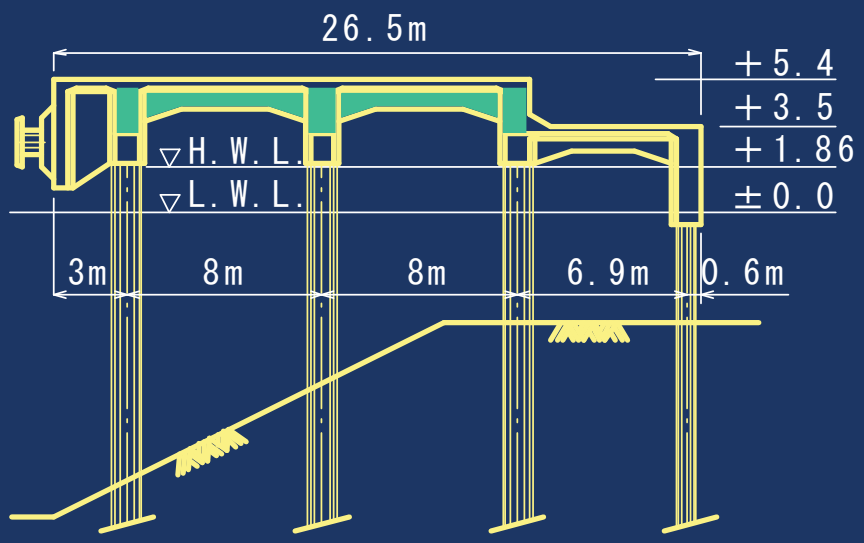
←補強後（平成７年）

補強部の錆汁
（平成１２年）
↓

供用再開を優先して
補強を実施
↓
補強時に残存した
塩分による鉄筋腐食

24

梁部材への電気防食の適用



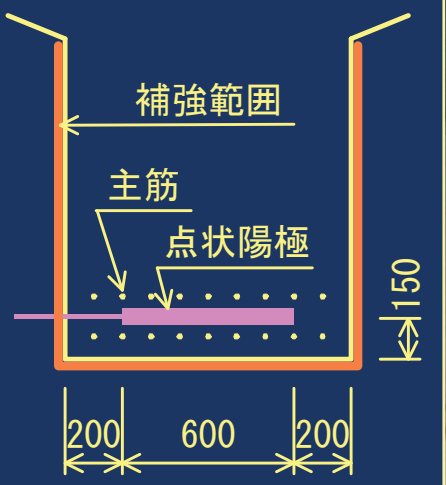
チタン製リボン陽極
↓
点状陽極方式と
線状陽極方式

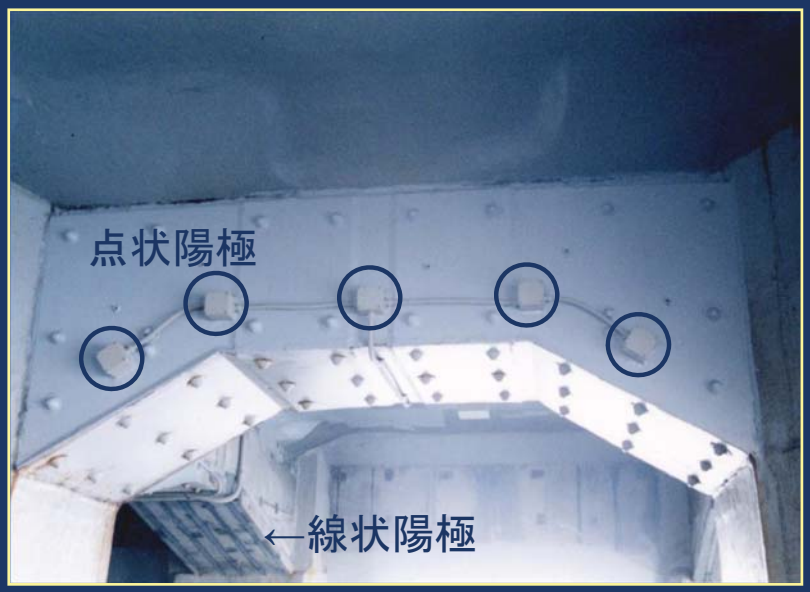
①適用条件　既設の補強鋼板，炭素繊維は存置する
②防食範囲　底面から30cmまで（主筋）を防食する
③防食基準　24時間後の復極量＝100mV以上
インスタントオフ電位＝−1100mV（vs. CSE）より貴

25

電気防食の陽極配置の例

点状陽極の設置断面

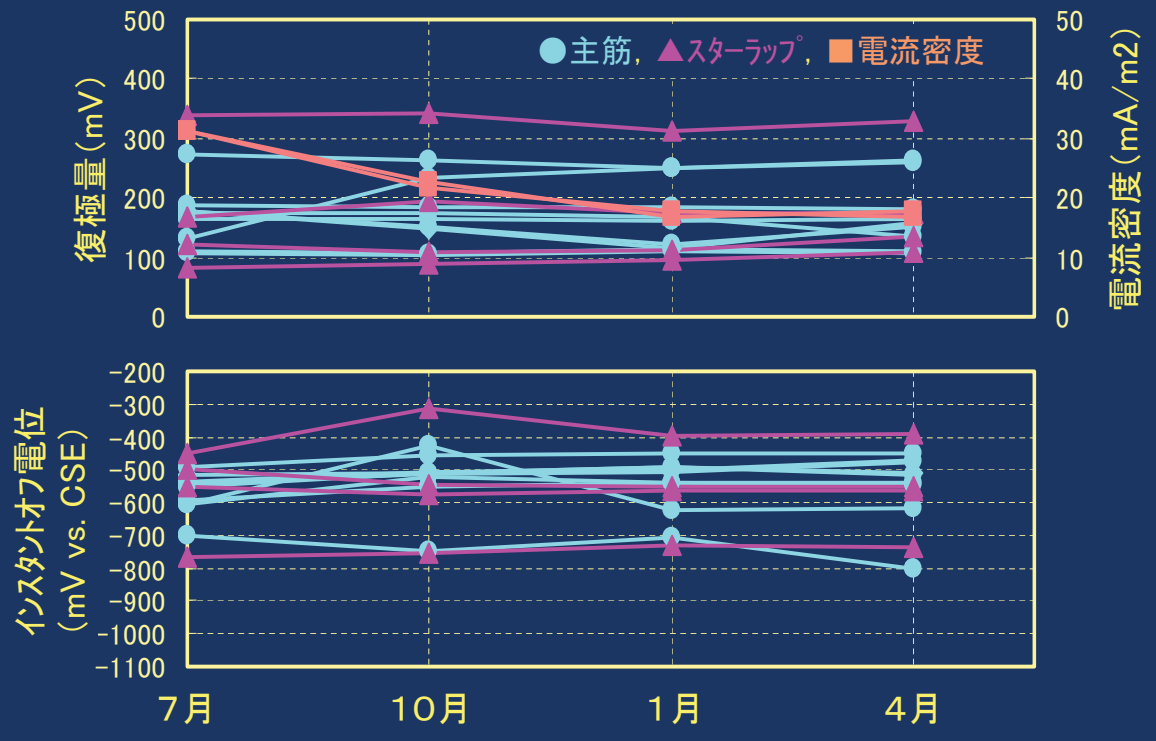




※@250となるように
両側面から挿入

26

電気防食効果の確認



27

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会（CP工法研究会）の紹介

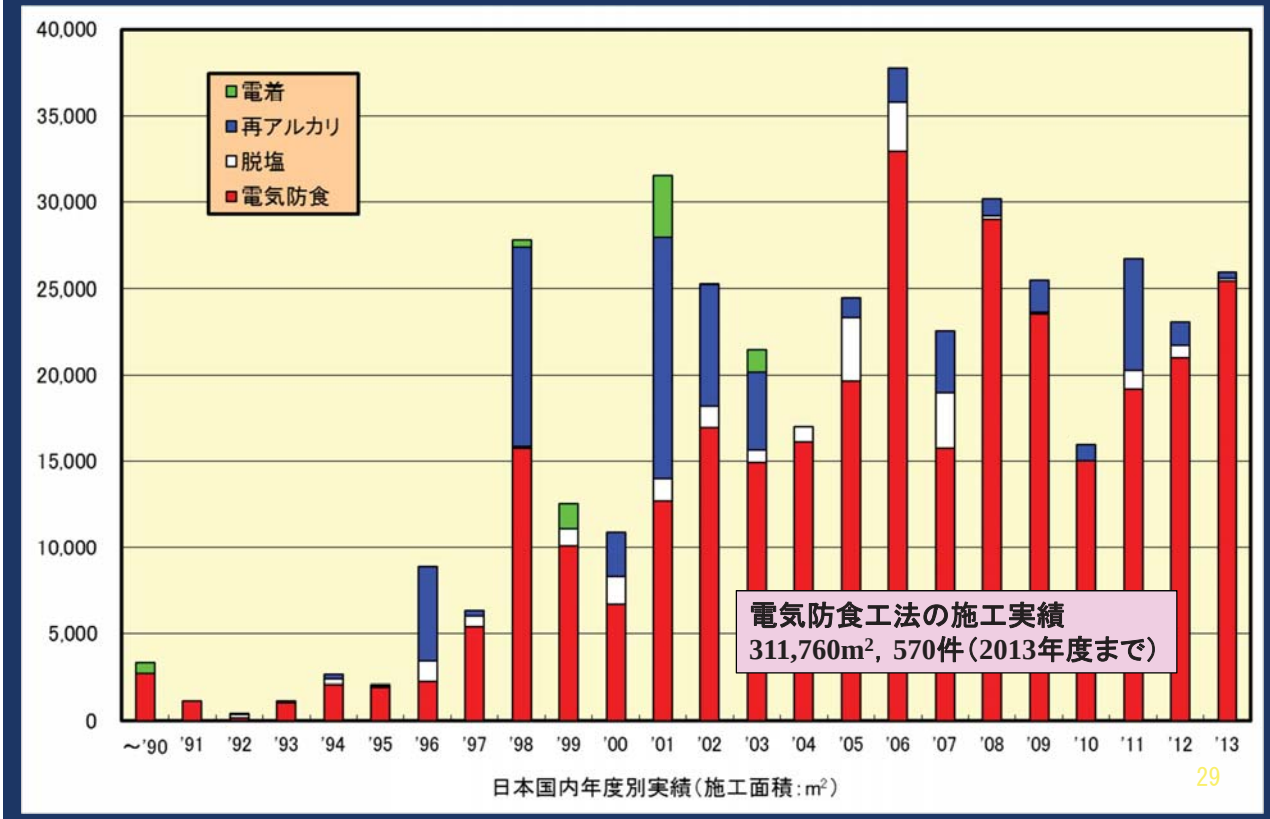
http://www.cp-ken.jp/

・会　長　　：宮川豊章（京都大学教授）
・顧　問　　：関　博　　（早稲田大学名誉教授）
　　：福手勤　　（東洋大学教授）
　　：武若耕司（鹿児島大学教授）
・事務局　　：東亜建設工業（株）内
・会員会社　：18社

・対象工法　1．電気防食工法
　　2．脱塩工法
　　3．再アルカリ化工法

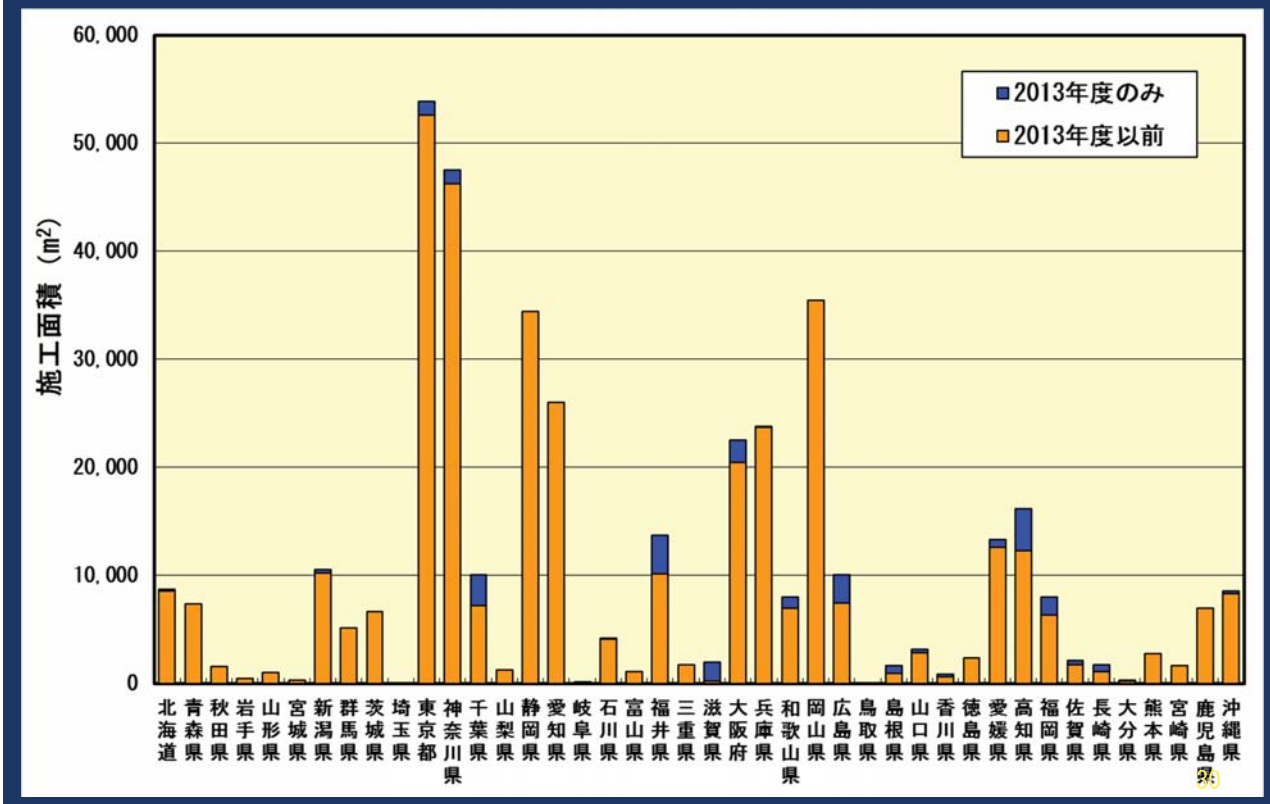
28

電気化学的防食工法の施工実績（年度別）

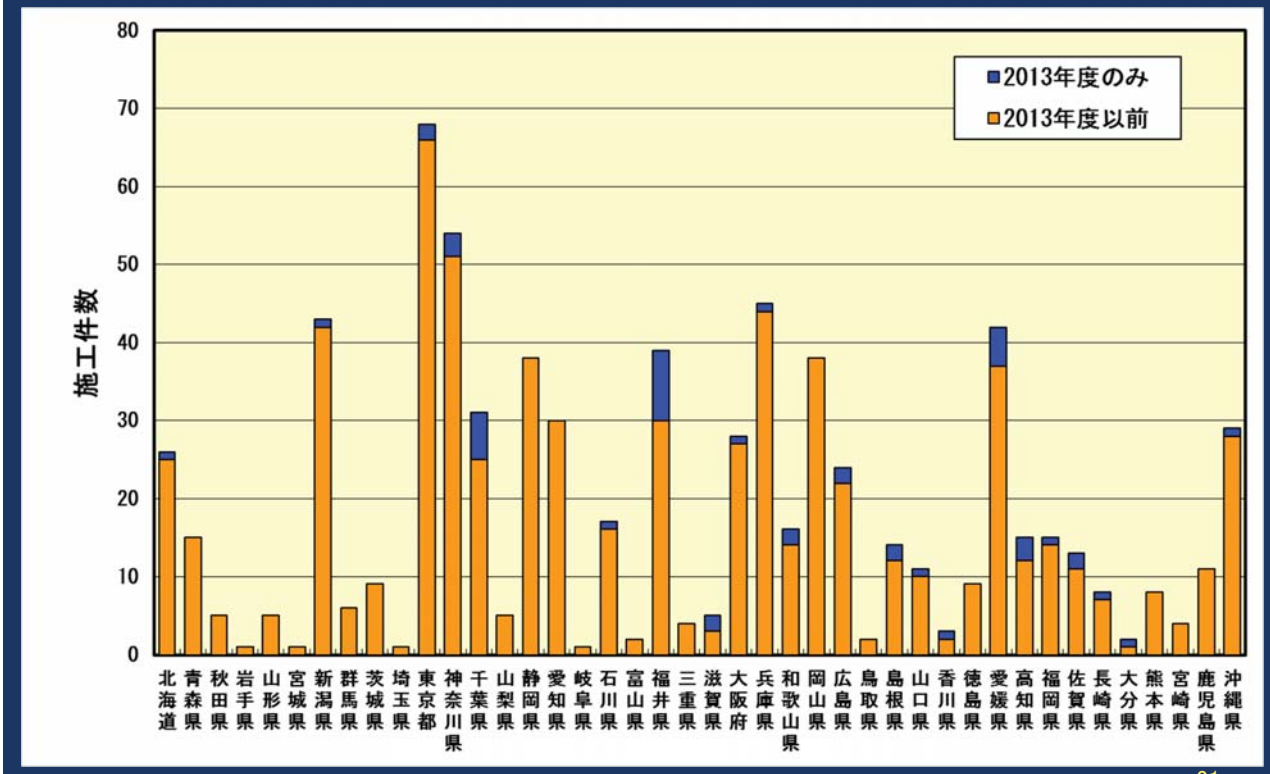


29

電気化学的防食工法の施工実績（地域別）



電気化学的防食工法の施工実績（地域別）



31

北陸自動車道 大慶寺川橋への電気防食の適用と追跡調査

ＳＩＰ（戦略的イノベーション創造プログラム）連携講座
「構造物メンテナンス講座」開設記念シンポジウム

中日本高速道路㈱　森山　守
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋㈱　橘　吉宏

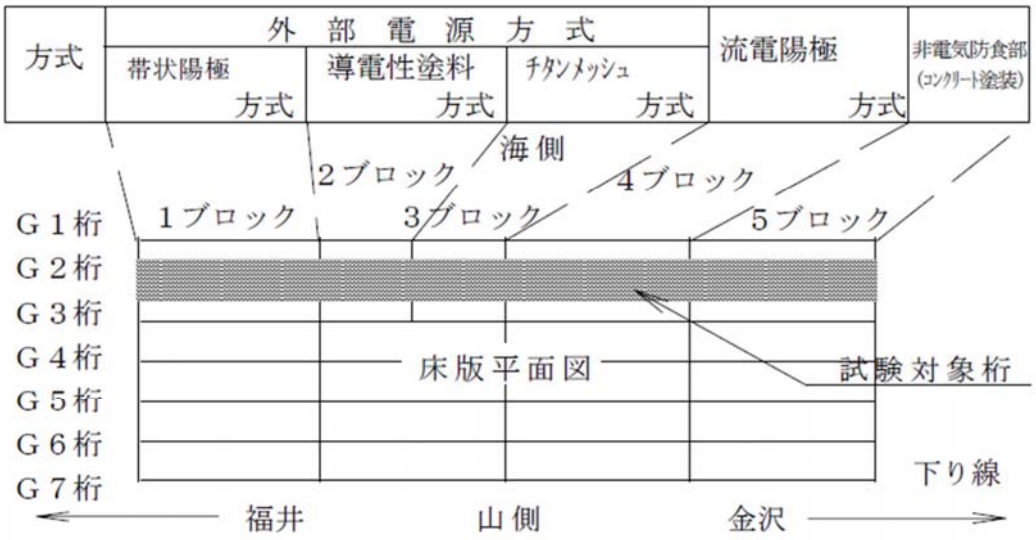
大慶寺川橋

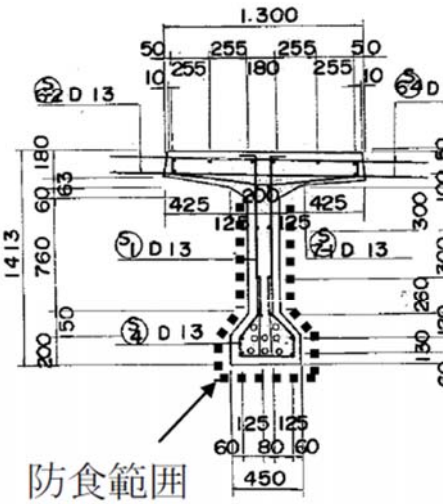
主な補修履歴	昭和47年	供用
	昭和58年	塩害補修（断面修復とコンクリート塗装）
	平成元年	再補修　＋　外ケーブル補強　＋　電気防食（G2桁）
	平成8、9年	電気防食追加（G3、G4桁）
	平成21年	電気防食の更新

平成元年(26年前)に採用した電気防食工法

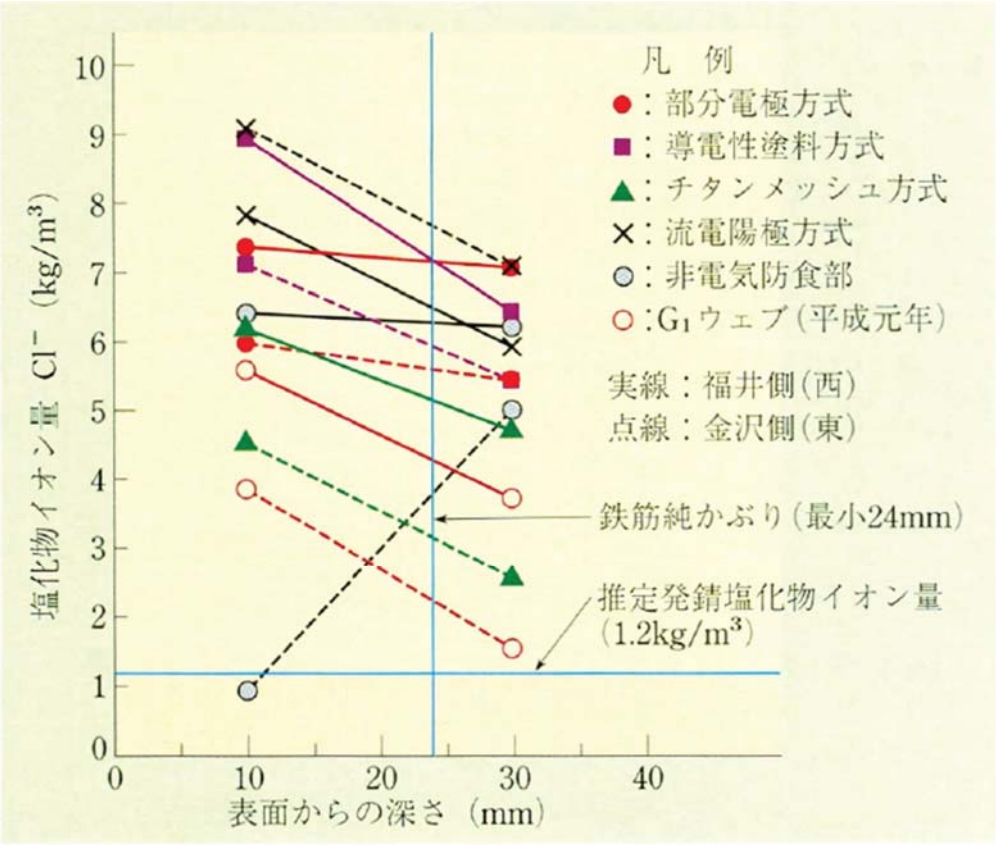
外部電源方式　3タイプ

流電陽極方式　1タイプ

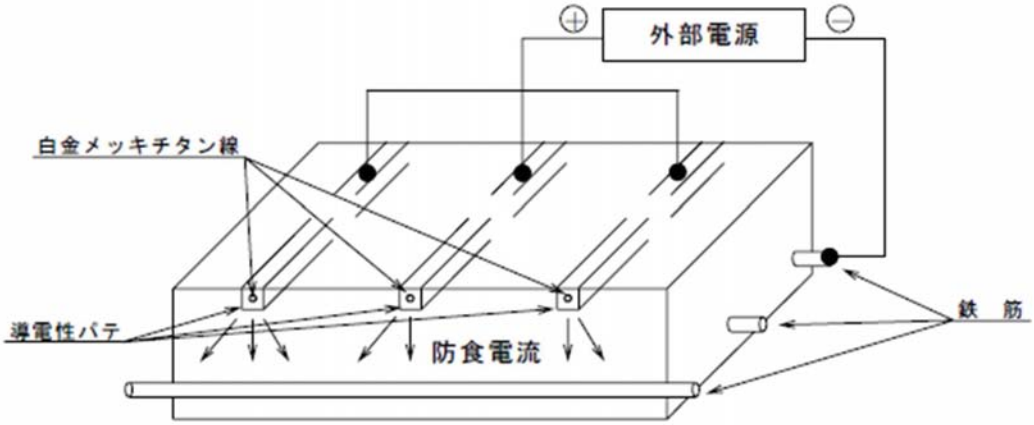




塩化物イオン量（電気防食9年経過時）



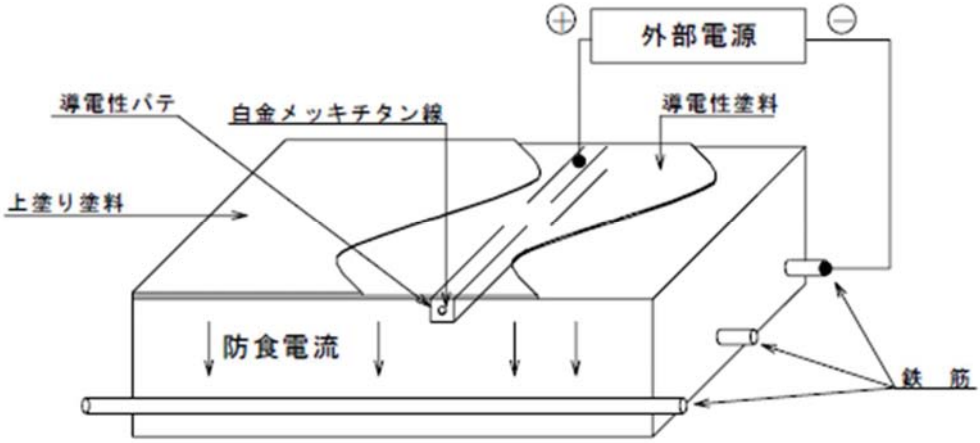
帯状陽極方式（外部電源方式）



主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
白金メッキチタン線 （@15cm　@30cm @60cmで試験施工）	導電性パテ （カーボングラファイト粉末+水溶性アクリルエマルジョン）	--
課題 ・導電性パテ材の消耗 ・パテ材周辺コンクリートの中性化		

NEXCO 中日本

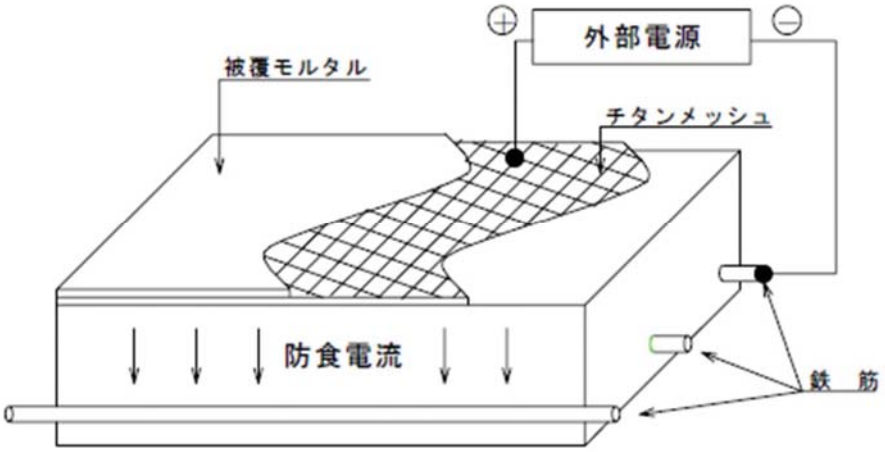
導電性塗料方式（外部電源方式）



主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
白金メッキチタン線	導電性パテ 導電性塗料	上塗り塗料
課題 ・導電性塗料のはがれ		

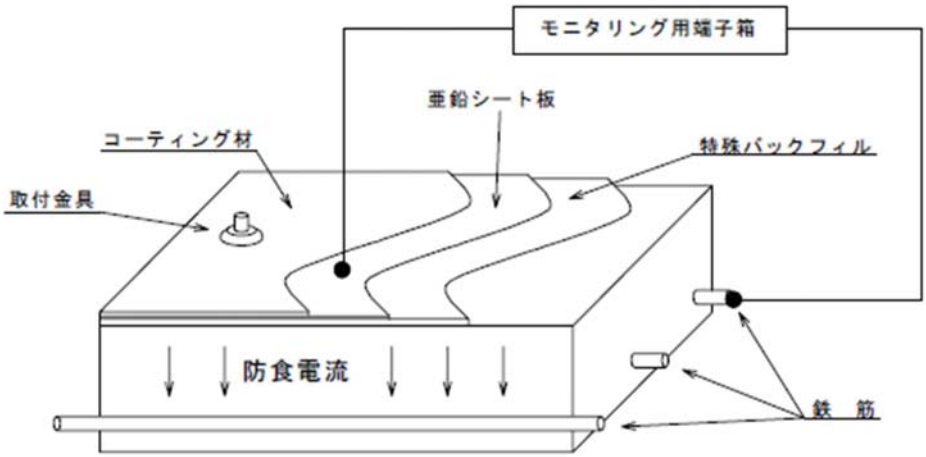
NEXCO 中日本

チタンメッシュ方式 （外部電源方式）



主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
チタンメッシュ	被覆モルタル	--
課題 ・陽極被覆モルタルの浮き		

亜鉛シート方式 （流電陽極方式）



主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
亜鉛シート板	--	バックフィル材（ベントナイト、$MgCl_2$、MgS） コーティング材
課題 ・亜鉛の消耗で更新が必要 ・今回は、20mA/m^2で寿命15年で設計		

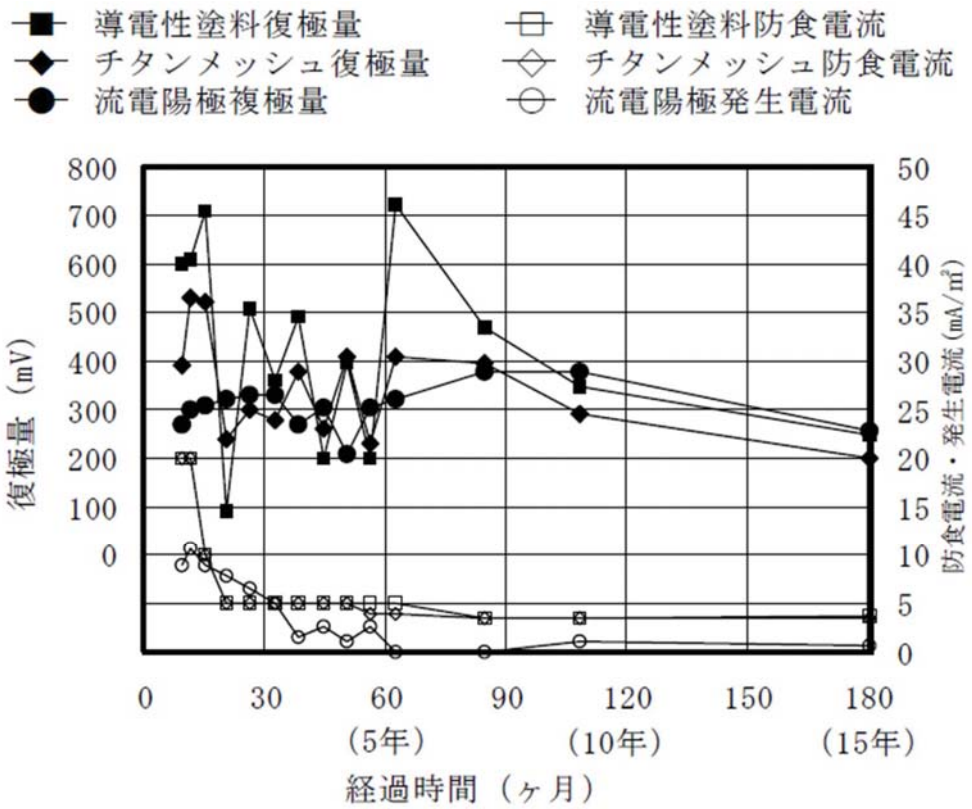
9年経過時　おおむね良好

・復極量100mV以上：　全ての計測点（各工法30～50計測点）で保持
　　復極量＝（電源を切った直後の鋼材電位）－（電源を切って24時間後の鋼材電位）
・チタン系陽極材：　健全
・亜鉛シート：　均一に消耗しないが、今後7年は期待できる状態→設計値の15年寿命期待

底面の亜鉛シートの消耗状態

内部の鋼材の状態（チタンメッシュ方式）
鋼材の腐食進行がないことを確認

15年経過時　復極量および防食電流の経緯



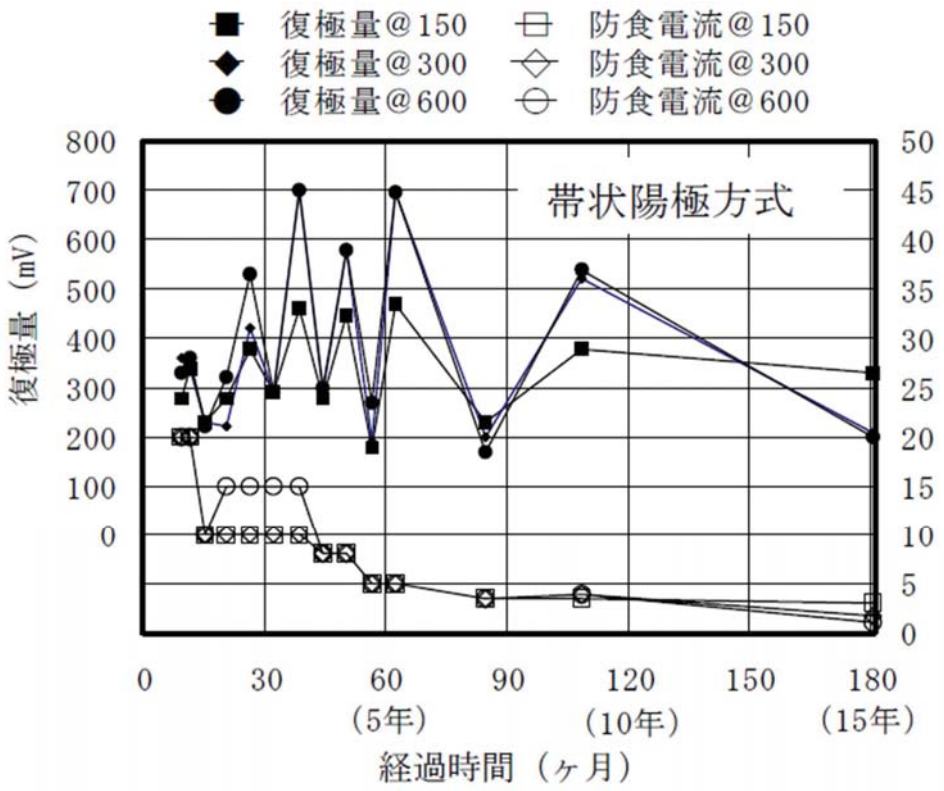
復極量：表示は平均値でばらつきが多い。100mVを保持できていない計測点あり。

工法	100mV以下計測点割合
導電性塗料	4%
チタンメッシュ	39%
亜鉛シート	15%

復極量を上げるために防食電流をあげると、電位が-1000mVを超えPC鋼材の水素脆化の危険性がある。

部分的には十分な防食効果が得られない可能性がある。

15年経過時　復極量および防食電流の経緯

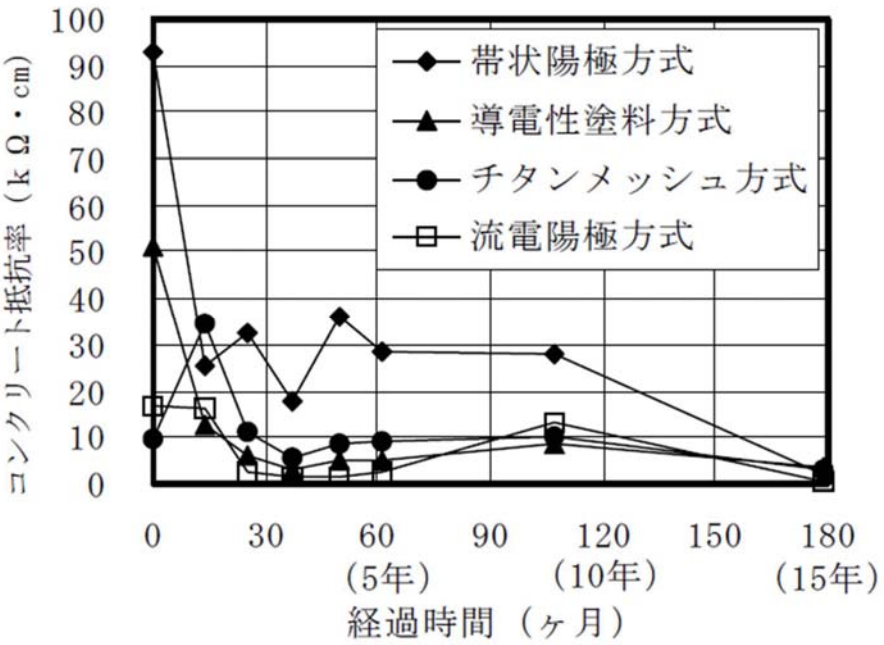


復極量：表示は平均値でばらつきが多い。100mVを保持できていない計測点あり。

帯状陽極方式	100mV以下計測点割合
ctc　15cm	0%
ctc　30cm	13%
ctc　60cm	16%

NEXCO 中日本

15年経過時　コンクリート抵抗率

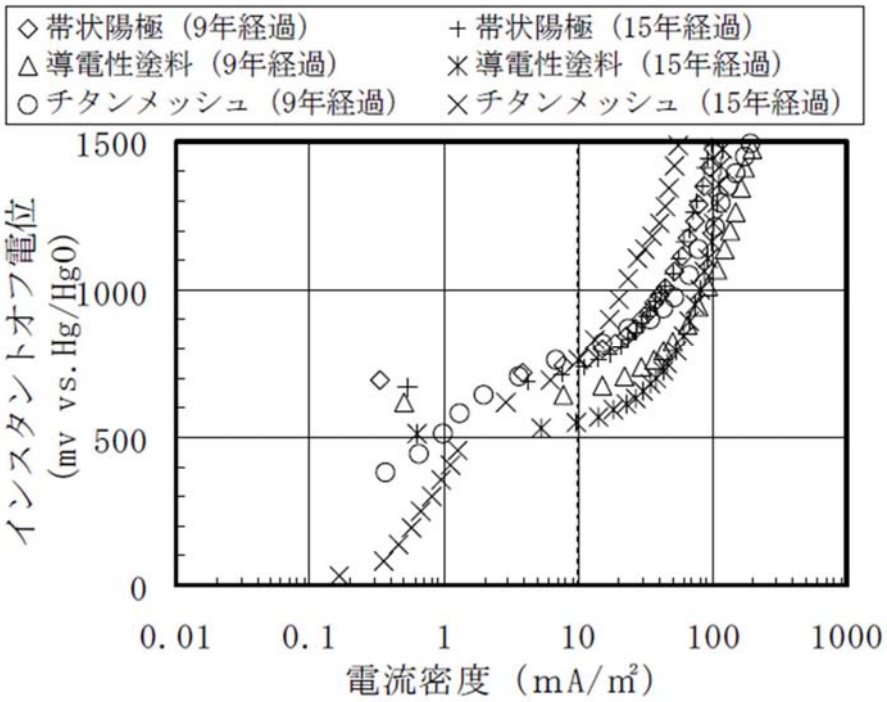


コンクリートが乾燥すれば抵抗率が大きくなり電流はながれにくい。

時間の経緯とともに現象しているが、15年目では工法による差はない。

NEXCO 中日本

15年経過時　アノード分極試験結果

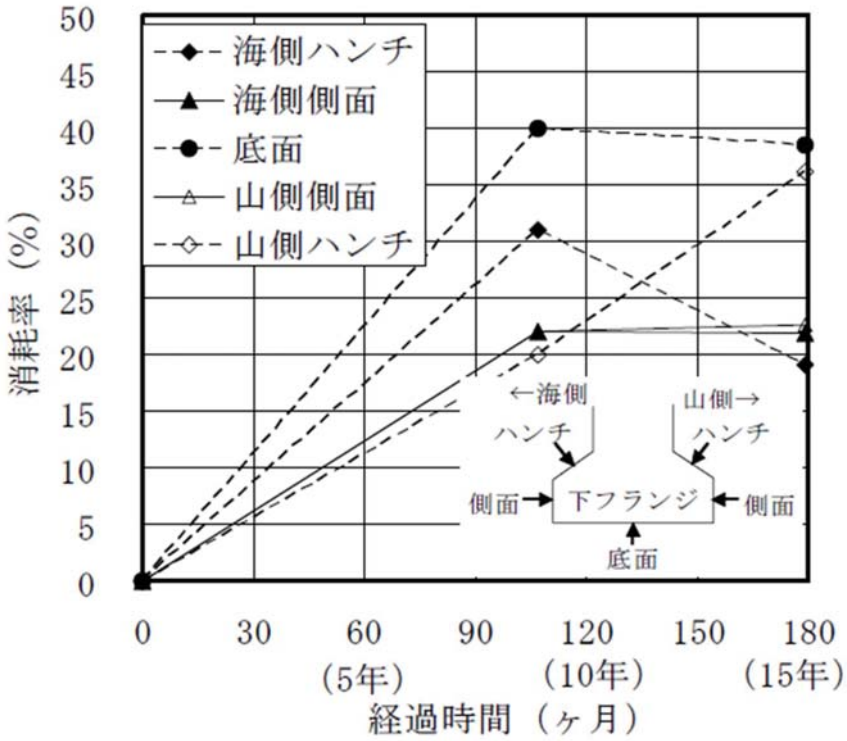


低電流密度域では直線的、高電流密度域では立上がる基本的な性状

導電性塗料方式とチタンメッシュ方式は、15年経過は9年経過に比べ候電流密度域で立上り勾配大

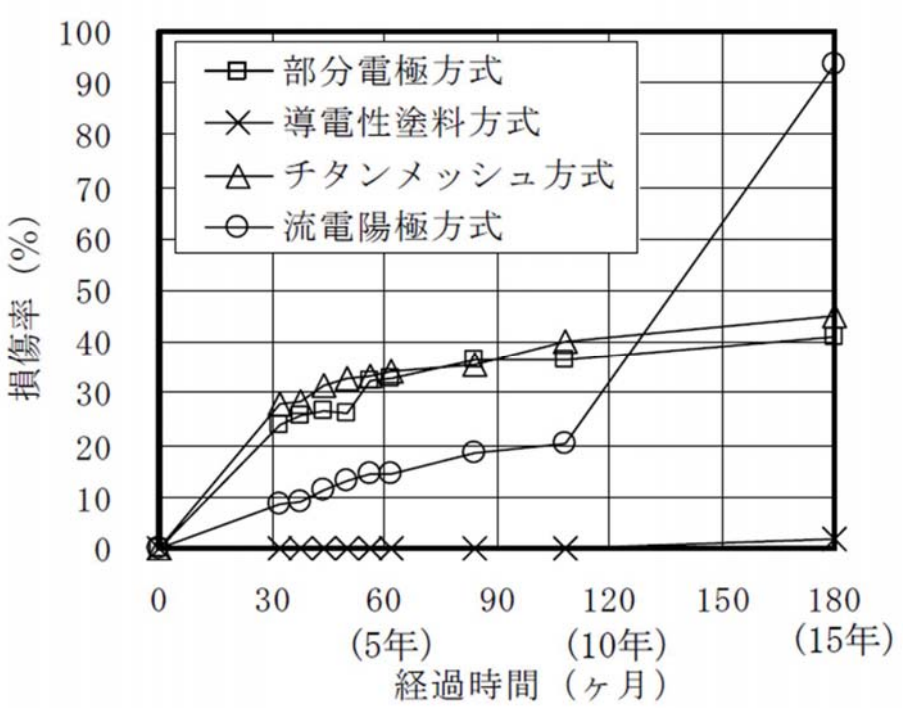
チタン線の劣化による不動態化により電流が流れ難くなっていることが推測される。

15年経過時　亜鉛シートの消耗率



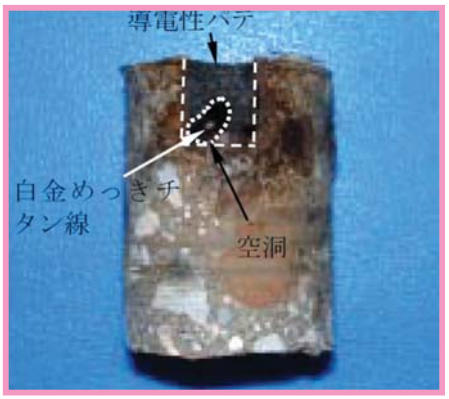
40%以下
9年経過時と15年経過時でほぼ同様
防食電流が小さいため、消耗が進行しなかったと考えられる。

15年経過時　副材損傷率の推移



帯状陽極：　導電性パテのひび割れ
導電性塗料：　塗装材の浮き
チタンメッシュ：　被覆モルタル浮き
亜鉛シート：　バックフィル材の非接触

帯状陽極のコア採取　劣化状況
　チタン線まわりに空洞が発生
　過大電流が流れたチタン線まわりのコンクリート劣化



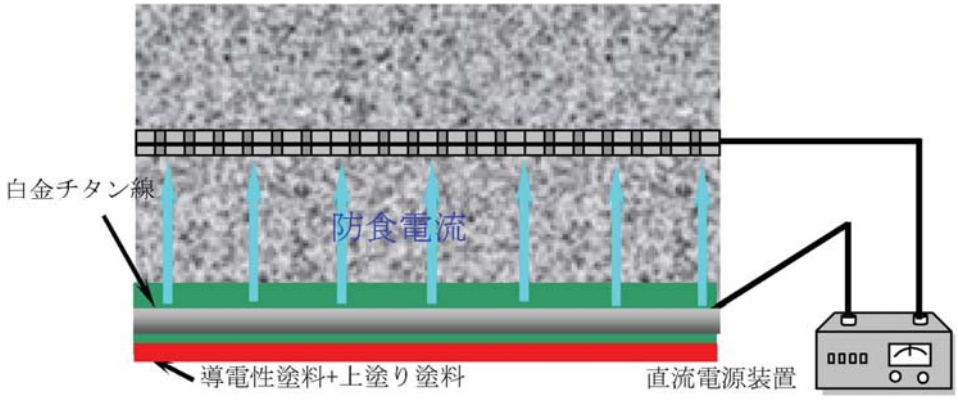
新技術導入における問題

開発期　→　試行期　→　競合･淘汰期　→　生き残った工法

平成元年に採用した工法＝生き残りに負けた工法　→　維持更新ができない！

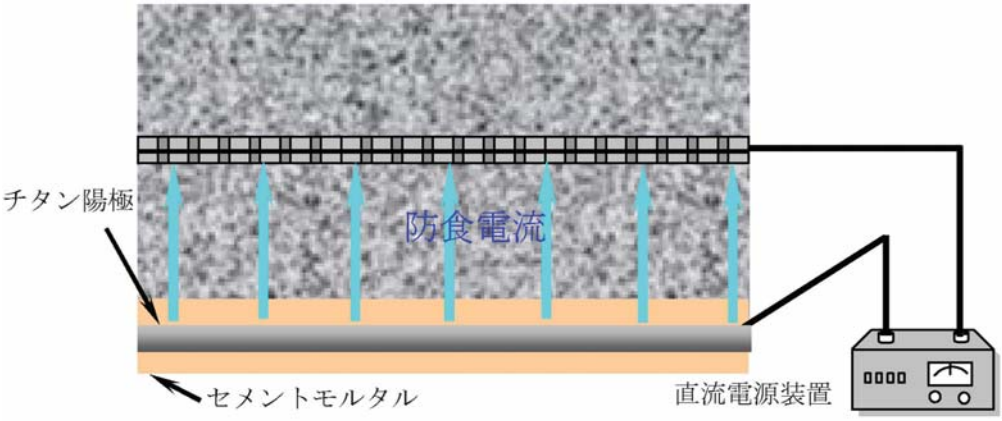
電源方式	外部電源方式			流電陽極方式
工法名	チタンメッシュ方式	導電性塗料方式	帯状電極方式	亜鉛シート方式
最近の採用事例	×	○（類似のものあり）	×	×
最新の工法	【エルグリッド陽極方式】 ・チタンメッシュ陽極＋FRPグリッド 【パネル陽極方式】 ・チタンメッシュ陽極＋永久型枠	【導電性塗料方式】 ・ﾌﾟﾗﾁﾅ・ﾆｵﾌﾞ被覆銅線＋導電性塗料 【導電性ﾓﾙﾀﾙ方式】 ・ﾌﾟﾗﾁﾅ・ﾆｵﾌﾞ被覆銅線＋導電性ﾓﾙﾀﾙ	【チタングリッド方式】 ・ﾁﾀﾝｸﾞﾘｯﾄﾞ陽極＋無機系被覆材 【ﾁﾀﾝﾘﾎﾞﾝﾒｯｼｭ方式】 ・ﾁﾀﾝﾘﾎﾞﾝﾒｯｼｭ陽極＋無機系被覆材 【ﾆｯｹﾙ被覆炭素繊維ｼｰﾄ方式】 ・ﾆｯｹﾙ被覆炭素繊維ｼｰﾄ＋ﾊﾞｯｸﾌｨﾙ 【チタントレイ方式】 ・チタントレイ＋無機系充填材	【アルミ溶射方式】 ・流電用アルミ線材の溶射（膜厚300μm）

電気防食の更新　比較検討　導電性塗料方式



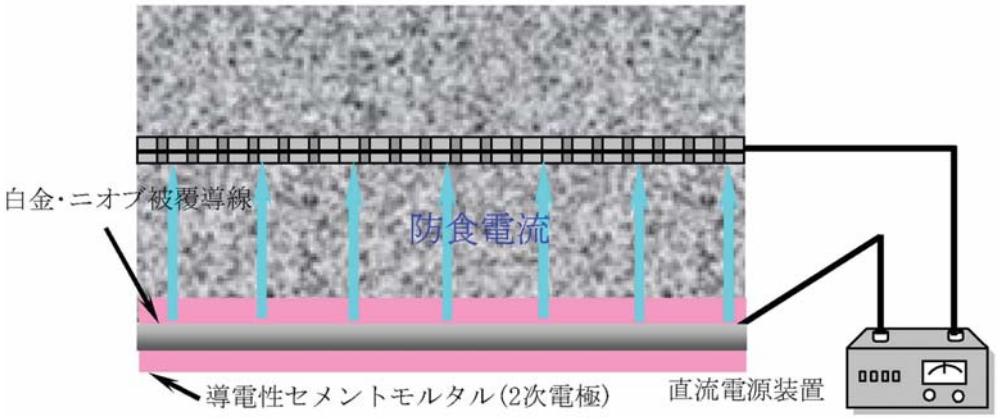
主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
白金メッキチタン線	導電性塗料	上塗り塗料
課題 ・導電性塗料の耐久性		

電気防食の更新　比較検討　チタングリッド方式



主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
チタングリッド	セメントモルタル	--
課題 ・陽極におけるモルタルの耐久性 ・モルタルによる重量増加		

電気防食の更新　比較検討　導電性モルタル方式



主材	副材	
1次電極	2次電極	仕上被覆材
白金ニオブ被覆導線	導電性ポリマーセメントモルタル	--
課題		
・陽極における導電性モルタルの耐久性		

電気防食の更新　比較検討　→　H21更新

	導電性塗料方式		チタングリッド方式		導電性モルタル方式	
LCCの比較	1.00	評価	1.15	評価	1.25	評価
構造性	・陽極設置に伴う死荷重増加がほとんど無い。	○	・陽極設置に伴う死荷重増加で上部工の補強が必要。	△	・陽極設置に伴う死荷重増加が若干るが補強までは必要ない。	△
施工性	・陽極材が塗料のため、初期施工や補修が最も容易。 ・はつり作業や吹き付け作業が無いため、飛散防止等の防護設備も最小限となる。 ・桁に付属物があっても柔軟に施工可能である。	○	・陽極材が連続した長いチタン棒のため、初期施工や補修が難しい。 ・桁に付属物があった場合、チタン棒の設置が難しい。	△	・陽極材が導電性モルタル(8mm程度)のため、初期施工や補修が比較的容易である。 ・吹き付け作業のため、飛散防止等の防護設備が必要。 ・桁に付属物があっても柔軟に施工可能である。	○
PC桁への適用性	・桁断面を切削等により痛めないことから、PC桁への適用に有効である。	○	・かぶりの薄い箇所ではチタン陽極と鉄筋との絶縁対策が必要となり適用は難しい。	△	・桁断面を切削等により痛めないことから、PC桁への適用に有効である。	○
維持管理性	・塗料の耐久性は使用環境によって異なるが、定期的な塗り替えや配線などの取替え（15年に1度）が必要である。	△	チタン陽極材の寿命は長い（40年）が配線などの定期的な取り替えが15年程度で必要。	△	・モルタルの耐久性は使用環境によって異なるが、補修（20年に1度）が必要である。また、配線などの定期的な取り替えが15年程度で必要。	○
総合評価	○		△		△	

現在の状況　導電性塗料方式

導電性塗料：　スウェーデン製

参考文献

1）文野、長沼、田中、新野、篠田：道路橋における電気防食試験施工、土木学会第46回年次学術講演会、1991.

2）野村、前田、石村、平：北陸自動車道大慶寺川橋での電気防食試験の評価、コンクリート工学 Vol. 37、No.12、 1999.

3）五寶、荒本、朝倉、野村：北陸地区における施工後15年を経た各種電気防食工の評価報告、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、2006.

4）足立、宮嶋、森山：北陸自動車道大慶寺川橋における電気防食リニューアル工事の検討、コンクリート工学Vol. 49、No.2、 2011.

最後に　中日本エンジ名古屋のコンクリートの分析設備

試験研究室

EPMA

蛍光X線部分析装置

複合サイクル試験設備

アルカリ骨材反応試験設備

電位差滴定装置

JNLA　140358JP

ご清聴ありがとうございました

SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）
連携講座「構造物メンテナンス講座」開設記念シンポジウム
「コンクリート橋の塩害劣化と電気防食工法による対策事例」

能登半島（国道249号）での塩害とASRにより複合劣化したコンクリート橋への適用事例

2015年 3月27日

金沢大学大学院自然科学研究科後期博士課程
アルスコンサルタンツ株式会社

麻 田 正 弘

1

本題の内容（30分）

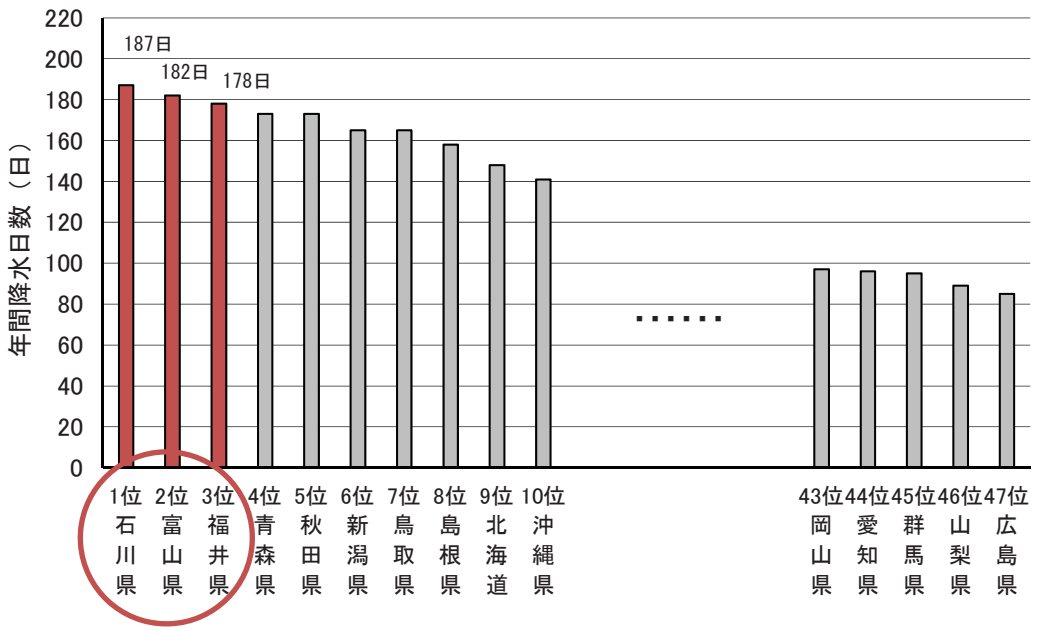
1. 北陸地方におけるコンクリート構造物に対する使用・環境条件
2. 地方公共団体における道路橋の管理数
3. 北陸地方におけるコンクリート橋への電気防食工法の適用
4. 能登半島（国道249号）での塩害とASRにより複合劣化したコンクリート橋への適用事例

2

1．北陸地方におけるコンクリート構造物に対する使用・環境条件

- 気象条件 （降水日数，降水量，および相対湿度）
- 塩害環境 （日本海から飛来塩分，凍結防止剤の散布）
- アルカリシリカ反応性 （反応性骨材の分布）
- 凍害環境 （山間地域）

気象条件 （年間降水日数）

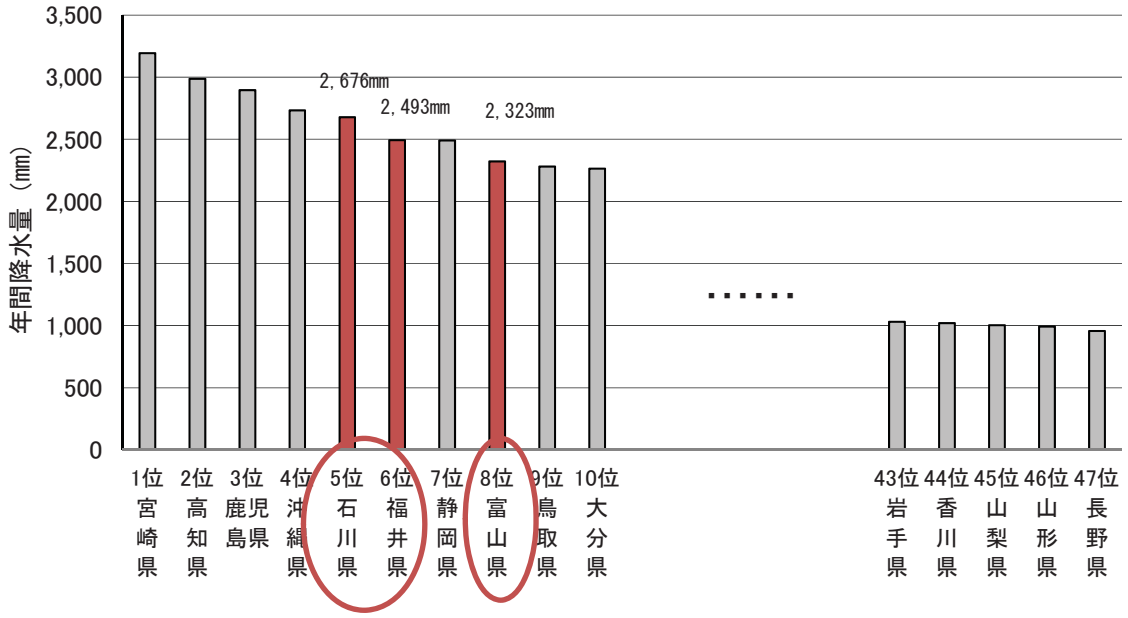


年間降水日数

（日降水量が1㎜以上であった日の年間の日数）

「総務省統計局：統計でみる都道府県のすがた2014，B自然環境，2014. 2.」

気象条件 （年間降水量）



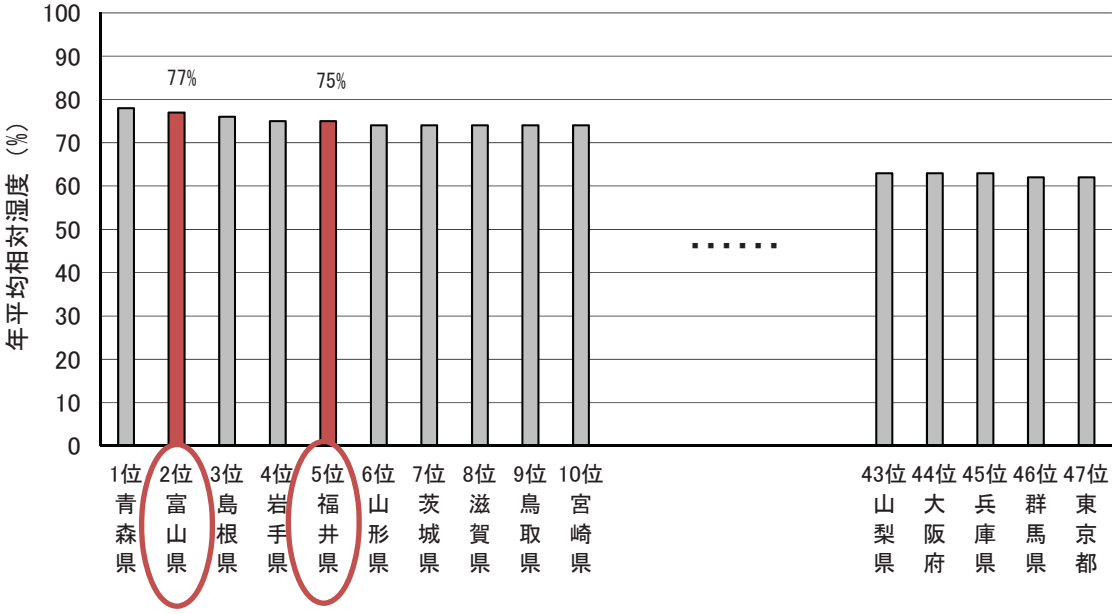
年間降水量

（年間の総雨量）

「総務省統計局：統計でみる都道府県のすがた2014，B自然環境，2014. 2.」

5

気象条件 （年平均相対湿度）



年平均相対湿度

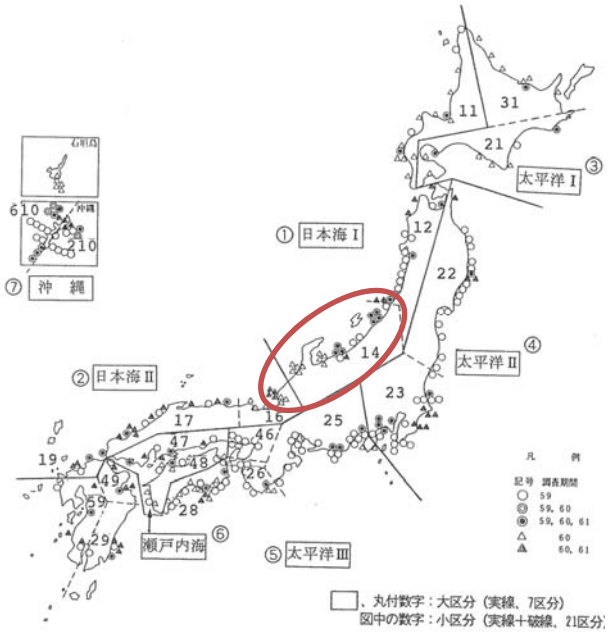
（１日24回の観測値から求めた年平均相対湿度）

「総務省統計局：統計でみる都道府県のすがた2014，B自然環境，2014. 2.」

6

塩害環境 （冬期日本海からの飛来塩分）

飛来塩分量の全国分布

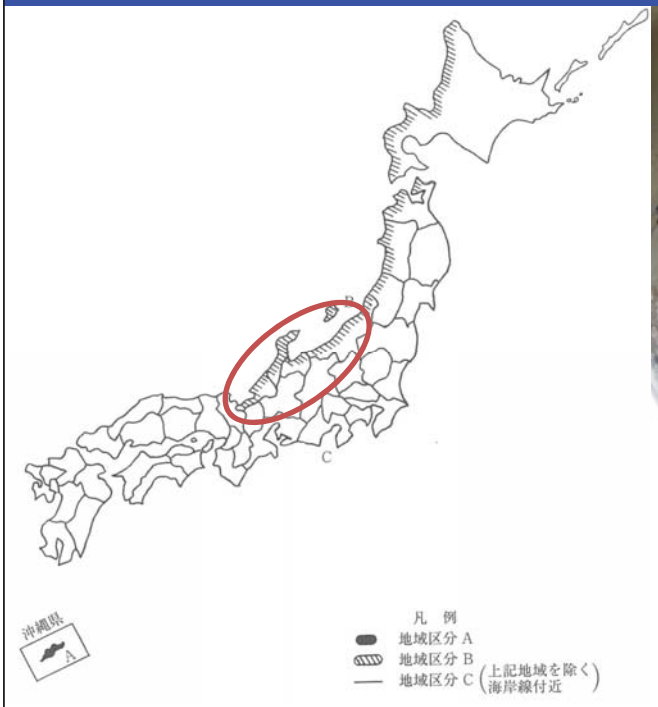


地域区分

「建設省土木研究所：飛来塩分全国調査（Ⅳ）－飛来塩分量の分布特性と風の関係－，土木研究所資料第3175号，1993.3」

7

塩害環境 （海岸線の飛来塩分）

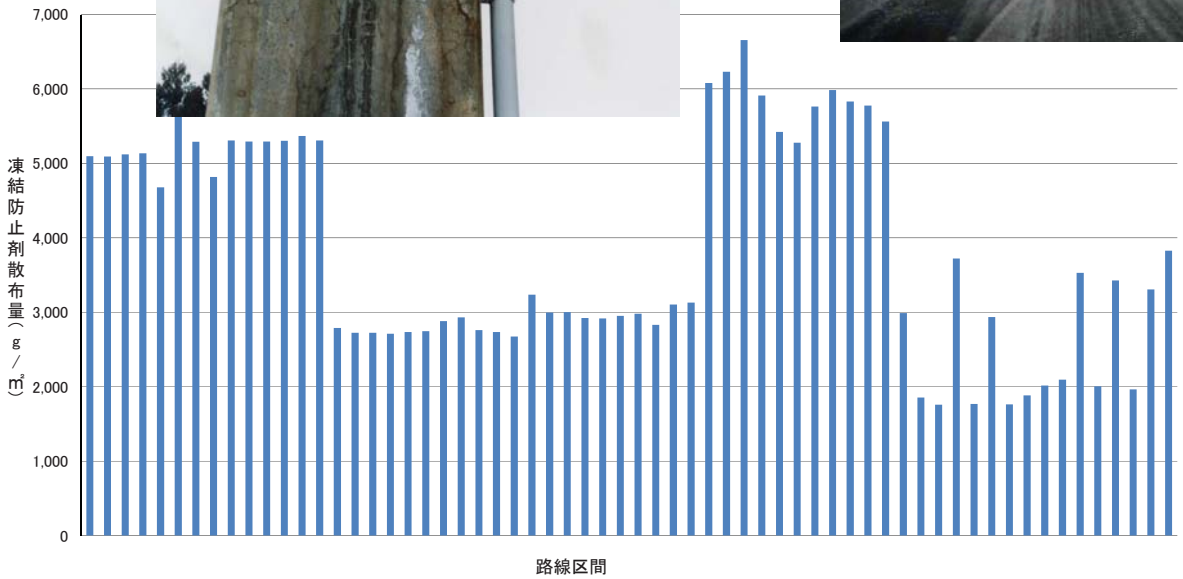


塩害の影響の度合いの地域区分

「日本道路協会：道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編・同解説，2012. 3.」

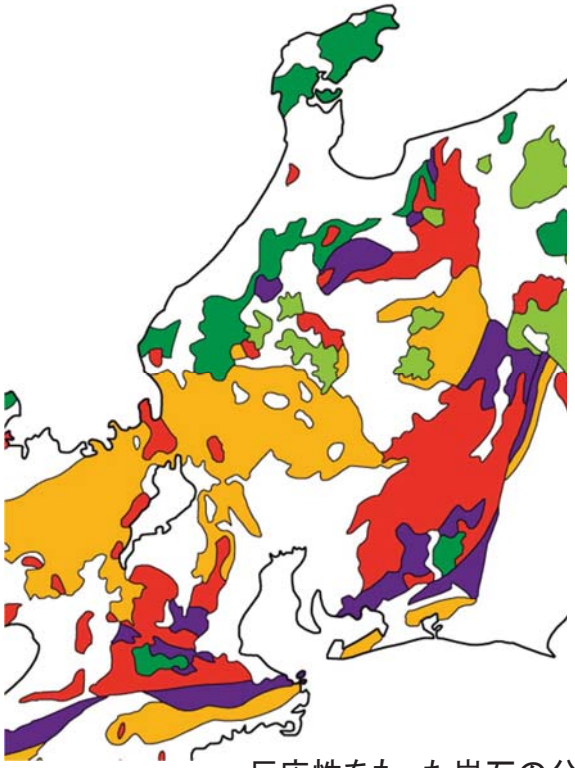
8

塩害環境 （凍結防止剤の散布）



凍結防止剤の散布状況

アルカリシリカ反応 （反応性骨材の分布）



- 第四紀火山岩類
- 新第三紀火山岩類
- チャートを多量に含む地層
- 花崗岩類（周囲のホルンフェルスが反応性）
- 変成岩類

反応性をもった岩石の分布 （北陸・東海地方）

株式会社 太平洋コンサルタント　広野真一氏

（ASRと関係の深い岩石の分布図（小笠原正継・須藤定久（2003）を改変）

凍害環境 （山間地域）

凍害危険度の分布図

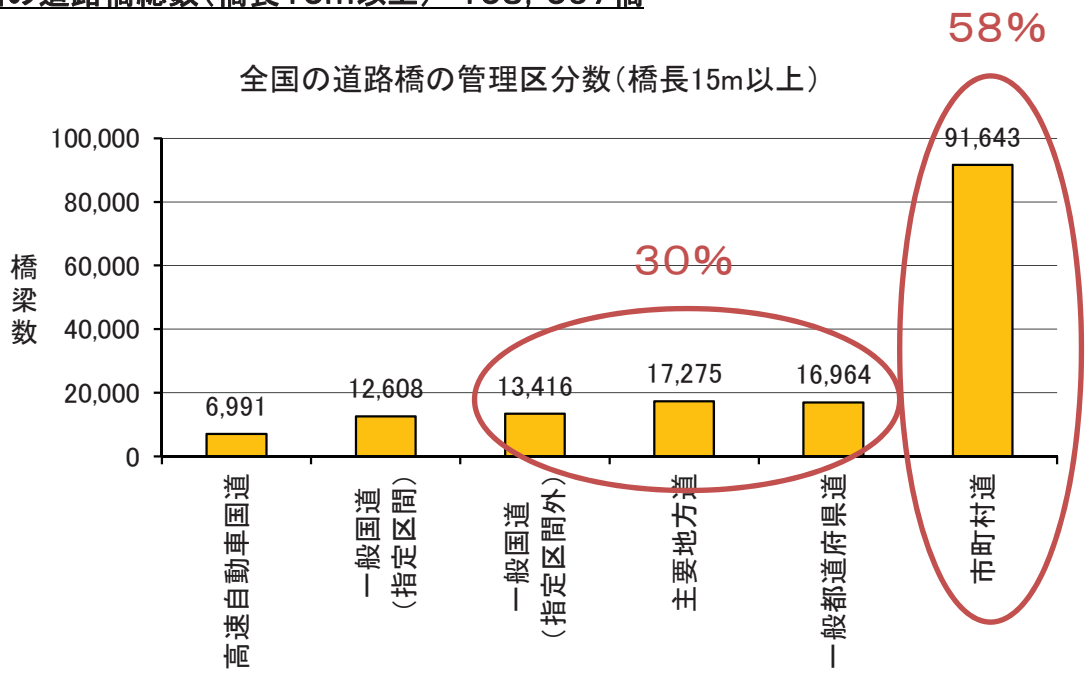
「長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案,セメント技術年報，Vol.29，1975」

2．地方自治体の道路橋の管理区分について

- 全国の道路橋の管理区分
- 北陸地方（石川県，富山県，福井県）の道路橋の管理区分

全国の道路橋の管理区分（橋長15m以上）橋梁数

全国の道路橋総数（橋長15m以上） 158，597橋



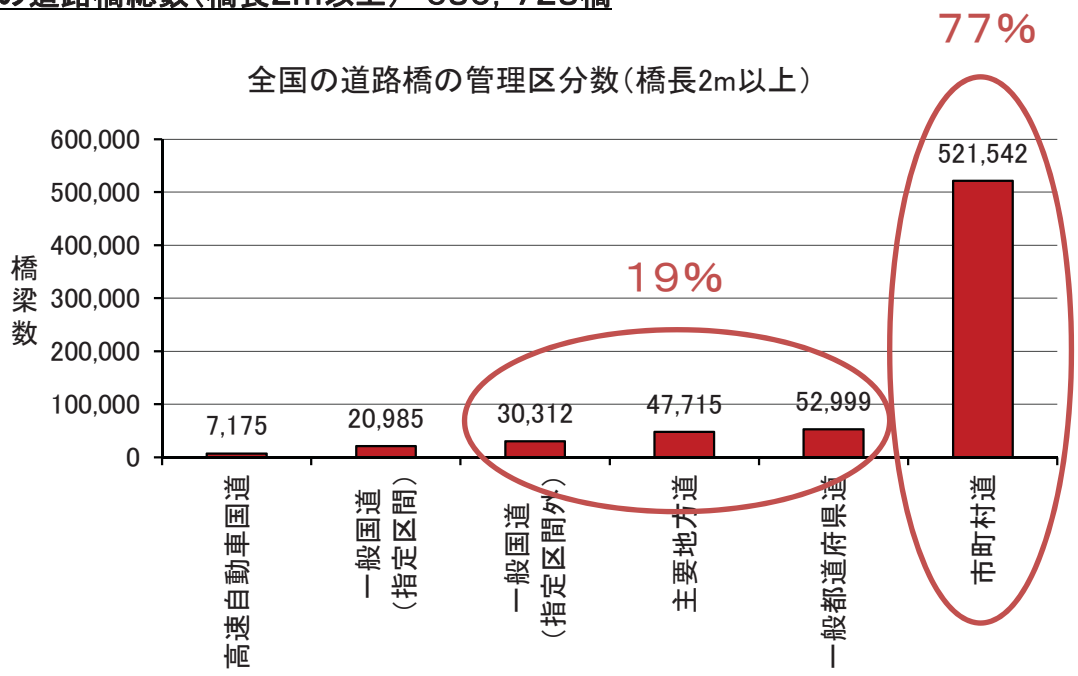
「国土交通省国土技術政策総合研究所：平成24年度道路構造物に関する基本データ集，国総研資料第776号，2014. 1.」

「国土交通省道路局監修：道路統計年報2012」

13

全国の道路橋の管理区分（橋長2m以上）橋梁数

全国の道路橋総数（橋長2m以上） 680，728橋



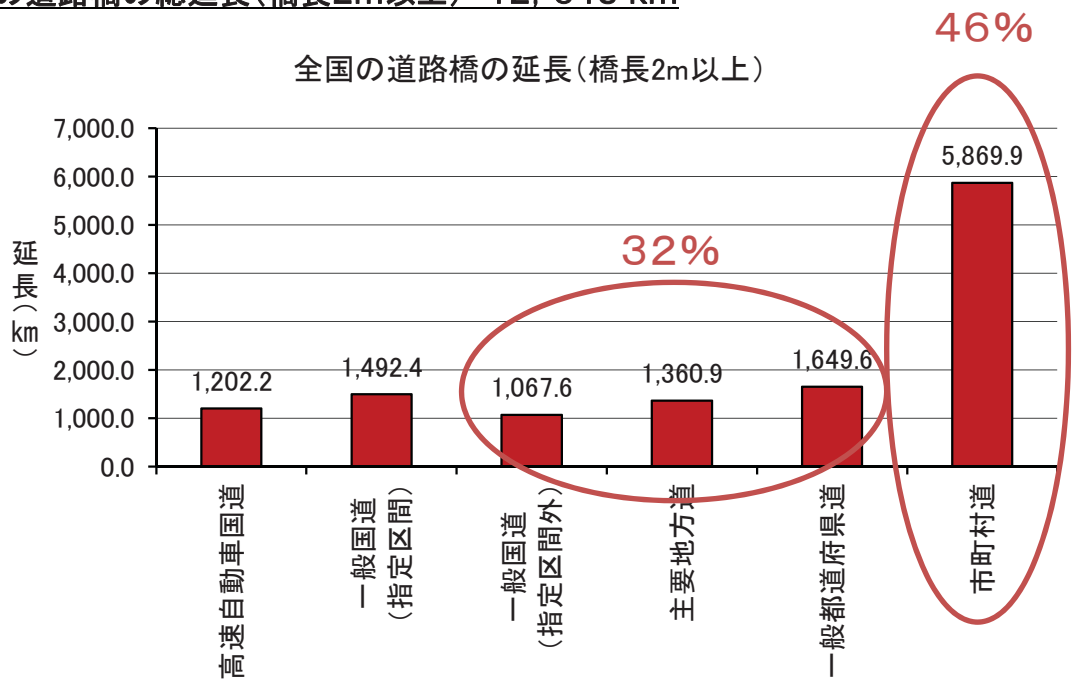
「国土交通省国土技術政策総合研究所：平成24年度道路構造物に関する基本データ集，国総研資料第776号，2014. 1.」

「国土交通省道路局監修：道路統計年報2012」

14

全国の道路橋の管理区分（橋長2m以上）延長

全国の道路橋の総延長（橋長2m以上） 12，643 km



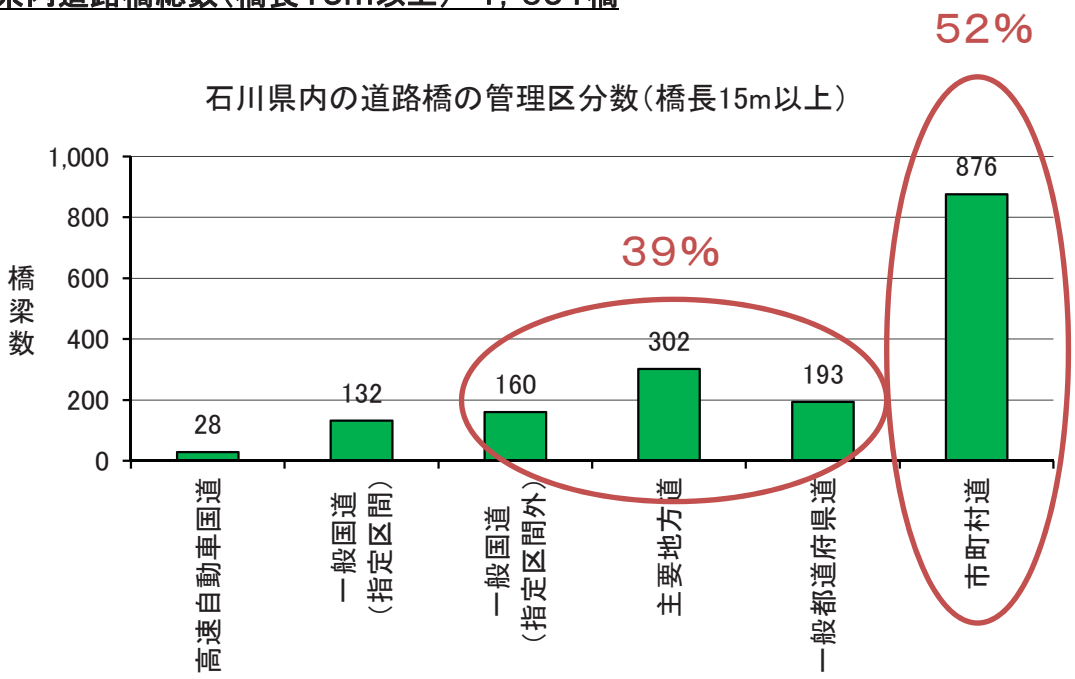
「国土交通省国土技術政策総合研究所：平成24年度道路構造物に関する基本データ集，国総研資料第776号，2014. 1.」

「国土交通省道路局監修：道路統計年報2012」

15

石川県内の橋梁の管理区分（橋長15m以上）橋梁数

石川県内道路橋総数（橋長15m以上） 1，691橋

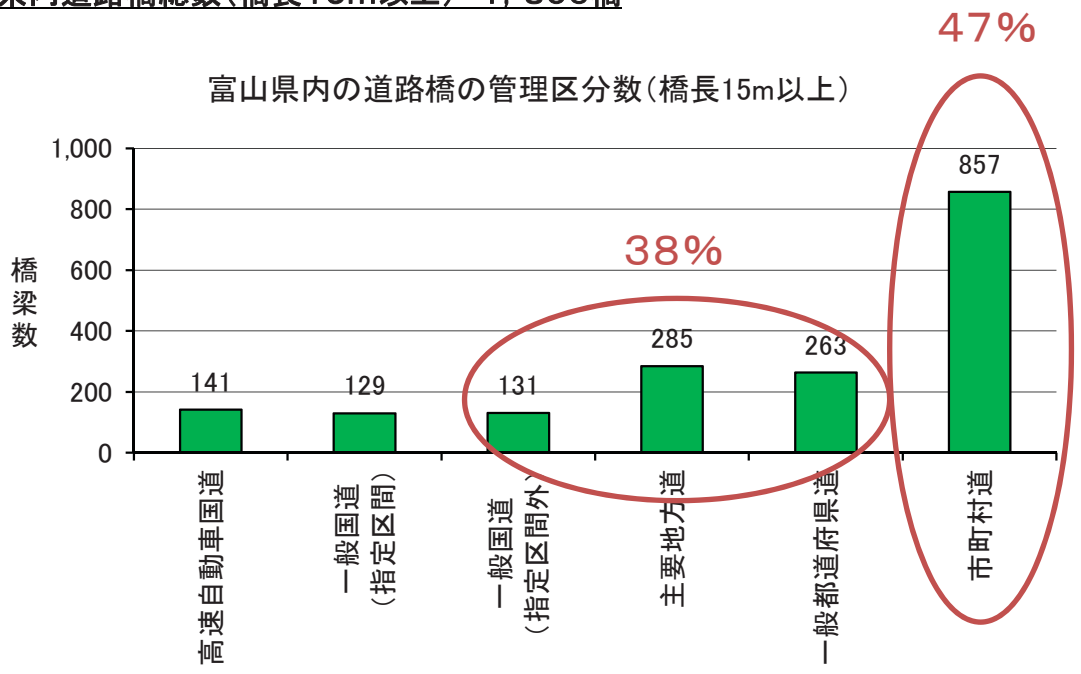


「国土交通省道路局監修：道路統計年報2012」

16

富山県内の橋梁の管理区分（橋長15m以上）橋梁数

富山県内道路橋総数（橋長15m以上）　1，806橋

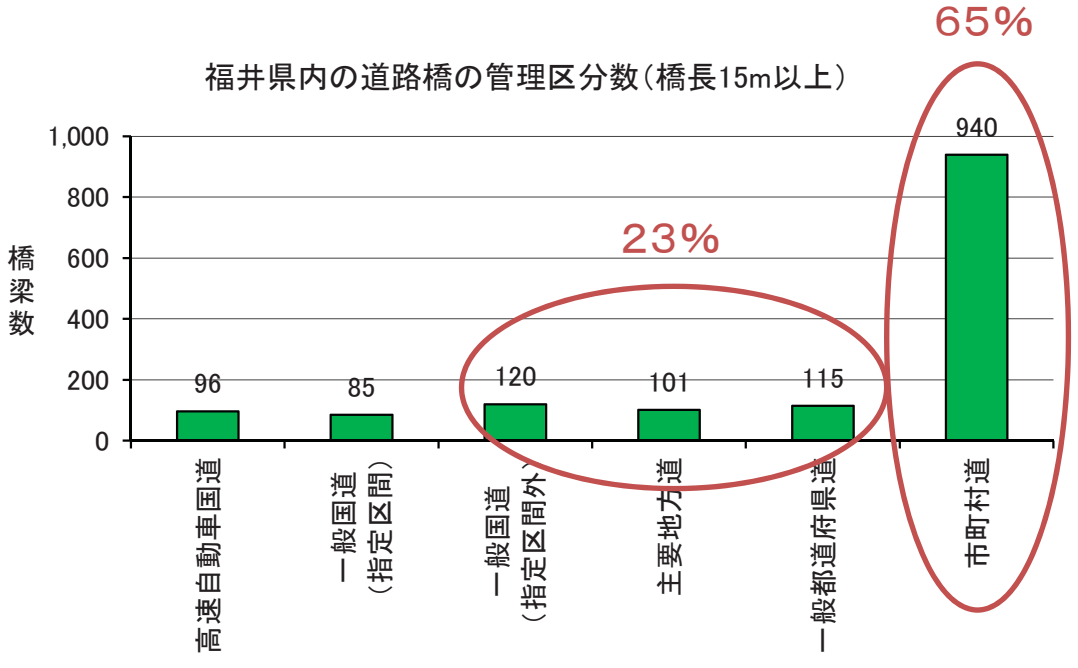


「国土交通省道路局監修：道路統計年報2012」

17

福井県内の橋梁の管理区分（橋長15m以上）橋梁数

福井県内道路橋総数（橋長15m以上）　1，457橋



「国土交通省道路局監修：道路統計年報2012」

18

地方の構造物の維持管理の見直し

市町村の場合は，予算が不足するのみならず，担当する土木技術者も少なく，丁寧な橋梁の維持管理を行うことが困難な状況にある。

人口激減地域などに対して，従来のように一律に維持管理することが困難になる可能性がある。この場合に必要なことは管理対象の見直しである。

全国一律の評価項目だけではなく，地域のニーズや環境などを考慮した評価を設定すべきである。

「土木学会第7回有識者会議」（平成26年10月21日）

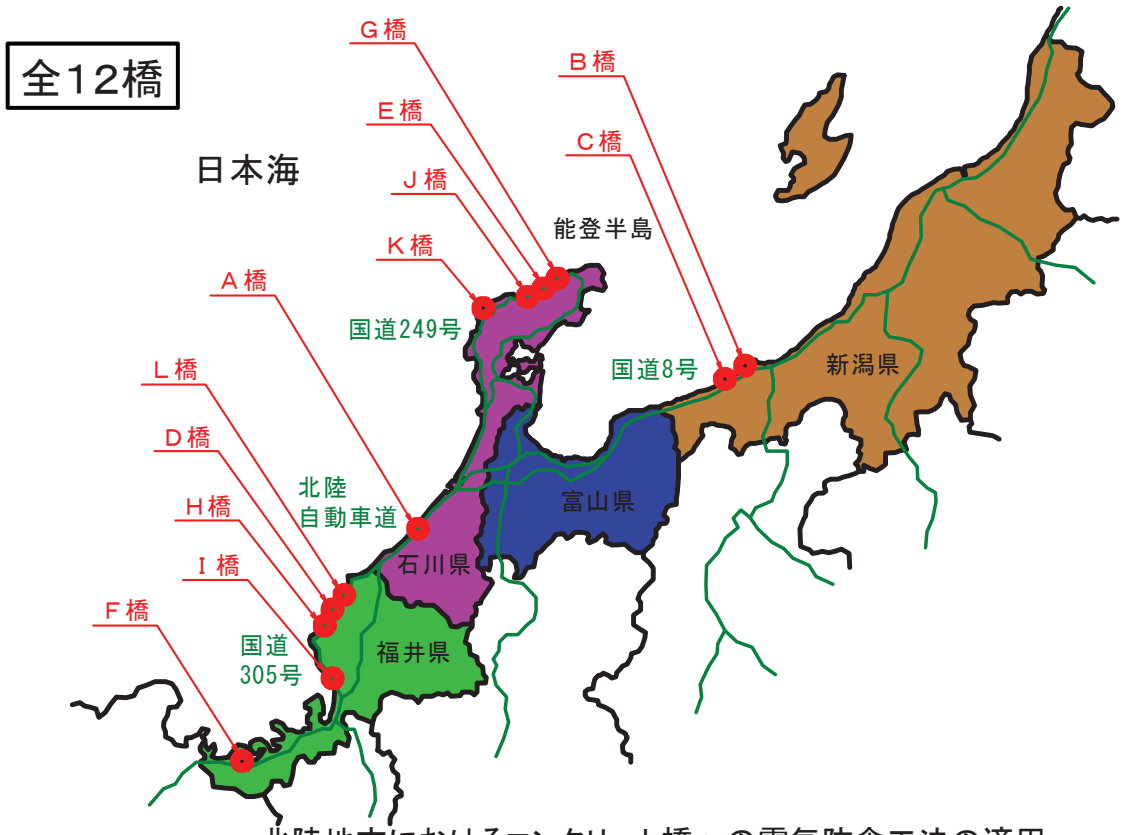
19

3．北陸地方におけるコンクリート橋への電気防食工法の適用

- 北陸地方における電気防食工法の適用箇所（コンクリート橋）
- 電気防食工法を適用したコンクリート橋の諸元と調査
- 電気防食工法を適用したコンクリート橋の防食状態

20

北陸地方における電気防食工法の適用箇所



北陸地方におけるコンクリート橋への電気防食工法の適用

21

北陸地方における電気防食工法の適用 （全12橋）

22

北陸地方における電気防食工法の適用 （全12橋）

北陸地方における電気防食工法の適用 （全12橋）

電気防食工法を適用したコンクリート橋の諸元と調査

橋梁	形式	建設年（供用年数）	道路形態	海岸線からの距離	補修年（建設～補修）	補修内容	再劣化	劣化過程	塩分濃度（表面3cm）kg/m³	鉄筋腐食度	PC鋼材腐食度
A橋	ﾎﾟｽT	1972年（43年）	平地部	80 m	1983年（11年）	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（後	7.0	Ⅳ	破断あり
B橋	ﾌﾟﾚT	1972年（43年）	高架橋	0 m	1988年（16年）	断面修復 表面被覆	再劣化	加（後期）	4.7	Ⅳ	Ⅳ G1桁（2本破断/24本）
C橋	ﾎﾟｽ 中空	2001年（14年）	平地部	0 m	新設	新設	新設	新設	新設	新設	新設
D橋	ﾎﾟｽT	1973年（42年）	平地部	0 m	不明	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（後期）	12.7	Ⅳ	Ⅳ G5桁（1本破断/9本）
E橋	ﾌﾟﾚT	1975年（40年）	平地部	0 m	補修なし	補修なし	補修なし	加速期（後期）	16.5	Ⅳ	Ⅳ G1,G4桁（1本破断/18本）
F橋	RC ﾗｰﾒﾝ	1973年（42年）	海上部	0 m	1986年（13年）	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（後期）	12.6	Ⅲ	データなし
G橋	ﾌﾟﾚT	1973年（42年）	平地部	0 m	補修なし	補修なし	補修なし	加速期（後期）	6.0	Ⅳ	Ⅳ G8,G11桁（1本破断/13本）
H橋	ﾌﾟﾚT	1975年（40年）	高架橋	0 m	2001（26年）	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（前期）	5.7	データなし	データなし
I橋	ﾎﾟｽT	1978年（37年）	高架橋	0 m	1999年（21年）	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（後期）	8.2		
J橋	ﾎﾟｽT	1980年（35年）	平地部	160 m	不明	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（前期）	2.7	Ⅳ	Ⅱ，Ⅳ G3桁（1本破断/13本）
K橋	ﾌﾟﾚ ﾎﾛｰ	不明	平地部	10 m	補修なし	補修なし	補修なし	加速期（後期）	データなし	Ⅳ	破断あり
L橋	有 ﾋﾝｼﾞ	1976年（39年）	高架橋	0 m	不明	断面修復 表面被覆	再劣化	加速期（前期）	10.0	Ⅳ	データなし

再劣化　8橋

PC鋼材破断 3橋

25

塩害劣化過程と対応する補修工法

構造物の劣化過程とそれに対応する補修工法の選定方針の例

劣化過程	構造物の要求性能ごとの対策方針　【　】は標準的な工法例を示す	
	安全性	使用性
潜伏期	塩化物イオンの浸透量の低減 【表面処理】	
進展期	塩化物イオンの低減・除去，鋼材防食 【表面処理】，【脱塩】，【電気防食】，【断面修復】 ※断面修復や脱塩に際し，表面処理を併用することもある。	
加速期前期	塩化物イオンの除去，鋼材防食 【断面修復】，【脱塩】，【電気防食】 ※断面修復や脱塩に際し，表面処理を併用することもある。	
加速期後期	耐力，剛性の回復等 【断面修復】 ※断面修復に際し，表面処理を併用する場合や，鋼材の増設・交換を行う場合もある。 ※プレストレストコンクリート構造物（部材）の場合は，断面修復に加えて電気防食を併用する場合もある。	
劣化期	耐力，剛性の回復等 【断面修復＋鋼材の増設や交換】 ※断面修復に際し，表面処理を併用することもある。 ※上記以外に，連続繊維接着，外ケーブル，巻立て，増厚等による場合もある。	

「土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書［維持管理編］」

26

電気防食工法を適用したコンクリート橋の防食仕様

橋梁	電防施工年 (建設～電防)	電気防食方式	防食対象	電防～現在(年)	防食面積 (m^2)	回路数	補強材併用
A橋	1989年 (17年)	帯状陽極・導電性塗料 チタンメッシュ・亜鉛シート	主桁	26年	18 , 9 9 , 17	1 , 1 1 , 1	外ケーブル
B橋	1996年 (24年)	チタンメッシュ・チタングリッド 亜鉛シート	主桁	19年	72 , 54 72	1 , 2 1	なし
C橋	2001年 (新設)	リボンメッシュ・チタングリッド チタンロッド・チタン溶射	床版底面	14年	428 , 390 - ,422	1 , 1 1 , 1	なし
D橋	2003年 (30年)	チタングリッド・リボンメッシュ	主桁・間詰	12年	90 450	1	CFPRシート
E橋	2006年 (31年)	導電性塗料	主桁	9年	267 267	2	CFRPプレート
F橋	2010年 (37年)	線状陽極・導電性塗料	主桁・横桁	5年	140,273 244,161,168	5	なし
G橋	2010年 (37年)	チタングリッド	主桁・横桁 間詰	5年	433	1	CFRPプレート
H橋	2011年 (36年)	チタングリッド	主桁・横桁	4年	327 328	1 1	なし
I橋	2011年 (33年)	チタングリッド	主桁	4年	データなし	データなし	外ケーブル
J橋	2012年 (32年)	チタングリッド　PI-Slit	主桁 (PC鋼材範囲)	3年	496	1	なし
K橋	2013年 (不明)	チタングリッド　PI-Slit	主桁	2年	122	1	CFRPプレート
L橋	2015年 (39年)	チタングリッド　PI-Slit	主桁 張出床版	施工中	600	2	なし

27

電気防食工法を適用したコンクリート橋の防食状態

橋梁	測定 年.月	電気防食方式	電防～測定 (年)	電源電流 (A)	電流密度 (mA/m^2)	鋼材電位 (mV v.s.SCE)	覆極量 (mV)
A橋	データなし	帯状陽極・導電性塗料 チタンメッシュ・亜鉛シート	0.6～7.6mA/m²		2 4 4 0.6	-815～-105 -495～-190 -710～-150 -665～-115-	10～770 15～525 15～560 15～360
B橋	2010.11	チタンメッシュ・チタングリッド 亜鉛シート	14年	0.11 0.002 -	1.38 0.07 ～ 0.07 0.23 ～ 0.46	-595 ～ -397 -570 ～ -542 -226 ～ -458	240 ～ 448 148 ～ 357 164 ～ 332
C橋	2010.11	リボンメッシュ・チタングリッド チタンロッド・チタン溶射	9年	データなし	-	-431 ～ -220 -219 ～ -13 -271 ～ -191 -467 ～ -2	106 ～ 238 55 ～ 206 121 ～ 194 84 ～ 419
D橋	2006.6 2009.3	チタングリッド・リボンメッシュ	3年	2.7	5.0	-701 ～ -383	117 ～ 298
E橋	2014.2～ 2015.2	導電性塗料	8年	0.46 0.46	1.7 1.7	-637 ～ -380 -560 ～ -351	161 ～ 327 230 ～ 298
F橋	2010.12	線状陽極・導電性塗料	覆極試験	1.22 0.48	5.0 3.0	-458 -441	204 219
G橋	2014.2～ 2015.2	チタングリッド	5年	1.30	3.0	-623 ～ -356	167 ～ 369
H橋	2011.11	チタングリッド	覆極試験	0.29 0.56	0.9 1.7	-543 -407	299 197
I橋	データなし	チタングリッド	-	-	-	-	-
J橋	2014.2～ 2015.2	チタングリッド　PI-Slit	3年	2.41	4.9	-587 ～ -303	169 ～ 394
K橋	2014.2～ 2015.2	チタングリッド　PI-Slit	1年	0.93	7.6	-791 ～ -504	206 ～ 390

28

4．能登半島（国道249号）での塩害とASRにより複合劣化したコンクリート橋への適用事例

- 電気防食工法を適用した4つのPC橋
- 電気防食工法を適用したPC橋の塩害およびASRに関する調査
- 日常管理による防食状態
- ASRへの影響に関するモニタリング調査

29

能登半島での塩害とASRにより複合劣化したコンクリート橋への適用

➢ 能登半島において

塩害劣化した4つのPC橋

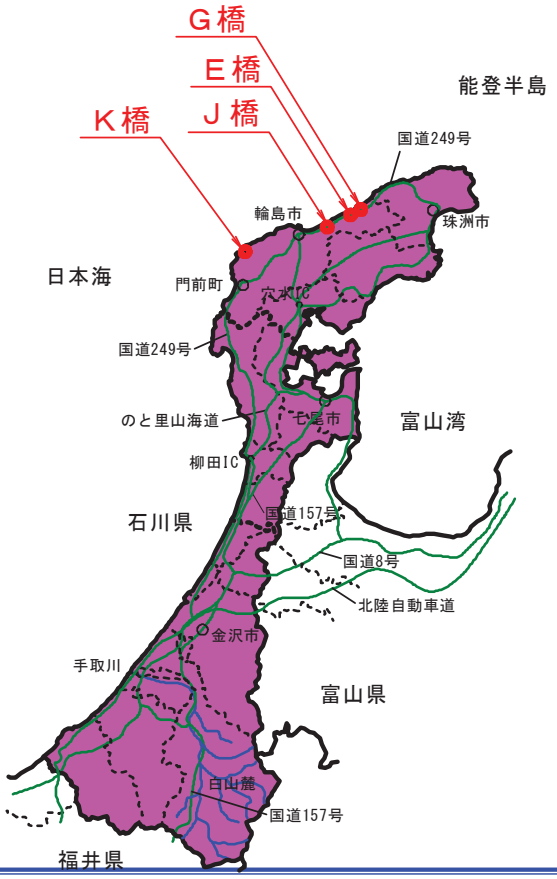
ASRを併発
（複合劣化）

塩害防食対策を優先

2006年～2013年
電気防食工法

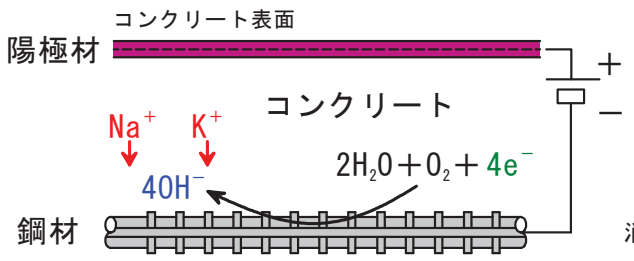
ASRひび割れ幅のモニタリング

モニタリング状況の報告



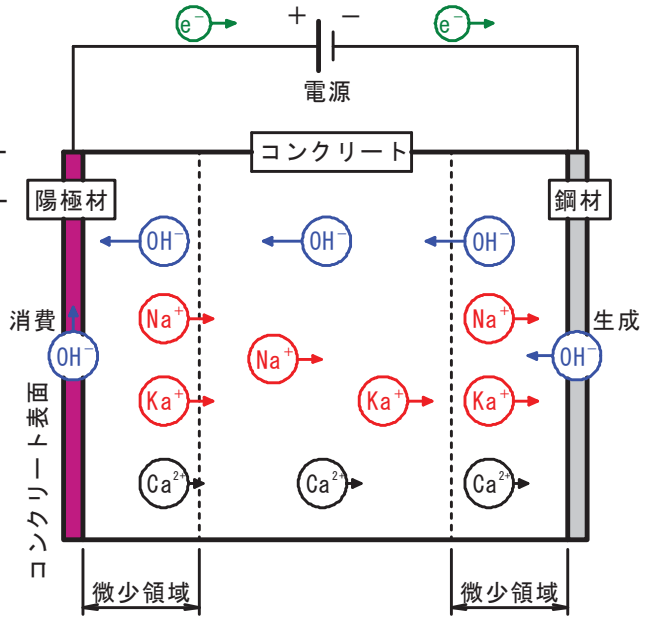
30

電気防食工法とASRの関係



鋼材周辺の電気化学的反応

アルカリ環境変化



電気化学的反応とイオンの移動

「日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制と診断研究委員会報告書，石井浩司氏，2008.9」

31

電気防食工法を適用した4つのPC橋

E橋 ﾌﾟﾚﾃﾝｼｮﾝT桁 L=20.0m (電防2006年)

G橋 ﾌﾟﾚﾃﾝｼｮﾝT桁 L=14.0m (電防2010年)

J橋 ﾎﾟｽﾄﾃﾝｼｮﾝT桁 L=36.0m (電防2012年)

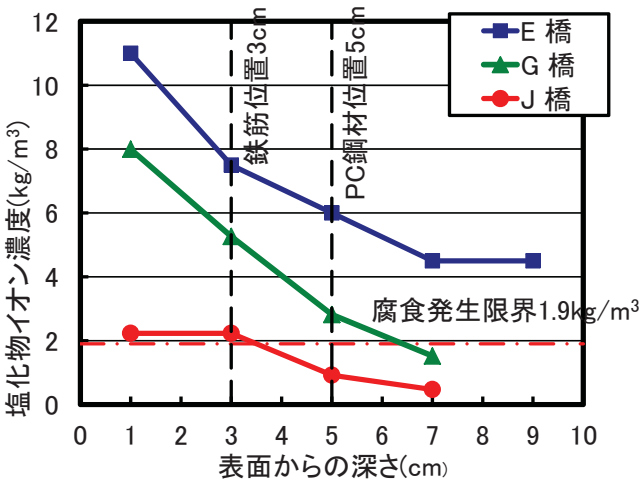
K橋 ﾌﾟﾚﾃﾝｼｮﾝﾎﾛｰ桁 L=17.0m (電防2013年)

32

外観目視による塩害劣化とASRによる劣化（複合劣化の判断）

33

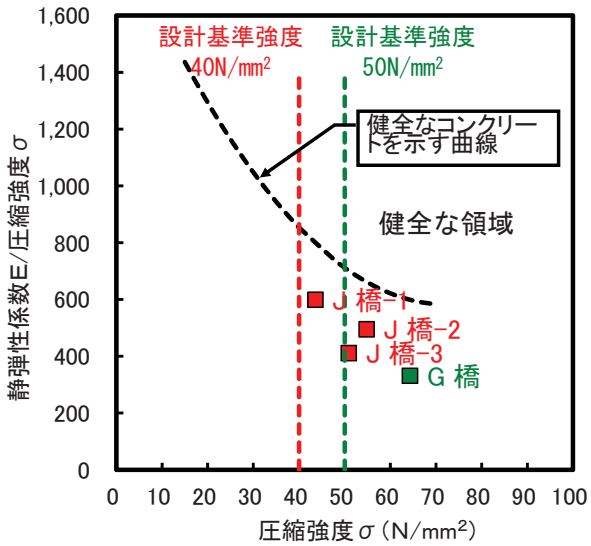
電気防食工法を適用したPC橋の塩害およびASRに関する調査

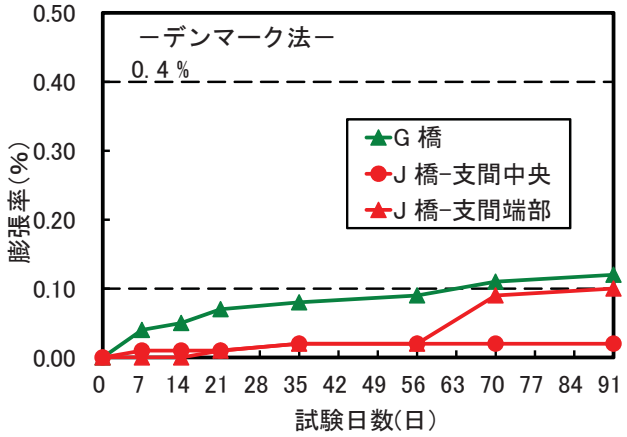


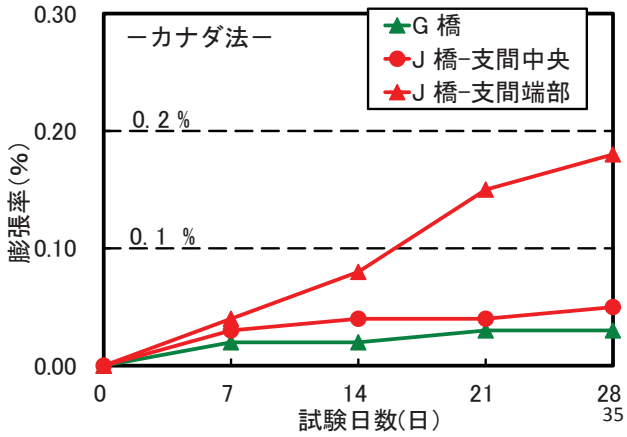
- はつり調査
- 塩化物イオン濃度調査

34

電気防食工法を適用したPC橋の塩害およびASRに関する調査







- ➢ 主桁から採取したコアによる
- ■ 圧縮強度・静弾性係数試験
- ■ 促進養生試験(残存膨張性)

35

日常管理による防食状態

■ 鋼材電位

過防食による水素ガス発生
カソード反応：$H_2O+2e^- \rightarrow H_2+2OH^-$

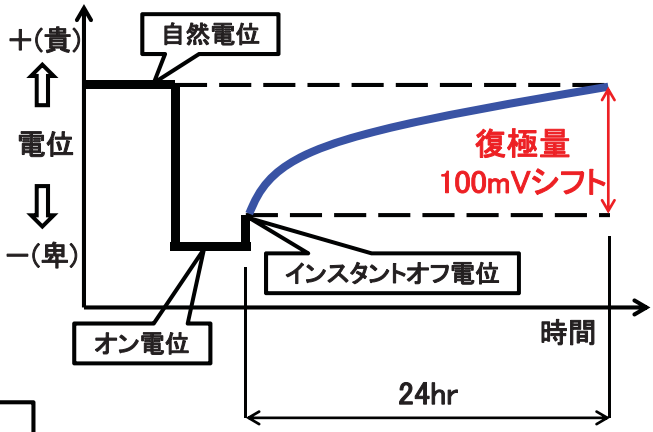
⇩

PC鋼材の水素脆化割れに留意

⇩

管理値
鋼材電位 −1000mV v.s.SCE より貴

● 復極量



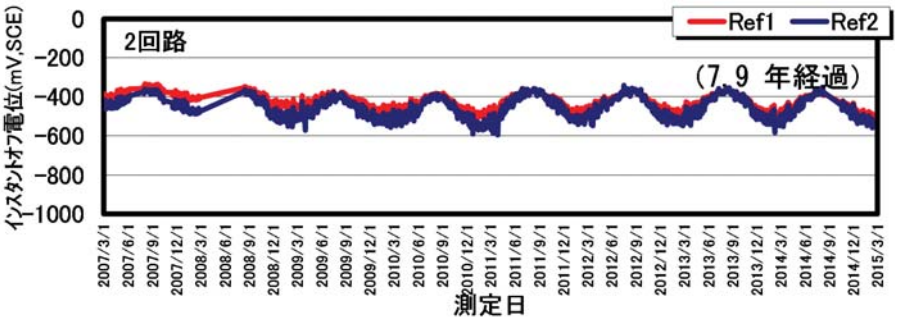
遠隔監視装置付き直流電源装置
(電子メール)

36

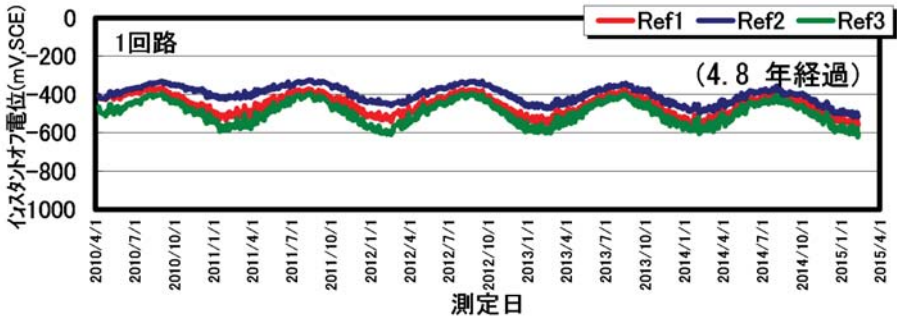
日常管理による防食状態（鋼材電位）

■ 鋼材電位

E 橋



G 橋

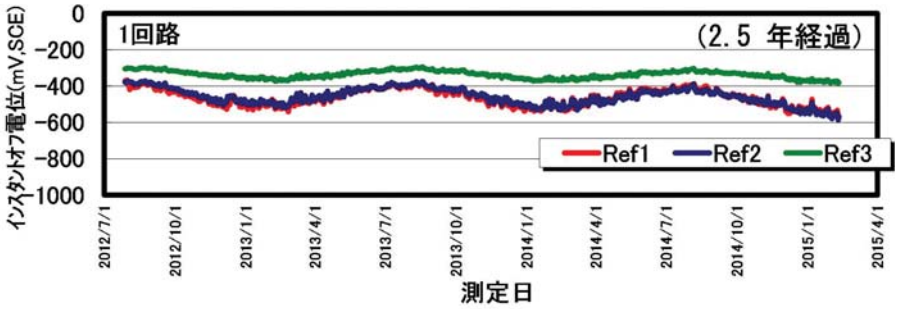


データ提供：株式会社ピーエス三菱　青山敏幸氏

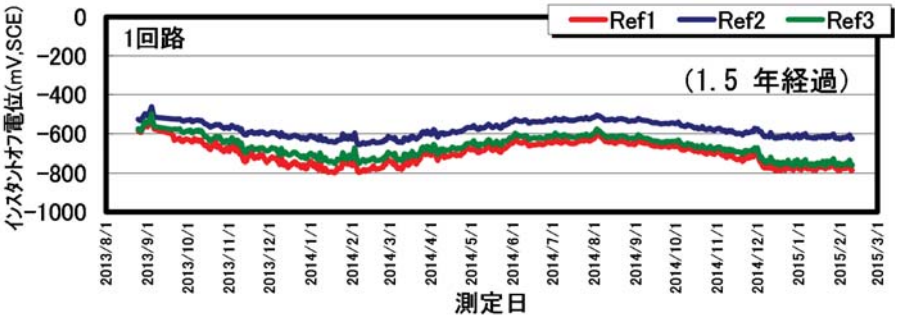
日常管理による防食状態（鋼材電位）

■ 鋼材電位

J 橋



K 橋

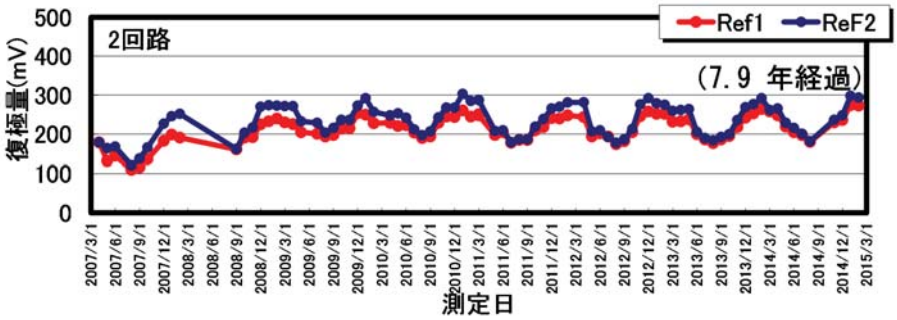


データ提供：株式会社ピーエス三菱　青山敏幸氏

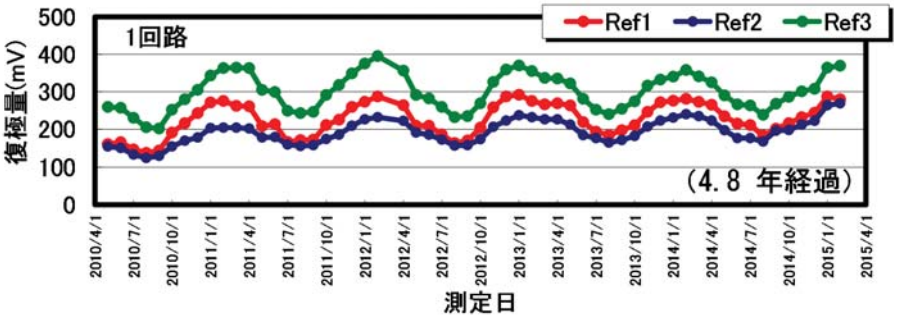
日常管理による防食状態（覆極量）

● 復極量

E 橋



G 橋



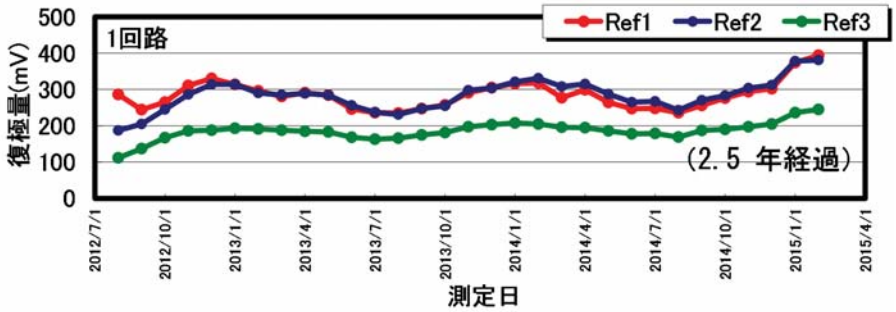
データ提供：株式会社ピーエス三菱　青山敏幸氏

39

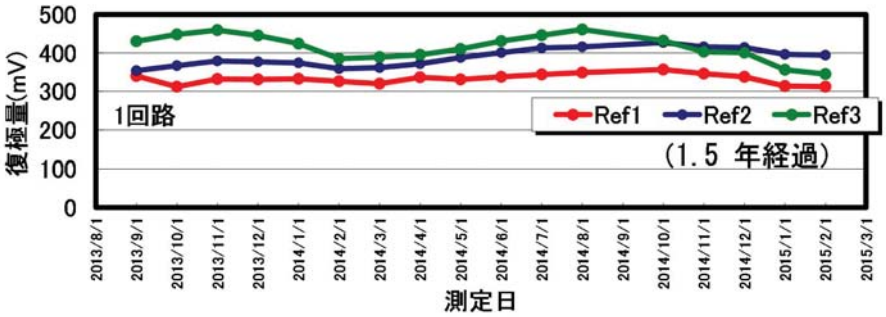
日常管理による現状の防食状態（覆極量）

● 復極量

J 橋



K 橋



データ提供：株式会社ピーエス三菱　青山敏幸氏

40

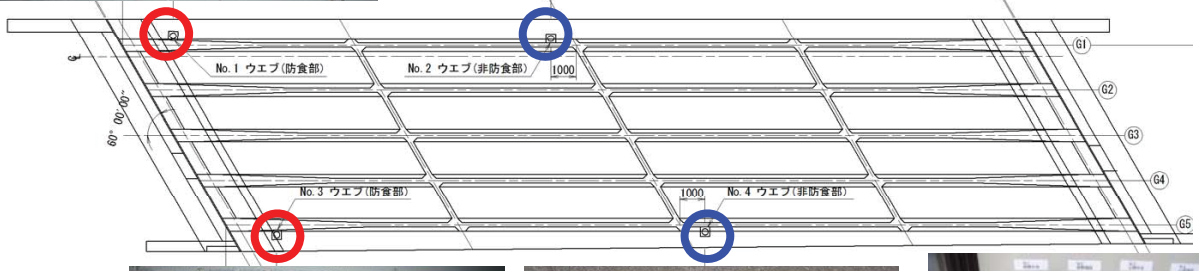
ASRへの影響に関するモニタリング調査

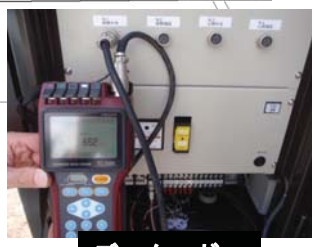
E橋 ひび割れ幅測定（コンタクトゲージ）　G橋ひび割れ幅測定（コンタクトゲージ）

41

ASRへの影響に関するモニタリング調査

J橋　ひび割れ幅測定（亀裂変位計）

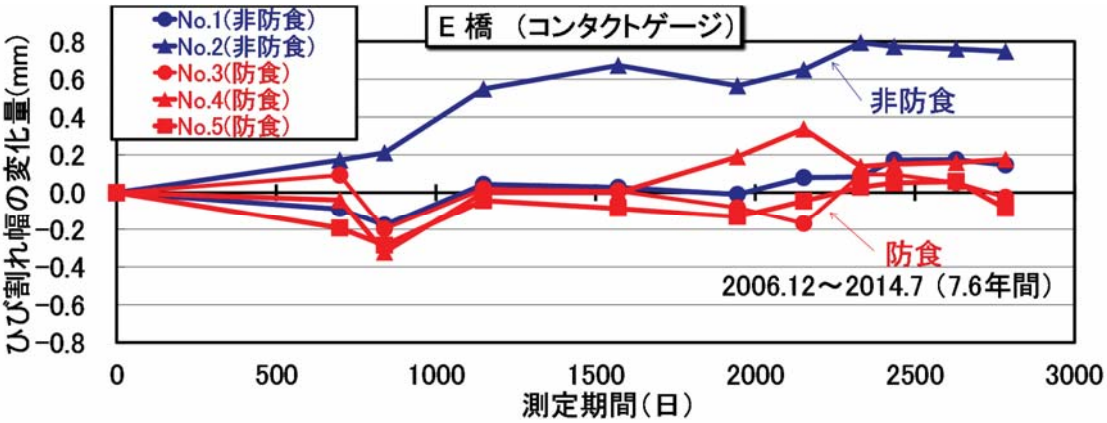




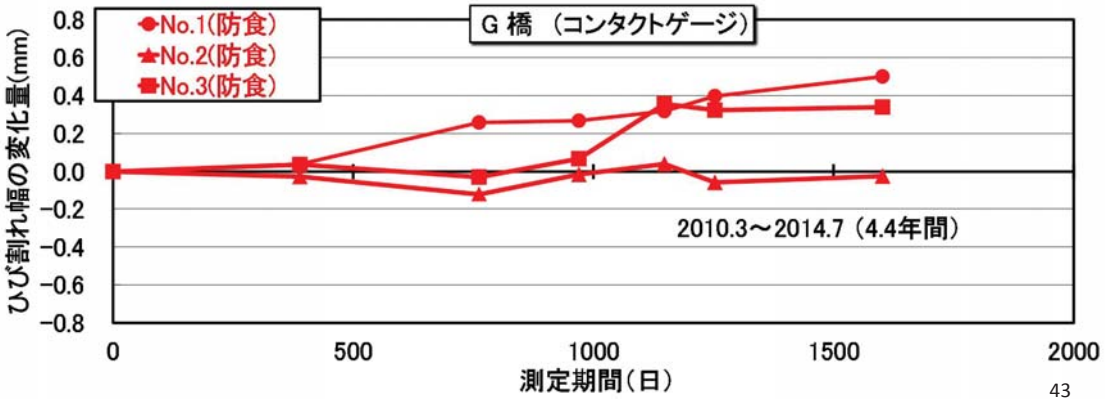
42

ASRへの影響に関するモニタリング調査結果

E 橋



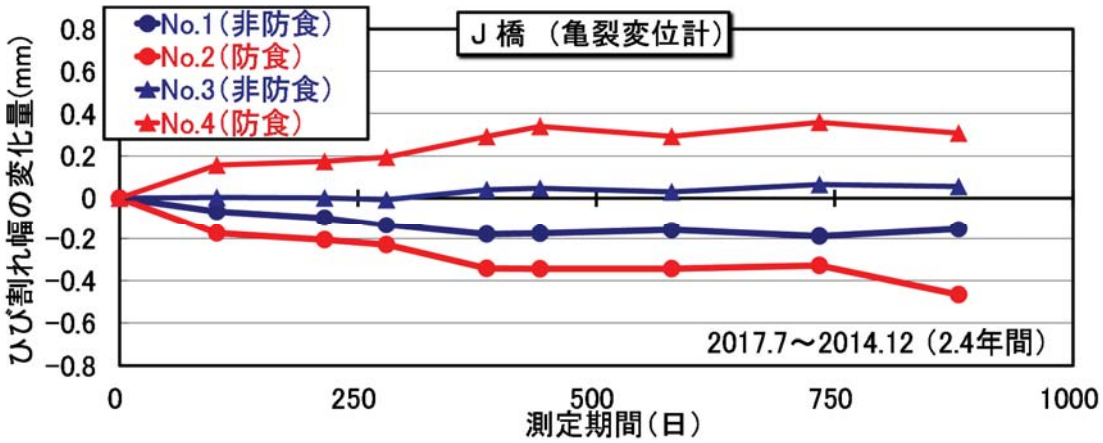
G 橋



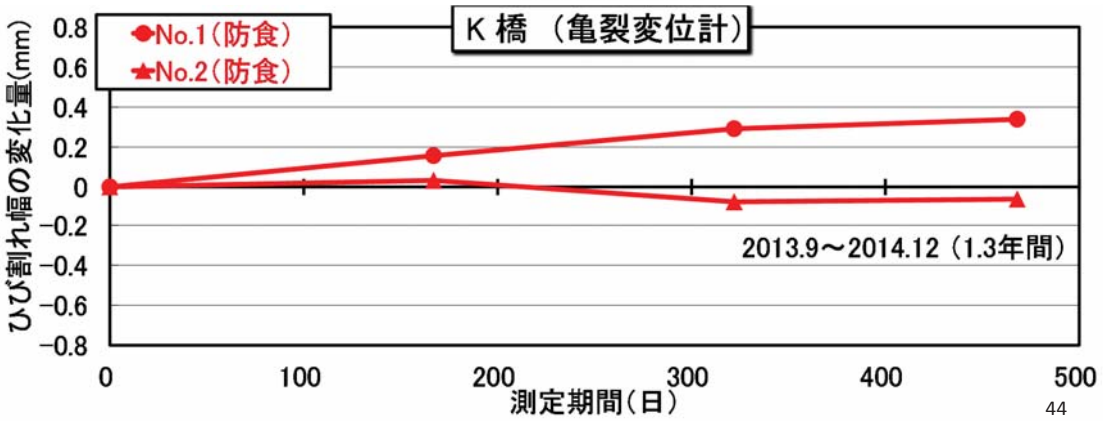
43

ASRへの影響に関するモニタリング調査結果

J 橋



K 橋



44

ま と め

1. 北陸地方のコンクリート橋で電気防食工法が適用された12橋の内訳は，再劣化したものが8橋，補修履歴がなくPC鋼材が破断したものが3橋，新設橋が1橋であった。
2. 塩害とASRにより複合劣化したPC橋への通電による影響は，最長通電期間7.6年，電流密度1.7mA/m2の条件で，ASR膨張の促進は認められなかった。ただし，長期的なモニタリングは必要である。

45

ご静聴ありがとうございました。

46

福井県における電気防食の適用事例

平成27年3月27日

福井県コンクリート診断士会
濵岡　弘二

1

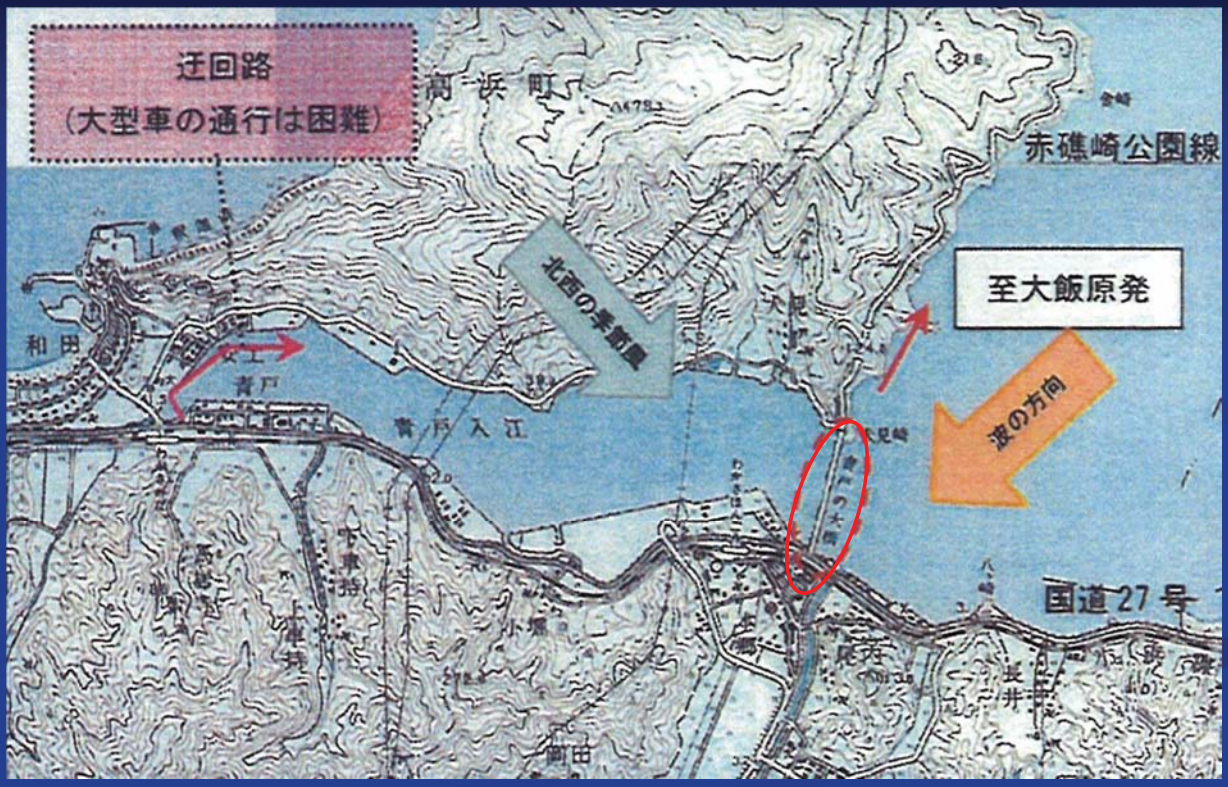
青戸の大橋

橋梁概要

架橋位置：福井県おおい郡おおい町本郷
建　　設：昭和48年12月
橋　　格：昭和39年示方書、1等橋（TL-20）
橋　　長：全長　　Σ L=743.01m
　　RCラーメン橋　　L1=150.00m
　　鋼鈑桁部　　L2=588.00m
　　鋼鈑桁接続橋台　L3=5.01m
有効幅員：RCラーメン橋　　B1=11.096～6.000m
　　鋼鈑桁部　　B2=8.100m
斜　　角：90°　00′　00″

2

架橋環境



架橋環境

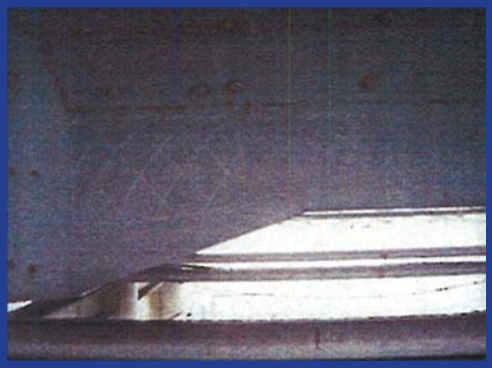
橋梁補修履歴

5

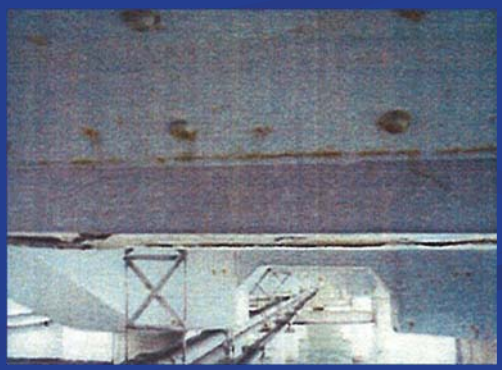
損傷状況

横桁側面うき

杭頭コンクリートはく離、鉄筋腐食



主桁側面うき



横桁うき

6

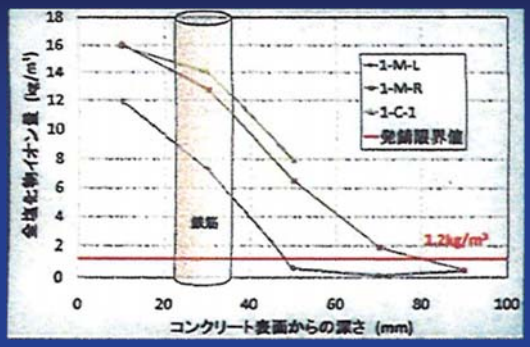
調査結果（損傷面積）

	H17面積（m²）	H21面積（m²）	進展度（%）
第1径間	42.6	60.5	142.0
第2径間	48.1	60.8	126.3
第3径間	11.6	21.3	182.9
第4径間	10.2	15.4	151.0
第5径間	18.7	29.8	158.3
合計	131.3	187.7	142.9

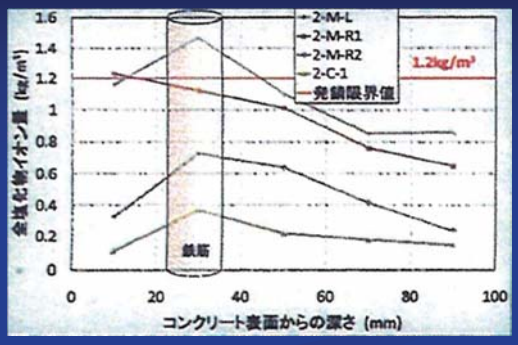
7

調査結果（塩化物イオン量）

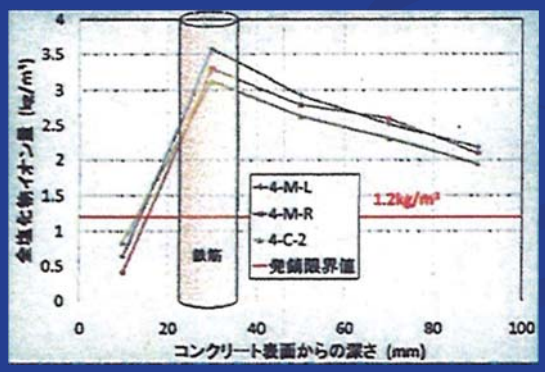
第1径間（主桁・横桁）



第2径間（主桁・横桁）



第4径間（主桁・横桁）



8

塩害劣化の評価

径間名	健全度グレード
第1径間（打替え部）	Ⅰ
第1径間	Ⅲ
第2径間	Ⅲ
第3径間	Ⅲ
第4径間	Ⅲ
第5径間	Ⅲ

グレードⅠ：塩害対策は不要
グレードⅢ：塩害が原因の損傷が見られるため、損傷の進行を抑制または現状の性能を維持するための補修対策が必要

「塩害橋梁維持管理マニュアル（案）」H20.4

9

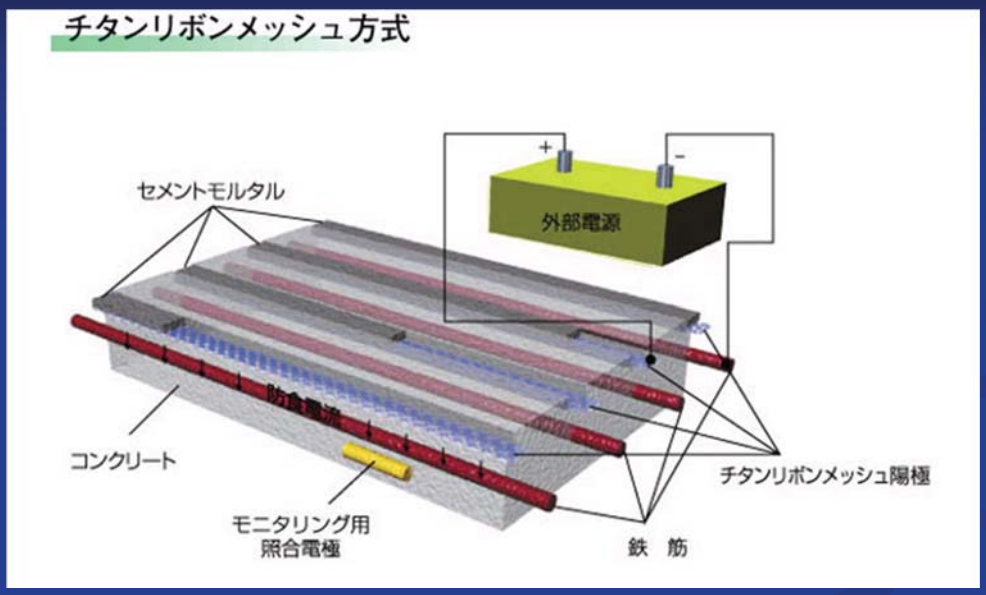
補修工法の選定

径間名	シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3
第1径間	電気防食（線状陽極）	電気防食（線状陽極）	電気防食（線状陽極）
第2径間			
第3径間		電気防食（導電塗料）	損傷部分の断面修復
第4径間			
第5径間			
考え方	単一の工法で維持管理が明快	部位の環境を考慮して電気防食工法を選択	部位の環境を考慮し、損傷面積も加味して工法を選択

上記の補修工法から、橋梁の重要性、補修コスト、施工性等を考慮して、シナリオ2の補修方法を選択

10

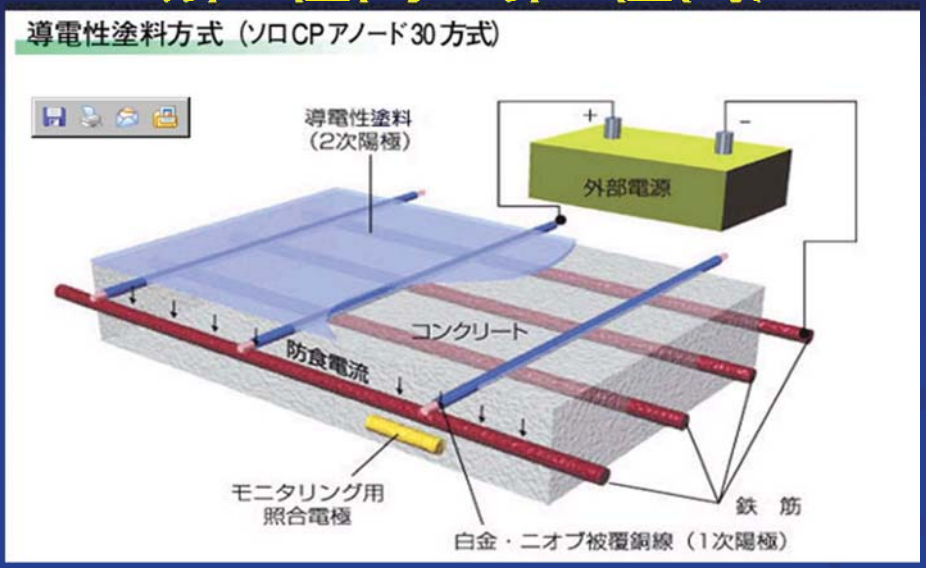
摘要した電気防食工法
（第1径間～第2径間）



コンクリート表面に一定間隔に切削した溝へモルタルを充填した後、チタンリボンメッシュ陽極を固定し、電流分配材にて一体化して外部電源と接続して防食電流を供給する。

11

摘要した電気防食工法
（第3径間～第5径間）



コンクリート表面に1次陽極としてプラチナニオブ被覆銅線をプラスチック釘にて設置。2次陽極として導電性塗料を塗布後、保護としてトップコートを塗装して外部電源と接続して防食電流を供給する。

12

補修方法

13

補修完了

14

河野大橋

橋梁概要

架橋位置：福井県南条郡南越前町河野
建　　設：昭和53年
橋　　格：昭和46年示方書、1等橋（TL-20）
橋　　長：460.00m
支　　間：21.75m×2＋24.25m×7＋29.25×8
構造形式：ポストテンション方式PC単純T桁橋
（セグメント工法）
有効幅員：7.000m
斜　　角：90°　00′　00″

15

架橋環境

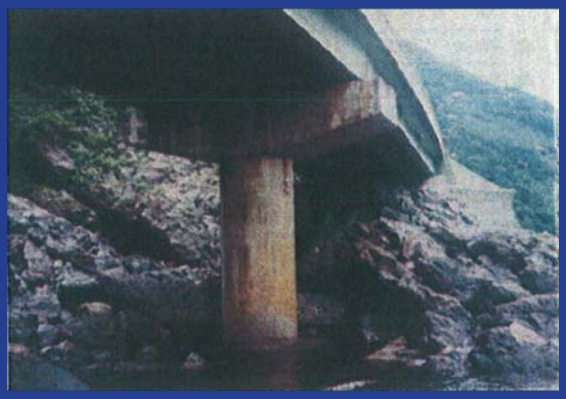
16

架橋環境

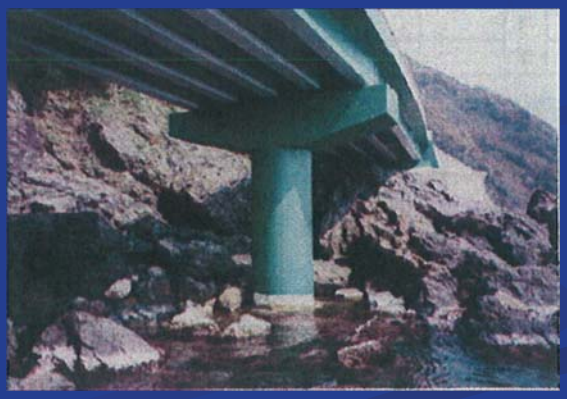
17

橋梁補修履歴

平成11年　9径間（P8～A2）
平成12年　8径間（A1～P8）
　下部工－脱塩、表面被覆
　上部工－断面修復、表面被覆



補修前の状況



補修後の状況

18

損傷状況

主桁ひび割れ・錆汁

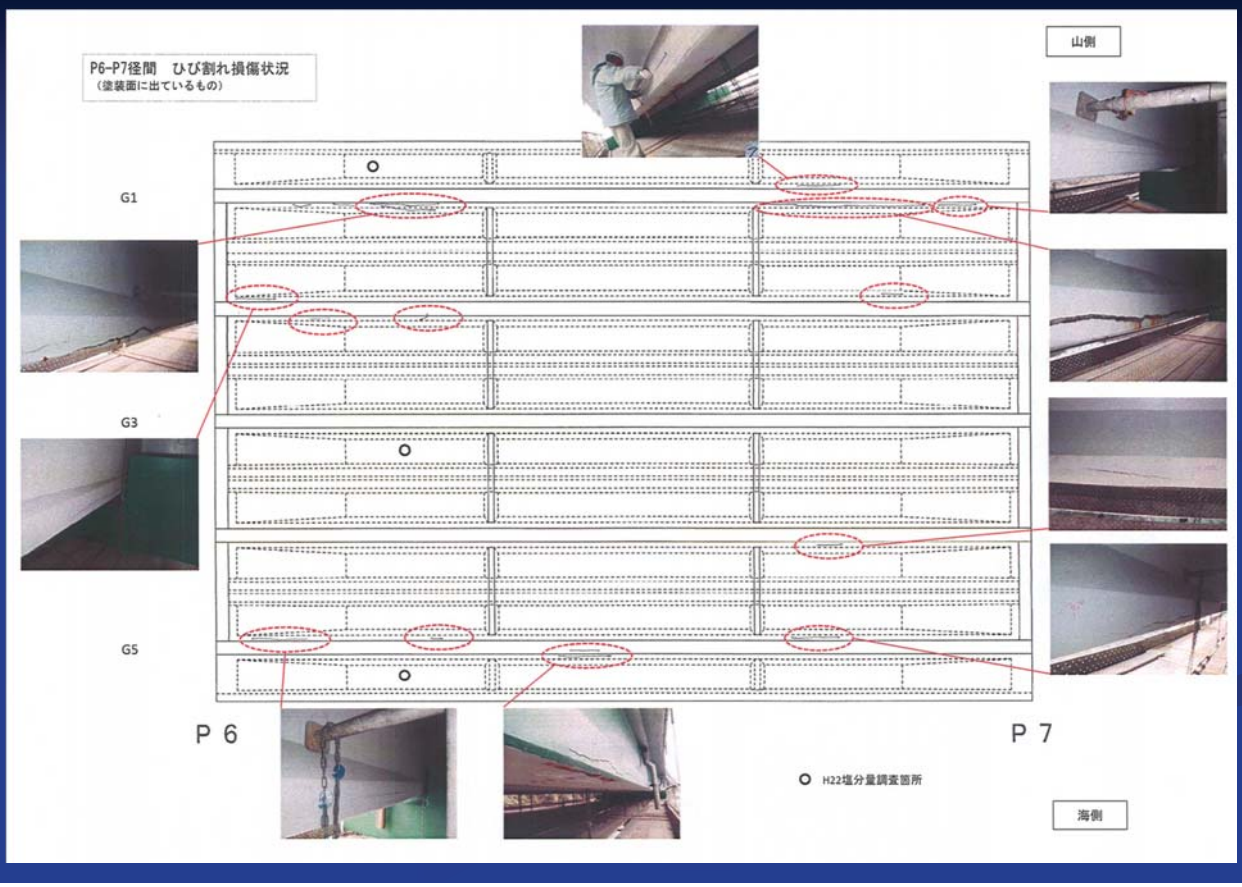
はつり後の状況

横桁はく離

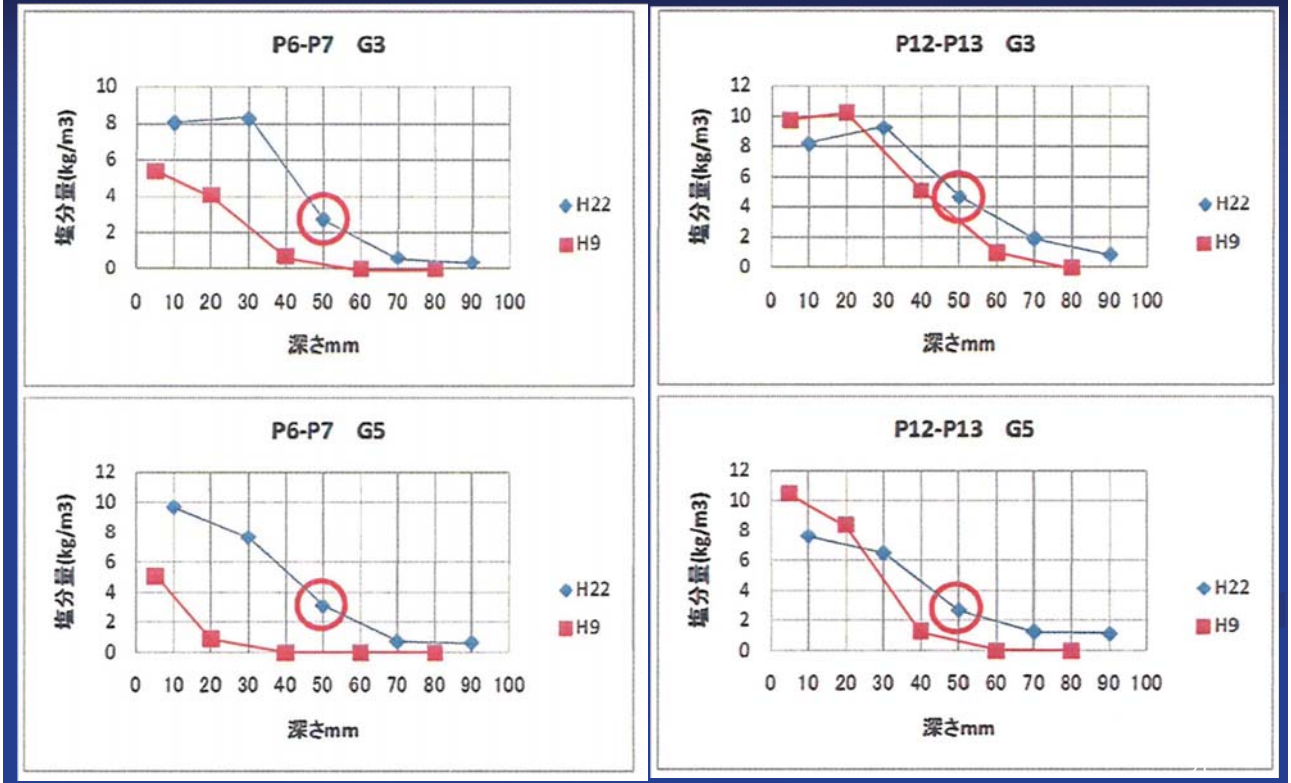
張出床版ひび割れ・錆汁

19

調査結果（ひび割れ発生状況）



調査結果（塩化物イオン量）



塩害劣化の評価

河野大橋の健全度は、「塩害橋梁維持管理マニュアル(案)」(H20.4)によると、グレードⅢ、Ⅳに該当する。したがって、「性能維持のための補修対策」、「損傷が甚大な箇所の恒久対策」の検討が必要。

グレードⅢ：塩害が原因の損傷が見られるため、損傷の進行を抑制または現状の性能を維持するための補修対策が必要

グレードⅣ：塩害が原因の損傷が甚大なため、耐荷性能の確認と評価を行うとともに安全確保のための早急な対策の実施と、更新を含めた恒久対策の検討が必要

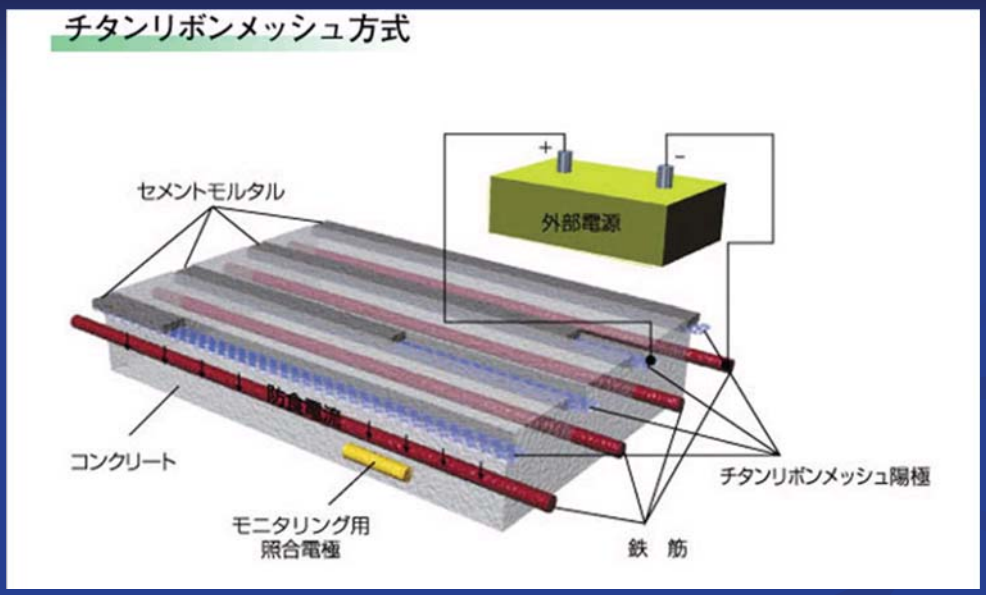
22

補修工法の選定

工法名称			直工費	採用
脱塩工法＋表面被覆工法			1.79	
電気防食工法	面状陽極	チタン溶射	1.57	
		チタンメッシュ	2.00	
	線状陽極	チタンリボンメッシュ	1.00	◎
		ニッケル被覆炭素繊維シート	1.00	
	点状陽極	チタンロッド	1.71	
	流電陽極	亜鉛シート	1.71	

工法名称	直工費	採用
プレストレス導入工法（外ケーブル工法）	1.00	◎
打替え工法（主桁取替工法）	3.35	

摘要した電気防食工法



コンクリート表面に一定間隔に切削した溝へモルタルを充填した後、チタンリボンメッシュ陽極を固定し、電流分配材にて一体化して外部電源と接続して防食電流を供給する。

補修完了

25

硬化の確認（復極量試験）

P5～P6径間

照合電極No.	竣工時（H26.7）	H27.2
1（G1桁）	172mV	287mV
2（G3桁）	179mV	309mV
3（G5桁）	139mV	280mV

P11～P12径間

照合電極No.	竣工時（H25.3）	H25.8	H26.3
1（G1桁）	132mV	119mV	273mV
2（G3桁）	189mV	206mV	308mV
3（G5桁）	188mV	166mV	275mV

復極量は防食基準（100mV）以上である。

26