

コンクリート構造物を うまく使いこなすには

-シナリオデザイン-



京都大学

インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット

宮川豊章

-内容-

- **丈夫で、美しく、長持ち**
- **失敗に学ぶ、経験工学**
- **作ることと、確かめること**
- **使いになすには**
塩害、アルカリシリカ反応、
グラウト問題
- **時空間シナリオ～シナリオデザイン**

- **丈夫で、美しく、長持ち**

<長寿命構造物>

日ノ岡第11号橋

- ・日本初の鉄筋コンクリート橋
- ・1903年7月完成
- ・設計者 田辺朔郎



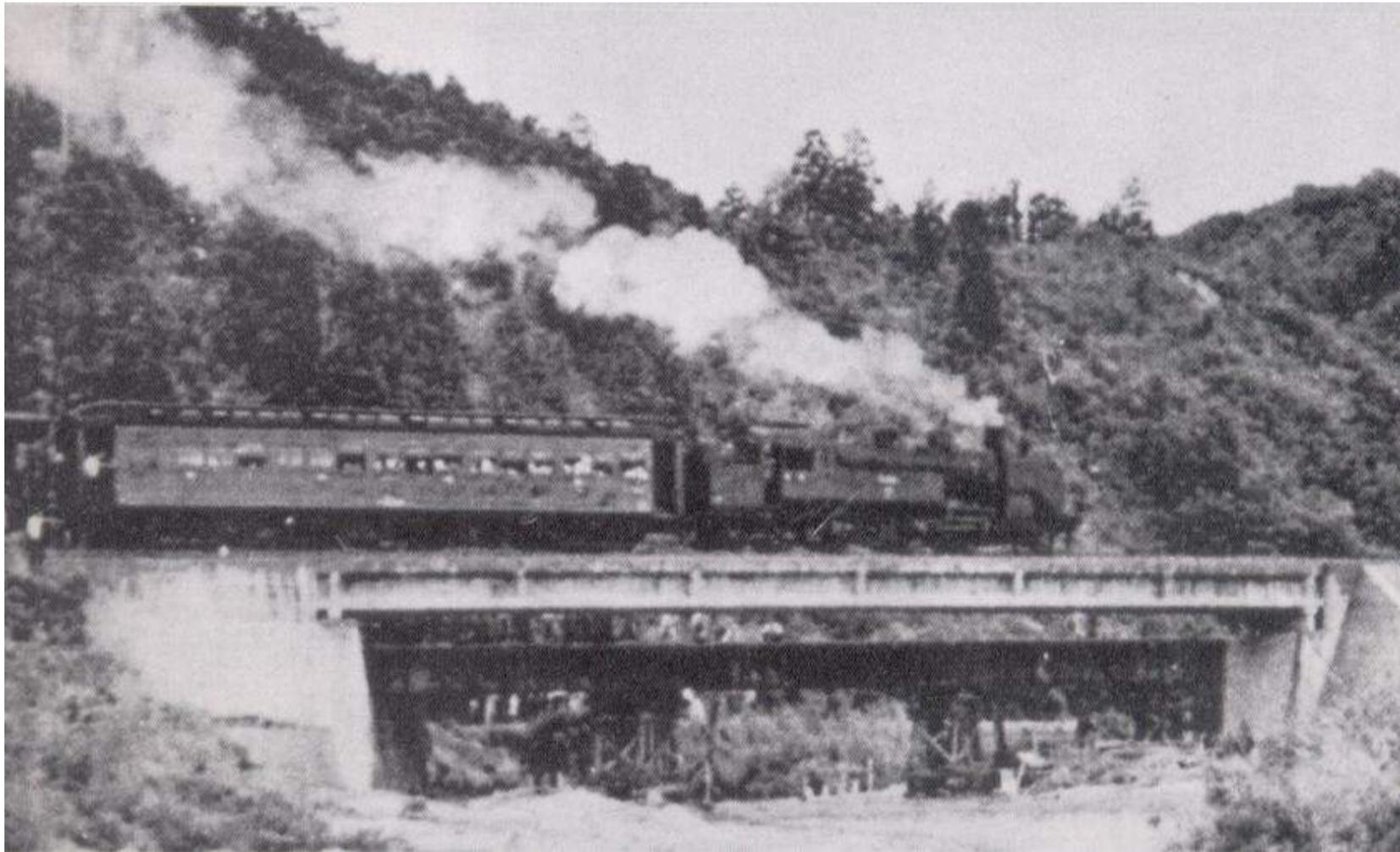


十郷橋
(1953)
福井県

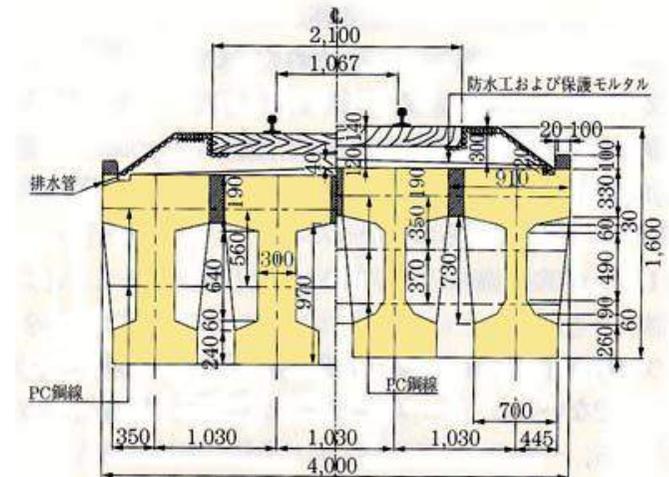


第一大戸川橋 (1954)

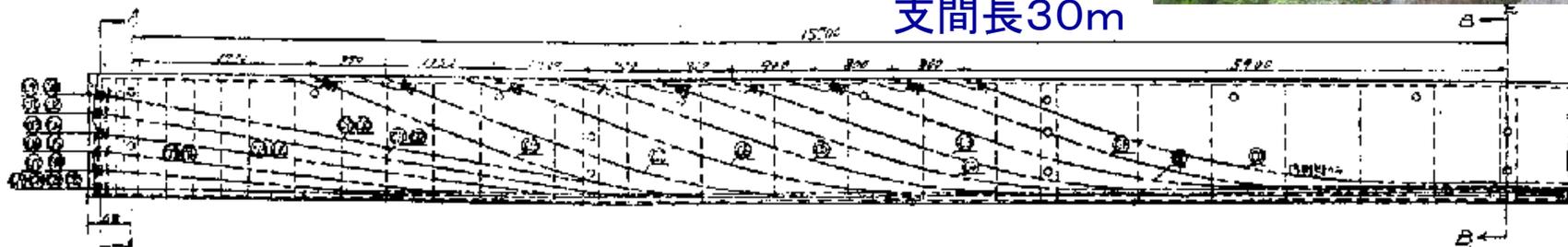
滋賀県 支間30m；本格的ポストテンション橋梁；現在もなお供用中



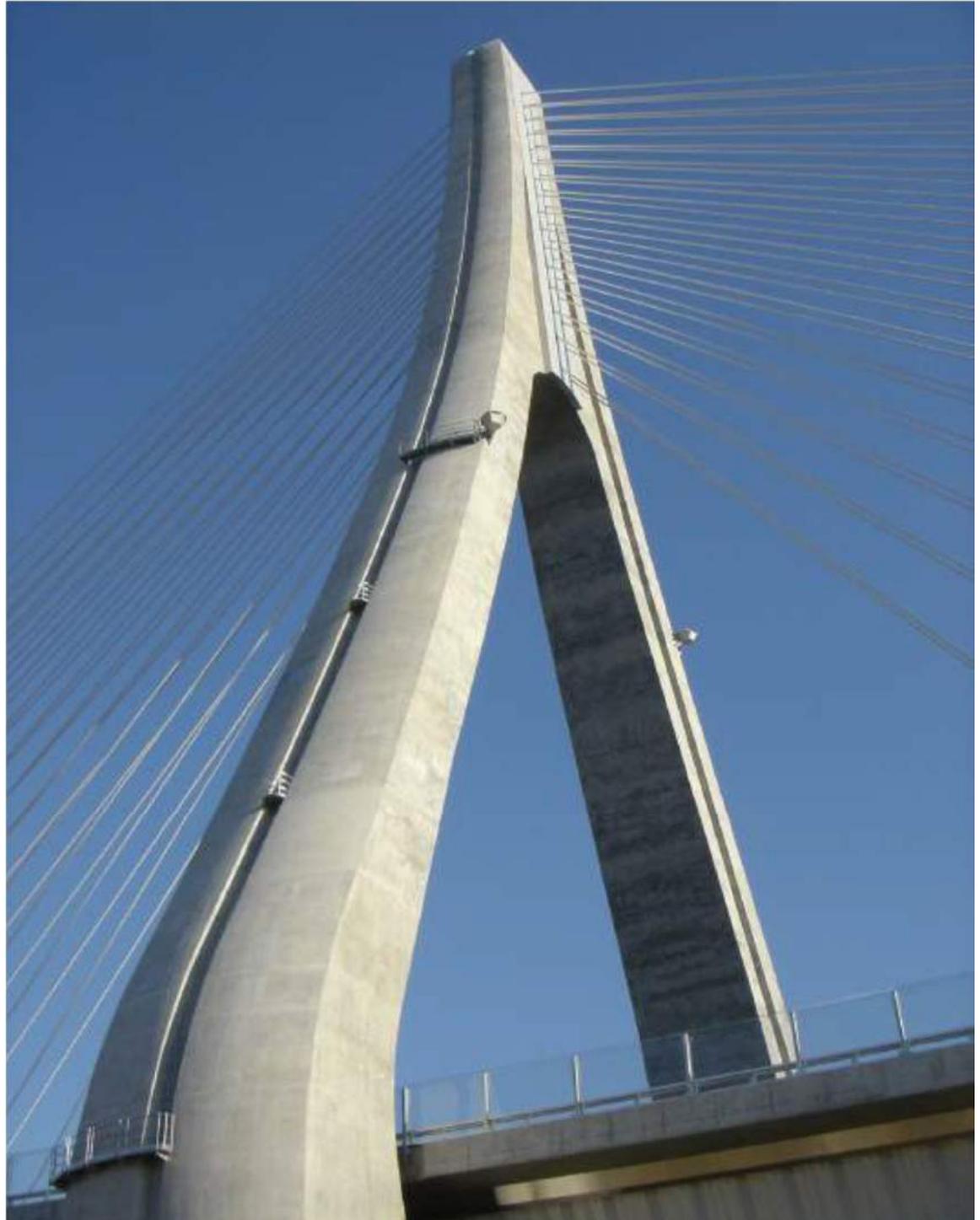
設計: 極東鋼弦コンクリート振興(仏人技師コバニコ氏)
 設計施工管理: 国鉄大阪工事事務所 仁杉巖次長



支間長30m



丈夫で
美しく
長持ち



福岡トンネルコンクリートの剥落



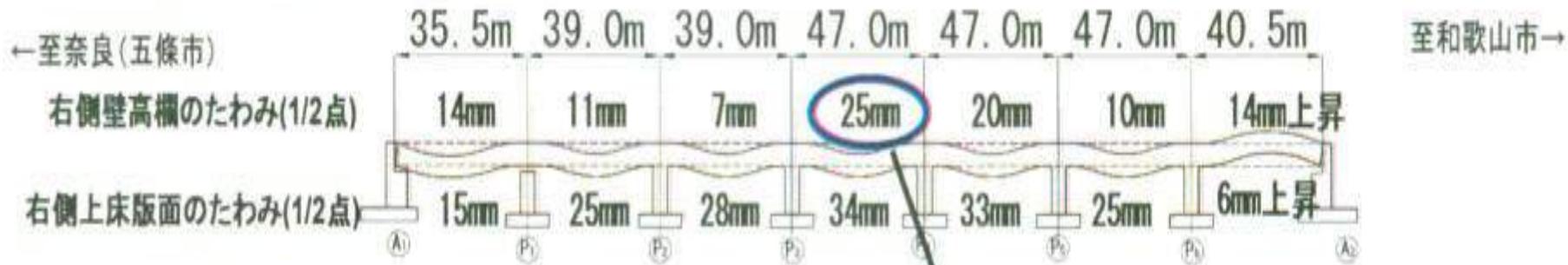


床版下面コンクリートの剥落

- **失敗に学ぶ、経験工学**



橋全体の変形(たわみ)のイメージ



最も大きなたわみ(P3~P4)

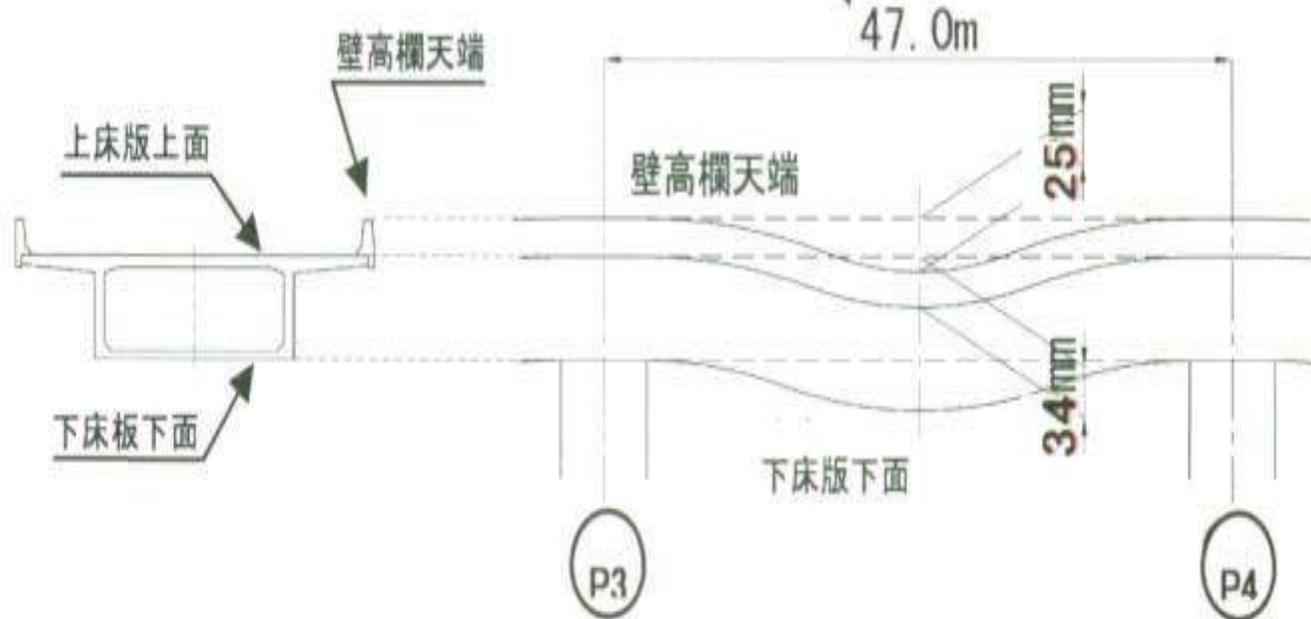
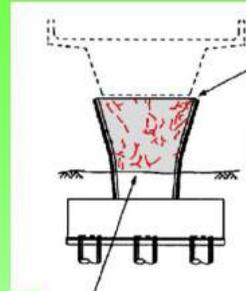
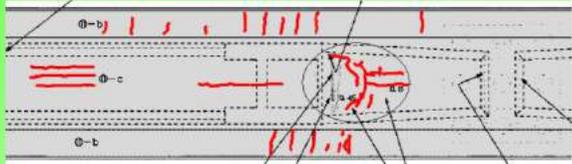


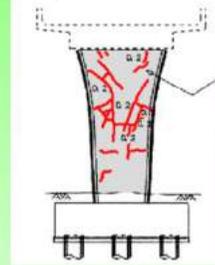
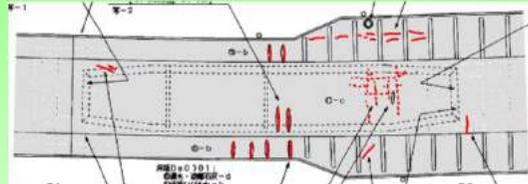
図 3.2.1.1 主桁部の鉛直変位 (たわみ)

ひび割れ発生状況(例)

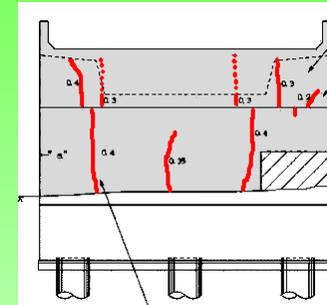
●山中川東高架橋 上部工(箱桁下面)と橋脚



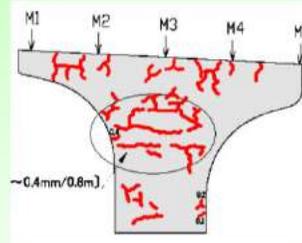
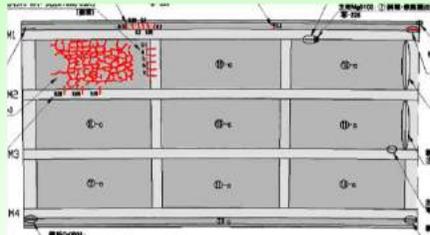
●山中川高架橋 上部工(箱桁下面)と橋脚



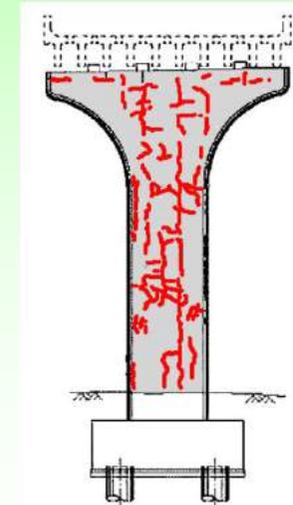
●金熊寺川高架橋 橋台



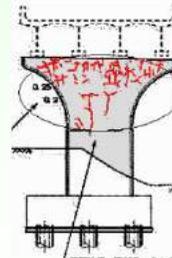
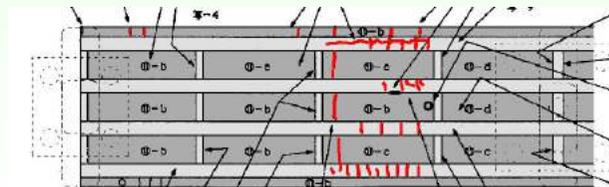
●自然田高架橋 上部工(プレビーム床版下面)と橋脚



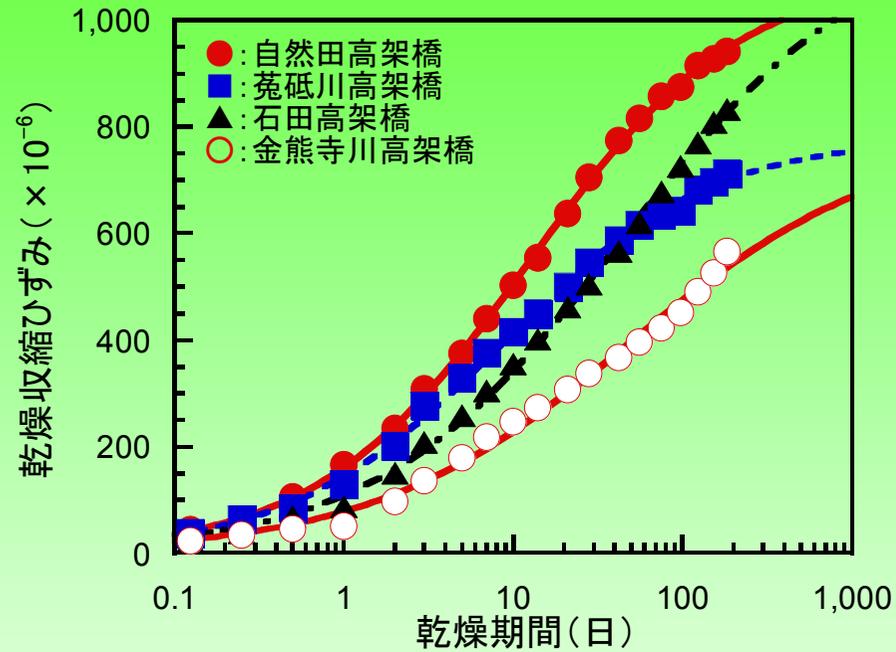
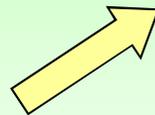
●石田高架橋 橋脚



●菟砥川高架橋 上部工(プレビーム床版下面)と橋脚



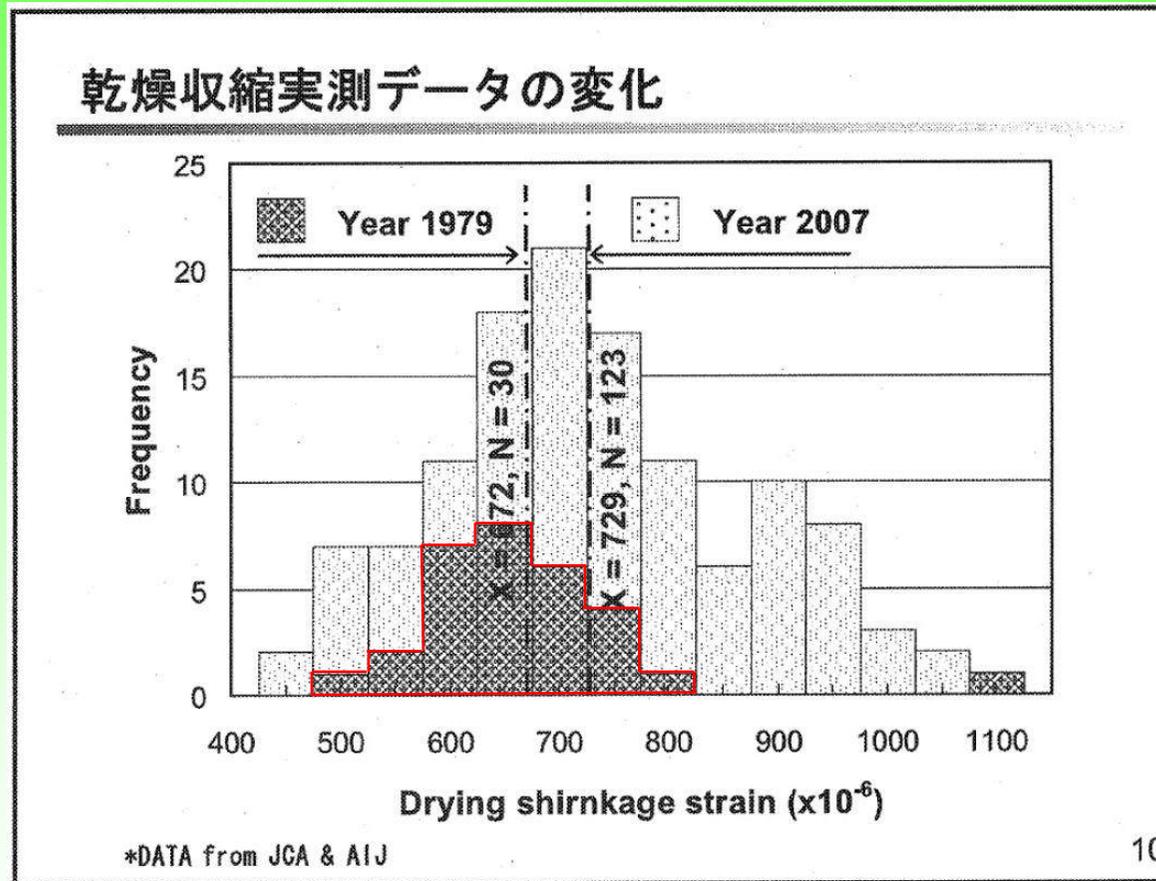
コア抜き供試体の長さ変化測定



最終ひずみ (双曲線で回帰した最終予想値)	
自然田高架橋	: 1,090 μ
石田高架橋	: 1,172 μ
菟砥川高架橋	: 782 μ
金熊寺川高架橋	: 789 μ

最終ひずみは大きいもので1,000 μ を上回ることが分かった。

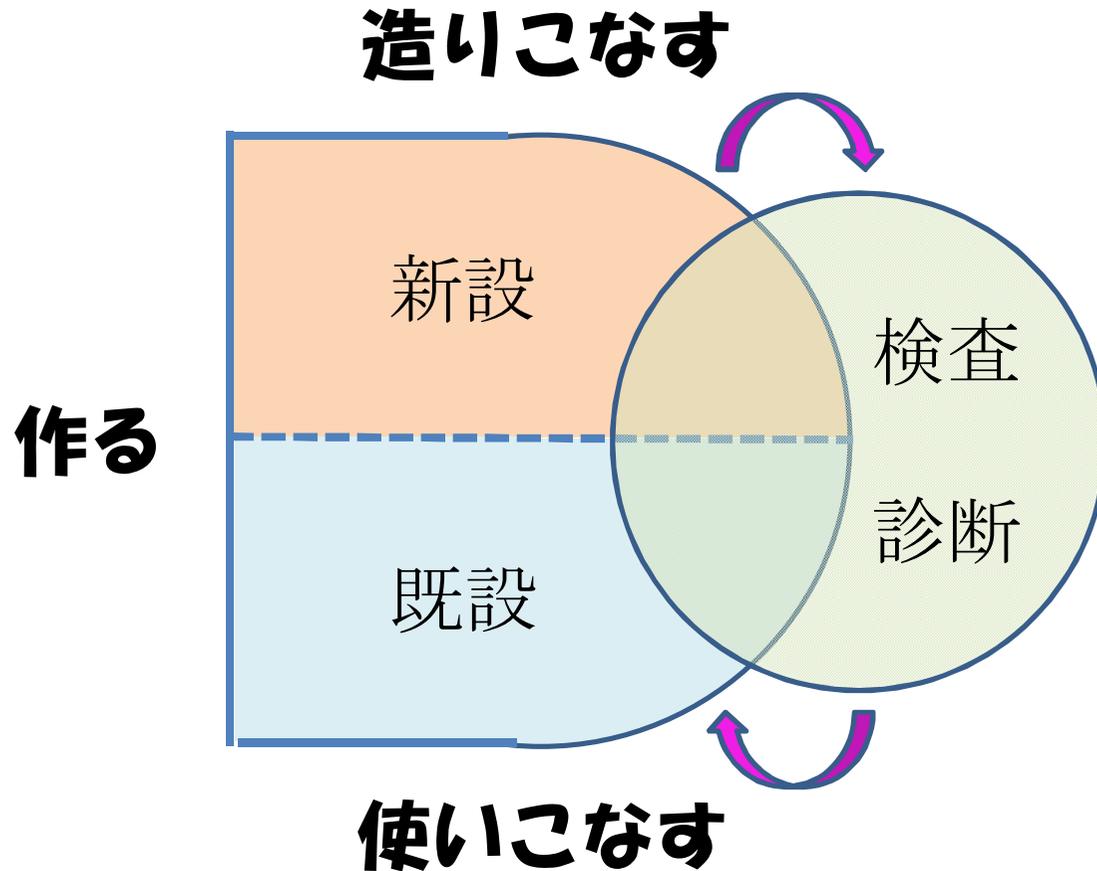
特性値 (ϵ_{req}) について



乾燥収縮実測データの変化 【JCI 時間依存性委員会 資料】より

- **作ることと、確かめること**

建設材料技術の位相



種々の材料レベルで、
強さ(寸法効果)
変形/剛性, 振動
靱性
破壊形式
(ひび割れ・欠陥)
耐久性: $R_t > R_s$
現場施工性
どのレベルが適切か?



中性化

塩害

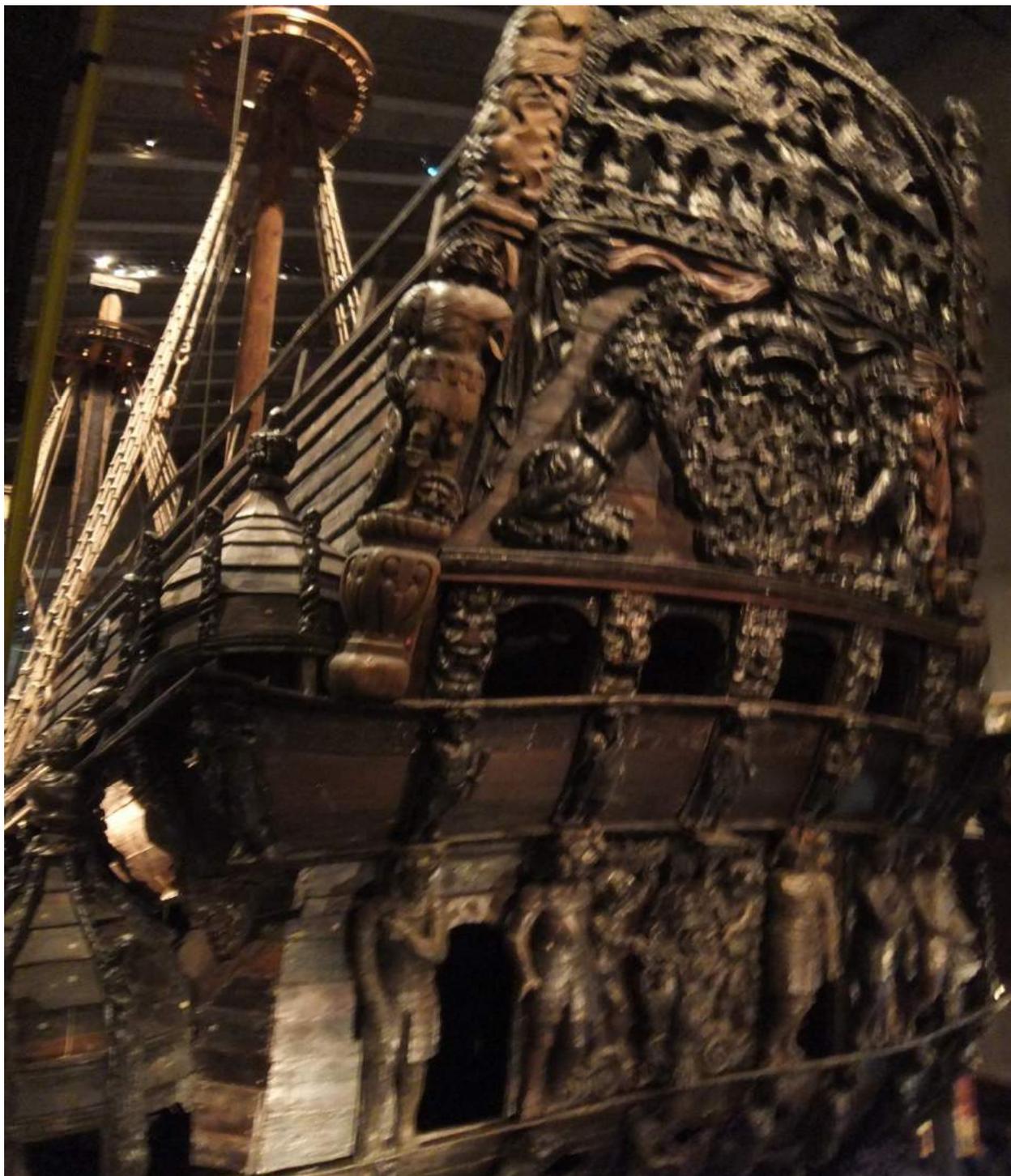




アルカリシリカ反応



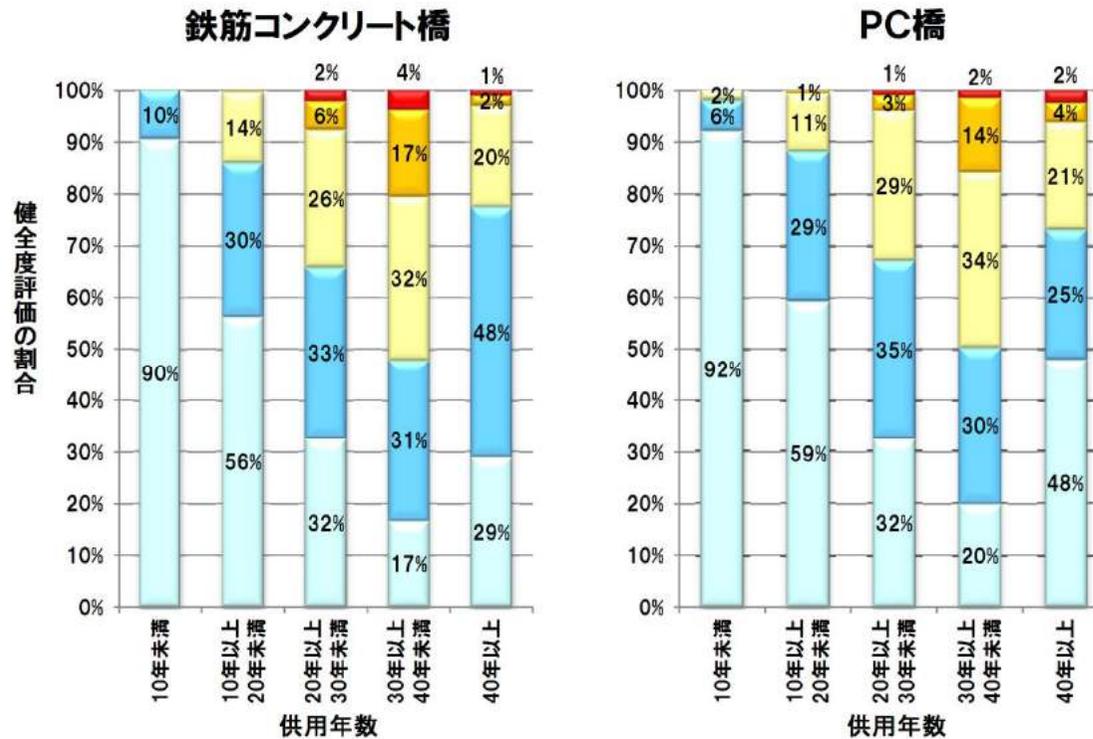
鉄筋破断



Vasa号

**300年以上
海水中**

- **使いこなすには**



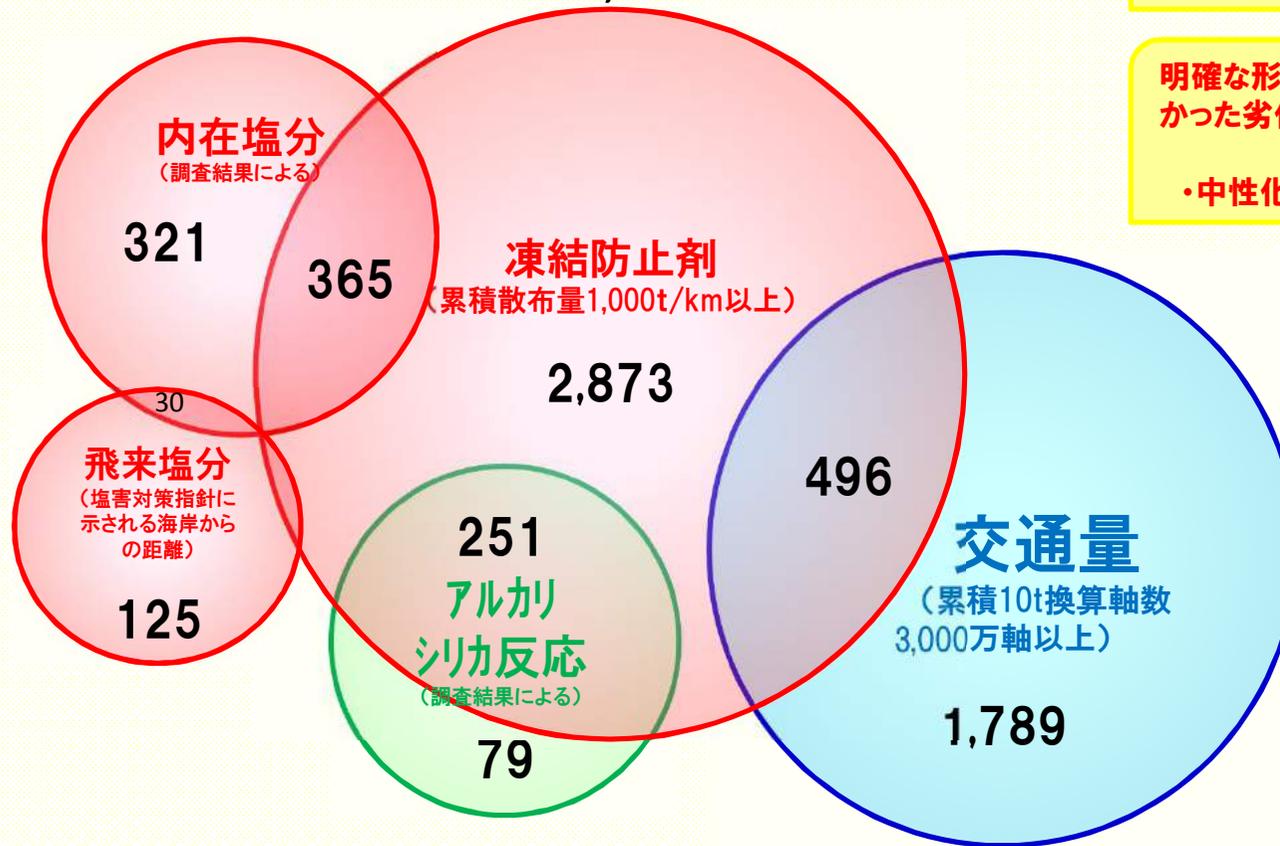
※ 40年以上では橋梁修繕率が向上しており、補修により健全度が回復していると考えられる

■ 健全度評価と指標

健全度	変状や劣化の進行	構造物の性能
I	問題となる変状がない	劣化の進行が見られない。
II	軽微な変状が発生している	劣化は進行しているが、耐荷性能または走行性能は低下していない。
III	変状が発生している	劣化がかなり進行しており、耐荷性能または走行性能の低下に対する注意が必要である。
IV	変状が著しい	耐荷性能が低下しつつあり、安全性に影響を及ぼす恐れがある。または、走行性能が低下しつつあり、使用性に影響を及ぼす恐れがある。
V	深刻な変状が発生している	耐荷性能の低下が深刻であり、安全性に問題がある。または、走行性能の低下が深刻であり、使用性に問題がある。

供用年数別健全度

全橋梁数 : 13,154橋
 下記の劣化要因に該当せず : 6,753橋
 下記の劣化要因に該当 : 6,401橋



初期欠陥

- ・かぶり不足
- ・豆板等

明確な形では考慮しなかった劣化

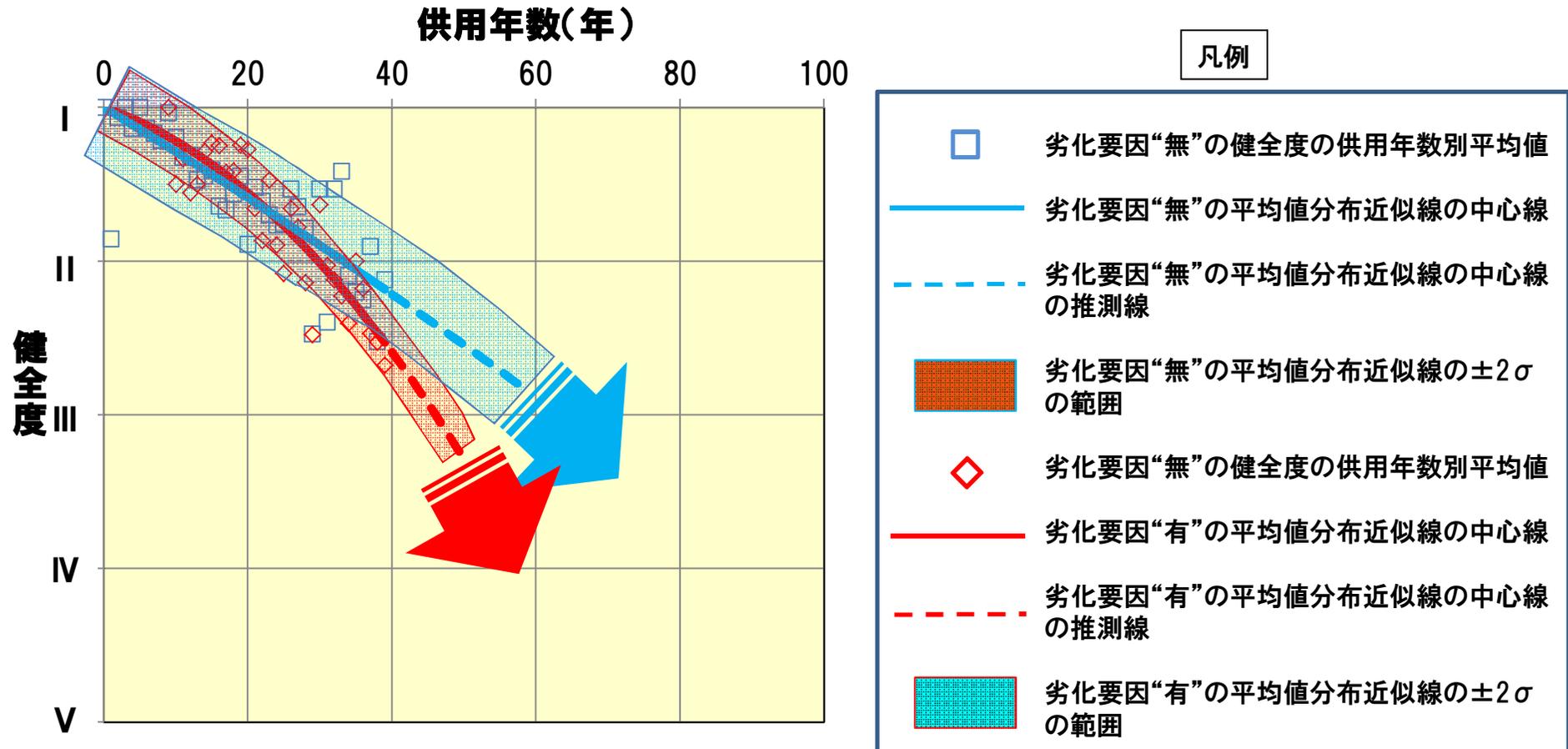
- ・中性化

※劣化要因の組合せ数が少ないものは除いているため、イメージ図の橋梁数の合計は劣化要因に該当する橋梁数と一致しない。

鉄筋コンクリート床版の主な劣化要因

劣化要因が無い場合でも今後100年にわたる健全性の維持は難しい。
劣化要因が有る場合は、更に厳しい。

※ 塩害は、中性化の影響との複合により促進される可能性がある。



鉄筋コンクリート床版の健全度の推移と予測

作用と保有性能

古い基準で設計

新幹線

ラーメン橋脚被災

新しい基準で設計

被災なし

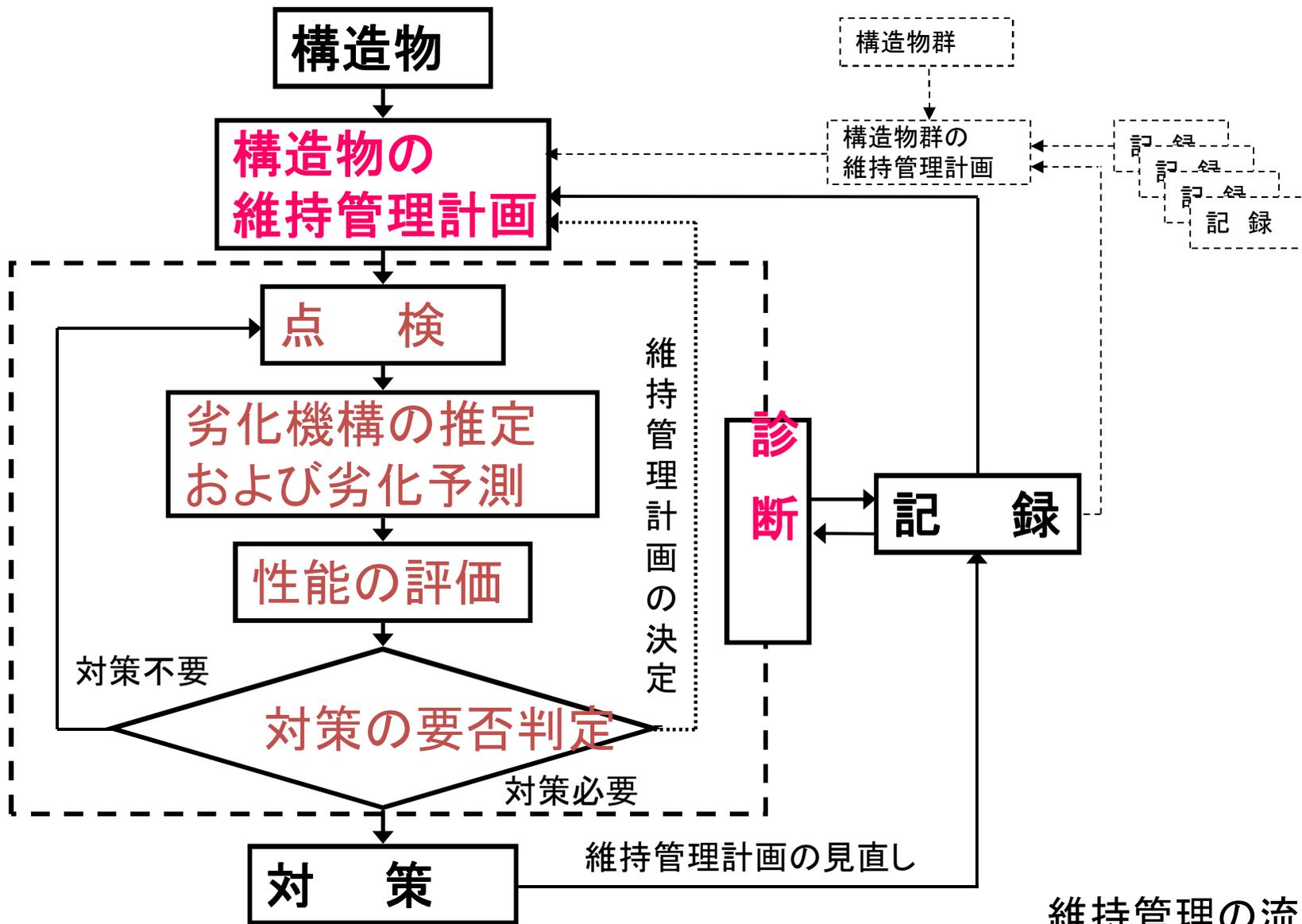
東北本線



劣化（≡古い基準）と耐震・耐荷性能

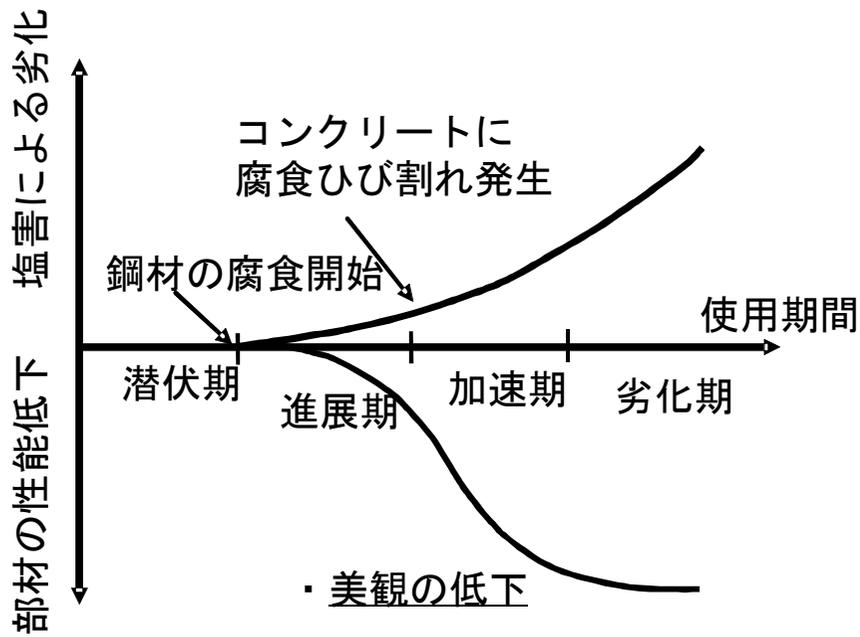
震災を考えるにあたっては維持管理を忘れてはならない。



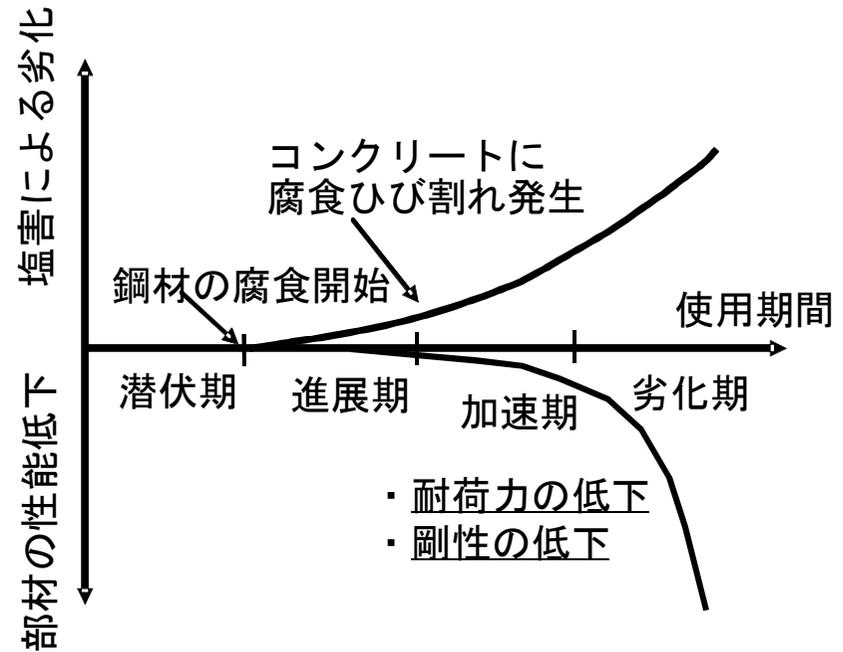


維持管理の流れ

- **塩害**



(a) 美観・景観に着目した場合



(b) 安全性に着目した場合

塩害による劣化進行過程の概念図の一例

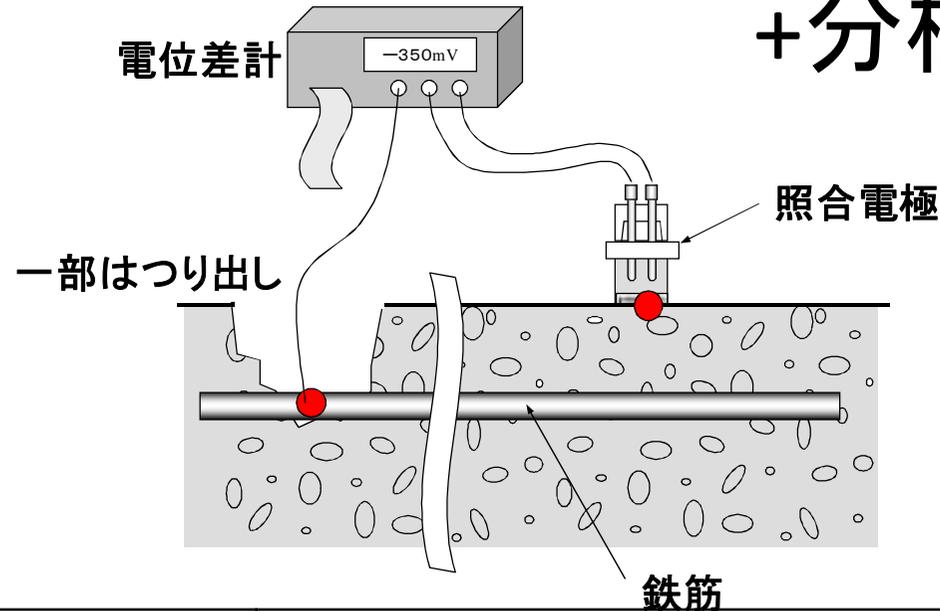
塩害の調査方法の現状

- ①目視調査・打音調査→定性的評価
- ②塩化物イオン濃度の調査→腐食環境評価



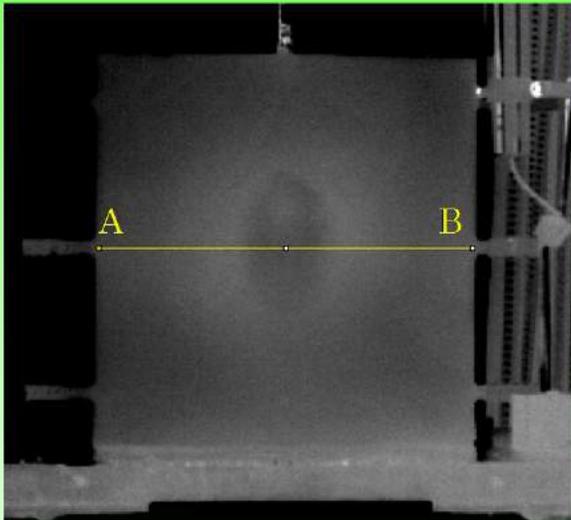
塩害の調査の現状

さらにやるとすれば →③自然電位法
+分極抵抗法？

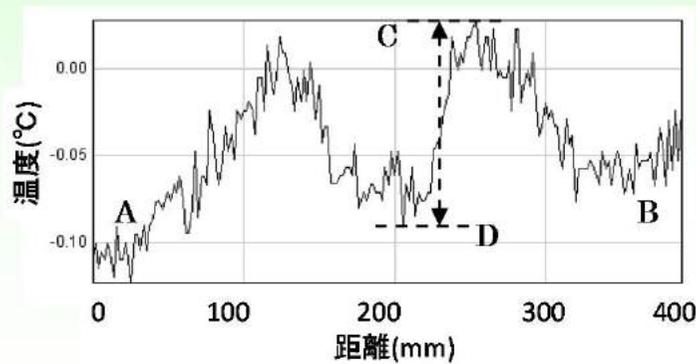


自然電位(E) (V_{VS} CSE)	鉄筋腐食の可能性
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり

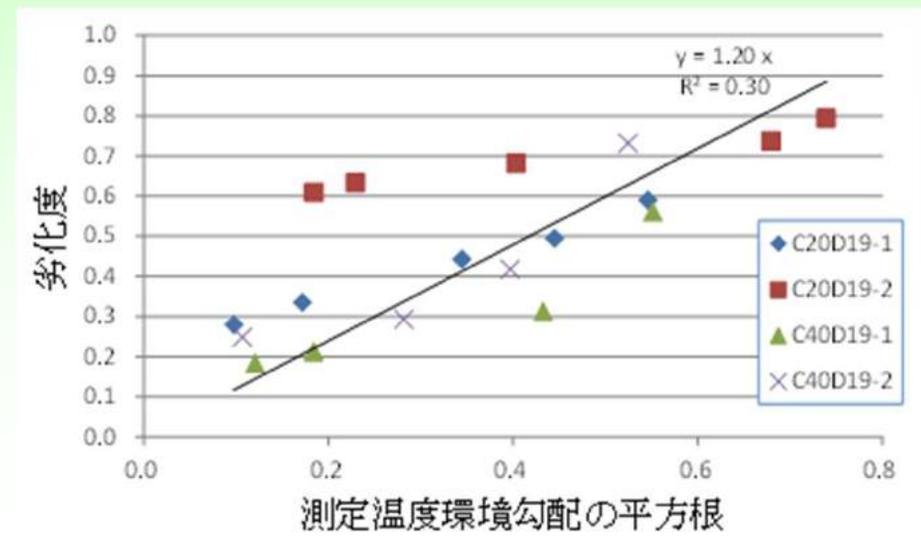
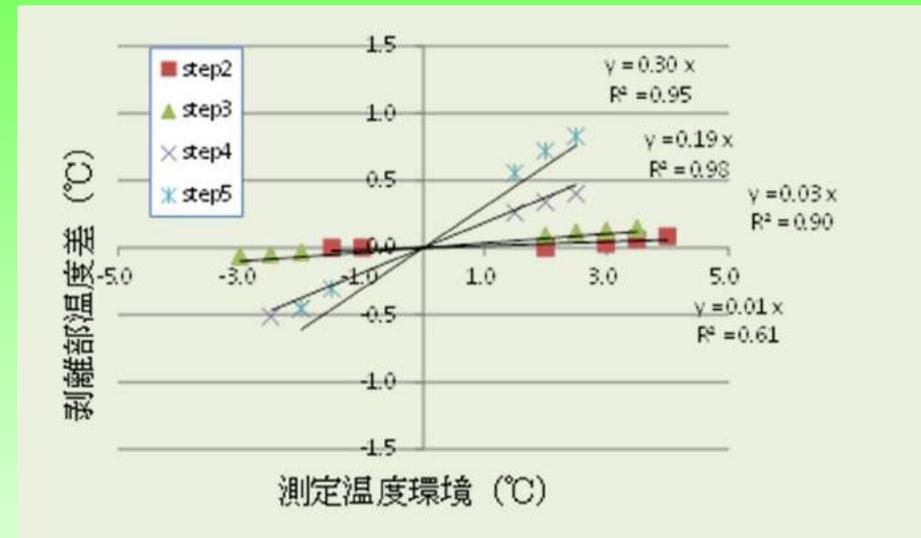
赤外線サーモグラフィによる剥落予測



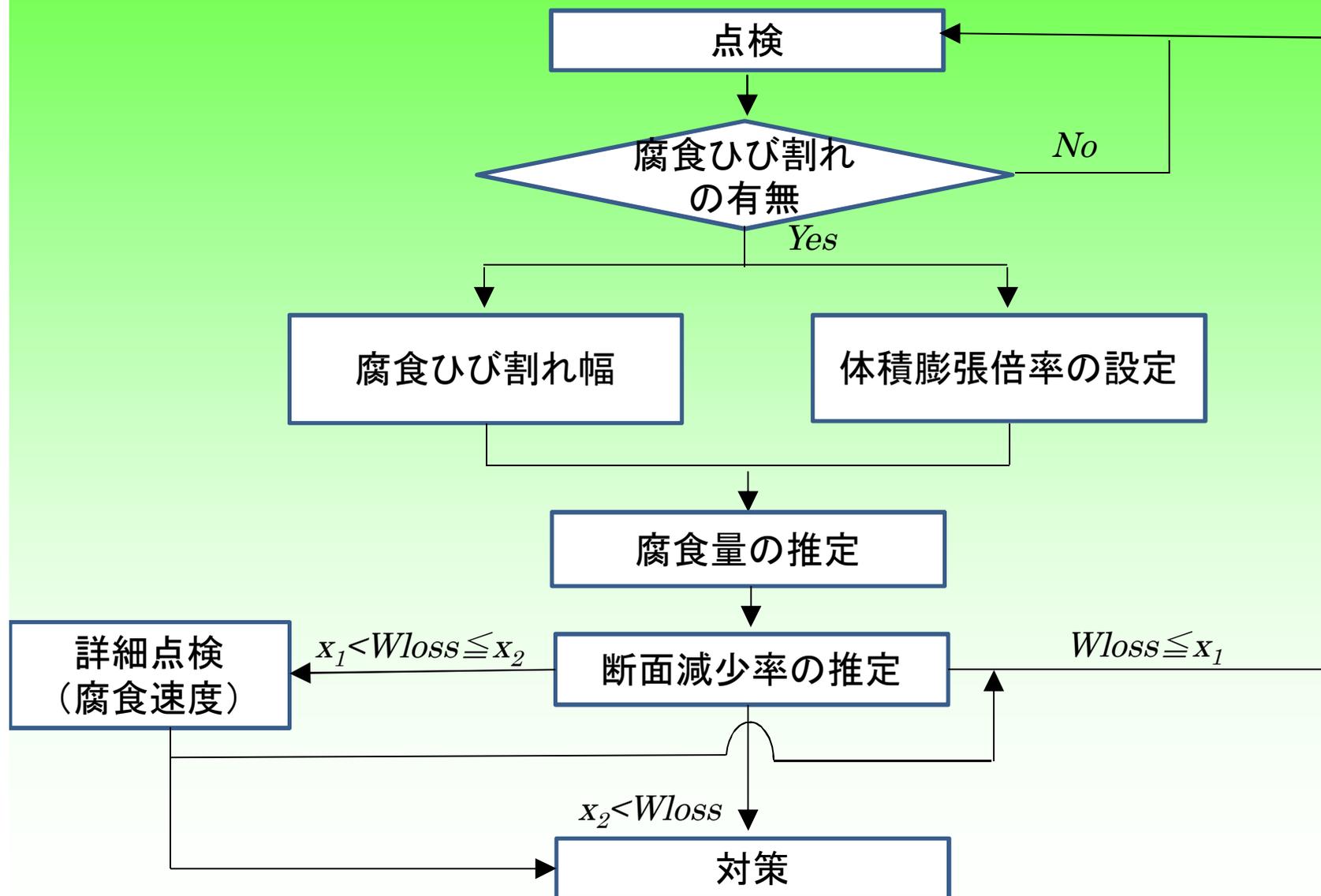
赤外線画像



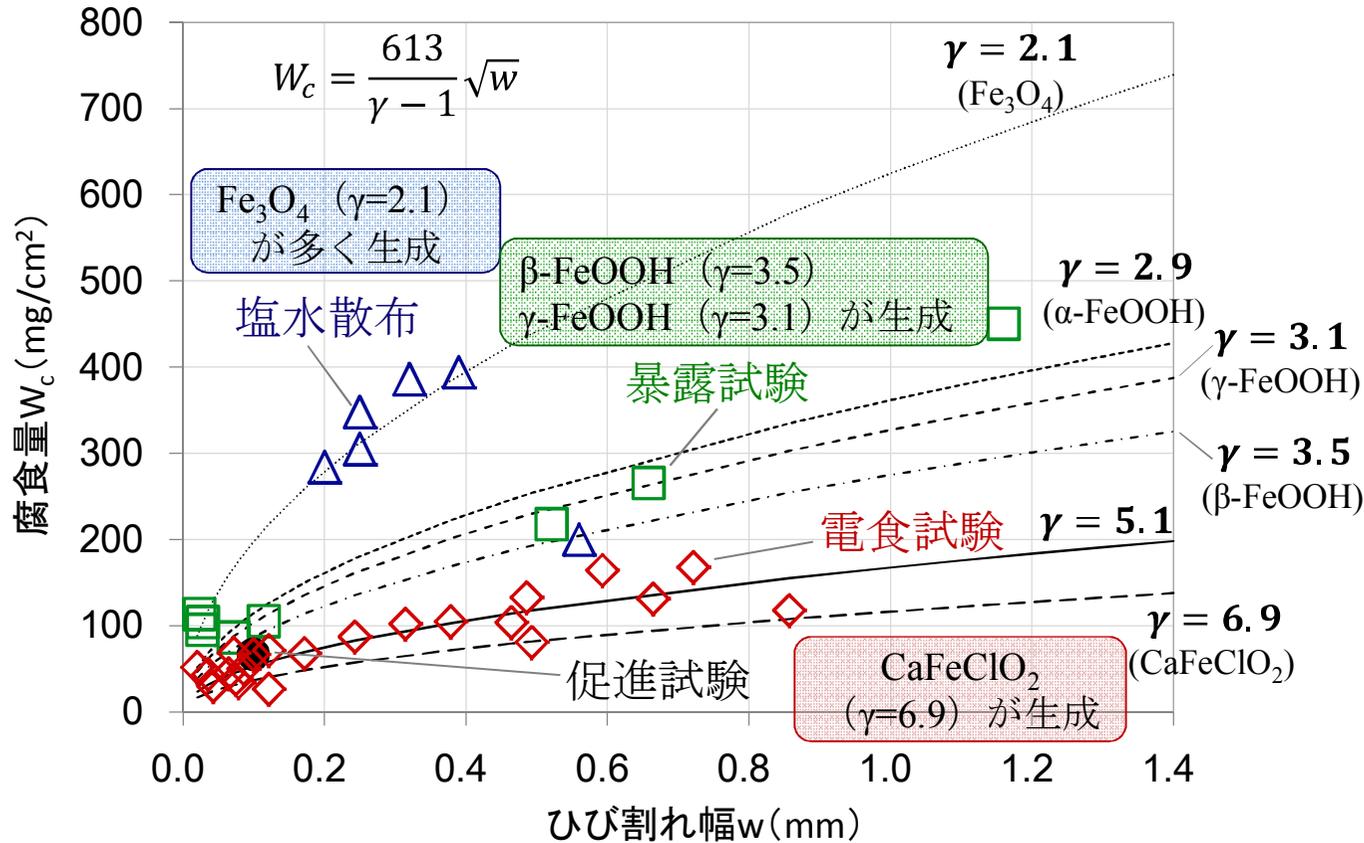
A-Bライン上の温度分布



維持管理フロー⇒マネジメント



ひび割れ幅と腐食量の関係



✓ 腐食量は腐食環境により大きく異なる

← 生成物の化学組成の違いによる

✓ 実環境で生成物が特定できれば腐食ひび割れ幅から腐食量が推定できる

腐食生成物の環境依存性を評価するために様々なpH, 塩化物イオン量, 溶存酸素量の環境下において生成する腐食生成物を分析 (ラマン分光法, AFM, KFM, SEM-EDX等)

腐食ひび割れを生じたコンクリート構造物の維持管理手法の確立

①コンクリート中の鋼材に関する腐食生成物の環境依存性の物理・化学的評価

	道路橋 (名立) 塩害 (乾燥)	道路橋 (福井) 塩害 (湿潤)	道路橋 (福井) 塩害 (乾燥)
			
Fe ₃ O ₄	23.8	12.2	33.4
α-FeOOH	0.0	24.9	0
β-FeOOH	4.9	0.0	4.7
γ-FeOOH	71.3	62.9	61.9
	鉄道橋 (小出) 乾湿繰り返し	鉄道橋 (本庄早稲田) 乾湿繰り返し→塩害	鉄道橋 (前橋) 乾湿繰り返し
			
Fe ₃ O ₄	33.0	34.5	37.3
α-FeOOH	65.0	34.8	19.5
β-FeOOH	0.0	12.6	30.6
γ-FeOOH	2.0	16.1	12.7

(%)

沖縄から福島まで

層状さび形成メカニズム

湿潤

①Fe₃O₄
鉄筋

アルカリ環境下のため、湿潤状態でFe₃O₄が形成する。



乾燥

②γ-FeOOH
①Fe₃O₄
鉄筋

乾燥状態となった際に空気酸化で表層がγ-FeOOHに変化する。



湿潤

②Fe₃O₄
①Fe₃O₄
③Fe₃O₄
鉄筋

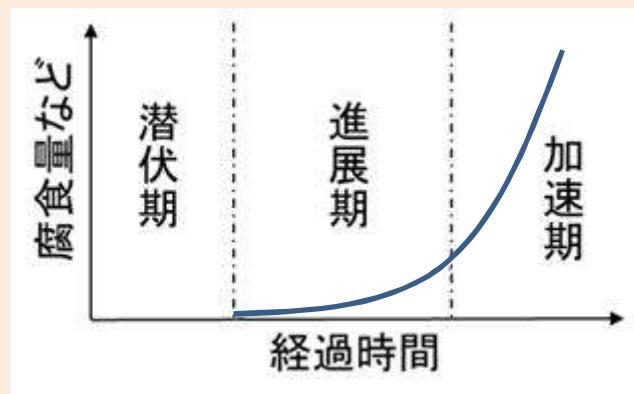
再び湿潤状態になるとγ-FeOOHが溶解しFe₃O₄に変化する。その際、鉄筋を酸化し、下地にFe₃O₄層を形成する。

酸化還元反応



腐食ひび割れを生じたコンクリート構造物の維持管理手法の確立

② 腐食およびコンクリートの腐食ひび割れ発生、進展メカニズムの解明と 先端非破壊検査技術の開発



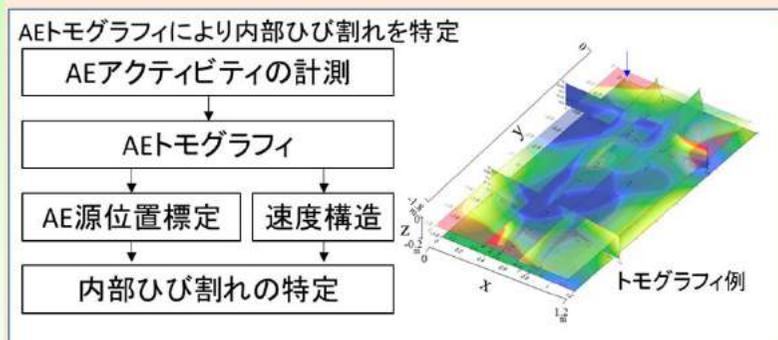
○ 破壊進展メカニズム評価

破壊のマルチスケール性を考慮した腐食劣化の進展評価 (μ _X線, AE/AET計測, 電気化学的測定)

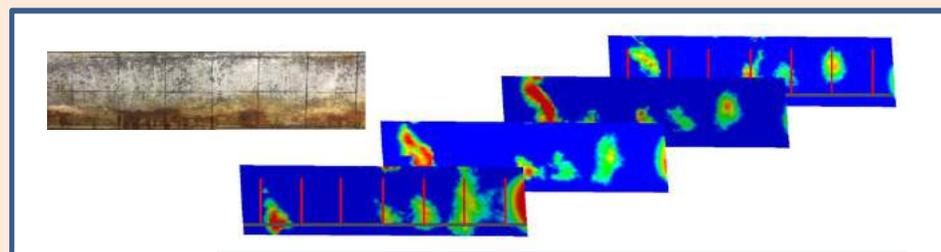
○ 原位置評価

非破壊先端手法による腐食劣化の評価

- ・表面波のウェーブレット解析に基づいた腐食層の特定
- ・AETモグラフィによる劣化領域, 内部ひび割れの特定 (NEDO)



■ AETモグラフィ



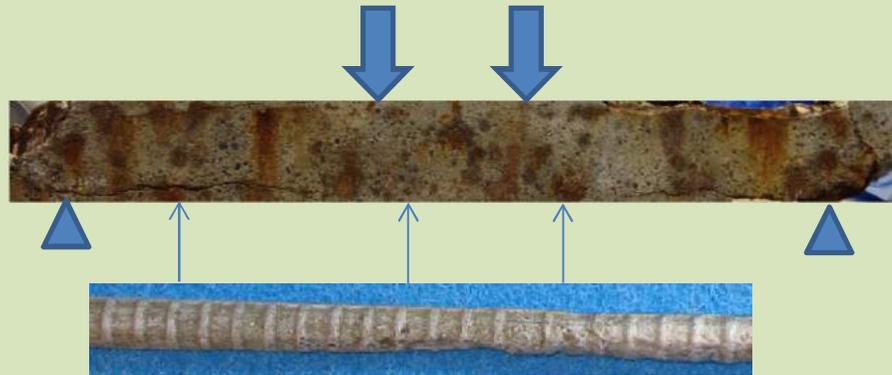
■ 鉄筋の腐食の可視化

主な検討事項

- 各先端非破壊技術の適用範囲を考慮した破壊メカニズム解明
- 鉄筋腐食量の新たな定量化手法および, 指標の確立

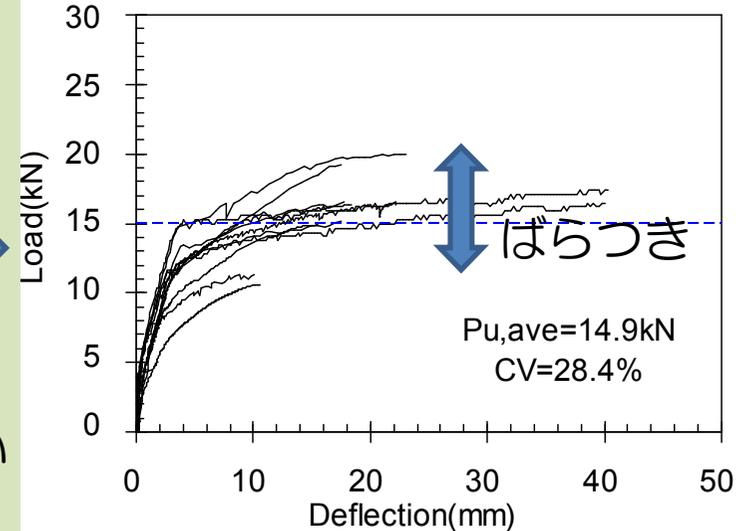
腐食ひび割れを生じたコンクリート構造物の維持管理手法の確立

③腐食ひび割れ-腐食量関係モデル化による構造物性能診断とそのマネジメントへの導入



中の鉄筋の腐食量？

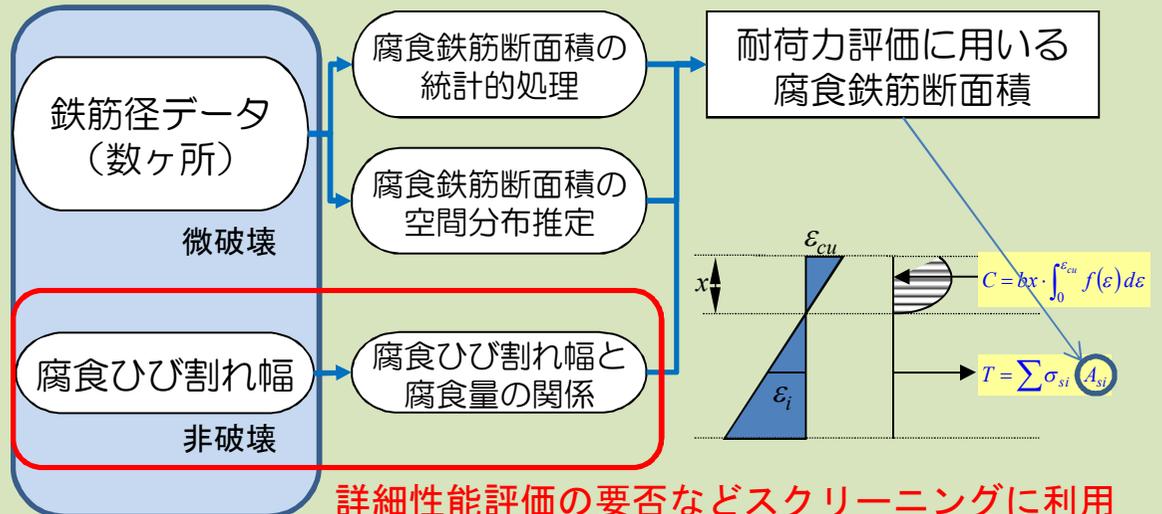
- 場所ごとに变化，表面から測定できない



グレーディングによる方法
→技術者の高度な判断が必要

耐荷性能診断のアプローチ

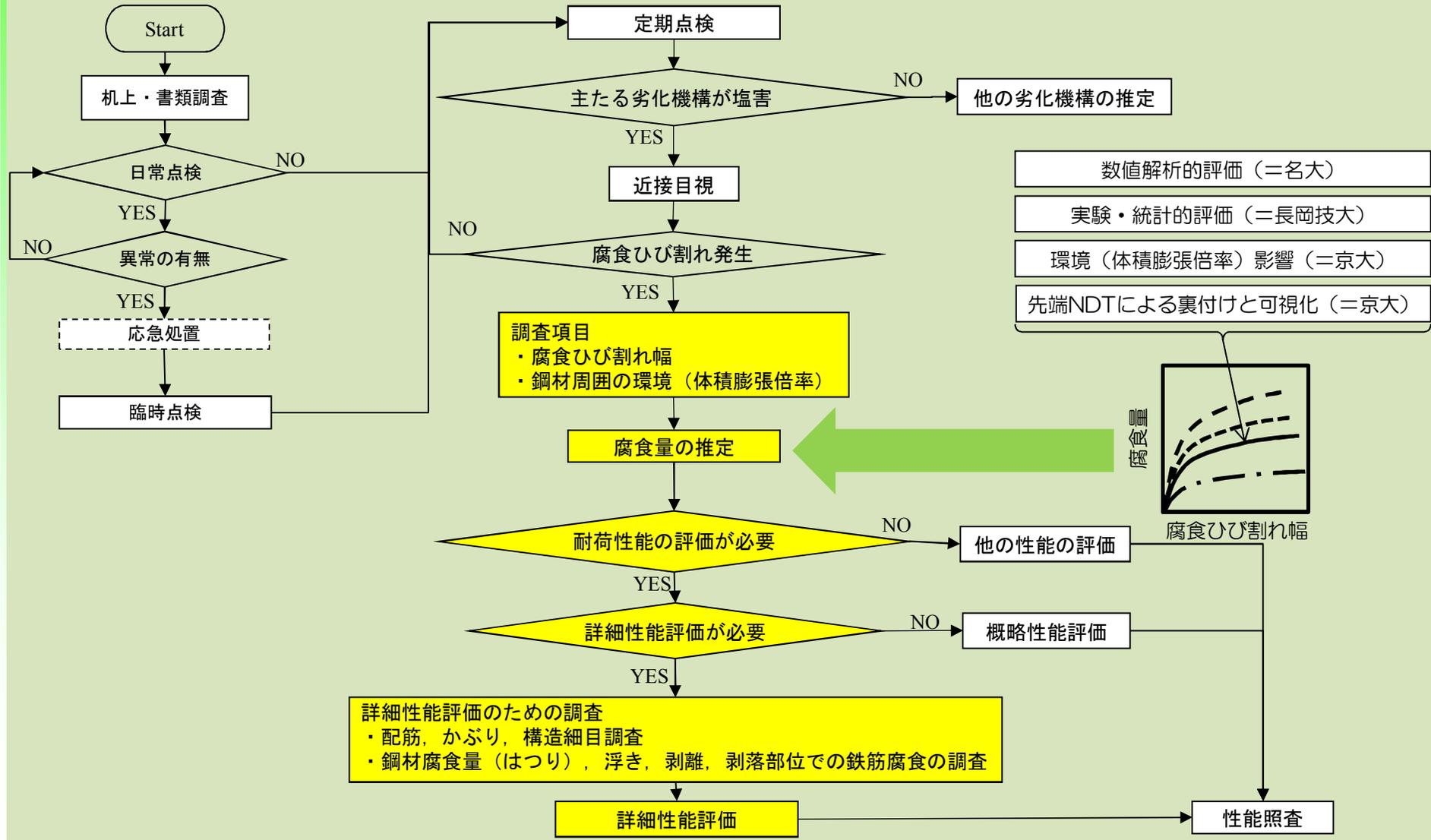
構造物の外観上のグレード	安全性
状態Ⅰ-1 (潜伏期)	—
状態Ⅰ-2 (進展期)	—
状態Ⅱ-1 (加速期前期)	—
状態Ⅱ-2 (加速期後期)	耐荷力・じん性の低下 ・鋼材断面面積の減少 ・破断 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少
状態Ⅲ (劣化期)	耐荷力・じん性の低下 ・鋼材断面面積の減少 ・破断 ・浮き・はく離によるコンクリート断面の減少



腐食ひび割れを生じたコンクリート構造物の維持管理手法の確立

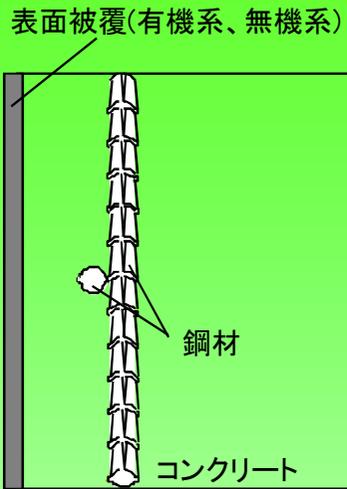
③腐食ひび割れ-腐食量関係モデル化による構造物性能診断とそのマネジメントへの導入

腐食ひび割れ幅-腐食量関係を導入した維持管理フロー

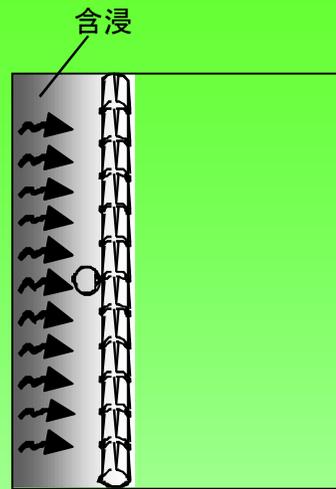


補修・補強に期待する効果と工法

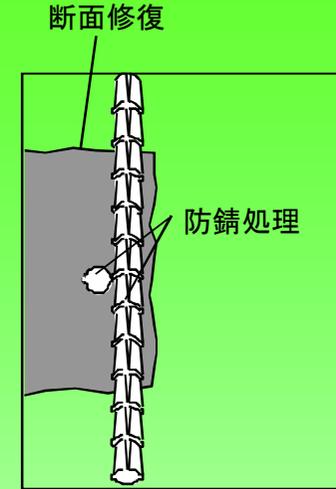
期待する効果	工法例
鋼材の腐食因子の供給量を低減	表面処理
鋼材の腐食因子の除去	断面修復, 電気化学的脱塩
鋼材の腐食進行を抑制	表面処理, 電気防食, 断面修復, 防錆処理
耐荷力を向上	FRP 接着, 断面修復, 外ケーブル, 巻立て, 増厚



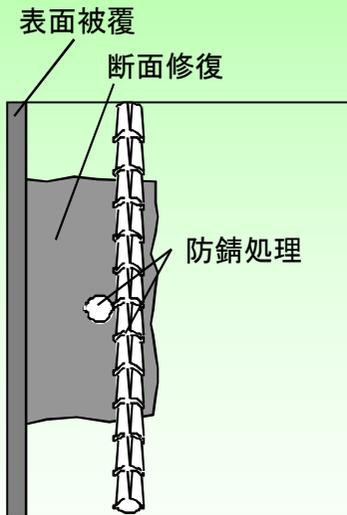
①表面被覆工



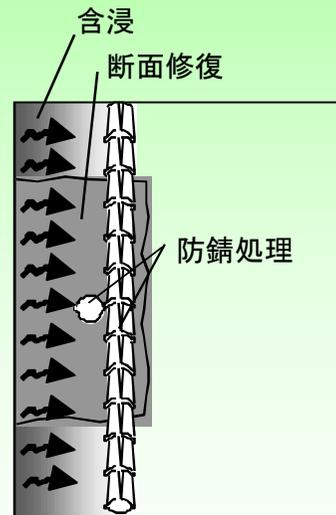
②表面含浸工



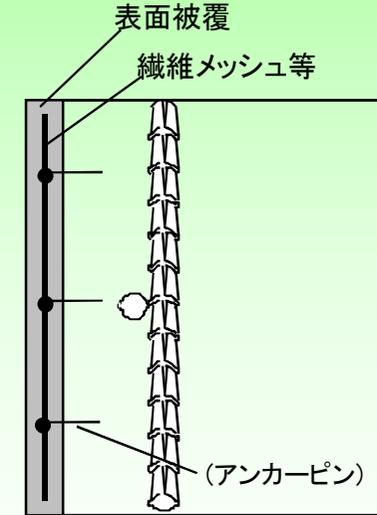
③断面修復工



表面保護工の併用例
③断面修復工+①表面被覆工



表面保護工の併用例
③断面修復工+②表面含浸工

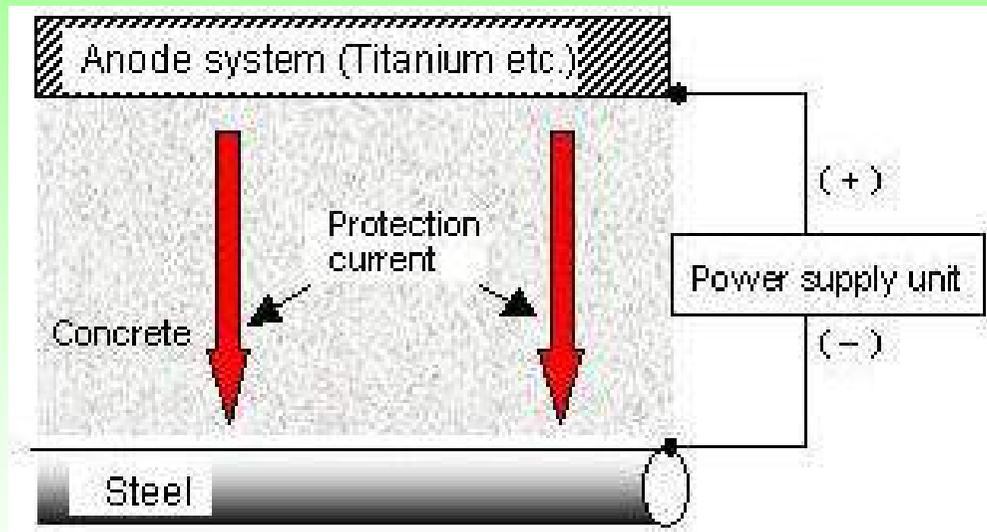


剥落防止対策例
①表面被覆工(繊維メッシュ入り)

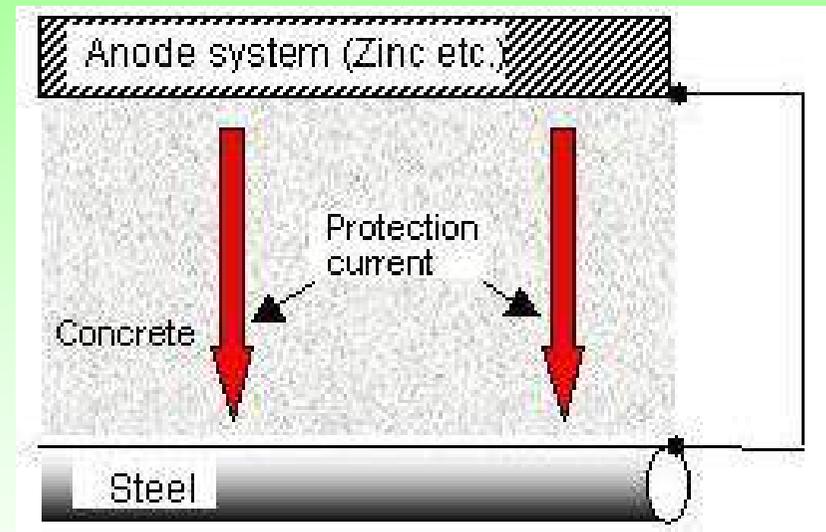
表面保護工の概念図

電氣化學的防食工法

電氣防食



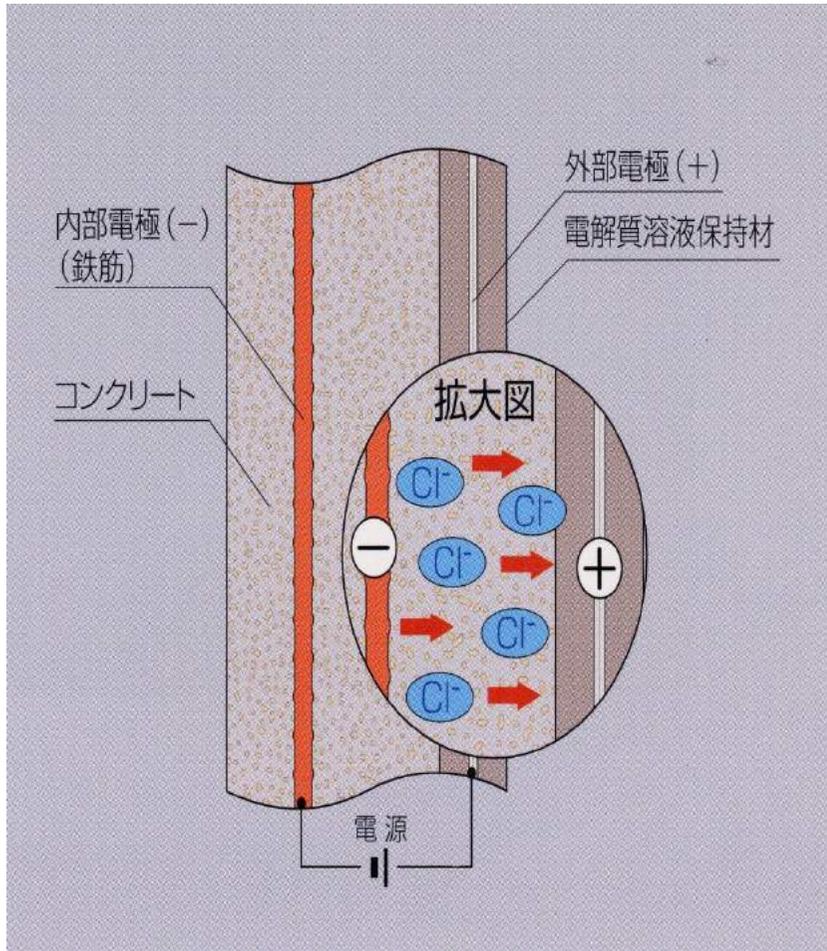
外部電源方式



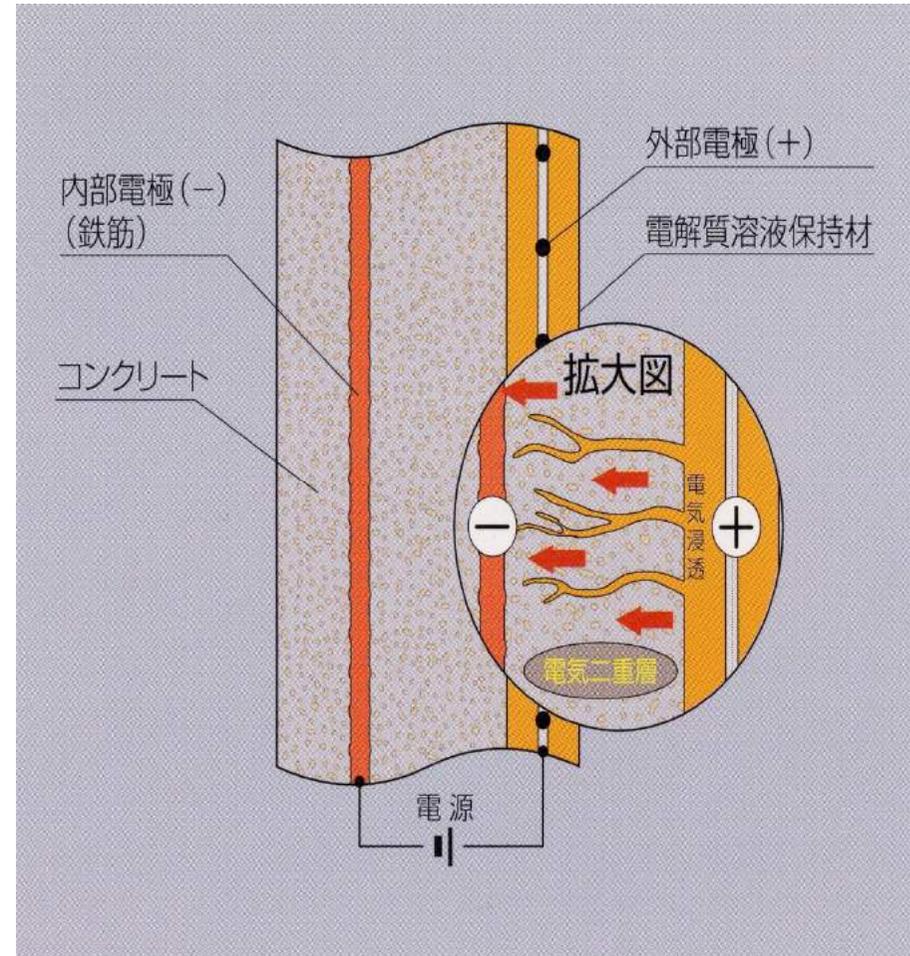
流電陽極方式

電気化学的防食工法

脱塩工法

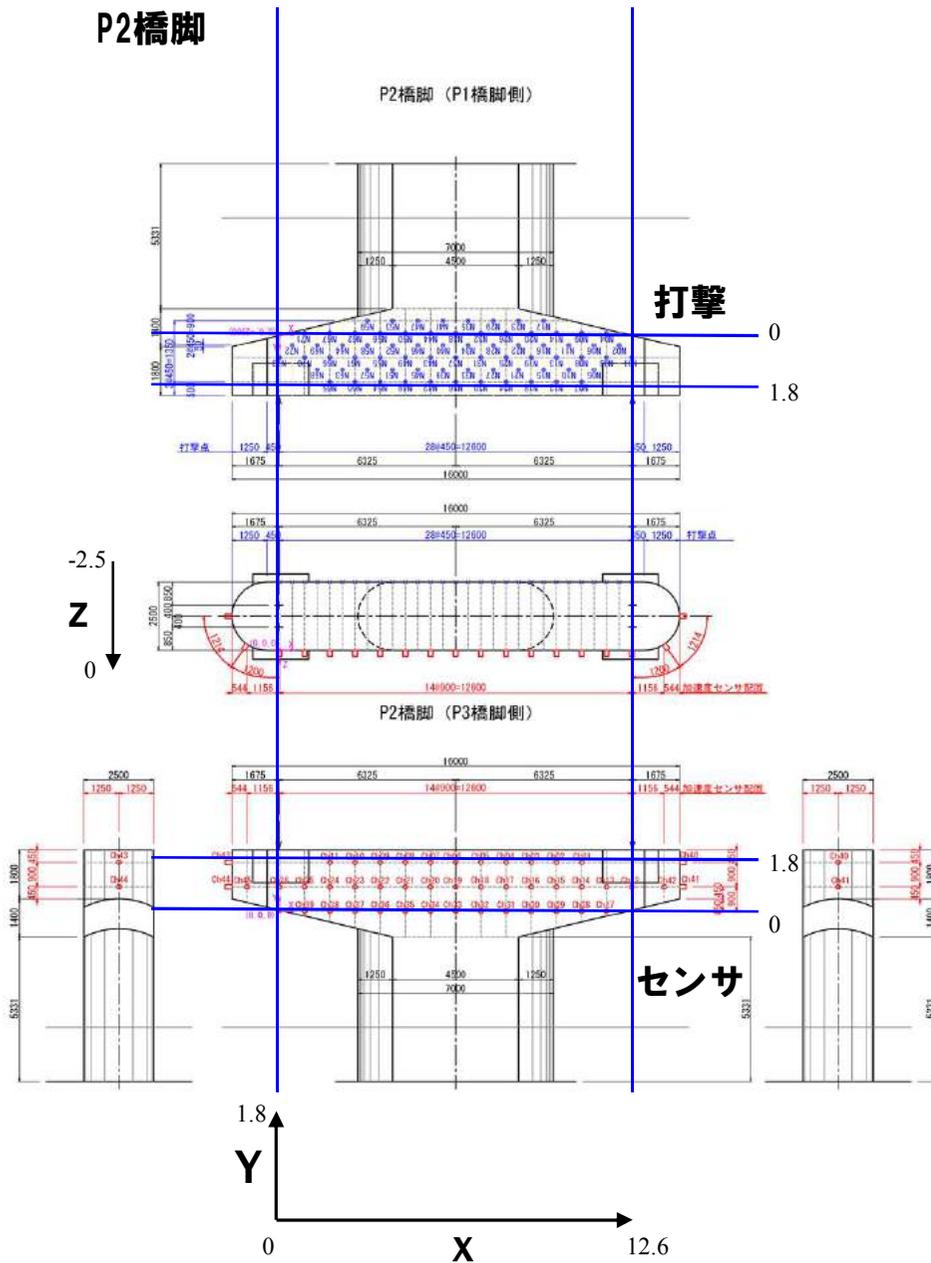


再アルカリ化工法



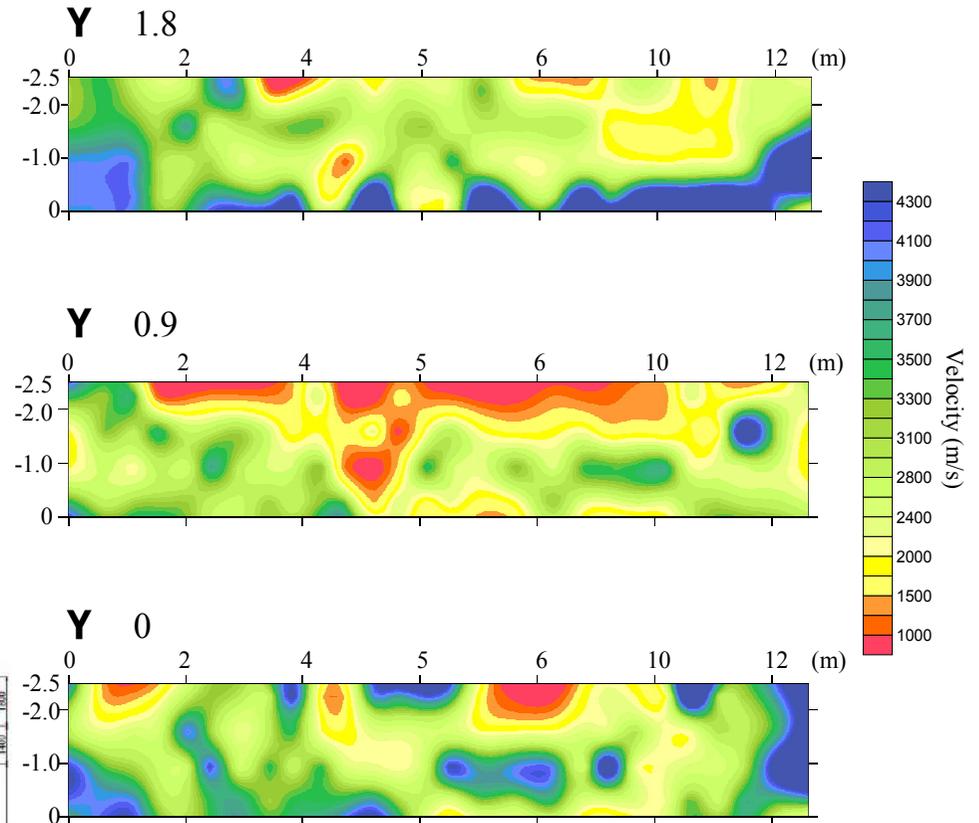
- **アルカリシリカ反応**

P2橋脚

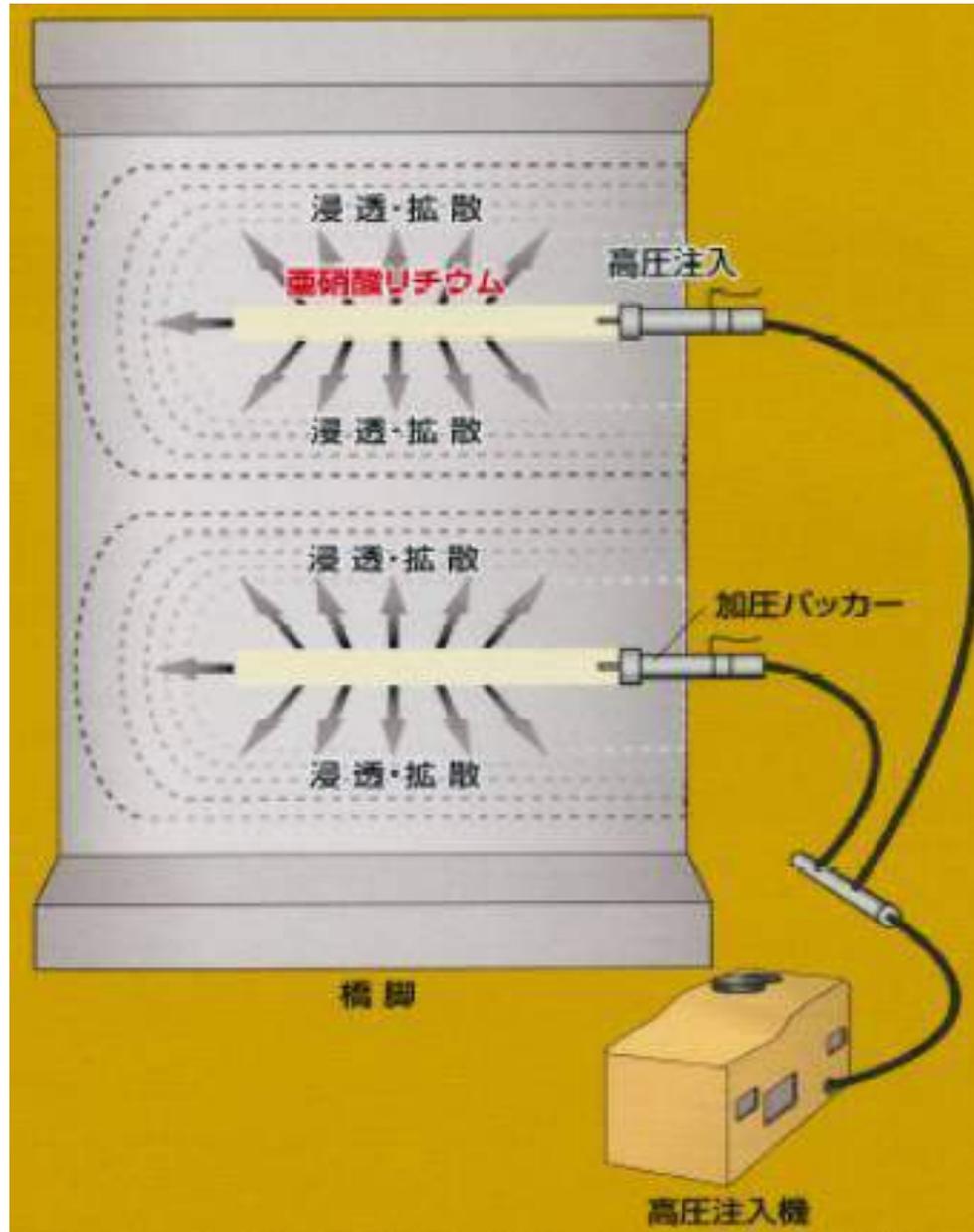


打撃(ハンマサイズφ100)

水平断面図



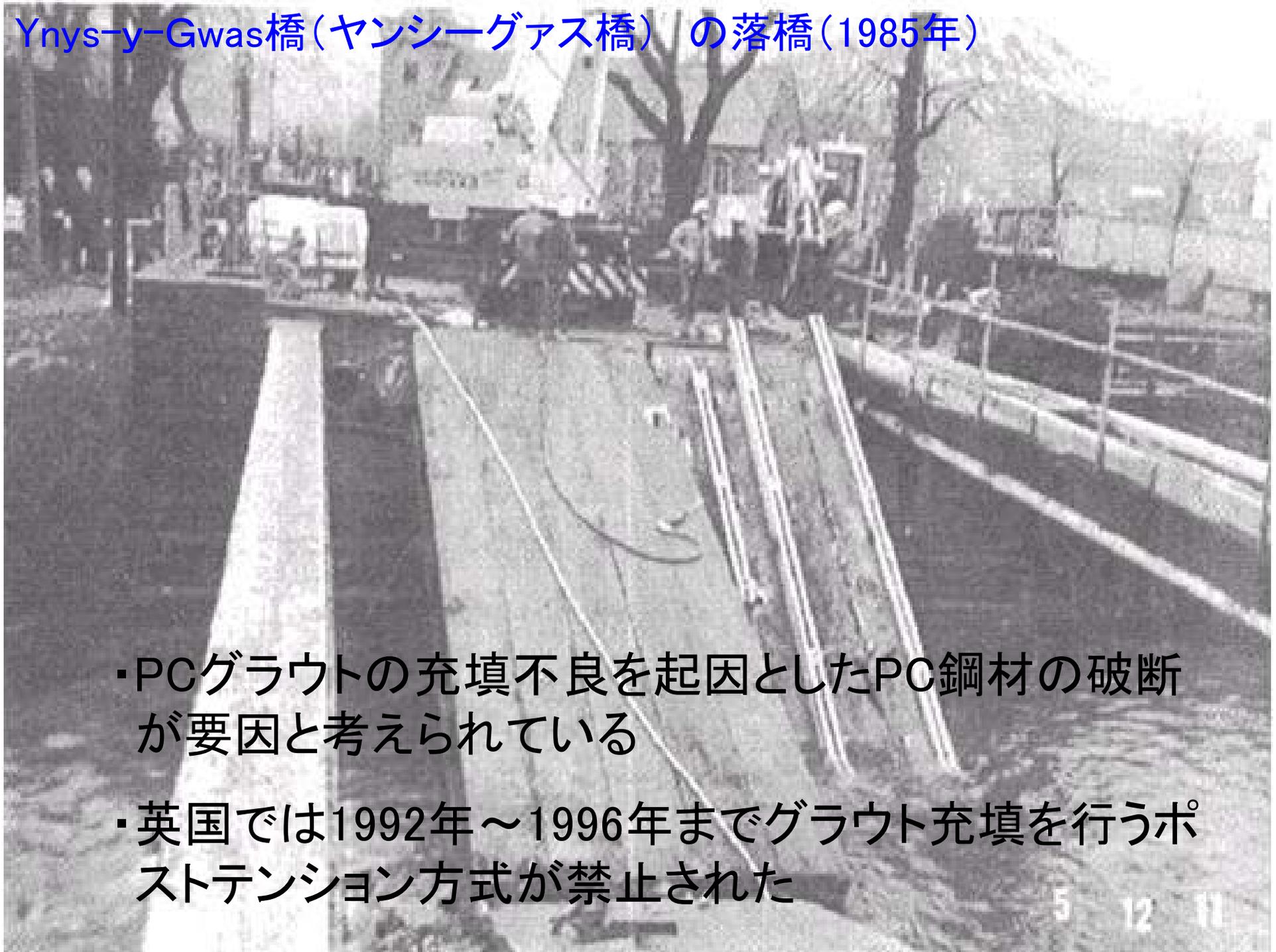
- 全体的に低い速度構造となる
- 大きなき裂が見られているところで特に低い速度構造が見られる
- 中央部 (x:4-5 m, y:0.9 m, z:0.5-2) に特徴的な低速度領域が見られる



亜硝酸リチウム圧入

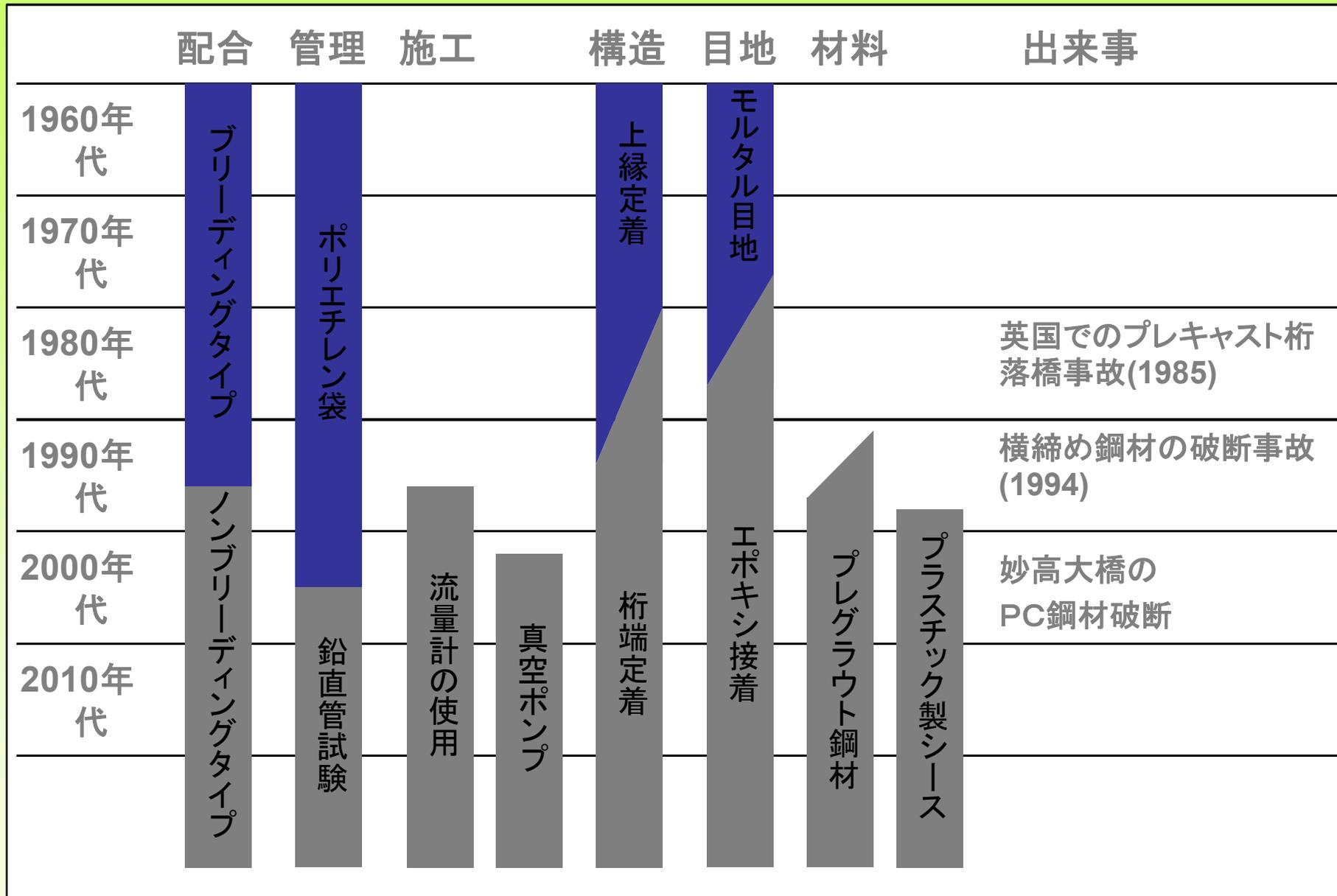
- **グラウト問題**

Ynys-y-Gwas橋(ヤンシーグアス橋)の落橋(1985年)



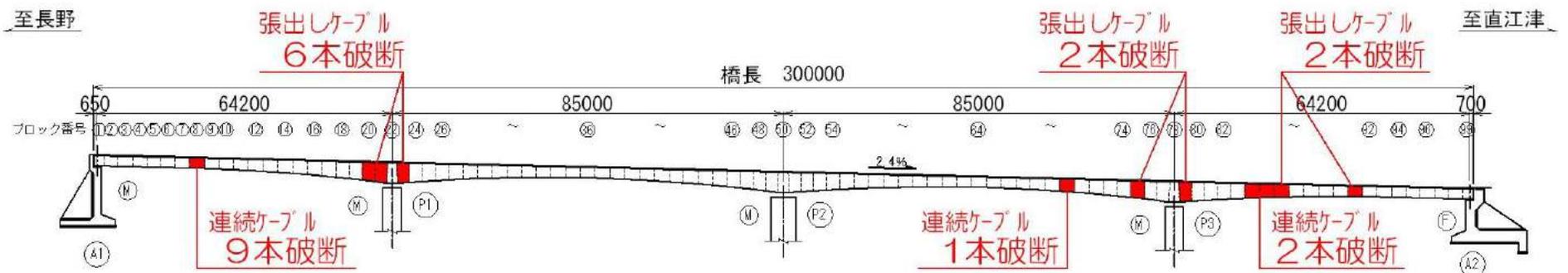
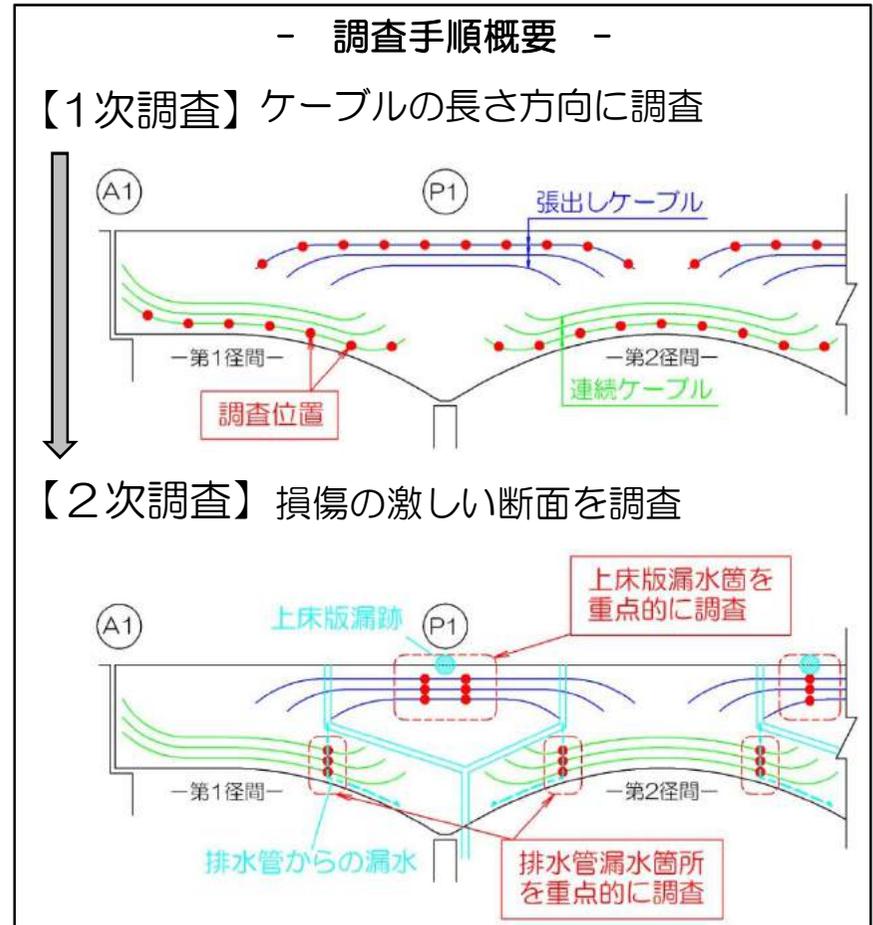
- ・PCグラウトの充填不良を起因としたPC鋼材の破断が要因と考えられている
- ・英国では1992年～1996年までグラウト充填を行うポストテンション方式が禁止された

グラウト技術の変遷

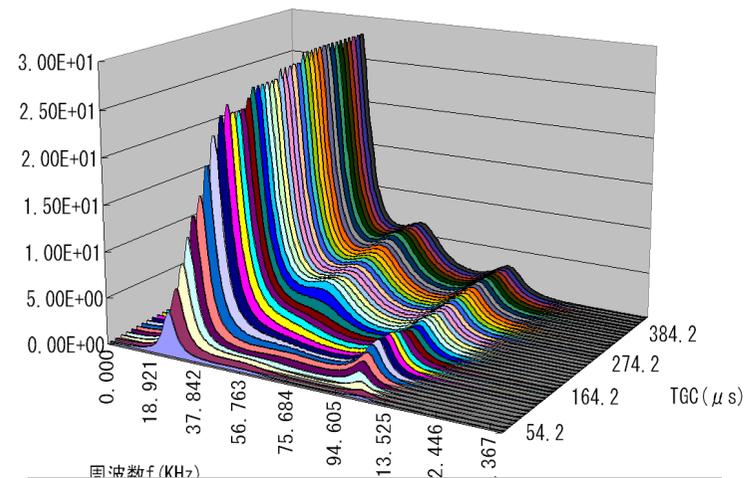
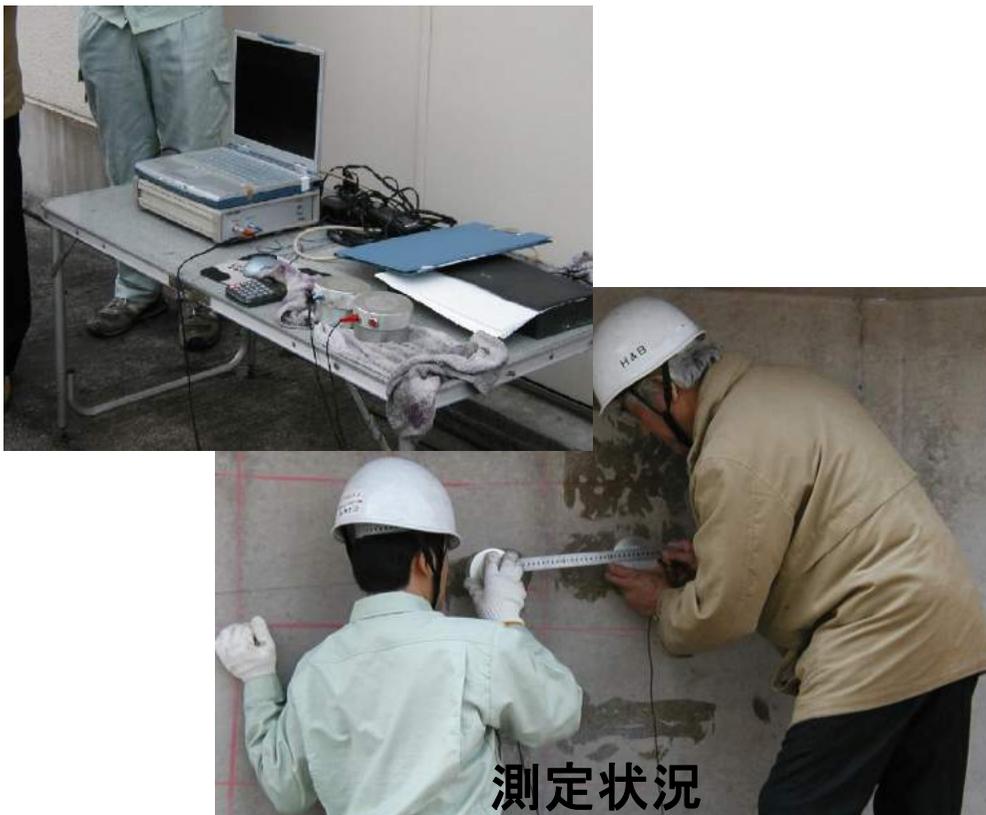


詳細調査

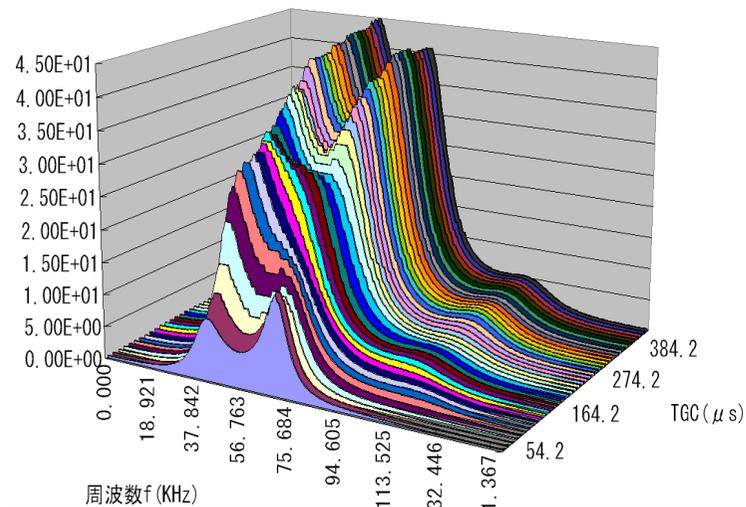
全体の損傷を効率的に把握するために、
削孔内視鏡調査による2段階調査を実施



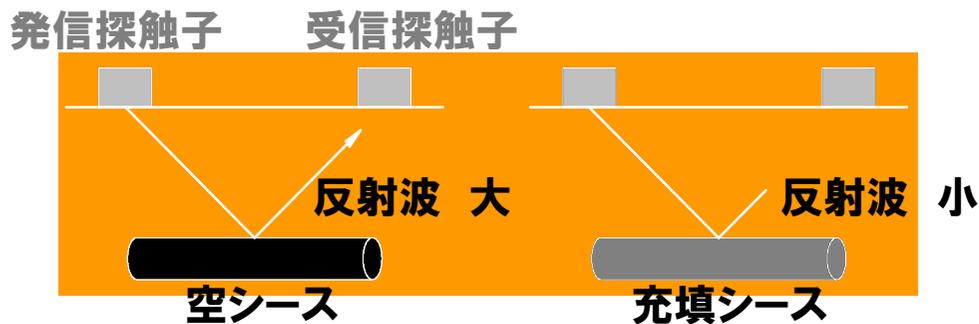
PCグラウト充填検査(広帯域超音波法)



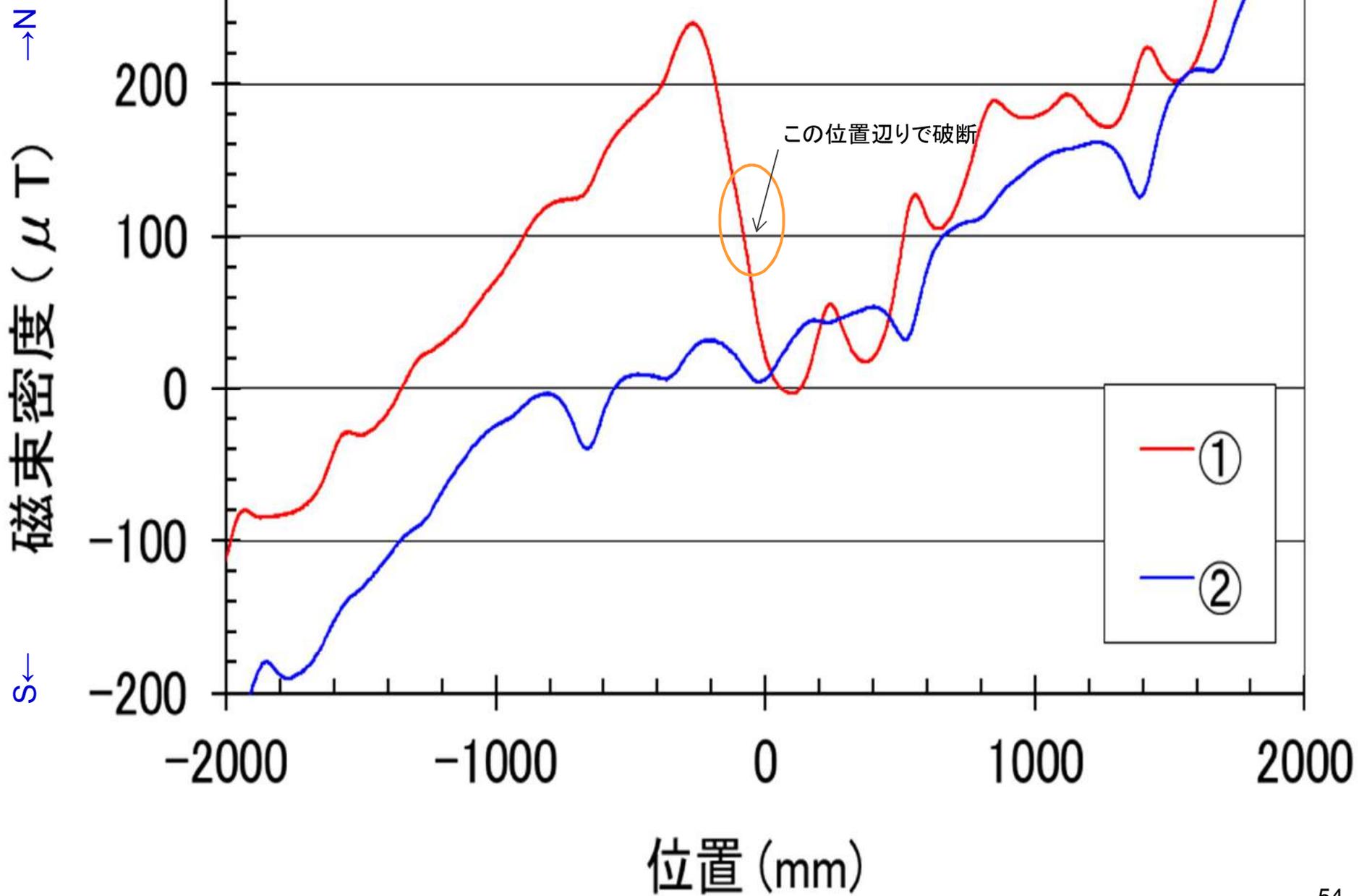
グラウト充填の判定例



グラウト未充填の判定例



・海岸線付近に位置するPCポストテンションT桁橋
PC鋼線(鋼製シース)が使用



・時空間シナリオ

従来は空間のみではなかったか？
初期力学偏重ではなかったか？

軍艦島

長崎市の特別な許可を得て掲載



長崎市の特別な許可を得て掲載

塩害



長崎市の特別な許可を得て掲載

東日本大震災における津波被害 2011.3



笹子トンネル天井板落下事故 2012.12 59



シナリオデザイン



インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット

Infra-System Management Reseach Unit