

コンクリート構造物を 造りこなし使いこなす

—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**
- **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**

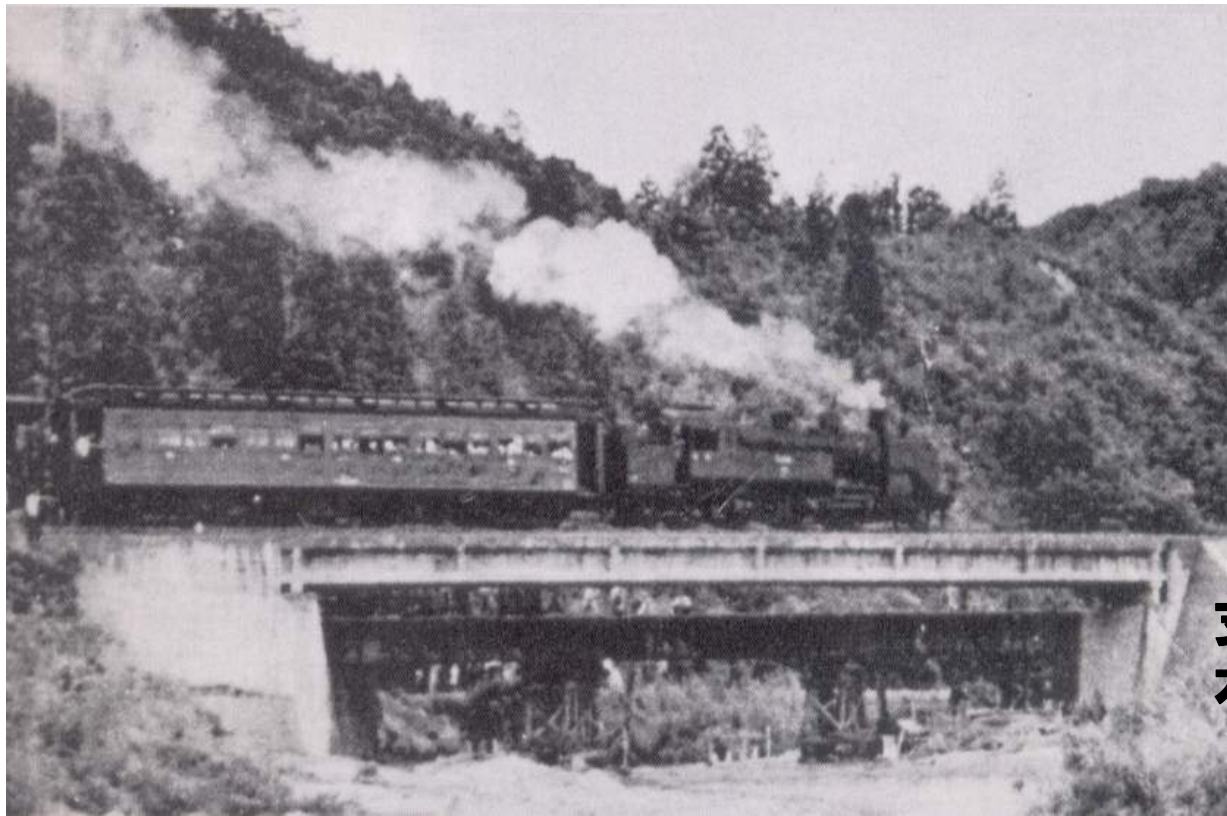
- 丈夫で、美しく、長持ち





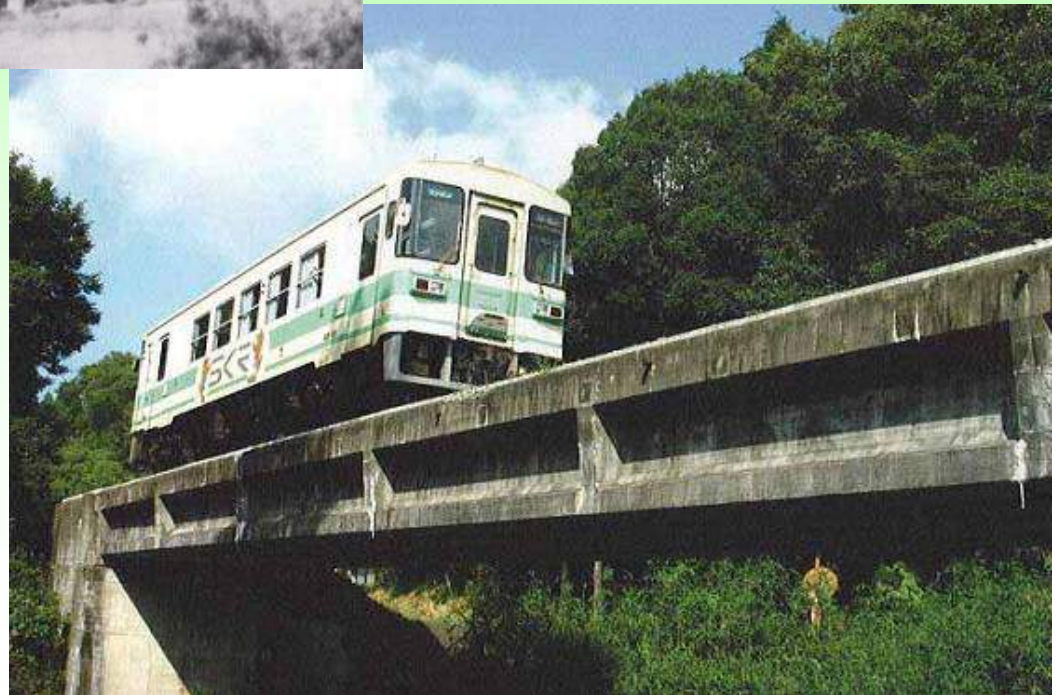
十郷橋
(1953)
福井県



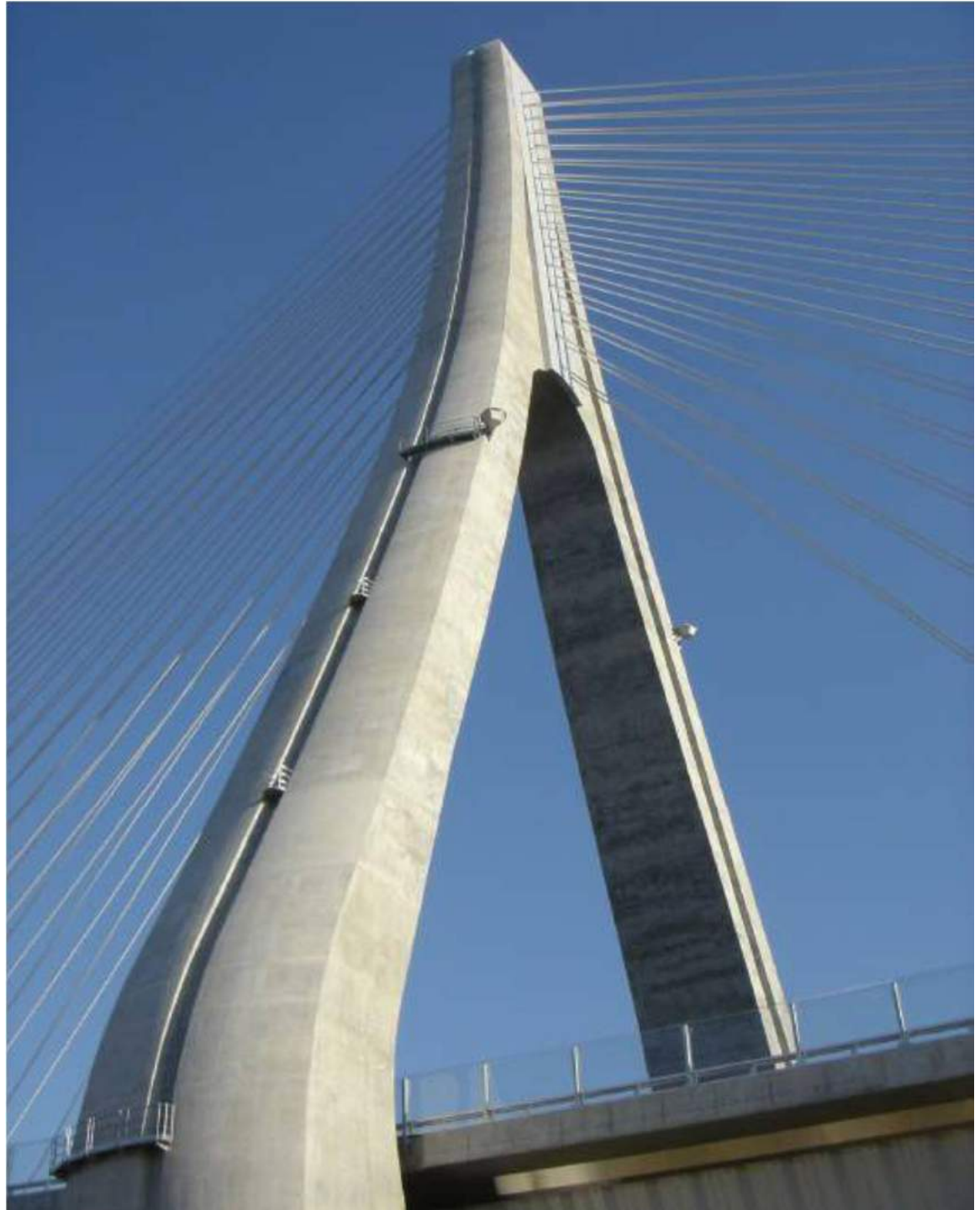


支間30m
本格的ポストテンション橋梁

第一大戸川橋 (1954) 滋賀県



丈夫で
美しく
長持ち

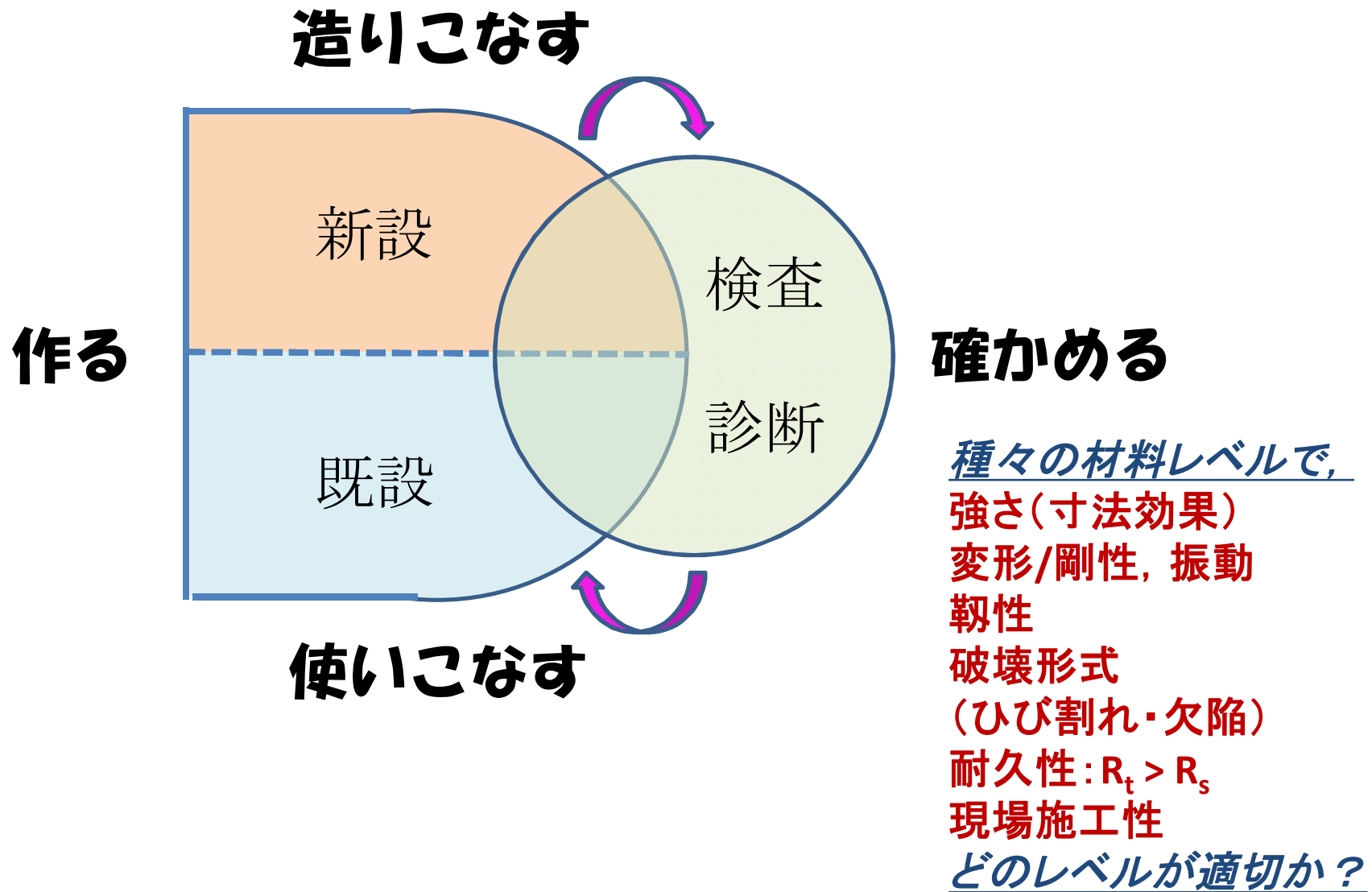


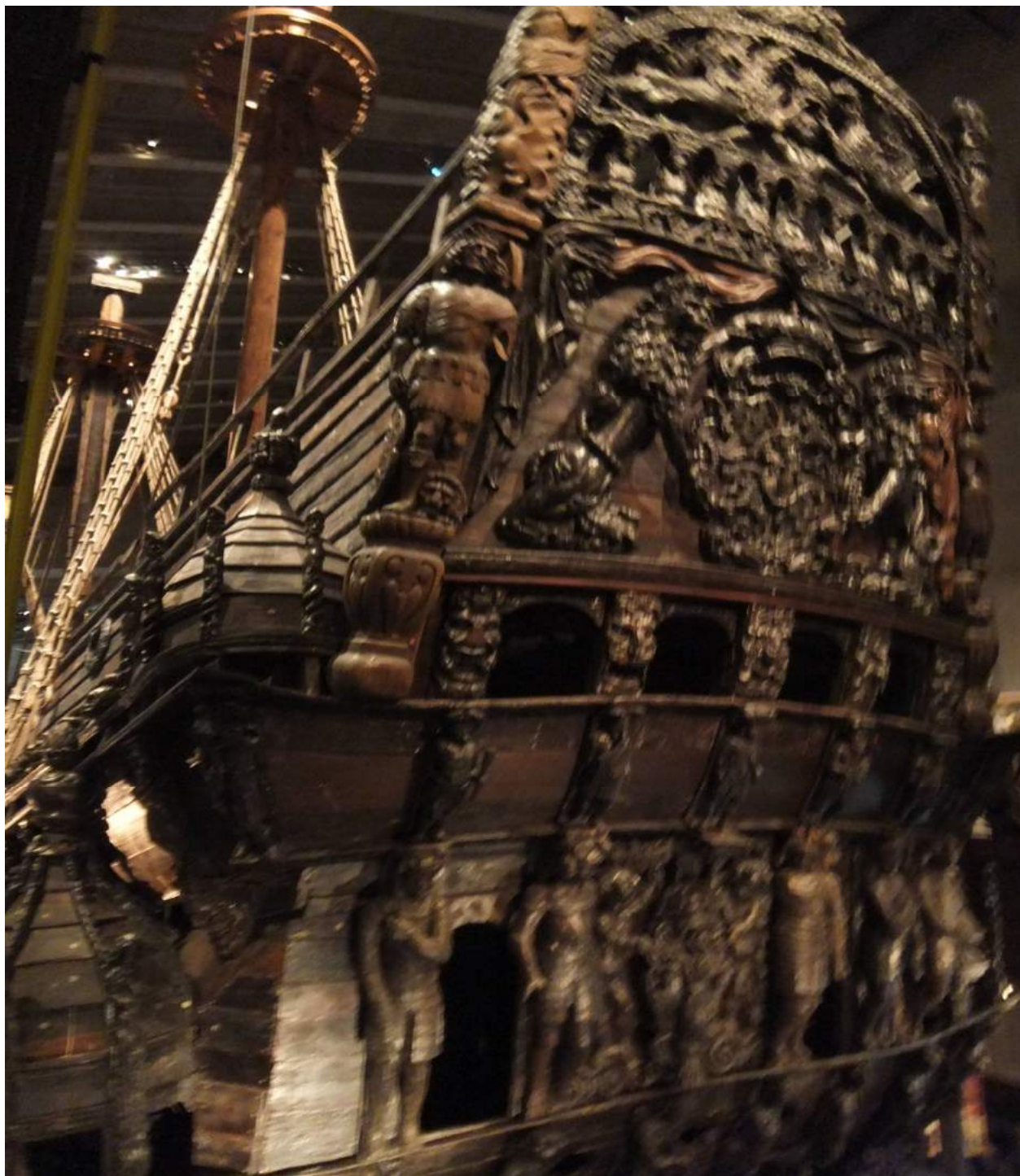


床版下面コンクリートの剥落

- **使いこなすには**

建設材料技術の位相





Vasa号

**300年以上
海水中**

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

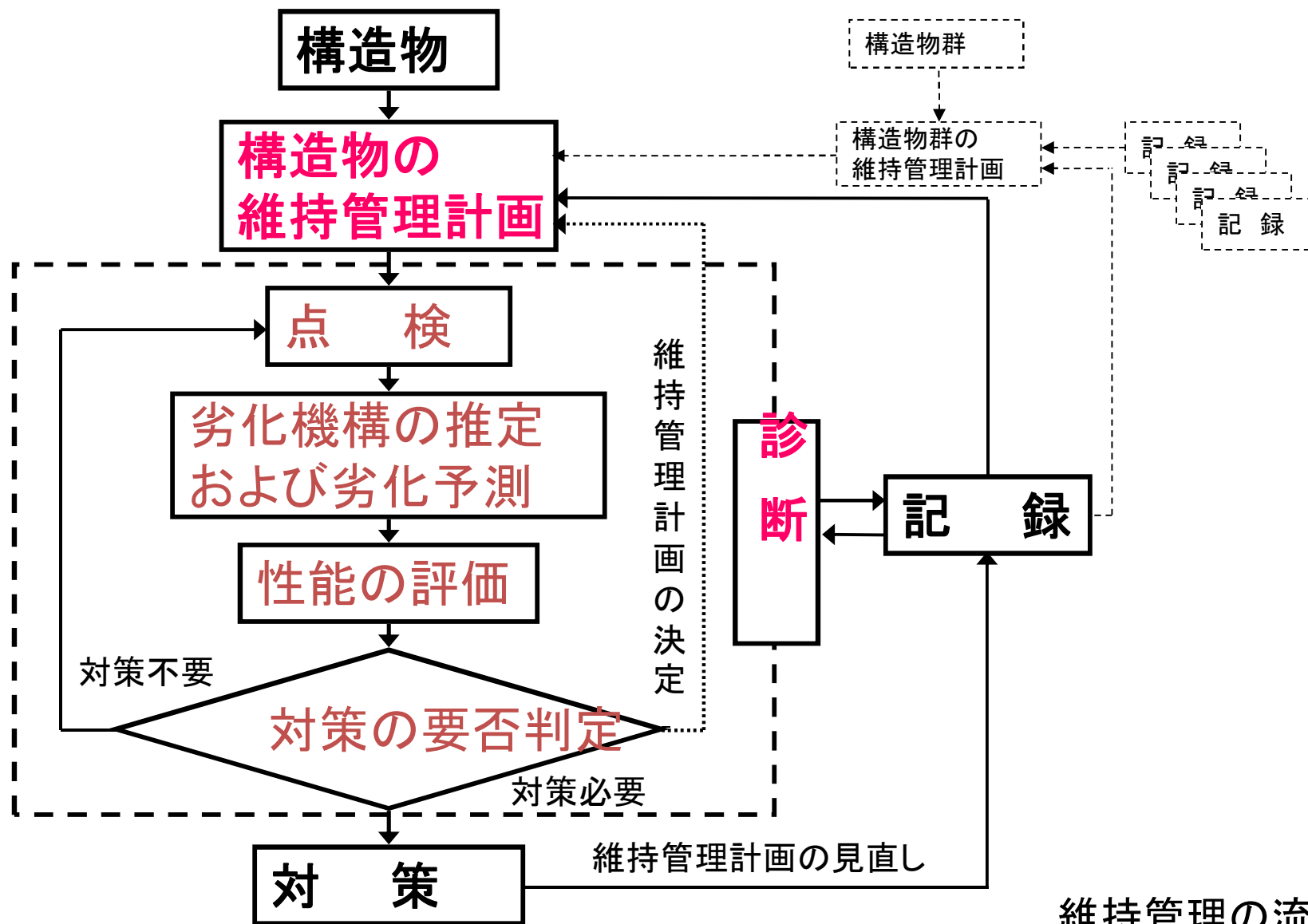
東北本線



劣化（≡古い基準）と耐震・耐荷性能

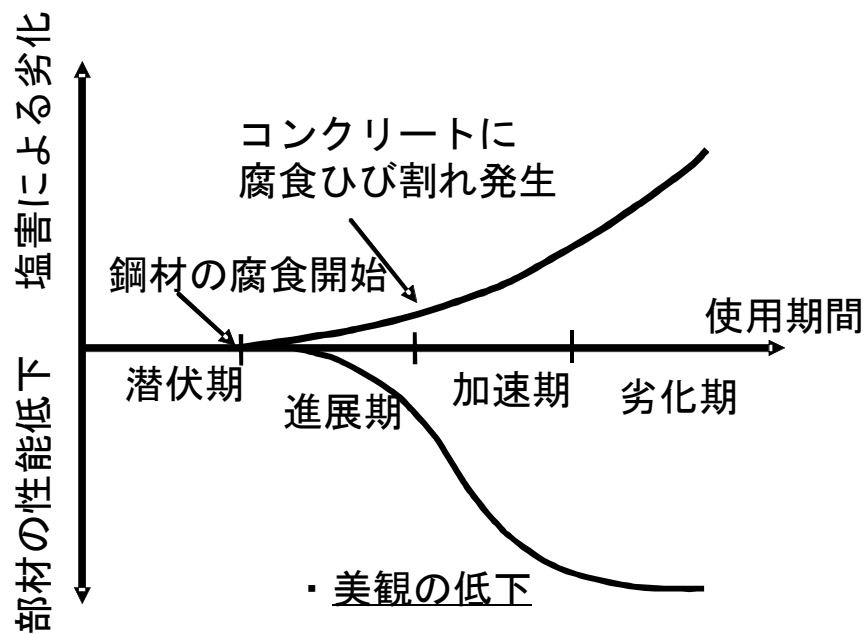
地震で壊れるのではなく、地震をきっかけに劣化で壊れる！



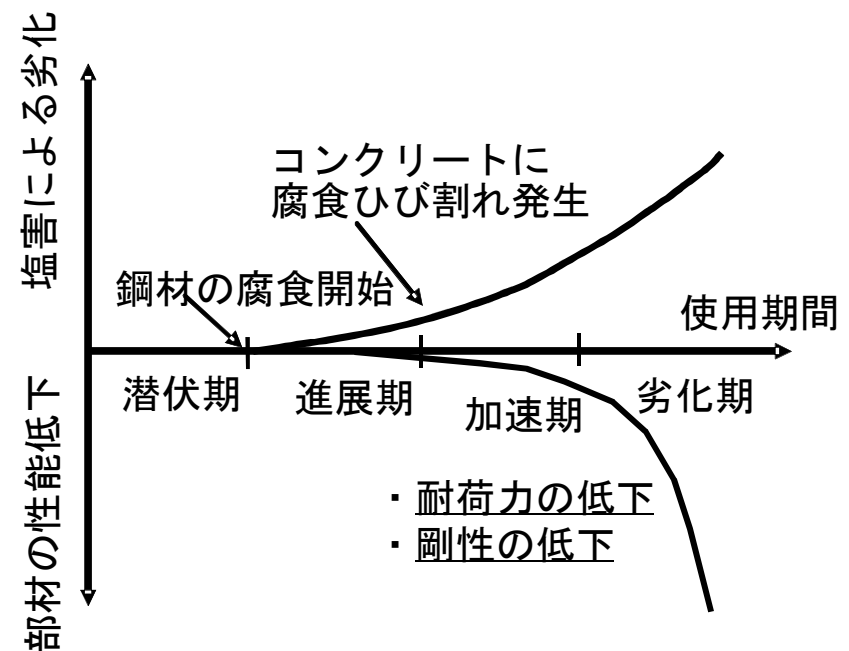


維持管理の流れ

- **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

**近接目視点検 / 5年
→次世代目視点検**

SIPでの提案

提案技術の全体像



外観上のグレード	安全性
状態Ⅰ	—
状態Ⅱ	—
状態Ⅲ	—
状態Ⅳ	耐荷力・じん性の低下
状態Ⅴ	

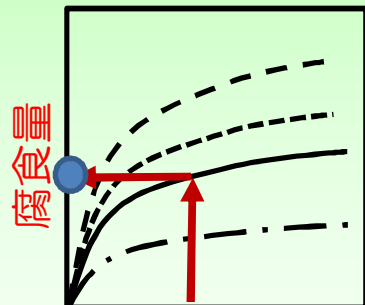
現状診断の問題点

- ・技術者の高度な判断が必要
- ・スキルのある技術者の不足

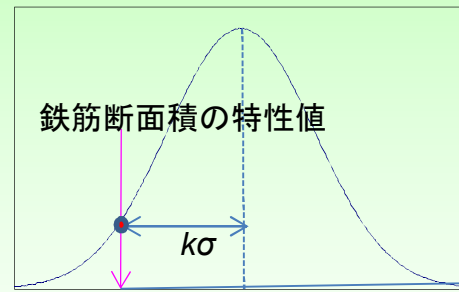
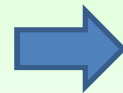
詳細点検・性能評価の可否をスクリーニングできる次世代型目視点検技術

新規性: ひび割れ情報を用いた簡易定量的な一次スクリーニング評価

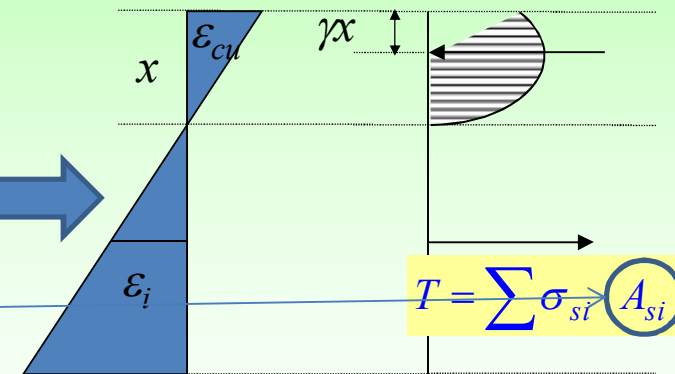
性能: 技術者不足下でも定量評価を実施できる



腐食ひび割れ幅



鉄筋断面積



ひずみ分布

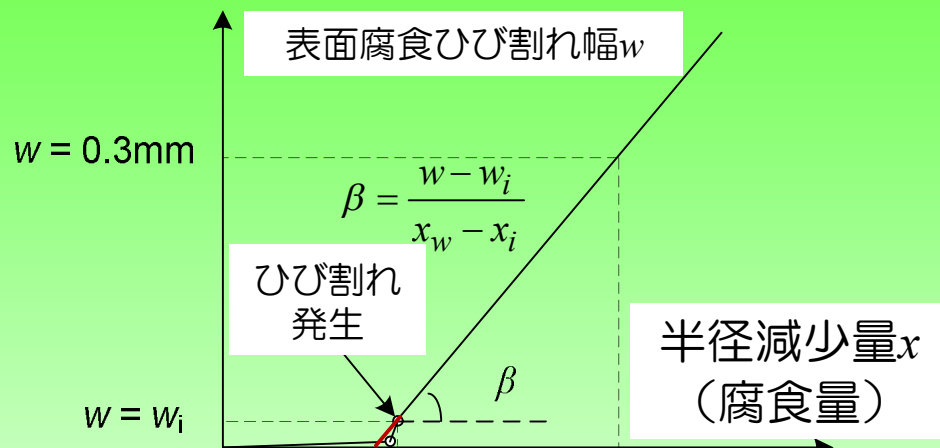
応力, 力

技術開発①: 腐食生成物生成フロー,
腐食量推定モデル
(技術開発①': 目視(腐食ひび割れ)
点検補完技術)

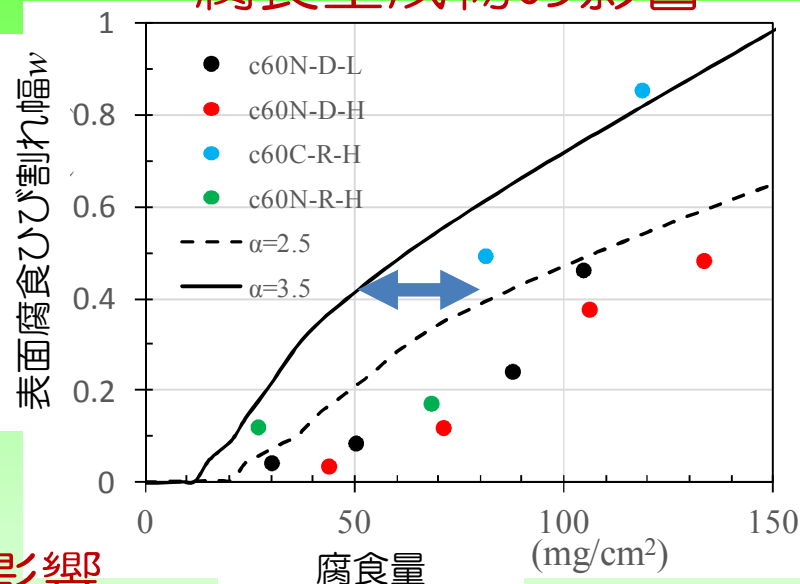
技術開発②: 構造物診断, 耐荷力評価手法

腐食ひび割れ幅と腐食量の力学的な評価

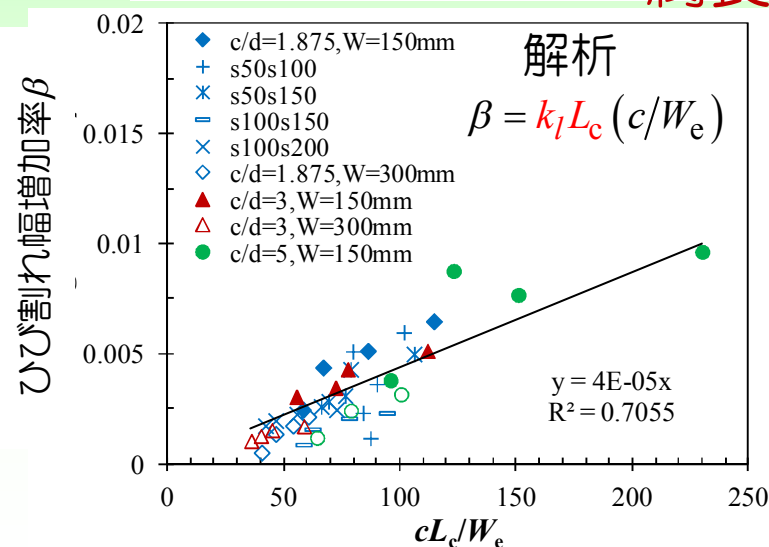
提案モデル $w = \beta(x - x_0)$



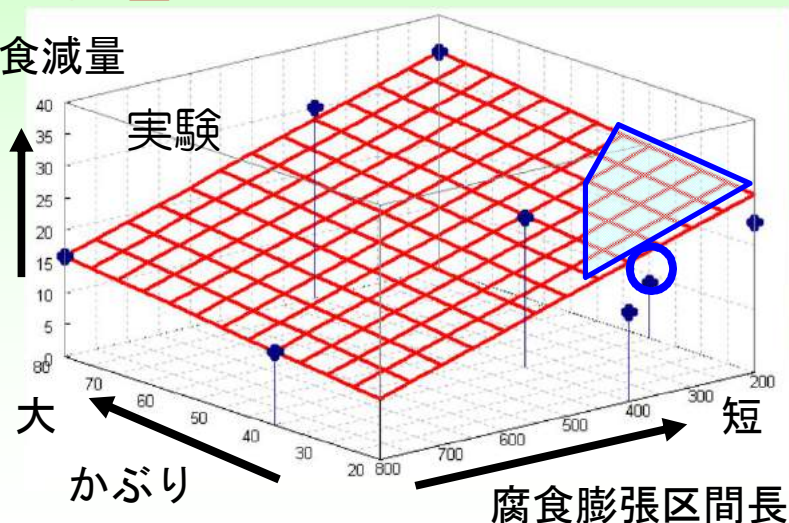
腐食生成物の影響



腐食長さの影響



腐食減量



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

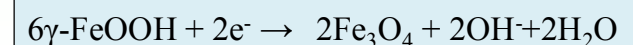
乾燥状態となった際に空気酸化で表層がγ-FeOOHに変化する。

湿潤

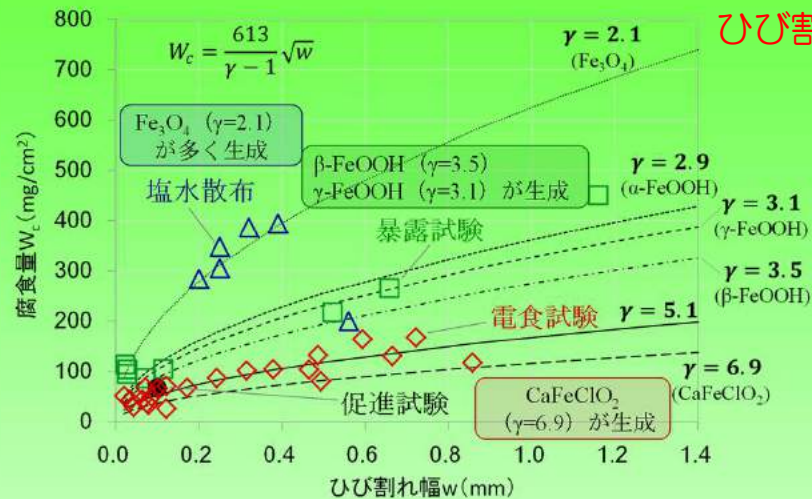
②Fe₃O₄
①Fe₃O₄
③Fe₃O₄
鉄筋

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



腐食生成物の環境依存性



ひび割れ幅に与える腐食生成物の影響と
腐食生成物の体積膨張倍率

腐食生成物		密度(mg/cm ³)	体積膨張倍率
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$	4.3	2.9
Akaganeite	$\beta\text{-FeOOH}$	3.6	3.5
Lepidocrocite	$\gamma\text{-FeOOH}$	4.1	3.1
Magnetite	Fe_3O_4	5.2	2.1
塩化酸化鉄(III) カルシウム	CaFeO_2Cl	3.4	6.9

分類	さびの状態	生成環境および主な特徴	体積膨張倍率
A1		比較的乾燥しやすい環境。赤さびが表面に定着するが、腐食速度は小さい。	3.1倍程度 ($\gamma\text{-FeOOH}$)
A2		材料分離を生じてブリーディングによる大きな空隙がある場合には、湿潤環境でも赤さびができる。ひび割れ発生後はさびが溶出し、腐食速度は大きい。孔食を伴うことも多い。	— (ひび割れ発生以降は溶出)
B		水が入りやすく抜けにくい環境でできやすい。水分を含むのっぺりした黒さびが表面に付着している。腐食速度は小さい。	2.5倍程度 (Fe_3O_4 , $\alpha\text{-FeOOH}$)
C		乾湿繰返し環境でできやすい。硬くて脆い黒さびの層状さびが鉄筋表面を覆っている。比較的腐食速度が大きいことが多い。	2.1倍程度 (Fe_3O_4)

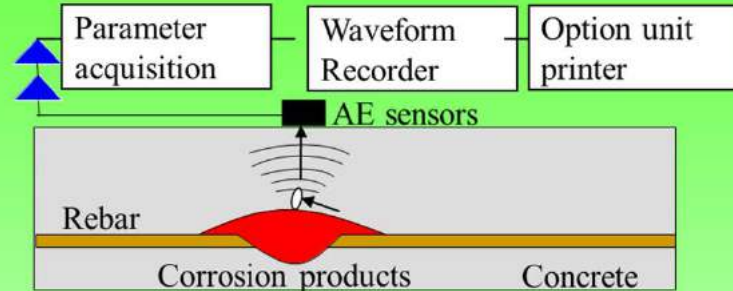
目視点検を補完する技術

1. 鉄筋電位の変化

電気化学的特性に着目したモニタリング

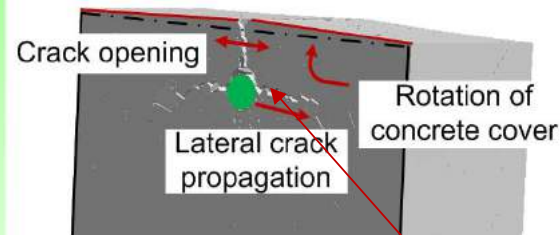
2. 鉄筋周辺の空隙層での腐食生成物の発生・成長

せん断型AEに着目した腐食反応進行の検出



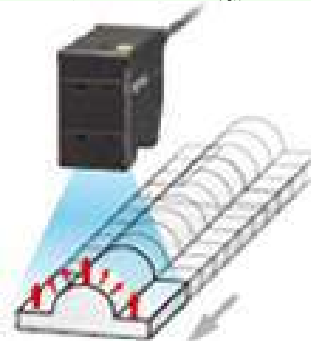
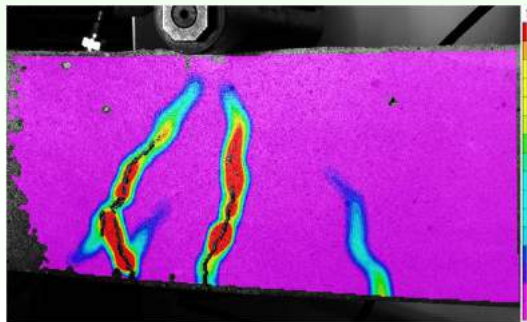
3. 鉄筋周辺での腐食層の形成

4. 腐食ひび割れ

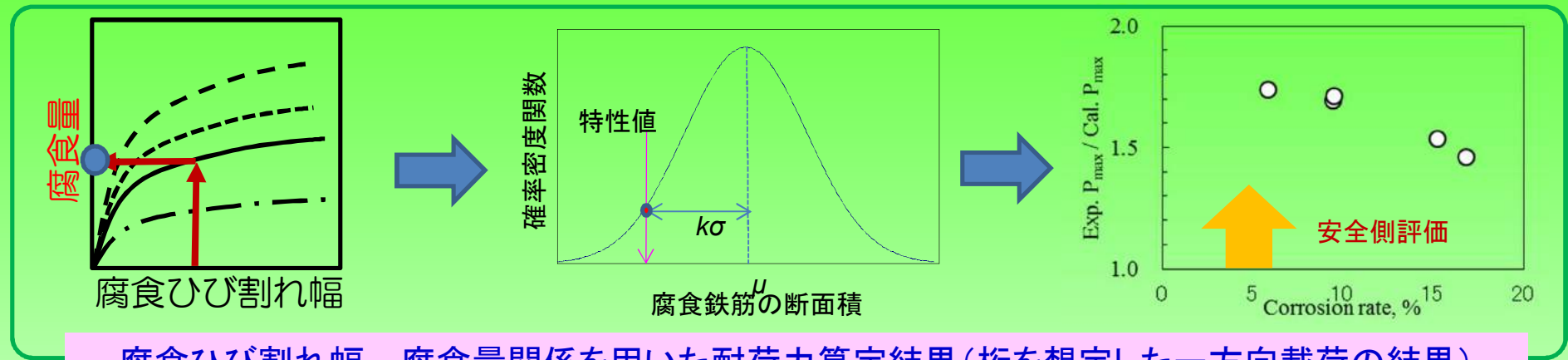


内部進展ひび割れ: 内部のひび割れに腐食が消費され危険側の評価に

・デジタルイメージコリレーション (面内・面外ひずみ計測)
・レーザー変位計による変形計測 (ロングレンジ版で最大3.5m)

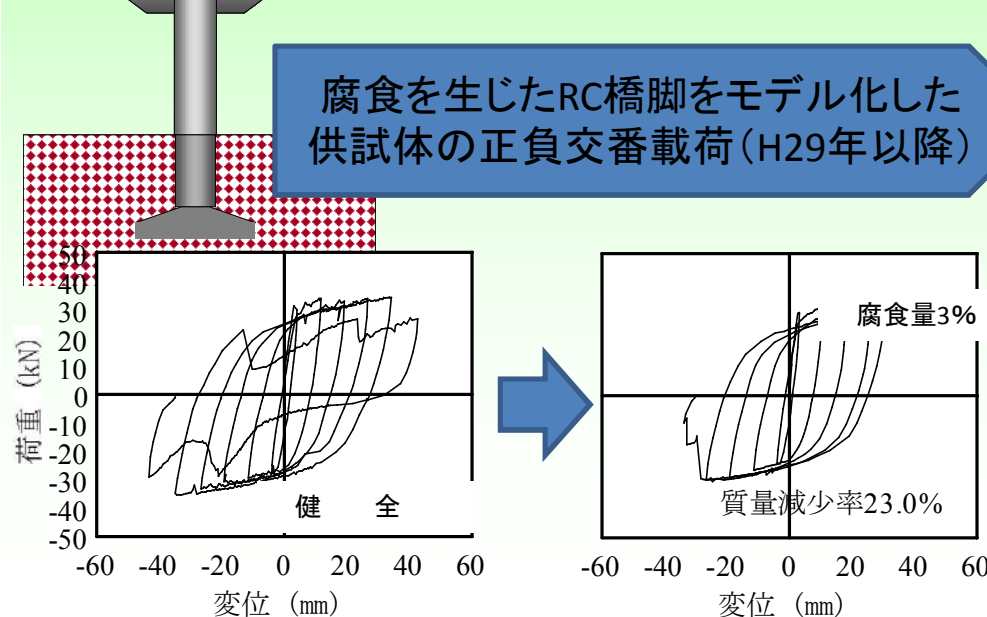


腐食の変動特性を用いた耐荷・変形性能スクリーニング



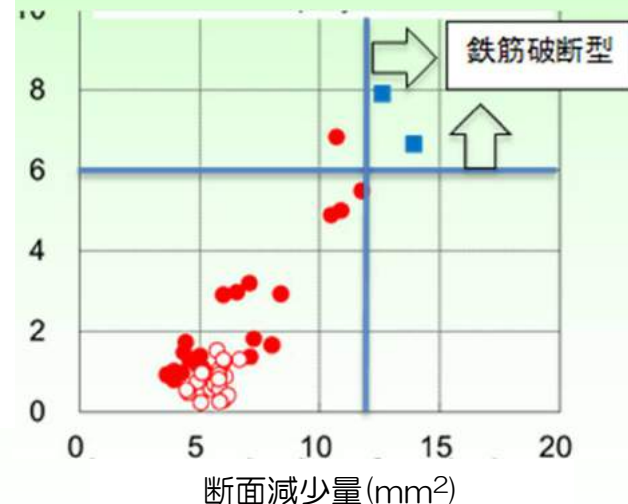
腐食ひび割れ幅－腐食量関係を用いた耐荷力算定結果(桁を想定した一方向载荷の結果)

腐食とそのばらつきの増加で、**主筋破断**による脆性的な破壊、**靱性低下**の可能性



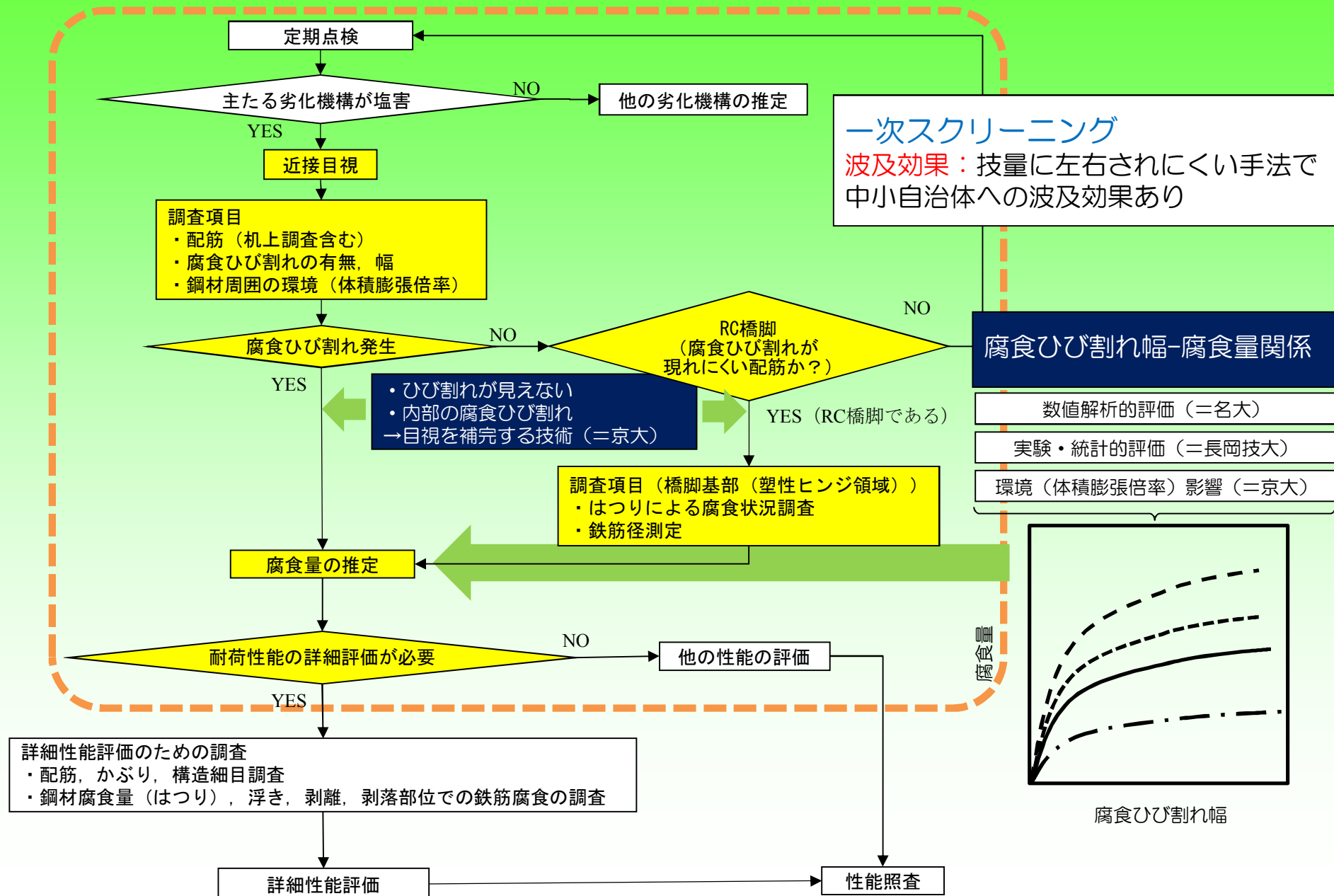
腐食を生じたRC橋脚をモデル化した供試体の正負交番载荷(H29年以降)

鉄筋断面積の標準偏差 (mm²)



鉄筋腐食量の変動で破壊形式を推測

次世代型目視点検フロー



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

- **アルカリシリカ反応**



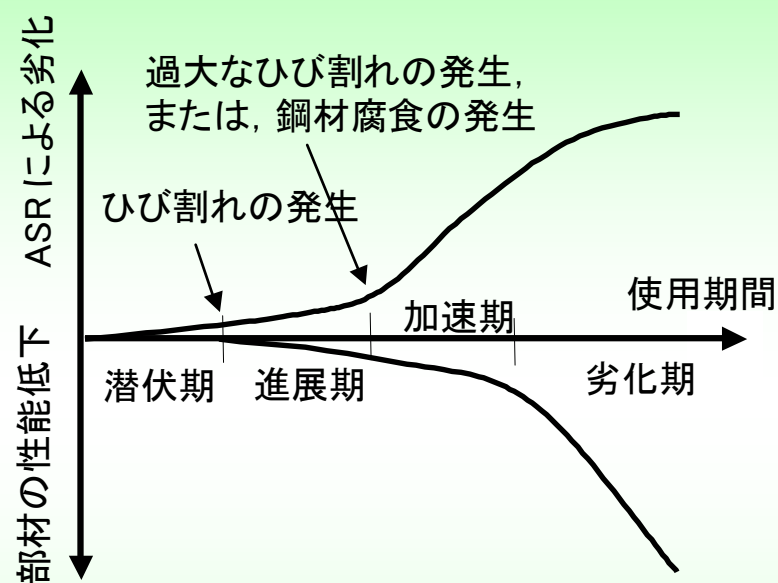
アルカリシリカ反応



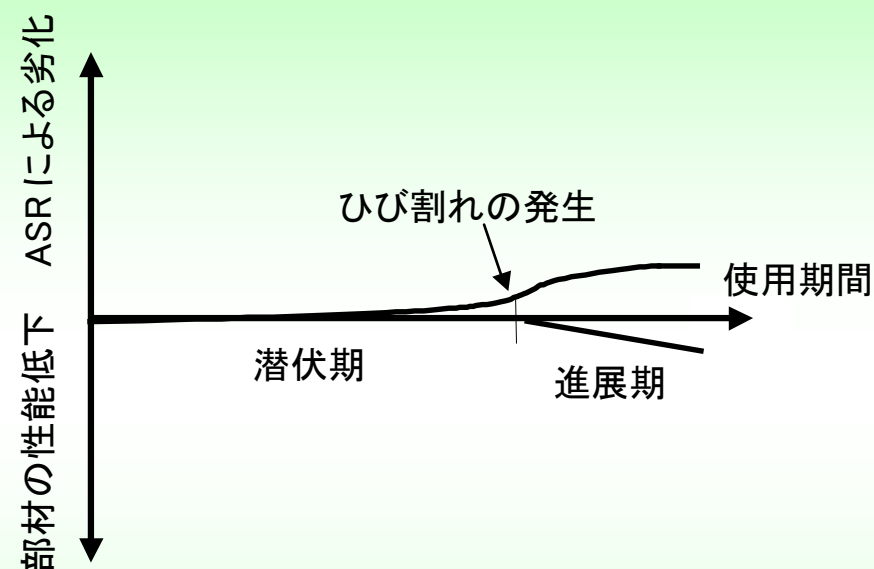
鉄筋破断

アルカリシリカ反応に対する構造物の維持管理

◆アルカリシリカ反応による劣化進行過程



(a) コンクリートが有する膨張性が大きい場合



(b) コンクリートが有する膨張性が小さい場合

解説 図 13.1.1 ASR による劣化進行過程の概念図

◆ASRでは、維持管理区分Aの適用は困難

構造物の外観上の グレードと性能低下

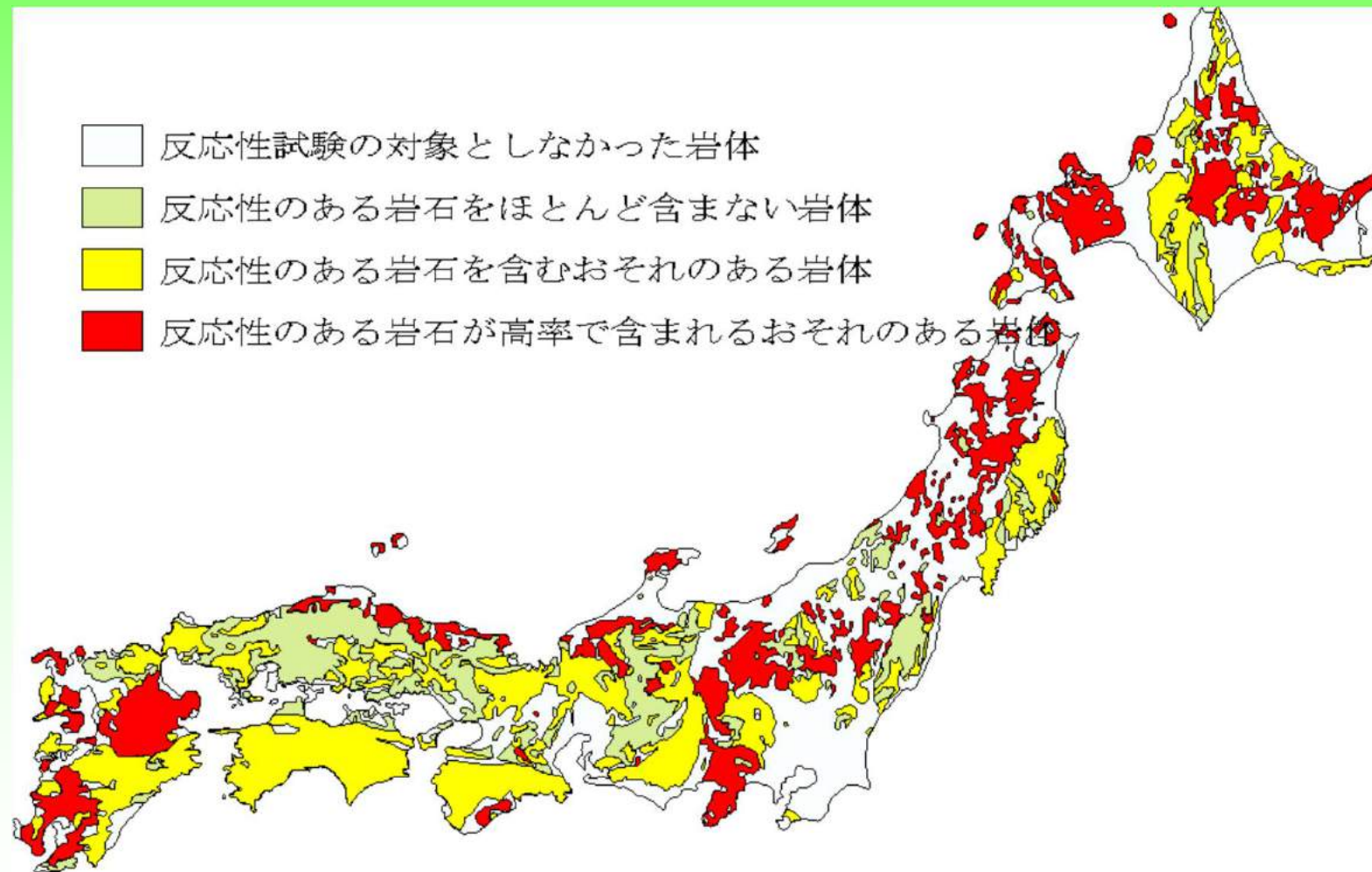
解説 表 17.4.1 構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下

構造物の外観上の グレード	安全性能	使用性能	第三者影響度 美観・景観
状態Ⅰ(潜伏期)	—	—	—
状態Ⅱ(進展期)	—	水密性などの低下	美観の低下
→ 状態Ⅲ(加速期)	じん性の低下 ・鋼材の腐食 耐荷力の低下	・ひび割れ 鋼材の腐食発生 ・ひび割れ	・ひび割れ ・変色 ・ゲルの滲出
状態Ⅳ(劣化期)	本来の照査: 耐荷力 簡易な照査: コンクリートの強度低下, 鋼材の付着力低下, 鋼材の降伏および破断	構造物の変位・変形 ・たわみ ・ずれ ・段差	第三者への影響 ・はく離 ・はく落

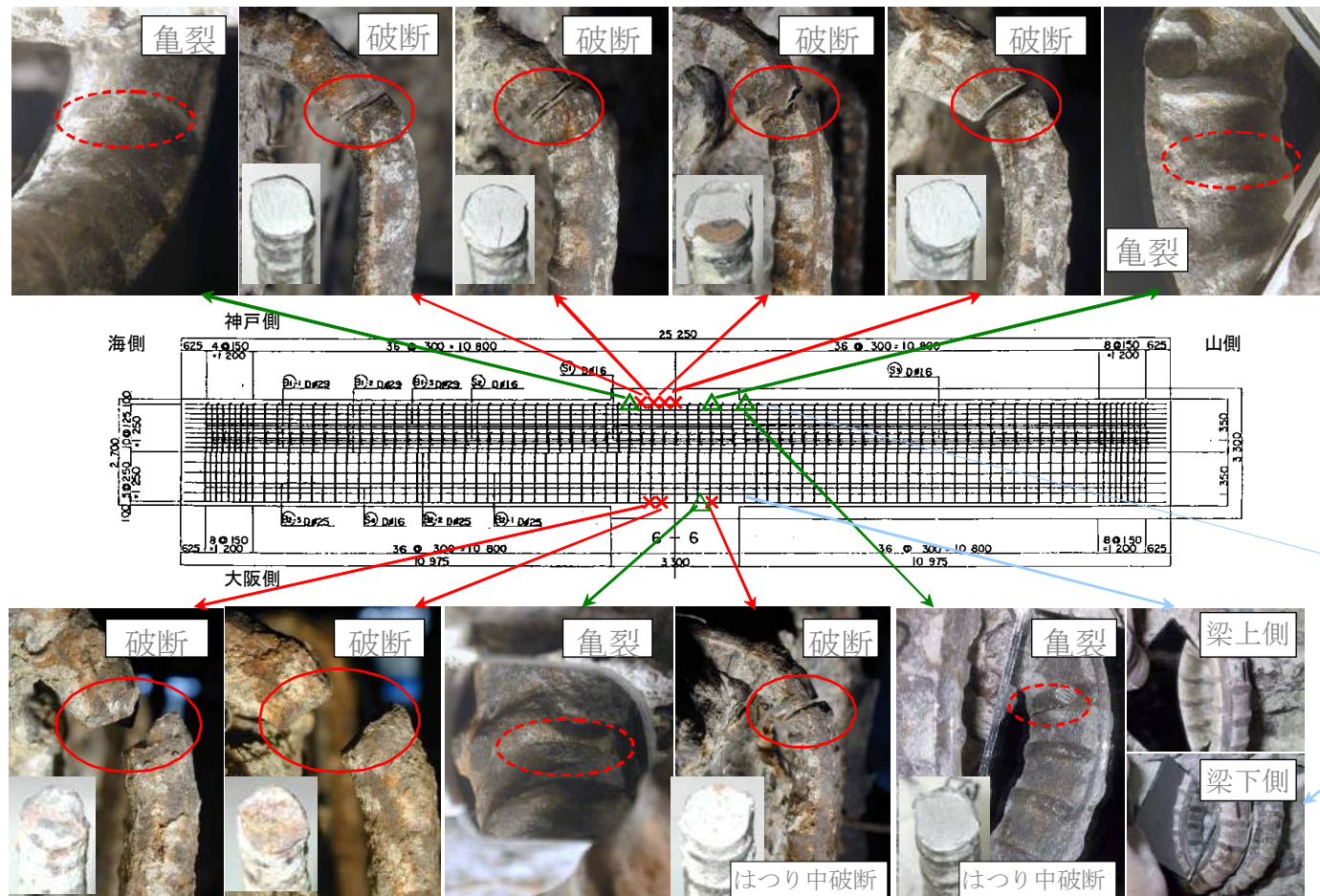
割れとゲル



反応性骨材の分布状況

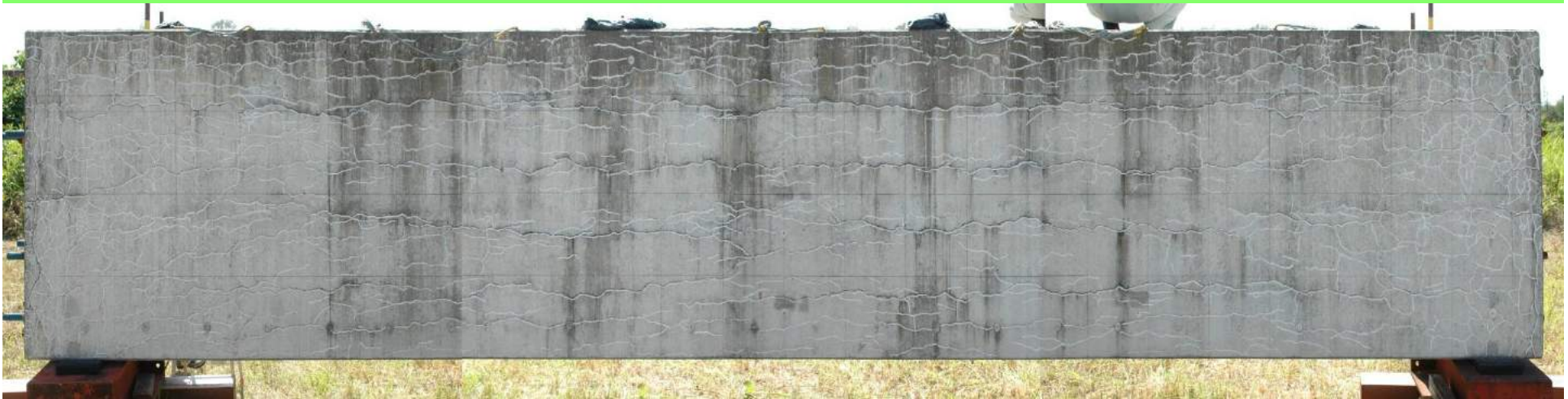


鉄筋破断の事例(橋脚梁部)



大型ASR供試体の載荷前後

($1.20 \times 1.25 \times 7.50\text{m}$)

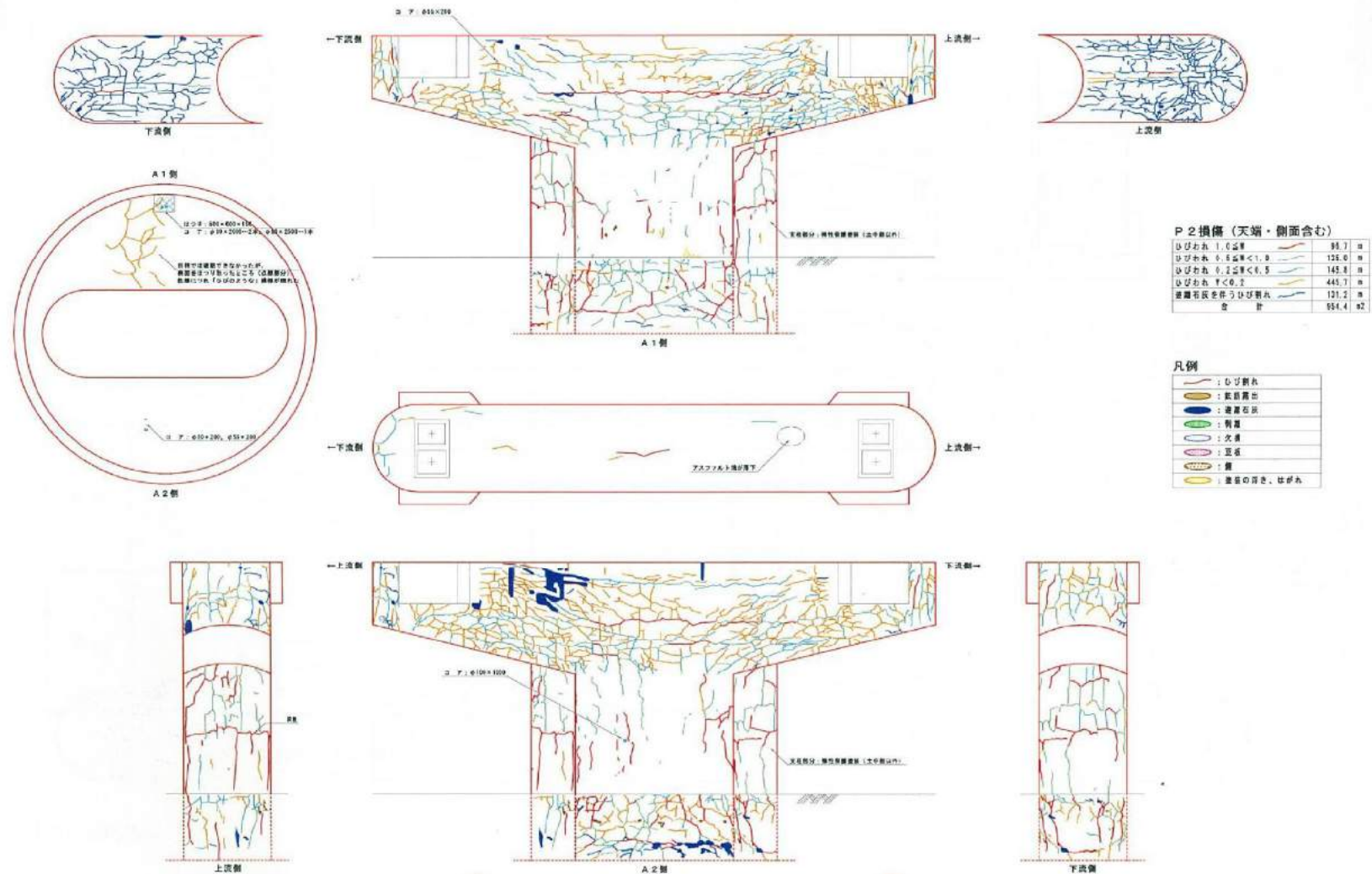


ASR供試体におけるひび割れ発生



<ASR損傷状況>

P2橋脚

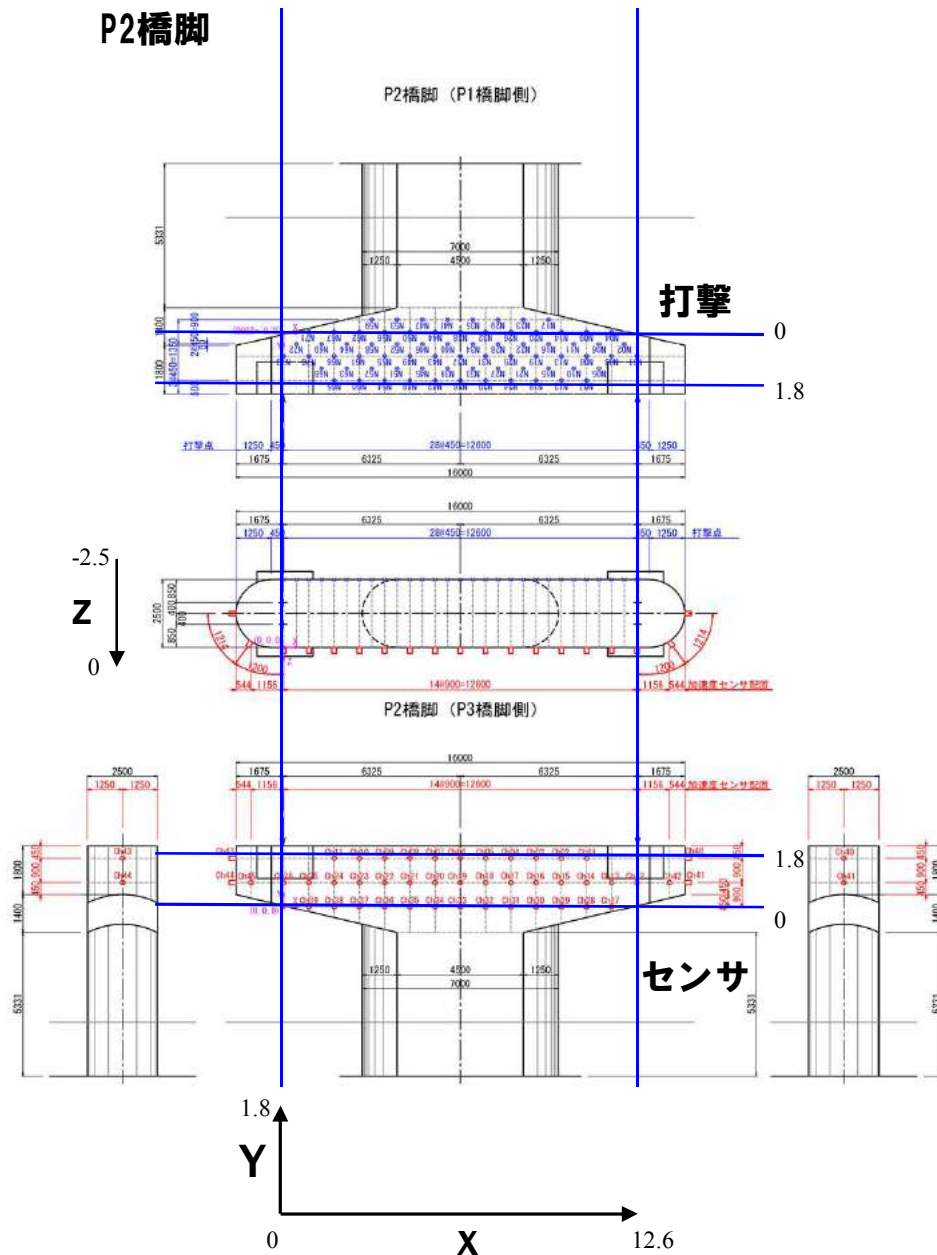


P2橋脚

P2橋脚 (P1橋脚側)

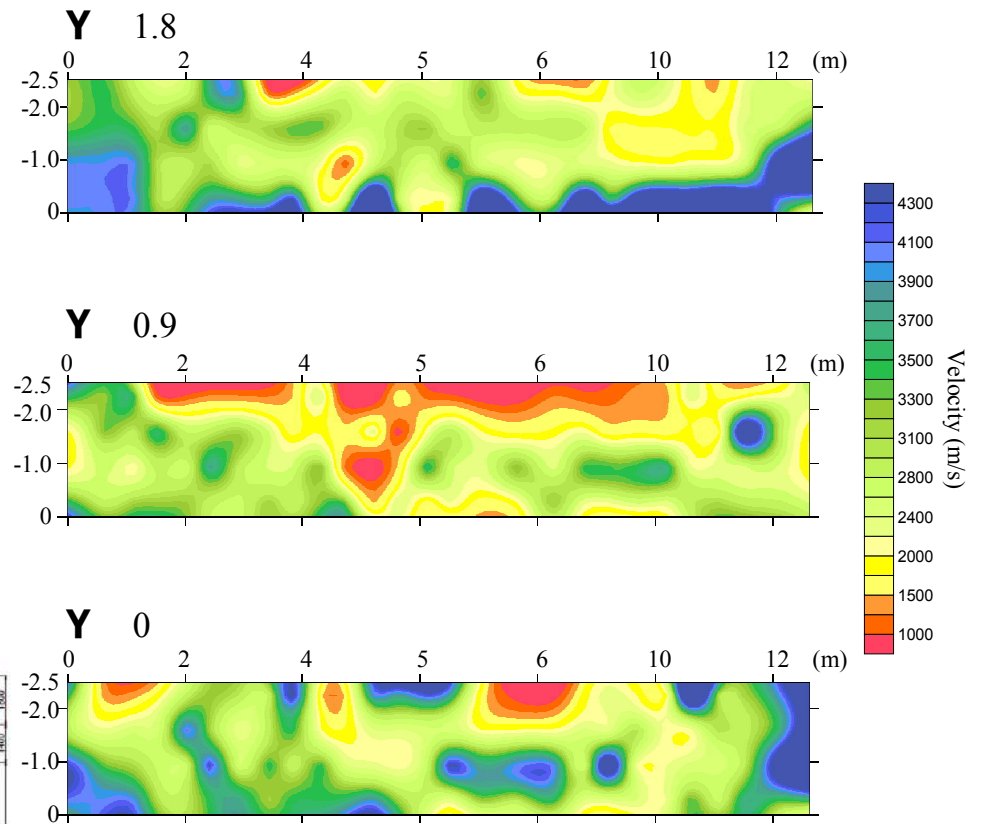
打撃

センサ



打撃(ハンマサイズφ100)

水平断面図



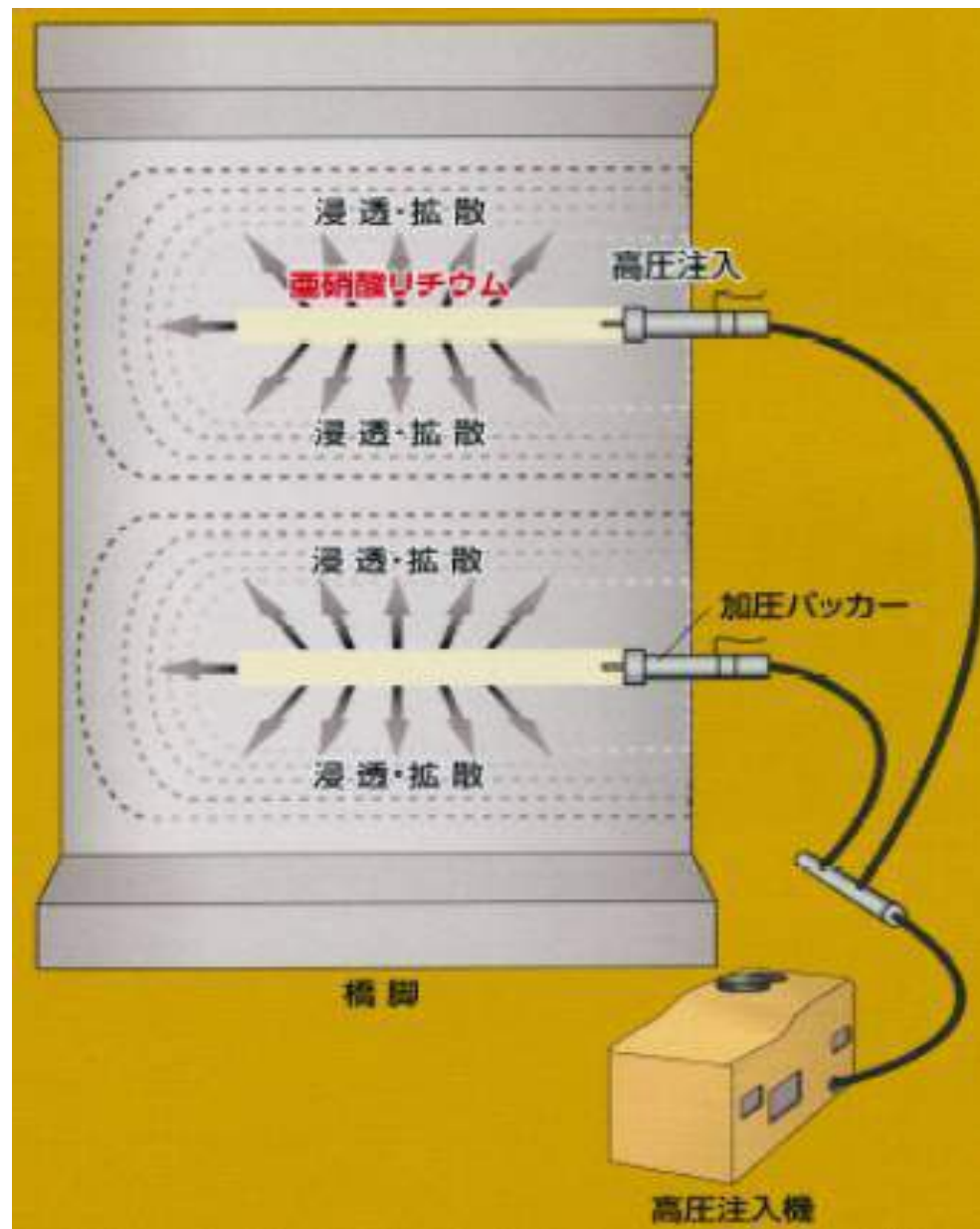
- 全体的に低い速度構造となる
- 大きなき裂が見られているところで特に低い速度構造が見られる
- 中央部 (x:4-5 m, y:0.9 m, z:0.5—2) に特徴的な低速度領域が見られる

アルカリシリカ反応に対する構造物の維持管理

◆補修，補強

解説 表 13. 4. 2 補修，補強に期待する効果と工法の例

期待する効果	工法例
ASR の進行を抑制	水処理（止水，排水処理），ひび割れ注入，表面処理（被覆，含浸）
ASR の膨張を拘束	プレストレスの導入，鋼板・PC・FRP 巻立て
劣化部を取り除く	断面修復
鋼材の腐食抑制	ひび割れ注入，ひび割れ充てん，表面処理（被覆，含浸）
第三者影響度の除去	はく落防止
耐荷力の回復・向上	鋼板・FRP 接着，プレストレスの導入，増厚，鋼板・PC・FRP 巻立て，外ケーブル



亜硝酸リチウム圧入

- **グラウト問題**

グラウト技術の変遷

	配合	管理	施工	構造	目地	材料	出来事
1960年代	ブリーディングタイプ	ポリエチレン袋		上縁定着	モルタル目地		
1970年代							
1980年代							英国でのプレキャスト桁落橋事故(1985)
1990年代	ノンブリーディングタイプ	鉛直管試験					横締め鋼材の破断事故(1994)
2000年代			流量計の使用	桁端定着	エポキシ接着	プレグラウト鋼材	妙高大橋のPC鋼材破断
2010年代			真空ポンプ			プラスチック製シース	

PCグラウト充填不足発生リスク(案)(共通事項)

NEXCO中日本寺田氏提供

	リスク	対象部位	リスク要因	リスクの発生確率				背景
				～昭和61年 (1986年)	昭和62年～平成8年 (1987年～1996年)	平成9年～平成14年 (1997年～2002年)	平成15年～ (2003年～)	
共通事項	PCグラウト 未充填	全体	品質管理 (施工不良)	高	中	低	低	1993年 PCグラウトの重要性に言及 1996年流量計、講習会受講
			グラウトホース 潰れ・はずれ	高	～1993年 高	1994年～ 低	低	1993年 ビニールホースからテトロンブレード ホースへ変更が記載
	PCグラウト 充填不足	(曲げ下げ部、 定着部)	ブリーディングの有無 (空隙の発生)	高	高	中	低	1996年 ノンブリーディングが望ましい 2002年 ノンブリーディングが必須 (旧PCグラウトの使用禁止) 2000年代よりプレミックス材の使用
			PCグラウトの先流れ (空隙の発生)	高	高	中	低	1996年 粘性型PCグラウトが記載 2002年 高粘性・低粘性PCグラウトが記載
		T桁上縁 箱桁上縁	上縁定着 (定着部からの浸水)	高	～1994年 高	1995年～ 中	低	支間長20m、28mで定着方法の使い分け T桁は、1994年以降全て端部定着
		全体	シース径の拡大 鋼より線の使用	高	中	低	低	シース径の拡大による充填性向上。
	PC鋼材腐食	セグメント 継目部	シース不連続 (PCグラウトの漏れ)	高	中	中	低	1986年 注意喚起が記載される。 2000年頃 セグメントカップラーの適用
		定着部 ウェブ	グラウトホースの処理 (ホースに沿った漏 水)	低	高	低	低	1986年～1996年 施工マニュアルに、グラウトホースの地覆へ集 約を推奨
		桁端、路面	定着部あと処理 (定着部の腐食)	高	中	低	低	1986年簡単な防水処理推奨 1996年後あと処理強化
		床版、桁	床版防水工設置の有 無	高	中	低	低	1972年道路橋示方書 必要に応じて防水層を設置 1990年道路橋仕様書 塩害地域、ひび割れが生じやすい箇所 打ち替え、帯水箇所の設置の追記 1998年JH設計要領 施工標準の設定 2002年道路橋示方書 防水工原則設置
		横締め せん断	プレグラウトPC鋼線の 採用	高	高	低	低	(高速道路の場合) 1998年床版にプレグラウト鋼材採用 1999年全面的にプレグラウト鋼材の採用

PCグラウト充填不足発生リスク(PC鋼棒に関する項目)

	リスク	対象部位	リスク要因	リスクの発生確率				背景
				～平成2年 (～1990年)	平成3年～平成6年 (1991年～1994年)	平成7年～平成10年 (1995年～1998年)	平成11年～ (1999年～)	
PC鋼棒に関する事項	PCグラウト未充填	横締めせん断	品質管理 (施工不良)	高	中	低	低	1993年 グラウトの重要性に言及 1996年流量計、講習会受講
			シースと定着体の 接続方法 (シースの外れ)	高	高	中	低	1990年定着部・シース取り付け部延長 7mm→35mm 1994年定着具とシースのジョイント使用
		斜めせん断	鋼棒の設置方法 (シースの潰れ、不連続)	高	低	中	低	～1980年 斜め配置 1980年代～ 鉛直配置 2002年～ PC鋼棒無
	PCグラウト充填不足	横締めせん断	シース径 (シース内空隙)	高	高	中	低	1994年径32mmPC鋼棒シース38mm→39.3mm 1998年径32mmPC鋼棒シース39.3mm→45mm 2005年鋼棒突出防止機能追加
			シース肉厚 (シースの潰れ)	高	高	中	低	1994年径26mmPC鋼棒 肉厚0.25mm、0.32mm 1994年径32mm鋼棒 肉厚0.25mm→0.27mm(0.32mmもあり)
		カップラー部	カップラー径 (カップラーのPCグラウト充填性)	高	高	高	中	1998年 径26mmカップラー径50mm→シース径58～59mm 径32mmカップラー径60mm→シース径68～70mm 2000年 下り勾配のカップラーシースに排気口 (従来25mに1か所)
			緊張余長 (カップラーの移動制限)	高	高	中	中	1993年カップラ伸長+19cm規定 1992年道路公団透明カップラー使用

PC橋のPC鋼材破断が懸念

1985年 イギリス



1992年 ベルギー



2005年 アメリカ



国内でも

1989年 新菅橋



1990年 島田橋



落橋に至らずともPC鋼材破断事例多数

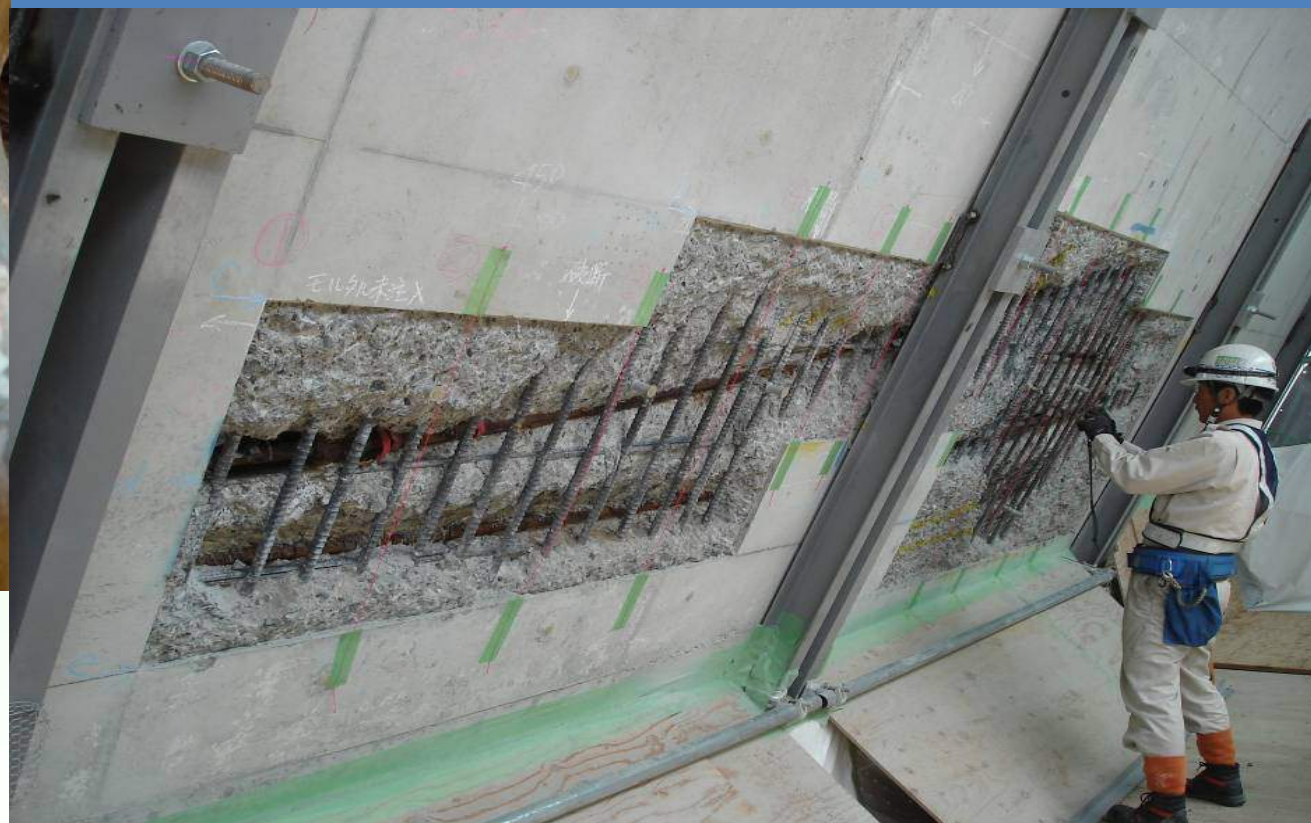


既往のPC鋼材破断の調査方法

削孔調査



はつり調査



既往の非破壊検査

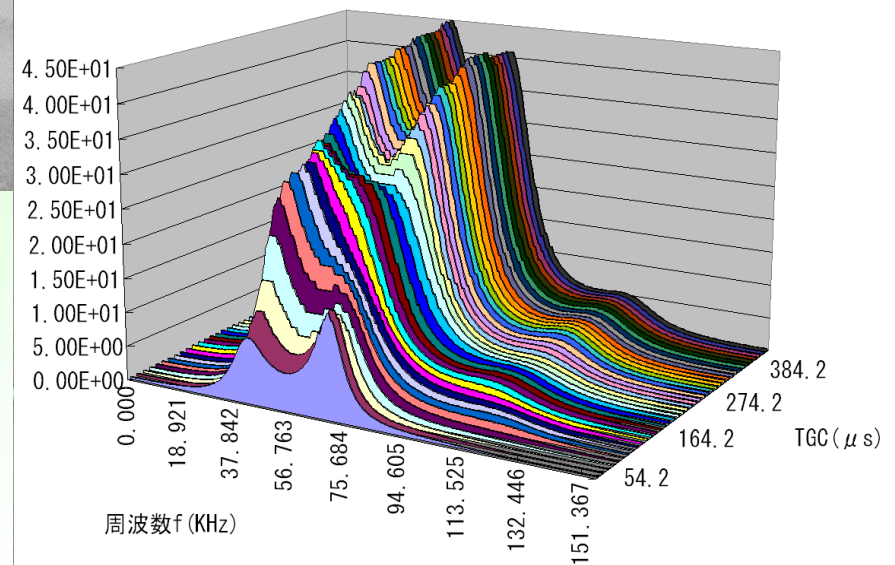
X線透過法



打音振動法-グラウト有無



広帯域超音波法-グラウト有無



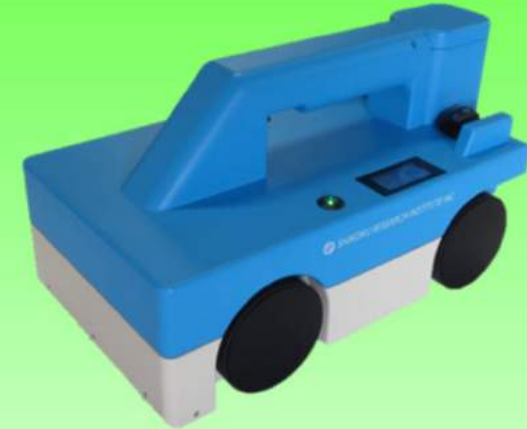
漏洩磁束法によるPC鋼材破断調査法



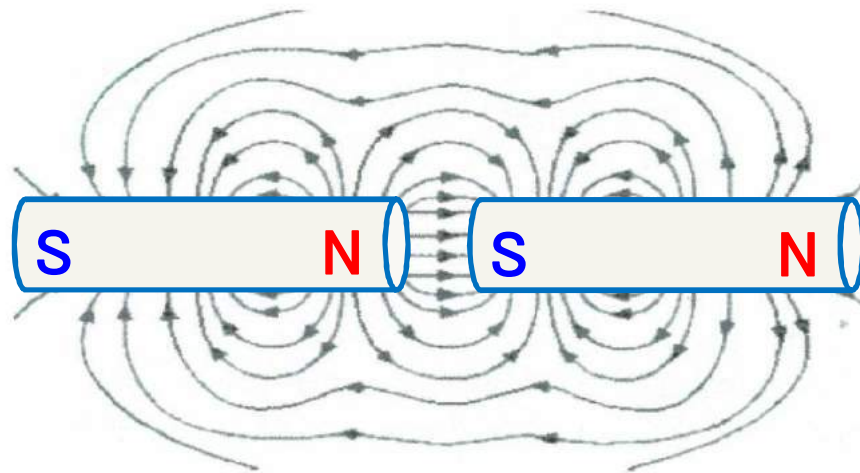
磁石ユニット

1 T(=10⁴ G)
10⁻¹ T(=10³ G)
10⁻² T(=10² G)
10⁻³ T(=10 G)
10⁻⁴ T(= 1 G)

地磁気

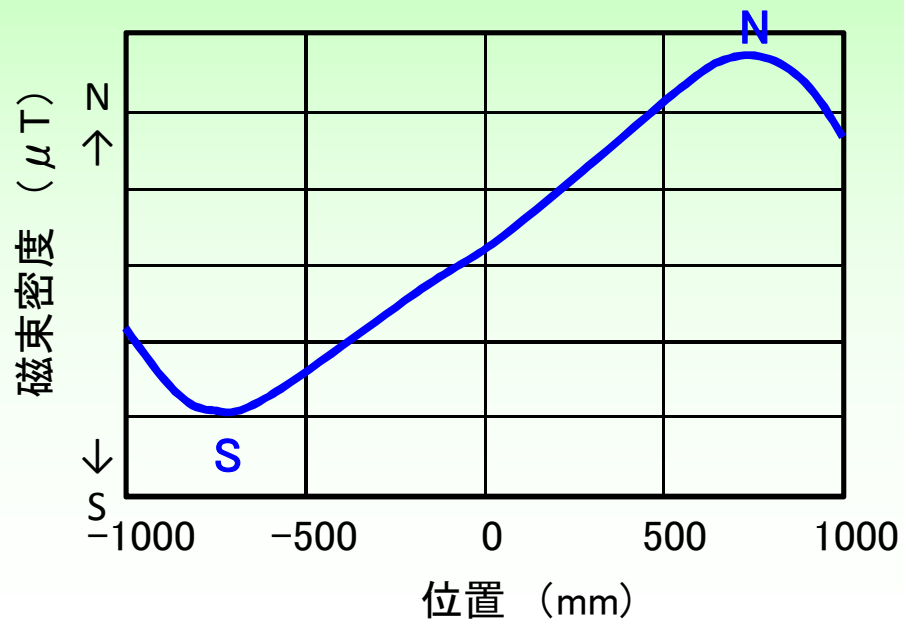
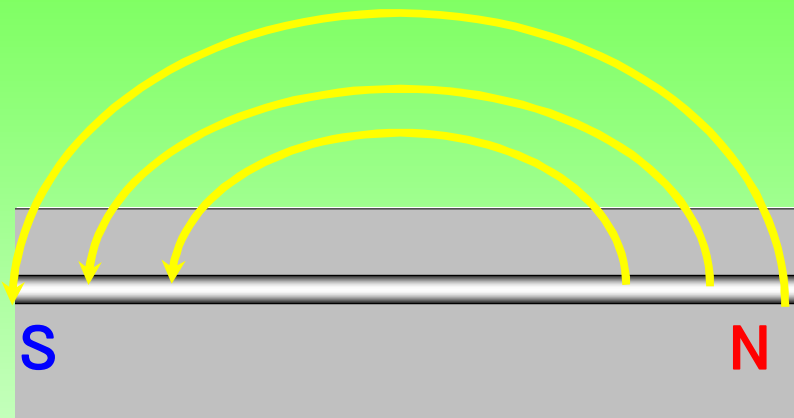


磁気計測ユニット

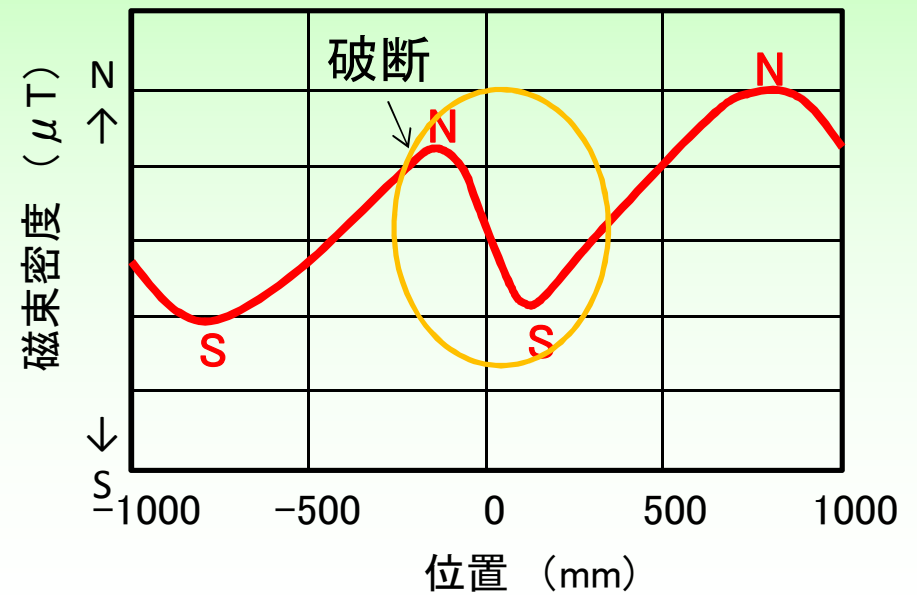
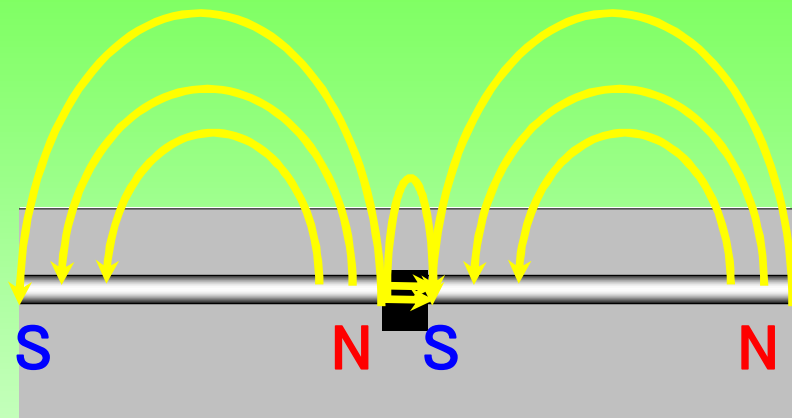


磁化後の磁束線イメージ

PC鋼材破断なし



PC鋼材破断あり



実橋(PCT桁橋)での検証

実際の状況（はつり後）



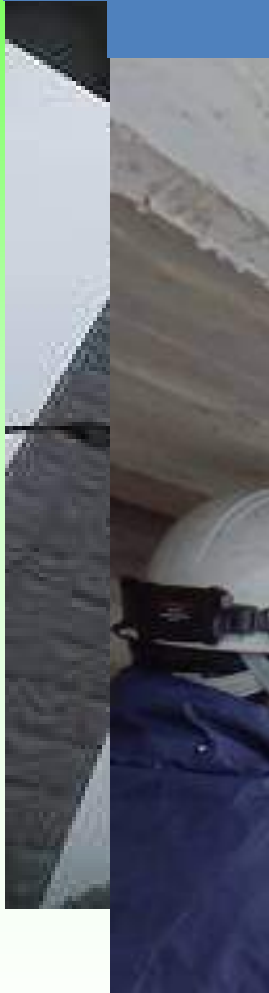
適用事例

DC箱桁（宙々 新浜勾川橋）

DCT桁（五洲地七敷橋）

DCII形桁（巨野旧）

PCI桁（中国道）



・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

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 55



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 Research Unit