

# コンクリート構造物の 補修・補強について

-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
- 補修・補強
  - 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



日ノ岡第11号橋

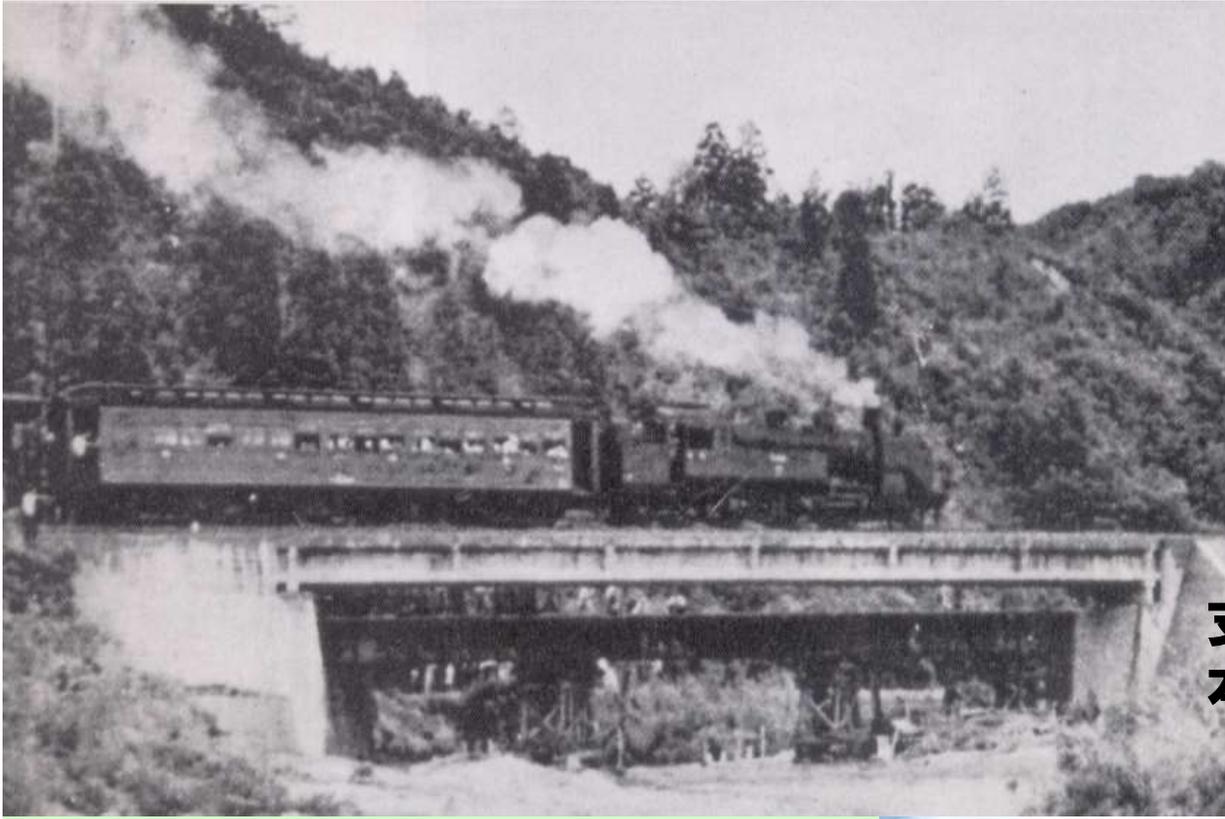
- ・日本初の鉄筋コンクリート橋
- ・1903年7月完成
- ・設計者 田辺朔郎

2017 04 30



十郷橋  
(1953)  
福井県



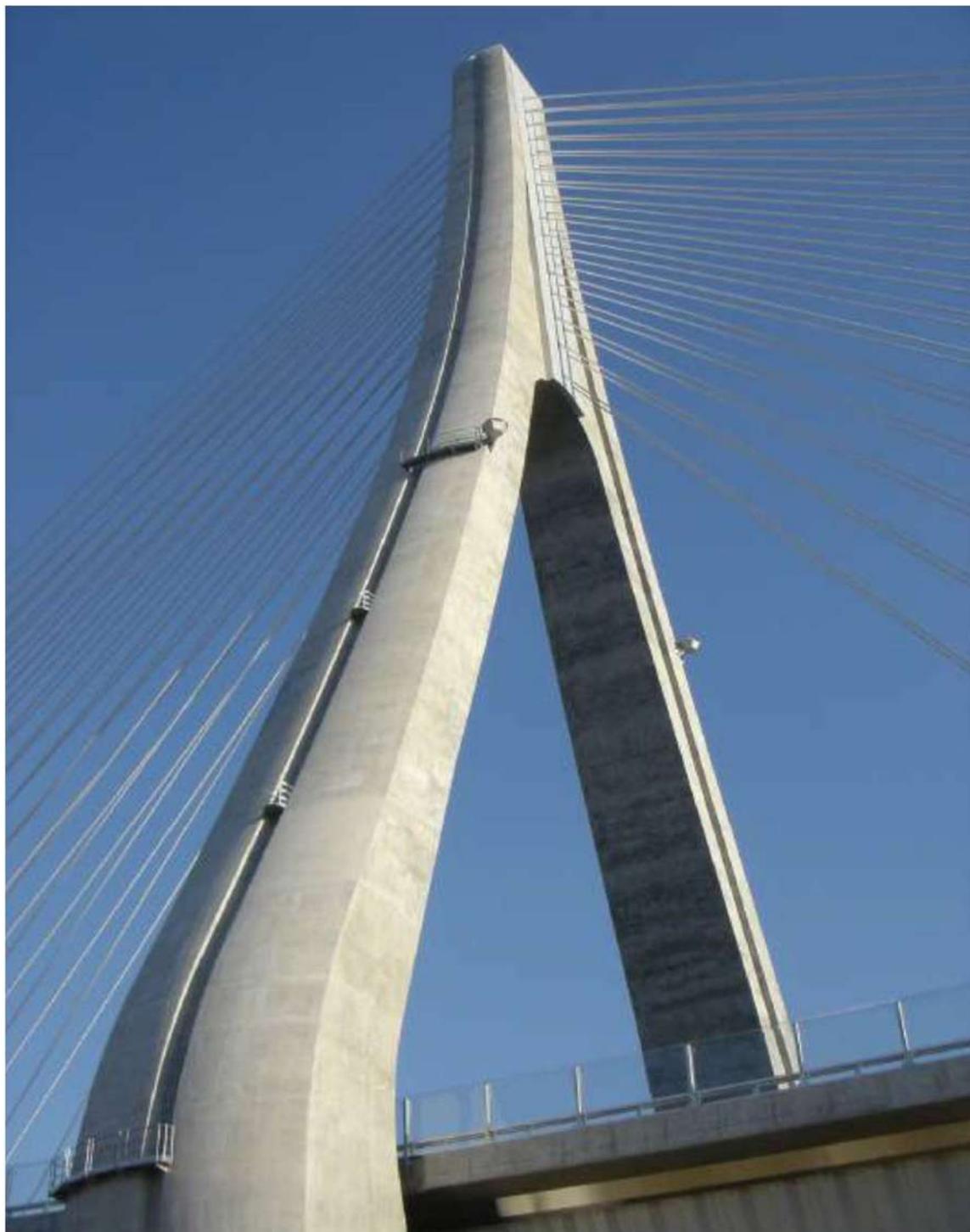


支間30m  
本格的ポストテンション橋梁

第一大戸川橋  
(1954)  
滋賀県



丈夫で  
美しく  
長持ち





A photograph showing the underside of a bed board. The concrete surface is heavily damaged, with large areas of peeling and crumbling. The remaining concrete is dark and uneven, with visible layers and textures. The background is a plain, light-colored wall.

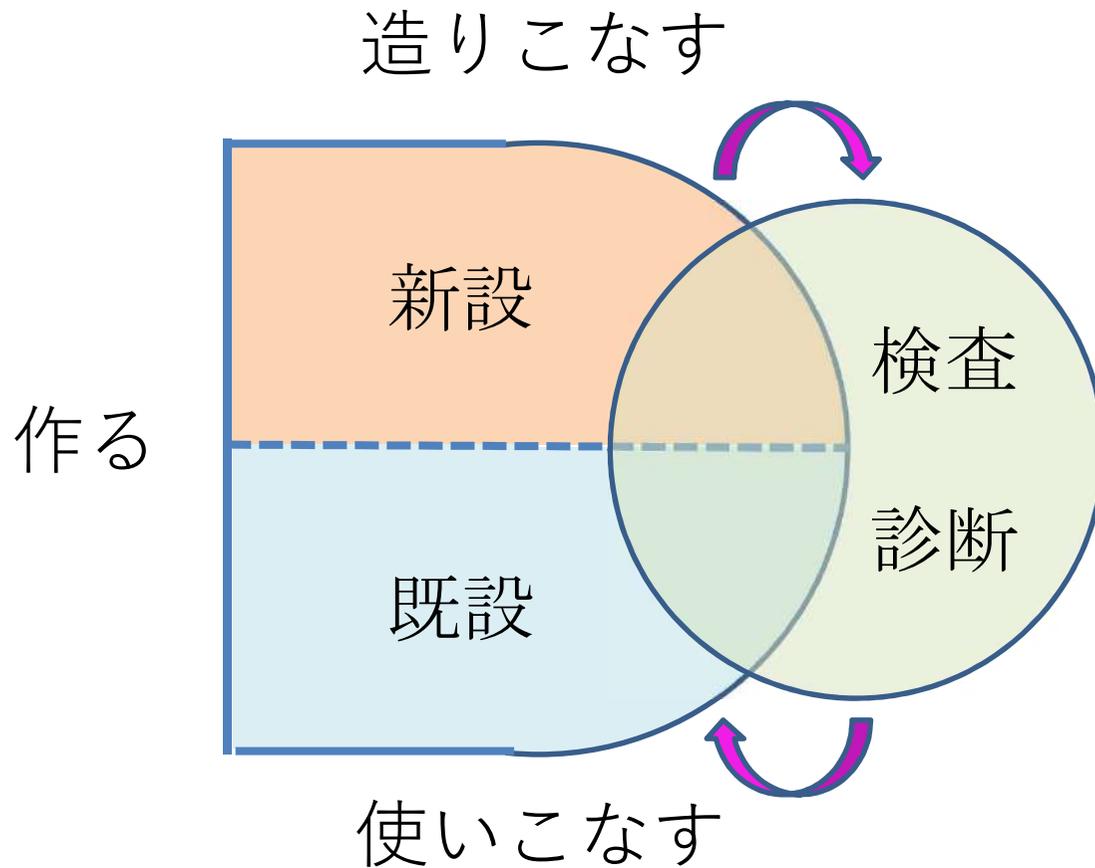
床版下面コンクリートの剥落

# 橋脚のアルカリシリカ反応



• 補修・補強

# 建設材料技術の位相

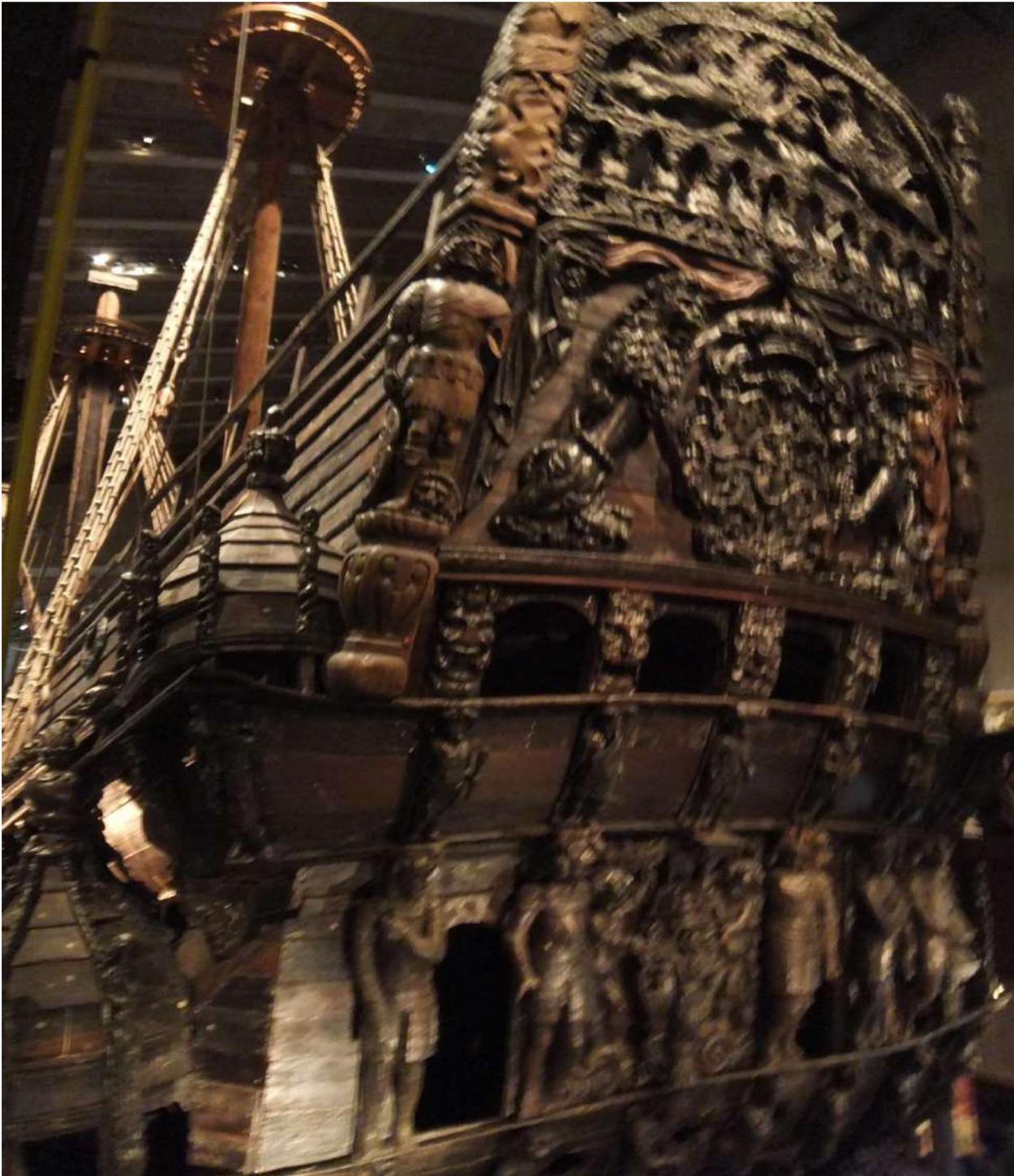


種々の材料レベルで、  
強さ(寸法効果)  
変形/剛性, 振動  
靱性  
破壊形式  
(ひび割れ・欠陥)  
耐久性:  $R_t > R_s$   
現場施工性  
どのレベルが適切か?

## 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 13



V a s  
a 号

300年以上  
海水中

# 五劫の 擦り切れ

十里四方の大岩に、  
三千年に一度天女が舞  
い降り、着ている「羽  
衣」でその岩を擦る。  
この岩が擦り切れて無  
くなってしまふまでの  
時間。

= 「劫」



# 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

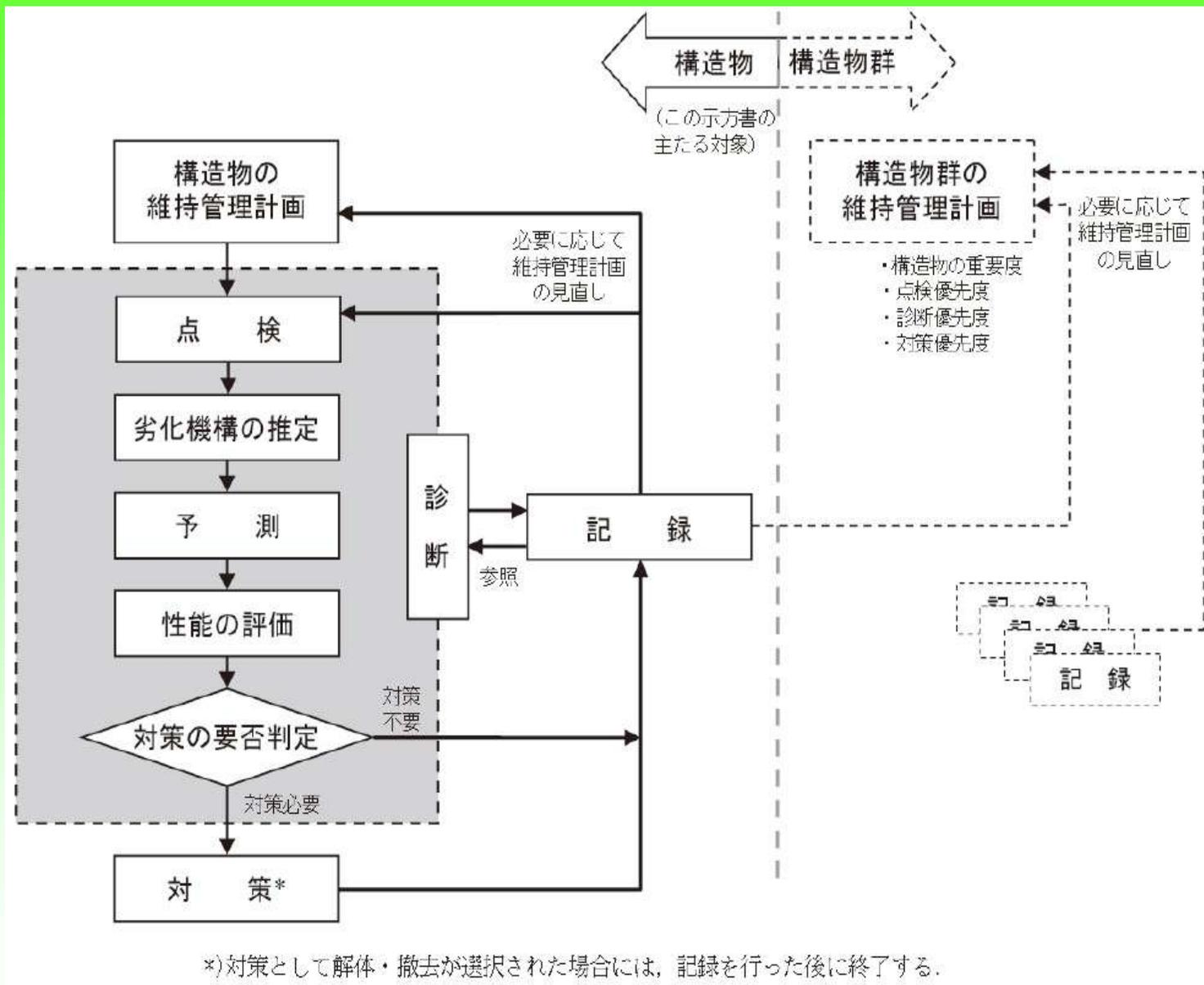
東北本線



# 劣化（≡古い基準）と耐震・耐荷性能

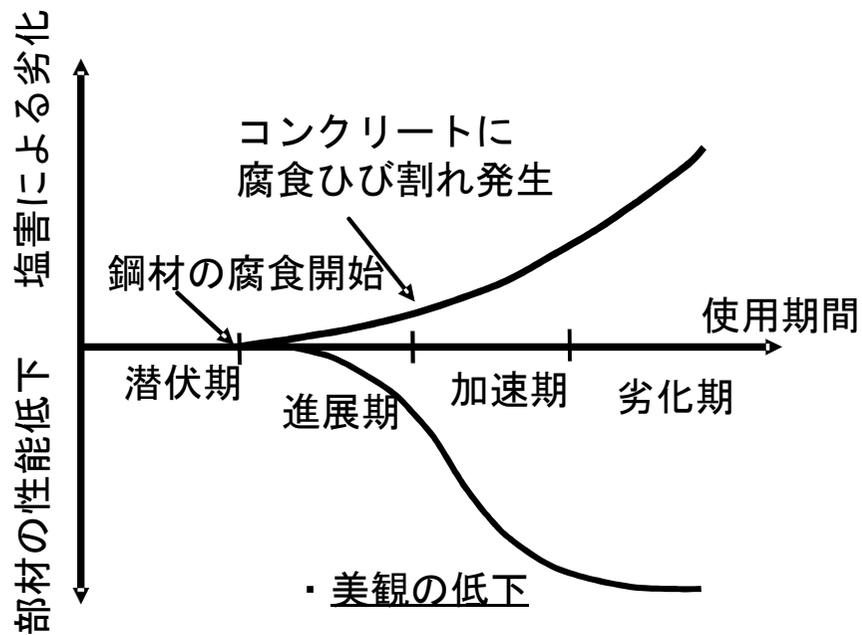
地震で壊れるのではなく、地震をきっかけに劣化で壊れる！



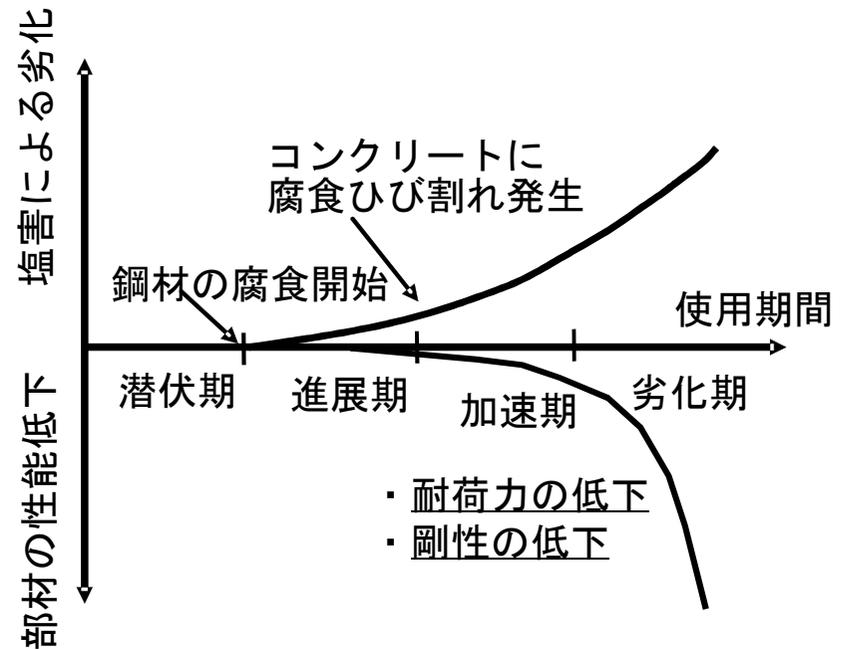


# 維持管理の流れ

- 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

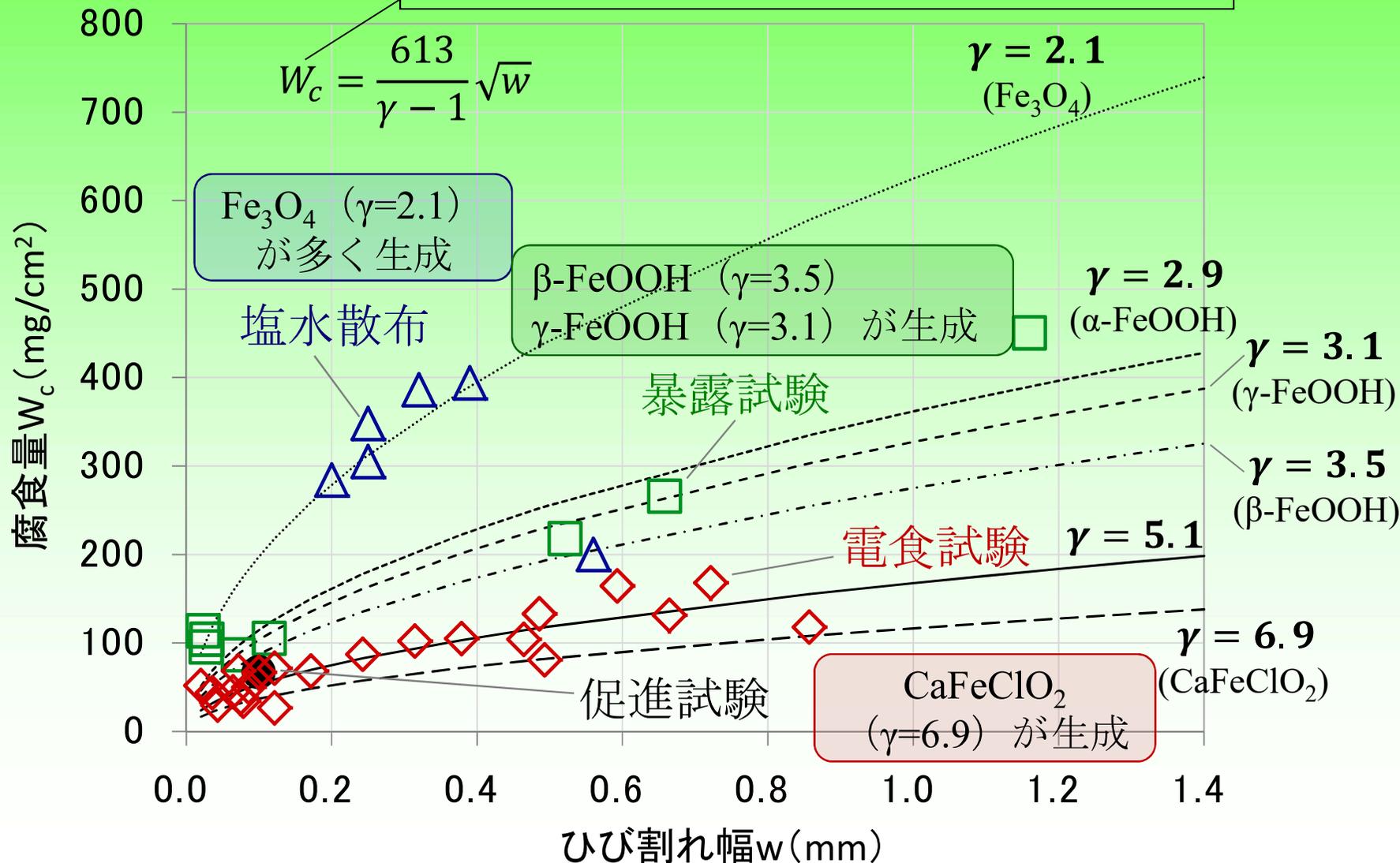
近接目視点検/5年  
→次世代目視点検

SIPでの提案

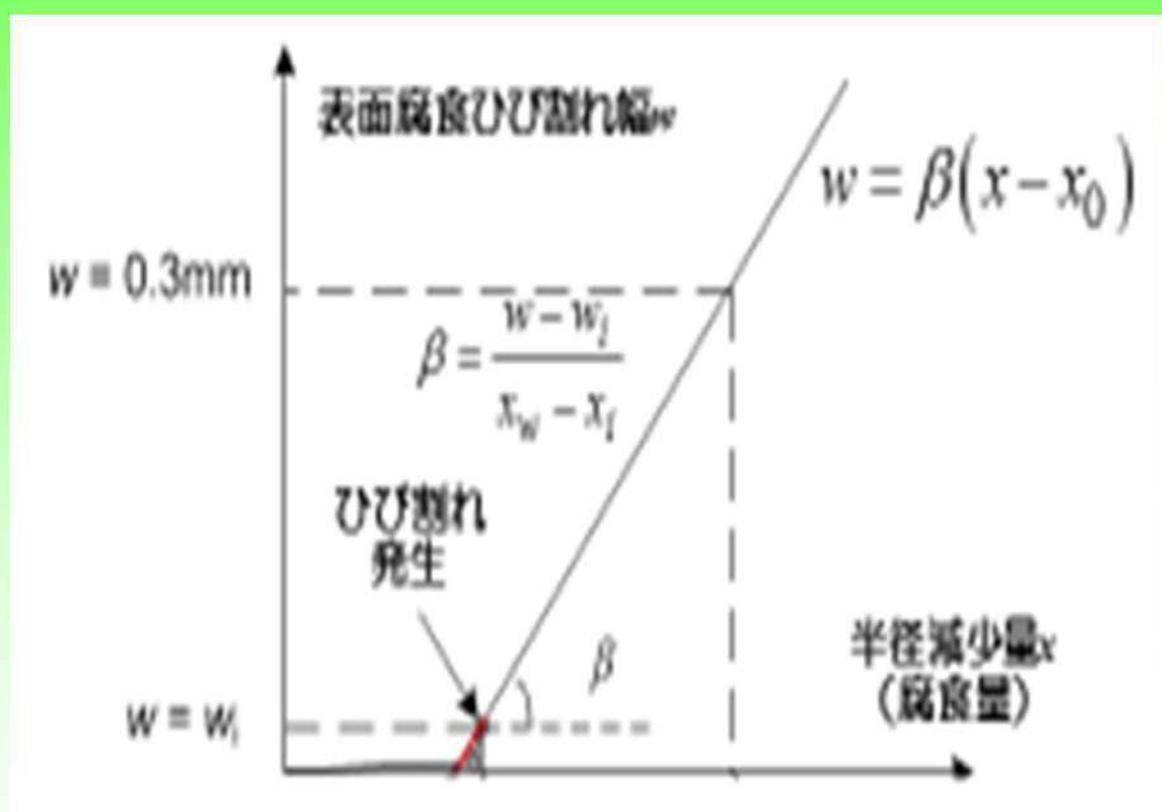
### 外観上のグレードと性能低下の要因

外観上のグレード	劣化過程	耐力・じん性	変形・振動	剥離・剥落	ひび割れ・汚れ
グレードI	潜伏期	—	—	—	—
グレードII	進展期	—	—	—	—
グレードIII-1	加速期前期	—	—	・ひび割れ, 浮き	・ひび割れ, さび汁 ・剥離, 剥落
グレードIII-2	加速期後期	耐力やじん性の低下 ・鋼材の断面減少 ・鋼材とコンクリートの付着力低下	剛性の低下 ・鋼材の断面減少 ・鋼材とコンクリートの付着力低下	・剥離, 剥落	・鋼材の露出
グレードIV	劣化期	・剥落等によるコンクリート断面の減少	・剥落等によるコンクリート断面の減少		

電食試験で得られた腐食ひび割れ幅-腐食量関係および  
体積膨張倍率を用いて算出



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 ( $\gamma$ -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。ひび割れ発生以後はさびが溶出し、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 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\alpha$ -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 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )





## 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

## 外観上のグレードと標準的な補修工法の例

外観上のグレード	劣化過程	標準的な補修工法例
グレードI	潜伏期	表面処理
グレードII	進展期	表面処理, 脱塩, 電気防食, 断面修復
グレードIII-1	加速期前期	断面修復, 脱塩, 電気防食
グレードIII-2	加速期後期	断面修復 (力学的な性能の回復を含む)
グレードIV	劣化期	断面修復 (力学的な性能の回復を含む)

- アルカリシリカ反応



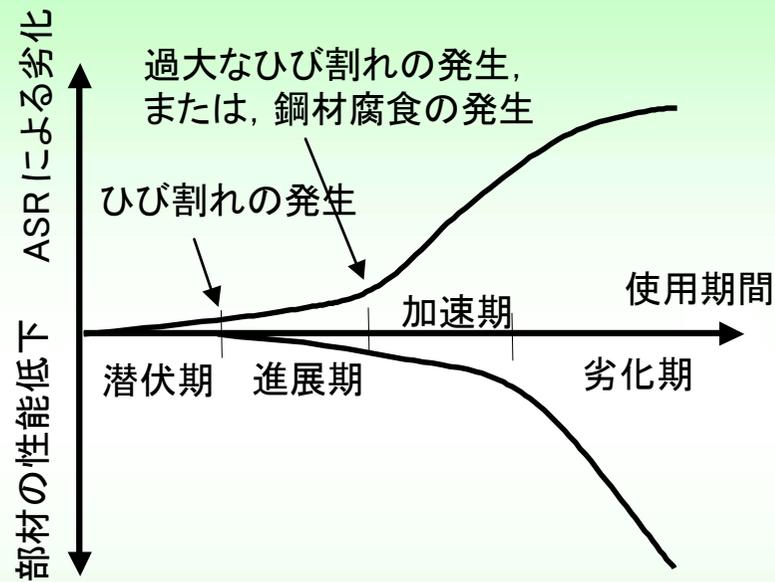
アルカリシリカ反応



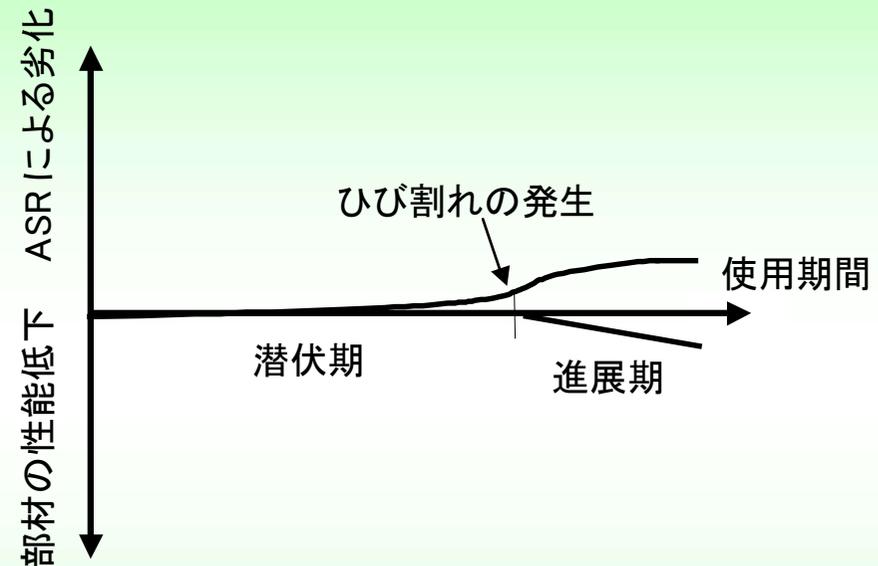
鉄筋破断

# 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

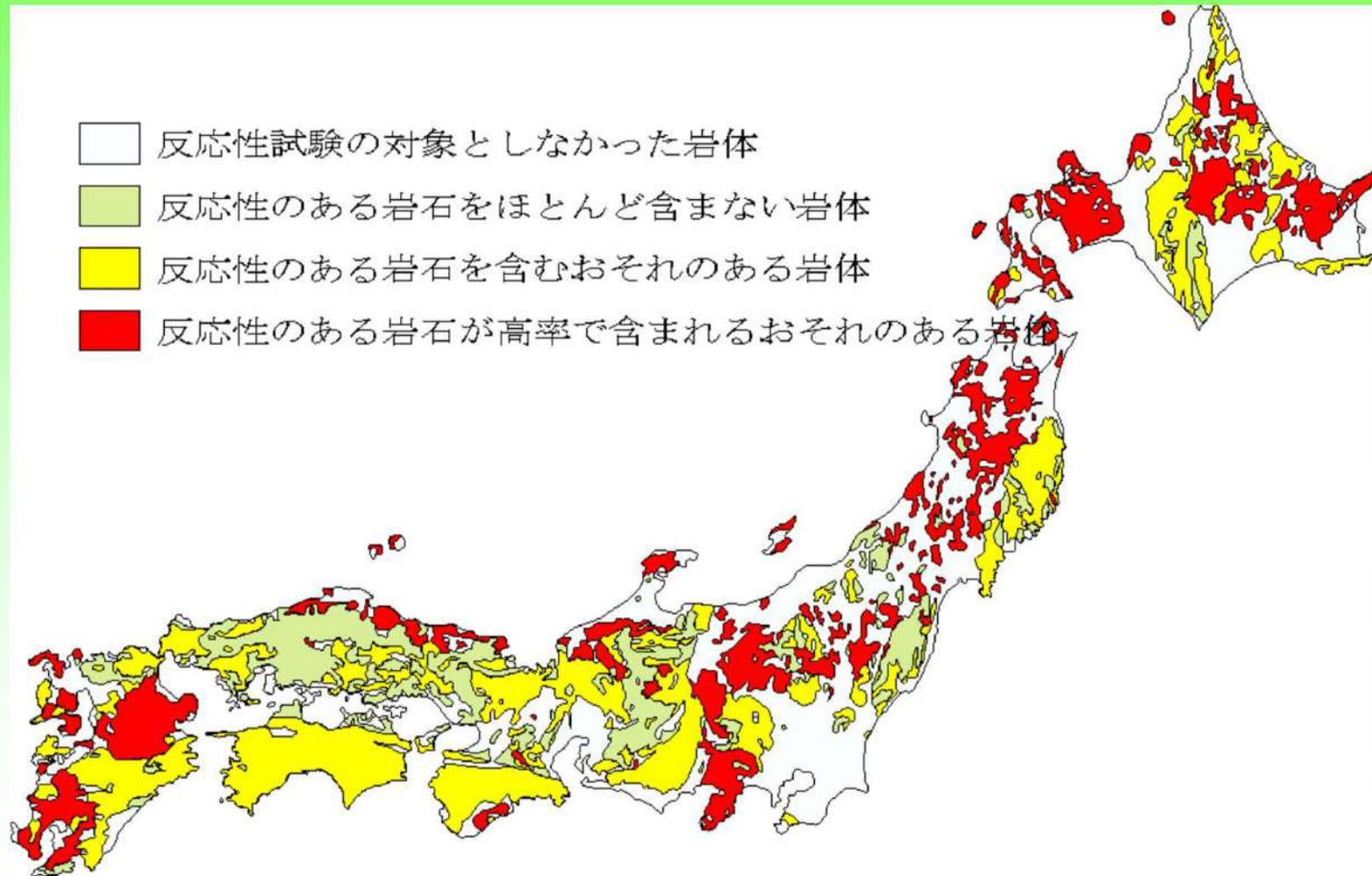


(b) コンクリートが有する膨張性が小さい場合

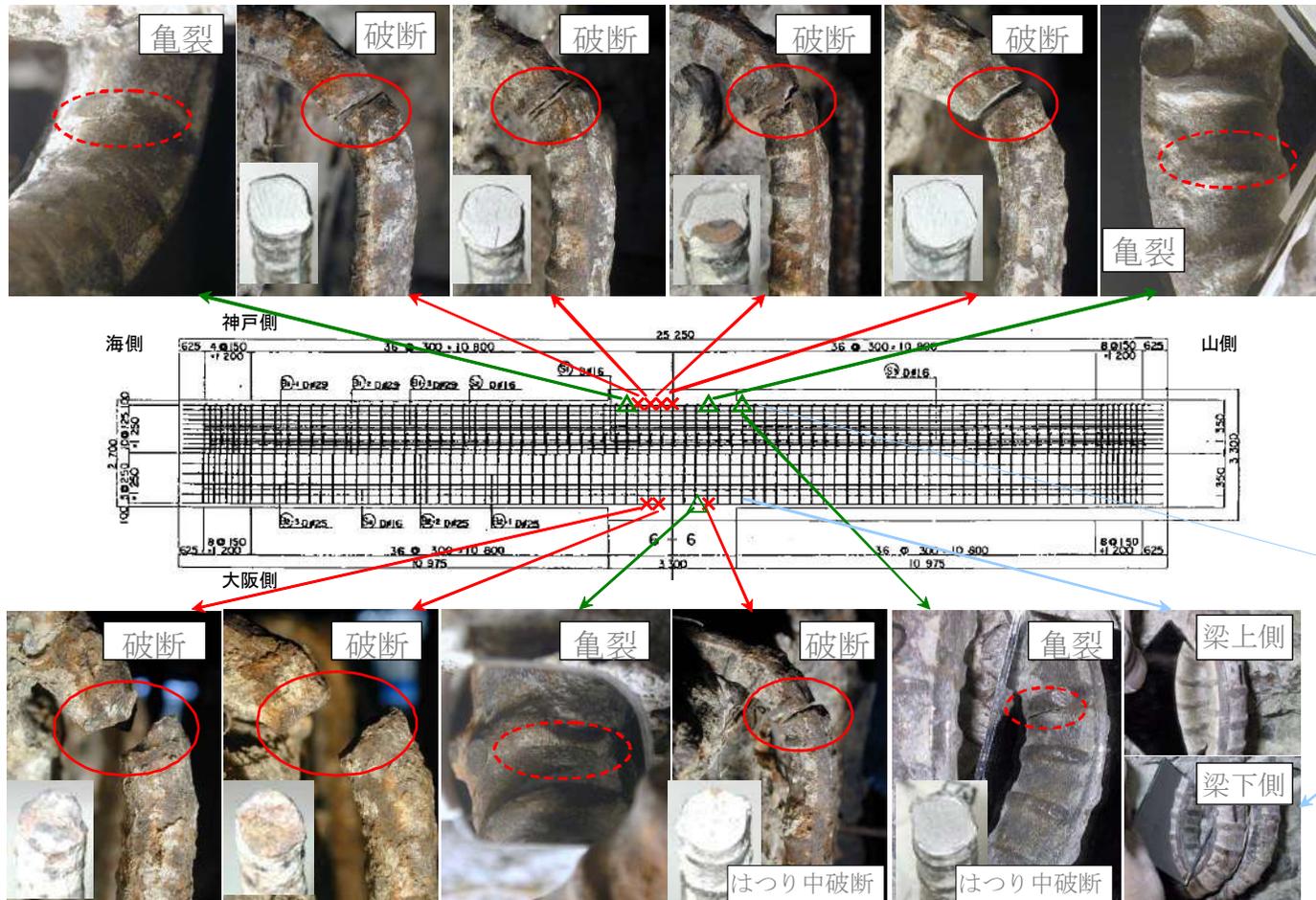
解説 図 13.1.1 ASRによる劣化進行過程の概念図

◆ASRでは、維持管理区分Aの適用は困難

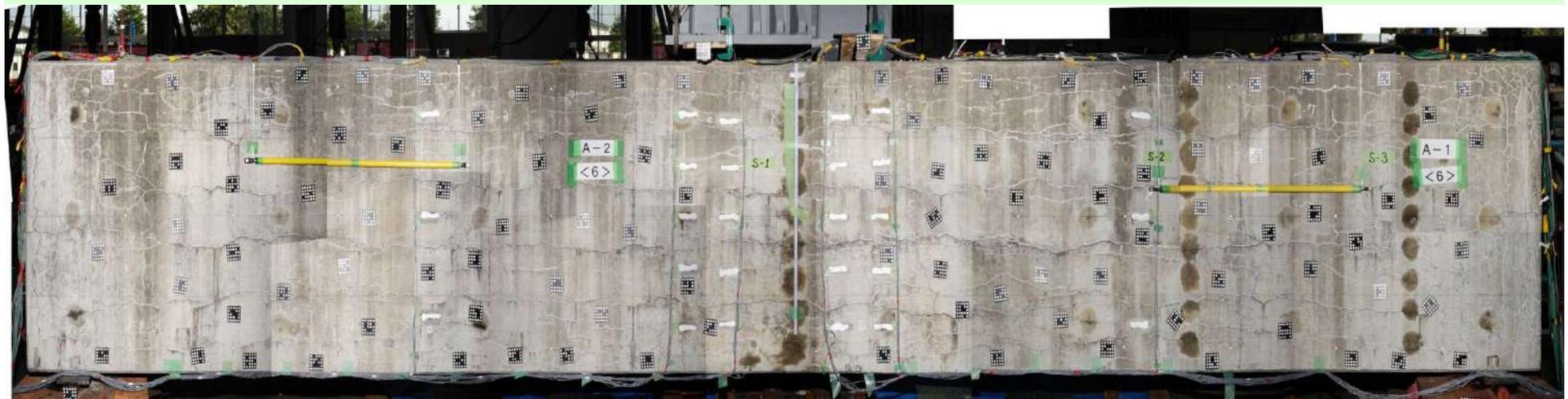
## 反応性骨材の分布状況



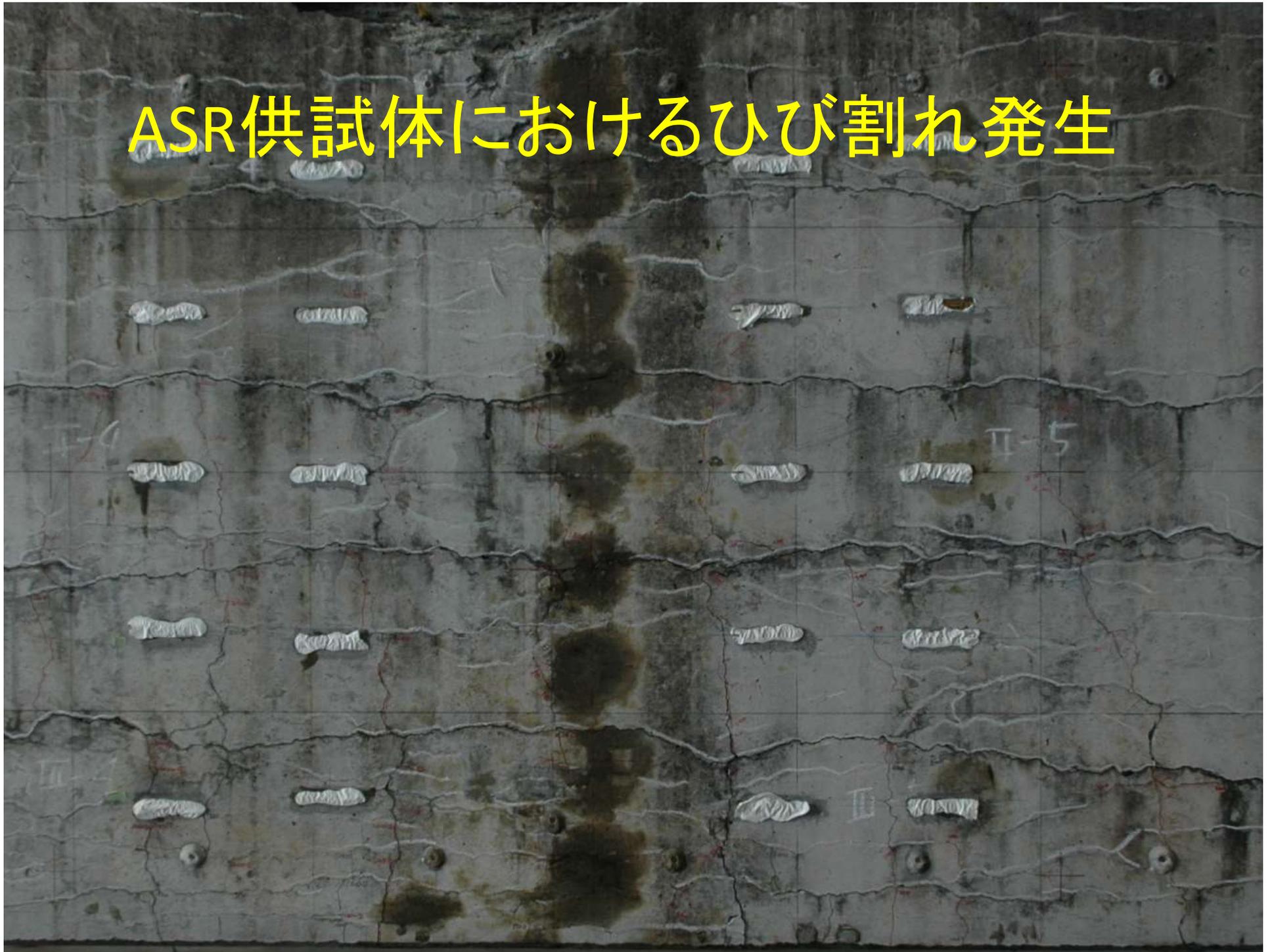
# 鉄筋破断の事例(橋脚梁部)



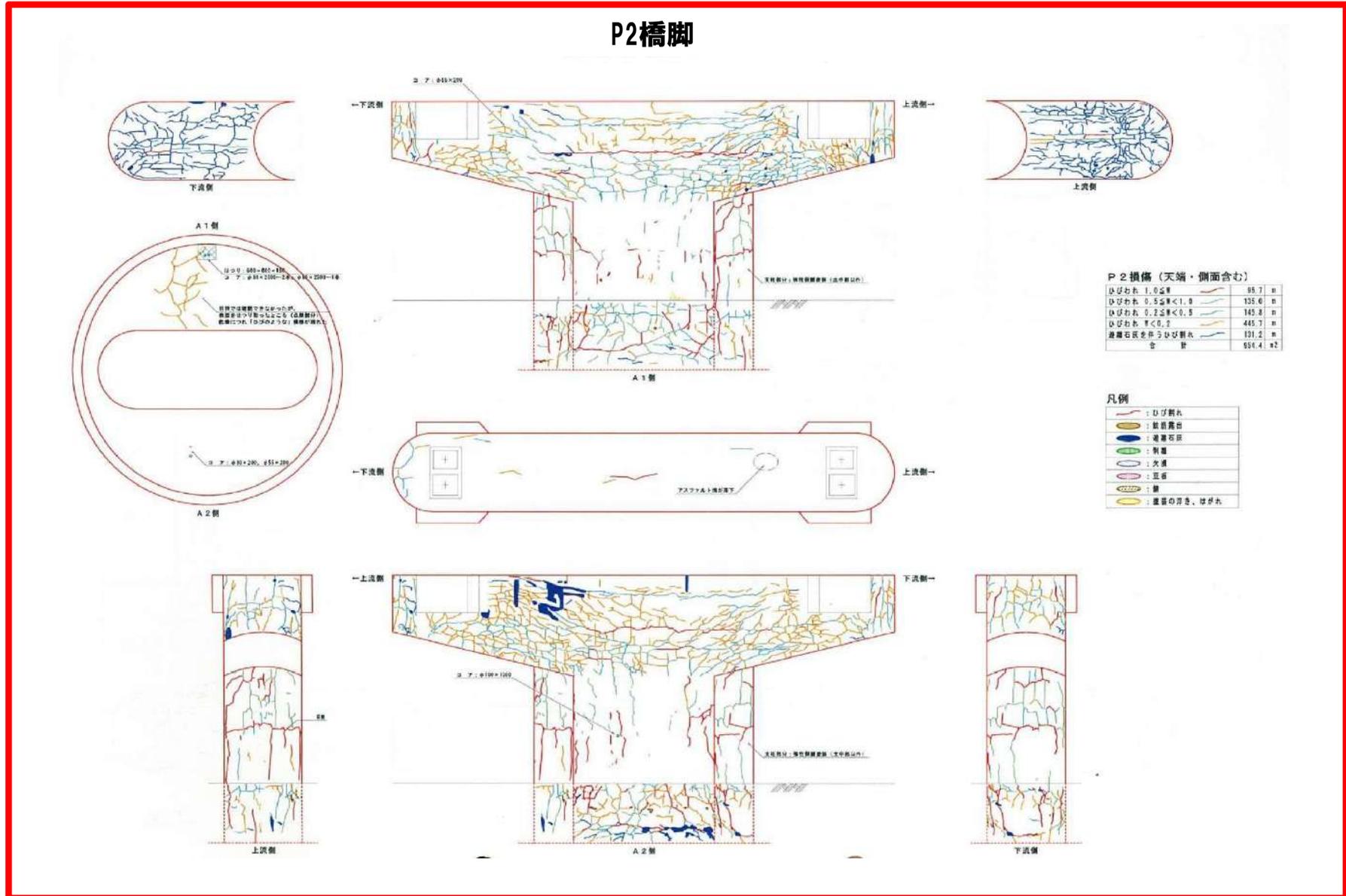
# 大型ASR供試体の載荷前後 (1.20 × 1.25 × 7.50<sup>m</sup>)



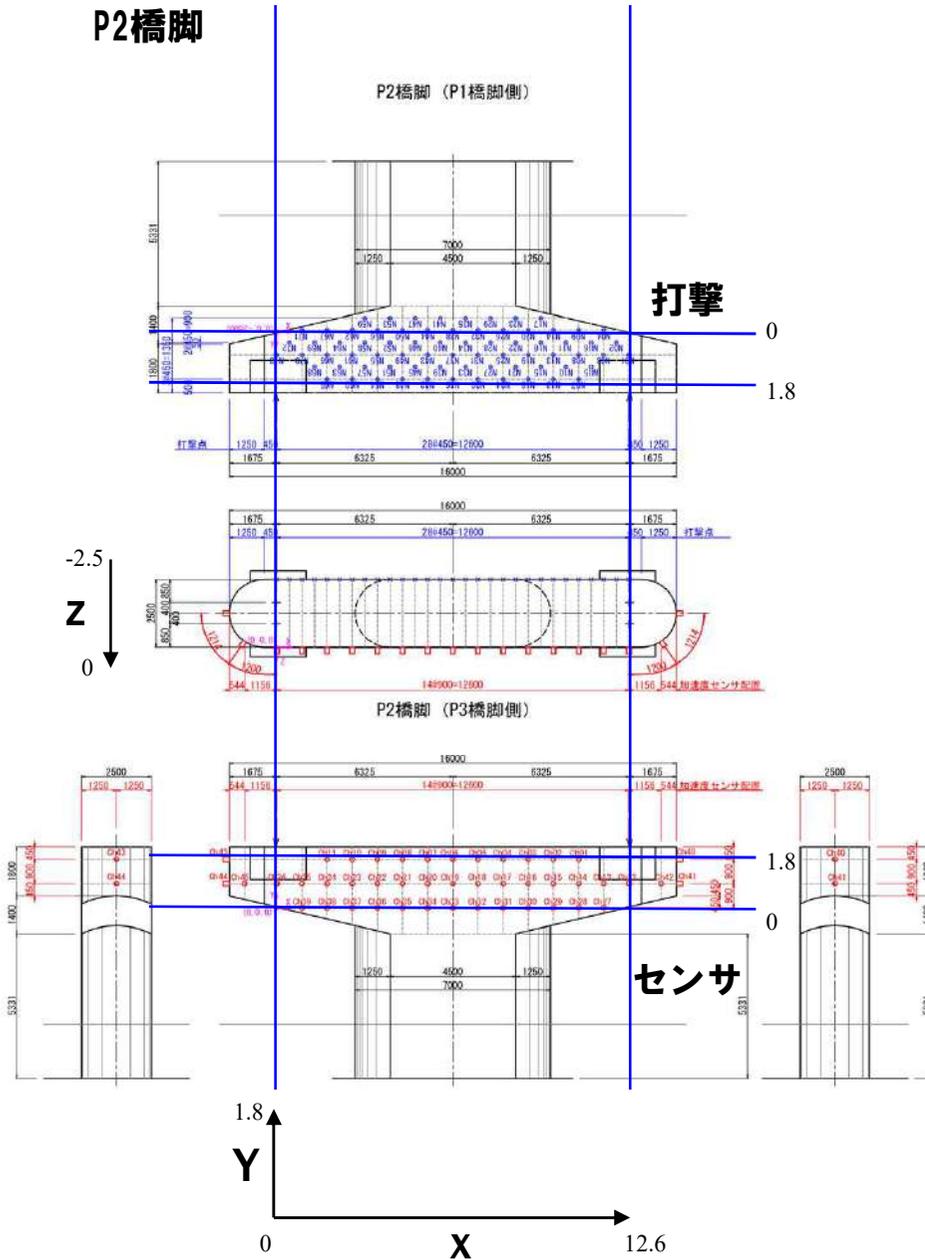
# ASR供試体におけるひび割れ発生



# <ASR損傷状況>

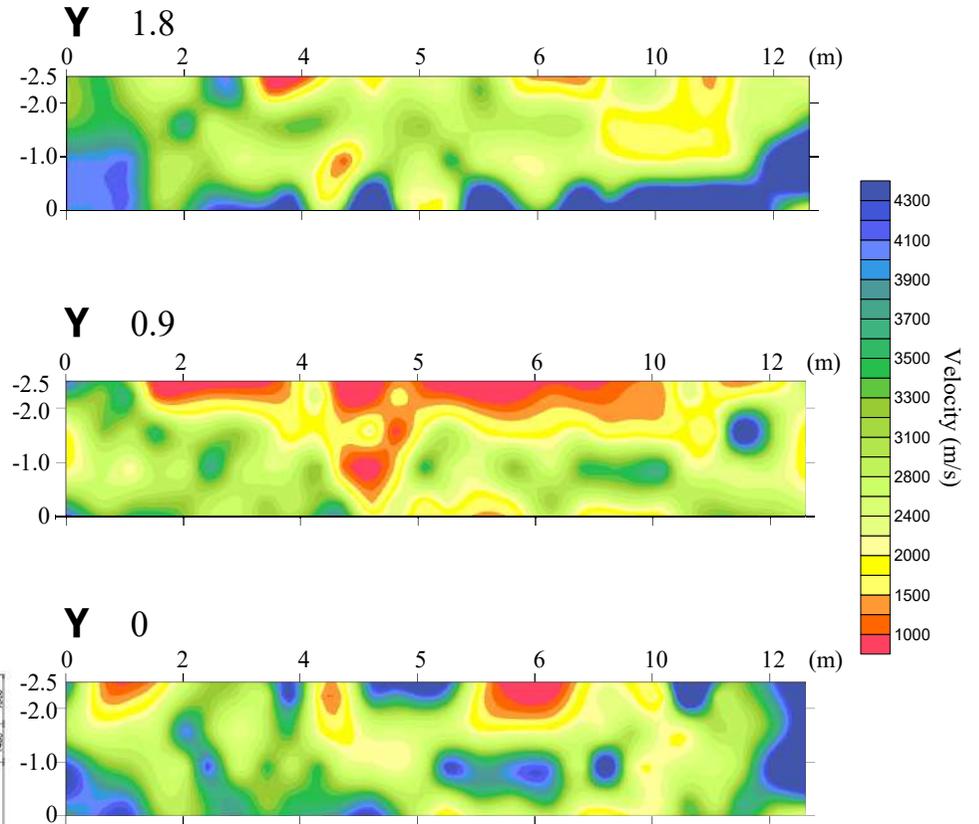


# P2橋脚



# 打撃(ハンマサイズφ100)

## 水平断面図



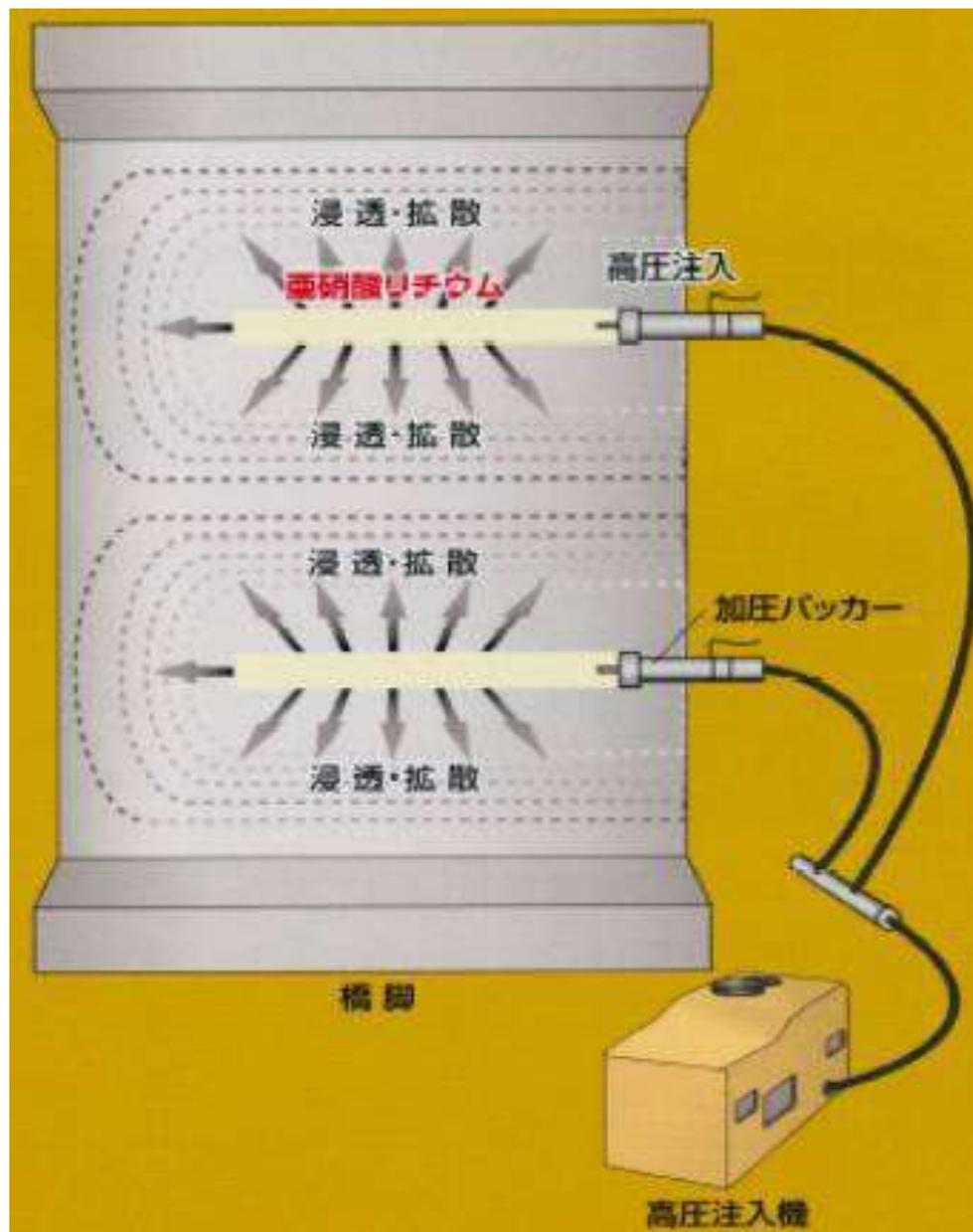
- 全体的に低い速度構造となる
- 大きなき裂が見られているところで特に低い速度構造が見られる
- 中央部 (x:4-5 m, y:0.9 m, z:0.5-2) に特徴的な低速度領域が見られる

# 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



# 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	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	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年カップラー伸長+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

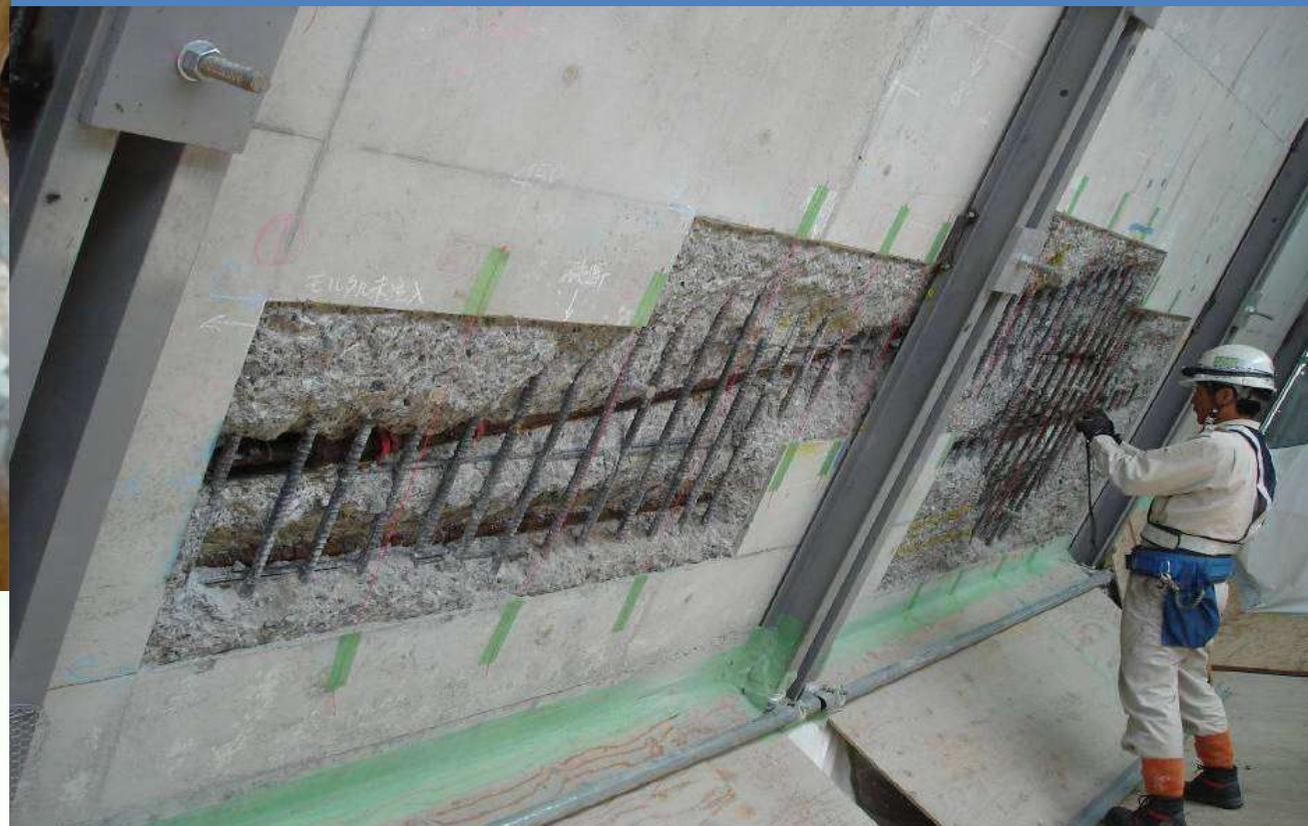


# 既往のPC鋼材破断の調査方法

## 削孔調査



## はつり調査



# 既往の非破壊検査

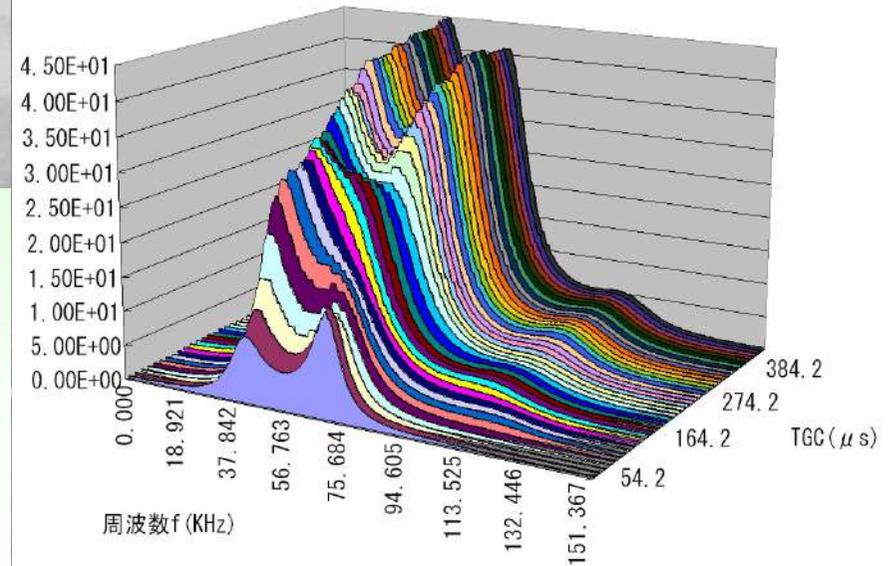
## X線透過法



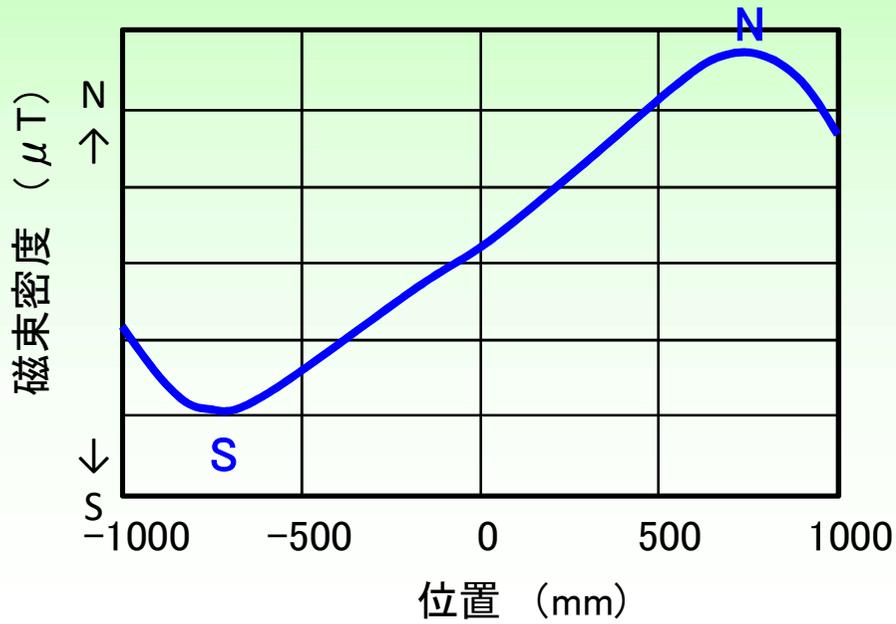
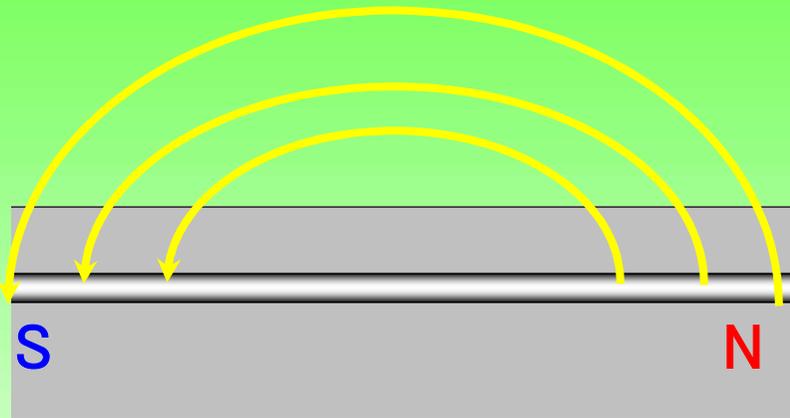
## 打音振動法-グラウト有無



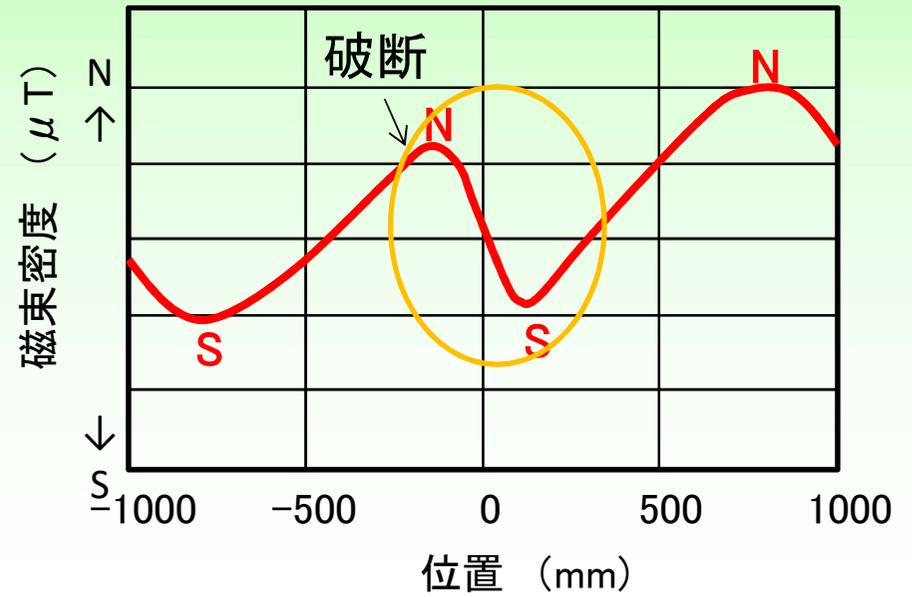
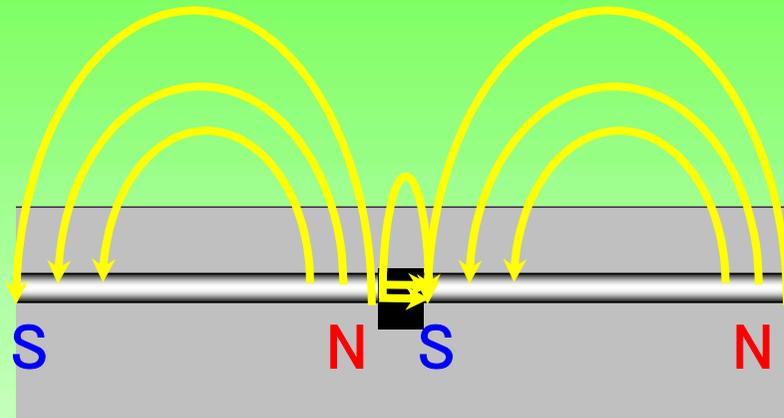
## 広帯域超音波法-グラウト有無



# 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）



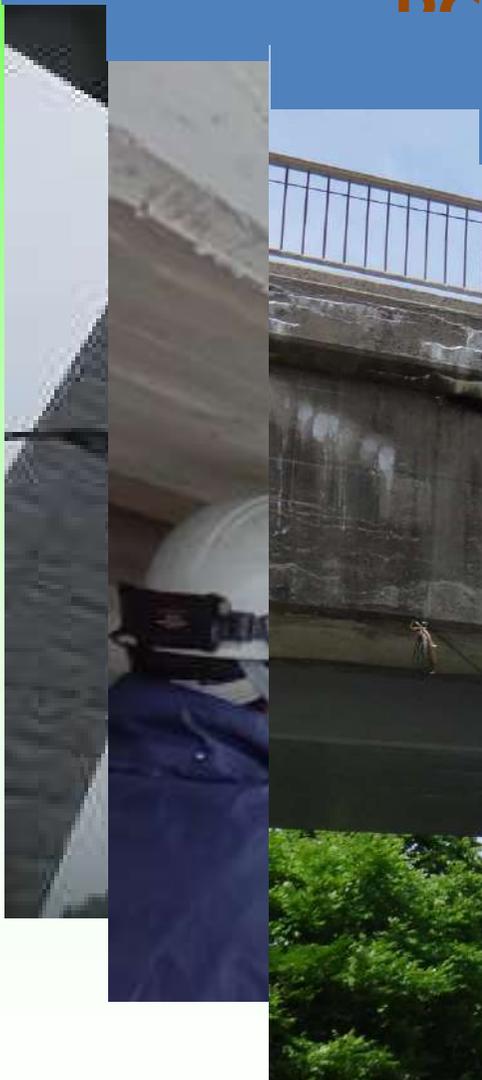
# 適用事例

DC箱桁 (宙夕 新浜勾川橋)

DCT桁 (五洲地七敷橋)

DCI形桁 (巨野旧)

PCI桁 (中国道)



# 調査項目と方法

調査項目	調査方法	評価内容
外観の変状	外観調査	PC鋼材の劣化の程度・範囲の推定をする。
PCグラウトの状態	放射線透過法	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定する。
	打音振動法	直線配置PC鋼材(横締め等)におけるPCケーブル1本ごとのPCグラウト充填状況を推定する。
	広帯域超音波法	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定する。
	インパクトエコー法	
削孔調査		
PC鋼材, プレストレスの状態	放射線透過法	調査位置におけるPC鋼材の破断を特定する。
	漏洩磁束法	
	削孔調査	調査位置におけるPC鋼材の腐食や破断を特定する。
	残存プレストレス量調査 (応力解放法)	調査位置における残存プレストレス量を推定する。

## 腐食PC鋼材と補修・補強工法選択事例

表面状況		塩水散布 期間	最小直径 減少比	補修・補強
	表面に錆びが半分以上発生している	7日	0.98	補修 (再注入)
	表面の錆がほぼ全面にわたり発生し、一部層状の腐食生成物が見られる	28日	0.97	
	表面に層状の腐食生成物が見られ、表面に凹凸が少し確認できる	63日	0.95	
	表面に層状の腐食生成物が堆積し、表面に凹凸が確認できる	112日	0.94	補強

# ・ 時空間シナリオ

従来は空間のみ？  
初期力学偏重？

# 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

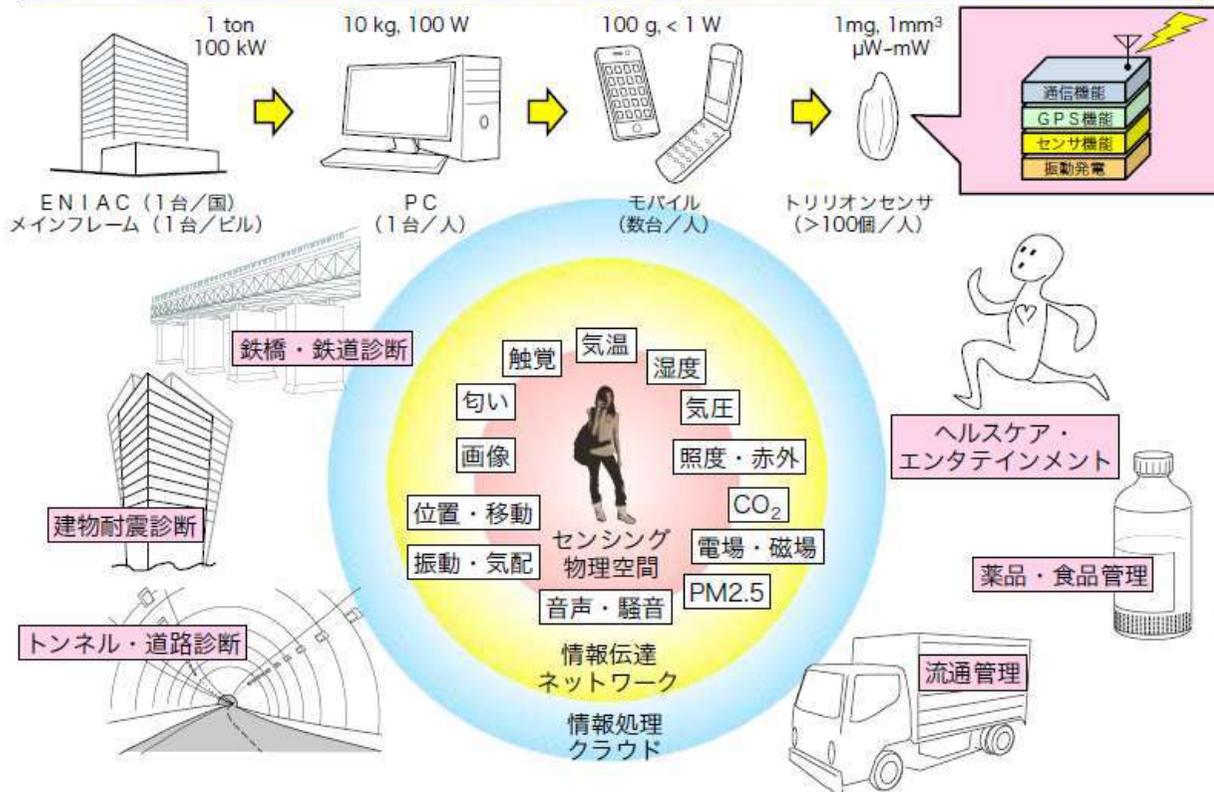
# 高効率MEMS振動発電デバイス

## エネルギー・環境新技術先導プログラム

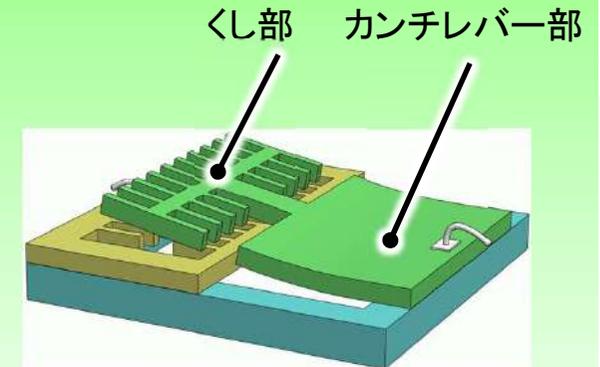
### トリリオンセンサ社会を支える高効率MEMS振動発電デバイスの研究 (NEDO)

地球上で年間1兆個の超小型センサを生産・消費する近未来の「トリリオンセンサ社会」に必要な不可欠な、超高効率の環境振動型発電素子(再生可能エネルギー)の実現を提案する。MEMS・マイクロマシン技術の新設計・新工法を新たに導入することで、コインサイズの面積で発電効率を従来比の2桁以上に飛躍的に高めた10 mW級の環境発電素子の設計・製作・評価技術を確立する。

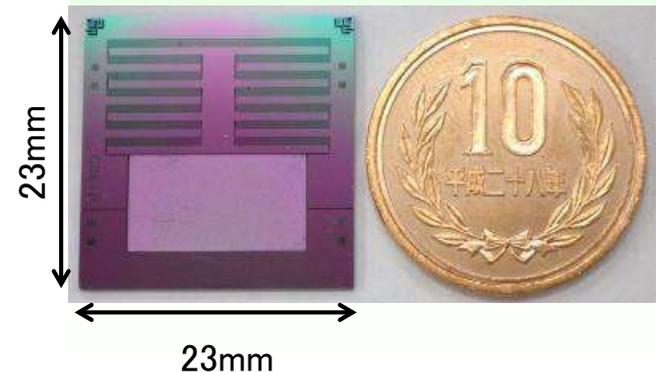
来たるトリリオン・センサ時代に必要不可欠な「振動発電型の自立電源」を開発



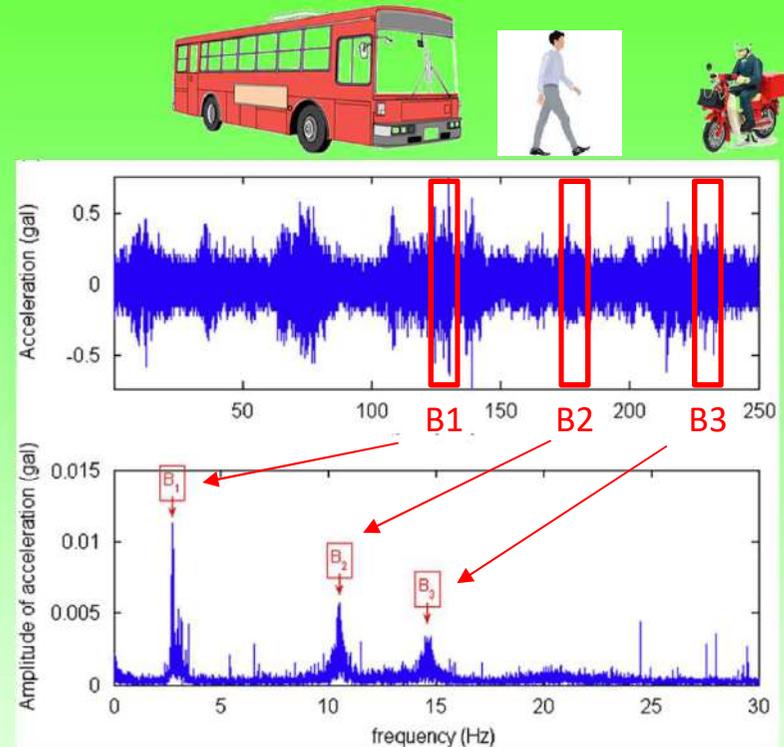
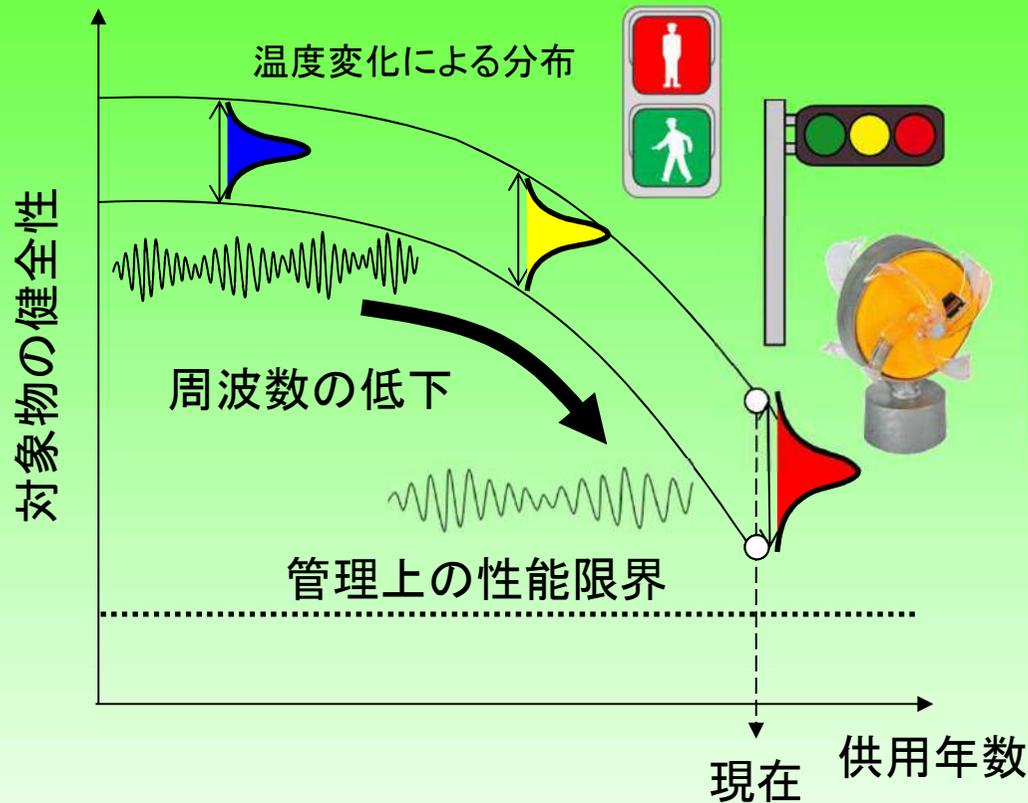
### 振動発電素子の構造 (面外振動型カンチレバー構造)



エッチングにより共振周波数自在



# 振動発電デバイスと振動による損傷検知の概念



## 高効率振動発電デバイスによる広帯域モニタリング

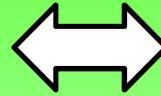
- 交通イベント毎の異常検知 VS 定常的な固有振動
- ワイヤレスデータ転送(データ) VS 発電量に依存した発光
- 異常検知=周波数分布×発電量の変化×季節変動
- ポアソン過程を考慮したイベント発生と電力量の変化



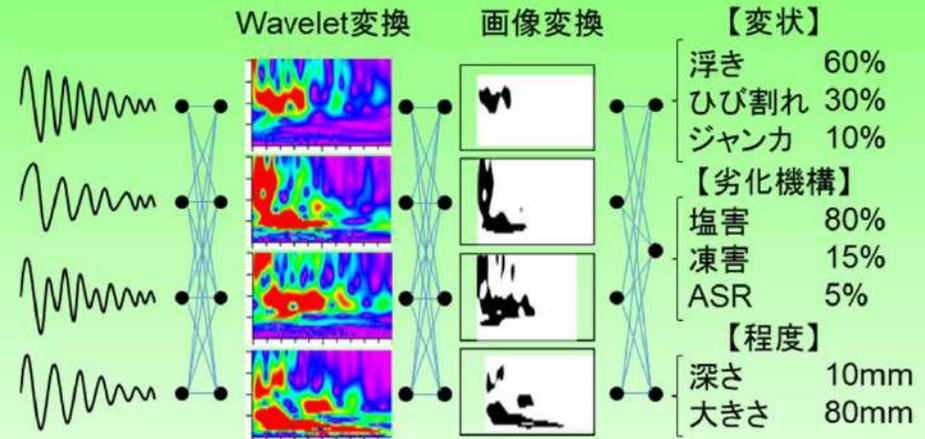
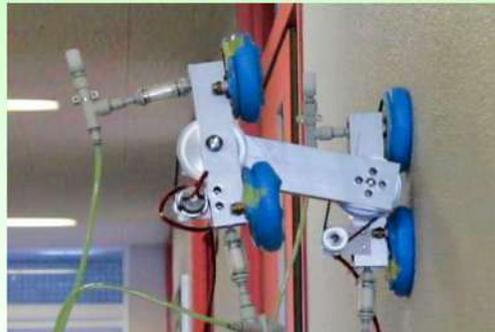
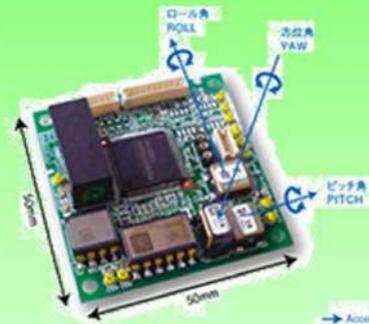
# インテリジェント打音システムの構築

## 壁面吸着ロボットを活用した打音認識AIシステム

打音作業の自動化  
自動位置標定  
ロボットの活用



打音データの自動集積  
打撃音の自動収集  
人工知能による損傷の認識



①技術者の感覚による変状認識を前提としながらも客観的・定量的に精度の高い評価を可能とし、②先進的技術の導入による労力削減を目指しながら、省コストで容易に実装可能なシステムを構築するものである。これにより、③都道府県・地方整備局が自ら策定する構造物の長寿命化修繕計画およびマネジメントサイクルの実施の一助とする。



# 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