



インフラ長寿命化を支える 維持管理技術の基本

—シナリオデザイン—



京都大学 名誉教授

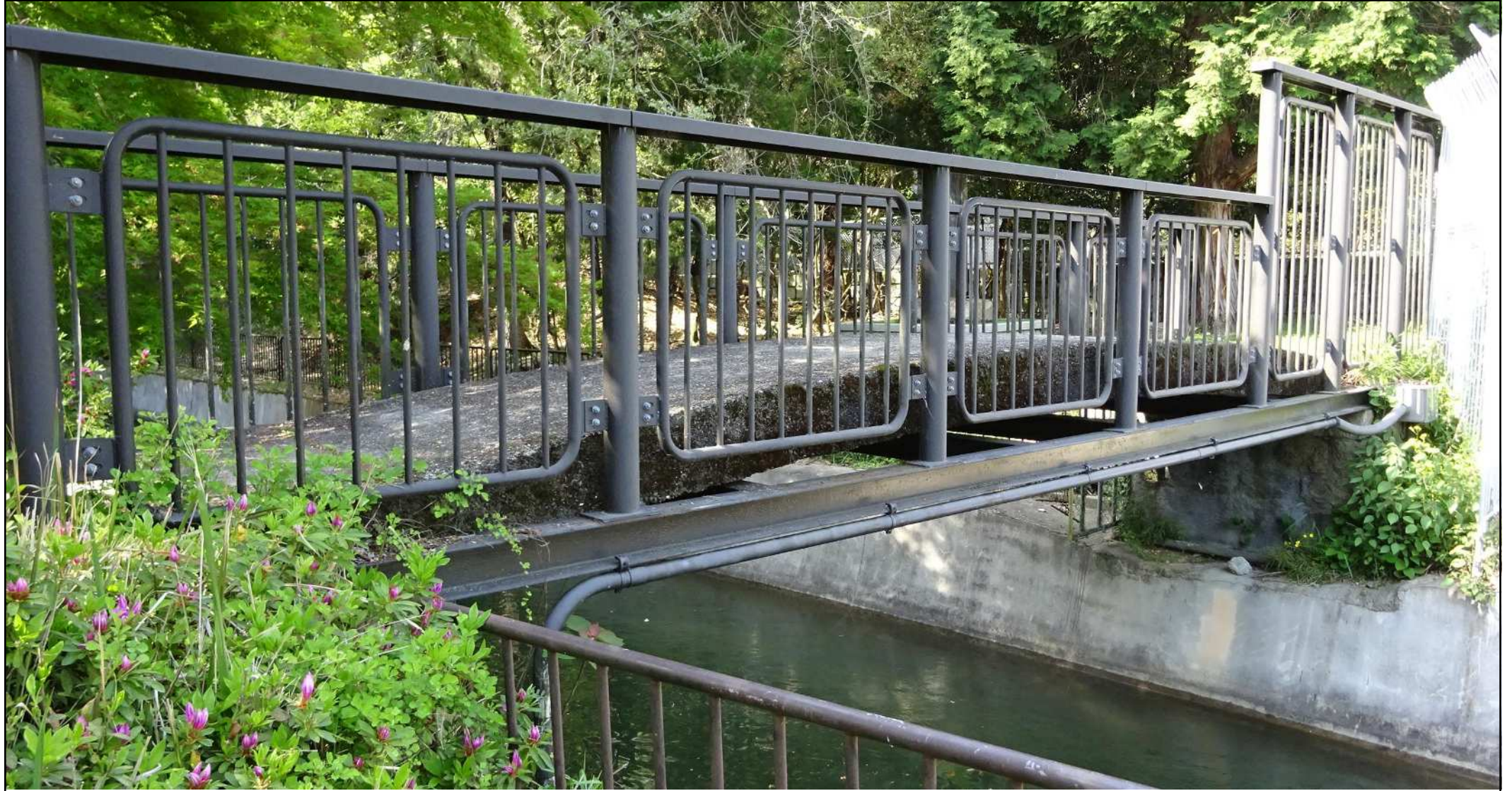


宮川豊章

- 内容 -

- **丈夫で、美しく、長持ち**
- **劣化⇒耐久性**
塩害、アルカリシリカ反応、
グラウト問題、乾燥収縮
- **時空間シナリオデザイン**
- **そして今、インフラは**

- **丈夫で、美しく、長持ち**



日／岡第11号橋

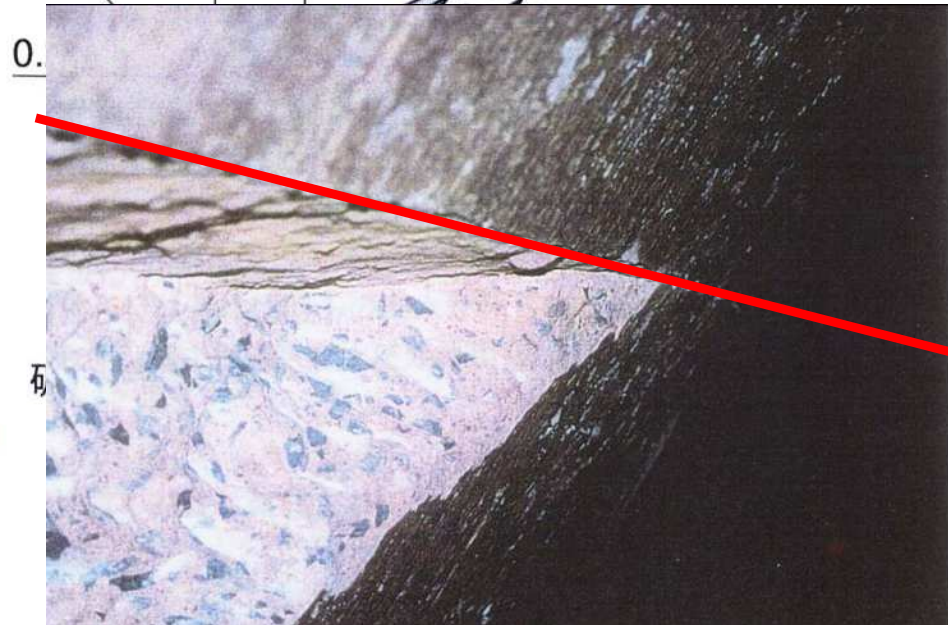
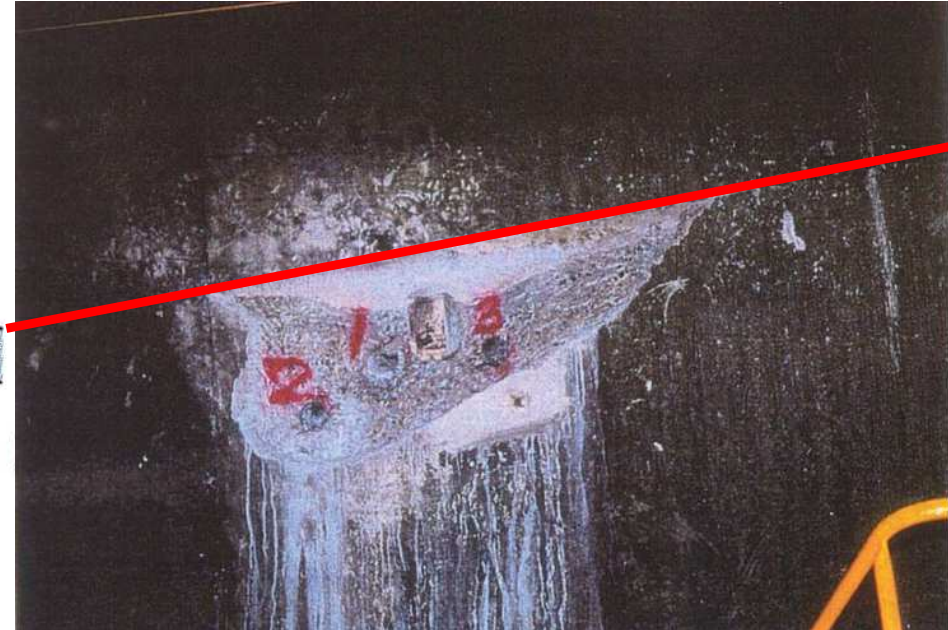
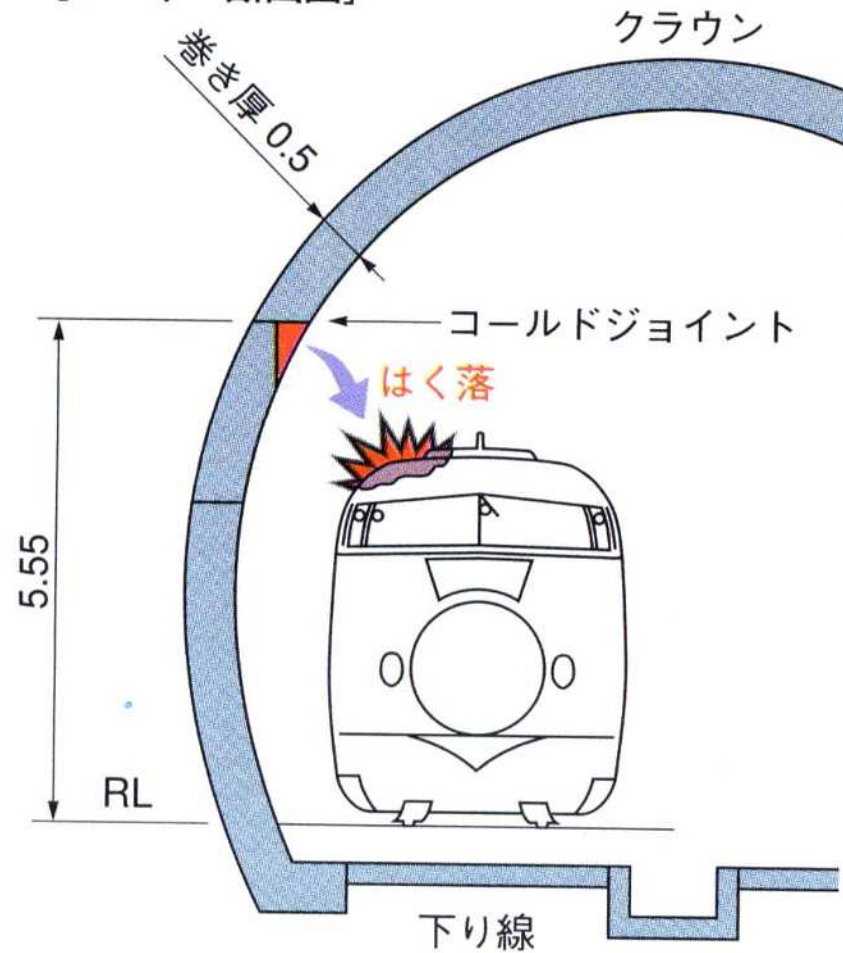
(1903)京都府・日本初の鉄筋コンクリート橋

設計者 田辺朝郎

山陽新幹線福岡トンネル壁面コンクリート塊落下事故1999.6

●コンクリートはく落部分の概要

[トンネル断面図]





塩害＋中性化（複合劣化）

床版下面コンクリートの剥落



笹子トンネル天井板落下事故 2012.12

インフラは今

二つの制約条件のもと

- ・ 地球温暖化

環境変動、緩和策(CO_2)と適応策(強靱化)

- ・ 人口減少社会

人手と予算

大きな目的を

- ・ 増大する高齢構造物を含めて、

⇒丈夫で美しく長持ちするインフラ、市民社会

=持続可能な未来

LCC & LCCO_2 を満足させるシナリオ

LCC・LCCO₂の算定にあたって ACI365委員会では

- ・ 供用期間を推定しようとする技術者は、
- ・ コンクリート材料、耐久性と劣化メカニズム、電気化学と腐食をよく理解し、
- ・ 構造形式、設計供用期間、推定方法、要求される試験方法、耐久性限界状態、性能照査モデル、予定される維持管理、要求される報告、について明らかにしなければならない。

インフラにおける時間軸

- 産業革命以降生産とそれに伴う短期経済的成長こそが善であるとの馬鹿げた幻想⇒しかし道路・鉄道施設に代表されるインフラの場合、造るために費やす時間や経費よりも、使う時間、経費の方が圧倒的に長くて大きい＝メンテナンス、維持管理行為こそが本道
- 生産と成長を偏重してきた社会は、メンテナンスや維持管理を「非生産的」な活動として周辺化
- **本道である維持管理にこそ長期生産性が必要**
- 維持管理にこそDX、ICTなどの新技術が必要・有効で、まずは点検診断分野から補修補強へ

生産性(向上)

- ・ どれだけ多く生産するかの度合い
- ・ 費用に対する成果の比率

⇒ お客様に満足していただくため、如何にうまく、丈夫で美しく長持ちさせるか！：全体最適化！

⇒ **適切に正確で早く、手戻りが無い！**

人口減少+上限規制+単価増大を上回る向上

- ・ デジタルデータを活用した情報システムによる予測・診断・対策（ハード+ソフト）
- ・ **劣化機構を抑えた補修補強システム：AC1562委員会によれば補修の半分は失敗！**

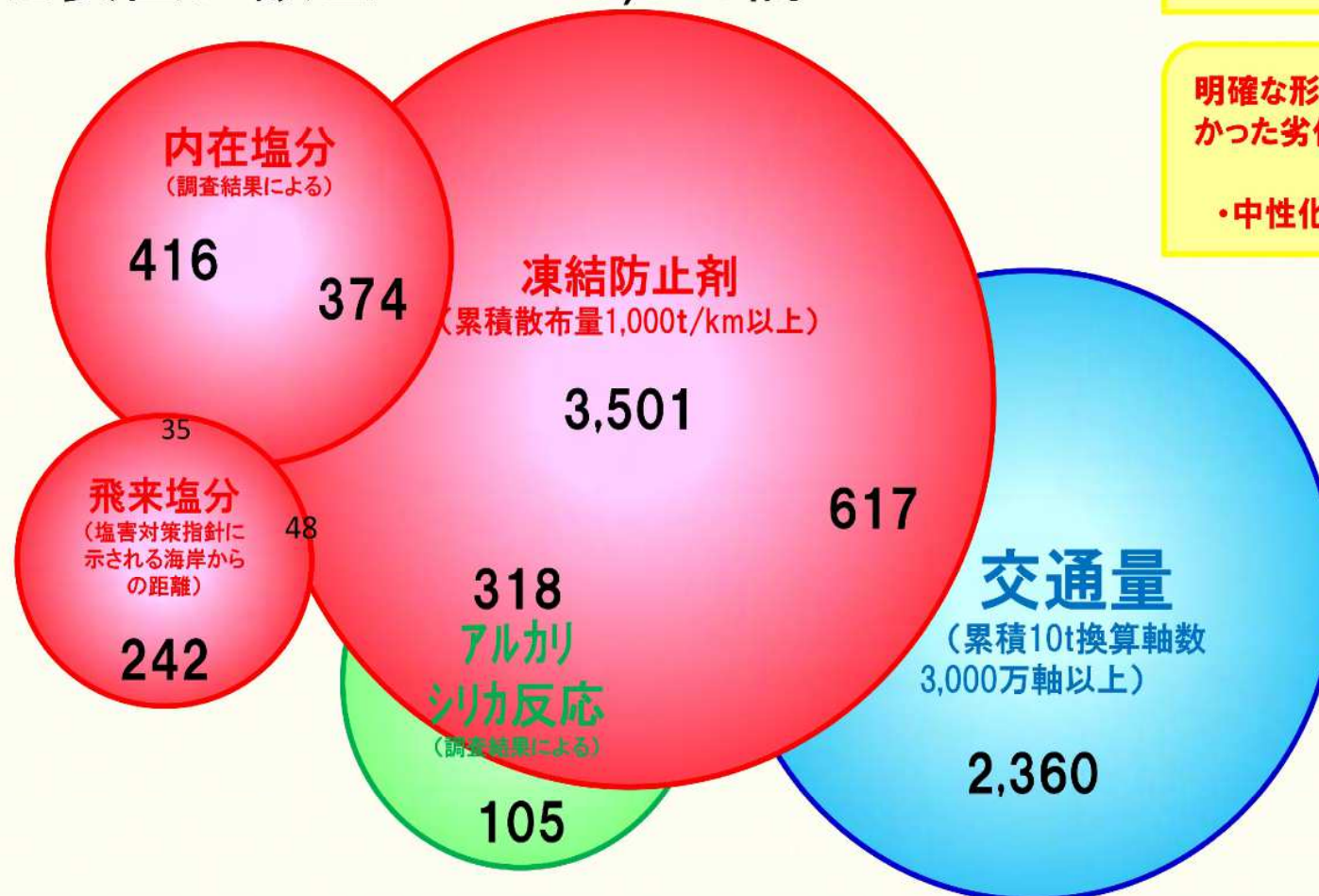
• 劣化⇒耐久性

: Allにはわからない！“意味”

橋梁の主な劣化要因

長期保全等検討委員会資料

全橋梁数 : 18,306橋
下記の劣化要因に該当せず : 10,230橋
下記の劣化要因に該当 : 8,076橋



初期欠陥

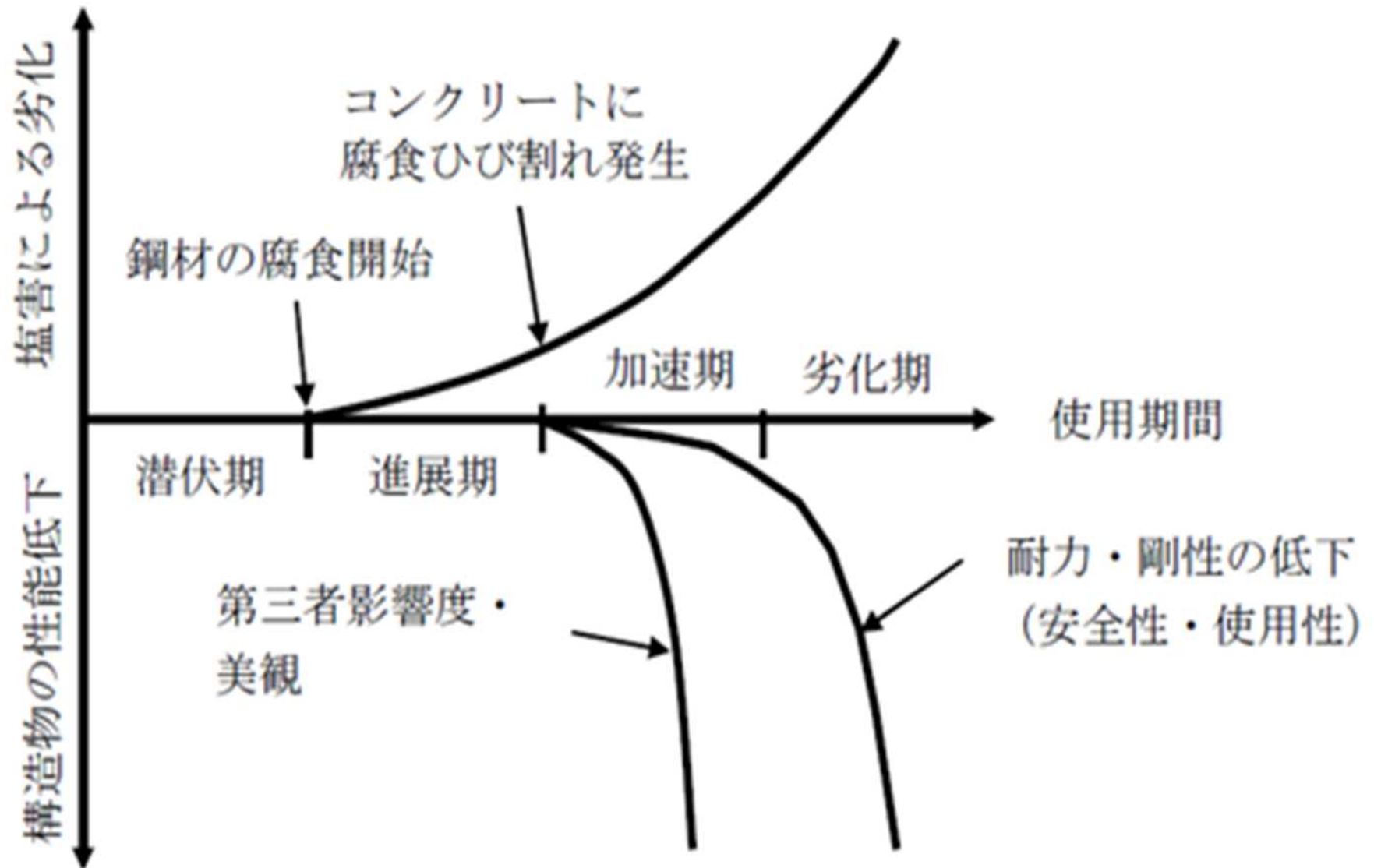
- ・PCグラウト空隙有
- ・かぶり不足
- ・豆板等

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。

- **塩害**



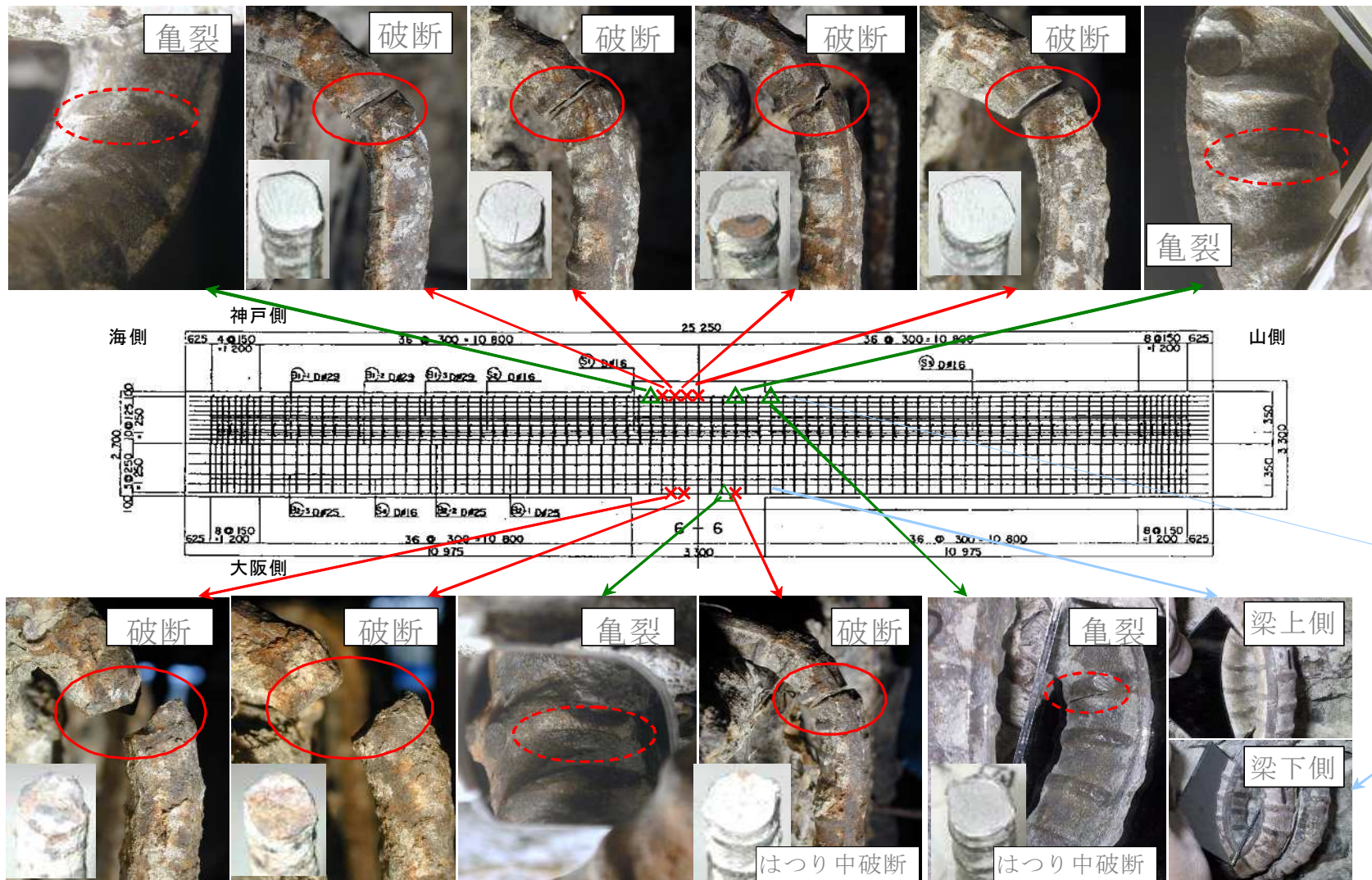
塩害による劣化進行過程の概念図の一例

- **アルカリシリカ反応**

三つの条件

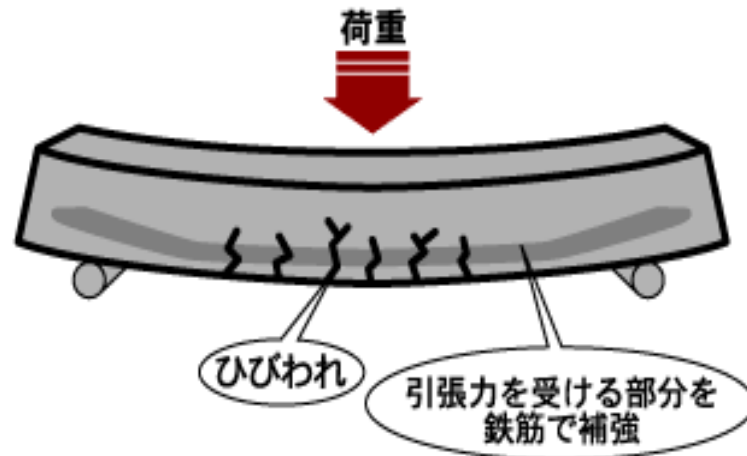
- 反応性骨材
- アルカリ(Na, K)
- 水

(阪神高速道路)

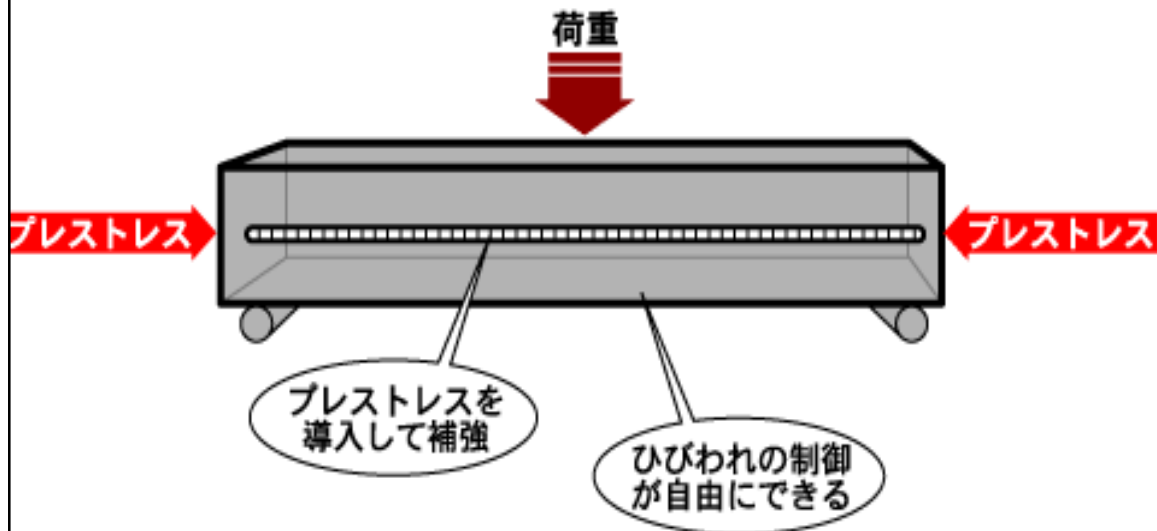


鉄筋破断の事例 (橋脚梁部)

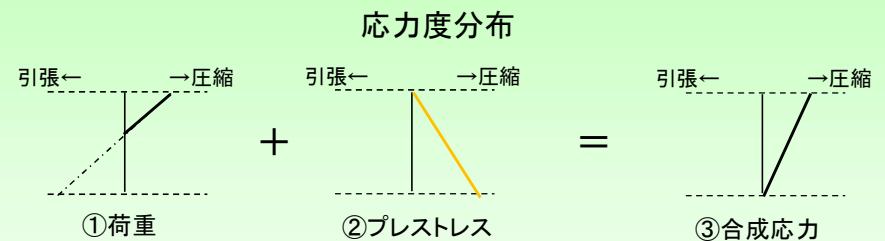
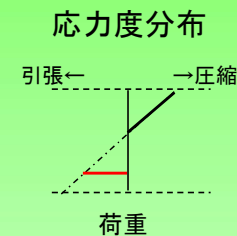
鉄筋コンクリート



プレストレストコンクリート



ところで、



鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリート

①塩害を生じたPC橋への対応

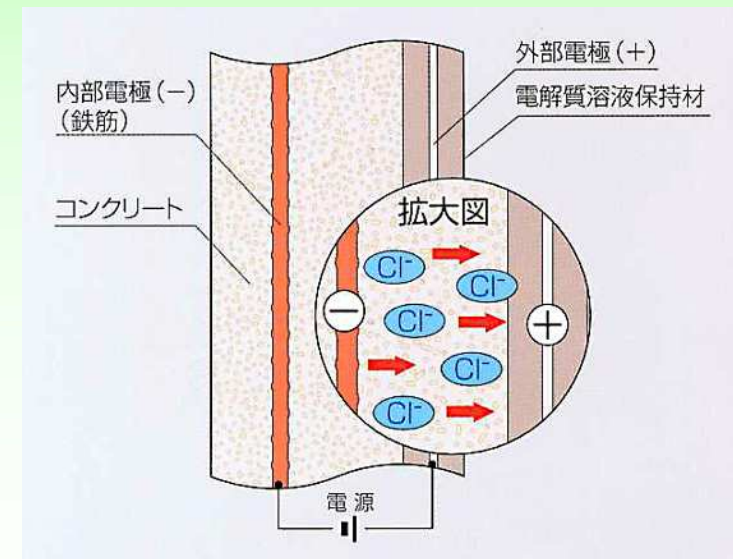
◆塩害に関する最近の研究動向

➤耐荷力評価

- ・腐食したPC鋼材の機械的性質評価
(引張強度, 伸び, 疲労強度等)
- ・塩害劣化を受けたPC部材の曲げ・せん断耐力
- ・グラウト未充てん部でPC鋼材が破断した際の
耐荷力への影響評価

➤補修効果

- ・断面修復の再劣化メカニズム
- ・鉄筋防せい材の長期的な効果
- ・脱塩工法等の適用性検討



脱塩工法

【腐食したPC鋼材(φ5mm)の状態】

質量減少率 1%程度未満

薄錆があるが、
磨くと地鉄がでる

＜錆落とし前＞



＜錆落とし後＞



質量減少率 1～2.5%程度

磨くと表面に点状の錆が目立つ

＜錆落とし前＞



＜錆落とし後＞



質量減少率 10%程度未満

錆が全面にあり、
磨くと欠損が目立つ

＜錆落とし前＞



＜錆落とし後＞



質量減少率 10%程度以上

径が小さくなっている

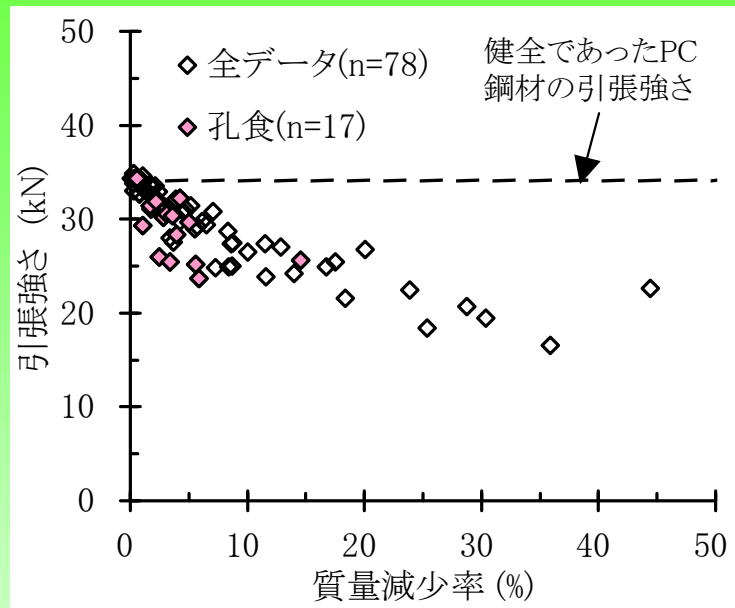
＜錆落とし前＞



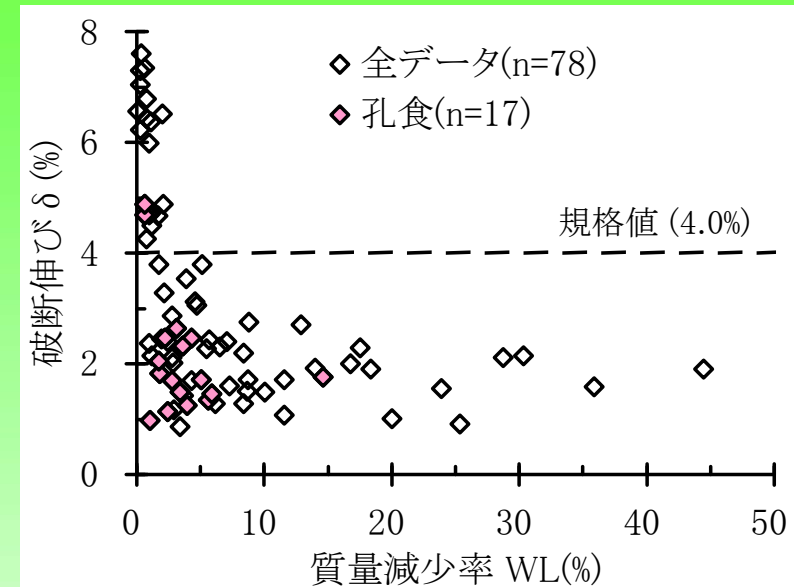
＜錆落とし後＞



【腐食PC鋼材(φ5mm)の機械的性質】



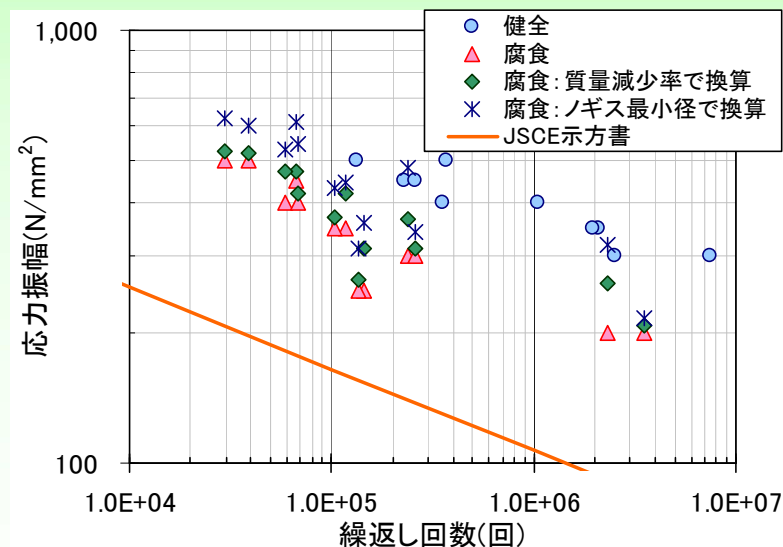
引張強さ



破断伸び

引張強さの低下に比べ、
伸びの低下が著しい。

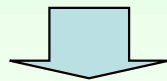
疲労強度に関しては、
質量減少率5%程度までなら
設計照査値を満足する。



疲労強度

②ASRを生じたPC橋への対応

- ・ ASRは古くから報告されており、橋梁においては1980年代に入り、関西地区等の橋脚において確認されている。
→当時の研究成果によると、ASR膨張が鉄筋にて拘束されている場合、耐荷性能に与える影響は少ないとの結論。
- ・ その後、1986年に定められたASR抑制対策が効果を発揮し、ASR劣化への技術対応が収束しつつあった。
- ・ 2003年のNHKにおいて、
鉄筋破断の報道！



各機関にて、緊急対応



【各機関における取組】

機関	国土交通省近畿地方整備局	阪神高速道路公団	土木学会	大学・土木研究所等
委員会名称	ASR橋脚等に関する対策 検討委員会	ASR橋脚の維持管理に 関する検討委員会	アルカリ骨材反応対策 小委員会	
検討内容	- 鉄筋が破断したRC梁の補強方法の検討 - ASR劣化は模擬膨張 - 短期 - 小型供試体 (300×300×2000)	- PC梁のせん断補強方法の検討 - 鉄筋破断メカニズム - 反応性骨材使用 - 小型供試体 (300×300×2000) - 中型供試体 (600×600×5000)	- ASR問題の現状まとめ - 鉄筋破断の実態把握とメカニズムの解明 - 構造安全性に関する検討	- 鋼材の付着劣化 - ASR劣化と鉄筋の拘束効果

【既往の結果のまとめ（2003年当時）】

○PC部材のASR劣化性状を長期にわたり調査・計測を行い、残存プレストレスや内部外部ひずみを確認した事例は稀少。

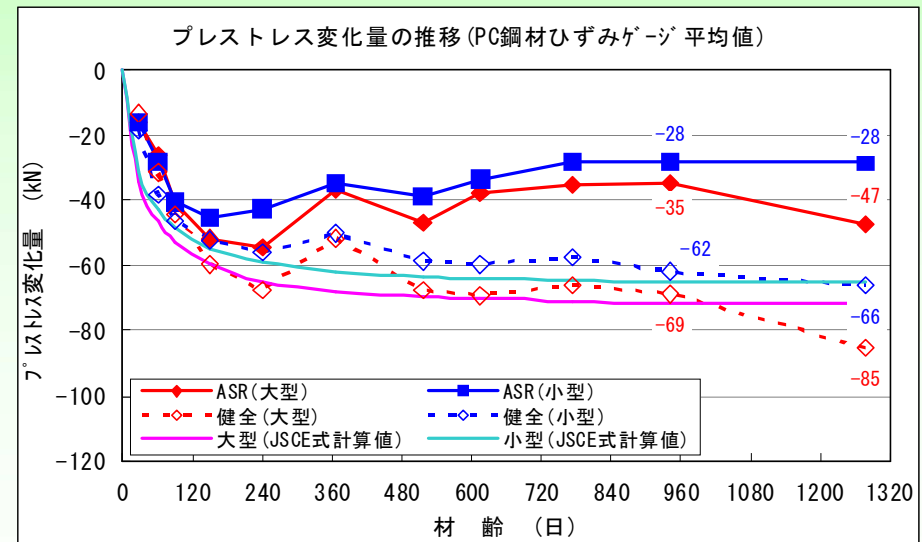
○研究室における小型試験体を用いた耐荷力実験はあるが、大型試験体（体積効果を考慮）による事例はない。

PC建協 ASR対策検討委員会

- ASR劣化試験体の長期劣化性状を確認した結果、ひび割れ密度が $6.0\text{m}/\text{m}^2$ 、内部ひずみで 0.45% を超えて劣化が著しく進行したが、プレストレス変化量は健全な試験体と同程度であった。
- ASR劣化試験体を用い設計荷重レベルの載荷試験を行った結果、剛性低下が見られたものの平面保持性能、弾性挙動とも健全試験体と大きな差異はなく、またPC部材としての復元性能を有していた。



大型試験体の暴露状況



プレストレス変化量

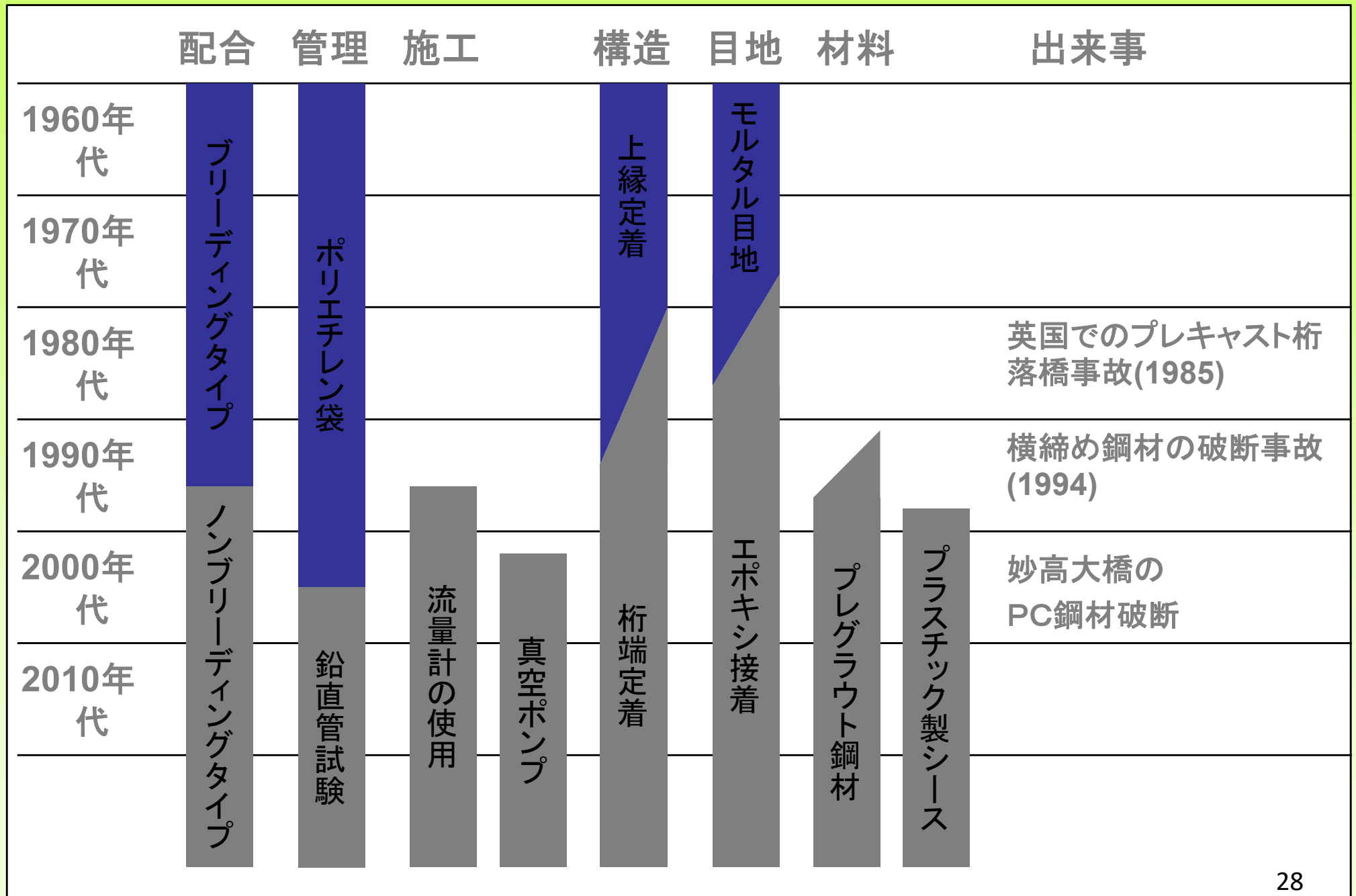
- ・ スターラップの破断を想定してせん断補強を行ったASR劣化試験体のせん断耐力試験によれば、ASR劣化による残存膨張が付加された状態でも所定の補強効果が得られた。



大偏心外ケーブル補強の実験状況

- **グラウト問題**
- **実は、ほぼ塩害問題**

グラウト技術の変遷





落橋前



落橋後 (2018)

Polcevera (Morandi) viaduct (1964)

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



PCグラウト鋼材関係調査

調査項目	調査方法		評価内容
PCグラウトの状態	放射線透過法	コンクリート表面からX線等を使って放射線透過写真を撮影する	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定
	打音振動法	PC鋼材両端部にセンサを取り付け、入力センサ側をハンマー等で打撃し、弾性波伝搬速度や入力側と出力側のエネルギー減衰および周波数特性を測定する	直線配置PC鋼材（横締め等）におけるPCケーブル1本毎のPCグラウト充填状況を推定
	広帯域超音波法	コンクリート内に高強度で広帯域の周波数を有する超音波を入力し、反射波を全て収録する。収録した波をフィルタリングし、特定したシースからの反射波特性を分析する	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定
	インパクトエコー法	PC鋼材が配置されている部分のコンクリート表面に鋼球打撃により弾性波を入力し、その反射波を振動センサで受信し周波数スペクトル解析を行う	
	SIBIE法	対象となるコンクリート構造物の内部欠陥の有無およびその位置を弾性波を用いて非破壊で調査し、調査結果を画像化して評価する	

調査項目	調査方法		評価内容
PC鋼材の状態	放射線透過法	コンクリート表面からX線等を使って放射線透過写真を撮影する	調査位置におけるPC鋼材の破断を特定する
	漏洩磁束法	鋼材が強磁性体であることを利用して、コンクリート表面からPC鋼材を着磁し、漏洩した磁束を測定する	

既往の非破壊検査

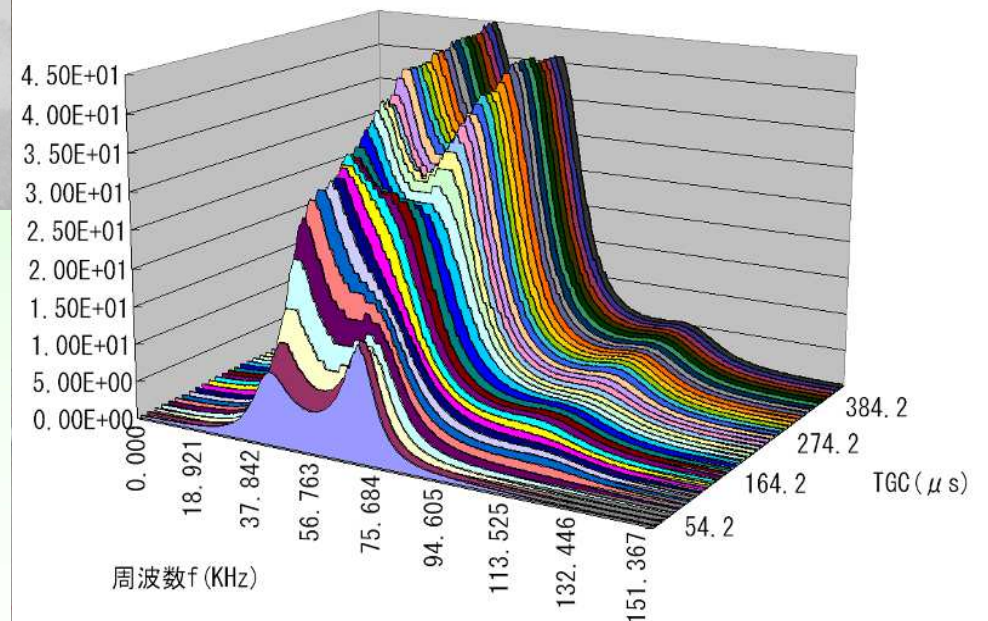
X線透過法



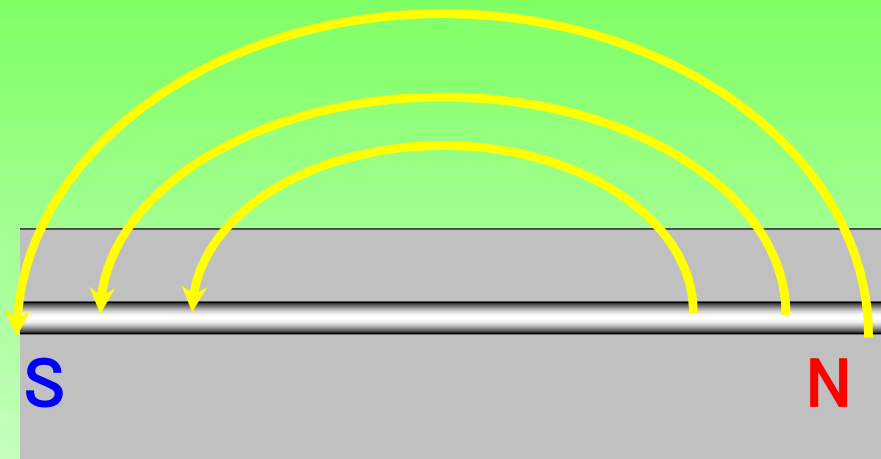
打音振動法-グラウト有無



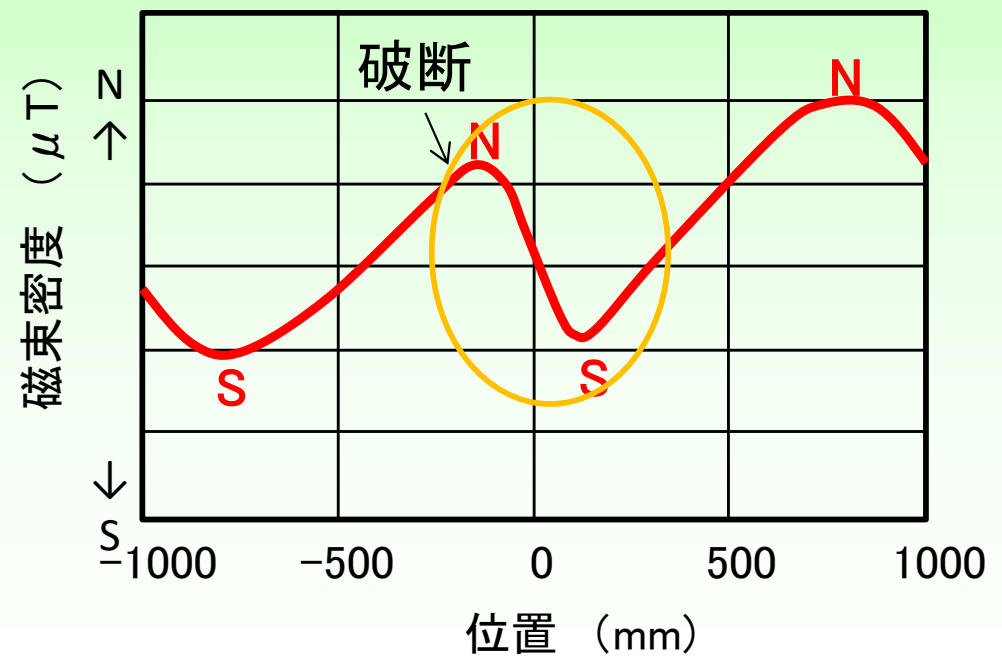
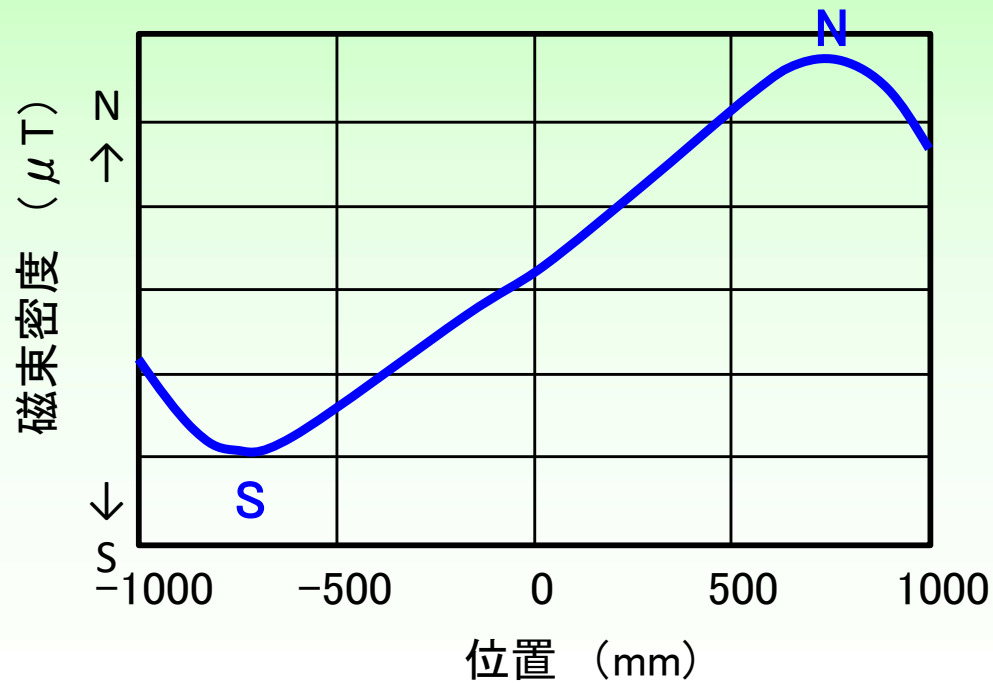
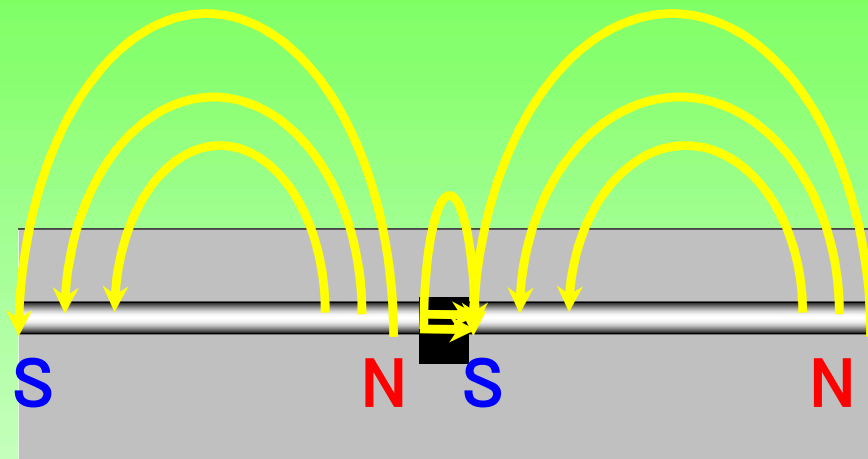
広帯域超音波法-グラウト有無



PC鋼材破断なし



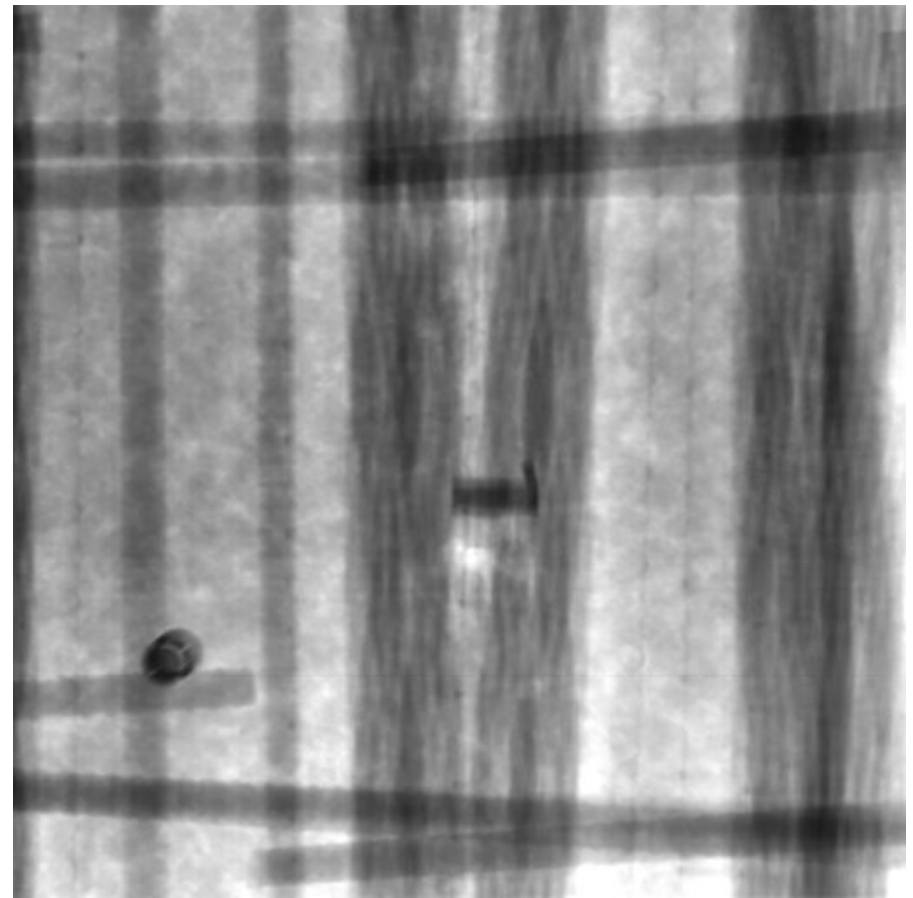
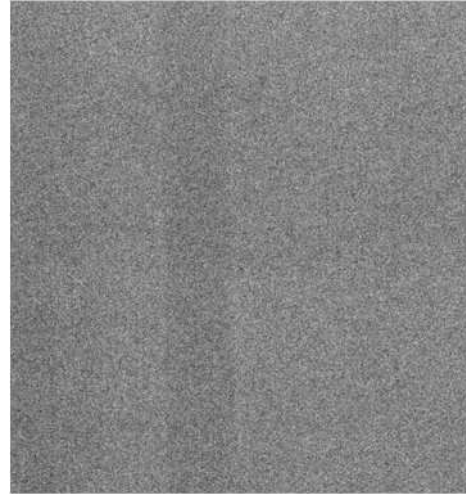
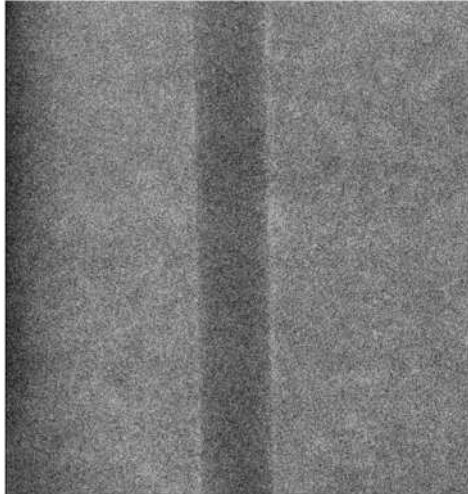
PC鋼材破断あり



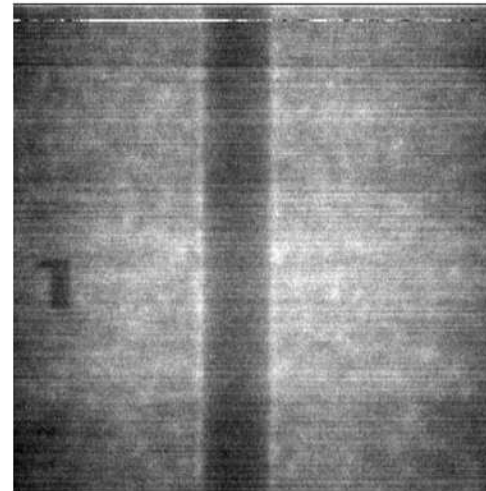
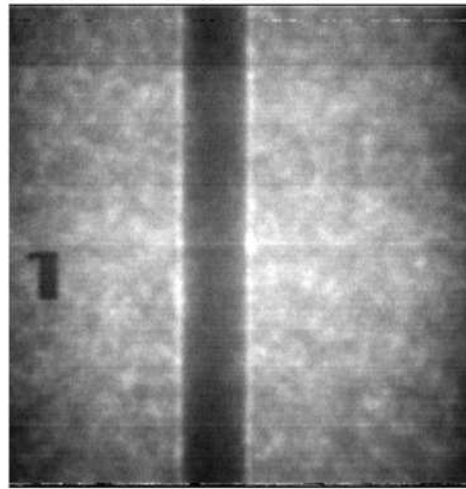
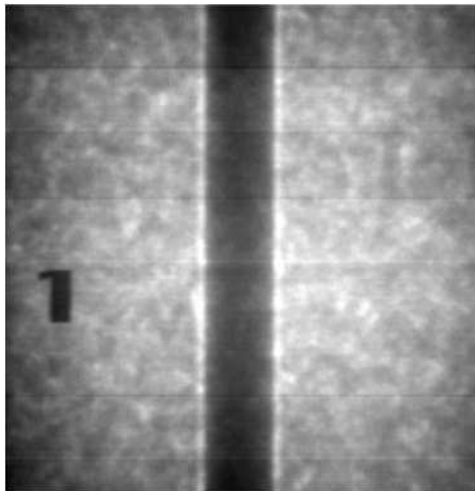
3.95MeV X線透過画像 実コンクリート構造物

950keV X線透過画像

FPD



SID



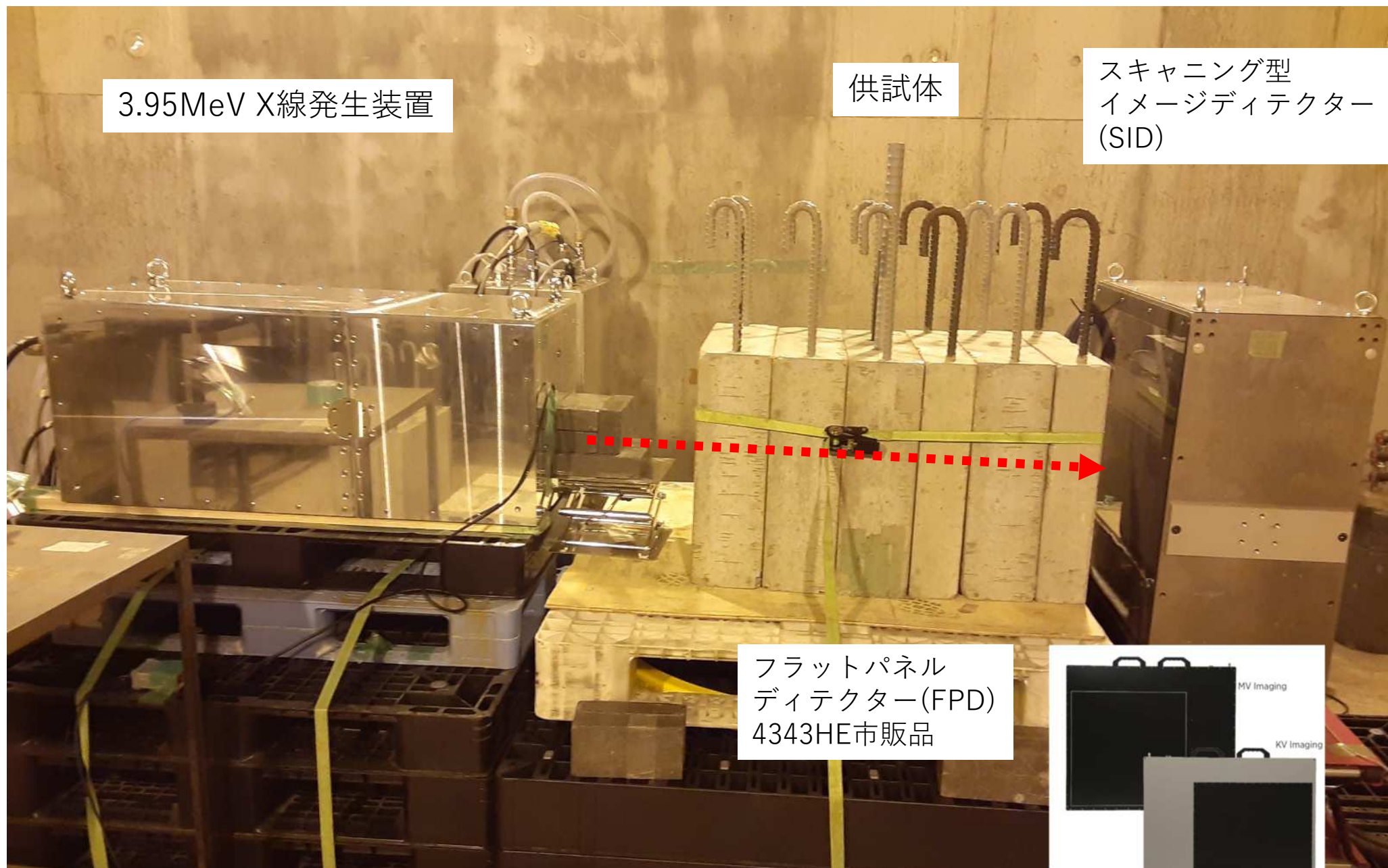
400mm

500mm

600mm

コンクリート厚

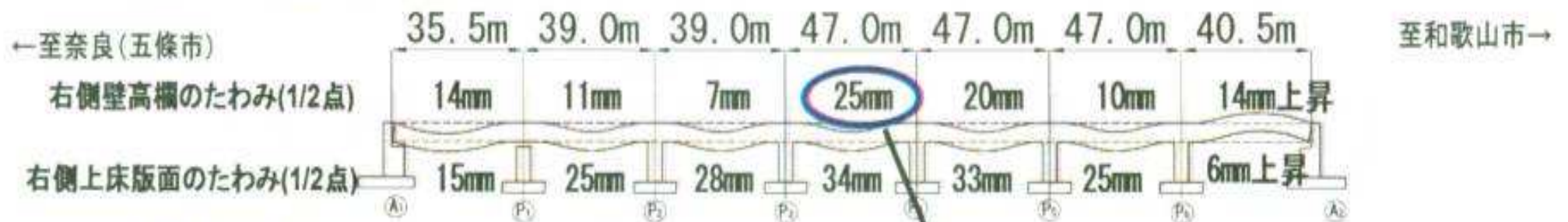
X線照射試験



- **乾燥収縮**

**橋本道路垂井高架橋、
第二阪和国道**

橋全体の変形(たわみ)のイメージ



最も大きなたわみ(P3~P4)

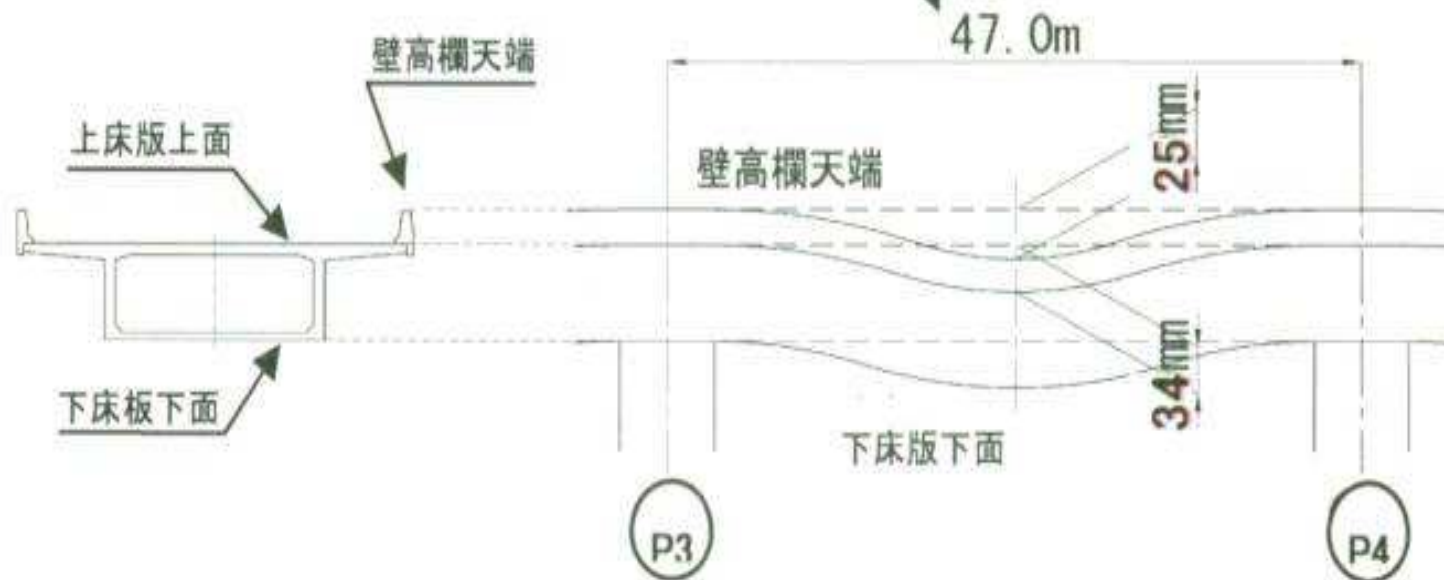
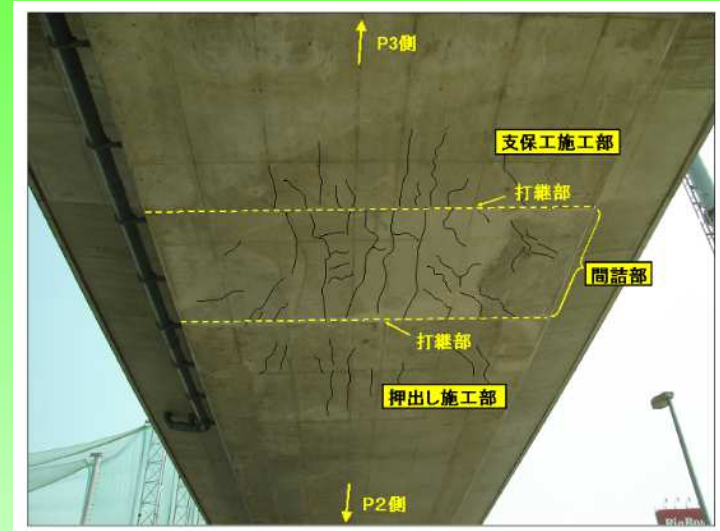


図 3.2.1.1 主桁部の鉛直変位 (たわみ)

変状の実際



●自然田高架橋 橋脚



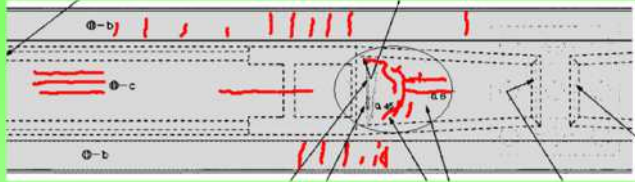
●山中川東高架橋 箱桁下面



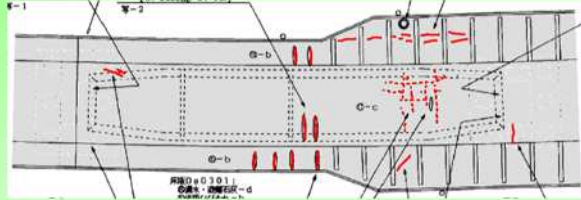
●菟砥川高架橋 プレベーム床版下面

ひび割れ発生状況(例)

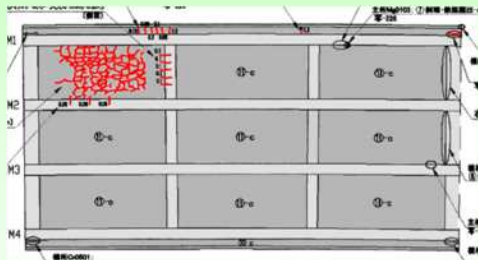
●山中川東高架橋 上部工(箱桁下面)と橋脚



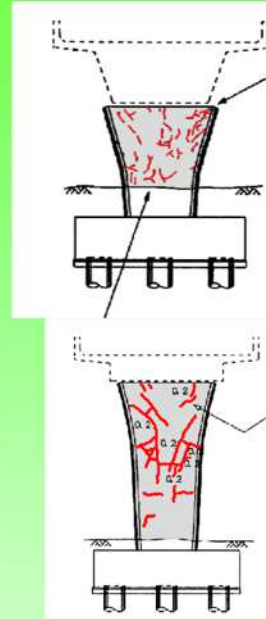
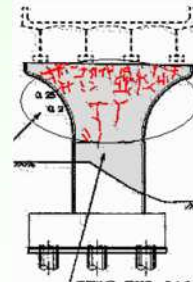
●山中川高架橋 上部工(箱桁下面)と橋脚



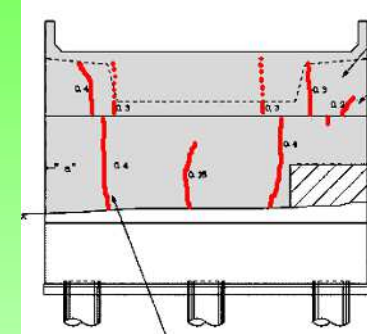
●自然田高架橋 上部工(プレキャスト床版下面)と橋脚



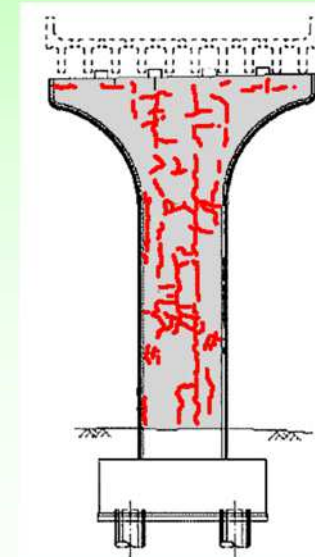
●菟砥川高架橋 上部工(プレキャスト床版下面)と橋脚



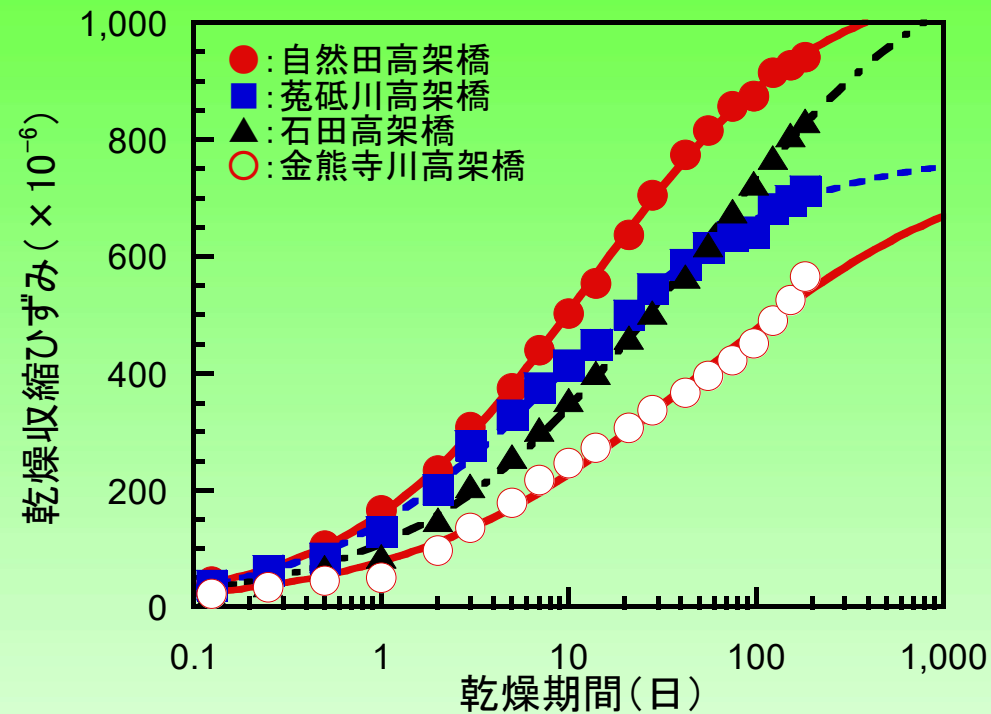
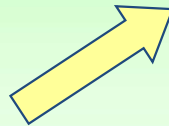
●金熊寺川高架橋 橋台



●石田高架橋 橋脚



コア抜き供試体の長さ変化測定



最終ひずみ

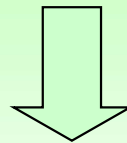
(双曲線で回帰した最終予想値)

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。

変状の原因

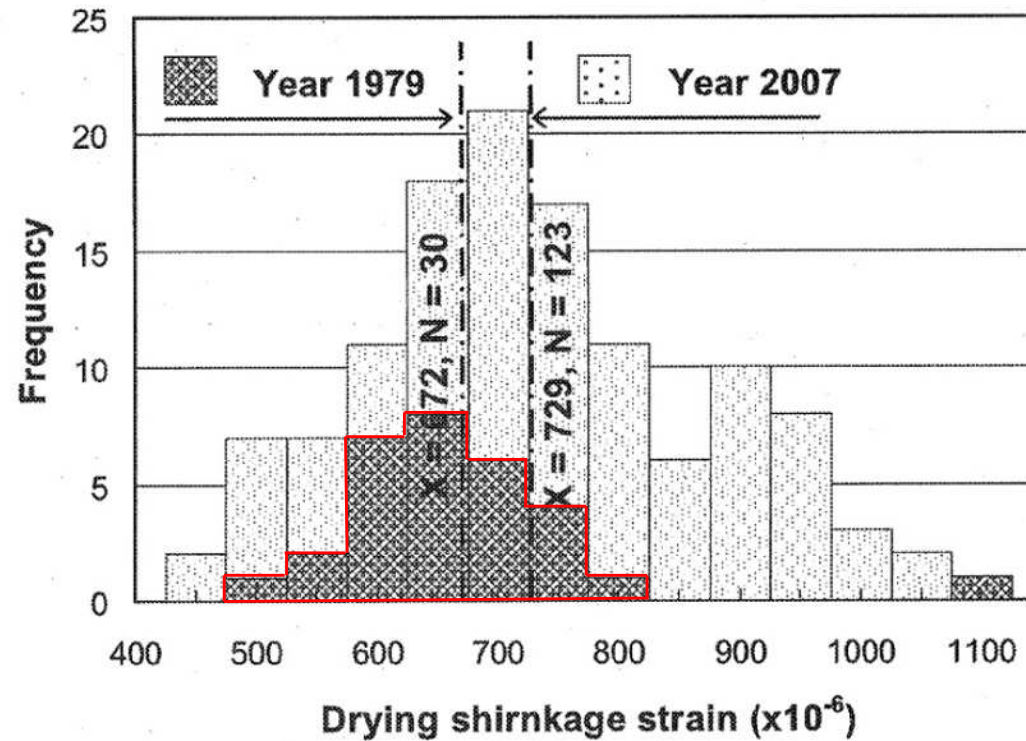
- 変状は工場製品に発生していない。
→現地調達したコンクリートに問題。
- コンクリートは大きな乾燥収縮ひずみを示す他は、特に問題がなかった。
- 解析モデルで大きな乾燥収縮ひずみを与えると、変状をある程度再現できた。



主たる要因は、コンクリートの乾燥収縮ひずみが大きくなる骨材が使用されたことにあり、現行の指針・規格類の体系では、この種の骨材を選別することが不可能であることによる。

特性値(ϵ_{req})について

乾燥収縮実測データの変化

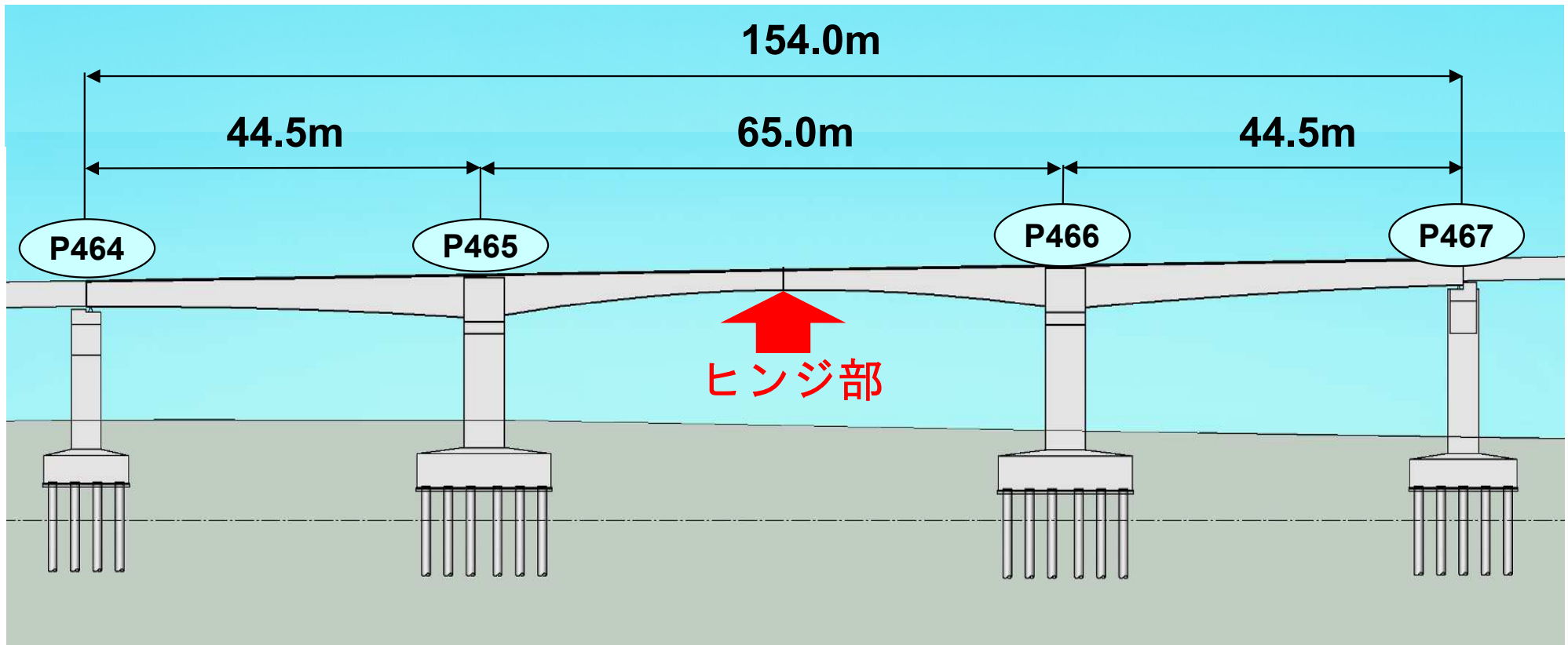


*DATA from JCA & AIJ

10

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

供用から約40年経過したディビダーク工法によるPC3径間有ヒンジ
ラーメン箱桁橋

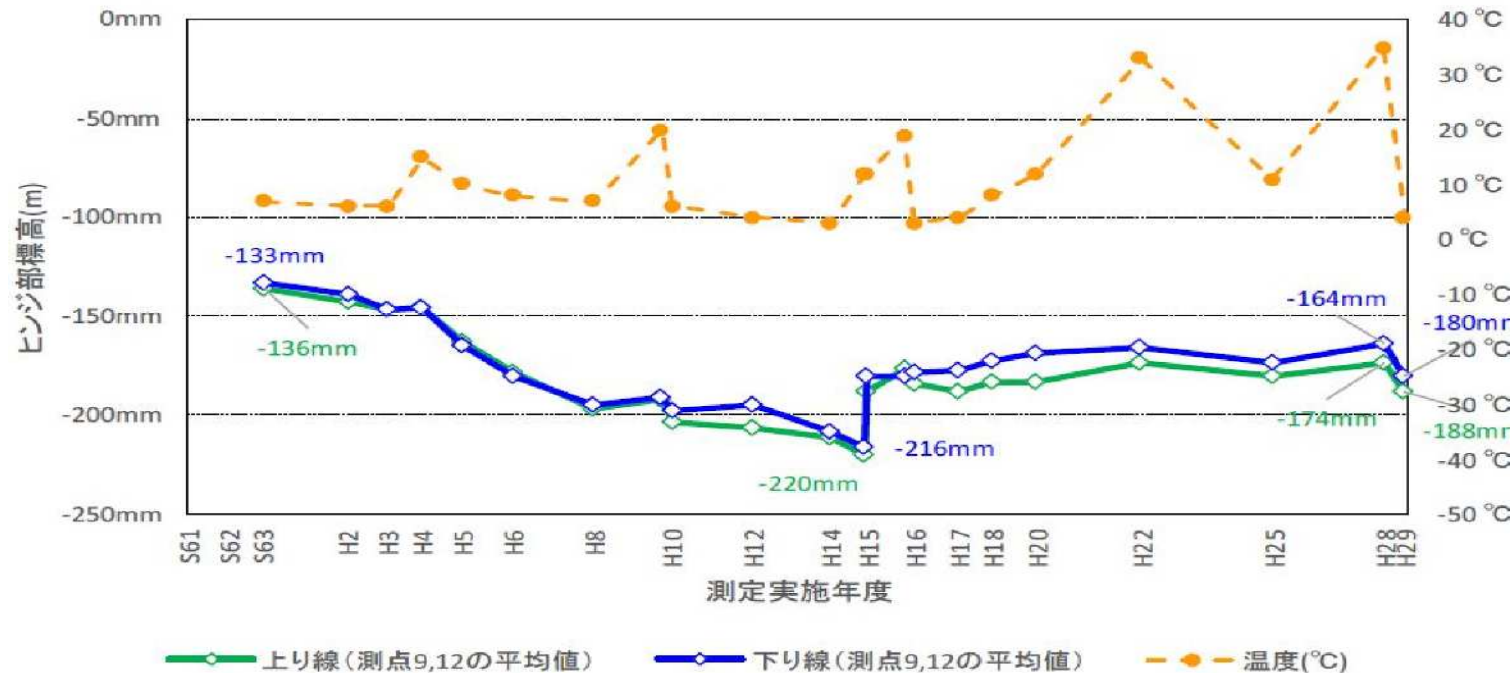


喜連瓜破高架橋



補強前の垂下り（橋面写真）

ヒンジ部垂れ下がり量 経年変化



- ◆ 走行性確保のために**舗装のオーバーレイ**(S61,H5)
 - 垂れ下がり悪化
- ◆ 経年的な垂れ下がり解消するため**下弦ケーブルとストラット部材によるヒンジ部の上越し補強**(H15)
 - 少し回復・進行を停止



【下弦ケーブル補強の状況】

・時空間シナリオデザイン

コロナ禍・パンデミック



10日物語(デカメロン)・意識の変化

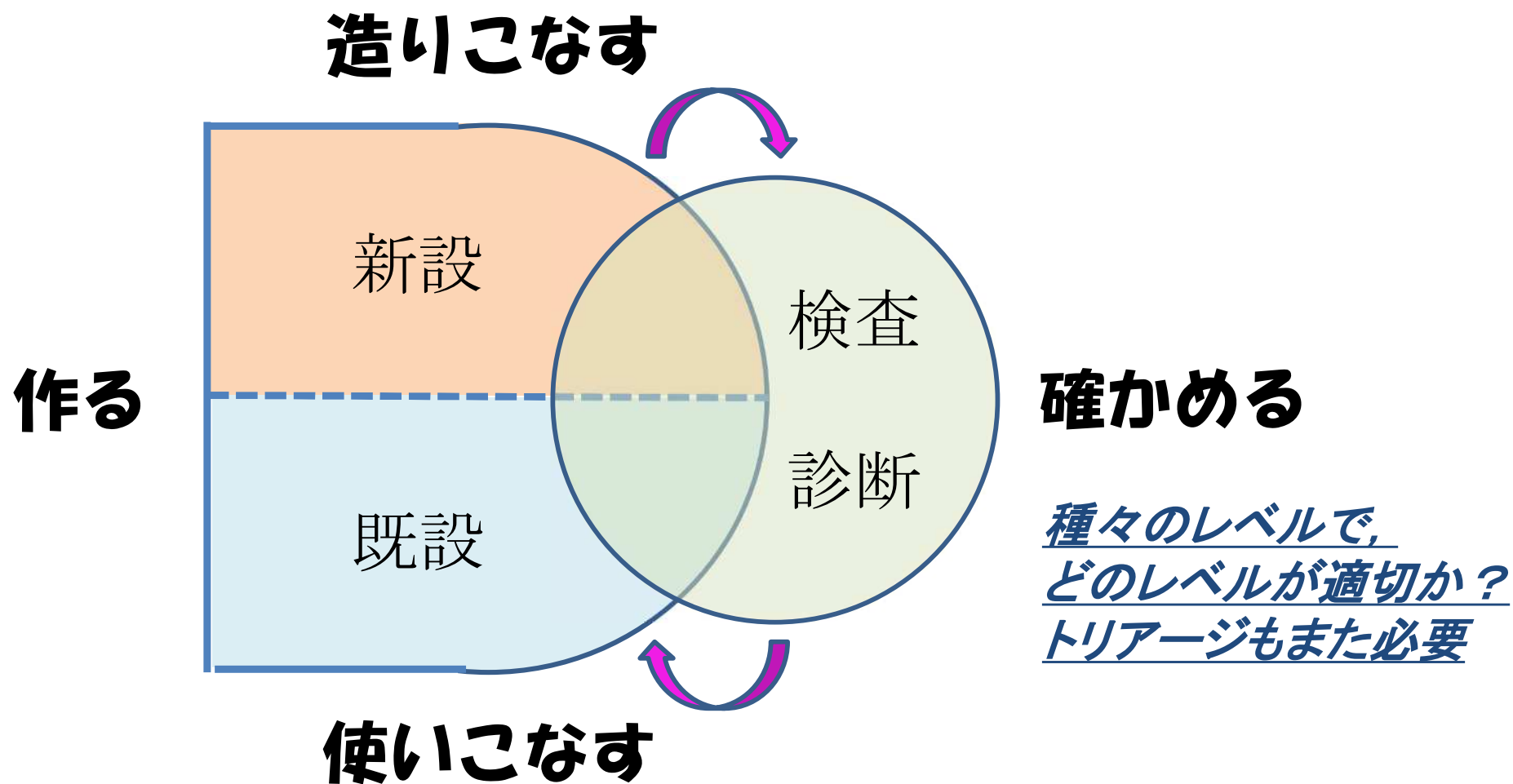
ニューノーマル：コロナ以降の世界

- ・ **非接触・非対面で社会活動を進めるため、様々な分野でデジタル技術。デジタルトランスフォーメーション(DX)が市民社会に浸透し始めた。⇒サイバー空間での作業増大**
- ・ **新型コロナ対策ではなく本来進む方向にコロナが加速(サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステム⇒Society 5.0)。サイバーインフラモデル、デジタルツイン**
- ・ **今こそ“どうなるかではなくどうすべきか”⇒シナリオ提案！**
- ・ **点検にドローンやロボットをはじめとする器具、結果をAIで解釈しARやMRなどで確認し、診断に。**
- ・ **しかし、AIには「意味」が分からない！
しかも、確信をもって偽りを報告することがある＋膨大なエネルギーを消費する。指示・質問&判断・選択が重要**

⇒今こそ本来の人間の知恵の出番！

・そして今、インフラは

技術の二本柱



時空間シナリオに基づいた維持管理
適切な維持管理で持続可能な未来が

定期点検や更新事業の実施等により得られた新たな知見

長期保全メニュー	定期点検や更新事業の実施等により得られた新たな知見	劣化写真
中空床版等の路面陥没等への対応	➤ 橋梁舗装補修の影響により、床版上面にひび割れが発生。交通荷重の影響により、ひび割れから床版の陥没に進展。また、ひび割れから水が床版内に浸透し、滞水することで床版下面まで損傷。	 
PC鋼材の腐食及びグラウト充填不足への対応	➤ 海岸からの水分・飛来塩分がコンクリート内に浸透しており、特にグラウトの充填不足の範囲ではグラウトによる防食効果が無いため、桁やPC鋼材が著しく劣化。 ➤ 防水塗装、電気防食などの補修を繰り返しているが、架橋から約50年が経過し、これまでの補修方法では劣化が抑制できず、剥離、PC鋼材の著しい腐食が発生。	 
舗装路盤部の疲労破壊への対応	➤ 交通荷重の繰り返しの影響により、上層路盤下面からひび割れが発生し表層まで貫通。 ➤ 舗装表面からの水が下層路盤まで浸透した結果、下層路盤の強度が低下し、舗装構成全体にたわみを伴う変形が発生。路盤の変形が戻らないため、表層・基層を補修しても短期間で新たなひび割れが発生。	
地すべり対策をしても変状が収まらない切土のり面への対応	➤ 大規模な断層や地山の亀裂に雨水が浸透することにより、切土のり面のすべり面の風化が進行し、地山の地すべりが長期的に進行。 ➤ これまでグラウンドアンカー等による補強を繰り返しているが、のり面全体の変状が止まらない状況。	 
火山堆積物地質における路面陥没への対応	➤ 盛土に浸透した降雨等により、空隙を有する火山堆積地層である原地盤へ、盛土内の細粒分が流出し、路面陥没や沈下が繰り返し発生。 ➤ 空洞の充填、遮水シート等の設置、排水溝の漏水防止対策などの補強、補修を繰り返しているが、建設から約35年が経過し、これまでの補修方法では発生を抑止することが困難。	 

× 電子

橋の匠

最適延命化方策選定システム

Selection System for Bridge Life Extension Method

最適調査方法
選定プログラム

最適補強方法
選定プログラム





一般社団法人

橋梁延命化シナリオ研究会

<https://bridge-scenario.or.jp/>

2050・カーボンニュートラル

- ・ 環境対策ではなく、産業・社会構造の変革。
- ・ エネルギー消費を減らし、エネルギー当たりのCO₂排出原単位を小さくすること。⇒働き方改革&AI
- ・ コンクリート：混和材の利用、CCU材料の利用、コンクリート中へのCO₂吸収+ α （工期など）

注)CCU=Carbon capture and utilization

- ・ 全体システムとして最も有効な対策は⇒丈夫で美しく長持ち！

⇒維持管理がポイント！！

二つのアプローチ

- ・ **故きを温ねて新しきを知る**

孔子、論語、BC5世紀頃

- ・ **未来を仮定して新しきをつくる**

出井伸之、ドラッカーとの対談

「勝ち残る経営者の条件」、2001
年1月19日



ISBN978-4-909523-03-7

C3051 ¥2500E



定価2,500円

(本体2,273円+税10%)

橋梁通信社

コンクリート橋

丈夫で美しく長持ち

宮川 豊章

橋梁通信社

コンクリート橋

丈夫で美しく長持ち

宮川 豊章

橋梁通信社

コンクリート構造 の維持管理 ・耐久性の歴史

CM



適切な維持管理で長寿命化を...

シナリオデザイン