

**コンクリート構造物の健康寿命を
カーボンニュートラルの中で
確保するために
-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**

インフラは今

- ・ **地球温暖化**
環境変動
緩和策と適応策
- ・ **人口減少社会**
人手と予算
増大する高齢構造物
- ・ **丈夫で美しく長持ちする市民社会**
丈夫で美しく長持ちするインフラ
LCC & LCCO₂

- 内容 -

- **丈夫で、美しく、長持ち**
- **健康寿命を確保するための補修補強
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

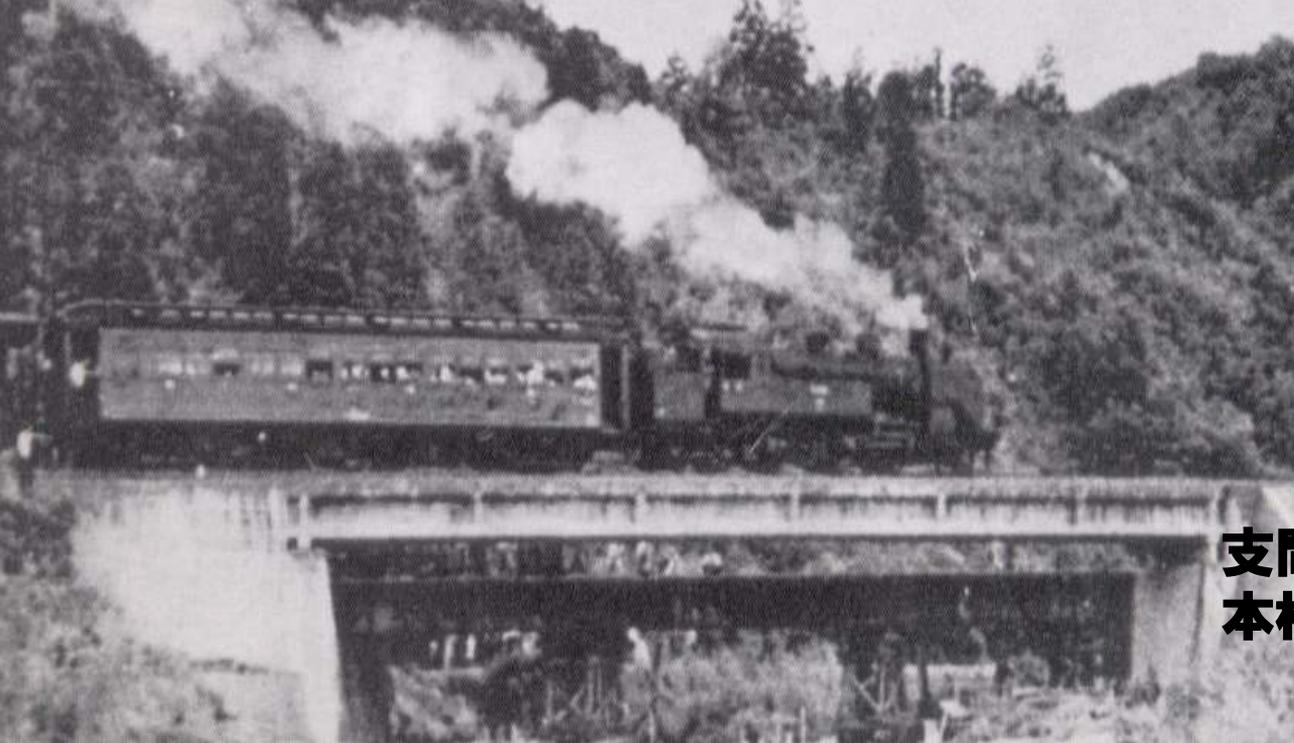
- ・日本初の鉄筋コンクリート橋
- ・1903年7月完成
- ・設計者 田辺朔郎

2017 04 30



十郷橋
(1953)
福井県



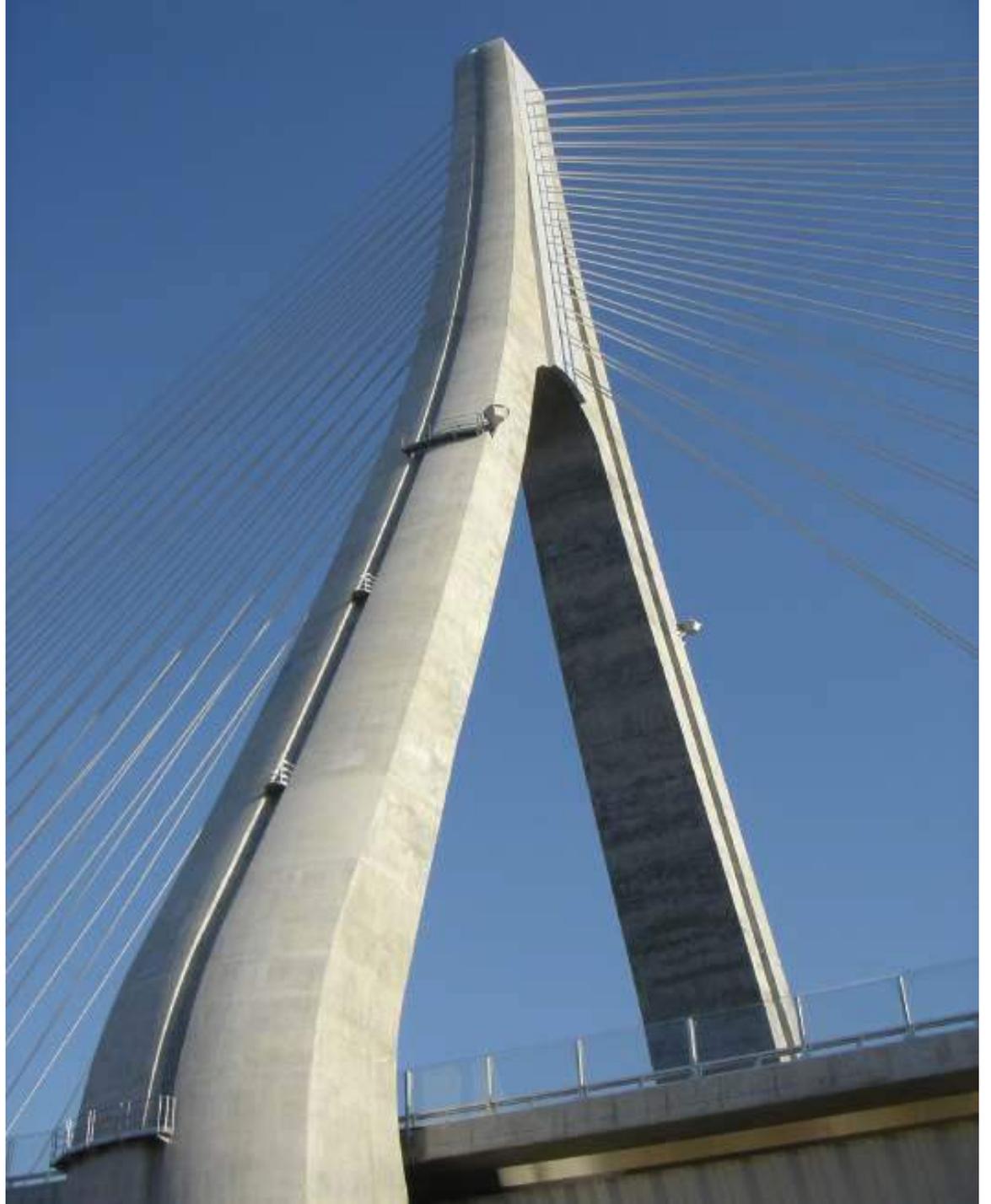


支間30m
本格的ポストテンション橋梁

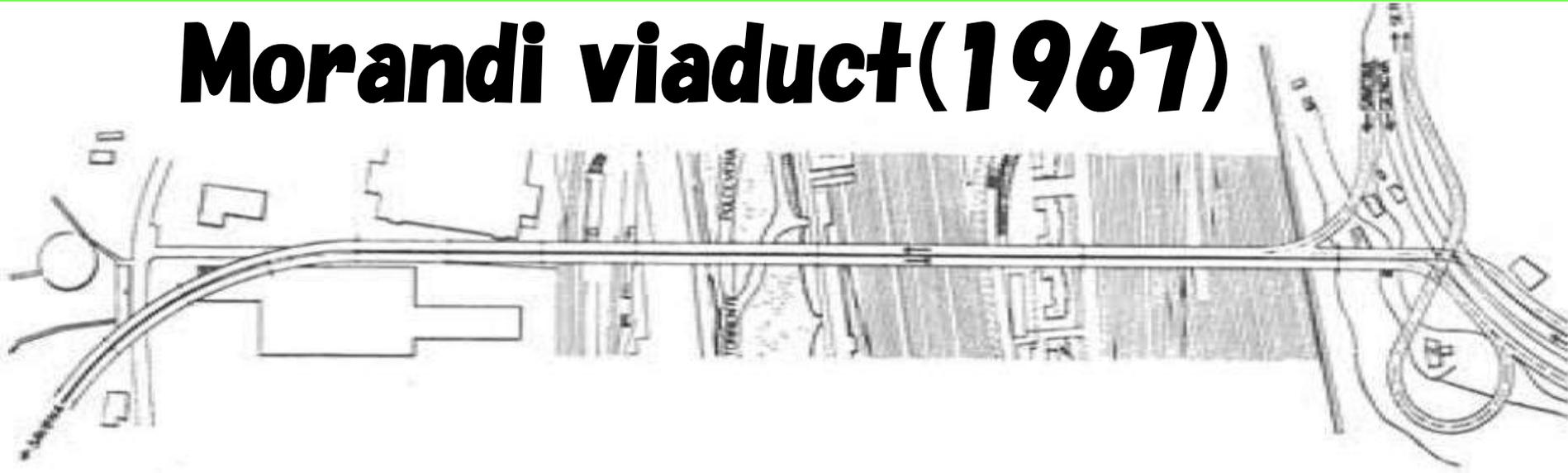
**第一
大戸川橋
(1954)
滋賀県**



**健康
寿命を
確保する!**

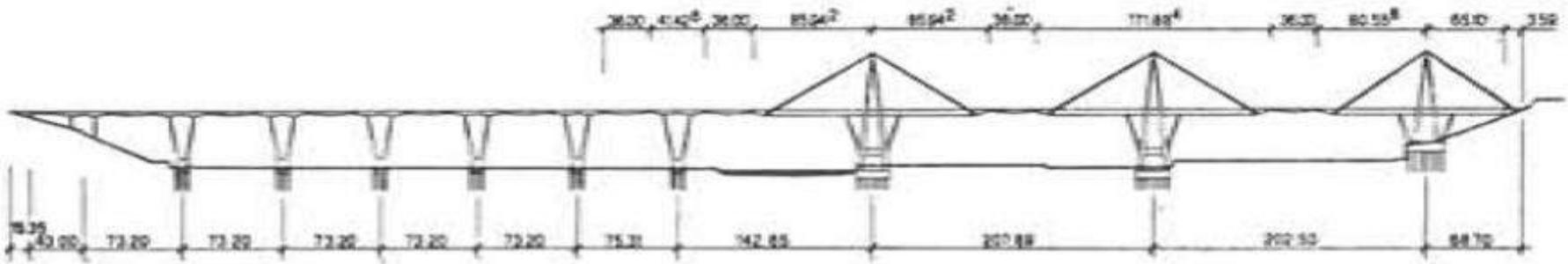


Polcevera viaduct: Morandi viaduct(1967)



planta

del viaducto principal y de las pistas de empalme



aspecto

del viaducto principal



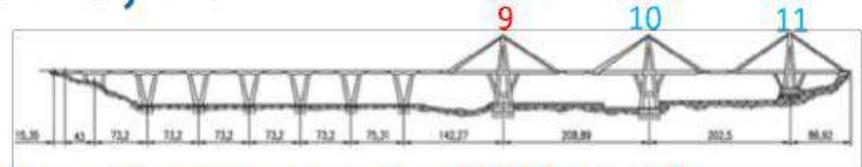
落橋前



落橋後 (2018)

Polcevera (Morandi) viaduct (1967)

SERVICE LIFE: INSPECTIONS, 2011 AND 2013



Frame 9 and 10:

2016 Report of the Italian Ministry of Infrastructure regarding inspections and tests performed in 2011 and 2013
(Journal Espresso, 13 September 2018; espresso.repubblica.it)

Stays:

- Inspected ducts and wires corroded
- Loss of pretension in the wires
- No injection in the inspected ducts

Girder:

- Inspected ducts and wires corroded
- Loss of pretension in the wires
- No injection in the inspected ducts
- Some wires broken



Stay of Frame 9



Girder

General:

Increase of deterioration with respect to 2003 and 2008 inspections

緊張材の防食



旧ポルチェベラ高架橋の取り壊し

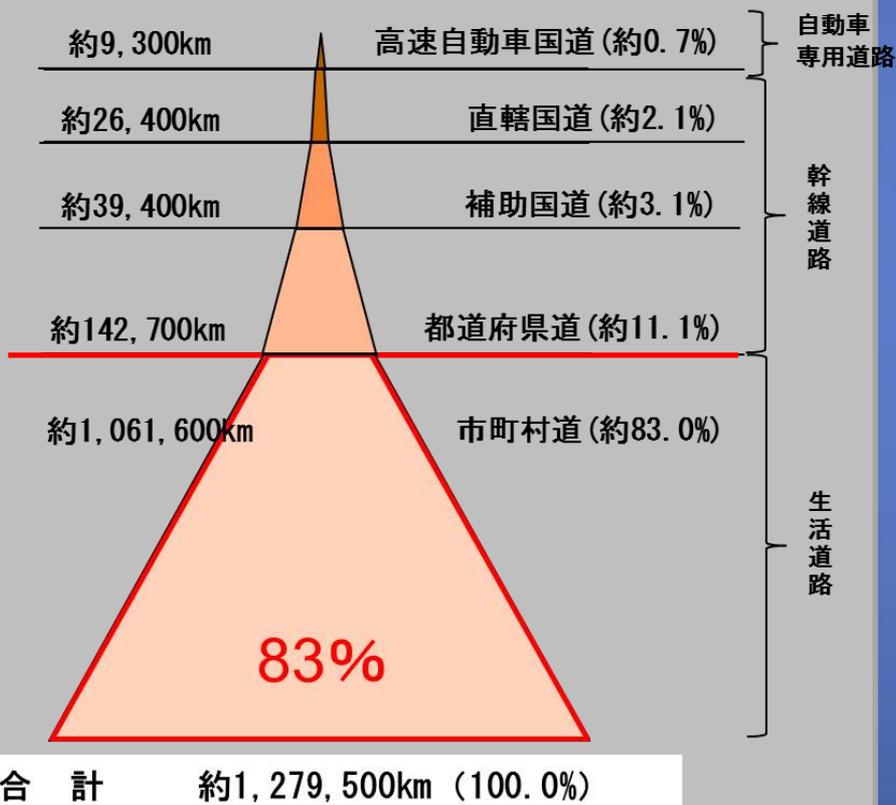


新ポルチェベラ高架橋(2020)

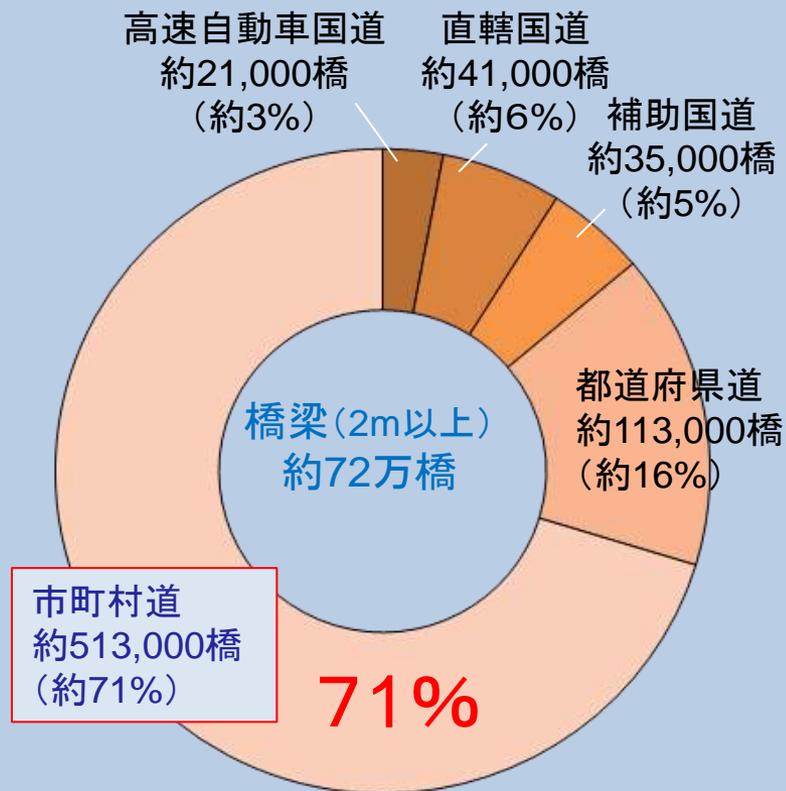
現 状

日本では、全橋梁約72万橋のうち**約51万橋が市町村道**

【日本の道路種別と延長割合】



【道路種別別橋梁数】



※四捨五入により端数調整している

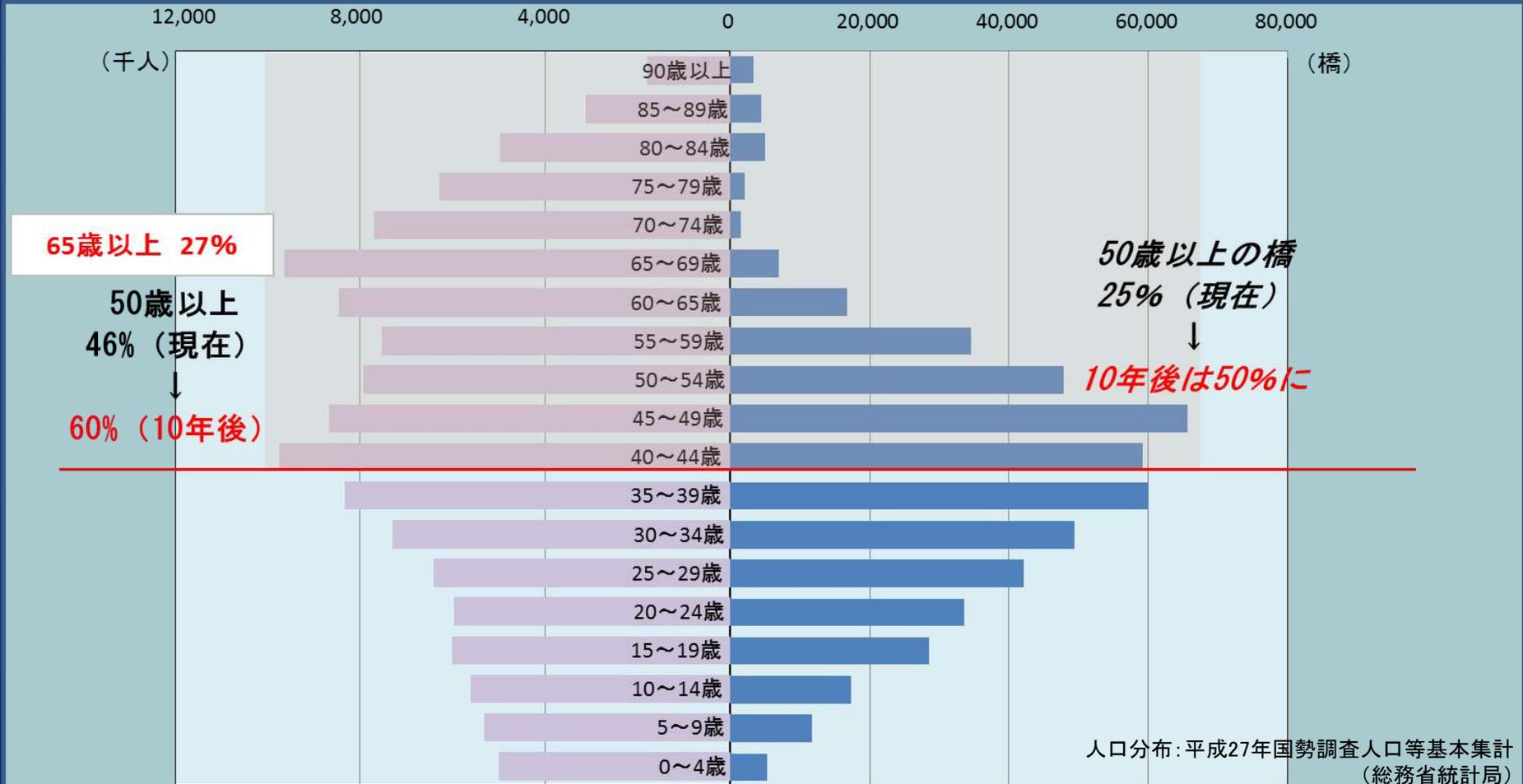
※道路局調べ (H31.3)

橋梁の高齢化

人と同じく橋も高齢化し、**10年後には50歳以上の橋梁が全体の5割を構成**

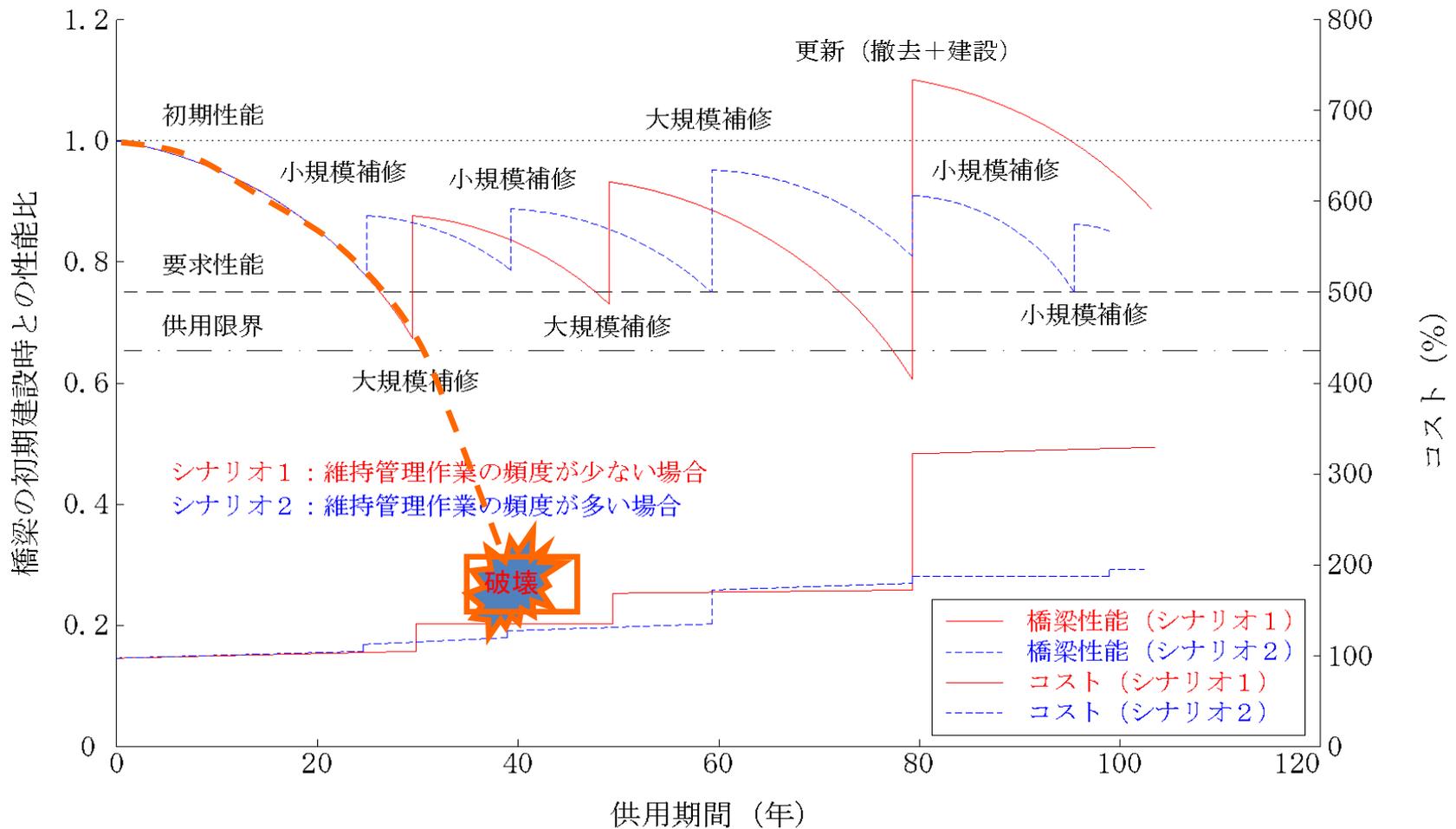
■人と橋の年齢分布

※橋長2m以上72万橋の分布



部材の損傷と対策の関係

性能とコストの推移(イメージ図)



道路橋の予防保全に向けて

膨大なストック量
橋齢50年を超えるのが近い
種々の劣化因子

要求性能の高度化
地震、設計法
荷重の増大

見ない

市町村の9割
技術者がいない
お金がない

見過ごし

技術の低下
教育の不足
愛情がない

先送り

落橋
経験が少ない
お金がない

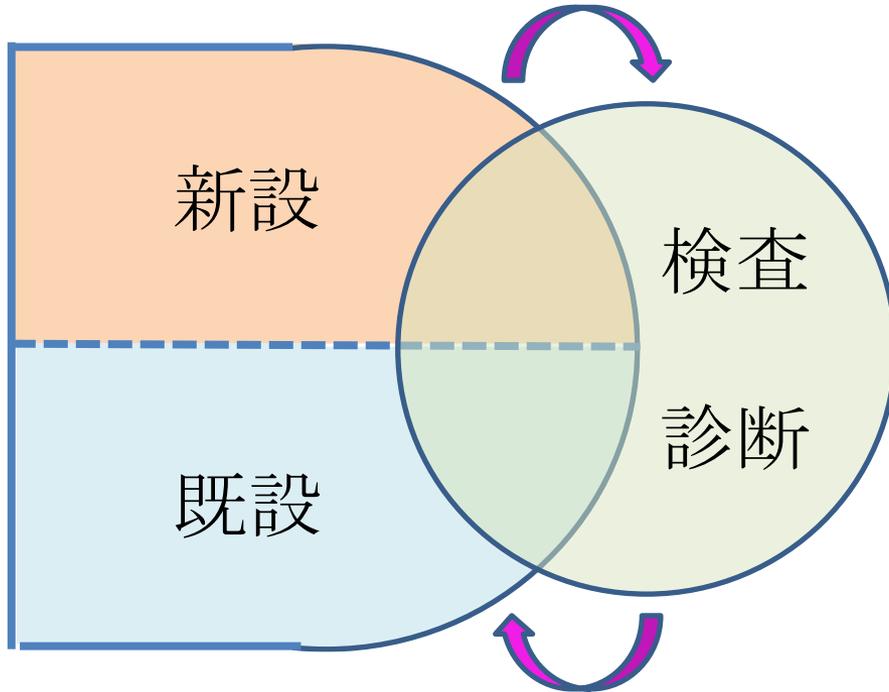
これではいけない

- **健康寿命を確保するための
補修・補強**

技術のレベル

造りこなす

作る



確かめる

種々の材料レベルで、
どのレベルが適切か？

使いこなす

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 19

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

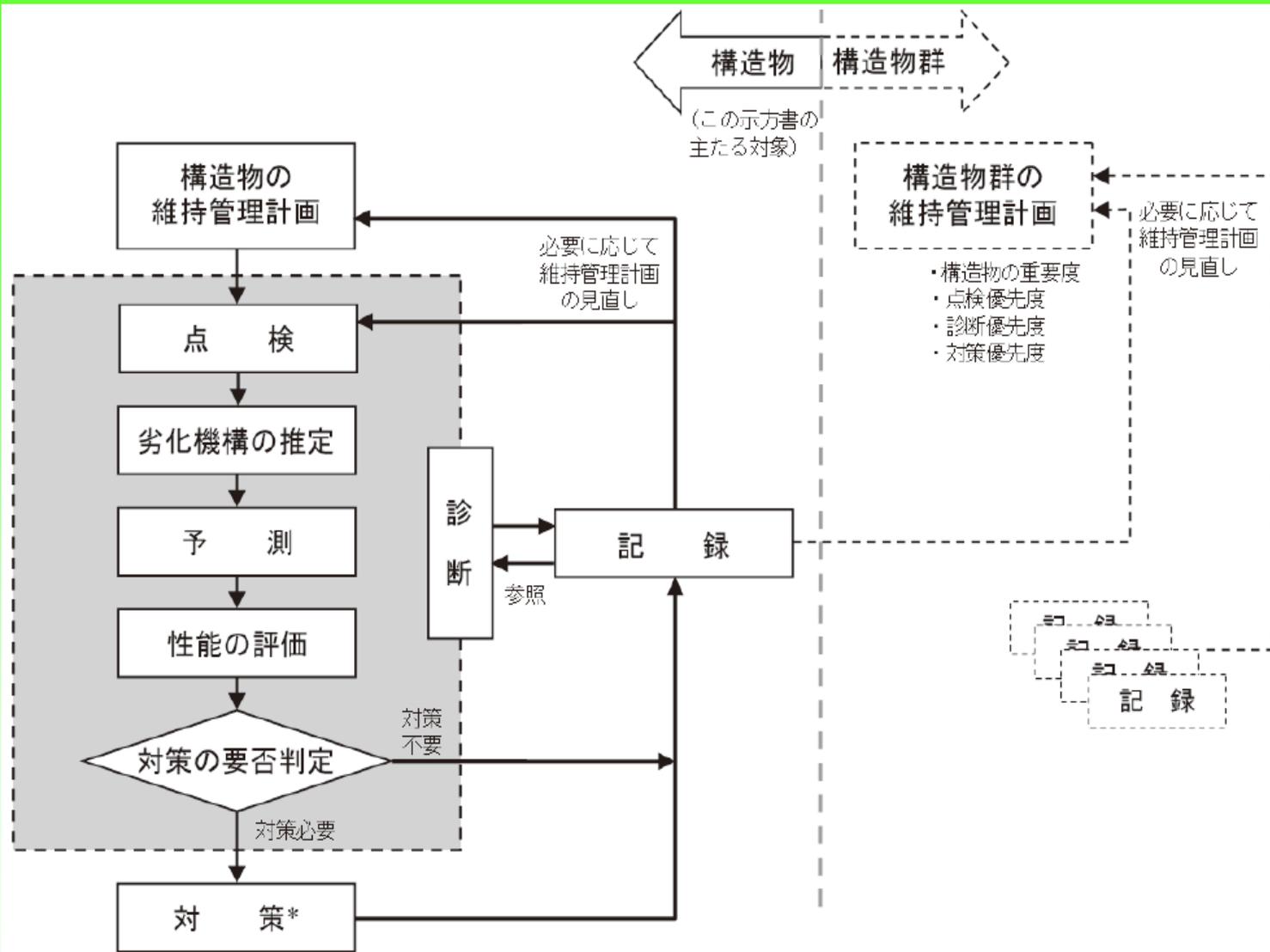
東北本線



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！

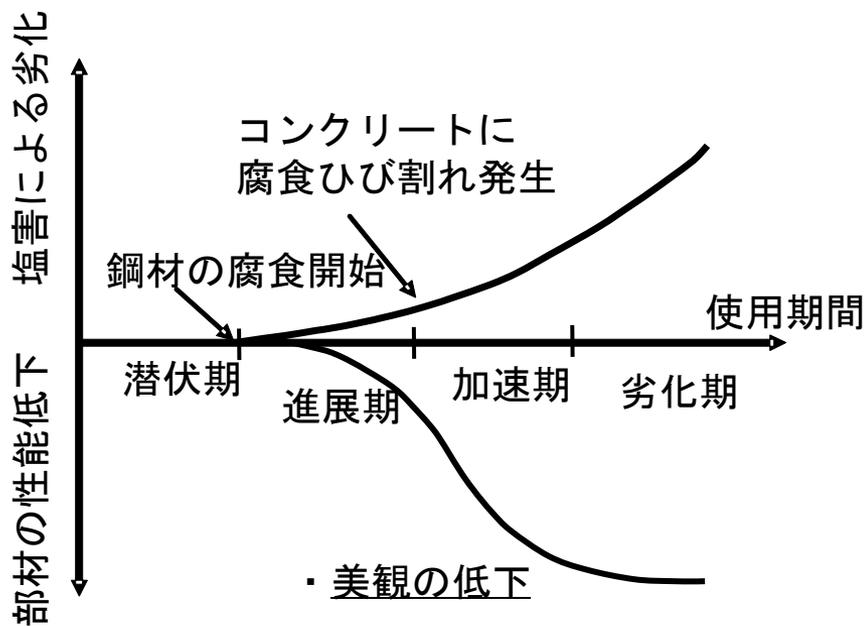




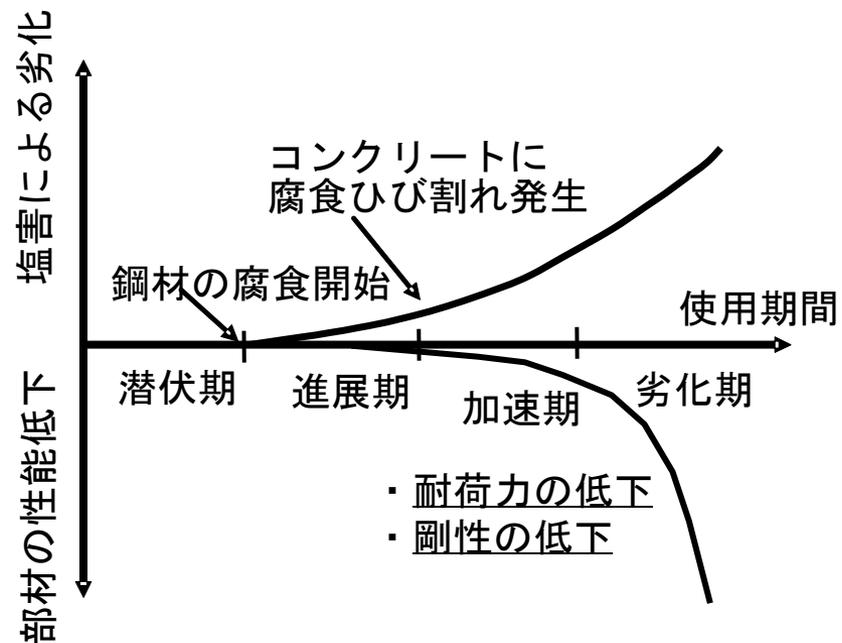
*)対策として解体・撤去が選択された場合には、記録を行った後に終了する。

維持管理の流れ

- **塩害**



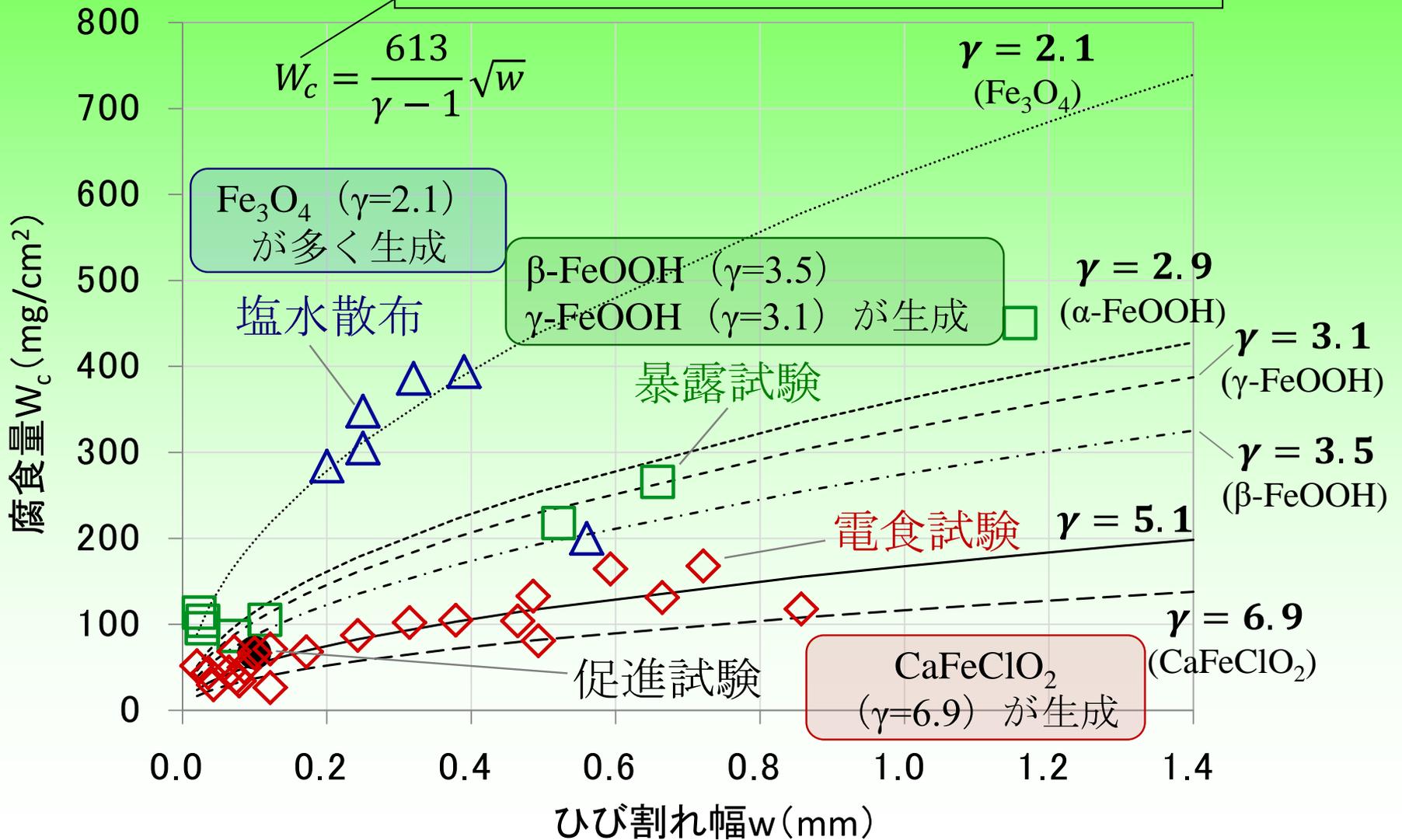
(a) 美観・景観に着目した場合



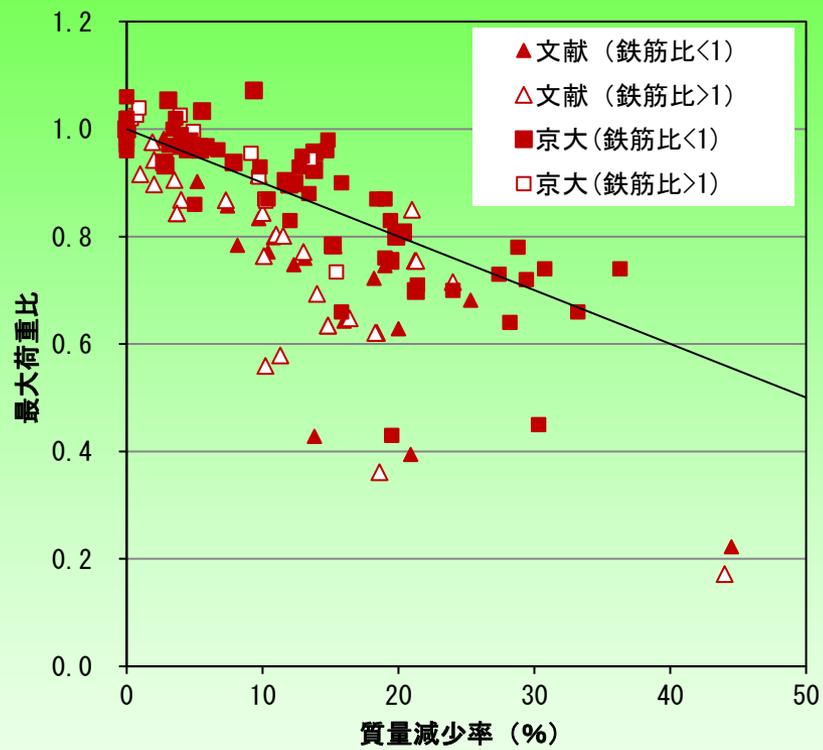
(b) 安全性に着目した場合

塩害による劣化進行過程の概念図の一例

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



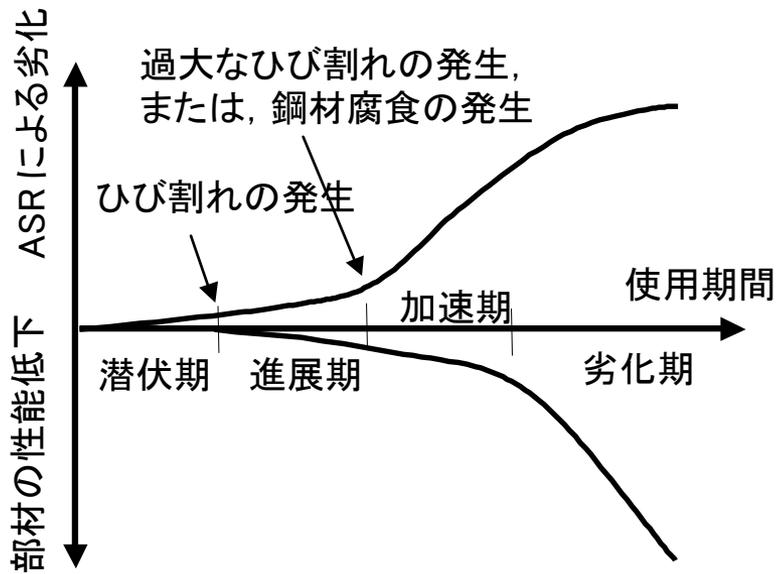
分類	さびの状態	生成環境および主な特徴	体積膨張倍率
A1		比較的乾燥しやすい環境。赤さびが表面に定着するが、腐食速度は小さい。	3.1倍程度 (γ -FeOOH)
A2		材料分離を生じてブリーディングによる大きな空隙がある場合には、湿潤環境でも赤さびができる。ひび割れ発生以後はさびが溶出し、腐食速度は大きい。孔食を伴うことも多い。	— (ひび割れ発生以降は溶出)
B		水が入りやすく抜けにくい環境でできやすい。水分を含むのっぺりした黒さびが表面に付着している。腐食速度は小さい。	2.5倍程度 (Fe_3O_4 , α -FeOOH)
C		乾湿繰返し環境でできやすい。硬くて脆い黒さびの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



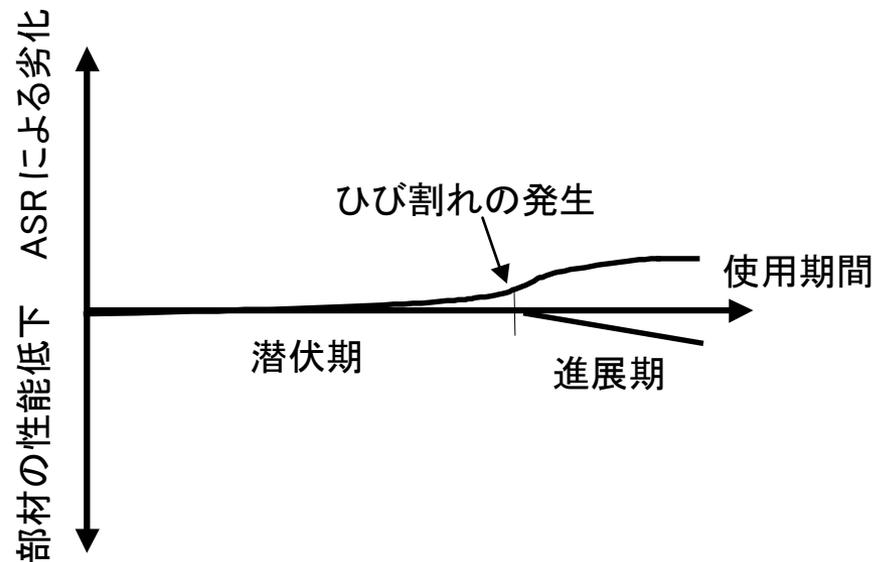
補修・補強に期待する効果と工法

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



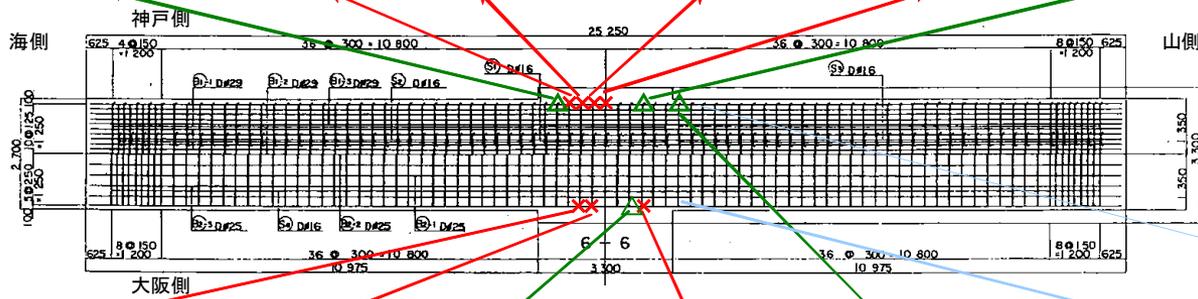
(a) コンクリートが有する膨張性が大きい場合



(b) コンクリートが有する膨張性が小さい場合

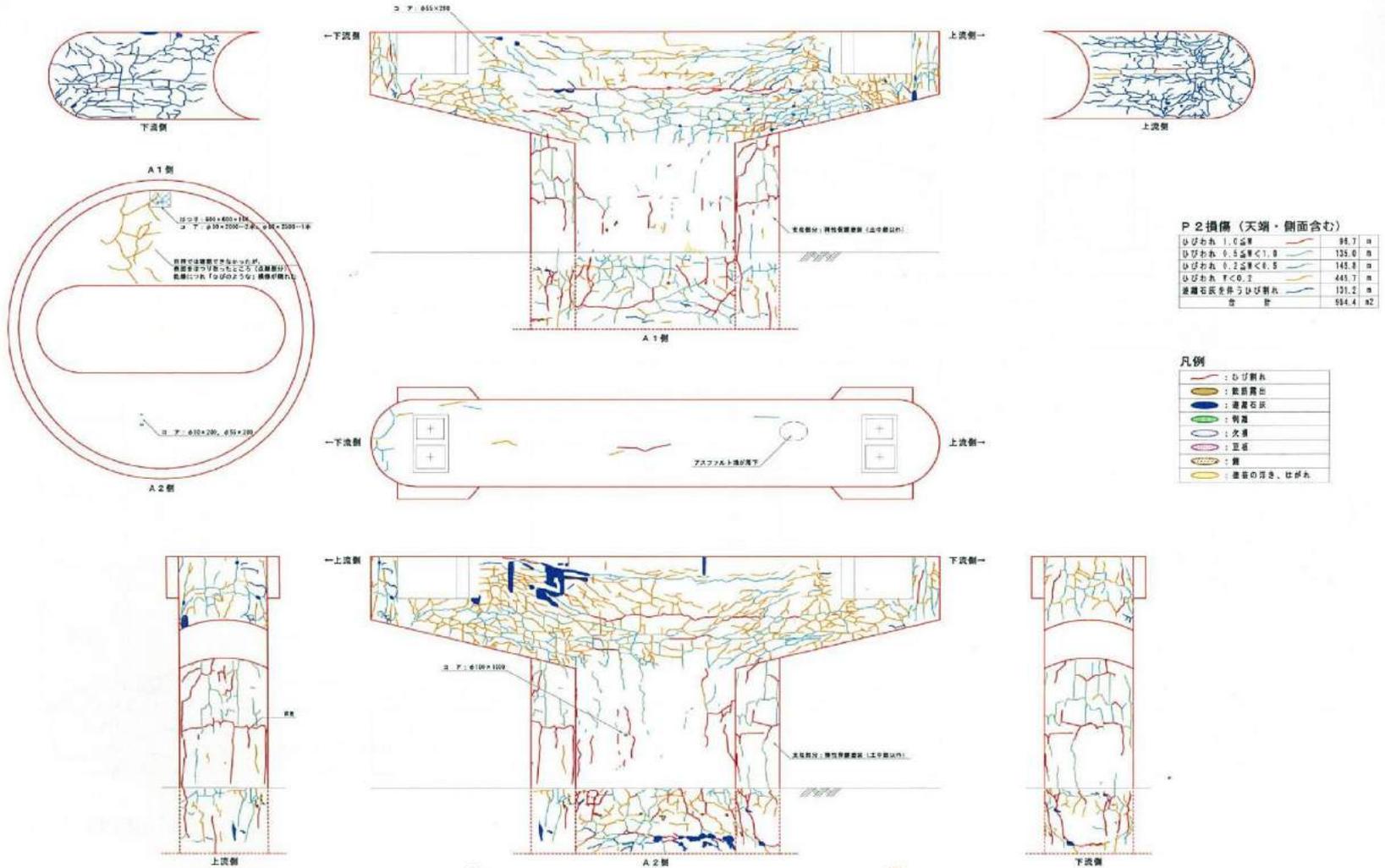
ASRによる劣化進行過程の概念図の一例

鉄筋破断の事例(橋脚梁部)



<ASR損傷状況>

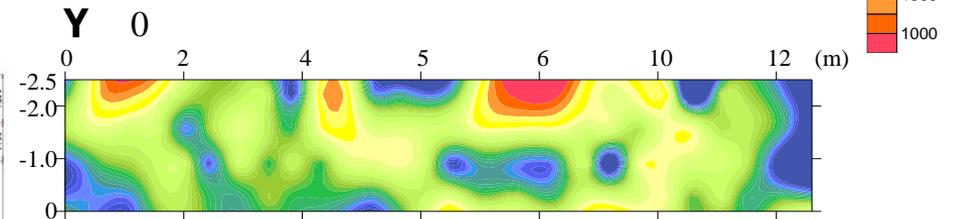
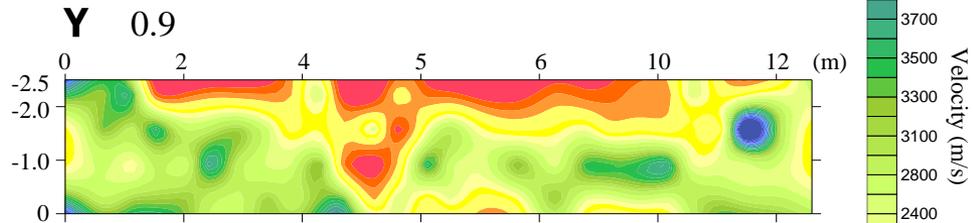
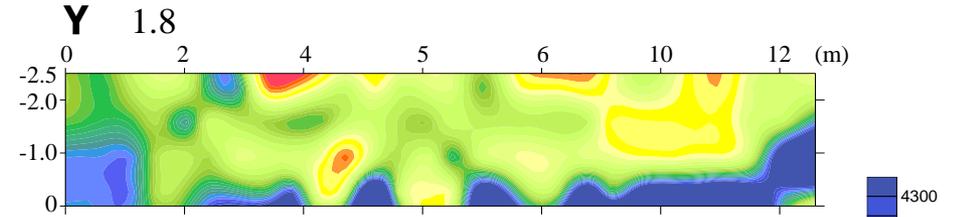
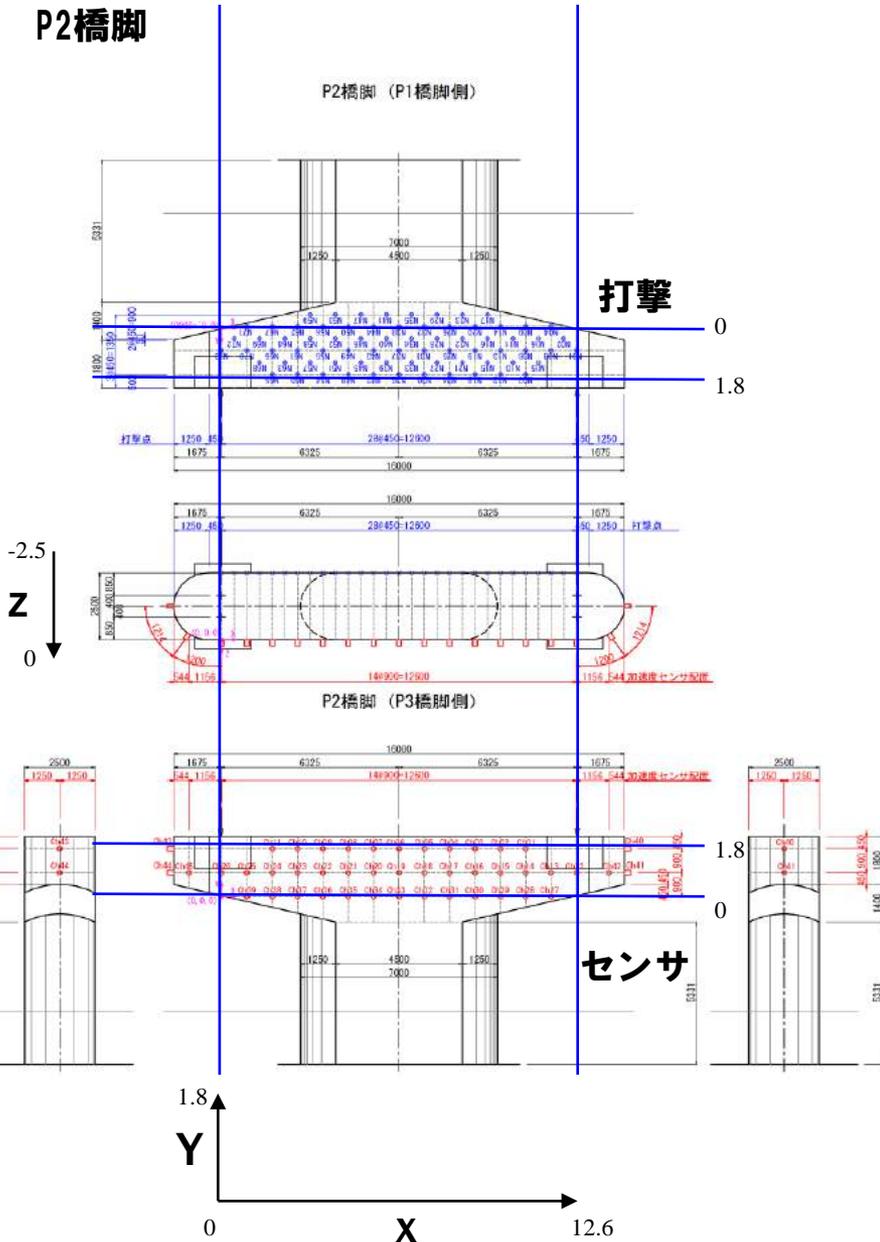
P2橋脚



P2橋脚

打撃(ハンマサイズφ100)

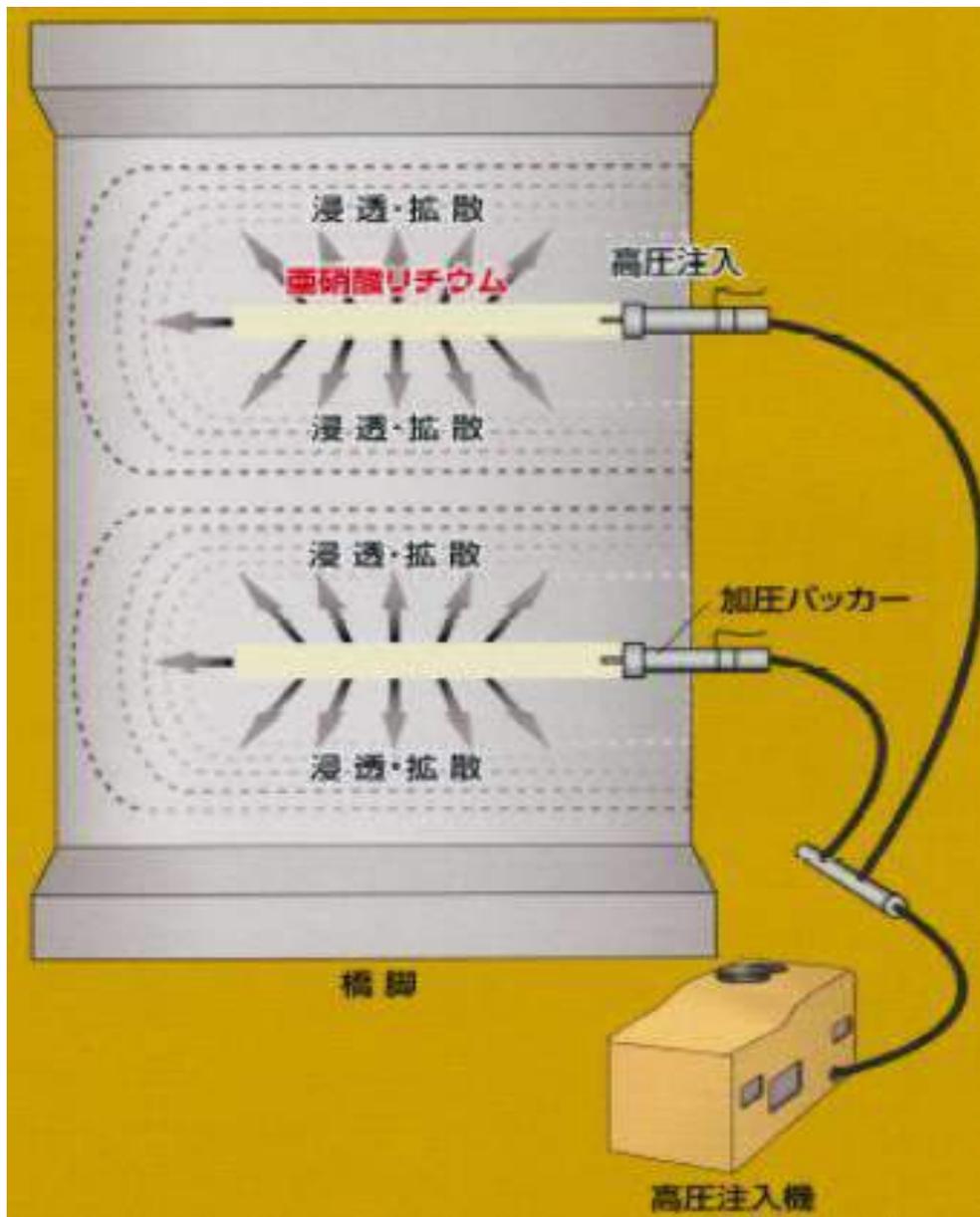
水平断面図



- 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

ASR補修・補強に期待する効果と工法

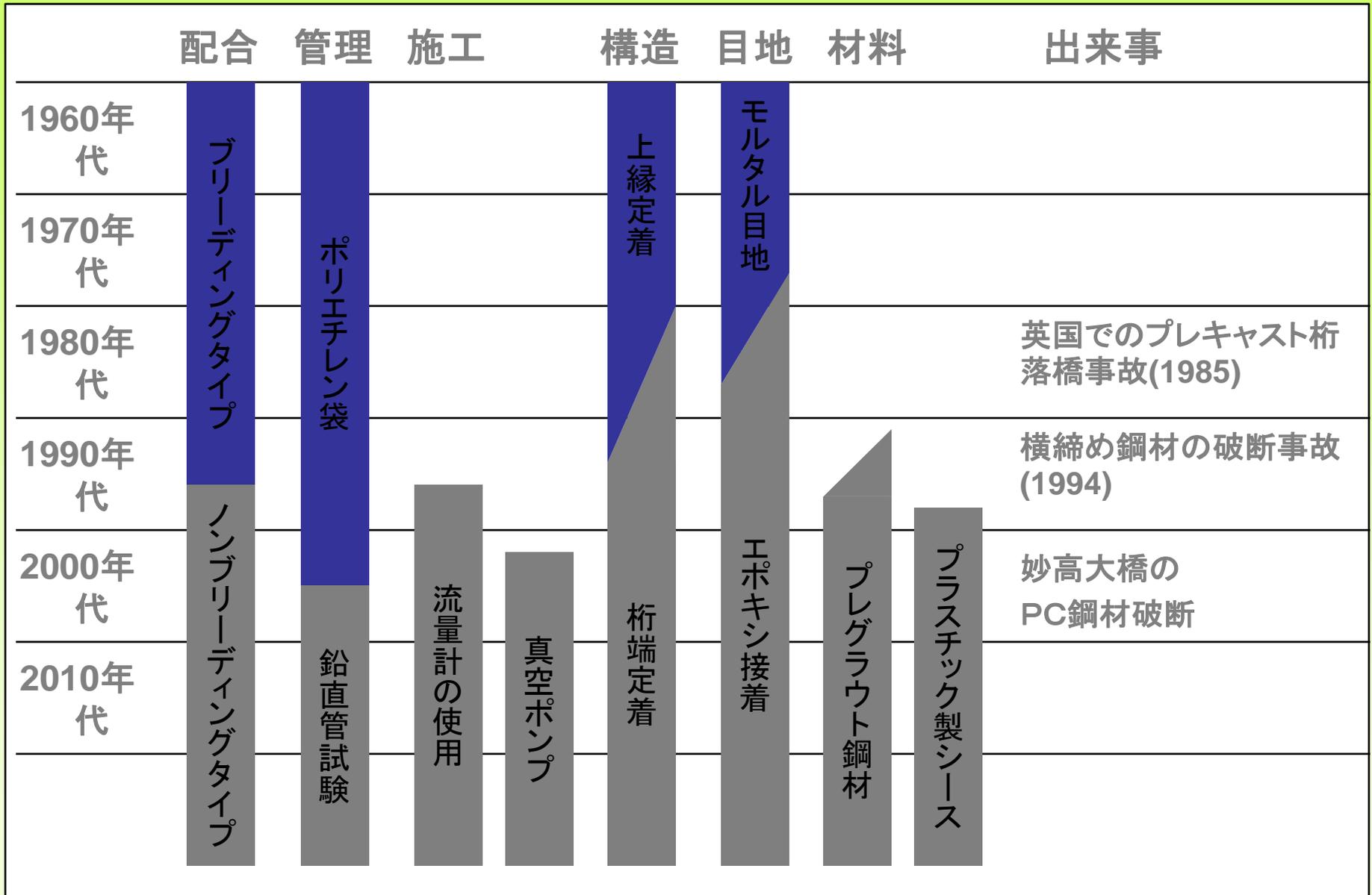
期待する効果	工法例
ASRの進行を抑制	水処理（止水，排水処理），ひび割れ注入，表面処理（被覆，含浸）
ASRの膨張を拘束	プレストレスの導入，鋼板・PC・FRP巻立て
劣化部を取り除く	断面修復
鋼材の腐食抑制	ひび割れ注入，ひび割れ充てん，表面処理（被覆，含浸）
第三者影響度の除去	はく落防止
耐荷力の回復・向上	鋼板・FRP接着，プレストレスの導入，増厚，鋼板・PC・FRP巻立て，外ケーブル



亜硝酸リチウム圧入

- **グラウト問題**

グラウト技術の変遷



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



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

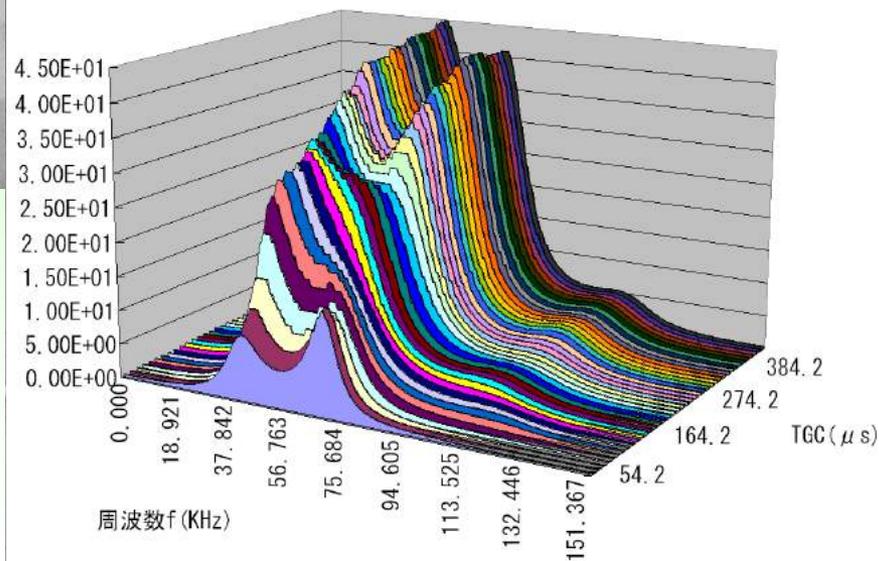
X線透過法



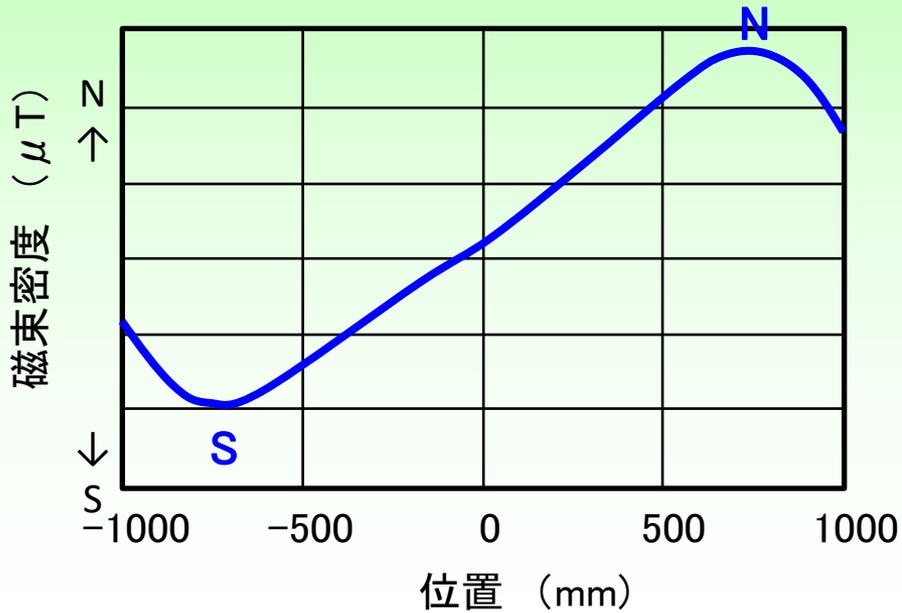
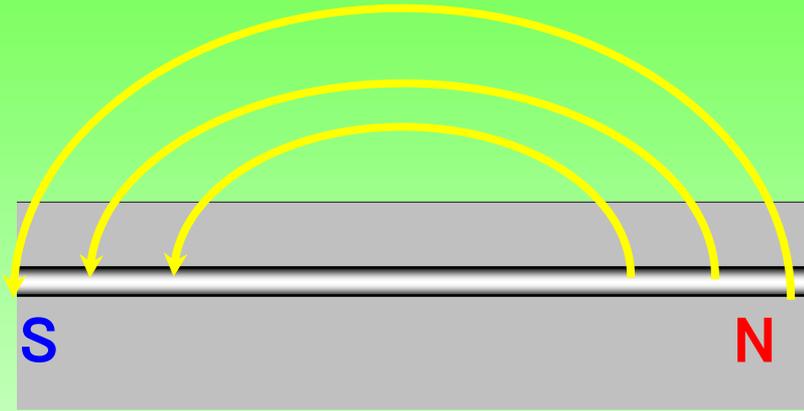
打音振動法-グラウト有無



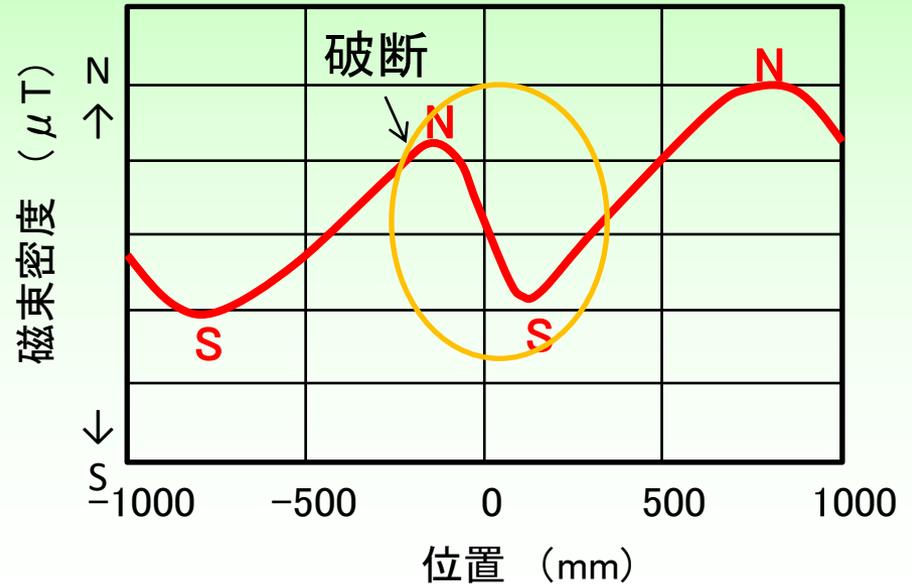
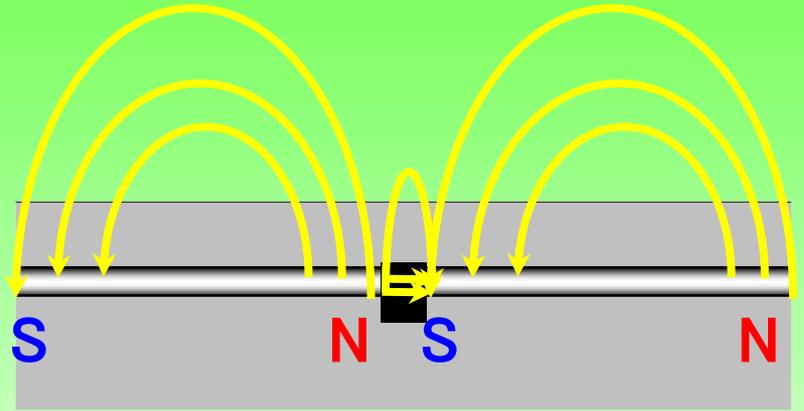
広帯域超音波法-グラウト有無



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）



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

× 終了

橋の匠

最適延命化方策選定システム

Selected System for Bridge Life Extending 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



■ 建設業界をとりまく環境 ■

つまり...

○インフラストックの増大(数的に、高齢化、大規模化、複雑・複合化)

○ベテラン技術者の高齢化・引退と若年・初級技術者の(早期)技量引上げ

○維持管理業務の質的・量的な増大と高度化、業務遂行のスピードupの社会的要請

■ ソフト「橋の匠」のターゲット ■

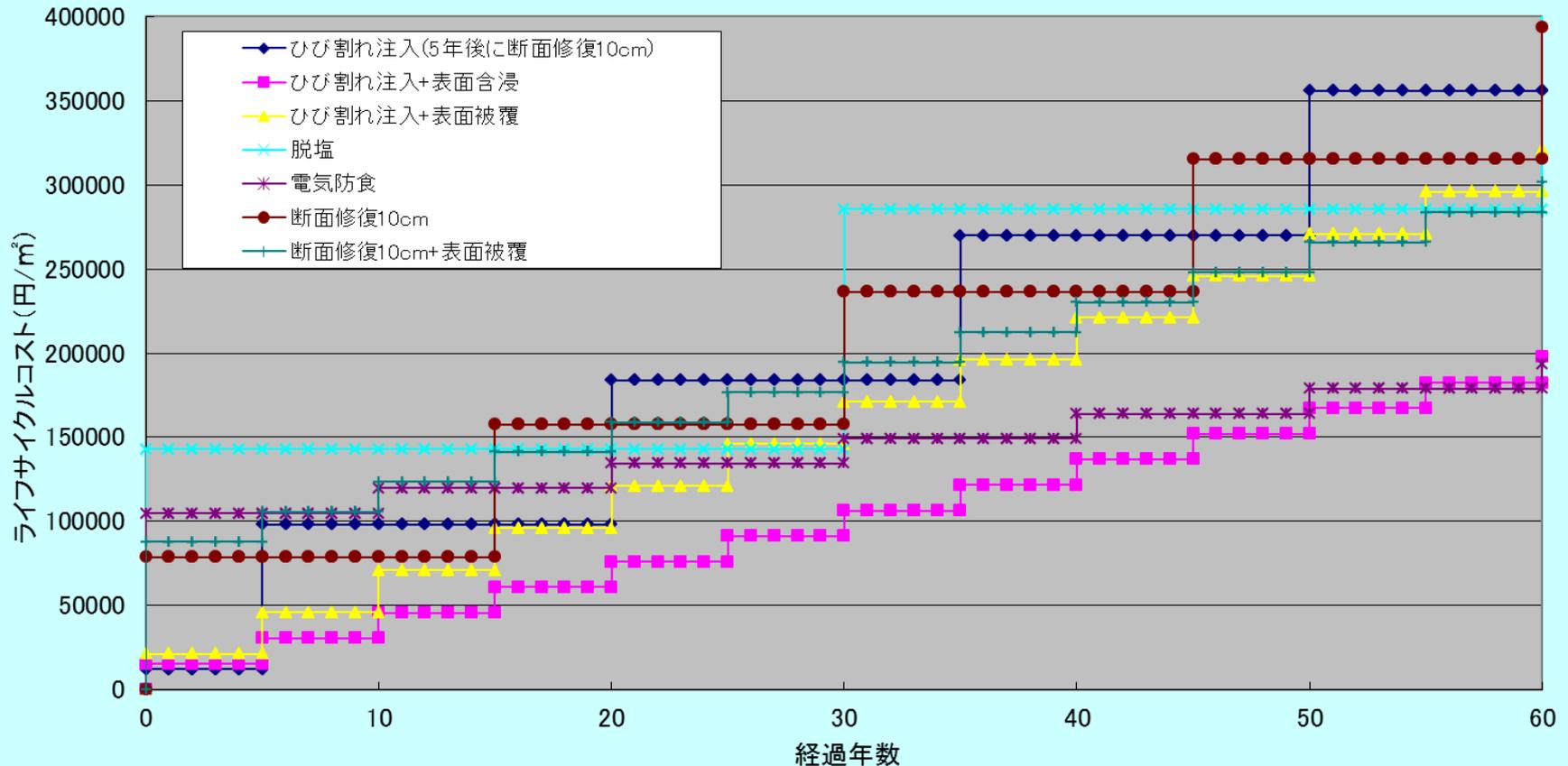
○ 若年・初級（経験少ない）技術者向け

- 維持管理業務の支援用に
- 維持管理の各種シミュレーション用に
- 維持管理の自己啓発用に

→ 「Digital 参考書」を提供しましょう！

必要に応じて、LCCを算定し最適工法(推奨案)を導く

1212 塩害/下部工/ひび割れあり/鉄筋腐食あり(鉄筋断面欠損なし)



$LCC = C_i + N \cdot C_r$ ここに、LCC:ライフサイクルコスト(円/㎡)

C_i : 初期補修費用(円/㎡) C_r : 再補修費用(円/㎡)

N : 予定供用年数内の再補修回数(回)

2次調査：具体的な調査方法を求める

前ページの②劣化状態を調査するための調査項目のうち、塩化物イオン含有量を求める調査方法には以下のような調査方法がある（画面は塩害の続き）

塩化物イオン含有量の測定方法には、これだけの方法が考えられる。各評価を参考にして、調査方法を選択してくれよ。

赤下線の評価↓を参考に選定する



採用調査法	調査方法	総合評価	実績	使用性	経済性	破壊度	新技術性	調査内容	詳細説明	調査表
<input type="checkbox"/>	塩化物イオン電極を用いた電位差滴定(全塩分)	◎	◎	◎	◎	微	—	滴定によって目的化合物の濃度を変化させながら電位差を測定し、濃度に関する情報を得る分析手法。		▲
<input type="checkbox"/>	チオシアン酸水銀(Ⅱ)吸光光度法(全塩分)	◎	◎	○	◎	微	—	試料溶液に光をあて、試料を通過する際の吸光度を測定することにより、濃度に関する情報を得る分析手法。		
<input type="checkbox"/>	硝酸銀滴定法(全塩分)	◎	◎	○	◎	微	—	指示薬としてクロム酸カリウムを用い、硝酸銀溶液で滴定する方法。		
<input type="checkbox"/>	クロム酸銀吸光光度法(可溶塩分)	○	◎	○	◎	微	—	クロム酸イオンの特性吸収波長領域における吸光度を測定することにより、塩化物イオン量を求める方法。		
<input type="checkbox"/>	塩化物イオン電極を用いた電位差滴定(可溶塩分)	○	○	◎	◎	微	—	滴定によって目的化合物の濃度を変化させながら電位差を測定し、濃度に関する情報を得る分析手法。		
<input type="checkbox"/>	硝酸銀滴定法(可溶塩分)	○	○	○	◎	微	—	指示薬としてクロム酸カリウムを用い、硝酸銀溶液で滴定する方法。		
<input type="checkbox"/>	イオンクロマトグラフ法(全塩分)	○	◎	△	○	微	—	水溶液中のイオン成分を陽イオン・陰イオンに分離して分析・定量することで塩化物イオン量を求める方法。		▼



一般社団法人

橋梁延命化シナリオ研究会

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

・これからの課題

コロナ以降の世界

- 2020年初頭以降現在まで、コロナ禍
- コロナ禍の後の社会は種々のものが確実に変わる。
- 非接触・非対面で社会活動を継続させていくために、様々な分野でデジタル技術が活発に使われるようになった。デジタルトランスフォーメーション(DX)が進められ、市民社会に浸透し始めた。
- この動きは、新型コロナウイルス対策というよりも本来の進む方向がコロナにより加速されたもの(DXによって社会を変化させるSociety 5.0の概念:2016)
- DXの中で点検にドローンやロボットをはじめとする器具が用いられ、その結果を人工知能(AI)で解釈し診断に用いようとする事も進められている。しかし、技術者が現場に行って技能を磨くことは今後も必須である。AIはその結果を評価し判断する人間以上の成果を出すことができないからである。
- 今こそ本来の人間の知恵の出番なのである。

コンクリートに要求されるもの

- **SGD' S・脱炭素化:CO₂排出量の削減、CO₂吸収・固定量の向上、評価方法の確立とルール化、適切な価値体系の創出**
- **自己治癒型材料、補修補強材料、自己診断型材料、ロボット施工用材料、3Dプリント用材料、フレキャスト製品用材料**
 - **フレキャスト製品は、地方整備局単位で具体的な検討**
- **鉄筋の結束や溶接、コンクリートの表面仕上げや吹付、資材搬送、清掃などのロボット化**
- **人工知能(AI)の利用**
 - **AIはその結果を評価し判断する人間以上の成果は出せな**
⇒人間が現場に行って技能を磨くことが今後も必要
- **今こそ人間の知恵の出番！**

AEセンサ搭載車両による土砂化検知技術

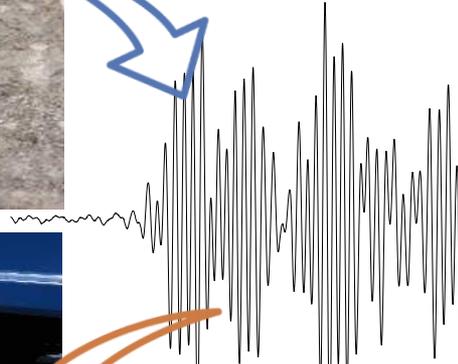
車両走行によるRC床版上面の変状(損傷した箇所)検知を効率化

“アコースティック・エミッション”

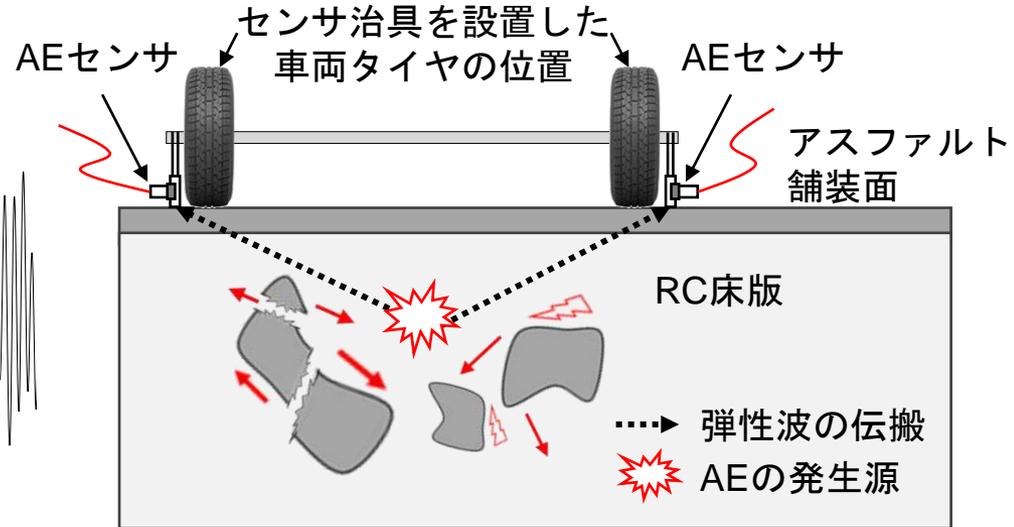
車両が走行すると…⇒RC床版内の損傷した箇所から弾性波の一種“AE”が発生
タイヤにセンサ装着 ⇒検出されたAEのエネルギーや周波数から土砂化程度を診断



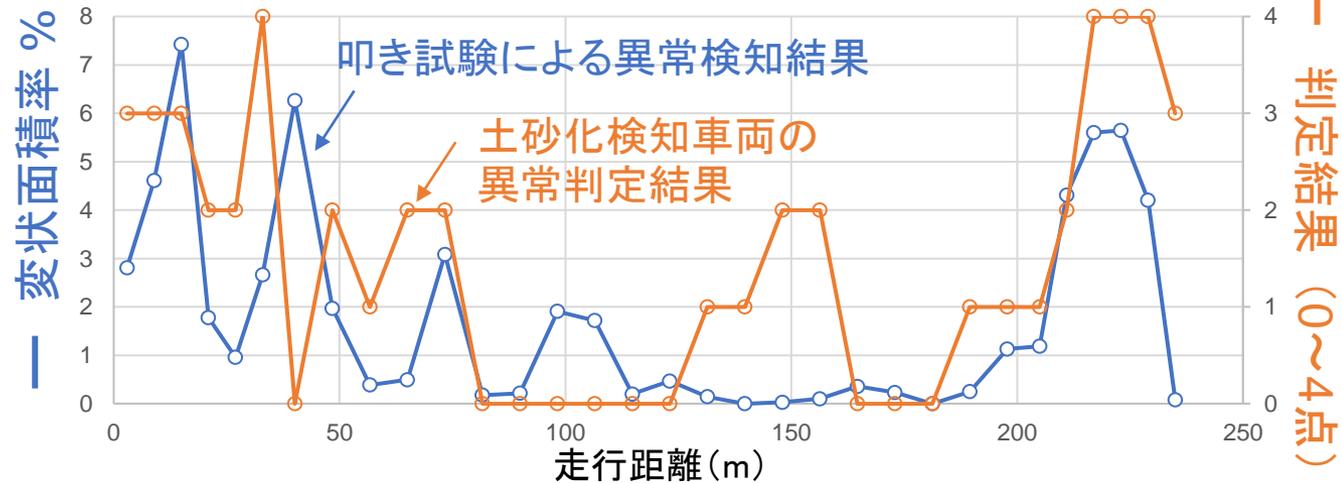
AEが発生



AEを検出



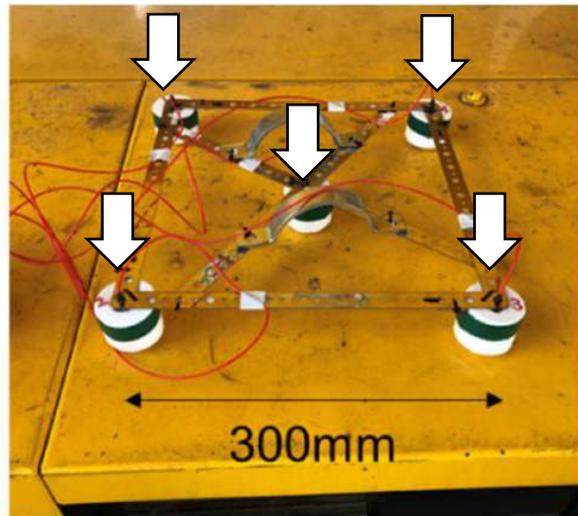
車両が上を走ること、RC床版内部からAE発生



3D-SIBIEによる水平ひび割れ分布調査

簡便な計測で床版内部に存在する水平ひび割れを検知する

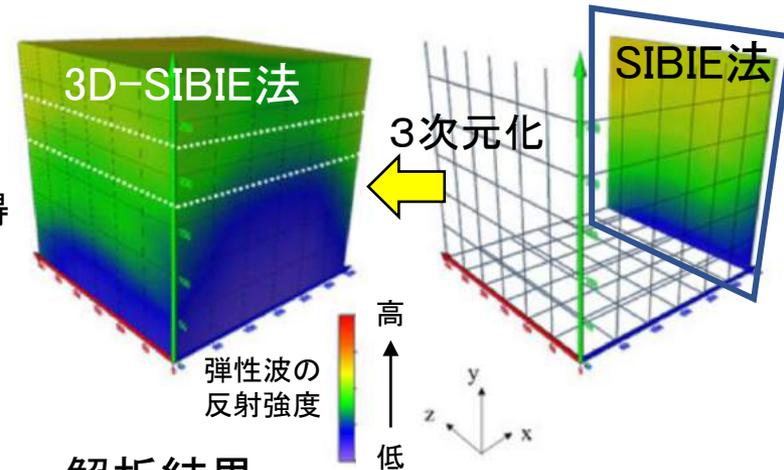
共同研究機関: NEXCO西日本, NEXCO西日本エンジニアリング関西



床版下面からの調査の様子

床版内部の水平ひび割れ分布を検知する方法

- コアリングよりも広範囲を調査できる
- 水平ひび割れの分布を可視化できる
- 床版の下面からの調査が可能



解析結果

弾性波反射強度分布を3次元表示
⇒高い値 = 内部のひび割れ箇所

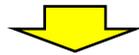
5つの加速度センサ(白矢印)から成る計測治具で弾性波データを取得

弾性波を用いた床版内部検知技術の進歩

インパクトエコー法: 弾性波波形の周波数スペクトルから内部欠陥の位置・大きさを同定



SIBIE法: 調査断面において弾性波の反射・回折の影響を二次元画像化して欠陥部を抽出



3D-SIBIE法: SIBIE法による欠陥部可視化を3次元化した手法

床版の維持管理, すなわち床版の劣化損傷程度をランク付けすることが可能

超広帯域SAセンサによるコンクリートダム堤体内部のひび割れ進展・評価リモートモニタリングシステムの研究開発

ダム堤体全体を網羅する内部損傷の自動モニタリング技術

(国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川砂防技術研究開発制度による委託研究開発:平成30~令和2年度)

ダム堤体内部の損傷時に生じるAEをリモートモニタリング

異常が見られたとき ⇒ 弾性波速度トモグラフィで内部を可視化 ⇒ 維持管理判断へ

地震発生

異常発生

①: 堤体内部の損傷をAEとして検知

目視で確認

内部状況が得られない

堤体でのAE計測

内部で破壊が生じたか確認

改良SAセンサの適用

②: 弾性波速度分布から
損傷個所を特定

弾性波速度トモグラフィによる調査

広範囲で内部状況を推測できる

弾性波(P波)速度トモグラフィ

透過波の励起が可能であれば、
深い位置のクラック進展状態を
推測できる

レイリー波速度トモグラフィ

透過波の励起が不可能の場合、ある程度の深さ
(波長に依存)のクラック進展状態を推測できる
表面劣化の調査に適用できる

維持管理の判断

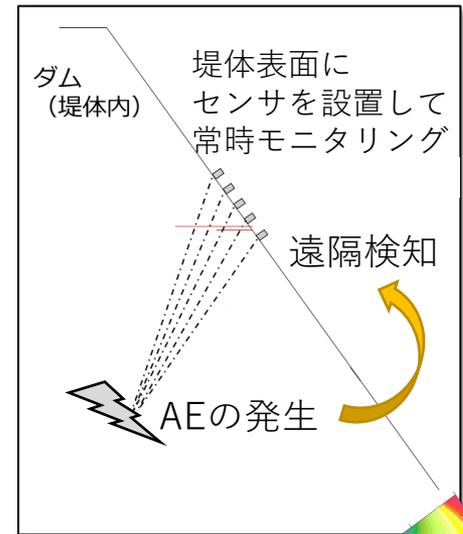
定期的に弾性波トモグラフィを実施することで
外観に異常が顕在化する前に劣化・損傷を
捉えることが可能

コアボーリングで直接確認

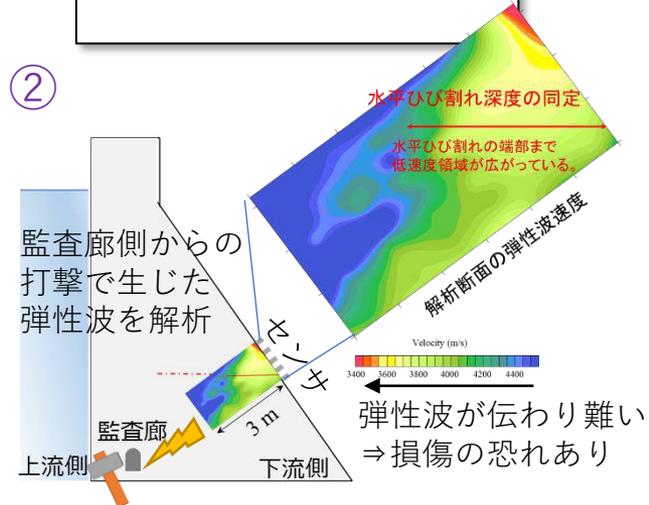
トモグラフィ結果のリファレンスデータ

詳細な計測・解析手法を
マニュアルとして整備

①



②



グラウンドアンカーおよび斜面の効率的な維持管理モニタリングシステムの開発

光ファイバセンサ網による常時監視で土砂災害を未然に防ぐ (JST 研究成果最適展開支援プログラム 採択課題)
 共同研究機関: 小松マテール株式会社, 国立研究開発法人 物質・材料研究機構

CFRTP
 (炭素繊維強化熱可塑性樹脂)

◎ 耐候性・耐食性が高い

光ファイバセンサ (FBG)

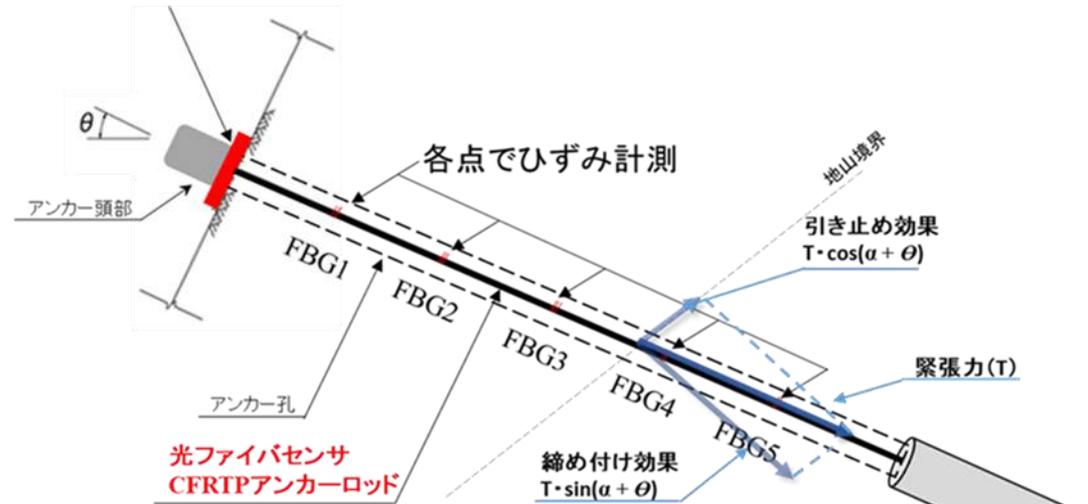
◎ ひずみ計測が可能
 ◎ 電氣的故障がない

屋外での
 長期監視
 に好適

新グラウンドアンカー(斜面安定構造物)システム

- CFRTP製スマート支圧板
 - 光ファイバセンサ+CFRTP製アンカーロッド
- ロッドの破断予兆や地山の動きを長期モニタリング

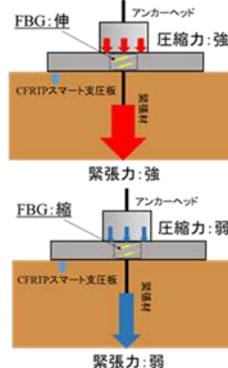
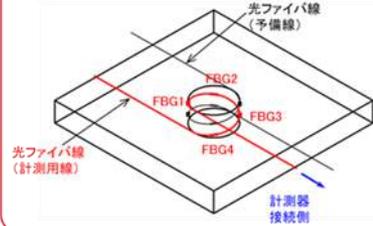
光ファイバセンサCFRTP支圧板
 緊張力(T)計測



⇒ 斜面の緊張力を長期監視できる
 “CFRTP製スマート支圧板”を考案

CFRTPスマート支圧板

緊張力の違いで、光ファイバセンサにおけるひずみが変わる



適用イメージ

オンデマンド計測(残存緊張力評価)

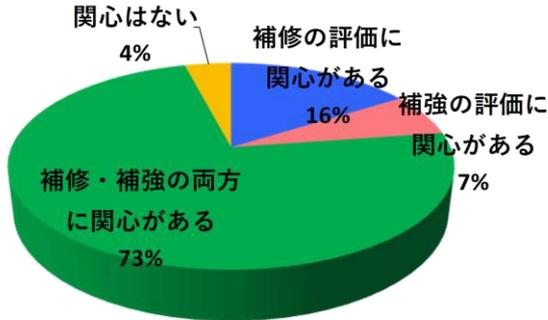


“スマート”グラウンドアンカーシステムの提案



Rayleigh波の伝播特性を利用した コンクリートの補修後の非破壊評価手法の開発

対策後の品質を担保するための効率的手法の開発

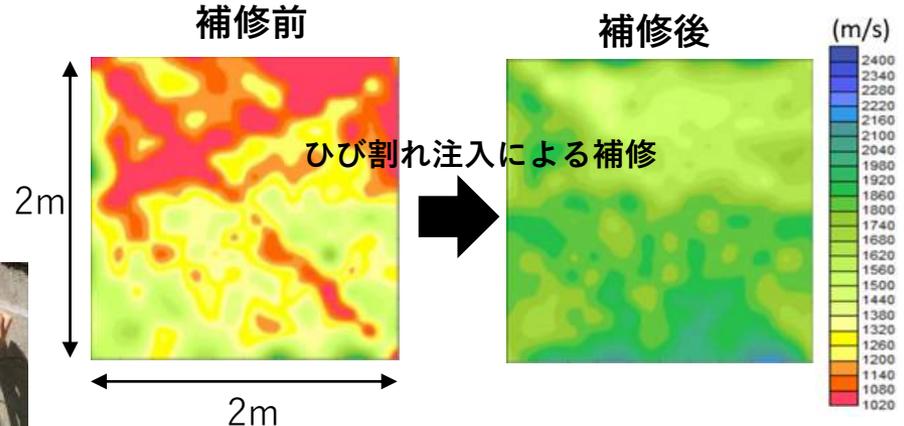


補修・補強施工後の品質評価への関心

京都大学インフラ先端技術コンソーシアムに参画する発注者、施工者、設計者、研究者、材料メーカーなどを対象に実施した実態調査アンケートの結果

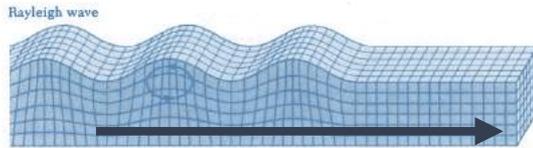


① Rayleigh波の速度分布を利用した 注入材未充填部のスクリーニング手法

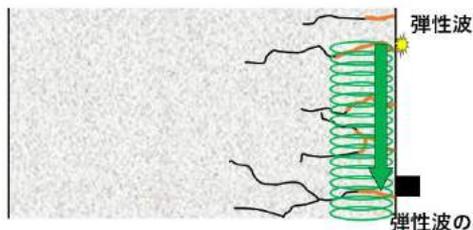


Rayleigh波の見かけ速度分布の例

② Rayleigh波の伝播挙動を利用した ひび割れ性状および注入状態の評価手法

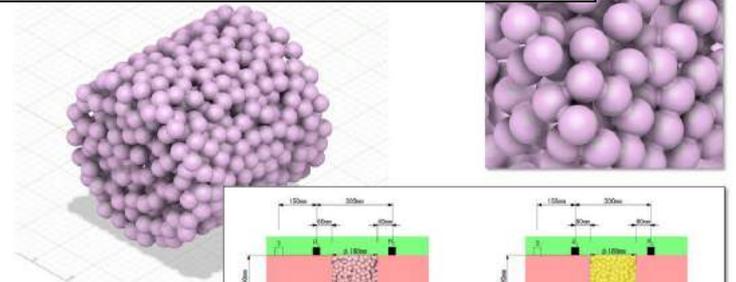


← Rayleigh波の伝播イメージ※

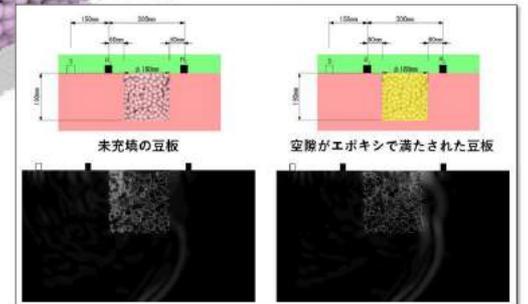


Rayleigh波の減衰理論により、ひび割れ性状（深さ、界面の接触状態等）、補修材の充填状態を定量的に評価する手法の開発

種々の変状に対する適用性の検討



→ 内部空隙への補修材の充填時の波動伝播解析の例



※ Thorne Lay, Terry C. Wallace, Modern Global Seismology, International Geophysics, Vol.58, p.18, 1995.



健康寿命を確保するための
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

