



**コンクリート構造物の健康寿命を
脱炭素戦略の中で確保するために**
-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**
- **AIにはわからない“意味” = 劣化
塩害、アルカリシリカ反応、
グラウト問題**
- **時空間シナリオデザイン**
- **今、何が？**

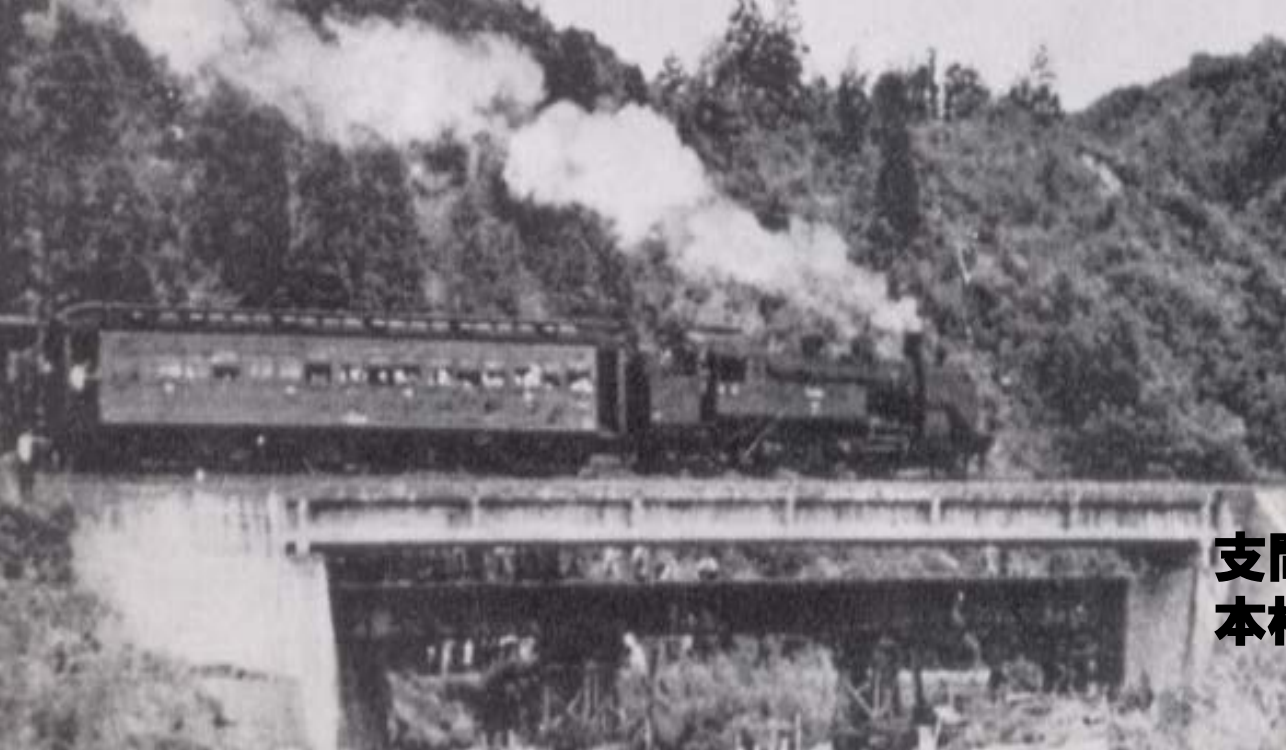
- **丈夫で、美しく、長持ち**



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



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**



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(CO₂ + 廃棄物) 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、

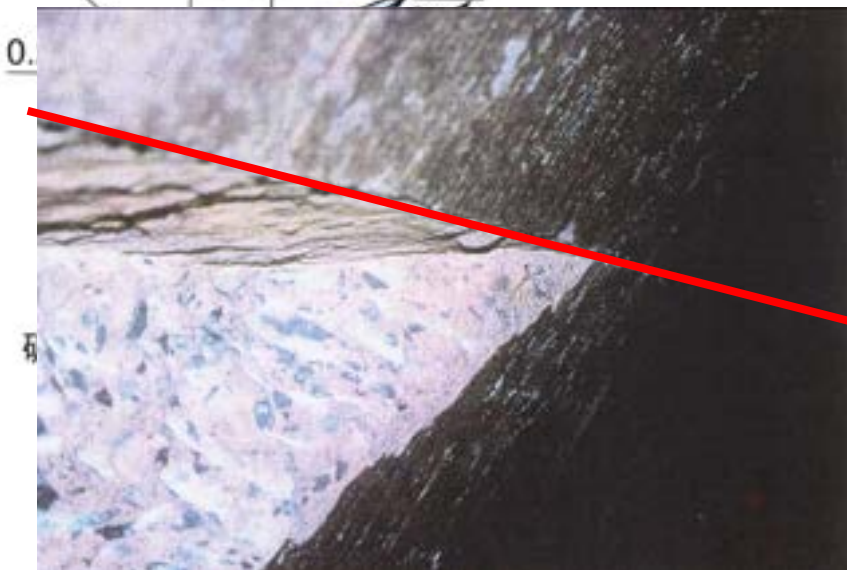
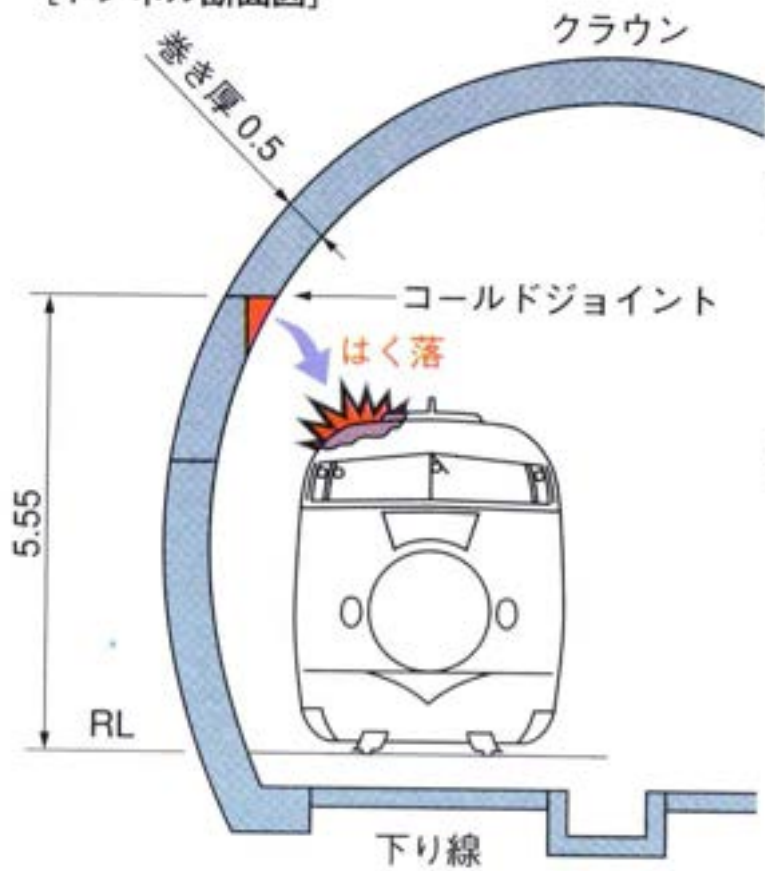
⇒ 丈夫で美しく長持ちするインフラ、市民社会


LCC & LCCO₂ を満足させるシナリオ

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]



The image shows a close-up of a concrete slab with several horizontal reinforcement bars (rebar) visible. The concrete surface is heavily deteriorated, showing significant delamination and scaling, particularly around the rebar. The color is a mix of grey, brown, and yellowish, indicating the presence of salts and other degradation products.

内的塩害(複合劣化)

床版下面コンクリートの剥落

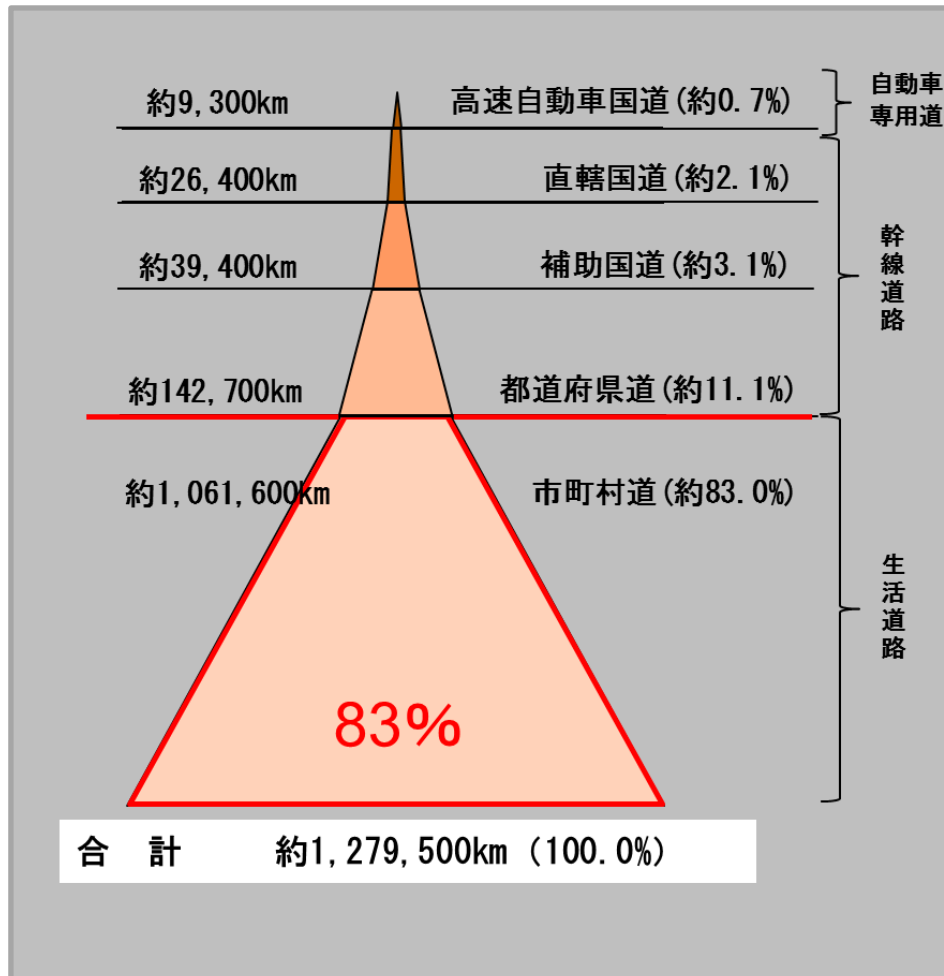


笹子トンネル天井板落下事故 2012.12

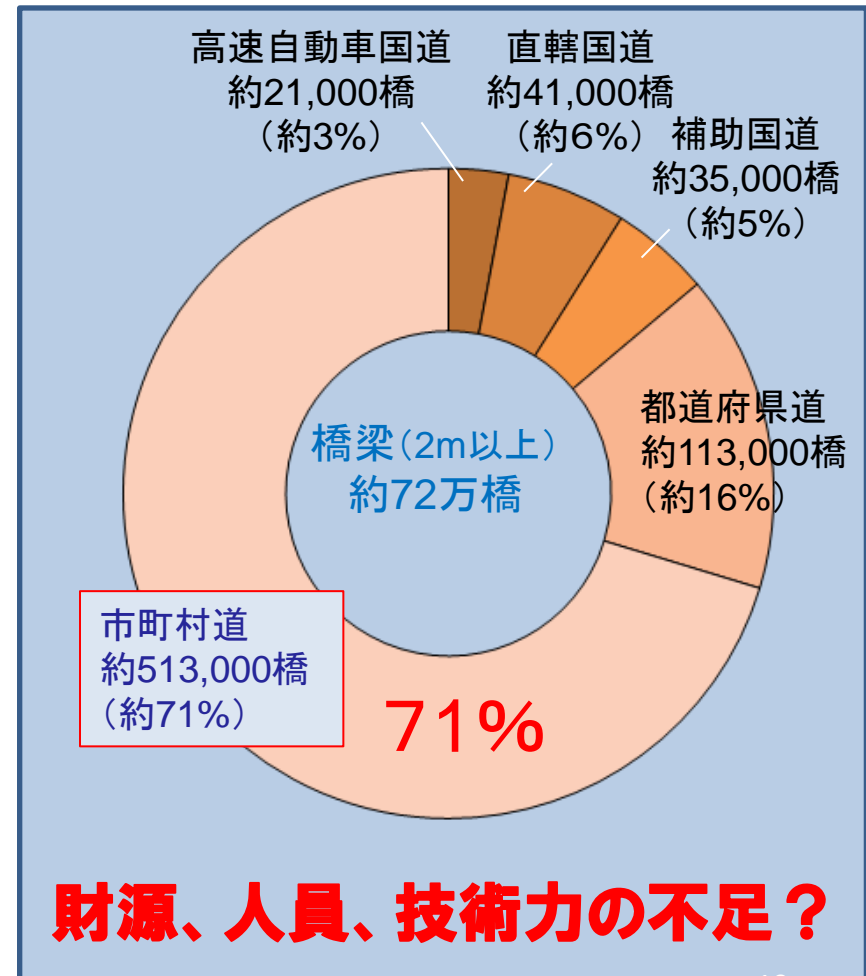
現 状（国土交通省）

約51万橋が市町村道しかも法定外橋もある

【日本の道路種別と延長割合】



【道路種別別橋梁数】



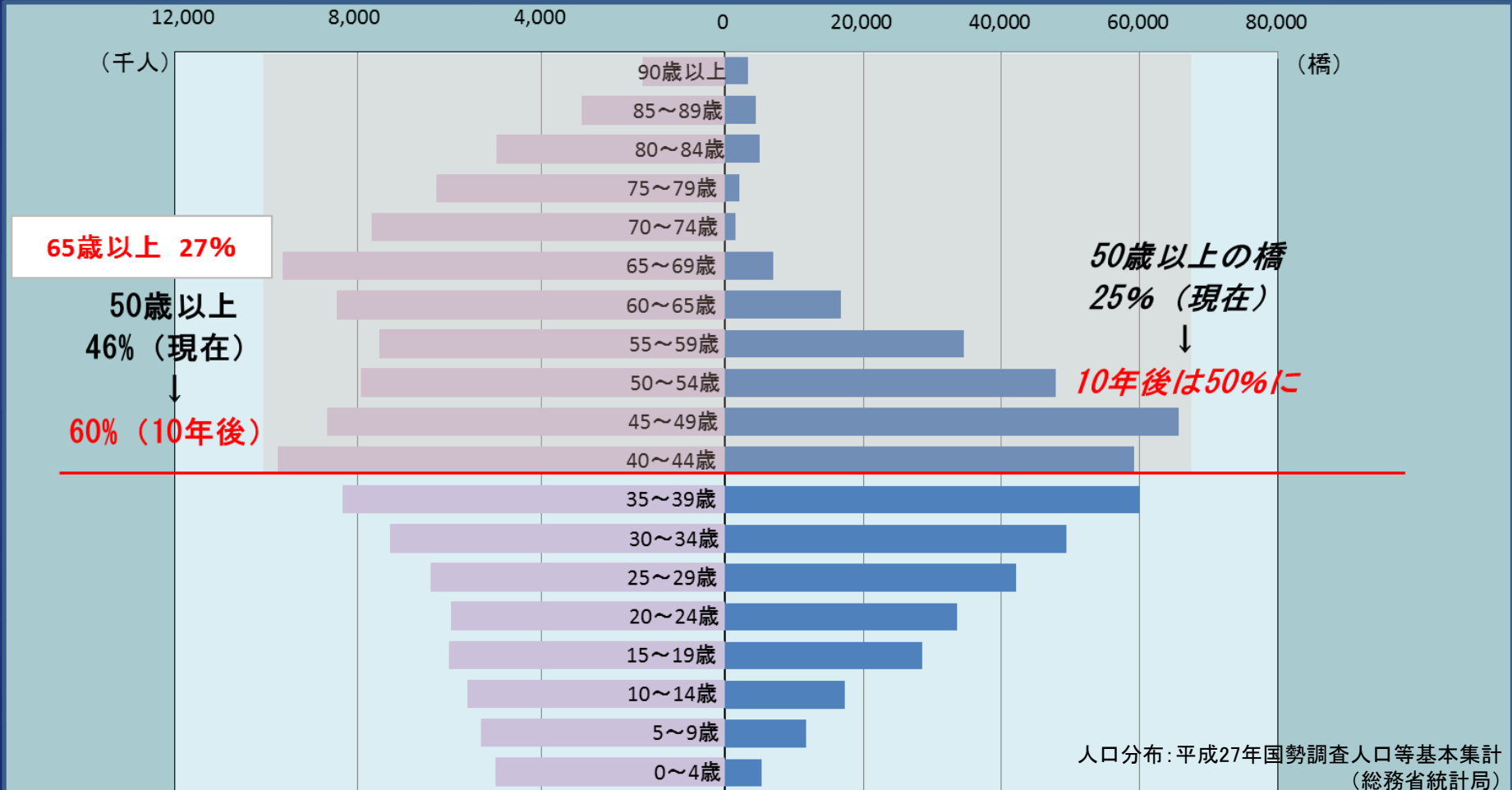
財源、人員、技術力の不足？

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



日本の人口

日本の橋

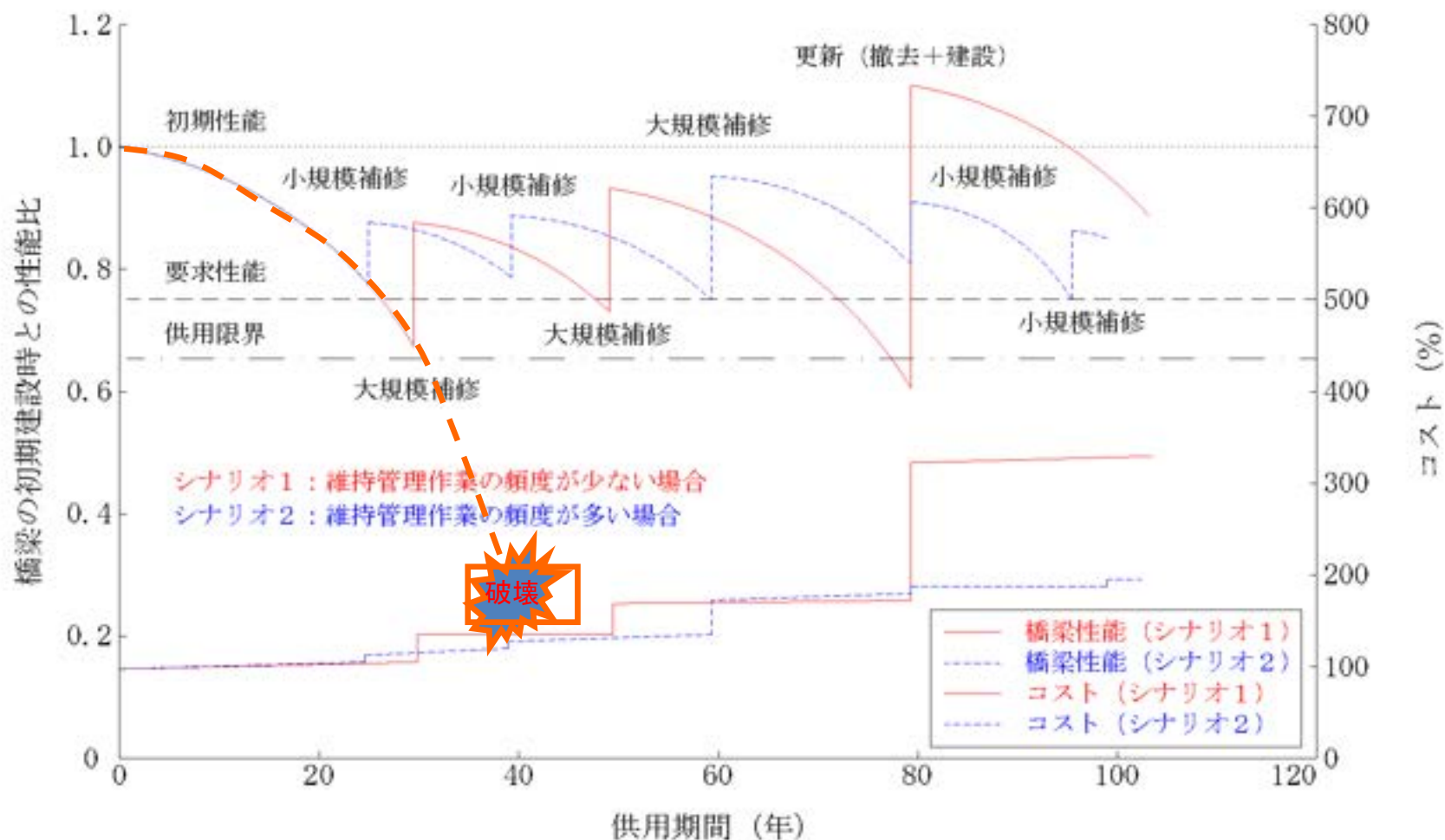
人口分布:平成27年国勢調査人口等基本集計 (総務省統計局)

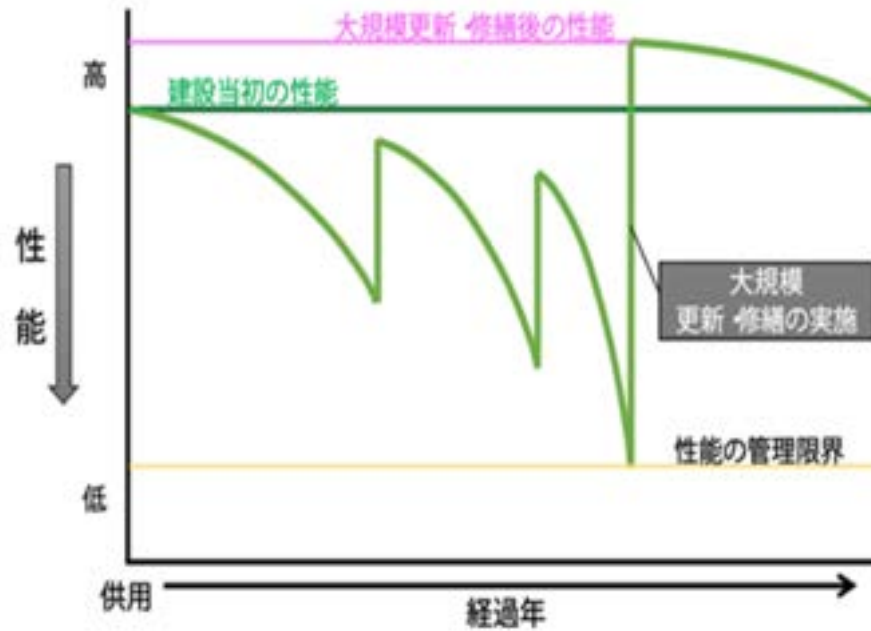
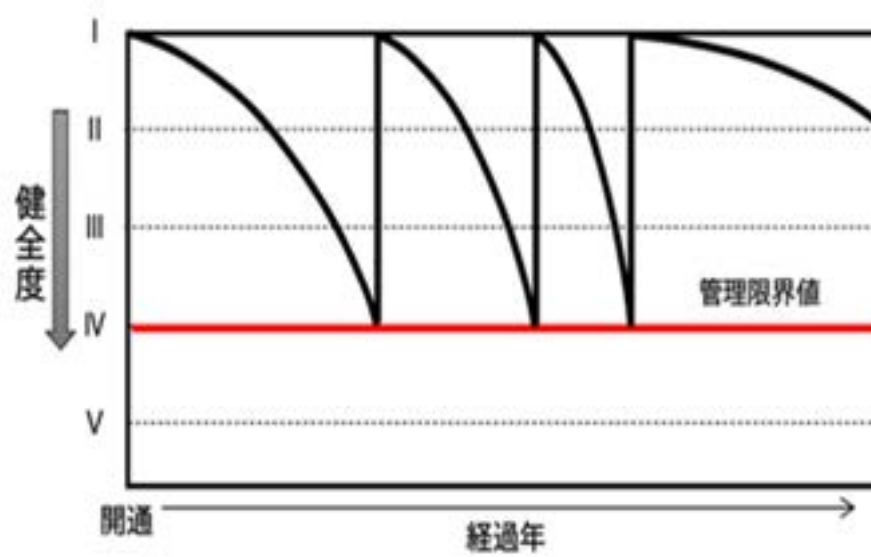
橋:道路局調べ(H31.3)

※東日本大震災の被災地域は一部含まず
都道府県・政令市は、地方道路公社を含む

部材の劣化と対策の関係

性能とコストの推移(イメージ図)





例：橋梁(鉄筋コンクリート床板等)

性能に関する新たな概念

• 劣化⇒耐久性

: Allにはわからない！“意味”

材料～構造

- 材料の性質の成り立ちと構造物への影響！
- 要素のつながり＝結合：強さ・変形の基本、耐久性、欠陥があると？
- 鉄鋼：金属結合、転位(降伏)、腐食
- 高分子：樹脂・ゴム・繊維⇒
共有結合(鎖構造)、ファン・デル・ワールス結合(ガラス転移温度)
- セメント：水和反応⇒イオン＋ファン・デル・ワールス結合
- コンクリート：大小の隙間、拡散、施工(W/C、空気量)

コンクリート強度

コンクリートは脆性的な破壊形態を示す材料であり、脆性材料の強さと欠陥(空隙量)の一般式は式1で表される。

$$\sigma_f = \sigma_0 \times \exp(-b \cdot p) \quad \dots \text{式1}^*)$$

σ_f : 空隙量がpの時の強さ

σ_0 : 空隙が全く存在しない時の強さ

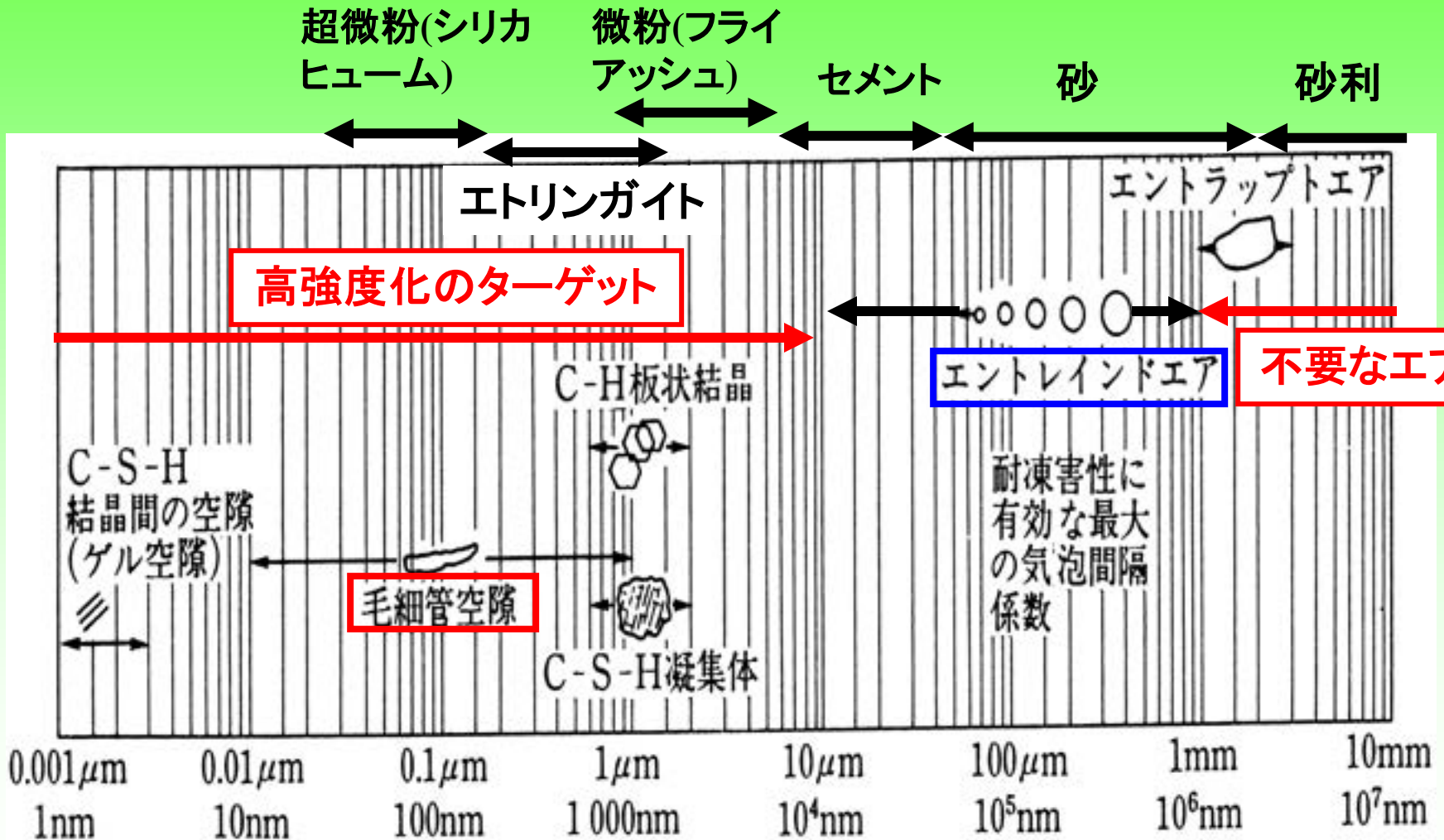
p: 空隙量

b: 材料や欠陥形状による定数

 式1から「空隙量0のセメントペースト硬化体」の強さを計算すると、700～800N/mm²と推測される。

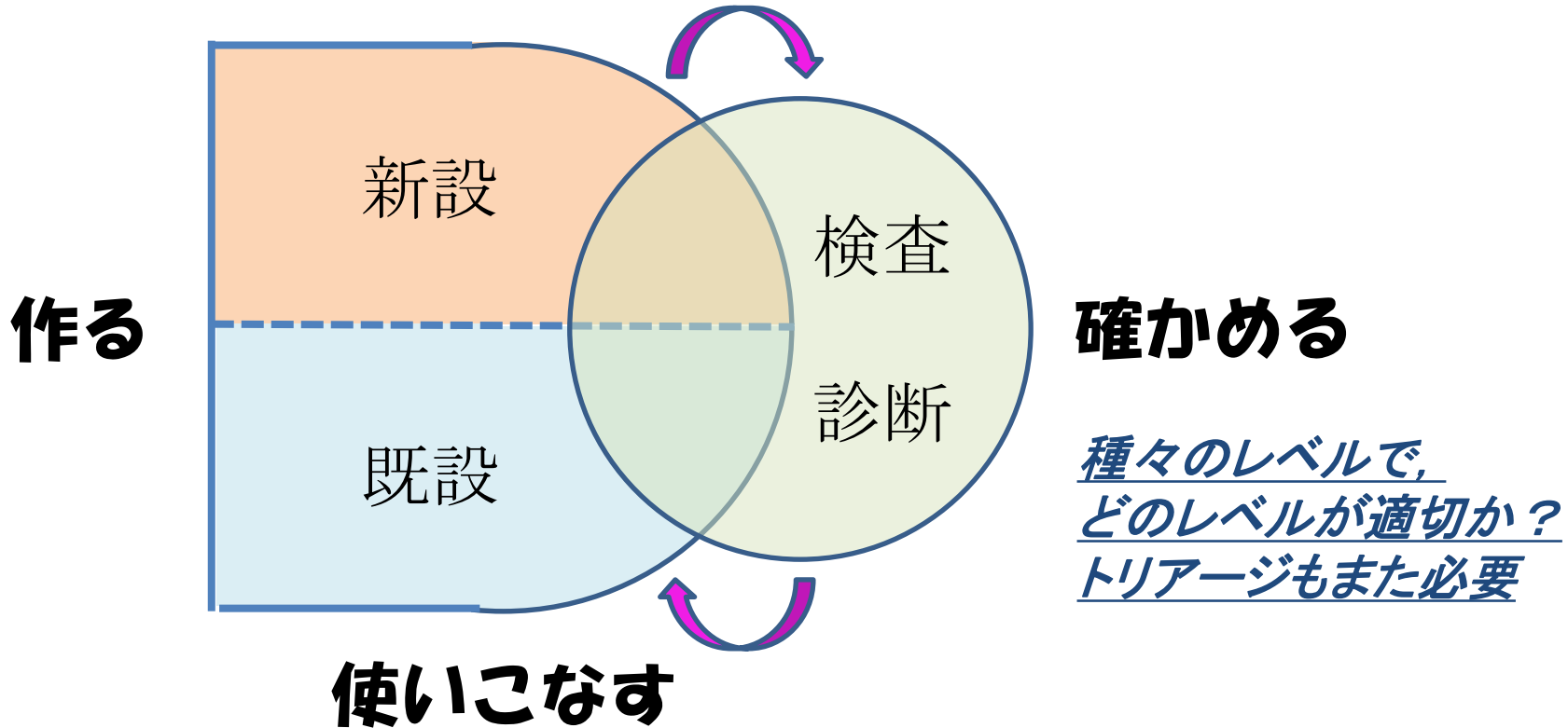
*)W. Duckworth, Journal of American Ceramics Society, Vol.36,pp68,1953

コンクリート中の空隙(欠陥)～耐久性



技術の二本柱

造りこなす



時空間シナリオに基づいた維持管理
破棄から予防保全までを技術者が提案¹⁸

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



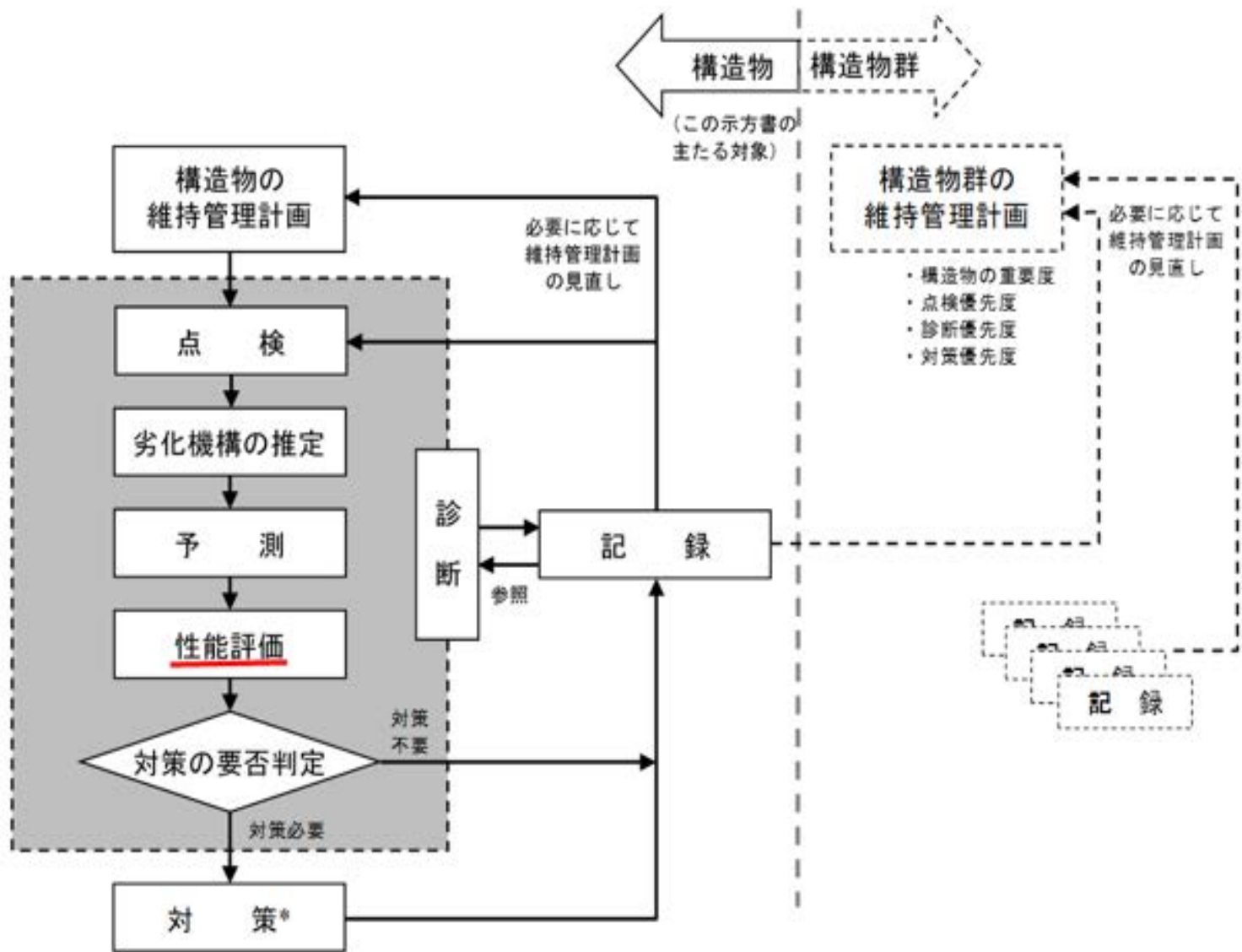
劣化（≡古い基準）と耐震・耐荷性能

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！



2001土木学会[維持管理編]

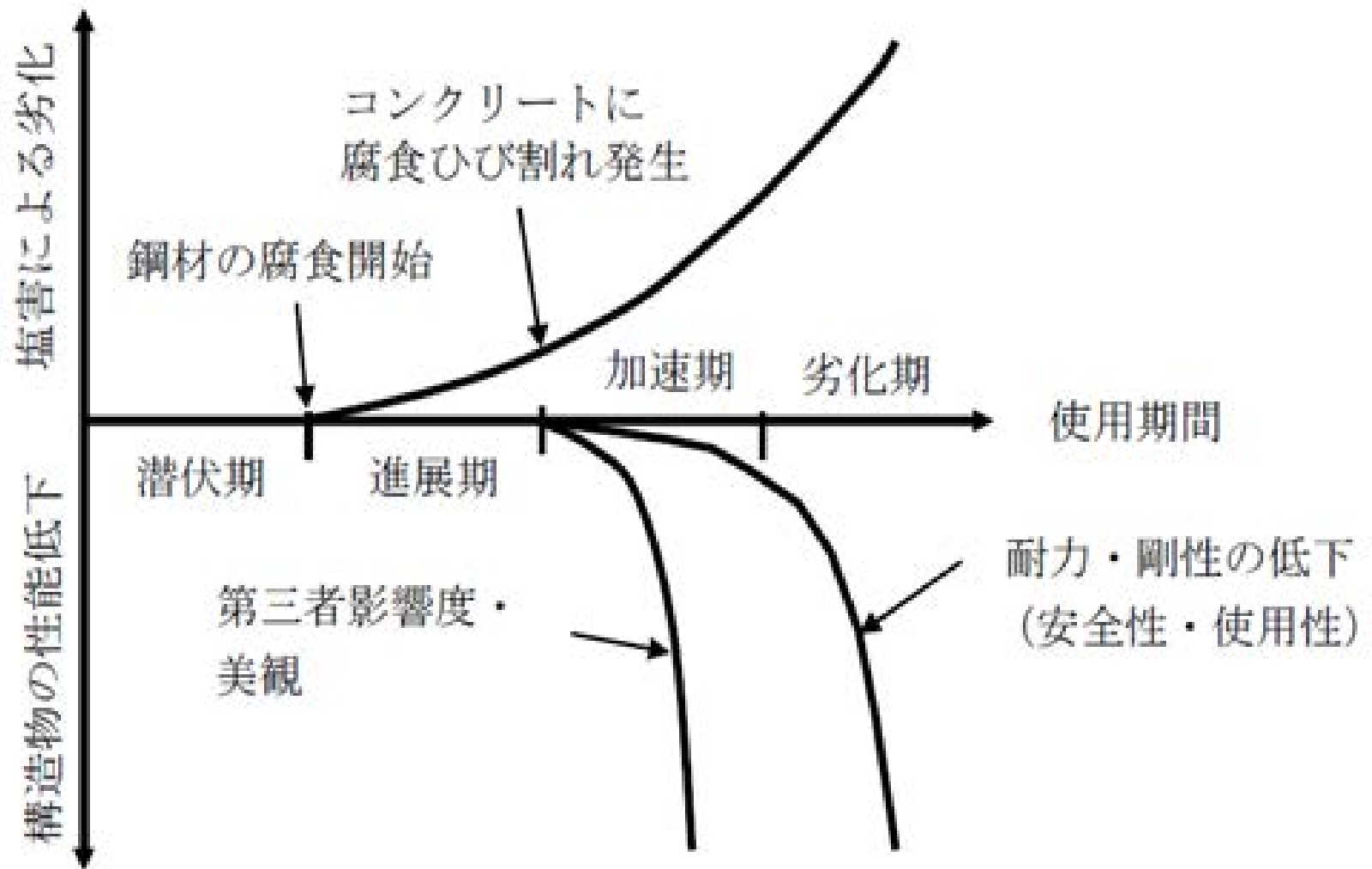
- ・ 性能開示+性能照査 = 性能規定型
- ・ 劣化機構に基づく、今は？(劣化度(期))と
これからは？(平衡論+速度論)
- ・ 設計規格 ≠ 維持管理規格
- ・ ライフサイクルを単なる計算結果ではなく技術者の思想に基づいて描く(シナリオデザイン)
⇒ LCC & $LCCO_2$
- ・ 「花の建設、涙の維持管理」⇒維持管理を日の当たる場所に + マーケットの成立




*)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**



塩害による劣化進行過程の概念図の一例

The image shows a close-up of a reinforced concrete structure, likely a wall or ceiling. Several horizontal steel reinforcement bars (rebar) are visible, embedded in a grey concrete matrix. The concrete shows signs of significant deterioration, including dark staining, pitting, and areas where the surface has eroded, exposing the underlying rebar. This is characteristic of internal corrosion, often caused by salt ingress (salt damage) leading to a complex degradation process (composite deterioration).

內的塩害(複合劣化)

外的塩害

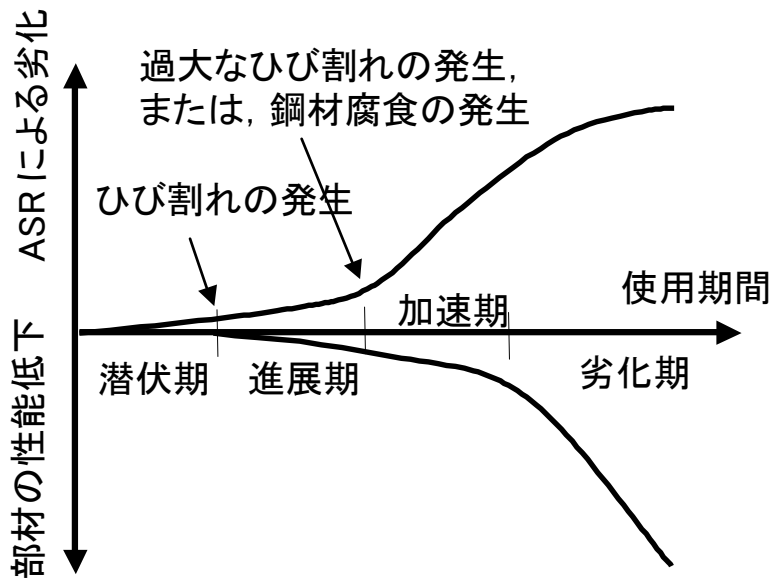




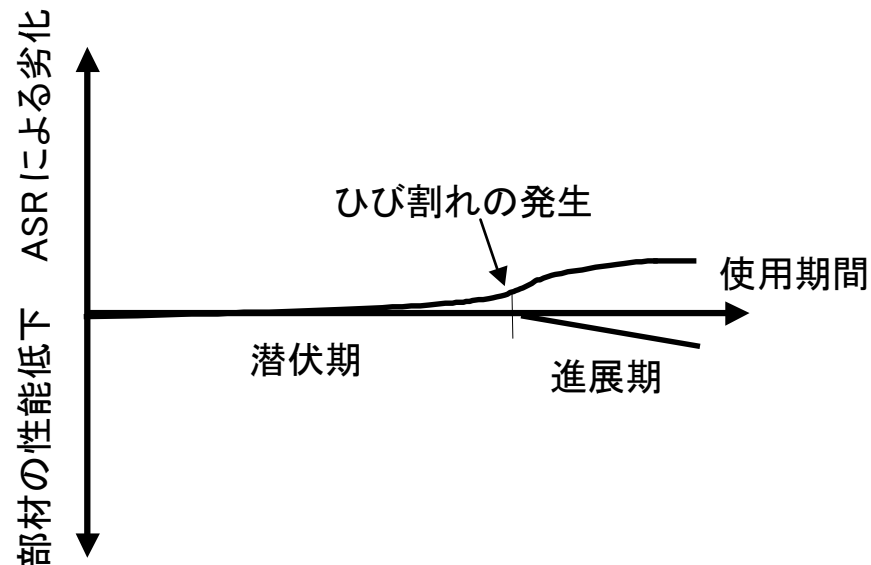
塩害補修・補強に期待する効果と工法

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



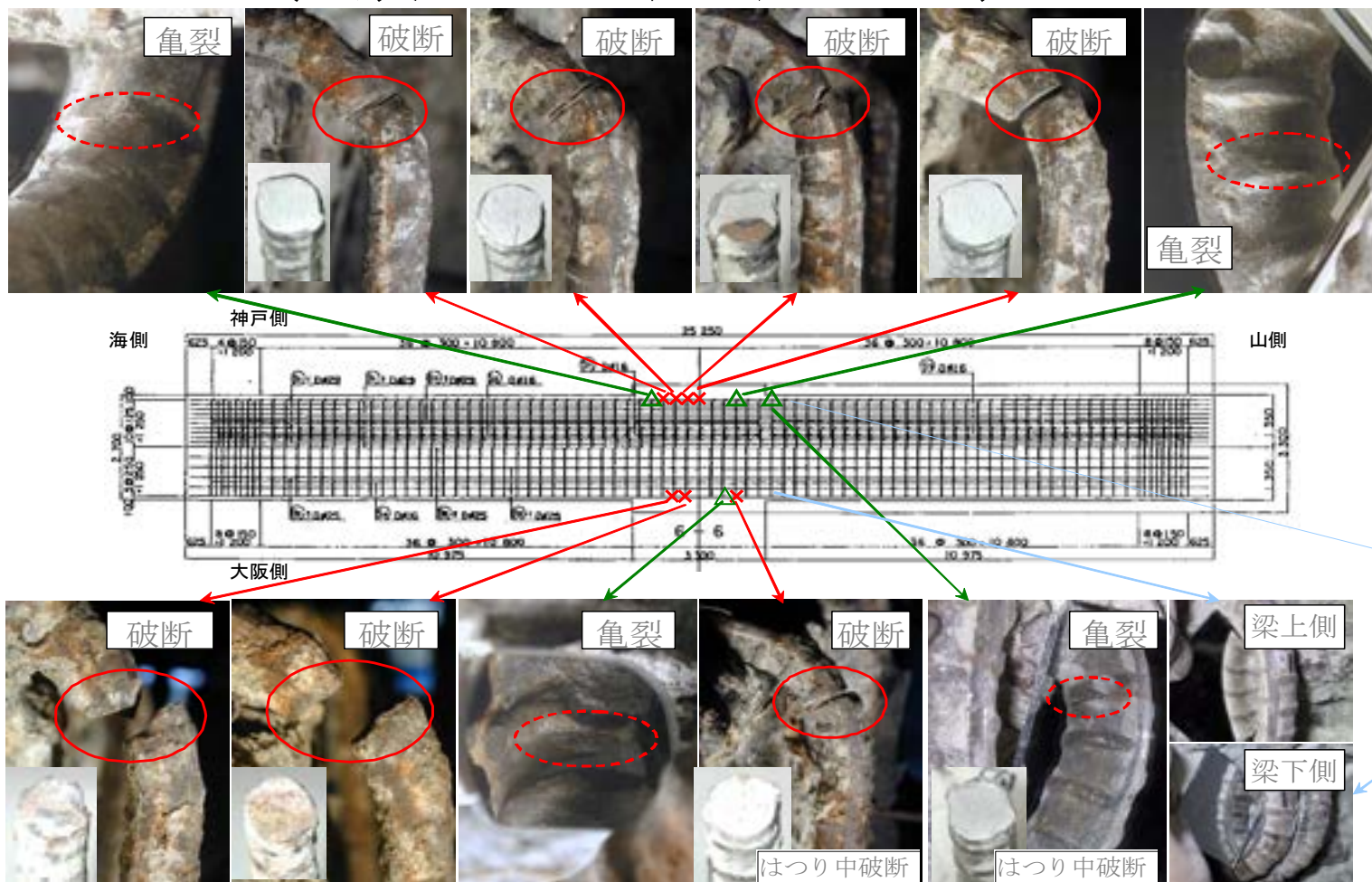
(b) コンクリートが有する膨張性が小さい場合

ASRによる劣化進行過程の概念図の一例

A close-up photograph of a concrete surface, likely a bridge pier, showing a prominent, jagged horizontal crack. The crack is dark and irregular, with some debris and exposed aggregate visible along its length. The surrounding concrete is light-colored and shows signs of weathering and minor surface cracking.

**阪神高速道路T型橋脚梁部
ひび割れ**

(阪神高速道路)



鉄筋破断の事例 (橋脚梁部)

A photograph showing the interior side of a concrete bridge railing. The railing is heavily damaged, with a prominent horizontal crack running across the top. The concrete is spalling and crumbling, revealing the internal structure and rebar. The background shows a green, forested hillside.

橋梁高欄部内側



カナダ

ASRダムのPS補強



日本



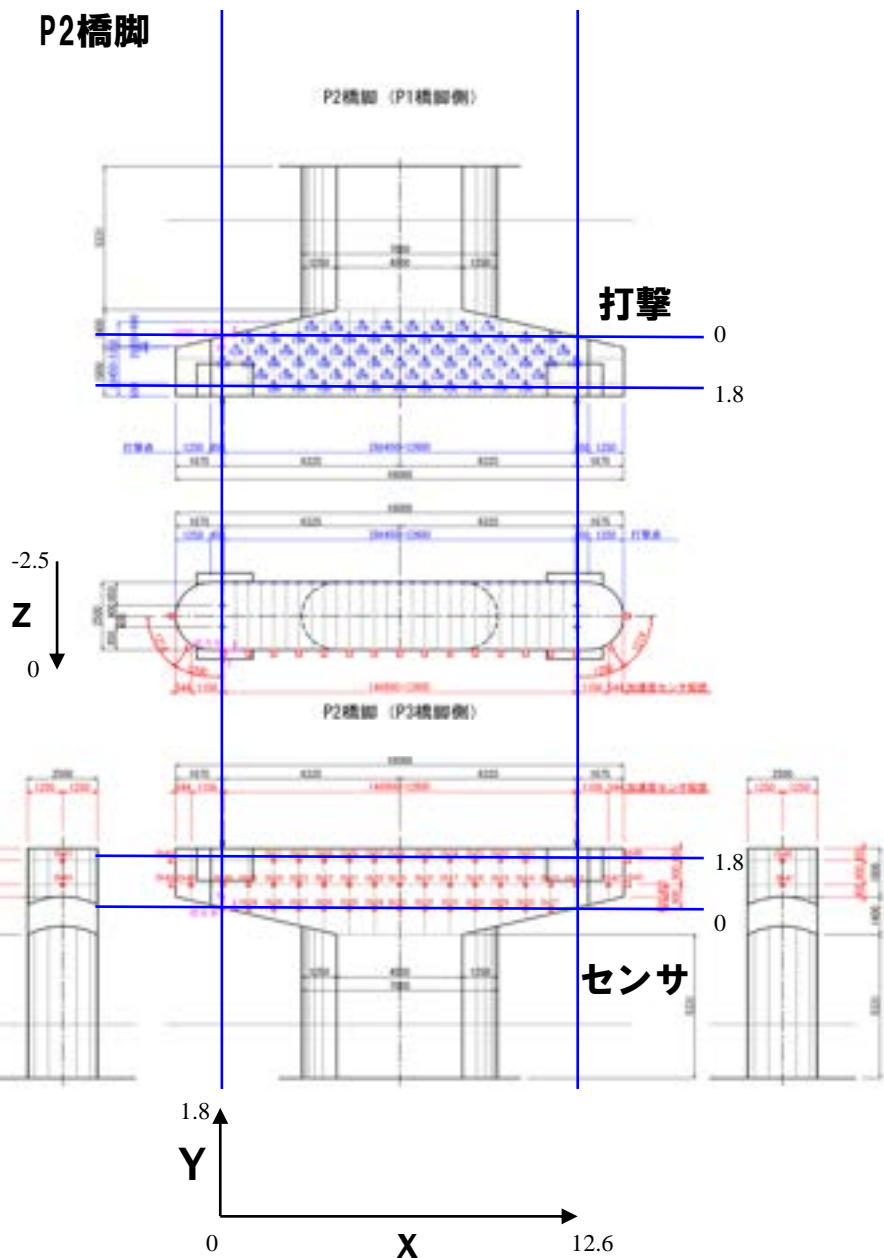
ブラジル



スペイン

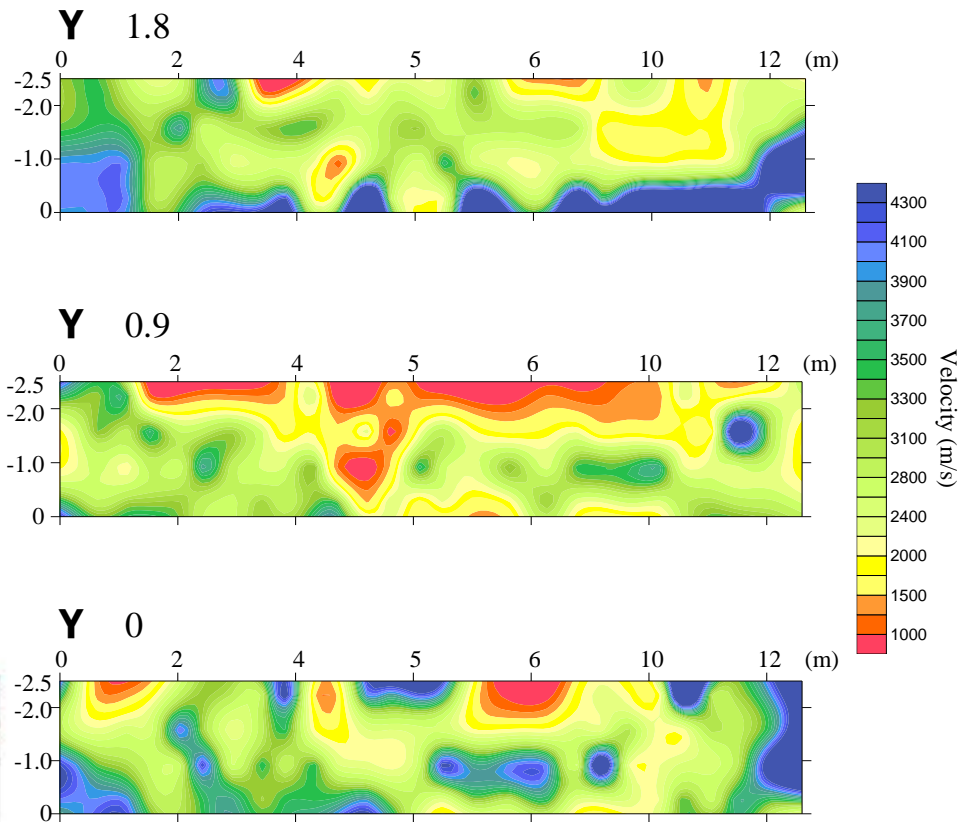
ASRによる鉄筋破断の例

P2橋脚



打撃(ハンマサイズφ100)

水平断面図



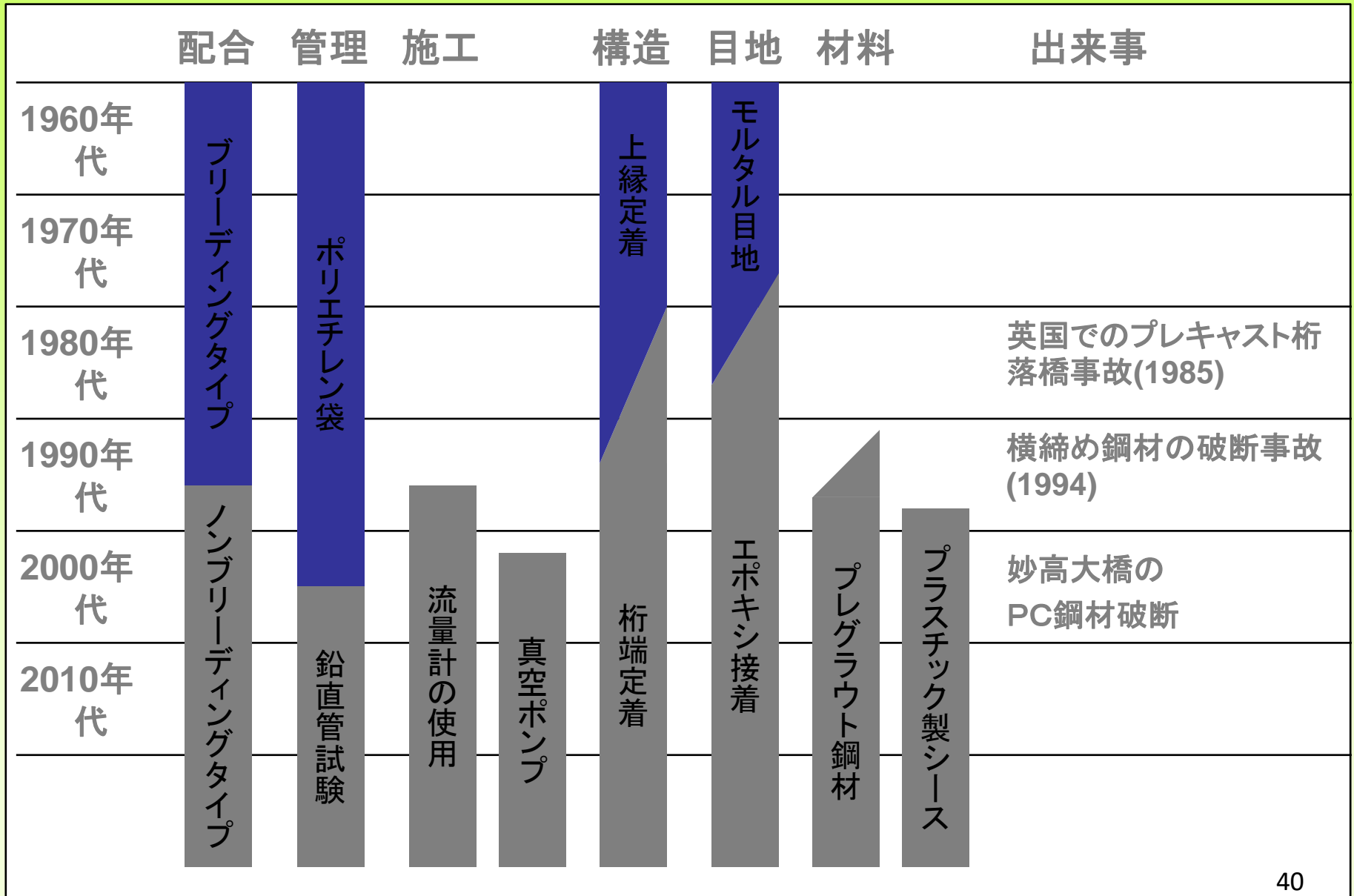
- 全体的に低い速度構造となる
- 大きなき裂が見られているところで特に低い速度構造が見られる
- 中央部 (x:4-5 m, y:0.9 m, z:0.5-2) に特徴的な低速度領域が見られる

- **グラウト問題**

PC橋のPC鋼材破断が懸念

イギリスでの落橋(1985年)

グラウト技術の変遷





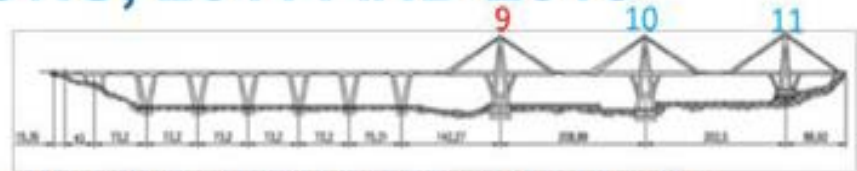
落橋前



落橋後 (2018)

Polcevera (Morandi) viaduct (1964)

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

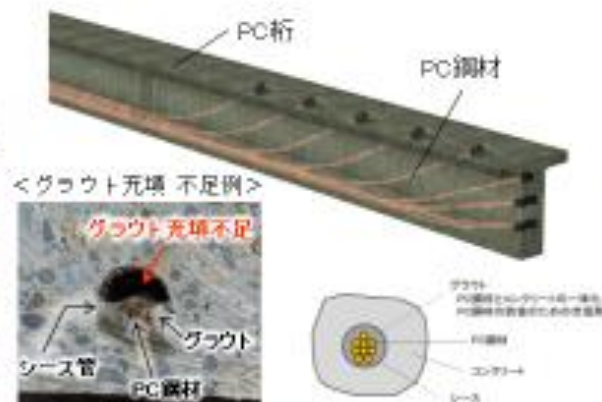
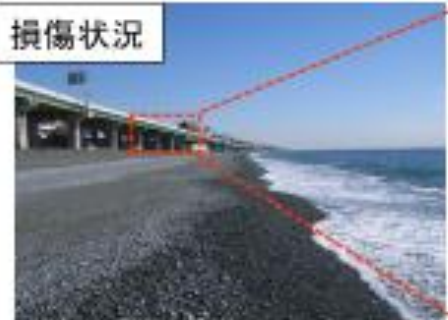
General:

Increase of deterioration with respect to 2003 and 2008 inspections

緊張材の防食

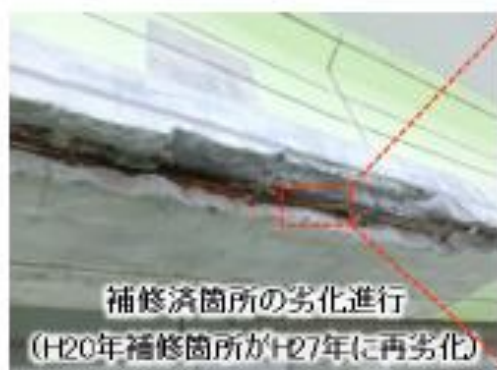
西湘バイパス 滄浪橋(神奈川県)

【国府津IC～橋IC間下り線、橋長5,685m、S46(1971)年開通、50年経過】



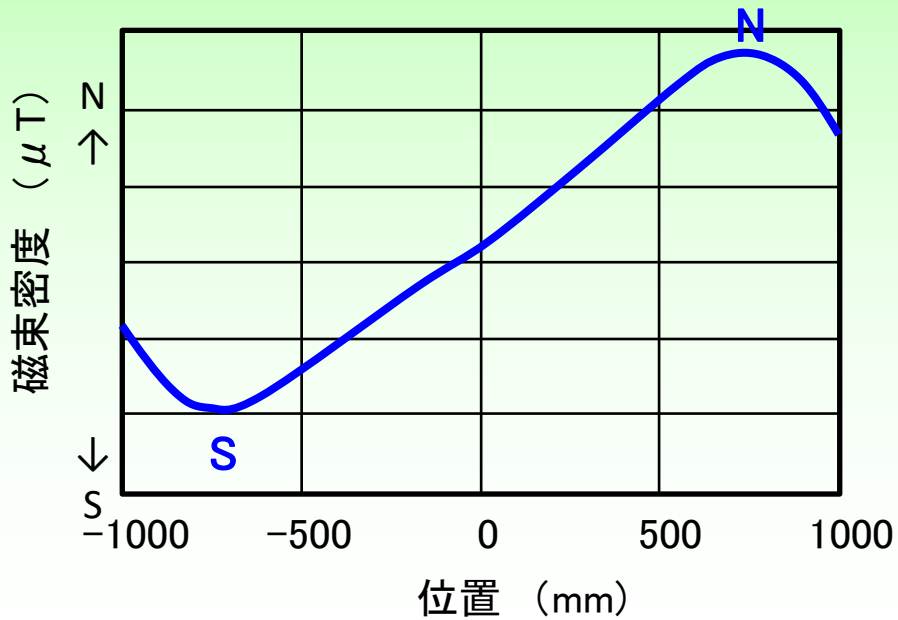
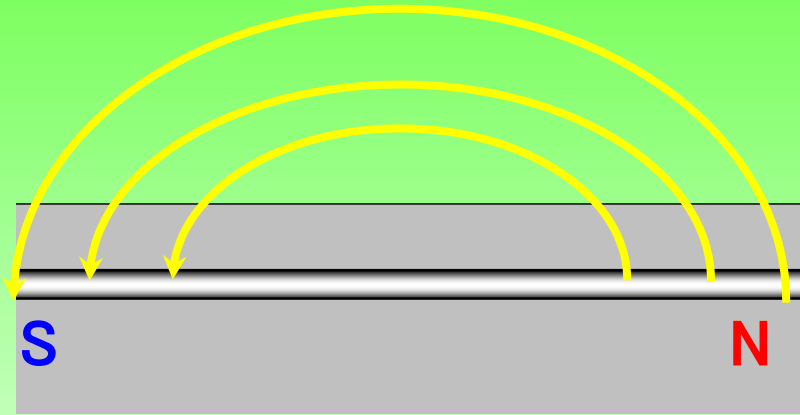
これまでの点検・補修状況

- 防水塗装や電気防食などの補修を繰返し実施
- H3(1991)年 部分的補修*(1回目)、防水塗装
 - H20(2008)年 部分的補修(2回目)、電気防食
 - H27(2015)年 近接目視において補修箇所の再劣化を確認、部分的補修(3回目)
- * コンクリートが剥離した箇所を補修するもの

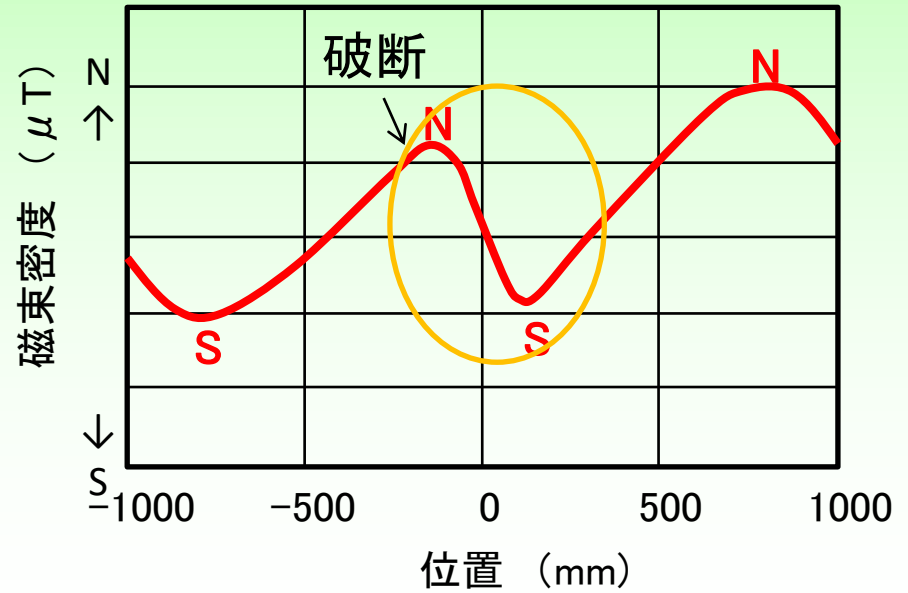
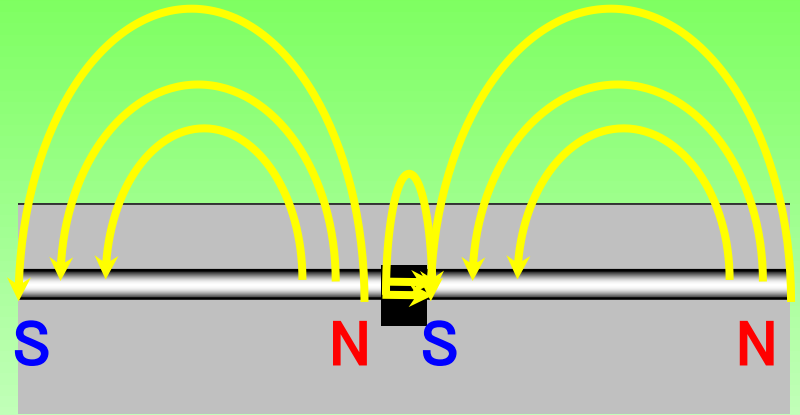


西湘バイパス滄浪橋の劣化

PC鋼材破断なし



PC鋼材破断あり



実際の状況（はつり後）



実橋(PCT桁橋)での検証

・時空間シナリオデザイン

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

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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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返し実施しているが、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	<ul style="list-style-type: none"> 交通荷重の繰返しにより、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	<ul style="list-style-type: none"> 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返ししているが、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	<ul style="list-style-type: none"> 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、補修を繰返し実施しているが、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。 	

■ 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！

× | 終了

橋の匠

最適延命化方策選定システム

Selection System for Bridge Life Sustaining 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



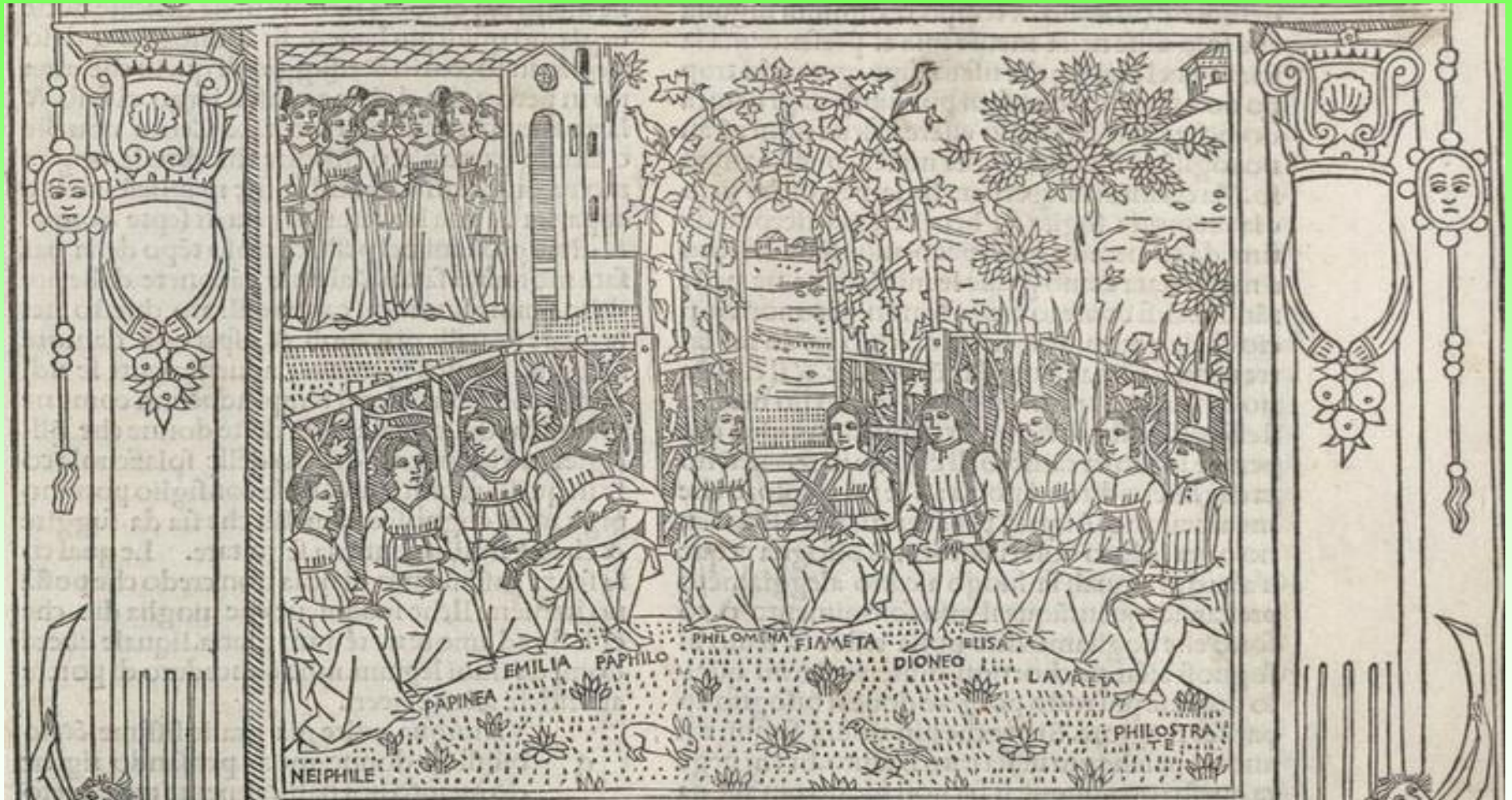
• **今、何か？**

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。
 - 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、長持ち！
 - + 急激に増大するEVへの無線給電⇒道路発電
 - それを支えるSociety 5.0

⇒ 三つのポイント!

コロナ禍・パンデミック



10日物語(デカメロン)・意識の変化

1. 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(DXによって、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)。
- ・ 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などで確認し、診断に。
- ・ そのためには、技術者が現場で技能を磨くことは必須。

⇒今こそ本来の人間の知恵の出番！

2. 知のネットワーク化

- ・ 離散したデータから連携したデータに
- ・ 時間軸の必要性⇒時空間挙動の把握
- ・ データとシミュレーションを使って予測することによって事前に対策を設定できる。
- ・ 技術者として“どうなるかではなく、どうすべきか”
- ・ シナリオ提案！
- ・ 狩猟・農耕・工業・情報・データ駆動型(Society 5.0)
- ・ 実行できる技術者の必要性。

⇒ 本当の技術者の重要性！

適応的熟達者

既習の技能を柔軟に応用したり、以前の経験を新しい事態に生かしたり出来る者

定型的熟達者

決まった課題において、手続きを正確に素早く実行できる者

適応的熟達者育成のための不可欠な条件

- 1) 絶えず新奇な問題に遭遇すること
- 2) 対話的相互作用に従事すること
- 3) 緊急(切迫した), 外的な必要性から解放されていること
- 4) 理解を重視するグループに所属していること

**適応的熟達者育成のための不可欠な条件
(波多野誼余夫氏論文より木村嘉富氏が作成)**

名譽・対価・喜びを！

3. サイバーとフィジカル

- ・ サイバーインフラモデル、デジタルツイン
- ・ 「国土交通データプラットフォーム」 BIM/CIM と3次元点群データの表示・検索・ダウンロード
- ・ 先進的な計測・点検・シミュレーション技術 + 人間センサ (スマホ) ⇒ サイバーモデルさらにはメタバース
- ・ 教育にも
- ・ しかし、AIには「意味」が分からない！
- ・ 現場(フィジカル)に裏打ちされたサイバー ⇒ 足が地面についた仮想空間を…

⇒ 新たなメンテナンス・シナリオを！

ISBN978-4-909523-03-7
 C3051 ¥2500E
 9784909523037
 9784909523037
 1923051025008

定価2,500円
 (本体2,273円+税10%)
 橋梁通商社

コンクリート橋

丈夫で美しく長持ち

宮川 豊章

丈夫で美しく長持ち

宮川 豊章

**コンクリート構造
 の維持管理
 ・耐久性の歴史**





人間の知恵としての
シナリオテイクイン