

コンクリート構造物の劣化，診断と対策

岐阜大学 工学部社会基盤工学科 小林孝一

工学部 副学部長

工学部附属アセットマネジメント技術研究センター 副センター長

「インフラ」

infrastructure ['ɪnfərəstrʌktʃə] *noun*

- ▶ the basic physical and organizational structures and facilities (e.g. buildings, roads, power supplies) needed for the operation of a society or enterprise: *the social and economic infrastructure of a country*.

ORIGIN: early 20th century: from French (see *infra-*).

infra- ['ɪnfərə] *prefix*

- ▶ Below
 - Anatomy below or under a part of the body

ORIGIN: from Latin *infra* 'below'.

古代ローマコンクリート



古代ローマ(約2000年前)コン
クリートの研究用大型試料

土木学会 コンクリートライブラリー
131号 古代ローマコンクリート

石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) に火山灰等
(SiO_2 含有) を混ぜたポゾラ
ン反応性の水硬性セメント



ポン・デュ・ガール (古代
ローマ時代の水道橋,
B.C.19年頃)



万神殿 (パンテオン,
A.D.118年~128年に建
設)

いずれもWikipediaより

ポルトランドセメント200周年

▶ 2024年はイングランドのLeedsのJoseph Aspdin（ジョセフ・アスプディン）によって出願されたポルトランドセメントの特許が成立して200周年の節目だった。

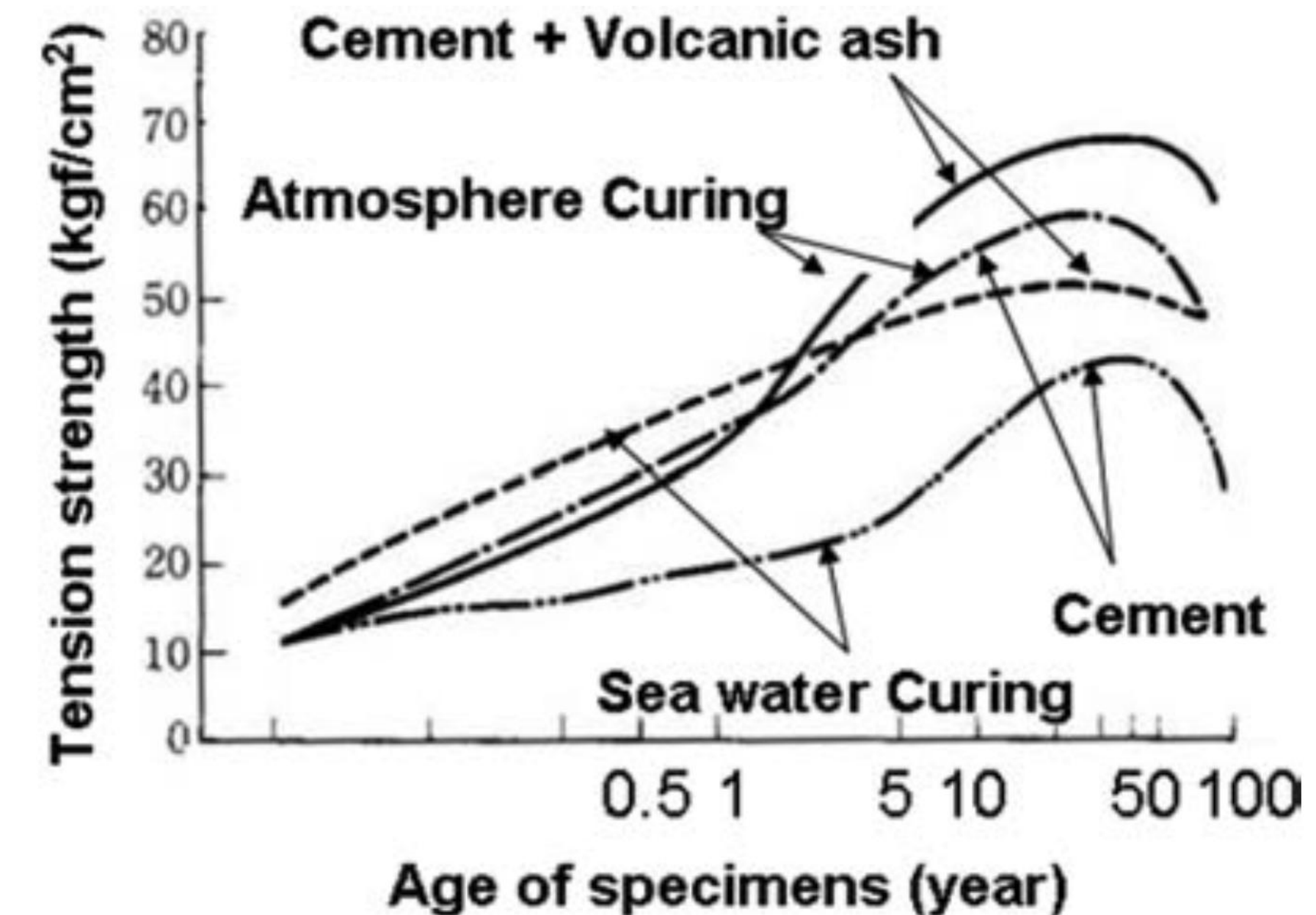
▶ 地球上の地表付近（深さ10マイル=16kmまで）に存在する元素の質量割合は、

- | | |
|------------|-------|
| 1) 酸素： | 49.5% |
| 2) ケイ素： | 25.8% |
| 3) アルミニウム： | 7.56% |
| 4) 鉄： | 4.70% |
| 5) カルシウム： | 3.39% |



▶ セメントの構成元素と見事に一致する→廉価

廣井 勇の100年試験供試体



土木学会コンクリート委員会，日本が世界に誇るコンクリート技術，2014

- ▶ 適切に設計・施工・維持管理されたコンクリート構造物は，長期間その性能が発揮され，必要な機能を保持することが期待できる

インフラの現状

2014年4月

国土交通省 社会資本整備審議会 道路分科会 が

▶ 「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」
を発表

“最後の警告 - 今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ”

▶ 異例の強い表現

技術に100%はあり得ない！！



維持管理の重要性

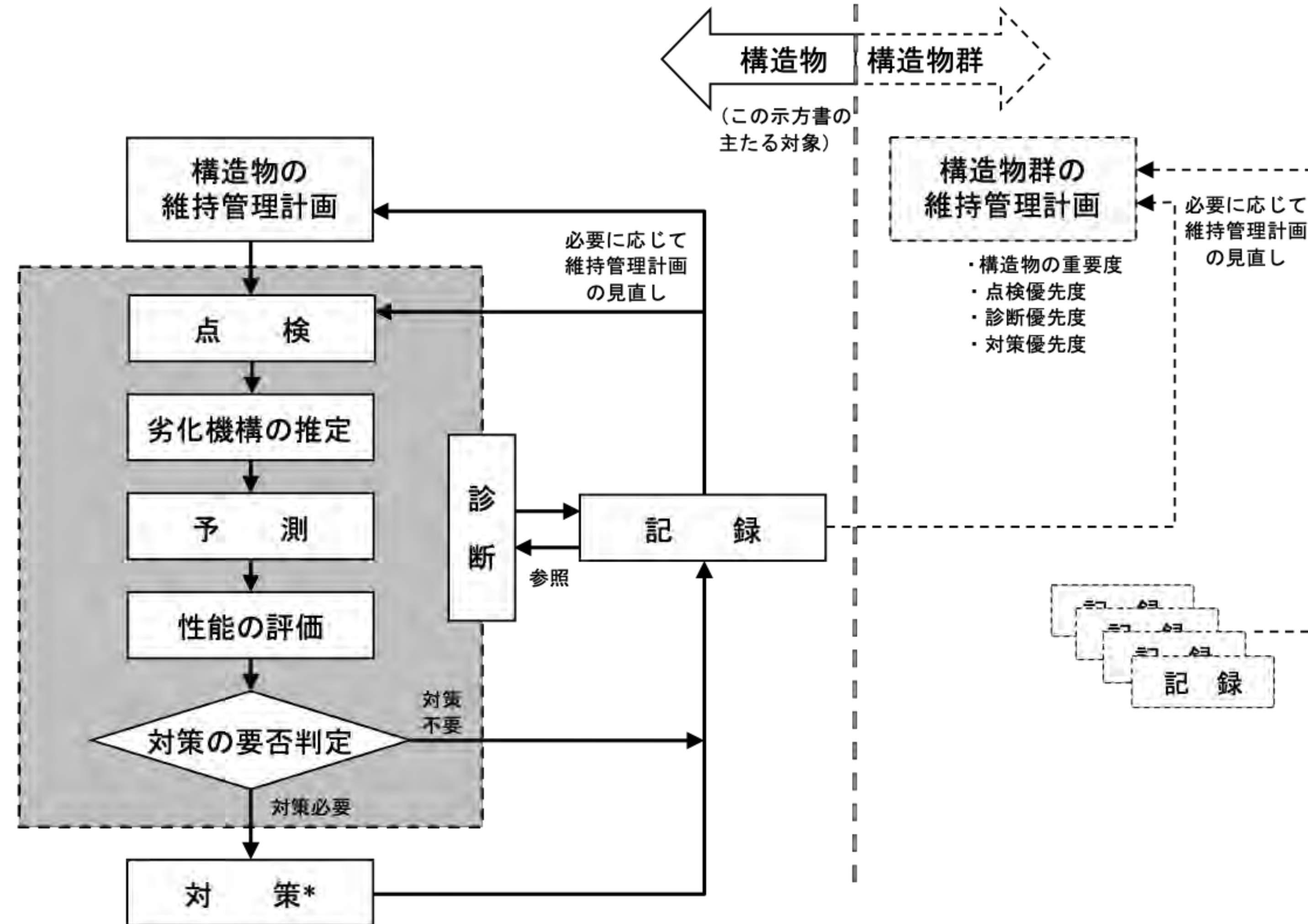
維持管理とは

- ▶ 維持管理とは，構造物の供用期間において，構造物の性能を要求された水準以上に保持するための全ての技術行為である．

【目的】

コンクリート構造物の維持管理は，構造物に必要な性能を確保し，私有財および公共財としての資産価値，歴史的・文化的価値を維持および向上させるために行う．

構造物の維持管理の手順



*) 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。

維持管理計画

- ▶ 初期の診断の結果や推定される劣化機構に基づき，構造物あるいは部材の診断の方法，維持管理限界，対策の方法，記録の方法等を示す．
- ▶ 維持管理に先立って策定し，診断の結果に基づいて，必要に応じて随時見直す．
- ▶ 維持管理計画を具体化した手順を明確にする．

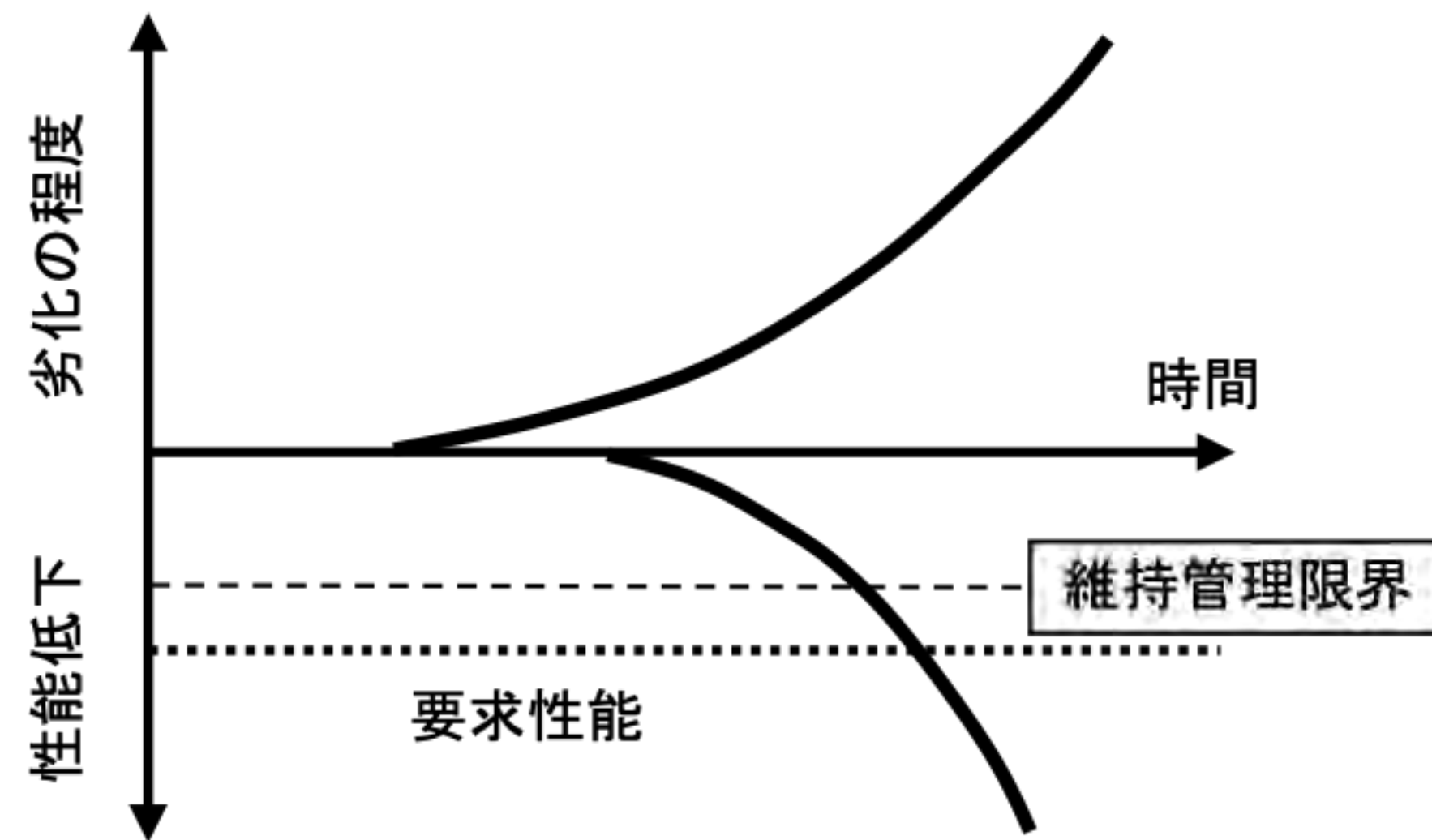
PDCAサイクル
をまわす

構造物の重要性（社会への影響），保有性能，供用期間，
経済性，地域性，人的資源を考慮して

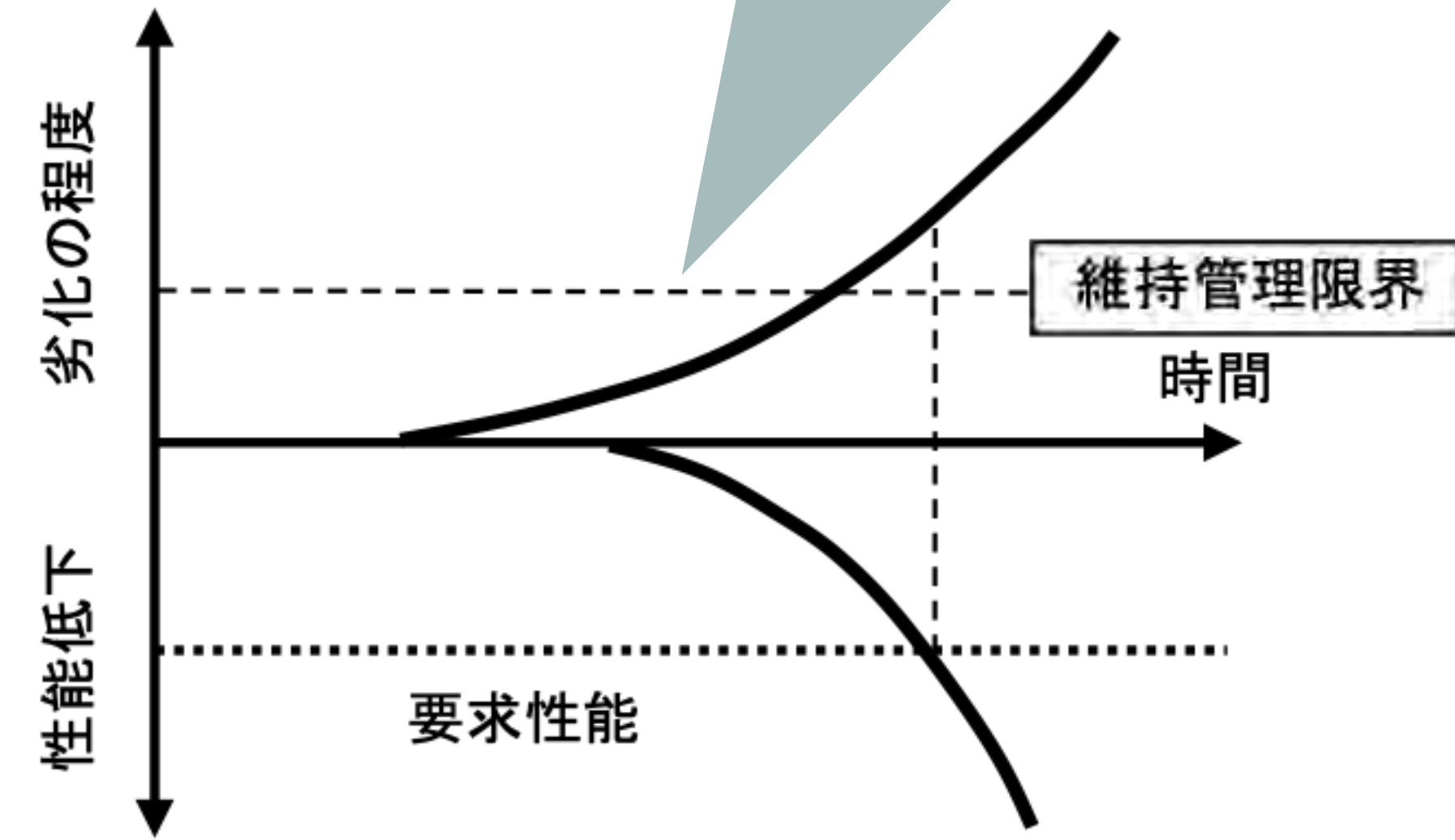
計画的に

実施することが重要である。

維持管理限界



(a) 性能を指標として設定する場合



(b) 劣化状態（外観上のグレードなど）を指標として設定する場合

維持管理の開始にあたっては，維持管理計画を策定し，維持管理限界を設定する。

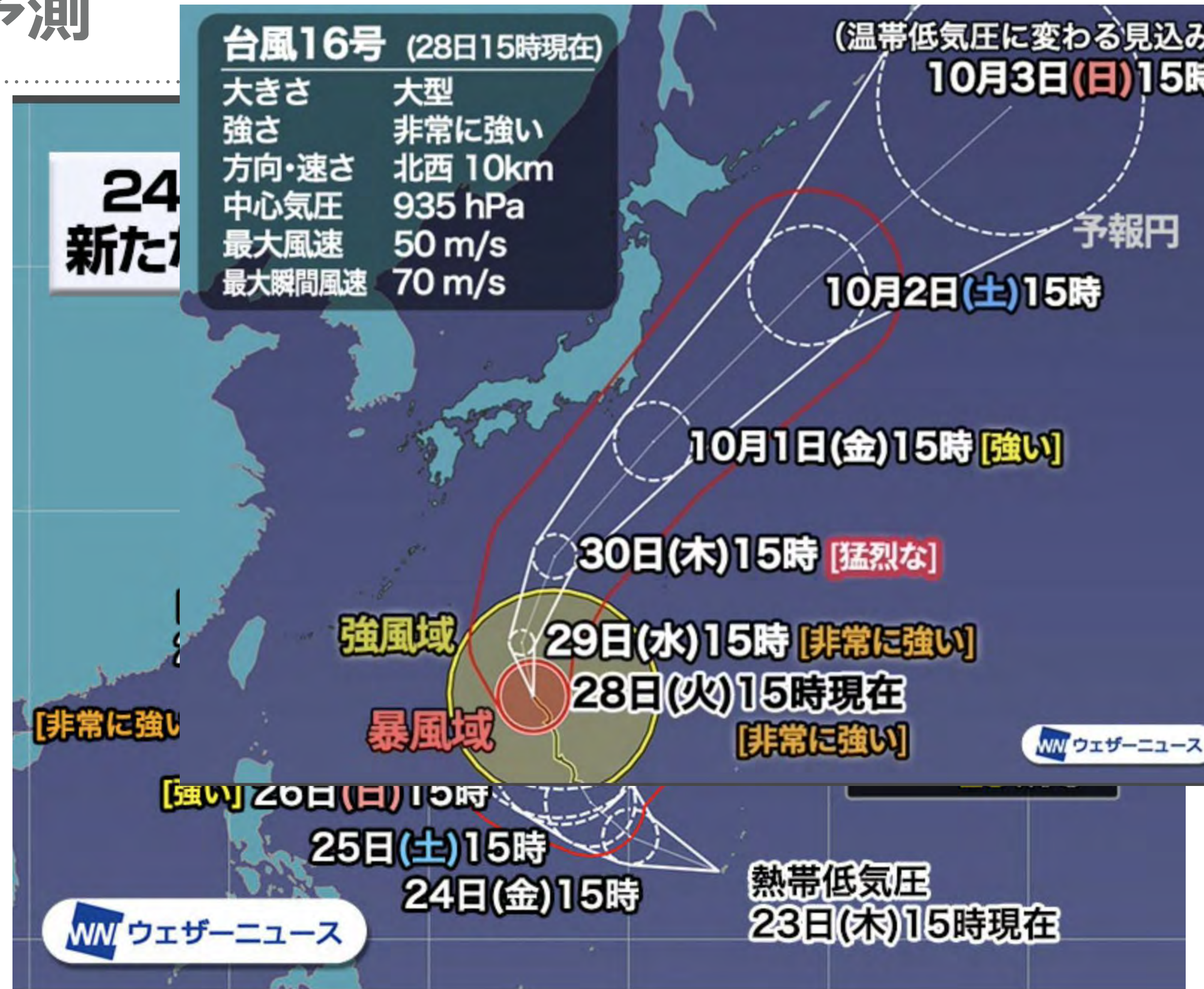
維持管理計画

▶ 構造物の特徴に応じて，画一的ではないメリハリの利いた方策を展開することが重要．

- 維持管理限界
- 調査方法（項目，手段，精度．．．．．）
- 性能の評価方法
- 想定する対策
- LCC

最適なシナリオを設定する

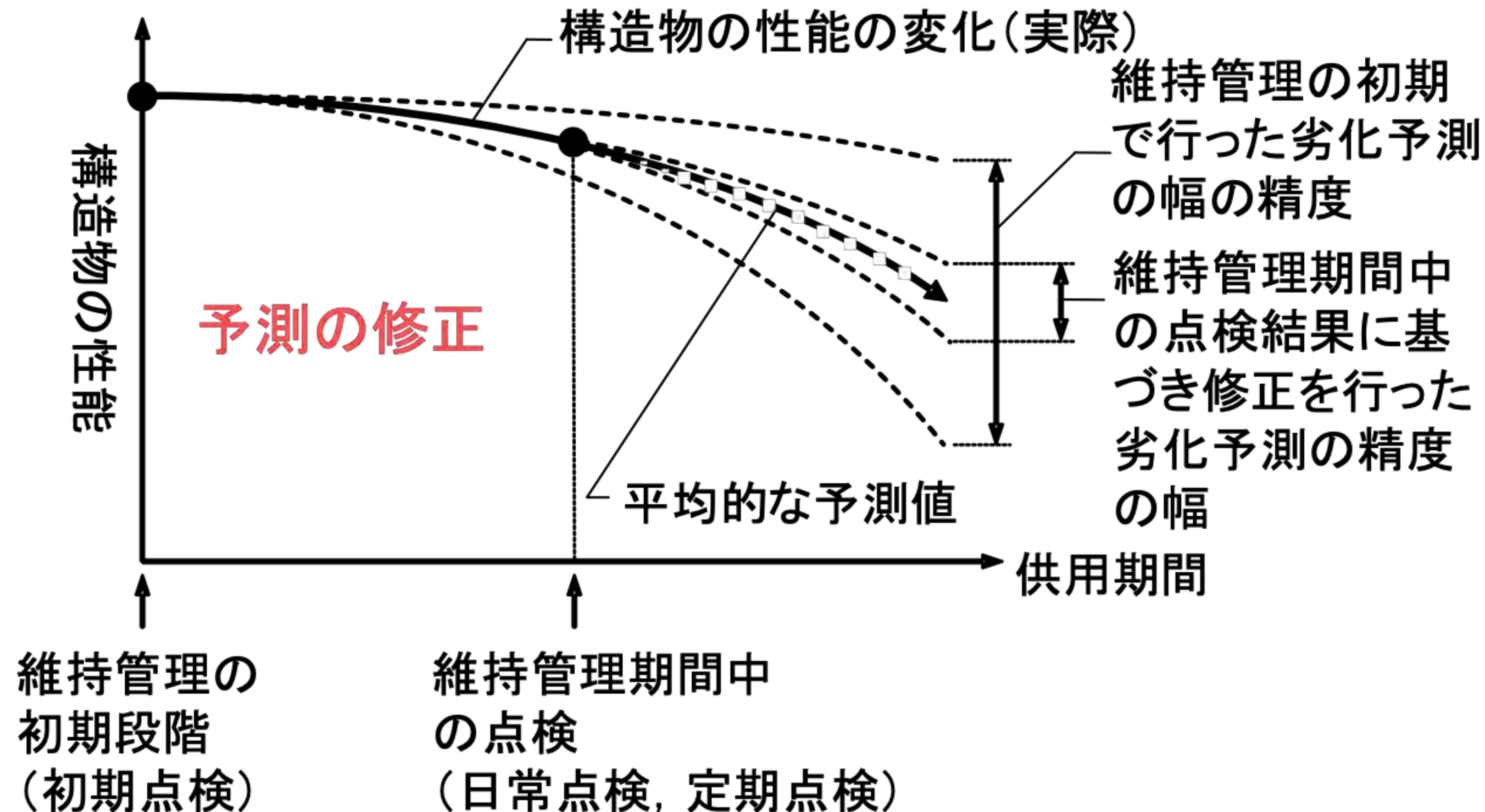
台風の進路予測



2021年9月 台風16号

劣化の予測

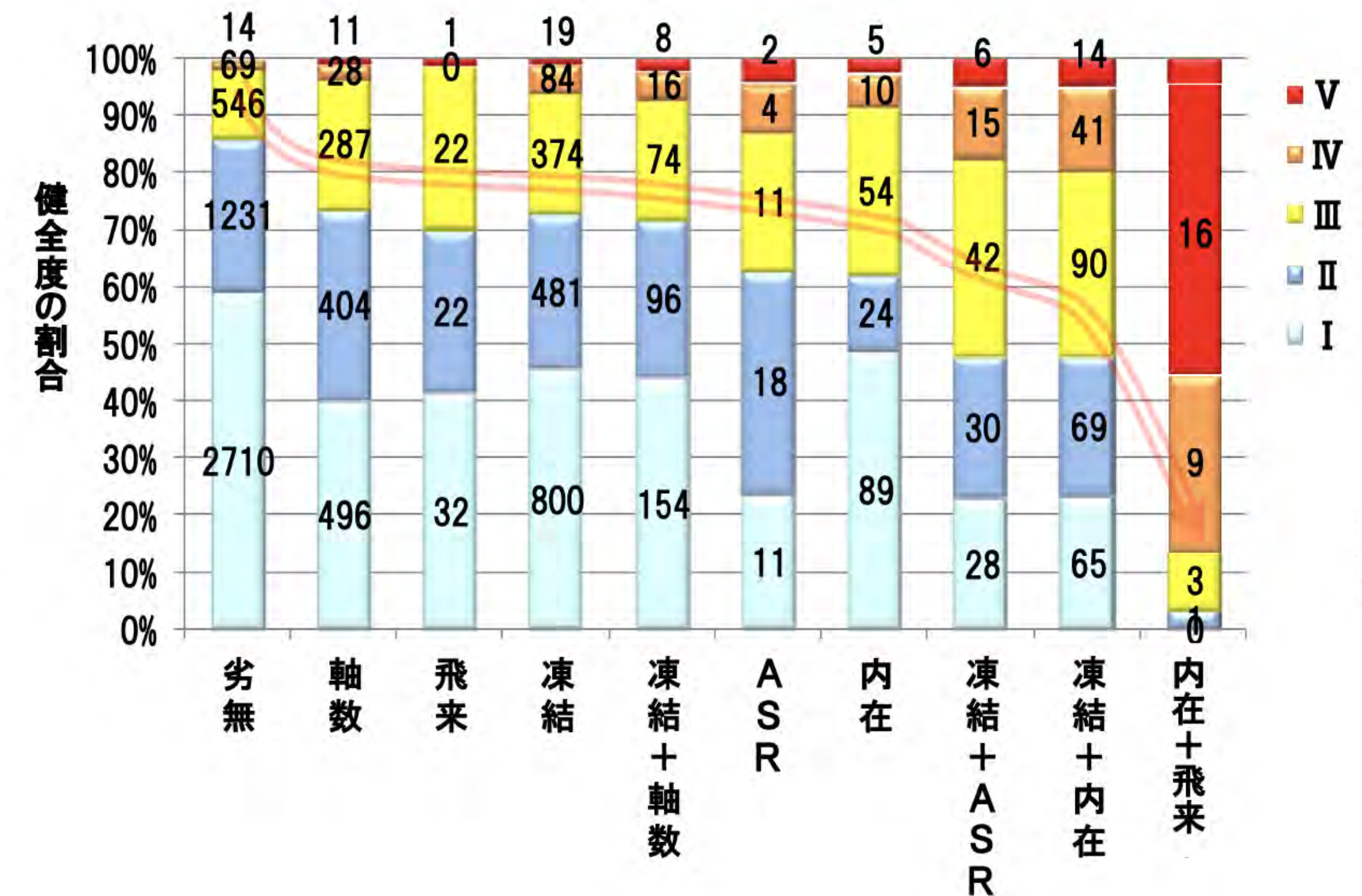
- 点検結果を蓄積することで予測結果を修正し，構造物の将来の状態に関する予測の精度を向上させ，より適切な維持管理を.



劣化機構の推定

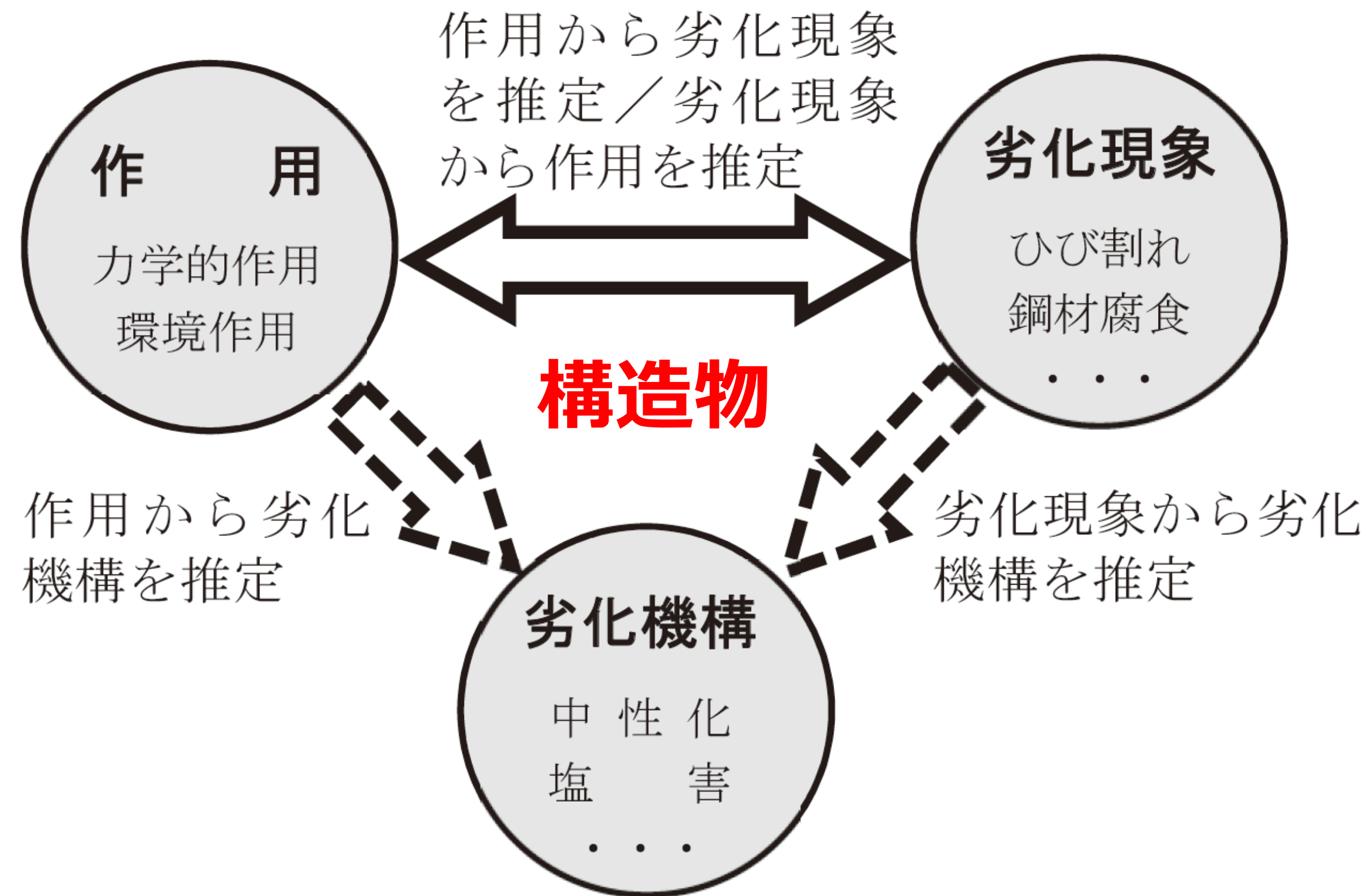
道路橋床版の例

- 劣化の有無だけではなく，劣化の種類により，性能の低下の速度は異なる！！
- 必ず，どんな劣化が生じているかを把握する！！
 - 予測のために必須
 - 維持管理シナリオを描くために



高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会報告書，2014

「作用」「劣化現象」「劣化機構」の把握の重要性



作用と劣化現象を把握して劣化機構の推定に結び付ける概念

予測の重要性

予測の目的：

- ▶ 補修・補強等の対策の可否や実施時期を判定すること
- ▶ 適切な維持管理シナリオを描くこと



- ▶ 予測結果がコスト削減や所有者・管理者の意思決定に大きく影響を及ぼす

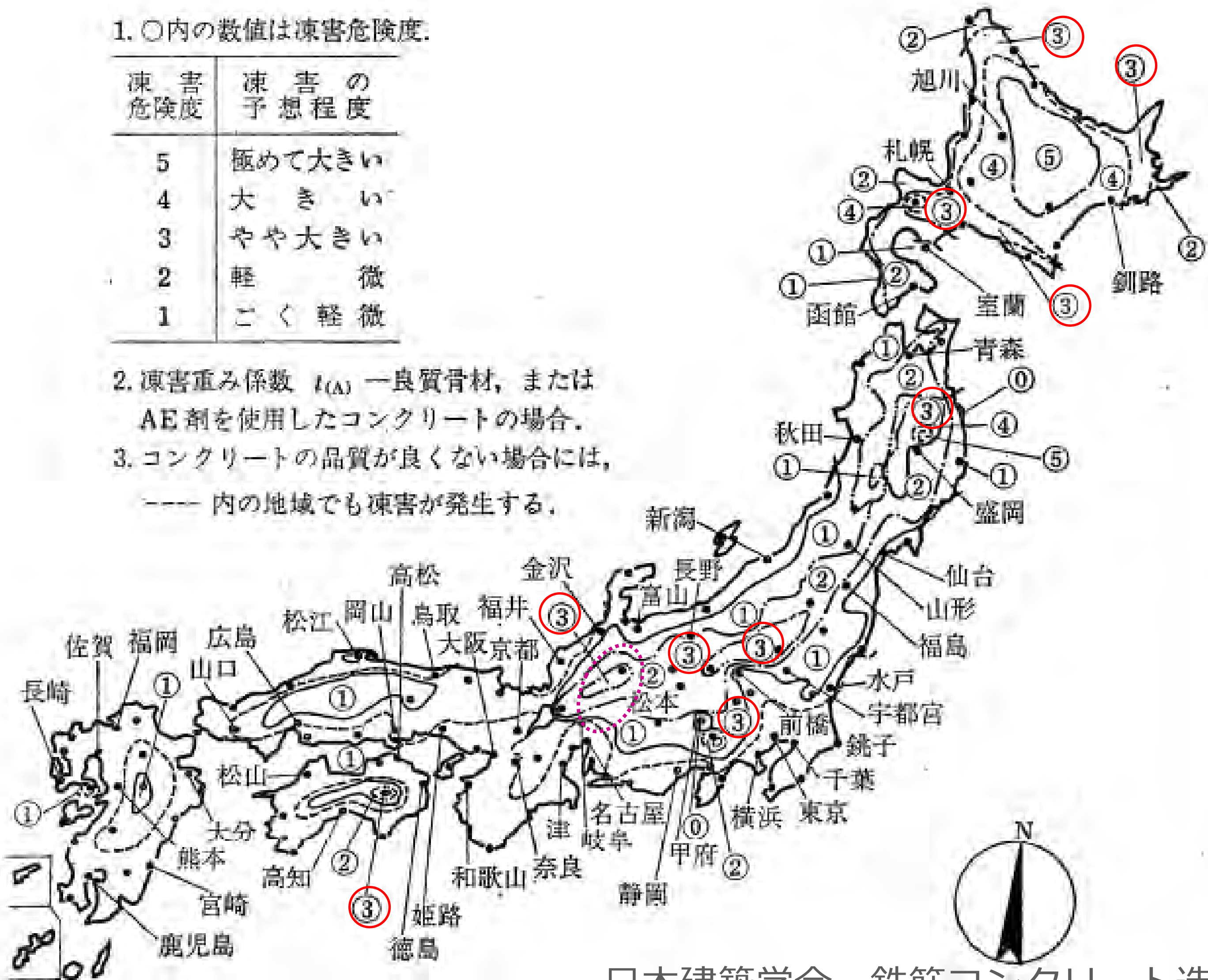
性能予測の精度や信頼性は、個別事象により異なるので、目的に応じた手法の選択が必要である。

地域特性の例：凍害危険度の分布

1. ○内の数値は凍害危険度.

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

2. 凍害重み係数 $I(A)$ 一良質骨材，または AE 剤を使用したコンクリートの場合.
3. コンクリートの品質が良くない場合には，
—— 内の地域でも凍害が発生する.



凍害危険度は、

- ①外気温上の凍結融解日数
- ②日射による凍結融解の増加日数
- ③融雪・降雨量による湿潤地域係数(コンクリート内部の含水状態)

をパラメータとして作成

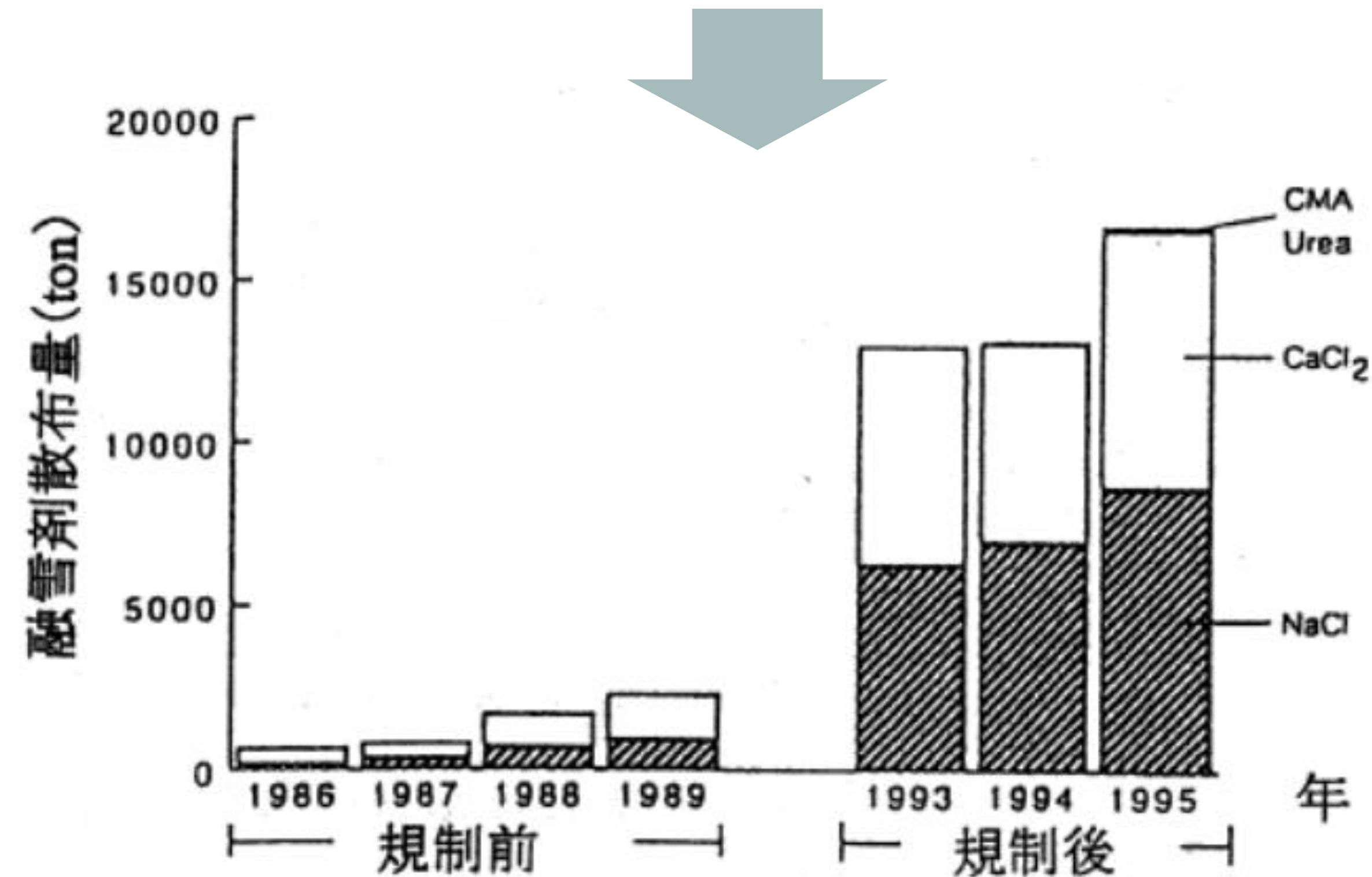
AEコンクリートの普及

1965年度地区別生コンクリート工場数とAEコンクリートの推定率

地区	北海道	東北	関東 信越	東海 北陸	近畿	中国	四国	九州	合計
工場数	35	35	248	108	110	41	45	84	706
AE剤納入 工場数	32	9	98	74	54	14	7	50	338
生コン生産 高（千m ³ ）	1,220	597	12,986	4,157	5,823	1,825	367	1,883	28,859
AE生コン推 定率（%）	73.3	15.8	39.9	69.3	34.4	15.8	31.7	67.5	44.2

凍結防止剤の散布

1991(平成3年)スパイクタイヤ禁止の法律の施行



青森県内における凍結防止剤撒布量の推移

凍結防止剤によるスケーリング



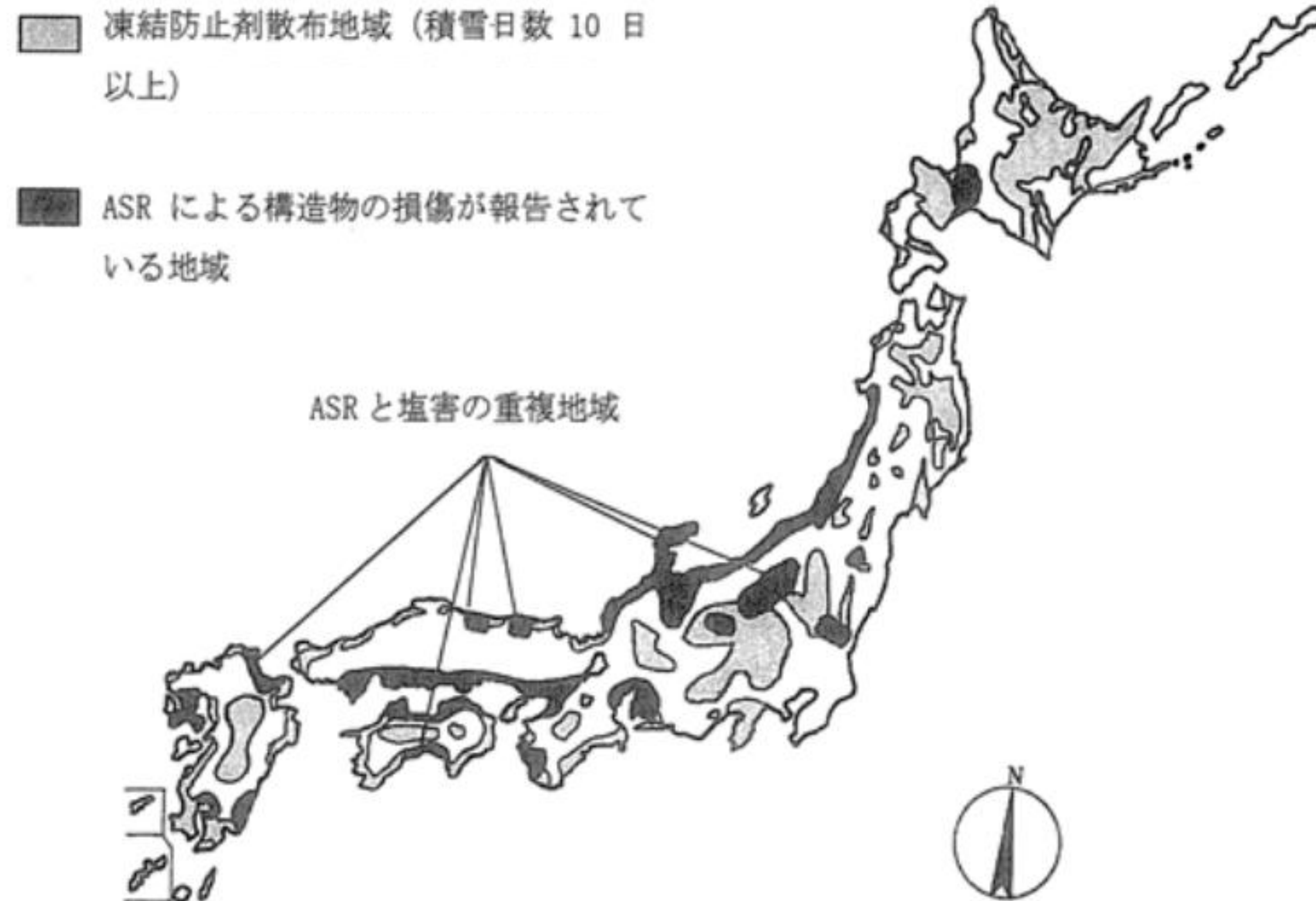
①道路橋壁高欄に生じたスケーリング劣化(供用開始後，一冬経過後)

②道路橋地覆部に生じた著しいスケーリング劣化(供用開始後，一冬経過後)

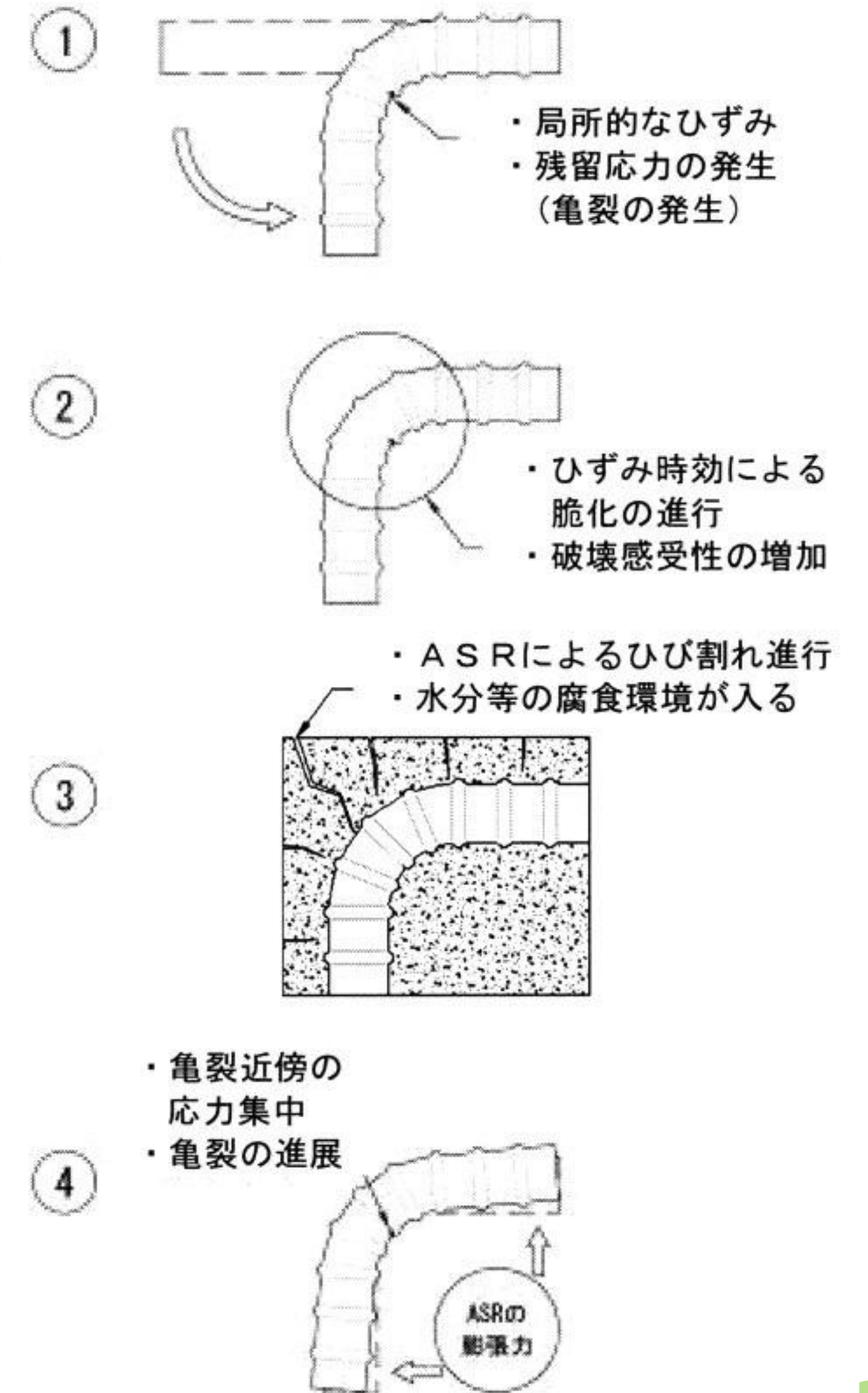
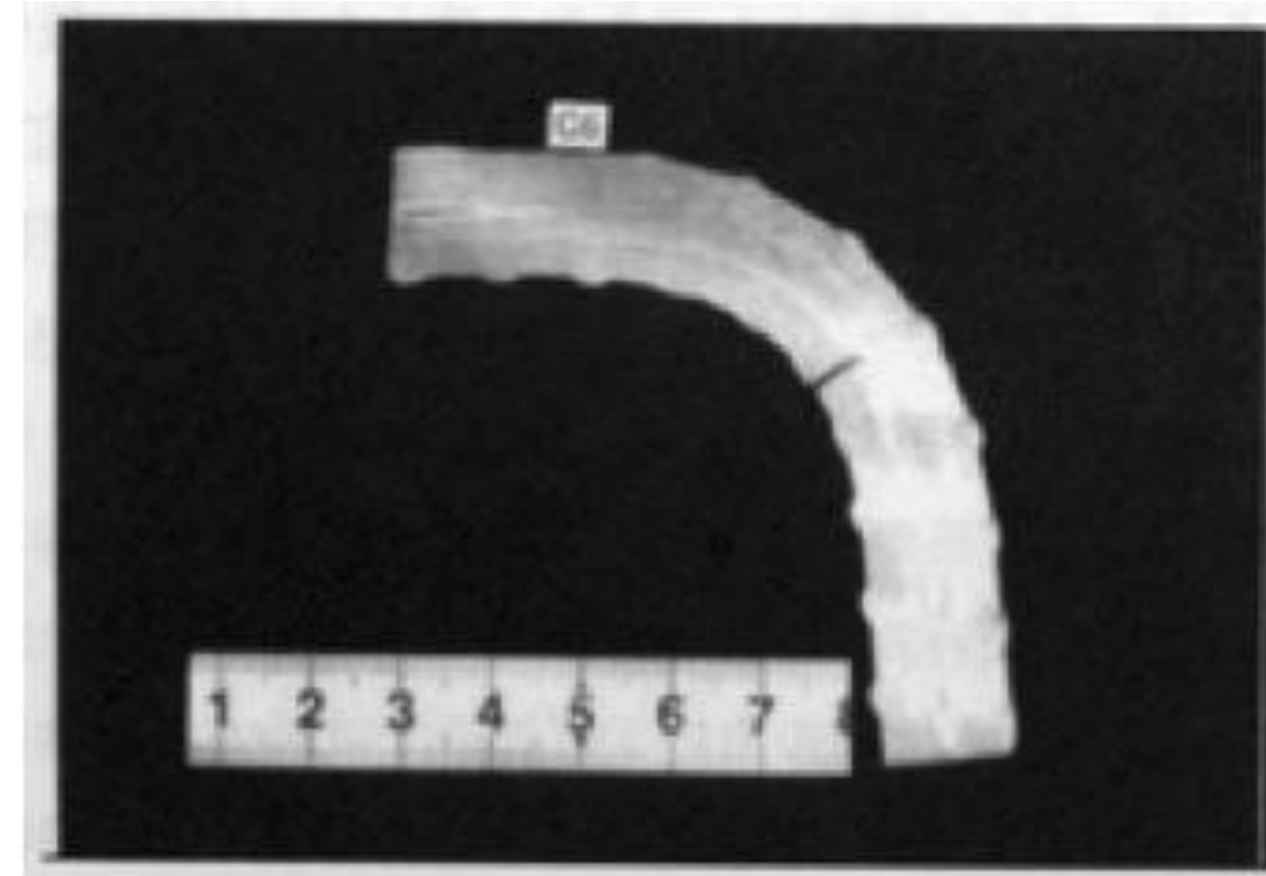
③一般道の中央分離帯に用いられた道路縁石(二次製品)に生じた著しい劣化(供用開後一冬経過後)



ASRの被害の分布

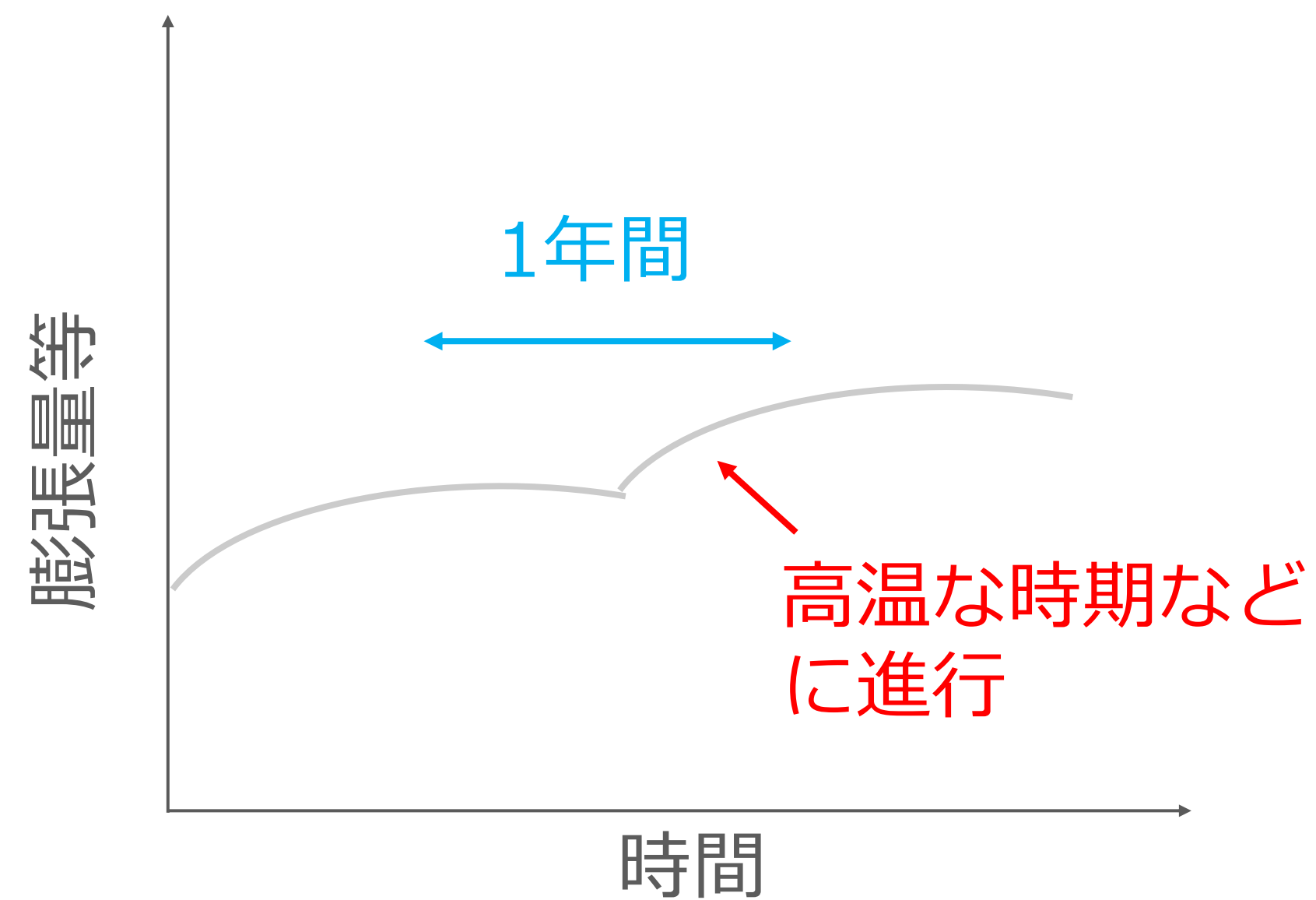


ASRによる鉄筋破断



ASRが顕在化した場合の追跡調査

- ▶ ASRによる膨張が継続的に進行していることの確認
ひび割れ（幅，長さ，密度）や膨張量等を定期的に調査
- ▶ 少なくとも1年以上の期間にわたる調査
- ▶ 膨張の進行予測を行う場合は，2～3年以上の継続的調査



膨張の進行の模式図



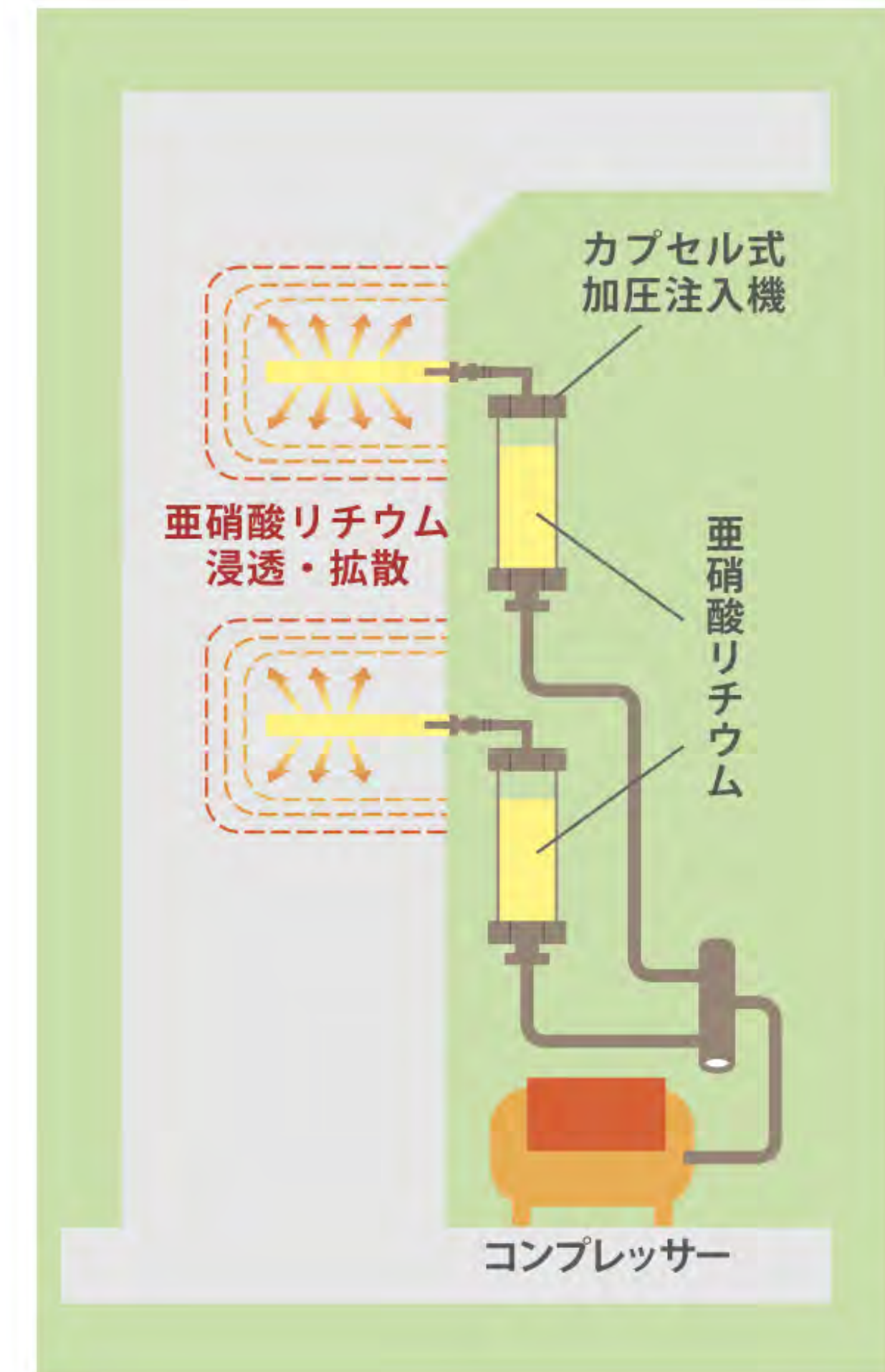
観測窓を設けて定期的な調査を行っている例

ASRへの対策の例



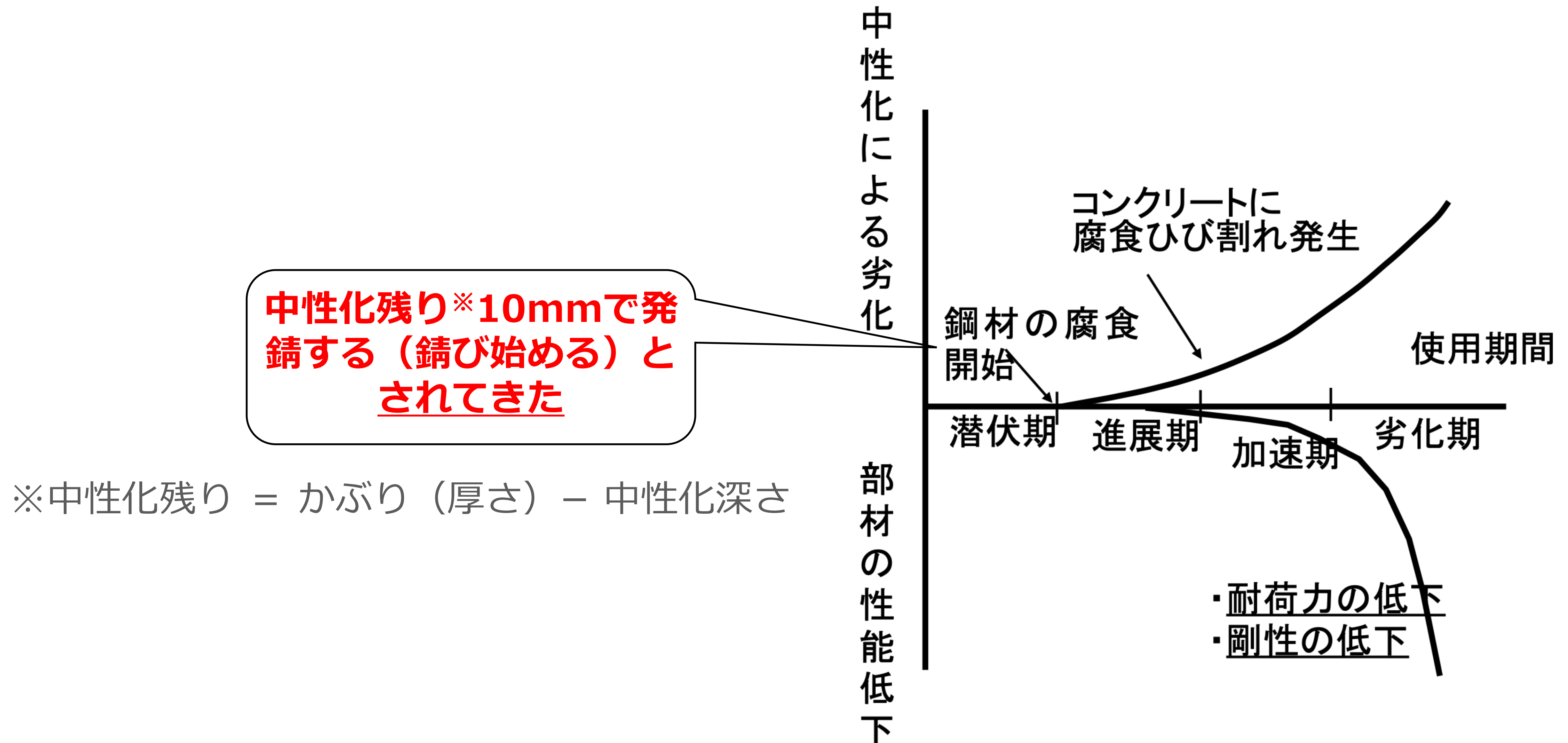
亜硝酸リチウムの圧入

ASRを引き起こすNa, Kと同じアルカリ金属の仲間であるLiを圧入し, 先行して骨材と反応させる



コンクリートメンテナンス協会

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食



中性化速度と環境の湿度

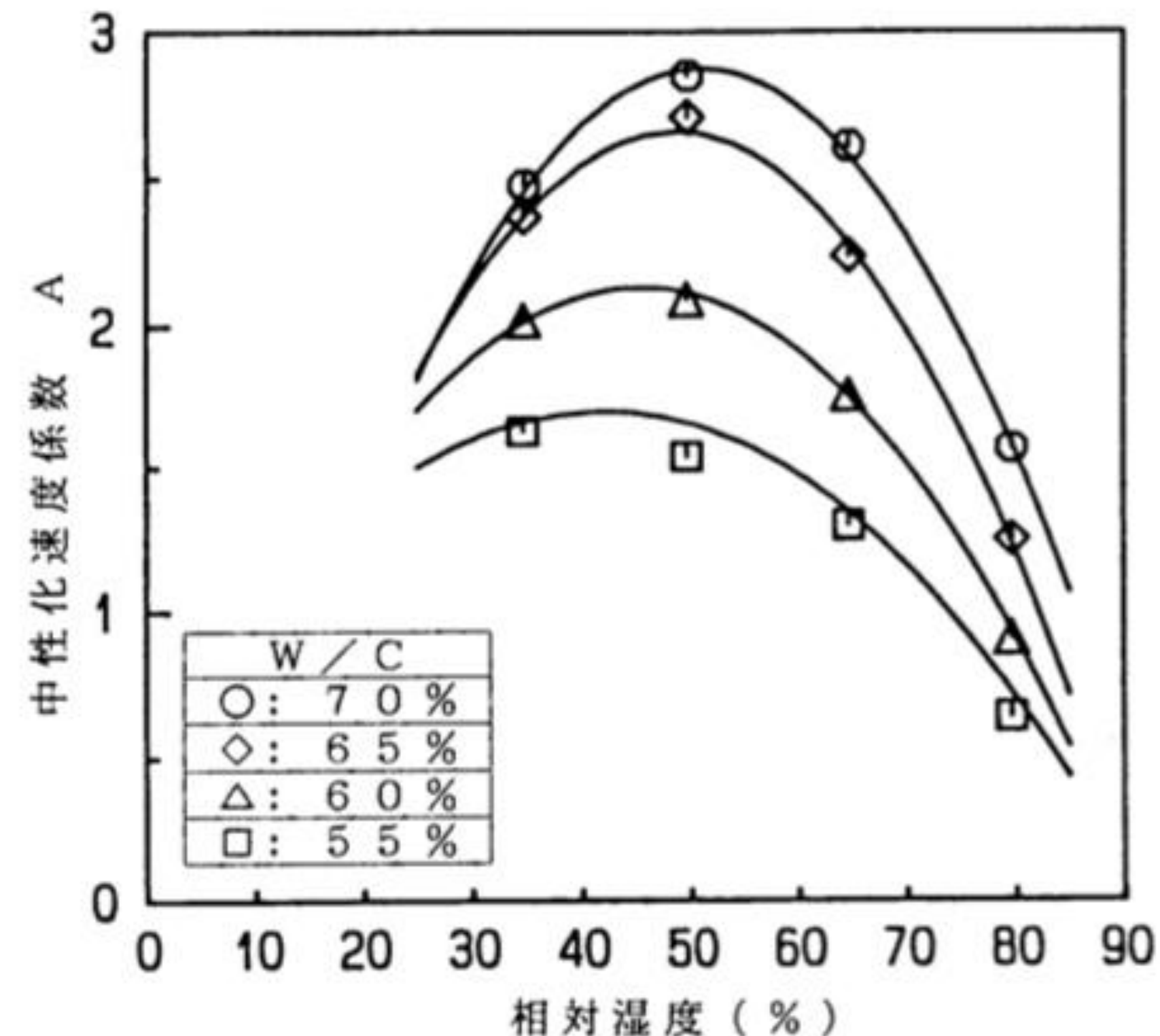


図-6 中性化速度係数と相対湿度との関係

* 適度に乾燥していると，中性化が早くなる。

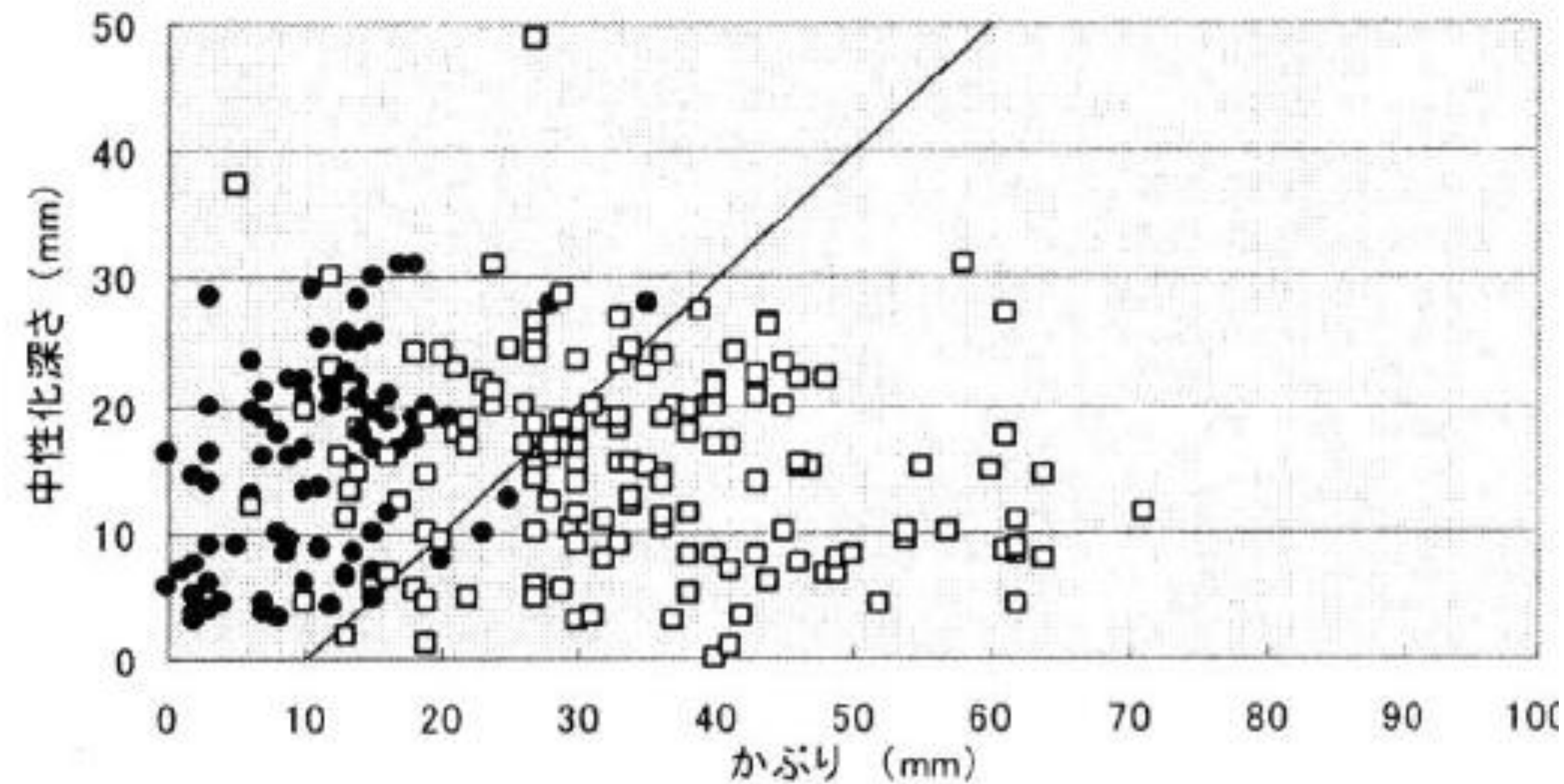
◆ 中性化を防ぐ＝中性化残りを確保する？



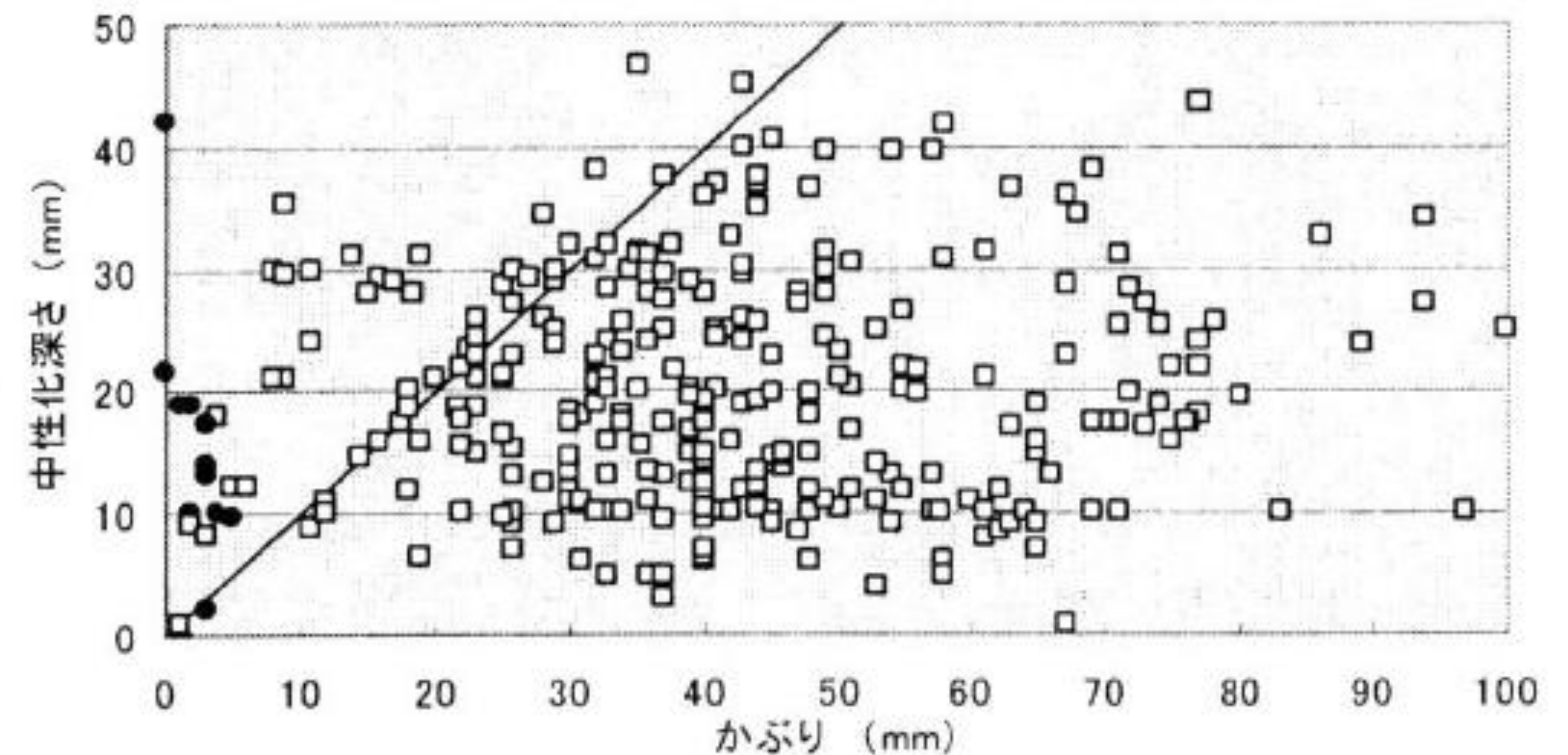
* 濡れていると，中性化（炭酸化反応）の進行は遅い

鄭ら：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，第1巻，第1号，pp.85-94，1990年

中性化（による剥落）と雨掛かり



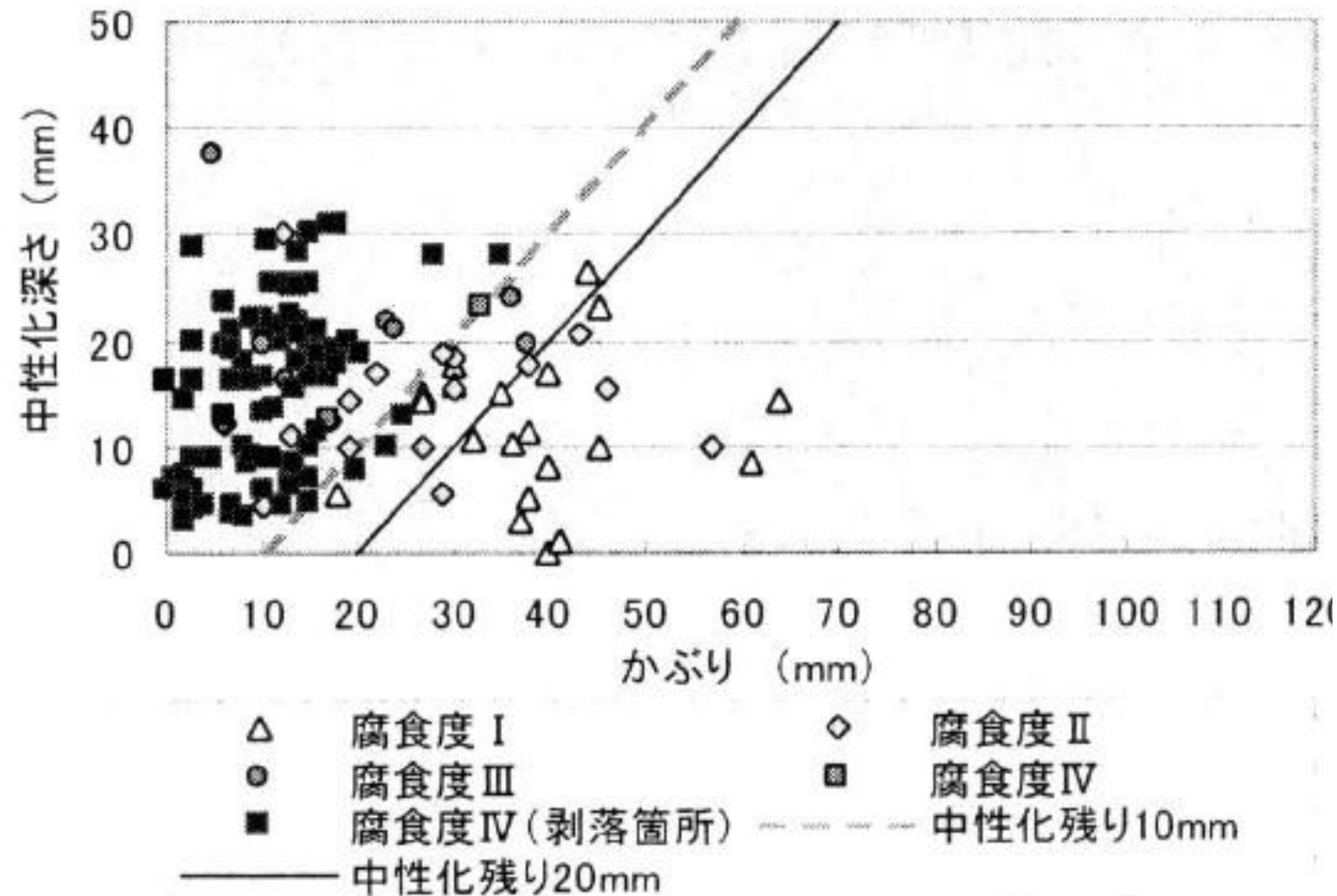
(a) 雨水等の影響を受ける箇所



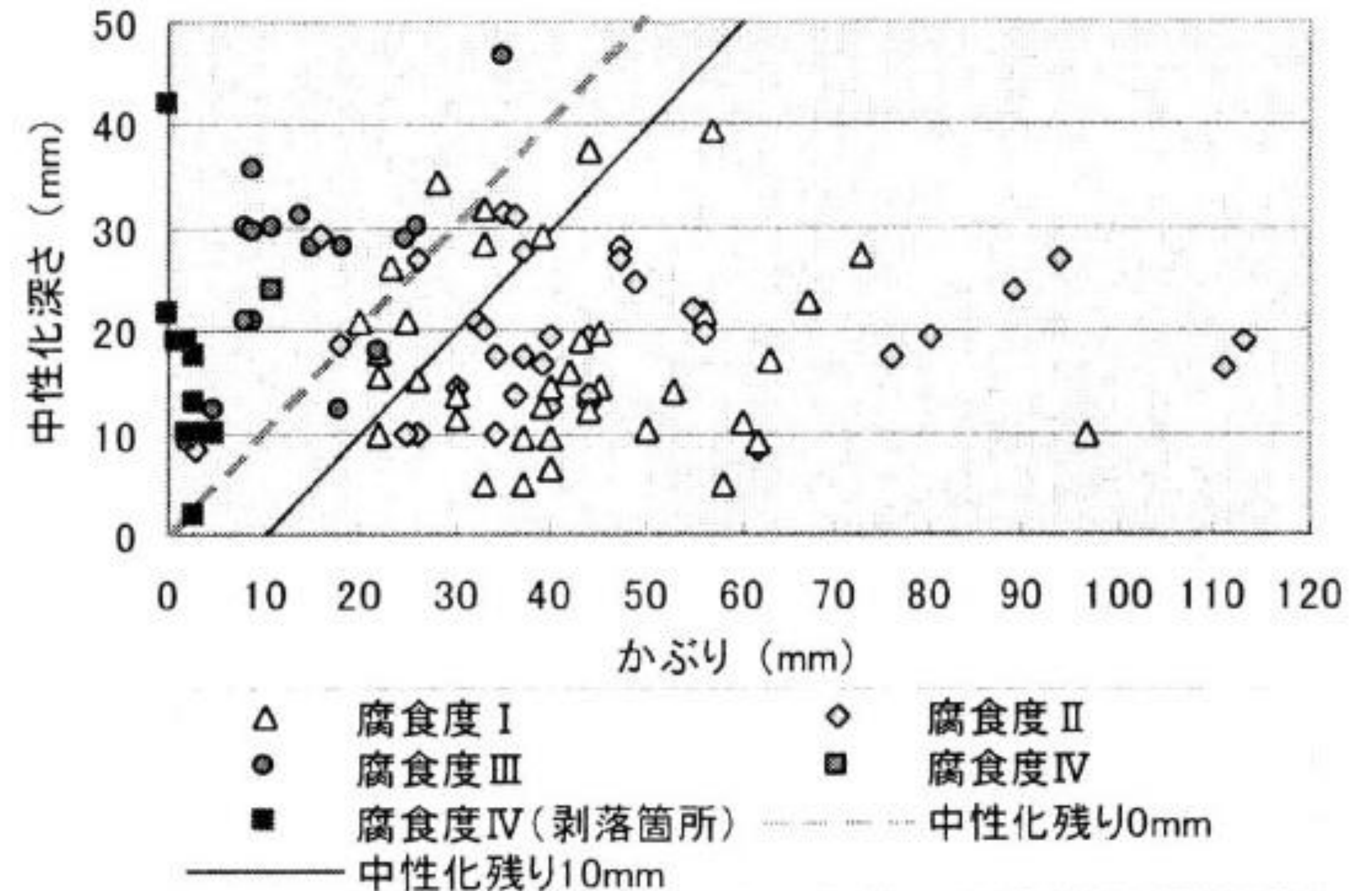
(b) 雨水等の影響を受けない箇所

石橋ら：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.123-134，2002.8

中性化による腐食度と雨掛かり



(a) 雨水等の影響を受ける箇所



(b) 雨水等の影響を受けない箇所

石橋ら：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.123-134，2002.8

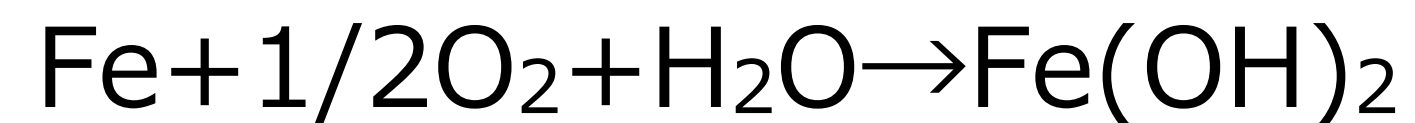
結論の抜粋

- ▶ 1965年以降に建設された高架橋等において, 鉄筋の腐食膨張圧によるコンクリート片の剥落が生じるのは, おおむね雨水等の影響を受ける箇所で中性化残り10mmであり, 雨水等の影響を受けない箇所では中性化位置が鉄筋位置に達し, かつかぶりが極端に小さい場所である.
- ▶ 1965年以降に建設された高架橋等において, 鉄筋の腐食が生じていると仮定した腐食グレードIII以上となるのは, おおむね雨水等の影響を受ける箇所で中性化残り20mm以下, 雨水等の影響を受けない箇所で中性化残り10mm以下である.

そもそも, なぜ中性化を防がなければならないか??

- ➡ 構造物の性能を低下させないため
- ➡ 鉄筋を錆びさせない (鉄筋断面の減少, 付着の喪失, etc.)

水が来なければ, 中性化残りが小さくなっても, 鉄筋は錆びない!!



「中性化」 ➡ 「中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食」

函渠における劣化（高湿度が悪影響）



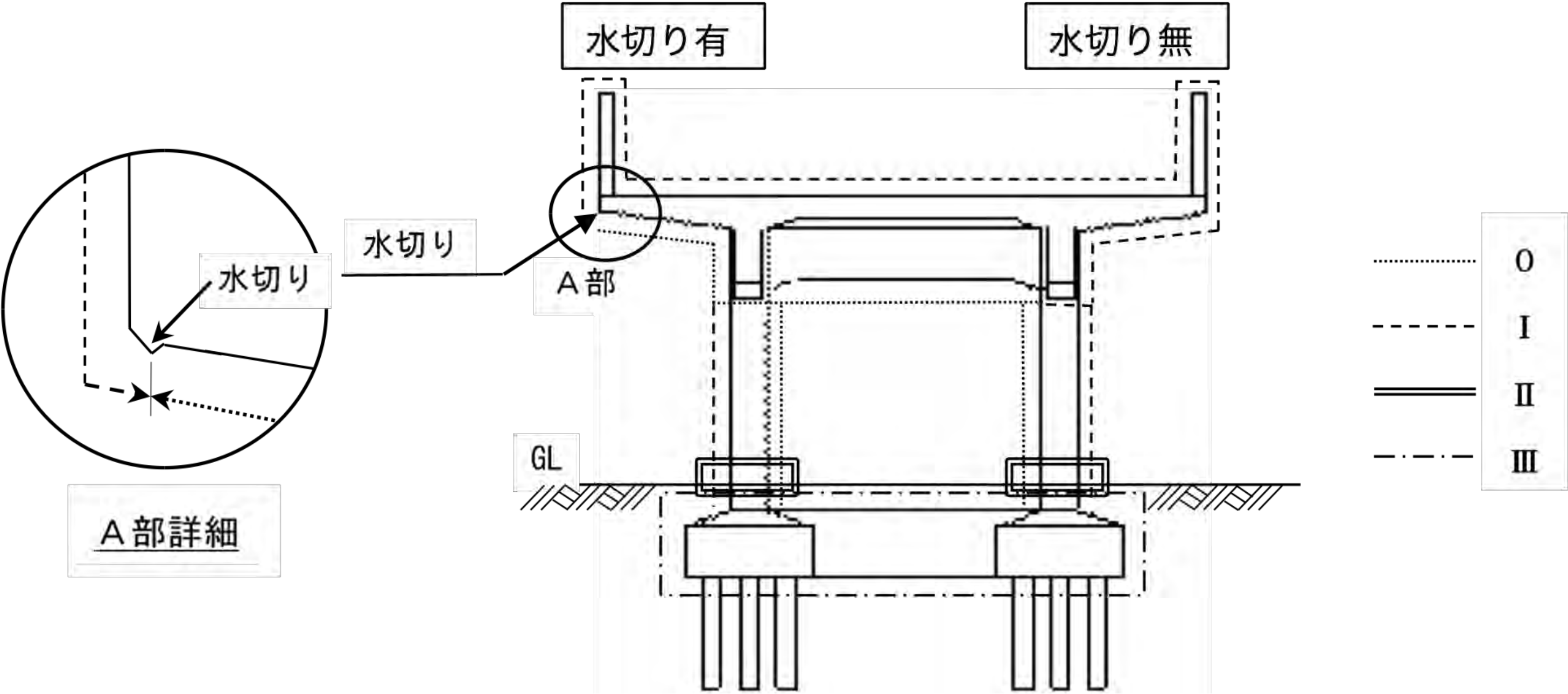


図 水掛かりを受ける部位の区分例

0	水掛かりがなく常時乾燥する部位
I	降水は掛かるが，降水がやめばすぐに乾燥が始まる部位
II	湿潤状態が長く続く部位
III	湿潤状態であっても乾湿の環境変化が少ない部位

鋼材腐食の進行予測

- 鋼材腐食の開始時期は，**中性化残り**と**水の供給状態**で判定することを原則とする。

中性化深さ：水掛かりのある／無い部分の両方で測定

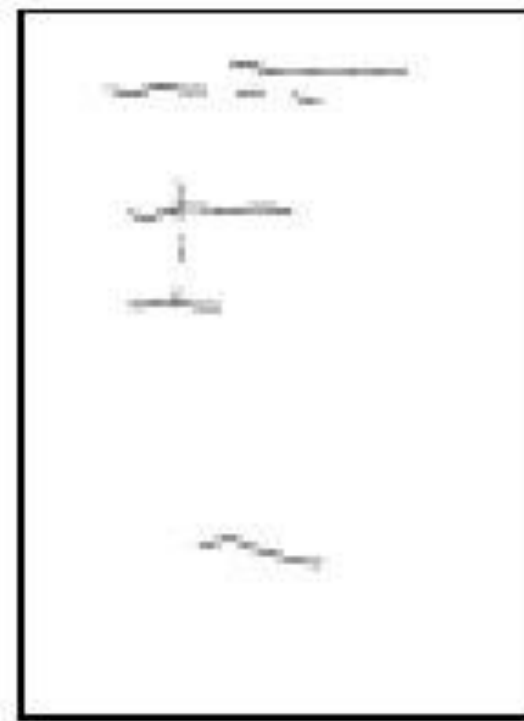
0	比較的乾燥した状態	構造物の性能に影響するような 重大な鋼材腐食は生じない
I	一般的な水掛かり環境	腐食開始は 中性化残り10mm
II	湿潤状態が長く続く環境	中性化残り10mm以上 の時点で腐食が開始している
III	常時湿潤状態で乾湿の繰返しが ない	構造物の性能に影響するような 重大な鋼材腐食は生じない

中性化深さが大きい（中性化残りが小さい）からといって，あわてて不必要な対策を行なわない！

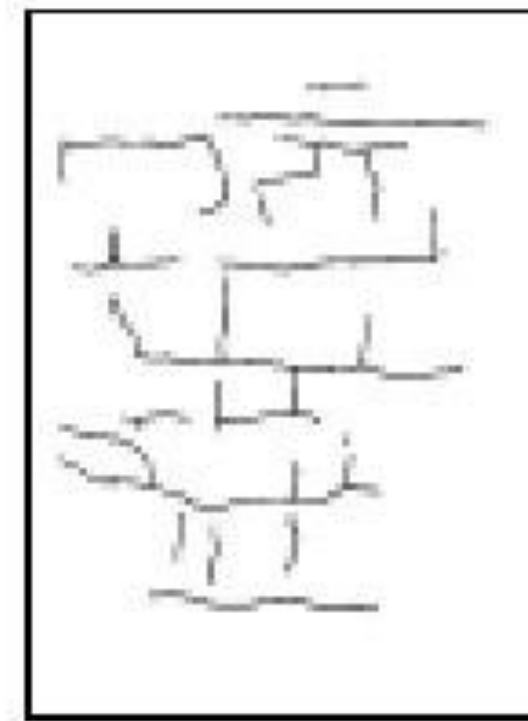
➤ **補修箇所は，欠陥となる**

床版疲労

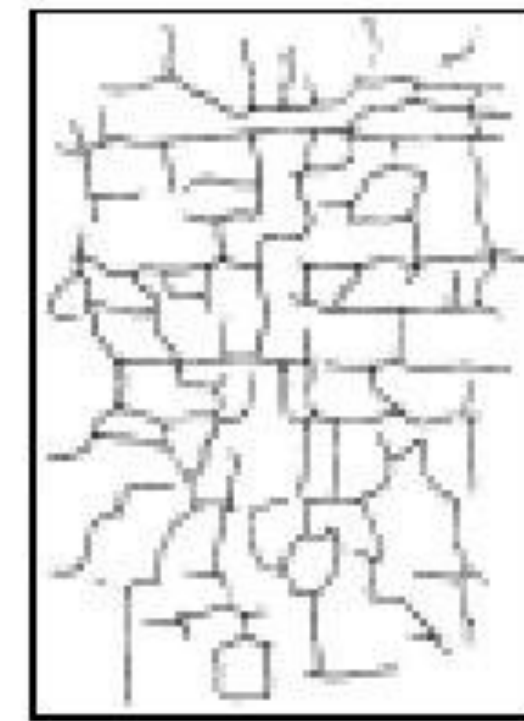
古典的な床版劣化の分類



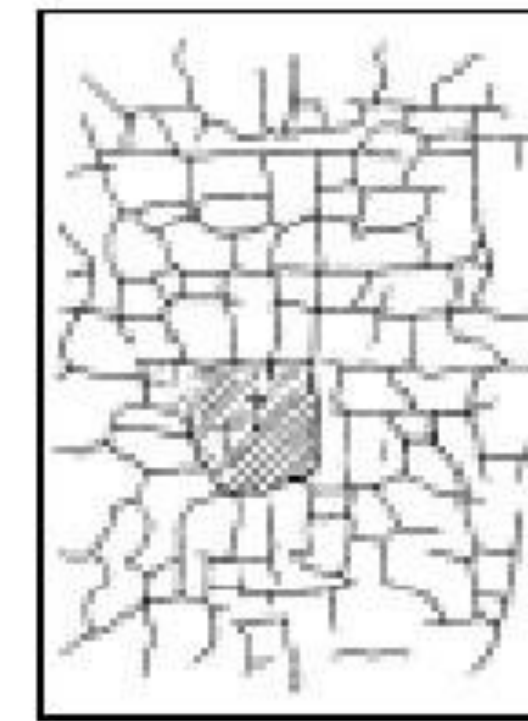
潜伏期



進展期



加速期



劣化期

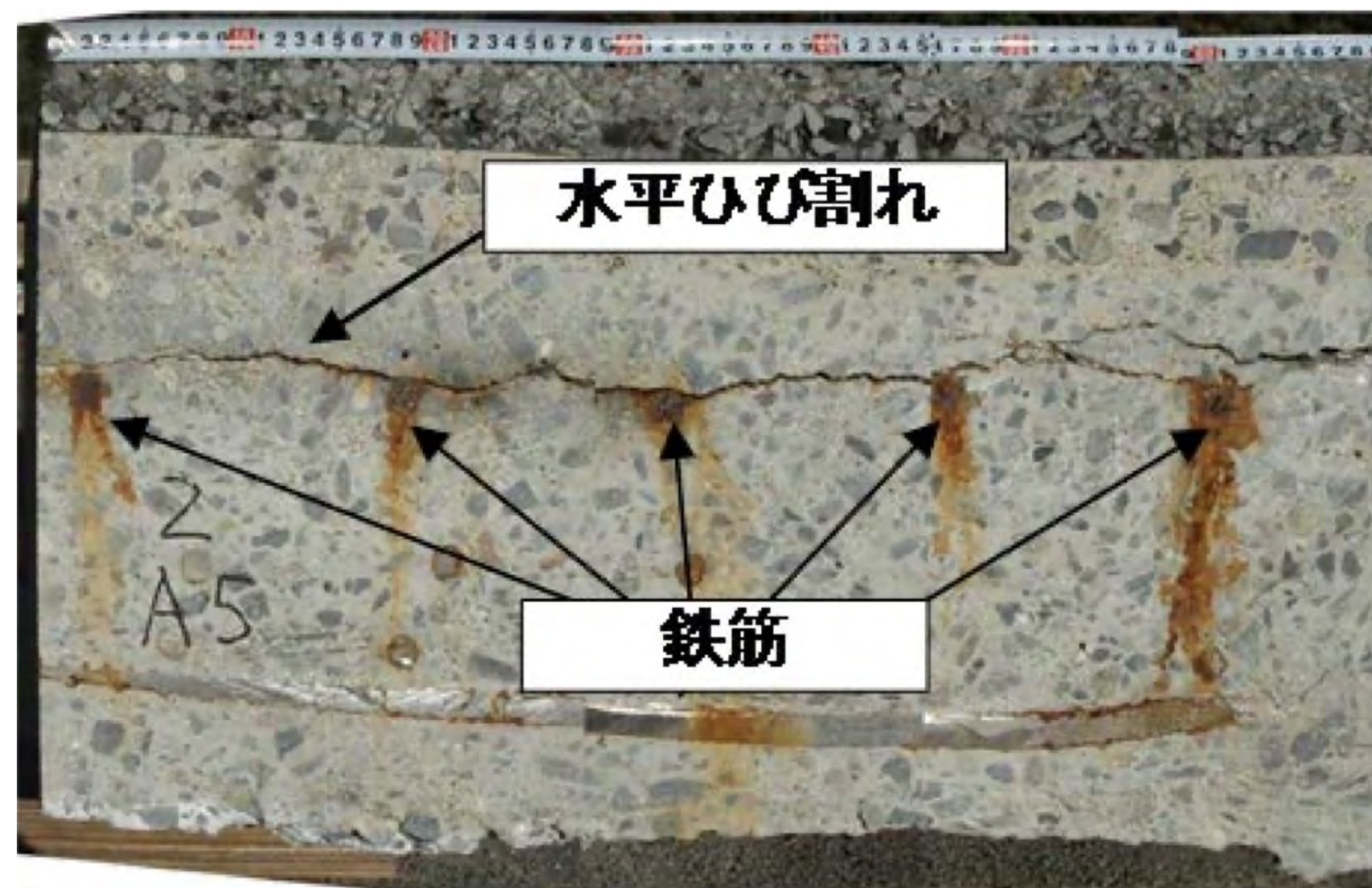
道路橋床版の疲労によるひびわれの状況

道路橋床版の疲労劣化は，（半）定量的診断が比較的進んできた分野である

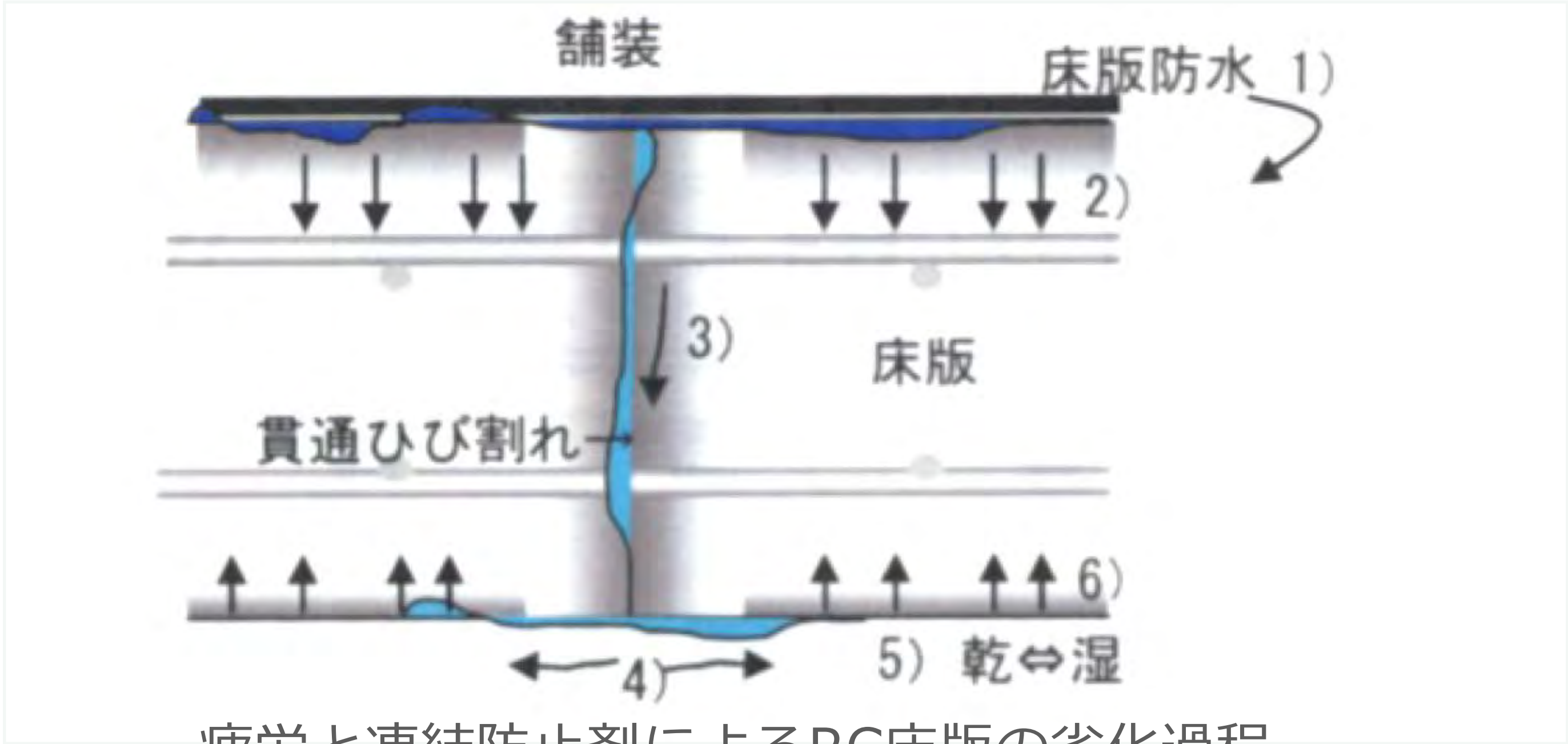
－ 下面のひび割れ状況，ひび割れ幅などを「目視」で評価，判定する

→ したがって，耐荷力ベースではない

- * 床版厚増大，配力筋量増加，床版支間長の制限などの設計基準の変遷を経て，従来型の床版疲労は生じにくい。
- * 近年，塩分の作用に起因する，新しい劣化プロセスをたどる床版劣化が増加中
 - 鉄筋位置に沿った水平ひび割れの発生が特徴
 - 内部であるため，目視では発見できない



鎌田ら：各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムの開発，土木技術資料 53-3（2011）



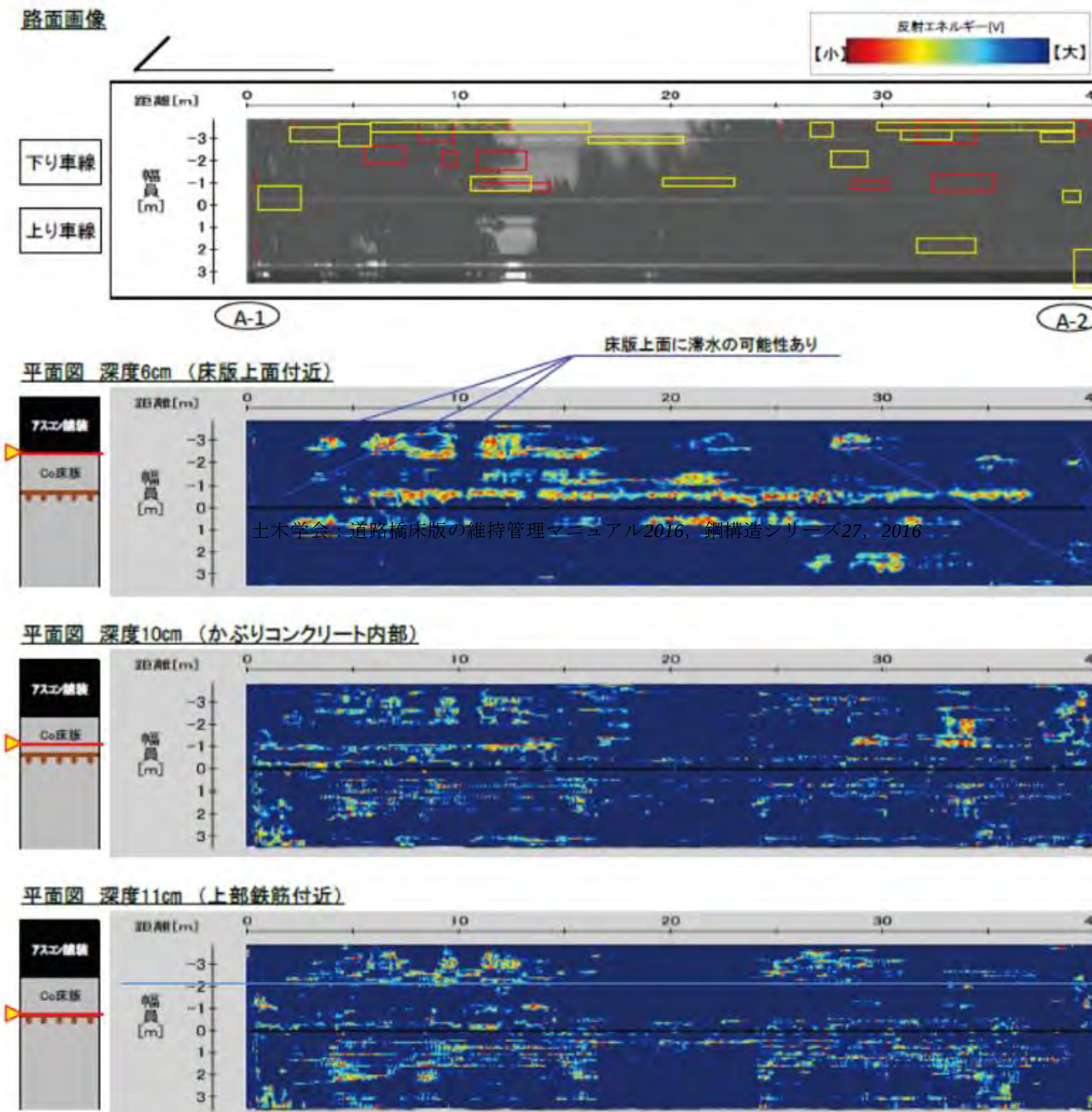
疲労と凍結防止剤によるRC床版の劣化過程

潜伏期	凍結防止材が乾燥収縮ひび割れ等を通じて，ポンピング作用により床版内に浸透していく
進展期	上側鉄筋に腐食発生，床版下面に白華.
加速期前期	床版上面の浮き，コンクリートの砂利化，舗装のポットホールが発生，貫通ひび割れと床版下面にエフロが発生．耐荷力の低下は未だ小さい．
加速期後期	塩分が床版下面で乾湿繰返しにより高濃度化．下側鉄筋も腐食し，耐荷力が低下し始める．
劣化期	下面で浮きや剥離，剥落．耐荷力の急激な低下と部分的抜け落ちの発生

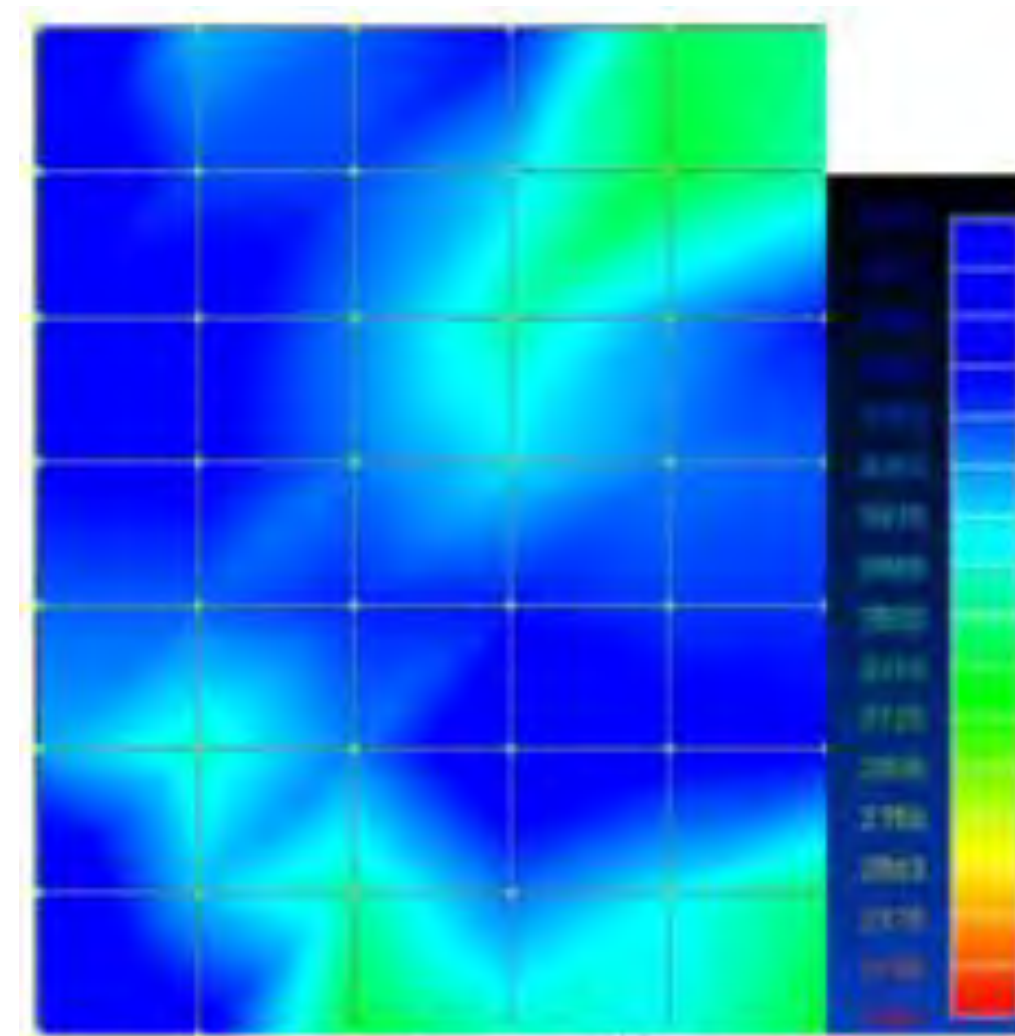


小林他：山間寒冷地におけるRC床版のASRと凍害による複合劣化の事例とその
検証実験，土木学会論文集E2，Vol. 70，No. 3，pp.320-335，2014年7月

電磁波レーダー法



弾性波トモグラフィ

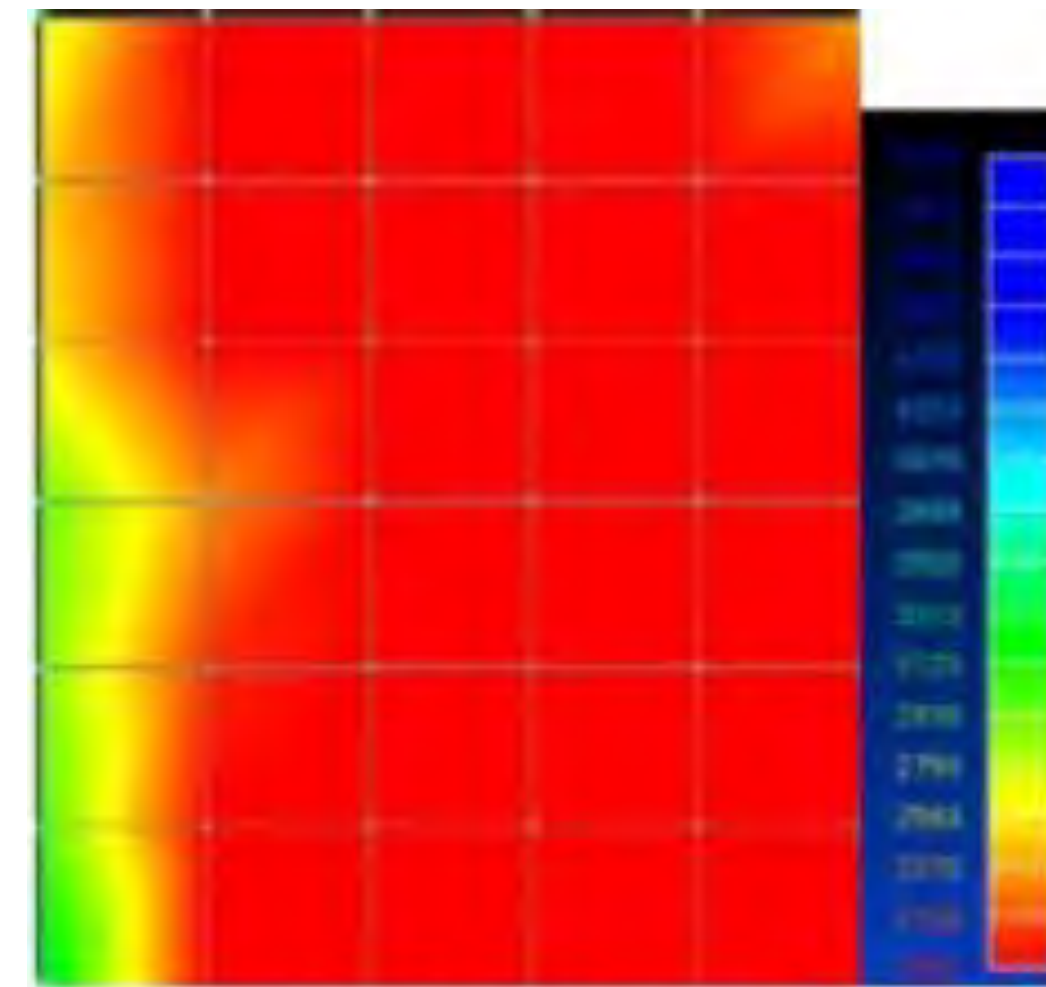


(a) トモグラム

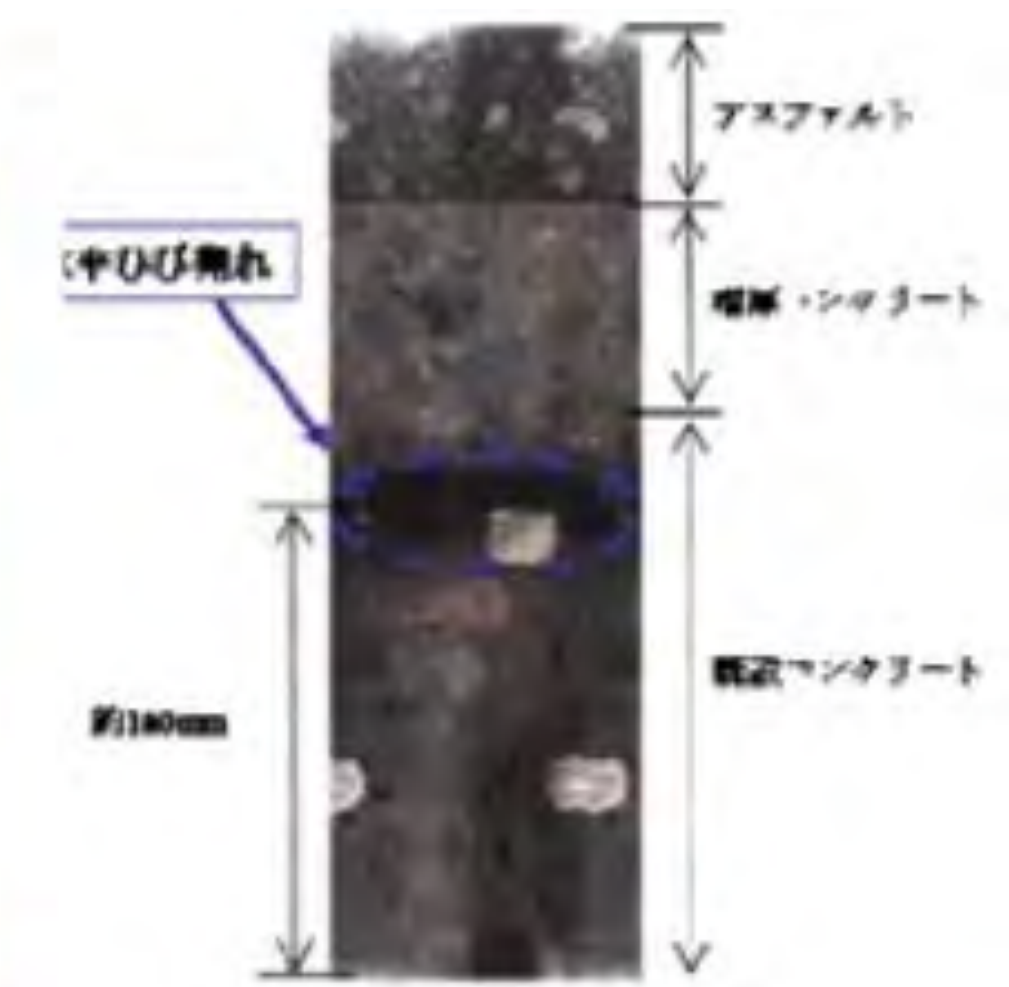


(b) 削孔観察

1) 水平ひび割れなし



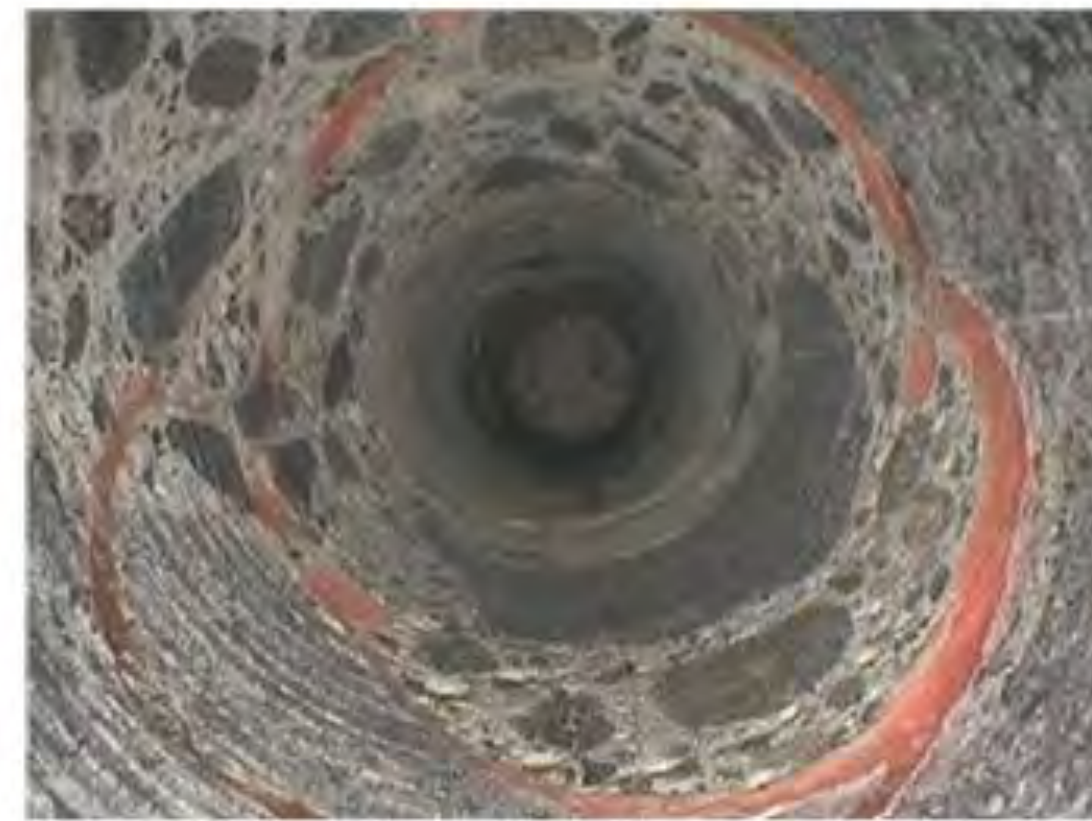
(a) トモグラム



(b) 削孔観察

2) 水平ひび割れあり

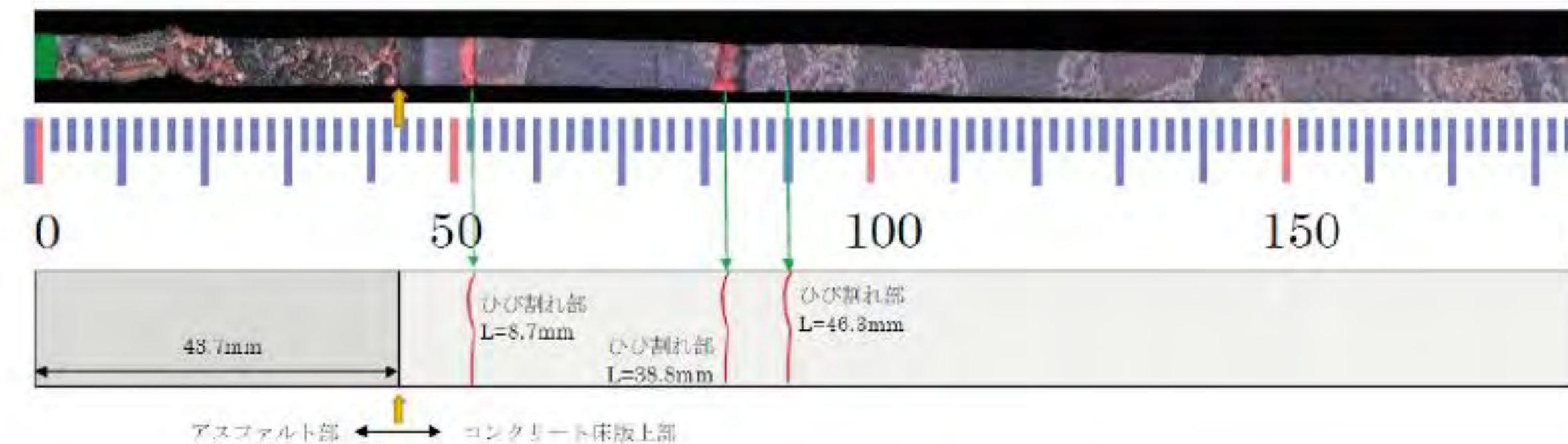
小径コア採取（+樹脂注入）



(a) 直視レンズによる測定結果



(b) ひび割れ幅の測定結果



(c) 動画処理によるひび割れ展開図の作成

φ5mm削孔→樹脂注入→φ9mm削孔→ファイバースコープ

PCグラウトの充填不足

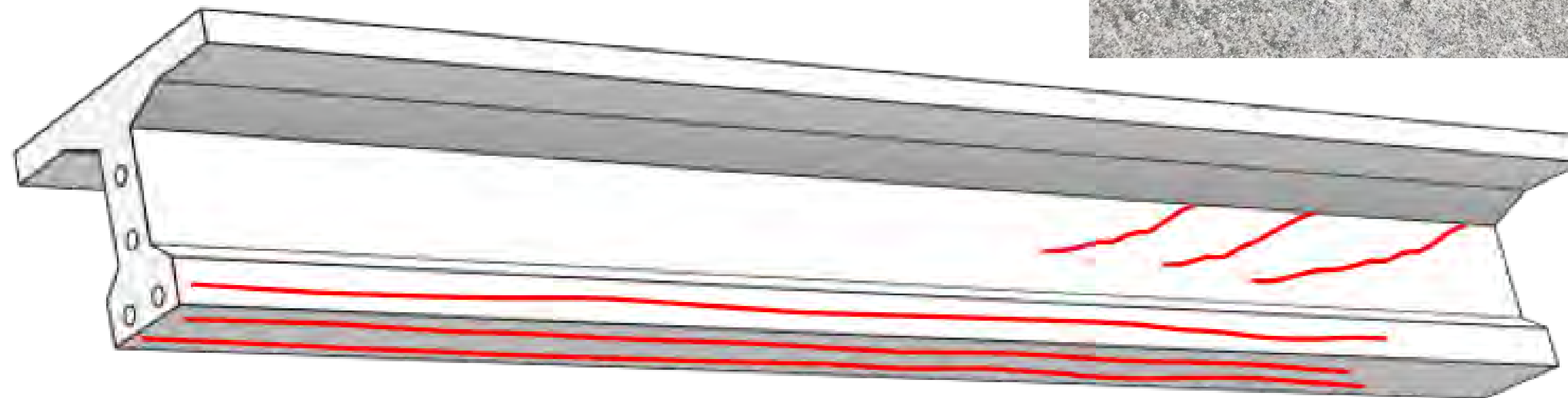
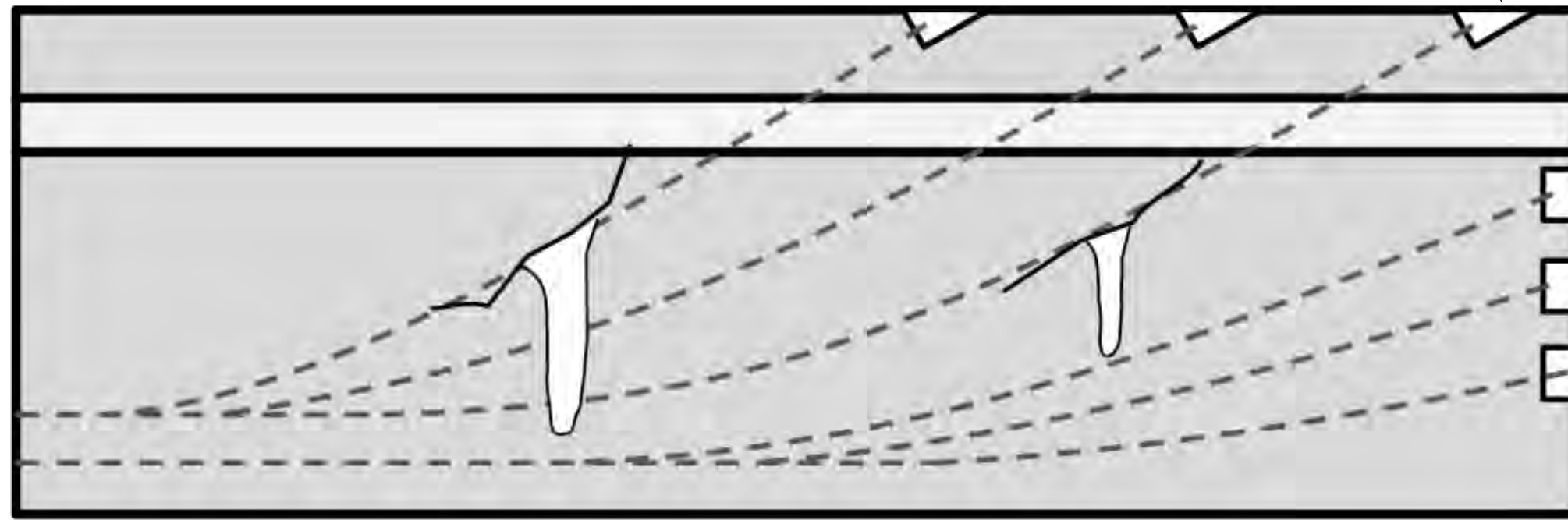
ポストテンション（ポステン）桁におけるグラウトの充填不足
→鋼材の腐食, 破断につながる



道路構造物ジャーナルNET
<https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/11039/>

緊張材の上縁定着

上縁定着部の切欠き部



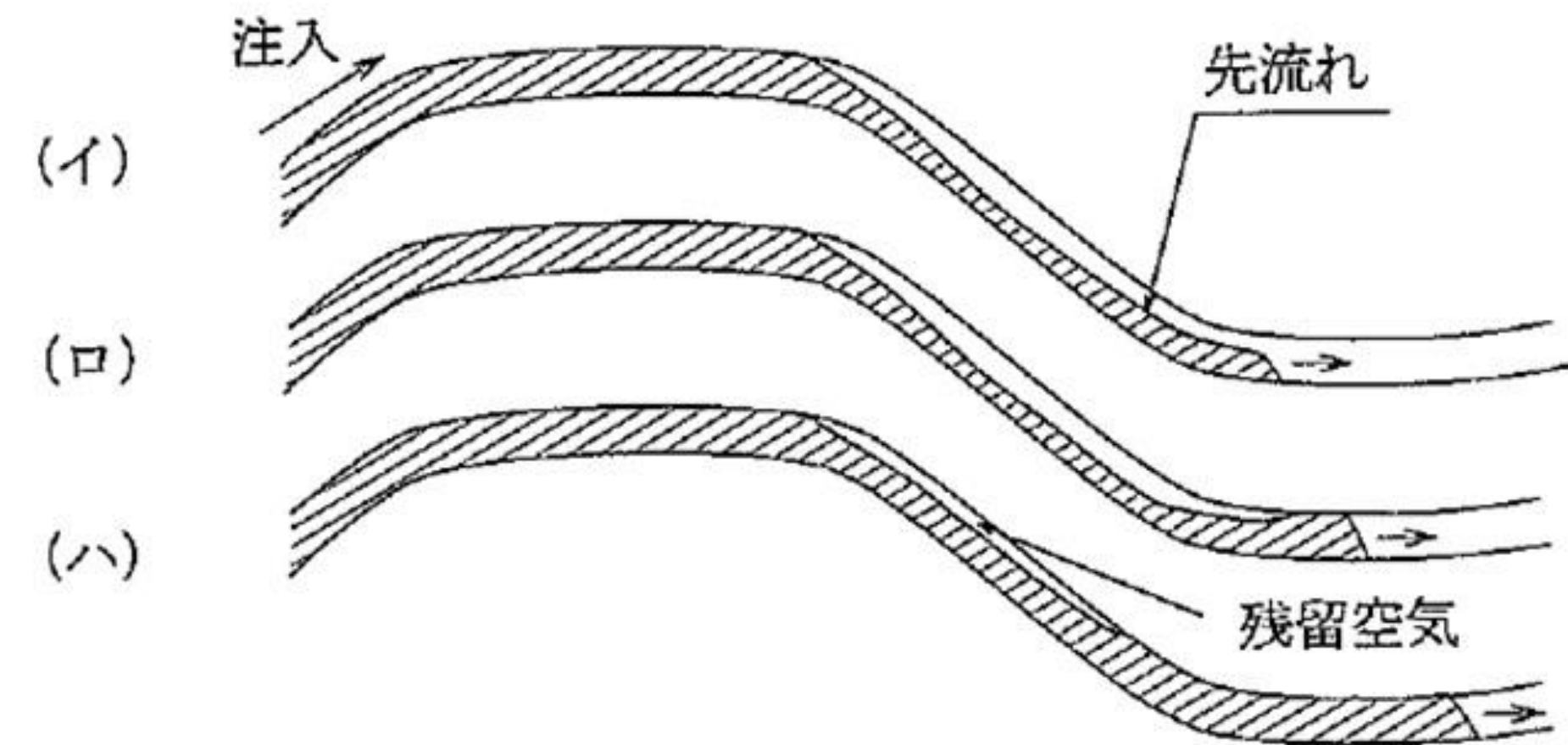
上縁定着部からシースに沿って浸入した水によりひび割れ，エフロの析出が起こる

シェットの谷側柱のひび割れ





グラウト材のブリーディング



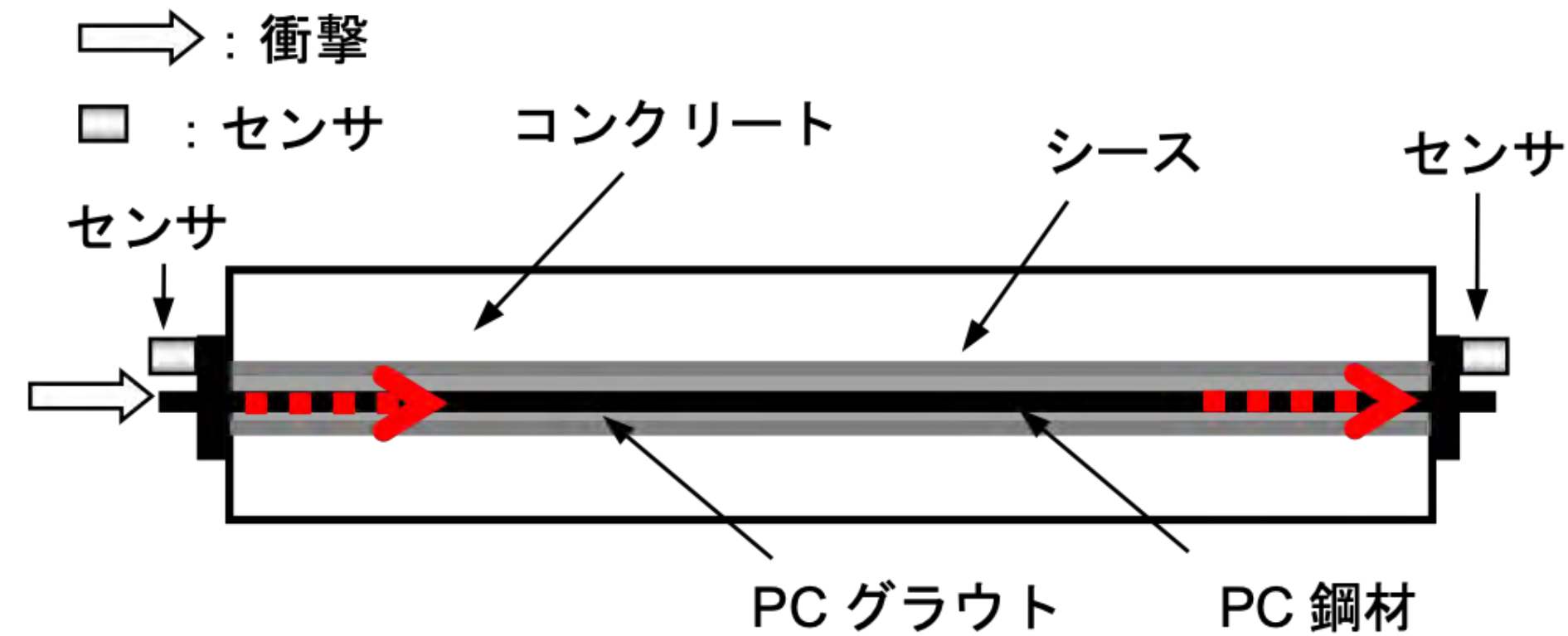
グラウト材の先流れ

適用基準類の変遷に基づく鋼材変状の発生危険性

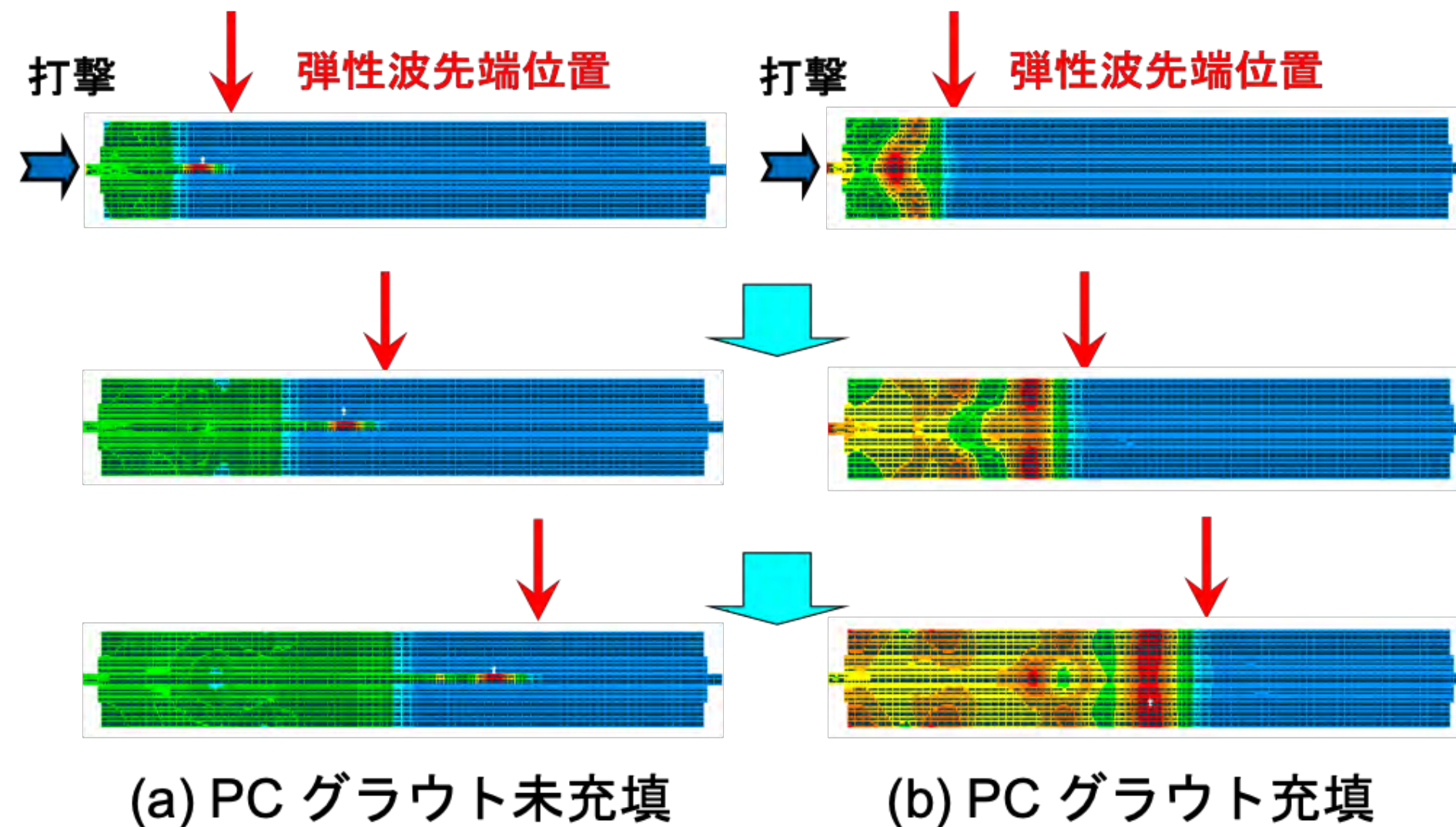
要 因		PCグラウト充填不足およびPC鋼材腐食の発生リスク																				背 景		
		1975		1980		1985		1990		1995		2000		2005		2010								
充 填 不 足	品質管理 (充填管理)																						1986年	PCグラウト記録
																							1996年	流量計，講習会受講義務
	ブリーディング に起因する空隙																						1996年	ノンブリーディング推奨
																							1999年	ノンブリーディング標準
																							2005年	鉛直管試験導入
	先流れ現象に 起因する空隙																						1996年	粘性型PCグラウトの記載
																						1999年	高粘性・低粘性型の使用	
シース径に 起因する 空隙	PC鋼線																					PC鋼より線12S12.7		
	PC鋼より線																					1973年	60mm→65mm	
																						1980年	65mm→70mm	
	PC鋼棒																					PC鋼棒φ32mm		
																						1994年	38mm→39.3mm	
																						1998年	39.3mm→45mm	
鋼 材 腐 食	床版防水層の設置 に起因する腐食																						1973年	必要に応じて防水層を設置
																							2002年	防水層の設置を原則
																							2007年	高性能対応の試験項目追加
	グラウトホースの 処理に起因する腐食																						1999年	深さ1cm以上のエポキシ樹脂であと埋め
																							2005年	あと埋め上に防水工を設置
																							2012年	グラウトホース間のあきを確保
PC鋼材の上縁定着 に起因する腐食																						1980年	道路橋T桁支間28m以上は 端部定着	
																						1994年	道路橋T桁は全て端部定着	

注) 発生リスク ■：対象とする要因に対して規定がない，もしくは対策に不備があった。
■：要因対策が実施されているが，途中経過的な対策であった。
□：要因対策が完了しており，PCグラウト充填不足やPC鋼材腐食が発生する可能性が低い。

衝撃弾性波法（弾性波の伝播速度の測定）



図－2. 4. 2 PC 鋼材軸方向に弾性波を伝播させる手法
（弾性波伝搬速度に着目する手法）

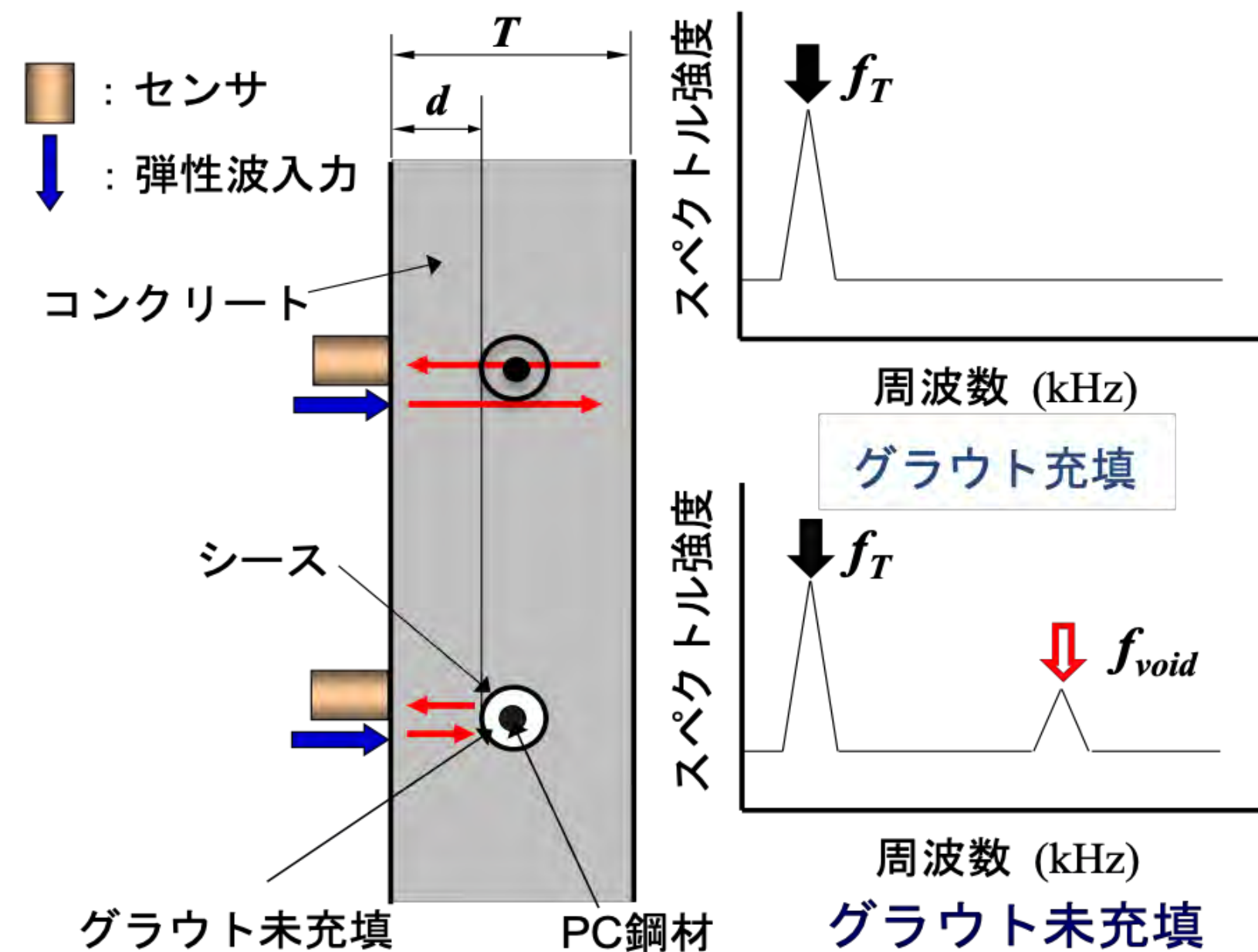


図－2. 4. 3 伝搬速度に着目した PC グラウト充填評価の原理

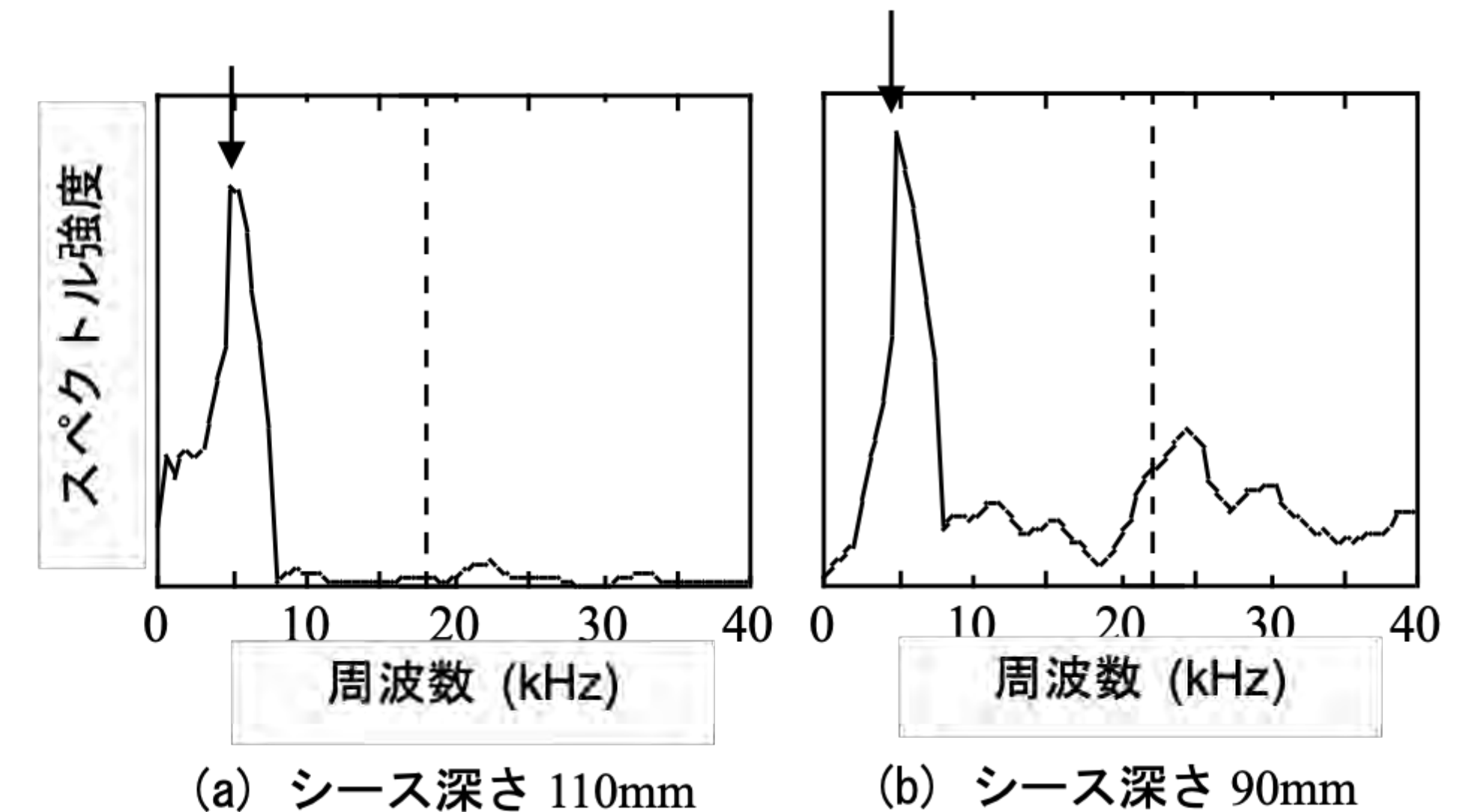
PC鋼材に直接打撃を入力
＝横締め鋼材の調査に有効

計測された伝播速度 V がしきい値 V_c より小さい場合は，グラウト充填状況が良好と評価され，しきい値 V_c より大きければグラウト充填状況が不良であると評価される。

インパクトエコー法

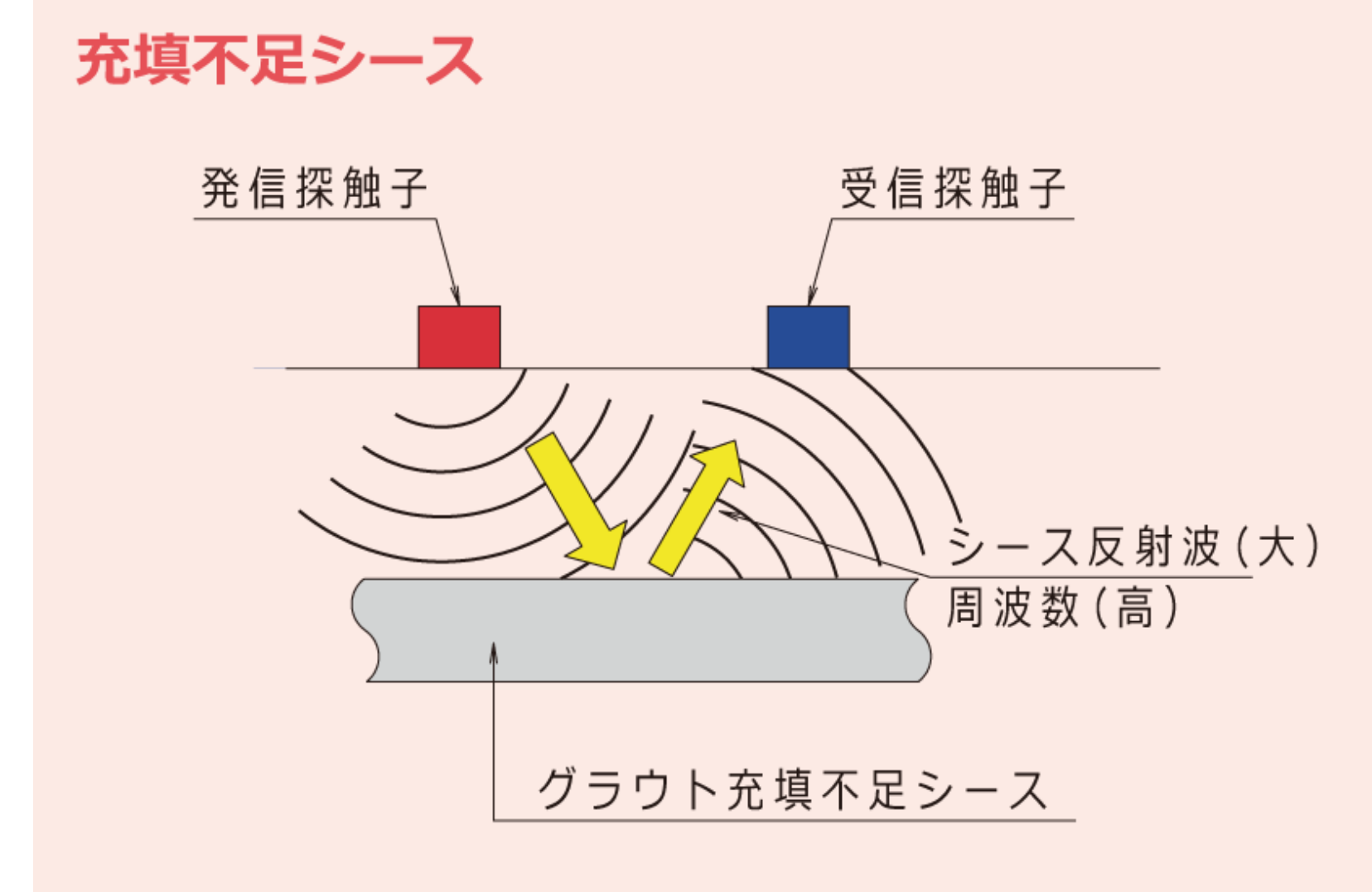
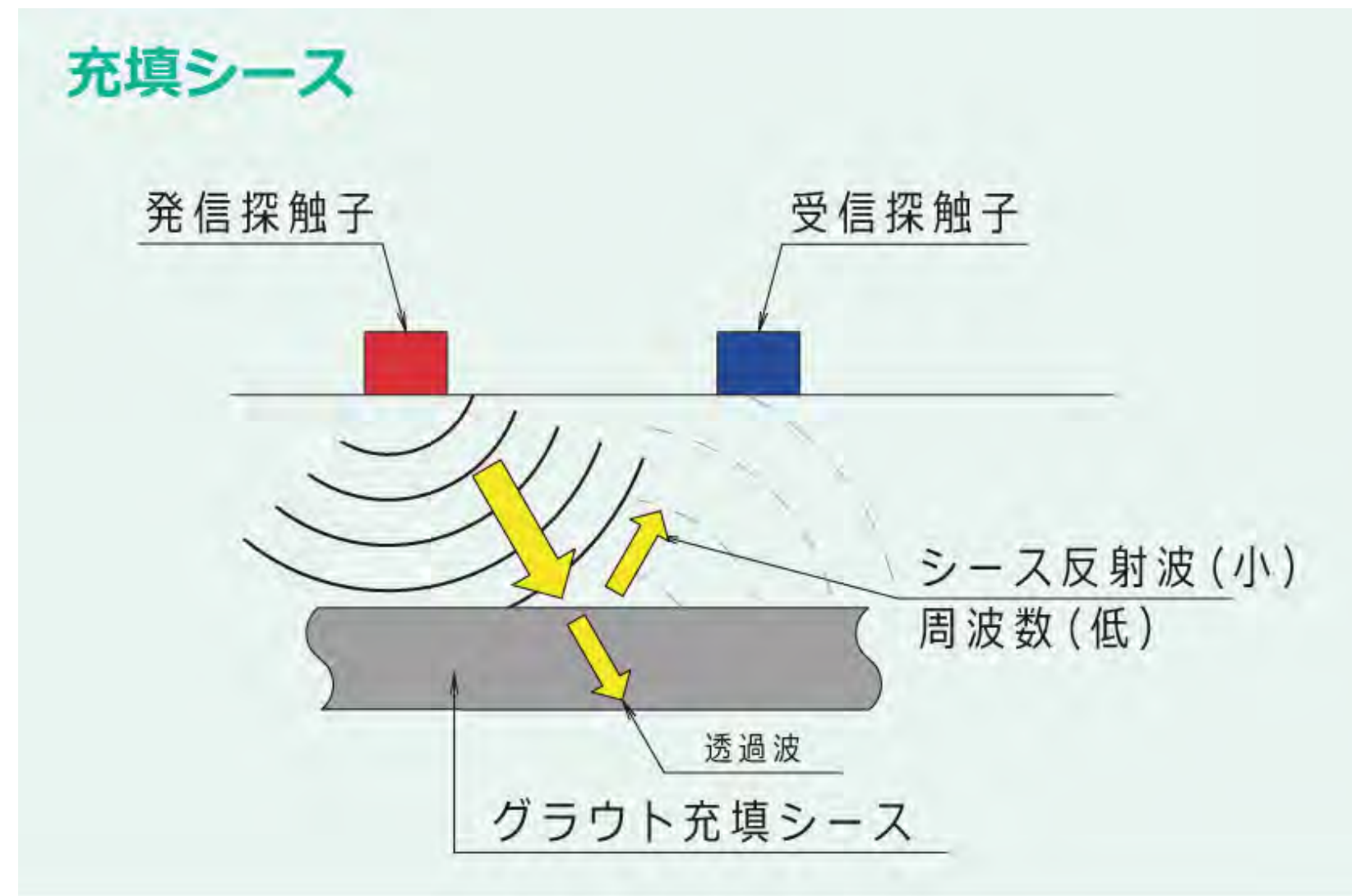


原理：コンクリート版厚に相当する周波数のピーク (f_T) が出現する。これに対し、グラウト未充填箇所が存在すると、 f_T 以外に、グラウト未充填箇所からの反射によるピーク (f_{void}) も出現する



実測例：左はシース内にグラウトが充填されており、右は未充填箇所が存在している

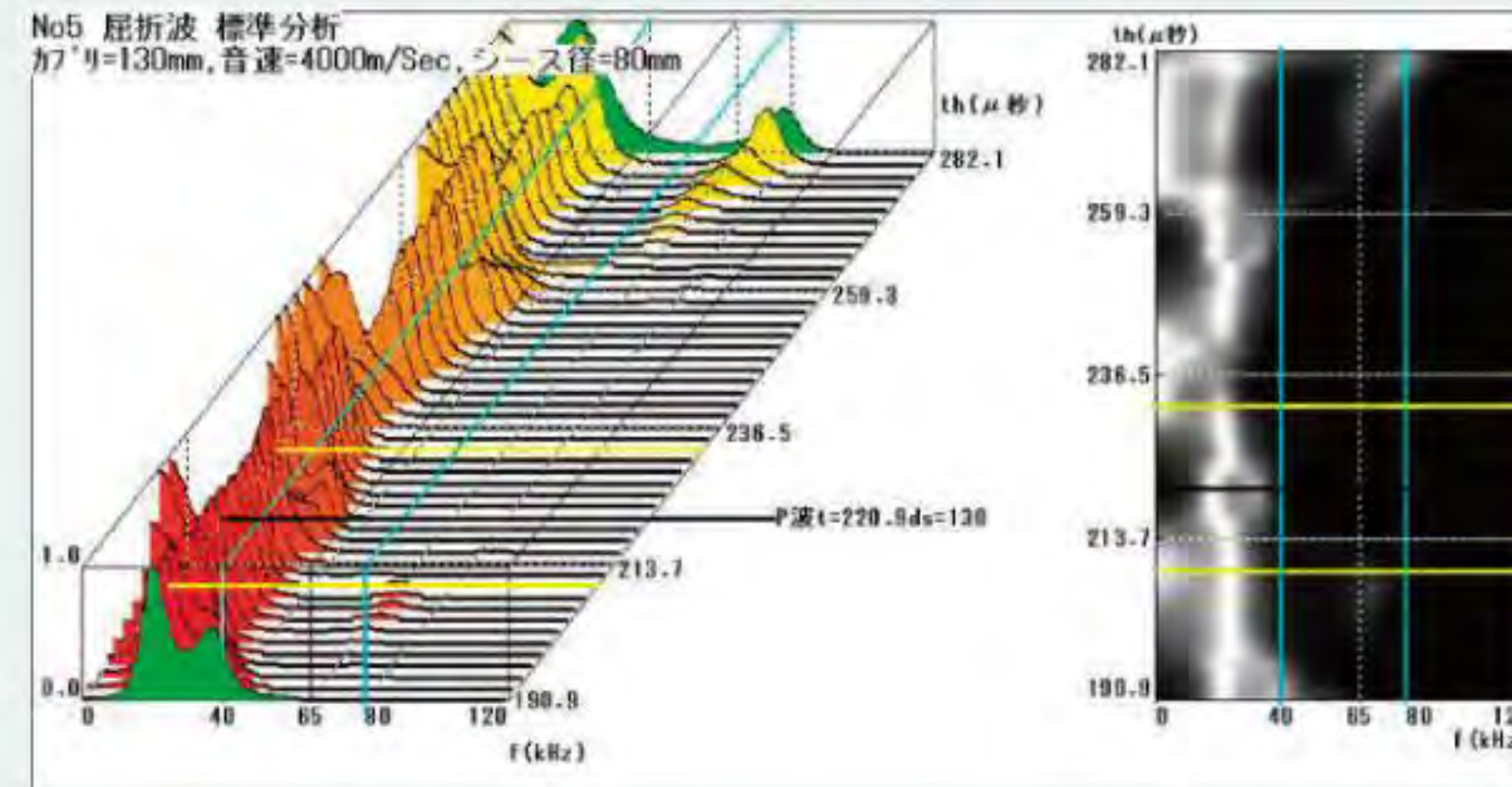
広帯域超音波法



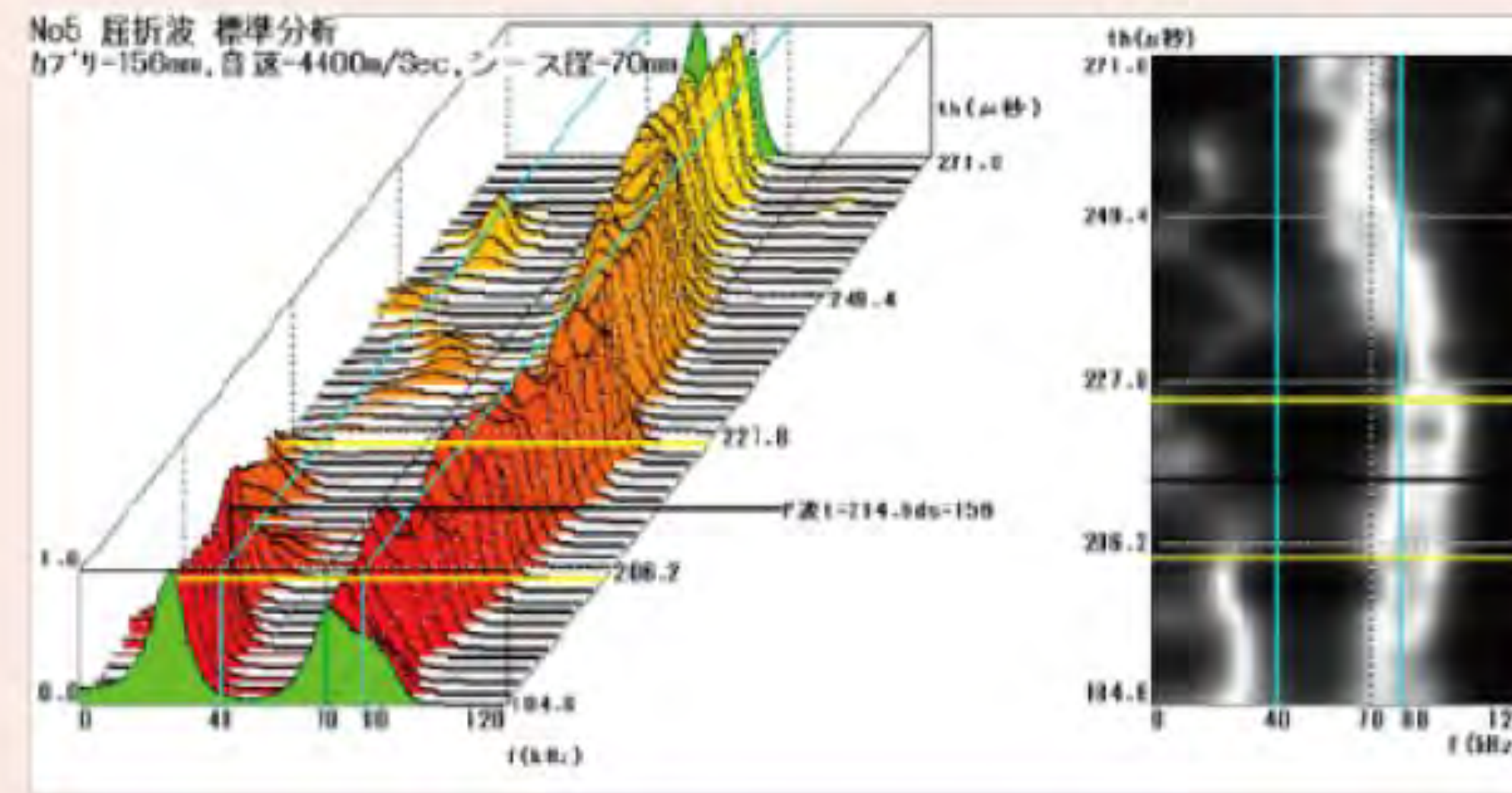
5k~700kHzと広範な周波数領域を使用して超音波を入力し，反射波の卓越振動数でグラウト充填の有無を判定する．

多点計測した波形を加算することで妨害波の影響を低減させるとともに，シースからの反射波を増幅させ，探査精度の向上を図る．

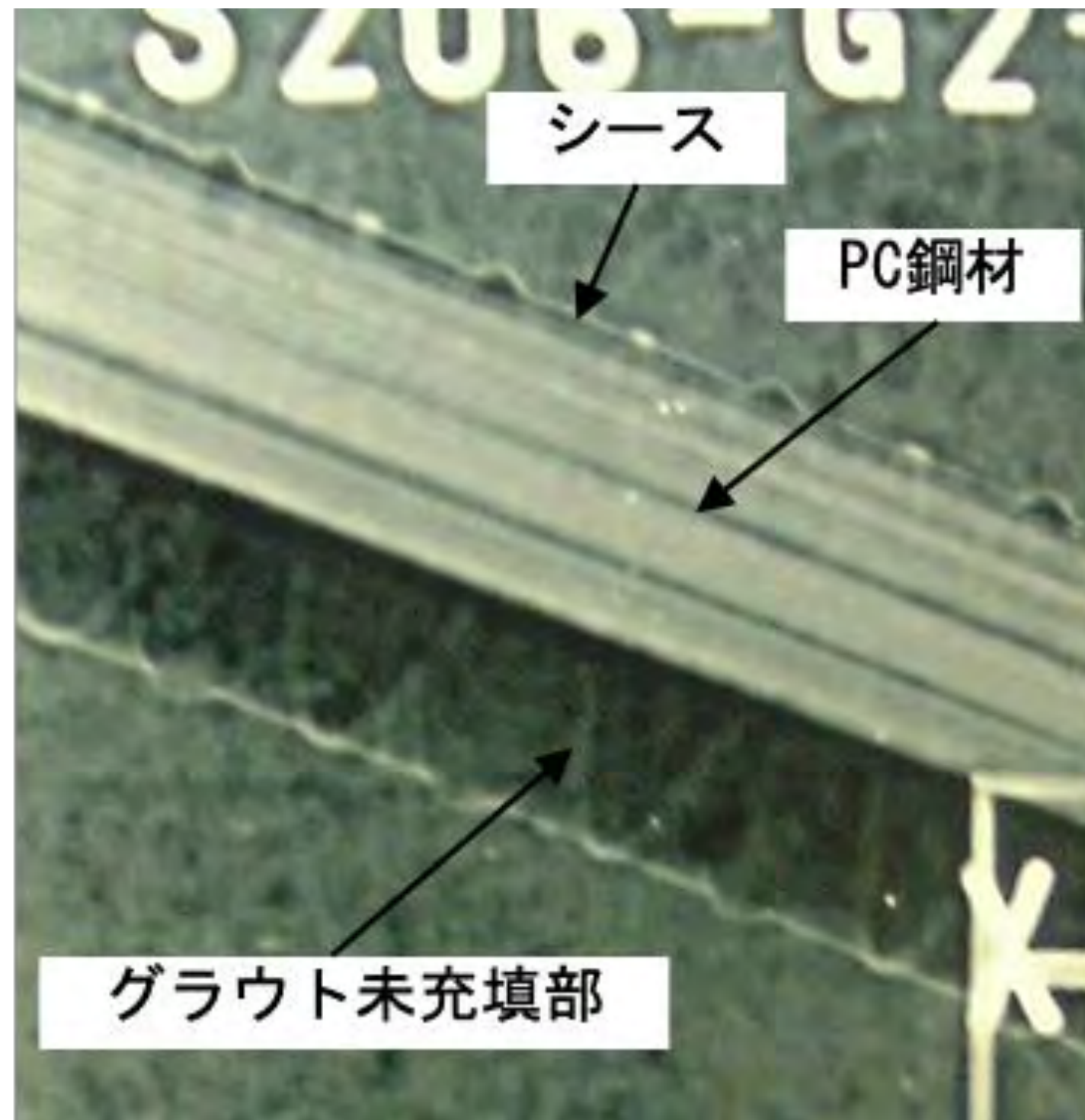
充填判定【○】例 40kHz 以下にピーク



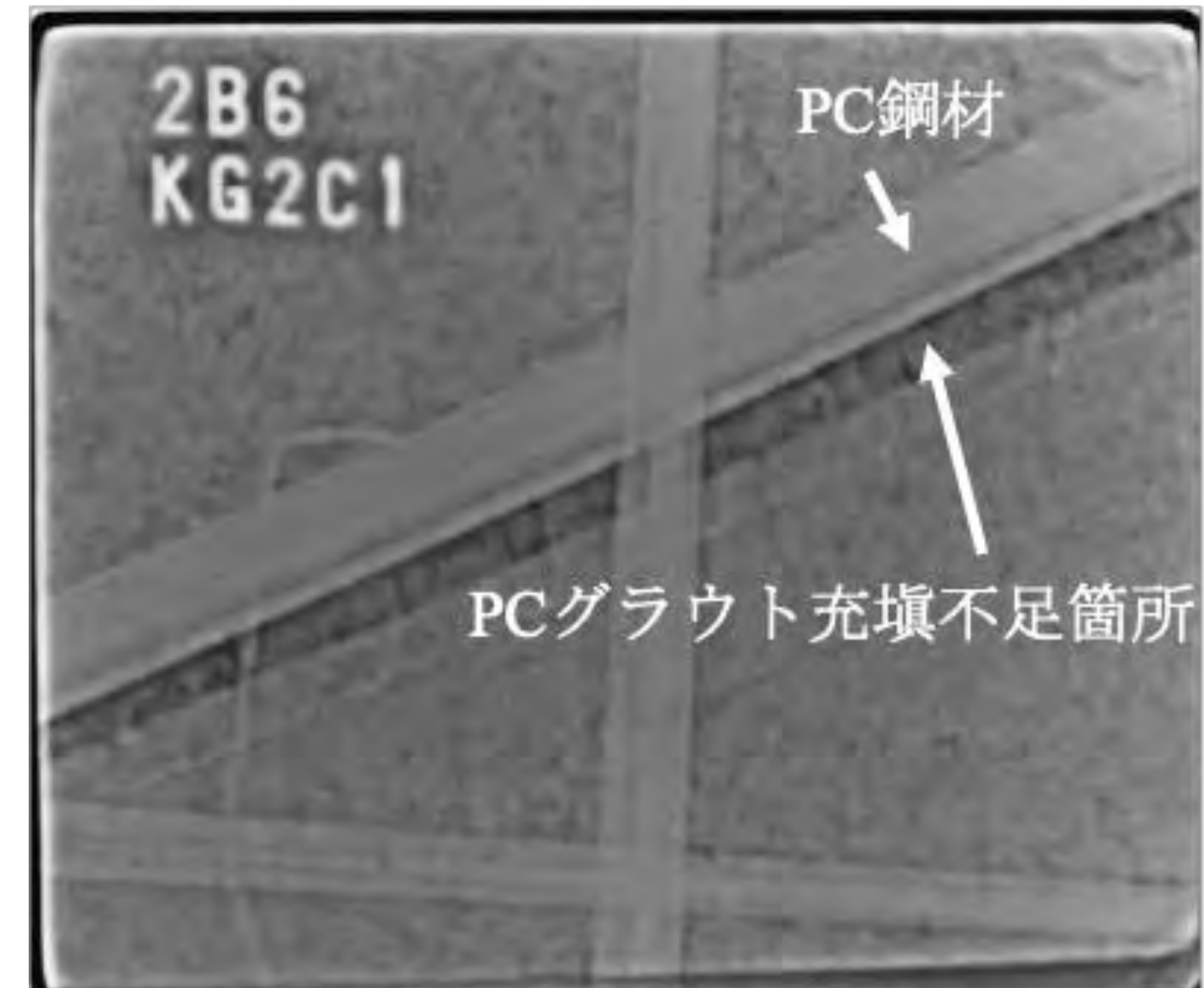
充填不足判定【×】例 80kHz 付近にピーク



X線法



JCI 既設コンクリート構造物の維持管理
と補修・補強技術に関する特別委員会報告
書，2015



2022年版コンクリート標準示方書〔維持管理編〕

対策

- ▶ 診断の結果から，構造物の性能や劣化の状況が維持管理限界に達することが明らかになった場合に，実施される．

目的を意識する！！

- ・点検強化
- ・劣化に関わる作用の制限
- ・力学的な作用の制限
- ・劣化への抵抗性の改善
- ・力学的な抵抗性の改善
- ・解体・撤去

実施の必要性を説明できることも重要
全ての構造物に予防維持管理を適用する必要はない

グラウトの未充填

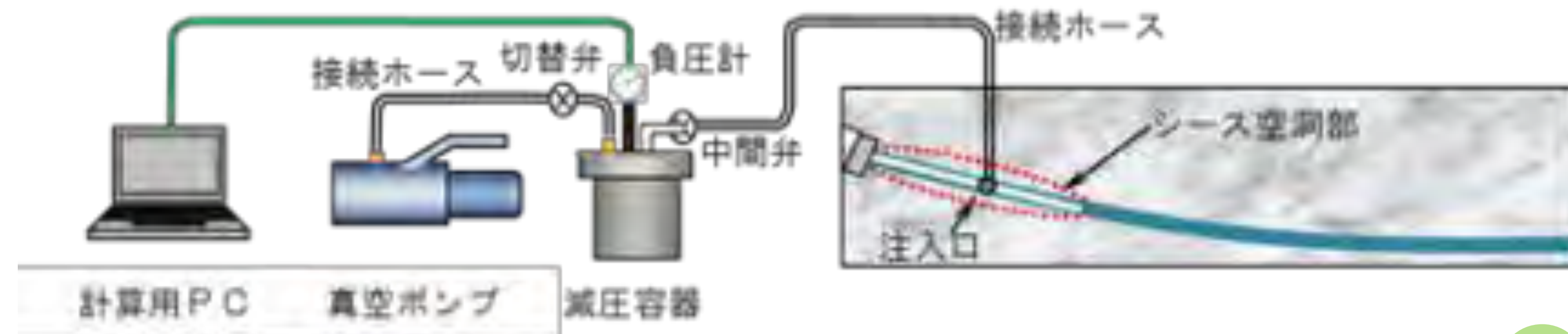
削孔



内視鏡にて確認
(空洞と鋼材の腐食)



空洞量の調査

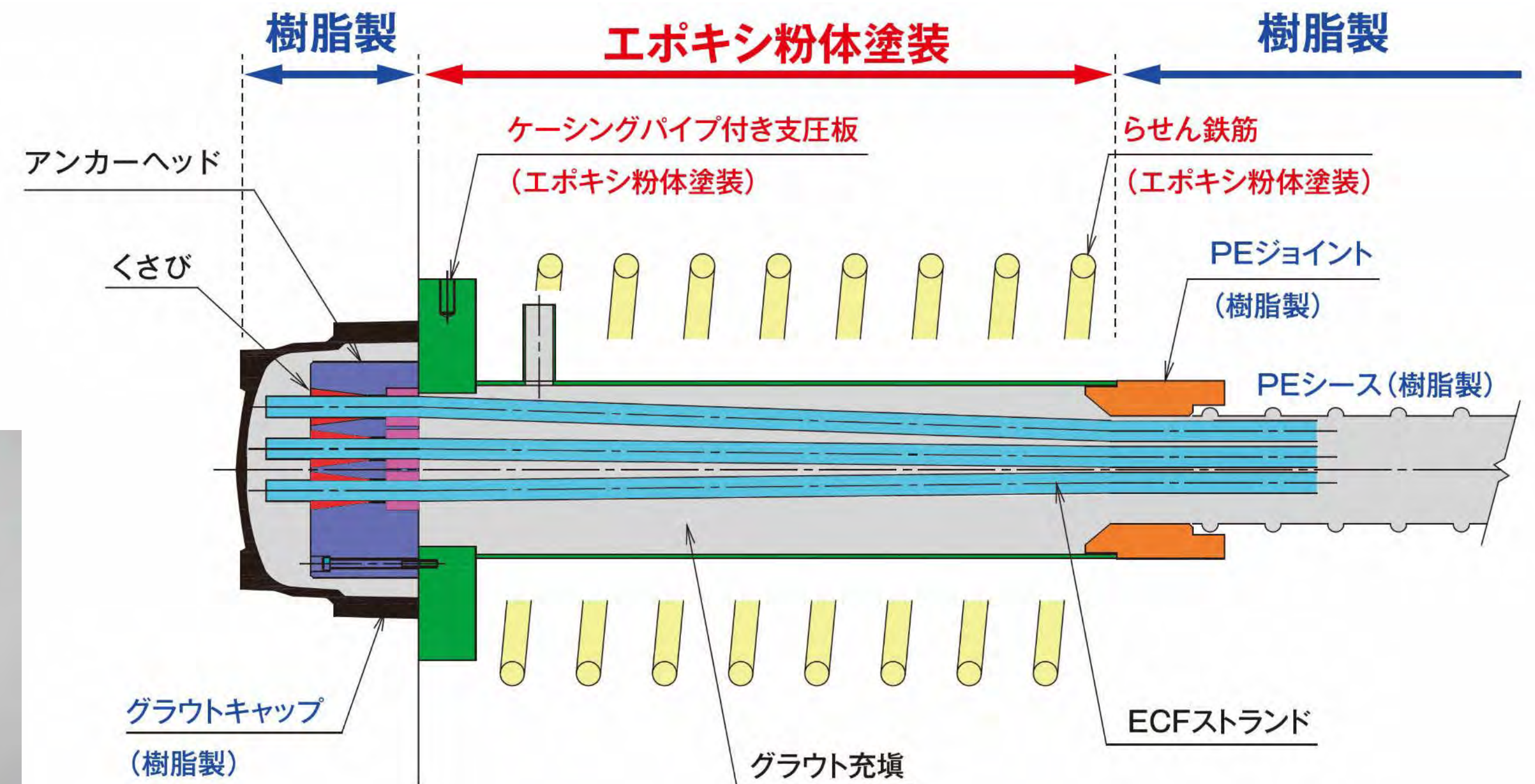


グラウト再注入

PC橋の耐久性の向上

▶ マルチレイヤープロテクション

いかなる保護層でも、その機能を発揮しなくなる場合があることを前提として、複数の保護層を設ける



樹脂製キャップ



ECFストランド



アンボンドマルチケーブル



スープロマルチケーブル

VSL JAPANのウェブサイトより

対策箇所の再劣化

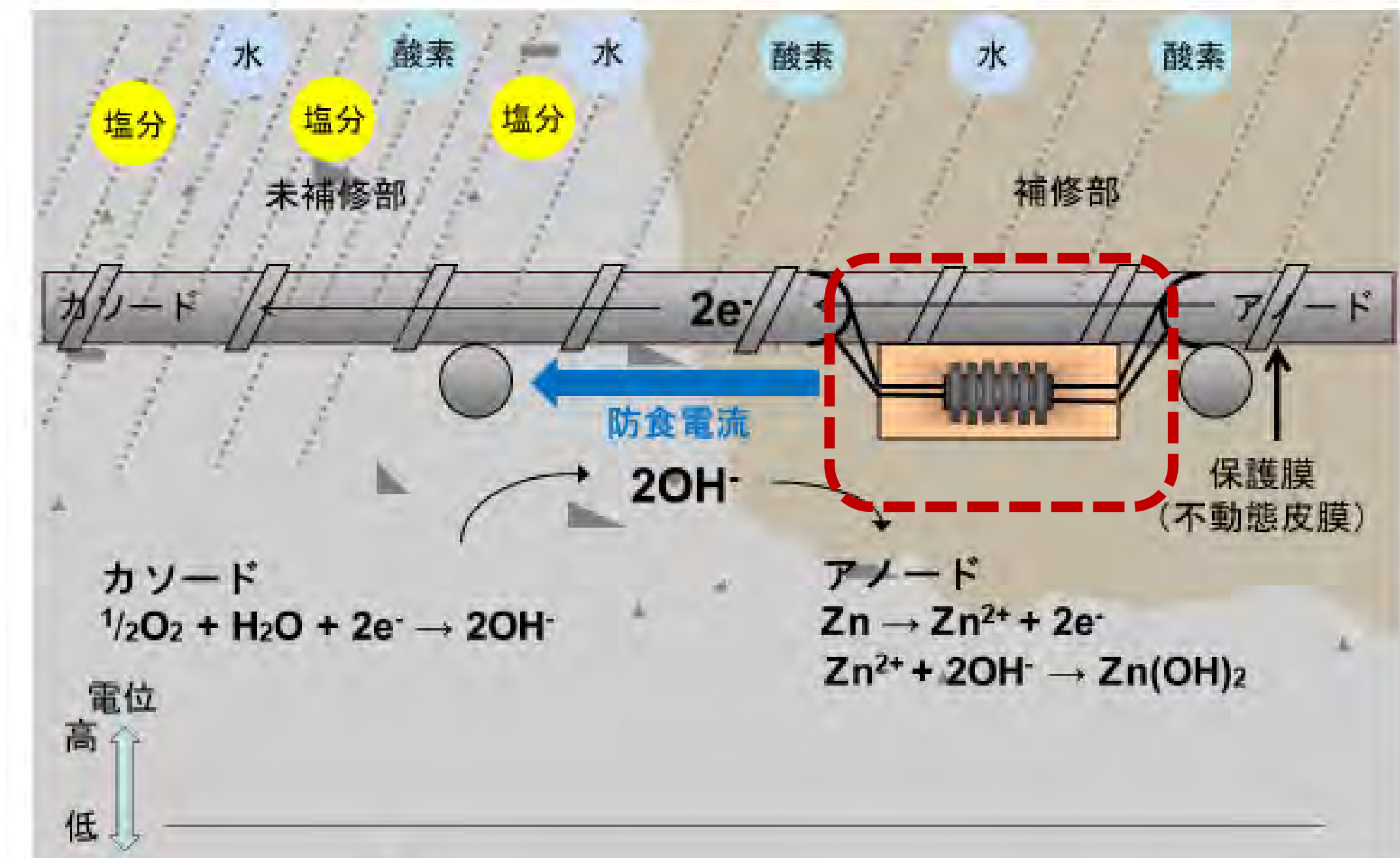
▶ 対策（補修・補強）の目的が不明なまま実施する対処療法

➡再劣化

例：

×塩害で剥落した場所を単に埋め戻す断面修復

○塩分含有部分を追加ではつりとした上で断面修復する



既存部に塩分が残留していても，犠牲陽極材を埋設すれば，マクロセル腐食は起こらない

対策の実施後の維持管理

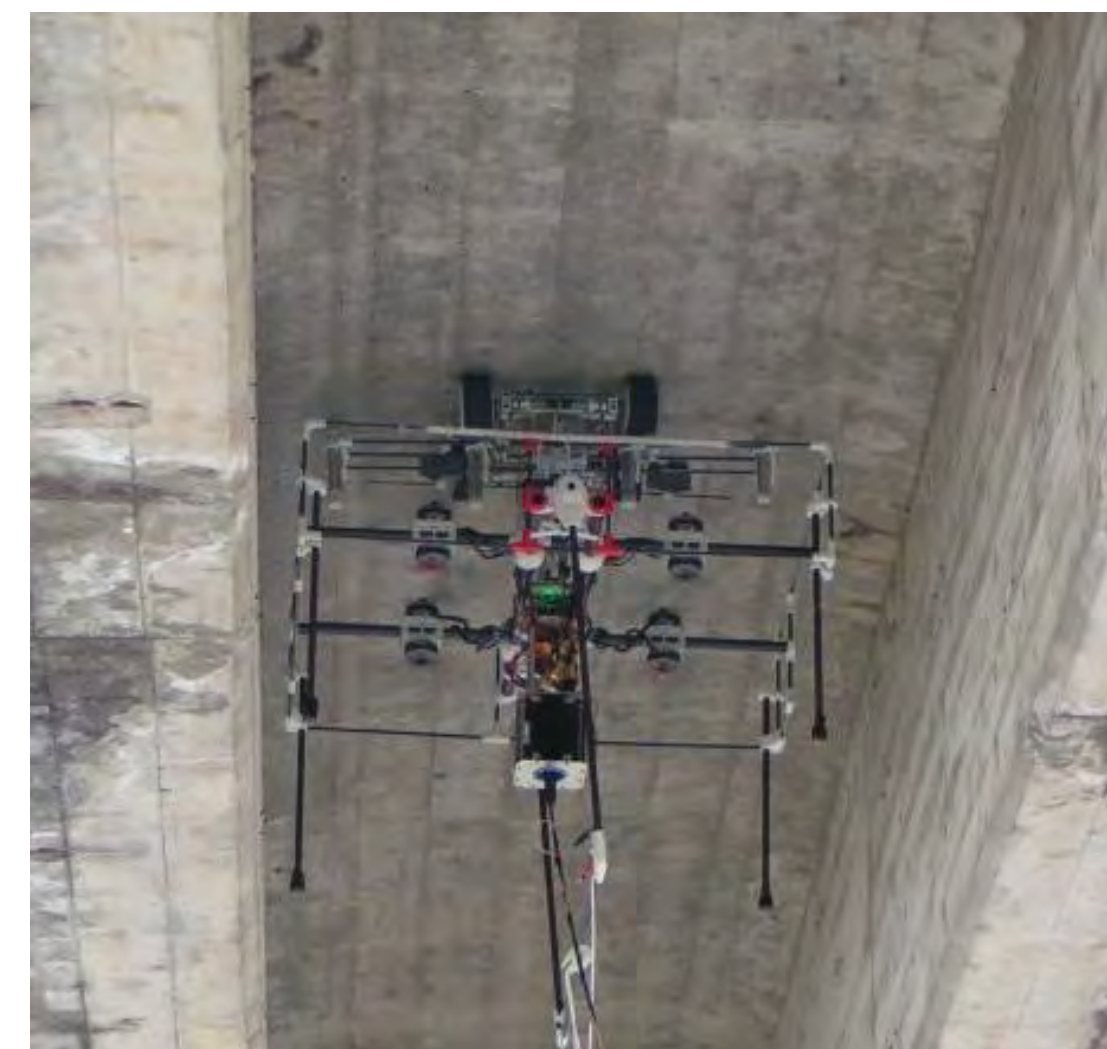
- ▶ 維持管理計画を見直し，新たに作成された維持管理計画に基づいて構造物の維持管理を行う．

はつりを行なった場所，何かを追加・接着した場所は，
以降，欠陥となる

新技術の開発と導入（特に点検）

- ▶ 効果的で信頼性が高く経済的なコンクリート構造物の維持管理を実現するために必要な新技術の開発を，他分野と連携を強化して推進する。

例：ドローンやロボット，通信，衛星情報（GIS）

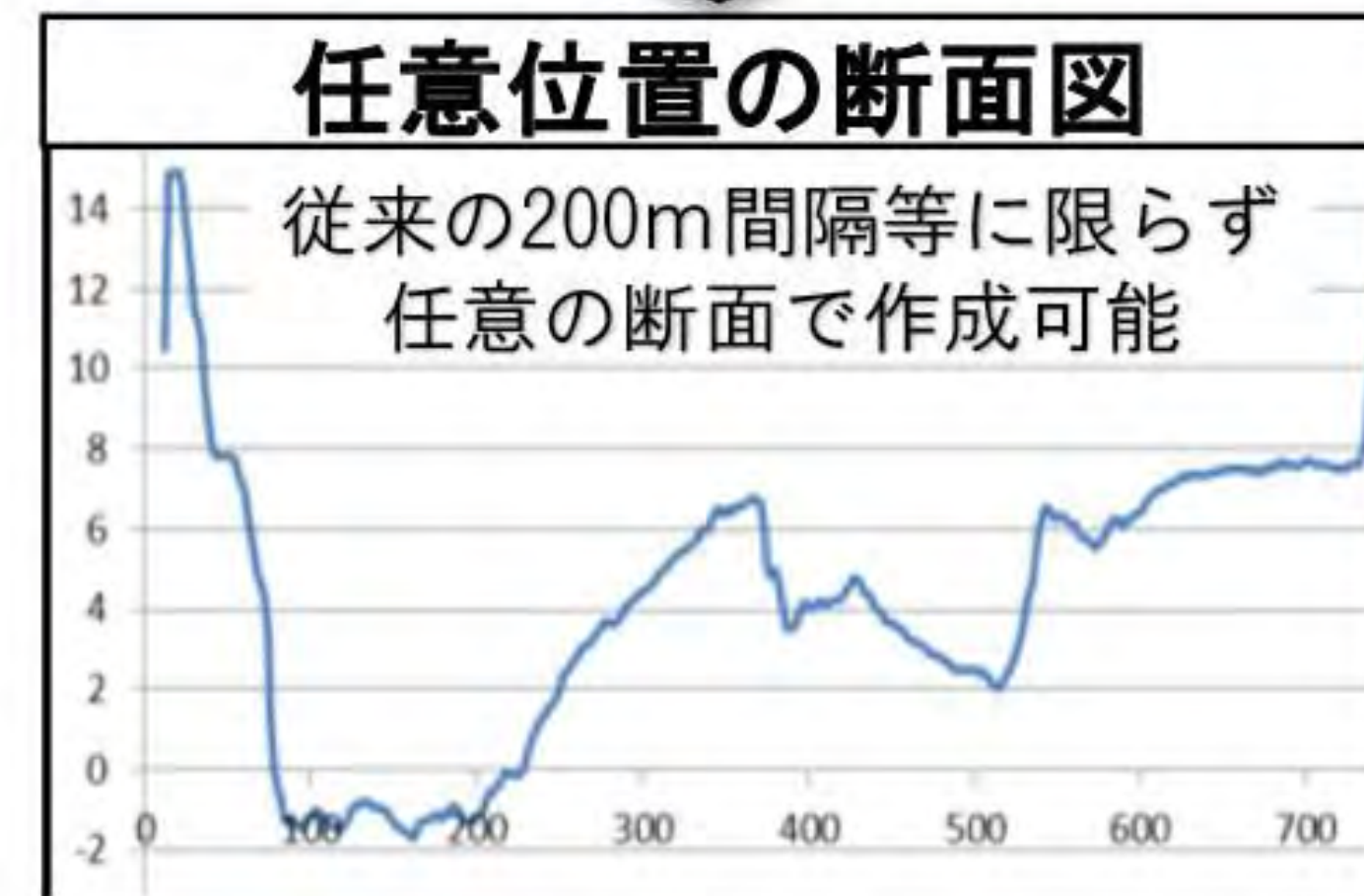
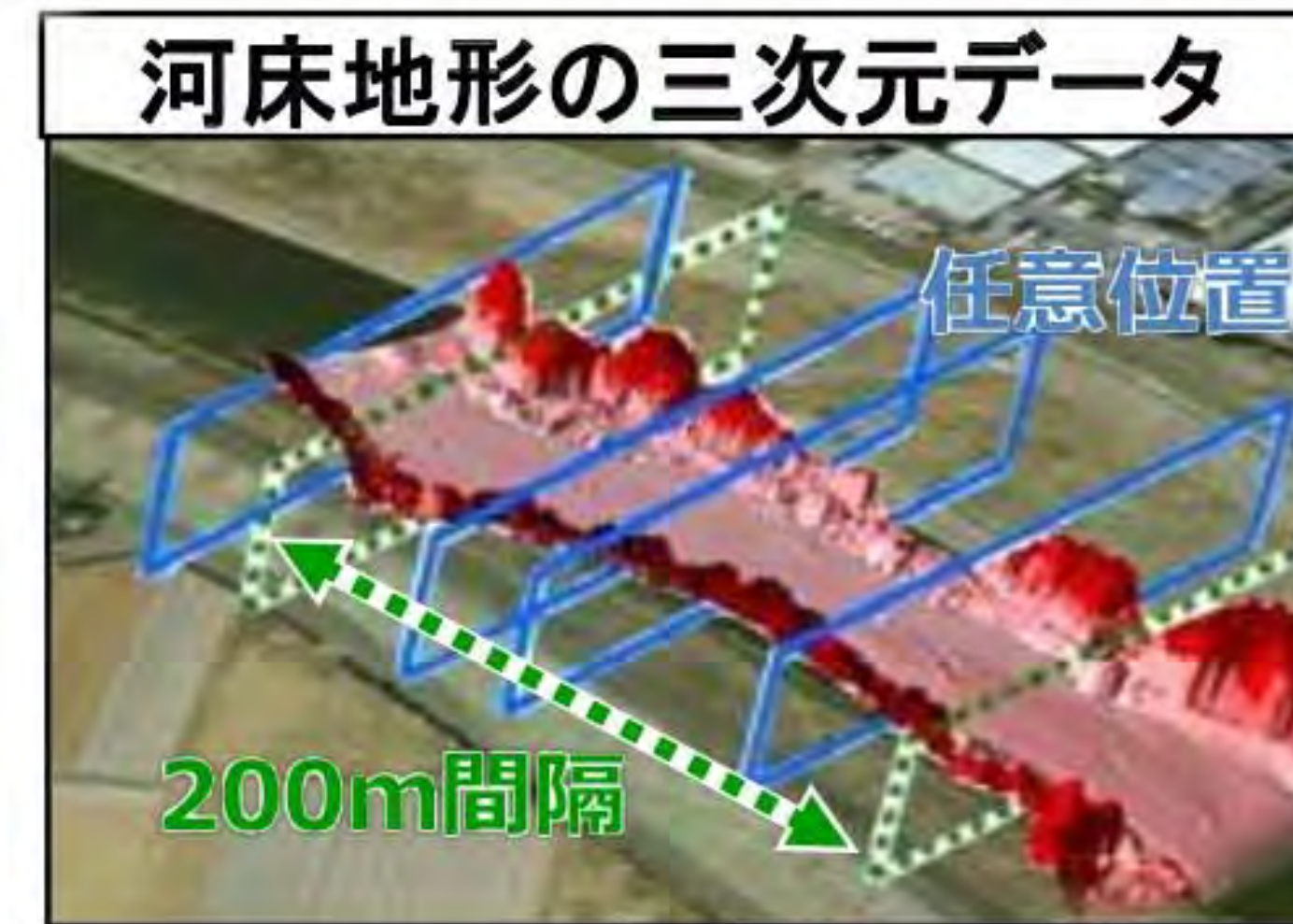


橋梁の打音検査や近接目視を代替するドローンの例

新技術の開発と導入



高速走行型非接触レーダーによるトンネル覆工の内部欠陥点検

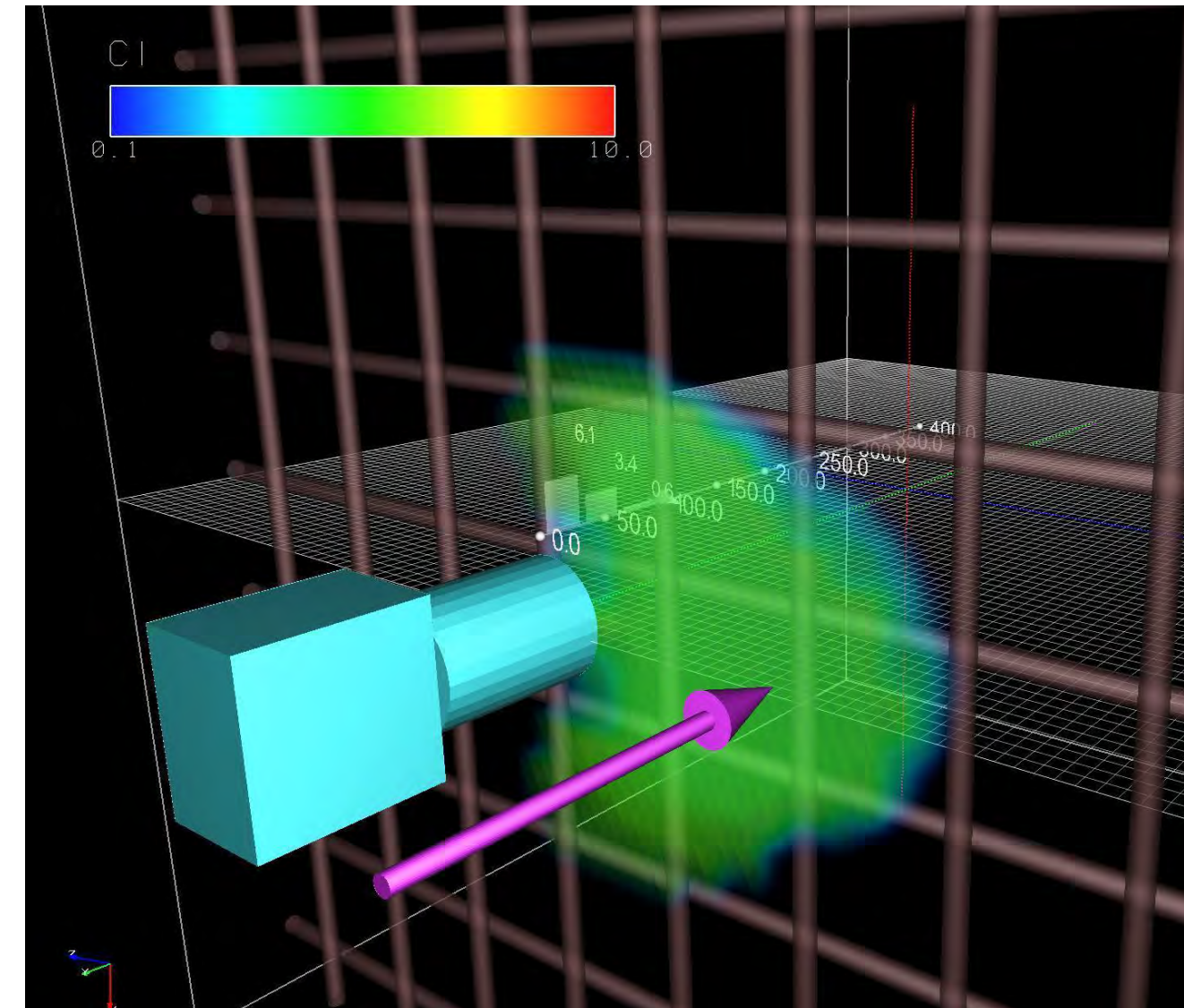


ALB（航空レーザ測深機）による河川洗掘状況の把握

新技術の開発と導入



中性子線を用いた非破壊塩分計
RANS-μ



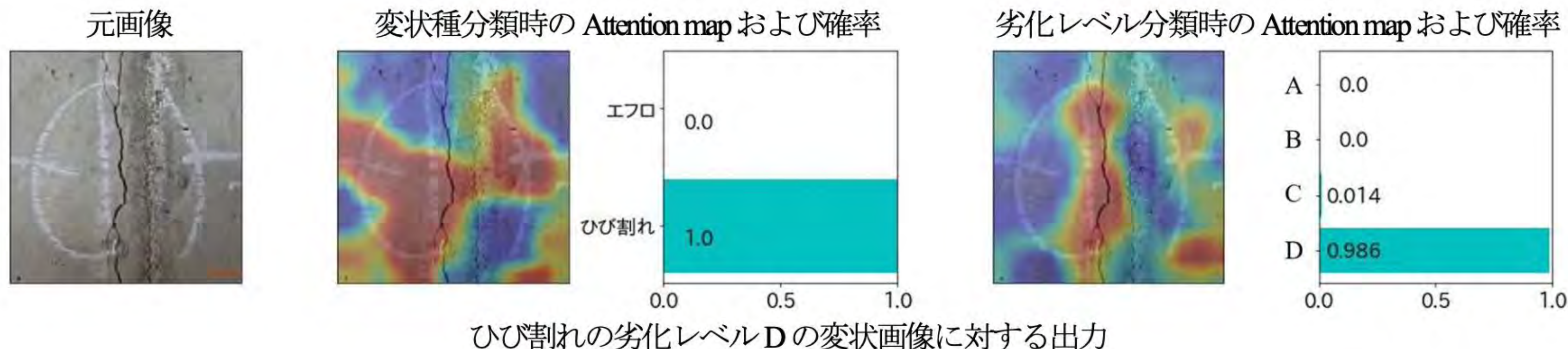
アウトプット画面

- ✓ 完全非破壊で，コンクリート表面から深さ方向の塩分量分布を測定可能
- ✓ 被覆材（表面被覆材、繊維シート、鋼板等）を除去せずに測定が可能
- ✓ 非破壊なので，全く同じポイントで何度も計測可能
（例：5年毎，脱塩前後．．．．）

AI，機械学習の活用



図-7 モデルが正しく判定した画像とその Attention の例. 上段は「腐食あり」の画像を表し，下段は「腐食なし」の画像を表す. また，Attention 中の数字は実際に推定された Attention の値を表し，0 から 1 の値で推定されている.



上：腐食箇所の自動抽出，

渡部, 小川, 前田, 小川, 長谷山, Attention-based Multiple Instance Learningに基づく背景の多様性に頑健な道路附属物の異状判定, AI・データサイエンス論文集, 2023, 4 巻, 3 号, p. 482-489

下：変状種類の分類と程度のレベル分け

小川, 前田, 小川, 長谷山, 社会インフラ点検時の変状画像を対象とした変状種と劣化レベルのマルチタスク分類, AI・データサイエンス論文集, 2023, 4 巻, 3 号, p. 807-814

AI，機械学習の活用

類似画像を検索することにより，変状画像から所見を自動生成する

変状画像	所見項目	所見
	橋梁点検者によって付与された所見	
	損傷性状に関する見立て	錆汁は見られず，現時点では鋼材の腐食には至っていないと推定され，耐荷力や耐久性に支障が生じている可能性は低いと推定される。
	損傷の進展予測	前回点検から損傷状況に顕著な進行は見られず，環境が大きく変わらなければ，損傷が急速に進展する可能性は低い。次回点検まで放置しても，耐荷力や耐久性が著しく低下する懸念は少ないと推定される。
	結論	以上より，水の浸入防止を目的とした措置を，耐久性確保の観点から，必要に応じて行うのが望ましい。
	PMに基づいて生成された所見	
	損傷性状に関する見立て	この損傷は小規模かつ局所的なものであるため，橋の機能やコンクリートの耐久性に大きな影響を与えるとは考えられません。
	損傷の進展予測	コンクリートのひび割れは劣化の兆候であり，次回の検査ではさらなる損傷の進行が明らかになると思われます。しかし，現時点では，前回の検査から大きな変化はありません。
	結論	以上より，耐久性や安全性を確保する観点から，水の浸入を防ぐ対策（封水）を早急に行う必要があると推察されます。

渡邊, 小川, 前田, 小川, 長谷山, Visual language modelを用いた変状画像に対する所見の自動生成—類似画像検索による Few-shot learningの導入—, AI・データサイエンス論文集, 2023, 4 巻, 3 号, p. 223-232

おわりに

- ▶ 設計へのフィードバックが必要
 - 「維持管理性」を考慮した構造物の設計
- ▶ 構造物「群」の維持管理
 - 前後1～2年の範囲で対策の実施を前倒し，あるいは先送りすることにより，維持管理費の平準化を図る
 - 10年程度の中長期の将来予測が必須．その結果を根拠資料とし，期間内の必要予算を大枠で想定し，それを確保する努力をすることも，特に管理者の重要な責務．
- ▶ 一方，持続可能とするためには，メリハリも重要．
 - ただし，メリハリをつける箇所を決めるためには，高い技術力が必要！！
- ▶ 市民の理解を得る努力
 - 説明できるようにすることが重要

工学とは

engineering [ˌɛn(dʒɪˈniərɪŋ] noun

the branch of science and technology concerned with the design, building, and use of engines, machines, and structures.

- ▶ a field of study or activity concerned with modification or development in a particular area: [software engineering](#).

工学とは

engineer [, ɛn(d)ʒɪ ' niə] noun

1. a person who designs, builds, or maintains engines, machines, or structures.

▶ a person qualified in a branch of engineering, especially as a professional:
an aeronautical engineer.

2. a person who controls an engine, especially on an aircraft or ship.

▶ North American a train driver.

3. a skilful contriver or originator of something: the prime engineer of the approach.

engine: from Old French **engin**, from Latin **ingenium** 'talent, device',

維持管理の鉄則

- ▶ 「____に生じる弊害を見抜くことができれば（中略）、弊害を癒すことは容易である。しかし、見抜くのが遅れて、誰にでもわかるような状態になってしまったら、もはや打つ手はなく、どうすることもできない」
- ▶ 「病の初期であれば治療は容易だが、放置して手遅れになれば、診断はしやすくとも治すことは不可能になる。_____もこれと同じである」