

2020年12月17日  
土研新技術ショーケースin福岡  
福岡県中小企業振興センター

# 道路橋メンテナンスサイクル へのAI導入

－土木研究所CAESARの取組み－

国立研究開発法人土木研究所

理事長 兼 構造物メンテナンス研究センター長

西川 和廣

\* 20201120 土木学会AIデータサイエンスシンポジウム講演資料を再構成

# はじめに

- 2017年土研理事長に就任、国交省から橋梁メンテナンスへのAI導入の検討の指示
- 目的は点検コスト負担の軽減と不足する技術者の補完、できれば技術の継承も視野に
- 義務化された5年に一度の定期点検をシステム化することを目標に検討をスタート
- AIの導入は「診断」を中心とし、一部「点検」に活用するのが適切と判断
- AIを活用したシステム化の考え方、CAESARのこれまでの取組みについてお話しします

# 今日お話しすること

1. システム化は戦略の立案から  
「彼(敵)ヲ知り、己ヲ知レバ、百戦殆フカラズ」
2. メンテナンスサイクル・・・司令塔は「診断」
3. 敵ヲ知ル・・・橋が死に至る病とは？
4. 己ヲ知ル・・・AIという優れたツール
5. AIを教育する・・・教材の作り方
  - RC床版の疲労損傷、土砂化の場合
6. 現場適用のイメージ

# 1. システム化は戦略の立案から

## (1) 戦略的維持管理とは？

- 「彼(敵)ヲ知り、己ヲ知レバ、百戦殆フカラズ」

### なぜ戦略が必要か？

- インフラ施設が一品生産されるものである上に、場所も使われ方もそれぞれ異なり、自ずと計画通りにはならない事象が発生するから
- 維持管理の現場では、戦況が常に変化し、持てる戦力でいかに戦うか、ときには賭けに出ることも必要であり、何よりも一般論が意味をなさない、まさに戦場のような世界

## 維持管理戦略策定への必須事項

彼(敵)ヲ知り、己を知レバ、百戦殆フカラズ  
(孫子の兵法)

### ● 彼(敵)ヲ知ル

- その 1 施設の性質・性格を知る
- その 2 寿命を縮める損傷・劣化要因とメカニズムを知る
- その 3 何処に、どんな状況で使われているか知る
- その 4 点検・診断手法、補修工法、予防方法を知る

### ● 己ヲ知ル

- その 1 自らの戦力を知る
- その 2 自らの立場を知る
- その 3 維持管理に必要な“脳”力を知る
- その 4 自らの弱点を知る

# 1. システム化は戦略の立案から

## (2) 戦略目標としての長寿命化

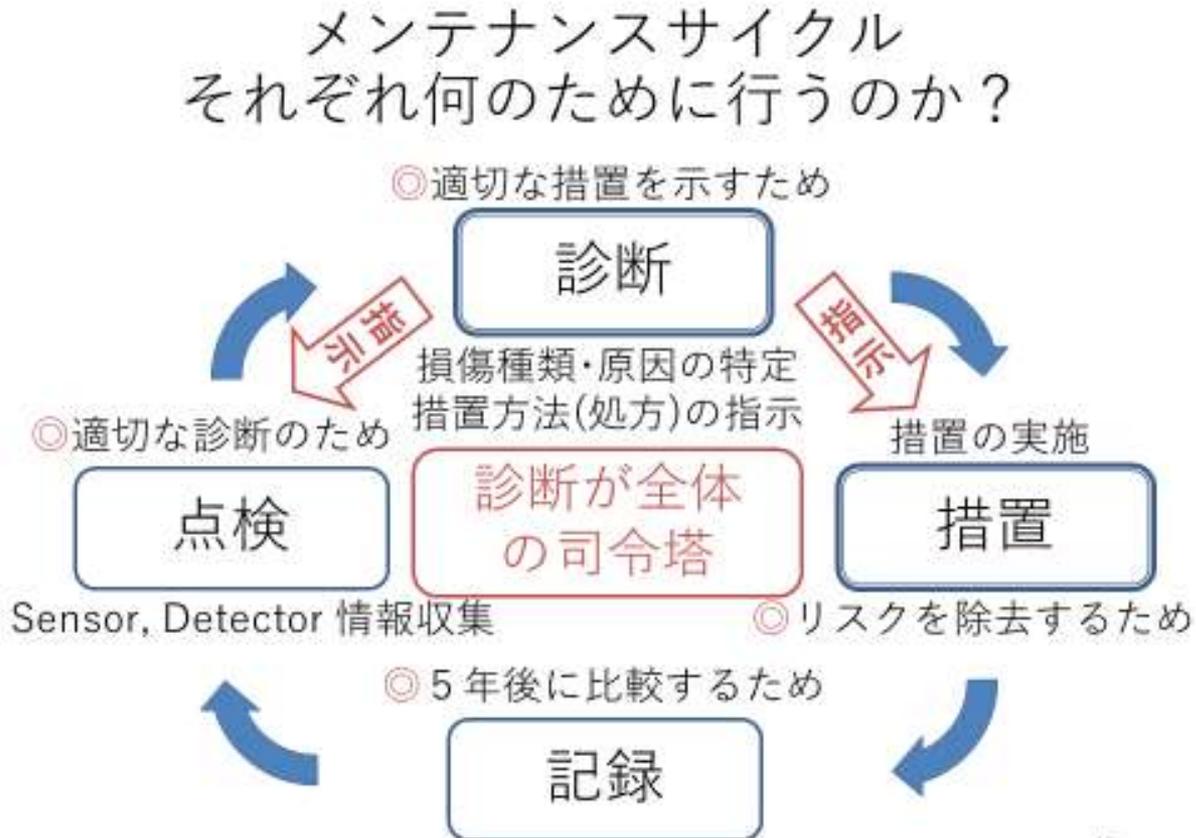
AI導入は目的ではない

- 「重要な基盤インフラとしての道路の機能が将来にわたって持続的に維持され、老朽化によって喪失されないこと」これが**戦略目標**
- 最小限かつ適切な維持管理行為により、既設・新設橋梁ともに極力長持ちさせて使うこと、すなわち長寿命化がとるべき**戦略**
- 予防保全は長寿命化を実現するための**戦術**
- 早期発見、早期治療はわかりやすい作戦、言い換えれば実務者の**行動規範**

## 2. メンテナンスサイクル

…司令塔は「診断」

(1) 点検・診断・措置・記録それぞれの目的



# メンテナンスサイクル それぞれ何のために行うのか？

◎適切な措置を示すため

診断

損傷種類・原因の特定  
措置方法(処方)の指示

指示

指示

措置の実施

◎適切な診断のため

点検

診断が全体  
の司令塔

措置

Sensor, Detector 情報収集

◎リスクを除去するため

◎5年後に比較するため

記録

## 2. メンテナンスサイクル ・・・司令塔は「診断」

### (2) 「診断」に求められる説明機能

- 「診断」にはしばしば高度な判断能力が必要とされるが、それに加えて高い信頼性が求められる
- それは、引き続き「措置」を行う管理者の信頼を得なければ、メンテナンスサイクルがスムーズに回らないから
- 信頼を得るためには、診断結果に論理的で説得力のある説明が伴っていないといけない
- ○論理的(Logical)、×理論的(Theoretical)

### 3. 敵ヲ知ル・・・橋が死に至る病とは？

#### (1) 外観からの点検には限界

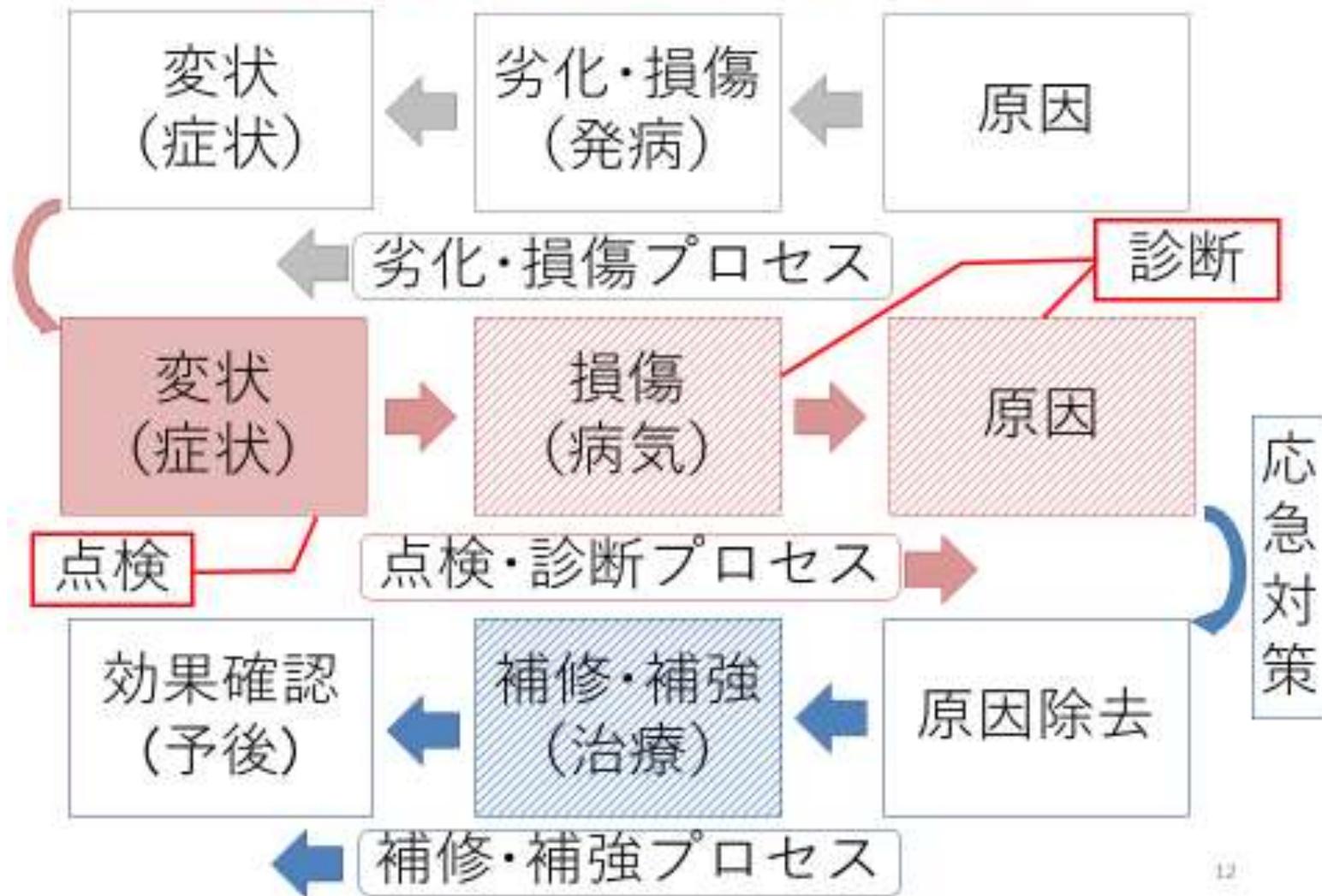
- 橋梁の場合、コンクリート表面のひび割れによって損傷の状況が判断できる場合もあるが、それは多様な損傷の一部にすぎない
- 同じひび割れが複数の異なる損傷メカニズムによって生じるようなことが少なくない

#### (2) きわめて多様な道路橋の損傷

- 死活荷重、地震、腐食等の化学的劣化など多彩
- 当初48種の損傷、現在120種に分類を拡大
- 原因が異なれば処方も異なるので細分化が必要

### 3. 敵ヲ知ル・・・橋が死に至る病とは？ (3) 変状、損傷、原因

変状・損傷・原因と点検・診断



## 4. 己ヲ知ル・・・AIという優れたツール

### (1) AIはメンテナンスの役に立つのか

曰く、

まだかなり時間がかかりそう

① ドローンの活用などによって点検業務の負担が時間、足場費用等の両面で軽減できるのではないか

正しく詳細な情報が残っていれば

② 補修・補強工法の選定が最適化できるのではないか

工学分野の論文とは性格が異なる

③ 医学の分野では、すべての論文を読み込んだAIが、有効な治療法を見出したというのではないか

# 4. 己ヲ知ル・・・AIという優れたツール

## (2) どのAIを使うのか

AIの御三家とされています

### GA(遺伝子的アルゴリズム)

- 遺伝子のような膨大な組合わせの可能性の中から最適解を速やかに見つけることが得意

### DL(ディープラーニング、深層学習)

- 画像や波形のように、記号化できないデータのパターン認識が得意で、学習データが十分にあれば、データ群の特徴を自動抽出する

### エキスパートシステム

- 人間の考え方をモデルにしたAI。予想される問題について、対処法をあらかじめ用意しておくので、専門家のシステムと呼ばれる。自ら学習する仕組みはなく、あらかじめ用意したルールがたくさんあるほど判断は正確になる

## 4. 己ヲ知ル・・・AIという優れたツール (3) 診断にエキスパートシステム

- 診断における判断の誤りは、深刻な事故につながる可能性がある
- さらに診断結果が信頼されないと、必要な措置の先延ばしを招く可能性がある
- ブラックボックス型のAI (GA、DL)は、診断には適してない
- 診断にエキスパートシステムを使用すれば、論理的な診断理由を出力できる可能性がある
  - そのアイデアはのちほど・・・

## 4. 己ヲ知ル・・・AIという優れたツール

### (4) DLによる点検支援

- 判断プロセスがブラックボックスであることが、DLの弱点だが、DLの持つパターン認識機能は魅力的
- 光学機器あるいは非破壊検査により得られる画像の解析は、点検者の経験や技術力を補完、高速化し、診断を支援する機能として大いに期待
- ただし、損傷メカニズムが解明されていなければ、全く無力
- 病理学の進歩がなければ、高性能の医療機器があっても機能しないのと同じ

## 5. AIを教育する・・・教材の作り方

### (1) すべてを教え込む

- 人工的な知能といっても、AIは教えたことしかできない
- とくにエキスパートシステムには、すべてを教え込むしかない
- 気の遠くなるような作業が予想されるが、取り組む価値はあると決意
- 2012年から3年間、(一財)橋梁調査会で直轄管理橋梁の診断業務に参画していた経験が、現在AIの教育を考える上で寄与

# 5. AIを教育する・・・教材の作り方

## (2) 医師の研修制度がモデル

- 「総合診療医 Dr.General」 NHK総合、若手研修医の研修プロセスをバラエティ化
- 様々な症状を訴える患者が登場、問診や体温・血圧などの基礎的な情報から考えられる病名をすべて列挙
- 必要な精密検査等から病名とその程度について絞り込み、原因を特定
- 総合診療科の医師の手に余るような特殊な疾患の場合には専門医を紹介
- 病気についての知識や、患者への説明について、医師の任務として重視

# 5. AIを教育する・・・教材の作り方

## (3) 点検・診断・措置・メカニズムのセット

- どのような原因でどこの部位に発生し、どのような段階を経て最終的な状態に至るのか(=**メカニズム**)、各段階はどのような**点検**手法で確認できるのか、各段階の振分け(=**診断**)は何によってできるのか、さらにそれぞれの状態に応じた**措置**の方法は？

→点検・診断・措置・メカニズムのセット

- すべての損傷に対し作成して教材とする

### 診断による措置方法の振分け

- 損傷原因を除去し、補修により健全な状態に復帰させる「**長寿命化**」
- 損傷・劣化の進行をコントロールし、更新までの期間を引き延ばす「**延命**」
- 緊急補強や交通規制、モニタリングなどにより、事故を回避しながら速やかに更新につなげる「**危機管理**」

## 5. AIを教育する・・・教材の作り方

### (4) メカニズムを紙芝居化することの効果

- 損傷メカニズムの各段階を紙芝居のように表現する
- 写真よりも伝えたいことを明確に示すことができる
- 損傷・劣化による構造系や材料の状態の変化がページが変わるごとに表現され、適用可能な点検方法や措置方法との対応が明確になる
- 紙芝居のページ＋該当点検写真(データ)を診断理由の説明資料として活用することで、判断プロセスの出力が可能なAIを実現できる

# 損傷メカニズムの紙芝居化 その1 RC床版疲労損傷の場合

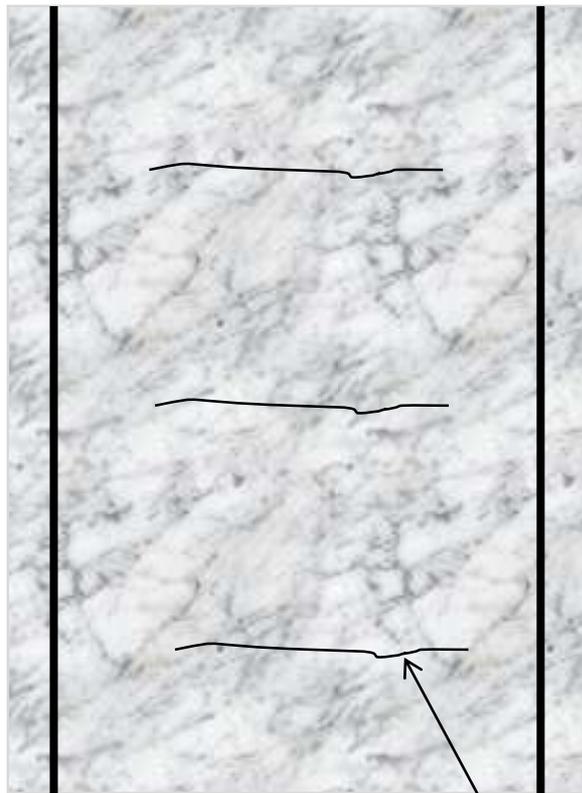


# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

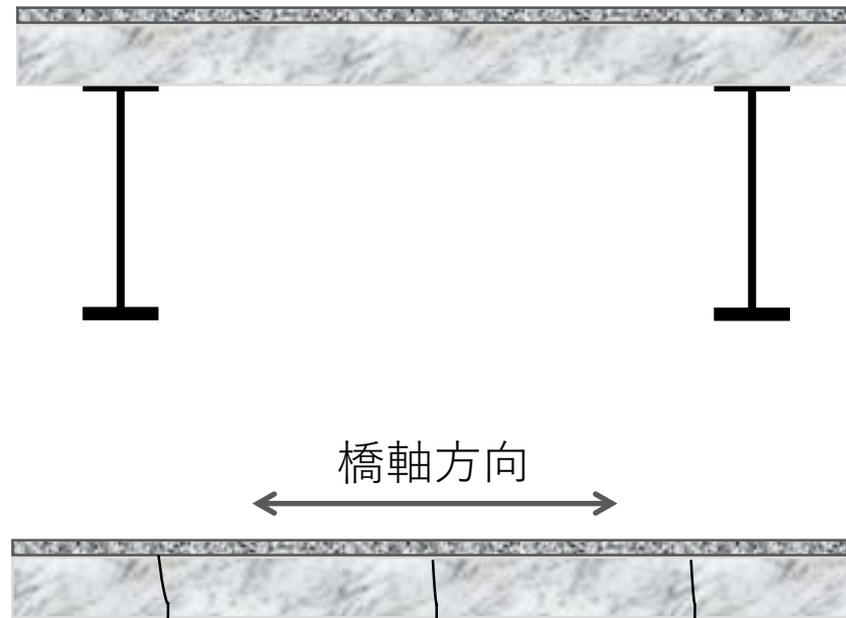
## ① コンクリート打設～乾燥収縮クラック

床版下面のクラック

- 通常の乾燥クラックは想定内、損傷ではない
- 舗装前の雨水の浸透で出た遊離石灰は、舗装後に乾けば問題なし



乾燥収縮  
クラック



- 貫通クラックにより、版から並列梁へ
- 配力筋が多いと版挙動を維持
- 中間支点上で陥没損傷が少ない理由

# RC床版の初期乾燥ひび割れ

乾燥収縮クラック + 遊離石灰

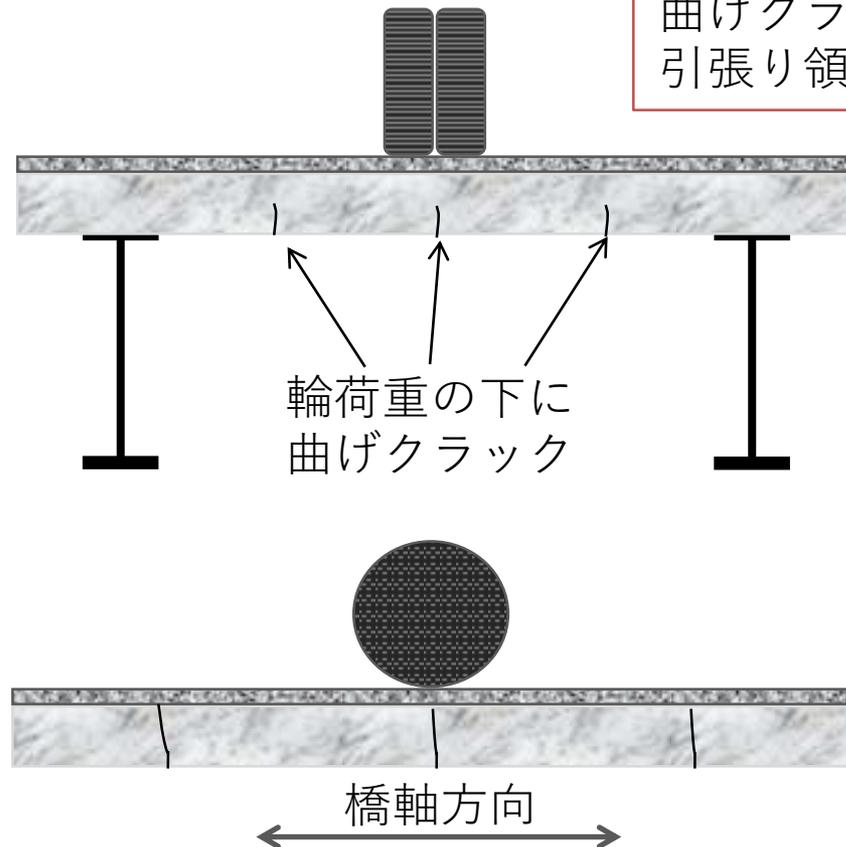
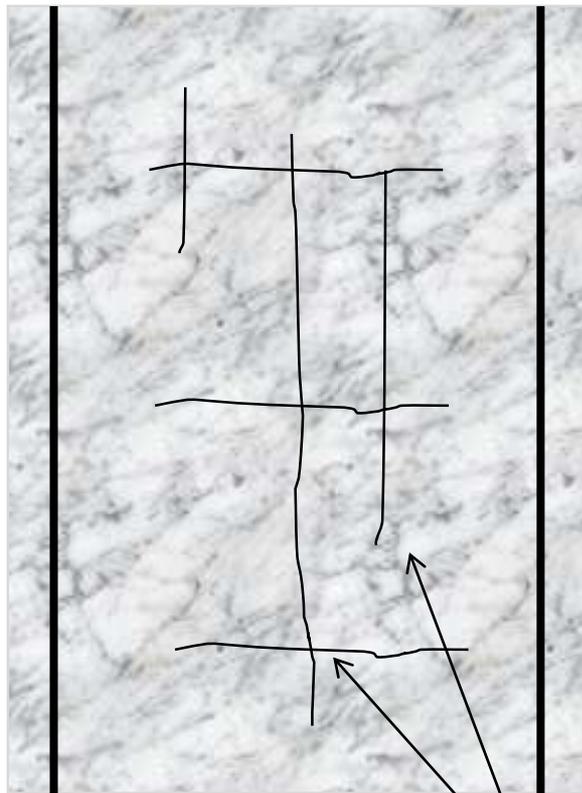


舗装後、乾いていれば損傷ではない

# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

## ② 供用開始～橋軸方向曲げクラック

床版下面のクラック



曲げクラックは引張り領域のみ

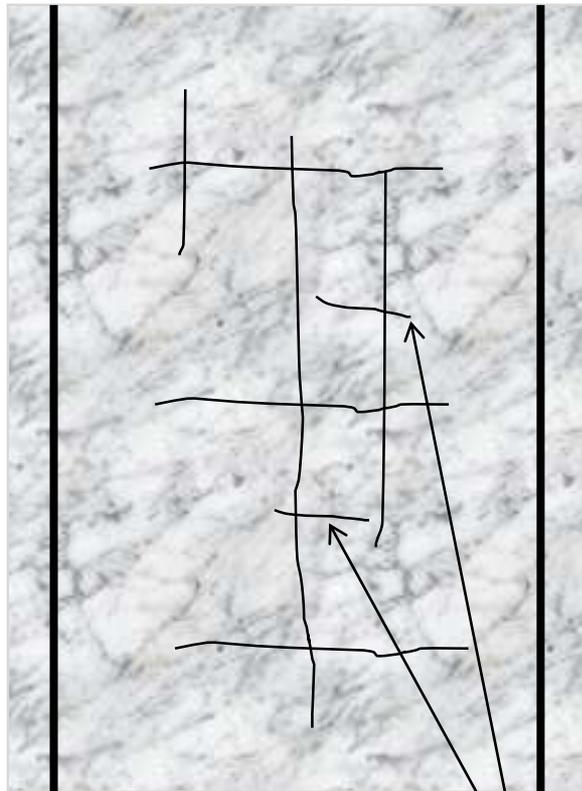
曲げクラック 0.2mm以上を検知

# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

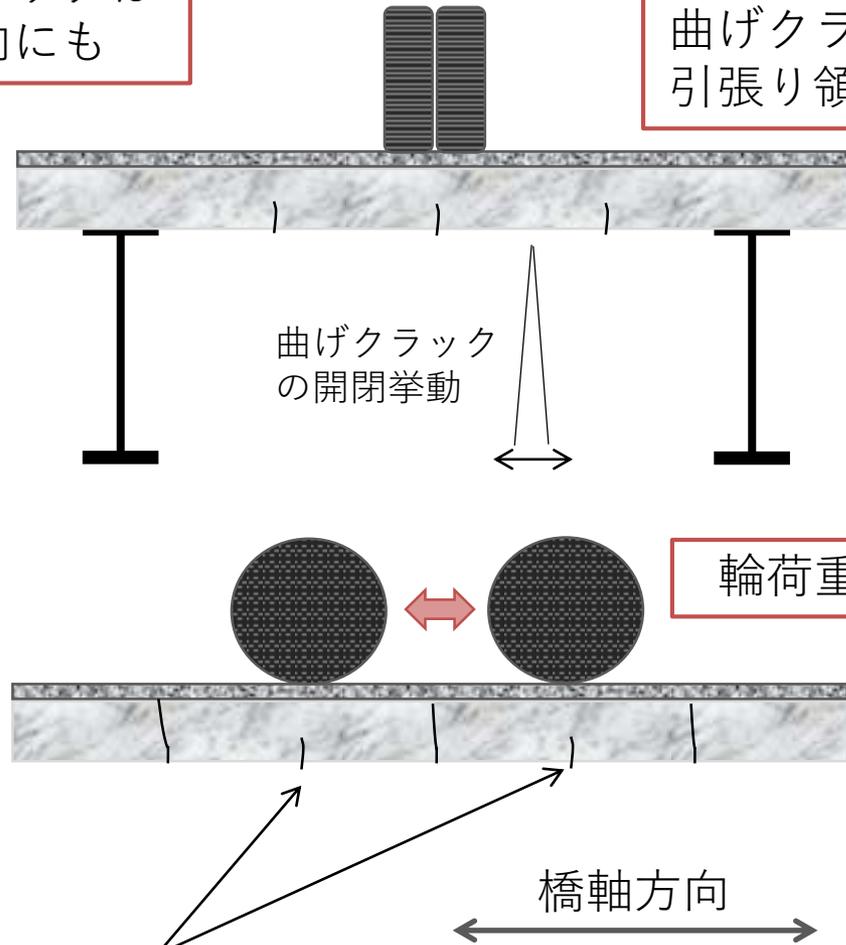
## ③ 橋軸直角方向曲げクラック

移動荷重なので、曲げクラックは  
何処にでも、どちらの方向にも

曲げクラックは  
引張り領域のみ



床版下面のクラック 橋軸直角方向  
曲げクラック



曲げクラック  
の開閉挙動

輪荷重が移動

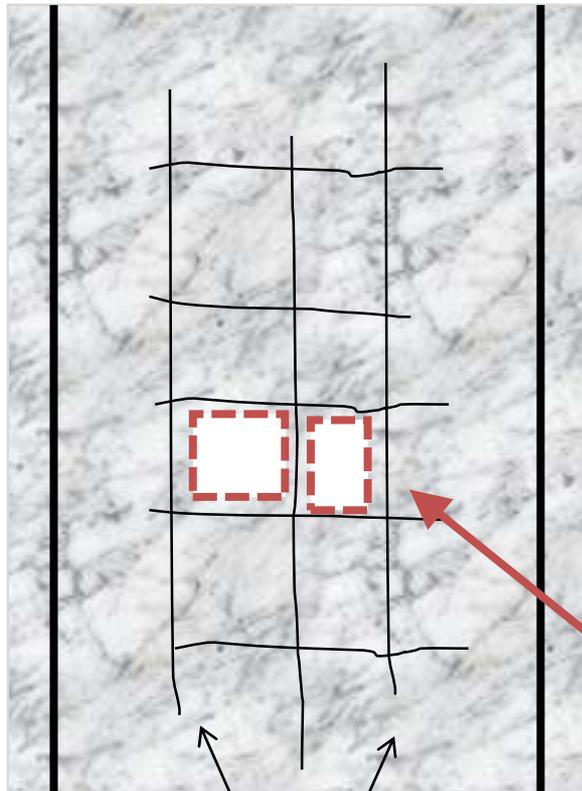
橋軸方向

# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

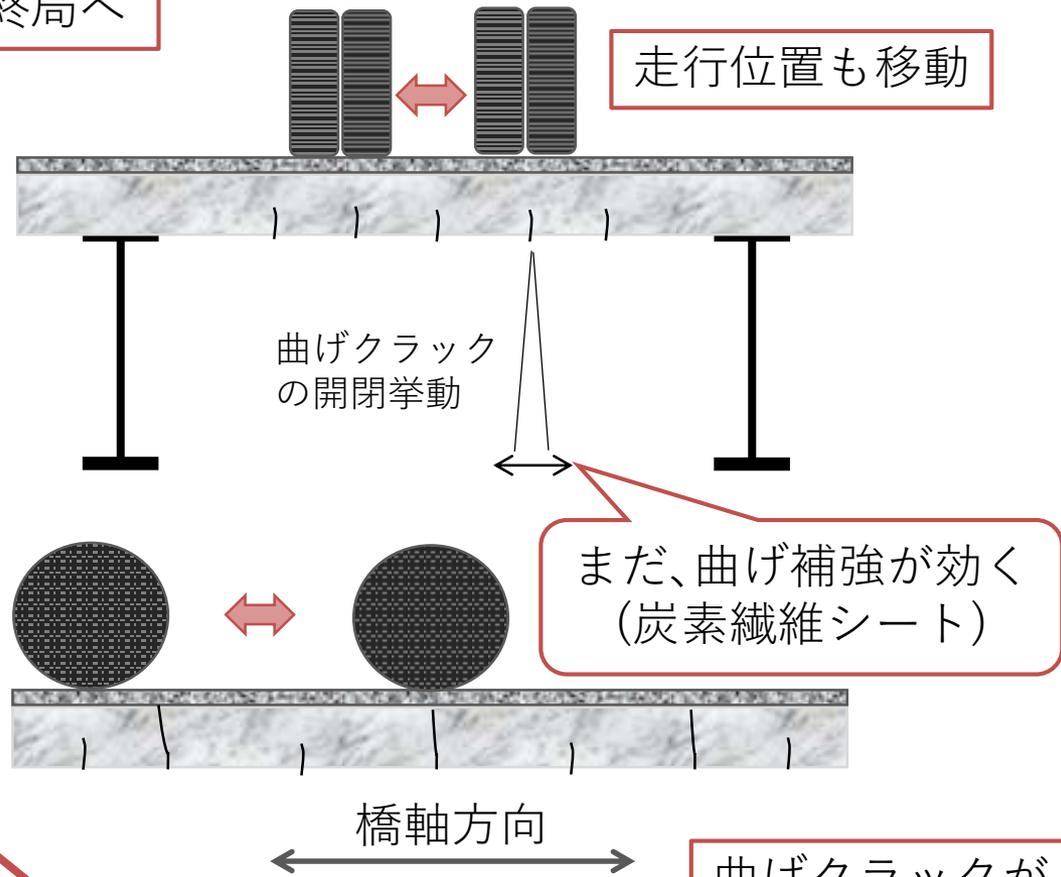
## ④ 曲げクラック(格子の形成)

疲労損傷が確定、いずれ終局へ

床版下面のクラック



さらに曲げクラック



走行位置も移動

曲げクラック  
の開閉挙動

まだ、曲げ補強が効く  
(炭素繊維シート)

橋軸方向

曲げクラックが  
主体

複数の閉じたブロック  
→ 疲労損傷と認識

# RC床版疲労損傷の初期～中期症状

明らかな疲労損傷



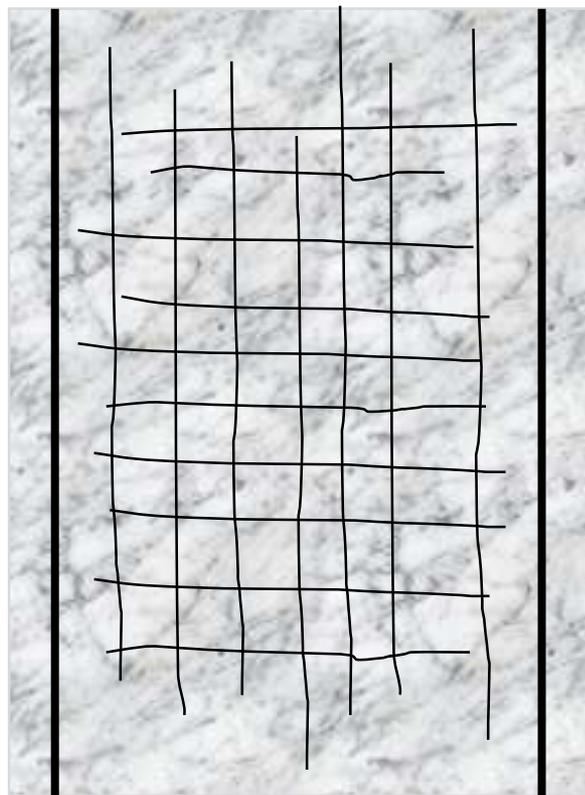
予防保全はこのあたりまで

# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

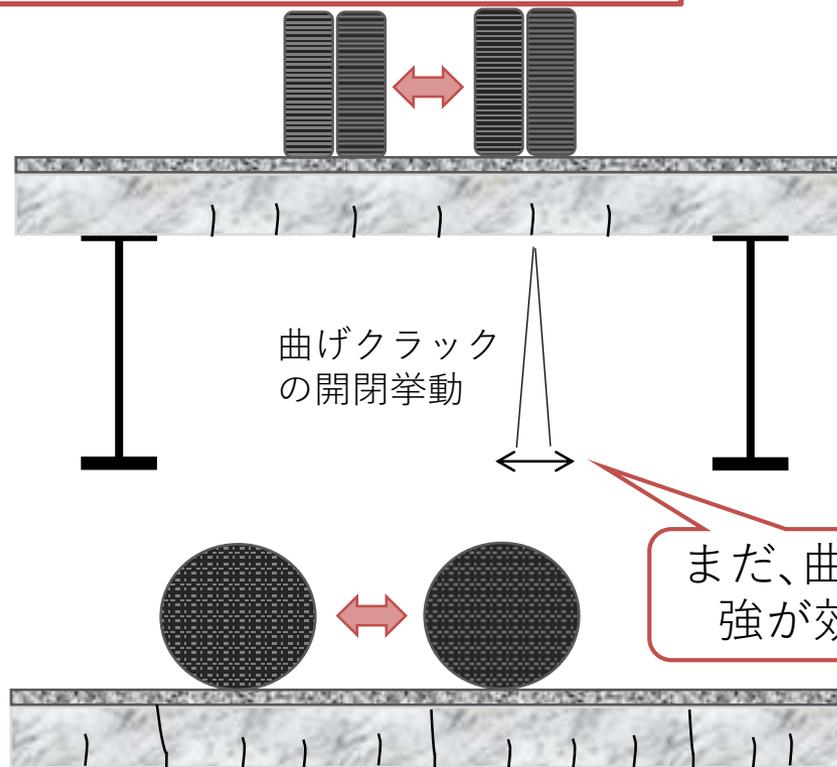
## ⑤ 格子密度が飽和状態に

クラック密度  
≒10m/m<sup>2</sup>

下面からの曲げ補強による予防保全はここまで！



床版下面のクラック



まだ、曲げ補強が効く

橋軸方向

ヤング係数が高く、付着面積の大きな炭素繊維シートが、曲げ補強には最適

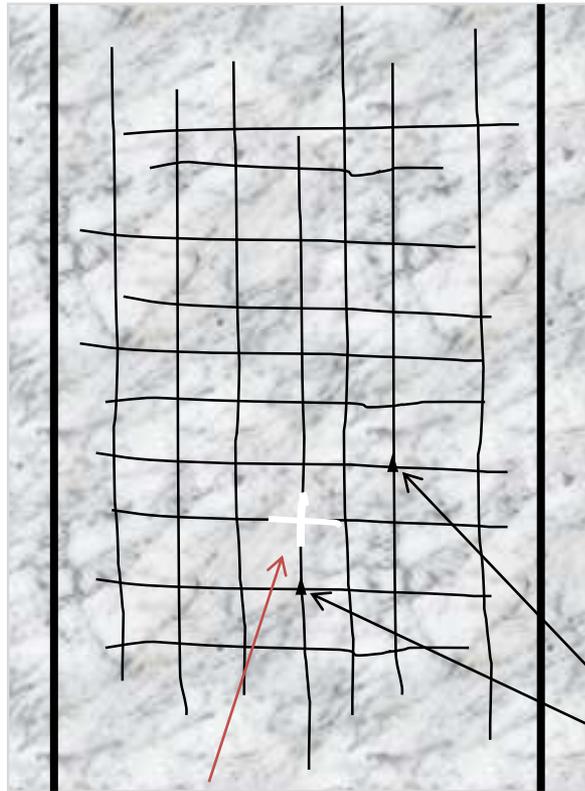
曲げクラックが主体

# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

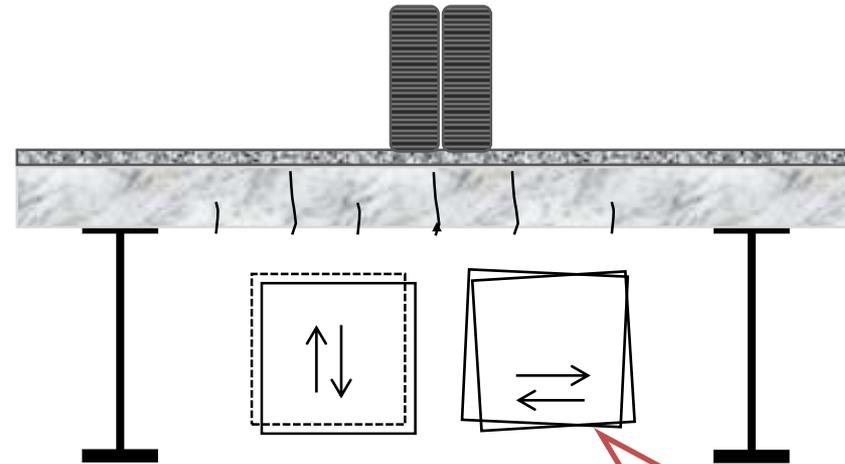
## ⑥ 貫通クラックが増加

直上を輪荷重が通過すると、クラックは上に向かって伸びて貫通する

床版下面のクラック  
密度は変化しない

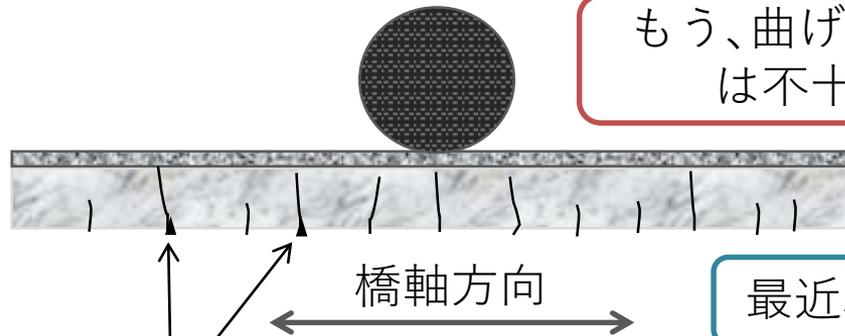


漏水・遊離石灰は  
特急券



貫通クラックの挙動

もう、曲げ補強では  
不十分



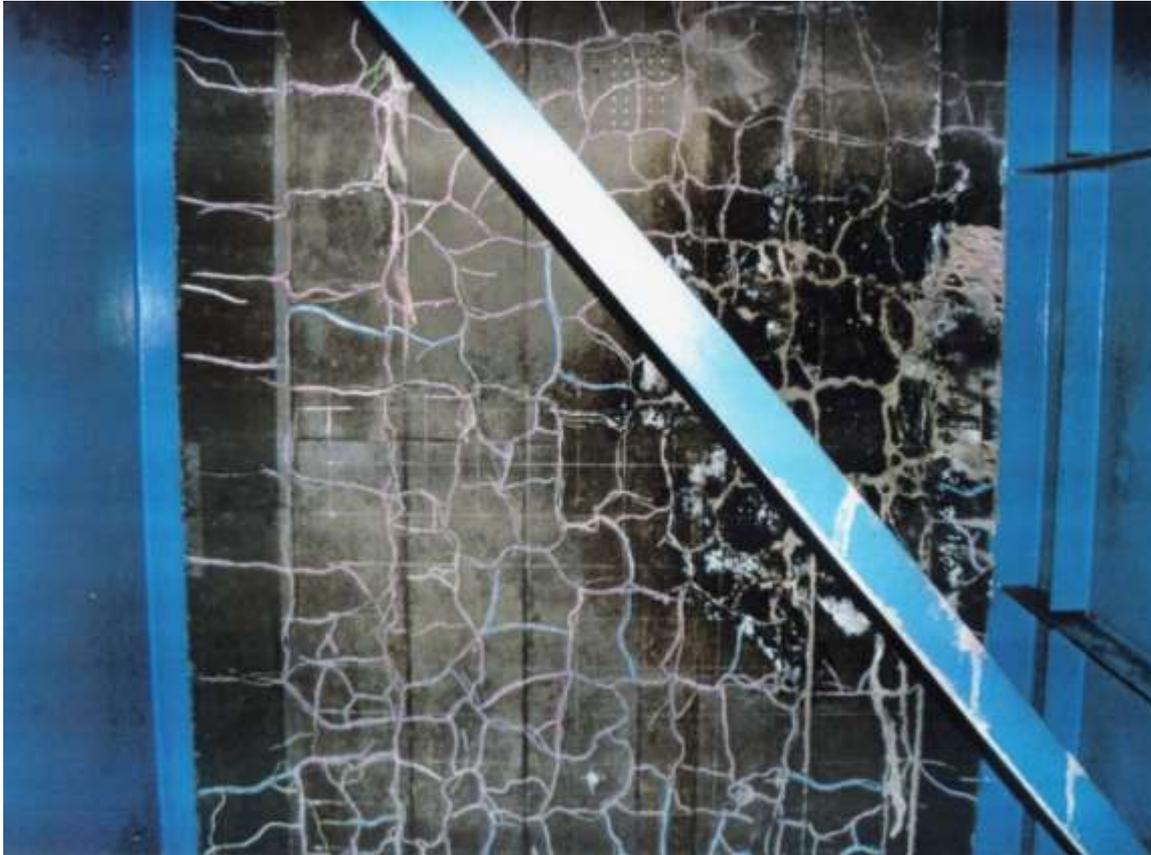
最近、状況変化

貫通クラックに  
角欠けが発生

せん断補強(上面増厚)  
+ 曲げ補強が必要

# RC床版疲労損傷の末期症状

漏水 + 遊離石灰



典型的な終局状態

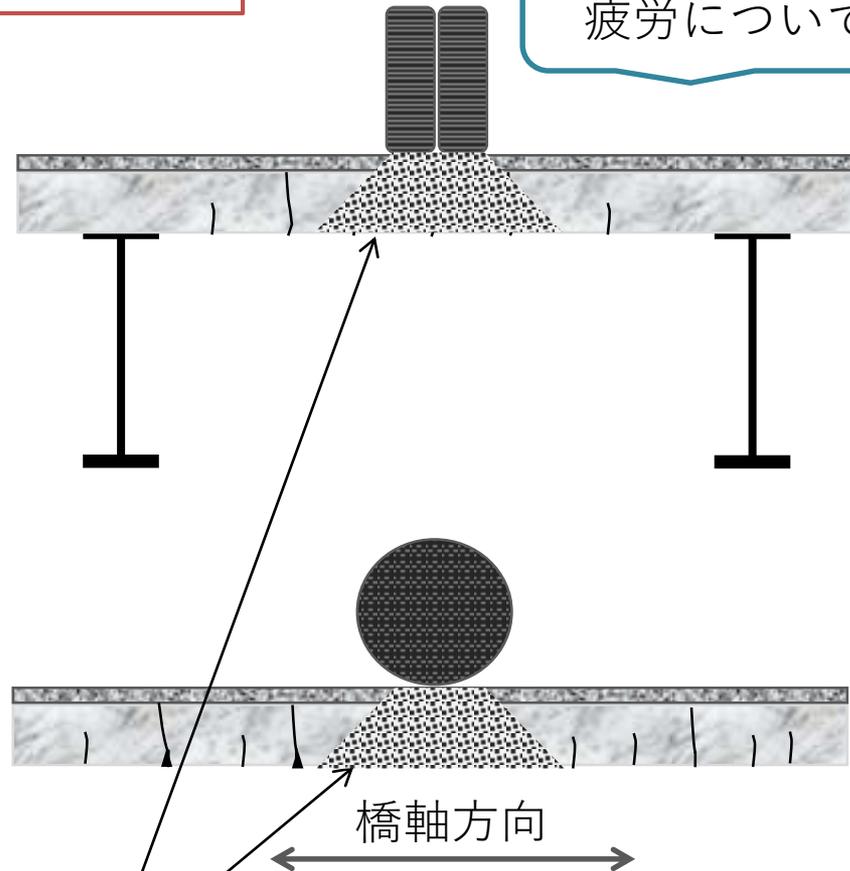
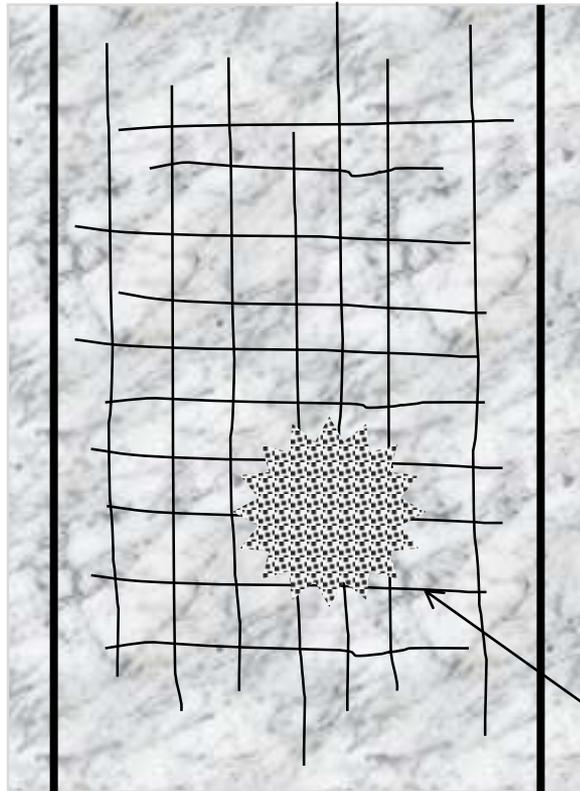
# 紙芝居化した疲労損傷メカニズム

## ⑦ 押し抜きせん断破壊(陥没)

橋の上下で第三者被害の可能性

昭和50年代後半以降、  
疲労については改善

床版下面のクラック



押し抜きせん断  
による陥没

# 損傷メカニズムの紙芝居化 その2 RC床版土砂化の場合

5年前の点検写真  
疲労損傷の兆候なし



2013年5月 いきなり陥没  
一面の遊離石灰にも注目



土砂化損傷！下からの点検では**予防保全**は不可能

# 土砂化は路面側から進行

- 床版上部のコンクリートが土砂状に
- 水の影響が疑われる
- 進行した土砂化は舗装の損傷として表面化する
- 予防保全としては手遅れ

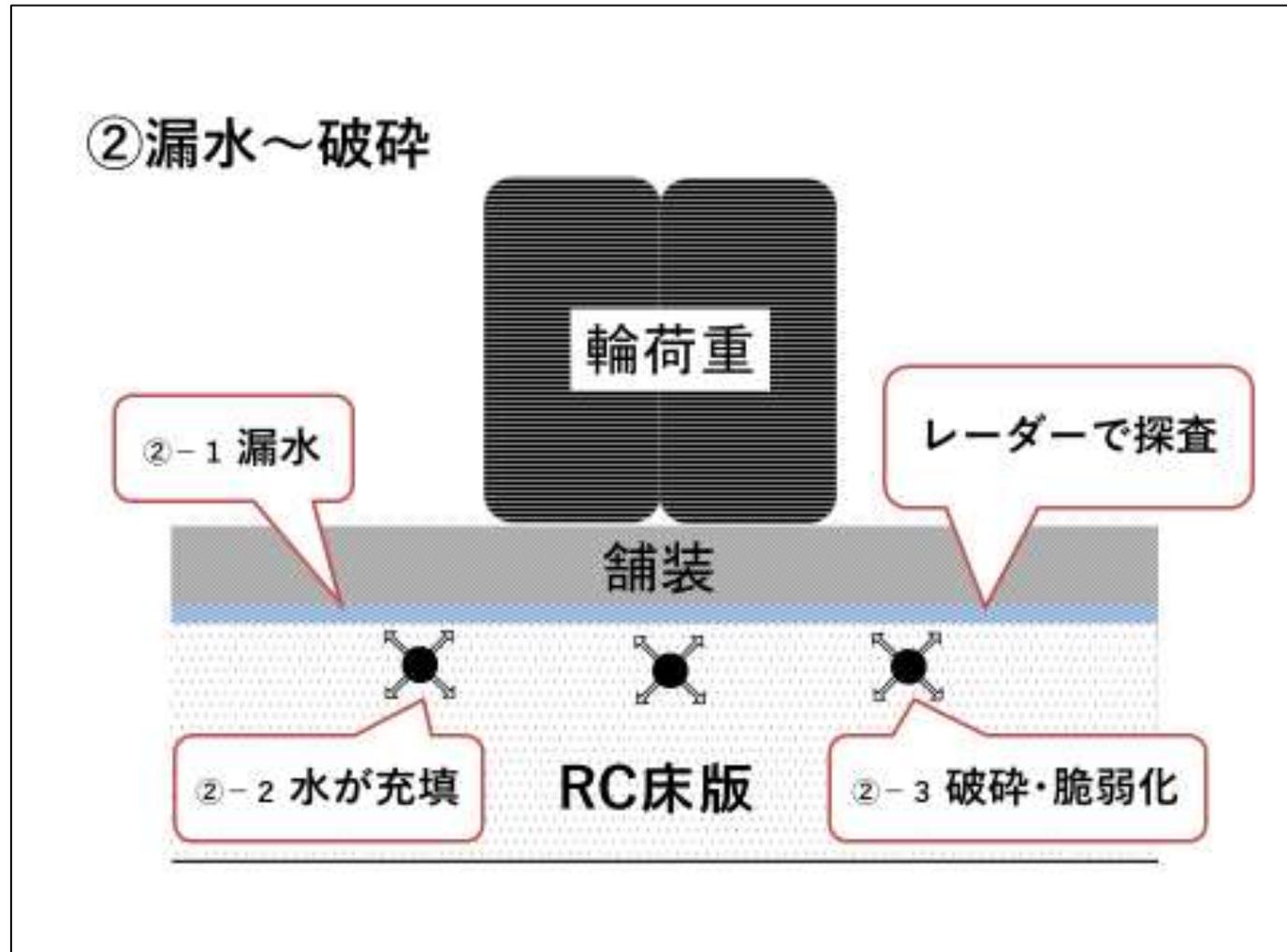


# 紙芝居化した損傷メカニズム RC床版の土砂化①

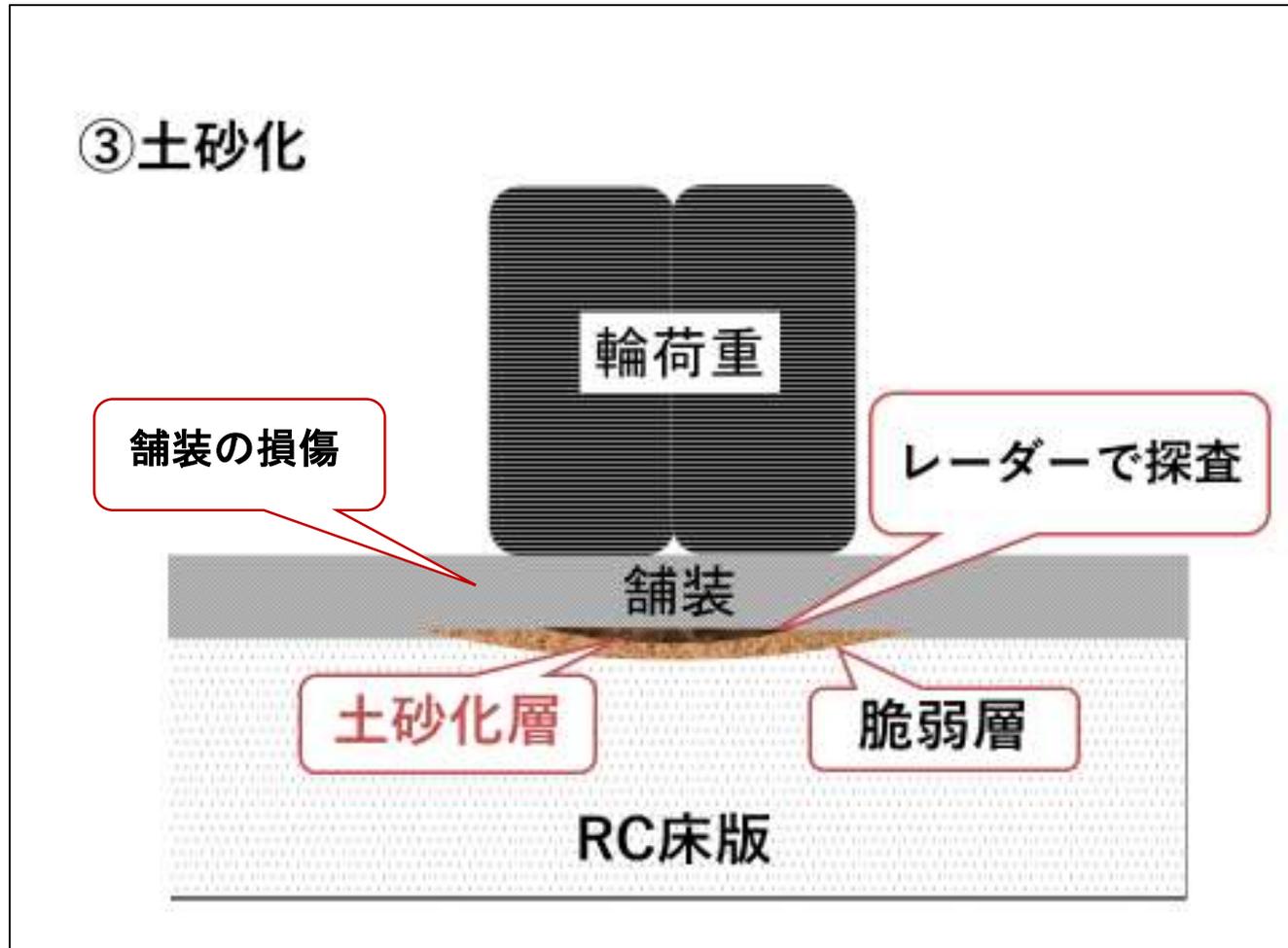
①健全



# 紙芝居化した損傷メカニズム RC床版の土砂化②

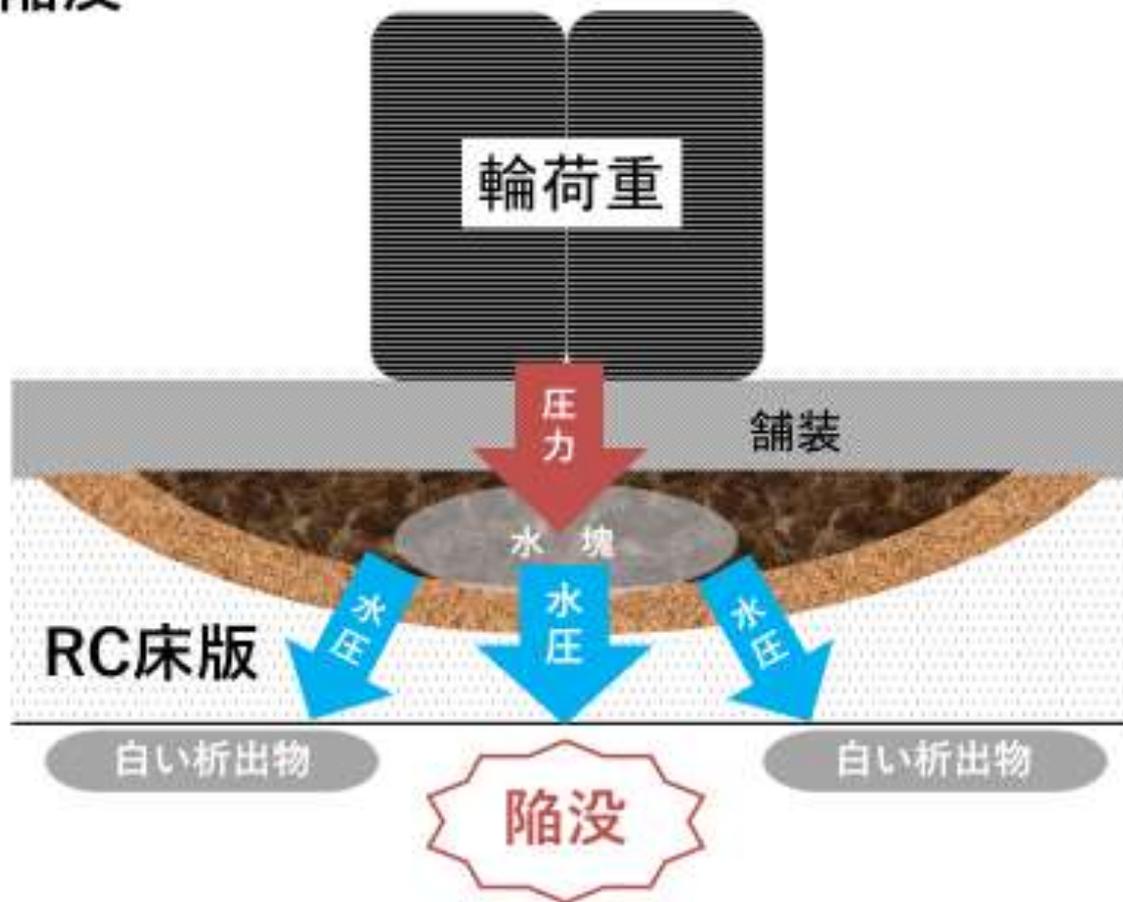


# 紙芝居化した損傷メカニズム RC床版の土砂化③



# 紙芝居化した損傷メカニズム RC床版の土砂化④

## ④ 陥没



# 診断結果の出力

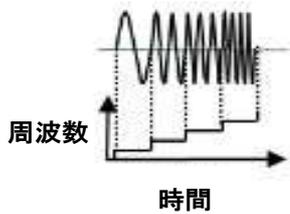
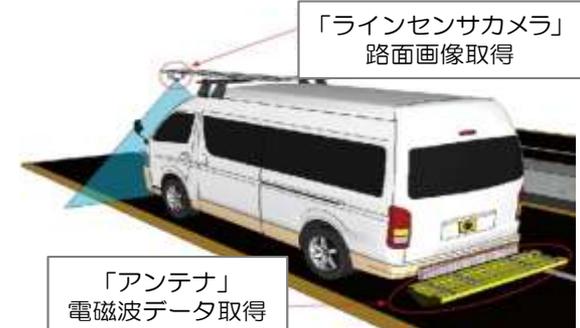
- 診断結果は、点検写真やデータとともに該当する紙芝居のページが出力される
  - ✓ 現在この損傷のこの段階にあって、その決め手はこの写真(データ)であると示される
  - ✓ 必要があれば、損傷メカニズムの解説とリンクして、診断理由を知ることができる
- すべての損傷メカニズムについてこのような図化を行い、AIシステムに記憶させて使用する
  - ✓ こうすることで、原因除去の必要性や措置の選択も理解しやすくなり、診断の信頼性が向上
  - ✓ 同時に先送りの要因が除かれるとともに、再劣化・早期劣化も抑制できるはずである

## 5. AIを教育する・・・教材の作り方

### (5) 電磁波レーダによる漏水の検知

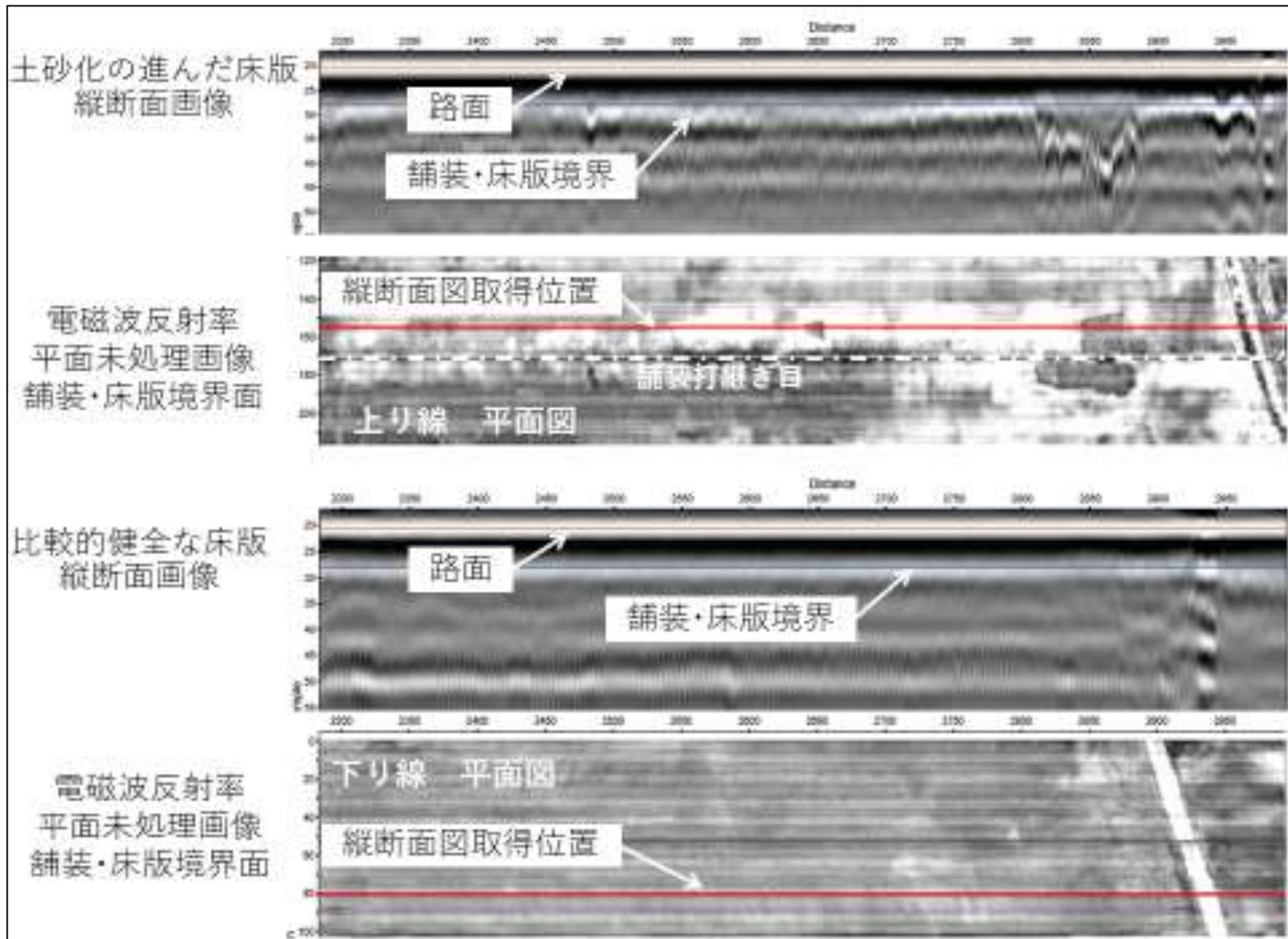
- 最も損傷事例が多いRC床版の土砂化の点検技術の開発が急務
- 予防保全可能な手法が必須
- 電磁波レーダの水に対する探査能力を活用、床版面への漏水を初期段階損傷として検知
- 車載型レーダを活用して定期点検毎に実施する必要がある
- 漏水位置を特定できれば、遮水処理のみで措置は完了する
- RC/PC床版橋等にも適用範囲を拡張可能

# 使用した車載型電磁波レーダー

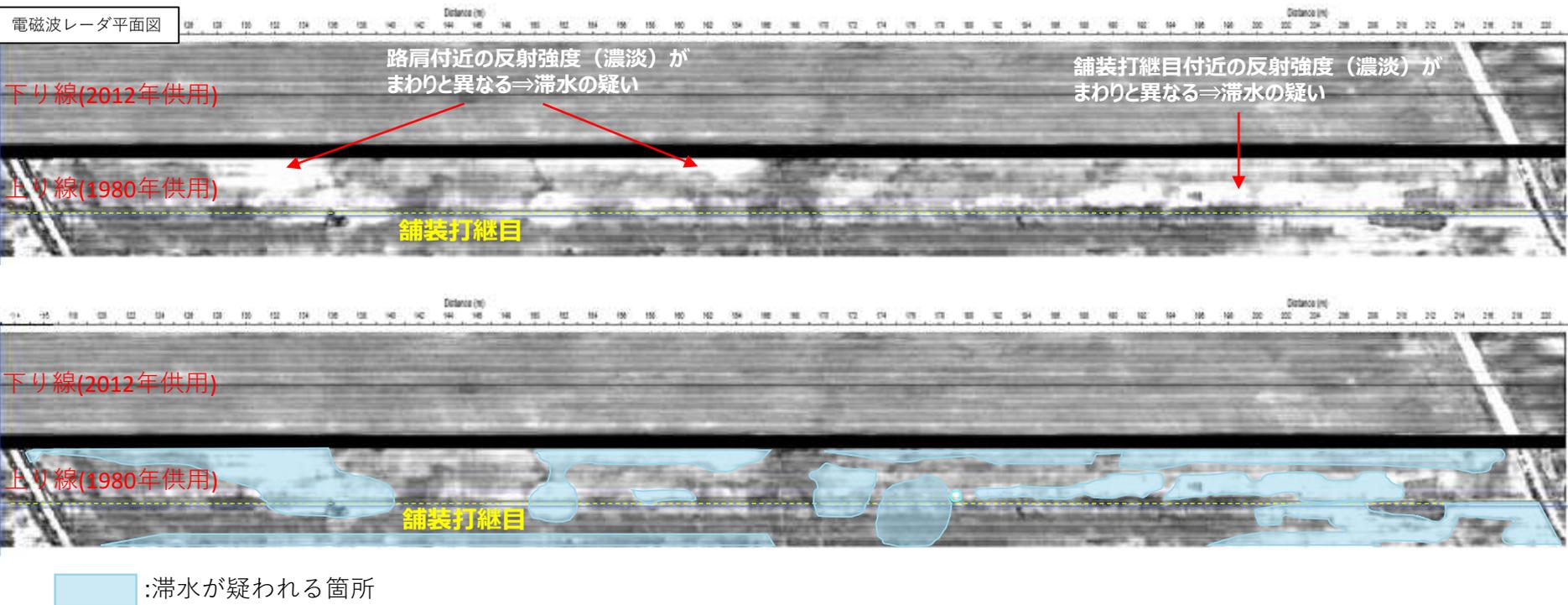
電磁波レーダ仕様				
機材名	3D-RADAR		変調方式	ステップ周波数
レーダ方式	変調連続波方式レーダーシステム			
変調方式	ステップ周波数		送信波形	
計測方法				
動作原理	離散的に変化する多周波数において、各周波数毎の送信波に対する反射波の振幅・位相を計測する		探査深さ	最大1500mm



# 電磁波レーダによる計測データ 様々な分析が可能



# 電磁波の反射強度から滞水エリアを表示した画像の一例



# 6. 現場適用のイメージ

## (1) AI診断Ver.1.0

- ① 通常点検 + 調書作成自動化とAI診断の試行
  - ロボット等を活用した点検の技術開発にはまだ時間を要するものと判断、点検は当面従来方式で行う
- ② タブレットによる点検指導と記録、転送
  - 経験の浅い点検者であっても、その後の診断に必要な情報が得られるとともに、順次クラウドに転送する
- ③ 点検所見の定型化
  - プルダウンメニューにより表現を定型化、将来の教師データとしての活用に資する
- ④ 点検調書、診断書の作成
  - 現場から転送されたデータに問題がなければ、点検調書と診断書がAIにより作成され、責任技術者の確認を経て完成する

## 6. 現場適用のイメージ

### (2) 次のステップへの展望

- 現場実装には、信頼を得られるレベルに到達するまで**試行と修正**が必要、Ver.1.0モデルのリリースが急がれる
  - ✓ 道路局の要請からRC床版とRC/PC床版橋を先行
  - ✓ 対象とする損傷や措置のメニューを順次拡大する
- 新たな知見や問題点を集積し、継続的に教師データを**更新する仕組み**を構築する必要がある
- 点検では、上部構造下面や主構間を飛行できる高性能ドローンに、変状の識別には3D-CIM(3次元カラー点群データ)の活用を期待している

# おわりに

- エキスパートシステムをAIと呼んで良いのか議論はありますが、AIもあくまでも道具のひとつ、戦略目標が達成できれば大成功だと考えます
- こうしている間にもインフラの劣化・損傷は進んでいます
- 信頼されるAIシステムの現場実装に邁進したいと思っています

**ご清聴ありがとうございました**