
第 10 回 CAESAR 講演会

開催日：平成 29 年 8 月 31 日(木)

会 場：一 橋 講 堂

国立研究開発法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)

目 次

■ 基 調 講 演

点検情報に基づくコンクリート橋の余寿命推定技術と点検省力化	3
-------------------------------------	---

東京大学・横浜国立大学 教授

前川 宏一 氏

■ 講 演

高出力 X 線による PC 橋内部の劣化調査と耐荷力評価	37
CAESAR 上席研究員	石田 雅博

要因は、地盤変位か振動か

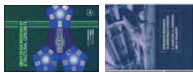
～熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析～ ..	57
CAESAR 上席研究員	大住 道生

必要な性能を確保する

～東北地整の耐久性確保の取り組み～	73
元国土交通省東北地方整備局	佐藤 和徳 氏

ICT を活用したインフラ維持管理システム（i-DREAMs）の社会実装	99
首都高速道路（株）保全・交通部長	土橋 浩 氏

基 調 講 演



点検情報に基づくコンクリート橋の余寿命 推定技術と点検省力化 -検査データと数値寿命推定法との同化-

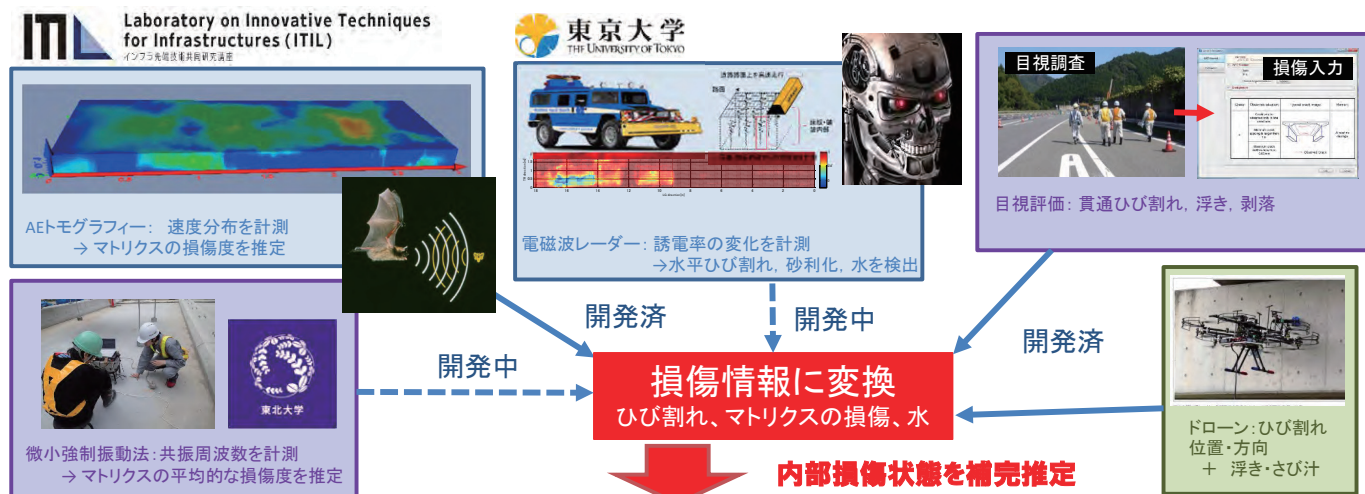
第10回 CAESAR講演会
土木研究所 構造物メンテナンス研究センター

前川 宏一

東京大学・横浜国立大学 2017年8月31日

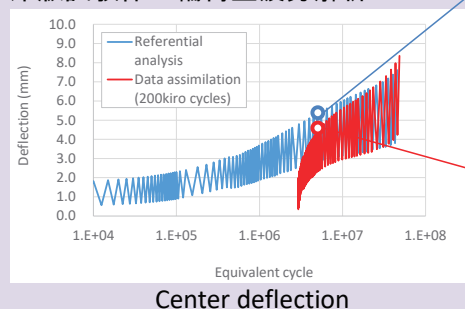


本日の主題: データ同化による床版の余寿命評価

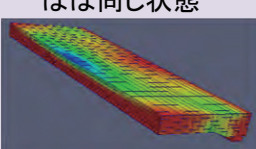
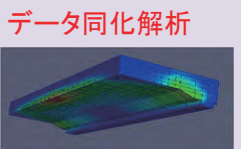
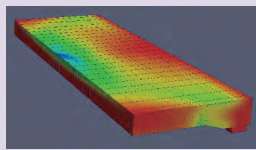
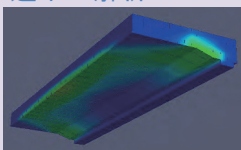


マルチスケール統合解析によるデータ同化

床版試験体の輪荷重疲労解析



通常の解析



データ同化解析

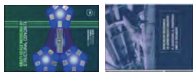
ほぼ同じ状態

どこから始めても余寿命が予測可能に

データ同化

既設床版





目的 Cox回帰分析による劣化因子予測の応用事例として分析結果の利用を行う

リスクスコアを利用した維持管理支援手法

$$h(t, \mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) = h_0(t) \exp(\mathbf{x}\boldsymbol{\beta})$$

1 床版毎リスクスコアのプロット



結果

- 正確な床版位置情報から、橋梁内でのリスクの差が直感的に明らかに
- 熊野町JCT⇄板橋JCT(交通量／構造上の理由によりリスク高)といった要重点管理区間が明確に

2 補修・補強効果検討への応用

3号渋谷線
渋谷→用賀

通常ケース

- 現設計でのリスクスコア (16~24cm)

増厚ケース

- 床版厚設計値 25cmと仮定

リスクスコアによる
補強効果の検討



結果

- 構造条件の変化による損傷リスクの低下が定量的・視覚的に明確となり、維持管理優先度決定などへの有効性を示す

維持管理,補修効果の定量評価、計画策定に寄与(石田教授、山崎: 土論 JSCE2016)



生存時間解析による橋梁点検データの活用

- 全橋梁の劣化状況の把握
- 多額の点検費用
- 膨大なデータの蓄積



データ分析による
維持管理方法、点検方法の効率化が必要

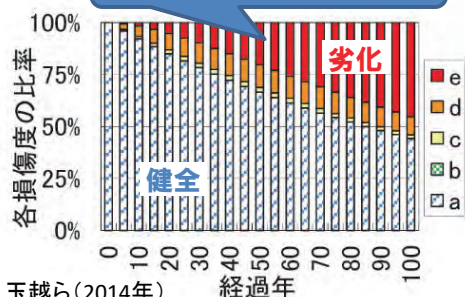
点検データの分析の現状と課題

全体の予測・分析に適合 重回帰分析、マルコフ連鎖モデルなど

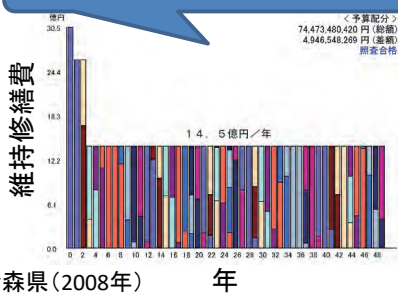
個別の問題には

全体推移は予測できる

予算の予測、平準化はできる



玉越ら(2014年)
コンクリート主桁の剥離・鉄筋露出
(塩害地域ポステンPCT桁)



青森県(2008年)
50年間のLCCシミュレーション結果
(青森県、橋梁長寿命化修繕計画)

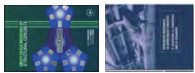
どれを優先すれば
良いのか

どの対策がどれくらい
良いのか

...分からない

生存時間解析

東北地方整備局直轄道路、首都高速道路、東名・名神高速道路、中国地方整備局から
SIPにデータ提供 → アクセントをつけた個別詳細点検 → 省資源化・省人化へ

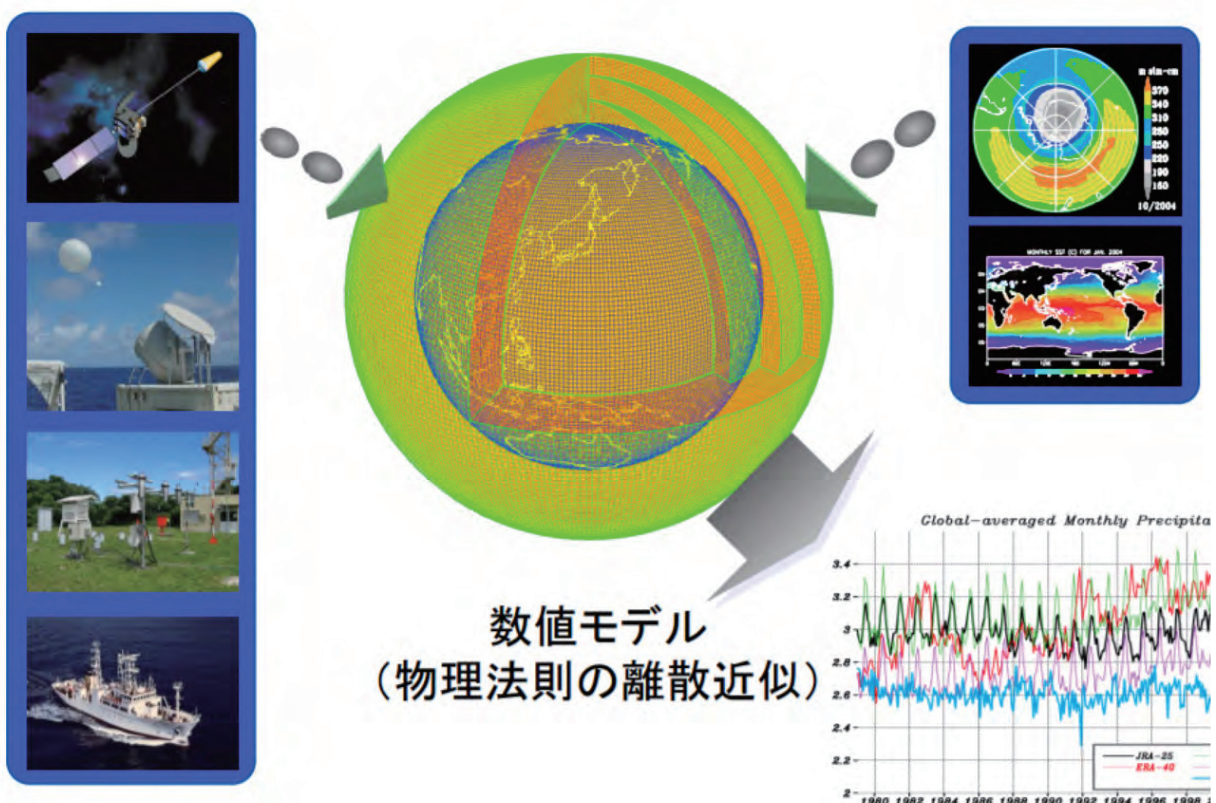


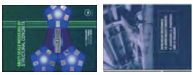
固定及び移動式モニタリング・センシング = 橋梁の点検・モニターと同じ



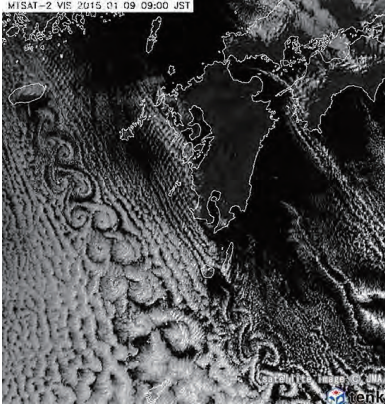
観測点間の科学的内挿→未来予測

背景：高度情報技術と大気海洋モデルの進歩：
過去100年の経験の延長線上に未来は見えない！地球温暖化





MISAT-2 VIS 2015 01 09 09:00 JST



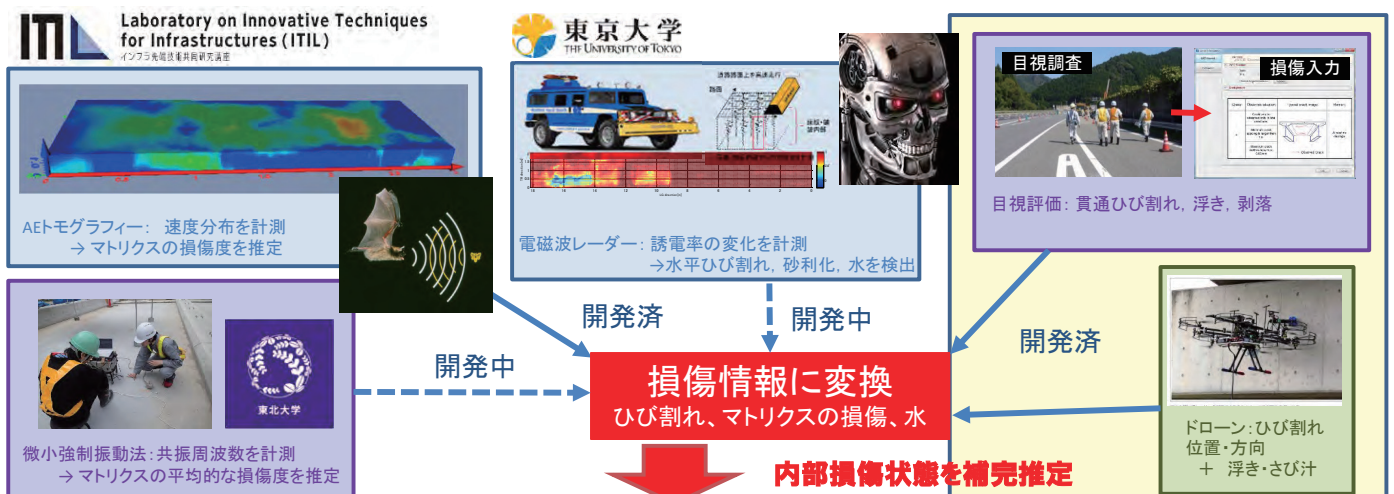
台風やカルマン渦の存在 → 単純内挿・外挿のみでは、(科学的知識にも矛盾しない) 確からしい推定値は得られない。

愚者は経験に学び、賢者は歴史に学ぶ。そして聖人は経験から悟る
 AI, training data engineers, science
 Fools say they learn from experience; I prefer to learn from the experience of others. by Otto von Bismarck

数値解析は科学・工学の(普遍と思われる)知識を代表したもの

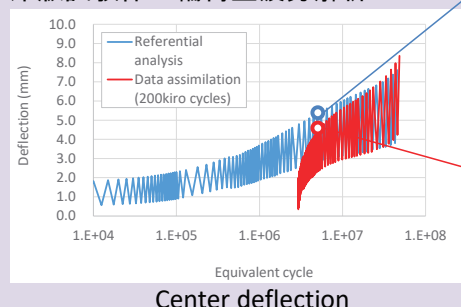


データ同化による床版の余寿命評価 (藤野SIP)

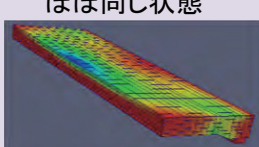
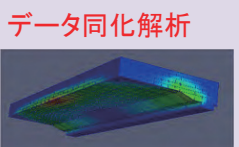
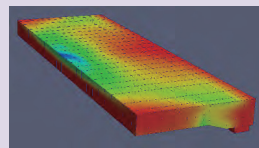
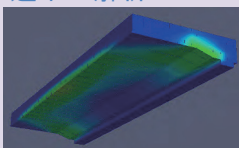


マルチスケール統合解析によるデータ同化

床版試験体の輪荷重疲労解析



通常の解析



データ同化解析

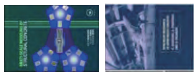
ほぼ同じ状態

どこから始めても余寿命が予測可能に

データ同化

既設床版





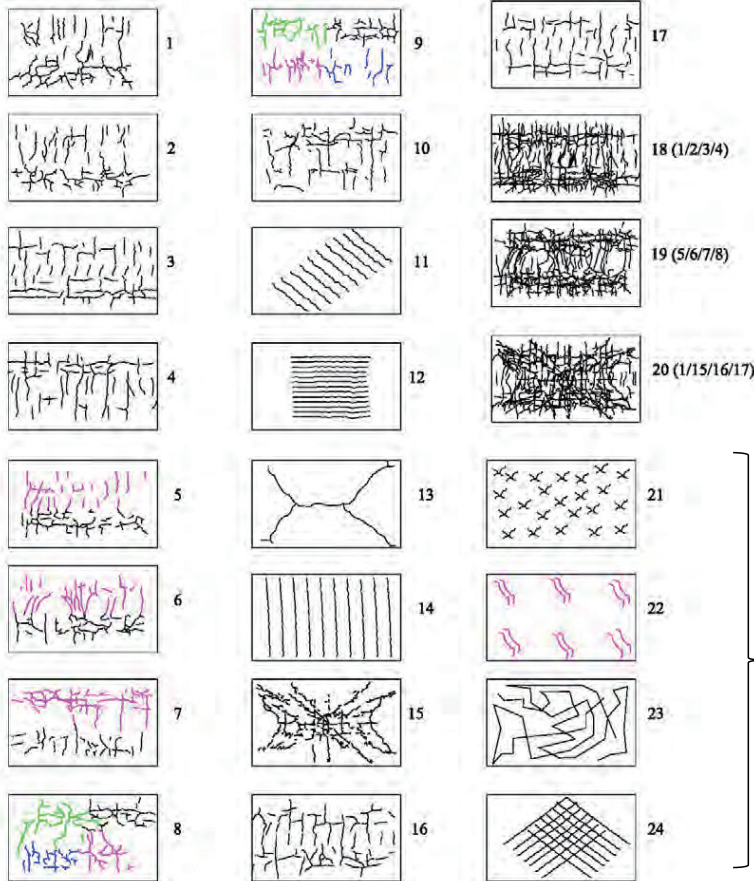
床版余寿命評価に関わるひび割れパターン

9

実橋梁の点検で得られた割れ図(1000近い)

試行的に作成したひび割れ図

高速道路の床版ひび割れ図(例)

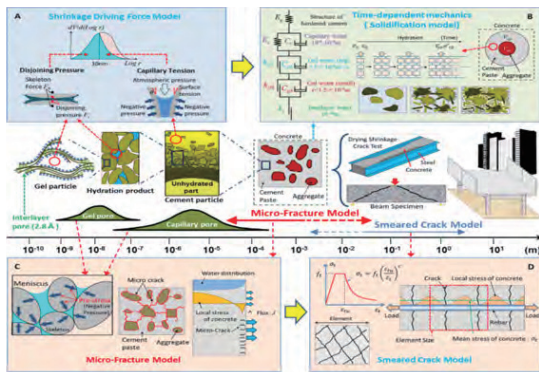


余寿命のランキングと
余寿命の期待値は？



データ同化:RC床版の余寿命予測システム

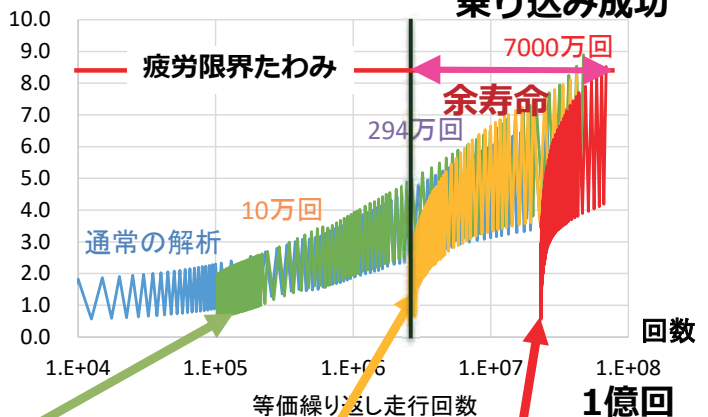
10



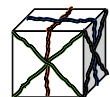
RC床版の疲労たわみ予測

データ同化による
乗り込み成功

たわみ (mm)
(劣化の指標)



6方向ひび割れモデルで構造内部のひび割れを推定
Predictor-corrector法

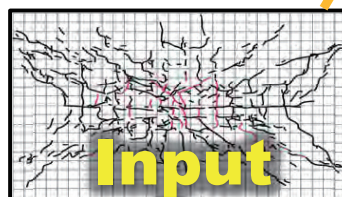


RC床版裏面のひび割れ図(実測)を初期値としてMS解析に

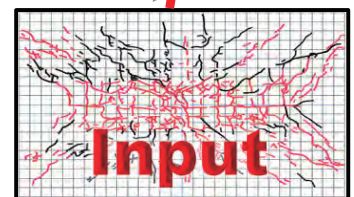
载荷回数



10万回



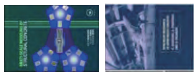
294万回



2306万回

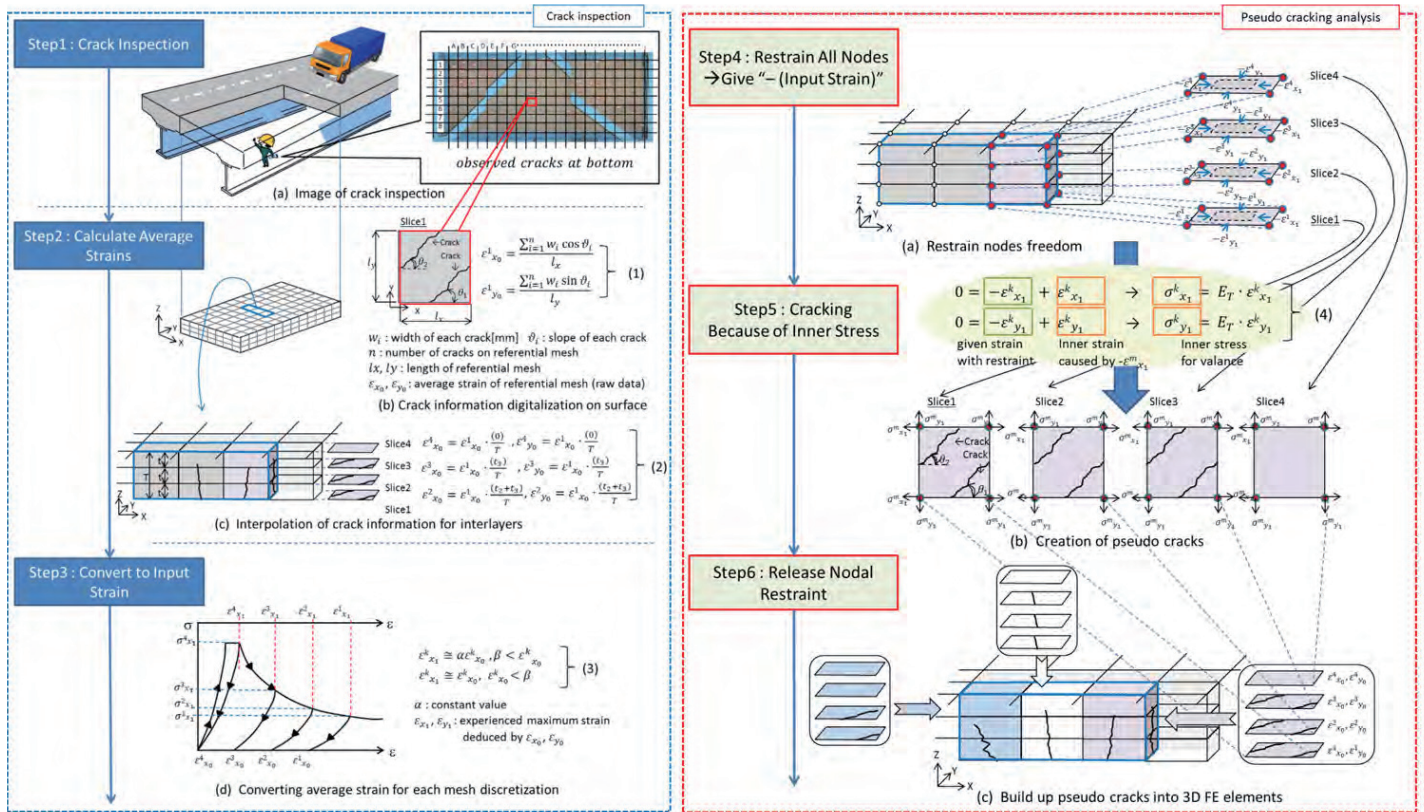
裏面のひび割れ状況から, RC床版の内部損傷と余寿命をpredictor-corrector法で推定

内閣府SIP抜粋



厚み方向に線形初期仮定→繰り返し、クラックを探索

11



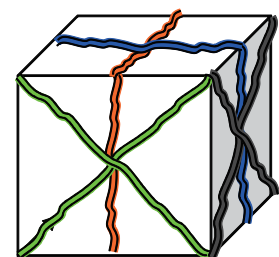
Fujiyama et al. (2011). Pseudo-cracking data assimilation, J. Advanced Concrete Technology



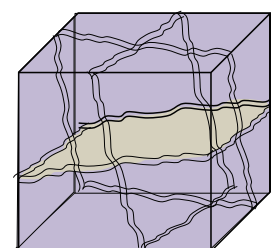
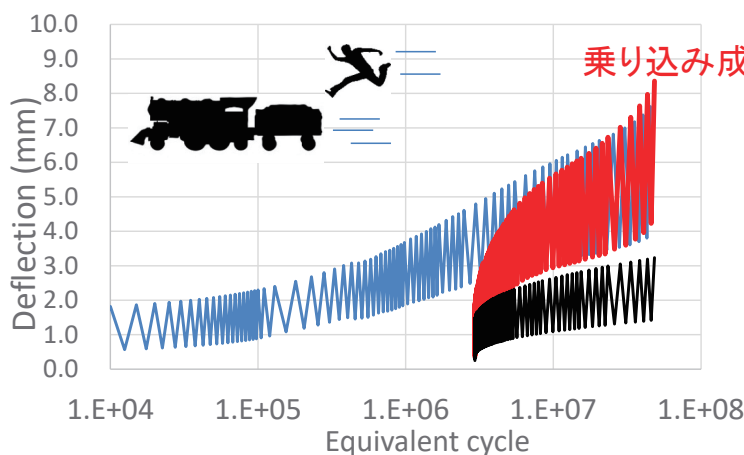
データ同化による床版の余寿命評価（目視、AET）

12

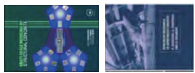
データ同化に必要な数理モデルには合理性、妥当性が必須



独立6方向の非直交ひびわれ
or 3方向ひび割れ投影モデル

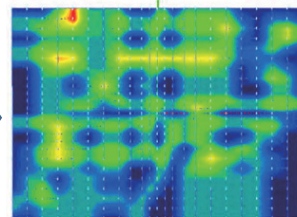
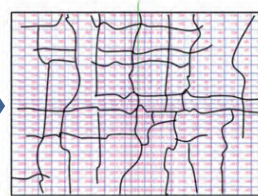
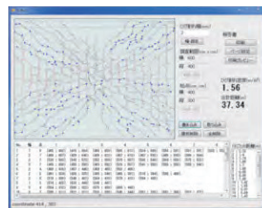


独立3方向のみの
非直交ひびわれ

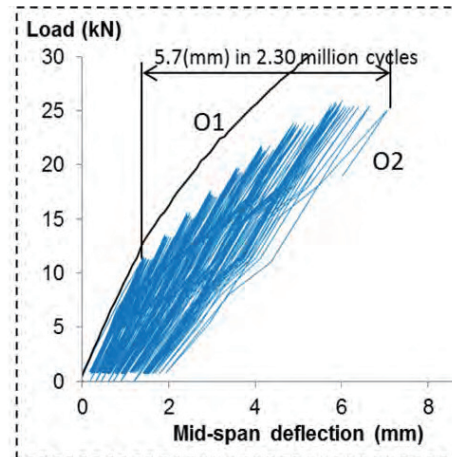
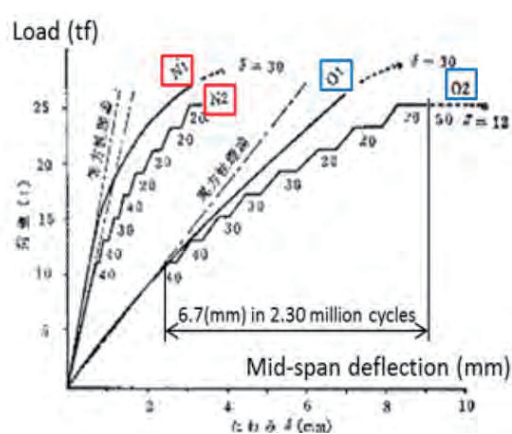
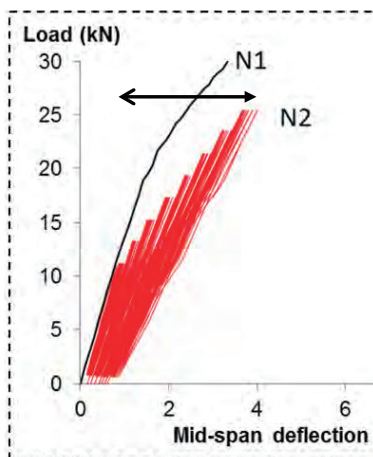


目視検査データをもとに床版内部を推定

13



実橋梁から切り出した床版を実験室に移動。疲労試験によって残存余寿命を求め、無損傷床版と比較検討



Fujiyama et al. (2011). Pseudo-cracking data assimilation, J. Advanced Concrete Technology



ひび割れ同化:実走行20万回(等価回数294万回)

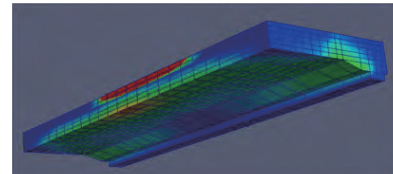
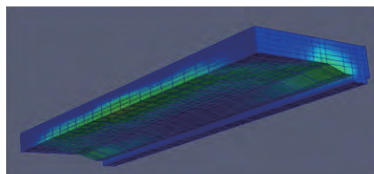
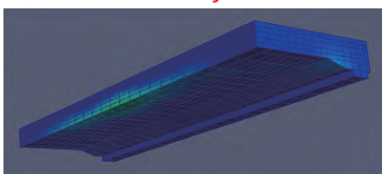
14

① 2.94 million cycle

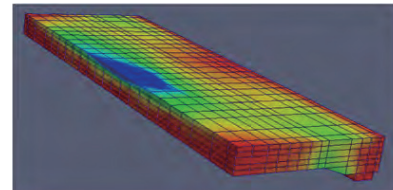
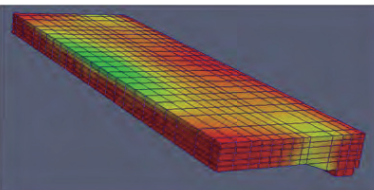
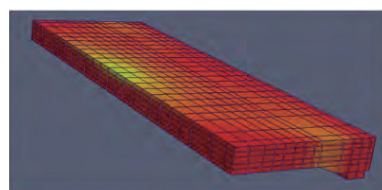
② 3.37 million cycle

③ 5.42 million cycle

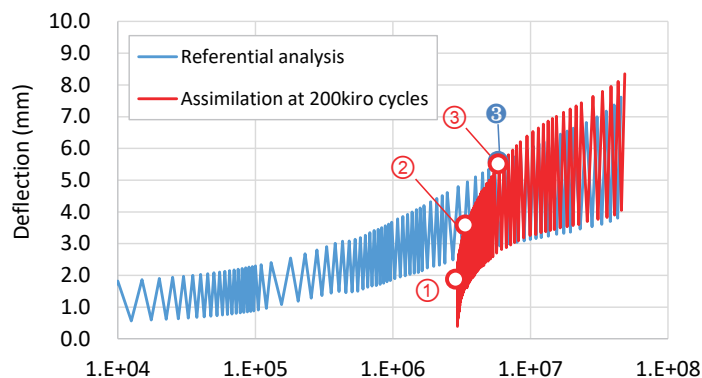
(a) Lower face



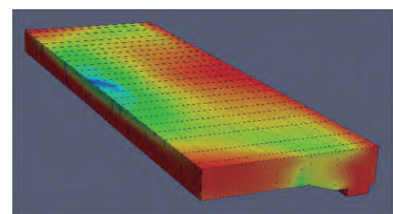
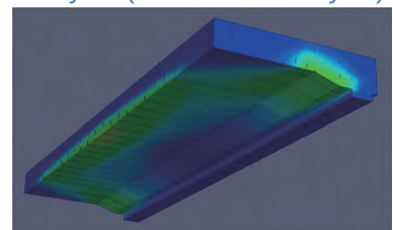
(b) Upper face



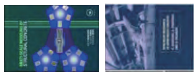
③ 5.42million cycle (Referential analysis)



(c) Center deflection

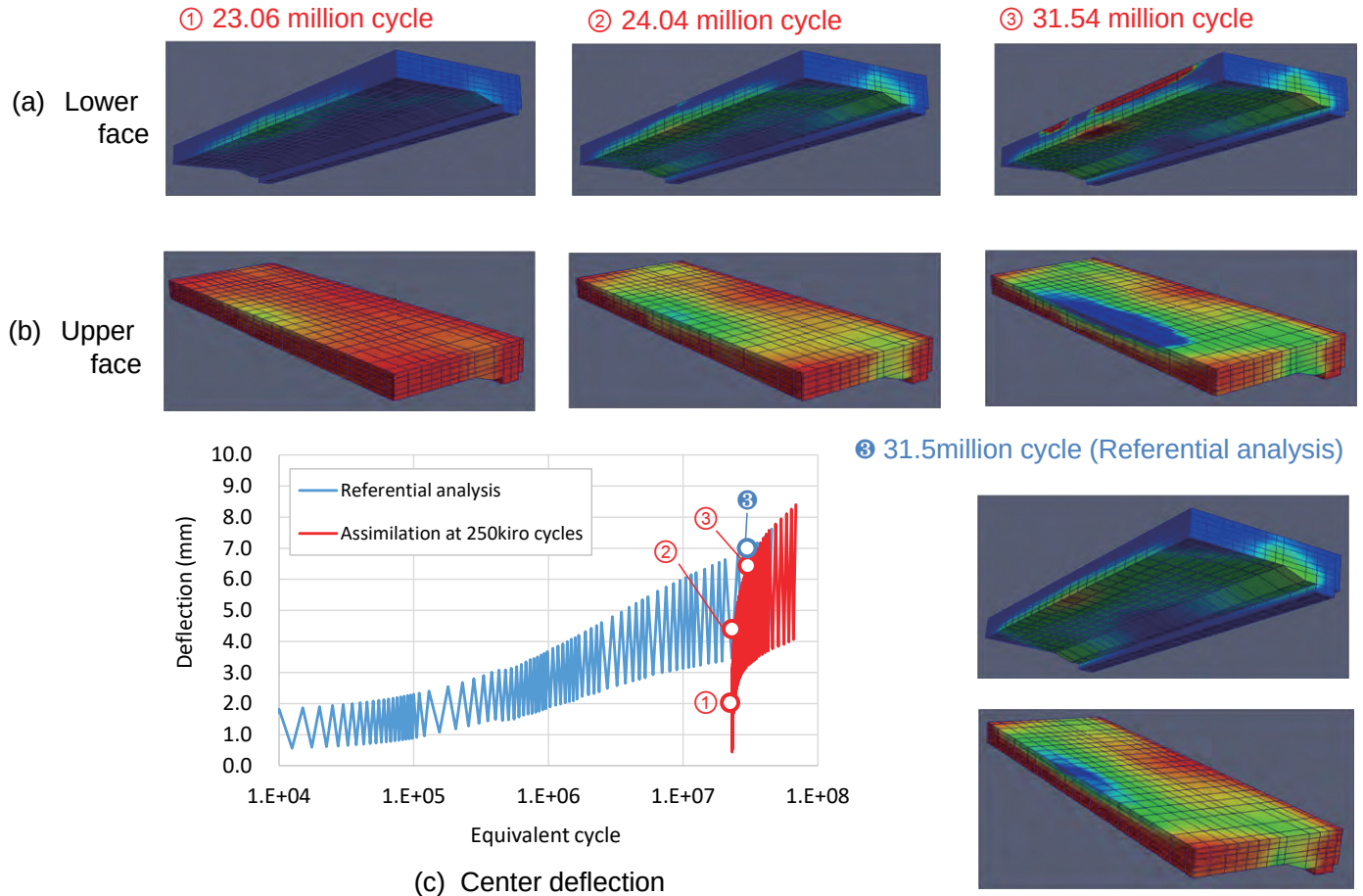


Tanaka, Takahashi, Maekawa (2017) Journal of Advanced concrete technology



ひび割れ同化:実走行25万回(等価回数2,306万回)

15



Tanaka, Takahashi, Maekawa (2017) Journal of Advanced concrete technology

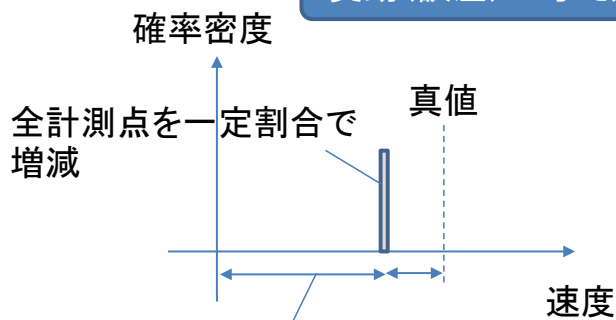


検査データに求められる精度の範囲

16

変動(誤差)の与え方

解析方法

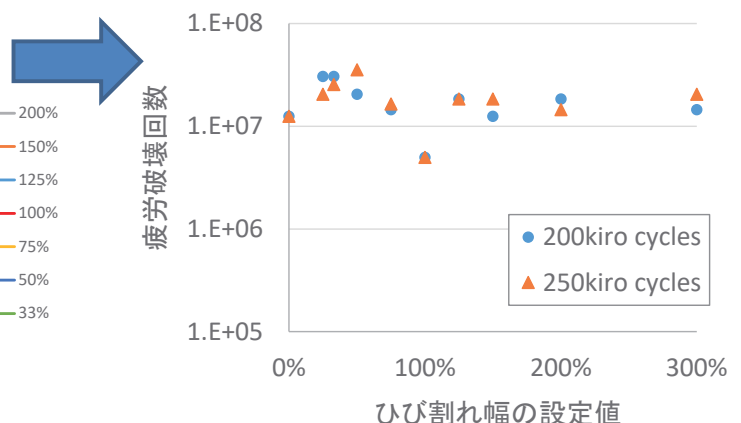
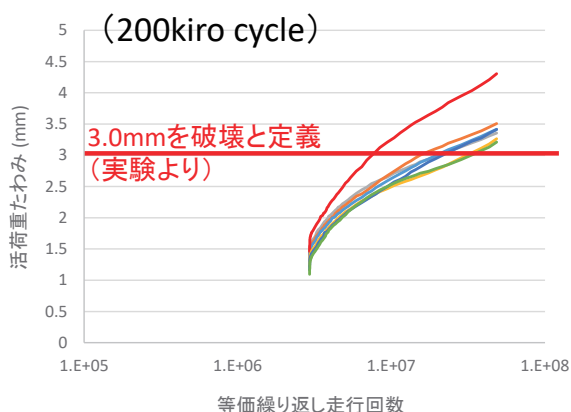


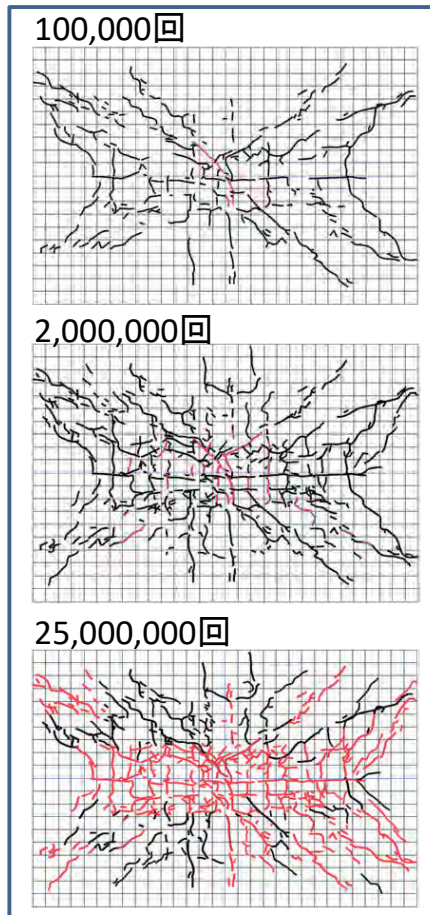
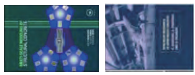
- ・ひび割れ幅に一定の係数を乗じる
- ・ひずみ分布を計算
- ・全節点を拘束し、収縮ひずみを与える
- ・節点拘束解放、載荷解析実行

ひび割れ幅(25%, 33%, 50%, 75%, 125%, 150%, 200%, 300%)

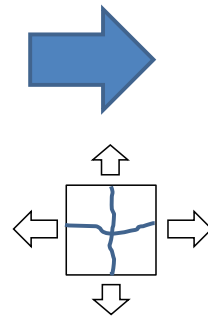
解析結果の例(活荷重たわみ)

ひび割れ幅の誤差と破壊回数の関係

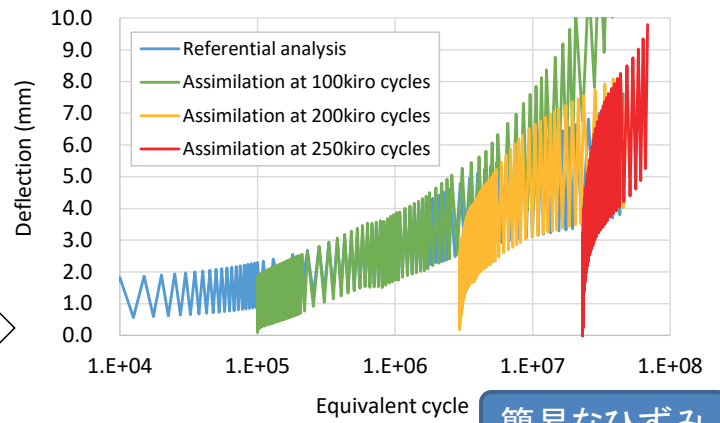
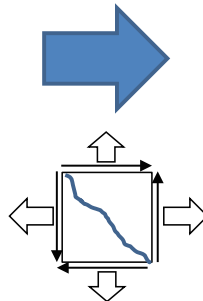




X,Y 引張
ひずみのみ

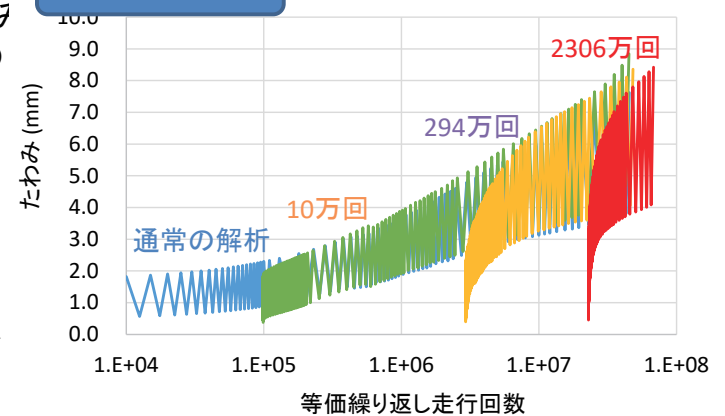


せん断ひずみ
(ひび割れの
方向)も考慮



簡易なひずみ

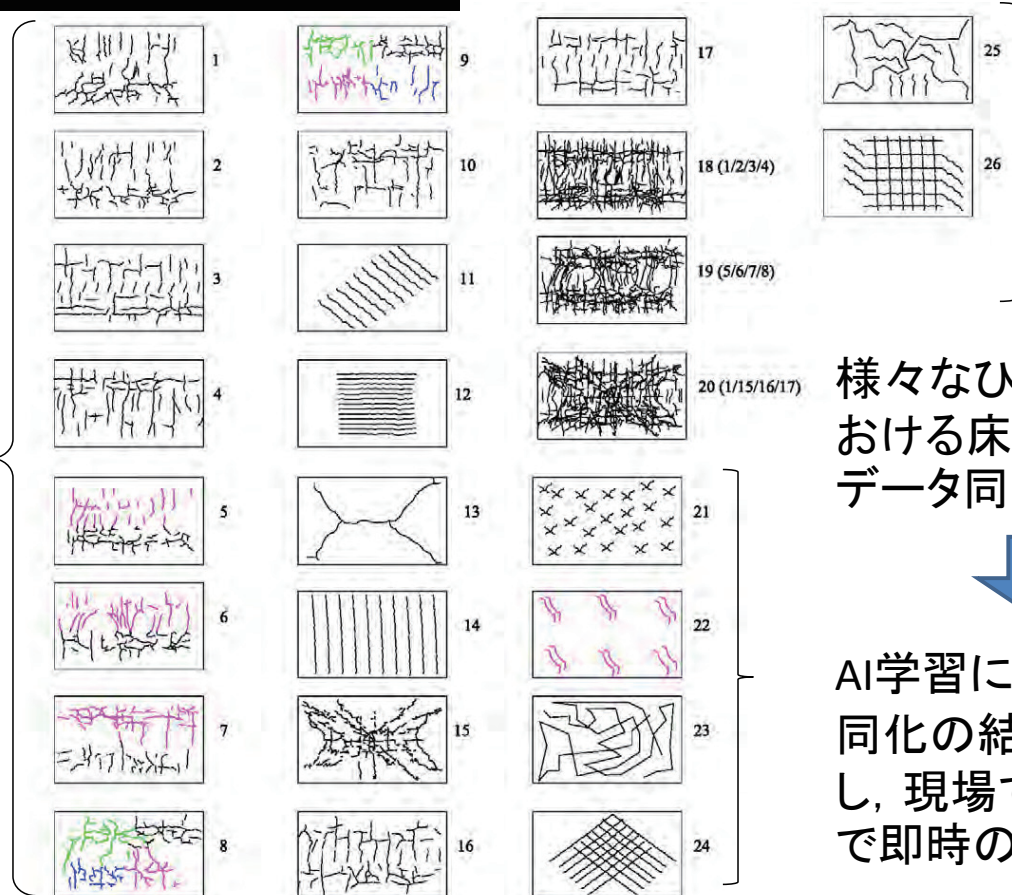
厳密なひずみ



床版余寿命評価のAI活用

試行的に作成したひび割れ図

高速道路の床版ひび割れ図(例)

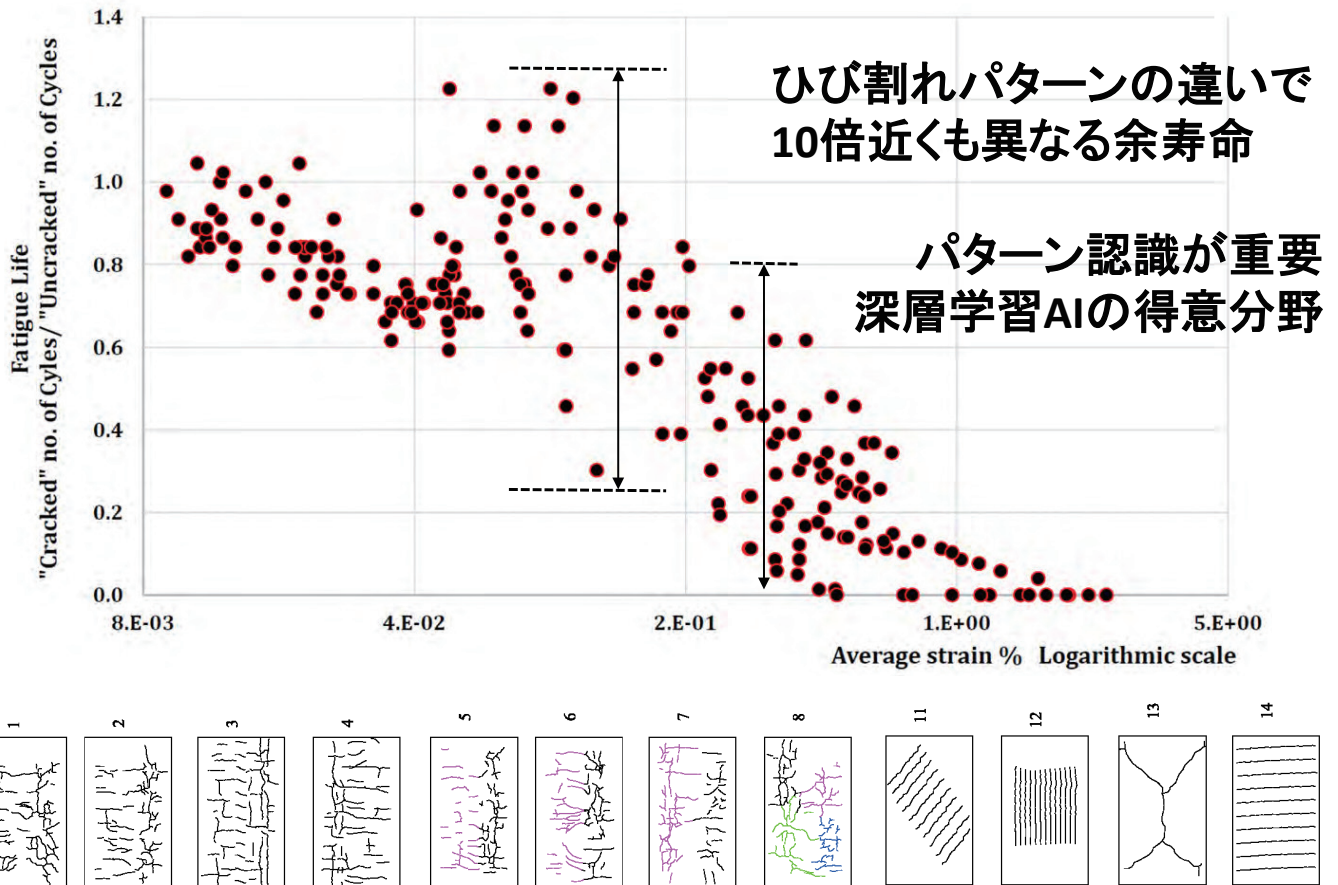


人工的に作った
パターンも教師
データに

様々なひび割れ状況に
おける床版の余寿命を、
データ同化で計算



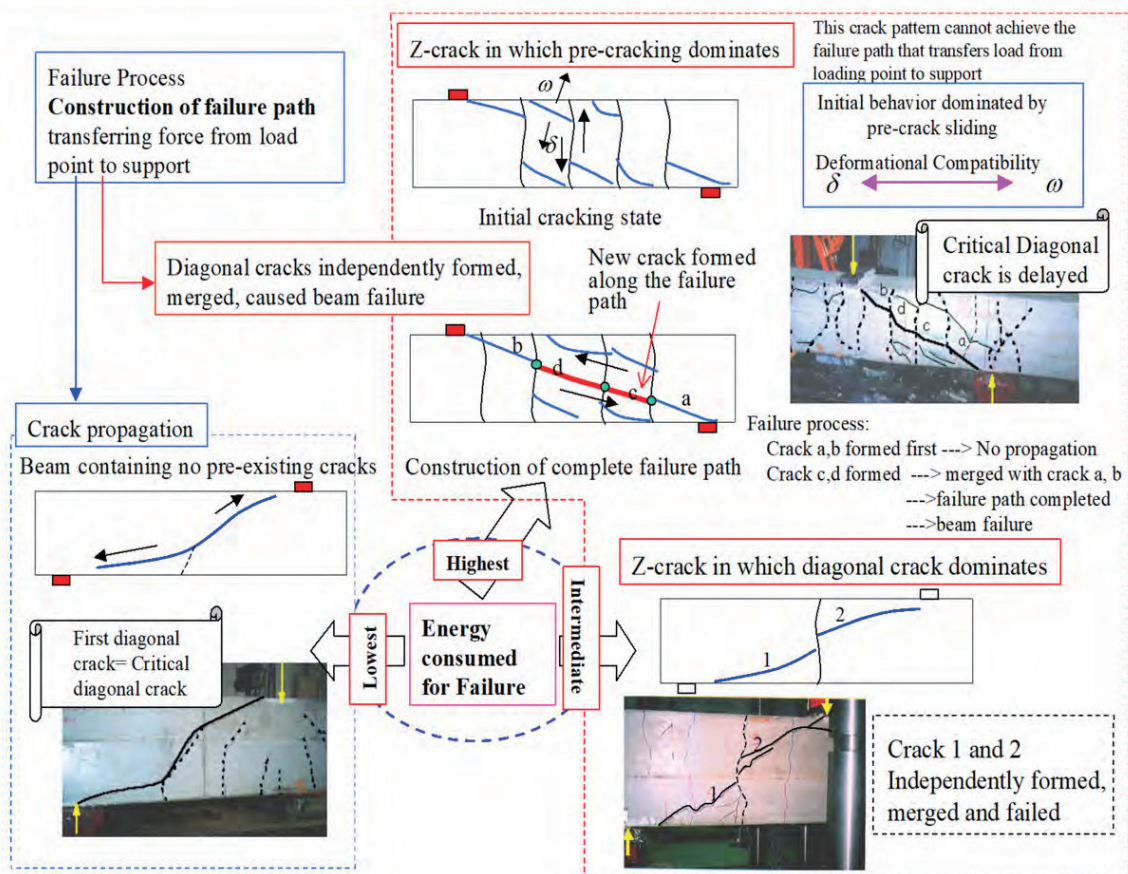
AI学習により、データ
同化の結果を総合化し、
現場では計算無し
で即時の余寿命診断



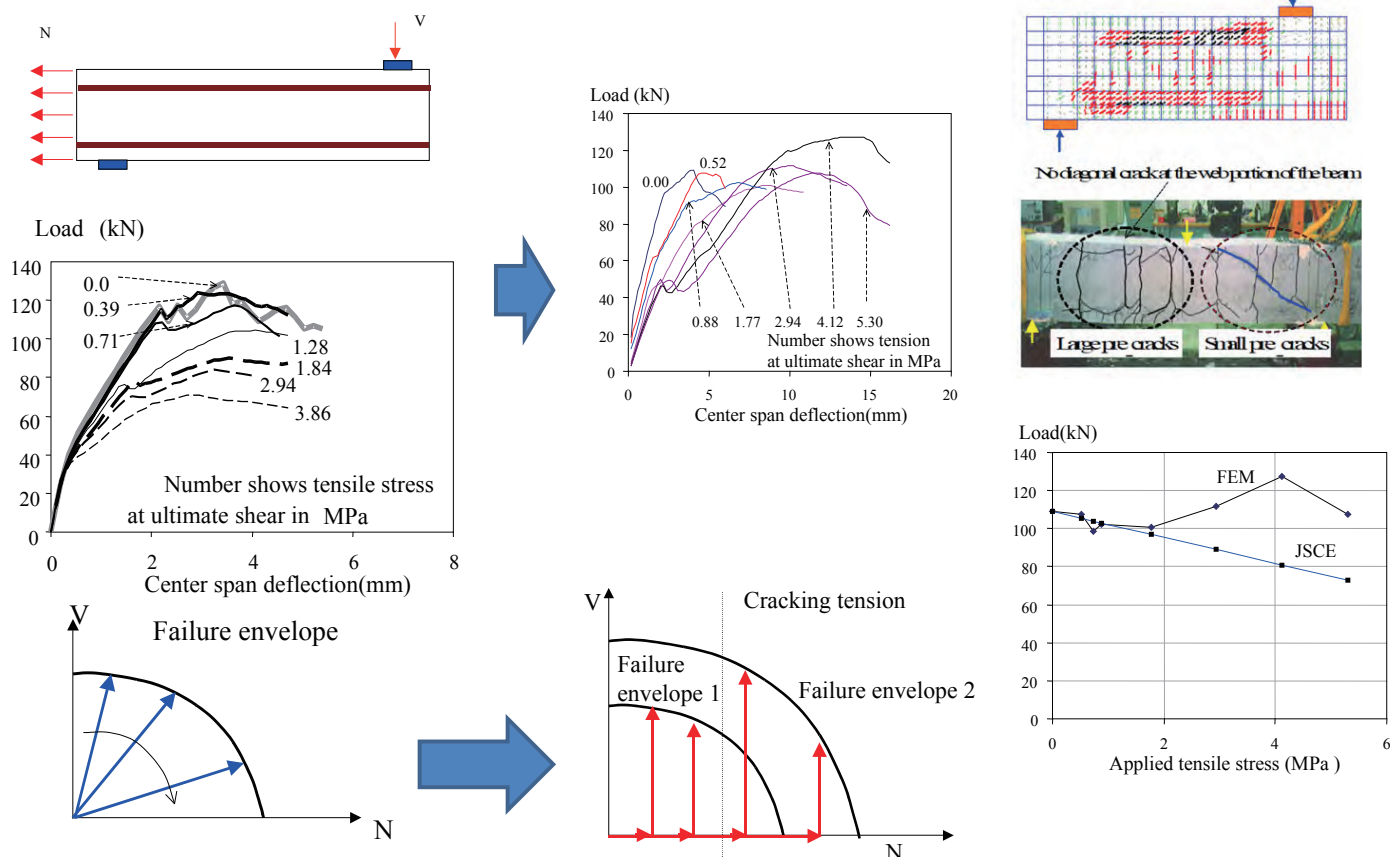
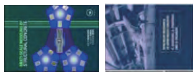
非直交ひび割れ群の相互作用

Maekawa et al. (2003) Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete

20



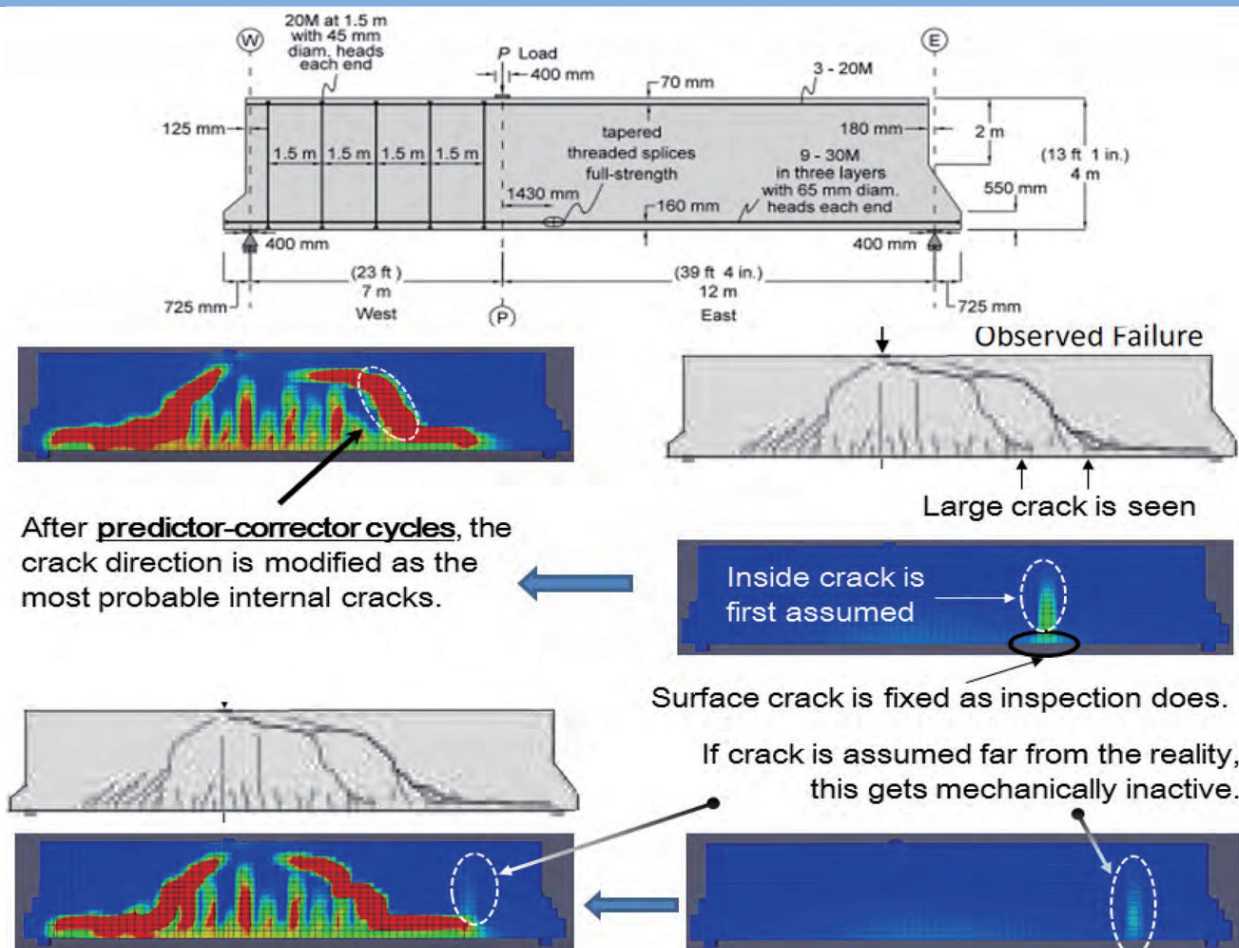
非直交ひび割れ群は、相互のひび割れ進展に相互に影響を及ぼす。

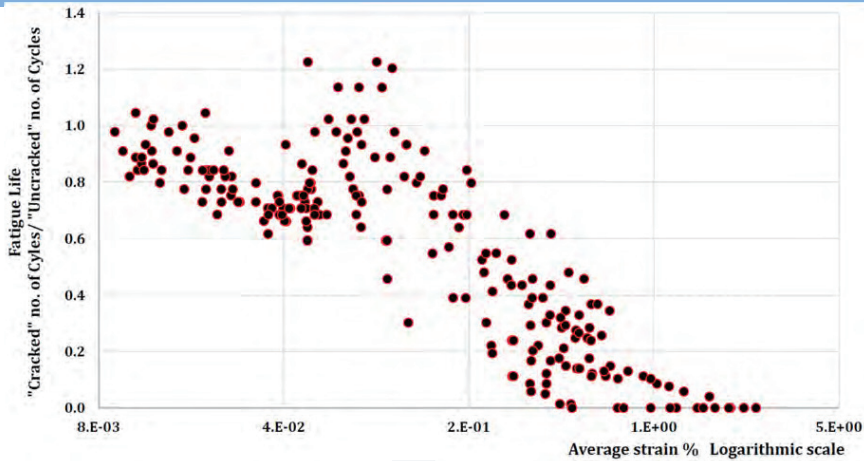
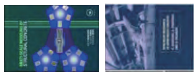


非直交ひび割れ群は、相互のひび割れ進展に相互に影響を及ぼす。

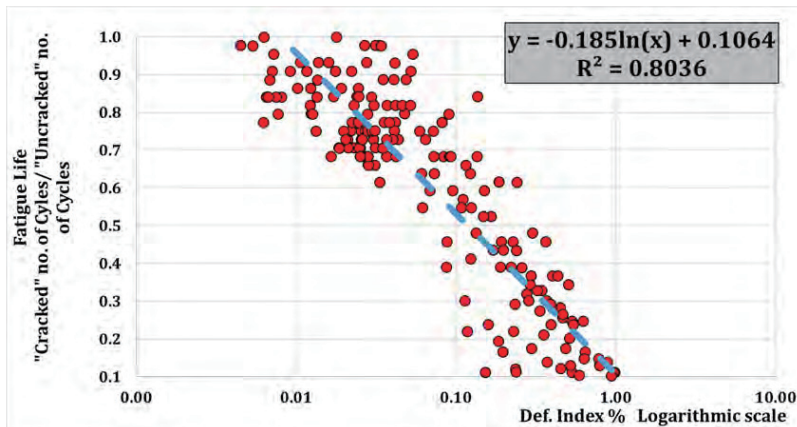


目視情報から面外せん断の位置推定の過程例





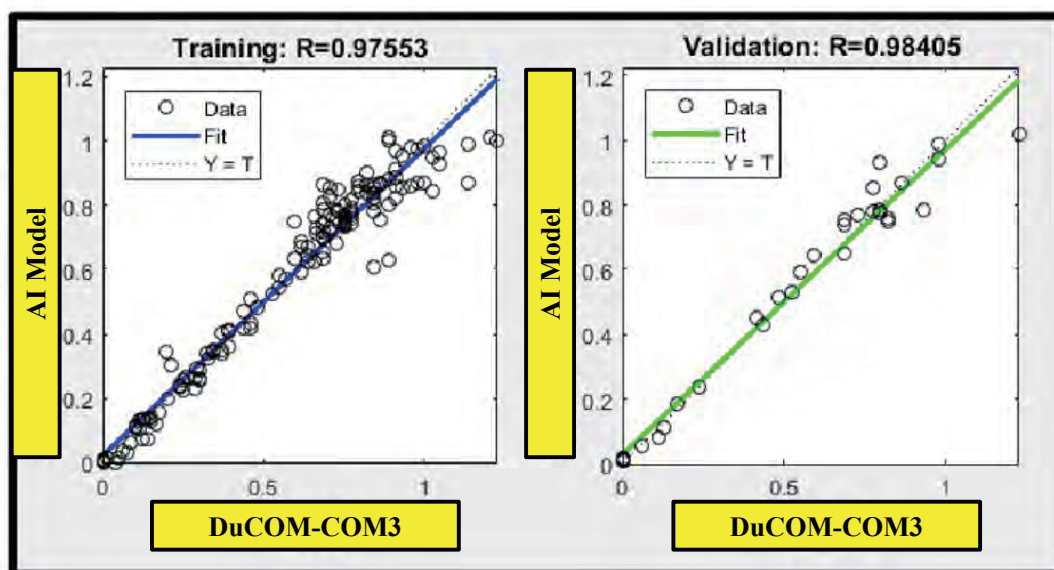
How about prediction by AI?



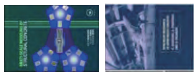
❖ ニューラルネットワークモデル: Eissa and Tanaka 2017

訓練データ
70 %のデータを使用

残りのデータに対する
適合性

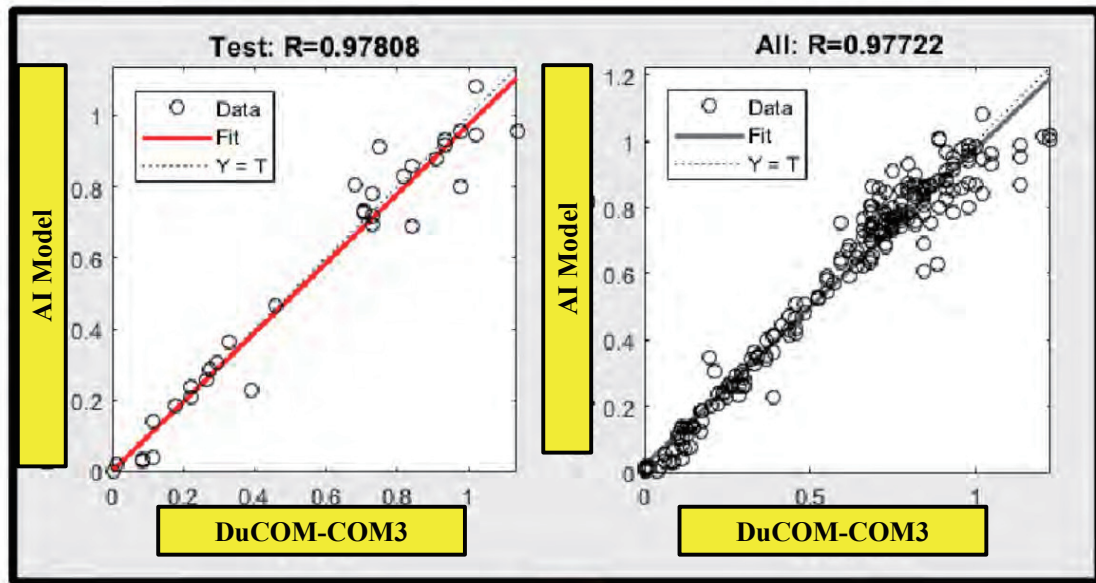


今のところ、力学指標と比較して、適合性が高い



全体の15%のデータでトレーニング

全てのデータで検証



今のところ、力学指標と比較して、適合性が高い



AI活用したRC床版の簡便自動余寿命予測

26



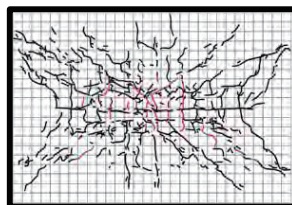
ドローンによる点検
AI技術（深層学習）を活用した画像からのひび割れ図の自動作成



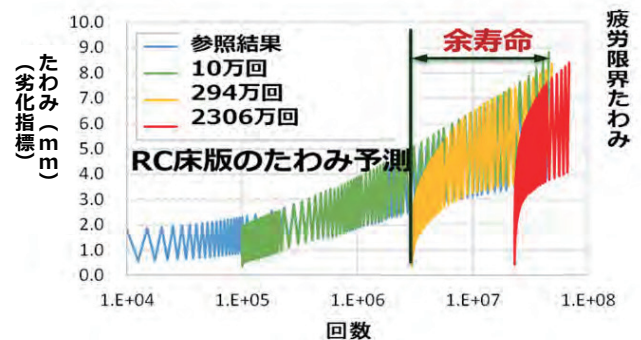
ひび割れ画像



3次元電磁波レーダー
(床版の内部状態)



ひび割れ状態図

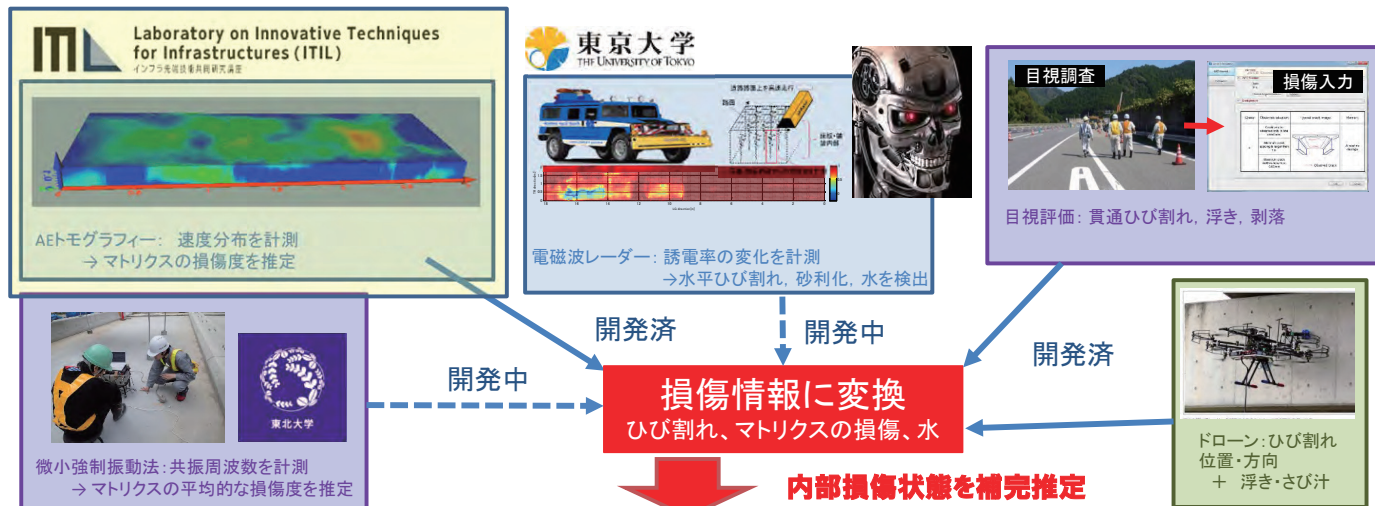


数多く教師データを作成, AI (深層学習) を適用し, 余寿命予測の自動化 (理研AIPとの連携)

マルチスケール解析

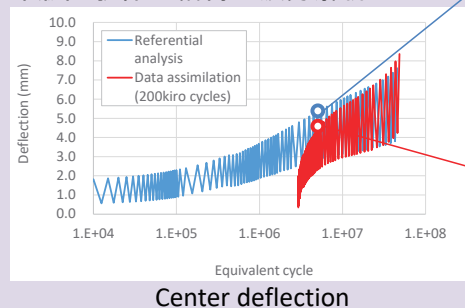
愚者は経験に学び、賢者は歴史に学ぶ。そして聖人は経験から悟る
AI, training data engineers, science

データ同化は過去の経験と歴史の両者から学ぶ。そして土木技術者は改めて経験から悟る。

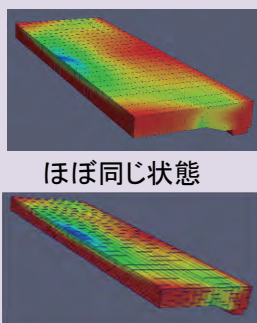
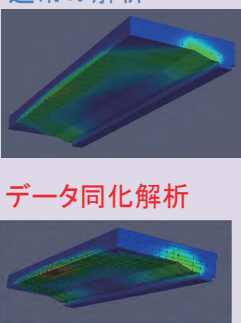


マルチスケール統合解析によるデータ同化

床版試験体の輪荷重疲労解析



通常の解析



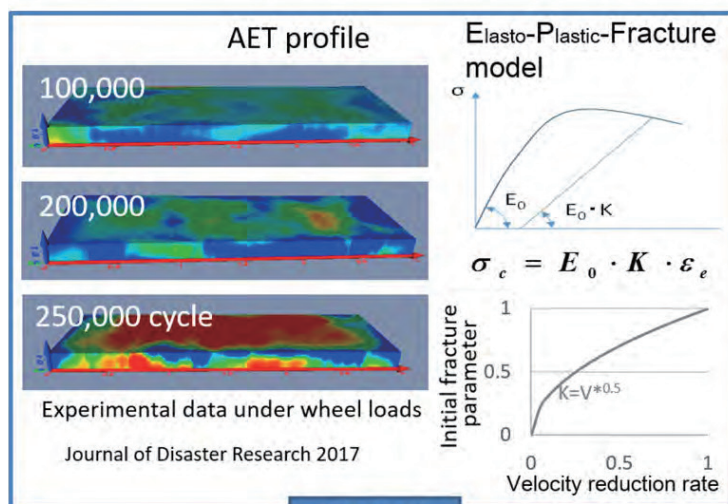
どこから始めても余寿命が予測可能に

データ同化

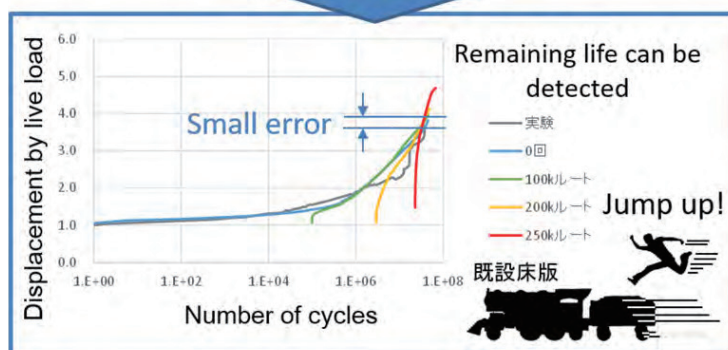
既設床版



AE トモグラフィー(塩谷)から内部損傷・ひび割れ推定



checked by fatigue test

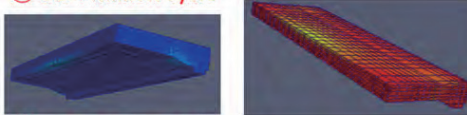


Remaining life can be detected

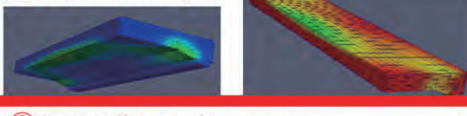
既設床版



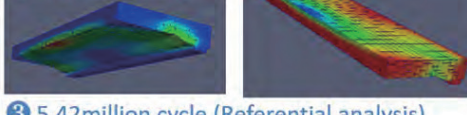
① 1.94 million cycle



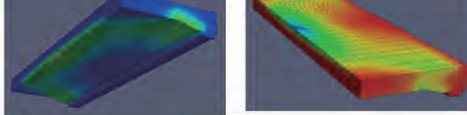
② 3.37 million cycle



③ 5.42 million cycle

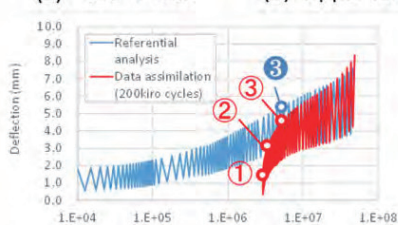


③ 5.42million cycle (Referential analysis)

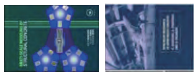


(a) Lower face

(b) Upper face

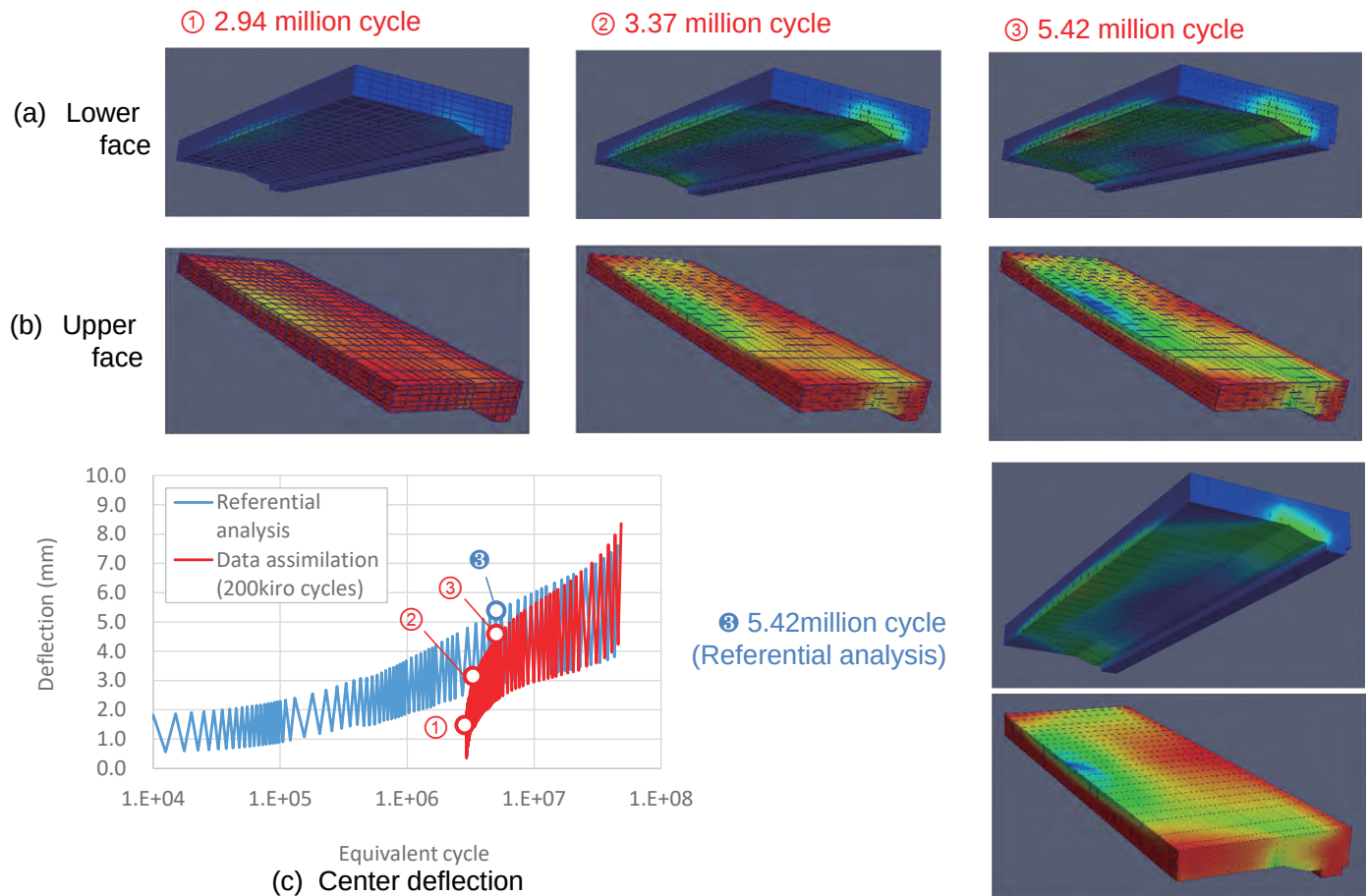


(c) Center deflection



AET同化、実走行20万回(等価回数294万回)

29

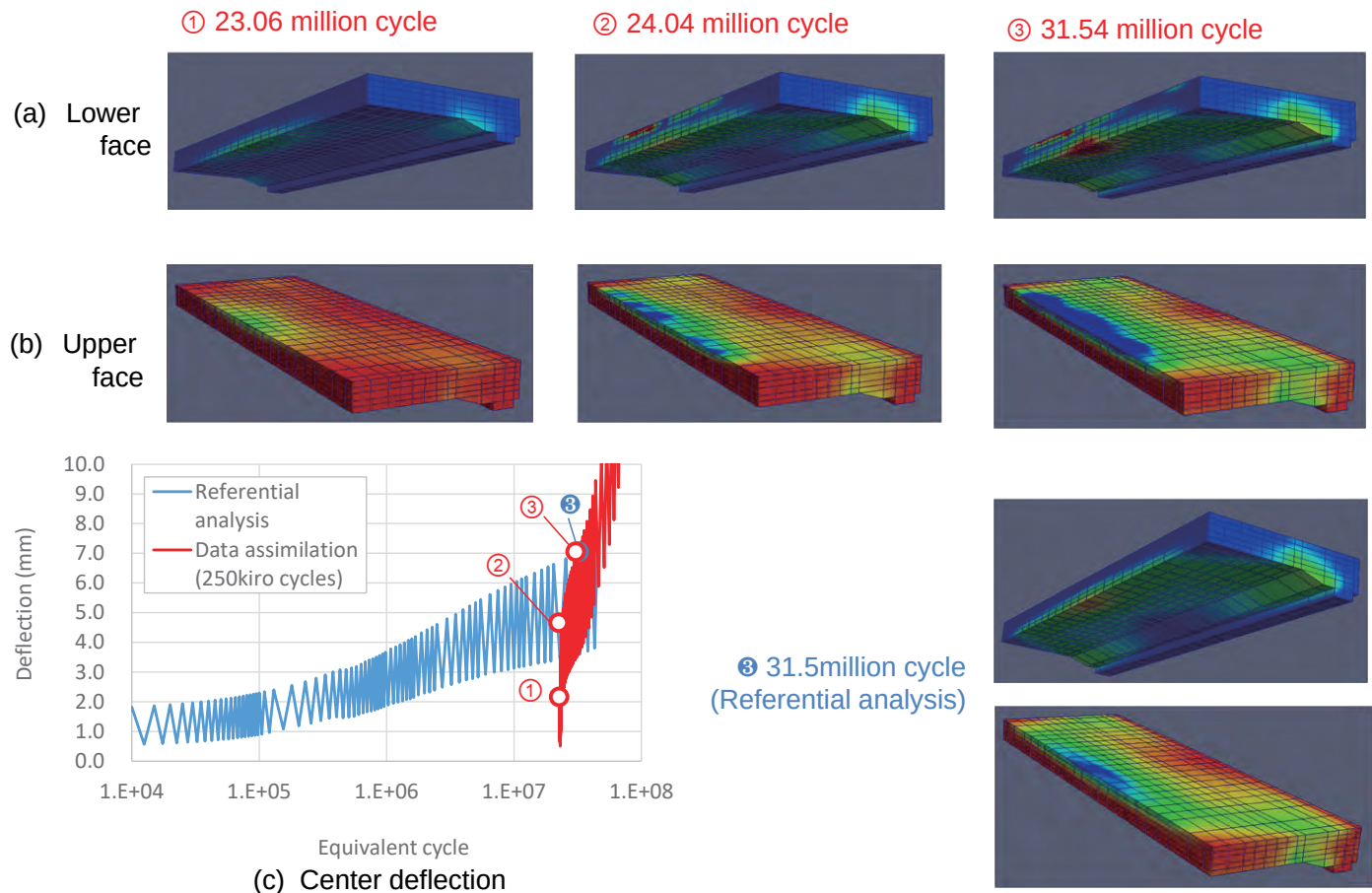


Tanaka, Takahashi, Maekawa (2017) Journal of Advanced Concrete Technology

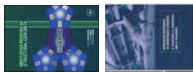


AET同化、実走行25万回(等価回数2306万回)

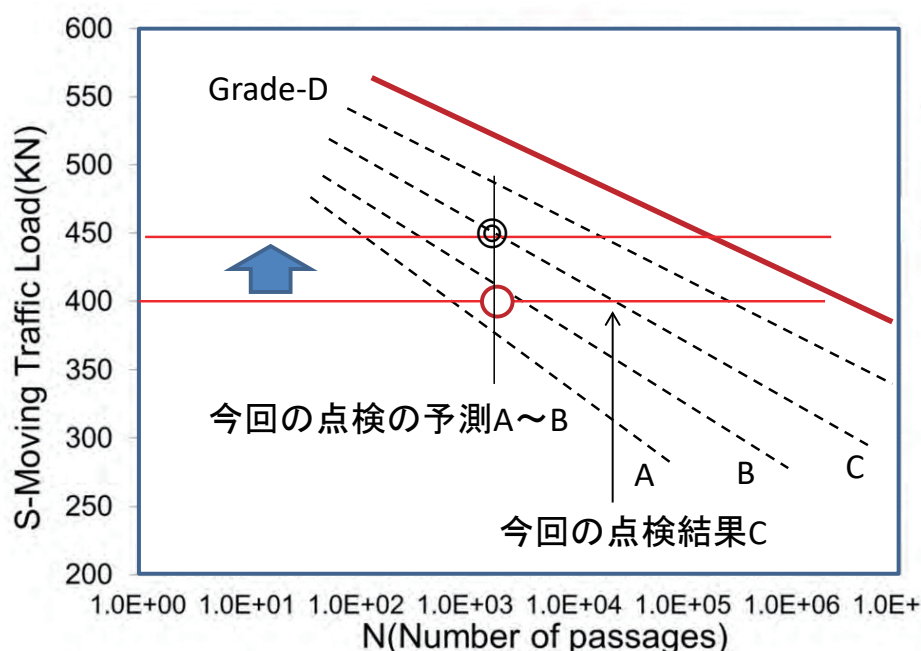
30



Tanaka, Takahashi, Maekawa (2017) Journal of Advanced Concrete Technology



—ASR,腐食進展無が期待でき、過去の点検データが使える場合—



以前の点検データからGrade-A~Bとなると予想されたが、今回の点検でgrade-Cと判定された場合、参照荷重を400から450へ上げて、余寿命推定値を修正

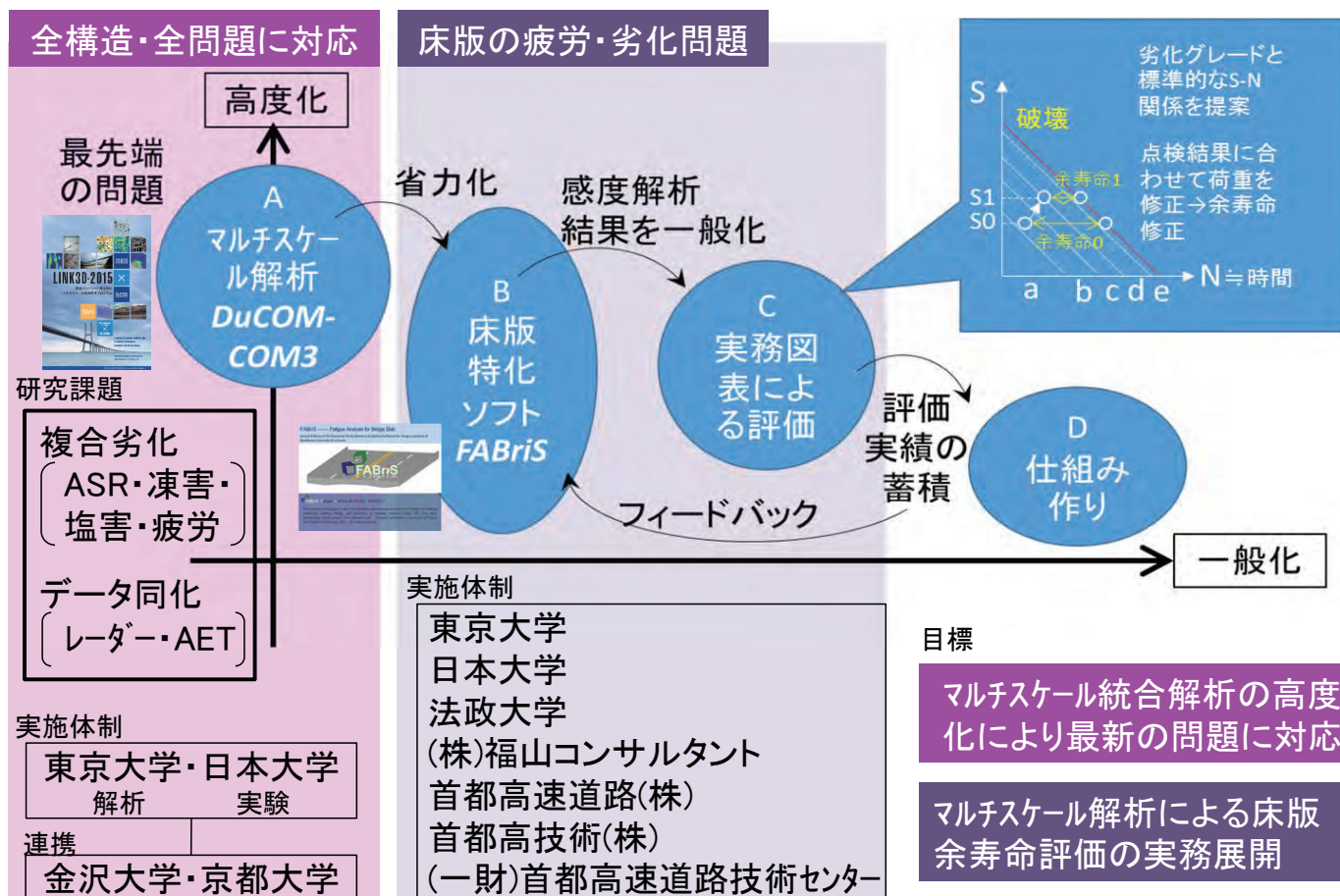
(疲労設計のフレームを考慮して縦軸を移動)

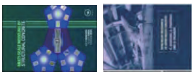
損傷マルコフ性
(上田・岡村 1980,JSCE標準示方書、平塚学位論文2015)

予測と結果の差＝施工の良否、荷重推定精度、材料特性値推定等不確定要素を次の寿命推定における入力荷重で引き受ける。

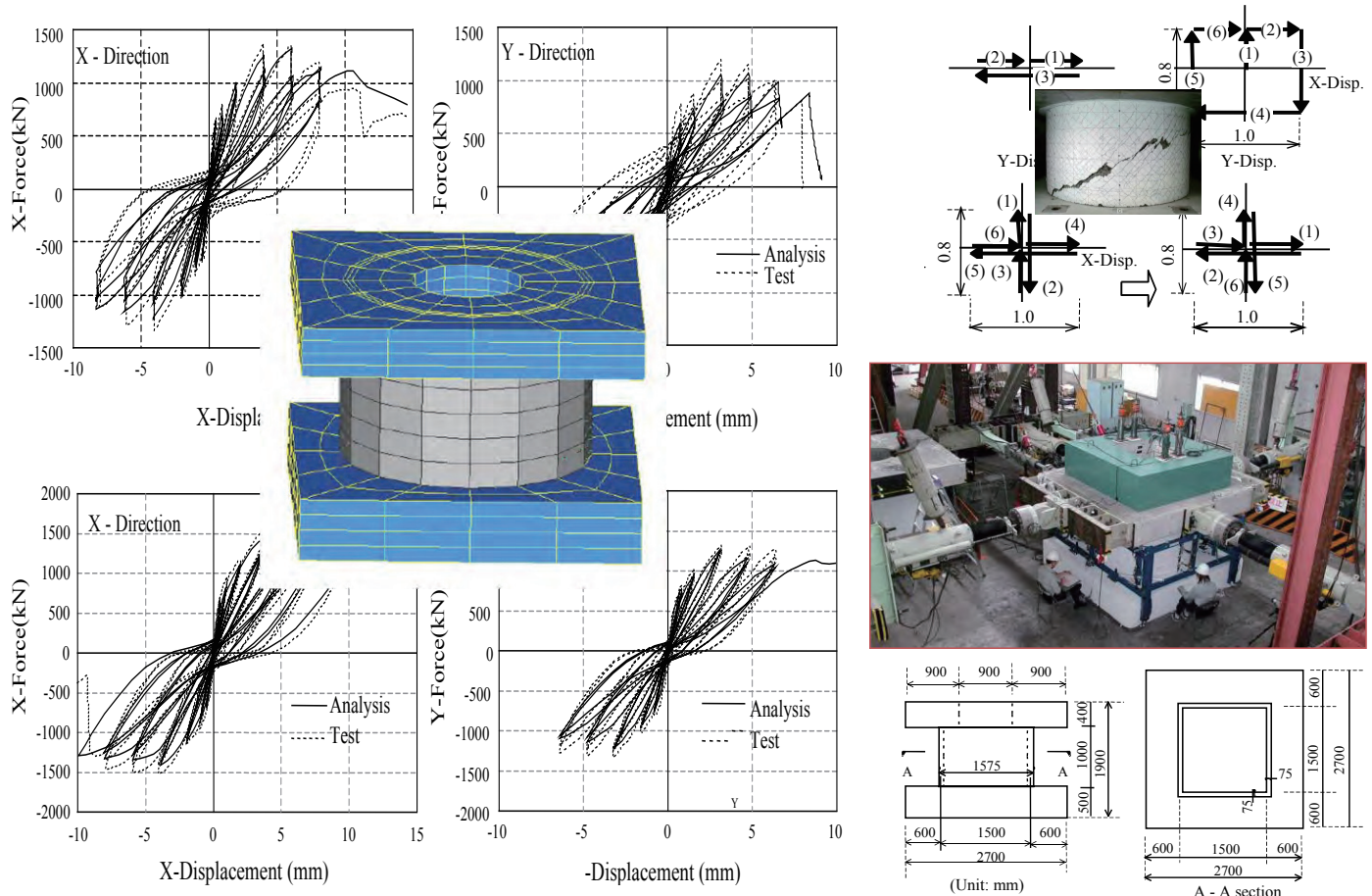


マルチスケール統合解析→橋梁用にカスタマイズ





Maekawa et al. (2003) Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete

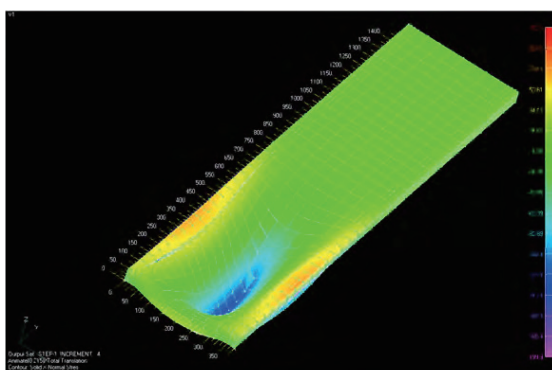


Maekawa et al. (2003) Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete

FATIGUE



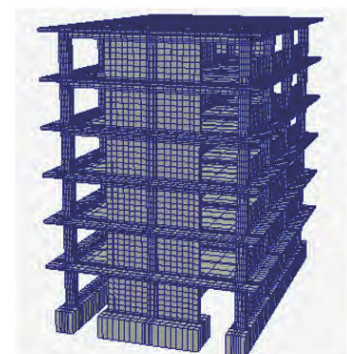
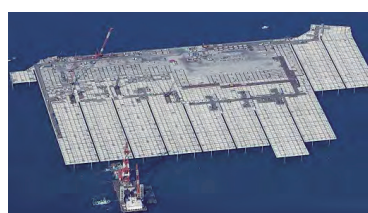
10^6 - 10^7 cycles, lower stress level
single sided, 10-50 years



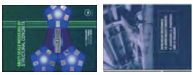
EARTHQUAKE



10-20 cycles, much high strain level (e-defense)
reversed cyclic, 10-60 sec



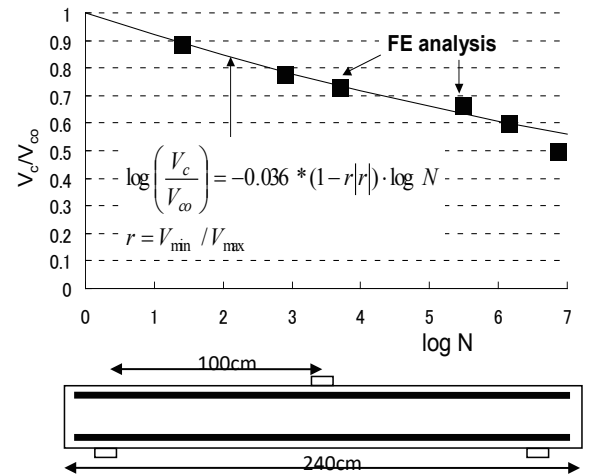
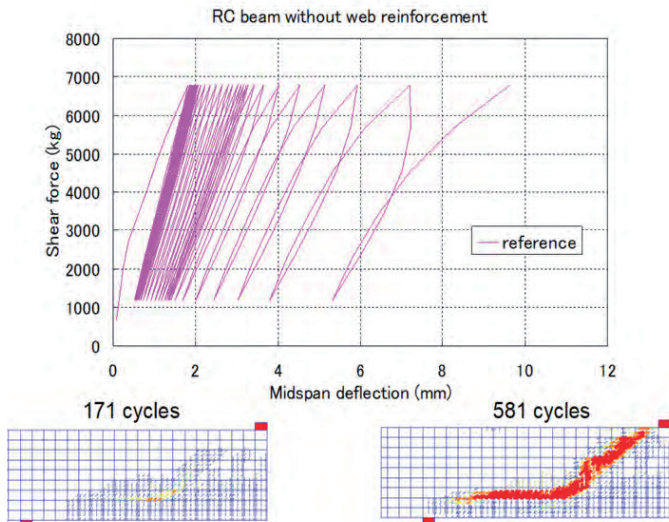
Maekawa et al. 2006,
Chijiwa et al. 2015
Journal of Advanced Concrete Tech.



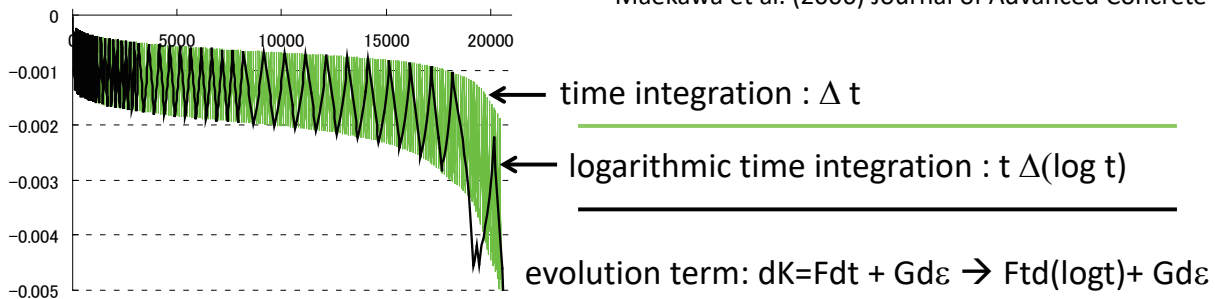
低サイクル耐震→高サイクル疲労破壊の予測

35

Maekawa et al. (2003) Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete



Maekawa et al. (2006) Journal of Advanced Concrete Technology



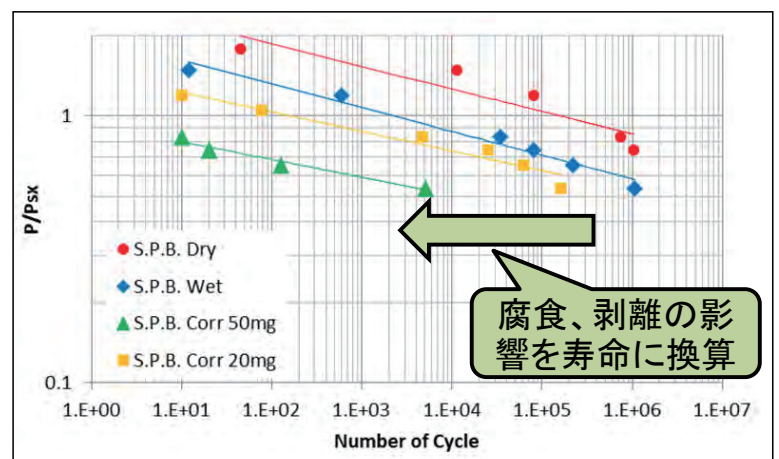
検査による剥離領域の特定→サイクル疲労破壊の評価

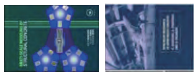
36



何時、何処で起こる？

Case	Corrosion	Condition
Dry	0%	Dry
Wet	0%	Wet
Corr 50mg	1.60%	Dry
Corr 20mg	0.64%	Dry

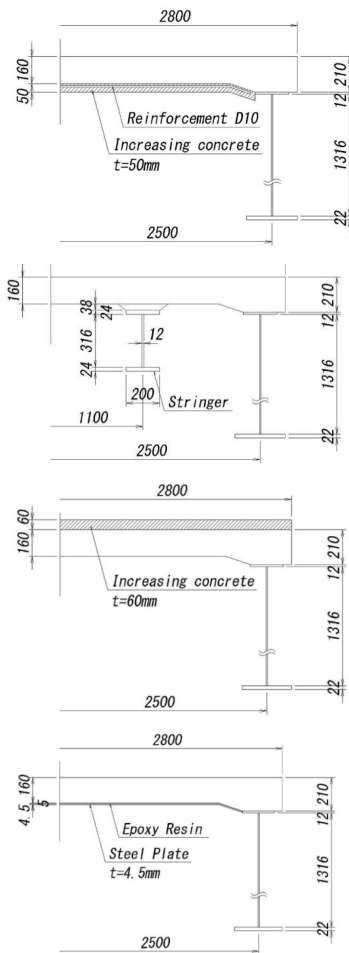




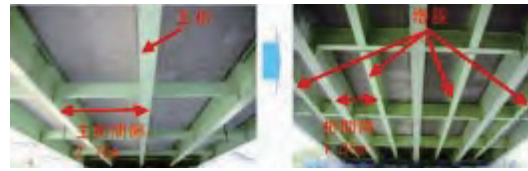
応用：補強工法の提案と実証(上面損傷部除去無)

37

平塚・前川 2017 橋梁と基礎



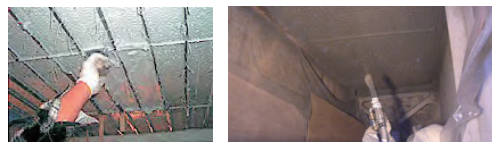
Steel plate bonded



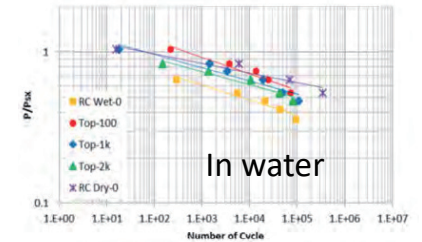
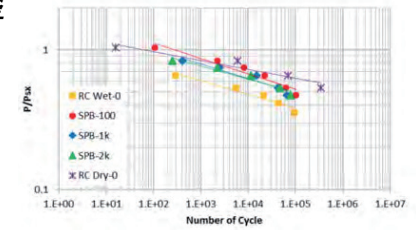
Additional beam



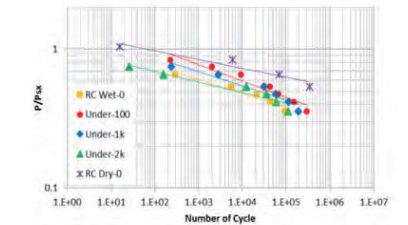
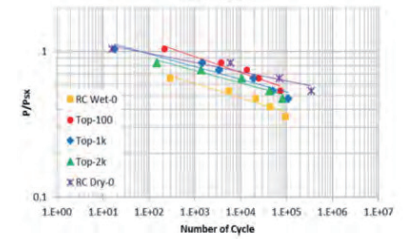
Overlaid upper face



Overlaid bottom face



In water



応用：補強工法の提案と実証(上面損傷部除去無)

38

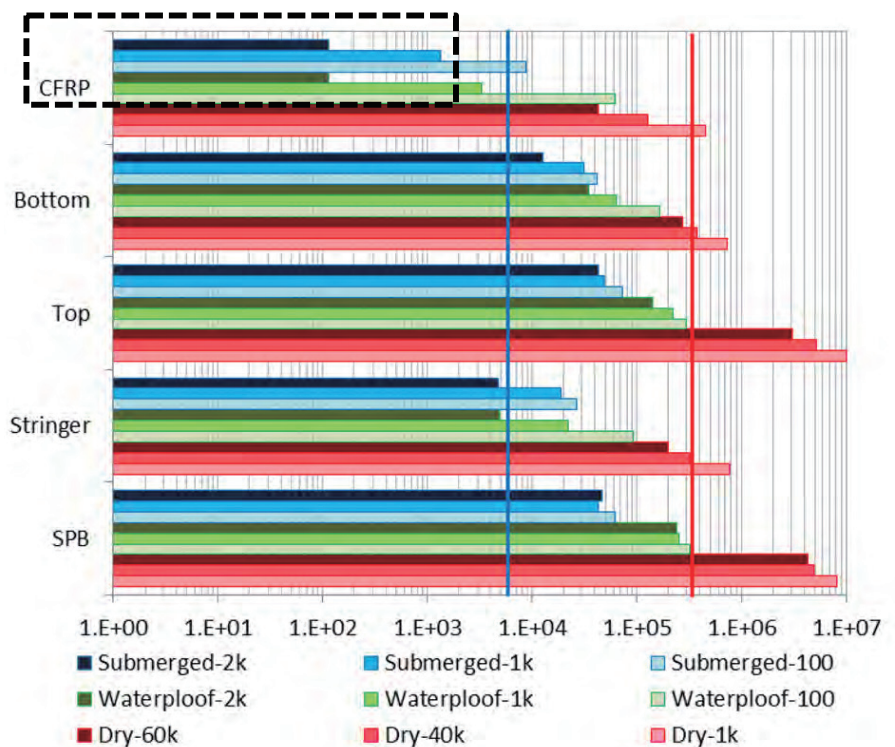
平塚・前川 2017 橋梁と基礎

比較対象 (冠水) 比較規準(乾燥)

Dry-1k	stage-b
Dry-40k	stage-b
Dry-60k	stage-b
Waterploof-100	stage-c
Waterploof-1k	stage-c
Waterploof-2k	stage-c
Submerged-100	stage-d
Submerged-1k	stage-d
Submerged-2k	stage-d

SPB: 鋼板接着工法

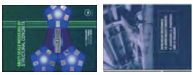
Stringer: 増桁工法



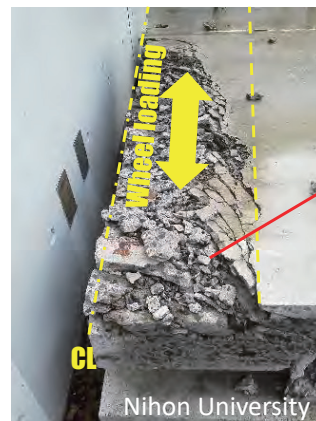
180kN(P/Psx=0.54)

平塚、前川 橋梁と基礎2017

防水対策はいずれの補強工法に対しても、早ければ早いほど効果高



Wheel loading test of RC slab specimen



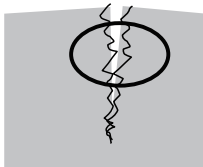
砂利化・土砂化の
進行→スラブの機
能喪失へ

前島、岩城
2014 Journal of JSCE

Sawn specimen
after loading test



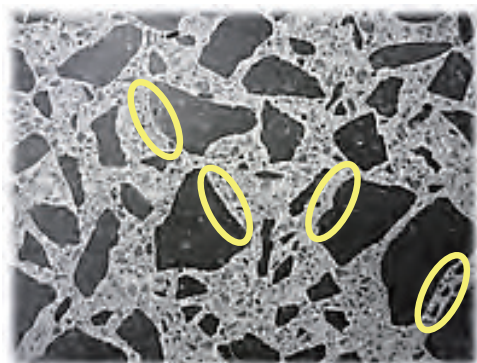
ひび割れ開閉→水圧変動→空隙内圧変動→砂利化



ひび割れ間の水圧変動(閉合時に上昇)



"cannot see the forest for the trees"
(focus on the details, and miss the main point: idiom)



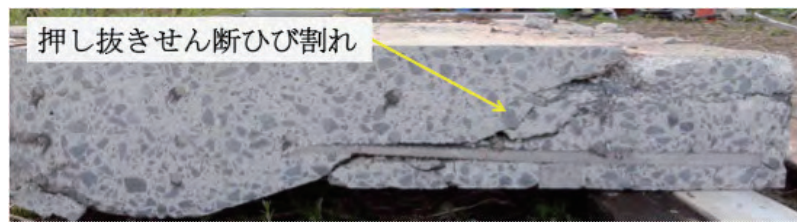
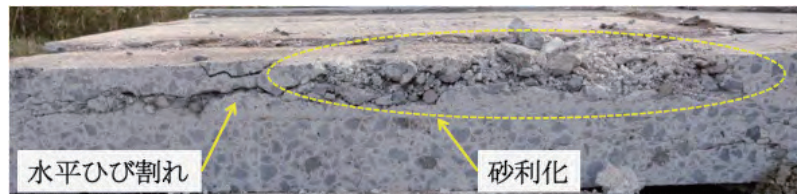
Capillary空隙内の水圧変動に伝達
骨材の結合機能が損傷→砂利化



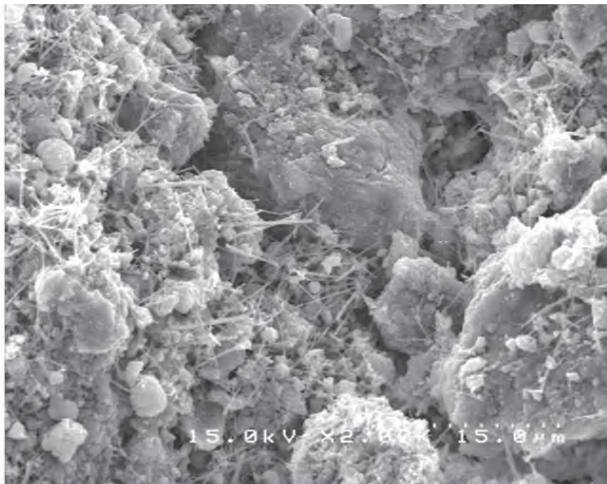
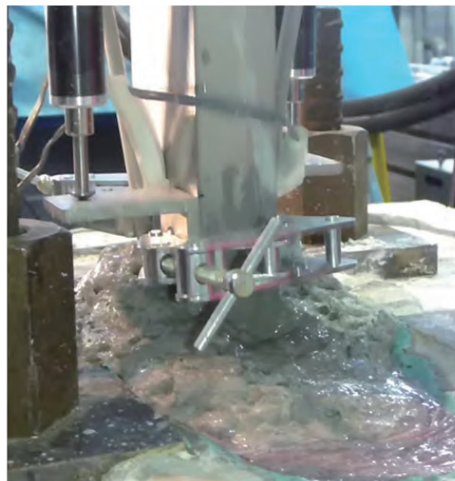
剛性・強度低下→
構造せん断力の負担機構の
変化、物質移動速度の変化
が連動



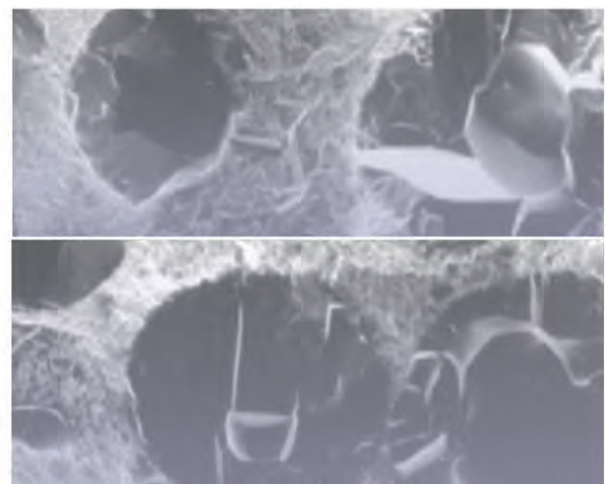
"Engineers shall see both the forest and the trees"



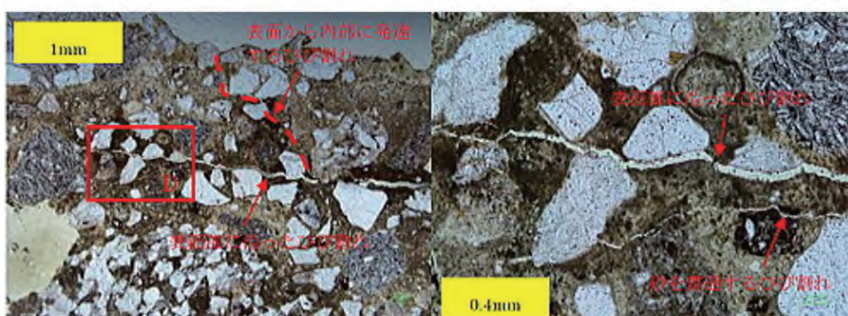
The aggregation takes place inside footing! by 千々和 (ACT 2016)



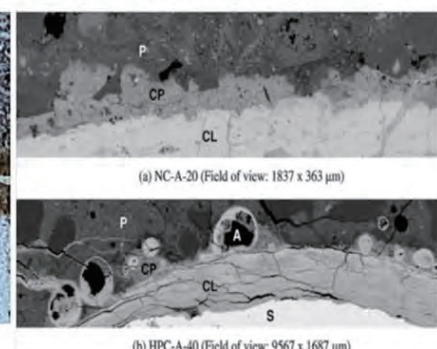
ナノスケール, CSH and Etringite

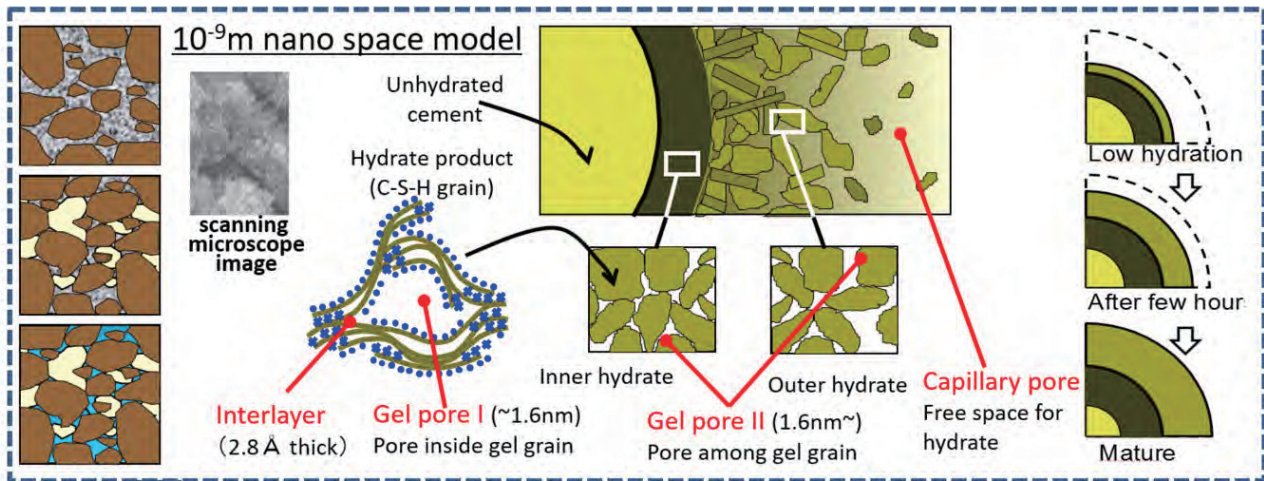


マイクロスケー, 微細気泡と氷の結晶
Cover-sheet; Journal of Advanced Concrete Tech.



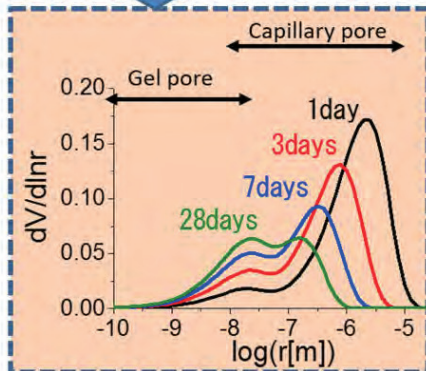
ミリメートルスケール, ASR-corrosion-gels



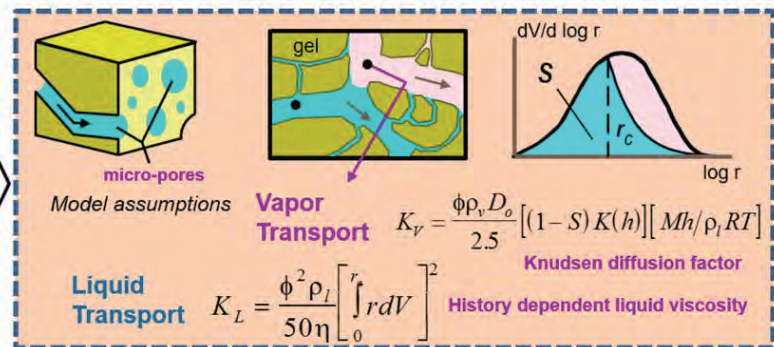


Integration

Maekawa, Ishida, Kishi (2008) Multi-scale Modeling of Structural Concrete

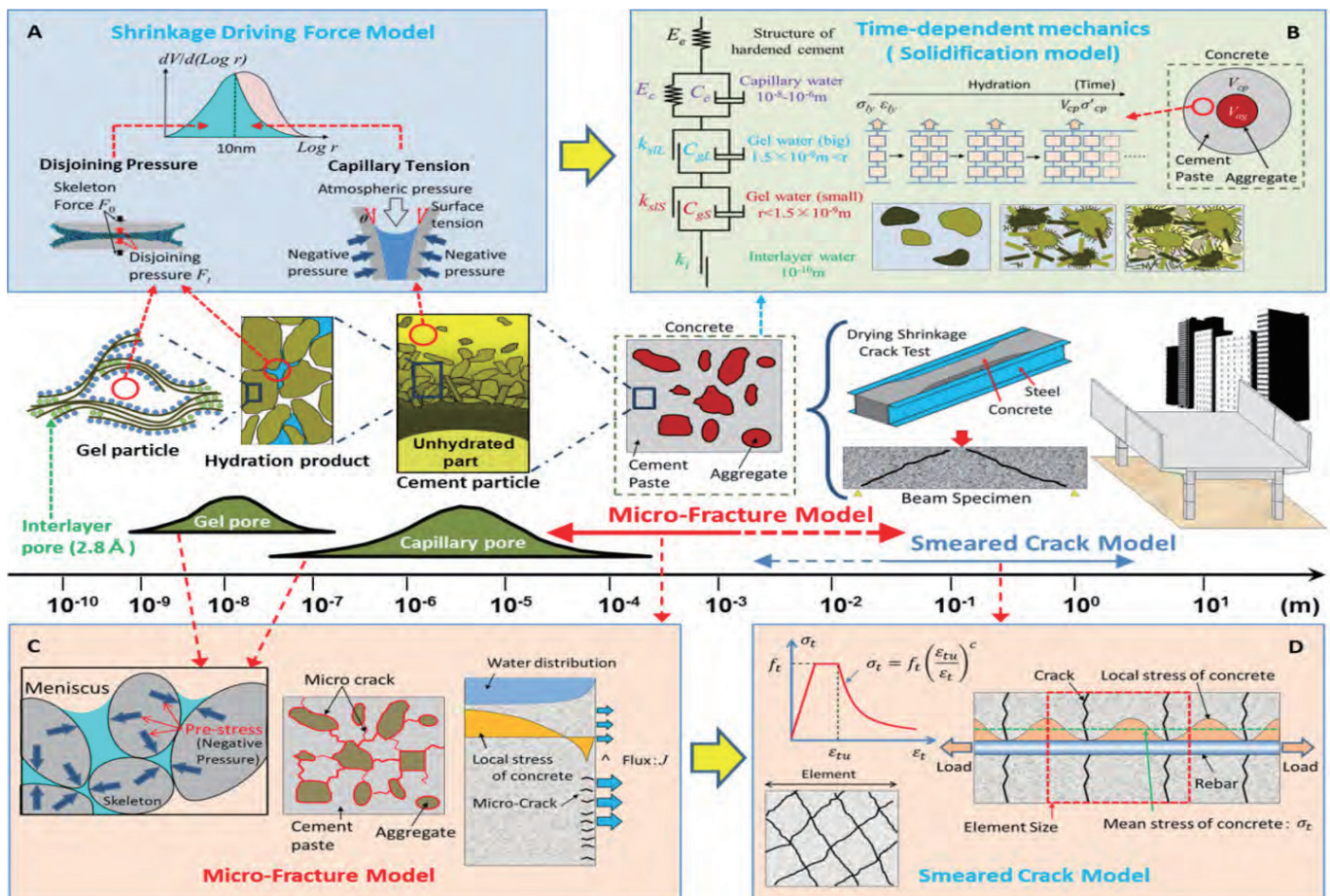


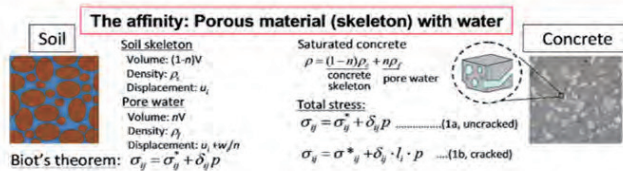
10⁻⁹m → 10⁻⁶m space structures



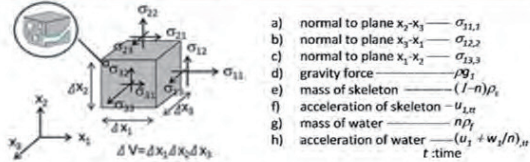
10⁻⁹m → 10⁻⁶m pore moisture state and motion

微細空隙を有する複合材料と構造のプラットフォーム





Dynamic equilibrium equations for a saturated skeleton



(1) Equilibrium in direction x_1

$$\sigma_{11,1} + \sigma_{12,2} + \sigma_{13,3} + \rho g_1 = (1-n)\rho_s u_{1,tt} + n\rho_f (u_1 + w_1/n)_{tt}$$

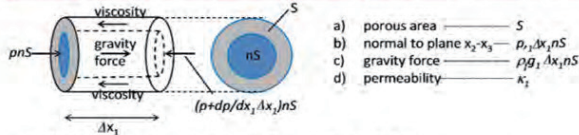
$$\sigma_{11,1} + \sigma_{12,2} + \sigma_{13,3} + \rho g_1 = \rho u_{1,tt} + \rho_f w_{1,tt}$$

$$\sigma_{11,1} + \rho g_1 = \rho u_{1,tt} + \rho_f w_{1,tt}$$

(2) Generalization for each coordinate axis

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho u_{i,tt} + \rho_f w_{i,tt}$$

Dynamic equilibrium equations for fluid materials in the skeleton



(1) Viscosity — resistant force exerted by contact with skeleton

From simple assumption; without any acceleration (static movement)

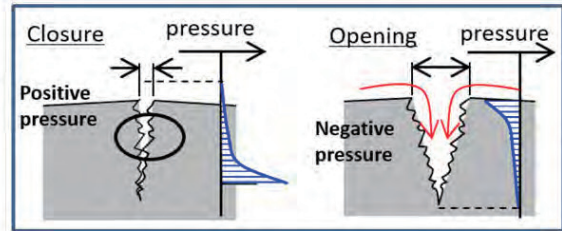
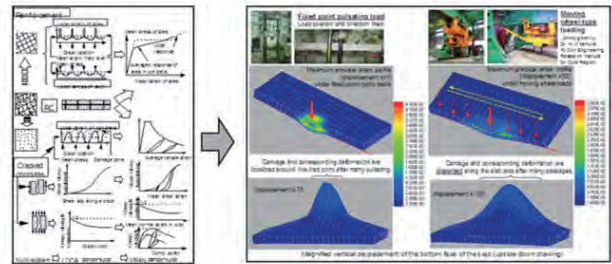
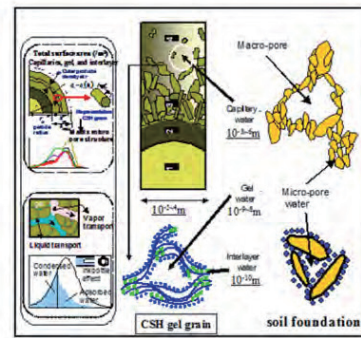
$$\rho_f \Delta x_1 / k_1 = 1/\kappa \cdot w_{1,1} \cdot \Delta x_1 n S$$

multiplied by " $-1/\Delta x_1 n S$ "

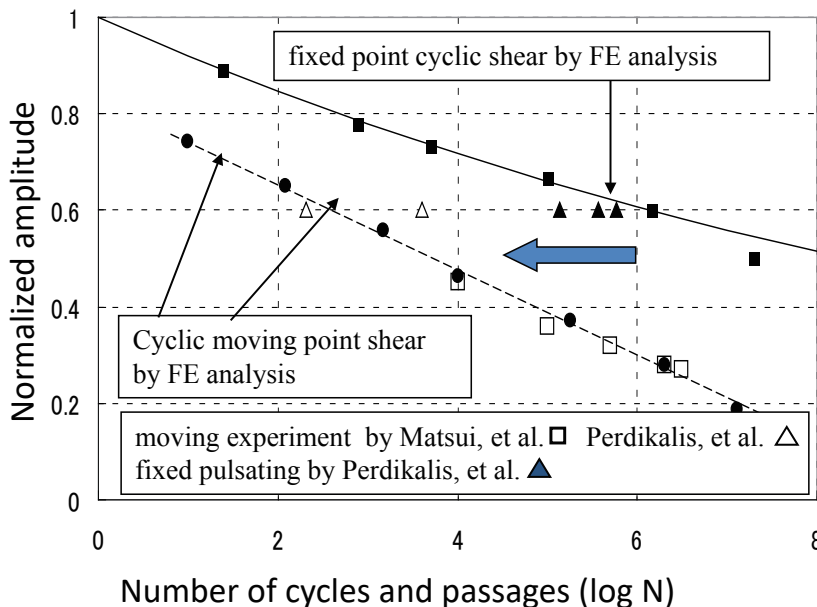
(2) Dynamic equilibrium

$$\rho_f \Delta x_1 / k_1 = 1/\kappa \cdot w_{1,1} + \rho_f (u_{1,tt} + w_{1,tt}/n)$$

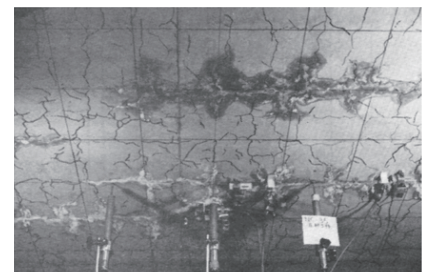
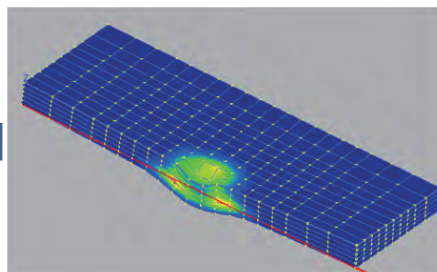
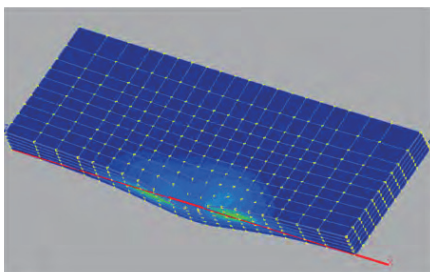
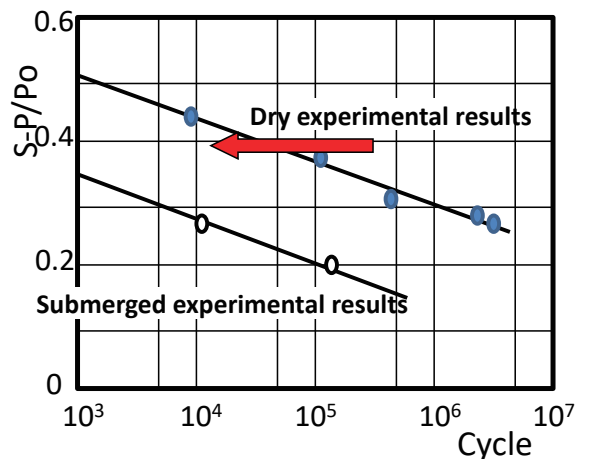
$$\rho_f = \rho_f (u_{1,tt} - g_1) + \rho_f w_{1,tt}/n + 1/\kappa \cdot w_{1,1}$$

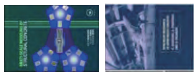


移動荷重→2~3桁寿命短縮→滞留水→さらに1~2桁



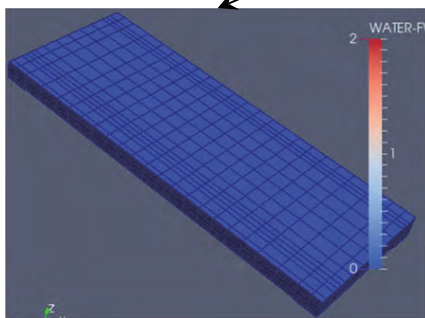
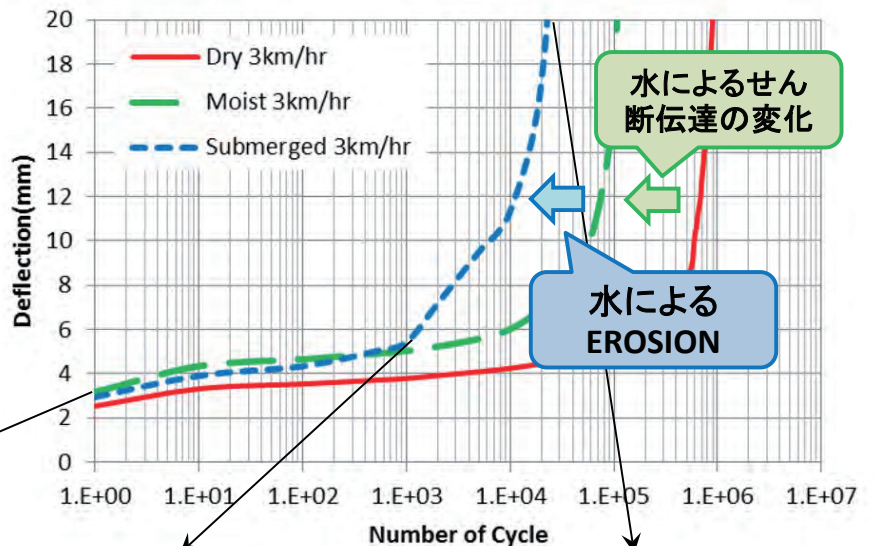
Maekawa et al. (2006) Journal of Advanced Concrete Technology



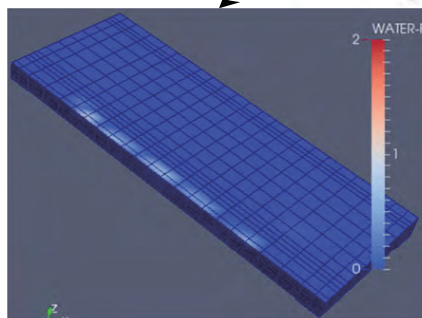


気中	交通疲労のみ
湿潤	クリープ、コンクリート破壊エネルギー低下、引張強度
路面湛水状態	さらに砂利化が付加 1/100の構造寿命劣化

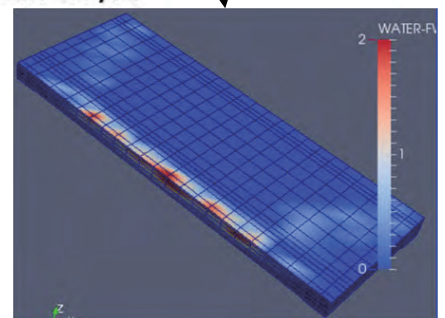
移動荷重＝違法過積載レベル



走行N=1



走行N=1,000



走行N=30,000



高速での床版上面・舗装の状態評価技術の必要性



長さ15m以上の道路橋の総数：約16万橋

車載型地中探査レーダーの床版・舗装内部探査への応用



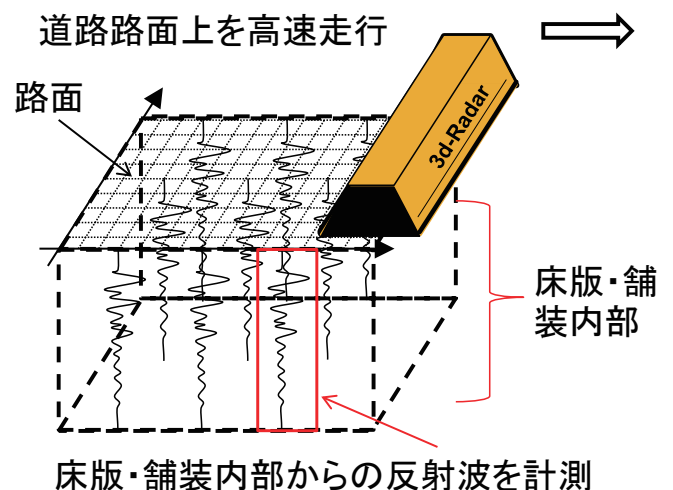
時速80kmの高速で地中からの反射波の計測が可能。

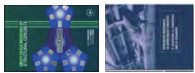


舗装を剥がした路面(床版)

人力ですべての箇所を叩いて、打音の異常を確認(打音試験)

従来の橋梁の床版の点検方法(要車線規制) → 膨大な時間とコスト

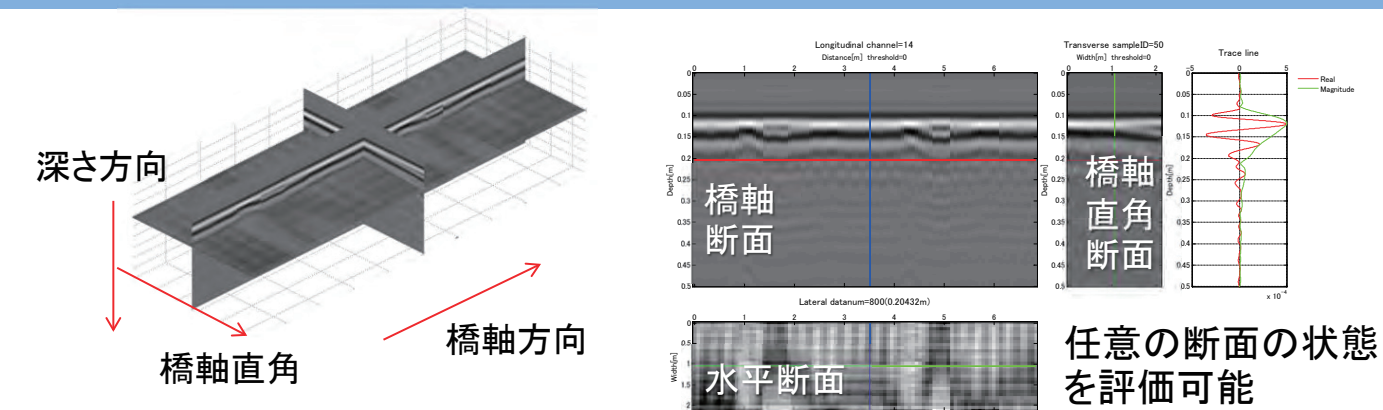




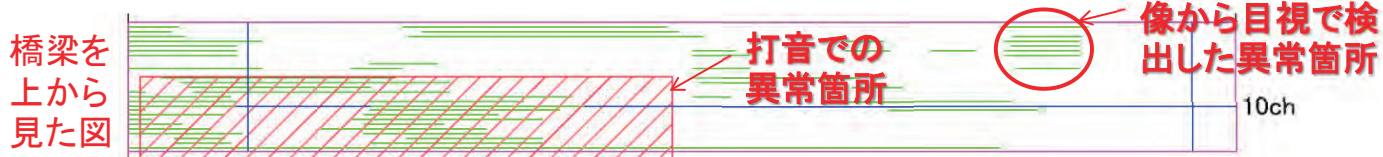
RC床版損傷検知に特化したハードウェア回線設計用の基礎実験システム(SHF帯電磁波計測システム:水谷)



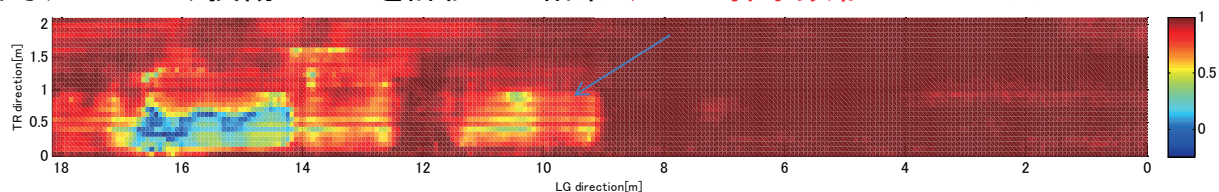
床版・舗装内部状態評価アルゴリズム (水谷)



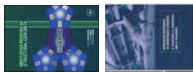
・打音試験の結果と商用ソフトを使った損傷検知の結果



・信号処理により損傷レベルを評価した結果: 処理時間 数秒 低精度, 作業に1週間

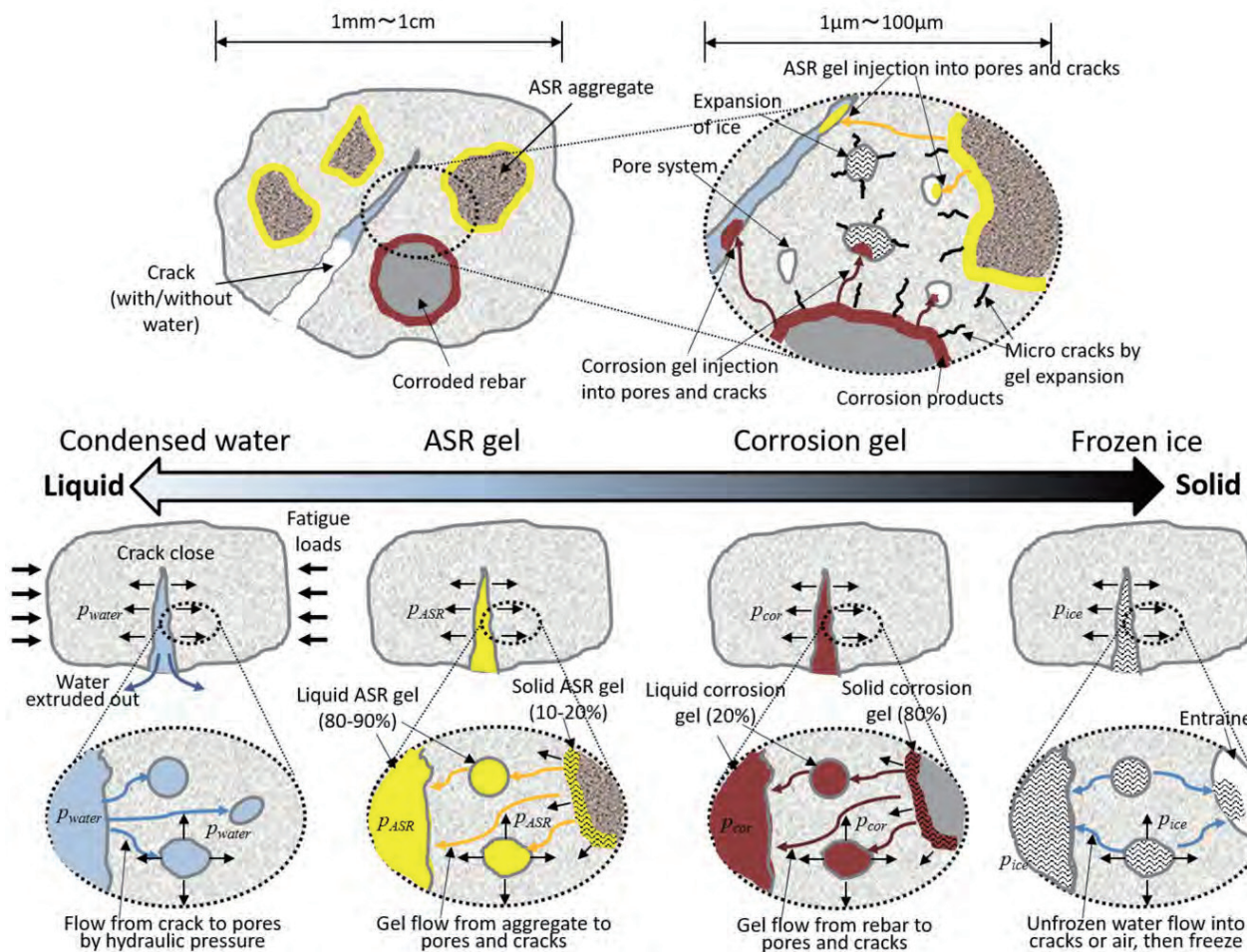


構築したアルゴリズムにより高い精度で打音での異常箇所を検出。



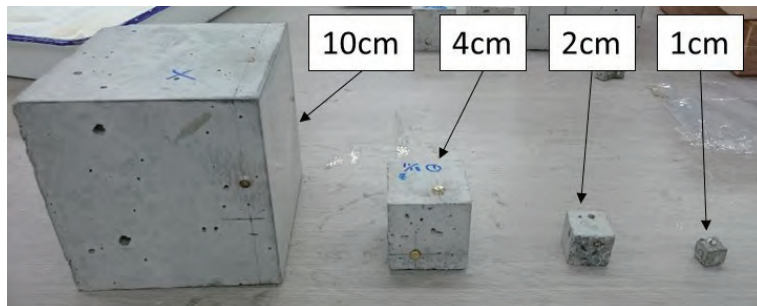
ASR、腐食、凍結データ同化の為の間隙相モデル

52

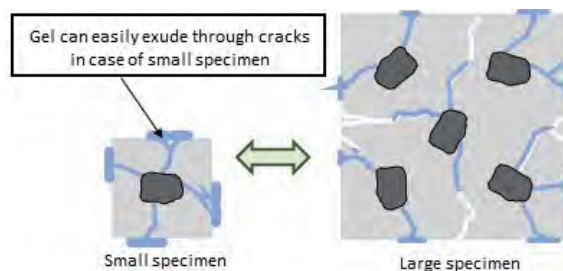
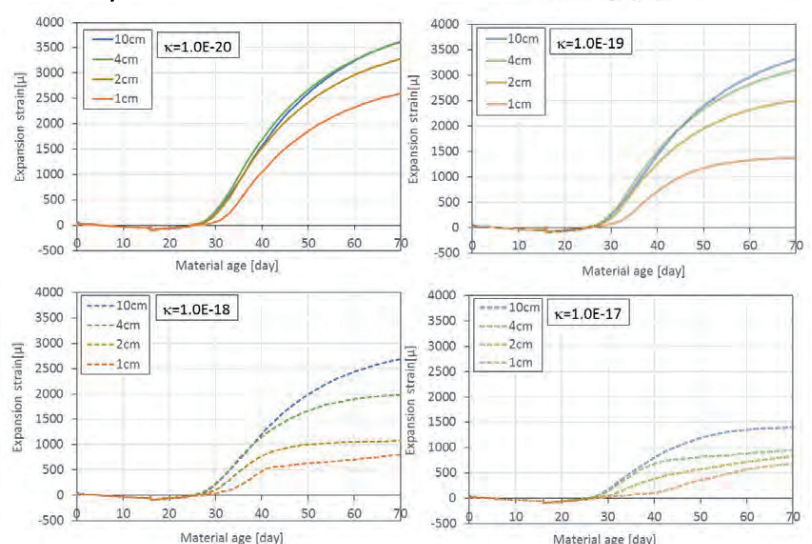
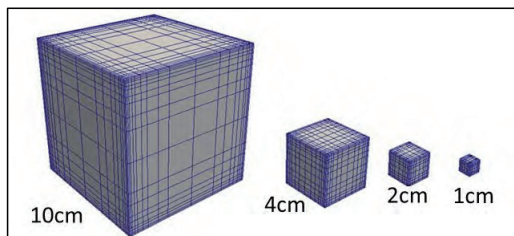
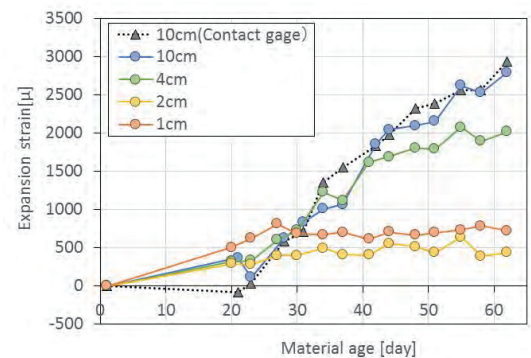


ASR膨張の寸法効果→材料特性ではなく構造応答

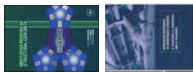
53



Takahashi, Maekawa 2016, FramCos, Berkley, USA

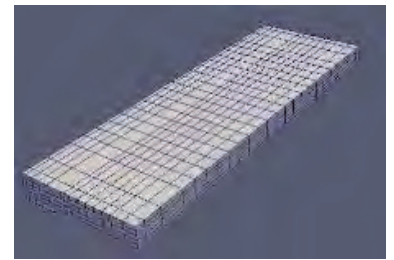
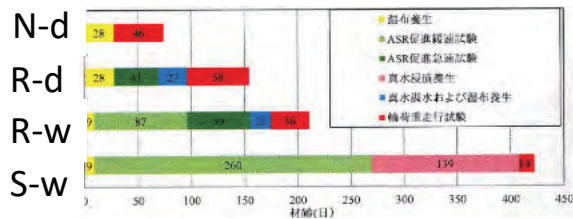


Takahashi et al. (2016) Journal of Advanced Concrete Technology



床版の膨張解析:ゲルの生成、移動、硬化と荷重作用

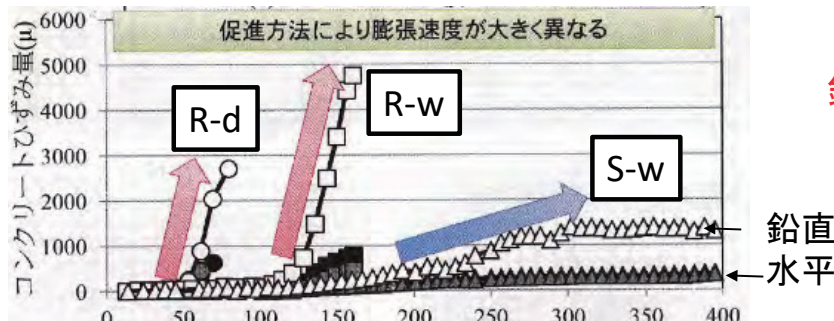
54



鉛直方向に大きな膨張

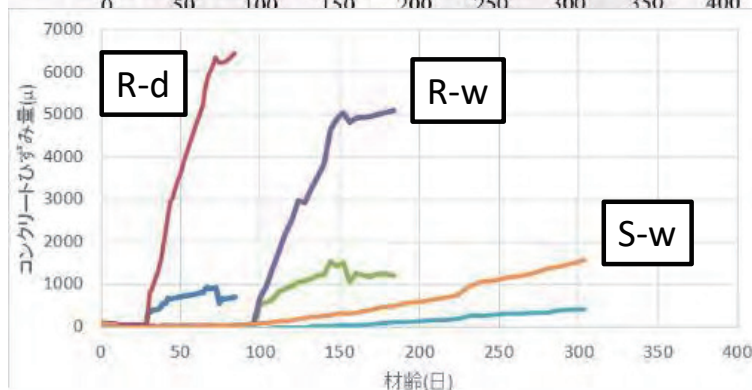
日大前島氏、岩城教授
よりご提供

実験結果



鉛直
水平

解析結果



供試体スケールで膨張
量等を合わせれば、
実構造物スケールにも
適用可能



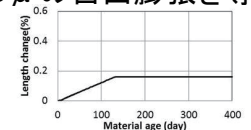
床版の膨張解析:ゲルの生成、移動、硬化と荷重作用

55

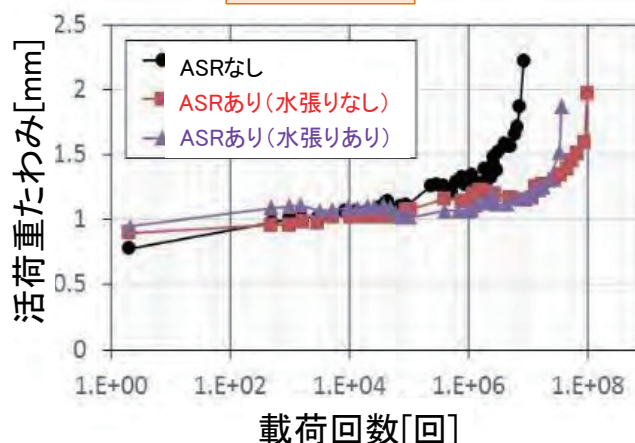
熱力学計算は計算負荷が大きいので、自由膨張量を所与のものとして与えて、その後の疲労挙動を検討

- ・ASRなし(収縮あり)
 - ・ASRあり(水張りなし)
 - ・ASRあり(水張りあり)
- の3ケースで輪荷重疲労載荷を実施

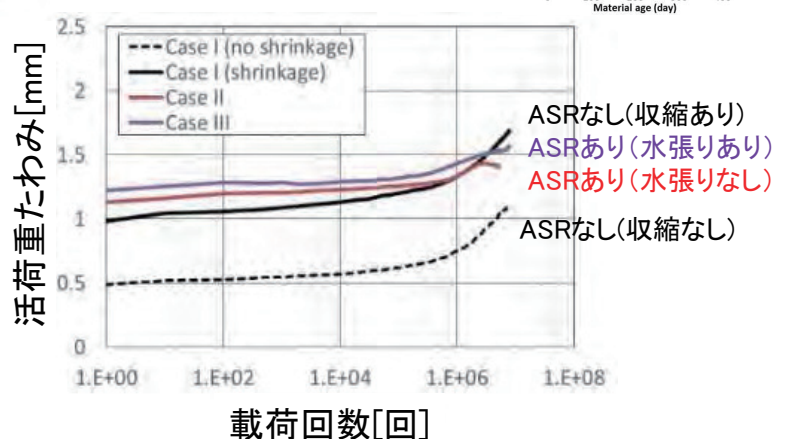
1800 μ の自由膨張を導入



実験結果

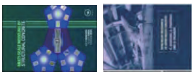


解析結果



ASRがある場合に疲労寿命が延びている
水張りの影響があまりない

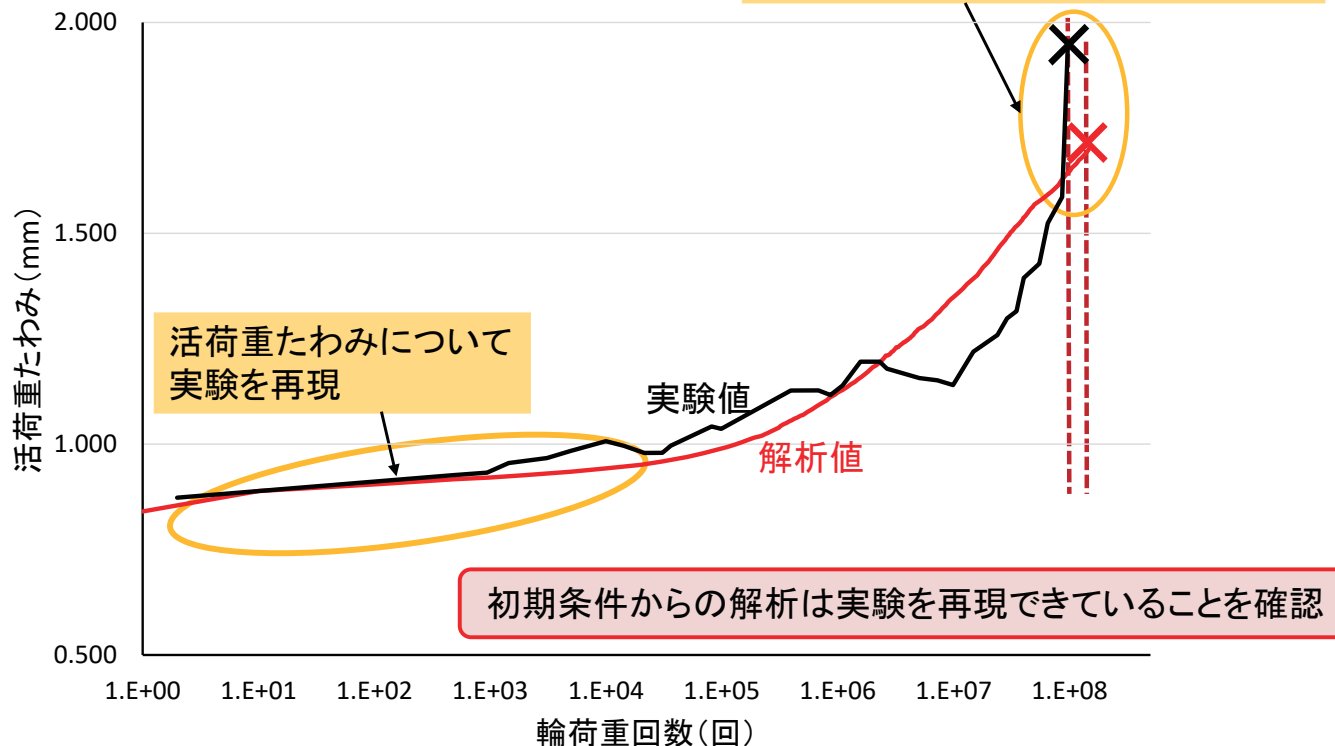
実験と同様の解析結果を得た



ASR膨張を受けた床版のデータ同化

56

初期条件からの解析と実験値との比較



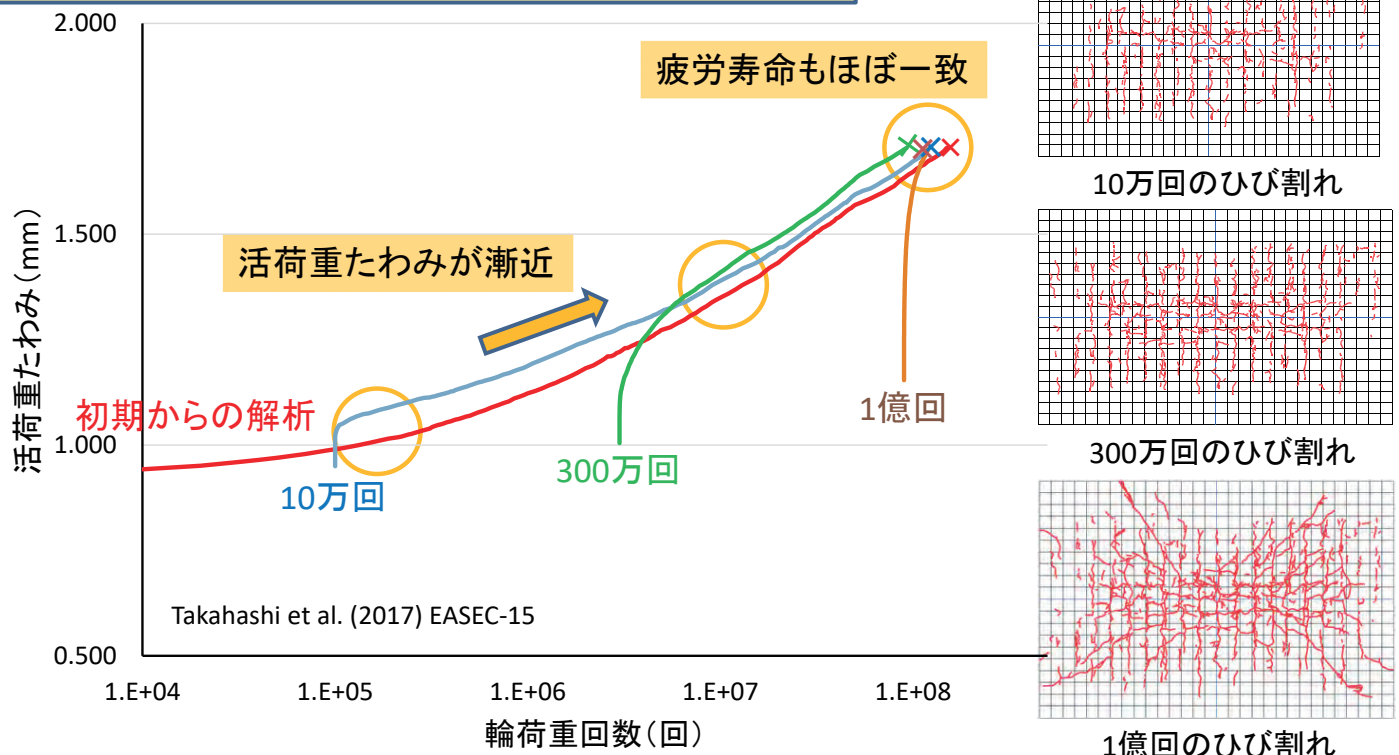
Takahashi et al. (2017) EASEC-15



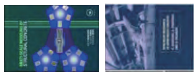
ASR膨張を受けた床版のデータ同化

57

初期条件からの解析とデータ同化を行った解析との比較

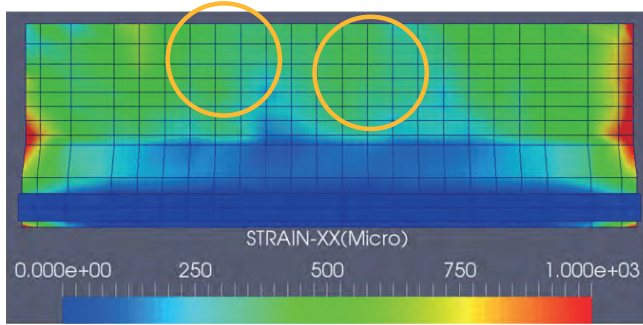


ASRの劣化を受けたコンクリートでもデータ同化により構造性能予測を行うことは可能

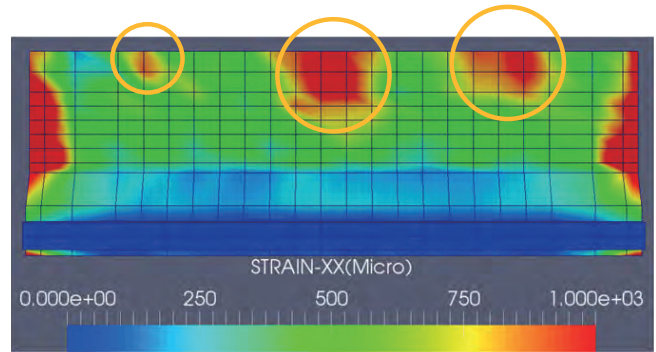


疲労試験の回数とともに、ひずみ図の同化を確認

初期条件からの解析

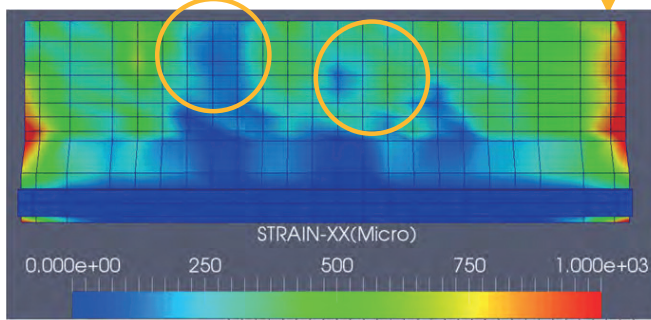


ひずみに一定の差異がみられる

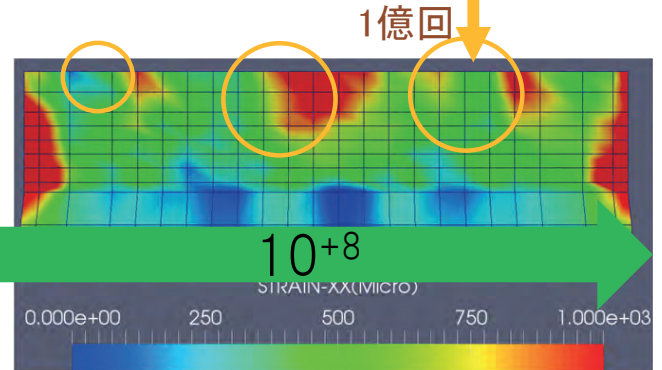


ひずみが一致している

10万回からの解析



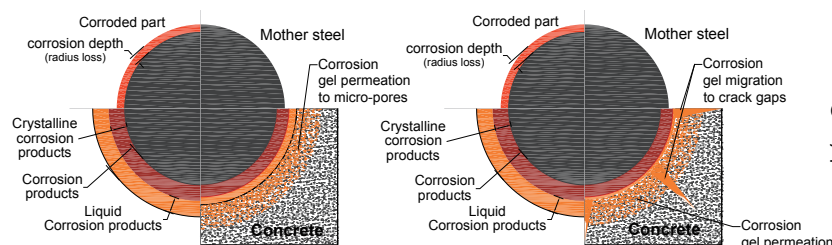
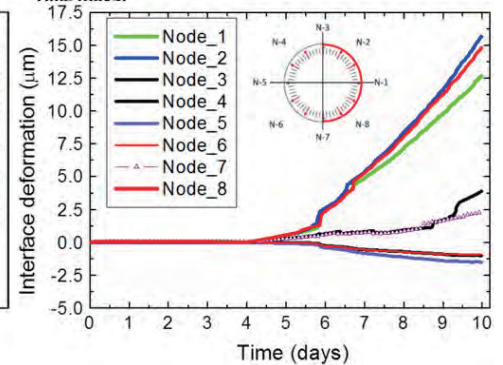
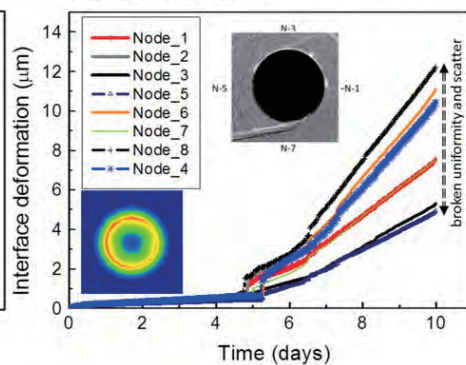
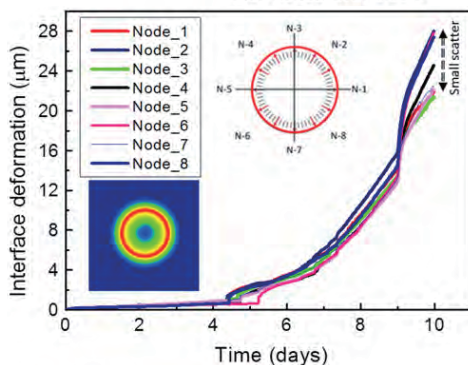
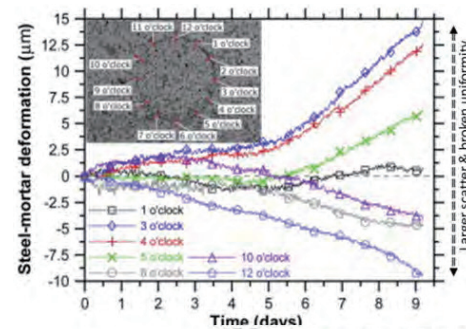
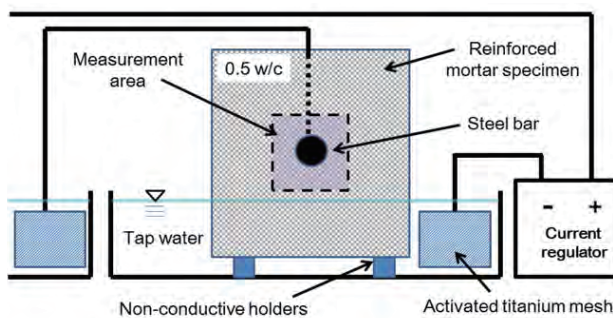
10万回



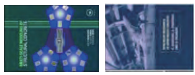
1億回

10^8

Takahashi et al. (2017) EASEC-15

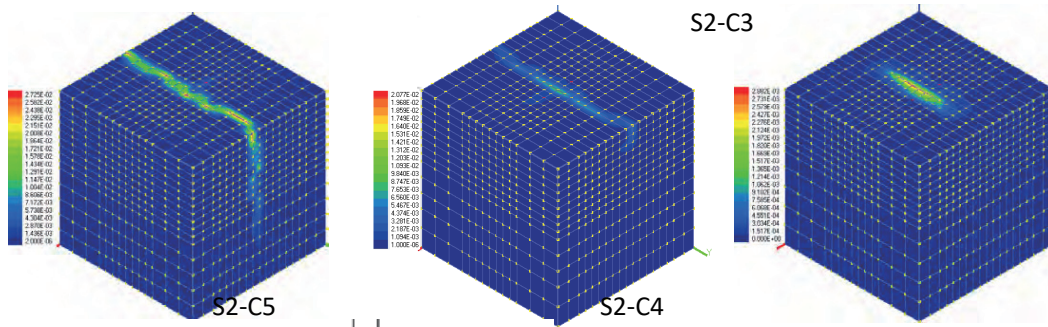


Gebreyouhannes et al. (2016)
Journal of Advanced Concrete
Technology

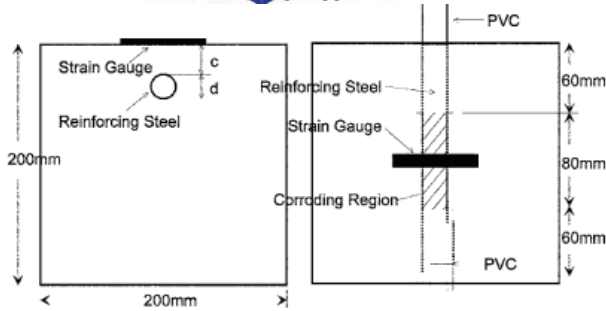


腐食ゲルの生成とひび割れ幅：時間依存性

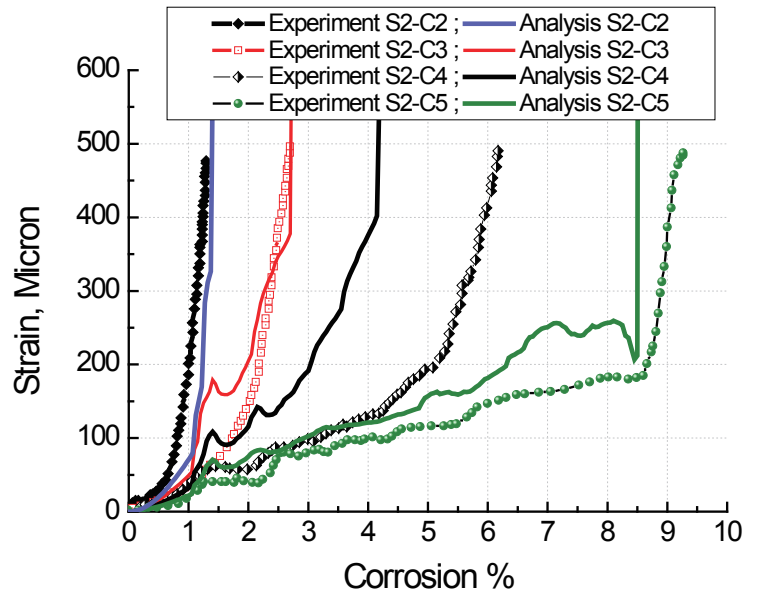
60



Gebreyouhannes et al. (2016) Journal of Advanced Concrete Technology

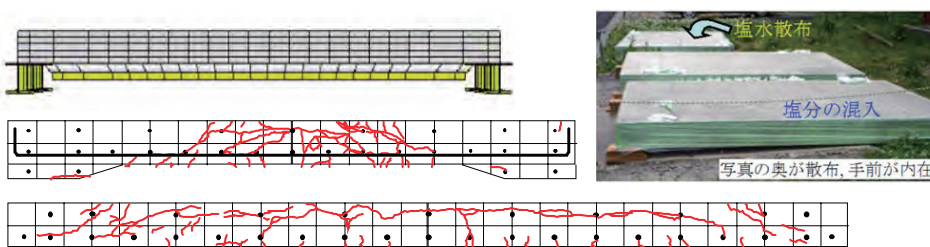


Experiment by Oh et al. 2008

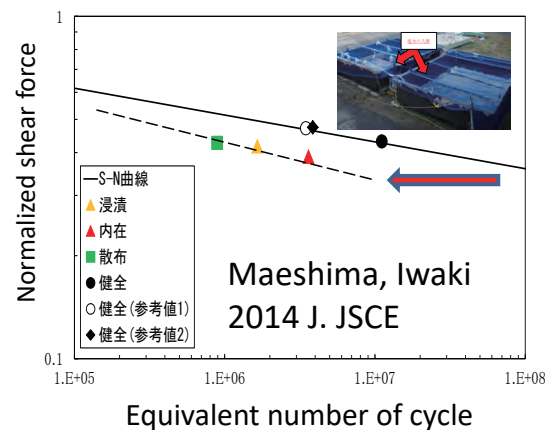
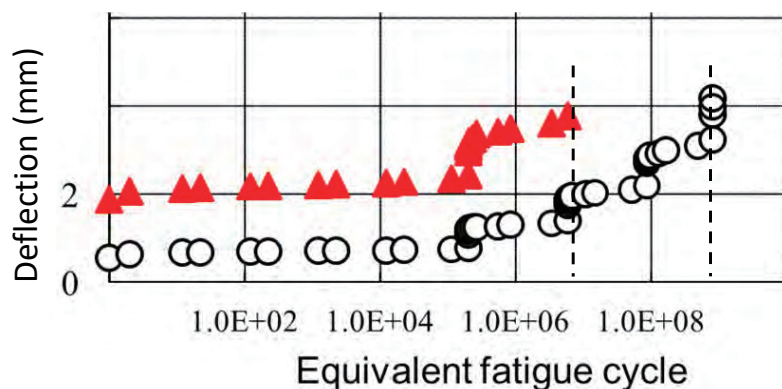
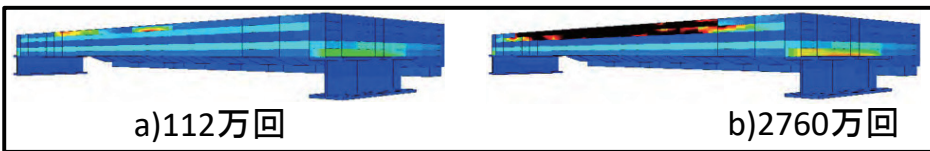
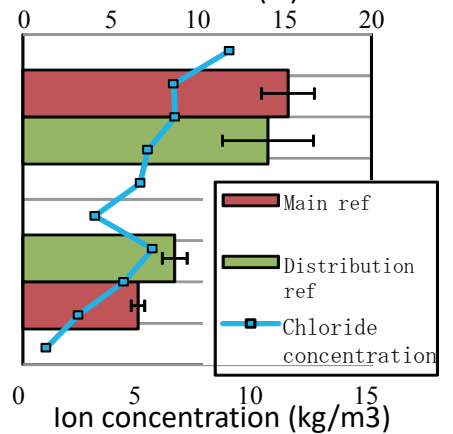


腐食劣化RC床版の余寿命推定

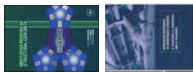
61



Corrosion rate (%)



Maeshima, Iwaki 2014 J. JSCE

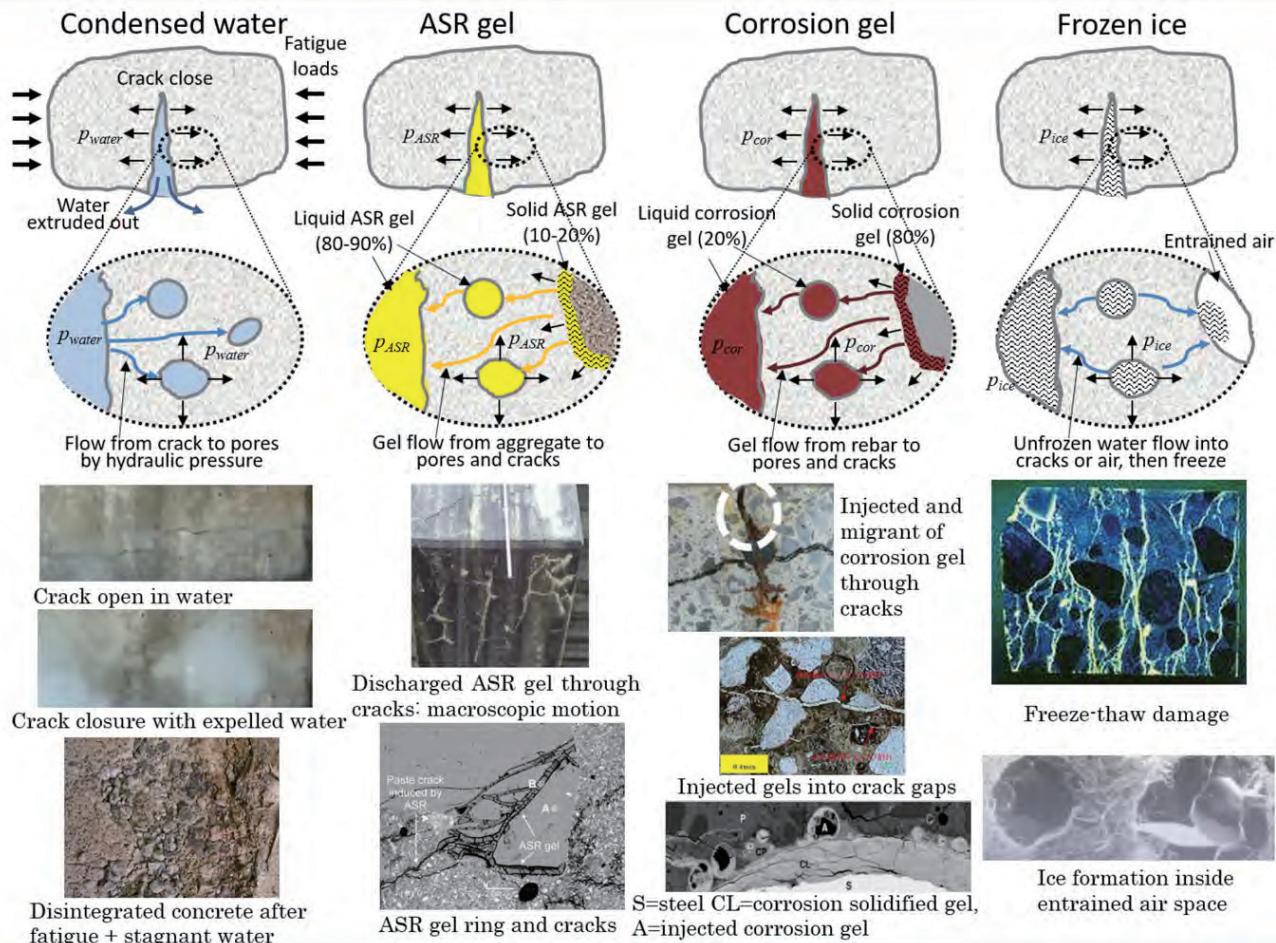
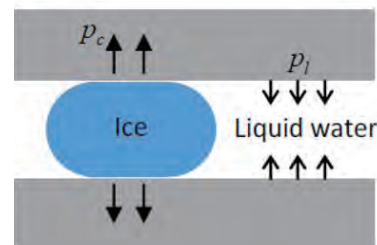
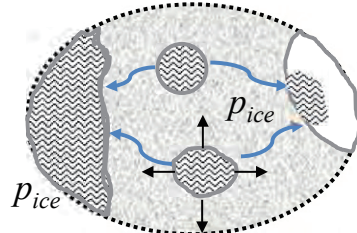
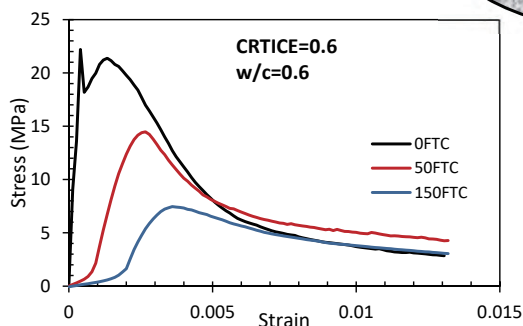
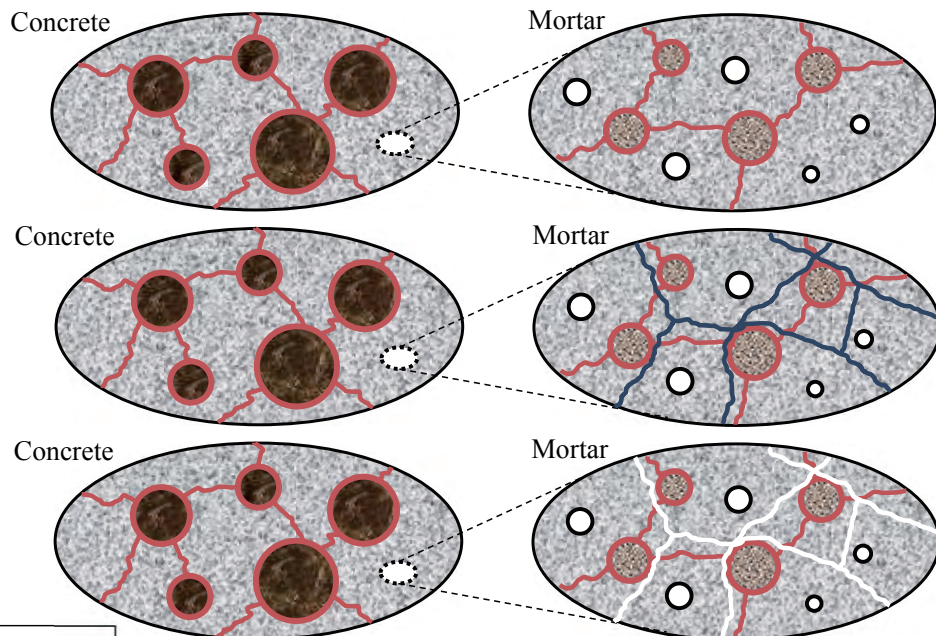


Gong, Takahashi, Maekawa (2017) Journal of Advanced Concrete Technology

ASR expansion
generated

More micro-
cracks by ice at
mortar level

Empty remaining
micro-cracks after
thawing





講 演

高出力X線によるPC橋内部の 劣化調査と耐荷力評価

国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)
上席研究員 石田雅博

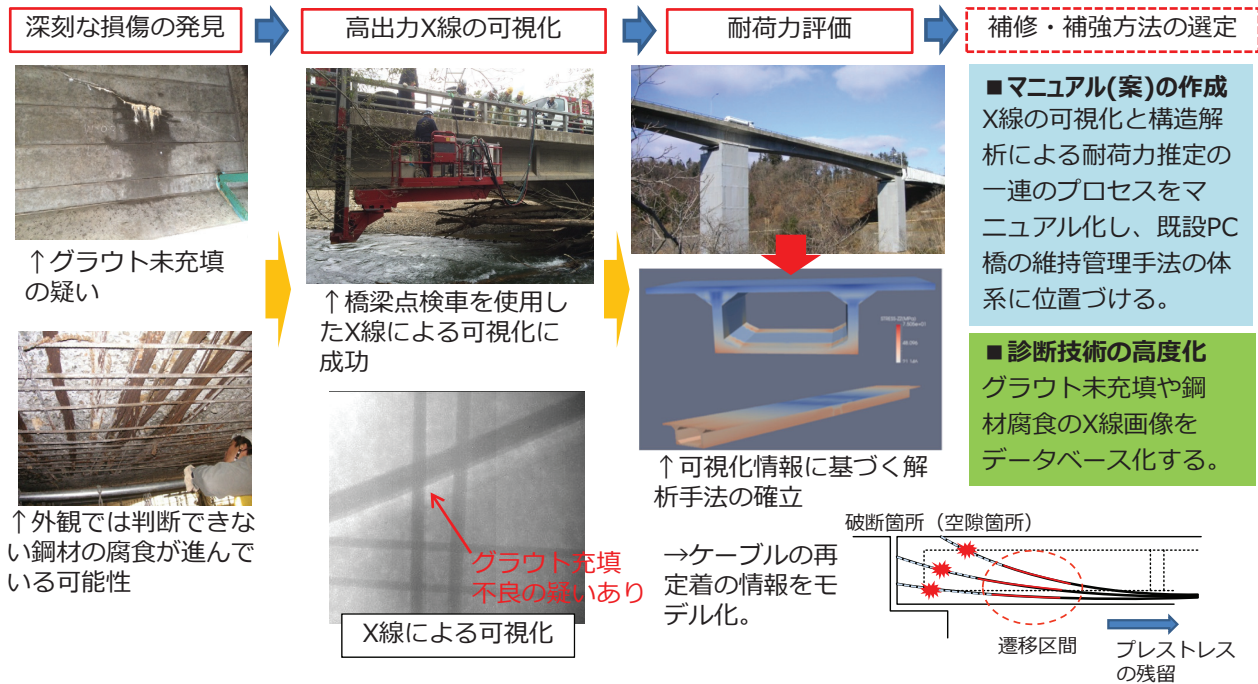
戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)
インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発
(H26-H30)

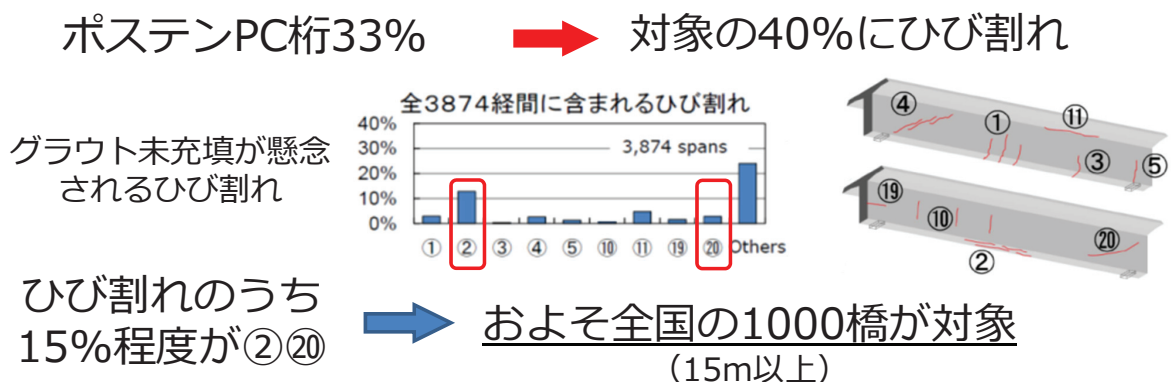
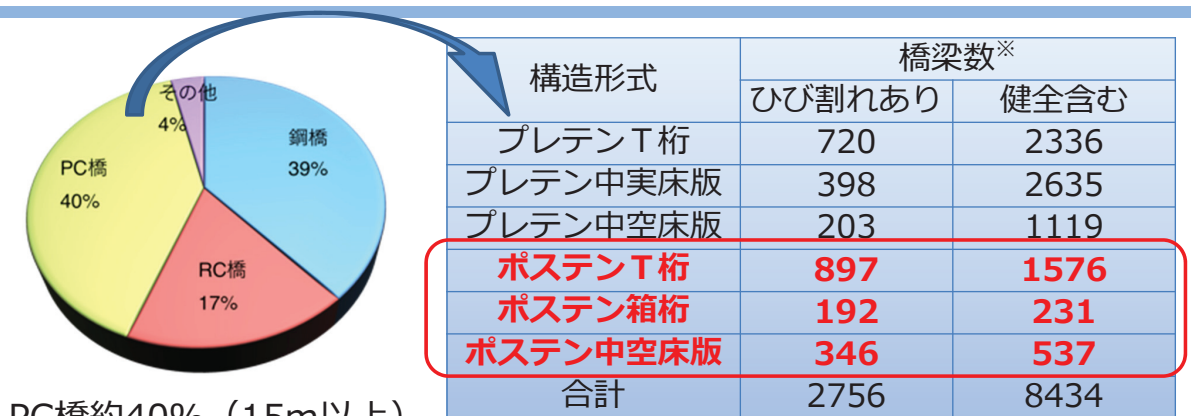
研究責任者：土木研究所上席研究員 石田雅博

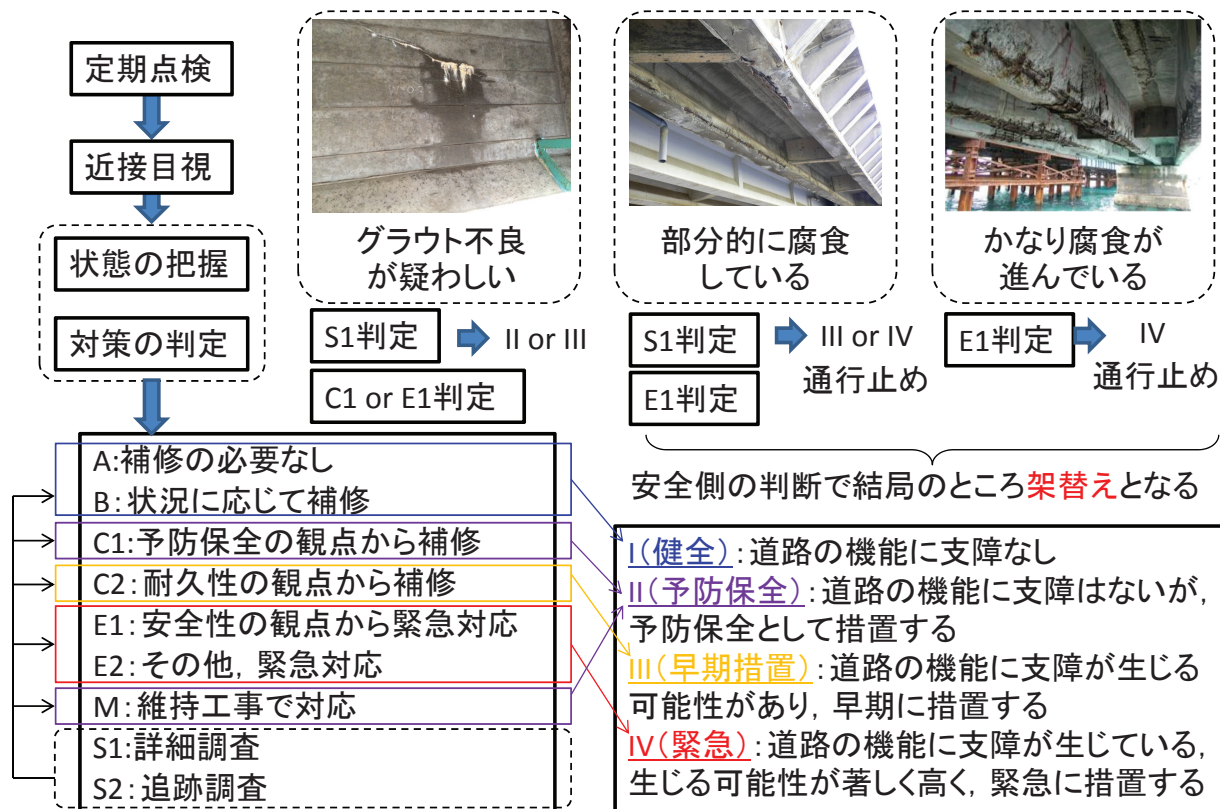
研究実施機関：
(国研)土木研究所，東京大学，(国研)理化学研究所

- ◆通常の検査技術では判断が困難な部材深部における内ケーブル破損に対して、X線技術により可視化を行い、残存耐力を正しく評価する技術を確認する。→**可視化情報に基づく耐荷力推定のプロセスを一元化**
- ◆高速道路など舗装切削前に床版土砂化の程度が把握できると出戻りが少ない→**可視化情報の活用**



対象橋梁のポテンシャル（PC桁損傷）

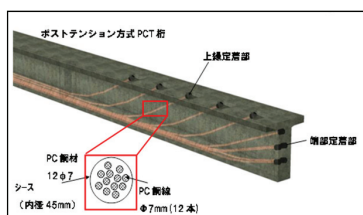




塩害劣化したPC桁の特徴

グラウト不良がある場合

塩分の供給経路



初期症状



末期症状

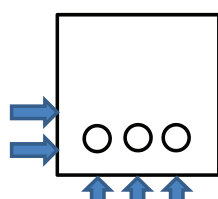


シース内からの塩分供給による内部での腐食進行 → 表面にひび割れが出にくい

→ 外観からの耐荷力評価が極めて困難

グラウト充填している場合

塩分の供給経路



初期症状

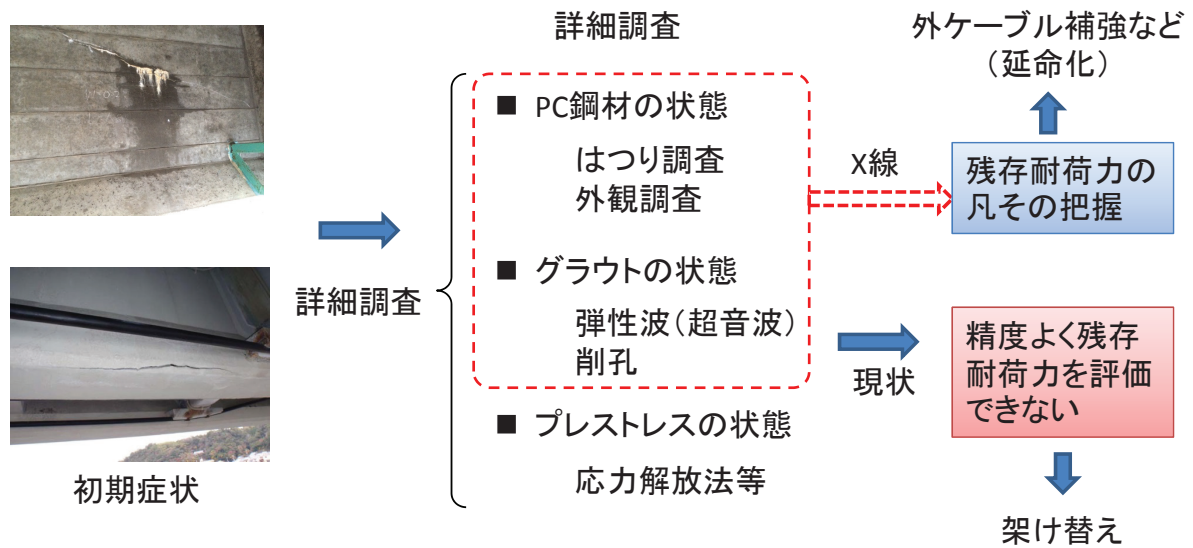


末期症状



コンクリート表面から供給される塩分により鋼材が腐食 → 表面にひび割れが発生

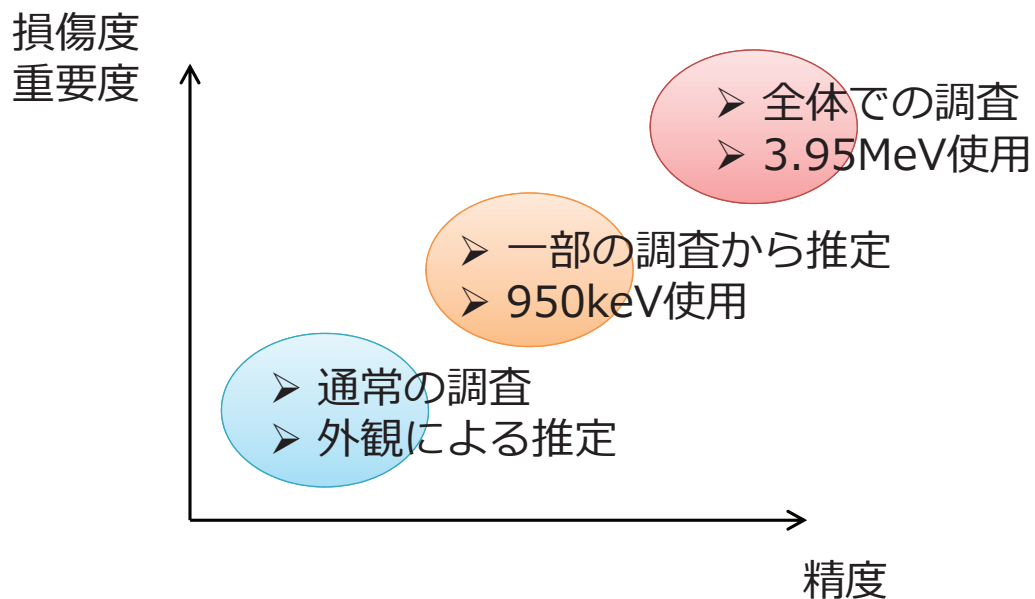
→ 外観からの耐荷力評価が可能



調査高度化のための課題

- ① 外観変状と実際の減肉量との相関が不明(特にグラウト不良の場合困難)
- ② 残存プレストレスが不明(鋼材破断とグラウト未充填区間の残存耐力の推定)
- ③ 実際の橋の残存耐力がどの程度か誰も把握していない

高度調査技術の位置づけ



構造物の重要度，損傷の度合いなどから，適用技術を使い分けることで，これまで安全側に撤去と判断されていたものを適切に補強し延命化させることができる

H27

新潟・妙高大橋（H27.11月）



H28

北海道・美恵橋（H28.9月）



H29

北海道・築別橋（H29.6月）



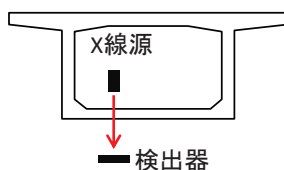
新潟・妙高大橋（H28.10月）



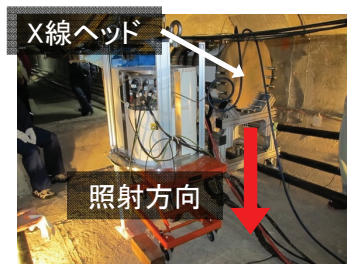
箱桁の撮影

4

撮像方法

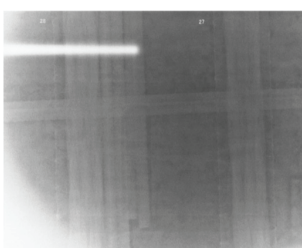


- ・箱桁内部にX線源を設置
- ・外側に設置した検出器で撮像

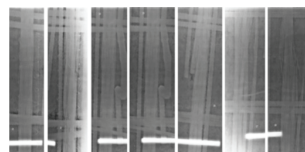


箱桁内のX線源設置の様子

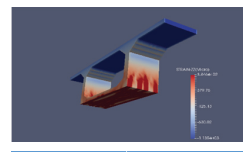
撮像結果



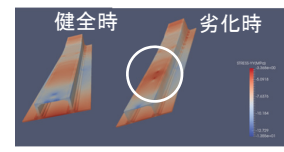
- ・950 keV X線源による撮像に成功
- ・橋梁内部のPC鋼材を明瞭に撮像



横方向（長手方向に垂直）の300 keV 線源によるスキャン画像



橋梁状態	荷重(kN)
健全時	7.61E+03
劣化時	7.20E+03


第一径間の解析
劣化時に下縁部に大きな応力分布

- ・横方向のスキャン結果から、PC鋼材の破断や残存率を10%単位で判断
- 3次元有限要素法による健全性の評価、構造耐力5%の低下と判定

②残存耐荷力評価

11

■ケーブル破断が懸念されるPC桁に対する可視化情報から耐荷力評価を行う

- ケーブル減肉量の推定 △（耐荷力上感度低い）
 - 破断箇所及びグラウト未充填区間の識別 ◎（耐荷力上感度高い）
- 特に未充填箇所によってプレストレス残存量が大きく変化する

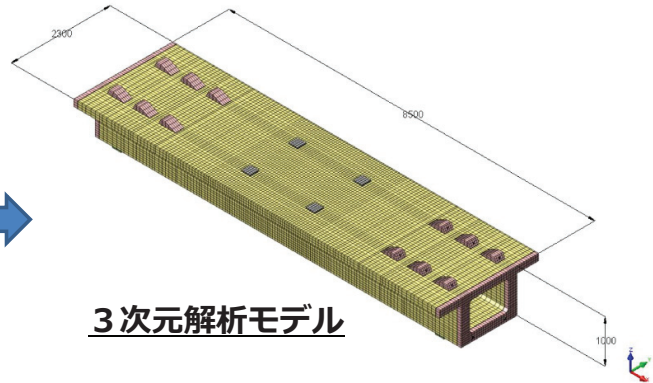
【解決すべき点】

鋼材破断等によりプレストレスが部分的に低減したPC桁の残存耐荷力

特に、PC箱桁のような立体挙動をする桁で、ケーブルが部分的に破断が生じた場合、**残存耐荷力を評価することは極めて難しい**



3次元解析モデル

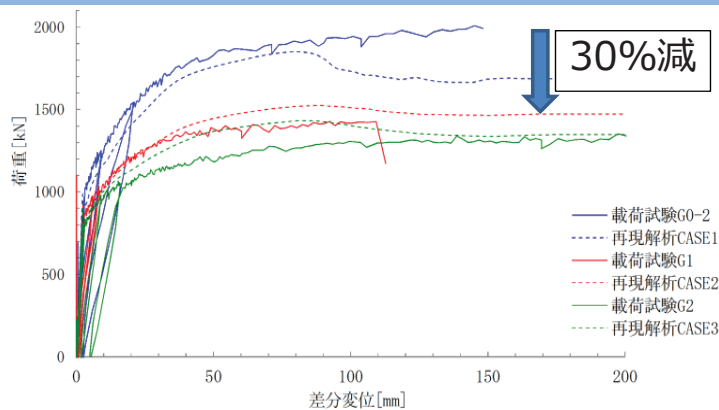


概要

- 模擬損傷を有する箱桁供試体の再現解析を実施
- 可視化情報に基づく解析結果と実験結果を比較

②残存耐荷力評価

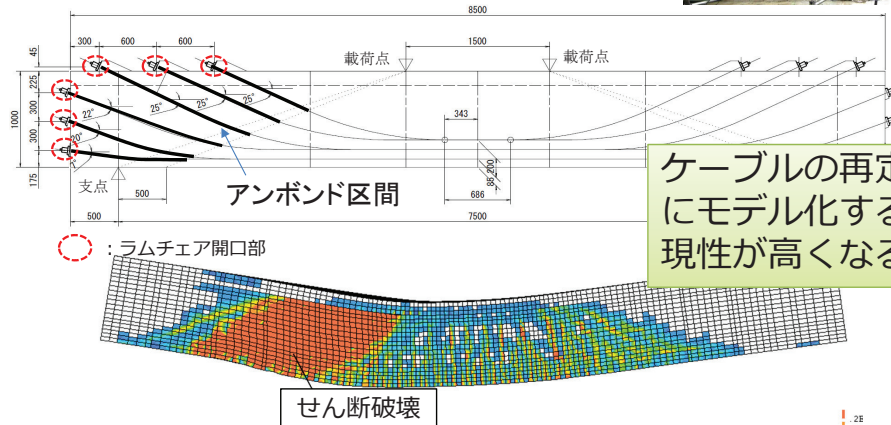
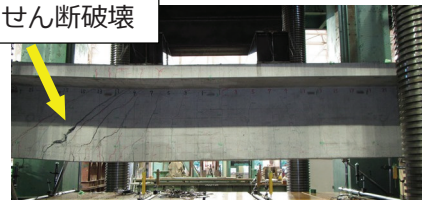
12



■結果

弾性挙動～降伏～終局に至る荷重-変位関係を精度よく再現可能。

せん断破壊



ケーブルの再定着を適切にモデル化することで再現性が高くなる

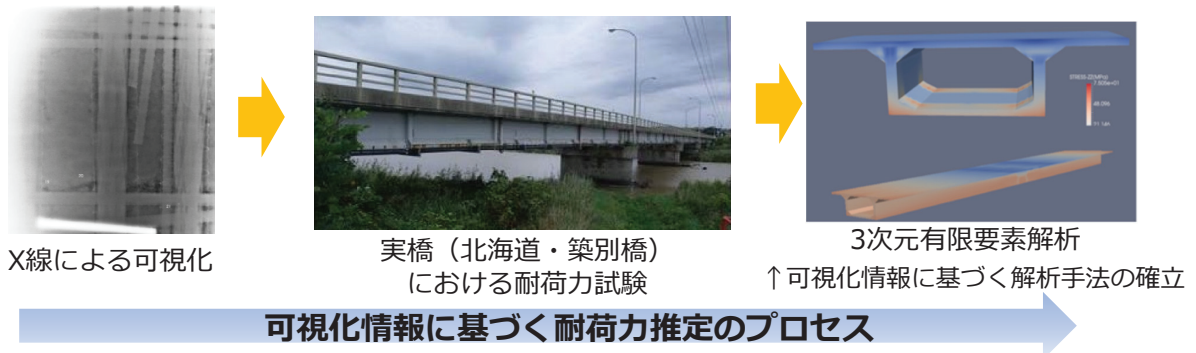
③実橋における耐荷力評価

13



【解決すべき点】

劣化損傷の生じた実橋を対象とした現地载荷試験による残存耐荷力の検証



北海道 築別橋载荷試験（7月26日～28日）

北海道苫前郡羽幌町築別 旧築別橋（44° 25 '01.7"N , 141° 44' 22.6"E）

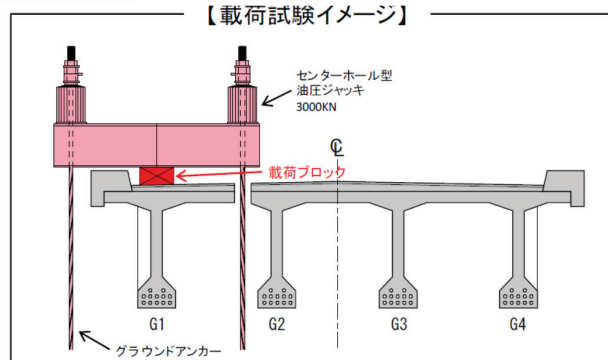
耐荷力試験見学場所の案内



位置図

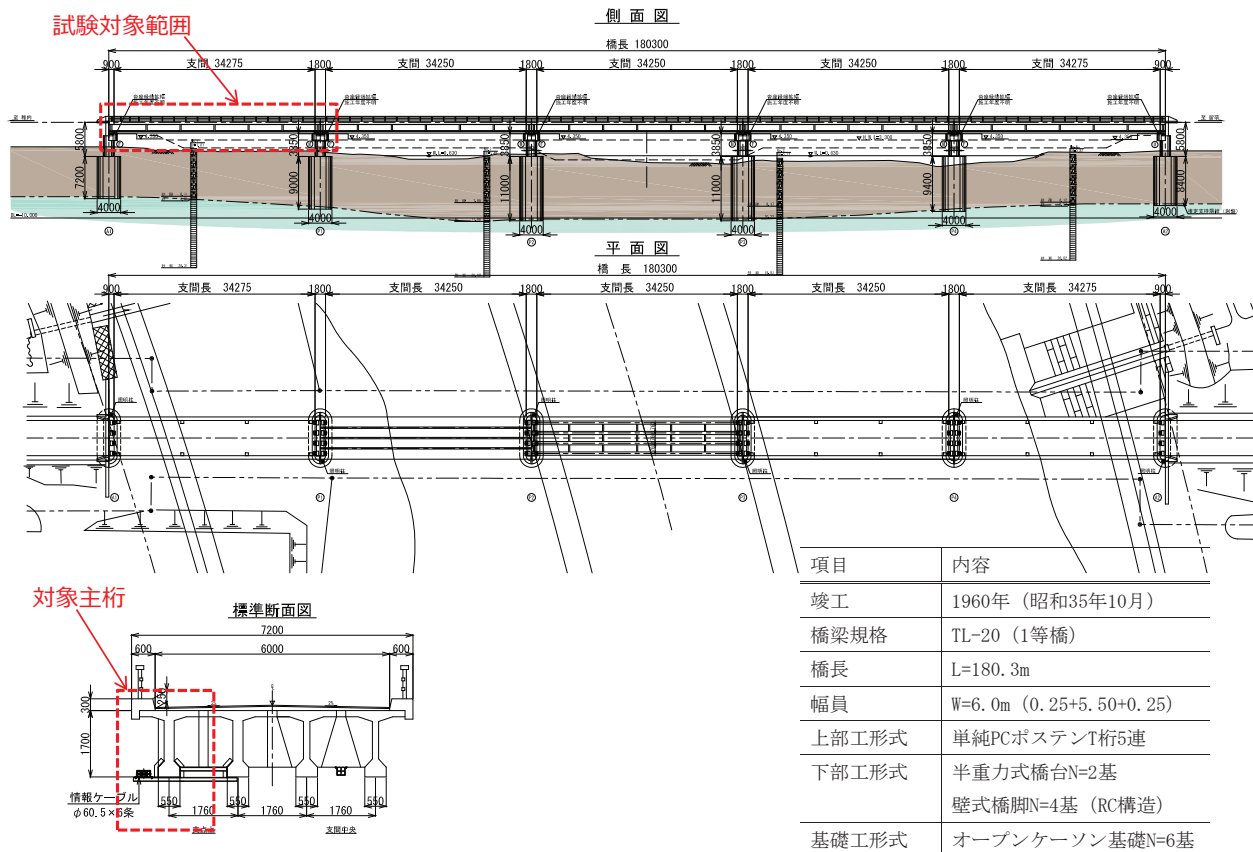


【载荷試験イメージ】



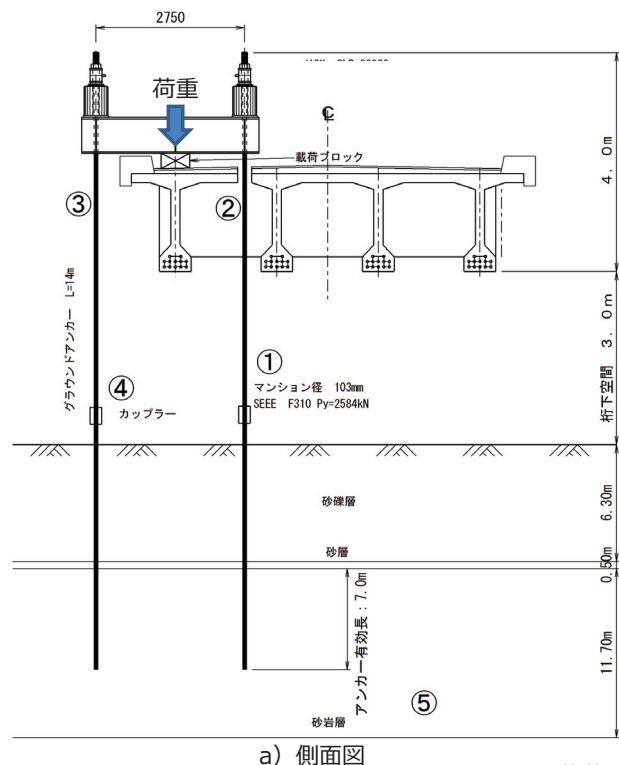
北海道 築別橋における破壊までの载荷試験

本橋梁は、橋長180.30mの単純PCポストテンションT桁橋（5連）である。試験対象の主桁は、A1-P1間のG1桁である。



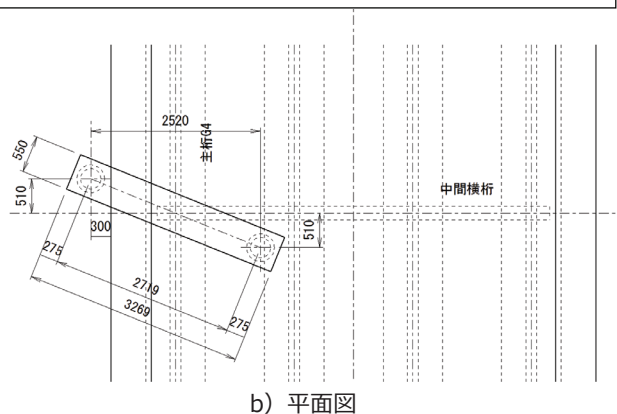
◆試験方法◆

载荷試験は、A1-P1間のG1桁の支間中央にて、2台の3,000kNセンターホール型油圧ジャッキを载荷梁に载荷し、静的により主桁が破壊に至るまで载荷する。载荷は単調増加载荷とし、载荷梁を水平に保ちながら载荷する。試験終了の判断は、载荷点直下の主桁上フランジの圧壊とする。



■施工方法

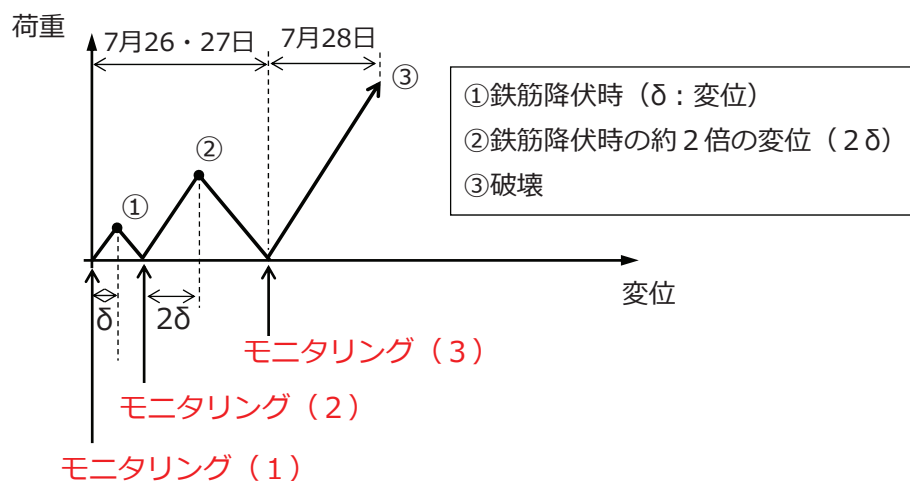
- ①使用ケーブルは耐力2,500kNのグラウンドアンカーを使用。
- ②橋梁側のアンカーは床版を削穴（径350mm）した箇所からボーリングマシンを載せて施工。
- ③橋梁の外側のアンカーも橋梁上から施工。
- ④グラウンドアンカー2本を砂岩層に定着させ、反力を受け持たせる。



载荷試験の状況図

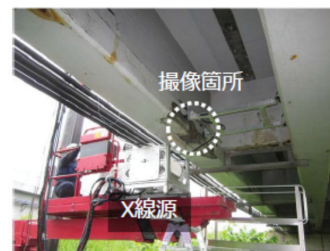
◆試験方法（続き）◆

載荷試験は2回の載荷除荷を行った後、供試体が破壊するまで載荷。この間、荷重除荷後において、適宜モニタリングを実施。

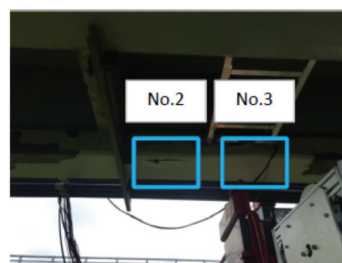
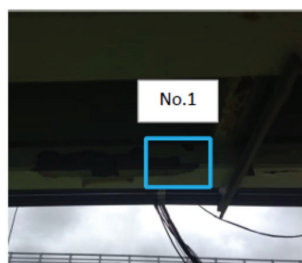


試験方法の概要

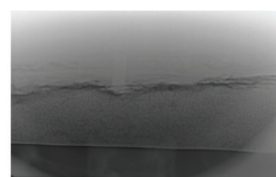
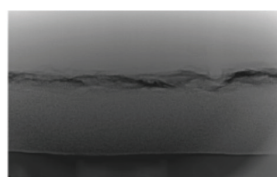
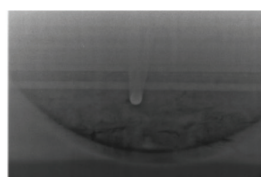
高出力X線によるコンクリート内部鋼材の調査



【撮影箇所】



【撮影箇画像】



No.1

No.2

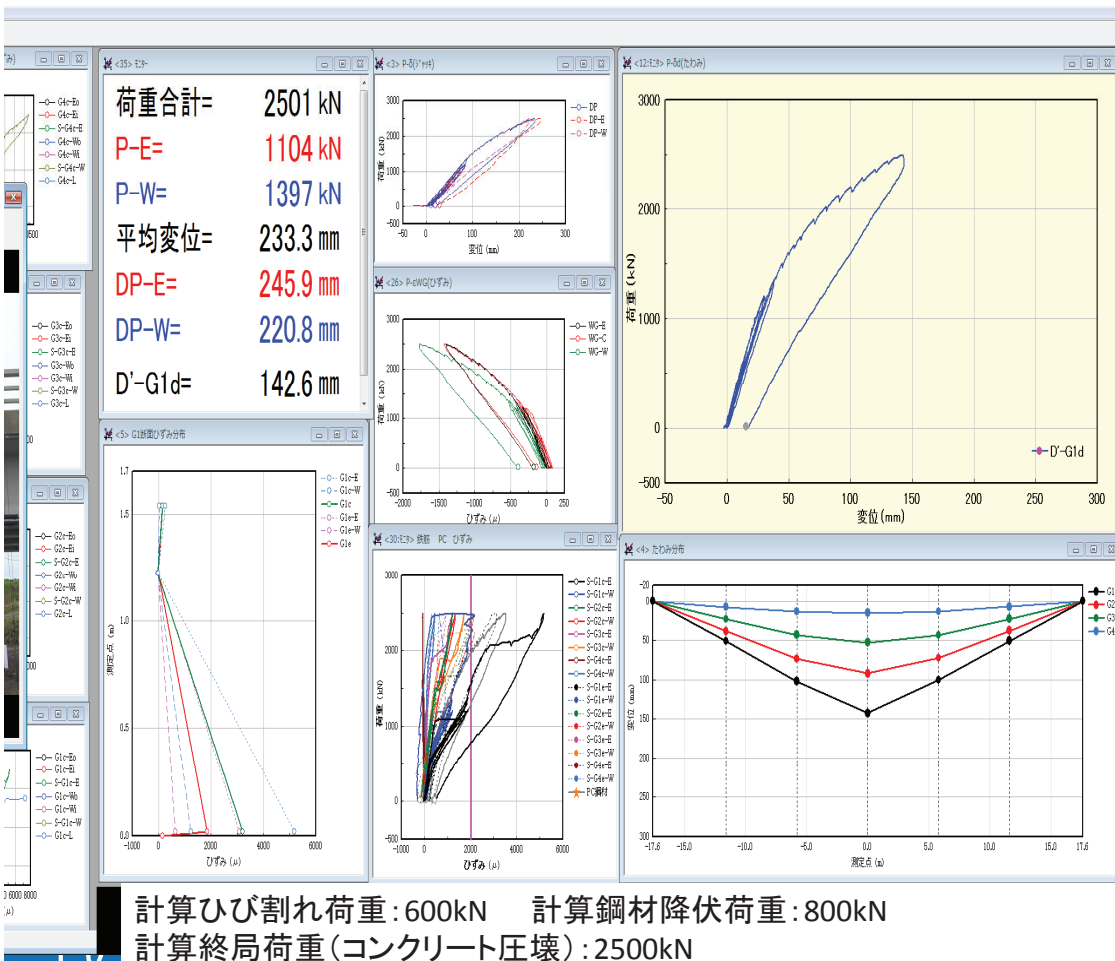
No.3





21





変位: 0mm



変位: 142.6mm

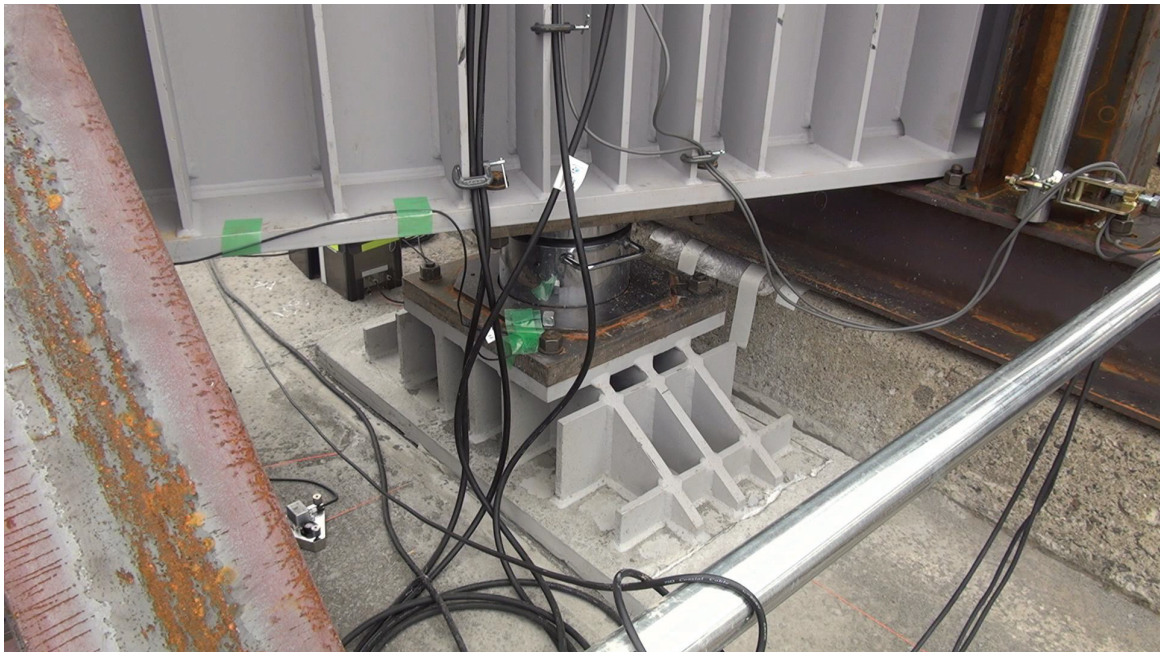




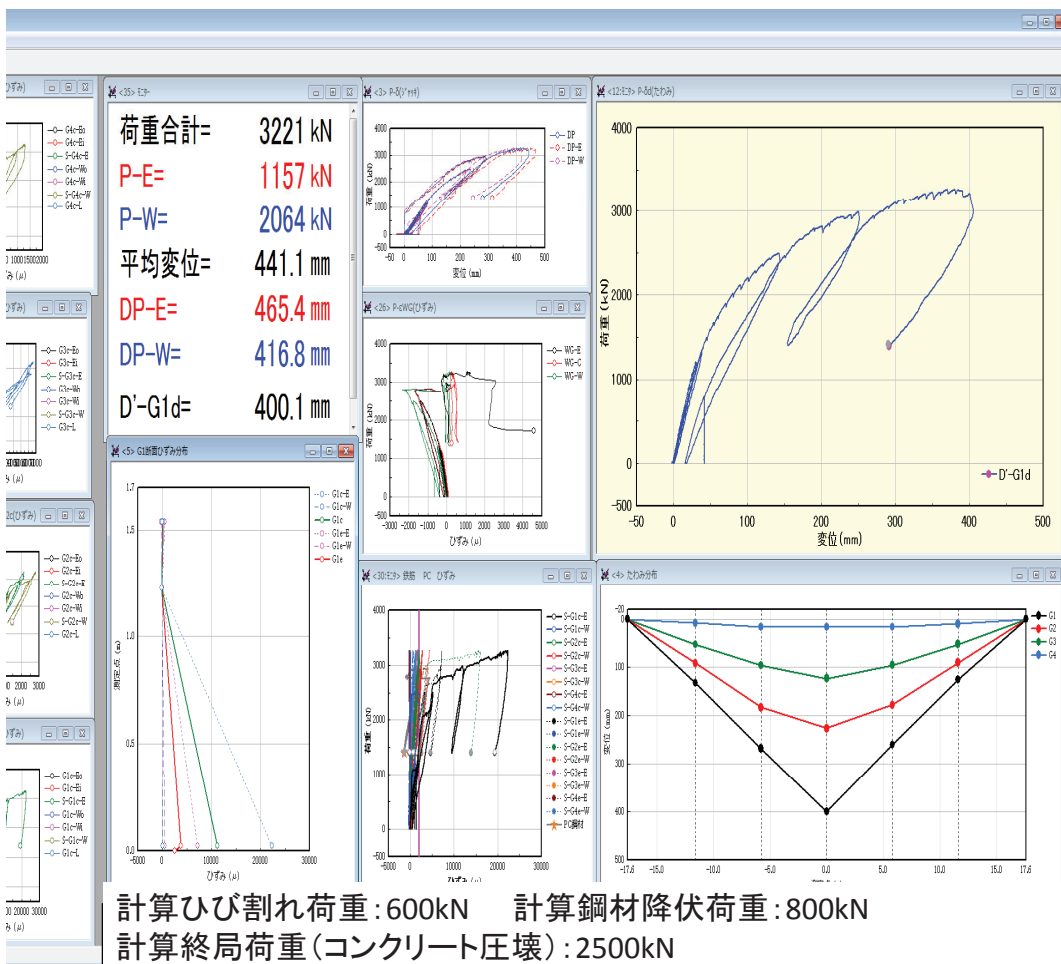
変位: 0mm



変位: 142.6mm



- ジャッキストロークの限界まで載荷
- 変位400mm
- 地覆に割れ
- せん断ひび割れの幅が2～3cmまで開く



変位 400mm



変位 400mm



横桁



G4桁





まとめ

- ・高出力X線により、PCのグラウト充填や鋼材の腐食・破断を調査する手法を開発した
- ・模型供試体や実橋梁での载荷試験を実施し、損傷を受けたPC橋の耐荷力評価を検証している
- ・今後、PC橋の耐荷力評価マニュアルを整備していく

要因は、地盤変位か振動か

～熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析～

CAESAR 上席研究員 大住道生



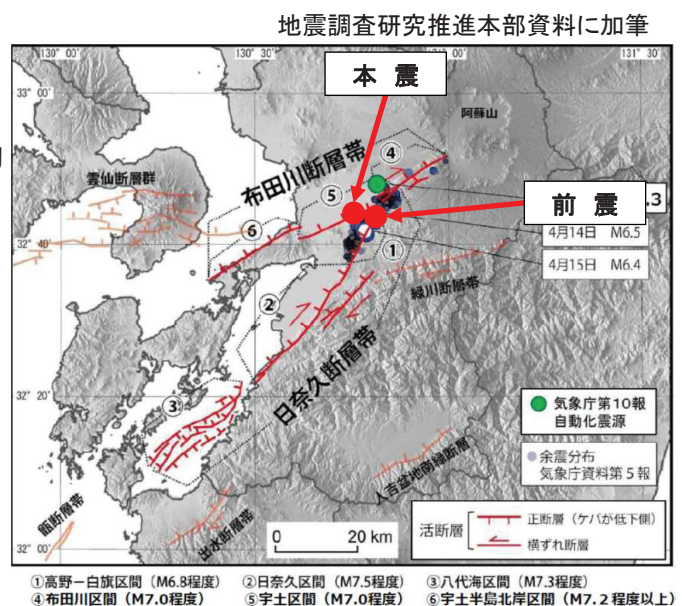
国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



1

熊本地震の諸元等

- 本震(4月16日 1時25分)
M7.3、震源深さ12km
布田川断層帯(主に布田川区間)の活動
- 前震(4月14日21時26分)
M6.5、震源深さ10km
日奈久断層帯(高野-白旗区間)の活動
- ・ 今回の地震は比較的右横ずれが卓越。



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



2

熊本地震により生じた亀裂分布と分析対象橋梁

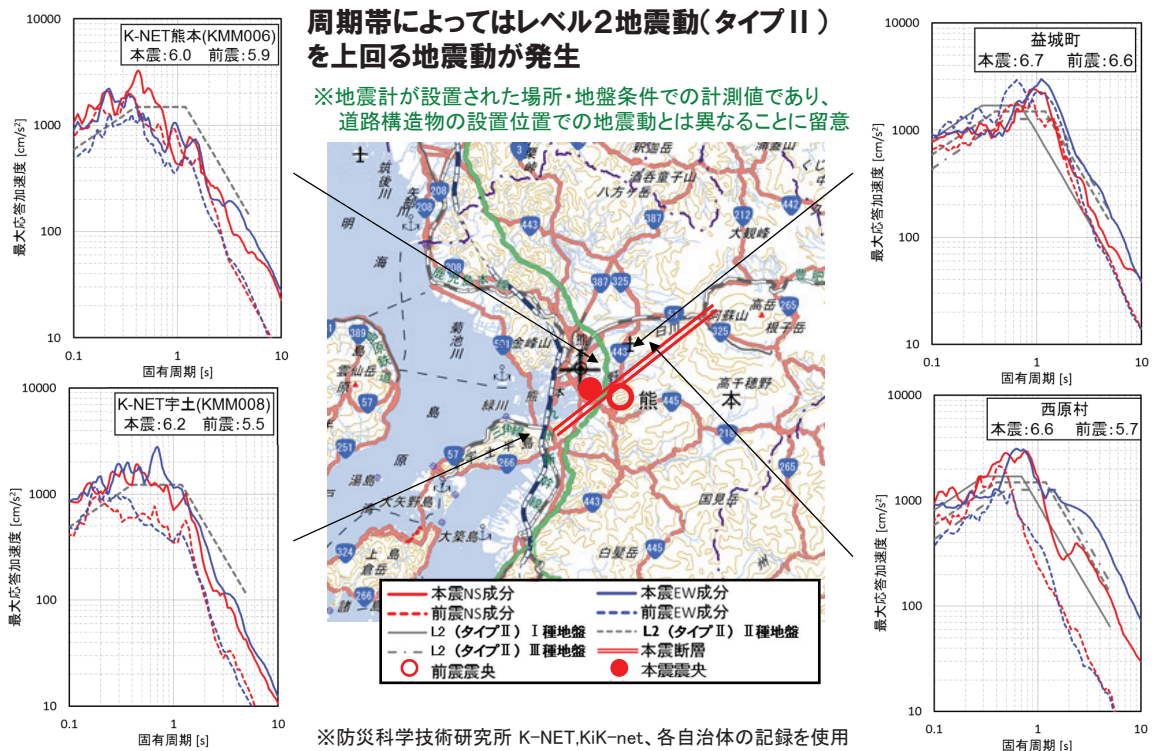


国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



3

代表的な地震動の加速度応答スペクトル



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



4

本研究の目的

平成8年の道路橋示方書に基づいて設計された橋が損傷

Ⅱ
兵庫県南部地震(熊本地震と同じ内陸直下型)
の教訓を踏まえ定められた基準



なぜこのような被害が生じたのか？



損傷要因に地盤変位が影響しているかどうか分析



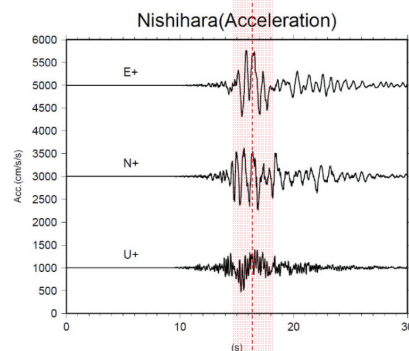
国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



5

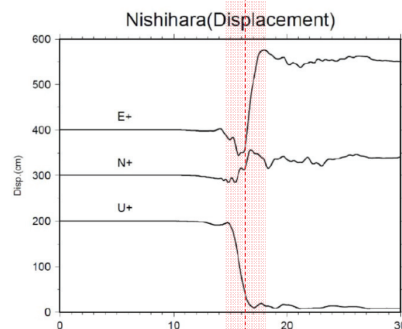
西原村小森で観測された地震動

加速度



平成28年4月16日1時25分

変位



出典: 岩田知孝: 益城町
宮園・西原村小森
本震記録の解析

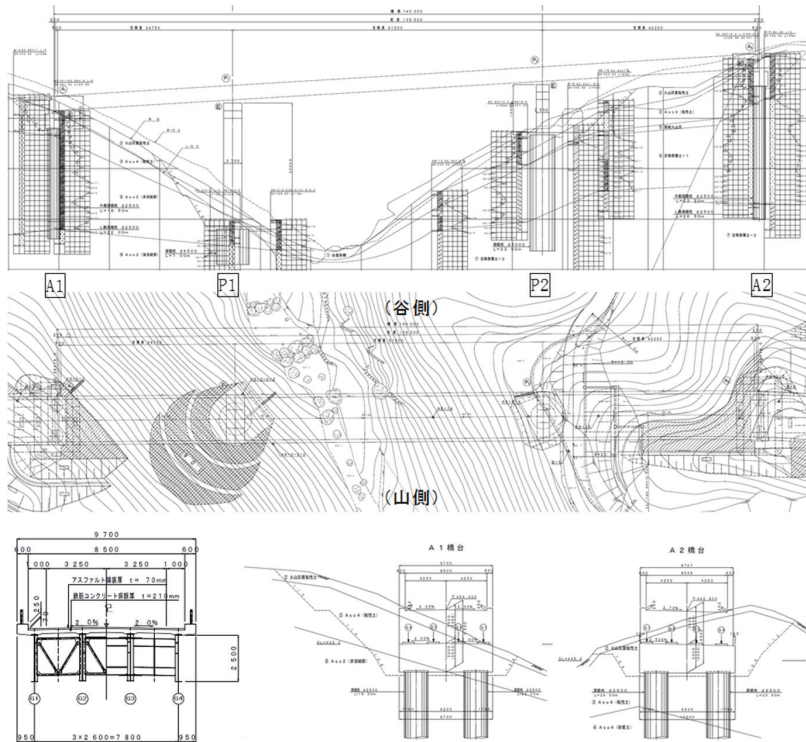


国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



6

俵山大橋の構造



- ・路線名：(主)熊本高森線
- ・橋長：140.0m
- ・径間数：3径間
- ・橋梁形式：鋼鈑桁橋
- ・支承形式：水平力分散ゴム支承
- ・下部構造形式：逆T式橋台、
張出し式橋脚
- ・基礎形式：深礎基礎
- ・竣工年次：2001年(H13)



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



熊本県提供

7

俵山大橋の損傷



写真-1 A1橋台背面側からの全景

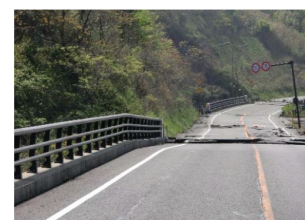


写真-2 A1-P1間での上部構造の屈折



写真-3 A1橋台の基礎の露出



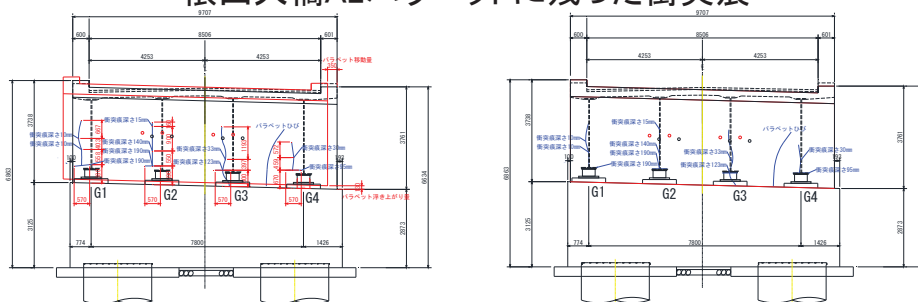
国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



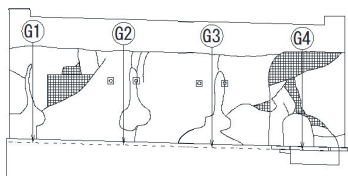
8

俵山大橋の損傷分析

俵山大橋A2パラペットに残った衝突痕



G1



G2



G3



G4



構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

国土交通省提供

13

俵山大橋の支承破断要因の推定

パラペットに残った衝突痕は桁形状(下半分程度)と一致



移動したパラペットを原位置に戻すと、衝突痕の高さは支承に載った状態での桁高さとほぼ一致

=

衝突の直前には桁は支承に載った状態



G1, G3, G4桁の衝突痕にはずり落ちた痕

=

衝突時に支承に復元力が残っていれば、ずり落ちた痕はできないはず



桁がパラペットに衝突し、押し込んだのと前後して支承が破断したと推定

その時にはA1側でも桁とパラペットが接触していたと推定

地盤変位

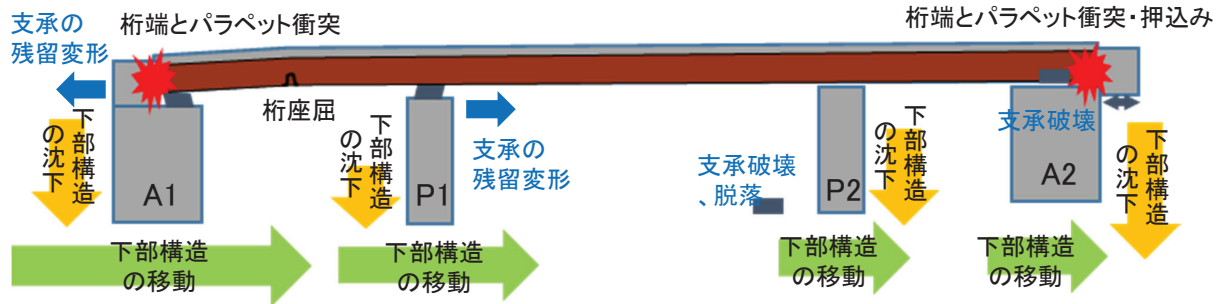


国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



14

俵山大橋の損傷要因の推定



- A1-P1間の桁フランジ断面変化部で座屈。
- 振動によるA1橋台パラペットと桁の衝突によりA1-P1間の桁が座屈したのか？
→A1側の桁端部の損傷が軽微であることから、桁に座屈するような力が伝わったとは考えにくい。
- A1橋台とP1橋脚が逆位相になったことにより、桁が座屈するほどの圧縮力がかかり得るか？→P1橋脚には目立った損傷がないことから、桁が座屈するほどの応答が生じたとは考えにくい。
- 地盤変位により、A1-A2間距離が縮小したことにより、両橋台から作用した圧縮力をA1側は支承と桁で分担した可能性。
- 下部構造の沈下により大きな曲げモーメントが作用した可能性。

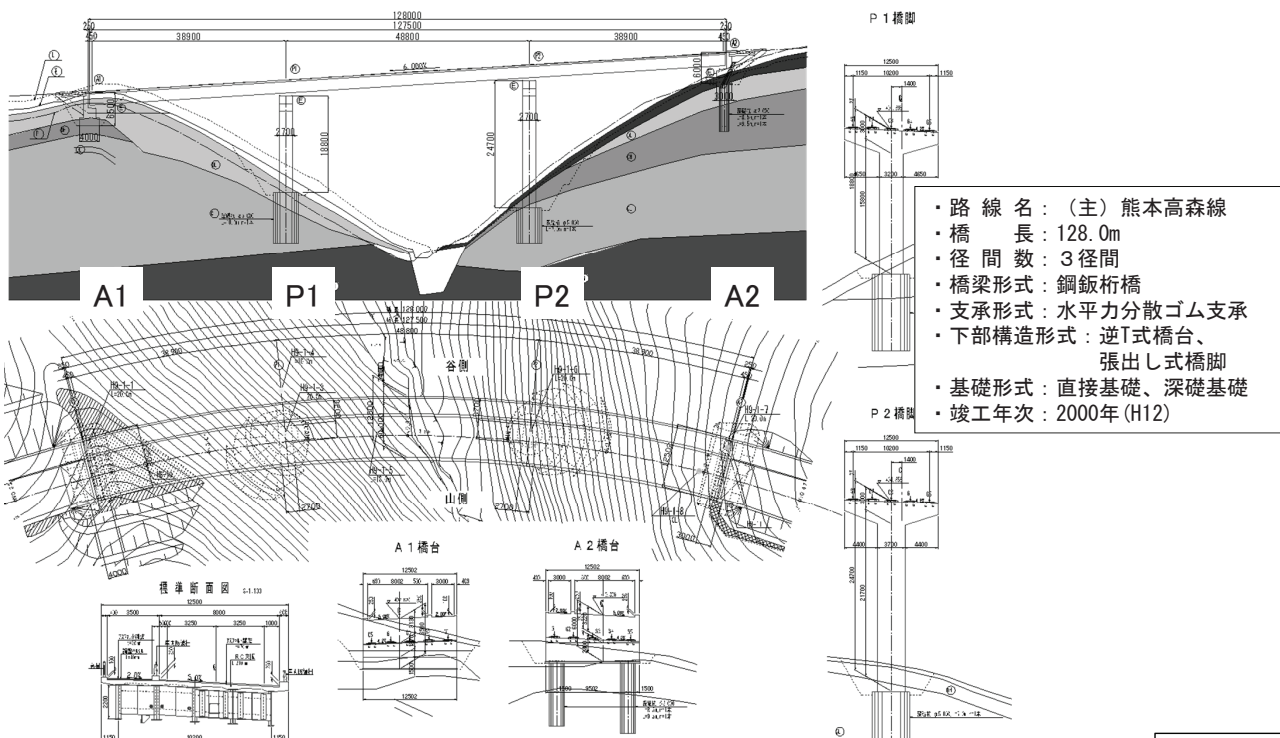


国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



15

扇の坂橋



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



熊本県提供

16

扇の坂橋



写真-1 扇の坂橋



写真-2 A1橋台ゴム支承上
の下フランジの変形



写真-3 A1橋台の横変
位拘束構造の損傷



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



17

扇の坂橋



A1橋台 (P1側から)



P2橋脚 (A2側から)



P1橋脚 (A1側から)



A2橋台 (P2側から)



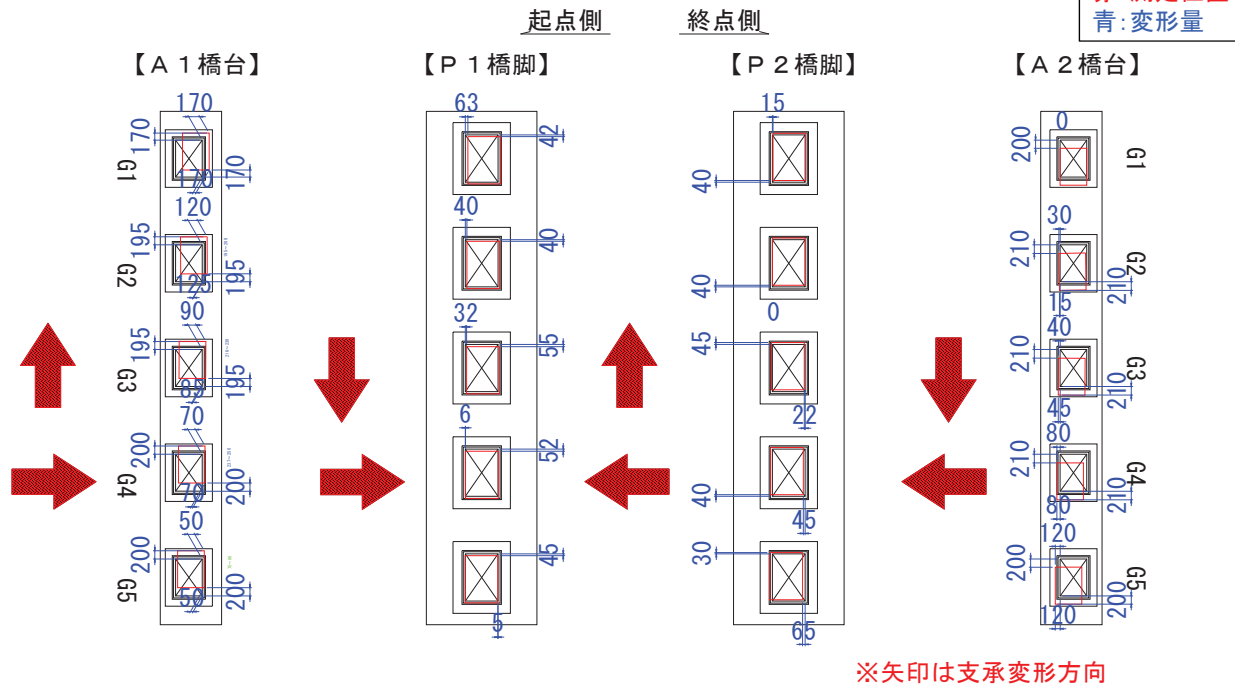
国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



18

扇の坂橋の測量結果

扇の坂橋の各下部構造上の支承の残留変形



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

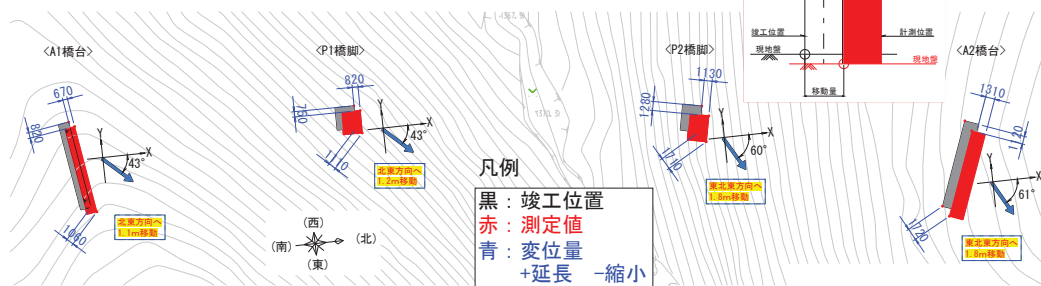


国土交通省提供

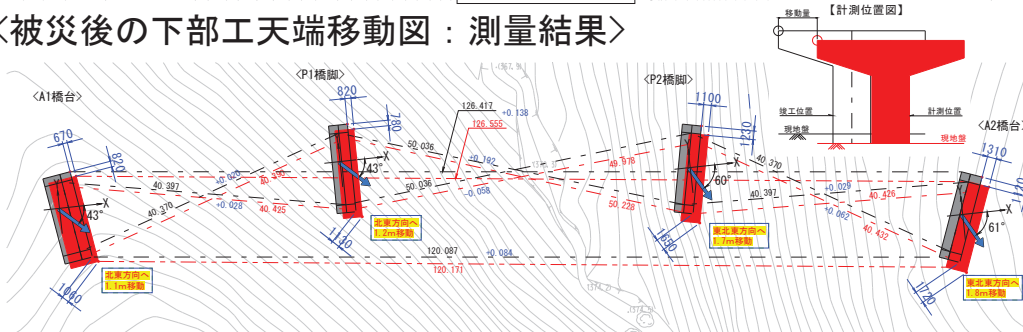
19

扇の坂橋の測量結果

〈被災後の地山移動図：測量結果〉 地山の移動は柱基部の測定値より計測



〈被災後の下部工天端移動図：測量結果〉



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

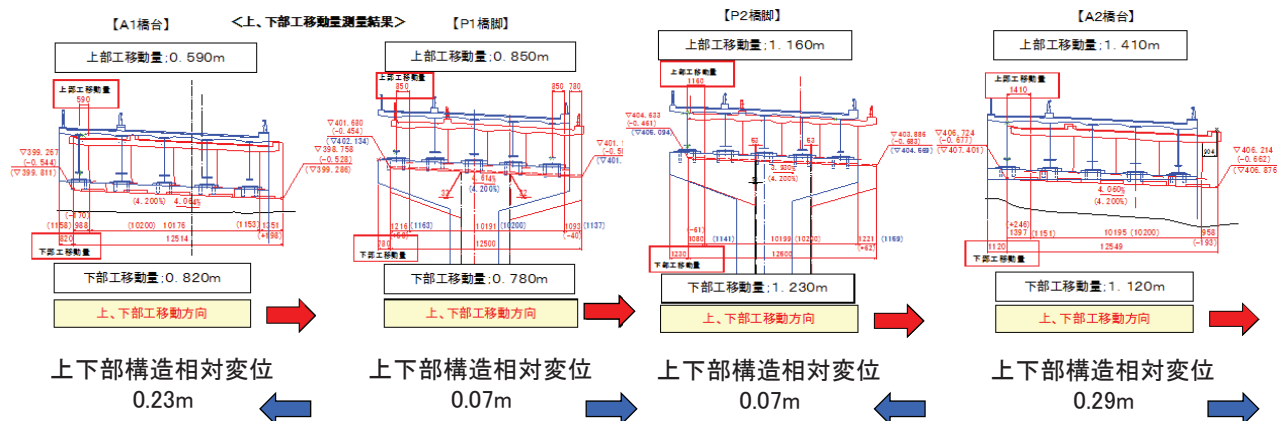


国土交通省提供

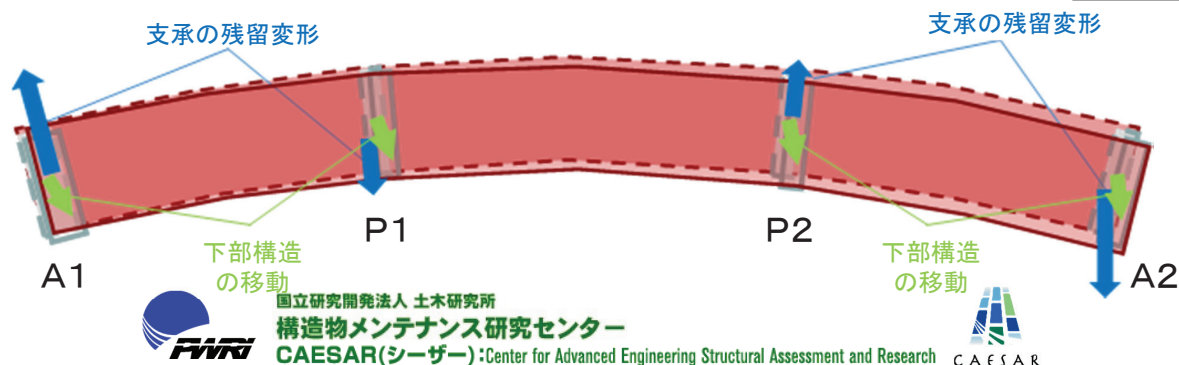
20

扇の坂橋の測量結果

— 竣工図座標値
— 震災後計測値



国土交通省提供



21

扇の坂橋の損傷状況



A1橋台上の伸縮装置

A2橋台上の伸縮装置

CAESAR (シーザー): Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

22

扇の坂橋の損傷状況



23

扇の坂橋の損傷要因の推定

- RCブロックのせん断破壊はブラケットの緩衝ゴムとの衝突によるものと考えられる
- 伸縮装置がほとんど損傷していない状態で、RCブロックとブラケットの緩衝ゴムが衝突するためには、伸縮装置のかみ合わせが外れる必要。
- ブラケットが当たったと考えられる位置を考慮すると、伸縮装置は引張方向に外れたと考えられる。
- ここで、下部構造の移動を考えなければ、A1側の伸縮装置が伸びれば、A2側の伸縮装置は縮むはず。
- 伸縮装置の圧縮側遊間は105mmであり、ブラケットのゴム幅150mmと比べると、下部構造の移動を考えなければ説明できない。
- 伸縮装置の残留変位およびRCブロックのせん断破壊は、地盤変位の影響によるものと推定される。

24

大切畑大橋



写真-1 大切畑大橋全景



写真-2 大切畑大橋(A1側から)



写真-3 桁の残留変位



写真-4 落橋防止ケーブルの破断



写真-5 P2橋脚のひび割れ

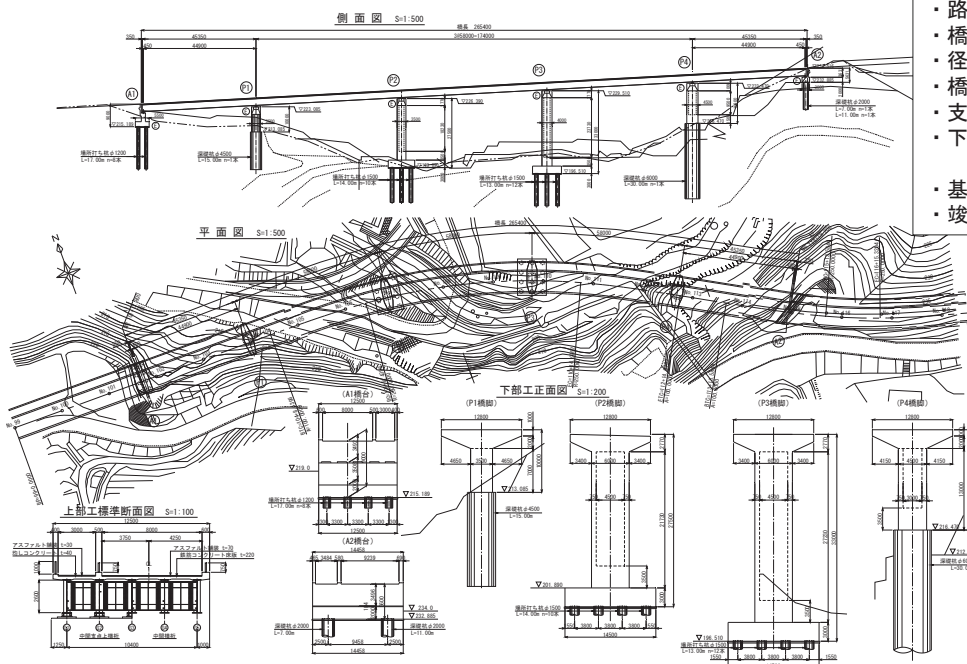


国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



25

大切畑大橋



- ・路線名：(主) 熊本高森線
- ・橋長：265.4m
- ・径間数：5径間
- ・橋梁形式：鋼鈑桁橋
- ・支承形式：水平力分散ゴム支承
- ・下部構造形式：逆T式橋台、
張出し式橋脚
- ・基礎形式：場所打ち杭、深礎杭
- ・竣工年次：2001年(H13)

熊本県提供



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research

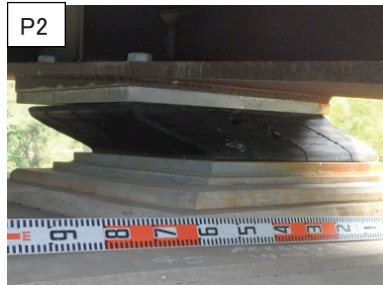


26

大切畑大橋の支承の損傷



ゴム部分又は接着層が破断



残留変形



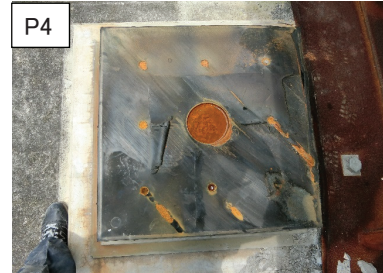
取り付けボルトが破断



取り付けボルトが破断



取り付けボルトが破断



ゴム部分又は接着層が破断

写真-1 ゴム支承の損傷状態



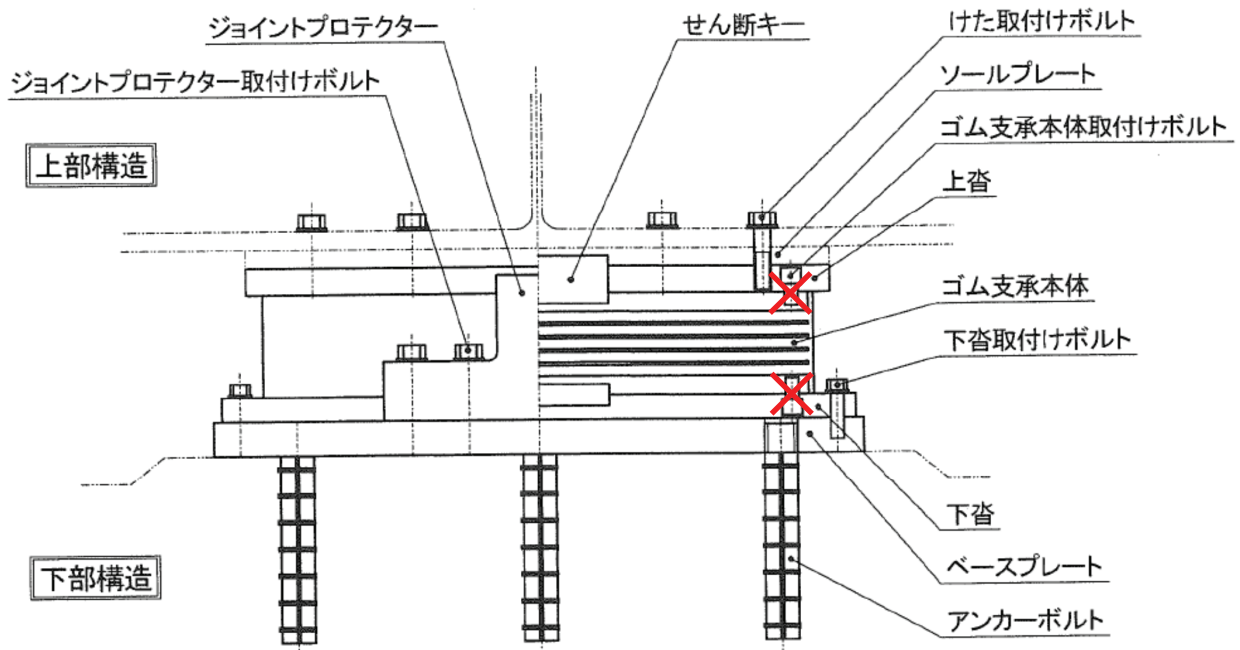
国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



国土交通省提供

27

大切畑大橋の支承の破壊箇所 (P1,P3,P4)



鋼橋用支承の構造例



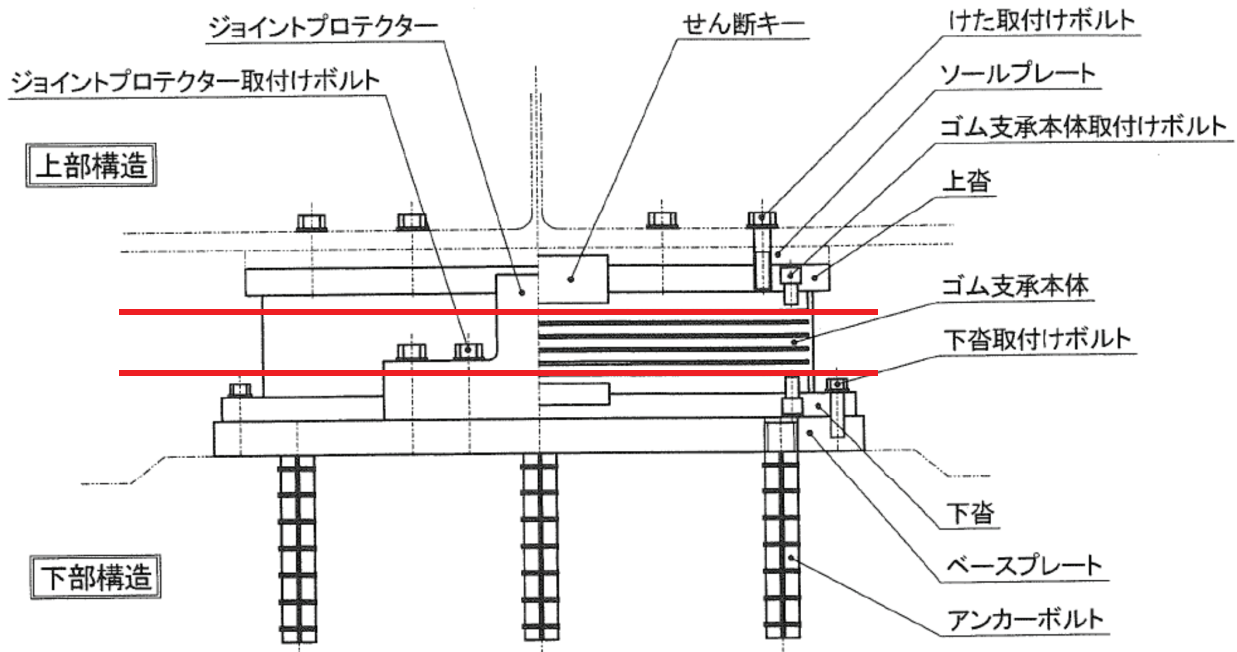
国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



ゴム支承の鋼材部の設計標準
(案):(社)日本支承協会、ゴム支
承協会 に加筆

28

大切畑大橋の支承の破壊箇所 (A1,A2)



鋼橋用支承の構造例



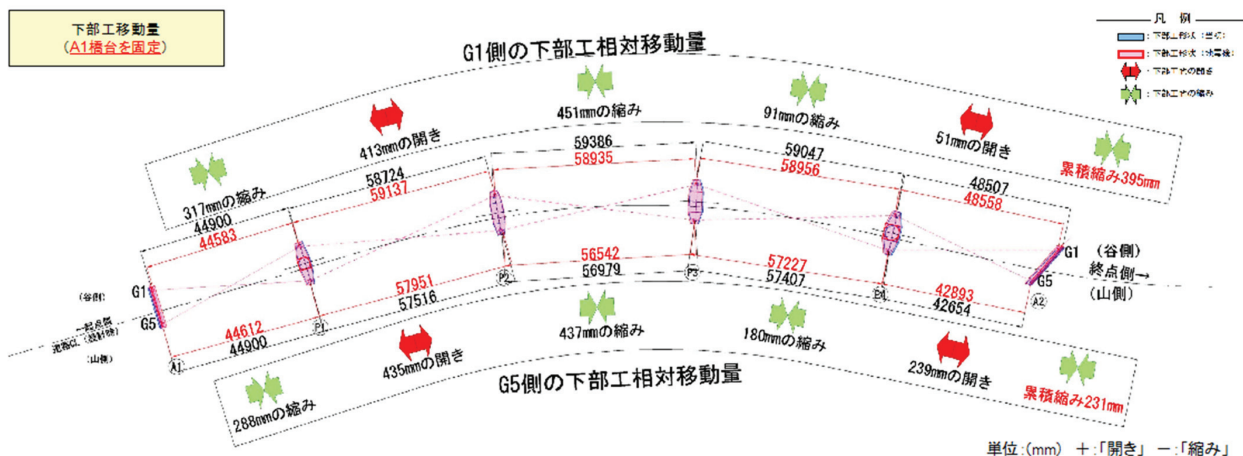
国立研究開発法人 土木研究所
 構造物メンテナンス研究センター
 CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



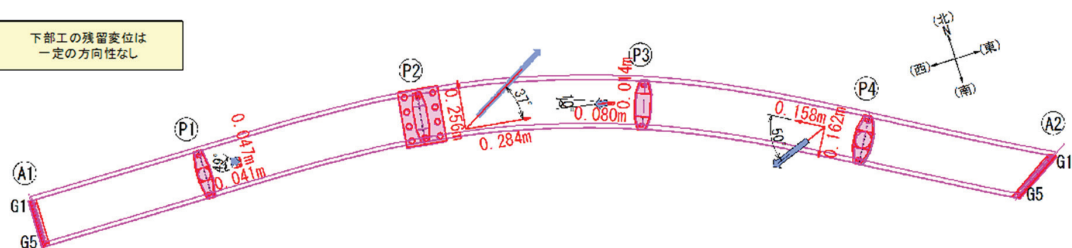
ゴム支承の鋼材部の設計標準
 (案):(社)日本支承協会、ゴム支
 承協会 に加筆

29

大切畑大橋の測量結果



下部工の残留変位は一定の方向性なし



国土交通省提供

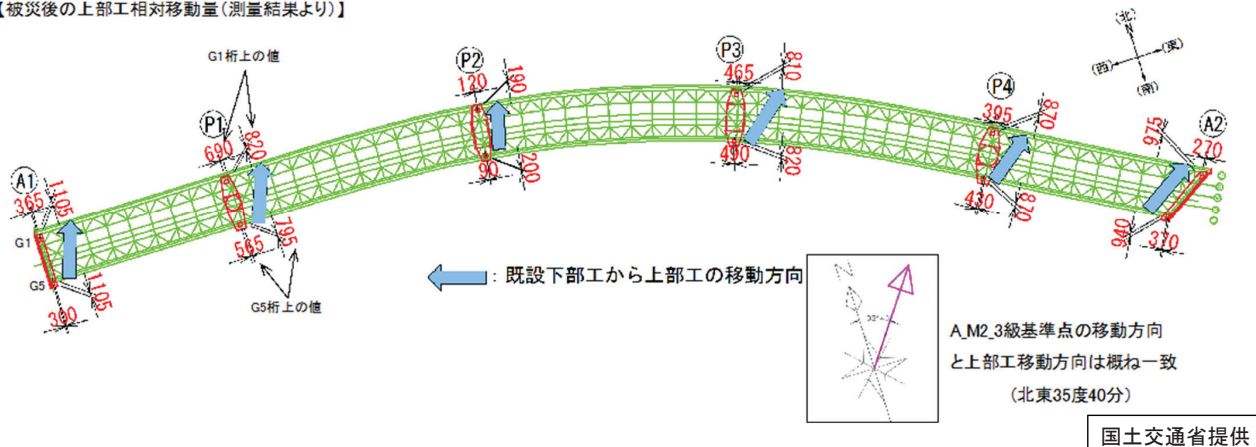


国立研究開発法人 土木研究所
 構造物メンテナンス研究センター
 CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



30

【被災後の上部工相対移動量(測量結果より)】



- 上部構造は、下部構造に対して相対的に北東方向に移動
- P2橋脚は地表面位置での水平変位と残留傾斜の両方の影響で北東方向に移動
- その影響でP2上の支承の残留変形は232～264%のひずみに収まったと思料
- その他の下部構造においては、上下部相対変位が約4～5倍



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



31

- 熊本地震で被災した道路橋のうち、主要地方道熊本高森線で平成8年道路橋示方書に基づいて耐震設計された橋である俵山大橋、扇の坂橋、大切畑大橋について、特に地盤変位に着目して被害の分析を行った。
- 地盤変位の影響によると推定される被害が見られることを確認した。
- 少なくとも地震時の地盤変位により下部構造が追従して移動し、これに伴って下部構造だけでなく、支承部や上部構造にも損傷が生じる状況となった可能性があることが明らかになった。
- このような被災経験を踏まえ、今後道路橋の建設に当たっては、地震時地盤変位が生じる可能性を適切に調査した上で、橋に及ぼす影響を最小化できるよう、路線計画や構造計画の各段階において適切な検討を行っていく必要があると考えられる。



国立研究開発法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
CAESAR(シーザー):Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research



32

必要な性能を確保する ～東北地整の耐久性確保の取り組み～

平成29年8月31日

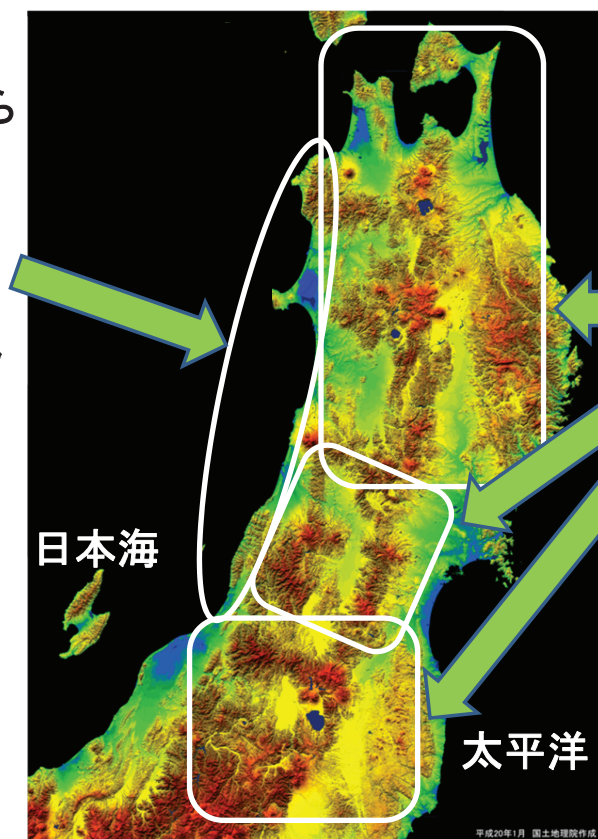
元 国土交通省東北地方整備局
佐藤 和徳

本日のプレゼンテーション

1. 東北地方の地形と気象
2. 厳しい気象環境、供用環境
3. 劣化の実態
4. 東北地方のコンクリート道路橋の
改善すべき事項や達成すべき性能
5. 対策の実例
6. 全国標準から地域標準へ
(全国一律の基準から
地域の劣化特性に適合した基準へ)

1. 東北地方の地形と気象

冬期に日本海からの季節風による飛来塩分の影響が強い地域
飛来塩分による塩害の発生リスクが高い地域



山岳・内陸地形の影響で積雪・寒冷の影響が強い地域
凍害、凍結防止剤による塩害、塩分環境下のASRの発生リスクが高い地域

凍結防止剤の散布状況 (写真提供 東北地方整備局)



散布車の後方から塩分を主成分とする凍結防止剤を散布

2. 厳しい気象環境、 供用環境

○平均散布量は
約10トン／km／年

○峠部及び日本海側では
30トン／km／年 超

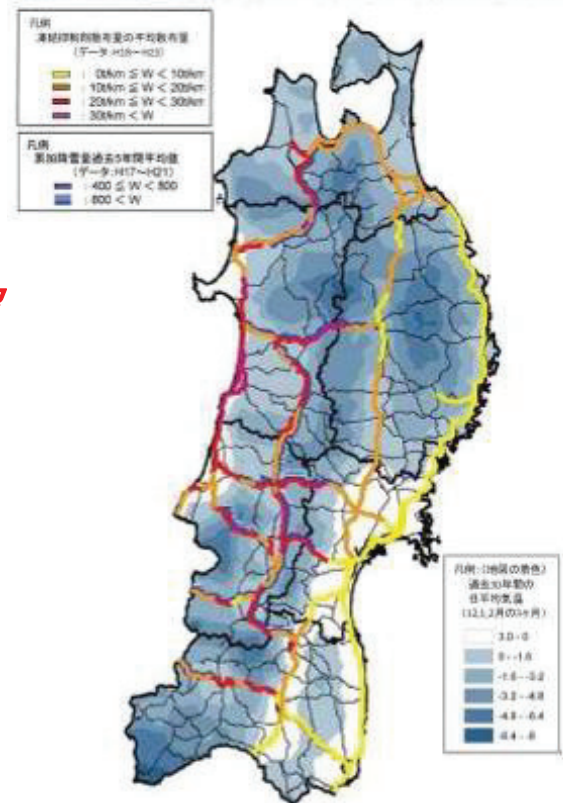
○H5スパイクタイヤ禁止以降に
散布量は増加

○凍結しやすい橋梁部は
重点散布区間

○凍結防止剤による塩害と
積雪・寒冷による凍害が発生

○橋梁など構造物には過酷な環境

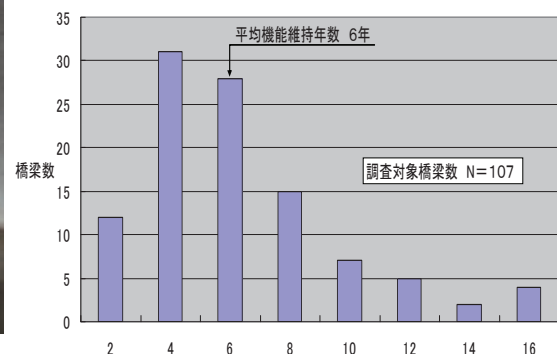
【除雪工区毎の凍結抑制剤散布量の整理(H18～H23の平均散布量)】



3. 劣化の実態(路面排水の影響)



伸縮装置の非排水機能は
平均6年で喪失
桁端部の塩害の補修が困難



伸縮装置の遊間から光が差している。非排水機能が喪失。
路面排水には塩分を主成分とする凍結防止剤が混入して
いるため、PC桁の端部に塩害が発生。

劣化の実態（路面排水の影響）



スラブドレーンの流末水で排水管が腐食



排水柵周辺からの漏水

劣化の実態（表層品質の影響）



沈みひび割れ



打重ね線



表面気泡



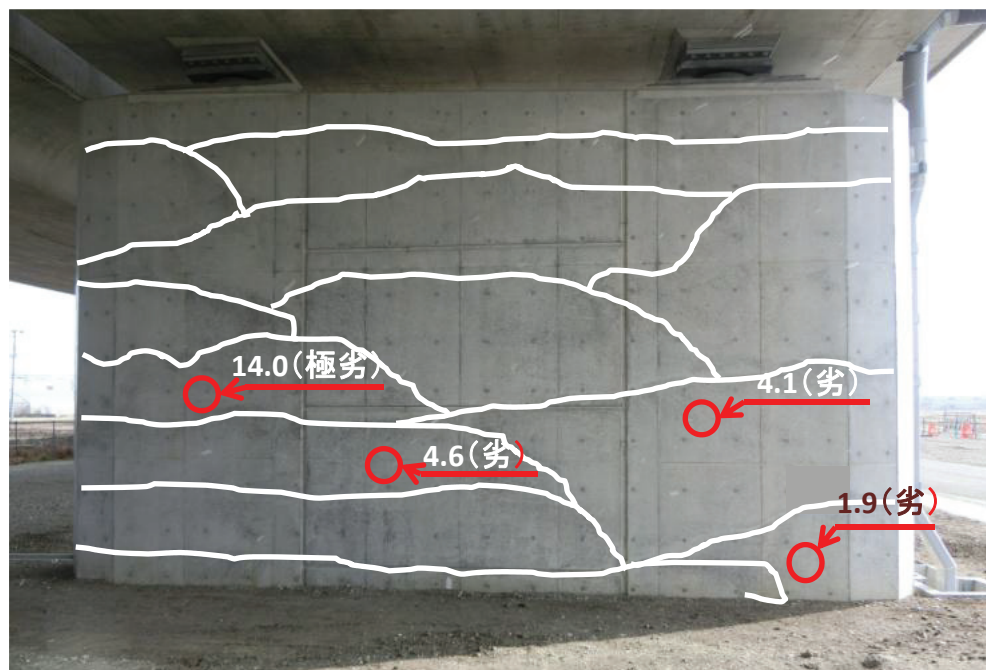
型枠継目のノロ漏れ

施工中に生じる不具合のために、塩分混じりの水が浸透しやすい表層品質となっている。

劣化の実態（表層品質の影響）

（データ提供：東北技術事務所）

補修は必要なくとも、打込み・締固めの程度が場所によって異なるので、透気係数はばらつく



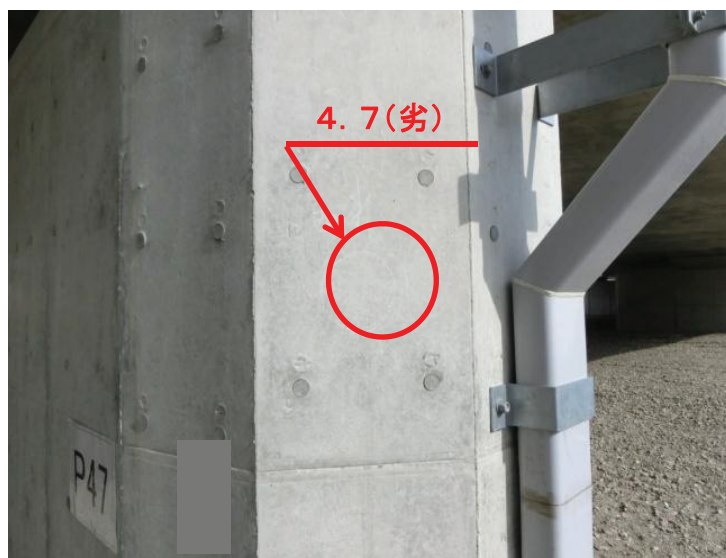
コンクリートの強度等 よび強度 24N/mm² スランプ 12cm 高炉B種 水セメント

	優	良	一般	劣	極劣
透気係数 KT (×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	10~100

劣化の実態（養生の影響）

表面微細ひび割れのある橋脚の透気係数

（データ提供：東北技術事務所）

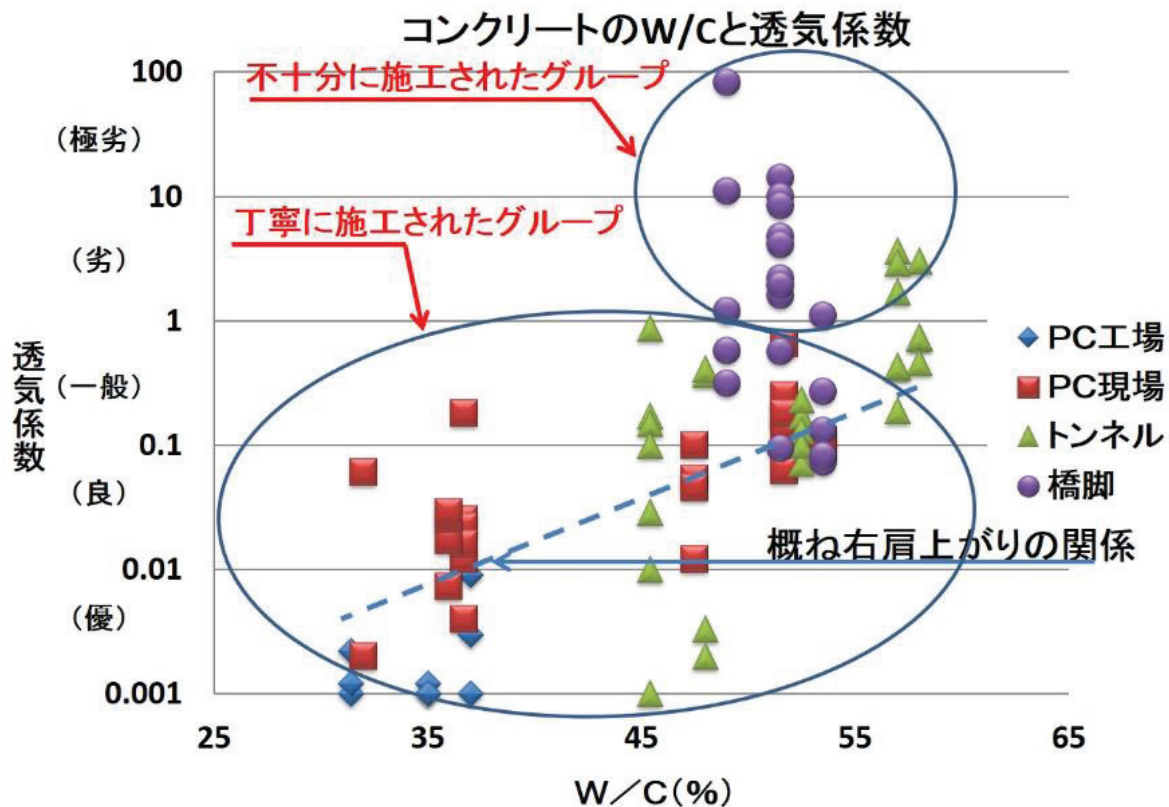


冬期施工の橋脚で、共通仕様書通りに養生して脱型した後、何もなかった橋脚。表面に微細ひび割れが入ったため透気係数は（劣）を計測。W/C=52.5%であれば透気係数は（一般）が十分可能。塩分混じりの水が浸透しやすい。

コンクリートの強度等 よび強度 24N/mm² スランプ 12cm 高炉B種 水セメント比 52.5%

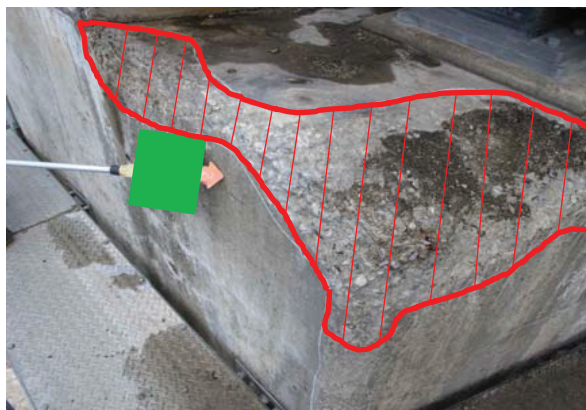
	優	良	一般	劣	極劣
透気係数 KT (×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1	1~10	10~100

コンクリートの表層品質の実態



劣化の実態（凍害）

供用11年目の橋台の凍害

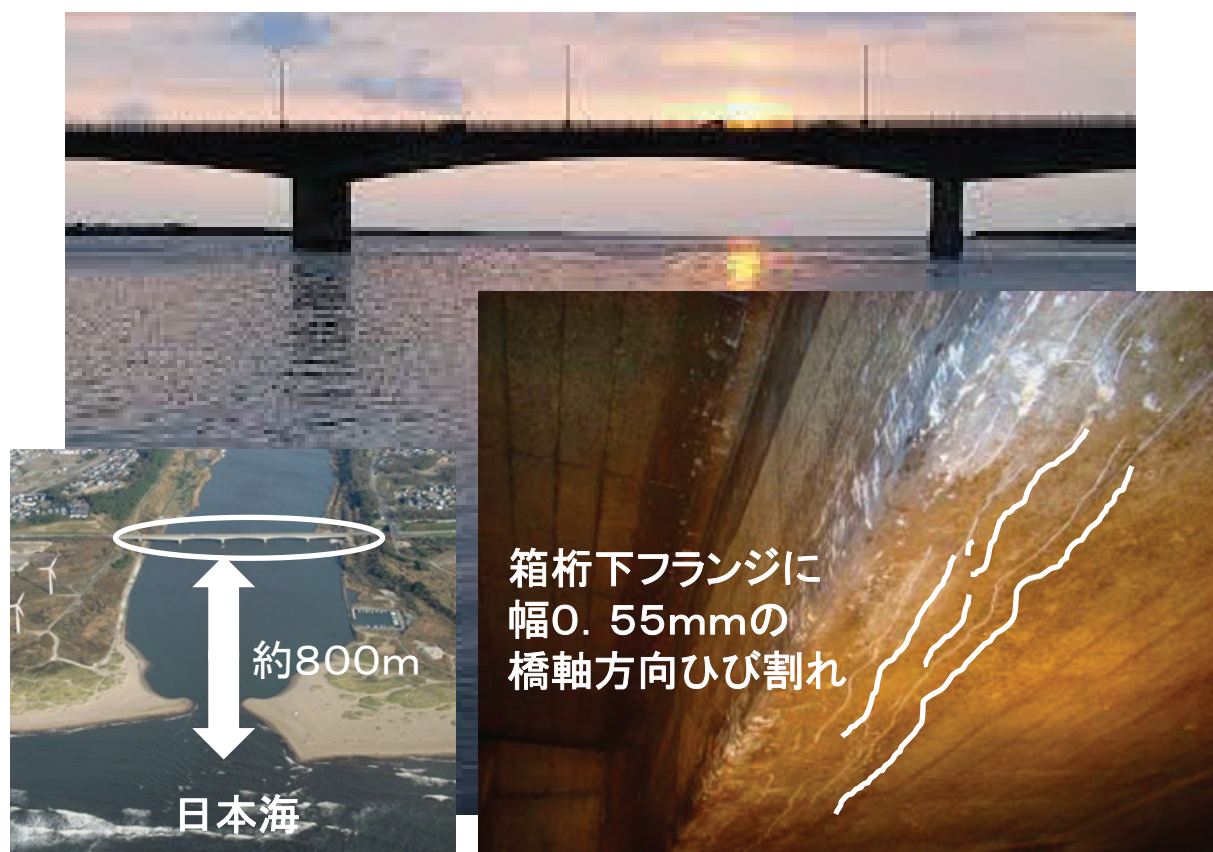


トンネル坑門工の凍害



凍結防止剤の影響で凍害が促進
道路橋示方書では、空気量4.5%を標準としているが、
下振れした場合凍害が発生しやすい

劣化の実態（飛来塩分による塩害）



劣化の実態（凍結防止剤による塩害）

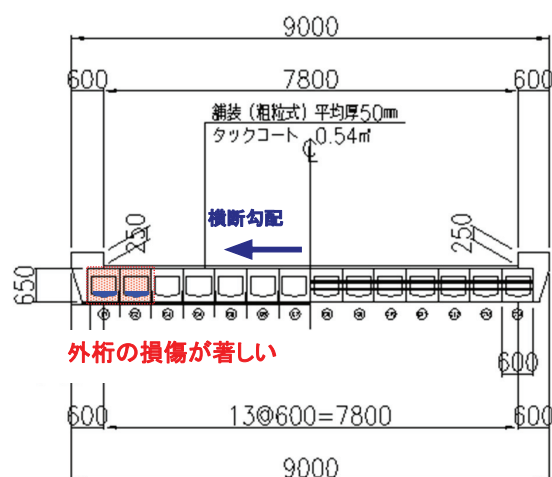


冬期には塩分を主成分とする凍結防止剤混じりの雪堤が形成される山岳橋梁のPC中空床版橋は、凍結防止剤による塩害で供用後34年で架替

凍結防止剤による塩害で供用後34年で架替



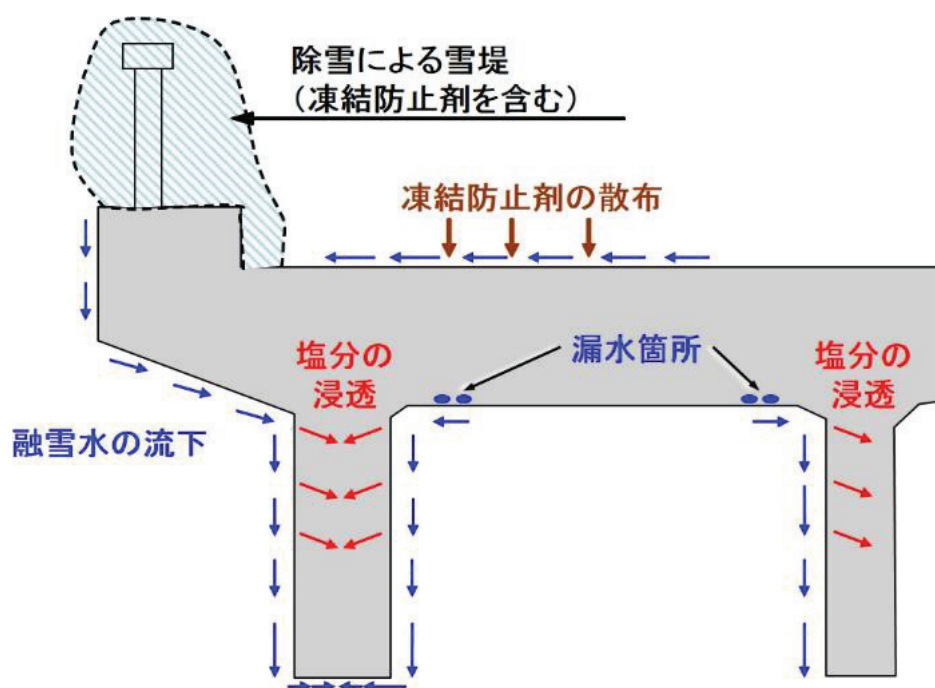
桁下面のPC鋼材の腐食、破断状況
硬化コンクリート中の空気量は約0%



※ 凍結制御剤による塩害と凍害の
複合劣化により損傷が著しく進行？

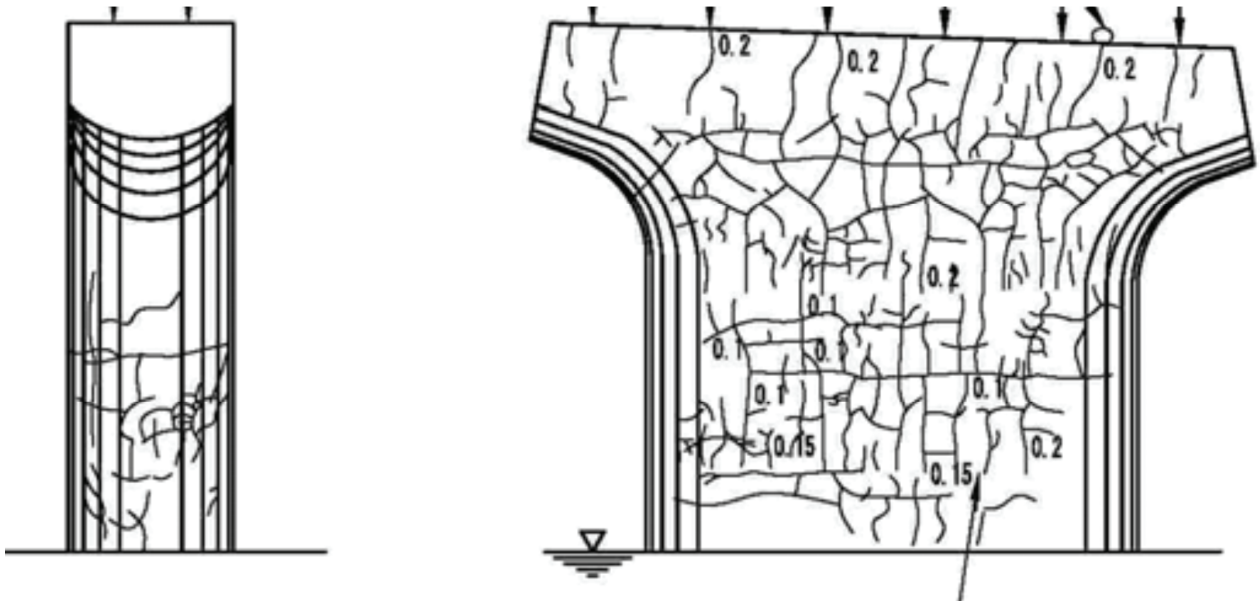
横断勾配の低い方の外桁内に塩分を含んだ水が滞水し、
内部鋼材を腐食させ、桁下面のコンクリートが剥離

凍結防止剤による塩害発生メカニズム



路面からの塩分混じりの回り水が塩害の主原因

劣化の実態(塩分環境下のASR)



海上に建設された橋脚に生じたひび割れ

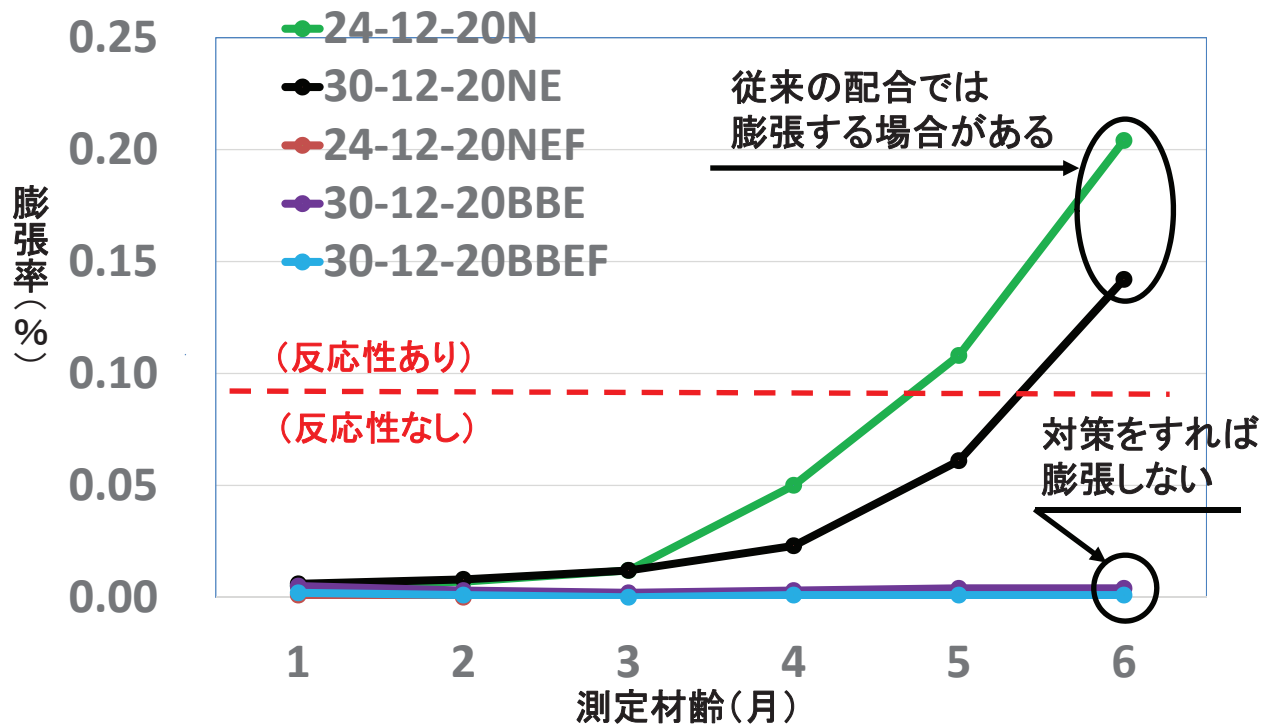
劣化の実態 (塩分環境下のASR)

桁端部の漏水の影響範囲に発生したASR



凍結防止剤の影響でASRが発生
道路橋示方書では、凍結防止剤による
アルカリの追加供給を想定していない

ASR反応性判定試験（SSWコンクリートバー法）



凡例... N: 普通セメント E: 膨張剤 F: フライアッシュ BB: 高炉セメント

劣化の実態（床版の砂利化）

舗装から土砂が噴出している箇所の
床版の状態、コンクリートの砂利化、鋼材腐食



塩害、凍害、ASR及び交通荷重による疲労の複合劣化？
交通量約1万2千台/日 昭和47年示方書 供用後36年

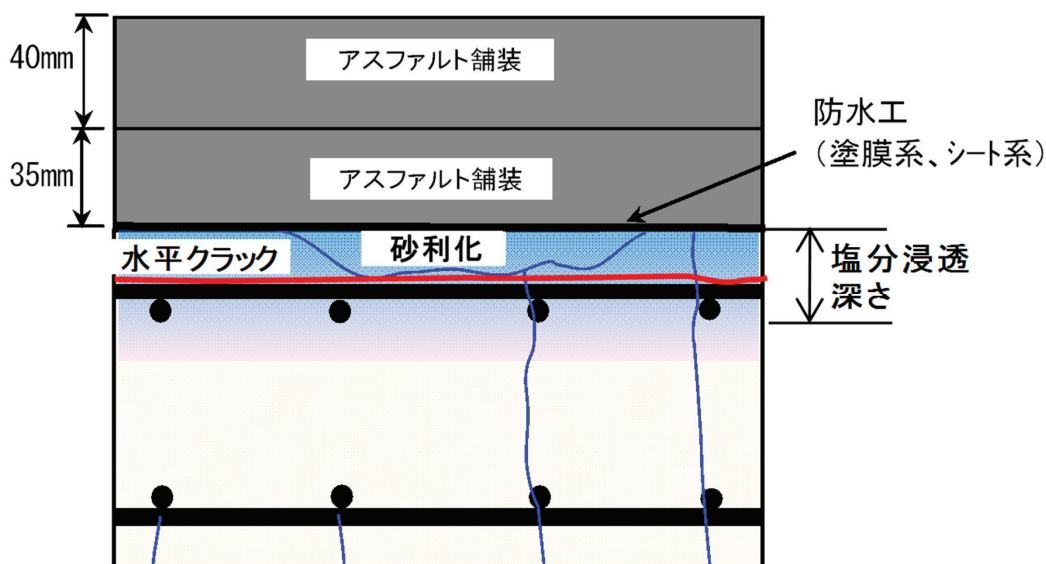
東北地方の床版は砂利化で壊れる

橋梁名	劣化形態	交通量(台／日)	供用後年数
橋梁1	交通荷重による疲労	約24、000台	45年
橋梁2	砂利化	約12、000台	36年
橋梁3	砂利化	約 8、000台	42年
橋梁4	砂利化	約 9、000台	35年
橋梁5	砂利化の疑い	約16、000台	36年

交通荷重による疲労で壊れた橋梁よりも短い期間で、しかも半分から約1/3の交通量で砂利化で壊れる

→ 交通量が原因で壊れているのでは無い
では、なぜ砂利化が起こるのか？

砂利化の推定メカニズム



水平ひび割れから入った塩分混じりの路面排水が、水平ひび割れ上部のコンクリート塊を塩害や凍害、塩分環境下のASRで脆弱化し、そこに交通荷重の繰り返しを受けて砂利化が発生

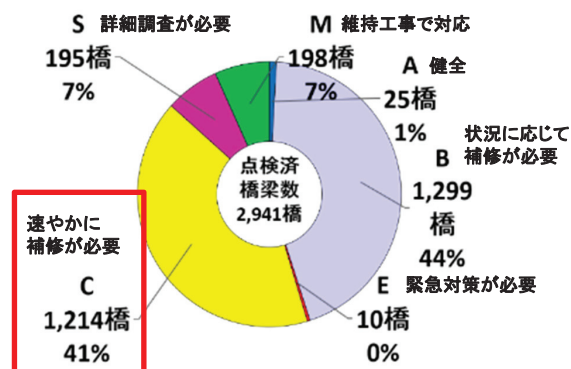
(資料提供: 日本大学 岩城 一郎教授)

東北では現在の基準等で品質・耐久性確保は困難

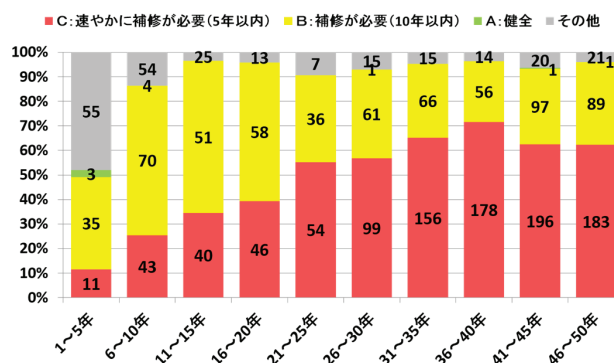
照査する項目	規定の概要
コンクリートの表層品質	規定不十分。表層品質に関する定量的な規定が不十分
飛来塩分による塩害	規定あり。海岸線からの距離により対策区分を決定
凍結防止剤による塩害	規定不十分。解説に記載はあるが実務として運用できる規定なし
凍害	規定不十分。空気量4.5%が標準であり、凍害対策としては6%程度必要
塩分環境下のASR	規定なし。基準策定時には、想定していない劣化
床版の砂利化	規定なし。基準策定時には、想定していない劣化
耐久性の検討	規定不十分。複合劣化に対する照査について実務として運用できる規定なし

大きな原因は、道路管理者による凍結防止剤の大量散布

道路管理者が基準が想定していない 供用環境をつくってしまった結果 構造物は早期に劣化



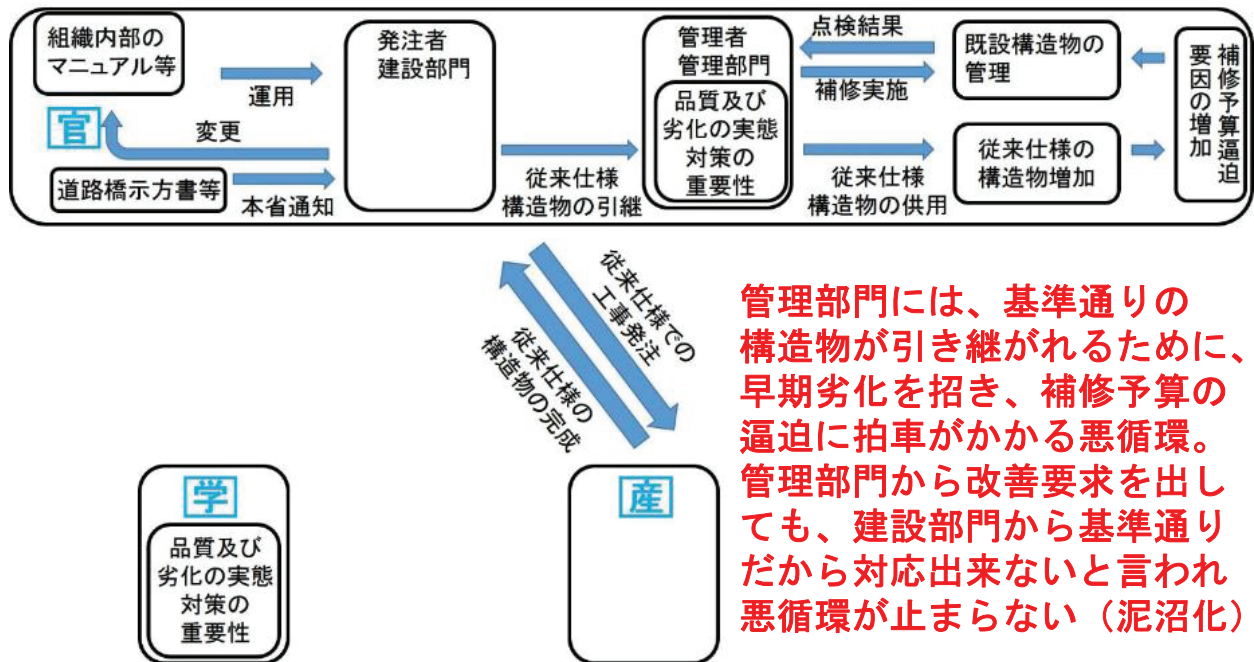
橋梁点検の結果
要補修が約4割



15年程度で要補修は約3割
25年程度で要補修は約5割

大量の構造物を短期間に建設する復興道路等の事業では
東北地方の劣化の実態を反映した対策を道路管理者が
とる必要がある。

現状は劣化する構造物が建設され続けるという悪循環。(管理部門の不条理)



建設部門は劣化の実態を認識していないため自覚なき悪循環を促進

復興道路等では多数の構造物を短期間に建設

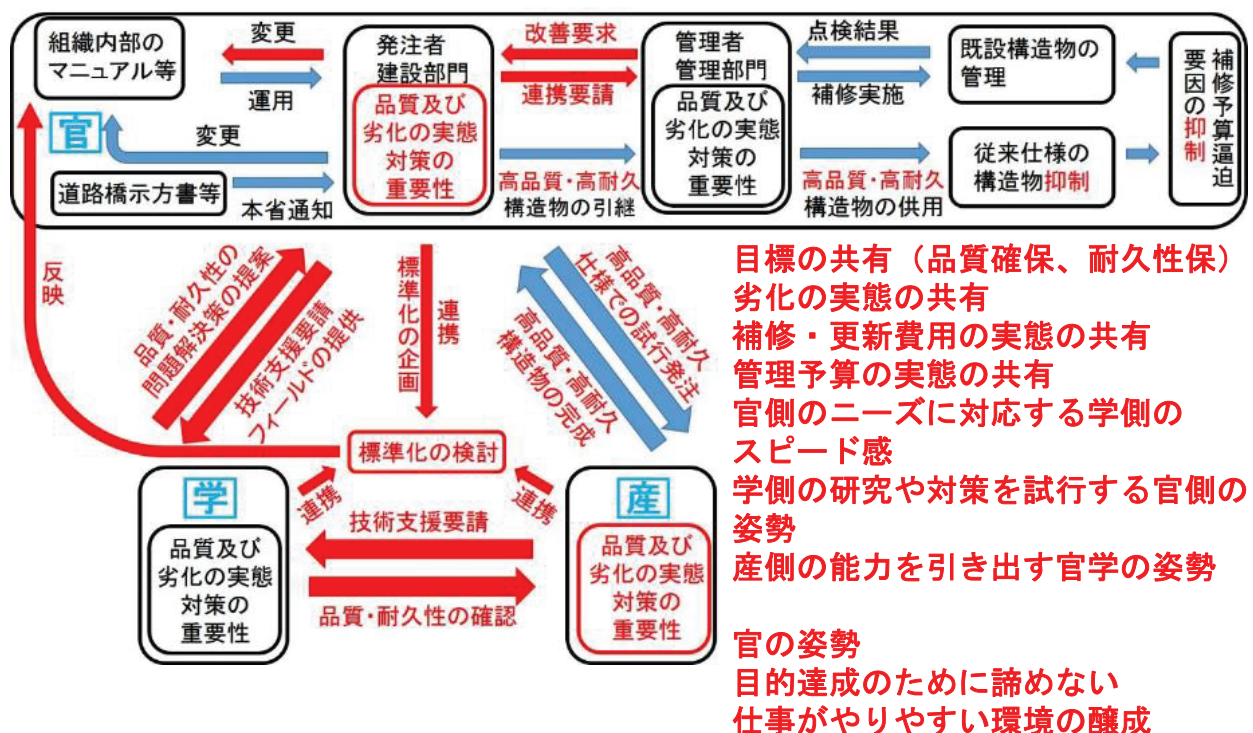


4. 東北地方のコンクリート道路橋の改善すべき事項や達成すべき性能

- ①劣化の実態を建設部門が共有し、**産学官で対策を実施**
- ②**塩分混じりの水の影響を緩和**(排水流末の適正化)
- ③**水が浸透しにくいコンクリート**の施工(表層品質の確保)
- ④**凍害**の防止
- ⑤凍結防止剤による**塩害**を防止
- ⑥塩分環境下の**ASR**を防止
- ⑦**床版の砂利化**の防止(複合劣化対策)

5. 対策の実例 (産学官の連携)

あるべき官内部および「産学官」の関係



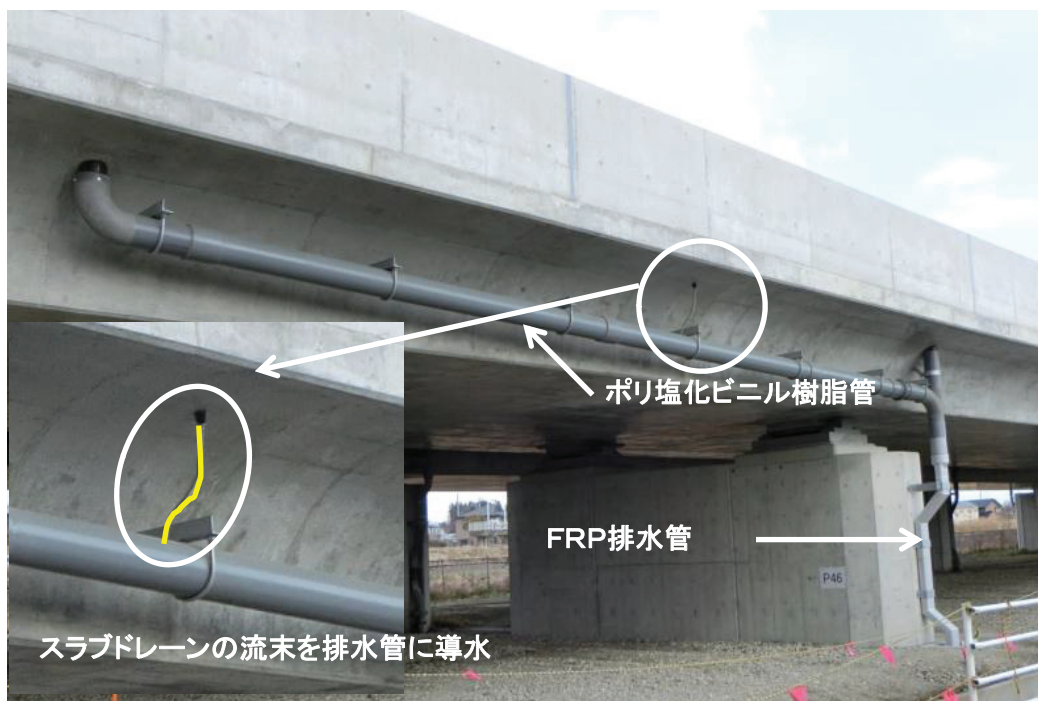
対策の実例（路面排水の影響対策）

桁端部に保護塗装、防錆鋼材を使用



橋の隙間からの漏水を防止。仮に漏水しても内部鋼材の腐食を防止

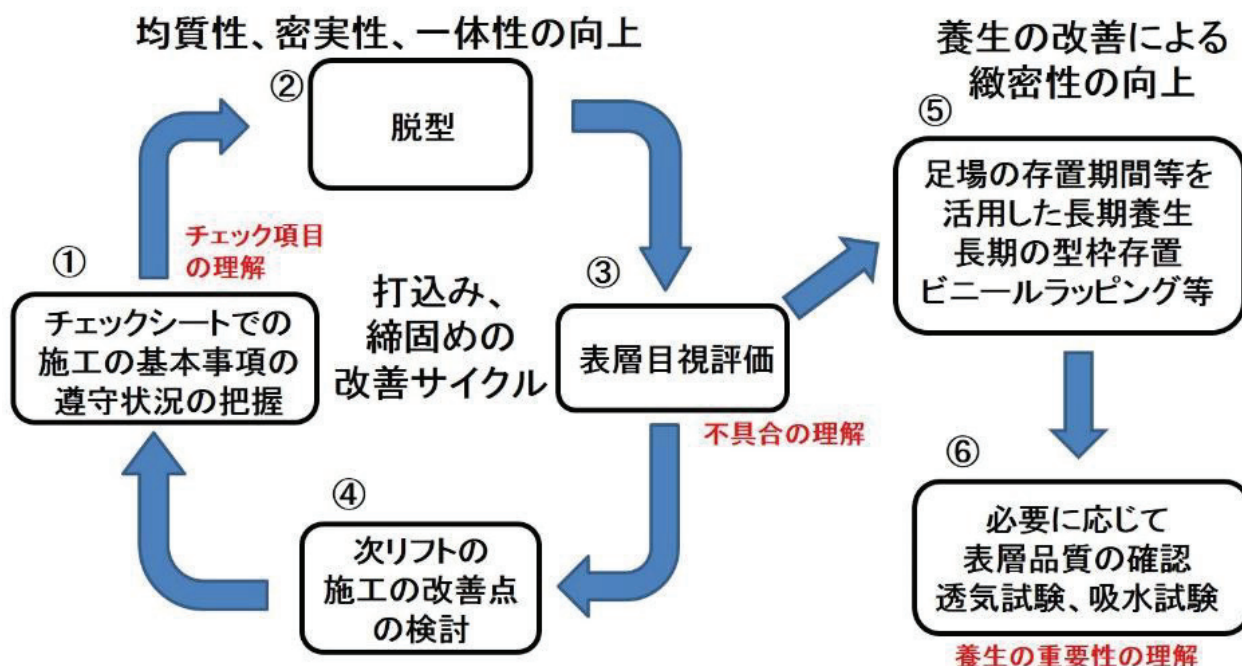
対策の実例（路面排水の影響対策）



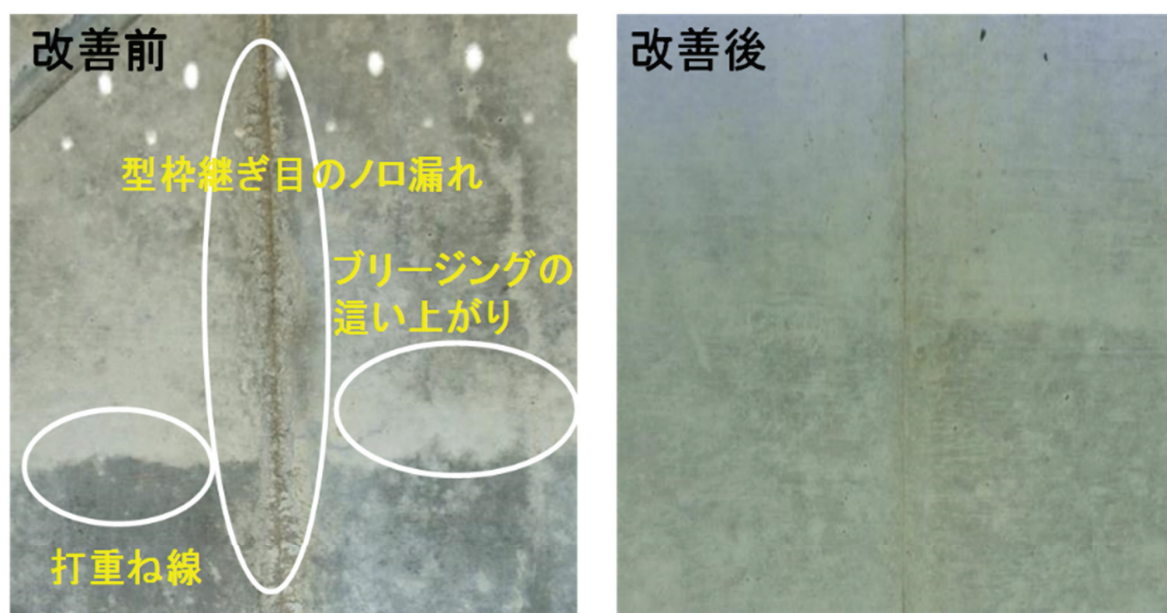
鋼管をポリ塩化ビニル樹脂管に変更し腐食を防止。
スラブドレーンからの排水を排水管に導水。

対策の実例（品質確保の仕組みと効果）

→ 気づきによる監督行為の適正化



品質確保の仕組みの効果



表層目視評価により、打重ね線や型枠継ぎ目のノロ漏れの改善を図った事例。施工状況把握チェックシートの効果でブリーディングの這い上がりも目立たなくなっている。

橋脚をビニールで巻いて追加養生



100m巻2000円の農業用ビニールシートで
橋脚を追加養生
透気係数は(一般)→(良)に改善

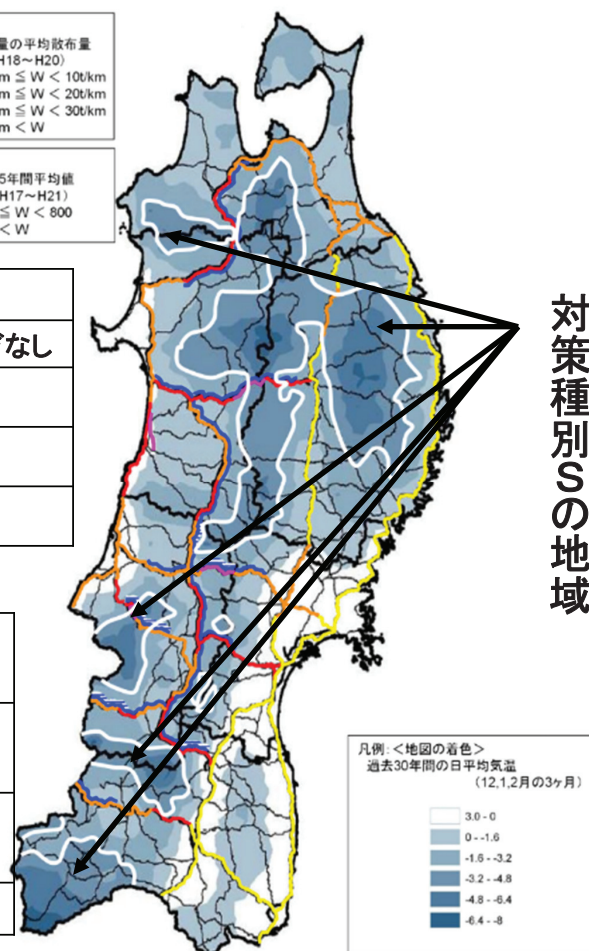
対策の実例 (凍害対策)

凍害の対策種別

	凍結防止剤の散布量		
	20t/km以上	20t/km未満	ほとんどなし
凍害区分3	S	A	A
凍害区分2	A	A	A
凍害区分1	A	A	B

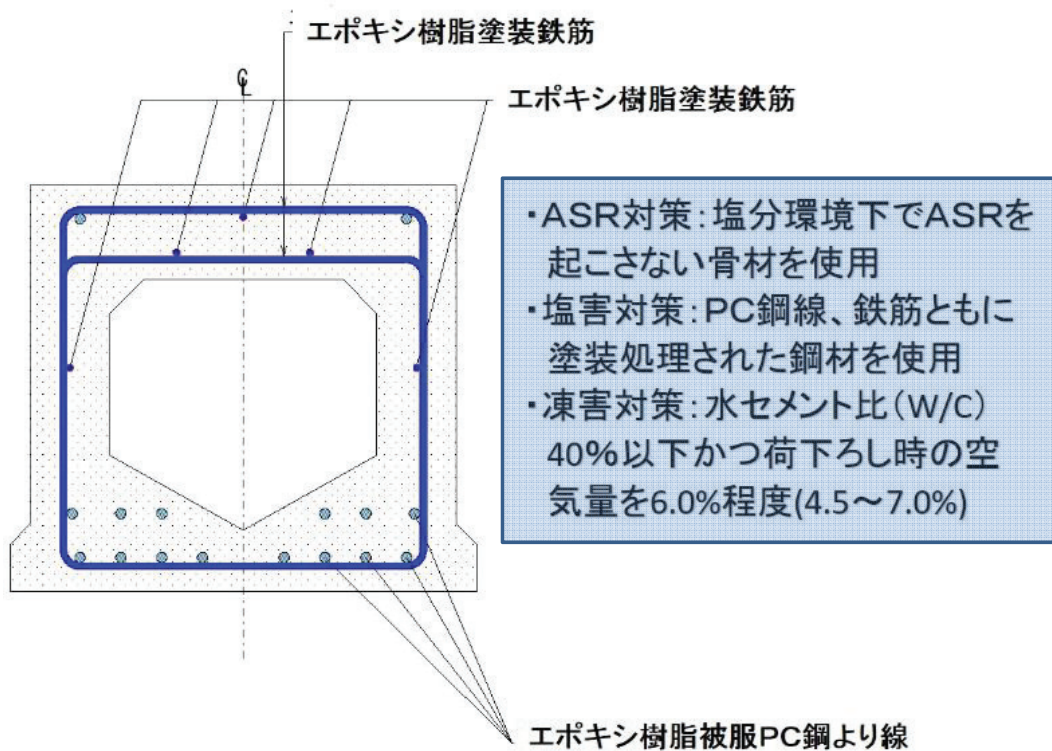
凍害対策の内容

対策種別	対策の内容
S	目標空気量6%かつ水結合材比45%以下 あるいは目標空気量7%(JIS適用外)
A	目標空気量5%(4.5~6%) (努力目標)(JIS適用)
B	目標空気量4.5±1.5%(JIS適用)



対策の実例(工場製作のPC桁の高耐久化)

PC中空床版橋の例



対策の実例(PCT桁の高耐久化)



防錆鉄筋の
組み立て状況

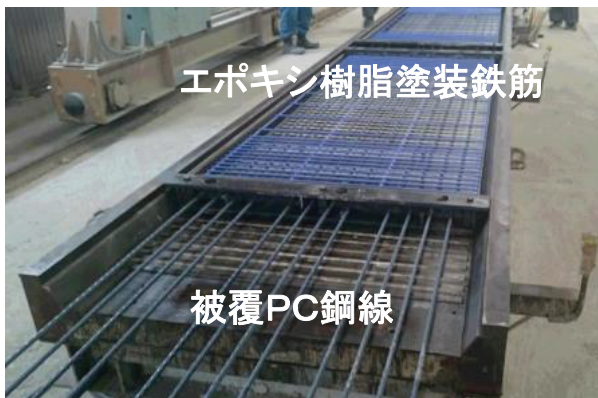


PC鋼線も防錆仕様
シースはPEシース



PC鋼線の
曲げ上げ治具も
防錆仕様

対策の実例（PCコンポ桁の高耐久化）



PC板および主桁の内部鋼材はすべて防錆処理

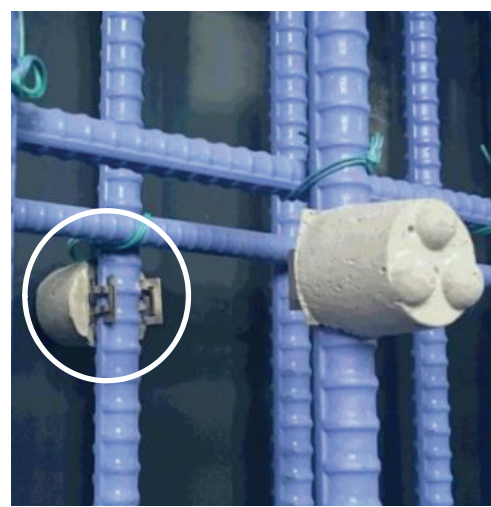
PCコンポ桁の高耐久化



ステンレス製の
せん断キー



カプラーシースの状況



スペーサー金具もステンレス

PCコンポ桁の高耐久化



桁の仮置き状況

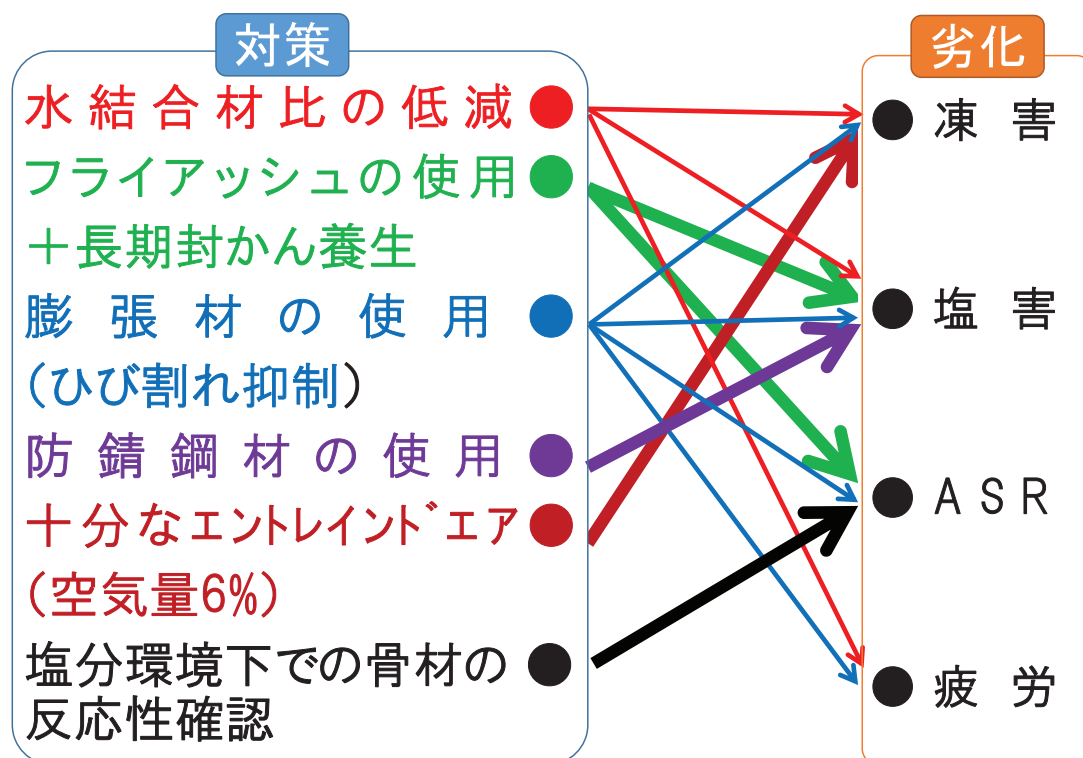


主桁の接合状況

現場打ちPC箱桁の高耐久化



対策の実例(床版の砂利化対策) コンクリート床版の多重防護の考え方



高耐久床版の基本仕様

鉄筋は防錆仕様(エポキシ樹脂塗装鉄筋)

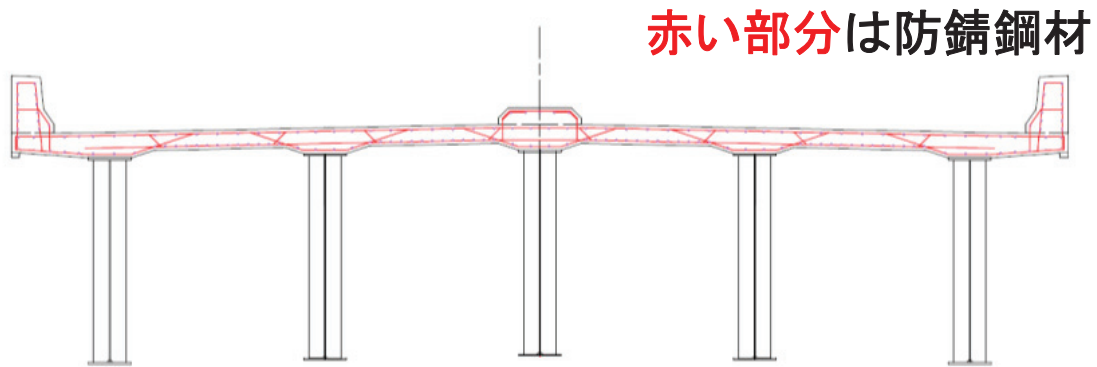
現場到着時の空気量の目標値は4.5%以上6%程度

W/B(水結合材比)は45%程度

フライアッシュ床版または高炉スラグ床版の採用

膨張剤の使用

対策の実例（高耐久床版の施工例）



赤い部分は防錆鋼材

凍害対策（現着4.5%～6.0%確保）

塩害対策（防錆鋼材の採用）

ASR対策（フライアッシュの混入）

配 合 表 kg/m³													
セメント	混和材		水	細 骨 材			粗 骨 材				混 和 材		
	①	②		①	②	③	①	②	③	④	①	②	③
283	20	62.5	155	456	111	185	303			707	3.03		
水セメント比		54.8%		水結合材比			51.2%		細骨材率		43.3%		

混和材①膨張材 混和材②フライアッシュⅡ種 混和材①AE減水剤

防錆処理鉄筋を全面採用



フライアッシュコンクリートの 受け入れ検査での品質は安定

台数	出荷時刻	のべ 打設量 (㎡)	出荷時 スランプ (cm)	出荷時 空気量 (%)	出荷時 温度 (℃)	受入れ時 スランプ (cm)	受入れ時 空気量 (%)	受入れ時 温度 (℃)
1	7:00	4	14.0	6.5	16	12.0	6.0	15
2	7:10	8	15.0	6.7	15	13.0 10.5*	6.0 5.4*	15
3	7:20	12	16.0	6.5	15	13.0	6.2	15
4	7:30	16	15.0	6.7	15	10.5	6.2	15
5	7:40	20				11.5	—	15
6	7:50	24				11.0	—	14
7	8:00	28				10.5	6.7	14
8	8:10	32				9.5	—	13
9	8:20	36				10.0	—	14
10	8:30	40				10.5	—	13
12	9:00	48	13.5	6.8	12	10.5	6.2	14
24	11:00	96	15.5	6.7	14	14.0	6.3	14
36	12:50	140	14.5	6.8	15	12.5	6.2	14

目標スランプ 12.0±2.5cm 実績スランプ 9.5～14.0cm
 目標空気量 4.5～6.9% 実績空気量 6.0～6.7%

フライアッシュコンクリートの 打込み、締固めの状況



締固めと空気量の確保を両立するため締固め時間は8秒を目安
 打込み、締固め後、間をおかずにこて作業がついて来ている

床版上面は保水シートと2層仕様の プチプチシート2枚重ねで覆って養生



給熱養生。床版表層の湿潤養生期間は3ヶ月

高耐久床版の施工例

フライアッシュ床版第2号(大沢第3橋)

- ・凍害対策 目標空気量 6%
- ・塩害対策 防錆鋼材の使用
- ・ASR対策 フライアッシュまたは
高炉スラグ微粉末の使用



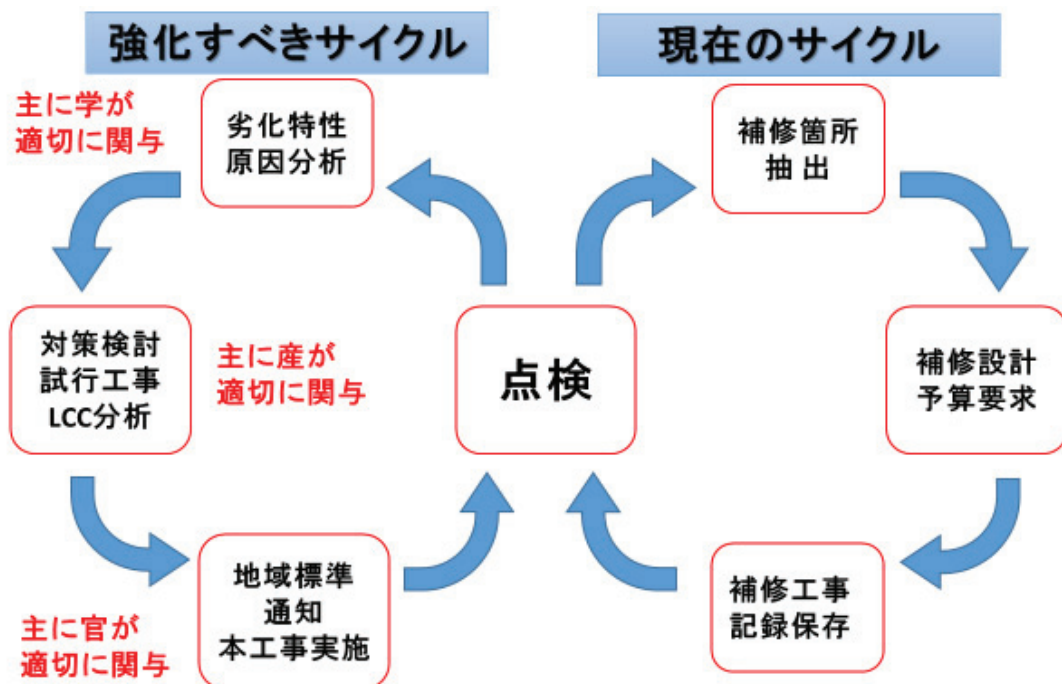
フライアッシュ床版第3号(浪板橋)

高炉スラグ床版第1号(新気仙大橋)



6. 全国標準から地域標準へ

地域の劣化特性に適応した地域独自の技術基準策定が悪循環から好循環へ転換を図る鍵（産学官の総力戦）



点検結果を有効活用。地域の劣化実態を踏まえた対策を地域標準として策定

東北地整が関わった品質・耐久性に関する手引き等 （地域標準の実例）

①設計段階における適切な排水計画

新設橋の排水計画の手引き

<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/haisuikakaku.pdf>

②施工段階における品質確保の取り組み

品質確保の手引き（案）（橋脚、橋台、函渠、擁壁編）

<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/tebiki/kyoukyaku.pdf>

品質確保の手引き（案）（トンネル覆工コンクリート編）

<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/tebiki/tonnelfukoukonkurito.pdf>

ひび割れ抑制のための参考資料（案）（橋脚、橋台、函渠、擁壁編）

<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/hibiwareyokusei.pdf>

③設計・施工段階における耐久性確保の取り組み

高耐久PC桁設計施工のポイント（床版桁編）（T桁編）

<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/point1.pdf>

<http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/point2.pdf>

設計・施工マニュアル（道路橋編）

<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00910/h12-hp/H28dourokyou.pdf>

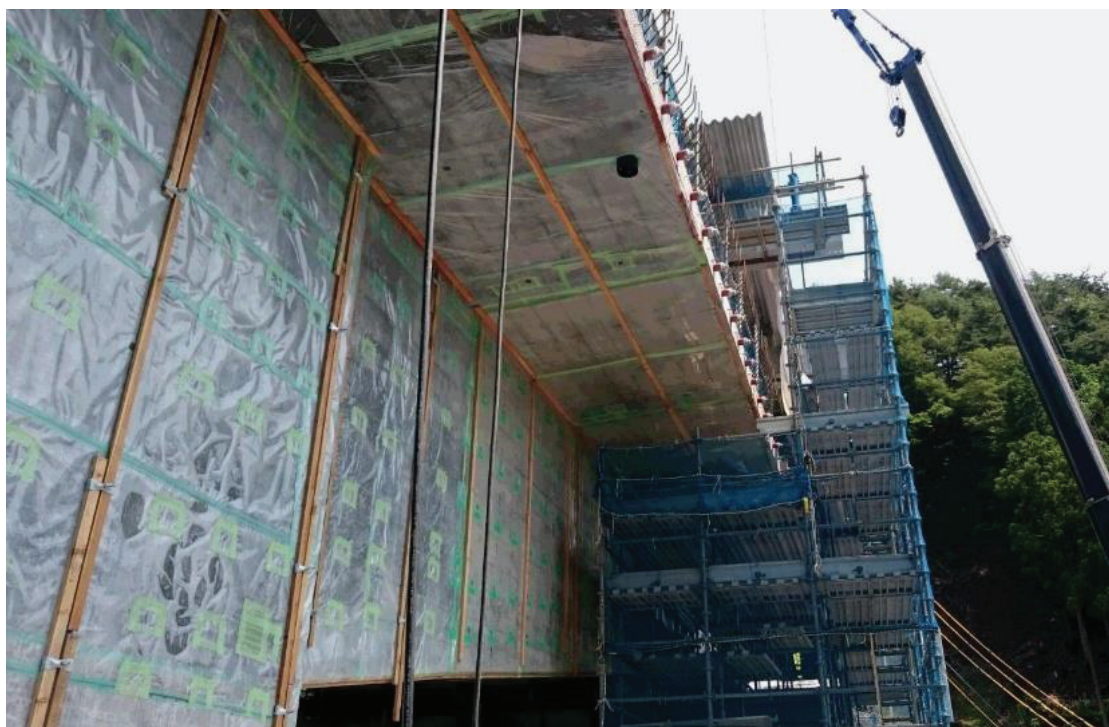
凍結抑制剤散布下におけるRC床版の耐久性確保の手引き（案）

http://www.jst.go.jp/sip/dl/k07/k07_RC.pdf

東北地方における凍害対策に関する参考資料（案）

http://www.thr.mlit.go.jp/road/sesaku/manual/170327_shiryou.pdf

今も様々なチャレンジが続いている



PC箱桁をビニールシートで覆って長期養生

楽しそうな技術者たち



難しいけどうまくいくと楽しい。しかも自信に満ちている。
こういう環境をつくるのが発注者の仕事。



ICTを活用したインフラ維持管理システム

(i-DREAMs®) の社会実装

平成29年8月31日

首都高速道路株式会社
保全・交通部
土橋 浩

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

1

i-DREAMs®, InfraDoctor® 開発の背景

社会環境の変化と課題

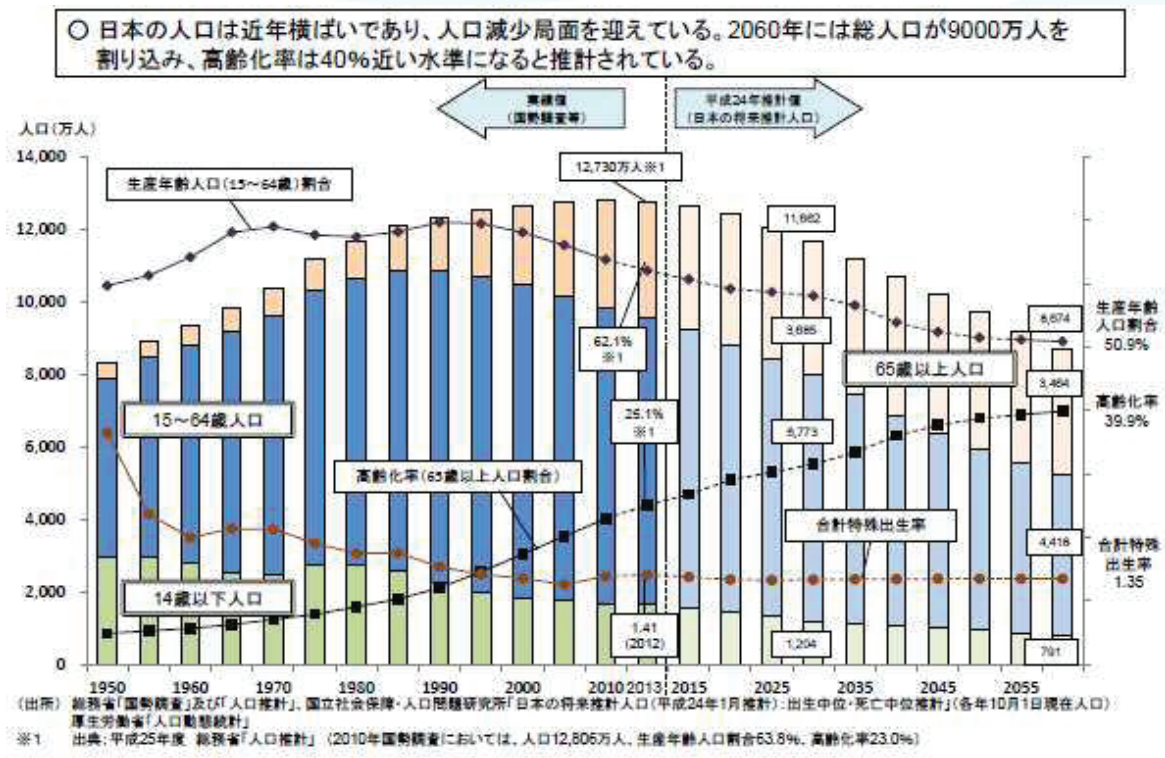
- 高度経済成長期以降に集中的に整備されたインフラの高齢化が今後進行
- 一方、人口の減少や少子高齢化により、2048年には人口が1億人を下回り、2060年には65歳以上の人口の割合が4割近くになると推計
- このため生産年齢人口が減少し、維持管理を担当する技術者、点検技術者不足の懸念等、財源確保の問題もとより、人材確保の問題が発生

このように社会環境が大きく変化する中、効率的なインフラのマネジメントを実施し、安全を確保することが強く求められている。このためには、

- 技術開発等により生産性の向上を図り、上記の課題を解決することが必要
- すなわち、点検技術の高度化により点検の効率化・合理化を図り、的確に構造物の診断、劣化予測を行うことにより、適時・適切な補修、補強を可能とする維持管理システムの構築が必要

そこで、ICT（情報通信技術）を活用し、様々な情報をIoT（Internet of Things）により有機的に「つなげ」、課題を「見える化」するとともに、さらにAIを活用することにより複眼的な判断が可能となり、ライフサイクルコストの最適化、持続可能なインフラマネジメントの実現が期待される。

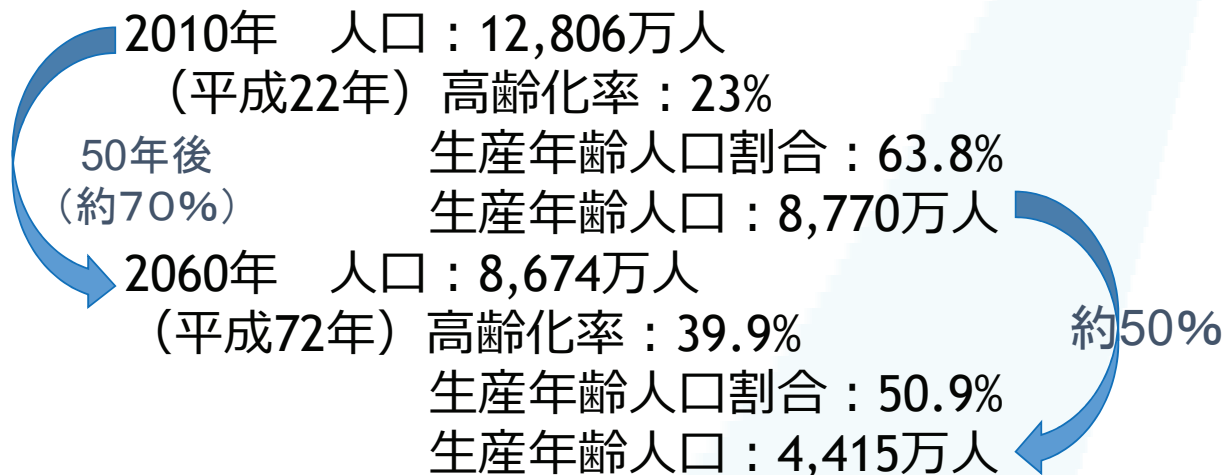
日本の人口の推移



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

3

生産年齢（15～64才）人口の比較



(出所) 総務省「国勢調査」及び「人口推計」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(平成24年1月推計)：出生中位・死亡中位推計」(各年10月1日現在人口)

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

4

社会資本の老朽化の現状

出典：国土交通白書2015第2節第2章P124

《建設後50年以上経過する社会資本の割合》

	H25年3月	H35年3月	H45年3月
道路橋 [約40万橋 ^{注1)} (橋長2m以上の橋約70万のうち)]	約18%	約43%	約67%
トンネル [約1万本 ^{注2)}]	約20%	約34%	約50%
河川管理施設 (水門等) [約1万施設 ^{注3)}]	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ [総延長：約45万km ^{注4)}]	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 [約5千施設 ^{注5)} (水深－4.5m以深)]	約8%	約32%	約58%

注1) 建設年度不明橋梁の約30万橋については、割合の算出にあたり除いている。

注2) 建設年度不明トンネルの約250本については、割合の算出にあたり除いている。

注3) 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。)

注4) 建設年度が不明な約1万5千kmを含む。(30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。)

注5) 建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。

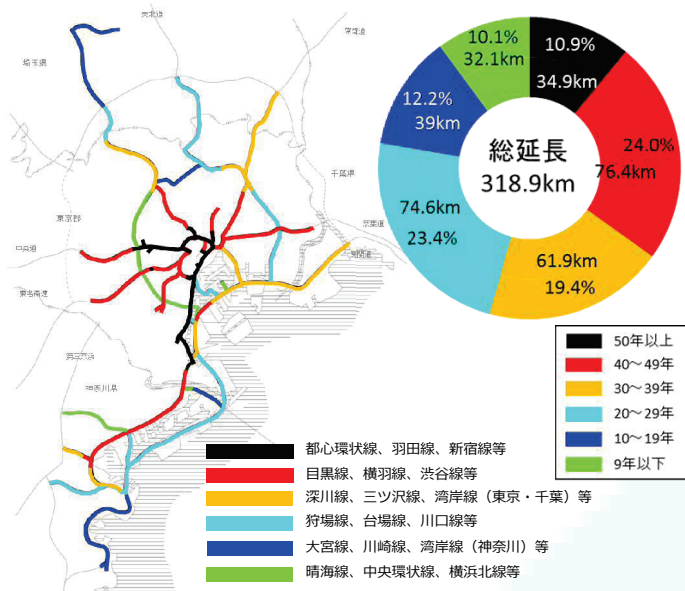
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

5

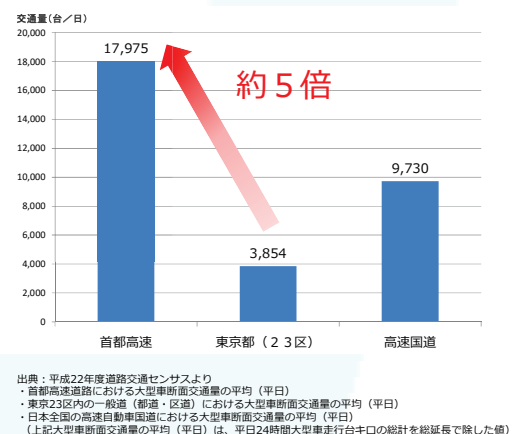
首都高速道路構造物の現状

- 総延長約319kmのうち、経過年数が50年を超える構造物は、現時点で全体の11% (約35km) であるが、10年後には35% (約111km) まで増大。
- 1日の平均利用交通量は約97万台、大型車の交通量は、東京23区内の一般道の約5倍となっている。

■ 開通からの経過年数比率(平成29年4月時点)



■ 大型車交通量比較



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

6

首都高速道路の構造物の特徴

- 高架構造が 全延長の約 8 割

鋼橋 約 9,300 径間

コンクリート橋 約 2,800 径間

- 橋桁を支える橋脚

コンクリート橋脚 約 5,900 基

鋼製橋脚 約 3,000 基

- 道路施設は、約350種類、約29万個、約920個/km

- 12t以上の軸重違反車の通行 15万回
(1日あたり約410回)
(平成29年4月現在)

i-DREAMs のコア技術

InfraDoctor[®] [インフラドクター]

～GISと三次元点群データを活用した道路・構造物維持管理支援システム～

InfraDoctor[®] のシステム概要

GISを基本とするプラットフォームと三次元点群データを用いて、道路・構造物の維持管理業務を支援

- ① GIS（地図） 上で指定した箇所から、点検・補修履歴や図面、三次元点群空間データなど 各種データを検索、表示
- ② レーザースキャナを用いて 三次元点群データ を取得、全方位動画 も収録
- ③ 三次元点群データから、2D、3DのCADを作成
- ④ 構造物の変状・変位計測 による点検業務支援
- ⑤ 構造図や規制図 等の作成による点検補修計画作成支援、点検補修 シミュレーション による事前確認

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

9

InfraDoctor[®] のシステム

GISを入口として各種情報にアクセス

GISを基本とするプラットフォーム



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

10

三次元点群データ



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

11

MMSによる点群取得事例

MMS : Mobile Mapping System
(レーザースキャナや全周囲カメラを搭載した計測車両)



法定速度で走行しながら、1秒間に110万点の情報を取得、3次元点群情報を作成

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

12

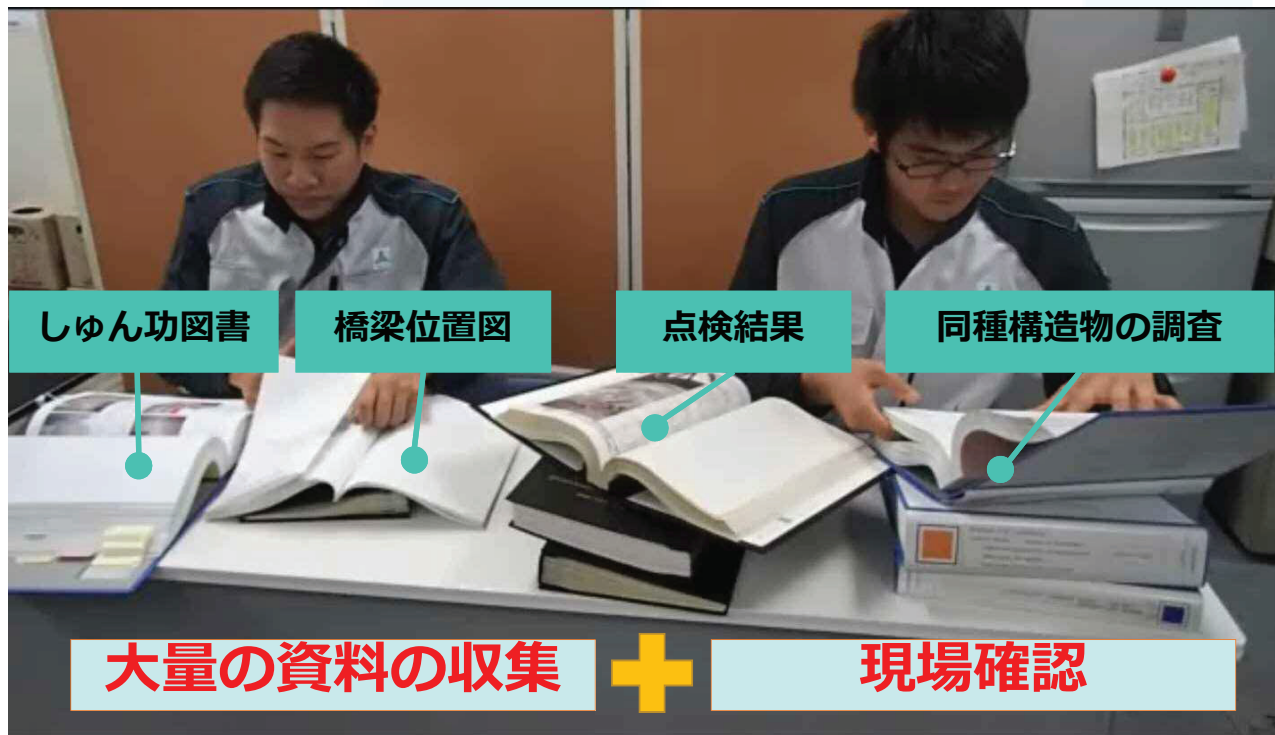
InfraDoctor[®]活用シーン

- ✓維持管理業務
- ✓測量・図面作成業務
- ✓補修補強設計業務
- ✓点検業務
- ✓施工計画業務

InfraDoctor[®]活用シーン

- ✓維持管理業務
- ✓測量・図面作成業務
- ✓補修補強設計業務
- ✓点検業務
- ✓施工計画業務

現状：管理台帳など各種データの検索

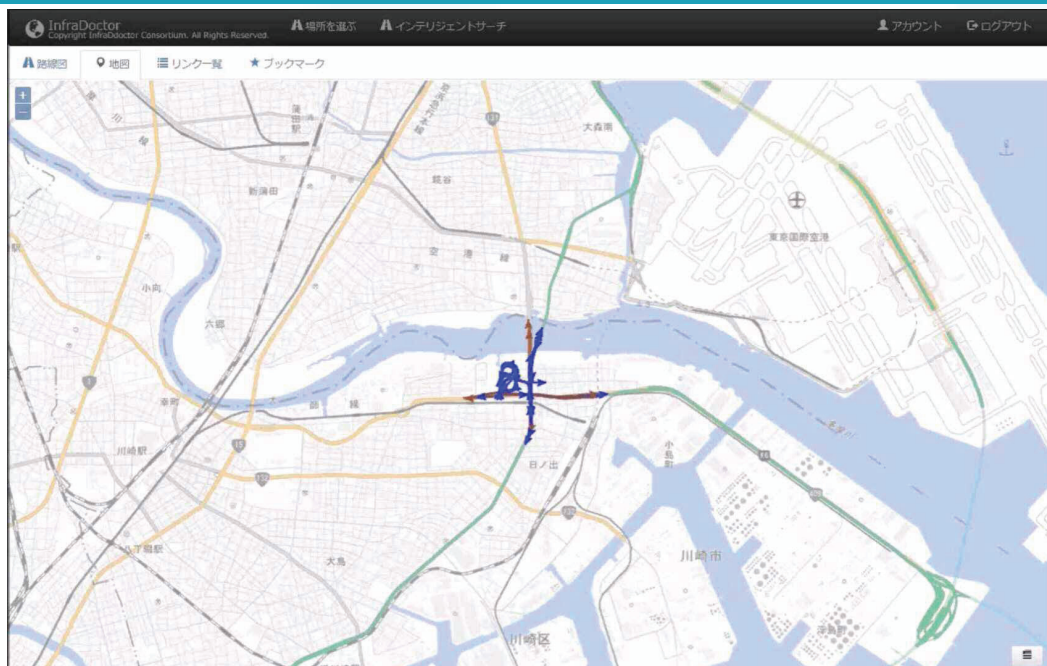


莫大な作業時間

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

15

GISで簡単に検索が可能 (インテリジェントサーチ)

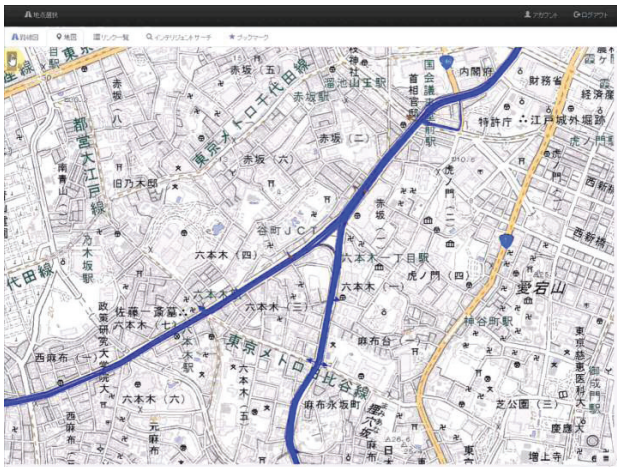


地図上で指定した箇所から各種図面・点検結果

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

16

3次元点群データと全周囲動画により現場確認が可能



3次元点群データ



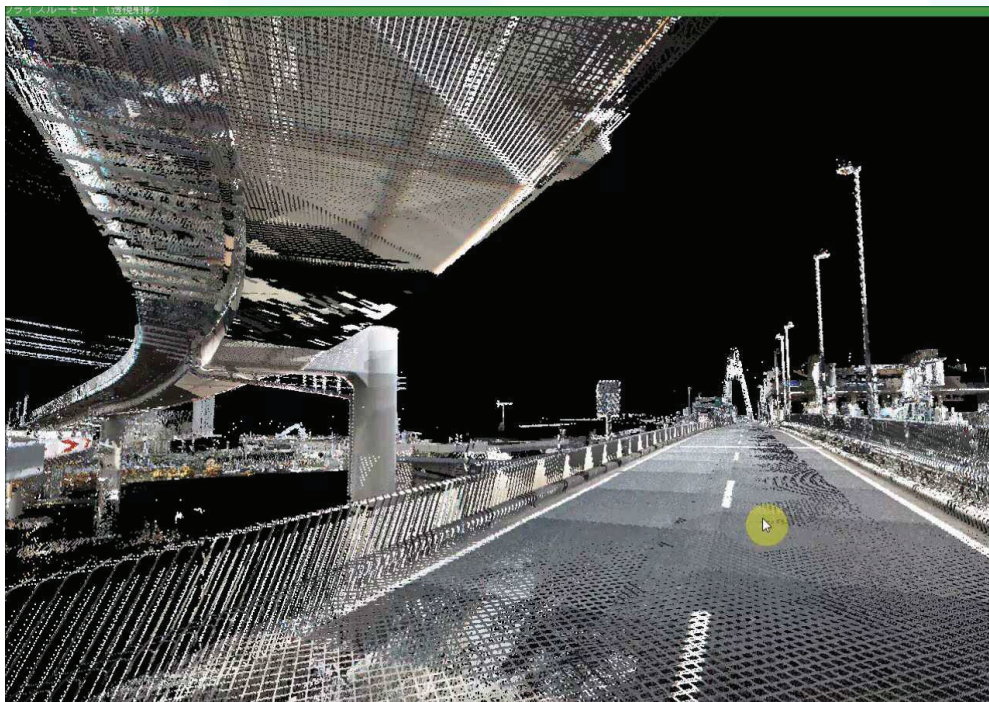
全周囲動画

移動時間「0」事務所で現場確認

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

17

交通規制不要、簡単に現場の寸法計測が可能

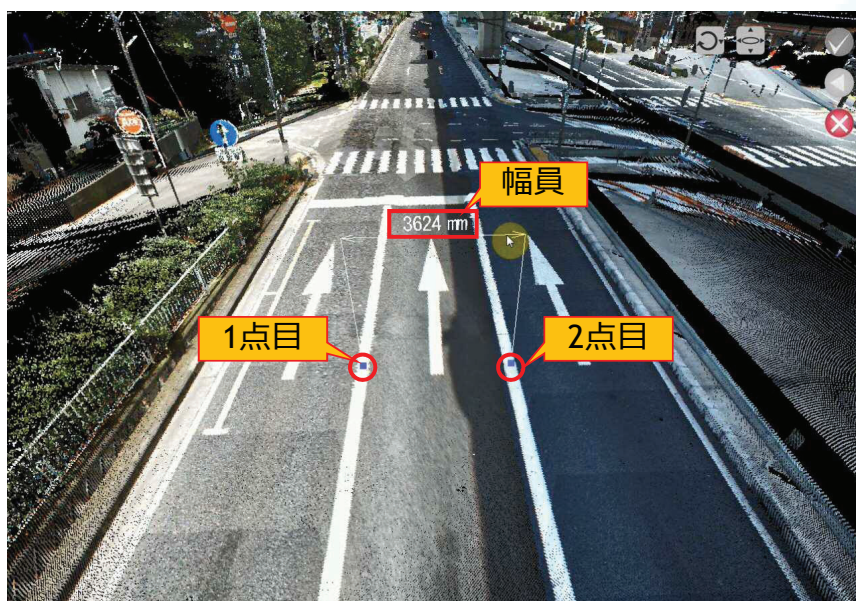


移動時間「0」事務所で寸法計測

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

18

交通規制不要、簡単に現場の寸法計測が可能

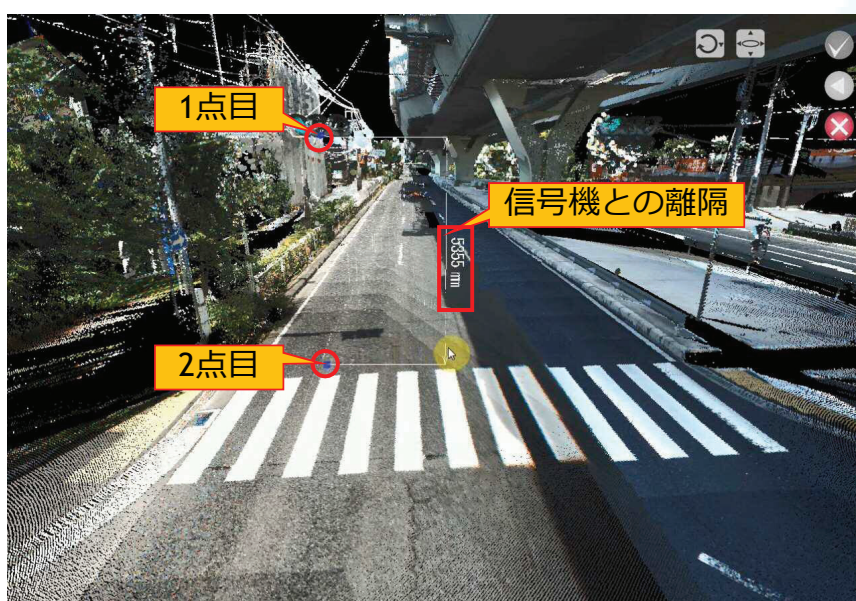


事務所で道路幅員等を計測

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

19

交通規制不要、簡単に現場の寸法計測が可能



事務所で道路付属物等の高さ計測

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

20

交通規制不要、簡単に現場の寸法計測が可能



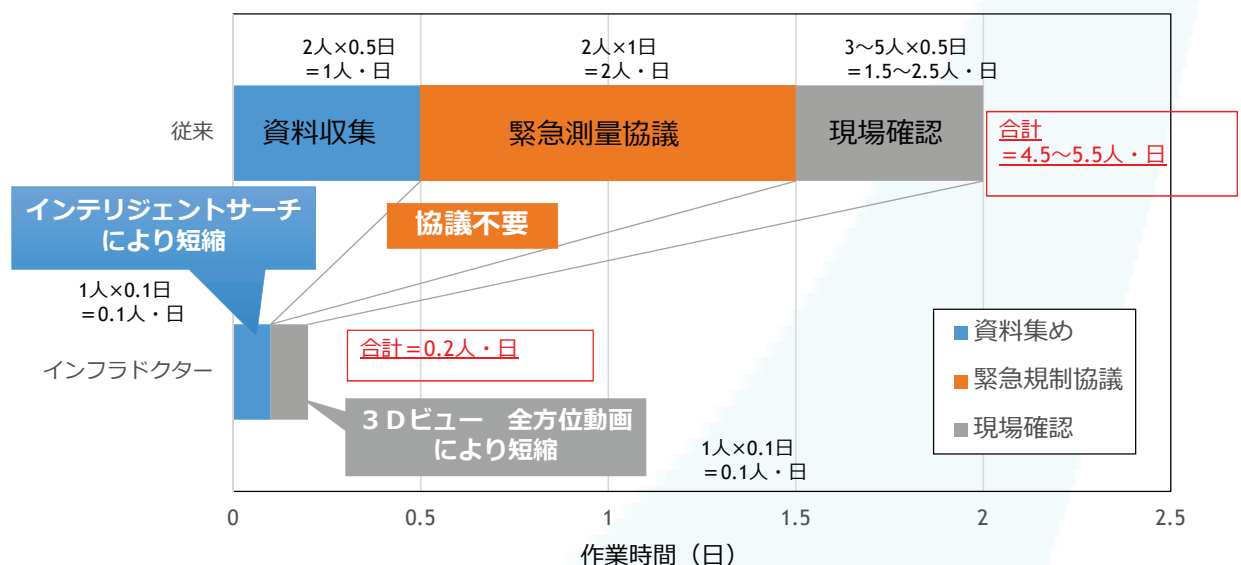
事務所で建築限界等の確認

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

21

資料収集～現場確認のリードタイム **90%** 短縮

生産性：20倍以上向上
(4.5～5.5人日⇒0.2人日)



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

22

InfraDoctor[®]活用シーン

- ✓維持管理業務
- ✓**図面作成・測量業務**
- ✓補修補強設計業務
- ✓点検業務
- ✓施工計画業務

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

23

現状：図面や台帳がない、検索に時間を要する

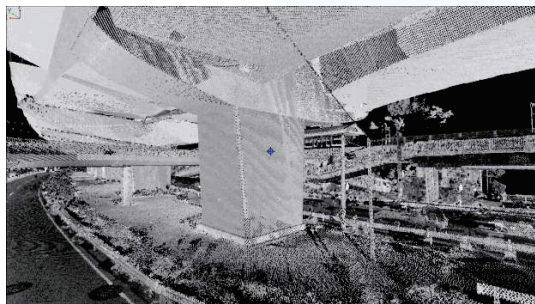


現況の図面や台帳がない

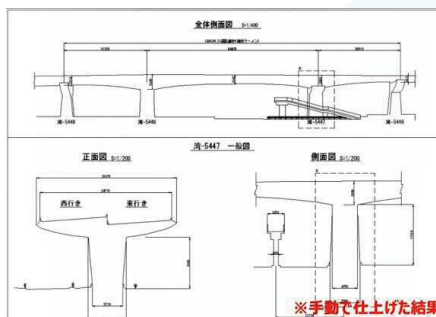
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

24

不足する図面等電子台帳データを作成可能



点群の断面から包絡線を自動作成



CAD図化



点群から面を自動作成、3D-CADモデル化

3次元点群データから
図面や3Dモデルを
半自動的に作成

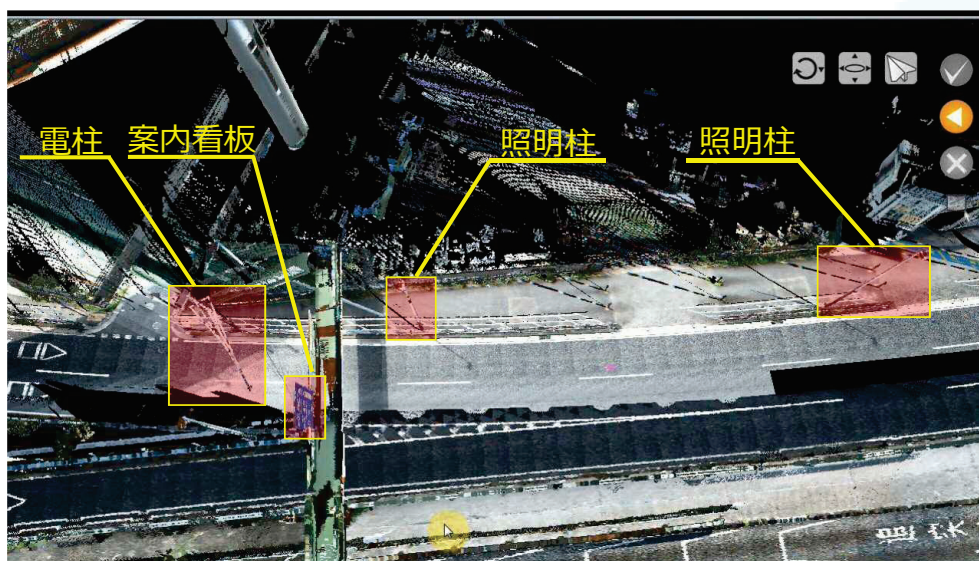
的確かつ効率的に構造物の劣化診断・予測解析が可能

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

25

管理台帳を簡単に作成可能

※イメージ図



三次元点群データから道路附属物等の位置を把握可能

国道17号 新大宮バイパス

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

26

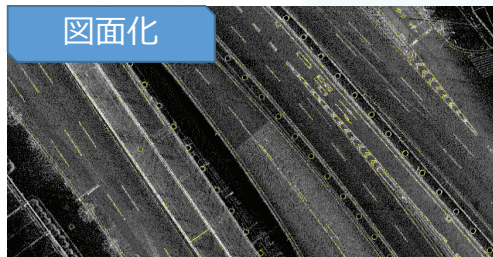
測量業務への適用が可能

点群データ



平和島料金所

図面化



完成図

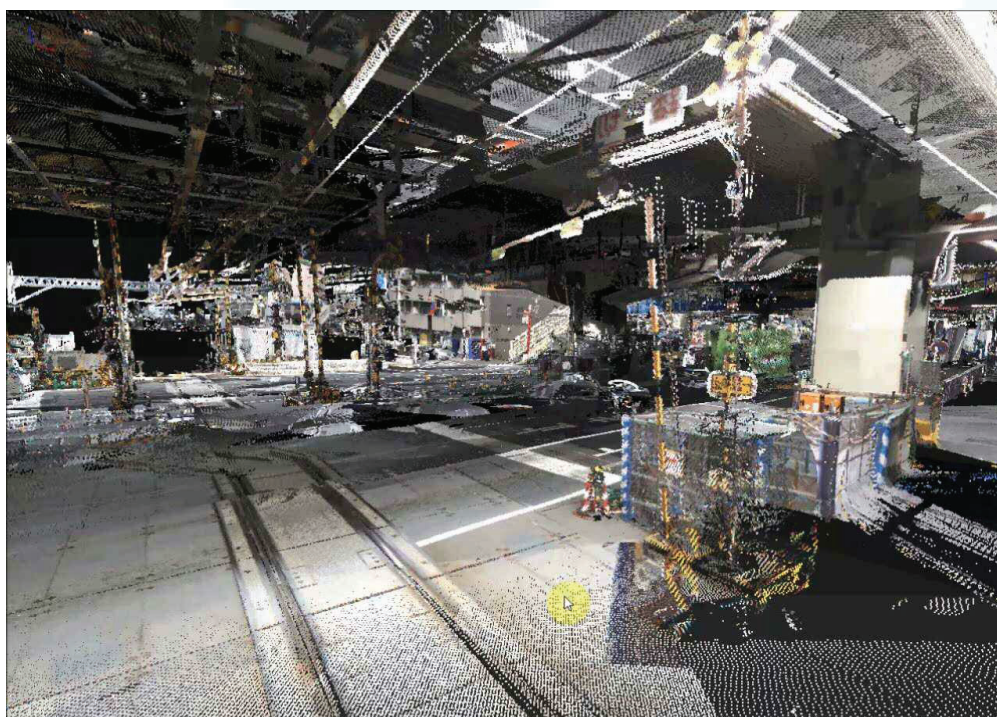


交通規制を行うことなく測量が可能

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

27

時間規制なく鉄道交差部の図面作成が可能



管理者の異なる構造物の位置関係を把握可能

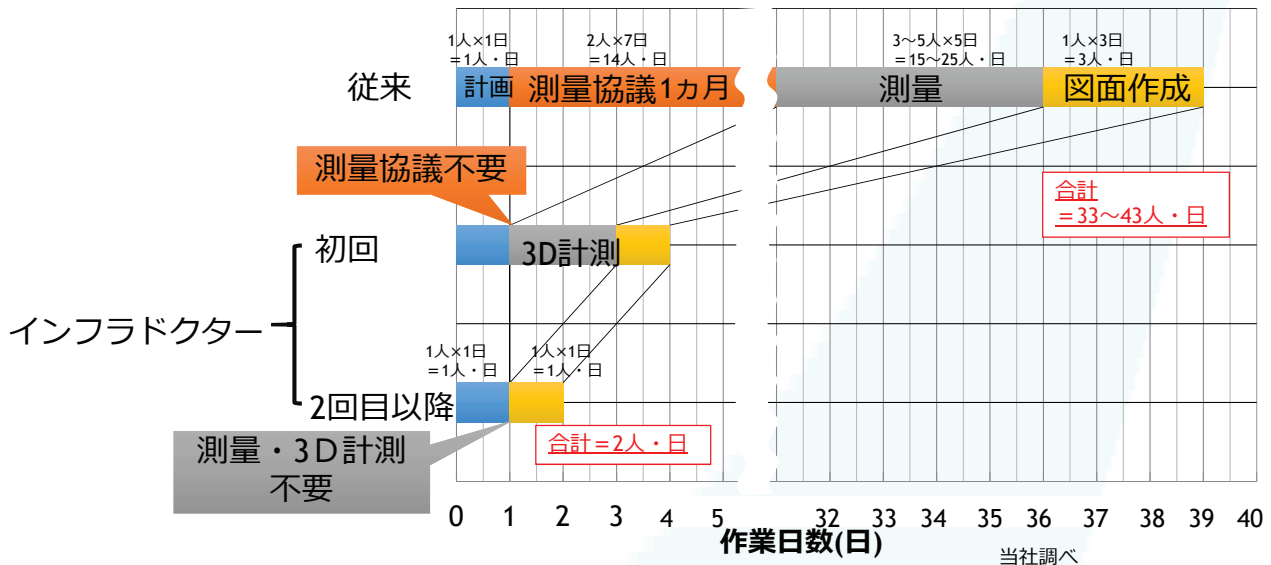
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

28

近接状況把握のリードタイム95%短縮

生産性：20倍程度向上

(33~43人日⇒2人日)



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

29

InfraDoctor®活用シーン

- ✓維持管理業務
- ✓測量・図面作成業務
- ✓点検業務
- ✓補修補強設計業務
- ✓施工計画業務

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

30

現状：大規模な交差点部では接近点検が困難

近接が困難な箇所



課題：大規模な交差点部等では交通規制が困難

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

31

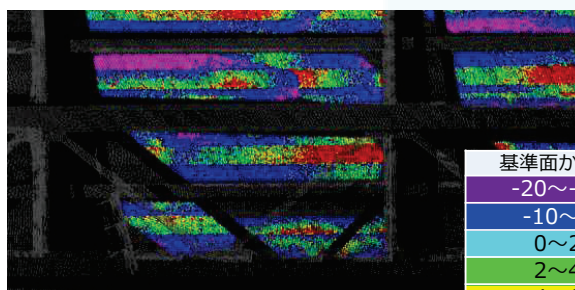
三次元点群データから変状を検出可能

変状検出機能で床版下面状況を可視化

R C床版下面状況



床版下面の凹凸の可視化



基準面からの変位

-20~-10mm

-10~0mm

0~2mm

2~4mm

4~6mm

6~20mm

**近接が困難な箇所での点検を補完
(1次スクリーニング)**

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

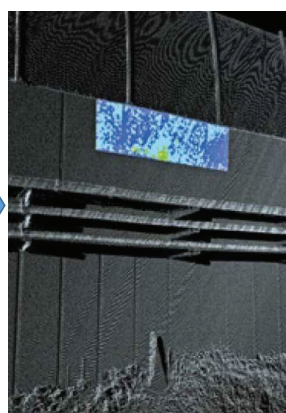
32

点群データから擁壁部の変状確認が可能

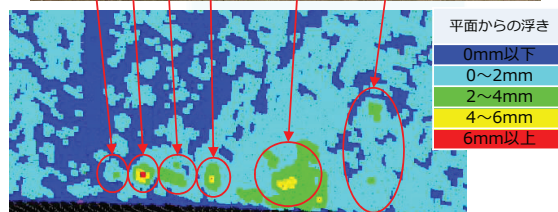
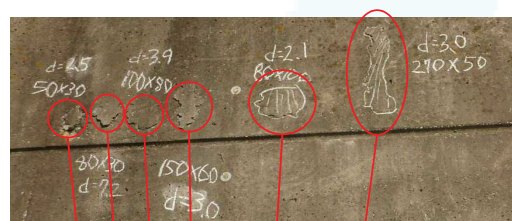
変状検出機能で擁壁表面の状況を可視化



3次元点群



構造物の基準面を作成



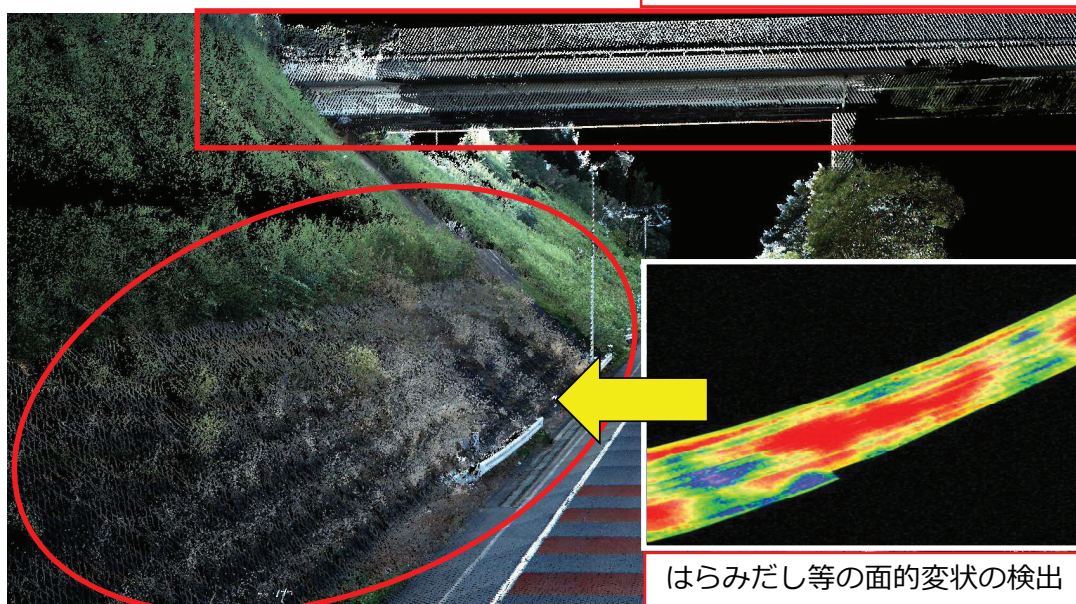
変状検出した構造物の画像

コンクリートの浮き・剥離損傷を検出

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

33

法面や跨道橋等の変状確認も可能



交通規制なく跨道橋の変状確認

はらみだし等の面的変状の検出

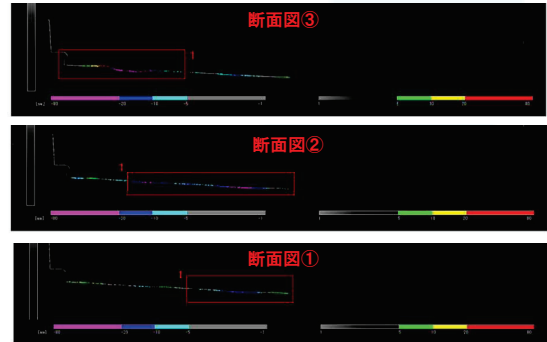
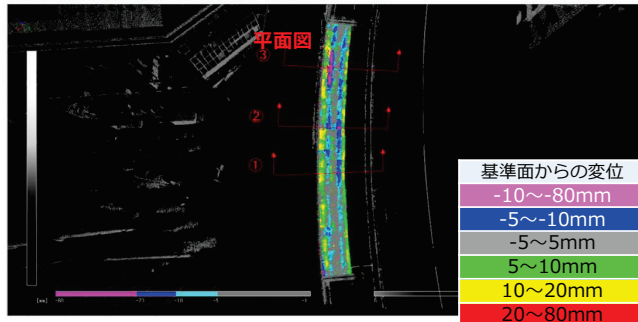
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

34

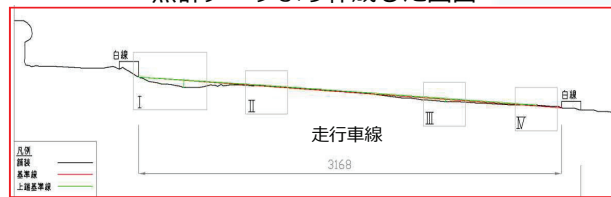
路面変状の検出が可能

首都高速道路 3号渋谷線

変状検出図(橋軸方向2.0mピッチで基準面作成)



点群データより作成した図面



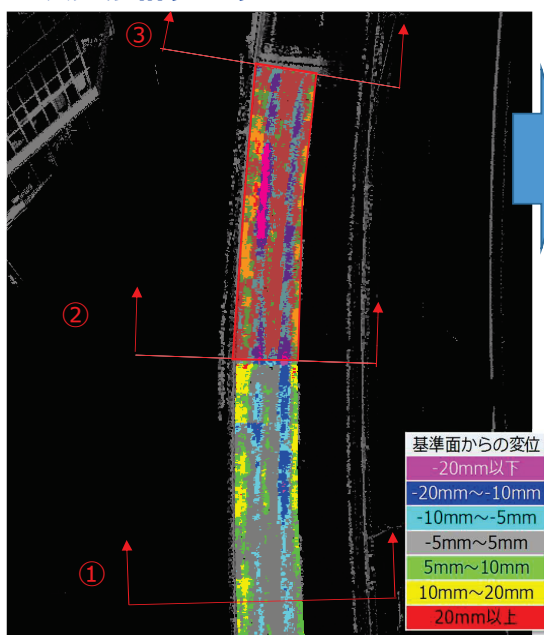
わだち掘れやポットホールなどの損傷を検出可能 + 画像データ
⇒MCIの自動算出

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

35

舗装補修計画を作成

3次元点群データ



路面部の凹凸を可視化

打替必要面積算出

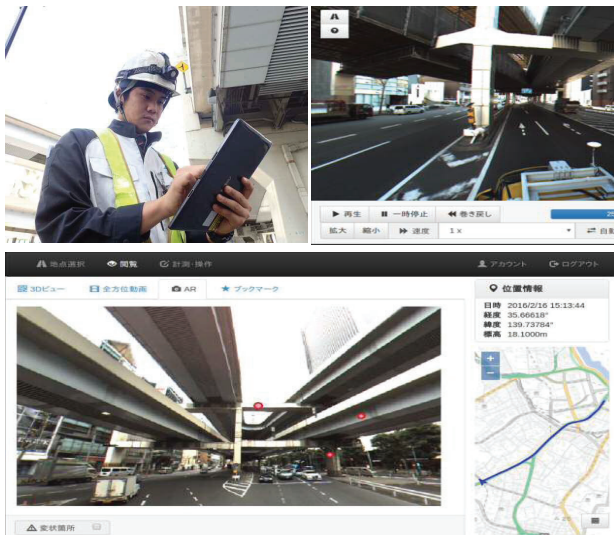
工事費用算出

補修計画作成

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

36

タブレットを活用した点検の効率化事例



＜サービスの提供方法＞

サービスの提供方法はウェブ上で行います。

＜タブレットによる利用＞

InfraDoctorはタブレットによる利用でいつでも・どこでも使用することが可能！

＜AR機能の利用＞

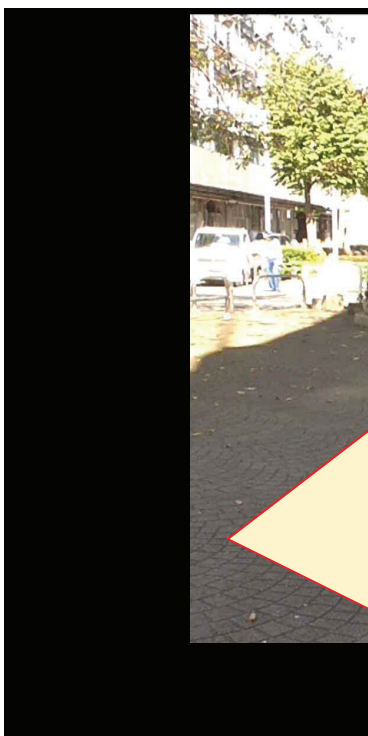
また、点群とカメラ上の画像を重ね合わせたAR（拡張現実）機能により

- ・ 寸法計測可能
- ・ 損傷の点検履歴把握
- ・ 既存損傷位置や状況の把握

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

37

過去の点検・損傷履歴を現場で確認が可能



点検・損傷履歴、損傷箇所を簡単に確認

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

38

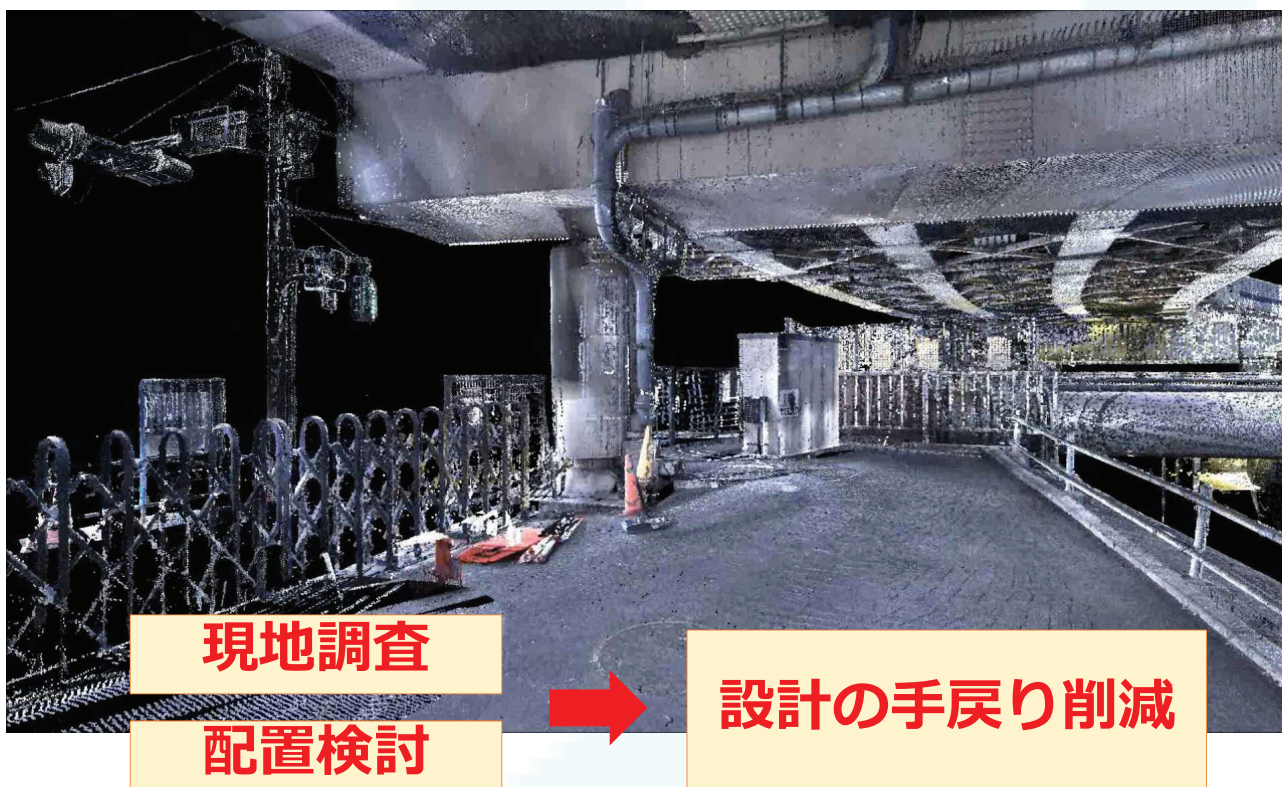
InfraDoctor[®]活用シーン

- ✓維持管理業務
- ✓測量・図面作成業務
- ✓点検業務
- ✓補修補強設計業務
- ✓施工計画業務

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

39

3D-CAD と点群データによる部材配置確認



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

40

InfraDoctor[®]活用シーン

- ✓維持管理業務
- ✓測量・図面作成業務
- ✓点検業務
- ✓補修補強設計業務
- ✓施工計画業務

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

41

シミュレーション（施工・点検車両の選定）

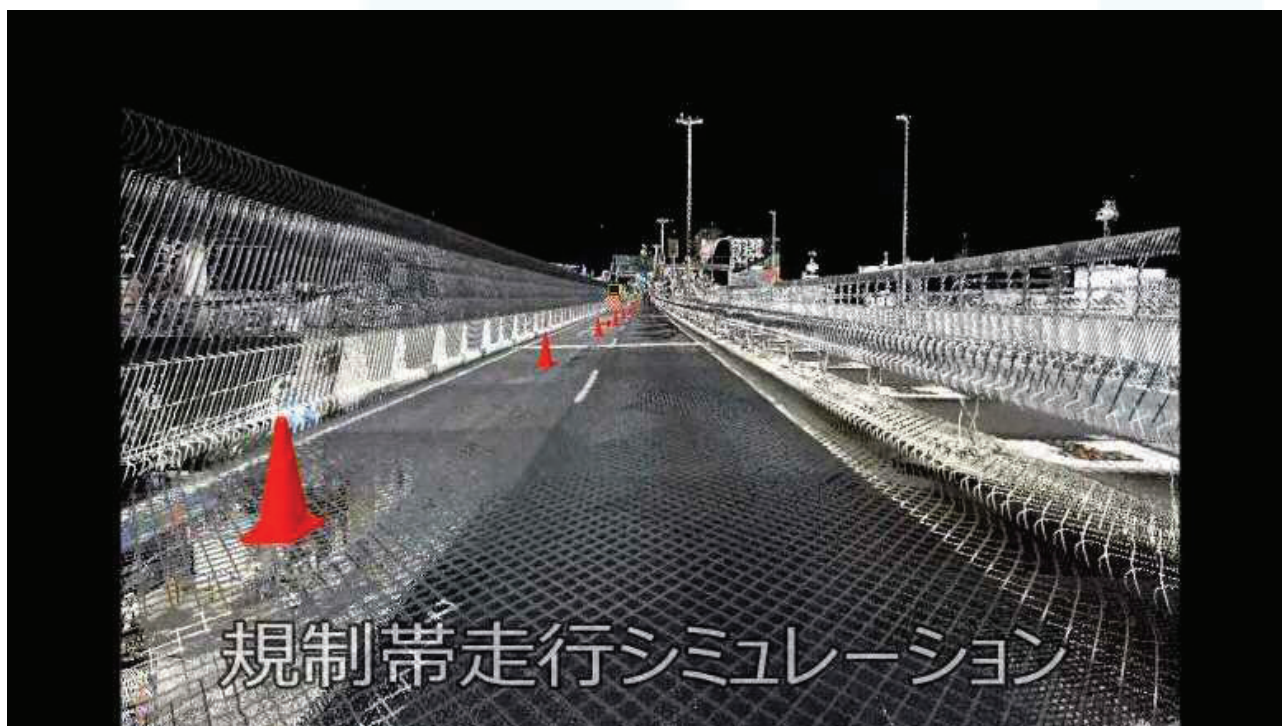


現場での手戻りを「0」に！

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

42

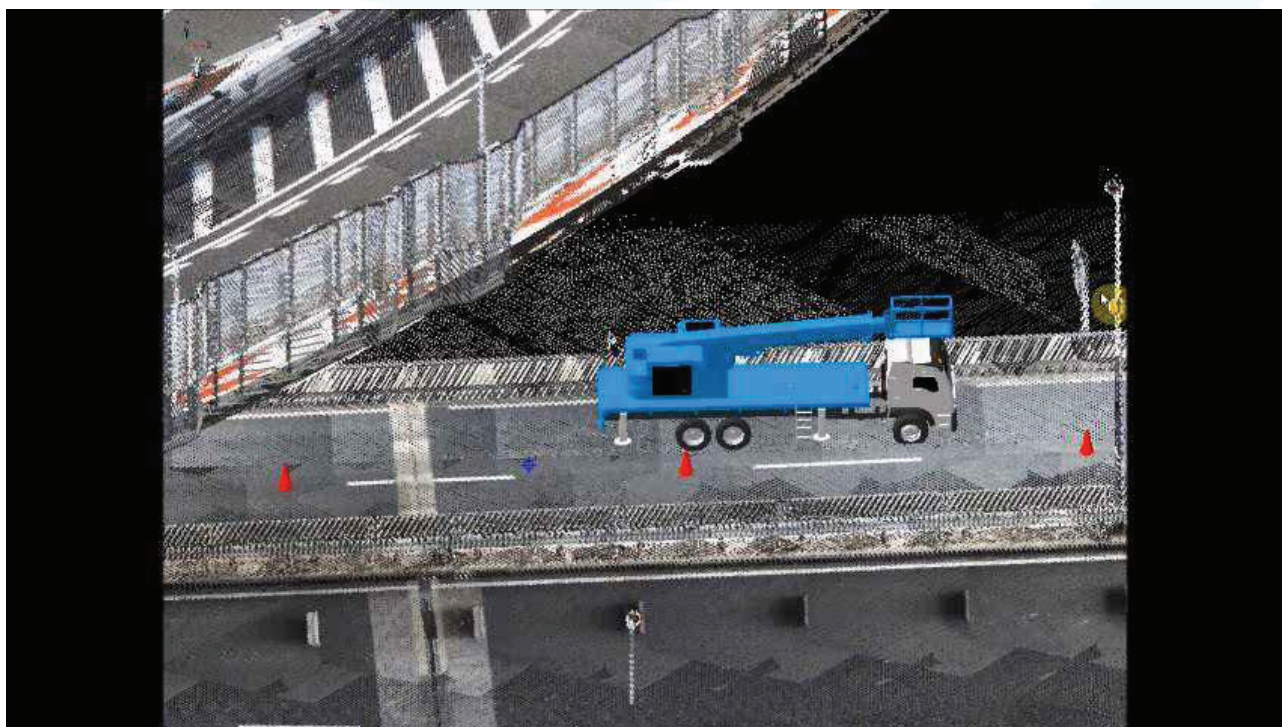
シミュレーション（交通規制の安全確認）



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

43

確認した規制図を簡単に作成



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

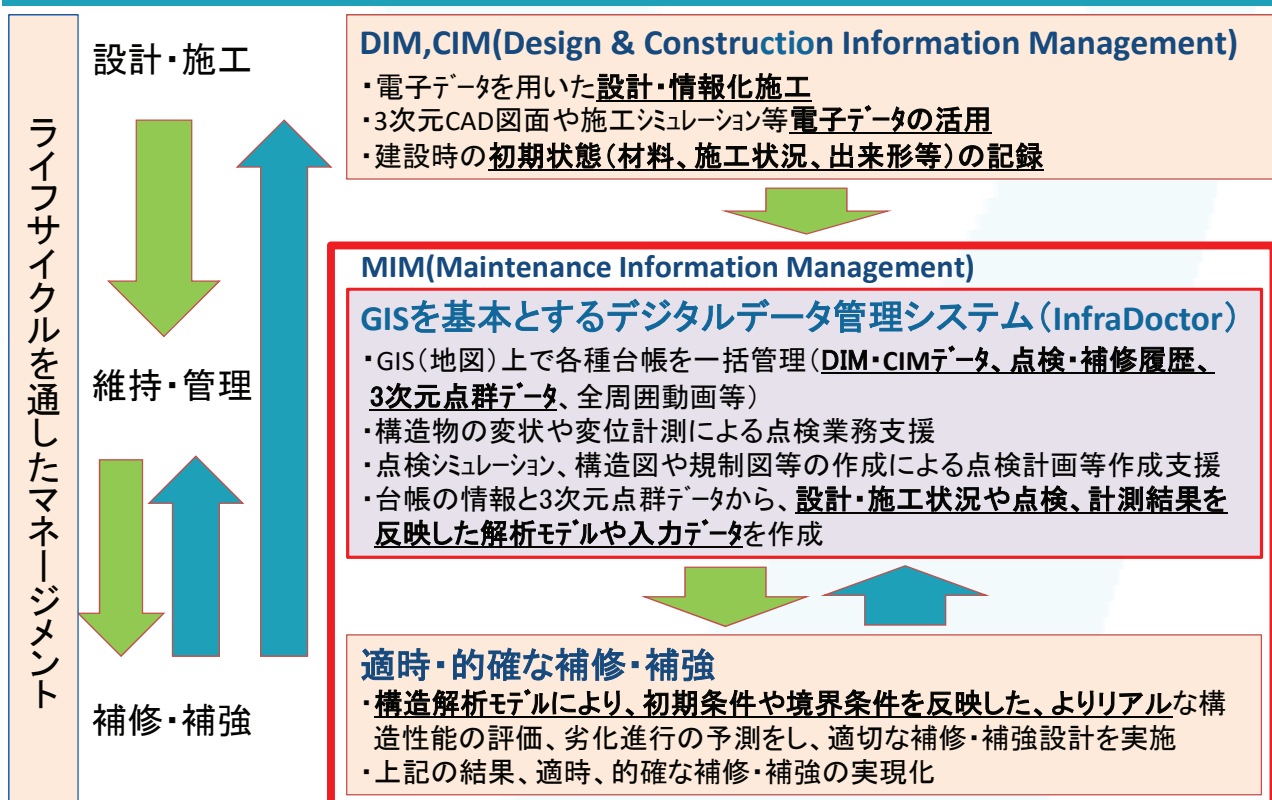
44

首都高の新たな維持管理システム スマートインフラマネジメントシステム “i-DREAMs®の開発”

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

45

スマートインフラマネジメントシステム（i - DREAMs®）



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

46

i-DREAMs[®]の主な技術

損傷推定AIエンジンを用いた先進的な維持管理

AIエンジンを用いて、点検データ、センシングデータや交通量等の環境条件データから構造物の劣化状況や進展性を推定し、補修時期や補修工法の決定を支援し、エンジニアが最終判断することで予測保全を実現を目指す

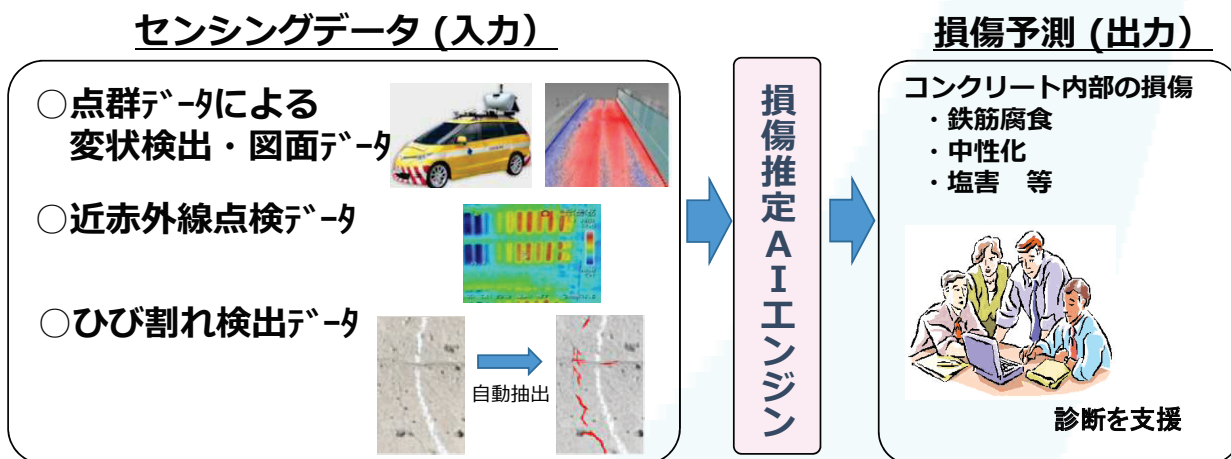


© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

49

<事例>

コンクリート表面のセンシングデータから、内部の鉄筋腐食等を推定するAIエンジン



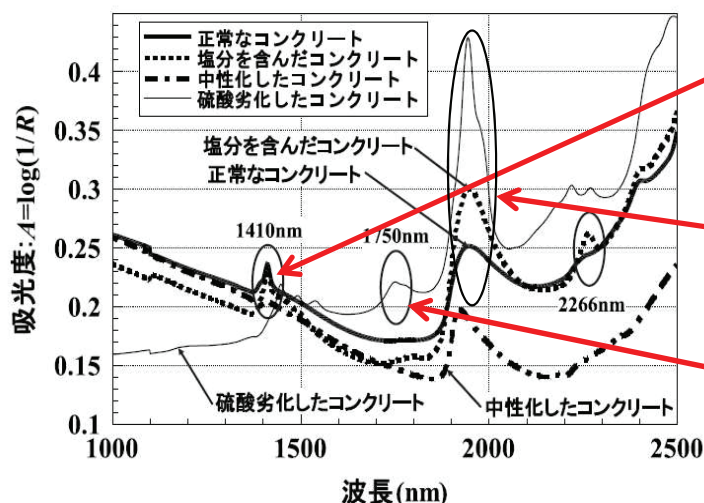
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

50

高感度近赤外分光を用いたインフラの遠隔診断技術

コンクリートが劣化すると、劣化因子により新たな成分が生成されたり、劣化物質により振動モードが変化する（高く/低くなる）ため、特定の波長に対して吸光度が変化する。

コンクリートの中性化、塩分浸透等による近赤外スペクトルの変化を以下に示す。



このピークの大きさから
中性化の度合いが推測可能

このピークの大きさから
塩分量が推測可能

このピークの大きさから
硫酸劣化の度合いが推測可能

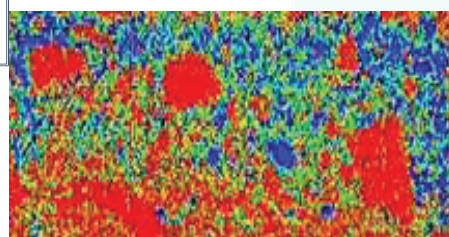
出典：金田尚志、石川幸宏、魚本健人、生産研究58巻3号(2006)

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

51

現場適用のイメージ

例えば、塩分濃度が高いと暗く撮影される



コンクリート表面の状況を即時画像化し、劣化状況を判断
(1次スクリーニング技術)

期待される効果

- 迅速かつ安価な点検
- 客観的かつ正確な劣化診断
- 遠望からの非破壊検査が可能
- ⇒ ・ 重点点検箇所の絞り込み
- ・ 劣化進行速度の把握



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

52

AI 打検システム機能概要

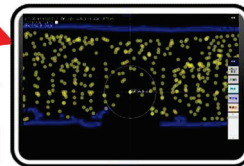
Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

- ハンマの打音波形と打撃軌跡を同時計測
- AIがリアルタイムに解析し、異音を検知し点検員に通知
- 異常の度合いを示すコンター図をオンサイトで自動生成

インフラ構造物の打音検査



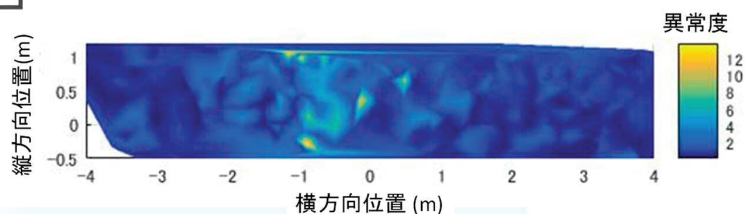
人工知能(AI)搭載タブレット端末



- ・ハンマの打撃位置をリアルタイム表示
- ・AIにより、リアルタイムで打音の異常を検知



異常度マップの自動生成



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

55

特徴と適用対象

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

特徴

- 熟練者でなくても点検漏れ（損傷見逃し、たたき残し）を防ぐ
- 市販の点検ハンマをそのまま使えるので、既存点検と高い親和性を実現
- 点検実績を見える化し、図面化の工数も削減

適用対象

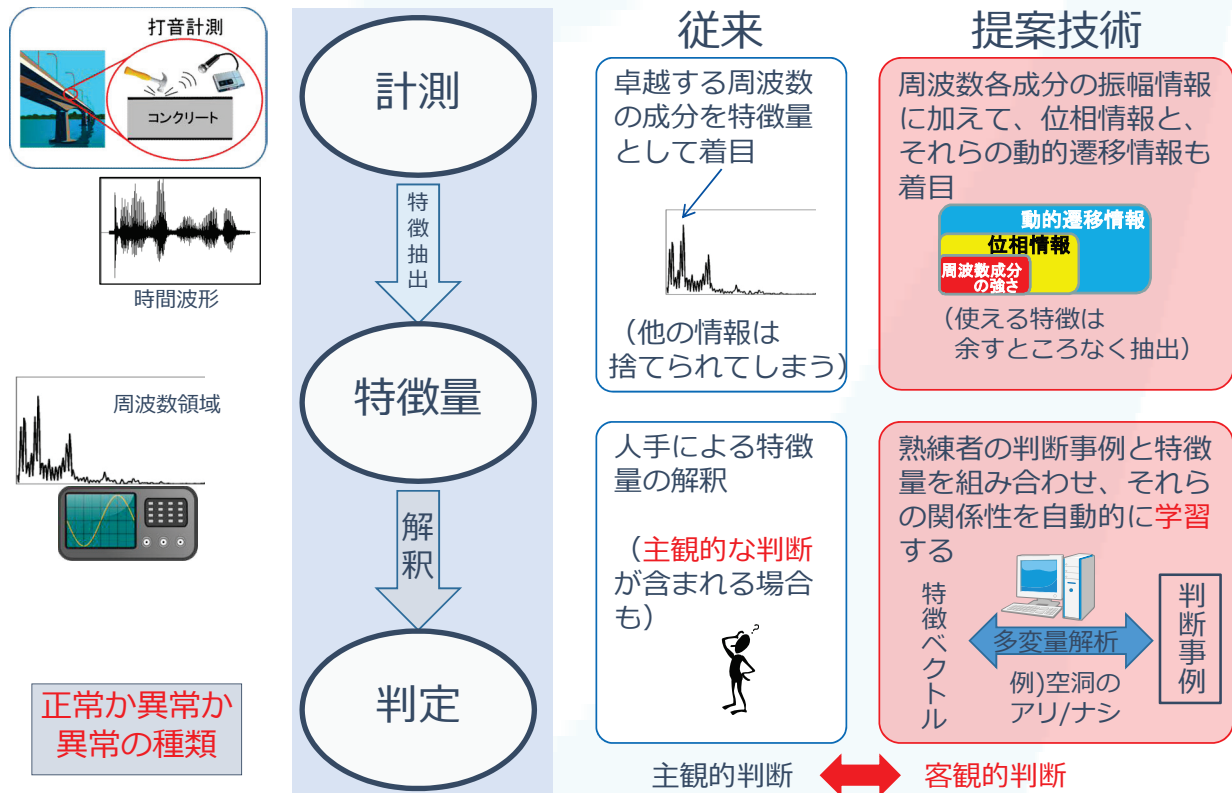
- 構造物の種類：コンクリート構造物、補強部材（補強鋼板、炭素繊維シートなど）
- 点検箇所：平面構造物（下部構造（橋台、橋脚）、擁壁、トンネル壁面など）
- 「立ち馬」「はしご」を使って行うたたき点検作業をカバー

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

56

人工知能による異音検知 ～機械学習に基づく打音解析～

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program



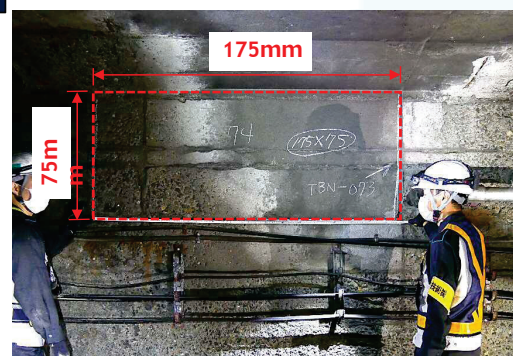
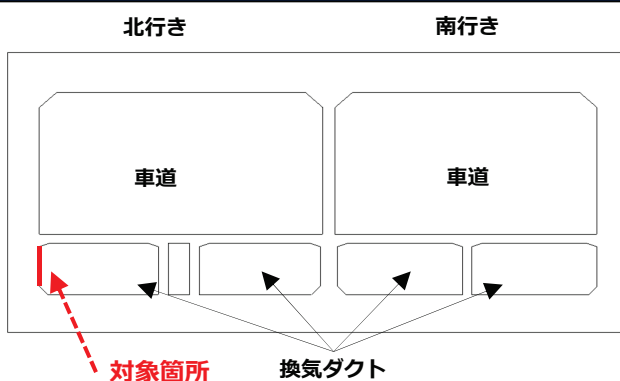
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

57

AI 打検システムによる検出事例

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

八重洲トンネル換気ダクト



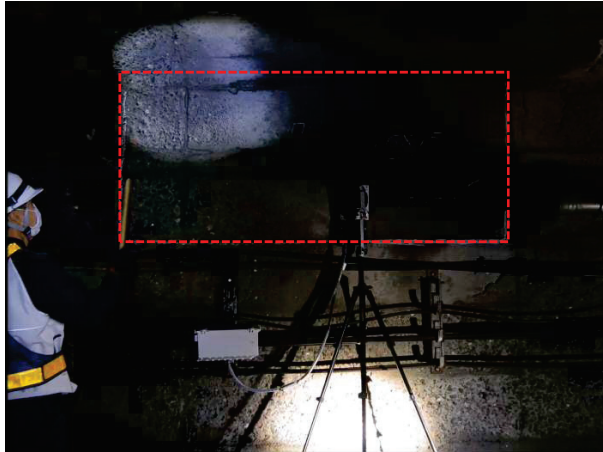
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

58

AI 打検システムによる検出事例

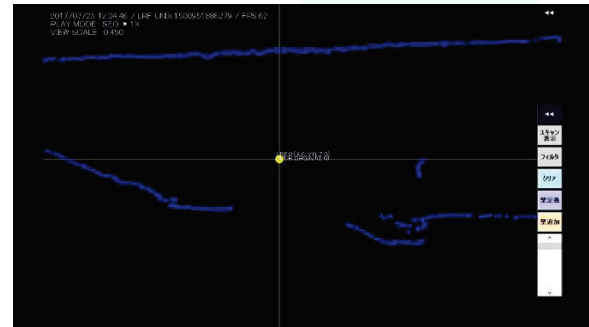
Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

点検員による打撃の様子



 : 実施範囲

AI搭載タブレット端末画面



● : センサが捉えた打撃位置
及びノイズ

※解析時は打音と一致している点のみ
を抽出するためノイズは除外される。

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

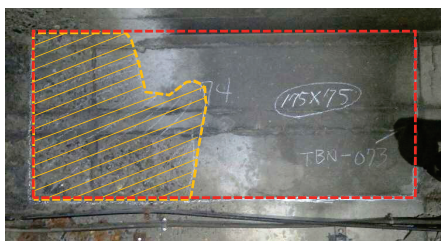
59

AI 打検システムによる検出結果

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

点検結果と解析結果の比較

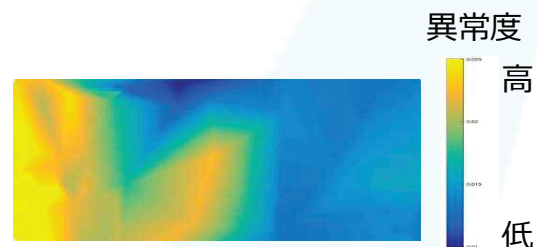
実施範囲と損傷範囲



 : 実施範囲

 : 浮き範囲

得られたコンター図



異常音検出マップ

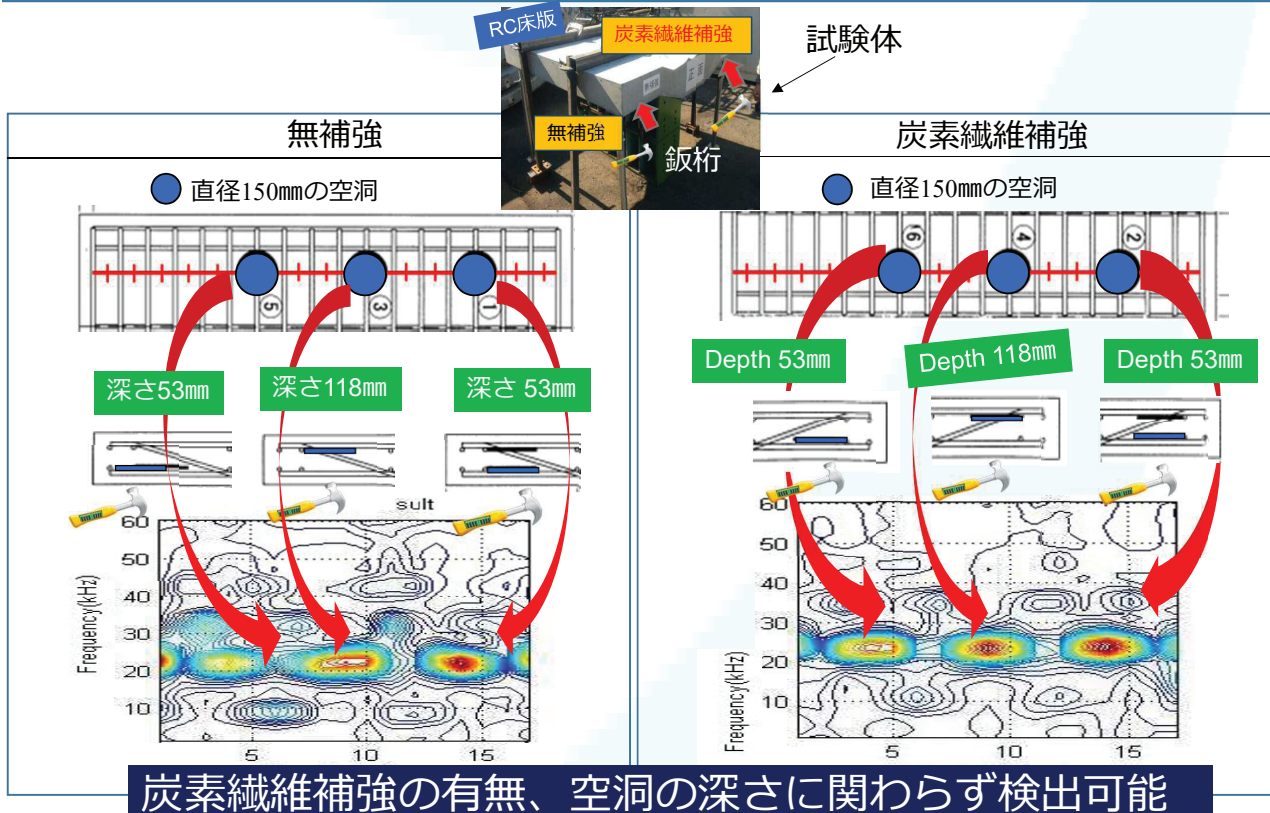
- 点検員による点検結果（チョーキング跡）と同様の結果が得られる。
- 現場においてリアルタイムで異常音検出マップの作成が可能である。

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

60

AIを用いた打音検査実証実験

～試験結果～



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

61

ドローンによる点検の試行

- ・ アクセスが困難な箇所の点検にドローンを導入し、効率的かつ確実な点検を実施
- ・ 大型地震時の道路啓開にドローンを活用
→ 4G LTEネットワークを活用した実証実験に着手



床版点検用ドローン
さいたま見沼地区で試行



道路啓開用ドローン

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

62

インフラパトロール®の開発

【これまでの巡回点検】（2～3回/週）

- ・路上巡回8コース、点検車両6台で対応
- ・車上目視は点検技術者と運転手各1名ずつ
- ・手持ちデジタルカメラを所用

【点検における課題】

- ・見落とし、撮り逃し、撮り直し
- ・画像のブレ、不鮮明
- ・無線による伝達ミス



車載カメラ



・1つのカメラが
60°の画角を撮影し、
3つで180°の範囲を
撮影

◆常時録画、高精細画像、映像共有（クラウド）を
活用して課題を解消するインフラパトロールを開発

【主な効果】

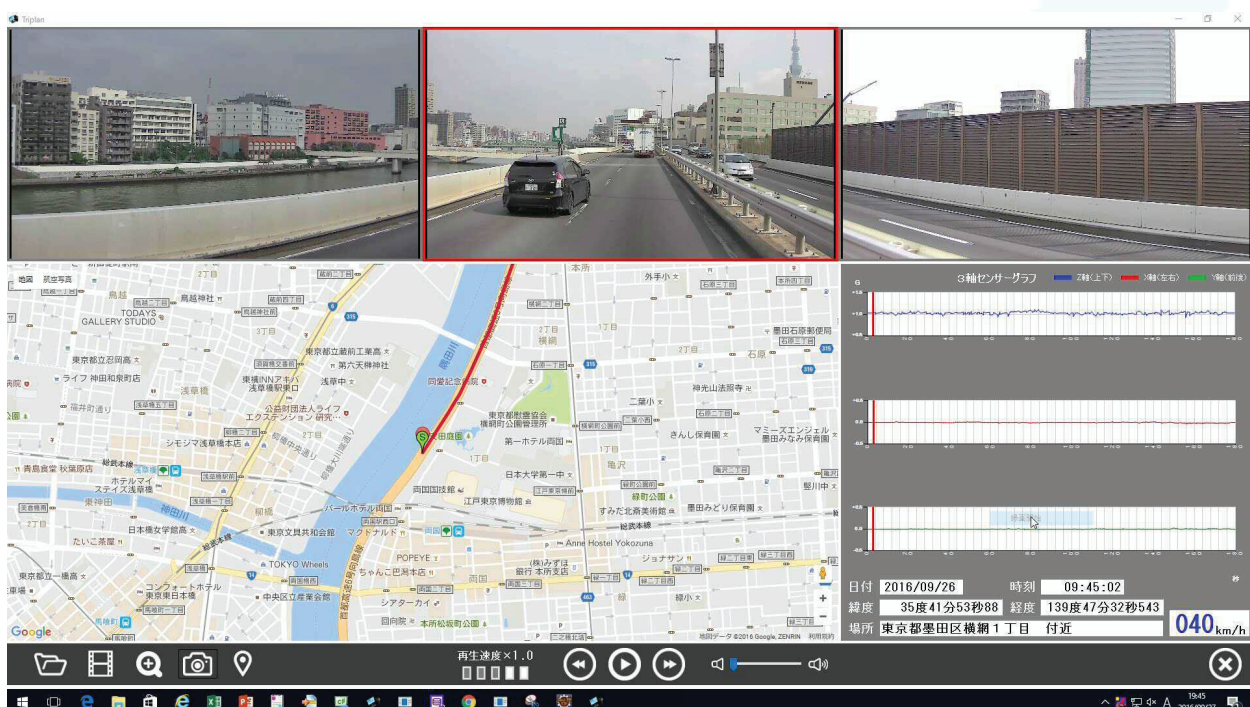
- ・位置などのメモをとる必要がなく、点検員が損傷発見に集中 ⇒ 点検精度が向上
- ・見逃しや路線の再走行が不要となり、撮り直しを削減 ⇒ 点検の効率化
- ・緊急事象などの映像を共有でき、事前に現場を確認 ⇒ 補修の効率化
- ・損傷自動検知により、車上目視では発見が困難だった損傷を発見 ⇒ 安全性の向上

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

63

取得画像

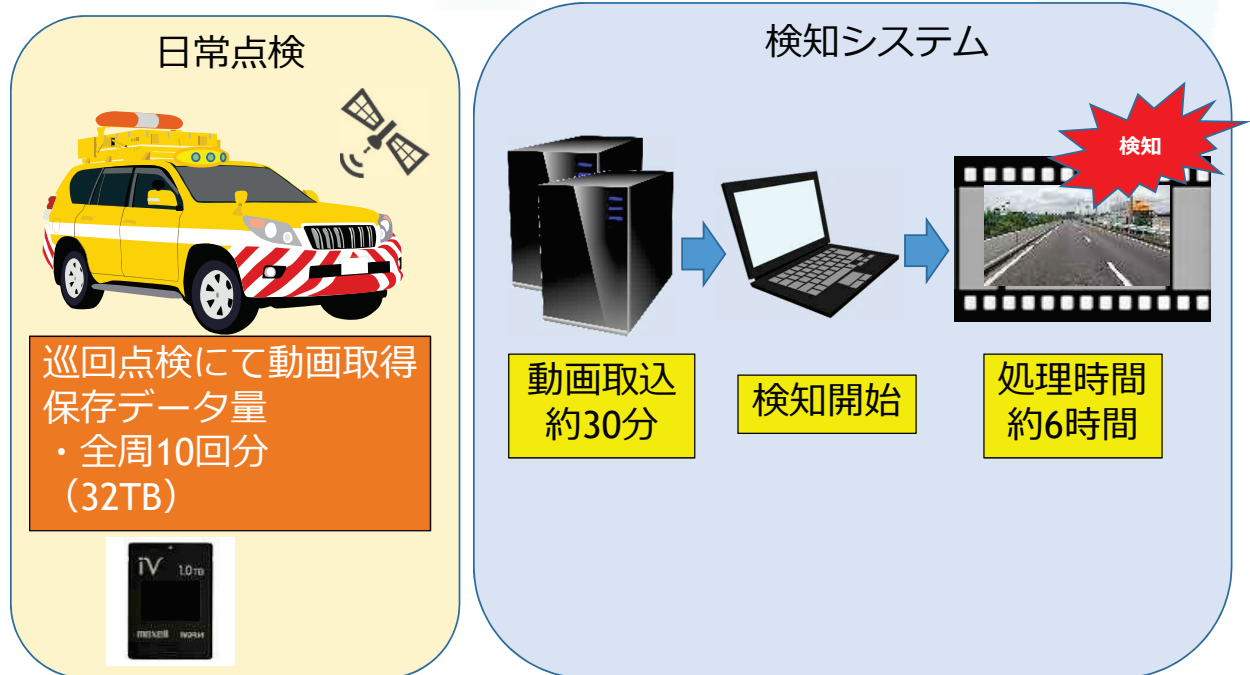
◆車両にGPSおよび加速度センサーを搭載し、位置情報および車両の揺れを把握



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

64

検知システム概要



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

65

サンプリングモアレ法に基づく画像計測技術



1. モアレの原理

ピッチ間隔が近い二つの周期的な模様を重ねると、右図のように干渉模様が現れる。片方を移動、回転させると模様が大きく変化する。この模様変化が「モアレ縞」と呼ばれ、数学的には位相変化と呼ばれている。この原理を利用することで、**構造物のわずかな変位を大きな位相変化として計測することが可能**である。



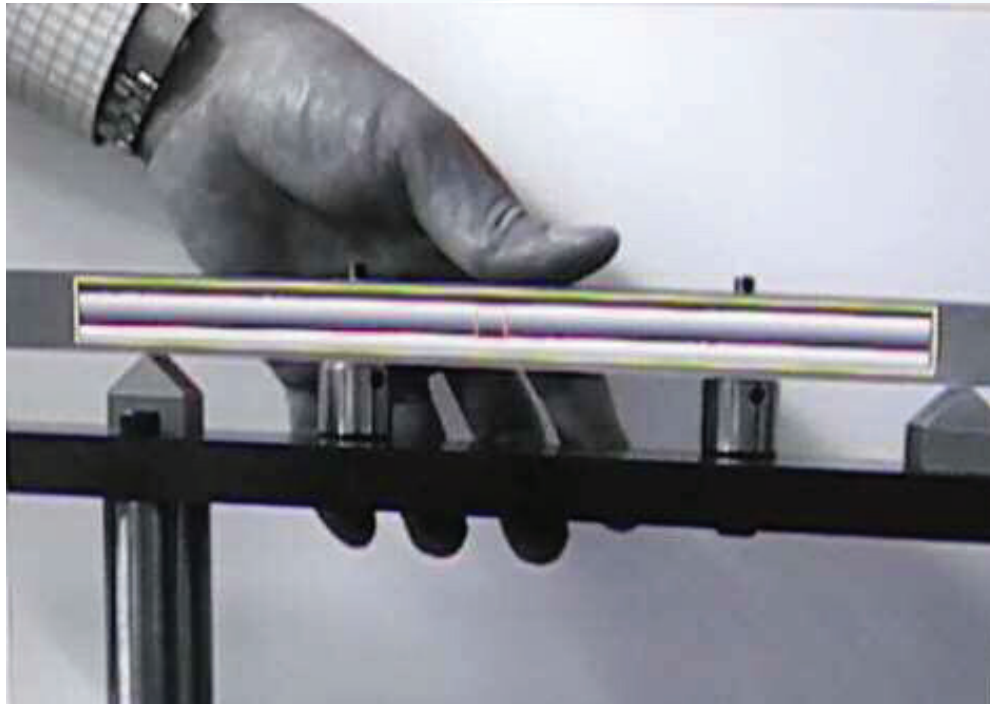
2. 計測方法

一つの周期模様を**構造物にターゲットとして添架**し、デジタルカメラを用いて撮影した画像を処理してモアレ縞を生成し、モアレ縞の位相変化から変位を計測する。

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

66

サンプリングモアレ法に基づく画像計測技術



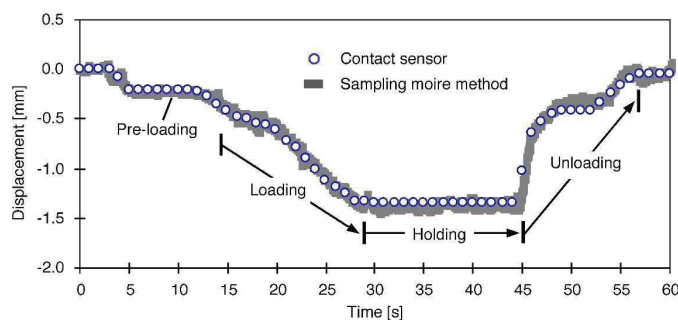
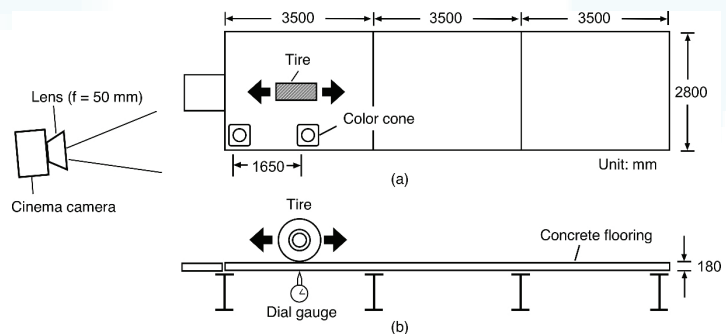
構造物のわずかな変位を大きな位相変化として計測可能

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

67

サンプリングモアレ法に基づく画像計測技術

3. 輪荷重走行試験



サンプリングモアレ法と接触式変位計の結果がよく一致していることを確認
ただし、シネマカメラは床版と離れたグランド(不動点)に設置している。

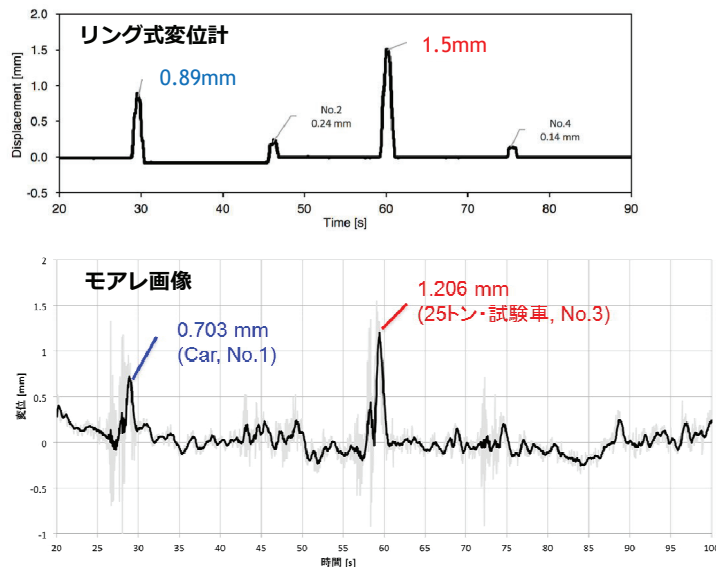
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

68

サンプリングモアレ法に基づく画像計測技術

4. 現場試験（3号渋谷線用賀料金所付近）

検査車両（25トン）を高速道路に通行させたときに、画像計測（サンプリングモアレ法）から橋梁のたわみ量を十分に評価することが可能



25トン車（NO.3）の走行試験では、リング式変位計は1.5 mm、モアレ画像は1.21 mmのたわみ量

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

69

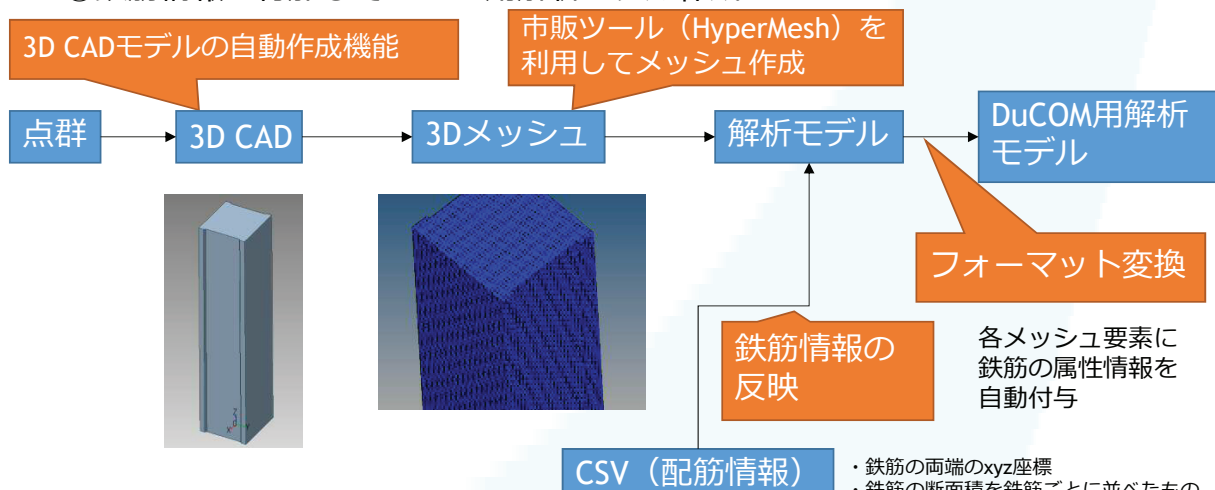
劣化予測解析技術の適用

DuCOM / COM3との連携検討

（東京大学：前川教授、石田教授との共同研究）

- 3Dの設計データ（3D CAD）から直接解析モデルを作成する仕組みを構築し、コンクリートの劣化予測への適用性を検討中

- ①点群から3Dメッシュ作成
- ②解析モデル作成
- ③鉄筋情報を付加してDuCOM用解析モデル作成



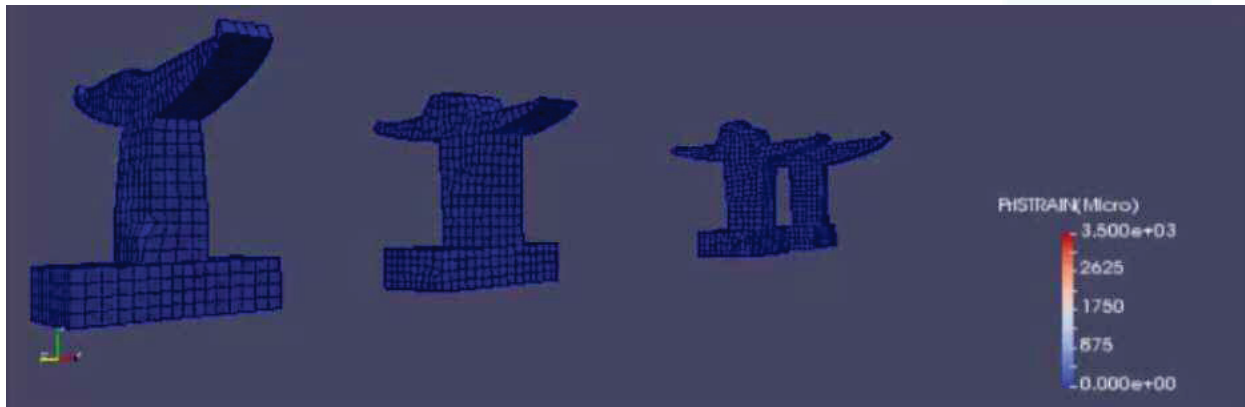
© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

70

劣化予測解析技術

DuCOM / COM3との連携検討

- ・ 作成したDuCOM/COM3用解析モデルを用いて、解析計算が実行できることを確認



- 点群データからInfraDoctorを用いて作成した3D CADデータと、別途定義した鉄筋情報を組み合わせ、シームレスに解析データを作成するシステムを開発
- 今後、解析精度の検証を実施
- コンクリート構造物の劣化診断、劣化予測を実施
- 適時・的確な補修・補強計画の策定に活用

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

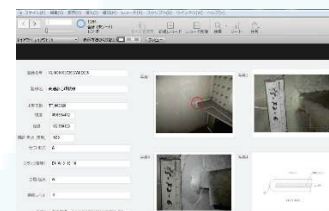
71

新技術の開発（東京都市大学との共同研究）

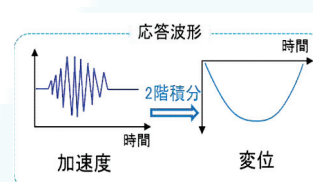
研究テーマ：首都高における点検・診断技術の開発・高度化
研究目的：的確な点検と診断を行うための技術開発
実施期間：平成26年4月～平成29年3月（3ヶ年）
構成員：東京都市大学、首都高速道路(株)、首都高技術(株)、
(一財)首都高速道路技術センター

＜研究成果例＞

- 損傷・補修事例のデータベース作成
- 衝撃弾性波法を応用したP Cグラウト充填不足検知技術の開発
(マルチチャンネル衝撃弾性波測定装置による空洞位置の特定)
- 加速度センサにより得られた加速度データに基づく変位算出手法の実用化
- 桁変位を利用したWIMシステムの開発
(動的車両計測)



データベース



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

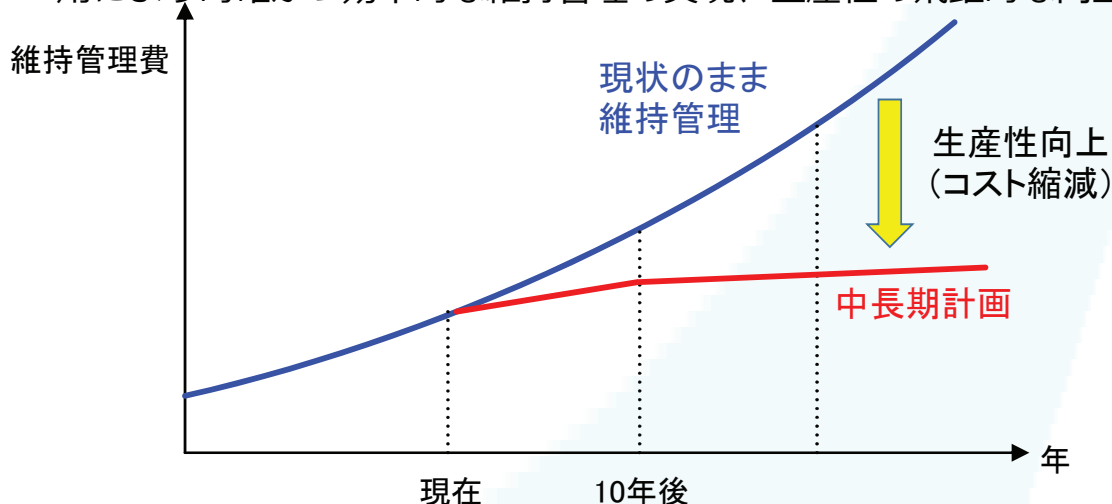
72

維持管理コストの見通しと生産性向上のイメージ

- ・ 構造物の高齢化により損傷数が増加、現状のままの維持管理を継続した場合、膨大な維持管理費が必要
- ・ 加えて、人口の減少にともない技術者や作業員等の人材不足が懸念



増大する維持管理を限られた経営資源（人・予算・もの・情報・時間）で実施するためには、新たな維持管理システム（*i*-DREAMs）の開発、活用により的確かつ効率的な維持管理の実現、生産性の飛躍的な向上が期待



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

73

i-DREAMs®の進捗状況

- GISプラットフォームおよび維持管理データについては、平成28年10月から首都高およびグループ会社において試験運用を開始し、平成29年7月から本格運用予定
- 3次元点群データは240km計測完了。平成29年8月までに全線計測完了予定
- 新技術、その他維持管理データは順次運用開始予定
- CIMは東品川栈橋、鯨洲埋立部大規模更新工事において試行運用中
- 自動運転用基盤地図への3次元点群データの活用

	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度
GISプラットフォーム および維持管理データ (構造諸元、点検・補修、維持管理支援)	試験運用	7月 本格運用		
新技術 (ロボットによる点検、新打音検査、デジタル画像解析、モニタリング)			順次本格運用	
その他維持管理データ (周辺情報、事故防災データ、交通管理データ)			順次本格運用	
東品川栈橋、鯨洲埋立部大規模更新工事におけるCIMの適用	試験運用		本格運用	
自動運転用基盤地図への3次元点群データの活用		プロトタイプ作成	基盤地図作成	

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

74

首都高における維持管理用三次元点群データのさらなる活用 ～ 自動運転支援システム用の地図基盤データを開発する会社と連携 ～

首都高速道路の維持管理に活用する高精度3次元点群データと自動運転支援システムに活用されるダイナミックマップ基盤企画株式会社（DMP）の高精度3次元地図基盤データとの相互利用と活用範囲の拡大に向けて連携を開始

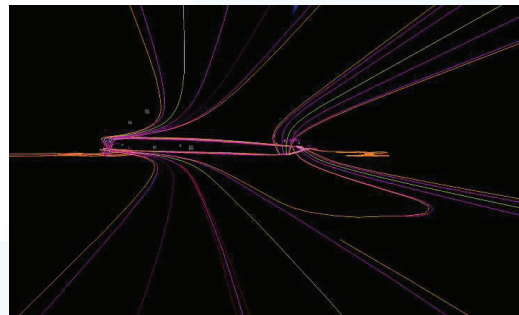
これにより、首都高速道路の新設・更新情報等を正確かつ早期に高精度3次元地図基盤データに反映させることが可能となり、交通事故削減他に向けて普及加速が見込まれる自動運転支援システムの信頼性向上を期待

また、衛星測位技術を活用したMMS（Mobile Mapping System）では、データ取得が難しい首都高速道路下の一般道路データも、当社が保有する橋脚などの維持管理データなどを活用し自動運転支援システム普及・拡大に向け更に連携範囲を拡大

【 MMSによる 首都高速道路の維持管理用3次元点群データ例と自動運転用ベクトルデータ例 】



維持管理用 3 次元点群データ



自動運転用ベクトルデータ例
(提供：DMP)

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

75

第1回インフラメンテナンス大賞の受賞について

GIS(地理情報システム)と三次元点群データを活用した道路・構造物の維持管理支援システム、「InfraDoctor[®] (インフラドクター)」が社会資本のメンテナンスに係る優れた取組を表彰するために創設された「インフラメンテナンス大賞」を高速道路会社で唯一受賞した。

[1]受賞概要

- ・主 催 者：国土交通省、総務省など6省
- ・受 賞 名：情報通信技術の優れた活用に関する総務大臣賞
- ・応募部門：技術開発部門
- ・案 件 名：GISと三次元点群データを活用した道路・構造物維持管理支援システムの開発
- ・表 彰 式：平成29年7月24日(月)



[2]案件の概要

道路・構造物の維持管理には膨大な手間とコストが必要で、今後インフラの老朽化の進行とともにますます効率的な維持管理手法が求められている。さらに、生産年齢人口の減少に伴い、維持管理を担う技術者の不足も懸念されている。

このため、道路などの構造物の維持管理の大幅な業務効率の向上、精度の向上及びコスト縮減を目的として、GIS(地理情報システム)と三次元点群データを活用した新しい道路・構造物維持管理システム(InfraDoctor[®]:インフラドクター)の開発を行った。

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

76



77

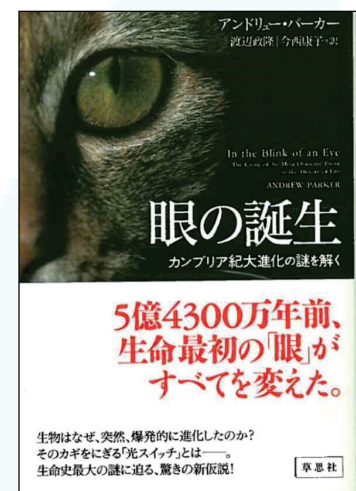
カンブリア紀の爆発（ビックバン） 進化史における画期的大事件

東京大学 松尾豊特任准教授：人工知能のトップ研究者

産業技術総合研究所人工知能研究センターシンポジウム（2017.3.28）

5億4300万年前：

- 現存する生物の原形が出そろった時期
- 主要な動物のグループの全てが硬い殻を進化させた
- 「眼」を持った三葉虫の出現
- 最初の「眼」が誕生、生物は眼を獲得
- 捕食方法進化、捕食者から回避



アンドリュー・パーカー著

「眼」の誕生前の高感知システムの映像

先カンブリア時代の環境にいた生物のスナップショット

「眼」の誕生以降の映像

先カンブリア時代の光景に視覚が加わると

⇒ 「見えない」状態から「見える」状態への一足飛びの飛躍

⇒ 動物の行動にとって途方もなく大きな一歩

ディープラーニングの進展による産業の可能性 「眼」を持った機械の誕生

東京大学 松尾豊特任准教授

産業技術総合研究所人工知能研究センターシンポジウム（2017.3.28）

- 近年、画像処理技術が飛躍的に向上
- 画像処理技術をAI（ディープラーニング）と組み合わせることで、機械が「眼」を持つようになる
- 従来、機械の精度向上は、「眼」を持たない中で工夫を続けることで実現してきた
- ディープラーニングの進化は、AIを実装した機械が「眼」を持ったこと
- 「眼」をもつことで機械ではできなかった作業の自動化が可能となる、例えば農業、**建設**、医療、ect.
- AIの進化は、「カンブリア紀の爆発」並みの大きなインパクトを様々な分野に及ぼす

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

81

現代のカンブリア紀の爆発

視覚を得るには、眼、神経系と脳が必要

• 眼は、光を利用して物体を識別するための映像を形成する能力を有する器官

• 視覚情報が電気信号として眼から脳に伝達

• 脳で像が結ばれ認識

• 様々な眼（センサー、レーザー、レーダー、電磁波、弾性波、（近・遠）赤外線、音響等）からの情報取得

• 神経系（情報伝達）：情報通信技術（Wi-Fi, 5G）, IoT

• AI（人工知能：機械学習、ディープラーニング）
• 技術者（頭脳, 知恵, 知力）

i-DREAMs®

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

82

今後の展望

～未来型維持管理に向けて～

- 異分野技術の融合、産学官の連携、オープンイノベーションにより新たな点検、センシング技術の開発、「眼」が誕生
- 加えて、画像処理技術、分析・解析技術の深化により複眼的視覚野が開発
- これら複眼から得られる情報（ビックデータ）をIoT（神経系）を活用しプラットフォーム（InfraDoctor）に統合
- ビックデータをAI（人工知能）により処理し、課題の「見える化」、「1次スクリーニング」を実施し、技術者の「頭脳、知恵、知力」による最終判断がより深化
- すなわち、カンブリア紀の爆発同様に、新たな「複眼」の誕生、神経系（IoT）や脳の高度化（AI、技術者）システム（i-DREAMs）により、革新的インフラマネジメントが実現
- この結果、インフラマネジメントにおける異次元の高度化、生産性の向上、省力化、効率化が達成され、持続可能な社会の実現が期待

© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

83

ご清聴ありがとうございました



© Metropolitan Expressway Company Limited 2017

84