

新都市社会技術融合創造研究会 第23回新都市社会技術セミナー@2026年10月13日
「PC橋の適切な維持管理に関する研究」

PC橋の健全性に関する評価手法の総合的研究 および維持管理における有効性の提案

研究成果報告

(2023～2025年度の3か年)

プロジェクトリーダー

京都大学大学院地球環境学堂 寄附講座教員 杉浦邦征



参加メンバー

研究PJリーダー

杉浦邦征(寄附講座教員(京都大学客員教授・名誉教授))

金哲佑教授(京都大学)

北根安雄教授(京都大学)

山本貴士教授(京都大学)

五井良直准教授(岐阜大学)

佐藤顕彦助教(京都大学)

河邊大剛研究員(京都大学)

丸山久一(名誉教授(長岡技術科学大学))

研究会幹事

高瀬和男(客員教授(京都大学、日本構造分析舎))

民間委員

大久保宣人(高田機工)

瀧本和志(HRC研究所)

浜博和、広野邦彦(NEXCO西日本イノベーションズ)

慈道充(阪神高速先進技術研究所)

天谷公彦、福井郭斗(日本ピーエス)

谷直彦、橋本啓汰、矢口 昂史(パシフィックコンサルタント)

近畿地整

谷道路保全企画官

田中道路構造保全官

竹中道路保全係長

藤井保全対策官(近畿地整近畿道路メンテナンスセンター)

森野保全企画係長(近畿地整近畿道路メンテナンスセンター)

仲野技術情報管理官(近畿地整近畿技術事務所)

※活動期間内で異動などでメンバー交代がありますが、上記は最終年度でのメンバー構成です。

プロジェクトの背景・目的 (研究開始当初の背景、目標等)

コンクリートは、耐久性に優れ、安価であるために多くの構造物で採用されている。しかし、劣化因子の侵入などの損傷により耐久性・耐荷性能が低下し、その機能を失ってしまう。

(研究の設定課題Ⅰ) コンクリート躯体内部に損傷、特にPC橋のPC鋼材の破断などの場合コンクリート表面に損傷が見えずに損傷の発見が遅れ著しく危険性が増すことがある。

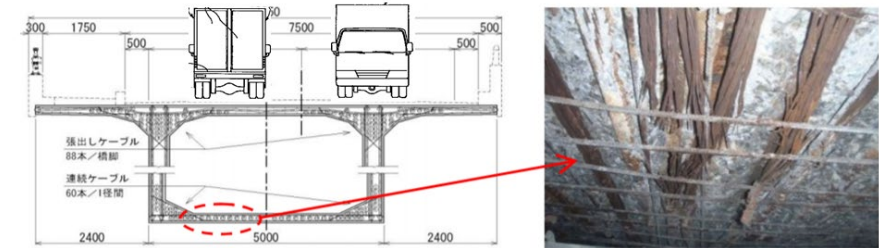
(研究の設定課題Ⅱ) 橋梁の点検は近接目視、打音検査など、専門家の経験値や感覚に頼った定性的評価であり、橋梁の損傷などによる機能低下を評価した結果とはなっていない。そのためにはモニタリングを利用した新しい管理方法の適用が必要だが、その適用が進んでいない。

【研究の目標】

研究Ⅰ: PC橋が発する振動、支間たわみや支点回転角、支点反力などに基づき、橋の健全性を総合的に評価する手法を提案する。特に、構造物の劣化判断に対して振動性状の変化をとらえた「SAFE技術」により、**見えない損傷の「見える化」**を行い、合理的な維持管理に資する指標を示すことを提案する。

研究Ⅱ: **定量的で再現性のあるモニタリングを用いた状態評価方法**を導入していく場合の考え方の一つを提案する。

「PC構造物」: PCケーブルの破断 中空断面PC橋梁の内部の耐水



ケーブルの破断の例

ある程度PC破断数が進行しないと活荷重などでのたわみ量にも変化が生じない

プロジェクトの研究目標に対する実施内容(研究の方法・項目等)

目標①: PC橋のケーブル破断などのコンクリート内部損傷に対して振動性状を用いた評価手法の提案と確認

- ・RC桁実験、PC桁実験を通じたPC鋼材破断等の見えない損傷へのSAFE技術の評価方法の提示
- ・実橋を用いた現場環境の変化に伴う物理量の変動状況の把握

→2023年度RC桁実験

→2024年度PC桁実験

→2025年度PC桁実験および再劣化実験

→2023年度冬/2024年度夏/2024年度冬/2025年度夏/実橋を用いて各種物理量(たわみ, 振動等)の計測

目標②: コンクリート内部の損傷を数値シミュレーションにより評価する方法の検討

→2023年度RC実験桁の耐荷解析

→2024年度PC実験桁の耐荷解析・振動解析

→2025年度RC実験桁の振動解析

目標③: デジタルデータを用いたモニタリングを活用する場合の課題と対策方法の提案

- ・社会実装に関する有効性の提案(マニュアルの作成)

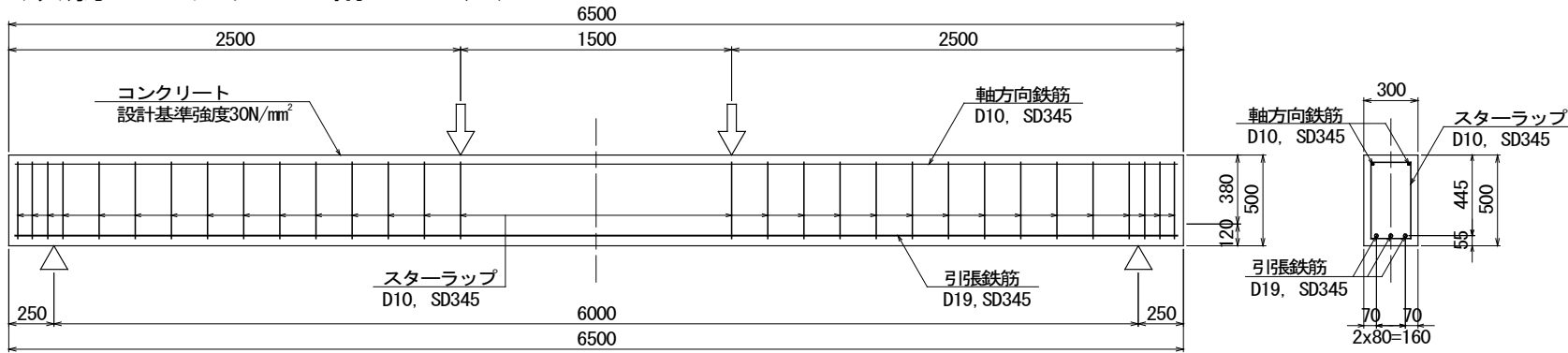
→2023年度ヒアリング実施

→2024年度管理者との意見交換

→2025年度マニュアル取りまとめ

目標①: 1. 2023年度 RC桁実験結果の概要

鉄筋コンクリート桁の寸法



支間 : 6m
供試体断面 : 300mm × 500mm

実験状況

実験場所

株式会社日本ピーエス 敦賀工場実験棟

□ 914-0027 福井県敦賀市若泉町3

実験日

令和6年1月19日～25日

参加メンバー

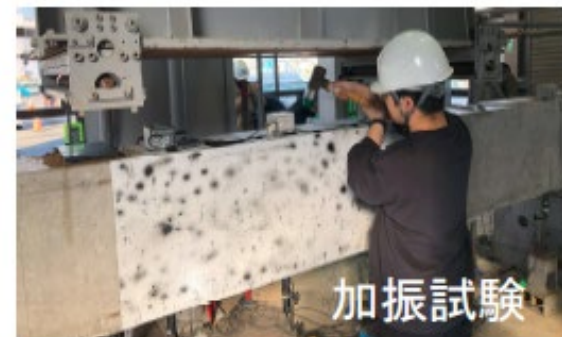
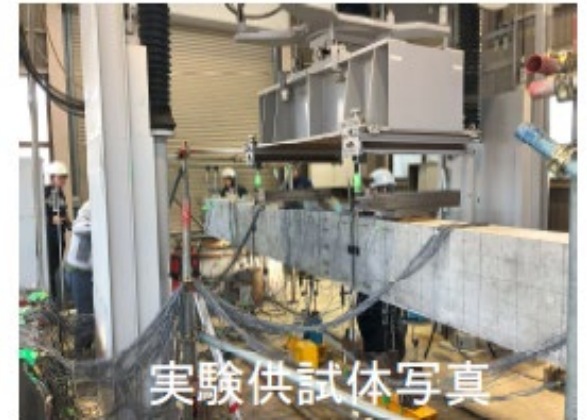
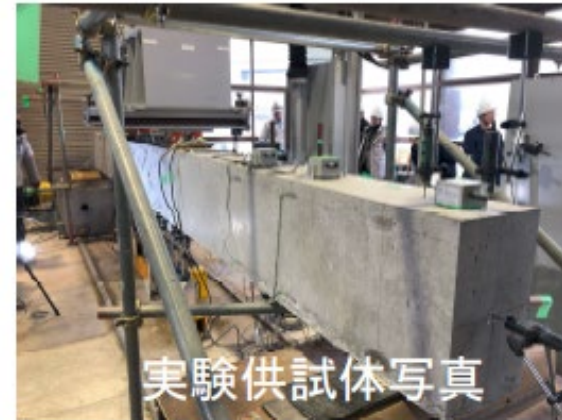
京都大学: 杉浦教授、金教授、山本教授、北根教授、
五井助教、高瀬客員教授、河邊研究員、
佐藤研究員、学生

長岡技術科学大学: 丸山名誉教授

NEXCO西日本イノベーションズ

阪神高速先進技術研究所

高田機工、HRC研究所、パシフィックコンサルタント

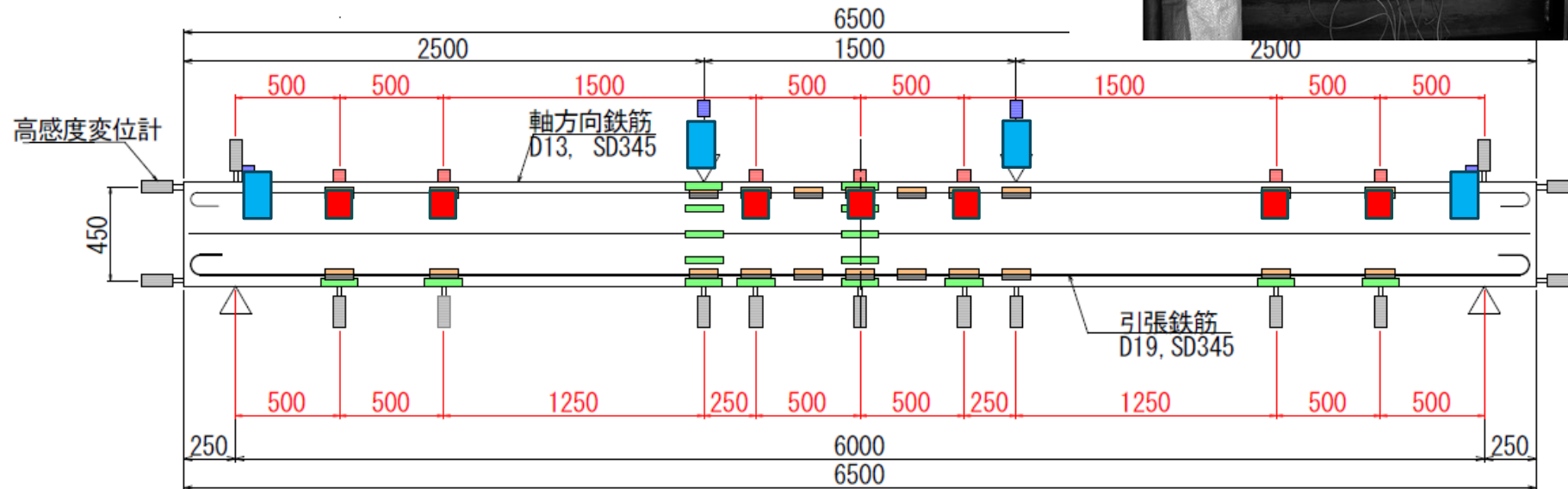
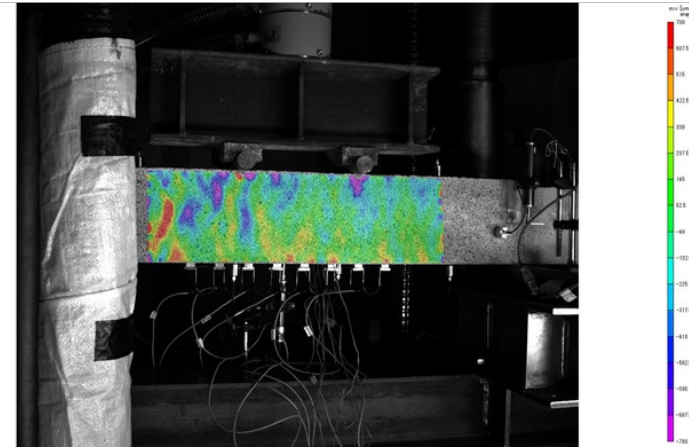


実験供試体計測項目、計測位置

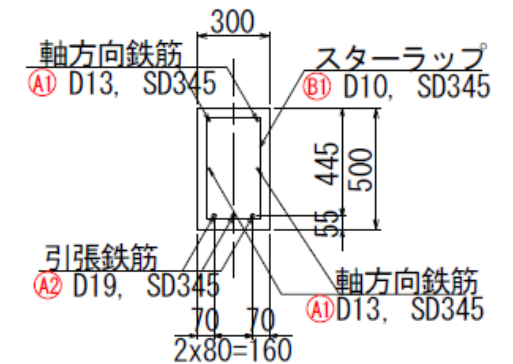
計測項目

- ・ 載荷荷重
- ・ たわみ
- ・ コンクリートひずみ
- ・ 鉄筋ひずみ
- ・ 加速度
- ・ ひび割れ幅 (π型変位計)
- ・ 画像相関法 (DIC)
- ・ ひび割れ発生形状

画像相関法の例

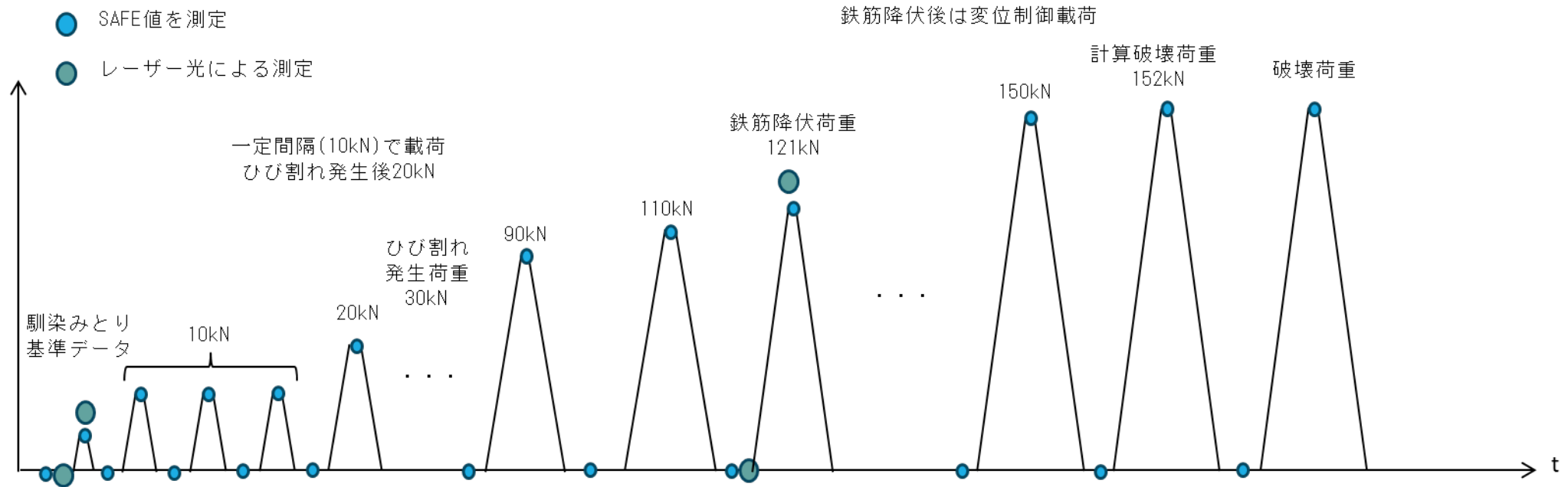


- WSG(ワイヤゲージ) CSG(コンクリーゲージ)ともに設置
- CSG (コンクリートゲージ)
- 加速度計 (3軸水晶振動子加速度計)
- レーザー受光目盛り



*寸法単位 : mm

荷重载荷ステップと状態計測



鉄筋コンクリート梁の曲げ破壊の過程

曲げ荷重の载荷開始

曲げひび割れの発生 (30 kN)

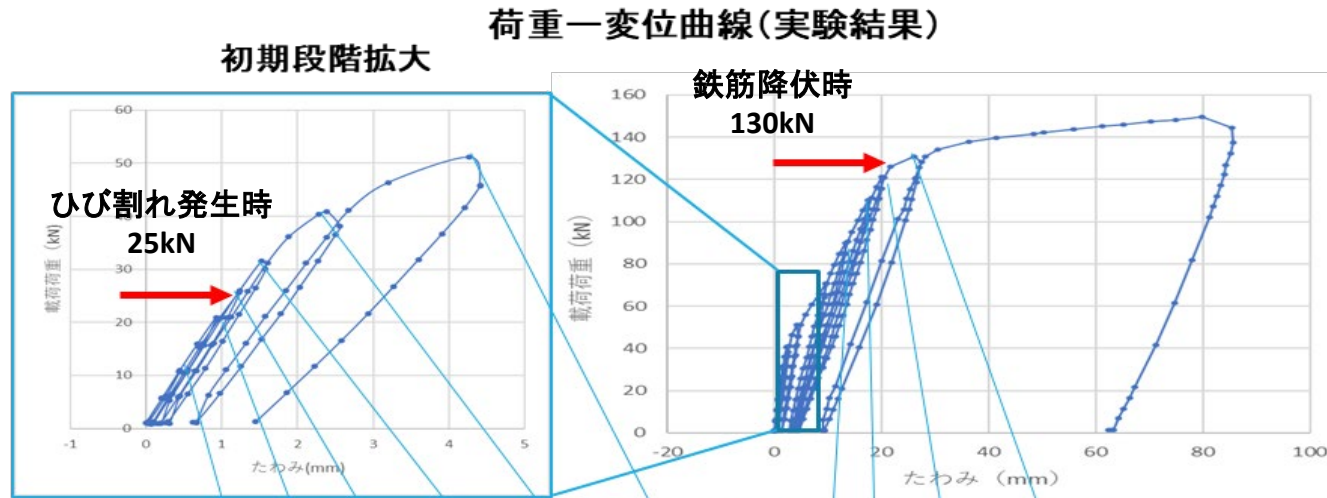
曲げひび割れ発生範囲の拡大

引張鉄筋の降伏 (121 kN)

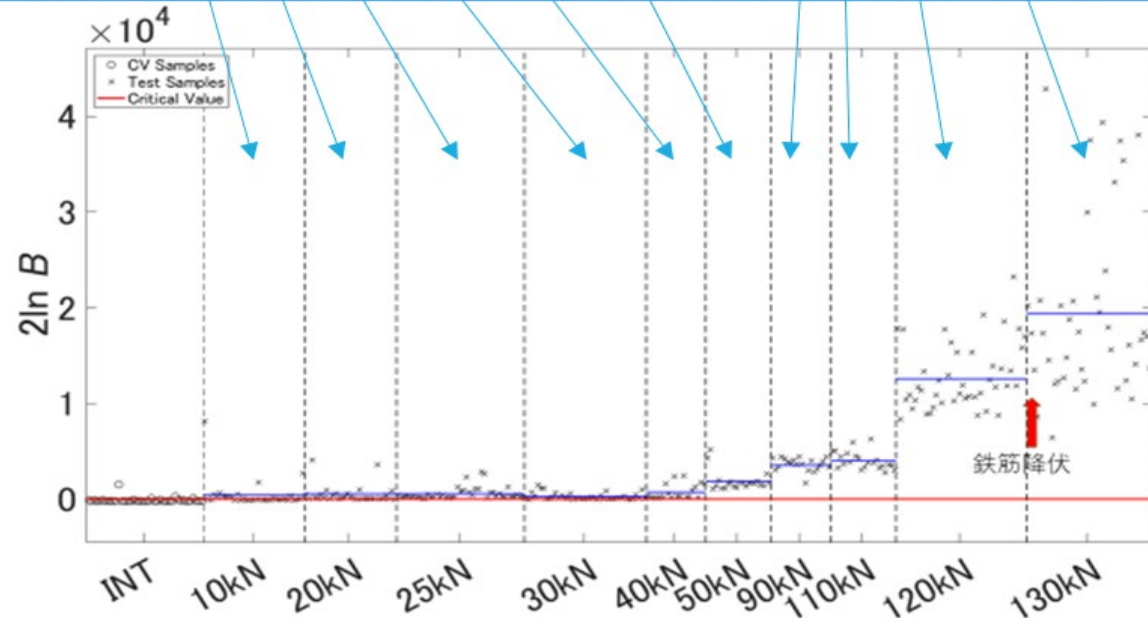
引張鉄筋の降伏範囲の拡大

コンクリート圧壊による破壊
(152 kN)

結果1:SAFEによる評価結果



提案評価方法(SAFE値)による結果(荷重除荷後の評価値)



【考察】

実験における荷重—変位曲線を左上図に示す。コンクリートひび割れは25kN付近で発生した。また、鉄筋の降伏は120kNから130kN付近で発生している。その後、変形が大きくなり試験体の安全から荷重150kN-変位85mmで実験を終了した。

SAFE値を左下図に示す。縦軸(2lnB)が異常検知指標を示し、(×)プロットが衝撃試験毎の判定値を示す。さらに各ステップにおける判定値の平均を青線で示した。

荷重載荷前のなじみをとった段階の加振計測の結果を基準データ(INT)として評価を行っている。

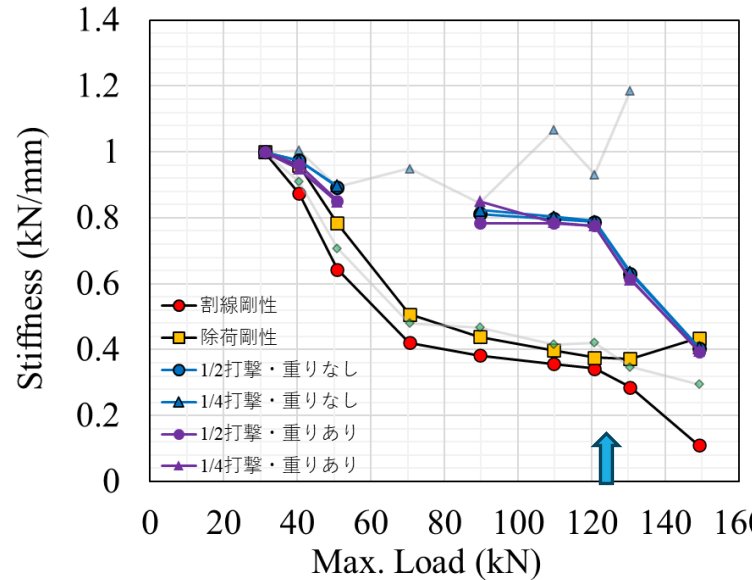
◎SAFEによる評価結果

1. ひび割れが発生した25kN以降について、荷重が大きくなった50kN以降については状態の異常を計測している。
2. 鉄筋降伏の少し前の90kNから平均的な値で異常を示し、鉄筋降伏直前の120kNにおいて著大な変化が確認できた。これは引張鉄筋降伏直前の状態を検知できる可能性を示唆している。

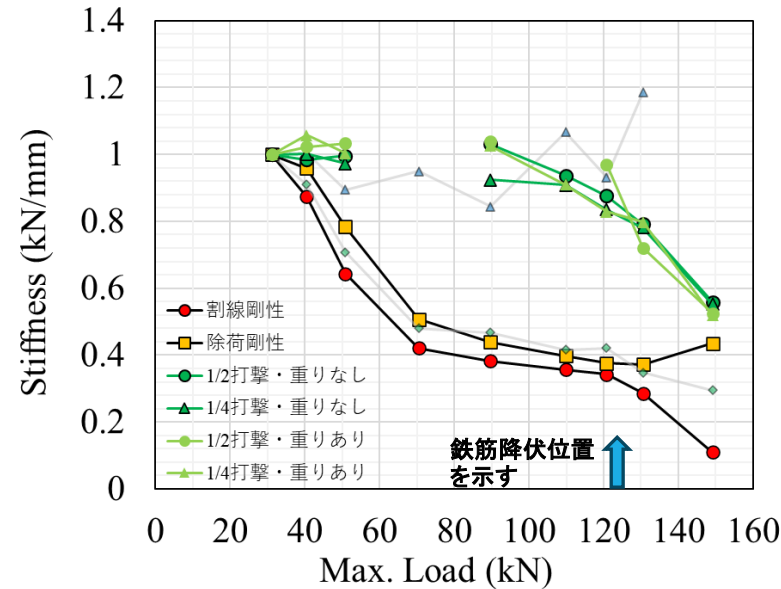
結果1:SAFEによる評価結果(続き,SAFE評価における計測結果からの考察)

低周波数帯域高感度加速度計

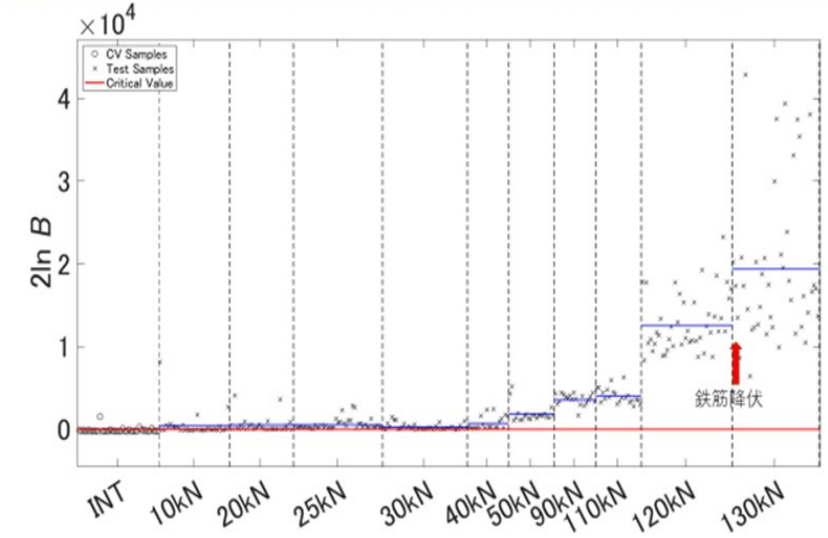
曲げ1次モードから算出した
剛性低下率



曲げ2次モードから算出した
剛性低下率



提案評価方法(SAFE値)による結果(荷重除荷後の評価値)



荷重変形曲線から①割線剛性、②除荷剛性を評価した。曲げモードからの推定剛性をコンクリートひび割れ時(30kN)を基準(1)とし無次元化し、割線剛性、除荷剛性と比較した結果を上図に示す。

【考察】

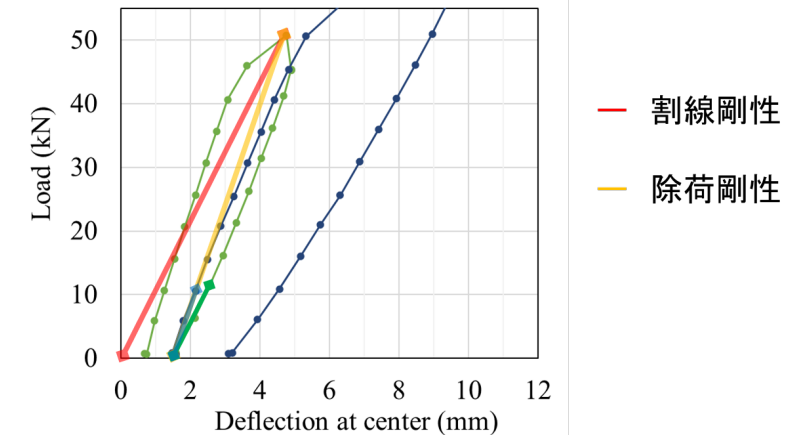
- ・割線、除荷剛性はコンクリートのひび割れ後に大きく減少し、その後70kNから鉄筋が降伏するまでは、変化が少ない。
- ・割線剛性は鉄筋降伏後にさらに減少する。
- ・**曲げ固有値から算出した推定剛性は、鉄筋降伏付近に大きく減少する。**
- ・曲げ2次モードによる剛性の評価値は鉄筋の降伏までは大きな低下はしない。

* 割線剛性はひび割れ面が開いた形での断面剛性を示していると考えられ、**曲げ固有値から算出した剛性はひび割れ面が閉ざされた状態の剛性**と考える。

→SAFE評価は使用状態の振動から構造体の劣化の進行を適切に評価する可能性が高いことが示されている。

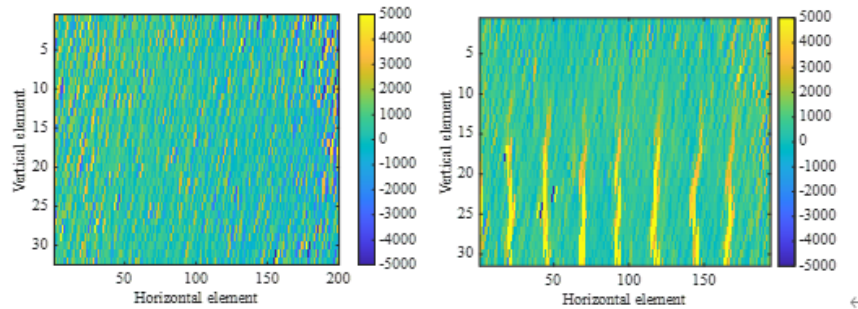
特に鉄筋降伏前から徐々に損傷の評価値が進行していることは、鉄筋とコンクリートの付着およびその付近の鉄筋の節によるコンクリート内部の微細な損傷を表現していると考えられる。これはPC橋におけるケーブル破断の損傷を評価するための有効な手段である可能性が高い。

各種剛性算出方法



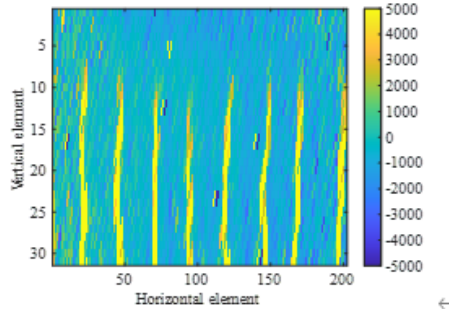
結果2: 画像相関法によるひび割れ評価結果

ひずみ分布、中立軸



(a) 25 kN

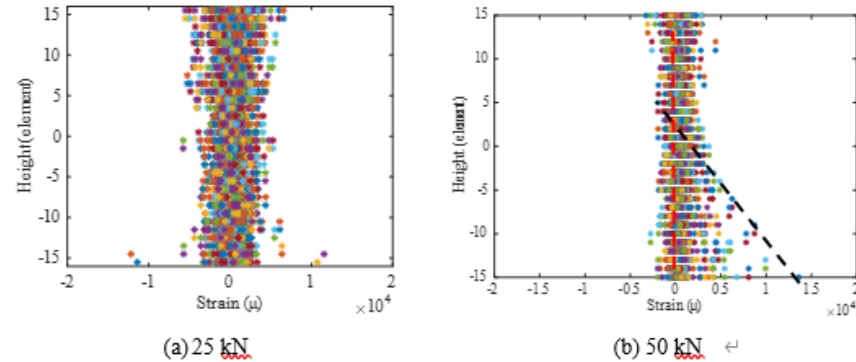
(b) 90 kN



(c) 130 kN

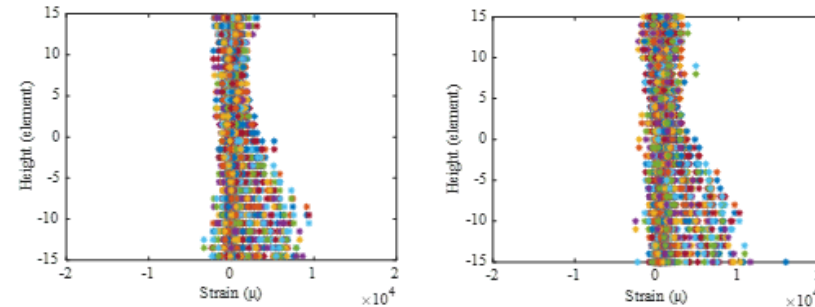
水平ひずみのコンター図(黄色:引張ひずみ, 青色:圧縮ひずみ)

上図から, 25 kNの段階では, DIC解析の結果からひずみの分布に規則性は確認できなかった. しかし, 90kNからは, 曲げひび割れの発生が水平ひずみの大きい範囲として確認できる. しかし, 水平ひずみ値の評価においては**DICの分解能に課題**が残った.



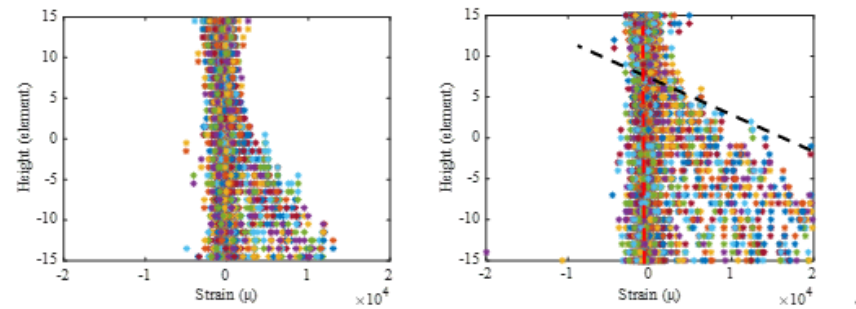
(a) 25 kN

(b) 50 kN



(c) 70 kN

(d) 90 kN



(e) 70 kN

(f) 90 kN

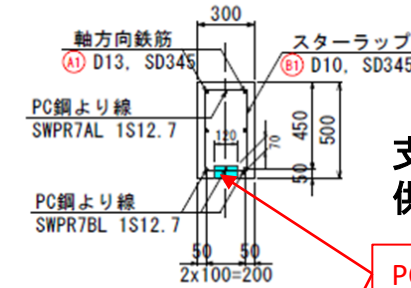
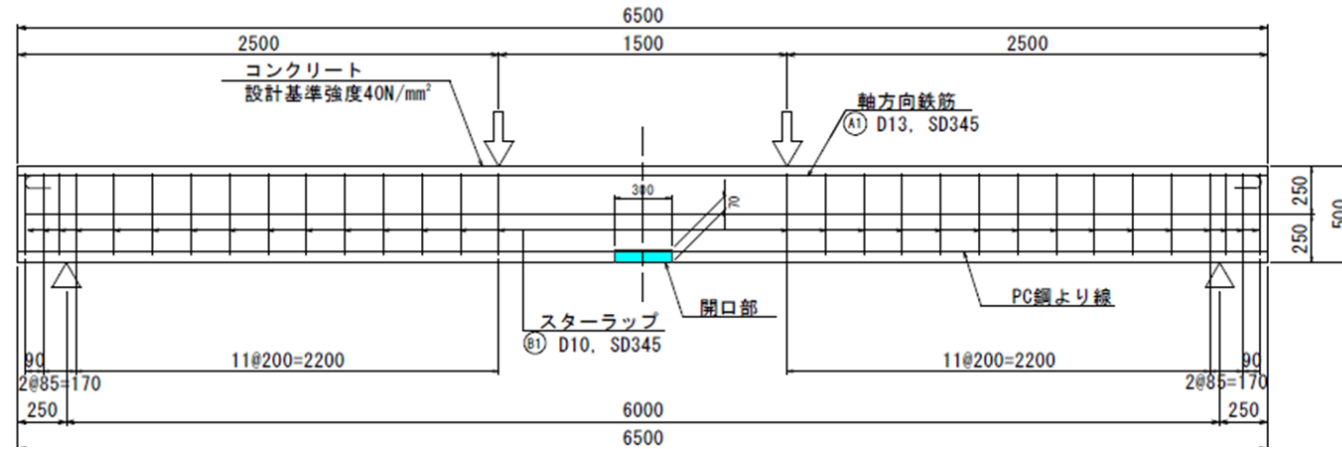
水平ひずみの高さ方向分布

ひび割れ発生時には, 図-(b)~(f)のように, 同一高さにおいて, ひび割れ部分の高い引張ひずみと, それ以外の部分が混雑している. 図-(b)(f)のように, **引張ひずみの外縁に補助線を引くと, 黒点線と赤点線の交点からひび割れの進展とともに中立軸が上側に移動しているようにも見える.**

しかし, 圧縮ひずみの計測精度に課題があるため, DICによる中立軸の計測には更なる検討が必要である.

目標①: 2. 2024年度 PC桁におけるPCケーブルの破断試験結果の概要

PC桁の寸法



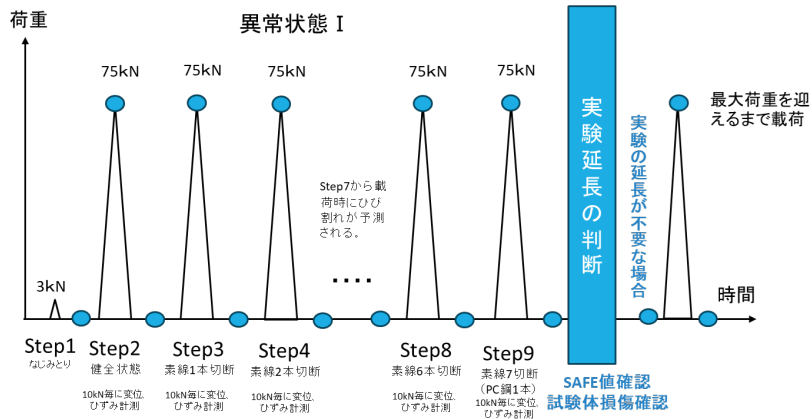
支間：6m
供試体断面：300mm×500mm

PCケーブルの素線を順次切断

- 実験場所
株式会社日本ピーエス 敦賀工場実験棟
- 実験日
令和6年12月2日～6日

荷重載荷ステップ

● 印部にて加速度計測、DICの計測を行う



計測項目

- ・ 載荷荷重
- ・ たわみ
- ・ コンクリートひずみ
- ・ 鉄筋ひずみ
- ・ 加速度
- ・ ひび割れ幅 (π型変位計)
- ・ 画像相関法 (DIC)
- ・ ひび割れ発生形状

実験状況



実験計画0: 模型桁の設計条件

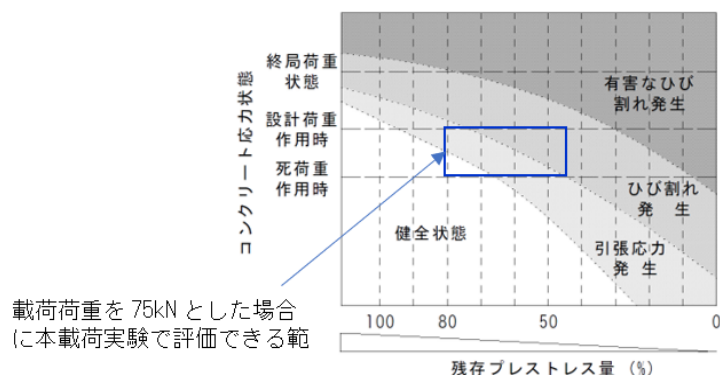
[illegible]

図-8 残存プレストレスと健全性の関係のイメージ

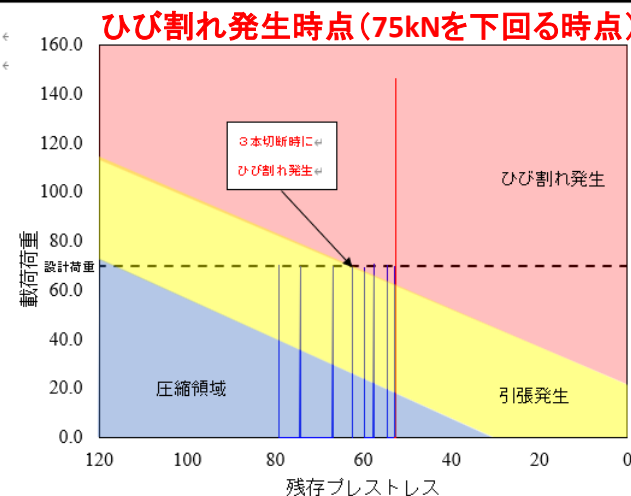
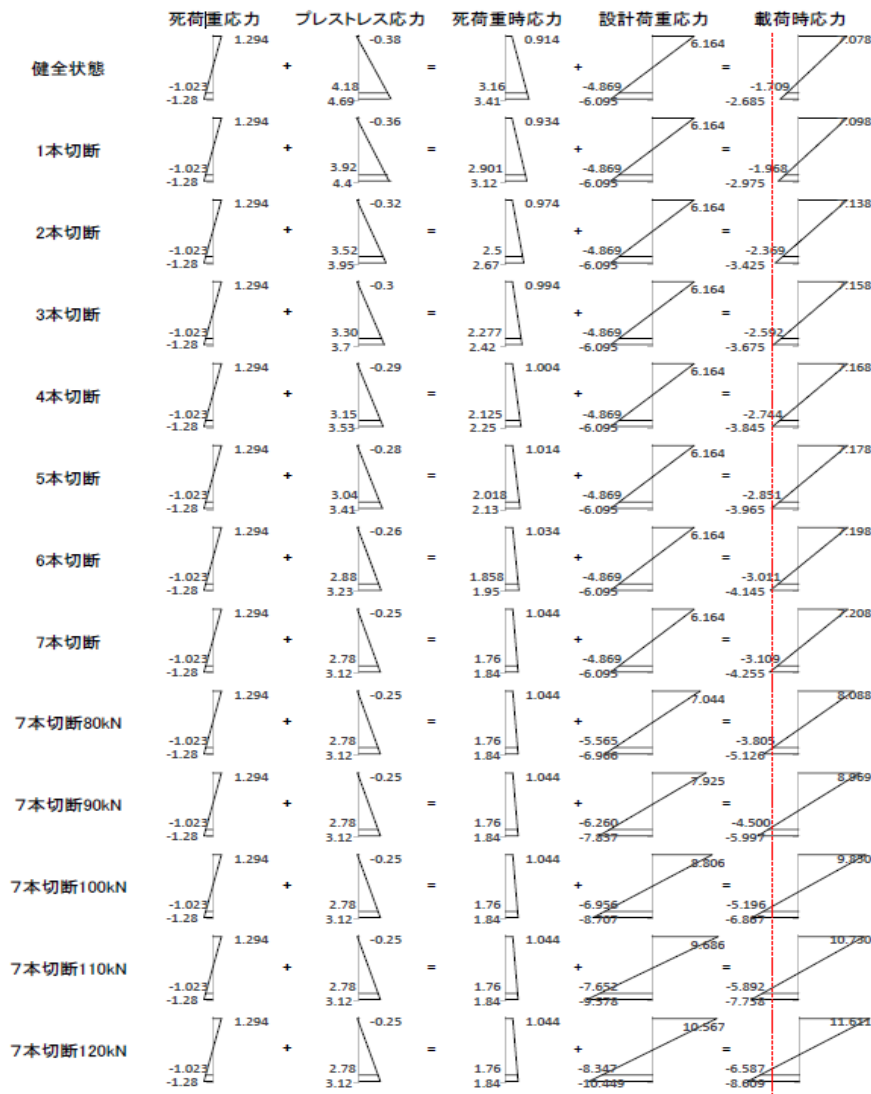


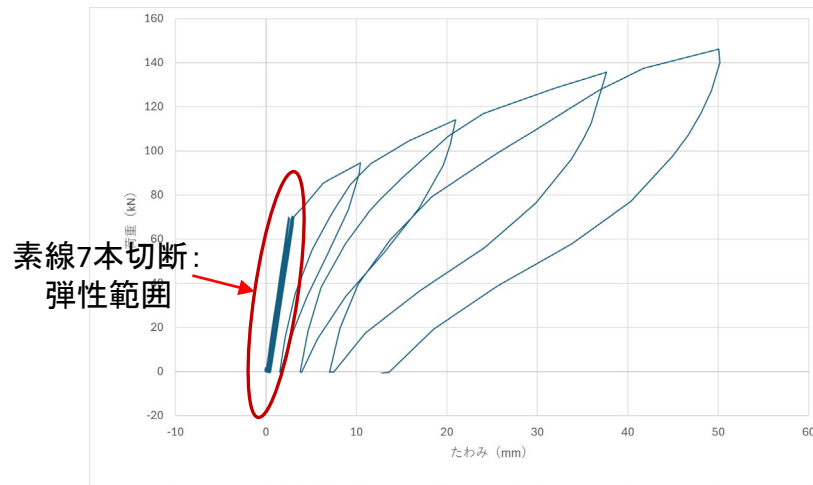
図-9 本実験における残存プレストレスとひび割れの関係

各荷重状態における断面内応力度

ひび割れ発生応力度 $\sigma_{CF}=3.78\text{N/mm}^2$

結果1:計測結果

荷重一変位曲線(実験結果)



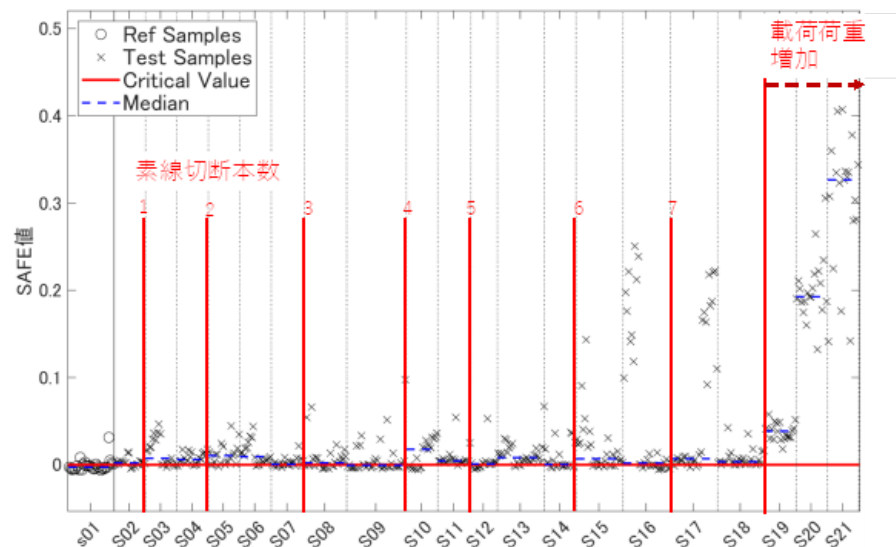
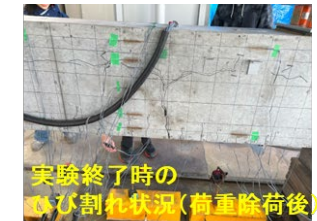
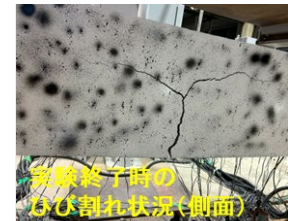
【考察】

実験における荷重一変位曲線を左上図に示す。

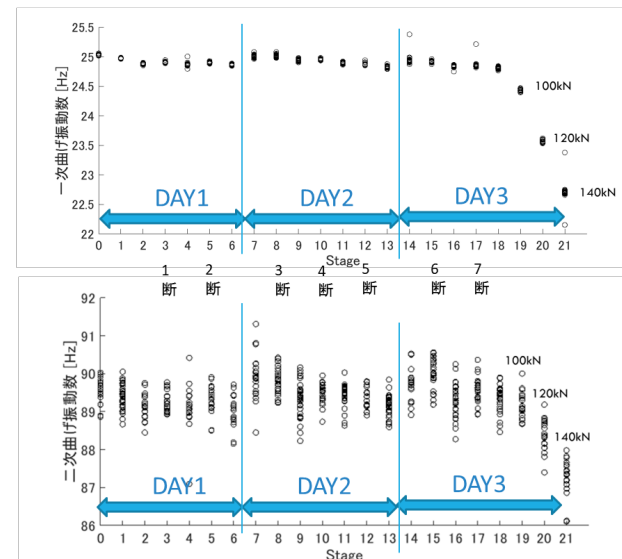
設計荷重とした75kNの載荷時は素線7本(PC鋼材1本)切断までの支間中央部の変形は弾性変形を示した。その後、100kNへ載荷した時に75kNを過ぎたあたりから変形量が大きく変化した。事前解析CASE2で示された解析結果と同様であった。

ひび割れは素線が4本切断したあたりから発生した。これも計画時の設計値で示した状況とほぼ一致した。

ひび割れは箱抜きの端から発生し、RC桁と異なり、主たるひび割れは一本であった。下記写真に示すように150kNの載荷時にはひび割れ幅が13mmとなり、その時点で実験を終了した。ただし、除荷するとひび割れ幅は2mm程度となった。また、ひび割れ図の赤四角部分には大きな荷重になってもひび割れは確認されなかった



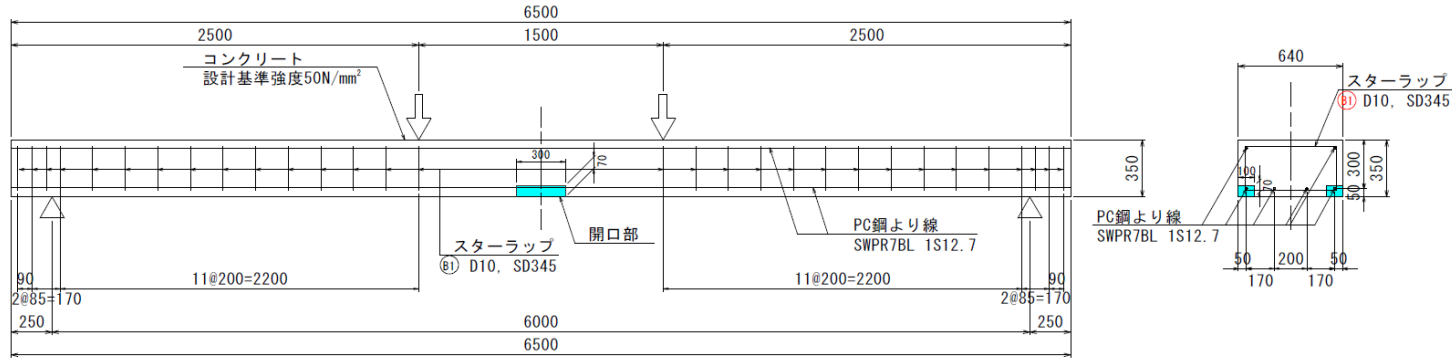
固有振動数計算結果



・PC梁試験の結果、PC鋼材を1本切断した状態でもPC梁のひび割れ幅は荷重除荷時には閉じており、前項の荷重変位曲線の結果からは、構造体は弾性挙動を示した。その間においてもSAFE値は異常を検知を示す傾向が若干見られた。その後、100kNの載荷状態では、PC鋼材のひずみが増加し、PC鋼材の付着が切れたり、ひび割れも大きくなった。つまり、SAFE技術により評価しなくてはならない状態として、どの程度の劣化が進んだ状態をSAFE値で明確に示すことができるのかに着目して検討することとした。

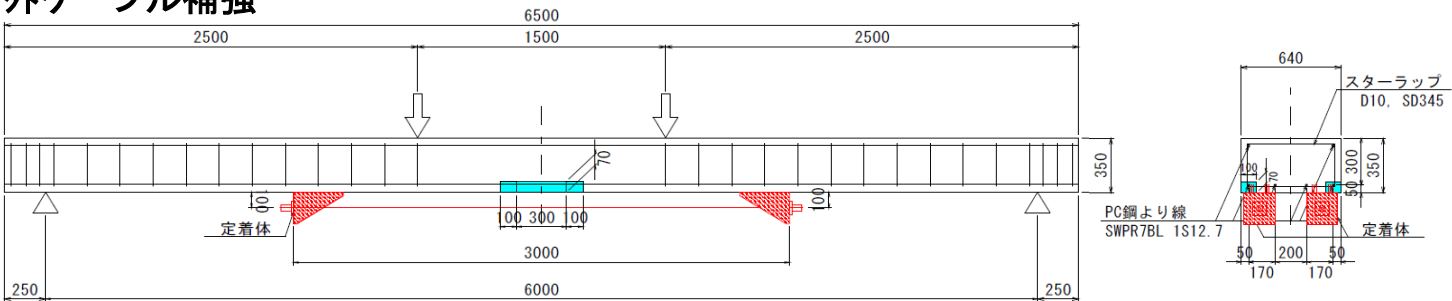
目標①: 3. 2025年度 PC桁実験の概要(再劣化実験を含む)

PC桁の寸法



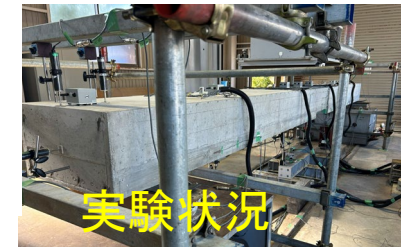
支間長 : 6m
供試体断面 : 幅640mm × 高さ350mm

外ケーブル補強



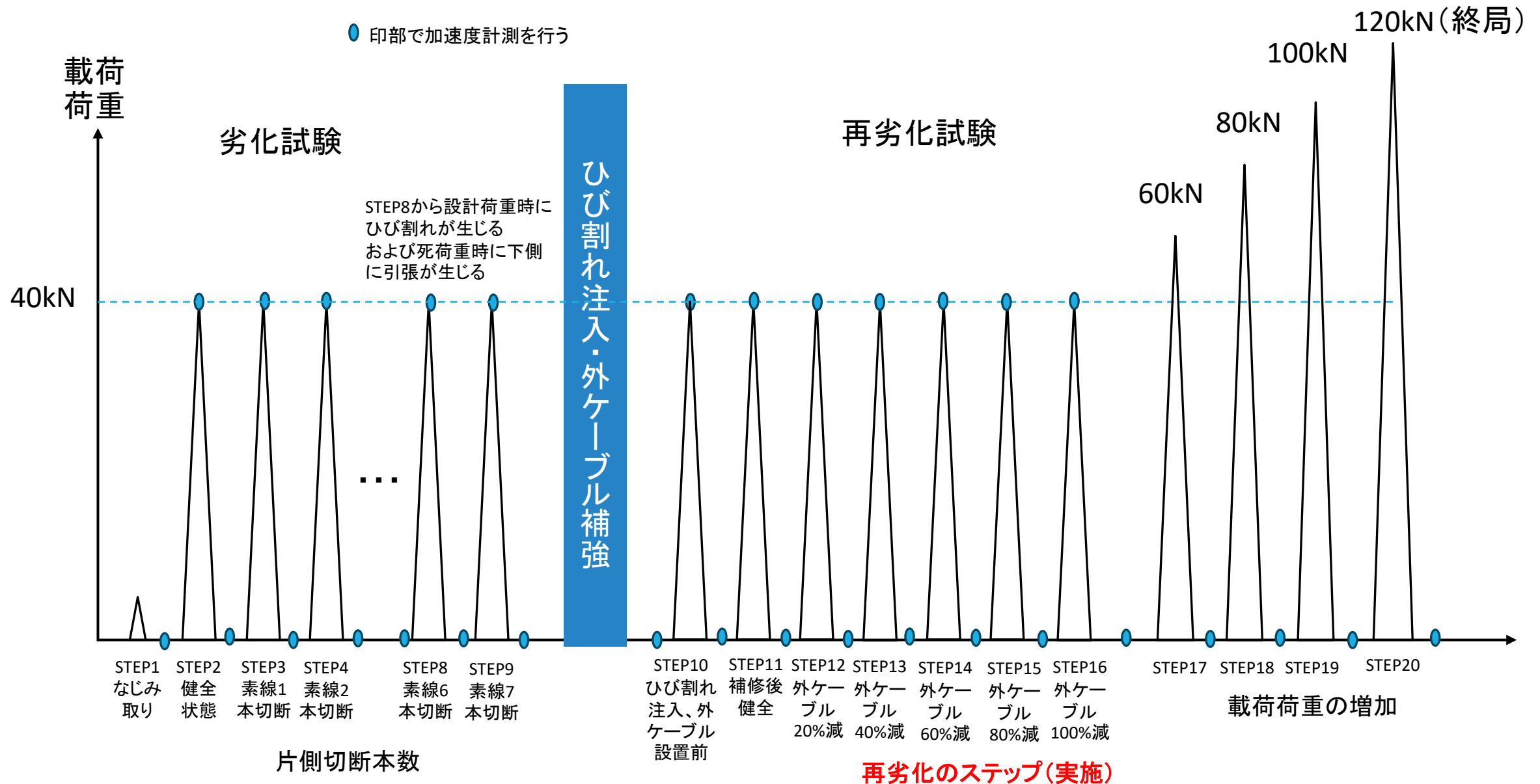
- 実験場所
株式会社日本ピーエス 敦賀工場実験棟
□ 914-0027 福井県敦賀市若泉町3
- 実験日
劣化試験 : 令和7年11月17日～19日
再劣化試験: 令和7年12月15日～18日
- 参加メンバー
京都大学: 杉浦教授、五井先生、高瀬客員教授、佐藤先生、河邊研究員、学生
長岡技術科学大学: 丸山名誉教授
NEXCO西日本イノベーションズ
高田機工、HRC、パシフィックコンサルタント

実験状況



荷重載荷ステップと状態計測

● 印部で加速度計測を行う

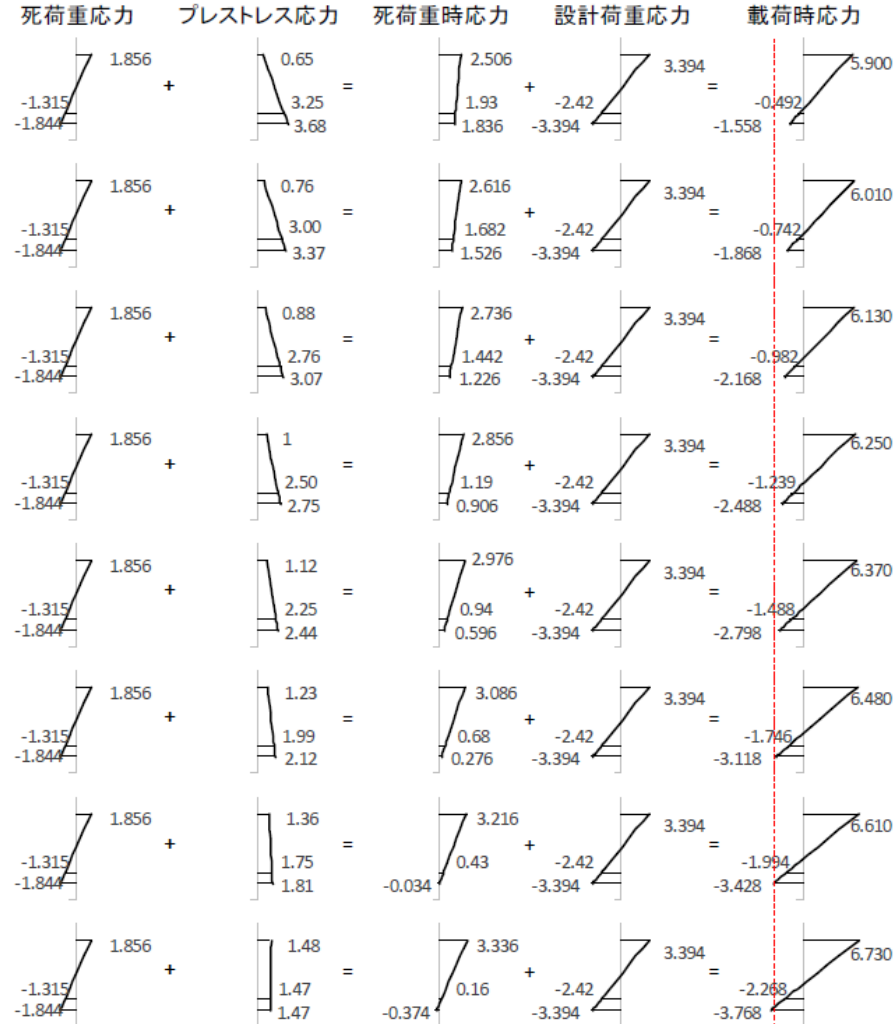


実験計画O: 模型桁の設計条件

補修前

スパン中央

健全状態



$\sigma_{cr}=3.37\text{N/mm}^2$

図-9 補修・補強前の応力状態図

補修後

スパン中央

緊張力 100%
(健全状態)

緊張力 85.7%
(2 本切断相当)

緊張力 71.4%
(4 本切断相当)

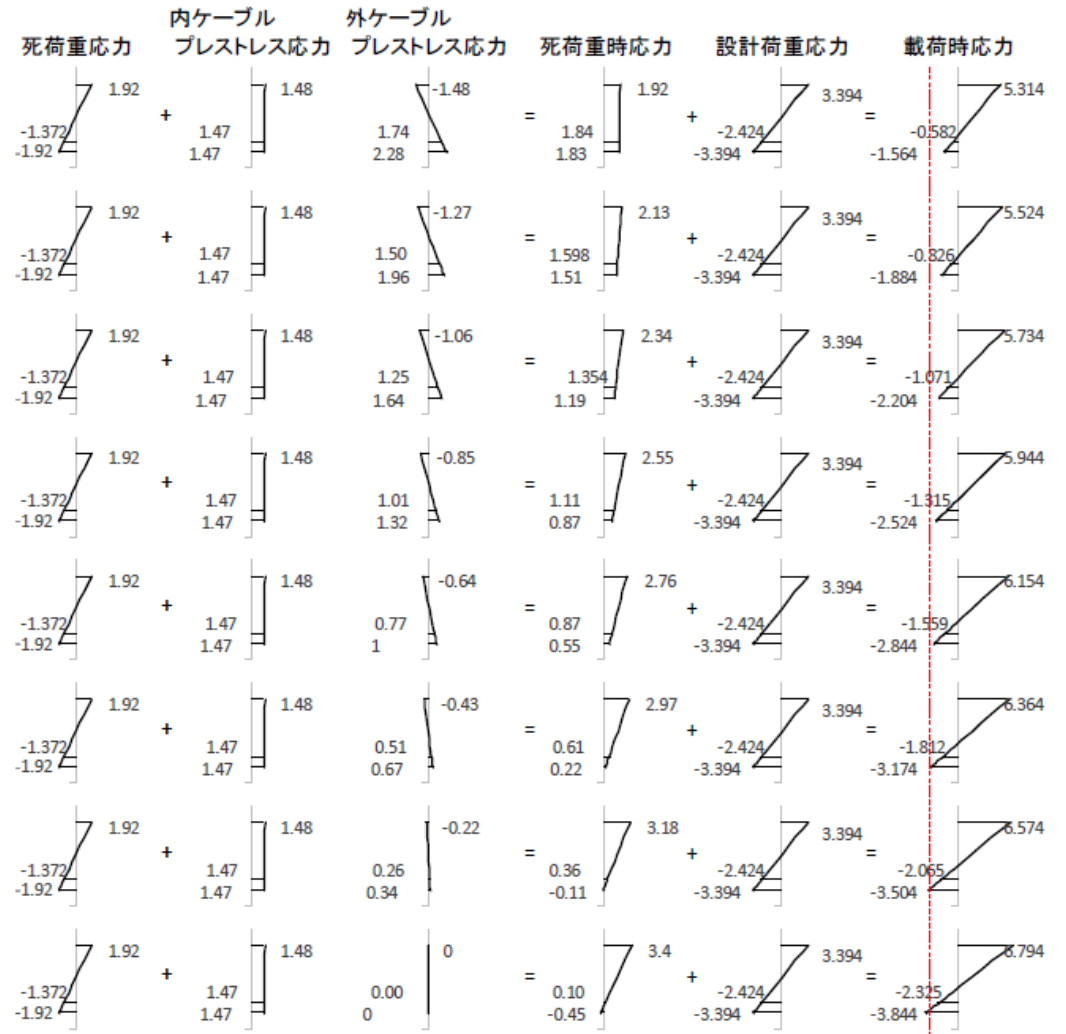
緊張力 57.1%
(6 本切断相当)

緊張力 42.9%
(8 本切断相当)

緊張力 28.6%
(10 本切断相当)

緊張力 14.3%
(12 本切断相当)

緊張力 0.0%
(14 本切断相当)

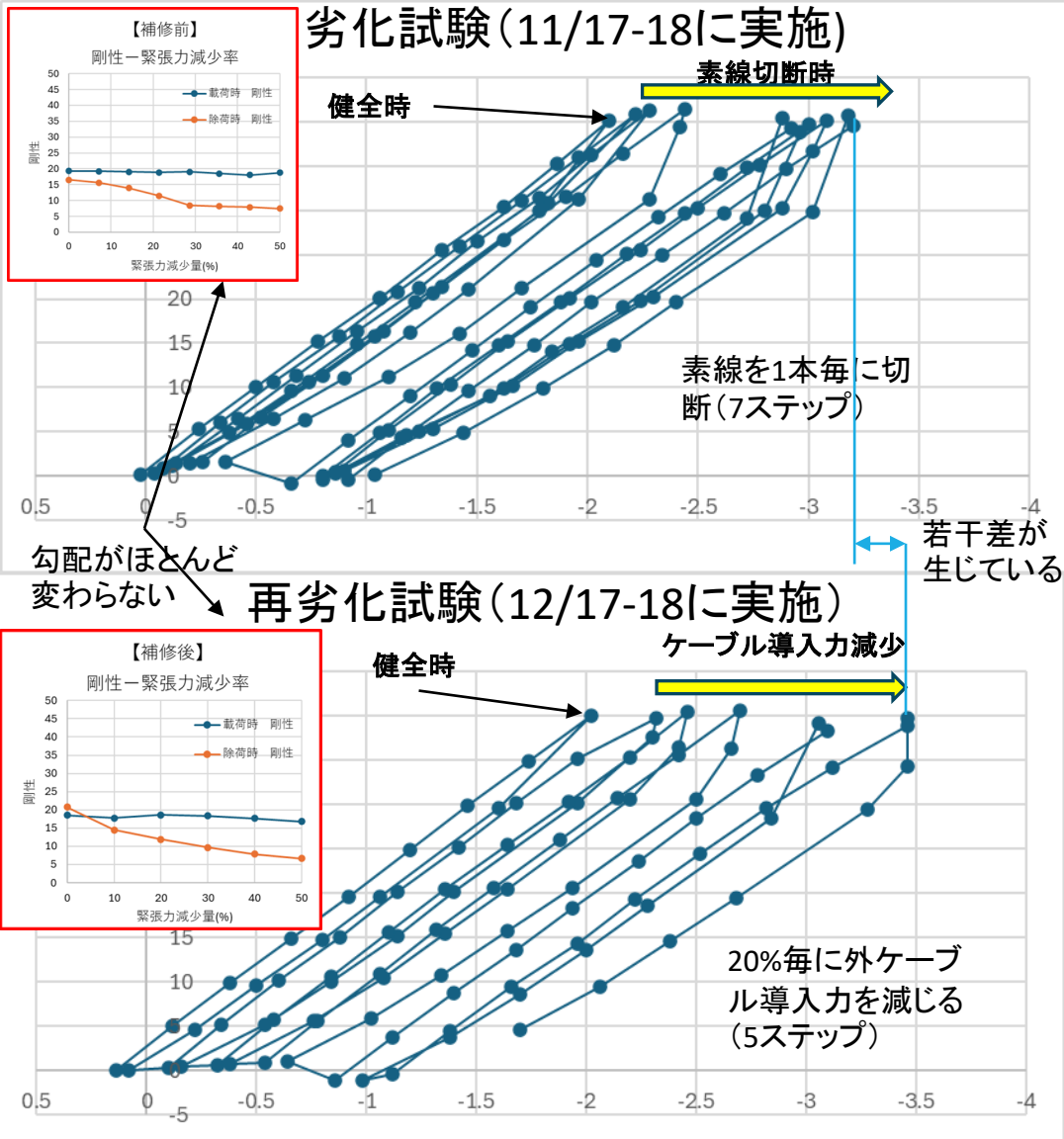


$\sigma_{cr}=3.37\text{N/mm}^2$

図-10 補修・補強後の応力状態図

再劣化のステップ
(当初案)

結果1:計測結果(劣化・再劣化 荷重-変位曲線)



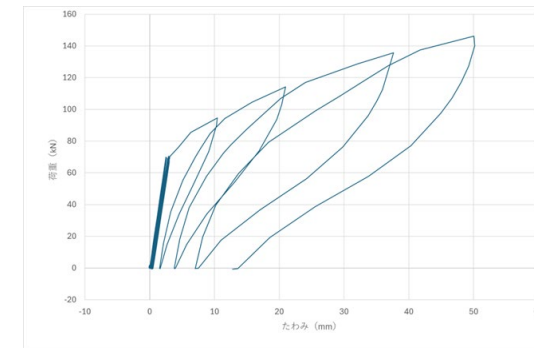
【考察】

実験における荷重-変位曲線を左図に示す。

上図(劣化試験)は製作した試験体のPC鋼材を素線1本毎に切断した際の荷重変位曲線、下図(再劣化試験)は**PC鋼材破断後、ひび割れ注入および外ケーブル補強を行い、その外ケーブルの張力を5ステップに分けて減じた場合**の荷重変位曲線を示す。

上図の劣化試験においては、素線3本目の切断時から荷重除荷時に荷重変位曲線が下に膨らむように見えている。これは、下図2025年度の試験では弾性域を超えたあたりから見た現象である。しかし、荷重載荷時の勾配に大きな変化を見ることはできない。

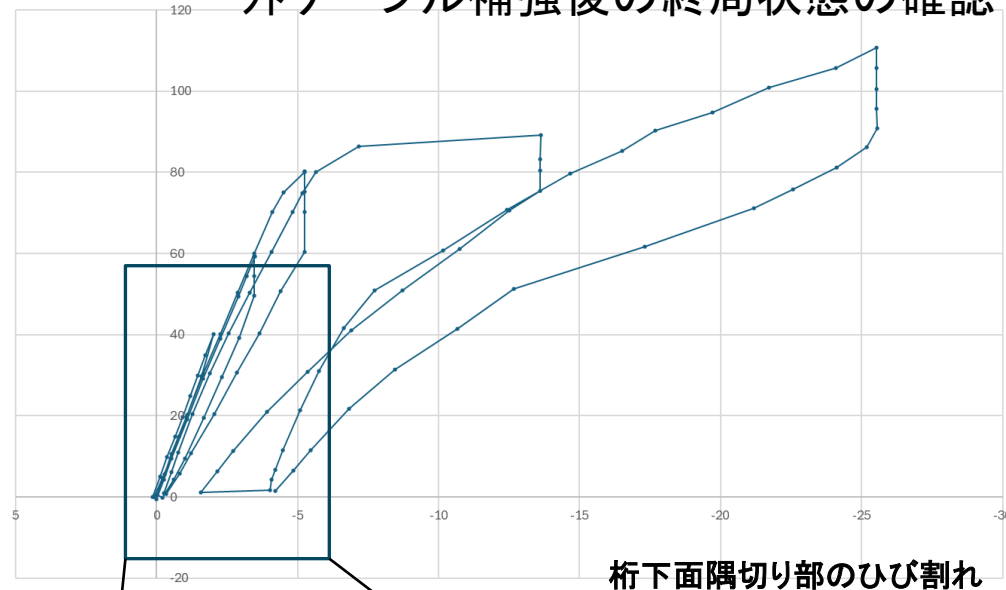
下図の再劣化試験において、外ケーブル軸力導入により劣化試験で生じた残留たわみ量は、計画通りゼロとなった。また、荷重載荷時の勾配も完成時とほぼ変わらない状況であり、外ケーブルの効果が確認できている。**外ケーブルの荷重を徐々に減少させていくと、荷重載荷時の変位量は劣化試験時と比べて若干大きくなっており、劣化の影響**であると思われる。



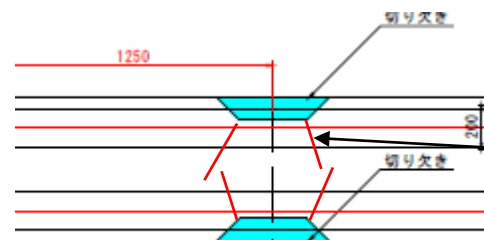
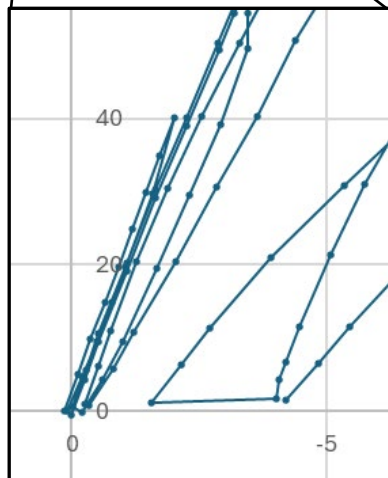
2025年度PC桁荷重変位曲線

結果1: 計測結果(続き, 外ケーブル補強の終局状態の確認 荷重-変位曲線)

外ケーブル補強後の終局状態の確認



拡大図



【考察】

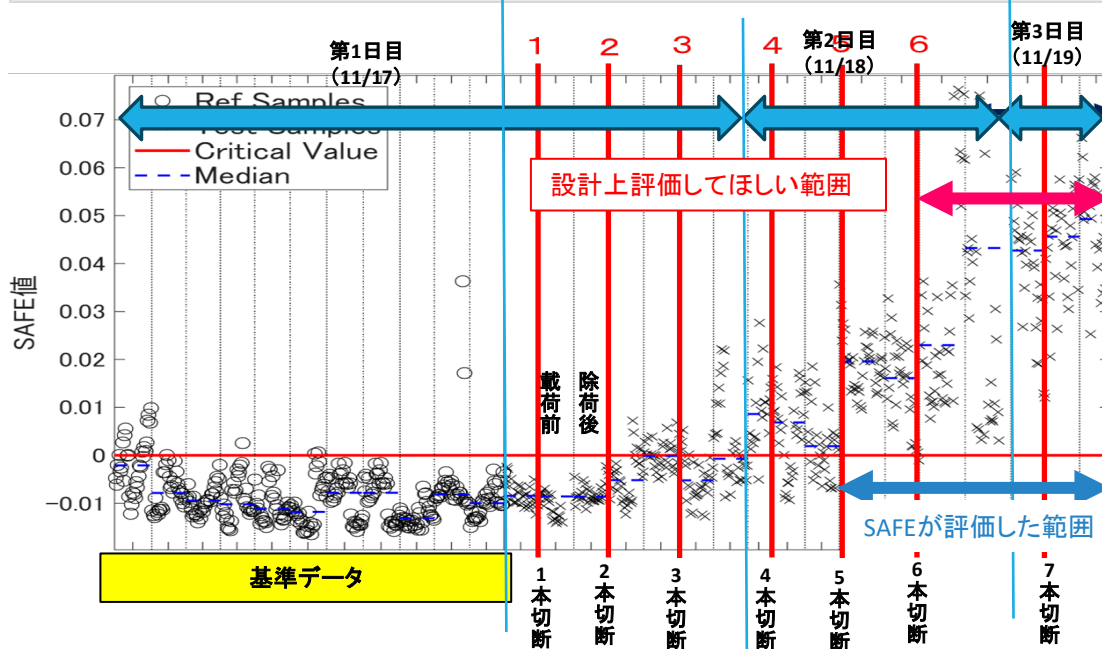
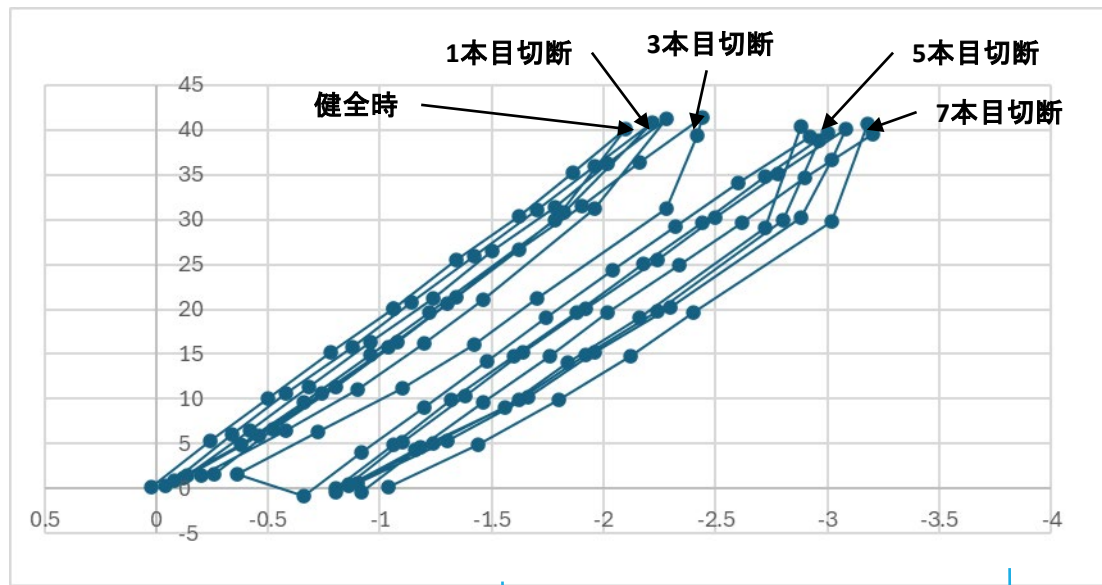
実験における最終的耐荷力確認のための荷重-変位曲線を左図に示す。

荷重は60、80、100、120kNの載荷を行った。120kNの載荷を行った際に桁のひび割れ幅が1.5mm程度を超えたために、外ケーブルの破断の危険があったため、実験を終了した。

外ケーブルの導入力は再劣化試験によりゼロにしたのちに再度外ケーブル張力を100%として載荷荷重を60kN以上に載荷していった。

1. 外ケーブルの張力を100%とすると残留ひずみはほぼ解消されることが分かった。外ケーブルが適切に作用している。
2. 荷重を60kNに載荷していく際の勾配は外ケーブルの最初の勾配より若干劣ることが分かった。
3. 100kNまで載荷中、90kNくらいの時に変位量が多くなり、荷重が増加しなくなった箇所があった。その時点で残留変形が大きくなった。
4. 次の段階で110kNへの載荷は行うことができたが、ひび割れ幅が大きく、外ケーブルの破断の危険があったために、実験を中止した。
5. 110kNへの荷重増加スタート点は4mmの残留変位があった。110kN載荷後の残留変位4.2mmとほぼ同等であり、この段階でもPCケーブルはまだ弾性的に作用していることが分かった。

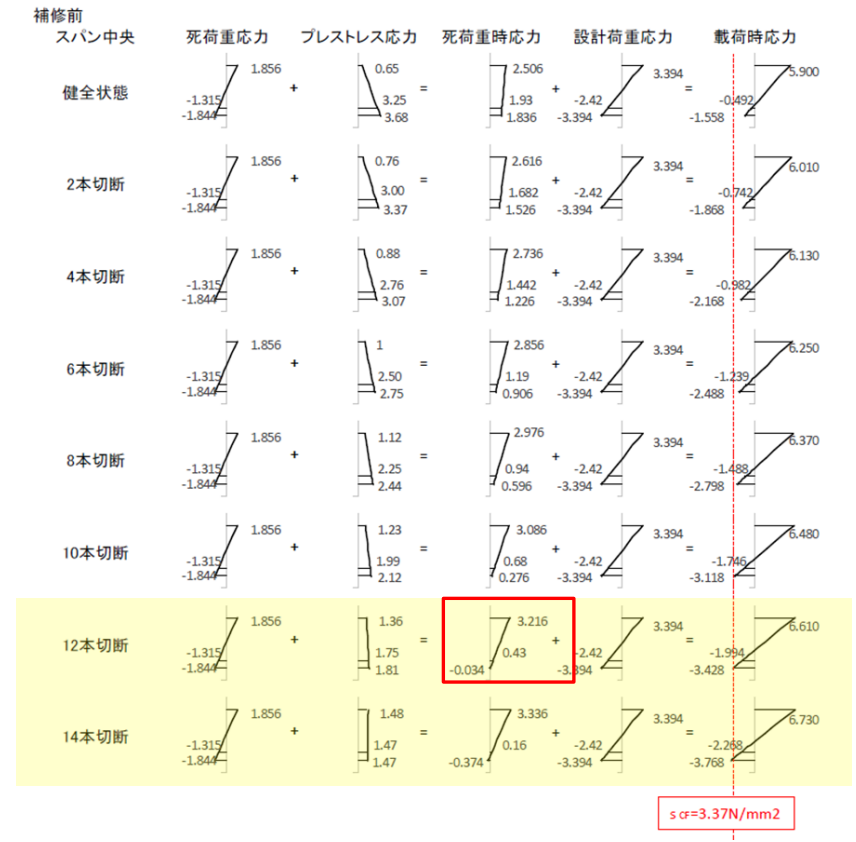
結果2:補修前 SAFE値の評価



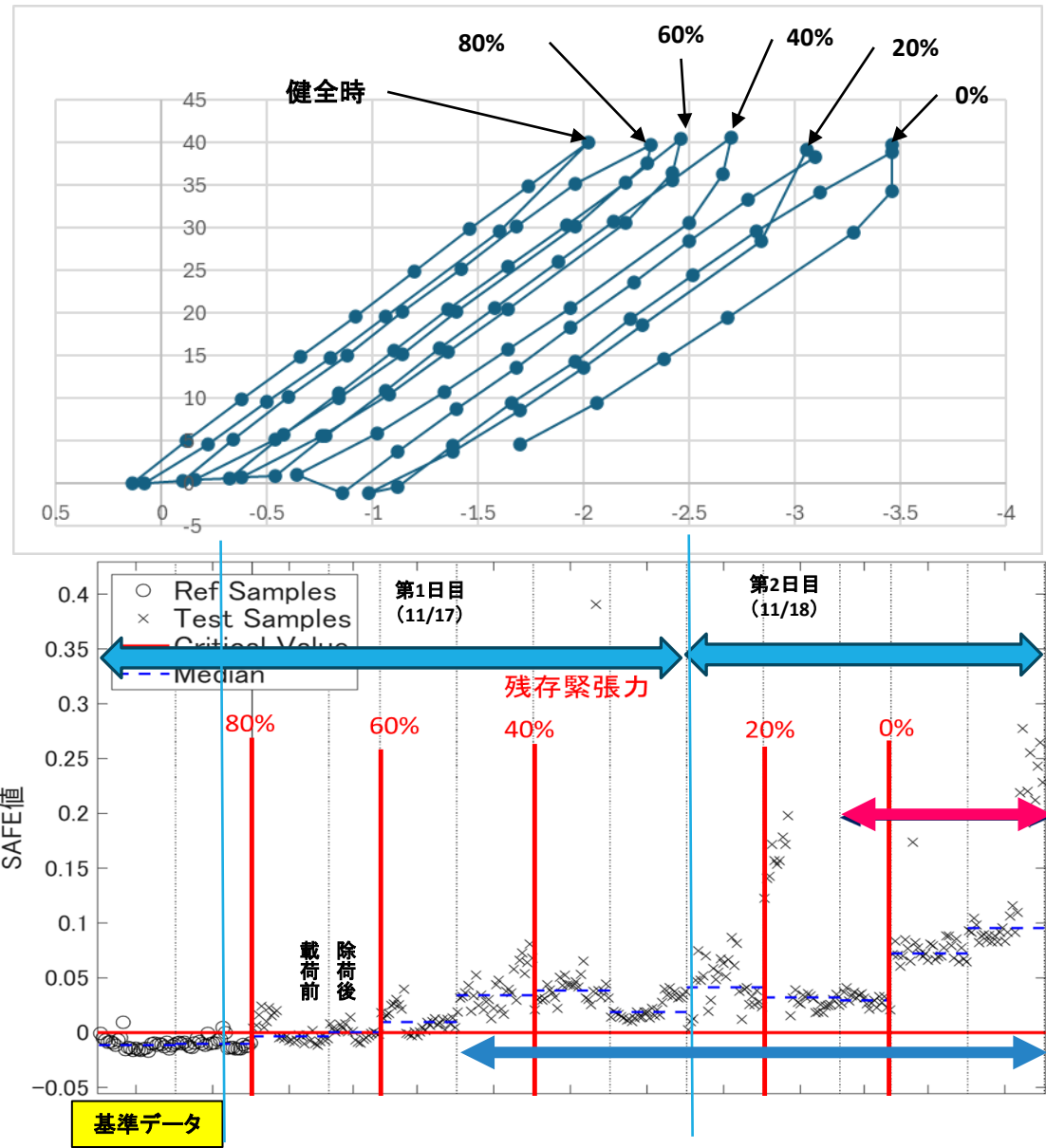
【考察】

実験におけるSAFE値の評価結果を左下図に示す。その実験における荷重—変位曲線を左上図に示す。

SAFE値評価は、5本切断(下図設計応力状態図では10本切断時)時点から明らかに異常と判断をされている。これは、死荷重状態において下側コンクリート面のプレストレスがなくなる状態(下図赤枠内)を示していると考えられる。



結果3:補修後の再劣化時 SAFE値の評価



【考察】

実験におけるSAFE値の評価結果を左下図に示す。その実験における荷重一変位曲線を左上図に示す。

SAFE値評価は、導入軸力が60%時点から明らかに異常と判断をされている。これは、死荷重状態において下側コンクリート面のプレストレスがなくなる状態(下図赤枠内)より早く異常を示していると考えられる。

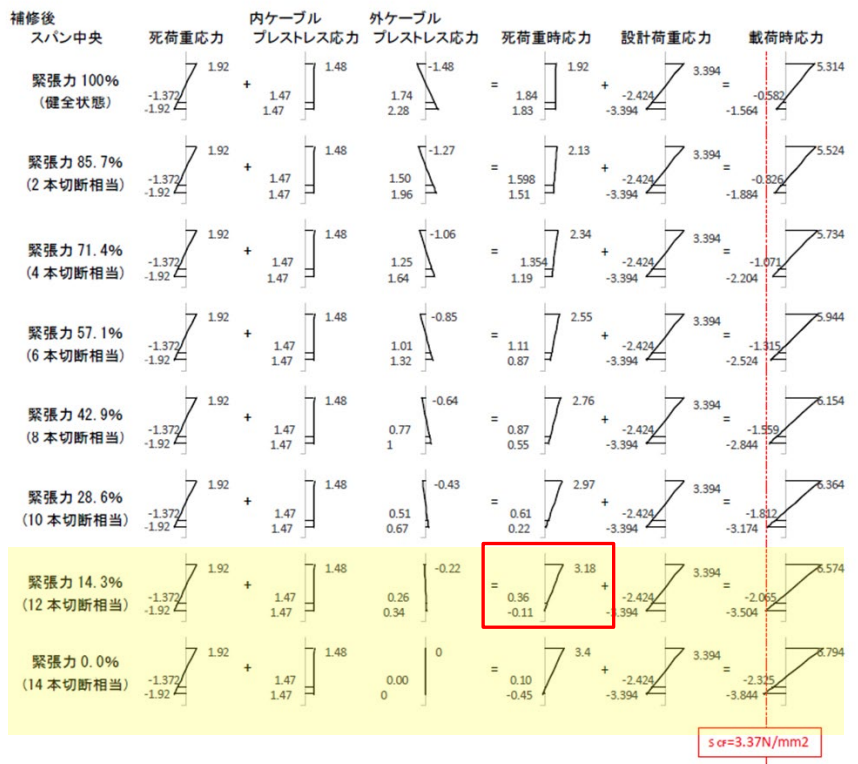


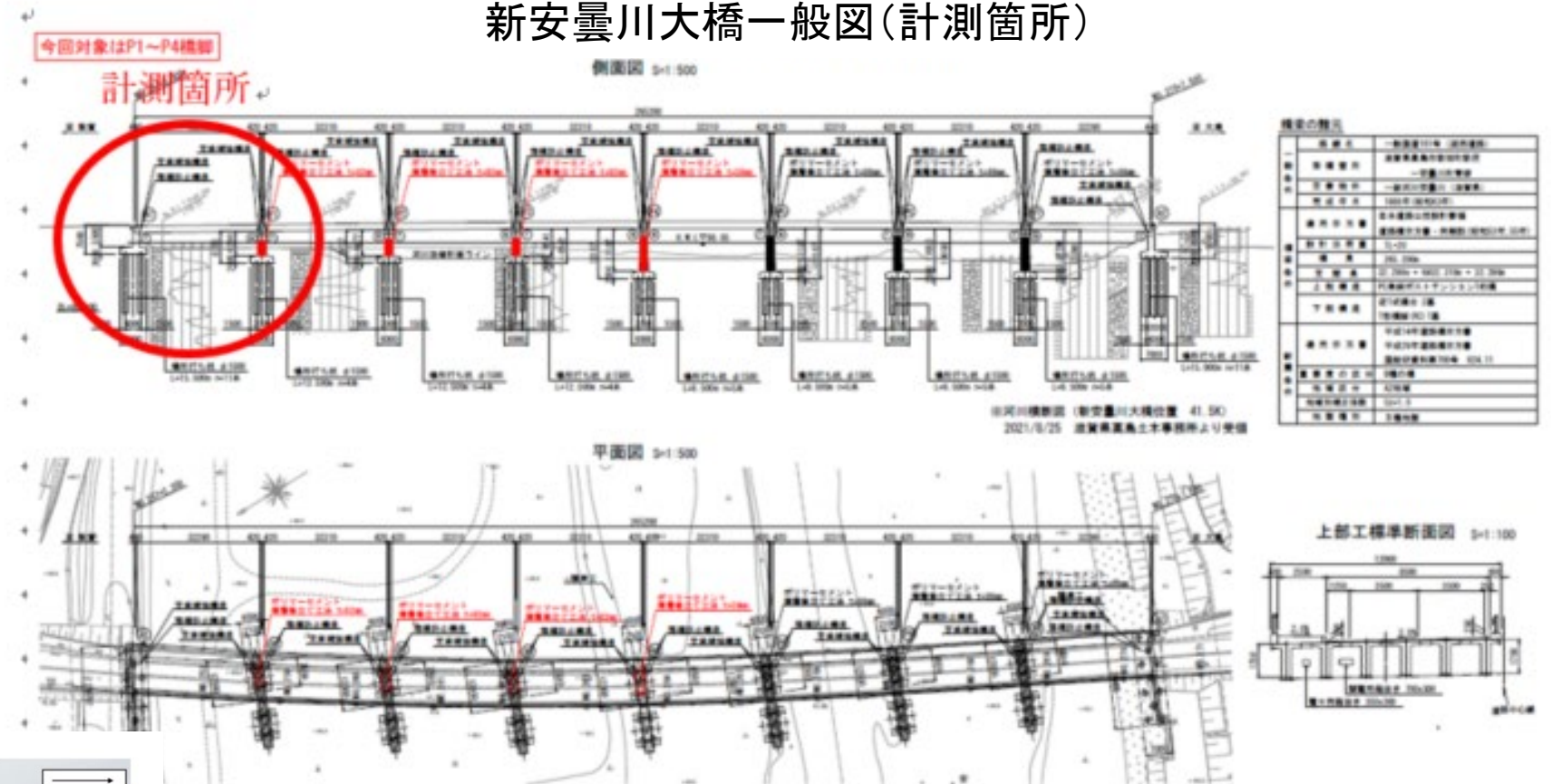
図-10 補修・補強後の応力状態図

目標①: 4. 実橋を用いた現場環境の変化に伴う物理量の変動状況の把握

橋梁位置



新安曇川大橋一般図(計測箇所)

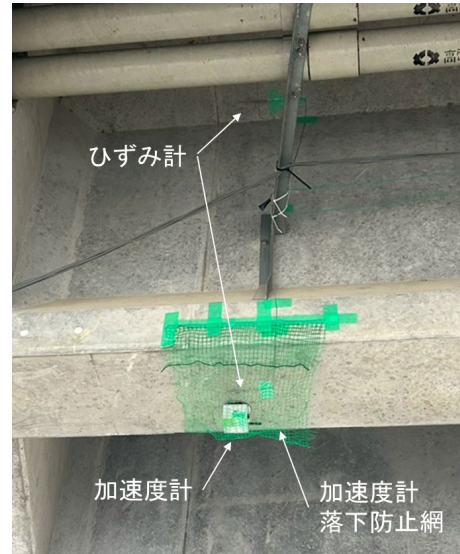
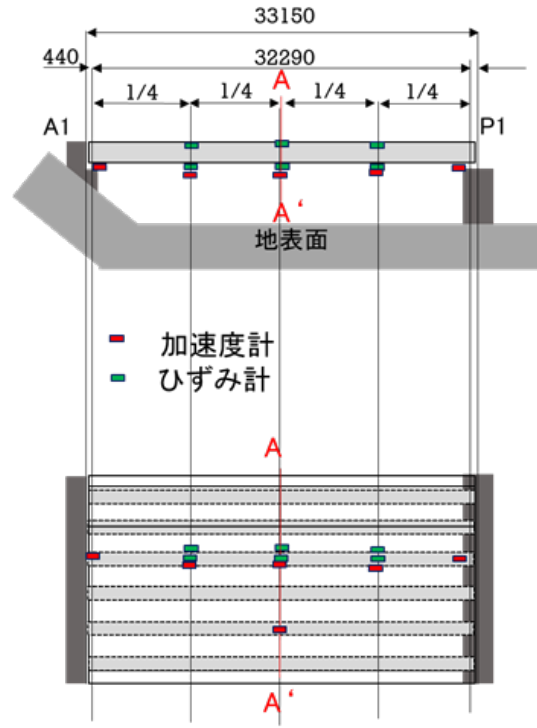


計測径間の写真



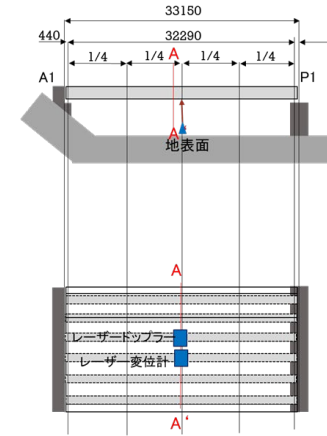
現場計測の概要

①加速度計・ひずみ計の計測



②たわみの計測

レーザー機器によるたわみ計測



桁端のたわみ角計測による計測



画像によるたわみ計測



計測期間

冬計測: 2024年3月4日～6日

夏計測: 2024年9月2日～3日

冬計測: 2025年1月29日～30日

夏計測: 2025年8月25日～26日 (夜間計測を含む)

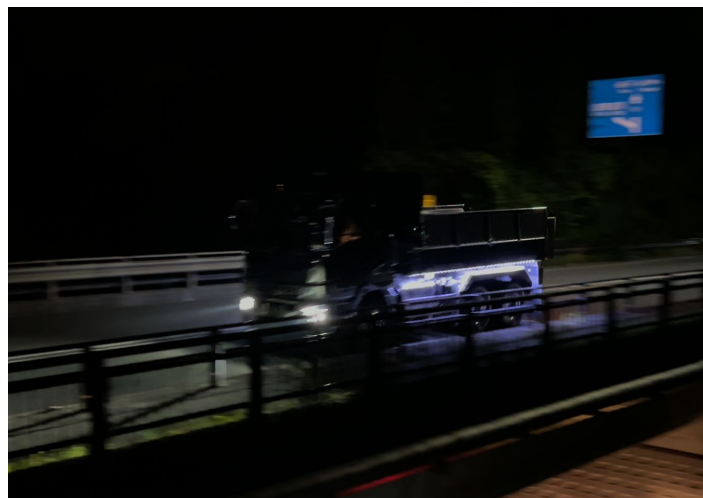
車両走行状況

昼間



荷重車(20トン相当)

夜間



走行中

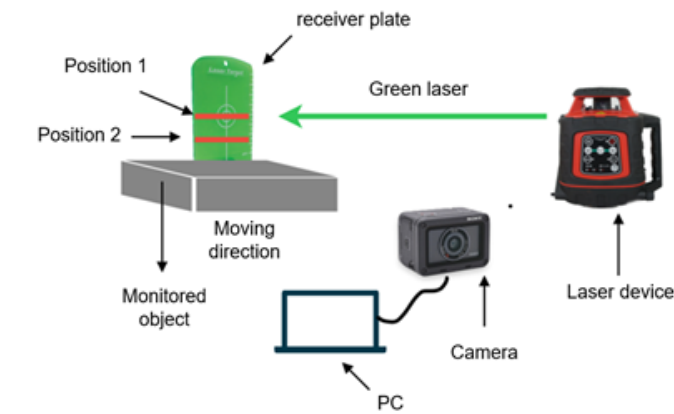


伴走者

高所作業車でのセンサ取付け作業状況

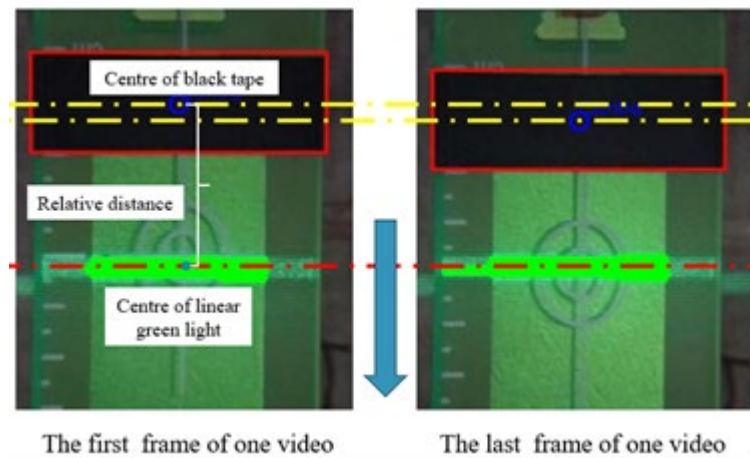


検討例1：供用下のPC橋上部工のLVBDTによるたわみ計測

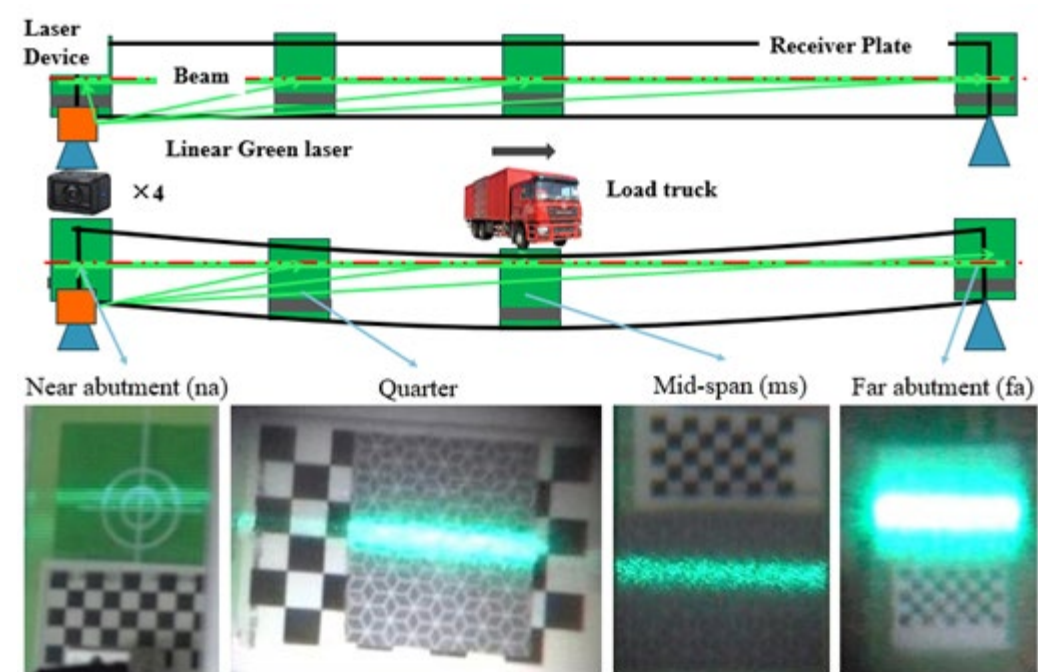


提案手法は、以下の要素から構成される。

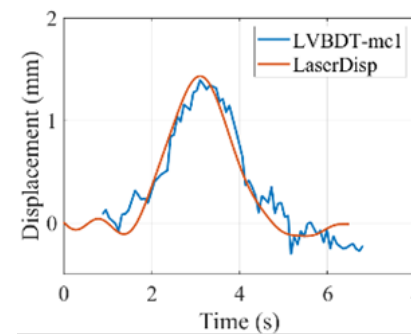
- 1.線状レーザー装置
- 2.受光板
- 3.ビデオカメラ



受光板には、水平基準としての線状レーザーを反射する機能に加え、レーザーと黒色テープ中心との距離を較正するための参照マーカーが付加されている。参照マーカーとして本実験では黒色テープを使用した



受光板1枚に対して1台のカメラとする。各カメラは単一の受光板を撮影し、載荷荷重により移動するそれぞれの受光板の動きを動画として記録する。記録した動画から、緑色の線状レーザーと受光板の参照マーカーの相対距離を解析することにより、橋梁のたわみを測定する

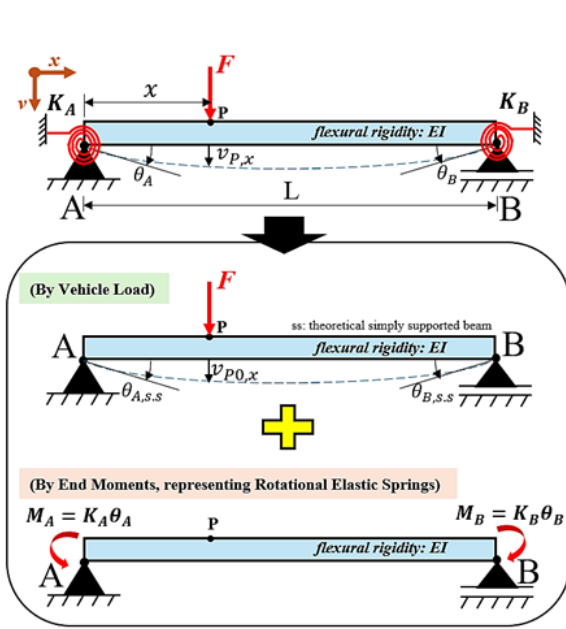


LVBDTおよびLDSのデータ計測例

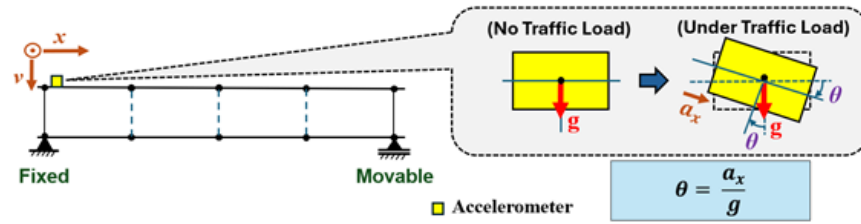
Laser and Video Based Displacement Transducers: LVBDT:
レーザおよびビデオを用いた計測手法

Laser Displacement Sensor, LDS: レーザー変位計

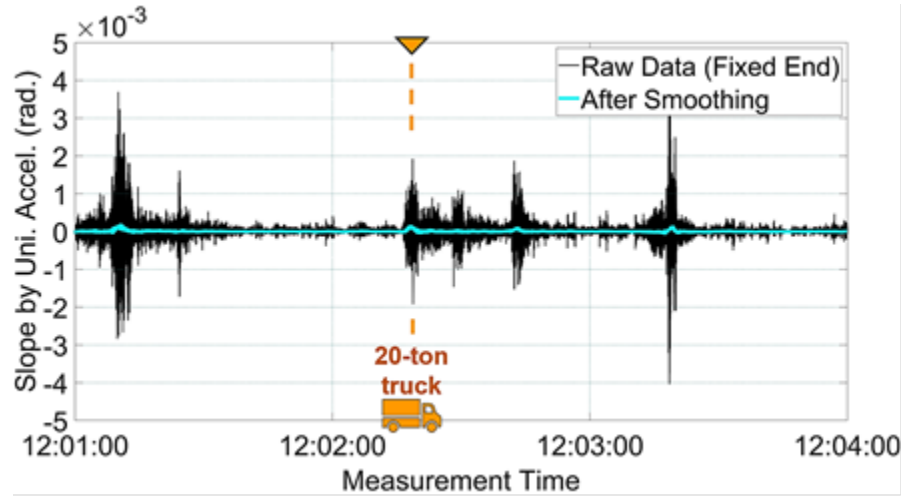
検討例2: 桁端たわみ角を利用したたわみ計測を用いた点検・診断支援



本法の基本的概念(両端に回転ばねを有する単純梁モデル)



加速度計によるたわみ角計測の概要



生波形と平滑化後の加速度の比較

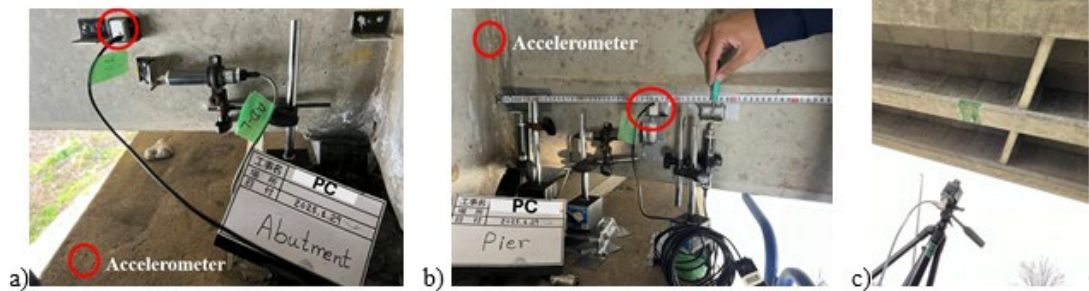


図-4.5 計測機器設置状況 a) A1側加速度計 b) P1側加速度計 c) レーザー距離計

表-4.1 本手法による2024年9月 計測値とその誤差

	レーザー距離計 による計測 [mm]	本手法	
		推定されたたわみ [mm]	Error [%]
	1.2447	1.2515	0.54
	1.3907	1.5219	9.44
	1.5107	1.4018	-7.21
	1.4514	1.3108	-9.68
	1.3301	1.1907	-10.48
平均値	1.3855	1.3353	-3.48
標準偏差	0.1036	0.1302	8.43

表-4.2 本手法による2025年1月 計測値とその誤差

	レーザー距離計 による計測 [mm]	本手法	
		推定されたたわみ [mm]	Error [%]
	1.3761	1.3515	-1.79
	1.5221	1.3320	-12.49
	1.4109	1.3076	-7.32
	1.4851	1.2790	-13.88
	1.3464	1.3126	-2.51
	1.3363	1.3301	-0.46
	1.2334	1.3655	10.71
	1.4192	1.2885	-9.21
平均値	1.3912	1.3209	-4.62
標準偏差	0.0905	0.0297	7.94

目標②:コンクリート内部の損傷を数値シミュレーションにより評価する方法の検討

検討1:COM3による解析(2023年度)

活動目標

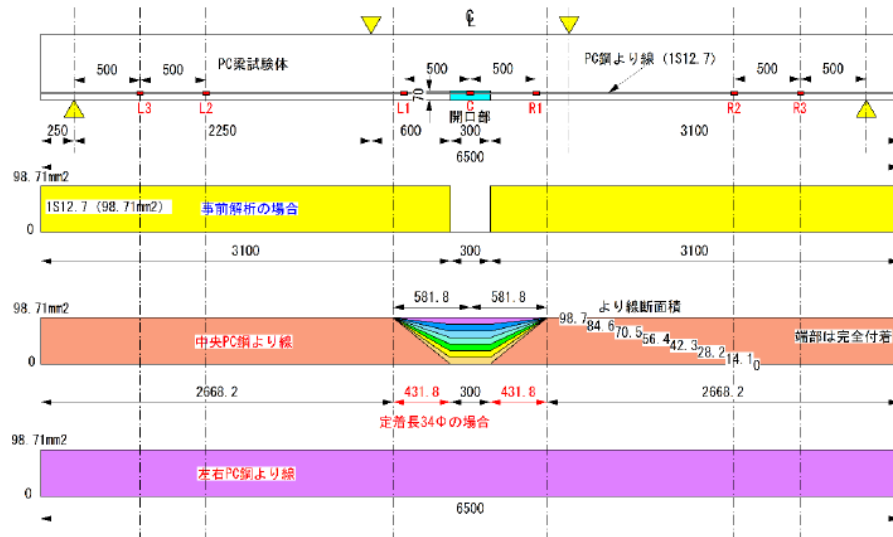
各種有限要素解析ソフトを用いた,

- 1)コンクリート構造物の構造性能および振動特性の再現性を調査
- 2)SAFE技術の異常判定と各物理量との対応関係を評価。

具体的活動

- 汎用有限要素解析ツール(本研究はDIANA)とCOM3(コンクリート構造物の非線形構造応答をシミュレーションするツール)を比較し、
- 降伏応力点等の実験値の再現性の違い
- 再現性向上を実現する、設定項目の整理
- 再現性への感度が大きい項目の把握

(COM3)入力条件



プレテンション部材の付着定着モデル案 (定着長 34φの場合)

(COM3)荷重変位曲線の再現性

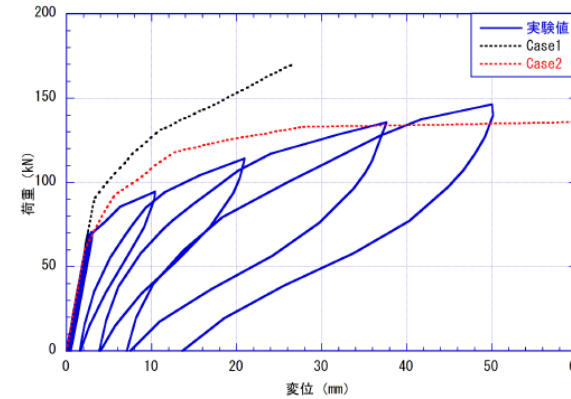


図1 荷重変位比較 (事前解析: 全体)

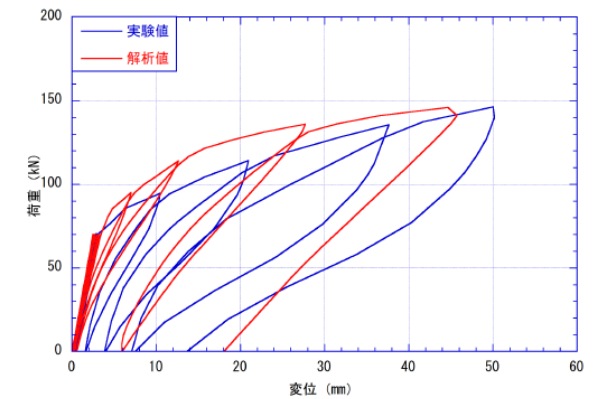


図7 荷重変位比較 (再現解析2: 全体)

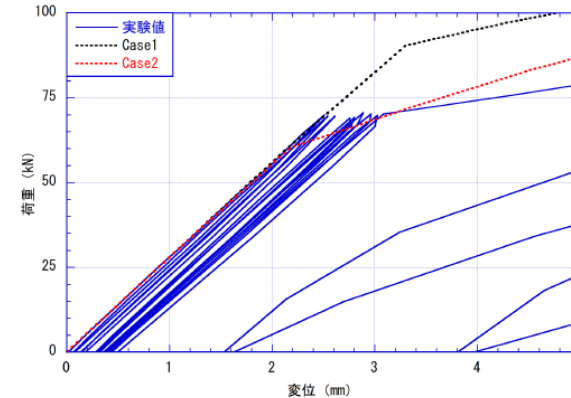


図2 荷重変位比較 (事前解析: 拡大)

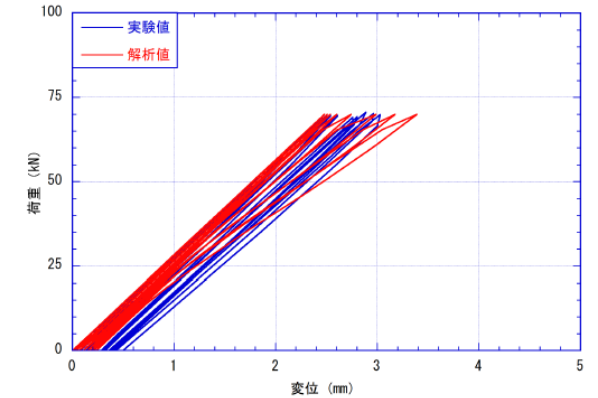
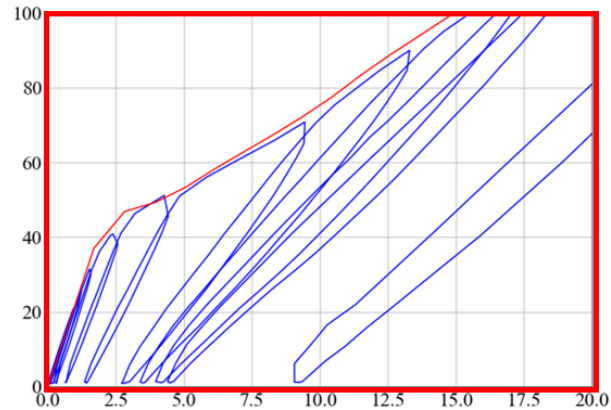
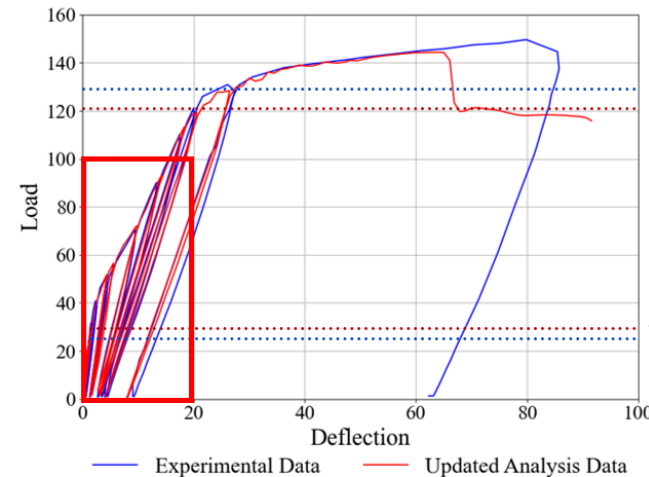
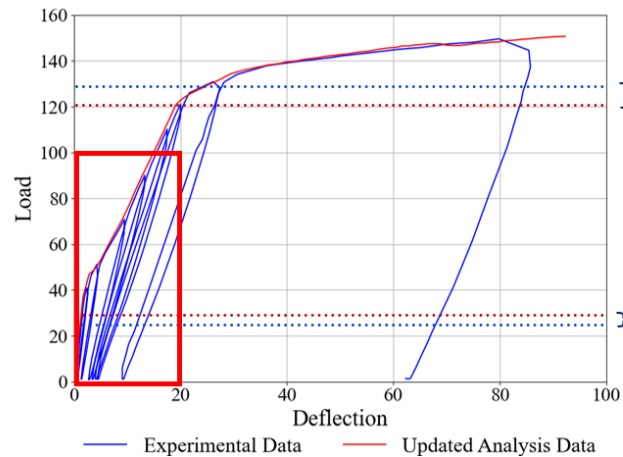


図8 荷重変位比較 (再現解析2: 70kN 繰り返し)

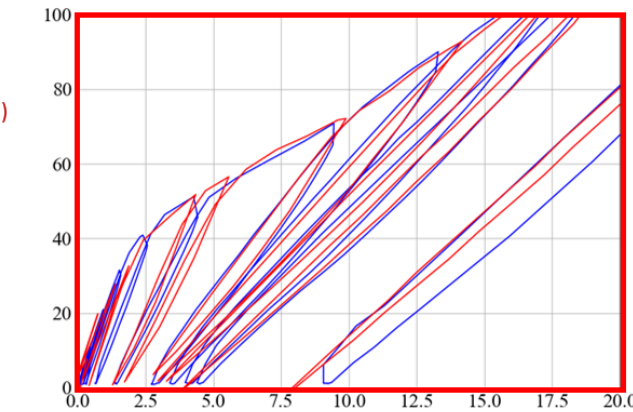
COM3を用いて、実験値の再現解析を進めた。事前解析では3本ともに有効なケースと箱抜き部分のPCケーブルを考慮しないケースで行った。今回は、素線を1本ずつ切断したケースについて入力条件を設定して解析を進めた。結果としては実験値と良好な相関性を得ることができた。

検討2: 汎用有限要素解析ソフトによる状態評価(2024年度)

(汎用) 荷重変位曲線の再現性

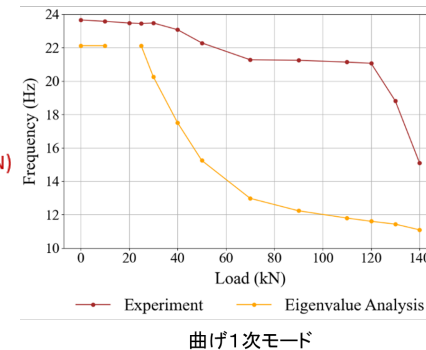


- ・鉄筋降伏以降の非線形挙動を含め、高精度な結果が得られた。
- ・モデルアップデートに1~2カ月ほどの膨大な時間がかかり、効率の面で課題が残る結果となった。

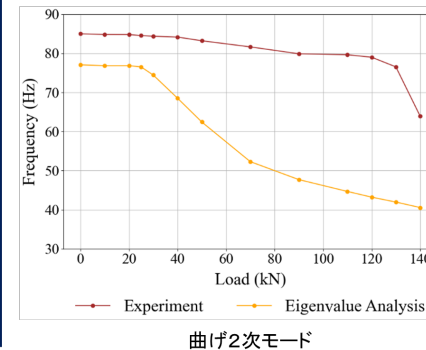


- ・線形・非線形挙動および残留変位等を含め、全体的に高精度な結果が得られた。
- ・終局付近の挙動の乖離は、解析未収束時の残差持ち越し量の積み重ねにより解析精度が低下。

固有値解析結果



曲げ1次モード



曲げ2次モード

・固有振動数としては計測結果と解析を一致することはできなかった。これは、汎用解析のソフト上においてひび割れを閉じた場合の評価がなされていないと考えられる。

2024年度の成果

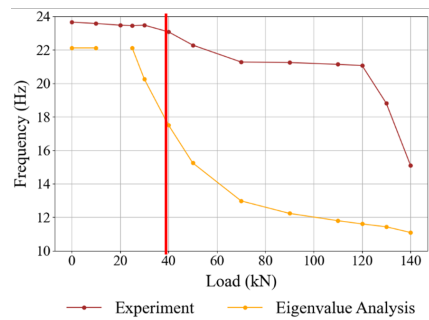
- ・変位制御を用いたFE解析における非線形領域までの解析精度の高さを確認した。ただし、非線形領域を含めたFEモデルアップデートには膨大な時間を要する。
- ・固有振動数推移に大きな乖離が確認されたが、構造物を評価したいケースによって適切なひび割れモデルの選択をする必要がある。

→サロゲートモデルによる短時間かつ高精度なFE解析の荷重-変位曲線再現結果から、膨大な時間を要する3次元FE解析の代替案としてのFNOベースのサロゲートモデル適用性などの可能性を検討したほうが良いと評価できた。

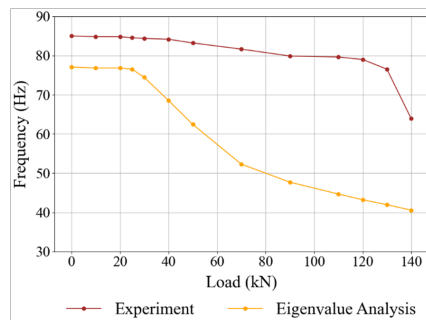
検討3: 汎用有限要素解析ソフトによる状態評価(2025年度)

令和6年度の課題

固有値解析結果



曲げ1次モード



曲げ2次モード

・固有振動数としては計測結果と解析を一致することはできなかった。これは、汎用解析のソフト上においてひび割れを閉じた場合の評価がなされていないと考えられる。

乖離の原因: ひび割れモデルの影響

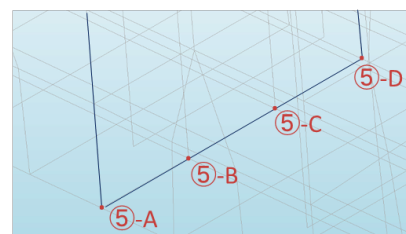
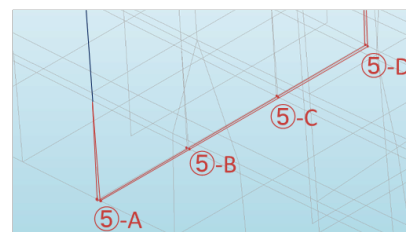
→ 適切なひび割れモデル選択の必要性

本研究の目的

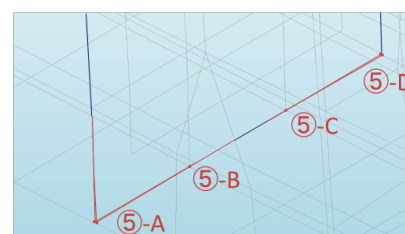
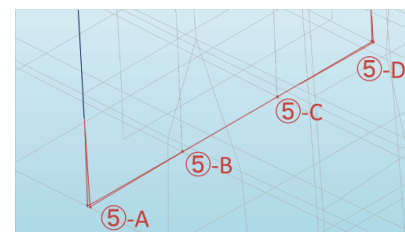
コンクリートのひび割れモデルの違いが
RC梁モデルの固有値解析に
及ぼす影響の考察

離散ひび割れモデルの特性を活かし、ひび割れ幅の算出と挙動の可視化

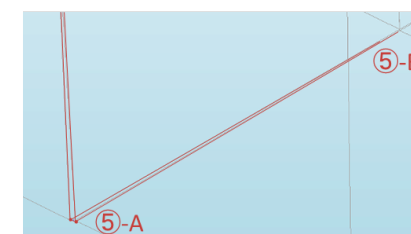
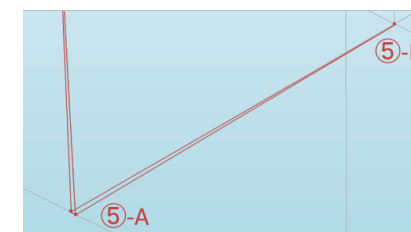
40kN



90kN



130kN



載荷ピーク時

除荷時

—: 開口
—: 閉口

除荷時: 閉口

除荷時: 載荷時とほぼ変化なし

左上の荷重と固有振動数の評価からは40kNでひび割れが発生すると荷重変位曲線が非線形挙動を示すのと同時に、固有振動数も急激に低下し、実験値から乖離する。固有振動数は主に質量と剛性で定義される値であり、質量が一定である以上、この変化は解析モデル内の剛性が急に低下したことを意味していると考えられる。しかし、コンター図ではひび割れの閉口挙動が確認できており、形は合っているのに剛性が変化しすぎている。

そこで、剛性が下がる原因を①ひび割れという幾何学的な変化と、②コンクリート自体の材料的な損傷の2つに分けて検討した。

このどちらが乖離の主因かを特定するため、コンクリートを線形弾性とした仮想モデルを導入する。

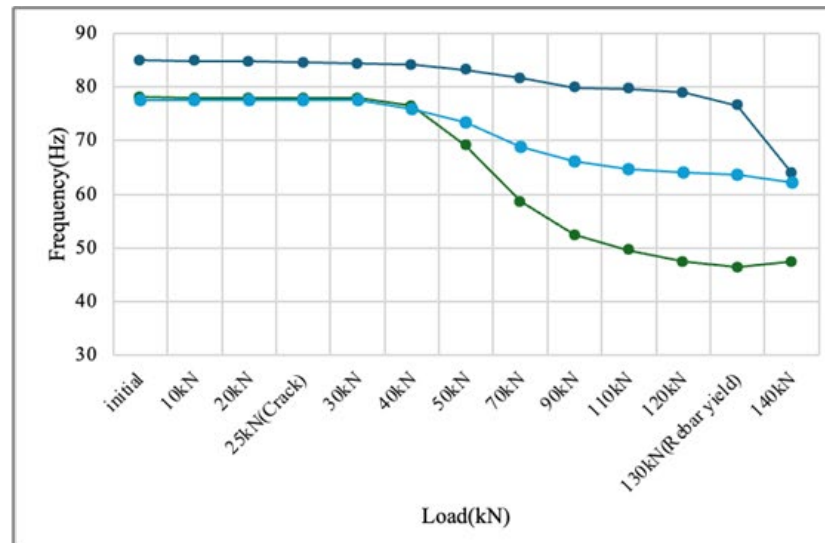
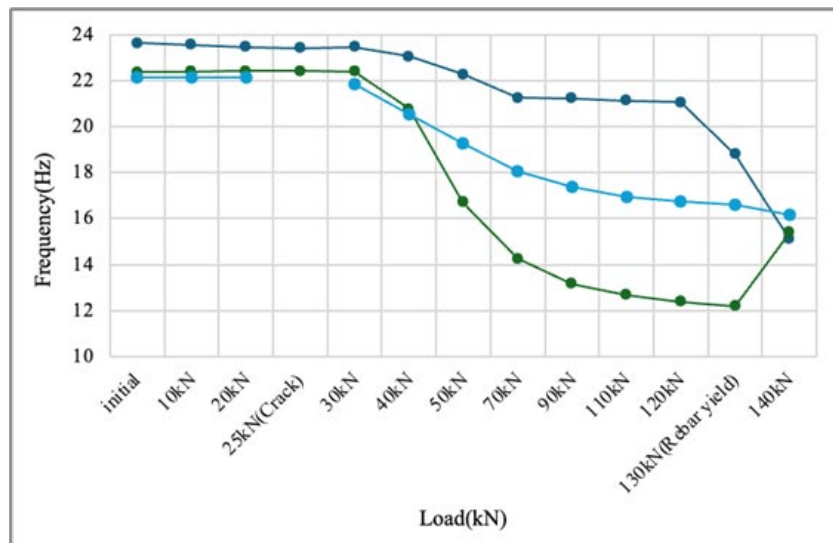
このモデルでは、コンクリート自体の材料損傷による剛性低下をシャットアウトし、純粋にひび割れが開いたことによる影響のみを抽出して検証しました。

検討3: 汎用有限要素解析ソフトによる状態評価(続き)

固有値低下の原因 = I (ひび割れ幅) + II (コンクリートの損傷)

	コンクリート	ひび割れ設定
モデルA	前川-福浦モデル	離散ひび割れモデル
モデルB	線形弾性	離散ひび割れモデル

○ ひび割れ発生という幾何学的な変化の影響
 × コンクリート自体の材料損傷の影響



曲げ1次モード —実験 —モデルA —モデルB 曲げ2次モード

コンクリート損傷を排除したモデルB
 が実験値と近い推移傾向を示した

コンクリートの損傷を排除したモデルでは、これまでのモデルと違い、実験値と近い推移傾向を示した。

今後の研究課題(応力状態の把握):

- ・静的耐力を評価する「大きな損傷」と動的剛性に影響する「微小損傷」を分離して評価できる構成則の検討
- ・離散ひび割れモデルの「局所化」の利点と、分散ひび割れモデル(前川-福浦モデル等)の「履歴再現性」を両立させる解析手法の確立

目標③: デジタルデータを用いたモニタリングを活用する場合の課題と対策方法の提案

活動成果1: モニタリングを活用にあたっての課題把握および意見交換

2023年度～2024年度活動内容

- 国土交通省などによるモニタリングなどの新技術活用に関する適用事例調査に実施
- 過去の地方自治体関係者へのモニタリングに関する意識調査結果の把握
- 新都市研究会でのマニュアルを設定する際の考え方の整理

以上の検討を経て

- 道路施設管理者(近畿地方整備局、西日本高速道路、阪神高速道路)、維持管理民間企業、大学関係者による意見交換会の実施

意見交換会を踏まえたマニュアルの必要性の検討結果

- モニタリングを行うにあたり、その位置づけを点検のための補完として位置付けることとして、計測データの信頼性の向上を図るためのモニタリングの導入の参考となるシナリオが必要である。
- モニタリングによる優位性や経済性を明確にしたい。
- モニタリングを導入するための技術の要求内容や技術レベルやを確認したい。
- モニタリング活用のため事前の検討事項やセンサーを取り扱いための留意点等を確認したい。
- モニタリングにより収集されたデジタルデータの将来性などを示したい。

報告書の目次構成

PC橋のモニタリングで取得したデジタルデータの活用マニュアル(案) (P1-P68)

1. 目的

- (1) 技術の背景
- (2) マニュアルの目的
- (3) 用語の定義

2. PC橋の点検の課題とモニタリングの役割と適用事例

- (1) 従来の定期点検の課題
- (2) モニタリングの定義と役割
- (3) モニタリングの活用事例

3. 点検などの技術における「リクワイヤメント」や「技術レベル」

- (1) 総論
- (2) 提案技術の性能整理
- (3) 提案技術の技術レベル
- (4) 本研究で得られた情報で実施できる高度化

4. モニタリングによるデジタルデータ評価の優位性

- (1) デジタルデータによる評価方法の優位性と課題
- (2) モニタリングの優位性を考慮した運用案
- (3) モニタリングによるデジタルデータ評価の経済的優位性に関する考察
- (4) モニタリングの有効性評価検討(実施例, 検討例)

5. デジタルデータを活用したモニタリング導入シナリオ

- (1) 総論
- (2) モニタリング導入に関する留意点
- (3) デジタルデータの収集・評価の計画
- (4) センサなどによるデジタルデータの収集
- (5) モニタリング導入のシナリオ

6. モニタリングにより収集したデジタルデータの活用案

- (1) 総論
- (2) 国の取組み
- (3) 道路会社および民間の取組み

付録資料(付P1-P170)

・提案技術の紹介: 実験結果のまとめおよび技術紹介

・文献資料

- ①RC梁の損傷過程と振動ベース(SAFE技術)の異常判断
- ②PC梁の損傷過程および損傷PC梁の補修後の再損傷過程と振動ベース(SAFE技術)の異常判断
- ③汎用非線形有限要素解析コードを用いた損傷状態の把握
- ④PC橋・実橋を用いた振動, 支間たわみや支点回転角の計測に関する実証データ

PC橋のモニタリングで取得したデジタルデータの活用マニュアル(案)

1. マニュアルの目的

(1) 技術の背景(モニタリング技術の提示と位置付け、モニタリングの必要性) P1

日本の道路・橋梁・トンネル、河川施設、エネルギー・通信などの社会インフラは、建設年代が戦後の高度経済成長期に集中しているために、現在その多くにおいて経年劣化が加速的に進行する段階に至っている。

2013年の道路法改正により5年に1度の全数近接目視点検が義務付けられて一定の健全性の把握ができています。

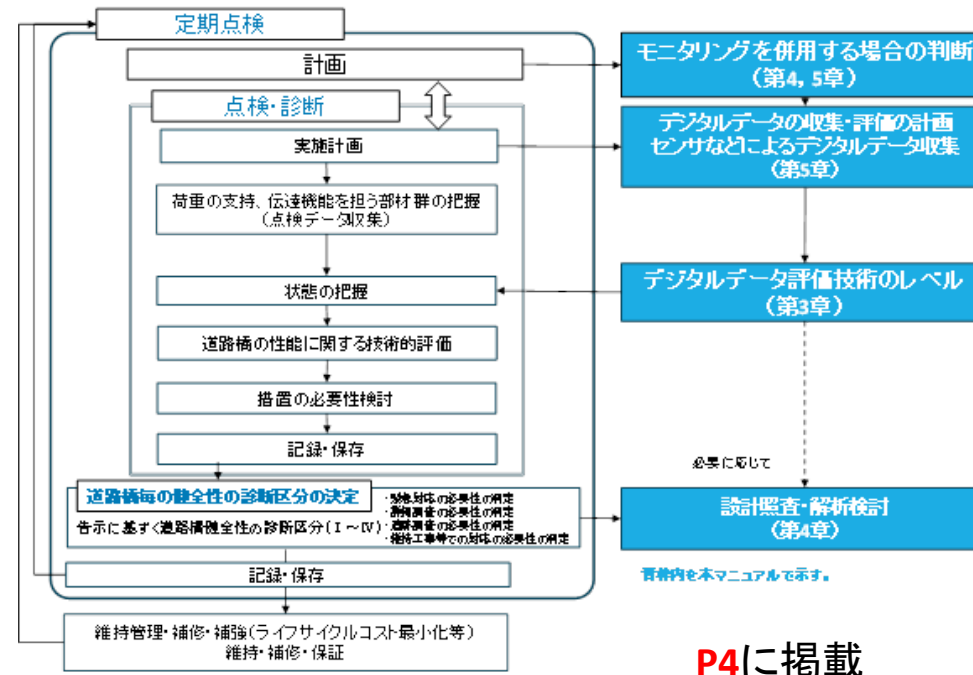
一方で、近接目視点検には構造工学的にみても本質的な限界が存在する。まず、近接目視は観測自体が「限定的・定性的」であり、腐食における進展速度のばらつきも大きい。劣化速度の推定に大きな不確実性が残る。

現在の点検体系は構造性能の時間変化を捉えられない「静的・離散型の管理」であり、これを「動的・連続的な性能監視」へ転換することが、これからの予防保全への移行に関して必要な技術であると考えられる。

(2) マニュアルの目的 P4

本マニュアルは、道路管理者が定期点検などを行う際にモニタリングによる計測データを用いてPC橋の維持管理を行う場合にその手順や考え方を示すものである。

PC橋梁の維持管理に当たって、目視点検の結果で構造体内部の損傷が判明できない場合、将来的に損傷の進行が危ぶまれる場合などにおいて定期点検時にモニタリングを併用し、その計測データの評価により状態把握を行う場合などのシナリオを設定し、モニタリング適用の考え方をまとめている。



第1章 背景、マニュアルの目的、用語の定義
第2章 従来点検方法の課題、モニタリングの実施例
第3章 計測データ評価に求められる技術、その技術レベル
第4章 モニタリングの優位性、留意点および運用方法
第5章 モニタリング条件の整理、実施するストーリー
第6章 モニタリング計測データの活用方法

P4に掲載

2. PC橋の点検の課題とモニタリングの役割と適用事例

(1) 従来の定期点検の課題 P8

2023年度末までに国土交通省は、3巡目の点検フェーズに入るにあたりこれまでの点検結果を振り返り、「点検品質のばらつき」、「記録品質とデータとしての有用性」および「地方自治体の負担感」の3点を課題を設定し対応を検討している。

PC橋のグラウト充填不足の現状(右図)とその要因の解説を行った。

PC橋梁における定期点検では、「劣化の不可視性」、「点検・診断の精度のばらつき」、「点検・診断のリソースの枯渇」が課題として考えられる。また、これらの課題解決のために、モニタリングの要求性能として「判定の客観性と再現性」、「不可視部・内部状態の評価」、「時間的連続性と経時変化の把握」、「現場適用性と持続可能性」が求められる。

(2) モニタリングの定義と役割 P10

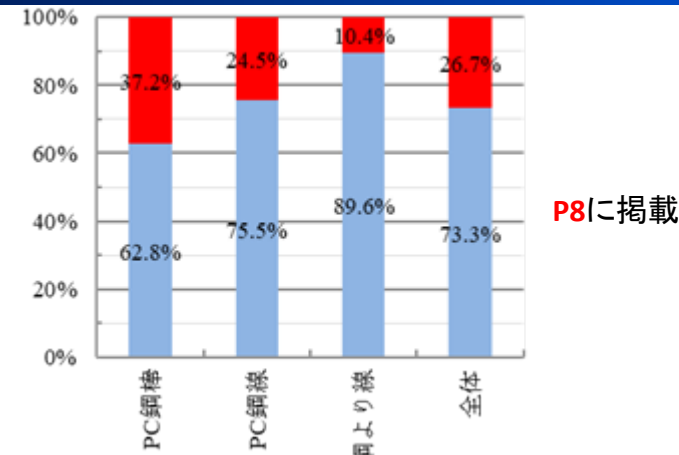
本マニュアルにおける「モニタリング」は、「構造物の物理状態(位置、応答、損傷など)を、あらかじめ規定された精度と頻度に基づき、時間的に連続または離散的に計測することで、その『状態変化』を定量的かつ客観的に把握する行為」と定義する。

構造物の維持管理は、原則として点検、診断、措置(対策)、記録のサイクルで定期的実施されている。モニタリングはこれらの維持管理サイクルの高度化・効率化につながることで期待され、その目的・役割は4つに大別される。

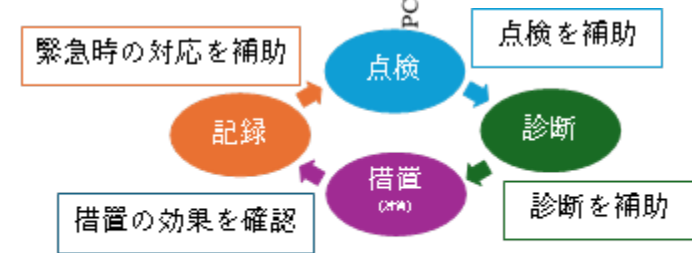
(3) モニタリングの活用シーンおよび活用事例 P11

モニタリングの活用シーンとして、①変状確認時に状態把握を目的として実施するモニタリング、②変状の早期発見を目的として実施するモニタリング、③補修・補強の効果を確認することを目的として実施するモニタリングが想定される。また、これらのモニタリングの活用シーンにおいて、データを取得するタイミングは、以下のa)～d)に分類されることが想定される。

- a) 短期的: 任意のタイミングで短期的にデータを取得する。
- b) 断続的: 一定の期間データを取得する。
- c) 日常的: 日常的にデータを取得する。
- d) 事後的: 災害発生などをを受けて事後的にデータを取得する。

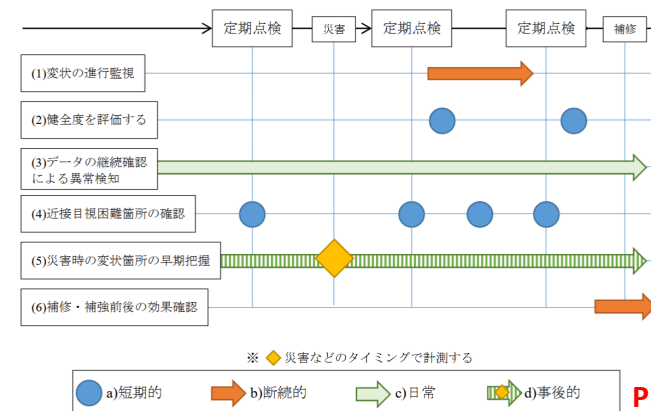


P8に掲載



P10に掲載

図-2.3 維持管理におけるモニタリングの役割



P11に掲載

3. 点検等の技術における「リクワイヤメント」および「技術レベル」

(1) 新技術活用に関する国の動向 P13

近接目視によらない方法の採用については「道路橋定期点検要領(技術的助言の解説・運用標準)4. 状態の把握」で、
”他の手段による状態に関する情報の把握によっても、最終的に『健全性の診断区分』が同等の信頼性で決定できることが明らかな場合には、必ずしも全ての部材について知識・技能を有する者が近接目視による状態把握を行う必要はなく、法令もこれを妨げるものではない”。

この考え方にに基づき、新技術の活用を促進するための「点検支援技術性能カタログR7.4」も公開されている。

今回提案する計測技術およびモニタリング技術を橋梁定期点検に位置付けていくためには、当該技術がどのように活用可能であるかを明確化する必要がある。そのため、本章では「点検支援技術性能カタログ」3-3)と同一の視点から技術を整理し、「リクワイヤメント」、「技術レベル」を明示する。

(2) 点検支援技術性能カタログの概要 P13

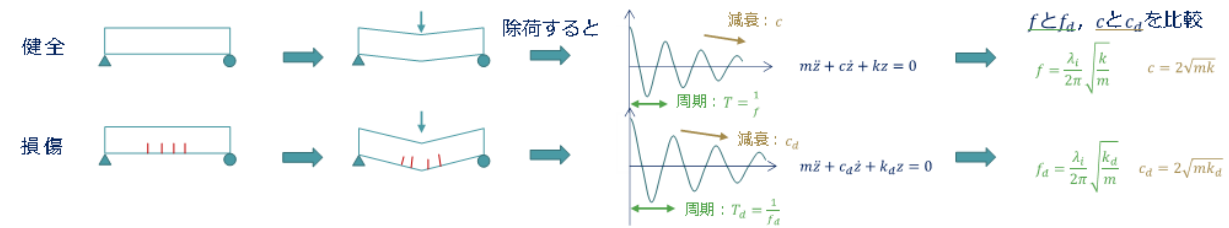
(3) 提案技術の技術レベル P16

- ・SAFE技術の概要
- ・レーザーおよび画像解析によるたわみ計測
- ・桁端のたわみ角の計測によるたわみ計測
- ・画像計測によるひずみ分布の評価

例:SAFE技術の概要

SAFEは構造物の動的応答を用いて、**異常を早く検知する技術**です。

- ◎ 構造物の状態把握のために取得される**加速度**や**ひずみ**などの動的応答から構造物の異常を検知します
- ◎ **基準状態のデータを事前取得し**、今新たに取得したデータが**基準状態から変化したかどうか**を知らせます。



振動($m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = f$)から固有振動数や減衰を求め、その変化から損傷程度を把握

振動を状態方程式に変換し、システム行列の変化を異常と判定する

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \hat{x} \end{Bmatrix}$$

SAFE :
行列の変化で
異常判定を行う

P20に掲載

4. モニタリングによるデジタルデータ評価の優位性

(1) デジタルデータによる評価の優位性と課題 P32

優位性	特性(内容)	重要度
定量化	計測物理量の定量的な情報を収集する	 高 低
正確性	計測機器の客観性により, 人によるばらつき, エラーは大きく改善される	
再現性	同一条件, 環境下で, 一定の計測誤差などは存在するが再現性が得られる	
見える化	目視点検で見えない損傷の「見える化」を図ることができる(内部損傷, 微細損傷の発見)	
継続性	一定条件のデータを継続的に収集し, 経時的な変化を客観的に正確にとらえることができる	
即時性	リアルタイムに通知することができ, 迅速な対応が可能である	
効率化	スクリーニング計測による点検の効率化, 省力化, 人が近づけない部分の検査が可能である	

課題について: 技術的課題、経済的課題、制度的課題に整理して示す。P33

(2) モニタリングの優位性を考慮した運用案 P34

- ・橋梁維持管理プロセスにおけるモニタリング技術の位置付けと運用案について適用審に分けて考察した。
- ・数値解析を取り入れる場合の考え方および適用方法について考察した。

(3) モニタリングによるデジタルデータ評価の経済的優位性に関する考察 P37

モニタリング技術の導入に関しては, 経済的優位性の視点が重要である。その経済的優位性が最も示されるのは, モニタリング技術の導入に関する課題に対して適切に克服を図る「リスクマネジメント」を実施することが重要であり, その中でリスクを明確に認識し, その影響範囲および結果の妥当性に関して認識し, 理解することにより, 技術に対する信頼性を得ることができるのではないかと考える。

適用条件の設定「リスクマネジメントの考え方」

設定したケーススタディ P39に表にまとめる

- ①判定区分Ⅲとなった場合の補修までの監視S2判定
- ②従来点検では高価となる場合など
- ③補修結果を担保する場合
- ④災害と関連した点検業務効率化の場合

5. 点検を補完するモニタリングの導入シナリオ

(2) モニタリング導入に関する留意点 P50

- ・モニタリングは状態の把握であり、剥落などの第三者被害への適用には限界がある。
- ・モニタリングにおけるしきい値などの設定状況によっては構造性能低下の進行見落としが生じる可能性がある。
- ・モニタリングの本質は目視点検の「代替」ではなく「補完」として活用する。

(3) デジタルデータの収集・評価の計画 P51

- ・対象構造物の適切な力学的な物理量(剛性, 減衰特性, 固有振動数, 応力度)を見つけ, その変化により構造物の診断を行うことを目的とするために, その目的に応じて収集・評価の計画をしないといけない。
- 「ひずみ」「変位」「加速度」の3つの代表的物理量における適用を計画する場合の留意点などを示した。

(4) センサ等によるデジタルデータの収集 P53

- 「ひずみ」「変位」「加速度」の3つの代表的物理量におけるセンサ等の計測機器を用いてデジタルデータを収集する場合の実務的検討点について示す。

(5) モニタリングの導入シナリオ P54

- a) 点検を補助するモニタリング
- b) 診断を補助するモニタリング
- c) 補修・補強の効果を確認するモニタリング
- d) 緊急時の対応を補助するモニタリング

5年に一度の定期点検結果

- ・桁下面の複数ひび割れ＋内部鋼材腐食
- 単なる表面劣化ではなく耐荷性能低下につながる可能性がある変状である
- 【モニタリングの目的】
- 劣化の進行把握（速度）危険兆候の早期検知（特にPC鋼材破断）

損傷の状況



- ・ ひび割れ発生
- ・ 内部鋼材の腐食

① ひび割れモニタリング（外観変状）

- ・ ひび割れ幅測定（パイ型変位計など）
→ 定量的な進展速度の把握
- ・ 画像記録・画像解析
→ 分布・延長・分岐など形状変化の把握
- ・ 鋼材腐食の把握（自然電位測定）
→ 腐食の「可能性」を面的に評価

② PC鋼材破断の検知（安全側の監視）

- ・ AEセンサ（アコースティックエミッション）
→ 破断時^{（タイトルなし）}に発生する弾性波を検知
- ・ 加速度計
→ 振動特性の変化や異常応答の検知

注意点）ひび割れ原因ごとの評価の違い

- ・ 過大な荷重・乾燥収縮・ASR → ひび割れ幅の変化の測定が変状の進行評価に有効
- ・ 腐食起因 → ひび割れ幅だけでは評価困難



a)点検を補助するモニタリング

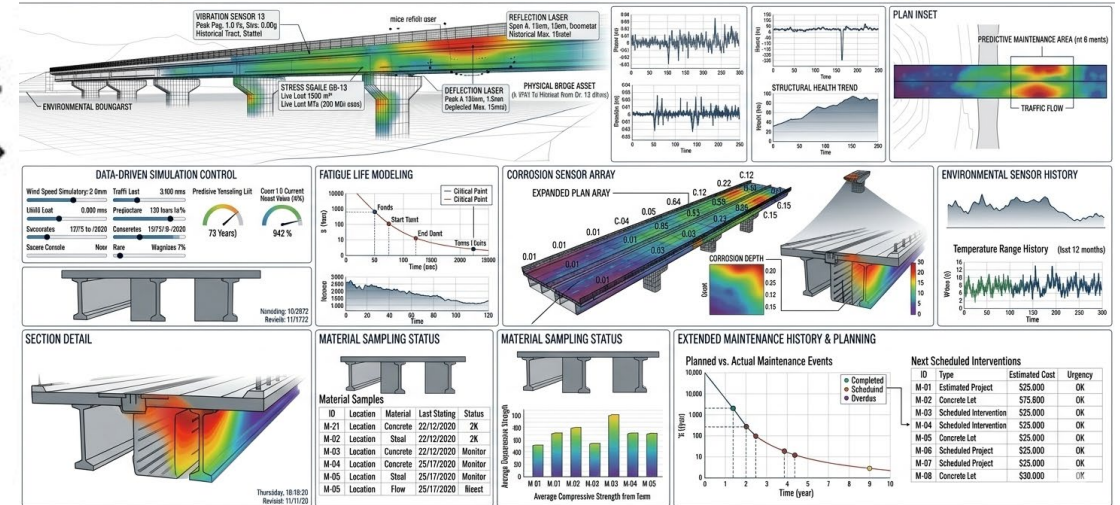
PC橋のモニタリングで取得したデジタルデータの活用マニュアル(案)

現実世界の実橋梁

仮想空間上に構築された橋梁モデル



モデル化



現実世界のデータ

- ・設計図書, 施工計画書
- ・施工時データ
- ・点検・補修補強履歴
- ・3D点群データ

モニタリングデータ

- ・IoTセンサ (ひずみ, 加速度, 温度等)
- ・気象データ (気温, 湿度, 風速, 降水量)
- ・交通量, 車両荷重

5年に1回の定期点検結果

効率・精度向上

長期的挙動や劣化の予測

- ・コンクリートのクリープや乾燥収縮を考慮
- ・様々な劣化シナリオをシミュレート

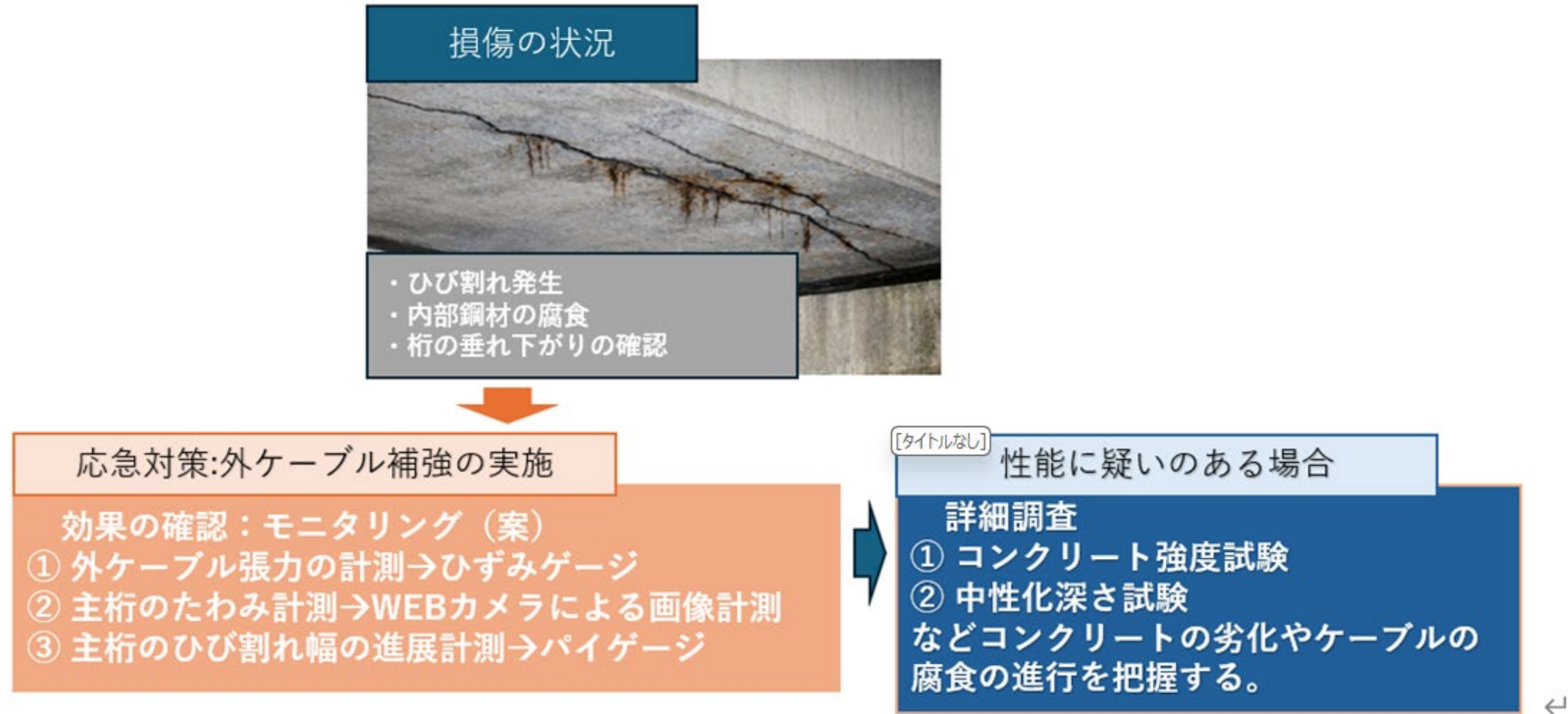
シミュレーション結果

デジタルツインの効果

- ・将来挙動の高精度予測
- ・実構造物を忠実に反映
- ・劣化シナリオをシミュレート

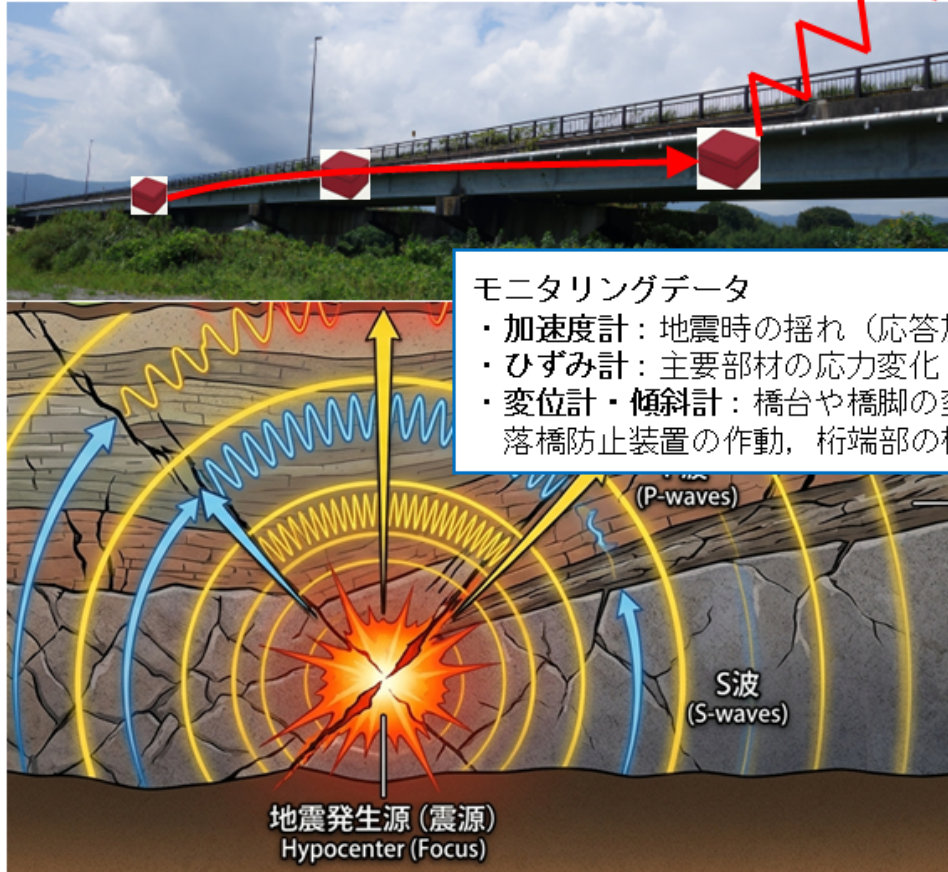
- ・事後保全から予防保全への転換
- ・メンテナンスコストの平準化・縮減
- ・技術・ノウハウの継承

b) 診断を補助するモニタリング



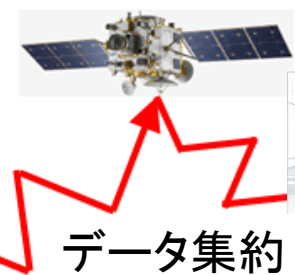
c)補修・補強の効果を確認するモニタリング

PC橋のモニタリングで取得したデジタルデータの活用マニュアル(案)



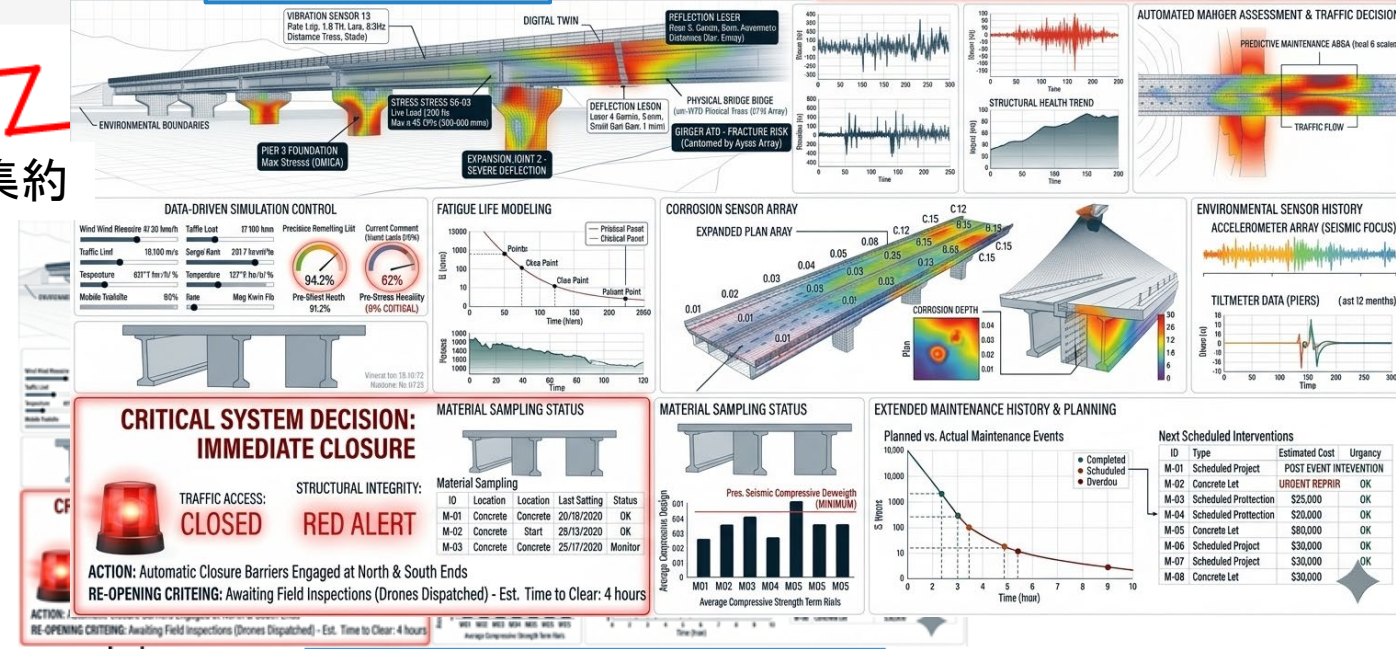
モニタリングデータ

- ・ 加速度計：地震時の揺れ（応答加速度）
- ・ ひずみ計：主要部材の応力変化
- ・ 変位計・傾斜計：橋台や橋脚の変位，落橋防止装置の作動，桁端部の相対変位等



データ集約

管理センター



しきい値との比較

通行判断区分を自動的・即座に提示

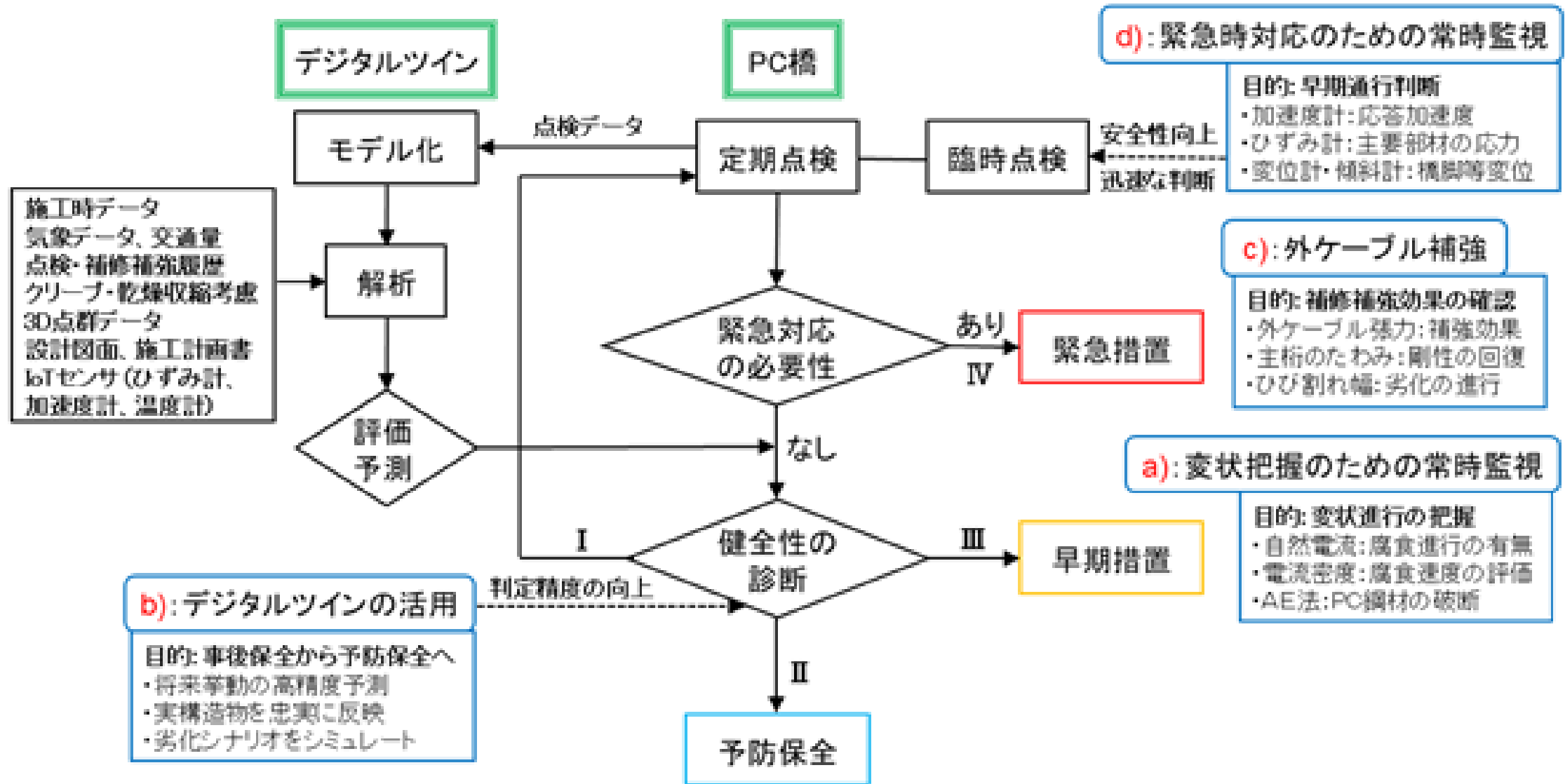
- ・ 異常なし（通行可）
- ・ 軽微な異常（徐行・片側交互通行）
- ・ 要詳細点検（通行止）

モニタリングシステム導入の効果

- ・ 大規模災害発生直後の早期通行判断支援
- ・ 経年劣化の定量把握による効率的な維持管理

d) 緊急時の対応を補助するモニタリング

PC橋のモニタリングで取得したデジタルデータの活用マニュアル(案)



定期点検と導入シナリオの関係

PC橋のモニタリングで取得したデジタルデータの活用マニュアル(案)

6. モニタリングにより収集したデジタルデータの活用

(1) モニタリングにより得られたデータの活用の意義

(2) 国の取り組み P61

a) 画像処理技術を用いた道路橋の常時監視システムの開発

b) インフラ分野のDXとして「インフラの作り方」の変革, 「インフラの使い方」の変革, 「データの活かし方」の変革を基本としての取り組みを示す。

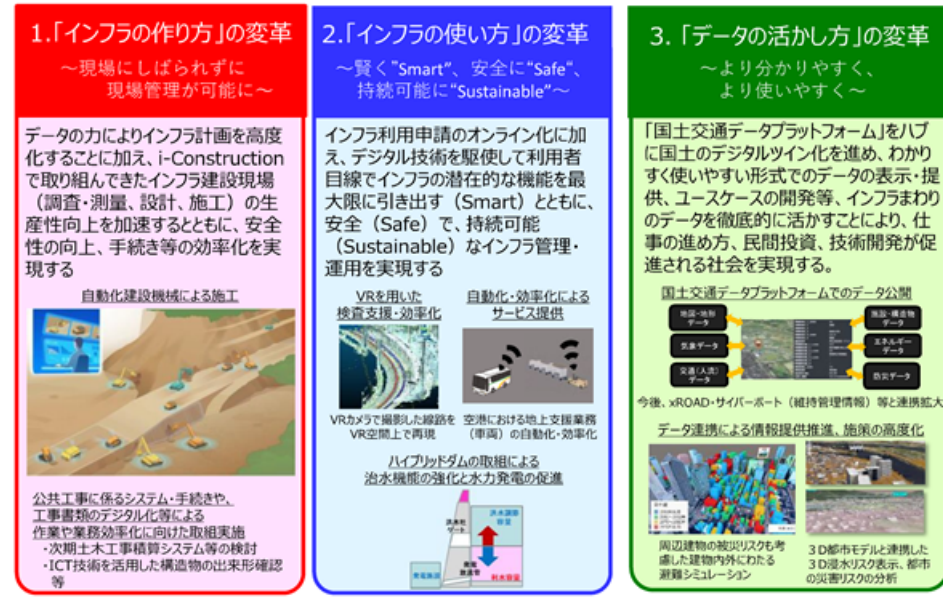
c) 近畿地方整備局のインフラ分野のDXとして「近畿インフラDX アクションプラン」の概要の説明

(3) 道路会社および民間の取り組み P66

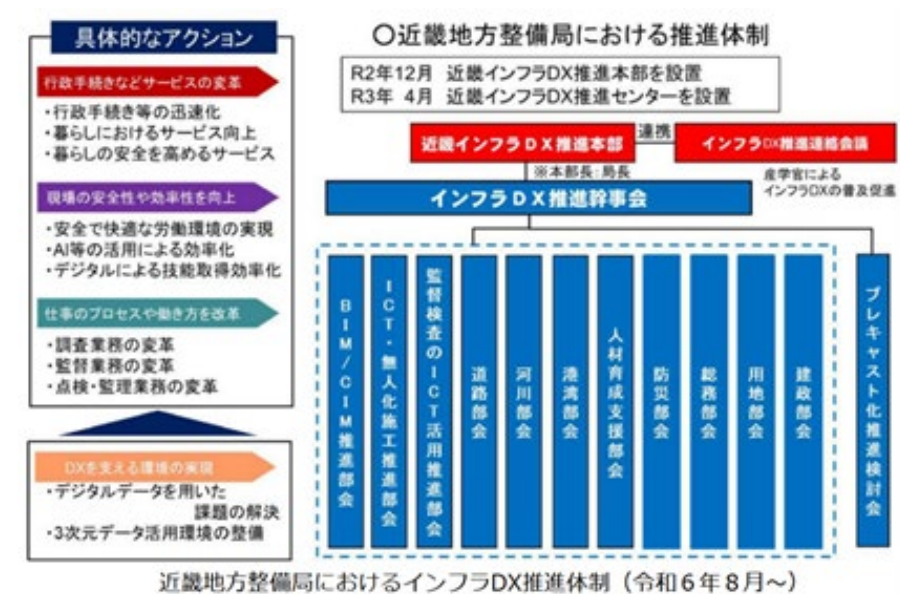
a) NEXCO西日本の取り組み

b) 阪神高速道路の取り組み

c) PC橋の劣化シナリオと変状段階別のモニタリング技術



P62に掲載



P65に掲載

本プロジェクト報告書の巻末資料では、プロジェクト期間に実施したデジタルデータを用いたモニタリングのコンクリート構造物への具体的な適用事例を3例示しています(第1章)。特に、振動を用いた異常検知技術であるSAFE(第2章)、梁構造のたわみを廉価に計測する技術(第3章)、画像処理によってひずみを計測する技術(第4章)について、計測方法、計測データの特徴、分析手法、従来技術と比較した際の利点・留意点を記載することでコンクリート構造物の維持管理の様々な場面での利用可能性を検討しています。 **いろんな場面でご活用ください。**

附録目次(案)

1. コンクリート構造物へのモニタリング計測事例集

- (1) RC梁4点曲げ載荷実験
 - a) RC梁供試体概要
 - b) 計測機器の概要および配置
 - c) 実験プロセス
 - d) 載荷実験結果
 - f) ハンマー加振実験結果
 - g) 非線形有限要素解析による実験の再現
- (2) PC梁4点曲げ載荷実験
 - a) PC梁供試体概要
 - b) 計測機器の概要および配置
 - c) 実験プロセス
 - d) PC鋼材の損傷レベルとPC梁の応力状態の関係(事前計算)
 - f) 載荷実験結果
 - g) ハンマー加振実験結果
- (3) 供用下のPC橋上部工の計測実験
 - a) 対象橋梁概要
 - b) 計測機器の概要および配置
 - c) 実験日時と荷重車計測
 - d) 変位計測結果
 - e) ひずみ計測結果
 - f) 加速度計測結果

2. 振動計測およびSAFE技術を用いた点検支援

- (1) 振動計測およびSAFE技術概要・特徴
- (2) 計算手順
- (3) RC梁4点曲げ載荷実験への適用例
- (4) PC梁4点曲げ載荷実験への適用例
- (5) 供用下のPC橋上部工の計測実験への適用例
- (6) 適用にあたっての留意点

3. 梁構造のたわみ計測と廉価な計測方法を用いた点検・診断支援

- (1) 梁構造のたわみと計測手法の概要・特徴
- (2) RC梁4点曲げ室内載荷実験への適用例
- (3) 供用下のPC橋上部工の計測実験への適用例

4. 桁端回転角を利用したたわみ計測を用いた点検・診断支援

- (1) 桁端たわみと計測手法の概要・特徴
- (2) 供用下のPC橋上部工の計測実験への適用例

5. 梁構造のひずみと画像計測を用いたひずみ計測の点検支援

- (1) 梁構造のひずみと計測手法の概要・特徴
- (2) RC梁4点曲げ載荷実験への適用例
- (3) PC梁4点曲げ載荷実験への適用例

