

新潟県コンクリート診断士 令和4年度技術セミナー

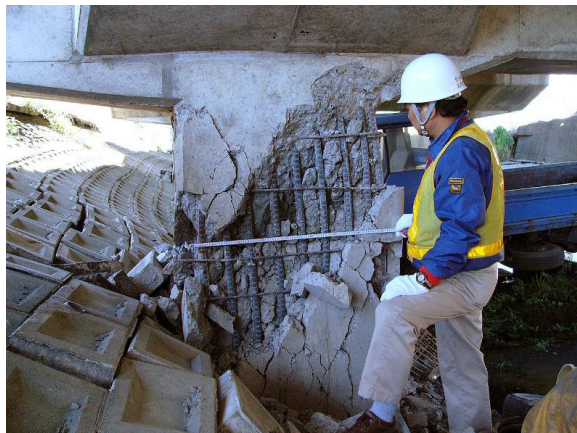
旧妙高大橋の健全性評価

金沢工業大学
田中 泰司

経歴



- 1997.3 富山県立高岡高等学校 卒業
- 2001.3 東京大学工学部社会基盤システム計画学科 卒業
- 2003.3 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 修士課程修了
- 2004.8 長岡技術科学大学環境・建設系助手(2006～同助教)
- 2015.1 東京大学生産技術研究所 特任准教授
- 2018.4 金沢工業大学環境土木工学科 准教授
- 2021.4 同教授



2004年10月 中越地震



2005年2月 大雪



2011年3月 東日本大震災

凍結防止剤で塩害劣化した長大PC橋

■ 国道 18 号妙高大橋の損傷事例

2009年にPCケーブルの破断を発見



H22北陸地方整備局管内研究会資料より抜粋

竣工：1972年

橋長：300m

幅員：10.05m

交通量：13,183台／日

大型車混入率 11.4%

上部構造：4径間連続PC箱桁橋

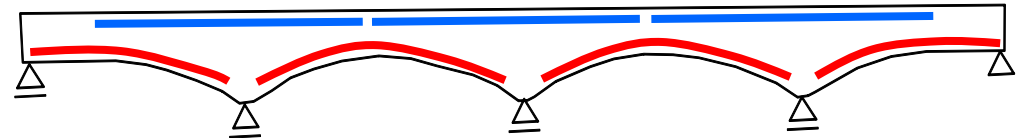
施工：プレキャストカンチレバー工法
(全99ブロック)

- 代替路線のない主要幹線道路
- 直轄国道で唯一，特車の重量規制を実施
- 深夜に過積載車が走行
- R3年夏に新橋に交通振替え

PC鋼材の腐食状況

ケーブル本数：504本

張出用PCケーブル 88本 × 3 = 264本

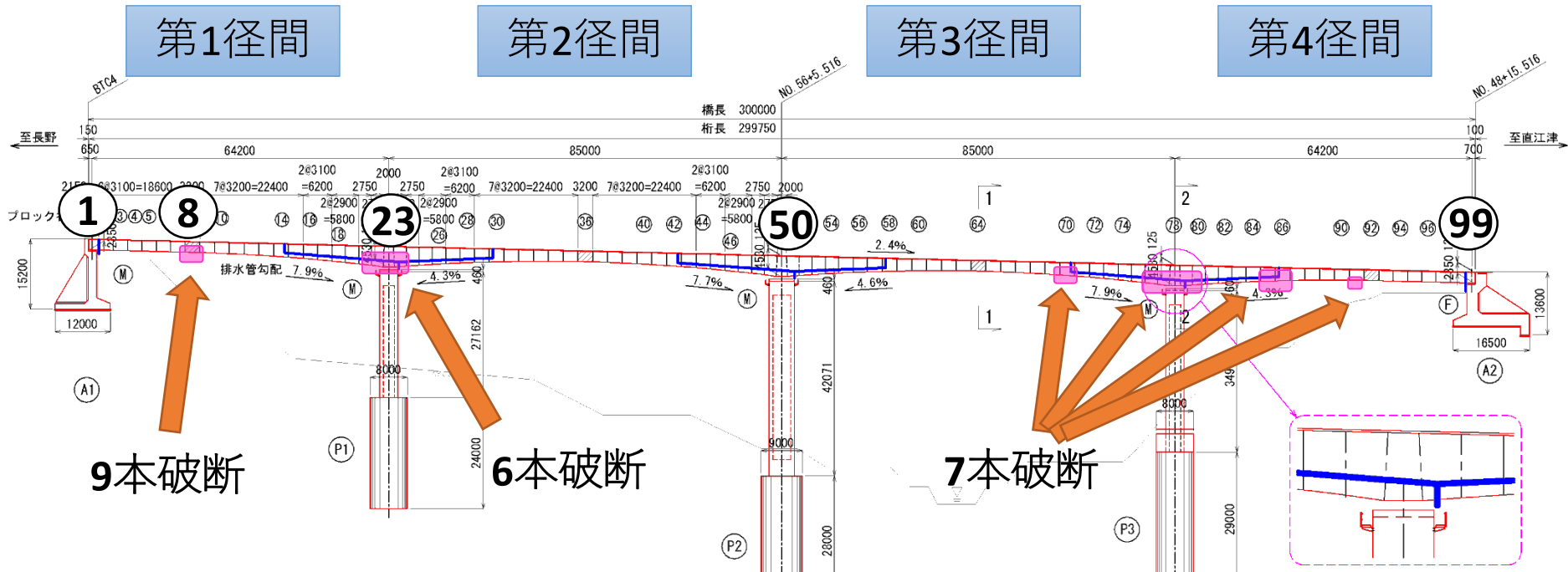


連続用PCケーブル 60本 × 4 = 240本

内視鏡調査

約1200ヶ所の調査

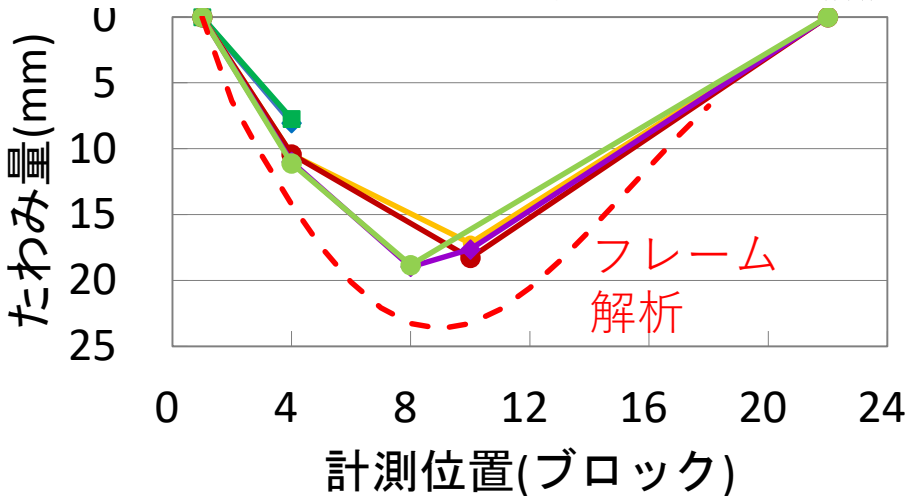
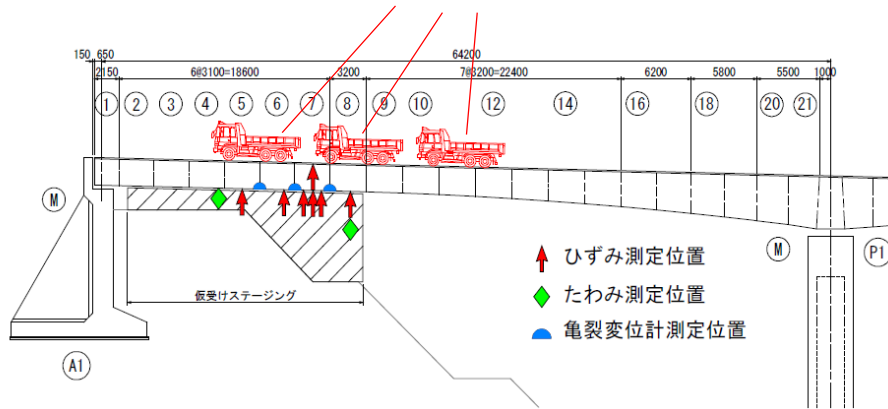
22本のPCケーブル破断を確認



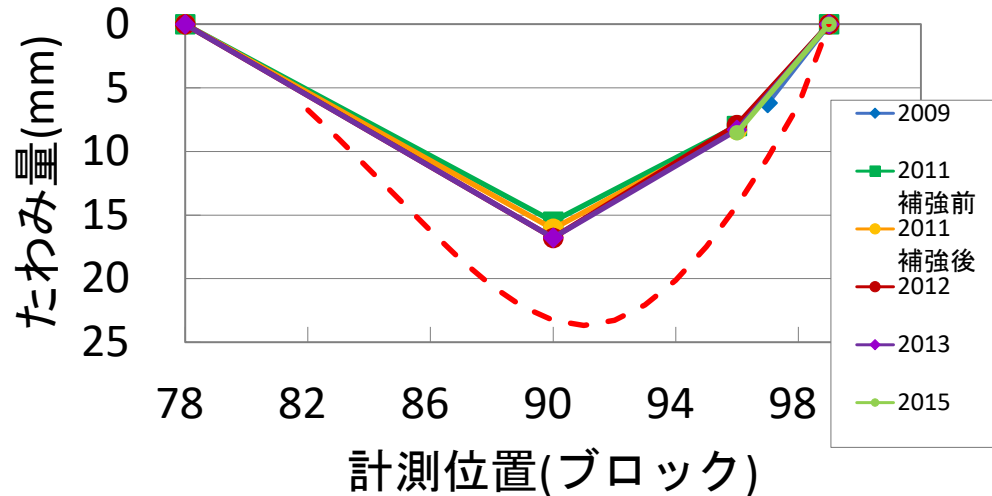
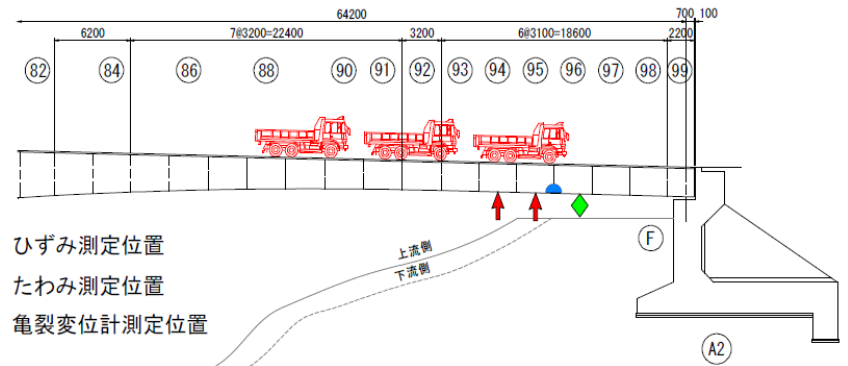
荷重車試験のたわみ分布

第1径間

120t (20t × 6台)の荷重車

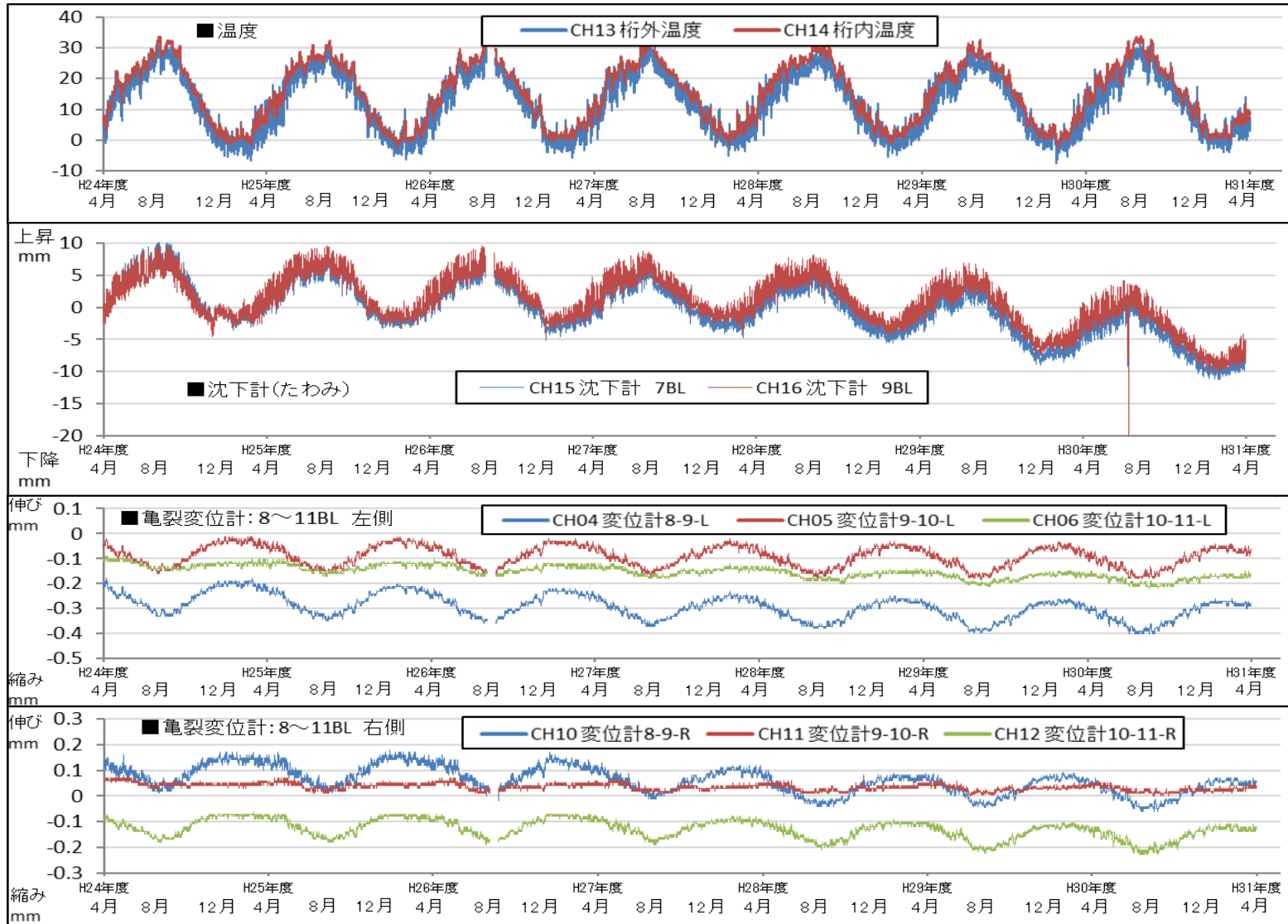


第4径間



- ・ フレーム解析の計算結果よりもたわみが小さい (壁高欄や舗装の剛性の影響)
- ・ たわみ分布に経年変化は見られない → 劣化が進んでいないということではない

桁の変位、長期計測結果



対策の要点

(管理者が求める内容)

通行荷重の規制の要否、要の場合の程度

架け替えか補強かの判断

架け替えとした場合、それまでの補強の有無

(技術的課題)

1. 現在の耐荷性能の評価

・ 載荷試験

・ 数値解析

2. 劣化(鋼材腐食)の進行度合いの評価

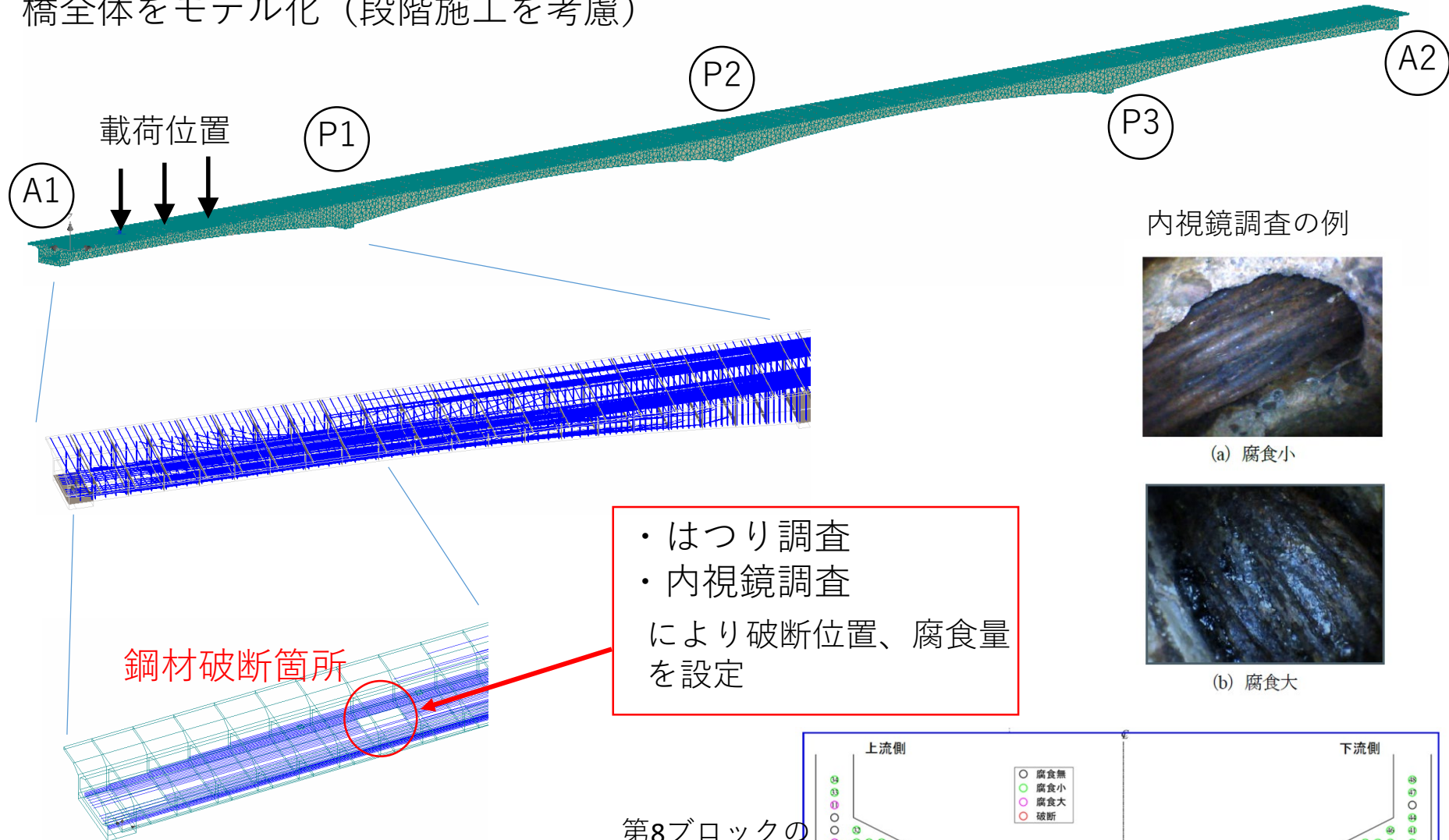
・ モニタリング

当面、大丈夫そうだけど、
どれくらい余裕があるのか？

変化はわかるけど、
どう評価すればよいのか？

解析による現状評価

橋全体をモデル化（段階施工を考慮）



・ はつり調査
 ・ 内視鏡調査
 により破断位置、腐食量を設定

内視鏡調査の例

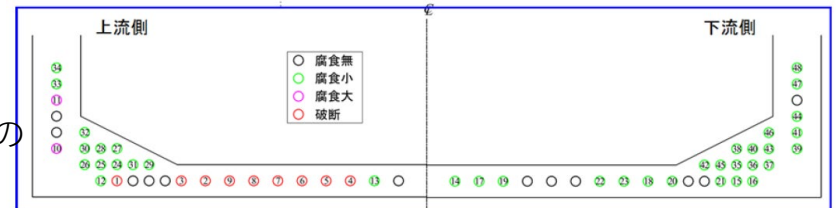


(a) 腐食小



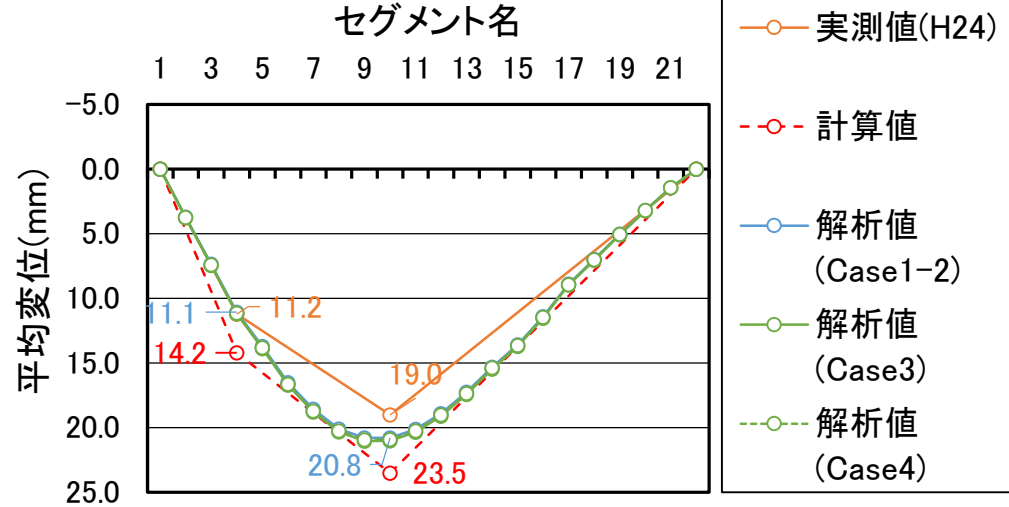
(b) 腐食大

第8ブロックの腐食量設定

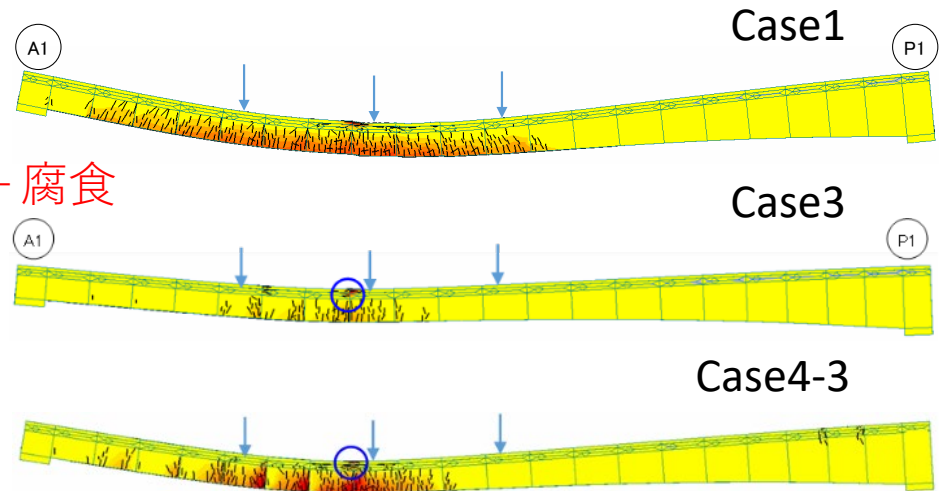
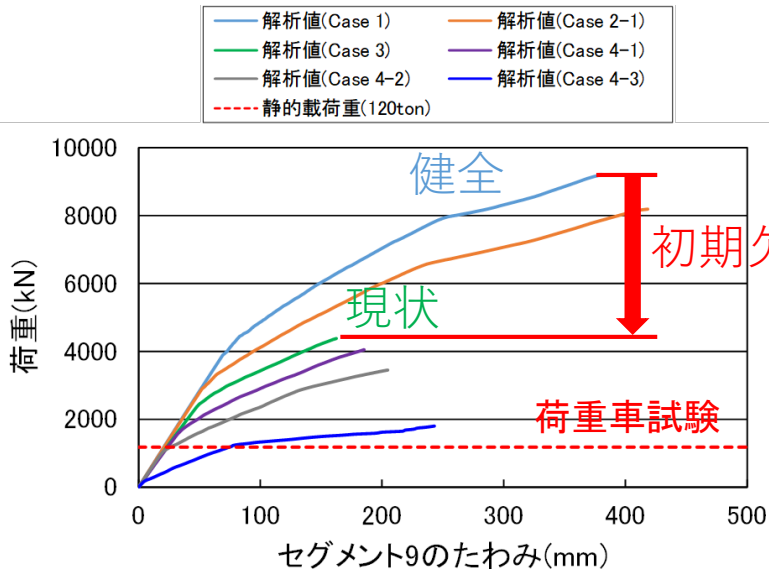


解析による現状評価

載荷試験との比較

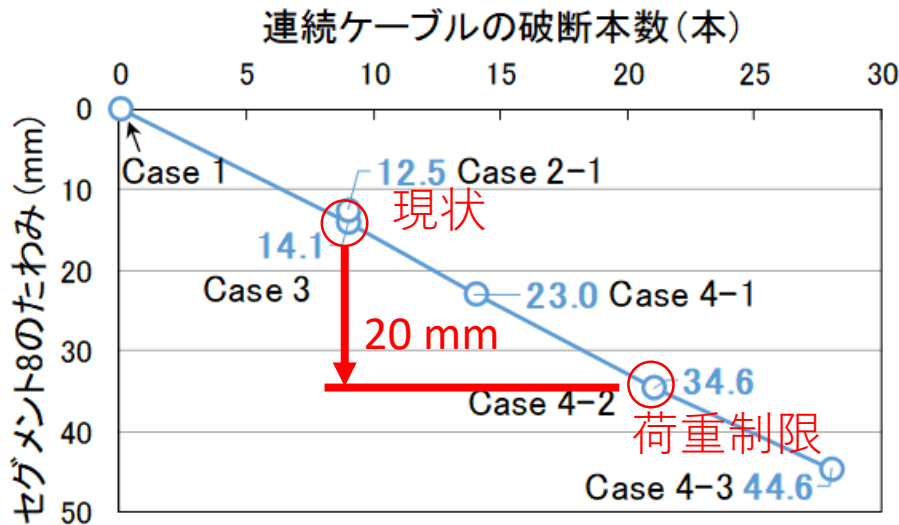


鋼材破断による耐力低下の評価

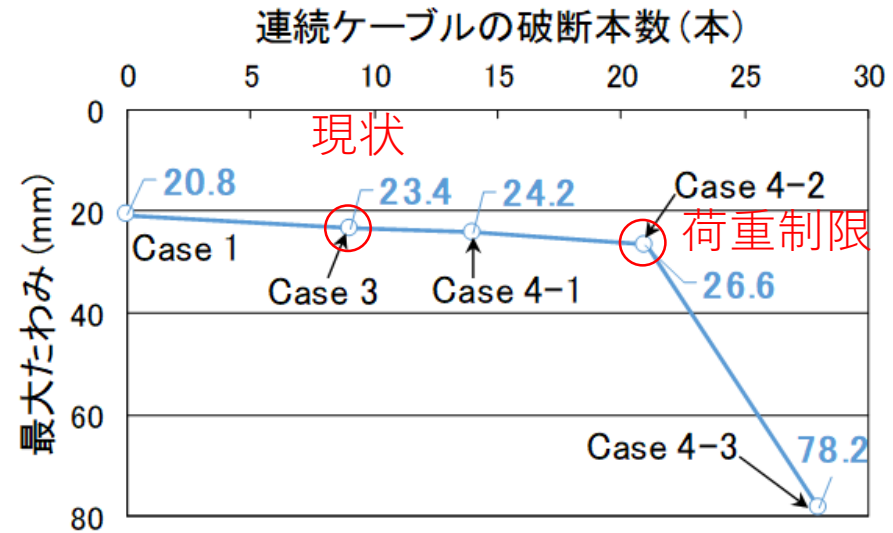


連続ケーブルの腐食が進行した場合の死荷重たわみ¹⁰

死荷重たわみの増加量



120t 载荷試験のたわみ



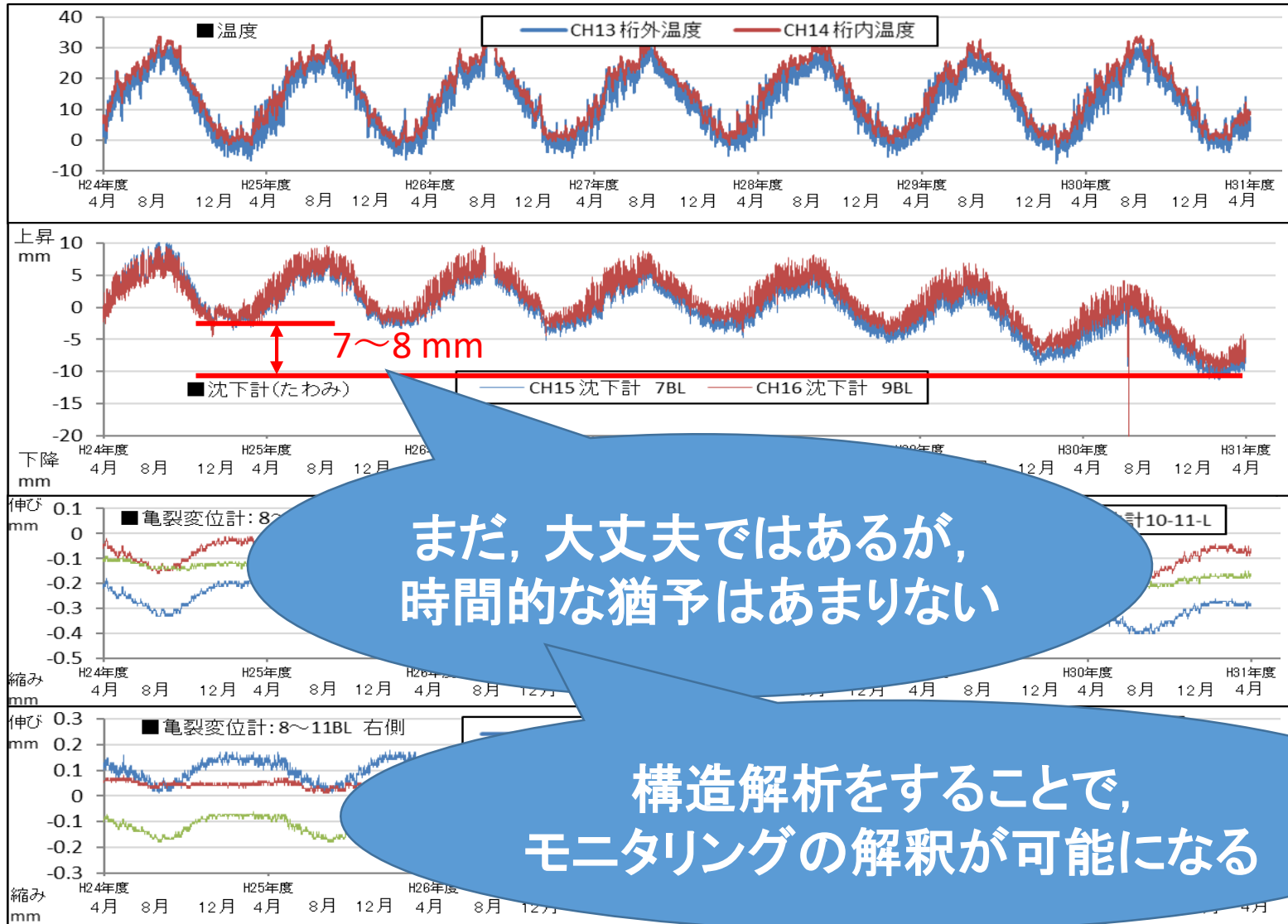
・死荷重たわみの長期モニタリングを実施すれば、腐食の進行が把握できる

管理レベル	状況概要	主な対応
注意レベル (たわみ+10 mm)	通常供用において注意が必要なレベル	特車荷重の引き下げ 速度抑制 車間確保誘導 監視頻度等の強化
警戒レベル (たわみ+20 mm)	耐荷力低下が懸念され、安全対策が必要なレベル	片側交通規制 载荷試験による確認 限界レベル対応準備
限界レベル (たわみ+30 mm)	荷重制限が必要なレベル	大型車通行止め (乗用車片交)

・120t程度の载荷試験では腐食の進行をほとんどとらえることができない（異常を検知したときには、相当腐食が進行している）

・载荷試験は、現時点での構造性能を確実に保証してくれるという利点がある

桁の変位、長期計測結果



ここまでのまとめ

- ・微破壊検査，構造解析，モニタリングを組み合わせてなんとか現状評価してきた（どのくらい正しかったのかは不明）
- ・評価精度を確保するには、高密度・高精度な腐食情報が不可欠

新たな非破壊検査を開発する必要がある

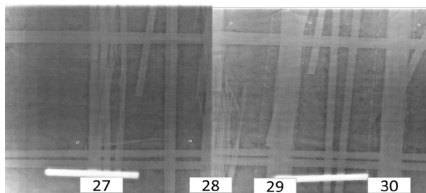
- △異分野の技術の転用（土木技術者だけで実施可）
- 異分野の技術を開発（異分野との協働が必要）

妙高大橋に使える非破壊検査技術を開発する

現在、取り組んでいる研究の概要

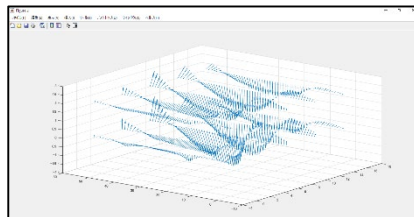
実施
内容

高出力X線装置
の開発



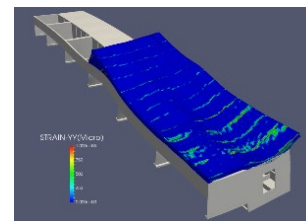
コンクリート深部の
鋼材腐食状況が検出
できる

磁気計測システムの
開発



浅い場所にある鋼材
腐食状況が非破壊で
迅速に確認できる

FEM解析による安全性
評価



腐食劣化した長大橋
の構造性能を定量的
に評価できる

想定
する
成果

実橋での実証（国道18号妙高大橋旧橋が対象）



PC鋼材が破断
R3供用終了
載荷試験・
解体調査を実施

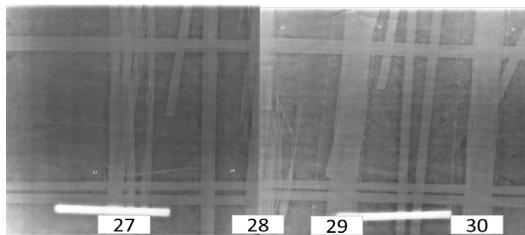
貢献

- ・ 腐食が進行したPC橋の検査・診断・性能評価手法を提供
- ・ 斜張橋ケーブル定着部などの鋼材の腐食状況も検出可能に

研究体制

研究代表者：金沢工業大学 田中泰司

高出力X線装置の開発



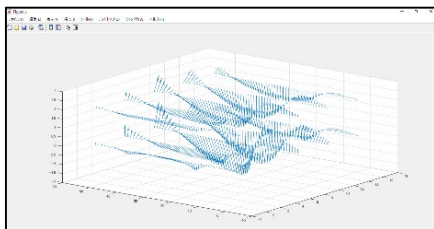
検証実験

東京大学
長谷川秀一

装置製作
・計測

アトックス(株)
飯塚浩之

磁気計測システムの開発



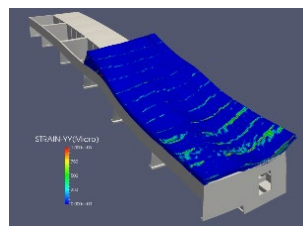
解析

金沢工業大学
田中泰司

検査

コニカミノルタ(株)
新山将史

FEM解析による安全性評価



解析

東京大学
石田哲也

モデリング

(株)コムエンジニアリング
土屋智史

腐食・破断検出

剛性・強度

実橋での実証 (国道18号旧妙高大橋を対象に検査・載荷試験・解体調査を実施)

北陸地方整備局 ←調整→ 金沢工業大学 田中泰司, 長岡技術科学大学 丸山久一



載荷試験

計測

鹿島建設(株)
新井崇裕

コーディネータ

大日本コンサルタント(株)
登石清隆

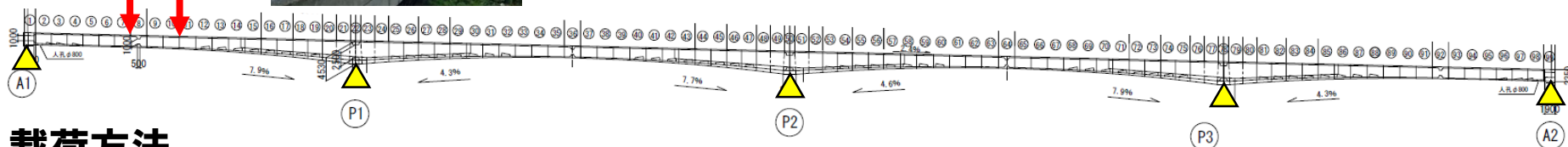
【載荷試験】 妙高大橋旧橋の載荷試験

載荷位置



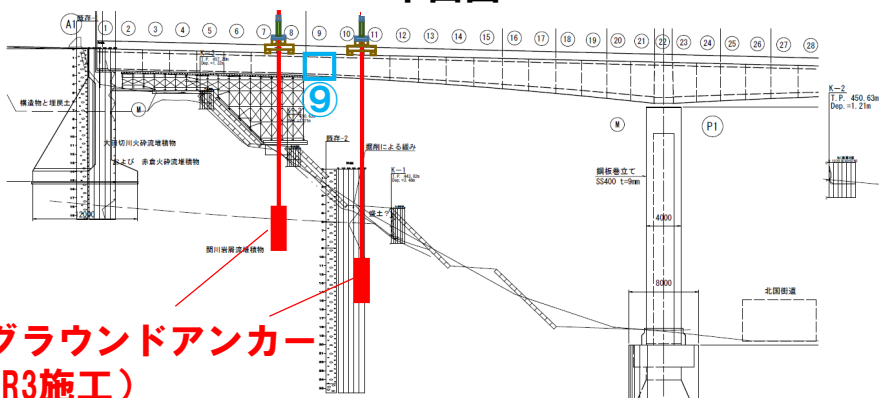
過去の荷重車試験に対応

(令和3年度計画・準備, 令和4年度実施)



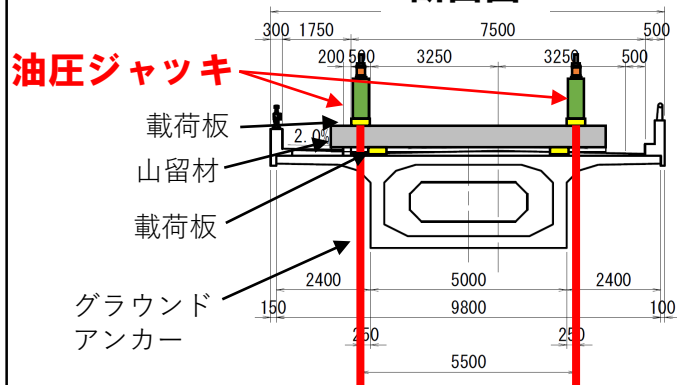
載荷方法

平面図



グラウンドアンカー (R3施工)

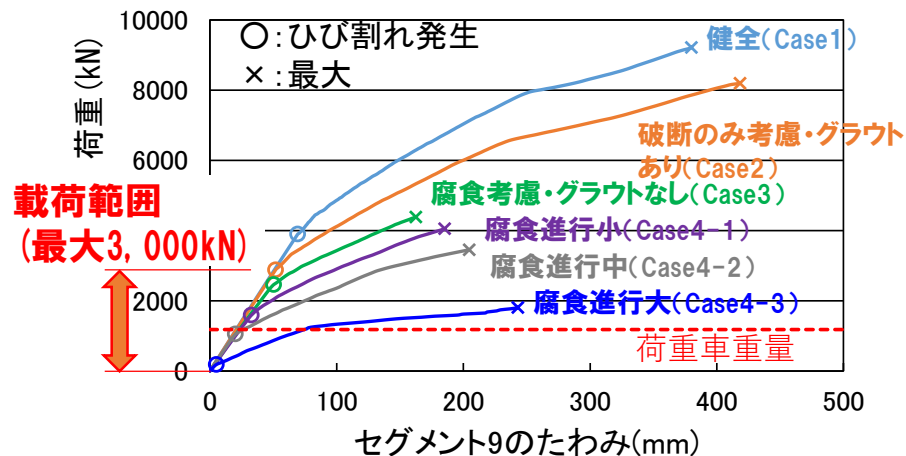
断面図



油圧ジャッキ

載荷板
山留材
載荷板
グラウンドアンカー

FEM解析結果 (既往研究)



載荷試験のねらい

載荷実験

・ 曲げひび割れ荷重

X線、磁気計測

・ 腐食分布
↓ 入力

構造解析

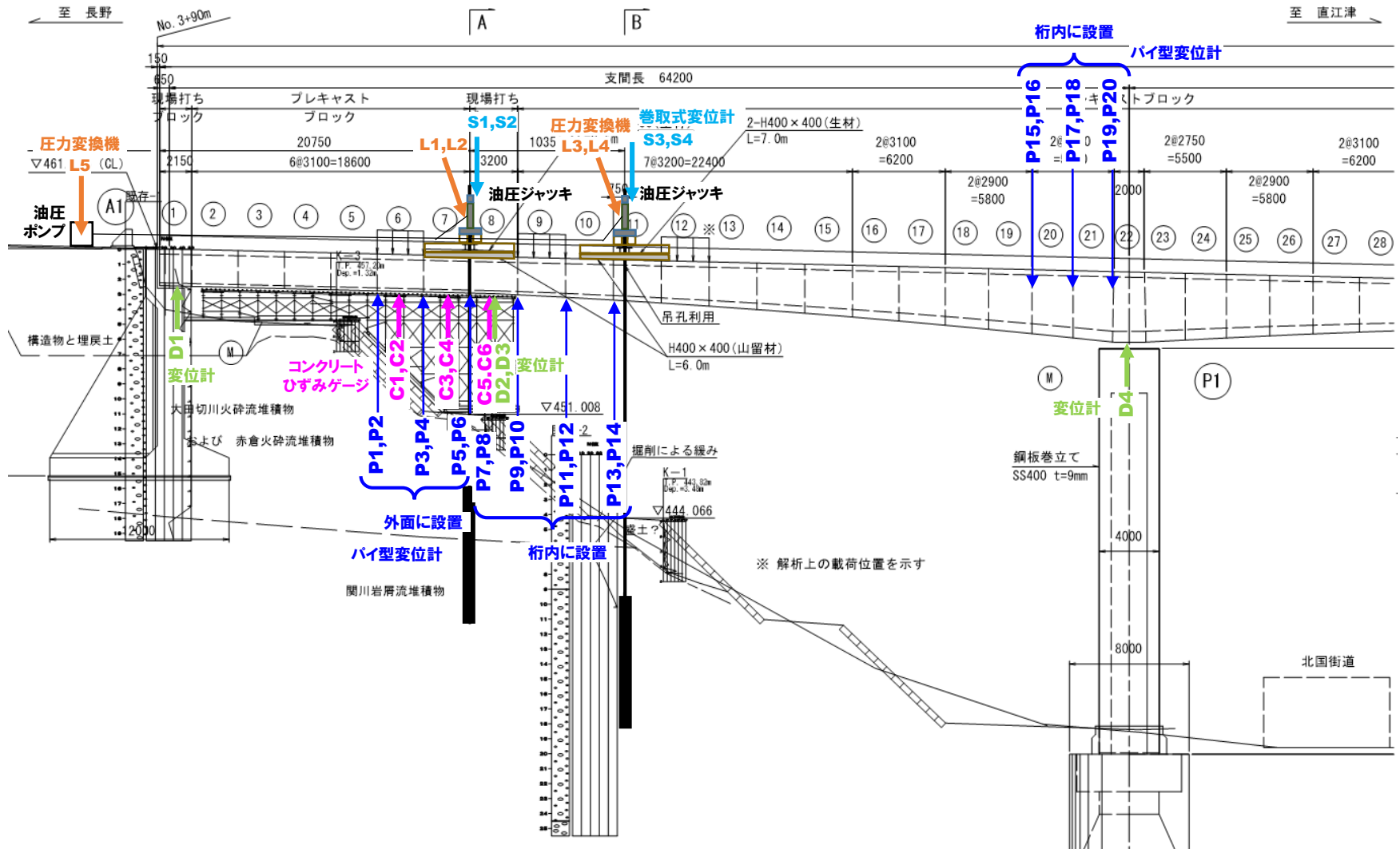
・ 曲げひび割れ荷重
・ 破壊荷重

比較

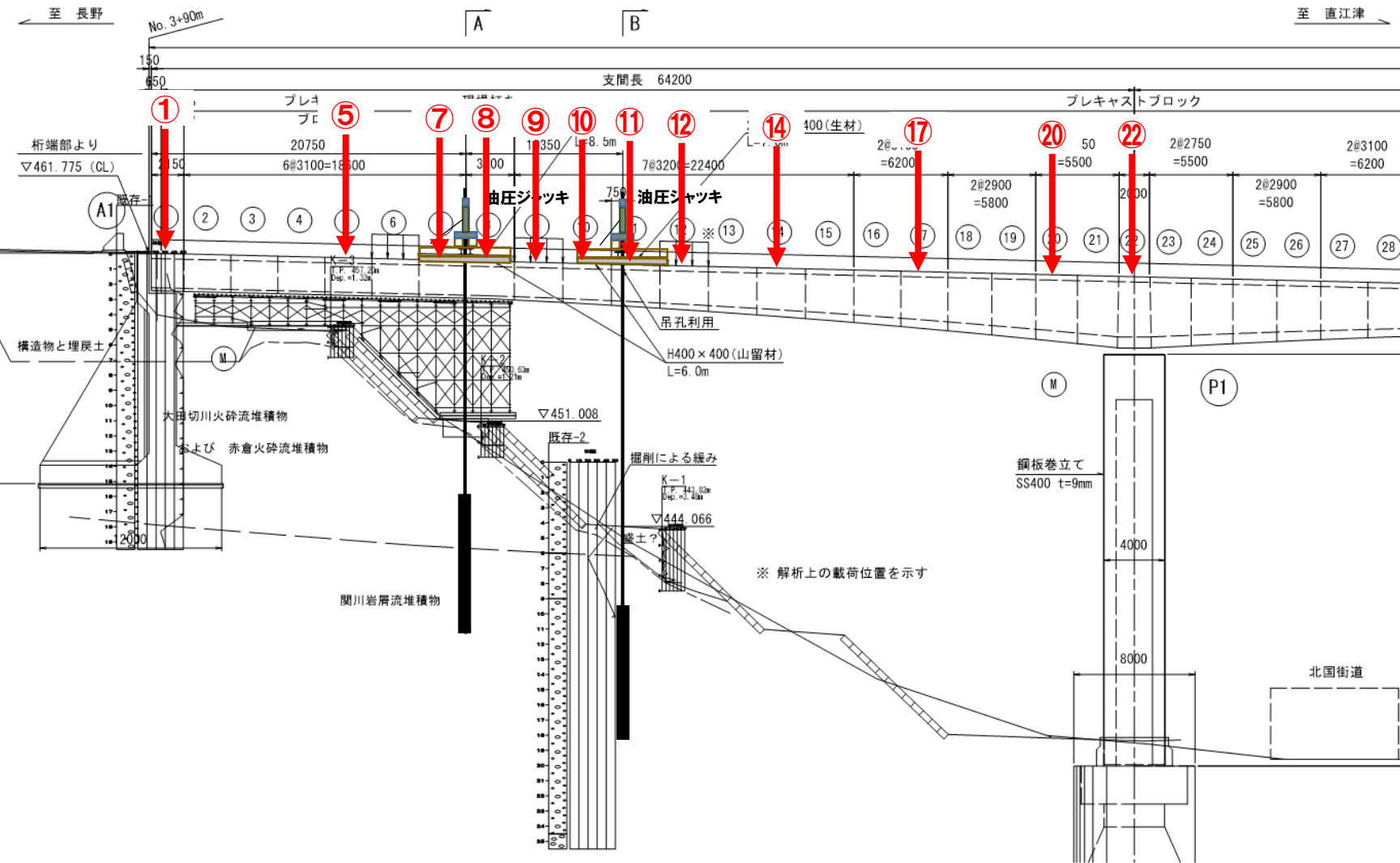
診断精度の評価

調査精度、腐食のモデル化、未調査部の取り扱い

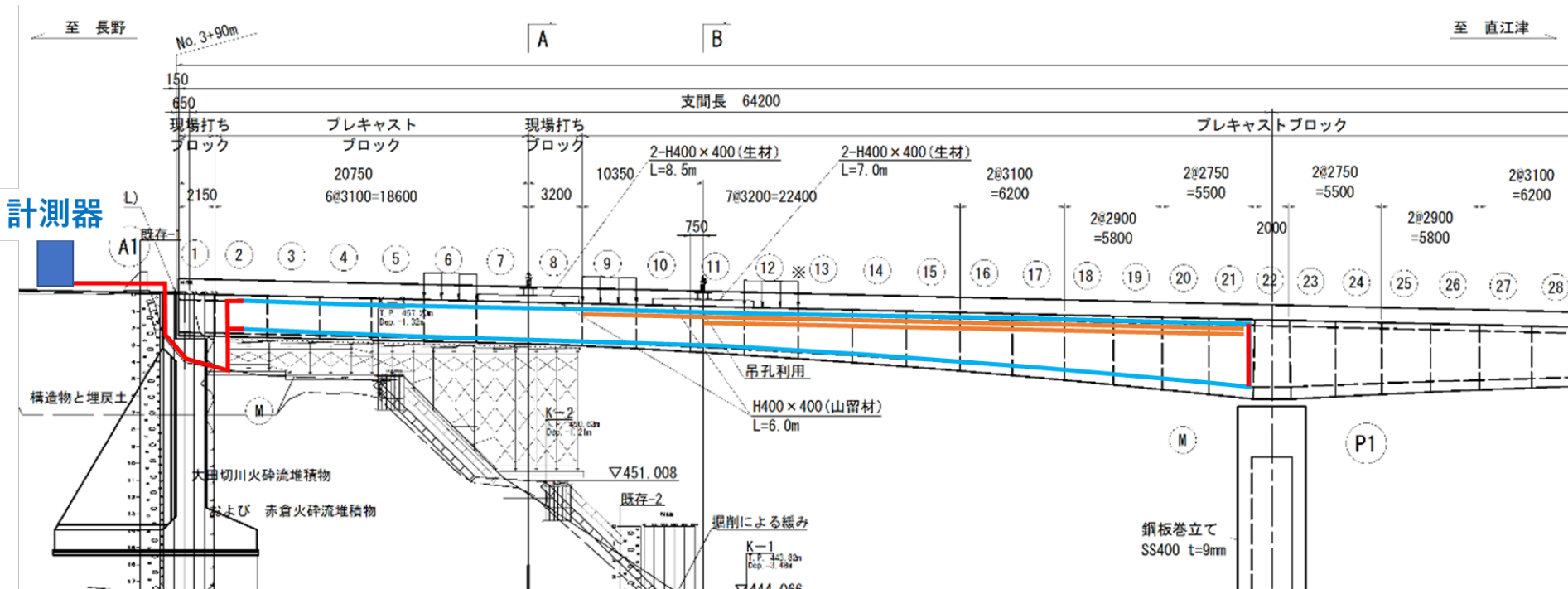
【載荷試験】各種センサの計測位置



【載荷試験】たわみ分布取得のためのレベル測量



【載荷試験】光ファイバーによるひずみ分布計測



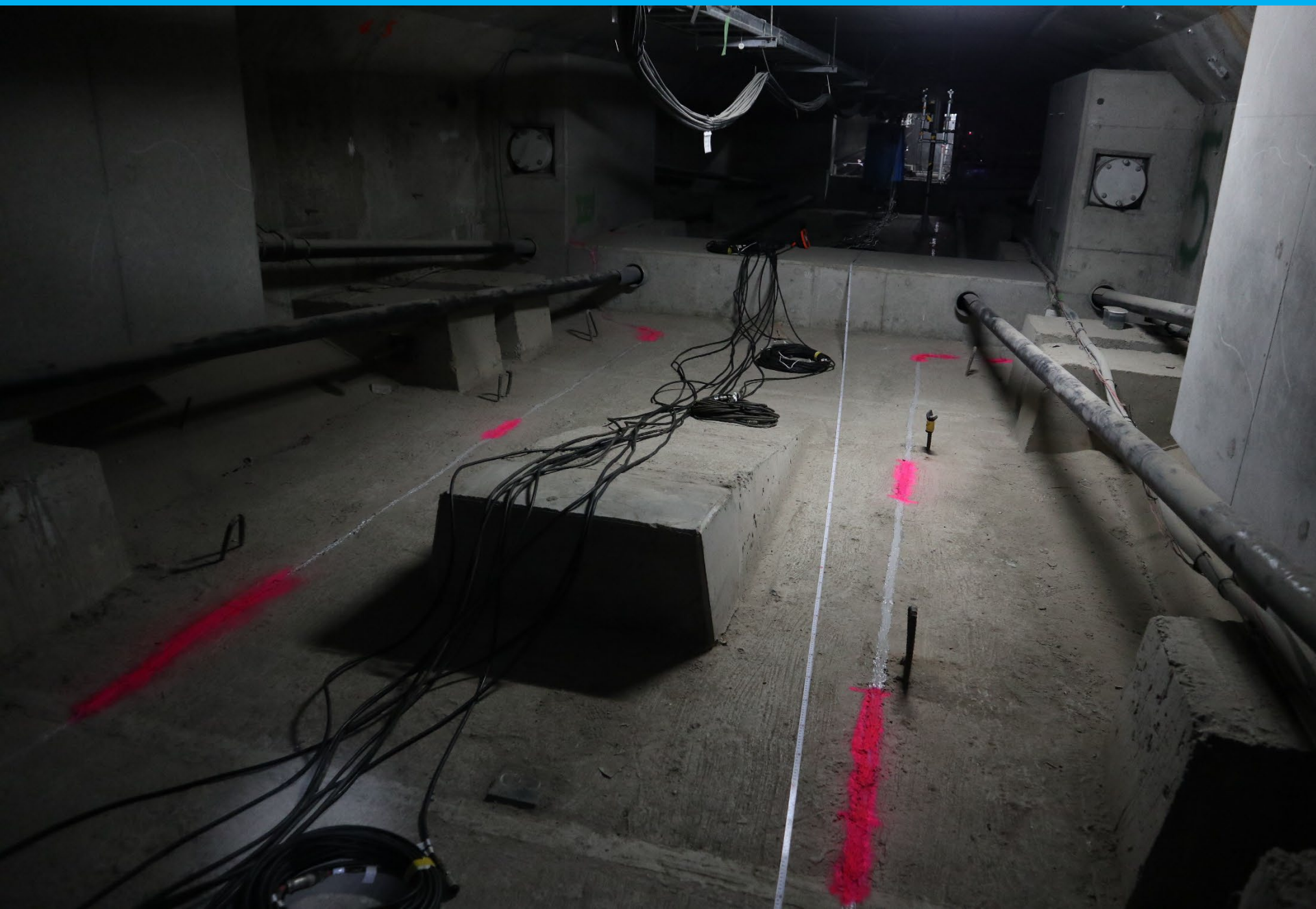
光ファイバー
ケーブル

光ファイバーケーブル
(テープ式)

- : 計測対象範囲 (接着剤使用)
- : 予備線 (テープで接着)
- : 計測対象外 (配線用ケーブル)



【載荷試験】光ファイバーによるひずみ分布計測

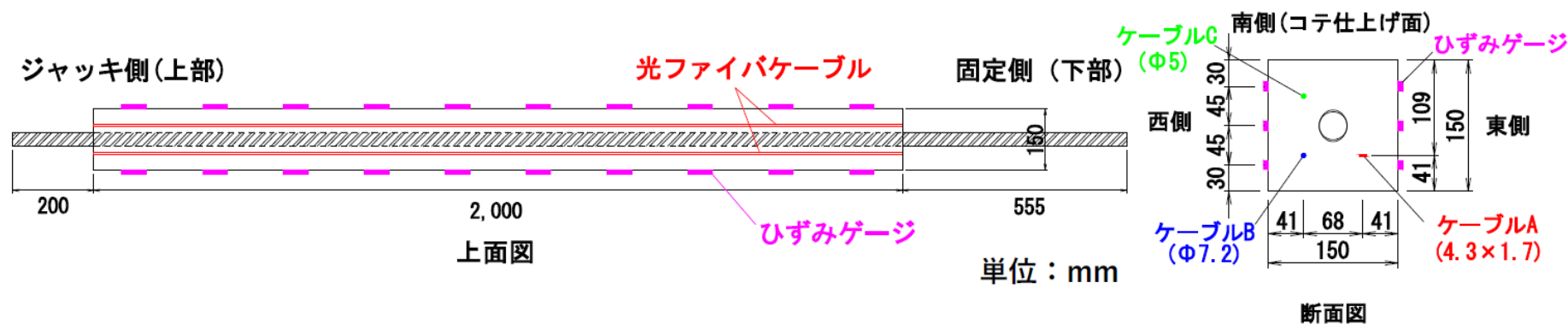


【載荷試験】光ファイバーによるひずみ分布計測

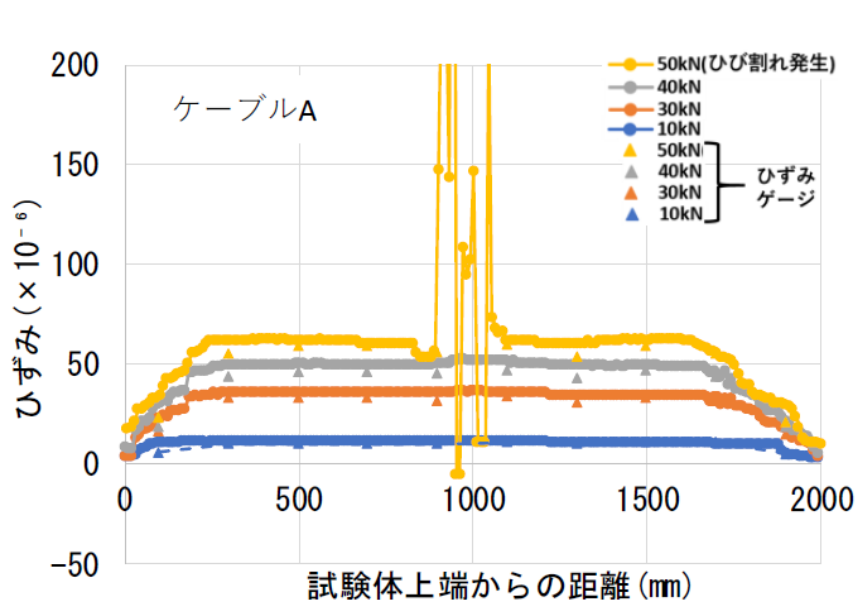


【載荷試験】光ファイバーによるひずみ分布計測

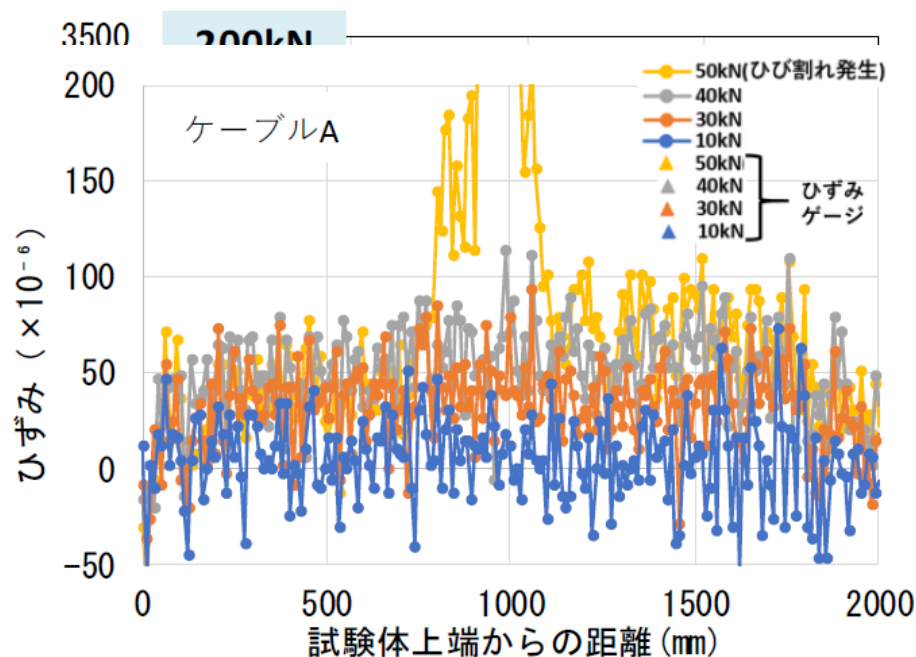
引張試験体の概要



ひずみ分布 (レイリー計測)



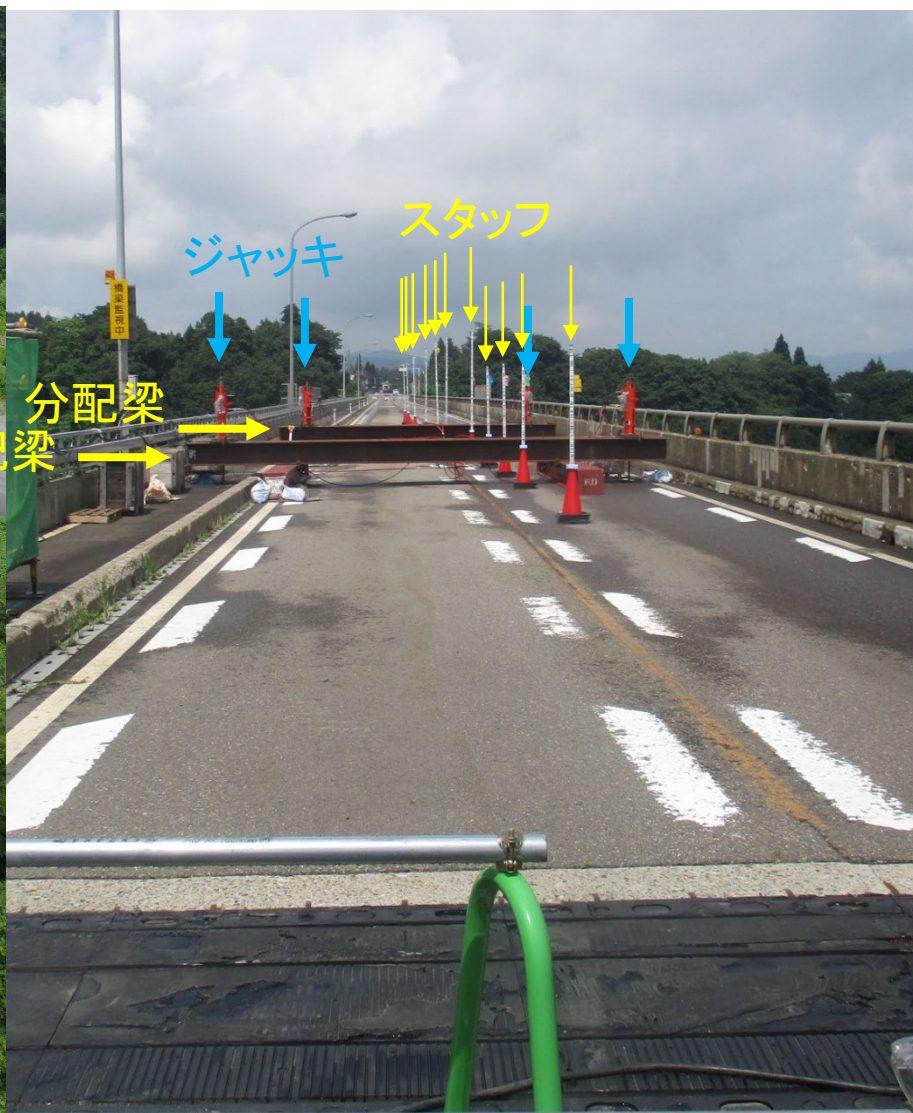
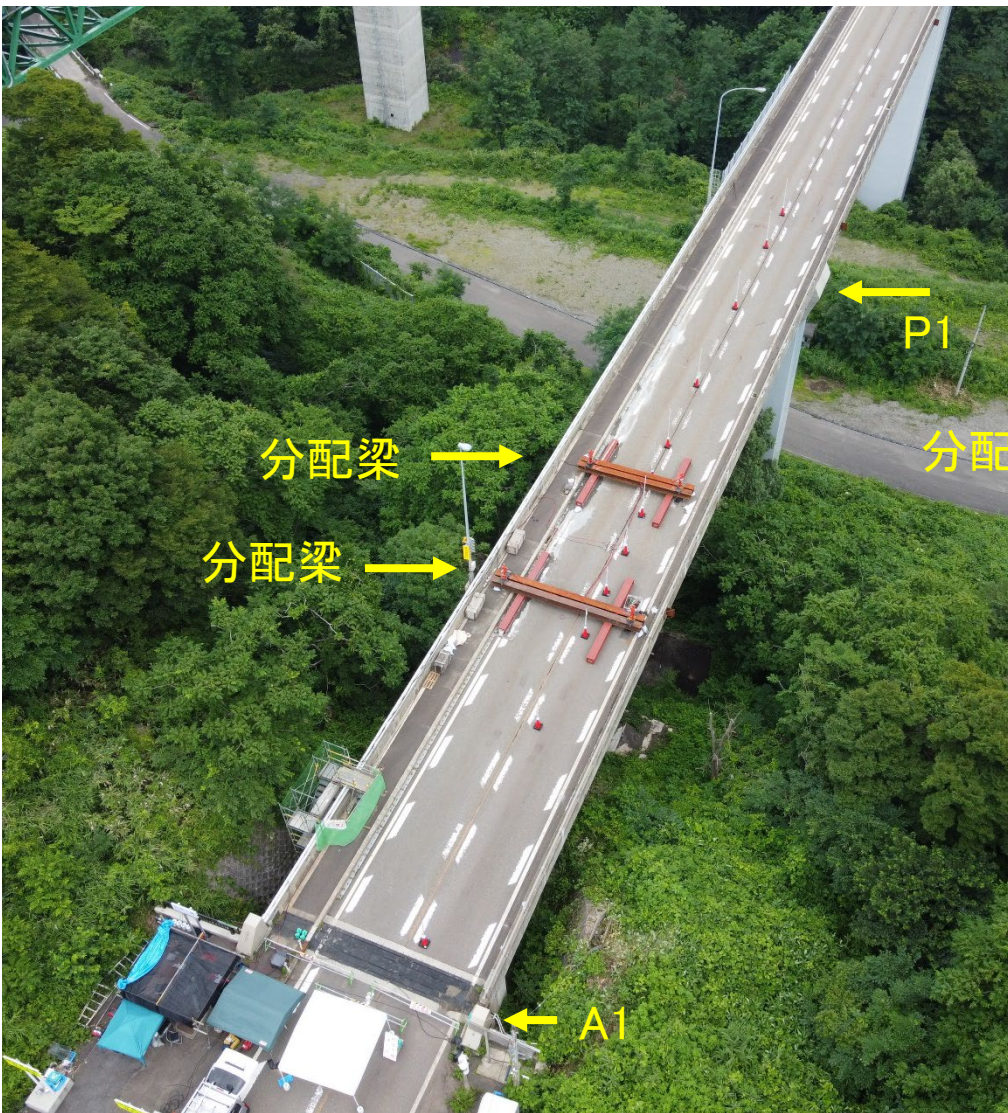
ひずみ分布 (ブリルアン計測)



【載荷試験】実施状況

ドローン撮影（クリエイトセンター提供）

橋面の状況



【載荷試験】実施状況

タイムラプス映像(山側から撮影)



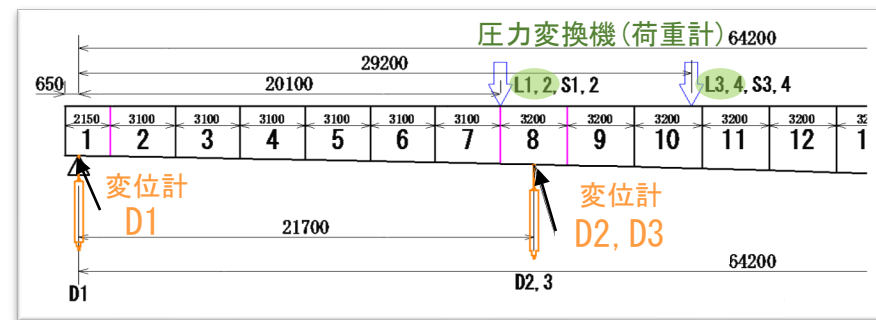
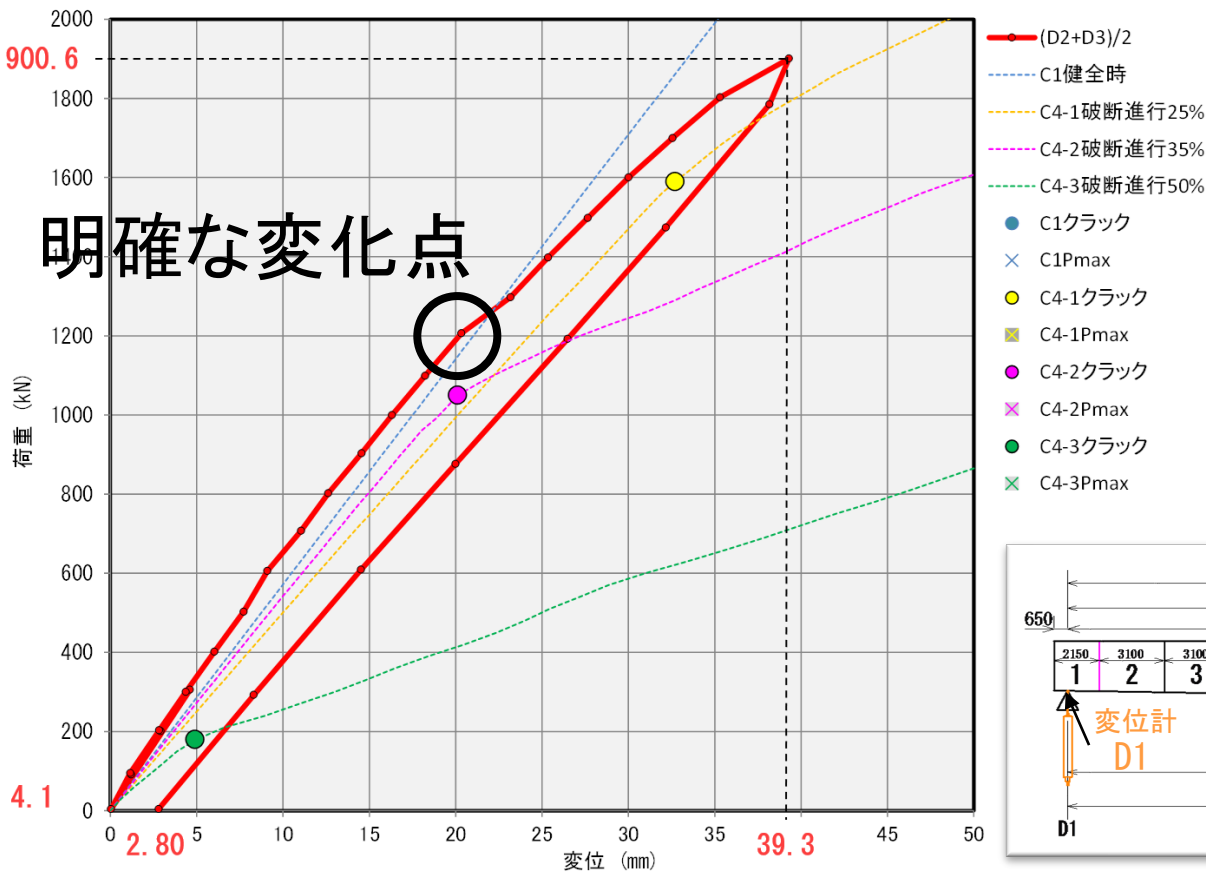
【載荷試験】実施状況



見学者 約70名

【載荷試験】実験結果

荷重－変位関係



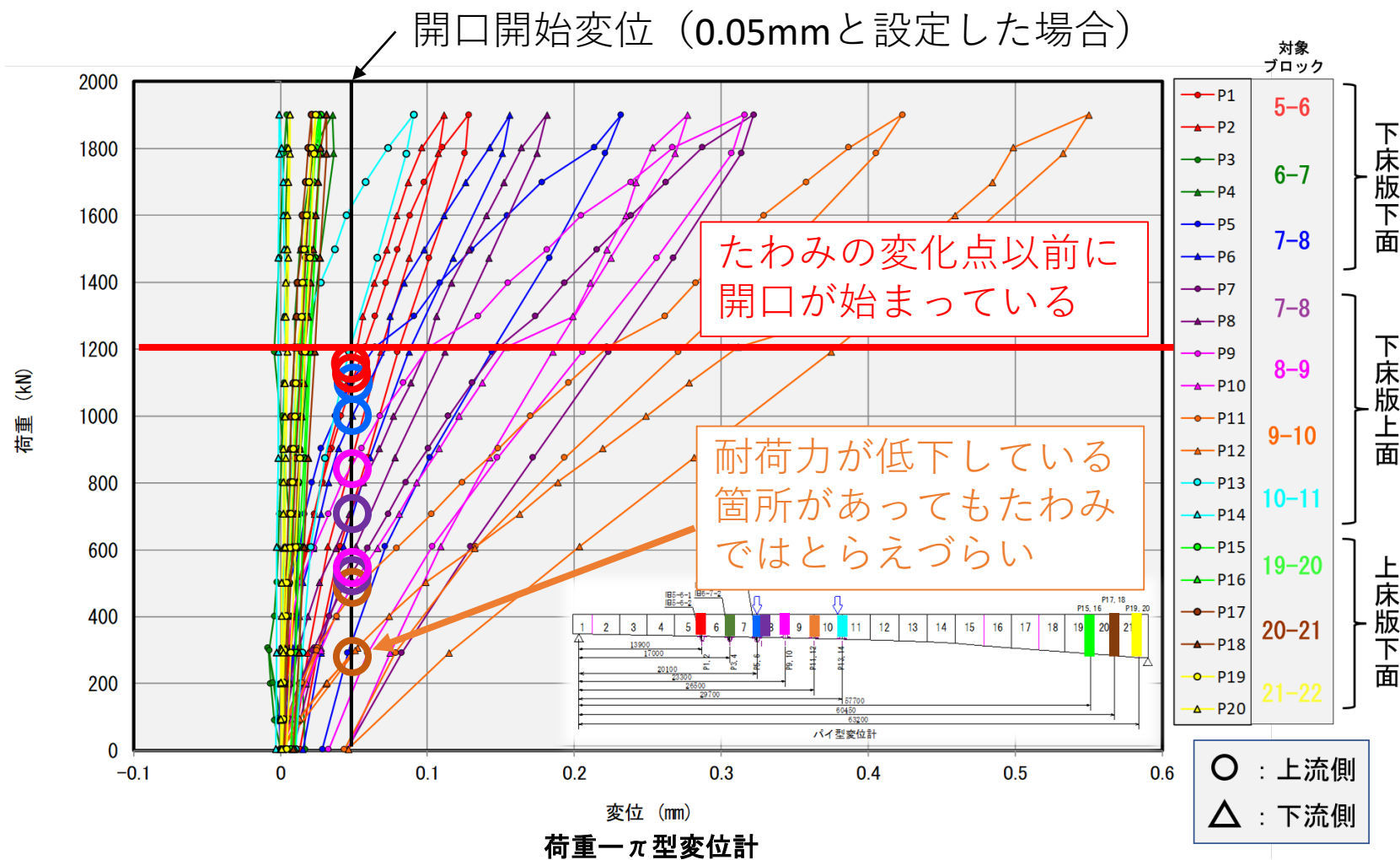
荷重－たわみ変位 (解析値との比較)

センサ設置位置

- ・C4-1～C4-2の範囲を予想 → C4-1をやや上回った
- ・連続繊維補強が解析で未考慮なので、概ね予想の範囲内

【載荷試験】 実験結果

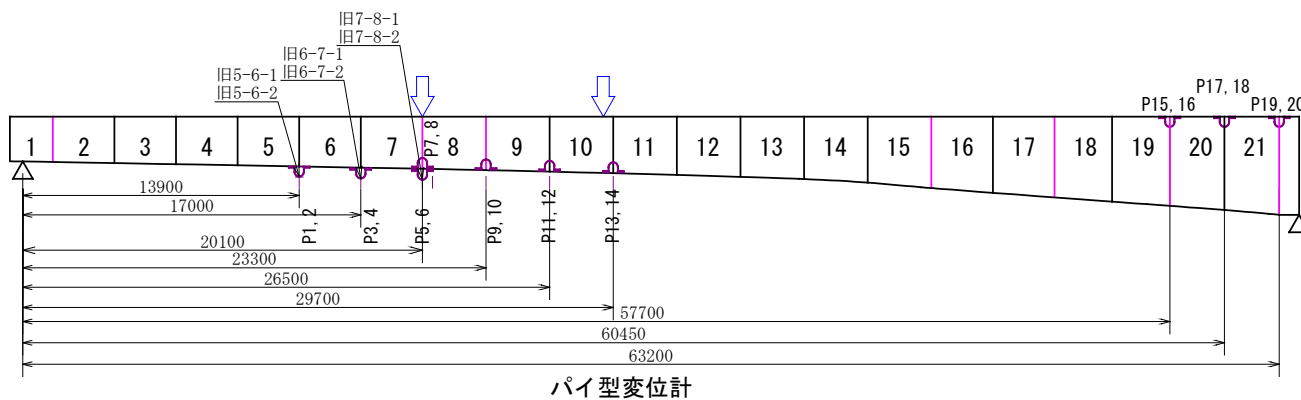
セグメント境界の開口量



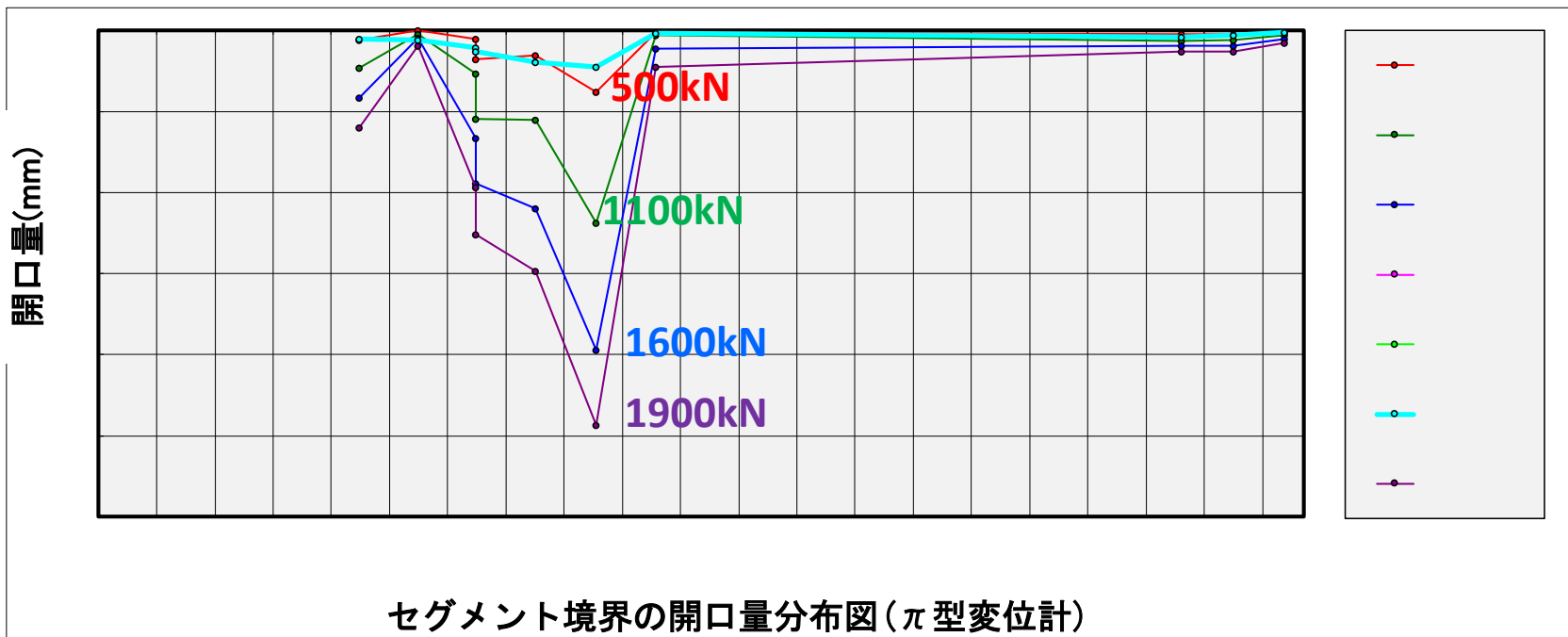
・場所によって開口量や開口し始める荷重が異なる

【載荷試験】 実験結果

セグメント境界の開口量

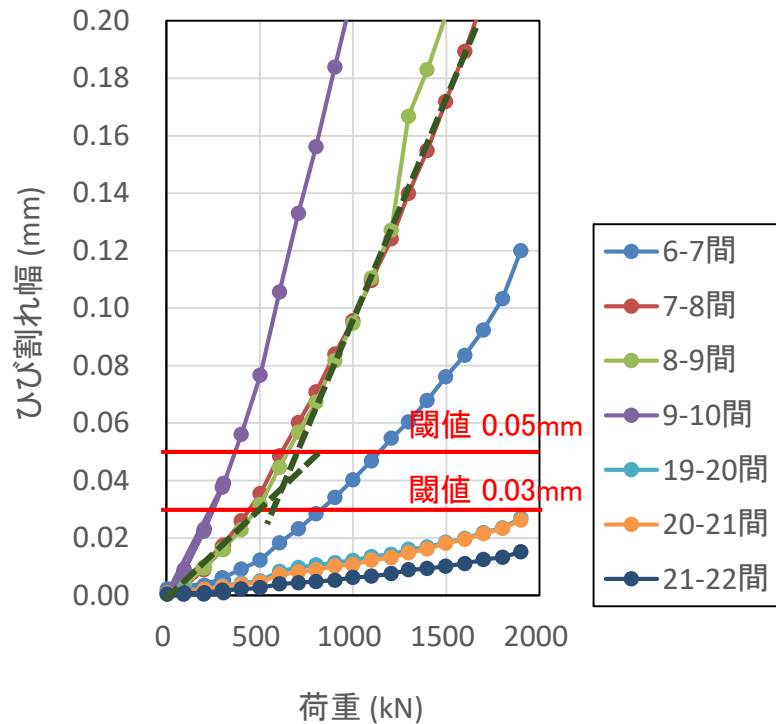


上流側と下流側
の変位の平均値
を用いている

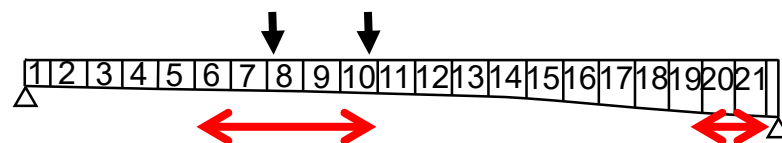


載荷試験時のひび割れ発生荷重

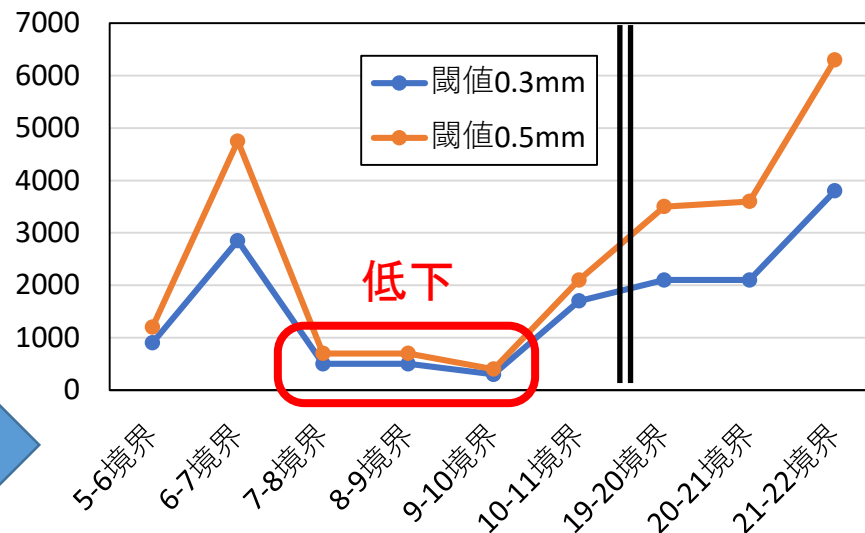
【パイゲージの計測結果】



セグメントの番号



ひび割れ発生荷重 (kN)



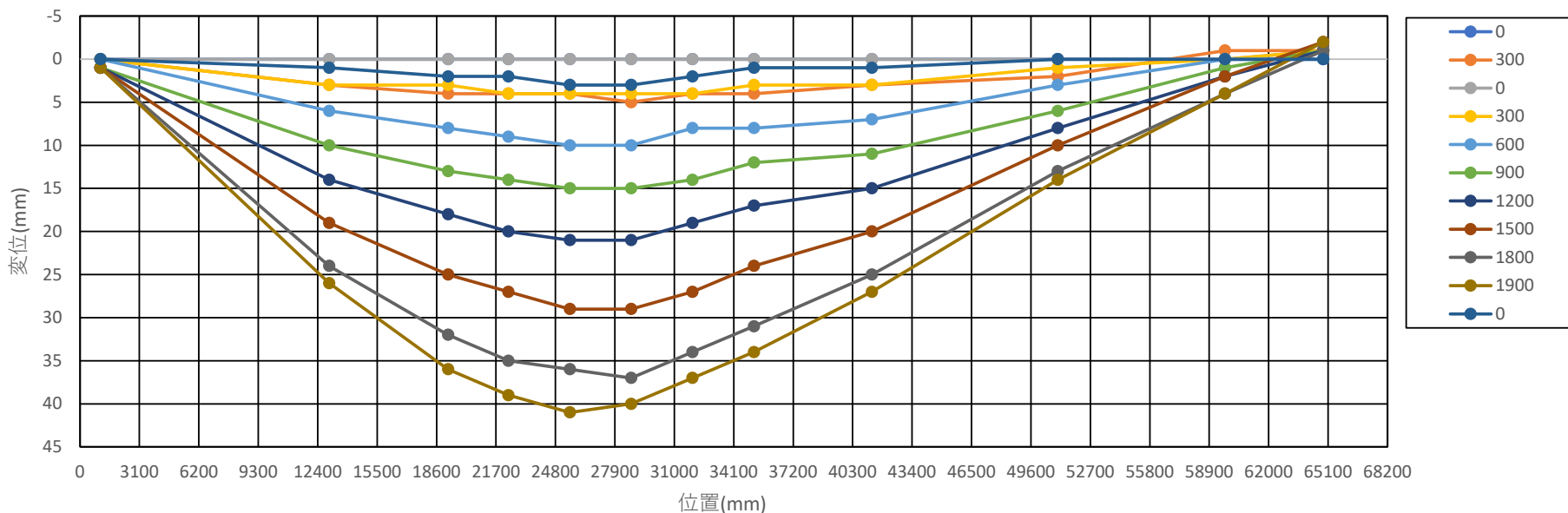
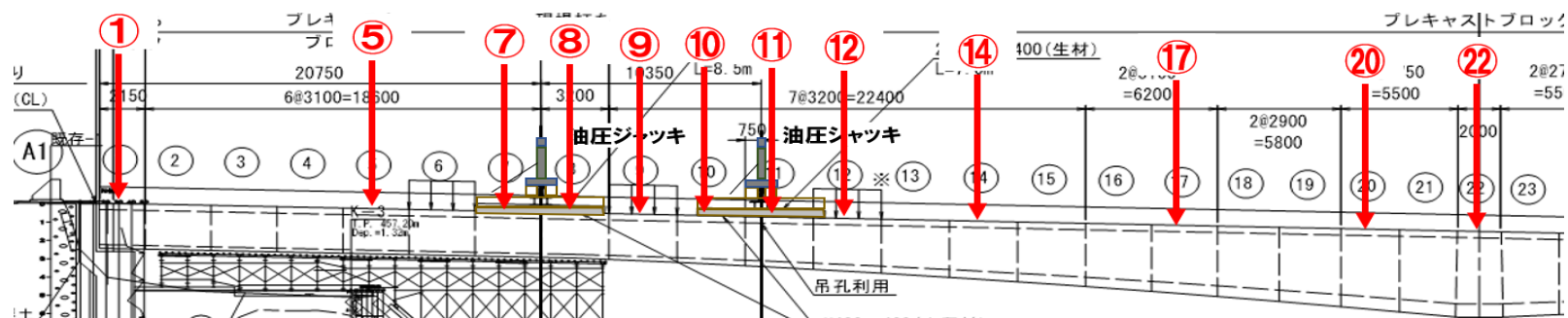
ひび割れ発生の閾値は、
0.03mmと0.05mmの2通りを設定

8～10ブロック境界でひび割れ
発生荷重が低下

20～22ブロックのひび割れ
発生荷重が比較的大きい

【載荷試験】 実験結果

電子レベルを用いた、たわみ計測



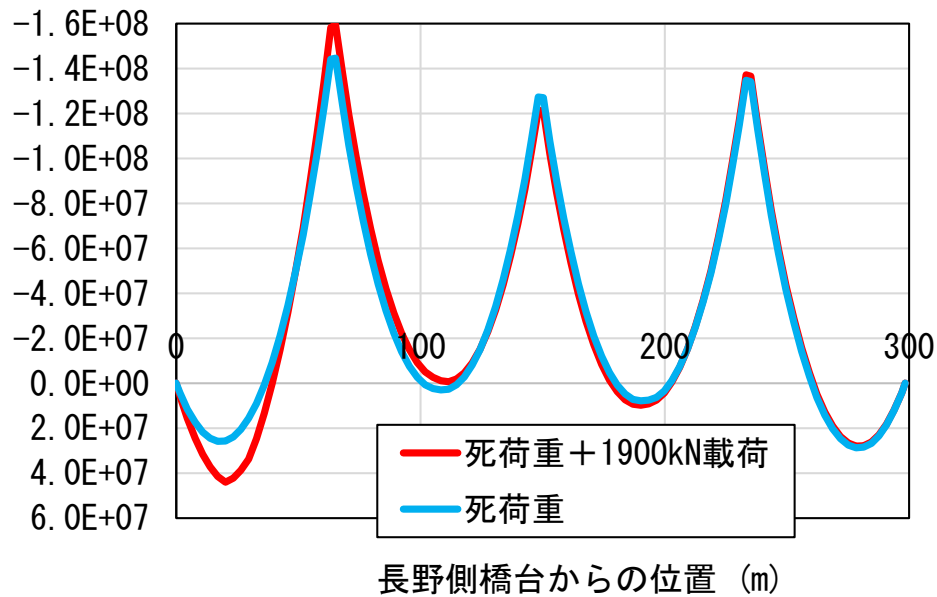
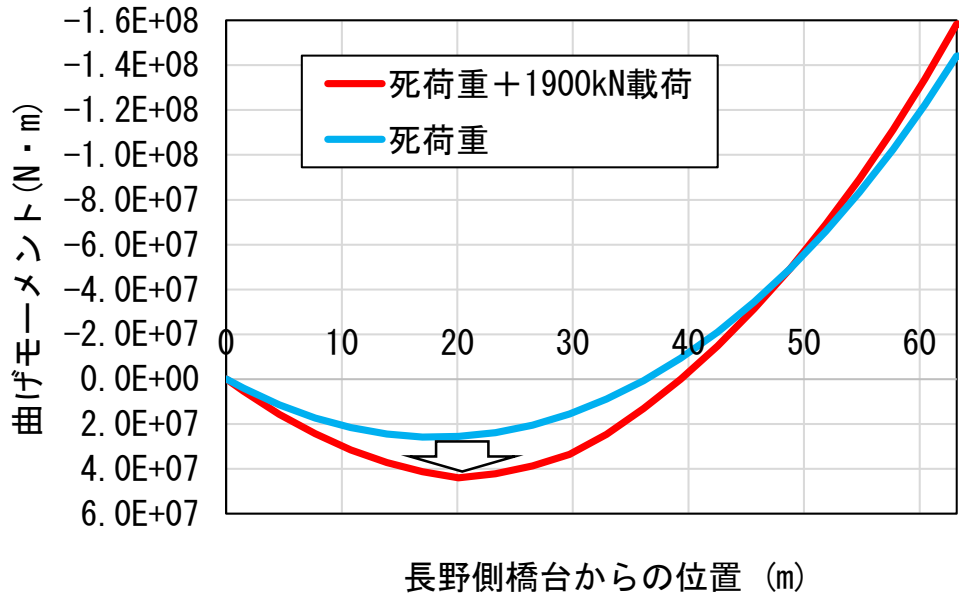
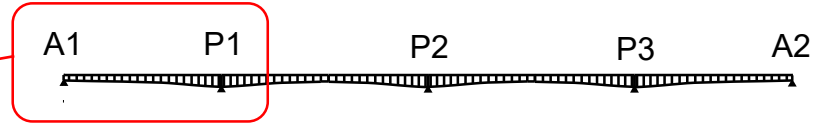
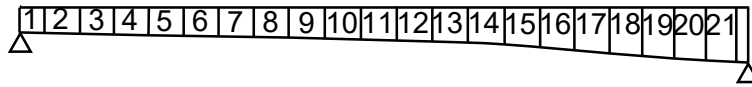
変位分布図(レベル測量)

・レベル測定によってたわみ分布を計測可能 → 橋下の不動点不要

フレーム解析

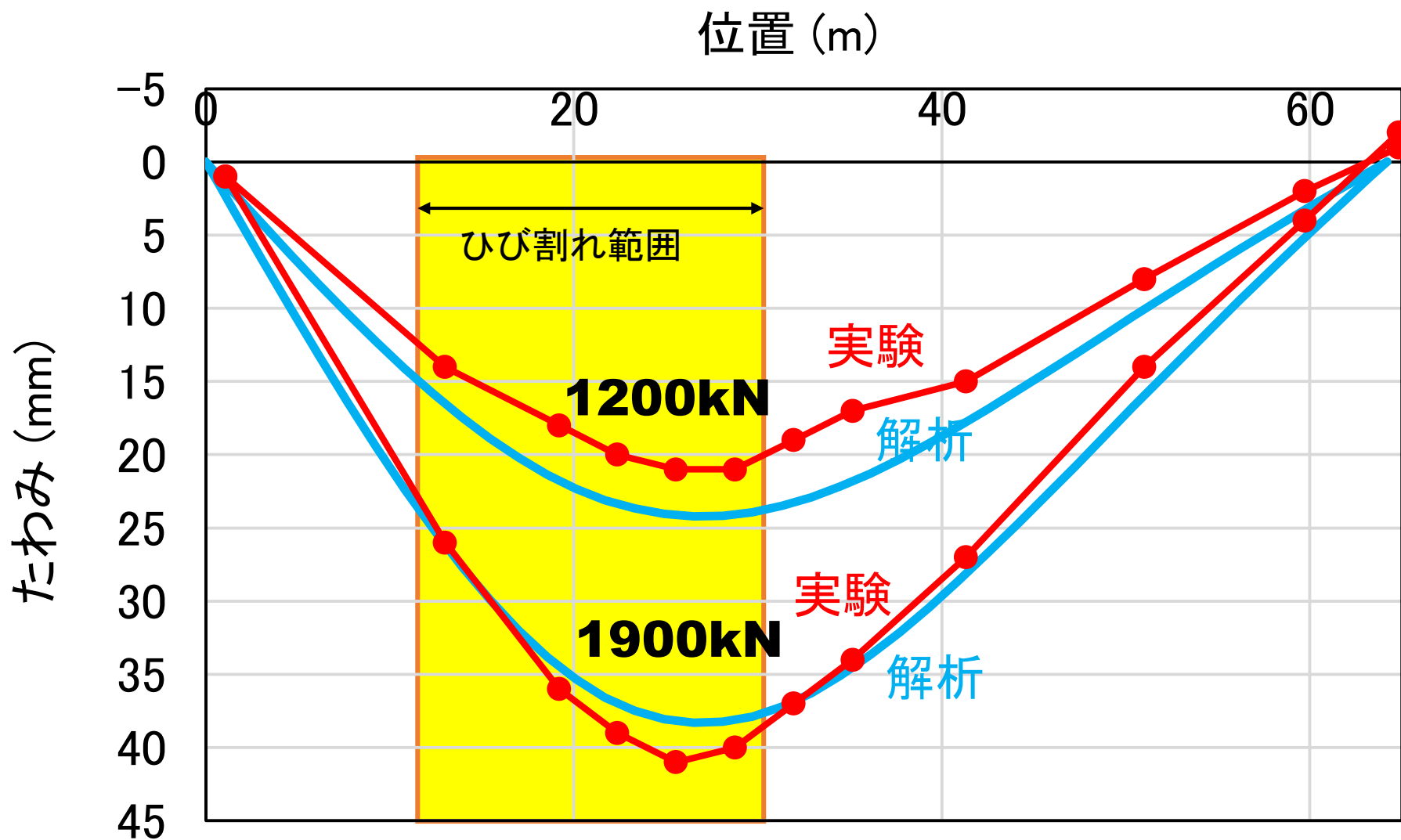
【第1径間】

【全径間】



- ・2次元線形解析 ... 載荷範囲はほぼ線形領域
- ・段階施工を考慮 ... 張り出し施工、側径間で連結
- ・クリープは未考慮 ... クリープによって支間中央の曲げモーメントは増加

たわみ分布の比較



・ひび割れの発生前後で実験と解析の大小関係が変化

ひび割れ発生時の曲げモーメント

フレーム解析の結果

実験

換算

位置	死荷重 (N・m)	1900kN載荷 (N・m)	載荷荷重 1kNあたり (N・m)	ひび割れ発生荷重(kN)	曲げモーメント(ひび割れ発生時、N・m)
5-6境界	2.50×10^7	1.27×10^7	6.68×10^3	900	3.10×10^7
6-7境界	2.58×10^7	1.56×10^7	8.21×10^3	(予2850)	4.92×10^7
7-8境界	2.56×10^7	1.84×10^7	9.68×10^3	500	3.04×10^7
8-9境界	2.39×10^7	1.83×10^7	9.63×10^3	500	2.87×10^7
9-10境界	2.05×10^7	1.82×10^7	9.58×10^3	800	2.34×10^7
10-11境界	1.56×10^7	1.81×10^7	9.53×10^3	1700	3.18×10^7
19-20境界	-10.25×10^7	-0.88×10^7	-4.63×10^3	(予2100)	-11.22×10^7
20-21境界	-12.24×10^7	-1.15×10^7	-6.05×10^3	(予2100)	-13.51×10^7
21-22境界	-14.41×10^7	-1.42×10^7	-7.47×10^3	(予3800)	-17.25×10^7

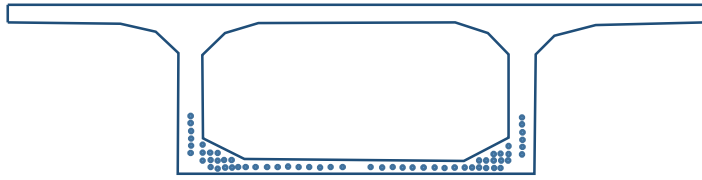
これまで着目していた区間

最も劣化している区間

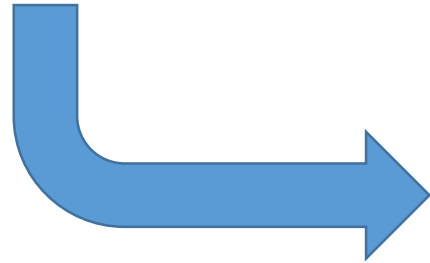
- ・セグメントによってひび割れ発生モーメントが大きく異なる
→ 腐食量が大きく異なる
- ・セグメント9-10境界が最も劣化が進行

ファイバー解析

【断面図】



【ファイバー分割】

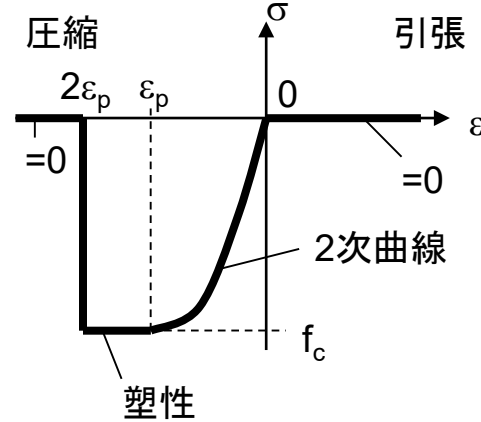


支配方程式: 力の釣合い式

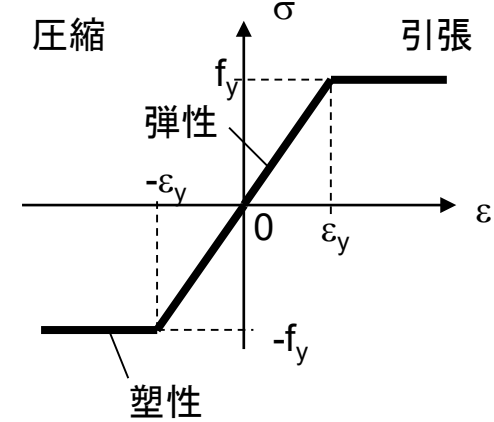
ひずみ分布の解法: Newton-Raphson法による収束計算

【構成則】

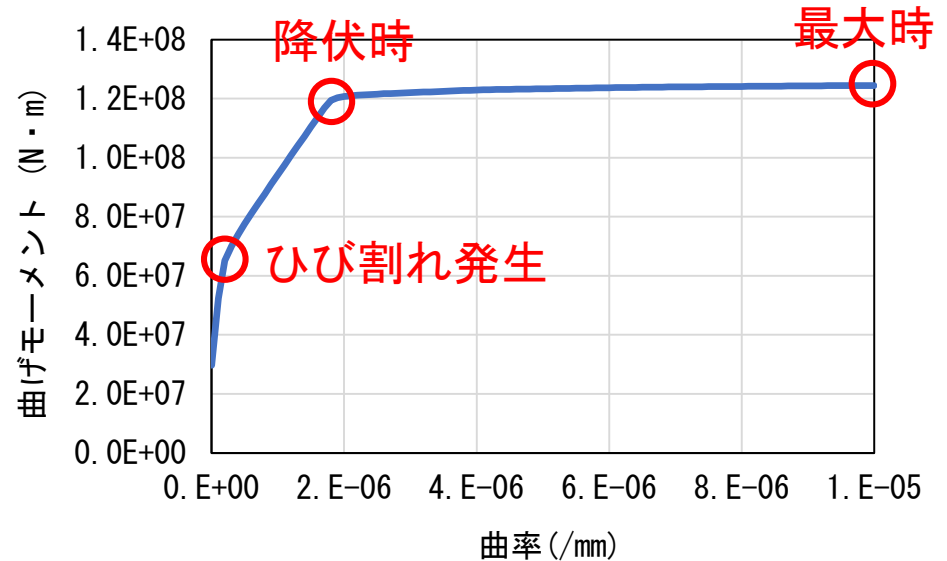
コンクリート



PC鋼材



【解析結果】 第12ブロック

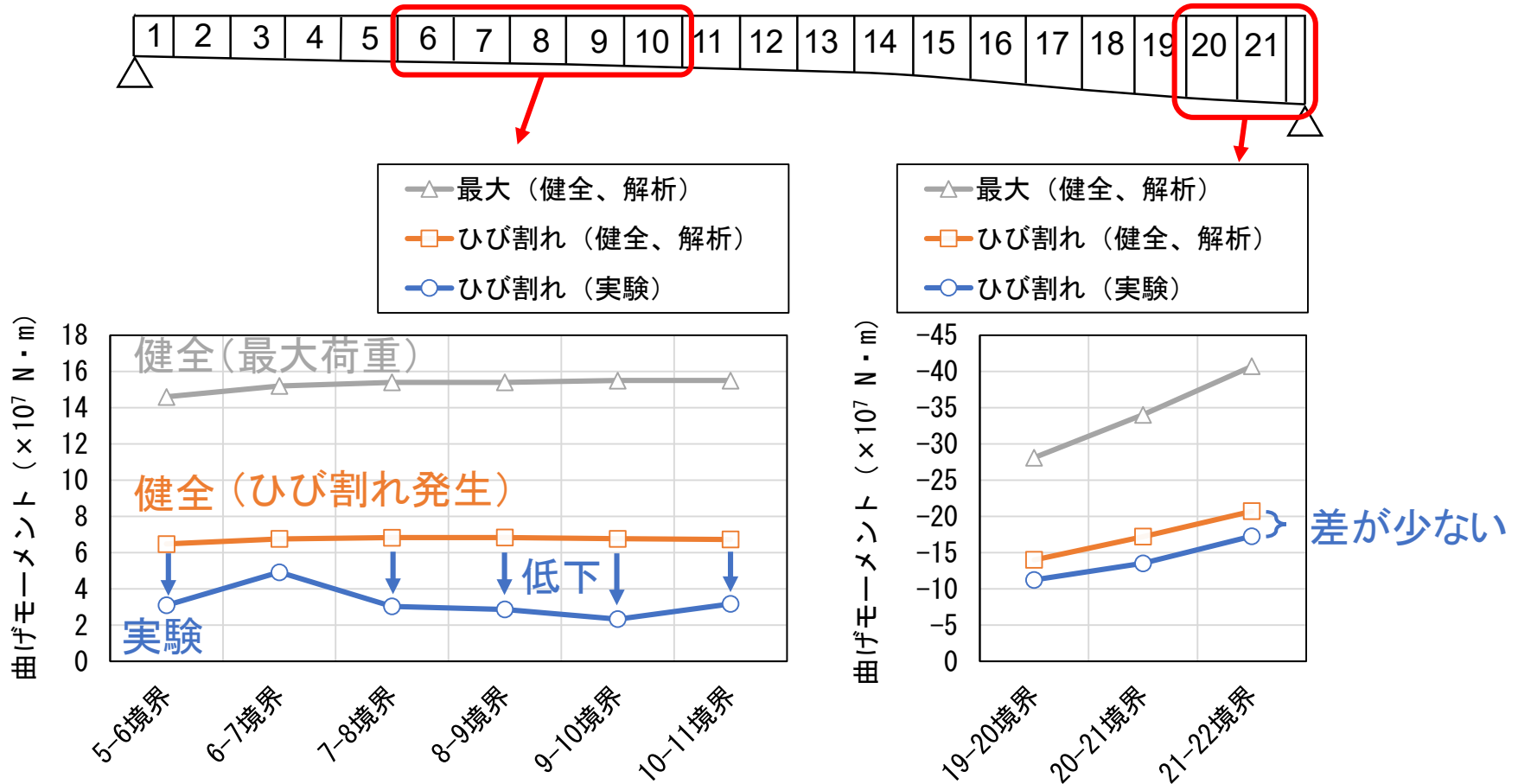


ファイバー解析

位置	実験	実験+フ レーム解析	ファイバー解析 (健全時)		プレストレスの低下率 (推定値)
	ひび割れ発生 荷重 (kN) (閾値0.03mm)	ひび割れ発生時の曲げ モーメント (N・m)	ひび割れ発生モーメン ト(N・m)	最大曲げ モーメント (N・m)	
5-6境界	900	3.10×10^7	6.48×10^7	14.6×10^7	48%
6-7境界	>1900 (予2850)	4.92×10^7	6.76×10^7	15.2×10^7	73%
7-8境界	500 (外900)	3.04×10^7	6.83×10^7	15.4×10^7	45%
8-9境界	500	2.87×10^7	6.84×10^7	15.4×10^7	42%
9-10境界	300	2.34×10^7	6.77×10^7	15.5×10^7	35%
10-11境界	1700	3.18×10^7	6.73×10^7	15.5×10^7	47%
19-20境界	>1900 (予2100)	-11.22×10^7	-14.00×10^7	-28.1×10^7	80%
20-21境界	>1900 (予2100)	-13.51×10^7	-17.20×10^7	-34.0×10^7	79%
21-22境界	>1900 (予3800)	-17.25×10^7	-20.71×10^7	-40.7×10^7	83%

- ・ 実験結果 (+フレーム解析) とファイバー解析との比較から、プレストレス力の低下率を評価 → おおまかな腐食量がわかる

ファイバー解析



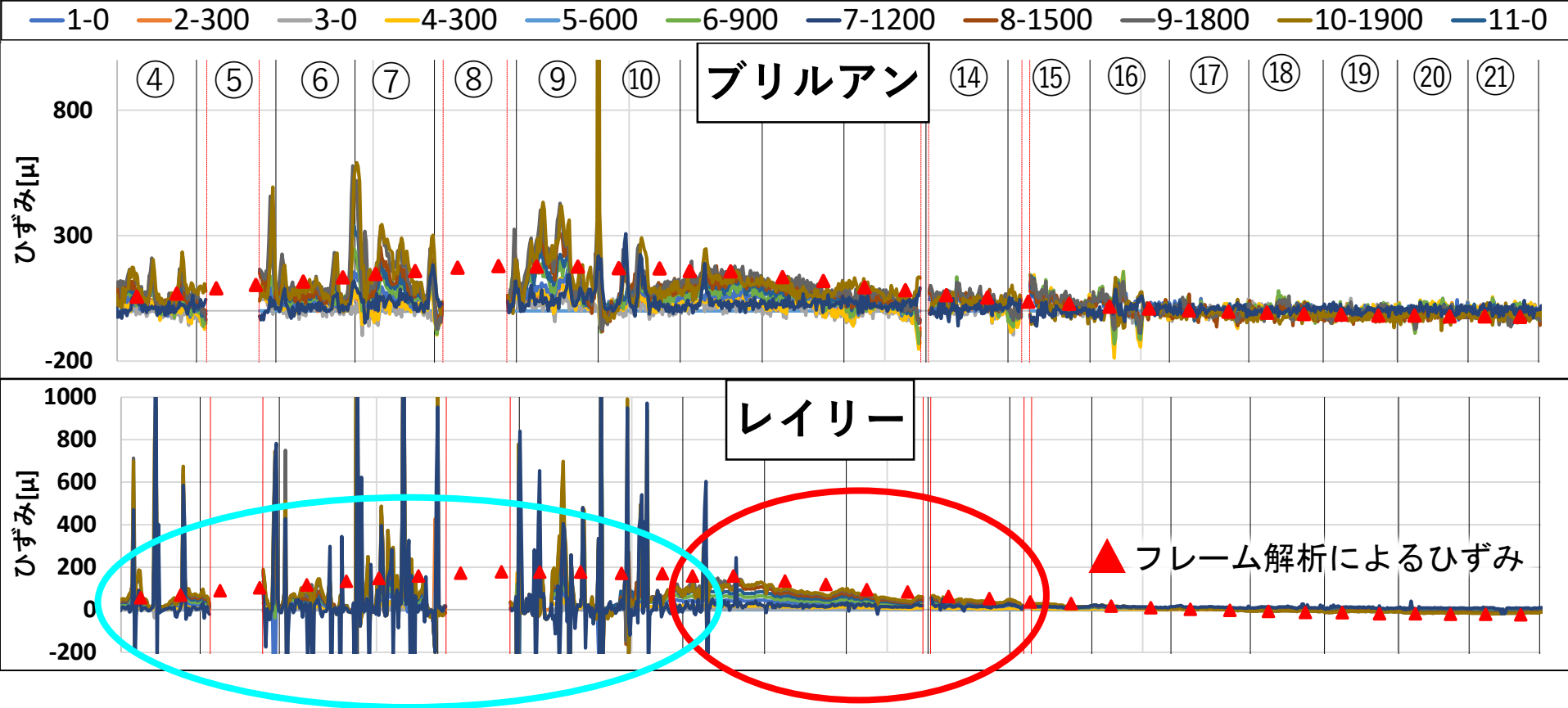
支間中央: 腐食によるプレストレス力の低下が顕著

健全時の35%~48%に低下 → 半数以上の鋼材が破断・腐食大か？

P1付近: 腐食およびプレストレス力の低下は比較的少ない

健全時の79%~83%に低下 → 2割程度の鋼材が破断・腐食大か？

フレーム解析と光ファイバ計測の比較



ひび割れ領域は局所ひずみが発生
ひび割れによる弾性ひずみの解放

弾性領域はフレーム解析とひずみが一致
ひび割れを跨いでコンクリートひずみ分布を計測できる

ひび割れ発生箇所の推測（寺尾発案）

表2 ひび割れ発生箇所の推測手順

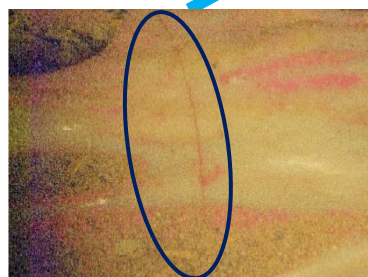
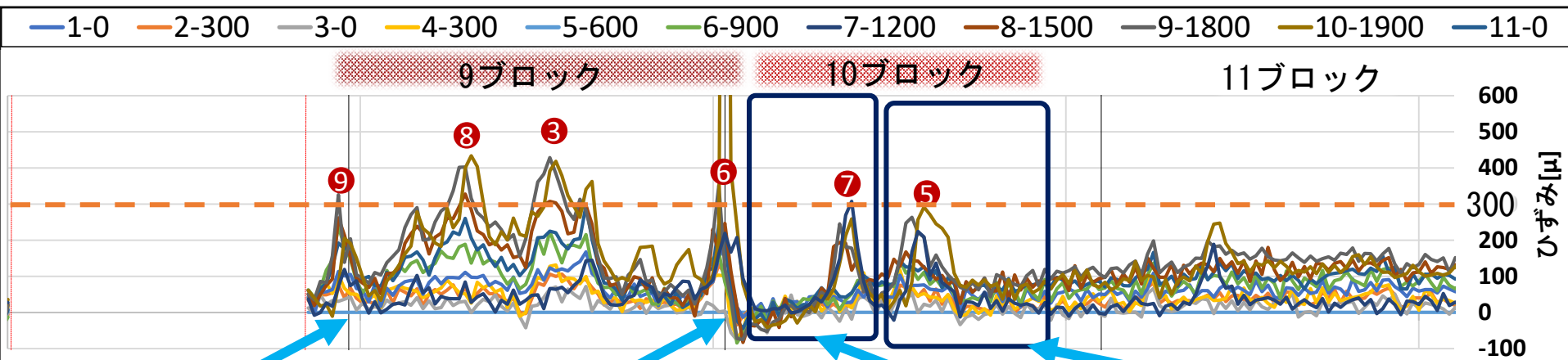
手順	閲覧データ	データの精査項目
①	ブリルアン	250 μ 以上のひずみがある点を探す
②	ブリルアン	①で探した点について点数をつける
③	レイリー	①で探した点について点数をつける
④	ブリルアン	②+③が同点の場合、ひずみが大きい順に目視確認の優先順位高いとする

表3 ひび割れ発生箇所の推測に使用した得点表

閲覧データ	項目	得点
ブリルアン・レイリー	ひずみが局所的である	+3p
ブリルアン	荷重を増加させたときにひずみが減少しない	+3p
	除荷時にひずみが大きくなる	-3p
	エラーの疑いあり	-2p
レイリー	荷重を増加させたときにひずみが減少しない	+1p
	除荷時にひずみが小さくなる	+1p

ブリルアンの結果がひび割れ発生評価に大きく影響するよう点数の比重を工夫

ひび割れ発生箇所の確認結果



マイクروسコープでの調査範囲

番号 ひび割れ発生箇所と確率順位

正確に距離計測できていない箇所

光ファイバから推測したひび割れ発生箇所と目視観察の結果が一致

測定エラー箇所を丁寧に取り除くことで、ひび割れ位置をある程度特定できる

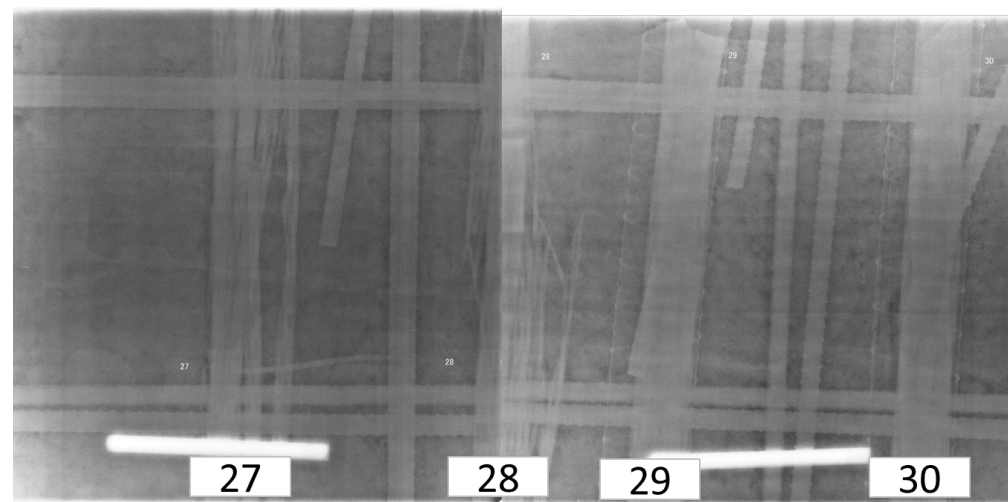
高出力X線による鋼材腐食・破断の検出

可搬型 X 線照射装置



(妙高大橋桁内, 2015年)

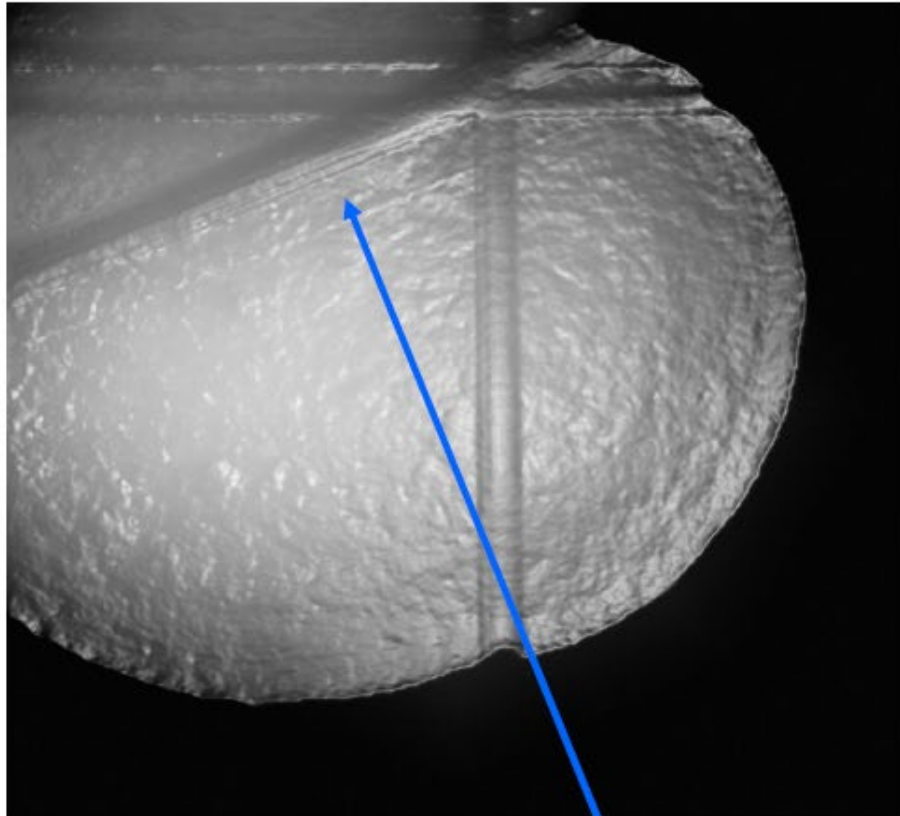
妙高大橋第8ブロックでのX線撮影画像



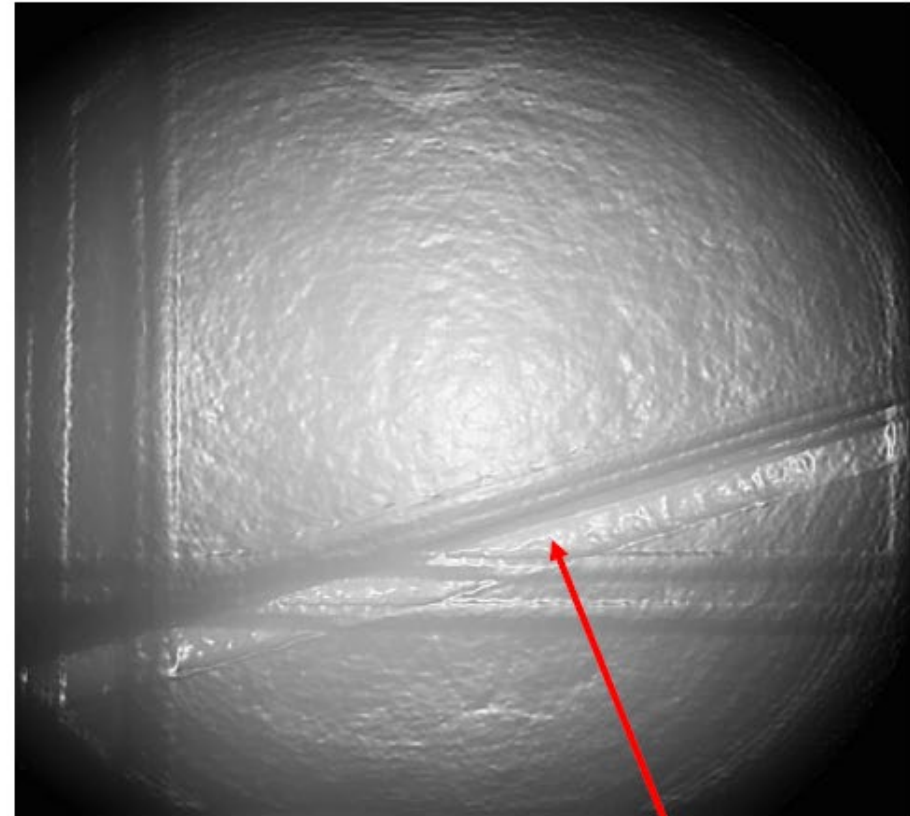
- 近年、X線照射装置の小型化が実現。現場へ運搬可能に
- フィルムのデジタル化、高精細化が進展
- CT技術の発達により、3D画像が取得可能
- 4MeV未満の出力であれば橋梁検査に使用可能 (放射線障害防止法)

3.95MeV高出力X線撮影による鋼材破断の検出

PCT桁ウェブの撮影・画像解析事例（厚さ200mm）



Edge強調画像
撮像① グラウト有り
(PCシース外筒確認可能)

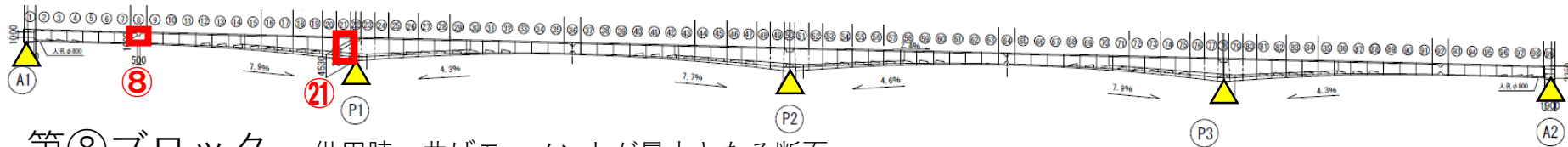


Edge強調画像
撮像③ グラウト無し
(PCシース外筒確認可能)

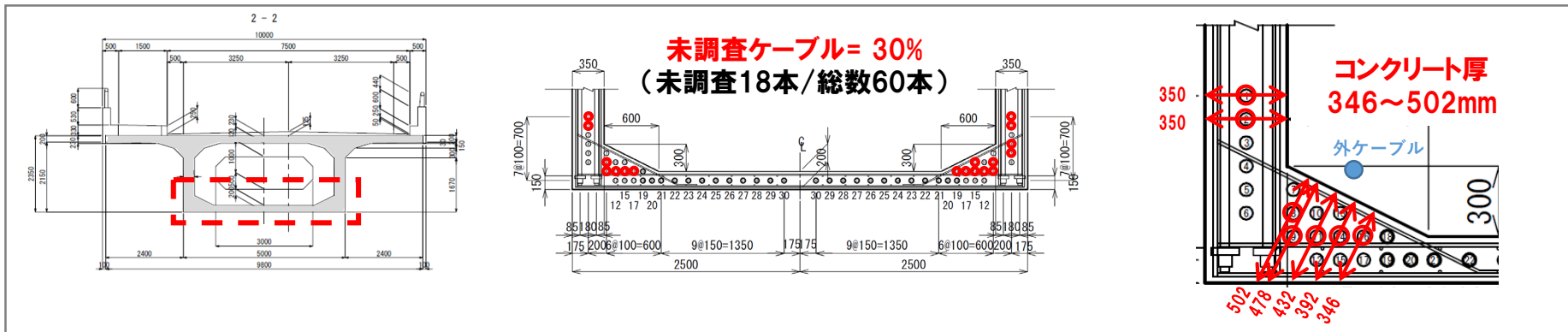
厚さが大きくなければ、鋼材、PCシースの状態を詳細に把握可能

【高出力X線装置の開発】 妙高大橋旧橋での計測

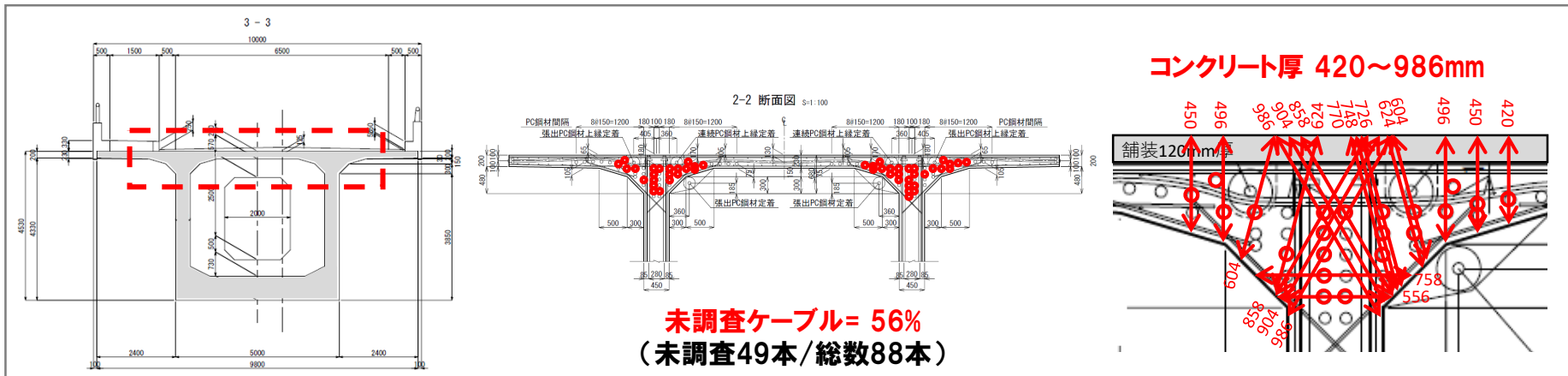
撮影箇所 正負の曲げモーメントが最大となる2断面に着目 (令和3年度計画・準備, 令和4年度実施)



第⑧ブロック 供用時、曲げモーメントが最大となる断面



第⑳ブロック 施工時、解体時、曲げモーメントが最大となる断面



- ・従来の検査法では検査不可能な場所を高出力X線で検査する。
- ・500~1000mm厚のコンクリートを透過する必要がある。

【高出力X線装置の開発】規制庁への申請作業

② 放射線解析（妙高大橋でのX線計測における安全管理）

妙高大橋での検査対象箇所については、下床版(⑧ブロック)、上床版(⑫ブロック)共に隅角部へのX線照射が必要。

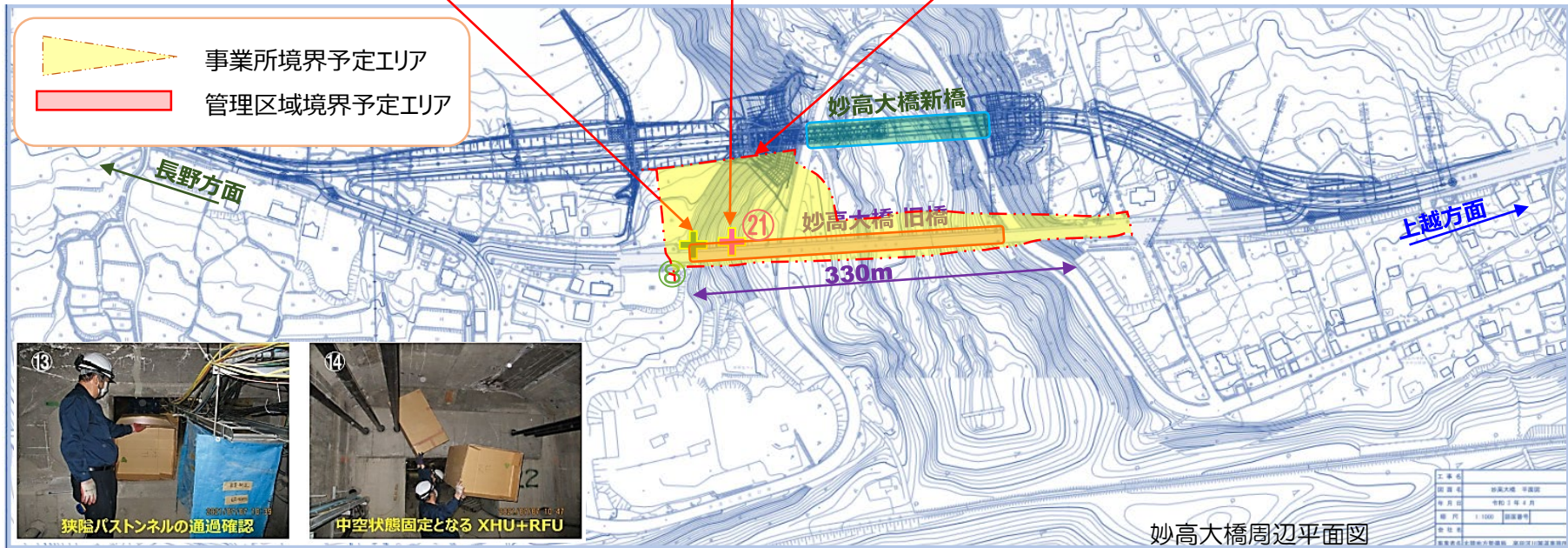
X線検査に使用予定の東大3.95MeV加速器型X線源は水平～下向き照射のみの許可条件→新たに上向き照射の許可申請手続き。

箱桁トンネル内にX線源を配置した条件で、照射方向に最も薄いコンクリートスラブについての透過X線線量率の評価を実施。

上床版側では垂直上空側の透過X線によるスカイシャインの線量率の評価を行った。その後、橋梁周辺の実環境線量評価を進めた

橋梁まわりに限定する管理区域以外では新妙高大橋側が高線量率となる推計。

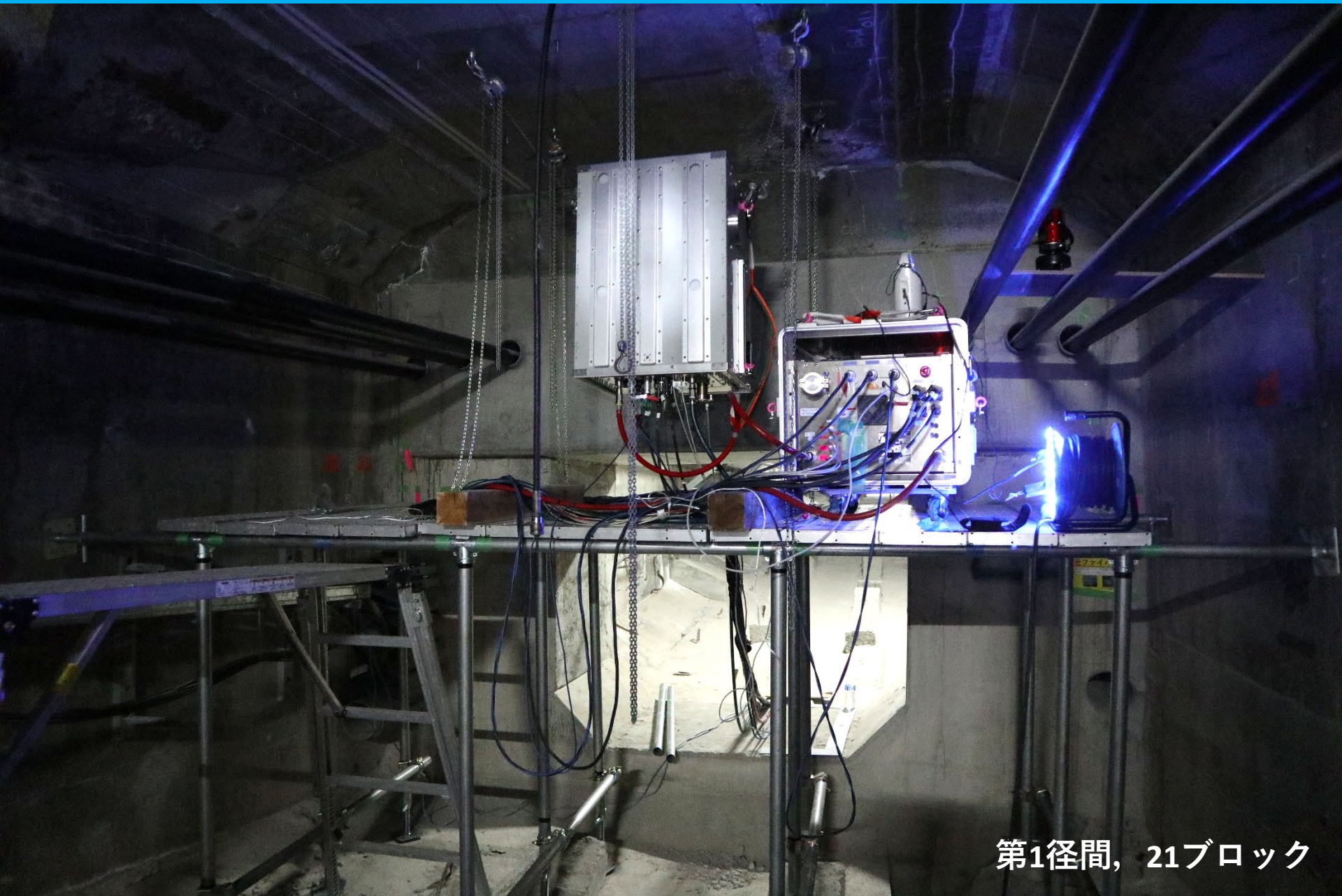
この直近を事業所境界位置としての仮定し、新橋側境界位置までの一般人立入の可能性を検討、現状は山林・崖地であり、周辺に立入規制線を設けて対応する方針。



X線検査時の対応

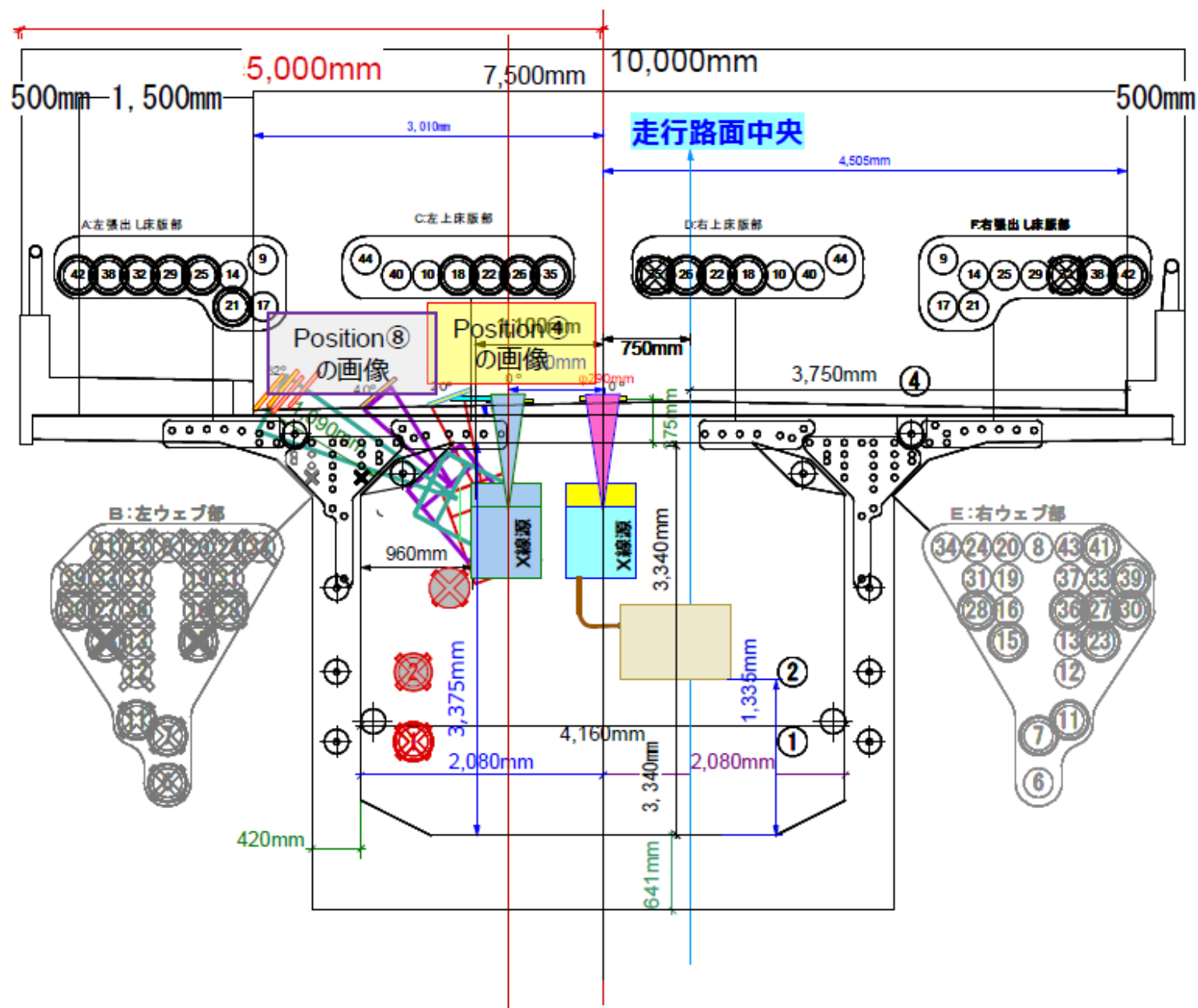
- ・ 事業所境界予定エリア : 立入禁止区域設定・管理、評価点の環境放射線線量率計測・記録
- ・ 管理区域境界予定エリア : 有資格者業務、X線照射時立入禁止、評価点線量率計測記録、
管理区域出入者の入出記録、個人被ばく線量記録、X線照射時間記録

X線源の設置状況 2022.7.10



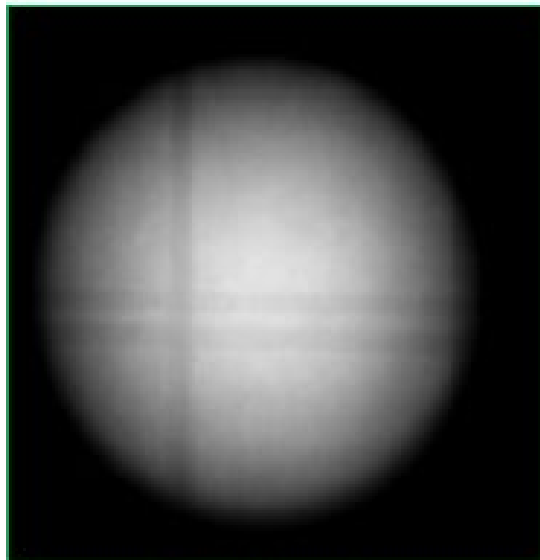
第1径間, 21ブロック

第21ブロックの照射位置

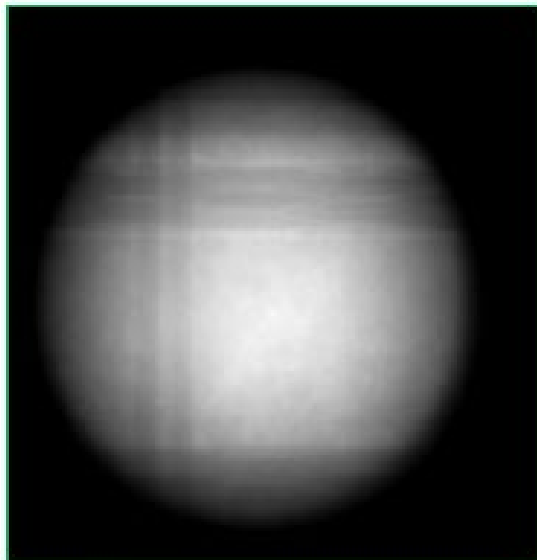


第21ブロックの撮影画像

元画像



Position 3

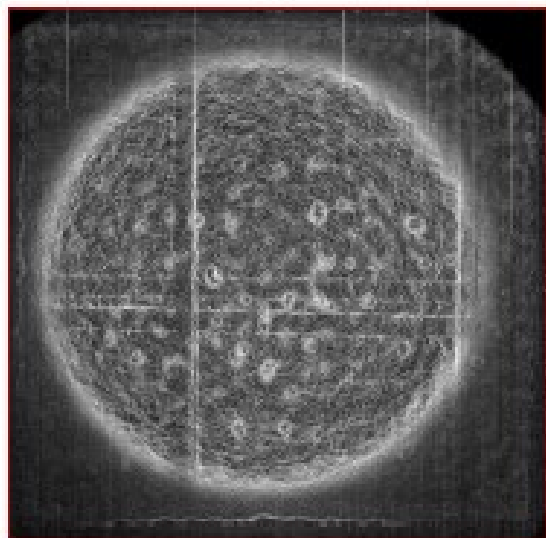


Position 4

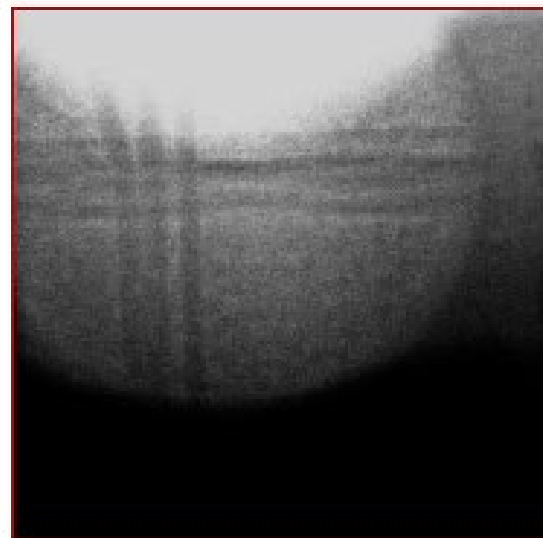
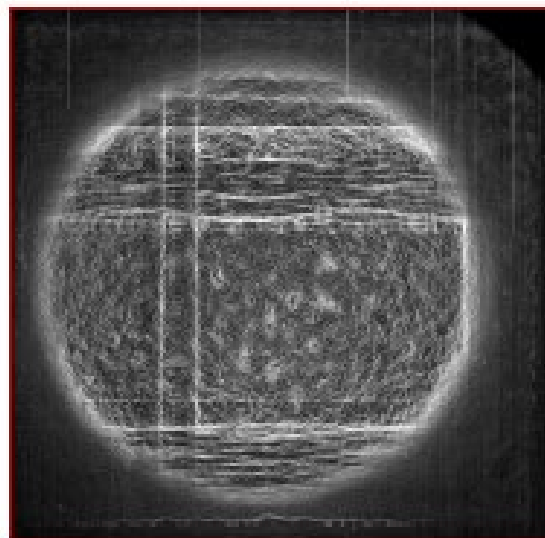


Position 5

画像処理後



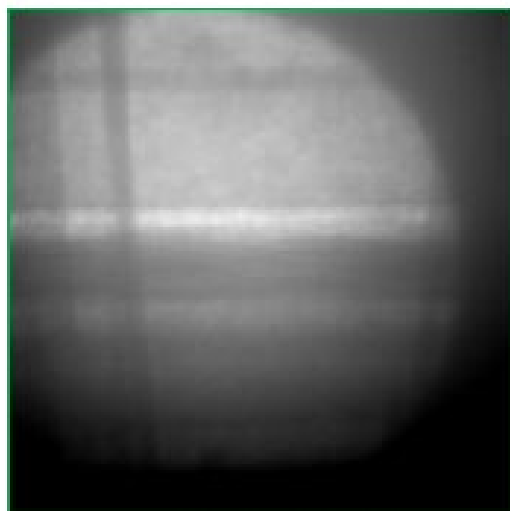
0° (420mm厚)



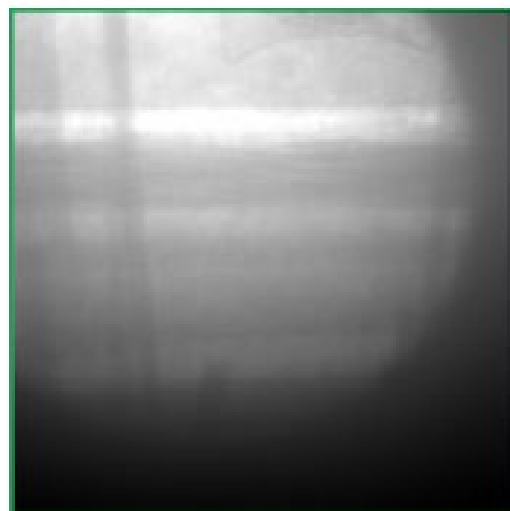
20° (500mm厚)

第21ブロックの撮影画像

元画像



Position 7

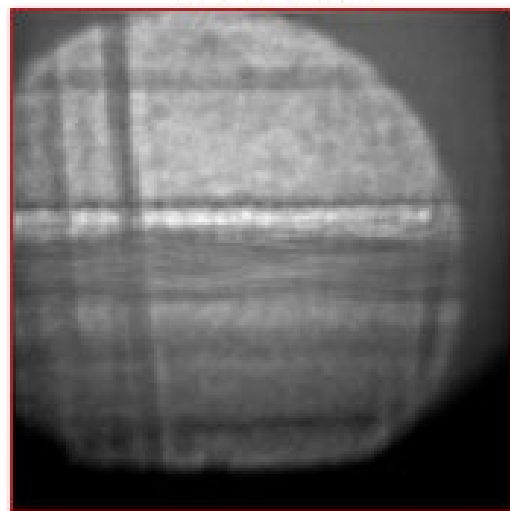


Position 8

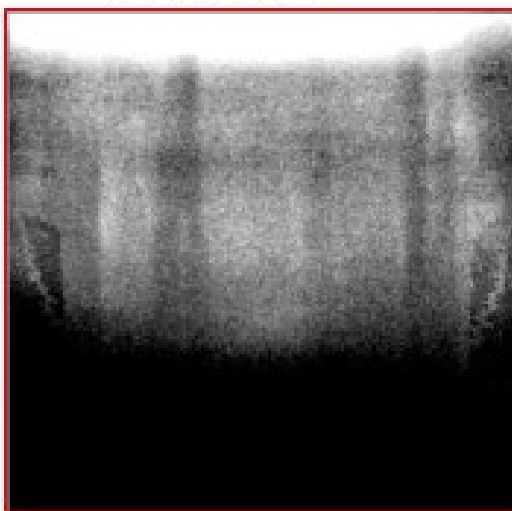
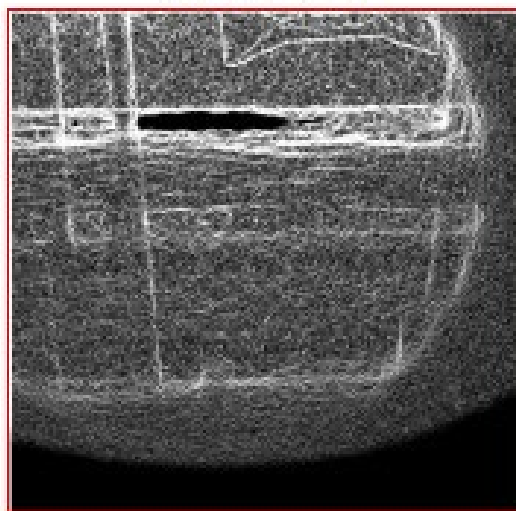


Position 9

画像処理後

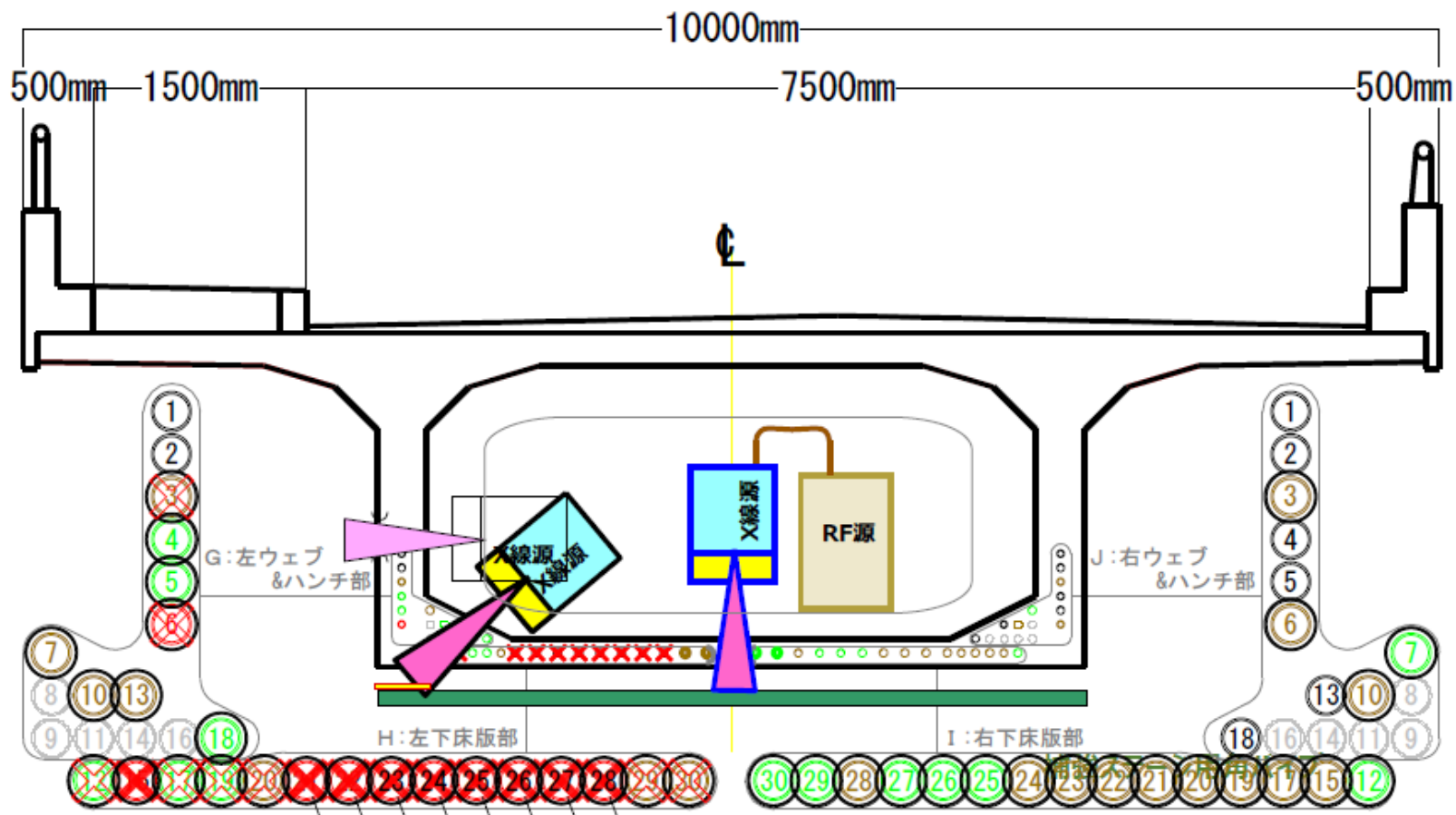


40° (600mm厚)



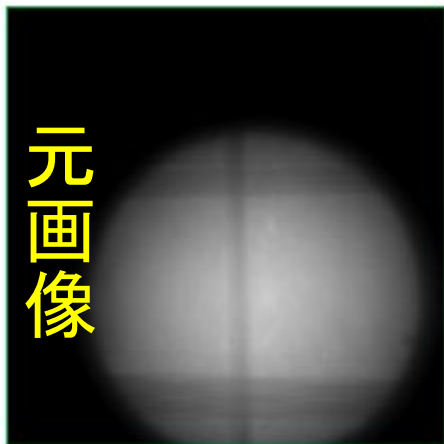
60° (1100mm厚)

第8ブロックの照射位置



第8ブロックの撮影画像

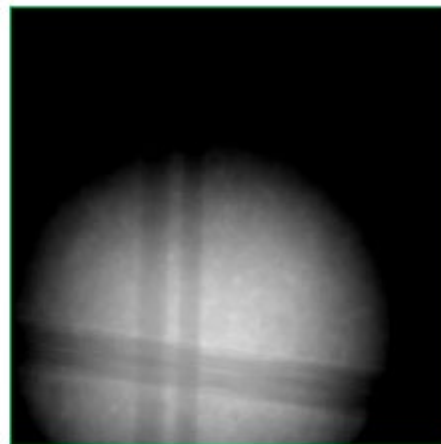
元画像



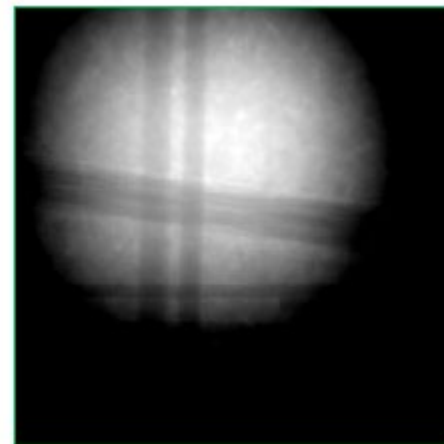
Position 17



Position 18

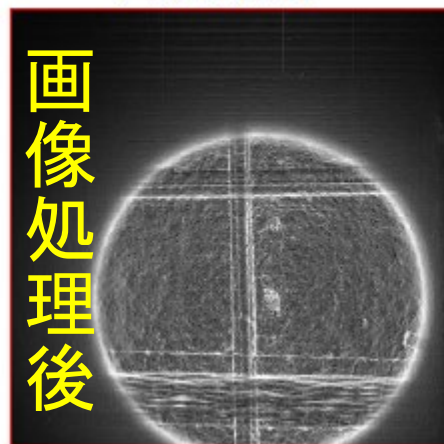


Position 19

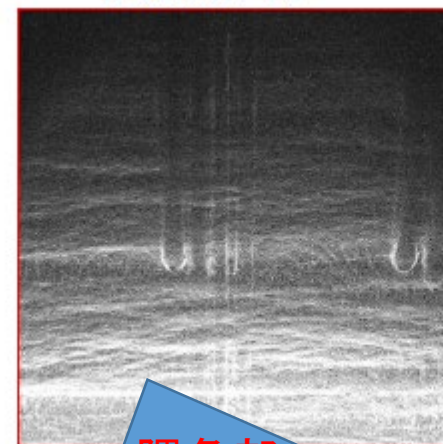


Position 20

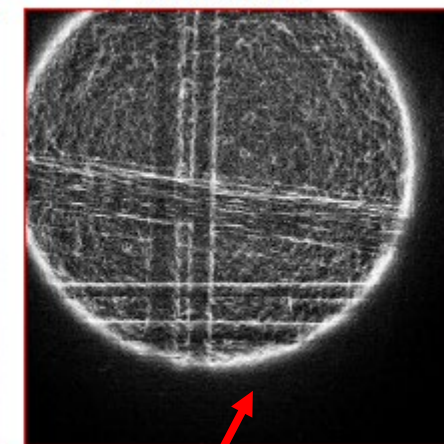
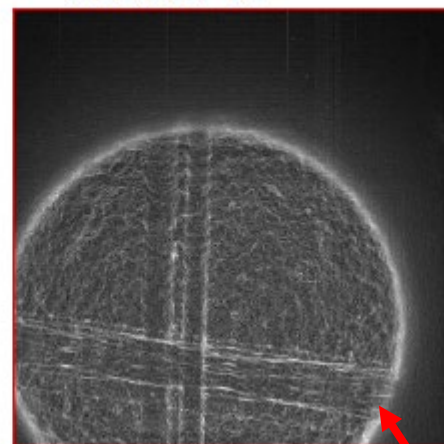
画像処理後



下床版中央



隅角部

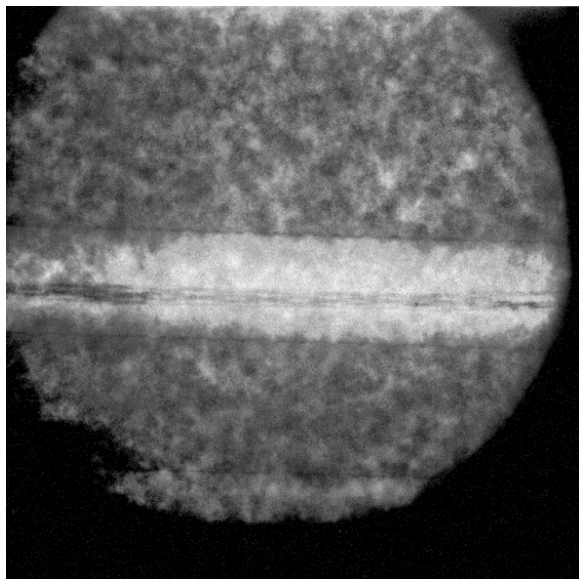


ウェブ

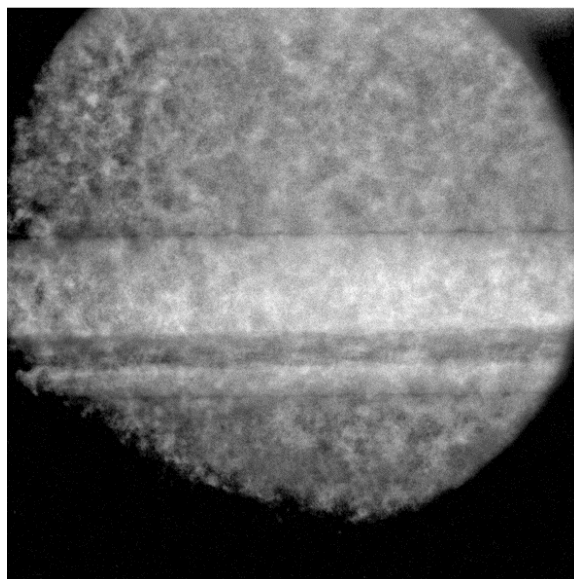


高出力X線 室内試験

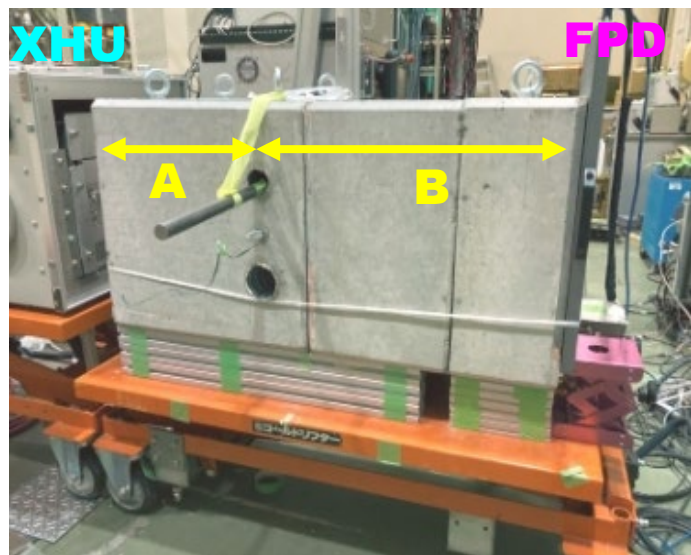
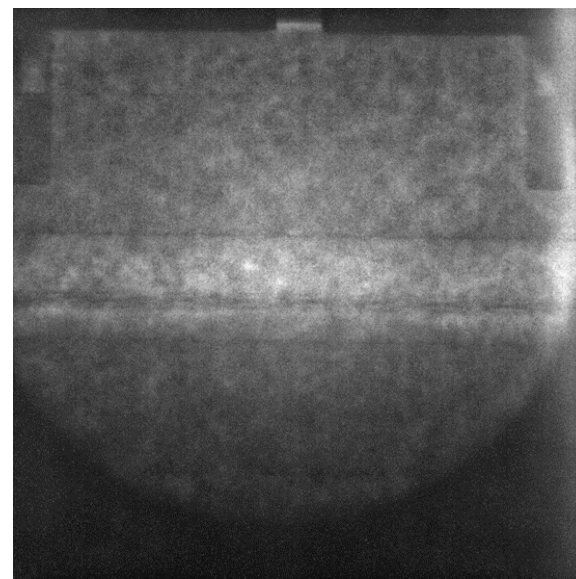
体系1



体系2



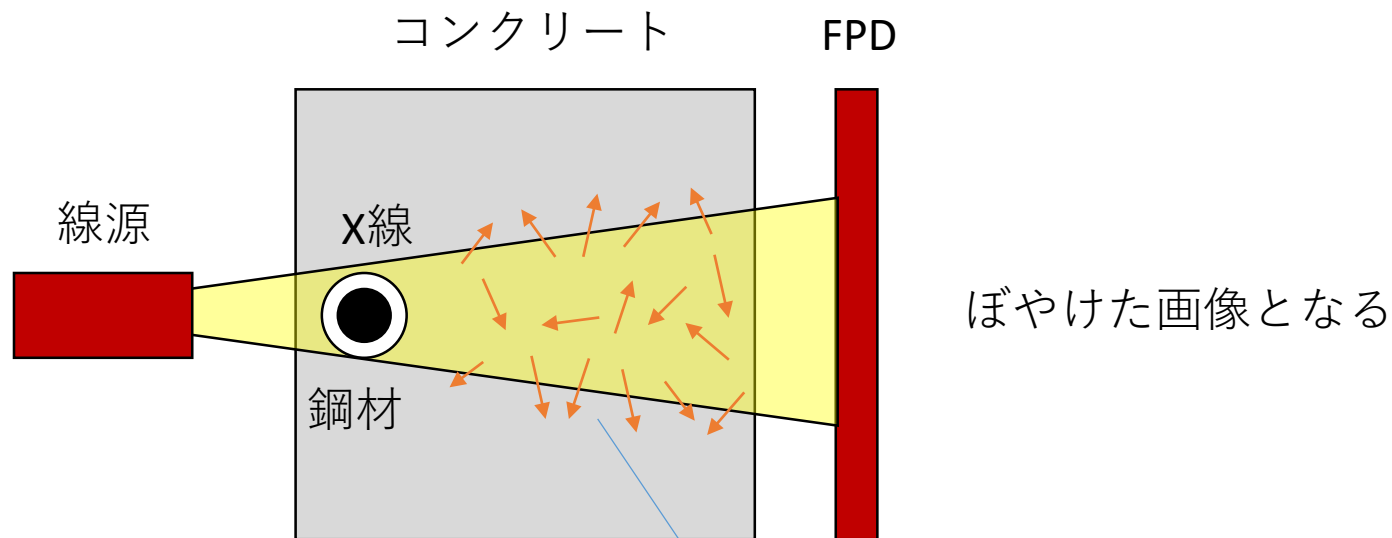
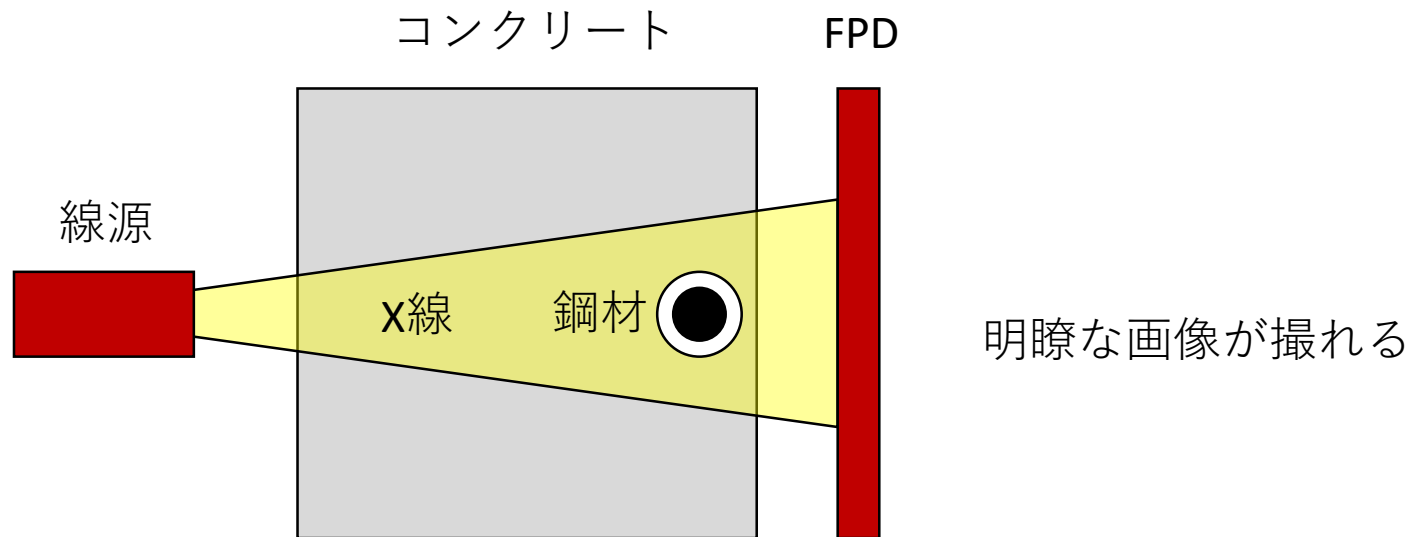
体系3



	A	B	計
体系1	40cm	10cm	50cm
体系2	10cm	40cm	50cm
体系3	40cm	30cm	70cm

全体の厚さが大きいほど、後側が厚いほど
シース・鋼材がぼやける

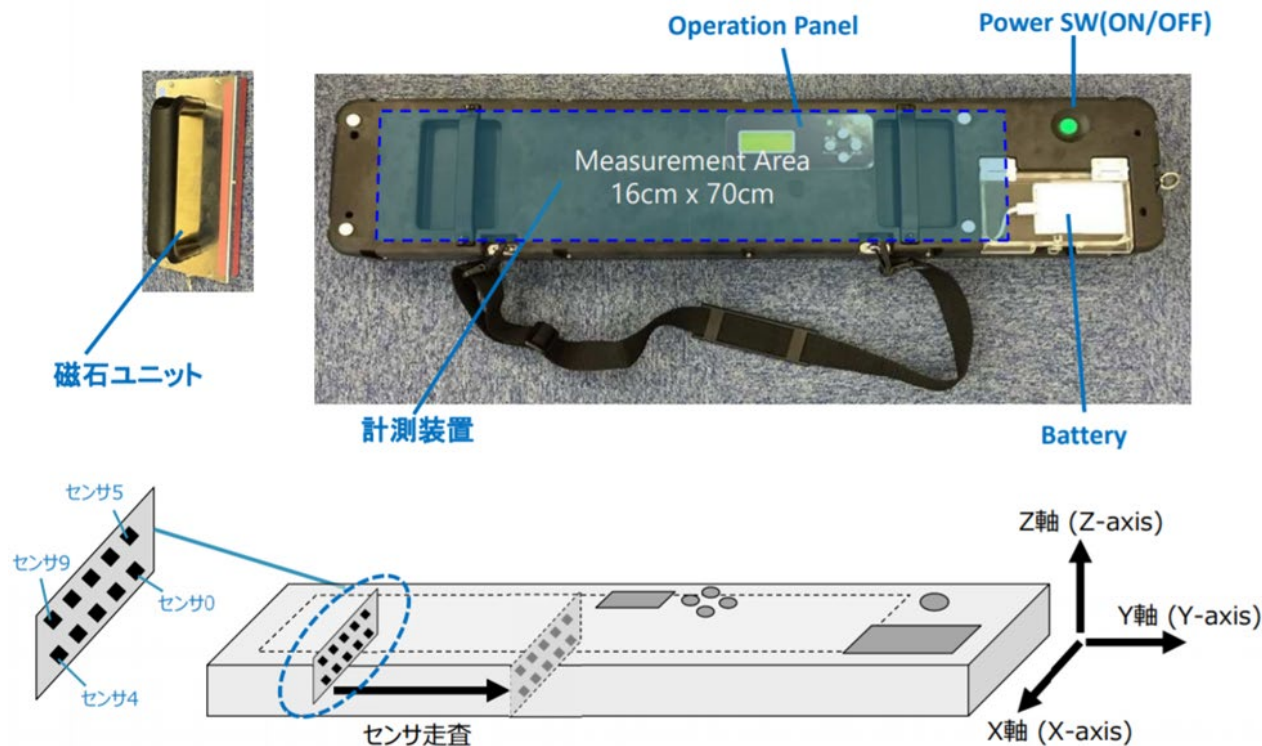
高出力X線 室内試験



鋼材背面のコンクリート中でX線が散乱

【磁気計測システムの開発】 使用機材

SenrigaN (コニカミノルタ製)



- 5個のセンサーを2段に配置 (横4cm間隔、高さ2cm間隔)
- 長軸方向に70cm走査
- X, Y, Zの3方向の磁束密度を計測

【磁気計測システムの開発】計測方法

1. 着磁した状態で計測



2. 磁石のない状態で計測

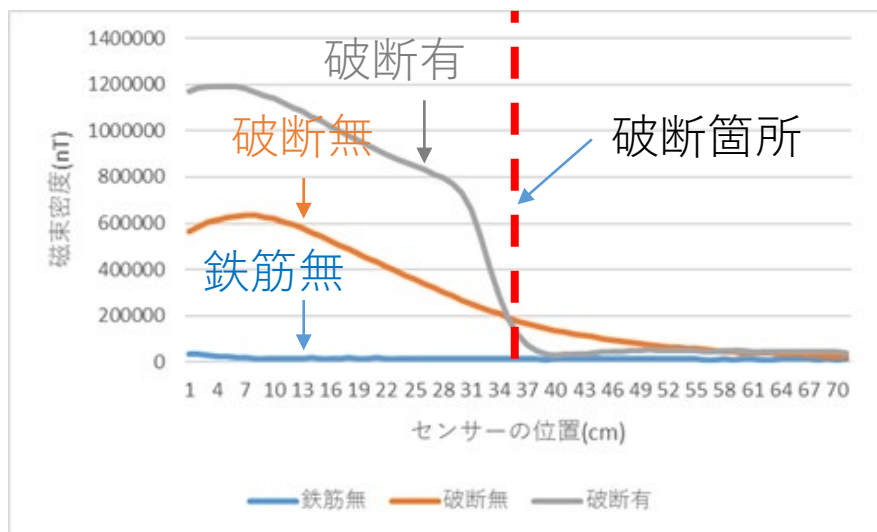


より深い鋼材の腐食・破断を検知するために、磁石を置いたまま磁束密度を計測

【磁気計測システムの開発】計測原理



計測結果 (z軸、D10)



- D10, またはD19の異形鉄筋を長手方向に配置
- かぶりは3.5cmに設定
- 大気中とコンクリートの透磁率は同等なので大気中で計測
- センサーの位置35 cmに破断箇所を設けた
- 鉄筋の有無で大きく異なる結果
- 破断箇所で急激に減衰

【磁気計測システムの開発】劣化橋梁の計測

【歌高架橋】

・第20径間G4桁下フランジ

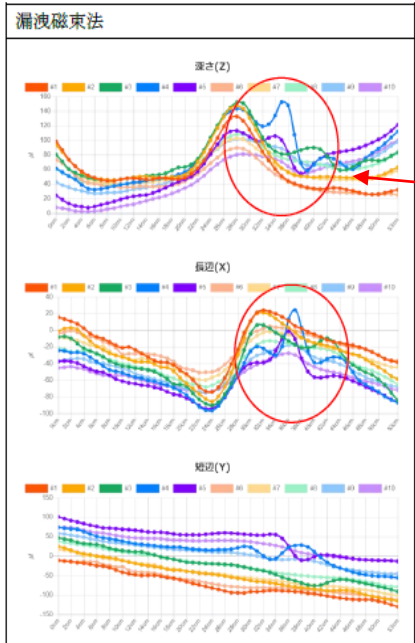


【能生大橋撤去桁】

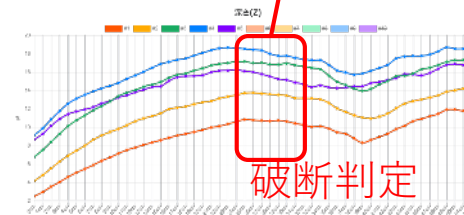
1966年竣工、2010年解体
撤去後2021年まで
名立暴露試験場で暴露



シーシ継手による異常検出例



破断波形とは異なる異常波形も検出
(ごく表層での異常、結束線か?)



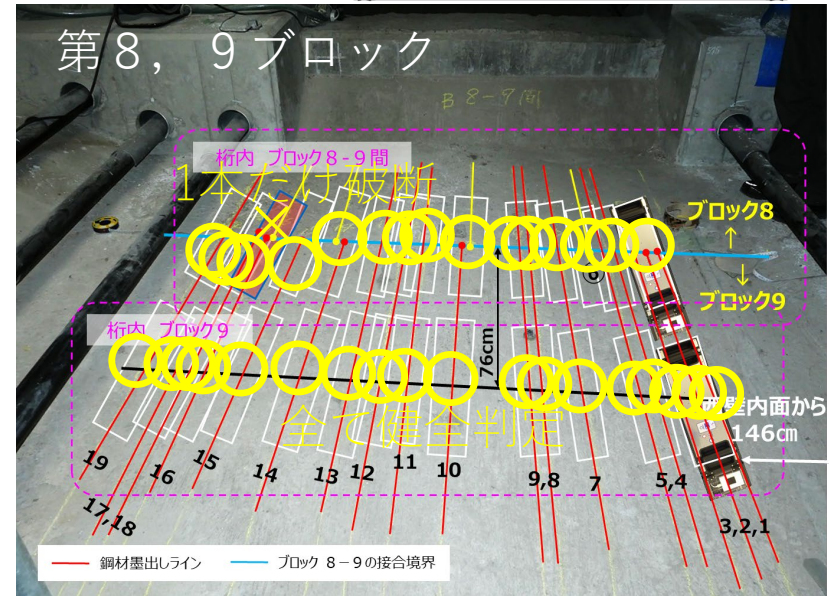
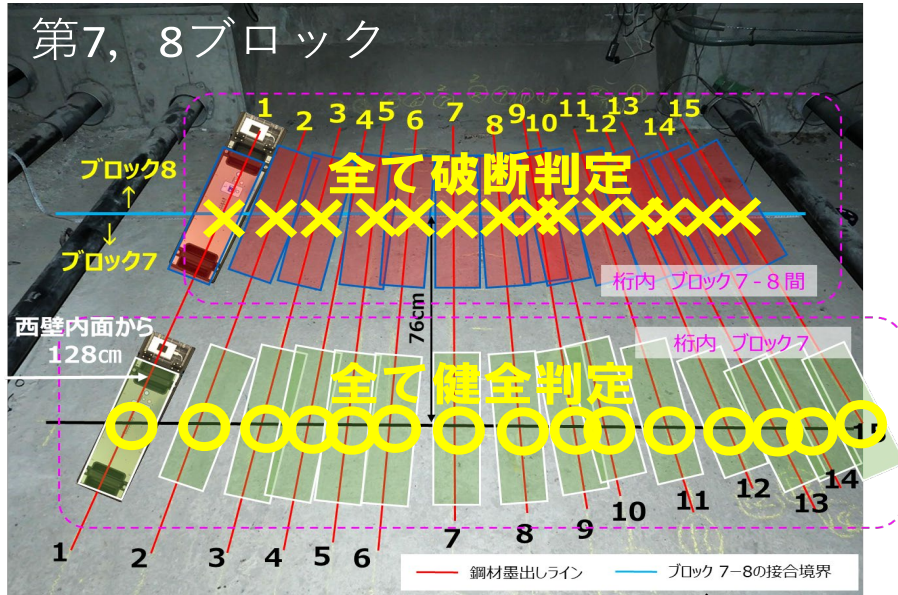
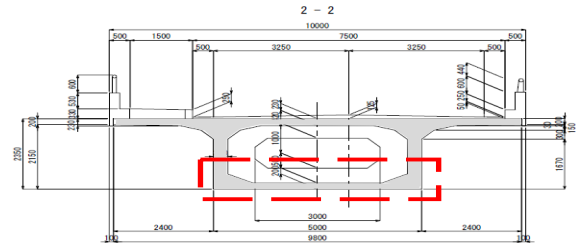
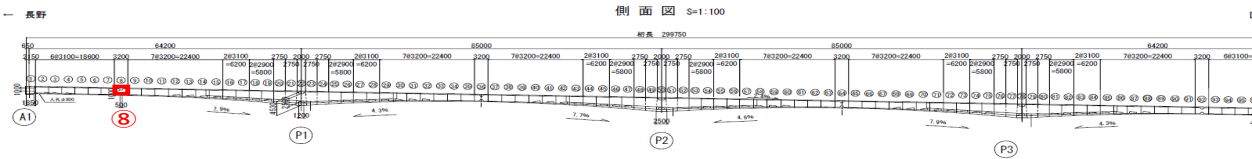
- ・シーシは腐食している
- ・PC鋼材自体は健全
- ・シーシの腐食/健全境界で破断波形を検出

・第10径間は測定もハツリ調査もすべて健全

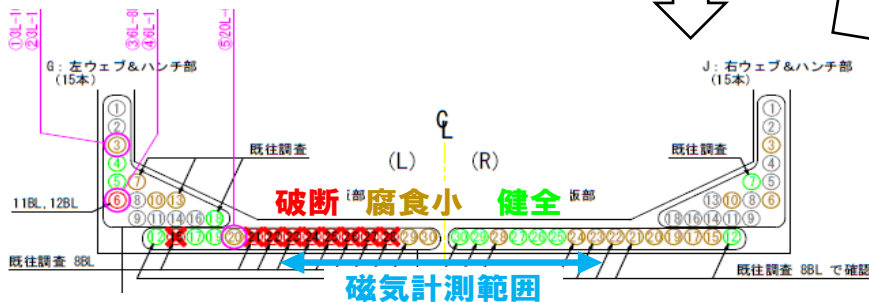
シーシ継ぎ目やシーシ腐食に反応してしまう

【磁気計測システムの開発】劣化橋梁の計測

妙高大橋旧橋・第1径間の下フランジ、第7～9ブロック（令和3年度実施）



第8ブロックのはつり調査結果



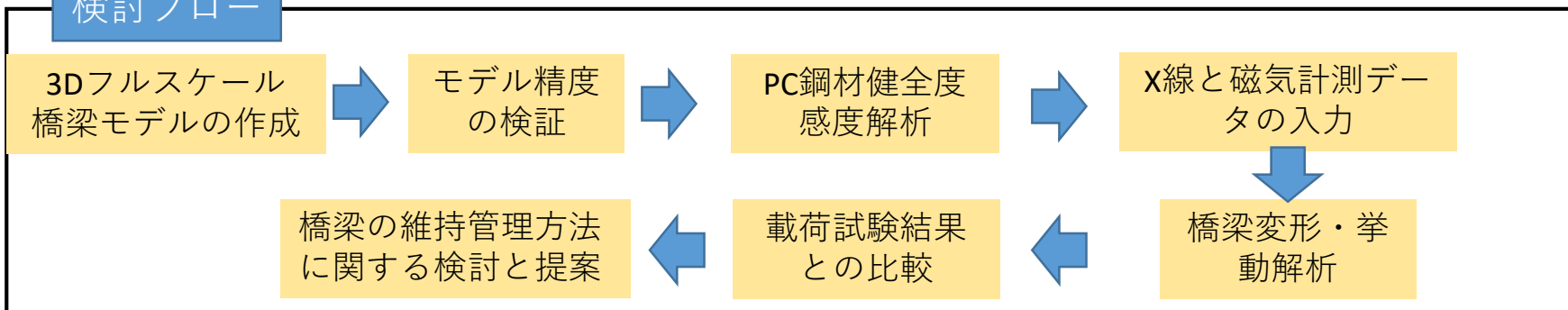
過去のはつり調査結果と相違
→解体調査による検証が必要

【FEM解析】 目的・手順・モデルの概要

目的

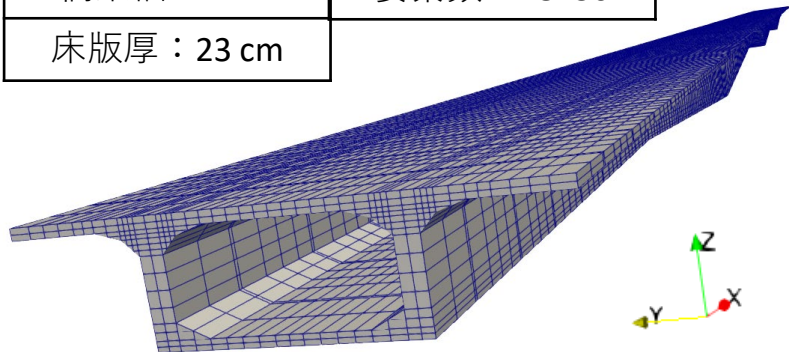
- PCストランドが腐食・破断した妙高大橋をフルスケール有限要素モデルにより再現し、構造全体系の安全性を数値解析によって評価する。その知見に基づき、具体的な維持管理の方法と限界値の設定方法について検討し、構造安全評価技術の体系化を目指す。

検討フロー

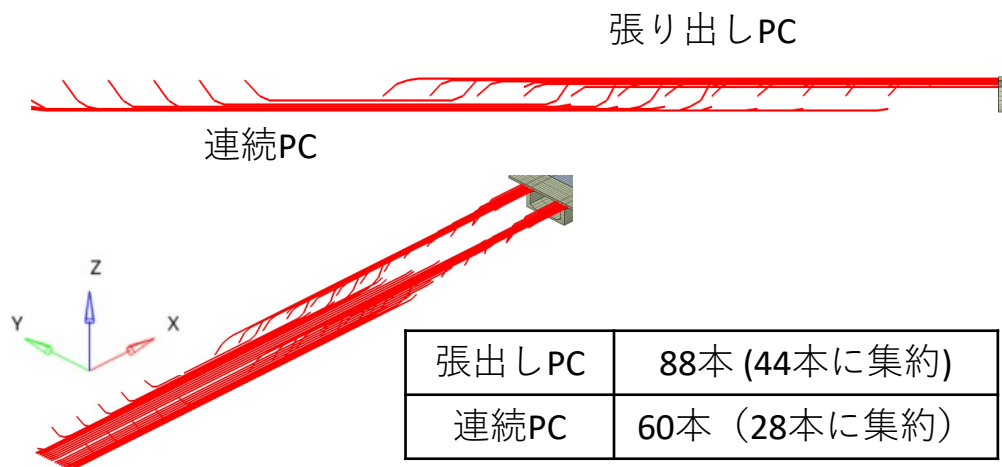


フルスケールモデルの概要

橋梁長さ：300 m	節点数：94800
橋梁幅：10 m	要素数：78436
床版厚：23 cm	



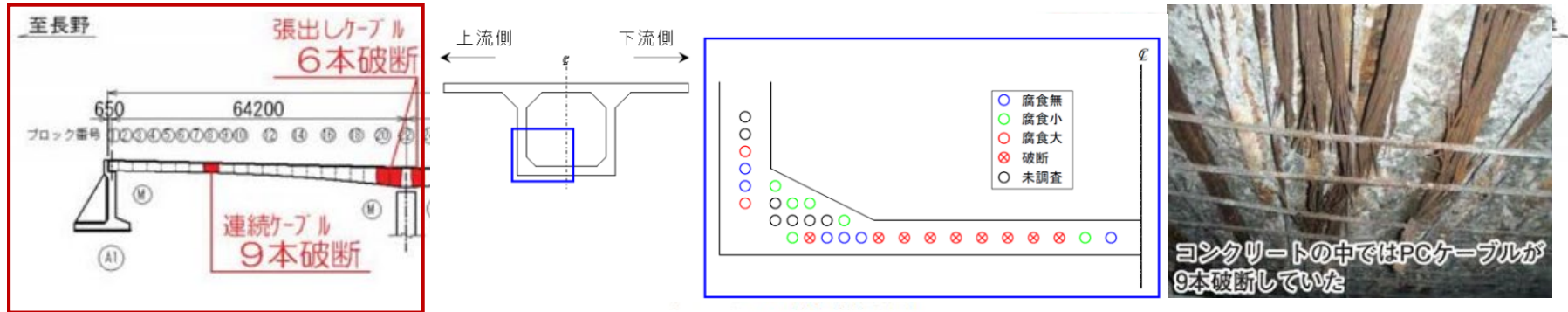
張出しケーブルと連続ケーブルのモデル化（第一径間）



張出しPC	88本 (44本に集約)
連続PC	60本 (28本に集約)

【FEM解析】PC鋼材の劣化調査結果

第8ブロックの腐食状況



2009年、第1径間中央で9本のPC鋼材の破断が確認された
内視鏡調査結果

ケーブルID	調査区間											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P1-39 -L												
P1-41 -L												
P1-33 -L												
P1-27 -L												
P1-23 -L												
P1-43 -L												
P1-37 -L												
P1-36 -L												
P1-13 -L												
P1-12 -L												
P1-11 -L												
P1-8 -L												
P1-7 -L												
P1-6 -L												
P1-3 -L												
P1-2 -L												
P1-1 -L												
P1-20 -L												
P1-19 -L												
P1-16 -L												
P1-15 -L												
P1-24 -L												
P1-31 -L												
P1-28 -L												
P1-34 -L												

凡例
 ●: 腐食無(グラウト有)
 ○: 腐食無(グラウト無)
 ●: 腐食小
 ●: 腐食大
 ●: 水滲出
 ×: 破断
 ●: H24再グラウト
 P1-NO-LR: 1次調査ケーブル
 P2-NO-LR: 2次調査ケーブル

配置本数 26
 調査本数 12

全ケーブルのうち、504箇所のPC鋼材の腐食、破断とグラウト充填状況を調査。ただし、点検していないところにも多く、正確にPC鋼材の状況を把握するのは難しい。

過去の調査結果をFEMに反映

【FEM解析】 現地調査結果の反映

調査の現状

不十分な調査結果を
どのように扱えばよいか？

ケーブルNO ブロックNO	調査結果														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A-1-L															
A-2-L															
A-3-L					●	●	●	●	●	●	●	●			
A-4-L												●	●		
A-5-L															
A-6-L				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
A-7-L							●					●			
A-8-L															
A-9-L															

－凡例－

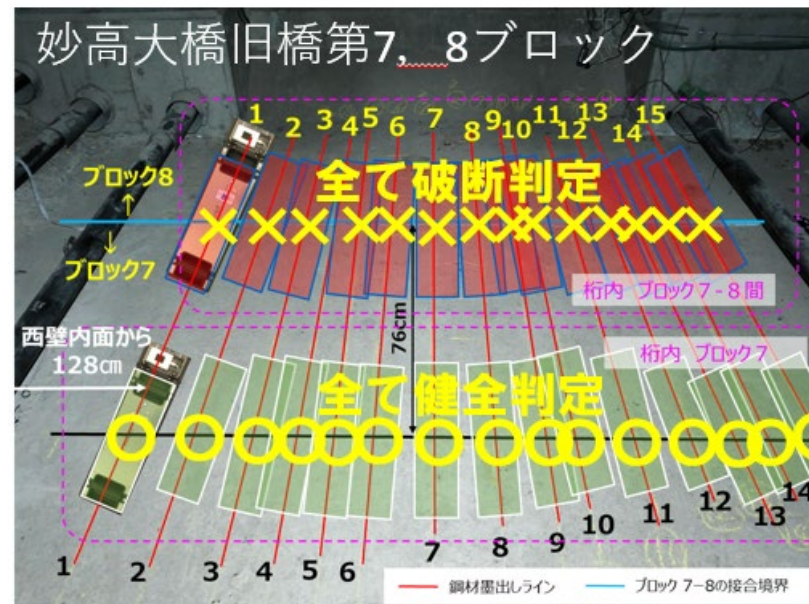
- (斜線) : 腐食無(グラウト有)
- (緑) : 腐食無(グラウト無)
- (黄) : 腐食小
- (赤) : 腐食大
- (青) : 水滲出
- × : 破断
- ≡ : H24再グラウト

内視鏡調査結果の例

仮定

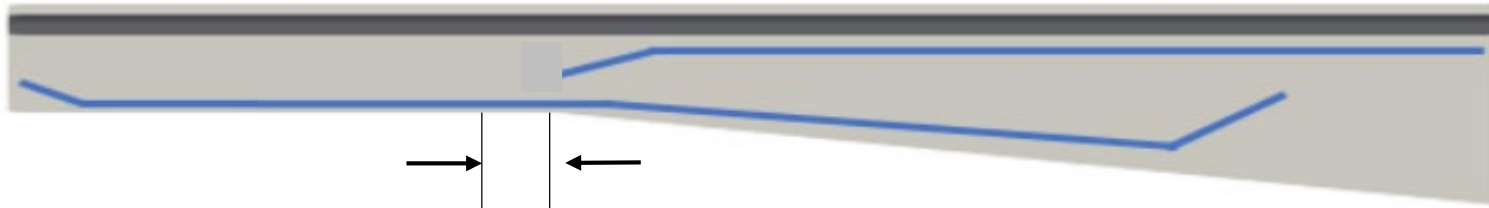
1. モデルは現場の点検情報に合わせてセグメントを単位として腐食、破断、グラウト充填の状況を設定。
2. 未点検なエリアは情報がないため、健全かつグラウト充填と仮定。
3. 磁気ストリーム法の計測結果に従って、第8ブロックは合計16本のPC鋼材が破断していると設定。
4. 腐食度が大の場合10%腐食、小の場合は2%腐食と仮定。

実橋計測 (令和3年度)



【FEM解析】腐食、破断の設定

各セグメントの腐食、破断、グラウト未充填割合



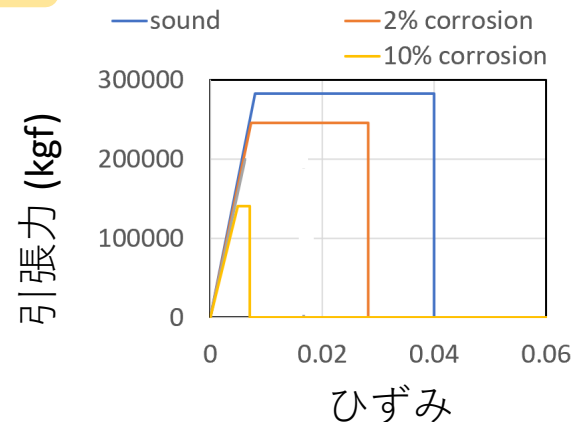
segment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
total PC number	20	22	24	26	28	30	30	30	32	34	34	38	36	36	34	36	32	34	38	40	44	44	
PC tendons condition	sound	100%	100%	96%	81%	93%	90%	90%	47%	88%	88%	79%	87%	97%	94%	97%	94%	87%	85%	89%	69%	75%	95%
	2% corrosion	0%	0%	4%	19%	7%	10%	10%	27%	13%	12%	18%	13%	3%	6%	3%	3%	13%	15%	11%	18%	14%	5%
	10% corrosion	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	3%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	10%	9%	0%
	rupture	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	27%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	2%	0%
grout condition	grout unfilled	0%	0%	4%	23%	7%	10%	17%	63%	16%	12%	21%	16%	6%	6%	3%	6%	13%	18%	18%	35%	27%	5%
	grout filled	100%	100%	96%	77%	93%	90%	83%	37%	84%	88%	79%	84%	94%	94%	97%	94%	87%	82%	82%	65%	73%	95%

PC tendons in segment No.8 has the greatest deterioration degree

腐食したPC鋼材の応力-ひずみ関係

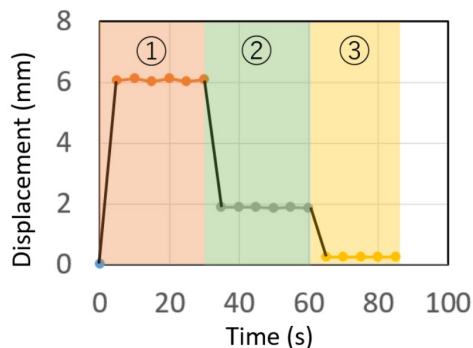
田中らの論文を参考にして、腐食したPC鋼材の構成則を設定した

降伏荷重比	$\frac{P_{y_{corrod}}}{P_{y_{sound}}} = e^{-0.07\delta}$
最大荷重比	$\frac{P_{u_{corrod}}}{P_{u_{sound}}} = e^{-0.076\delta}$
破断ひずみの比	$\frac{\epsilon r_{corrod}}{\epsilon r_{sound}} = e^{-0.175\delta}$



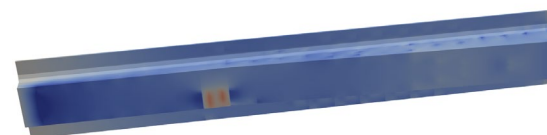
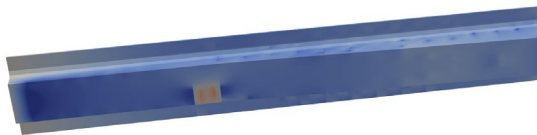
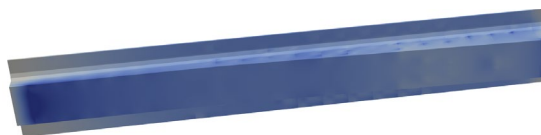
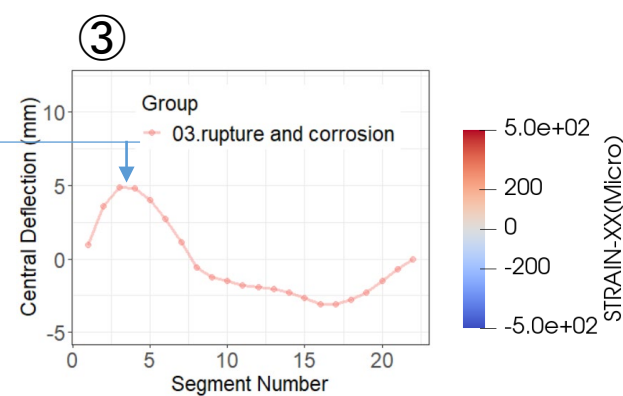
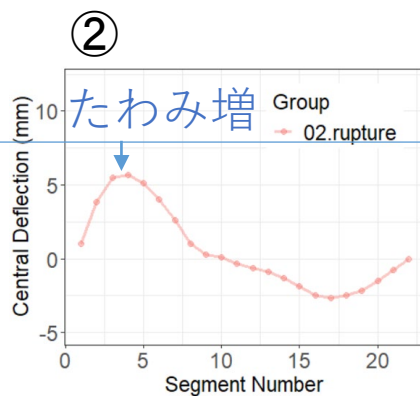
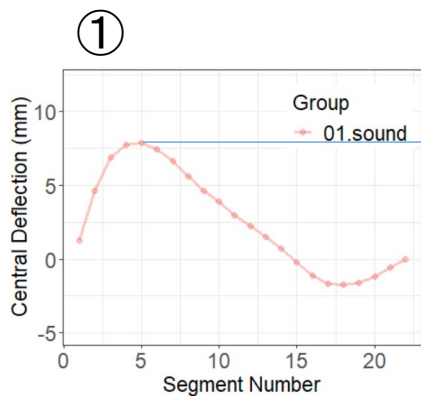
【FEM解析】解析手順およびたわみ分布

解析手順



- ① 自重とグラウト充填状況の設定
- ② 鋼材破断の設定
- ③ 腐食の導入

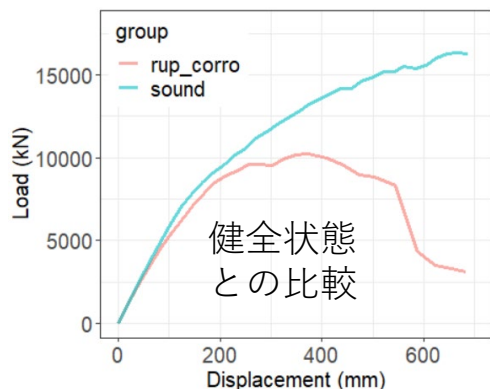
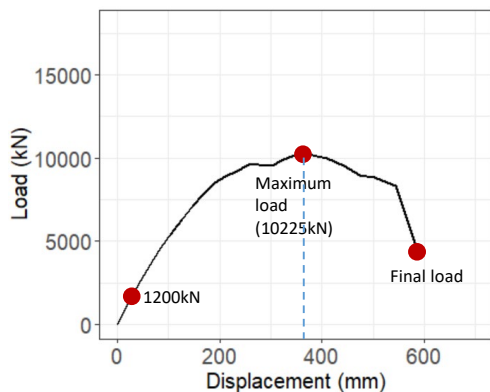
たわみ分布



劣化進行により自重によるたわみが増加

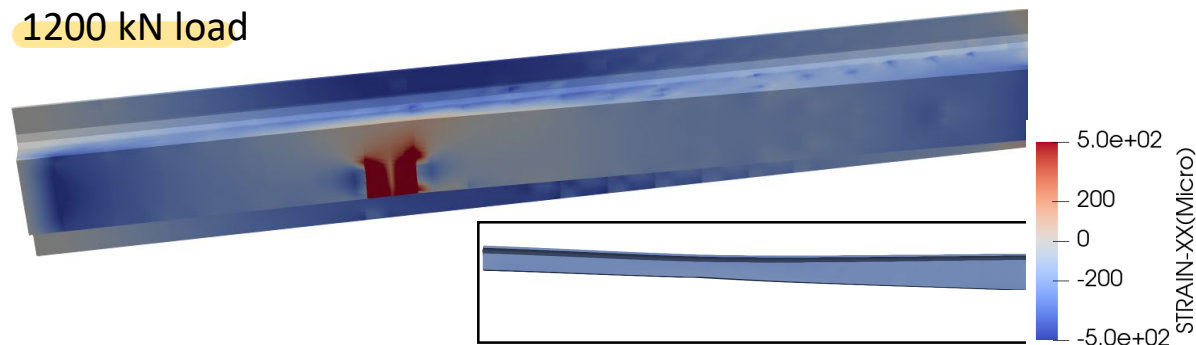
【FEM解析】荷重－たわみ関係、ひずみ分布

荷重－変位関係

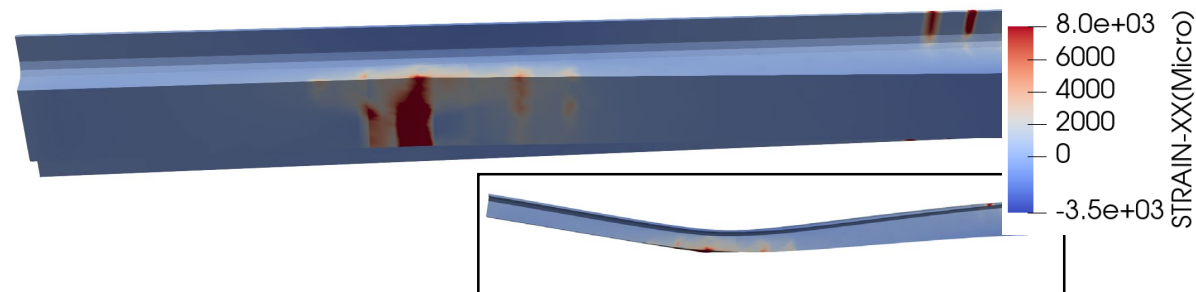


腐食破断を考慮した橋梁の耐荷力は約10000kNとなり、健全状態より、約40%低下していた。
第8セグメント範囲でひずみが集中的に発生している。

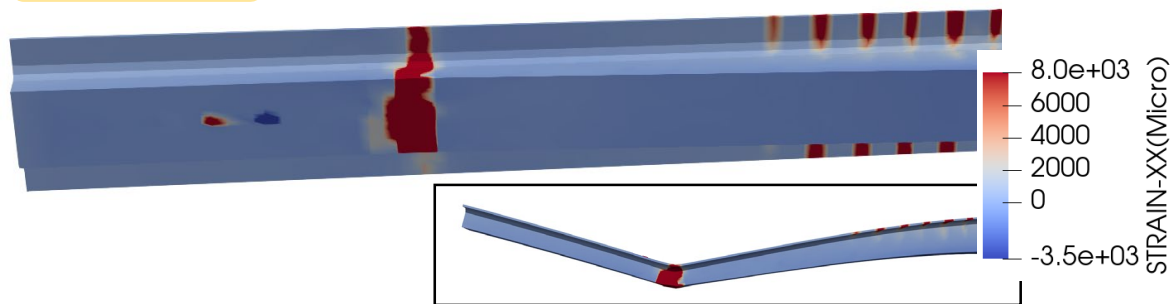
1200 kN load



最大荷重



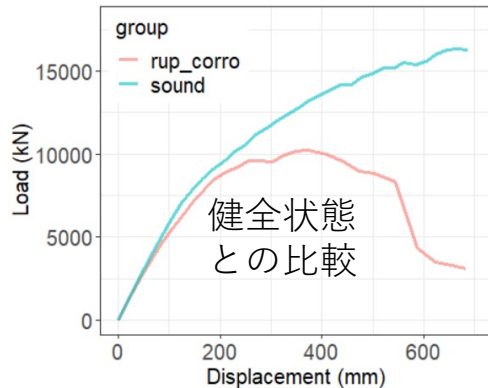
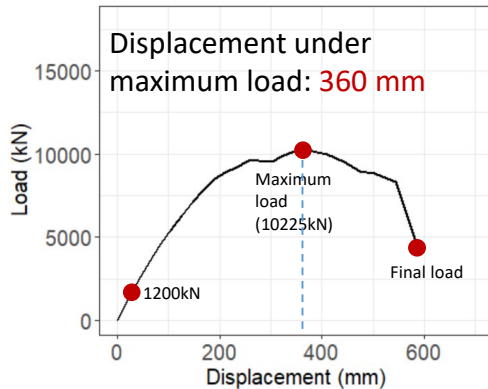
終局状態



Scale = 10

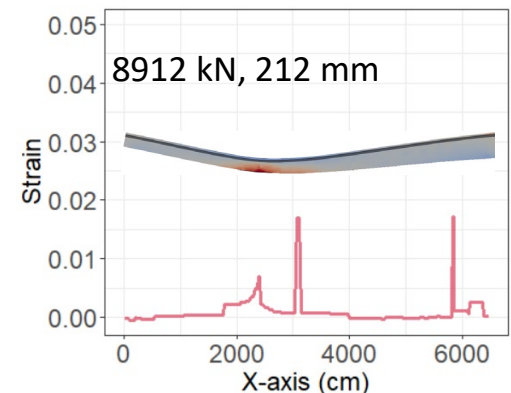
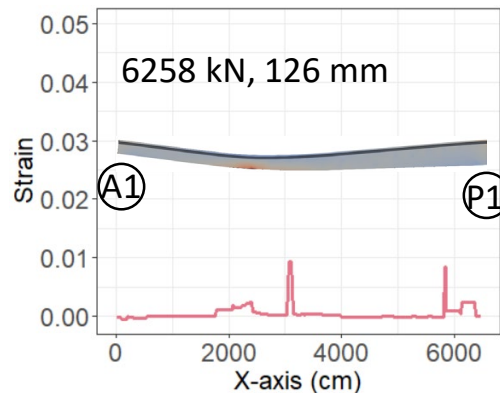
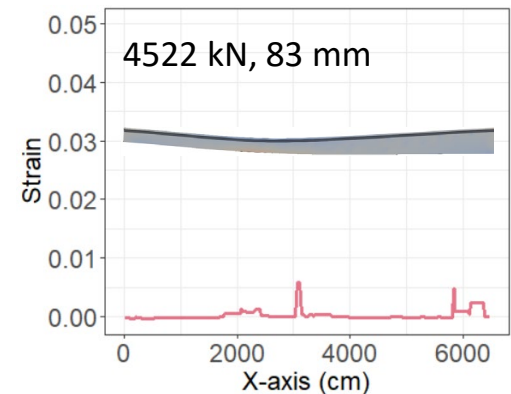
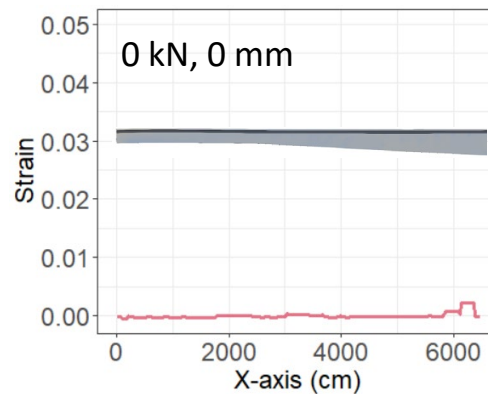
【FEM解析】PC鋼材のひずみ分布

荷重 - 変位関係



腐食破断を考慮した橋梁の耐荷力は約10000KNとなり、健全状態より、約40%低下していた。
第8セグメント範囲でひずみが集中的に発生している。


PC鋼材のひずみ分布



- 第8セグメントとP1近くで顕著なひずみの増加がみられる。
- グラウトが完全に充填されていないため、コンクリートとPC鋼材のひずみが一致しない。
- グラウト充填が不十分な橋梁に対して、コンクリートの目視でPC鋼材の状況を判断することが難しい。

まとめ

- 載荷試験のたわみ計測結果は予想の範囲内の挙動。載荷初期から開口し始めた箇所はたわみ計測では把握が難しい。
- 載荷実験とフレーム解析、ファイバー解析を組み合わせ分析した結果、支間中央で5～6割、柱頭部で2割プレストレスが低下していたと推測される。
- 光ファイバによりひび割れ発生範囲を評価可能。正確な位置の同定は今後の課題。ひび割れ後もコンクリートひずみ分布は計測可能。
- 電子レベル計測により、たわみ分布が計測可能。
- 高出力X線を使えば、60cm厚程度のコンクリート内の鋼材の状況を現場撮影し、視認可能。ただし、X線の散乱によって画像はかなりぼやける。画像解析手法の開発が別途必要。
- かぶりが小さい場合、漏洩磁束法や磁気ストリーム法によって鋼材の破断検出は可能。かぶりが大きくなった場合の計測方法、解析方法の構築が課題。
- 限られた非破壊検査結果から、構造安全性を適切に評価する枠組みが必要。載荷試験で大まかに評価し、クリティカルな断面を集中的に検査するなど。



ご清聴ありがとうございました