

950 keV XバンドライナックX線源による 実橋梁その場透視検査・構造強度診断の開始

COMMISSIONING OF ON-SITE INSPECTION AND STRUCTURAL ANALYSIS BY 950 KEV X-BAND LINAC X-RAY SOURCE

上坂充^{#A)}, 三津谷有貴^{A)}, 橋本英子^{A)}, 土橋克広^{A)}, 矢野亮太^{B)}, 竹内大智^{B)},
ベレデ・ジャン・ミシエル^{B)},

大島義信^{C)}, 石田雅博^{C)}, 草野譲一^{D)}, 田辺英二^{D)}, 丸山夏代^{E)}, 大矢清司^{E)}, 服部行也^{E)},
小石川篤^{F)}, 村田健太郎^{F)}, 櫻井栄男^{G)}, 尾川浩一^{H)}, 貝吹太志^{H)}, 關義親^{I)},
立若正弘^{J)}, 小野洋伸^{J)}

A) 東京大学原子力専攻, B) 同原子力国際専攻, C) 土木研究所, D) (株)アキュセラ, E) 日立パワーソリューション、F) (株)XIT、G) (株)アクシオン・ジャパン、H) 法政大学、I) 日本原子力研究開発機構、J) (株)関東技研

発表内容

1. 950keVXバンド電子ライナックX線源
/3.95MeVX線・中性子源
2. 実橋梁透視試験
3. 構造強度解析
4. 部分角度CT・Tomosynthesis
5. 今後の展開

内閣府SIP(Strategic Innovation Program)

「異分野融合による イノベーティブメンテナンス技術の開発」

(H26~H30)

研究責任：土木研究所

研究実施機関：

土木研究所，東京大学，理化学研究所

協力機関：

NEXCO東日本

国土交通省建設技術研究開発費補助金

「高エネルギー可搬型X線 橋梁その場透視検査の実用化」

(H27,28)

(東京大学,土木研究所,(株)アキュセラ、(株)アキシオン・
ジャパン)

現状の課題

グラウト充填不足

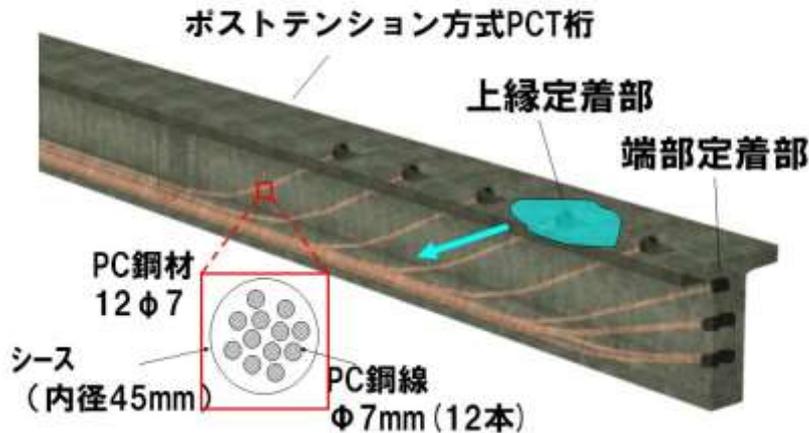
橋梁	佐野橋	能生大橋	はくい 羽咋川海浜橋	T橋
充填 状況 一例	 未充填 (ウェブ)	 充填不足 (ウェブ)	 未充填 (ウェブ)	 未充填
充填不足 調査箇所	$\frac{16}{342}$ (4.7%)	$\frac{2}{64}$ (3.1%)	$\frac{8}{145}$ (5.5%)	$\frac{0}{16}$ (0%)
未充填 調査箇所	$\frac{4}{342}$ (1.2%)	$\frac{0}{64}$ (0%)	$\frac{1}{145}$ (0.7%)	$\frac{1}{16}$ (6.3%)



PC鋼材の腐食・破断

PCT桁橋のPC鋼材配置の概念図

(概ね1980年代以前)



グラウト未充填個所の存在

X線による
可視化

外観に顕在化せず

PC鋼材の腐食・破断

破壊の進行

急激な破壊・落橋

可搬型950keV・3.95MeVXバンドライナックX線源

950keV

電源・チラー

X線発生部

マグネトロン

主要仕様

運転周波数	9.3 [GHz]
RF源	マグネトロン
入力RF電力	250KW
パルス幅・繰返数	3 [μs]、330 [PPS]
加速管全長	25 [cm] 以下
ビーム電流	64mA以上
電子ビーム集束方式	RF集束方式
X線発生強度	50 [mGy/min]以上 at 1 [m]
電子銃電圧	20KV
電子銃	三極管

装置仕様

RF加速空洞共振周波数	9.3 [GHz] ±25 [MHz]
電子ビーム収束方式	RF集束方式
X線発生強度	2,000 [mGy/min]以上 at 1 [m]
RF発生源	9.3[GHz]マグネトロン パルス幅4[μs] 繰返数200[PPS]
電子銃出力電流	パルスピーク電流 300 [mA]以上
出力方式	コンデンサ充電スイッチング方式
X線ヘッドユニット重量	62kg
コリメータ重量	80kg
高周波源ユニット重量	62kg
HVPS,制御ユニット重量	116kg

3.95MeV

電源等

マグネトロン

加速管部



X線検出器

産業プラント・橋梁などの現場＝機材設置環境が狭所、高所が多い

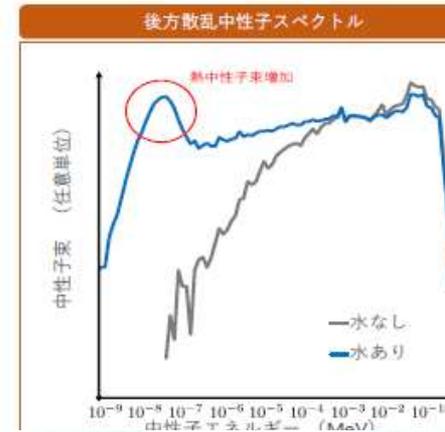
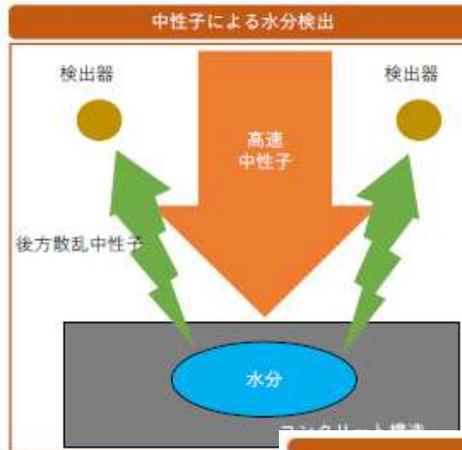
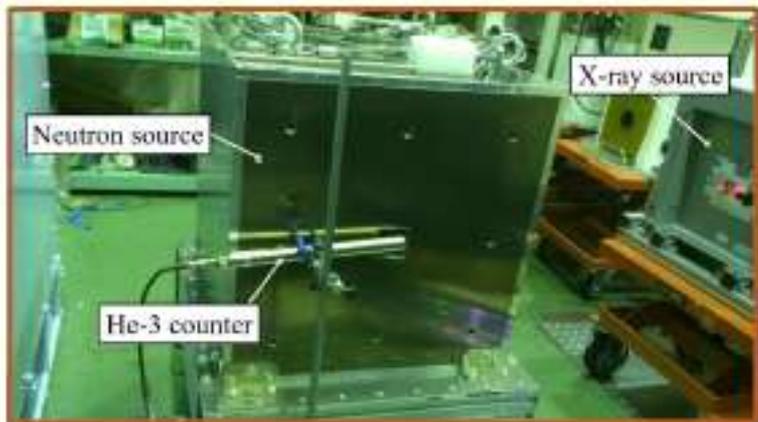
→薄型半導体フラットパネル検出器(Perkin Elmer)を使用



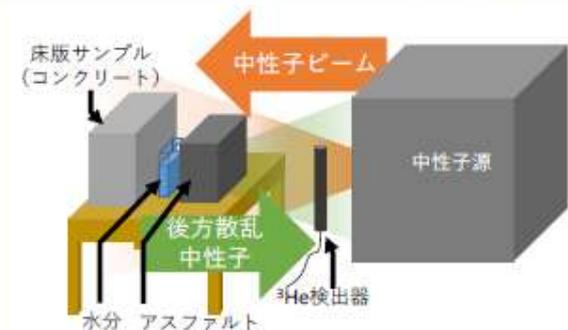
	XRD0822	XRD1622
Detector Size	8" x8"(20x20cm)	16"x16"(41x41cm)
Energy Range	20keV-15MeV	20keV-15MeV
Scintillator Type	Gd2O2S:Tb	Gd2O2S:Tb & Cu Filter
Resolution	200 um Pixel Size	200 um Pixel Size
Phosphor Layer	208um, 100mg/cm ²	436um, 100mg/cm ²
Frame Rate	15 fps	1 fps
Electronics	14bit ADC & 2Gain Setting	14bit ADC & 2Gain Setting
Interface	Gigabit Ether Net(GigE)	Gigabit Ether Net(GigE)
Weight	3.7kg	8.8kg

- ・～15MeVの高エネルギーX線で可使用
- ・検出デバイス:テルビウム添加酸硫化ガドリニウム(Gd2O2S:Tb (GOS))を用いたシンチレータ方式

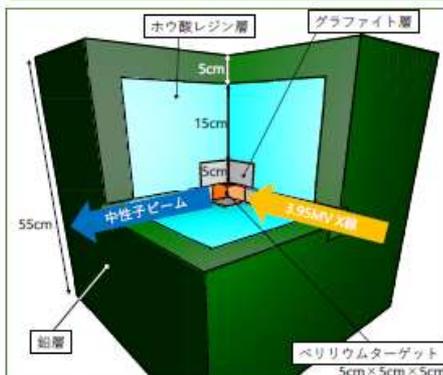
3.95MeV X線源+Beターゲットによる中性子発生



コンクリート構造水分検出実証実験

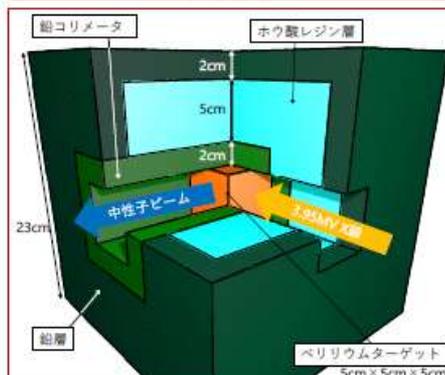


プロトタイプ



- ターゲット重量 1500 kg
- フルエンス (Be表面) 2.79×10^8 n/s
- フラックス (Be表面) 1.86×10^4 n/s/cm²

改良設計



- ターゲット重量 70 kg
- フルエンス (Be表面) 7.16×10^8 n/s
- フラックス (Be表面) 4.76×10^4 n/s/cm²

950keVX線源新潟県実橋梁検査(H27.11.4-6)



・装置の改良による操作性も向上し、適切かつ迅速なセッティング・測定・撤収が可能になった。

3次元有限要素法による強度評価

使用解析ソフト: DuCOM-COM3

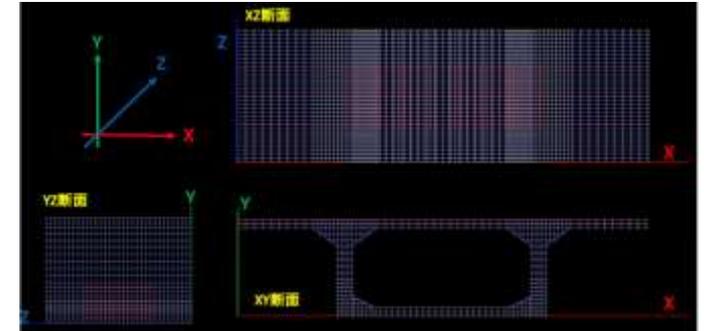
開発: 東京大学社会基盤学科コンクリート研究室

各種物性値:

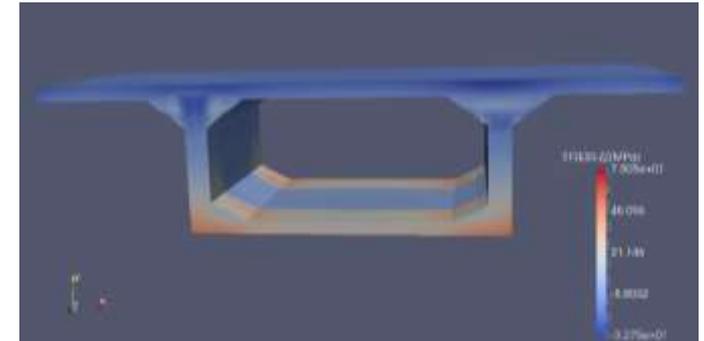
コンクリートのヤング係数	$3.1 \times 10^4 MPa$
PC鋼材のヤング係数	$2.0 \times 10^5 MPa$

解析の対象:

1. 設計荷重を印加した際の橋梁断面の応力状態の確認
設計荷重を印加した際の応力状態を図り、その**応力がコンクリートの許容応力に収まっているか**を評価する
* 設計荷重にはL荷重を採用
2. PC橋降伏時の降伏モーメントの計算
PC橋は橋梁下部に**ひび割れが発生した時点**で降伏
→ひび割れの発生から降伏モーメントを計算する

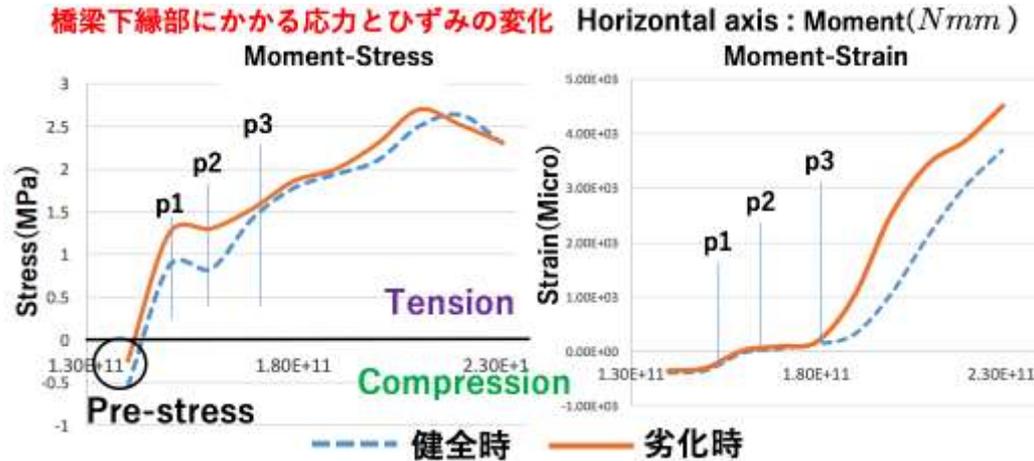


↑解析メッシュの様子



↑計算結果が反映されたモデル

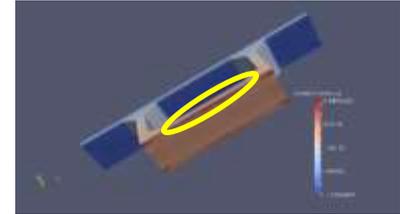
降伏モーメントの評価



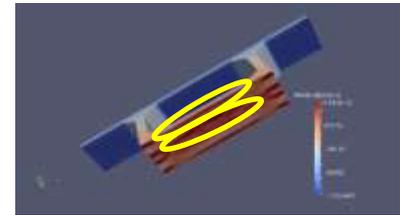
橋梁状態	モーメント(Nmm)	荷重(kN)
健全時	1.90E+11	7.61E+03
劣化時	1.80E+11	7.20E+03

5%の減少

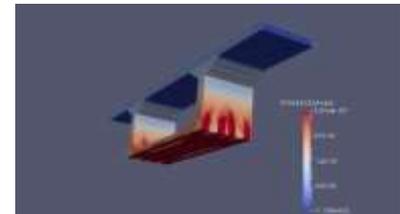
P1:弾性体接合部破壊開始



P2:中央部破壊開始



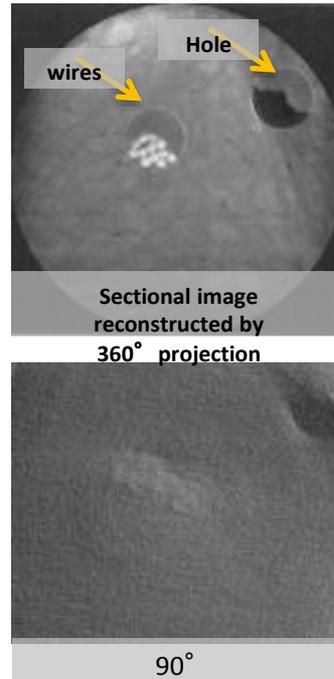
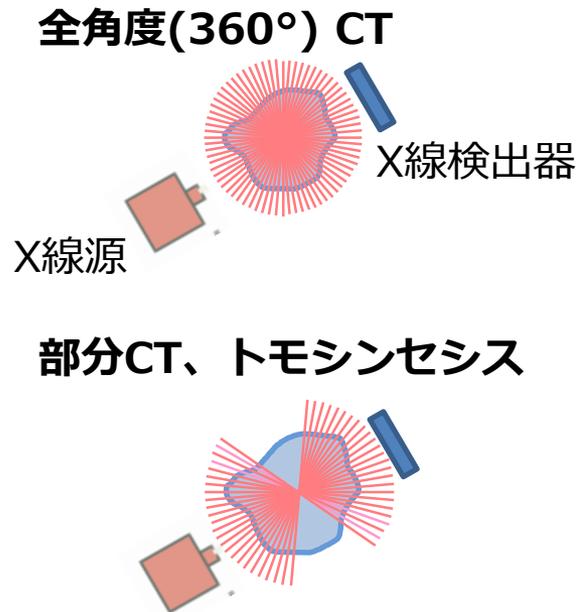
P3:劣化時中央部降伏点



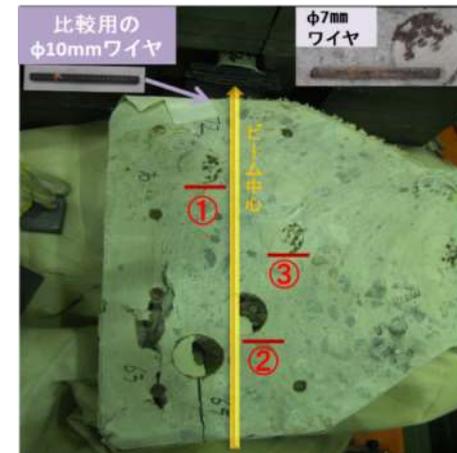
- ・可搬型950keVXバンドライナックX線源は社会インフラ検査用に平成27年11月4-6日妙高大橋試験開始。PC鋼の切断、断面積減少を10%刻みで判定した。3次元構造解析により降伏モーメントの5%減少を判定。
- ・今年度実験室での成果による、PC,RC鋼の断面積減少が5%以下で評価でき、構造耐力の減少も5%で評価できる目処が立った。

部分角度CT・トモシンセシス適用に向けた取り組み

- ・鉄筋が複雑に重なりあう部分の識別→立体画像での識別
- ・足場や照射角度が限定されて全角度CTはできない。
→部分角度CTまたはトモシンセシスを適用



測定した橋梁サンプル



- ・部分CTやトモシンセシスなどの限定角度でのスキャン→画像の歪みが発生する。
 - ・360° CTによる信頼性高い豊富なデータの蓄積
- 現場取得画像 (部分CT・トモシンセシス) と
校正データベースの比較による内部構造寸法の判定

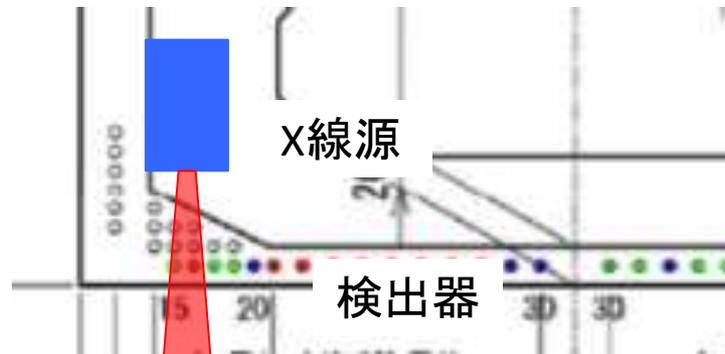
部分角度CT再構成の適用 – 橋梁検査への適用

橋梁検査適用における問題点:

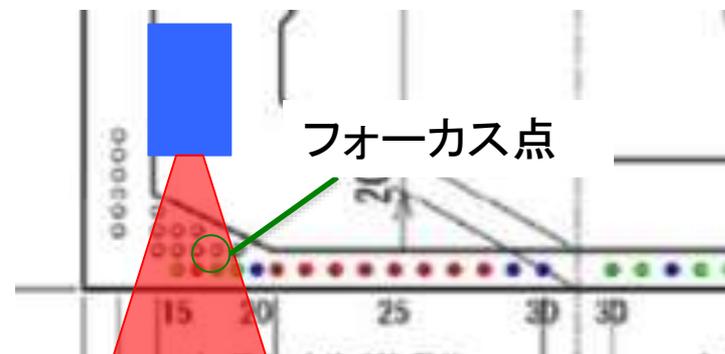
妙高大橋試験は検出器位置合わせが高難度であった

→円弧状の移動は現実的ではない

→X線照射角度を広げて、少ない移動量(=並行移動)で再構成できることが望ましい

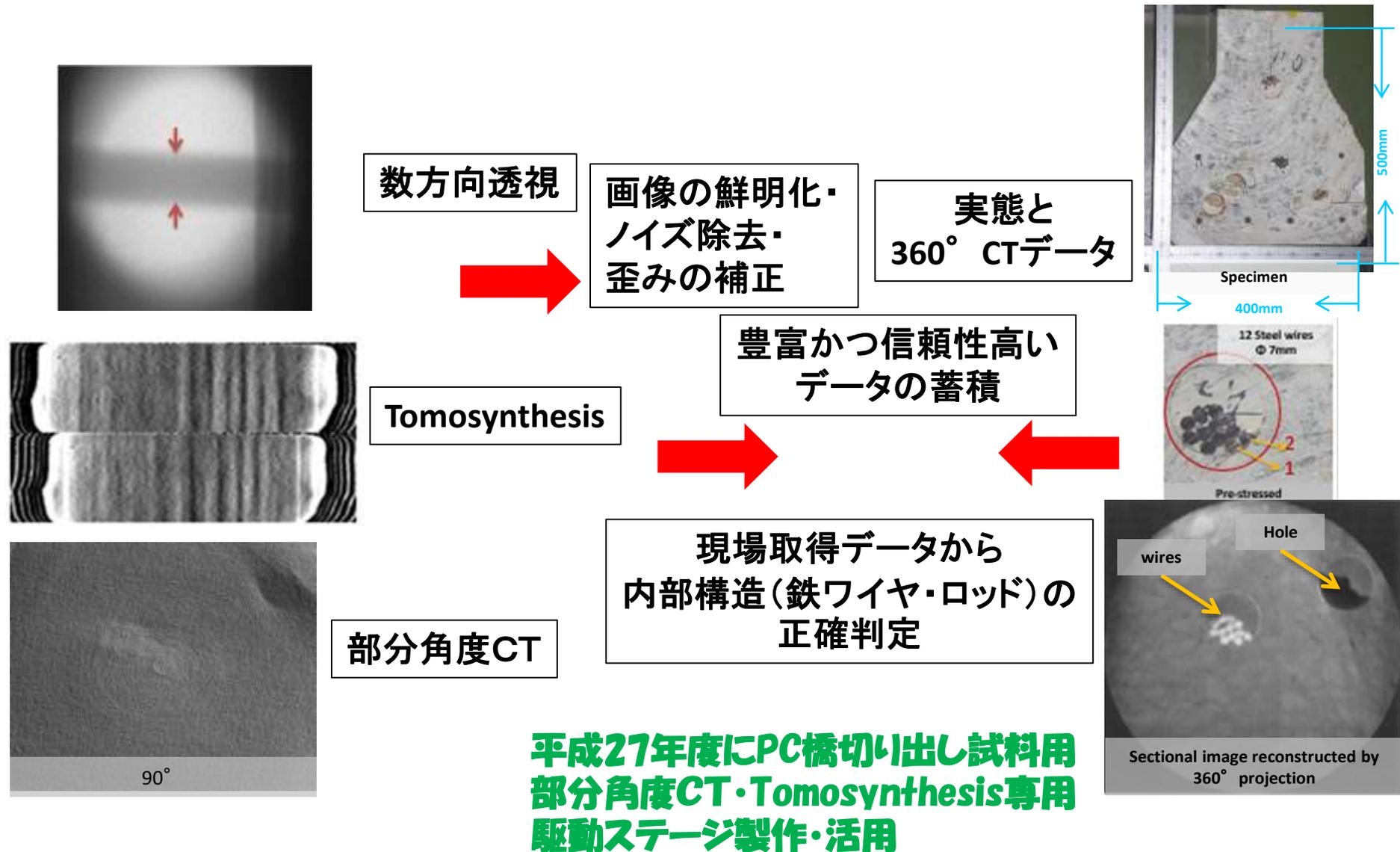


理論的に回転は可能だが、検出器位置合わせなどに課題



平行移動でも、ある点からみると、いろいろな方向からビームが当たることに

現場取得想定画像と実験室校正データベースによる断面内部構造の判定



性能評価ファントム1・2と試験ステージ

Phantom 1



Phantom 2



3.2 ファントム1による全角度CTとTomosynthesis



図2. 評価用ファントム（アクリル＋鉄筋6～10 mm径混在）

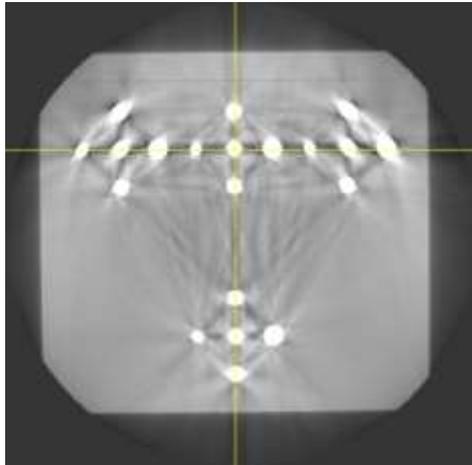
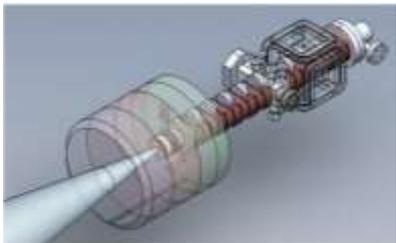


図3. 全角度CT画像（左）および、Tomosynthesis法による画像（右）

3.2 ファントム1による部分角度CT

土木研究所との検討より、実橋梁現場ではが提案された。
30° 頂角のX線コリメータと水平走行して、 $\pm 15^\circ$ 相当スキャンが限界



30° 部分角度CTにて鉄ワイヤは楕円に歪むものの、短軸径はほぼもとの外径と一致している

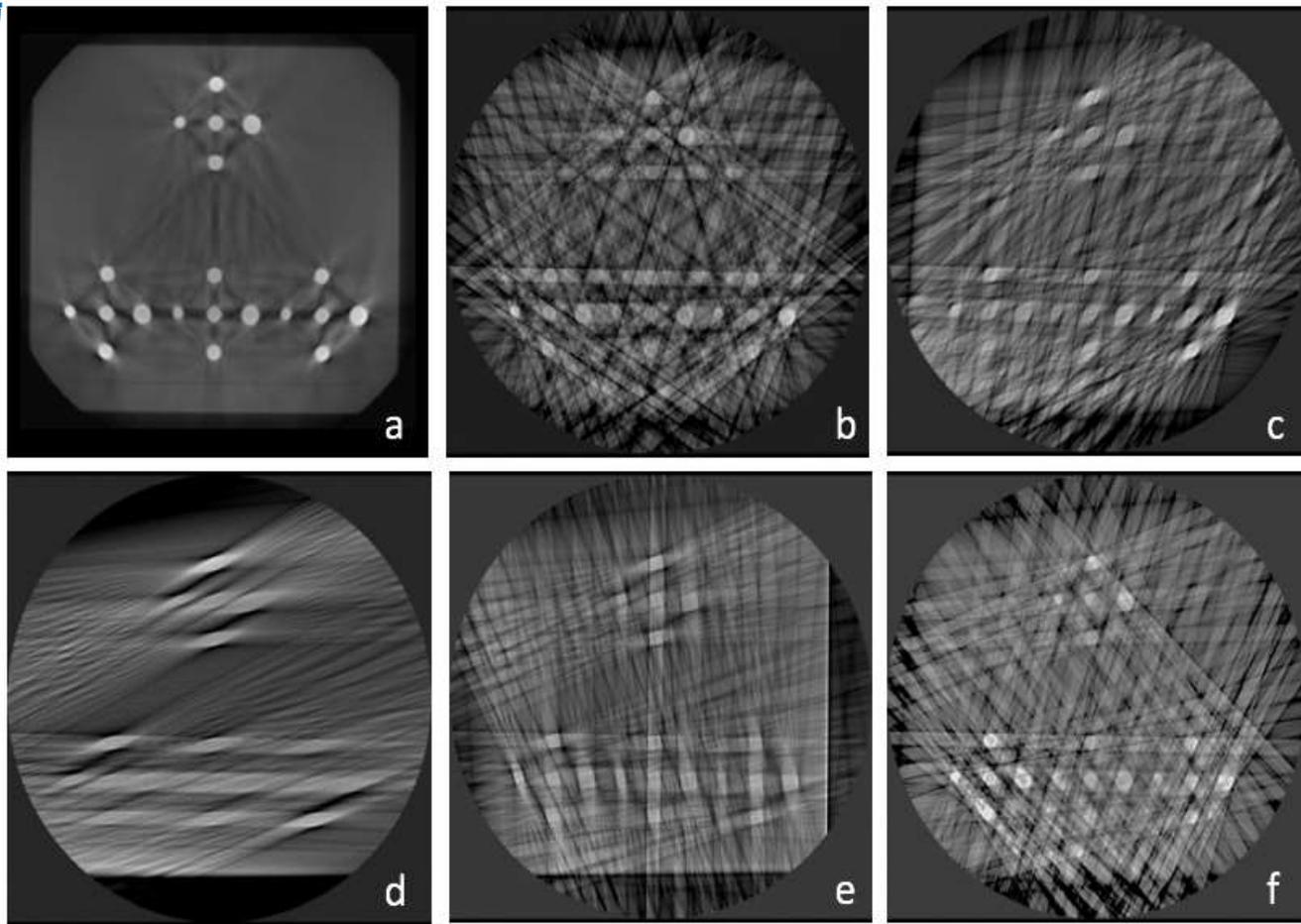


図4. 全角度CT(a: 0.36° ピッチ、b: 36° ピッチ)および部分角度CT(c,d,e,f)。
(c)角度制限 90° 、 9° ピッチ、10投影データ、1方向投影(0°)、
(d)角度制限 30° 、 3° ピッチ、10投影データ、1方向投影(0°)、
(e)角度制限 30° 、 6° ピッチ、5投影データ、2方向投影($0^\circ + 90^\circ$)、
(f)角度制限 30° 、 10° ピッチ、3投影データ、3方向投影($0^\circ + 60^\circ + 120^\circ$)

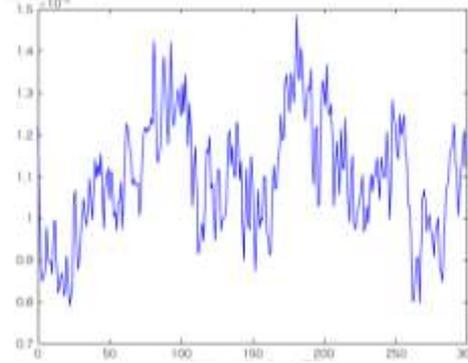
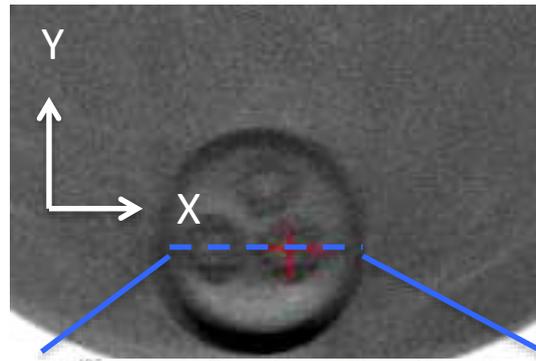
部分角度CT再構成の適用

-ワイヤ径の推定(元は円形のアプリオリ)-

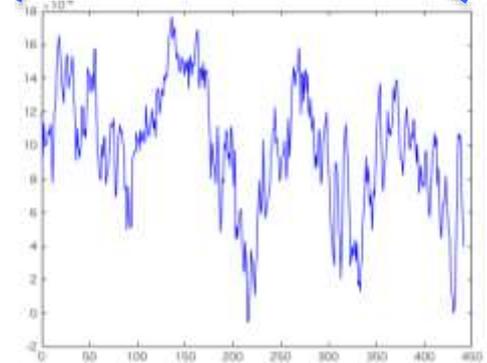
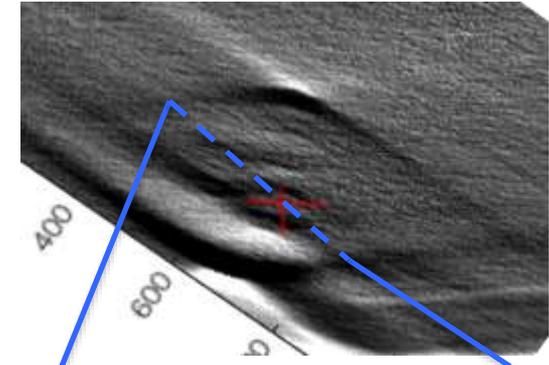
シース内のプロファイル(下)+ワイヤ1本(10mm, 十字部)の直径の両端の座標を目視で取得した

- 360度画像と36度画像では違いがある
→ **本来なら円状**
→ 角度情報から補正できる可能性

- ワイヤ部とコンクリート部の境界をどこに取るかが課題



360/0.36



36/0.36

	直径(mm)	
360度	10.5	
36度	X: 16.1	Y: 9.3

3.3 ファントム2による全角度CTとTomosynthesis

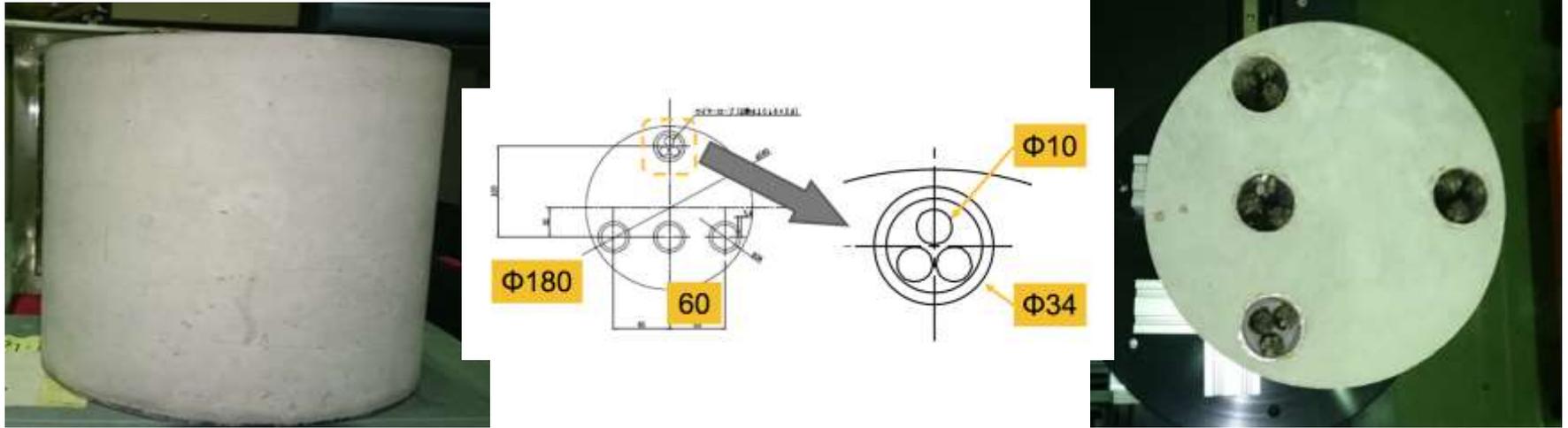
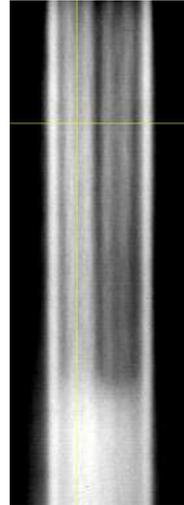
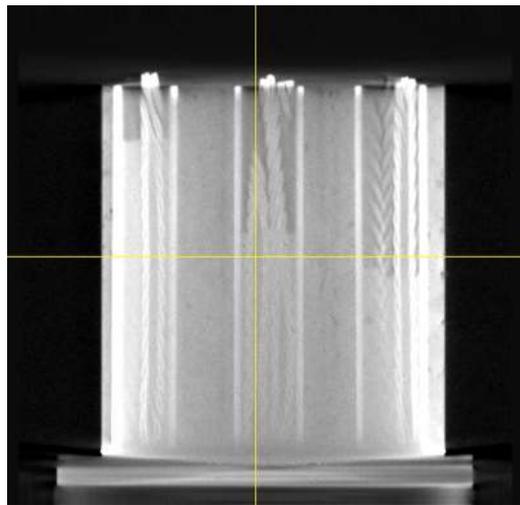
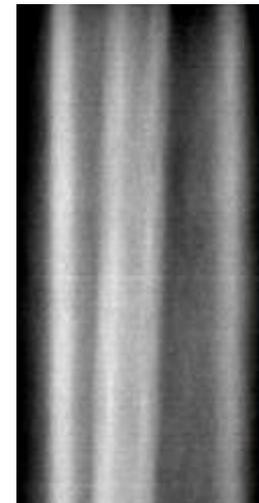


図5. PC橋梁模擬評価用ファントム。コンクリート全体径180 mm。シース管径34 mm内にそれぞれ3本のPC鋼材(10 mm径)を配置し、グラウトを50~80%程度まで充填したもの。



グラウトの未充填が明確に判定できる



30° Tomosynthesisにて鉄ワイヤの外径が1mm程度の精度で評価できている

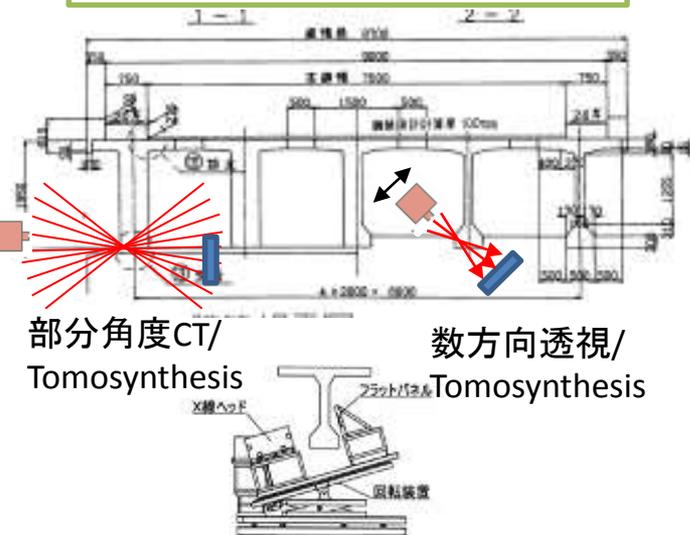
図6. 全角度CT結果 (左) および、Tomosynthesis画像 (右)

図8. 30° でのTomosynthesis再構成画像

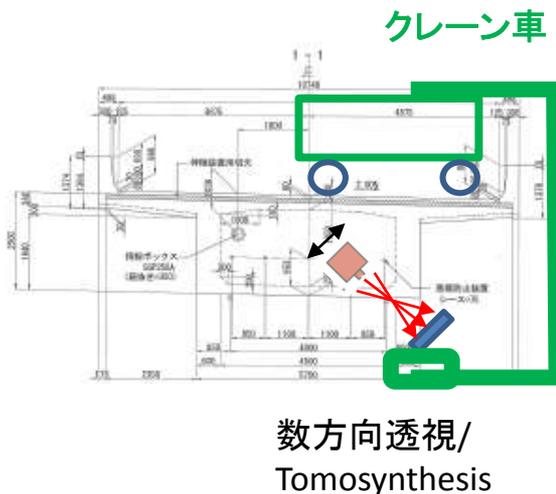
4.2 橋梁タイプ別の測定体系

橋梁タイプ: T桁橋・箱型桁橋・床版桁の3種類

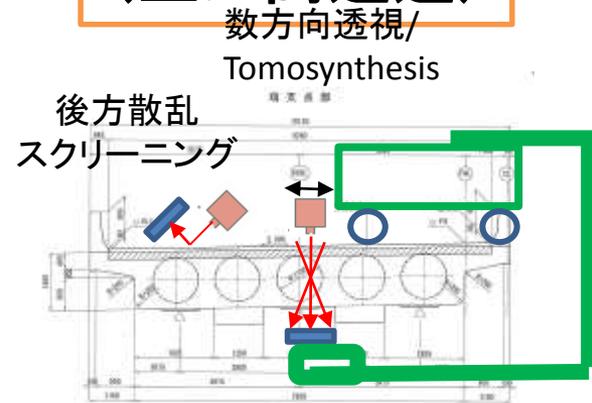
T桁橋
(主に地方管轄道)



箱型桁橋
(主に国道)



中空床版桁橋
(主に高速道)



数方向透視/
Tomosynthesis



950 keV / 3.95 MeV X線源



X線カメラ/
イメージングプレート



専用回転ステージ、
足場を用いた撮影

橋梁点検車など
を用いた撮影

鉄筋が複雑に重なりあう部分の識別

→部分角度CT・tomosynthesis等を適用

社会インフラ“往診”の七つ道具

- 放射線源

950keVX線源、3.95MeVX線・中性子源、300kVX線管、水処伝中性子源 (^{252}Cf , 日立PS)、電磁レーダー

- セッティング

足場、橋梁点検車

- 内部構造判定

透視画像、部分角度CT、Tomosynthesis

- 構造解析

ファイバーモデルはり理論、3次元非線形鉄筋コンクリート

まとめ

950keVXバンドライナックX線源による実橋梁のその場内部透視試験・構造強度劣化が開始された(H27.11.4-6)

- ・可搬型950keVXバンドライナックX線源は社会インフラ検査用に平成27年11月4-6日妙高大橋試験開始。PC鋼の切断、断面積減少を10%刻みで判定した。3次元構造解析により降伏モーメントの5%減少を判定。
- ・今年度実験室での成果による、PC,RC鋼の断面積減少が5%以下で評価でき、構造耐力の減少も5%で評価できる目処が立った。
- ・装置の改良による操作性も向上し、適切かつ迅速なセッティング・測定・撤収が可能になった。

内部鉄筋の直径減少の評価の高精度化

- ・実験室におけるファントムを用いた、全・部分角度CTとTomosynthesisの試験を行った。
- ・橋梁現場において、30°頂角のX線コリメータを使って水平走行して、+/-15°相当スキャンCT, Tomosynthesisを想定し、直径6-10mmのPC,RC鋼の直径を1mm以内の精度で判定できる見込みである。

今後の展開

- ・新潟県実橋梁(箱型橋)での第2回目の試験(950keVX線源は道路上に設置して片側通行)。その場でSIPプロジェクトの中間審査。
- ・北海道実橋梁(T桁橋)の試験。
- ・3.95MeVX線(40cm厚以上)・中性子源(水分検出)の利用。