

3.95MeV 高出力X線源による PC橋のグラウト充填調査

令和6年11月 5日

東日本高速道路(株) 新潟支社 専任役 西川 孝一
(株)ネクスコ・エンジニアリング新潟 土木事業部 土木技術部構造技術課長 佐藤 英頼

あ な た に、ベ ス ト・ウ ェ イ。



- 本日は、放射線のインフラ点検への活用の一事例として、高速道路の橋梁における高出力X線によるPCグラウトの充填調査についてご紹介させて戴きます。

はじめに

プレストレストコンクリート橋のPCグラウト充填不良はPC鋼棒の腐食、破断を招き、橋梁全体の健全性に重大な影響を及ぼします。

従前のPCグラウト充填確認方法は、主に非破壊検査により確認するが、コンクリート厚さ40cmを超えるとその精度が低下し、新たな検査手法の開発が求められていた。

表1 従前確認方法の比較

調査方法	対象鋼棒		探傷範囲	適用条件
	主/斜鋼棒	横締め鋼棒		
削孔調査	○	○	—	全調査に削孔、埋め戻しが必要
衝撃弾性波	×	○	—	横締めPC鋼棒しか適用出来ない
インパクトエコー (IE)	○	△	150mm	探傷範囲は空隙大きさ/深さ = 0.25以内
広帯域超音波 (WUT)	○	△	250mm	かぶり25cm以下かつ鉄筋重複部の調査不可
低出力X線透過 (RT)	○	○	400mm	照射時間2時間程度必要

※ IE法の探傷範囲はシース径φ38mmとした場合を記載。RTはコンクリート厚さを記載

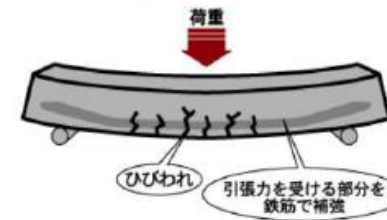
プレストレストコンクリート橋

- ・鉄筋コンクリートは引張力に対して鉄筋で抵抗する構造
- ・大きな荷重が作用するとひび割れが発生することは避けられない

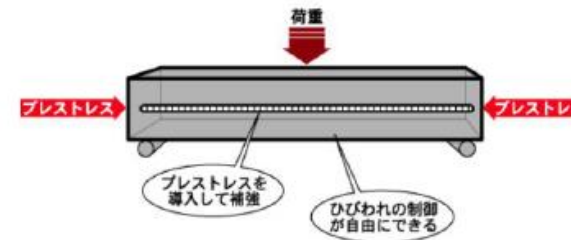


- ・コンクリートにあらかじめ圧縮力（プレストレス）を導入することでひび割れが生じない構造とすることができる
- ・プレストレスの導入には一般にP C鋼材（PC鋼棒、PC鋼線、PC鋼より線）を使用

鉄筋コンクリート



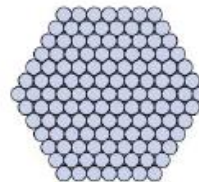
プレストレストコンクリート



鉄筋コンクリートは、引張力に対して鉄筋で抵抗する構造ですが、コンクリートの多少のひびわれは避けられません。一方、プレストレストコンクリートではあらかじめコンクリートに圧縮応力を作用させることによって、ひびわれを生じさせない構造としたり、ごくわずかのひびわれ幅に制御することも可能です。



PC鋼棒



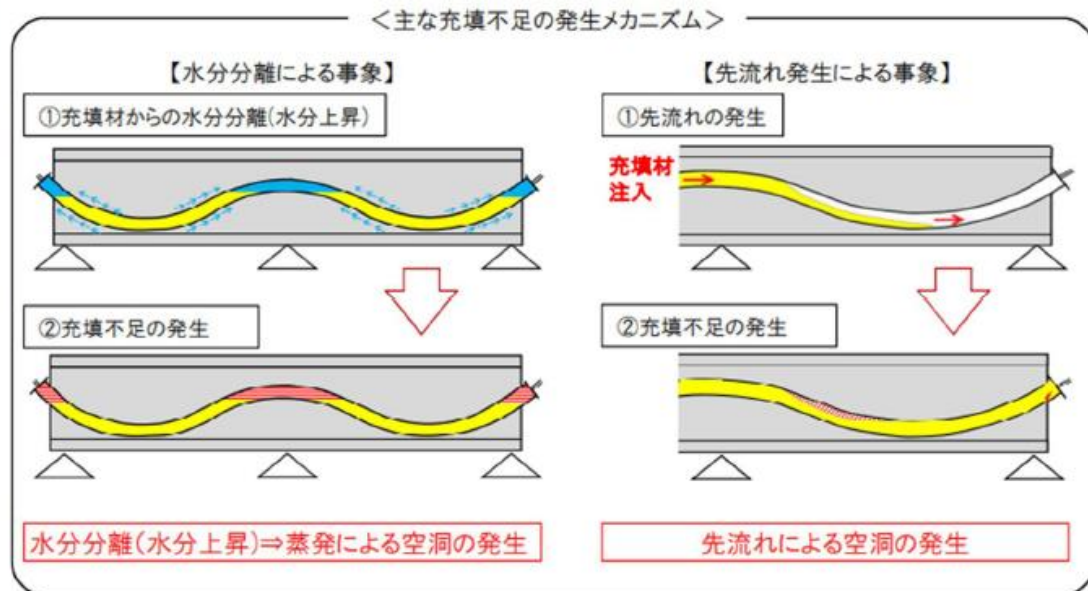
PC鋼線



PCより線

PCグラウトとは

- P C 鋼材とコンクリートを一体化し、さらに P C 鋼材を腐食から守るために、シース内にPCグラウト（水+セメント+混和剤）を充填
- 技術（材料、注入、検査技術）が未熟であった時代（主に2000年以前）は、未充填の可能性有
→ 水等の侵入により鋼材が腐食・破断する恐れ



令和6年3月5日 令和6年第7回原子力委員会資料第1号
放射線によるインフラ検査の利活用 より転載

高出力X線の適用

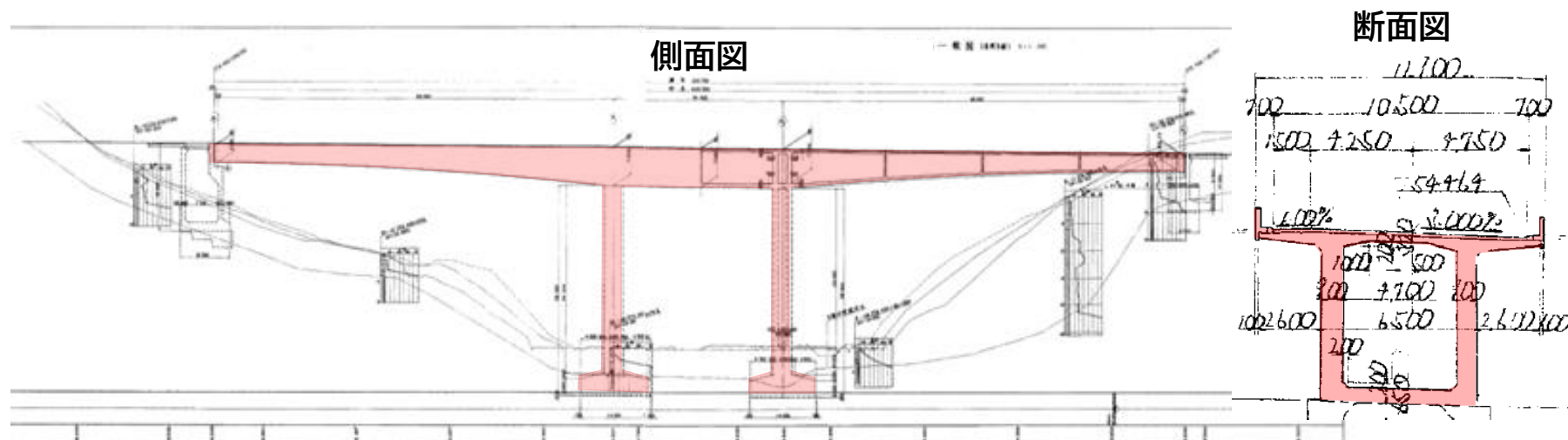
過去にPC鋼棒の破断突出事象が発生している北陸道下り線「万蔵川橋」にて高出力X線(3.95MeV)と高感度な検出器を用い、コンクリート厚さ1mの壁内に位置するPCグラウト充填調査を実施。



万蔵川橋外観

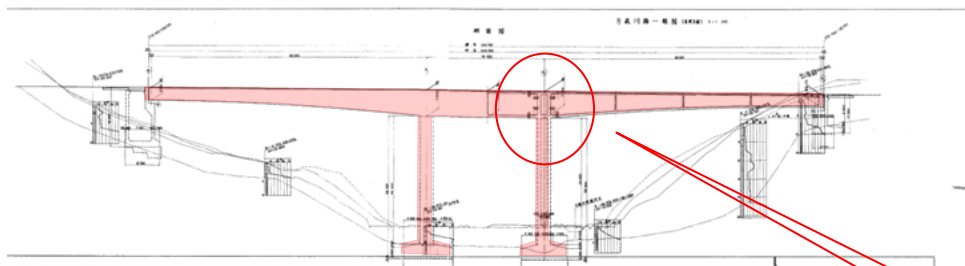


橋梁概要



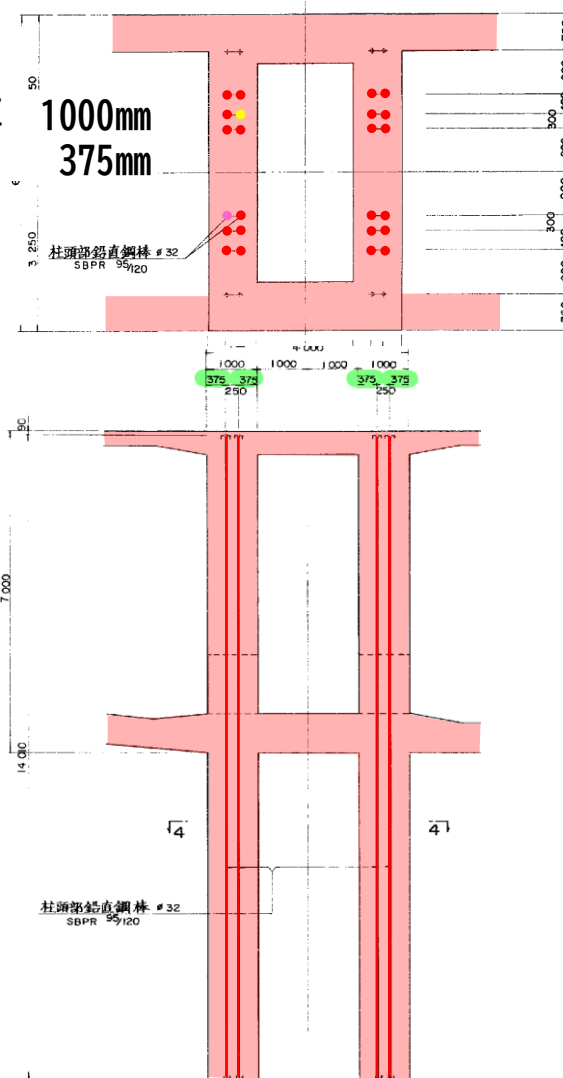
	上り線	下り線 (高出力X線試行対象)
構造形式	PC3径間連続π型ラーメン箱桁橋	PC3径間連続π型ラーメン箱桁橋
橋 長	206.700m	206.700m
桁 長	206.500m	206.500m
支 間	85.0m + 35.0m + 85.0m	85.0m + 35.0m + 85.0m
有効幅員	10.500m	10.500m
供用年次	1983年 (昭和58年)	1983年 (昭和58年)

調査実施までの経緯



断面図

壁厚
深さ



隔壁厚1.00mと厚いこと 並びに鉄筋の後ろ側の壁表面から375mmの位置にPC鋼材があるため、2020年時点では非破壊検査による調査が出来なかった。

このため、最新技術の情報収集に努めていたところ、2020/8 東京大学 上坂教授から「X線を用いたPC橋及びRC橋の内部観察手法について」のご講演を受け、万蔵川橋で試験的に実施できないか検討を行った結果、可能性が高いと判断。

破断したPC鋼材は施工時に必要なもので、突出対策済みであり、現時点ではこの鋼材が無くても設計上、設計耐力は保持されていることを確認したため、日常点検の重点対象として対策を一旦終了している。

高出力X線調査実施概要

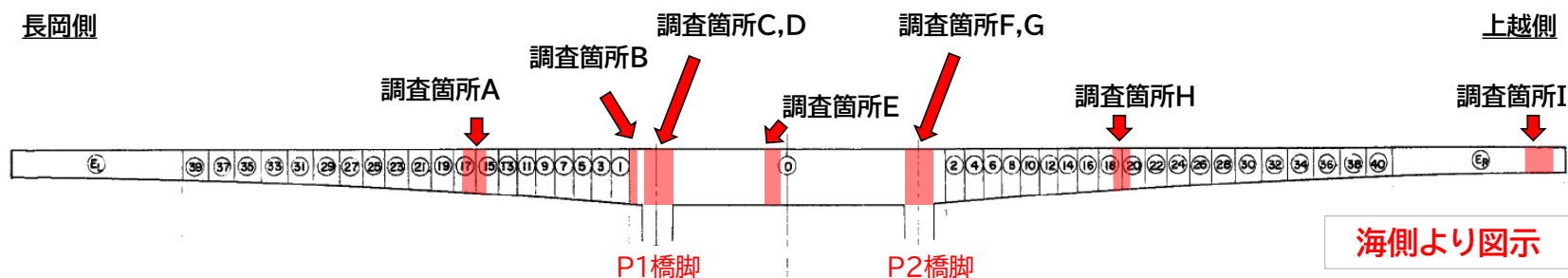
- 本検査の目的：PC鋼棒辺縁部のグラウト有無画像の評価と判定
- 実施期間：2023年9月1日～10月18日の約1.5ヶ月
- 検査数：万蔵川橋柱頭部47本、側壁部8本、下床版部1本の合計56本
(本報告では、特徴的な画像を説明する)
- 調査会社：(株)ネクスコエンジニアリング新潟 【調査協力実施：(株)アトックス】
- 使用機材：①万蔵川橋マンホールに搬入可能な小型で可搬的な X線発生装置とシステム
(X線源出力 3.95MeV、1.1Gy/min)
②高感度検出器 (S I D：スキャニング型イメージディテクター)
③装置の位置精度確保のためのアライメント治具、移動レール類
④X線透過画像よりPC鋼棒特定のための予測ソフト
- 評価：事前に万蔵川橋と同様の模擬体を製作し空隙画像、数値化の検討を実施後、実際に万蔵川橋で評価を行った
グラウト有無判定は、次の三点より行った
 - ①X線透過画像
 - ②コンクリートと空隙との輝度値比較
 - ③空隙隙間寸法

高出力X線調査測定箇所

◆広帯域超音波測定での測定困難箇所と柱頭部で実施

- (1) PC鋼棒のかぶり厚が概ね300mm以上の箇所
- (2) 主鉄筋および斜鋼棒等の鋼材が重複もしくはは間隔が狭い箇所
- (3) 主鋼棒の設置間隔が密な箇所
- (4) WUTにより未充填と判定された箇所
- (5) 柱頭部の鉛直鋼棒

上記条件に該当する箇所を対象に調査を実施した。

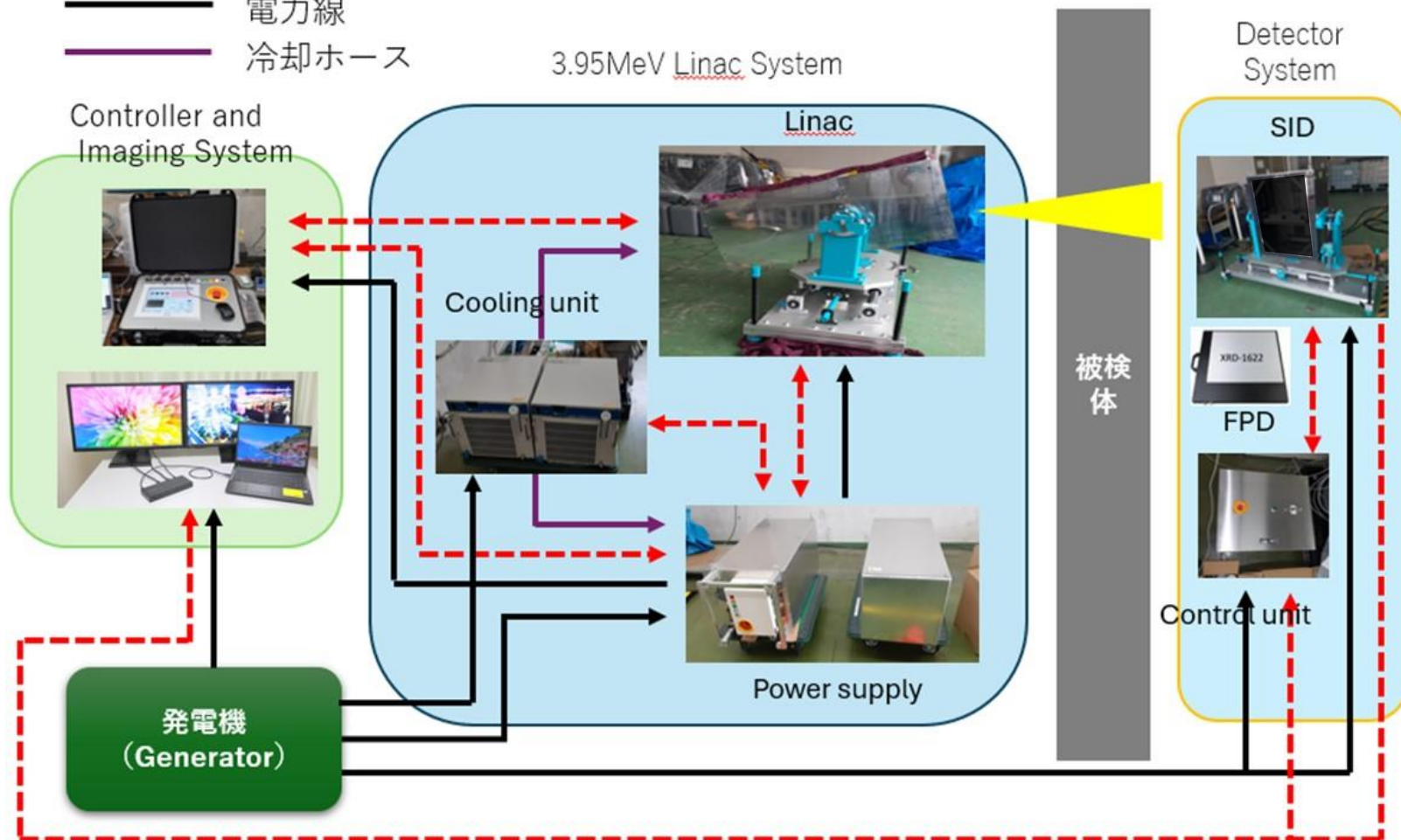


調査箇所	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
上越側点検口までの距離	147m	127m	123m	117m	107m	88m	82m	57m	7m	
該当する選定条件	(2)	(1), (2)	(1), (5)	(1), (5)	(3)	(1), (5)	(1), (5)	(4)	-	
コンクリート厚さ	600mm	1270mm	1000mm	1000mm	750mm	1000mm	1000mm	500mm	200mm	合計
PC鋼棒の調査数量	3本	1本	12本	12本	1本	11本	12本	3本	1本	56本

高出力X線調査システム概要

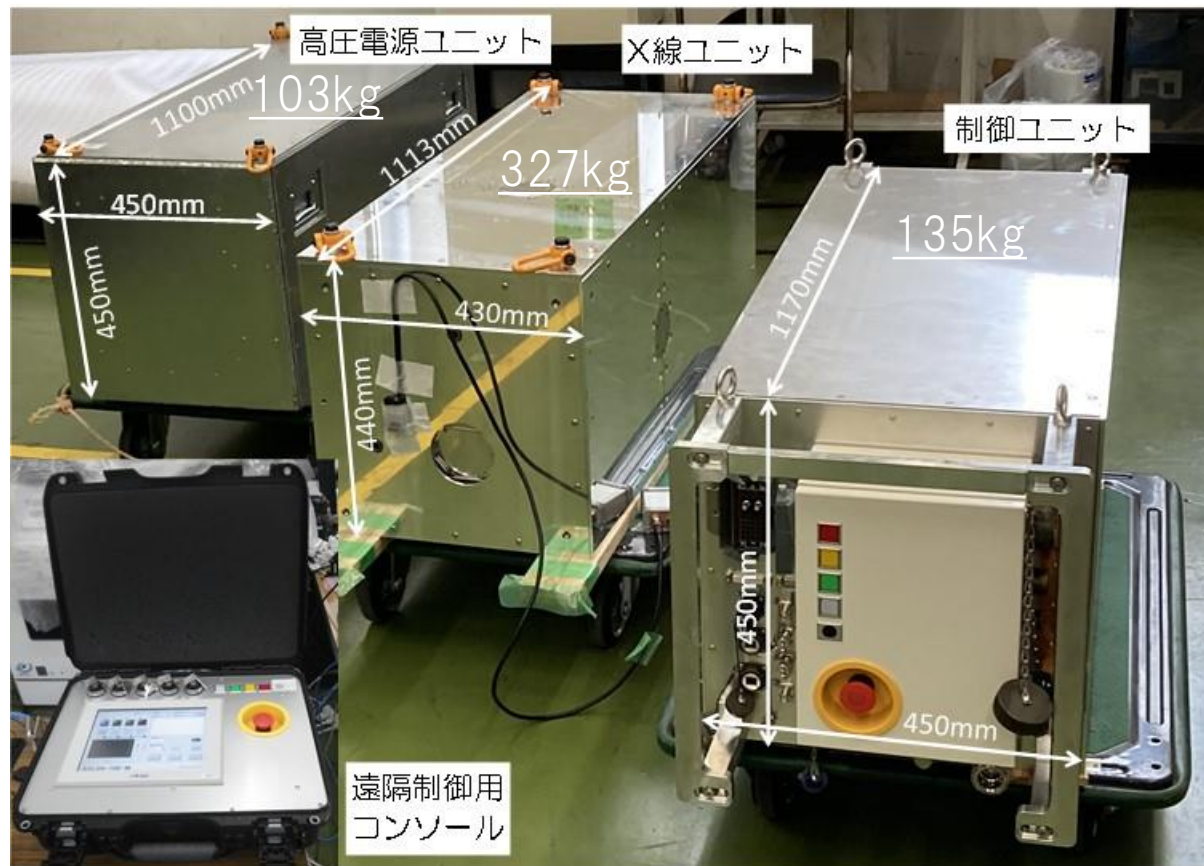
小型で可搬的なシステムを構築

- 制御・信号線
- 電力線
- 冷却ホース



使用機器①

3.95MeV X線発生装置類(電源・X線源・制御・冷却)



(株)アトックスによる小型化

PC箱桁橋の点検孔(1000×1000)
や箱桁内の点検口(600×600)を
通過できる機器を使用



使用機器②

X線検出器

柱頭部、側壁部用

SID:スキャニング型イメージディテクター
幅690×奥行351×高さ829(mm)、重量93(kg)



床版部用

FPD:フラットパネルディテクター
型式:4343HE
幅630×厚み24.5×高さ540(mm)、重量14.6(kg)



機器搬入等状況

作業状況



機材吊り降し



箱桁内搬入



箱桁内機材移動(隔壁通過)



電源車、本部車設置状況

機器設置状況

機材設置状況

柱頭部



壁に対して垂直にX線を充てると鋼材が重複するため水平方向に15°の角度をつけて撮像

側壁部

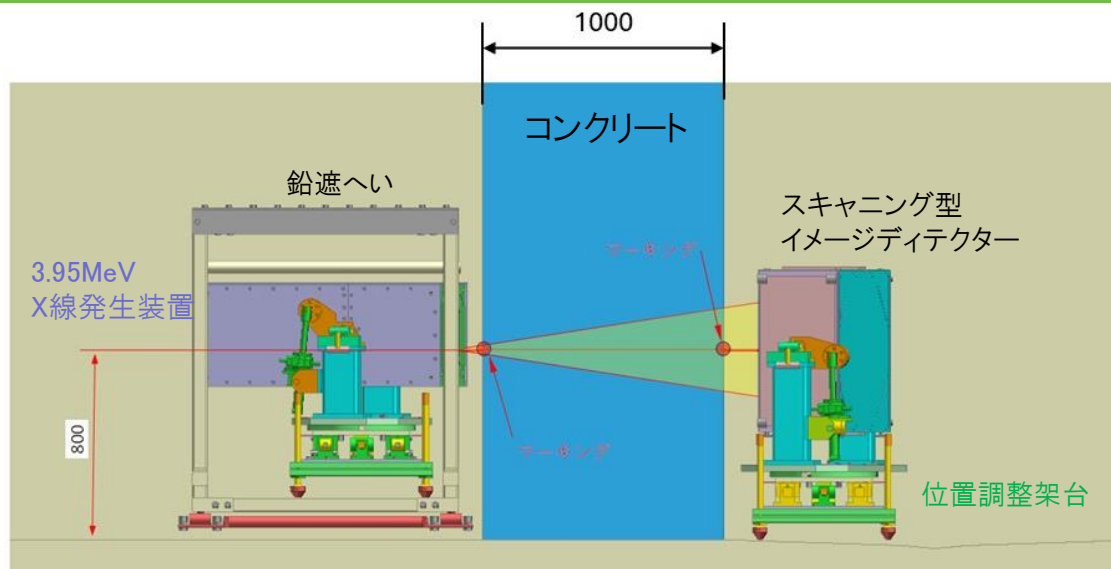


側壁部は上下方向に15°の角度をつけて撮像

機器配置イメージ

柱頭部装置配置

断面図

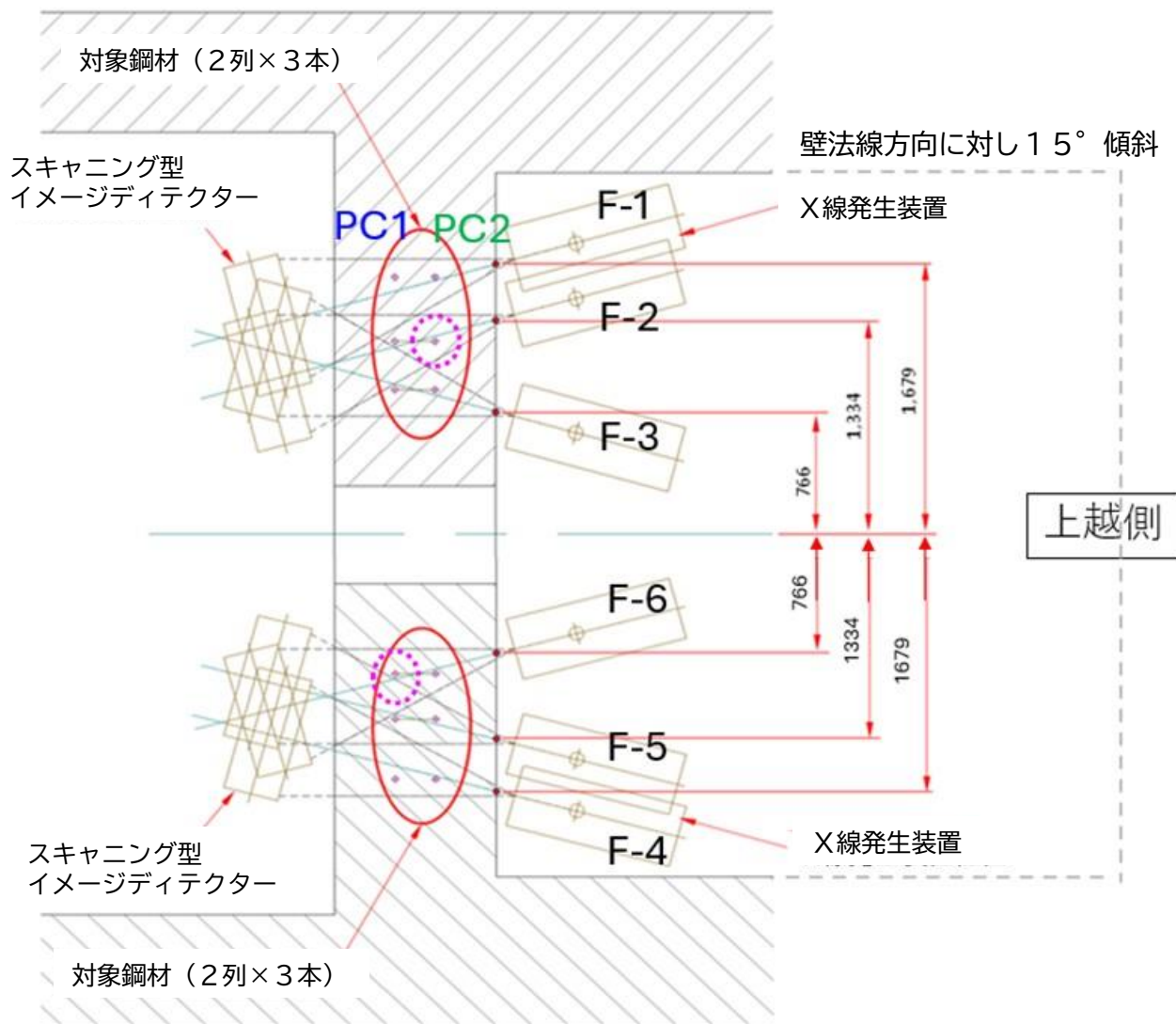


俯瞰図



柱頭部での機器配置

柱頭部の機器配置



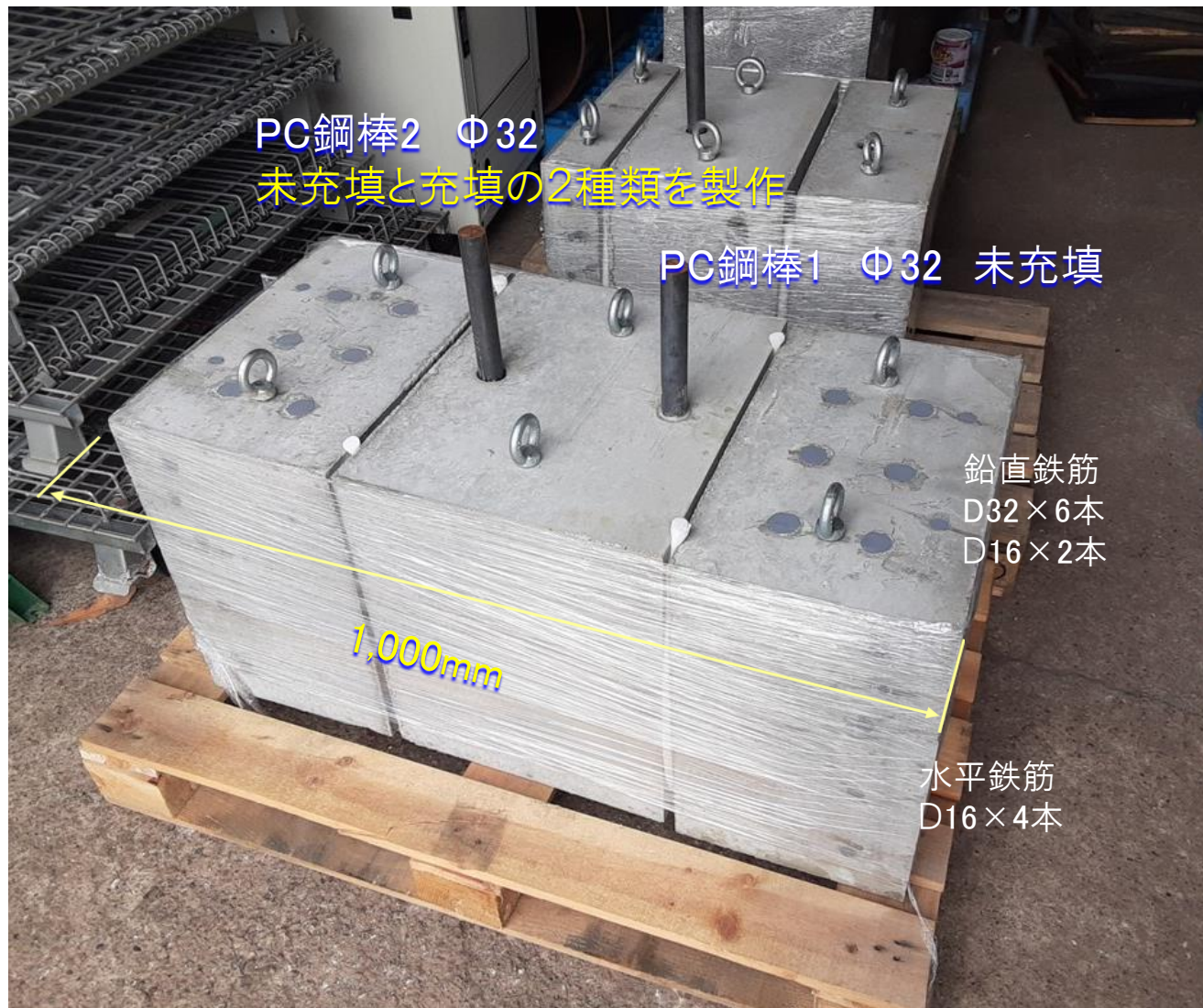
模擬試験体

模擬試験体

実橋での調査に先立ち
PC鋼材グラウト未充填を模擬した試験体にて確認実験を実施

万蔵川橋の柱頭部の配筋状態を再現

コンクリートの配合は 建設当時の配合を再現



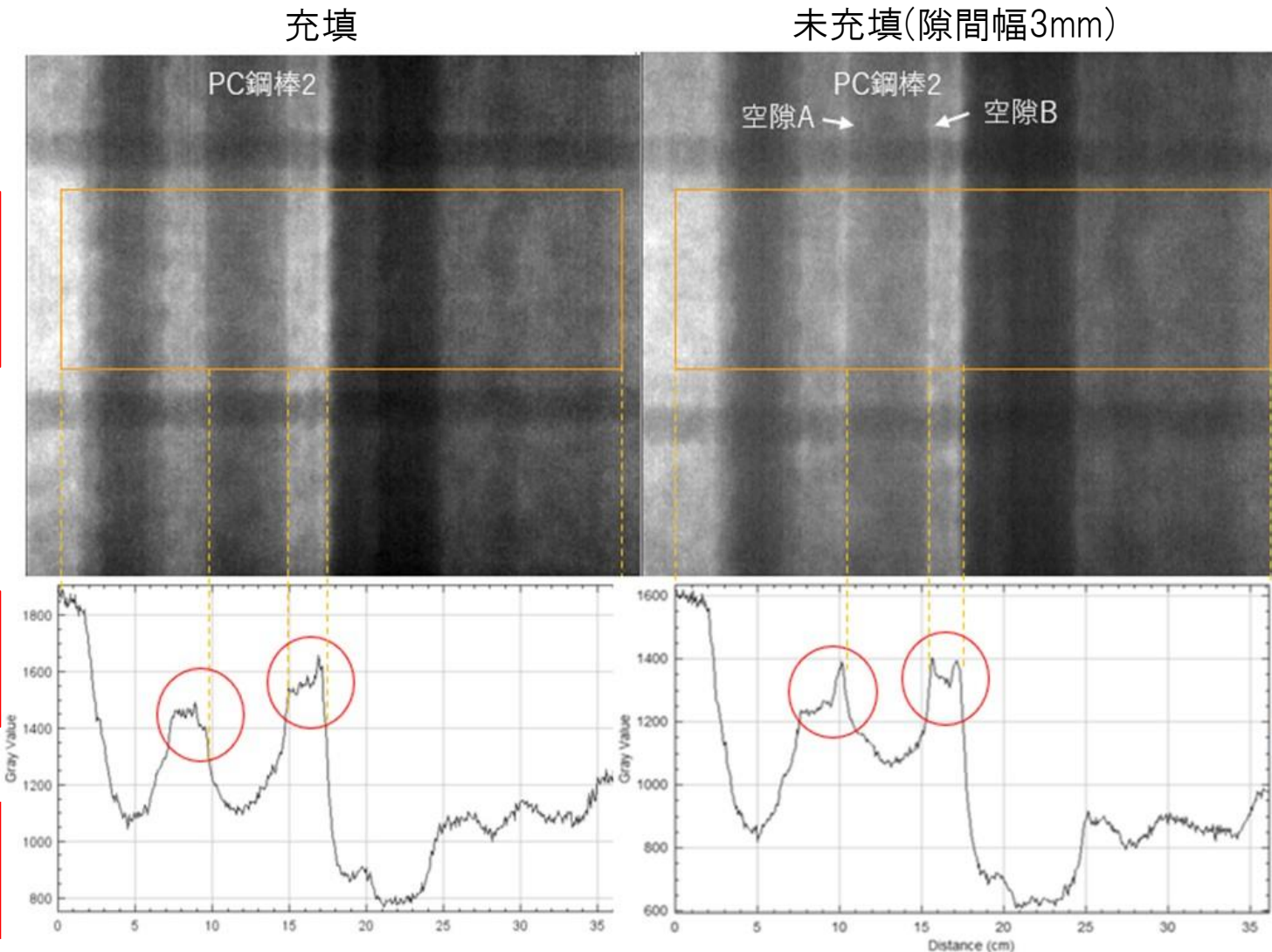
模擬試験の結果

模擬試験体での 画像比較

X線透過画像の評価について
グレースケール32bit階調の
輝度値として数値化し、
画質及び空隙評価を実施

縦軸に橙枠内の縦方向の平均
輝度値をとり、横軸は水平方
向の位置としてグラフ化

結果、空隙の有無でPC鋼棒2
の辺縁部の輝度値に明確な違
いが見られた



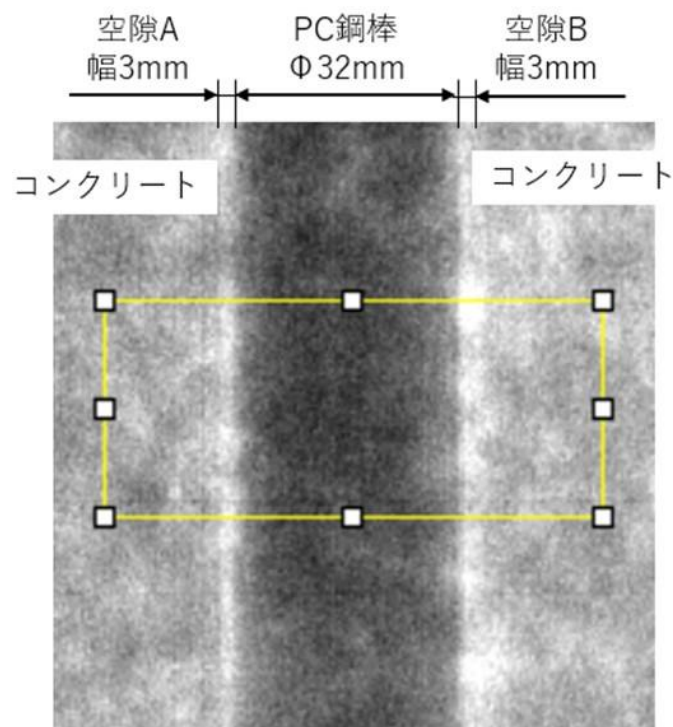
参考文献：コンクリート橋検査における可搬型高エネルギーX線源の透過X線撮像能力の定量化
竹内大智, 小沢孝生, 上坂充, 他 土木学会論文集E 2, Vol. 74, No.1, 66-79, 2018

定量的判定指標の検討

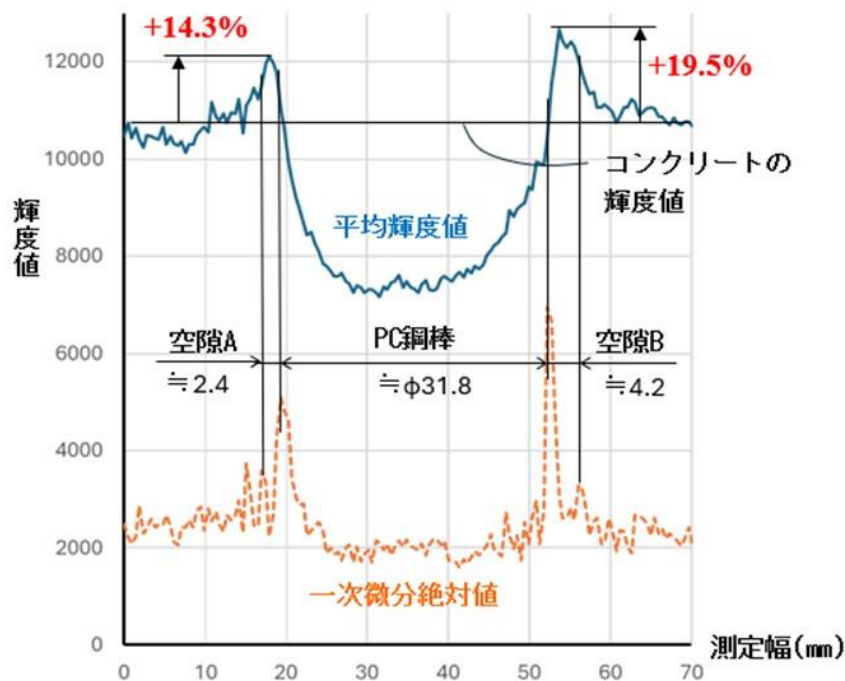
模擬試験体での輝度値比較の結果から

評価指標： $\{(\text{鋼棒辺縁部の連続的白色部の平均輝度値}/\text{コンクリート部の平均輝度値})-1\} \times 100$

10(%)以上の差が見られた場合
未充填の可能性大として評価
することとした



空隙部拡大



輝度グラフ

PC鋼棒の特定

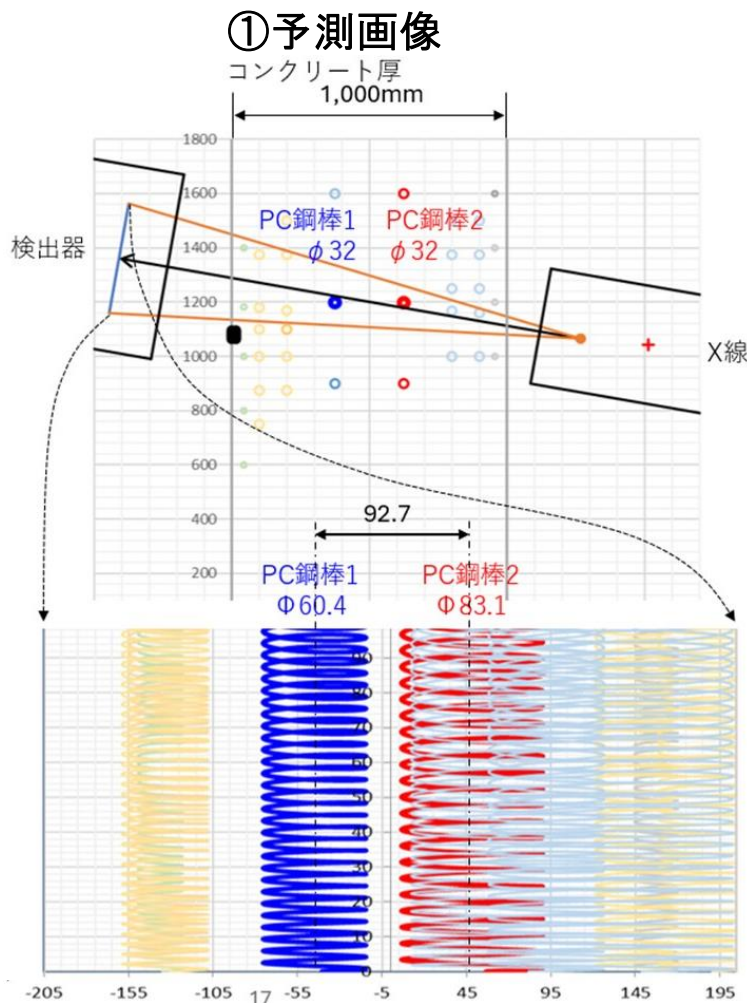
X線透過画像のPC鋼棒特定 (柱頭部の例)

レイアウト図

予測画像

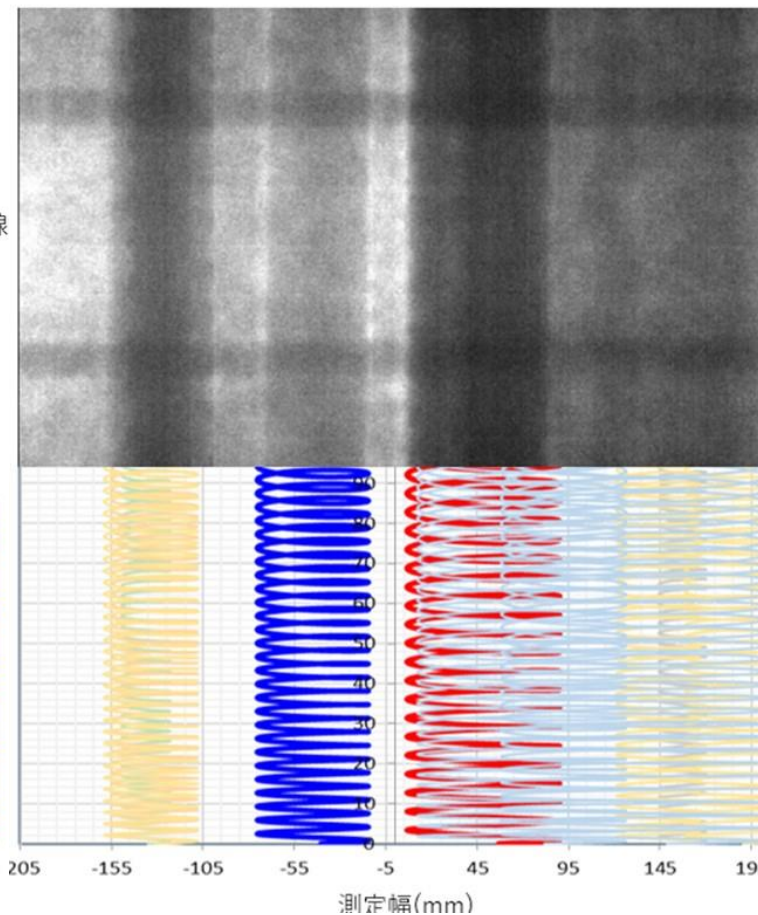
配筋図を基に撮像されると考えられる鋼材の透過画像上の予測画像を作成し、取得画像と照合することで特定した。

測定幅(mm)



② 取得画像とのフィッティング

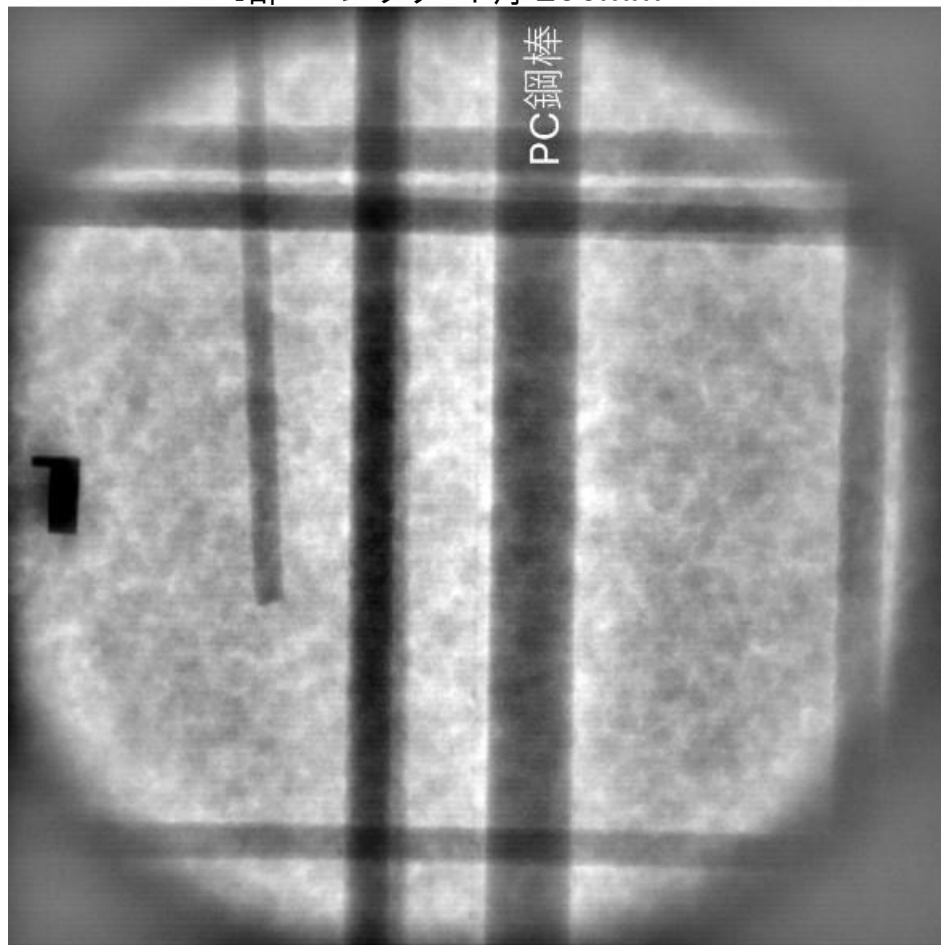
鉄筋 PC鋼棒1 PC鋼棒2と鉄筋が重複



取得透過画像①

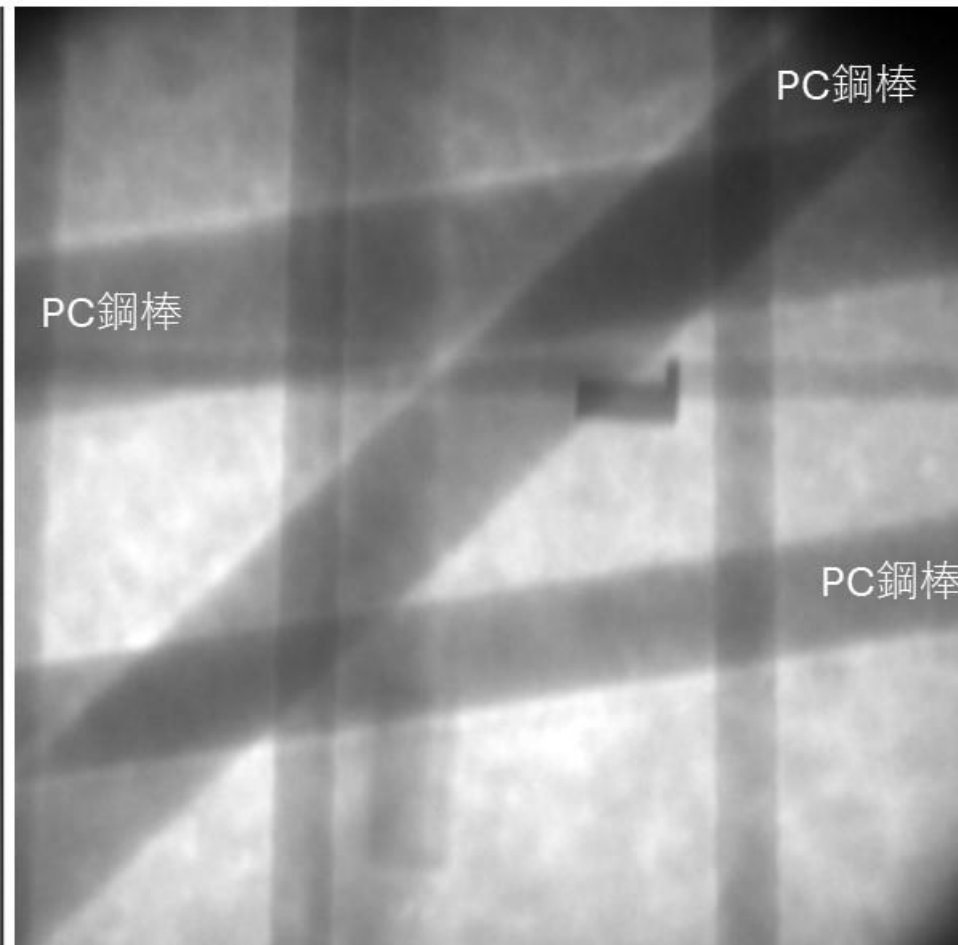
万蔵川橋X線透過画像 1

I部:コンクリート厚200mm



FPD

H部:コンクリート厚500mm



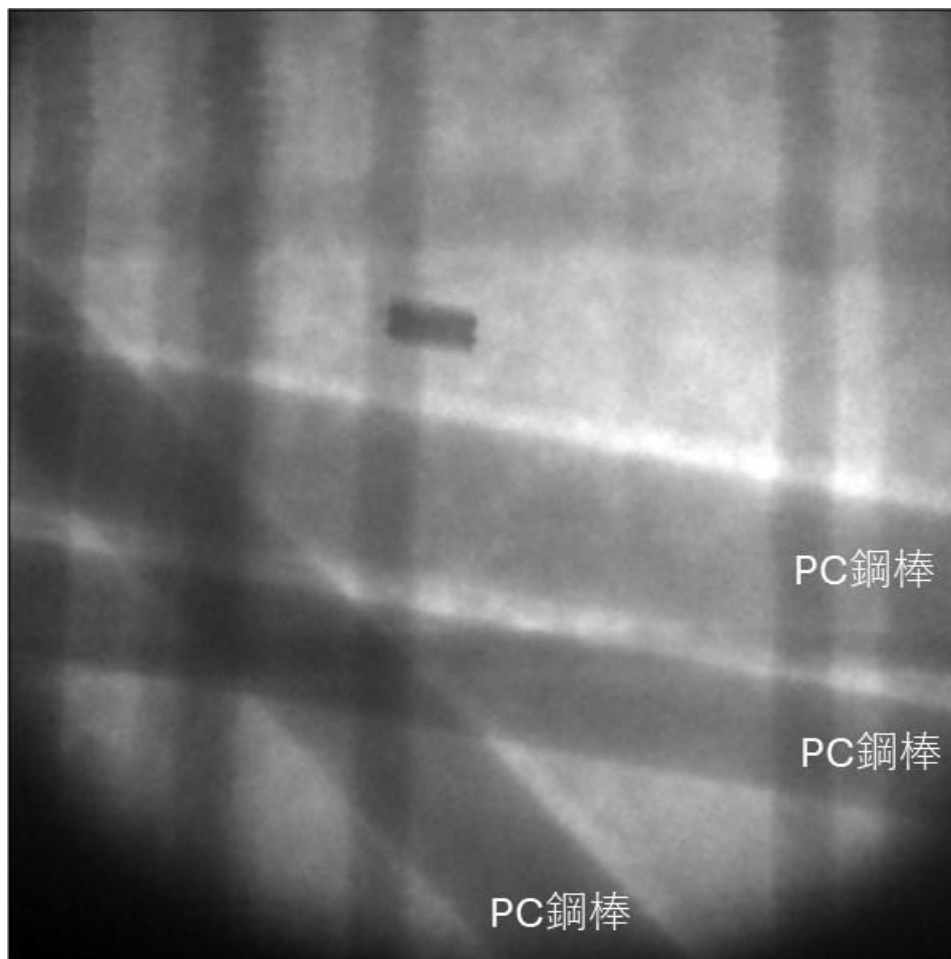
SID

取得透過画像②

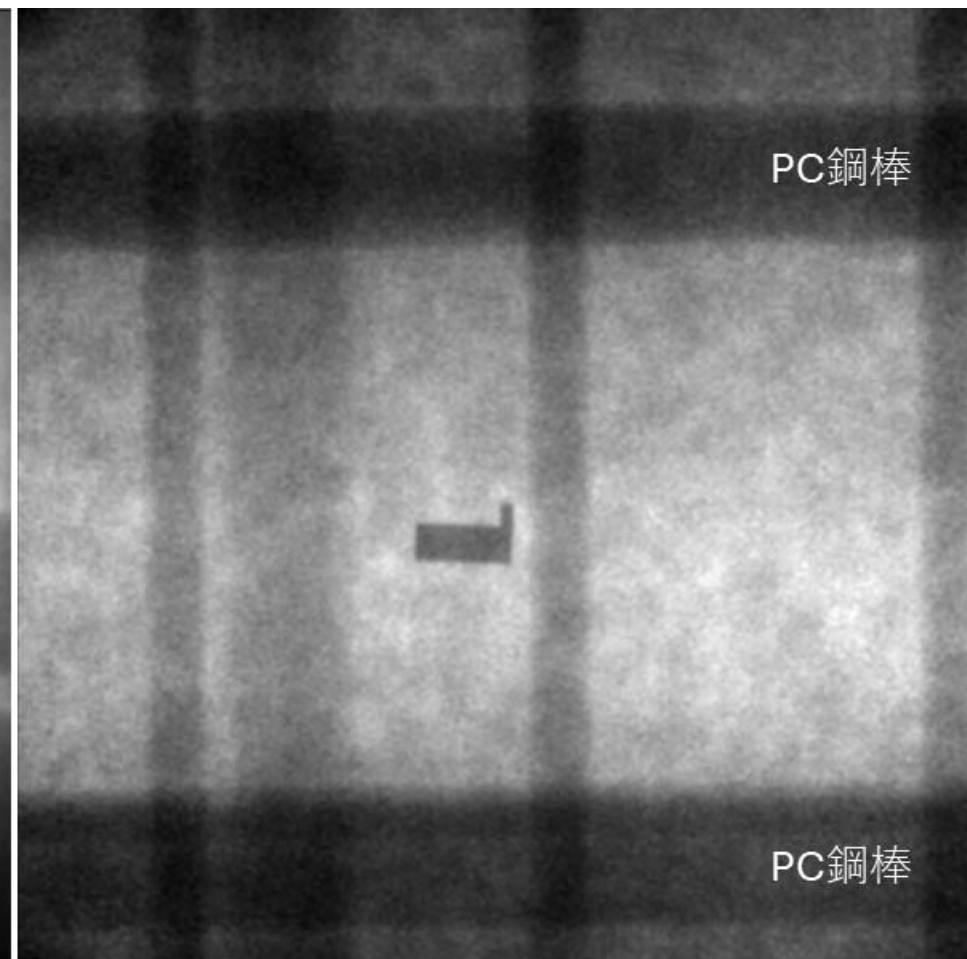
万蔵川橋X線透過画像 2

A部:コンクリート厚600mm

E部:コンクリート厚750mm



SID

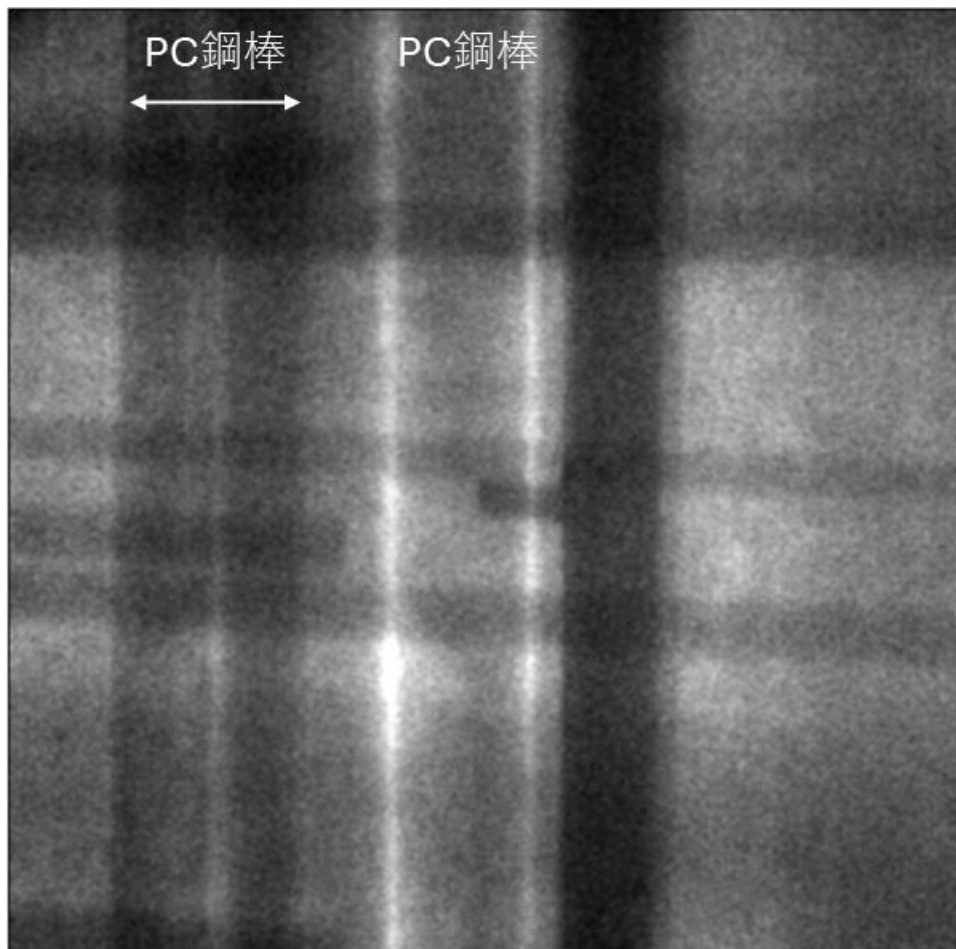


SID

取得透過画像③

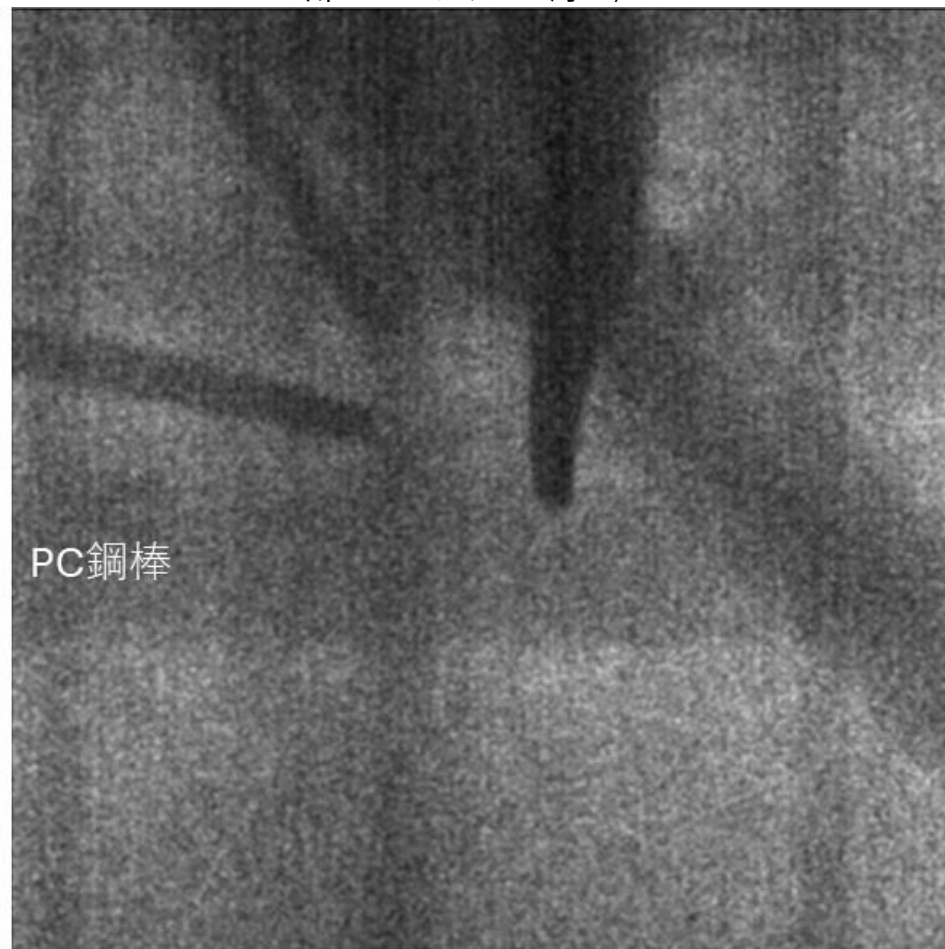
万蔵川橋X線透過画像 3

G部:コンクリート厚1,000mm



SID

B部:コンクリート厚1,270mm

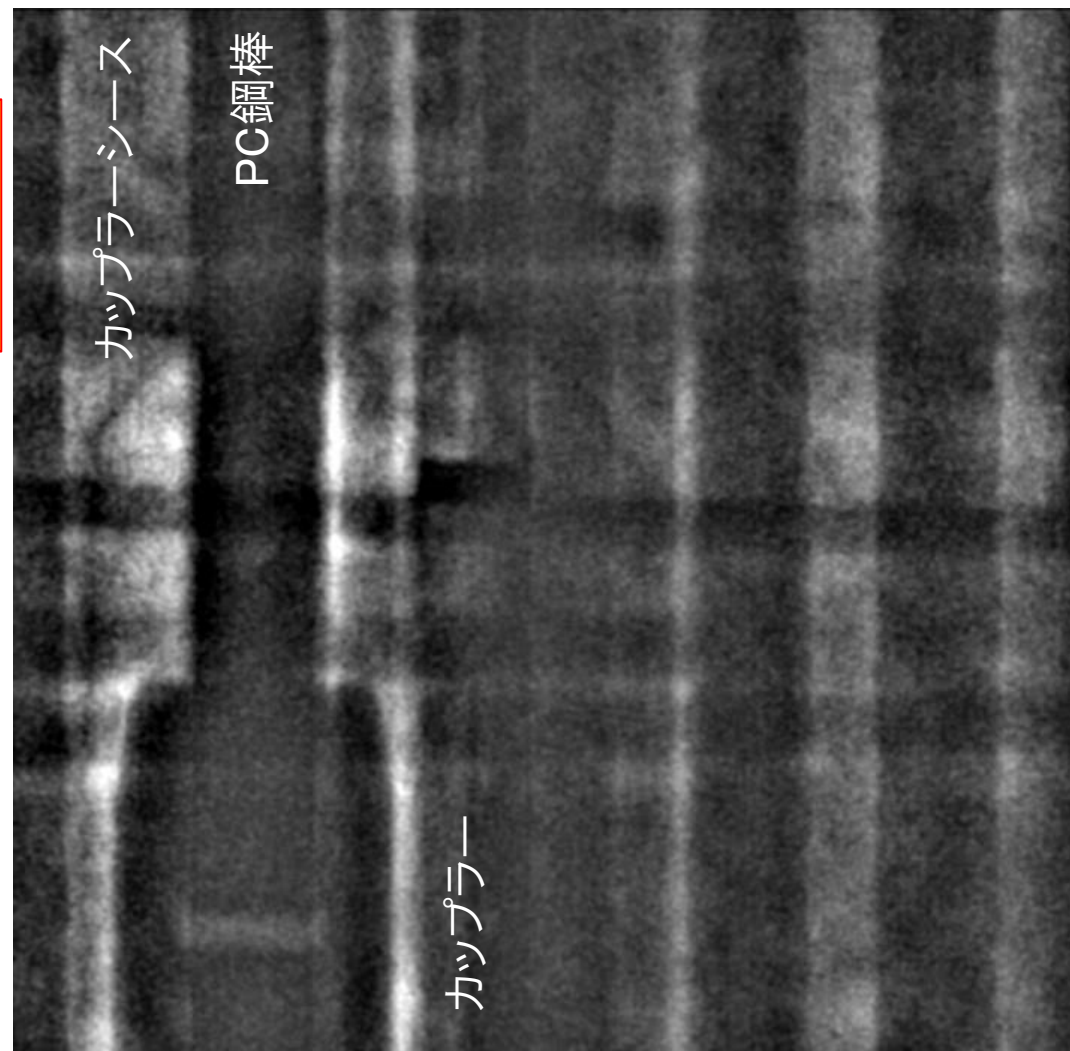
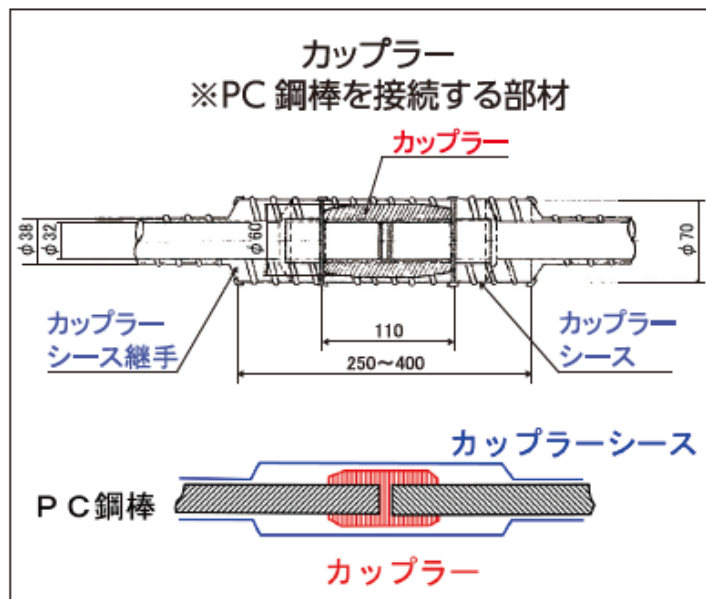


SID

特徴的な取得画像(参考)

柱頭部D-6 透過画像

壁厚1m内の鋼材の画像
PC鋼棒を接続するカップラーが写っており
カップラーシースと空隙と思われる白い
エリアも確認出来る



調査結果

本調査における調査結果を示す。



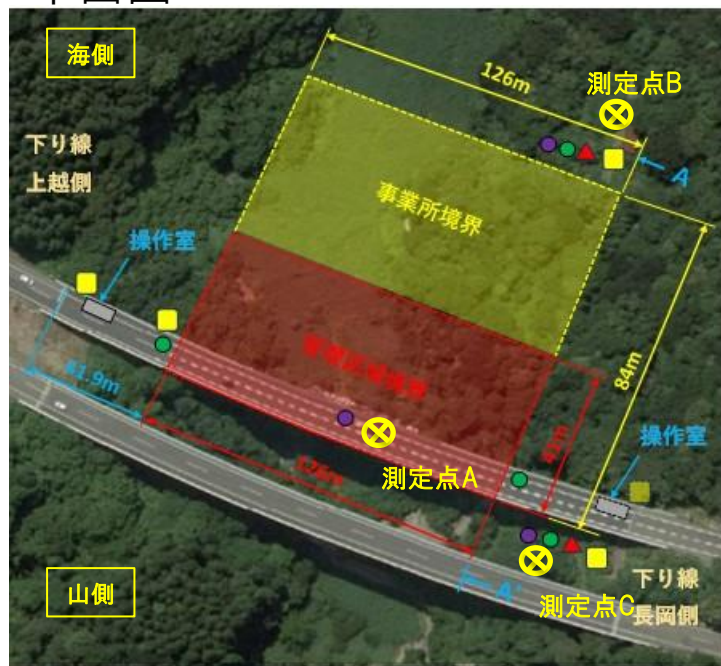
項目	調査箇所		C						D						E	F						G						H	I	合計	
	A	B	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6		F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6				
PC-1	○	○	×	○	○	○	×	○	○	不	×	外	不	×	○	○	×	○	外	○	無	不	○	○	×	×	○	○	○	○	○
PC-2	×	-	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	不	×	-	○	×	○	○	○	×	不	○	○	○	×	○	×	○	×	-
PC-3	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
評価数	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	1	56
未充填の可能性が低い	2	1	1	2	2	2	1	1	2						1	2		2	1	2			2	2	1		2	2	1	32	
未充填の可能性が高い	1		1				1	1		1	2	1		2		2				1					1	2		1		17	
その他										1		1	2								2									7	

<凡例> ○：未充填の可能性が低い ×：未充填の可能性が高い 不：解析不可 外：照射視野外 無：PC鋼棒無し □PC鋼棒突出箇所

X線透過画像を評価した結果、全56本のPC鋼棒のうち、17本(約30%)でグラウト未充填の可能性が高い調査結果となった

高出力X線調査 管理区域の設定

平面図



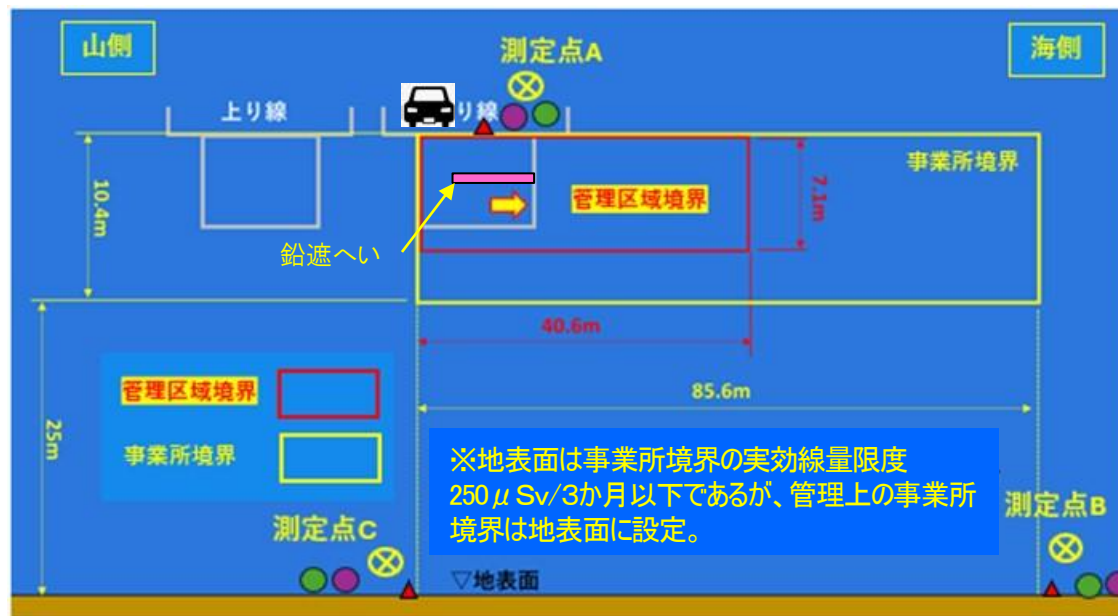
- : 管理区域境界
1.3mSv/3か月
- : 事業所境界
250 μ Sv/3か月
- : 監視人
- : 放射線測定員
- ▲ : バリケード設置位置
- : パトライト設置位置

放射性同位元素等の規制に関する規則（電離放射線障害防止規則（第三条等））に基づき、各調査箇所にてX線発生装置の照射時間を決定し、X線漏洩を放射線シミュレーションにて事前評価し設定。

X線源上部を鉛板で遮へいし
高速道路の通行止めは回避

放射線シミュレーションの結果
最大積算線量となる地点の
範囲を調査箇所全体に適用
管理区域境界 126m×41m
事業所境界 126m×84m
と設定

断面部
上越側より記載
(A-A'断面)



照射時間の実績比較

調査箇所 A ~ I の照射時間並びに取得画像数（計画/実績比較）

調査箇所		A	B	C	D	E	F	G	H	I
計画	撮像箇所数	1	1	6	6	1	6	6	1	1
	照射回数	3	3	18	18	3	18	18	3	3
	スキャン速度 (mm/sec)	1	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2	0.2	1	—※
	照射時間 (min/回)	06:40	33:20	33:20	33:20	13:20	33:20	33:20	06:40	1:00
	総照射時間 (sec)	1,200	6,000	36,000	36,000	2,400	36,000	36,000	1,200	180
	取得画像数	3	3	18	18	3	18	18	3	3
実績	撮像箇所数	1	1	6	6	1	6	6	1	1
	照射回数	7	8	35	32	9	44	38	4	5
	スキャン速度 (mm/sec)	5	2	2	2	5	2	2	5	—※
	照射時間 (min/回)	01:22	03:25	03:25	03:25	01:22	03:25	03:25	01:22	0:30
	総照射時間 (sec)	360	1,740	10,080	10,080	1,260	11,460	11,040	240	156
	取得画像数	7	6	28	27	8	28	30	3	5
実績/計画	総照射時間比	1/3.3	1/3.5	1/3.6	1/3.6	1/1.9	1/3.1	1/3.3	1/5	1/1.2
	取得画像数比	2.3	2.0	1.6	1.5	2.7	1.6	1.7	1.0	1.7

※調査箇所 I は F P D 使用のためスキャン速度の設定はない

各調査箇所の照射時間は、模擬試験体での試験の状況から、計画時よりも1/5~1/10に短縮しても判定可能な画像が取得できたことから、これにより撮像回数を増やすことができ、細かい位置調整やより明確な画像取得が可能となった。
結果、現場における照射時間のロスを含めても、総照射時間は概ね 1 / 3 となった。

線量予測と実績の比較

各調査箇所のX線積算線量は、当初計画していた線量に対し大幅に削減された。これは模擬試験体での試験の結果、安全側に設定した計画線量よりも照射時間を短縮したことが大きな要因と考えられる。実績積算線量は高速道路路面方向に対しては最大でも 1/77 となり、装置上部の鉛遮蔽や管理区域の縮小など、今後の調査の効率化につながる結果であった。

調査箇所 A ~ I の積算線量値 (計画/実績比較)

単位: μSv

調査箇所		A	B	C	D	E	F	G	H	I	
計画	測定点	A	218	237	136	136	235	136	136	238	75
		B	0.64	0.64	0.1	0.1	0.64	0.1	0.1	0.64	—
		C	0.14	0.14	0.08	0.08	0.14	0.08	0.08	0.14	—
		D	—	—	—	—	—	—	—	—	176
実績	測定点	A	0.745	1.567	1.304	1.248	1.312	1.621	1.768	0.433	0.39
		B	0.024	0	0	0	0.034	0	0	0.016	—
		C	0.023	0	0	0	0	0	0	0	—
		D	—	—	—	—	—	—	—	—	31.6
実績/計画	測定点	A	1/293	1/151	1/104	1/109	1/179	1/84	1/77	1/550	1/192
		B	1/27	—	—	—	1/19	—	—	1/40	—
		C	1/6	—	—	—	—	—	—	—	—
		D	—	—	—	—	—	—	—	—	1/6

・ 協議先一覧

	関係機関	内容	備考
1	原子力規制庁	放射性発生装置の一次的な使用場所の変更届	放射性同位元素等の規制に関する法律第10条第6項
2	高速道路交通警察隊	道路工事等協議書	道路法第80条に基づく道路規制協議
3	地元警察署	道路使用許可申請書	届出要件に該当しないため提出せず
4	地元自治体	道路占用許可申請書	届出要件に該当しないため提出せず
5	地元自治会	作業内容の説明	市街地でないため自治会には説明せず
6	地権者	作業内容、立入制限等の説明	今回は1名のみ
7	労働基準監督署	機械等設置・移転・変更届（足場設置届）	労働安全衛生法、労働安全衛生規則に該当するため届出

今回の調査対象橋梁は山間部の谷に架かる橋梁であり、周辺に住居等は無く、谷底低地部に休耕田がある環境。
また、幅員3m程度の林道が1本あるのみで、調査実施時に通行する車両もほぼ無い状況であったことから、通行規制や進入制限等に関して問題となる事象は発生しなかった。

主な成果及び今後の課題

◎主な成果

- 従前確認ができなかったコンクリート厚1,000mm、被り300mm以上、鋼材が重複している箇所において数ミリ幅のグラウト充填有無を確認が出来た
- 取得画像より数値化を行い、輝度値の差によるグラウト充填の評価判定指標は適合性が高いことが確認できた
- 鋼材が重複する場合でも取得予測画像により精度よく対象鋼材を特定することができた
- WUTとの調査結果と整合する結果であった
- 位置調整架台の採用によりX線発生装置とディテクターの位置合せが容易となり作業性が向上した

○今後の課題

- 数値化の精度向上
- 取得画像の精細性向上
- 検出器の更なる小型化
- 広範囲を網羅する面的な検査手法
- 作業性の更なる向上

以上