

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)}, 櫻井榮男^{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)}

Mitsuru Uesaka^{#A)}, Yuki Mitsuya^{A)}, Eiko Hashimoto^{A)}, Katsuhiko Dobashi^{A)}, Ryota Yano^{B)}, Hiroaki Takeuchi^{B)},
Jean-Michel Bereder^{B)}, Yoshinobu Oshima^{C)}, Masahiro Ishida^{C)}, Joichi Kusano^{D)}, Eiji Tanabe^{D)}, Natsuyo Maruyama^{E)},
Seiji Ohya^{E)}, Yukiya Hattori^{E)}, Atsushi Koishikawa^{F)}, Kentaro Murata^{F)}, Hideo Sakurai^{G)}, Koichi Ogawa^{H)}, Futoshi
Kaibuki^{H)}, Yoshichika Seki^{I)}, Masahiro Tatewaka^{J)}, Hironobu Ono^{J)}

^{A)} Nuclear Professional School, School of Engineering, The University of Tokyo

^{B)} Department of Nuclear Engineering and Management, School of Engineering, The University of Tokyo

^{C)} Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research, Public Works Research Institute

^{D)} Accuthera Inc.

^{E)} Hitachi Power Solutions Co., Ltd.

^{F)} XIT Co., Ltd.

^{G)} AXION JAPAN Co., Ltd.

^{H)} Hosei University

^{I)} Japan Atomic Energy Agency

^{J)} KANTOGIKEN Co. Ltd.

Abstract

Regular diagnosis of the structural health of social infrastructure such as bridge and road is indispensable in order to realize safe and reliable society. X-ray non-destructive testing is a powerful technique to inspect the structural defects in detail. We have been developing portable high energy X-ray sources based on electron Linac,

In this research, we will show the recent development and results of our activities: Demonstration of on-site inspection of bridges, structural analysis based on Finite Element Method using X-ray inspection result, and partial angle Computed Tomography and Tomosynthesis for actual bridges. Development of portable neutron source for water detection will also be introduced.

1. はじめに

1.1 研究の背景

橋梁や道路、トンネル、産業プラントといった社会・産業インフラは我々の生活を支えるものであり、これらの構造物の健全性を定期的に診断することは、安全かつ安心な社会の実現のためには不可欠となっている。特に現在では、高度成長期時代に建造された構造物の多くが設計寿命を迎えつつあり、今後も多くの構造物が老朽化することが予想される。そのため、これらの維持管理の合理化を図るための非破壊検査技術と健全性診断技術の開発が急務となっている。

社会・産業インフラの点検では、目視や打音といった全体のスクリーニング技術に加えて、X線などによる個別

箇所の特定期間検査がある。特にX線による透視は構造物の内部構造を可視化できる詳細な点検技術として期待されているが、従来の技術では厚みのある部材に対して撮像に時間がかかり、また鮮明な画像が得られにくいといった問題があった。これらの問題はX線源のX線透過力の低さや出力の低さに起因する問題であり、これを解決するための新しいX線源が求められている。

そこで我々は、現在開発を進めている可搬型Xバンド電子ライナック型加速器X線源を用いて、先端的非破壊検査技術として屋外現場で様々な社会・産業インフラの構造健全性検査を推進してきた[1-6]。将来的な実用化を見据えて、橋梁等の多様な環境におけるインフラ現場へ導入できるように、撤去部材や現場での実証試験を行ってきている。

X線による橋梁の透視検査で詳細に可視化しなければいけないポイントとしては、鋼材の破断箇所の可視化だけでなく、破断に至っていないが腐食し減肉した鋼材

[#] uesaka@nuclear.jp

の高分解能での可視化と定量的評価、あるいはプレストレスト・コンクリート橋梁(PC 橋梁)のシース管内のグラウト未充填箇所の検出、土砂化した床版などが重要である。

例えばグラウト未充填は PC 橋梁の工法上生じてしまうものであるが、応力不均衡をもたらす上に、水分の侵入による鋼材の腐食を引き起こしやすいため、これを X 線を以って検出するのは重要である。

また、可視化した結果のみで終わるのではなく、将来的に X 線可視化結果から橋梁の健全性診断へと繋がるようにしなければならない。そのためのステップとして、実際に X 線撮像した結果を用いて構造解析を行って橋梁の耐力の評価をすること、およびそれを実際の試験結果と合わせて解析手法の信頼性を高めることも重要と考えられる。

1.2 研究の目的

本研究では、950 keV X バンドライナック X 線源を用いた、橋梁のその場透視検査技術の現場検証および実験室での技術開発について述べ、これらを通じて構造物健全性診断技術の開発について俯瞰した視点を提供することを目的とする。

まず実橋梁の現場での X 線撮像の概要およびその結果を示し、それに基づいた行われた三次元構造解析の結果について示す。

また、現場での試験と並行して、実験室の環境においても X 線撮像技術の検証を行っている。単なる X 線撮像ではなく、構造物の断面情報を得られる部分角度 Computed Tomography(CT)や Tomosynthesis は、鋼材が密集した箇所においても一つ一つを分離して詳細に観察できる技術として期待できる。この部分角度 CT および Tomosynthesis を実験室にて橋梁試料に対して適用し検証した結果について示す。

他にも、中性子源開発によるコンクリート中の水分検出などは鋼材の腐食箇所の特特定などに重要な技術であり、構造物健全性評価において大きな役割を果たすと考えられる。これに関しても紹介をする。

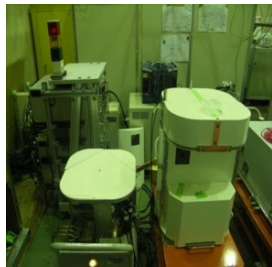


Figure 1: Portable X-band linac based X-ray source. The maximum X-ray energy is 950 keV. The pulse width is 2.5 μ s, the frequency is 330 pulse/s. The RF power is 250 kW. The intensity is approximately 50 mGy/min at 1 m on the beam axis.

2. 実橋梁の X 線撮像および構造解析

2.1 実橋梁の X 線撮像

2015 年 11 月に、可搬型 950 keV X バンドライナック X 線源および 300 keV X 線管を用いて、実際の PC 橋

梁の特定箇所に対し、現場で X 線撮像を行った。この橋梁はポストテンション方式の箱桁橋梁である。箱桁内部に加速器 X 線源を設置し、コンクリートを挟んで対角側に X 線検出器を設置し、透過画像を取得した。X 線検出器としてはイメージングプレートおよびフラットパネル検出器を用いた。

これらの X 線源は、出力する電子線のエネルギー及び X 線のエネルギーが 1 MeV 未満であるため、放射線障害防止法によって X 線源として取扱い、管理区域外での使用も可能となっている。その際の安全管理は電離放射線障害防止規則に準じて、特に放射線管理区域は 3 ヶ月間で 1.3 mSv を超えない程度の空間線量限度を設定し、モニタリングを行いながら、十分な安全性を確保して撮像を実施した。

Figure 2 に X 線撮像の結果を示す。元々損傷が生じているのが判明していた箇所であるが、それを X 線によって鋼材ワイヤのほつれの詳細な状態を観察することができた。損傷の無いワイヤの径と比較することによって、減肉したワイヤの径を測定することができている。このようにして橋梁を断面方向に X 線撮像スキャンを行い、得られた情報を基にして橋梁の耐力評価を 3 次元の有限要素法を用いて実行した。

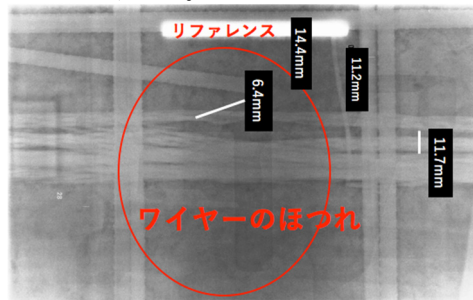
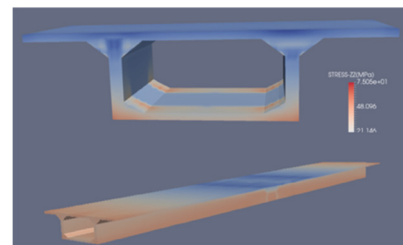
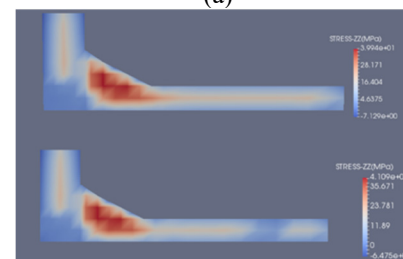


Figure 2: X-ray image of a part of a pre-stressed concrete bridge. Some wires were confirmed to be wasted by comparing the width (diameter) of each wire.



(a)



(b)

Figure 3: (a) Mesh model of a part of the bridge (box girder type) for finite element method analysis. (b) Difference of the distributions of pre-stress of the bottom edge of the box girder.

2.2 3次元有限要素法による構造解析

試験を行った橋梁のうち、X線によって測定を行ったブロックについて有限要素法のモデルを作成し、ニューマークの梁理論から計算された設計荷重をかけた際のモーメントを境界条件として設定し、解析を行った。Figure 3 にそのモデルを示す。

有限要素解析の結果、PC鋼材の劣化によってプレストレス力が減少したため、箱桁の下縁部分における引張り応力度が0.3 MPaほど上昇していることが確認できた。Figure 4 にプレストレス力の分布の差を示している。鋼材の劣化が無い場合ではひび割れ発生(降伏)には8417 kNの荷重を要し、今回のような劣化が生じた場合では8016 kNでひび割れが発生すると計算され、5%ほど耐力が減少していることが確認できた。現状ではこの程度の劣化によってコンクリートにかかる応力度は許容応力度の範囲内であり、長期間の使用による劣化があるものの、橋梁の健全性には問題はない。

3. 部分角度 CT および Tomosynthesis による橋梁試料断面画像の取得

3.1 橋梁の部分角度 CT および Tomosynthesis

鋼材が密集した箇所の試験では、X線CTなどによって構造物の断面画像(三次元情報)を得て、鋼材をひとつひとつ分離して観察する必要がある。しかしながら、実際の橋梁では対象とする構造物の大きさや足場の狭さといった制限から、線源と検出器を360°回転させてCTを行うことができない箇所が多い。そこで、限られたスキャン角度、撮像回数からも断面情報を得られる、部分角度CT および Tomosynthesis といった手法によって断面画像を取得することを考え、実験室の環境で検証しその精度を評価することを目的とした。

Tomosynthesis は対象物に対してX線源あるいはX線検出器を平行に動かし、複数の異なる角度からのX線視差画像によって、対象物の内部構造を三次元的に再構成する手法である。部分角度CTと同じく、限られた方向からの限られた照射方向・撮像回数でも三次元的に画像を再構成できるため、実橋梁のX線検査においての適用が期待される。

3.2 アクリルファントムを用いた評価

部分CT および Tomosynthesis の評価のために、可視性のよいアクリル中に約6から10mmの直径をもつ鋼材を配置した、RC橋梁の構造を模擬したファントムを作成した。Figure 4 にその正面および上方から見た写真を示している。

Figure 5 に、参考データとして取得した全角度(360°)CTの結果と、また Tomosynthesis による再構成結果を示した。Tomosynthesis においては、限定角度からの照射のため鋼材断面が楕円形となって再構成されたが、しかしながら6mm、8mm、10mmと異なる直径の鉄筋を明確に識別できることが確認できた。限定角度での再構成のため、鉄筋形状が楕円形となって見られるが、楕円形状の短軸方向の径の長さを用いることによって、鉄筋径の評価が可能である。

また、部分角度CTの試験結果をFigure 6 に示す。

回転角度に制限があった場合にも、投影方向を増やすことによって再構成画像の楕円形状の歪みを抑制できることが分かる(Figure 6, (e)(f))。しかしながら、現場での足場の制限の問題や、X線源と検出器の相対的な位置関係が崩れるなどの問題から、現場で投影方向を何度も変更するのは難しいことが多い。そのため部分CTにおいても、投影方向が1方向からのみの場合でも評価ができることが重要である。Figure 6 の(d)がそれに相当するが、断面形状は楕円形となるが、しかしながら楕円の短軸の長さは全角度CTの円形の鉄筋の径と1mm以内の精度でほぼ一致しており、これを用いて鉄筋径の評価が可能であると考えられる。



Figure 4: The acrylic phantom which contains steel rods. The diameters of rods are from 6 to 10 mm.

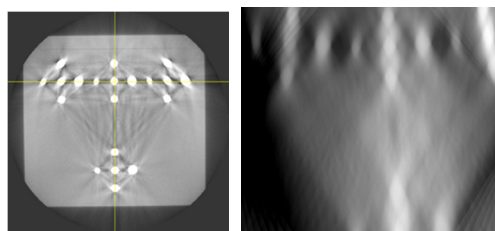


Figure 5: Reconstructed cross section images of the acrylic phantom by full angle Computed Tomography (Left) and Tomosynthesis (Right). Tomosynthesis was done with $\pm 36^\circ$ scan angle.

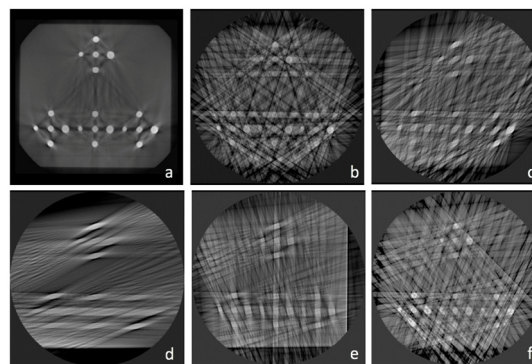


Figure 6: Reconstructed cross section images of the acrylic phantom by (a)(b) full angle CT and (c)(d)(e)(f) partial angle CT. The scan pitches for full angle CT images were (a) 0.36° (b) 36° . For partial angle CT: the scan angle, the scan pitch, the number of projections for each direction, and the number of projection directions were (c) 90° , 9° , 10, 1 (d) 30° , 3° , 10, 1 (e) 30° , 6° , 5, 2 (0° , $+90^\circ$ rotated) (f) 30° , 10° , 3, 3 (0° , $+60^\circ$, $+120^\circ$ rotated) respectively.

3.3 PC 橋梁模擬ファントムを用いた詳細評価

次に、PC 構造を模擬した評価用ファントムについても同様に 950 keV X 線源を用いて Tomosynthesis 法による評価を行った。このファントムでは、コンクリート内にシース管および 10 mm 径の PC 鋼材ワイヤそれぞれ 3 本ずつ配置されている。また、それぞれのシース管内にグラウトを 50~80%ほど充填させている。

Figure 7 に、実際に作成した PC 構造模擬の評価用ファントムの正面画像、上面画像および、全角度 CT の断面画像、Tomosynthesis による再構成断面画像を示す。PC 構造模擬のファントムについても同様に、Tomosynthesis によって楕円形状の歪みは生じたものの、楕円形状の短軸方向長さから PC 鋼材の直径を 1mm 以内の精度で判別できる見込みが得られた。

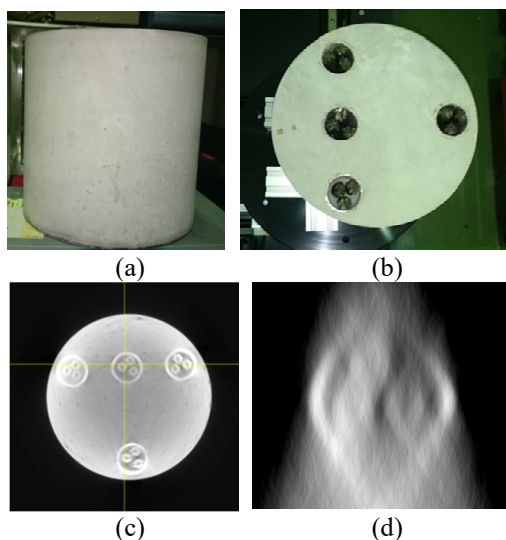


Figure 7: (a)(b) Pictures of the concrete phantom for simulating pre-stressed concrete bridge. The diameter of phantom, sheath pipe, and wire were 180 mm, 34 mm, and 10 mm, respectively. Reconstructed cross section images of the phantom are also shown: (c) Full angle CT and (d) Tomosynthesis ($\pm 36^\circ$ angle).

4. 可搬型加速器中性子源によるコンクリート中の水分検出実験

橋梁のコンクリート中の堆水は PC 鋼材のグラウト未充填箇所への侵入によって鋼材の腐食および耐力の低下をもたらすなどの問題を引き起こす。そのため、コンクリート中の水分を検出するシステムは、X 線による可視化と同様に重要な目標の 1 つである。軽元素である水によって高速中性子が散乱されやすいことを利用すれば、水によって散乱された中性子を計数することによってコンクリート中の水分を検出できると考えられる。

我々は 3.95 MeV の可搬型 X バンドライナック X 線源とベリリウムターゲットを組み合わせて、中性子を発生させるシステムを構築し、実験室の環境において水分検出実験を行っている。この中性子による水分検出システムにおいても、高い精度でコンクリート中に配置した水分の検出が行うことができ、今後は中性子の高強度

化による測定の高速度および中性子ターゲットステーションの小型化による可搬性の向上が目標となっている。

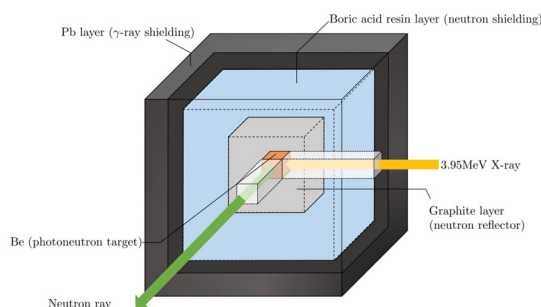


Figure 8: Schematic of the neutron source station using 3.95 MeV X-ray and Beryllium target.

5 まとめ

本研究では、950 keV X バンドライナック X 線源を用いた、橋梁のその場透視検査技術の現場検証および実験室での技術開発について紹介した。

特に実橋梁の現場での X 線撮像試験に成功しており、それによって鋼材の劣化を詳細に観察できることを実証した。

また、X 線による透過画像の取得に留まらず、それを基にした健全性の診断技術の確立が重要であり、そのステップとして有限要素法を用いた三次元構造解析を行っており、それによって残存耐力の評価を行うことに成功した。

また、現場での試験と並行して、実験室の環境においても X 線撮像技術の検証を行っており、構造物の断面情報を得られる部分角度 CT や Tomosynthesis といった技術によって、橋梁を模擬したサンプルにおいても内部の断面構造を高精度に観察し、ワイヤ径の評価ができることを示した。

他にも、鋼材の腐食を引き起こすコンクリート中の堆水の検出のための可搬型小型中性子源の開発を行っており、その実験室での技術開発について紹介した。

今後はこれらの要素技術の精度を高めるとともに、現場での検証を繰り返し、信頼性の高い健全性診断技術として確立していくことが求められている。

参考文献

- [1] On-site nondestructive inspection by upgraded portable 950keV/3.95MeV X-band linac x-ray sources, Mitsuru Ueaska, Katsuhiko Dobashi, Takeshi Fujiwara et al, IOP Publishing, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 47, 23, 2014.
- [2] Backscattering X-ray System using 950 keV Linac for Non-destructive Inspection, Changheng Liu, Ryota Yano, Mitsuru Ueaska et al, The 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology, ICMST-Kobe, 2014.
- [3] 9.3GHz X バンドライナック非破壊検査装置の実用化, 土橋克広, 上坂充, 藤原健, 検査技術, 日本工業出版, 20(1), 56-62, 2015年1月号, 2015.
- [4] 三浦至, 上坂充, 草野譲一, 服部行也, 小野洋伸, 現場用可搬型 X バンドライナック 950keV 高エネルギー X 線技術

の開発と産業プラントでの活用, 検査技術, 日本工業出版, 20(1), 49-55, 2015年1月号, 2015.

[5] 特集・インフラ市場意趣争奪戦 (第2部ロボ・非破壊で限界突破) 「研究室を飛び出す非破壊検査」, 上坂充, 日経コンストラクション, 日経BP社, 2014年8月25日号, 2014.

[6] 三浦至, 上坂充, 草野譲一, 服部行也, 小野洋伸, 950keV ライナック X線源システムによる化学プラント蒸留塔内部流体のダイナミックイメージング予備撮像結果の紹介, 日本設備管理学会, 平成26年度第2回最新設備診断技術の実用性に関する研究会, 2014.