

可搬型高エネルギーX線源による 橋梁検査向け部分角度CT再構成の研究 STUDY ON PARTIAL CT RECONSTRUCTION FOR BRIDGE INSPECTION WITH THE PORTABLE HIGH ENERGY X-RAY SOURCE

矢野亮太^{A)}, 竹内大智^{A)}, 上坂充^{A),B)}, 草野譲一^{C)}, 土橋克広^{B)}, 丸山夏代^{D)}, 村田 健太郎^{E)},
立若正弘^{F)}, 大島義信^{G)}
Ryota Yano^{#,A)}, Hiroaki Takeuchi^{A)}, Mitsuru Uesaka^{B)}, Joichi Kusano^{C)}, Katsuhiko Dobashi^{B)}, Natsuyo Maruyama^{D)},
Kentarō Murata^{E)}, Masahiro Tatewaka^{F)}, Yoshinobu Oshima^{G)}

^{A)} Dept. of NEM, Grad. School of Engineering, The University of Tokyo

^{B)} Dept. of Nuclear Engineering, Grad. School of Engineering, The University of Tokyo

^{C)} Accuthela Inc., ^{D)} Hitachi Power Solutions Co., Ltd, ^{E)} XIT Inc., ^{F)} Kanto-Giken, ^{G)} PWRI

Abstract

We had a real bridge X-ray non-destructive inspection at the bridge in use locating on November 2015 and had managed to visualize damages of PC (Pre-stressed concrete) wires that were buried in the concrete part of the bridge. A significant decrease of the residual durability of this bridge was estimated in order of 5 %, using the experimental results. However it cannot be said that this calculation had enough accuracy to use in maintenance planning because the result was based on the enumerated damage of PC wire judged visually. For a higher precision, this research is going to apply partial CT (Computed Tomography), which is usually employed in medical region and non-destructive testing for small industrial objects, for bridge inspection. We conducted an experiment with a small sample to measure how reconstructed images change in accordance with X-ray view angle and projection increments.

1. 背景

1.1 日本における橋梁検査

日本における橋梁建設は、1960年代の高度経済成長期に集中的に行われた。現在、これらの時期に建設された橋梁が建造後50年を迎え、老朽による耐力低下が懸念されている。国内では、災害時に橋梁が崩落する事故が起こったり、国外に目を向けると供用中の橋梁が崩落する事故が起こったりしている。

それらの橋梁には適切なメンテナンスが求められる一方で、管理・保全に費やすことのできる資源は限られている。そのため、より効率的な保守の必要性が高まっている。現在、5年に1度の目視・打音によってスクリーニング的な定期検査を行い、それによって異常が発見された場合、より精度の高い特定検査によって、異常の状況を詳しく把握することで、適切な保守を行うことが予定されている。そこで、我々は屋外利用可能な可搬型高エネルギーX線源(950 keV/ 3.95 MeV)を用いた非破壊検査をその特定検査の手法として提示している。

1.2 屋外における放射線利用

放射線の屋外利用をするにあたって、法律上では印加電圧が1 MeV未満のものはX線発生装置と分類され、事業所長の許可を得た上で屋外利用が可能となる。また、1 MeVを超えるものについては放射線発生装置と分類され、原則的に屋外利用はできないが、4 MeV未満であれば、橋梁検査目的の場合に限って、原子力規制庁の許可を得た上で屋外利用が認められている。

1.3 プロジェクト概要

我々は、SIP (Super Innovation Program) 「異分野融合によるイノベーションメンテナンス技術の開発」の枠組みの中で、橋梁の保全計画に寄与できるような高精度かつ上流から下流までをサポートする検査システムを構築している。

土木研究所・国土技術総合研究所の屋外実験場において行った試験では、950 keV線源は厚さ400 mm程度、3.95 MeVはそれ以上の厚みを持ったコンクリート供試体内の損傷を可視化することに成功した。また、2015年11月に行った実橋梁での試験では、200 mm- 300 mm厚さをもったコンクリート内部のPCワイヤの10%オーダーでの減肉の評価に成功した[1]。

しかし、損傷の有無が判明するだけでは、その損傷が即座に橋梁の修繕を必要とするようなものなのか分からないため、欠損が橋梁全体の耐久性にどの程度の影響を与えるのかを、マクロスケール/ミクロスケール両面から評価する方法を検討している。前者は、梁理論によって単純化した体系での計算を、後者は有限要素法を用いた3Dモデルによるコンピュータ解析を行っていた。実橋梁試験に対する両者の計算結果は、実験結果から判明したPCワイヤ損傷は、橋梁全体の耐力の5%程度の減少を指し示し、両者とも一致している。

より高精度な評価を目的として、対象内部の断面画像を得ることのできる、CT (Computed

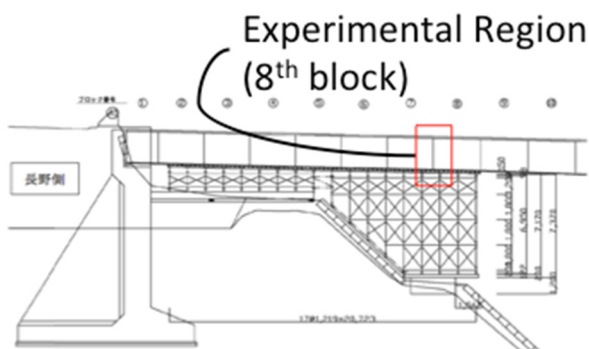


Figure 1: Side view of Myoko-bridge.

Tomography)およびトモシンセシスの適用可能性も検討している。

本橋梁は内部に空洞を持つ箱型橋であるが、他にはT型、床版型がある。橋のタイプによって検査方法を変えていく必要があり、T型橋は今年度北海道にて実験を行って知見を溜める予定である。床版橋については、3.95 MeVを中性子源として利用し、中性子後方散乱で水分による土砂化の検出を予定している。

1.4 研究の目的

本研究は、信頼度の高い非破壊検査システムの開発を多角的なアプローチで目指しているプロジェクトの中で、部分角度CTを用いてPCワイヤの劣化を検出することが目的である。本稿では、実橋梁検査にはじまり、実験結果を利用した土木的なマクロスケール構造計算についての説明を行っている。また、部分角度CTの小型サンプル実験の結果から、今後の実橋梁への応用に向けた展望を探っていく。

2. 実橋梁試験

2.1 概要

2015年11月、新潟県の実橋梁において、950 keV線源を用いたX線非破壊検査試験を行った。これは橋梁の試験においてX線発生装置を利用した国内初の実験であった。

実験目的としては、X線によって橋梁の非破壊検査が可能であることを実証すること、及び実験中における周囲の線量が許容可能なレベルであるかどうかを確かめるという2点があった。

2.2. 試験橋梁について

本橋梁は昭和47年に供用が開始されたPC (Prestressed Concrete)橋であり、全長300m、4径間100ブロックからなる橋梁である。PC橋はコンクリート内部に直径15.2mmのワイヤ12本がより線状に結われているPCワイヤが埋め込まれており、強度を保っている。

本橋梁はこれまでの検査の結果を受けて、2年後の

取り壊しが決まっている。そのため、劣化が懸念されている部位のコンクリートをはがす等、他の検査がすでに行なわれている。今回の試験では内部の劣化状況が既知の部位を対象にすることで、試験後の透過X線画像と実際の状況との一致具合を確かめることが可能であった。また、その他の試験のために組まれた足場が残っており、実験体系を組むのが容易になるといった利点もあったので、これらの理由から、本橋梁にて試験を行うこととした。試験はFigure 1に示すように長野県側から25m程進んだ場所にある、第8ブロックにて行った。この第8ブロックは第1径間の中央に位置し、過去の検査で9本のPCワイヤの破断が確認されていた。

2.3 実験体系

Figure 2に試験体系の模式図を示す。本橋梁は内部が空洞になっている。その空洞部分に加速器を設置し、橋梁下部方向にX線を照射した。検出器は橋梁底部に設置した。まず、オンラインで像を確認可能なFPD (Flat Panel Detector)を用いて大まかな位置合わせを行ったのちに、感度が高く撮像に適しているIP (Imaging Plate)をその場所に設置し、撮像を行った。撮像時間はコンクリートの厚さなどに応じ、適宜調整し、3分-5分のレンジで行った。

線量測定は道路上に線量計を設置し、照射前および照射中の線量を測定した。実験当日は他の検査も並行して行われており、片側路上通行止めの状況だったので、車道上に線量計を設置することが可能であった。

2.4 実験結果

Figure 3に示すのが7枚のX線透過画像を1枚にまとめたものである。部位としては、図4断面図の歩道(左)側底部にあたる。各々のPCワイヤには設計時に番号が振られており、図中の番号はそれを表している。

Figure 3をみると、22番にPCワイヤを覆っているシースを確認することができる。また、28番をはじめ、本来より線状になっているワイヤがほつれている部位の存在が確認できる。なお、この画像

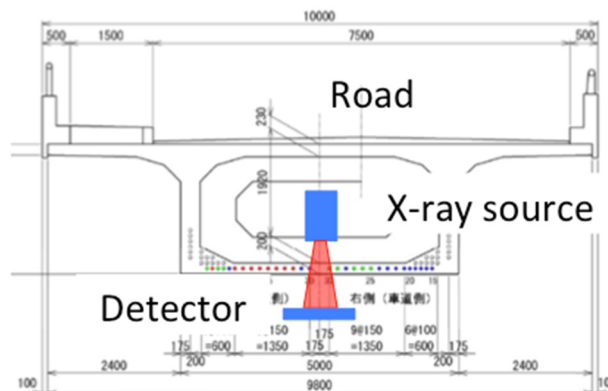


Figure 2: Cross sectional view of experimental setup in Myoko-bridge.

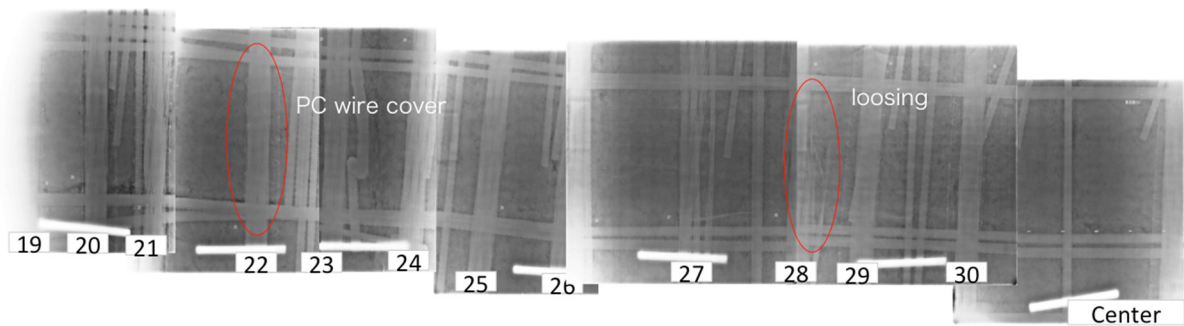


Figure 3: X-ray transmission image of the bridge whose vertical direction corresponds to axial direction of the road.

データは日立 PS が結合したものを編集したものである。

また、X 線照射中の道路上における線量は、バックグラウンド放射線との有意な差がないことが確認された。これはつまり、本実験のような箱型橋梁の底部検査では、交通規制の必要がないということの意味している。

3. はり理論を基にしたマクロスケール構造計算

実橋梁における実験によって、実橋梁検査で、PC ワイヤの劣化状況を把握できることが確かめられた。では、これらの損傷が橋梁全体の耐力をどの程度低下させているのか推定することが、検査結果を保全計画に活かすにあたって必要となる。

ここでは、本学社会基盤専攻の前川教授及び田中准教授の指導のもと、構造力学的手法で耐力がどのように変化するかを計算した。

3.1 構造計算の流れ

通常、橋梁の設計は、法律で定められた荷重がかかった時に、橋梁全体に生じるモーメント図を作成し、全ての部位におけるモーメントが許容される大きさであることを条件に行われる。

材料の降伏は、生じるひずみが降伏ひずみより大きくなった際に生じる。降伏時にかかる最大モーメントの大きさは、材料的な強度と構造的な強度の積である、曲げ剛性によって決まるため、曲げ剛性を求めることが必要となる。

今回は損傷によって生じた曲げ剛性の変化を計算し、その結果、耐力(許容可能な最大重量)が、設計時と比べてどの程度変化したかを検証した。

計算の流れは以下のとおりである。

1. 透過 X 線画像から、PC ワイヤの損傷状況を判断する。損傷の度合いは、断面積の変化として、目視で 10% 単位の推定をした。
2. PC ワイヤ情報を入力し、曲げ剛性、降伏モーメントを計算した。
3. 仮想的荷重を載荷して、ニューマークのモーメント計算法によって、橋梁全体にかかるモーメントを計算した。

4. 3. の操作を繰り返し、降伏モーメントのかかるような荷重を求め、それを残存耐力とした。

3.2 ファイバーモデル

曲げ剛性を求めるにあたって、Figure 2 のような設計図ベースの断面図を、長方形の組み合わせである Figure 4 のように書き換えた。これはファイバーモデルと呼ばれ、X 軸方向の変形のみ注目し、構造を微小長方形要素に書き換えることで、計算を簡略化する手法である。内部に入っている PC ワイヤについては、ファイバーモデルの重心を原点とした座標軸を考え、X 座標と断面積をインプットして計算を行った。ヤング率と降伏応力を入力として、生じるひずみとの推移と降伏応力を超えた時点での降伏モーメントが出力されるため、グラフの傾きから曲げ剛性を得られる。

本試験の場合、入力として用いる PC ワイヤの断面積が変化しているため、入力が変化し、曲げ剛性の変化として出力される。

3.3 ニューマークのモーメント計算法

本橋梁は 4 径間に分かれているため、単純はりの計算法をそのまま使うことはできない。ひずみの線形性を利用し、境界条件に当てはまるように係数を計算することで、不静定はり問題を解くニューマークのモーメント計算法で係数を求めた。それから、荷重に対するモーメント分布図を作成した[2]。

3.4 計算結果

Table 1 に示すのが、降伏モーメント及び残存耐力の、設計図のデータを基にした計算結果と判明した



Figure 4: 8th block represented in Fiber model.

損傷から修正したインプットを基にした計算結果との比較である。

降伏モーメント、残存対力ともに設計時点からの5%程度の減少がみられる。この結果は、社会基盤学専攻の前川教授によると、有意な差であり、このことから、2年後の取り壊し予定は妥当であると結論づけることができる。

Table 1: Yield Moment and Residual Durability Calculated by the Input of Original Design and of the Experimental Design

	Original Design	Experiment	Ratio (%)
Yield moment (kN m)	1.42 *10 ²	1.37 *10 ²	96.4
Residual Durability (kN)	8.75 *10 ³	8.30 *10 ³	94.8

4. 部分角度 CT 再構成の適用

4.1 概要

透過 X 線画像をもとに、橋梁全体の耐力が推定可能であることを示した一方で、計算の入力として用いた情報は、立体的構造を投影したものから目視で得たものであった。

その入力部分の精度を高めるため、対象の断面情報を得ることが可能な CT 再構成技術を橋梁検査に適用することが現在予定されている。

しかし、橋梁検査では病院における人体 CT で行なわれているような、360° のフルプロジェクションは不可能である。投影角および投影枚数が減少すると、再構成画像は劣化する。どの程度までの画像劣化ならば、PC ワイヤの直径を推定できるとして許容できるかを評価する必要がある。ここでは、実験室系における実験を通じて、画像の劣化の傾向を検証した。

4.2 橋梁における CT 撮像

橋梁における CT 撮像では、病院や小型工業品非破壊検査のように、検査物の周囲に X 線源と検出器

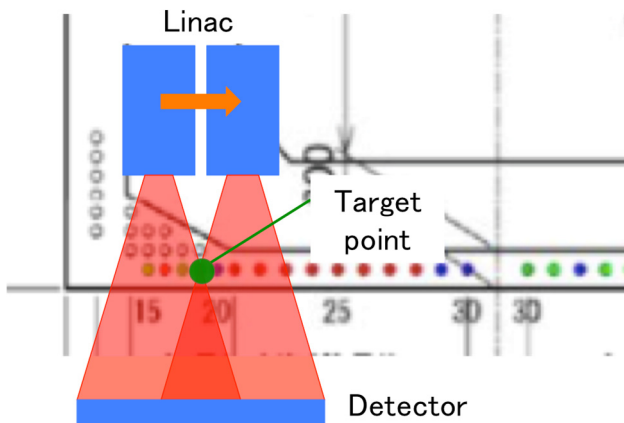


Figure 5: Beam direction variation from the view of target point in parallel motion CT.

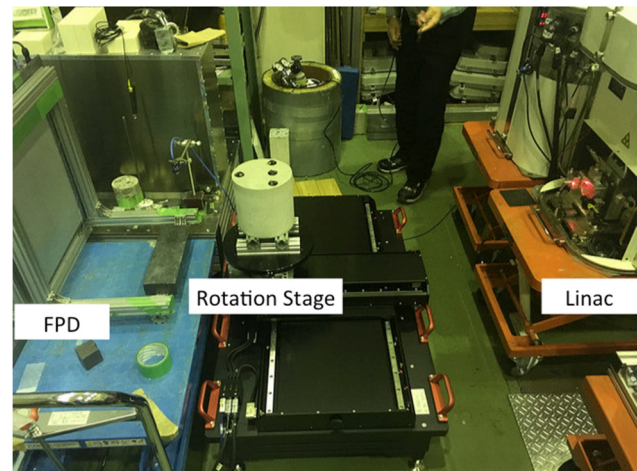


Figure 6: Setup of small sample experiment.

を固定して、同期して回転することができない。2節での実橋梁試験で、最も課題となったのが、X 線源と検出器との位置合わせであった。

そのため、橋梁検査にて CT を適用する場合、回転運動を行うことは位置合わせ・角度合わせを同時に行う必要があるという点で複雑すぎる可能性がある。ここで、Figure 5 のように線源と検出器を平行に移動することで、ある点から注目すると、コーンビーム X 線を照射した場合、様々な経路を通ったデータを得ることができる。将来的には、この方式を用いた CT 再構成を適用することを目標としており、その第一歩として、X 線ビーム角度を現行の 17° から 30° に広げる改造を現在行っている。

4.3 FBP (Filtered Back Projection)

CT 再構成の手法として最も一般的に使われているのが FBP である。数学的な処理ができるため、透過 X 線は物質の減衰率の線積分和として表される。これをラドン変換し、逆フーリエ変換にかけることで、内部の減衰率の値を求めることができる[3]。

4.4 小サンプルを用いた実験

実験室において、外径 35 mm のシース内に 10 mm 径の PC ワイヤが 3 本埋め込まれた、直径 180 mm の円柱サンプルを用いて実験を行った。Figure 5 に実験体系を示す。右手の線源から左手の検出器に向かって X 線を照射し、サンプルを中央の回転ステージに置いて 0.36° 刻みで回転し、合計 360°、1000 回の撮像を行った。撮像時間は 2.5 秒で、事前に垂直棒レファレンスを用いて回転中心と水平の確認を行った。

4.5 角度による画像の劣化

4.2 で得られた実験データを間引くことで、撮像角度と撮像間隔の角度を変化させたデータセットを作成した。Figure 6 に示すのが、撮像角度と撮像間隔を変化させたときの再構成画像である。再構成手法としては FBP を用いた。

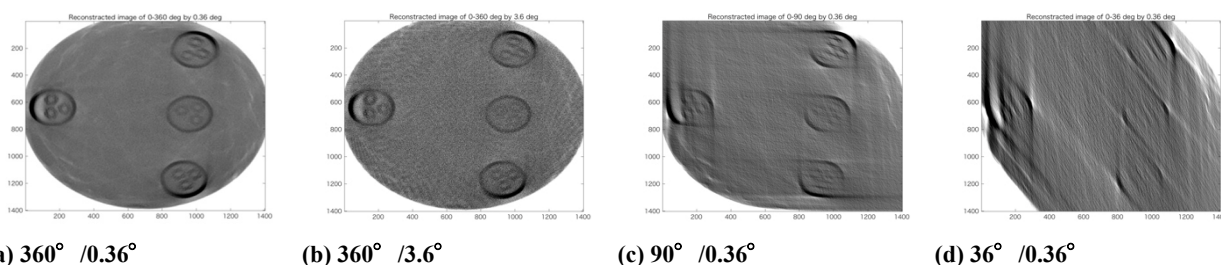


Figure 8: Reconstructed images by FBP with various projection angles and numbers (projection angle / projection pitch).

(a)は360° CTかつ1000投影で、外側輪郭・PCワイヤともに再構成できていることがわかる。それに対して(b)は投影数を100投影に減らしたものである。コンクリート部分がまだらになっていることが確認される。(c),(d)は撮像角度を変化させたもので、角度の減少に伴ってサンプルの外側輪郭及びPCワイヤが歪んでいることが分かる。

4.6 歪みによるワイヤ径推定

Figure 7 (a), (d)において、画像から10 mmのPCワイヤ径の推定を行った。推定したワイヤは、(d)の中でも比較的輪郭が再構成されている、画面最も左側に縦に2本あるワイヤのうち、下側にあるものである。左側のワイヤをズームしたものをFigure 8に示す。図中の赤十字の長さを計算したものが、Table 2に示されている。画像プロファイルから、境界値を識別するのが困難であったため、360°画像は目視で境界線の外縁を両端として入力し、36°画像については、最も長い部分と最も短い部分を入力した。長さの基準としては、PCワイヤを囲んでいるシースの外径が35 mmであることを利用した。

Table 2の結果からは、角度減少によって、歪みが生じていて、それがある方向に対して顕著であることが分かる。また、360°データに対して値に変動が見られるのは、目視で長さを取っていることが理由として挙げられる。境界強調技術の適用などで、境界の取り方を定量化すると、この問題は解決されると考えられる。

Table 2 Estimated Diameter in mm Calculated for 360/36 Deg. Images

360 deg.	10.5	
36 deg.	16.1 (longer)	9.3 (shorter)

5. まとめ・今後の展望

実橋梁の試験では、200-300mm厚コンクリート内のPCワイヤ損傷の可視化に成功した。また、そのデータを用いてファイバーモデルとニューマークのモーメント計算法を用いて橋梁全体の耐力の変化を推定し、5%の耐力低下が導かれ、2年後の取り壊し予定が妥当であることを確かめた。今後、更なる精度向上のために、実験室における部分角度CT予備

実験を行い、撮像角度と間隔によって再構成品質が劣化していく傾向をつかむことができた。

今後は、PCワイヤ部分の直径の評価のために、画像歪みの定量化を目指していく。

また、現在は小サンプルの再構成はFBPのみによって行なっているが、FBPは角度情報の欠落による再構成画像への影響が大きく、より部分角度に強い再構成法であるSART-TVやEM法などを利用することで部分角度CT再構成の品質を上昇させることが可能だと考えられる。

また、今年10月に予定されている第2回実橋梁試験および、北海道におけるT型橋実橋梁試験データを用いて断面再構成をすることを目指している。

謝辞

(株)XITの村田健太郎様にはCT用データ処理などで、多大なご協力をいただいた。本研究(の一部)は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:NEDO)によって実施された。

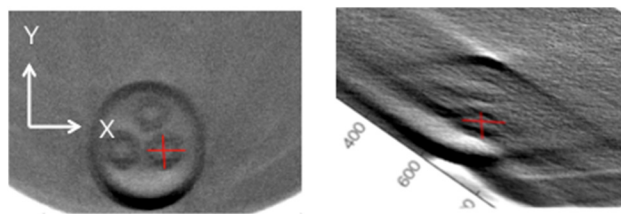


Figure 7: 360/36 deg. pictures focusing on PC wires on the left side (left: 360, right: 360).

引用文献

- [1] Yano Ryota and Uesaka Mitsuru. DEVELOPMENT OF A NON-DESTRUCTIVE INSPECTION SYSTEM FOR INDUSTRIAL AND SOCIAL INFRASTRUCTURES WITH 950 keV/3.95 MeV PORTABLE X-BAND LINAC BASED X-RAY. IPAC Proceedings, 2016.
- [2] 遠田良喜, 盛岡昌夫. 土木構造力学. 市ヶ谷出版社, 1981.
- [3] 橋本雄幸, 篠原広行. C言語による画像再構成の基礎. 医療科学社, 2006.