

高エネルギーX線源による橋梁健全性評価における 検査精度向上についての検討

STUDY ON ACCURACY IMPROVEMENT OF STRUCTURAL ANALYSIS AND EVALUATION OF BRIDGE USING HIGH ENERGY X-RAY SOURCE

竹内 大智^{#,A)}, 矢野 亮太^{A)}, 上坂 充^{A)}, 土橋 克弘^{A)}, 草野 譲一^{B)}, 大島 義信^{C)}, 石田 雅博^{C)}
Hiroaki Takeuchi^{#,A)}, Ryota Yano^{A)}, Mitsuru Uesaka^{B)}, Dobashi Katsuhiko¹, Joichi Kusano², Yoshinobu Oshima³

^{A)} The University of Tokyo

^{B)} Accuthela Inc.

^{C)} Public Works Research Institute

Abstract

Last year, we conducted the experiment to watch the condition of inner steel wire (pre-stressed wire) in real bridge. In this experiment, we succeeded in getting clear picture of pre-stressed wire and evaluate their state by X-ray inspection using our portable X-band Linac. And taking these results into consideration, we evaluated the structural soundness of the bridge by structural analysis using finite element method. To improve the accuracy of this inspection method, we need quantitative evaluation of corrosion of prestressed wire. So we tried to improve the accuracy of transmit X-ray inspection and quantitative examination of damage.

1. はじめに

1.1 橋梁におけるX線検査

橋梁におけるX線検査では、コンクリート内部に存在する鉄筋、プレストレスト・ワイヤー(PC鋼材)の役割が重要となる。当研究室での検査では主に橋梁内部のPC鋼材の腐食の検出を目標とする。X線による検査は、事前の目視、打音検査によるスクリーニングによって特定された危険箇所のみに対して行う。その危険箇所にあるPC鋼材の状態を透過X線試験によって評価し、その評価された値を用いて3次元有限要素法による構造解析を行う。この構造解析によって、健全時と比較した降伏モーメントの減少を算出し、橋梁健全性の評価を行う。

昨年11月に当研究グループが行った実橋におけるX線非破壊検査では、実橋梁の内部にあるPC鋼材の腐食・劣化を確認することに成功した。また、その腐食状況を視覚的に評価することによって構造解析を行うことで、構造健全性の評価を行った[1]。

また、PC鋼材の腐食の要因として、シース内におけるグラウトの未充填箇所の存在を検出することが課題となる。当研究グループは今年3月に土木研究所にて行われた実験にて、実橋梁を模した供試体におけるグラウト未充填箇所の検出に成功した。

1.2 有限要素法による構造解析

コンクリート構造物の安全性の評価には、コンクリート特有の非線形挙動を高精度で再現可能な有限要素解析ソフトによる構造計算が重要となる。本研究グループでは、東京大学工学部社会基盤学科コンクリート研究室にて開発されたDuCOM-COM3を用

いている。DuCOM-COM3は地震動や風振動のような動的特性から数十年にわたる長期変形挙動までのマルチタイムスパンの構造物の力学挙動の計算を担うCOM3と、コンクリートの水和反応や物質・水分移動、材料劣化の計算を担うDuCOMがある。これらを錬成することによって、分子レベルのミクロスケールから構造物レベルのマクロスケールまでの様々なスケールでの構造物の挙動が計算される。橋梁の動的特性を観察するにあたっては主にCOM3を使用することで、解析対象モデルの各領域に発生する応力、ひずみ、変位、ひび割れの様子が計算可能である。モデルの計算にあたって、X線検査の結果を反映させる領域はPC鋼材の直径およびプレストレスト力である。既往の研究によってPC鋼材の断面の減肉により、プレストレスト力が大きく減少することが判明している[2]。そのためPC鋼材の減肉状況の正確な評価から残存しているプレストレスト力を推定することが構造解析の精度向上に不可欠である。構造解析に用いるモデルの例をFigure 1に示す。

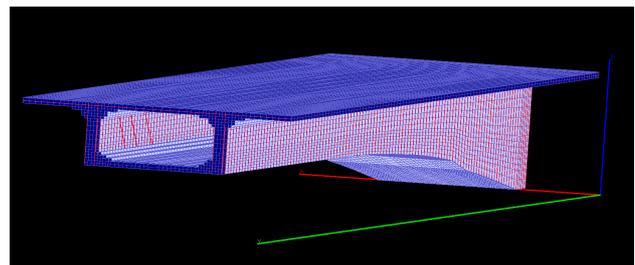


Figure 1: The model of Structural Analysis using Finite Element Method.

1.3 本研究の目的

前回の実験における PC 鋼材の腐食の評価は目視によるものであり、定量性をもった結果を出すことはできなかった。しかし、今後の検査では PC 鋼材の腐食を定量的に評価することが、3 次元構造解析の精度向上に不可欠である。そのため構造解析の前段階にあたる X 線検査における検査精度の向上、および定量的評価が重要となる。

本研究では人工的に PC 鋼材に腐食を生じさせた供試体を用意し、X 線撮像試験を行うことで、どの程度の腐食を定量的に評価できるかを検証した。

2. 透過 X 線撮影試験の概要

2.1 X 線装置の概要

通常の橋梁における試験では、撮影に用いる X 線源として東大の所有する可搬型 950 keV X 線源と、日立パワーソリューションズの所有する 300 keV X 線管の 2 種を用いる。また検出器には Perkin Elmer 社製フラットパネル検出器と富士フィルム製イメージングプレートの 2 種を用いる。本研究では 950 keV X 線源とフラットパネルを使用した。

2.2 供試体の概要

本実験における供試体では、グラウト未充填部分における PC 鋼材の劣化を再現する。PC 橋において最も深刻な腐食が起こると予想される部分が、シース内部でグラウトによって保護されていない PC 鋼材であると考えられるためである。そのため供試体は、シースの周囲をかぶり厚 80 mm 程度、奥行き 300 mm のコンクリートブロックとする。シース内部はグラウトで満たさず、空洞の状態に腐食させた PC 鋼材を差し込み、X 線によって撮影を行う。

また、使用するコンクリートとして、高度経済成長期に建造された PC 橋において一般的に用いられる水準のコンクリートを用いた。(水セメント比 36%) PC 鋼材は 10.8 mm 径 7 本より線 (JIS 規格 SEEE F130) を使用し、シースは内径 35 mm のものを使用する。長さはそれぞれ 50 cm のものを使用し。

PC 鋼材は質量減少率をそれぞれ、0, 5, 10, 20, 30 % を目標として腐食させたサンプルを用いる。サンプルをそれぞれ P00, P05, P10, P15, P20, P30 とする。

2.3 直径推定の手法

本研究では ImageJ を用いてピクセルあたりの長さから PC 鋼材の直径を推定する。まず、撮影によって得られた画像から輝度値の分布を読み取り、コンクリート部分とグラウト未充填部分の箇所を特定する。Figure 2 は撮影結果の例であり、写真中の直線のように、シースに対して直角になるように引いた直線上の輝度の分布をプロットすると Figure 3 のようなグラフが得られる。Figure 3 のグラフからコンクリート部分、グラウト未充填箇所、PC 鋼材の部分構成するピクセルの様子が判別できる。

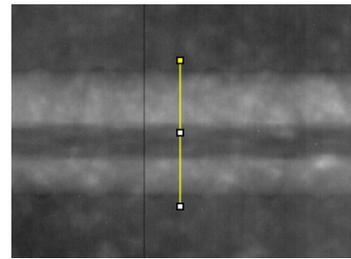


Figure 2: Example of a picture which given by X-ray inspection.



Figure 3: The plot of Gray-value which given by the result.

この輝度値のグラフからシースの外径の長さがいくつのピクセルで構成されているかがわかる。このシースの外径は 38 mm と既知の値であるため、1 ピクセルあたりの長さを特定することが可能である。ここから、PC 鋼材が何ピクセルで構成されているかを計測していく。計測箇所は 20 箇所とし、それぞれで測られた直径を平均することで PC 鋼材の直径を推定する。

3. PC 鋼材の直径推定

3.1 撮影結果

X 線による撮影の結果、PC 鋼材ははっきりと確認することができ、質量減少率による直径の変化は可視化することに成功した。Figure 4 は実際に得られた画像である。

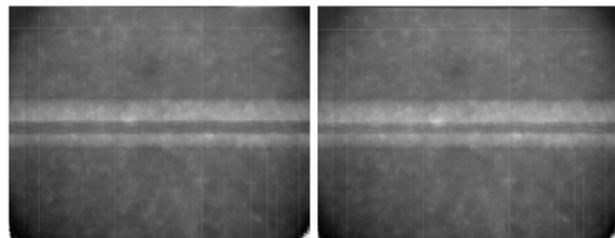


Figure 4: The result of transmit X-ray inspection. The left one is the standard. The right one has 30% corrosion of mass.

3.2 PC 鋼材の直径の推定

撮影された結果から、各サンプルにおける PC 鋼材の直径の推定を行った。直径の推定には ImageJ を用いた画像処理を行った。Table 1 はそれぞれの腐食した PC 鋼材それぞれに対し、X 線検査によって得られた画像から

鋼材の直径を推定した結果をまとめたものである。この結果から、直径推定値は実際のノギスによる計測値と最大で 0.2 mm ほどの誤差が生じていることがわかる。

Table 1: The Estimation of Diameters of Each Prestressed Wire

| PC 鋼材サンプル | 直径推定値 | ノギスによる計測値 |
|-----------|---------|-----------|
| P00 | 10.8 mm | 10.8 mm |
| P05 | 10.2 mm | 10.3 mm |
| P10 | 9.9 mm | 10.0 mm |
| P15 | 9.5 mm | 9.7 mm |
| P20 | 9.1 mm | 9.3 mm |
| P30 | 8.4 mm | 8.6 mm |

3.3 考察

X 線による検査の結果から、理想的な条件下においては質量減少率と PC 鋼材の直径推定値には十分に相関があると考えられる。しかし、実際の計測値とは 1 mm 以下であるものの誤差が生じた。これらの誤差以外にも X 線源そのものによって生じる誤差についての検討も必要である。また、本実験ではすべての PC 鋼材のシース内での位置が同一であるという条件において比較可能な値を得ている。そのため、シース径をもとに PC 鋼材の直径を推定する場合、PC 鋼材のシース内における位置によって推定される直径の値にどの程度の変化があるかを検討する必要がある。

4. PC 鋼材の位置による差の検討

4.1 実験概要

950 keV Linac を X 線源とした場合、ビーム形状はコーンビームとなる。撮影結果から PC 鋼材の直径を推定する場合、シースの外径を基準値として、その相対的な比から PC 鋼材の直径を推定する手法が有効である。しかし、シースの外径を基準値とした場合、PC 鋼材のシース内の位置によってその撮影結果にあらわれる大きさは変化すると予想される。この実験では PC 鋼材が最も拡大されて映る場合と最も縮小されて映る場合の差を比較することで、どの程度の誤差が生じるかを検証した。

4.2 撮影体系

この実験では、コーンビームによる拡大がもっとも大きい箇所と最も小さい箇所の結果を比較する。シース内における PC 鋼材の位置は図のように設定した。実験の体型を Figure 5 に示す。

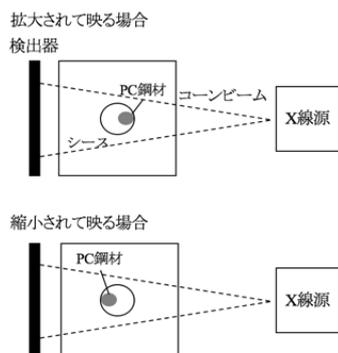


Figure 5: The model of inspection.

4.3 結果

撮影された画像から、上記の PC 鋼材の位置による大きさの変化を推定した。その結果、最大で 2 % ほどの推定値の誤差が生じることが判明した。拡大側で映った場合と縮小されて映った場合の直径推定値の変化を Table 2 に示す。

Table 2: The Result of the Experiment

| PC 鋼材 | 実際の直径 | 拡大側 | 縮小側 |
|--------|---------|---------|---------|
| 直径推定値 | 10.8 mm | 10.8 mm | 10.6 mm |
| 基準値との比 | 100 % | 100 % | 98 % |

4.4 考察

シース内の位置により、最大で 2 % ほどの誤差が直径推定値にあらわれることがわかった。しかし 2 % の差の場合、質量減少率の推定にはそれほど大きな影響を及ぼさないことから、今後もシースを基準とした PC 鋼材の直径推定を行うことで、質量減少率を推定していく手法を検討していく。

5. 結論

コンクリート供試体と腐食させた PC 鋼材を用いた一連の実験により、PC 鋼材に全面腐食が生じている場合、直径の変化と質量減少に相関があることが確認された。しかし、実測値とは誤差が生じており、この誤差をどの程度容認するかが今後の検討事項となる。また、シースをスケールとした場合、PC 鋼材のシース内における位置関係によって、推定値に 2 % ほどの誤差が生じることが確認された。

6. 今後の展開

今回の実験では、PC 鋼材が全面腐食を生じている場合の腐食度の検出を主な目的とした。しかし、PC 鋼材の腐食の種類としては、孔食や PC 鋼材の部分的な切断といった全面腐食以外のものも高い割合で存在する。そのため、それらの腐食の検出が今後の課題となる。また、次回に執り行われる実橋の X 線検査において、他の部分角度 CT やトモシンセシスといった技術を組み合わせることで、PC 鋼材の腐食を定量的に評価していくことを目指す。また、前回の実橋の試験結果を用いて行われた構造計算においても、評価の定量化によって精度向上の余地が残されている。そのため、定量的な検査結果を用いた構造計算の精度向上も今後の課題である。

参考文献

- [1] M. Uesaka *et al.*, “可搬型 X バンドライナック X 線源による大型構造物内部透視動画と実橋梁検査”, 日本工業出版, 検査技術, Vol.21, 2016, pp. 45-52.
- [2] S. Kuga *et al.*, “腐食した PC より線の機械的性質とプレテンション PC 梁の残存耐力の評価”, 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.1, Oct, 2012, pp. 211-216.