

# 可搬型高出力X線によるPC桁内部の可視化実験

大島義信・宇佐美 惣・石田雅博・土橋克宏・上坂 充

## 1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物では、近年グラウトの充填が十分に行われていない事例が確認されており、対策が進められている<sup>1)</sup>。シース内にグラウト未充填箇所が存在すると、雨水や塩化物イオン等がシース内に侵入する恐れがあり、その結果PC鋼材が腐食、破断し、最終的に落橋という重大事故に繋がる可能性もある<sup>2)</sup>。

シース内グラウトは、先流れやブリージングなどの影響で、シース曲げ上げ部付近やケーブル定着部付近が未充填である可能性が高い。このような状況でPC桁の主ケーブルが破断すると、グラウトが充填されている箇所でケーブルが再定着するものの、未定着区間ではプレストレスが損失し、その断面の耐力が大幅に低下する<sup>3)</sup>。すなわち、空隙部でPC鋼材が破断した場合、再付着の位置に応じて桁の耐力が大きく変化するため、グラウト充填範囲を広域に検知することは極めて重要である。現在、超音波法などによる未充填個所の把握が検討されている<sup>4)</sup>が、鋼材が複数配置された個所などにおける検知は困難である。

土木研究所CAESARでは、東京大学と連携し、PC桁全体のグラウト未充填区間、鋼材減肉量、破断有無の把握を目的として、高出力X線源によるコンクリート橋検査技術の開発を行っている。ここでは、土木研究所内で実施した撤去桁を用いた可視化実験の結果を報告する。

## 2. X線発生装置

現在、橋梁調査で用いているX線源はその出力が300keVまでであること、適用限界厚さは30～40cm程度といわれていること、厚い部材の場合は撮像に時間がかかることなど、従来の非破壊検査技術には限界があった。一方で、X線の利用を規定している放射線障害防止法においては、屋外で使用する場合、橋梁検査に限って4MeVまでの

X線源の使用が認められている。本研究では、現場適用に向けて新たに950keV X線発生装置（以下950keV機）、および3.95MeV X線発生装置（以下3.95MeV機）の開発を行った<sup>5)</sup>。3.95MeV機の全体像を写真-1に示す。装置は、X線源、高周波発生装置、電源、水冷ポンプから構成されている。高出力の他装置に比べ重量が小さいのが特徴であり、既存の橋梁点検車に搭載可能なように、X線源等を200kg以下に抑えている。また、実橋梁への適用に向けて、X線源および検出器を連続的に稼働できる専用のスキャン架台を作成している。

## 3. X線検出器

現在、X線の分布強度を測定する検出器として、特に医療用に用いられているものにイメージングプレート（Imaging Plate : IP）がある。放射線が照射された物質にある特定のレーザ光を照射すると、発光現象が生じる。IPはこの現象を利用したもので、X線を感受したプレートにレーザを照射して発光量を測定することで画像を得る。読み取り後のIPは、改めて強い光を照射することで画像を消去できるため、繰り返し撮像が可能である。また、半導体を用いたX線フラットパネル検出器（Flat Panel Detector : FPD）も多く用いられている。

今回は、FPDおよびIPを用いた撮像を試みた。いずれの検出器もデジタル情報として画像を取得することができる。



写真-1 3.95MeV X線発生装置

#### 4. 室内試験

屋外での試験に先立ち、開発装置の基本性能を確認するため、撤去橋梁より切り出したプレストレストコンクリート桁の下フランジ部（写真-2）の撮像を室内において実施した。なお、PC鋼材の径を確認するため比較用の鉄筋（直径10mm）を供試体前（写真中B側）に設置して撮像している。

この部材の寸法は40cmであり、従来の装置では撮像時間に1時間程度を要していたが、わずか数秒で写真-3の画像を得ている。この画像は、写真-2に示すAからBに向かう方向（X線ビームライン）に撮像したものである。この桁はポストテンション方式による桁であり、一つのシース内に直径7mmのPC鋼線が12本配置されている。写真-3は1方向からの撮像であるため、各シース内のPC鋼線は、3本しか確認できていない。また、撮像中心から離れたシース③では、数までは確認できない。しかし、本装置は角度を変化させた複数枚の画像も短時間で撮像することが可能であり、検出精度向上のため、装置開発と並行してCT技術にも取り組んでいる。

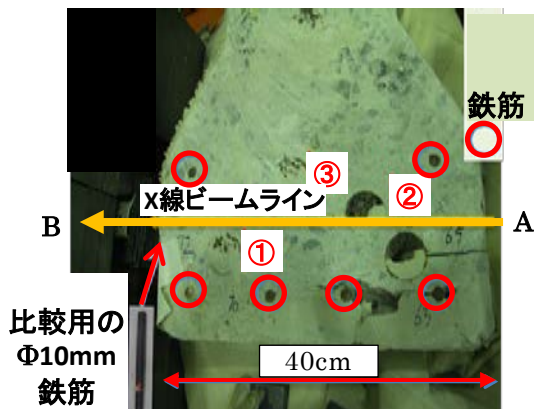


写真-2 撮像対象（PC桁下フランジ部）

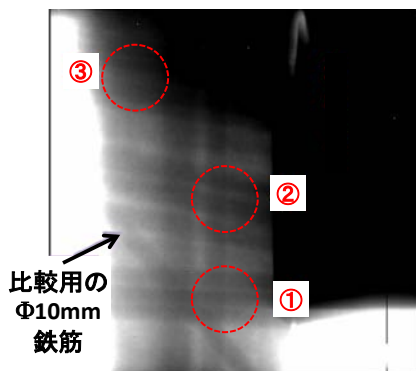


写真-3 X線画像（撮像時間1秒）

#### 5. 950keV X線発生装置による屋外試験

##### 5.1 実験概要

3.95MeV機は、法的には放射線発生装置に相当するため、一般的なX線発生装置とは異なる法規制を受ける。これに対し、950keV機は一般的なX線発生装置として取扱いができるため、法的な面での運用は容易である。そこで、屋外における3.95MeV機の適用に先立ち、950keV機による撮像を実施した。撮像対象とした桁は写真-4に示すPCT桁橋の撤去桁であり、ウェブ厚159mm、下フランジの最大厚さ350mmである。

##### 5.2 可視化結果

###### (1) ウェブ部

撮像対象としたウェブ部分の厚さは150mmであり、従来のX線管であっても撮像は可能とされている。今回、950keV機の調整が不十分であり、X線源の出力は定格の1/3であったが、従来の機器と比較して撮像時間は大幅に短縮され、IPでは露光時間が約2分、FPDでは1秒毎にオンラインで可視化することができた。写真-5および写真-6は、それぞれIPとFPDによって撮像されたウェブ部の画像である。なお、X線は写真-4に示すとおり水平方向に照射している。また、写真-5に示される数値は、検出器の前に設置した基準棒（直径19mmステンレス棒）により推定された鋼材径を示している。いずれも9mmの鋼材径と近い数値を示していることがわかる。

IPおよびFPDのいずれの場合においても、鋼材径が推定可能であることがわかった。

###### (2) 下フランジ部

下フランジ部の撮像結果を写真-6に示す。今回、下フランジに対して水平方向にX線を照射してい

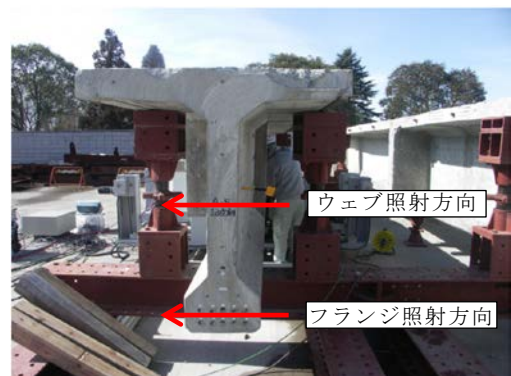


写真-4 950keV機用撤去桁

るため、鋼材が重なって撮像されているが、9mmおよび13mmの鋼材径の差異を明確に区別することができる。従来、350mm厚の部材内の鋼材を撮像することは困難であったが、今回の撮像では照射時間約20分で鋼材径を把握することが可能となった。なお、水平方向内に重なる鋼材を分離するためには、CT技術を用いる方法か、斜角を持たせ鋼材が重ならないように撮像する方法が考えられる。

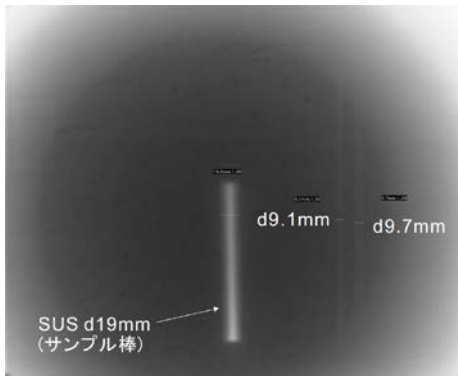


写真-5 950keV機IP画像（ウェブ部）

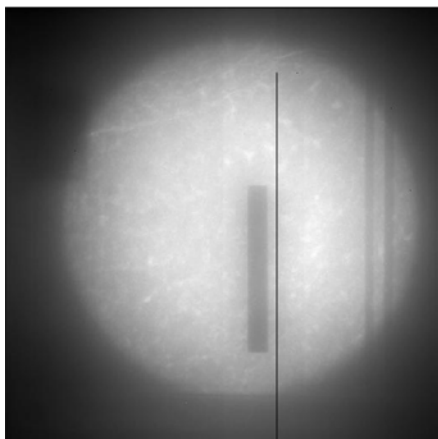


写真-6 950keV機FPD画像（ウェブ部）

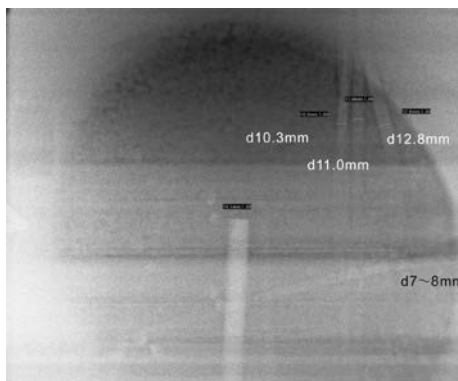


写真-7 950keV機FPD画像（下フランジ部）

## 6. 3.95MeV X線発生装置による屋外撮像

### 6.1 実験概要

3.95MeV機は法的には放射線発生装置であり、橋梁への照射に限り一時的な使用場所の変更が認められている。しかし、これまで使用された実績はなかった。そのため、今回土木研究所内で実施された屋外での撮像実験は、国内における初めての試みとなった。3.95MeV X線源設置の様子を写真-7に示す。950keV機用試体同様、土研内に設置してあるPCT桁橋を対象とした（写真-8）。ただし、ウェブ厚は170mm、下フランジ部の最大厚さは400mmであり、950keV機用試体よりもやや部材厚が大きい。

### 6.2 可視化結果

3.95MeV機は撮像時の線量が非常に高く、検出器が飽和して画像が得られなかったため、出力を定格の1/6まで落として撮像を行った。なお、X線は950keV機同様、ウェブ部および下フランジ部に対して水平方向に照射している。

#### (1) ウェブ部

FDPにより得られたウェブ部の画像を写真-9に示す。画像からは鋼材を確認することができる。ウェブ厚170mmに対し、3.95MeV機による画像は1秒程度で取得されており、定格出力の1/6であっても十分な撮像能力があると判断できる。



写真-8 3.95MeV X線発生装置



写真-9 3.95MeV機用撤去桁

(2) 下フランジ部

ウェブ撮影後、スキャン架台により検出器を異動させ下フランジ部の撮像を行った。写真-10に示す通り、部材厚が400mmにもかかわらず30秒程度で画像を取得することができた。画像からは鋼材の存在を確認できる。

今回の撮像実験は、国内初の高出力X線源の屋外適用であり、必ずしも機器の調整が十分とは言えなかった。今後は、より鮮明な画像が得られるよう機器の調整を実施していく予定である。

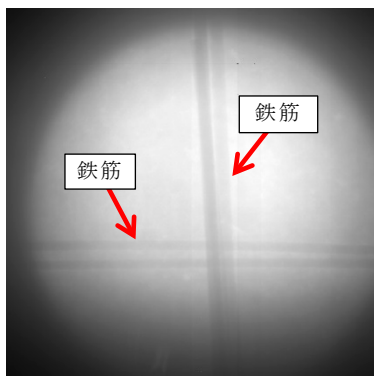


写真-10 3.95MeV機 FPD画像 (ウェブ部)

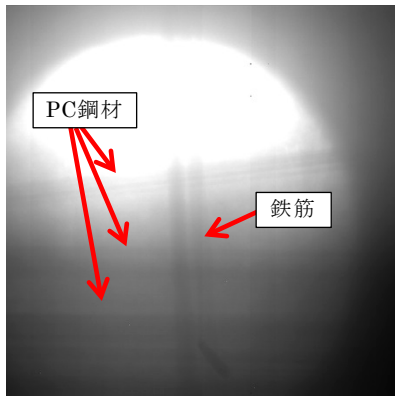


写真-11 3.95MeV機 FPD (下フランジ部)

7. まとめ

本研究では、日本で初めて屋外で実施された3.95MeV高出力X線源によるPC撤去桁の撮像実験について報告した。現在、部分CT(部分的な角度からCTを得る方法)による画像解析の高度化を含め、実際の橋梁での実施をめざし検討を進めている。今後は、非破壊試験結果から得られた可視化情報から、損傷したPC桁の耐荷力推定を行うシステムの構築を行っていく予定である。

謝 辞

本研究の一部は総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「異分野融合によるイノベティブメンテナンス技術の開発」(管理法人:JST)によって実施された。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 上東泰: PC橋の維持管理、プレストレストコンクリート、Vol.45、No.1、pp.64~71、2003
- 2) R. J Woodward: Conditions within ducts in post-tensioned prestressed concrete bridges (TRRL laboratory report), Transport and Road Research Laboratory, 1981
- 3) 前田友章、徳永光宏、田所敏弥、谷村幸裕: 鋼材破断時の付着特性に着目した PC 梁の曲げ耐力に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.2、pp.529~534、2010
- 4) 鎌田敏郎、内田慎哉、角田 瑩、佐藤浩二: 実橋梁 PC桁での非破壊試験によるPCグラウト充填評価方法に関する研究、土木学会論文集E2、Vol.68、No.4、pp.238~250、2012
- 5) Mitsuru Uesaka et.al: "950 keV, 3.95 MeV, 6 MeV X-band Linacs for Nondestructive Evaluation and Medicine", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, NIMA53737, S0168900211014586, 10.1016 / j.nima. 2011

大島義信



土木研究所構造物メンテナンスセンター橋梁構造研究グループ 主任  
Yoshinobu OSHIMA

宇佐美 惣



土木研究所構造物メンテナンスセンター橋梁構造研究グループ 主任  
Osamu USAMI

石田雅博



土木研究所構造物メンテナンスセンター橋梁構造研究グループ 上席  
Masahiro ISHIDA

土橋克宏



東京大学大学院工学系研究科原子力専攻 特任  
Katsuhiko DOBASHI

上坂 充



東京大学大学院工学系研究科原子力専攻 教授  
Mitsuru UESAKA