

X線検査技術の最新動向①〔予防保全編〕

現場用リアルタイムX線検査装置の開発

コンクリートの現場検査効率化実現のために

つくばテクノロジー(株) 齊藤 典生・松岡 一夫・王 波

1. はじめに

日本のインフラは東京オリンピックに象徴される高度成長期以降50年近くが経過し、老朽化の一途を辿っている。それにより、数々の事故の報告が耳新しい昨今である。そういう中、2020年の東京オリンピックが決定し、このインフラの老朽化対策が急務の課題として挙げられている。それに対する取り組みも、官民を挙げて行われている。

この課題に対して、インフラの非破壊、非接触での検査を現場で効率良く実施したいというニーズがあり、なかでも建造物のコンクリートをその場で短時間に検査できる技術、装置が強く望まれている。

そこで我々は、産業技術総合研究所の技術移転ベンチャーとして有する高い技術力をもとに、コンクリートを非破壊で、しかもリアルタイムで効率良くX線検査を行うことができる現場用X線検査装置を開発した。

2. X線検査装置への要求

X線装置は今や病院などの医療用途、工場などの工業用途のために幅広く使用されている。そしてここにきて、一般市民の安心、安全の確保のために、インフラの老朽化度合を検査する

必要性が生じ、各種X線検査装置が開発され、試されている。

例えば、海外製のポータブルパルスX線透視装置による各種X線透過検査、また国内でXバンドライナックを用いた950keV、3.95MeVの高いX線出力での橋梁コンクリートのX線撮像試験などが盛んに行われている。ただし、これらの装置でも現場で機動性が良く、短時間にセッティングから検査まで、効率的にコンクリートをX線検査できる装置は見当たらないという問題が出てきている。

現場でのX線検査装置として、以下のようなニーズを満たすものが求められている。

- ① 小型、軽量で可搬性に優れたもの。
- ② 短時間で撮像結果の表示が可能なものの。
- ③ 検査コストができるだけ廉価なもの。
- ④ 検査結果の信頼性が高いもの。
- ⑤ 検査装置の寿命が長いもの。

以上のニーズを満足するため、当社では、建造物のコンクリートを主対象として、非破壊でその老朽化検査を行うことが可能なX線検査装置の開発を実施し、小型X線発生装置およびGEM検出器(Gas Electron Multiplier、高感度ガス検出器)より構成される現場用リアルタイムX線検査装置を開発した。

3. 開発した現場用X線検査装置

開発した現場用X線検査装置は、小型X線発生装置とGEM検出器とをそれぞれスーツケース1個に納めて持ち運び可能で、機動性があり、現場に出向いてコンクリートX線検査が容易に、効率良くできる。

(1) 小型X線発生装置

写真1に開発した小型X線発生装置の外観を示す。この小型X線発生装置は、X線管としてカーボンナノ構造体冷陰極電子源を採用したもの（産業技術総合研究所 鈴木良一首席研究員が開発したパルス動作のX線発生装置⁽¹⁾では、単三乾電池6個で1,000回のパルス照射ができるという優れた特性を持つ）で、今回、検出器にGEM検出器を使うため、パルス動作より相性のいい連続動作する装置を新たに開発した。その仕様は第1表のようなものである。

この仕様のように、X線出力は150keVまで、管電流は2mAであり、X線管焦点サイズは1mm×1mmとなっており、熱フィラメント型X線管の装置より焦点サイズが小さいため、対象物との距離を短くして撮像しても高精細な画像が得られる。また、発生器と制御器を別筐体とし、ハンドリングを良くしたが、必要により、発生器の上に制御器を置き、固定した状態で、一体型X線発生装置としても使える。そのサイズは持ち運びの良さを考慮して、発生器W353mm×H330mm×D235mm、制御器W353mm×H330mm×D199mmと小型で移動し易いものとした。

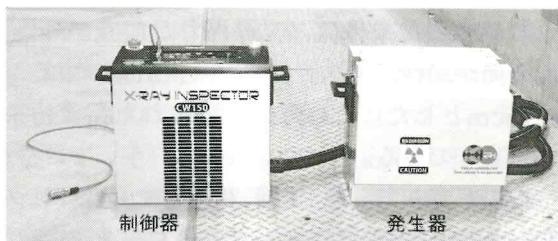


写真1 小型X線発生装置

第1表 小型X線発生装置の仕様

項目	仕様値	備考
管電圧	連続60keV～150keV 出力電圧 可変制御	3極管 最大管電圧150keV (陽極+90keV、 陰極-60keV)
管電流	2mA	連続値
X線管 焦点 サイズ	1mm×1mm	
冷却 方式	X線管 オイル循環式	ラジエター 強制空冷
電源	単相交流 100V (50/60Hz)	最大消費電力300VA
外径 寸法	発生器 (mm) W353×H330×D235 制御器 (mm) W353×H330×D199	
重量	総重量 29.5 kg (制御／オイル ホース含む)	発生器 14.5 kg 制御器 12.5 kg

(2) GEM検出器

写真2に高エネルギー加速器研究機構 宇野彰二教授が開発したGEM検出器（高感度リアルタイムガス検出器）を示す。このGEM検出器は、もともとフォトンカウンティング、中性子計測用に開発された検出器⁽²⁾に、X線と反応する物質を附加することで、X線を非常に高感度で検出できるようにしたものである。

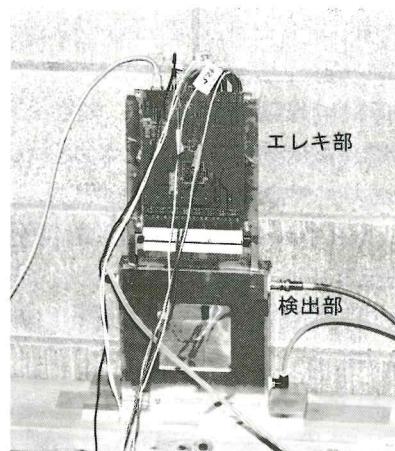


写真2 GEM検出器

そもそもGEM検出器は、両面フレキシブル基板に多数の細孔が開けられたもので、チャンバーガス中でここに高電圧を印加すると、それぞれの孔がガス増幅を行うことでガス放射線検出器として働き、二次元的な画像が得られる。その仕様は第2表のようなものである。

第2表 GEM検出器の仕様

項目	仕様値
検出面サイズ	10cm×10cm
空間分解能	1mm
増幅率	10,000倍
チャンバーガス	アルゴンガス
形状	曲げられる
深さ方向の計測	可能
検出部サイズ	W150×H150×D30mm
検出部重量	約3kg
装置総重量	約10kg

この仕様のように今回の検出面サイズは10cm×10cmであるが、さらなら大型化も可能で、20cm×20cmのサイズも検討している。

検出部にチャンバーガスとして100mL程度のアルゴンガスを充填するが、アルゴンは大気中に約0.9%存在する不活性ガスであり、人体にも環境にも悪影響を与えない。また、GEM検出器の両面フレキシブル基板は、ポリミドなどで作られるので、曲げて曲面化も可能で、さらに深さ方向の計測も可能である。別な実験では、厚さ10mmの鉄板に深さを1mmずつ変化させた直徑6mmの9つの穴を開いた鉄板を透過撮像すると、それぞれの穴の位置で深さ1mmごとのX線検出量の差が識別できた。このことから、二次元検出画像に加えて、三次元検出画像取得の可能性がある。

あらためて、現在行われているコンクリート検査を考えると、X線発生装置も比較的大型で、エージングなどの準備が必要で、現場での手間

がかかっていた。また、検出器も一般的なフィルムの場合は、撮影してから現像行程となり、1枚1枚の写真を見るまでに時間を要していた。

当社の小型X線発生装置は、X線管にカーボンナノ構造体冷陰極電子源を使用しているので、予熱が必要なく、使いたい時にすぐ出力で、小型ながら150keVというX線を長寿命で発生できる。

また、GEM検出器は、X線を非常に高感度に、短時間で、二次元の検出画像を取得でき、画面上でリアルタイムにコンクリートの老朽具合、またその中の鉄筋の有無、位置、腐食状態などを検査可能である。

実際に検査する場合は、この小型X線発生装置の発生器部分とGEM検出器の検出部部分で対象物を挟んだ状態で設置する。そして、X線発生装置の制御器を離れた場所で操作してX線を発生し、透過してきたX線の検出画像を同じ離れた場所のパソコン画面上でリアルタイムにモニターする。

この時、コンクリートを透過したX線は、検出器内部で電子に変換され、さらに電子雪崩により増幅され、即座にパソコンの画面上に画像として写し出される。そうすると、現場で離れた場所で検査できるのと、高感度検出器により100～150keV程度のX線出力で、その照射時間も30秒ほどという短時間のため、作業員の被ばく線量を低く抑えられる。

(3) 現場でのコンクリート撮像試験

今回、現場で検査したコンクリートの厚さは15cmで、その内部の鉄筋直徑は10mmであった。この時の撮像条件は、X線出力が100keV、照射時間が30秒、X線装置とガス検出器の距離が約25cmとした。この条件で得られた撮像結果が写真3である。

この写真3で、照射時間30秒ですぐにコンクリート内の鉄筋がリアルタイムに写し出された。この撮像画像は、検出したX線をそのまま

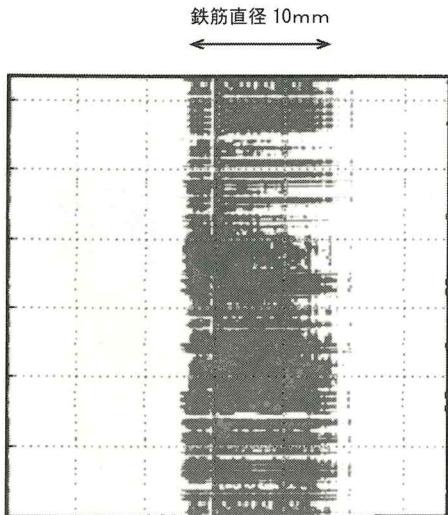


写真3 コンクリート内の鉄筋撮像画像

画像化した物で、これに各種の画像処理を施せば、より精細で見易い画像にできる。それと、この検出器はデジタル検出器で、即座に撮像結果が画像化されるため、容易に何度も撮り直して対象物を検査できる。結果として、現場試験を行い、本装置の有用性を確認できた。

4. 現場用リアルタイム X線検査装置の展開

開発したX線検査装置は、実用化に向けて開発を進めており、これが全国の現場で利用されれば、非破壊検査が加速され、鉄筋コンクリート、その他構造物の老朽化対策が一気に進むものと期待される。具体的には、X線発生装置と検出器で対象物をサンドイッチにして、そのまま発生器と検出器を一対にして30秒撮像ごとに対象物を移動しながら走査させることで広い面積を効率良くその場撮像できる。

また、このX線検査装置は、コンクリートのみならず、その他の対象物への応用も考えられる。例えば、道路の両側にある街灯柱、電線およびその施設、配管およびその設備などその可能性は様々である。実際、電線や配管なども高

度成長期に建設されたものがほとんどで、これらもその老朽化対策が急務の課題となっている。

我々の現場用リアルタイムX線検査装置を使用すれば、ここで示したコンクリート同様、他の物でも効率的な現場検査ができる。それにより、必要な対策を即座に講じることができ、工事経費を抑えつつ、インフラの保全が可能となる。

5. おわりに

老朽化検査するためにコンクリートをリアルタイムで現場撮像できるX線検査装置について紹介した。この装置はその他のインフラに対しても有効な検査手段と考えられる。この装置で現場検査すれば、検査物の老朽化具合を速やかに非破壊で把握して、迅速な対策が可能になる。これは、被災地や災害地などの緊急を要する場所で、よりリスクヘッジするための有効な検査手段としても有望である。これによって、日本全国、機動性良く、老朽化インフラの現場検査を迅速に実施することで、人々の安心、安全の確保への貢献が期待される。

【謝辞】

本開発にあたり、産業技術総合研究所 鈴木良一首席研究員、高エネルギー加速器研究機構 宇野彰二教授に多大なるご協力をいただき、ここに深く感謝申し上げます。

また、本開発は、(独)科学技術振興機構復興促進プログラム (A-STEP) シーズ顕在化タイプ採択課題No.241FS0049の研究開発費により行われたことを記して謝意を表します。

<参考文献>

- (1) 鈴木良一：“乾電池駆動可搬型X線源”、検査技術、17卷、1号、pp.40-43 (2012)
- (2) T.Uchida, Y.Fujita, M.Tanaka and S.Uno, “Prototype of a Compact Imaging System for GEM Detectors”, IEEE Trans.Nucl.Sci., Vol.55, pp.2698-2703 (2008)

【筆者紹介】

齊藤 典生

つくばテクノロジー㈱
計測事業部 主任研究員
〒305-0047 茨城県つくば市千現2-1-6
プラザ106室
TEL : 029-855-5589 FAX : 029-875-5212
E-mail : saito@tsukubatech.co.jp

松岡 一夫

つくばテクノロジー㈱
マークティング事業部 部長
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
(独)産業技術総合研究所 中央第2、2-1E-314
TEL : 029-852-7777 FAX : 029-886-5288
E-mail : matsuoka@tsukubatech.co.jp

王 波

つくばテクノロジー㈱
代表取締役社長
〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1
(独)産業技術総合研究所 中央第2、2-1E-314
TEL : 029-852-7777 FAX : 029-886-5288
E-mail : wangbo@tsukubatech.co.jp

つくばテクノロジー株式会社

<代表者> 王 波
<本社住所>
〒305-0047 茨城県つくば市千現2-1-6
TEL : 029-855-5589 FAX : 029-875-5212
URL : <http://www.tsukubatech.co.jp/>
<資本金> 1,000万円
<従業員数> 15名

<主要取引先>

(独)産業技術総合研究所、(株)日立パワーソリューションズ、サムテック㈱、(株)千代田テクノル、日本電計㈱ 他

<主な事業内容>

- 超音波可視化非破壊検査装置の開発・製造・販売
- X線非破壊検査機器の開発・製造・販売
- AE、光ファイバー・センシングシステムの開発・製造・販売
- 電子計測機器、画像検査装置の開発・製造・販売