

近畿

special

「良好な環境の 再生と創造」

Kei ~自然環境の再生と環境負荷の低減をめざして~

近畿技報

17
VOL.

preview

移動足場の活用により安全で効率的に
橋梁点検を試行
高精度空間情報統合システムを
活用したダム管理

intermission

思い出 (木津川上流河川事務所 山添 裕幸)
珍しい橋、変わった橋あれこれ

zoom

高エネルギー超高輝度X線発生装置を
用いた鉄筋コンクリートの内部観察

serial

近畿の近代土木遺産⑦
大沙川隧道、由良谷川隧道

folder

NETIS登録技術
(「試行申請型」における事前審査技術)

update

「建設技術展 2006 近畿」開催される





高エネルギー超高輝度X線発生装置を用いた鉄筋コンクリートの内部観察

立命館大学 放射光生命科学研究センター長
電子光情報工学科 教授

山田 廣成



このコーナーでは、最新技術の研究・開発現場からホットな情報を紹介しています。

今回は、立命館大学放射光生命科学研究センター長 電子光情報工学科教授 山田廣成先生より「高エネルギー超高輝度X線発生装置を用いた鉄筋コンクリートの内部観察」について原稿を寄せて頂きましたのでご紹介します。

要旨

橋梁やプラント設備、建築物などの非破壊検査、特に極厚コンクリートの検査には、高い透過力と解像力をもった高エネルギーX線源が要求される。本研究では新しいX線発生機構を応用して開発されたみらくる型高エネルギー超高輝度X線発生装置を用いたコンクリート透過試験結果について述べる。みらくる型6MeV X線発生装置の10ミクロン微小光源点による拡大撮像によってコンクリート内部のひび割れを造影剤無しで観察することができた。さらには、この高エネルギー超高輝度X線源を外形30cmまで縮小するプロジェクトについて述べる。

1. はじめに

近年、橋梁やプラント設備、建築物などの非破壊検査（メンテナンス、定期診断）の重要性が指摘されている。厚い構造物内部の可視化には、超音波法や、サーモグラフィーなど種々の方法があるが、放射線（X線）検査が最も信頼性のある検査方法として利用されている。しかし、放射線検査においても利用する線源によって、空間分解能、透過能力、撮像時間は大きく異なる。現在、コンクリートの放射線検査に利用されている可搬式のX線管球における検査可能なコンクリート厚みは、500mm程度（鉄棒

9mmを識別する条件）が限界とされているが^{1,2)}、その場合、厚い被写体に対して、必要なX線強度を発生するために線源の焦点寸法を1.5mm~3.0mmに設定している。したがって、既存のX線源では、コンクリートの内部の微細なひび割れ、空洞等の欠陥まで検出することはできない。500mm以上の厚みをもったコンクリートに対してはメガエレクトロンボルト（MeV）までのX線を発生させることができる電子線加速器（LINAC）が適用されるが、その焦点（光源）サイズの大きさも、ターゲットの熱による損傷により0.5mm程度³⁾までが限界とされ、コンクリート内部の微細構造を観察することはできない。しかし、鉄筋コンクリートの経年劣化を精度よく診断するためには、表面から見られない内部の微細なひび割れ、空隙の性状および鋼材の腐食状態等を知る必要があり、コンクリートの放射線検査においては、厚い構造物中の微細構造を識別できる高い透過能力と高い解像力をもった線源が要望されている。微細孔、ひび割れの識別に関する研究は、レントゲン撮影法を応用し、造影剤を利用したX線造影撮影法が厚み50mm程度のコンクリートに対して試みられ、その性状観測結果が報告されている。⁴⁾そこで当研究室と企業の産学共同で開発した^{5) 6) 9)}、新しいX線発生機構に基づくみらくる型6MeV X線発生装置（立命館大学放射光生命科学研究センター所有）を用いて通常のX線管では困難なコンクリート内部の微細なひび割

れの検出を試みた。本報では、本装置を用いたコンクリート内部のひび割れ透過検査結果について述べる。

2. みらくる型高輝度高エネルギーX線発生装置

図-1にみらくる型6MeV X線発生装置を示す。本装置は、電子を発生し6MeVまで加速する入射器マイクロトロンと6MeVの電子を周回軌道に蓄積する電子シンクロトロンから構成されている。シンクロトロンとマイクロトロンの装置外径は、60cmに小型化され、装置全体の大きさは2m×1mである。みらくる型X線発生装置のX線発生原理は、シンクロトロンの周回電子軌道上に微細な金属ターゲットを設置して制動X線を発生するというものである。図-2にX線ターゲットを示す。電子軌道上に張られた軽元素からなる細線の中心に微小な金属片を設置することによって微小点光源が実現できる。X線の光源点サイズは、金属ターゲットの電子ビームとの断面積と厚みで決定され、数ミクロンの光源点を実現されている。みらくる型X線発生装置では、ターゲットにより散乱や減速を受けなかった一部の電子は再度周回してターゲットに衝突するため微細ターゲットでも強度を著しく低下することなく、高出力なX線を発生することができる。さらに、発生するX線のエネルギーは、既存の線源同様に最大エネルギーが電子エネルギーまで到達する。みらくる型6MeV X線発生装置の場合には、最大エネルギー6MeVまでの高エネルギーX線を発生する。したがって、みらくる型のX線発生機構は、ミクロンオーダーの点光源からMeV領域まで含んだ高エネルギーX線を発生させることができる。また、X線のエネルギー中心は、X線ターゲットの材質、サイズ等によって可変であり、ターゲットに厚み0.5mmの白金(Pt)やタンゲステン(W)を用いた場合は200keV付近に、同厚みの銅(Cu)やアルミニウム(Al)を用いた場合には100keV以下にピークをもつエネルギースペクトルを示す。



図-1 6MeVみらくる型X線発生装置

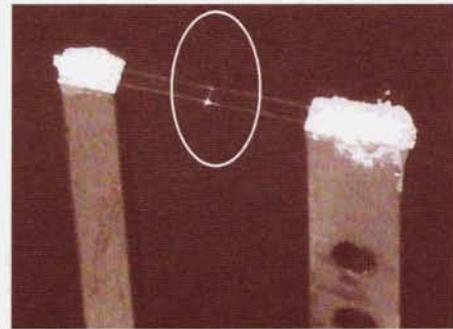


図-2 X線ターゲット

3. コンクリート内部のひび割れ検査

みらくる型6MeV X線発生装置を用いてコンクリート内部のひび割れの透過検査を行った。図-3に透過検査に用いた鉄筋コンクリート供試体の形状・寸法を示す。供試体寸法は150×240×1000mmとし、引張鉄筋にD16(SD345, $f_y=370$ N/mm²)を2本、せん断補強鉄筋にスターラップφ9(SR295, $f_y=363$ N/mm²)を100mm間隔で配置し、コンクリートは設計基準強度 $f'_{ck}=24$ N/mm²で配合設計を行ったものである。これを材齢28日において供試体の曲げ載荷試験を実施し、曲げ破壊した供試体のひび割れに対してコンクリートの厚みが150mmとなる方向からX線透過撮像を実施した。

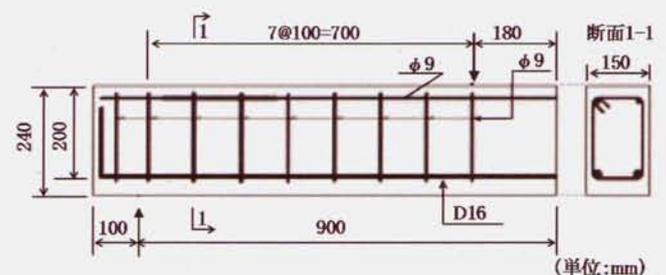


図-3 鉄筋コンクリート供試体の形状と寸法



図-4に実験配置図を示す。X線撮像は、微細なひび割れを識別するために、微小光源点を利用した拡大撮像配置で行った。拡大撮像の配置は、光源-被写体間距離 $L1=1.7\text{m}$ として拡大率を3倍とした。また、従来行われている密着撮像も行い拡大撮像により得られた画像との比較を行った。密着撮像は $L1=4.9\text{m}$ の配置で行った。このときの照射視野はそれぞれ $170\text{mm}\phi$ と $510\text{mm}\phi$ となる。さらにコンクリートのひび割れ識別能に対する光源点サイズ効果を確認するために、X線ターゲットには、 $25\mu\text{m}\phi$ の銅(Cu)のロッドと $3\text{mm}\phi$ のタングステン(W)ロッドターゲットを用いた。X線検出器には、イメージングプレート(IP) (読み取り装置FUJIFILM製FCR-XG1)を用いた。検出面のサイズは $300\text{mm}\times 300\text{mm}$ であり、解像度は $200\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。

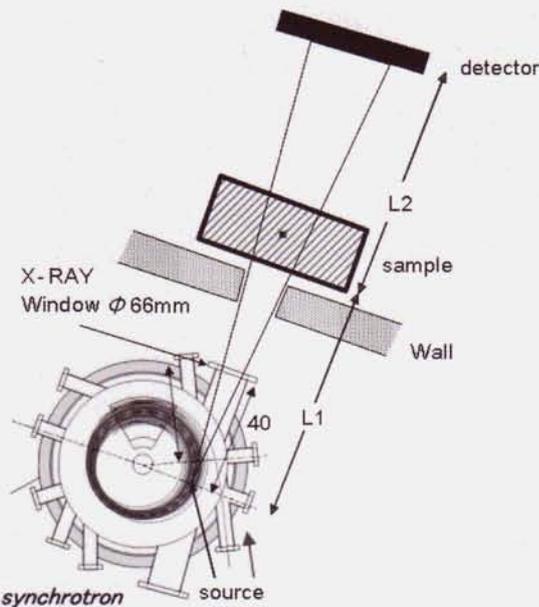


図-4 実験配置

ひび割れ箇所周辺の密着撮像写真を図-5(a)に、 $\phi 25\mu\text{m}$ および $\phi 3\text{mm}$ ロッド型ターゲットを用いた場合のX線による3倍拡大透過写真を図-6,図-7に示す。撮像に要した時間は、密着撮像で 100sec 。 $\phi 25\mu\text{m}$ および $\phi 3\text{mm}$ ロッド型ターゲットを用いた拡大撮像でそれぞれ 500sec 、 50sec であった。図-5(b)には、密着撮像写真をデジタルデータ上で3倍に拡張したイメージもあわせて示した。密着撮像では、載荷軸方向に進展した割れおよび鉄筋の周辺に生じている内部

の割れがわずかに観測されるが、分岐した割れまで識別することはできていない。これに対して、 $\phi 25\mu\text{m}$ のロッド型ターゲットを用いた拡大撮像では、解像度が大きく向上し、コンクリート内部鉄筋周辺のひび割れの分岐が観察され、ひびわれの方向、数まで識別することができる。 $\phi 3\text{mm}$ のロッド型ターゲットを用いた拡大撮像においてもひび割れの有無は確認されるが、幾何学的不鋭によるぼけによって細かいひび割れまでは観察できていない。そこで、同厚みのコンクリート表面に貼り付けた異なる直径の鋼線の識別限界から各条件における解像性能を評価した。密着像および $\phi 3\text{mm}$ 光源および $\phi 25\mu\text{m}$ 光源による3倍拡大像においてそれぞれ 1.5mm 、 1.5mm 、 0.5mm の鋼線が識別可能であった。これよりみらくる型 6MeV X線発生装置の微小ターゲットを用いた拡大撮像によって 150mm 厚コンクリート中のサブミリ幅のクラックが検出できることが示された。

これらの識別能の違いは、 $\phi 3\text{mm}$ のターゲットを用いた拡大像にみられる光源サイズによる幾何学的なぼけと、密着像における被写体から発生する前方散乱X線によるコントラストの低下に起因している。これは、同じ位置に配置された受光面で同一線量を得るために必要な照射時間が、3倍拡大撮像では、密着撮像の5倍の時間を要し、さらに3倍拡大撮像時のコンクリート中の $\phi 9\text{mm}$ の鋼線のコントラストが、密着撮像時の同鋼線のコントラストに比較して3倍高いコントラストを示していたことから明らかであった。

微小光源を用いた拡大撮像配置によるコンクリートの放射線検査は、拡大効果によって解像性能を上げるだけではなく、エアギャップ効果によって散乱X線の検出器への混入を低減させ、X線像のコントラストと粒状性を向上することができるコンクリート検査・診断に有効な検査方法であることが示された。つまりコンクリートの放射線検査には、実用的なX線強度と微小光源点をもった高エネルギーX線源が必要であり、みらくる型 6MeV X線発生装置は、コンクリートなどの重構造物の検査に非常に適した線源であることが実証された。

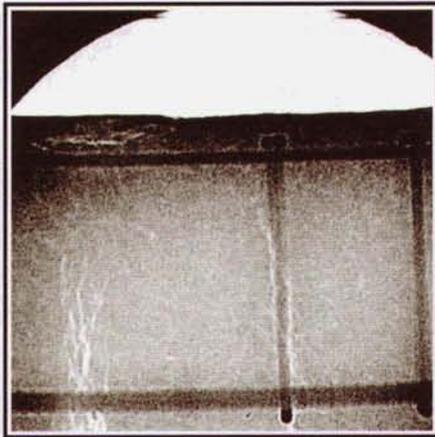


図-5(a) 密着撮像 (等倍)
($\phi 25\mu\text{m}$ ロッドターゲット)

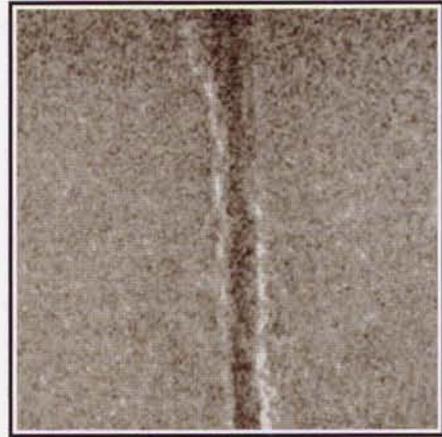


図-5(b) 密着撮像 (3倍拡大)
($\phi 25\mu\text{m}$ ロッドターゲット)

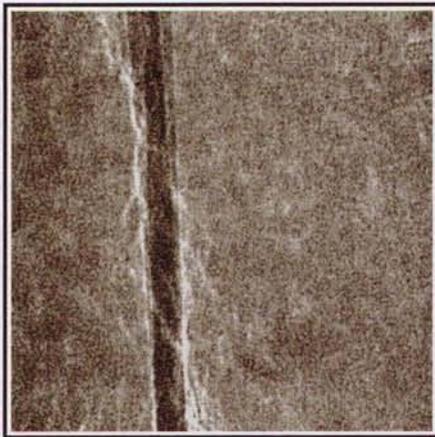


図-6 3倍拡大像
($\phi 25\mu\text{m}$ ロッドターゲット)

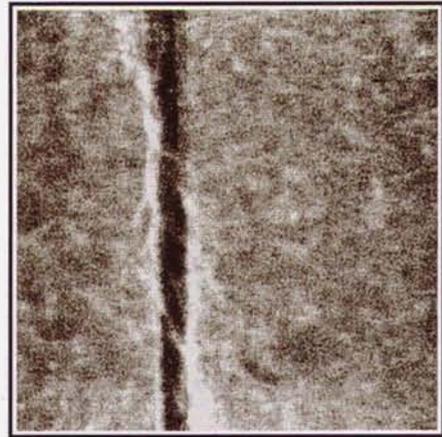


図-7 3倍拡大像
($\phi 3\text{mm}$ ロッドターゲット)

4. ポータブルシンクロトロンの開発^{7, 8)}

今回コンクリートの非破壊検査に使用したみらくる型6MeV X線発生装置は、最大X線エネルギーが6MeV、装置サイズが、1m×2mの常設タイプの高出力X線源である。したがって、戸外へ持ち出して、既設コンクリート構造物の非破壊検査に用いることができない。そこで、産学共同により、シンクロトロンの小型化に基づくさらに小型装置の開発を進めている。図-8(a)に装置概観イメージ図を示す。電子軌道半径は8cm、磁石外径は30cmのシンクロトロンである。永久磁石を用いることにより、電源や冷却水の供給が不要である。もはやX線管と同等のサイズとなっている。装置本体部は鉛ケースに収め、効果的に遮蔽をしている。入射器には4MeVの直線加速器 (LINAC)

を使用する。これは、2005年6月に、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律が一部改正され、4MeV以下の直線加速器を橋梁又は橋脚の非破壊検査を目的に一時使用することが可能となったからである。加速高周波源にはオイルタンクが不要のマルチビームクライストロンを使用しており、図-8(a)に示す大きさとなる。遮蔽を含めた装置本体部での重量を1トン以下に抑え、図-8(b)に示すように、みらくる型4MeV X線発生装置をロボットアームなどの先端に取り付け、橋梁や橋脚のコンクリート構造物の内部を高精度で非破壊検査する。

みらくる型4MeV X線発生装置が発生するX線の線質は、6MeVタイプと同じように、ターゲットの材質で選択できる。発生するX線スペクトルは、 $25\mu\text{m}$ ϕ の銅ロッドターゲットを用いた場合、数10keV～



4MeVにわたる。また、みらくる型4MeV X線発生装置のX線強度は、6MeVタイプに比べ約10倍増大することが見込まれている。したがって、コンクリートの撮像時間は、6MeVタイプの実験と同条件での撮像が、1/10の時間で行える。さらに、X線視野は、6MeVタイプの2倍強になり、光源-窓間距離は1/2になることにより広視野で高拡大率のX線撮像が可能になる。したがって、25 μ m ϕ の銅のロッドターゲットを用いて卓上型装置みらくる型6MeV X線発生装置により得られた3倍拡大X線透過像と同じ写真を得るためには、被写体をL1=0.5mに設置し検出器をL2=1.5mに設置すればよく、このときの撮像時間は、5sec.程度となる。

みらくる型 X線発生装置の運転に関しては、PCによる自動制御をおこなっている。装置のスタンドパイとシャットダウンは自動化され、スイッチ一つでX線の発生が可能である。また、X線発生時のインターロックは勿論のこと、緊急時の非常停止もボタン一つでおこなう。そのため、運転が複雑になる粒子加速器という印象は無く、専任のオペレータも不要である。また、みらくる型4MeV X線発生装置の運転に必要な電源容量は約40kVAであり、メンテナンスとしては、直線加速器の電子銃を年に一度交換する程度である。

みらくる型4MeV X線発生装置は、来年度初めには完成し、調整運転を経た後、実際に戸外へ持ち出してコンクリート構造物の非破壊検査をおこなう予定である。可搬型のみらくる型4MeV X線発生装置は、橋梁や橋脚といったコンクリート構造物の非破壊検査だけでなく、車や航空機のエンジンやコンテナの非破壊検査、空港のセキュリティチェックなどへの利用も視野に入れている。また、高い拡大率を利用したX線顕微鏡やX線マイクロCTへの利用、さらには波長300 μ mの遠赤外線を発生する光源としての利用も可能である。

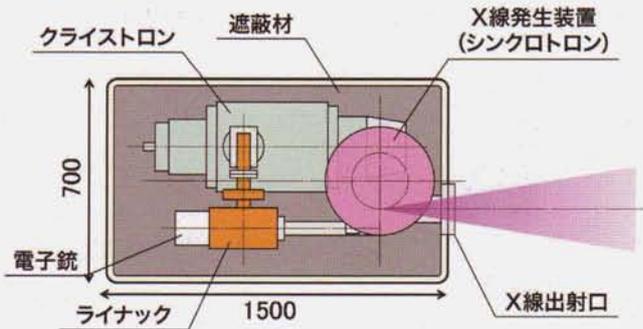


図-8(a) 開発中の可搬型高精度非破壊検査装置 (みらくる型4MeV X線発生装置) のイメージ図

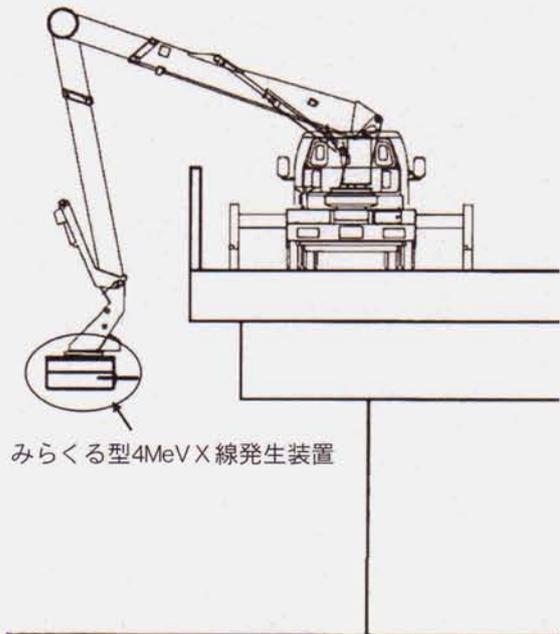


図-8(b) みらくる型4MeV X線発生装置をロボットアームの先端に取り付け橋梁や橋脚の高精度非破壊検査をおこなう

5. 参考文献

- 1) 水沼守 花田廣 非破壊検査第37巻第9号pp.871-872
- 2) 日本非破壊検査協会規格NDIS1401-1992
- 3) H.Miyai, K.Satou, H.Kitaguchi and S.Izumi: A High Energy X-ray Computed tomography Using Silicon Semiconductor Detector, 1996 Nuclear Science Symposium Conference Record, Vol.2, pp816-821, (1997)
- 4) 大塚浩司 土木学会論文集 No.451/V-17,pp.169-178, 1992.8
- 5) 山田廣成 応用物理 第74巻 第4号,2005.
- 6) H.Yamada, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B199, 2003 pp.509-516.
- 7) D. Hasegawa, R. Young, M. Morita and H. Yamada.; Proc. The 9th Int. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation, Korea, 2006, June
- 8) H. Yamada, D. Hasegawa, M. Morita, T. Hirai, M. Sasaki, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY Vol.24 No.5 (2006) pp. 385-389
- 9) <http://www.photon-production.co.jp/>

山田先生にききました

>>放射光発生装置については、例えば“S Pring 8”に代表されるように非常に大きな施設、設備というイメージがありましたが、本研究では、非常に小型化された装置になっております。小型化に取り組んだきっかけなどをお教えいただけませんかでしょうか。

私がシンクロトロンと関係するようになったのは、超伝導シンクロトロンAURORA（現立命館大学所有小型放射光発生装置）の開発にたずさわった以降のことです。1985年頃、次世代半導体メモリー生産用のX線源として放射光が注目され、加速器の開発が盛んに行われました。AURORAは、開発に成功しX線リソグラフィの研究が進展しました。しかし、AURORAは十分に小型ではなく、産業界に受け入れられるにはいたりませんでした。そこで、私は、放射光装置を超小型化して、万人が享受できる装置とすることを研究のターゲットとしました。たとえば、放射光で利用されているX線利用技術を生産現場や研究現場で利用することや病院や非破壊検査の現場に導入することを目的としました。そして本稿で述べたように“みらくる型”の卓上式シンクロトロンの開発に着手し、高輝度高エネルギーX線の発生に成功しました。

>>>本装置の今後の活用の方向について、特に建設、土木分野での活用の可能性、広がりについてお考えをお教えいただけませんかでしょうか。

1960年代の高度経済成長期に建設されたコンクリート建造物の耐用年数が限界に近づいています。これらの橋梁構造物のすべてを建て替えることは不可能で、優先順位をつけて延命策を講じる必要がありますが、その効率的な診断方法はまだありません。MeV領域の小型・ポータブルの高輝度X線発生装置を実用化できれば、従来観測できなかったコンクリート内部の欠陥や鉄筋の腐食などの問題箇所を短時間で早期に発見して効率的に補修できると期待されます。

繫 Kei



技術と人をつなぐ情報交流誌



国土交通省 近畿地方整備局

近畿技術事務所

<http://www.kkr.mlit.go.jp/kingi/>



2100

この印刷物は再生紙及び環境対応型大豆油(SOY)インキを使用しています。