

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 高エネルギー可搬型X線橋梁その場透視検査の実用化
2. 研究期間 平成 26 年度～平成 27 年度
3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	上坂 充	東京大学・教授
研究代表者	上坂 充	東京大学・教授
共同研究者	田辺 英二	株式会社アキュセラ 代表取締役社長
共同研究者	草野 譲一	株式会社アキュセラ 研究員
共同研究者	櫻井 栄男	株式会社アクシオン・ジャパン 代表取締役社長
共同研究者	石田 雅博	国立研究開発法人土木研究所 上席研究員
共同研究者	大島 義信	国立研究開発法人土木研究所 主任研究員
共同研究者	宇佐美 惣	国立研究開発法人土木研究所 主任研究員

4. 補助金交付総額 44,330 千円

5. 研究・技術開発の目的

高エネルギー (950 keV, 3.95 MeV) 可搬型Xバンド (9.3 GHz) 電子ライナック X 線源を使用した橋梁その場透視検査技術の実用化に向けた研究開発を行う。

実際の橋梁では構造物の大きさの問題や足場の制限等からスキャン回数や時間が限られるため、全角度 (360°) CT による検査は難しい。そのため、部分角度 CT や Tomosynthesis、複数方向透視といった方法によって、限られた方向からの透過画像から高精度な検査ができる必要がある。本研究課題では、実験室において、これらの技術を用いた検査技術の確立を目指す。

対象としては、RC 橋の直径 10 mm 以上の鉄ロッドおよび PC 橋のダクト中での 7 mm 鉄ワイヤを、実験室において部分角度 CT・Tomosynthesis・複数方向透視によって、1~2 mm の精度で形状判定できる技術を確認することを目指した。また、土木研究所にて実践試験を実施し、実際の橋梁現場でのセッティング・撤収の高速化、操作性の向上、その場データ分析・輸送・電源供給の技術も確立させることを目標とした。以下に詳細な目標を示す。

研究目標

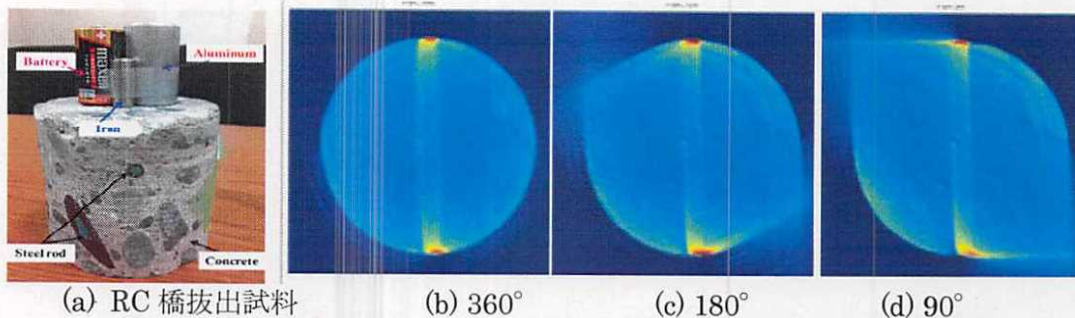
- (1) RC・PC 橋の直径 10 mm 以上の鉄筋について、950 keV X 線源と部分角度 CT・Tomosynthesis 解析手法を用いて、鉄筋径の減少を 1-2 mm、断面積比 1-2 % の精度で、30 分以内の測定・解析時間で判定する。
- (2) PC 橋シース中の直径 7 mm の鉄ワイヤについて、3.95 MeV X 線源と部分角度 CT・Tomosynthesis 解析手法を用いて、鉄ワイヤ径の減少を 1-2 mm、断面積比 7-8 % の精度で、30 分以内の測定・解析時間で判定する。
- (3) 実際の橋梁現場でのセッティング・撤収の高速化、操作性の向上、その場データ分析・輸送・電源供給の技術も確立し、セッティング・撤収にそれぞれ 3 時間程度、実測定 2~3 日で 1 つの橋の検査と評価を完了できるようにする。

6. 研究・技術開発の内容と成果

研究目標(1) : RC・PC 橋の直径 10 mm 以上の鉄筋について、950 keV X 線源と Tomosynthesis 解析手法で、直径の減少を 1-2 mm、断面積比 1-2 %の精度で、30 分以内で判定する。

研究目標(1)に関しては、まず、RC 橋から直径 100 mm、高さ 200 mm で切り出したサンプルを用いて測定を行った。950 keV X 線を用いて、部分角度 CT によって内部構造画像を再構成し、部分角度 CT 時における画像の歪みを評価した。図 1 にその再構成画像の結果を示す。左から、360° (全角度) CT、180° 部分角度 CT、90° 部分角度 CT となっている。現場では全角度 CT は困難なケースが多く、このような部分角度 CT などの限定された撮像回数からの画像再構成によって全角度 CT に近い高精度な再構成画像を得られるかどうか重要である。

図 1 から分かるように、スキャン角度を 4 分の 1 に限定した 90° 部分角度 CT においても、縦方向に見える外径 10 mm の鋼材は全角度 CT と同様に、ほぼ正確に再構成できることが示された (断面積比 1-2%の精度)。部分角度 CT のアルゴリズムに起因する問題から、部分角度 CT では円形の外周が楕円形に歪んでいることが観察できる。これは別の角度から小角の部分角度 CT を行い、その画像を補正に用いることによって対処できる (後述、図 4 参照)。



(a) RC 橋抜き出し試料 (b) 360° (c) 180° (d) 90°
図 1 950 keV X 線システムによる RC 橋切り出し試料を用いた部分角度 CT

また、より詳細な評価のために、実際の橋の切り出しサンプルではなく、6~10 mm の直径の鋼材をアクリル中に配置した、RC 構造模擬の評価用ファントムを作成した (図 2)。このファントムと 950 keV X 線源を用いて Tomosynthesis 法および部分角度 CT による再構成画像の評価を行った。Tomosynthesis 法は対象物に対して X 線源あるいは X 線検出器を平行に動かし、異なる角度からの撮影画像を用いて 3 次元的に透過画像を再構成する手法である。部分角度 CT と同様に、限られた方向からの限られた撮像回数で画像を再構成できるため、実橋梁の X 線検査においての実用化が期待される技術である。

図 3 に、このファントムを用いて行った全角度 CT の結果と、Tomosynthesis 法による再構成結果を示す。Tomosynthesis 法においては、部分角度 CT 同様に鋼材断面が楕円形となって再構成されたものの、6mm、8mm、10mm の異なる直径のものを明確に識別することができている。Tomosynthesis 法は歯科診療の X 線診断技術として実用的に使われているが、コンクリート構造物の X 線撮像では歯科診療に比べて高いエネルギーの X 線を使用するため、そのため散乱 X 線がノイズとなって生じ画像の SN 比を悪くする傾向にある。しかしながら、今回のファントムを用いた試験においても、Tomosynthesis 法によって 1mm 以内の高い精度で鋼径を判定できることが実証できた。

また、同じファントムを用いて、部分角度 CT による再構成も行った。部分 CT では角度制限を 90° および 30° に制限し、限られた方向からの限られた撮像回数での再構成画像を評

価した。図4にその結果を示す。図4の(c)は 90° の部分角度CTであり、また(d)、(e)、(f)は 30° の部分角度CTである。どのケースも投影撮像回数とともに9~10データでほぼ同じである。しかしながら、 30° の場合は、投影方向を1~3方向で変更して撮像している。同じ 30° の角度制限の部分角度CTであっても、投影方向を増やすことによって分解能が改善され、また画像歪みが改善する傾向があることが分かった。特に図4(f)の場合、CTのアーチファクトはあるが(a)の全角度CTに近い形で画像が得られることが分かった。 30° 単独(図4(d))、 90° 連続スキャン(図4(c))では円形断面は楕円に歪むが短軸の値は元の外径と1mm以内でほぼ一致している。



図2. 評価用ファントム (アクリル+鉄筋6~10 mm 径混在)

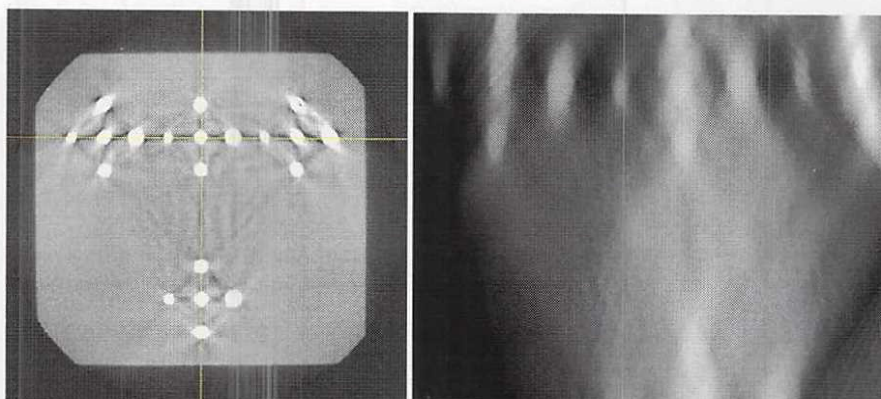


図3. 全角度CT画像(左)および、Tomosynthesis法による画像(右)

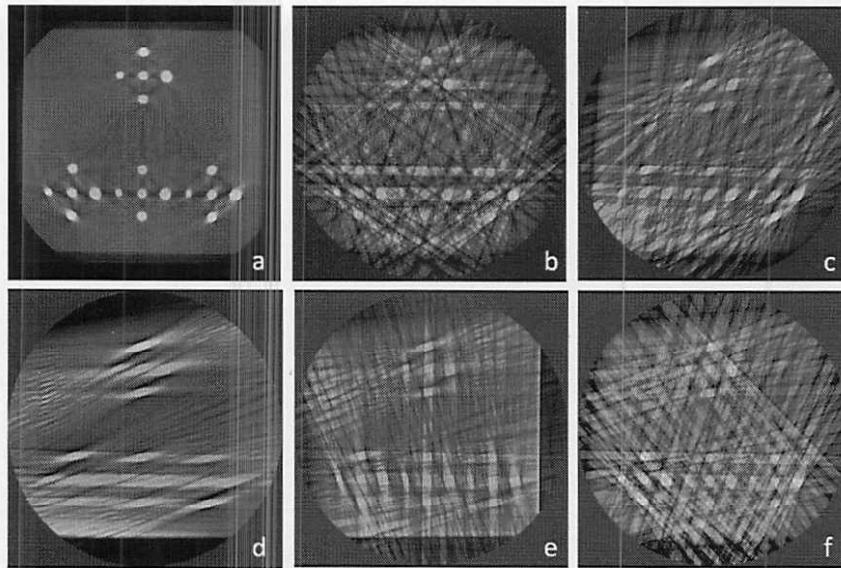


図4. 全角度 CT (a: 0.36° ピッチ、b: 36° ピッチ) および部分角度 CT (c,d,e,f)。
 (c)角度制限 90°、9° ピッチ、10 投影データ、1 方向投影 (0°)、
 (d)角度制限 30°、3° ピッチ、10 投影データ、1 方向投影 (0°)、
 (e)角度制限 30°、6° ピッチ、5 投影データ、2 方向投影 (0° +90°)、
 (f)角度制限 30°、10° ピッチ、3 投影データ、3 方向投影 (0° +60° +120°)

次に、PC 構造を模擬した評価用ファントムを作成し、これに関しても 950 keV X 線源および Tomosynthesis 法および部分角度 CT による評価を行った。

図5に示したのは、実際に作成した PC 構造模擬の評価用ファントムである。このファントムでは、コンクリート内にシース管および 10 mm 径の PC 鋼材ワイヤそれぞれ 3 本ずつ配置されている。また、それぞれのシース管内にグラウトを 50~80%ほど充填させたサンプルとなっている。

このグラウトの充填性を X 線によって確認できるかどうかは重要である。シース管内にグラウト未充填箇所が存在した場合、ここに雨水や塩分が侵入することによって PC 鋼材の腐食を招き、鋼材の破断を生じやすくする可能性がある。また、未充填箇所が存在する場合、PC 鋼材とコンクリートの接着が弱くなるため、曲げ耐力などの性能が低下する。したがって、この PC 鋼材の減肉などの状態を観察するのみならず、グラウト未充填箇所を X 線によって検査・発見できるということは、橋梁の構造安全性の検証において重要である。

このファントムに関しても、950 keV X 線、そして Tomosynthesis および部分角度 CT による再構成画像を得てその評価を行った。

図6はこのファントムの全角度 CT の結果(左)と、限定された照射角度・回数からの Tomosynthesis 法による再構成画像である(右)。どちらも、3つのシース管を通る縦方向断面を表示している。全角度 CT の画像から分かるように、手前3本のシース管のうち、左からグラウト充填率が約80%、約60%、約50%となっている Tomosynthesis 法においても、全角度 CT と同様に、PC 鋼材およびグラウト境界面を明確に識別できていることが分かる。PC 鋼材の断面画像からも、1mm 以内の精度でその鋼材直径を判定可能である。図7は同様に、全角度 CT と Tomosynthesis 再構成画像の横方向断面画像である。この Tomosynthesis の結果からも、3つの PC 鋼材とその直径を判断できることを実証した。

また、実際の現場では加速器の X 線源コリメータ角を現状の 17° から 30° へと広げて広角での X 線撮像を行うことを予定している。それに関して、30° のスキャン角度で Tomosynthesis 画像を再構成した所、ワイヤ断面図が図7のように得られており、図5と同様に 1mm 以内の精度での外径判別できる見込みが得られた。

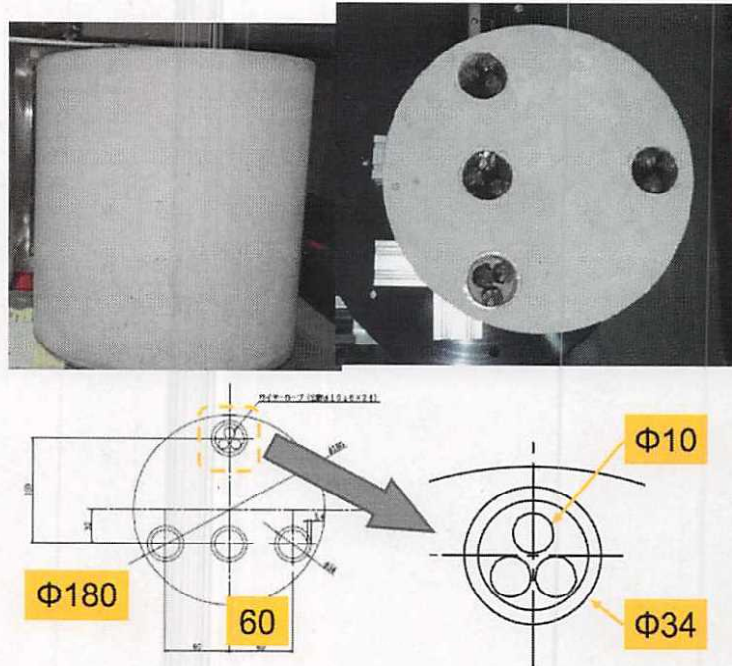


図 5. PC 橋梁模擬評価用ファントム。コンクリート全体径 180 mm。シース管径 34 mm 内にそれぞれ 3 本の PC 鋼材（10 mm 径）を配置し、グラウトを 50～80%程度まで充填したもの。

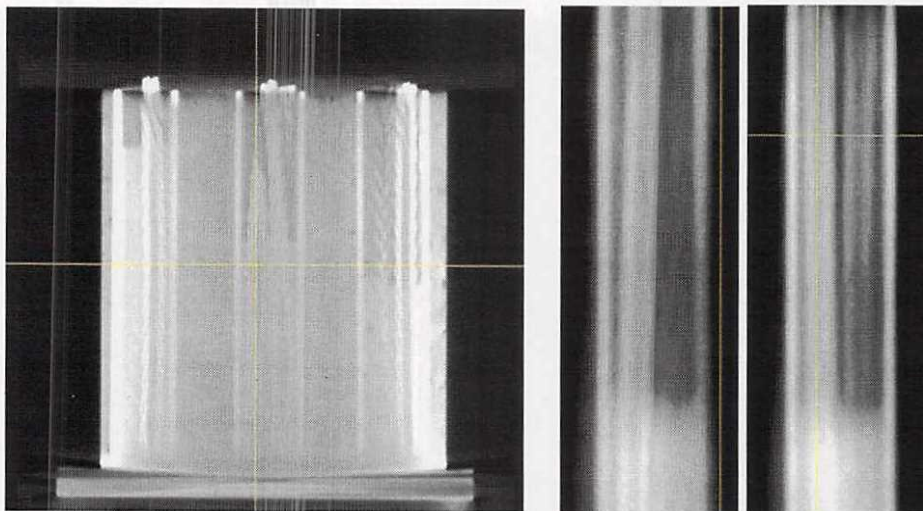


図 6. 全角度 CT 結果（左）および、Tomosynthesis 画像（右）

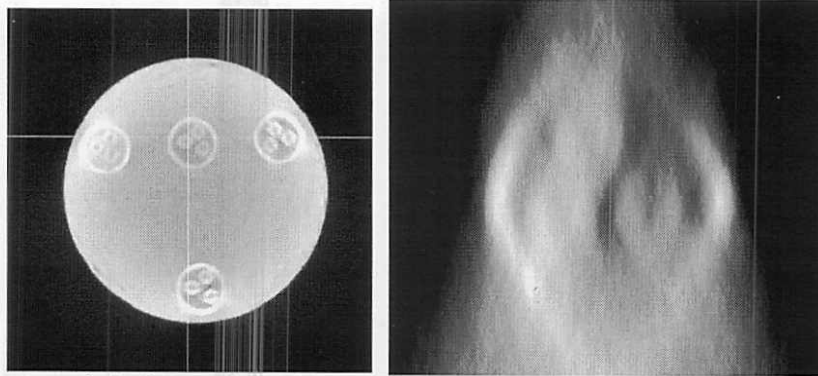


図 7. 全角度 CT 結果 (左) および、Tomosynthesis 画像 (右)



図 8. 30° での Tomosynthesis 再構成画像

以上、成果をまとめると以下になる。

- ・橋梁現場において、30° 頂角の X 線コリメータを使って水平走行して、±15° 相当スキャン CT, Tomosynthesis を想定した。
- ・±15° 限定角度 Tomosynthesis にて、外径 6-10mm の PC, RC 鋼の半径を 1mm 以内の精度で判定できた。
- ・30° 単独, 90° 連続スキャンでは円形断面は楕円に歪むが短軸の値は元の外径と 1mm 以内でほぼ一致している。

研究目標(2) : PC 橋のパイプ中での 7 mm 鉄ワイヤについては 3.95 MeV X 線源で Tomosynthesis 解析手法と部分角度 CT、鉄ワイヤの直径の減少を 1-2 mm、断面積比 7-8 % の精度で 30 分以内で判定する。

PC 橋から実際に切り出した試料を用いて、3.95 MeV X 線源と Tomosynthesis 法および部分角度 CT によって、試料中の PC 鋼材ワイヤ (直径 7 mm) の X 線画像を再構成し、直径を評価する試験を行った。

まず、Tomosynthesis 法による再構成を行った。その結果を図 9 に示す。Tomosynthesis 法によって、外径 7 mm 鉄ワイヤが再構成されているのが確認できた。

また、全角度 CT および部分角度 CT によって同試料の断面図を再構成し、その評価を行った。360° 全角度 CT であれば、パイプ中の PC 鋼材ワイヤ (直径 7 mm) のすべてが明確に見えていることがわかった (断面積比 7-8 %)。また欠落したワイヤの箇所は黒く識別できている (図 10 左)。しかしながら、実際の橋梁の橋桁部では全角度 CT は不可能であるため、CT を行う場合は部分角度 CT による検査でなければならない。そのため、本試料

を用いて、 180° と 90° の部分角度 CT 画像を再構成し、結果を同じく図 10 に示した。この結果より、 180° の部分角度 CT であれば、 360° 全角度 CT と同様に PC 鋼材ワイヤを 1-2mm の精度で判別可能であることを示した。

部分角度 CT による再構成では、元の円形のワイヤは楕円に変形してしまっていた。これに関する対策としては、異なる中心角での別角度からのスキャンを行うことによって、これらの 2 種の再構成画像から歪みを補正することによって対処できると考えられる（図 4 参照）。

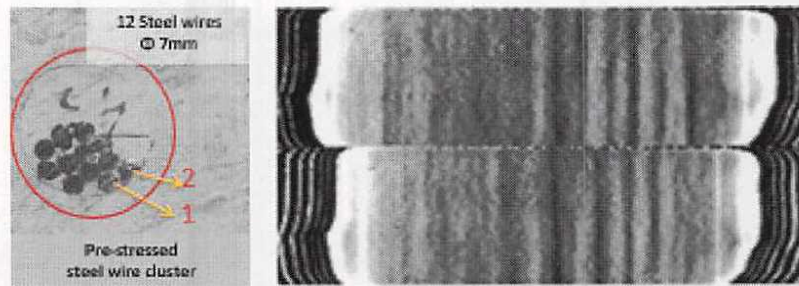


図 9. PC 橋切り出し試料断面図（左）および、3.95 MeV X 線システムによる PC 鋼材ワイヤの Tomosynthesis 法による再構成画像（右）

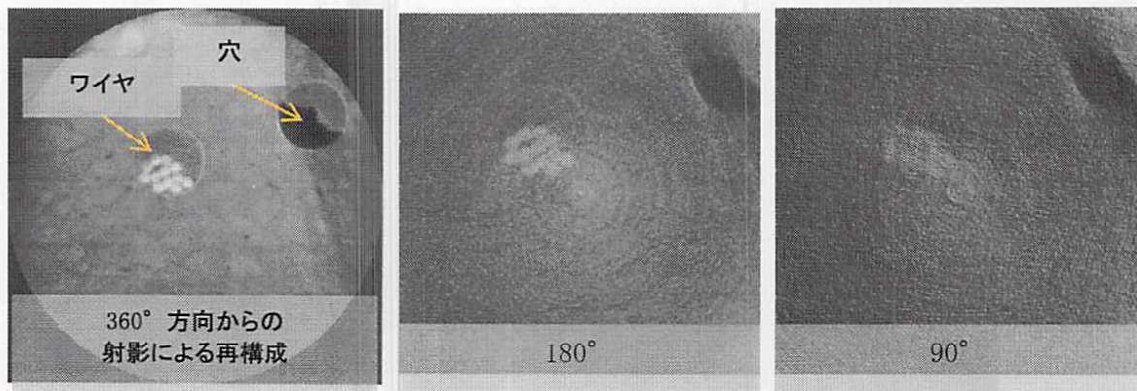


図 10. フル角度 CT 結果、 180° 部分角度 CT、 90° 部分角度 CT の再構成画像

研究目標(3)： 実際の橋梁現場でのセッティング・撤収の高速化、操作性の向上、その場データ分析・輸送・電源供給の技術も確立し、セッティング・撤収にそれぞれ 3 時間程度、実測定 2, 3 日で 1 つの橋の検査と評価を完了できるようにする。

平成 27 年 1 月 29 日土木研究所にて、3.95 MeV X 線源の日本で初めての管理区域外での試験を実施した。放射線安全管理については、原子力安全規制庁、東京大学、土木研究所と綿密に安全対策の確認を行った。

また、本研究課題の目標の 1 つに据えていた検査の高速化に関しても、設定準備・撤収をそれぞれ 3 時間以内で実施することに成功している。前日に東京大学・東海キャンパスに荷積みしてあった全機器を小型トラック 1 台、中型バン 1 台で早朝つくば市の土木研究所まで搬送した。8 時半頃から機器配置準備し、11 時半から X 線透過試験を開始した。試験は 15 時には完了し、それから撤収し始め、18 時前に撤収完了できている。その様子を図 11 に示す。

この透視検査により、厚さ 400 mm のフランジ部の内部鉄筋構造が 1 秒程度で測定できている。

また、検査効率の向上に関しては、配線ケーブルのグループ管理化が最重要であった。950 keV X線源は産業インフラその場透視検査等で10回程度の実績も蓄積されており、その経験と機器保管・運搬・作業の最適化がこの高速な準備・撤収に繋がっていると考えられる。

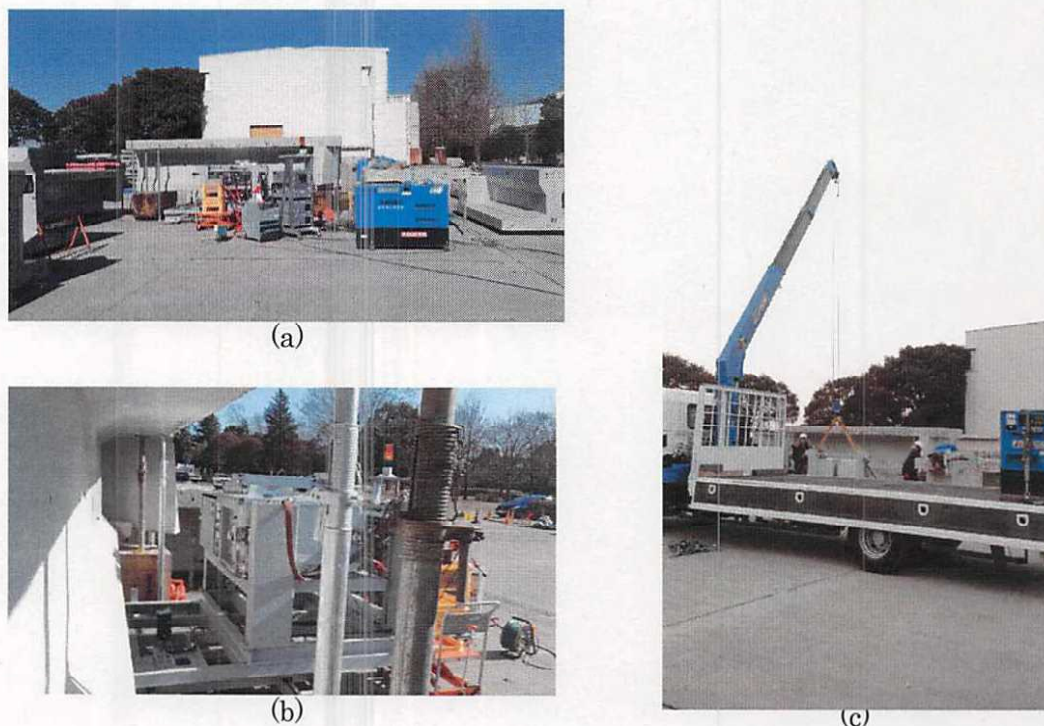


図 11. 日本初の 3.95 MeV 電子ライナック X線システムの管理区域外橋梁透視試験(土木研究所) (a)機器設置 (b) X線システム設置 (c) 撤収

また、実際の橋梁現場での試験を見据えて、X線源については以下の改造・改良をおこなった。

まず 950 keV X線源については、実際の現場では橋梁に対して垂直方向に X線を照射して撮像するケースがほとんどであると考えられる。したがって、垂直方向へ X線を照射する機能を付加しなければならない。そこで 950 keV X線源のシステム筐体に改造・改良を施し、垂直下面照射用架台機構一式を導入し、垂直方向照射を実現した。

また、高電圧電源の定格最高電圧発生時の安定性の改良をおこなった。上記の改良により、AC電源 OFF状態から、定常的な X線撮像可能となる加速器システムの起動時間が~30分以内に、AC電源通電状態での X線撮像条件変更に伴う起動・停止のインターバルは5分以内に実行可能となった。これによって実際の橋梁現場での試験が迅速に行えるようになった。

また、部分 CT技術の成立性確認のための精密 3軸ステージ(1 μ m ステップ)の製作を行った。これによって、部分 CTおよび Tomosynthesis法による橋梁サンプルの撮像試験に成功し、実際の橋梁現場での適用性の確認のための試験を行うことが可能になった。

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
日経コンストラクション、2014年8月25日号 特集・インフラ市場意趣争奪戦（第2部ロボ・非破壊で限界突破） 「研究室を飛び出す非破壊検査」 (P49～P51)	平成26年8月25日	日経BP社	浅野祐一、木村駿 (取材記事)
The 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology, ICMST-Kobe 2014, “Backscattering X-ray System using 950 keV Linac for Non-destructive Inspection”	平成26年11月4日	The Joint Accelerator Conferences Website (JACoW)	Changheng Liu, Ryota Yano, Mitsuru Uesaka, Takeshi Fujiwara, and Katsuhiko Dobashi
Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Volume 47, Number 23 “On-site nondestructive inspection by upgraded portable 950keV/3.95MeV X-band linac x-ray sources” (P1～P9)	平成26年12月14日	IOP Publishing	Mitsuru Uesaka, Katsuhiko Dobashi, Takeshi Fujiwara, Cuixiang Pei, Wenjing Wu, Joichi Kusano, Naoki Nakamura, Masashi Yamamoto, Eiji Tanabe, Seiji Ohya, Yukiya Hattori, Itaru Miura, Hidetaka Honma, Masahiro Ishida and Yoshitomi Kimura
検査技術、2015年1月号 “9.3GHzX バンドライナック非破壊検査装置の実用化” (P1～P7)	平成27年1月1日	日本工業出版	土橋克広、上坂充、藤原健
可搬型高エネルギーライナックX線源による産業・社会インフラ診断原子力技術の新しい社会貢献 (Vol.57, No.9, 604-607, 2015)	平成27年9月1日	日本原子力学会誌 Vol.57	土橋克広、上坂充、藤原健
検査技術、2015年9月号、『X線動画撮影技術による化学プラント装置内部流体の可視化』 (P32-P36)	平成27年9月1日	日本工業出版	三浦到、上坂充、草野譲一、服部行也、小野洋伸
可搬型950 keV/3.95 MeV Xバンド電子ライナック X線源による産業/社会インフラ診断 (vol.12, No.3,142-151,)	平成27年10月31日	日本加速器学会誌, vol.12	上坂充、橋本英子、土橋克広、藤原健、草野譲一、大矢清司、三浦到、大島義信、石田雅博

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
該当無し				

9. 成果の実用化の見通し

本研究によって、高エネルギー（950 keV, 3.95 MeV）可搬型 X バンド（9.3 GHz）電子ライナック X 線源を使用し、

- (1) RC・PC 橋の直径 10mm ほどの鉄筋について、950 keV X 線源と Tomosynthesis 解析手法で、径の減少を 1-2mm、断面積比 1-2%の精度で、30 分以内で試験・判定することが可能になった。
- (2) PC 橋のシース中での 7mm 鉄ワイヤについて、3.95 MeV X 線源で Tomosynthesis 解析手法と部分角度 CT を用いて、鉄ワイヤの直径の減少を 1-2mm、断面積比 7-8%の精度で、30 分以内で試験・判定することが可能となった。
- (3) 実際の橋梁現場でのセッティング・撤収の高速化を実現した。また、操作性の向上、その場データ分析・輸送・電源供給の技術も確立した。セッティングと撤収にそれぞれ 3 時間程度の短時間となり、また実測定については 2~3 日で 1 つの橋の検査と評価を完了できるようにした。土木研究所にて実践試験を実施し、実際の橋梁現場でのセッティング・撤収の高速化、操作性の向上、その場データ分析・輸送・電源供給の技術も確立させた。

上記(1)~(3)によって、高精度な橋梁の検査技術および実際の橋梁現場での高速な試験技術を確立することに成功した。

今後は、SIP プロジェクト「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(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)」(H26~30・内閣府)の中で、確立された技術を長野県妙高大橋での X 線透視検査に適用し、構造強度評価まで実施し、解体工法決定に貢献する。さらに実橋梁での試験実績を積み、特定検査手法として実用化させる見通しとしている。

950 keV X バンド(9.3 GHz)電子線形加速器 X 線源の産業インフラ非破壊検査について、東京大学・(株)アキュセラと共同開発・機器の最適化を行い、ここまで 9 回のオンサイト非破壊検査の実績がある。その非破壊検査応用について、(株)三菱化学が用途調査・探索・調整を行い、(株)日立パワーソリューションが非破壊検査を請け負って実施している。(株)関東技研が X 線源・検出器の駆動システムを製作している。上記の機器開発・最適化・市場開拓・非破壊検査の実施・実績の蓄積と改良に関する、東京大学東海キャンパスを中心としたコンソーシアムで出来上がっている。社会インフラの非破壊検査につき、X 線源開発・活用について上記のコンソーシアムに加え、土木研究所による橋梁構造健全性評価、(株)NEXCO 東日本・茨城県庁等地方自治体による用途調査・提供が行われている。

10. その他

無し

(注)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格で定める A 列 4 とし、縦位置左綴とすること。
各項目の記入にあたっては、数字、図表等を用いて詳細に説明すること。
記入量に応じて、適宜、欄を引き伸ばして差し支えない。
2. 「研究課題名」について
平成 2 7 年度建設技術研究開発費補助金交付申請書に記載した研究課題名を記入する

- こと。
3. 「研究期間」について
当該研究課題について補助金が交付された期間（年度）を記入すること。
 4. 「代表者及び研究代表者、共同研究者」について
 - (1) 「代表者は1人又は1法人を記入すること。研究代表者は1人を記入すること。共同研究者は、研究に参加している者全てを記入すること。
 - (2) 研究組織の変更により代表者又は研究代表者を交替している場合は、交替後の研究者名を記入すること。
 5. 「研究・技術開発の内容と成果」について
 - (1) 当該研究期間に行った研究によって得られた成果を、各年度の交付申請書の「研究・技術開発の目的及び目標」「本年度の実施計画」と対比させてわかりやすく記入すること。
 - (2) 主要な研究方法、手段等の経過を詳細に記入すること。
 6. 「研究成果の刊行に関する一覧表」について
記入した書籍又は雑誌については、その刊行物又は別刷り一部を添付すること。
 7. 「研究成果による知的財産権の出願・取得状況」
説明上必要な書類を、適宜、添付すること。
 8. 「成果の実用化の見通し」について
研究・技術開発の成果による実用化について、具体的な計画がある場合にはその内容を記載すること。