

論文

小型中性子源による床版内部の水・空隙非破壊観察技術

池田義雅*, 大竹淑恵*, 柳町信三**, 橋口孝夫*, 水田真紀***

*理博, 理化学研究所, 中性子ビーム技術開発チーム (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

**理修, 理化学研究所, 中性子ビーム技術開発チーム (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

***工博, 理化学研究所, 中性子ビーム技術開発チーム (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

小型加速器中性子源 RANS を用いて, コンクリート内の空隙および水に対する後方散乱中性子利用型の非破壊検査法を開発した. 床版上面に生じた劣化損傷を想定し, 厚さ 6cm のコンクリートに空隙または水に見立てたアクリルブロックを挟んだサンプルについて, 厚さ方向に中性子を入射し内部の構造を計測した. 小型加速器中性子源のパルス中性子を入射し後方散乱中性子を適切なタイミングで計測することで, 路面から 6cm 下の水または空隙の二次元分布の非破壊測定が可能であることを放射線シミュレーションと実験から示した.

キーワード: 中性子加速器, 後方散乱, 反射イメージング, 非破壊検査

1. はじめに

道路橋を構成する部材の中で, 床版と他の部材との違いの一つは, コンクリート表面に舗装が敷設されていることにある. つまり床版の点検では, 舗装面下で経時的に劣化が進行していく状況を確認することができない. しかしながら, 床版は道路利用者を直接支える部材であり, 劣化程度によっては利用者に重大な被害を及ぼす恐れがある. したがって, 床版では第三者被害の防止を目的とし, 予防保全的にメンテナンスされることが望ましく, 舗装面下の劣化進行を捉える技術が必要とされている.

コンクリート床版の劣化は水の影響を受けて促進される¹⁾ことが認識され, 1987年「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料」で本格的に床版防水が適用された. しかし現在でも, コンクリート上面の土砂化や層状の水平ひび割れの発生, コンクリート塊の抜け落ちに至ったケースが報告されている²⁾. さらに, 塩害等の複合的な劣化要因がある場合には急激に健全性が低下する傾向があること, PC床版に比べRC床版の場合, 健全性を永続的に保つことは困難であるとの調査結果も報告されている³⁾.

以上の問題意識から, 本研究では, 舗装面下で進行するコンクリート床版の劣化状況を路面側から知る非破壊検査手法の一つとして, 中性子源の適用を検討する. 将来的には土砂化や抜け落ちに繋がる滞水, 層状ひび割れ, 浮き等, コンクリート床版の

健全性低下の予兆を把握できる技術の確立を目指す.

2. コンクリート床版の検査に向けた装置の開発

2.1 コンクリートの検査に適した中性子

中性子線は, 原子核を構成している粒子の一種である中性子が運動エネルギーを得て飛ぶ放射線の一種である. 放射線はその粒子種とエネルギーによって物質との相互作用が異なり, これが物質に入射した際の透過率や反射率に影響する. 放射線を用いた内部非破壊検査ではサンプルに入射した放射線が外へ放射する数を計測し, サンプル内部の各物質の透過率(または反射率)の差から, それらの元素や密度, サイズ等の分布をイメージングする. よって用いられるべき放射線はサンプル全体に対して十分な透過性を確保しつつ, イメージングの際の陰影を付けるため, 異なる物質間で相互作用の強さに十分な差があるものを選択する必要がある.

中性子線は, 電子と相互作用せず, 原子核種によって相互作用の強さが決まり, 透過力も異なる. 例えば, シリコンやカルシウムなどの元素を多く含む媒体に対する透過力は高く, 比較的深部まで入り込む. 同時に中性子は, 水素, リチウム, ホウ素といった軽元素に対して相互作用が強く, 水や有機物などに感度が高い利点がある. そのためコンクリート構造物内の水分の有無や分布を測定するのに適した性質も持っていると言える.



図-1 理研小型中性子源システムRANSの外観

さらに、インフラを形成する巨大なコンクリートを対象とするため、高い透過能力が必要となる。RANSは、8桁のエネルギー領域を持つ中性子を同時に発生する。よって、測定対象とする材料の特性や現象によって、中性子のエネルギー領域を選ぶことが可能である。例えば、エネルギー0.01~0.1eVの中性子を利用することにより、鋼材の塗膜下腐食ならびに水の出入りの可視化に世界で初めて成功し⁴⁾、産業界との共同利用が進みつつある。一方、エネルギー1MeV以上の中性子の透過を利用して30cm厚さのコンクリートを介して鋼材を計測できることを確認している^{5, 6)}。しかしながら透過による測定では中性子源と検出器で対象を挟み込む必要があり、利用可能な状況に限られることから、本研究では新たな手法の開発に着手した。

2.2 装置の利便性の向上

本研究で利用した理研の小型加速器中性子源 (RANS: Riken Accelerator-driven Neutron Source) の外観を図-1に示す。RANS開発の方針は、材料開発や非破壊検査などへの利用を容易にするため、遮蔽を含めたシステム全体をコンパクト化することである。

RANSの開発では、まず中性子発生効率の高い陽子線を用い、長寿命 Be ターゲット⁷⁾を採用した Be(p,n),B 反応による中性子源を構築し、2013年より2年間安定連続運用を行った⁸⁾。陽子線エネルギー7MeV、パルス幅約20~180 μ s、繰り返し周波数20~200Hz、最大平均電流100 μ A、遮蔽体はホウ素ポリエチレンと鉛を組合せ、中性子ビームライン最長約5mである⁹⁾。

これまでの中性子線の利用については、研究用原子炉での中性子によるイメージング実験の他に、エネルギー100meV以下の中性子の波の性質を利用した物質構造解析研究、原子核による中性子捕獲核反応を利用した元素分析などが行われてきた。これについては、原子炉を有する限られた施設のみで利用が可能であり、近年、大型加速器を利用した中

性子源として大強度陽子加速器施設J-PARCなどの稼働開始により、更に多くの高度な中性子利用が期待されている。しかし中性子利用の頻度に関して、このような大型装置利用は年間数日間のみに限られているのが現状であり、リソース不足が中性子利用促進への大きな障害となっている。このような背景を受けて、RANSは企業内や大学においていつでも利用可能な手元で使える小型中性子源として開発している^{9, 10)}。

2.3 現場適用を意識した小型・軽量化

現在のRANSは据置型であり、放射線管理区域内に設置しているが、開発当初より屋外への持ち出しを念頭に放射線遮蔽能や安全性に配慮した設計がなされている。現在の放射線障害防止法および関連法令では原子力規制委員会の許可を得た4MeV未満の線形加速器を含む装置を橋梁等の検査に利用可能であると定められている。このことを受け、コンクリート床版の劣化診断等、インフラ構造物の非破壊検査技術への利用を目指した小型化と安全性向上に取り組んでいる。

まず、中性子源を搭載した車両を橋梁等のインフラ構造物の検査に利用するため、装置のコンパクト化にも取り組んでいる。現在設計している4MeV未満陽子線を利用した車載型小型中性子源のターゲットステーションの重量は、放射線輸送計算に基づくと約700kg程度である。そして、さらなる小型化と屋外での安全性向上に向け、発生する放射線量を低減する技術の開発も行っている。高感度な検出器と画像解析技術の高度化を図ると同時に中性子線の更なる短パルス化を実現することにより、中性子線の出力を抑えても従来よりも鮮明な透過画像の取得を可能にしようとするものである。これにより、放射線量が飛躍的に低減されるとともに、装置全体のサイズ・重量も軽減される。もちろん、装置を移動させることに対する危険性(走行時の振動や衝突の影響、放射性物質の飛散等)を回避する対策についても検討している。

表-1 シミュレーションに用いたコンクリートおよびアスファルト混合物の元素組成

	密度 (g/cm ³)	元素組成 (wt%)
コンクリート	2.2	O: 0.5446, Si: 0.346, Ca: 0.0446, Al: 0.0348, Fe: 0.0143, H: 0.0103, Mg: 0.0022, K: 0.0022, C: 0.001
アスファルト混合物	2.35	O: 0.48, Si: 0.42, C: 0.085, H: 0.01, N: 0.005

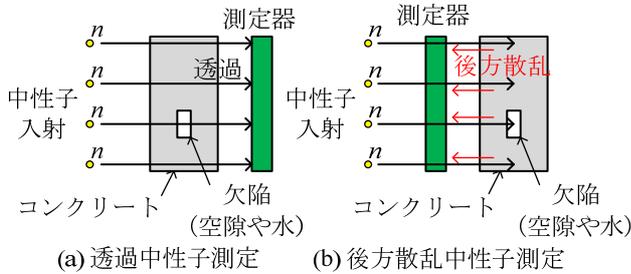


図-2 中性子測定方法のイメージ

さらに、屋外での安全性確保については、電源スイッチオフにより完全に放射線をオフにすることで考慮されている。そして、放射線遮蔽能については、小型中性子源非破壊観察システム稼働時でも放射線を自然放射線程度まで抑えることができるよう、遮蔽能を含めたシステム開発を進めている。

3. シミュレーションに基づく観察手法の開発

運動エネルギー1MeV 程度の中性子をコンクリート標的に入射すると、中性子は物質中の原子核と弾性散乱して運動エネルギーの一部を失い減速し、運動方向も変化する。これを物質から放射されるまで繰り返し、20~50 meV 付近にピークを持ったエネルギー分布を作る。この反応の頻度は原子核種やその密度に依存し、ここでは水素原子核密度が最も支配的である。また力学的に二体衝突であるため、中性子と質量の近い水素原子核との衝突によって受け渡すエネルギー量が最も大きくなる。よって低エネルギー中性子の放射量は主に媒質の水素密度に依存することになり、その計数変化から内部の水分量の分布を得ることができる。この論文ではサンプルに入射後、複数散乱を経て最終的にサンプル入射面から放射される後方散乱中性子を扱う。図-2 に本実験のイメージを透過中性子測定と対比して示す。

放射線はその線種やエネルギーによって透過率や反応率が異なるため、それを適切に選び取る必要がある。また放射線の測定に用いる検出器には、そ

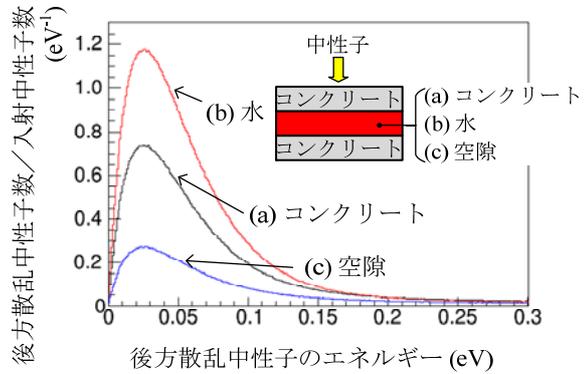


図-3 シミュレーションによる後方散乱中性子のエネルギースペクトル

れぞれ測定できるエネルギーの領域や測定効率が異なる。RANS においてエネルギーは最大 5MeV の中性子を入射し、弾性散乱を繰り返して 10meV まで広く分布するので、内部の情報を得るために適切なエネルギー範囲や反射タイミングを、既に測定されている各原子核と中性子の反応断面積テーブルを用いた放射線輸送計算によるシミュレーションから予測し、測定のために適切な検出器と測定法を選定することとする。シミュレーターは geant4¹¹⁾ を用いて生成した。シミュレーションに用いたコンクリートおよびアスファルト混合物の元素組成を表-1 に示す。本研究では、コンクリートやアスファルト混合物に含まれる水素密度が主としてシミュレーション結果に影響する。よって、一般的な各材料の元素組成を適用することとし、コンクリートは普通ポルトランドセメントを用いた W/C=0.55 のもの、アスファルト混合物は体積比でアスファルト 5%、空隙 4%、それ以外を骨材として算出した。なお、セメントの化学成分は文献¹²⁾、アスファルトの化学組成はある原油から製造されたストレートアスファルトの元素分析結果¹³⁾を参考にした。

厚さ 6cm のコンクリート 1m×1m を 3 段に重ねて床版に見立て、中央段のコンクリートを空気または水に置換した時の中性子による内部観測をシミュレートした。図-3 は上記サンプルに対して、RANS でも用いられる 1MeV の中性子をサンプル中心に入射時、サンプル表面から放射する中性子のエネルギースペクトルを示す。低エネルギー (E<0.2 eV) 後方散乱中性子の計数は水によって増加し空

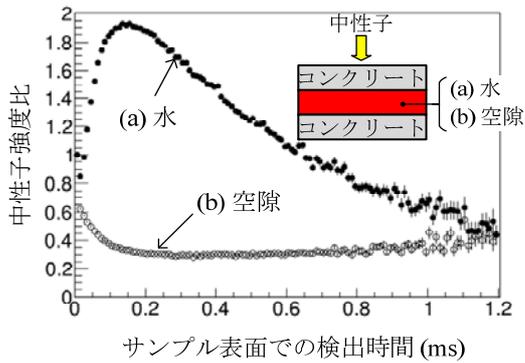


図-4 シミュレーションによる表面から放射する後方散乱中性子強度を標準状態で規格化した強度比の時間分布

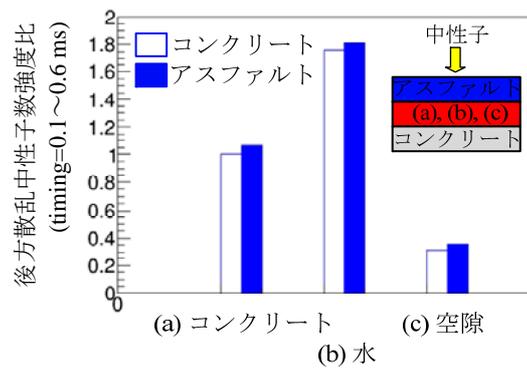


図-5 シミュレーションによる表層部や内部の材質の後方散乱中性子強度への影響

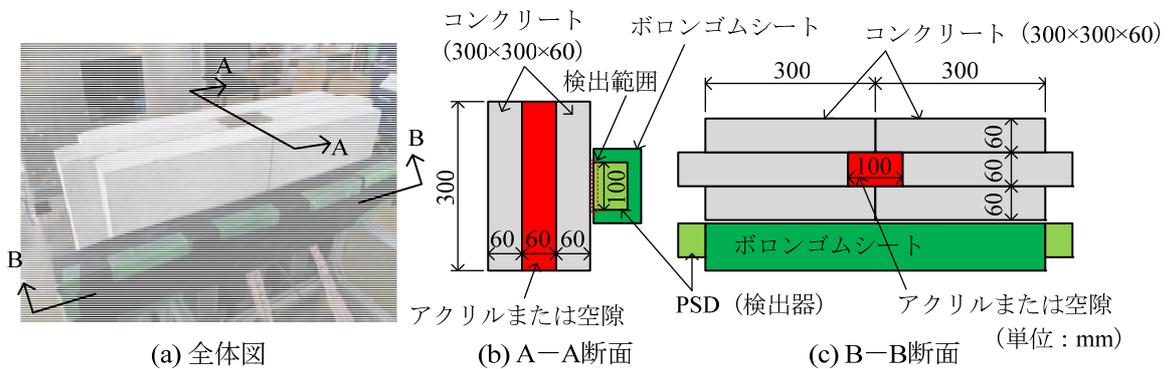


図-6 実験セットアップ

隙によって減少している。散乱回数の少ないまま放射する高エネルギー中性子に比べて、多くの散乱の後に放射する低エネルギー中性子はサンプル内部の媒質に強く依存して増減しており、このエネルギー領域での後方散乱中性子計数変化を測定できれば内部の水や空隙を検知することが可能である。低速な低エネルギー中性子は高エネルギー中性子に比べて長い時間をかけてサンプルから放射する。

図-4に水や空隙により増減する後方散乱中性子量を、水や空隙のない標準状態で規格化した強度比の時間分布を示す。低エネルギー中性子は主に0.05~1msのタイミングで放射しており、この強度変化から内部の水や空隙を検知することができる。このタイミングはサンプルの材質や形状によって変化すると考えられ、パルス中性子源を用いて中性子入射から放射の時間分布を測定し、適切な計測タイミングを取ることで、内部の情報を持つ中性子を選び取ることができる。

図-5はタイミング0.2~0.6msで放射する後方散乱中性子の計数をコンクリートのみのサンプルの値で規格化した中性子線強度比を示す。図-2, 3と同様に厚さ6cmのコンクリート1m×1mを3枚

重ね、表層をアスファルト混合物に置換したもの、および中層を水または空隙に置換したものを比較した。内部の水による強度増加は1.8倍、空隙による強度減少は0.4倍になった。シミュレーションで用いたコンクリートとアスファルト混合物の元素組成比を表-1に示す。今回考慮したアスファルト混合物の水素含有量はコンクリートより3.8%多いのに対し、主に水素原子核密度に感度の強い本シミュレーションで得た後方散乱中性子強度については、コンクリートのみのセットアップと比較して6.5%増加している。この差は今回測定する水や空隙のシグナルに比べて小さいことから、以下の実験においてはアスファルト混合物ではなく、すべてコンクリートを用いる。さらに、実験での扱い易さから、水と同等の水素密度を持つアクリルを水の代わりに用いる。

4. 小型加速器中性子源を用いた床版模擬サンプル内部の水と空隙の反射イメージング

RANSにおける中性子を用いた床版内部の水、および空隙の非破壊イメージング観察を実証するた

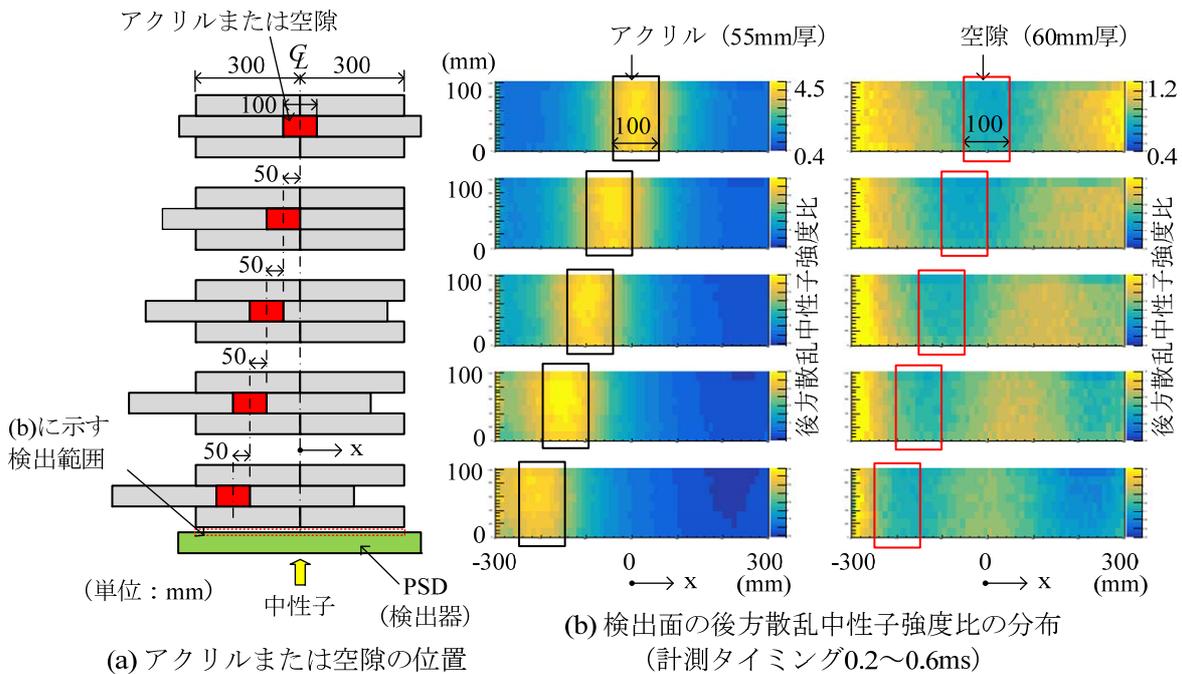


図-8 実験から得られた後方散乱中性子強度比によるアクリルまたは空隙の判別結果

め、模擬実験を行った。図-6にセットアップを示す。厚さ6cm、幅30cm×30cmのコンクリートを横方向2列厚さ方向3段に並び、中央段に幅10cm×30cmの空隙(厚さ6cm)またはアクリルブロック(厚さ5.5cm)を挟む。そして、中性子検出器を片面中央に密着させて設置し、同面から中性子を入射し、放射する個々の中性子の時間と位置分布を計測し、水や空隙の存在しない標準状態の値からの計数比を観測する。

検出器は10気圧の He^3 を封入した直径12.7mm、長さ600mmの有感領域を持つガス管チェンバーを8本並列に並べたものを用いる。有感面の横幅はサンプルと等しく、サンプルの中性子入射側表面に密着させる。中性子個々に対して時間分解能 $1\mu\text{s}$ 程度、位置分解能3mm程度の測定が可能である。検出効率は低エネルギーほど高くなり、10meVで90%程になるため、シミュレーションにより予測されるエネルギー範囲(図-1)を測定するのに適する。

パルス幅 $30\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数150Hz、平均電流 $19\mu\text{A}$ の矩形パルス陽子ビームから生成させた中性子を用い、一回5分間の測定を行った。ただし検出器の計数限界のため、厚さ5cmのホウ素入りポリエチレンブロックを設置し、中性子ビーム強度を1/10程に減じた上で入射した。

図-7に後方散乱中性子量を内部のアクリルや空隙と同じ幅範囲で計測し、アクリルや空隙のない標準状態で規格化した強度比の時間分布を示す。シミュレーション(図-4)で予測した通り、入射からのタイミング0.1~1.0msの範囲での後方散乱中性

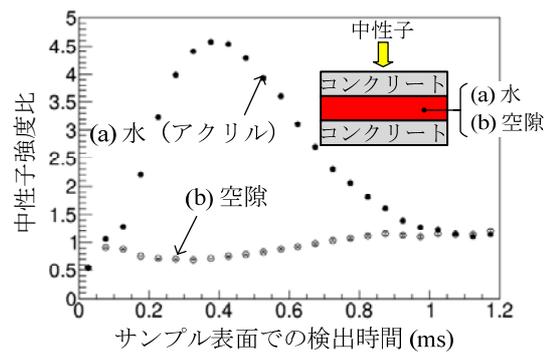


図-7 実験から得られた表面から放射する後方散乱中性子強度を標準状態で規格化した強度比の時間分布

子強度変化は水によって増加し、空隙によって減少している様子は一致している。また、水と空隙の存在による標準状態からの強度比の増減量としては、実験とシミュレーションの間でいくらか異なるのはコンクリートの含水量に差があるためと考えられるが、空隙と水の間強度比は最大5倍程と一致している。以上、水がある場合の強度変化の実験結果から、本手法では舗装下の土砂化や抜け落ちに繋がる滞水を捉えられる可能性がある。

図-8(b)は後方散乱中性子の位置強度分布とサンプル内部のアクリルや空隙の位置との比較を示した二次元ヒストグラムである。横軸は横幅600mmを60分割、縦軸は縦幅102mmを管毎に8分割し、検出器有感面を480のピクセルに分割した。アクリルや空隙の位置を中央から左側にずらした

から (図-8(a)), ピクセル毎にタイミング 0.2~0.6ms の後方散乱中性子を計測し, 標準状態での値で規格化して強度比分布とした。図-7 でも示した通り, 本実験で用いた試料において, 内部のアクリルによる強度変化は最大 4 倍に達し, また空隙による強度変化は最大 0.7 倍程である。それぞれの強度変化量に合わせ, 強度比はアクリル観測時に 0.4~4.5, 空隙観測時に 0.4~1.2 の間でカラーリングした。強度の高くなる部分を明色で, 低くなる部分を暗色で示し, 内部のアクリル (空隙) の位置と後方散乱中性子強度比の増加 (減少) 位置は一致しており, 本セットアップにおいてコンクリート下のアクリル (水) や空隙部分の識別に十分な感度があることを確認した。

5. まとめ

小型加速器中性子源 RANS を用いて, コンクリート内の空隙および水に対する後方散乱中性子利用型の非破壊検査法を開発した。パルス中性子を用いて後方散乱中性子を適切なタイミングで計測することで床版表面から 6cm 下の水または空隙の二次元分布を観測可能であることをシミュレーションと実験から示した。

以上より, 本手法は, 道路橋コンクリート床版の非破壊検査の技術の一つとなる可能性が示された。既に, 厚さ 10cm のコンクリートより下にある厚さ 5mm のアクリルブロック, 厚さ 20cm のコンクリートの下にある厚さ 20mm のアクリルブロックについて, 本研究と同様の手法で検出することにも成功している。今後, 可搬型加速器中性子源の開発とともに, 検出器の改良や計測の最適化を行い, 床版に生じた劣化損傷の検出能力の向上を進めていく。そして, 線源開発とともに社会実装開発へ向けた実証機開発フェーズへと進む計画である。

謝辞

本研究 (の一部) は 文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」および総合科学技術・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)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人 JST) によって実施されました。

参考文献

- 1) 松井繁之:「移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について」, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987.
- 2) 藤原英之:「道路橋コンクリート床版の「土砂化」に関する調査報告」, J-BEC レポート, pp.11-17,

vol.10, 2014.

- 3) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, p.43, 2014.
- 4) 山田 雅子, 大竹 淑恵, 竹谷 篤, 須長 秀行, 山形 豊, 若林 琢巳, 河野 研二, 中山 武典:「小型中性子源を使った塗膜下腐食鋼材の非破壊イメージング観察」, 鉄と鋼, Vol.100, No.3, pp.429-431, 2014.
- 5) 大竹淑恵, 須長秀行:「橋梁構造物に関する非破壊検査」, JACIC 情報 110, pp.62-69, Vol.29, No.1, 2014.
- 6) 大竹淑恵:「量子ビームによる非破壊健全性診断に向けて—小型中性子源 RANS—」, 非破壊検査, pp.221-224, Vol.64, No.5, 2015.
- 7) Y. Yamagata, K. Hirota, J. Ju, S. Wang, S. Morita, J. Kato, Y. Otake, A. Taketani, Y. Seki, M. Yamada, H. Ota, U. Bautista and Q. Jia: “Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams”, Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry, Vol.305, Issue 3, pp.787-794, 2015.
- 8) Y. Otake (partial author), M. Uesaka and H. Kobayashi: Compact neutron source. In A.W.Chao, W.Chou (Eds.) Reviews of Accelerator-Science and Technology, New Jersey: World Scientific, Vol.8, pp.181-208, 2015.
- 9) Y. Ikeda, M. Takamura, A. Taketani, H. Sunaga, Y. Otake, H. Suzuki, M. Kumagai, Y. Oba: “Prospect for application of compact accelerator-based neutron source to neutron engineering diffraction”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol.833, pp.61-67, 2016.
- 10) Y. Ikeda, M. Takamura, A. Taketani, H. Sunaga, Y. Otake, H. Suzuki, M. Kumagai, Y. Oba and T. Hama: “Measurement of neutron diffraction with compact neutron source RANS”, IL NUOVO CIMENTO C, Vol.38, Issue 6, 177, 2015.
- 11) Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al.: “Geant4, A Simulation Toolkit”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol.506, Issue 3, pp.250-303, 2003.
- 12) 阿部 頼政:「道路技術者のアスファルト講座 第2回アスファルトの製法と組成」, アスファルト, Vol.92-93 合併号, pp.46-52, 1972.
- 13) 田代 忠一: 小特集*硬化コンクリート中の水分の役割/2「セメント硬化体中の水分」, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.12-15, 1994.

(2016年7月18日受付)