

中性子によるコンクリート構造物の非破壊イメージングおよび定量評価法



藤田 訓裕
Fujita Kunihiko

1 はじめに

近年、国内外において橋（橋梁）やトンネルといった交通インフラの老朽化が社会問題となっている。橋梁の経年劣化で緊急性が高いのが、床版と呼ばれる鉄とコンクリートで構成される構造物である。床版はアスファルト等の舗装の下にあって、利用者の荷重を直接支えている重要な構造物だが、このコンクリートのセメント成分が流れ出し、石や砂利のみが残る土砂化と呼ばれる現象が問題となっている。このような劣化は上面の舗装を剥がさないと確認できないため、放置した結果、ある日突然道路に穴が開く（抜け落ち）といった事象も報告されている。このような大事故につながる破壊を防ぐためだけでなく、定期検査を行い損傷が小さいうちに補修をすることで、トータルの維持費を低減させる予防保全というやり方が提唱されて久しいが、こと床版に関しては、金銭的、時間的コストがかかるという理由で、ほとんど行われていないのが現状である。

そこで、床版上層の舗装を剥がすことなく、健全性を判別するための装置として、理研独自開発の小型中性子源 RANS, RANS-II¹⁾ を使った中性子散乱イメージング法のシステム開発を行ってきており、これまでに様々な成果をあげてきている²⁻⁸⁾。そして、将来的には車輛搭載型中性子源 RANS-III を用いて、全国の橋梁の非破壊検査を行うことを目標としている（図 1）。

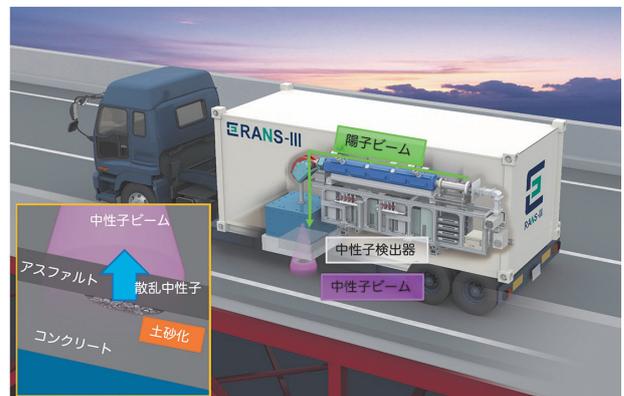


図 1 （予想図）RANS-III を用いた床版劣化の計測

2 中性子散乱イメージング

2.1 中性子を用いた非破壊検査

中性子と物質（の原子核）との散乱確率は同位体毎に異なっており、水素をはじめ軽元素との散乱確率は高いが、鉄等の金属は比較的透過しやすいという特徴を持っている。特にインフラ構造物でよく使用される鉄鋼に対して高い透過力を持つため、非破壊検査に有効なプローブと言える。しかし従来、高速中性子を用いたイメージングは透過を用いたものがほとんどで、これには中性子の発生源と検出器で計測対象物を挟み込む必要がある。そのため、橋梁の床版のような巨大な構造物を検査するには、路面と反対側（桁の裏側）にアクセスする足場を組む必要がある等、莫大なコストが必要であったり、そもそも不可能であったりする。

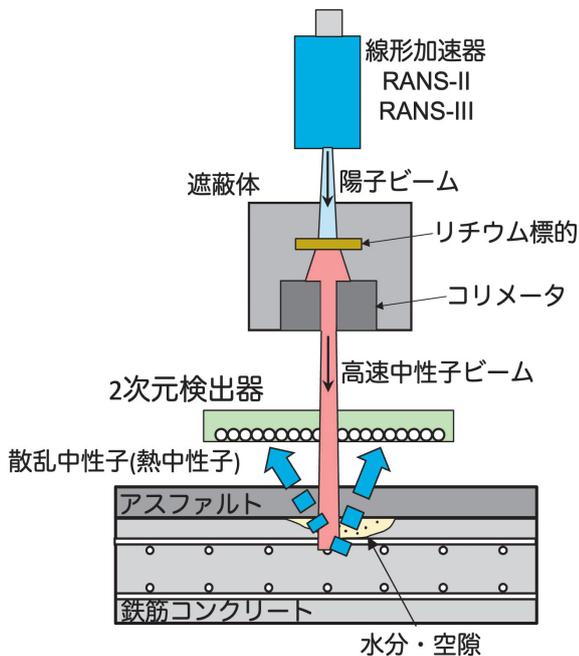


図2 散乱イメージング法概念図

2.2 中性子散乱イメージング

散乱中性子イメージングとは高速中性子のビームを検査対象物に照射し、中性子が内部で物質と散乱・減速をおこなった結果、計測対象物の表面（後方）まで戻ってきた中性子の位置分布を計測する手法である。この概念図を図2に示しているが、この手法では中性子源と検出器が計測対象物に対して片側に存在するため、対象を挟み込む必要がないという利点がある。

2.3 時間情報を用いた水分・空隙の分離

表面に戻ってくる中性子の分布は、内部を伝搬する際に経路上に存在する物質の元素組成と密度に依存した応答を示す。ここで、劣化によってコンクリート内部に水分が含まれている場合、中性子が散乱され、減速される確率が多くなり、結果熱中性子の発生量が多くなる。しかし、水分は熱中性子の遮蔽としても働くため、コンクリートのより深くから戻ってくる中性子にとっては遮蔽の効果となり、熱中性子数は減少する。一方、空隙の場合は、コンクリートが存在しないことによって表面近くの中性子にとっては散乱・減速が起らないため、熱中性子発生量の減少に働くが、奥深くから戻ってくる熱中性子に対しては遮蔽が少なくなることによる、中性子数の増加の効果となる。このように、表面に戻って

くる熱中性子と内部の水分や空隙の量は単純な比例関係にはならないことが分かっている。

そこで、筆者らが注目したのが、コンクリート内部での伝搬時間の差を用いる方法である。RANS, RANS-II の中性子は時間的にパルス構造を持っているビームであるため、床版に高速中性子ビームを照射した瞬間から、熱中性子が検出器に到達するまでの時間を計測することが可能である。水分と空隙では伝搬時間の違いが現れると考え、時間でフィルターをかけることで、両者を識別することを試みた。具体的な計測条件は粒子輸送シミュレーション Geant4 を用いて見積もりを行った⁷⁾。

3 実験セットアップ

3.1 小型中性子源RANS-II

小型中性子源である RANS-II は、陽子加速器、ビーム輸送系、リチウム標的、ターゲットステーションで構成されている。陽子加速器は RFQ 線形加速器と呼ばれるもので、本手法に必須である陽子のパルスビームを得ることができる。2.49 MeV まで加速された陽子はビーム輸送系を通り、リチウム標的まで導かれ、そこで ${}^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^7\text{Be} + \text{n}$ 反応を起こし中性子を発生させる。このとき、中性子のエネルギースペクトルは約 0.8 MeV を最大値とした連続分布を持つ。リチウム標的の周囲は放射線遮蔽のために、ポリエチレン、鉛、ボロン含有ポリエチレン、そして鉛を用いた多層構造のターゲットステーションと呼ばれる遮蔽体で囲われている。最も中性子フラックスの高い陽子ビーム軸方向に長さ 500 mm、面積 $150 \times 150 \text{ mm}^2$ の開口部が設けられており、そこから中性子ビームが放出される。今回の計測ではより微小な欠陥を見やすくするため、ビーム径をより小さくするために、開口部に $\phi 30 \text{ mm}$ の穴の空いたポリエチレンコリメータを挿入した。

3.2 試験体

床版の試験体は、アスファルト層、欠陥挿入穴付き鉄筋コンクリート (RC) 床版層、コンクリート床版層、RC 床版層の4層で構成されている (図3左)。2層目の RC 床版中心には $100 \times 100 \times 70 \text{ mm}^3$ の穴が開けられており、ここに欠陥ブロックと健全なコンクリートを挿入することができる。

コンクリートが水分で侵食されると、セメント成

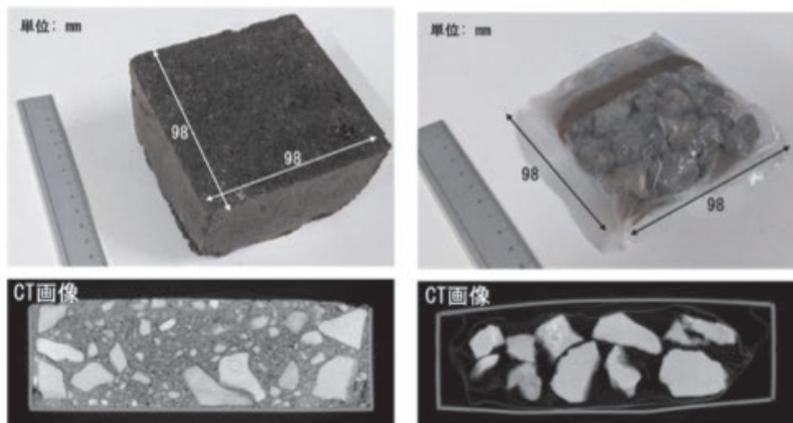
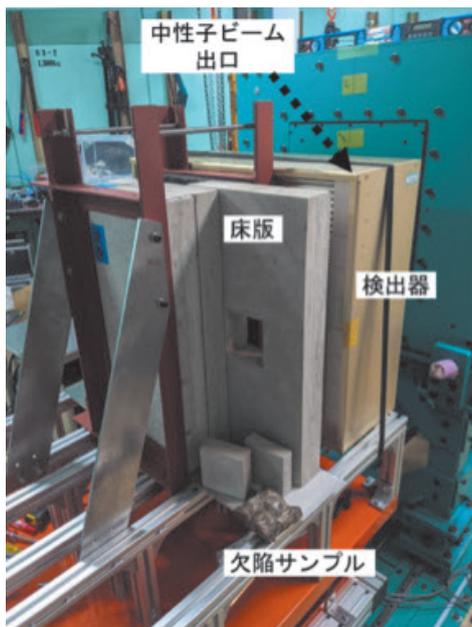


図3 実験セットアップ(左), 接着剤型(中央), 及び袋詰め型(右)の欠陥ブロック

分が流され、粗骨材（石）と細骨材（砂利）だけが残る土砂化の状態になる。土砂化した床版では上（路面）側は乾燥した骨材で、下側は湿った砂利が堆積していると考えられている。この状態を模擬するために3種類の欠陥ブロックを用意した。1つ目は、砂利と石を接着剤で封入した「接着剤型」のブロックで、接着剤の中には多くの水素が含まれているため、土砂化が起こった後に雨等で水浸しとなった状態と見なすことができる（図3中央）。2つ目は、骨材の石をテフロン製の袋に詰めて固定した「袋詰め型」のブロックで、健全なコンクリートより空隙が多い自然乾燥した状態の土砂化と見なすことができる（図3右）。3つ目は、2つ目の袋詰め型とポリエチレン板を組み合わせた「滞水土砂化型」のブロックで、現場で起きている滞水した土砂化（上側が空隙、下側が水分）により近い状態と考えられる。

3.3 検出器

検出器はヘリウム3ガスを用いた比例計数管であり、有効面積が $600 \times 600 \text{ mm}^2$ である。2次元イメージを得ることができ、位置分解能は縦が8 mm（中心部）及び12.7 mm（上下端部）で、横方向は4 mm程度である。この検出器は位置だけでなくビーム発生から検出器到達までの時間情報を計測できるため、中性子が計測対象物内部の伝搬に要した時間を取得できる。

4 結果と考察

4.1 イメージング

欠陥ブロックを挿入した状態で中性子ビームを照射して、得られた2次元イメージングの結果を図4に示している。左図が40 mm厚の接着剤型土砂化ブロックで、右図が30 mm厚の袋詰め型土砂化ブロックの結果である。縦軸、横軸は床版の正面から見て縦、横方向を表しており、色はコンクリートが健全な状態と比べて比の値を反映しており、中性子収量が増えると暖色（黄色～赤色）、減少すると寒色（水色～青色）を示す。

接着剤型の結果では、欠陥位置を中心として10%以上の中性子収量の増大（緑、黄色の領域）が確認できることから、水素との散乱で熱中性子が多く生成された効果が観測できていると考えられる。袋詰め型の結果では、中心部分で5%程度中性子収量比が減少（青色の領域）している。これは、空隙の存在による熱中性子の減少が観測できていることを意味している。以上の結果から、本手法で水分と空隙の2次元イメージングが行えることが示された。

4.2 定量評価

欠陥の有無を定量的に評価するために、図4で示した2次元図を数値化した。床版の縦（y）方向に

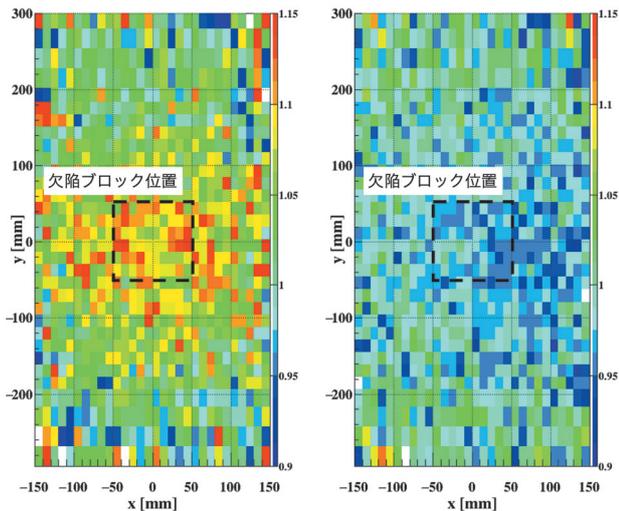


図4 水分・空隙のイメージング結果

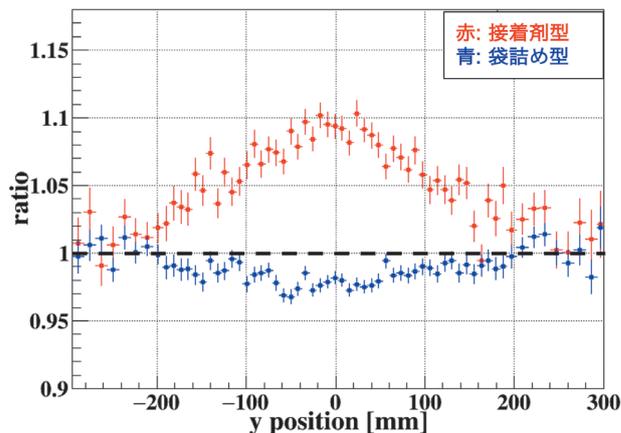


図5 水分・空隙の定量評価

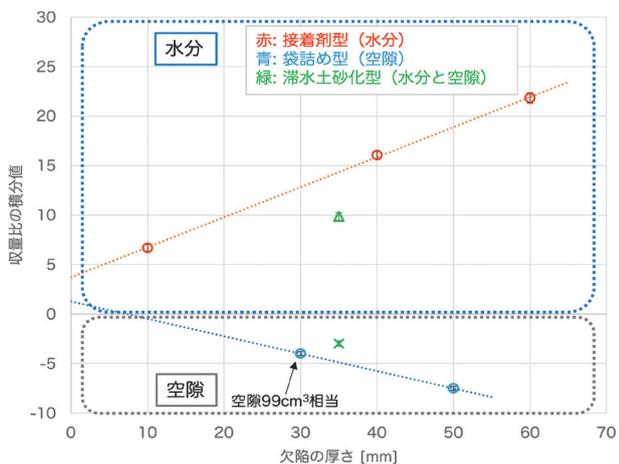


図6 欠陥体積とピーク積分値の相関

中性子数の比を足し合わせた1次元のプロットを作成した結果を図5に示している。横軸は垂直方向の検出位置で、縦軸は中性子収量の比を表している。赤線、青線がそれぞれ接着剤型、袋詰め型の結果を示している。水分が含まれている接着剤型は $y = 0$ mm を中心に1以上の正のピークを示し、空隙のある袋詰め型は1以下の負のピークを示している。

この手法で欠陥の体積を定量評価できるかを確認するために、ピークの積分値を求め、欠陥の厚さとの相関を求めた。その結果を図6に示している。このグラフでは、欠陥の厚さを横軸に、積分値を縦軸に表示しており、水分（水素）を含んだ模擬欠陥では傾きが正の比例、空隙では傾きが負の比例関係を持つことが見て取れる。すなわち、欠陥の体積を定量評価できているということが示された。また、本

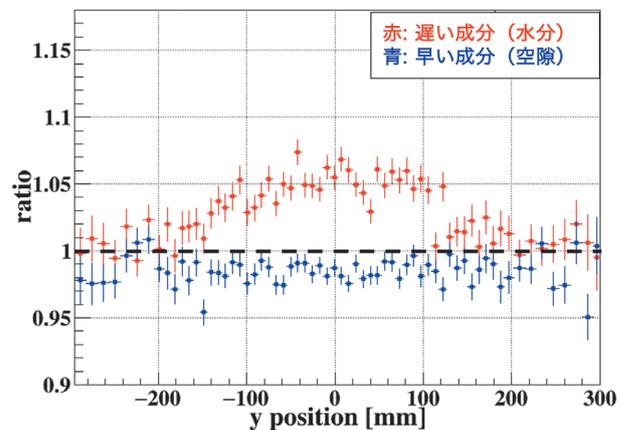


図7 時間情報を用いた、水分・空隙の識別

測定手法では少なくとも湿った土砂 10 mm 厚（空隙 33 cm³ 相当）、乾いた土砂 30 mm 厚（空隙 99 cm³ 相当）の欠陥が検知可能であるということも確認された。

4.3 水分と空隙

前節では、欠陥が水分もしくは空隙だけである場合には、中性子収量比の積分値の正負から判別できることが示されたが、両方が含まれる滞水土砂化型の場合を、水分もしくは空隙だけの場合と区別して識別をするために、時間情報を用いたイベント選別条件を探索した。コンクリート中の伝搬時間が短い成分（検出タイミングが早い）と長い成分（検出タイミングが遅い）それぞれでイベント選別を行い、中性子収量比の位置分布を求めた。その結果を図7に示している。

検出タイミングが遅い成分は水分を含む接着剤型と同じ正のピークを示す一方、早い成分は空隙だけである袋詰め型と同じ負のピークを示していることが明らかとなった。ここで、このピーク積分値を図6の緑点のバツ（早い成分）と三角（遅い成分）で示している。グラフから、時間のタイミングで正負が入れ替わることが確認できるため、適切な時間でイベント選択をすることで水分と空隙、両方の存在を分別して検知することが可能であることが示された。

5 まとめと今後の展望

今回開発した技術は鉄筋コンクリートの床版だけでなく、コンクリートの構造物全般に適用可能である。また、開発中のトラック搭載型小型中性子源RANS-IIIと組み合わせることで、様々な橋梁での非破壊劣化診断が可能になると期待できる。

計測システムすべてがトラックに搭載可能となることで橋梁、トンネルをはじめ、様々なインフラ構

造物の定期診断が容易になり、コンクリート劣化の初期段階で補修ができれば、インフラ維持の低コスト化や長寿命化に寄与できると期待できる。

参考文献

- 1) T. Kobayashi, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.*, **A994**, 165091 (2021)
- 2) 大竹淑恵, 他, *JACIC 情報*, **110**, 29(1), 62-69 (2014)
- 3) 大竹淑恵, *非破壊検査*, **64**, 221-224 (2015)
- 4) 池田義雅, 他, *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集*, **17**, 285-290 (2017)
- 5) Y. Otake, *et al.*, *Journal of Disaster Research*, **12**(3), 585-592 (2017)
- 6) Y. Ikeda, *et al.*, *Plasma and Fusion Research*, **13**, 2406005-1-5 (2018)
- 7) 藤田訓裕, 他, 第11回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 47-52 (2020)
- 8) 藤田訓裕, 他, *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文集*, **21**, 484-489 (2021)

(前 理化学研究所 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム, 現 三菱電機(株))