

論文

RI 中性子源を用いた床版内部劣化の 2 次元イメージングの実証試験

藤田訓裕*, 岩本ちひろ*, 高梨宇宙*, 大竹淑恵*

*博士 (理学), 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 丁目)

持ち運びが容易, かつ使用に際して資格や許可が不要である RI 中性子源を用いた床版の内部劣化可視化装置の開発を行った. アスファルト舗装下にある, 空隙および水分の劣化を模擬した RC 床版に対して中性子を照射し, 内部で反射した後表面から放出された熱中性子を計測することで, 欠陥の 2 次元イメージを取得した. その結果, 理化学研究所で確立されている加速器中性子源を用いた手法に比べて, 強度が 1000 分の 1 以下の中性子強度であっても 30cm 四方の範囲に存在する厚さ 10mm 以上の欠陥を 3 分以内で計測できる可能性が示された.

キーワード: 中性子, 非破壊可視化, RI 利用, 空隙, 水分

1. はじめに

これまでに理化学研究所 (理研) において, 土砂化をはじめ, 舗装下の床版内部劣化を検知する装置として, 加速器中性子源 (RANS, RANS-II) を用いた計測システムの開発が行われている¹⁾⁵⁾. 舗装の上から床版に中性子ビームを照射した後, 床版上面方向 (後方) に散乱された中性子を計測することで欠陥の位置と種類を特定する手法である. これらの開発においては, 加速器中性子ビーム特有の, 強度が高い, 直進性が良い (線源から角度広がりがない), かつ時間的に ON/OFF の構造を持つパルスビームであるという利点を生かし, 内部劣化の位置と体積について短時間, かつ低バックグラウンド, 高精度の定量評価を可能としてきた. 一方, 理研では現場のニーズに合わせた複数の中性子源を用いたシステム開発を行っており, 例えば橋脚や桁のコンクリート中の塩分濃度計測においては Radio Isotope (RI) 中性子源を用いた軽量, コンパクトな計測システムを開発し, 現場利用を実現している⁶⁾. また, 宇宙探査の分野では月・火星にある土の水分を計測するという計画も存在している. 近年, 床版の土砂化や水平ひび割れを早期に発見し, 修復を行うという現場需要は高まってきており, 選択肢を増やすという観点からも, 計測精度が多少悪化するとしても, 補修が必要な欠陥を検知することが可能な, 軽量・コンパクト, かつ安価で, 法律の規制も少ない計測システムを開発することは重要であると考えられる.

本研究では, 計測時間や精度については加速器中性子源より劣るが, 人が手で運べるほどの重量であり, 使用に際して原子力規制庁への申請や許可が不要である装置として, RI 中性子源を用いた内部劣化観察システムの開

発を行った. RI 中性子源を用いた空隙の検査装置として先行研究⁷⁾では, 100x100x10mm³の空隙に対しておよそ横 60cm の範囲を計測するために 30 分以上を必要としている. 本研究では, 同じ大きさの空隙に対して, より短時間で広範囲を計測でき, かつ定量評価を可能とすることを目指した開発を行った.

最初に粒子輸送シミュレーションを用いて, 線源の位置と中性子分布の相関をはじめ, 計測時間の見積もり, および中性子強度を増強させるための反射材の最適化計算を行った. 得られた条件を元にして, これまでに加速器中性子源を用いて計測した RC 床版の試験体を用いて, 空隙と水分を模擬した欠陥の計測を行った.

2. 散乱中性子を用いた空隙・水分のイメージング

放射線の一種類である中性子線は電氣的に中性な粒子で, 物質に対して透過しやすいという特徴を持つ. また, 散乱・減速を行う確率は水素が高く水分の存在に敏感である一方, 金属と散乱する確率は低いため, 金属の内側を透視しやすいという特徴を持つ. RI 中性子源を用いた非破壊検査装置としては水分計が広く用いられており, 例えば土木分野においては土中の含水比を計測する装置として実用化されている. しかし, 現状では広い範囲を検査し, 空隙や水分といった欠陥の位置と大きさをマッピングする用途には位置精度や検出効率が不足している.

そこで本研究では, 空隙と水分両方のイメージング, および体積の定量評価を短時間で可能とするため, 散乱中性子イメージング法の高度化開発を行った. 具体的には, 1. 遮蔽体および反射材の構造最適化による中性子数の増大, および周囲への被ばく線量の低減, 2. 位置情報

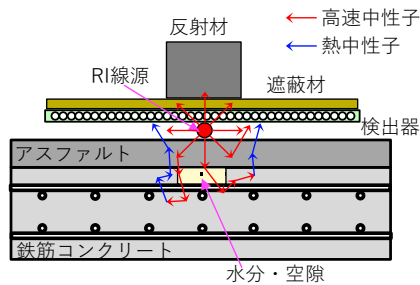


図-1 散乱イメージング装置の概略図。
赤と青の矢印は中性子の伝搬の一例。

が取得可能な、大面積、高検出効率の中性子検出器を導入することによる欠陥の定量評価手法の確立を行った。

2.1 散乱中性子イメージング法

中性子散乱イメージング法の概略を図-1 に示している。計測手順は、まず RI 線源、もしくは加速器中性子線源から発生させた高速中性子（赤矢印）を計測対象物に照射し、その後、対象物内部で散乱・減速を繰り返した後、表面から線源方向（後方）に戻ってきた熱中性子（青矢印）を検出器で計測する。中性子と対象物内部の物質（の原子核）との散乱確率は、原子核の数密度と種類に依存するため、表面に戻ってくる中性子の数量分布を計測することで、経路上に水分や空隙などの欠陥が存在する場合と、健全な場合との違いを観察することができる。この手法では、中性子発生源と計測器が計測対象に対して片側に存在するため、対象物を挟む込む必要がなく、床版のように巨大な構造物を計測する用途に適した手法である。

3. 実験セットアップ

本実験で用いた装置全体の写真を図-2(左)に示している。装置は RI 線源、反射材、検出器、試験体で構成されており、以下の節でそれぞれの詳細を説明する。

3.1 RI 線源

中性子線源としてカリフォルニウム 252 (^{252}Cf) という RI を使用した。 ^{252}Cf は放射能(ベクレル)あたりの中性子発生数が多く、放出される中性子エネルギーが平均で 2MeV と低いため、屋外現場で取り扱いやすいという特徴がある。半減期は 2.645 年で崩壊する放射性核種で、崩壊の 3.1% が自発核分裂を起こし、その際に平均 3.77 個の中性子を放出する。つまり、一度の崩壊あたり平均 0.117 個の中性子を放出する。放出される中性子の角度分布は等方的である。本研究で用いた RI 線源の放射能は計測日の時点で 1.75MBq であり、毎秒 2.05×10^5 個の中性子を放出する。線源となる粉末は直径 9.4mm、長さ 36mm のステンレス円筒に封入されているが、その外観を図-2(右下)に示している。



図-2 計測時の写真。装置全体(左)、
検出器裏側(右上)、および RI 線源(右下)。

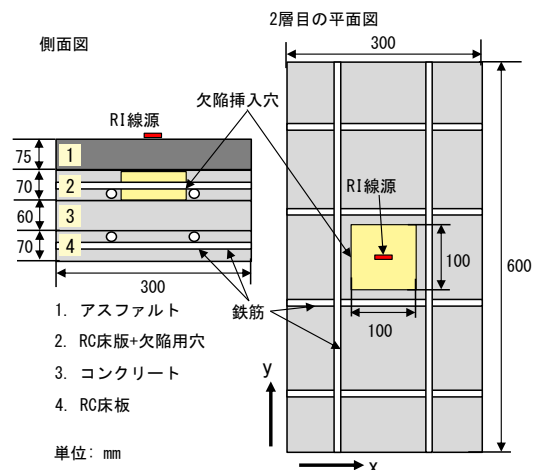


図-3 試験体の側面図(左)、および平面図(右)。

3.2 反射材

RI 線源からは中性子が等方に放出されるため、床版の反対側に放出される中性子は計測に寄与しない上に、周囲への被曝量が多くなるため、これを低減させるための反射材の設置を検討した。図-2(右上)に示すように、床版と反対側である検出器の裏側にグラファイト製のブロックを設置する事で、ブロック内部で中性子が散乱・反射し、その一部が床版へ照射される。それによって、欠陥を通過する中性子の量が増え、検出感度が上昇することが期待される。詳細については、4 章でシミュレーション検討、5.1 節で実験結果の考察を行う。

3.3 検出器

散乱によって計測対象の表面から放出される熱中性子数についての位置分布を計測する検出器として、位置感応型ヘリウム 3 (^3He) 比例計数管を使用した。ステンレス管に 10 気圧程度のヘリウム 3 ガスが封入されており、中性子とは核反応 ($n + ^3\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + ^1\text{H}$) を起こすことで、

中性子とヘリウム 3 が衝突した位置を知ることができる。検出器は横向きステンレス管が縦に 64 本並べられた構成をしており、有感領域は $600 \times 600 \text{mm}^2$ である。位置分解能は横方向がおよそ 5mm で、縦方向はステンレス管の直径で決まっており、上下中心から $\pm 200 \text{mm}$ 範囲では 8mm 、それ以外の周辺部が 12.7mm である。

3.4 試験体

本計測で用いられた床版の試験体は加速器を用いた計測と同様に 4 層で構成されており、1 層目から順にアスファルト層、欠陥挿入穴付き RC 床版層、コンクリート床版層、RC 床版層である。試験体のサイズおよび概略図を図-3 に示している。2 層目の RC 床版中心の開口部 ($100 \times 100 \times 70 \text{mm}^3$) に模擬欠陥、もしくは健全なコンクリートを挿入することができる。床版を垂直に立て、4 層全体を 2 対の鉄フレームで挟み込み、リフター付き架台の上に設置した。試験体および検出器のセットアップを図-2 (左図) に示している。

本研究で用いた模擬欠陥の種類は、 10 、 30 、 60mm 厚さの空隙、および 10mm 厚さのポリエチレン (PE) である。空隙は開口部より薄い厚さのコンクリートブロックを下層側に挿入することで実現した。例えば 40mm 厚さのコンクリートを挿入することで 30mm の空隙が模擬できる。他方、水分の模擬には水と同様に多くの水素を含んでいるポリエチレンの板を使用した。ここで、厚さ 60mm のコンクリートを下層側に、 10mm のポリエチレン板を上層側に重ねることで、滞水状態を模擬した。また、開口部に床版と同じ成分で製作した厚さ 70mm のコンクリートブロックを詰めることで健全な状態とみなした。

3.5 計測手順

将来の現場計測では検出器と RI 線源を一体にして、位置を変えながら計測を行い、広い範囲の欠陥マップを作成することが目的であるが、本研究では床版の面積が $300 \times 600 \text{mm}^2$ と検出器よりも狭いため、床版に対する検出器の位置は固定し、RI 線源のみを移動させて計測を行った。また、グラファイト反射材は計測条件毎に設置と取り外しを行った。

本研究を通して、一回の計測は 15 分であった。RI 線源の放射能は 1.75MBq であったが、将来の現場計測においては本計測より 5 倍以上高い強度の線源を用いることは法令上可能であるため、3 分での計測は原理的に可能である。

4. 粒子輸送シミュレーション

検出器や RI 線源の配置、また遮蔽材や反射材の効果についての最適化を行うため、 ^{252}Cf から発生した中性子について、Geant4 ライブラリ (version 4.6.3) を用いた粒子輸送シミュレーションを行った。中性子と物質との反応確

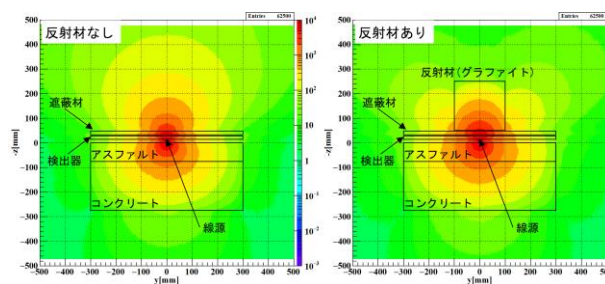


図-4 反射材なし(左)と反射材あり(右)のシミュレーション結果。床版中心を通る断面図で、赤い色ほど通過する中性子の数が多いことを示している。

率の計算には ENDF-B/VII と呼ばれる核データライブラリを使用した。実験で用いた試験体および検出器と同じ材質、サイズ、位置を持ったモデルを作成し、RI 線源から高速中性子を発生させ、床版表面での中性子線の持つエネルギー、および空間情報をシミュレーションした。シミュレーション計算においては、実験と同じように、RI 線源の位置、および反射材の材質、サイズ、および位置を変化させ、検出器に到達した熱中性子の数量分布の変化を計算した。

一例として、図-4 に反射材のあり、なし 2 パターンのシミュレーション結果を示している。床版の縦 (y 方向) の中心線に沿った、zx 平面における断面を表わしている。暖色 (赤、オレンジ) であるほど中性子数が多いことを表わしており、線源の位置を中心に中性子が広がっていることが見て取れる。図より反射材がある場合 (右図) はない場合 (左図) に比べて、上方向に抜けていく中性子が減少し、他方、コンクリートに伝搬し、欠陥を通過する中性子が増加していることが確認できた。この反射材の材質や大きさを変化させながら検出器で計測される中性子数の比較を行った。取り回しなども考慮した結果、グラファイト素材で大きさが $200 \times 200 \times 200 \text{mm}^3$ である場合が最適であり、この時、中性子数が 1.34 倍に増加するという結果が得られた。

5. 実験結果と考察

5.1 反射材の効果

健全な状態の床版を用いて、床版の中心に RI 線源を設置した場合に、検出器全体で計測される中性子数を反射材ありとなしの場合で比較を行った。15 分の計測を 2 回行った結果、反射材を設置した場合の中性子数は、設置しない場合と比較して、平均で 1.40 倍であった。4 章で述べたシミュレーションの結果と近い値であり、反射材の効果の正しく評価できているといえる。この結果から、反射材によって 4 割程度の計測時間の短縮が可能であることが示された。なお、本論文の以降では断りが無い限り、反射材を用いていない場合の結果を示している。

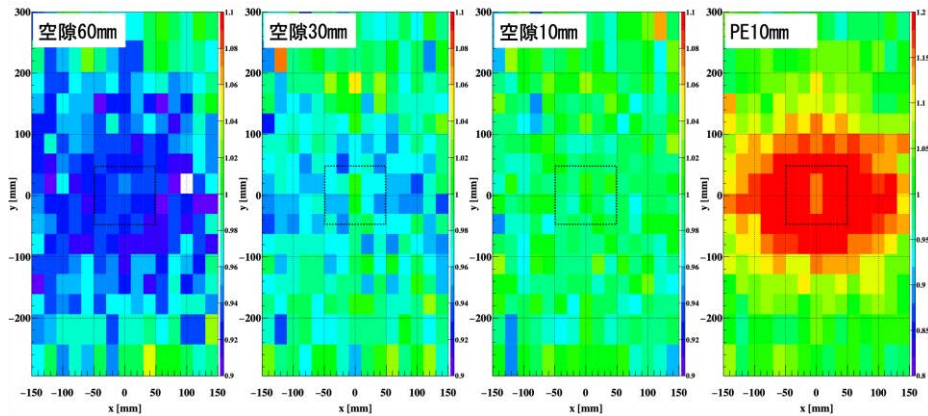


図-5 欠陥の2次元イメージング結果(実験値). 中心の点線で示された四角枠は欠陥の位置を表わしている.

5.2 空隙と水分の2次元イメージング

RI線源を欠陥挿入穴中心の真上に設置した後、床版の2層目に欠陥を挿入した状態と欠陥の無い健全な状態の2パターンにおいて試験体から反射された熱中性子数を計測した。この2パターンで中性子数の比を取ることで得られた2次元イメージを図-5に示している。左側から欠陥が60mm、30mm、10mm厚の空隙、そして10mm厚のポリエチレンの結果を表わしている。横軸、縦軸がそれぞれ検出器上での横(x)、縦方向(y)の位置を表しており、色は中性子数の比を表している。健全な状態と比べて、中性子数が減少している場所は寒色に、変化していない場所は緑色に、そして増加している場所は暖色を示す。また、中央の四角点線で囲まれた領域は欠陥の位置を表わしている。

図より空隙が存在している場合は空隙の場所を中心に中性子数が減少しており、空隙の厚さが大きいほど減少の領域も大きくなるのが見て取れる。ここで、空隙10mmの場合は比の減少量が小さく、単純に2次元図だけを見て欠陥の存在を判定することは難しいと解ったため、中性子数の定量評価を行い、判定式を用いて判別する事を試みた。この結果は、5.3節以降で述べる。また、欠陥がポリエチレン(水分)の場合は中性子数の増大が欠陥中心に観測された。このことから、本手法では空隙30mm以上やポリエチレン10mm以上の欠陥はイメージング可能であることが示された。

5.3 中性子数量比を用いた欠陥体積の定量評価

前節で得られた3種類の空隙、およびポリエチレンについての2次元イメージを縦(y)軸方向に射影した分布を図-6に示している。ここで、縦軸は中性子数の比を表わしており、各データ点における縦線の長さは統計誤差を表わしている。仮に欠陥が無い、またはこの検出システムが欠陥に対して感度が無い場合には縦軸(ratio)は1の値を示す。図より、空隙については1以下の負のピークを示す一方、ポリエチレンは1以上の正のピークを示すことがわかる。また空隙・ポリエチレン双方のピーク

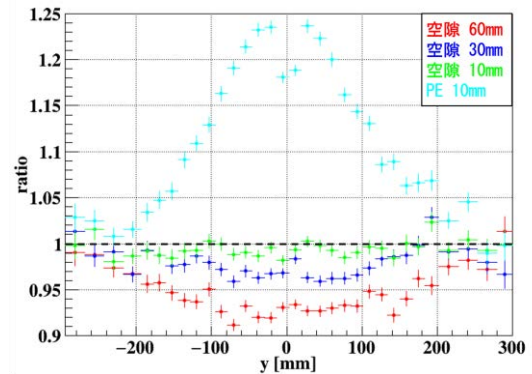


図-6 中性子数量比の縦方向分布(実験値).

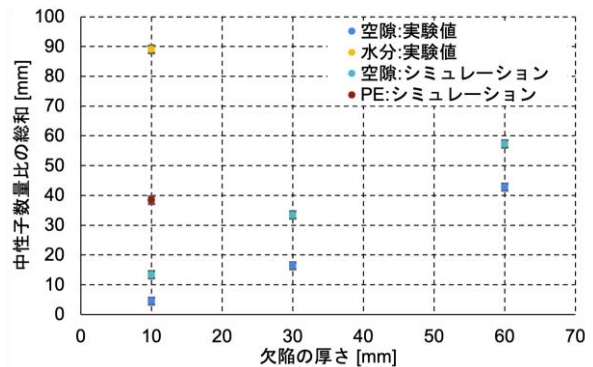


図-7 欠陥の厚さと判定値(比の総和)の相関.

幅は欠陥の横幅(100mm)に比べて広い分布をもつ事が分かる。これは、RI線源から空隙に対して斜めに入射する中性子が多いため、散乱・反射後の分布も広がりを持つためだと考えられる。また、空隙のピークの最小値は空隙の厚さに従って小さくなっていることが分かることから、この検出システムは空隙の厚さの違いを正しく検知できているといえる。

ここで、このピーク形状と空隙の厚さの相関を確かめるために中性子数量比の総和を求めた。各データ点と縦軸(ratio)が1の横ライン(破線)で囲まれる領域の面積であり、空隙・ポリエチレンのいずれにおいても、誤差以上に有意な正の値を持っていれば、この計測システムでその欠陥が検知できていることを意味する。総和と欠陥の

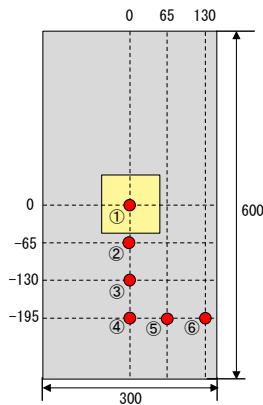


図-8 線源の設置位置。黄色部分が欠陥の位置。

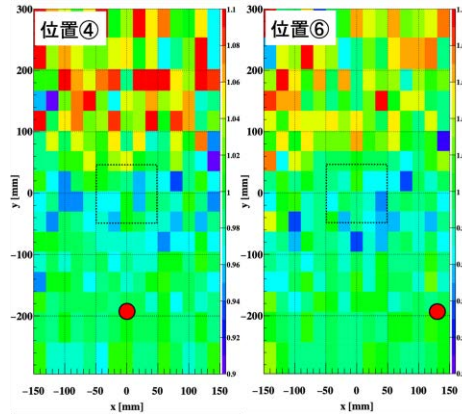


図-9 厚さ 30mm の空隙で RI 線源が中心に無い場合の 2 次元イメージ(実験値)。赤点は RI 線源の設置位置。

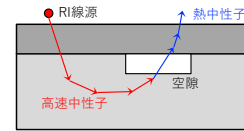


図-10 空隙の存在により中性子が表面に戻って来やすくなる一例。

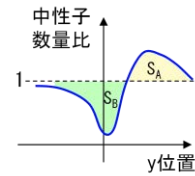


図-12 中性子数量比分布のピーク形状の概念図

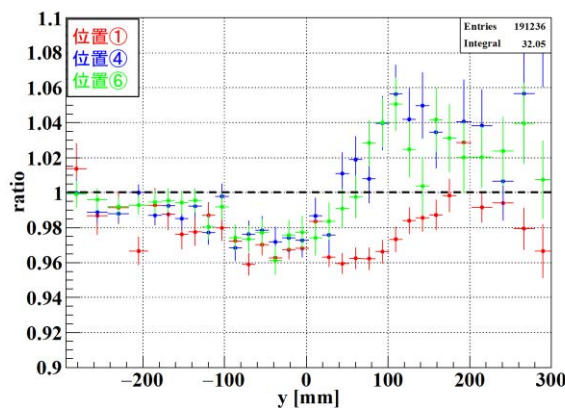


図-11 欠陥が空隙 30mm 厚さにおける RI 線源の位置と中性子数量比分布の変化(実験値)。

厚さの相関を表したグラフを図-7 に示している。横軸が欠陥の厚さで、縦軸が総和である。縦軸の誤差は各データ点の大きさにほぼ等しい。ここでは、実験データとシミュレーションの結果双方を表示しているが、空隙の結果はいずれも欠陥の厚さに総和の値が比例していることが確認できる。ここで、空隙の面積は厚さに関わらず同じであるため、この総和を用いることで欠陥の体積を定量評価できることが示された。また、ポリエチレンの総和も有意な値を持っており、検知可能であることが示された。シミュレーションの結果は、欠陥が空隙の場合においては過大評価で、ポリエチレンの場合においては過小評価の傾向を示しているが、概ねグラフの形状は一致しており、正しく見積もりを行うことができているといえる。シミュレーションをより正確に行うためには、コンクリート中の水和物を含む水素量を正しく評価することが今後の課題であると考えられる。

5.4 線源と欠陥が離れている場合のイメージング結果

前節までは RI 線源が欠陥挿入穴の中心にある場合の結果であったが、現場の計測においては一度に広い範囲を計測できる事が重要であると考えられる。そこで、こ

のシステムで欠陥の計測が可能な範囲を確認するために、欠陥が RI 線源から離れた場所にある場合の計測を行った。なお、3.5 節で述べたとおり、本測定では検出器は移動させず、RI 線源のみを移動させて計測を行った。図-8 に RI 線源を設置した場所を示している。ここで、床版の端付近に RI 線源を置くと中性子が散乱せずに外側に放出される効果が多くなり、実際の道路とは状況が大きく変わってしまうため、ある程度内側でできるだけ離れた場所を選択した。

図-8 における④、⑥の点で得られた厚さ 30mm の空隙についての 2 次元イメージの結果を図-9 に示している。図より欠陥位置を境にして RI 線源に近い方は、中性子数の減少(寒色)を示すのに対して、RI 線源と反対側は中性子数が増加(暖色)を示すことが分かった。これは、RI 線源が空隙の中心に設置された図-5 では見られなかった傾向であり、中性子が斜め方向から入射されることで生じる現象であることが分かる。斜めから入射した中性子は空隙より深い場所で散乱し、空隙を上方向に横切り表面に到達する成分が多くなる。そのため、コンクリートで充填されている場合には遮蔽され、表面に届かなかった分の中性子が増える、という効果が現れるためだと考えられる (図-10)。

5.5 一度の計測で空隙を検知できる範囲

図-8 で示す RI 線源の位置①、④、⑥の 3 点において欠陥が空隙 30mm の場合の縦(y)方向の中性子数量比分布を求めた結果を図-11 に示している。④、⑥の場合では $y=20\text{mm}$ 近傍で中性子数の比が 1 以下から 1 以上へと変化しているため、この特徴的な分布を数値化することで、欠陥の存在をより高感度で検知することを試みた。ここで、それぞれのグラフを図-12 に示す概念図の様に 1 を境にした正と負のピークの組み合わせであると考え、正 (1 以上) の面積(S_A)、および負 (1 以下) の面積(S_B)それぞれを求め、この和(S_A+S_B)を判定値として用いた⁴⁾。判定値の結果を表-1 に示す。表の列は左から、RI 線源

表-1 線源と欠陥の間の距離と判定値

RI 線源 の位置	空隙厚さ [mm]	距離 [mm]	判定値 S _A +S _B	誤差
①	30	0	16.4	1.1
②	30	65	19.0	1.2
③	30	130	15.3	1.5
④	30	195	19.9	2.0
⑤	30	206	10.1	1.2
⑥	30	234	9.9	1.1
①	10	0	4.5	1.1
②	10	65	7.6	1.2
③	10	130	3.5	1.5
④	10	195	9.3	2.0
⑤	10	206	4.2	0.9
⑥	10	234	4.2	1.1

の位置、空隙の厚さ、床版表面における欠陥中心から RI 線源までの直線距離、欠陥の判定値 S_A+S_B、およびその誤差を表している。

表-1 より、すべての位置において、判定値は誤差以上の有意な値を持つことから、この範囲においては 30mm、および 10mm 厚さの空隙は検知可能であるといえる。ここで、⑥の距離 234mm はおよそ一辺が 330mm の正方形の対角線の半分に相当するため、この計測システムで約 300x300mm² の範囲を 15 分で計測することが可能であるといえる。計測時間を 5 分の 1 である 3 分に短縮した場合、統計誤差が約 2.3 倍に増加するが、それでも、どの判定値も誤差以上の有意な値を持つ。例えば最も厳しい条件である、線源位置③での空隙 10mm 厚においても、判定値>誤差(3.5 > 1.5 × 2.3)であることから、判別可能であると言える。つまり、表-1 のどの条件でも 3 分での計測で空隙の判別が可能であると考えられる。

6. まとめ

人の手で持ち運び可能で、かつ使用の際に必要な規制が少ない RI 中性子線源 (²⁵²Cf) を用いた床版内部劣化の可視化装置の開発を行った。加速器中性子源 RANS-II で計測した際と同じ試験体を用いて、アスファルト舗装下に模擬した空隙や水分の可視化試験を行った。模擬欠陥として、厚さ 60, 30, 10mm の空隙、および厚さ 10mm のポリエチレンを用いた結果、すべての欠陥の検知に成功し、さらに空隙計測においては、厚さ、すなわち体積が定量評価できることが示された。また、RI 線源と欠陥が離れている場合においても、中性子数量比の分布が正と負両方のピークを持つという特徴を利用することで、精度の高い判定が可能であることが示された。また、グラファイトを素材とした中性子反射材を検出器背面に設置することで、4 割程度の計測時間の短縮が可能である

ということも示された。以上のことから、この計測システムを用いることで、舗装厚 75mm の RC 床版の 30x30cm² の範囲にある、厚さ 10mm 以上の空隙や厚さ 10mm 以上の水分の判別を 3 分以内で行う事が可能であると示された。また、粒子輸送シミュレーションを行い、実験値と概ね一致した結果が得られたため、今後様々な床版や欠陥での計測において、事前予測を立てるために利用することが可能となった。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K04656 の助成を受けて実施しました。RC 床版の試験体は JFE エンジニアリング株式会社様から提供いただきました。

参考文献

- 1) 池田義雅, 大竹淑恵, 水田真紀: 後方散乱中性子を利用した道路橋床版内の損傷可視化技術, 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, 第 17 巻, pp.285-290.
- 2) Y. Otake, et al.: Research and Development of a Non-destructive Inspection Technique with a Compact Neutron Source, Journal of Disaster Research Vol.12, No.3, (2017) pp.585-592.
- 3) Y. Ikeda, Y. Otake, and M. Mizuta: Nondestructive measurement for water and voids in concrete with compact neutron source, Plasma and Fusion Research, Vol.13 (2018.3) pp.2406005-1-5.
- 4) 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 野田秀作, 井田博之: 散乱中性子を用いた床版内部欠陥の非破壊検査システム, 第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.47-52, 2020.
- 5) 藤田訓裕, 岩本ちひろ, 高梨宇宙, 大竹淑恵, 野田秀作: 散乱中性子イメージング法を用いた道路橋床版の滞水・土砂化検知システム, 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, 第 21 巻, pp.484-489.
- 6) 若林泰生, Mingfei Yan, 岩本ちひろ, 藤田訓裕, 水田真紀, 高村正人, 大石龍太郎, 渡瀬博, 池田裕二郎, 大竹淑恵: 小型中性子源 RANS ならびにカリフォルニウム線源を利用したコンクリート構造物の塩害に対する非破壊検査装置の開発, 中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するシンポジウム論文集, 2021, pp.202-209
- 7) 神頭峰磯, 瀬古繁喜, 池永太一: 中性子線源の両側に検出部を設けた散乱型 RI 測定装置の空隙検知特性に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.687-696, 2021.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)