

論文

散乱中性子を用いた床版内欠陥の非破壊検査システム

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***

*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 丁目)

** 工博, JFE エンジニアリング (株) 技術本部総合研究所 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2 丁目)

*** JFE エンジニアリング (株) 技術本部総合研究所 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町 2 丁目)

道路橋を構成する合成床版において、舗装下で起こる滞水、土砂化などの劣化や、鋼鉄近くに生じるコンクリート未充填などの初期施工不良を非破壊で検査するシステムの開発をシミュレーションにより行った。中性子ビームを合成床版に照射し、内部からの反射で表面に戻ってくる中性子を計測することで、内部に発生した空隙の厚さや位置を定量評価できることを確認した。本研究では新たに口径を絞ったビームによるビームスキャン法を採用した事で、従来では不可能であった舗装やコンクリートの下に生じた厚さ 1cm 以下の空隙の検知のみならず、6cm 程度の精度で場所の特定が可能である事がわかった。

キーワード：中性子, 後方散乱, 非破壊検査, 合成床版, 小型加速器

1. はじめに

道路橋の床版は道路利用者を直接支える重要な部材であり、経年劣化や初期施工不良などから発生する損傷は利用者に重大な被害を及ぼす恐れがある。この重大な破壊を未然に阻止するためには、定期的な点検を行うことが予防保全の観点から重要であると認識されているところである。しかしながら、床版は通常、アスファルト層が上面に敷設されているため、従来の目視法で定期的な検査を行おうとすると、その都度アスファルトを剥がさなければならず、金銭コスト、所要時間、および通行止め等の利用制限が必要などの面から不可能であることが多い。

コンクリートの劣化は水の浸入により促進される事が明らかとなっている¹⁾。その為、小さなひび割れや施工時のコンクリート未充填がさらなる水の侵入を促すことで、土砂化や層状のひび割れを引き起こし、ついにはコンクリート塊が抜け落ちるといった大きな破壊へとつながってしまう²⁾。さらには、塩を含んだ海風や凍結防止剤による塩害が劣化を促進することや、PC 床版に比べると RC 床版は健全性を永続的に保つのは難しいとの報告もある³⁾。これらの観点から、アスファルト層を剥がすことなく床版の内部の水や空隙を検査できるシステムの開発は非常に重要であるといえる。

本研究では舗装面の下で起こる滞水、土砂化などのコンクリートの劣化および、コンクリート未充填などの初期施工不良を路面側から非破壊で検知するためのシステ

ム開発を行った。将来的に可搬型の中性子源を用いて現場測定を行う事を見据えたモデルの構築、およびモンテカルロシミュレーションを用いたデータ解析を行った。

2. 中性子ビーム照射による合成床版の非破壊検査

床版をはじめとするインフラ構造物の様に、巨大な質量をもつ物体の内部情報を非破壊で観察するためには、物質に対して透過力の高いプローブが必要である。プローブの候補として電磁波、音波、放射線が挙げられるが、放射線の一つである中性子は電氣的に中性の粒子であり、さらに X 線を含む電磁波とは違い、物質と原子核反応のみで相互作用するため透過力が高い。また、反応を起こす確率は原子核毎に異なり、特に水素(¹H)とよく反応するため、水に対して高い感度を持つ。この特徴を生かした中性子照射による非破壊検査技術は、水分計などとして一般的に使用されている。

2.1 中性子後方散乱法(反射法)を用いたイメージング

理研では小型中性子源 RANS, RANS-II を用いた、インフラ構造物の非破壊検査システム開発を行っている⁴⁾。システム全体は図-1 に示したとおり、線形加速器、標的、コリメータ、中性子検出器、およびサンプルで構成されている。線形加速器を用いて陽子ビームを加速し、リチウムやベリリウム標的に照射すると、原子核反応($p+{}^7\text{Li}\rightarrow n+{}^7\text{B}$ や $p+{}^8\text{Be}\rightarrow n+{}^8\text{B}$)が起こり、高いエネルギーを持った中性子線が発生する。水分計で使用されるカリ

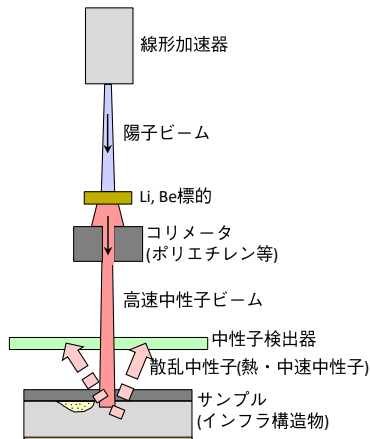


図-1 散乱中性子測定による欠陥検出の概念図

フォルニウム線源から発生する中性子と比べて、この中性子線は発生源である陽子ビームの運動方向と同じ向きに多く発生するため、周囲への被ばく量が抑えられるという利点がある。

発生した中性子ビームをサンプルに照射すると、コンクリートや鉄などの物質を透過しながら内部まで侵入し、一部中性子が後方散乱によってサンプル表面に戻ってくる。この表面に戻ってくる中性子の数、エネルギー、およびタイミングは内部の物質によって変化するため、表面に検出器を設置して2次元中性子強度比分布を得ることで、2次元画像として内部の情報を非破壊で可視化することが出来る。この検査手法では計測に必要な全ての装置がサンプルの片側に有る。例えば、道路橋床版の測定では橋梁の裏側に検出器を設置する必要が無い。その為、従来の非破壊検査に比べて金銭コストや所要時間の短縮という点で非常に有利な手法であると言える。

2.2 合成床版内部の中性子の伝搬

合成床版に高速中性子ビームを照射させた際に、中性子が内部で伝搬する様子を図-2 に示している。高速中性子は検出器を構成する³Heガスやステンレス管とはほとんど反応せず、合成床版に入射する。中性子は軌道上に存在する原子核と散乱して進行方向を変えるが、原子核散乱は確率現象であるため、床版内部で中性子はランダムな軌道を描く。散乱確率は衝突する原子核の種類に依存し、水素は高く、鉄は低いという特徴を持っているため、水(水素)を含むコンクリート中では中性子の散乱頻度は高い、一方で鉄の中では散乱頻度が低い為、長距離を進む事が可能である。その為、コンクリートのみの床版より、鋼板が埋設されている合成床版の方が、より深い場所まで侵入する事が出来る。この特性によって、コンクリート内部に発生する微小な欠陥の検出においては、合成床版の方がより感度が高いことが予測される。

2.3 従来法との違い

理研における先行研究⁴⁶⁾では、後方散乱中性子を用い

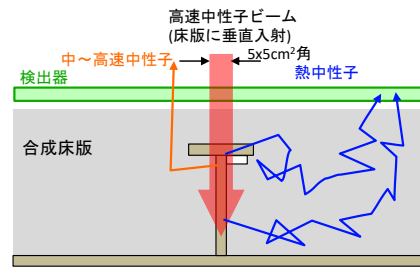


図-2 中性子が合成床版内部を伝搬する様子

たイメージング手法を用いて、床版に生じた欠陥を検出するシステムの開発を行ってきた。熱中性子(3.2節を参照)に対する計測数(収量)の空間分布を測定する事で表面層を作るアスファルトやコンクリートの下の床版の内部に生じた水や空隙を2次元画像として得られるほか、中性子の検出タイミング情報により奥行き方向の位置が測定できる事が示された。ここで、設定された欠陥は3から6cmの厚さであった⁴⁵⁾。

本研究ではより小さな1cm以下の欠陥の検知が可能であり、かつ欠陥の位置を10cmより良い精度で判別出来るシステムを目指して以下3点の開発を行った。

(1) ビームのコリメート

中性子ビームに対してコリメートと呼ばれる、ビーム径を絞り、平行度を上げる操作を行った。ビームを狭い範囲に照射することで、欠陥の有無に感度がない範囲外からの中性子数が減少するため、より深い場所にある物質を低バックグラウンド環境で検査する事が可能になる(3.3節を参照)。現場の測定においては、図-1で示したように、中性子源の出口に狭い口径を持つポリエチレン等の遮へい材を設置する事で、ビームのコリメートが可能であると想定される。

(2) ビームスキャン法

コリメートした中性子ビームの照射位置を変化させ、複数点で2次元画像測定を行うビームスキャン法を開発した。空隙とビームの相対位置が変化することで中性子収量の位置分布に変化が表れる事を利用して空隙の位置を特定することが出来る(3.5節を参照)。

(3) 測定エネルギー範囲の拡大

測定する後方散乱中性子のエネルギー範囲を熱中性子の1箇所無く、中速中性子にも対応させた(3.2節を参照)。中速中性子は統計量が少ない代わりに、空隙に対する検知感度が高い為、現場の測定状況に合わせて、より信頼性が高い方を使い分けることが可能であると判明した。

3. 粒子輸送シミュレーションを用いた欠陥測定

本研究では初期施工不良で合成床版のT字鋼板裏に空隙が発生した場合の検知可能性についてシミュレーションでの評価を行った。床版内における中性子の輸送計算

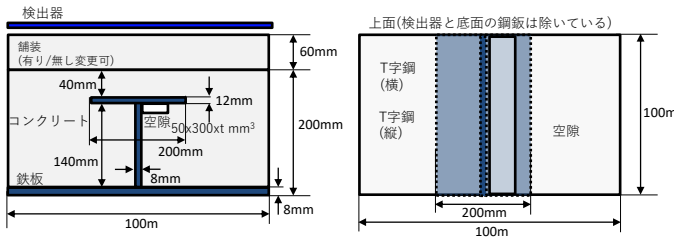


図-3 作成した床版のモデル。側面図(左)と平面図(右)。

を放射線のモンテカルロシミュレーションコードである Geant4¹⁰⁾(version 10.5.1)を用いて行った。中性子と物質との反応確率の計算には ENDF-B/VII.1 と呼ばれる核データライブラリを使用した。このシミュレーションコードでは材質、サイズ、および位置といった構造物の情報を定義して、発生した放射線が物質中でどのように輸送されるかを計算する事が出来る。また、仮想的な検出器を設置する事で、任意の場所で放射線の持つエネルギー、時間、空間情報を得る事が出来る。

3.1 合成床版のモデル作成と中性子ビームの定義

実際の図面や元素組成をベースに合成床版のモデル作成を行った。合成床版モデルは図-3 に示すとおり、コンクリート層、T字鋼板および底面の鋼板層で構成されている。ただし、本研究で想定する初期施工不良の検査においては舗装を施す前に可能である事から、本シミュレーションでは舗装を含めていない。なお、コンクリートの元素組成は Geant4 ライブラリが提供している標準のコンクリート値(G4_CONCRETE)を用いた。また、鋼板の組成は純鉄であると近似した。初期施工不良によって生ずる空隙は T 字の根元箇所が発生しやすいと仮定し、厚さ(t)が可変な直方体の空隙を設定した。使用した厚さは t=3, 10, 30mm の 3 通りで、幅と奥行きはそれぞれ 50mm と 300mm である。その他の寸法については図-3 に示したとおりである。なお、水平面方向の広さは中性子の透過力を考慮し、十分に大きな値(100x100m²)を用いた。また、中性子検出器として、非常に薄い板状で床版と同じ面積の物を床版の表面に接する位置に設置した。

シミュレーションで用いた高速中性子ビームはエネルギーが 1MeV の単色で、断面の広さは 5x5cm² である。ビームの向きは床版に対して垂直な方向で、角度広がり無し平行ビームである。なお、以降に示す結果を得るために発生させた中性子数は 10⁸ 個である。1つの条件あたりの計算時間は 40 個の CPU(Intel Xeon E7-4880v2(2.50GHz))を用いて 3 時間程度であった。

3.2 中性子の時間とエネルギー分布

前節で述べた通りに合成床版モデルの作成と入射粒子の定義を行い、モンテカルロ法により粒子輸送シミュレーションを実行した。中性子が床版に入射した後、検出

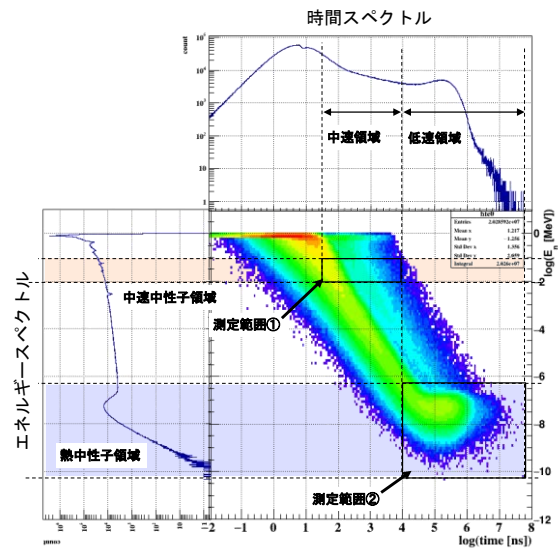


図-4 エネルギー(左下)、時間スペクトル(上)および、2次元の相関図(右下)。

器に到達するまでの時間を横軸に、検出時点での運動エネルギーを縦軸とした 2 次元分布図を図-4 の右下に示している。また、左下、上の図はそれぞれ、2次元図をエネルギーと時間方向に射影した 1次元スペクトルを表している。ここで、現場の実測においてはエネルギーを直接測定する事は出来ないが、用いる検出器の種類や遮へい材を適切に用いる事で、測定エネルギー範囲を選択することは可能である。

運動エネルギーが大きい、すなわち速度が大きい中性子は検出されるまでの時間が短く、逆にエネルギーの小さい物ほど検出時間は遅くなる。例えば、床版内で数回散乱された中性子は光速の 1%程度を持つ中速中性子となり、検出時間はマイクロ秒以下が多い(測定範囲①)。それに対して、散乱回数がおおよそ 20 以上に達すると速度が室温の空気と同程度となる。このエネルギー領域は熱中性子と呼ばれ、測定される時間はビーム入射から数 10 マイクロ秒以降となる(測定範囲②)。なお、熱中性子がさらに物質と衝突しても、検出までの時間は増えるが、エネルギーは減少しないため、時間とエネルギーは相関しなくなる。これは、同じ運動エネルギーを持つもの同士の散乱ではエネルギーを失う事は無くなる為である。その様子が、2次元図の右下側で確認できる。

3.3 後方散乱中性子のイメージング

図-4 で示した 2 つの測定領域を用いて、床版の水平面における 2 次元位置情報を得た。図-5(a)は欠陥が無い場合と鋼板下に空隙が有る場合のそれぞれの条件で得られる中性子の収量比分布を表している。左図は熱中性子領域を選択した場合で、横軸、縦軸が床版表面での 2 次元位置(x,y)、色は中性子収量比を表している。ここで、中性子収量比とは、検出器の単位面積あたりに入射した中性子について、空隙が有る場合と無い場合(健全な状態)それぞれでの収量の比である。ビーム照射位置かつ空

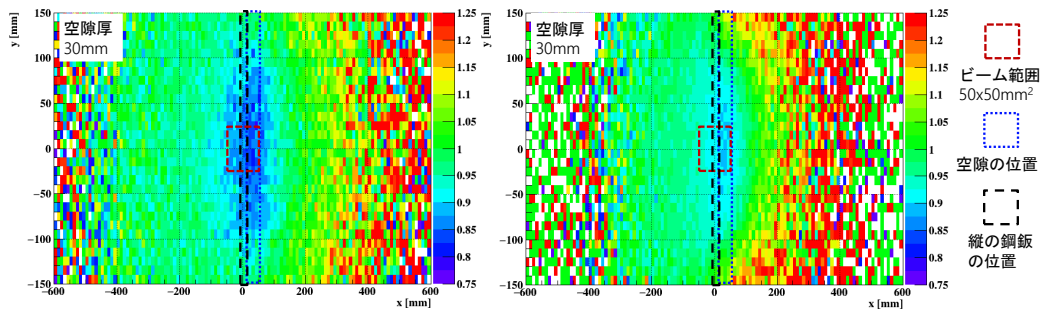


図-5(a) 後方散乱でコンクリート表面に戻ってきた中性子収量について、空隙の有りで比を取ることで得られた2次元分布. 左図が熱中性子, 右図が中速中性子の測定結果を表している.

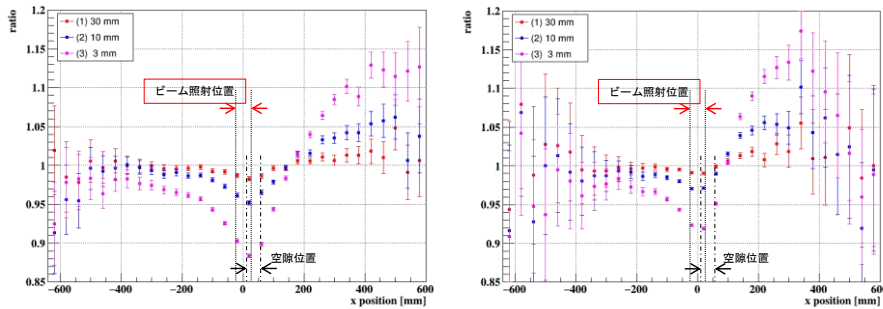


図-5(b) 中性子収量比の1次元分布図. 図-5(a)の2次元図を横軸方向へ射影することで得られる. 赤, 青, マゼンタの点はそれぞれ, 空隙厚さが3, 10, 30mmの場合を表している. 左図が熱中性子, 右図が中速中性子測定の結果である.

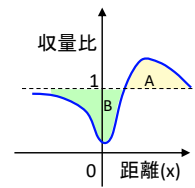


図-6 ピーク構造の概略図

隙の場所周辺が青色であるのは、中性子収量比が欠陥無しの場合より減少している事を表している。これは本来コンクリートで中性子が散乱し、熱化するはずであった分が空隙に置き換わったことで発生量が減少した、言い換えると“負”の中性子源に置き換わったことを意味している。他方、照射位置から離れた場所では比が1以上の増大(黄～赤色)を示しているが、これは空隙より深くに侵入した中性子が斜め後ろに散乱された後、床版から放出される事象が増えていることを示唆している。この原因は、空隙の存在によりコンクリートで散乱される確率が減少し、表面まで到達しやすくなるためだと考えられる。図-5(a)の右図は中速中性子測定の結果で、軸の定義は左図と同じである。熱中性子と同様に比が減少する領域と、増大する領域が存在するが、増大の強度がより大きい事が分かる。元々検出までのコンクリート内部における散乱回数が少ないため、空隙による散乱確率の減少の影響の方が大きくなるためだと考えられる。

中性子収量比と空隙厚さの相関を定量評価するために得られた2次元分布図を射影した1次元図を作成した。熱中性子と中速中性子の結果をそれぞれ図-5(b)の左図と右図に示している。3通りの空隙厚さについて、横軸はT字鋼鉄を横切る方向の位置(x), 縦軸は中性子収量の比を表している。ここで、収量比の誤差は統計誤差のみを考慮している。2次元図でも観測されたとおり、ビーム照射位置近傍(x=0mm)では比は1以下で“負”の中性子源が起源となるピーク構造を持ち、ピーク高さは空隙厚さが大きいほど大きい。それに対して、空隙方向でか

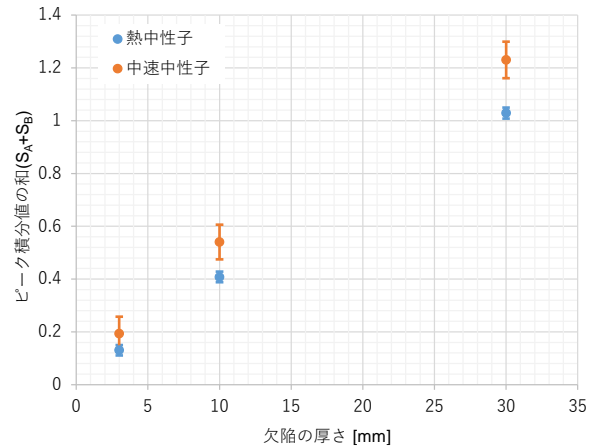


図-7 欠陥厚さと収量比ピークの面積和

つビーム照射位置の外側領域(x>200mm)では比が1以上の正のピーク構造を持つ事が確認できた。幅の広いビームを用いた先行研究⁴⁶⁾では、空隙による収量比の減少は確認されていたが、増大現象は確認されていなかった。正のピークと負のピークそれぞれの領域が重なってしまい、ピークが相殺された為だと考えられる。この結果からコリメートビームを用いた本研究では、それぞれのピークが相殺されずに観測できる為、空隙の検出感度が向上したと考えられる。

3.4 空隙の検知

1次元の収量比分布のピーク構造をモデル化した概略図を図-6に示している。ここで、正のピークをA、負のピークをBと定義する。空隙の検知を定量的に行うた

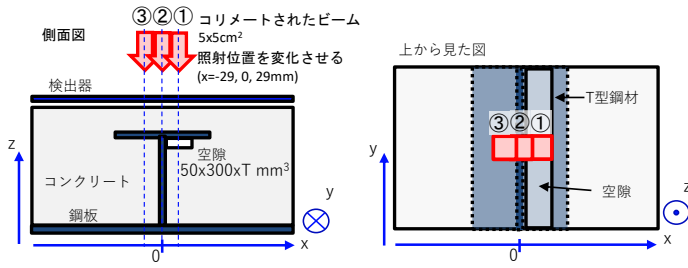


図-8 ビームスキャン法の概略図. 側面図(左)と平面図(右).

め、それぞれのピーク面積(S_A, S_B)が空隙の厚さに相関している事に着目し、両者のピーク面積を足し合わせた値(S_A+S_B)を空隙の判定に用いる事を試みた。その結果を図-7に示す。横軸が欠陥厚さ、縦軸がピーク面積の和(S_A+S_B)を表しており、正の相関が現れている事が分かる。ここで、縦軸の誤差は統計誤差のみを考慮している。なお、欠陥が無い、もしくはこのシステムに欠陥を検知する感度がない場合は縦軸の値は0となる。熱中性子および中速中性子測定それぞれで2通りのグラフ(青点、橙点)が得られているが、いずれも全ての空隙厚さにおいて0でない有意な値を持っているため、全ての厚さで空隙は検知可能であると言う事が分かる。なお、熱中性子に比べて、中速中性子を測定する場合は統計量が少ないため誤差が大きい、検知の感度は高いため大量のビーム照射でより小さい欠陥を検査する際にはより信頼性が高い。つまり、現場測定において得られる統計量や予想される欠陥サイズなどの状況に依り、信頼性が高い方を都度選択することが可能となったと言える。

3.5 ビームスキャン法による欠陥方向の判別

本研究では、コリメートされたビームを用いているため、従来法では行われなかったビーム照射位置を変えながらの複数点測定(ビームスキャン法)が可能となる。そこで、空隙とビーム中心間の距離の関数として、収量比分布の変化を観測した。図-8に示すとおりビームを空隙の真上①からT字鋼板を横切りながら遠ざかる方向(②, ③)に29mm間隔で移動させた場合の中性子収量比分布を、図-9に示している。このとき、空隙の厚さは10mmである。図-5(b)と同じ様にビーム照射位置では負のピーク、範囲外では正のピークが現れる。図から明らかのように、ビーム照射位置を変化させると、床版中心($x=0$ mm)近傍の負のピークについては変化量が小さいが、空隙側のビーム照射範囲外である $x>200$ mm近傍(青矢印)では正のピークが大きく変化していることが分かる。正のピークは3.3節で述べたとおり、コンクリート層の空隙より深い場所まで侵入した中性子が斜め後ろ方向に散乱した事象により形成されるが、ビーム照射位置が空隙から遠ざかるにつれ、よりコンクリート層の浅い領域から浅い角度で斜め後ろに散乱される中性子がピーク形成

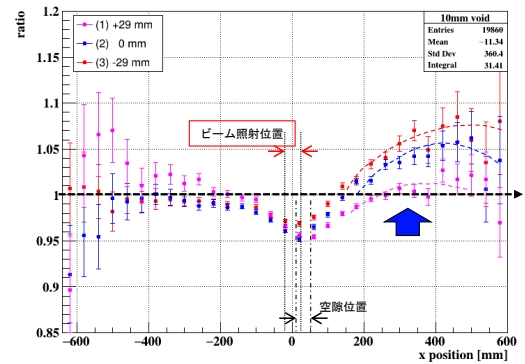


図-9 ビーム照射位置と正のピーク値の変化

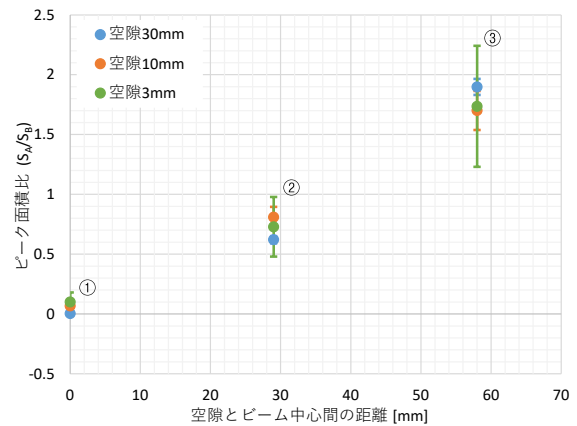


図-10 ピーク面積比と空隙とビーム中心間の距離

に寄与するため、ピークが増大してゆくと考えられる。対して、 $x=0$ 近傍の負のピークは本来空隙の位置に存在したコンクリートからほぼ真後ろに散乱される中性子が作るピークであるので、ビーム照射位置に対する依存性は小さいと考えられる。

ビーム照射位置が欠陥から遠ざかるにつれて、正のピークが増大するが、負のピークは変化が小さい事が判明した。この傾向を利用し、空隙の位置を精度良く検知する方法として、正と負のピークの面積比を空隙と欠陥の中心間距離の関数として表す手法を用いた。ビーム照射位置をT字鋼板の左側、中心および右側と変化させ、それぞれのピーク面積の比(S_A/S_B)を取得した。3種類の空隙厚さ(30, 10, 3mm)について、ビーム照射位置と空隙の中心間の距離(0, 29, 58mm)とピーク面積比(S_A/S_B)との相関を示したのが図-10である。距離0において縦軸は0に近い値であり、距離が大きくなるにつれて S_A/S_B の値が大きくなる傾向が確認出来た。空隙厚さが薄いほど誤差による不定性は大きくなるが、グラフより欠陥厚さが3mm(緑点)であっても有意に増加傾向が確認出来る。ここで、空隙からの距離が0と58mmの2点において、ピーク面積比(S_A/S_B)の値は誤差以上に変化していることはグラフより明らかである。すなわち、ビームスキャン法を用いることで、3mm厚さの欠陥に対して、存在の有無だけでなく、欠陥位置を誤差が6cm以下の精度で決定することが可能であると言える。

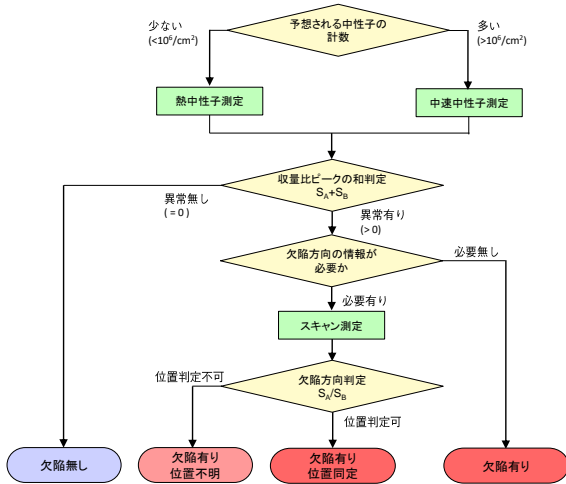


図-11 欠陥判定フローチャート

4. 欠陥判定フローチャート

現場で初期施工不良を検知する場合に行うべき測定とその判定基準を図-11 に示している。最初に、中速中性子か、熱中性子どちらのエネルギー領域を測定するかを選択する。3.4 節で述べた通り、測定物である合成床版に中性子を大量に(典型的には 10^6 n/cm^2 以上)照射できる状況では中速中性子の方が有利であるが、少量の場合は熱中性子測定の方が検知感度は良い。次に、いずれかの領域で測定を行った後、3.4 節で述べたピーク判定を行う。ここで異常が無ければ欠陥無しとの判定を下し、異常がある場合で欠陥方向の情報が必要な場合は欠陥有りとの結論を得る。最後に、欠陥方向の情報が必要な場合は3.5 節で述べたビームスキャン法を用いた測定を行う。そこで欠陥位置が得られれば、欠陥有りでかつ位置同定出来たとの結果となる。欠陥の大きさ、バックグラウンド状況によっては位置不明との結果を得る事もあり得る。以上のフローチャートにより空隙の存在について、4 通りの結論で判定できることになる。

5. まとめ

合成床版の経年劣化によるひび割れ、土砂化や、初期施工不良によるコンクリート未充填を非破壊で検知するシステムとして、後方散乱中性子を用いた計測手法の開発を行った。粒子輸送コード Geant4 を用いたモンテカルロシミュレーションを行い、合成床版表面に設置した検出器で得られる位置、時間、エネルギー分布を計算により求めた。コリメートされたエネルギー 1MeV の高速中性子ビームを合成床版に垂直に入射し、欠陥が無い場合と空隙がある場合の中性子収量比を取得した。収量比の位置分布に現れる正負のピークの積分値を用いる事で、3mm 厚の空隙の検知が可能であると判明した。さらに、T 字鋼を横切るようにビームを複数箇所へ照射するビームスキャン法を新たに開発した。空隙と照射位置の間隔

に対する、中性子強度比分布の変化を用いる事で空隙の場所が誤差 6cm 以下の精度で判定できるという事が判明した。これにより、将来的には可搬型の中性子源を用いる事で、現場で欠陥の存在と位置が判別可能となる事が示された。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K04656 の助成を受けたものです。また、本研究の一部は、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) 池田義雅, 大竹淑恵, 柳町信三, 橋口孝夫, 水田真紀:「小型中性子源による床版内部の水・空隙非破壊観察技術」, 第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.93-98, 2016.
- 5) 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, Vol.17 (2017) pp.285-290.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Y. Otake, Y. Seki, Y. Wakabayashi, Yo. Ikeda, T. Hashiguchi, Y. Yoshimura, H. Sunaga, A. Taketani, M. Mizuta, Y. Oshima and M. Ishida: "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.
- 10) 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.

(2020 年 7 月 17 日受付)