

論文 散乱型 RI 中性子線測定装置における減速材がコンクリートの RI カウンターの増減に及ぼす影響の検討

神頭 峰磯*1・瀬古 繁喜*2・池永 太一*3・山田 和夫*4

要旨：鋼とコンクリートとの複合構造において、鋼板とコンクリートとの界面に対する空隙や滞水を、³He 比例計数管を利用した RI 中性子線測定装置により検知することを目指している。本研究では、RI 中性子線測定装置に減速材を用いることで、RI 中性子線測定装置近傍での RI カウンターの変化量を大きくし、測定点の状態変化を捉えやすくするため、減速材としてポリプロピレンとポリエチレンを用いて実験的に検討した。その結果、ポリプロピレンやポリエチレンを減速材として用いた場合は、厚さ 10mm 以上で熱中性子の検出が容易になり、RI カウンターは、減速材の厚さの二乗に比例することが明らかになった。

キーワード：ラジオアイソトープ、中性子線、減速材、ポリプロピレン、ポリエチレン

1. はじめに

鋼とコンクリートを用いた複合構造は、耐久性に優れるため、様々なところで採用されている。たとえば、鋼道路橋の場合、鋼コンクリート合成床版や鋼コンクリート複合ラーメン橋で採用されることが多く、一般的に施工されている構造物である。しかし、これらの複合構造物は、コンクリートが鋼板で覆われて、鋼板の補剛や過密な配筋によって構造的な狭隘箇所ができやすく、コンクリートの打込み時に鋼板上が充填不良となる懸念がある。また、鋼板とコンクリートは付着強度が弱いため、コンクリートの硬化後は、鋼板とコンクリートとの界面が剥離しやすい。そのため、コンクリートの微細なひび割れから浸入した雨水などが鋼板上に滞水し、構造物の耐久性低下の要因になることもある。特に滞水を伴った床版は、輪荷重の繰り返しにより疲労耐久性が著しく低下することが、既往の研究で報告されている¹⁾。そのため、これら鋼板上の空隙や滞水など、不可視部分の状態把握が施工時および維持管理時に望まれている。

筆者らは、放射性同位体（以下、RI）による中性子線を用いた散乱型の測定装置を用いて、これら複合構造物の鋼板外側から、コンクリートと接する鋼板上の空隙や滞水の検知を試みている。鋼板上の空隙や滞水の検知は、既往の研究成果で、散乱型 RI 中性子線測定装置（以下、測定装置）で捉えることが可能であり、減速材を使用することにより、RI カウンターが増加するため、鋼板上の空隙や滞水が検知しやすくなることを明らかにした^{2),3)}。

本研究では、測定装置近傍の状態変化に対する RI カウンターの感度を大きくすることを目的として、測定装置に減速材を用いて実験的に検討した結果を述べる。

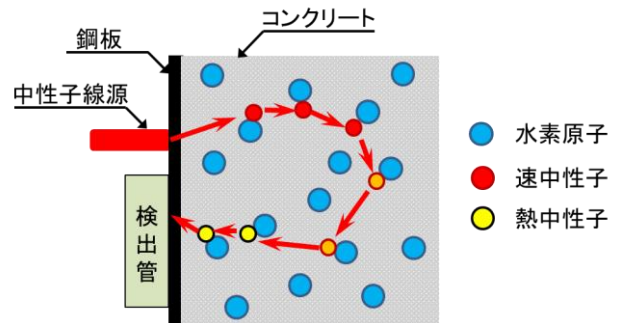


図-1 散乱型中性子線測定装置の原理イメージ

2. 散乱型中性子線測定装置の概要

2.1 測定原理

RI から放出される速中性子は、放出時に 0.1MeV 以上の高いエネルギーを有しているが、水素原子との衝突を繰り返すことで、エネルギーが減衰され、平均 0.025eV 程度の熱中性子となる。熱中性子までエネルギーが減衰されると検出管による検知が可能となり、水素原子によって散乱・減衰されて戻ってきた熱中性子を検出管が捉えてカウントすることができる。そのカウント数の変化から鋼板上の空隙や滞水の検知を行う。本研究で使用した測定装置の測定原理のイメージを図-1 に示す。なお、本測定装置に用いた検出管は、³He 比例計数管であり、検出管の内部はヘリウムガスが封入されている。この検出管が熱中性子を捉えると電気パルスが発生し、ある閾値を超えた回数を RI カウンターとして計数することで、不可視な中性子を定量評価する。

*1 日本車輛製造株式会社 輸機・インフラ本部技術計画室 (正会員)

*2 愛知工業大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社 機械部

*4 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工学博士 (正会員)

2.2 測定装置の概要

本実験で使用した測定装置の概要を図-2に示す。測定装置は、散乱型のRI中性子線測定装置であり、平面寸法が200mm×150mm、厚さが2mmのアルミニウム底板の中心に、筒状のステンレス製ホルダへ円筒に密閉された²⁵²Cf線源（以下、線源）を配置した。アルミニウム底板は2重とし、減速材を挟み込める構造として、線源を測定装置の中心とした。使用した線源の強度は、実験の都合上、0.51MBq、と0.74MBqの2種類となった。また、線源の両側には、熱中性子の検出管として、直径25.4mm×長さ157.4mmの³He比例計数管をアルミ箔テープで保護を行い、線源に対して並行に配置した。なお、測定装置の検出管はパソコンに接続され、検出管が捉えたRIカウントを1秒ごとに記録を行っている。測定装置の外観形状を図-3に示す。なお、既往の研究で使用していた測定装置³⁾は、検出管1本で構成されていたが、本実験では、熱中性子の検出を向上するため、検出管を2本として線源の両側に配置している。

2.3 減速材の概要

中性子は、物質中の原子の原子核と衝突を繰り返すことで、エネルギーが低下していく特性がある。検出管で多くの中性を捕捉するためには、速中性子の持つエネルギーをより多く減少させる必要がある。線源から放出された速中性子が、測定装置近傍での衝突減速において熱中性子にまで低下しない間に検出管を突き抜けてしまったり、周囲へ散乱するロスを抑制する狙いもある。速中性子のエネルギー低下には、一般的に原子番号の小さい原子が有利とされており、水素や炭素等が挙げられる。そのため、中性子の減速材としては、これらの原子を多く保有している物質が大きな効果を期待できる。ポリプロピレンとポリエチレンの化学式は、それぞれ(C₃H₆)_n、(C₂H₄)_nであり、水素原子の占める割合は、軽水(0.111)<ポリプロピレン(0.128)<ポリエチレン(0.135)となることから、一般に軽水よりも高い減速効果が得られることが知られている。本実験では、測定装置の減速材として加工が容易で、比較的入手しやすいことから、ポリプロピレン樹脂とポリエチレン樹脂を減速材として使用した。

3. 実験の概要

3.1 実験の因子と水準

実験は、減速材の効果有効範囲の確認を目的に、測定装置に減速材を取り付けずに測定を行ったシリーズ1と、減速材の効果を確認するためのシリーズ2の2種類とした。シリーズ1の被験体は、測定装置の有効範囲を確認するため、より多くの熱中性子を捉える目的でポリプロピレンと、比較のためコンクリートの2種類とした。被験体の長さは400mmとして、幅を40mmから400mm、

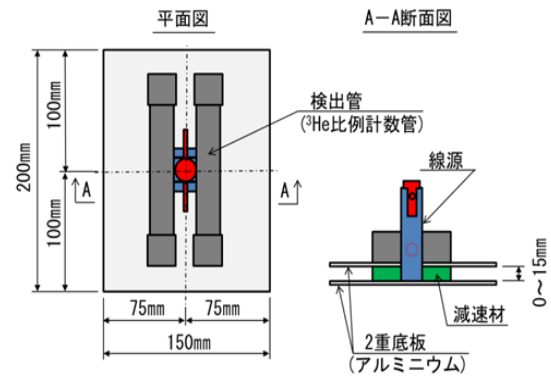


図-2 測定装置概要

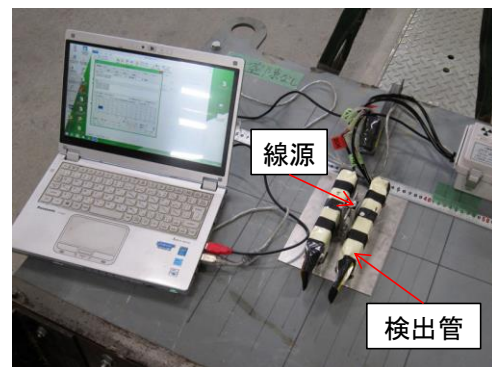


図-3 測定装置外観

表-1 シリーズ1の実験因子と水準

実験因子	実験水準
被験体の種類	ポリプロピレン, コンクリート
被験体の幅	40mm, 80mm, 120mm, 200mm, 400mm
被験体の厚さ	20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm, 150mm, 200mm, 400mm

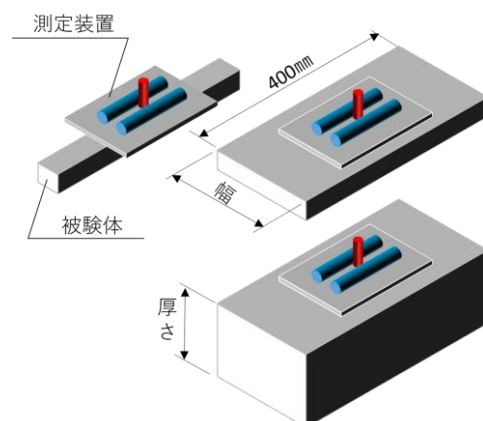


図-4 測定装置を使用した実験イメージ

厚さを20mmから400mmの範囲で変化させてRIカウントを測定した。シリーズ1の実験因子と実験水準を表-1に示す。また、測定のイメージを図-4に示す。

次にシリーズ2として、減速材による測定装置近傍のRIカウントの変化を測定することを目的に、被験体の幅を400mmとしたコンクリートを使用して、被験体の厚さを20mmから400mmの範囲で変化させて、RIカウントを測定した。また、減速材の種類をポリプロピレンとポリエチレンの2種類、幅を35mmで一定として、厚さを0mmから15mmの範囲で変化させた。なお、減速材の厚さ0mmの場合は、減速材を使用せずに測定を行う場合とした。また、減速材の厚さ15mmは、ポリプロピレンのみとした。シリーズ2の実験因子と実験水準を表-2に示す。

3.2 使用材料

(1) ポリプロピレンとポリエチレン

減速材として使用したポリプロピレンとポリエチレンは、各々一般的に市販されている密度0.91g/cm³と0.96g/cm³の樹脂性ブロックを減速材の厚さの水準ごとに加工して作製した。

(2) コンクリートの材料および配合

被験体のコンクリートは、設計基準強度を30N/mm²とした普通コンクリートであり、セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は砂利、細骨材は山砂とした。使用したコンクリートの材料を表-3に、配合を表-4に示す。

3.3 測定方法と結果の整理

被験体のコンクリートは、型枠の脱型後は継続して水温20℃で水中養生を行い、測定時に水中から取り出して表面の水分をウエスで拭き取った状態で測定を行った。また、測定は被験体の中心に測定装置の中心を合わせて3分間行い、1分当たりの熱中性子のカウント数をcpm(count per minute)として記録した。

本実験では線源強度の異なる2つの線源を使用したため、実験結果を単純にRIカウントとして比較ができない。そこで計数率比を計算した。計数率比は線源固有の基準日に測定した基準値から測定日まで低下した値(cpm)を測定日と線源の半減期から求め、測定されたカウントとの比を表す。計数率比の算出方法を式(1)に示す。

$$\text{計数率比} = \frac{\text{測定(cpm)}}{\text{基準値(cpm)} \times 0.5^{\frac{\text{測定日}-\text{基準日}}{\text{半減期}}}} \quad (1)$$

なお、本実験に使用した線源の半減期は966日である。

4. 実験結果

4.1 シリーズ1の結果

(1) 被験体がポリプロピレンの場合

被験体をポリプロピレンとした場合の計数率比と被験体厚さの関係を図-5に示す。被験体の幅が大きくなるほど計数率比は高くなり、被験体の幅が200mm以上で、概ね計数率比は変わらなくなっている。また、被験体の

表-2 シリーズ2の実験因子と水準

実験因子	実験水準
被験体の厚さ	20mm,40mm,60mm,80mm,100mm,150mm,200mm,400mm
減速材の種類	ポリプロピレン, ポリエチレン
減速材の厚さ	0mm,3mm,10mm,15mm(ポリプロピレンのみ)

表-3 コンクリートの材料

種類	産地・名称	物性値
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³
水	地下水	密度1.00g/cm ³
細骨材	山砂(愛知県豊田市)	表乾密度2.58g/cm ³ , 粗粒率2.67
粗骨材	砂利(岐阜県多治見市)	表乾密度2.60g/cm ³ , 実積率63.3%
混和剤	AE減水剤	変性リグニンスルホン酸とポリカルボン酸, 密度1.09g/cm ³
	AE剤	アルキルエーテル型陰イオン界面活性剤, 密度1.04g/cm ³

表-4 コンクリートの配合

水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
57.4	44.9	175.5	306	791	978	0.198	0.198

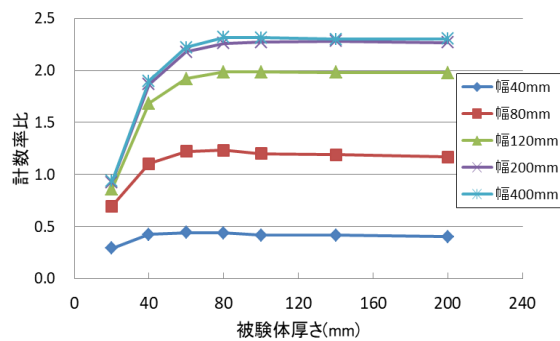


図-5 計数率比と被験体厚さ(ポリプロピレン)

厚さに対しては、幅80mm程度にかけて計数率比が変化し、厚さ100mm以上では、計数率比は変化しなくなった。一方、被験体の幅が40mmの場合は、計数率比は低く、厚さ20mmの場合を除き、厚さに対する変化も見られない。これは、被験体が小さすぎて速中性子が減速されにくく、熱中性子のRIカウントとして増加しないためである。部材の角部などを測定する場合は、明確にRIカウントが得られないことが予想され、今後の課題となる。また、各被験体の幅に対する被験体の厚さ20mmから40mmの勾配は、被験体の幅が大きくなるほど急になっている。これは、検出管近傍に被験体が近づくにつれて、より多くのRIカウントが得られるためであり、20mmや40mmのような小さな領域においても、状態変化を把握しやすいと考えられる。また、図-5から、本測定装

置では、ポリプロピレンが速中性子を熱中性子に変化させる有効範囲は、厚さ 80mm 程度、幅 200mm 程度と考えられる。この範囲内で減速材の加工を行い、測定装置に取り付けることにより、多くの熱中性子を捕捉することが期待できる。

次に、図-5 に示した計数率比と被験体厚さの関係から、被験体の厚さが 200mm の計数率比を基準とした計数率比の割合を図-6 に示す。被験体の幅が 120mm 以上では、被験体の厚さと計数率比の割合の関係は、ほとんど一致した傾向となり、被験体の厚さが大きくなると、計数率比の割合は高くなり、厚さ 80mm 以降は一定となった。被験体の幅が 40mm の場合には、厚さが 40mm から 80mm のときに、被験体の幅が 80mm の場合は、60mm から 80mm のときに計数率比の割合が 100%を超えた。これは、中性子線の散乱が、被験体の大きさが小さいときには得られる RI カウントが小さいため、線源から放出される速中性子が周囲の影響を受けるものと考えられる。

(2) 被験体がコンクリートの場合

被験体をコンクリートとした場合の計数率比と被験体厚さの関係を図-7 に示す。計数率比は、ポリプロピレン被験体に比べて 1/6 程度に大きく低下している。これは、被験体の材質（水素原子や炭素原子の量）の違いによって、測定装置の測定可能範囲が異なるためである。被験体がコンクリートの場合、被験体の幅 40mm の場合を除くと、ポリプロピレンの場合と同様に、被験体の幅が大きくなるほど計数率比が高くなる傾向であった。しかし、ポリプロピレンの場合と異なり、計数率比は被験体の幅が 200mm を超えても高くなる傾向を示した。また、コンクリートの厚さに対しても、被験体の幅 40mm を除いて、被験体の厚さが大きくなるにつれて、計数率比が大きくなる傾向がみられたが、計数率比が一定となる被験体の厚さは、ポリプロピレンの場合と異なり、100mm から 150mm 程度の範囲にある。次にポリプロピレン被験体と同様に、被験体厚さが 200mm の計数率比を基準とした計数率比の割合を図-8 に示す。被験体の幅 40mm において、被験体の厚さが大きくなっても計数率比の割合は、概ね 100%で変化が見られなかった。その他の被験体の幅に対する計数率比の割合は、幅 120mm の被験体を除いて、厚さが大きくなるほど、計数率比の割合が増加する傾向にある。しかし、ポリプロピレン被験体と比較して、厚さ 20mm から 40mm の範囲のグラフ勾配は緩やかなため、測定装置単独の場合には厚さが小さい領域での検出は難しいと考えられる。

以上から、ポリプロピレン被験体は、コンクリートの被験体より計数率比は高く、得られる RI カウントが大きいため、測定装置に減速材を使用することにより、より多くの RI カウントによって測定を容易にできると考え

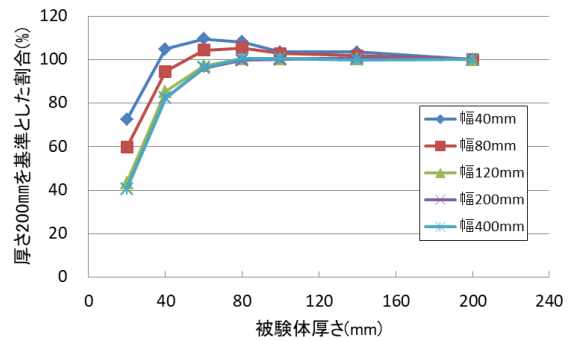


図-6 厚さ 200 mmの計数率比を基準とした割合 (ポリプロピレン)

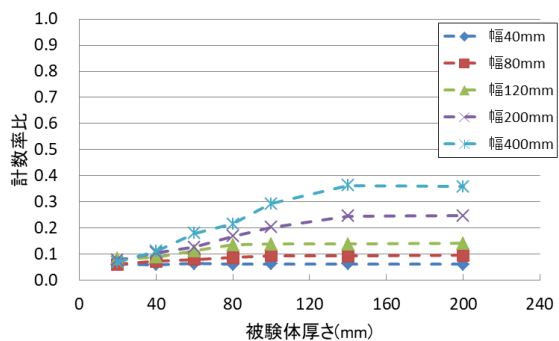


図-7 計数率比と被験体厚さ(コンクリート)

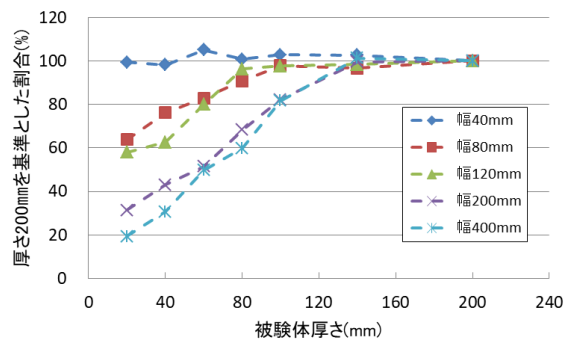
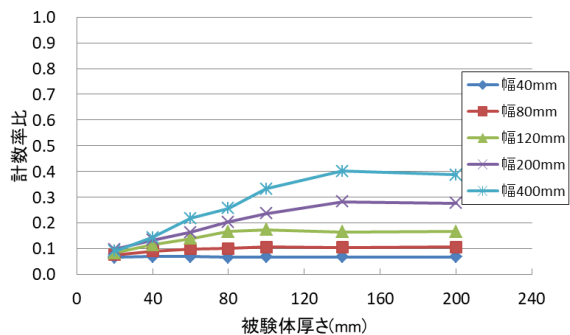


図-8 厚さ 200 mmの計数率比を基準とした割合

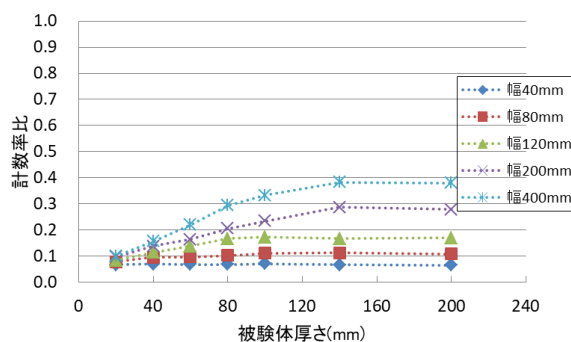
られる。また、減速材によって、測定装置近傍の領域変化を捉えやすくなり、より小さな空隙の検出も期待できる。

4.2 シリーズ2の結果

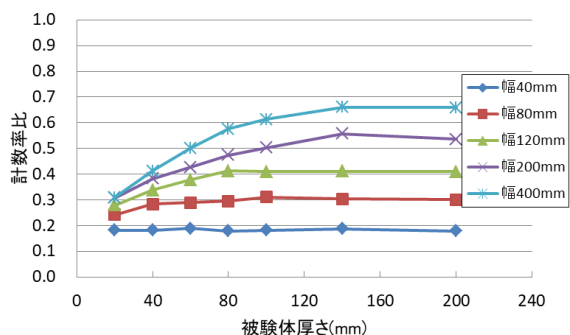
コンクリートを被験体として、測定装置にポリプロピレンを減速材として使用した場合において、各被験体の幅ごとに測定された計数率比と被験体の厚さの関係を図-9 に示す。減速材を使用した全ての水準において、シリーズ1の結果と同様に、被験体の幅または、厚さが大きくなるほど計数率比は高くなる傾向を示した。ただし、被験体の幅 40mm の場合は、減速材の厚さが大きくなり、計数率比が高くなっても、被験体の厚さに対する変化はみられなかった。減速材によって RI カウントは増加する



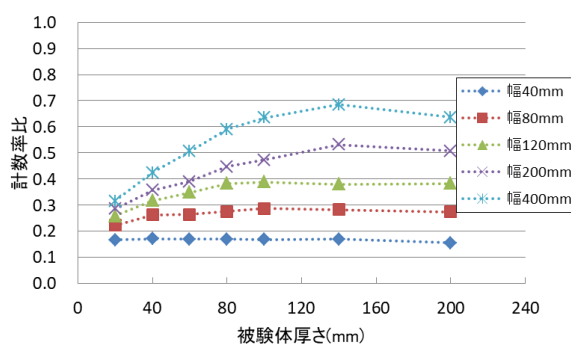
(a) ポリプロピレン 3mm



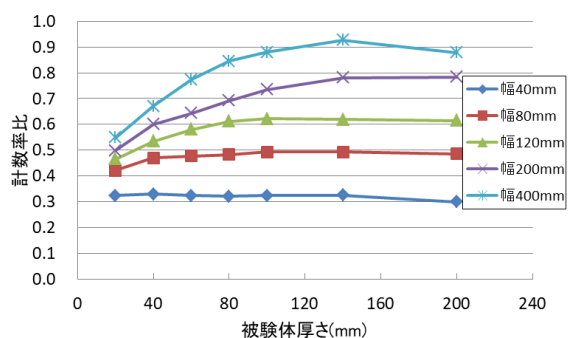
(a) ポリエチレン 3mm



(b) ポリプロピレン 10mm



(b) ポリエチレン 10mm



(c) ポリプロピレン 15mm

図-9 計数率比と被験体厚さ
(減速材：ポリプロピレン)

図-10 計数率比と被験体厚さ
(減速材：ポリエチレン)

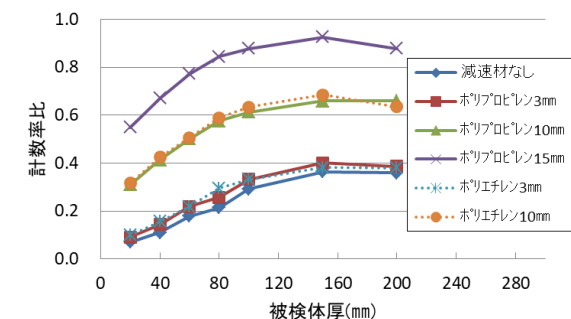


図-11 ポリプロピレンとポリエチレンの比較

ものの、被験体を通過した中性子が検出管に到達していないためと考えられる。また、図-9 では、減速材の厚さを大きくすることにより、計数率比を全体に嵩上げするだけでなく、厚さに対する計数率比の増加量も大きくなっている。そのため、厚さの大きい減速材の使用により、小さな領域の測定も容易になると考えられる。

次にポリエチレンの減速材を 3mm と 10mm とした場合の被験体の幅に対する被験体の厚さと計数率比の関係を図-10 に示す。ポリエチレンを減速材とした場合もポリプロピレンを減速材と使用した場合と同様に、被験体の幅が大きくなるほど計数率比は高くなり、被験体厚さが大きくなるほど計数率比も高くなる傾向を示した。計数率比は、ポリプロピレンの場合と同様の値を示しており、大きな差がないことが判る。

図-9、図-10 から減速材の種類・厚さごとの計数率比と被験体厚さの関係は、図-11 のようになる。減速材なしの場合と減速材 3mm の場合は差がほとんどなく、本測定装置では、減速材の厚さは 3mm では効果がないことが判る。また、図-11 において、被験体の厚さ 200mm に対するポリプロピレン減速材の 3mm の場合の計数率比は、0.387 であり、ポリエチレン減速材 3mm の場合が 0.380 と、差は 2% 程度であった。さらに、ポリプロピレン減速材 10mm の場合の計数率比は、0.659 であり、ポリエチレン減速材 10mm の場合が 0.636 と差が 3% で大きな違いが認められなかった。ポリプロピレンとポリエチレンとでは、炭素原子と水素原子の構成比が同じであるため、比重の違いでわずかな差が生じたと考えられる。

どちらの減速材も減速材の厚さを大きくするほど得られる RI カウントが大きくなる傾向を示し、被験体を通じた速中性子を効率よく減速して熱中性子として検出できると考えられる。そのため、検出管に減速材を使用することで、より小さな領域変化も捉えて、定量評価することができると考えられる。また、被検体の幅が 40mm の場合で被験体の厚さ 200mm での計数率比と減速材の厚さの関係を図-12 に、被験体の幅が 200mm の場合で被験体の厚さ 200mm での計数率比と減速材の厚さの関係を図-13 に示す。本実験の範囲内で、減速材の厚さと計数率比は二次式で近似でき、減速材の厚さの二乗に比例して計数率比が高くなることが明らかになった。また、この図からもポリプロピレンとポリエチレンで減速材として差異がないことが判る。また、図-14 には、被験体の幅 400mm の場合について、減速材の厚さの変化に対する計数率比の増加量を被験体の厚さごとに示した。どの被験体厚さにおいても減速材の厚さが大きくなると、計数率比の増加量が増しており、より厚さの大きい減速材が測定に有利であることが判る。

シリーズ 1 とシリーズ 2 の結果から、減速材を測定装置に使用することによる特異な影響はみられず、減速材は RI カウントを相対的に増加させ、特に厚さが小さい領域の測定を容易にできると考えられる。

5. まとめ

今回の実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 被験体の種類によって、計数率比や計数率比が一定となる被験体厚さが異なる。
- (2) ポリプロピレンを減速材とした場合、幅 80mm 程度、厚さ 200mm 程度の範囲が有効と考えられる。
- (3) 減速材は測定される RI カウントを全体的に増加させ、特に厚さの大きい減速材は減速材 1mm あたりの計数率比の増加が大きく、より一層測定を容易にする。
- (4) 減速材として、ポリプロピレンとポリエチレンを比較した場合、性能に大きな差は見られなかった。
- (5) 計数率比は、減速材の厚さの二乗に比例して高くなり、減速材としては 10mm 以上で感度が高まる効果が期待できる。

謝辞

本研究の実験を実施するにあたり、愛知工業大学工学部建築学科の乙子快斗氏、和歌佑弥氏、有我拓磨氏の協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

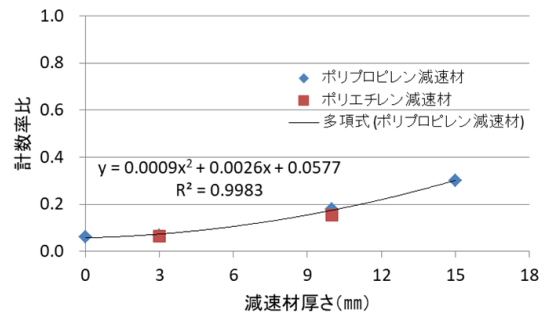


図-12 被験体厚さ 200 mm における減速材の厚さと計数率比の関係 (被検体の幅 40mm)

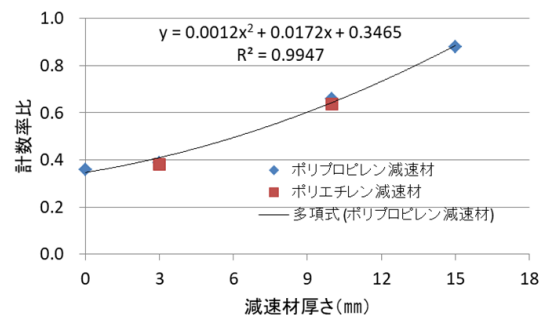


図-13 被験体厚さ 200mm における減速材の厚さと計数率比の関係 (被検体の幅 200mm)

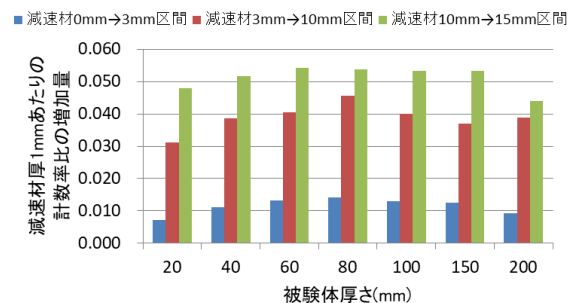


図-14 減速材厚さ 1mm に対する計数率比の増加量

参考文献

- 1) 林暢彦ほか：T型リブを用いた鋼・コンクリート合成床版の中間支点部輪荷重走行試験，土木学会 第 4 回道路橋床版シンポジウム，pp.191-196，2004
- 2) 山田浩子ほか：中性子線測定装置による鋼製型枠内側の空隙検出に関する研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.35, No1, pp.1783-1788, 2013
- 3) 神頭峰磯，瀬古繁喜，山田和夫：RI 中性子線測定装置による合成床版のコンクリート充填確認手法の基礎的検討，土木学会 第 10 回道路橋床版シンポジウム，pp.93-98, 2018