

論文

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

神頭峰磯*, 瀬古繁喜**, 山田和夫***

*日本車輛製造株式会社 輸機・インフラ本部技術計画室(〒456-8691 愛知県名古屋市中熱田区三本松町1-1)

**博士(工学), 愛知工業大学教授 工学部建築学科(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)

***工博, 愛知工業大学教授 工学部建築学科(〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)

合成床版は下部が鋼板で覆われており、コンクリート打込み時に充填状況を確認することが難しい。コンクリートの充填状況を施工中に鋼板の外側から確認することを目的に、散乱型中性子線測定装置を用いて検査する手法に着目した。本論文では、線源側と検出管側に減速材を設置した場合の空洞の大きさと、位置に対する RI カウントの変化を測定し、中性子線によって未充填部分を検出する技術の基礎的な検討を行った結果を報告する。
キーワード：ラジオアイソトープ, 中性子線, 合成床版, 充填確認

1. はじめに

鋼道路橋の床版に近年採用されている鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版)は、床版下面に設置される鋼材(以下、底鋼板)とコンクリートを一体化させた高耐久の床版コンクリートである。しかし、底鋼板は、リブプレートやスタッドジベルなどの各種鋼材が密に溶接されており、構造的な狭隘箇所によりコンクリート打込み時の充填不良が懸念される場合がある。そのため、現場では、配合の工夫や入念な締固め施工などによって、充填不良の防止に努めている。また、充填不良が打込み時に確認できれば、当該箇所を再振動することにより、充填不良を防止することができる。そのため、打込み箇所のハンマーによる打音確認やセンサによる充填不良検知も一般的に行われている(例えば¹⁾)。しかし、ハンマーによる打音確認は定量的な判断が難しく、検査時の判断にバラツキが生じる懸念があり、センサは複数箇所用いた場合にケーブルが、硬化後コンクリートの水みちになる恐れがある。そのため、合成床版のコンクリート打込み時に不可視部分の充填不良を定量的に評価するシステムが望まれている。

本研究では、合成床版のコンクリート打込み時の充填不良に対し、中性子線の利用による検査技術の確立を目的に、RI カウンタを用いた基礎的な実験を行った。

2. 散乱型中性子線測定装置を用いた実験

2.1 測定の原理

中性子のうち、大きな運動エネルギーを有するものを速

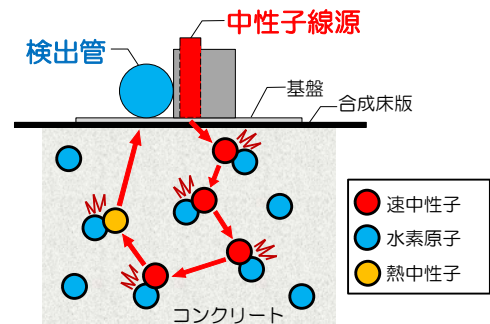


図-1 測定原理のイメージ図(散乱型の例)

中性子と呼んでいるが、速中性子は主に水素原子と衝突を繰り返すことで、拡散しながらエネルギーを消失し、熱中性子と呼ばれるエネルギーの低い中性子に変換される。したがって、速中性子が減速される割合は水素原子の量と関係することになる。これらの原理から、中性子線源から放射される速中性子は、コンクリート内では水分として存在することが多い水素原子と衝突して熱中性子に変わり、RI カウンタによって水素原子の量に関する定量的な測定が可能となる。なお、中性子の発生には、大きく分けて2種類の方法があり、天然由来の鉱物から中性子を発生する RI 線源もしくは、加速器を用いて人工的に中性子を作る方法がある。既往の研究成果では、車載可能な小型の加速器も開発されている²⁾。また、中性子線の測定方法としては、測定対象物の片側に中性子線源を設置し、その反対側に検出管を設置する透過型と、測定側に中性子線源と検出管を並列に設置する散乱型がある。前者はフレッシュコンクリートの単位水

量の計測において多くの実績があるが³⁾、装置は比較的大きくなる。一方、散乱型は透過型と比較して装置がコンパクトにまとめられるメリットがある。

2.2 測定装置の概要

本研究では、現場において、ポータブルに持ち運んで使用する方法を目標としているため、中性子の発生はRI線源を用いた。また、測定装置は、よりコンパクト化を図るため、中性子線源と検出管を並列配置する散乱型測定装置とした。中性子線源には、カリホルニウム²⁵²Cf(線源強度0.92~0.95MBq)を採用し、直径9mm×36mmの金属の円筒形の中心部付近から速中性子が放出される。また、検出管には、直径25mm×120mmの円筒形の検出器(³He比例計数管)を使用した。この検出管に熱中性子が1個入ると電極に集められる電荷を測定し、集められる電荷に比例して単発的な電圧の脈動が高くなることを利用して測定する。電圧の脈動が高くなり、ある閾値を上回った数がRIカウントとしてスケーラーに表示される仕組みである。測定装置の概要を図-2に示す。ステンレス板の基盤上に中性子線源と検出管を並列に配置し、鋼板との固定は、合成床版の底鋼板が鋼材であることから、マグネットベースを採用した。

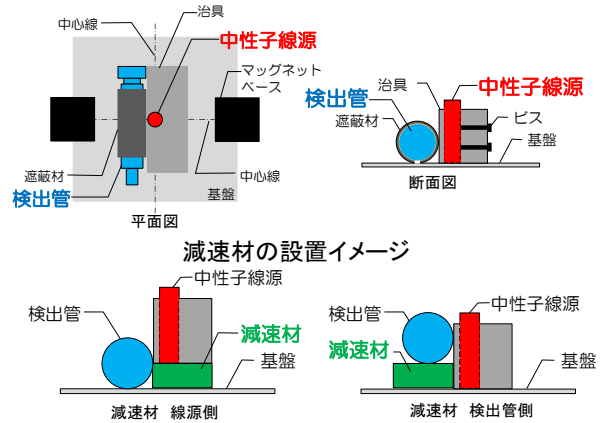


図-2 測定装置の概要

2.3 実験概要

合成床版の打込み時の充填不良を検出するため、鋼板背面からフレッシュコンクリートの空隙検知を目的として実験を行った。試験体は、合成床版を想定し、図-3に示すような750mm×700mm×300mmの鋼製型枠とした。片側の側面を合成床版の底鋼板に見立てて、鋼板上に空隙を模擬した発泡スチロールを設置してコンクリートを打込んだ。コンクリートが硬化する前に空隙の周辺から25mm間隔で測定装置を移動させ、RIカウントの変化から空隙の検知を試みた。また、測定精度を向上させるため、速中性子を減速して熱中性子に変換し易くするため、図-2に示すように、測定装置に減速材を用いて、測定精度の変化を調べた。

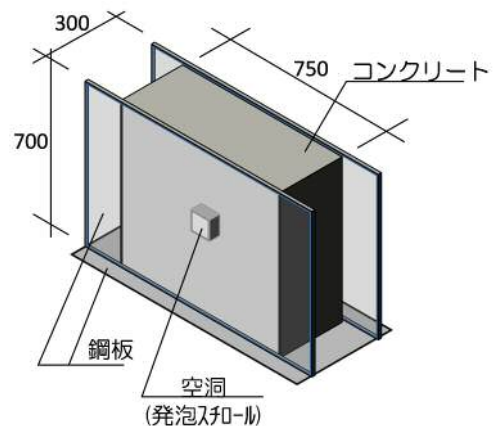


図-3 試験体の概要

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単用量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
50.0	42.2	166	332	780	1024	3.32

表-2 コンクリートの材料

種類	名称	製造・産地	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント	密度 3.16g/cm ³
細骨材	砂	豊田	表乾密度 2.55g/cm ³
	碎石 2005	瀬戸	表乾密度 2.17g/cm ³
粗骨材	砂利	豊田	表乾密度 2.60g/cm ³
	フローリック SV(AE 減水剤)	フローリック	密度 1.00g/cm ³
混和剤	凝結遅延剤	竹中油脂製	ポリヒドロキシカルボン酸複合体
水	地下水	上澄水	密度 1.00g/cm ³

2.4 使用材料

試験体に打込むコンクリートは、呼び名が30-8-20Nを使用し、測定装置での測定が2日間に及ぶことから凝結遅延剤をトラックアジテータに投入して試験体に打込んだ。また、試験水準が多いことから、試験体の作製は2グループに分けて、コンクリートの打込みを別々の日に行った。コンクリートの配合を表-1に、コンクリートの使用材料を表-2に示す。打込んだコンクリートのフレッシュ性状は、凝結遅延剤混入前のスランプが2グループとも8cmであったが、混入後は1グループの打込みが17.5cm、2グループの打込みが15.0cmまで増加した。ただし、空気量は規格値上限の6%未満(規格値:4.5%±1.5%)であった。また、材齢28日の圧縮強度は、1グル

ープが33.5N/mm²で、2グループが32.6N/mm²であった。測定側の鋼板は、合成床版の底鋼板と同じ仕様とする

ため、材質 SM400A の板厚 8mm とした。また、鋼板の表面は、コンクリート接触面となるため、鋼板表面を ISO Sa2.5 のグレードでブラスト処理を行った後に、無機ジンクリッチペイントを目標膜厚 30 μ m で塗装した。

測定装置に使用する減速材は、ポリプロピレン((C3H6)n)とポリエチレン((C2H4)n)が一般的に使用されるが、水素原子の結合が多く、より多くの減速効果が期待できるポリプロピレンの板を採用した。

2.5 実験水準

既往の研究成果では、RI カウントを用いた空隙検知は、50mm 四方より大きな空隙で検知できるようであるが、空隙の大きさや厚さを定量的に評価することが課題とされている⁴⁾。本実験では、より小さな空隙を確実に検知するため、減速材を測定装置に設置し、熱中性子を多く発生させて、RI カウントを増加することにより、小さな空隙検知を試みる。また、減速材の設置箇所は、中性子線源側と検出管側が考えられ、減速材の厚さによっても RI カウントが異なると想定した。そのため、減速材は、厚さを 0mm, 3mm, 5mm, 10mm の 4 種類として、それぞれ中性子線源側に設置する場合と、検出管側に設置する場合の合計 8 水準とした。この水準に対して、測定した空隙の種類を表-4 に示す。空隙は正方形として 0mm, 50mm, 70mm, 100mm の 4 種類、厚さは 0mm, 5mm, 10mm, 20mm の 4 種類、合計 8 種類とした。

2.6 測定方法

装置による測定は、図-4 左に示すように、空隙の中心から左右 125mm の範囲で 25mm ピッチに測定線を罫書いて 25mm 間隔で測定できるようにした。測定は空隙中心から-125mm(左)の位置から始めて、+125mm(右)の位置まで行った。なお、試験体から 1.5m 以上離れた場所にスケーラーを設置し、1 箇所につき 1 分間の RI カウントの測定を 3 回繰り返して行った。

また、測定は図-4 右に示すように、コンクリート打込み直後から行い、測定点の真上に中性子線源が設置されるように測定装置を鋼板上にマグネットベースで固定して測定した。このとき、測定装置を正確に設置するため、横方向の中心線から 100mm 上部に定規を水平に設置して、一連の測定時にずれないようにした。

2.7 実験結果

(1) 減速材なしの場合

実験結果によって得られた RI カウントは、1 分間 \times 3 回測定した平均値を採用した。測定原理から、空隙のない場合は各位置での RI カウントの変化は少なく、空隙部分では RI カウントが小さくなる傾向となる。減速材なしで、空隙厚さ 0mm の場合の RI カウントを図-5 および表-5 に示す。RI カウントは 1070cpm \sim 1197cpm の範囲にあり、標準偏差は 8 \sim 54 であった。ある程度バラツキ

表-4 実験で使用する空隙の種類

		空隙一辺の長さ(mm)			
		0	50	70	100
空隙厚さ(mm)	0	○	—	—	—
	5	—	○	—	○
	10	—	○	○	○
	20	—	○	—	○

※○ : 1 グループ ○ : 2 グループ

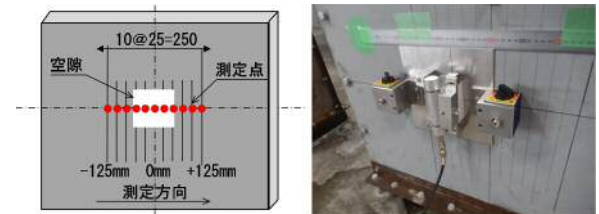


図-4 測定方法のイメージと測定状況

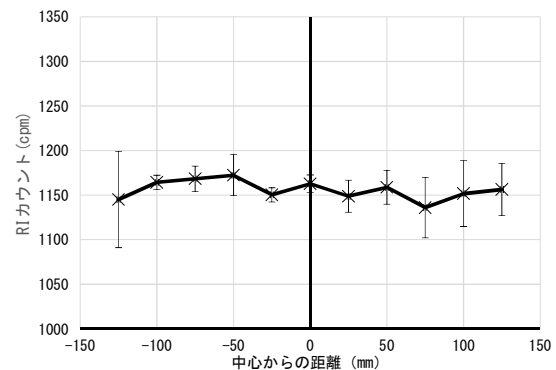


図-5 空隙なしの RI カウント(減速材なし)

表-5 RI カウントの誤差

	最大	最小
計測値(cpm)	1197	1070
平均値(cpm)	1172	1136
標準偏差	54	8
変動係数(%)	4.72	0.69

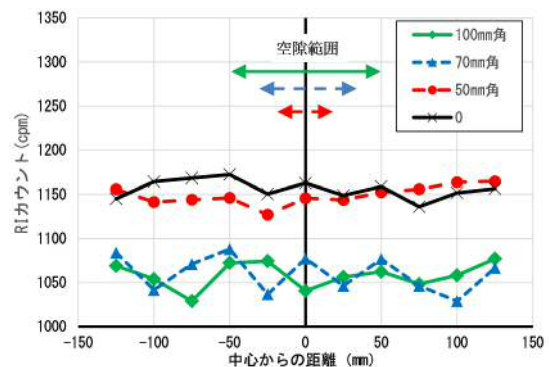


図-6 空隙厚さ 10mm の RI カウント(減速材なし)

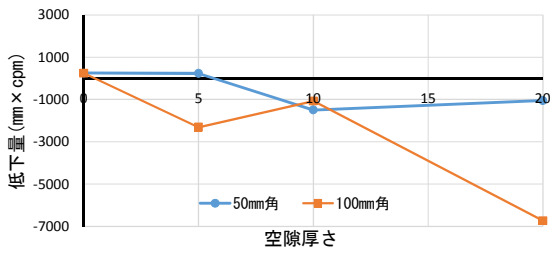


図-7 空隙厚さに対する RI カウントの低下量

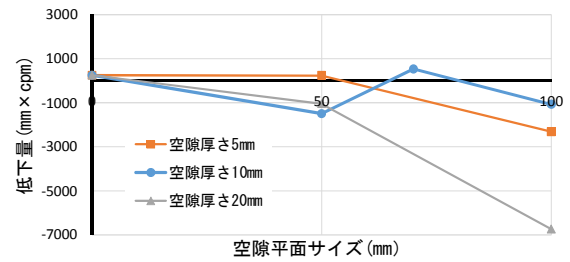


図-8 空隙平面サイズによる影響

があるが、大きな変動はみられず、安定した RI カウントが測定できた。次に、空隙厚さ 0mm と 10mm で、空隙の有無または、空隙の大小に対する RI カウントの比較を図-6 に示す。空隙厚さ 0mm では、RI カウントの変化が少なく、コンクリート中の水分に対する速中性子の変化を捉えていると言える。しかし、空隙サイズが 50mm 角の場合も変化量が少なく、一測定点の RI カウントでは空隙の有無の判断が困難であった。また、空隙サイズが 70mm 角と 100mm 角の場合も一測定点の RI カウントでの空隙判断が難しい。なお、図-6 では、全体的な RI カウントが、空隙サイズ 0mm と 50mm 角で近く、70mm 角と 100mm 角とは離れている。これは、試験体作製を 2 グループに分けて別の日にコンクリートを打込んだため、コンクリート中の水分量の若干の違いが RI カウントに現れたものと考えられる。このため、空隙に対する RI カウントを実際に評価する場合には、同一コンクリートの空隙のないところと空隙箇所を比較することが必要となる。

次に図-7 に示すように、得られた RI カウントを、RI カウントの低下量として整理した。空隙外となる測定点の両端各 2 点の RI カウントを平均して基準の値とし、測定結果の RI カウントのグラフにおいて、空隙を設置した長さを対象とし、各測定点での基準値と測定値の差から空隙範囲全体での低下量を面積 (単位: mm x cpm) として求めた。空隙サイズが 50mm 角の場合は、空隙厚さが 10mm 以上で RI カウントの低下量が発生しているが、RI カウントの低下量のピークは空隙厚さ 10mm となっており、20mm の場合は変化量が少ない結果となった。一方、空隙サイズが 100mm 角の場合は、空隙厚さ 10mm の RI カウントの低下量が少ないものの、空隙厚さ 20mm の場合は多くなっている。図-8 は、同じグラフを空隙の平面サイズで整理したものである。空隙の平面サイズが大きくなるごとに RI カウントの低下量が多くなる傾向にある。今回の RI カウントの低下量から空隙の検知は可能であるが、空隙厚さが 20mm の場合に RI カウントの低下量が 10mm よりも減少していることから、容易に空隙の幅と厚さを評価することは難しい。

(2) 減速材を使用した場合

厚さ 5mm の減速材を線源側に使用した場合で、空隙厚さ 0mm と 10mm に対する各空隙サイズの RI カウントを

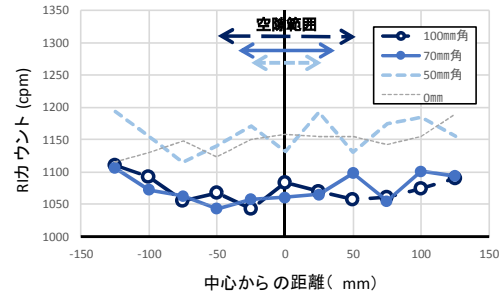
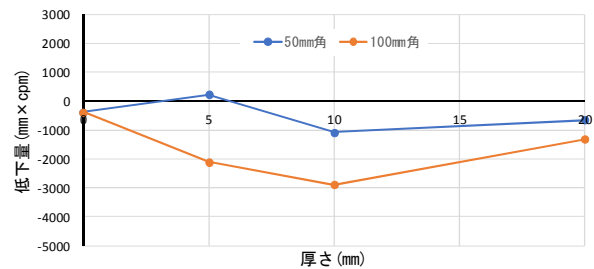
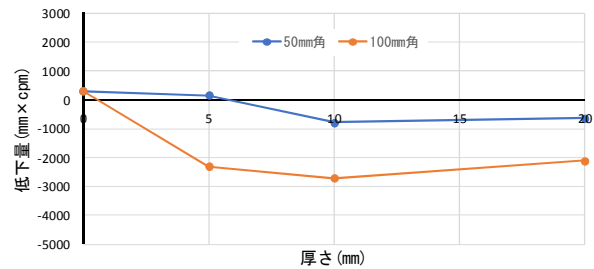


図-9 線源側に 5mm の減速材を設置した場合の空隙厚さ 10mm の RI カウント

a) 減速材線源側 3mm



b) 減速材線源側 5mm



c) 減速材線源側 10mm

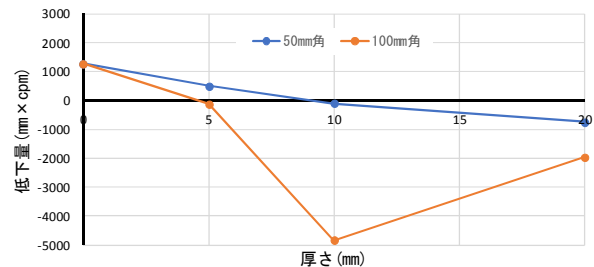


図-10 減速材(線源側設置)の RI カウントの低下量

図-9 に示す。空隙サイズが 50mm 角の場合は空隙以外の場所でも 60~70cpm 程度 RI カウントが上下しており、空隙なしの場合との相違が見られないが、空隙が

70mm角以上となるとRIカウントは空隙範囲で低下している。このように、減速材を使用することで、RIカウントの変化を捉えて、空隙を判断しやすくなると考えられる。次に、線源側に減速材を使用した場合のRIカウントの低下量を図-10に示す。線源側に減速材を3mm設置し、空隙サイズが50mm角の場合は、図-6に示す減速材なしの場合と比較して、RIカウントの低下量が多くなった。しかし、減速材の厚さを増すとRIカウントの低下量の変化が小さくなった。散乱型による測定の場合、測定可能な試験体の厚みが200mm程度とされており⁵⁾、減速材の厚みが増すことにより、速中性子の影響範囲が少なくなったものと考えられる。また、空隙サイズが100mm角になると、50mm角と同様に空隙厚さ10mmをピークに概ねRIカウントの低下量は少なくなった。

一方、図-11に示すように減速材を検出管側に設置した場合の空隙サイズ50mm角は、空隙厚さ5mmと20mmに対して、減速材を使用しない場合と比較して、RIカウントの低下量が多くなり、空隙を認知し易くなった。また、空隙サイズ100mm角では、線源側に減速材を用いた場合と同様に、空隙厚さ10mmがRIカウントの低下量のピークになる傾向が見られた。

これらの結果から、減速材を検出管側に設置することにより、速中性子の影響範囲を阻害することなく、より多くの熱中性子を発生させることが可能となる。そのため、RIカウントの低下量の変化が多くなり、より小さな空隙を検知もしくは、空隙の検知の定量値を明確にできる可能性があると考えられる。なお、減速材の厚さによってRIカウントの低下量が大きくなる訳ではないため、減速材の影響の程度を評価することは、今後の課題と考える。

3. 障害物による測定への影響

3.1 底鋼板に設置される測定上の障害物

合成床版の底鋼板は、図-12に示すように、鋼板の補剛やコンクリートとの一体性確保のため、リブプレートやスタッドジベルなどの鋼材類が溶接されている。これら底鋼板に溶接されている鋼材類は、測定範囲に対するコンクリート中の水素原子の量を変化させ、RIカウントに影響を及ぼす懸念がある。そのため、図-13に示すように鋼板にリブプレートとスタッドジベルを溶接して試験体側面に設置し、RIカウントを測定することで、その影響を確認した。リブプレートは、材質SM400Aの幅120mm、板厚12mmとし、鋼板の中央に1本縦に配置した。また、スタッドジベルは、直径16mm、長さ150mmのものを使用し、中心から左右に200mm、上下に250mmの間隔で9本設置した。なお、鋼板上面は、無機ジンクリッチペイントを塗装した。測定は鋼板の中央から25mmピッチで±150mmの範囲で行った。

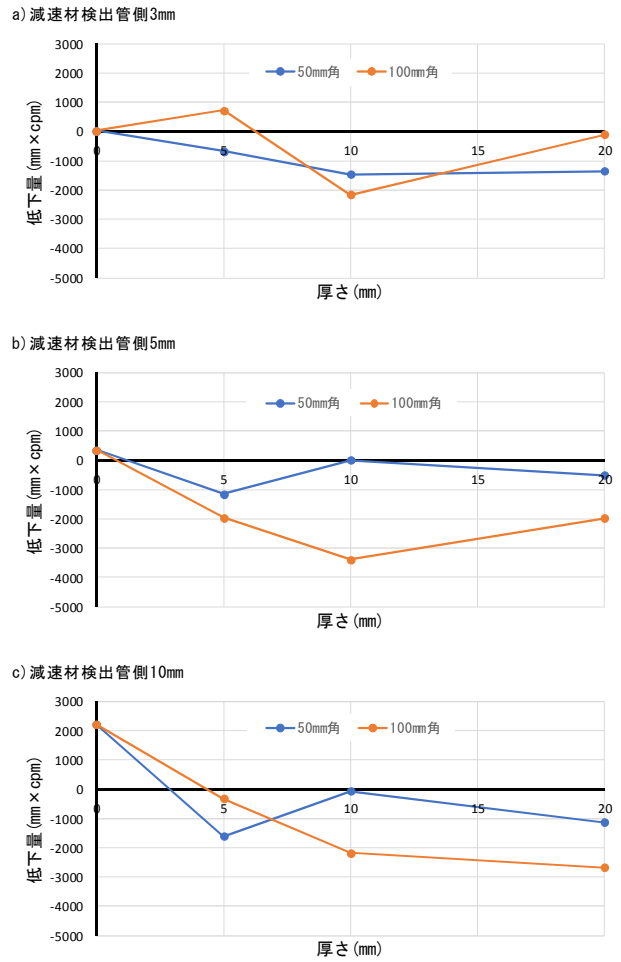


図-11 減速材(検出管側設置)のRIカウントの低下量



図-12 合成床版の底鋼板の例

3.2 測定結果

RIカウントの測定は、これまでの実験結果でRIカウントの低下量が明瞭に確認できた減速材を検出管に厚さ10mmで設置して行った。なお、試験水準は、障害物としてリブプレートを設置した場合、スタッドジベルを配置した場合、空隙平面サイズが100mm角で厚さが10mmの場合と障害物なしの場合の4種類とした。図-14にRIカウントを示す。グラフ内には、障害物なしの場

合の RI カウントを試験体全体で平均した値を基準として示し、この基準カウントからの変化で影響を確認した。スタッドジベルは、基準線に対して±30cpm 程度の RI カウント量の変動が認められるが、障害なしの変動も同程度であり、スタッドジベルの設置している中心部は RI カウントに変化はないことから、全般的にスタッドジベルの影響はないと考えられる。

一方、リブプレートの場合、リブプレートを設置した中心部で RI カウントが大きく低下しており、リブプレート範囲外では RI カウントが基準ライン付近にあることから、明らかに RI カウントがリブプレートの影響を受けていると考えられる。

リブプレートの影響を明確にするため、空隙サイズを 100mm 角、空隙厚さ 10mm とした場合、リブプレートを設置した場合を RI カウントで比較した。図-15 に示すように、空隙範囲で RI カウントは低下しており、空隙を検知できている。しかし、リブプレートも同様の範囲で RI カウントが低下しており、空隙の場合の RI カウントの低下パターンと酷似している。そのため、実際に現場で測定する際には、あらかじめリブプレートの場所を把握する必要がある。

4. まとめ

本研究では、合成床版のコンクリート打込み時の充填不良の検知を目的として、散乱型中性子線測定装置を使用した基礎実験を行った。本研究で得られた実験から、以下の知見を得た。

- (1) 散乱型中性子線測定装置を用いることで、鋼板上に打込んだフレッシュ状態のコンクリートに発生する空隙を RI カウントで評価できる。
- (2) 空隙範囲の長さによる RI カウントの基準値と測定値の差を面積で評価したとき、空隙サイズが 50mm 角および 100mm 角の場合ともに、空隙厚さ 10mm を概ねピークとして RI カウントが低下した。
- (3) ポリプロピレンの減速材を検出管側に使用することにより、50mm×50mm で厚さ 5mm の小さな空隙を検知できる可能性がある。
- (4) 合成床版の鋼板上に設置される鋼材類のうち、スタッドジベルは測定に大きく影響しないが、リブプレートは空隙と同様なカウント低下の影響を与える。

参考文献

- 1) 中本啓介, 高橋秀樹: 合成床版コンクリートの充填時における品質管理について, 第 20 回土木施工管理技術論文集, pp.271-272, 2016
- 2) 池田義雅ほか: 小型中性子源による床版内部の水・空隙非破

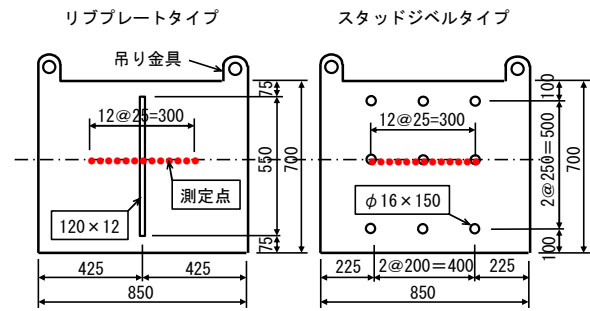


図-13 模擬障害物試験板

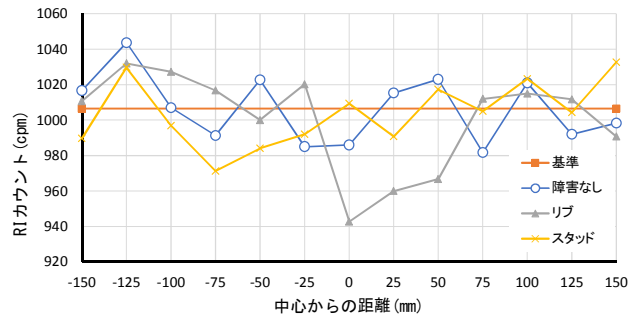


図-14 障害物設置時の RI カウント

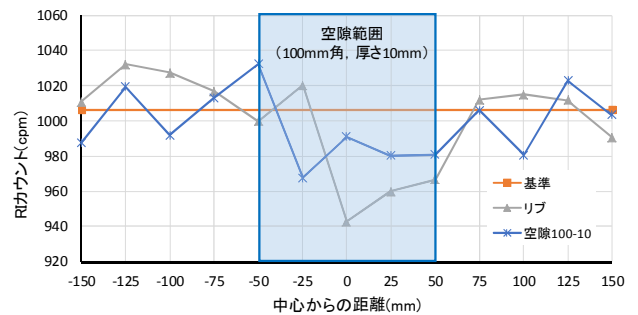


図-15 空隙とリブプレートの RI カウント

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

- 3) 井上孝之ほか: ラジオアイソトープ水分計による単位水量連続測定技術の実施(耐震改修工事の例), コンクリート工学, 第 48 巻, 11 号, pp.20-27, 2010
- 4) 山田浩子, 瀬古繁喜, 徳永将司, 井上和政: 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, No.1, pp.1783-1788, 2013
- 5) 角拓郎ほか: 中性子線測定装置による RI カウントと鋼板型枠中の被検体の種類および厚さの関係, 第 64 回年次学術講演会, V-471, pp.939-940, 2009

(2018 年 7 月 20 日受付)