

論文 RI 中性子線測定装置による鋼板内側でのコンクリートの空洞と滞水の検出に関する研究

瀬古 繁喜*1・神頭 峰磯*2・山田 和夫*3

要旨: 鋼コンクリート合成床版等において、鋼板の内側でのコンクリートの充填不良を検出する方法として、RI 中性子線測定装置を用いた手法の適用を実験的に検討した。打込み直後に空洞を測定する場合と硬化後に空洞を水で満たした状況を測定する場合、および硬化後の空洞で測定装置の減速材の位置や厚さを変えた実験を行った。その結果、RI カウント低下量はフレッシュ状態の空洞の場合には空洞の厚さが大きいと大きくなるが、滞水の場合は空洞の厚さの二乗に比例して大きくなること、減速材の効果は、既往の結果も含めると検出管側に設置して厚さを 2mm~5mm とするとき RI カウントの低下量が大きくなるのが分かった。

キーワード: ラジオアイソトープ, 中性子線, 鋼板, 空洞, 滞水, 減速材

1. はじめに

鋼道路橋の床版に採用されている鋼コンクリート合成床版や、発電所施設などでの鋼板とコンクリートを一体化させた構造体の鋼コンクリート構造では、リブプレートやスタッドジベルなどの各種鋼材が内部に設置されており、狭隘箇所によってコンクリートの充填不良の発生が懸念される。現場では、配合や入念な締固めなどの工夫によって充填不良の防止に努めており、さらに打込み時に充填の状態が確認できれば、再振動の対策等を効果的に実施できる。

このような背景から、打込み箇所の打音確認やセンサーによる充填検知も検討されている¹⁾が、未だ実用上の問題がある。また硬化後であっても充填不良の箇所や程度が分かれば注入等の対策を講じることもできるが、やはり鋼板の内側で生じる空洞を検出することは難しい。

筆者らは、主にコンクリート打込み時に鋼板の内側で生じる空洞を検出する手法として、放射性同位体(以下、RI)による中性子線を用いた散乱型測定装置の実験的な検討を行ってきた²⁾。本報では、空洞の大きさを 50~100mm とし、打込み時および硬化後の空洞、空洞に水が溜まった状態(以下、滞水)を検知する方法として、速中性子が熱中性子まで減衰される途中段階でも検出しやすくする効果を期待する中性子線の減速材の有無や厚さが検出精度に及ぼす影響を実験的に検討した結果を述べる。

物質中を拡散する間に原子核と衝突を繰り返してエネルギーを失い、最終的には分子の熱運動程度に減衰される。これを熱中性子と呼ぶ。速中性子のエネルギーを減衰させる割合は、水素原子が飛び抜けて高い。コンクリート材料においては、水素原子が主に水分として存在することから、速中性子の減衰割合とコンクリートの単位水量とを関係付けた測定技術に関する研究がみられた³⁾。

測定対象物質における速中性子の減衰割合を測定する方法には大別すると二種類があり、一つは物質中で減衰されずに透過してきた速中性子の割合を測定する透過型であり、もう一つは物質中で散乱・減衰されて中性子線源の側に戻ってきた熱中性子の割合を測定する散乱型である。散乱型の測定原理のイメージを図-1に示す。

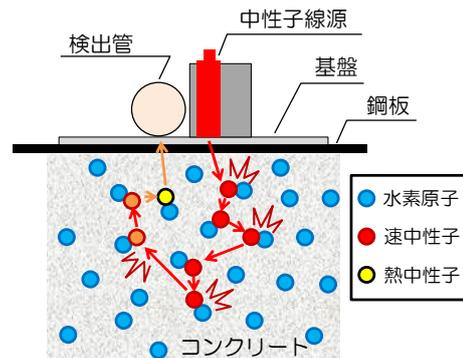


図-1 散乱型中性子線測定装置の測定イメージ

2. 散乱型中性子線測定装置の概要

2.1 測定原理

RI から放出される中性子線は、はじめ大きな運動エネルギーを有しており速中性子と呼ばれる。速中性子は、

2.2 測定装置の概要

本実験で用いる測定装置は散乱型 RI 測定装置である。アルミニウム基盤上に直径9mm×長さ36mmの金属に密閉された線源(カリフォルニウム ²⁵²Cf, 線源強度 0.92~

*1 愛知工業大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 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)

*3 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工学博士 (正会員)

0.95MBq) と検出管 (^3He 比例計数管, 直径 25mm×長さ 70mm) を並列に配置し, 周囲からの影響を抑制する目的で検出管に遮蔽材を巻き付けて測定面側に 2mm の空きを設けたものである。検出管はスケーラーに接続されており, 熱中性子が検出管に入ると電圧が脈動することから, 設定した閾値を超える電圧の脈動回数をスケーラーが RI カウント(cpm)として表示する。

測定装置の平面の配置を図-2 に示す。中性子線源と検出管は並列に配置し, 測定装置の平面的な中心は線源の中心位置とした。左右両側のマグネットベースは, 装置を鋼板に固定させるために設けた。測定装置の断面の概要を図-3 に示す。実験では減速材が無い場合(図-3 上段)と, ポリプロピレンの減速材を検出管又は線源の下(図-3 下段)および両側に設置する場合を設定した。

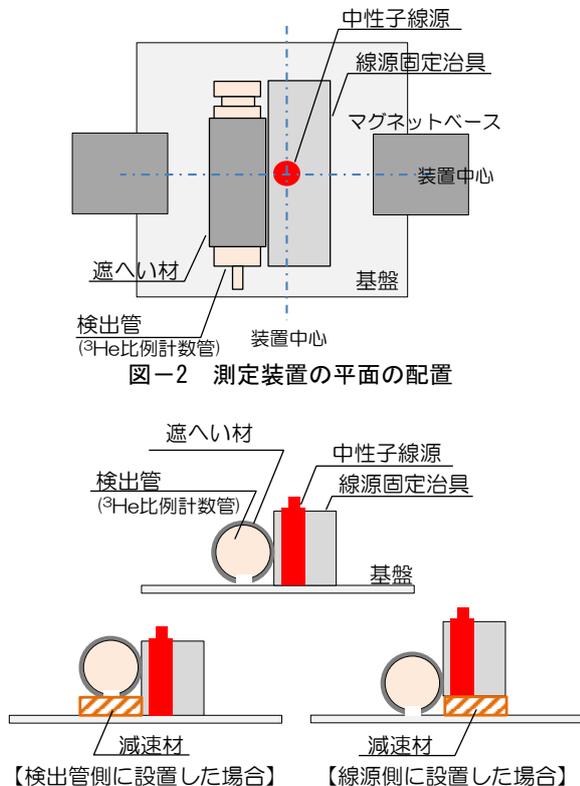


図-3 測定装置の断面の配置

3. 実験の概要

3.1 実験の因子と水準

測定装置の実験因子は中性子線の減速材の有無と減速材の位置, および減速材の厚さとした。実験因子と水準を表-1 に示す。

表-1 測定装置の実験因子と水準

実験因子	水準
減速材	有り, なし
減速材の位置	検出管側, 線源側, 両側
減速材の厚さ(mm)	2, 3, 5

試験体の実験因子は, コンクリートの状態, 空洞の大きさ(正方形の辺の長さ)と厚さおよび空洞の中身の種類とした。空洞の中身が空気の場合は, 発泡スチロールで代用した。実験因子と水準を表-2 に示す。

表-2 試験体の実験因子と水準

実験因子	水準
コンクリートの状態	フレッシュ, 硬化後
空洞の大きさ(mm)	0, 50, 100
空洞の厚さ(mm)	0, 5, 10, 20
空洞の中身	空気, 滞水

実験は二つのシリーズで実施した。シリーズ 1 では, 測定装置の減速材はなしとし, フレッシュコンクリートに空気の空洞を設けた場合と硬化後のコンクリートで空洞に滞水させた場合を測定した。シリーズ 2 では, 硬化後のコンクリートで 50mm 角と 100mm 角で厚さ 10mm の空洞(空気)に対して, 減速材の位置と厚さを変えた場合を測定した。実験の組合せを表-3 および表-4 に示す。

表-3 実験の組合せ (シリーズ 1: 空洞と滞水)

コンクリートの状態	空洞の中身	減速材: なし						
		空洞の大きさ0	空洞大きさ50mm			空洞大きさ100mm		
			厚さ5mm	厚さ10mm	厚さ20mm	厚さ5mm	厚さ10mm	厚さ20mm
フレッシュ	空気	○	○	○	○	○	○	
硬化後	滞水	○	○	○	○	○	○	

表-4 実験の組合せ (シリーズ 2: 減速材の位置と厚さ)

コンクリートの状態	空洞の中身	空洞の大きさ	減速材: 有り									
			検出管側			線源側			両側			
			厚さ2mm	厚さ3mm	厚さ5mm	厚さ2mm	厚さ3mm	厚さ5mm	厚さ2mm	厚さ3mm	厚さ5mm	
硬化後	空気	50mm	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		100mm	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

3.2 試験体の概要

試験体の大きさは幅 750mm×高さ 700mm×厚さ 300mm とした。測定面の鋼板は溶接構造用圧延鋼材で材質が SM400A, 厚さが 8mm のものを使用した。空洞を設けた試験体では, 測定面の中央に発泡スチロールを両面テープで貼り付けてコンクリートを打ち込んだ。

空洞を滞水させる試験体は, 硬化後に鋼製の型枠を取り外し, 空洞を模擬した発泡スチロールを取り除いた後で空洞部分に塗料を塗布し, コンクリート表面まで水を満たして測定面の鋼板を設置して測定に供した。

測定位置は空洞の中心から 25mm ずつの間隔とし, 測定装置を左から右へ順に移動させた。空洞を設けた試験体の概要, 滞水させた試験体の概要, 測定位置を各々図-4 から図-6 に示す。

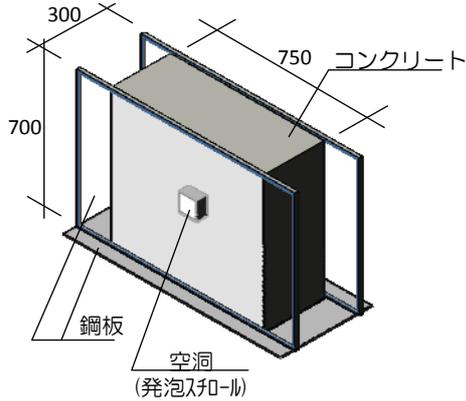


図-4 空洞を設けた試験体の概要

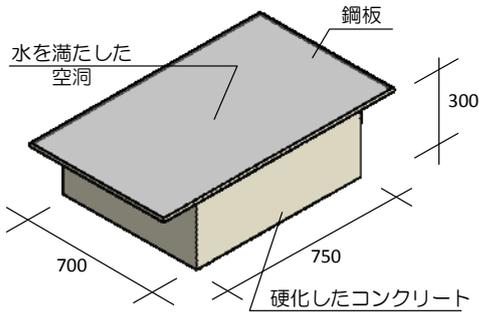


図-5 空洞に滞水させた試験体の概要

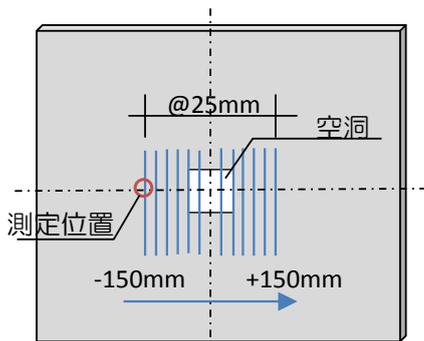


図-6 鋼板上の測定位置

3.3 コンクリートの材料と配(調)合

(1) コンクリートの材料

試験体に使用したコンクリートは、呼び名が 30-8-20N の生コンクリートとした。コンクリートの材料を表-5 に示す。なお、コンクリートを打ち込んでからフレッシュ状態での測定に時間を要することから、凝結遅延剤(ポリヒドロキシカルボン酸)をセメント量の 0.5% 添加した。

表-5 コンクリートの材料

種類	名称・産地	物性値
セメント	普通ポルトランド(T社)	密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
水	地下水	$1.00\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	山砂(愛知県豊田市)	表乾密度 $2.55\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率2.80
粗骨材	砕石(愛知県瀬戸市)	表乾密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ 、実積率59%
化学混和剤	AE減水剤(F社)	リグコンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩、密度 $1.10\text{g}/\text{cm}^3$

(2) コンクリートの配(調)合

30-8-20N のコンクリートの配(調)合を表-6 に示す。

表-6 コンクリートの配(調)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
50.0	44.7	166	332	780	1024	3.32

3.4 測定の手順と結果の整理

測定は、図-6 に示した測定位置と装置の中心を合わせてマグネットベースで固定したあと、1分間の測定を3回繰り返して行った。3回の測定値から平均値を算出し、これを1測定点での測定値とした。測定値の単位の cpm は、1分間に測定される熱中性子のカウント数を表す。なお測定範囲は、シリーズ1では $\pm 125\text{mm}$ を対象とした。

4. 実験結果

4.1 シリーズ1 (空洞と滞水の場合)

(1) フレッシュ状態の空洞の場合

空洞の大きさ 50mm 角について、空洞無し(0)・厚さ 5mm・10mm・20mm の場合の測定結果を図-7 に示す。図-7 では、空洞中心からの距離と測定した RI カウントの関係を示している。図中には空洞の範囲を枠で示した。

空洞無しでは全体の平均が 1156cpm で、測定値は $\pm 20\text{cpm}$ 程度の範囲で変動した。空洞を設置した場合は、測定値が空洞の影響を受けにくい両端の2点ずつの平均値を算出して両端の平均値に対する各測定値との差を比較した。空洞厚さ 5mm では測定値の最小値との差は 36cpm、厚さ 10mm では 30cpm、厚さ 20mm では 25cpm の差となり、空洞厚さによる違いはみられなかった。

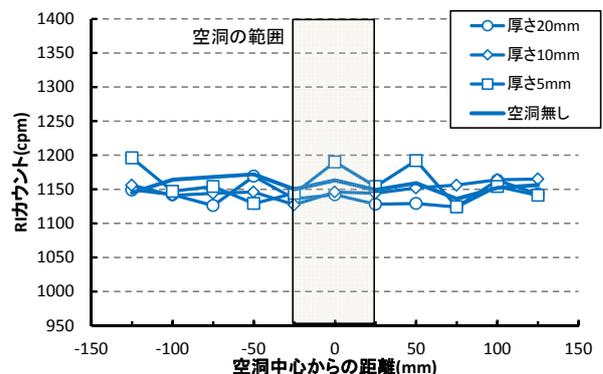


図-7 測定位置と RI カウント測定値の関係 (空洞(空気)大きさ 50mm の場合)

空洞の大きさ 100mm 角について、空洞無し(0)・厚さ 5mm・10mm・20mm の場合の測定結果を図-8 に示す。空洞無しの場合に比べると、空洞の大きさ 100mm 角

の場合の測定値が全体に低い。試験体の製作ロットの違いも考えられるが、後述するように値が異なる理由は明確には分からない。両端各2点の平均値に対する差を比較すると、空洞厚さ5mmでは測定値の最小値との差は29cpm、厚さ10mmでは36cpm、厚さ20mmでは77cpmとなり、空洞厚さが大きいほどRIカウンットの最小値との差は大きくなる傾向がある。

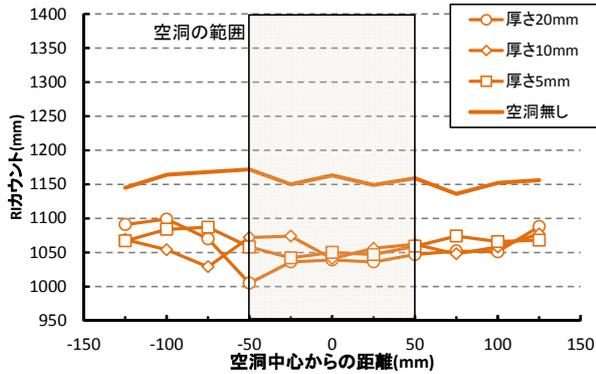


図-8 測定位置とRIカウンットの測定値の関係 (空洞(空気)大きさ100mmの場合)

(2) 硬化コンクリート中の滞水の場合

滞水の大きさ50mm角について、空洞無し(0)・厚さ5mm・10mm・20mmの場合の測定結果を図-9に示す。空洞無しでは全体の平均が993cpmで、測定値は±25cpm程度の範囲で変動した。滞水の場合は、測定値が滞水の影響を受けにくい左端2点と右端1点の平均値を算出してこの値に対する差を比較した。滞水の場合は空気の場合と異なり、RIカウンットは滞水付近で高くなった。これは、中性子線水分計と同じ原理で、水によって減衰された熱中性子が多いことを示している。空洞厚さ5mmでは測定値の最大値との差は42cpm、厚さ10mmでは81cpm、厚さ20mmでは155cpmとなり、空洞厚さと比例してRIカウンットの最大値は大きくなる傾向がある。空洞が空気の場合に比べると空洞厚さの影響は顕著にみられる。

滞水の大きさ100mm角について、空洞無し(0)・厚さ5mm・10mm・20mmの場合の測定結果を図-10に示す。

左側2点と右側1点の平均値に対する差を比較すると、空洞厚さ5mmでは測定値の最大値との差は47cpm、厚さ10mmでは118cpm、厚さ20mmでは459cpmとなり、空洞厚さが大きいほど50mm角の場合よりもRIカウンットの最大値は飛躍的に大きくなる傾向がある。

なお、図-9および図-10において、測定結果のグラフが左右対称とならないのは、線源と検出管を横並びとした装置の非対称性があるためである。

4.2 シリーズ2 (硬化後の空洞での減速材の違い)

(1) 空洞の大きさ50mm角の場合

空洞の大きさ50mm角(厚さ10mm)について、減速材

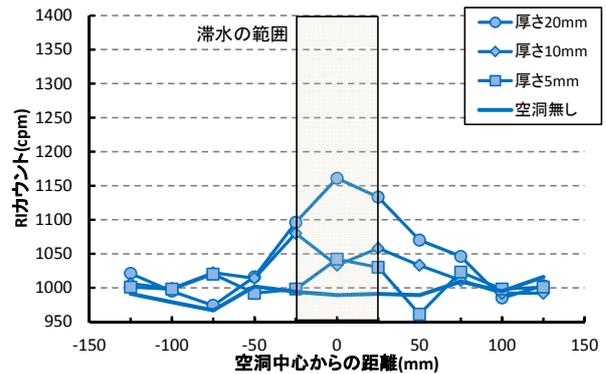


図-9 測定位置とRIカウンットの測定値の関係 (空洞(滞水)大きさ50mmの場合)

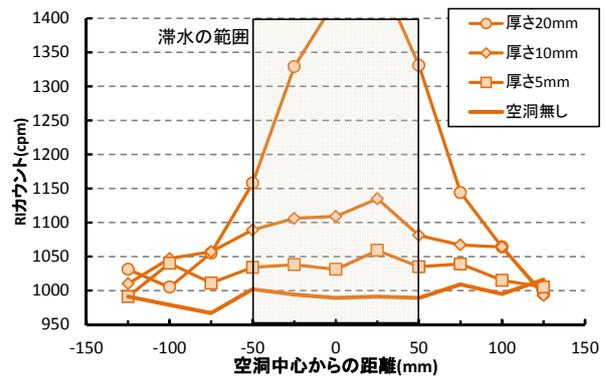


図-10 測定位置とRIカウンットの測定値の関係 (空洞(滞水)大きさ100mmの場合)

を検出管側に設置した場合と線源側に設置した場合および両側に設置した場合に、減速材の厚さ2mm・3mm・5mmの場合を比較した図を図-11に、両端各2点の平均値に対する最小値の差をまとめたものを表-7に示す。

減速材を検出管側に設置した場合には、最小値の差は13cpmから39cpmであり、測定値の変動を考慮するといずれの減速材の厚さでも違いは明確にはみられなかった。

減速材を線源側に設置した場合には、最小値の差は26cpmから34cpmであり、測定値の変動を考慮するといずれの減速材の厚さでも違いは明確にはみられなかった。

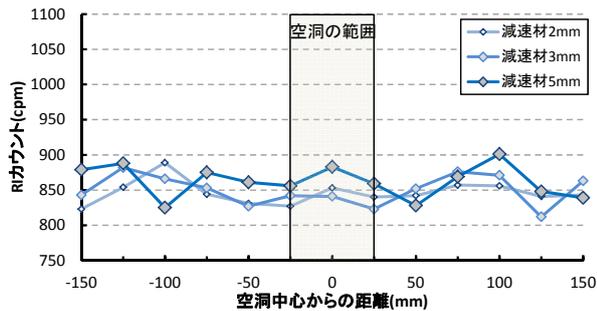
減速材を両側に設置した場合には、最小値の差は減速材厚さ3mmでは70cpmとなり、測定値の最小値の差が他の減速材厚さの場合よりも大きくなった。

線源側に厚さ3mmの減速材を設置した場合と両側に厚さ5mmの減速材を設置した場合は、他と比べるとRIカウンットが全体に高い。図-12でも同様であるため、装置中の配置を変えた影響か、測定周辺のバックグラウンドの影響などが考えられるが、明確な原因は分からない。

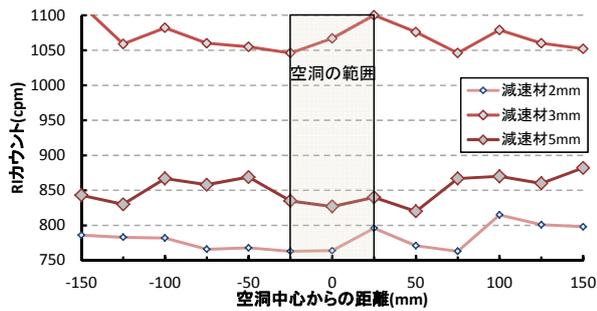
表-7 両端各2点の平均値と最小値の差(空洞50mm角)

減速材の位置	減速材2mm	減速材3mm	減速材5mm
検出管側	13	38	39
線源側	29	26	34
両側	26	70	35

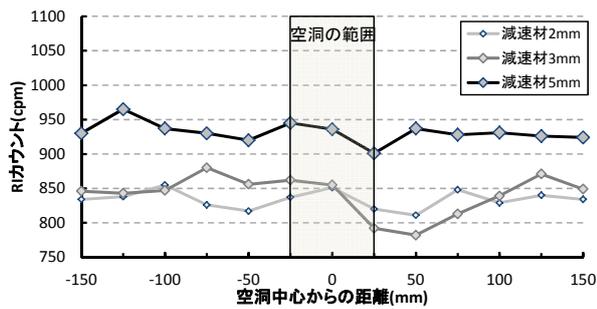
単位: cpm



(a) 減速材を検出管側に設置した場合



(b) 減速材を線源側に設置した場合



(c) 減速材を両側に設置した場合

図-11 測定位置とRI カウント測定値の関係
(硬化後：空洞大きさ 50mm の場合)

(2) 空洞の大きさ 100mm 角の場合

空洞の大きさ 100mm 角(厚さ 10mm)について、減速材を検出管側に設置した場合と線源側に設置した場合と両側に設置した場合に、減速材の厚さ 2mm・3mm・5mm の場合を比較した図を図-12 に、両端各 2 点の平均値に対する最小値の差をまとめたものを表-8 に示す。

減速材を検出管側に設置した場合、最小値の差は減速材厚さ 2mm では 47cpm となり、測定値の最小値の差が他の減速材厚さの場合よりも大きくなった。

減速材を線源側に設置した場合、最小値の差は減速材厚さ 2mm では 47cpm となり、測定値の最小値の差が他の減速材厚さの場合よりも大きくなった。

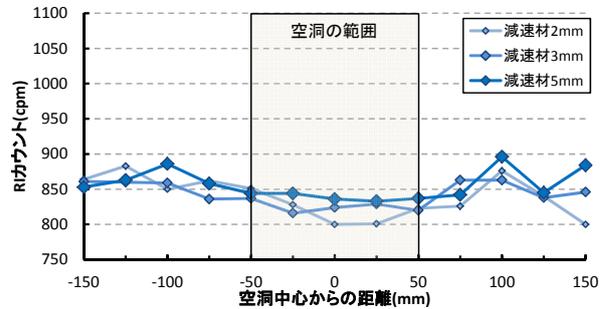
減速材を両側に設置した場合、最小値の差は減速材厚さ 3mm では 43cpm、厚さ 5mm では 56cpm となり、減速材厚さ 2mm の場合よりも大きくなった。

図-8 のフレッシュコンクリートの場合の空洞の厚さ 10mm における RI カウントの最小値の差が 36cpm であ

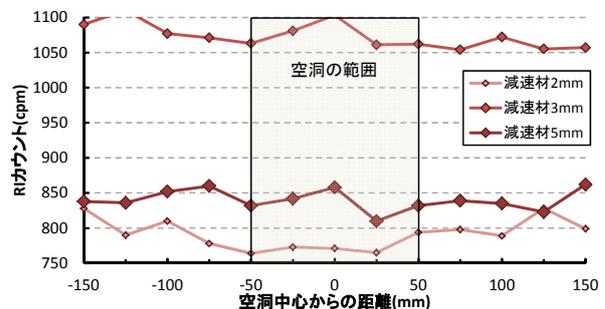
表-8 両端各 2 点の平均値と最小値の差(空洞 100mm 角)

減速材の位置	減速材2mm	減速材3mm	減速材5mm
検出管側	47	35	28
線源側	47	24	30
両側	34	43	56

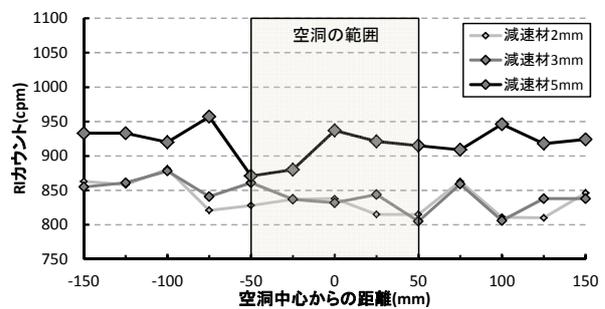
単位：cpm



(a) 減速材を検出管側に設置した場合



(b) 減速材を線源側に設置した場合



(c) 減速材を両側に設置した場合

図-12 測定位置とRI カウント測定値の関係
(硬化後：空洞大きさ 100mm の場合)

ったのに比べると、全体の RI カウントが低くても、硬化したコンクリートでも最小値の差が変わらないか減速材の設置によって差が若干大きくなるようである。

5. 空洞範囲での RI 変化量による比較検討

5.1 シリーズ 1 (空洞と滞水の場合)

RI カウントの測定結果のうち、両端の 2 点ずつの平均値(滞水の場合は左端 2 点と右端 1 点の平均値)を基準とし、空洞の範囲における RI カウントの変化量を算出して空洞の厚さとの関係を比較したものを図-13 に示す。平均値を上回る値を正、下回る値を負とした。

硬化後の滞水では、空洞の厚さが大きくなると RI カウ

ントの変化量は正の値で厚さの二乗に比例して大きな値となった。フレッシュの状態での空洞(空気)では滞水に比べると変化量が小さいが、大きさ 100mm 角の場合には空洞の厚さが 10mm から 20mm へ大きくなると RI カウント変化量は負の値で大きくなった。空洞(空気)と滞水とで傾向が大きく異なるのは中性子線が水素原子で減衰される作用による違いである。

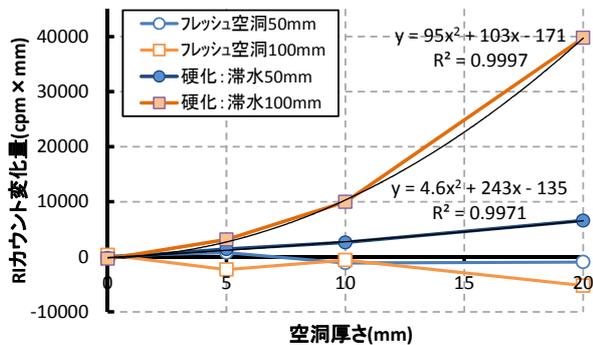


図-13 空洞厚さと RI カウント低下量の関係
(フレッシュ状態の空洞と硬化後の滞水の比較)

5.2 シリーズ 2 (硬化後の空洞での減速材の違い)

前項と同じく、空洞の範囲における RI カウントの変化量を算出して減速材の厚さとの関係を比較したものを、空洞の厚さが 10mm で大きさが 50mm 角の場合を図-14 に、100mm 角の場合を図-15 に示す。図中には、既往の実験⁴⁾のフレッシュ状態での空洞(空気)の場合の結果を併せて示した。

図-14 より、空洞の大きさが 50mm 角の場合、検出管側では既報⁴⁾と同じ傾向であったが、線源側では異なる傾向となった。厚さ 10mm で 50mm 角の空洞を検出するためには、減速材の設置位置および減速材の厚さの効果に関する再現性も含めてさらに検討する必要がある。

図-15 より、空洞の大きさが 100mm 角の場合、検出管側では既報⁴⁾に近い傾向となったが、線源側ではフレッシュ状態において減速材厚さ 3mm と 5mm では変化量が負の大きい値であるが、今回の結果では低下量がほとんどみられず異なる傾向となった。以上より、両側に減

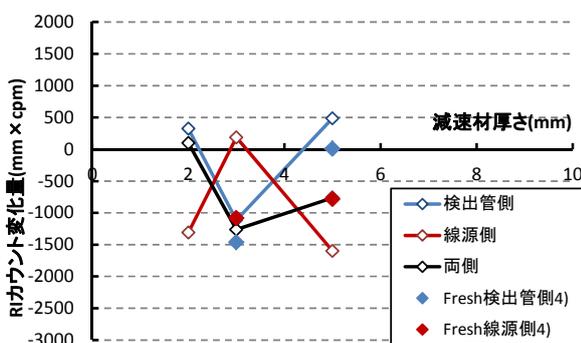


図-14 減速材の厚さと RI カウント低下量の関係
(硬化後の空洞：大きさ 50mm 角の場合)

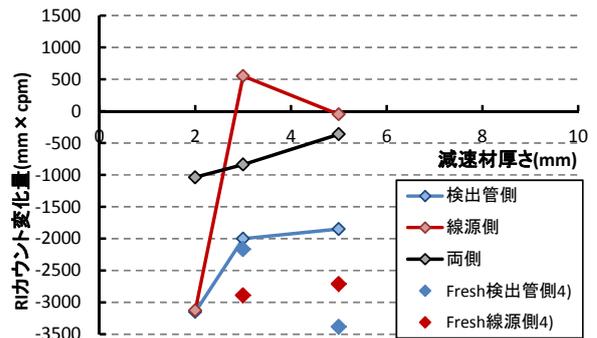


図-15 減速材の厚さと RI カウント低下量の関係
(硬化後の空洞：大きさ 100mm 角の場合)

速材を設置するよりも、検出管側に減速材を設置して厚さを 2mm~5mm とするとき RI カウントの変化量が負の大きい値となったが、今後も継続して再現性や精度に関する実験検証が必要と考える。

6. まとめ

今回の実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) フレッシュ状態の空洞の場合、50mm 角では RI カウントの最小値の差は空洞厚さによる差はないが、100mm 角では空洞厚さが大きいと最小値の差が大きくなる。硬化後の滞水の場合、50mm 角でも 100mm 角でも滞水厚さが大きいと RI カウントの最大値の差は大きくなる。
- (2) RI カウント変化量は、フレッシュ状態の空洞の場合に空洞厚さが大きいと負で大きくなるが、滞水の場合は空洞厚さの二乗に比例して正で大きくなった。
- (3) 減速材の効果は、今回の実験の範囲では 100mm 角の大きさにおいて、既往のデータも含めると検出管側に減速材を設置して厚さを 2mm~5mm とするとき RI カウントの低下量が大きくなる。

参考文献

- 1) たとえば、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) たとえば、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) たとえば、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、コンクリート工学、第 48 巻、11 号、pp.20-27、2010
- 4) 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論文報告集、pp.93-98、2018