

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04801

研究課題名(和文) 中性子線散乱減衰を原理とした鋼板内のコンクリート欠陥の新規評価手法に関する研究

研究課題名(英文) Study on a new evaluation method for detecting concrete defects from the steel plate side by the principle of radiation scattering attenuation

研究代表者

瀬古 繁喜 (SEKO, Shigeki)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：50507259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：1、測定装置の空隙検知性能の向上を目的として、簡易評価装置による実験では、ポリプロピレンの中性子線減速性能や、ホウ素含有ゴムによる熱中性子の吸収性能などが明らかとなった。この結果を反映した測定装置の実験では、RIカウンターの測定値の分布形状から、図形指数と空隙反応指数という指標を考案し、ポリプロピレンやホウ素含有ゴムを装着した装置によって空隙の有無および位置や空隙範囲の特定が容易となることが分かった。

2、合成床版の実大に近い模擬試験体を用いて実験的に検討を行った。空隙や鋼板上のリブではRIカウンターの低下が確認され、鉄筋やスタッドは、RIカウントに及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、合成構造の部材にコンクリート打込み中または硬化後に鋼材の外側から測定した熱中性子量(RIカウント)等と、発生する欠陥部の関係式の基礎を確立することを目的とした。中でも、速中性子のエネルギー減衰を制御して検出効率を高める減速材と、中性子線遮へい材で放出範囲を制御する手法が欠陥の検出性能に及ぼす影響を明らかにすることができたこと、実験で選定した減速材や遮へい材をRI線源の周りに設置することで測定対象に絞り込んだ速中性子の放出が精度を高められることを実験により明らかとできた効果は大きい。鋼材を通して、即時的にコンクリートの欠陥部の位置・大きさを判別できる検査技術を確立に向けて前進できた。

研究成果の概要(英文)：Using a radioisotope backscatter detector, the thermal neutron measurement results included the effect from the sides of the detector. To solve this problem, experimental tests were conducted. In the first, the characteristics of different moderators were investigated to choose the applicable material. In the second, when the selected moderator was attached to the void detecting system, tendency of radio-isotope count on mock specimen were examined experimentally. The experiments revealed that attached moderator to this device improves the void detection capability. In the composite structures, many steel stiffening members are attached inside of steel plates, which may be influencing factors during a nondestructive inspection. The effect of steel stiffening members inside composite slabs on RI counts was investigated, and steel rib plate influences the evaluation of the results decreasing RI counts as well as a void.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：コンクリート 空隙 中性子線 ラジオアイソトープ 遮蔽 集束 複合構造物 RIカウント

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼材とコンクリートの合成構造における充填欠陥の検出手法として、例えば合成床板における検査技術の研究として、弾性波を利用した方法では低周波成分を含む広帯域な音波を横波として伝搬させる手法があるが、周波数特性の解析が必要となり簡便な判別手法としては実用的とはいえない。また硬化後のコンクリートに赤外線サーモグラフィを用いた可視化手法があるが、コンクリート打込み時に適用するには所要時間が長い問題がある。本研究の優位性は、RI カウントの変化を利用した分かり易い評価法で、即時的に測定できる技術となる点である。一方で、速中性子が半径約 20cm まで到達するため小さな欠陥の測定精度には限界があった。

2. 研究の目的

本研究では、合成構造の部材にコンクリート打込み中または硬化後に鋼材の外側から測定した熱中性子量(RI カウント)等と、欠陥部の平面的な位置および奥行き方向の大きさを特定できる関係式の基礎を確立する。測定装置はエネルギーの高い速中性子を放出する RI 線源の隣に 2 本の検出管(測定対象で減衰された低エネルギーの熱中性子を測定)を配置した形を基本とする。現状では速中性子の影響範囲が大きいために例えば 50mm 角程度の欠陥の検出の精度は低い。本研究では速中性子のエネルギー減衰を制御して検出効率を高める可能性のある減速材と、RI 線源周囲に中性子線遮へい材を設置して放出範囲を制御する手法によって検出性能に及ぼす影響を明らかにすることを主眼とする。

3. 研究の方法

3.1 シリーズ 1: 減速材の性能評価実験の概要

(1) 実験装置

シリーズ 1 の実験装置を図 1 に示す。シリーズ 1 の実験では、減速材における中性子線「透過減衰(以下、透過)」、「散乱反射(以下、反射)」、「吸収」の作用を調べるための簡易的な実験装置を用いた。実験装置は、実験装置の下方に配置した中性子線源(カリホルニウム ^{252}Cf : 線源強度 0.6MBq、半減期 2.65 年)の上下に直径 25.4mm、長さ 157.4mm の ^3He 比例計数管を中性子検出管として設置した。フレームから吊り下げた上側の検出管の下面には、各種減速材を設置できる減速材ホルダーを設けた。上下の検出管の間には、RI カウントを増加させる目的で、幅 400mm×長さ 400mm×厚さ 40mm のコンクリート板(以下、中間板)を設置した。なお、断面寸法が 100mm×100mm の木材は、中間板を支える台である。実験は、減速材ホルダーに各種減速材を設置し、上下の各検出管で計数される RI カウントによって評価した。RI カウントは 3 分間連続測定し、1 分間を 3 回測定とした平均値を cpm (counts par minute) とした。

(2) 実験水準と使用材料

シリーズ 1 の実験では、検出管の大きさに合わせて幅 35mm×長さ 200mm とした各種減速材の厚さを変化させて、RI カウントを測定した。表 1 に示すように、減速材の種類は、エネルギー減衰の高いポリプロピレン($(\text{C}_3\text{H}_6)_n$ (以下、PP)およびポリエチレン($(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ (以下、PE)、熱中性子の吸収作用が期待できるホウ素原子を含む酸化ホウ素(B_2O_3)を 10%含有したポリエチレン樹脂(以下、BPE)、炭化ホウ素(B_4C)を 40%含有したシリコンゴム(以下、BR)と、純度 100%のカドミウム(以下、Cd)の 5 種類とし、減速材なしの場合も測定した。

3.2 シリーズ 2: 減速材を装着した測定装置の実験概要

(1) 測定装置

測定装置の概要を図 2 に示す。測定装置を構成する各部品に減速材を取り付けることから、外形寸法は、幅 200mm×長さ 200mm とし、測定装置の外縁には厚さ 30mm までの減速材を取り付ける構造とし、検出管および線源ケースは、厚さ 5mm の BR で覆うことができる構造とした。測定装置の中央には、中性子線源として、カリホルニウム ^{252}Cf (線源強度 0.52MBq) をステンレス製の線源ケース、または PP 製の線源ケースに入れて設置している。中性子線源は、検査対象面に近くなるように配置し、線源ケース下面から 7.5mm の位置より中性子線が出射される。従来測定装置と同様に、底板は厚さ 2mm のステンレス製の 2 重構造であり、その底板上に配置した検出管直下に、

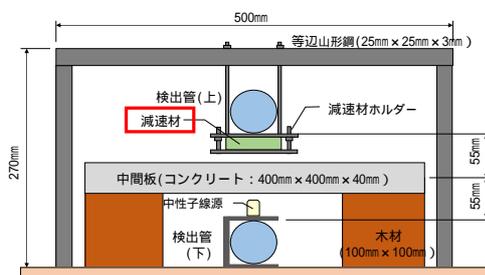


図 1 シリーズ 1 の実験装置の概要

表 1 シリーズ 1 の減速材の種類

番号	減速材種類	記号	厚さ (mm)	備考
1	なし	N	-	-
2	ポリプロピレン	PP	10, 20, 30	密度: 9.1g/cm ³
3	ポリエチレン	PE	10, 20	密度: 9.6g/cm ³
4	カドミウム	Cd	1, 5, 10	純度 100%
5	ホウ素樹脂	BPE	10, 20	B ₂ O ₃ : 10%含有
6	ホウ素ゴム	BR	5, 10	B ₄ C: 40%含有

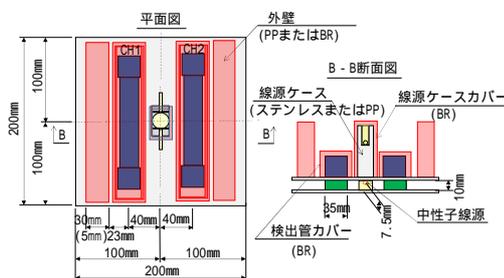


図 2 シリーズ 2 の測定装置の概要

に、底板は厚さ 2mm のステンレス製の 2 重構造であり、その底板上に配置した検出管直下に、

幅 35mm×長さ 200mm×厚さ 10mm の PP を減速材として設置している。

(2) 測定方法の概要

シリーズ 2 における測定装置の実験水準を表 2 に示す。測定装置に減速材を取り付ける部品は、図 2 に示すように、線源ケース、検出管および測定装置の外縁に設置する壁面（以下、外壁）とした。なお、線源ケースの材質は、従来の測定装置と同じステンレスの他に、厚さ 5mm の PP も使用した。線源ケースの PP は、熱中性子の量を増やすとともに、中性子線源下面以外の側面方向に出射する中性子線と水素原子を衝突させて、エネルギー減衰を大きく受けない状態で反射を多く発生させ、検査対象面に進む中性子線を増加させる目的としている。また、測定装置下面以外から検出管に入射する、測定に対して余分な熱中性子を計数させないことを目的として、線源ケースおよび検出管には、厚さ 5mm の BR をカバーとして設置した。

表 2 シリーズ 2 の測定装置の実験水準

番号	線源ケース	BRカバー		測定装置の外壁
		線源	検出管	
1	ステンレス	なし	なし	なし
2		なし	なし	BR(5mm)
3		なし	なし	PP(30mm)
4	PP	5mm	5mm	なし
5		なし	なし	なし
6		5mm	5mm	なし
7		5mm	5mm	BR(5mm)
8		5mm	5mm	PP(30mm)

実験で使用した試験体は、縦 700mm×横 750mm×厚さ 300mm の鋼コンクリート複合試験体とした。試験体の中央には、空隙に見立てた幅 100mm×長さ 100mm×厚さ 10mm の発泡スチロールが設置してあり、後半外側で中央ゼロに対して -175mm から +175mm の範囲を 5mm 刻みで、1 分間ずつ RI カウントを測定した。

3.3 シリーズ 3：模擬試験体における測定結果の評価に関する実験

(1) 測定装置

測定装置の概要を図 3 に示す。測定装置の外形は、厚さ 2mm のステンレス板を底板とし、幅 156mm×長さ 280mmH 形となっている。底板に設置した検出管直下には、幅 35mm×長さ 200mm×厚さ 10mm のポリプロピレンを減速材として配置した。測定装置の幅方向の中央には中性子線源としてカリホルニウム (^{252}Cf ：半減期 2.65 年：本実験での線源強度 0.36MBq から 0.39MBq) を配置した。検出管には厚さ 5mm のホウ素ゴムを被覆して側方から飛来する中性子線の影響を低減した。測定装置全体は厚さ 2mm のステンレス製のカバーで覆い、その内側の側面にも厚さ 5mm のホウ素ゴムを取り付けた。

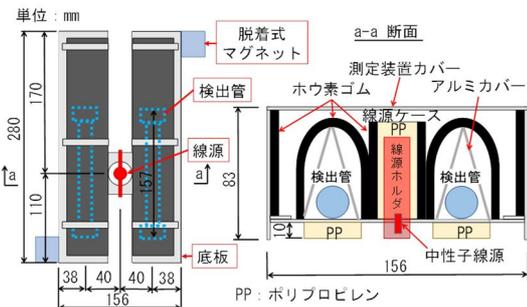


図 3 シリーズ 3 の測定装置の概要

(2) 測定方法の概要

実験で使用した試験体の概要を図 4 に示す。試験体は、ずれ止めとしてスタッドを用いて鋼板とコンクリートを一体化するロビンソン型の合成床版を参考に、幅 1.5m、長さ 1.5m、厚さ 8mm の鋼板上に空隙、リブ、スタッドを配置した形状とした。また、試験体の全厚さが所定の厚さとなるようにコンクリートを打込んだ。鉄筋は、上面のかぶり厚さ 40mm とし、D19 の主鉄筋を最大間隔 110mm で、D16 の配力鉄筋を最大間隔 200mm で、格子状に配置した。なお、鋼板の両面は無機ジンクリッチペイントを目標膜厚 30 μm で塗装した。

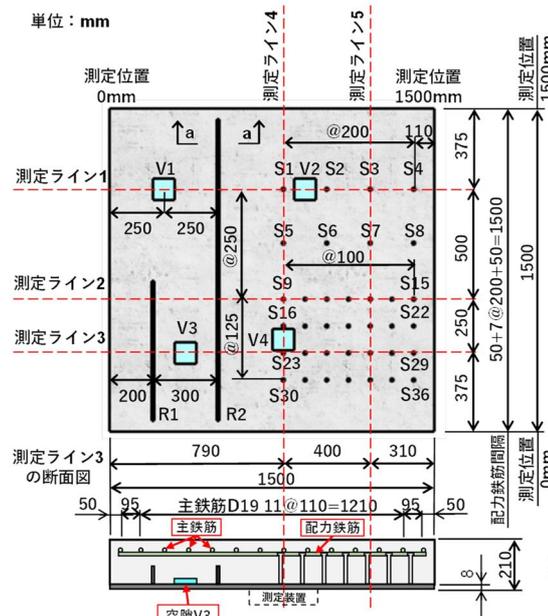


図 4 シリーズ 3 の模擬試験体の概要と測定ライン

図 4 には、実験で測定する測定ラインも示している。各測定ラインは、RI カウントが変化すると予想される空隙、リブやスタッドの間隔を変えた箇所とした。これらの測定ラインではフレッシュコンクリート時とコンクリートの硬化後に鋼板側から測定装置で RI カウントを測定した。

4. 研究成果

4.1 シリーズ 1：減速材の性能評価実験の結果

測定された値に対して、各減速材の反射作用および透過作用を考慮した場合の RI カウントを表 3 に示す。表 3 には、減速材なしの場合の RI カウントの合計値を基準とし、各減速材の RI

カウントから、減速材での反射、透過、吸収作用の減速材なしに対する割合も示した。なお、RI カウントの合計値が負の値となる場合は吸収作用とした。

PP と PE は、減速材の厚さを大きくすると RI カウントも増加し、20mm までの厚さに対しては、材質によらず合計値は同程度であった。しかし、反射と透過の割合が異なり、PP は PE と比較して反射が多く、透過が少ない結果となった。反射による遮蔽効果は PP が有利と考えられ、PP の厚さを大きくすることにより、より高い遮蔽効果が得られると考えられる。

Cd は反射も透過も RI カウントがマイナスを示し、熱中性子を全体的に吸収していることを示している。Cd は 1mm 程度の厚さがあれば十分な遮蔽効果が期待できると考えられる。

ホウ素を含有している BPE については、厚さ 10mm の場合は若干熱中性子が透過する傾向を示しているが、材料特性としては熱中性子の吸収性能を示している。厚さを 20mm とすると、反射の RI カウントが大きく増加し、透過の RI カウントの減少も大きくなった。BPE は、反射成分が増加して透過成分は減少しているため、遮蔽効果が高い減速材であると考えられる。

同じくホウ素を含有する BR では、厚さが 5mm では反射も透過も RI カウントが減少している。厚さを 10mm としても反射の RI カウントの増加が BPE より少なく、透過の RI カウントが大きく減少する結果となった。このため、熱中性子の遮蔽は、BPE より BR のほうが、小さい厚さで高い効果を得ることができると考えられる。

4.2 シリーズ2：減速材をすべて装着した測定装置の実験結果

(1) 線源ケースがステンレスの場合

水準 5 に外壁として BR を追加した水準 7 の空隙影響範囲外における RI カウントは、水準 5 に対して 10% 程度減少した。このことから、線源ケースをステンレスから PP に変えた場合においても、測定装置の側方から飛来してくる熱中性子がある程度存在しており、その影響を抑制していることがわかる。また、測定装置の外壁を PP とした水準 8 では、RI カウントが 3% 程度しか増加せず、測定装置の側方から飛来する熱中性子が遮蔽出来おり、透過の熱中性子は検出管の BR カバーが吸収していることを示している。

図 5 には、全ての減速材を測定装置の部品に使用した水準 7 と水準 8 の場合の RI カウントの増減割合および、その変化の区分を示した。RI カウントの増減割合のグラフの形状は、測定位置 0mm に対して、概ね左右対称にプロットされている。また、空隙範囲で RI カウントの増減割合は、平坦に近くなり、空隙位置と範囲をより明確に示している。このときの RI カウントの増減割合は、測定点 -150mm の位置から、減少→増減均衡→増加の経路をたどり、空隙が検知しやすくなっているといえる。

(3) 減速材等の測定結果への効果の評価

測定装置から得られる RI カウントは、RI カウントの増減割合で示されるグラフの凸形状によって空隙の認識状態が変わるため、空隙の検知性能について、グラフの図形形状と空隙に対する測定装置の反応を定量的に評価しようとした。ここでは、図形指数と空隙反応指数を定義し、測定装置の遮蔽およびコリメートに対する効果について評価することを試みた。図 6 には、水準 2 と水準 6 を例に、RI カウントの増減割合から描かれるグラフの図形形状のイメージを示す。図 6 の図形は、RI カウントの減少区間の始終点をプロットしたものであり、横軸との交角を 1 および 2、それぞれの近似直線との交角を 1 および 2 としている。空隙範囲の RI カウントの変化が少なく、空隙範囲を示す測定位

表 3 RI カウントの測定結果と各種作用の算定

種類	減速材 厚さ (mm)	減速材の RI カウント (cpm)			反射率 (%)	透過率 (%)	吸収率 (%)
		反射 (RI_{ref})	透過 (RI_{tr})	合計			
PP	10	206	26	232	13.0	1.64	0.00
	20	523	271	794	32.9	17.1	0.00
	30	996	283	1279	62.7	17.8	0.00
PE	10	86	153	239	5.42	9.63	0.00
	20	461	336	797	29.0	21.2	0.00
	30	996	283	1279	62.7	17.8	0.00
Cd	1	-78	-82	-160	0.00	0.00	10.1
	5	-160	-47	-207	0.00	0.00	13.0
	10	-78	-118	-196	0.00	0.00	12.3
BPE	10	-140	82	-58	0.00	5.16	3.65
	20	284	-154	130	17.9	0.00	0.00
BR	5	-115	-90	-205	0.00	0.00	12.9
	10	62	-222	-160	3.90	0.00	10.1

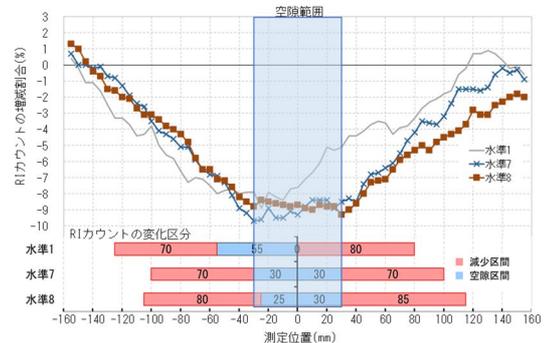


図 5 すべての減速材を用いた場合の増減割合

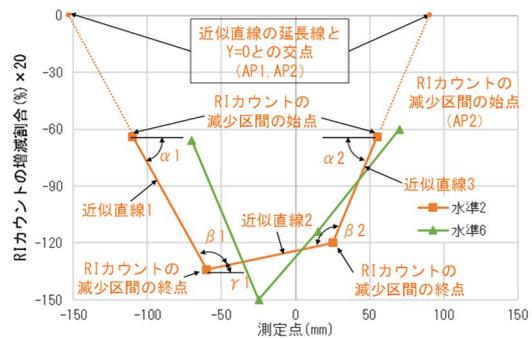


図 6 測定結果のグラフの図形形状のイメージ

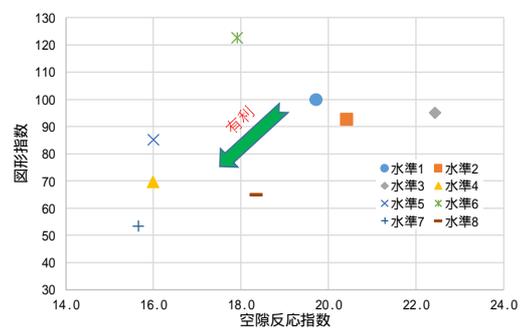


図 7 空隙反応指数と図形指数による評価

図 7 空隙反応指数と図形指数による評価

置がより空隙に近いほど、空隙の範囲や空隙の位置を判定しやすくなる。

図7では、各水準に対する図形指数と空隙反応指数を示している。この図では、左下にプロットされるほど空隙が検知しやすい状態になる。図7より、水準7が最も遮蔽およびコリメートによる空隙検知性能が高く、次いで水準4、水準5および水準8の順であることが分かった。

4.3 シリーズ3：模擬試験体における測定結果の評価に関する結果

(1) 測定ライン1から4でのRIカウントの増減割合

試験体のRIカウントの測定結果から、空隙とリブではRIカウントの減少が大きく、スタッドと鉄筋の場所ではRIカウントの変化が小さいことから、スタッドと鉄筋は測定結果に影響しないと考えられる。RIカウントの増減割合で評価する場合の基準値はRIカウントの変化が少ない測定箇所のRIカウントを使用する必要がある。そこで、空隙を配置していない場所のRIカウントとスタッドの配置区間をRIカウントの増減割合の基準値として実験結果を整理した。

測定ライン1から4のRIカウントの結果を、RIカウントの増減割合として求めて図8に示す。今回設定した基準値から得られる各測定ラインのリブR2は、RIカウントの減少割合が、-9%から-10%と類似している。また、V2とV4の空隙も-12%から-13%と大差ないため、基準とした範囲の場所および長さは、各測定ラインで異なるが、概ねコンクリートのみを測定した場合のRIカウントに近いと考えて差し支えない。空隙とリブの位置は、RIカウントの増減割合の極小値の位置で概ね示される。ただし、効率よく検査を行うためには、リブと空隙の区別が直ちにできることが望ましく、リブに近接する空隙の区別については、今後の検討課題である。

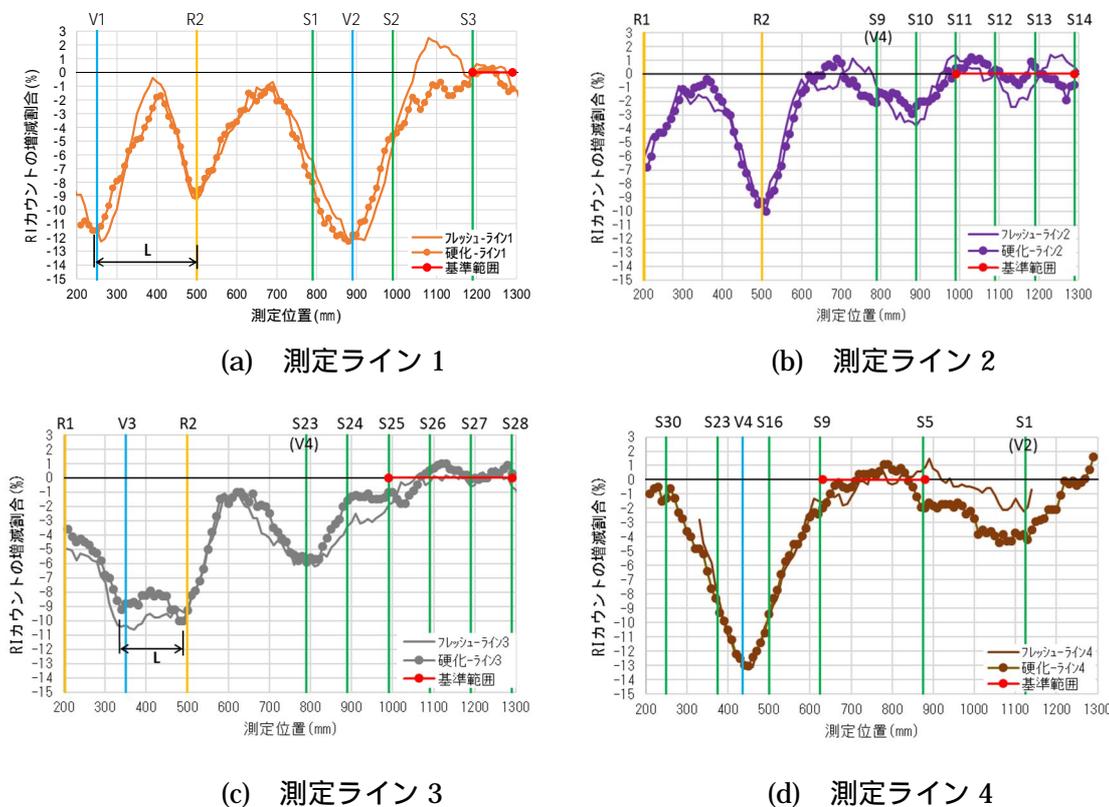


図8 各測定ラインのRIカウントの増減割合

(2) 空隙の中心と測定装置の測定位置の離れの影響

図8の測定ライン2、3、4のスタッド区間にあるRIカウントの窪みは、極小値は異なる空隙の傾向を示している。空隙中心から測定ラインまでの離れ量は、測定ライン4のV4が0mm、測定ライン3のV4が62.5mm、測定ライン4のV2が100mmとなっている。そこで、空隙のRIカウントが-3%を超えるもので整理し、縦軸を20倍とした簡易図形を図9に示す。空隙位置が離れるにつれて、底辺の幅が広がり台形形状が崩れていくように見える。図9には、空隙の台形を構成する底辺の2点のRIカウントの減少割合と空隙中心から測定装置までの離れ量で整理した結果も示しているが、RIカウントの減少割合と離れ量の関係は、2次曲線で近似できた。

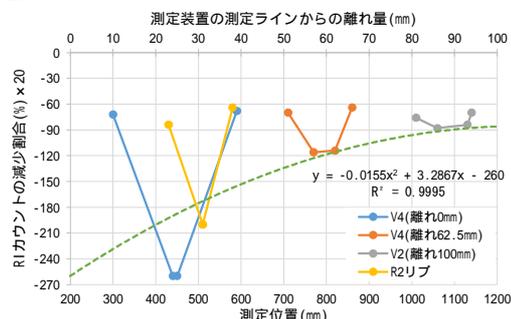


図9 測定装置の離れ量とRIカウントの減少割合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 神頭 峰磯, 瀬古 繁喜, 池永 太一	4. 巻 68A
2. 論文標題 中性子線の遮蔽材料が散乱型RI測定装置の検出特性に及ぼす影響に関する実験的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 825-835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.68A.825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 神頭 峰磯, 瀬古 繁喜, 池永 太一	4. 巻 67A
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 687-696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.67A.687	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 瀬古 繁喜, 神頭 峰磯, 池永 太一
2. 発表標題 鋼板内側に空隙を設けた模擬試験体における散乱型RI測定装置を用いた空隙の検出に関する実験的検討（その2：フレッシュコンクリートと硬化コンクリートでの異なる大きさの空隙の測定結果）
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神頭 峰磯, 瀬古 繁喜, 池永 太一, 菱川水裕, 山田和夫
2. 発表標題 散乱型RI測定装置におけるエネルギー減速材が熱中性子の増減に及ぼす影響（その2：減速材を複合にした場合のRIカウントの変化）
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	池永 太一 (IKENAGA Taichi)		
研究協力者	神頭 峰磯 (KOZU Mineki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------