

論文 中性子イメージングによる厚さ 5cm のコンクリート供試体に浸透する水の非破壊定量手法の検討

吉村 雄一*1・水田 真紀*2・大竹 淑恵*3・林崎 規託*4

要旨：コンクリートへの水の浸透、水の存在は構造物の劣化進行に影響し、水の浸透は構造物の耐久性を左右するため、コンクリート内部における水の動きを定量する非破壊手法の開発は重要である。我々は小型加速器を駆動して発生させた中性子線をコンクリートに照射して透過像を取得するイメージングを行い、コンクリートの吸水量（秤量値）と透過像が示す水分量の関係性を評価した。その結果、中性子透過率と吸水量の間には高い相関があることを明らかにし、厚さ 5cm のコンクリートへの水の浸透を非破壊で定量評価できる手法を提案した。

キーワード：水、中性子、イメージング、非破壊方法、定量評価

1. はじめに

塩害や凍害、中性化といった劣化において水の浸透に対するコンクリートの抵抗性は構造物の耐久性を評価する上で重要な因子となり得る。例えば、沿岸部の橋梁では水面下の橋脚部に比べて浸水していない上部工（桁や床版）において塩害による鉄筋腐食の進行が早いこと¹⁾や、中性化において水がかりのない場合に短期間で腐食が開始する一方、その後にひび割れ発生に至る過程では水がかりのある場合に劣化がより進展する²⁾との報告がある。外部環境から影響される乾湿繰返しや浸水といった、コンクリート内部の含水状態の変動が構造物全体の劣化の進行に与える影響が大きいと考えられることからコンクリート内の水の動きを定量的に評価する手法の開発は重要である。

中性子線はケイ素や鉄、鉛といった重元素を透過する性質と、水素やリチウム、ホウ素などの軽元素に強く反応する非透過性を示す粒子線としてコンクリートや金属材料内の水の可視化に適したプローブであり、従来からプラントの配管内部や地盤の水分検知に利用されてきた。中性子を発生する線源として大型の加速器や原子炉、放射性同位体などが主であるが小型加速器を利用した中性子源の設計・開発が近年行われ、国内における中性子の利用機会は今後拡大する状況にある。2013年に理化学研究所で稼働を開始した理研小型中性子源 RANS³⁾においてはコンクリートの床版検査に応用して土砂化のような表層下で進行する劣化状況を観察する反射イメージング技術⁴⁾やコンクリート中の塩分を非破壊で検出する中性子捕獲即発ガンマ線分析⁵⁾など小型中性子源によるコン

クリート検査技術の開発が行われている。

我々は多種のコンクリートに関するデータを蓄積できる環境を提供し、手法の最適化、高度化に対応できる小型中性子源の優れたアクセシビリティに着目した。そして、これまでに小型中性子源を利用した中性子イメージングによるコンクリートの水測定方法を検討し⁶⁾、アルカリシリカ反応を有する供試体における劣化度と水の浸透の関係について評価⁷⁾を行ってきた。その中で厚さ 5cm の供試体に対して、吸水した質量と中性子透過像から導出した水分量を比較して、中性子イメージング法が水の浸透を経時観察できる手法であることを確認した。しかし、限定した配合での結果であり、異なる配合を持つ試料評価への適用可否について不明であったため、本報告では水セメント比の異なる供試体について評価を行い、その可能性を検討した。

2. 小型加速器中性子源による中性子イメージング

図-1 に小型中性子源を利用した中性子イメージングの概要を示す。水素イオン源で発生したパルス陽子線（繰返し周波数 100Hz、パルス幅 60 μ s）が線形加速器を通じてエネルギー 7MeV まで加速され、ベリリウムターゲットに衝突して中性子が発生する。その後、ターゲット直後に配置したポリエチレンモデレータを通じてエネルギー \sim meV の熱中性子と MeV 領域の高速中性子をスペクトルに持つ中性子線となり、導管を通じて外部に出力される³⁾。中性子線を射出口前に配置されたコンクリート供試体（寸法：70 \times 70 \times 50mm）に入射し、コンクリートを透過した熱中性子がイメージング検出器（検出面 9 インチ

*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 融合理工学系 原子核工学コース 博士後期課程（正会員）

*2 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 工博（正会員）

*3 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 理博

*4 東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 工博

Gd タイプ中性子イメージインテンシファイア⁸⁾ 内部で可視光に変換され、CCD カメラによって撮像される。供試体に入射した中性子は透過方向に存在する元素の種類やその量によって透過度が変化することから、中性子イメージングによって供試体内部の材料分布が可視化される。

中性子イメージングをコンクリートに対して実施するとケイ素やカルシウム等の元素からなる骨材は中性子線に対する反応が小さく透明に映る。一方、水を多く含むセメント水和物や外部から浸透した水は中性子が散乱されて透過像に強く陰影がつくことからコンクリート内の水の分布が可視化される。透過方向に存在する水の多少が影の濃さとなって現れるため、透過度から含水量の評価が可能になる。また、同一供試体の透過像を異なる含水状態で撮影して画像間の差分を導出すると骨材やセメントペーストなどの状態間で変化の小さい因子がキャンセルされて、移動した水の分布がイメージとして抽出される。中性子イメージングが示すこれらの特性を利

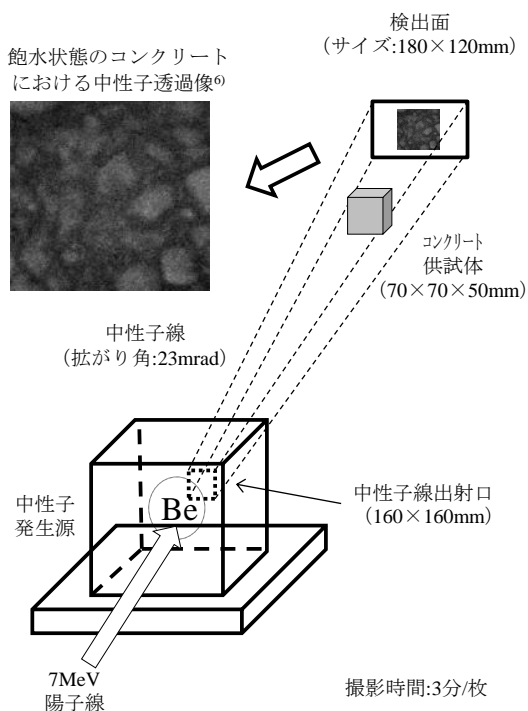


図-1 小型加速器中性子源 RANS による中性子イメージング

用して厚さ 5cm のコンクリートに浸透する水の定量について検討を行った。

3. コンクリートに浸透する水の定量手法の提案

3.1 γ 線による透過率への影響

中性子イメージングを行う環境下では中性子発生源(ターゲットやモデレータ)や周辺の設置物から放射化

により発生した γ 線や室内で散乱される中性子線がバックグラウンドとして透過する中性子線に混在して検出器に到達する。本評価で検出器として使用した 9 インチ Gd タイプ中性子イメージインテンシファイアは γ 線シンチレータの材料であるヨウ化セシウムがコンバータの一部に使用されており、 γ 線にも感度を示す。 γ 線は軽元素に対する相互作用が微弱であり水を透過することからバックグラウンドとして透過像に映りこみ、結果、水に対するコントラストが低下する。したがって、 γ 線成分を除去することができれば、より厚いコンクリートに浸透する水を定量評価できると考えられる。そこで中性子線と γ 線が検出器に到達する時間差を利用して検出器の動作タイミングを制御し、中性子発生源に由来する γ 線成分

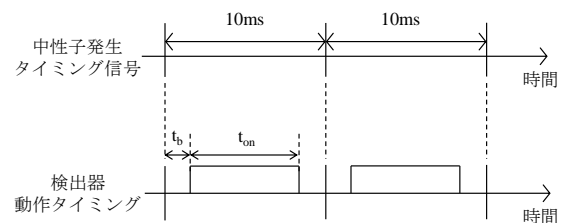


図-2 イメージング検出器の動作タイミング

の除去を実施した。図-2 にイメージングにおける検出器の動作タイミングについて示す。

熱中性子が発生するポリエチレンモデレータからイメージングに利用する検出器までの距離は 3.6m であり、熱中性子(エネルギー: 25meV)の速度 $2.2 \times 10^3 \text{m/s}$ と γ 線の速度 $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ (光速) から検出器に到達する時間は熱中性子で 1.6ms、 γ 線は 12ns となる。そこで、中性子の発生タイミングを基準として一定時間遅延したタイミング(遅延時間: t_b とする)からイメージングを開始するブランキング動作を行った。遅延時間 t_b は熱中性子の到達時間 1.6ms を考慮して中性子発生時から 1ms 以下の範囲で調整し、パルス出力される中性子の繰返し周期が 10ms であることから後続パルスの検出を避けるよう遅延時間 t_b と動作時間 t_{on} の合計を常に 8ms と設定した。試料には熱中性子の反応断面積(透過度)が水と近似するアクリル⁹⁾を使用し、中性子透過方向の厚さが階段状に変化するステップ形状の試料を用意して透過像の撮影を行った。

図-3 にブランキング動作を行って評価したアクリルステップの透過率を示す。縦軸に透過率、横軸にアクリルステップの厚さをプロットして片対数グラフに示した。ブランキング動作の有無に拘わらず、アクリルの厚さが増加するにつれて透過率が低下し、厚さ 6mm を超えたあたりからその傾きが緩やかになる。また、ブランキン

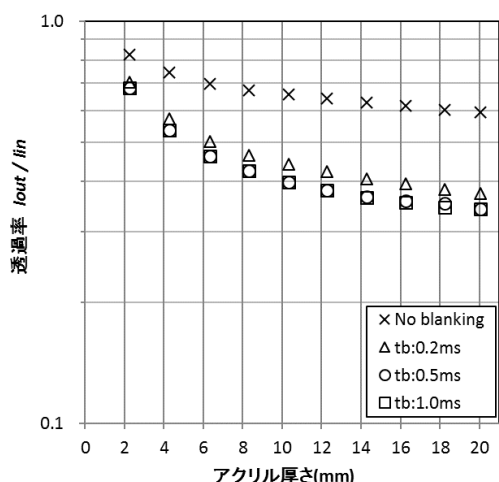


図-3 ブランキング動作時のアクリルステップ
に対する透過率の比較

グ動作を行わない場合にアクリル厚さ 20mm における透過率は約 60%であることに對し、ブランキング動作時の透過率は 34~41%程度であり、遅延時間によっても透過率が 7%弱異なる結果が示されている。以上の検討から、アクリルステップの透過率評価において γ 線がバックグラウンドとして寄与する影響が大きいことが明らかになり、ブランキング動作を行うことで、水量の増分に対応する中性子透過率の差をより大きく捉えられることがわかった。

3.2 厚みのあるコンクリートに浸透する水の定量方法

中性子イメージングによって可視化される成分の定量を行うにあたって以下 2 つの方法が挙げられる。1 つは定量対象とする成分について段階的に厚さを変化させた標準のスケールとして透過像を撮影し、試料とスケールの透過率を比較して定量を行う方法である。この方法は水で作製したスケールとコンクリートの透過率の比較から水分量を導出することに対応する。もう 1 つは、成分量の異なる 2 状態の試料の透過率とその際に別手法で計量した成分量の関係を検量線として定量を行う方法である。これは乾燥・湿潤状態のコンクリートの透過率と秤量した含水量の関係を利用して定量を行うことに該当する。ただし、いずれの手法を利用するにしても、成分量の増加に対して透過率が一様に低下する検量線が要求されるため、これを満足する条件が定量可能な試料の厚さ

を制限している。

そこで本評価ではコンクリートが吸水によって変化する透過率を、スケールとするアクリルステップの透過率と対応させることで厚さ 5cm のコンクリートに浸透する水を定量する可能性を検討した。セメントすべてが水和反応に使用する水量は一般的にセメント質量の 30%程度であると言われていることから、今回使用した単位セメント量 (表-1) では、厚さ 5cm のコンクリートの 5~7mm に相当する部分は乾燥状態に含まれている水になる。そこで厚さ 6mm のアクリルステップの透過率を起点として、最小二乗法で線形近似した場合に最も相関係数 R^2 の高いブランキング動作を厚さ 5cm のコンクリートにおける水の定量評価に適した測定条件であると仮定し、遅延時間 $t_b=0.2ms$ 、駆動時間 $t_{on}=7.8ms$ ($R^2=0.9816$) を設定した中性子イメージングを 6 日間の吸水試験において実施し、供試体に浸透する水の量を試みた。

4. 吸水試験における水の浸透性状評価

4.1 コンクリートの配合および吸水試験

本評価で使用したコンクリートの配合について表-1 に示す。水セメント比 42%の PC シリーズ (供試体名:PC-1, 2) と 60%の RC シリーズ (供試体名:RC-1, 2) があり、打設後 30 日間水中養生した後に常温にて保管を行った。セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。寸法が 100×100×400mm の供試体全ての面を 15mm 程度切り取ったブロックから打設方向に幅 50mm 程度に切り出し、70×70×50mm の供試体を各シリーズから 2 個ずつ用意した。供試体は 50℃の炉で乾燥させて質量が変化しなくなった状態を作り出して吸水試験を開始した。はじめに、吸水前 (乾燥状態) のコンクリートの透過像を撮影し、その後アルミ容器内に敷いたアルミ角棒上に供試体を配置し、下部 2mm が浸水する程度に容器内に水を張って上向き吸水を開始した。なお、ブリーディングによる影響を避けるため、打設面を全てにおいて上面とした。撮影時は供試体を容器から取り出して計量し、中性子線の照射位置にセットして 3 分間の中性子イメージングを実施しその後、再び容器内に戻して吸水試験を再開した。上記の作業を繰り返すことで吸水試験における水の浸透を測定した。

表-1 コンクリートの配合

名称	W/C (%)	空気量 (%)	骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (g/m ³)	AE 助剤 (g/m ³)
					W	C	S	G		
PC シリーズ	42	4.0	15	48	184	438	743	869	1095	1752
RC シリーズ	60	4.0	15	51	189	315	891	866	787	1259

圧縮強度 : PC シリーズ=44.5N/mm² (材齢 3 週間), RC シリーズ=33.1 N/mm² (材齢 2 週間)

4.2 浸透する水の透過像とその定量性

図-4 に浸透する水の透過像の導出工程について示す。中性子イメージングによって得られたコンクリートの透過像に対してノイズ処理やシェーディング補正、画素結合による空間誤差の低減⁶⁾を行って、透過率画像(解像度:2.25mm,空間誤差<1%)を作成した。そして、任意時間吸水させた時のコンクリートの透過率画像 $I_{t=t}$ ($t(h)$ は任意)を乾燥時の画像 $I_{t=0}$ で除した差分画像の対数として水の透過像 ΔT を出力した。

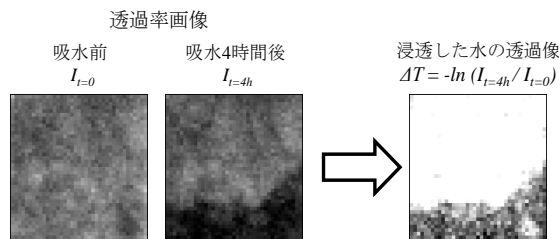


図-4 浸透する水の透過像の導出例

3.2 節で述べた通り、5cm 厚さのコンクリートの透過率変化について厚さ 6mm を起点としたアクリルステップの透過率の関係と対応させることで、水の透過像 ΔT は、

$$\Delta T = -\ln(I_t/I_{t=0}) = a_w d_w \quad (1)$$

として、一定の a_w (単位長当りの水の減衰係数) に従って透過方向に存在する水の厚さ d_w に比例する関係となり、全画素にわたる ΔT の総和と透過像の総面積との積 (W_{image} とする) が吸水量に相当する。図-5 に供試体 4 種について吸水試験で評価した W_{image} と秤量した吸水量の関係を示す。吸水量と水の透過像が示す W_{image} との間に強い相関 ($R^2=0.9908$ (PC-1), 0.9878 (PC-2), 0.9934 (RC-1), 0.9923 (RC-2)) が得られており、5cm 厚さのコンクリートに浸透する水の透過像が定量性を有していることが確認できる。6 日間の吸水試験において供試体 4 種の吸水量は最大で 30g 弱であり、水の透過像においてすべての供試体で上面まで水が浸透していた。これは、供試体の吸水面から上面まで水が均一に浸透したと考えれば、コンクリートの面積 (70×70mm) で吸水分の体積を割ると平均約 6mm 厚の水が透過方向に対して分布していることになる。つまり、3.2 節に示した乾燥状態のコンクリート中に存在する水の厚さ 7mm 程度から吸水による厚さ 6mm を加えた約 13mm の厚さまでの透過率変化がアクリルステップの厚さ 7mm 以上における線形な透過率変化と対応した結果、定量性が得られたものと考えられる。骨材の不均一な分布、空隙やひび割れによって透過方向に存在する水の厚さが場所ごとにバラつき、定量性を損なうことが想定されたが本評価においてはアクリルステップに対する透過率から得られた測定条件 (中性子イメ

ージング検出器の動作タイミング: 遅延時間 $t_b=0.2ms$, 駆動時間 $t_{on}=7.8ms$) の下、定量性を維持できることを確認した。これは、供試体厚さを粗骨材の最大寸法 2 倍強の厚さにしたことで中性子透過方向の水分布の均一性を確保できたことと、ミクロスケールでの不均一な水の分布が透過率画像の解像度 2.25mm にわたって平均化されていることがその理由として考えられる。

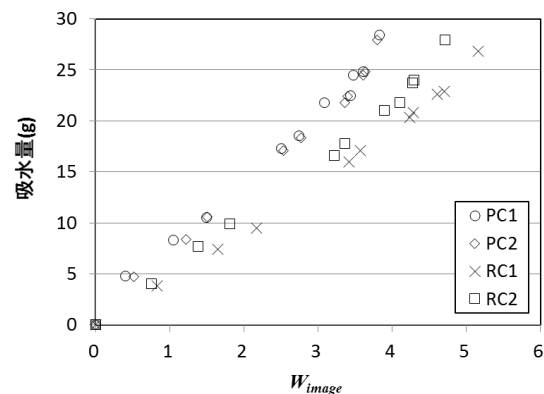


図-5 水の透過像が示す吸水量に対応する W_{image} と実際の吸水量の関係

一供試体内での材料的なバラつきを考慮して 2 種の水セメント比につき各々 2 個ずつ評価したが、図-5 に示すように PC, RC シリーズ共に吸水量に対応して W_{image} が同等の傾きで推移しており、同配合の供試体は定量性に関してバラつきは小さい結果となっている。しかし、2 種の水セメント比を比較すると同様の傾きを示さない為、 W_{image} から異なる水セメント比の供試体を定量するためには更なる補正が必要であることがわかった。同じ吸水量であっても低水セメント比の PC シリーズが RC に比べて W_{image} (すなわち透過率の差) が小さく出力されているこの結果は、アクリルステップが厚くなるにつれてステップ間の透過率差が小さくなる結果と類似している。これは、吸水による透過率の差が小さく出力されることに対応し、乾燥状態において元々含まれている水の量が RC に比べて PC の方が多いことを示唆している。さらに、乾燥状態の透過率を比較すると PC は RC に比べて平均で 1.4% 低くなっており、表-1 に示したコンクリートの配合から PC と RC 間における単位水量に差は殆どないものの、PC の単位セメント量は RC に比べて多く、水和反応に使用されて残存している水の量は相対的に多いことが透過率を低減させたものと予想される。

4.3 異なる水セメント比の供試体を示す水の浸透性状

6 日間の吸水試験にて PC および RC シリーズに対する水の浸透性状について評価を行った。図-6 に吸水試験 (経過時間 1, 25, 49, 73, 148 時間後) において供試体 PC-1 に浸透する水の透過像 ΔT を示す。吸水過程にお

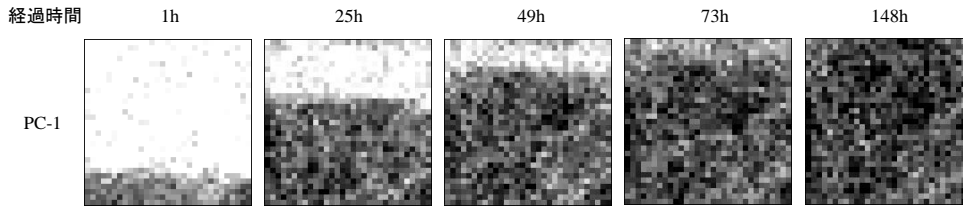


図-6 供試体 PC-1 に浸透する水の透過像

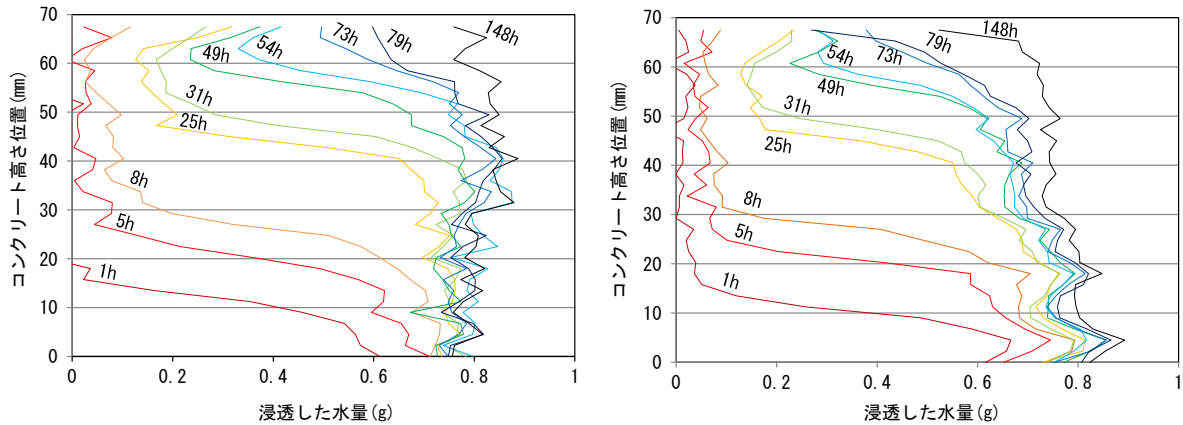


図-7 コンクリートの高さ方向に対する水の分布 (左) PC-1 (右) RC-1

いて均一に水位が上昇しており、73 時間後には供試体上面まで水が及んでいることがわかる。実際、供試体上面には水滴が浸み出していた。また、供試体外観では底面から 10mm 程度の高さまで表面が濡れる様子を確認し、それ以降は吸水量が増加しても濡れの範囲が拡大することにはなかった。一面吸水試験の場合、供試体の吸水面とその反対面以外を樹脂やアルミテープでシールして実施されることが多い。本実験ではそのような処理は行わなかったため、表面の濡れは乾燥した可能性はあるが、中性子イメージングのために吸水を中断する 5 分程度の間に供試体の質量は変化しなかった。

3.2 節で得られた定量性に基づき、水の透過像 ΔT が示す水の量を高さ毎に合計した値をプロットしたコンクリートの高さ方向に対する水の分布を図-7 に示す。図-7 (左) が供試体 PC-1、(右) が RC-1 の水の分布に該当する。縦軸はコンクリートの高さ位置、横軸は高さ位置から 1 画素分の高さまでの領域 (W70×D50×H2.25mm) 内に含まれている水の量を示している。図は吸水試験が開始されると水の分布する領域が供試体下部に現れ、時間の経過に伴い上部にその領域が拡大していく様子を定量的に表している。PC-1 においては 1 時間後には 10mm 高さ以上まで水が浸透し、図-6 の透過像と同様に、その後徐々に水が上方に浸透していく様子を確認できる。また、25 時間経過すると浸透した水量がほとんど変化し

ない領域が現れ、その範囲は時間の経過とともに広がっている。この領域の水量が最大であることから、底面からの吸水試験では底面側から水の浸透が飽和しながら進んでいると確認できる。さらに、浸透した水量は高さ位置に依らずほぼ一定であったことから、内部にひび割れなどの欠陥はなかったと推察される。

当初、水セメント比 42% の PC-1 が 60% の RC-1 に対して高い圧縮強度を持つことから水の浸透に対して優れた抵抗性を示すことを予想していたが今回実施した吸水試験においては吸水量や水の浸透速さ (図-7 における水位の上昇のしやすさ) に関して大きな差は見られなかった。図-5 に示している 4 つの供試体の吸水量はいずれも最大で 30g 弱であり、高さ方向に対する水の分布も同じシリーズでの供試体のバラつきは確認されなかった。空隙構造や水和物、試験開始時の含水状態などのパラメータが水の浸透に大きく影響を与えるが、全ての供試体を質量が変化しない程度に乾燥させた状態に揃えて試験を開始していることから今回の結果に関しては試験方法でなく供試体の特性によるものであると考えられる。コンクリートの配合から考察すると、水みちとして挙げられる骨材界面の遷移帯に関して、RC シリーズより PC シリーズの単位細骨材量の方が少ないため、PC シリーズの遷移帯量の方が少ないと予想される。また、セメント内の空隙に関しては、PC シリーズが RC シリーズに比べて

単位セメント量が多いことが水の浸透に対する抵抗性に何らかの影響を与えた原因として考えられるため、今後、細孔径分布や結合水量などの測定データも含めて検討を続けたい。

5. まとめ

本研究は小型加速器中性子源を利用した中性子イメージングにより厚さ5cmのコンクリートに浸透する水を非破壊で定量する手法を検討したものである。以下に得られた結果および知見を示す。

- (1) 小型加速器中性子源を利用して配合の異なるコンクリートの透過像を撮影し、浸透する水の透過像を出力した。
- (2) 中性子発生が行われる環境下で併発する γ 線がバックグラウンドとしてイメージングに影響することを考慮し、検出器の動作タイミングを制御することで検出する γ 線の低減方法を提案し、その効果を確認した。
- (3) アクリルステップの中性子透過率変化と比較することで、コンクリートに浸透する水の量に従って変化する透過率を推定し、厚さ5cmのコンクリートに浸透する水の定量できる手法を提案した。
- (4) 中性子透過率と吸水量の間には良好な相関性が存在することを明らかにした。この関係を適用すれば、配合に応じた補正を行うことが可能になり、配合の異なるコンクリートへの水の浸透を定量的に比較検討できることがわかった。

供試体由来の散乱中性子や γ 線などもバックグラウンドとして定量評価に影響を及ぼすことが考えられ、コントラストをより向上した中性子イメージングを行うにあたって別途対策が必要になる。複数の補正方法がこれまでに提案されているが標準的な方法がない現状にある。今後は手元で使える小型加速器中性子源の利便性を活用して多種のコンクリート評価に適応する定量手法の高度化を図り、コンクリート内部の水測定による耐久性評価を行っていく。

謝辞

本研究(の一部)は文部科学省「光・量子融合連携研究開発プログラム」および総合科学技術・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。また、サンプルは京都大学山本貴士先生よりご提供いただきました。

参考文献

- 1) 山路徹, 横田弘, 中野松二, 濱田秀則: 実構造物調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾RC構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討, 土木学会論文集E, Vol.64, No.2, pp.336-347, 2008.6
- 2) 前原聡, 伊代田岳史: コンクリート中の含水率とかぶりが鉄筋の腐食速度に及ぼす影響, 土木学会第72回年次学術講演会, V-153, pp.305-306, 2017.9
- 3) Otake, Y. et al.: Research and Development of a Non-Destructive Inspection Technique with a Compact Neutron Source, Journal of Disaster Research, Vol.12, No.3, pp.585-592, 2017
- 4) 池田義雅, 大竹淑恵, 水田真紀: 後方散乱中性子源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, 補強およびアップグレードシンポジウム Vol.17, pp.285-290, 2017.10
- 5) 若林泰生, 吉村雄一, 水田真紀, 大竹淑恵, 池田裕二郎: 小型中性子源および即発ガンマ線を用いたコンクリート構造物内塩分濃度分布の非破壊診断技術の開発, コンクリート構造物の補修, 補強およびアップグレードシンポジウム Vol.17, pp.659-664, 2017.10
- 6) 吉村雄一, 水田真紀, 須長秀行, 大竹淑恵: 小型中性子源を利用したコンクリートの水測定方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.613-618, 2017
- 7) 吉村雄一, 水田真紀, 須長秀行, 大竹淑恵, 林崎規託: 小型加速器中性子源を利用したコンクリートにおける水の浸透性状評価, コンクリート構造物の補修, 補強およびアップグレードシンポジウム Vol.17, pp.653-658, 2017.10
- 8) 日塔光一: 中性子カラー-ITMで領域が広がる新しい検査技術, 東芝レビュー, Vol.64, No.7, pp.70-71, 2009
- 9) Kobayashi, H: A correlated study between effective total macroscopic cross sections and effective energies for neutron beams with continuous spectra, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A Vol.424 pp.151-157, 2015