

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04227

研究課題名（和文）コンパクト中性子源の透過イメージングによるコンクリートの複合劣化抵抗性評価

研究課題名（英文）Measurement of combined deterioration resistance of concrete with a compact neutron source

研究代表者

水田 真紀（Mizuta, Maki）

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・研究員

研究者番号：00411257

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、高品質かつ高寿命なコンクリート材料の開発に資すること、コンクリート構造物の予防保全的な維持管理に寄与することを目的とし、中性子イメージングによりコンクリート中の水分の非破壊観察を行い、以下の結論を得た。（1）複合劣化した実構造サンプルの実験より、目視できるひび割れだけで劣化程度を判断するよりも、内部方向に比較的広い範囲までコンクリートの状態が変化している可能性を示した。（2）現場での採取コアを想定した円柱サンプルの実験より、1サンプルから水分浸透速度係数を測定できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリート標準示方書【維持管理編】が改訂され、「水の作用」が構造物の全ての劣化に関わる作用として捉えられ、中性化については「水の浸透」を伴う鋼材腐食による劣化進行と性能低下の特徴を考慮した維持管理が示され、劣化機構の一つに「複合劣化」が含められた。構造物の維持管理において、水の影響が強く認識されるようになり、本研究が果たす役割は大きい。今後、コンクリート構造物の維持管理指標の非破壊計測技術として本研究を発展させる。特殊な技術では、定期的の実施される検査・点検・診断に利用されることは難しいため、理研小型中性子源システムRANSのようなコンパクト中性子源の利用価値の向上にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to develop nondestructive test method which can visualize water movement in concrete. Neutron imaging is chosen to attain this goal and is conducted at the RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source, RANS.(1)This study was a first trial of neutron imaging for reinforced concrete samples which were extracted from existing RC bridge decks. The RC decks were deteriorated by combined factors and were overlaid by steel fiber reinforced concrete. Water movement in concrete with steel bars and/or fibers was successfully obtained. As a result, existing concrete could be deteriorated more widely and severely than expected by visual observation.(2)Neutron imaging demonstrated that the water penetration rate coefficient could be obtained with a single circular sample. Furthermore, when the sample was a cylinder, it was clarified that the influence of the sample shape on the transmitted images obtained through neutron imaging.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 中性子 中性子イメージング 透過画像 コンパクト中性子源 複合劣化 水分浸透
円柱サンプル

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インフラを予防的に維持管理していくためには、①品質を確保すること、②劣化進行の予測精度を高めることが必須である。①の品質には、材料、施工、初期欠陥の検知・除去・対応の3つが含まれる。施工に関して、2001年国土交通省「土木コンクリート構造物の品質確保について」通達依頼、山口県がいち早く取り組み、福島県の震災復興工事など、施工品質向上への動きが広がりつつある。また、初期欠陥については、早期劣化する構造物の半数以上の要因になっていると言われており、特に事故に直結する道路橋床版では、舗装下の水みちや滞水を路面から非破壊検査する手法²⁾を開発する流れもある。

現在のコンクリート構造物の耐久性は、土木学会コンクリート標準示方書によれば、鋼材腐食（ひび割れ、中性化、塩害）とコンクリートの劣化（凍害、化学的侵食）に対して照査されている。ここで着目すべきは、鋼材腐食もコンクリートの劣化も「水」の寄与が極めて大きいということである。水は、塩分を運ぶ媒介となり、アルカリ骨材反応を促進し、凍害を引き起こす要因となる。ひび割れは大きく開けば水が浸入しやすくなり、セメント水和物と化学反応を起こして多孔化する現象が化学的侵食である。中性化では、水分浸透を伴うことで鋼材が腐食することを考慮する試験法が規定された（「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」JSCE-G 582-2018）。つまり、コンクリート中の水分移動を捉えることは、複数の劣化に対する抵抗性（＝品質）を評価することと同等である可能性がある。

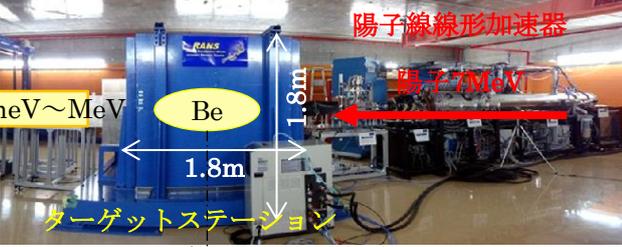
2. 研究の目的

本研究は、高品質かつ高寿命なコンクリート材料の開発に資すること、コンクリート構造物の予防保全的な維持管理に寄与することを目的としている。具体には、中性子イメージングによりコンクリート中の水分を非破壊で観察し、以下の2点に着目した研究を進めた。

- (a) 複合劣化した鉄筋コンクリートの水分浸透観察
- (b) 円柱コンクリートサンプルの水分浸透観察

3. 研究の方法

(1) 実験セットアップ

中性子イメージングは、-1に示す理研小型中性子源システム RANS (RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Systems) を利用した。RANSは、実験室に入る程度にまで小型化された加速器駆動中性子源であり、ターゲット前はオープンスペースになっていることから多様な実験に対応でき、年間を通じて高頻度で利用することが可能である。本研究では年平均約3週間、RANSで実験を実施した。中性子検出器には、入力面9インチの中性子イメージインテンスファイア³⁾（以下、中性子I.I.）を使用した。なお、イメージセンサには、冷却型カラーCCDカメラを使用し、検出視野は180×120mm、1画素は0.045mmである。

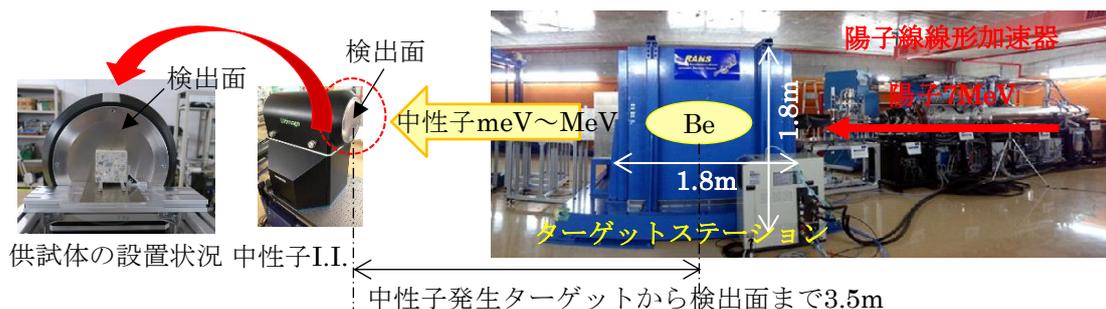


図-1 理研小型中性子源RANSと中性子透過イメージング実験の状況

(2) 画像解析方法

画像解析は、オープンソースのImageJで行った。まず、任意吸水時間の透過画像の他、中性子ビームを照射しない画像（ダーク画像）とサンプルを設置せずに中性子ビームのみを照射した画像（ダイレクト画像）を撮影し、次の方法でサンプル画像を作成する。

STEP1: ノイズ処理（輝点ノイズを周辺画素の中間値に置換）

STEP2: ダーク処理（検出器・バックグラウンド誤差の低減のため、オフセット値を引算）

STEP3: シェーディング処理（中性子の強度分布を平坦化）

STEP4: 各画像の輝度の規格化（中性子発生の変動を除去）

すべてのサンプル画像に上記の処理をした後、初期状態の透過画像 $I_{i=0}$ と t 時間吸水させたコンクリートの透過画像 $I_{i=t}$ から、吸水した水の透過画像 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = -\ln(I_{i=t}/I_{i=0}) = a_w \cdot d_w \quad (\text{式-1})$$

ここで、 a_w は単位長さあたりの中性子の減衰係数、 d_w は水の厚さである。

(3) 実験サンプル

- ・ 複合劣化した角柱コンクリート

冬期に凍結防止剤を散布される地方の道路から撤去された RC 床版を対象とした。図-2 に示すように、アスファルト舗装は剥された状態であり、床版上面を鋼繊維補強コンクリートで増厚補強されている。また、鉄筋に沿う層状ひび割れが発生し、かぶりが剥落している箇所もあった。

本研究では、健全な箇所の代表としてハンチ部分 (No.3-6)、劣化が進行し、かつ鉄筋を含む部分 (No.2-4) の 2 種類を比較した。φ 100mm のコアを採取し、図-3 に示すように角柱サンプルを中性子イメージング用に切り出した。図中の 50mm が中性子透過方向の厚さであり、中性子 I.I. の検出範囲の制限により、サンプル高さは 100mm 以下になるように分割した。

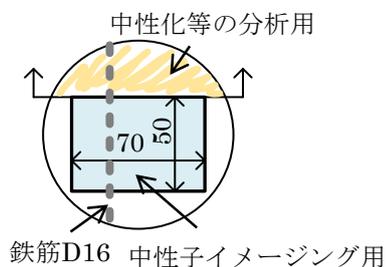
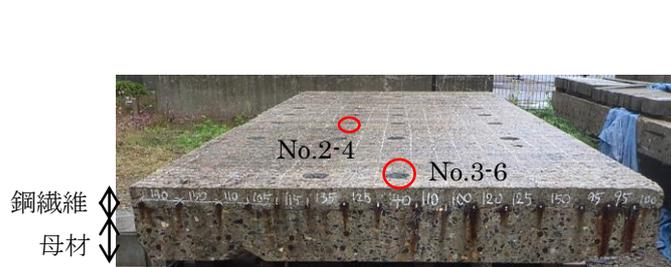


図-2 RC床版の劣化状況とサンプル採取位置 図-3 角柱サンプルの切り出し方法

- ・ 円柱コンクリート

ASR 劣化した実橋梁から採取した円柱コンクリート (φ100×270mm) をサンプルとした。約 6 年間室内で保管していたため、実験時にはかなり乾燥した状態であったと推察される。また、ASR 膨張は終結しており、表面に目視できるひび割れは発生していなかった。

4. 研究成果

- (1) 複合劣化した鉄筋コンクリートの水分浸透観察

① 中性子イメージングによる水分浸透観察

中性子イメージングの結果を図-3 に示す。撮影時間は 3 分である。透過画像の下に示す数値は吸水時間であり、陰影の濃い部分は、水分が増加した部分を示している。

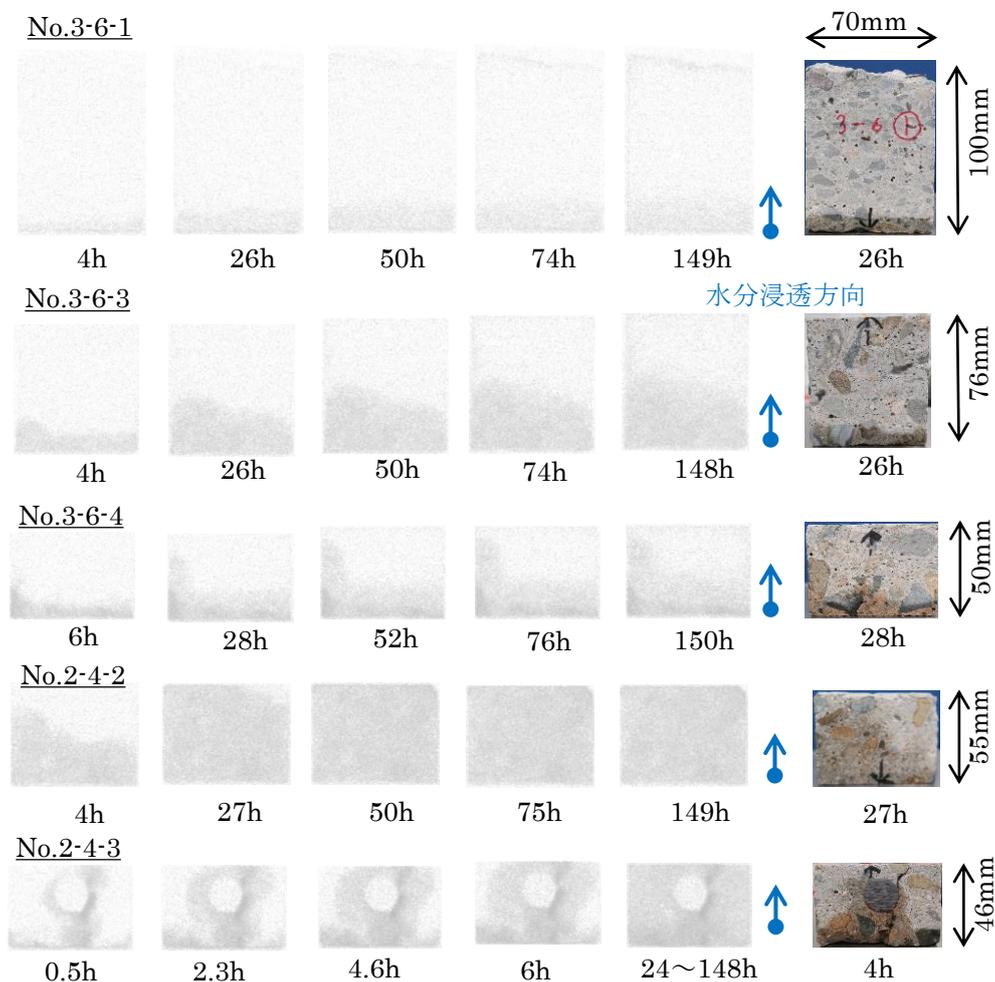


図-3 RC床版から採取したサンプルの中性子イメージング

鋼繊維補強コンクリートの No.2-4-1、No.3-6-1 はいずれも水分浸透は小さい、同様の傾向であったため、No.2-4-1 は省略した。母材コンクリートは、鋼繊維補強コンクリートに比べて、速く水分が浸透した。とりわけ No.2-4-2、No.2-4-3 は、およそ 1 日で上面まで水分が浸透し、その後の変化はなかった。このことから、劣化程度は目視できるひび割れだけで判断できず、内部まで比較的広い範囲のコンクリートの状態が変化している可能性が示唆された。また、No.3-6-3、No.3-6-4 では、母材コンクリート No.2-4 に比べると水分が浸透する高さは低かったものの、150 時間経過しても水分浸透が進む様子が見られ、さらに水分の浸透しやすさに偏りがある様子が観察された。

②結論

- ・ 中性子イメージングは、鉄筋コンクリートや鋼繊維補強コンクリートのように、鉄筋を含むコンクリートへの水分浸透を可視化できる手法であることを明確に示した。
- ・ 母材コンクリートの中性子イメージングにより、目視できるひび割れだけで劣化程度を判断するよりも、内部方向に比較的広い範囲までコンクリートの状態が変化している可能性があることが示唆された。
- ・ ハンチ部 No.3-6 が No.2-4 よりも健全な状態のコンクリートと考えれば、母材コンクリートの水分浸透状況の相違は、コンクリートの劣化程度を表す指標になる可能性がある。

(2) 円柱コンクリートサンプルの水分浸透観察

①実験結果および考察

円柱コンクリートサンプルの $\phi 100\text{mm}$ 面から一方向に水分を浸透させる吸水試験を実施し、4 時間吸水後と 22 時間吸水後に中性子イメージングを実施した。中性子ビームの照射方向は、円柱断面方向（最大透過距離=100mm）、撮影時間は 5 分である。なお、サンプル表面には、テープ等の被覆を施していない。また、各吸水時間での吸水量は、それぞれ 22g と 49g だった。

図-4 に吸水前と 4 時間吸水後の輝度を示す。ここで、距離 0 は吸水面、輝度は幅 18mm (400pixel、1pixel は 0.045mm) の平均である。輝度は高いほど、検出面により多くの中性子が到達したことを表し、サンプルに水が多いと検出面に届く中性子が減るため、輝度は低くなる。まず、吸水前の軸、周面付近の輝度分布を見ると、ともに吸水面で最も高く、1000pixel (45mm) 辺りまで徐々に低下している。これは、サンプルから散乱される中性子の影響が、連続した部分と端部（吸水面）では異なることを意味している。本研究のように端部からの水分浸透に着目する場合、散乱中性子の影響が大きい範囲の変化を捉えることになるため、今後、散乱中性子を除去あるいは低減させる方法について、検討する必要がある。

次に、軸付近と周面付近の吸水前の輝度分布の形状を比べると、両者は良く似た傾向を示したが、周面付近の距離 1000pixel 以上で、輝度がばらつく様子が見られた。これは、円柱サンプルでは、軸付近と周面付近の中性子透過距離が異なり、水の検出感度に差が生じたためと考えられる。その結果、透過距離の短い周面付近の方が骨材の存在をより反映したと推測される。

吸水前と吸水後の輝度分布を比較すると、軸付近、周面付近のいずれの場合も、吸水後の輝度は吸水前よりも低下し、その範囲は軸付近で吸水面（距離=0）から 1000pixel 辺りまで、周面付近では 500pixel 辺りまでだった。これは、水分浸透により吸水面近くの水分量が増加したこと

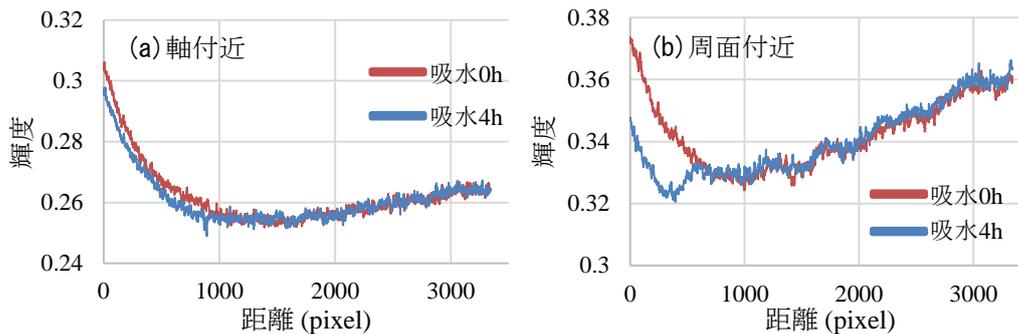


図-4 吸水前後の輝度の比較

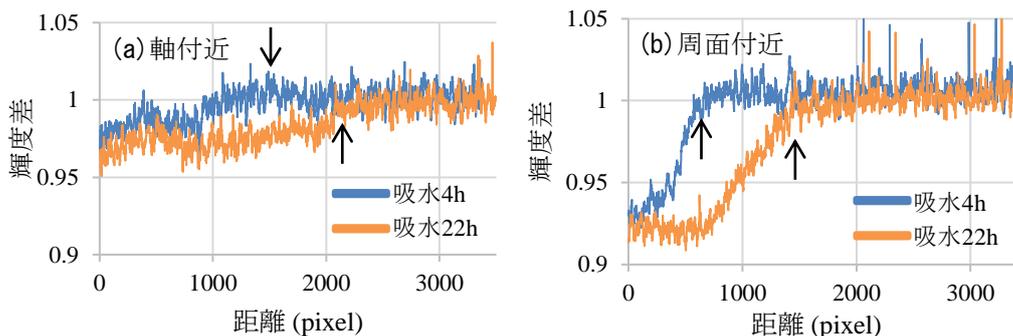


図-5 吸水による輝度差の変化

で、透過する中性子が減少したことを示している。これより、円柱サンプルの場合、吸水前後の輝度が変化する範囲は異なるものの、中性子イメージングで水分浸透状況を捉えられていることが分かった。

次に、吸水前後の画像の差分（以下、輝度差と称す）を吸水4時間後と22時間後について比較した。画像の輝度差（図-4同様、幅18mmの平均）の時間変化を図-5に示す。吸水前後の輝度に変化がない場合、図-5の縦軸の輝度差は1となり、水分が増えると1より小さくなる。

吸水時間の経過に伴い、吸水量が増加し、輝度差が1以下になる範囲が広がり、水分が内部に浸透している様子が観察された。これより、吸水前後の画像の差分を取ることで、円柱サンプルでも水分が浸透する範囲を判別できることがわかり、中性子イメージングが水分浸透深さの非破壊計測手法になる可能性が示された。ここで、図-5の変化点（図中の矢印）を浸透深さと考え、土木学会コンクリート標準示方書【規準編】の「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」（JSCE-G 582-2018）で定義されるパラメータ、水分浸透速度係数を算出した。輝度差が1以下になる範囲が、軸と周面付近で異なることから、軸付近では $10.0\text{ mm}/\sqrt{\text{hr}}$ 、周面付近では $13.4\text{ mm}/\sqrt{\text{hr}}$ となった。軸と周面付近の輝度差が異なる原因究明においては、中性子イメージングで得られる円柱サンプルの画像の解釈について、さらに検討する必要がある。

②結論

- ・ 円柱コンクリートの水分浸透速度係数の測定において、中性子イメージングを適用できる可能性が示された。
- ・ 円柱サンプルの中性子イメージングでは、軸付近と周面付近の輝度差が異なり、部位毎の水分浸透深さが得られた。今後、円柱サンプルの画像の解釈を進め、端部の影響、散乱中性子の影響を除去・低減させる方法についてさらに検討する必要がある。

<参考文献>

- 1) 山口県土木建築部：コンクリート構造物品質確保ガイド2020、2020.4
- 2) 大庭、神馬、仲谷：赤外線熱画像および自動熱解析診断システムによる効率的な路面調査に関する検討、第2回 i-Construction の推進に関するシンポジウム、土木学会、6-5、2020.7
- 3) 日塔光一：中性子カラーI.I.TM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.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大竹淑恵、水田真紀	4. 巻 60
2. 論文標題 講座：中性子技術を用いたコンクリートの評価技術の最前線 小型中性子源の開発と維持管理への活用 最前線	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学	6. 最初と最後の頁 346-350
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Maki Mizuta
2. 発表標題 Compact Neutron Sources for Maintenance of Concrete Structures in an Earlier Stage
3. 学会等名 6th Joint Workshop of RIKEN RAP and JCNS（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水田真紀
2. 発表標題 理研小型中性子源システムRANSから始まるコンクリート構造物の非破壊観察技術
3. 学会等名 岐阜大学コンクリート研究会第68回講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水田真紀
2. 発表標題 中性子透過イメージを利用したコンクリート中の水分挙動の評価
3. 学会等名 公益社団法人日本材料学会第205回コンクリート工事中用樹脂部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------