中性子によるコンクリート中の水分の可視化

兼 松 学*

1. はじめに

硬化コンクリート中の水分挙動については古くから注目されており、乾燥収縮やクリープのような主として乾燥過程が支配的な現象や、腐食を代表とする水分の供給過程が支配的な現象、さらには火災時などを想定した高温下における水分挙動など、これまで水分移動特性に着目した研究が数多くなされている。硬化コンクリート中への水分浸入はそれ自体が劣化とは言えないが、硬化体中へ浸入する水分は鉄筋腐食にかかわるだけでなく、外部より塩化物イオン等の劣化因子を運ぶなど、劣化の進行に大きくかかわる。

このような水分挙動の解明には水分の定量評価が欠かせないため、これまで、質量法や、各種センサを用いる手法に加え、各種放射線を用いる方法などが用いられている。多くの場合、これら手法を駆使することでおおむねの目的は達成できるものの、近年では微視的領域に着目した研究が多くなされており、これまでの測定手法では十分な現象説明が不可能である場合も少なくない。

本稿でご紹介する中性子ラジオグラフィ（Neutron Radiography）とは、中性子と原子核の相互作用により生じる減衰特性の差を利用して、被写体の透過画像を得る非破壊測定手法のひとつであり、コンクリート中の水分挙動を可視化する技術として利用される。直接視ることをできない事象を視えるようにすることを可視化と呼ぶのであれば、中性子ラジオグラフィは、物質を透過した中性子線を利用して“見える化”する技術であるといえる。

一般に、X線は鉛や鉄など重い元素で遮蔽されるのに対し、中性子線は水素、リチウム、ホウ素、カドミウム、サマリウムなどの透過率が低く、セメントや骨材の主成分である珪素、カルシウム、酸素、アルミニウム、鉄などの透過率はこれら元素に比して2桁ほど高い（透過しやすい）。そのため、一般的なコンクリートを撮影した中性子ラジオグラフィにおいては、セメント硬化体中の結合水として水素を多く含むペースト部分は透過率が低く暗く、相対的に透過率の高い骨材部分は明るくなる（図-1）。このとき、測定される中性子強度（≒画像の輝度値）は一定精度で物質質量に変換可能であるとされ、測定結果から

図-1 コンクリートの中性子ラジオグラフィ
(色の濃い箇所がセメントペーストで白い箇所が骨材)

各所の物質質量を定量的に評価することが可能である^{1),2)}。また、任意の時刻間の差分画像を得ることで、その間に变化した物質質量（例えば水分）を非破壊で捉えることができる点が魅力である。

本稿では、コンクリートの可視化技術のひとつとして中性子ラジオグラフィによる水分状態の可視化について、筆者の実施した研究を関単に紹介させていただく。

なお、中性子ラジオグラフィの適用に関する国内外の研究展開については、やや古いが本誌に拙稿³⁾を掲載いただいているので、そちらをご参考いただきたい。

2. 中性子ラジオグラフィの原理

実際の水分挙動の可視化の話に入る前に、まずは関単に測定原理について述べさせていただく。

中性子ラジオグラフィの基本的原理は単純で、中性子線を物質に照射し、透過した中性子線を蛍光コンバーターにより可視光に変換し CCD カメラまたはイメージングプレートにより撮影するだけである。例として日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 を線源とする熱中性子ラジオグラフィ装置（Thermal Neutron Radiography Facility：TNRF）の撮影概念図を図-2 に示す。図のとおり、原子炉から取り出した中性子線をコリメータにより導き、対象に照射し、透過した中性子を裏面のコンバーターで捉え、可視光に変換し CCD カメラで撮影する。

* かねまつ・まなぶ／東京理科大学 准教授（正会員）

図-2 熱中性子ラジオグラフィ装置概念図

CCD カメラは直接放射線に曝されると測定精度を下げるため、2枚のミラーを用いて、中性子線照射領域から外れたところで撮影できるように工夫されている。

中性子線はX線などに比して透過性が高いとされるが、実用されている装置仕様では、水分の定量を目的とするなら数 cm 程度、可視化のみなら 10 cm 程度が限界ではないかと考える。

撮影した画像は、各画素の輝度が飛来した中性子線量に比例することを利用して、式(1)の関数を利用することで各地点の物質量を定量することが可能である。

$$I_{out,t} = I_{in,t} \cdot e^{-\lambda \cdot \rho \cdot \delta} \quad (1)$$

ここで、 $I_{out,t}$ ：時刻 t (s) における透過中性子強度 (n/cm^2)、 $I_{in,t}$ ：入射中性子強度 (n/cm^2)、 λ ：物質の質量減弱係数 (g/cm^2)、 ρ ：物質のかさ密度 (g/cm^3)、 δ ：物質のかさ厚さ (cm) である。

ここで、質量減弱係数は、中性子の単位質量あたりの減衰量を示す物質固有の値で、複数の物質からなる場合でも重ね合わせが成り立つ。したがって、異なる時刻の画像間の差分を取ると、時刻間に変化した物質量のみを定量化することができる。すなわち、時刻間で水分量のみが変化した場合、水分量の経時変化を捉えることが可能である。

なお、ここで得られる画像は厚み方向の情報が重なって映し出させており、3次元的な情報は2次元に縮約されている。しかしながら、対象の透過画像を複数方位か

ら撮影し、コンピュータトモグラフィ (CT) 技術により再構築することで、任意の断面の状態を可視化することも可能である。

3. コンクリート中の水分の可視化

3.1 ひび割れ中の水分挙動の可視化

ひび割れは鉄筋コンクリートにとって不可避な現象のひとつであり、一般環境下においてはひび割れを介して水分や劣化因子が鉄筋にもたらされることで鉄筋腐食につながる。ひび割れが劣化現象に及ぼす影響については工学的には多くの研究がなされ、解析などにより多くのことがわかってきているが、それでもなお実際にひび割れ近傍にどのように水分が供給されるかについては不明な点が多かった。

図-3は、ひび割れから水分が供給される様子を中性子ラジオグラフィにより捉えた画像であり、およそ1時間までの水分変化を可視化したものである。試験体は、中央に貫通ひび割れを導入した $100 \times 100 \times 20$ mm のコンクリートで、水分は側面および上部に設けた水槽から供給されている。ここで、「水分が供給される様子を中性子ラジオグラフィにより捉えた画像」と述べたが、正確には、画像解析により初期状態（乾燥状態）に対する差分画像であり、各箇所において初期状態から変化した水分を表現した画像となっている。

また、紙面の図では確認できないが、動画で確認すると⁴⁾、ひび割れ中に先行して水分が浸透し、その後硬化体の組織中に水分が浸透してゆく様子が捉えられており、さらには、ひび割れ中の水分が経時変化により脈動している様子も確認することができる。ひび割れ表面は水槽となっており常に水分が供給される環境にあるにもかかわらず、ひび割れ中に水分の増減する様子が確認されたことは興味深い。

さて、組織中を浸透する水分は、セメント硬化体部分に浸透する水分が支配的であると考え、画像の各地点の最大吸水量は、その地点のセメントペーストの体積に比例して増減するはずである。そこで、差分水分量を各所のセメントペースト割合で除してやったものが図-4である。このような処理を行うと、これまで各地点で上下

W/C=50%, 105℃ 乾燥した試験体

図-3 ひび割れから供給される水分状況

A. Transmission neutron radiograph

B. Quantification analysis of incremental moisture transport

C. Specimens' specifications

図-4 A. 透過画像, B. ひび割れから浸透するペーストあたりの含水率分布, C. 試験体概要

図-5 モデル骨材（左）を用いた骨材周りの吸水挙動（円筒型の骨材の周りを水分（色の濃い箇所）が浸み込む様子が確認できる）

図-6 モデル骨材周りの水分挙動（時間変化を重ねて可視化した画像。下部から徐々に水が上がってきている）

図-7 FEM 解析結果と実験結果の比較¹⁾

（図中 画像は右が測定結果，左が解析結果。グラフは矢印の位置の体積含水率分布を示している）

に乱れていた水分量がフラットになって、ペースト体積当たりの水分量の分布を可視化することができ、さらに鮮明に水分移動を可視化・定量化することが可能である。

3.2 モデル骨材を骨材周りの水分挙動の可視化

3.1 ではひび割れ近傍の水分挙動の可視化から定量化まで紹介したが、さらに詳細な水分挙動を検討するために、モデル骨材中（図-5）の水分挙動の可視化を試みた。

円筒形の骨材を作製し、同じく $100 \times 100 \times 20$ mm のモルタル中に打込み、下面（ 100×20 mm 面）からの吸水挙動を確認した。

実験の結果骨材周りを水分が回り込むように吸水してゆく様子が捉えられた（図-5、図-6）。下面から吸水さ

れた水分が上昇してきたのち、骨材にぶつかる物質質量が保存されるため骨材周りに先行して水分が上昇する様子が捉えられている。

このような挙動は、FEM による詳細モデルにより解析的にも再現することが可能であり（図-7）、複合材料をモデル化することでより詳細な水の動きを解析的に再現できる可能性を示している¹⁾。

3.3 加熱下における水分挙動

コンクリート中の水分状態の測定は、先述したように、通常、センサの埋設により測定されることが多いが、センサでの測定が特に難しいのがひび割れや腐食部位など損傷部位での測定と、加熱下での測定である。加熱下に

おける水分状態の測定は電極式のセンサによる測定が行われているが、それでも詳細な測定は困難が伴う。そこで、中性子ラジオグラフィにより加熱下における水分挙動の測定を試みた。

試験体サイズは100×100×20 mmで、加熱は下面から行った。加熱により移動する物質は水分のみであると仮定すると、3.1で述べたように同様に加熱前後の画像間で差分解析を行うと、移動した水分量を捉えることが可能である。

特に、ひび割れ部や骨材界面に沿って乾燥が進む様子を観察することが可能である。また、この様子を定量化した場合、PP繊維を混入した場合に水分勾配がなだらかになっている様子を確認できる(図-8)。一般に、加熱すると加熱面から離れた部分で含水率の高くなるいわゆる“水分ダマリ”が生じるとされており、さらには加熱試験を行うと試験体裏面から水分が滲出する現象が確認されることが多い。画像からは、乾燥面では含水率が

0を下回る領域が確認されるとともに、確かに含水率が初期状態より高くなる水分ダマリを視ることができる。含水率が0を下回る領域においては、セメント硬化体から放出された水分に加え、水酸化カルシウムの分解に伴い生じた水分が、加熱により移動した結果、含水率が0を下回る結果となったものを考える。一方で、温度は詳細に測定できないものの、水分ダマリは100℃近辺で確認され、いったん気体となった水分が移動し雰囲気温度が100℃程度になった箇所まで凝縮し水分ダマリとなっている可能性を示唆するものである。

今後、爆裂との関係がどのようなになっているか、さらに詳細に解明されることが期待される。

4. 中性子ラジオグラフィの利用

ここまで、中性子ラジオグラフィのコンクリート分野への適用について筆者の関わる研究を中心にご紹介した。

しかしながら、そもそもどのようにすれば中性子関連の実験ができるか疑問に思われる方も多いと思う。そこで、簡単ではあるが、国内の装置に関して簡単に述べたいと思う。

4.1 原子炉

我が国で中性子ラジオグラフィが一般利用可能な研究用原子炉は、日本原子力研究開発機構の保持する、JRR-3(茨城県東海村)と、京都大学原子炉実験所の所有するKUR(大阪府泉南郡)のみである。これらは、施設供用制度により一般ユーザーも利用可能である。しかしながら、JRR-3は震災による稼働停止から再起動されておらず、KURも昨年まで稼働していたが、現在、新規制基準への適合確認作業中であり、残念ながら再稼働はかなり先になる見込みである。

JRR-3に設置されたTNRFは世界的にも上位の中性子強度を持っているのに対して、KURは2桁近く中性子強度が低い。

4.2 放射性同位体

放射性同位元素(RI(ラジオアイソトープ))の管理は難しいものの、一般環境下で利用できる中性子線源のひとつで、それ自体の自発核分裂によって中性子線を放出する。コンクリート工学分野においてラジオグラフィの利用は見られないが、単位水量の測定や非破壊探査に用いられている(例えば6,7)。一般的に用いられる同位体としてはカリフォルニウムが挙げられる。

4.3 加速器

加速器は、電子線や陽子線等を加速させてターゲットに照射して中性子を発生する装置で、小型のものから大型のものまで様々利用可能である。

J-PARC(大強度陽子加速器施設、茨城県東海村)では、B-22ポートに新たにRADEN(図-9)と呼ばれる中性子イメージング設備が設置され、昨年12月にファーストニュートロンを観測し、近く一般供用を開始する予

図-8 高温下におけるコンクリートの中性子透過画像および定量結果⁵⁾

図-9 RADEN (J-PARC) 平面図 (上) および内観写真 (下)

定である。J-PARC はパルス中性子を利用することが特徴であり、TOF (飛行時間法) と呼ばれる分析によりスペクトル分析が可能となるため、ラジオグラフィと同時に各種化学分析が可能となるものと考えられる。

一方で、近年では、理化研を中心として小型中性子線源 RANS の開発が進められている。さらなる小型化が指向されており、オンサイトでの中性子線源の利用が期待されており、土木研究所と共同で橋梁などの非破壊検査への適用を探っている。

5. ま と め

本稿では、中性子ラジオグラフィのコンクリート分野への応用のなかでも、特に水分挙動の可視化に焦点を当

てて紹介した。

中性子ラジオグラフィは 1970 年代から少しずつコンクリート工学に適用されてきたが、多くは試行的な内容が多かった。しかしながらここ 10 年ほどはコンクリートのテーマへの適用事例が増加しており、筆者のみならず世界的にコンクリート工学分野での利用が活発になってきている。J-PARC など次世代型の中性子線源や、RANS などの小型中性子線源の登場により、いよいよコンクリート工学の正当な手段として一層の貢献が期待されるようになってきている。

その魅力は、単なる可視化にはとどまらない。

謝 辞 本稿執筆にあたり、図-9 の写真ほか RADEN の情報について、名古屋大学工学研究科 鬼柳善明教授にご協力いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 兼松 学・土屋直子・野口貴文：熱中性子ラジオグラフィによるコンクリート中の吸水過程の解明，日本建築学会構造系論文集，Vol.78, No.690, pp.1339～1347, 2013
- 2) 兼松 学・丸山一平・野口貴文・飯倉 寛：中性子ラジオグラフィによるコンクリートのひび割れ部における自由水挙動に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.61, pp.160～167, 2007
- 3) 兼松 学：中性子ラジオグラフィのコンクリート工学分野への適用に関する研究動向，コンクリート工学，Vol.45, No.11, pp.48～54, 2007. 11
- 4) 東京理科大学兼松研究室 HP：中性子ラジオグラフィによるひび割れ中の水分挙動可視化動画，http://www.rs.noda.sut.ac.jp/manabu/NR_web/NR_webj.htm
- 5) M. Kanematsu, M. Nakano, M. Tamura, N. Tuchiya, Y. Saito and Y. Kawabata : In-situ Measurement of the Hydraulic Behavior of High Strength Concrete under High Temperature, Kyoto University KUR Progress Report 2012
- 6) 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
- 7) 山田雅裕・森沢友博・羽濑貴士・吉田慎一郎：中性子水分計を用いたコンクリートの単位水量測定技術の検討，コンクリート工学年次論文集，Vo.25, No.1, pp.911～916, 2003