



展 TENBO 望

理工学部会 企画 *

コンクリートのイメージング



兼松 学
Kanematsu Manabu
(東京理科大学)

1 はじめに

コンクリートは、年間1億 m^3 近く使用される水に次いで使用量の多い大量消費材であり、社会基盤・都市空間の形成には欠かすことのできない材料である。社会の成熟に伴い国内の新規建設投資は減少傾向にあるものの、多様な高機能・高性能なコンクリートが開発されるとともに、産業副産物を使用するなどした環境負荷低減型のコンクリートの開発・実用化が活発に進められている。これまで蓄積した膨大なストックを維持していくことを考えると、既存コンクリート構造物の維持保全といった側面もますます重要視されている。

このような背景の中で、コンクリートのイメージング技術の利用は2つの側面で注目されている。1つはコンクリート分野における実際の構造物の状態を把握・評価する非破壊検査技術としての側面と、もう1つは実験室において真の現象をつかむための測定技術としての側面であり、両者とも近年活発に研究が行われている。

本稿では、筆者が携わった中性子イメージング(中性子ラジオグラフィ)について紹介する。

2 コンクリートの中性子イメージング

本題に入る前に、簡単にコンクリートとは何かについて触れさせていただく。

コンクリートは、ケイ酸カルシウムを主成分とするセメントと、水、骨材(砂及び砂利)から構成され、おおよそ体積の7割を骨材が占める。セメントと水の化学反応により硬化し、水を取り込んでカルシウムシリケート水和物及び水酸化カルシウムを主成分とするセメント硬化体を形成する。近年では、前記材料以外にも、性能改善あるいは高性能化を指向して化学混剤が加えられるとともに、環境側面の改善を目的として高炉スラグやフライアッシュといった産業副産物も用いられるようになってきている。コンクリートは圧縮に強く引張に弱い性質を有するため、これを鋼材で補強した複合材料が鉄筋コンクリートである。

さて、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1つである。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性が低く、セメントや骨材の主成分である珪素、カルシウ

* 中性子応用専門委員会

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桁ほど大きい（透過しやすい）¹⁾。コンクリートは前述のようにセメント硬化体中に水分を含むことから、中性子をコンクリートに照射した場合、主として各所の水分量の違いに起因した濃淡画像を得ることが可能である（図1）。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り、特に、任意の時刻の差分画像により時刻間の物質質量の変化を捉えることができる点が魅力である。

コンクリート工学分野で初めて中性子イメージングが適用されたのは筆者の知る限りは1972年のH. Reijonenら²⁾の研究が最も早く、コンクリートの主要な劣化現象の1つである中性化の進行を非破壊測定により可視化・定量化することを試みている。以降、コンクリートの

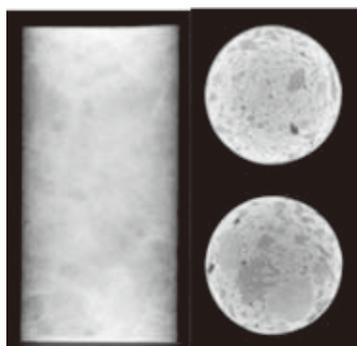


図1 左：中性子ラジオグラフィによるコンクリートの円柱試験体の透過画像（JRR-3 TNRFにて撮影）
右：CTによる断面（色の濃い部分が骨材領域）

破壊プロセスにおける微細ひび割れの進展を観察したり³⁾、ASR（アルカリシリカ反応）及びDEF（ダイレイドエトリングイフォーメーション）による破壊プロセスを可視化する研究⁴⁾などが行われている。我が国では川端ら⁵⁾が最も早いと思われ、50×20×100 mmのコンクリート試験体を用いて、内部の骨材状況を可視化することに成功している。ここ10年間では、コンクリート中の水分移動プロセスにイメージング技術を適用する事例^{例えば6,7)}が増加傾向にあり、徐々にコンクリート工学分野の最先端の研究領域での本格的利用が進んでいるものとする。

3 コンクリート中の水分挙動

コンクリート中の水分挙動は、コンクリートの強度発現や変形挙動などに加え、耐久性にも大きく影響を与えるため、古くから多くの研究がなされてきた。中でも、様々な原因でコンクリートに生じるひび割れは、外部から劣化因子を運ぶ経路となり、内部の鉄筋が腐食する原因となることから、その影響を正確に評価することが必要とされる。そこで、100×100×20 mmのコンクリート片の中央にひび割れを導入し、ひび割れ表面に設置したプールから水分を供給し、コンクリート中に運ばれる水分挙動を捉えることを試みた（図2）⁸⁾。なお、測定は全て日本原子力研究開発機構JRR-3の中性子ラジオグラフィ装置（TNRF）を利用した。

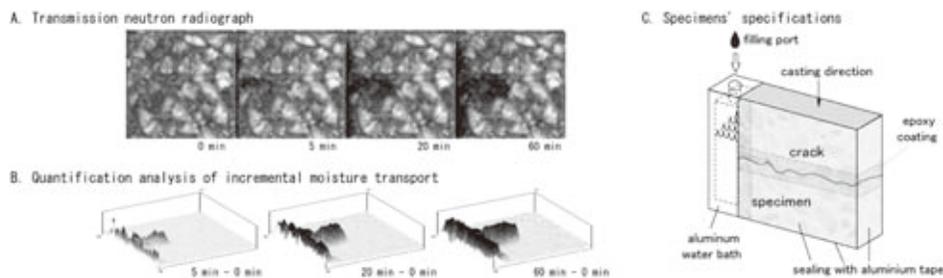


図2 水分定量化の一例
左上：透過中性子画像、左下：画像解析により移動した水分のみを抽出、右：試験体概要

図2Aは、人工的に導入したひび割れから供給される水分の様子を初めて中性子イメージングで捉えた画像である。コンクリート中にひび割れを介して水分がじわじわと供給される様子を鮮明に捉えられている。

そこで、更に詳細な水分挙動を捉えるために、円筒形のモデル骨材を用いてセメント硬化体中を動く水分の挙動について中性子ラジオグラフィにより検討した。その結果、セメント硬化体中を移動する水分が、円筒形骨材の周りを回り込むように移動する様子を捉えた(図3)。一般に、骨材周辺には10~50 μm程度の、組織が疎な不連続領域(遷移態領域)が形成されることが知られているが、これまでの手法では骨材周りの水分挙動を定量的に捉えることは困難であった。そこで、これらの結果を分析し、有限要素法解析による数値解析を行ったところ、遷移帯領域の影響を考慮しないモデルであっても中性子イメージングで捉えた現象を同様に再現することができた(図4)。このことは、遷移帯の水分移動に及ぼす影響はごくミクロな範囲にとどまり、マクロな見掛け上の水分挙動には大きく寄与していないことを示すものであった。

これら成果は、近年高度化する耐久性モデルの実証データとして貴重であり、一連の研究は中性子イメージングがコンクリート中の水分挙動を捉える強力なツールとなり得ることを示している。

4 高温下における水分挙動の測定へのチャレンジ

建築に用いられる鋼材は、高温に曝されると降伏点及び強度が低下することが知られているが、鉄筋コンクリート造は、鉄筋を覆うコンクリートの熱伝導率が低いことから耐火的であるとされ、火災時にあってもその構造性能を一定時間保持するよう設計されている。

しかしながら、しばしば火災に曝されたコン

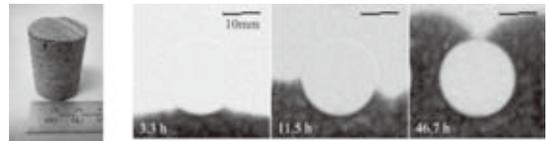


図3 モデル骨材(左)を用いた骨材周りの水分挙動

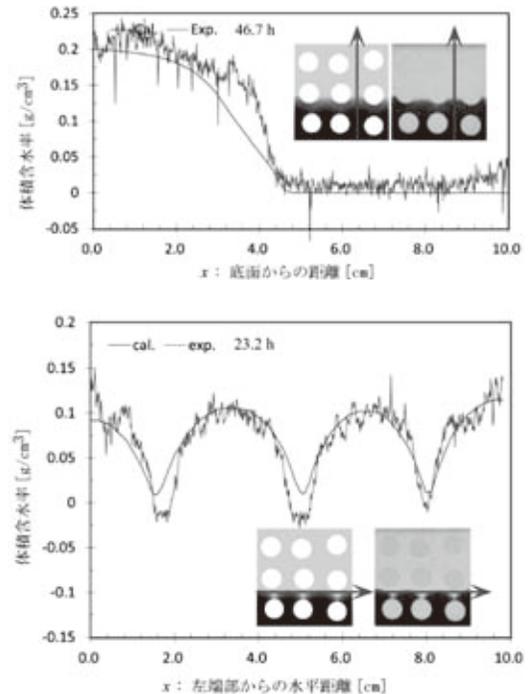


図4 FEM解析結果と実験結果の比較⁹⁾

図中の画像は、9つのモデル骨材を配置して下面から吸水させた場合の中性子ラジオグラフィ差分画像(右)とFEM解析結果(左)である。グラフは、矢印の箇所の体積含水率の測定値と解析値の比較であり、結果を良好に再現している

クリートの表面が欠け跳ぶ現象(爆裂という)が報告されており、鉄筋を被覆するコンクリートが早期に失われることで、火災時に十分な耐力を維持できなくなることが懸念される。このような爆裂現象は高強度コンクリートにおいて顕著であるとされており、実務上は有機系繊維を混入するなどの対策が取られ安全が確保されているものの、そのメカニズムについては不明な点が多い。

コンクリートの爆裂のメカニズムは諸説あって、コンクリートを構成する骨材とセメント硬化体の熱的変形特性の違いによる熱応力による説と、高温下において、セメント硬化体中に存在する水分が高温で蒸発する作用による説と、これら両者のハイブリッドによるという説などが主流であった。近年では、セメント硬化体自体から発生する水分の影響も無視できないことも明らかになっており、いずれにしろ爆裂現象に対して水分が寄与していることは間違いないと考えられている。

これまで、コンクリートの水分状態を動的に測定するには、埋設型のセンサの利用が一般的であった。しかしながら、高温下あるいは爆裂時におけるセンサの破壊や、センサ自体を埋め込むことによる現象への影響が懸念される上に、そもそも爆裂現象を捉えるだけの十分な空間分解能を得ることは困難であった。これに対し、中性子の透過性は温度依存性が低く、測定装置への温度作用に配慮すれば、高温下における非破壊測定が可能である。そこで、高温下におけるコンクリート中の水分移動現象への適用を行った。爆裂実験は、全て京都大学原子炉実験所の研究用原子炉 KUR の B-4 実験室の中性

子ラジオグラフィ装置を用いて行った。

加熱測定はコンクリート試験片を下部からブンゼンバーナーの火炎で加熱するもので(図5)、点火後1分で加熱面表面温度を約1,000℃まで上昇させた。コンクリート試験体には高強度コンクリートを用い、爆裂対策として一般的な有機繊維の有無を水準とした。

図6に測定結果を示す。この画像を定量評価することで加熱下におけるコンクリート中の水分挙動を評価することが可能である。ここで、セメント硬化体中の空隙中に捉えられた自由水のみならず、高温作用により破壊されたセメント硬化体組織から放出される結合水もが加熱により移動しており、さらには、水蒸気となってコンクリートの内部側に移動し、温度が100℃

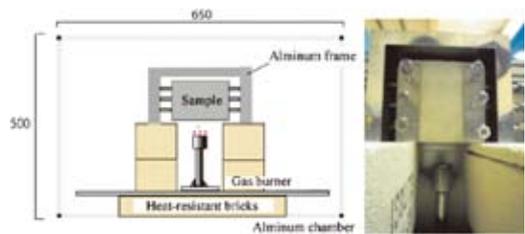


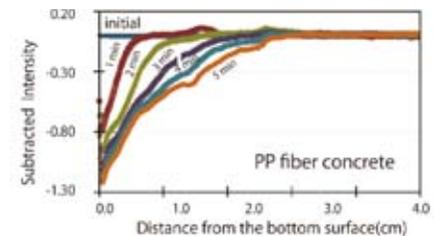
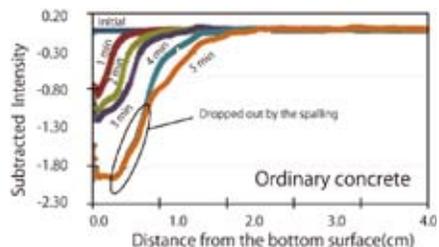
図5 加熱装置概要



a) 繊維無混入コンクリートの差分中性子透過画像
4分経過時に爆裂現象が確認された



b) 繊維混入コンクリートの差分中性子透過画像
繊維に沿って乾燥が進展する様子が捉えられている



c) 上:繊維無混入コンクリート, 下:繊維混入コンクリート

図6 高温下におけるコンクリートの中性子透過画像及び定量結果

よりも下がった領域において再度凝縮し、水分だまりを形成していることが明らかとなった。爆裂時の透過画像の取得は世界でも初めての試みであり、これまで不明であった爆裂時の水分挙動の解明に大きく近づいたと考える。

また、有機繊維を混入した試験体では爆裂現象は観察されなかったが、画像からは繊維混入により繊維に沿って内部まで乾燥が進む様子が観察された。これは、従来から言われているように、熱により融解した有機繊維の残した空間が抜け道となることで水分の移動が容易になり、破壊に必要な圧力形成を妨げた結果と考えられる。同様の実験がほかの研究者にもトレスされており、今後世界的にこれら議論が深まることが期待される。

5 終わりに

本稿では、コンクリートのイメージング技術について筆者の関わる範囲で最新の知見を紹介した。いずれも研究室的研究であるが、これら研究をしていると、実構造物の調査での利用ができないかを問われることが多い。近年では理化学研究所による可搬式小型中性子線源の開発が進んでおり、土木構造物の調査を中心として実地での調査への利用が検討されている。

中性子イメージングは、コンクリート工学分野において高空間分解能、高時間分解能を有す

る極めて有用なツールであると認められ、今後、分野の最先端の研究領域における利用がますます増加するものと考えられる。残念ながら東日本大震災の余波による JRR-3 の運転停止により多くの実験が止まっていたが、近年、J-PARC や各種研究機関において新たなイメージング技術・装置の開発が進んでおり、基礎研究から応用研究までその期待は大きい。

参考文献

- 1) (社)日本アイソトープ協会 理工学部会 中性子イメージング専門委員会, 中性子イメージング技術の基礎と応用, (2009)
- 2) Reijonen, H., *et al.*, *Cement and Concrete Research*, **2**(5), 607-615 (1972)
- 3) Najjar, W.S., *et al.*, *Cement, Concrete and Aggregates*, **8**(2), 103-109 (1986)
- 4) Kesner, K., *et al.*, *Material Journal*, **101**(4), 318-326 (2004)
- 5) Kawabata, Y., *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A529**, 238-242 (2004)
- 6) de Beer, F.C., *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A605**, 167-170 (2009)
- 7) Zhang, P., *et al.*, *Science China*, **53**(5), 1198-1207 (2010)
- 8) 兼松学ほか, セメント・コンクリート論文集, **61**, 160-167 (2007)
- 9) 兼松学ほか, 日本建築学会構造系論文集, No.690, 1339-1350 (2013)
- 10) 森田武, コンクリート工学, **45**(9), 87-91 (2007)