

論文 コンクリートの吸水過程における粗骨材の影響に関する研究

兼松 学*1・土屋直子*2・野口貴文*3

要旨:本研究では、コンクリートの吸水過程における粗骨材の影響に関して明らかにすることを目的として、中性子ラジオグラフィを用いた水分挙動の測定実験を実施した。結果より、コンクリートの骨材周辺の水分移動は、骨材周囲を水分が回り込むように移動することが確認された。一方で、骨材の近傍には特に顕著な水分を確認したが、これは主として骨材界面の壁効果によることを示した。また、硬 X 線マイクロトモグラフィによりさらに微細な水分挙動を実験的に確認し、吸水過程においては微細な気泡中を含む比較的大きな空隙中では水分移動がないことを確認した。

キーワード:コンクリート, 吸水, 中性子ラジオグラフィ, 硬 X 線トモグラフィ, 遷移帯

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性は古くからコンクリート工学の重要課題であるが、中でも鉄筋腐食は鉄筋コンクリート構造物の耐久性に大きく影響を及ぼす要因のひとつである。そのため、鉄筋コンクリート構造物における鉄筋腐食の限界状態について多くの研究がなされてきたが、鉄筋腐食の条件のひとつである、水分供給について不明な点が少なくない。そこで、一般環境における鉄筋への主要な水分供給源である、雨水などを想定した液水的作用に伴う吸水過程について解明することを目的とした一連の研究を実施した。特に、本稿では、コンクリートの吸水過程における骨材および骨材界面の影響について、実験的検討を行った。

本稿では、中性子ラジオグラフィによりモデル粗骨材を用いたコンクリートの吸水過程について実験的に捉えた。また、セメント硬化体中の水分挙動について、硬 X 線マイクロトモグラフィを用い、ヨウ化ナトリウム (NaI) を造影剤として実験的に確認し、吸水時における水分移動についてミクロな視点から考察した。

2. モデル粗骨材によるコンクリートの吸水過程に関する実験的検討

2.1 実験概要

本研究では、コンクリート中の水分挙動におよぼす粗

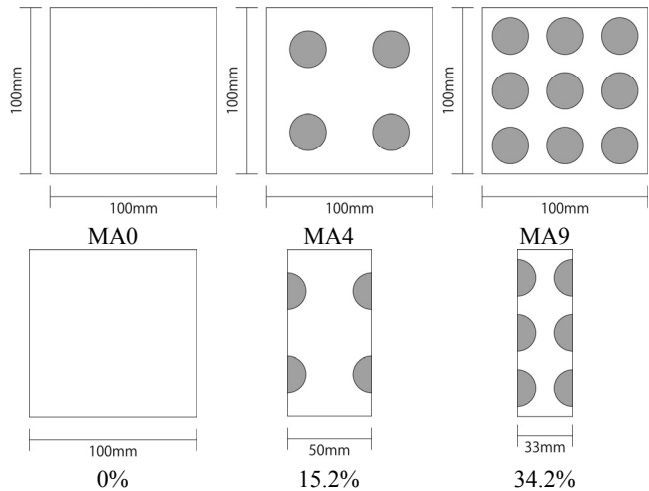


図-1 モデル粗骨材の概観およびレイアウト
(数値は下図枠中におけるモデル粗骨材の体積割合)

骨材の影響について検討するため、硬質砂岩(青梅産)系の岩石からコア採取したφ22mmの円柱型の模擬骨材(以下モデル粗骨材)を用いてコンクリート試験体を作製し、吸水試験を実施した。用いた調合を表-1に、セメントは市販のポルトランドセメントを使用し、細骨材は、大井川水系陸砂(絶乾密度:2.60 g/cm³, 吸水率:2.21%), 粗骨材は、青梅産硬質砂岩(絶乾密度:2.65g/cm³, 吸水率:0.7%)を使用した。

水準として用いた骨材レイアウトを図-1に示す。

表-1 調(配)合表

記号	W/C (wt %)	粗骨材率 (vol%)	S/C	空気 (%)	水	セメント	骨材		高性能 AE 減水剤 (ml)
							細骨材	粗骨材	
							(kg/m ³)		
MA0	50	0	2.45	6.1	267	533	1304	0	C*0.7
MA4	50	15.2	2.45	5.2	226	452	1102	403	C*0.7
MA9	50	34.2	2.45	4.0	175	350	855	906	C*0.7

*1 東京理科大学理工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 (独)建築研究所 研究員 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

水セメント比は全て 50%とし、粗骨材率が一般的なコンクリートとほぼ同等となるように粗骨材率を設定した試験体(34.2%)を作製した。また比較用に、粗骨材率がその半分程度となる試験体(粗骨材率 15.2%)、およびモデル粗骨材を含まないモルタル試験体を作製し、それぞれ試験体水準名を MA9, MA4, MA0 とした。

試験体は、モデル骨材を型枠に配置し、別途混練したモルタルを打込んで作製した。打設方向は、ブリーディングスペースの形成を避けるため、モデル粗骨材軸方向に打設した。試験体は、打設後 24 時間で脱型し、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ で材齢 28 日まで水中養生し、その後、72 時間の 105°C 乾燥により絶乾状態(吸水率 6.30%)とした。なお、 105°C 乾燥に伴い骨材周辺を中心としてマイクロクラックの発生が懸念されるが、試験体表面についてマイクロスコープで確認した範囲では数 10μ を超えるような顕著なひび割れは確認されなかった。試験体は、脱型後に $100\times 100\times 400\text{ mm}^3$ 試験体から 20mm 厚にスラブソーにより湿式で切り出したものを使用し、試験の端部の $100\times 100\text{ mm}^2$ 型枠面を除いて使用した。

なお、吸水試験中の側面からの水分の逸散を防止するため、乾燥後はエポキシ樹脂およびアルミテープにより側面を密封した。

2.2 中性子ラジオグラフィによる水分定量

モデル粗骨材を用いたコンクリートの吸水時の水分状態を、中性子ラジオグラフィにより非破壊により測定した。中性子ラジオグラフィは、中性子の高い透過性を利用した透過画像により可視化手法¹⁾であり、コンクリート中の水分の定量を高分解能で取得することが可能な手法である²⁾。本研究では、著者らがこれまで開発した手法を用い^{2, 3)}、日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィ装置(TNRF)を用いて測定を行った。

中性子ラジオグラフィによるイニシャル画像の測定後、 $100\times 20\text{ mm}^2$ の底面を水槽に浸し、48 時間の吸水試験を実施した(図-2)。吸水試験は $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温槽中で実施し、中性子ラジオグラフィの測定は、試験体のみチャンバから取り出し水との接触がない状態で行った。中性子ラジオグラフィの測定後、試験体の放射化がおさまるのを待つ必要があるため、水槽に戻すまでに 10 分程度を要する。したがって、接水時点からの累積時間からラジオグラフィの測定にかかった時間を差し引いて経過時間と定義した(以降特に断りがなければ経過時間をもって時間と称した)。

なお、中性子ラジオグラフィのノイズ除去などの画像解析手続きや、定量化手法は、著者らのこれまでの研究成果に基づいて実施した。

中性子ラジオグラフィは、各画素が中性子線の透過量

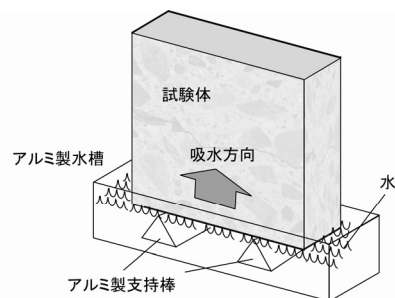


図-2 吸水試験概要

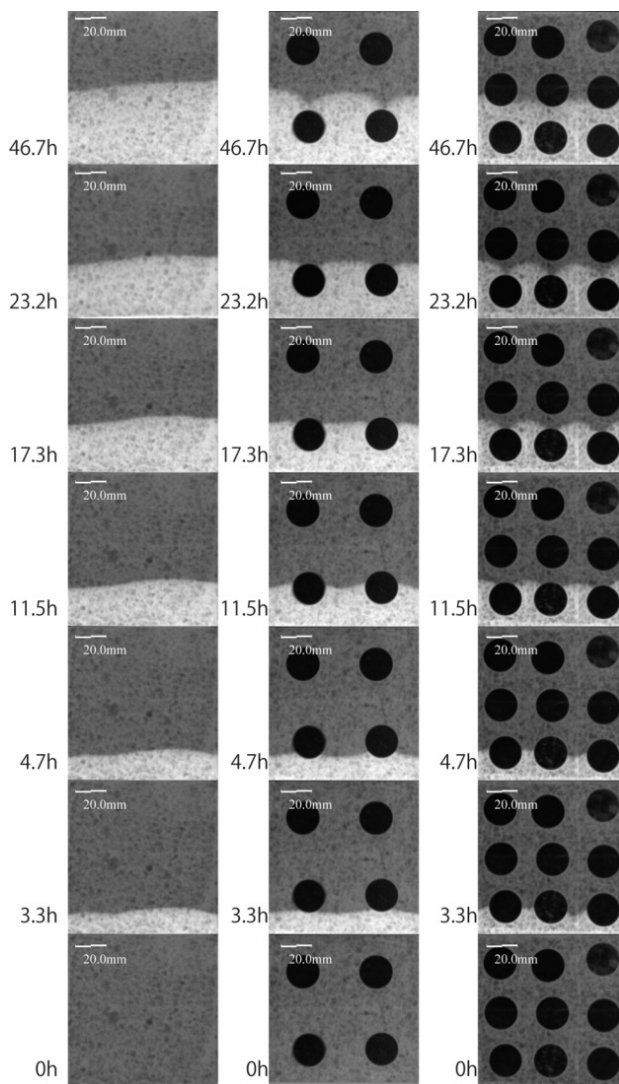


図-3 中性子ラジオグラフィによる測定結果(強度画像)

に応じた値を持つ透過画像として取得され、画像解析により各画素の中性子線減衰率に応じた値を持つ強度画像に変換される。一般に、コンクリートを構成する元素の中では水素の透過率が著しく低いため、強度画像は概ね各所の水分量に応じた画像となり、水和物や自由水の存在により強度が大きくなる。

これに対して、各時刻の強度画像から絶乾状態の初期強度画像を差し引くことで、各時刻までに変化した水分量(105°C乾燥に対する自由水分量)に応じた値を持つ差分強度画像を得ることが可能である。なお、定

量化に関しては文献 2, 3 を参照頂きたい。

2.3 実験結果

得られた中性子ラジオグラフィ(強度画像)を図-3 に示す。

図中、色の濃い箇所が中性子の透過度が高く、色の薄い箇所は透過度が低い箇所を表す。図中、黒い円形の箇所がモデル粗骨材であり、その他の不定形な濃いグレーの箇所が細骨材、やや薄いグレーがセメントペースト部、薄いグレーないし白い箇所は水分の浸透箇所を表す。

結果より、中性子ラジオグラフィにより骨材近傍の水分挙動が明確に捉えられていることがわかる。

すなわち、試験体下面から移動してきた水分は、骨材下面のレベルに到達すると、骨材のまわりを迂回しながら、見かけ上、骨材界面に沿って水分移動が先行する。骨材間隔の最も狭い箇所を通過すると、逆に骨材上面に回り込む箇所の水分移動速度は停滞し、結果として水分のフロントがV字型になる現象が確認された。

これら事象の原因として、骨材自体の吸水や骨材界面の遷移帯の影響が疑われる。そこでまず、モデル骨材の吸水状況を確認した。例として、図-4 に 48 時間における、MA9 の中央下部の骨材部の強度画像分析結果を示す。グラフは、強度が高いほど水分量大きいことを示す。

結果から、骨材範囲においても若干の吸水を確認できるが、その量は他のモルタル部分と比して僅かで、ごく表面の吸水にとどまっていることがわかる。また、吸水総量(グラフ中の面積)としてもモルタル部分に比して充分小さく、吸水試験に大きな影響を及ぼしたとは考えにくい。

次に、骨材表面に存在するとされる遷移帯の影響について検討した。例として図-5 に、48 時間における、MA9 の中央下部の骨材近傍の水分状態を分析した結果を示す。各線は、骨材中心から外側に向けて 10 度ごとに強度分布を画像解析により抽出し、全方位に対して平均値を取ったものである。

図-5 b)には、48 時間の状態と絶乾状態との差分値をとった差分強度を示した。骨材端部にあたる十数 mm に、小さなピークが確認された。このことから、骨材周辺に僅かながら自由水分量の多い領域が存在することが明らかとなった。

一方、初期状態(絶対乾燥状態の骨材周りの水分状態を)の強度画像を単純に数値化すると、a)のような概形となり、差分強度と同様に、骨材近傍に水分の集中を示すピーク(図中 10mm 近傍)が見られた。a)は絶乾状態の強度画像であるので、骨材表面に見られるピークは、自由水分によるものではなく、セメントペースト中の水和物の結合水に起因するものと考えられる。すなわち、骨材近傍では細骨材が幾何学的な壁効果により他所のように充填で

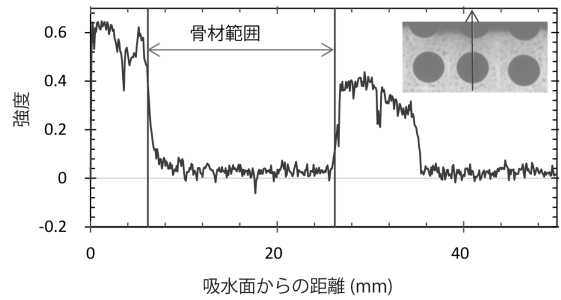


図-4 骨材部(右図矢印部分)における強度分布

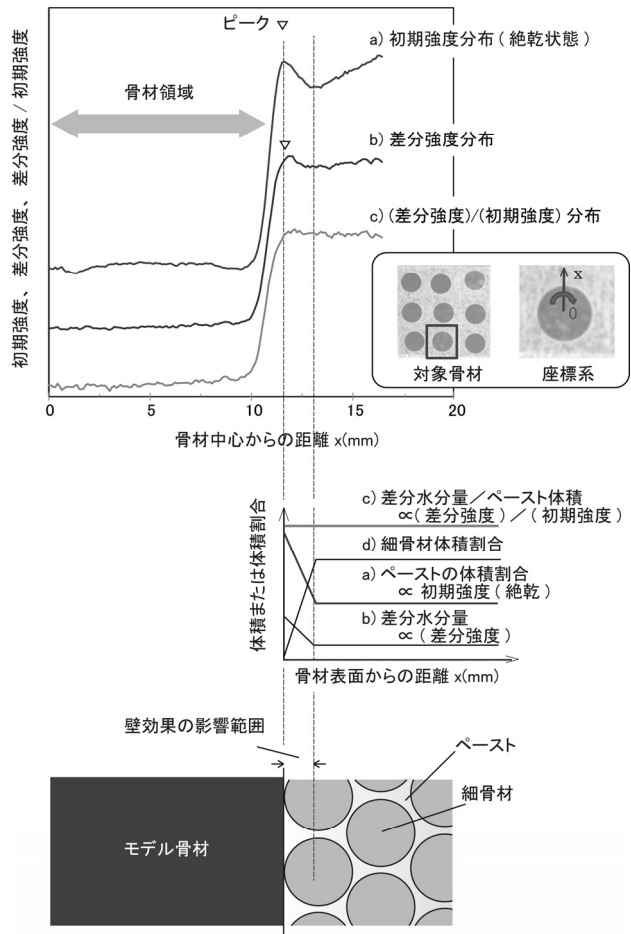


図-5 モデル粗骨材近傍の分析と壁効果の関係

a) 絶乾状態における半径方向の水分強度の平均値, b) 絶乾状態(初期画像との)との差分水分強度値, c) ペーストあたりの水分量に比例した値(差分強度)/(初期強度), d) 壁効果を考慮した細骨材割合

きず、ペーストリッチな領域を構成しているため、骨材近傍のペーストの増加に伴い、強度のピークが確認されたものと考えられる(図-5 中段および下段)。

初期強度は、概ねコンクリート中のペースト量に比例することから³⁾、差分強度(b)を初期強度(a)で除することで、ペースト体積あたりの水分量に比例した値に変換することが可能である。その結果を図-5 c)に示す。ペーストあたりの水分量に換算した場合、骨材近傍に観察されたピークは消失し、モルタル部分(10mm 以上の箇所)

では一定値を示すことがわかる。このことは、48時間において、ペーストあたりに移動してきた水分量は一定であることを示している。

すなわち、水分の移動は骨材の界面に存在する遷移帯領域の影響を受けていないことが伺え、差分水分分布に見られたピークは、骨材界面の遷移帯領域(ITZ)に蓄えられた水というよりは、骨材界面に生じる壁効果^(例えば 4)により増加したペースト部が保持している水分であると考えたほうが妥当である。

いずれにしても、ペーストあたりの水分分布が見られないことから、骨材界面とペーストの間には駆動力となる含水率勾配は見られず、ここで想定しているような比較的移動速度の早い巨視的な水分移動に対する遷移帯領域の寄与は考えにくいことを示唆するものである。

3. 硬 X 線トモグラフィによるミクロな水分移動の検証

3.1 実験概要

本研究では、 μm オーダーの空隙孔における水分挙動を検証するために、硬 X 線マイクロトモグラフィ(以下 μCT)により水分移動の測定を行った。本研究で用いた μCT 装置は、ローレンス・バークレー国立研究所(米国、バークレー)、アドバンストライトソース(Advanced Light Source : 以下 ALS)の硬 X 線マイクロトモグラフィ(Synchrotron-based Hard X-ray Micro-Tomography)を用いた。本装置は、ALS のシンクロトロンを線源とする透過 X 線装置で、光学系にも依存するが、おおよそ $1\mu\text{m}$ /画素の分解能での CT 画像の取得が可能である。同様の装置を用いた既往研究としては、国内では SPrig-8 やフォトンファクトリーの利用した人見や杉山らによる研究蓄積^(例えば 5~9)が際立っている。

X 線の透過特性は概ね原子サイズ(元素番号)に依存しており、水分の動きを捉えるのには不向きとされる。そこで、本研究では造影剤としてヨウ化ナトリウム(NaI)を用い水分の動きを可視化することを試みた。実験では吸水に用いる溶液として、NaI 水溶液を用い、NaI 濃度については、事前の検討を踏まえて 3M とした。

NaI を造影剤として用いた場合の問題は、水分と NaI が必ずしも同期して移動するわけではない点にあり、厳密には水分の浸透フロントは NaI の計測位置と一致しないものと考えられる。しかしながら、吸水プロセスにおいては、すくなくとも、NaI が検出されない箇所には水分は供給されていないと仮定できるものとした。

試験体は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 35%ペースト試験体であり、直径 5mm×40mm のプラスチックの容器(市販のストロー)に打設し作製した。24時間で脱型し、その後 100%の湿度下で1ヶ月養生し、その後真空中で保管した。さらに、試験前日に試験体側面



写真-1 浸漬実験の様子

をエポキシ樹脂でシールして側面からの吸・放水を防止した。

試験は、あらかじめ用意した水溶液中に試験体の端部を浸漬し(写真-1)、所定の時間間隔で水槽から取り出して μCT の撮影を行った。 μCT の取得にはおおよそ 30 分程度かかり、その間は水分との接触が無いため、測定期間中は試験体端部をプラスチックテープで封をすることとし、測定終了後は速やかに水槽に戻して吸水試験を継続した。

3.2 結果と考察

浸漬前、浸漬後 4 時間 45 分後および 15 時間後の CT 画像を図-6 に示す。図は、試験体の各時刻、各高さにおける切断面であり、Z は試験体底部(吸水面)からの距離を表す。図中の白い箇所が高 X 線吸収領域である。

結果より、 μCT によりセメントペーストの内部が鮮明に測定できていることがわかる。また、NaI に起因する高 CT 値領域(X 線吸収値領域:高輝度領域)が試験体の側面および底部(吸水面)に確認された。先述したとおり、NaI は厳密には水分の浸透位置と一致しない可能性があるが、ここでは、NaI に起因する高 CT 値領域を水分浸透箇所と仮定し、以下では特に断りのない限り区別しないものとする。結果より、水分が吸水面から浸透している様子が確認される一方で、側面に円環状に水分浸透箇所が見られた。これは、試験体の養生が不十分で、試験体表層が中央に比して粗になっていた可能性があることと、真空中乾燥の際に表層部から乾燥が進んだ結果、中央に比して早い速度で吸水が進んだためと考えられる。

また、断面画像中央部分の CT 値の変動の分析結果を図-7 に示す。グラフは図-7 左に示す断面画像中の枠線で囲った部分(約 0.3mm 幅)の CT 値を、y 軸方向に平均した分布図である。

結果からは、表面から水分が移動していく様子が CT 値により捉えられていることがわかる。また、異なる切断面を見ると、より吸水面に近い切断面では、徐々に全

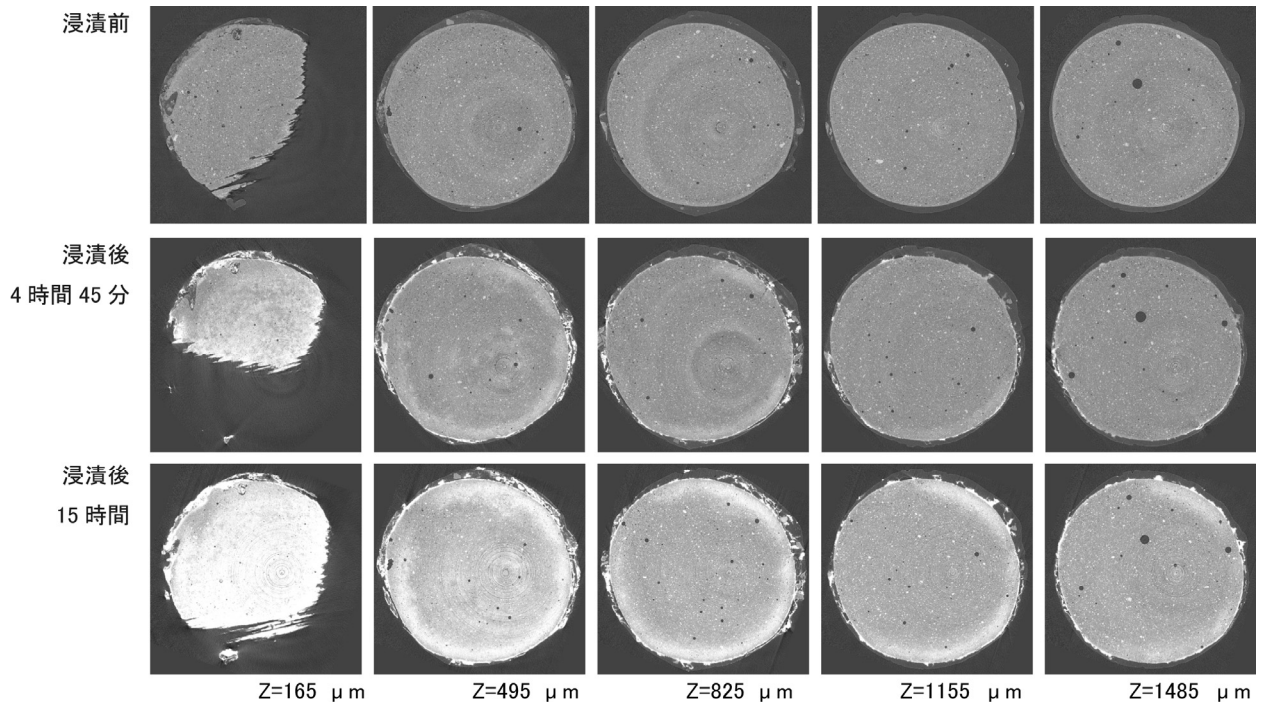


図-6 硬 X 線トモグラフィの測定結果 (T は測定時刻, Z は試験体底部(吸水面)からの高さ)

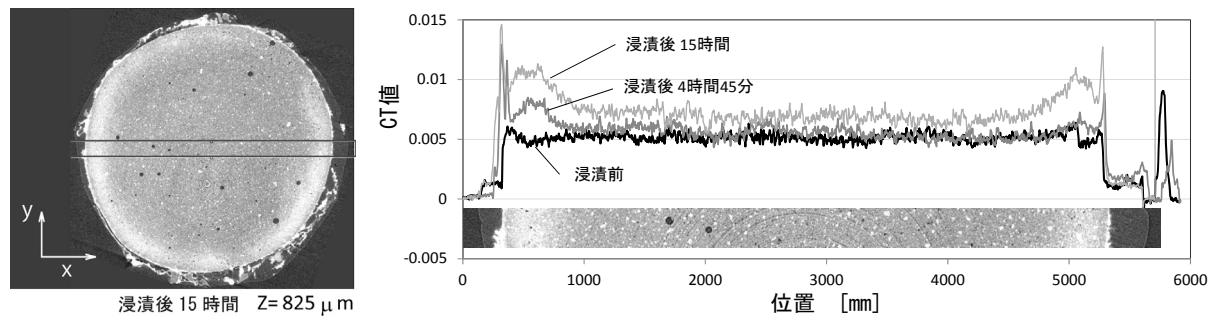


図-7 硬 X 線トモグラフィの CT 値分布
(グラフは、左画像枠部分(右グラフ下に拡大)の y 方向の平均 CT 値分布)

体の CT 値が上昇している様子が捉えられており、側面に対して底面からの水分移動の影響が卓越していることを示すものである。

図-8 に μ CT で得られた各時刻における画像の拡大図を示す。時間の経過に伴い白色化した箇所が NaI の浸潤領域である。

本研究の視点から特筆すべきは、吸水過程の初期においては、高 CT 値箇所は、 μ CT で確認できるサイズ(数 μ m 程度)の不定形な空隙や独立連行空気泡の内部では確認されず、 μ CT で空隙構造を捉えられない硬化体組織部全体が白色化する形で確認された。一方で、外部につながるエポキシ中の空隙表面には NaI の凝縮箇所が確認されており、NaI 溶液のアクセスがあれば μ CT でも NaI の凝縮を確認できることを意味している。

すなわち、水分の吸水過程においては、数時間の範囲では外部と連結のない空隙中には水分の浸透がないことを示唆するものと考えられる。

以上の結果を、2章で述べた結果と合わせて考えると、水分は外部と連結のない数 μ m 程度以上の空隙は、水分移動に寄与しておらず、同様に、外部と連結のない骨材遷移帯は、マクロに見て水分移動に大きな貢献がないことを意味すると考える。

このことは、今後の吸水プロセスの水分移動解析においては、セメント硬化体の水分移動特性を把握することで、健全なコンクリートの物性を予測することが可能であることを意味する。一方で、外部に連結性を有するひび割れや粗大空隙や遷移帯は雨水のダイレクトな通り道となることは明らかで、今後、ひび割れなどによる水分供給をより詳細に検討することが重要と考える。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの吸水過程における粗骨材の影響に関して明らかにすることを目的とした、一連の基礎的実験を行った。以下にその知見をまとめる。

- (1) 中性子ラジオグラフィを用いた水分挙動の測定実験を実施した。結果より、コンクリートの骨材周辺の水分移動は、骨材周囲を水分が回り込むように移動することが確認された。
- (2) 骨材近傍の水分状態を定量的に分析した結果、骨材近傍約 5mm までの範囲で見られる体積含水率の増加現象は、骨材近傍における壁効果に起因するペースト率の増加に起因する。
- (3) 骨材近傍においてペーストあたりの水分分布が見られないことから、骨材界面とペーストの間には駆動力となる含水率勾配は見られず、比較的移動速度の早い巨視的な水分移動に対する遷移帯領域の寄与は考えにくいことを示唆するものである。
- (4) 硬X線マイクロトモグラフィによりさらに微細な水分挙動を実験的に確認し、吸水過程においては微細な気泡中を含む比較的大きな空隙中では水分移動がないことを確認した。

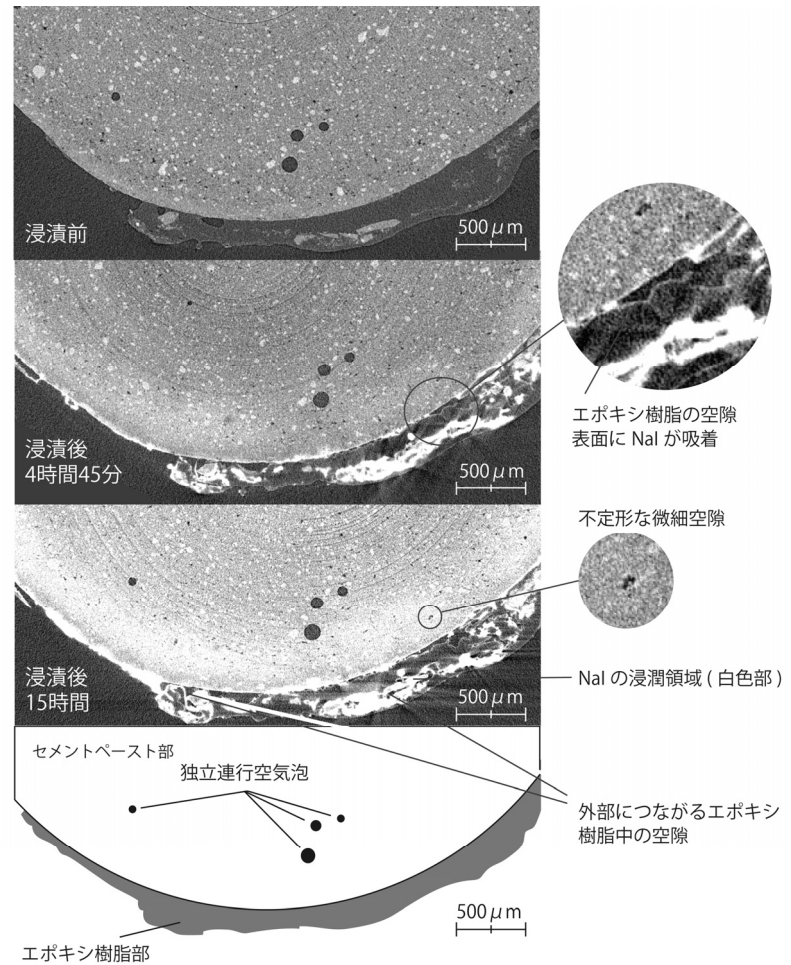


図-8 硬X線トモグラフィの拡大図

謝辞：本研究の一部は、公益財団法人 鹿島学術振興財団の研究者交流援助を受けて実施したものである。ここに銘記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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，45(11)，pp.48-54，2007.11
- 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，61，pp.160-167，2007.3
- 3) 兼松学，土屋直子，丸山一平，野口貴文：中性子ラジオグラフィによるコンクリートひび割れ部の吸水過程における水分移動現象の評価，セメント・コンクリート論文集，62，pp.175-182，2008.3
- 4) W.X. Xu, Z. Lv, H.S. Chen：Effects of particle size distribution, shape and volume fraction of aggregates on the wall effect of concrete via random sequential packing of polydispersed ellipsoidal particles, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol.392, Issue 3, pp.416-426, 2013.2
- 5) 人見尚，三田芳幸，齊藤裕司，竹田宣典：SPring-8におけるX線CT像によるモルタル微細構造の観察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.645-650，2004
- 6) 人見尚，片岡弘安：ひび割れ導入モルタルのX線CTによる自己治癒過程の研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1427-1432，2011
- 7) 池上裕樹，杉山隆文：実構造物フライアッシュコンクリートの空隙構造のイメージング，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1859-1864，2011
- 8) 増田亜由子，Promentilla M.A.B.，杉山隆文：放射光X線CTによるセメントペーストの材齢経過に伴う微細構造変化の観察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.539-544，2010
- 9) Promentilla M.A.B.，Sugiyama T.：X-ray Microtomography of Mortars Exposed to Freezing-Thawing Action，Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.97-111, 2010