

硬化コンクリートの含水率および内部への水分浸透に関する各種試験方法

Various test methods for water content of and water penetration into hardened concrete.

木野瀬 透*1

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（RC）造構造物の含水状態を把握することの重要性が高まっている。コンクリート中の水分は、中性化、鉄筋腐食、乾燥収縮、アルカリシリカ反応、凍害および火害等の劣化現象に深く関係する。特に、鉄筋まで中性化が到達した後の鉄筋腐食環境を把握する目的で、既存RC造構造物のコンクリートの含水状態を把握するニーズが増加している¹⁾。

長年、RC造構造物の供用限界の目安は、コンクリートの中性化の進行を基準に判断されてきた。これは、中性化深さが鉄筋のかぶり厚さを超えると、鉄筋の不動態被膜が破壊されて腐食環境に至るという劣化機構が一般的に認知されているからである。この考え方によると、高度経済成長期に建設された築50年を超える多くの建築物が供用限界を迎えることとなる。一方で、著者らは、RC造構造物の耐久性調査を通して、中性化の進行速度は含水状態に影響を受けること²⁾や、鉄筋まで中性化が到達しても、水分の影響を受けない環境では腐食しにくくなること³⁾を報告している。例えば、写真-1は、鉄筋のかぶり厚さを超えて中性化が進行しているものの、屋内で水分の影響を受けにくい環境にあるため、腐食が進んでいない状況を示している。以上のように、RC造構造物の鉄筋腐食環境を適切に評価することを目的として、コンクリートの含水状態（含水率）を把握することが重要となる。

上記等の背景を踏まえ、第三者機関による中性化の進行と鉄筋のかぶり厚さの関係のみで判断しない総合的な「RC造建築物の構造体の耐用年数評価」業務が行われている。本稿では、耐用年数評価において使用される指標

の一つである「コンクリートの含水率」の測定方法を説明する。さらに、現在、提案・検討されている試験方法について情報を提供することを目的として整理した。

土木学会における水分浸透に関する試験方法（案）⁴⁾の制定（2018年）、コンクリート工学年次大会（2022年度）における水分浸透に関するセッションの設置等、コンクリート表面から水分が浸透する速度や現象の把握に向けた検討が盛んになっている。鉄筋腐食の要因となる降雨等による短期の水分浸透を評価する方法として規定された試験方法（案）に加え、国内外における水分浸透状況の把握手法について、簡潔に解説する。



写真-1 中性化が到達しても腐食が進んでいない鉄筋（かぶり厚さ：約30mm（縦筋）、中性化深さ：約40mm）

*1 KINOSE Toru：一般財団法人 日本建築総合試験所 試験研究センター 建材部 材料試験室

2. コンクリートの含水率の測定方法

コンクリートの含水率は、一般に、絶乾状態における質量に対する自由水（化学的に結合していない水）の量のことを指す。従来、RC造構造物においては、乾式によりコンクリートコア（以下、コア）を採取し、自由水を105℃で乾燥させる測定方法（質量法）が用いられている。この方法により直接的に水分量を測定できる一方で、乾式によるコアの採取は、一般的に普及している湿式によるコアの採取と比較して、コストや現場作業の労力が大きくなる。そこで、コンクリートの含水率（含水状態）を評価する方法として、表-1に示すように様々な測定方法が提案されている。

2.1 質量法

質量法は、コンクリート中の自由水を乾燥させることにより、直接的にコンクリート中に含まれる水分量を測定する方法である。一般的に、JIS A 1476「建築材料の含水率測定方法」⁵⁾により測定される質量基準質量含水率の百分率は「含水率」または「質量含水率」と呼ばれることが多い。同規格内では、表-2に示すようにコンクリート等のセメント系材料以外にも木質系材料、発泡プラスチック材、せっこう系材料等の含水率測定方法が規定され、各種材料の乾燥温度が示されている。ここでは、屋外の雨掛かりの有無および屋内の3種類の環境から採取したコンクリートを対象として、JIS A 1476による質量基準質量含水率の測定方法の一例を示す。

表-1 含水率（含水状態）の各種測定方法

測定対象	測定方法	概要
内部	質量法	乾式により採取したコアやはつり片の自由水を乾燥させ、コンクリートの絶乾質量に対する採取時のコンクリートの自由水量を「含水率」として求める方法である。
	電気的方法 (電気抵抗・静電容量)	含水状態により変化する電気抵抗、静電容量を測定し、含水率を求める方法である。 コンクリートを打ち込む前にあらかじめ電極を設置するか、振動ドリルにより削孔した小孔内に電極を挿入することにより、電極間の電気抵抗等を測定する。 この原理を基にした市販の含水率計がある。
	湿度センサーによる方法	含水状態と関係の深い、コンクリート内部の湿度環境を把握することで、含水状態を評価する方法である。
	中性子線、X線による方法	主にコンクリートへの水分の浸透状況を可視化する目的で使用される。透過画像の差分解析や検出された中性子強度（X線強度）と含水率の関係をを用いて定量評価される。
表面	電気的方法 (電気抵抗・静電容量)	上記同様に電気抵抗や静電容量を測定する方法であるが、電極をコンクリートの表面に押し当てて測定する。
	変色紙の貼付けによる方法	定性的に水分の有無や浸透状況を確認する目的で、乾燥度試験紙による方法がある。

表-2 JIS A 1476に規定される各種材料の乾燥温度⁵⁾

試験対象とする材料の種類	乾燥温度
105℃において組織的構造が変化しない材料 (セメント系材料、木質系材料、石材、セラミック等)	105±2℃
65～105℃の間で組織的構造の変化が生じる材料 (発泡プラスチック材、紙、布等)	65±2℃
高温で結晶水の蒸発、発泡材の放散が生じる材料 (せっこう系材料、気泡材等)	40±2℃

【測定方法の一例】

① RC造構造物の試験対象位置において、乾式によりコアを採取する。

【註】質量測定および乾燥開始までに時間を要する場合は、不透湿性フィルム（ポリエチレンフィルム等）やアルミニウム箔を用い梱包し、含水状態が変化しないように密封する。

② 試験の目的に応じて、コアから試験片を切り出す。ここでは、図-1のように、コアの表面から100mmの位置まで、20mmの間隔で試験片を切り出し、含水率の分布を測定する例を示す。

③ 試験片の切り出した直後の乾燥前の質量 (m) を測定し、 $105 \pm 2^\circ\text{C}$ に設定した乾燥機に入れ、質量が恒量となるまで乾燥させる。

④ 乾燥後の試験片の質量 (m_0) を測定し、式(1)により質量基準質量含水率 (u) を算出する。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u : 質量基準質量含水率 (kg/kg)
 m : 乾燥前の試験片の質量 (kg)
 m_0 : 乾燥後の試験片の質量 (kg)

試験の結果、図-2に示すような含水率分布が得られる。先述した通り、コンクリート分野において、一般に含水率の測定結果は百分率 (%単位) で示される。また、異なる使用材料や配(調)合等を用いたコンクリートの含水状態の相対比較やコンクリート中の水分移動解析等を目的として、飽水状態における含水率(吸水率)を100%とする「相対含水率」(飽和度とも呼ばれる)を用いた検討も行われている。

なお、上記のコアによる含水率の測定では、「乾式」により採取したコアを用いるため、コストや労力を要する。有田らは、ドリル削孔粉を用いた簡易的な質量法による含水率の測定方法を検討している⁶⁾。直径10mm以上の振動ドリル用ビットを用いて、2孔から採取したドリル削孔粉によって、乾式コアとほぼ同程度の含水率が測定できることを報告している(図-3)。一方で、同方法は削孔粉の採取量、削孔速度および削孔時に生じる摩擦熱等の影響によりばらつきが大きくなることがあるため、さらなる検討が必要としている。

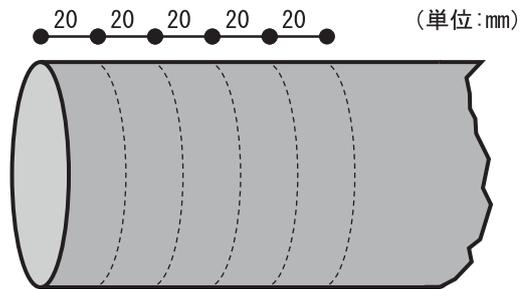


図-1 試験片の切り出し方法(一例)

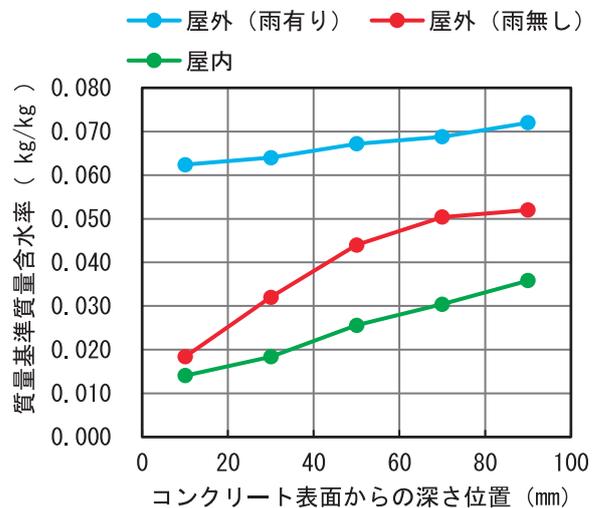


図-2 含水率分布の測定結果(一例)

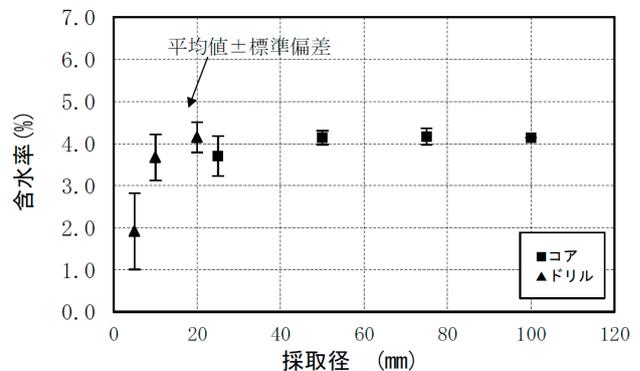


図-3 採取径による含水率と標準偏差⁶⁾

2.2 電気的方法

電気的方法は、コンクリートの電気抵抗や静電容量が、含水状態により変化する性質を利用して、コンクリート中に含まれる水分量を間接的に測定する方法である。電気的方法は、電極をコンクリートの内部に設置する方法、またはコンクリート表面に押し当てる方法がある。電気抵抗の測定による方法では、あらかじめ作成したキャリブレーションカーブ（含水率と電気抵抗の関係）により含水率に換算する。

著者ら⁷⁾は、片側の端面から温度勾配が生じるように105℃乾燥により含水率を調整したコンクリート試験体について、振動ドリルで削孔した2つの孔内にステンレス製のブラシ型電極を挿入し、電極間の電気抵抗を測定した(図-4)。その後、同位置の含水率を測定し、電気抵抗と含水率の関係を求めた結果を図-5に示す。このように、含水率が大きくなると、電気抵抗は小さくなる傾向が認められている。この性質を利用して、ステンレス製のブラシ型電極により測定される電気抵抗から含水率を求める含水率計が市販されている^{例えば、8)}。また、あらかじめコンクリート打設時にステンレス棒電極を埋設することで、硬化初期からの含水率変化を捉える方法が検討⁹⁾されている。この際、電極間のコンクリートを誘電体とするため、コンクリートの使用材料（セメント、骨材、混和材の種類等）、配（調）合、測定位置による粗骨材の偏在等により電気抵抗や静電容量は変化する。湯浅らは、コンクリートよりも安定した空隙構造を持つセラミックを誘電体とした測定方法を提案している¹⁰⁾。

コンクリート内部に電極を挿入する以外に、コンクリートの表面に電極を押し当てる方法により、削孔等の前準備が不要で、簡易的に含水率を測定できる市販品が各社より販売されている^{例えば、11)~14)}。なお、これらの含水率の測定値は、表面付近の値であり、鉄筋のかぶり厚さ位置の値を正確に把握するのは困難と考えられる¹⁰⁾。

2.3 湿度センサーによる方法

コンクリート内部が一定の温湿度環境で保たれている場合、同位置におけるコンクリート内部の相対湿度とコンクリートの含水状態が平衡状態になる性質を用いて、含水状態を把握することができる。コンクリート内部の相対湿度と平衡状態における含水率の関係は、平衡含水率曲線または水蒸気吸着等温線等と呼ばれ、水蒸気の吸着過程と脱着過程で異なる曲線を描くため、現在どちらの過程にあるのか注意する必要がある。

RC造構造物において、図-6に示すようにコンクリート表面から振動ドリルで削孔した小孔内に、湿度セン

サーを埋設する方法が提案されている^{2), 15)}。今本らは、軍艦島構造物群において、コンクリート内部の相対湿度と質量法による含水率の関係は、同構造物群のコンクリート試験片を用いて測定した平衡含水率曲線（等温吸着曲線）と概ね一致したことを報告している(図-7)¹⁵⁾。

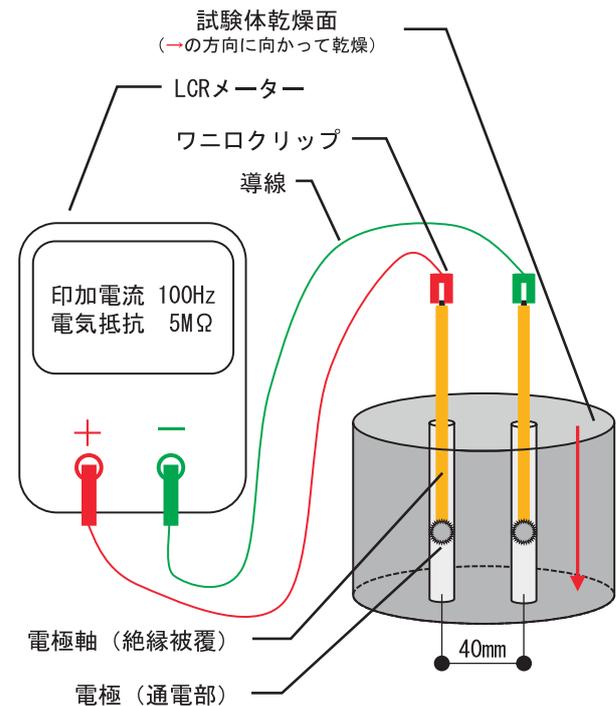


図-4 電気抵抗の測定方法（一例）

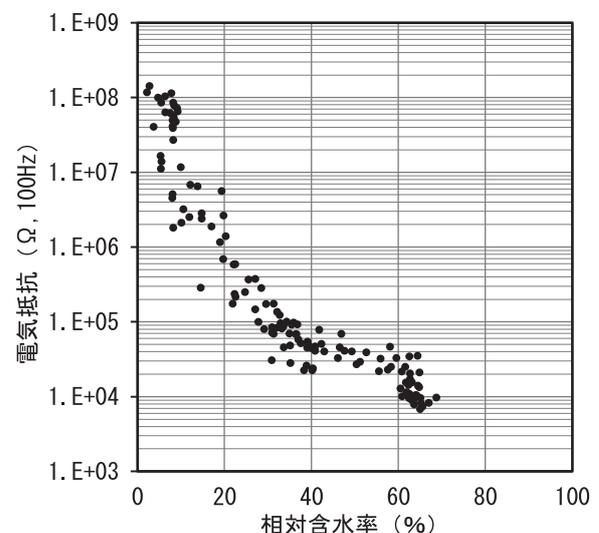


図-5 電気抵抗と含水率の関係（一例） 文献7の図を編集

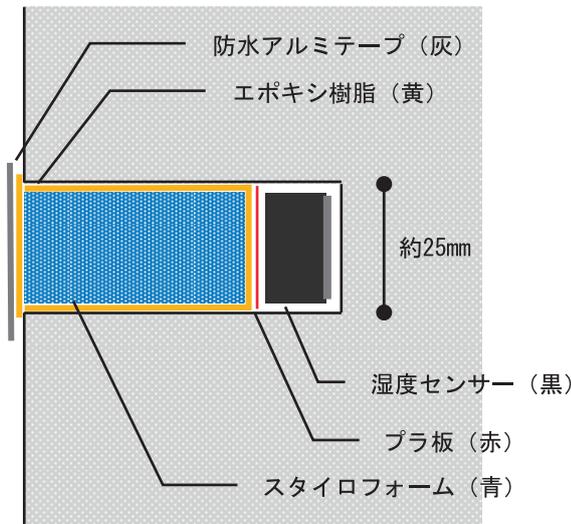


図-6 湿度センサーの設置イメージ

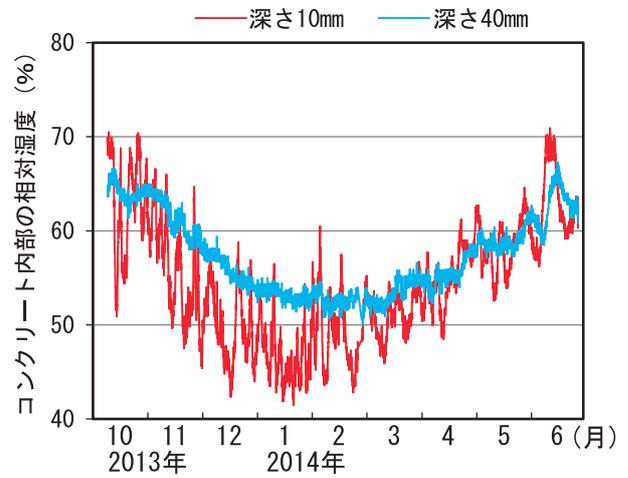


図-8 相対湿度の変動
(測定期間：2013年10月～2014年6月)

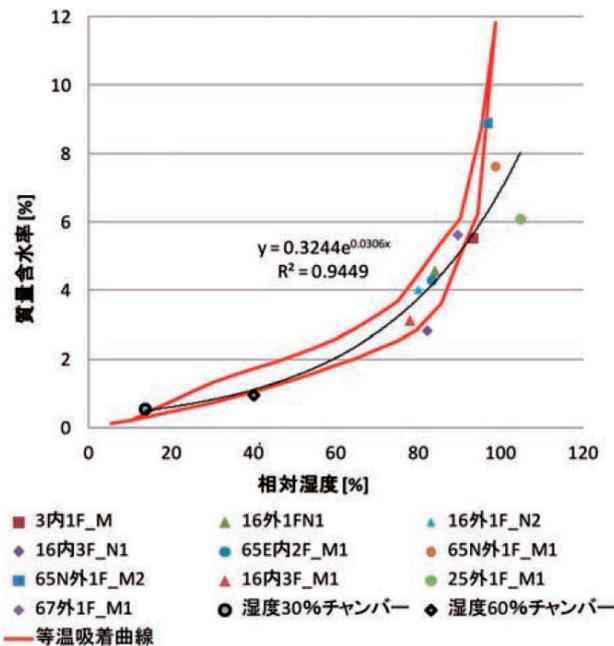


図-7 相対湿度と質量含水率の関係¹⁵⁾

また、著者は、東京都内のRC造構造物の外壁部において、コンクリートの表面から10mmと40mmの位置に湿度センサーを埋設し、コンクリート内部の相対湿度の変動を約1年間測定した(測定期間：2013年10月～2014年6月)。図-8に示すように、表面から10mmの位置では、外部環境により短期間での変動が大きくなる。一方で、表面から40mmの位置では、長期間での変動はあるものの、短期間での変動は小さく、外部環境の変化による影響は受けにくいことが分かる。

2.4 その他の方法

その他の方法として、水分の存在により色が変化する乾燥度試験紙¹⁶⁾や、中性子線¹⁷⁾やX線¹⁸⁾を試験体に照射し、得られた透過画像により水分の存在を確認する方法等が提案されている。

① 乾燥度試験紙による方法¹⁶⁾

調湿剤として使用される青色シリカゲルと同様に塩化コバルトを含有した変色紙(塩化コバルト紙)を用いる方法である。この変色紙は、水分を含んでいない時は青色を示し、水分を含むと徐々に赤色に変化していく。湯浅らは、変色紙をコンクリート表面に貼り付けて10分後の色を10段階に評価することで、コンクリート表面から約0.5cmまでの含水状態(コンクリート表面からの水分蒸発速度)を評価できるとしている。

② 中性子線による方法

中性子線を被写体(試験体)に透過することにより、被写体の透過画像(中性子ラジオグラフィ)を得ることができる。中性子線を用いた技術は、硬化コンクリート内部の欠陥探傷技術、硬化コンクリート内部鉄筋にかかる応力測定、フレッシュコンクリートの単位水量測定、水分浸透状況の可視化等に応用されている¹⁷⁾。また、舟川らは、セメントペースト試験体において、含水時と乾燥時の透過画像の差分解析や検出された中性子強度と含水率の関係を予め把握することにより、試験体中の水分を定量評価している¹⁹⁾。

③ X線による方法

密度差により透過量に変化するX線を試験体に照射し、X線画像(X線CT(computed tomography))を得ることにより、硬化コンクリートの内部構造を二次元的または三次元的に可視化する目的で用いられる。微細構造を非破壊的に可視化する方法²⁰⁾、硫酸塩などによる化学的侵食の状況を可視化する技術²¹⁾等に応用された例がある。水分測定の見点では、含水状態の影響により異なるコンクリートの密度差から得られる透過像の差分解析により、コンクリート中への水分の浸透状況を連続的に可視化する目的で利用されている(例えば、18)、22)。

3. コンクリート中への水分浸透に関する試験方法

3.1 JSCE-G 582「短期の雨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)」による方法

降雨等に伴うコンクリート内部への水分の浸透は、RC造構造物の鉄筋腐食に影響を及ぼす。土木学会では、2017年制定のコンクリート標準示方書(設計編)²³⁾において、「中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査」が示された。この照査では、コンクリート内部への水分の浸透速度を表す水分浸透速度係数が必要となる。示方書内では、水分浸透速度係数を計算式により算出するか、適切な試験により定めることとされていたものの、制定当時は同学会による試験方法が示されていない。

水分浸透速度を評価する試験方法として、国外では、BS EN 12390-8²⁴⁾、DIN 1048²⁵⁾ および ASTM C 1585²⁶⁾等が制定されていたが、いずれも自然環境下における水分の浸透を評価しているとは言えない。BS EN 12390 および DIN 1048では、コンクリート中に水分を加圧して浸透させたのち、割裂面において水分の浸透深さを測定する。また、ASTM C 1585では、水分の浸透深さではなく、吸水による質量増加を測定する。

このような背景のもと、降雨などの常圧環境下における長時間の水分供給を想定した方法として、円柱試験体の端面の水中浸せきによる水分浸透深さから水分浸透速度係数を求める試験方法(JSCE-G 582:2018)⁴⁾が提案された。本測定方法の一例を示す。また、試験体の水中浸せきのイメージを図-9に、試験終了後の試験体を写真-2に示す。

【測定方法の一例】

- ① 直径100 mm、長さ200 mmのコンクリート円柱試験体を9体(浸せき期間3水準、各3体)作製する。
- ② 試験の目的に応じた養生を行ったのち、試験体の型枠底面側の端面から約25 mmまでの部分を切断する。
- ③ 切断後の試験体を20℃かつ60%RHの環境で91日間、または40℃かつ30%RHの環境で28日間の乾燥を行い、質量を一定とする。
- ④ 乾燥後の試験体の側面をエポキシ樹脂またはアルミニウム箔テープ等でシールしたのち、切断面を下にして、試験体の下部から10 mmの位置まで漬かるように水中に浸せきする。
- ⑤ 既定の水中浸せき期間(5時間、24時間、48時間)が経過したのち、試験体を引き上げ、軸方向に割裂する。
- ⑥ 割裂面に対し、水分により着色する現像剤を噴霧し、浸せき面から着色が生じた深さ(水分浸透深さ)を測定する。
- ⑦ 水分浸透速度係数を式(2)により求める。

$$A = \frac{\sum_{n=1}^n (\sqrt{t_i} - \sqrt{\bar{t}}) \cdot (L_i - \bar{L})}{\sum_{n=1}^n (\sqrt{t_i} - \sqrt{\bar{t}})^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、A : 水分浸透速度係数 (mm/√hr)

n : データ数 (3体)

$\sqrt{t_i}$: i番目のデータの浸せき時間の平方根 (√hr)

$\sqrt{\bar{t}}$: 浸せき時間の平方根の平均値 (√hr)

L_i : i番目のデータの水分浸透深さ (mm)

\bar{L} : 水分浸透深さの平均値 (mm)

(i番目のデータは3体の平均値でない個々の試験体の値を示す)

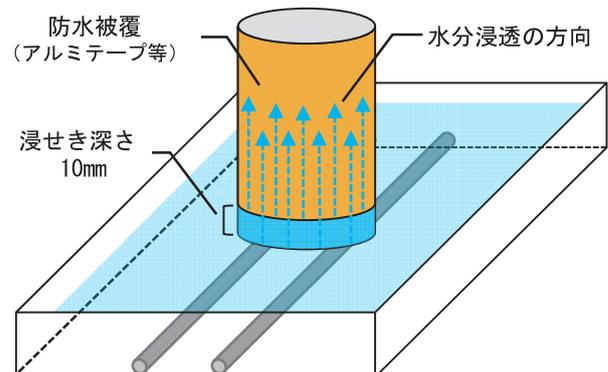


図-9 試験体の水中浸せきイメージ

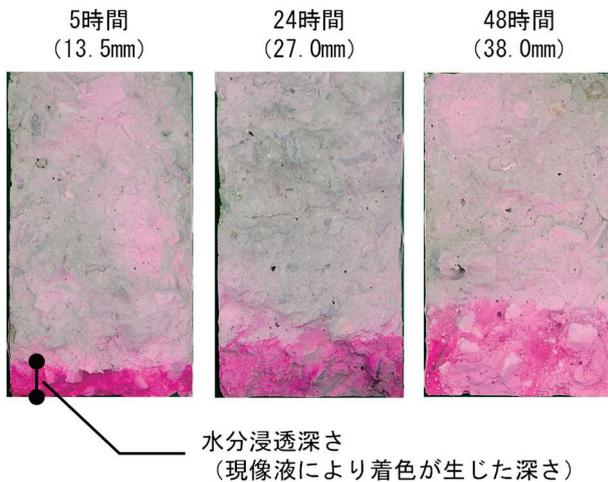


写真-2 割裂面に現像剤を噴霧した試験体の一例
(写真上部に浸せき時間と水分浸透深さの測定値を示す)

3.2 中性子線およびX線による方法

中性子線やX線を用いることで、試験体に各放射線を照射し、非破壊で内部への水分の浸透状況を可視化することができる。以下に、中性子線およびX線を用いた水分の浸透に関する分析例を紹介する。

兼松らは、中性子ラジオグラフィにより、円筒形の骨材を内在したモルタル試験体 (100×100×20mm) の端面 (下面) からの水を浸透させた状況を観察した (図-10)²⁷⁾。下面から骨材周囲を回り込むように水分が徐々に浸透していく状況を観察できる。また、質量法による含水率測定やセンサーによる測定では困難であったひび割れ部における経時的な水分の浸透現象を中性子ラジオグラフィにより可視化されている (図-11)²⁸⁾。

X線CTによる分析例として、近年、コンクリート中への水分の浸透速度がLucas-Washburnの式に従うか否かの検証が行われている^{例えば、22)}。Lucas-Washburnの式とは、円管内の液状水の浸透距離 (L) は、時間の平方根 (\sqrt{t}) に比例するという式であり、コンクリート中への水分浸透にも適用されている²⁹⁾。R. Kiranらは、X線CTを用いて、骨材種類、混和材の有無、浸透環境の温度および試験体の乾燥条件が水分浸透に及ぼす影響を観察し、いずれの条件においても、浸透距離と吸水時間の平方根の間には非線形関係が観察され、吸水に停滞が生じたこと²²⁾を報告している。

藤牧ら³⁰⁾は、中性子線およびX線を用いて、同一試

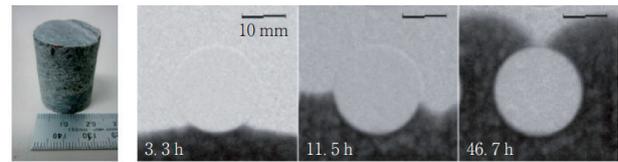


図-10 中性子ラジオグラフィによる
円柱型骨材周囲への水分浸透状況の可視化²⁷⁾

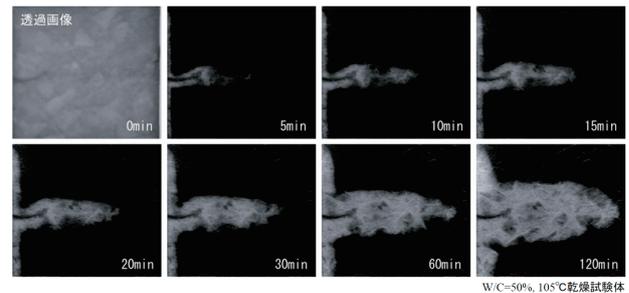


図-11 中性子ラジオグラフィによる
ひび割れ部における水分浸透状況の可視化²⁸⁾

験体における水分の浸透状況を観察し、両方法を比較している。その結果、水素原子とモルタル中のカルシウム原子およびけい素原子の減衰という観点から、中性子線はX線と比べて水分の浸透をより明瞭に把握できると報告している。一方で、国内では中性子源装置が利用可能な機関は限られているが、X線CT装置は多くの機関で導入できるというメリットがある。

4. おわりに

本稿では、コンクリート中の水分に関連し、規格化された試験方法に加え、研究等で使用されている方法の一部を紹介した。これまで、RC造構造物の耐久性評価において、圧縮強度や中性化深さの測定と比較すると、含水状態の重要度は低かった。一方で、RC造構造物の長寿命化が望まれる今日、中性化後の鉄筋腐食リスクを適切に判断するため、コンクリートの含水状態や内部への水分浸透を把握することが求められる。今後は、今回紹介した試験方法を適切に活用していく必要がある。

現在、日本非破壊検査協会内に設置された「コンクリートの含水率に関する試験方法研究委員会」(委員長 日本大学 湯浅昇教授)では、共通試験を通して各種試験方法の比較データを蓄積し、その規格化が検討されている。それにより、日本非破壊検査協会のNDIS規格やJIS規格等として広く普及し、RC造構造物の維持管理を目的に使用されることが期待されている。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考－中性化は寿命か？－，2017年度日本建築学会大会（中国）材料施工部門パネルディスカッション資料，2017.8
- 2) 木野瀬透，今本啓一，田沼毅彦，清原千鶴：コンクリート中の水分を考慮した中性化後における鉄筋腐食予測に向けた基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.601-606，2015
- 3) 木野瀬透，今本啓一，清原千鶴：実構造物の鉄筋腐食に影響を及ぼすひび割れ，中性化および含水率に関する実地調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1227-1232，2016
- 4) 土木学会基準：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），2018
- 5) 日本規格協会：JIS A 1476「建築材料の含水率測定方法」，2016
- 6) 有田剛士，田中章夫：乾式工法を用いたコンクリートの含水率測定方法に及ぼす測定深さの影響，2021年度日本建築学会関東支部研究報告集，Vol.92，pp.65-68，2022.3
- 7) 木野瀬透，吉田夏樹，新大軌，今本啓一：高温加熱したコンクリートの含水状態と電気抵抗に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1282-1287，2022
- 8) <https://www.kett.co.jp/products/hi-800/>（2022年9月4日参照）
- 9) 鎌田英治，田畑雅幸，中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定，セメント技術年報，XXX，pp.288-292，1976
- 10) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性による含水率試験方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第62巻，第498号，pp.13-20，1997
- 11) <https://www.kett.co.jp/products/hi-100/>（2022年9月4日参照）
- 12) <https://www.kett.co.jp/products/hi-520-2/>（2022年9月4日参照）
- 13) <https://www.fts-web.jp/product/?id=1603248135-247540>（2022年9月4日参照）
- 14) <https://www.screeningeagle.com/en/products/resipod>（2022年9月4日参照）
- 15) 今本啓一，下澤和幸，吉田夏樹：軍艦島構造物群の劣化メカニズムとその学術的価値，GBRC，Vol.41，No.1，pp.25-32，2016.1
- 16) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇，逸見義男，佐藤弘和：乾燥度試験紙によるコンクリートの含水状態の評価，日本建築仕上り学会論文報告集，第5巻，第1号，pp.1-6，1998.3
- 17) M. Lukovic, G. Ye, E. Schlangen, K. V. Breugel: Moisture movement in cement-based repair systems monitored by absorption, Heron, Vol. 62, pp. 21-45, 2017
- 18) 日本コンクリート工学会：「中性子線を用いたコンクリートの検査・診断」に関するシンポジウム 委員会報告集，2021
- 19) 舟川勲，沼尾達也，飯倉寛：中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の水分評価に関する基礎的研究，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol.67，No.4，pp.596-604，2011
- 20) E. N. Landis, E. Nagy: Examination of Pore Structure Using Three Dimensional Image Analysis of Microtomographic Data, Concrete Science and Engineering, Vol.2, pp.162-169, 2000
- 21) S. R. Stock, N. K. Naik, A. P. Wilkinson, K. E. Kurtis: X-ray microtomography (micro CT) of the progression of sulfate attack of cement paste, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.1673-1675, 2002
- 22) R. Kiran, H. Samouh, A. Matsuda, G. Igarashi, S. Tomita, K. Yamada and I. Maruyama: Water Uptake in OPC and FAC Mortars under Different Temperature Conditions, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.19, pp.168-180, 2021.3
- 23) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書（設計編），2017.3
- 24) British Standard: BS EN 12390-8 Testing hardened concrete – Part 8 Depth of penetration of water under pressure, 2000
- 25) German National Standard: DIN 1048 part 5 Testing of hardened concrete (specimens prepared in mould), 1991
- 26) ASTM International: ASTM C1585-20 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, 2020
- 27) 兼松学：中性子によるコンクリート中の水分の可視化，コンクリート工学，53巻，5号，pp.447-451，2015
- 28) 兼松学，野口隆文，丸山一平，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水分挙動の可視化および定量化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.981-986，2007
- 29) 中村兆治，酒井雄也，岸利治：若材齢モルタル硬化体への液状水侵入挙動に関する基礎的研究，第66回セメント技術大会講演要旨，pp.104-105，2012.5
- 30) 藤牧哲也，丸山一平，大竹淑恵，水田真紀：中性子画像とX線画像によるモルタル吸水実験の比較評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1648-1653，2020

【執筆者】



*1 木野瀬透
(KINOSE Toru)