

論文 コンクリート内の水分浸透性状に高炉スラグ微粉末が与える影響の 中性子イメージングによる検討

菊地 晃平*1・酒井 雄也*2・水田 真紀*3・大竹 淑恵*4

要旨：本研究では中性子イメージングを用いて、高炉スラグ微粉末（BFS）を使用したコンクリート内の水分浸透性状の理解と、BFSの使用が水漏れ検知剤の呈色に与える影響の理解を目的とした。中性子イメージングから求めた深さ方向の含水量分布から、BFSの使用によりコンクリートへの水分浸透の性状が大きく変化することを確認した。さらに、BFSの使用量の増加に伴って、検知剤による呈色領域以深で、中性子イメージングで計測される含水量が増加した。これらの差異は、BFSの使用によりコンクリート内の空隙構造が緻密化したことに起因する可能性を指摘した。

キーワード：水分浸透, 高炉スラグ微粉末, 中性子イメージング, 水漏れ検知剤, 空隙構造

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に建造されたコンクリート構造物の維持管理が重要な課題となっている。コンクリート構造物の代表的な劣化現象として、コンクリートの中性化が関与する鉄筋腐食がある。そのため、中性化速度係数に代表されるような中性化と鉄筋腐食の関係性についての研究が多く行われてきた¹⁾²⁾。2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、中性化に伴う鋼材腐食について、「コンクリートの中性化深さが設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないこと」を照査することにより、「鋼材腐食深さが限界値に達しないこと」と記載されている³⁾。しかし、実際にはコンクリートの中性化が進行したとしても、水の供給が乏しい場合に鋼材腐食の進展が見られない、または進行が著しく遅いことが報告されている⁴⁾。一方で、これまでのコンクリート標準示方書では、水の供給の有無が鉄筋腐食に与える影響が陽に考慮されておらず、実際の劣化進行と乖離することがあった。このような乖離を解消するため、2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では水の影響による鋼材腐食の考え方が導入され、「中性化深さが設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界深さに達しないこと」に代えて、「設計耐用期間中の中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食深さが限界値以下であること」という改訂がなされた⁵⁾。このような改訂に伴い、コンクリート内の水分移動の高精度な予測がさらに重要となった。

コンクリート標準示方書〔設計編〕には、コンクリートの水分浸透速度係数を取得する方法が2つ記載されている。1つ目の方法は、水分浸透速度係数の予測式を使用する方法であり、2つ目の方法は、実験によって水分浸透速度係数を求める方法である。前者の方法では、変

数が水結合材比（W/B）のみとなっており、水分浸透性状を改善させることが指摘されている高炉スラグ微粉末（BFS）⁶⁾などの、混和材による効果を十分に反映できない可能性がある。また、後者の実験においては、水分浸透深さを測定する際に水漏れ検知剤（以下、検知剤とする）を使用することが定められているが、どの程度の含水率以上で検知剤が呈色するのかなど不明な部分が多い。またBFSを用いたモルタルにおいて、吸水による重量増加は生じているにもかかわらず、検知剤が呈色しない事例が報告されている⁷⁾。

上記のような問題を解決するためには、コンクリート中の含水量分布と検知剤による水分浸透深さを比較することが有効である。しかし、水分センサーなどを用いた方法で得られるのは、局所的な情報にとどまる。

そこで本研究では中性子イメージングによる水分浸透の定量評価手法⁸⁾を用いて、コンクリート内の含水量分布を取得した。これにより、BFSの使用がコンクリートへの水分浸透性状や、検知剤の呈色に与える影響の理解を目的として検討を実施した。

2. 実験方法

2.1 使用材料の組成および物性

本研究は普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³、比表面積 3380cm²/g）、細骨材として砂岩砕砂（表乾密度 2.65g/cm³、吸水率 1.32%、粗粒率 3.04）、粗骨材として砂岩碎石（表乾密度 2.67g/cm³、吸水率 0.836%、粗粒率 6.53）、BFS（密度 2.91g/cm³、比表面積 4250cm²/g）を使用した。

2.2 供試体作製

本研究ではまず、W/B が 50%、寸法が 100×100×

*1 東京大学 工学系研究科社会基盤学専攻（学生会員）

*2 東京大学 生産技術研究所准教授 博士（工）（正会員）

*3 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 博士（工）（正会員）

*4 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 理学博士（正会員）

400mmのコンクリート角柱供試体を作製した。コンクリートの配合を表-1に示す。BFSの置換率（内割置換）を0, 50, 70%とし、それぞれの供試体名をN50, B50, B70とした。コンクリート打設後、24時間で脱型し、20±2℃で水中養生を実施した。材齢2ヶ月で水中養生を終了して図-1に示すように、角柱供試体の両端から約10mmを除去した後に100×100×50mmの角柱供試体を切り出し、表面から15mmを切断することで、70×70×50mmの供試体を1種類の配合に対して、2つずつ作製した。供試体厚さを50mmとしたのは、中性子イメージングによる含水量の評価が可能であることが確認されている⁸⁾ためである。中性子イメージング用の供試体に加えて、検知剤で水分浸透深さを測定するために70×70×40mmの供試体を、各配合において4つずつ作製した。すべての供試体を切断した後、直ちに温度40±2℃、湿度30±5%の環境下に静置した。乾燥開始から1ヵ月以上が経過し、24時間での質量減少率が0.1%以下であることを確認した上で、供試体の乾燥を終了し、水分浸透試験を実施した。

2.3 水分浸透試験

プラスチック容器内にアルミ製の角棒を固定して、その上にコンクリート供試体を静置し、打設底面を浸せき

面として供試体の底面から5mmの高さまで水を張って水分浸透試験を実施した（図-2）。水分浸透試験中の室内は温度20℃、湿度70%であった。浸せき時間は、5, 25, 49, 125時間とした。ただし、今回の中性子イメージングでは、1回の測定に5分程度（中性子の照射時間3分）を要し、1つの供試体のイメージングを行っている間、他の供試体の浸透試験を継続した。そのため、各供試体の実際の浸せき時間は上記浸せき時間から最大約0.5時間前後している。イメージングの直前に、0.1gまで測定可能な電子天秤で吸水量を測定した。

2.4 中性子イメージング

本研究では、理研小型加速器中性子源RANSを使用して水分浸透過程のイメージングを行った。写真-1に本実験の様子を示す。中性子は、水素に対しては透過度が低下するため、コンクリート内の水分の有無を観察することが可能である。ターゲットステーションから中性子検出器の前に静置された供試体にパルス波の中性子線（エネルギー50meVの熱中性子、繰り返し周波数：100Hz、パルス幅：65μs）を3分間照射した。コンクリート内の水分が多い部分は中性子が中性子検出器（解像度45μm/pixel）に到達せず、透過画像において低い輝度として現れるため、画像解析ソフトのImageJを用い、含水量

表-1 コンクリート配合表

供試体名	水結合材比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	BFS	細骨材	粗骨材
N50_1,2	50	10.0	5.0	45	170	340	—	865	1057
B50_1,2	50	14.0	3.4	45	170	170	170	859	1049
B70_1,2	50	13.5	3.0	45	170	102	238	856	1046

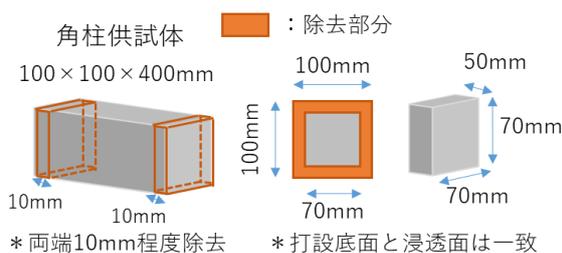


図-1 供試体概要

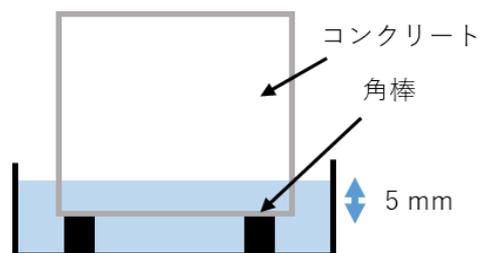
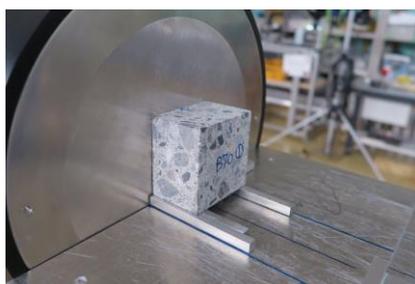


図-2 水分浸透試験



(a) 中性子検出器と供試体



(b) ターゲットステーション

写真-1 RANSによる中性子イメージングの様子

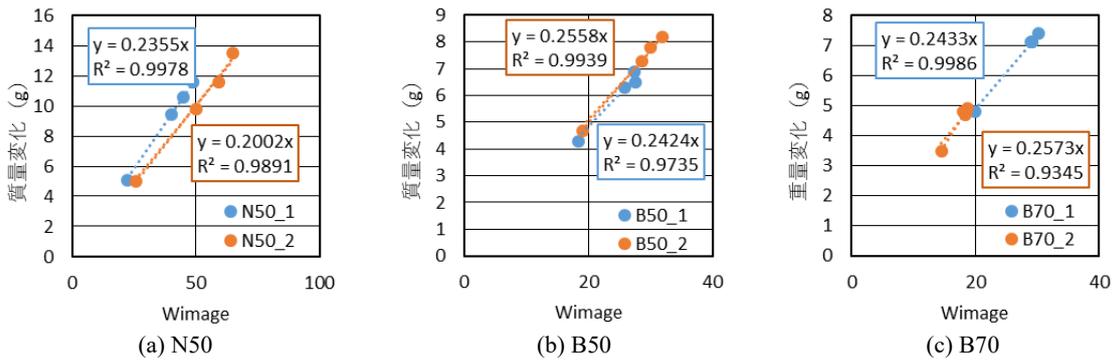


図-3 W_{image} と重量変化の関係

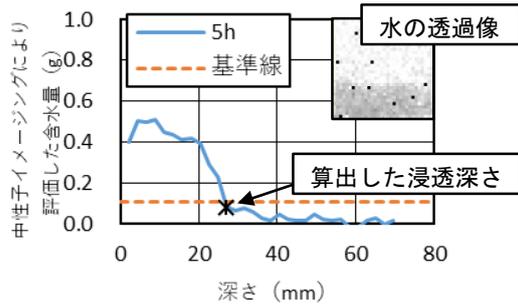


図-4 水分浸透深さの算出方法

分布を反映した画像データを取得した。

2.5 水分浸透性状の評価方法

(1) 中性子イメージングの定量化方法

中性子イメージングによって得られた画像データ（解像度：45 μ m/pixel）に対してノイズ処理，シェード補正，画素結合を行い⁹⁾，前処理した透過画像（解像度：2.25mm/pixel，空間誤差：1%以下）を作成した。既往の報告の手法⁸⁾に従い， t 時間の水分浸透後の透過画像(I_t)を水分浸透前の透過画像($I_{t=0}$)で除した画像の対数である透過画像を出力した。

$$\Delta T = -\ln\left(\frac{I_t}{I_{t=0}}\right) = a_w \cdot d_w \quad (1)$$

ΔT は浸透した水の透過像， a_w は透過方向の単位長さ当たりの水の減衰係数， d_w は透過方向に存在する水の積算量である。ここで，本検討では熱中性子を利用したため，水の減衰係数 a_w は一定とした¹⁰⁾。つまり，式(1)から水の透過像 ΔT は中性子の放射方向の水の厚さ d_w に比例するため，供試体全体における ΔT の総和(W_{image} とする)がコンクリートの吸水量に相当する。

図-3に W_{image} と吸水による質量変化との関係を示す。すべての供試体において， W_{image} と質量変化の間には良好な線形関係が見られる。そこで本研究では図-3中の近似式を用いて，中性子イメージングで取得した透過画像から水分浸透試験中の吸水量を算出することとした。具体的には，1ピクセル(2.25mm)毎の画素値の総和を算出し，図-3の近似式に代入することで，含水量の分布を算出した。

(2) 検知剤による水分浸透深さの評価

中性子イメージング用供試体と同様の浸せき時間が経過後，検知剤を用いた検討用の供試体を割裂し，片方の割裂供試体に検知剤を散布した。散布直後に，発色した部分の浸せき面からの距離を測定し，測定した距離を水分浸透深さとした。

(3) 飽和度分布の評価

2.5(2)で検知剤を散布しなかったもう一方の割裂供試体を用いて，深さ毎の飽和度を測定した。割裂供試体を乾式カッターにより1cm毎に切断し，湿潤質量(m_w)を測定した。測定後，真空飽水によってサンプルを飽和状態にし，その時の質量を飽和質量(m_s)とした。その後，サンプルを105 $^{\circ}$ Cの乾燥炉に入れ，24時間の質量減少率が0.1%以下になるまで乾燥を行い，乾燥後の質量を絶乾質量(m_d)とした。飽和度(%)は以下の式より算出した。

$$\text{飽和度}(\%) = \frac{m_w - m_d}{m_s - m_d} \times 100 \quad (2)$$

2.6 空隙構造分析

水銀圧入法(MIP)により空隙構造分析を実施した。浸せき時間が125時間終了し，中性子イメージングが完了後，コンクリート供試体から5mm角程度のサンプルを複数採取し，それをアセトンに24時間浸せきして水とを停止させた。そして，D-dry法により24時間，試料を乾燥させたのちにMIPを実施した。

2.7 中性子イメージングと飽和度による浸透速度係数の算出

中性子イメージングにより評価した含水量の分布と，そこから浸透深さを求める方法を図-4に示す。各浸せき時間において浸せき面の反対側から計4面(浸せき面から56.25, 58.5, 60.75, 63mmの位置にある浸せき面と平行な面)の含水量の平均値(μ)と標準偏差(σ)を算出し，以下の式により基準線を求めた。

$$\text{基準線} = \mu + \sigma \quad (3)$$

浸せき面から，含水量分布と基準線が交差する位置までの距離を水分浸透深さとした。水分浸透深さと浸せき

時間から水分浸透速度係数を求めた。

2.5 (3)で述べた、1cm 毎に切断した割裂供試体の飽和度から浸透速度係数を算出する方法は以下の通りであり、基本的には図-4 に示した方法と同様である。N50 では、浸せき 5, 25, 49 時間における深さ 50-60mm 及び 60-

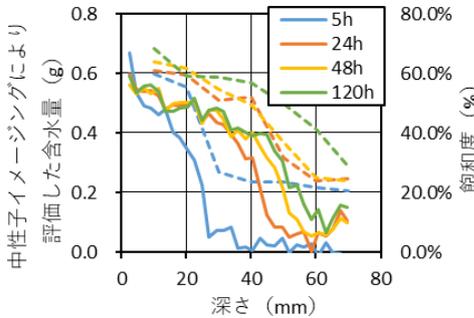
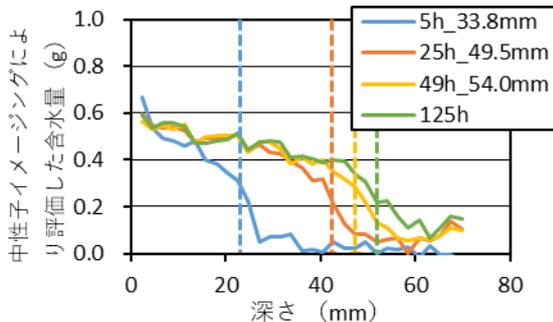
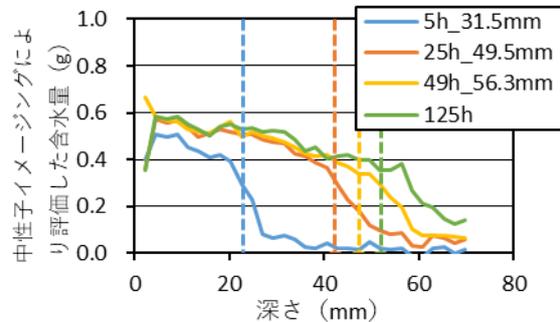


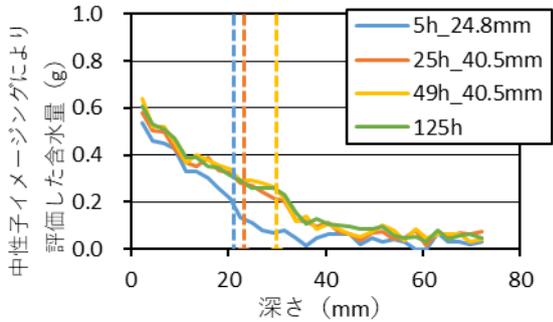
図-5 含水量分布と飽和度分布の比較
(N50_1, 実線：吸水量分布, 破線：飽和度)



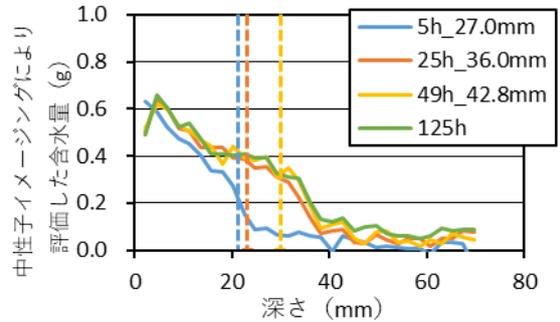
(a) N50 の供試体 1



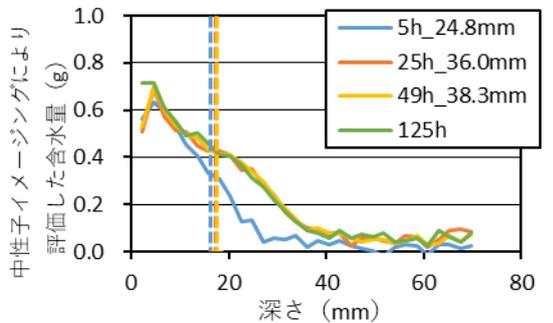
(b) N50 の供試体 2



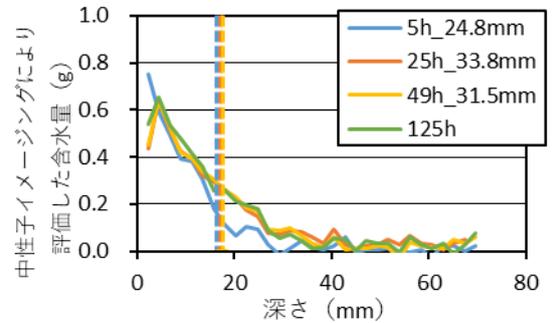
(c) B50 の供試体 1



(d) B50 の供試体 2



(e) B70 の供試体 1



(f) B70 の供試体 2

図-6 中性子イメージングによる深さ毎の含水量
(実線：中性子イメージング, 破線：検知剤から測定した浸透深さ)
凡例：浸せき時間_中性子イメージングから評価した浸透深さ

70mm の飽和度の平均 (μ) と標準偏差 (σ) を算出し、B50 と B70 では浸せき 5, 25, 49 時間における浸せき面から 40-50mm 及び 50-60mm, 60-70mm の飽和度の平均 (μ) と標準偏差 (σ) を算出し、以下の基準線を求めた。

$$\text{基準線} = \mu + 2\sigma \quad (4)$$

ここで、式(3)とは異なり 2σ とした理由は、骨材量の影響により飽和度のばらつきが大きくなったため、このばらつきを上回る程度の基準を設定する必要があったためである。式(4)より値が大きい飽和度を持つ深さを浸透域であるとみなし、5, 25, 49 時間の浸透深さから水分浸透速度係数を求めた。

3. 結果

3.1 中性子イメージングによる含水量評価

まず図-5 に、中性子イメージングにより評価した N50_1 の含水量分布と、輪切りにした供試体から求めた

飽和度との比較を示す。両者の急減する位置や分布形状は概ね一致していることが確認できる。中性子イメージングにより評価した各供試体の含水量の分布を図-6に示す。縦軸は供試体の浸せき面から各深さにおける2.25mm厚さの含水量を表している。N50においては、例えば含水量が0.3gに到達した深さを見ると、浸せき開始から5時間では約25mm、25時間では約45mmといったように、時間の経過に伴い深部への浸透が生じていることが確認できる。水分浸透の最前面と思われる位置では、含水量が急激に減少しており、それ以浅では、時間が経過しても含水量の増加はほとんど見られない。また浸せき時間が長くなるにつれて、すなわち浸透深さが深くなるにつれて、深さ毎の最大含水量が緩やかに減少している。以上のような浸透挙動は、コンクリート内の空隙構造の連結性に起因すると考えられる。浸せき面においては表面に存在する空隙の全てに浸透するが、深部に存在する空隙に水分が浸入するには、その空隙と浸せき面の空隙とが連結している必要がある。そのため、浸透が進むにつれて水が浸透可能な空隙が確率的に減少し、到達可能な最大含水量が緩やかに減少しているものと考えられる。

一方、B50とB70の含水量分布は、N50のような最前面での急激な含水量の減少は生じにくくなっており、浸せき面から深部に向かって緩やかな勾配を持って減少している。特にB70では、含水量の急減がほとんど見られない。またいずれも浸せき25時間以降は、含水量分布がほとんど変化しておらず、浸透が停滞している様子が確認できる。

図-7にMIPで評価した空隙径分布を示すが、BFSの置換率が増加するに伴い空隙構造が緻密になっていることが確認できる。同様の傾向は既往の研究¹¹⁾においても報告されている。BFSを用いた供試体ではこのような緻密な空隙構造を有することにより、確率的に浸せき面と連結した空隙がより少なくなり、深部につながる空隙が存在しないために、25時間以降の含水量分布の変化が生じなくなった可能性がある。

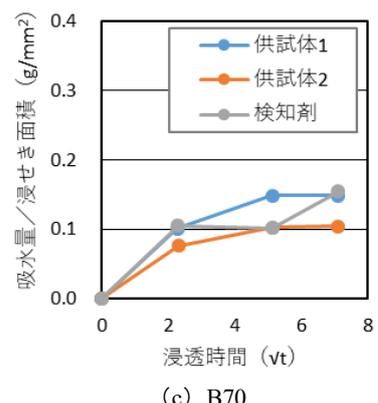
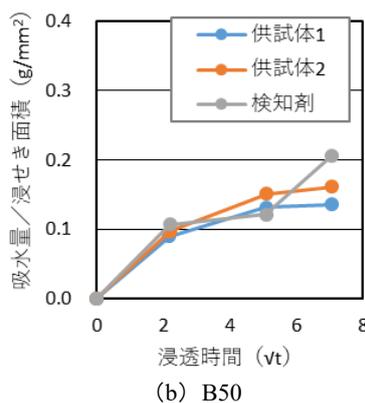
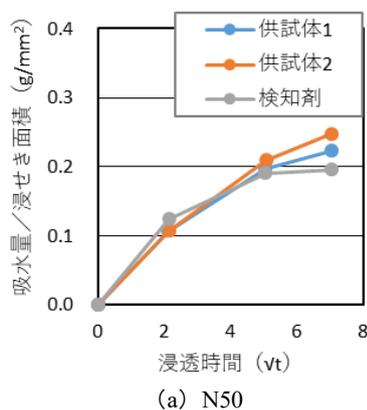


図-8 吸水量の比較

3.2 中性子イメージングによる水分分布と検知剤による浸透深さとの関係

次に、中性子イメージングに用いた供試体と検知剤による測定に用いた供試体の比較を行う。両検討で用いた供試体は同一ではないが、図-8に示すように、質量変化から評価した含水量はいずれの供試体においても概ね一致している。

図-6中の破線は、それぞれの浸せき時間において検知剤により評価された浸透深さである。ただし、B50とB70の125時間時点では既往の研究⁷⁾と同様に検知剤が呈色しなかったため、検知剤の散布前に、水分の浸透により割裂面が暗く変化していた領域から浸透深さを求めた。N50は含水量が0.3g以上の領域で呈色したのに対して、B50やB70では0.2~0.4gとばらつきが見られた。

2.7で述べた方法により中性子イメージングから評価した浸透深さが図-6の凡例に示されているが、いずれの供試体においても、中性子イメージングにより評価した浸透深さは検知剤による浸透深さより大きくなったが、これは浸透深さの定義の違いに起因する。ただし、前述のように、BFSの置換率が増加するにつれて、中性子イメージングにより評価した含水量が急減する位置が不透明になり、中性子イメージングと検知剤による浸透深さの差は大きくなる傾向があった。BFSの置換により検知剤が呈色しなくなった原因として、空隙構造の違いが考えられる。ここで水漏れ検知剤は一般に、スプレー中の微粒子が散布対象から毛管張力により水を吸い上げ、そこに染料が溶解することで呈色する。図-7より、N50と

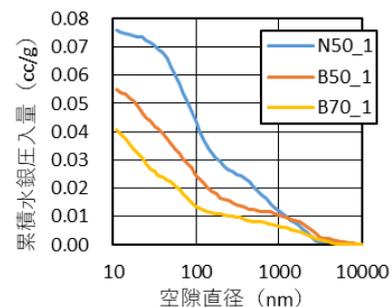


図-7 空隙構造分布

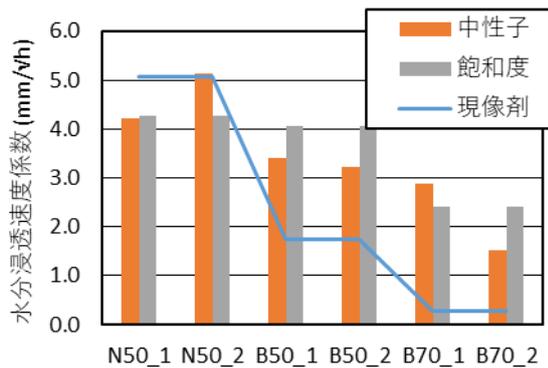


図-9 各種方法による水分浸透速度係数

比較して B50 や B70 では、水が浸透した空隙径が微小であることが考えられる。このように微小な空隙内に存在する液状水を、スプレー中の微粒子が吸い上げられなかったために、呈色が生じなかった可能性が考えられる。含水量は検知剤の呈色にどのように影響しているのか、BFS の使用によりなぜ閾値が変化したのか、空隙径が呈色の有無に影響しているのかなど、今後さらに検討する必要がある。

3.3 各方法から算出した水分浸透速度係数の比較

各方法で算出した水分浸透速度係数を図-9 に示す。どの方法で求めた浸透速度係数も BFS の置換率の増加に伴って減少しており、既往研究⁹⁾と同様の傾向となった。中性子イメージングと検知剤から算出した水分浸透速度係数は、算出した手法による大小の差はあるものの、概ね傾向を捉えていることが確認できる。BFS の置換率の増加に伴い、中性子イメージングや飽和度から求めた浸透速度係数と、検知剤から求めた浸透速度係数との乖離は増大した。このことは、検知剤を用いて水分浸透速度係数を測定する場合、BFS を用いたコンクリートでは実際の浸透速度よりも過小評価される可能性を示唆している。ただし、BFS を用いたコンクリートでは水分浸透が停滞していたため、そもそもどのように速度を求めるべきなのかを議論する必要があると考えられる。また、検知剤が何を評価しているのか理解を深め、浸透速度が小さくなる原因を詳細に検討するとともに、必要に応じて検知剤による評価手法の改良が必要と考えられる。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 中性子イメージングにより、BFS の使用によってコンクリート中への水分浸透が大きく変化することを確認した。また BFS の置換率の増加に伴い、検知剤で評価された浸透深さで深での含水量が増加していることや、水分浸透が停滞していることを確認した。原因として、空隙構造の影響を指摘した。
- 中性子イメージングや飽和度、検知剤によって算出

した水分浸透速度係数を比較し、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、検知剤による浸透速度係数は、他の手法よりも小さくなることを指摘した。

謝辞: 本研究は鉄鋼スラグ協会の助成を受けて実施した。また本検討で用いた中性子イメージングによる定量評価では、吉村雄一氏（元理化学研究所客員研究員，現鹿島建設（株）技術研究所）にご協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 米澤 敏男ほか：コンクリートの中性化後における鉄筋の腐食速度に関する研究，日本建築会構造系論文集，Vol.79，No.704，pp.1405-1414，2014.10
- 2) 鳥取 誠一，宮川 豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，Vol.64，No.767，pp.35-46，2004.8
- 3) 土木学会：2012年版コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 4) 轟俊 太郎，渡辺 健，鬼頭 直希，笠 裕一郎：現地調査データを用いた鉄筋腐食速度への影響因子に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.919-924，2015
- 5) 土木学会：2017年版コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018
- 6) 平本 真也，大塚 勇介，植村 幸一郎，檀 康弘：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水分浸透性に関する評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.77-82，2019
- 7) 鎌田 知久，岸 利治：乾燥に伴う水分の逸散と空隙構造の変化がセメント硬化体への液状浸透性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.641-646，2019
- 8) 吉村 雄一，水田 真紀，大竹 淑恵，林崎 規託：中性子イメージングによる厚さ5cmのコンクリート供試体に浸透する水の非破壊定量手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，2018
- 9) 吉村 雄一，水田 真紀，須長 秀行，大竹 淑恵：小型中性子源を利用したコンクリートの水測定方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.613-618，2017
- 10) 玉置 昌義：中性子イメージングによる材料工学の研究，RADIOISOTOPES，Vol.56，pp.417-429，2007
- 11) 檀 康弘ほか：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集 E，Vol.65，No.4，pp.431-441，2009.10