論文 中性子イメージングを利用した水セメント比および単位セメント量 がコンクリートの水分浸透に与える影響の評価

吉村 雄一*1・水田 真紀*2・大竹 淑恵*3・林崎 規託*4

要旨:水セメント比および単位セメント量を要因とした 5 種のコンクリート供試体の水分浸透試験を行い, 小型中性子源を利用した中性子イメージングを用いて吸水過程における水の動きを評価した。水セメント比 40%の供試体は水分浸透に高い抵抗性を示し,空隙率や細孔径分布が示す緻密な空隙構造と良好な相関を確 認した。また,同じ水セメント比においても単位セメント量が増えると空隙量が増加し,水の浸透速度に差 異が生じることがわかった。さらに,水セメント比の低下につれ吸水量分布の不均一性が見られ,浸透速度 の導出に必要となる浸透高さの決定が困難になることが示された。

キーワード:水分浸透,中性子イメージング,非破壊検査,小型中性子源

1. はじめに

コンクリート構造物に外部から侵入する水や二酸化炭 素は劣化を促進する重要な因子であり、塩害やアルカリ シリカ反応、中性化の進展に大きな影響を及ぼす。最近 ではコンクリート内の物質移動抵抗性の評価法として表 面吸水試験や透水・透気試験が実施されており、測定精 度の向上や新たな検査手法の開発が今後の効率的な構造 物の維持管理に大きく寄与するものと考えられる。

2017 年度に改訂された土木学会コンクリート標準示 方書設計編では水の影響を考慮した鉄筋腐食に関する照 査が新たに加わり,割裂面で目視確認される水分浸透深 さから水分浸透速度係数を決定する試験法が土木学会規 準(案)¹⁾として規定され,水分の浸透速度に関する知見 がより求められている。その中で水分浸透挙動を非破壊 観察する手法の一つとして中性子線を利用したイメージ ング²⁾が挙げられる。この非破壊イメージングでは水分 浸透挙動を同一供試体に対して経過観察できる特徴があ り,劣化・暴露した試験体の評価や乾湿繰返し,異なる 温度・湿度条件下でのデータ比較に適している。

我々は中性子線が主に利用される大型の研究用原子 炉や大強度加速器施設とは異なる,長さ 5m 程度の陽子 線加速器により駆動する小型中性子源 ³⁾を用いて厚さ 5cm のコンクリートに浸透する水分の定量手法を検討⁴⁾ してきた。本研究では、セメントの種類や養生条件,材 齢を統一し、水セメント比および単位セメント量を変化 させた供試体を用意し、2 つの要因がコンクリートの空 隙構造と水分浸透挙動に与える影響に着目して中性子イ メージングによる非破壊分析を行った。

2. 測定概要

2.1 供試体諸元

表-1 にコンクリート配合を示す。水セメント比 50% を基準とし、単位水量Wを一定とした場合に水セメント 比 40 および 60%に変化させた 2 種類と単位セメント量 C を基準として水セメント比 40 および 60%とした 2 種 類、計 5 種類の配合とした。セメントには普通ポルトラ ンドセメントを使用し、スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5 ±1.5%、最大骨材寸法を 20mm として混和剤でスランプ と空気量を調整した。各配合につき、角柱供試体 (100× 100×400mm)を作製し、打設翌日に脱型、30 日間水中 養生を行った。そして、図-1 に示す要領で全ての面を 15mm 程度切り取った軸中央付近から 70×70×50mm の 供試体 a、bを取り出した。

2.2 水分浸透試験

供試体を40℃の炉に40日間入れ,24時間での重量変 化が0.1%以下になった状態を初期状態として水分浸透 試験を開始した。アルミ角棒を配したプラスチック容器



*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院 融合理工学系 原子核工学コース 博士後期課程 (正会員) *2 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 工博 (正会員) *3 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 理博 *4 東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所 工博

/#+⇒+>/++-	W/C (%)	空気量 (%)	スランフ [°] (cm)	粗骨材 最大 寸法 (mm)	細骨材 率(%)	単位量(kg/m³)					
(共武)(本) 名称						W	С	S1	S2	G	АЕ (С×%)
1-a,b	60	5.4	13.5		53.0	198	330	632	276	805	0.00
2-a,b	60	5.5	10		45.4	165	275	585	254	1007	1.10
3-a,b	50	4.5	10	20	43.9	165	330	551	239	1010	1.10
4-a,b	40	3.8	10		43.9	132	330	577	252	1057	2.50
5-a,b	40	5.3	14.5		41.9	165	413	506	220	1005	0.75

表-1 コンクリート配合

C:普通ポルトランドセメント, S1:川砂, S2:砕砂, G:砕石

AE:高機能 AE 減水剤(水セメント比 50,60%),高性能 AE 減水剤(水セメント比 40%)を使用

材齢5ヶ月(水中養生110日後,乾燥40日)

の中に、容器に直接触れないよう角棒上に供試体をセットし、供試体底面(70×50mm)から2mm程度の高さまで水を張り、試験を開始した。試験は8日間継続し、中性子イメージングを行うとともに吸水量を逐次計量した。ブリーディングによる影響を避けるため、打設面を全て上面とし(図-1参照)、試験の簡便性の観点から供試体側面のシールは行わなかった。

2.3 中性子イメージング

本評価では理化学研究所にある小型加速器中性子源 RANS³⁾を使用してイメージング実験を実施した。図-2 に中性子イメージングの概略図を示す。線源から出力さ れるパルス中性子線を3分間供試体に照射し,透過した 中性子線をイメージング検出器によって画像化(中性子 イメージング)する。中性子はケイ素やカルシウムとい



図-2 中性子イメージング概略図

った骨材を構成する元素に対して反応が微弱である一方, 水素に強く散乱されて透過度が低下する特徴を持つため、 コンクリートに中性子線を照射すると水分の有無に陰影 がついた透過像が出力される。また、その陰影は透過方 向に存在する水の量によって明度が変化することから画 像解析ツール ImageJ によってコンクリートの吸水量分 布を出力し,同一供試体の水分浸透を経時観察すること が可能である。本評価では検出器に中性子イメージイン テンシファイア⁵⁾(9インチGdタイプ, 解像度45µm/pixel) を使用し、内蔵される中性子コンバータと冷却型 CCD カ メラを経由して中性子線を可視光に変換して透過像の出 力を行った。なお、本検出器は中性子線(エネルギーが 数 meV~数十 meV の熱中性子)のみならず γ線にも感 度を有しているため、線源から検出器に飛来するγ線の 影響を低減するブランキング動作を行った 4。これは, パルスの発生から検出器までの中性子とγ線の到達時間 の差を利用する方法で、水分の検出感度を向上させるこ とができる。具体的には、エネルギー50meVの中性子線 (繰返し周期:10ms, パルス幅:60µs)は1.2ms後, 光の速 さで伝搬する γ線は約 12ns 後に検出器に到達すること から, 0.2~8msの間に検出動作を行うことによりγ線の 影響を除去した。

2.4 中性子透過像から吸水量分布への定量化

撮影した透過像に対してノイズ除去や強度分布補正[®] を実施し,透過度を示す透過率画像を作成した。中性子 透過像はコンクリートを構成する元素が入射する中性子 に対して独立に作用し,各要素(セメント,骨材,水分) に対する透過度の乗算として出力されることから,吸水 前後の透過率を除算すると状態間の差分である浸透水分 のみが画像抽出される(ここでは水の透過像*ΔT*と呼ぶ)。

$$\Delta T = -\ln\left(\frac{l_t}{l_{t=0}}\right) = a_w \cdot d_w \tag{1}$$



図-3 Wimageと秤量値の関係

*aw*は透過方向における単位長当りの水の減衰係数, *dw*は
透過方向に存在する水の積算量であり,厚さの次元を持つ.供試体の全体範囲(画素数)にわたる *ΔT* の総和
(*Wimage*とする)は,画像が示す吸水量に相当する。

3. 中性子イメージングによる吸水量の定量性

全ての供試体に対して中性子透過像から得られたコン クリート中の吸水量 Wimage と電子天秤(最小単位 0.1g) で秤量した値の関係を図-3 に示す。透過像が示す吸水 量と秤量値の一様な線形関係が示されており,また Wimage と秤量値の関係における傾きが供試体 2,供試体 1,3,4,供試体5の3種類に分かれていることがわかる。

この勾配は、緩やかなほど少ない吸水量の変化をより 大きな Wimage の違いで捉えられることを示し、つまり水 分の検出感度が高いことを表していることから、透過像 が示す水分の検出感度を意味する。そして、勾配を変化 させる要因としては、供試体内部で散乱される中性子の 影響が考えられる。つまり、中性子は水素によって散乱 されることから、中性子の散乱がコンクリートに含まれ る水素量に左右され、勾配が変化したと考えられる。本 研究のように水分浸透の時間差から浸透水分を抽出する 場合、吸水前の供試体の水素量が多ければ多いほど、散 乱された中性子が透過像のオフセット成分に混入するこ とになり、吸水後の透過率との差が小さくなる。また、 同じ配合の供試体であっても、中性子透過方向の厚さが 厚くなるほど、同様に吸水前後の透過率差が小さくなる。

本評価では供試体の厚さは全て 50mm であり, さらに 材齢と養生条件も等しいことから, 検出感度の違いは吸 水前の供試体内に残存している結合水等の水素量による ものと予想した。そこで図-4 にて結合水量の多少と相 関があると推測される単位セメント量が Wimage と秤量値 の関係における傾き(水分検出感度)に及ぼす影響を評



図-4 単位セメント量が水分検出感度に与える影響

価した。その結果,単位セメント量が少ないほど傾きは 小さく,高い水分検出感度を有していることを確認した。 上記の内容から,この関係を以って乾燥時の供試体にお ける水素含有量を相対的に比較できる可能性があること がわかった。

4. 中性子イメージングによる水分浸透観察

透過像を吸水量分布に定量化した全供試体の水の透 過像 *AT* を図-5 に示す。ここで、各画素の *AT* は、中性 子透過像から得られたコンクリート中の吸水量 *Wimage* と 秤量値の関係 (図-3)を用い、配合ごとに最小二乗法に よる線形近似を行い、水量に換算した。*AT* は 50×50 画 素を1 画素に結合し解像度 (1 画素あたりの寸法)を 2.25 ×2.25mm として、画素結合を行ってバラつきを低減し 画像出力を行った。グレースケールで水量を階調表示し ており、影に該当する部分が浸透した水、影の濃さが透 過方向に分布する水量に対応する。なお、離散的に分布 している透過率の低い画素は検出する中性子の統計量に 応じて生じる偶然誤差であり、水の有無に関わらずバラ つきとして像に現れたものである。

供試体下面を浸水させた供試体が上向きに吸水を開始し、時間の経過と共に水の浸透範囲が広がる様子を図 -5 から確認することができる。この水の動きと含水率 の推移の対応を比較するため、図-6 に水分浸透試験に おける体積含水率の推移を示す。ここで体積含水率とは、 吸水量を供試体体積で除算した値である。吸水時間に拘 わらず、供試体 1>2>3>5>4 の順で体積含水率は小さくな り、水セメント比の低下に伴って水分浸透に対する抵抗 性が向上していることがうかがえる。図-5 に示された 吸水量分布に着目すると、水セメント比が等しい場合で も、供試体 1,2 (水セメント比 60%) と 4,5 (水セメント 比 40%)の間において浸透性状が異なっており、それぞ



※すべて下面は吸水面,上面は打設面である。

図-5 水分浸透試験における吸水量分布を可視化した水の透過像△7

れセメント量の多い供試体1と5の方が,浸透速度が速 くなる傾向が見られ,図-6の体積含水率の経時変化の 結果と合致する。一方,供試体4および5においては供 試体側面付近に比べて中心近くの含水量が少なく(影が 薄く),凹型の水位になっていた。

次に,全幅を解像度と同じ 2.25mm 間隔で分割し,分 割された領域(高さ 70mm×幅 2.25mm×厚さ 50mm)内 の吸水量を供試体ごとに比較した。図-7(左),(右)に吸 水 3~4時間後,および 148~151時間後の吸水量分布を 示す。横軸は供試体水平方向の位置を示している。

図-7(左)より吸水 3~4時間後においては吸水量の多

い供試体 1-a を除いて,幅中央付近(位置 20~50mm)の 吸水量が表面近く(位置 0~20,50~70mm)に比べて少 なく,内部への水分浸透が進みにくい傾向にあることが 確認できる。また,図-7(右)より吸水 148~151時間後 には水セメント比 50%以上の供試体(1-a,2-a,3-a)では全 幅の吸水量がほぼ均一になっているのに対し,水セメン ト比の低い供試体(4-a,5-a)では中央(位置 20~50mm) 付近と表面近く(位置 0~20,50~70mm)の吸水量の差 が大きい状態を維持している。この事象の原因として, 供試体表面をシールすることなく水分浸透試験を実施し ていることから表面乾燥の影響を受けていることと,供



図-6 体積含水率の時間変化

図-7 水平方向の吸水量分布

(左)水分浸透開始から 3~4 時間経過,(右) 148~151 時間経過





試体ごとの水分浸透抵抗性の違いが現れたことの2つの 可能性が考えられる。そこで次章では、浸透抵抗性に強 く関連する空隙構造について考察を行うことにした。

5. 吸水量分布に対する空隙構造の影響

コンクリートの空隙構造に関する評価として水銀圧 入法による細孔径分布の測定とアルキメデス法による空 隙率の評価を実施した。

5.1 細孔径分布

図-8に5種類の供試体に対する細孔径分布を示す。 径 1µm 以下の細孔径分布に対して配合による差異が生 じており,水セメント比 60%の供試体 1,2 は細孔径が約 1µm 以下の範囲において空隙量が増加する一方,水セメ ント比 40 および 50%の供試体 3,4,5 では 0.04µm 以下の 空隙量が増加している。水セメント比の違い(供試体 2,3,5)が細孔径分布に与える影響を見ると低水セメント 比の供試体について空隙量の減少と空隙径の縮小傾向が 確認でき,より緻密な空隙構造が形成されている。

水セメント比が等しい供試体 1 と 2, および供試体 4 と5を比較すると単位セメント量(単位水量)の多い供 試体 1,5 の空隙量が多く,空隙径も若干ではあるが大き くなる傾向が見られる。水セメント比が高い供試体ほど その差は顕著であり,供試体の養生方法や材齢は全て同



じ条件であることから水和反応に使用されない水分量の 多少によって空隙量が変化した結果であると考えられる。 5.2 アルキメデス法による空隙率の測定

供試体乾燥時の質量と水分浸透試験後に浸水させて 飽水状態とした湿潤時の質量(それぞれ W_d, W_s とする) を計量し,湿潤時の体積 V_s と水の密度 ρ_w から空隙率 p を以下の式を利用して算出した.

$$p = \frac{(w_s - w_d)}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_w} \tag{2}$$

空隙率と積算細孔体積の関係を図-9に示す。なお、空

隙率は同配合の供試体2個の平均値とした。

積算細孔体積と空隙率は同様の傾向を示しているも のの、比例関係は見られない。これは、水銀圧入法から 得られる細孔体積は水みちとなる骨材周辺の空隙等の影 響を含まないためと考えられ、今後、空隙構造について さらに検討する必要がある。しかし、4 章図-6 の体積 含水率の時間変化から推測される水分浸透抵抗性とは傾 向が一致しており、積算細孔体積、空隙率が高いほど、 水分が浸透しやすい様子が観察された。

5.3 高さ方向の吸水量分布

空隙が水分浸透に与える影響を評価する為に高さ方 向の吸水量分布を出力し,浸透高さの経時変化を考察し た。図-10に水分浸透試験において体積含水率が最大・ 最小を示した供試体 1-a および 4-a さらに基準の供試体 3-a について高さ方向の吸水量分布を示す。縦軸は 2.25mm 間隔で高さ方向に分布する吸水量をプロットし た値であり,幅70mm×厚さ50mm×高さ2.25mmの中に 含まれる吸水量を示している。時間が経過しても吸水量 が変わらなければ、その部分は水分で飽和された状態と 考えられる。すべての供試体で試験開始後 23h 経過時に 浸漬面から15mm 程度は水分飽和状態となっており、図 -7の体積含水率の傾向と同様に, 飽和時の吸水量は水セ メント比が高いほど増加した。さらに、時間が経過する と供試体ごとに特徴的な吸水量分布を示すようになった。 すべての供試体において、浸漬面から距離が離れるにつ れて飽和に至る吸水量が減少しており、とりわけ供試体 4-a は高さ方向の吸水量分布における勾配が大きくなっ た。これは、水セメント比が低い場合、水分が浸透する 一様な空隙組織が形成されにくいことから、高さ方向の 水分の進入経路が限られている可能性が示唆される。ま た,供試体 4-a は勾配が急変する特異的な箇所を示さず, 文献7)で定義した浸透高さに対する便宜的な決定が困難 であることから目視や含水率センサによる測定結果との 整合性を評価する必要がある。

6. まとめ

- (1)小型加速器中性子源を利用した中性子イメージングにより、水セメント比と単位セメント量を要因とした5種類の配合を持つコンクリート(70×70×厚さ50mm)の透過像を撮影し、水分浸透試験において浸透する水分の定量化を実施した。
- (2) イメージング画像が示す水分量と秤量値の関係は乾燥時にコンクリートが保有する水分量によって変化する傾向が見られ、この関係を利用して乾燥時の供試体における水分量を相対的に比較できる可能性が示された。

- (3) 水セメント比の低下につれて水分浸透に対する抵抗 性が向上すると同時に、同一の水セメント比におい てもセメント量の違いによって浸透速度に差異が生 じた。また、水セメント比が低いほど供試体中央付近 の吸水量が少なく内部へ水分浸透が進まない傾向が 顕著になった。
- (4) 細孔構造が緻密で空隙量の少ない低水セメント比 (水セメント比 40%)の供試体は浸漬面から上方に 離れるにつれて分布する水量は急激に低下する傾向 を示す一方,他の水セメント比 50,60%の供試体と比 較してその変化が小さいことから,文献 7)で定義し た浸透高さの決定が困難であることがわかった。今 後、浸透高さの決定について,他の手法との整合性を 評価する必要があることがわかった。

謝辞

本研究の一部は総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ 維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人 JST)に よって実施されました。

参考文献

- 1) 土木学会: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
- 2) 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, Vol.53, No.5, pp.447-451, 2015
- Otake, Y. et al.: Research and Development of a Non-Destructive Inspection Technique with a Compact Neutron Source, Journal of Disaster Research, Vol.12, No.3, pp.585-592, 2017
- 4) 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, pp.1683-1688, 2018
- Nittoh, K. et al.: Development of Neutron Color Image Intensifier for Pulsed Neutron Source, Physics Procedia, Vol.69, pp.177-184, 2015
- 6) 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
- 7) 吉村雄一,水田真紀,須長秀行,大竹淑恵,林崎規 託:中性子イメージングを適用した水セメント比の 異なるコンクリートの水分浸透抵抗性評価,コンク リート構造物の補修,補強,アップグレード論文報 告集,pp.641-646,2018