

# 論文 中性子線透過イメージングを用いたコンクリートの水分浸透特性に関する基礎的研究

盛谷 洋輝\*1・久保 善司\*2・吉村 雄一\*3・水田 真紀\*4

**要旨:** コンクリート構造物の劣化の発生・進行は、コンクリート中の物質移動によって支配される。本研究では、コンクリート中の物質移動を評価し得るコンクリート中の水分浸透に着目して、非破壊で定量的な水分移動の把握が可能な中性子線透過イメージングを用いて空隙構造の異なるコンクリートの水分浸透特性について検討を行った。その結果、粗大空隙が多いものほど吸水量は多くなるとともに、水分浸透高さも高くなるのが中性子線透過イメージングを用いることで明らかとなった。さらに、同一水セメント比であっても、粗大空隙の多少によって空隙の連続性が異なり、水分浸透性は粗大空隙に依存することが示唆された。

**キーワード:** 中性子線透過イメージング, 水分浸透, 空隙構造, 水分浸透高さ

## 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化の発生・進行は、それらの劣化要因となる各種物質の移動に支配される。その物質移動は、炭酸ガスや水蒸気などの気体の移動、水に代表される液体の移動、さらに水に溶解したイオンの拡散・移流による移動などに整理できる。

コンクリート構造物の劣化の1つに、鋼材の腐食が挙げられる。鋼材腐食が進行するためには、水と酸素が必要であり、実構造物の維持管理において水の供給に着目することが重要であると指摘もされている<sup>1)</sup>。すなわち、劣化の発生および進行を把握・制御を行うためには、水分供給条件とともに、物質移動を評価し得るコンクリート中への水分浸透を把握することはきわめて重要な課題として位置付けられる。コンクリート中の物質移動は、コンクリートの緻密性、すなわち細孔構造に依存する。

Powers<sup>2),3)</sup>によれば、セメントペースト硬化体は、未水とセメント、水和生成物、および毛細管空隙からなるとし、水和生成物が保有する空隙をゲル空隙としている。ゲル空隙は、水で満たされており、そのゲル水と水和反応に使用された結合水を練混ぜ水から差し引いた残存水が毛細管空隙（毛細管水）と呼ばれる。ゲル水に比べて粗大な空隙径の毛細管空隙は、上述のような劣化現象を引起す物質の移動の支配的な経路になるものと考えられる。したがって、コンクリートの毛細管空隙を把握することは物質移動を評価することにおいて重要である。同一水セメント比（W/C）のコンクリートにおいても、毛細管空隙量（粗大空隙量）が異なれば、その物質透過性が異なるものと予想される。

他方、その物質移動において、各種物質の媒体となる水分浸透を把握する手法には、これまで多くの検討がなされてきた。水の移動をリアルタイムでかつ、直接的に評価する手法の1つとして、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中性子線透過イメージングによる方法がある<sup>4)</sup>。中性子線は、ケイ素や鉄、鉛などの重元素に対する透過率が高く、水素やリチウムホウ素などの軽元素に対する透過率は低い。そのため、コンクリートを通過する際には、コンクリート中に存在する水分の量によって透過率が異なり、透過率から測定時の含水率分布を得ることが可能となる。小型中性子源を利用したコンクリートの透過画像より水分を定量する方法は、得られた透過画像に対してノイズ除去、強度分布補正、画素の結合を行うことで、空間誤差が1%以下になることが確認されている<sup>5)</sup>。また厚さ5cmのコンクリート供試体に対して、吸水した質量と中性子透過画像から導出した水分量を比較し、中性子線透過イメージングにより水分浸透の経時変化を評価できることが確認されている<sup>6)</sup>。

本研究では、定量的な水分移動の把握が可能とされる中性子線透過イメージング法により、同一セメント比における空隙構造（粗大空隙量）の異なるコンクリート中の水分浸透特性を把握し、空隙構造が水分浸透特性に与える影響を検討した。なお、粗大空隙量の推定計算には、Powersの水和モデル<sup>2),3)</sup>を用い、フレッシュ時に混入された空気と毛細管空隙の総和を、粗大空隙量として異なる空隙構造のコンクリートの配合を用意した。

\*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

\*2 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類准教授 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 理修 (正会員)

\*4 理化学研究所 中性子ビーム技術開発チーム 工博 (正会員)

表-1 供試体要因

供試体名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						空気量 (%)	毛細管空隙 (%)	ゲル空隙 (%)
			W	C	S	G	AE 減	AE 助			
W190-1,2	55	49	190	345	819	856	0.35	0.035	6.0	6.94	5.59
W175-1,2		47.2	175	318	818	919	1.1	0.016	5.2	6.38	5.14
W155-L-1,2		47.2	155	282	856	962	2.8	0.011	4.6	5.65	4.55
W155-H-1,2		47.2	155	282	856	962	2.3	0.017	5.6	5.65	4.55

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 使用材料

セメントとして普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）を使用した。細骨材として、手取川産川砂（密度:2.57g/cm<sup>3</sup>）を使用し、粗骨材として手取川産川砂利（密度:2.58g/cm<sup>3</sup>, Gmax:20mm）を使用した。

(2) 配合

既往の検討においては、W/C の異なるセメントペースト、モルタルあるいはコンクリートなどを対象とした研究が多く検討されており、それらに関する多くの知見が蓄積されている。本研究では、同一水セメント比のコンクリートを対象に、異なる空隙構造が水分移動特性に与える影響を検討することとした。一般的なコンクリートを想定し、水セメント比 (W/C) を W/C を 55% とし、単位水量、空気量の異なるコンクリート供試体を作製した。

コンクリート角柱供試体 (75×75×400mm) は、打設 1 日後に脱型し、その後約 2 か月水中養生を行った。養生後、角柱供試体の中央部から厚さ 50mm の供試体 (75×75×50mm) を 2 個ずつ切り出し、測定に用いた。また、離型剤による浸透特性への影響を避けるため、型枠面をディスクサンダで研磨した。なお、供試体名の最後の数字は同一配合・同一空気量の角柱供試体 (75×75×400mm) から切り出したいずれかを番号 1,2 で示した。

(3) Powers の水和モデルに基づく空隙構造（推定）

Powers の水和モデル<sup>2),3)</sup>を用いて空隙構造の概略を把握した。Powers の水和モデルは、本来セメントペーストの構成相割合を求めるもので、セメント 1g が水和反応すると 0.23 g の水と結合して水和反応生成物を形成し 0.19 g のゲル空隙を形成する。このときの化学的収縮による体積減少量は、結合水体積の 0.254 倍となり、単位水量と単位セメント量、セメントの密度及び水和度よりセメントペーストの構成相割合を算出することができる。本研究では、コンクリートを対象としているため、コンクリート配合中におけるセメントペースト（水+セメント）の容積に関して、Powers の水和モデルにより構成相割合を計算し、これに細骨材、粗骨材、空気量の単位体積を考慮し、コンクリート中の単位体積当たりの構成相

■毛細管空隙 ■ゲル空隙 ■空気量 ■未水和セメント ■水和生成物 ■化学的収縮

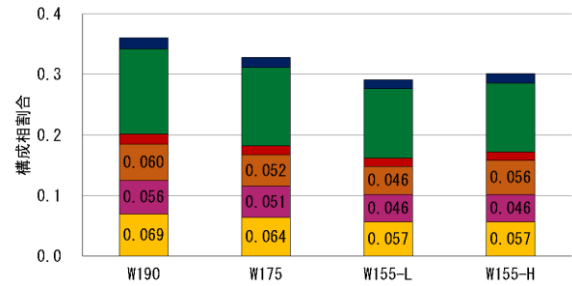


図-1 コンクリート構成相割合

割合を求めた。計算の際に必要な水和度については、内藤ら<sup>7)</sup>の実験結果を参考に、水和度を 0.85 と仮定した。作製した供試体とその配合および空気量、空隙量を表-1、コンクリートの構成相割合を図-1 に示す。単位水量 155kg/m<sup>3</sup> についてはフレッシュ時の空気量が異なるものを用意した。空気量が多い方を H, 少ない方を L で表した。

同一水セメント比のコンクリートの粗大空隙構造の相違を、コンクリートの緻密性を把握する非破壊手法を用いて確認するとともに、水分浸透実験における吸水特性を中性子線透過イメージングにより把握し、空隙構造の相違が水分浸透特性に与える影響について検討することとした。

2.2 非破壊試験による緻密性評価

(1) コンクリートの比抵抗

コンクリート供試体の緻密性を評価するため、インピーダンスアナライザを用いて比抵抗の測定を行った。測定においては、ステンレス板を電極として、コンクリート供試体を挟み込む形で測定を行った。コンクリート表面に均一に電流を流すために、3%の塩化物ナトリウム溶液に 5%のカルボキシ・メチル・セルロース (CMC) を添加したものをコンクリートと電極間の媒体として用いた。電圧は 1.0V とし周波数は、10 kHz とした。比抵抗は (1) 式より算出した。Powers の水和モデルにより推定した粗大空隙との関係を把握することとした。

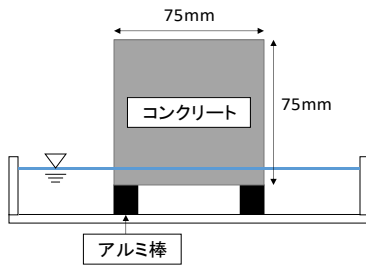


図-2 水分浸透試験概要図

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ ：比抵抗( $\Omega \cdot m$ )

$R$ ：抵抗値 ( $\Omega$ )

$A$ ：供試体の断面積( $m^2$ )

$L$ ：供試体長さ(m)

### (2) 超音波伝播速度

非破壊検査によりコンクリートの品質を評価する方法の一つとして超音波伝播速度測定法が用いられている。既知区間の距離を超音波の伝播時間で除すことで超音波速度を測定することができる。Powersの水モデルにより推定した粗大空隙との関係を把握するため、超音波伝播速度を測定した(分解能  $0.1 \mu s$ , パルス電圧 500V, 54kHz トランスジューサ, 受信感度 20kHz~500kHz)。測定は、2 か月間水中養生後に行い、測定方向は、角柱供試体の長さ方向(400mm)とした。

## 2.3 水分浸透特性の評価

### (1) 水分浸透試験

供試体は、切断後温度  $40^\circ C$  で約 1 ヶ月間乾燥させ、質量が変化しなくなったことを確認して水分浸透試験に用いた。水分浸透試験は打設底面が 5mm 程度浸漬するようにして行った。水分浸透試験の概要を図-2 に示す。水分浸透試験では、吸水量(質量)の測定を行った。

### (2) 粗大空隙率の評価

水分浸透試験前のコンクリートの乾燥は、比較的乾燥しやすい粗大な空隙に存在した水分が逸散したものと考えられる。その空隙率  $P$  をアルキメデス法により求めた。

空隙率  $P$  は、飽水質量  $W_s$ ,  $40^\circ C$  で 1 ヶ月乾燥させたときの乾燥質量  $W_d$ , 飽水時の体積  $V_s$  及び水の密度  $\rho_w$  を用いて以下の式より算出した。

$$P(\%) = \frac{W_s - W_d}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_w} \cdot 100 \quad (2)$$

### (3) 中性子線透過イメージングと吸水量の定量化

小型加速器中性子源 RANS の実験セットアップを図-3

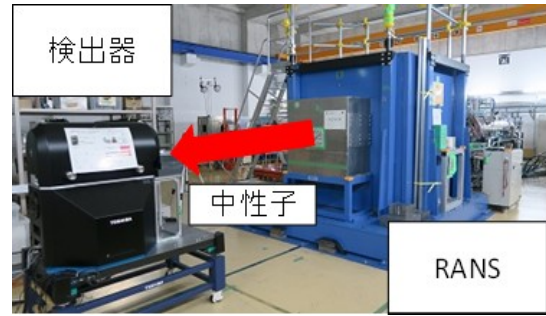


図-3 実験セットアップ

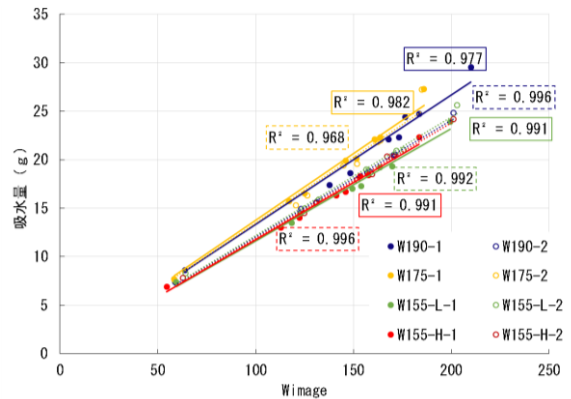


図-4 水の透過画像より算出した  $W_{image}$  と実際の吸水量の関係

3 に、示す。水分浸透試験において電子天秤で吸水量の測定を行った後、中性子検出器前に供試体を設置し、中性子ビームを 3 分間照射させイメージングを行った。撮影終了後再び水に浸漬させ、吸水試験を再開した。この作業を繰り返すことでコンクリートの水分浸透のイメージングを行った。得られた透過画像に対し、既往の研究<sup>5,6)</sup>を参考にノイズ除去、強度分布補正、画素(1画素=45  $\mu m$ /pixel)の結合を行うことにより空間誤差を 1%まで低減させ解像度  $1.8 \times 1.8 mm$  の透過率画像を作成した。その後、吸水前(乾燥時)の透過率画像を  $I_{t=0}$ , 任意時間吸水させたときに透過率画像を  $I_t$  とし、吸水後の画像  $I_t$  を吸水前の画像  $I_{t=0}$  で除した差分画像の対数として時間  $t$  の間に浸透する水の透過率画像  $\Delta T$  を出力した。

$$\Delta T = -\ln\left(\frac{I_t}{I_{t=0}}\right) = a_w d_w \quad (3)$$

$\Delta T$  は、一定の単位長さ当たりの水の減衰係数 ( $a_w$ ) と中性子線透過方向に存在する水の総和 ( $d_w$ ) の積である。したがって、全面素にわたる  $\Delta T$  の総和 ( $W_{image}$  とした) が吸水量に相当する。この方法によって算出した吸水量と、吸水試験で秤量した吸水量の関係を図-4 に示す。すべての供試体において吸水量と  $W_{image}$  の良好な相関が得

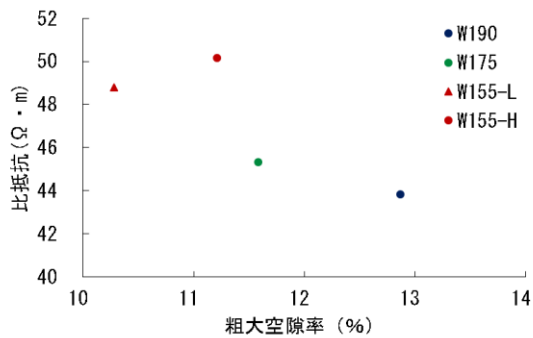


図-5 比抵抗と粗大空隙率の関係

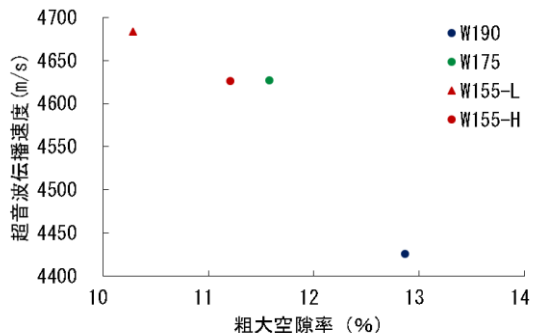


図-6 超音波伝播速度と粗大空隙率の関係

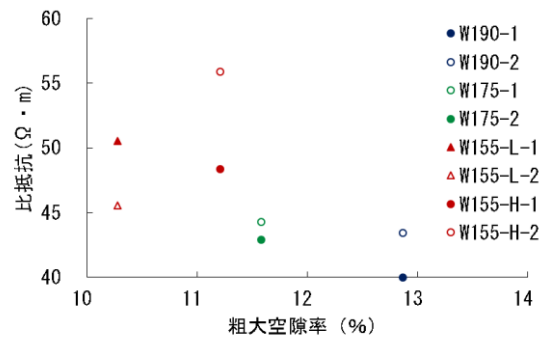


図-7 切断後 5cm 厚さの供試体の比抵抗と粗大空隙率の関係

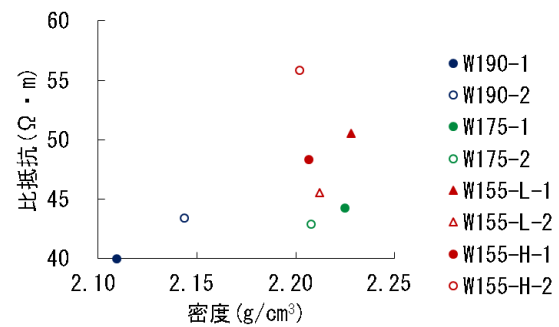


図-8 比抵抗と密度の関係

られた。したがって、中性子線透過イメージングから得られる透過画像は、吸水量を定量的に評価していることが確認でき、図-4 で得られた傾きに 1 画素当たりの  $\Delta T$  を乗じることで 1 画素当たりの吸水量を算出することができる。なお、供試体によって傾きが異なり、単位水量が少ない供試体ほど、傾きが小さくなる傾向にあった。吉村ら<sup>8)</sup>によると供試体が厚い場合や乾燥状態において元々コンクリートに含まれている水が多い場合に、水の検出感度が低下し、 $W_{image}$  が小さく出力される。したがって、単位水量の多いコンクリートほど、乾燥時に残存していた水の量が多かったことが考えられる。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 非破壊試験による緻密性評価

Powers の水和モデルを用いて算出した粗大空隙率と供試体切断前のコンクリート角柱供試体 (75×75×400mm) の比抵抗及び超音波伝播速度の図-5 および図-6 に関係を示す。測定には、各要因 1 体で行った。毛細管空隙は、劣化現象を引き起こす物質移動の経路になりうる。2.1(3)において、Powers 水和モデルに基づきコンクリートの構成割合を算出した。本研究では、コンクリート単位体積当たりの毛細管空隙率に、フレッシュ時の空気量を加えたものを粗大空隙率とした。また、単位体積当たりのゲル空隙率、毛細管空隙率、フレッシュ時の空気量の和を全空隙率とした。

比抵抗は、粗大空隙率が大きくなるほど、小さな値を

示した。比抵抗は、セメント硬化体の空隙量に影響を受け、比抵抗の大きいコンクリートほど緻密であるという報告がある<sup>9)</sup>。また、比抵抗の逆数である電気伝導率は Powers の水和モデルによって算出したセメントペーストの毛細管空隙率に強く依存するという報告<sup>10)</sup>もある。したがって、粗大空隙率の小さいものほど、コンクリートの緻密性は高く、大きな比抵抗が得られたと考えられる。超音波伝播速度も比抵抗同様に、空隙率が大きくなるほど小さな値を示した。飽水状態で測定を行っているため、空隙は水で満たされている。水の超音波伝播速度はセメント水和物より遅いため空隙率が大きいほど超音波伝播速度は小さくなったと考えられる。

上記の結果から、Powers の水和モデルによって算出した粗大空隙率は、概ねコンクリート供試体の空隙構造を評価できていることが確認された。

切断後の供試体 (75×75×50mm) の比抵抗と粗大空隙率の関係を図-7 に示す。測定は、75×75×400mm の角柱供試体から切り出した、同一条件の供試体 2 つを用いて行った。5cm 厚さで測定した場合も、空隙率の増加とともに、比抵抗が減少する傾向が現れた。しかし、同配合で空隙率が同じであると推定される供試体間でも比抵抗に相違が認められた。この原因として、粗骨材が均一に混入せず、型枠内で偏りが生じたものと考えられる。それらを密度の相違から確認することとした。切断後 5cm 厚さの供試体の密度と比抵抗の関係を図-8 に示す。同配

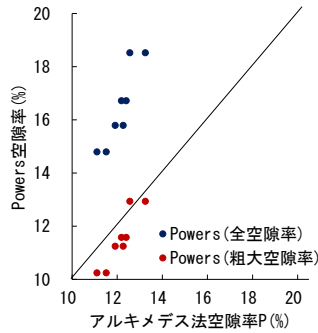


図-9 空隙率の比較

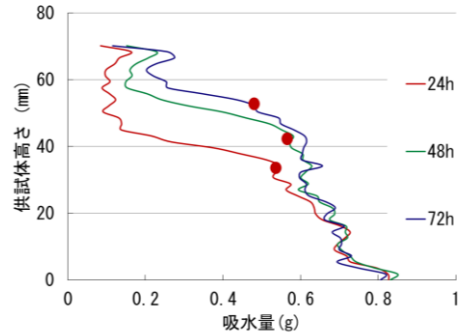


図-11 水分浸透高さ導出方法

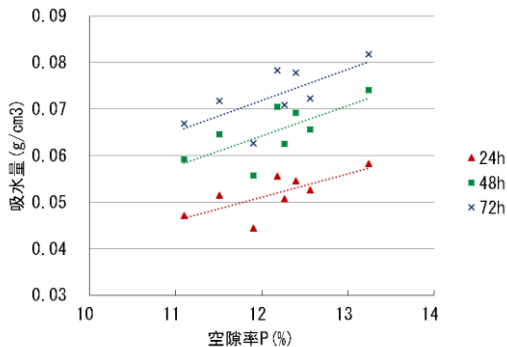


図-10 吸水量と空隙率 P の関係

合の供試体の場合密度の大きいほうが比抵抗も大きくなっているため、同一配合における比抵抗の差は、骨材の分布に偏りが原因であると考えられる。

### 3.2 水分浸透特性の評価

#### (1) 空隙率 P (アルキメデス法)

アルキメデス法により算出した空隙率 P と Powers の水和モデルより算出した全空隙率及び、粗大空隙率の関係を図-9 に示す。Powers の水和モデルにより算出した粗大空隙率(毛細管空隙率+空気量)は、全空隙率に比べてアルキメデス法により算出した空隙率に近い値を示した。つまり、今回の乾燥条件によって得られた空隙(水分逸散した空隙)は、比較的粗大な空隙であるものと考えられ、実環境下における乾湿作用で飽和され、あるいは乾燥される空隙に相当するものと考えられる。他方、作製された供試体は、3.1 述べたとおり同一配合の場合でも骨材混入量にばらつき(骨材分布の偏り)があることが確認された。したがって、粗大空隙量の指標として、ここでは、アルキメデス法により得られた空隙率 P を採用することとした。

#### (2) 吸水量

空隙率 P と各供試体の単位体積当たりの吸水量の関係の経時変化を図-10 に示す。空隙率 P が大きいほど吸水量が大きくなる傾向が認められた。コンクリートの水セ

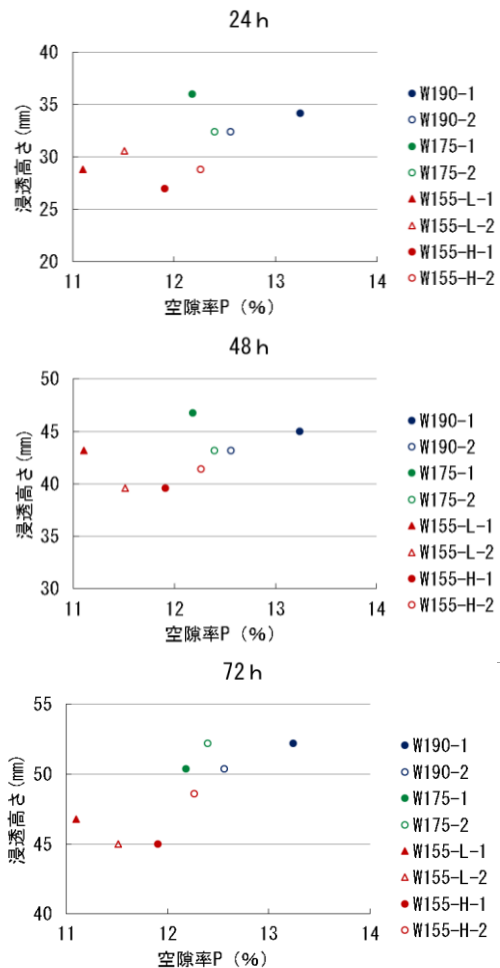


図-12 水分浸透高さ空隙率 P の関係

メント比は同一であるため、ペースト部分の細孔構造は同一であるとする、空隙が大きいコンクリートほど吸水量、すなわち水分浸透量が大きくなったものと考えられる。この結果から、水分浸透における吸水量は、粗大空隙量を評価できるものと考えられる。

#### (3) 水分浸透高さ

今回は、リアルタイムで水分浸透現象を把握可能であるため、水分浸透の高さについても評価が可能である。同一水セメント比のコンクリートにおける粗大空隙量の



相違が水分浸透高さに与える影響を検討することとした。

水分浸透高さの導出方法を W190-1 を例に図-11 に示す。透過画像から吸水量を定量化することによって、吸水量の空間分布が得られる。すなわち、高さ方向の吸水量分布が得られる。定量化においては、既往の研究<sup>6)</sup>を参考に高さ方向に 1.8mm ごとの吸水量を求めた。W190-1 の例は、水分分布の経時変化が示されている。既往の研究<sup>11)</sup>と同様に、水分浸透高さは、高さ方向の吸水量が急激に減少する高さとして定義した。図中に W190-1 の場合の水分高さを赤丸印で示した。

吸水開始後、24, 48, 72 時間後の空隙率 P と水分浸透高さの関係を図-12 に示す。粗大空隙率が大きいほど浸透高さは高くなった。水セメント比が同一であり、セメントペースト部分の細孔構造は基本的には類似したものと考えると、同一高さにおいて浸透した水分が空隙を満たす状態はほぼ同様であると推定できる。つまり、同一高さまで水分が浸透した場合には、空隙が多いコンクリートほど吸水量は大きくなる。このことは空隙率 P と吸水量の関係からも確認できる。他方、空隙率 P と浸透高さの関係からは、空隙率 P が大きいほど、浸透高さも高くなった。この原因として、空隙率 P が大きい、すなわち、粗大空隙が大きいものでは、粗大空隙間あるいは微細な空隙を含めてその連続性が増し、水分浸透性が高くなるものと考えられる。したがって、同一水セメント比であっても、粗大空隙の多少によって空隙の連続性が異なり、水分浸透性は粗大空隙に依存するものと考えられる。

今回の結果から、水分浸透深さは最大で約 10mm 程度の差が生じており、実構造物において同一の W/C であっても、粗大空隙の多少が耐久性に影響を与える可能性が示唆される。なお、粗大空隙率 P と水分浸透高さの関係にはばらつきも認められた。これらのばらつきも含めてさらなる検討を行い、粗大空隙が水分浸透（速度、浸透量）についてその詳細を明らかにする必要がある。

#### 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 粗大空隙率が高いほど、超音波伝播速度は小さくなり、比抵抗は大きくなった。Powers の水和モデルによって算出した粗大空隙率は、概ねコンクリート供試体の空隙構造を評価可能であった。
- (2) 中性子線透過イメージングによって水分浸透現象を定量的に比較検討できることが確認された。
- (3) 空隙率 P が大きいものほど吸水量は大きくなった。
- (4) 中性子線透過イメージングにより導出した水分浸透高さは、粗大空隙率が大きくなるほど高くなった。

- (5) 同一水セメント比であっても、粗大空隙の多少によって空隙の連続性が異なり、水分浸透性は粗大空隙に依存し、それらが耐久性に影響を与える可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 上田洋, 飯島亨, 鈴木浩明: コンクリート構造物への水分浸透の影響を調べる, RRR, Vol.71, No.6, pp.20-23, 2014
- 2) T. C. Powers: Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, Journal of the American Ceramic Society, Vol.41, No.1, pp.1-6, 1958
- 3) A. M. Neville: ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, 2004
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 吉村雄一, 水田真紀, 須長秀行, 大竹淑恵, 林崎規託: 小型加速器中性子源を利用したコンクリートにおける水の浸透性状評価, 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.653-658, 2017
- 7) 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: シリカヒューム混入セメントペーストにおける電気伝導特性と粗大毛細管空隙空間構造の関係, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.370-377, 2009
- 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, pp.1683-1688, 2018
- 9) 梶原彩野, 皆川浩, 久田真: モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 10) 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: セメントペーストの電気伝導率と粗大毛細管空隙空間構造の対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.901-906, 2009
- 11) 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