

論文 シリカフェーム混入コンクリートの中性子線透過イメージングによる水分浸透性評価

吉田 千晶*1・久保 善司*2・小黒 拓郎*3・水田 真紀*4

要旨: コンクリート構造物の劣化において有害物質の侵入は必須であり、水分とともにコンクリート中へ浸透することが多い。そのため、水分浸透性は劣化の進行を支配する要因の一つとされる。本研究では、コンクリートの高強度化に用いられる混和材としてシリカフェーム(SF)に着目し、マイクロファイラー効果およびポゾラン反応の両者による細孔構造の緻密化が水分浸透性に与える影響を中性子透過イメージングにより検討した。その結果、SF 混和の緻密なコンクリートにおいても、中性子透過イメージングにより、SF 混和による水分浸透抑制の効果は大きいこと、さらにはその水分浸透性の相違を把握することが可能であった。

キーワード: 中性子線透過イメージング, 水分浸透性, シリカフェーム, 低水結合材比, 流束分布

1. はじめに

コンクリート構造物を劣化させる原因として、塩害、中性化、凍害、およびアルカリシリカ反応等が挙げられる。劣化が発生・進行するには、各劣化における有害物質の侵入が必須となる。さらに、これらの有害物質は水分とともにコンクリート中へ浸透することが多い。そのため、水分移動特性は劣化の進行を支配する要因の一つとされる。

現状では、コンクリート中における水分移動現象を把握する方法として、含水率センサを埋設する方法、水分を浸透させた供試体の割裂面の目視観察によって、浸透深さを計測する方法などが一般的である¹⁾。割裂する場合には、同一の供試体、条件において繰り返すことによる再現性の確認ができない。また、含水率センサを埋設する方法ではスポット評価となるため、リアルタイムでの浸透速度そのものを十分に把握しているとは言い難い。

近年、コンクリートの水分浸透性を把握する手法として、期待されているのが、中性子線透過イメージングである。現在、産業利用を目的に開発が進む小型中性子源を通じてコンクリートの水分浸透を分析する環境が構築されてきている。この方法は、コンクリート中を移動する水の透過像を得る一種のレントゲンであり²⁾、水を透過してしまう X 線やγ線に対して、水素に強く散乱される中性子の性質を利用する。「非破壊試験であるため、同

一の供試体を繰り返し用い、再現性確認のための測定も可能であり、コンクリートの水分分布を欠損なくより正確に捉えることができる。小型中性子源を利用したコンクリートの透過画像に対してノイズ除去、強度補正、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²⁾。また、厚さ 5 cm のコンクリート供試体に対して吸水した質量と中性子線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³⁾。

既往の中性子線透過イメージングによる手法においては、W/C=40%までの検討がなされているものの、圧縮強度が 100N/mm² を超えるようなシリカフェーム (SF) を混和した高強度コンクリートについては対象とされていない。SF を混和したコンクリートには、マイクロファイラー効果およびポゾラン反応による細孔構造の緻密化が期待される。SF 混和によるコンクリートの緻密化が水分浸透性に与える影響を、定量的な水分移動の把握が可能な中性子透過イメージング法により把握することを目的とした。また、SF を混和したコンクリートの性状を把握するため、圧縮試験、超音波伝播速度、電気抵抗の測定も行った。

表—1 SF の物性および化学組成

密度 (g/cm ³)	BET比表面積 (m ² /g)	化学組成 (%)							
		Ig.loss	SiO ₂	MgO	SO ₃	Cl	Moisture	Free Si	Free CaO
2.23	15.6	1.7	93.4	0.77	0.35	0.042	0.3	0.03	0.0

*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 理工研究域 地球社会基盤学系 准教授 工博 (正会員)

*3 金沢大学 理工研究域 地球社会基盤学系

*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—2 コンクリート配合

要因名	W/C (%)	W/B (%)	SF/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						空気量 (%)	水和度	毛細管空隙 (%)	ゲル空隙 (%)	Powersの粗大空隙率 (%)
					W	C	S	G	SF	SP					
35-0L	35	35	0	46	160	457	769	901	0	5.49	3.5	0.72	2.50	6.36	6.00
35-0H	35	35	0	46	160	457	769	901	0	5.49	5.1	0.72	2.46	6.25	7.56
35-10L	35	32	10	44	160	457	717	901	46	5.49	3.3	0.68	2.00	6.73	5.30
35-10H	35	32	10	44	160	457	717	901	46	5.49	5.9	0.68	1.95	6.55	7.85
40-10	40	36	10	46	160	400	769	901	40	4.80	4.6	0.72	3.04	6.16	7.64

2. 実験概要

2.1 供試体

(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/cm³），細骨材として手取川産川砂（密度：2.59g/cm³），粗骨材として手取川産川砂利（密度：2.59g/cm³，最大寸法 Gmax：20mm）を用いた。また，シリカフューム（SF）として市販のもの（密度：2.23g/cm³，活性指数材齢 7 日：101%，材齢 28 日：121%）を用いた。SF の物性および化学組成を表—1 に示す。

(2) コンクリート配合

本研究では高強度コンクリートを想定し，W/C を 35% および 40% とした。また，SF はセメント質量に対して外割置換（0 および 10%）とした。W/C=35% については，空気量の異なる供試体を用意し，空気量の多少を供試体名の H，L で表した。配合を表—2 に示す。

既往研究において⁴⁾，Powers の水和モデルを用いて算出した粗大空隙率（毛細管空隙+フレッシュ時空気量）によって粗大空隙の大小の評価が可能と報告されている。本研究においては，空隙構造の概略を知るために，Powers の水和モデル⁵⁾⁶⁾を用いた。結果は表—2 に併記した。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，セメントの密度及び単位水量と単位セメント量，水和度からセメントペーストの構成相割合を算出できる。本研究ではコンクリートを対象としているため，Powers の水和モデルを用いて算出したセメントペーストをコンクリート配合に置き換え，コンクリートの構成相割合を求めた。SF をセメントに置き換え，計算に必要な水和度においては，関ら⁷⁾の実験結果を参考に，材齢と W/B から 0.68 から 0.72 と仮定した。

(3) 供試体作製

コンクリート角柱供試体（75×75×400mm）は打設翌日脱型し，その後約 3 か月間水中養生を行った。養生後，角柱供試体の中央部から厚さ 35mm の供試体（75×75×35mm）を 2 個ずつ切り出し，供試体名に番号 1，2 を付し，区別した。単位セメント量が増加すると，浸透水分に対する検出感度が低下する傾向が報告されている³⁾。そのため，浸透性の評価が困難となる可能性が想定され

たため，既往の研究よりも供試体厚さを薄くし，35mm とした。

なお，コンクリートの圧縮試験用には円柱供試体（直径 100mm，高さ 200mm）を作製し，超音波伝播速度および電気抵抗の測定には切断前の角柱供試体（75×75×400mm）を用いた。

2.2 コンクリートの物性試験

(1) 圧縮強度

万能試験機を用いて圧縮強度を測定した。一般的にコンクリートの圧縮強度は W/B に支配され，W/B の小さいコンクリートほど緻密であるため，圧縮強度が高いものと考えられる。SF のボゾラン反応性を確認するため，材齢 28 日，63 日および 91 日において圧縮強度試験を実施した。

(2) 超音波伝播速度

非破壊試験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あり，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伝播速度を測定することができる。本研究では，28 日，63 日および 91 日の飽水状態での超音波伝播速度を測定した。

(3) コンクリートの電気抵抗

コンクリートの緻密性（空隙の量や連続性）を評価するために，コンクリートの電気抵抗を測定した。本研究では，28 日，63 日および 91 日の飽水状態の電気抵抗を測定した。

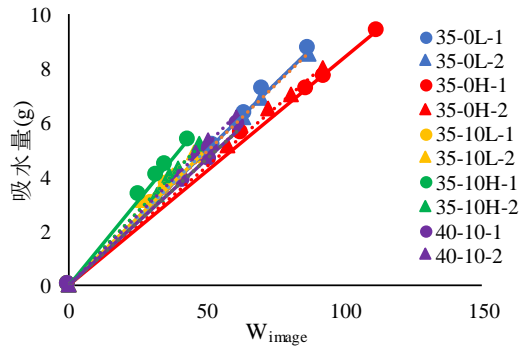
測定はインピーダンスアナライザを用い，ステンレス板を電極とし，コンクリート供試体をはさみこむ形で行った。コンクリート表面に均一に電流を流すために，3% の塩化ナトリウム溶液を脱脂綿に染み込ませたものをコンクリートと電極間の媒体として用いた。電圧は 1.0V とし，周波数は 10kHz とした⁸⁾。比抵抗の算出法は式(1)のとおりである。

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

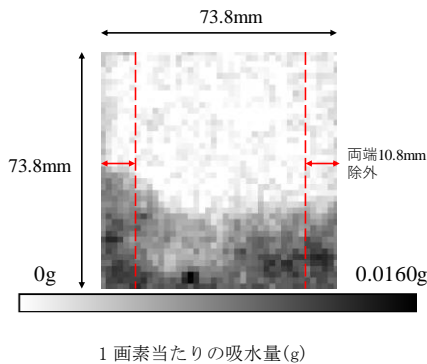
ここで， ρ ：比抵抗($\Omega \cdot m$)，R：抵抗値(Ω)，A：供試体断面積(m^2)，L：供試体長さ(m)である。

(4) 空隙率

水分浸透試験に用いた供試体の空隙率 P を求めるため



図—1 W_{image} と吸水量の関係



図—2 浸漬開始 16 時間における 35-0H-1 透過画像

にアルキメデス法を用いて求めた。求め方は、式(2)より算出した。

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

ここで、 W_s : 飽水質量(g)、 W_d : 40°C乾燥後質量(g)、 V_s : 飽水時の体積(cm^3)、 ρ_w : 水の密度(g/cm^3)である。

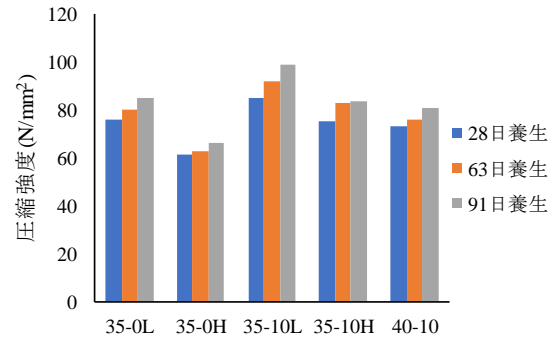
2.3 水分浸透試験

供試体は同一要因 2 体を用意し、温度 40°C で約 3 週間乾燥させ、水分浸透試験を開始した。水分浸透試験は底面が 5mm 程度水中に浸漬するようにして行った。浸透試験開始後の質量変化(吸水量)を電子秤(精度 0.1g)で測定した。

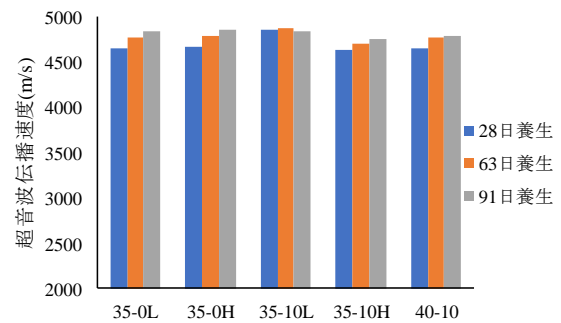
2.4 中性子線透過イメージによる水分定量

中性子透過イメージングは理研小型中性子源システム RANS を用いて行った。中性子透過イメージングとは、水分量によって中性子線の透過率が異なることを利用し、対象物の水分分布を画像として取得する手法である。本研究では、供試体に中性子線を 3 分間照射し、水分浸透試験開始前、16、44、64 および 164 時間後の中性子線透過画像を取得した。

吸水前の透過画像を $I_{t=0}$ 、任意時間吸水させたときの透過画像を I_t とし、吸水後の画像 I_t を吸水前の画像で除すことで水分のみの画像が抽出される。時間 t の間に浸透した水の透過像 ΔT は以下で表される。



図—3 圧縮強度測定結果



図—4 超音波伝播速度結果

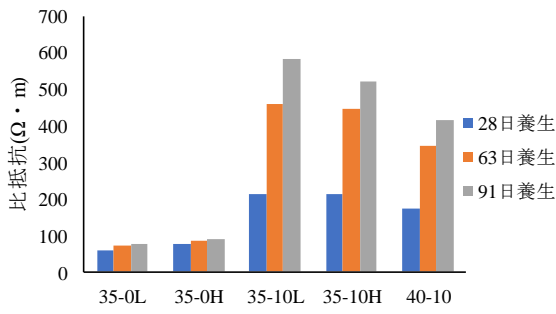
$$\Delta T = -\ln\left(\frac{I_t}{I_{t=0}}\right) = a_w d_w \quad (3)$$

ΔT 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 の積であり、供試体全範囲の ΔT の総和は、画像が示す吸水量 W_{image} に相当する。

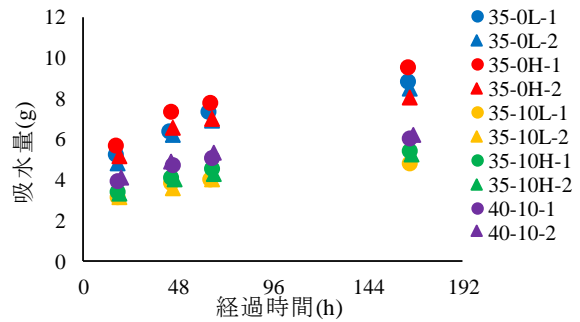
得られた透過画像は、既往の研究³⁾⁴⁾を参考にノイズ除去、強度分布補正を行った。また、中性子線の揺らぎによる誤差を低減するため、画素結合により 1 画素を 1.8mm ($40 \times 40 = 1600$ 画素) とし、空間誤差を 1% 以下にした。

透過画像より算出した ΔT の総和 (W_{image}) と吸水量(秤量値) の関係を図—1 に示す。 R^2 値はすべて 0.99 以上となり、両者には良好な相関関係が認められ、中性子線透過イメージングを用いて得られたコンクリートの水分浸透画像は、吸水量を定量的に評価していることが確認できた。このことから、図—1 で得られた傾きに 1 画素当たりの ΔT を乗じることで 1 画素当たりの吸水量が求まる。

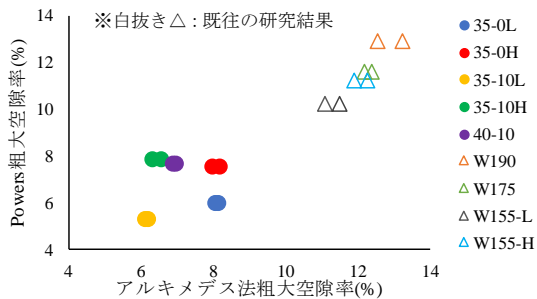
中性子線透過画像の一例(浸透試験開始 16 時間の 35-0H-1) を図—2 に示す。画像の左右端の吸水量が多いように見える。コンクリート中の本質的な水の移動は中央付近のものと考えられることから、この左右端の影響を除去するため、両端部 (10.8mm) を除外して、後述の計算を行うこととした。



図—5 電気抵抗測定結果



図—7 水分浸透試験結果



図—6 アルキメデス法空隙率と Powers 空隙率の関係

3. 結果及び考察

3.1 コンクリートの品質評価

(1) 圧縮強度

圧縮強度結果を図—3 に示す。W/C=35%では、SF 混和同士および SF 無混和同士を比較すると、SF 混和の有無にかかわらず、空気量が少ないほど圧縮強度は高くなり、高強度コンクリートにおいては空気量が圧縮強度に与える影響は大きいことが確認された。SF 混和では、空気量の少ない 35-10L は材齢に伴う圧縮強度の増加が無混和より若干大きい。他方、空気量の大きい 35-10H では、材齢 63 日と 91 日の強度が同程度であった。混入した空気量が多くなると、ポズラン反応による圧縮強度増加の効果が低減される可能性が高い。

(2) 超音波伝播速度

超音波伝播速度結果を図—4 に示す。W/C=35%および 40%のいずれも 4800m/s 程度の高い超音波伝播速度となり、いずれも緻密なコンクリートであることは確認できた。しかし、前項で見られた空気量の違いや圧縮強度の増加傾向は超音波伝播速度に反映されなかった。

(3) コンクリートの電気抵抗

電気抵抗測定結果を図—5 に示す。SF 混和コンクリートはマイクロファイバー効果とポズラン反応によるコンクリートの緻密化に加え、ポズラン反応によって細孔溶液の導電率が低くなるため、普通コンクリートよりも比抵抗が著しく増加するとされ⁹⁾、SF 無混和のものとは単純に比較できない。しかし、SF 混和のもの比抵抗は SF 無混和と同様に、材齢とともに高くなり、ポズラン反応

が進行したことを確認できた。このことから、SF 混和コンクリートでは、材齢の経過とともに組織が緻密化しているものと推察される。

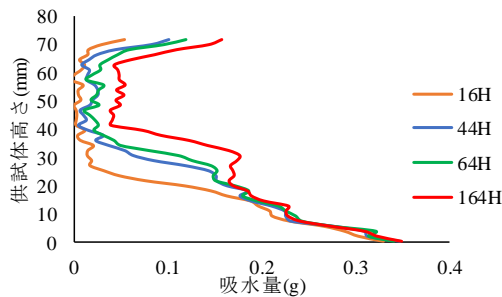
(4) 空隙率

Powers の水和モデルを用いて計算した空隙と、アルキメデス法を用いて算出した実験時の空隙を比較した。既往の研究⁴⁾によれば、粗大空隙(毛細管空隙+空気量)と、アルキメデス法を用いて算出した空隙量には相関があり、40°Cの乾燥によって生じた空隙(水分逸散が生じた空隙)は比較的粗大な空隙であるとされている。アルキメデス法を用いて算出した空隙率 P と、Powers の水和モデルを用いて算出した空隙率の関係を図—6 に示す。比較のため、著者らが既報で報告した W/C=55%の普通コンクリートの結果⁴⁾を併記した。凡例の数字は単位水量を示す。なお、既往の研究⁴⁾の材齢は 2 カ月である。Powers の水和モデルを用いて算出した空隙率とアルキメデス法を用いて算出した空隙率 P の関係には、ばらつきはあるものの、概ね相関が認められる。本研究で対象としたコンクリートは W/B=32~36%のもので、Powers の水和モデルで推定した空隙に対して、混入した空気量が占める割合は、既往の W/C=55%のものより大きい。そのため、フレッシュ時の空気量と、振動締固め後の空気量が異なるなどもばらつきの影響として考えられる。若干のばらつきはあるものの、所定の乾燥期間後の粗大空隙を表す指標として本研究においても、アルキメデス法による空隙率 P を指標とすることとした。

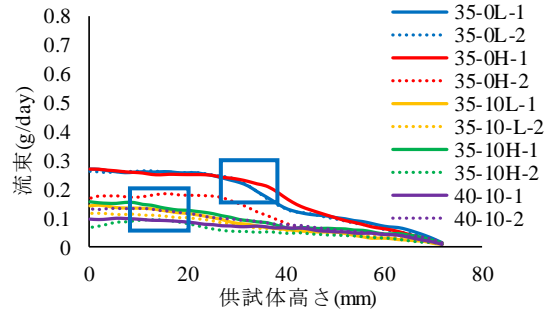
3.2 水分浸透特性の評価

(1) 水分浸透試験

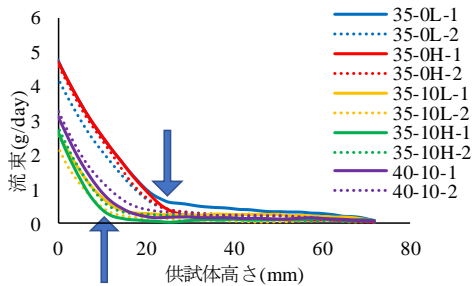
水分浸透試験結果を図—7 に示す。いずれの供試体も時間とともに吸水量が増加し、その吸水速度は徐々に減少した。W/C=35%では、SF 混和の吸水量は無混和の 1/2 程度まで低減した。SF 混和の W/C=40% (W/B=36%) の吸水量は、SF 無混和の W/C=35%の約 2/3 程度まで低減され、SF の混和によって高い水分浸透抑制効果が得られることが確認された。また、同一配合において、空気量の大きいものの吸水量は若干大きい傾向を示した。W/B



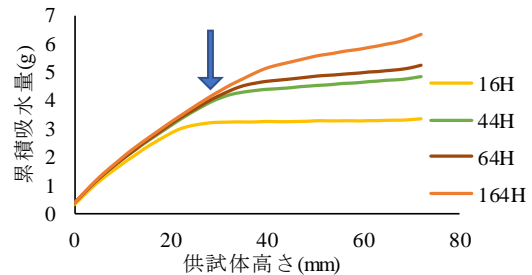
図—8 35-0H-1 透過画像から取得した吸水量分布



図—10 64～164 時間の流束分布



図—9 0～16 時間の流束分布



図—11 35-0H-1 における累積吸水量分布

が同じ場合でも、吸水量は空気量が大きいものほど若干大きくなったものの、既往研究⁷⁾に比べてその影響は顕著ではなかった。緻密なコンクリートでは吸水量自体が小さくなるため、その影響が顕著とならなかった可能性が示唆される。

(2) 水分流束

透過画像から高さ方向の吸水量分布を算出した。得られた吸水量分布の例を図—8 に示す。それをもとにコンクリートの水分流束を算出した。流束 (g/day) は 24 時間当たり、ある高さの浸透面 (7.5×3.5cm) を通過した水の質量と定義した。浸透開始から 16 時間における流束分布を図—9 に、64～164 時間における流束分布を図—10 に示す。

浸透開始から 16 時間においては、いずれも供試体高さ (底面を 0 とした高さ方向の位置) が高くなると急激に流束は小さくなった。流束が概ね 0 となる高さ (図—9 中矢印)、すなわち、透水がほぼ生じていない高さは、W/C にかかわらず、SF を混和したものの方が低かった。これは、SF の混和によって組織が緻密化され、吸水作用が大幅に低減されたものと考えられる。W/C=40% の SF 混和のものでは、W/C=35% の無混和よりも吸水作用が低減されていることが確認された。他方、空気量の影響は顕著でなく、コンクリートの配合 (細孔構造) が同じ場合には、空気量は流束に大きな影響を与えなかったものと考えられる。

浸透開始 64～164 時間後においては、底面 (高さ 0mm) からある一定高さまでの流速が概ね一定の範囲が認められた。SF 混和のものでは 10～20mm 高さ、無混和のもの

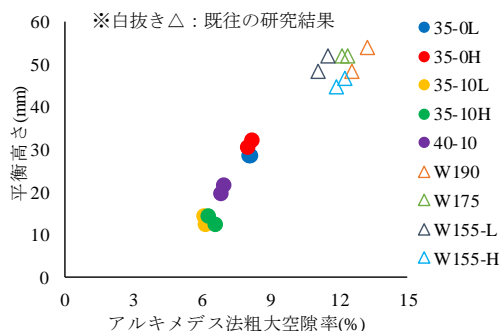
では 30mm 前後の高さであり、いずれもその高さ以降は流束が低下した (図—10 青囲み)。吸水させる駆動力 (毛細管力) と吸水速度が平衡に達しているものと考えられ、この流束が一定となる高さが小さいほど、水分浸透性は低下すると考えられる。SF を混和すると、流束および一定となる高さも小さくなり、SF 混和による効果が確認された。なお、空気量の影響については前述と同様に顕著な影響はなかったと考えられる。

(3) 累積吸水量と平衡高さ

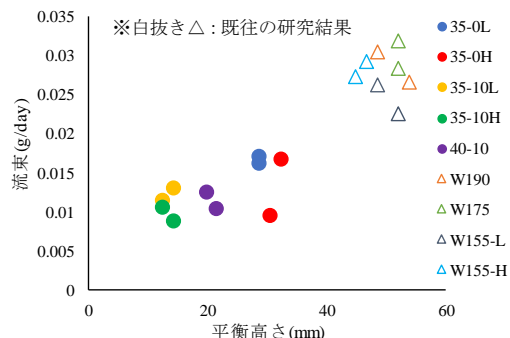
透過画像から高さ方向の吸水量分布を算出し、それをもとにコンクリートの累積吸水量を算出した。ある高さまでの吸水量を足し合わせたものをその高さの累積吸水量とした。累積吸水量の例を図—11 に示す。水分浸透開始 44 時間以降、累積吸水量が変化しない最大の高さが存在する (図—11 中青矢印: 累積吸水量曲線が重なる最大の高さ)。この高さまで吸水量 (含水量) は変化していない点であり、この高さから上部への水の浸透量と底面からの吸水量が平衡している領域となる。つまり、この領域の底面側からの流速とこの高さにおける流速は釣り合い状態にある。この高さをここでは平衡高さとして定義した。平衡高さが高いほど、コンクリートが持つ吸水させる駆動力は大きいものと考えられる。

平衡高さとアルキメデス法を用いて算出した空隙の関係を図—12 に示す。既往で報告した W/C=55% の普通コンクリートの結果⁴⁾についても平衡高さ (水分浸透開始 47 時間以降) を求め、図中に併記した。

粗大空隙率が大きいほど平衡高さは高くなった。W/C にかかわらず、SF を混和したものの方が平衡高さは低く



図—12 平衡高さとの空隙率の関係



図—13 平衡高さとその高さにおける流束

なった。SFの混和によって組織が緻密化され、吸水作用が大幅に低減されたものと考えられる。さらに、W/C=40%のSF混和ものでは、W/C=35%のSF無混和よりも平衡高さが低く、吸水作用が低減されていた。他方、空気量の大小の影響は平衡高さに顕著に現れず、同一配合のものにおいては同程度の平衡高さとなった。緻密なコンクリートにおいては導入された空気は貯留するスペースとなるものの、吸水作用を高める作用はそれほど顕著でない可能性が示唆される。

平衡高さにおける流束を図—13に示す。この時の流束は本実験の供試体については0～44時間のもの、既往の研究の供試体については0～47時間のものを採用した。ばらつきはあるものの、平衡高さが高いものほど、その高さにおける流束は大きくなった。平衡高さが高いほど、吸水作用が大きいとした仮定を裏付ける結果となった。コンクリートが緻密になればなるほど、吸水作用は小さく低減され、平衡高さとともにその流束は小さくなることが確認された。

4. 結論

本研究の範囲で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 中性子線透過イメージングは低W/Bの緻密なコンクリートにおいても水分浸透性の相違を把握することが可能であった。
- (2) SF混和による緻密化の効果は大きく、同程度のW/BであればSFを混和したものの水分浸透性は小さい。
- (3) SF混和により緻密化したコンクリートの平衡高さは普通コンクリートよりも小さく、その流速も小さかった。
- (4) 緻密なコンクリートにおいて空気量が水分浸透性(流束)に与える影響は顕著でなかった。

謝辞

本研究では、吉村雄一氏(株)トプコン、理化学研究

所客員研究員)に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木浩明, 上田洋: コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.676-681, 2014, 7
- 2) 吉村雄一, 水田真紀, 須長秀行, 大竹淑恵: 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
- 3) 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, 2018.7
- 4) 盛谷洋輝, 久保善司, 吉村雄一, 水田真紀: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019.7
- 5) 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
- 6) A.M.Neville: ネビルのコンクリートバイブル技報堂出版, 2004
- 7) 関慎吾, 笠原清, 栗山武雄, 河角誠: セメントの水和結晶の面より見たるコンクリートの圧縮強度, コンクリートジャーナル, Vol.6, No.4, pp.31-38, 1968.4
- 8) 榎原彩野, 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, pp.789-793, 2008.7
- 9) 関博, 宮田克二, 北峯博司, 金子雄一: 比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.451, V-17, pp.49-57, 1992.8