

論文 表面吸水試験を用いたコンクリート品質評価に関する基礎的検討

古賀 裕久*1・渡辺 博志*2・河野 広隆*3・片平 博*4

要旨: 種々の配合のコンクリートを作製し、表面吸水試験の測定結果に影響を与える要因や測定誤差などについて検討した。その結果、同一の材料を用いたコンクリートの場合、約 6 時間後の吸水量を測定することで、水セメント比が 30~70%の範囲で 10%ずつ異なるコンクリートを容易に区別できた。測定時に吸水が及ぶ範囲は、水セメント比や測定前の含水率調整条件によって異なっていた。また、吸水量には、水セメント比だけでなく細骨材の影響が大きく現れる場合があることが明らかになった。

キーワード: 表面吸水試験, 吸水, 骨材, 高炉スラグ細骨材, 人工軽量細骨材

1. はじめに

コンクリートの耐久性を比較的簡易に評価する試験方法として、従来から、圧縮強度試験が用いられる場合が多い。一般に、圧縮強度はコンクリートの水セメント比と関係があり、圧縮強度が大きいコンクリートは一定の耐久性を有すると考えられている。

しかし、近年、コンクリート構造物の耐久性に関する関心が高まっていることから、耐久性に関わる性質をより適切に評価できる指標として、硬化コンクリート中の水や空気の移動に着目した検討が行われている。このうち吸水のしやすさは、凍害など水に起因する劣化に影響を与えると考えられる¹⁾。また、近年の研究で、塩化物イオンの侵入について、液状水の浸入挙動が関係しているとの指摘^(例えば、2)もある。すなわち、吸水性状を適切に評価することができれば、凍害や塩害などに対する抵抗性をより適切に評価できる可能性がある。

ところが、現状では、コンクリートの吸水性状を測定する手法は十分確立されているとは言えず、測定結果に影響を与える要因には不明な点も多い。そこで、試験条件が試験結果に与える影響や、試験結果の再現性について検討した。その後、コンクリートの材料、配合などが吸水性状に及ぼす影響について検討した。本検討では、試験条件を制御しやすい方法として、あらかじめ含水状態を調整した試料を水面に接するように配置し、毛細管作用で吸水させる表面吸水試験に着目した。

2. 検討方法

2.1 表面吸水試験

(1) 試験の方法

表面吸水試験に関しては ASTM C 1585 や RILEM で提案された方法³⁾がある。そこで、ASTM の方法を参考にして試料の大きさや吸水方法(図-1)を定めた。試験

は、気温 20℃の部屋に設置した容器内で行った。

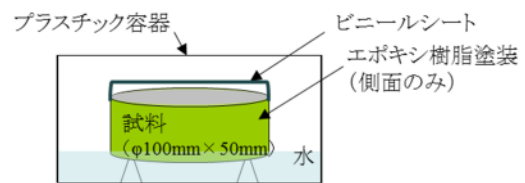
ただし、試験前の含水状態調整に関しては、表-1 のように変更した。ASTM の方法は、試料の内部を実構造物の環境に近い RH50~70%の状態にできる方法として提案⁴⁾されているが、配合や初期の含水状態によっては乾燥が不十分となるおそれがあることも指摘されている⁵⁾。そこで、本検討では、気温 20℃, RH60%の環境でほとんど質量が変化しなくなった試料を試験に用いた。

(2) 試料の作製方法

試験に用いる試料を作製する際には、ブリーディングの影響を緩和するために、まず、150×150×530mm の角柱供試体を打設し、材齢 28 日まで水中養生した後に、高さ方向で中央の位置から φ100mm のコアを採取・整形した(図-2)。試料は、厚さ 50mm で、型枠に接していた面(以下、型枠面)から吸水させることを標準とした。

2.2 密度吸水率試験

表面吸水試験は、試験前の含水状態の調整を含めると



※供試体が水中に約 2mm 没するようにした。供試体上面は、ビニールで覆い、水はね等による吸水を防いだ。

図-1 表面吸水試験状況の模式図

表-1 試験前の含水状態調整方法

今回実施	ASTM C 1585
20℃, RH60%の恒温恒湿槽内で質量がおおむね一定となるまで保管(4週間以上)する。	50℃, RH80%の環境で3日間乾燥させ、その後15日間以上23℃環境下にある密封容器中に保管し、含水率分布を安定させる。

*1 (独) 土木研究所 材料資源グループ基礎材料チーム主任研究員 工修 (正会員)

*2 (独) 土木研究所 材料資源グループ基礎材料チーム上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*4 (独) 土木研究所 材料資源グループ基礎材料チーム主任研究員 (正会員)

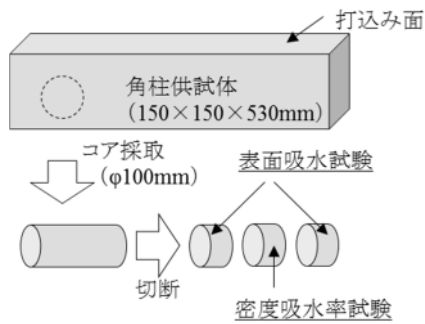


図-2 供試体の採取・整形方法

表-2 コンクリートの配合と試験結果

記号	W/C (%)	単体量(kg/m ³)				Sl (cm)	Air (%)	σ 28 (N/mm ²)
		W	C	S	G			
A30	30	175	583	604	960	24.5	3.1	90.1
B30							22.0	4.2
A40	40		438	722		19.0	3.8	85.4
A50	50		350	793		19.5	5.0	45.8
B50						17.5	3.8	44.0
A60	60		292	840		18.0	4.4	37.8
A70	70		250	874		18.0	5.0	27.9
B70						9.5	3.3	25.2

※使用骨材：S（掛川産山砂，吸水率 2.23%），G（笠間産砕石，吸水率 0.46%）

※水セメント比 30%，40%の配合には高性能 AE 減水剤を使用した。それ以外の配合には AE 減水剤を使用した。

試験に要する期間が長い。そこで，吸水に関する他の指標として，コンクリート試料の吸水率を測定することも試みた。本検討では，図-2 のように採取した試料を真空環境で約 1 日吸水させて，表乾質量，水中質量を測定した後に絶乾質量を測定した。試験結果からコンクリートの吸水率を求めた。

2.3 検討ケース

(1) 試験方法に関する検討

試験方法に関する検討は，表-2 に示す配合を用いて行った。使用材料は，普通ポルトランドセメント，掛川産山砂，笠間産砕石とした。試験は 2 回の時期にわたって実施しており，同じ配合について複数の結果があるので A または B の記号を付して整理した。

測定する試料は，厚さ 50mm に整形し，含水状態を表-1 の条件で調整したものを標準としたが，比較のため，試料の厚さを 10~70mm の範囲で変えた場合や，含水状態調整時の湿度を 75% または 90% と大きくした場合についても行った。また，一部試料を対象に，絶乾状態とした試料を用いた再測定も行った。その方法は後述する。

(2) 材料・配合の影響に関する検討

材料や配合の影響に関する検討では，表-3 に示す条件で材料や配合を変更し，検討を行った。これらを変更したコンクリートのフレッシュ性状及び強度に関する試験結果を表-4 に示す。一部の試験ケースでは，試料

表-3 材料・配合に関する検討ケース

種類	詳細
セメント種類	配合 A50 に対し，セメントの 30% または 50% を高炉スラグで置換した配合，セメントの 20% をフライアッシュで置換した配合。
空気量	配合 B50 に対し，AE 剤を用いて空気量を増加させた配合，消泡剤を用いて空気量を減少させた配合。
粗骨材種類	配合 A50 の使用粗骨材を，吸水率 3.89% と大きい低品質粗骨材に変更した配合。
細骨材種類	配合 A50 の使用細骨材を，高炉スラグ細骨材（吸水率 0.88%）に変更した配合。 配合 B50 の使用細骨材を，吸水率の小さいケイ砂（吸水率 0.24%），やや吸水量の大きい砕砂（三重県産，吸水率 2.46%），構造用人工軽量細骨材（膨脹頁岩系，吸水率 12.35%）に変更した配合。 配合 B70 の使用細骨材を，ケイ砂（吸水率 0.24%）に変更した配合。

表-4 コンクリートの試験結果（材料等を変更の場合）

検討の種類		Sl (cm)	Air (%)	σ 28 (N/mm ²)
セメント	高炉スラグ 30%	18.0	3.8	49.4
	高炉スラグ 50%	18.0	3.7	42.8
	フライアッシュ 20%	16.5	4.3	42.8
空気量	空気量増	18.0	7.6	34.2
	空気量減	15.0	1.9	47.7
粗骨材	低品質粗骨材	13.5	4.3	47.7
細骨材	高炉スラグ細骨材	2.0	5.1	46.0
	ケイ砂	21.5	6.0	39.4
	砕砂	0.5	2.0	40.8
	軽量細骨材	6.0	4.2	39.3
	W/C=70%，ケイ砂	19.5	5.6	21.6

※空気量を意図的に変更した配合以外は目標空気量を 4.5% としして混和剤の使用量を変更した。スランプは供試体製作に支障のない範囲を目標とした。ただし，入手できた材料の量に制約があり，空気量やスランプが基本的な配合（表-2）と大きく異なったコンクリートを用いた場合もある。スランプの小さな配合については，打設時に型枠側面のたたきを入念に行うなど配慮した。スランプの大きな配合もあったが，表-2 の A50 と比較して材料分離の程度が特に大きいというような配合はなかった。

※構造用人工軽量細骨材は，他の細骨材と同様，十分吸水させた状態から表乾状態とし，練混ぜに用いた。

の厚さを 50mm から変更したものについても試験を行った。

3. 表面吸水試験結果の評価方法に関する検討

3.1 ASTM における評価方法

試験時の吸水が水の表面張力によるものであるとすると，式(1)で表される吸水量は，理論的には，時間の平方根に比例すると考えられる。ASTM では，6 時間までの測定結果を式(2)にあてはめて回帰分析し得られる初期吸水速度を，評価指標の一つとして提案している。な

お、このとき用いるデータは、吸水量と時間の平方根の間の相関関係が良好で、相関係数で0.98以上となるものでなければならない。

$$I_t = \frac{m}{a \cdot d} \quad (1)$$

ただし、 I_t : 時間 t における吸水量 (mm), m : 吸水開始から時間 t までの間の質量変化 (g), a : 吸水面積 (mm^2), d : 水の密度 (g/mm^3)

$$S_i = \frac{I_t - b}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

ただし、 S_i : 時間 t における初期吸水速度 ($\text{mm}/\text{s}^{0.5}$), t : 吸水開始からの時間(s), b : 初期吸水量(mm)

3.2 RH60%の環境で調整した試料を用いた検討

今回行った表面吸水試験中の吸水量の推移について、**図-3**に例を示す。

まず、吸水速度の速い水セメント比70%の場合に着目すると、厚さ10, 20, 30mmの試料は、吸水開始から24時間後ごろまでに吸水量の急速な増加が止まり、以降はほぼ横ばいとなった。これらの試料を観察すると試料上面が濡れ色に変色しており、水の移動が試料上面まで達したことが確認された。これに対し水セメント比30%の場合は、吸水量の変化がほぼ横ばいとなった試料は厚さ10mmのものに限られており、吸水の範囲は10mm余りに限られていたと考えられる。このように、コンクリートの品質によって、試験中に吸水の及ぶ範囲が異なった。しかし、吸水開始から6時間後の時点では、吸水の範囲は、表面から10mm以下程度と考えられる。

そこで、ASTMの提案に従って初期吸水速度の算定を試みたが、例えば水セメント比30%の配合などで相関係数が0.98を下回り、吸水量と時間の平方根の間の相関関係は十分には良好でなかった。各試料の初期の吸水性状に着目すると、厚さが小さい試料ほど初期の吸水速度がわずかに大きい傾向があった。また、試料厚さによる初期の吸水速度の違いは、水セメント比が小さい供試体ほど、明確であった。

3.3 絶乾状態の試料を用いた再試験

試料の厚さによって初期の吸水速度が異なった理由について検討するため、表面吸水試験を行った後、約半年間屋内で保管していた一部の試料を用いて、再試験を行った。再試験は、試料を105℃の乾燥炉で約3日間乾燥させて絶乾状態としたのちに行った。**図-4**に試験結果を示す。

再試験では、初期の吸水速度は、試料厚さに関わらずほぼ一定であった。また、水セメント比50%で、厚さが10~30mmの試料について、吸水量の増加がほぼ横ばいとなった吸水開始から7日後の吸水量に着目すると、気

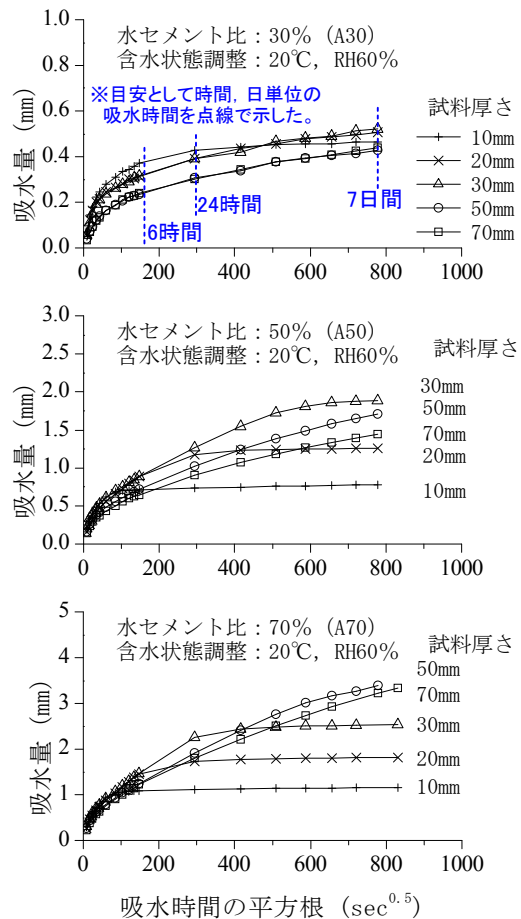


図-3 試料厚さの異なる試料の吸水量の推移

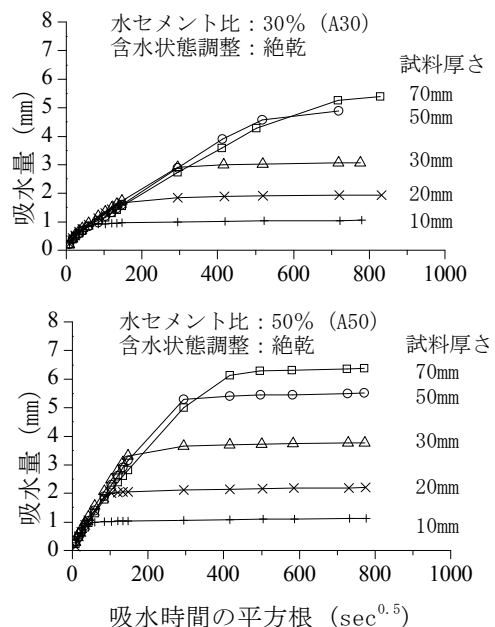
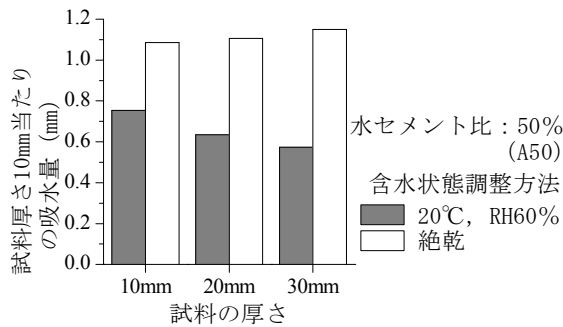


図-4 絶乾にした試料の吸水量の推移 (再試験)

温 20℃, RH60%の環境で含水状態を調整した当初の試験では厚い試料ほど、厚さあたりの吸水量が小さかったが、再試験では、おおむね試料の厚さと比例していた(**図-5**)。これらの結果から、気温 20℃, RH60%の環境で



※試験期間中に吸水量がほぼ横ばいになった試料を対象に検討した。試料の厚さ当たりの吸水量を求める際には、ノギスで測定した厚さを用いた。各条件1試料の試験結果。

図-5 試料厚さあたりの吸水量の比較 (配合 A50)

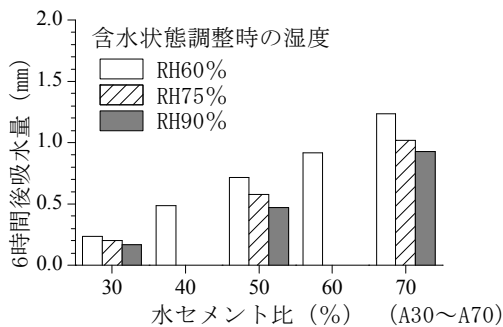


図-6 含水状態調整時の湿度の影響

長期間保管した試料でも、厚さによって試験前の含水量に差があり、また、各試料の表層と内部でも含水率に分布があつて、試験結果に影響を与えたと考えられる。

3.4 試験前の含水状態調整について

コンクリートの含水状態が異なると吸水性状が異なることが知られている。その影響程度を把握するために、試験前に保管する容器内の相対湿度を変更した場合について検討した。厚さ 50mm の試料について吸水開始から 6 時間後の吸水量を図-6 に示す。吸水性状を正確に把握するためには、気温・湿度の安定した環境で含水状態を調整することが必要である。

3.5 試験結果の評価に関する検討のまとめ

今回の試験結果から、試験前の含水率調整条件が異なる場合は表面吸水試験の結果に影響があることが確認された。また、調整条件は同じでも試料の厚さが異なる場合には、試験前の試料の含水状態に差が生じ、試験結果に影響があつた。以降は、気温 20°C、RH60% の環境で調整した厚さ 50mm の供試体に着目して検討する。

なお、試料によっては、吸水開始から 6 時間後までの間でも吸水量と吸水時間の平方根の間の相関関係が十分に高くない場合もあつた。そこで、本報では回帰分析による初期吸水速度の算定は行わず、式(1)で計算される吸水開始から 6 時間後の吸水量を 6 時間後吸水量として、以降の検討における主な指標とした。このとき吸水が及

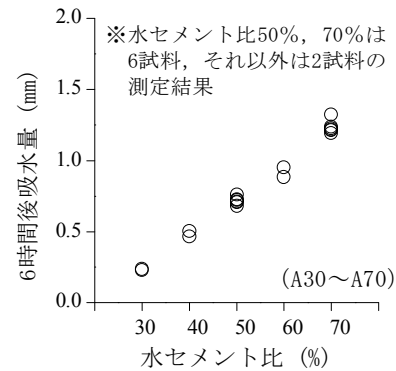


図-7 6 時間後吸水量のばらつき

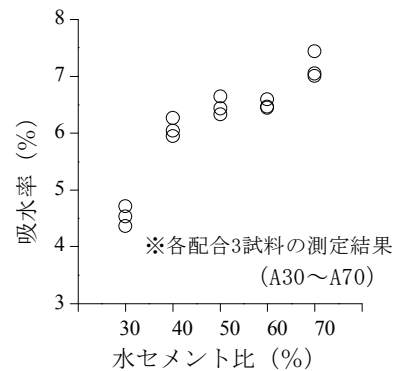


図-8 密度吸水率試験による吸水率

ぶ範囲は、配合にもよるが表面から 10mm 以下程度と考えられる。評価の範囲が表層付近に限られていることの良否については、今後の検討課題である。

4. 表面吸水試験の再現性等に関する検討

表面吸水試験の試験結果の再現性については不明な点が多いので、同一条件の試料を複数測定した。その結果を図-7 に示す。水セメント比 50% 及び 70% の場合は、同一条件の試料を 6 試料用意して試験を行ったが、試料による試験結果の変動は、水セメント比による吸水量の違いと比較すると小さかつた。試験結果の変動を変動係数で表すと、水セメント比 50, 70% のいずれも 3.7% であつた。

なお、参考のため密度吸水率試験による吸水率の測定結果を図-8 に示す。水セメント比が 40~60% 程度の範囲では、吸水率に顕著な差が無く、この点で表面吸水試験の結果と傾向が異なつた。今回、表乾状態の吸水率を求める際には真空環境で吸水させており、試料内部の空隙のほとんどが水でみだされておられる。これに対し、表面吸水試験は、空隙の寸法や連続性の違いによって異なる吸水速度を評価しているものと考えられる。このように両試験法の着目点が異なつているので、試験結果の傾向が異なつたものと考えられる。

5. 材料・配合が吸水性状に与える影響に関する検討

前章までの検討で試験方法についての基礎的な知見が得られた。本章ではその知見をふまえて、材料や配合が吸水性状に与える影響について検討した。試験結果は、主に6時間後吸水量として整理した。ほとんどの試験ケースは試料数2で行い、その平均値を用いた。

(1) 水セメント比

図-7に示したように、同一の材料を用いた試料でも、水セメント比が10%異なると6時間後吸水量は明確に異なっていた。水セメント比が10%異なる配合については、表面吸水試験でその品質の違いを評価することが可能と考えられる。

(2) セメントの種類

水セメント比50%の配合で、セメントの一部を混和材で置換した場合の測定結果を図-9に示す。高炉スラグで置換した場合は、吸水量の低下が認められ、緻密なコンクリートになったためと考えられた。置換率50%とした場合、圧縮強度(表-4)は無置換の場合に及ばなかったが、吸水量は最も小さかった。フライアッシュで置換した場合は、吸水量はほとんど変化しなかった。材齢28日で水中養生を終えたため、ポズラン反応の効果が十分に発揮されていない可能性がある。

(3) 空気量の影響

混和剤の使用量を変更して空気量を変化させた場合の測定結果を図-10に示す。消泡剤を用いて空気量を低下させた場合に吸水量がやや小さかったが、他の要因による影響と比較して顕著とまでは言えず、空気量が吸水性状に与える影響は明確ではなかった。エントレインドエアによる気泡は独立して存在するので、表面からの吸水に与える影響が小さかったものと考えられる。なお、この傾向は、表面吸水期間1週間でも変わらなかった。

(4) 粗骨材及び試験面の影響

水セメント比の異なる試料や使用粗骨材が異なる試料について、型枠面を試験面とした場合と、その対面にあたる切断面を試験面とした場合の測定結果をあわせて図-11に示す。

水セメント比が異なる試料について面による違いを比較すると、水セメント比が50%、70%の場合は型枠面で、30%の場合は切断面で吸水量がやや大きかった。標準として用いた粗骨材の場合、骨材の断面およびモルタルとの界面からの吸水量は、水セメント比50%や70%のモルタルマトリックスよりも小さいが、水セメント比30%のそれよりも大きかったものと考えられる。これに対し、吸水率の大きな粗骨材を用いた場合は、水セメント比が50%でも切断面の方が型枠面よりも吸水量が大きかった。粗骨材が吸水量に与える影響は、モルタル部分と骨材の品質の関係によって異なると考えられる。

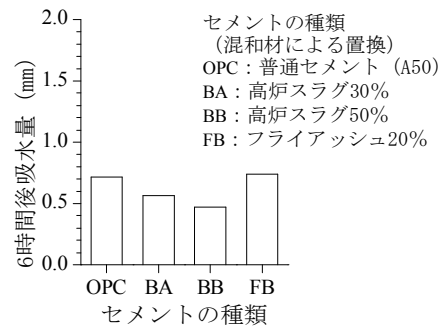


図-9 セメント種類と吸水量の関係

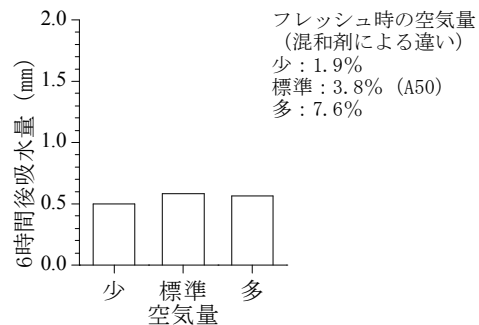


図-10 空気量と吸水量の関係

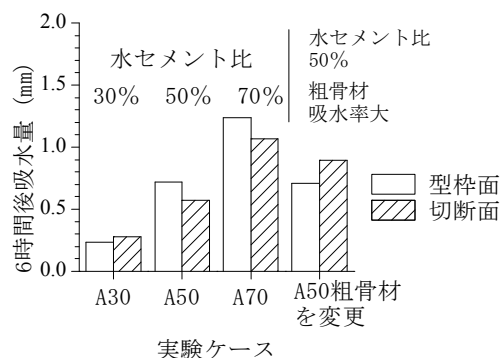


図-11 測定面や骨材種類と吸水量の関係

ただし、型枠面を試験面とした場合、粗骨材による吸水量の違いは顕著ではなかった。6時間後吸水量の測定時は、吸水の及ぶ範囲が型枠面表層に限られており、体積中で粗骨材の占める割合が少ないためと考えられる。

(5) 細骨材の影響

使用細骨材が異なる試料について、比較して図-12に示す。高炉スラグ細骨材やケイ砂を用いた場合、吸水量が顕著に低下していた。高炉スラグ細骨材やケイ砂は、他の骨材と比較して均質な材料であり、吸水しにくい物質で構成されているために吸水を抑制できたものと考えられる。これに対し、やや吸水率が大きい砕砂を用いた場合は、山砂を用いた場合よりもわずかに吸水量が大きくなっていった。

なお、代表的な試料について試料厚さの異なる試料の吸水量の推移を図-13に示す。図から6時間後吸水量の大きさは、7日間の表面吸水試験中に水が浸入した範囲

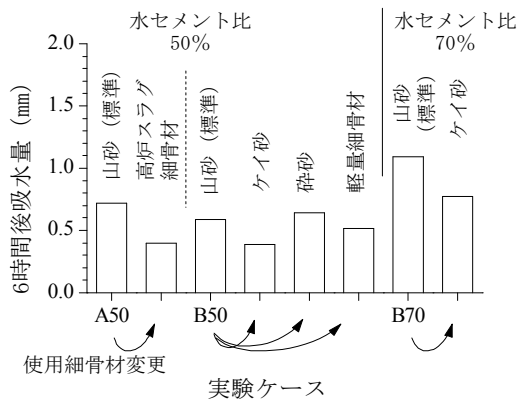


図-12 細骨材種類と6時間後吸水量の関係

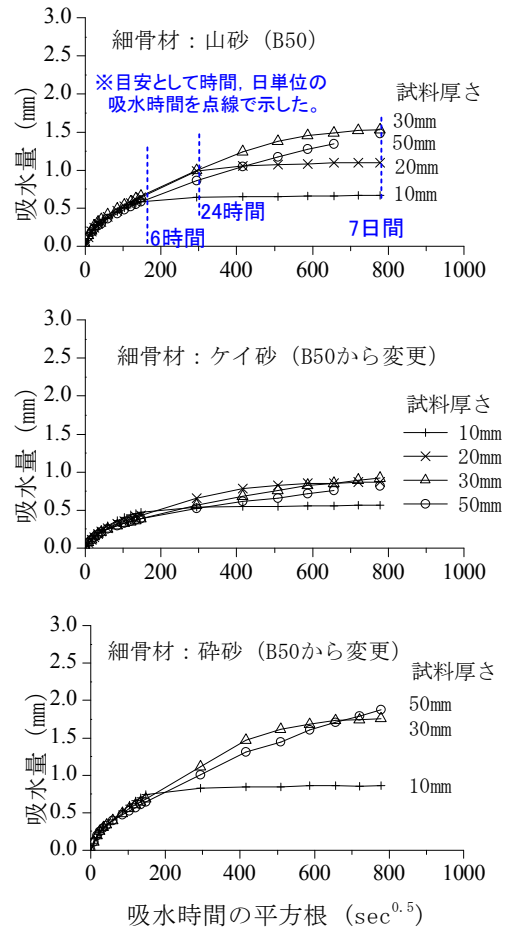
と関係があることが確認できた。

一方、吸水率の大きい人工軽量細骨材を用いても、表面吸水試験での吸水量は大きくならなかった。骨材の吸水率試験の結果と表面吸水試験時の吸水量は、概略では関係を有しているものの、空隙の特性が大きく異なる場合は、密度吸水率試験の結果から表面吸水試験の結果を予想することは困難と考えられる。

6. まとめ

表面吸水試験の試験結果の再現性や、試験条件、コンクリートの材料、配合などが及ぼす影響等について検討した。得られた知見のうち、主なものを以下に示す。今後、コンクリートの塩水浸せき試験などを行って、表面吸水試験結果と耐久性の良否の関係について検討していく予定である。

- (1) 表面吸水試験中の吸水範囲は、試料の水セメント比や測定前の含水状態、吸水時間によって異なるが、気温 20℃、相対湿度 60% の環境で含水状態を調整した供試体の吸水開始から 6 時間後の吸水量を測定する場合、表面から約 10mm 程度であった。
- (2) 気温 20℃、相対湿度 60% の環境で含水状態を調整した水セメント比 50% の試料などで検討した結果、6 時間後吸水量の変動係数は 3.7% と小さく、試験結果の再現性は高かった。
- (3) 同一の材料を用いた場合、水セメント比の大小によって 6 時間後吸水量が異なり、水セメント比 30~70% の範囲で、品質の違いを把握できた。
- (4) (1) から、型枠に接していた面を試験面とした場合、粗骨材の品質の影響は現れにくかった。
- (5) 水セメント比が同じコンクリートでも、使用する細骨材によって表面吸水試験中の吸水量が大きく異なった。高炉スラグ細骨材やケイ砂を用いた場合、6 時間後吸水量が減少した。



※山砂、ケイ砂の試料厚さ 50mm については、6 日目欠測。
※砕砂は、試料厚さ 20mm の試料を製作しなかった。

図-13 細骨材による試料の吸水量推移の違い

参考文献

- 1) 片平博, 河野広隆: 小径コアの短時間吸水量に着目したコンクリートの耐久性評価法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1599-1604, 2002.6
- 2) 高橋佑弥, 石田哲也, 岸利治: 低水セメント比領域に着目したコンクリート中の塩分浸透および液状水移動に関する熱力学連成解析の高度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.796-801, 2012.6
- 3) RILEM TC116-PCD: Tests for Gas Permeability of Concrete C. Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete, Materials and Structures, Vol.32, pp.174-179, 1999.4
- 4) D. P. Bentz et al.: Service Life Prediction Based on Sorptivity for Highway Concrete Exposed to Sulfate Attack and Freeze-Thaw Conditions, FHWA-RD-01-162, 2002.3
- 5) RILEM TC116-PCD: Concrete Durability an Approach towards Performance Testing, Materials and Structures, Vol.32, pp.163-173, 1999.