

論文 表面吸水試験による養生条件が異なるコンクリートの品質評価

吉田 行^{*1}・島多 昭典^{*2}

要旨：コンクリートの所要の品質を確保するには、適切な養生が重要となる。しかし、養生により確保されるコンクリートの品質の程度については必ずしも明確になっていないため、実際に施工されたコンクリートの品質評価手法の確立が望まれている。本研究では、コンクリートの品質評価手法として比較的簡易な表面吸水試験に着目し、養生条件が異なるコンクリートの品質評価への適用性について基礎的な検討を行った。その結果、表面吸水試験による吸水量は、塩化物イオンの拡散係数やコンクリートの比較的粗大な細孔容積と相関があり、養生や配合に起因するコンクリートの品質評価が概ね可能なことを示した。

キーワード：養生，表面吸水試験，塩化物イオンの拡散係数，細孔容積

1. はじめに

コンクリートの所要の品質を確保するには、適切な養生が重要となる。しかし、養生により確保されるコンクリートの品質がどの程度なのかについては必ずしも明確になっていないため、実際に施工されたコンクリートの品質評価手法の確立が望まれている。

コンクリートの品質を評価する方法として、耐久性に関わる水や炭酸ガスなどの侵入経路となる細孔の量を量る方法があるが、その測定には費用と手間がかかり簡便性に欠ける。このため、最近では、コンクリートの物質移動抵抗性を評価することを目的として、実際の構造物でも非破壊で測定することが可能な透気試験¹⁾や表面吸水試験^{2,3)}に関する研究が多く行われている。これらの手法には利点が多いが、特殊な試験装置が必要なことに加え、実構造物での測定にあたっては、含水率の影響や測定誤差を考慮した測定サンプル数および測定箇所の設定など、竣工時検査として実用化するには課題がある。

一方、比較的簡易にコンクリートの吸水特性を試験する方法として、コンクリート試験体の一面を水に浸けて吸水量を量る表面吸水試験がある。この方法においても、含水率は影響するが、既往の研究⁴⁾で簡易な含水調整でも品質の違いを評価できることが示されており、試験法としては簡便性が高い。また、細孔量の測定と同様、実構造物のコンクリートの性質を調べるにはコア等の採取が必要となるが、最近ではボス供試体⁵⁾による強度試験方法も提案されており、例えばこのような供試体を使用すれば実構造物を直接的に損傷することなく試験が可能となる。

以上から、本研究では、コンクリートの品質評価手法として比較的簡易な表面吸水試験に着目し、養生条件が異なるコンクリートの品質評価への適用性について基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは、土木工事で一般的に用いられている、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，比表面積 3,320cm²/g，以下、普通セメント(記号 N)と記述）と高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm³，比表面積 3,760cm²/g，以下、高炉セメント(記号 B)と記述）の 2 種類を用いた。細骨材は、苫小牧市樽前産の除塩された海砂（表乾密度 2.67g/cm³，吸水率 0.87%，粗粒率 2.85）を、粗骨材は、小樽市見晴産砕石（表乾密度 2.67g/cm³，吸水率 1.80%，粗骨材最大寸法 25mm）を用いた。また、スランプと空気量を調整するために、AE 減水剤（リグニンスルホン酸塩系）と AE 剤（樹脂酸塩系）を用いた。コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は 50%を中心として、一部のケースでは 40%と 60%についても検討したが、単位水量は一定とした。目標スランプと空気量は、土木工事で一般的な 8±2.5cm，4.5±1.0%とした。なお、表には実測のスランプおよび空気量の平均値も併記した。

2.2 供試体の養生条件と湿潤養生後の試験工程

表-2 は、コンクリートの養生条件と湿潤養生後の表面吸水試験の試験工程を示している。

養生温度は一般的な 20℃と低温養生を想定した 5℃の 2 水準を考慮し、材齢初期の湿潤養生期間は、コンクリート標準示方書施工編に示されている湿潤養生期間の標準⁶⁾を参考にして、養生温度との組合せを考慮して 3, 5, 7, 9, 12 日からそれぞれ選定するとともに、材齢 28 日

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)			AE	AE剤	スラン	空気量	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 (C×%)	(C×%)		(cm)
N	40	42	145	363	779	1077	0.31	0.0018	10.1	4.7
	50	44		290	843	1074	0.25	0.0013	9.6	4.8
	60	46		242	900	1057	0.30	0.0008	8.5	5.0
B	40	42		363	775	1072	0.25	0.0045	8.2	4.5
	50	44		290	840	1070	0.20	0.0038	10.1	5.2
	60	46		242	898	1055	0.20	0.0033	9.3	5.2

*1 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム主任研究員 博士（工学）(正会員)

*2 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム上席研究員 (正会員)

まで湿潤養生したケースも加えた。湿潤養生は、不織布製の養生マットを水道水で湿らせて供試体を覆う湿布養生とした。

湿潤養生後の試験工程は2通り設定し、所定期間湿潤養生後に含水調整を行ってから吸水試験を行うケースと、所定期間湿潤養生した後に材齢28日まで各温度とも相対湿度60±5%に制御された実験室内で気中養生を行った後、1回目の吸水試験、含水調整、2回目の吸水試験を行うケースとした。

2.3 表面吸水試験用供試体

図-1に表面吸水試験用供試体の採取・整形方法を示す。表面吸水試験用の供試体は既往の研究⁴⁾を参考にして、150×150×530mmの木製型枠にコンクリートを打設し、所定期間湿潤養生を行った。養生は型枠存置のまま打設面を水道水で湿らせた不織布で覆い、湿潤養生期間終了の前日に脱型し、供試体側面からφ100×150mmのコアを採取した。なお、型枠には塗装合板を使用し、コンクリート剥離剤は使用していない。

コア採取後速やかにコンクリートカッターで厚さ50mmに3分割し、30分程度試験体表面を自然乾燥させた後、吸水面(型枠面)以外をエポキシ樹脂でシールした。エポキシ樹脂の硬化後、各温度の水中に試験体を浸漬し、所定の湿潤養生期間となる翌日まで養生した。

2.4 表面吸水試験方法

図-2に表面吸水試験の実施状況を示す。吸水面(試験面)が水中に約2mm浸漬するように試験体を静置した。試験開始から1時間おきに6時間後までと24時間後に、試験面の水滴を布で拭き取り表乾状態にした試験体の質量を0.1g単位まで測定し吸水量を求めた。なお、試験はコアから切り出した試験体2試料1組で行い、その平均値で評価した。

2.5 含水調整方法

湿潤養生直後の試験体は飽水状態のため、吸水試験を行うには吸水面の含水調整が必要となる。試験体の含水状態を一定にするには、一定の温湿度環境下で一定期間乾燥させる必要があるが、本研究では品質評価試験方法として簡略化を図るため、既往の研究⁴⁾を参考に、湿潤養生直後から24時間、各温度の相対湿度60%の環境で自然乾燥させることにより含水調整を行った。

また、所定期間湿潤養生後に材齢28日まで気中養生を行った試験体については、気中養生後の含水率が各ケースで異なることから、気中養生直後から1回目の吸水試験を24時間実施し、その後上記と同様に含水調整として各温度とも相対湿度60%の環境で24時間自然乾燥させ、再び24時間吸水試験(2回目)を行った。

表-2 養生条件と湿潤養生後の試験工程

養生温度	水セメント比	湿潤養生期間	湿潤養生後の試験工程	養生温度	水セメント比	湿潤養生期間	湿潤養生後の試験工程
20℃	40%	3日	1	5℃	40%	5日	1
			2				2
		28日	1			28日	1
	50%	3日	1		50%	5日	1
			2				2
		5日	1			7日	1
			2				2
		7日	1			9日	1
			2				2
		28日	1			12日	1
	60%	5日	1		60%	7日	1
			2				2
	28日		1		28日		1

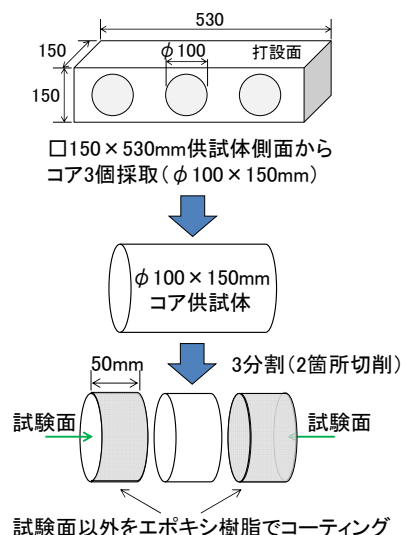
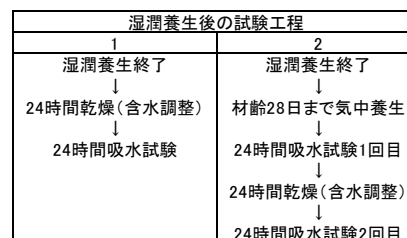


図-1 吸水試験用供試体の採取・整形方法

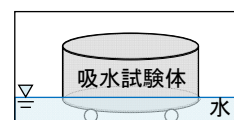


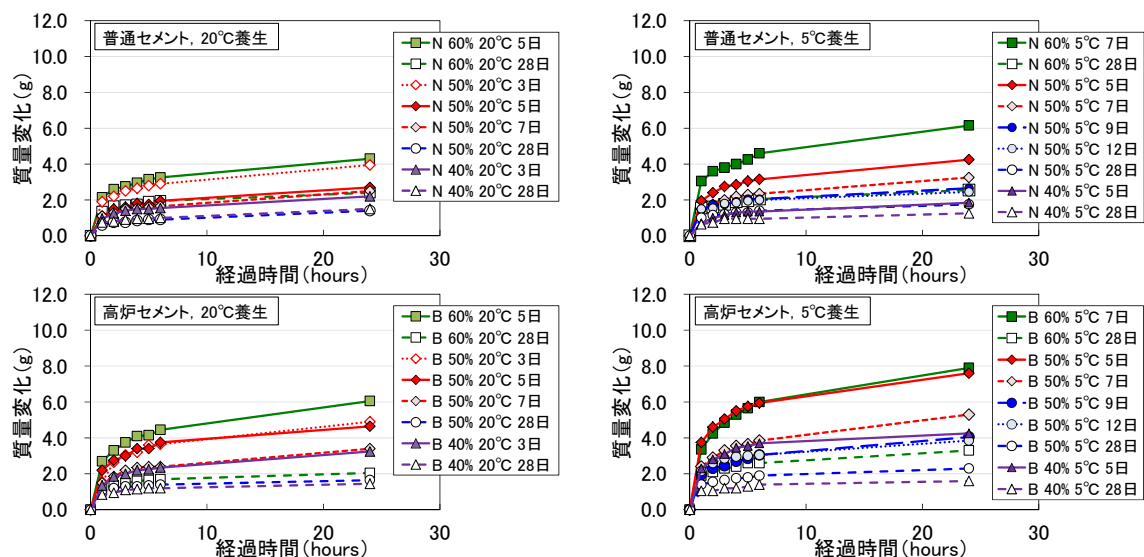
図-2 表面吸水試験の実施状況

3. 表面吸水試験結果および考察

3.1 湿潤養生直後の試験体の吸水による質量変化

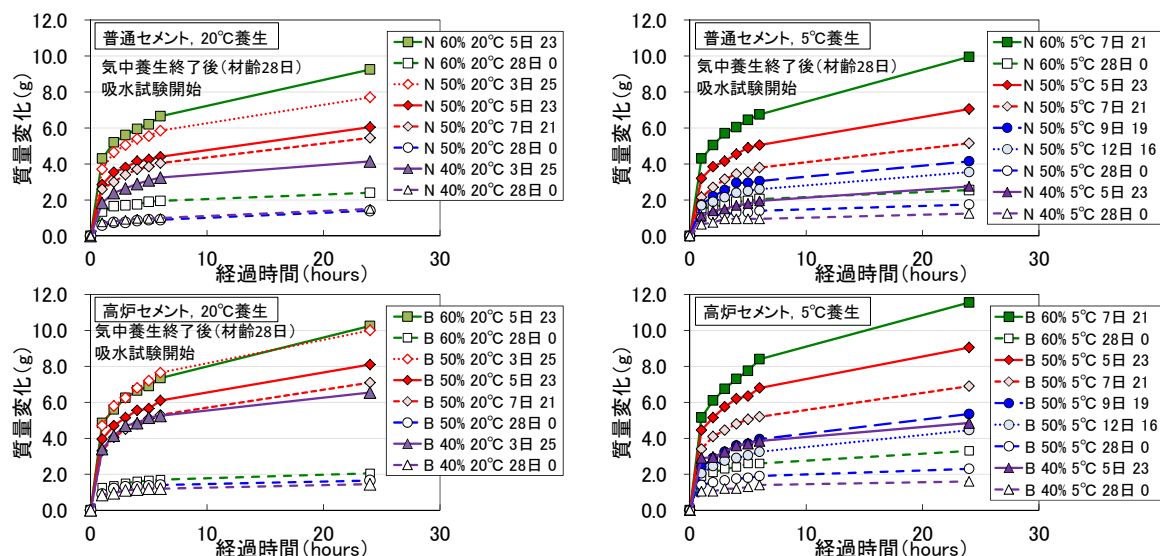
図-3に湿潤養生直後の試験体を24時間自然乾燥させた後、吸水を開始した試験体の質量変化を示す。なお、凡例の記号と数値表記は左から順に、セメント種類(N, B), 水セメント比(40, 50, 60%), 養生温度(20℃, 5℃), 湿潤養生期間(3~28日)である。

吸水開始後1時間の質量変化は24時間吸水後の4割以上となり、その後も吸水時間の経過とともに増大し、セ



(凡例表記：左からセメントの種類 (N,B)，水セメント比(%)，養生温度 (20, 5°C)，湿润養生期間 (日))

図-3 試験体の質量変化 (湿润養生直後 24 時間自然乾燥させ吸水開始)



(凡例表記：左からセメントの種類 (N,B)，水セメント比(%)，養生温度 (20, 5°C)，湿润養生期間 (日)，気中養生期間 (日))

図-4 試験体の質量変化 (所定期間湿润養生後材齢 28 日まで気中養生を行い、その後吸水開始)

メントの種類や養生温度によらず、水セメント比が小さく湿润養生期間が長いほど質量変化は小さいことが確認できる。また、配合が同じであれば、5°C養生の方が20°C養生よりも質量変化が大きくなり、養生条件が同じであれば高炉セメントは普通セメントより質量変化が大きくなったが、湿润養生期間が長くなるとそれらの差が小さくなることが確認できる。

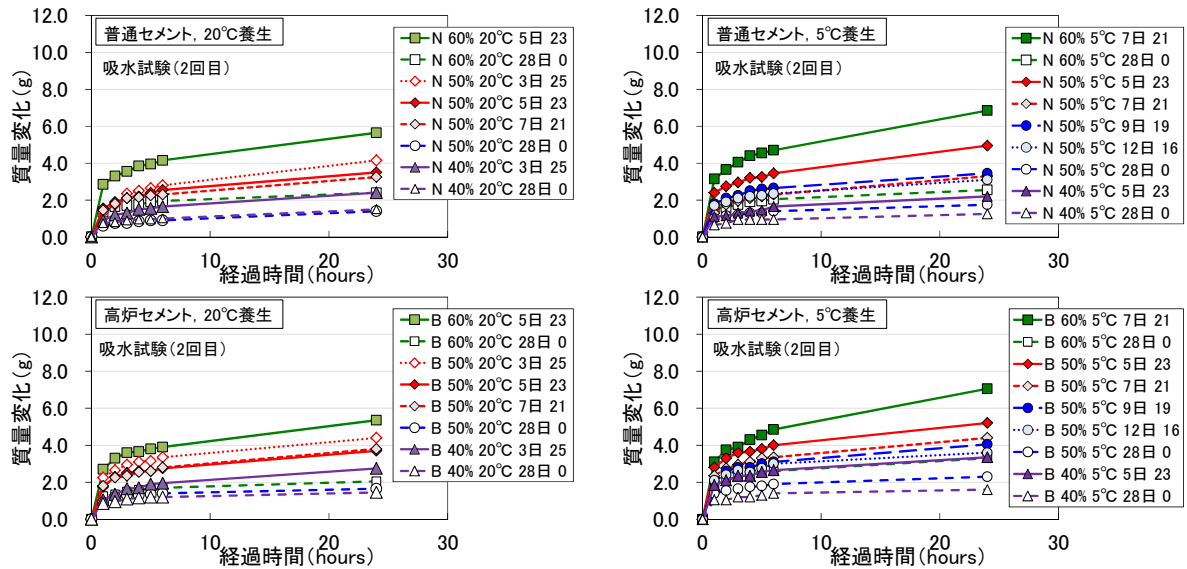
3.2 気中養生後の試験体の吸水による質量変化

図-4 に所定期間湿润養生後に材齢 28 日まで気中養生を行い、その後吸水試験を開始した試験体の質量変化を示す。凡例は図-3 の表記に加え、末尾に湿润養生後の気中養生期間 (日数) を示している。なお、比較のため材齢 28 日まで湿润養生し気中養生を行っていないケース

(凡例の末尾の数値がゼロのケース) も併記しているが、この値は湿润養生直後 24 時間自然乾燥させた後、吸水させた試験結果である。

試験体の大きさや開放面積は異なるものの、既報⁷⁾で確認されているように、気中養生後の試験体表層の含水率は大きく低下するため、図-3 よりも吸水による質量変化は大きい。セメントの種類、水セメント比および養生条件と質量変化の関係は、湿润養生直後に含水調整した試験体で得られた結果と同様の傾向を示した。

図-5 に、含水調整を考慮して 1 回目の吸水試験後に 24 時間自然乾燥させ、再度吸水試験 (2 回目) を行った結果を示す。1 回目の吸水試験 (図-4) に比べて質量変化は小さくなったが、各種要因 (条件) と質量変化の傾向



(凡例表記：左からセメントの種類 (N,B)，水セメント比(%)，養生温度 (20, 5℃)，湿潤養生期間 (日)，気中養生期間 (日))

図-5 試験体の質量変化 (1 回目の吸水試験後 24 時間自然乾燥させ再度吸水開始)

は同様であった。また、湿潤養生直後に含水調整して実施した試験結果とも同程度のオーダーとなっており、試験体の乾燥の影響をある程度相殺していると考えられ、本研究で実施した簡易な含水調整でも、含水率が異なるコンクリート表層の品質評価が可能と思われる。

4. 品質評価への適用性評価

4.1 配合、養生条件と吸水量

前節の吸水試験結果と各種要因の比較を容易にするため、吸水面積を考慮した吸水量を算定し評価した。吸水量は既往の研究⁴⁾を参考に、式-1により算出した。

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

ここで、 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(mm²)， d ：水の密度(g/mm³)

なお、本研究においては、いずれの吸水時間においても各条件と吸水量の関係に同様の傾向が確認できるが、各条件の差が明確な 6 時間後の吸水量を抽出して評価を行った。

図-6 に 2 回目の吸水試験結果から算出した材齢 28 日における各試験体の 6 時間後の吸水量を示す。横軸の日数は湿潤養生期間を示している。ただし、湿潤養生 28 日は、湿潤養生直後から 24 時間自然乾燥後に吸水試験を行ったものである。

図から、養生条件や配合の違いにより吸水量が異なる傾向が明確に示され、水セメント比の低減や湿潤養生日数の増加により吸水量が減少する傾向が確認できる。

図-7 に湿潤養生直後に吸水試験を実施した場合と、湿

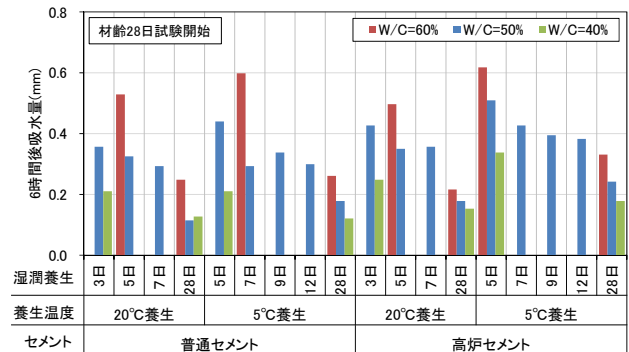


図-6 2 回目の吸水試験結果から算出した各試験体の 6 時間後の吸水量

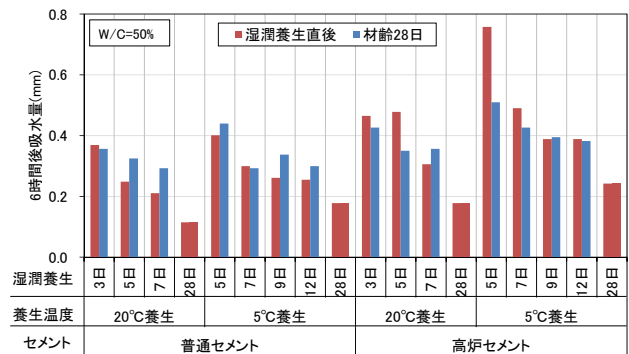


図-7 湿潤養生直後と材齢 28 日で実施した場合の吸水量

潤養生後に材齢 28 日まで気中養生した後に吸水試験を実施した場合の吸水量を示す。凡例の「湿潤養生直後」とは、湿潤養生直後から 24 時間自然乾燥後に測定を行った吸水量、「材齢 28 日」は、気中養生後 24 時間吸水試験を行い、終了後直ちに 24 時間自然乾燥させ、再度吸水試験を行った 2 回目の吸水量である。

普通セメントでは、湿潤養生直後よりも材齢 28 日の吸水量が少し多くなる傾向がみられ、気中養生期間の乾燥による微細ひび割れ等、もしくは簡易な含水調整では乾燥の影響を排除しきれていないことが考えられる。

一方、高炉セメントでは、全体として両者の差は小さく、湿潤養生日数が短いケースでは湿潤養生直後の方が逆に吸水量が多かった。高炉セメントは材齢初期の水和速度が遅く、湿潤養生後の気中養生中にも水和が増進し、特に湿潤養生期間が短いものほどその影響を受けたことが考えられるが、普通セメントと同様に乾燥の影響も受けており、気中養生中の水和だけでは十分に説明できない。このため、精度の高い評価を行うには含水の調整方法の影響についても検討が必要である。

図-8 にコンクリートの表層部と内部から採取した試験体の吸水量を示す。図は水セメント比 50%の材齢 28 日に試験を開始した結果を抽出したものである。なお、内部の試料とは、図-1 に示したコア試料を 3 分割したものの中央の試料であり、試験体切り出し後、表層試料と同様に 1 面以外をエポキシ樹脂でコーティングし、吸水試験の試験面となる開放面は材齢 28 日までビニールで密閉し封緘することによりコンクリートの内部の状況を再現した。

表層部と内部の吸水量の違いは明確であり、表層部は吸水量が多く、乾燥による養生不足や微細ひび割れ等による品質低下を示していると考えられるが、簡易な含水調整の影響について今後検討することで、より精緻な検討が可能になると思われる。

図-9 にコンクリート標準示方書施工編⁶⁾に示されている湿潤養生期間の標準とコンクリート表層部の 6 時間後吸水量を示す。図中丸で囲んだ部分のように、各セメントおよび養生温度に対応した湿潤養生期間の標準よりも短い場合は吸水量が大きくなり、それ以降は変化が小さくなる傾向が確認できる。

4.2 塩化物イオンの拡散係数と吸水量

コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、水を介して行われることから、塩化物イオンの浸透は吸水量と相関があると考えられる。そこで、一部の配合および養生条件について、JSCE-G571 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）に準拠して実効拡散係数を求め、吸水量との関係を調べた。なお、実効拡散係数は土木学会コンクリート標準示方書に基づき見かけの拡散係数に変換して評価した。

図-10 に塩化物イオンの拡散係数と吸水量の関係を示す。普通セメントでは養生温度の違いによらず、吸水量の増加とともに塩化物イオンの拡散係数が大きくなる傾向が確認できる。一方、高炉セメントでは普通セメントよりも拡散係数が小さく、全体としては右肩上がりの傾

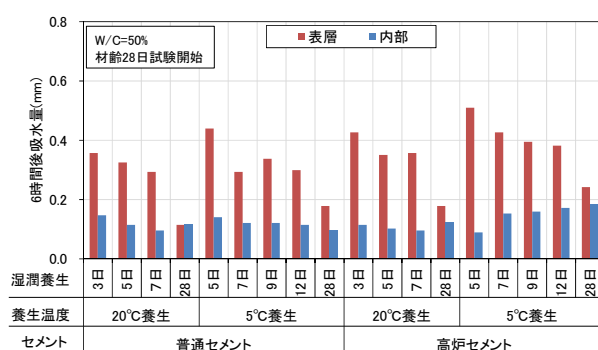


図-8 表層部と内部から採取した試料の吸水量

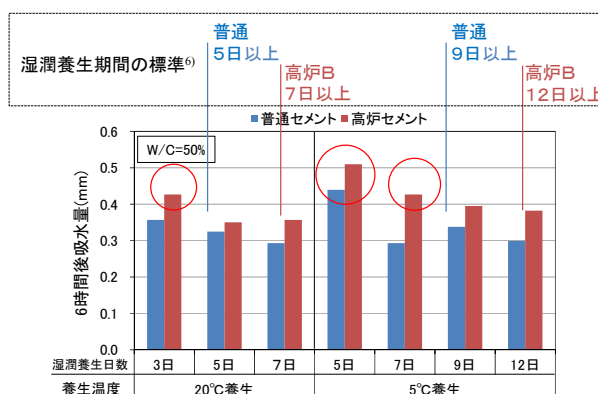


図-9 湿潤養生期間の標準日数と 6 時間後吸水量

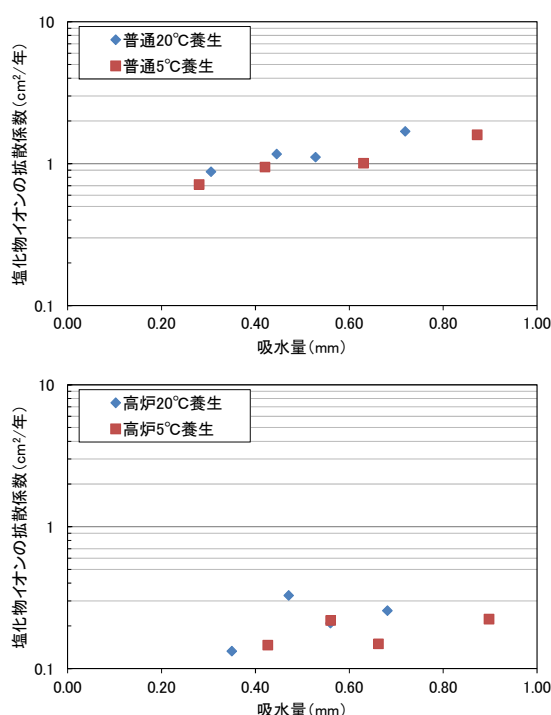


図-10 塩化物イオンの拡散係数と吸水量の関係

向はあるものの、あまり明確とはならなかった。これは、高炉セメントでは、細孔量だけでなく、その屈曲度や塩化物イオンの固定などの影響により拡散係数が全体に小さくなり、各要因で差が小さくなったためと推察される。

4.4 細孔容積と吸水量

コンクリートの吸水量とコンクリート表層部の細孔構造の関係を調べるために、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。なお、細孔の測定は、材齢 28 日で、吸水試験用供試体と同じ試料の試験面表層部 5mm から試料を採取して行い、不溶解残分量を補正したセメントペーストあたりの空隙率で表記した。

図-11 に各コンクリートの細孔容積を示す。耐久性との相関が高い細孔径 50nm 以上⁸⁾とそれ以下の領域に分けて表示しているが、水セメント比が小さく湿潤養生期間が長いほど比較的粗大な細孔の容積が減少する傾向が確認できる。

図-12 に比較的粗大な 50nm 以上の細孔容積と吸水量の関係を示す。いずれのセメントにおいても吸水量と細孔容積には高い相関があり、吸水量が多いほど比較的粗大な細孔容積が多いことを確認できた。

5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 表面吸水量は、水セメント比が小さく湿潤養生期間が長いほど少ない。また、配合が同じであれば、5℃養生の方が 20℃養生よりも吸水量は多く、養生条件が同じであれば高炉セメントは普通セメントより吸水量は多くなるが、湿潤養生期間が長くなるとそれらの差は小さくなる。
- (2) セメントの種類により差はあるが、表面吸水量が少ないほど塩化物イオンの拡散係数は小さく、50nm 以上の比較的粗大な細孔容積は少ないことを確認した。
- (3) 本研究で検討した比較的簡易な表面吸水試験により、養生や配合に起因するコンクリートの品質評価が概ね可能なことが示された。なお、品質評価をより詳細に行うには、含水調整の影響に関する検討が必要である。

参考文献

- 1) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表面透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol. 68，No. 4，pp. 385-398，2012.12
- 2) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013.3
- 3) 笠井和弘，寺澤正人，槇島修，川里麻莉子：表面吸水試験による養生方法がコンクリートの表層品質に及ぼす影響度評価，とびしま技報，No.62，pp.21-28，2013

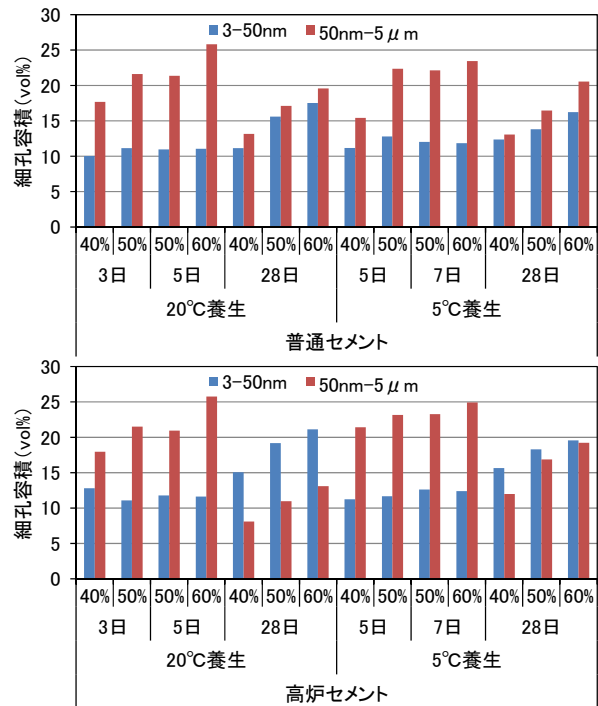


図-11 各コンクリートの細孔容積

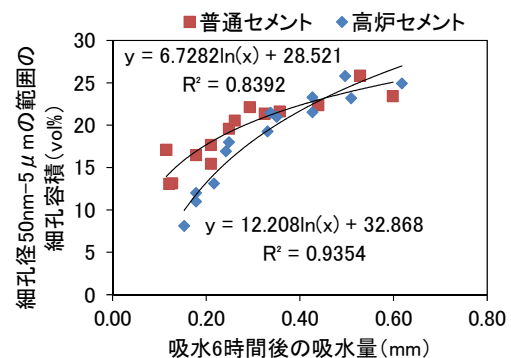


図-12 比較的粗大な細孔容積と吸水量の関係

- 4) 古賀裕久，渡辺博志，河野広隆：表面吸水試験を行う試料の含水状態調整について，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，第 14 巻，pp.411-416，2014.10
- 5) 独立行政法人土木研究所，戸田建設：ボス供試体による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），http://www.pwri.go.jp/jpn/results/offer/hihakai/kyodo_boss.pdf
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕，pp.121-125，2013.3
- 7) 吉田行，嶋田久俊，水田真紀，島多昭典：養生がコンクリートの含水率や品質に及ぼす影響と超音波による品質評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.634-639，2014.7
- 8) セメント協会：わかりやすいセメント科学，pp.78-104，1993.3