

論文 耐凍害性への養生の影響と評価手法の検討

吉田 行^{*1}・嶋田 久俊^{*2}・水田 真紀^{*3}・田口 史雄^{*4}

要旨：養生がコンクリートの耐久性に及ぼす影響については、十分に解明されていない。本研究では、寒冷期施工で特に留意が必要となる養生がコンクリートの強度や耐凍害性に及ぼす影響について検討を行った。また、耐凍害性評価の観点から、品質検査方法としての透気試験の適用性に関する基礎的な検討を行った。その結果、養生条件により強度や耐凍害性は異なり、強度と耐凍害性は必ずしも一致しないことが確認された。また、透気試験によりコンクリート表層品質に与える養生条件の影響を概ね評価できるが、竣工時検査で耐凍害性を評価するには、表層の品質だけでなくコンクリートの深さ方向の品質や含水率の影響も考慮する必要があることが示唆された。

キーワード：養生, 耐凍害性, 透気係数, 品質検査

1. はじめに

コンクリートの養生は、ひび割れなどの初期欠陥の防止だけでなく、長期的な耐久性を確保する上で極めて重要である。特に寒冷期の施工においては、養生期間の確保だけでなく、給熱養生時の温度や養生中にコンクリートが乾燥しないような工夫が必要である。

標準的な養生方法については、セメントの種類や養生温度に応じた養生期間の目安や養生終了後の留意点等が土木学会コンクリート標準示方書施工編に記載されている¹⁾。養生期間は、一般に、経済性や効率性の観点から、所要の強度が得られるまでの期間を目安に決定されることが多く、特に、寒冷期の施工では、初期凍害防止の観点から、所定の圧縮強度が得られるまでコンクリートを5℃以上に保ち、さらにコンクリートが急冷しないように2日間0℃以上に保つことが標準的な養生条件となっている。しかしながら、水で濡れているコンクリートが継続して厳しい気象作用を受ける場合には、さらに大きな強度が得られるまで養生を続ける必要があることもコンクリート標準示方書には示されており、養生により確保されるコンクリートの耐久性レベルについては必ずしも明確になっていない。また、既往の研究においても、養生が強度に及ぼす影響よりも耐久性に関わる物質移動抵抗性に及ぼす影響の方が大きく、強度を物質移動抵抗性の指標とすることが必ずしも適切でないことが指摘されている²⁾。

一方、コンクリート構造物の竣工時には、完成した構造物が所用の性能を満足していることを検査する必要があるものの、現状におけるコンクリート構造物の検査は、各施工段階における材料やコンクリートの検査と、受け取り時には、出来形計測や品質確認のための表面目視検

査、強度試験等が行われている状況であり、出来上がりコンクリートそのものの耐久性等の各種性能を直接的に検査する方法は確立されていない。

これらのことから、本研究では、特に寒冷期の施工を考慮し、養生がコンクリートの強度と耐凍害性に及ぼす影響について検討を行うとともに、竣工時における出来上がりコンクリートの品質を直接的に評価する方法として、近年、その適用性に関する研究が多く実施されている透気試験^{3), 4)}に着目し、耐凍害性評価の観点から、その適用性に関する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

低温環境下での養生がコンクリートの物性および耐久性に及ぼす影響に関する基礎的なデータの取得を目的として、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 3,350cm²/g、以下、普通セメント(N)と記述）と高炉セメント B 種（密度 3.06g/cm³、比表面積 4,020cm²/g、以下、高炉セメント(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（密度 2.70g/cm³、吸水率 1.25%、粗粒率 2.75）を、粗骨材は、小樽市見晴産砕石（密度 2.66g/cm³、吸水率 2.2%、粗骨材最大寸法 25mm）を用いた。また、空気量を調整するために、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

表-1 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE剤 (C×%)	空気量 (%)	スランプ (cm)
				W	C	S	G			
N	N	50	44	145	290	853	1073	0.0050	4.3	10.0
B	B					851	1065	0.0088	5.0	9.0

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

*2 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム主任研究員 工修（正会員）

*3 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム研究員 博士（工学）（正会員）

*4 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム上席研究員 博士（工学）（正会員）

す。水セメント比は 50%の 1 水準とし、目標スランブ 8 ±2.5cm、目標空気量を 4.5±1.0%として、配合試験を実施して決定した。なお、表－1 には実測値を示している。

2.2 供試体の養生条件

表－2 に養生条件と試験開始材齢の一覧を示す。養生条件として、養生温度は低温養生を想定した 5℃と一般的な 20℃の 2 水準、養生方法は水中、気中、封緘、湿布の 4 水準とした。気中養生について、20℃養生では、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%に制御された実験室内に静置し、5℃養生では、温度のみが制御された実験室内に静置することにより行った。なお、5℃に制御された室内の平均的な温度は 6.4±2℃、相対湿度 55±5%程度であった。また、養生期間の標準は材齢 28 日としたが、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を考慮して¹⁾、セメントの種類と養生温度の組合せに応じて湿潤養生期間を 3, 5, 7, 9, 12 日としたケースや、湿潤養生後、各温度条件で材齢 28 日まで気中養生したケースについても検討した。供試体の脱型は、20℃養生ではセメントの種類によらず材齢 1 日で行ったが、5℃養生では凝結の遅延および脱型時の供試体の破損を考慮し、普通セメントで材齢 2 日、高炉セメントで材齢 4 日とした。したがって、表－2 に示した各湿布養生期間には、厳密には型枠内で静置されていた期間を含んでいる。

3. 実験項目と試験方法

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ10×20cm 円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠して実施した。

3.2 凍結融解試験

凍結融解抵抗性は、水中凍結融解試験と、一面凍結融解試験によるスケーリング試験により評価した。

水中凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法に準拠して各養生終了後より試験を開始し、相対動弾性係数と質量変化率により評価を行った。

スケーリング試験は ASTM C672 に準拠し試験を実施した。各条件による養生後、220×220×100mm の角柱供試体に-18℃を 16 時間、23℃を 8 時間の 1 日 1 サイクルで凍結融解作用を与えた。試験面は打設面 (220×220mm) とし、試験面以外をエポキシ樹脂コーティングした後、試験面には土手を設けて試験溶液を湛水し凍結融解作用を与えた。試験溶液には、塩害との複合劣化を想定して、3%NaCl 水溶液を使用した。なお、供試体作製時の打設面の処理については、型枠に打ち込み後各養生場所へ移動し (打ち込み開始から 30 分程度経過)、金ごてによる最終的な表面仕上げを行ったのみであり、ブリーディング等の除去は行っていない。また、水中養生供試体のコーティングについては、養生終了直後の湿潤面に施せな

表－2 養生条件と試験開始材齢

セメント	養生温度	養生条件	試験項目と試験材齢 (日)			
			圧縮強度	水中凍結融解	スケーリング試験 (ASTM)	透気係数測定
N	20℃	水中	3.5,28	28	28	28
		湿布3日+気中25日	28	28	28	28
		湿布5日+気中23日	28	28	28	28
		気中28日	3.5,28			
		封緘28日	3.5,28			
	5℃	水中28日	5.7,9,12,28	5.7,9,28	5.7,9,28	28
		湿布5日+気中23日	28	28	28	28
		湿布7日+気中21日	28	28	28	28
		湿布9日+気中19日	28	28	28	28
		気中28日	5.7,9,28			
		封緘28日	5.7,9,28			
B	20℃	水中28日	5.7,28	28	28	28
		湿布5日+気中23日	28	28	28	28
		湿布7日+気中21日	28	28	28	28
		湿布9日+気中19日	28			
		湿布12日+気中16日	28			
		気中28日	5.7,28			
		封緘28日	5.7,28			
	5℃	水中28日	5.7,9,12,28	5.7,9,12,28	5.7,9,12,28	28
		湿布5日+気中23日	28	28	28	28
		湿布7日+気中21日	28	28	28	28
		湿布9日+気中19日	28	28	28	28
		湿布12日+気中16日	28	28	28	28
		気中28日	5.7,9,12,28			
		封緘28日	5.7,9,12,28			

※表中の日数は、各種試験を開始した材齢

いため、試験開始材齢の朝に水中から取り出して温度 20℃、相対湿度 60%に設定した室内で 2～3 時間程度静置した。その後、スチレンフォームで成形した土手 (幅、高さともに 2.5cm) を試験面の 4 辺にシリコンで接着し、翌日まで室内に静置した (18 時間程度)。翌日、試験面以外をエポキシ樹脂でコーティングし、2～3 時間程度エポキシ樹脂の硬化を確認した後、試験を開始した。なお、土手接着およびコーティング作業時には、作業面以外を湿布養生して供試体内の水分をできるだけ保持するように対応した。

3.3 透気係数測定^{5),6)}

コンクリート表層の透気性については、二重チャンバー方式の表層透気試験機を用いて透気係数を測定した。なお、供試体には、スケーリング試験用供試体と同じ 220×220×100mm の角柱供試体を使用した。試験は、表－2 に示した 15 ケースについて、養生終了直後の材齢 28 日に実施し、供試体の打設面と型枠底面の両方で測定した。また、供試体の含水の影響を除去する観点から、測定を終了した各供試体を 40℃で乾燥させ、質量変化が概ね一定となった 3 週間後に再度透気係数を測定した。なお、測定は各養生条件に対し 1 供試体のみで行った。

4. 試験結果および考察

4.1 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

図－1 に水中、封緘および気中養生を行った供試体の圧縮強度と材齢の関係を示す。

材齢 28 日までの範囲内においては、何れの養生温度

および材齢においても、普通セメントの方が高炉セメントより圧縮強度は大きかった。また、養生の影響としては、水中養生が最も強度は増加し、以下、封緘養生、気中養生の順となり、水中と封緘養生は強度の増加割合が同程度でその差は小さかったが、気中養生の場合、強度の増加割合が小さくなる傾向が確認された。

図-2 に圧縮強度と積算温度の関係を示す。なお、積算温度は式(1)より算出した⁷⁾。

$$M = \sum (\theta + A) \cdot \Delta t \quad (1)$$

ここに、 M ：積算温度（℃・日）、 θ ：時間 Δt におけるコンクリート温度、 A ：定数（一般に 10℃）

図のように、セメントの種類により強度増加の傾きは異なるが、強度差が小さく増加割合が同程度だった水中養生および封緘養生は同一直線上となり、気中養生の場合には、強度の増加が小さい傾向であることがわかる。

以上から、圧縮強度発現はセメントの種類、養生方法、養生温度により異なるが、養生温度の影響については、セメントの種類および養生方法を考慮することにより、積算温度による予測が可能となった。

図-3 に湿潤養生日数と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示す。湿潤養生日数とは、型枠存置期間も含めた湿布養生日数を示しており、湿潤養生以降は、材齢 28 日まで各養生環境で気中養生を行ったものである。なお、湿潤養生日数 28 日は、各温度で水中養生を 28 日実施した場合の圧縮強度である。

全体として、湿潤養生期間が長いほど強度が大きくなることが示され、強度発現における湿潤養生期間の重要性が確認された。なお、低温下での強度発現が小さい高炉セメントでは、5℃養生における水中養生材齢 28 日の強度が若干小さいが、他の養生ケースでは湿潤養生後に気中養生を行っており、気中養生期間における強度発現とコンクリートの乾燥に伴う見かけ上の強度増分の総和が低温下での強度発現を上回ったためと考えられる。

4.2 凍結融解抵抗性（水中凍結融解試験）

図-4 に各養生ケースにおけるコンクリートの水中凍結融解試験結果を示す。左図は水中養生終了直後から凍結融解試験を開始したケース、右図は所定材齢まで湿布養生後、材齢 28 日まで気中養生を行ってから試験を開始したケースである。水中養生終了直後から凍結融解試験を開始した場合（左図）、水中養生期間が長く養生温度が高いほど質量減少率は低下し、普通セメント N は水中養生 7 日以下では耐久性指数が著しく低下した。これに対して、高炉セメント B は、質量減少率は普通セメント N より若干多いものの耐久性指数はいずれも高かった。図-1 に示したように、高炉セメントは特に低温環境下での材齢初期の強度発現が小さいため、材齢初期の凍結融解抵抗性は低いと考えられたが、耐久性指数について

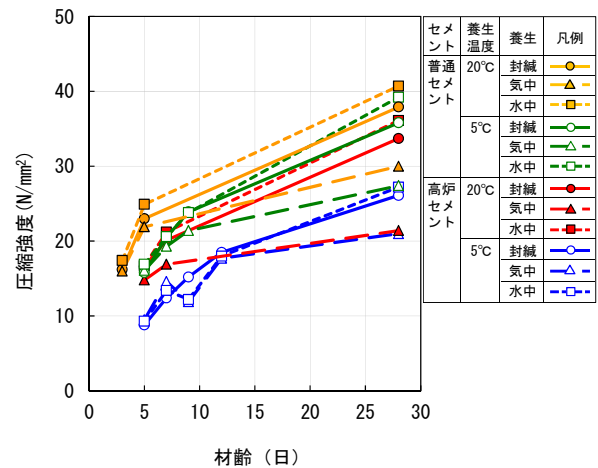


図-1 圧縮強度と材齢の関係（水中、封緘、気中）

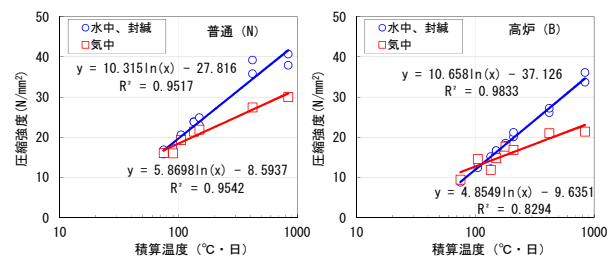


図-2 圧縮強度と積算温度の関係

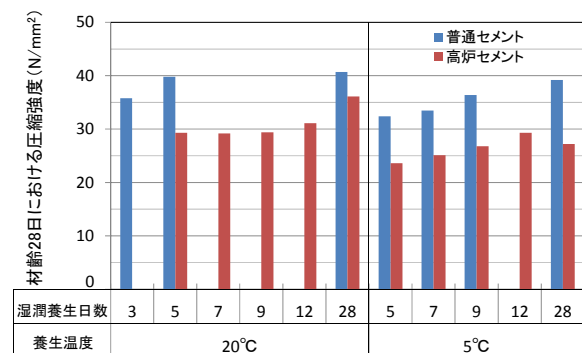


図-3 湿潤養生日数と圧縮強度

は逆の傾向を示した。これは、凍結融解試験期間中に水和が進行し、強度が増加したことが影響した可能性があるが、詳細なメカニズムについては別途検討が必要である。一方、湿布養生後に気中養生したものは、湿布養生期間が短い場合でも耐久性指数の低下はみられず、質量減少は低下した。このように、凍結融解抵抗性はセメントの種類や養生条件により異なり、特に質量変化への影響が大きく、これらは強度発現だけではなく、コンクリートの含水の程度も影響していると考えられる。

4.3 スケーリング抵抗性

図-5 にスケーリング抵抗性に及ぼす湿潤養生期間の影響を示す。左図は普通セメント、右図は高炉セメントの結果を、上段は所定期間湿布養生後材齢 28 日まで気中養生を行い試験を開始したケース、下段は所定期間の水

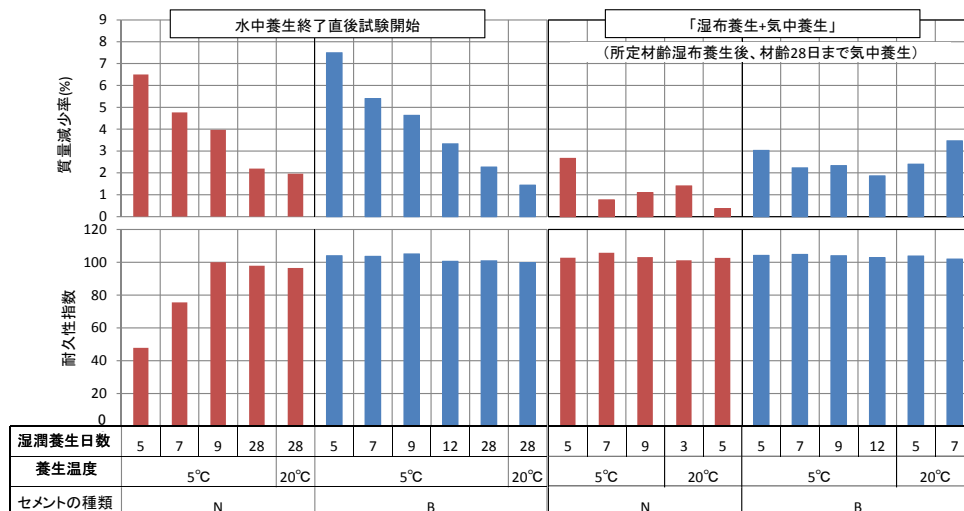


図-4 各養生ケースにおけるコンクリートの水中凍結融解試験結果

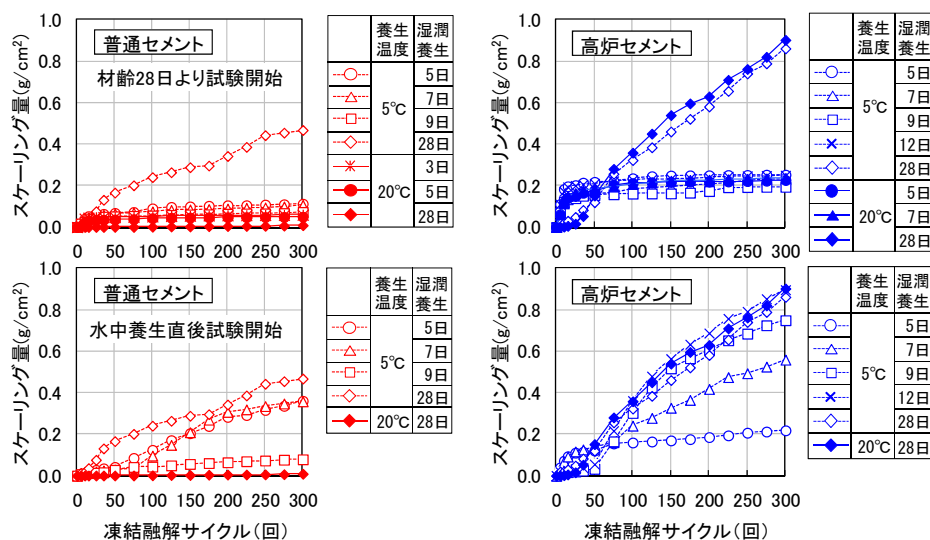


図-5 スケーリング抵抗性に及ぼす湿潤養生期間の影響 (ASTM 法, 材齢 28 日試験開始)

中養生直後から試験を開始したケースである。

普通セメントの場合、5°C養生で気中養生を行わずに材齢 28 日まで水中養生後試験を開始した供試体のスケーリング量が最も多くなったが、このケースを除くと、養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほどスケーリングは抑制される傾向が確認された。

一方、高炉セメントの場合、所定期間湿布養生後に材齢 28 日まで気中養生を行い試験を開始したケースでは (右図上段)、いずれも凍結融解初期にスケーリングが増加したものの、10 サイクル以降は増加割合が急激に低下し、ほぼ横ばいとなった。これに対して、水中養生直後に試験を開始したケースでは (右図下段)、水中養生期間が長いほど凍結融解初期のスケーリング量は小さかったものの、25 サイクル以降急激にスケーリング量が増大し、水中養生期間が長いほどスケーリングは多くなった。既往の研究によると^{8), 9)}、品質が比較的低いコンクリート

表層に水分が滞水して凍結した際には未凍結水がコンクリートの内部方向に移動し、コンクリートの内部の組織構造が緻密なほど未凍結水は内部方向へ移動しにくくなり、結果的に表層部に蓄積された圧力により表層コンクリートがはく離する機構が報告されている。これによれば、湿潤養生期間が長いほどコンクリートの組織構造は緻密になるため未凍結水は内部方向へ移動しにくくなり、その結果スケーリング量が増大したことが考えられる。

以上から、スケーリング量は、普通セメントでは、養生温度が高く湿潤養生期間が長いほど抑制される傾向が一部を除き確認されたが、高炉セメントでは、気中養生後に試験を行った場合、養生条件の違いによる差は見られず全体に少ないが、湿潤養生直後に試験を行った場合には、養生期間が長いほど増加する傾向が確認された。

4.4 透気係数に及ぼす養生条件の影響

図-6 に各養生ケースにおけるコンクリート表層の透

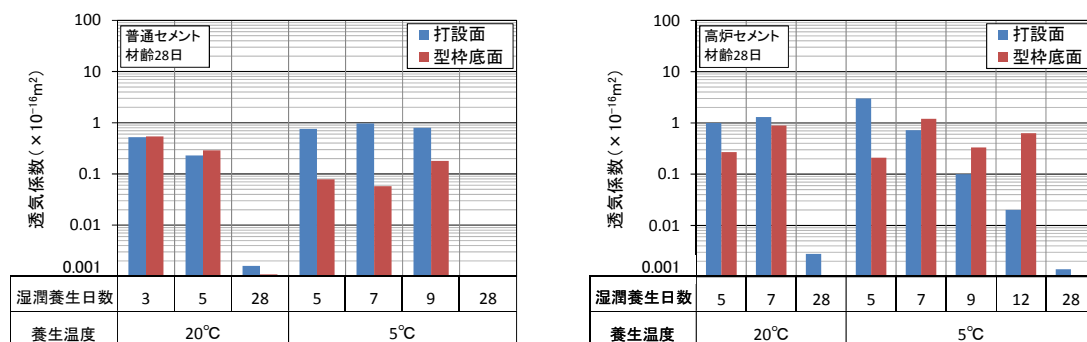


図-6 各試験ケースにおけるコンクリート表層の透気係数

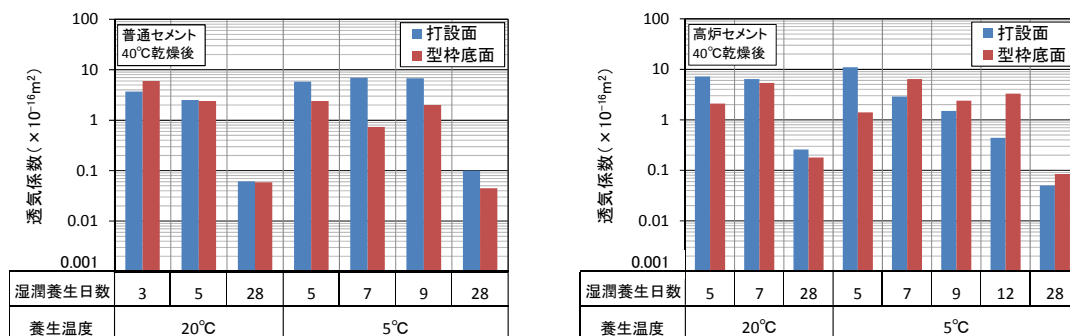


図-7 40°C乾燥後のコンクリート表層の透気係数

気係数を示す。セメントの種類および養生ケースにより透気係数は異なり、普通セメントを用いた場合、20°C養生のケースでは、打設面と型枠底面の値が同程度で差は無く、湿潤養生期間が長いほど透気係数は低下した。5°C養生のケースでは、打設面の方が型枠底面よりも透気係数は大きかったが、湿潤養生期間の違いに明確な差はみられなかった。

一方、高炉セメントを用いた場合、20°C養生のケースでは、湿潤養生28日で極めて透気係数は小さくなったが、湿潤養生5日と7日では逆の傾向を示し、養生の影響が明確とならなかった。これに対して、5°C養生のケースでは、打設面の透気係数は湿潤養生期間が長いほど透気係数は低下する傾向が認められた。しかし、型枠底面では明確な傾向がみられず、一部の供試体では型枠底面の方が打設面よりも透気係数は大きくなった。本研究における透気係数の測定は、各条件とも1供試体のみでしか測定を行っていないため、これらの逆転現象は測定上のばらつきの影響を受けている可能性も考えられ、今後測定精度に関する検討が必要である。

図-7に含水の影響を除去する観点から40°Cで乾燥させた後に測定した透気係数を示す。40°C乾燥により透気係数自体は大きくなり、透気係数が含水の影響を受けることが確認された。しかし、全体の傾向は変わらず、セメントの種類や養生条件により、透気係数は異なった。

Torrentの提案では、コンクリートの透気性は対数表記の透気係数の値により、優(0.001~0.01)、良(0.01~0.1)、

一般(0.1~1)、劣(1~10)、極劣(10~100)(いずれも単位は、 $\times 10^{-16} \text{m}^2$)の5段階に区分されている⁵⁾。これによると、28日間湿潤養生を実施したものは、良から一般の評価であるが、湿潤養生期間が短いものは一般から劣評価であり、透気試験によりおよそその品質を評価できる可能性が示された。また、透気係数に与える養生の影響については、特に養生の影響を受けやすい高炉セメントの打設面において、湿潤養生期間が長いほど透気係数が低下する比較的明確な傾向が確認された。

4.5 透気係数と耐凍害性の関係

図-8に水中凍結融解試験における300サイクル終了時の質量減少率と透気係数の関係を示す。なお、透気係数は40°C乾燥後の打設面の透気係数により評価している。普通セメントではほとんど相関が見られないが、高炉セメントでは、ばらつきはあるものの透気係数が大きいほど質量減少率が増加する傾向が概ねみられた。質量減少率は、水中養生直後から試験を開始した場合に養生の影響が大きい結果であったが(図-4参照)、本研究では水中養生材齢28日を除くケースでは水中養生直後の供試体の透気係数を測定していない。このため、両者の相関があまり明確にならなかったことが考えられる。

図-9に一面凍結融解試験における300サイクル終了時のスケーリング量と透気係数の関係を示す。スケーリング量は水中凍結融解試験と同様に、水中養生直後から試験を開始した供試体でスケーリング量が急激に増大する傾向確認されており(図-5参照)、特に、材齢28日

まで水中養生した後直ちに試験を開始したケースは、図中に矢印で示したように、普通セメントの20℃養生の場合を除き全体の傾向から大きく外れている。しかし、これらを除いた場合においても、明確な傾向は確認できなかった。これは、比較しているスケーリング量の差が小さいことに加え、スケーリングの発生機構が関係していることが考えられる。4.3節でも述べたように、既往の研究で^{8), 9)}、凍害によるスケーリングの発生は、コンクリート表層の品質や内部の透水係数とともに、コンクリート中の水分量の影響を大きく受けることが報告されている。一方、本研究で検討した透気係数は、コンクリート表層部の物質移動抵抗性に関する特性値であるため、耐凍害性を評価するには、コンクリート表層からの深さ方向の品質との関係の整理や、含水の影響に関する検討が必要と考えられる。また、寒冷期に施工され、厳寒の環境下で直ちに供用される構造物に対しては、初期凍害あるいは供用早期の耐凍害性を評価する観点から、透気試験による表層部の物質移動抵抗性だけでなく、構造物解放時の含水率に関する検査が必要と考えられ、今後、養生とコンクリートの含水率の関係についても検討する必要がある。

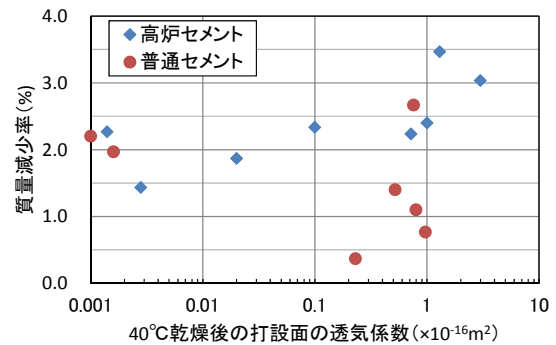
5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下になる。

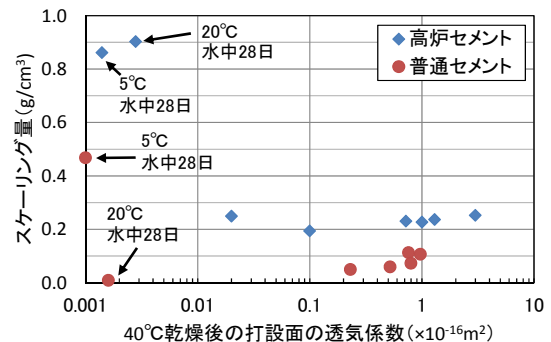
- (1) 圧縮強度発現は、特に湿潤養生期間に大きく依存し、養生の重要性が確認された。また、養生温度の影響は、積算温度により予測可能であり、乾燥を受けた場合にも適用できるが、湿潤養生の場合と強度発現の傾向が異なることが確認された。
- (2) セメントの種類や養生条件の違いにより耐凍害性は異なり、強度の増加と耐凍害性の向上は必ずしも一致せず、コンクリートの含水の程度が影響していることが示唆された。
- (3) 透気試験により、コンクリートの表層品質に与える養生条件の影響を概ね評価できるが、竣工時検査で耐凍害性を評価するには、表層の透気係数だけでなくコンクリートの深さ方向の品質や含水率の影響も考慮する必要があることが示唆された。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕，pp.126-129とpp.159-166，2008.3
- 2) 岡崎慎一郎，八木翼，岸利治，矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.227-234，2006.
- 3) 白根勇二，舟橋政司，松尾健二：施工条件や養生条



図一8 質量減少率と透気係数の関係



図一9 スケーリング量と透気係数の関係

件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1313-1318，2010.

- 4) 蔵重勲，廣永道彦：コンクリートの中酸化抵抗性と表層透気係数の関連分析に基づいた品質検査判定基準の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.718-723，2012.
- 5) Torrent,R. and Frenzer,G.: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992, Sept.1995
- 6) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44，No.2，pp.31-38，2006.2
- 7) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.166-167，1996.4
- 8) 遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊：スケーリング劣化の予測に関する基礎的研究，コンクリート工学次論文集，Vol.27，No.1，pp.733-738，2005.7
- 9) 遠藤裕丈，田口史雄，名和豊春：スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響，土木学会論文集 E，Vol.66，No.3，pp.348-365，2010.9