

養生条件がコンクリートの耐久性に及ぼす影響

(独) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○吉田 行
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 水田 真紀
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム 嶋田 久俊

コンクリートの品質を確保するには適切な養生が重要であり、一般に養生期間は経済性や効率性の観点から強度発現を目安に決定されている。しかし、養生により確保される耐久性のレベルについては必ずしも明確になっていない。このため、本研究では養生条件が各種耐久性に及ぼす影響について検討した。その結果、初期の湿潤養生期間が長いほど耐久性は向上するものの、セメントの種類等により傾向が異なることがわかった。

キーワード：長寿命化、耐久性、養生

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や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て養生期間の目安や養生終了後の留意点が土木学会のコンクリート標準示方書等に記載されており、養生期間の目安は、経済性や効率性の観点から、所要の強度が得られる期間を標準としている。しかし、強度増加と品質向上は相関があると考えられるものの、養生条件がコンクリートの耐久性に及ぼす影響については必ずしも明確になっていない。

このため、本研究では、性能規定に対応した施工マニュアルの提案に向けた寒冷地での適切な養生方法の検討として、養生温度および養生期間等の養生条件がコンクリートの強度や耐久性に及ぼす影響に関する基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

寒冷地における施工において特に留意が必要となる低温環境下での養生がコンクリートの品質に及ぼす影響を把握するために、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/cm^3 、比表面積 $3,340\text{cm}^2/\text{g}$ 、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 3.05g/cm^3 、比表面積 $3,750\text{cm}^2/\text{g}$ 、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（密度 2.67g/cm^3 、吸水率 0.87% 、粗粒率 2.85 ）を、粗骨材は、小樽市見晴産砕石（密度 2.68g/cm^3 、吸水率 1.45% 、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% を基本としたが、水セメント比を小さくした場合の養生の影響を検討するために、 45% を加えた2水準とした。目標スランプと空気量はそれぞれ $8\text{cm}\pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5\pm 1.0\%$ とした。

(2) 供試体の養生条件

各試験では、後述する各試験方法に準拠した標準的な供試体に加え、実構造物を想定した壁状供試体を作製し検討を行った。壁状供試体は、上部を解放した内寸幅 $60\text{cm}\times$ 高さ $60\text{cm}\times$ 奥行 20cm の木製型枠にコンクリートを3層に分けて打込み、各層とも棒状バイブレータによる締固めと、型枠面の気泡痕を抑制するためにスパーキング処理を行った。また、脱型後は両側面をアルミテープでシールした。

表-2に養生条件と試験実施または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°C と一般的な 20°C の2水準、養生方法は標準的な水中養生と、実施工を想定して所定期間湿布養生を行った後に材齢28日まで気中養生を行う方法の2水準とした。なお、

表-1 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	AE減水剤添加量 (C×%)	s/a (%)	コンクリート単位置量 (kg/m^3)				AE剤 (C×%)
					W	C	S	G	
N45	N	45	0.25	44	145	322	832	1072	0.0052
N50		50	0.15			290	844	1077	0.0075
B45	B	45	0.20	44	145	322	827	1057	0.0093
B50		50	0.15			290	840	1074	0.0095

表-2 養生条件と試験材齢

セメントの種類	水セメント比	養生温度	養生条件	供試体	試験項目				
					圧縮強度	促進中性化	塩分浸透	凍結融解	スケーリング
普通	50%	20°C	湿布5日+気中23日	円柱	5.28	28	28		
				壁	28	28	28		
			水中28日	円柱	28				
		5°C	湿布5日+気中23日	円柱	5.28	28	28		
				壁	5.28	28	28		
			湿布7日+気中21日	円柱	7.28	28	28		
		壁	28	28	28				
	水中28日	円柱	28						
	45%	20°C	湿布3日+気中25日	円柱	3.28				3.28
				角柱	5.28				5.28
			湿布5日+気中23日	円柱	28				28
		5°C	湿布5日+気中23日	円柱、角柱	5.28	28	28	5	5.28
壁				28	28	28			
湿布7日+気中21日			円柱	7.28			7	7.28	
	角柱	28				28			
水中28日	円柱	28							
高炉	50%	20°C	湿布7日+気中21日	円柱	7.28	28	28		
				壁	28	28	28		
			水中28日	円柱	28				
		5°C	湿布7日+気中21日	円柱	7.28	28	28		
				壁	28	28	28		
			湿布12日+気中16日	円柱	12.28	28	28		
		壁	28	28	28				
	水中28日	円柱	28						
	45%	20°C	湿布5日+気中23日	円柱	5.28				5.28
				角柱	7.28				7.28
			湿布7日+気中21日	円柱	7.28				7.28
			角柱	28				28	
5°C		湿布7日+気中21日	円柱、角柱	7.28	28	28	7	7.28	
			壁	28	28	28			
	湿布12日+気中16日	円柱	12.28			12	12.28		
	角柱	28				28			
水中28日	円柱	28							

表中の数字は試験を実施または開始した材齢

気中養生は、20°C養生では、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ に、5°C養生では、温度 $5 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ に制御された実験室内に静置することにより行った。なお、湿布養生と気中養生を組み合わせた場合の湿布養生期間については、土木学会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¹⁾を考慮して、セメントの種類と養生温度の組合せに応じて3、5、7、9、12日から選定した。供試体の脱型は、コンクリート強度 5N/mm^2 を目安に²⁾、過年度の試験実績を考慮して、標準的な供試体については、20°C養生ではセメントの種類によらず材齢1日で、5°C養生では普通セメントで材齢2日、高炉セメントで材齢3日とした。また、壁状供試体の脱型は、普通セメントでは養生温度によらず材齢2日で、高炉セメントの20°C養生では材齢3日、5°C養生では材齢4日で行った。したがって、表-2に示した各湿布養生期間には、厳密には型枠内に封緘状態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

a) 圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108に準拠して実施した。供試体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体と、壁状供試体より水平方向に採取した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ コア供試体とした。壁状供試体からのコア採取位置は、図-1に示すように壁状供試体の上部、中部、下部とし、各1個ずつ採取した。

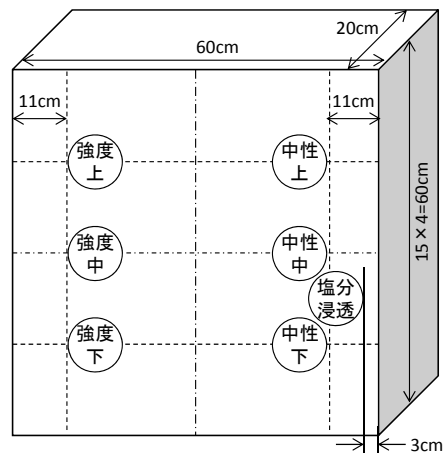


図-1 壁状供試体からのコア採取位置

b) 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法に準拠して試験を実施し、相対動弾性係数と質量減少率により評価を行った。なお、過年度実施した試験において、所定の期間湿潤養生した直後から凍結融解試験を開始した場合と、所定の期間湿潤養生後に材齢28日まで気中養生を実施してから試験を開始した場合を比較した結果、湿潤養生後に気中養生を行ったものは相対動弾性係数の低下がほとんど無く、質量減少率も大きく低下したのに対し、湿潤

養生直後に凍結融解試験を開始した場合、湿潤養生日数が短いほど質量減少率が大きくなり、耐久性指数が大きく低下するケースもみられた。このため、本研究では、凍結融解抵抗性への影響が大きかった湿潤養生直後に凍結融解試験を開始する条件で検討を行った。

スケーリング試験はASTM C672に準拠した試験を行った。供試体は22×22×10cmの角柱供試体を使用し、各養生終了後に-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(22×22cm)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、塩化物による複合劣化を想定して、3%NaCl水溶液を使用した。なお、湿潤養生直後の供試体については、湿潤面にエポキシ樹脂コーティングは施せないため、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に試験を開始した。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した。

c) 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153に準拠して行い、φ10×20cm円柱供試体と図-1に示す箇所から採取したφ10×20cmコア供試体を用いた。円柱供試体は、脱型後壁供試体の状況を模擬するために側面をアルミテープでシールしてから材齢28日まで養生を行い、コア供試体は材齢28日でコア採取後に側面をアルミテープでシールしてから促進中性化試験を開始し、促進材齢13週で供試体を割裂して中性化深さを測定した。

d) 塩化物イオンの実効拡散係数試験

塩化物イオンの実効拡散係数試験は、JSCE-G571-2003に準拠して行った。供試体は、脱型後側面をアルミテープでシールしてから材齢28日まで養生を行ったφ10×20cm円柱供試体と、材齢28日で壁供試体から採取したφ10×20cmコア供試体を用いた。試験用の試料は、円柱供試体については、壁供試体の型枠面との比較を考慮し、円柱型枠底面を含む表層部5cmと高さ方向の中央部から切り出し、コア供試体の試料は壁供試体型枠面の表層部5cmと壁供試体厚さ方向の中央部から切り出した。

3. 試験結果および考察

(1) 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

図-2に各配合・各養生条件における材齢28日の圧縮強度を示す。なお、湿潤養生28日の試験値は水中養生28日

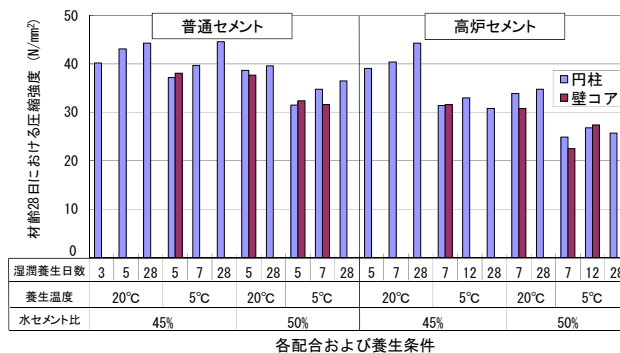


図-2 材齢28日における圧縮強度

の試験結果である。

全体として、湿潤養生期間が長いほど強度は増加する傾向がみられる。また、養生温度の影響については、普通セメントでは養生温度の違いによる強度発現の差が高炉セメントに比べて小さく、水セメント比が小さくなるとその傾向はさらに顕著になった。一方、高炉セメントは養生温度の影響が大きく、特に水セメント比が小さいほどその差は大きくなった。なお、高炉セメントの水セメント比45%と50%の5℃養生供試体については、湿潤養生28日が7日や12日に比べて圧縮強度が小さくなっている。これは、5℃養生における強度の増加の程度が小さいことに加え、湿潤養生7日と12日は、湿潤養生終了後材齢28日まで気中養生による乾燥の影響を受けており、供試体乾燥による見かけの強度の増加の程度が低温養生下における強度発現を上回ったためと考えられる。また、円柱供試体と壁状供試体から採取したコア試料の圧縮強度を比べると、概ね同程度であった。

以上から、圧縮強度発現は、養生温度や湿潤養生期間により異なり、特に、材齢初期の水和反応が遅い高炉セメントでは養生の影響が顕著となり、強度発現に対する養生の重要性が確認された。

(2) 凍結融解抵抗性(水中凍結融解試験)

図-3に各配合および養生条件におけるコンクリートの水中凍結融解試験結果を示す。W/C=50%の場合、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、普通セメントは湿潤養生7日以下では耐久性指数が低下した。これに対して、高炉セメントの質量減少率は普通セメントと同様の傾向を示し、普通セメントより若干多かったが、耐久性指数はいずれも高かった。

一方、W/C=45%の場合、W/C=50%よりも質量減少率が改善され、普通セメントでみられた耐久性指数の低下も改善の傾向がみられた。しかし、湿潤養生日数と凍結融解抵抗性の関係については、湿潤養生日数が短いほど質量減少率は増大し、普通セメントでは耐久性指数も低下することが確認された。

以上から、湿潤養生日数の増加により、凍結融解抵抗性は改善されることが明らかになり、養生の重要性が確

認された。また、2007年制定コンクリート標準示方書施工編では、湿潤養生期間の目安が日平均気温5°C以上の場合、普通セメントで9日、混合セメントB種で12日とされており¹⁾、本研究の結果からこの日数を確保すればコンクリート中の含水が高い場合でも耐久性指数の低下は小さいと考えられる。他方、コンクリート標準示方書の寒中コンクリートの章では、厳しい気象作用を受けるコンクリートの養生終了時の所要圧縮強度の標準が、連続してしばしば水で飽和され、コンクリートの断面が薄い場合には15N/mm²とされている。ここで、現場における湿潤養生と室内試験の封緘養生を同等と仮定した場合、過年度実施したW/C=50%の普通セメントの5°C封緘養生の材齢5日強度は15.8N/mm²、材齢7日で20.5N/mm²であり、**図-2**に示したようにW/C=45%ではさらに強度が大きくなることを考慮すると、普通セメントの場合、強度の面か

らは材齢5日程度で養生を終了することが可能と判断される。しかし、含水が高い状態のまま低温環境下に曝され、直ちに凍結融解作用を受けるような現場の場合には、**図-3**のように養生期間を短縮すると早期の劣化が生じる可能性もある。このような特殊な状況がある場合には、強度による管理だけでなく、耐久性を考慮した適切な養生を行う必要がある。

(4) スケーリング抵抗性

図-4にW/C=50%の場合のスケーリング量と凍結融解サイクルの関係を示す。上段の図は20°C養生、下段は5°C養生の試験結果である。なお、凡例で湿潤養生日数と試験開始材齢が異なるものは、湿潤養生後に試験開始材齢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。

普通セメントの場合、養生温度5°Cで材齢28日まで水中養生後ただちに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。また、湿潤養生後に気中養生を行ってから試験を開始したケースは、いずれもスケーリング量が少なくなっており、供試体の含水の程度が影響していると考えられる。

一方、高炉セメントの場合、湿布養生後に気中養生を行ってから試験を開始したケースでは、いずれも凍結融解初期にスケーリングが増加したが、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、湿潤養生直後に試験を開始したケースでは、湿潤養生期間が長いほど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増大し、湿潤養生期間が長いほどスケーリングが増大する傾向を示した。既往の研究によると³⁾、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するが、コンクリート内部の組織構

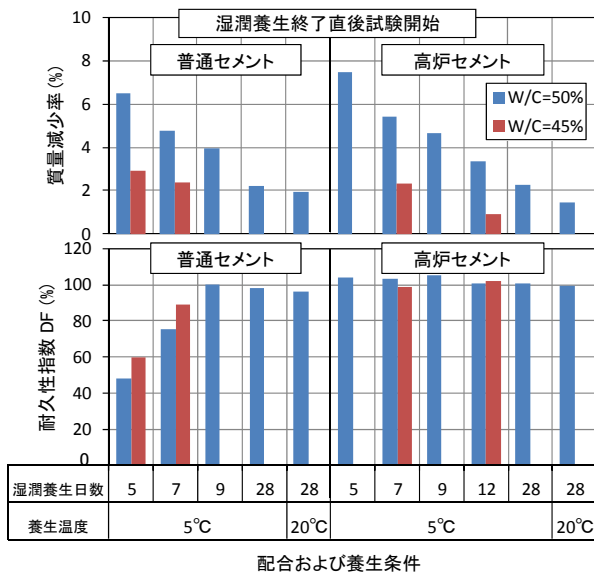


図-3 水中凍結融解試験結果

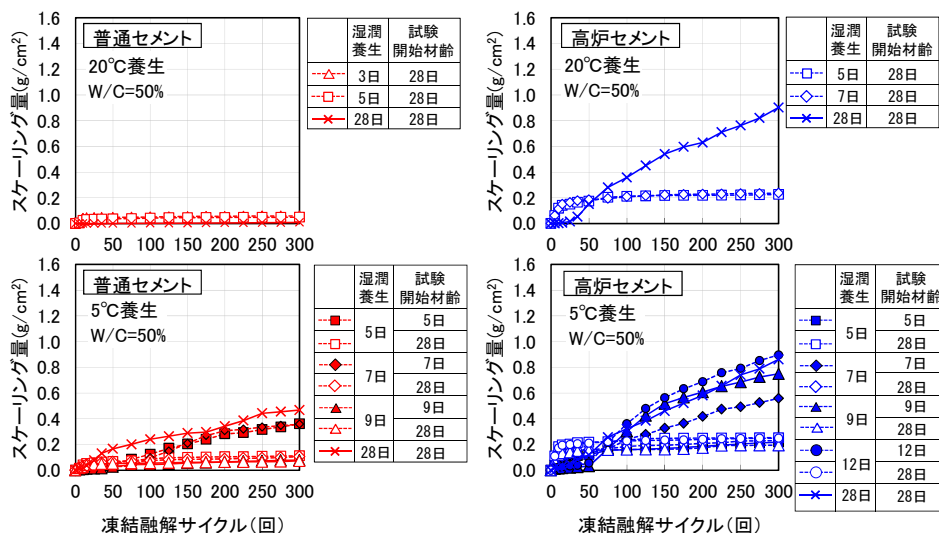


図-4 スケーリング量と凍結融解サイクルの関係 (W/C=50%)

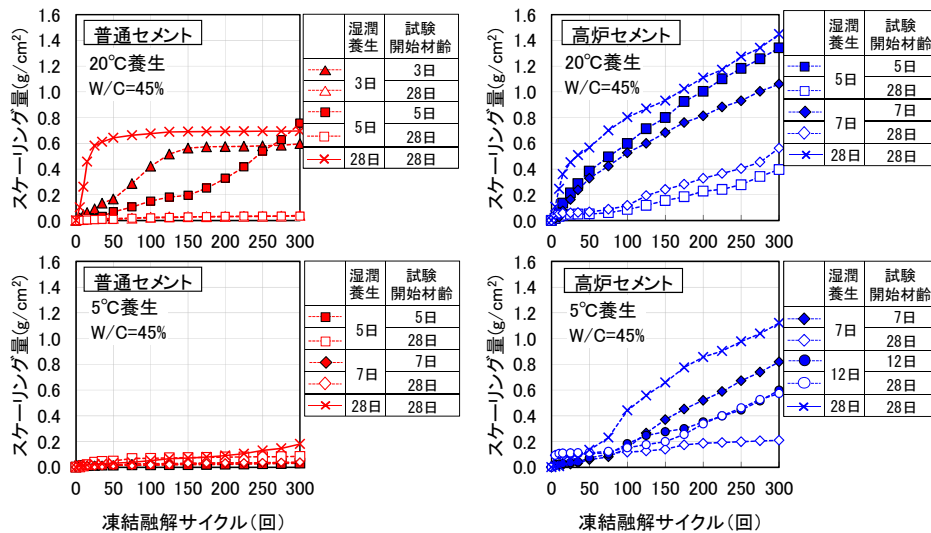


図-5 スケーリング量と凍結融解サイクルの関係 (W/C=45%)

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、結果としてスケーリング量が増大したことが考えられる。

図-5にW/C=45%の場合のスケーリング量と凍結融解サイクルの関係を示す。

20°C養生の場合、湿潤養生直後に試験を開始したケースは、いずれも気中養生後に試験を開始したケースよりスケーリング量が急激に増加しており、含水の影響と考えられる。一方、5°C養生では、普通セメントでは材齢28日まで水中養生した後ただちに試験を開始したケースで最大となったものの、全体にスケーリング量は少なかった。一方、高炉セメントでは湿潤養生直後に試験を開始したケースでスケーリング量が増大する傾向がみられ、含水の影響と考えられる。

なお、W/C=45%では5°C養生よりも20°C養生の方が、さらにW/C=50%よりもスケーリング量が増大しており、前述した既往の研究のとおり、組織構造が緻密なほどスケーリングが増大する傾向が確認された。

(5) 中性化抵抗性及ぼす養生条件の影響

図-6に壁状供試体から採取したコア供試体による中性化促進13週後のコンクリートの中性化深さを示す。

中性化深さは、セメントの種類、水セメント比の影響は明確であったが、ブリーディング等の影響による供試体高さ方向の違いについては、明確な傾向はみられなかった。養生条件の違いについては、同一セメント、同一採取高さで比較すると、概ね湿布養生期間が長いほど中性化深さは小さい傾向がみられた。また、普通セメントでは明確ではないが、高炉セメントでは同じ湿布養生期間でも20°C養生の方が5°C養生よりも中性化深さは小

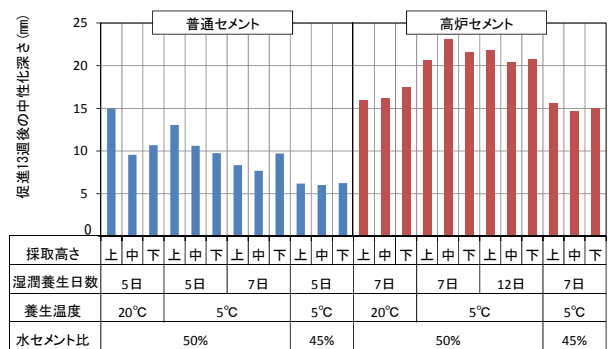


図-6 壁状供試体から採取したコア試料の中性化促進13週後の中性化深さ

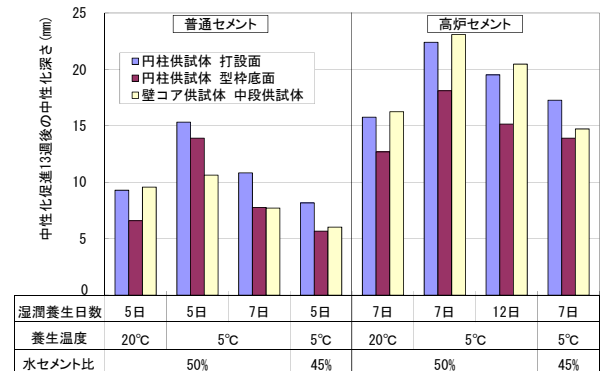


図-7 円柱供試体およびコア供試体による促進中性化深さの比較

く、セメントの温度依存性の影響がみられた。

図-7に円柱供試体とコア供試体による促進中性化深さの比較を示す。なお、コア供試体は、打込み高さ方向の影響を排除するため、壁状供試体の中段から採取したコンクリートの中性化深さを示している。また、円柱供試体については、打設面と型枠底面で測定した結果をそれ

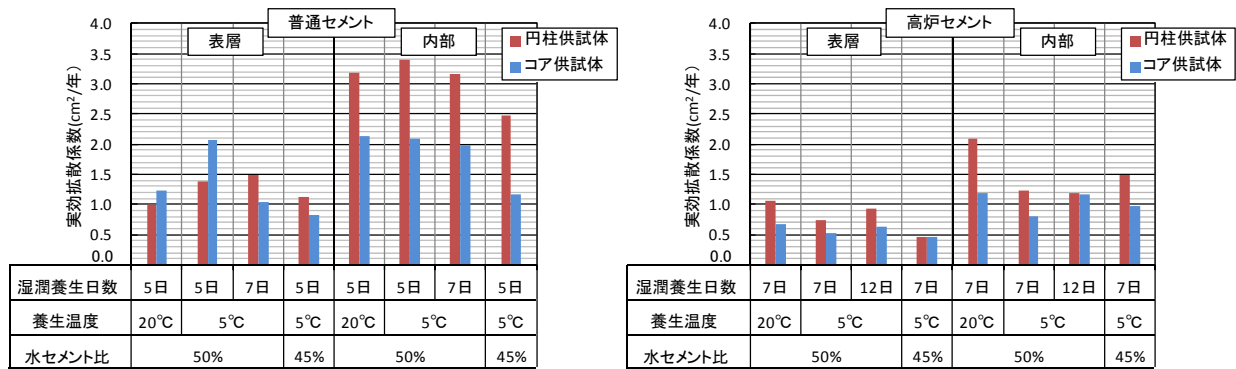


図-8 塩化物イオンの実効拡散係数

それぞれ示している。円柱供試体の打設面と型枠底面では、いずれも型枠底面の方が中性化深さが小さく、打込み方向の影響がみられた。円柱供試体とコア供試体を比較すると、普通セメントでは概ね型枠底面とコア供試体の中性化深さが同程度であったが、高炉セメントでは円柱供試体の打設面とコア供試体の中性化深さが同程度となり、セメントにより傾向は異なった。しかし、全体としては、いずれの場合も養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほど中性化深さは小さくなる傾向があり、中性化抵抗性と養生は相関があることが確認された。

(6) 塩化物イオンの移動に及ぼす養生条件の影響

図-8に各コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数を示す。円柱供試体と壁コア供試体はほぼ同様の傾向を示したが、普通セメントの表層部の一部を除くと、壁コア供試体の方が円柱供試体よりも拡散係数は小さい傾向を示した。これについて、円柱供試体は壁供試体に比べて寸法が小さく、脱型後供試体側面をアルミテープでシールしたものの、気中養生中の乾燥の程度が大きくなった可能性が考えられる。また、本研究では、表層部よりも内部試料の方が拡散係数が大きい結果となった。これは、円柱供試体表層部の試料は型枠底面から採取しており、打設高さ方向の影響が卓越した可能性が考えられる。一方、壁供試体については、透気係数を測定する関係から型枠面にスペーシングを行っており、これにより表層部が緻密化したことなどが考えられる。しかしながら、本研究の範囲ではその原因について特定することができないため、再現性について確認を行うなどさらに詳細な検討が必要である。

以上より、ここでは実構造物に近いと考えられる壁供試体の表層部に着目し、養生条件の違いによる拡散係数を比較する。普通セメントの拡散係数は、養生温度が高く湿潤養生期間が長いほど拡散係数は低下する傾向がみられた。しかし、高炉セメントでは養生条件と拡散係数の明確な傾向はみられなかった。これについて、高炉セメントは普通セメントに比べて塩化物イオンの拡散係数

が小さいことが知られており、セメントの種類の影響が大きいことや、実効拡散係数試験は20℃程度の常温環境の試験室内で実施したため、温度依存性が高い高炉セメントは試験期間中に養生が促進され、結果的に養生の影響が小さくなったことなどが考えられる。

4. まとめ

本研究では、性能規定に対応した施工マニュアルの提案に向けた寒冷地での適切な養生方法の検討として、養生温度および養生期間がコンクリートの強度や耐久性に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。これらの成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 圧縮強度発現は、養生条件の影響を大きく受け、養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほど強度発現は大きくなり、養生の重要性が確認された。
- (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しないことが明らかとなり、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) 中性化抵抗性は、圧縮強度と同様に、養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほど向上する。
- (4) 塩化物イオンの実効拡散係数は、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小さくなる傾向がみられたが、高炉セメントでは明確な傾向がみられず、セメントの種類の影響が大きかった。

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) 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.119-120、1996.4
- 3) 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