

## 15.5 性能規定に対応したコンクリート構造物の施工品質管理・検査に関する研究(2)

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 26

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

技術開発調整監付（寒地技術推進室）

研究担当者：田口史雄、馬場道隆、内藤 勲、吉田 行

遠藤裕丈、伊佐見和大

横山博之、宮本修司、中村直久、村中智幸

### 【要旨】

本研究は、各種性能を長期に亘り保持する品質を受け取り時に評価する検査方法と、性能規定に対応した適切な施工マニュアルを確立し、それらの活用により現場での新技術の導入促進、および構造物の品質向上を図り、ライフサイクルコストの縮減を図るものである。平成 23 年度は、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検討を行うとともに、出来上がりコンクリートの品質評価システムの提案に向けた品質検査技術の検討として、透気試験や超音波伝播速度測定の適用性に関する検討を行った。その結果、中性化や塩分浸透に対する抵抗性は養生条件により異なることが確認されたがその傾向はセメントの種類によっても異なること、および超音波伝播速度などの非破壊試験によりコンクリートの品質をある程度評価できる可能性が示唆されたが、耐久性との関係については必ずしも明確とならず、さらに検討が必要なことがわかった。

キーワード：性能規定、施工、品質管理、検査、養生

### 1. はじめに

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、出来型、表面の目視検査や強度試験等が行われているが、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。一方、コンクリート構造物への要求性能の多様化に伴い、打込み、締固め、養生等の施工に起因したコンクリートの不具合に関する現場技術相談が非常に多い。このため、受け取り検査時の各種性能を担保した品質検査等の充実や性能規定に対応した多様なコンクリートへの施工標準（養生方法等）が社会的に強く求められている。

本研究では、竣工時における出来上がりコンクリートの耐久性等の品質を適切に検査できる検査方法を含めた品質評価システムの提案とともに、品質を確保するための施工性、施工方法、養生方法等に関する施工マニュアルを提案することを目的としている。耐寒材料チームでは、主として寒冷地における適切な養生方法に関する検討を行う。平成 23 年度は、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うとともに、出来上がりコンクリートの品質評価システムの提案に向けた品質検査技術の検討として、透気試験や超音波伝播速度測定の適用性に関する検討を行った。

### 2. 試験概要

#### 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/cm<sup>3</sup>、比表面積 3,340cm<sup>2</sup>/g、以下、普通セメント(N)と記述）と高炉セメント B 種（密度 3.05g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3,750cm<sup>2</sup>/g、以下、高炉セメント(B)と記述）の 2 種類

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 (%)	コンクリート単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				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

15.5 性能規定に対応したコンクリート構造物の  
施工品質管理・検査に関する研究(2)

を用いた。細骨材は、苫小牧樽前産の除塩された海砂（密度 2.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.87%、粗粒率 2.85）を、粗骨材は、小樽見晴産砕石（密度 2.68g/cm<sup>3</sup>、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。水セメント比は前年度より検討を行っている 50%に加え、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。目標スランプと目標空気量はそれぞれ 8cm±2.5cm、4.5±1.0%とした。

2.2 供試体の概要と養生条件

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、H23 年度は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 60cm×高さ 60cm×奥行き 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、透気試験の実施を考慮して型枠面の空隙を抑制するためにスペーシング処理を行った。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℃と一般的な 20℃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材齢 28 日まで気中養生を行う方法の 2 水準とした。なお、気中養生について、20℃養生では、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%に、5℃養生では、温度 5±2℃、相対湿度 60±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

表-2 養生条件と試験開始材齢

記号	セメント	W/C	養生温度	養生条件	供試体	試験項目									
						圧縮強度、静弾性超音波、表面水 (φ10cm×20cm)	細孔径分布	促進中性化	急速塩分	凍結融解	CDF	スケーリング	気泡分布		
N50-20S5	普通	50%	20℃	湿布5日+気中23日	円柱	5.28	28	28	28						
壁					28	28	28	28							
N50-20S5				水中28日	円柱	28									
N50-5S5				5℃	湿布5日+気中23日	円柱	5.28	28	28	28					
						壁	5.28	28	28	28					
N50-5S7					湿布7日+気中21日	円柱	7.28	28	28	28					
			壁			28	28	28	28						
N50-5W			水中28日		円柱	28									
N45-20S3			普通		45%	20℃	湿布3日+気中25日	円柱	3.28					28	3.28
湿布5日+気中23日				5.28								28	5.28		
N45-20W	水中28日	28							28	28					
N45-20S5	5℃	湿布5日+気中23日		円柱			5.28	28	28	28	5	28	5.28	28	
				壁			28	28	28	28					
N45-20S7		湿布7日+気中21日		円柱			7.28				7	28	7.28		
N45-20W		水中28日		28						28	28				
B50-20S7		高炉		50%		20℃	湿布7日+気中21日	円柱	7.28	28	28	28			
								壁	28	28	28	28			
	B50-20W						水中28日	円柱	28						
	B50-5S7		5℃		湿布7日+気中21日		円柱	7.28	28	28	28				
							壁	28	28	28	28				
	B50-5S12				湿布12日+気中16日		円柱	12.28	28	28	28				
壁						28	28	28	28						
B50-5W	水中28日				円柱	28									
B45-20S5	高炉				45%	20℃	湿布5日+気中23日	円柱	5.28					28	5.28
			湿布7日+気中21日						7.28				28	7.28	
			B45-20W				水中28日	28				28	28		
			B45-5S7				5℃	湿布7日+気中21日	円柱	7.28	28	28	28	7	28
		壁		28					28	28	28				
		B45-5S12	湿布12日+気中16日	円柱				12.28				12	28	12.28	
				壁		28					28	28			
		B45-5W	水中28日	28							28	28			

表中の数字は試験を実施または開始した材齢

み合わせた場合の湿布養生期間については、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<sup>1)</sup>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、12日から選定した。供試体の脱型は、コンクリート強度 $5\text{N}/\text{mm}^2$ を目安に<sup>2)</sup>、昨年度の試験実績を考慮して、標準的な供試体については、 $20^\circ\text{C}$ 養生ではセメントの種類によらず材齢1日で、 $5^\circ\text{C}$ 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 $20^\circ\text{C}$ 養生では材齢3日、 $5^\circ\text{C}$ 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。

### 2.3 検討項目と試験方法

#### (1) 圧縮強度および静弾性係数試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して実施した。併せて、JIS A 1149 に準拠して、コンプレッソメータを用いて静弾性係数を測定した。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。

#### (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により評価を行った。

スケーリング試験はASTM C672 並びにRILEM CDF法に準拠した試験をそれぞれ行った。

ASTM法では、 $220 \times 220 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体を作製し、各養生後に $-18^\circ\text{C}$ を16時間、 $23^\circ\text{C}$ 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( $220 \times 220\text{mm}$ )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し凍結融解作用を与えた。なお、水中養生および湿布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 $20^\circ\text{C}$ 、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

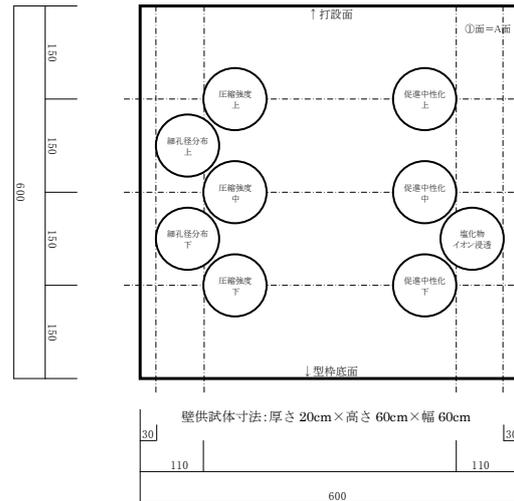


図-1 壁状供試体からのコア採取位置

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。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。

CDF試験では、 $+20^\circ\text{C}$ から定速で4時間で $-20^\circ\text{C}$ まで冷却し、 $-20^\circ\text{C}$ を3時間保持後、定速で4時間で $+20^\circ\text{C}$ まで加熱した後、 $+20^\circ\text{C}$ を1時間保持する、12時間1サイクルで凍結融解作用を与えた。供試体は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を半分に切断して $100 \times 100 \times 200\text{mm}$ としたものを用い、試験面はASTM法と同様に打設面とした。供試体は各種養生後、試験面以外をエポキシ樹脂でコーティングして試験を開始した。なお、水中養生供試体については、湿潤面にエポキシ樹脂コーティングが施せないため、試験開始材齢の前日に水中から取り出し、室内で試験面以外を2~3時間乾燥後、試験面以外の面に対してエポキシ樹脂コーティングを施し、試験開始まで室内にて保管した(24時間程度)。ただし、水中から取り出した後、試験開始まで、試験面は乾燥しないよう湿布養生した。試験水にはASTM法と同様、3%NaCl水溶液を用いた。

#### (3) 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、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体と図-1に示す箇所から採取した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ コア供試体を用いた。円柱供試体は脱型後壁状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の測定を行った。

(4) 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、電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法（案）（JSCE-G571-2003）に準拠して行った。供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$  円柱供試体と壁供試体から採取した  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  コア供試体を用い、円柱供試体は促進中性化試験用供試体と同様に、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。また、壁供試体の型枠面と比較するために、円柱供試体からの試料は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てそれぞれ測定した。

(5) 超音波伝播速度

養生条件の違いによるコンクリート表層の品質を把握することを目的として、超音波伝播速度を測定した。図-2 に各供試体における超音波伝播速度測定の概要を示す。

圧縮強度との関係を調べる試験では、円柱供試体の打設面（上面）および底面の中心に超音波測定器の端子をあて、供試体の軸方向に対する透過法により測定した超音波伝播時間と、ノギスを用いて測定した供試体長を超音波伝播距離として、伝播距離/伝播時間により超音波伝播速度を求め評価した。また、コンクリー

ト品質との関係を調べる試験では、円柱供試体および壁状供試体により測定を行った。円柱供試体については、打設面から高さ方向に 2cm 刻みで直径方向に対する透過法により測定した。壁状供試体については、厚さ方向に対する透過法（上部、中部、下部それぞれ 11 点）で測定を行った。

(6) 透気係数測定

コンクリート表面の透気性については、二重チャンバー方式の表面透気試験機を用いて透気係数を測定した<sup>3),4)</sup>。透気係数の測定は、 $20 \times 20 \times 20\text{cm}$  の角柱供試体と壁状供試体を用いて湿布養生終了直後と材齢 28 日で行った。角柱供試体では打設面と型枠側面の 2 面で測定を行い、壁状供試体では供試体幅の中央部において高さ方向に 3 カ所（上、中、下部）の位置で各 1 点ずつ、供試体の表裏面で測定した。

(7) 表面水分率測定

超音波伝播速度と透気係数への含水率の影響を確認するために、表面水分率の測定を行った。表面水分率の測定は、高周波容量式 (20MHz) の接触型コンクリート・モルタル水分計を用いて行い、円柱供試体では打設面と底面で各 3 回計測した合計 6 個の測定値の平均値で評価した。また、角柱供試体では打設面と型枠側面で、壁状供試体は上部、中部、下部にそれぞれについて 3 回計測した平均値で評価した。

(8) 細孔径分布測定

各種養生終了後、コンクリートの表層と内部の細孔構造を比較するため、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。細孔測定用試料は、粗骨材界面を含むように 5mm 立方体にコンクリートカッターで切断し、アセトン中で洗浄した後、D-dry ( $5 \times 10^{-4}\text{mmHg}$ ) で 7 日間乾燥させて測定を行った。測定は、水銀圧入式ポロシメーターを用いた（圧入圧 0.01~410MPa、測定細孔直径 3nm~120 $\mu\text{m}$ ）。細孔容積は、試料体積から骨材体積を除いた硬化セメントペースト体積当たりの空隙率で表記した。なお、骨材体積は、細孔測定と同様に採取した試料から得た不溶解残分質量率（セメント協会法 F-18<sup>5)</sup> に準拠）に試料質量を乗じこれを骨材密度で除して求めた。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

図-1 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。

いずれの配合についても、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

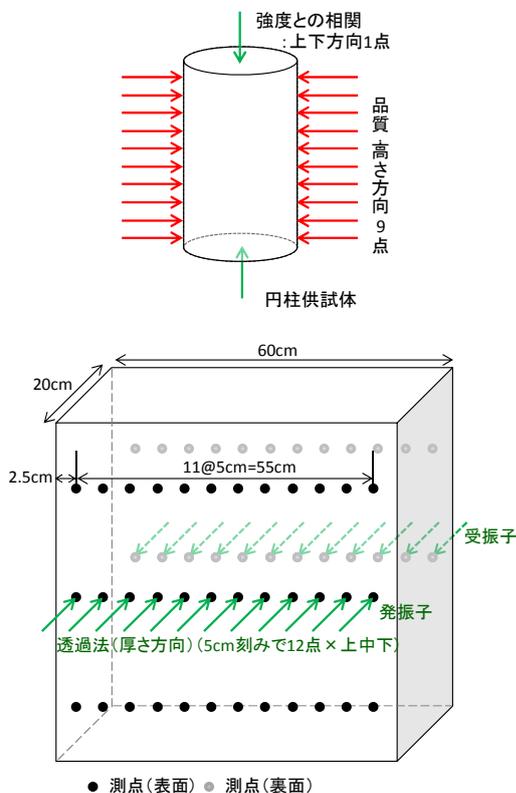


図-2 超音波伝播速度測定概要

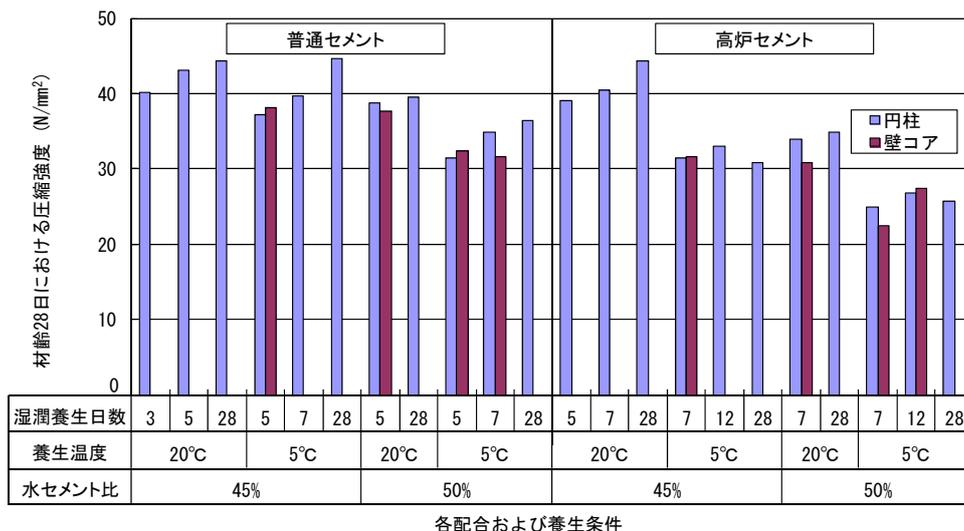


図-3 材齢 28 日における圧縮強度

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、B45-5°CおよびB50-5°Cの湿潤養生日数 28 日が湿潤養生日数 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、低温の 5°C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、圧縮強度発現は昨年までの検討と同様<sup>6)</sup>、養生温度や湿潤養生期間により異なるが、セメントの種類や水セメント比により、圧縮強度に与える養生条件の影響の程度は異なった。特に、材齢初期の水和反応が遅い高炉セメントではその傾向が顕著となり、強度発現に対する養生の重要性が確認された。

### 3.2 静弾性係数に及ぼす養生条件の影響

図-4 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度の増加に伴い、静弾性係数は増加傾向にあり、昨年度の試験結果と同様、セメントの種類や養生条件によらず、土木学会のコンクリート標準示方書に示されている圧縮強度に対する静弾性係数の標準値と概ね対応していることが確認された。

### 3.3 凍結融解抵抗性 (水中凍結融解試験)

図-5 に各配合および養生条件におけるコンクリー

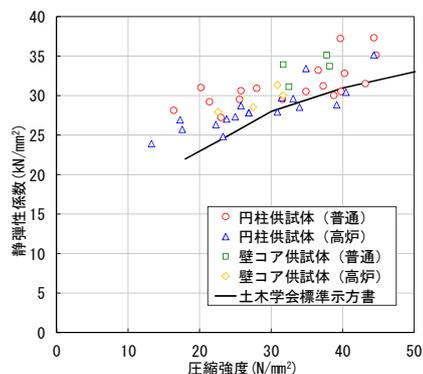


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

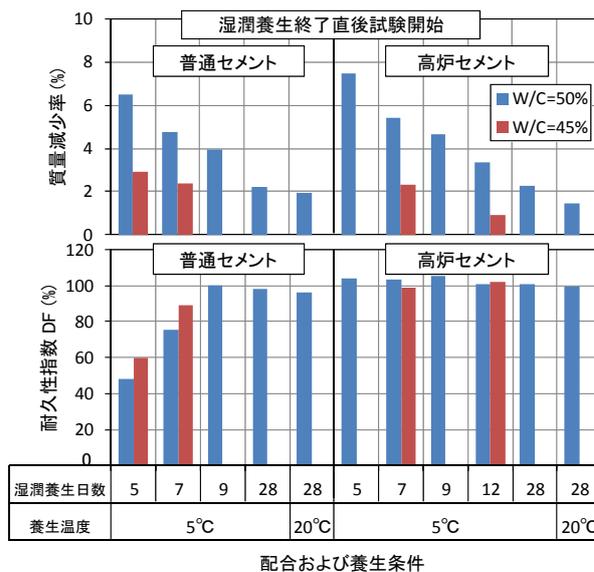


図-5 水中凍結融解試験結果

トの水中凍結融解試験結果を示す。横軸の数値は湿潤養生日数(5-28日)を意味している。なお、昨年度は、凍結融解抵抗性に及ぼす供試体の含水の影響について検討することを目的として、W/C=50%のコンクリートに対し、湿潤養生直後に凍結融解試験を開始した場合と、所定期間湿布養生後(5-12日)材齢28日まで気中養生を行った後に開始した場合について検討した<sup>6),7)</sup>。その結果、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、普通セメントでは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、今年度実施したW/C=45%については、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。図中W/C=50%は昨年度実施のデータを示しているが、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、W/C=50%と同様、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施工編では、湿潤養生期間の目安が日平均気温5℃以上の場合、普通ポルトランドセメントで9日、混合セメントB種で12日とされており<sup>1)</sup>、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。一方、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/mm<sup>2</sup>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、昨年度実施したW/C=50%の普通セメントの5℃封緘養生の材齢5日強度は15.8N/mm<sup>2</sup>、材齢7日で20.5N/mm<sup>2</sup>であり、**図-3**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。しかしながら、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-5**に示した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、耐久性を考慮して適切に養生を行う必要がある。

### 3.4 スケーリング抵抗性 (ASTM法)

**図-6**に昨年度より継続的に実施し、凍結融解300サイクル経過した各コンクリート(W/C=50%)のスケーリング量の経時変化を示す。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℃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N5W28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

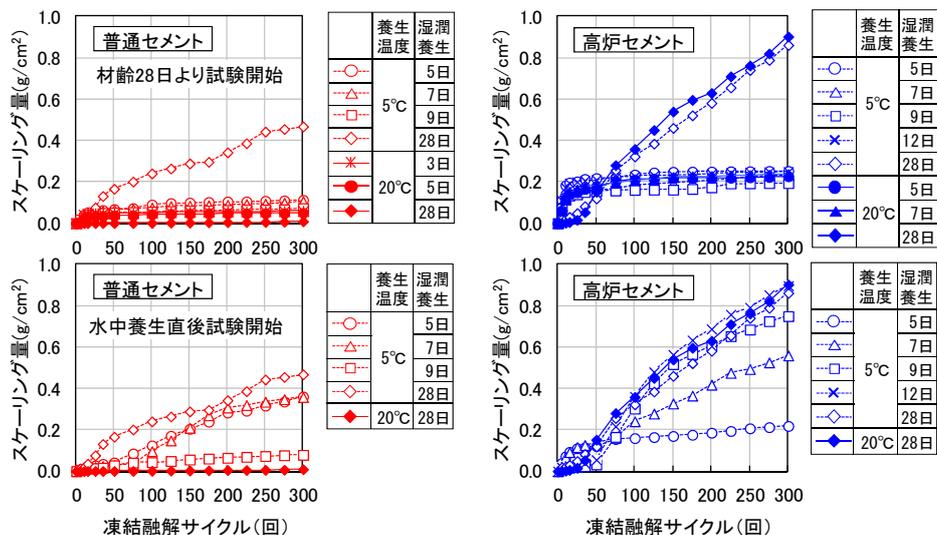


図-6 スケーリング量と凍結融解サイクルの関係 (ASTM法、W/C=50%)

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(右図下段)、湿潤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、湿潤養生期間が長いほどスケーリングは多くなった。これについては、コンクリート表層部の水分が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、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、結果的に表層部に蓄積された圧力が表層のコンクリートのはく離により緩和される。このため、湿潤養生期間が長いものほどスケーリング量が増大したと考えられる<sup>8)</sup>。

図-7 に W/C=45% の場合のスケーリング量と凍結融解

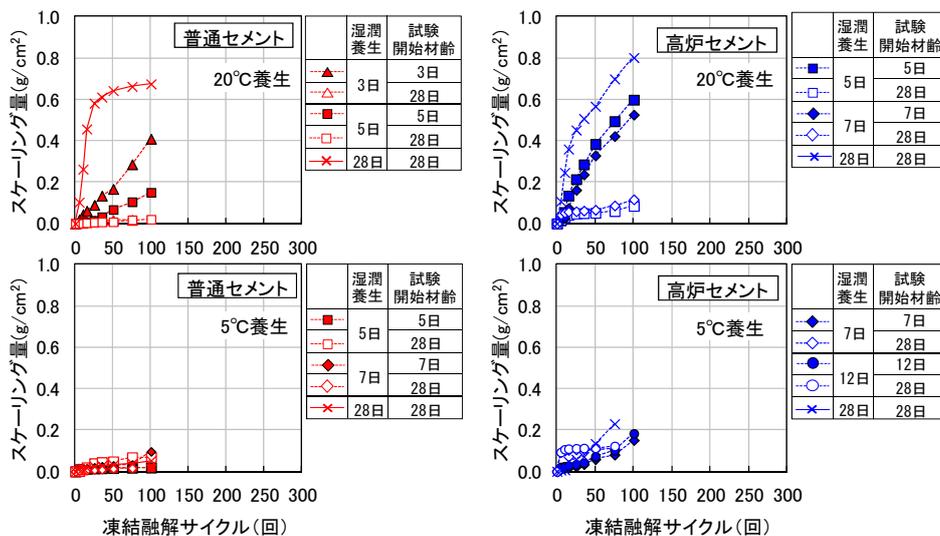


図-7 スケーリング量と凍結融解サイクルの関係 (ASTM 法、W/C=45%)

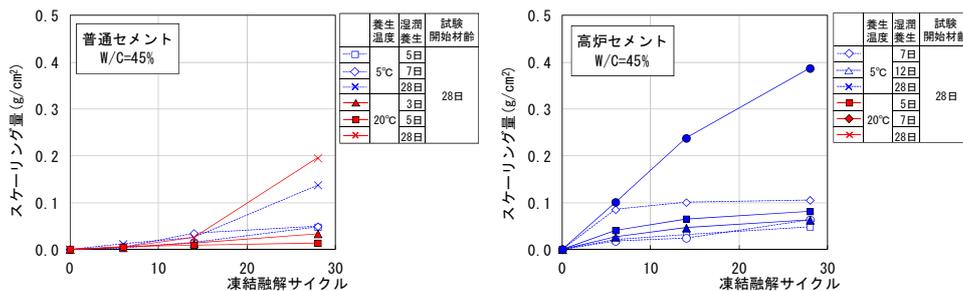


図-8 スケーリング量と凍結融解サイクルの関係 (CDF 法、W/C=45%)

サイクルの関係を示す。凡例の湿潤養生期間と試験開始材齢が同じものは湿潤養生直後に試験を開始したものであり(凡例塗りつぶし)、それ以外は、湿潤養生後材齢 28 日まで気中養生を行い試験を開始したものである(凡例白抜き)。

20°C養生の場合、いずれも湿潤養生直後に試験を開始したケースは、気中養生後に試験を開始したケースよりもスケーリング量が急激に増加している。一方、5°C養生では、凍結融解 100 サイクルではいずれも差が無くスケーリング量は少ないものの、特に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見え始めており、さらに継続して評価する必要がある。

### 3.5 スケーリング抵抗性 (CDF 法)

図-8 に W/C=45% の場合の CDF 法によるスケーリング量と凍結融解サイクルの関係を示す。普通セメントの場合、材齢 28 日まで湿潤養生を行った後に試験を行ったケースで、養生温度によらず最終的なスケーリング量は多かったが、他のケースでは 20°C養生の方が 5°C養生よりもスケーリング量は抑制された。しかしその

差は小さく、湿潤養生期間の違いによる差も明確ではなかった。

一方、高炉セメントの場合、20℃養生では湿潤養生期間が長いほどスケーリング量は増大する傾向となったが、湿潤養生 28 日のスケーリング量が突出しており、湿潤養生 5 日と 7 日の差は小さかった。これに対して、5℃養生では湿潤養生期間による明確な傾向はみられず、湿潤養生 5 日と 28 日が同程度でスケーリングが少なく、湿潤養生 12 日は凍結融解 7 サイクルでスケーリングが発生した以降は、ほぼ横ばいで推移した。

以上から、CDF 法によるスケーリング量においても、セメントの種類および養生条件により異なることが確認されたが、湿潤養生期間による明確な傾向は確認できなかった。

### 3.6 中性化抵抗性に及ぼす養生条件の影響

図-9 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℃養生の方が 5℃養生よりも中性化深さは小さく、セメントの温度依存性の影響がみられた。

図-10 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ぞれ示している。円柱供試体の打設面と型

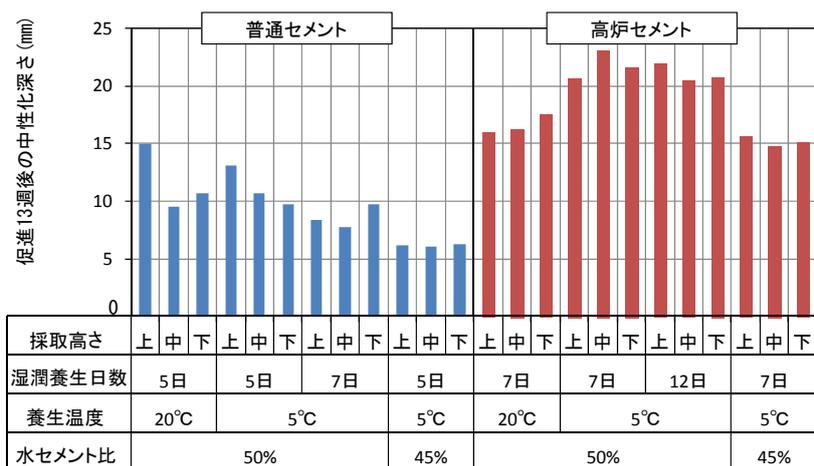


図-9 壁状供試体から採取したコア試料の中性化促進 13 週後の中性化深さ

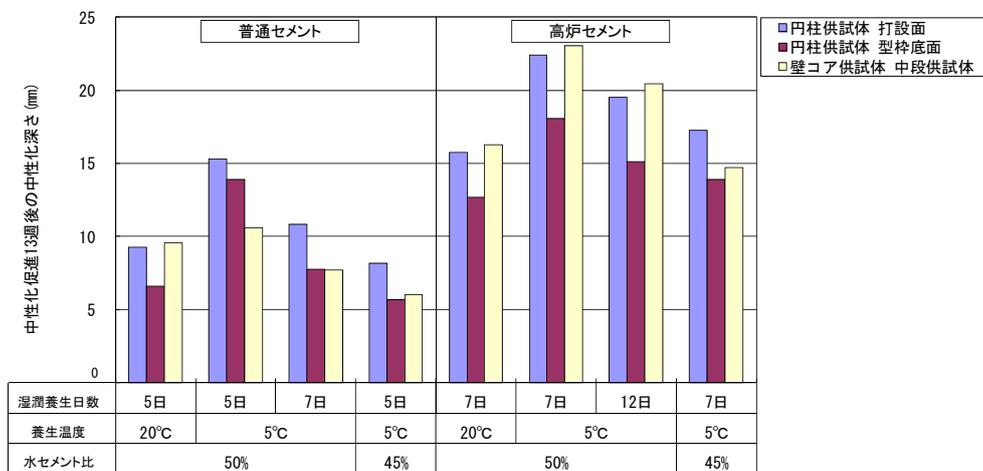


図-10 円柱供試体およびコア供試体による促進中性化深さの比較

枠底面では、いずれも型枠底面の方が打設面より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N50-20S5を除くと型枠底面とコア供試体の中性化深さが同程度となったが、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。

### 3.7 塩化物イオンの実効拡散係数に及ぼす養生条件の影響

図-11 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となった。また、本研究においては、表層部よりも内部試料の方が拡散係数が大きい結果がえられた。コア供試体の方が円柱供試体よりも拡散係数が小さい傾向となったことについては、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。一方、表層部よりも内部の方が拡散係数が大きくなったことについては、円柱供試体は表層部の試料を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。また、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、後述する各コンクリートの細孔径分布を比較すると、いずれも内部の方が表層部よりも細孔容積は少なくなっていることから、原因については特定できないため、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。

これらのことから、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した。普通セメントの表層部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が考えられる。

### 3.8 見かけの超音波伝播速度とコンクリート品質

#### (1) 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

図-12 に円柱およびコア供試体の供試体軸方向に透過した見かけの超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す。なお、図中の近似直線は普通・高炉を合わせた全データのものである。また、「見かけ」としたのは、コンクリートの含水の程度が超音波伝播速度に及ぼす影響を補正していないためである。円柱およびコア供試体の軸方向の超音波伝播速度は圧縮強度と比較的良好な相関がみられ、強度の増加とともに超音波伝播速度も増加した。昨年実施した試験結果でも同様の傾向となっており、超音波伝播速度から圧縮強度を予測することは可能と考えられる。

#### (2) コンクリートの品質と超音波伝播速度の関係

図-13 に壁状供試体で直接測定した供試体厚さ方向の見かけの超音波伝播速度と、壁供試体から採取したコア供試体の軸方向に測定した超音波伝播速度をそれぞれ示す。なお、壁供試体は上部、中部、下部の各高さで水平方向に 11 点測定した平均値、コア供試体は各

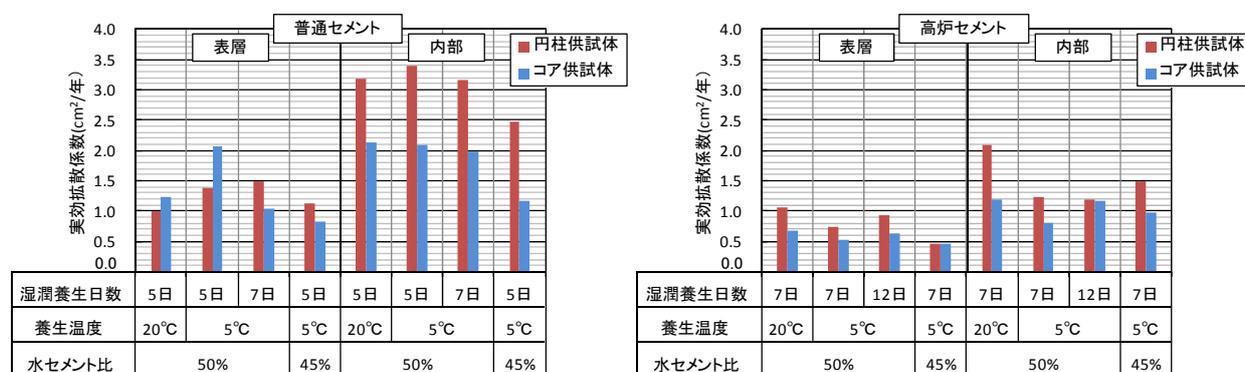


図-11 塩化物イオンの実効拡散係数

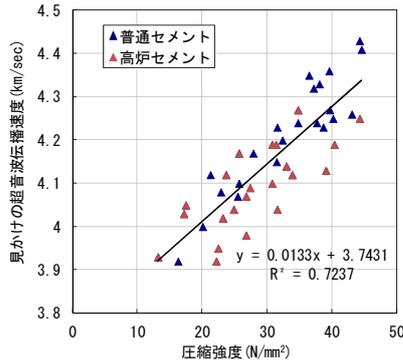


図-12 超音波伝播速度と圧縮強度の関係  
(円柱・コア供試体の軸方向に透過)

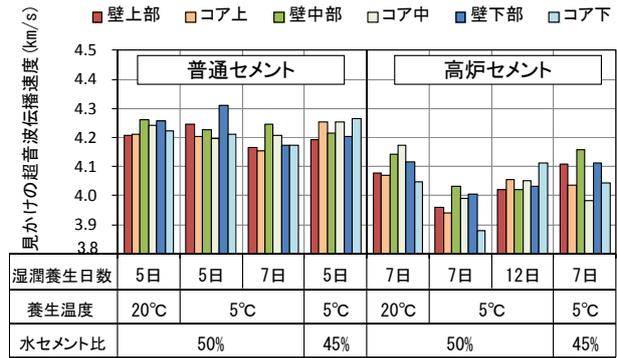


図-13 壁およびコア試料の超音波伝播速度  
(壁は厚さ方向、コアは軸方向に透過)

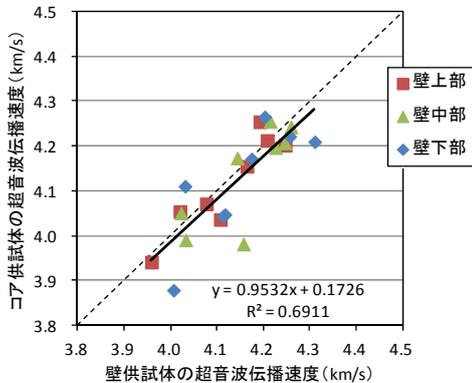


図-14 壁とコア供試体の超音波伝播速度

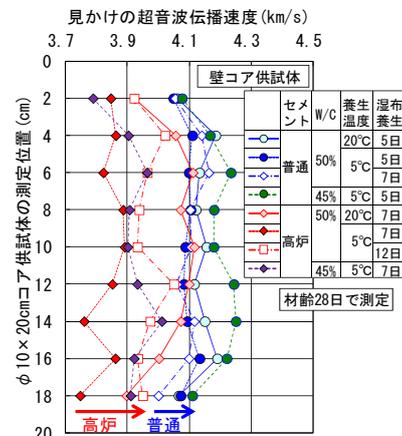


図-15 コア試料の超音波伝播速度  
(直径方向に透過)

高さから採取した強度試験用と中性化試験用のコア供試体2個(図-1参照)の平均値である。同一高さの壁供試体とコア供試体の超音波伝播速度は若干ばらつきがみられるが、全体としてはいずれも同様の傾向を示し、普通セメントでは供試体軸方向(厚さ方向)の透過法による超音波伝播速度と養生条件の関係が明確とならなかったが、高炉セメントでは湿潤養生期間が長く、養生温度が高く、水セメント比が小さいほど超音波伝播速度は大きい傾向がみられた。

図-14に壁供試体とコア供試体の見かけの超音波伝播速度の関係を示す。上述したように、多少のばらつきはあるが、両者には比較的良好な相関がみられた。

以上から、(1)で述べたとおり圧縮強度の推定については、超音波伝播速度と圧縮強度に比較的良好な相関がみられ、壁供試体とコア供試体の超音波伝播速度にも相関が認められることから、実際の構造物においても超音波伝播速度を測定することにより、圧縮強度の推定は可能と考えられる。一方、養生条件の違いによ

るコンクリートの品質の違いのような微細な差については、セメントの種類により評価が異なることから、適用が可能となる条件の整理が必要である。

図-15に壁状供試体から水平方向に採取したコア試料の直径方向に透過した見かけの超音波伝播速度を示す。供試体の高さの0cmと20cmはいずれも壁供試体の型枠面であり、型枠面の超音波伝播速度は供試体中間部(壁供試体内部)よりも遅い傾向がみられ、型枠面表層部は乾燥の影響により内部よりも品質が低下している可能性が考えられる。また、いずれのセメントも養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほど超音波伝播速度は増加する傾向があり、水セメント比が小さい場合についても超音波伝播速度は増大している。また、初期養生の影響を受けやすい高炉セメントの方が、養生条件の違いによる変化が明確であり、特に養生温度の影響が大きいことがわかる。さらに、これらの傾向は中性化の傾向とも対応していることから、超音波伝播速度によりコンクリートの品質をある程度評価する

ことは可能と考えられる。

### 3.9 透気係数に及ぼす養生条件の影響

図-16 に壁供試体の透気係数を示す。上図は、湿布養生後に材齢 28 日まで気中養生を行ったもの、下図は湿布養生終了直後に測定したものである。なお、これらの値は含水等の補正を行っていない。いずれのケースでも、特に湿布養生直後において、透気係数は壁状供試体下部の方が上部よりも小さい傾向となり、高さ方向の差が確認された。他方、養生条件の違いや水セ

メント比の違いによる差は、普通セメントでは (図-16 左)、特に気中養生実施後では明確とならなかった。これに対して、初期の水和が比較的遅く、初期養生が特に重視される高炉セメントでは (図-16 右)、養生条件の違いや水セメント比の違いによる差も確認され、養生温度が高く、湿布養生期間が長く、水セメント比が小さいケースで透気係数は小さくなる傾向がみられた。

図-17 に角柱供試体の透気係数を示す。小型供試体については、供試体の打設面と型枠側面で透気係数を



図-16 壁状供試体の透気係数

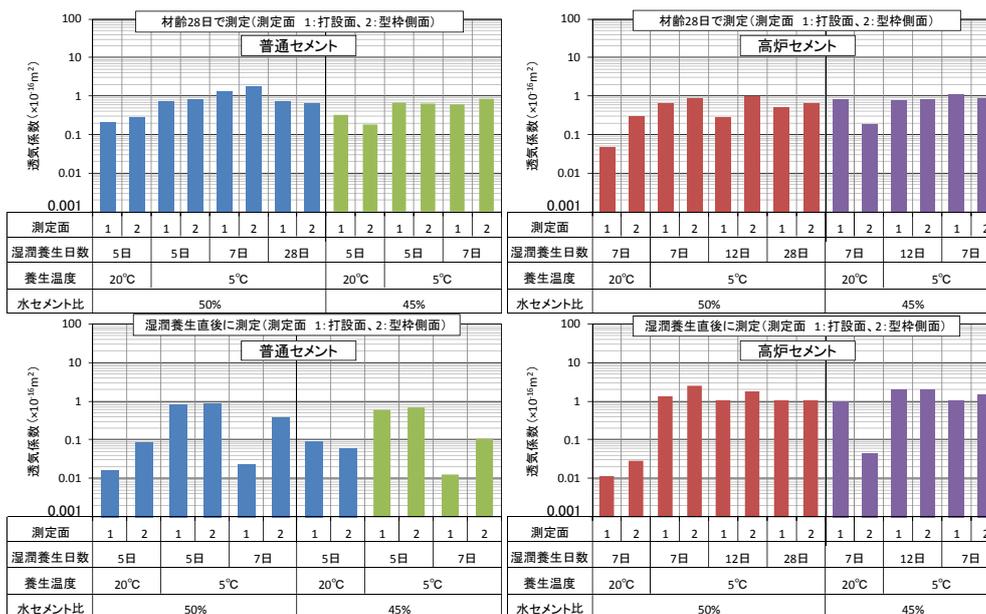


図-17 角柱供試体の透気係数

測定しているが、本研究においては、打設面の方が型枠側面よりも透気係数が小さい傾向となった。一般的には、打設面はブリーディングの影響により脆弱になると考えられるが、透気係数は逆の傾向を示しており、表層部のコテ仕上げの影響や、ブリーディングにより表層部の粗骨材が少なくセメントリッチな状態となり、骨材界面の脆弱層の影響が小さくなったことなどが考えられるが、原因については特定できない。

気中養生を行ったものと湿潤養生直後を比較すると、全体に湿潤養生直後の方が透気係数は小さく、コンクリートの含水の影響を受けることがわかる。透気係数はいずれも養生条件の違いによる明確な傾向はみられず、特に気中養生を行った場合には明確な差がみられなかった。このように、小型供試体の場合、壁供試体と傾向が異なり、供試体寸法が小さくことによる供試体の乾燥の程度や透気係数の測定自体の影響が考えられる。

以上のように、透気係数は測定する供試体の寸法やセメントの種類により傾向が異なる結果となった。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<sup>3)</sup>。壁供試体の透気係数は、特に高炉セメントの場合に品質の差が現れており、透気試験によりある程度の品質を評価できる可能性が示されたが、一方で、耐久性との関係として、例えば促進中性化試験の結果と透気係数を比べると、中性化抵抗性を透気係数の絶対値により統一的に評価できないことがわかる。これは、中性化が二酸化炭素の通りやすさだけでなく、コンクリート中の水酸化カルシウム量など化学的な反応等の影響により決まるためである<sup>9)</sup>。このことから、透気係数によりある程度コンクリートの品質の違いを評価することは可能と考えられるが、セメントの違い

(水和物や化学反応) に影響される耐久性については統一的な基準での評価は困難であり、このことは塩化物イオンの実効拡散係数の結果からも明らかである。このため、透気試験によりコンクリートの耐久性を評価するには、コンクリートの含水状態の影響を含めてさらに検討する必要がある。なお、ここで比較検討を行った透気係数の値は、壁供試体では表裏面の2点、角柱供試体は2個の平均値であり、サンプリング数が少ないことに加え、同一配合でも測定箇所によりばらつきがみられるケースもあり、サンプリング数やサンプリング箇所についても課題があるため、更なる検討が必要である。

### 3.10 コンクリートの表面水分率

図-18 に角柱供試体のコンクリートの表面水分率を示す。凡例の湿布後とは湿布養生直後に、気中後とは湿布養生後材齢 28 日まで気中養生を行った後に測定した値を意味している。なお、使用した水分計で計測できる最大水分量は 12% であり、側面で観測された値の多くは測定不可能を示したため、それらについては上限値の 12% で示している。測定のタイミングに差はなかったものの、いずれも打設面の方が型枠側面より湿布養生直後においても表面水分率は低かった。また、気中養生後も同様だったが、打設面と型枠面の水分率の差は小さくなった。打設面の水分率が低いことについての原因は不明だが、打設面はブリーディング等の影響により表層部の組織が粗いため水分の逸散が大きいと考えられること、また、表面水分計は表層部から深さ 4cm 程度までの水分の平均として表示されるが、特に表層部の水分の影響を受けると考えられるため、結果として打設面表層部のわずかな水分の変化が反映された可能性がある。

図-19 に角柱供試体の質量変化と表面水分率の変化を示す。供試体の質量変化をみると、高炉セメントの水セメント比 45% のケースで養生温度の違いによる質

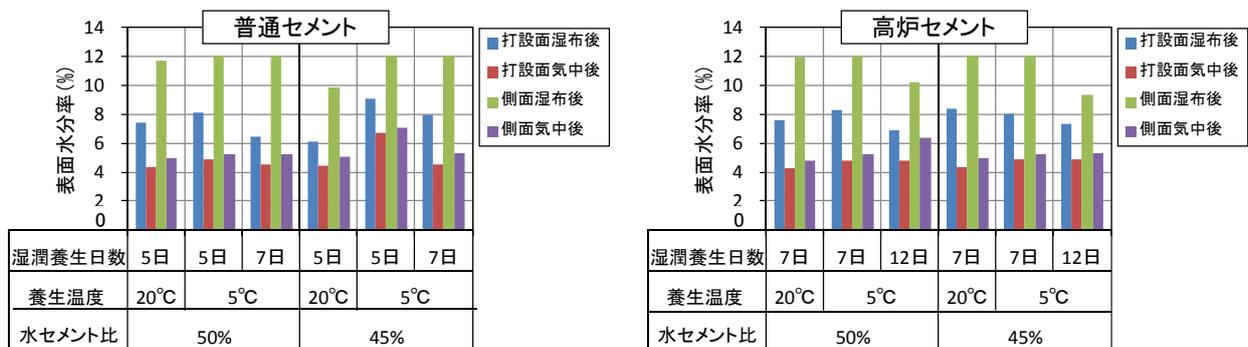


図-18 コンクリートの表面水分率の比較 (角柱供試体)

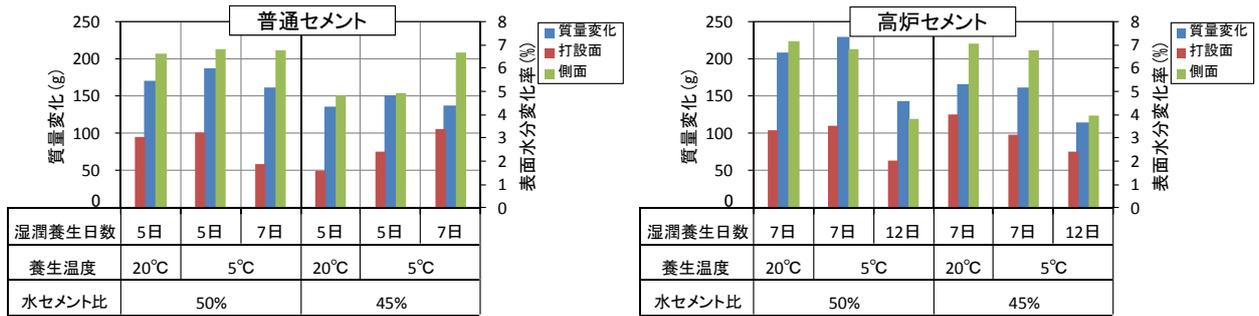


図-19 角柱供試体の質量変化と表面水分率の変化

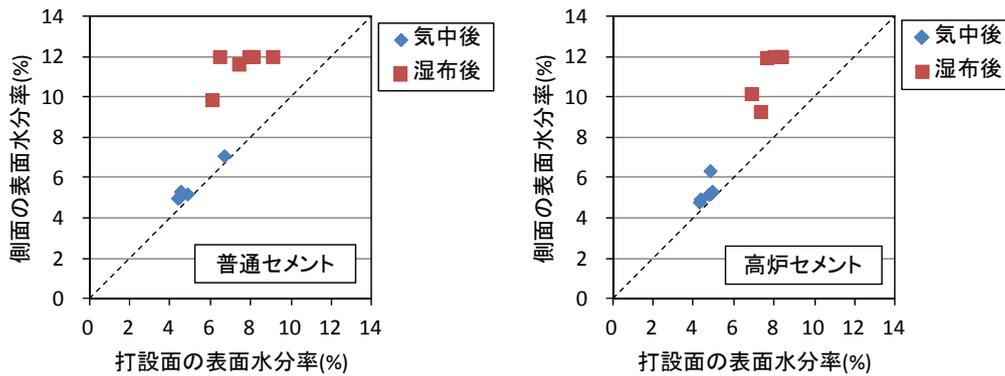


図-20 打設面と側面の表面水分率の関係

量変化が逆転しているがこれを除くと、養生温度が高く、湿布養生期間が長いほど質量の減少は抑制される傾向がみられる。これは、良好な養生条件ではコンクリートの組織構造が緻密になり、乾燥しにくくなったものと考えられる。また、表面水分率は増減の程度に差はあるものの、全体としては質量の変化に応じて変化する傾向が概ねみられたが、気中養生後の側面の水分率の変化が大きかった。

図-20 は打設面と側面の表面水分率比の関係を示しているが、湿布養生直後には打設面と側面に大きな差があるものの、気中養生後にはほぼ同程度になる傾向がよくわかる。

以上から、養生条件の違いによりコンクリートの含水の程度は異なり、良好な養生条件ほどコンクリートが緻密になり水分が抜けにくくなることが示された。また、表面水分計によりコンクリートの含水の変化を把握することは可能であるが、特にコンクリート表層部の含水の影響を受けやすいと考えられ、コンクリートの含水の程度は超音波伝播速度や透気係数だけでなく、コンクリートの凍結融解抵抗性や乾燥収縮にも大きく影響することから、コンクリートの深さ方向の違いを含め、さらに詳細な検討が必要である。

### 3.11 細孔構造に及ぼす養生条件の影響

図-21 に各コンクリート表層と内部の細孔径分布を示す。図の凡例の「円」は円柱供試体を、「上」と「下」はコア供試体の採取位置(図-1 参照)を、「表」と「内」は供試体の表層と内部をそれぞれ意味している。なお、円柱供試体の表層試料は、円柱型枠底部面より採取したものである。円柱供試体およびコア供試体のいずれも、コンクリート表層の方が内部よりも細孔容積が多く、細孔構造が粗大な傾向がみられる。これは、コンクリート表層の方が乾燥の影響を受けやすく、水和反応に影響しているためと考えられる。

図-22 に養生条件ごとに比較した各コンクリートの細孔径分布を示す。上段は円柱供試体、中段は上部から採取したコア供試体、下段は下部から採取したコア供試体における表層と内部の細孔径分布を示しており、中央から左の6枚の図は普通セメントを、右の6枚の図は高炉セメントを用いたコンクリートである。普通コンクリートでは、コンクリート内部の細孔容積の差は細孔径 100nm 以上の領域で若干の差がみられるが、100nm 以下の微細高はほとんど差がない。これに対して、表層部については湿潤養生期間が長いほど、全体に細孔容積が減少する傾向がみられる。一方、高炉セメントでは、普通コンクリートよりも養生条件の影響

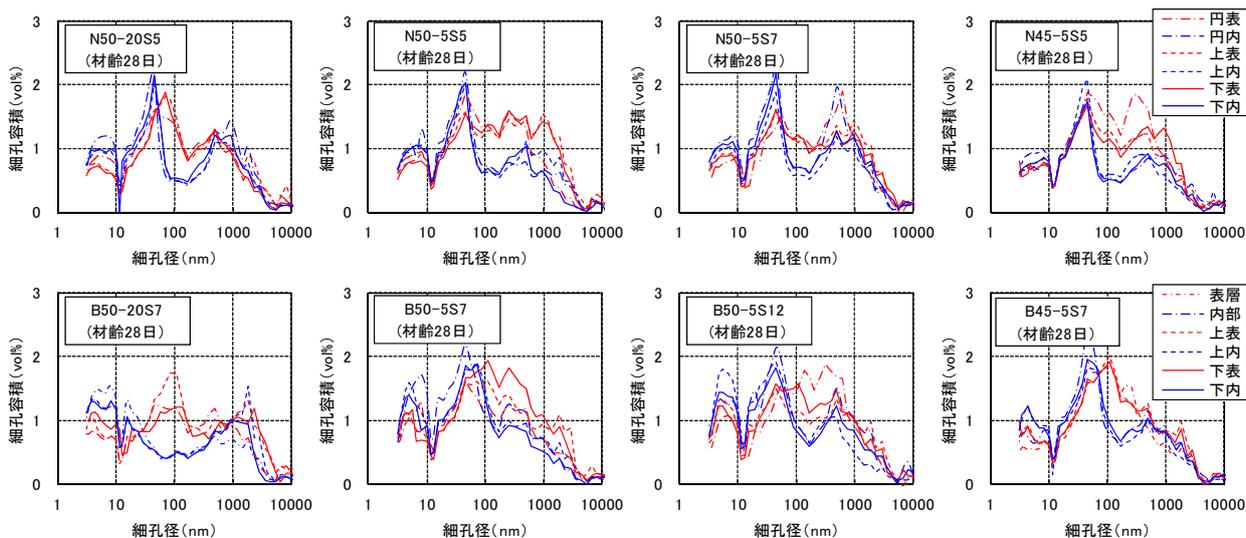


図-21 各コンクリートの細孔径分布（表層部と内部の比較）

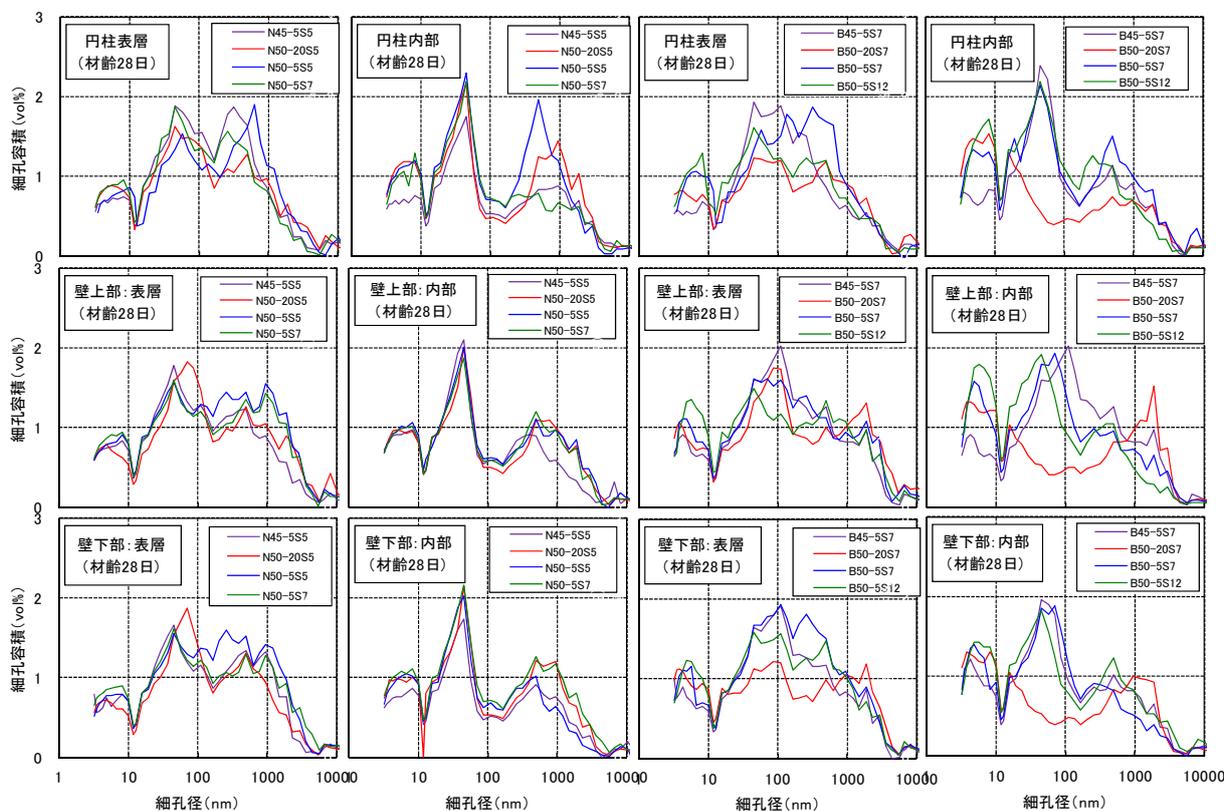


図-22 各コンクリートの細孔径分布（養生条件による比較）

を大きく受ける傾向がみられ、特に 20℃養生では細孔が大きく減少した。これは、高炉セメントの温度依存性の影響と考えられる。また、表層部では内部よりも養生の違いによる細孔容積の変動が顕著であった。

以上のように、コンクリートの細孔は養生条件の影響を反映しており、養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほど細孔容積は減少し、特に高炉セメントで顕著

であった。しかしながら、養生条件の違いによる差は細孔容積の絶対的な量としては微少であり、この違いを非破壊試験等により評価するには、他の試験方法を含めてさらに検討が必要である。

#### 4. まとめ

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検討を行うとともに、出来上がりコンクリートの品質評価システムの提案に向けた品質検査技術の検討として、透気試験や超音波伝播速度測定の適用性に関する検討を行った。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できた。
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 透気係数は、材齢初期の水和が遅い高炉セメントでは、養生温度が高く湿潤養生期間が長いほど小さくなったが、普通セメントでは明確な傾向はみられなかった。また、透気係数は供試体の寸法による影響を受け、小型の供試体では養生との明確な傾向がみられなかった。なお、透気係数は測定箇所によりばらつきがみられ、サンプリング（数や箇所）の課題があるため、更なる検討が必要である。
- (5) 耐久性は、劣化因子のコンクリート内部への通りやすさだけでなく、化学的な反応等の影響も受けるため、透気係数による統一的な基準での耐久性の評価は困難であり、コンクリートの含水状態の影響を含めて、適用条件等を整理する必要がある。
- (6) 超音波伝播速度により、圧縮強度の推定は可能であり、養生条件の違いによる品質の差も確認できたが、耐久性との関係については、透気係数と同様にコンクリートの含水状態の影響を含めてさらに検討する必要がある。
- (7) コンクリートの表層と内部の細孔径分布の違いはみられ、養生温度が高く、湿潤養生期間が長いほど細孔容積が減少する傾向がみられたが、絶対的な量としての差は微小であり、この差を非破壊試験により評価するには、他の試験方法も含めて更

に検討する必要がある。

今後は、寒冷地での適切な養生方法の検討として、特にコンクリートの含水状態の影響について、埋め込み型の水分計の利用によるコンクリート内部の含水状態（内部相対湿度など）と表面水分計による表面水分率の関係を整理するとともに、各種耐久性への影響の程度を検討する。また、品質検査技術の検討として、他の試験方法も含めてさらに検討するとともに、冬期に施工された既設構造物や新設構造物の調査を実施し、実構造物におけるデータと室内試験におけるデータの関係について検討する予定である。

#### 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) 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
- 4) 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
- 5) セメント協会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告、コンクリート専門委員会報告、F-18、1967.9
- 6) 吉田行、田口史雄：コンクリートの強度と耐久性に及ぼす養生条件の影響、寒地土木研究所月報、No.705、2012.2 吉田行、田口史雄：養生条件がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響について、土木学会第66回年次学術講演会講演概要集（平成23年度）、V-067、pp.133-134、2011.9
- 7) 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
- 8) 岸谷孝一、西澤紀昭ほか編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「中性化」、技報堂出版、pp.21-23、1986

## A STUDY ON THE PERFORMANCE-BASED QUALITY CONTROL AND INSPECTION METHODS FOR THE CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURES

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2010-2014

**Research Team** : Cold-Region Maintenance Engineering  
Research Group (Materials Research Team)  
Cold-Region Technology Development  
Coordination (Cold-Region Technology  
Promotion Division)

**Author** : TAGUCHI Fumio, BABA Michitaka, NAITO Isao,  
YOSHIDA Susumu, ENDO Hirotake,  
ISAMI Kazuhiro, YOKOYAMA Hiroyuki,  
MIYAMOTO Syuji, NAKAMURA Naohisa,  
MURANAKA Tomoyuki

**Abstract** : The purposes of this study included the development of a method to evaluate quality for the long-term performance of various functions after construction, the creation of construction procedure manuals applied to performance-based design, and through such activities, work toward the on-site introduction of new technologies, improved quality of structure and reduced life-cycle cost. In FY2011, in order to investigate the proper curing methods of concrete in cold regions, the influence of curing temperature and curing period on the strength and the durability of concrete was examined. Besides, in order to investigate the inspection testing methods of the performance of concrete structure directly using the constructed structure, the applicability of non-destructive methods such as air-permeability test and ultrasonic method was also examined. The results showed that the carbonation and chloride ion permeability of concrete depend on curing conditions and cement types. In addition, it was indicated that the quality of concrete can be evaluated using non-destructive testing methods such as ultrasonic method. However it was not cleared the relationship between test values measured by non-destructive methods and concrete durability, and more study is needed to clear them.

**Key words** : performance-based, construction, quality control, inspection, curing