

15.3 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、島多昭典、嶋田久俊、内藤 勲、
吉田 行、遠藤裕丈、水田真紀
川村浩二、宮本修司、佐藤博和、中村直久、
渋谷直生、渡邊尚宏

【要旨】

本研究は、性能規定に対応した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適切な施工標準を確立することによって確保し、更にそれらの技術を活用することで、現場での新技術の活用促進および構造物の品質向上を図り、長寿命化およびライフサイクルコストの縮減に資するものである。平成 24 年度は、性能規定に対応した施工マニュアル（受取検査、打設・養生方法など）の提案の一環として、養生温度および養生期間等の養生方法がコンクリートの含水率や乾燥収縮に及ぼす影響について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の検討については、超音波伝播速度測定、透気試験および電気抵抗率測定の適用性など品質検査技術に関する検討を行った。その結果、養生やコンクリートの含水率が特にコンクリート表層部の品質に影響し、材齢初期の湿潤養生期間を確保することで水分逸散が抑制され乾燥収縮抑制に寄与すること、および各種非破壊試験によりコンクリートの品質を評価できることを確認した。また、これまでの試験結果から、養生条件が異なる場合のコンクリートの性能を整理した。

キーワード：性能規定、施工、品質管理、検査、養生

1. はじめに

現状の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）の確立が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、平成 24 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て、寒冷地での適切な養

生方法について、養生温度および養生期間等の養生方法がコンクリートの含水率や乾燥収縮に及ぼす影響について検討を行った。また、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の検討として、超音波伝播速度測定、透気試験および電気抵抗率測定の適用性など品質検査技術に関する検討を行った。なお、本報告においては、養生条件が品質に及ぼす影響について、各種品質検査の測定値との比較によりその適用性について一体となって論じる必要性から、本報告書では、それらを関連づけた記述としている。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの配合と使用材料

試験で使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。

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 ³)				AE剤 (C×%)
					W	C	S	G	
N50	N	50	0.15	44	145	290	843	1077	0.003
B50	B						840	1074	0.005

15.3 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)

配合は過年度より検討を行っている一般的に用いられている水セメント比 50%、目標スランプ 8cm±2.5cm、目標空気量は4.5±1.0%とした。セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3,340cm²/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/cm³、比表面積 3,760cm²/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、苫小牧樽前産の除塩された海砂（密度

2.67g/cm³、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/cm³、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。

2.2 養生条件と供試体の概要

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、養生温度は一般的な 20℃と

表-2 養生条件と試験開始材齢

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、 静理性	表面・内部含水率、 超音波伝播速度	透気 係数	電気抵抗率 4プローブ法	乾燥 収縮	急速 塩分	細孔径 分布	示差熱 分析
普通	50%	20℃	湿布3日＋気中25日	φ100×200mm	3,28			3			28	28
				□100×400mm				3				
				□100×200mm、□220×100mm		3,14,21,28				28	28	
				壁200mm厚	28	3,14,21,28	28		28	28	28	
			湿布5日＋気中23日	φ100×200mm	5,28		5					
				□100×400mm				5				
				□100×200mm、□220×100mm		5,14,21,28				28	28	
				壁100mm厚		5,14,21,28	28			28	28	
				壁200mm厚		5,14,21,28	28		28	28	28	
				壁300mm厚		5,14,21,28	28			28	28	
			水中養生	φ100×200mm	28		5,7,14,28					
				□100×400mm				28				
		5℃	湿布5日＋気中23日	φ100×200mm	5,28		5					
				□100×400mm				5				
				□100×200mm、□220×100mm		5,14,21,28				28	28	
				壁100mm厚		5,14,21,28	28			28	28	
				壁200mm厚		5,14,21,28	28		28	28	28	
				壁300mm厚		5,14,21,28	28			28	28	
			湿布7日＋気中21日	φ100×200mm	7,28		7					
				□100×400mm				7				
			□100×200mm、□220×100mm		7,14,21,28				28	28		
			壁200mm厚		7,14,21,28	28		28	28	28		
			湿布9日＋気中19日	φ100×200mm	9,28		9					
				□100×400mm				9				
□100×200mm、□220×100mm		9,14,21,28				28	28					
水中28日	φ100×200mm	28		1,5,7,14,28								
	□100×400mm				28							
高炉	50%	20℃	湿布5日＋気中23日	φ100×200mm	5,28		5					
				□100×400mm				5				
				□100×200mm、□220×100mm		5,14,21,28				28	28	
				壁200mm厚	28	5,14,21,28	28		28	28	28	
			湿布7日＋気中21日	φ100×200mm	7,28		7					
				□100×400mm				7				
				□100×200mm、□220×100mm		7,14,21,28				28	28	
				壁100mm厚		7,14,21,28	28			28	28	
				壁200mm厚		7,14,21,28	28		28	28	28	
				壁300mm厚		7,14,21,28	28			28	28	
			水中養生	φ100×200mm	28		1,5,7,14,28					
				□100×400mm				28				
		5℃	湿布7日＋気中21日	φ100×200mm	7,28		7					
				□100×400mm				7				
				□100×200mm、□220×100mm		7,14,21,28				28	28	
				壁100mm厚		7,14,21,28	28			28	28	
				壁200mm厚		7,14,21,28	28		28	28	28	
				壁300mm厚		7,14,21,28	28			28	28	
			湿布9日＋気中19日	φ100×200mm	9,28		9					
				□100×400mm				9				
			□100×200mm、□220×100mm		9,14,21,28				28	28		
			湿布12日＋気中16日	φ100×200mm	12,28		12					
				□100×400mm				12				
				□100×200mm、□220×100mm		12,14,21,28				28	28	
				壁200mm厚		12,14,21,28	28		28	28	28	
			水中28日	φ100×200mm	28		1,5,7,14,28					
□100×400mm					28							

※表中の数値は、試験開始または実施材齢

低温養生を想定した 5℃の 2 水準、養生方法は実施工を想定して所定期間湿潤養生を行った後材齢 28 日まで気中養生を行う方法と、供試体の一部において所定期間水中養生を行う方法の 2 水準とした。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。また、湿潤養生後の気中養生については、20℃養生では、温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ に、5℃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、湿潤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。

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 600mm、高さ 600mm、厚さ（奥行き）200mm の木製型枠にコンクリートを 3 層に分けて打込み、各層とも棒状パイププレートによる締固めと、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。なお、一部の養生条件では、供試体の厚さによる品質検査測定への影響を検討するため、100mm および 300mm 厚さの供試体についても試験を実施した。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℃養生ではセメントの種類によらず材齢 1 日で、5℃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℃養生では材齢 3 日、5℃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。なお、壁状供試体の水分の変化が壁面（600×600mm 表と裏面の 2 面）からのみとなるように、型枠脱型後両側面および上部打設面をアルミテープでシールした。

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 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体を用いた。

(2) コンクリート内部の含水率および表面水分率測定

養生条件の違いがコンクリート表面（壁面）からの深さ方向の水分分布に及ぼす影響を確認するために、



写真-1 電気抵抗式モルタル・コンクリート水分計

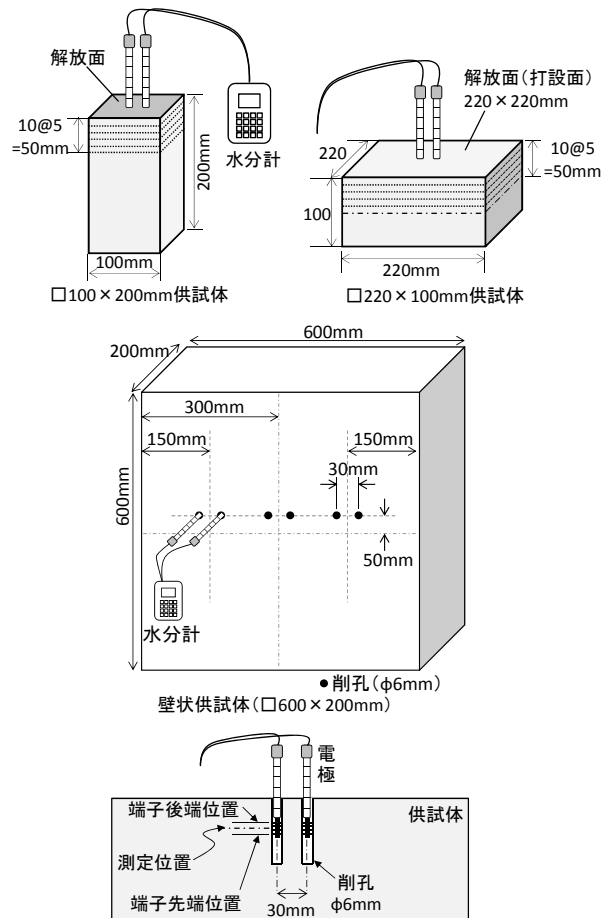


図-1 含水率の測定方法

写真-1 に示した電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計（コンクリートの含水率測定範囲：0～10%）を用いてコンクリートの含水率を測定した。図-1 に各供試体における含水率の測定方法を示す。深さ方向の含水率の測定は、 $\square 100 \times 200\text{mm}$ および $\square 220 \times 100\text{mm}$ の角柱供試体と壁状供試体で行った。角柱供試体では、実構造物における一面からの乾燥を模擬して、解放面以外はアルミテープでシールし、2 供試体の平均値で評価した。壁状供試体では、打設上面と供試体側面をアルミテープでシールし、型枠面（600×600mm）を解放

面（表と裏の2面）とし、表面の3箇所測定を行いそれらの平均値で評価した。なお、壁状供試体の一部には埋め込み型の水分計を供試体中央部に設置したため、これとの干渉を避けるため削孔高さは供試体高さの中間高さより50mm上方にずらした。測定は、事前準備としてコンクリート振動ドリルにより直径6mmの穴を30mm間隔で2箇所削孔し、削孔粉をエアスプレーで除去した後、所定深さに水分計のブラシ型センサを挿入して行った。なお、電極先端のブラシ型端子部分の長さは約20mmあり、本研究では、ブラシ型端子の先端と後端の中間位置が測定深さとなるようにした。測定間隔は、湿布養生終了直後、材齢14日、21日、28日とした。なお、既往の研究で、ドリルによる削孔時やエアスプレーによる削孔粉除去時にも含水率が若干低下することが報告されているが³⁾、本研究では、これらによる含水率の低下は小さいと考え、考察の対象とはしないこととし、削孔時の作業をできるだけ短時間で行うとともに、削孔後も測定直前まで湿布で覆うなどの処置をとった。また、次回測定時までの期間、削孔穴からの直接的な乾燥の影響を防ぐため、10×10mm程度のアルミテープを貼り付け穴を塞いだ。

(3) 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から深さ方向の品質を把握することを目的として、透過法による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。測定は、□100×200mmおよび□220×100mmの角柱供試体を用いて、□100×200mm供試体については解放面から深さ方向に10mm刻みで40mmまでと内部100mm位置で行い、□220×100mm供試体については、10mm刻みで90mm深さまで行い、それぞれ2供試体の平均値で評価した。

(4) 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^{4),5)}。透気係数の測定は、壁状供試体の材齢28日のみで行い、図-1に示した含水率を測定した削孔穴の上部3箇所とその裏面3箇所で行い、計6箇所の平均値により評価した。

(5) 電気抵抗率測定（4プローブ法）

養生条件がコンクリートの電気抵抗率に及ぼす影響を確認するために、非破壊で測定できる4プローブ法（Wenner法）⁶⁾によりコンクリートの電気抵抗率を測定した。測定は、φ100×200mm円柱供試体の側面で行い、水中養生槽から取り出して表面の水分を拭き取った表乾状態で測定を行った。なお、電極間隔はAASHTO

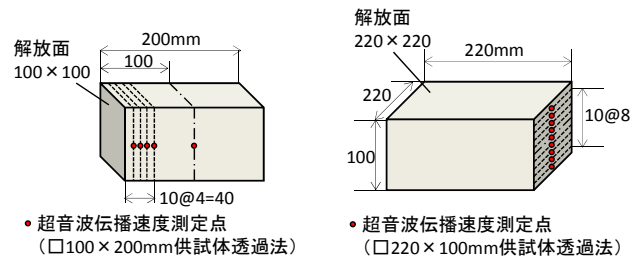


図-2 角柱供試体における超音波伝播速度の測点

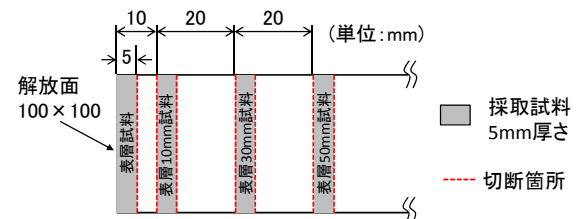


図-3 分析用試料採取位置（□10×20cm 供試体）

の規格⁷⁾を参考にして38mm間隔とした。

(6) 乾燥収縮試験

養生条件がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を確認するために、乾燥収縮試験を行った。試験は、JIS A 1129-3に準拠したダイヤルゲージ法で行った。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を用い、供試体両端面の中央にゲージプラグが配置されるようにあらかじめゲージプラグを型枠に設置し、コンクリートを打ち込んで成形した。湿潤養生直後に基長を測定し、各温湿度環境に設定した実験室に静置し、所定の期間毎に質量変化とひずみの測定を行った。

(7) 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）に準拠して行った。供試体は、壁状供試体から採取したφ100×200mmのコアの表層部50mmと中央部50mm試料をそれぞれ切り出して測定した。

(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⁸⁾。なお、細孔の測定は□10×20cm角柱供試体および壁状供試体で行い、角柱供試体からの試料採取は、図-3に示すように、表層部、表面から深さ10mm、30mm、50mmの各5mm厚さとした。また、壁状供試体については、水平方向にコアを抜き取り、コアの表層部（解放面）と表面から深さ50mm位置から試料を採取した。各部位から採取した試料は、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 (5×10^{-4} 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 μ 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-18⁹⁾ 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。

(9) 示差熱分析

コンクリートの水和状況と反応生成物を確認するために、示差熱分析を行った¹⁰⁾。なお、分析用試料は、細孔用の試料と同様の位置から採取した。測定はいずれも熱分析装置を用い、昇温速度 10°C/min で熱質量分析(TG-DTA)を行った。結合水量は 20°C と 800°C の質量減量より、Ca(OH)₂ 量は、450°C 付近の質量減少より、CaCO₃ 量は 650~800°C 付近の質量減量よりそれぞれ求めた。測定試料は、まず粗砕したコンクリートを鉄乳鉢中で粉碎しながら粗骨材を取り除き、残った試料をさらにアセトン中で軽く粉碎して、75 μ m 以下の粉末を採取した。試料は、この粉末をさらに窒素ガス雰囲気中で一定質量となるまで乾燥させたものを用いた。それぞれの測定量は、試料質量から骨材質量を除いた

硬化セメントペースト質量当たりの割合で表記した。なお骨材質量は、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 に準拠)により補正した。

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-3 に各養生条件における湿布養生終了直後の圧縮強度の関係を示す。なお、図中には、湿布養生と水中養生の違いや年度のばらつきを確認するために、H22 年度に実施した水中養生各材齢における強度や、H24 年度の水中養生材齢 28 日における強度も併記した。

いずれも湿潤養生期間(材齢)が長く、養生温度が高いほど強度は増加することが確認できた。また、湿布養生と水中養生を比べると、多少の上下はみられるものの、H22 と H24 年度の水中養生材齢 28 日強度でも同程度の差があることから、湿布養生と水中養生には実質的に差がないと判断できる。

図-4 は、所定期間湿布養生後に材齢 28 日まで気中養生を行った供試体の圧縮強度を示している。なお、比較のために水中養生材齢 28 日の強度も併記している。20°C 養生では、いずれのセメントでも材齢初期の湿布養生期間が長い方が圧縮強度は微増した。これに対して、5°C 養生ではセメントの種類により若干傾向が

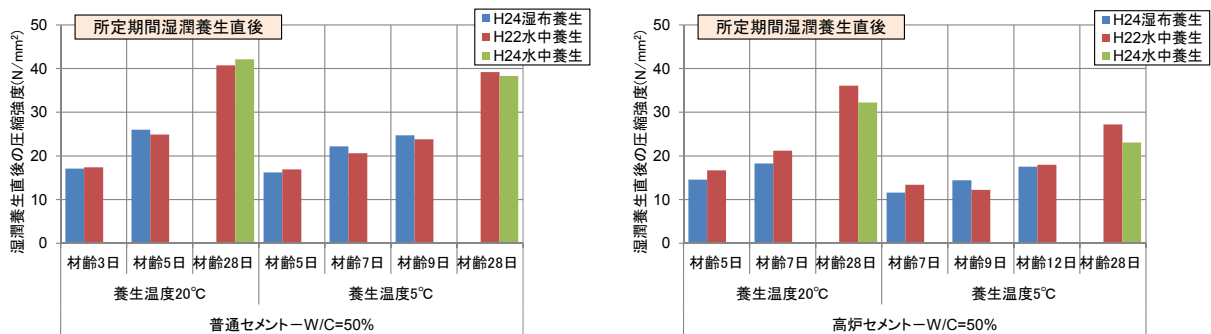


図-3 各養生条件における湿潤養生終了直後の圧縮強度

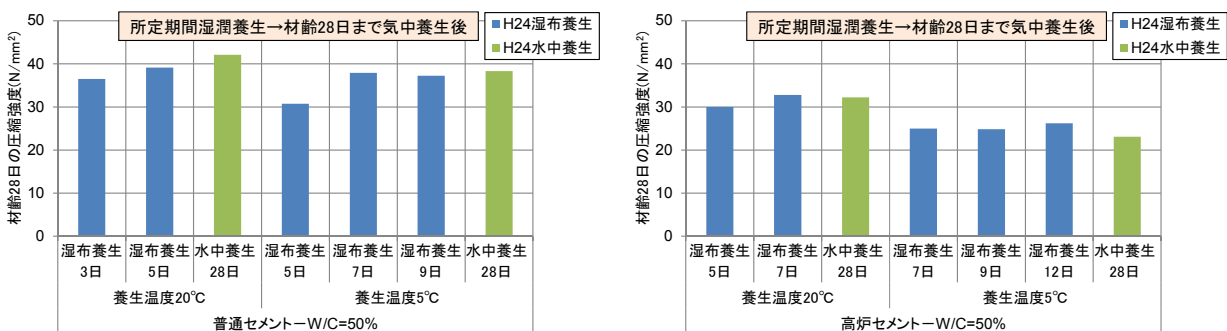


図-4 各養生条件における材齢 28 日の圧縮強度

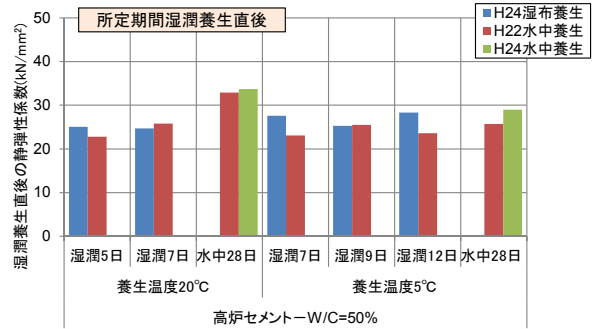
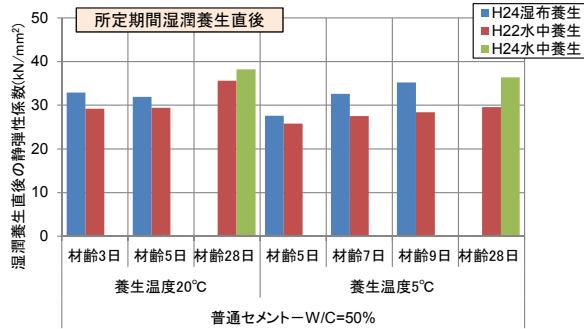


図-5 各養生条件における湿潤養生終了直後の静弾性係数

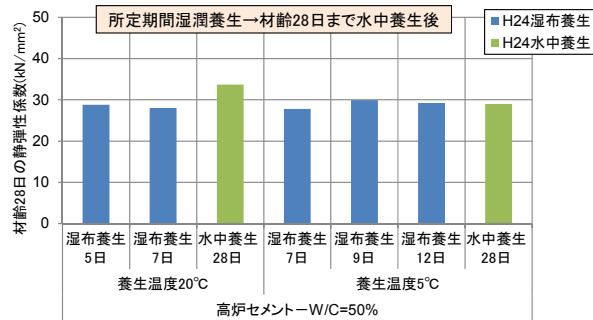
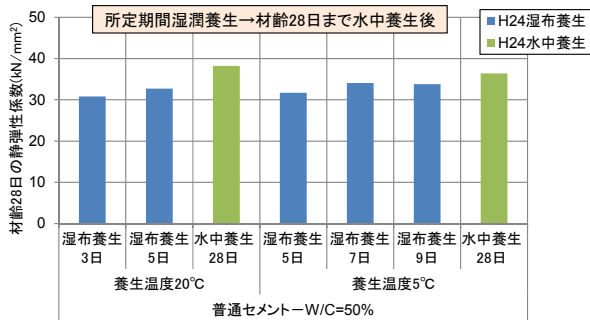


図-6 各養生条件における材齢 28 日の静弾性係数

異なった。普通セメントの 5°C養生では、初期の湿潤養生期間 5 日から 7 日で大きく増加したものの 7 日以降は増加が確認されず、水中養生や 20°C養生とほぼ同程度となった。一方、高炉セメントの 5°C養生では、初期の湿潤養生期間によらず材齢 28 日強度はほぼ同程度となったが、全体的に 20°C養生よりも 5N/mm²程度低かった。なお、水中養生以外の圧縮強度は、気中養生期間の乾燥の影響を受けており、高炉セメントの 5°C養生で気中養生した供試体の強度が水中養生よりも増加しているのは、供試体の乾燥による見かけの強度の増加¹¹⁾が低温下における強度の増加を上回ったためと考えられ、過年度の試験でも同様の傾向は確認されている。

以上から、圧縮強度は昨年までの結果と同様¹²⁾、養生温度や湿潤養生期間により異なり、初期の湿潤養生期間を適切に確保することで水中養生材齢 28 日と同程度の強度を確保できることが確認できた。ただし、気中養生後の強度は乾燥による見かけの強度増加の影響を含んだ値であり、気中養生条件下ではそれ以上の強度増加は見込めないため、水中養生を継続した場合の長期的な強度発現を保証するものではない。

3.2 静弾性係数に及ぼす養生条件の影響

図-5 と図-6 に各養生条件における湿潤養生終了直後と材齢 28 日の静弾性係数をそれぞれ示す。

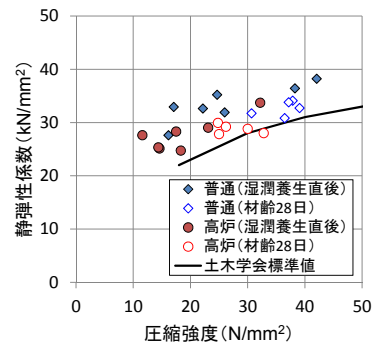


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

普通セメントの 5°C養生では、湿潤養生終了直後の静弾性係数が材齢の進行（湿潤養生期間の増加）とともに微増したが、それ以外の条件では初期の湿潤養生期間の影響は明確ではない。また、H24 湿布養生より H22 水中養生の方が静弾性係数は小さいが、H22 と H24 の水中養生材齢 28 日における弾性係数の差も同程度であるため、圧縮強度と同様、水中養生と湿布養生では実質的な差は無いと言える。なお、図-4 に示したように、圧縮強度では湿潤養生期間を適切に確保することで水中養生 28 日と同程度の強度が確保されたが、静弾性係数は図-6 に示したように高炉セメントの 5°C養生を除き、水中養生を若干下回る傾向がみられた。

なお、図-7 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示すが、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¹³⁾と概ね対応していることを確認した。

3.3 コンクリート内部の含水率

(1) □100×200mm 角柱供試体の含水率変化

図-8 に□100×200mm 供試体におけるコンクリート表面からの深さと含水率の変化を示す。凡例の湿潤期間とは、材齢初期に実施した湿潤養生期間を示している。したがって、湿潤養生終了直後の測定時の材齢も、この湿潤期間と同じである。

いずれのケースも、湿潤養生終了直後の含水率は高く、以降は気中養生の影響により含水率が低下し、コンクリート表面に近いほど含水率の低下が大きいことがわかる。また、気中養生期間が長くなるほど、コンクリート内部の含水率も徐々に低下する傾向も確認できる。セメントの種類で比較すると、湿潤養生終了直後の含水率は高炉セメント(図-8 右列)の方が高いが、それ以降は高炉セメントの方が普通セメント(図-8 左列)よりも含水率の低下が大きい。また、養生温度の違いでは、5℃養生よりも20℃養生の方が乾燥の影響を受けていない湿潤養生終了直後から含水率が低い傾向がみられ、乾燥が進むと、5℃養生の方が若干含水率

の低下が大きい傾向が確認された。これらの傾向については、セメントの種類によるコンクリートの水和反応の速度の違いやコンクリートの水和反応の進行に伴う毛細管水の減少と、気中養生期間の乾燥の影響を考慮することにより、以下のように考えられる。本研究で使用した含水率計により測定される含水率は、コンクリートの細孔(毛細管)に存在する水分量との相関が高いものである。一方、コンクリート中の毛細管水は、水和反応の進行に伴う細孔構造の緻密化により徐々に減少するため、水和が進行したコンクリートほど含水率は低下すると考えられる。これにより、養生温度が高い場合や普通セメントを用いたコンクリートは、養生温度が低い場合や高炉セメントを用いたコンクリートよりも水和反応が早いため、細孔構造が早期に緻密になり、乾燥の影響を受けていない場合でも含水率が低下したと考えられる。他方、湿潤養生後は乾燥の影響を受けるため、水和反応が遅く細孔構造が粗いコンクリートほどその影響は大きくなる。このため、高炉セメントを用いたコンクリートや、養生温度が低く湿潤養生期間が短いものほど含水率の低下が大きくなったと考えられる。

(2) □220×100mm 角柱供試体の含水率変化

図-9 に□220×100mm 供試体におけるコンクリート

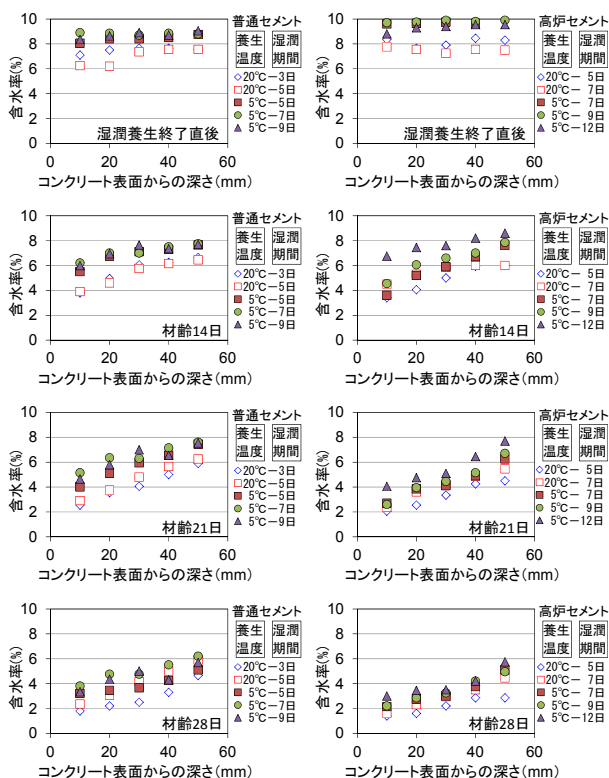


図-8 コンクリート表面からの深さと含水率変化
(□100×200mm 供試体)

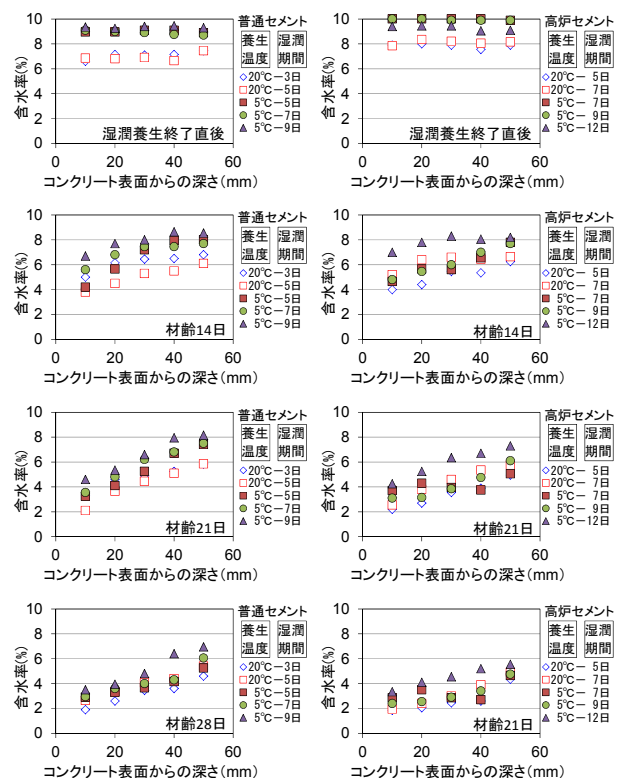


図-9 コンクリート表面からの深さと含水率変化
(□220×100mm 供試体)

15.3 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)

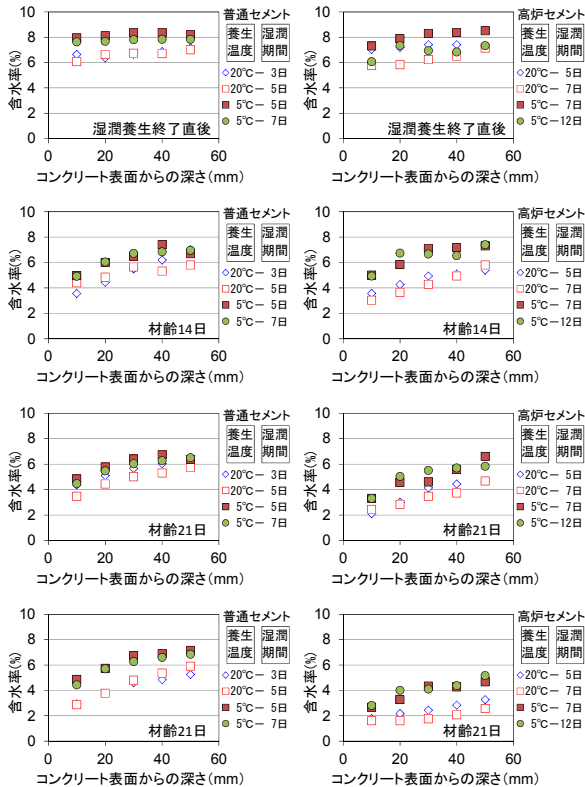


図-10 コンクリート表面からの深さと含水率変化
(□600×200mm 壁状供試体)

表面からの深さと含水率の変化を示す。なお、高炉セメントの5℃養生、湿潤養生期間7日と9日の湿潤養生終了直後において、含水率が測定上限値を超え測定不能となったことから、ここでは、測定上限値の10%とした。

図-1 に示したように、□100×200mm 供試体よりも乾燥の影響を受ける解放面の面積が220×220mmと大きい、含水率変化は□100×200mm とほぼ同様の傾向が認められた。

(3) 壁状供試体の含水率変化

図-10 に壁状供試体におけるコンクリート表面（解放面）からの深さと含水率の変化を示す。なお、供試体厚さはいずれも同一（200mm）のケースで比較した。

基本的には、角柱供試体と同様に、湿潤養生終了直後の含水率は高く、気中養生の影響により含水率は低下し、特にコンクリート表面に近いほど含水率の低下が大きいことが確認できた。他方、前述の角柱供試体では、養生温度が高く湿潤養生期間が長いほど材齢初期の含水率が比較的小さく、気中養生期間が長くなるにしたがい養生温度が低く湿潤養生期間が短いほど含水率が低下する傾向がみられたが、壁状供試体では、5℃養生よりも20℃養生の方がいずれの材齢において

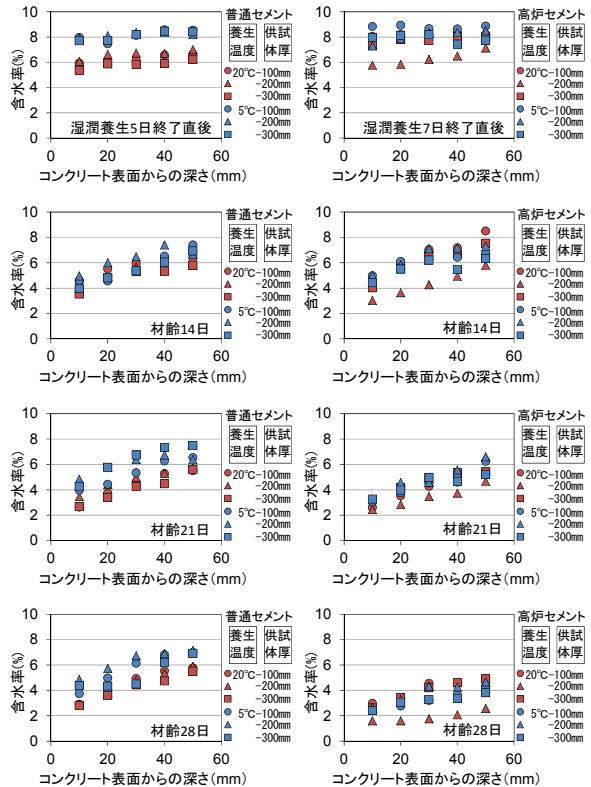


図-11 含水率変化に供試体厚さの影響
(□600×100～300mm 壁状供試体)

も含水率は小さく、湿潤養生期間の違いについては明確な差は確認できなかった。これについては、実構造物を想定した壁状供試体の場合、角柱供試体よりも解放面積が大きい（片面600×600mm）ことに加えて解放面が表裏2面であることが影響している可能性があるが、本研究の範囲内では、その原因については特定できなかった。

図-11 に含水率変化に及ぼす壁状供試体の厚さの影響を示す。全体としては、20℃養生の方が5℃養生よりも含水率が若干小さい傾向が確認できるが、供試体厚さの違いによる明確な傾向は確認できなかった。

以上から、コンクリートの表面から深さ方向の含水率の変化は、セメントの種類、養生温度、湿潤および気中養生期間により異なり、コンクリート表面に近いほど乾燥の影響を受けやすいため含水率の変化が大きいことや、気中養生期間が長期になるにしたがってコンクリート内部の含水率も徐々に低下することを確認した。このことから、表層部は乾燥の影響を受けやすく、内部よりも品質が低下しているものと推察される。

3.4 超音波伝播速度（透過法）

(1) □100×200mm 供試体の超音波伝播速度の変化

図-12 に□100×200mm 供試体における超音波伝播速

15.3 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)

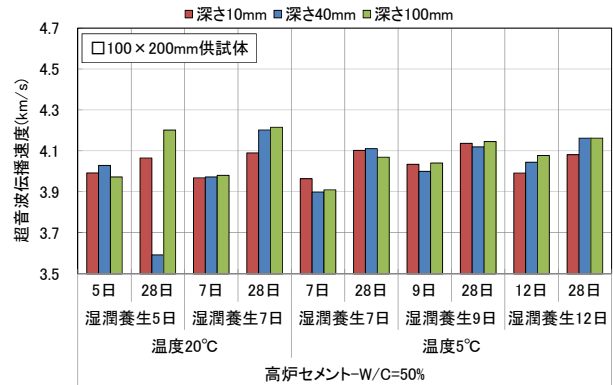
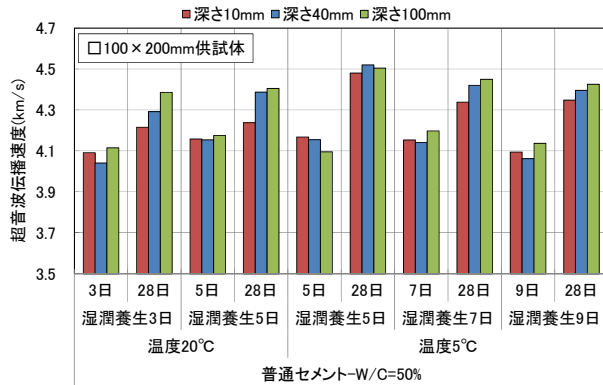


図-12 コンクリート表面からの深さ方向の超音波伝播速度（透過法、□100×200mm 供試体）

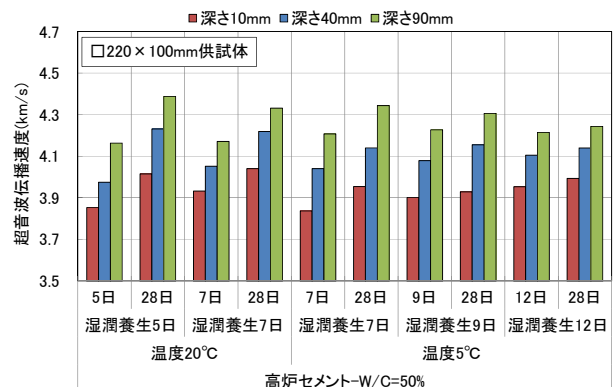
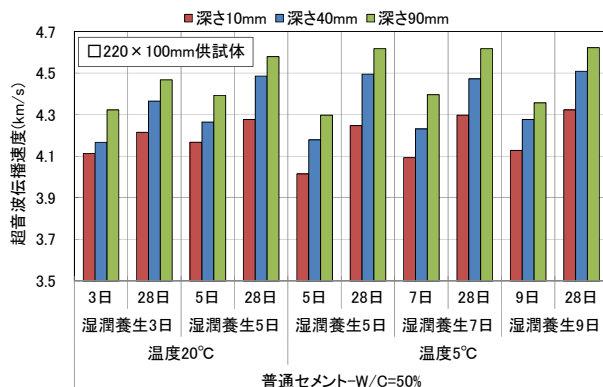


図-13 コンクリート表面からの深さ方向の超音波伝播速度（透過法、□220×100mm 供試体）

度（透過法）を示す。図中の水平軸ラベルの日数は、超音波測定を実施した材齢であり、同様に表示している湿潤養生日数と同じものについては、湿潤養生終了直後の乾燥の影響を受けていない状態で測定した値である。ラベル 28 日は所定期間湿潤養生後に材齢 28 日まで気中養生を行い測定した値である。また、凡例の深さとは、コンクリート表面（解放面）からの深さ方向の測定位置を示している。なお、測定位置は図-2 に示したとおりであるが、ここでは、表面から 10mm、40mm、90 または 100mm を抽出して評価した。

普通セメント（左図）の場合、湿潤養生終了直後は、深さ方向の超音波伝播速度に差はみられなかった。これに対し、気中養生終了時の 28 日では、湿潤養生終了直後よりも全体に速度が増加したものの、表面と深さ方向で速度差がみられ、表層に近いほど速度は遅かった。このことから、強度増進に伴い超音波伝播速度も増加したが、乾燥の影響を受けやすいコンクリート表層部の方が内部よりも伸びが小さく、品質が低下していると判定できる。しかし、前節で乾燥の影響を受けやすい表面に近いほど含水率が低下していることを確認しており、超音波伝播速度は含水率が高いほど速く

なることから、含水率の影響もを受けていると考えられる¹⁴⁾。このため、コンクリート品質そのものを精度良く評価するには、含水の影響を排除する必要がある。

一方、高炉セメント（右図）の場合、20°C養生については普通セメントと同様の傾向がみられるが、5°C養生では、湿潤養生終了直後よりも材齢 28 日で超音波伝播速度は増加しているものの、表層部と内部で明確な速度差は確認できなかった。これは、前節でも確認したように、高炉セメントの 5°C養生は水和反応が遅いため比較的粗大な細孔が多く、結果として深部においても水分が逸散しやすくなり、深部の品質がそれほど向上しなかったため、表層部との差が明確にならなかったことが考えられる。

(2) □220×100mm 供試体の超音波伝播速度の変化

図-13 に□220×100mm におけるコンクリート表面からの深さ方向の超音波伝播速度（透過法）を示す。

□220×100mm 供試体では、いずれも乾燥の影響を受けていない湿潤養生終了直後から表層部と内部で速度差がみられ、表面に近いほど速度は低下していた。これは、図-2 に示したように、この供試体の解放面が打設面のため、表面に近いほどブリーディング等の影響

を受けたことによると考えられる。

また、材齢 28 日における超音波伝播速度は、高炉セメントの 5℃養生ではその差が小さいものの、いずれも強度増進に伴い湿潤養生終了直後より増加した。なお、表面に近いほど速度が低下する傾向は湿潤養生直後と同様だったが、詳細にみると乾燥の影響を受けやすい深さ 10mm とそれ以深の速度との差が湿潤養生直後よりも拡大していた。このことから、超音波伝播速度により、ブリーディング等による品質差や養生の影響をある程度評価できることが明らかになった。

以上から、透過法による超音波試験によりコンクリートの品質を評価することができると考えられる。ただし、コンクリートの品質を精度良く評価するには、超音波伝播速度に及ぼす含水率の影響を排除する必要がある。

3.5 透気係数に及ぼす養生の影響

図-14 に透気係数に及ぼす養生の影響を示す。図中水平軸ラベルの湿潤日数とは、材齢初期に行った湿布養生日数を示しており、透気係数の測定は所定期間湿潤養生した後に材齢 28 日まで気中養生を行った時点で実施した。なお、透気試験は壁状供試体で行っており、ここでは、供試体厚さを同一（200mm）としたケースで比較している。

養生温度で比べると、20℃養生の方が 5℃養生よりも透気係数は小さい傾向にある。また、湿潤養生期間では、普通セメントの 20℃養生を除くと、差は小さいものの湿潤養生期間が長い方が透気係数は小さい。このように、透気係数により養生がコンクリートの品質に及ぼす影響をある程度評価できる可能性がある結果が得られた。一方、セメントの種類で比較すると、同じ養生温度では、セメントの種類によらず透気係数は同程度か、むしろ 5℃養生では高炉セメントの方が普通セメントよりも透気係数が小さく、圧縮強度とは異なる傾向であった。このことは、透気試験によって、圧縮強度では評価できない耐久性を評価できる可能性

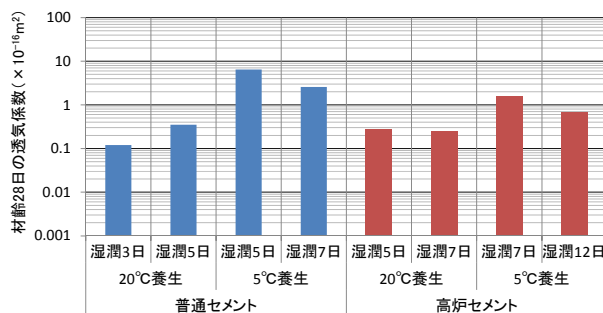


図-14 透気係数に及ぼす養生の影響

があるが、一方で、今回の測定値は6測点の平均値であり、実際の測定値にはバラツキもみられていることから、測定時の適切なサンプル数等、誤差の影響などの課題について検討する必要がある。

図-15 に透気係数に及ぼす供試体厚さとコンクリート表面から深さ 10mm における含水率の影響を示す。

20℃養生の方が 5℃養生より透気係数が小さいという養生温度との関係については同様に確認できるが、高炉セメントの 20℃養生を除くと、全体としては、供試体が厚くなるほど透気係数が大きくなる傾向があり、特に普通セメントの 5℃養生において顕著であった。一般的に、透気係数はコンクリートの含水率の影響を受け、含水率が高いほど空気は通りにくくなるため透気係数は小さくなる¹⁵⁾。図-15 には、透気係数に及ぼす影響が特に大きいと考えられる、壁状供試体表層部（表面から深さ 10mm 位置）の含水率も示しているが、高炉セメントでは含水率はほぼ一定であり、普通セメントでも、20℃養生ではほぼ一定のため、これらのケースでは含水率の影響はほとんど無いと考えられる。しかし、普通セメントの 5℃養生では、供試体が厚いほど含水率が高い傾向があるが、透気係数も増加しており、上述した含水率と透気係数の一般的な関係とは逆の傾向を示した。このことから、気中養生 21 日後の材齢 28 日における比較の範囲では、コンクリートの含水率は透気係数にほとんど影響していない可能性があるが、供試体厚いほど透気係数が大きくなる理由は不明であり、今後測定データのバラツキ等を含めて検討する必要がある。

図-16 は H23 と H24 年度の試験結果を比較したものである。これによると、上述した、養生温度、湿潤養生期間、セメントの種類の影響を必ずしも統一的に説明できないことがわかる。また、測定で使用した透気試験機自体の温度適用範囲が 5℃～30℃とされており、本研究で検討した 5℃養生のケースは適用範囲の最低値ではあるものの、実際の測定時には異常値が何度か

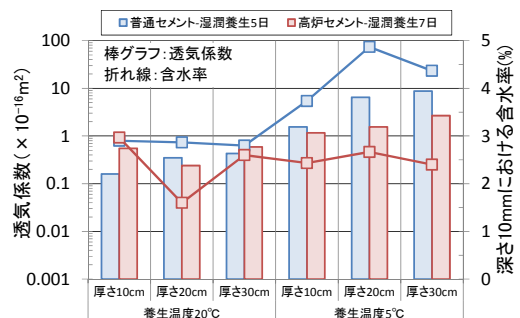


図-15 透気係数に及ぼす供試体厚さと含水率の影響

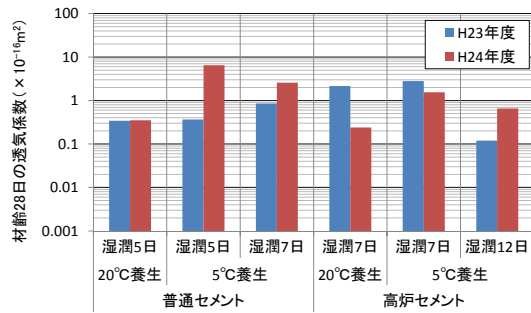


図-16 年度毎の透気係数の比較

計測されていたことから、測定誤差に加えて、試験機自体の測定環境適用範囲についても課題がある。

3.6 4プローブ法によるコンクリートの電気抵抗

図-17に4プローブ法によるコンクリートの電気抵抗値と材齢の関係を示す。

材齢の進行とともにコンクリート供試体の電気抵抗値は増加した。セメントの種類で比較すると、普通セメントの方が高炉セメントよりも電気抵抗値が大きい傾向があるが、材齢の進行とともにその差は小さくなり、20℃養生では材齢28日で逆転した。また、養生温度で比較すると、普通セメントは材齢初期で20℃養生の方が5℃養生よりも抵抗は大きかったが、徐々に差は無くなり、材齢14日以降はほぼ同程度だった。高炉セメントは、材齢28日までの範囲内では、20℃養生のほうが5℃養生よりも電気抵抗は大きかった。これらの傾向は、水中養生を実施した場合の強度発現の傾向

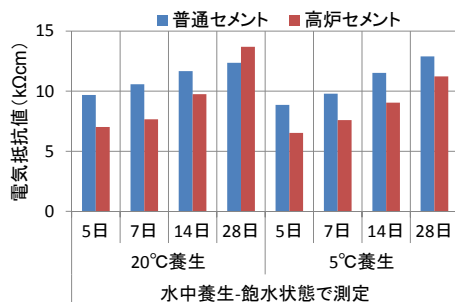


図-17 電気抵抗値と材齢の関係 (4プローブ法)

と同様である。

図-18に電気抵抗値に及ぼす養生方法の影響として、湿布養生終了時の測定値と、同一材齢で測定した水中養生供試体の値を比較したものを示す。

両者に差は無く、この結果は圧縮強度でも湿布養生と水中養生に差はみられなかったことから、湿布養生と水中養生は同様の効果があることが確認できた。なお、電気抵抗値は、図-17に示したように、材齢の進行、すなわち水和反応の進行に伴い増加するため、コンクリートの品質を評価する一つの方法として期待でき、コンクリートの含水率や塩分浸透抵抗性と関連づけて評価する研究も行われていることから¹⁶⁾、今後耐久性との関係について検討を行う。なお、実構造物への適用に当たっては、コンクリートの含水率が電気抵抗値に大きく影響することから、含水率の影響や測定条件等を整理する必要がある。

3.7 乾燥収縮に及ぼす養生の影響

図-19に20℃養生、図-20に5℃養生における乾燥に伴うひずみと乾燥期間の関係をそれぞれ示す。なお凡例は湿布あるいは水中養生期間を示しており、各供試体は、所定期間の湿布あるいは水中養生直後から乾燥を開始している。

20℃養生の場合、普通セメントでは、湿布養生3日後から乾燥を開始した供試体の乾燥収縮ひずみが最大となったが、湿布養生5日と水中養生28日とでは大きな差がみられず、乾燥期間91日のひずみは概ね500μ

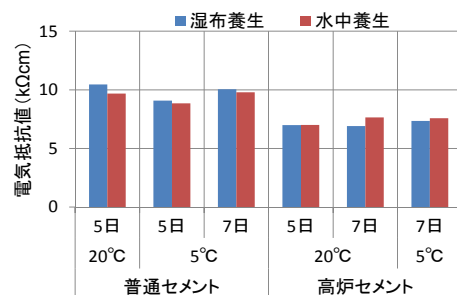


図-18 電気抵抗値に及ぼす養生方法の影響

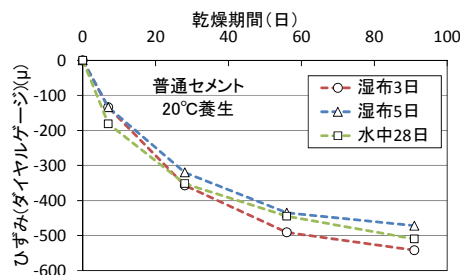
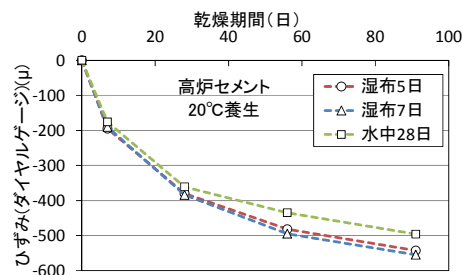


図-19 乾燥に伴うひずみと乾燥期間の関係 (20℃養生)



15.3 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)

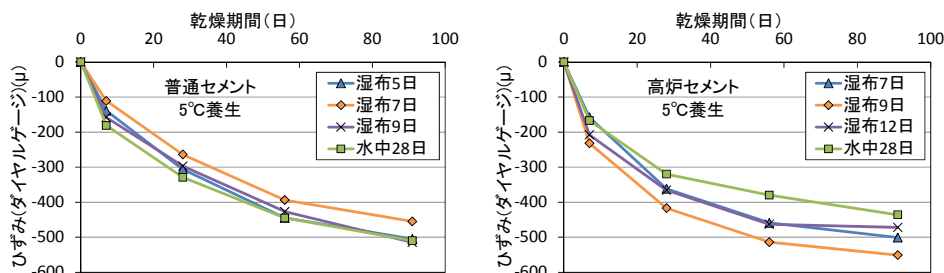


図-20 乾燥に伴うひずみと乾燥期間の関係 (5℃養生)

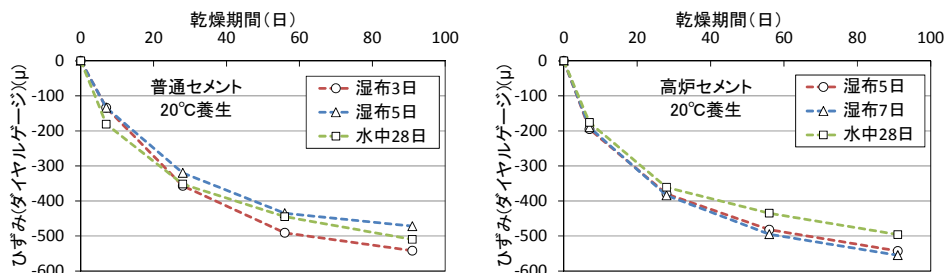


図-21 乾燥収縮ひずみ質量変化率の関係 (20℃養生)

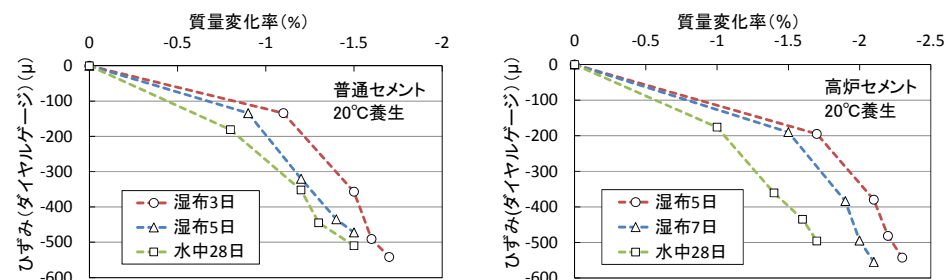


図-22 乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係 (5℃養生)

程度となり、初期養生の違いによるひずみ差は 60μ 程度だった。一方、高炉セメントでは、湿布養生期間で差はないが水中養生 28 日の供試体は乾燥期間 28 日以降の収縮量が 40μ 程度低減した。なお、セメントの種類で比較すると、乾燥期間 28 日までは高炉セメントの方が 50μ 程度ひずみは大きくなる傾向があるが、それ以降はセメントの種類による差はほとんどみられなかった。

これに対して、5℃養生の場合、普通セメントでは、湿布養生 7 日の供試体のひずみが他の養生条件よりも 50μ 程度小さかったが、その他の供試体では初期養生の違いによるひずみ差はほとんど確認できなかった。一方、高炉セメントでは、水中養生 28 日のひずみが最小 (約 440μ) となり、湿布 7 日と 12 日が同程度 (約 500μ) で、湿布養生 9 日が最大 (約 550μ) となった。このように、乾燥収縮ひずみは、普通セメントでは初

期養生の影響が比較的小さいものの、高炉セメントの低温養生では材齢初期の養生が乾燥収縮ひずみに与える影響が大きいことが確認できた。しかし、乾燥収縮ひずみと材齢初期の湿潤養生 (ここでは湿布あるいは水中養生を意味する) 期間等の間に一意的な傾向は確認できなかった。

図-21 に 20℃養生、図-22 に 5℃養生における乾燥収縮ひずみと質量変化率の関係をそれぞれ示す。

いずれも質量変化率の増加に伴い、収縮ひずみは増大している。20℃養生では、セメントの種類によらず、材齢初期の湿布養生期間が長いほど質量変化が抑制され、水中養生 28 日は最も質量変化が小さいが、同時に、質量変化率が同じ場合、湿潤養生期間が長いほどひずみが大きくなる傾向が確認できる。これについて、乾燥収縮のメカニズムとして比較的好く用いられている毛細管張力説によると¹⁷⁾、乾燥により細孔内の水が逸

散する際に生じる毛細管張力は細孔径が小さいほど大きくなるとされている。このため、細孔が緻密な配合ほど収縮ひずみは大きくなると考えられる。一方、細孔が緻密なほど細孔内の水は逸散しにくくなるため、収縮ひずみは逸散する水の量も考慮する必要がある。本試験結果は、上述のように、材齢初期の湿潤養生期間が長いほどコンクリートの細孔組織が緻密になり質量変化は小さくなるとともに、湿潤養生期間が長いほど質量変化率あたりのひずみは増大しており、上記メカニズムと符合している。また、本研究では、乾燥収縮ひずみと材齢初期の湿潤養生期間等に一意的な傾向はみられなかったが、これは湿潤養生による細孔組織の緻密化に伴い水分が逸散しにくくなるプラスの効果と、緻密化に伴う毛細管張力の増大により収縮が大きくなるマイナスの影響が相互に作用したためと考えられる。

以上から、初期の湿潤養生期間が長いほどコンクリートの水分逸散を抑制できることが明らかとなり、乾燥収縮を抑制する観点からは湿潤養生期間の延長は有効であるが、実際に生じる乾燥収縮量は細孔の緻密化に伴う毛細管張力の影響を受けるため、乾燥収縮によるひび割れ抵抗性の評価については、さらに検討する必要がある。

3.8 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-23 壁状供試体から水平方向に採取したコア試料の塩化物イオンの実効拡散係数を示す。横軸ラベルの日数は湿潤養生日数を示しており、実効拡散係数はいずれもここに示した期間湿潤養生を行った後、各養生温湿度条件下で材齢 28 日まで気中養生を行ってから測定した値である。なお、凡例の表面とはコア試料の表面部（解放面）、内部とはコア試料の中間（壁厚の中間位置）より採取したものを示している。

養生の影響では、高炉セメントの 5℃養生では差は無く、これを除くと湿潤養生日数が長いほど実効拡散係数は大きくなっており、一般的な傾向とは逆の傾向を示した。養生温度の違いでは、高炉セメントの 5℃養生では 20℃養生より実効拡散係数が小さいという逆の傾向を示したが、それ以外では明確な傾向は確認できなかった。

また、実効拡散係数は、表面部よりも内部試料の方が大きい結果となった。昨年度も同様の傾向が確認されており、壁供試体作製時に型枠面に行ったスケーリングの影響や型枠表面に塗布したコンクリート剥離剤の影響が考えられたことから、今年度の供試体作製時

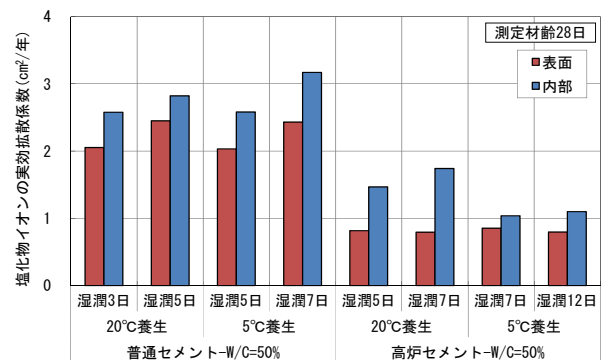


図-23 塩化物イオンの実効拡散係数

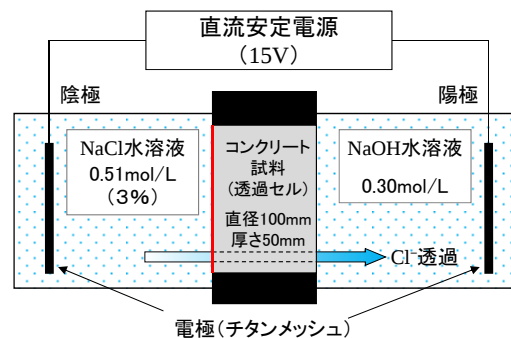


図-24 実効拡散係数試験装置の概要

には、昨年と同様に型枠面にスケーリングは行ったものの、剥離剤を使用しないで供試体を作製した。しかし、結果として昨年度と同様の傾向が得られたことから、剥離剤の影響ではないことは判明した。また、スケーリングは、型枠面に接するコンクリート表面の比較的粗大な気泡等を除去する目的で行うものであり、コンクリートの細孔組織の緻密化には大きく影響しないと考えられる。

一方、後述する熱分析試験の結果から、コンクリート表面は内部よりも中性化が生じていることが明らかとなり、コンクリートが中性化した場合、炭酸カルシウム (CaCO_3) の生成により細孔は緻密になる場合があることが知られている¹⁸⁾。塩化物イオンの実効拡散係数は、図-24 に示すように、中央に設置したコンクリート試料（直径 100mm、厚さ 50mm）に対して電気泳動により強制的に塩化物イオンを透過させることにより測定される。本研究における表面部の試料は、表面が陰極側になるように設置して塩化物イオンを透過させているため、表面部の中性化により細孔が緻密になったことが影響して、実効拡散係数が小さくなった可能性が考えられる。しかし、後述する細孔径分布測定では、表面部よりも内部の方が緻密になっている結果も得られており、表面部が中性化により緻密になっていると

した仮説と矛盾している。これについては、細孔測定用の表面部の試料は、表面から深さ 5mm までの表面部を 5mm 角に切り出し、表面を含む 6 面から水銀を圧入して測定するため、中性化していない面からは水銀が入り込むため、中性化していない部分では表層の方が内部よりも乾燥の影響などにより細孔容積が多くなった可能性がある。これらによれば、湿潤養生期間が短いほど表面部は中性化しやすくなり、結果として実効拡散係数が小さくなることが予測され、この傾向は本試験結果とも一致する。しかしながら、養生温度が高いほど、かつ湿潤養生期間が長いほど実効拡散係数が大きくなる傾向は、中性化の影響がほとんど無い内部でも同様であり、これらのメカニズムだけでは全てを説明できないため、さらに詳細な検討が必要である。

3.9 コンクリートの細孔径分布

(1) □100×200mm 供試体の細孔径分布

図-25 に角柱供試体の表層から深さ方向における細孔径分布を示す。上段は普通セメントの各養生条件下における細孔径分布を、下段は高炉セメントの各養生条件下における細孔径分布を示しており、いずれも所定期間湿布養生後に各温湿度環境下で材齢 28 日まで気中養生してから測定したものである。なお、普通セメントの 20℃湿布 3 日養生（上段左図）の深さ 30mm の測定値が異常値のため、記載していない。

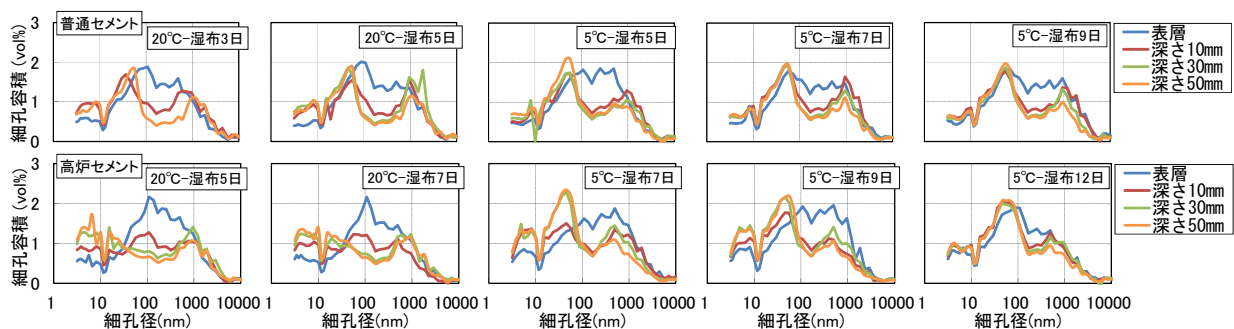


図-25 角柱供試体の表層から深さ方向における細孔径分布（□100×200mm 供試体）

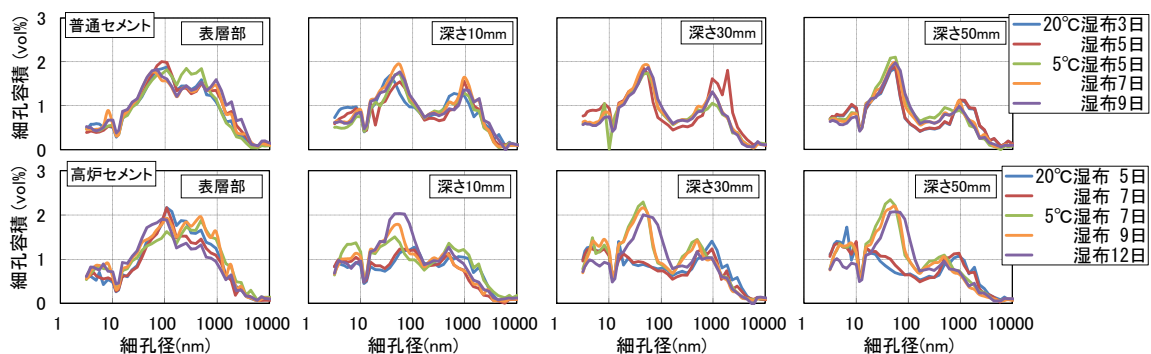


図-26 試料採取位置毎の細孔構造に及ぼす養生の影響

上段の普通セメントに着目すると、いずれの養生条件においても表層試料の細孔容積が細孔径 50nm～1000nm（1μm）付近の領域で多いことがわかる。既往の研究では¹⁹⁾、細孔径 50nm 以上の毛細管空隙量は強度やイオン透過性に影響し、さらに細孔径 100nm 以上の粗大な毛細管空隙量は透気・透水性、凍結融解抵抗性に影響するとされていることから、本測定による表層品質の差が耐久性に影響を及ぼしていると考えられる。また、深さ 10mm の試料も、深さ 30mm 以深と比べて細孔容積が若干多くなる傾向がみられ、特に 20℃養生では、材齢初期の湿布養生期間が長いほど細孔容積は減少しており、養生の影響が確認された。他方、深さ 30mm と 50mm ではほとんど差がみられなかった。

一方、下段に示した高炉セメントでも基本的に普通セメントと同様の傾向があり、表層の細孔容積は多いことが確認でき、特に 100nm～1μm 付近の細孔容積が多い傾向がある。また、深さ 30mm 以深ではほとんど差が無く、20℃養生では細孔容積が大きく減少していた。

以上から、3.3 節で述べたように、コンクリートの表層部は気中養生期間における含水率低下の影響を受け、内部よりも品質が低下していることが確認された。

図-26 に試料採取位置毎の細孔構造に及ぼす養生の影響を示す。上段は普通セメントを、下段は高炉セメントの測定結果を示している。

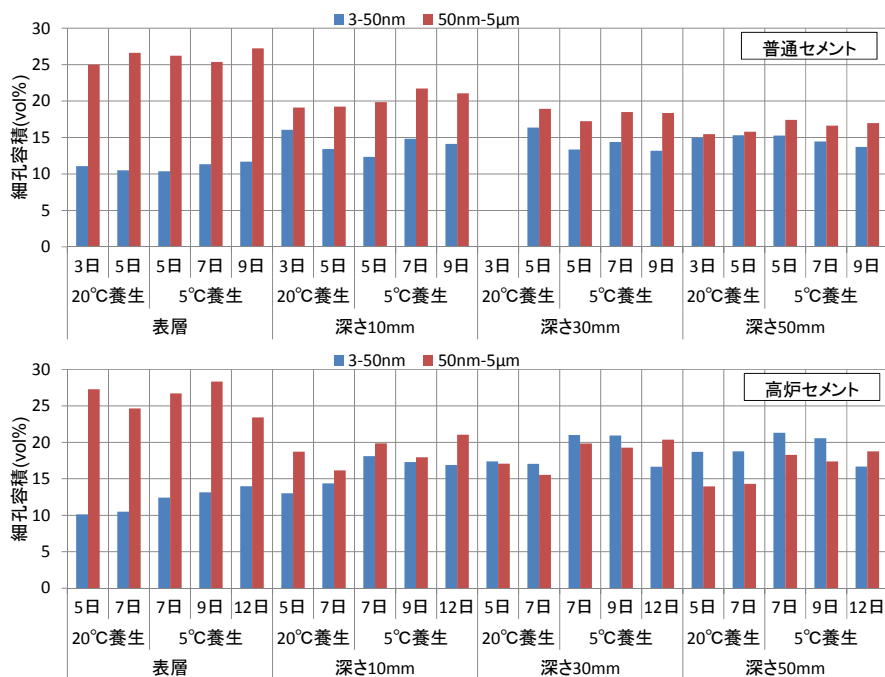


図-27 細孔径 50nm 前後の範囲の細孔容積の総和

普通セメントでは、いずれの試料採取位置についても養生温度および湿布養生期間の違いによる明確な差はみられなかった。これに対して、高炉セメントでは、表層部で養生温度が高く材齢初期の湿布養生期間が長いほど、細孔径 100nm $\sim$ 1 μ m 付近の領域の細孔容積が減少する傾向がみられた。また、深さ 10mm 以深では、養生温度が高いほど細孔容積は大きく減少することが確認できたが、材齢初期の湿布養生期間の違いでは明確な傾向は確認できなかった。

図-27 に既往の研究¹⁹⁾から耐久性に影響すると思われる細孔径 50nm $\sim$ 5 μ m の領域の細孔容積の総和と、細孔径 50nm より小さい微細孔領域の細孔容積の総和を示す。上段の図は普通セメントを、下段は高炉セメントを示している。

50nm 以上の比較的粗大な領域の細孔容積は、表層部で最も多く、深さ 10mm で大きく減少し、普通セメントではさらに深さ方向にわずかに減少したが、高炉セメントでは深さ 10mm 以深では大きな差がなかった。これに対して、50nm より小径の細孔は内部の方が多い傾向があり、特に高炉セメントでは表層と深さ 10mm 以深との差が顕著に認められた。

養生の影響をみると、普通セメントでは、いずれの試料採取箇所においても養生温度や材齢初期の湿布養生期間の違いによる明確な差は確認できなかった。一方、高炉セメントでは、養生温度が高い方が 50nm 以上の細孔は減少し、20°C 養生では材齢初期の湿布養生期

間が長いほどさらに減少したが、5°C 養生では湿布養生期間の違いによる明確な差は確認できなかった。

(2) 壁状供試体の細孔容積

図-28 に厚さ 20cm の壁状供試体から採取したコアの表層部（解放面）と内部（表面から 50mm 位置）の細孔径分布を示す。

いずれも表層部の方が内部よりも細孔容積は多く、表層部においては材齢初期の湿潤養生期間が長いほど細孔径 50nm $\sim$ 1 μ m 付近の細孔容積が若干減少する傾向がみられた。他方、内部については湿潤養生期間の影響はほとんど確認できなかった。また、高炉セメントは養生温度の影響が大きく、特に内部の細孔容積が大きく減少した。これらの傾向は、角柱供試体と同様であり、供試体の寸法や解放面の面積が異なることによる影響は確認できなかった。

図-29 に細孔構造に与える壁状供試体の厚さの影響を示す。図-11 に示した供試体厚さと含水率変化の関係と同様、いずれの条件においても壁状供試体の厚さの違いによる細孔径分布の明確な差は確認されなかった。

図-30 に細孔径 50nm $\sim$ 5 μ m の領域の細孔容積の総和と、細孔径 50nm より小さい微細孔領域の細孔容積の総和を示す。

細孔径 50nm 以上の比較的粗大な領域の細孔容積は、角柱供試体と同様、いずれも表層部の方が深さ 50mm よりも多く、表層部の品質が低いことがわかる。これ

15.3 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)

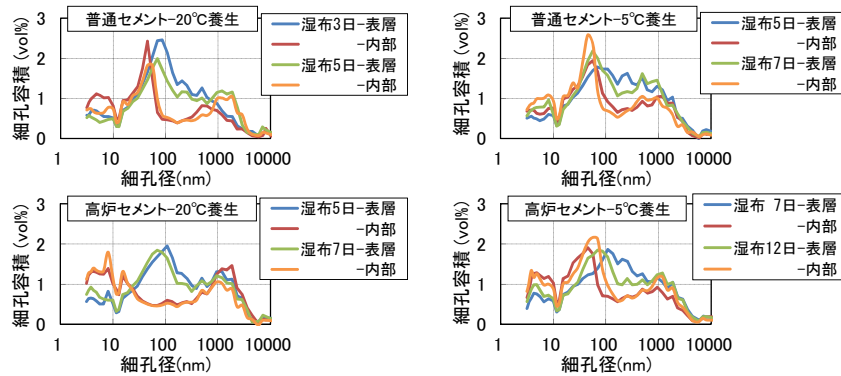


図-28 コア表層部と内部の細孔径分布（壁状供試体厚さ 200mm）

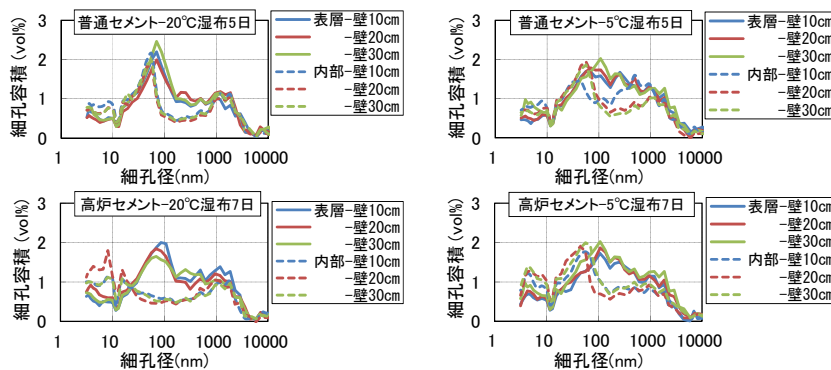


図-29 細孔構造に与える壁状供試体の厚さの影響

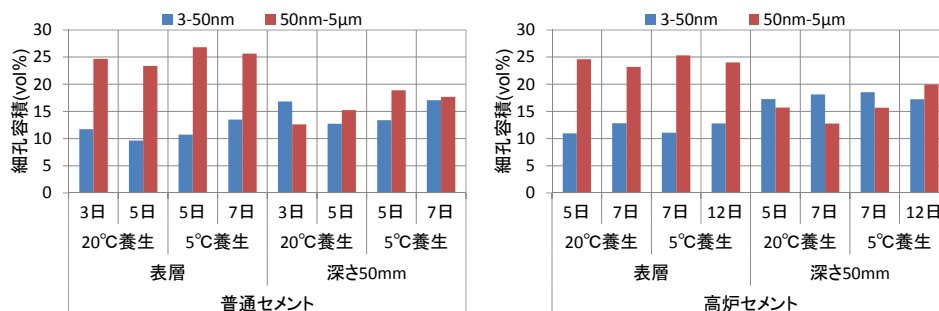


図-30 細孔径 50nm 前後の範囲の細孔容積の総和（壁状供試体厚さ 200mm）

に対して、50nm より小径の細孔は深さ 50mm の方が表層よりも多く、特に高炉セメントで顕著だった。

養生の影響を見ると、一部バラツキはみられるものの、養生温度が高く、材齢初期の湿布養生期間が長いほど細孔径 50nm 以上の細孔容積は減少する傾向がみられた。

以上から、コンクリート細孔構造は養生の影響を受け、特に気中養生期間における含水率の低下は、コンクリート表層部の品質低下に大きく影響を及ぼすことが確認された。また、含水率の低下に伴う品質の低下は、コンクリート表面から深さ 20mm 程度以内の表層部

に限定され、含水率の低下が表層部に比べて小さい深さ 30mm 以深では養生温度の影響のみが反映されることが明らかとなった。

3.10 コンクリートの熱分析試験結果

(1) □100×200mm 供試体の熱分析試験結果

図-31 に□100×200mm 供試体の表層から深さ方向における熱分析試験結果を示す。各分析値は、所定期間湿布養生後に各温湿度環境下で材齢 28 日まで気中養生してから測定したものであり、水平軸ラベルの日数は材齢初期に実施した湿布養生期間を示している。また、上段の図は普通セメントを、下段の図は高炉セメ

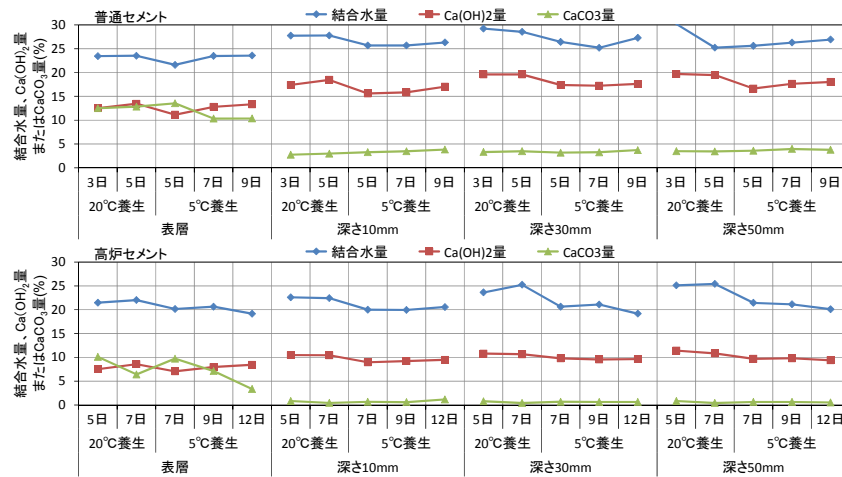


図-31 角柱供試体の表層から深さ方向における熱分析試験結果

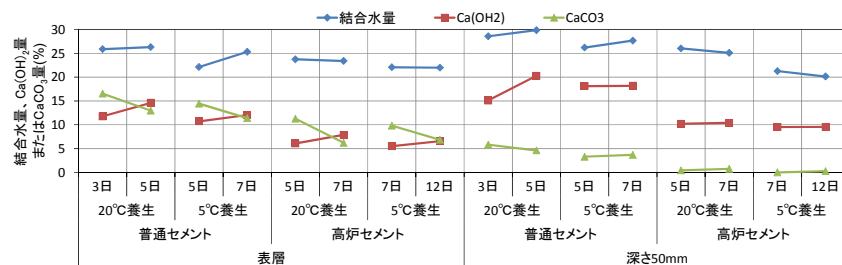


図-32 壁状供試体の表層と深さ 50mm における熱分析試験結果

ントを用いたコンクリートの値を示している。

結合水量は、普通セメントでは、いずれの養生条件でも表層が深さ 10mm 以深よりも少なく、深さ 10mm 以深はほぼ同程度だった。また、表層では差はないものの、深さ 10mm 以深では 20℃養生の方が 5℃養生より結合水量が若干増加したが、材齢初期の湿潤養生日数の違いでは差がなかった。一方、高炉セメントでは、試料の採取位置によらず 20℃養生の方が 5℃養生よりも結合水量は多く、水和反応に及ぼす養生温度の影響が確認されたが、材齢初期の湿潤養生日数の違いでは差がなかった。また、20℃養生では表層と深さ 10mm の結合水量が深さ 30mm 以深の結合水量よりも若干少なかったが、5℃養生では試料採取位置によらずいずれも同程度だった。また、結合水量はいずれも普通セメントの方が高炉セメントよりも多く、セメントの種類による水和率の違いが確認できた。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ はセメントの水和反応生成物であり、水和反応の進行に伴い増加するが、結合水量とほぼ同様の傾向が確認され、含水率の低下が大きい表層で少なく、深さ 10mm 以深ではほぼ同程度であった。なお、普通セメントよりも高炉セメントの方が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は少ないが、高炉セメントは普通セメントの一部を高炉スラグ

微粉末で置換したものであり、セメント量が少なく水和速度が遅いことに加え、スラグの潜在水硬性により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されたことが影響したものである。

一方、 CaCO_3 はコンクリートの炭酸化に伴い生じる生成物であり、乾燥の影響に伴う含水率の変化が大きかった表層部で多く確認され、深さ 10mm 以深では少なく変化はみられなかった。

(2) 壁状供試体の熱分析試験結果

図-32 に壁状供試体の表層と深さ 50mm における熱分析試験結果を示す。なお、分析の試験材齢や軸ラベルの日数等は図-31 と同様である。

結合水量は、いずれも表層より深さ 50mm の方が多く、普通セメントでは、養生温度が高く材齢初期の湿布養生期間が長いほど増加した。一方、高炉セメントでは、養生温度が高いほど結合水量は増加したが、材齢初期の湿布養生期間については明確な傾向は確認できなかった。

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は、養生条件の違いが結合水量よりも明確となり、高炉セメントの深さ 50mm では養生の影響は確認できなかったが、これを除くと、養生温度が高く材齢初期の湿布養生期間が長いほど生成量は増加する傾向がみられた。

CaCO₃量は、角柱供試体と同様、表層部で多く確認され、養生温度が高く材齢初期の湿布養生期間が長いほどその生成量は減少したが、深さ 50mm では明確な差は確認されなかった。

図-33 に各反応生成物量に及ぼす壁状供試体の厚さ(100～300mm)の影響を示す。上段は普通セメントを、下段は高炉セメント供試体の分析値を示している。

全体としては壁厚の違いによる明確な傾向はみられない。しかし、普通セメントの 5℃養生では、壁厚が薄いほどCa(OH)₂量が減少しCaCO₃量が増加する傾向がみられた。これは、3.5 節の図-15 に示したように、普通セメントの 5℃養生条件では、壁が薄いほどコンクリート表層の含水率が小さくなっているにもかかわらず、透気係数が小さくなる傾向が確認されており、壁供試体表層部の炭酸化による表面の細孔の緻密化が透気係数の減少に大きく影響を及ぼしたことが推察される。

以上から、熱分析により含水率の変化が大きい表層部はセメントの水和率が低く、コンクリートのごく表面に近い表層部が炭酸化していることが明らかとなり、セメントの種類や養生の影響を受けることが確認された。なお、ごく表層部の炭酸化は、透気性や塩化物イオンの浸透性に影響を及ぼしている可能性が示唆されたため、その持続性などが長期的な耐久性への影響について検討する必要がある。

3.11 養生条件が異なる場合のコンクリートの性能

過年度までの試験結果を含め、これまで実施してきた各種試験結果から、養生条件が異なる場合のコンクリートの性能を簡単に整理し表-3 に示す。

基本的には、養生温度が高く、材齢初期の湿潤養生期間が長いほどコンクリートの品質は向上するが、凍結融解抵抗性は養生条件だけでなく、実際に凍結融解作用を受ける時のコンクリートの含水率が大きく影響するため、冬期施工後直ちに交通解放する場合などは、

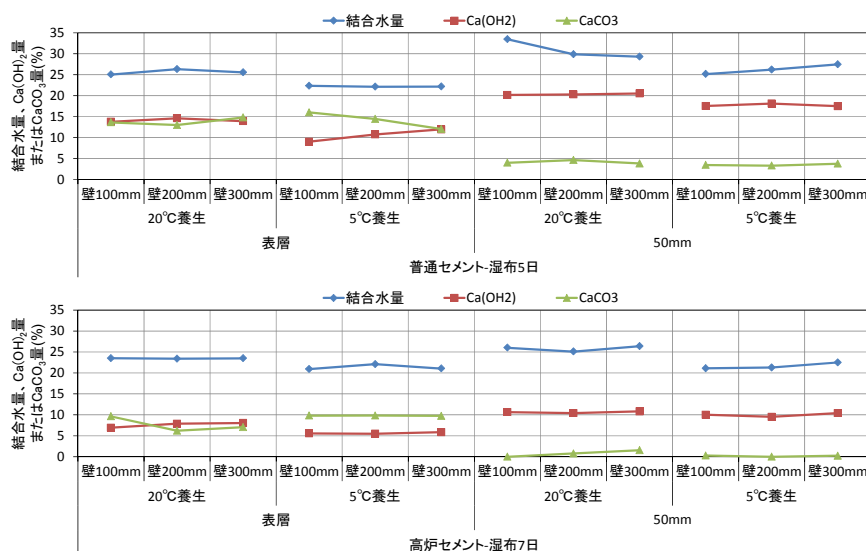


図-33 各反応生成物量に及ぼす壁状供試体の厚さ(100～300mm)の影響

表-3 養生条件が異なる場合のコンクリートの性能

要求性能	セメントの種類	コンクリートの性能			
		養生温度		湿潤養生期間	
		低温	標準	短い	長い
圧縮強度、静弾性係数	普通セメント	△	○	△	○
	高炉セメント	×	○	×	○
耐久性	中性化抵抗性	普通セメント △	○	△	○
	高炉セメント	×	△	×	△
	塩分浸透抵抗性	普通セメント △	○	△	○
	高炉セメント	○	◎	○	◎
	凍結融解抵抗性 (高含水率)	普通セメント △	○	△	○
	高炉セメント	△	△	△	×
凍結融解抵抗性 (低含水率)	普通セメント	○	◎	○	◎
	高炉セメント	○	○	○	○

性能: ◎優、○良、△要求性能レベルにより判断、×不良

コンクリートの含水状況を確認することが長期的な耐久性を確保するうえでも極めて重要となる。また、コンクリートに求められる性能として評価した場合、セメントの種類により耐久性は大きく異なり、必ずしも一定の養生だけで同レベルの性能を満足しないため、セメントの種類に応じた施工標準が必要であることもあらためて確認できた。

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等の養生条件がコンクリートの含水率や乾燥収縮に及ぼす影響について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の検討として、超音波伝播速度測定、透気試験および電気抵抗率測定の適用性に関する検討を行った。

これらの途中成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 圧縮強度は、養生温度や湿潤養生期間により異なり、材齢初期の湿潤養生期間を適切に確保することで水中養生材齢 28 日と同程度の強度を確保できることが確認できた。また、静弾性係数は、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を満足することを確認した。
- (2) コンクリートの表面から深さ方向の含水率の変化は、セメントの種類、養生温度、湿潤および気中養生期間により異なり、表面に近いほど乾燥の影響を受けやすく含水率の変化が大きいことや、気中養生期間が長期になるほどコンクリート内部の含水率も徐々に低下することを確認した。
- (3) 透過法による超音波試験により、コンクリートの表層から内部の品質をある程度評価できることを確認した。
- (4) 透気係数により養生がコンクリートの品質に及ぼす影響をある程度評価できる結果が得られた。しかし、測定データの誤差やセメントの種類が異なる場合の評価などに課題があり、さらに試験機自体の測定環境適用の範囲についても検討する必要がある。
- (5) 電気抵抗値は、材齢の進行に伴い増加するため、コンクリートの品質を評価する方法として期待できるが、実構造物への適用に当たっては、さらにコンクリートの含水率の影響や測定条件等を整理する必要がある。

- (6) 材齢初期の湿潤養生期間が長いほどコンクリートの水分逸散を抑制できるため、乾燥収縮を抑制する観点からは湿潤養生期間の延長は有効であるが、実際に生じる乾燥収縮量は細孔の緻密化に伴う毛细管張力の影響を受けるため、乾燥収縮によるひび割れ抵抗性の評価については、さらに検討する必要がある。
- (7) 塩化物イオンの実効拡散係数は、一般的な養生の効果とは逆の傾向を示し、表面部の中性化の影響が示唆されたが、原因の解明には至らなかった。このため、塩化物イオンの浸透抵抗性については、今後さらに検討する必要がある。
- (8) コンクリート細孔構造は養生の影響を受け、特に気中養生期間における含水率の低下は、コンクリート表層部の品質低下に大きく影響を及ぼすことが確認された。また、含水率の低下に伴う品質の低下は、コンクリート表面から深さ 20mm 程度以内の表層部に限定され、含水率の低下が表層部に比べて小さい深さ 30mm 以深では養生温度の影響が支配的になることが明らかとなった。
- (9) 熱分析により含水率の変化が大きい表層部はセメントの水和率が低く、コンクリート表層部のごく表面が炭酸化していることが明らかとなり、セメントの種類や養生の影響を受けることが確認された。なお、ごく表層部の炭酸化は、透気性や塩化物イオンの浸透性に影響を及ぼしている可能性が示唆されたため、長期的な耐久性への影響について検討する必要がある。
- (10) これまで実施してきた各種試験結果から、養生条件が異なる場合のコンクリートの性能を整理した。今後は、性能を意識したより具体的な養生方法を取りまとめるとともに、耐久性と非破壊検査等により得られる特性値の関係を詳細に分析し、品質管理と検査方法に関する検討を進める予定である。

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) 上田洋、玉井譲：コンクリート構造物の表層付近における水分分布の検討、歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会(216 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ 87、土木学会、pp.113-120、2009

15.3 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)

- 4) 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
- 5) 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
- 6) 土木学会：土木学会基準として制定が望まれる試験方法の動向ーコンクリートの性能評価を可能とする新しい基準体系とはー、コンクリート技術シリーズ 84、pp.108-113、2009
- 7) American Association of State Highway and Transportation Officials：Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, AASHTO Designation: TP 95-11
- 8) コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル、日本コンクリート工学協会、pp.124-125、2000.5
- 9) 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
- 10) コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル、日本コンクリート工学協会、p.60、80、83、2000.5
- 11) 福留和人、古川幸則、庄野昭：コンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生条件の影響評価手法に関する研究、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、Vol.67、No.1、pp.18-27、2011
- 12) 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
- 13) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕、pp.44、2008.3
- 14) 林田宏、田口史雄、遠藤裕丈、草間祥吾：超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究、寒地土木研究所月報、No.656、pp.10-15、2008.1
- 15) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(JSCE335 委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集、コンクリート技術シリーズ、pp.136-146、2012.7
- 16) 西博貴、皆川浩、久田真、佐藤道生：電気抵抗率から推計される塩化物イオン拡散係数と実効拡散係数の関係、土木学会第 67 回年次学術講演会概要集、V-093、pp.185-186、2012.9
- 17) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、pp.51-54、1996.11
- 18) 佐伯竜彦、大賀宏行、長瀧重義：中性化によるコンクリートの微細組織の変化、土木学会論文集、第 420 号／V-13、pp.33-42、1990.
- 19) セメント協会：わかりやすいセメント科学、pp.78-104、1993.3

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

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2010-2014

Research Team : Materials Research Team,

Cold Region Technology Promotion Division

Author : TAGUCHI Fumio, SHIMATA Akinori,

SHIMADA Hisatoshi, NAITO Isao,

YOSHIDA Susumu, ENDO Hirotake,

MIZUTA Maki, KAWAMURA Koji,

MIYAMOTO Syuji, SATO Hirotomo,

NAKAMURA Naohisa, SHIBUYA Sunao,

WATANABE Masahiro

Abstract : The purposes of this study included the establishment 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 FY2012, as part of proposal of construction manuals applied to performance-based design, including inspection methods for acceptance of concrete structure and methods for replacement and curing of concrete, the influence of curing temperature and curing period on the moisture content and the drying shrinkage 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 ultrasonic method, air-permeability test and four-point Wenner array probe test was also examined. The results showed that curing and moisture content of concrete particularly influence on the quality of concrete surface, and the drying shrinkage can be reduced by securing the wet curing period to a certain extent at the early age because the evaporation of moisture from the concrete surface was controlled. In addition, it was indicated that the quality of concrete can be evaluated using various non-destructive testing methods examined in this study. Moreover, from the concrete durability test results confirmed until now, the durability performance of concrete cured in various conditions was summarized.

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