

論文 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

吉田 行^{*1}・嶋田 久俊^{*2}・水田 真紀^{*3}・島多 昭典^{*4}

要旨: 厳寒期に施工されるコンクリートの品質確保の観点から、養生方法がコンクリートの含水率および品質に及ぼす影響について検討するとともに、コンクリートの品質を検査する方法として、超音波による評価の可能性について検討した。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すること、および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できることを示した。

キーワード: 養生, 含水率, 細孔容積, 超音波伝播速度

1. はじめに

コンクリートの品質を確保するには、コンクリート打ち込み後の養生が極めて重要であり、特に寒冷期にはセメントの種類や外気温等を考慮して養生条件を適切に設定する必要がある。例えば、養生期間については、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設定されている。しかし、標準的な養生条件により確保できる耐久性のレベルがどの程度なのかは必ずしも明確になっていない。

著者らは既報¹⁾において、品質確保の観点から、湿潤養生期間を十分に確保することの重要性を確認している。しかし一方で、コンクリートの含水率が高い状況で凍結融解作用を受けた場合、スケーリング等の劣化が大きくなり、寒冷期の施工で所定の養生後すぐにコンクリートが厳寒の環境下に曝される場合には、含水率に留意する必要があることを確認している。このため、本研究では、コンクリートの含水率に着目し、養生がコンクリートの含水率および品質に及ぼす影響について検討するとともに、コンクリートの品質を確認するための検査方法の一つとして、超音波による評価の可能性について検討した。

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含水率および品質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/cm³, 比表面積 3,340cm²/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/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 2.68g/cm³, 吸水率 1.45%, 粗骨材最大寸法 25mm)を用いた。また、スランブ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%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 に養生条件と試験実施材齢の一覧を示す。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±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²⁾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を考慮した小型の角柱供試体に加え、実構造物を想定した壁状供試体を作製し検討した。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

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (C×%)	AE 剤 (C×%)	空気量 (%)	スランブ (cm)
			W	C	S	G				
N	50	44	145	290	843	1077	0.15	0.003	4.8	8.7
B					840	1074		0.005	5.0	8.5

*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(正会員)

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	試験項目※		
				含水率測定	超音波伝播速度	細孔径分布測定
普通		20℃	湿布3日+気中25日	3,14,21,28	3,28	28
			湿布5日+気中23日	5,14,21,28	5,28	28
		5℃	湿布5日+気中23日	5,14,21,28	5,28	28
			湿布7日+気中21日	7,14,21,28	7,28	28
高炉		20℃	湿布5日+気中23日	5,14,21,28	5,28	28
			湿布7日+気中21日	7,14,21,28	7,28	28
		5℃	湿布7日+気中21日	7,14,21,28	7,28	28
			湿布9日+気中19日	9,14,21,28	9,28	28
			湿布12日+気中16日	12,14,21,28	12,28	28

※表中の数値は、試験実施材齢

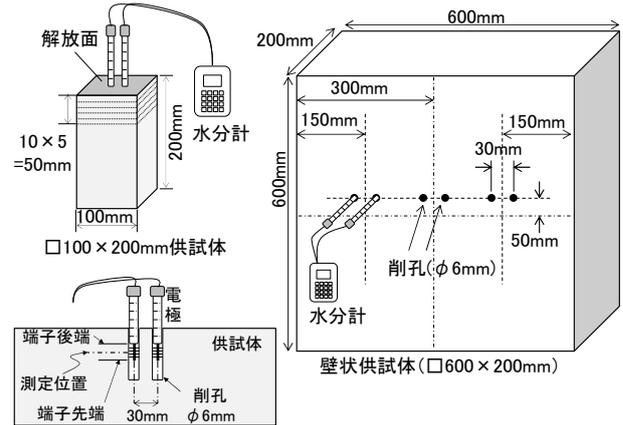


図-1 各供試体における含水率測定方法の概要

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レタによる締固めと、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。供試体の脱型は、コンクリート強度 5N/mm^2 を目安³⁾に、過年度の試験実績を考慮して、小型角柱供試体については、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鎖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

3.1 コンクリート内部の含水率測定

養生条件の違いがコンクリート表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、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。この水分計は、外装材の補修・改修工事の際に、下地材の含水率状況を把握するために開発されたもの⁴⁾であり、105℃恒量法により求めたコンクリート・モルタルの含水率と電気抵抗の特性値の関係から含水率に変換されたものである。図-1に各供試体における含水率測定方法の概要を示す。深さ方向の含水率の測定は、100×100×200mmの角柱供試体と、実構造物を意識した600×600×200mmの中型の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て型枠面（600×600mm）2面を解放（表と裏の2面）し、表面の3箇所ですべての平均値で評価した。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の孔を30mm間隔で1箇所あたり2孔削孔し、削孔粉をエアスプレーで

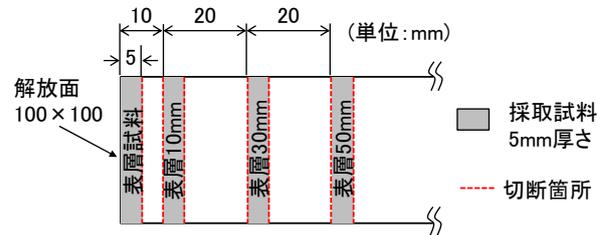


図-2 角柱供試体からの分析用試料採取位置

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、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。ただし、埋め込み型水分計はコンクリート打設後に故障したため、本論文では挿入型水分計のみで評価した。

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⁵⁾ことが報告されている。しかし、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、削孔穴からの直接的な乾燥の影響を防ぐため、測定終了後10×10mm程度のアルミテープで孔を塞いだ。

3.2 細孔径分布測定

養生終了後のコンクリートの表層と内部の細孔構造を調べるため、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。なお、角柱供試体からの試料採取は、図-2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（φ10×20cm）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、D-dry 後の試料を振動ミル粉砕後に(1+100)塩酸不溶解残分を測定して残分補正を行い、硬化セメントペースト体積当たりの空隙率で表記した。

3.3 超音波伝播速度の測定

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。なお、超音波伝播速度の測定は、材齢の経過に伴う変化を把握するため、100×100×200mm の角柱供試体で行った。図-3 に超音波伝播速度測定の概要を示す。測定は、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、2 供試体の平均値で評価した。なお、測定時にはアルミテープを一部剥がして端子を接触させ、測定後は再度シールした。

4. 試験結果および考察

4.1 コンクリート内部の含水率変化

(1) 100×100×200mm 角柱供試体の含水率変化

図-4 に角柱供試体のコンクリート表面(解放面)からの深さ毎の含水率を示す。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は、この日数と同じである。また、図-5 は湿潤養生直後と材齢 28 日の含水率の差(湿潤養生後の含水率の低下量)を示している。

いずれのケースも、湿潤養生直後の含水率は高く、深さ方向の差はほとんど無いが、それ以降は気中養生の影響により含水率が低下し、材齢 28 日では、コンクリート表面に近いほど含水率の低下が大きく、表層から 50mm 程度の内部でも含水率が低下することが確認できる。

また、湿潤養生直後の含水率は、普通セメント(図-4 左列)の方が高炉セメント(図-4 右列)よりも低く、さらに養生温度が高く湿潤養生期間が長い方が低い傾向がある。しかし、図-5 に示したように、湿潤養生後の含水率の低下は、高炉セメントの方が普通セメントよりも大きく、湿潤養生期間が短いほど大きい傾向がみられた。また、湿潤養生期間が同じ場合、5℃養生の方が 20℃養生よりも含水率の低下は大きかった。これらの傾向については、コンクリートの水和反応速度の違いや、水和反応の進行に伴う細孔中の水分の減少および気中養生期間における乾燥の影響を考慮することで、以下のように推察できる。

本研究で用いた含水率計により測定される含水率は、

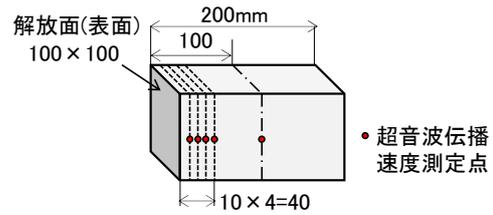


図-3 角柱供試体における超音波伝播速度の測点

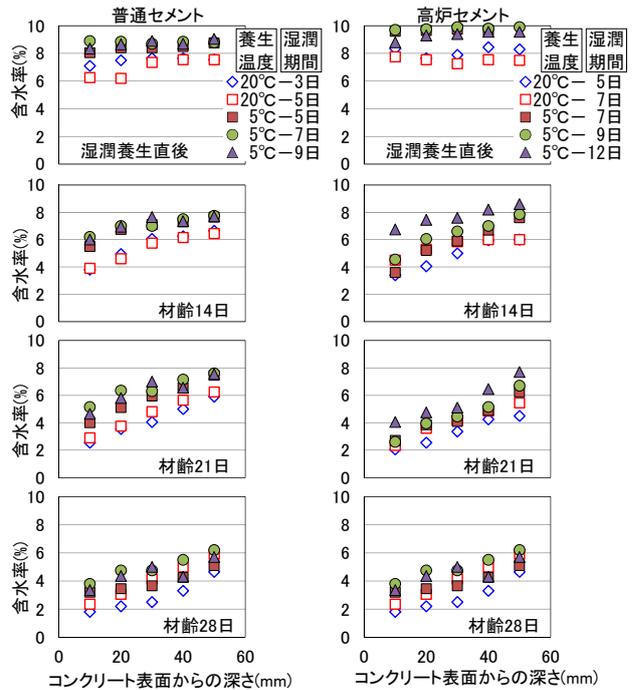


図-4 コンクリート表面からの深さ毎の含水率 (100×100×200mm 角柱供試体)

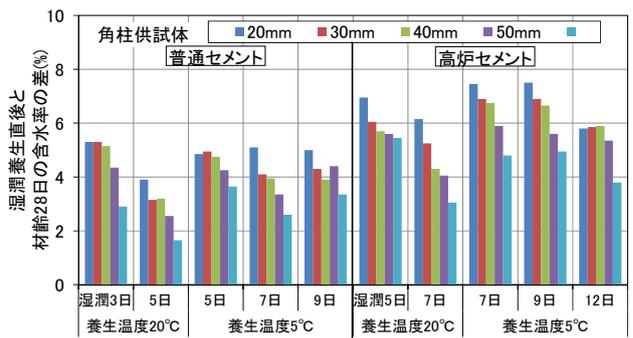


図-5 湿潤養生直後と材齢 28 日の含水率の差(角柱)

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、コンクリートの細孔中の水分量は、水和反応の進行に伴い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。このため、普通セメントを用いた場合や養生温度が高く湿潤養生期間が長いコンクリートは、養生温度が低く湿潤養生期間が短い場合や高炉セメントを用いた

コンクリートに比べて水和反応が速いため、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湿潤養生終了直後の含水率が小さくなったと考えられる。他方、湿潤養生終了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水分の逸散が大きくなる。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) 600×600×200mm 壁状供試体の含水率変化

図-6 に壁状供試体におけるコンクリート表面（解放面）からの深さ毎の含水率を示す。基本的には、角柱供試体と同様に、湿潤養生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が確認できた。

図-7に湿潤養生直後と材齢28日の含水率の差を示す。角柱供試体と同様に、高炉セメントの方が普通セメントよりも含水率の低下は大きかった。また、湿潤養生期間が長いほど含水率の低下が大きくなる傾向が概ねみられたが、角柱供試体よりもその差は小さく、養生温度の違いによる差はほとんどなかった。角柱供試体との違いについては、試験体体積に対する開放面積の割合は、壁試験体の方が角柱供試体よりも倍大きいものの壁試験体の含水率変化は小さく、湿潤養生直後の含水率が既に壁供試体の方が小さいことから、供試体内の水分移動だけでなく水和の程度が影響していることが考えられ、これらを明らかにするにはより詳細な検討が必要である。

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、セメントの種類や養生条件により異なり、コンクリート表面に近いほど乾燥の影響を受けやすく含水率の低下が大きいことや、表面から5cm程度の内部の含水率も徐々に低下することを確認した。なお、これらの傾向は既往の研究⁶⁾結果とも一致している。以上から、表層部は乾燥の影響を受けやすく、内部よりも相対的に品質が低下しているものと推察される。

4.2 表層の含水率と凍結融解試験後の質量減少率の関係

養生と凍結融解抵抗性について検討した既報¹⁾では、強度と凍結融解作用によるスケーリング量は必ずしも対応せず、コンクリートの含水率が影響していることが示唆された。そこで、既報におけるJIS A 1148-A法による300サイクル終了後の質量減少率と本研究で得られた表層部の含水率の関係を図-8に示す。湿潤養生後に材齢28日まで気中養生を行ったものは表層部の含水率が大きく低下し、全体としては凍結融解後の質量減少が抑制される傾向がある。しかし、気中養生後の領域を詳細にみると、概ね含水率が高いほど質量減少が抑制される傾向も確認される。このことから、施工後直ちに凍結融解作用を受ける環境下では、表層の含水率を4%以下とすること

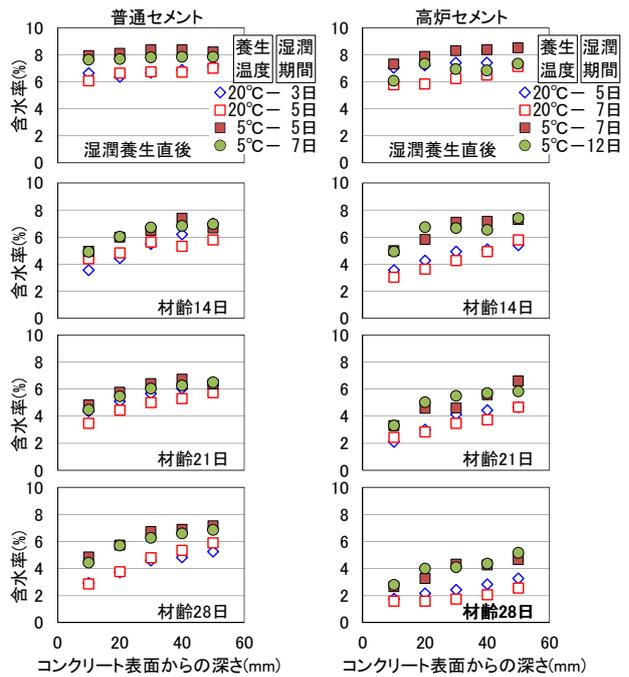


図-6 コンクリート表面からの深さ毎の含水率 (600×600×200mm 壁状供試体)

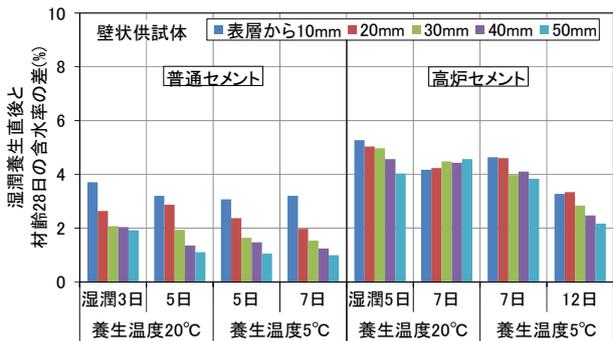


図-7 湿潤養生直後と材齢28日の含水率の差(壁)

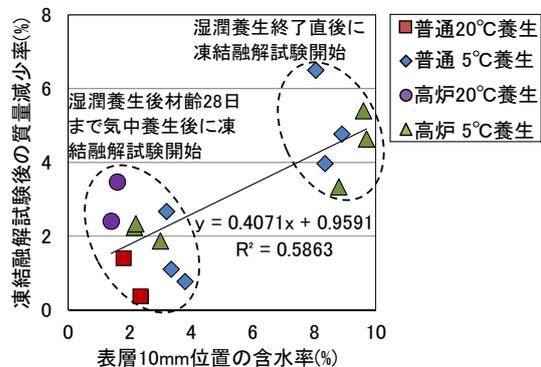


図-8 表層の含水率と凍結融解試験後の質量減少率

でスケーリングを大きく抑制することが可能となるが、さらに凍結融解抵抗性を向上するには、湿潤養生期間を十分に確保した上で一定程度乾燥期間を設け、表層の含水率を低下させた状態で開放するのが有効と考えられる。

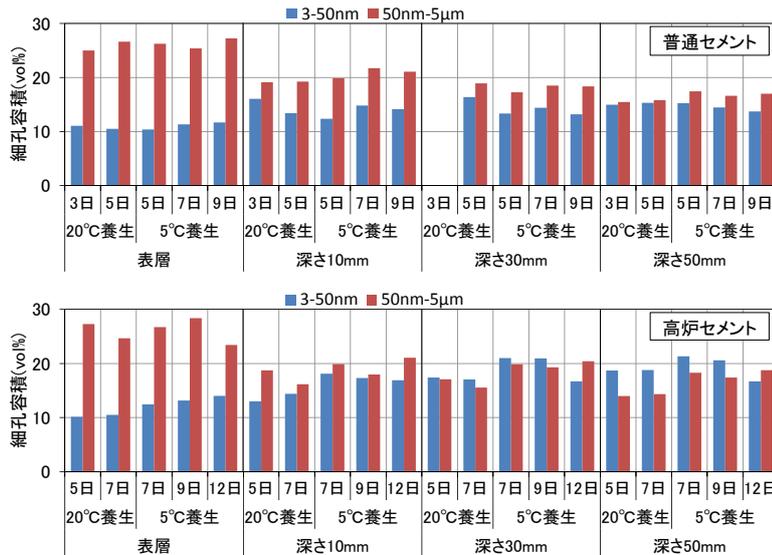


図-9 細孔径 50nm 前後の範囲の細孔容積の総和
(角柱供試体)

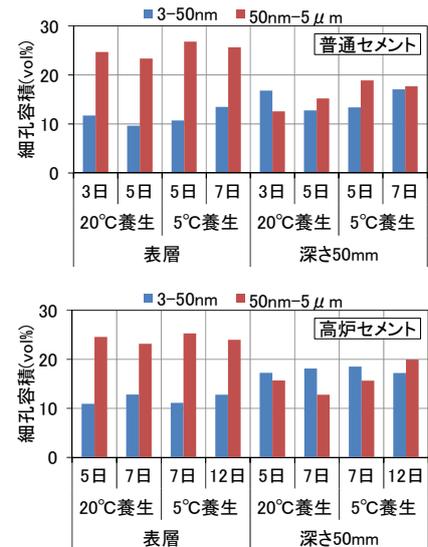


図-10 細孔径 50nm 前後の範囲の細孔容積の総和 (壁状供試体)

4.3 コンクリートの細孔容積

(1) 100×100×200mm角柱供試体の細孔容積

4.2で述べたように、乾燥がコンクリートの品質に及ぼす影響を確認するため、表層部(表層5mm)と内部(表面から10, 30, 50mm)における各コンクリートの細孔容積を調べた。ここでは、耐久性への影響を考慮し、既往の研究⁷⁾から耐久性に影響すると考えられる細孔径50nm~5μmの領域と、細孔径50nmより小さい微細孔領域に分けて評価した。図-9に角柱供試体の材齢28日における細孔容積を示す。なお、普通セメントの深さ30mm, 20°C養生の材齢3日は異常値により除外した。

50nm以上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く傾向があり、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) 600×600×200mm壁状供試体の細孔容積

図-10に壁状供試体の材齢28日における細孔容積を示す。細孔径50nm以上の細孔容積は、角柱供試体と同様、いずれも表層部で多く、表層部の品質が内部よりも相対的に低いことがわかる。これに対して、50nmより小径の細孔容積は、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、養生温度が低い場合、特に高炉セメントでは粗大な細孔が多い傾向があるが、含水率低下が細孔構造に及ぼす影響が大きく、特にコンクリート表面から深さ20mm程度以内の表層部への影響が顕著となることが確認された。これらは水和速度と乾燥の程度に起因していると考えられる。

4.3 超音波伝播速度(透過法)による品質評価

図-11に角柱供試体における超音波伝播速度(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、湿潤養生日数と同じものについては湿潤養生直後、28日は材齢28日の測定値である。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、ここでは、表面から10mm, 40mm, 100mmを抽出して評価した。

普通セメントの場合、湿潤養生直後は、深さ方向の伝播速度に差はみられなかった。これに対し、材齢28日では、湿潤養生直後より全体に速度は増加したものの、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く、表層部で比較的粗大な細孔が多い傾向と一致した。また、養生温度や湿潤養生期間の違いによる伝播速度の明確な差は確認されなかったが、細孔容積でも明確な差は確認されておらず同様の傾向を示した。

他方、高炉セメントの場合、20°C養生では普通セメントと同様の傾向だったが、5°C養生では、表面からの深さ方向の速度差は確認できなかった。また、養生温度が高いほど伝播速度は速かったが、湿潤養生日数の違いによ

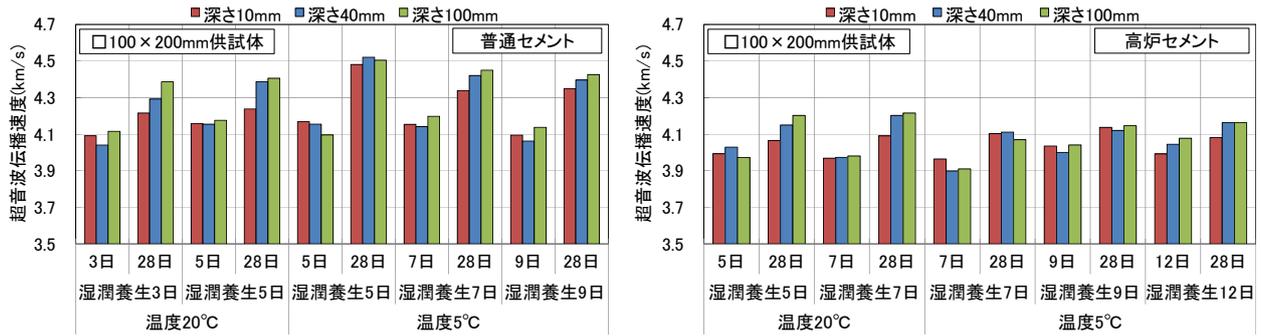


図-11 コンクリート表面からの深さ方向の超音波伝播速度（透過法，100×100×200mm 角柱供試体）

る明確な差は確認できず，これらは各養生条件における細孔容積の結果と概ね対応していた。

一方，図-12 には，材齢 28 日における超音波伝播速度と各領域の細孔容積の関係を示した。普通セメントではほとんど相関は無いが，高炉セメントでは，相関係数は低いものの比較的粗大な細孔が少ないほど伝播速度は大きくなる傾向が確認できる。普通セメントは水和反応が比較的速いため，既報¹⁾で示したように，湿潤養生日数が 5 日以上になると材齢 28 日の圧縮強度にほとんど差がなくなる。このため，伝播速度にも差が無く，細孔との相関が確認できなかつたと考えられる。一方，高炉セメントは養生条件による品質差が大きく，伝播速度でもある程度の相関が確認できたと考えられる。

以上から，例えば不適切な養生を実施した場合など，コンクリートの品質差が大きくなる場合には，超音波伝播速度により，ある程度品質を評価できると考えられる。他方，超音波伝播速度は含水率が高いほど速くなる⁸⁾。本試験結果は含水率の影響も含んでおり，コンクリートの品質を精度良く評価するには，含水の影響を排除して評価する必要がある。今後詳細な検討が必要である。

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) コンクリートの含水率の変化は，セメントの種類や養生条件により異なり，養生期間が同じ場合，低温養生の方が変化は大きく，表面に近いほど乾燥の影響を受けやすく，含水率が凍結融解抵抗性に影響していることを確認した。
- (2) 養生温度が低い場合，特に高炉セメントでは粗大な細孔が多い傾向があるが，含水率低下の影響が大きく，特にコンクリート表面から深さ 20mm 程度以内の表層部への影響が大きいことが確認された。これらは水和速度と乾燥の程度に起因していると考えられる。
- (3) 透過法による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できることを示した。

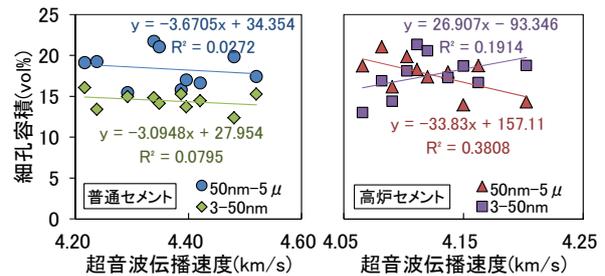


図-12 超音波伝播速度と各領域の細孔容積（材齢 28 日）

参考文献

- 1) 吉田行，嶋田久俊，水田真紀，田口史雄：耐凍害性への養生の影響と評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.943-948，2013.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 建設省：改装材の補修・改修技術の開発，建設省官民連帯共同研究報告書，1989.12
- 5) 上田洋，玉井謙：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
- 6) 唐沢智之，安部弘泰，柳田淳一，山崎裕一，安田正雪，松田拓：各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験その 4 湿潤養生打ち切り時期が壁部材含水率に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演概要集(関東)，pp.331-332，2006.9
- 7) セメント協会：わかりやすいセメント科学，pp.78-104，1993.3
- 8) 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