

養生がコンクリートの含水率や品質に及ぼす 影響と品質検査に関する検討

(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を行うとともに、出来上がりコンクリートの品質検査として、超音波伝播速度の適用性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評価できることを確認した。

キーワード：長寿命化、耐久性、養生方法、品質検査、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る。一般に、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、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。このため、著者らは、各種耐久性を満足する適切な養生方法の提案を目的として、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ている。また、所定の施工プロセスを経た出来上がりコンクリートの耐久性等の品質を竣工時に検査する方法についても併せて検討している。

これまでの検討から、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が、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ることも確認している¹⁾。これらを踏まえ、本研究では、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、出来上がりコンクリートの品質検査方法の一つとして、超音波伝播速度の適用性に関する検討を行った。

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 $3,760\text{cm}^2/\text{g}$ 、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% とし、目標スランプと空気量は土木工事で一般的な $8\text{cm}\pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5\pm 1.0\%$ とした。

(2) 供試体の養生条件

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、養生温度は一般的な 20°C と低温養生を想定した 5°C 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°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

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

表-2 養生条件と試験材齢

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	含水率測定、 超音波伝播速度	細孔径分布
普通	50%	20℃	湿布3日+気中25日	φ100×200mm	3,28		28
				□100×200mm		3,14,21,28	28
				壁600×600×200mm	28	3,14,21,28	28
			湿布5日+気中23日	φ100×200mm	5,28		
				□100×200mm		5,14,21,28	28
				壁600×600×200mm		5,14,21,28	28
		5℃	水中養生	φ100×200mm	28		
			湿布5日+気中23日	φ100×200mm	5,28		
				□100×200mm		5,14,21,28	28
				壁600×600×200mm		5,14,21,28	28
			湿布7日+気中21日	φ100×200mm	7,28		
				□100×200mm		7,14,21,28	28
				壁600×600×200mm		7,14,21,28	28
			湿布9日+気中19日	φ100×200mm	9,28		
				□100×200mm		9,14,21,28	
			水中28日	φ100×200mm	28		
高炉	50%	20℃	湿布5日+気中23日	φ100×200mm	5,28		
				□100×200mm		5,14,21,28	28
				壁600×600×200mm	28	5,14,21,28	28
			湿布7日+気中21日	φ100×200mm	7,28		
				□100×200mm		7,14,21,28	28
				壁600×600×200mm		7,14,21,28	28
		5℃	水中養生	φ100×200mm	28		
			湿布7日+気中21日	φ100×200mm	7,28		
				□100×200mm		7,14,21,28	28
				壁600×600×200mm		7,14,21,28	28
			湿布9日+気中19日	φ100×200mm	9,28		
				□100×200mm		12,14,21,28	28
			湿布12日+気中16日	φ100×200mm	12,28		
			水中28日	φ100×200mm		12,14,21,28	28
				壁600×600×200mm		12,14,21,28	28

※表中の数値は、試験実施材齢

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、型枠面の空隙を抑制するためにスパーキング処理を行った。供試体の脱型は、コンクリート強度5N/mm²を目安³⁾に、過年度の試験実績を考慮して、小型供試体については、20℃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。

(3) 実験項目と試験方法

a) 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、100×100×200mm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。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、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。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⁴⁾が、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を行うとともに、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で塞いだ。

b) 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⁹⁾。なお、細孔の測定は100×100×200mm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-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（5×10⁴mmHg）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～120μm）。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。

c) 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。なお、超音波伝播速度の測定にあたっては、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、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。

3. 試験結果および考察

(1) コンクリート内部の含水率変化

a) 100×100×200mm 角柱供試体の含水率変化

図-4 に 100×100×200mm 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は、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。



写真-1 電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計

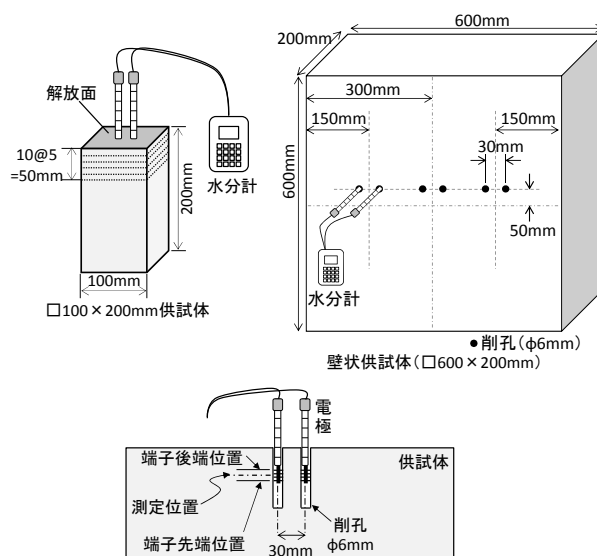


図-1 含水率の測定方法

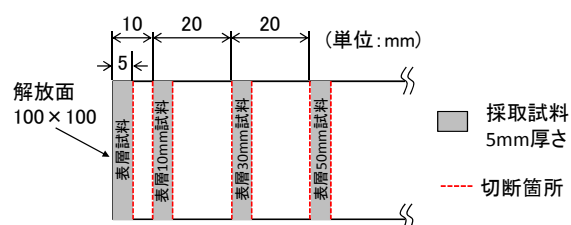


図-2 試料採取位置（100×100×200mm 角柱供試体）

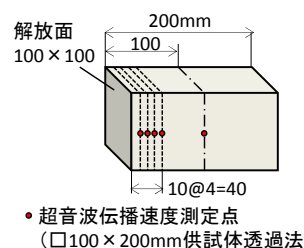


図-3 角柱供試体における超音波伝播速度の測点

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-4 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-4 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、乾燥の影響を受けていない湿潤養生終了直後においては、20℃養生の方が5℃養生より含水率は低い、乾燥が進むと、5℃養生の方が含水率の低下は若干大きい傾向がある。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、以下のように推察できる。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のほど含水率の低下が大きくなったと考えられる。

b) 600×600×200mm 壁状供試体の含水率変化

図-5 に壁状供試体におけるコンクリート表面（解放

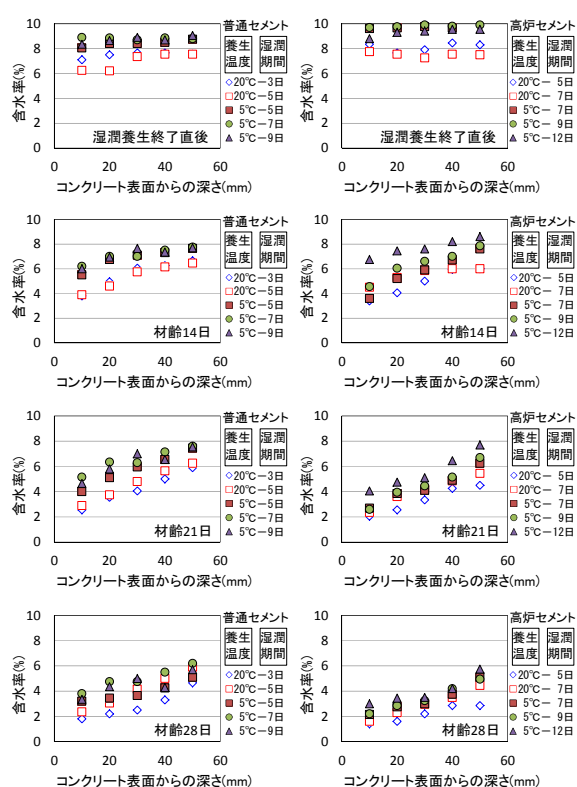


図-4 コンクリート表面からの深さと含水率変化
(100×100×200mm 角柱供試体)

面)からの深さと含水率の変化を示す。

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、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も含水率は小さく、前述した角柱供試体における養生温度や湿潤養生期間と含水率の関係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。

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。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。

(2) コンクリートの細孔容積

a) 100×100×200mm角柱供試体の細孔容積

図-6に既往の研究⁹⁾から耐久性に影響すると考えられる細孔径50nm～5μm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

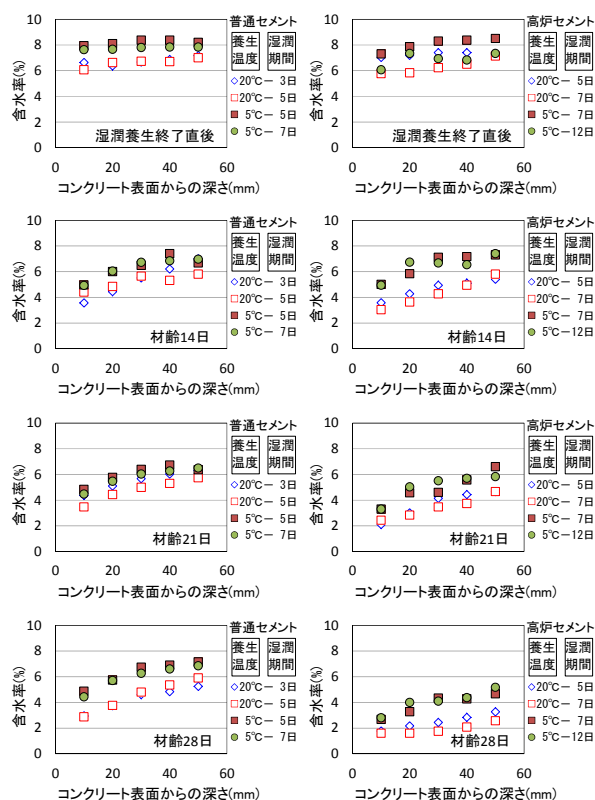


図-5 コンクリート表面からの深さと含水率変化
(600×600×200mm 壁状供試体)

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℃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℃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。

b) 600×600×200mm壁状供試体の細孔容積

図-7に細孔径50nm～5μm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することを確認した。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) 超音波伝播速度（透過法）

図-8に100×100×200mm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、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-3に示したと

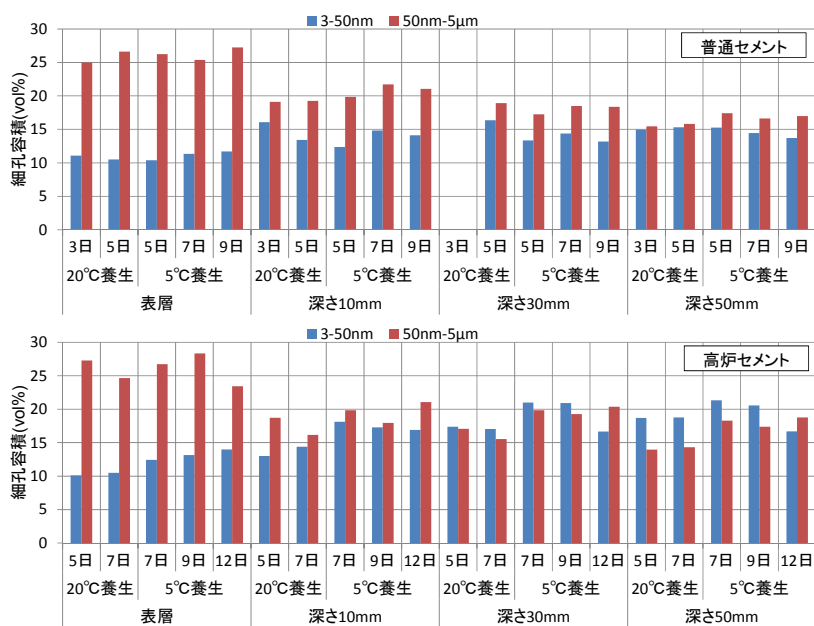


図-6 細孔径 50nm 前後の範囲の細孔容積の総和（100×100×200mm 角柱供試体）

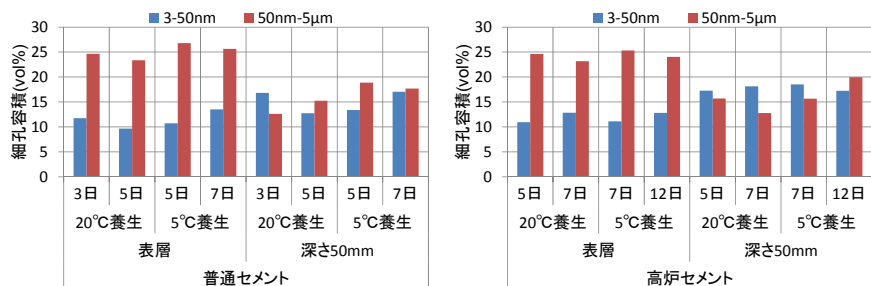


図-7 細孔径 50nm 前後の範囲の細孔容積の総和（600×600×200mm 壁状供試体）

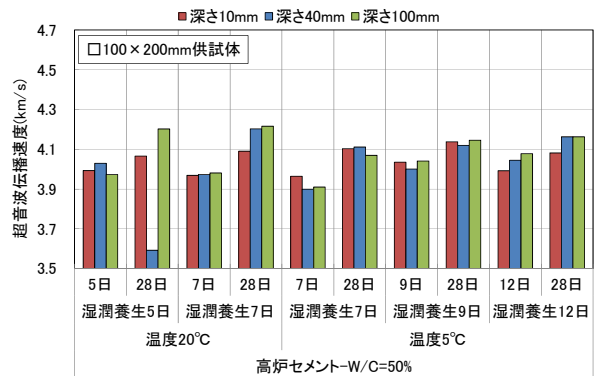
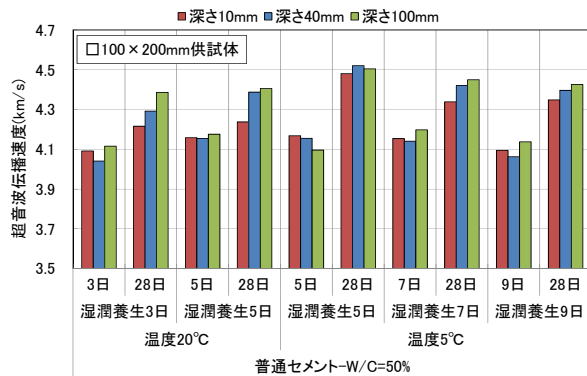


図-8 コンクリート表面からの深さ方向の超音波伝播速度（透過法、100×100×200mm 角柱供試体）

おりであるが、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（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、相対的に品質が低下していると判定できる。しかし、前述したように、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⁷⁾ことから、含水率の影響も受けられていると考えられる。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、前述したように、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。

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。

4. まとめ

本研究では、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、出来上がりコンクリートの品質検査方法の一つとして、超音波伝播速度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) 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、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。
- (2) 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。
- (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。

参考文献

- 1) 吉田行、水田真紀、嶋田久俊：養生条件がコンクリートの耐久性に及ぼす影響、第 56 階（平成 24 年度）北海道開発技術研究発表会、IK-4、2013.2
- 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) 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
- 5) 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
- 6) セメント協会：わかりやすいセメント科学、pp.78-104、1993.3
- 7) 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