論文　凍結融解抵抗性に及ぼす養生の効果に関する基礎的研究

吉田　行[*1]・島多　昭典[*2]

要旨：コンクリートの所要の強度や品質を確保するためには適切な養生が重要となるが，養生により確保される耐久性の程度については必ずしも明らかになっていない。本研究では，特に留意が必要となる寒冷期の施工を考慮し，凍結融解抵抗性に及ぼす養生の効果について検討した。その結果，型枠存置期間の延長やテープ養生による養生期間の延長により，凍結融解抵抗性は概ね向上することを確認した。また，超音波伝播速度はコンクリートの細孔容積と関連する傾向が確認され，細孔構造を評価できる可能性が示唆された。

キーワード：養生，凍結融解抵抗性，細孔容積，超音波伝播速度

1. はじめに

コンクリートの所要の強度や品質を確保するためには，適切な養生が重要となる。特に，寒冷期の施工では，所定の圧縮強度が得られるまでコンクリートを 5℃以上に保ち，さらにコンクリートが急冷しないように2日間0℃以上に保つことが，初期凍害を防ぐための標準的な養生条件として土木学会コンクリート標準示方書 [1)]（以下，示方書と記述）に示されている。しかし，水で濡れているコンクリートが継続して厳しい気象作用を受ける場合には，さらに高い強度が得られるまで養生を続ける必要があることも同時に示されており，養生により確保される耐久性の程度については必ずしも明確になっていない。

一方，コンクリートの温度を適切に保持する方法として，断熱性の高い材料でコンクリートを覆う保温養生や，外気温が低い場合には，施工空間を囲い込み，ジェットヒーター等で施工空間内を適温に保つ給熱養生が行われている。しかし，給熱養生時には施工空間内の湿度が低下するため，コンクリートを乾燥させない工夫が重要となる。乾燥を防ぐ方法として，積極的に給水する散水養生や湿らせた養生マットで覆う湿布養生のほか，水分の逸散抑制（保水）を目的として，型枠（せき板）存置や非透水透湿素材のシートやテープによる保水養生が行われている。しかし，これらの養生方法の違いが，耐久性にどの程度影響するのかは必ずしも明確になっていない。

以上の背景を踏まえ，本研究では，凍結融解抵抗性確保の観点から，型枠存置期間を一定期間延長する方法と，型枠を取り外した後，ポリオレフィン系フィルムとアクリル系粘着剤で構成された（フィルム厚さ 80μm）市販品の保水養生テープにより養生する方法の効果に関する基礎的な検討を行った。

2. 実験用コンクリートの概要

2.1 使用材料および配合

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 3,320cm^2/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 3,890cm^2/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/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（表乾密度 2.67g/cm^3，吸水率 1.54%，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±2.5cm，4.5±1.0%とした。なお，表には実測のスランプおよび空気量の平均値も併記した。

2.2 供試体の養生条件

表-2 は，コンクリートの養生条件と，後述する品質を評価するための各種試験の実施または開始材齢を示している。養生期間は，一般的には経済性や合理性の観点から，所要の強度が得られるまでの期間を目安に決定され，示方書の寒中コンクリートの章 [1)]では，初期凍害を防ぐために養生終了時に必要となる圧縮強度の標準や，その強度を得る養生期間の目安が示されている。一方で，示方書の養生の章 [2)]では，コンクリートの湿潤養生期間の標準が示されており，早期に強度が発現した場合でも，湿潤養生期間の標準を満足する必要があるとされている。

そこで，本研究では，養生条件の基準として，示方書に示されている湿潤養生期間の標準よりも早期に養生を終了した場合を想定し，普通セメントの 20℃養生では型枠存置期間を 3 日，5℃養生では 5 日，高炉セメントの

表－1　コンクリートの配合

セメントの種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3) 水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)	空気量 (%)	スランプ (cm)
N	50	44	145	290	843	1074	0.25	0.0038	5.2	9.3
B					840	1070	0.22	0.0050	4.8	8.5

*1 土木研究所寒地土木研究所　耐寒材料チーム主任研究員　博士（工学）(正会員)
*2 土木研究所寒地土木研究所　耐寒材料チーム上席研究員　(正会員)

表-2　養生条件と試験実施または開始材齢

セメント	養生温度	型枠存置期間（脱型材齢）	型枠存置期間延長	脱型後→養生テープで保水養生	水中凍結融解	CDF試験	細孔径分布	超音波伝播速度	圧縮強度（N/mm^2）	
									湿潤養生終了時	材齢28日
普通ポルトランド	20℃	3日	－	－	3日	3,28日		3,28日	24.1	41.3
			2日	－	5日	5,28日		5,28日	28.0	39.0
			－	2日	5日	5,28日		5,28日	28.2	41.0
	5℃	5日	－	－	5日	5,28日		5,28日	20.7	38.2
			4日	－	9日	9,28日		9,28日	29.1	42.0
			－	4日	9日	9,28日		9,28日	24.3	36.9
高炉セメントB種	20℃	5日	－	－	5日	5,28日		5,28日	20.8	31.8
			2日	－	7日	7,28日		7,28日	22.3	33.8
			－	2日	7日	7,28日		7,28日	22.7	32.7
	5℃	7日	－	－	7日	7,28日		7,28日	16.1	28.1
			5日	－	12日	12,28日		12,28日	20.1	29.1
			－	5日	12日	12,28日		12,28日	20.2	30.6

20℃養生では5日，5℃養生では7日をそれぞれ設定した。この基準の養生条件に対して，型枠存置期間を延長した場合と，基準養生期間で型枠を取り外した後に，ポリオレフィン系フィルムとアクリル系粘着剤で構成された（フィルム厚さ 80μm）市販品の養生テープ（以下，養生テープと記述）を供試体全面に貼ってさらに養生を行うケースについて検討した。

型枠存置期間の延長および養生テープによる養生期間は，20℃養生では2日，5℃養生では4日（高炉セメントでは5日）とした。なお，コンクリート打設面については，脱型まで（型枠延長期間含む）水道水を含ませた不織布による湿布養生を行った。また，材齢28日で試験を実施（開始）した供試体は，実際の工事の状況を想定し，湿潤養生（以下，湿潤養生と記述）終了後に相対湿度60%に制御されたそれぞれの温度の実験室内で気中養生を行った。

表-2 には湿潤養生終了時と材齢28日の圧縮強度試験の結果も併記している。強度が最も低かった高炉セメントの5℃養生材齢7日でも，示方書[1)]に示されている初期凍害を防ぐために養生終了時に必要となる圧縮強度の標準値15N/mm^2（最も厳しい条件の強度）を満足していることを確認した。

供試体は，後述する各試験法に準拠した定型供試体に加え，幅400×高さ400×厚さ200mmの壁状供試体を作製し，所定の材齢で壁状供試体から採取したφ100×200mmコア供試体を用いて各試験を実施した。なお，湿潤養生終了後は，壁表裏面（400×400mm）2面を解放し，それ以外の面はアルミテープでシールした。

3. 養生の効果を評価するために実施した各試験の概要

3.1 凍結融解試験

凍結融解抵抗性は，水中凍結融解試験と，CDF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法に準拠して行い，供試体は100×100×400mmの角柱供試体を用いた。なお，既報[3)]で示したように，湿潤養生終了後に乾燥を与えてから試験を実施した場合劣化が小さくなり，養生条件による差が小さくなったことから，ここでは養生効果の差を明確にするため，養生終了後の含水率が高い状態で試験を開始した。

スケーリング試験は，RILEM CDF法に準拠した試験を行った。CDF試験では，+20℃から定速で4時間で-20℃まで冷却し，-20℃を3時間保持後，定速で4時間で+20℃まで加熱し，+20℃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，100×100×400mmの角柱供試体を中央で切断したものを用い，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た。試験面は打設面とし，試験水には3%NaCl水溶液を用いた。試験開始材齢は，湿潤養生終了時と養生終了後に気中養生を行い材齢28日に達した時点の2材齢とした。

3.2 細孔径分布測定

コンクリートの品質を把握するために，各種養生終了後のコンクリートの表層部と内部の細孔構造を水銀圧入法により測定した。なお，細孔の測定は，壁状供試体の中央付近から採取したコアの表層部5mm（暴露解放面）と表面から深さ50mm位置から試料を採取して行った。

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～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。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。

3.3 超音波伝播速度測定

超音波伝播速度は，壁状供試体の中央付近から水平方向に採取した2本のφ100×200mmコア供試体を用いて，解放表面から深さ方向に10mm刻みで裏面まで直径方向に透過法（超音波センサー直径20mm）で測定を行い，2供試体の平均値で評価した。

4. 試験結果および考察

4.1 水中凍結融解試験による凍結融解抵抗性の評価

図-1 に水中凍結融解試験結果を示す。普通セメントの20℃養生では，質量変化率に差はないが，型枠存置期間3 日の相対動弾性係数は凍結融解サイクルの進行とともに大きく低下した。これに対して，型枠存置期間の延長と養生テープにより保水養生したものは，いずれも 300 サイクル終了後の相対動弾性係数が 80%以上となり，養生の効果が確認できた。また，5℃養生でも，型枠存置期間の延長やテープ養生によりいずれも改善の傾向を示した。しかし，この場合でも，凍結融解 120 から 180 サイクル程度で相対動弾性係数が 60%以下となっており，低温養生の場合には，凍結融解作用を受ける前に含水率を低下させるなどの対策が必要である。

一方，高炉セメントの場合，20℃養生ではいずれも質量減少が小さく，相対動弾性係数も 85%以上だった。しかし，5℃養生では，型枠存置期間の延長やテープ養生を実施した供試体の相対動弾性係数が大きく低下した。これは，養生延長によりコンクリートの組織構造が緻密になり，凍結時の未凍結水の移動により生じるコンクリート毛細管内の圧力が増大したことが原因と考えられる。なお，普通セメントでも同様の状況が生じていると考えられるが異なる傾向となった。これは，セメントの水和速度の違いにより，**表-2** に示したように普通セメントの方が高炉セメントより強度が大きく，凍結時に生じる内部応力と強度の関係が異なったためと考えられる。

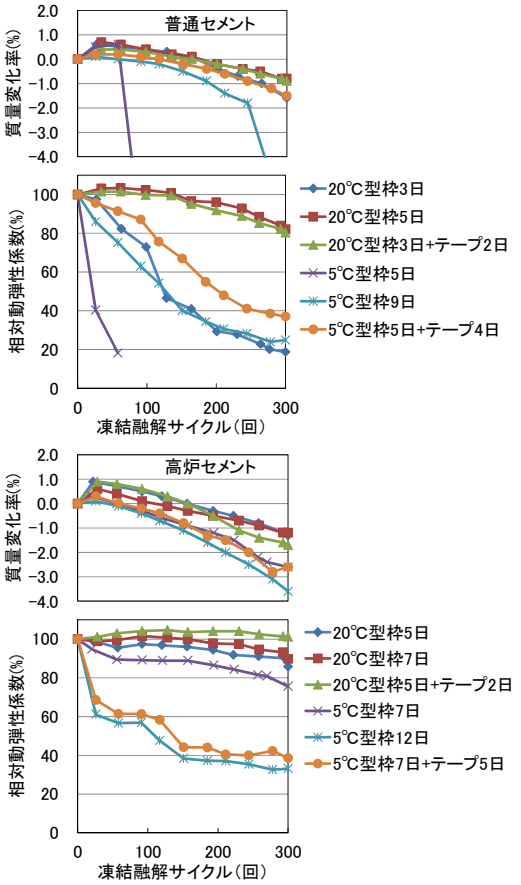
4.2 CDF試験によるスケーリング抵抗性の評価

図-2 に CDF 試験による試験終了時（凍結融解 28 サイクル）のスケーリング量を示す。

普通セメントでは，湿潤養生終了時から試験を開始した場合，型枠存置期間の延長およびテープ養生によりスケーリングは概ね減少する傾向を示した。

一方，高炉セメントでは，20℃養生の湿潤養生終了後から試験を開始したケースでテープ養生による効果が確認できたが，全体としては同等か増加する場合もみられた。特に 5℃養生の湿潤養生終了時から試験を開始した場合のスケーリング量が増大した。これについて，スケーリング劣化はコンクリートの組織構造と含水率が大きく影響すると考えられ [4]，養生延長により組織構造が緻密になり，且つ保水により含水率が高い状態で凍結融解作用を受けたため未凍結水の移動に伴う内部圧力が大きくなり，その緩和のために表層部の剥離が大きくなったと考えられる。

また，保水期間は同じでも，型枠存置期間を延長した場合は，テープ養生に比べてスケーリング量が多い傾向がみられた。これは，本研究では，CDF 試験の試験面は打設面で実施しており，打設面の養生は湿布養生を実施



図－1　水中凍結融解試験結果

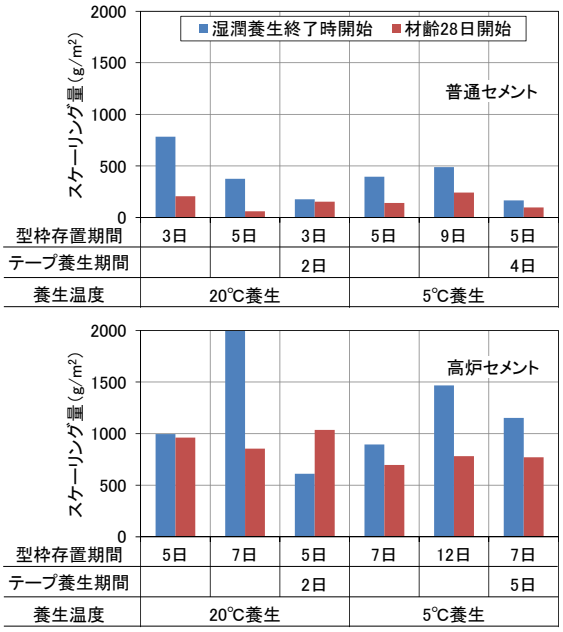


図-2　CDF 試験によるスケーリング量

している。他方，テープ養生では，型枠を取り外すまでは上記と同様に打設面は湿布養生を行っているが，それ以降は打設面も養生テープを貼り付けて養生を行っている。スケーリング試験開始前に高周波容量式の接触型水分計（20MHz，含水率測定範囲 0～12%）により，打設

面の含水率を測定した結果，湿潤養生終了時の含水率はいずれも測定限界以上（12%以上）となった。しかし，湿布養生では水分が供給されるのに対し，テープ養生は水分の逸散防止のみの効果であるため，型枠存置延長の方が水分の供給が多く，細孔構造がより緻密化して凍結時に生じる毛細管内の圧力が高まり，スケーリングが増大したと推察される。なお，普通セメントとの傾向の相違については，水中凍結融解試験と同様，高炉セメントよりも強度発現が速く，凍結融解作用を受けた時点での強度が高かったことが影響したと考えられる。

図-3 には，材齢 28 日における試験開始前の打設面の含水率を示した。いずれも含水率は 5%前後まで低下しており，材齢 28 日より試験を開始した場合にスケーリング量の差が小さかったのは，含水率の低下によりスケーリングの絶対量が減少したためと思われる。

4.3 コンクリートの細孔容積

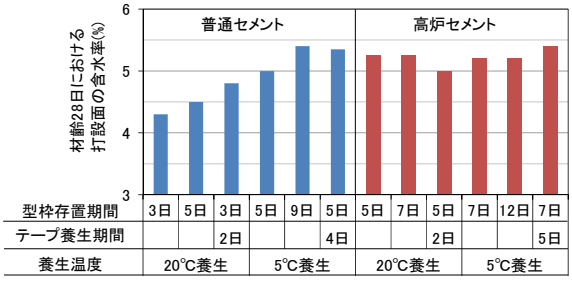
図-4 に，既往の研究[5]から耐久性に影響すると考えられる細孔径 50nm～5μm の領域の細孔容積の総和と，細孔径 50nm より小さい微細孔領域の細孔容積の総和を示す。図の左列は普通セメント，右列は高炉セメントを，上段は湿潤養生終了時の，下段は湿潤養生終了後に気中養生を材齢 28 日まで行った時点のものである。

湿潤養生終了時の細孔容積は，普通セメントでは，型枠存置期間を延長した場合，細孔径 50nm 以上の比較的粗大な細孔量が若干減少する傾向を示したが，テープ養生したものは，型枠存置期間が短い場合と同程度だった。この傾向は，前節で湿潤養生終了時に CDF 試験を開始したケースにおいて型枠存置期間を延長した供試体のスケーリング量が多くなった原因に関する推察と一致する傾向である。これに対して，高炉セメントでは，20℃養生の場合 5℃養生よりも水和反応の進行により 50nm 以上の細孔容積が減少する傾向はあるものの，型枠存置期間の延長やテープ養生による違いはみられず，必ずしも上述の推察の証明には至らなかった。

湿潤養生後に気中養生を材齢 28 日まで行った場合，乾燥の影響を受ける表層部の細孔容積は，湿潤養生終了時と比べて 50nm 以上の粗大な細孔容積が増加し，50nm 未満の細孔容積は減少する傾向を示した。これに対して，内部の細孔容積は，50nm 以上の粗大な細孔が減少し，表層と内部で異なる傾向を示した。乾燥が細孔構造に及ぼす影響については，既往の研究[6]でも，乾燥による 50nm 以上の細孔の粗大化が報告されており，乾燥による微細なひび割れの影響による可能性が考えられる。

以上，細孔容積からは，型枠存置期間の延長やテープ養生による効果は必ずしも確認できず，凍結融解試験の個別の結果とも必ずしも対応していなかった。

一方，**図-5** は CDF スケーリング量とコンクリート内部の細孔径 50nm 未満の領域の細孔容積の関係である。バラツキはあるものの，全体としてはこの領域の細孔容積の増加に伴いスケーリング量は増加する傾向が確認でき，コンクリートの緻密化により未凍結水移動時に発生する



図－3　打設面の含水率（材齢 28 日，試験前）

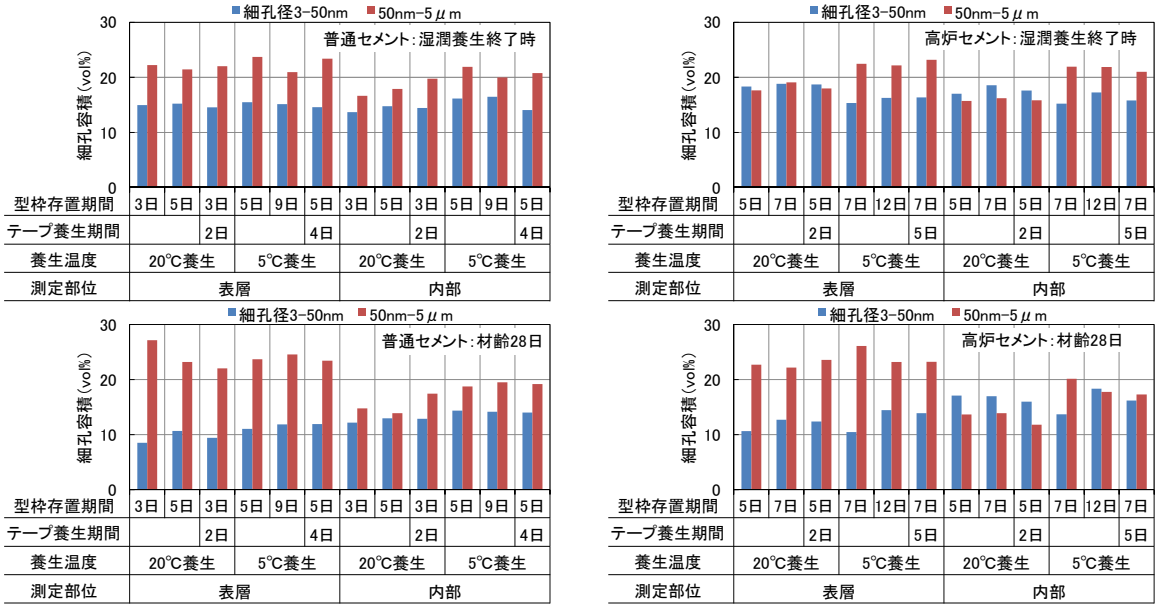


図-4　細孔径 50nm 前後の領域の細孔容積

毛細管内圧力が高まり，スケーリングが増大したとする推察と傾向は一致している。しかし，実際には，コンクリートの含水率により凍結時に毛細管内に生じる圧力は異なることに加え，コンクリート強度とも関連するため，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。

4.4 超音波伝播速度とコンクリートの品質

図-6 にコンクリート表面から深さ方向の超音波伝播速度（透過法）を示す。測定位置深度 0cm と 20cm はコア供試体の端面で，壁供試体の型枠面（表裏面）を意味する。なお，超音波伝播速度はコンクリートの含水率の影響を受ける [7]ため詳細に検討するには含水率の補正が必要であるが，ここでは含水率補正していない見かけの超音波伝播速度として表示している。

湿潤養生後の超音波伝播速度は，バラツキはあるものの，いずれも表層から内部まで比較的均一な分布を示しているのに対し，湿潤養生後に気中養生を材齢 28 日まで行ったものは，表層部（両端面）の超音波伝播速度が供試体内部よりも低下しており，その値は湿潤養生後と同程度であった。他方，内部の速度は湿潤養生後よりも増大した。乾燥に伴う含水率の低下は，20mm 以下の表層部で著しいことが明らかとなっており [8]，表層部は乾燥により相対的に品質が低いことを示していると考えられる。一方，中心部の含水率は表層より高いことから，中心部の速度増加はコンクリートの品質の向上を意味していると考えられる。

図-7 に表層部 4 点（表裏の表面から 2 点ずつ）の速度の平均値と，供試体中心部 11 点（表裏の表面 4 点ずつを除いた中心部データ）の速度を平均したものを示す。平均的な超音波伝播速度で比較すると，養生の延長により，基準養生よりも超音波伝播速度が概ね増大する傾向や，表層と中心部の差異が湿潤養生終了時にはほとんど無く，材齢 28 日で内部の速度が表層よりも速い傾向が確認できる。なお，5℃養生では，材齢 28 日でも表層と中心部の差が小さいが，これは，低温ほど乾燥しにくいことに加え，水和速度が遅いことが影響していると考えられる。

以上の結果をもとに，速度に差がみられた材齢 28 日のそれぞれの細孔容積と超音波伝播速度の関係を示したのが**図-8** である。凡例は表層または内部の細孔径の範囲を示している。また，横軸の平均超音波伝播速度とは，**図-7** に示した表層 4 点平均値と中心部 11 点の平均値のことを指し，表層と内部の細孔容積と平均超音波伝播速度をそれぞれ対応させて示している。いずれも，細孔容積と超音波伝播速度には概ね相関があり，耐久性に影響すると考えられる比較的粗大な細孔径 50nm 以上の細孔容積が減少し，50nm 未満の微細孔が増加して組織が緻密になると超音波伝播速度は増大することが確認された。

以上から，超音波伝播速度はコンクリートの細孔容積と関連し，細孔構造を評価できる可能が示唆され，細孔容積とスケーリング抵抗性等の関係をさらに検討することにより，耐久性の評価も期待される。なお，本研究では超音波伝播速度の含水率による補正を行っていないため，今後含水率の補正について検討する必要がある。

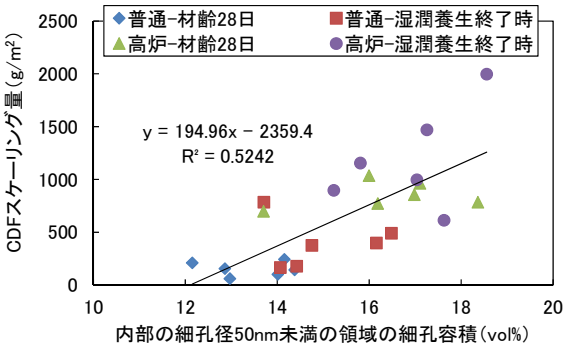


図-5　CDF スケーリング量とコンクリート内部の細孔径 50nm 未満の領域の細孔容積の関係

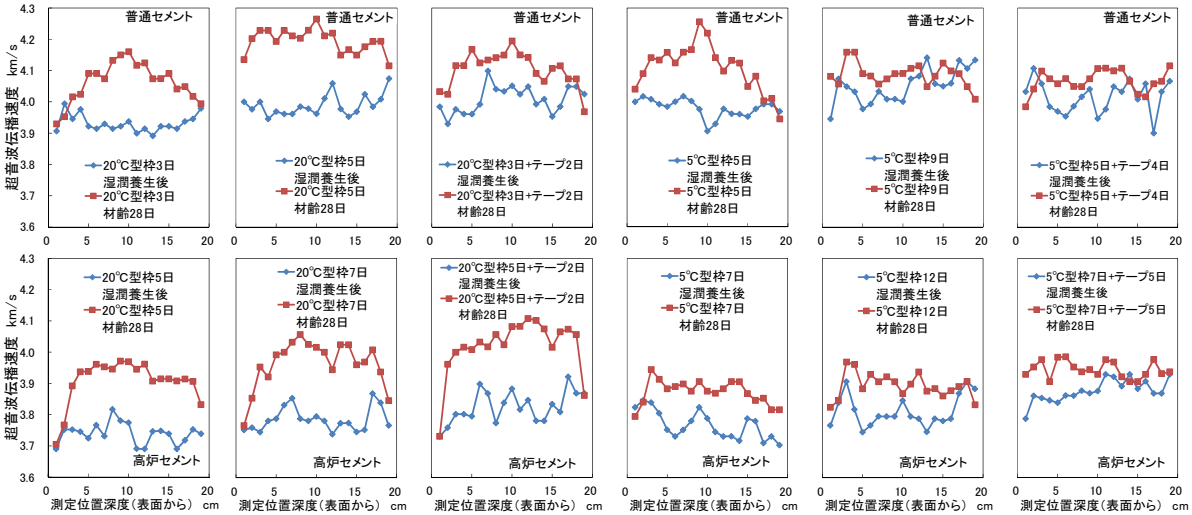


図-6　コンクリート表面から深さ方向の超音波伝播速度

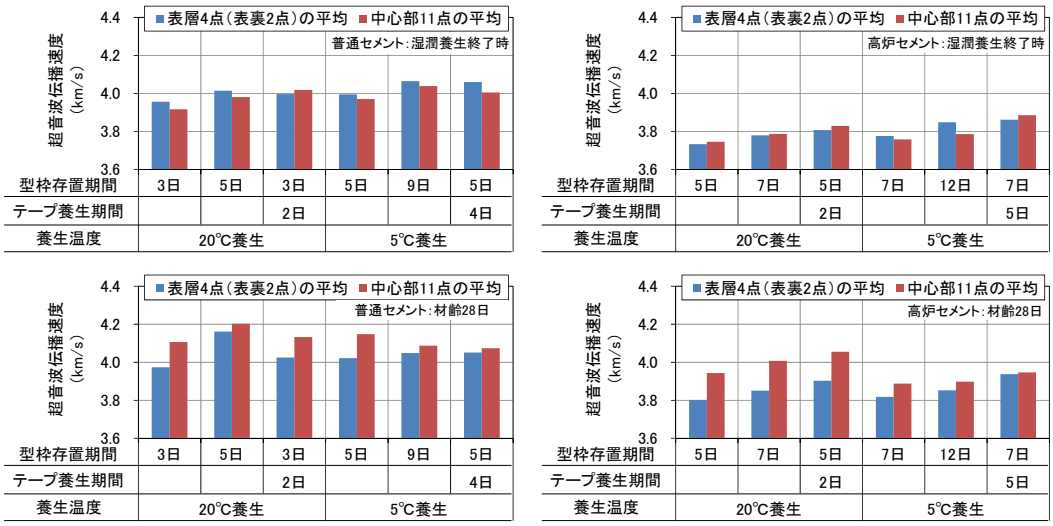


図-7　表層と中心部の平均超音波伝播速度

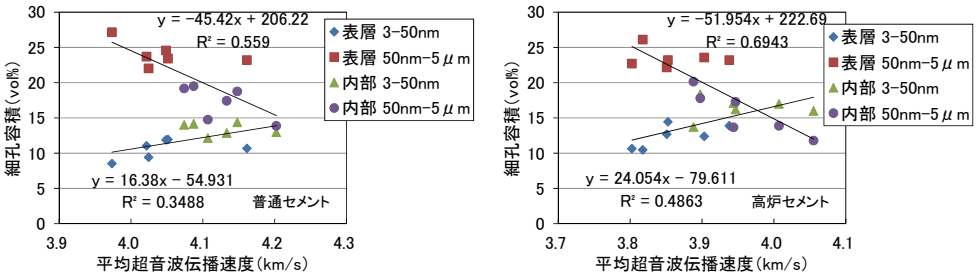


図-8　細孔容積とコンクリート表層から深さ方向の平均超音波伝播速度の関係

5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のようになる。

(1) 凍結融解抵抗性確保の観点から，型枠存置期間を延長する方法と，型枠取り外し後養生テープにより養生する方法の効果について検討した結果，保水養生期間の延長により，概ね凍結融解抵抗性は向上するが，セメントの種類や養生温度によりその傾向は異なることを確認した。

(2) スケーリング抵抗性は，コンクリートの細孔構造や含水率の影響を受け，特に微細な細孔が増加するとスケーリングが増加する傾向を確認した。

(3) コンクリートの含水率により凍結時に毛細管内に生じる圧力が異なることに加え，コンクリート強度とも関連するため，微細な細孔の増加とスケーリング増加の関係を明らかにするにはより詳細な検討が必要である。

(4) 超音波伝播速度はコンクリートの細孔容積と関連する傾向が確認され，コンクリートの細孔構造を評価できる可能性が示唆された。

参考文献

1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書［施工編：施工標準］，pp.156-164，2013.3

2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書［施工編：施工標準］，pp.121-125，2013.3

3) 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

4) 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

5) セメント協会：わかりやすいセメント科学，pp.78-104，1993.3

6) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：乾燥によるコンクリート組織の不均質化，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，2002

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 年 1 月

8) 吉田行，嶋田久俊，水田真紀，島多昭典：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，コンクリート工学次論文集，Vol.36，No.1，pp.634-639，2014.7