

# 冬期施工における養生条件がコンクリートの早期スケーリングに及ぼす影響

Influence of curing conditions in winter construction on scaling deterioration of concrete

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 正員 佐藤義臣 (Yoshitaka Sato)  
 正員 吉田 行 (Susumu Yoshida)  
 正員 島多昭典 (Akinori Shimata)

## 1. はじめに

近年、冬期に施工した地覆や壁高欄等のコンクリートにおいて、JIS 工場から出荷されたコンクリートを用い、湿潤養生、温度、型枠・支保工の取り外し時期、および取り外し後の管理等、工事仕様書や設計施工関連の基準等に則って施工した場合でも想定より早期に凍結融解作用によるスケーリング劣化が発生している事例がある。

スケーリングに影響すると考えられる要因として、コンクリートの使用材料や配合（特に水セメント比や空気量）のほか、気象条件や日照条件、養生温度や養生日数などの養生条件等が挙げられる。このうち、冬期施工において特に留意が必要な養生日数は、表-1 や表-2 に示すように、セメントの種類、施工時期（日平均気温）、養生温度など、複数の条件を基に決定するが、所要の圧縮強度を得る温度制御養生期間の目安については、表-2 に示すように 5℃以上の温度制御養生を行った後の次の春までに想定される凍結融解の頻度を考慮して設定する必要がある。しかし、その設定が適切でなかった場合は養生日数が不足して早期のスケーリング劣化につながる可能性がある。そこで、本研究では、冬期施工における養生条件が早期スケーリング劣化に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合

実験では、土木工事で一般的に使用されている普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm<sup>3</sup>、以下、普通セメントと記述）と高炉セメント B 種（密度 3.05g/cm<sup>3</sup>、以下、高炉セメントと記述）を使用した。細骨材は苫小牧樽前産の陸砂（密度 2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.98%）を、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（密度 2.68g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.49%、粗骨材最大寸法 20mm）を用いた。

コンクリートの配合を表-3 に示す。国土交通省北海道開発局の道路設計要領<sup>3)</sup>に記載されている、地覆・壁高欄に使用されるコンクリートの標準的な品質条件を考慮し、水セメント比は最大水セメント比として示されている 55%に設定した。スランブと空気量は、それぞれ 12.0±2.5cm、4.5±1.5%として、AE 助剤（変性ロジン酸化合物系）と AE 減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）を適宜用いて調整した。

### 2.2 養生条件

#### (1)養生方法

表-4 に本研究で設定した養生方法と養生パターンを示す。冬期施工における養生条件の設定にあたり、厳冬

表-1 湿潤養生期間の標準<sup>1)</sup>

日平均気温	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種
15℃以上	3日	5日	7日
10℃以上	4日	7日	9日
5℃以上	5日	9日	12日

表-2 所要の圧縮強度を得る温度制御養生期間の目安<sup>2)</sup>  
 (断面の大きさが普通の場合)

5℃以上の温度制御養生を行った後の次の春までに想定される凍結融解の頻度	養生温度	セメントの種類		
		早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種
(1)しばしば凍結融解を受ける場合	5℃	5日	9日	12日
	10℃	4日	7日	9日
(2)まれに凍結融解を受ける場合	5℃	3日	4日	5日
	10℃	2日	3日	4日

表-3 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	コンクリートの単位量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
					W	C	S	G		
N	普通セメント	55	4.5	45	155	282	851	1048	0.06	0.00575
B	高炉セメント	55	4.5	45	155	282	847	1044	0.08	0.00800

期の施工を想定して、表-2 に示す次の春までに想定される凍結融解の頻度を「しばしば」に、養生温度は最低基準となる 5℃を基準として設定した（以下、5℃ノーマルと記述）。一方、頻度の設定が適切でなかった場合については、「まれ」とした場合の養生条件を設定した（以下、5℃読間違いと記述）。さらに、通常期の施工として、20℃養生した場合についても実施した（以下、20℃ノーマルと記述）。

養生は、いずれの養生パターンにおいても、所定期間湿布養生を行った後、材齢 28 日まで気中養生、真水養生、塩水養生の 3 通りの方法で行った。これら 3 通りの養生方法は、湿潤養生終了後の現場環境を再現しており、「気中養生」は、降雨や降雪の供給を受けない未供用の現場、「真水養生」は、降雨や降雪による水の供給を受ける未供用の現場、「塩水養生」は、湿潤養生終了後の早期に供用され、降雨や降雪による水の供給に加え凍結防止剤の影響を受ける現場を想定している。

#### (2)養生パターン

各養生パターンにおける詳細な養生プロセスについて、「5℃ノーマル」は、上述したように表-2 の凍結融解頻度が「しばしば」と、養生温度 5℃に該当する各セメントの温度制御養生期間を湿布養生日数として設定した。また、湿布養生終了後は、土木学会コンクリート標準示方書施工編の寒中コンクリート<sup>2)</sup>において、コンクリートの急冷を防ぐために設定することを標準としている 0℃以上を 2 日間保つ工程を加え、その後、材齢 28 日ま

表-4 養生方法と養生パターン

セメントの種類	養生方法の種類	養生パターン	養生温度	養生期間													
				打込み	4日	5日	6日	7日	9日	11日	12日	14日	28日				
普通セメント N	所定期間 湿布養生 ↓	20℃ ノーマル	20℃	20℃湿布養生5日					20℃で各養生（気中、真水、塩水）23日							ASTM C672 試験開始 0cyc~ 100cyc	
		5℃ ノーマル	5℃	5℃湿布養生9日					5℃ 2日	低温室（-18~+23℃）で各養生（気中、真水、塩水）17日							
		5℃ 読違い	5℃	5℃湿布養生 4日		5℃ 2日		低温室（-18~+23℃）で各養生（気中、真水、塩水）22日									
高炉セメント B	(各養生) 気中 真水 塩水	20℃ ノーマル	20℃	20℃湿布養生7日					20℃で各養生（気中、真水、塩水）21日								
		5℃ ノーマル	5℃	5℃湿布養生12日										5℃ 2日	低温室（-18~+23℃）で 各養生14日		
		5℃ 読違い	5℃	5℃湿布養生 5日		5℃ 2日		低温室（-18~+23℃）で各養生（気中、真水、塩水）21日									

での間、気中、真水、塩水の各養生を行った。なお、湿布養生は、温度 5℃、相対湿度 60% に設定した実験室内で、湿らせた養生マットで供試体を包んだ上からビニール袋をかけて行い、その後の 0℃ 以上 2 日以上の確保については、同じ実験室内で養生マットを外して気中乾燥状態で静置した。その後、凍結融解作用を受ける環境下に晒されることを想定して、後述するスケーリング試験を実施するため低温室（-18℃~+23℃ で温度が可変する試験室）に移し、-18℃ を 16 時間、+23℃ を 8 時間の 1 日 1 サイクルで凍結融解作用を与える環境下で気中、真水、塩水の各養生を行った。

「5℃読違い」は、5℃ノーマルで設定した凍結融解頻度を「まれ」に変更し、それに対応する温度制御養生期間を湿布養生日数としたため、湿布養生日数が短く湿布養生後の各種養生期間が長くなっているが、それ以外の取り扱い は 5℃ノーマルと同様である。なお、温度制御養生期間の設定において、次の春までの凍結融解頻度を「まれ」とした場合は、本来、湿潤養生後の 0℃ 以上を 2 日間確保する必要はないが、冬期施工を行っている実際の現場では実施されているため、ここでも設定した。

「20℃ノーマル」は、表-1 に示した湿潤養生期間の標準の日平均気温 15℃ 以上に該当する各セメントの湿潤養生期間を湿布養生日数として設定し、その後、材齢 28 日までの間、温度 20℃、相対湿度 60% に設定した恒温恒湿室で、気中、真水、塩水の各養生を行った。

### 3. 実験項目と試験方法

#### 3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ10×20cm 円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠し、湿布養生終了時と材齢 28 日に実施した。なお、5℃養生における真水と塩水養生は、JIS A 1148 A 法に準じた凍結融解試験を実施する際に使用する円柱供試体用のゴムスリーブに供試体を入れて各養生水を注ぎ、材齢 28 日まで低温室に静置した。

#### 3.2 スケーリング試験

スケーリング試験では、各養生後の材齢 28 日から 220×220×100mm の角柱供試体を用いて、ASTM C672 に準じて -18℃ を 16 時間、23℃ を 8 時間の 1 日 1 サイクルで凍結融解作用を与えた。試験面は打込み面（220×220mm）とし、試験面に土手を設けて試験溶液を湛水し凍結融解作用を与えた。試験溶液には、3%NaCl 水溶液を使用した。なお、供試体は湿布養生後に試験面と底

面以外の供試体側面をエポキシ樹脂コーティングし、湿潤養生終了後（5℃養生については 0℃ 以上を 2 日間確保後）から材齢 28 日までの養生は、気中養生はそのまま各試験室内に静置し、真水と塩水養生は試験面にそれぞれ真水と 3%NaCl 水溶液を湛水した状態で各試験室内に静置した。このため、真水養生の供試体については、材齢 28 日で試験面の溶液を真水から 3%NaCl 水溶液に変更している。

#### 3.3 表面水分率測定

スケーリングは凍結融解作用を受ける時点の含水率が影響すると考えられるため、一部の養生パターンで、凍結融解作用を与える直前にスケーリング試験用供試体の試験面の表面水分率を測定した。測定には、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、供試体に対して水分計を縦横に向きを変えて複数個所測定を行い、異常値を除く最大値により評価した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

図-1 に各養生を行った供試体の圧縮強度を示す。材齢 28 日までの範囲内においては、いずれの養生条件および材齢においても、普通セメントの方が高炉セメントより圧縮強度は大きかった。また、いずれのセメントでも 5℃養生したケースは 20℃ノーマルよりも強度は低下しており、湿布養生期間が短い 5℃読違いは 5℃ノーマルよりもさらに強度は低下した。このことから、養生温度や湿潤養生期間が強度発現に大きく影響することがあらためて確認できた。また、本研究においては、湿布養生後の気中、真水、塩水の各養生の違いで材齢 28 日の圧縮強度に大きな差はないことから、材齢初期の湿潤養生の重要性が確認できる。なお、詳細にみると、気中養生で真水や塩水養生よりわずかに強度が高いケースがみられた。これは乾燥の影響により見かけの強度が高くなったことや、5℃養生では凍結融解作用を与える環境下で養生を行っているため、真水や塩水養生では凍結融解回数は少ないもののその影響が気中養生よりも大きく、強度の増加が小さかったことが考えられる。

一方、表-5 は土木学会コンクリート標準示方書施工編の寒中コンクリート<sup>2)</sup>に記載されている養生温度を 5℃ 以上に保つのを終了する時に必要な圧縮強度の標準であるが、この強度を確保するための温度制御養生期間の目安が表-2 であり、これは普通の断面の場合である

ため、5°Cノーマルの養生パターンでは 12N/mm<sup>2</sup>、5°C読違いでは 5N/mm<sup>2</sup> が対応する。いずれの養生パターンにおいても湿布養生後の強度はこれらの基準値を満足したが、本来 5°Cノーマルとすべき現場条件にもかかわらず 5°C読違いの条件を設定した場合を想定すると、5°C読違いの湿布養生後の強度はいずれのセメントも 12N/mm<sup>2</sup> を下回っており、この場合、十分な強度に達しない状態で凍結融解作用を受けることを意味する。また、地覆・壁高欄の設計基準強度は 24N/mm<sup>2</sup> であるが、20°Cノーマルでは、いずれのセメントも材齢 28 日の圧縮強度は設計値を超えたものの、5°C養生の高炉セメントではいずれも設計値を満たしておらず、普通セメントでも 5°C読違いではわずかに達している程度であることから、冬期施工を行う際には、特に養生や気象条件の影響を受けやすいコンクリート表層部の品質確保に留意する必要がある。

#### 4.2 圧縮強度と積算温度の関係

図-2 に圧縮強度と積算温度の関係を示す。積算温度は式-1 より算出した<sup>2)</sup>。なお、低温室における積算温度は、円柱供試体を別途用意し、供試体中心部に熱電対を埋め込んで測定した 4 サイクル (4 日間) のデータの平均値を 1 サイクル当たりの積算温度として算出し、養生日数を乗じて積算した。

$$M = \Sigma (\theta + A) \cdot \Delta t \quad (\text{式-1})$$

ここに、 $M$ : 積算温度 (°C・日)、 $\theta$ : 時間  $\Delta t$  におけるコンクリート温度 (°C)、 $A$ : 定数 (一般に 10°C)

図-2 にはセメントの種類毎に全データに対する近似直線を示しているが、セメントの種類により同一積算温度における圧縮強度や圧縮強度の増加の程度は異なるものの、本研究においては、いずれのセメントにおいても各養生条件によらず圧縮強度と積算温度には高い相関があることを確認した。

#### 4.3 各養生条件におけるスケーリング量

図-3 に養生パターン毎のスケーリング量を示す。なお、本研究では、5°C養生において、湿布養生後に 0°C 以上を 2 日間確保した後、低温室に移して凍結融解作用を与える環境下で養生を行ったため、低温室に移した段階から 5 サイクル毎にスケーリング量を測定している。このため、図には材齢 28 日を基点の 0 サイクルとして、それ以前の低温室で計測したスケーリングの凍結融解サイクルはマイナスで表示し、材齢 28 日以降の測定値と積算して評価した。

セメントの種類で比較すると、既往の研究<sup>4)</sup>でも明らかかなように、いずれの養生パターンにおいても普通セメントより高炉セメントを用いた方がスケーリング量は多いことが確認された。

養生パターンで比較すると、普通セメントでは、全体にスケーリング量が少なく差がないが、いずれも気中養生で増加しており、5°Cノーマルは 20°Cノーマルよりもスケーリング量が多く、5°C読違いはさらに多かった。気中養生は湿布養生後材齢 28 日までの間乾燥状態にあり、圧縮強度は大差なかったものの、水和が進まず表層

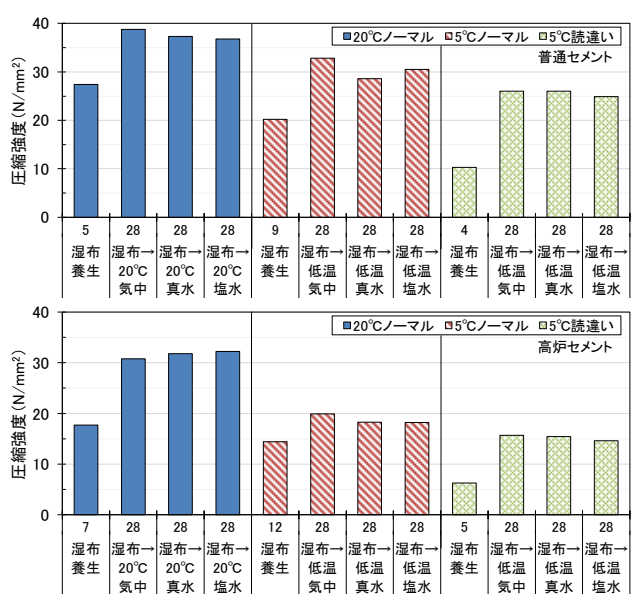


図-1 各養生後のコンクリートの圧縮強度

表-5 養生温度を 5°C 以上保つのを終了するときに必要な圧縮強度の標準 (N/mm<sup>2</sup>)<sup>2)</sup>

5°C以上の温度制御養生を行った後の次の春までに想定される凍結融解の頻度	断面の大きさ		
	薄い場合	普通の場合	厚い場合
(1) しばしば凍結融解を受ける場合	15	12	10
(2) まれに凍結融解を受ける場合	5	5	5

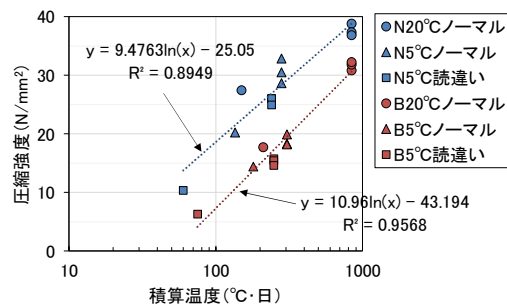


図-2 圧縮強度と積算温度の関係

部の品質に影響したことが考えられる。

高炉セメントでは、20°Cノーマルの真水と塩水養生でスケーリング量が急激に増加したが、既往の研究<sup>5)</sup>で乾燥工程なしの高含水状態で凍結融解作用を与えた場合、急激にスケーリングが増加することが報告されており、本研究でも同様の現象が生じたものと考えられる。5°Cノーマルと 5°C読違いでは、普通セメントと同様、気中養生のスケーリング量が多くなり、乾燥による水和の遅れが影響していると考えられる。また、5°C読違いは、塩水養生したケースでも急激にスケーリング量が増加しており、圧縮強度が 5N/mm<sup>2</sup> 程度と低い時点で、塩水による凍結融解作用を受けたためと考えられる。

#### 4.4 凍結融解開始時の強度とスケーリング量の関係

図-4 に凍結融解開始時の圧縮強度と凍結融解 100 サイクルにおけるスケーリング量の関係を示す。凍結融解開始時の圧縮強度は、20°Cノーマルはスケーリング試験開始時の材齢 28 日強度を、5°C養生は低温室に移す前の湿布養生終了時の強度とした。いずれのセメントも両者に

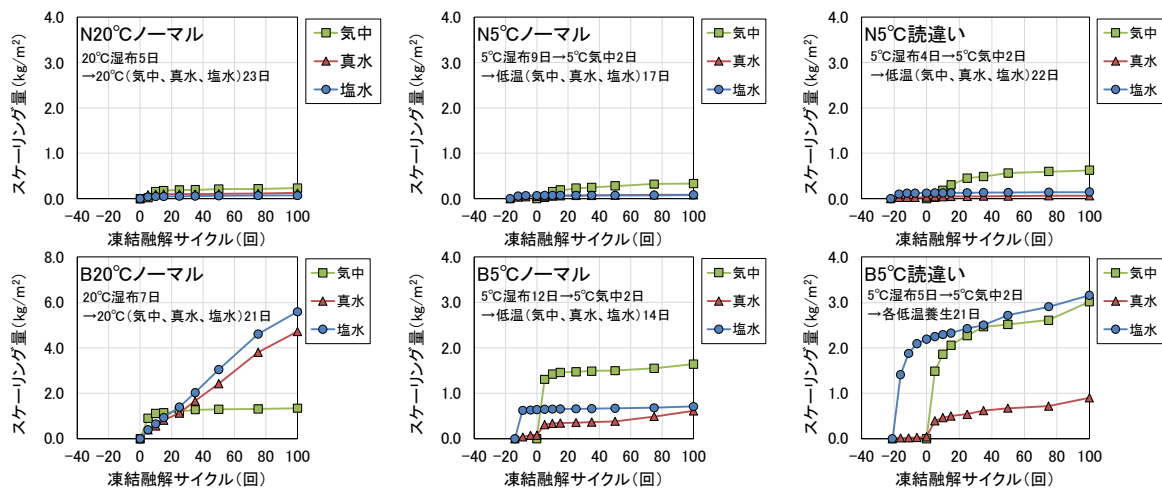


図-3 各養生条件で養生したコンクリートのスケール量

明確な関係はなく、強度試験用供試体による圧縮強度だけではスケール抵抗性を単純に評価できず、水和の進行に伴い変化する細孔構造やコンクリートの含水状況、試験溶液の種類等を考慮して評価する必要がある。

#### 4.5 凍結融解開始時の表面水分率の影響

図-5 にスケール供試体の湿潤養生後の乾燥期間と試験面の表面水分率の関係を示す。5°C養生の真水と塩水養生では実施していないが、セメントの種類や養生条件によらず、乾燥日数が長くなると表面水分率は減少していることが確認できる。

図-6 に凍結融解開始時の表面水分率と凍結融解100サイクルにおけるスケール量の関係を示す。普通セメントでは両者の明確な関係は確認できないが、高炉セメントでは、凍結融解開始時の含水率が高いほど、スケール量が多くなる傾向があることを確認した。

#### 5. まとめ

本研究では、養生条件が早期のスケール発生に及ぼす影響について室内実験を行い、現場条件や気象条件を考慮して養生条件を設定する際に、その設定が適切でない場合には必要な養生が不足しスケール劣化が大きくなる可能性があること、およびスケール抵抗性は圧縮強度だけでなく、セメントの種類やコンクリートの含水率、作用する水の種類（真水、塩水）等を考慮して評価する必要があることを確認した。今後は、実際の養生条件と実構造物の劣化状況を調査し、それらに関連付けて早期スケール劣化対策の検討を行う。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕、pp.124-128、2018.3
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編：施工標準〕、pp.161-168、2018.3
- 3) 国土交通省北海道開発局：令和4年度北海道開発局道路設計要領、[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/do\\_u\\_ken/ud49g7000001tos-att/splaat0000003wal.pdf](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/do_u_ken/ud49g7000001tos-att/splaat0000003wal.pdf)
- 4) 遠藤裕丈、熊谷守晃、嶋田久俊：長期凍結融解による表面剥離に及ぼす凍結防止剤の影響、コンクリー

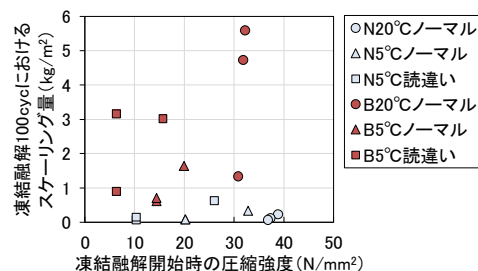


図-4 圧縮強度とスケール量の関係

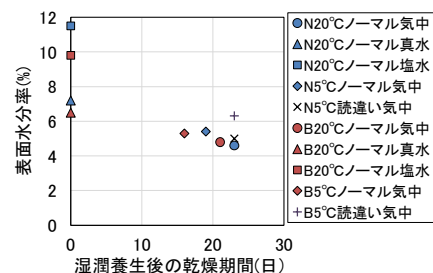


図-5 湿潤養生後の乾燥期間と表面水分率の関係

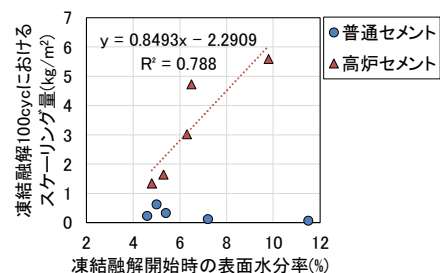


図-6 凍結融解開始時の表面水分率とスケール量の関係

ト工学年次論文集、Vol. 23、No. 2、pp.613-618、2001.7

- 5) 吉田行、島多昭典：塩化物作用下におけるスケール抵抗性の促進評価試験法に関する研究、土木学会コンクリート構造物の耐害性確保に関する調査研究小委員会（359委員会）委員会報告書およびシンポジウム論文集、pp.339-344、2021.10