

凍結防止剤によるコンクリートのスケーリングに及ぼす養生・乾燥の影響

Effect of Wet curing and Dry curing on Scaling of Concrete by Deicing salt

北海道開発土木研究所 ○正 員 遠藤 裕丈 (Hirotake Endoh)
 北海道開発土木研究所 正 員 田口 史雄 (Fumio Taguchi)
 北海道開発土木研究所 正 員 嶋田 久俊 (Hisatoshi Shimada)

1. はじめに

積雪寒冷地における凍害は、配合や材料の品質に影響されるが、構造物がおかれる環境条件によっても被害程度は異なる¹⁾。冬期間、路面に散布される塩化物系の凍結防止剤は、コンクリートの凍害（スケーリング）を促進させる特徴を持つ。しかし、凍結防止剤によるスケーリング劣化に及ぼす環境条件の影響が検討された例は多くない。本研究では、凍結融解作用を受ける前のコンクリート面の状態、すなわち硬化後の養生日数・乾燥期間がスケーリング劣化にどのように影響するかを調べた。

2. 概要

2.1 配合・使用材料

配合を表-1に示す。使用材料は普通ポルトランドセメント（以下：普通ポルト）と高炉セメントB種（以下：高炉B種）、海砂（密度2.70g/cm³、吸水率0.97%、粗粒率2.86）、碎石（密度2.67g/cm³、吸水率1.58%、最大寸法25mm）である。スランブは8±2.5cm、空気量は4.5±1%を目標値とした。

2.2 凍結融解試験

2.2.1 供試体・養生

図-1に供試体を示す。供試体は220×220×100mmとし、試験面（220×220mm）に試験水を湛水させるため、幅25mm、高さ20mmの土手を設置した。試験面は主に打設面とした。比較のため、BB50は底面についても試験を行った。図-2に養生条件を示す。試験開始材齢は、28日

表-1 配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(ml/m ³)	
			W	C	S	G	AE減水剤	空気連行剤
NP50	50	44	140	280	862	1089	700	14.0
BB50	50	44	140	280	859	1085	700	17.5

〈記号〉 NP:普通ポルトランドセメント、BB:高炉セメントB種

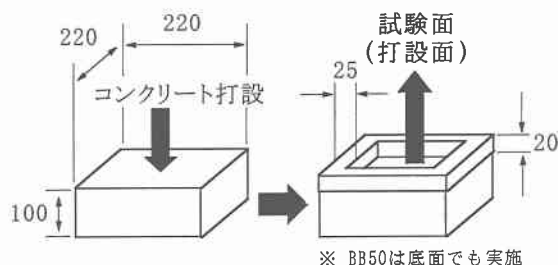


図-1 供試体 (数値の単位はmm)

および91日とした。湿気養生では、湿った麻袋で試験面を覆い、20℃の湿気養生室に安置した。湿気養生の日数は、開始材齢28日は7日（S07-Z28）と28日（S28-Z28）、開始材齢91日は7日（S07-Z91）と28日（S28-Z91）および91日（S91-Z91）とした。気中放置では、温度20℃、湿度60%の恒温室に供試体を安置した。S28-Z28とS91-Z91は、湿気養生のみ行い、気中放置は行わなかった。

2.2.2 試験方法

凍結防止剤による凍害劣化に及ぼす硬化後の養生・乾燥の影響は、急速水中凍結融解試験（JSCE-G501-1999）準拠のもとで検討された研究成果²⁾があるが、本研究ではコンクリートの1面に対してのみ凍結融解作用を与えて剥離抵抗性を評価するASTM-C-672に準拠して試験を行った。試験水は、濃度3%の塩化ナトリウム水溶液（以下：NaCl）および淡水を用いた。試験面に試験水を深さ6mm程度張り、-18℃で16時間凍結、23℃で8時間融解の24時間1サイクルの凍結融解作用を与え、5、10、15、30、…（以降15サイクルおき）サイクル目にスケーリング量の測定を行った。

2.3 乾燥収縮試験

供試体の寸法は100×100×400mmとし、材齢1日で脱型後、7日間隔で打設面の長さ変化および質量変化率を測定した。供試体の保存環境は、図-2のS07-Z91（=S07-Z28）、S28-Z91、S91-Z91（=S28-Z28）の3条件とした。測定はJIS-A-1129によった。

2.4 細孔構造分析

細孔構造は、図-2の養生終了後、220×220×100mmの打設面から深さ0～1cmと2～3cmの2箇所から試料を採取し、水銀圧入法により分析した。

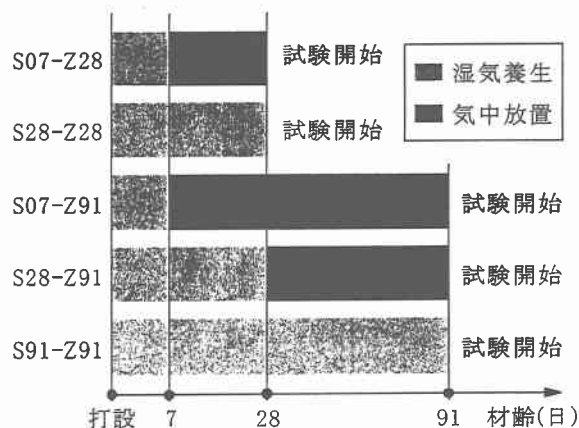


図-2 養生条件

3. 結果・考察

3.1 圧縮強度試験

φ10×20cmの供試体を気中放置した場合（気中）、湿った麻袋で覆って安置した場合（湿気）、水中養生した場合（水中）で行った。図-3に結果を示す。水中、湿気、気中の順に強度発現は大きく、湿気と水中の養生効果はほぼ同じと考えられる。また、初期強度は普通ポルトが大きい。高炉B種の長期強度が大きい。

3.2 凍結融解試験

3.2.1 淡水を用いた場合

図-4に結果を示す。スケーリング量は、S07-Z28が最も多く、次いでS07-Z91、S28-Z28、S28-Z91、S91-Z91と養生日数が短い順に多い。養生日数が同じであるS07-Z28とS07-Z91、S28-Z28とS28-Z91を比較すると、いずれも開始材齢が91日の方がスケーリング量は少ない。スケーリング量をセメントの種類別で比較すると、S07-Z28、S07-Z91、S28-Z28は高炉B種が多いが、S28-Z91、S91-Z91は僅差である。これは、コンクリートが淡水浸漬下で凍結融解作用を受ける場合、湿気養生28日以上かつ気中放置91日以上になると、スケーリングに及ぼすセメントの影響が著しく小さくなることを示唆する。

3.2.2 NaClを用いた場合

同じく図-4に結果を示す。普通ポルト（NP50）、高炉B種（BB50）とも、打設面の結果をみると、S28-Z28とS91-Z91は、試験直後に著しく多くスケーリングした。次いでS07-Z91、S28-Z91の順にスケーリング量が多く、スケーリングの進行が淡水とは大きく異なっている。S07-Z28は、普通ポルトでは最もスケーリング量は少ない

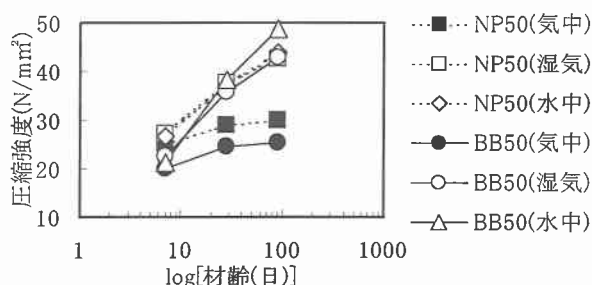


図-3 圧縮強度

いが、高炉B種では15サイクル以降でスケーリング量が急増した。ここで示された特徴は、セメントの種類に関係なく気中放置を行わなかったコンクリートのスケーリング量が試験直後に急増していること、かつ、この傾向が淡水では全くみられないこと、また、気中放置が長いコンクリートは、試験直後のスケーリングの発生量はやや多いものの、その後は試験直後に比べると安定したことである。一方、底面をみると、気中放置を行っていないコンクリートのスケーリング量がやや多い傾向にあるが、スケーリング量は打設面に比べると少ない。

写真-1にNP50の30サイクル目の打設面を示す。S07-Z91は、面的かつ広範に薄くスケーリングした。S91-Z91は、大きなモルタルの剥離痕が部分的にみられる一方、健全なペーストが多く残存していることが確認できる。

3.3 スケーリングの挙動に関する考察

3.3.1 養生時におけるコンクリートの挙動

図-5に乾燥収縮の結果を示す。湿気養生中は長さ変化

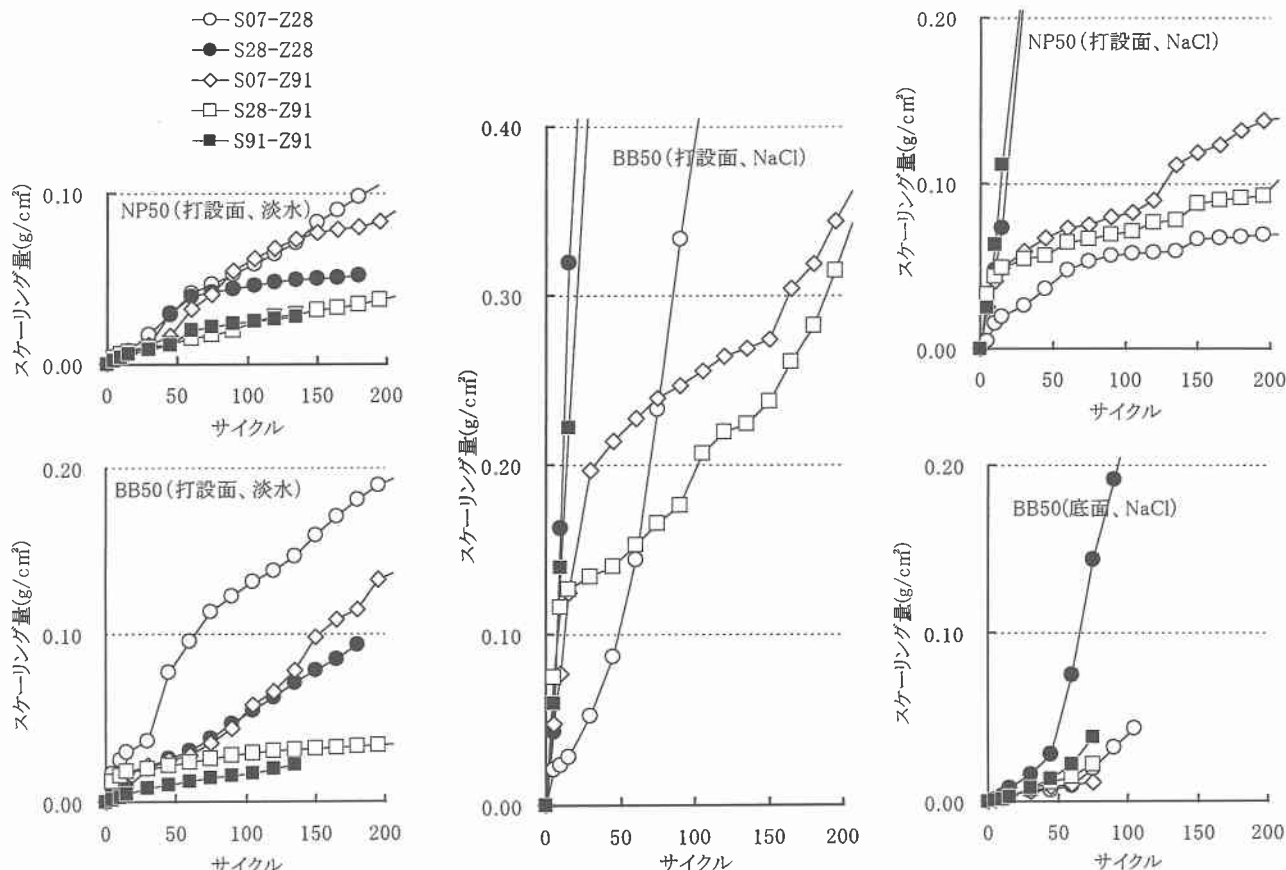


図-4 凍結融解試験結果

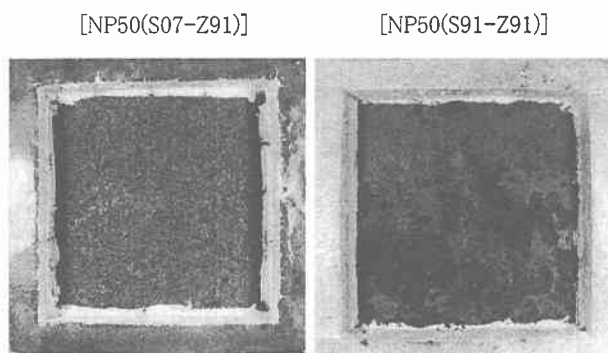


写真-1 30サイクル目の打設面の状況(NaCl)

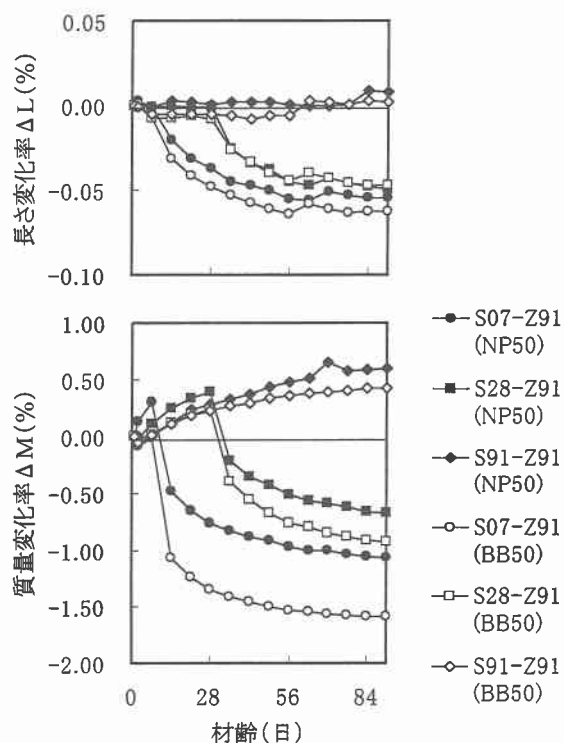


図-5 乾燥収縮試験結果

がほとんど認められず、質量は増加（プラス）した。湿気養生から気中放置に切り替わると、長さ、質量とも、急激に減少（マイナス）した。長さは乾燥収縮、質量はコンクリート表面付近の水分逸散の影響と思われる。

図-6に打設面の細孔分布を示す。鎌田³⁾は、細孔径が750～7500Å領域の細孔は凍害に大きく影響すると報告している。湿気養生の日数が長くなるにつれて細孔容積が減少し、ペーストの組織構造が緻密になっている。これらは、淡水のスケーリング試験結果に対応している。図-5と図-6は、湿気養生が長いほど水和進行に有利になる一方、気中放置が行われないとコンクリート表面付近の飽水度が高くなることを示唆する。

3.3.2 湿気養生による表面飽水の影響（淡水、NaCl）

図-7に養生終了時の質量変化率と75サイクルの打設面のスケーリング量の関係を示す。淡水を用いた場合、スケーリング量は、養生過程における質量変化率の影響を殆ど受けていない。これに対し、NaClを用いた場合、養生過程における質量変化率がプラスになる（飽水度が

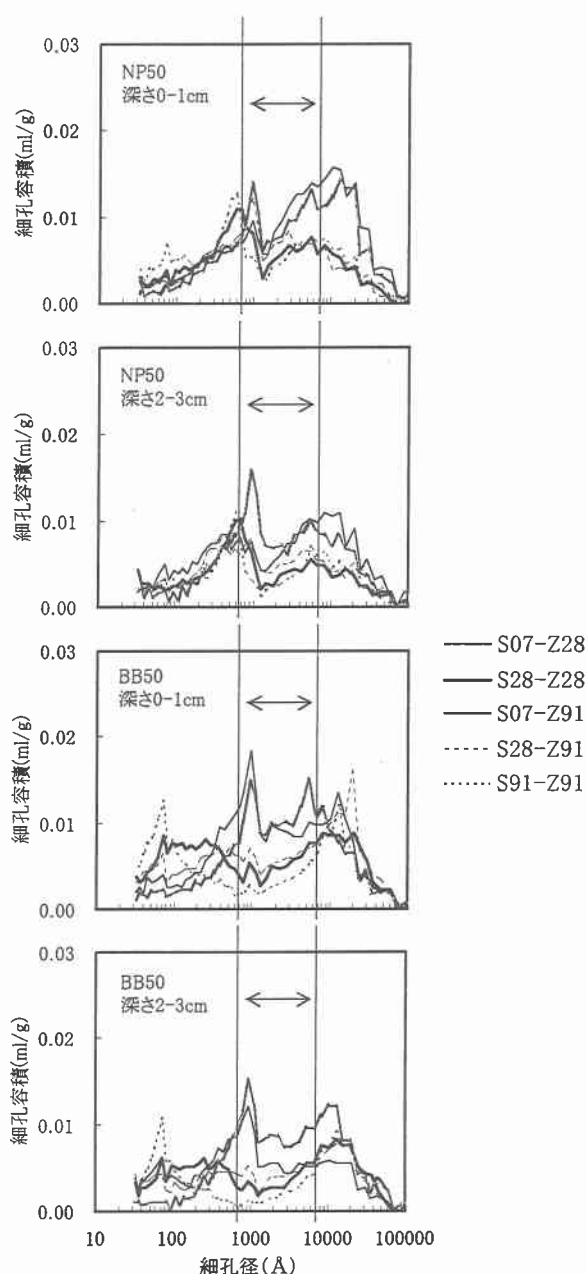


図-6 細孔構造（打設面）

高くなる）と、セメントの種類に関係なく、スケーリング量は著しく増大している。スケーリング量が著しく増大したのは、図-6でも示したようにペーストの組織構造が緻密で、気中放置を行っていないS28-Z28とS91-Z91である。このことは、コンクリートがNaClによる凍結融解試験を受けた場合のスケーリング劣化は、コンクリート表面付近の飽水度が最も影響することを意味する。融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会⁴⁾は、スケーリングは水圧と浸透圧の複合作用によって発生すると報告している。それによると、浸透圧には、主に温度低下によって、コンクリート毛細管中に存在する弱アルカリの細孔水のうち、粗大な毛細管中の水が凍結することで、未凍結の細孔水のアルカリ濃度が増大し、ゲル水との間に発生するものと、塩化物水溶液と細孔水との間に発生するものがある。コンクリート表面の飽水

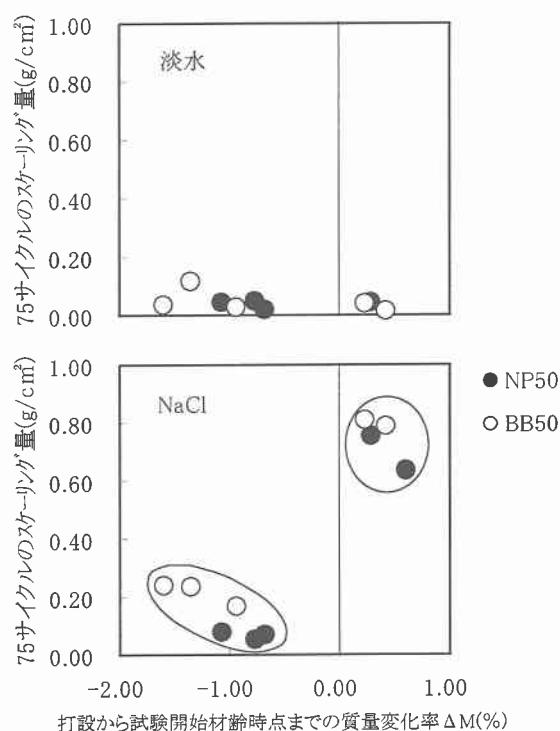


図-7 養生の質量変化率と打設面のスケーリング量の関係

度が高いS28-Z28とS91-Z91では、NaCl溶液の濃度を薄める作用、すなわちコンクリート表面の飽和水がNaCl溶液へ引き寄せられる浸透圧が発生すると思われる。この浸透圧が、写真-1に示すように試験面に部分的な損傷を与えたと推定される。淡水を用いた場合は、NaClに比べて浸透圧の影響が極めて小さく、緻密な組織によってスケーリングの発生が抑えられたと考えられる。

3.3.3 気中放置の影響（淡水）

図-4で示した淡水を用いたスケーリング量の測定結果のうち、気中放置を行ったS07-Z28、S07-Z91、S28-Z91に着目すると、スケーリング量は、多い方からS07-Z28、S07-Z91、S28-Z91の順になっている。スケーリング量は、湿気養生の日数が長い方が、また、湿気養生の日数がともに7日の場合は気中放置の日数が長い方が少なくなっている。しかし、高炉B種をみると、S07-Z91のスケーリング量は、50サイクルまではS28-Z91とほぼ同程度であったが、それ以降ではスケーリング量は多く発生している。図-6の細孔容積をみると、湿気養生の日数が短く、かつ、気中放置の日数が長いS07-Z91が最も多い。これは、水和の進行が十分でないことに加え、気中放置による水分の逸散で収縮が促進され、マイクロクラックが発生したためと考えられる。打設面から深さ2～3cmの箇所も、この影響を受けていることがわかる。S28-Z91も気中放置の日数は長い、S07-Z91に比べると細孔容積は小さい。図-5の質量変化率みると、S28-Z91の質量減少はS07-Z91に比べて小さくなっている。図-6の結果を照合して考えると、これは、S28-Z91の方がセメントと水和反応によって水和物に変化した水の量が多いことに起因すると推定される。つまり、S28-Z91は長期の湿気養生によって水和が促進され、マイクロクラックの

発生を抑制し得る程の緻密な組織が形成されたため、やや長期の気中放置を受けてもマイクロクラックがそれ程発生しなかったため、結果的にS07-Z91より細孔容積が小さくなったものと考えられる。以上のことから、S07-Z91は、初期は飽水度が小さいためスケーリング量は少なかったが、マイクロクラックの影響で後に多くスケーリングしたと考えられる。

3.3.4 気中放置の影響（NaCl）

図-4で示したように、NaClを用いた場合は、淡水と異なり、打設面ではS07-Z91とS28-Z91においては、試験直後に面的かつ広範に薄くスケーリングしたが、S28-Z28とS91-Z91とは対照的に、後にスケーリングの発生量は抑制された。S07-Z91とS28-Z91は、長期の気中放置で表面付近が著しく乾燥しているため、NaClが表面から深さ方向へ多く浸透すると予想される。コンクリート表層がNaClによって飽和されると、層間凍結による塩分濃度とコンクリート温度分布の関係から応力差が生じ、損傷するとされている⁴⁾。このことから、S07-Z91とS28-Z91は、応力差の影響で乾燥した表層部分が試験直後にスケーリングしたと考えられる。

3.3.5 打設面と底面の比較

図-4にてNaClを用いた高炉B種の底面をみると、養生・乾燥の影響はみられるが、打設面に比べるとスケーリング量は著しく減少している。底面は、ブリーディング水の減少、コンクリートの自重による圧縮作用により、極めて良好な表面品質を形成している。これは、いかなる環境下でもスケーリングを抑制するには、コンクリート表面品質を著しく高める必要があることを示唆する。

4. まとめ

- (1) スケーリング劣化は、養生、乾燥の影響を受ける。劣化挙動は、試験水が淡水とNaClで大きく異なる。
- (2) 常時、湿気環境におかれたコンクリートがNaClによる凍結融解を受けると、早期に試験面が部分的に損傷しやすい。
- (3) 長期にわたり気中放置されたコンクリートが淡水による凍結融解を受けた時のスケーリング量は、初期は少ないが、マイクロクラックが発生している場合は後に多く発生する。NaClの場合は、試験直後は広範に薄くスケーリングするが、後に安定する。
- (4) スケーリングを抑制するには、コンクリート表面の品質を著しく高めることが必要である。

参考文献

- 1) 田畑:コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究,学位論文,1986.2
- 2) 三浦他:凍結防止剤の影響を受けるコンクリートの凍害劣化に関する実験的研究,融雪剤によるコンクリート構造物の劣化に関するシンポジウム論文集,日本コンクリート工学協会,pp.159,1999.11
- 3) 鎌田:セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害,コンクリート工学Vol.19, No.11, pp.16～22, 1981
- 4) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,pp.24, 1999.11