

高炉セメントを用いたコンクリートのスケーリング抵抗性低下要因について

Study on cause of promotion of scaling deterioration of concrete with blast furnace slag cement (B-type)

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

高炉セメントが用いられたコンクリートは、塩化物イオンの浸透抑制、アルカリ骨材反応の抑制、水密性、化学抵抗性の向上に対して比較的有効とされ¹⁾、コンクリート構造物の耐久性向上やライフサイクルコストの縮減効果が期待される。さらには、スラグのリサイクルによる環境負荷低減に対する貢献性も有する。

北海道の構造物は、塩害と凍害との複合劣化の影響を受けやすい過酷な環境下に曝されることから、耐塩害性に加え、耐凍害性も強く要求される。高炉セメントを用いると、コンクリート全体の耐凍害性の向上に対して有効である反面、コンクリート表面の耐凍害性は低下しやすいとされ¹⁾、凍結防止剤や海水との複合作用によるスケーリングの発生が懸念されるが、表面の耐凍害性が低下しやすい原因については、未だ明らかに整理されていない。高炉セメントは、耐久性や環境面の観点から需要、実績の増加が将来的に予想されることから、寒冷地における課題の一つであるコンクリートの表面の耐凍害性の改善技術の確立が求められる。

そこで、本研究ではコンクリート表面の耐凍害性改善に向けた検討を行うための資料を得ることを目的とし、表面の耐凍害性が低下する原因について検討した。

2. 概要

2.1 配合・材料・供試体

表-1にコンクリート配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用いた。水セメント比(W/C)は50%とした。細骨材は苫小牧市樽前錦岡産の海砂(密度2.70g/cm³、吸水率0.89%)、粗骨材は小樽市見晴産の碎石(密度2.67g/cm³、吸水率1.07%、最大寸法25mm)を使用した。

供試体の寸法は□22×10cmとした。打設後、試験開始までの工程を図-1に示す。材齢1日で脱型後、コンクリートの表面を養生マットに見立てた麻布で3日間覆い、養生を施した。養生後は材齢91日まで温度20℃、湿度60%の恒温室に静置した。さらに、材齢91日到達後、表面の飽水度を意図的に高めるために、表面を淡水で湛え(以下、浸漬と記)、再吸水させた後、各種試験を行った。浸漬の日数は0日、7日、30日、60日の4水準とした。写真-1に浸漬後の表面状況の一例を示す。外観上、浸漬させても表面に目立った変状は特にみられなかった。

2.2 凍結融解試験

試験はASTM-C-672に準じて行った。図-2に示すように、表面(以下、試験面と記)に土手を据え付け、試験

表-1 コンクリートの配合

記号	セメント	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				添加量 (C×%)	
						W	C	S	G	AE 減水剤	空気 連行剤
NP50	普通	50	44	8	4.5	140	280	862	1090	0.25	0.004
BB50	高炉	50	44	8	4.5	140	280	859	1086	0.20	0.006

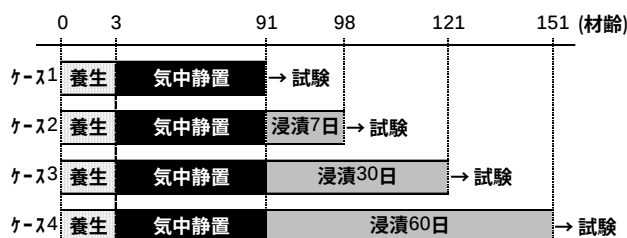


図-1 打設後、試験開始までの作業工程

ケース1 (浸漬0日後)

ケース4 (浸漬60日後)



写真-1 浸漬前後の表面状況 (BB50、打設面)

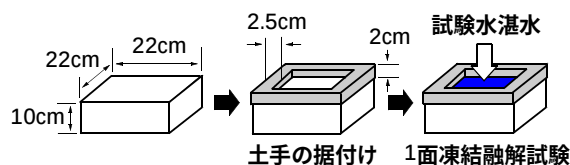


図-2 凍結融解試験方法

水を深さ6mm程度張った後、1面凍結融解試験を行い、試験面に生ずるスケーリング片の質量を測定した。凍結融解工程は-18℃で16時間凍結、23℃で8時間融解の1日1サイクルとした。試験水は濃度3%の塩化ナトリウム水溶液(以下、NaCl)と淡水の2水準とした。試験面には供

試体の打設面もしくは底面を用いた。

2.3 飽水度

浸漬期間が終了した時点すなわち試験開始前における供試体の試験面の飽水度を調べた。測定する領域は、長期的に凍結融解作用を与えた際のスケーリング深さが1cm前後とする既往の研究成果²⁾を踏まえ、試験面から深さ0～1cmとした。コンクリートカッターを用いて、試験面から深さ1cmまでの表層を切り取り、含有水分量と細孔量を測定し、(1)式³⁾により求めた。

$$S_n = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = \frac{\left(\frac{P_w}{\rho_w} \right)}{V \times P_d} \times 100 \quad \cdots (1)$$

ここに、 S_n は飽水度(%)、 V_w は細孔に含まれる水の体積(cc)、 V_t は細孔量(cc)、 P_w はペーストに含まれる水の質量(g)、 ρ_w は水の密度(1.0g/cc)、 V はペースト1gあたりの細孔量(cc/g)、 P_d はペーストの絶乾質量(g)を示す。細孔量の測定は、水銀圧入式のポロシメーターを用いて行った。

本研究では、切り取った表層全体に含まれる水分量から表層に含まれる骨材の吸水量を差引いた値を P_w 、表層の絶乾質量から表層に含まれる骨材の絶乾質量を差引いた値を P_d とした。ここでは、切り取った表層の不溶解残分量を測定し、残分量を全て骨材の質量とみなして計算を行った。また、 P_w と P_d からペーストの吸水率を計算し、浸漬期間における吸水率の経時変化もあわせて調べた。

3. 結果および考察

3.1 ペーストの吸水率

図-3に浸漬日数に対する表層のペーストの吸水率の経時変化を示す。浸漬開始後の吸水率の経時変化をみると、全体的に、浸漬7日目にかけて吸水率は急速に増大し、7日目以降はBB50の打設面では緩やかに増加、それ以外は概ね収束傾向を示した。ここで、BB50の打設面と底面に着目すると、吸水率の増加量は打設面の方が大きい。図-4はBB50の打設面と底面における浸漬前の細孔分布を比較したものであるが、打設面の方が細孔分布は大きい傾向がみられる。これはブリーディング等によって表面組織が脆弱化したためと考えられ、このことが吸水率の変動に影響を及ぼしたものと考えられる。

図-5に飽水度の測定結果を示す。BB50の打設面は、浸漬の日数に対応して飽水度が増加しているのに対し、その他のシリーズは浸漬の途中から飽水度が減少に転ずる傾向が一部で見受けられた。この理由は、ペースト中の余剰水の一部が、セメント成分との水和反応によって消費されたためではないかと考えられる。

3.2 スケーリングの進行に及ぼす飽水度の影響

図-6～10に凍結融解試験の結果を示す。ここでは、スケーリングの進行に及ぼす試験開始前の飽水度の影響について整理した。

図-6、7は打設面を試験面、試験水にNaClを用いた場合の結果である。NP50では、試験開始前の試験面の飽水度がスケーリングの進行に及ぼす影響はほとんど認め

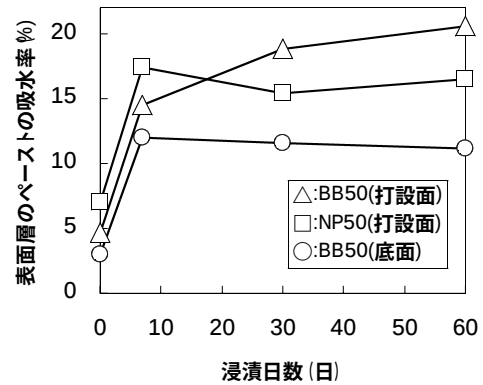


図-3 浸漬期間中における吸水率の経時変化

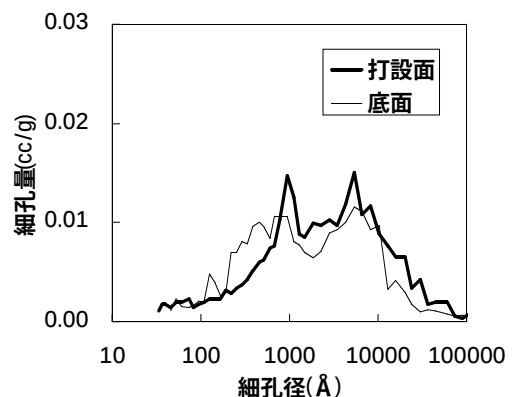


図-4 細孔分布に及ぼす部位の影響 (BB50、浸漬0日)

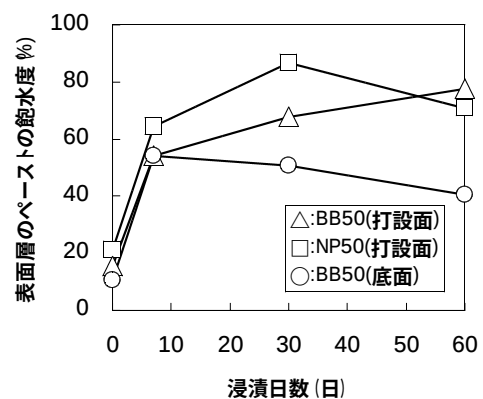


図-5 浸漬期間中における飽水度の経時変化

られなかった。一方、BB50は、NP50に比べるとスケーリング発生量は全体的に多い。さらに注目すべき点として、試験開始前の飽水度が高くなるほど、スケーリングが著しく進行する挙動を示した。試験前の飽水度が高いケースではスケーリングに加え、150サイクルで供試体の側面にひび割れが発生し、打設面から浸透した試験水がひび割れ箇所から外部へ漏水するなど、供試体が著しく損傷したものもあった。これについては、150サイク

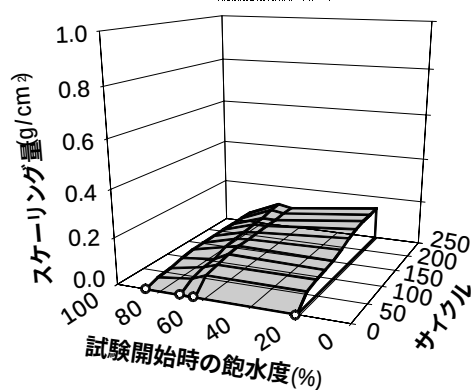


図-6 スケーリングの進行に及ぼす飽水度の影響
(NP50、打設面、NaCl)

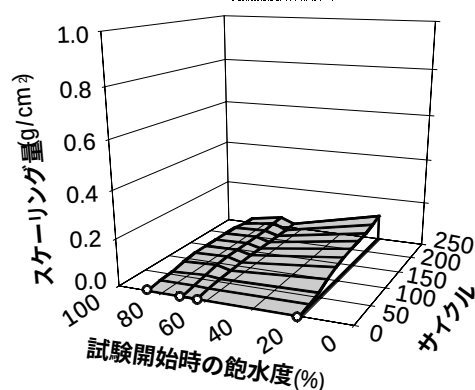


図-8 スケーリングの進行に及ぼす飽水度の影響
(NP50、打設面、淡水)

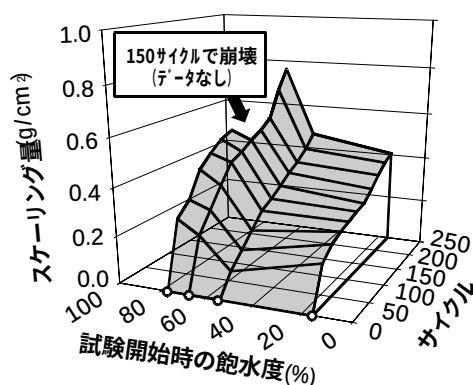


図-7 スケーリングの進行に及ぼす飽水度の影響
(BB50、打設面、NaCl)

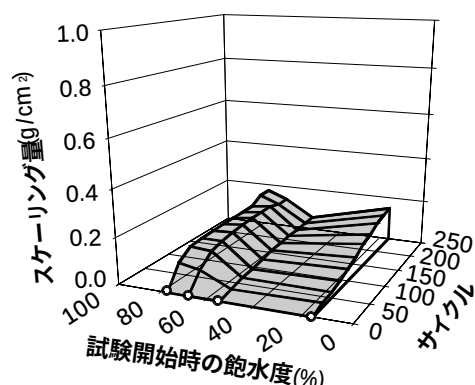


図-9 スケーリングの進行に及ぼす飽水度の影響
(BB50、打設面、淡水)

ルで試験を中断した。

図-8、9は打設面を試験面、試験水に淡水を用いた場合の結果である。NP50は、NaClの実験結果と同様、スケーリングの進行に及ぼす試験前の飽水度の影響はほとんどみられていない。BB50については、NaClの実験でみられたような著しい供試体の崩壊は認められなかったが、試験面の飽水度が高いケースでは、50サイクル以内の早い段階でスケーリングがやや多く生ずる特徴的な傾向が見受けられた。

図-10は底面を試験面、試験水にNaClを用いたBB50の結果である。底面の飽水度の上昇値は最大で50%程度と、打設面に比べると低くとどまっている。底面でも、飽水度の影響が僅かながら現れているが、図-6で示した打設面の結果から比べると、その影響は比較的小さいと考えられる。

3.3 高炉セメントが用いられたコンクリートの スケーリング抵抗性低下要因に関する考察

スケーリングは、コンクリートが凍結した際に、コンクリートの組織で発生する水の凍結膨脹圧や、細孔内での水の流動に伴う浸透圧などに支配されることが知られており⁴⁾、表面に滞留する水分は劣化の進行に大きな影響を及ぼす。打設面を試験面とした実験結果をみると、NP50は試験前の試験面の飽水度が80%程度でもスケー

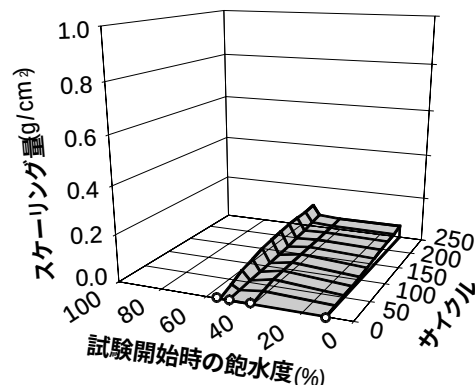


図-10 スケーリングの進行に及ぼす飽水度の影響
(BB50、底面、NaCl)

リングに与える影響は小さいのに対し、BB50は飽水度の上昇に伴いスケーリングの進行が著しくなるなど、両者の劣化挙動は明らかに対照的である(図-6と図-7もしくは図-8と図-9)。また、BB50は、試験前の飽水度が同じでも、打設面と底面ではスケーリング量が異なる傾向を示している(図-7と図-10)。

筆者はこれまで、W/Cが50%程度のコンクリートの透水係数が普通ポルトランドセメントでは $4.4 \times 10^{-10} \text{cm/}$

sに対し、高炉セメントB種は 1.2×10^{-10} cm/sと普通ポルトランドセメントの約1/4であること⁵⁾、コンクリート表面のプルオフ強度（表面強度）が高くなるほどスケーリングは発生しにくく、プルオフ強度は底面の方が打設面よりも大きい傾向にあること⁶⁾等の知見を得ている。

これらの情報をもとに、高炉セメントB種を用いたコンクリートの表面の耐凍害性が低下する原因をマクロ的に整理すると、以下のように考察される。

試験面の表層に水分が蓄積されたままの状態ではコンクリートが凍結工程に移行すると、水分の凍結膨脹に伴い、耐凍害性を低下させる要因の一つである凍結余剰水が発生する。スケーリングの発生を抑制するには、これらの余剰水を未飽和の領域へ避難させ、水圧の緩和を図る必要がある。コンクリートの透水性は、一般に、高炉セメントB種の方が普通ポルトランドセメントに比べ、透水係数は低く、水密性に富んでいる。しかし、このことは理論上、表層で発生する凍結余剰水の未凍結層への移動、避難の障害となることを示唆する。このため、結果的にスケーリングという形で水圧緩和が図られたものと推測される。

試験面に底面を用いた実験では、スケーリング量が極めて少ない状態で推移したが、これは、打設時の圧密作用による表面強度の増大に伴うペーストの吸水率の上昇抑制すなわち凍結余剰水の減少がスケーリング量の減少に効果的であったためと思われる。

本実験で得た成果の範囲において、高炉セメントB種を用いたコンクリートの表面の耐凍害性を高める対策を検討すると、(a)表面を緻密化させて吸水率の上昇抑制、(b)水圧が緩和されやすいよう透水性の緩和、が考えられるが、当然のことながら、後者は、コンクリート全体の耐久性の低下が懸念される。このため、表面の緻密化を図り、吸水を抑制させることが有効な対策と思われる。

4. まとめ

本研究では、高炉セメントを用いたコンクリート構造物の表面の耐凍害性を改善する技術の確立を目的とし、表面の耐凍害性が低下する原因について検討を行った。以下に、得られた知見を整理する。

- (1) 浸漬期間中におけるペーストの吸水率の経時変化は、打設面の方が底面よりも大きい。
- (2) 深さ0～1cmの飽水度は、基本的には浸漬の日数に対応し、増大した。
- (3) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの打設面では、試験開始前に浸漬させて飽水度を増加させても、その後のスケーリングの進行に大きな影響はみられなかった。
- (4) 高炉セメントB種を用いたコンクリートの打設面では、浸漬させて試験前の飽水度を高めるとスケーリングが進行しやすくなる挙動を示した。一方、底面では、飽水度の影響が僅かながらみられたものの、打設面に比べると、その影響は比較的小さい。
- (5) 高炉セメントB種を用いたコンクリートの表面の耐凍害性が低下しやすい原因は、表面層に蓄積され

た水分の未凍結層への移動のしにくさに起因し、凍結水圧の緩和がスケーリングという形で起こるためと推測される。

5. おわりに

本研究では、耐久性、環境面、両者の観点から、今後、需要増が予想される高炉セメントの普及促進に向け、寒冷地における課題の一つである、コンクリートの表面の耐凍害性の改善に向けた一検討を行った。表面の緻密化、改質を図ることで表面の耐凍害性の改善は可能であり、高炉セメントが有する他の長所を活かすことで構造物の長期耐久性をさらに高められると考えられる。今後は、表面の改質技術の検討に向けた具体的な検討を材料面、施工面から検討を更に進めていく予定である。

参考文献

- 1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針
コンクリートライブラリー86、土木学会、1996.6
- 2) 遠藤裕丈、田口史雄、嶋田久俊：塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケーリング特性、土木学会論文集、No.725、V-58、pp. 227-244、2003.2
- 3) RILEM tentative methods. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete, p.217, MATERIALS AND STRUCTURE, Vol.10, No.58, 1977
- 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、1999.11
- 5) 遠藤裕丈、田口史雄、嶋田久俊：凍結防止剤および海水によるスケーリング劣化の予測に関する基礎的研究、北海道開発土木研究所月報、pp.23-30、2004.3
- 6) 遠藤裕丈、田口史雄、嶋田久俊：プルオフ引張試験によるスケーリング劣化の予測に関する基礎的研究、第60回土木学会北海道支部研究発表会講演集、V-24、pp.756-757、2004.1