

論文 スケーリング劣化の予測に関する基礎的研究

遠藤 裕丈^{*1}・田口 史雄^{*2}・嶋田 久俊^{*3}

要旨: コンクリート構造物の凍害は、ひび割れやスケーリングなど形態は多様で、凍結防止剤や海水が作用する環境下ではスケーリングが進行しやすいなど物理的機構も複雑である。個々の現象についてはある程度明らかにされてはいるが、劣化の進行を予測するモデルの構築には至っていない。本論文では、予測に関する研究の一環として、スケーリングの進行のしやすさを予測するモデルの構築に向けた基礎的な検討を行った。その結果、スケーリングの進行性はプルオフ強度および透水係数と関係がある知見を得た。

キーワード: スケーリング, 予測, プルオフ強度, 透水係数, 飽水度

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物においては、凍結融解作用に起因する凍害が懸念される。凍害の基本的な原因は空隙中の水分の凍結にあるが、劣化の形態は組織の弛緩、ひび割れ、スケーリング、ポップアウトなど多様で、特に凍結防止剤や海水が複合的に作用する環境下ではスケーリングが著しく進行しやすいなど、物理的機構も複雑である。

LCCを縮減した構造物の維持管理を行うには、劣化の進行を未然に予測し、適切な時期に補修もしくは劣化抑制対策を施すことが望ましい。しかし、凍害に関しては、多様な劣化形態や複雑な物理的機構がすべて包括された劣化予測モデルが構築されるまでに至っていない。凍害の劣化予測、モデル化に関する研究では凍結融解抵抗性を主にコンクリートの強度や気泡間隔係数に着目した山下¹⁾の報告、セメント硬化体に着目した桂ら²⁾の報告がある。本研究では、表面のスケーリング抵抗性に着目した。スケーリングに関しては、劣化に及ぼす影響因子に関する報告はあるものの、劣化予測に関する報告は少ない。

そこで、凍害劣化予測モデルの構築の一環として、スケーリング劣化の予測のモデル化

に向けた基礎的な検討を行った。

2. スケーリングに及ぼす細孔の影響

2.1 概要

耐凍害性に影響を及ぼす因子の一つに細孔構造^{1),2)}がある。そこで、本項ではスケーリングに及ぼす細孔構造の影響について調べた。

水セメント比は25, 35, 45, 55, 65%の5水準、セメントは普通ポルトと高炉B種の2水準、スランプと空気量は各々 8 ± 2.5 cm, 4.5 ± 1.0 %を目標値とした。粗骨材は碎石(密度 2.67 g/cm³, 最大径25mm), 細骨材は除塩処理済の海砂(密度 2.70 g/cm³)を用いた。ここでは、各々のコンクリート面(打設面, 型枠面, 底面)においてその影響を調べることにし、 $22 \times 22 \times 10$ cm(試験面: 打設面と底面)と $22 \times 22 \times 150$ cm(試験面: 型枠面)の2種類の供試体を作製した(図-1)。材齢3日まで試験面を養生マットで覆った後、試験開始材齢28日まで恒温恒湿室(温度 20 , 湿度 60%)に静置した。

スケーリング試験はASTM-C-672に準じ、図-2に示すように、試験体($22 \times 22 \times 10$ cm)の試験面にモルタル製の土手を築き、試験水を深さ6mm程度張って -18 で16時間、 23 で8時間の1面凍結融解試験を行い、試験面に生

*1 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 研究員(正会員)

*2 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 室長(正会員)

*3 独立行政法人 北海道開発土木研究所 材料研究室 副室長(正会員)

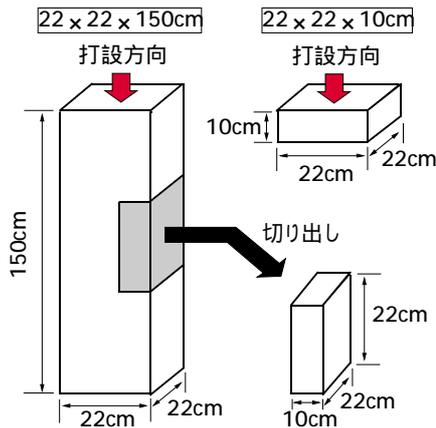


図-1 供試体の作製方法

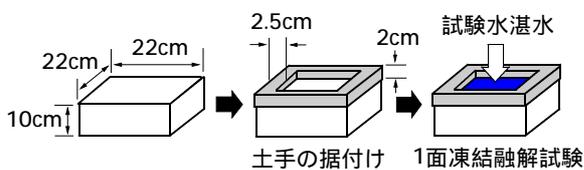


図-2 凍結融解試験方法

ずるスケーリング片の質量を測定した。試験水は、凍結防止剤および海水作用環境下を想定し、NaClとCaCl₂の各水溶液および人工海水を用いた。水溶液の濃度は3%とした。

細孔構造は、試験面から深さ0~0.5cmの層を試料とし、材齢28日（試験前）に試料を採取し、水銀圧入法に準じて分析を行った。

2.2 実験結果

図-3に細孔量とスケーリング量との関係を示す。耐凍害性に影響する細孔は750~7500とされる³⁾が、ここでは750以上の領域を扱うこととした。スケーリング量は300サイクルまでの累積値を用いた。細孔量が多いほどスケーリング量も多くなる傾向が全体的には見受けられるが、細孔量0.1~0.3cc/gの領域では、細孔量が同一でも、打設面の方がスケーリングは生じやすい結果を示した。スケーリング量に及ぼす試験水の影響については、NaClがやや大きい傾向が見られた。

3. スケーリングに及ぼす表面強度の影響

3.1 概要

前項の実験では、スケーリングに及ぼす細

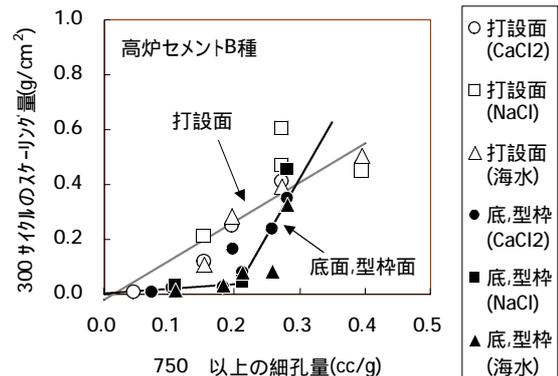
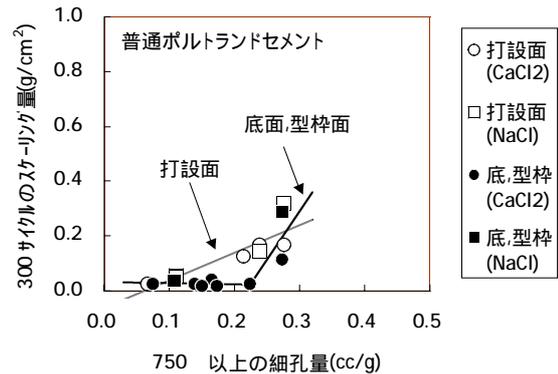


図-3 細孔量とスケーリング量との関係

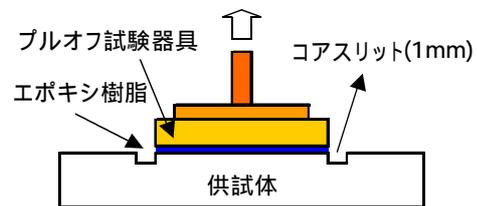


図-4 プルオフ試験の方法

孔の影響は各々のコンクリート面で異なり、特徴的な傾向の一つとして、打設面ではスケーリングが生じやすい結果を得た。打設面はブリーディングの影響を受けやすいことから、試験面の強度が影響したものと推定された。そこで、本項ではスケーリングに及ぼす表面強度の影響について調べてみた。

表面強度はプルオフ試験⁴⁾（図-4）に準じ、材齢28日（試験前）の試験面に55mmの鋼製ディスクを接着し、それを引っ張り上げることで、試験面の破断強度を測定した。

3.2 実験結果

図-5にプルオフ強度と細孔量とを比較したグラフを示す。プルオフ強度は、水セメント

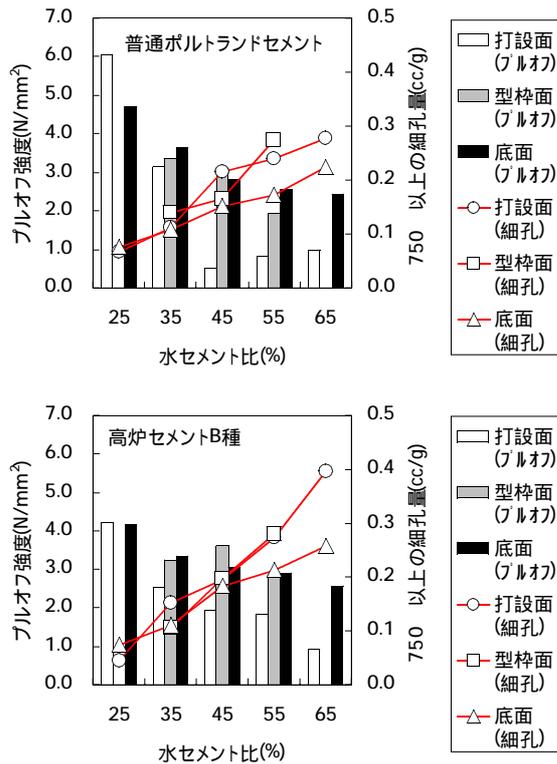


図-5 プルオフ強度と細孔量の比較

比25%を除くと打設面が最も小さく、ブリーディングの影響が示唆される結果となった。25%は水セメント比が低く、ブリーディングの影響が小さかったものと思われる。また、水セメント比の増加に伴い、プルオフ強度は減少、細孔量は増加する傾向が概ね見受けられた。普通ポルトの打設面の水セメント比45%、55%においてはプルオフ強度と水セメント比の関係が対応しておらず、これについては精度良く求められていない可能性はあるが、全体的にみると組織の密実性に及ぼす水セメント比の影響が概ね表れている。

図-6にプルオフ強度とスケーリング量との関係を示す。スケーリング量は前項の実験で得た値を用いた。プルオフ強度が低いほどスケーリングは多く生ずる傾向が示され、両者は密接な関係にあることがわかった。試験水の影響は前項同様NaClがやや大きい結果を示した。また、セメント別にみると、表面強度が同一の場合は高炉B種を用いたコンクリートの方がスケーリング量が多いようである。

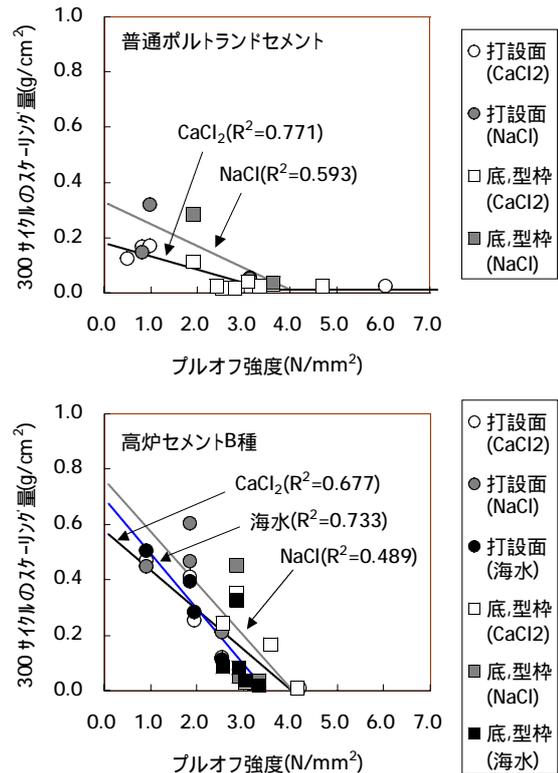


図-6 プルオフ強度とスケーリング量との関係

4. 高炉B種が用いられたコンクリートのスケーリング抵抗性低下の要因

4.1 概要

本項では、高炉B種を用いたコンクリートの方が多くスケーリングした前項の実験結果の要因を検討するため、以下の実験を行った。

ここでは、普通ポルトと高炉B種、各々のセメントを用いた際の劣化挙動の基本的な違いをマクロ的に把握することとし、水セメント比を1水準に絞ることとした。当初、25~65%の中間の45%を予定していたが、25%と35%におけるスケーリングの進行性は比較的緩やかであったため、45%では挙動の違いを明瞭に把握できない可能性が懸念されたため、5%増やして50%に設定した。スランプや空気量の目標値は前項の実験と同様である。

養生条件を図-7に示す。供試体は22×22×10cmとし、材齢3日まで試験面を養生マットで覆った後、試験面を十分に乾燥させるため、材齢91日まで恒温恒湿室に静置した。さらに、試験面の飽水度を意図的に高める目的で、一

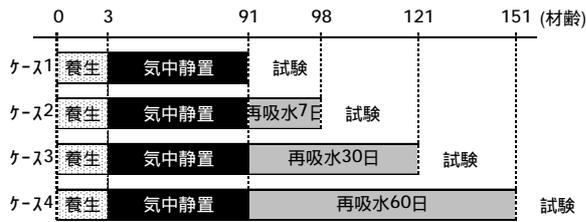


図-7 試験開始までの養生・静置条件

部の供試体については91日経過後，試験面に淡水を張って再吸水させた。再吸水日数は7日，30日，60日とした。

養生終了後，スケーリング試験と飽水度の測定を行った。試験面は打設面および底面とした。スケーリング試験の試験水は3%濃度のNaCl水溶液を用いた。飽水度は気中静置もしくは再吸水終了後，試験面から深さ0~1cmの層を切り取り，細孔量とペースト含有水分量を求め，(1)式⁵⁾から算出した。

$$Sn = \frac{V_w}{V_t} \times 100 = \frac{\left[\frac{P_w}{w} \right]}{V \times P_d} \times 100 \quad \dots(1)$$

ここに，Snは飽水度(%)，Vwは細孔に含まれる水の体積，Vtは総細孔量，Pwはペーストに含まれる水の質量，wは水の密度，Vはペースト1gあたりの細孔量，Pdはペーストの絶対乾質量を示す。細孔量は水銀圧入法で求めた。

4.2 実験結果

図-8にスケーリングに及ぼす試験前の飽水度の影響を整理した。試験面が打設面の場合，普通ポルトを用いたコンクリートは，スケーリングに及ぼす飽水度の影響は小さい傾向を示したのに対し，高炉B種を用いたコンクリートは，試験前の飽水度が高いほどスケーリングは著しく進行する結果を示した。底面は，飽水度が最大で50%程度と打設面に比べると低く，ここでは高炉B種のみ実施しているが，飽水度の影響は僅かながら現れているものの，打設面に比べると影響は小さいと言える。

4.3 スケーリング抵抗性低下要因の考察

スケーリングは一般に水の凍結膨脹圧や浸

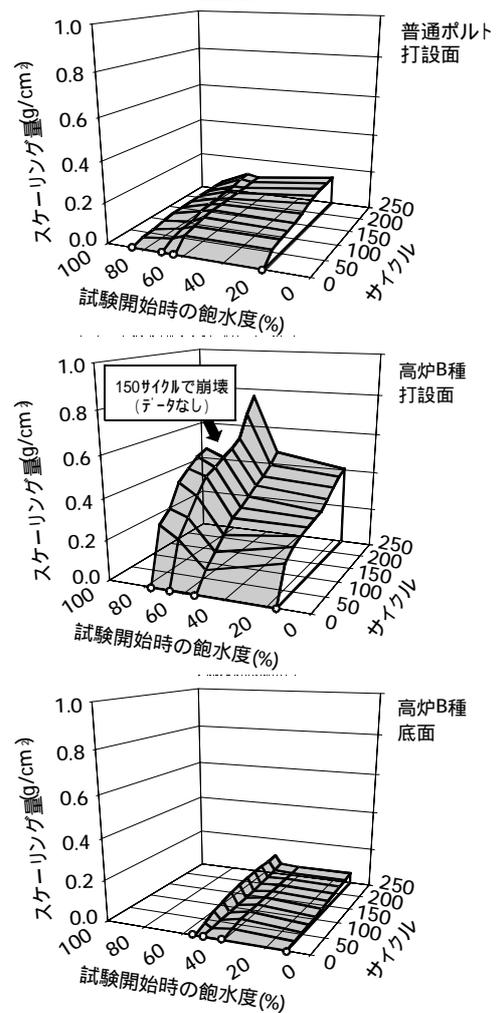


図-8 スケーリングに及ぼす試験前の飽水度の影響

透圧に伴う細孔での水の流動圧が要因とされている⁶⁾。このことから，表面に滞留する水分の影響は大きいと言える。

打設面の結果をみると，普通ポルトを用いた場合，試験前の飽水度が80%程度でもスケーリングに与える影響は比較的小さかったのに対し，高炉B種は，試験前の飽水度が高いコンクリートほどスケーリングは著しく進行しており，劣化挙動は明らかに対照的である。

Starkは，高炉B種のスケーリングが進行しやすい理由の一つに炭酸化の影響を指摘している⁷⁾が，本研究においては材齢および養生の環境から考えると，試験面の炭酸化が著しく影響している可能性は小さいと思われる。

本研究では，実験結果の範囲内で総合的に検討を行った結果，高炉B種を用いたコンク

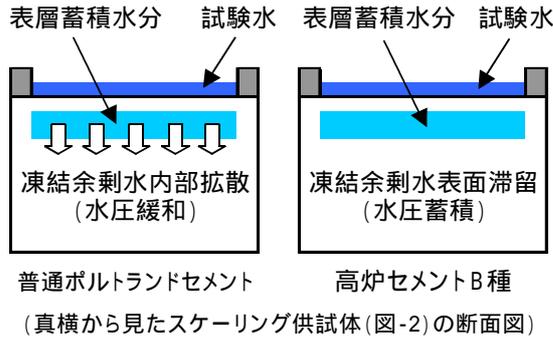


図-9 スケーリング抵抗性低下要因イメージ図

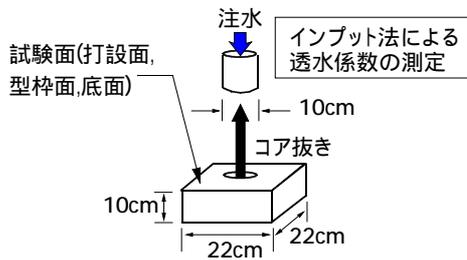


図-10 透水係数測定手順

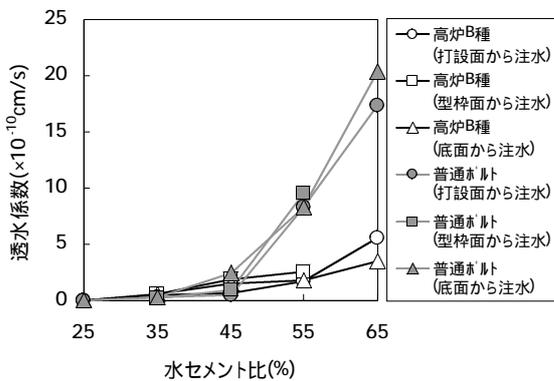


図-11 透水係数の測定結果

リートのスケーリング抵抗性が低下しやすい原因について以下のように考えた。

乾燥状態のコンクリートが再吸水を受ける場合、表面の硬性が低いほど表層部に水分が蓄積されやすい。水分が蓄積された状態で凍結が始まると、表層部に凍結余剰水が生ずる。表面は凍結状態にあるため、スケーリングを抑制するには、余剰水を内部の未飽和領域へ移動させ、水圧を緩和する必要がある。コンクリートの透水係数は普通ポルトに比べ、高炉B種を用いた方が一般に低い⁸⁾。このことは

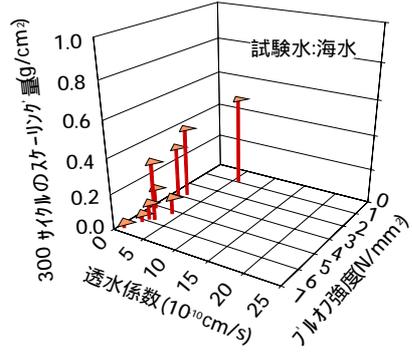
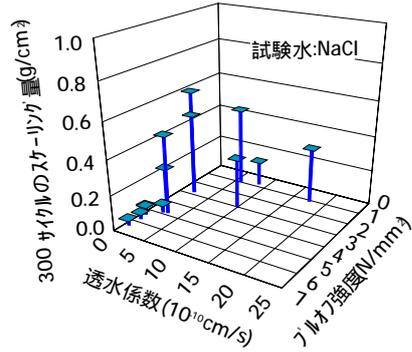
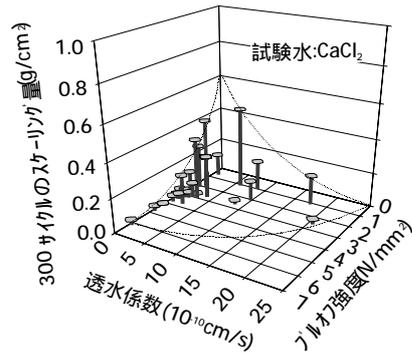


図-12 プルオフ強度, 透水係数, スケーリング量の関係

優れた水密性を示唆するが、図-9に示すように余剰水の未凍結層への流動を阻む負の作用が働くと思われる。このため結果的に水圧がスケーリングの形で緩和されたと推察する。

底面はプルオフ強度が比較的高いことから、飽水度抑制に加え、水圧に対する力学的抵抗性がスケーリング抑制に繋がったと思われる。

普通ポルトで乾燥後の再吸水による影響が小さかった結果も図-9と整合する。一方で、飽水度が高いケースではスケーリング量が若干減少する結果を得た。これは再吸水によって水和が促されたためではないかと思われる。

5. スケーリング進行性予測手法の提案

スケーリングの進行性はプルオフ強度およ

表-1 スケーリング抵抗性の考察(図-12より)

コンクリート表面品質条件		スケーリング抵抗性
プルオフ強度	透水係数	
低い	低い	低下しやすい
高い	低い	大きく向上
低い	高い	やや向上
高い	高い	(理論的には)向上傾向

び透水係数と関係がある知見が得られた。既往の文献⁹⁾で、スケーリングで劣化したコンクリートの損傷度を改良プルオフ法と透水性で評価する研究が行われているが、健全なコンクリートの将来的なスケーリングの進行性をセメントの影響を考慮した上で簡易的に予測する方法としても有用と思われる。そこで、プルオフ強度、透水係数(いずれも試験前)、スケーリング量の関係を整理することとした。

透水係数は「2.」項と同じ材齢28日の供試体(養生方法も同じ)から図-10に示すように

10×10cmコアを採取し、インプット法に準じて求めた。図-11は結果だが、透水係数に及ぼす試験面の影響は殆ど見受けられなかった。この値を用いて関係を整理したものが図-12で、図から推察される傾向を表-1にまとめた。

まず、プルオフ強度と透水係数ともに低い場合はスケーリングが促されやすい傾向がみられる。このことは図-9の考察とも符合する。一方、プルオフ強度が低くても透水係数が大きい場合や、透水係数が低くてもプルオフ強度が大きい場合はスケーリング抵抗性が向上する傾向がみられる。前者は凍結余剰水の未飽和空隙への移動のしやすさ、後者は表面強度増大の効果によると思われる。以上のことから、プルオフ強度と透水係数の組み合わせによる予測の有用性が示唆された。

図-12をもとに、スケーリング抵抗性を高める基本的な対策を考えると、(1)水圧が緩和されやすいように透水性を向上、(2)表面の緻密化および吸水の抑制の2つが考えられるが、(1)は構造物そのものの耐久性低下が懸念されることから(2)が有効な対策と言える。

6. まとめ

本研究で得た知見を、以下にまとめる。

- (1)スケーリングに及ぼす細孔量の影響は部位によって異なる傾向が示された。
- (2)高炉B種を用いたコンクリートのスケーリング抵抗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すると推察された。
- (3)スケーリングの進行性は、プルオフ強度と透水係数との組み合わせによって説明できると考えられる。

参考文献

- 1)山下英俊：コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究，北大学位論文
- 2)桂修，吉野利幸，鎌田英治：過冷却水の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構，コンクリート工学論文集，第10巻第2号，pp. 51-63, 1999
- 3)鎌田英治：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)コンクリート診断技術'02，基礎編，pp.98，日本コンクリート工学協会
- 5)RILEM tentative methods.The critical degree of saturation method of assessing the freeze thaw resistance of concrete,pp.217,MATERIALS AND STRUCTURE,Vol.10,No.58,1977
- 6)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
- 7)Jochen Stark and Bernd Wicht(太田利隆,佐伯昇訳)：Dauerhaftigkeit Von Beton,pp.204, Weimar,20.November 1995
- 8)土木学会，コンクリート標準示方書，施工編，pp.80，2002
- 9)月永洋一，庄谷征美，笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第8巻第1号，pp.121～132, 1997