# スケーリング劣化に及ぼすコンクリート細孔の湿潤状態の影響に関する一検討

# Effect of Pore Water Content in Concrete on Scaling Deterioration

遠藤 裕丈\* 田口 史雄\*\* 嶋田 久俊\*\*\*

Hirotake ENDOH, Fumio TAGUCHI and Hisatoshi SHIMADA

冬期の地覆打換えのように、コンクリートの細孔が高い湿潤状態になっている状況下で凍結融解を 受ける場合は凍害の早期顕在化が懸念される。本報文では、凍害の一現象であるスケーリングに及ぼ す細孔の湿潤状態の影響について検討を行った。その結果、細孔が全て液状水で満たされている領域 の最大径が10<sup>3</sup> Å以上の場合、塩水との接触によってスケーリングが短期間で急速に生じやすい結果 が得られ、そのような環境条件が予想される構造物においては水セメント比を小さくする、液状水が 存在する最大径が10<sup>3</sup> Å以下に下がるまでは塩水との接触を避ける等の対策が必要であることがわか った。

≪キーワード:スケーリング;細孔;湿潤;凍結防止剤;温度ひずみ曲線≫

Under environmental conditions where the pores in the concrete are in a highly water content, such as with wheel guard reconstruction in winter, there is concern about early occurrence of frost damage. The influence of the pore saturation on scaling, which is a phenomenon of frost damage, was therefore studied. The study revealed that contact with salt water caused the rapid occurrence of scaling over a short period of time when maximum diameter with the presence of liquid water was  $10^3$ Å or higher. It was thus found that a structure subject to such environmental conditions would require special measures to be adopted, such as a reduction in the water-cement ratio and the avoidance of contact with salt water until maximum diameter with the presence of liquid water decreases to  $10^3$ Å or lower.

 $\ll$  Keywords : scaling , pore , water content , deicing salt , temperature-strain curve  $\gg$ 

### 1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物は、冬期間は厳しい凍 結融解作用を受けやすく、凍害の被害が懸念される。 凍害は、一般に吸水や冷却などの外部環境の影響を受 ける表面から進行するため、かぶりの劣化や欠損を招 き、各種物質の浸透に対する抵抗性が低下し、鋼材の 腐食を早める原因となる。

現在のコンクリート標準示方書では、設計段階から 耐久性に関する照査を行うことが規定されている。凍 害に対する照査を合理的に行うには、凍害の程度、凍 害深さを時間軸で評価できる凍害進行モデルの構築が 必要<sup>1)2)</sup>である。しかし、凍害劣化の予測は難しく、 耐久性の設計法は未だ確立されていない。この現状認 識のもと、日本コンクリート工学協会北海道支部では 「凍害と耐久性設計研究委員会」を設置し、活動を展開 している。

また、凍害の要因としては、コンクリートの品質に 加え、施工後の環境も挙げられる。たとえば、冬期の 地覆打換えでは施工終了後、すぐに凍結融解を受ける 場合もあることから、コンクリートは高い湿潤状態に あることが予想される。このため、凍害に対する耐久 性の設計法は、構造物の立地条件や環境条件が反映さ れた形が望ましい。

このような背景から、筆者らは凍害の一現象である スケーリングに及ぼす環境の影響について研究を進め ている。本報文では、スケーリングに及ぼす細孔の湿 潤状態の影響について実験した結果の一部を述べる。

#### 2. 実験概要

表-1にコンクリート配合を示す。水セメント比(以 下、W/Cと記述)は50、40、30%とした。セメントは 北海道で多く使用されている高炉セメント B 種を基 本とし(配合記号 B5、B4、B3)、50%では普通ポルト ランドセメントもあわせて使用した(配合記号 N5)。 細骨材は除塩処理を施した苫小牧樽前産の海砂(密度 2.70g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.89%)、粗骨材は小樽見晴産の砕 石(密度2.68g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.07%、最大寸法25mm)を用 いた。

図-1に供試体を示す。寸法は22×22×10cmで、打 設面(22×22cm)に試験水を張るための土手を据付けた。 凍結融解時の温度ひずみ曲線を調べるため、供試体の 打設面から深さ1cmに熱電対と埋込みゲージを埋設し た。

図-2に養生方法を示す。材齢7日まで湿った麻布 を打設面に被せ、その後、継続して麻布を被せて湿潤

表-1 コンクリートの配合

記号	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
B5	高炉	50	44	140	280	859	1085
N5	普通			140	280	862	1089
B4	高炉	40	42	149	373	776	1063
B3		30	40	155	517	680	1013



図-2 供試体の養生方法

を保持させたもの(養生記号 W)と、温度20℃、湿度 60%の恒温恒湿室に静置して含水量を下げたもの(養 生記号 D)の2水準とした。凍結融解試験は材齢91日 から行った。また、材齢91日の時点における打設面か ら深さ0~1 cmの細孔中の湿潤状態もあわせて調べ た。

凍結融解試験は ASTM C 672<sup>3)</sup>に準じ、打設面に 試験水を深さ6mm張って-18℃で16時間、23℃で8時

表-2 供試体の記号

供試体の記号	配合記号	養生記号	試験水記号
B5-W-W		\\/	W
B5-W-N	DE	vv	N
B5-D-W	БЭ	D	W
B5-D-N		D	N
N5-W-W		\\/	W
N5-W-N	N/5	vv	N
N5-D-W	IND	D	W
N5-D-N		D	N
B4-W-W	D/	\\/	W
B4-W-N	D4	vv	N
B3-W-W	B3	\\/	W
B3-W-N	50	vv	N

間の1面凍結融解試験を行い、5~15サイクル毎に 剥離片を採取し、スケーリング量を測定した。試験水 は淡水(試験水記号W)と凍結防止剤を想定した塩化 ナトリウム水溶液(試験水記号N、以下塩水と記す)の 2水準とした。濃度は3%とした。

**表-2**は、本実験における供試体の記号である。記 号は、配合(B5、N5、B4、B3) - 養生(W、D) - 試験 水(W、N)の組み合わせで構成されている。

### 3. 実験結果

## 3.1 スケーリング挙動(配合記号 B5、N5)

図-3に淡水を用いたスケーリング試験の結果を示 す。50サイクルまでは僅かではあるがB5-D-Wの スケーリング量が多い。全体を通すと、材齢91日まで 麻布を被せた養生記号Wの方が少ないスケーリング 量で推移している。図-4は塩水を用いた試験結果で ある。養生記号Wは、試験直後からスケーリングが 急速に多く発生しており、淡水の試験とは全く対照的 な結果となった。

# 3.2 スケーリング試験開始前の深さ0~1cmの細孔の湿潤状態(配合記号 B5、N5)

ここで、試験開始材齢91日における細孔の湿潤状態 について調べた。本実験ではセメントペーストの含水 量を測定した後、図-5に示す石田のモデル<sup>4)</sup>を用 いて整理した。このモデルは、ある任意の湿度環境下 では液状水が存在する細孔の最大径(以下、rcと記す) が一意的に決まるというものである。このとき、rc よりも小さい細孔は全て液状水(以下、Scと記す)で 満たされ、一方で湿潤状態のコンクリートが乾燥した 場合、rc は小径側へシフトするが、その際、rcより





図-6 スケーリング試験開始前の細孔の湿潤状態

大きい細孔の壁面には吸着水(以下、Sink と記す)が 残るため、水分の分布は Sc と Sink を足した形となる。

本実験においては rc の決定に際し、養生記号 W は Sc のみ、養生記号 D は Sc と Sink の両者を考慮する 必要がある。石田は Sc と Sink の関係についても解析 を行っており、W/C=55%、湿度60%の条件では、Sc と Sink の比率は0.3:0.1となる解析結果を報告してい る<sup>4)</sup>。この条件は、本実験の配合および養生方法に概 ね近いことから、ここでは計算を簡便に行うため、 Sc:Sink = 3:1とした。細孔分布の測定は水銀圧入 法に準じて行った。

図-6に結果を示す。この図は凍結融解試験前の状態を表しているので、図中の供試体の記号は第3項の 試験水の記号を省略し、配合(B5、N5) - 養生(W、D) の組み合わせで表示している。養生記号Dに比べ、 養生記号Wの方が細孔量は小さく、組織はち密化し ている。その一方でrcは湿潤環境下にあった養生記 号Wの方が大きい。

スケーリング抵抗性は、試験水が淡水の場合は細孔

量と密接な関係にあることが図-3と図-6からわか る。一方、塩水の場合、細孔量との明確な関係はみら れないが、図-4と図-6から急速にスケーリングが 生じたコンクリートのrcはいずれも10<sup>3</sup>Å以上の領域 に存在していることが確認された。

# 3.3 深さ1cmにおける凍結融解時のひずみ挙動

図-7に深さ1cmの位置で測定した温度ひずみ曲線 を示す。ここでは、配合記号 B5のみ実験を行った。

## (1)凍結過程

凍結過程はいずれも収縮挙動を示している。これは、 エントレインドエアーへ移動した凍結余剰水が凍結時 に周囲の組織から水分を吸収して成長するため、それ が満たされるまで、エントレインドエアーに移動した 水分の量と組織内で凍結した水の膨脹体積との差分だ け収縮した<sup>5)</sup>ためと判断される。

試験水が塩水のB5-D-Nは25サイクル以降、20 ℃から0℃にかけて緩やかに収縮し、0℃近辺で急激 に膨脹、そして再び収縮に転ずる特異な挙動を示した。 これは、劣化の影響でゲージとコンクリートの付着が



図-7 深さ1cmにおける温度ひずみ曲線(配合記号 B5のみ)

損なわれてゲージの拘束が一部解かれ、0℃までは温 度変化(低下)の影響で収縮、0℃近辺では欠陥部から 浸透してゲージ周囲に蓄積された水の凍結によって一 時的に膨脹、その際に凍結水が媒介となってゲージと 供試体が見かけ上一体化し、それ以降はコンクリート の動きに追随する形で収縮を示したと考えられる。

一方、試験水が同じく塩水の B5-W-N をみると、 1サイクルと5サイクルでは-10℃あたりで急速に収 縮している。養生記号 W は養生記号Dに比べて深さ1 cmの細孔の液状水が多いことと、塩水の凍結で濃度が 高まると高濃度域への水の流れが加速的に増幅される <sup>6)</sup>ことから、塩水が多く滞留している表面へ液状水 が急速に移動したことで収縮挙動を示したと思われ る。この現象は、凍結水圧の突発的な発生と氷の形成 増進を引き起こしやすく、試験直後にスケーリングが 急速に生じた結果と一致しており、試験水が塩水の場 合のスケーリング抵抗性に及ぼす rc(図-5、6)の 影響が強く示唆される。約-10℃まで液状水が凍結し なかった理由は、塩水の存在による過冷却の影響であ ろう。

### (2)融解過程

淡水の場合、B5-D-W は50サイクルまで膨脹ひ ずみの残留が生じているのに対し、細孔量が小さい B5-W-W は膨脹ひずみの残留が殆ど認められない。こ のことから、組織のち密化が膨脹ひずみの残留に対す る抵抗性の向上に効果的であると言える。

次に、塩水の場合、25サイクル以降のB5-D-Nは、 ゲージ周りの凍結水の融解により0℃近辺で膨脹拘束 が解放されて一時的に収縮し、0℃以降では温度変化 (上昇)の影響で緩やかに膨脹する挙動を示している。 図-8は最大スケーリング深さの結果である。B5-D-Nの最大スケーリング深さは約5mmであるが、組 織の劣化は少なくともゲージが埋設されている深さ1 cmまで進行していると言える。



図-8 最大スケーリング深さの測定結果

一方、スケーリングが急速に生じた B5-W-N は、 最大スケーリング深さは B5-D-N とほぼ同じ約5 mm だが、深さ1 cmの温度ひずみ曲線は乱れることなく継 続的に一定の動きをしており、膨脹ひずみの残留も認 められない。この結果は、液状水による物理的な作用 が及んだ範囲は深さ5 mm~1 cm未満と極めて限定的で、 深さ1 cmの組織は健全な状態にあること、すなわち、 劣化は表層で集中的に生じていることを意味してお り、細孔がち密化している結果と傾向が一致している。 3.4 rc に及ぼす W/C の影響

ここでは、スケーリングに及ぼす rc の影響につい てさらに詳しく検討することとした。

図-9に配合記号 B4、B3のスケーリング試験結果 を示す。養生記号はいずれも W で、配合記号 B5の結 果もあわせて示している。淡水はいずれの配合も極め て少ないスケーリング量で推移した。塩水は10サイク ルで B4に変状が現れ、スケーリングが急速に生じた が、B3はスケーリングが殆どみられなかった。



図-9 スケーリング試験結果(配合記号 B4、B3)

図-10は養生記号 W における B3と B4の細孔の水 分分布である。図-6と同様の理由から、供試体の記 号は第3項の試験水の記号を省略し、配合(B3、B4) - 養生(W のみ)の形で表している。rc は、B4では 10<sup>3</sup>Å以上の領域に存在しているが、B3はそれよりも 小さい範囲にあることがわかった。これらの結果から、 rc が10<sup>3</sup>Å以上の場合、塩水が作用する凍結融解環境 下では、細孔の液状水が活性化し、スケーリングが早 い段階で顕在化する恐れがあると言える。

図-11は最大スケーリング深さの測定結果である。 B4の塩水の結果をみると、100サイクルまでのコンク リート欠損深さは約5mmであった。図-8の結果とあ わせると、液状水の影響が懸念される最小深さは、 100サイクルまでで約5mmと言える。

以上のことから、凍結融解を受ける直前のコンクリ ートの細孔が高い湿潤状態になると予想される構造物 のスケーリング抵抗性を照査する際、rc が10<sup>3</sup> Å以上 で塩水との接触が懸念される場合は対策工の検討を要



すると言える。本実験の範囲内においては rc が低下 するまで塩水との接触を避ける、W/C の低減(30%程 度)が対策工として挙げられるが、実用性の考慮も必 要なため、この点については今後詳細に検討を進める こととしたい。

### 4. まとめ

スケーリングに及ぼす細孔の湿潤状態の影響に関す る実験で得られた結果をまとめると、次のとおりである。 (1) 淡水が作用する環境下では湿潤の程度より細孔量

- の影響が卓越する。 (2)塩水が作用する環境下では液状水が存在する細孔 の最大径(rc)の影響が大きい。それが10<sup>3</sup>Å以上の
- 場合、スケーリングが急速に発生する恐れがあり、 rc が小さくなるまで塩水との接触を避ける、W/C を低減するなどの対策が必要がある。

## 参考文献

1) 凍害の予測と耐久性設計の現状 - 凍害と耐久性設



図-11 最大スケーリング深さの測定結果

計研究委員会報告書 - 、日本コンクリート工学協 会北海道支部、pp.64、2006.6

- 2) 土木学会:コンクリート標準示方書維持管理編、 pp.115、2001.1
- 3) American Society for Testing and Materials: Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C 672
- 石田哲也、Rajesh P.CHAUBE、岸利治、前川宏一: 任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水 状態予測モデル、土木学会論文集、No.564、 V-35、pp.199-209、1997.5
- 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、北海道大学学位論文、 pp.113、1999.3
- 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・論文集、日本コンクリート工学協会、 pp.29、1999.11



遠藤 裕丈\*

寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 研究員



田口 史雄\*\*

寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 上席研究員 技術士(建設)



嶋田 久俊\*\*\*

寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 総括主任研究員