

スケーリングの進行性の簡易判定評価式の提案

(独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 ○遠藤 裕丈
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 田口 史雄
 北海道大学大学院 工学研究院 正会員 名和 豊春

1. はじめに

塩化物の供給を受ける寒冷地のコンクリート構造物では、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリング（表面がうろこ状に剥離する形態の凍害）の促進が懸念される。しかし、スケーリングに対する耐久性設計法は未だ整備されていないのが現状である。

筆者らは既報¹⁾において塩化物によるスケーリングの促進挙動を実験的に解析し、スケーリングの進行速度を ΔSC 、コンクリートの弾性係数を E_s 、弾性係数の低下に及ぼす氷層のクリープ挙動に起因する表層亀裂および亀裂周壁からの液体の抜き出しによる応力増大の影響（図-1）²⁾を考慮した補正係数を m 、表層（深さ0～1cm間）で発生する凍結圧の圧力勾配を ΔP_h （内部より表面側が大きいほどマイナス）で表すと、 $m \cdot E_s$ と ΔP_h がともに小さいほど、脆弱的な表層に凍結圧の負荷が集積する形となり、 ΔSC が大きくなることを明らかにした（図-2）。本論文ではこの知見をさらに発展させ、スケーリングの進行性を簡易に判定できる設計に資する評価式の提案に向けて検討を行ったので、結果を報告する。

2. 提案方法の考え方の整理

筆者らは、 ΔSC と $m \cdot E_s$ 、 ΔP_h の関係は、次式に示す形で表現できることを既報において確認している¹⁾。

$$\Delta SC = (a \cdot m \cdot E_s + b) \Delta P_h + c \cdot m \cdot E_s + d \quad (1)$$

ここに、 a 、 b 、 c 、 d は係数である。一般に弾性係数は圧縮強度、および圧縮強度は水セメント比と密接な関係にある³⁾。一方、凍結圧勾配は透水係数と密接な関係にある¹⁾。そこで、構造物の設計において設定が可能な水セメント比と透水係数に着目し、式(1)にあわせる形で次式を設定した。

$$\frac{\Delta SC}{A} = \left\{ e \left(\frac{W/C}{B} \right) + f \right\} \left(\frac{k}{C} \right) + g \left(\frac{W/C}{B} \right) + h \quad (2)$$

ここに、 W/C は水セメント比(%), k は透水係数(cm/s), A 、 B 、 C は ΔSC , W/C , k を無次元化させるための係数, e , f , g , h は係数である。ここでは、3.以降で詳述する実験によって得られるデータを使用して重回帰分析を実施して式(2)中の係数 e , f , g , h を算出し、その結果をもとにスケーリングの進行性を簡易に判定できる評価式を構築・提案する。

3. 実験方法

表-1にコンクリートの配合を示す。細骨材は苫小牧錦岡産の除塩処理済の海砂（表乾密度 2.70g/cm^3 、吸水率0.97%、粗粒率2.86）、粗骨材は小樽見晴産の碎石（表乾密度 2.67g/cm^3 、吸水率1.58%、粗粒率6.97、最大寸法25mm）を使用した。スランブは8cm、空気量は4.5%を目標値とした。練混ぜ後、図-3に示す寸法の供試体を製作し、湿潤養生を3日間行い、次いで温度 20°C 、湿度60%の気中に静置した後、ASTM C 672に準じた1面凍結融解試験および $\phi 100 \times 100\text{mm}$

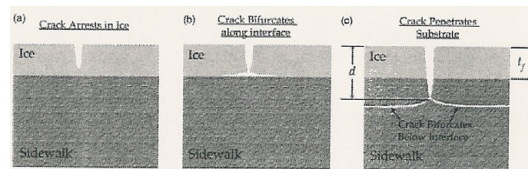
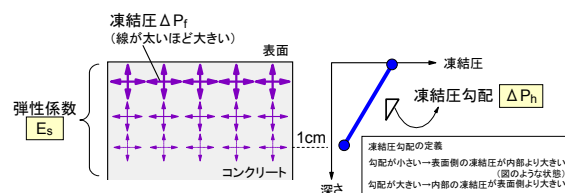
図-1 表層亀裂の発生イメージ (Valenza ら)²⁾図-2 スケーリングの促進に及ぼす影響因子¹⁾

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	セメント	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
N25	25	普通 ポルト	128	512	703	1087
N35	35		133	380	780	1111
N45	45		140	311	835	1095
N55	55		143	260	890	1076
N65	65	高炉 B種	147	226	937	1045
B25	25		139	556	670	1037
B35	35		143	409	753	1072
B45	45		144	320	823	1078
B55	55		145	264	882	1065
B65	65		145	223	939	1047

W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, 空気量は4.5%

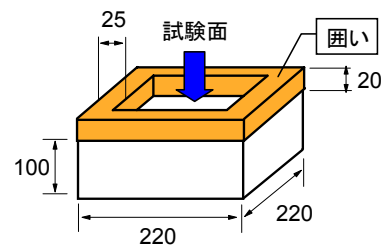


図-3 供試体

キーワード コンクリート, 凍結融解, 塩化物, スケーリング, 耐久性設計

〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 TEL 011-841-1719 FAX 011-837-8165

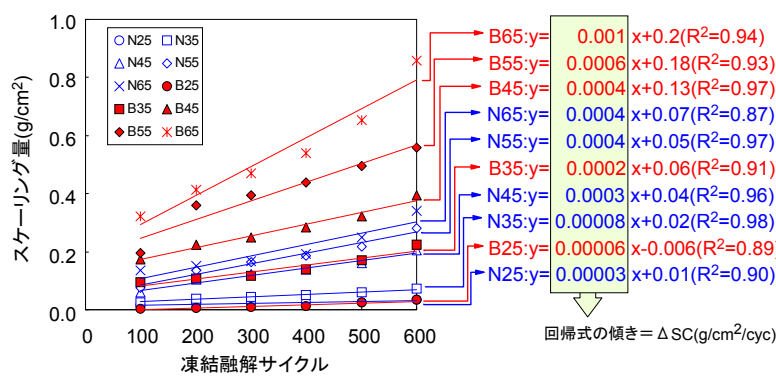


図-4 スケーリングの進行速度 ΔSC の算出(試験面は打設面)

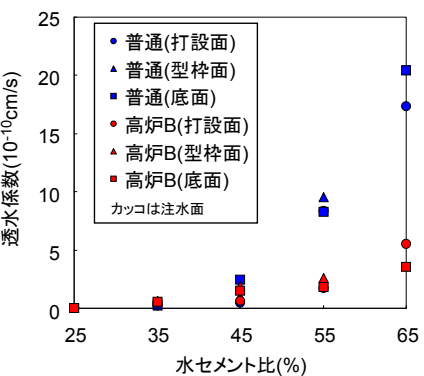


図-5 透水係数

のコアを供試体から採取してインプット法に準じた透水試験を行った。凍結融解試験では、試験面に 3%塩化カルシウム水溶液を深さ 6mm 張り、 -18°C で 16 時間、 23°C で 8 時間の 1 日 1 サイクルの凍結融解作用を繰返し与え、試験面に発生するスケーリングの量を測定した。試験面および透水試験における注水面は、打設面、型枠面、底面の 3 箇所とした。

4. 結果・考察

図-4 は凍結融解試験結果の例、図-5 は透水係数の測定結果を示している。スケーリング発生量は、配合によっては試験開始から 100 サイクルまではブリーディングの影響でやや大きかったが、100 サイクル以降は概ね一定の割合で増加した。ここでは計算を極力簡便に行うため、100~600 サイクル間で直線回帰を行い、その傾きをスケーリング進行速度 ΔSC とした。同様の作業を底面、型枠面でも行い、これら全平均 ($0.0003\text{g/cm}^2/\text{cyc}$) を式(2)の A とした。式(2)の B は表-1 に示す水セメント比の平均をとって 45%, C は図-5 に示す値の平均をとって $3.5 \times 10^{-10}\text{cm/s}$ とし、重回帰分析を行った。

表-2 に結果を示す。この値を式(2)に代入して得られる $\Delta SC/0.0003$ の計算値と凍結融解試験から得られる $\Delta SC/0.0003$ の実測値は図-6 に示すように良く対応した。図-7 は表-2 の値を代入した式(2)から求めた ΔSC , W/C , k の関係である。 W/C が大きくかつ k が小さいほど ΔSC が大きい形のグラフが得られた。この傾向は既報¹⁾の知見(図-2)とも良く一致する。ここで式(2)の右边を W/C と k の項の積の形に整理すると、式(3)のようになる。

$$\frac{\Delta SC}{0.0005} - 2.52 = \left(\frac{W/C}{45} - 1.67 \right) \left(\frac{k}{3.5 \times 10^{-10}} + 2.31 \right) \quad (3)$$

左辺は ΔSC に依存する値であり、まとめて ω で表すと式(4)が得られる。

$$\omega = \left(\frac{W/C}{45} - 1.67 \right) \left(\frac{k}{3.5 \times 10^{-10}} + 2.31 \right) \quad (4)$$

すなわち、 ω の許容範囲を設定することで、スケーリングに対する耐久性設計を式(4)により行うことができる。もちろん ω の許容範囲は部材の要求性能(スケーリング量の許容上限)や環境条件によって変化するため、一様ではない。今後は構造物調査を実施して ω の許容範囲の設定に向けた検討を進めていく予定である。

参考文献

1) 遠藤裕丈, 田口史雄, 名和豊春: スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露環境の影響, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.348-365, 2010.9
2) Valenza II, J. J. and Scherer, G. W. : Mechanism for Salt Scaling, *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol.89, No.4, pp.1161-1179, 2006.
3) 村田二郎, 長瀧重義, 菊川浩治: 土木材料コンクリート, pp.89-90, 共立出版, 1991.6

表-2 重回帰分析の結果

<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	R^2
1.66	-2.77	3.83	-2.21	0.898

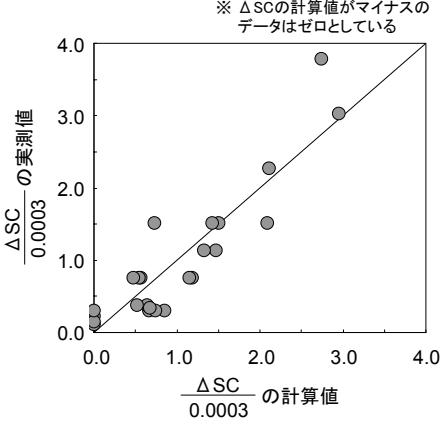


図-6 $\Delta SC/0.0003$ の計算値と実測値

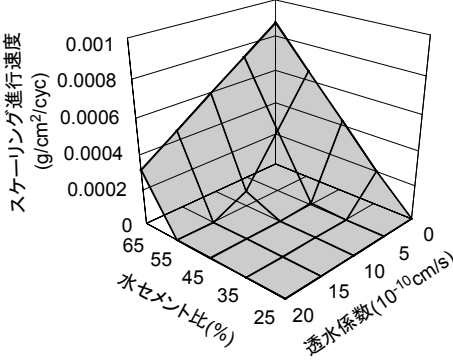


図-7 式(2)から求めた ΔSC , W/C , k の関係