

凍結融解と塩化物の複合作用を受けるコンクリートの凍害劣化予測に関する研究

(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
 (独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 田畑浩太郎

1. はじめに

コンクリート構造物を管理する国や自治体では構造物の長寿命化修繕計画を策定し、効率的な維持管理を行って構造物の長寿命化を図る取り組みがなされている。適切な計画を策定するには実態に即した劣化予測が必要で、そのための予測技術の充実・整備が急がれる。寒冷地における代表的な劣化に凍結融解と凍結防止剤等の塩化物の複合作用による凍害(スケーリング・ひび割れ)が挙げられる。現在の凍害予測はひび割れのみといった単一の劣化形態の進行を前提としているが、実際は複数の劣化形態が同時に発生・進行する場合が殆どである。このため本研究ではスケーリングとひび割れの同時進行を前提とした凍害予測の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体および実験方法

表-1に配合を示す。セメントは高炉B種と普通ポルトで、実験に用いたコンクリートの水セメント比は45, 55, 65%とした。細骨材は海砂(密度 2.67g/cm³, 吸水率 0.87%), 粗骨材は碎石(密度 2.67g/cm³, 吸水率 1.78%, 最大寸法 25mm)を用いた。目標空気量は4.5±1.5%とした。図-1に

表-1 コンクリート配合 (圧縮強度は材齢 28 日における実測値)

記号	セメント	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				圧縮強度 (MPa)
			W	C	S	G	
B45	高炉 B 種	45	145	322	808	1073	41.1
B55		55	147	267	865	1059	19.2
B65		65	149	229	917	1035	16.4
N45	普通ポルト	45	144	320	815	1082	46.8
N55		55	146	265	871	1065	35.4
N65		65	148	228	922	1041	27.4

実験の流れを示す。打設後、材齢 7 日まで湿布養生の後、28 日まで恒温恒湿室(温度 20°C, 湿度 60%)に静置し、28 日から濃度 3%の塩化ナトリウム水溶液(以下、塩水と記す)を用いた凍結融解試験と比較のための塩水浸漬試験を開始した。凍結融解試験は JIS A 1148 を準用し、供試体を 3mm 厚の塩水で覆えるゴム製の容器に供試体を挿入して塩水を注ぎ、凍結融解試験槽で-18°C~5°Cの範囲で 1 サイクル 3~4 時間の凍結融解を与えた。構造物の状態にあわせて一面から試験水を供給させるため、試験面(打設面)以外の 5 面にシラン系表面含浸材を塗布して防水処理を施し、さらに冷気伝達面を打設面に限定する目的で断熱性を有するスチレンボードを設置した。凍結融解は 600 サイクルまで行い、途中 36 サイクル毎にスケーリング量、ひび割れは相対動弾性係数で評価するものとして 100 サイクル毎に相対動弾性係数、試験終了時に力学特性把握のため JIS A 1106 に準じて曲げ強度を測定した。スケーリング量は 110°C で乾燥後の剥離片の質量から求めた。相対動弾性係数は構造物での鉄筋付近までの影響の測定を想定し、超音波測定器で深さ 1, 2, ..., 8, 9cm の超音波伝播速度を測定し、式(1)¹⁾と式(2)より各深さの相対動弾性係数を求めた。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (1)$$

$$RE_d = (E_{dn} / E_{d0}) \times 100 \quad (2)$$

ここに E_{dn} は n サイクルの動弾性係数(GPa), V_n は n サイクルの超音波伝播速度(km/s), E_{d0} は凍結融解の影響を受けていない時の動弾性係数(GPa)である。ここでは水和の影響を排除するため凍結融解試験と同じ期間塩水浸漬させた時の動弾性係数を E_{d0} とした。

2.2 凍害予測

コンクリート標準示方書には凍害の予測式が示されていないが、幾つかのモデルが提案されている。ここでは既研究に基づく簡易

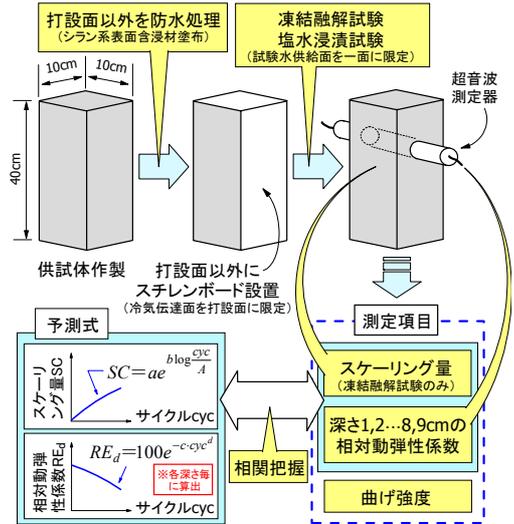


図-1 実験の流れ

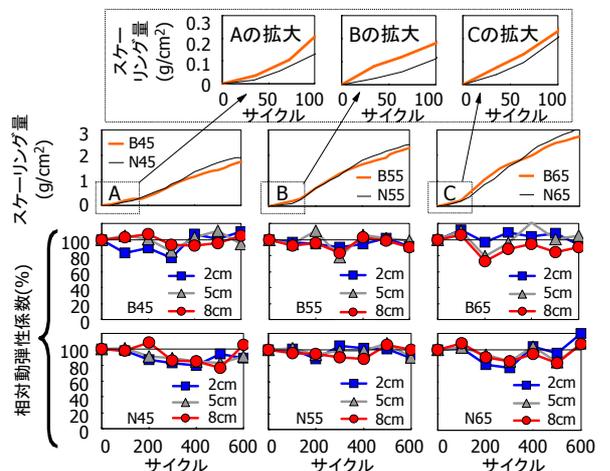


図-2 スケーリング量および相対動弾性係数

キーワード コンクリート, 凍害, 耐久性設計, 劣化予測

〒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

なモデルを利用してスケーリングは式(3)²⁾, 相対動弾性係数は淡水の場合の式ではあるが式(4)³⁾による評価を試みた。

$$SC = ae^{b \log \frac{cyc}{A}} \quad (3)$$

$$RE_d = 100e^{-c \cdot cyc^d} \quad (4)$$

ここに SC はスケーリング量(g/cm^2), RE_d は相対動弾性係数(%), cyc はサイクル, A はサイクルを無次元化させるための係数(ここでは, 凍結融解試験期間の中間をとって 300 とした), a, b, c, d は条件によって定まる係数である。

3. 実験結果・考察

3.1 凍害の進行状況の把握

図-2 に凍結融解試験結果を示す。スケーリング量は水セメント比が大きいくほど多く, 水セメント比とは密接な関係にあった。薄皮の剥離状態(写真-1)の100サイクルでは高炉B種のスケーリング量が多く, 既往の知見²⁾と対応したが, 角欠けなど大きな損傷に至った(写真-1)600サイクルは普通ポルトランドのスケーリングが多かった。一方, 相対動弾性係数は, スケーリング量の測定結果とは対照的に, 水セメント比やセメント種類の影響, ならびに深さの違いによる影響はさほど見られず, 全体的に80%程度の均等な値を示した。相対動弾性係数に及ぼすこれらの影響は, 混入されたエントレインドエアによる水圧緩和効果によって抑制されることが考えられる。

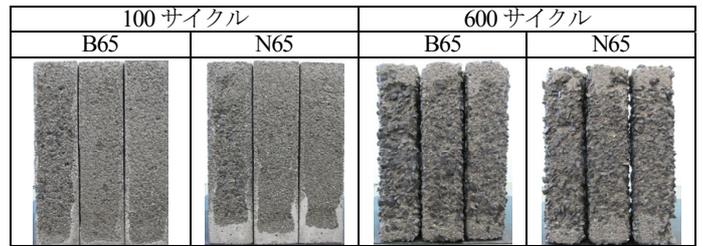


写真-1 凍結融解を与えた供試体の外観の一例

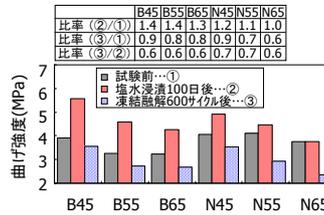


図-3 曲げ強度

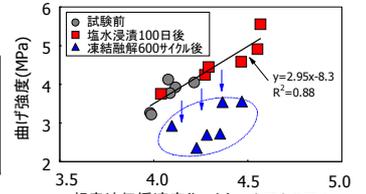


図-4 超音波伝播速度と曲げ強度

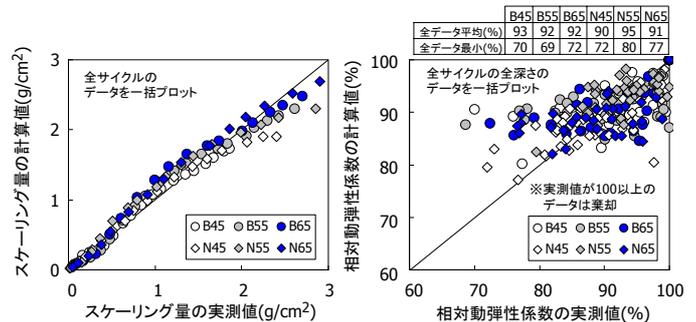


図-5 スケーリング量と相対動弾性係数の実測値と計算値の比較

図-3 に曲げ強度の結果を示す。凍結融解試験と同じ期間, 塩水に浸漬させた場合は試験前に比べると最大1.4倍増進したが, 凍害が発生した場合は低下している。図-4 に超音波伝播速度(全深さの平均)と曲げ強度の関係を示す。凍結融解を受けておらず, コンクリートの品質が均等に健全なもの(試験前, 塩水浸漬)は良い相関を示した。これは曲げ強度と水和の程度が密接な関係にあることを表す。しかし, 凍結融解を受けたものは回帰線から逸脱しており, 凍害による損傷は曲げ強度に大きな影響を及ぼすことが確認された。本研究では相対動弾性係数が80%程度まで低下すると曲げ強度は試験前の0.6~0.9倍となる結果が得られた。凍結融解試験前後の曲げ強度の比率(③/①)は水セメント比とほぼ対応しているが, 水セメント比が大きいくほどスケーリングが大きい(図-2)ことから, 水セメント比に加えてスケーリングによる断面欠損の程度も曲げ強度の低下に影響を及ぼしている可能性も考えられる。

3.2 凍害予測に関する考察

スケーリング量と相対動弾性係数の実測値と式(3), 式(4)から求めた計算値との比較を図-5に示す。スケーリング量は実測値と計算値が良く対応した。相対動弾性係数は, 実測値がばらついている影響はあるものの, 45°線の近傍にほぼ沿ってプロットされ, 淡水の評価式である式(4)は塩水の場合も概ね対応する結果が示された。凍結融解と塩化物の複合作用を受けた場合の凍害劣化曲線は基本的に式(3), 式(4)を併用することで得られると考えられる。今後はこの知見をふまえ, 凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受ける実構造物の凍害の進行性を式(3), 式(4)を用いて検証する予定である。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見について, 以下に整理する。

- (1) スケーリングは水セメント比の影響を大きく受けるのに対し, 相対動弾性係数の低下挙動は水セメント比や表面からの深さの影響よりも混入されたエントレインドエアによる水圧緩和効果に依存する。
- (2) 凍結融解と塩化物の複合作用による凍害(スケーリング・ひび割れ)劣化曲線は, 基本的に式(3), 式(4)を併用することで得ることができる。

【参考文献】

- 1) 緒方英彦, 野中資博, 藤原貴央, 高田龍一, 服部九二雄: 超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法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.63-70, 2006.12
- 2) 遠藤裕丈: 凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法に関する研究, 北海道大学博士学位論文, p.138, 2011.3
- 3) 野口博章: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する基礎的研究, 法政大学博士学位論文, p.32, 2007.9