

論文 スケーリングに及ぼすコンクリート中の塩化物イオン量の影響

遠藤 裕丈*1・田口 史雄*2・名和 豊春*3

要旨：凍結融解と塩化物の複合作用によって促進されるコンクリートのスケーリングに対する耐久性の照査手法は、未だ確立されていない。スケーリング促進の要因の一つに、コンクリートに蓄積される塩化物イオンの量の変化に起因して発生する二次的な圧力の作用が考えられ、スケーリングの危険性と塩化物イオン量の関係を定量化できれば、照査に活用できるように思われる。このため、スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響について検討した。その結果、スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響は、本研究の範囲では普通ポルトランドセメントを用いた場合は 8kg/m^3 、高炉セメント B 種の場合は 1kg/m^3 が最も大きかった。
キーワード：凍結融解, スケーリング, 塩化物イオン量, 温度ひずみ曲線

1. はじめに

コンクリートが凍結融解と塩化物の複合作用を受けると、表面がうろこ状に剥離していくスケーリングが進行しやすく、構造物の美観の損失や、かぶりの減少等による鋼材の早期腐食が懸念される。しかし、スケーリングに対する耐久性の照査手法は確立されていない。

スケーリングは、コンクリートに接触する塩化物水溶液の濃度が約 3%のときに最も顕著に発生することが Verbeck ら¹⁾の研究等で明らかになっている。しかし、実際の環境下では、コンクリートに供給される塩化物水溶液の濃度は常に一定とは限らず、この情報を耐久性の設計に反映させることは難しい。

スケーリングの促進メカニズムに関しては、浸透圧説の拡大解釈²⁾や塩化物イオンの濃度勾配に起因する凍結挙動の変化³⁾など種々提唱されており、本質的にはコンクリート中の塩化物イオン量の変化に起因して発生する二次的な圧力が深く関与していると考えられる。このことから、スケーリングに及ぼすコンクリート中の塩化物イオンの蓄積量の影響を明らかにし、スケーリングの危険性を塩化物イオン量で定量化できれば、耐久性の照査に活用できるように思われる。

そこで、本研究では、コンクリートのスケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響について基礎的な検討を行った。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの配合

表-1 に供試体の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一般にスケーリングが生じやすいとされる高炉セメント B 種の 2 種類を用いた。水セメント比は 50%、細骨材率は 45%とした。目標スラ

表-1 供試体のコンクリート配合

記号	セメント	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Cl
N0	普通	140	280	850	1,067	0
N1						1
N2						2
N4						4
N6						6
N8						8
B0	高炉 B 種	140	280	847	1,061	0
B1						1
B2						2
B4						4
B6						6
B8						8

【凡例】 W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, Cl: 塩化物イオン

ンプは 8cm、目標空気量は 5%とした。細骨材は苫小牧錦岡産の除塩処理済みの海砂 (密度 2.70g/cm^3)、粗骨材は小樽見晴産の碎石 (密度 2.67g/cm^3 , 最大寸法 25mm) を用いた。塩化物イオンの混入量は 0, 1, 2, 4, 6, 8kg/m^3 の 6 水準とした。塩化物イオンは練混ぜ時にミキサへ投入した。AE 減水剤はリグニンスルホン酸系、空気連行剤は変性ロジン酸化合物系のものを使用し、添加量は単位セメント量の 0.25%および 0.004%とした。記号は、セメントの種類 (N, B) と塩化物イオン量 (0, 1, 2, 4, 6, 8) との組み合わせによって構成されている。

2.2 供試体

図-1 に供試体を示す。供試体の寸法は $\phi 10 \times 5\text{cm}$ の

*1 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 (正会員)

*2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム工学専攻 教授 工博 (正会員)

円盤状とした。これは、スケーリングはコンクリートの表層が剥離する現象であるので、表層の局所的な劣化挙動を詳細に検討するには、厚さは極力薄い寸法が適当と考えたためである。なお、高炉セメント B 種を用いた場合、スケーリングは生じやすい一方で透水係数は小さい傾向にある。そこで、スケーリング挙動を水の流動挙動と関連づけながら評価したい理由で、ひずみゲージを中央部に埋設した。ひずみゲージは温度補償機能を有するものを用いた。供試体は打設後、湿った麻布で覆って 3 日間湿気養生させた後、材齢 28 日まで温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室に静置させた。

2.3 吸水試験

水の供給は凍害の要因の一つである。そこで、コンクリートの吸水挙動に及ぼす塩化物イオン量の影響を検討するため、材齢 28 日より吸水試験を行った。ここでは、プラスチック製のコンテナ (60×40×30cm) の中に約 20℃の水道水を溜め、その中に供試体を浸漬させ、供試体の吸水率の経時変化を式(1)により求めた。

$$Q_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad (1)$$

ここに、 Q_t は吸水 t 日目の吸水率、 W_t は t 日目の供試体の質量、 W_0 は試験開始前の供試体の質量である。なお、 Q_t は試験開始時点の含水状態が大きく影響するが、本研究においては、高周波水分計で試験開始時の供試体の深さ 1cm の含水率を事前に測定したところ、すべての試料で 4.5%前後であり、含水状態はいずれも概ね同程度である。なお、吸水率は供試体 3 個の平均とした。

2.4 凍結融解試験

スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響を検討するため、材齢 28 日より凍結融解試験を行った。ここでは、JIS A 1148 仕様のゴム製の容器を使用し、容器 1 つに供試体を 6 個入れ (図-2)、水道水を注いで供試体全面を水で覆った。コンクリート全体で捉えた場合、水道水で濃度が薄まると仮定すると、この方法では塩化物イオン濃度は表面で薄く、内部で濃い状態となり、一般的な構造物の濃度勾配は逆となるが、本研究は全体ではなく表層の一部で生ずる劣化挙動を検討の対象としており、その挙動をシミュレートさせたい理由から、この方法により行った。凍結融解温度とサイクルは ASTM C 672 に準じ、-18℃で 16 時間、23℃で 8 時間の 24 時間 1 サイクルとした。当初は、凍結時に発生する供試体周囲からの過剰な水の押し込みの影響を排除したい理由から、凍結行程に切替える際に容器内の水を排除する気中凍結・水中融解方式により行った。しかし、42 サイクルを終えた時点で劣化の兆候が一向に見られなかったため、43 サイクルで水中凍結・水中融解方式に切替え、凍結融解の強さを高めた。

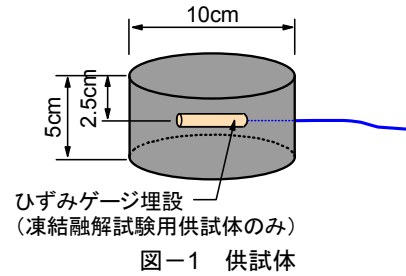


図-1 供試体

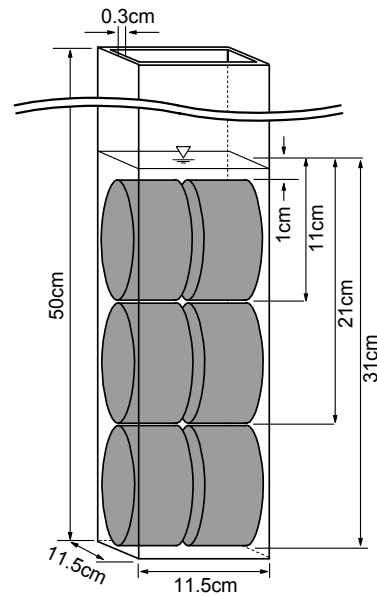


図-2 容器内の供試体の状況 (凍結融解試験)

ここでは、5~10 サイクルに 1 回の間隔で供試体の質量変化率の経時変化を式(2)により求めた。

$$M_c = \frac{W_c - W_0}{W_0} \quad (2)$$

ここに、 M_c は c サイクルの時の質量変化率、 W_c は c サイクルの時の供試体の質量、 W_0 は試験開始前の供試体の質量である。

質量変化率は、供試体 3 個の平均とした。なお、供試体 3 個のうち 1 個には、埋め込み型ひずみゲージを供試体の中央部に埋設している。

3. 試験結果・考察

3.1 吸水挙動に及ぼす塩化物イオン量の影響

(1) 吸水率

図-3 は吸水試験の結果を示している。塩化物イオン量が多い供試体ほど吸水率は途中まで小さい値で推移する傾向を示した。これは、塩化物イオンとセメントペースト水和物が結合⁴⁾し、コンクリートが緻密化したことが一因と考えられる。この傾向は、高炉セメント B 種を使用した B シリーズで顕著に表れていた。このことは、高い塩化物量と結合しやすい高炉セメントの特徴⁴⁾と一致する。なお、B4, B6, B8 は 10 日経過後、吸水速度が

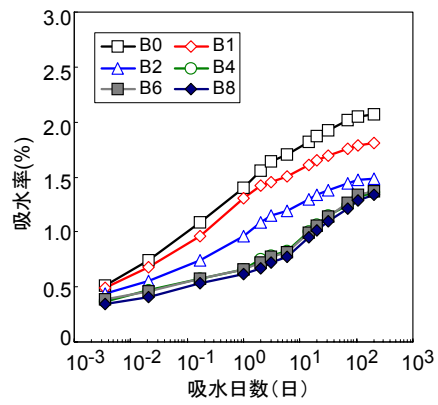
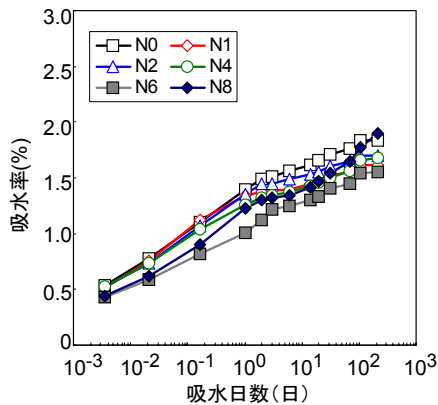


図-3 吸水試験結果

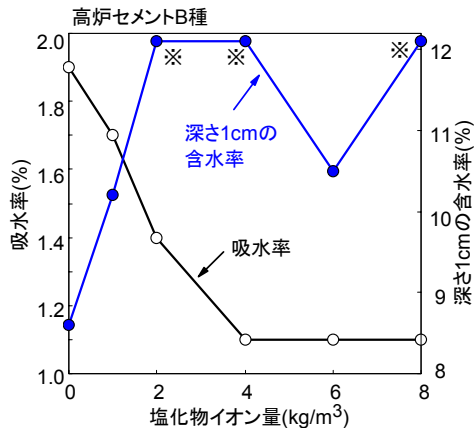
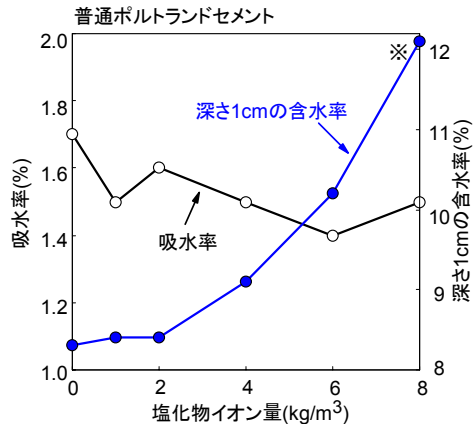


図-4 吸水率と深さ 1cm の含水率

大きくなっている。この一因として、高炉セメントの場合、セメントペースト水合物と化学的に結合する塩化物イオンはセメント重量比で最大 1%とされている⁴⁾ことから、本研究においては、 2.8kg/m^3 の塩化物イオンは化学的に結合し、それ以外の塩化物イオンは空隙溶液に溶存する形となるため供給水との間に濃度差が発生して、水が空隙溶液に引き寄せられたことが考えられる。N8でも同様の傾向がみられるが、Bシリーズと同様の現象が作用したと思われる。

(2) 任意の吸水日数における深さ 1cm の含水率

ここで、水分の蓄積状況を把握するため、吸水試験の任意の途中段階において深さ 1cm の含水率を高周波水分計で測定した。図-4 に吸水率および深さ 1cm の含水率と塩化物イオン量の関係を示す。なお、本研究では 31 日目に測定を実施した。高周波水分計の仕様で、測定が可能な含水率の上限値は 12%であり、12%以上だった供試体は※印で表示している。吸水率とは対照的に、深さ 1cm の含水率は塩化物イオン量が多いほど大きかった。このことは、供給された水の多くは、供試体の内部には移動せず、表層にとどまりやすいことを示している。なお、B6 は傾向から外れているが、これについては異常値の疑いがある。

一方、セメント別でみると、吸水率は、塩化物イオン

量 0, 1kg/m^3 は普通ポルトランドセメントを使用した N シリーズが約 0.2%大きく、2, 4, 6, 8kg/m^3 は B シリーズが 0.2~0.4%小さい。それに対し、深さ 1cm の含水率は B シリーズが全体的に大きい。表層に水がとどまりやすい挙動は、B シリーズで表れやすいことが読み取れる。

3.2 スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響

図-5 に凍結融解試験の結果を示す。2.4 で前述したように、42 サイクルまでは気中凍結・水中融解方式で行ったが、吸水による質量増加が試験開始直後に生じた程度で、劣化の兆候は殆ど認められず、質量変化率はほぼ一定値で推移した。

そこで、凍結融解の強さを高めるため、43 サイクルで水中凍結・水中融解方式に切替えたところ、質量変化率が一時的に微増した後、スケーリングが発生した。この微増は、凍結時に発生した周囲からの水の押し込みによると思われる。N シリーズは、N8 が 131 サイクルでやや大きなスケーリングが生じたが、N0~N6 は軽微なスケーリングが生じた程度で、著しい損傷には至らなかった。一方、B シリーズは、55 サイクルで B0 と B1 にスケーリングが発生した。特に B1 のスケーリングが大きく、55 サイクル以降も劣化は著しく進行した。その後、72 サイクルに B2、92 サイクルに B4 および B6、112 サイクルに B8 でスケーリングが発生したが、B1 に比べるとス

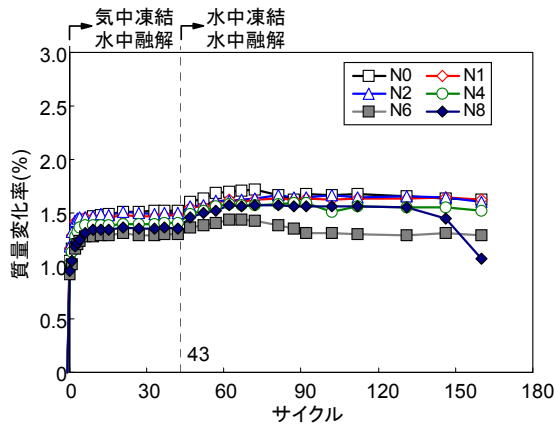


図-5 凍結融解試験結果

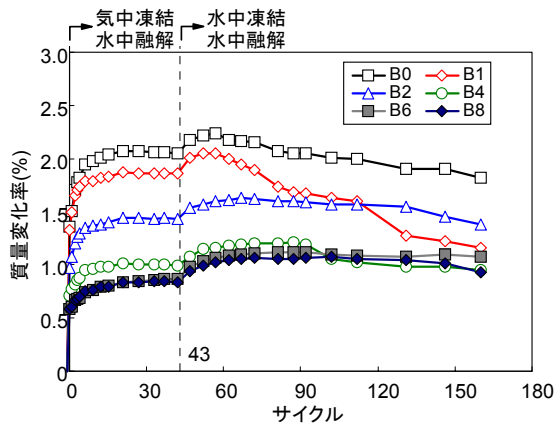


図-5 凍結融解試験結果

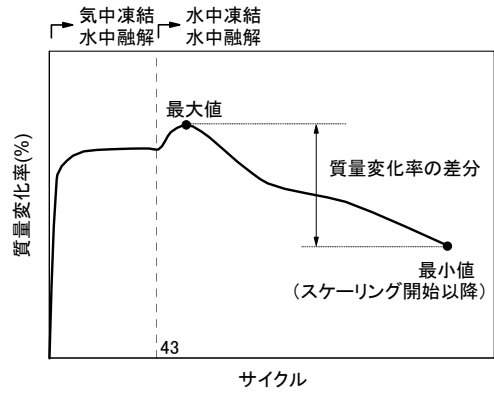


図-6 質量変化率の差の求め方

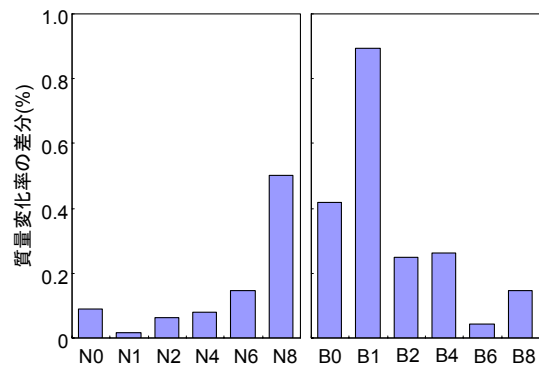


図-7 質量変化率の差分

ケーリングの程度は小さかった。

ここで、質量変化率の最大値から最小値を差し引いて、質量変化率の差分を求めた(図-6)。図-7に結果を示す。この値が大きいくほど、スケーリングの程度が大きいことを表している。本研究の範囲では、スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響は、Nシリーズでは 8kg/m^3 、Bシリーズでは 1kg/m^3 が最も大きかった。また、スケーリングの程度はBシリーズが大きい傾向にあった。

3.3 スケーリング挙動に関する考察

吸水試験と凍結融解試験は、水の供給の強さが同一ではなく、両者を包括して定量解析することは厳しいが、静水中でも供試体に静水圧が作用することを勘案すると、水の浸透性(しやすさ、しにくさ)そのものの基本的な性質は両試験において定性的には同じと考えられる。Nシリーズの吸水試験結果をみると、N8は深さ1cmの含水率が最も大きく、また吸水率も最終的には最大値を示した。これは耐凍害性の面では極めて不利な状態であり、凍結融解試験結果とも一致する。Bシリーズは、Nシリーズに比べて全体的にスケーリングは大きかった。Bシリーズは、表層に水がとどまりやすいことを吸水試験で確認している。このことから、表層に多くの水がとどまったことで表層に大きな凍結水圧が作用したことがスケーリングの一因と考えられる。本研究ではB0と

B1、特にB1のスケーリングが大きかったが、吸水試験での深さ1cmの含水率はB1が大きく、前述した考察と概ね一致する。一方、B2、B4、B6、B8は、吸水試験での深さ1cmの含水率は大きい、凍結融解試験の結果とは対応していない。一方、吸水試験での吸水率は全シリーズの中で小さく、これについては凍結融解試験結果と対応している。このことから、B1と同程度のスケーリングの発生に要する水量が供試体に蓄積されていなかったために顕著な損傷に至らなかったと考えられる。これらのことから、スケーリングの危険性は吸水率と表面の含水率とのバランスから決定されるように思われる。

3.4 供試体の膨張収縮挙動に関する考察

図-8、9に供試体中心部の膨張収縮挙動を示す。ここでは、スケーリングの程度が最も大きかったN8とB1、および、比較としてN8、B1と塩化物イオン量が同じでセメントの種類が異なるN1とB8の結果を代表して載せる。温度は試験室内の温度である。

(1) 気中凍結・水中融解(0~42サイクル)

図-8をみると、凍結行程では収縮を示している。これは、気泡に生成された氷晶の濃度が高まり、浸透圧の作用で細孔内の水が気泡に吸収され、吸収された量だけ収縮した⁵⁾と考えられる。収縮はB8が最も小さいが、これは気泡に吸収される水が少ないことを示唆し、吸水試

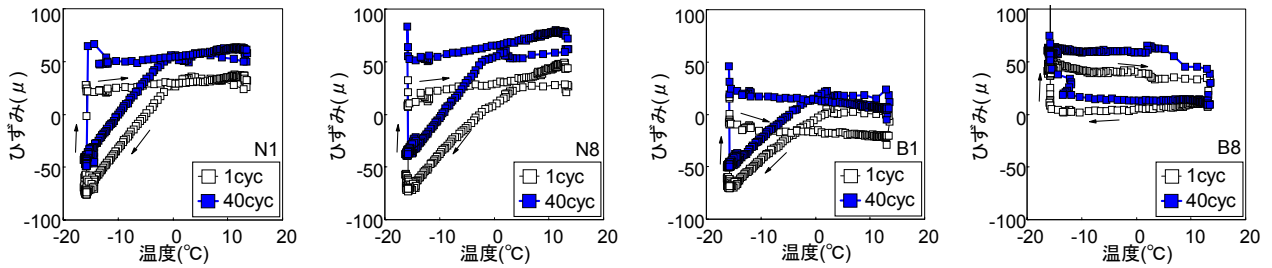


図-8 温度ひずみ曲線 (-18°Cで16時間, 23°Cで8時間, 気中凍結・水中融解)

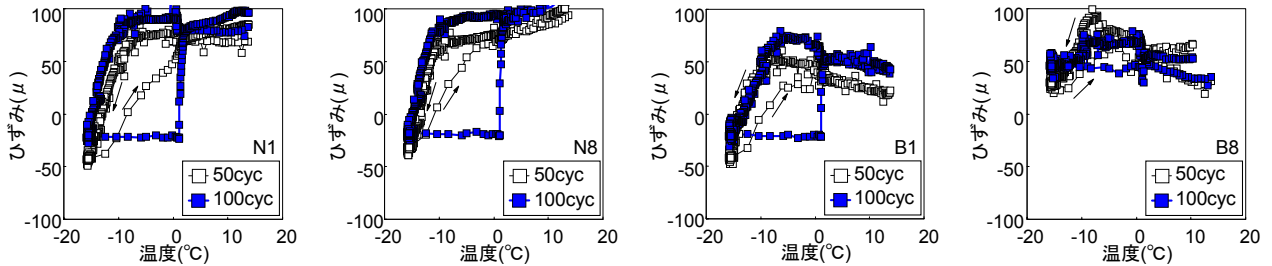


図-9 温度ひずみ曲線 (-18°Cで16時間, 23°Cで8時間, 水中凍結・水中融解)

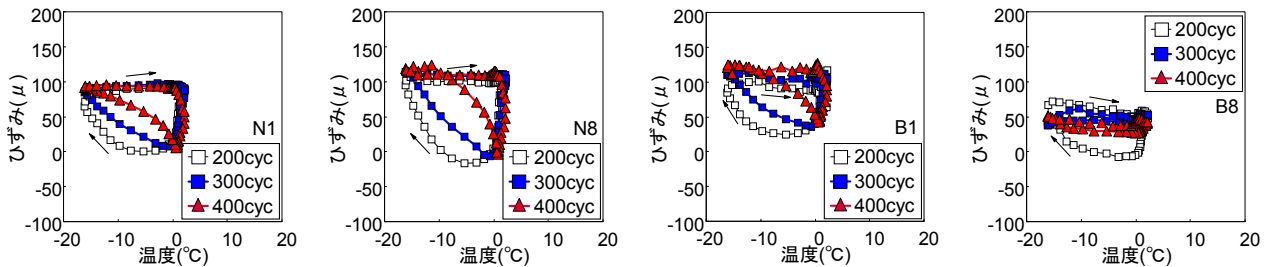


図-10 温度ひずみ曲線 (-18°C~5°Cで3~4時間, 水中凍結・水中融解)

試験の結果とほぼ一致する。いずれも-18°Cで大きく膨張しているが、これは融解切替え時に常温の水道水を容器に注いだ関係で膨張が急速に進行したことによる。

(2) 水中凍結・水中融解 (43 サイクル~)

図-9 をみると、凍結行程では-10°Cで収縮が生じ、また100サイクルの融解行程では収縮の回復に遅れが生じている。これは、凍結水量の増加で熱伝導率⁶⁾が低下したことで凍結の開始と融解の進行に遅延が生じたと考えられる。収縮量は約150μで、同一の温度条件下で200μの収縮が生じている既往の文献⁵⁾に近い値となっている。この段階ではB1で大きなスケーリングが生じているが、温度ひずみ曲線の動きに大きな乱れはない。これは、表面のスケーリング挙動と内部の膨張収縮挙動の変化は必ずしも連動はしないことを示している。

なお、値は微量であるが、一部で温度がプラスの領域で温度低下に伴い膨張している。この理由は不明であるが、熱膨張係数はコンクリートが $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、水が $2 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ ⁷⁾で、1°C低下に対する収縮は水の方が大きいことから、供試体中の水の収縮にコンクリートが抵抗(膨張)した可能性がある。

(3) 急速水中凍結・水中融解

図-8, 9においていずれの供試体にも温度ひずみ曲線の動きに大きな変化がみられなかった理由から、凍結融解試験終了後、ひずみゲージを埋設した供試体のみ容器に残し、容器を通常の凍結融解試験槽(JIS A 1148)に移し替えて-18°C~5°Cで3~4時間の急速凍結融解作用を与え、引き続き補足的な検討を行った。図-10に結果を示す。凍結行程では最初は収縮したが、その後は大きな膨張に転じた。これは、気泡が飽和に達したことで気泡への水の移動がなくなり、細孔内で余剰状態となった水が細孔でそのまま凍結膨張したものと考えられる。

ここで、発生した全てのクラックに水が蓄積されると仮定し、水の凍結による膨張(ひずみ差と称す)を図-11に示す方法で簡易的に求めた。図-12に結果を示す。ここでは、塩化物イオン量が同じ供試体同士を比較した(N0とB0, N1とB1, ..., N8とB8)。図には200, 300, 400サイクルの結果を一括プロットした。N0~N8のひずみ差が90~120μであるのに対し、B0~B8は20~90μで、塩化物イオン量によらずBシリーズの方がひずみ差は小さかった。ひずみ差が小さいことは凍結水量

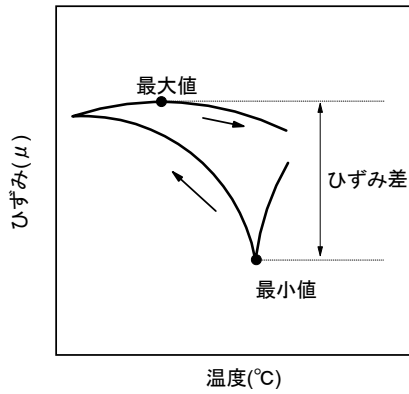


図-11 ひずみ差の求め方

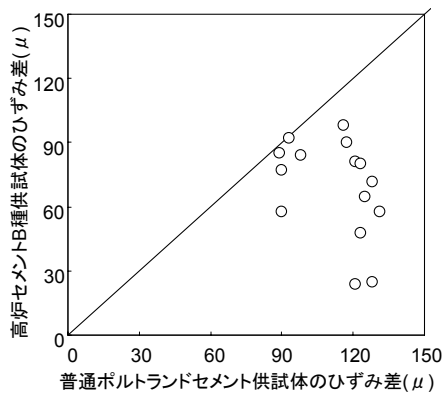


図-12 ひずみ差に及ぼすセメントの種類の影響

が少ないことを意味しており、B シリーズは、強い凍結融解作用を与えても供試体内部に水は移動しにくいことがわかった。

写真-1 は 467 サイクル後の状況である。N シリーズは塩化物イオン量が大きく、B シリーズは塩化物イオン量が小さいシリーズでスケーリングが大きい。この状態は、3.3 で述べた考察とも概ね対応していた。

3.5 セメントの影響に関する考察

本研究の範囲では、スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響は、普通ポルトランドセメントは 8kg/m^3 、高炉セメント B 種は 1kg/m^3 が最も大きく、塩化物イオンの要因を凌駕する形でセメントの種類による影響も強く明確に表れる結果となった。スケーリングは、表層での凍結余剰水の膨張・流動圧の繰り返しに起因して発生する現象であり、基本的には表層での水の流動挙動が主因であるが、塩化物イオン量に加えて、セメントの種類という要素も表層での水の流動挙動に大きな影響を及ぼすと言える。このことから、スケーリングの危険性の照査にあたっては、両者の影響を総合して評価する必要があると考える。

4. まとめ

得られた知見をまとめると、以下の通りである。



写真-1 467 サイクル後の供試体
(劣化が最も著しかった部分を撮影)

- (1) 塩化物イオン量が多い供試体は、吸水率は小さい一方で、深さ 1cm の含水率は大きい傾向にあった。塩化物イオン量が比較的多い一部の供試体では、ある日数から吸水速度が増加に転じたものもあった。
- (2) 本研究の範囲では、スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響は普通ポルトランドセメントは 8kg/m^3 、高炉セメント B 種は 1kg/m^3 が最も大きかった。

参考文献

- 1) Verbeck George and Klieger Paul : Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin 150, pp.1-13, 1957
- 2) M.Pigeon and R.Pleau : Durability of Concrete in Cold Climates, E&FN SPON, pp.11-30, 1995
- 3) 赤堀弥生, 西祐宜, 名和豊春 : 温度及び塩化物イオン濃度勾配がセメント硬化体中水分の凍結挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, p.1197-1202, 2007.7
- 4) Jochen Stark and Bernd Wicht (訳者: 太田利隆, 佐伯昇) : Dauerhaftigkeit Von Beton, 社団法人セメント協会, pp.72-74, 1999
- 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, p.113, 1999.3
- 6) 村田二郎, 長瀧重義, 菊川浩治 : 土木材料コンクリート, p.121, 共立出版株式会社, 1991
- 7) 理科年表, p.471, 丸善株式会社, 1990