

コンクリートのソルトスケーリングのメカニズムの解明に関する研究

羽原 俊祐, 小山田 哲也

岩手大学理工学部

概要 NaCl 等の凍結防止剤の使用に伴い、コンクリートのスケーリング劣化が激しくなっており、この現象をソルトスケーリングといわれている。スケーリング劣化現象を解明するため、ASTM C 672 法と整合性がある本研究室で開発した小片試験方法を使用し、ソルトスケーリングに及ぼす冷却最低温度(0~-40°C)及び凍結防止剤の濃度の影響(0.01~10%)を把握した。さらに、モルタルの配合の影響を把握するため、砂セメント比(S/C=0-3)及び水セメント比(W/C=0.25~0.7)をかえてソルトスケーリングを評価した。得られた結果としては、ソルトスケーリングは真水では起こらず、幅広い凍結防止剤の濃度(0.1~10%)で生じる。凍結する最低温度の影響は少なく、-7°C以下の温度で生じる。砂セメント比は著しく小さい場合、水セメント比も0.35以下で抑制効果があるが、それ以上では水セメント比の影響は少なく、砂セメント比が1以下の範囲では抑制されるが、それ以上では影響は少ない。

1. 研究目的

NaCl 等の凍結防止剤の使用量の増加に伴い、道路におけるコンクリート構造物のスケーリング劣化が激しくなっており、この現象をソルトスケーリングという。ソルトスケーリングについては、多くの研究がされてきた^(1, 2)が、その詳細については、不明な点も多い。本研究では、スケーリング劣化現象を解明するため、ASTM C 672 法と整合性がある小片試験方法⁽³⁻⁵⁾を使用し、ソルトスケーリングに及ぼす冷却最低温度(0~-40°C)及び凍結防止剤の濃度の影響(0.01~10%)を把握した。さらに、モルタルの配合そのものの影響を把握するため、砂セメント比(S/C=0~3)及び水セメント(W/C=0.25~0.7)をかえてソルトスケーリングの評価を行い、ソルトスケーリング現象の解明のための基礎的検討とした。

2. 研究方法

2. 資料及び実験方法

2. 1 使用した材料及び配合

セメントは市販の普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/cm³)を使用し、細骨材は2.5 mm 篩を通過した表乾状態の盛岡市黒川産砕砂(表乾密度:2.80 g/cm³)を用いた。

AE 剤は使用せず、水セメント比 0.4 以下のモルタルについては必要に応じて、ナフタレン系高性能減水剤を使用した。

モルタルの配合は、Table 1 に示す。標準的な実験水準においては、モルタルの配合は水セメント比(W/C)を0.5、砂セメント比(S/C)を2.5とし、凍結防止剤としてNaCl濃度は3%、冷却最低温度を-20°Cとした。なお、比較に真水を使用した場合の検討を加えた。

それぞれの因子の検討については、小片試験法である特徴を生かして、幅広いレンジで検討を行った。

最低温度の検討では、3種類の冷凍庫を使用し、-5°Cから-40°Cの範囲で検討した。凍結防止剤濃度の影響については、0%から10%の範囲で検討を行った。水セメント比の検討においては、砂セメント比を1.5に下げ、水セメント比を0.25から0.7の範囲で検討し、0.4以下では、連行空気の混入が少ないナフタレン系高性能減水剤を使用し

Table 1. Condition of experimental factor

	Std.	Range
W/C	0.5	0.25 ~ 0.7
S/C	2.5	0 ~ 3
Lowest temperature (-20°C)	-20°C	-5 ~ -40
Concentration of NaCl solution (%)	3%	0.01 ~ 10

た。砂セメント比については、水セメント比を0.35及び0.45で検討し、セメントペーストである0からコンクリート中のモルタル部に相当する3の範囲で検討した。

2.2 ソルトスケーリング評価試験

筆者らが提案した小片試験によるソルトスケーリングの評価方法^(3, 4)に従い、実施した。ダイヤモンドカッターより切り出した1辺が8 mm立方体を用い、1組3粒として、質量比10:1として100 mlポリプロピレン容器を使用して1日1サイクルの凍結融解(凍結12時間, 融解12時間)を与え、3% NaCl(凍結防止剤)溶液を用い、10回までの所定の回数で凍結融解を与えた。凍結融解サイクル後、分離乾燥させ、2.5 mm残分から質量残存率を求めた。質量残存率を元に、スケーリング耐久性指標(SDI)を算出した。SDIの計算は次の通りである。

$$SDI = \text{質量残存率}(\%)$$

質量残存率が60%未満の場合

$$SDI = P \times N/M$$

$$P = 60(\%)$$

N = 質量残存率がPのときのサイクル数(回)

M = 試験終了を予定しているサイクル数(回)

(本報告の場合 M=10)

なお、この小片試験方法は、ASTM C 672法など他のソルトスケーリング評価試験方法と比較検討した結果ある程度の整合性があり⁽⁵⁾、スケーリングを評価する上では有効である。

3. 研究結果及び考察

3.1 冷却最低温度の影響

スケーリングは冷却最低温度が関係するといわれている。小山田らは、氷とコンクリートの低温時の熱膨張率はほとんど同じであるが、凍結防止剤溶液では収縮量が2~3倍程度大きくなり、氷とコンクリートとの付着が強い場合には、この収縮率の違いがコンクリートへの作用力として破壊が生じることを提案している⁽⁶⁾。これによると凍結最低温度が大きくなればなるほど、スケーリングは大きくなる。また、溶液が真水の場合でも低温でスケーリングが起こる可能性も予想された。真水, NaCl 1%, 3%での10サイクル後の小片試料の形状観察結果をFig. 1, 冷却最低温度のサイクル毎の質量残存率の関係をFig. 2に示す。真水の場合、-5°Cから-40°Cのすべての温度の範囲で、凍結融

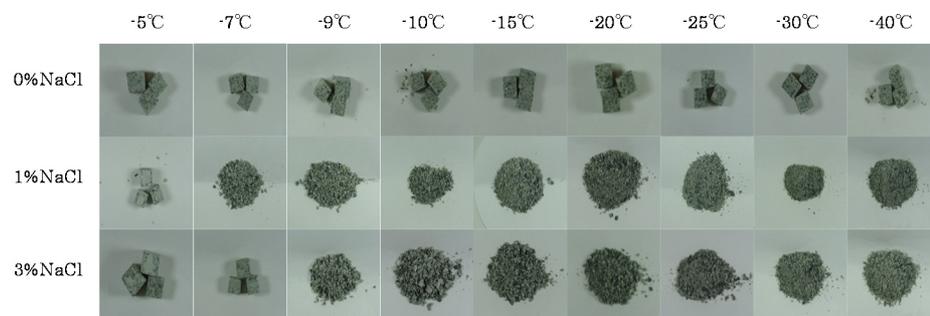


Fig.1. Appearance of specimens after 10 cycles of freezing and thawing

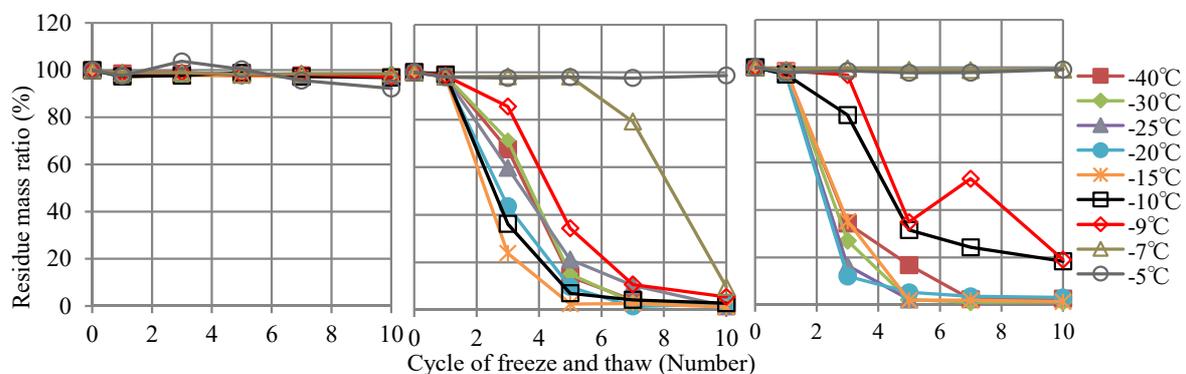


Fig.2. Residue mass ration of specimens with different lowest temperature of freezing

解サイクル 10 回後も 100%近い質量残存率を示し、濃度 0%である真水では、ほとんどスケーリングが起こっていないことがわかる。Fig. 1 のように形状観察結果からも、凍結最低温度が -40°C に低下してもスケーリングは起こっていない。凍結融解サイクル 10 回における、NaCl 1%の凍結防止剤濃度では -5°C を下回る水準で、3%では -7°C を下回る水準で激しいスケーリングを起こしている。サイクル毎の質量残存率をみると、 -10°C 以下の温度域ではほとんど、劣化の相違は少なく、凍結最低温度の影響は同じ傾向を示している。 -10°C 以下の範囲で最低温度が高くなると、3回、5回での質量残存率は高くなり、幾分スケーリングの程度は軽減される。これは氷の堅さやコンクリートとの付着などが関係すると考えられる。

凍結融解サイクル 10 回でのスケーリング耐久性指標 SDI と凍結最低温度の関係を Fig. 3 に示す。試験は -5°C 以下の低温域で行った。真水では 100%近い値を示し、スケーリングは生じていない。一方、 -10°C 以下ではほとんど数値に変化がなく、NaCl 1%、3%ともに、 -10°C 以下では激しいスケーリングが生じている。 -10°C 以上でも SDI をスケーリング耐久性が極めて高いとする 60%を上回ったものは、 -5°C のみであった。 -10°C 以上での詳細な検討がスケーリングを解明する上で重要な役割を果たすことがわかる。凍結防止剤濃度は、低いほど、スケーリング開始温度は高くなる。凍結防止剤を使用した場合にのみ、スケーリングが生起するので、ソルトスケーリングと呼ぶことに符合する結果となった。

3.2 凍結防止剤濃度の影響

ソルトスケーリングは凍結防止剤濃度 3%程度で最も劣化が激しいことが知られている⁽²⁾。ここでは、小片試験方

法の特徴を生かして、真水、NaCl 0.01%~10%の範囲の広いレンジで、17 の濃度水準を取り、評価試験を行った。Fig. 4 は、凍結融解サイクル 5 回を与えた後の小片試験の形状である。0.5%から 6%の範囲で立方体の供試体の崩壊が観察されはじめていることがわかる。10 回までの凍結融解サイクルに伴う質量残存率の関係を Fig. 5 に、SDI との関係を Fig. 6 に示す。凍結融解サイクル 1 回目ではほとんど、質量残存率の相違が見られないが、3 サイクルでは 0.3%~8%の範囲で質量残存率の低下が現れ、80%以下になるのは 1%~6%の範囲であり、3%にピークが認められる。5 回では、0.1%~6%の範囲が 80%以下の質量残存率を示す。10 回では、0.3%から 6%の範囲で、質量残存率は 0%となる。NaCl の場合、幅広い濃度範囲でソルトスケーリングが進むことがわかる。サイクル数 10 回とした SDI で比べてみると、SDI が 60%以下になる凍結防止剤濃度の範囲は 0.08%から 10%の範囲であり、1%~4%の範囲が最もスケーリングが著しく、文献(2)の結果と一致する。ソルトスケーリングにおける劣化濃度の範囲は比較的広い。

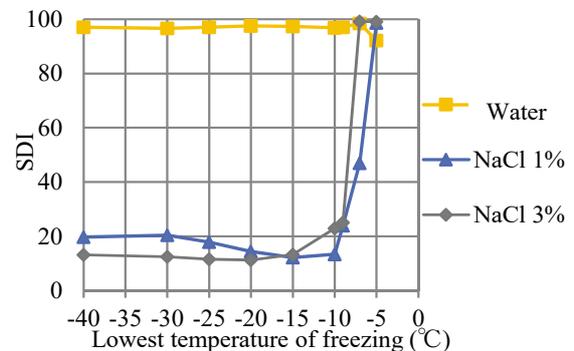


Fig.3. SCI with different lowest temperature

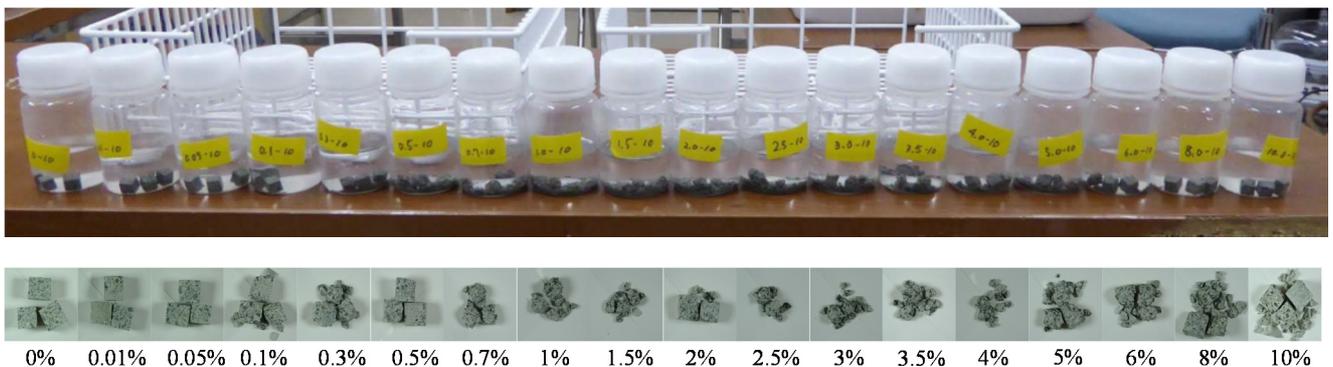


Fig.4. Appearance of specimens after 5 cycles of freezing and thawing with different concentration

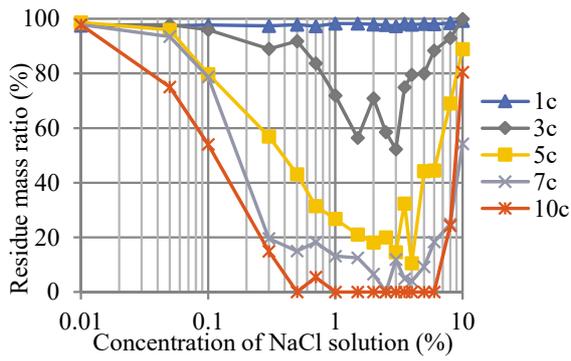


Fig.5. Residue % with different concentration of NaCl

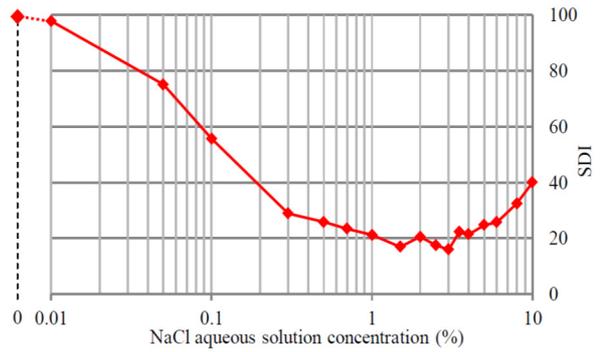


Fig.6. SDI with different concentration of NaCl

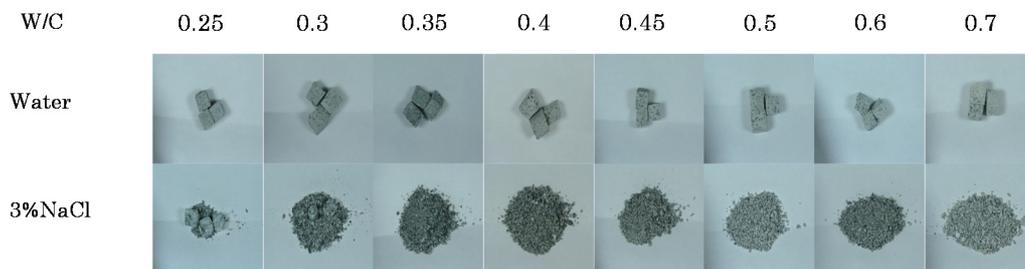


Fig.7. Appearance of specimens after 10 cycles of freezing and thawing prepared with different W/C

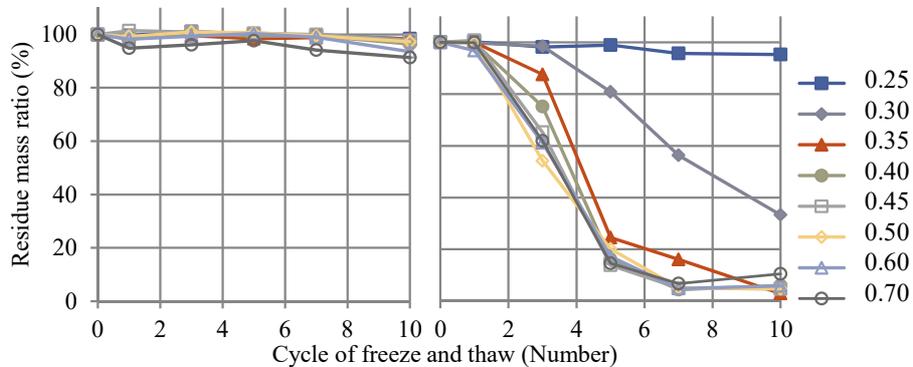


Fig.8. Residue mass ration(%) of specimens prepared with different W/C

3.3 配合の影響

(1) 水セメント比の影響

砂セメント比(S/C)を 1.5 一定とし、水セメント比を 0.25 ~0.7 の範囲とした。溶液は真水及び 3% NaCl で評価し、10 回サイクル後の小片の形状観察結果を Fig. 7 に、サイクル毎の質量残存率の結果を Fig. 8 に、スケーリング耐久性指標 (SDI) を Fig. 9 に示す。形状観察結果から、真水においては水セメント比にかかわらず、スケーリングは認められない。たとえ 0.7 の高水セメント比においてもスケー

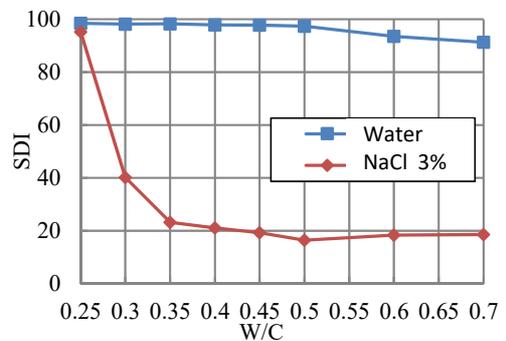


Fig.9. SDI of specimens with different W/C

リングは進展しない。一方、3% NaCl 溶液では水セメント比 0.25 においても、わずかであるが小片試料隅角部からの剥離がみられる。ひび割れなどの内部崩壊による凍害とは異なり、スケーリングは、コンクリート表面から内部へ劣化が進む現象である。内部ひび割れによる凍害では、水セメント比を低下させることが有効とされている⁽⁷⁾。内部ひび割れにおいては、水セメント比を0.25にした場合には起こらないとされている⁽⁷⁾。凍結融解のサイクルに伴う質量残存率の結果から、水セメント比 0.35 以下の場合からスケーリング抵抗性は向上するが、0.35 以上ではほとんど同じ

劣化状態となる。SDI の結果もより顕著で、0.35 以上ではほとんどスケーリングの程度が変わらず、0.3 で効果を発揮し、0.25 ではほとんど劣化しない結果となった。ソルトスケーリングを抑制するには、超高強度コンクリートのように水セメント比0.3以下にする必要があり、実用的とはいえない。

(2) 砂セメント比の影響

ここでは、水セメント比を 0.35 及び 0.45 として、砂セメント比の影響について検討を行った。10 サイクル後の形状観察を Fig. 10 に、サイクル毎の質量残存率を Fig. 11 に、

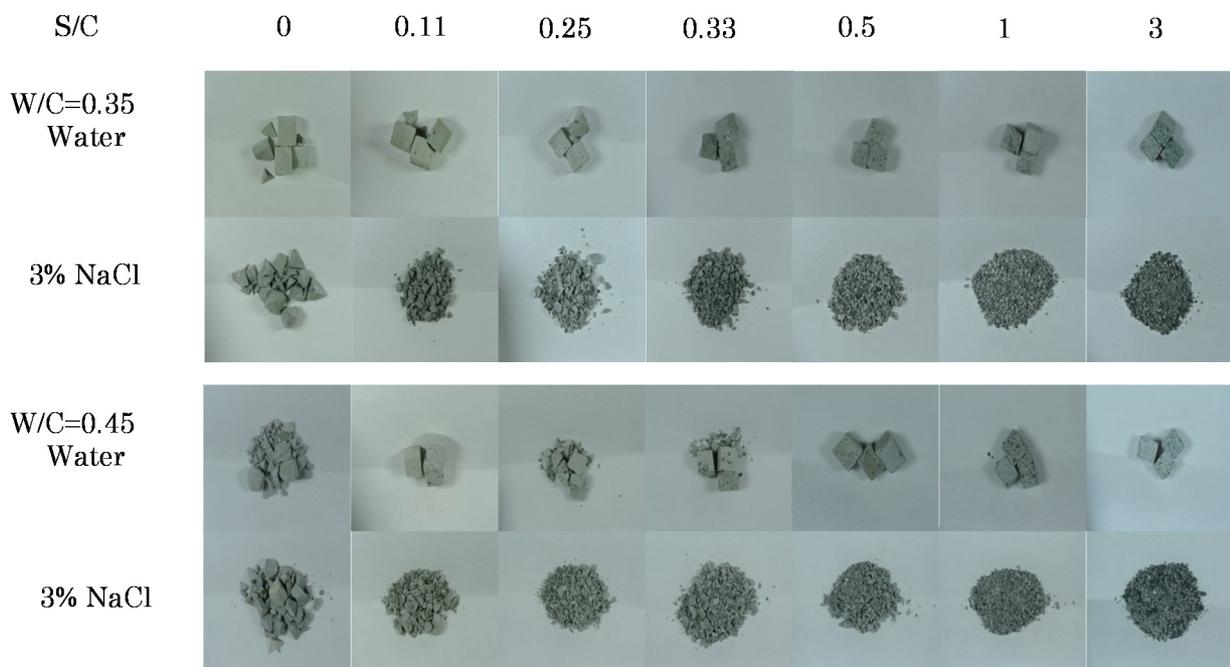


Fig. 10. Appearance of specimens after 10 cycles of freezing and thawing prepared with different S/C

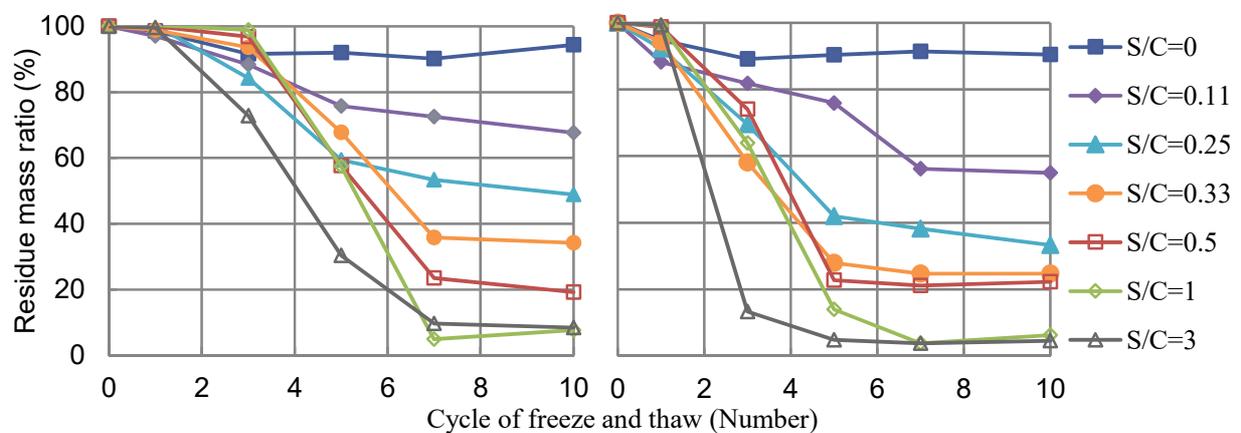


Fig. 11. Residue mass ratio(%) of specimens prepared with different S/C

SDIを Fig. 12 に示す。真水では砂セメント比に係らず、ほとんど劣化しないが、S/C=0 のセメントペーストでは、大きな破片として壊れている。これらは 2.5 mm より大きい質量残存率では検出されず、SDI としても現れない。モルタルとセメントペーストとの違いは、骨材の混入であるが、これにより亀裂の伝播が抑制される。均質になるにつれ、ガラスのように歪みが全体に広がり破壊がすすむため、脆性的な破壊になった可能性がある。一方骨材が入るにつれ、その様な劣化はほとんど認められない。3% NaCl では、砂セメント比が 0.25 以上の範囲では、ほとんどソルトスケールングに対する抵抗性は低く、それ以下ではセメントペーストに近いモルタルでスケールング抵抗性の向上が見られる。また、水セメント比 0.45 と比べ 0.35 と低いほど、サイクル毎の質量残存率が低いことがわかる。セメントペーストとモルタルとではスケールングの劣化メカニズムが異なることと、砂セメント比が通常モルタルの範囲では、スケールングの抵抗性への影響は比較的小さいことがわかる。

本研究では、小片試験方法を採用することで、広範囲にわたって、凍結最低温度、凍結防止剤濃度 (NaCl)、配合 (水セメント比、砂セメント比) の影響について検討を行い、ソルトスケールングの現象解明につながる基礎データを得ることができた。

4. まとめ及び今後の課題

本研究では、小片試験方法を用いて、凍結最低温度、凍結防止剤濃度 (NaCl)、配合 (水セメント比、砂セメント比) がソルトスケールングに及ぼす影響について検討を行い、次の結果が得られた。

- 1) スケールングは、真水では起こらず、凍結防止剤 NaCl が 0.05%以上の濃度の幅広い範囲でスケールングは発生し、ソルトスケールングと呼ばれる由縁を確認することができた。
- 2) スケールングに及ぼす凍結最低温度の影響、真水では -40°C の範囲においてスケールングは生じない。1% NaCl 及び 3% では、-10°C 以下の凍結最低温度ではスケールングは激しい。その間の温度の相違は小さい。-5°C ~ -10°C の冷却最低温度で、スケールングが著しく進む温度域がある。
- 3) 配合の影響として、水セメント比については、0.35 以上では、ソルトスケールング抵抗性はほぼ同じで抵抗性は

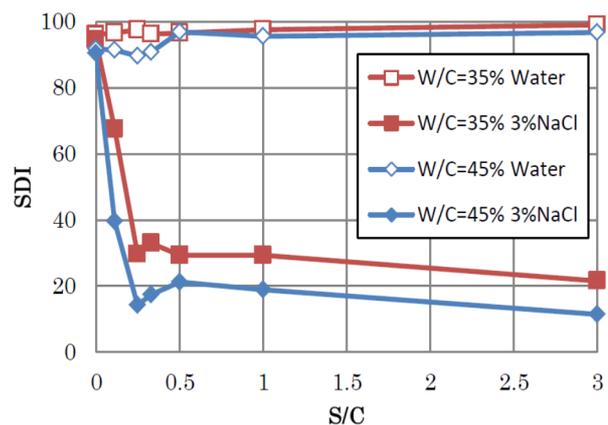


Fig. 12. SDI of specimens with different S/C

低く、0.35 以下では効果を発揮する。0.25 では比較的高い抵抗性を示す。砂セメント比については、砂セメント比が 3 から 0.3 までのセメントペーストに近い領域までは、スケールング抵抗性の向上は見られず、それ以下では効果がみられる。セメントペーストでは質量残存率は 100% 近く高いペーストでは脆性的に破壊する。

更なる、スケールングメカニズムの解明のため、スケールング温度についての詳細な検討及び、塩化ナトリウム水の凍結にかかわる現象の解明などを通して、スケールングのメカニズムの解明を進める。

5. 文献

- 1) J.J. Valenza, G.W. Scherer, A review of salt scaling: I Phenomenology, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1007-1021, (2007)
- 2) G.J. Verbeck, P. Klieger: Studies of "salt" scaling of concrete, Highw. Res.Board. Bull. 150 (1957) 1-17.
- 3) 小山田哲也ら: スケールング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp. 935-940, (2011)
- 4) 羽原俊祐ら: コンクリートのスケールング劣化に及ぼす凍結防止剤の影響, セメント・コンクリート論文集, No.67, pp.95-101, (2013)
- 5) 菅野華果ら: 既存スケールング試験方法に対する小片凍結融解試験方法の整合性, セメント・コンクリート論文集, No.68, pp.419-425, (2014)
- 6) 小山田哲也ら: コンクリートのスケールング劣化に及ぼす凍結防止剤の影響, セメント・コンクリート論文集,

No.65, pp.354-359,(2011)

- 7) 鎌田英治:凍結作用を受けたコンクリートの挙動と細孔構造, セメント・コンクリート化学とその応用, セメント協会, pp.13-19, (1987)

Working Mechanism on the Salt Scaling of Concrete

Shunsuke HANEHARA, Tetsuya OYAMADA

Iwate University

Summary

Concrete deterioration due to scaling of surface became harder with increase of scattering deicer (sodium chloride) for concrete road structure. This kind of deterioration is well known as salt scaling of concrete. Recently our laboratory proposed new test method with small sized sample which has a good correlation between ASTM C 672 and other test methods. With using this test method, influence of the lowest temperature of freezing, concentration of deicer (sodium chloride) and mix proportion of mortar on salt scaling deterioration of concrete are studied in this research. There is no appearance of scaling deterioration in case of using pure water at any lowest temperature of freezing. Salt scaling of concrete was more generated under deicer concentration of 0.1% to 10%, and -7 degree centigrade or lower of lowest temperature of freezing. Water cement ration of less than 0.25 is effective to decrease salt scaling. Sand cement ration from 1 to 3 is not effective.