

論文 スケーリング劣化に及ぼすコンクリート表面に発生する応力の影響

樊 小義*1・小山田 哲也*2・羽原 俊祐*3

要旨：本研究ではコンクリートのスケーリング劣化の作用メカニズムを解明するため、凍結する際に、コンクリート表面に働く応力とスケーリング抵抗性の関係について検討した。6種類の凍結防止剤を用いて氷およびコンクリート内部の詳細なひずみ分布を測定した。その結果、凍結防止剤の種類によりコンクリートの表面ひずみは異なり、氷およびコンクリート表層に働く応力の総和により、スケーリング量が決定付けられることが分かった。

キーワード：スケーリング抵抗性、連行空気、ひずみ分布、応力

1. はじめに

スケーリング劣化とは、凍結融解によりコンクリートの表面がフレーク状に剥げ落ちる劣化現象である。近年、スパイクタイヤの規制による交通安全を確保のために散布される凍結防止剤がスケーリング劣化を促進することが報告され¹⁾、岩手県をはじめとする東北地方で多く顕在化している。

スケーリング劣化の成因について、社団法人日本コンクリート工学協会編「コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書(2008)」では、コンクリートの飽水度の上昇²⁾、表層の押し上げ現象³⁾、表層のクリープ現象⁴⁾、熱衝撃⁵⁾、化学作用⁶⁾に整理されている。ただしこれらのメカニズムを単独で用いても説明できない事象が多くあり、複合して作用していると考えられてきた。

一方、コンクリートのスケーリング劣化のメカニズムについて John J. Valenza II ら⁸⁾は、Glue-Spall theory^{9),10)}と名付けたガラス表面の加工技術をベースとした理論を提案した。コンクリート表面の水とコンクリートの降温下におけるひずみ差がスケーリング劣化の成因であると提案した。

筆者ら¹¹⁾は、Glue-Spall theory を参考し、弾性理論を使用して氷の降温下におけるヤング係数とひずみを実測し、収縮により発生する引張応力を算出するとともに氷とコンクリートの付着強度を求め、モルタル表面に作用する応力の実験的な検証を試みた。

その結果、求められた引張応力とスケーリング量には一定の関係が認められるものの、凍結防止剤の種類および量が異なる場合に、同じ応力でもスケーリング量が多いものと少ないものに傾向が分かれることも分かり、現象の解釈には至らなかった。

本研究では既往の研究で提案したメカニズム¹¹⁾を改善し、凍結を受けるときのモルタル表面のひずみ差による

応力を追加することによりスケーリング量との関係を実験的に解明し、新たなメカニズムの提案を目指した。

2. 提案するスケーリングのメカニズム

本研究で提案するスケーリングメカニズムの概念図を図-1に示す。凍結過程の凍結点を起点としたコンクリートおよび氷のひずみ変化をもとに考案した。連行空気の影響により、下記のように2つの場合を想定した。

まずはコンクリート表層について考える。コンクリート中の空隙が水で満たされている場合、コンクリートが水の凍結点以下に冷やされると、冷却された側の大きな毛細管空隙内の水が凍結しはじめ、氷は凍結して膨張する。氷の温度がさらに低くなると、コンクリートは線膨張係数に伴って収縮し始める。図-1ではこの温度低下によりAまで収縮したとする。

凍結防止剤溶液が存在する場合、水が氷になる際に塩を排除して結氷するため、毛細管空隙には未凍結部と凍結部が混在し、塩分濃度の差が生じ、未凍結部から凍結部へ向けた浸透圧が発生する。また未凍結水は凍結水よりもエンタルピーが高く、圧力が発生して水が集まった部分は膨張する。

凍結による膨張と温度低下による収縮が同時に作用しており、膨張については連行空気の量により以下のように区別する。

2.1 連行空気が膨張を緩和しない場合

コンクリート表層の水が凍結し、膨張圧を緩和できない場合コンクリート表層には膨張が生ずる。この点をA1とする。Aまで収縮すべきものがA1までしか収縮できず、コンクリート表層にひずみが生ずる。これを ε_m とする。一方、凍結防止剤溶液の側では結氷後の温度低下により、氷は収縮してBに達したとする。コンクリート表層は、この収縮に追従できず、A1からBまでのひずみが発生する。このひずみを ε_i とする。この2つのひずみ

*1 岩手大学大学院 工学研究科機械・社会環境システム専攻 (学生会員)

*2 岩手大学 理工学部社会環境工学科准教授 工博 (正会員)

*3 岩手大学 理工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

差によりコンクリート表層に応力が発生してスケーリングが発生する。

2.2 連行空気が膨張を緩和する場合

前述のようにコンクリートは温度低下により収縮して A まで達する。連行空気が十分な場合、コンクリート表層の膨張が緩和されるが、氷と比較してコンクリートの線膨張係数は小さく、氷に追従して A2 まで収縮する。A2 と A の間にはひずみ差が生じ、コンクリートには引張力が発生する。一方、氷は B まで収縮する。A2 と B との差が溶液氷による引張力として作用し、スケーリングが発生する。

2.3 コンクリート表面に生ずる応力

本研究では、以上のような浸透圧説と Glue-Spall theory とを合計した 2 つの力がコンクリート表面に働くと考え、本研究ではこの提案するメカニズムを実験的に証明することとした。

モルタルに働く力 F_m は実測値を基に弾性理論を利用して、ヤング係数とひずみの関係から式 (1) のように算出した。

$$F_m = \varepsilon_m \cdot E_m \quad (1)$$

ここに、 F_m ：モルタル表層が受ける膨張力

ε_m ：モルタルのひずみ

E_m ：モルタルの弾性係数

同様に溶液氷がコンクリート表層に作用する力は式 (2) のように算出した。

$$F_i = \varepsilon_i \cdot E_i \quad (2)$$

ここに、 F_i ：氷の収縮応力

ε_i ：氷のひずみ

E_i ：氷の弾性係数

両者が凍結時にコンクリート表層に発生する応力であり、両者は逆向きにコンクリート表層に引張応力を与える。したがって表面に発生する応力は式 (3) のように 2 つの応力の合成応力と考えた。なお、それぞれの計算結果は断面積を考慮した応力としている。

$$F = F_i + F_m \quad (3)$$

本研究では、式 (3) の二つのパラメータをそれぞれの実験により実測して、実証しようとした。

3. 実験概要

3.1 使用材料

実験条件を表-1 に示す。セメントには普通ポルトラ

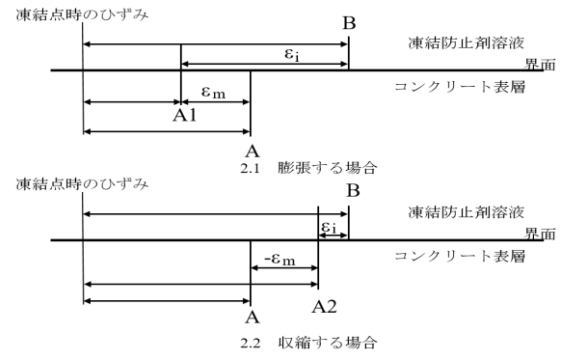


図-1 提案するメカニズムの概念図

ンドセメント（密度 3.15 g/cm³）を使用し、細骨材には黒川産砕砂（表乾密度 2.86 g/cm³）を用いた。供試体は AE モルタルとした。粗骨材が入ると、表面に発生する応力を適切に捉えにくいと判断したためである。AE 剤にはアルキルリン酸エステル系を用い、フレッシュモルタルの空気量はいずれも 9.0%とした。コンクリートに換算すると 6.0%に相当する。配合は、水：セメント：細骨材を 0.55：1：2.8 の質量割合とした。

本研究では表-2 に示す 6 種類の凍結防止剤と真水を実験の対象とした。陰イオンは酢酸系と塩化物系の 2 種類であり、陽イオンはナトリウム、カリウムとカルシウムを組み合わせた。すべての凍結防止剤において 3%の質量パーセント溶液の濃度で実験を行った。

3.2 試験方法

(1) スケーリング量

本実験では、ASTM C 672 に準拠した凍結融解試験を行い、モルタル供試体のスケーリング量を評価した。図-2 のように、Φ153mm の塩化ビニルパイプにモルタルを高さ 100mm に打ち込んだものを用いた。型枠を取り付けたまま材齢 28 日まで水中養生した後、底面側の木製の板を取り除き、測定面として実験に供した。モルタルの隅角部あるいは側面部からのモルタルのスケーリングを防ぐため、塩化ビニルパイプとの境界部分はシリコン樹脂で被覆した。

供試体を-20℃の冷凍庫内で 16 時間、20℃の室内で 8 時間を 1 サイクルとした環境に晒し、50 サイクルまで行った。5 サイクルごとに劣化した表面の剥離物をブラシ

表-1 配合条件

項目	内容
セメント	普通ポルトランドセメント
水セメント比	0.55
セメントと細骨材比	1:2.8
AE 剤種類	アルキルリン酸エステル系
空気量	9.0%

表－2 凍結防止剤の種類

名称	記号
塩化ナトリウム	NaC
塩化カリウム	KC
塩化カルシウム	CaC
酢酸ナトリウム	NaA
酢酸カリウム	KA
酢酸カルシウム	CaA

で軽く掻きとり、濾紙上に採取して溶液を水で洗い流し、105℃で一日間乾燥させ、得られた剥離物質量を測定してスケーリング量とした。本研究では 50 サイクル後の単位面積当たりの剥離物の質量（スケーリング量を試験面の表面積で除したもの）で評価した。

(2) ひずみ量

凍結時の氷のひずみはモールドゲージをモルタル表面に置いて求めた（図－3 のひずみゲージ A）。ゲージの浮き上がりを防止するため、中央をガムテープで軽く拘束し、水平方向の移動を妨げられないように配置した。本研究で対象としたひずみは凍結点を 0 として-20℃までの変化量とした。ひずみ変化は 10 分ごとに測定した。

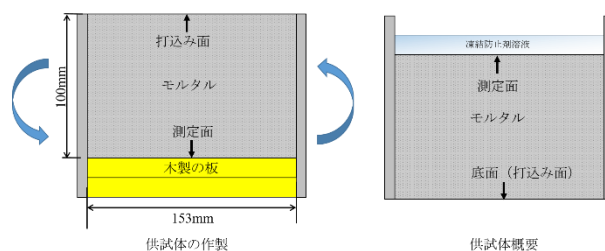
モルタルのひずみは凍結融解試験用の供試体と同様なものを別に作製して測定した。ひずみゲージは図－3 に示す位置に埋め込み、凍結する際のモルタル内部のひずみ変化を測定した。設置箇所はモルタル表面から 1mm、3mm の位置にそれぞれ 2 本と 30mm の位置に 1 本を配置した。1mm のひずみゲージは、隣接する二つのゲージの間をくぐってモルタルが行き渡るよう、図－3 のようにゲージを配置した。ごく表層部（深さ 1mm）の位置におけるひずみを測定するには、モールドゲージのフランジが邪魔であったため、上部を削って使用した。凍結段階中に、氷と同様に表面の凍結防止剤溶液が凍結点になった時点の各ひずみを 0 として、氷と同様にひずみ変化を 10 分ごとに測定した。表面の溶液が-20℃に達するまで、モルタル内部の各位置のひずみを測定し続けた。

使用したひずみゲージは、コンクリート内部に挿入するモールドゲージであり、仕様によれば低温環境では使用できず、温度補正も保証外であった。そこで本研究では SS400 に固定して低温下での見かけひずみを計測し、0℃以上で保障されている補正式と比較して、相違がないことを確認して使用することとした。

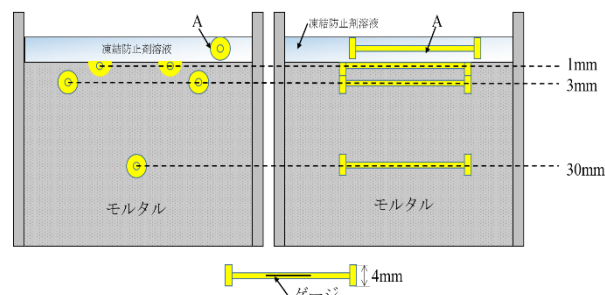
(3) 弾性係数

氷の弾性係数は、共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断性係数および動ポアソン比試験方法

（JIS A 1127-2001）に準拠した方法により、たわみ振動による一次共鳴振動を測定し、動弾性係数を算出して求



図－2 供試体の作製および供試体概要



図－3 ひずみ測定用供試体のゲージ位置

めた。使用した供試体は、10×40×160mm の氷板とし、5℃の環境で試験した。

モルタルのヤング係数は、JIS A 1149:2010 に準拠した方法により、圧縮試験を行って求めた。供試体の寸法は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体とした。

4. 実験結果および考察

4.1 スケーリング量

各凍結防止剤に浸漬させて凍結融解を 10 サイクルまで繰り返した供試体の累積スケーリング量を図－4 に示す。本研究では、陰イオンや陽イオンの違いによる 10 サイクルまでのスケーリング量の特徴は見られなかった。

4.2 凍結時ひずみとその変化

スケーリング促進試験の際のモルタル内外に発生しているひずみ量の分布をすべての溶液において測定した。一例として塩化カルシウム溶液を使用した場合を図－5 に示す。凍結点である-2.6℃を基準として-20℃までに発生したひずみの変化量を横軸としており、縦軸はモルタル表面から深さ方向の長さである。なお横軸のマイナスは収縮を表している。実験結果は、試験表面を真水あるいは凍結防止剤の溶液で満たした場合と表面に溶液が無い場合の 3 条件を示しており、凍結防止剤は、塩化カルシウム溶液（図中で CaC）を用いたものを例示した。

真水あるいは凍結防止剤の溶液で満たした場合のひずみに着目すると、真水（図中で Water）の場合には、モルタルの表面のひずみが 409×10^{-6} であるのに対し、塩化カルシウム溶液（図中で CaC）の場合には、 457×10^{-6}

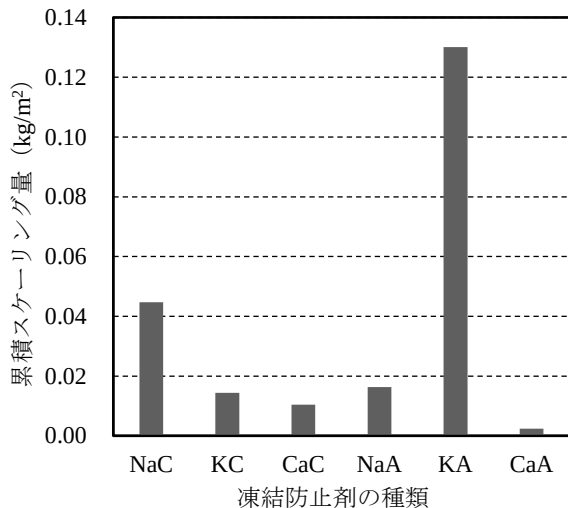


図-4 10 サイクルまでの累積スケール量

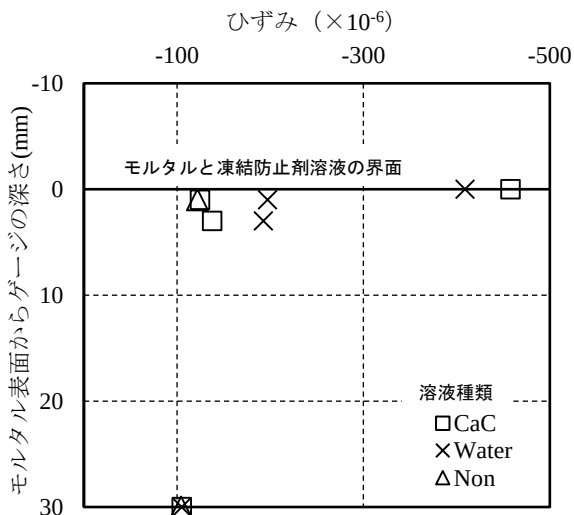


図-5 各深さにおけるひずみ分布の例 (CaC)

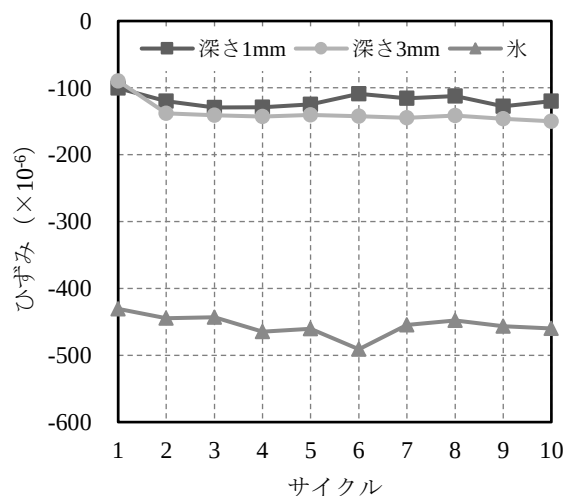


図-6 各サイクルのゲージ位置における氷とモルタルのひずみ (CaC)

となり、ひずみが大きく生じている。

本研究では、モルタル表面に溶液が無い(図中で Non) 場合のひずみとそれぞれの場合の違いが溶液に特徴づけられたひずみと考えた。

深さ 30mm の深部では、3 条件でひずみ量の変化はなく、モルタル表面の溶液の影響は無視できるものと考えられる。

深さ 1mm のひずみについて、モルタル表面に溶液が無い場合(図中で Non) を基準として、真水(図中で Water) で満たした場合には大きく収縮している。これはモルタル中の連行空気が凍結により発生する水圧を緩和して温度低下と共に収縮したこと、モルタル中の水も温度低下に伴い収縮したこと、モルタルが界面の氷に追従した結果と考えられる。一方で塩化カルシウム溶液(図中で CaC) の場合には、基準と比較してひずみが若干収縮側にある。真水と比較して、モルタル中の氷が収縮しにくいことを示しているものと考えられるが、今後検証を要すると考えている。

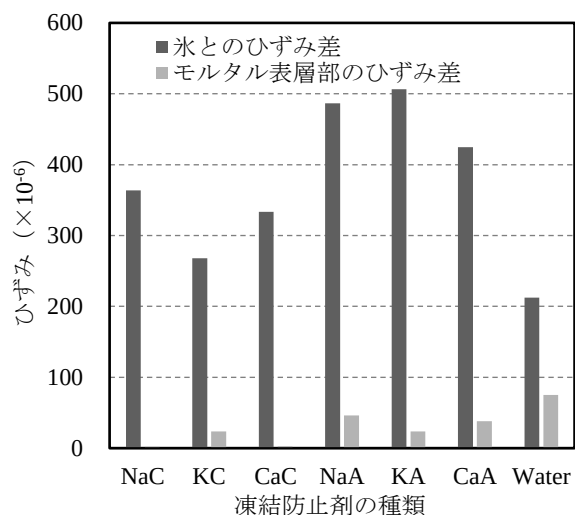
凍結融解試験 10 サイクルまでの塩化カルシウム溶液で表面を満たした供試体のひずみの経時変化を図-6 に示す。

氷のひずみはモルタル深さ 1mm の場合より大きく、凍結融解サイクルに伴い収縮量が徐々に大きくなっている。これは表層のモルタルが損傷を受け、氷の収縮に追従しているものと考えられる。一方、モルタル界面の内側のひずみを見ると、深さ 3mm では収縮ひずみ量が 2 サイクルからほぼ変化がない。これに対し深さ 1mm では 2 サイクル以降の収縮ひずみが小さく、5 サイクル目以降ではサイクルが進むにつれ膨張している。これは組織にひび割れが生じて弛緩していることを意味しているものと考えられ、スケールが表面から発生することを裏付けている。

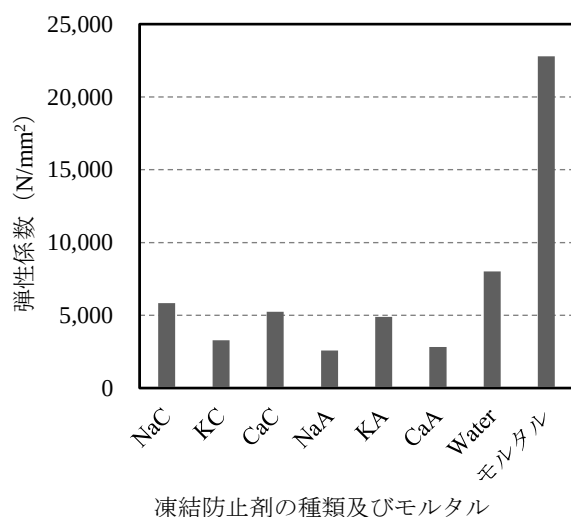
このように氷およびモルタル表層のひずみは経時的に変化する。本研究では、変動をより平準化することと考えて、解析に用いるひずみを 10 サイクル目までの平均ひずみとした。

図-7 に各凍結防止剤によるひずみを示す。凡例の黒はモルタルの-20℃のひずみと氷とのひずみ差である。また凡例の灰色は表面に溶液のないモルタルのひずみとそれぞれの凍結防止剤を満たしたモルタルの深さ 1mm のひずみ差である。

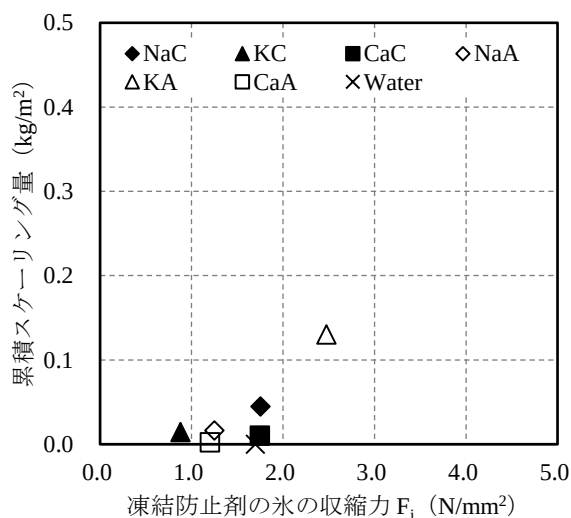
氷のひずみはいずれも収縮側であり、真水と比較していずれの凍結防止剤でも大きな収縮を示している。また凍結防止剤の種類により、発生するひずみは相違し、酢酸系の凍結防止剤で大きいことが分かった。一方、モルタル内部のひずみは本研究の範囲では 0 あるいは 100×10^{-6} 以下程度の収縮であり、凍結防止剤の種類によ



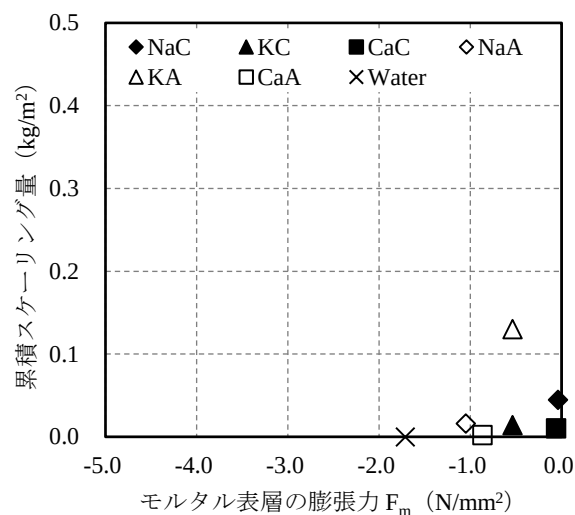
図ー7 モルタルに対する氷のひずみ差およびモルタル表層のひずみ差



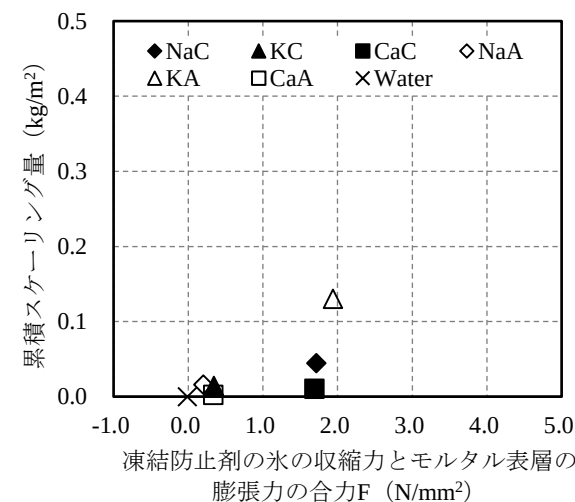
図ー8 凍結防止剤の氷およびモルタルの弾性係数



図ー9 凍結防止剤の氷の収縮力とスケーリング量の関係



図ー10 モルタル表層の膨張力とスケーリング量の関係



図ー11 凍結防止剤の氷の収縮力とモルタル表層の膨張力との合力とスケーリング量の関係

り異なり、酢酸系の凍結防止剤と真水で大きいことが分かった。

4.3 ヤング係数

図ー8 に氷およびモルタルの動弾性係数を示す。真水の弾性係数は 8009N/mm^2 であり、いずれの凍結防止剤溶液も動弾性係数は小さくなる。これは溶液の氷は真水部分のみであり、溶液を濃縮しながら凍結するため、氷内部の組織が粗雑であるためと考えられる。本実験で使ったモルタルのヤング係数は 22800N/mm^2 であった。

以上の結果から、式 (1), (2), (3) によって、それぞれに働く各応力を算出し、スケーリング量の関係について検討した。

4.4 応力とスケーリング量の関係

図ー9 に、 -20°C における各凍結防止剤の氷の収縮力とスケーリング量の関係を示す。概ね溶液による引張応力

とスケーリングの関係が明らかとなった。ただしスケーリングが生じない真水の応力が大きく生じており、一般的な認識とは逆転する結果となり、疑問が残った。

図-10 に界面から深さ 1mm のモルタル表層の膨張力とスケーリング量の関係を示している。前述の通り、モルタル表面は氷の収縮と同等の方向であり、モルタル内部には圧縮力が発生していると考えられる。したがって氷の引張応力を緩和することとなると考え、応力をマイナスとして考えた。酢酸系の凍結防止剤によるひずみが塩化物系より大きく、負の応力が多く発生する。ただしこれのみではスケーリング量との相関は見られない。

氷の収縮とモルタルの収縮力を積算し、スケーリング量との関係を求めた結果を図-11 に示す。氷とモルタル内部からモルタル表層に働く応力とスケーリング量の関係は一定の関係が見られる。一定の応力まではスケーリングは軽微であるものの、限界の応力を超えると、応力が増加するごとにスケーリング量が増加する。一定の応力を超えることによりひび割れが発生し、スケーリングがサイクルに応じて増えることにもつながるものと考えられる。この一定の応力とはモルタルのひび割れを含む引張強度と関係すると考えられる。本実験で検討したモルタルの引張強度は 3.8N/mm^2 との結果が得られており、約半分の応力により、はく離したといえる。

5. おわりに

本研究では、凍結防止剤を散布したモルタル表層に発生する応力を実験的に求め、弾性理論を使用して説明しようとした。本実験を通じて得られた結論は以下の通りである。

1. 使用する凍結防止剤の種類により、スケーリング量が異なる。
2. 凍結によりモルタル表面に発生する応力とスケーリング量との関係は、凍結防止剤の種類によらず弾性理論で説明できることが分かった。
3. モルタル表面に働く応力が限界を超えると、劣化が発生すると考えられる。

参考文献

- 1) 庄谷征美, 月永洋一: 東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004
- 2) Verbeck, Gerge and Kieger, Paul: Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bullerin 150, pp.1-13, 1957
- 3) M,Pigeon and R.Pleau : Durability of Concrete in Cold Climates,E & FN SPON, pp. 11-30, 1995
- 4) Jochen Stack and Bernd Witch (訳者: 太田利隆, 佐伯昇):Dauerhaftigkeit Von Beton, 社団法人セメント協会, p.180, 1999
- 5) 赤堀弥生, 西祐宣, 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, pp.1197-1202, 2007
- 6) John J. ValenzaII and George W Scherer: Mechanism for Salt Scaling, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 89, No. 4, pp.1161-1179, 2006
- 7) 庄谷征美, 月永洋一, 阿波稔, 原忠勝: 塩化物の影響を受けるコンクリートのスケーリング発生過程における歪み挙動に関する 2,3 の実験, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.370-375, 2000
- 8) John J. Valenza II, George W. Scherer: A review of salt scaling: II. Mechanisms, Cement and Concrete Research 37, pp.1022-1034, 2007
- 9) S.T. Gulati, H.E. Hagy, Analysis and measurement of glue-spall stresses in glass-epoxy bonds, J. Am. Ceram. Soc. 65 (1), pp.1-5, 1982
- 10) S.T. Gulati, H.E. Hagy, Theory of the narrow sandwich seal, J. Am. Ceram. Soc. 61 (5-6), pp.260-263, 1973
- 11) 小山田哲也ほか: コンクリートのスケーリ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