

論文 融雪剤が浸透したコンクリートのスケーリング劣化の検討

高科 豊^{*1}

要旨：本研究では融雪剤が散布されることによるコンクリートのスケーリング劣化問題を検討する。コンクリート表層部において、蓄積された融雪剤の成分は、降雨・降雪による新たな水分供給の稀釈的な作用により、その飽水度を増加させ、スケーリング劣化の進行を促進させる働き等を持つと考える。特に、事後散布・融氷能力をもつ塩化カルシウムの融雪剤による劣化は、化学的劣化と稀釈的な水分による氷圧等の物理的劣化の複合的劣化として考えられる。本研究はAE コンクリート供試体を用い、融雪剤溶液の含浸、稀釈水の供給、凍結融解作用の一連の質量変化等の実験・解析を行い、その劣化特性を検討する。

キーワード：稀釈水、スケーリング劣化、ニューラルネットワーク、塩化カルシウム

1. はじめに

粉塵公害の防止から、スパイクタイヤの全面使用禁止が法制化されて以来、道路に融雪剤が凍結防止の目的で使用されている¹⁾。

北欧、北米、カナダでは15年以上前から、融雪剤による劣化が問題になり、現在、高度な維持管理体制化の必要性が求められている²⁾。

融雪剤によるコンクリートの劣化の特徴は、凍害による表層剥離（スケーリング）の問題とともに、コンクリートの化学的な組織の変化をとともなう複合的劣化の状態にあると考える³⁾。

本研究は、AE コンクリートの供試体を対象として、散布される融雪剤溶液成分が蓄積以後、新たな降雨・降雪による稀釈水浸透の働きからみたスケーリングの特性を検討する。すなわち、融雪剤による化学的劣化の影響を受けた後、凍結融解の作用の影響を受ける可能性があることを問題とする。また、実験の時間的な履歴要因等を系統的に整理するため、実験結果とともに、階層型のニューラルネットワークに学習させ、実験要因などの感度分析からの考察を加えた。なお、融雪剤は、道路環境の凍結後の事後散布（融氷・融雪の能力を持つ）下を想定し、塩化カルシウム（二水塩）を対象とした。

表-1 コンクリートの配合

セメント の種類	Gmax (mm)	スラブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	W	単位量 C	単位量 S	単位量 G	混合剤 AE(g)
早強	20	10±2	55	3±2	40	194	353	692	1035	105.9
早強	20	6±2	55	3±2	45	194	353	777	950	105.9
早強	20	10±2	55	3±2	45	201	365	764	933	109.5
早強	20	16±2	75	3±2	47	212	283	816	920	84.9

(上から順にSERIES 01, 02, 03, 04と命名)

2. 実験概要およびデータ整理と情報処理

2.1 実験計画と各SERIESの概要

表-1に各SERIES別のコンクリートの示方配合を示す。内容としては、W/C=55%, 75%において4SERIESの配合計画をした。セメントは早強ポルトランドセメントを用い、各SERIESごとに、10×10×40cmの供試体を8本ずつ作製した。写真-1は打設の様子で、表層部にグリス等の油の付着の影響が残らないように、PPC用紙を挟むことで、仕上げ表層面の保護をした。

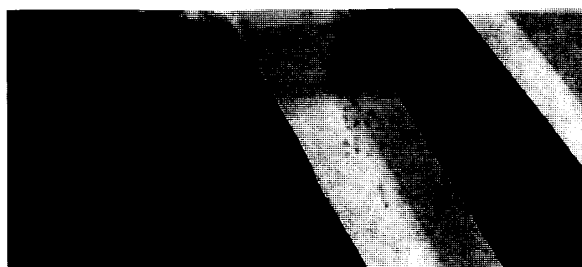


写真-1 コンクリートの打設と表層部の保護

*1 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科 工修（正会員）

表－２ 実験SERIESと工程の計画

SERIES	融雪剤 溶液浸漬	通常水 浸漬	浸漬溶液の種別					凍結融解サイクル数
			I	II	III	IV	V	
01	7→28	28→56	○		○	○	○	25, 50, 75, 100
02	7→28	28→75	○		○	○	○	25, 50, 75, 100
03	7→28	28→56	○	○	○		○	25, 50, 75, 100
04	7→35	35→63	○	○	○		○	25, 50, 75, 100

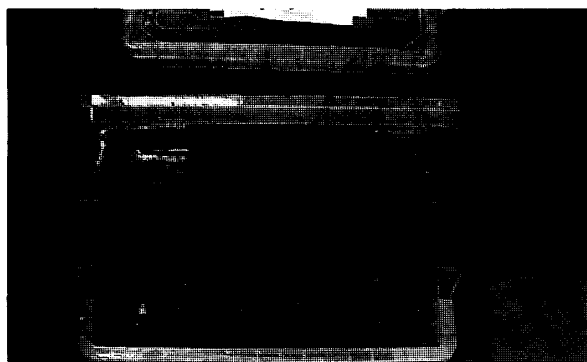
脱型後材齢7日まで気中養生(湿度95%以上)

溶液浸漬等の表中の数字は材齢を示す。○印は種別の適用を表す。

- I 塩化カルシウム20%溶液常温
II 塩化カルシウム25%溶液常温
III 塩化カルシウム30%溶液常温
IV 塩化カルシウム30%溶液低温
V 水中養生
- ここで、Vの水中養生工程の場合は
融雪剤溶液への浸漬期間はないものとし、
すべて通常水(稀釈水)による状態とする。

また、実験工程は材齢7日まで、 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ で、気中養生を施した後、供試体を融雪剤溶液に浸漬した。表－２に、塩化カルシウム溶液の濃度の種別等、各 SERIES をまとめた実験工程の計画を示す。また、表中の浸漬の環境温度は、常温の場合、 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、低温の場合、 $-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ [フリーザ使用]である。写真－２に示すように、供試体は2本1組とし、気中養生→融雪剤の各溶液浸漬→稀釈水(水道水 [通常水と表現]: $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$) 浸漬供給→水中凍結水中融解作用の連続する各工程ごとの平均質量を観測記録した。なお、浸漬の方法(立方体法(Cube Immersion Method))は供試体の全体が溶液浸漬となる状態とした⁴⁾。また、凍結融解サイクルは冷媒の温度で管理し、凍結最低温度 -25°C 、2時間、融解最高温度 $+20^{\circ}\text{C}$ 、2時間を1サイクルとし、突起部を持つゴム製の容器内は水道水を用い、凍結融解作用中の化学的な劣化はない扱いとした。なお、表－３に各工程別の観測総数を示す。

(全データ数: 256観測)



写真－２ 塩化カルシウム溶液への供試体浸漬

表－３ 各実験工程と観測数

SERIES	観測数				総数
	気中養生 段階	融雪剤 浸漬	通常水 浸漬	凍結融解 作用	
01	4	3	4	4	15
02	4	3	8	4	19
03	4	3	4	4	15
04	3	4	4	4	15

2.2 実験結果・工程履歴・実験の条件等の

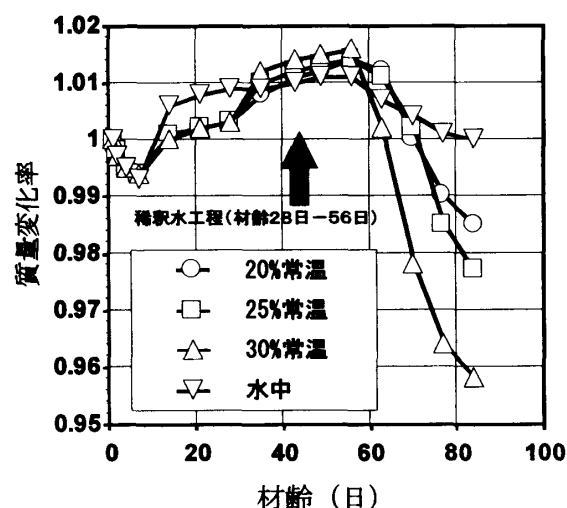
階層型ニューラルネットワークへの学習

ニューラルネットワーク処理の最大の特徴は、獲得データに内在する複合的に絡み合った要因間の現象面の結果をネットワーク上に学習することで、学習の範囲内の状況をその感度により、非線形的に補間再現し、かつ要因感度の影響を独立・分解的に考察できること(逆解析)にある。今回、一連工程の変化する質量は脱型時質量(材齢1日時)の相対値[質量変化率: 脱型時の質量に対する各時点の質量の相対比]として捉え、全獲得データを同一のニューラルネットワークで学習した。なお、ネットワークの構成は、入力側に、対象ユニット {W/C, s/a , ペースト容積率, 材齢}, 環境ユニット {気中養生日数, $20\% \cdot 25\% \cdot 30\%$ (各常温) $\cdot 30\%$ (低温) 塩化カルシウム溶液の浸漬の日数, 稀釈水(通常水)浸漬日数, 凍結融解サイクル数} の11ユニットである。出力側は指標ユニット {各時点の質量変化率} の1ユニットである。中間層は1層 $\cdot 10$ ユニットで、計算のアルゴリズムは誤差逆伝播法である。

3. 実験結果およびその考察

3.1 実験工程全体の質量変化率からの概観

図－１に全実験工程の質量変化率[実験値]の推移(SERIES03)を示す。供試体の質量は気中養生の段階で減少し、融雪剤溶液等に浸漬することで増加に転ずる。融雪剤溶液への含浸量は、今回の大きさのコンクリートの供試体の場合、水中養生状態への含浸量に比べて、小さい結果となった。この傾向性はW/C = 55%の他のSERIESの場合もほぼ同様である。但し、低温の



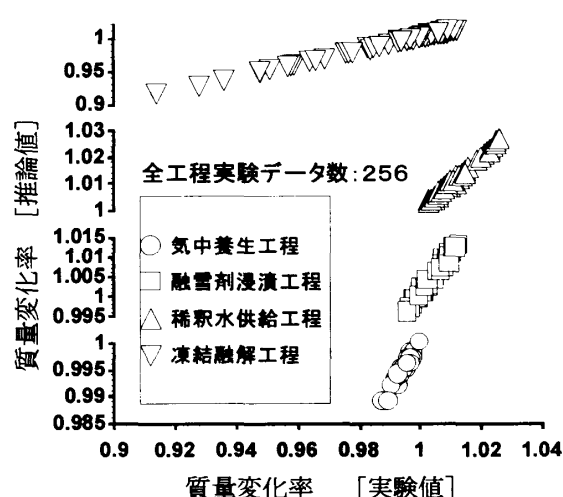
図－１ 全工程質量変化率の実験値 (SERIES03)

浸漬では若干含浸量は低減する。また、 $W/C = 75\%$ になると、水中浸漬の場合も、融雪剤溶液浸漬の場合も、含浸量の大きさは、 $W/C = 55\%$ に比べて著しく増大する。

また、今回の研究で特に問題視している点は融雪剤溶液に浸漬した後、供試体を通常水浸漬に移行した段階で、質量の変化が著しく増大し、その推移の曲線に明らかに変曲点が認められることにある。これはコンクリート内部に融雪剤溶液成分が蓄積し、後に供給が予想される通常水（降雨・降雪を想定）により稀釈される働き（外部から内部濃度を薄める作用）を持つためと考える。この現象は検討した融雪剤の全種別全 SERIES にみられ、表層部で稀釈されることにより融雪剤濃度が低下し、融雪剤本来の凍結防止の目的を凝固点降下の働きから形骸化し、コンクリートの飽水度を高め、スケーリング量（氷圧による表層剥離）の増加を導くと考える。

3.2 質量変化履歴の学習結果

前節で述べたように、融雪剤浸漬の工程から稀釈工程への移行による変曲点を持つ質量変化の推移をニューラルネットワークによって要因とともに学習させ、その感度をみることで実験結果の考察の一助とした。図－２に各工程別にまとめた全 SERIES の質量変化率における実験値と推論値の対応結果（データの学習）を示す。

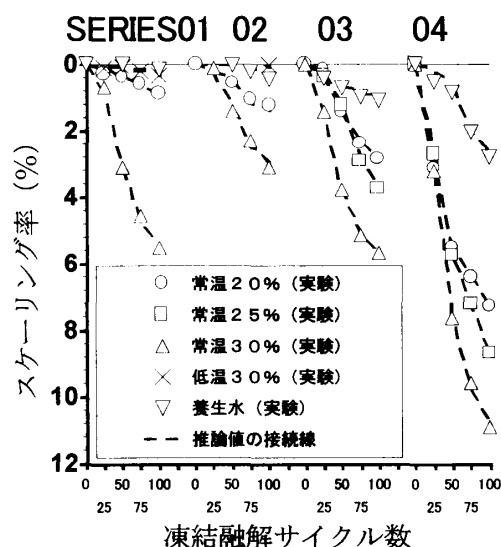


図－２ 全 SERIES の質量変化率の学習結果

両者には、工程の種別に関係なく、相関関係がほぼ確認でき、工程要因による質量変化の推移の持つ非線形現象〔工程・要因によって異なる質量の変化曲線〕をユニットの感度として把握できる。以後、研究の目的に従って、実験値と推論値を併用しながら、結果の考察を展開する。

3.3 スケーリング率と融雪剤溶液の関係

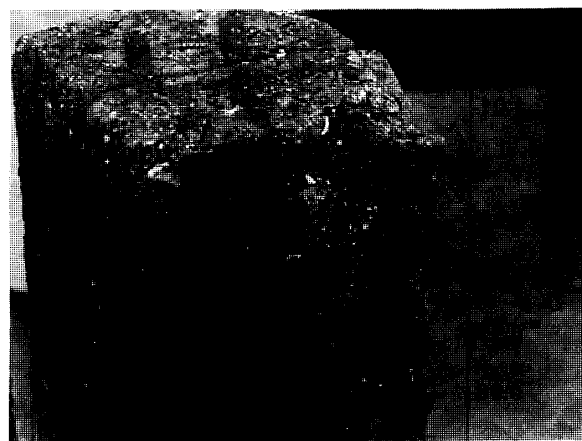
図－３に各 SERIES ごとの融雪剤浸漬の工程の種別要因とスケーリングの関係を示す。ここで、スケーリング率(%)とは、 $[(\text{凍結融解作用前の質量} - \text{凍結融解作用後の質量}) / \text{凍結融解作用前の質量}] \times 100$ で表す。常温の場合、塩化カルシウム濃度が大きいほど、スケーリング率は大きくなる。しかし、低温浸漬の場合には、スケーリング率はほとんど増加しない。これは、塩化カルシウムの場合、スケーリング率に關与する働きが、上述の稀釈水分増加に伴う氷圧の物理的劣化とともに、複塩の生成や組織成分の溶出の化学的劣化の両面が働くため、低温の場合、コンクリートと塩化カルシウムの両者間の反応が鈍化する傾向にあるためと考える⁵⁾。但し、常温の場合であっても、化学的劣化作用が働くと考えられる融雪剤浸漬工程の段階では、表面上の劣化の現象はほとんどみられず、30%常温の場合のみ、打設面の付近に微細なひび割れが僅かに確認できる程度である。また、



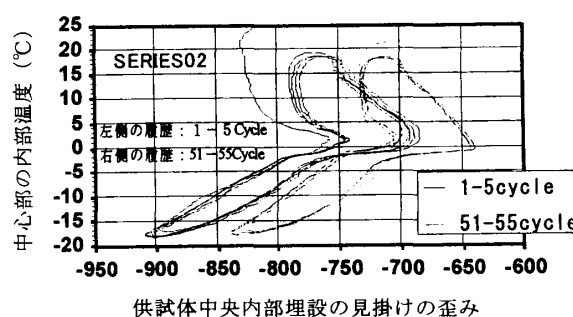
図－3 融雪剤浸漬履歴とスケーリングの関係

W/C = 7.5 % (SERIES04) の場合は、残りの W/C = 5.5 % (SERIES01 - 03) の場合に比べて、スケーリング率は大きくなるが、過去の融雪剤浸漬の濃度要因による影響の大きさの序列はほぼ変わらない。

写真－3に融雪剤溶液の浸漬蓄積後、稀釈水の影響を受けた供試体のスケーリングの状況を (SERIES01, 30%常温, 100cycle時) 示す。劣化が表面化するのは、上述の通り、凍結融解作用後であって、今回の実験の条件内の融雪剤浸漬の段階では全SERIES共通して、写真のような骨材が露呈化することは全くない。コンクリートの品質の低下において、融雪剤による化学的劣化を受けた潜在的な影響は、稀釈水の供給段階によるその飽水度の増加から、スケーリング劣化として促進化することは実験工程の順序および目視からも明らかで、融雪剤による蓄積量との関係性や空隙的組織の変化に与える空間構造の影響が機構の評価的にも十分慎重に検討・説明がされなければならないと考える。図－4は、凍結融解作用工程時の供試体の中心に埋設した歪みゲージと熱電対による観測の結果の一部であるが、凍結融解作用により、供試体は、表面剥離を起こすと同時に、残留する内部の歪みを生じていることもうかがえ、凍害劣化が、表面



写真－3 融雪剤浸漬蓄積後の稀釈水によるスケーリング (SERIES01, 30%常温, 100cycle)



図－4 凍結融解作用時の供試体内部残留歪み

からどの程度の深さまで影響を与えているかについては、質量変化からだけでは分からない。すなわち、表面剥離を生じた表層の部分だけが劣化の影響を受けた部位とみることもできないが、表層の部位から浸入する新たな稀釈の働きの水がスケーリング現象の促進に寄与していることに異論はないと考える。

3.4 水分増加率と融雪剤溶液の関係

各 SERIES の供試体の融雪剤溶液浸漬の状態から、通常水浸漬の状態への移行の稀釈現象に着目して考える。融雪剤がコンクリートに散布される道路下は溶液滞水下にあると考えられ、その成分蓄積等の影響を受けたものが、降雨・降雪等の新たな水分の供給により、どのように含浸し、質量増加に影響を与えるかを検討する。

図－5に融雪剤成分蓄積後の成分稀釈の働きによる供試体の含有水分の増加を示す。ここで、水分増加率とは、脱型時における供試体質量に

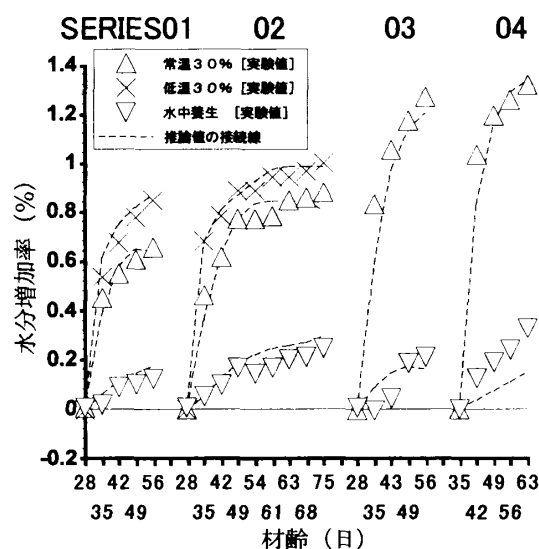


図-5 融雪剤蓄積成分稀釈の含有水分の増加

対する移行開始時点からの増加した水分の質量を百分率として表したものである。図-5中に示す通り、融雪剤溶液浸漬後、降雨等の通常水浸漬の状態に各供試体を移行すると、明らかにその影響を受け、含浸水分の増加量は、自然の含浸の同 SERIES・同実験条件下の水中養生の継続の水分増加量に比べ、著しく大きい観測値を得た。これはコンクリート表層部において、過去蓄積した内部の溶液濃度を、外部から稀釈強制的な水分が浸入し、コンクリート表層濃度を新たに薄めようとする働きのためと考える。この稀釈現象は、今回検討したすべての実験の SERIES の融雪剤の溶液の種別にみられ、かつ融雪剤浸漬の環境下が常温設置の場合も、低温設置の場合も同様で、含浸水分量の増加が凍結劣化膨張圧の危険性を促進するものと考え。

3.5 水分増加率とスケーリング率の関係

図-6は全 SERIES で得られた実験結果から 100cycle 時のスケーリング率と融雪剤から通常水に以降開始時点から 21 日間浸漬期間の水分増加率の関係を、検討要因の種別に関わらず、推論値の結果とともにまとめたものである。同図の結果からも明らかなように、両者間には、相関関係がみられ、塩化カルシウムの融雪剤を用いる場合、水分の増加率の大きさとともに、スケーリング率が大きくなる傾向にある。但し、

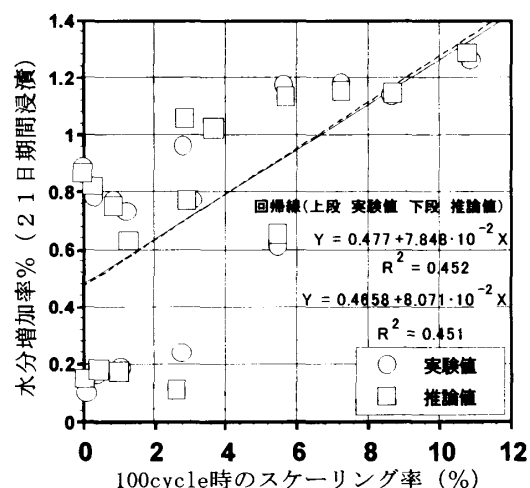


図-6 稀釈水分増加とスケーリング率の関係

スケーリング率の大きさが稀釈水の氷圧の物理的劣化のみならず、潜在的な化学的劣化の影響を同時に受けていることは結果の解釈において無視することはできないと考える。

3.6 ニューラルネットワーク感度解析からの実験値の推論的な考察

前節の水分増加率・スケーリング率の指標をニューラルネットワークの出力ユニットに適用し、対象ユニット {W/C, s/a, ペースト容積率}, 環境ユニット {塩化カルシウム濃度, 浸漬環境下の区別 (常温・低温)} を入力側の

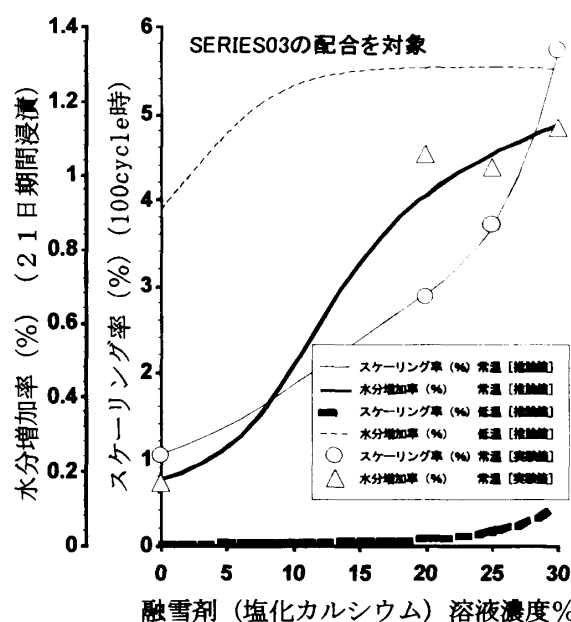
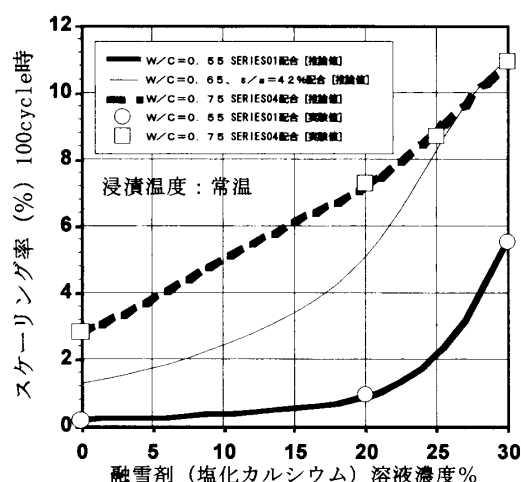


図-7 融雪剤溶液濃度とスケーリングの関係



図－8 融雪剤溶液濃度とスケーリングの関係

ユニットに適用し、学習後のネットワークから感度分析を行った。図－7に融雪剤溶液濃度と水分増加率及びスケーリング率の関係を示す。

融雪剤溶液の濃度が大きくなると、水分増加率やスケーリング率は大きくなる。但し、融雪剤低温浸漬の環境下の場合、スケーリング率は極めて小さいものとなる。図－8に実験の対象の供試体の配合の面から、融雪剤の溶液濃度とスケーリング率の関係の一例をまとめた。実験データの存在しない溶液濃度であっても、学習後のネットワーク感度から、スケーリング率の変化の様相を、全実験データの傾向性を根拠に、非線形補間の推論値としてみることができる。

4. 結論

コンクリートに散布された融雪剤成分の内部蓄積と、以後の外部からの降雨・降雪の稀釈水の増加によるスケーリングに着目した研究事例はほとんどなく、本研究より以下の結論を得た。

(1) 上記稀釈水による水分増加は、自然含浸現象と異なり、外部からの強制的な水分の浸入増加となり、含浸時間中の質量変化曲線にその影響を受けたと考えられる急激な変曲点の実験結果のすべての SERIES にみられる。

(2) 上記稀釈水によるスケーリングは浸漬の融雪剤（塩化カルシウム）濃度が大きいほど、その劣化量が大きい。また、常温浸漬の場合は

低温の場合より、その影響が大きいことから、日射等により融雪剤が常温の滞水下状態にあることはスケーリングの促進に著しく繋がる危険性を持つものとする。但し、今回の実験結果のスケーリング率は、稀釈水による氷圧の物理的劣化と融雪剤成分による化学的劣化の複合的劣化と位置づけなければならないと考える。

(3) 実験条件や実験結果をニューラルネットワークに学習させ、その感度の分析から、実験結果に与える要因等の影響を各々の非線形現象の補間的な解釈から計算することができる。

〔謝辞〕 八戸工業大学庄谷征美先生・月永洋一先生に稀釈水によるスケーリングの過去の研究事例についての貴重な助言を頂きました。また、山口大学宮本文穂先生にご指導も頂きました。また、平成12年度神戸高専都市工学科・卒業研究生、常本宗記君・富重陽輔君・藤田浩平君の協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三浦 尚：融雪剤による鉄筋コンクリート構造物の劣化，コンクリート工学，vol.38，No.6, pp.3-8，2000.6
- 2) 三浦 尚ほか，コンクリート調査研究小委員会凍結防止剤ワーキンググループ：我が国のコンクリート構造物における凍結防止剤の影響，土木学会論文集 No.490/V-23，pp.15-19，1994.5
- 3) 月永洋一・庄谷征美・笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集 第8巻第1号，pp.121-133，1997.01
- 4) 日本コンクリート工学協会、融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999.11
- 5) 笹谷輝彦・鳥居和之・川村満紀：塩化カルシウム溶液によるコンクリートの化学的腐食，第49回セメント技術大会講演集，pp.856-861，1995.5