

論文 凍結融解作用を受けるコンクリートの凍害深さに関する一考察

池 翰相^{*1}・楠 貞則^{*2}・添田 政司^{*3}・大和 竹史^{*4}

要旨：コンクリート標準示方書「維持管理編」の耐凍害維持管理基準では、凍害によるコンクリート劣化予測を凍害深さとその進行速度をもとに行うことを基本としているが、この「凍害深さ」の評価方法は明瞭でないのが現状である。本研究で ASTM C672 に準じた凍結融解試験を実施し、その挙動を非接触型レーザー変位計によるスケーリング深さと、可視画像による骨材露出率を測定するとともに、サーモグラフィーを用いて熱画像解析した結果、これら測定方法が凍害劣化の劣化予測に対して有効な手法であることを確認した。

キーワード：凍結融解、凍害深さ、スケーリング量、レーザー変位計、骨材露出率、熱画像

1. はじめに

韓国では 1994 年、1995 年に相次いで供用中の橋梁、デパートが突然倒壊する事故が発生した。このため、日本と同様に韓国においてもコンクリート構造物の維持管理・保全に関する技術が重要視され、長期耐久性、超寿命化の面からコンクリート構造物の効率的な施設点検・調査手法の開発が急務となり、研究が盛んに行われるようになってきている。

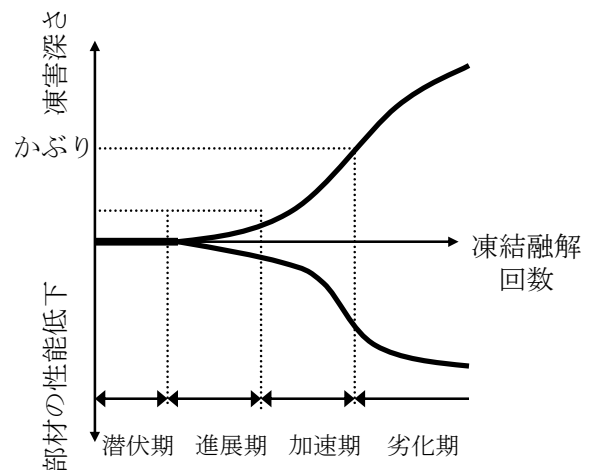
韓国は、緯度上で日本の青森から福岡に位置し、シベリアの寒気を直接的に受ける等、気象条件としては日本以上に厳しい面もあり、凍害を受けたコンクリート構造物の実例はきわめて多いにも関わらず（写真－1）、凍結融解作用に関する指針がなく、この分野の研究調査が少な



写真－1 実際に凍害を受けた韓国の構造物

いのが現状である。

日本の凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測については、コンクリート標準示方書「維持管理編」の耐凍害維持管理基準¹⁾、図－1に示すようにモデル化され、凍害深さとその進行速度をもとに行うことを基本としているが、この「凍害深さ」の評価方法は明確でないのが現状である。このため、凍害劣化を受ける構造物の維持管理手法は未だ研究開発中のものが多い^{2) 3)}。そこで本研究は、凍害劣化のうちスケーリングによる劣化に着目し、水セメント比や空



図－1 凍害劣化過程の概念図

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設材料専攻 修士(工学) (正会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科助手 修士(工学) (正会員)

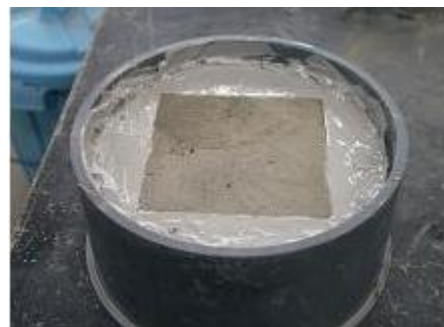
*3 福岡大学大学院 工学研究科資源・循環工学専攻助教授 博士(工学) (正会員)

*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

表－１ 配合試験結果

種 類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						フレッシュ性状		硬化性状	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE剤	スランプ	空気量	圧縮強度 (N/mm ²)	
			W	C	S	G	C× (%)	C× (%)	(cm)	(%)	σ_7	σ_{28}
AE コンクリート	45	43	168	373	742	1049	1.20	0.24	7.5	4.0	37.2	41.9
	55	45	168	305	802	1044	1.20	0.20	8.0	4.5	29.1	33.4
	65	47	168	258	855	1028	1.20	0.20	8.5	5.2	23.2	29.8
Non-AE コンクリート	45	43	190	422	736	1036	1.00	—	7.8	1.8	34.8	46.9
	55	43	190	345	763	1074	1.00	—	8.0	1.6	31.3	39.5
	65	43	190	292	782	1100	1.00	—	8.3	1.4	24.1	34.4

気量の条件を変えたコンクリートを作製し、ASTM C672 に準じた凍結融解試験を行い⁴⁾、スケール量やスケール深さの測定とともに、可視画像による骨材露出率の測定やサーモグラフィを用いて熱画像解析し、進展期および加速期での剥離部の検出や骨材露出率の定量化を行った。この試験結果より、凍害劣化を受けるコンクリートの劣化予測への適用性について検討した。



写真－２ 試験体の作製

2. 実験概要

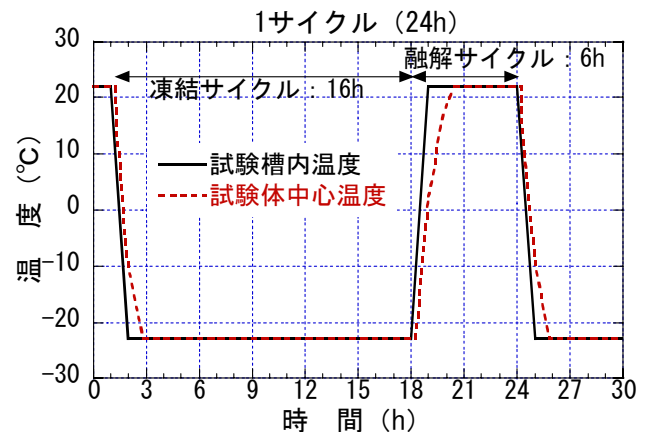
2.1 使用材料及び配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）を使用した。細骨材には海砂（密度 2.58g/cm³, 吸水率 0.96%）を、粗骨材には碎石 2005（密度 2.75g/cm³, 吸水率 1.11%）を使用した。

表－１に本実験に使用した配合を示す。コンクリートの水セメント比は 65%, 55%, 45% の 3 種類とし、AE 剤を用いて空気量を調整した AE コンクリートと、AE 剤を用いない Non-AE コンクリートの 2 種類を設定した。

2.2 試験体の作製及び養生

試験体は、写真－２に示すようにφ200×H100 mmの塩化ビニール管の中にコンクリートを打設し、ブリーディング終了時に ASTM に基準化されている表面仕上げを実施した。その後、材齢 28 日まで 20℃の水中養生を実施した。なお、



図－２ 試験体の温度履歴

この養生期間中に一度試験体を取り出し、上面中央の120×120mm以外を樹脂によるライニング処理を行った。

2.3 凍結融解試験

試験体の上面に NaCl3%溶液を深さ 6mm まで注ぎ、気中凍結気中融解試験装置に設置した後、50 サイクルの凍結融解作用を与えた。1 サイクルは 24 時間で、凍結に 16 時間、融解に 6 時間



写真-3 レーザー変位計



写真-4 サーモグラフ

かけた。凍結最低温度は -23°C とし、また、融解最高温度は $+23^{\circ}\text{C}$ とした。図-2は本試験の試験槽と供試体内部の温度履歴の結果を示したものであり、サイクル毎に一定の温度条件下で供試体の内部でも凍結融解が生じるようにしている。

2.4 測定項目

所定の凍結融解サイクル終了毎にスケーリング量、スケーリング深さ、可視画像(写真)における骨材露出率および熱画像の測定を実施した。

スケーリング量は、試験体表面から採取した剥離部を真空乾燥して、デシケーターで常温に戻した後、電子天秤で測定した。スケーリング深さは、写真-3に示すように測点移動用専用台を備えたレーザー変位計とデータローグを用いて図-3に示すような精度で測定し、これを色別のコンター図として整理した。熱画像は、写真-4に示すようにサーモグラフィーを用いて、予め簡易な温風器で打設面を 40°C に加熱し、それから常温に戻るまでの各段階の熱画像を撮影した。

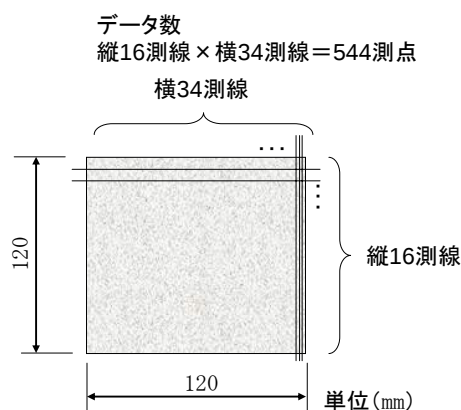


図-3 スケーリング深さ測定要領

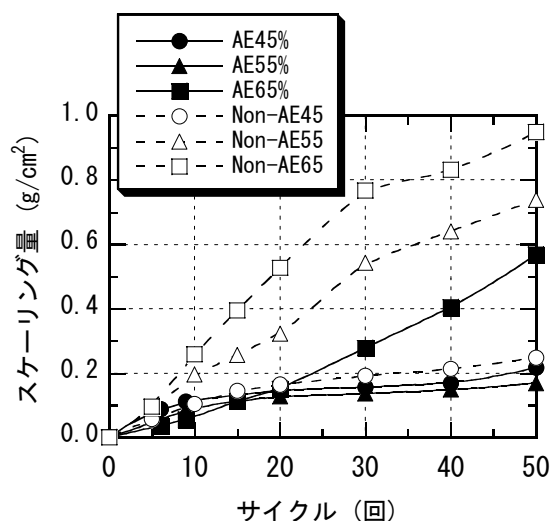


図-4 スケーリング量の測定結果

3. 試験結果及び考察

3.1 スケーリング量

図-4に凍結融解サイクル数とスケーリング量の関係を示す。AE, Non-AE コンクリートとも凍結融解サイクル数の増加に伴い、スケーリング量も増加しているが、そのスケーリング抵抗性はNon-AE コンクリートが極めて小さく、劣化進行が速いことがわかる。W/C の影響について、AE コンクリートは $55\% < 45\% < 65\%$ の順に大きくなった。ただし、45%と55%はほぼ同等のスケーリング量である。Non-AE コンクリートは $45\% < 55\% < 65\%$ の順となった。いずれもW/C が大きいほどスケーリング量も増加する傾向であった。

3.2 スケーリング深さ

図-5にAEコンクリートのスケーリング深さの測定結果の一部を、図-6に50サイクル終了時のAE, Non-AEコンクリートのスケーリング深さの測定結果を示す。AE, Non-AEコンクリートともスケーリング深さはサイクルの増加に伴い増加傾向を示すが、一様なスケーリング深さの分布を呈するものでない。W/Cの影響について

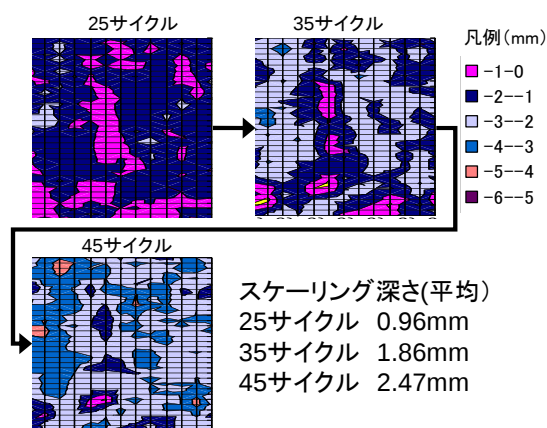


図-5 AEコンクリート(W/C=65%)のスケーリング深さ

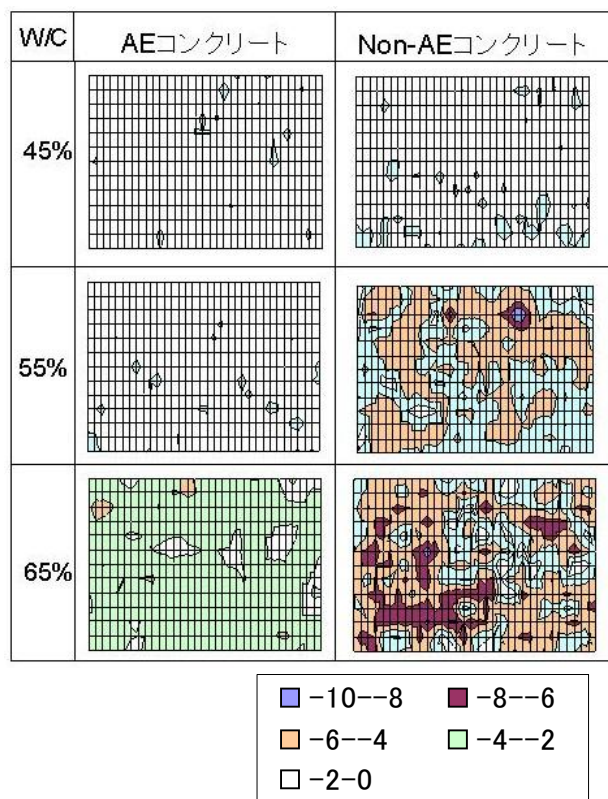


図-6 スケーリング深さ(50サイクル)

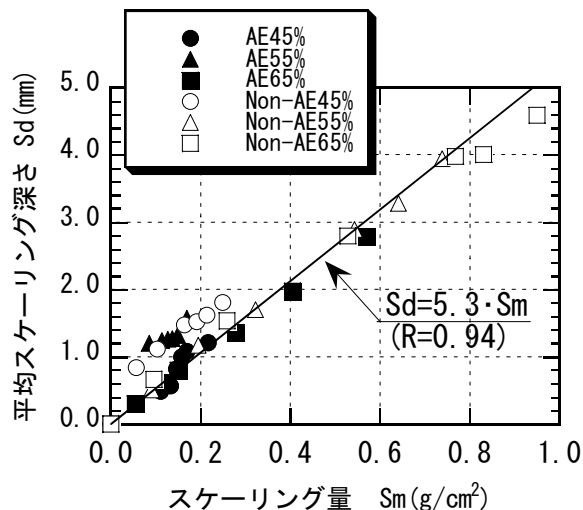


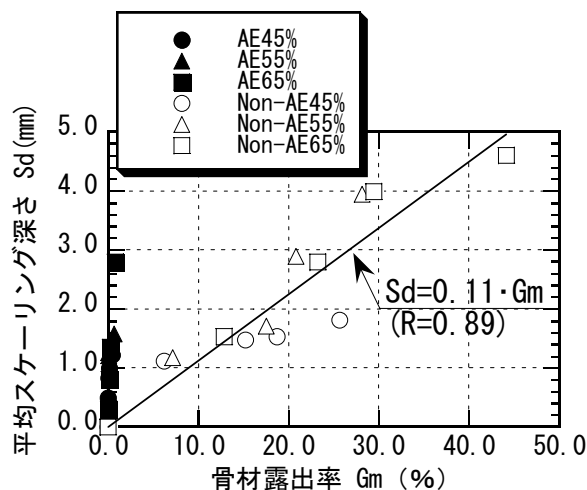
図-7 スケーリング量と平均スケーリング深さの関係

は、いずれも水セメント比が大きくなるに伴い、スケーリング深さが深くなっている。ここで、前節のAEコンクリートのスケーリング量は50サイクル終了時にW/C=45%とW/C=55%がほぼ同程度であった。スケーリング深さにおいてもこれと同様な傾向が見られる。また、50サイクル終了時のAE, Non-AEコンクリートのスケーリング深さについて、AEコンクリートではW/C=65%, Non-AEコンクリートではW/C=55%以上で劣化が顕著となり、空気連行の有無による違いが明確に表れた。

図-7にスケーリング量と平均スケーリング深さの関係を示す。スケーリング量と平均スケーリング深さの間には、空気連行の有無、W/Cに明確な差異がないことから、劣化の進行速度に関係なく、高い相関関係が認められる。このことは、劣化の進行は局所的に大小の差異はあるものの、スケーリング深さの測定で劣化の進行過程をある程度予想することが可能であると考えられる。

3.3 可視画像における骨材露出率

コンクリート標準示方書「維持管理編」の耐凍害維持管理標準では、凍害によるコンクリートの劣化進行深さ(凍害深さ)と劣化過程について図-1に示したようなモデル化で表現され



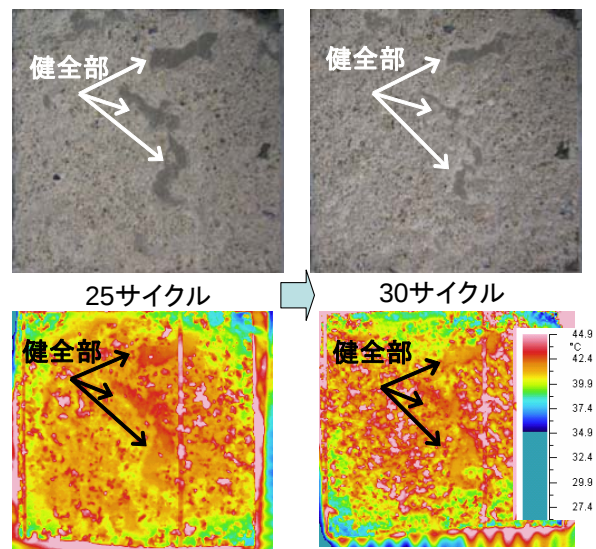
図－８ 骨材露出率と平均スケーリング深さの関係

ている。図の劣化過程のうち、実構造物の保守点検を想定した場合、進展期（コンクリート表面の劣化は進行するが、鋼材腐食がない期間）、加速期（コンクリートの劣化が大きくなり、鋼材腐食が増大する期間）における劣化の進行予想が特に重要になるものと考えられる。本試験では、AE コンクリートのように 50 サイクルまでの凍結融解サイクルでコンクリート表面が劣化した程度を進展期とし、Non-AE コンクリートのように骨材の露出が顕著で劣化が大きい状態を加速期と設定した。

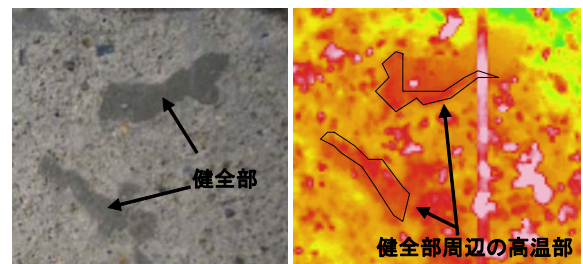
図－８に可視画像による骨材の露出度と平均スケーリング量の関係を示す。AE コンクリートのように表面が劣化した程度であれば特に相関は認められないものの、Non-AE コンクリートでは骨材露出度の増加に伴い平均スケーリング深さが増加する相関関係が認められた。また、いずれも W/C の違いによる影響は特になく、このことから、可視画像による骨材露出率も、劣化の程度によっては、凍害劣化の進行過程を予想する指標として適用することが十分可能であると考えられる。

3.4 熱画像

図－９に劣化過程として進展期の熱画像測定結果の一部を示す。進展期では、健全部、スケーリング部が温度差である程度識別できる。凍



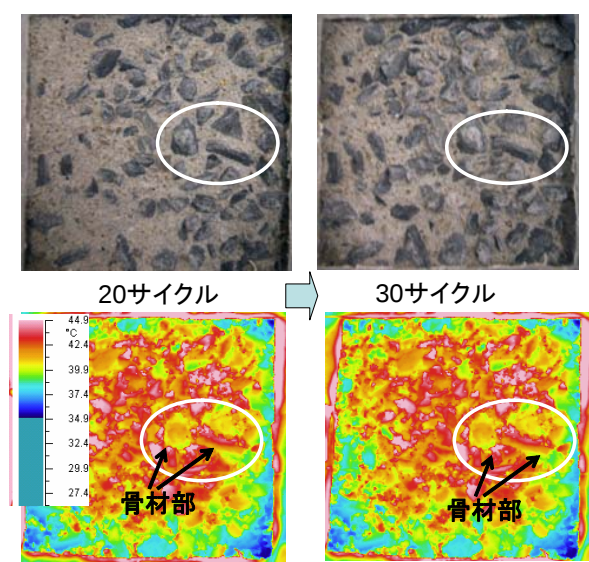
図－９ 進展期の熱画像測定結果（AE コンクリート，W/C=65%）



図－10 劣化の兆候

結融解サイクルが 25 サイクルまでは試験面の表層劣化も微小であり、健全部とスケーリング部の温度差も鮮明であるが、30 サイクル以上でコンクリート表面が粗になると（平均スケーリング深さが 1mm 以上）、スケーリング部が温度差というよりも斑点状に見られるのが確認できる。また、図－10 に 25 サイクル時の健全部周辺域の可視画像と熱画像を劣化の兆候として示す。可視画像では健全部としか確認できない部分が、熱画像では温度差が生じており、健全部周辺の高温部が次のサイクル終了時に剥離した。これは、熱画像が目視で確認できない内部の浮きを捕らえたものと考えられる。

図－11 に劣化過程として加速期の熱画像測定結果の一部を示す。加速期では、測定部表面の凹凸の影響が大きく、温度差はあるものの、モルタル部と骨材部を区分するような温度差でなかった。ただし、可視画像との比較や一回の熱



図－11 加速期の熱画像測定結果（AE コンクリート，W/C=65%）

画像だけでなくサイクル毎の熱画像を重ねると、進展期と温度変化の幅に違いがあるものの、モルタル部と骨材部の識別が可能である。可視画像と熱画像の比較では、図からも骨材部の確認が容易にできる。熱画像の重ね合わせでは、図中に指した範囲内に温度差が違う2種類の骨材があるが、サイクル数が違っていても同一位置の骨材の温度差はほぼ一定の温度領域となっている。このことは、熱画像の測定で骨材露出率の推定が可能となり、スケーリング深さ（量）を求めることができる。よって、熱画像はコンクリートの凍害劣化の進行予測のための「凍害深さ」の評価手法として有効であると考えられる。

また、熱画像の測定を通じて、本試験では熱風機（ドライヤー）で試験面の加熱を実施している。このため、狭い試験面においても熱風の試験面へ当たる角度はスケーリング劣化が進行するほど、凹凸の影響でむらができたように感じられた。これは、熱画像そのものの測定精度に影響するものである。コンクリート実構造物の劣化調査への熱画像の適用は、非破壊、非接触で観測できることに特徴を有するが、更に時間、コストを考慮すると、対象部への加熱の方法や距離および加熱温度による測定精度を明確にする必要がある。このため、今後更に熱画像

測定の精度を上げるための手法についても検討していく予定である。

3. まとめ

本研究によって、以下のことがわかった。

- (1) ケーリング量は W/C が大きいほど増加し、そのスケーリング抵抗性は Non-AE コンクリートが極めて小さく、劣化進行が速い。
- (2) スケーリング量と平均スケーリング深さの間には、空気連行の有無、水セメント比に関係なく、高い相関関係が認められる。
- (3) スケーリング深さの測定で劣化の進行過程をある程度予想することが可能である。
- (4) 骨材露出率は、劣化の進行予想過程の加速期において、W/C に関係なく、平均スケーリング深さと相関関係が認められ、凍害劣化の進行過程を予想することが可能である。
- (5) 熱画像は、劣化の進行過程の加速期における劣化の兆候を捉えることができ、進行期を含めモルタル、骨材部を識別できる。
- (6) 以上のことから、熱画像の測定は、骨材露出率、スケーリング深さ・量を予測することが可能で、「凍害深さ」の評価へ適用可能である。
- (7) 今後、実構造への適用試験を実施したい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「維持管理編」，2002 年制定
- 2) 月永洋一，庄谷征美ほか：コンクリートのスケーリング抵抗性改善に関する一検討，セメント・コンクリート論文集，NO. 49，PP. 698～703，1995
- 3) 竹田宣典，十河茂幸：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，VOL23，No. 2，PP. 427～432，2001. 6
- 4) ASTM C 672-84 Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals