

論文 養生条件の異なるコンクリートの表層品質評価と耐久性に関する研究

海沼 飛鳥*1・武田 三弘*2・大友 鉄平*3・小梁川 修司*4

要旨: 本研究は、養生方法の異なるコンクリート版を想定した表層部に対して各種非破壊検査を行い、その手法によってどの様な傾向が見られるのかを明らかにすると共に、その評価結果と凍結融解抵抗性との関係について求めたものである。実験の結果、透気試験・透水試験においても養生条件毎の密実性の違いを区別できること、材齢によっては評価結果が変わること、耐凍害性との関係については概ね評価結果と同様の傾向であることが分かった。また、非破壊検査による表層品質評価が低かったコンクリート表層の方が、含浸性塗布材を塗布したことによる耐凍害性の向上が顕著に見られることを明らかにした。

キーワード: 養生, 透気試験, 吸水試験, 簡易透気試験, 凍結融解試験, 含浸性塗布材

1. はじめに

現在、日本のコンクリート構造物は老朽化が進行している。橋梁を例に例えると、全橋梁のうち、建設から50年以上経過する割合は2032年時点で約59%と加速度的に急増する見込みとなっている。そのため、新たに建設されるコンクリート構造物においては、この現状を鑑みて将来的な補修や修繕を未然に防ぐことが望まれており、予防的な対策として新設時のコンクリートの密実性や長期耐久性の保持が重要視されている。これらの評価には、各種非破壊検査が用いられることが多いが、どの様な非破壊検査を用いて実施することが適切なのか検討すべきである。例えば、養生方法の異なるコンクリート版表層部に対して、各種非破壊検査によって同一箇所を測定した場合、その測定結果にどの様な傾向があり、また、同時に各種非破壊検査による評価結果と耐久性との関係や、各種非破壊検査結果に対する含浸性塗布材の効果についても、同一供試体による比較を行った事例があれば、機種を選定する際の参考になるものと思われる。

そこで、本研究では土間コンクリートやコンクリート床版などのコンクリート版を想定した供試体に対して各種養生を行い、その養生方法の違いによって、各種非破壊検査によるコンクリート表層の品質評価結果へ及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。また、各種養生後の供試体に対して、凍結融解試験を行い、各種非破壊検査結果と凍結融解抵抗性との関係について比較検討した。さらに、各種養生後の供試体に対して含浸性塗布材を塗布した後、凍結融解試験を行い、各種非破壊検査結果と含浸性塗布材による耐凍害性の効果についても実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の寸法は500mm×500mm×100mmとし、スランプ9.7cm、空気量2.5%のコンクリート版を想定した供試体を5体作製した。表-1はコンクリートの配合条件を示したものである。なお、供試体には鉄筋を配置せず、打設面以外に型枠を存置することとした。

2.2 養生材料及び養生方法

養生は無養生(記号M)、シート養生(記号S)、保水性養生マット2種及び湛水養生(記号T)の5ケースとした。保水性養生マットは、通常の保水性養生マット(記号A)とスリットが入っている地覆用マット(記号J)の2種使用した。また、一般に地覆部の養生は、鉄筋が突き出ている条件であるため、シートで鉄筋ごと覆い尽くす養生方法を取られることが多い。今回、スリット入りの地覆用の養生マットを使用した場合と従来のシートで覆った場合との比較をするため、シート養生は、供試体型枠の四つ角に鉄筋を想定した長さ70cmの棒を設置し、覆い尽くす養生を行った(写真-1参照)。

各種養生は打設翌日の同時刻から開始している。なお、養生マットは養生前日から水に浸漬し、水切りを行った後に敷設している。養生期間は7日間とし、期間後はい

表-1 コンクリート配合表 (kg/m³)

W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	AE
55.3	42.6	175	316	763	1045	0.009

*1 東北学院大学大学院 工学研究科環境建設工学専攻 (学生会員)

*2 東北学院大学 工学部環境建設工学科 (正会員)

*3 早川ゴム株式会社 事業開発グループ土木技術チーム (正会員)

*4 国土交通省 東北地方整備局 (法人会員)



写真-1 養生の様子

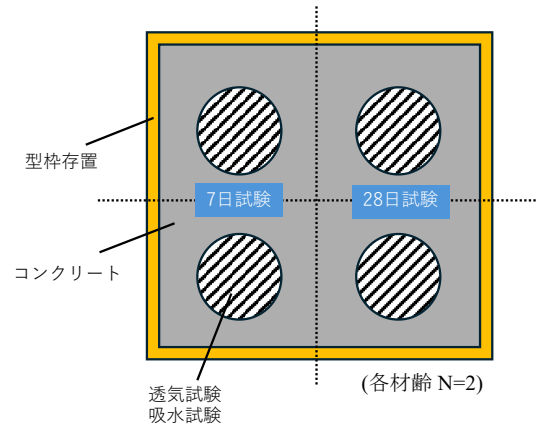


図-1 各種非破壊試験測定箇所

ずれの養生材料とも外した。養生期間中の途中散水は、スリットを入れた養生マットにのみ 7 日間のうち 2 回散水を行った。供試体は、直射日光や雨が当たらないように屋根付きの屋外を選定して設置している。

2.3 コンクリートの評価方法

養生後のコンクリート表面は、トレント法²⁾による透気試験，SWAT 法²⁾による吸水試験，独自に開発した簡易透気試験³⁾の測定を行い，比較・検討を行った。評価試験は材齢 7 日及び 28 日に行い，材齢 7 日は養生終了直後における評価，材齢 28 日は養生を行った後の経時的な評価として行っている。材齢初期における透気試験による吸引の影響や，吸水試験による水分供給の影響を考慮して，測定箇所は，図-1 に示すように材齢毎に分け，測定順番は水分の影響を無くするため，透気試験，簡易透気試験，吸水試験とした。また，コンクリート表面の水分率の測定は，低周波交流電界式水分計を用いて定期的に測定を行った。

写真-2 は，本研究室で開発した簡易透気試験機を示している。本装置の特徴は，本体が呼び径 100mm の硬質塩化ビニール排水継ぎ手とつまみ付き掃除口排水用塩ビ継ぎ手を組み合わせたもので，それに 2 本のコック（一方は吸引用，もう一方は負圧調整用）と負圧計を取り付けている。簡易透気試験機の端部には軟質シリコンでコンクリートとの密着性を向上させるシングルチャンバーとなっている。測定は，シリコン部分を測定面に設置し，調整用のコックを閉め，吸引用のコックから減圧し，負圧計の値が-80kPa を超えるまで吸引する。その後吸引用コックを閉め，負圧計の値が-80kPa から-60kPa までに増圧するのに要した時間 (sec) を計測し，その増圧量 (20kPa) を経過した時間で除した値を簡易透気係数 (kPa/sec) と定義している。なお，20kPa までの増圧が進まないような緻密なコンクリートの場合，5 分を最大計測時間とし，増圧した値を 5 分 (300 秒) で除した値を簡易透気係数として求めている。簡易透気係数の品質評価のグレーディング



写真-2 簡易透気試験の測定風景

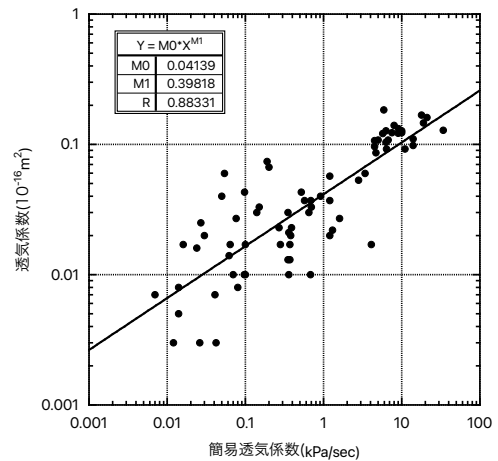


図-2 透気係数と簡易透気係数との関係

は，0.005 未満を「緻密」，0.005 以上 0.05 未満を「密」，0.05 以上 0.5 未満を「微粗」，0.5 以上 10 未満を「粗」，10 以上 20 未満を「極粗」としている。なお，レディーミクストコンクリート（普 21-18-20N，普 24-18-20N，普 30-18-20N，普 30-12-20N）で施工されたコンクリート版の同一箇所をトレント法と簡易透気試験において測定した 74 箇所の相関図を図-2 に示す。この図より相関係数 0.88 の正の相関があることが分かっている。

2.4 凍結融解試験

凍結融解試験用の供試体は、材齢 28 日の各種非破壊検査による測定が終了後、養生条件ごとに 3 体ずつ φ150mm のコア抜きを行った。その後、各試験体上面には塩水を溜めることができるようシリコンプールを作製し、凍結融解試験時には濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液を湛水し、ASTM C 672 法の試験条件⁴⁾に沿って実施した。試験のサイクルは、凍結温度 -18°C かつ凍結保持時間 18 時間、融解温度 20°C かつ融解保持時間 6 時間とし、1 サイクル 24 時間で凍結融解試験を繰り返し行った。

スケーリング抵抗性の評価として、表-2 に示す 6 段階の目視レイティングによる評価に加え、スケーリング量の測定を行った。スケーリングは、養生条件ごとに 2 体の試験体から採取して、単位面積あたりのスケーリング量 (kg/m²) に換算をし、その平均値を評価した。なお、測定は凍結融解 3 サイクル毎に実施し、30 サイクルまで行った。

2.5 含浸性塗布材を使用した凍結融解試験

含浸性塗布材を塗布した条件の凍結融解試験用の供試体は、養生後半が経過したコンクリートからコア抜き (φ150mm, N=1) したものを使用した。実験に用いた含浸性塗布材は、シラン系表面含浸材に浸透性防錆剤を配合したものである。この含浸材の特徴は、塩化物イオンが侵入した既設のコンクリート構造物にも効果を発揮することができ、また、塗布する事で形成される吸水防止層によってコンクリート構造物への水の侵入を防ぎ、塩害、凍害、アルカリシリカ反応等の劣化因子を阻止することができる。さらに、本含浸材は透湿性に優れており、コンクリート中の水分を水蒸気として放散する特徴を有している。含浸性塗布材はメーカーの推奨する規定量を塗布し、12 日後に凍結融解試験を実施した。なお、凍結融解試験の概要については前述 2.3 と同様である。

3. 実験結果及び考察

3.1 表面水分率の測定結果

表-3 は、各養生条件における材齢 7 日と 28 日の水分率の測定結果を示している。材齢 7 日において、湛水養生と保水性養生マットを使用した供試体の水分率は、非破壊検査の測定結果では参考値として扱われる 5.5% 以上であった。一方で、無養生とシート養生の供試体の水分率は約 4.5% であったため、保水性養生マットの使用によって、コンクリート表面の水分率の保持に効果を発揮することが示唆された。材齢 28 日における水分率の測定結果では、材齢の経過に伴い、いずれの条件においても水分率が減少する結果 (3.9%~4.4%) となったが、養生マットや湛水養生の方が、無養生やシート養生よりも高い水分率を維持出来ている結果となった。

表-2 ASTM 法に規定される目視による評価基準⁴⁾

評価	コンクリート表面の状態
0	剥離なし
1	粗骨材の露出なし 劣化深さ最大3mm程度のごく軽微な剥落
2	軽度の剥落 (評価1と評価3の中間に位置する程度)
3	いくらか粗骨材の露出が確認される中度の剥落
4	強度の剥落 (評価3と評価5の中間に位置する程度)
5	表面全体に粗骨材の露出が確認される激しい剥落

表-3 表層水分率測定結果

養生方法	水分率 (%)	
	材齢7日	材齢28日
無養生 (M)	4.4	3.9
シート (S)	4.5	3.9
養生マット (A)	5.6	4.2
地覆部用養生マット(J)	6.5	4.3
湛水養生 (T)	6.5	4.4

3.2 各種非破壊検査の測定結果

図-3 は材齢 7 日、図-4 は材齢 28 日における各供試体の透気試験の測定結果を示している。なお、水分率が 5.5% 以下で試験を行うことが望ましいとされているため、5.5% を超えた試験結果については参考値と考えている。

材齢 7 日においては、無養生(M)及びシート養生(S)の供試体ではいずれも透気係数は同程度であり、品質評価が「劣」であった。一方で、養生マット(A)では「一般」、養生マット(J)及び湛水養生(T)では「良」となった。既往の研究⁵⁾では、水分率が高くなると品質評価が急激に向上する傾向が確認されており、表層水分率が高かった養生マット(A,J)と湛水養生(T)では、透気係数は低く評価される結果となった。材齢 28 日の測定結果と比較すると、ほぼ同傾向であるが、材齢 7 日で見られた養生マットと湛水養生の明確な差が、次第に縮まっており、透気係数自体が大きくなる傾向となった。これは、乾燥により水分率が低くなったことの影響と考えられる。

図-5 は材齢 7 日、図-6 は材齢 28 日における吸水試験の測定結果を示している。吸水試験の結果は、無養生及びシート養生では品質評価が「劣」、養生マット及び湛水養生では「良」または「一般」であった。評価の傾向としては透気試験と同様の傾向が見られ、養生マット及び湛水養生の評価は無養生やシート養生と比較して極めて良い傾向が見られた。既往の研究⁵⁾においても水分率が高い場合に吸水速度が低くなる傾向が顕著に見られた。この要因として、本実験では、コンクリート表面のブリーディング水の有無を確認し、ブリーディング水が見られなくなった時点で押しつけるよう饅ならしを実施したことが挙げられる。この饅ならしの影響で、表層が緻密な状態になった事に加え、養生を適切に行ったことで、表層面がより

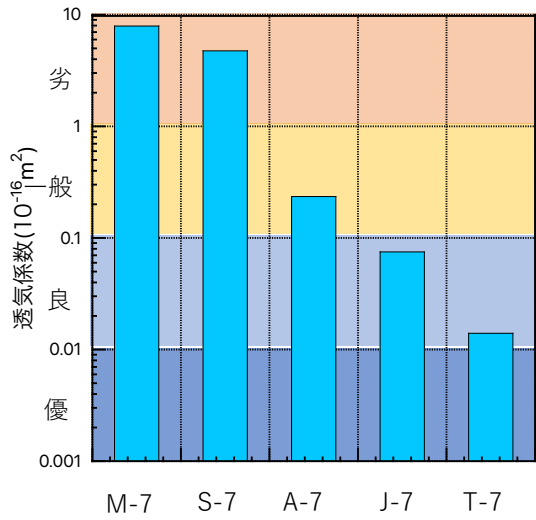


圖-3 表層透氣試驗結果(材齡7日)

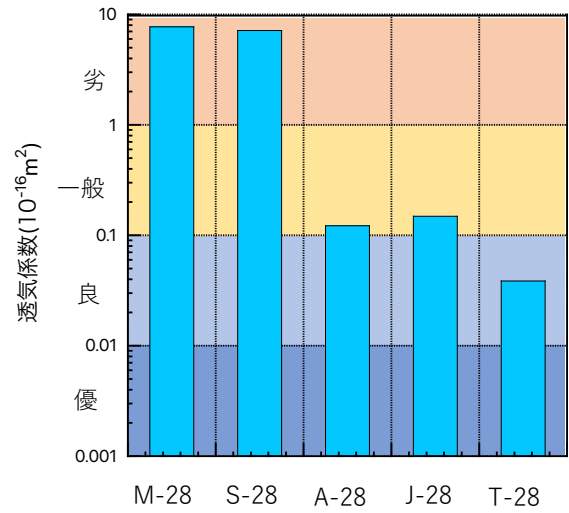


圖-4 表層透氣試驗結果(材齡28日)

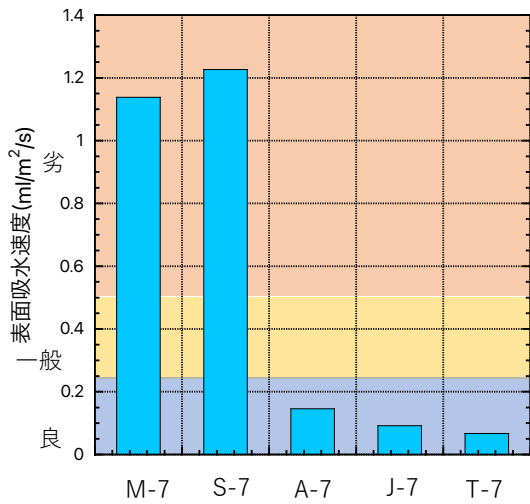


圖-5 表面吸水試驗結果(材齡7日)

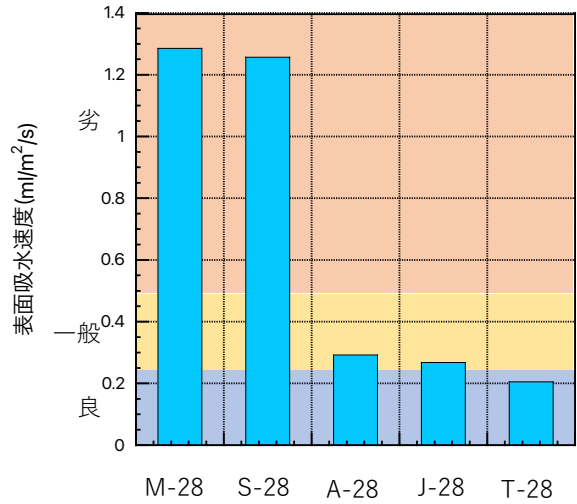


圖-6 表面吸水試驗結果(材齡28日)

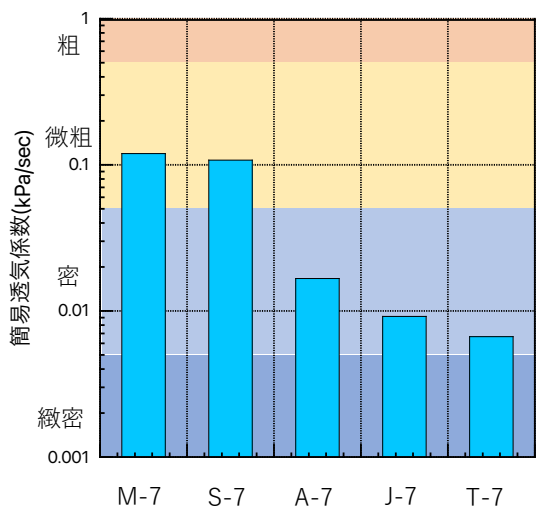


圖-7 簡易透氣試驗結果(材齡7日)

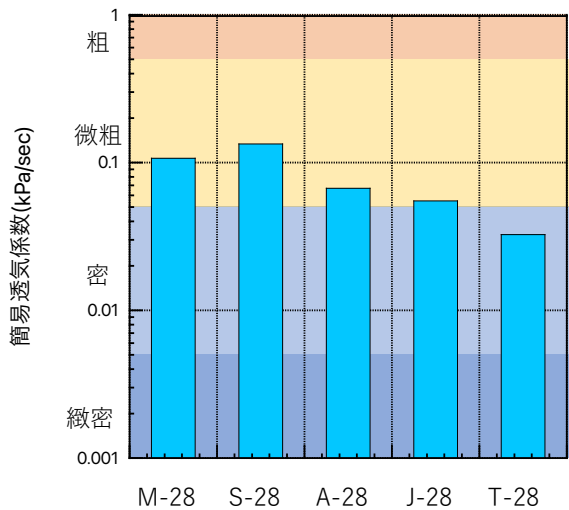


圖-8 簡易透氣試驗結果(材齡28日)

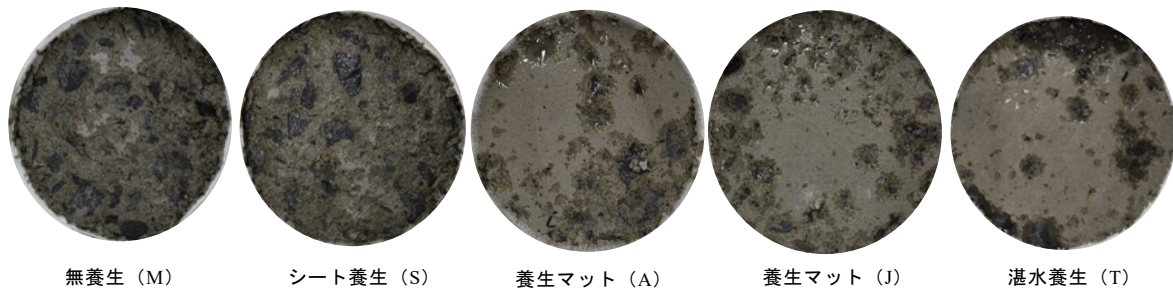


写真-3 供試体表面の様子

緻密になっていたものと考えられる。透水試験は、測定深さが小さいことから、緻密になった表層箇所の影響を受け、評価結果が良かったものと考えられる。なお、材齢による評価結果の差としては、透気試験と同様の傾向となることが分かった。

図-7 は材齢 7 日、図-8 は材齢 28 日における各供試体の簡易透気試験の測定結果を示したものである。材齢 7 日の測定結果では、表層透気試験と同様の傾向が見られ、無養生及びシート養生の品質評価が「微粗」、養生マット及び湛水養生の品質評価が「密」であった。材齢 28 日時の測定結果では、湛水養生のみ品質評価が「密」となり、その他の養生のものはいずれも品質評価が「微粗」であったが、養生方法の違いによる差は見られることが分かった。

以上の結果より、コンクリート表層部の同一箇所について各種非破壊検査を用いて測定した結果、初期材齢（材齢 7 日）においては、いずれの場合も養生条件の悪いものと良いもので明確な差が見られ、どの非破壊検査においてもグレード評価には差が見られるが、養生条件による密実性の差を比較出来ることが分かった。

材齢 28 日における各種非破壊検査の測定結果は、コンクリート表面の乾燥によりいずれも評価結果が悪い方向へとシフトする傾向が見られた。しかしながら、この傾向はコンクリート自体が劣化したわけではなく、コンクリート表層の水分の蒸発により、一時的にポーラス化しただけであるため、表層品質評価をする際は、表面水分率の値を考慮した評価を行う必要があるものと思われる。評価結果とコンクリート表層水分率との関係については今後検討を行う予定である。

3.3 凍結融解試験結果

写真-3 は、凍結融解 30 サイクル時における各供試体の状況である。目視レイティングによる評価の結果、無養生とシート養生の供試体では表面全体に著しい劣化を確認することができ、スケーリングに伴う粗骨材の露出等も散見されたため、評価を 5 としている。一方、保水性養生マットの供試体では、無養生やシート養生の供試体ほど表層の劣化が確認できなかったが、同様にスケーリングに伴う粗骨材の露出が散見できたため評価を 4 とした。

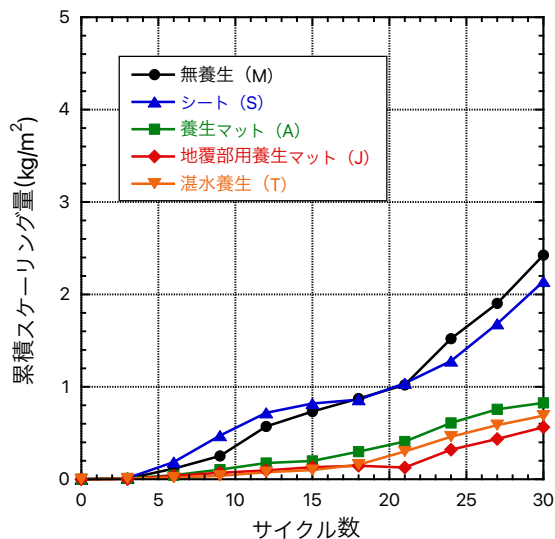


図-9 累積スケーリング量(無塗布)

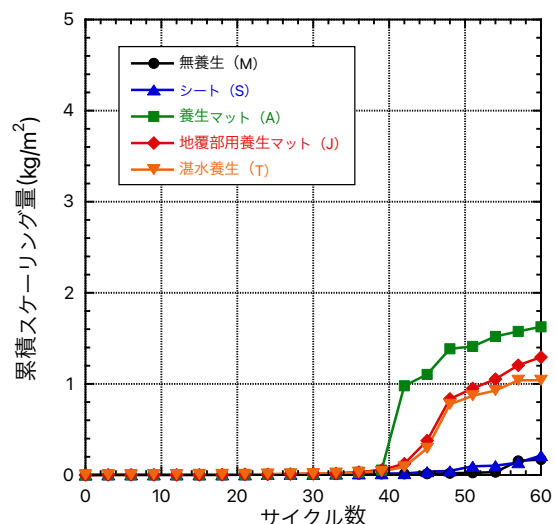


図-10 累積スケーリング量(シラン系)

スリット入りの保水性養生マットと湛水養生の供試体では、粗骨材の露出が確認できたものの、上記の供試体に比べて、スケーリングによる劣化が明らかに少ないため、評価を 3 とした。目視レイティングによる評価より、養生後の各種非破壊検査による評価が良い供試体については、耐凍害性を有していることが示唆された。

図-9は、凍結融解試験を30サイクル行った累積スケーリング量を示したものである。この結果より、初期のサイクル時から無養生およびシート養生ではスケーリング量の増加が確認でき、湛水養生や保水性養生マット2種と比較するとその差が顕著であった。30サイクル時における無養生およびシート養生の累積スケーリング量は2.1～2.5kg/m²であり、湛水養生および保水性養生マット2種のスケーリング量は0.5～0.7kg/m²であったため、各種非破壊検査によって得られた評価と耐凍害性を示す累積スケーリング量は概ね同様の傾向であることが示された。

3.4 含浸性塗布材を使用した場合の凍結融解試験結果

図-10は、凍結融解試験によってシラン系塗布材を塗布した供試体から得られた累積のスケーリング量を示したものである。シラン系塗布材を塗布した供試体に関しては図中に示すように、30サイクル終了時において累積スケーリング量に大きな違いが見られなかった。そのため、累積スケーリング量の差が顕著に生じた60サイクルまで凍結融解試験を行った。結果より、養生時に高い水分率を保持していた供試体において39サイクル以降から累積スケーリング量が増加しており、養生マット及び湛水養生の3ケースの供試体の累積スケーリング量は、2.0～2.6kg/m²となった。一方で、養生時に水分率が比較的低かった無養生とシート養生の供試体については、50サイクル以降に累積スケーリング量の増加傾向が僅かに見られたものの、最終的に60サイクル時の累積スケーリング量が約0.20kg/m²と少ない傾向にあった。コンクリート表面に対してシラン系塗布材を塗布した場合、無塗布の場合に比べ40サイクルまでは、スケーリングの発生を抑えることが出来ており、塗布材の効果を確認することが出来たが、養生後のコンクリート表層の品質評価が低かった条件の供試体の方が、耐凍害性は向上する結果となった。この理由として、表層品質評価が低かったコンクリート面には、ひび割れや空隙の発生が多く、それによって塗布材がより深くまで含浸することにより、塗布材による効果が顕著に現れたと考えられる。そのため、各種非破壊検査結果で、評価が低いコンクリート表層では、塗布材を塗布したことによる耐凍害性の向上が顕著に見られる可能性を知ることが出来た。

4. 結論

本研究はコンクリート版を想定した供試体に対して各種養生を行い、その養生方法の違いによって、各種非破壊検査によるコンクリート表層の品質評価結果へ及ぼす影響について明らかにし、非破壊検査結果と凍結融解抵抗性との関係や各種非破壊検査結果と含浸性塗布材による耐凍害性の効果について確認することを目的とした。本実験の範囲内で以下のことが言える。

- (1) コンクリート表層部の同一箇所について各種非破壊検査を用いて測定した結果、初期材齢(材齢7日)においては、いずれの場合も養生条件の悪いものと良いもので明確な差が見られ、どの非破壊検査においてもグレード評価には差が見られるが、養生条件による密実性の差を比較出来ることが分かった。
- (2) 材齢28日における各種非破壊検査の測定結果は、コンクリート表面の乾燥によりいずれも評価結果が悪い方向へとシフトする傾向が見られた。しかしながら、この傾向はコンクリート自体が劣化したわけではなく、コンクリート表層の水分の蒸発により、一時的にポーラス化しただけであるため、表層品質評価をする際は、表面水分率の値を考慮した評価を行う必要があるものと思われる。
- (3) 凍結融解試験による耐久性試験の結果、各種非破壊検査で評価結果が良かった条件のコンクリートは、スケーリング量が少ない傾向となり相関性が見られる結果となった。この様に同バッチの同配合のコンクリートにおいて養生条件のみ変化させた場合のように、異なる条件が少ない場合には、両者の相関性はあるものと考えられる。
- (4) 各種非破壊検査によって評価した結果が、良かった条件と悪かった条件において、含浸性塗布材を塗布した後の凍結融解抵抗性は、悪かった条件の方がより高くなることを明らかにした。この要因としては、表層部の評価結果が悪い条件では、表層部がポーラス化していることで、より含浸性塗布材が浸透したことにより、凍結融解抵抗性が高くなったものと思われる。

参考文献

- 1) R.J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete on site, *Materials and Structures*, Vol.25, pp.358-365, 1992
- 2) 林 和彦, 細田 暁, Usman AKMAL, 藤原 麻希子: コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1804-1809, 2012
- 3) 小角神月, 武田三弘: 簡易透気試験を用いたコンクリート測定深さに関する研究, 令和5年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-15, 2024
- 4) 権代 由範, 庄谷 征美, 月永 洋一, 子田 康弘: 塩化物環境下におけるスケーリング抵抗性の評価試験法に関する基礎的研究, *コンクリート工学論文集*, 第20巻, 第1号, pp.59-70, 2009
- 5) 菅原 瑛, 武田三弘, 鈴木恵子: 各種非破壊検査によるコンクリート表層評価の基礎的研究, *土木学会全国大会第76回年次学術講演会講演概要集*, V-334, 2021