

論文 増粘剤含有高性能 AE 減水剤の使用によるごみ溶融スラグコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について

大畑 卓也*1・安形 和香*2・山本 貴正*3・河野 伊知郎*4

要旨：ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートは、凍結融解作用を繰返し与えると大きく劣化することが知られている。そのため寒冷地域では、ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの普及が進んでいない。本稿では、ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートに増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用することで、スケーリング劣化に対する抵抗性を高めることを実験的に確認した。さらに、ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートに増粘剤含有高性能 AE 減水剤を使用することにより、凍結融解作用と塩害を複合作用させた場合の塩分浸透を大きく抑制することを明らかにした。

キーワード：凍結融解試験, ごみ溶融スラグ細骨材, 増粘剤含有高性能 AE 減水剤

1. はじめに

我が国では、大量の生活ごみや産業廃棄物の排出に伴い、これらのごみを焼却処分した際に発生する焼却灰などの廃棄物を埋立てするための処理場が全国的に不足している。そのため環境省を中心として、環境負荷低減を目的とした循環型社会の形成に向けて、廃棄物・リサイクル対策が進められている。その取組みの一つとして、一般廃棄物や下水汚泥などを焼却処理した際に発生する焼却灰を溶融処理して製造したごみ溶融スラグを資源化し、再利用する試みが行われている。ごみ溶融スラグは、道路の路盤材として使用することが一般的¹⁾であるが、コンクリートの細骨材として、ごみ溶融スラグの利用普及により、廃棄物等の資源化をさらに促進させる研究²⁾³⁾が行われている。

ごみ溶融スラグをコンクリートに使用した場合、ガラス質であることから多くの空気を巻き込むという特性⁴⁾を有している。そのためごみ溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートは、凍結融解作用を繰返し与えると大きく劣化することが報告⁵⁾⁶⁾されており、寒冷地域では、ごみ溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートの普及が進んでいないのが現状である。

また、寒冷地域の国道では、ほぼ全ての道路で冬期路面管理のため、主に塩化物系の凍結防止剤が散布されており、凍結防止剤を含む融雪水等が接するコンクリート構造物では複合作用が生じている。さらに寒冷地域で海に隣接するコンクリート構造物は飛来塩分により、凍害と塩害の複合作用を受けやすい環境にある。しかし、ごみ溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートに凍害と塩害の複合作用を作用させた研究については、詳細に検討されていない。

本稿では、ごみ溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートの粘性の増加を目的として、増粘剤含有高性能 AE 減水剤（以下、高粘性 AE 減水剤）を使用した供試体を作製し、凍結融解による影響について検討を行った。さらに、ごみ溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートに凍害と塩害の複合作用を作用させ、その影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料として、セメントは高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm^3 ）と普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）を使用した。粗骨材は岐阜県多治見市三之倉町産の砕石（最大寸法 20mm 、表乾密度 2.67g/cm^3 ）、細骨材は岐阜県多治見市大畑町産の山砂（表乾密度 2.55g/cm^3 、吸水率 1.76% ）、ごみ溶融スラグ細骨材は豊田市渡刈クリーンセンターで製造されたごみ溶融スラグ（表乾密度 2.85g/cm^3 ）、混和剤には、粘性の影響を検討するため、ポリカルボン酸系 AE 減水剤とポリカルボン酸系高粘性 AE 減水剤を使用した。

なお、豊田市渡刈クリーンセンターは流動床式ガス化溶融炉を採用している。本稿で使用したごみ溶融スラグ細骨材は、廃棄物を燃焼した後、 $1200\sim 1300^\circ\text{C}$ 以上の高温で溶融させ、水砕により冷却固化することにより製造された溶融スラグである。

2.2 コンクリートの配合と供試体

ごみ溶融スラグを細骨材として使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。溶融スラグの有効活用に係わるガイドライン（案）⁷⁾では、溶融スラグ細骨材を使用したプレキャストコンクリート製品の水セメント比は 55%

*1 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科助教 工博（正会員）

*2 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 愛知工業大学 工学部 建築学科准教授 工博（正会員）

*4 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科教授 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合および空気量, 圧縮強度

記号	コンクリートの配合条件									空気量 (%)	材齢28日 圧縮強度 (MPa)
	使用 セメント	水セメ ント比 (%)	単体量 (kg/m ³)					混和剤 (g/m ³)	粘性*		
			水	セメント	細骨材	ごみ溶融 スラグ	粗骨材				
S55	高炉セメ ントB種	55	180	327	405	405	920	1800	あり	4.6	26.6
S55V			180	327	405	405	920	1800	なし	4.8	28.6
S50		50	177	354	385	385	969	1770	あり	4.6	41.3
S50V			177	354	385	385	969	1770	なし	4.6	40.0
NC55	普通ポル トランド セメント	55	180	327	810	-	920	1800	あり	4.0	41.3
NC55V			180	327	810	-	920	1800	なし	4.3	42.2
NC50		50	177	354	769	-	969	1770	あり	4.4	42.2
NC50V			177	354	769	-	969	1770	なし	4.6	46.9

※粘性「あり」はAE 減水剤を示し、粘性「なし」は高粘性 AE 減水剤を示す。

以下を標準としている。また、コンクリート用溶融スラグ細骨材の標準情報 (TRA0016) に準拠した溶融スラグ細骨材を使用したプレキャストコンクリート製品の多くは水セメント比が50%程度であることから、本稿のコンクリートの水セメント比は、55%と50%の2水準とした。表中のS50およびS55は、水セメント比が50%と55%のごみ溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート供試体を示している。なお、ごみ溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート供試体は、細骨材の容積比50%をごみ溶融スラグと置換した。さらに、溶融スラグを細骨材として使用したコンクリート供試体には、ごみ溶融スラグを使用した二次製品への使用実績が多い、高炉セメントB種を使用した。また、表中のNC50およびNC55は、水セメント比が50%と55%のごみ溶融スラグ細骨材を使用していないコンクリート供試体を示している。なお、ごみ溶融スラグを細骨材として使用していないコンクリート供試体には、一般的なセメントである普通ポルトランドセメントを使用した。本稿では、高粘性 AE 減水剤を使用することにより各コンクリート供試体に粘性を付与した (表中, S55V, S50V, NC55V, NC50V)。各供試体の目標空気量は 4.5±0.5%とし、表-1 に計測した空気量と

圧縮強度を示す。

各供試体は 400mm×100mm×50mm の角柱供試体を作製した後、コンクリート用カッターを用いて、100mm×100mm×50mm の角柱供試体に切断した。供試体は打設後、28日間水中養生を行った後に凍結融解試験を行った。各供試体の打設面のみ凍結融解劣化を限定させるため、供試体の打設面以外の5面には、エポキシ樹脂を用いて防水処理を行った。さらに供試体の打設面には、シリコンを用いて土手 (約15mm) を形成した。

2.3 実験方法

(1) 凍結融解試験

凍結融解試験は ASTM C 672 を参考とし、1日1サイクルで凍結と融解を繰り返し行い、50サイクルまで凍結融解試験を行った。試験温度を図-1 に示す。凍結過程は約-20°C(16時間)、融解過程は約20°C(8時間)を1サイクルとした。凍結融解試験の試験水には、水道水と食塩水 (NaCl 濃度3%)の2種類を用いた。

各供試体は、コンクリートの打設後に28日間の水中養生を行った。養生後、供試体の打設面に試験水を深さ5mm程度張った状態で24時間経過させた後、凍結融解試験を開始した。評価項目としては、5サイクル毎にスケール量を計測した。

(2) 硝酸銀発色試験

硝酸銀発色試験は、食塩水を使用した凍結融解試験を50サイクルまで行った供試体を実施した。供試体の中央を割裂し、破断面に対して、硝酸銀水溶液(0.1mol/L)を噴霧し、塩化物イオンの浸透深さを計測した。

3. 試験結果および考察

3.1 水道水を使用した凍結融解試験

水道水を使用した凍結融解試験結果を図-2、図-3に示す。ごみ溶融スラグコンクリート供試体(S50, S55)と普通コンクリート供試体(NC50, NC55)を比較すると、50サ

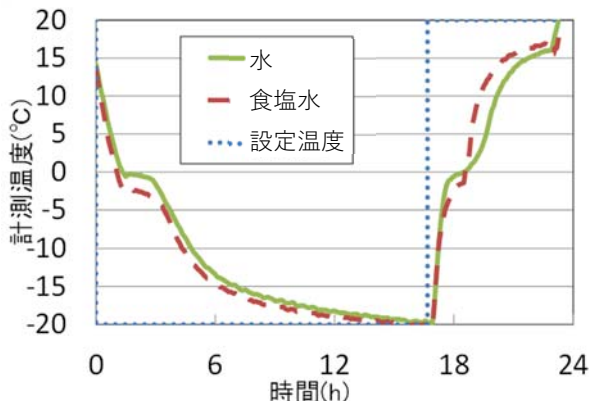


図-1 凍結融解試験の温度履歴

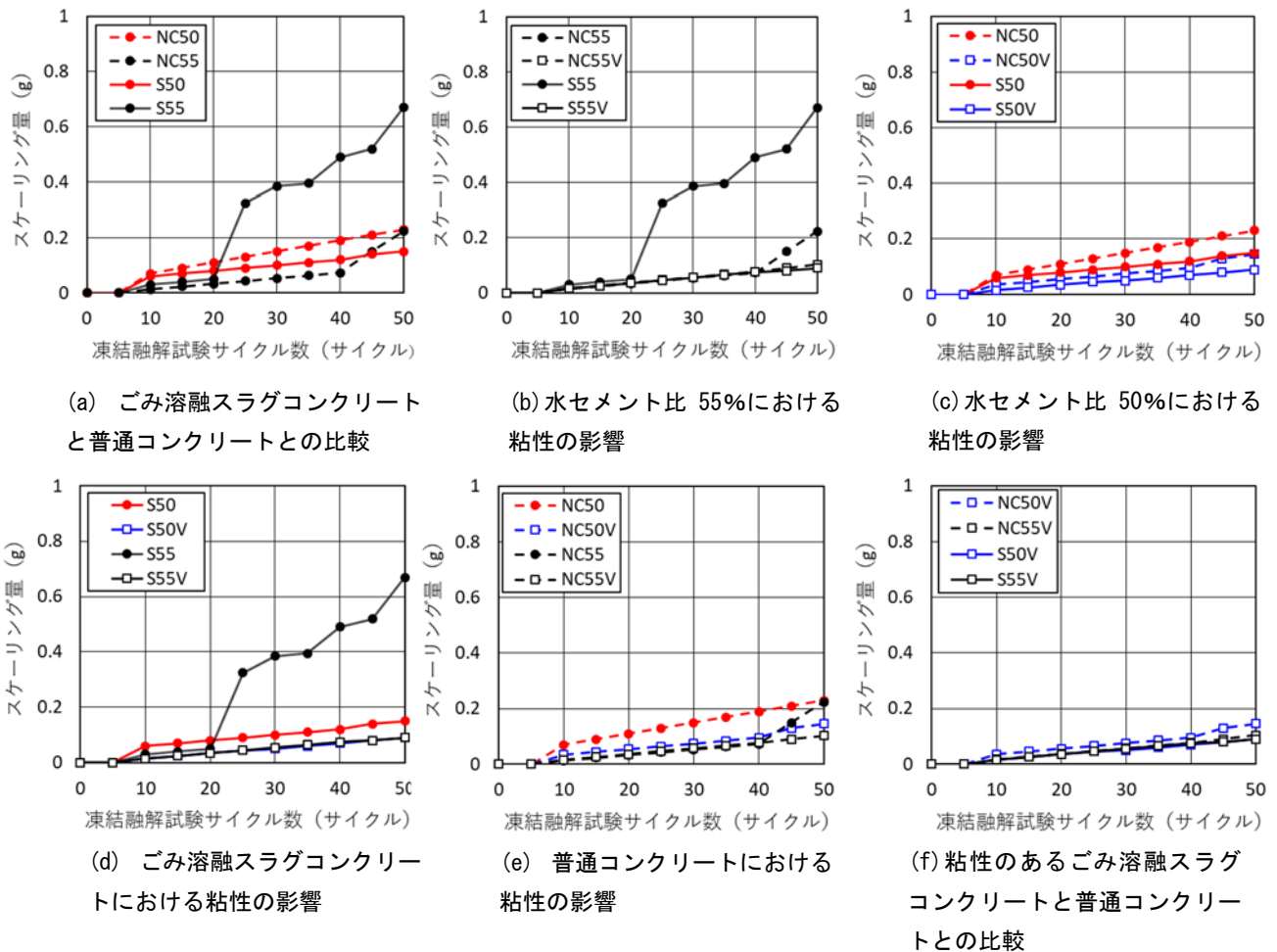


図-2 水道水を用いた凍結融解試験結果

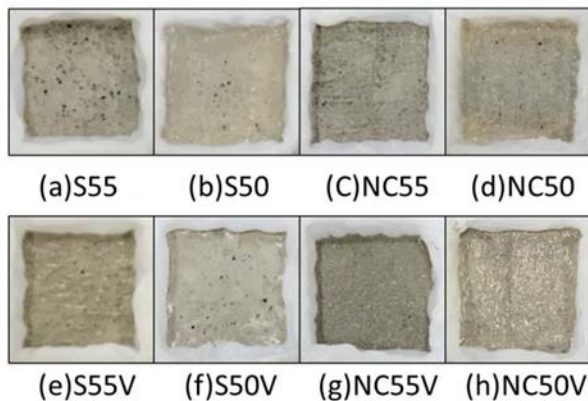


図-3 水道水を用いた凍結融解後の供試体

サイクル終了時に水セメント比 55%のごみ溶融スラグコンクリート供試体 (以下, S55) のスケーリング量が増加する傾向を示した。S55 は、使用している水分の量が多いことに加えて、ごみ溶融スラグがガラス質のため、粘性が低下したためスケーリング量が増加したと考えられる。さらに既往の研究⁴⁾により、ごみ溶融スラグの表面はガラス質でありセメントペーストとの付着強度が小さいため、凍結融解作用により質量減少が大きくなることが報告されている。本稿においても、ごみ溶融スラグコン

クリート供試体と普通コンクリート供試体で使用したセメントが異なるものの、水セメント比が 55%と大きい場合については、ごみ溶融スラグとセメントペーストとの付着強度低下に伴い、スケーリング量が増加したものと考ええる。水セメント比 50%のごみ溶融スラグコンクリート供試体 (以下, S50) と S55 を比較すると、スケーリング量が減少する傾向を示した。S50 は、S55 と比べて単位水量が少ないため、圧縮強度が 41.3MPa と普通コンクリートと同等の強度が発現していることに加え、適切な空気が混入できたためスケーリング量が減少したと考えられる。

高粘性 AE 減水剤を使用した供試体(S50V,S55V, NC50V,NC55V)については、ごみ溶融スラグコンクリート供試体、普通コンクリート供試体に関わらず、スケーリング量が減少する傾向を示した。ごみ溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの粘性を高めることにより、スケーリングが抑制されることが報告⁷⁾されている。本稿でも、高粘性 AE 減水剤を使用することにより、凍結融解作用による劣化が抑制されたと考えられる。

3.2 食塩水を使用した凍結融解試験

食塩水を使用した凍結融解試験結果を図-4, 図-5 に

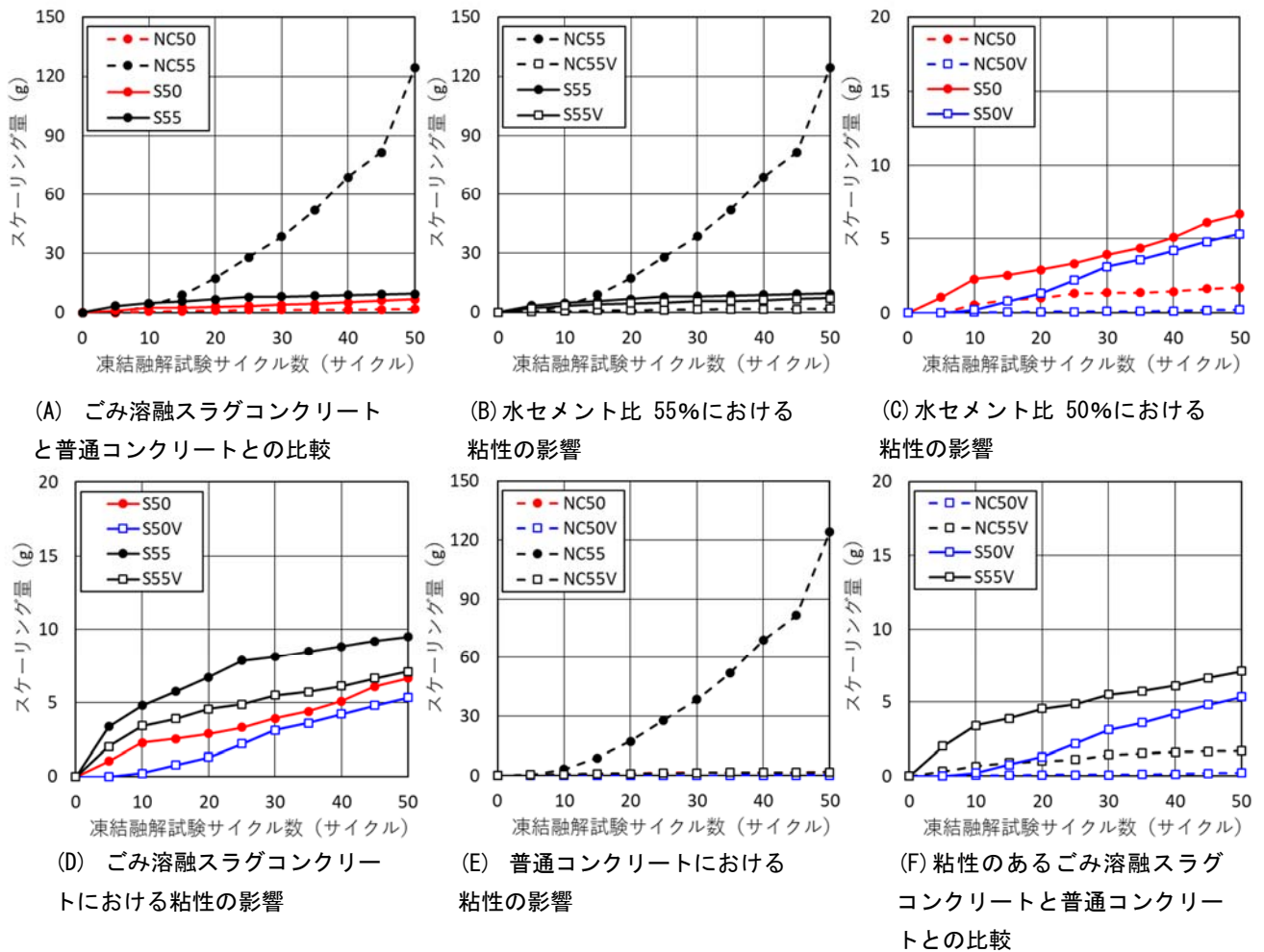


図-4 食塩水を用いた凍結融解試験結果

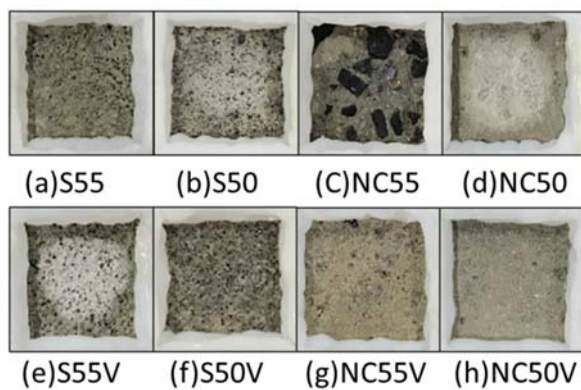


図-5 食塩水を用いた凍結融解後の供試体

示す。食塩水を使用した凍結融解試験は、水道水を使用した凍結融解試験と比べてスケーリング量が急激に増加する傾向を示した。食塩水の凍結時には、水分凍結に伴う膨張圧に加えて、コンクリート微細空隙中の未凍結水による移動圧や、食塩水とコンクリート内部との塩分濃度差による浸透圧が作用するためスケーリング量が増加したと考える。全供試体中、水セメント比 55%の普通コンクリート供試体(以下、NC55)のスケーリング量が、最も多くなる結果となった。この結果は、NC55 が他の供試体

と比較して空気量が 4.0%と少ないことから他の供試体よりも塩分の浸透圧や凍結融解作用による抵抗性が劣っていたと考えられる。S50 と S55 を比較すると、水セメント比が小さい S50 のスケーリング量が少なくなる傾向を示した。S50 が S55 よりもスケーリング量が減少した要因としては、水セメント比が小さいため、圧縮強度が大きくなったことであると考え。高粘性 AE 減水剤を使用した供試体(S50V,S55V, NC50V,NC55V)については、水道水を使用した凍結融解試験と同様、全ての供試体でスケーリング量が少なくなる結果となった。スケーリング量に着目すると、S55V>S50V>NC55V>NC50V となり、ごみ溶融スラグ細骨材を使用することによりスケーリング劣化抵抗性が低下することを確認した。

この結果から、ごみ溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートであっても、高粘性 AE 減水剤を添加することにより耐凍結融解抵抗性を改善できることを示した。

なお、ごみ溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートに食塩水を使用した凍結融解試験を行った場合についても、凍結サイクル時に 5 サイクル程度で部分的なポップアウトが確認された。一般にごみ溶融スラグによるポッ

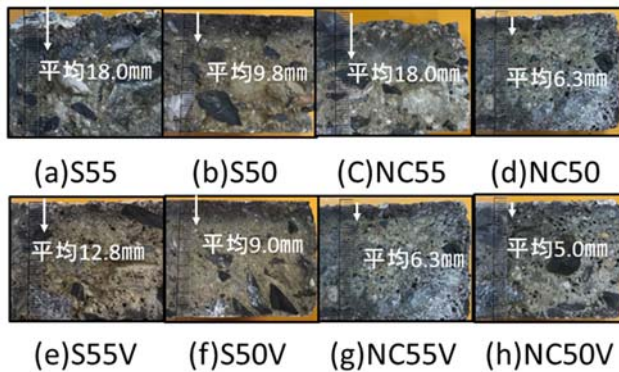


図-6 硝酸銀水溶液噴霧後の供試体

ポプアウトは、スラグ中に残存している生石灰が水と反応して消石灰に変化する際の膨張により生じるものと考えられる。しかし、氷点下では化学反応が促進しにくいいため、ポプアウトの原因は凍害と塩害の複合劣化によるものと考えた。ごみ熔融スラグ細骨材を使用したコンクリート供試体は、ごみ熔融スラグとセメントペーストとの付着強度が小さいため、コンクリート中の間隙水が氷に変化した際に生じた氷圧に NaCl の浸透圧が加わることで、コンクリート表層においてポプアウトが助長されたと考えた。この結果から、飛来塩分の影響を受ける海岸付近のコンクリート構造物や、凍結防止剤の影響を受ける道路に隣接するコンクリート構造物には、ごみ熔融スラグ細骨材を使用しないことが望ましいと考える。

3.3 硝酸銀発色試験

硝酸銀発色試験結果を図-6、図-7に示す。硝酸銀発色試験による塩化物イオン浸透深さは、打設面を基準とした。スケーリングにより損失したコンクリートを含めて塩化物イオン浸透深さとして計測を行った。NC55の塩化物イオン浸透深さは、平均18.0mm(スケーリングによる損失高さは約4.0mm)、NC50の塩化物イオン浸透深さは、平均9.8mmであった。ごみ熔融スラグを使用したS55の塩化物イオン浸透深さは、平均7.7mmであった。さらにS50の塩化物イオン浸透深さは、平均6.3mmと良好な結果を示した。この結果は、高炉セメントB種による潜在水硬性によりコンクリートが緻密となり、塩分浸透が抑制されたと考えられる。S50とS55の塩化物イオン浸透深さを比較すると、S50が1.4mm小さくなる結果となった。一般的に水セメント比が大きいコンクリートは塩化物イオン浸透深さが大きくなることが知られているため、本稿でも同様の結果となったと考える。NC50、NC55についても水セメント比が小さな供試体の方が、凍結融解試験後の塩化物イオン浸透深さが小さくなる傾向が確認できた。そのため、ごみ熔融スラグを使用したコンクリートであっても適切に水セメント比を管理し、高炉セメントB種を使用することにより、凍結防止剤や飛来塩分が影響する場合においても、普通ポルトランド

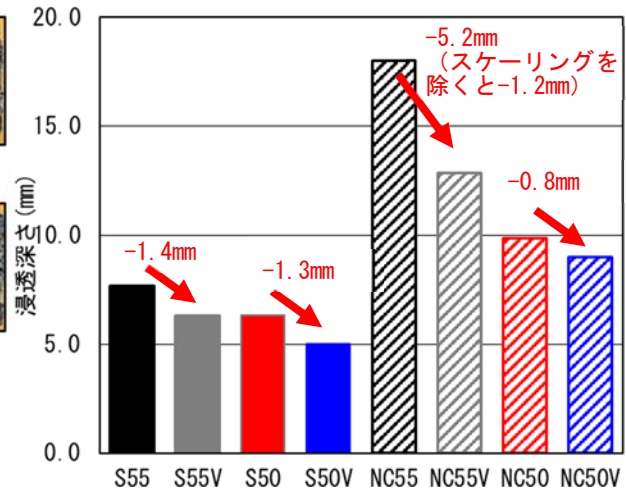


図-7 硝酸銀発色試験結果

セメントのコンクリート構造物よりも鉄筋腐食に対する抵抗性に優れていることが確認できた。

さらに、高粘性AE減水剤を使用した供試体(S50V,S55V,NC50V,NC55V)については、全て塩化物イオン浸透深さが平均で約13%改善される結果となった。この結果は、増粘性により分離抵抗性が向上したため、緻密なコンクリートとなり塩分浸透を抑制したと考えられる。特に、S50と高粘性AE減水剤を使用したS55Vは両供試体ともに平均塩化物イオン浸透深さが6.3mmとなり、本稿では高粘性AE減水剤の効果は水セメント比に換算して5%程度と大きな効果を確認した。

4. まとめ

本研究では、ごみ熔融スラグ細骨材を使用したコンクリートに対して水道水または食塩水を用いて凍結融解試験を実施し、高粘性AE減水剤の使用によるスケーリング量および塩化物イオン浸透深さについて影響を明らかにした。

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 高粘性AE減水剤を使用することにより、ごみ熔融スラグ細骨材を使用したコンクリートのスケーリングを抑制することを確認した。
- 2) ごみ熔融スラグ細骨材を使用したコンクリートに凍結融解試験を実施した場合、部分的なポプアウトが確認された。
- 3) ごみ熔融スラグを使用したコンクリートのスケーリングを抑制するためには、水セメント比を小さくすることが有効であることを確認した。
- 4) 食塩水を使用した凍結融解試験後、ごみ熔融スラグを使用したコンクリートの塩化物イオン浸透深さは、普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも減少する傾向を示した。この結果は、ごみ熔融スラグを使用したコンクリートに高炉セメントB種を

使用したことが大きく影響したと考える。

- 5) 普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種を使用したコンクリートに対して高粘性 AE 減水剤を添加することにより、塩化物イオン浸透深さが小さくなる傾向を確認した。そのため、海岸に隣接する寒冷地のコンクリート構造物や凍結防止剤を散布する道路付近のコンクリート構造物に対して高粘性 AE 減水剤を使用することで、凍結融解作用と塩害の複合劣化による鉄筋腐食が発生しにくくなる可能性を示した。

謝辞：本研究の遂行にあたり材料提供を頂いた関係各社に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) ゼロエミッション社会を目指す技術開発委員会 廃棄物・溶融スラグ利用技術等専門部会：溶融スラグの有効活用に係わるガイドライン（案），2013.3
- 2) 齊藤丈士，中田善久，菅田雅裕，池永博威：ごみ溶融スラグ細骨材を用いた高性能 AE 減水剤コンクリートのブリーディングに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.121-126，2005
- 3) 河野伊知郎，大畑卓也，松井隆哉：ごみ溶融スラグおよび鉱物質微粉末を用いたコンクリートの基礎的性状，土木学会全国大会第 72 回年次学術講演会，V-078，2017
- 4) 河野伊知郎，中嶋清実，齊藤和秀，林孝明：ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.94-99，2012
- 5) 柏崎健輔，佐藤重悦，城門義嗣，加賀谷誠：ごみ溶融スラグをリサイクル使用したコンクリートの凍結融解特性と品質改善に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1435-1440，2005
- 6) 佐々木肇，寺谷俊明，榊原純一，喜多達夫：都市型廃棄物溶融スラグを細骨材に用いたコンクリートの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.319-324，2001
- 7) 米川尚希，河野伊知郎，大畑卓也，山本貴正，松井隆哉：鉱物質微粉末によるごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状改善，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，V-150，2019