

論文 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスケーリングに与える粒度分布の影響

山内 守*1・中溝 翔*2・藤井 隆史*3・綾野 克紀*4

要旨: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、AE 剤を用いなくても高い凍結融解抵抗性が得られることが知られている。本研究では、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのスケーリングに、粒度分布が与える影響について検討を行った。その結果、製造工場によらず、粒度の細かい高炉スラグ細骨材ほど、スケーリングを抑制する効果が高いこと、また、粒度の粗い高炉スラグ細骨材であっても、それを細かく粉砕することで、ふるいによって分けられた細かな粒度の高炉スラグ細骨材と同様の効果を持つことが分かった。さらに、長い期間水中養生を行うことで、スケーリングを抑制する効果が大きくなることが分かった。

キーワード: 高炉スラグ細骨材, 凍結融解, スケーリング, 粒度, 養生期間

1. はじめに

積雪寒冷地域において、凍結融解作用は、コンクリート構造物の耐久性を下げる劣化要因である。凍結融解作用による劣化現象は、スケーリング、ポップアウト、ひび割れ、崩壊の4つに大きく分けられる。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、これまでに JIS A 1148: 2010「コンクリートの凍結融解試験方法 (A 法)」によって試験を行っても、AE 剤を用いることなく、高い耐久性指数が得られることが知られている¹⁾。本研究は、凍結融解作用による劣化現象の中でも特にスケーリングを対象とし、高炉スラグ細骨材を用いることによる改善効果の確認と、その効果に与える高炉スラグ細骨材の品質の影響を調べたものである。

コンクリートのスケーリングを試験する方法としては、ASTM C 672 の方法や、それに準拠した JSCE-K 572-2013「けい酸塩系表面含浸材の試験方法 (案)」に示されるスケーリングに対する抵抗性試験、小山田らのモルタル小片を用いた試験方法²⁾等がある。本研究では、JIS A 1148: 2010 による凍結融解試験時にコンクリートの質量減少を測定することでコンクリートのスケーリングを調べ、小山田らの提案するモルタル小片を用いた試験によって、高炉スラグ細骨材がコンクリートのスケーリングに与える影響を調べた。その結果、製造工場によって高炉スラグ細骨材がコンクリートのスケーリングに与える効果が異なること、製造工場によらず細かな粒度の高炉スラグ細骨材ほど、スケーリングを抑制する効果が高いこと、また、粗い粒度の高炉スラグ細骨材であっても、それを細かく粉砕したものは、ふるいによって分けられた細かな粒度の高炉スラグと同様な効果をもつこ

と等を実験によって明らかとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

高炉スラグ細骨材は、4 つの異なる工場で製造されたものを用いた。これらの工場で作成された高炉スラグ細骨材の粒度分布を図-1 に示す。粗粒率の小さいものから、A 工場製 (表乾密度: 2.77g/cm³, 吸水率: 0.69%, 粗粒率: 2.14), B 工場製 (表乾密度: 2.73g/cm³, 吸水率: 1.40%, 粗粒率: 2.61), C 工場製 (表乾密度: 2.70g/cm³, 吸水率: 2.06%, 粗粒率: 2.71), D 工場製 (表乾密度: 2.69g/cm³, 吸水率: 3.08%, 粗粒率: 3.50) である。また、粒度分布による影響を調べるために、各工場のスラグを図-2 に示す JIS A 5011-1: 2013 に規定される BFS1.2 の粒度分布の最も粗いもの (粗粒率: 2.68) 中間のもの (粗粒率: 2.09) および細かいもの (粗粒率: 1.50) に粒度調整したものを用いた。さらに、粒径の影響を調べるために、0.15mm 以下, 0.15~0.3mm, 0.3~0.6mm, 0.6~1.2mm, 1.2mm 以上の各粒径に分けたものを用いた。比較のために細骨材に、硬質砂岩砕砂 (表乾密度: 2.64g/cm³, 吸水率: 2.00%, 粗粒率: 3.02) も用いた。セメントは、普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm³, ブレーン値: 3,350cm²/g) を、コンクリートの粗骨材には、硬質砂岩砕石 (最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.74g/cm³, 吸水率: 0.53%) を用いた。

本実験に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリートの水セメント比は 35% で、単位水量は 175kg/m³ である。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤、消泡剤および増粘剤を用いた。

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科資源循環学専攻

*3 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				高性能 減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	増粘剤 (C×%)	
			W	C	S					G
					SS	BFS				
35.0	2.0	42.2	175	500	720	0	1,027	0.50	0.01	0.00
					0	755				0.08

SS：硬質砂岩砕砂， BFS：高炉スラグ細骨材

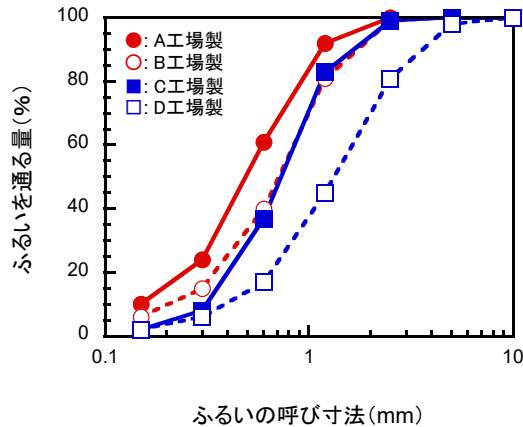


図-1 各工場における高炉スラグ細骨材の粒度分布

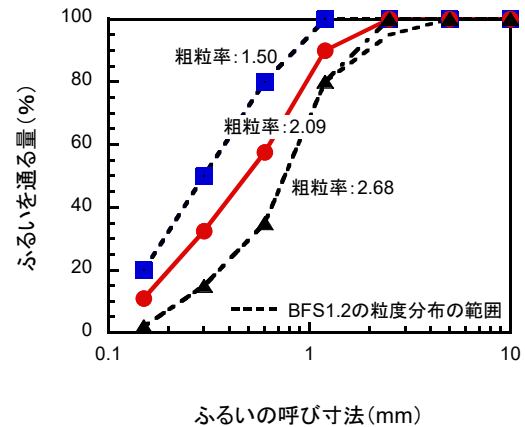


図-2 粒度調整を行った高炉スラグ細骨材の粒度分布

モルタルを用いた実験では、5mm ふるいを用いて練混ぜ直後のコンクリートから採取したモルタル、および、セメント、水、砂を練り混ぜて作製したモルタルの2種類を用いた。セメント、水、砂を練り混ぜて作製したモルタルは、JIS A 1146:2007 に示される配合を参考に、水：セメント：細骨材を質量比で、1：2：4.5 の割合で用いた。なお、粒径が 0.15mm 以下、0.3mm 以下および 0.15～0.3mm の高炉スラグ細骨材のみを用いる場合には、作業性を確保するためにセメントに対して質量比で 2%の高性能減水剤を添加している。

2.2 コンクリートの凍結融解試験

コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148: 2010 に規定される水中凍結融解試験方法（A 法）に準拠して行った。なお、試験水には、質量パーセント濃度で 10%の塩化ナトリウム水溶液を用い、供試体には、100mm×100mm×400mm の角柱供試体を用いた。供試体は、コンクリートの打込みから 24 時間は型枠内で養生を行い、脱型後から試験開始まで水中で養生を行った。

2.3 モルタル小片を用いた凍結融解試験

モルタル小片を用いた凍結融解試験には、図-3 に示す一辺が 10mm の立方体のモルタル小片を用いた。モルタルは、40mm×40mm×160mm の型枠に打ち込み、20±2℃の室内で 24 時間後まで型枠内で養生を行った後脱型し、材齢 7 日および 56 日まで水中養生を行った後に、ダイヤモンドカッターを用いて一辺が 10mm のモルタル小片を作製した。ポリプロピレン製の容器に、モルタル小片 5 個（約 14g）と試験水 100mL を入れ、3 時間で-20℃まで

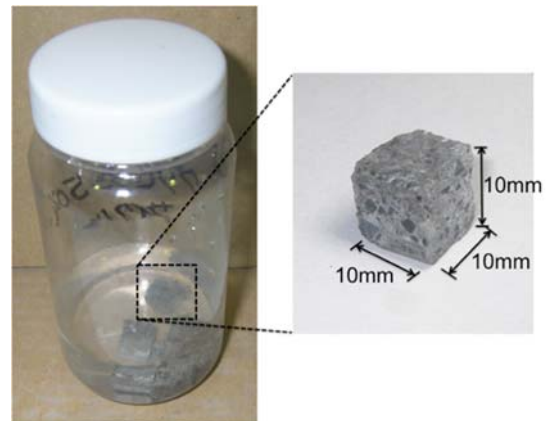


図-3 モルタル小片を用いた凍結融解試験の試験方法

降温させ 9 時間保持して凍結をさせた後、3 時間で 30℃まで昇温させ 9 時間保持して融解させる工程を 1 サイクルとして試験を行った。融解工程終了後に、モルタル小片を取り出し、崩れ落ちた部分を取り除いて質量を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートのスケーリングとモルタル小片の質量変化の関係

図-4 は、水中養生を材齢 7 日まで行ったコンクリートの凍結融解試験における質量変化を示したものである。試験水には、質量パーセント濃度で 10%の塩化ナトリウム水溶液を用いている。これらのコンクリートには、AE 剤および増粘剤を用いていない。質量変化には、コンク

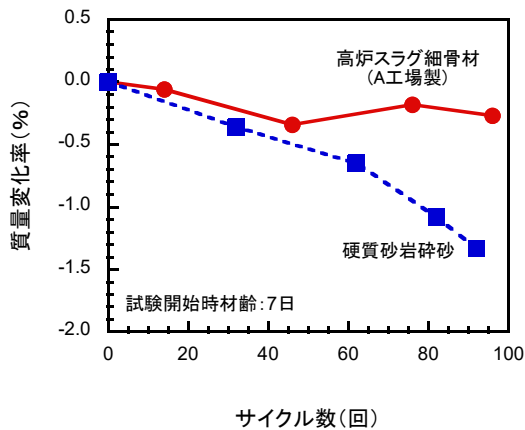


図-4 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解における質量変化



図-5 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験後の表面（凍結融解 99 サイクル後）

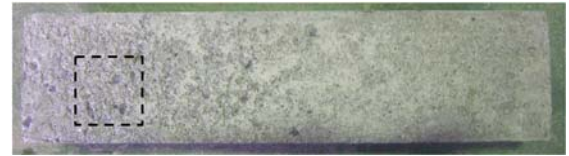


図-6 硬質砂岩砕砂を用いたコンクリートの凍結融解試験後の表面（凍結融解 92 サイクル後）



図-7 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの拡大写真

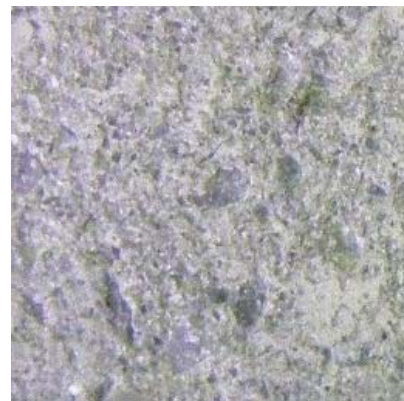


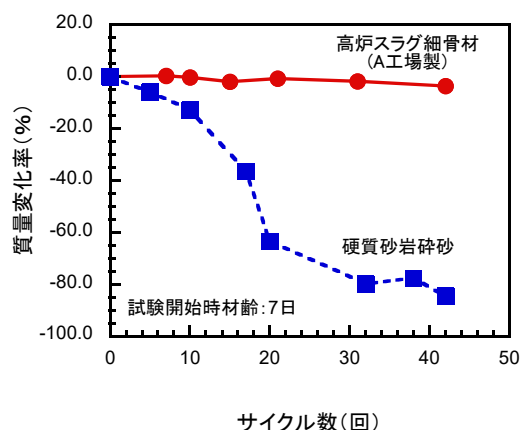
図-8 硬質砂岩砕砂を用いたコンクリートの拡大写真

リート表面に生じるスケーリングによる質量の減少と、コンクリートの表面や内部に生じる微細ひび割れ内に水が浸入することによる質量の増加の2つの要因が含まれることになるが、細骨材にA工場製の高炉スラグ細骨材を用いたものは、硬質砂岩砕砂を用いたものに比べて質量変化が小さいことが分かる。図-5 および図-6 は、それぞれ、図-4 に示すA工場製の高炉スラグ細骨材および硬質砂岩砕砂を用いたコンクリートの表面を撮影したものである。高炉スラグ細骨材を用いたものは、凍結融解の繰返しを99サイクル行った後の結果で、硬質砂岩砕砂を用いたものは、92サイクル行った後の結果である。また、図-7 および図-8 は、それぞれ、図-5 および図-6 の点線で囲まれた部分を拡大したものである。これらの図より、細骨材に硬質砂岩砕砂を用いたコンクリートは、粗骨材が現れる程度スケーリングが生じていることが分かる。一方、細骨材にA工場製の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、表面の損傷はほとんど生じておらず、スケーリングが生じにくいことが分かる。

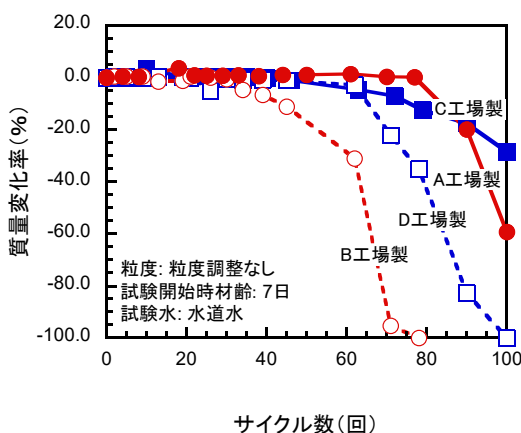
図-9 は、図-4 に示すコンクリートから5mm ふるいを用いて採取したモルタルにより作製したモルタル小片

の凍結融解試験の結果である。試験水には、質量パーセント濃度で10%の塩化ナトリウム水溶液を用いている。スケーリングの大きい硬質砂岩砕砂を用いたコンクリートから作製したモルタル小片は、凍結融解作用を40サイクル繰返し後に質量が80%減少している。一方、スケーリングの小さいA工場製の高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートから作製したモルタル小片では、凍結融解作用の繰返しを40サイクル以上行っても質量変化が小さいことが分かる。図-10 は、図-9 に示すモルタル小片を凍結融解40サイクル行った時点での破壊状況を示している。硬質砂岩砕砂を用いたモルタルは、凍結融解の作用を40サイクル繰返し後には、ほとんど崩れているのに対し、A工場製の高炉スラグ細骨材を用いたモルタル小片では、大きな角欠けはしておらず、凍結融解抵抗性が高いことが分かる。

図-4 から図-8 で示したコンクリートの凍結融解試験で生じるスケーリングと、図-9 および図-10 で示したモルタル小片を用いた凍結融解試験の結果は、概ね同様の傾向を示している。モルタル小片を用いた凍結融解試験を用いれば、コンクリートに生じるスケーリングの



図－9 高炉スラグ細骨材を用いたモルタル小片の凍結融解による質量変化



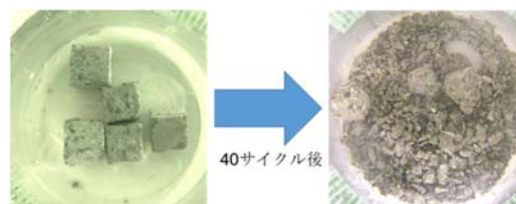
図－11 高炉スラグ細骨材の製造工場による差 (水道水を用いた場合)

傾向が把握できると考えられる。

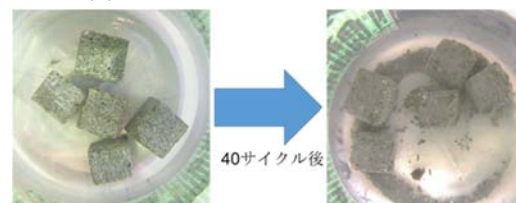
3.2 高炉スラグ細骨材の製造工場による差

図－11 は、製造工場の異なる 4 種類の高炉スラグ細骨材を用いたモルタル小片の凍結融解試験結果を示したものである。モルタルの配合は、水、セメントおよび細骨材を、質量比で 1 : 2 : 4.5 とした JIS A 1146: 2007 に示されるものである。これらの結果は、水中養生を材齢 7 日まで行った後、直ちに試験を開始したものである。なお、試験水には、水道水を用いている。この図より、高炉スラグ細骨材の製造工場によって、モルタルの質量変化に差があることが分かる。一方、図－12 は、試験水に質量パーセント濃度で 10%の塩化ナトリウム水溶液を用いて試験を行った結果である。いずれの製造工場のものも、図－11 に示した水道水を用いたものに比べ、早期に質量が減少していることが分かる。

図－13 は、製造工場の異なる 4 種類の高炉スラグ細骨材を、図－2 に示した JIS A 5011-1:2013 に規定される BFS1.2 の最も粗い粒度分布に調整した高炉スラグ細骨材を用いたモルタル小片の凍結融解試験を行った結果である。図－12 に示す粒度調整を行わないものに比べて、

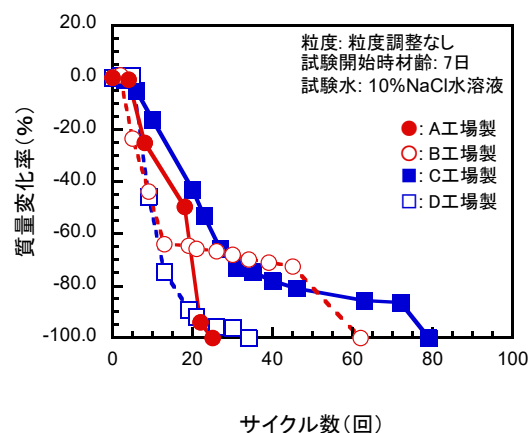


(a)硬質砂岩砕砂を用いたモルタル

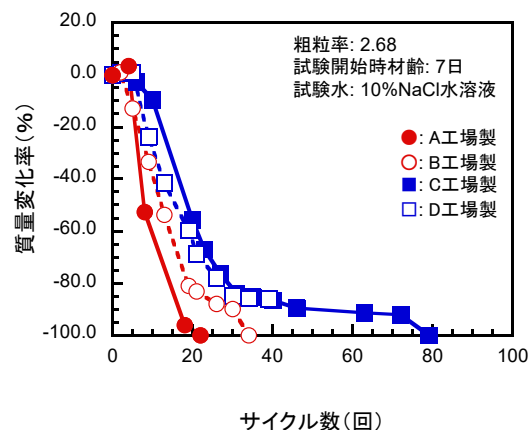


(b)高炉スラグを用いたモルタル

図－10 モルタル小片の破壊状況



図－12 高炉スラグ細骨材の製造工場による差 (塩水を用いた場合)



図－13 最も粗い粒度分布に粒度調整をした高炉スラグ細骨材の結果

いずれの製造工場のものであっても、早期に質量が減少していることが分かる。一方、図－14 は、図－2 に示した JIS A 5011-1: 2013 に規定される BFS1.2 の中間の粒度分布に調整した高炉スラグ細骨材を用いた結果である。いずれの製造工場のものも、細かい粒径のものが增多することで、図－13 に示した粗い粒度分布の結果に比べて質量減少率が小さくなっていることが分かる。さらに、図

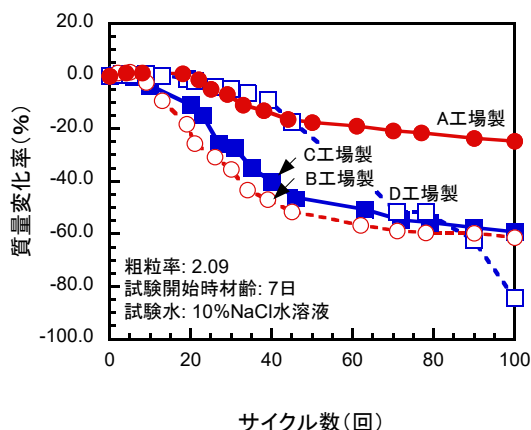


図-14 中間の粒度分布に粒度調整をした高炉スラグ細骨材の結果

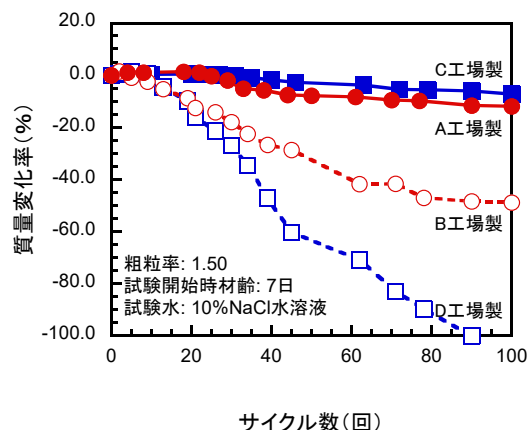


図-15 最も細かい粒度分布に粒度調整した高炉スラグ細骨材の結果

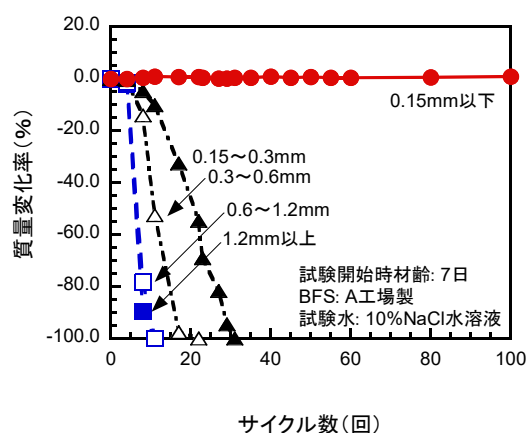


図-16 粒径の影響（試験開始時材齢 7 日の場合）

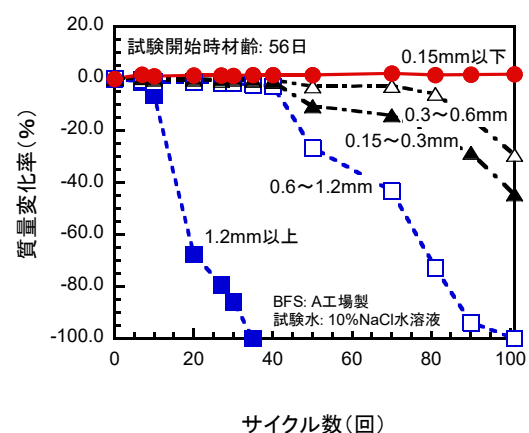


図-17 粒径の影響（試験開始時材齢 56 日の場合）

図-15 は、図-2 に示した JIS A 5011-1: 2013 に規定される BFS1.2 の最も細かい粒度分布に調整した高炉スラグ細骨材を用いた結果である。A 工場製および C 工場製のものは、凍結融解作用の繰返しを 100 サイクル行った後でも、質量変化がほとんど生じていない。高炉スラグ細骨材の製造工場による差もあるが、粒度分布が与える影響は、より大きいと考えられる。

3.3 粒径および養生の影響

図-16 は、A 工場製の高炉スラグ細骨材を 0.15mm 以下、0.15~0.3mm、0.3~0.6mm、0.6~1.2mm、1.2mm 以上にふるい分け、それぞれの粒度の高炉スラグ細骨材を用いたモルタル小片の凍結融解試験結果を示したものである。試験は、水中養生を材齢 7 日まで行った後、直ちに開始している。なお、試験水には、質量パーセント濃度で 10%の塩化ナトリウム水溶液を用いている。この図より、大きな粒径のもののほど、早期に質量が小さくなることが分かる。一方で、粒径が 0.15mm 以下の細かいものでは、凍結融解の繰返しを 100 サイクル行った後でも、質量変化はほとんど生じていない。図-17 は、図-16 に示したモルタルを、材齢 56 日まで水中養生を行った後に、凍結融解試験を行った結果である。長く養生を行う

ことで、大きな粒径のものも、質量減少率が小さくなることが分かる。一方、図-18 は、1.2mm 以上の粒をミルで粉砕し、0.3mm 以下にしたものを用いたモルタルの凍結融解試験の結果である。試験は、水中養生を材齢 7 日まで行った後、直ちに開始している。いずれの工場で作られた高炉スラグ細骨材の大きな粒も、細かくすりつぶすことで、凍結融解による質量減少が小さくなっている。高炉スラグ細骨材には水硬性があることが知られており³⁾、圧縮強度は長期にわたって増進することや、中性化がわずかながら抑制されることが報告されている⁴⁾。大きな粒径のものは、骨材表面で生じる反応に時間がかかるため、養生期間を長くとり、細かくして表面積を増やし、高炉スラグ細骨材が反応しやすくさせることで、骨材とペーストの界面が強固になり、スケーリングを抑制する効果が高まるものと考えられる。

図-19 は、試験開始時材齢が高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を相対動弾性係数で示した結果である。細骨材には、A 工場製の高炉スラグ細骨材を用い、AE 剤は用いていない。混和剤には、高性能減水剤、消泡剤および増粘剤を用いている。いずれの試験開始時材齢の場合でも、凍結融解作用

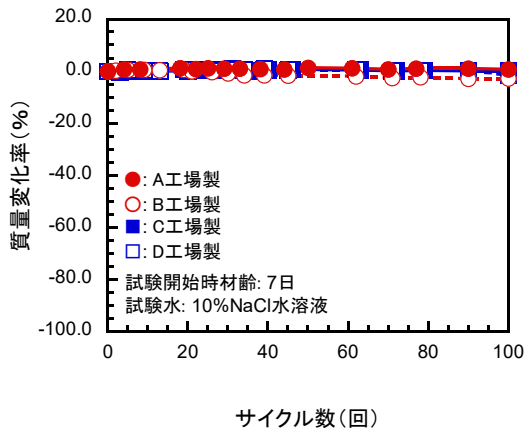


図-18 粗い粒を粉砕して用いた結果

を 300 サイクル繰り返した後の相対動弾性係数は、95%以上になっている。一方、図-20 は、図-19 に示した高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果を質量変化率で示したものである。材齢 7 日で試験を開始したものは、凍結融解の繰り返しを 300 サイクル行った後には、質量が 3.5%程度減少しているのに対し、材齢 28 日で試験を開始した場合には、1.0%以下にまで小さくなっている。相対動弾性係数で示した凍結融解抵抗性は差が小さい場合でも、質量変化率で示した凍結融解抵抗性では、養生期間による影響があるといえる。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、養生期間を長くにとれば、粒径の大きい高炉スラグ細骨材が反応することで、凍結融解抵抗性がより改善されと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめ、本論文の結論とする。

- 1) 粒度の細かい高炉スラグ細骨材ほど、コンクリートのスケーリングを抑制する効果が高い。
- 2) 長い期間水中養生を行うことで、粗い粒度の高炉スラグ細骨材もスケーリングを抑制する効果が大きくなる。
- 3) 粒度の粗い高炉スラグ細骨材であっても、それを細かく粉砕したものは、ふるいによって分けられた細かい粒度の高炉スラグと同様な効果をもつ。
- 4) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、JIS A 1148: 2010 に示される凍結融解試験方法 (A 法) によって試験を行った場合、相対動弾性係数に与える材齢による差が小さい場合であっても、スケーリングは、長期間にわたって水中養生を行ったものの方が小さくなる。

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議

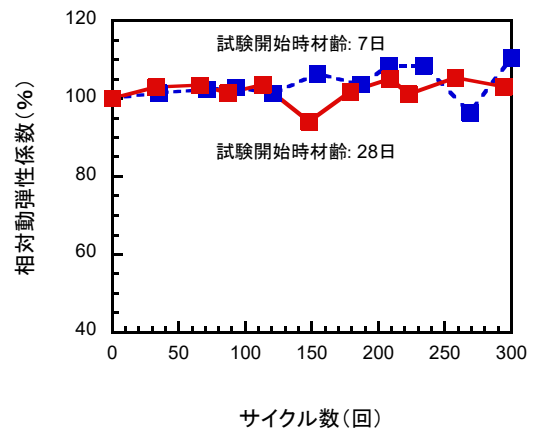


図-19 養生期間がコンクリートの相対動弾性係数に与える影響

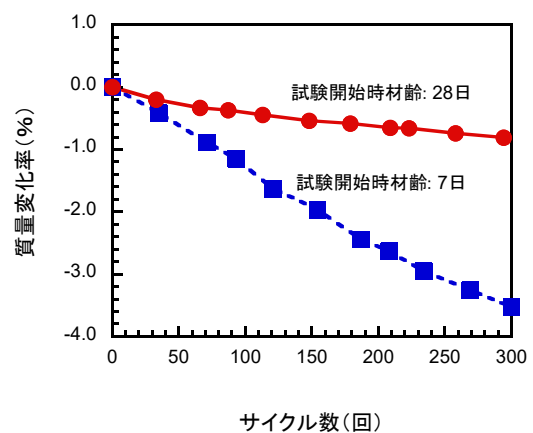


図-20 養生期間がコンクリートの凍結融解による質量変化に与える影響

の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人: NEDO) によって実施された。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 4, pp.417-427, 2014. 12
- 2) 小山田哲也, 羽原俊祐, 高橋拓真, 高橋俊介: スケーリング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No.1, pp.935-940, 2011. 6
- 3) 光藤浩之, 吉澤千秋, 高橋智雄, 木之下光男: 高炉スラグ細骨材の固結防止技術, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.87-92, 2004. 6
- 4) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009. 6