

論文 下水汚泥溶融スラグを用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究

加藤 教弘^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正和^{*3}・藤田 浩史^{*4}

要旨： 本研究は、下水汚泥溶融スラグ（以下溶融スラグとする）がコンクリートの耐凍害性に与える影響を把握することを目的とした。実験は、養生条件、AE 剤の有無、溶融スラグ置換率を変え、凍結融解試験や気泡間隔係数の測定などを行った。その結果 AE 剤を添加しない場合は、溶融スラグを混和することにより、気泡間隔係数が小さくなり耐久性指数が上昇することが確認された。また、AE 剤を添加した場合は、溶融スラグを混和しても性状に大きな変化がないことが確認された。

キーワード： 下水汚泥溶融スラグ、凍結融解、気泡間隔係数、SEM

1. はじめに

栃木県内では、流域下水道 7 処理場と、公共下水道 34 処理場が稼動しており、汚水処理過程で年間 73000 トン（平成 16 年度）の下水汚泥を排出している。さらに近年、下水道普及率の増加に伴い、下水汚泥排出量も増加しており、今後更に増加傾向にあると考えられる。

このような背景から、栃木県では、下水汚泥の有効利用を積極的に進めており、下水汚泥資源化工場では、溶融スラグを製造し、減容化、再利用化を推進している。また、溶融スラグの有効利用促進のため、平成 15 年 3 月に「栃木県エコスラグ有効利用促進指針」を策定した。栃木県では、本指針に基づき、溶融スラグの利用促進を図っている。また、平成 18 年 6 月に JIS A 5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」および JIS A 5032「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ」が日本工業標準調査会より発行された。

下水汚泥溶融スラグとは、下水汚泥焼却灰を 1200℃以上の高温で溶融し、冷却固化したものである。水中で冷却固化された溶融スラグは、粒径が通常 5mm 以下と細

かいため、砂の代替材料として埋め戻し材やコンクリート用細骨材への適用が期待されている。

既往の研究¹⁾より、溶融スラグを細骨材に対し置換したコンクリートの様々な性質について検討した。その結果、溶融スラグを細骨材に対し 30%程度まで置換した場合、コンクリートの諸性状に問題ないことが確認された。さらに、無混和のコンクリートと比較した場合、条件によっては耐凍害性に優れる結果を得た。

本研究では、良好な性状が確認されている置換率 30%までの範囲で溶融スラグを段階的に置換し、溶融スラグがコンクリートの耐凍害性に与える影響を把握することを目的として実験を行った。

2. 実験 A：AE 剤無添加実験

2.1 実験概要

(1) 概要

ここでは、溶融スラグがコンクリートの耐凍害性に与える影響をより顕著に把握するため、AE 剤を添加せずに、溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートを作製し、凍結融解試験を行った。

表－1 使用材料

種別	名称	記号	密度 (g/cm ³)	粉末度 (cm ² /g)	吸水率 (%)	実積率 (%)	F. M.
水	上水道水	W	1.00	—	—	—	—
結合材	普通ポルトランドセメント	C	3.15	3,260	—	—	—
細骨材	鬼怒川産川砂	RS	2.56	—	2.52	67.7	2.93
	下水汚泥溶融スラグ	MS	2.64	—	0.18	56.0	3.80
粗骨材	碎石 5 号	G5	2.64	—	0.38	56.8	6.45
	碎石 6 号	G6	2.66	—	0.49	54.9	7.07
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	SP	1.05	—	—	—	—
	アルキルアリルスルホン酸系 AE 剤	AE	1.05	—	—	—	—

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻（正会員）

*2 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博（正会員）

*3 宇都宮大学 工学部建設学科助教 工博（正会員）

*4 三菱マテリアル株式会社 セメント事業カンパニー 工修

表-2 使用配合

配合名	W (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	溶融スラグ置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	RS	MS	G
MS0	169	46.9	47.7	0	169	360	820	-	931
MS10				10	169	360	738	89	931
MS20				20	169	360	656	178	931
MS30				30	169	360	574	267	931

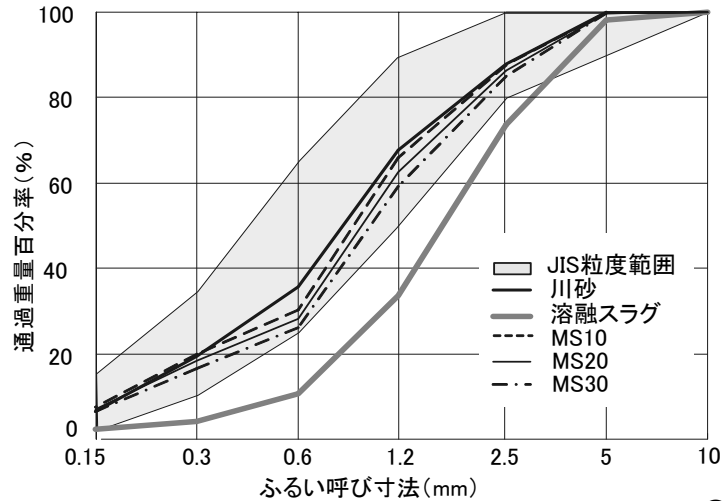


図-1 溶融スラグと川砂の粒度分布

(2) 使用材料

使用材料を表-1に示す。使用した溶融スラグは、環告46号²⁾に準拠し、溶出試験を行った結果、全項目でJIS A 5031に記載された基準を満足していることが確認されたものである。また、モルタルバー法 (JIS A 1146) によるアルカリシリカ反応性試験においても無害と判定されている。しかしながら JIS A 5031 に定められている粒度の規定のみ満足していない。本実験で用いた溶融スラグと川砂の粒度分布を図-1に示す。

(3) 配合条件

配合表を表-2に示す。溶融スラグ置換率0%を基本配合とし、その配合条件は、単位水量を169kg/m³、細骨材率を47.7%、G5とG6の混合比を1:1、水セメント比を46.9%とし、設計基準強度は30N/mm²とした。また、溶融スラグを細骨材に対して体積比で内割置換し、置換率を0、10、20、30%の4水準とした。本実験で用いた川砂と溶融スラグを合成した粒度分布を図-1に示す。目標スランプはSL=8±2cmとし、高性能減水剤添加量の調整を適宜行った。

(4) 養生条件

本研究では蒸気養生と水中養生の2種類の養生を行った。蒸気養生の条件は、前置き1.5時間、温度上昇20℃/h、最高温度65℃、最高温度保持時間3時間である。以後自然放冷し、蒸気養生終了後、脱型し、試験実施材齢14日まで気中養生した。水中養生の条件は、20℃で行い

表-3 空気量試験結果

養生方法	溶融スラグ置換率(%)	Air(%)
蒸気養生	0	3.0
	10	4.0
	20	3.5
	30	4.2
水中養生	0	2.8
	10	4.3
	20	5.8
	30	5.3

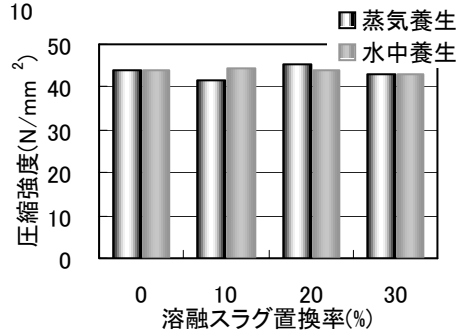


図-2 圧縮強度試験結果

蒸気養生と同材齢で比較するため14日を材齢とした。

(5) 試験項目

ここでは、下記に示した5項目について実験を行った。以下に試験方法を示す。

- 1 空気量試験：JIS A 1128に準拠
- 2 圧縮強度試験：JIS A 1108に準拠
- 3 凍結融解試験：JIS A 1148に準拠
- 4 気泡間隔係数：ASTM C 457に準拠
- 5 走査型電子顕微鏡による観察

2.2 実験結果

(1) 空気量試験結果

空気量試験結果を表-3に示す。溶融スラグを混和する事で、空気量が増加する傾向が確認された。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験には、Φ10cm×20cmの円柱供試体を用いた。圧縮強度試験結果を図-2に示す。いずれの配合においても、溶融スラグ置換率に関わらずほぼ同等の圧縮強度を示した。

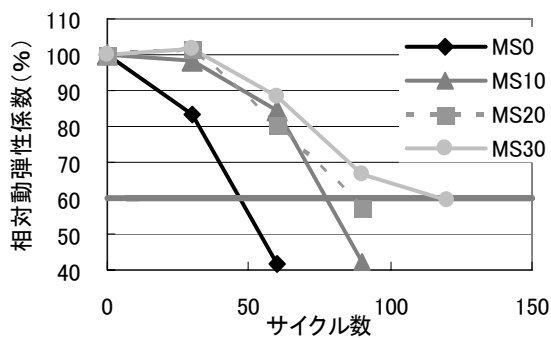


図-3 蒸気養生における相対動弾性係数の変化

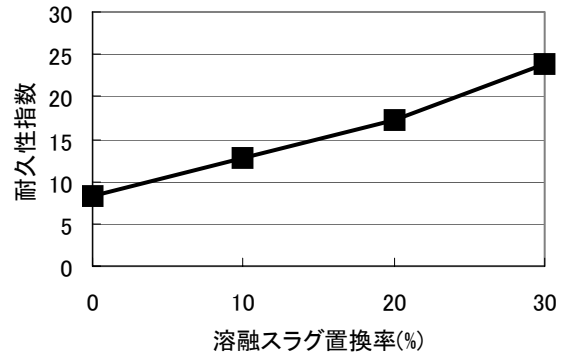


図-4 耐久性指数と溶融スラグ置換率の関係(蒸気養生)

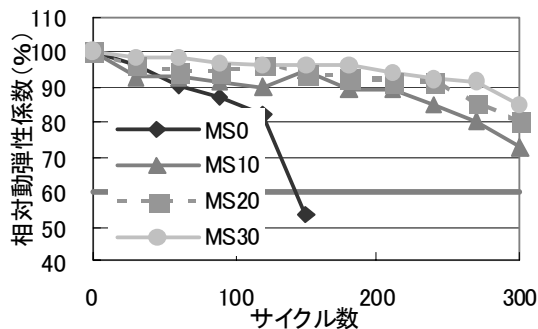


図-5 水中養生における相対動弾性係数の変化

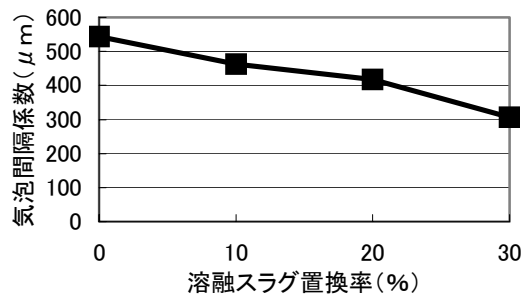


図-6 気泡間隔係数と溶融スラグ置換率の関係

(3) 凍結融解試験結果

蒸気養生におけるコンクリートの相対動弾性係数の変化を図-3、耐久性指数と溶融スラグ置換率の関係を図-4に、水中養生におけるコンクリートの相対動弾性係数の変化を図-5に示す。

一般的に、蒸気養生が行われたコンクリートはマイクロクラックが発生し、細孔構造が粗大化するなどの原因により、凍結融解抵抗性は低くなる傾向がある。

図-3より、溶融スラグ無置換の配合は、60サイクルで相対動弾性係数が60%を下回っているため凍結融解抵抗性の非常に低いコンクリートであることが分かる。図-4より、低いレベルではあるが溶融スラグ無置換のもの比べると溶融スラグ置換率の増加により、耐久性指数が改善されていることが確認された。

また、図-5より水中養生において溶融スラグ無置換の配合では、150サイクルで相対動弾性係数が60%を下回ったが、溶融スラグを混和したものは300サイクルで60%を下回っておらず、高い耐久性を示した。さらに、溶融スラグを置換に伴い、相対動弾性係数が高い傾向を示している。よって、水中養生においても溶融スラグ置換率の増加により、凍結融解抵抗性が向上したことが確認された。

以上より、養生条件によらず溶融スラグ置換率の増加により、耐凍害性が改善される傾向が確認された。

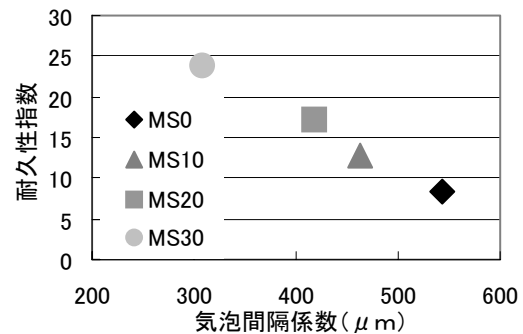


図-7 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

(4) 気泡間隔係数

気泡間隔係数と溶融スラグ置換率の関係を図-6に、気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-7に、気泡径分布図を図-8に示す。

一般的に、AE剤を用いない場合、コンクリートの内部の空気はエントラップトエアだけとなるため、気泡間隔係数は400~700μm程度となると考えられる。図-6より溶融スラグ無置換では500~600μm程度の大きい気泡間隔係数となったが、溶融スラグ置換率の増加に伴い、気泡間隔係数が小さくなる傾向が確認された。また、図-7より気泡間隔係数が小さくなるにつれて耐久性指数が向上することが確認された。また、図-8より気泡径の分布を調べた結果、溶融スラグ置換率の増加に伴い耐凍害性に有効である気泡弦長200μm以下が多く混入

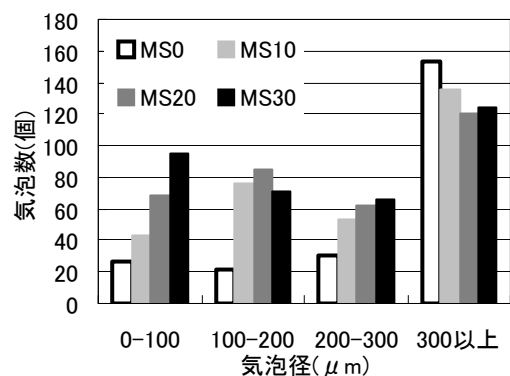


図-8 気泡径分布図

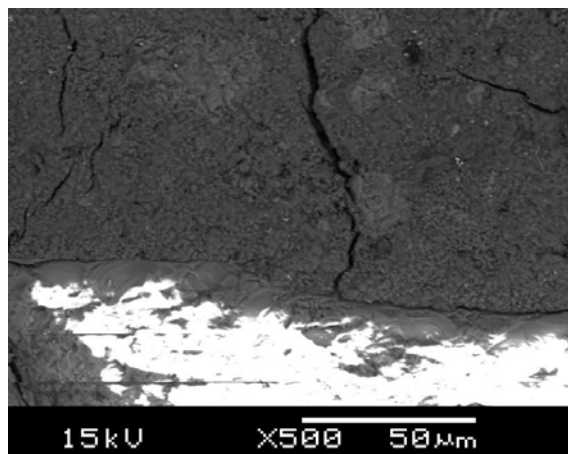


写真-1 溶融スラグとペースト部の界面写真

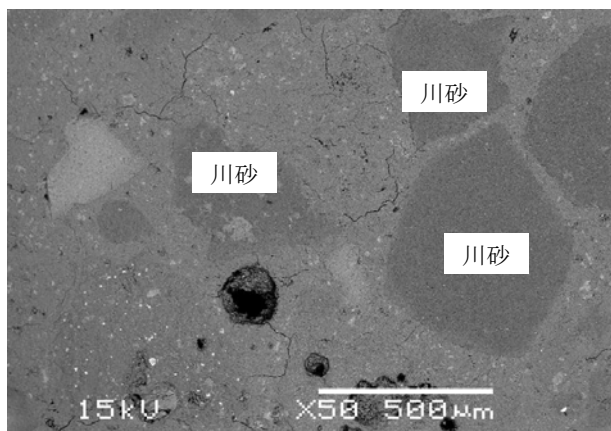
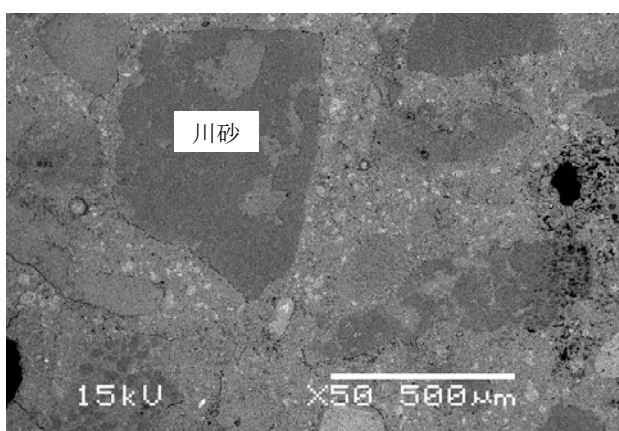


写真-2 溶融スラグ無置換の断面写真（左：水中養生 右：蒸気養生）

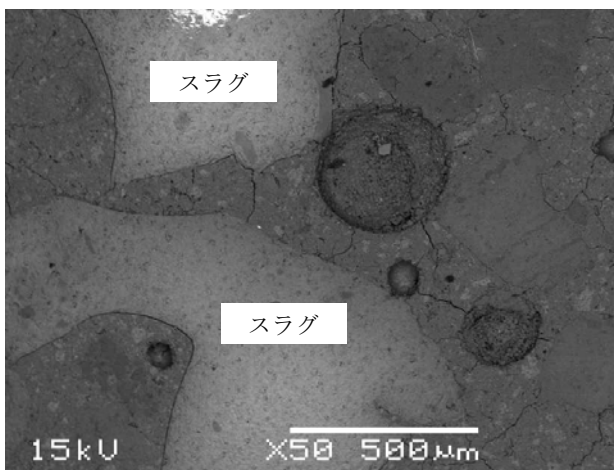
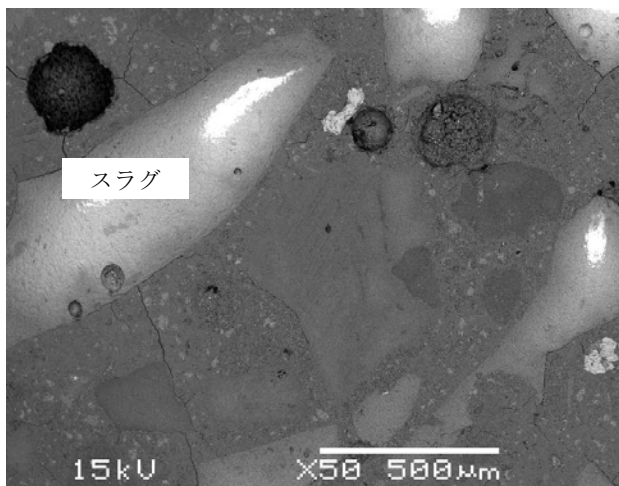


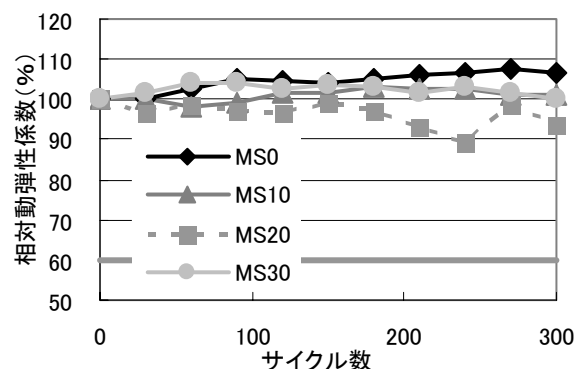
写真-3 溶融スラグ置換率 30%の断面写真（左：水中養生 右：蒸気養生）

される傾向が確認された。この要因として、溶融スラグの粒形は角張っており針状であるため、練混ぜの際にエントラップトエアを分断し、微細な気泡を巻込むことが考えられるが今後の検討を要する。

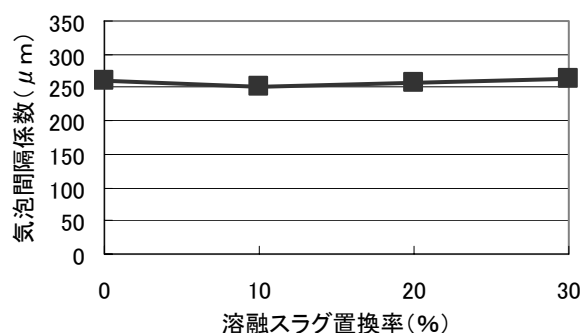
(5) 走査型電子顕微鏡による観察

溶融スラグの混和による耐凍害性の改善の要因として、溶融スラグが何らかの反応をし、溶融スラグの界面が活性化され付着性状が改善されることが予想された

ため、走査型電子顕微鏡を用いて細骨材及び溶融スラグのペースト部との界面付近を観察した。溶融スラグ置換率 30%での溶融スラグとペースト部の界面写真を写真-1、溶融スラグ無置換の断面写真を写真-2、溶融スラグ置換率 30%の写真を写真-3 に示す。写真-1 より、本実験では溶融スラグとペースト部の界面においては特に反応は確認されず、界面においてマイクロクラックが多数発生している事が確認された。写真-2, 3 より蒸気



図－9 蒸気養生における相対動弾性係数の変化



図－10 耐久性指数と溶融スラグ置換率の関係

養生では水中養生よりもマイクロクラックが多く発生することが確認された。

(6) 実験 A に関する考察

実験 A より溶融スラグの混和により耐凍害性が改善される傾向が確認された。その要因として溶融スラグの吸水率が考えられる。一般的に、吸水率が低い骨材を使用することで凍結融解抵抗性が向上することが知られており³⁾、今回用いた溶融スラグの吸水率は 0.18% と非常に低いため耐久性がやや向上したものと思われる。

また、溶融スラグの混和により空気量が増大する傾向があり、これも要因の 1 つと考えられる。溶融スラグの角張った粒形により、微細な気泡が増大し気泡間隔係数が小さくなることが推定されるが今後の検討を有する。

3. 実験 B : AE 剤添加実験

3.1 実験概要

(1) 概要

実験 B では、AE 剤を混和したコンクリートにおける溶融スラグの耐凍害性に与える影響を把握するため実験を行った。なお、実験 A において水中養生において高い耐久性を有することが確認された。そこで溶融スラグの蒸気養生での耐凍害性を把握するため、ここでは養生方法を蒸気養生とした。

(2) 使用材料

使用材料は、2.1(2)と同様である。

(3) 使用配合

使用配合は、2.1(3)と同様である。ただし、目標空気量は $\text{Air}=4.5\pm1.5\%$ とし、AE 剤添加量の調整を適宜行った。

(4) 養生条件

養生条件は 2.1(4)と同様である。

(5) 試験項目

ここでは、下記に示した 3 項目について実験を行った。試験方法を以下に示す。

- 1 空気量試験：JIS A 1128 に準拠
- 2 凍結融解試験：JIS A 1148 に準拠

表－4 空気量試験結果

養生方法	溶融スラグ置換率(%)	Air(%)	AE剤添加率(%)
蒸気養生	0	6.0	1.2
	10	5.6	1.2
	20	5.7	0.6
	30	6.0	0.6

3 気泡間隔係数：ASTM C 457 に準拠

3.2 実験結果

(1) 空気量試験結果

空気量試験結果を表－4 に示す。すべての配合において、目標値を満足した結果となった。また、AE 剤添加量は、溶融スラグ置換率の増加に伴い低減される傾向にあった。

(2) 凍結融解試験結果

蒸気養生における相対動弾性係数の変化を図－9 に示す。いずれの配合も、相対動弾性係数 90%以上と高い耐凍害性を示した。

(3) 気泡間隔係数

気泡間隔係数と溶融スラグ置換率の関係を図－10 に、気泡径分布図を図－11 に、気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図－12 に示す。図－10 より、溶融スラグを混和することによる気泡間隔係数の変化はみられなかった。また、図－11 より気泡径分布でも溶融スラグ混和による変化はみられなかった。図－12 から溶融スラグによる明確な傾向はみられず、いずれの配合も高い耐凍害性を有している。

このように、AE 剤を混和した場合に気泡間隔係数などに変化が現れなかった原因として、表－4 に示すように溶融スラグを混和することで、AE 剤添加率が小さくなったことなどが考えられる。一般的に、AE 剤を混和することで $200\mu\text{m}$ 以下の気泡が混入される。そのため、AE 剤添加率が減少した溶融スラグ置換率 20, 30%は $200\mu\text{m}$ 以下の気泡数が減少すると考えられる。しかし、い

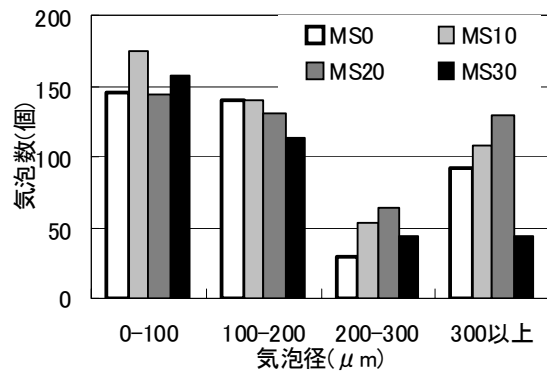


図-11 気泡径分布図

ずれの配合においても、 $200\mu\text{m}$ 以下の気泡数がほぼ一定となった。このことより、AE剤を混和した場合でも溶融スラグを混和する事により、気泡径が $200\mu\text{m}$ 以下の気泡が増加すると考えられる。

4. まとめ

溶融スラグがコンクリートの耐凍害性に与える影響を把握することを目的とした実験を行った結果、以下のような知見が得られた。

- (1) AE剤を添加しない場合は、溶融スラグを混和することにより、溶融スラグ無混和と比較し気泡弦長 $200\mu\text{m}$ 以下の割合が多くなり、それに伴い気泡間隔係数が小さくなる。
- (2) AE剤を添加しない場合は、溶融スラグを混和することにより、溶融スラグ無混和と比較し耐凍害性が改善される。

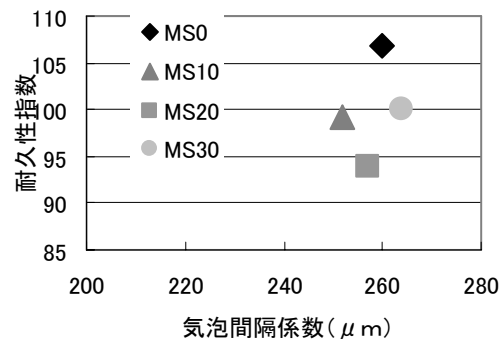


図-12 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

(3) AE剤を混和した場合、溶融スラグを混和すると所要の空気量を得るためのAE剤添加量を低減することが出来る。

(4) AE剤を混和した場合、溶融スラグを混和しても気泡間隔係数などには影響はないが、高い耐凍害性を示す。

参考文献

- 1) 藤田浩史：下水汚泥溶融スラグのコンクリート製品への適用，土木学会栃木会研究発表会要旨，2007
- 2) 環境省：環境省告示第46号「土壤の汚染に係る環境基準について」，1991
- 3) 鎌田卓郎：骨材の吸水率がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.17，No.1，1995