

論文 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

柏崎 健輔*1・佐藤 重悦*2・城門 義嗣*3・加賀谷 誠*4

要旨：シャフト炉式ごみ溶融炉から排出された溶融スラグを用いて、コンクリート用細骨材の一部として使用した場合の耐凍害性の程度を、耐久性指数、質量減少率、コンクリート表面の明度、強度の観点から検討し、さらに、溶融スラグをボールミルを用いて短時間粉砕し、これを用いたモルタルのブリーディング量および強度に基づき溶融スラグの品質改善に関する検討を行なった。その結果、溶融スラグ粒子に内在する欠陥によると思われる耐凍害性および明度の低下が発生すること、また、粉砕加工することによりブリーディング量が減少し、強度増加などの粒子性状の改善が可能となることを明らかにした。

キーワード：溶融スラグ、耐久性指数、強度、明度、ボールミル粉砕、ブリーディング量

1. はじめに

多様化するごみに十分対応できること、ごみ処理後の残渣を資源として全て有効活用できること、最終処分場の延命が図れることおよびダイオキシン対策など環境面においても優れた処理特性を有するなどの観点から、2002年3月にシャフト炉式ガス化溶融炉を有する溶融施設が秋田市総合環境センターに竣工した。これにより年間約15,000tのごみ溶融スラグ(以下、溶融スラグ)が発生すると見積もられている。

溶融スラグを用いたコンクリートの凍結融解試験結果について、溶融方式の違いにより溶融スラグの品質が異なり、ブリーディング量の差により用いたコンクリートの耐凍害性が若干異なることが示されている¹⁾。著者らは、溶融スラグを粉砕して用いることによりモルタルの強度増加が得られることを示した²⁾。

本研究では、秋田市のシャフト炉式ガス化溶融炉から発生する溶融スラグをコンクリート二次製品に活用することを想定し、コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす溶融スラグの粒子性

状の影響やボールミルを用いた粉砕による粒子性状改善効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料、配合およびコンクリートの製造

普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)、最大寸法20mmの碎石(密度 2.68g/cm^3 、吸水率1.24%)、天然砂(密度 2.58g/cm^3 、吸水率3.03%、粗粒率2.72)および秋田市のシャフト炉式ガス化ごみ溶融炉から排出された急冷スラグ(密度 2.80g/cm^3 、吸水率0.40%、粗粒率2.69)を用いた。メタクリル酸系ポリマーを主成分とする高性能減水剤とポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウムを主成分とするAE剤を用いた。

表-1にコンクリートの示方配合を示す。配合設計では、通常のコンクリート製品に用いられる設計基準強度 30N/mm^2 が得られるように、水セメント比44.3%、スランプの範囲 $6.0\pm 1.5\text{cm}$ 、空気量の範囲 $5.0\pm 1.5\%$ を基準とし、細骨材のスラグ置換率を質量比で0、30、50および70%の

*1 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 東北職業能力開発大学校 住居環境科助教授 (正会員)

*3 秋田大学大学院 工学資源学研究科生産・建設工学専攻 工修 (正会員)

*4 秋田大学 工学資源学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	スラグ置換率 (%)	単位量(kg/m ³)						
		W	C	S	Sg	G	SP	AE
44.3	0	146	330	732	0	1090	1.485	0.033
	30			512	220			
	50			366	366			
	70			220	512			

表-2 モルタルの示方配合

モルタルの種類	細骨材の種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	Sg
C	天然砂	40	387	968	790	0
D	スラグ				0	858
E	粉碎スラグ				0	873
F	天然砂	80	336	420	1370	0
G	スラグ				0	1487
H	粉碎スラグ				0	1514

4種類としたコンクリートを製造した。

2.2 凍結融解試験および明度測定

凍結融解試験を JIS A 1148 の水中凍結融解試験方法 A 法に準じて行った。また、美観上も重要となる供試体表面の明度 L* を色彩色差計を用いて各凍結融解サイクルにおいて測定した。

2.3 コンクリートの強度試験

スランプおよび空気量試験を行った後、圧縮強度用の円柱供試体として $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 、凍結融解試験用角柱供試体として $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ 供試体をそれぞれ製造した。また、凍結融解試験終了後の供試体について JIS A 1106 に準じて曲げ強度試験を行い、さらにそれらの切片を用いて JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。供試体の養生方法として、実際の二次製品の養生方法に近づけるため、24 時間蒸気養生後 24 時間水中養生を行い、さらに 12 日間試験まで気中養生を行った。

2.4 ごみ溶融スラグの粉碎およびモルタルの製造

普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3)、天然砂 (密度 2.58g/cm^3 、吸水率 3.03%、粗粒率 2.72)、ごみ溶融スラグ (密度 2.80g/cm^3 、吸水率 0.40%、粗粒率 2.69) および、ごみ溶融炉スラグを粉碎したスラグ (密度 2.85g/cm^3 、吸水率 0.40%、粗粒率 1.57) を用いた。粉碎スラグを卓上ボールミルで製造した。粉碎方法としてスラグを 110°C で 24 時間乾燥後、ポットに直径約 30mm のシリコンボールを 4.7kg およびスラグを 2kg 入れ、回転速度を 68r.p.m として 30 分間粉碎した。このように設定したのは粉碎エネルギーを節減するためであるが、粉碎時間についてはさらに検討の余地がある。

表-2 にモルタルの示方配合を示す。モルタルのフロー値が 200 程度となるように配合を選定した。粉碎した場合との対比が十分行なえるようにモルタルを設定し、水セメント比を大きく異なる、40 および 80% とした。空気量およびブリーディング量をそれぞれ JIS A 1128、JIS A 1123 に準拠して測定し、養生条件として水中養生 (水温 $20 \pm 1^\circ \text{C}$) とし、材齢 28 および 91 日まで養生を行い、曲げおよび圧縮試験を JISR5201 に準じて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ごみ溶融スラグをリサイクル使用したコンクリートの基礎性状

図-1 にスラグ置換率とスランプおよび空気量の関係を示す。スランプおよび空気量ともに、スラグ置換率の増加に伴い、ほぼ増加する傾向が認められる。スラグの種類によっては、置換率の増加に伴ってスランプが減少する場合もあるが³⁾、スランプの増加は使用したスラグの品質がコンクリート用細骨材の基準を満足していること、表面がガラス質のスラグが増加してモルタル成分のせん断抵抗が減少したことなどによると考えられる。また、スラグ置換率 70% においては、スランプの増加を見越して高性能減水剤使用量を減じたため減少した。空気の増加原因については 3.3 において若干の検討結果を示す。

図-2 にスラグ置換率と圧縮強度および単位容積質量の関係を示す。スラグ置換率 70% において、圧縮強度が減少する傾向が認められる。これは、スラグ粒子内の気泡の存在や表面のひび割れが顕微鏡観察で見られたことから、スラ

グ粒子自体の脆弱さやスラグ表面とペーストとの付着不良の影響が現れたと考えられる。単位容積質量は、密度の大きいスラグの増加により幾分増加すると考えられる。

3.2 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抵抗性

図-3 に凍結融解サイクル数と相対動弾性係数および質量減少率の関係を示す。相対動弾性係数は若干低下しているものの、300 サイクル終了時において各置換率において80%以上となった。別に行なった試験で空気量を3~4%しか連行しなかった場合においては、30~60 サイクルで60%以下に低下しとことから、スラグを置換した場合、空気量を6%程度連行させる必要があると考えられる。質量減少率は、置換率の大小にかかわらず最初減少(質量増加)し、後に増加(質量減少)傾向に転じることがわかる。これは、試験開始前の12日間気中養生としたため、試験開始後の吸水により供試体質量が増加したと考えられる。その後、スラグを置換した場合、スラグ粒子を含むモルタルのスケーリングにより、供試体質量の減少が顕著にあらわれたと考えられる。

図-4 に凍結融解サイクル数と気乾状態の明度L*を示す。明度L*は0で黒、100で白を示す。図中太線はスラグの明度を示す。図より明度L*は、サイクル数とともに減少する傾向が認められる。これは、凍結融解作用に伴う供試体表面のスケーリングによって、スラグ粒子が表面に露出したために明度が低下し、スラグの明度に近づいたと考えられる。

図-5~7 にスラグ置換率と耐久性指数、300 サイクル終了時の質量減少率および明度の関係を示す。スラグ置換率の増加に伴い耐久性指数は減少し、置換率70%で85.4となった。質量減少率は、スラグを置換しない場合より増加するが、置換率の増加による増加傾向は認められなかった。一般に、ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートのブリーディング量は、溶融方式の違いにもよるが天然砂を用いた場合

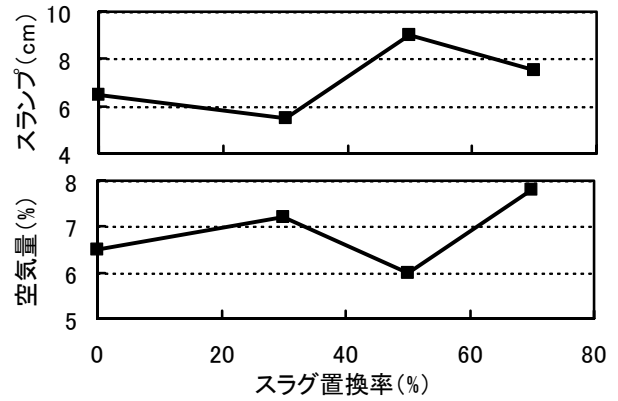


図-1 スラグ置換率とスランプおよび空気量の関係

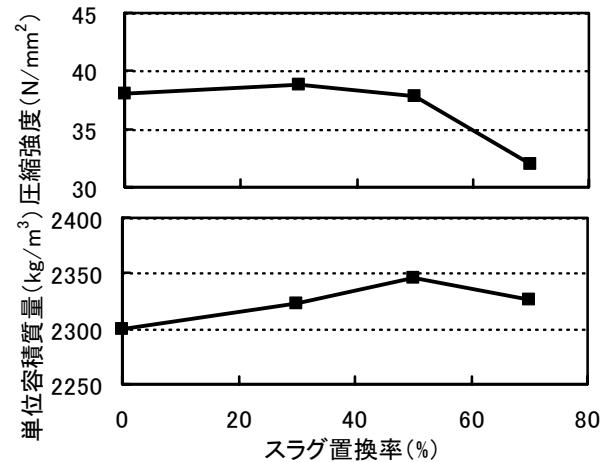


図-2 スラグ置換率と圧縮強度および単位容積質量の関係

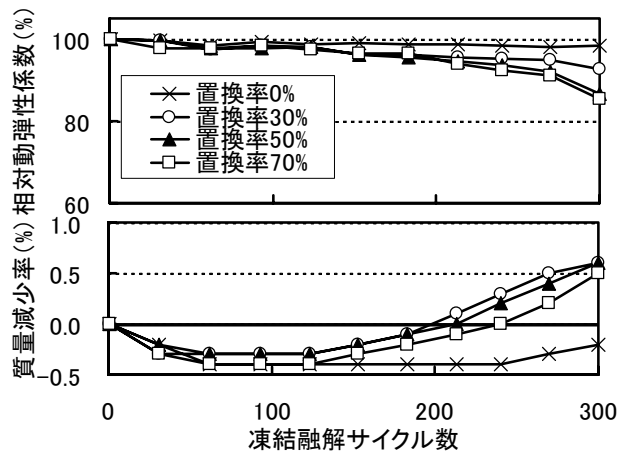


図-3 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数および質量減少率の関係

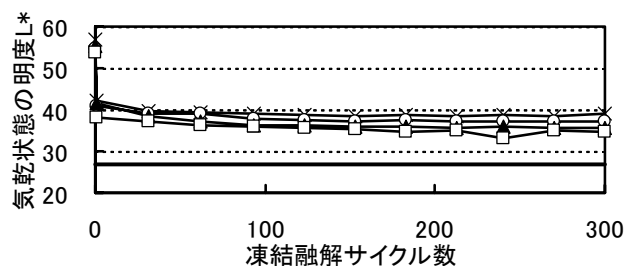


図-4 凍結融解サイクル数と明度L*の関係

より増加することが指摘されている^{1), 3)}。ブリーディング量の増加は、コンクリート表面に脆弱層を形成し、スケーリングの程度を増加させると考えられている。しかし、図-6 に示したようにスラグ置換率の増加に伴う質量減少率の増加傾向が認められなかった。これは、用いたスラグの粗粒率が天然砂のそれより小さく、ブリーディング量が大きく異ならなかったことによると推察される。なお、置換率 0%の場合と比較して質量減少率が増加したのは、スラグ粒子自体に内在する欠陥により凍結融解作用によって劣化し、表面からはく離した影響が大きいと判断される。

供試体表面の明度は、300 サイクル終了時ではスラグ置換率の増加に伴い減少する傾向が認められる。また、凍結融解試験前でもスラグ置換率の増加に伴う減少傾向が認められた。試験前後の明度の差は、置換率の変化によらずほぼ一定であることから、スラグ置換率を増加するとコンクリート表面がスラグの明度である黒色に近づき、凍結融解作用によってスラグ粒子が表面に露出した場合、これが顕著になると考えられる。

図-8 および 9 にスラグ置換率と試験前後における圧縮強度比および試験終了後の曲げ強度比を示す。強度比をスラグ置換率 0%の強度に対する各スラグ置換率の強度の百分率とした。圧縮強度比は、試験開始前においては、置換率 70%を除いて低下が認められなかった。試験終了後においては、置換率の増加に伴って低下し、70%においてこれが顕著となった。また、曲げ強度比においては、この傾向がさらに顕著となった。このような現象が生じた原因として、凍結融解作用を受けた場合、スラグ粒子に内在する気泡や微細なひび割れなどの欠陥により粒子自体の劣化が進行し、ペーストとの付着が損なわれたことが考えられる。したがって、ごみ熔融スラグの有効活用を図るためには、スラグ粒子に存在する欠陥を除去する必要があると判断される。

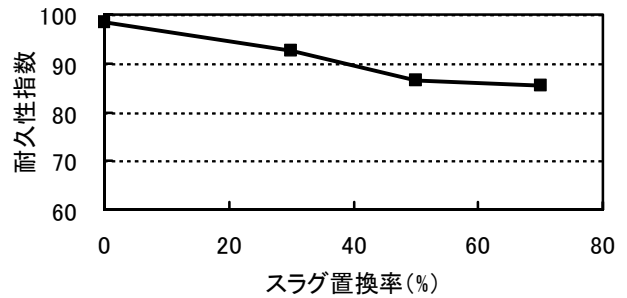


図-5 スラグ置換率と耐久性指数の関係

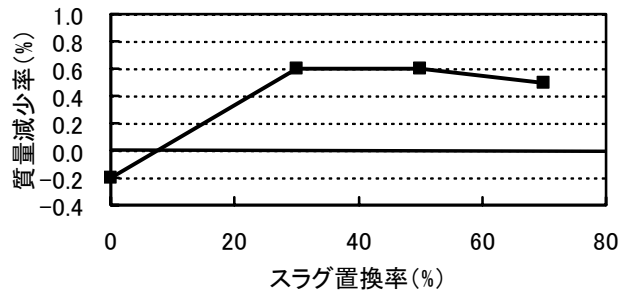


図-6 スラグ置換率と質量減少率の関係

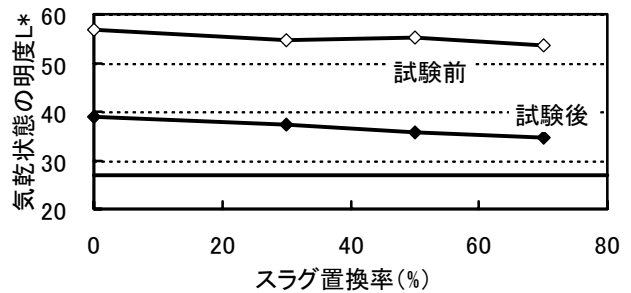


図-7 スラグ置換率と気乾状態の明度 L* の関係

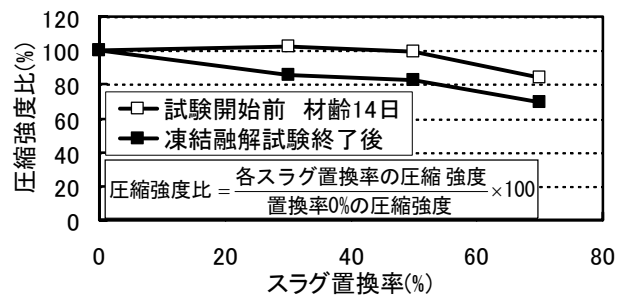


図-8 スラグ置換率と試験前後における圧縮強度比の関係

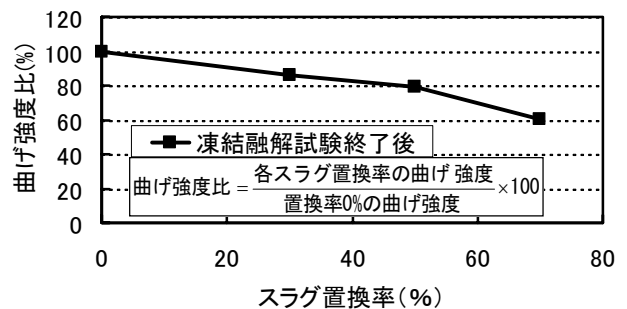


図-9 スラグ置換率と試験後の曲げ強度比の関係

3.3 粉砕したごみ溶融スラグを用いたモルタルの品質改善に関する検討

図-10 にモルタルのフロー値の比較を示す。図中の C および F は天然砂, D および G はごみ溶融スラグ, E および H はごみ溶融スラグを粉砕したものをそれぞれ細骨材として用いたモルタルを示す。なお, 細骨材の違いを示すため混和剤を用いないプレーンモルタルとした。W/C=40%においては, フロー値に大きな変化はなかった。W/C=80%においては, F が最も大きく, G が最も小さく, H はこれより大きくなった。W/C が大きい場合, スラグの使用量が多く, スラグ粒子同士の接触に伴う形状の角ばりの影響でフロー値が減少すること, また, スラグを粉砕することによって形状が改善されることによると考えられ, 既往の研究結果⁴⁾と同様の結果が得られた。

図-11 にモルタルの空気量の比較を示す。この試験で用いたモルタルの配合においては, AE 剤を使用していないため, 空気量はエントラップドエア量である。W/C=40%では, D および E が C より若干多くなる傾向となった。W/C=80%においては, G は F の約 8 倍となり, H は 4.5 倍と空気量は減少した。

モルタル供試体断面の顕微鏡観察を行なった結果, 溶融スラグを用いた場合, 複数のスラグ粒子表面の凹部と接触した寸法の大きい気泡が多く観察されたのに対して, 粉砕した溶融スラグを用いた場合, 寸法小さいスラグ粒子表面と接触した小さい気泡が観察された。3.1, 図-1 で示したが, 空気量が増加したのは, 第 1 に, スラグ粒子表面に気泡が付着し易いことが考えられる。第 2 に, 気泡が合体して気泡径が大きくなっても, 複数のスラグ粒子が大きくなった気泡表面に付着しているため, 気泡の浮力により浮上できずに留まるため空気量が増加したと考えられる。この現象は, 水中での溶融スラグ粒子の観察からも明らかとなった。したがって, 粉砕により溶融スラグの粒子寸法を減じることによって空気量を低減できるように思われる。

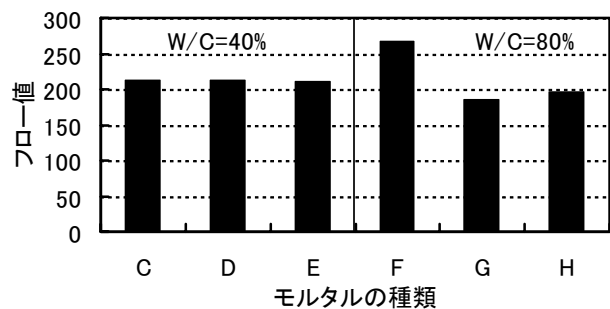


図-10 モルタルのフロー値の比較

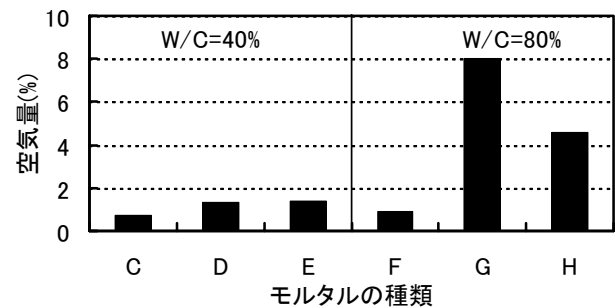


図-11 モルタルの空気量の比較

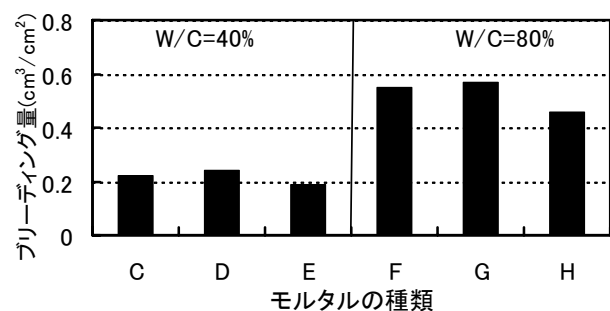


図-12 モルタルのブリーディング量の比較

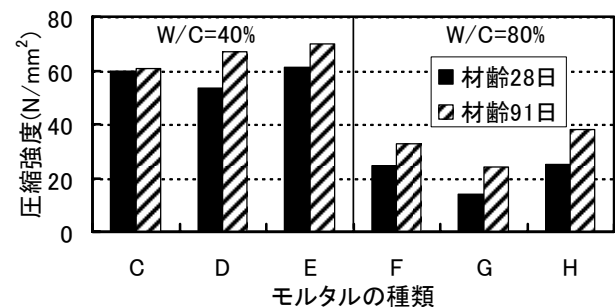


図-13 材齢 28 および 91 日の圧縮強度の比較

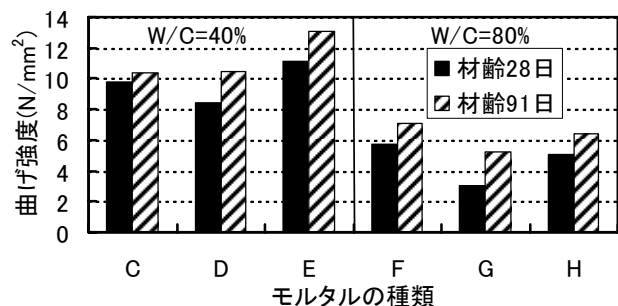


図-14 材齢 28 および 91 日の曲げ強度の比較

図-12 にモルタルのブリーディング量の比較を示す。W/C=40 および 80%において、天然砂および溶融スラグによるブリーディング量の差は少なかった。一方、粉砕したスラグを用いた場合、他のものよりも小さくなる傾向が認められる。スラグを粉砕することにより、ブリーディング量は小さくなり、粒子性状が改善されたと考えられる。

図-13 および 14 に材齢 28 および 91 日の圧縮および曲げ強度の比較を示す。W/C=40 および 80%ともに、細骨材に溶融スラグを使用した場合の強度は天然砂を使用した場合と比べ、低下する傾向が認められた。図-11, 12 に示したように、空気量が多いこと、またブリーディング量の差はほとんどないことから、粒子の脆弱さや、ペーストとの付着の弱さに起因すると考えられる。また、粉砕した溶融スラグを用いた場合においては、天然砂とほぼ同等以上の値を示していた。このことから、スラグを粉砕加工することにより、粒子性状が改善されることが明らかとなった。粉砕したスラグを使用することによって、耐凍害性も改善されることが期待され、今後の検討課題としたい。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) スラグ置換率の増加に伴いスランプおよび空気量は増加し、圧縮強度は粒子自体に内在する微細ひび割れや空隙欠陥と付着不良の影響により置換率 70%で低下した。単位容積質量は幾分増加した。
- (2) スラグ置換率の増加に伴い耐久性指数は減少し、空気量 6%を確保することにより置換率 70%で 85.4 となった。質量減少率は、スラグを置換しない場合より増加するが、置換率の増加に伴う増加は認められなかった。
- (3) コンクリート表面の明度は、スラグ置換率の増加に伴い減少し、凍結融解 300 サイクル終了時には溶融スラグの明度

(黒色) に近づいた。

- (4) 天然砂と比較して溶融スラグの密度は大きく、吸水率は小さいが、微細ひび割れや気泡を有するため、凍結融解作用により劣化してペーストとの付着が損なわれるため凍結融解試験後の圧縮および曲げ強度が置換率とともに大きく低下する傾向が認められた。
- (5) 溶融スラグを粉砕して使用したプレーンモルタルについて、粉砕しない場合と比較した結果、フロー値は同等以上、空気量は同等以下となった。また、モルタルのブリーディング量は粉砕しない場合、天然砂を用いた場合と大きく異ならないが、粉砕した場合減少し、材齢 28 および 91 日の圧縮および曲げ強度は粉砕することによって増加して粒子性状の改善を図れることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 北辻政文, 田中礼治, 遠藤孝夫, 鳴海繁実: 都市ごみガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用, コンクリート工学論文集, No.13, Vol.2, pp89~97, 2002, 5.
- 2) 佐藤重悦: ごみ溶融スラグおよび廃石膏ボードのリサイクル利用に関する実験的研究, 秋田職業能力開発短期大学校紀要, pp.13~17, No.9, 2004, 3.
- 3) 高田聡恵, 糸山豊, 上原匠, 梅原秀哲: 溶融スラグのコンクリート用材料としての有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp1629~1634, 2004.
- 4) 松田節男, 錦織和記郎, 平戸誠一郎: 溶融スラグの細骨材利用における磨砕加工の効果, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp355~356, 2004, 9.

謝辞: 本研究に対して、秋田市環境部ならびに新日鉄(株)環境事業部の協力を得た。ここに記して謝意を表す。