

# 論文 都市ごみ溶融スラグを混入したモルタルのフレッシュ性状・圧縮強度に関する研究

佐川 康貴<sup>\*1</sup>・松下 博通<sup>\*2</sup>・鶴田 浩章<sup>\*3</sup>・三宅 淳一<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、都市ごみ溶融スラグのコンクリート用骨材としての適用性について、溶融型式の異なる都市ごみ溶融スラグ及びそれらを磨砕加工したものをを用いてモルタルを作製し、フレッシュ性状及び圧縮強度について検討を行った。その結果、都市ごみ溶融スラグの置換率の増加に伴いモルタルのフレッシュ性状は良くなるが、圧縮強度は低下することが明らかとなった。また、磨砕加工によりフレッシュ性状は改善可能であるが、圧縮強度は必ずしも改善できないことを示した。

**キーワード**：都市ごみ溶融スラグ、磨砕加工、フレッシュ性状、圧縮強度

## 1. はじめに

現在、都市ごみ溶融スラグ（以下、スラグ）は、その有効利用により環境対策や最終処分場の延命化等に極めて有効であると考えられている。しかしながら、現時点ではスラグを使用した実績が少ないことや規格化が進んでいないこと、コストがかかること等の問題を有する。スラグの再資源化に対しては、一部の自治体<sup>1)</sup>で取り組みが始まっているものの、消極的な自治体も多く、スラグの再利用率は決して高いものではなく、スラグの利用拡大が社会的な課題となっている。したがって、今後のスラグの積極的な有効利用を図るためには、一定品質を満たす建設資材として認知を得ていくことが必要である。

スラグをコンクリート用骨材として適用するには、表面の平滑さに起因するセメントペーストとのなじみにくさ、締固め時における粒子破砕による細粒化等の問題が挙げられ、有効利用の拡大のためにはそれらの諸問題に関するデータの蓄積が急務となっている。

そこで、本研究では4種類の代表的な炉型式により、異なる過程で生成されたスラグをモル

タルに混入し、モルタルのフレッシュ性状及び圧縮強度に与える影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 対象としたスラグ

本研究で使用したスラグの発生炉と生成過程について表-1に示す。スラグは代表的な溶融炉型式4種類（コークスベッド式炉、アーク式炉、プラズマ式炉、表面溶融式炉）を選び、それらの該当炉を持つ自治体より夏季に入手した。

表-1 対象としたスラグ

スラグ	溶融炉型式	メタル分離	磨砕加工
A	・コークスベッド式炉 溶融温度:1700~1800度 溶融雰囲気:還元	スラグ化後に分離	無
Bg	・アーク式炉 溶融温度:1300~1600度 溶融雰囲気:酸化	スラグ化後に分離	有
C	・プラズマ式炉 溶融温度:1400~1500度	スラグ化後に分離	無
Cg	溶融雰囲気:還元		有
D	・表面溶融式炉 溶融温度:1300~1400度	メタル分離無	無
Dg	溶融雰囲気:酸化		有

\*1 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助手 修士（工学）（正会員）

\*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博（正会員）

\*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教授 博士（工学）（正会員）

\*4 電源開発（株） 技術開発センター茅ヶ崎研究所所長 工修（正会員）

それらのうち、Bgは製造工程において、非常に良く磨かれ、角張りの少ない粒子形状を有しており、今回用いたスラグの中で最も粒子形状が良く、粒子表面が平滑なものである。Cg、DgはC、Dをインペラブレーカーにより壁に叩きつけて軽度の破碎を行い、角張りの少ない粒子形状としたものである。以後、本論文では粒子形状の改善のためのこれらの加工を磨砕加工と称することとする。また、スラグのみでは評価し難い試験については天然砂（大井川産陸砂）や高炉スラグ細骨材との比較を行うことで相対的な評価を行った。

図-1に各スラグの化学成分を示す。いずれのスラグも化学成分の合計がほぼ100%に近いことから、スラグ中の各成分は酸化物として組織を形成しているものと思われる。また、全体の80~90%をSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaOが占め、SiO<sub>2</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はほぼ同様の成分比となっており、CaO/SiO<sub>2</sub>にも大きな差は認められない。化学成分には熔融雰囲気は異なっても大きな相違は認められない。また、DのみFeOの含有量が多くなっていることが分かる。これはDのスラグ生成の際にはメタル分離が行われていないことによるものと考えられる。

表-2に密度試験、吸水率試験、粒形判定実積率試験の結果を示す。表における粒形判定実積率とF.M.から、A、BgがC、Dと比較して粒形や粒度の良いものということが分かる。また、図-2に各スラグ及び天然砂、高炉スラグ細骨材の粒度分布を示す。なお、図中で白抜きグラフにしたスラグは磨砕加工を施したものを示している。A、Bgはコンクリート用砕砂の粒度規格を満たしたが、C、Dは粗目側に外れる結果となった。しかし、磨砕加工を行ったCg、Dgは粒度規格を満足する結果となった。よって粒度の粗いスラグは磨砕加工を適切に行うことにより、粒度規格を満足出来ると言える。

## 2.2 スラグ粒子の強度の検討

スラグ粒子の強度を把握するため、スラグの圧かい強度試験を行った。すなわち、スラグ粒

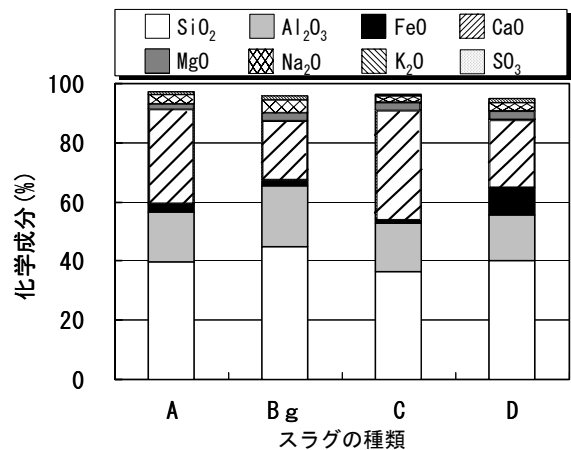


図-1 スラグの化学成分

表-2 スラグの基本物性

試料	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粒形判定実積率 (%)	F.M.
A	2.71	1.2	64.2	2.72
Bg	2.65	0.6	67.9	2.71
C	2.78	0.8	59.2	3.69
D	2.75	1.3	62.0	4.65
高炉スラグ	2.73	0.6	55.8	2.69
天然砂	2.61	1.5	58.6	2.79

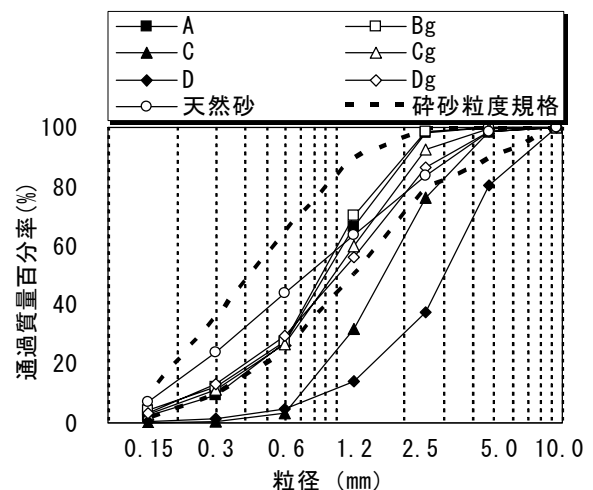


図-2 粒度分布

子に一軸圧縮試験機で直接圧縮荷重を加えることにより破壊させ、破壊時の最大荷重を測定した。載荷方法はひずみ制御とし、ひずみ速度は1mm/min.とした。試料はふるい目3.2mmを通過し、2.8mmにとどまった粒子を任意に50個選び、105°C±5°Cの乾燥炉で乾燥後、室温まで冷却して使用した。この試験は高炉スラグ細骨材と天

然砂についても比較対象として行った。

### 2.3 スラグ混入による凝結時間への影響

図-1から、本研究において使用したスラグの化学的性質はいずれもほとんど同様であったため、スラグの混入による凝結時間への影響はいずれのスラグもほとんど同等であると考えた。よって、凝結試験を JIS A 1147 に準じて C スラグを対象に行い、スラグの使用がセメントの水和反応に与える影響について検討を行った。配合は後述する表-4の C スラグに示した。

### 2.4 スラグ混入によるモルタルのフレッシュ性状及び圧縮強度の特性

コンクリート用細骨材としてスラグを利用するにあたっては、粒子形状が角張っていることに起因する応力作用時の粒子破碎や単位水量の増加、粒子表面が平滑であることによるセメントペーストとの付着の悪さなどが問題点として挙げられる。よって、スラグを混入したモルタルを作製し、フレッシュ性状や圧縮強度に与える影響について検討を行った。

スラグの粒度分布は天然砂（大井川産陸砂）の粒度分布に合わせた。これにより、各スラグの粒度が異なることの影響が排除され、スラグ粒子の品質の違いによる影響が比較可能となる。天然砂細骨材の粒度分布は図-2に示している。

配合は、水セメント比  $W/C=0.5$  一定とし、細骨材中のスラグ置換率を 0, 25, 50, 75, 100% として、モルタルのフロー値が  $190 \pm 5$  となるよう単位水量を変化させた。セメントは普通ポルトランドセメント(密度  $3.16\text{g/cm}^3$ , 比表面積  $3270\text{cm}^2/\text{g}$ )を、骨材はそれぞれ表乾状態で使用した。モルタルの空気量、ブリーディング率はそれぞれ JIS A 1128, JIS A 1123 に準拠して行った。供試体は打設後 24 時間で脱型し、所定の材齢まで水中養生を行い、圧縮試験を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 スラグ粒子の強度

表-3に圧かい強度試験結果を示す。いずれの試料もばらつきが大きいことが分かる。また、

表-3 圧かい強度試験結果

試験対象	荷重 (N)			
	最大値	最小値	平均	標準偏差
A	712	20	105	128
Bg	1213	6	319	283
C	798	8	78	148
Cg	1304	22	297	343
D	324	12	77	72
Dg	1968	43	387	329
高炉スラグ	113	12	54	23
天然砂	332	12	140	73

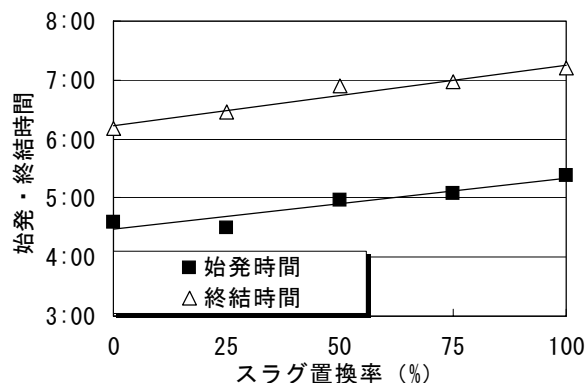


図-3 Cスラグ置換率と凝結時間の関係

摩砕加工を行っていない A, C, D の強度が低く、磨砕加工を施している Bg, Cg, Dg の強度が高い。この理由として、磨砕加工によってスラグの角張りが取れることで、磨砕加工を行ったスラグの方が圧かい強度が大きくなったものと考えられる。しかし、磨砕加工を行った Bg, Cg, Dg は標準偏差が大きい結果となった。なお、現在、細骨材の強度を把握する試験方法は確立されておらず、今後のスラグ細骨材の強度を確認する試験方法の確立が望まれる。

### 3.2 凝結時間

図-3に C スラグ置換率と凝結時間の関係を示す。図より、スラグ置換率の増加に伴い始発・終結時間がともに直線的に長くなっているのが分かる。しかし、スラグ置換率 0% と 100% の差は始発時間で 48 分、終結時間で 1 時間 1 分であり、スラグ置換による凝結時間への大きな影響はないと考えられる。スラグ混入による凝結遅延の理由としては、ペーストとスラグの付着の悪化等が考えられる。

表-4 モルタル試験練り結果

スラグの種類	スラグ置換率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					フロー値
			水	セメント	細骨材			
					天然砂	スラグ	計	
天然砂のみ	0		291	582	1382	0	1382	192
A	25	50	287	575	1045	348	1394	191
	50		284	567	699	699	1397	194
	75		279	557	350	1050	1399	192
	100		273	546	0	1413	1413	187
Bg	25		285	570	1044	348	1392	186
	50		276	553	712	712	1423	185
	75		268	535	357	1071	1429	186
	100		256	513	0	1442	1442	187
C	25		289	579	1044	348	1392	193
	50		285	570	695	695	1389	188
	75		283	565	352	1057	1410	194
	100		272	544	0	1415	1415	190
Cg	25	285	570	1058	353	1411	188	
	50	278	556	716	716	1431	192	
	75	268	535	366	1098	1464	194	
	100	256	512	0	1465	1465	190	
D	25	295	589	1021	341	1362	187	
	50	292	584	687	687	1373	187	
	75	295	590	341	1023	1364	192	
	100	286	571	0	1363	1363	190	
Dg	25	287	575	1045	348	1394	186	
	50	280	560	714	714	1427	191	
	75	274	548	361	1083	1445	192	
	100	261	522	0	1468	1468	189	

### 3.3 フレッシュ性状及び圧縮強度

表-4にモルタルの試験練りの結果を示す。試験練りの結果、目視による材料分離は確認されなかった。次に図-4にスラグ置換率と空気量の関係を示す。図より、スラグ置換率が増加するに伴い空気量も増加する傾向にあることが分かる。AE剤等は使用していないことから、これはエントラップトエアであると考えられる。スラグの使用によりエントラップトエアが増加することは他の試験等によっても報告されている<sup>2)</sup>。空気量の増加傾向は、置換率が25%程度まではいずれのスラグも同様であるが、50%以上の置換率とした場合、空気量の増加傾向が大きくなるとともに、スラグの種類による違いが著しくなることが分かる。空気量増加の原因として、粒子形状や粒子の電気化学的性質の影響等が考えられるが、その説明は今後の課題である。

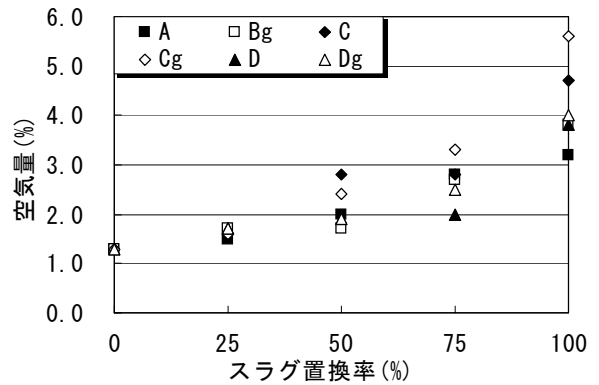


図-4 スラグ置換率と空気量の関係

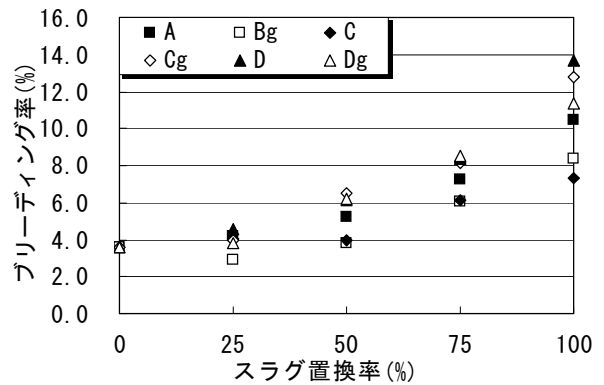


図-5 スラグ置換率とブリーディングの関係

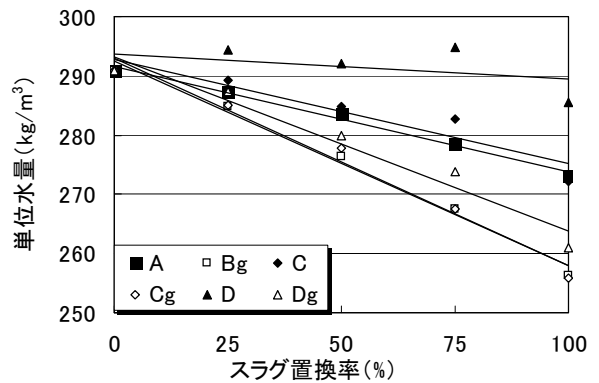


図-6 スラグ置換率と単位水量の関係

空気量の増加はモルタルの圧縮強度にも影響を与えるため、スラグを高置換率で使用する際には試験練り等で空気量の確認を行う必要がある。

図-5にスラグ置換率とブリーディング率の関係を示す。ブリーディング率についても空気量と同様の傾向が見られ、置換率が50%以上の場合にスラグの種類による違いが大きくなった。この理由として、スラグ粒子の表面が平滑なため保水性が低いということが考えられる。

次に、図-6にスラグ置換率と単位水量の関

係を示す。また、図中の直線はそれぞれの回帰直線を示している。本試験は W/C 一定であり、骨材の粒度分布も合わせていることから、単位水量が減少している骨材ほど天然砂よりも粒形がよく、モルタルのコンシステンシー改善効果があると言える。未加工の A, C であっても単位水量が減少しており、スラグ混入による単位水量の増加は認められなかった。また、白抜きグラフの磨砕加工スラグは未加工スラグに比べて単位水量の減少量が大きいことから、磨砕加工はコンクリートのコンシステンシーを大きく改善するものであり、骨材としてのスラグの性能向上に非常に有効であることを示している。

図-7 にスラグ置換率と材齢 28 日における圧縮強度の関係を示す。図より、W/C 一定にも関わらず各スラグとも置換率の増加に伴い圧縮強度が減少していることが分かる。また、D を磨砕加工した Dg では強度増進が見られるが、C と Cg の場合にはほとんど強度増進はなされていない。また、磨砕加工され、単位水量を最も減少させた Bg は最も強度が小さくなっている。

このような強度低下の原因として、スラグの物性の他に前述した空気量の増加が考えられる。そこで、既往の研究により空気量が 1% 増加するごとに圧縮強度が 4~6% 低下することが明らかとなっていることから、空気量 1% につき圧縮強度が 5% 低下すると仮定し、式(1)に基づいて空気量を考慮した圧縮強度を算定した。

補正圧縮強度

$$= \text{圧縮強度} / (1 - \text{空気量} \times 0.05) \quad (1)$$

ここに、補正圧縮強度：空気量による強度低下を補正した圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

スラグ置換率と上式により求めた補正圧縮強度の関係を図-8 に示す。A を見ると、補正圧縮強度にスラグ置換率の影響がほとんど見られない。また C と Cg, D と Dg を見ると、圧縮強度には磨砕加工の有無にほとんど影響がないことが明らかとなった。また、最も単位水量を減少させた Bg は空気量を補正した補正圧縮強度に

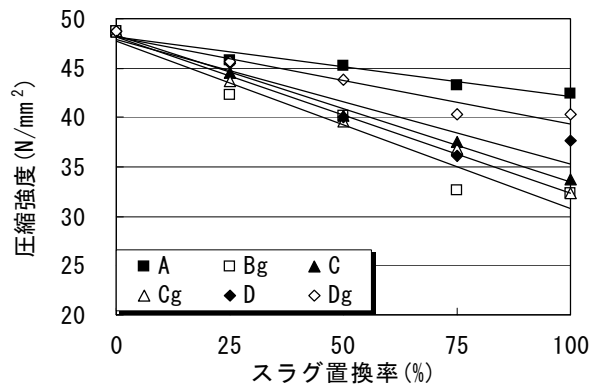


図-7 スラグ置換率と圧縮強度の関係

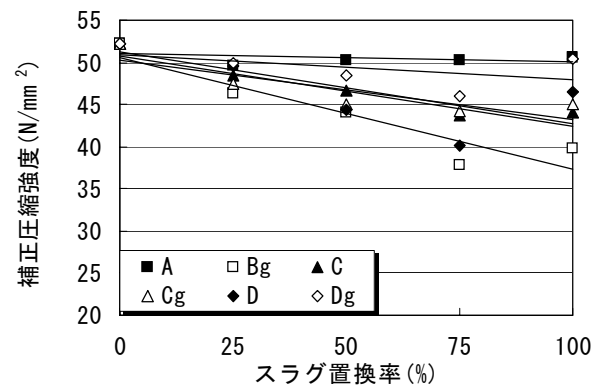


図-8 スラグ置換率と補正圧縮強度の関係

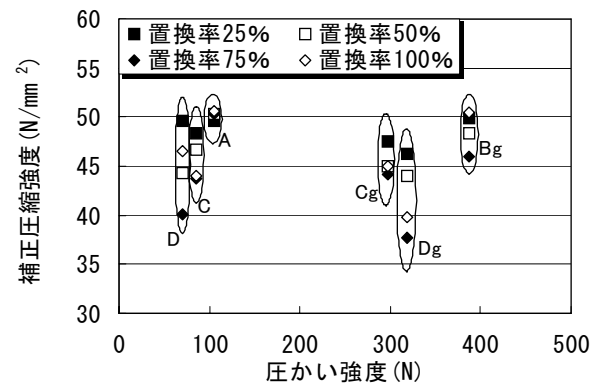


図-9 圧かい強度と補正圧縮強度の関係

ついても最も低い結果となっていることが分かる。

図-9 にスラグの圧かい強度の平均値と補正圧縮強度の関係を示す。図より、圧かい強度と圧縮強度にはほとんど相関が認められず、本研究の範囲内においてはスラグの強度がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響は小さい結果となった。

次に、写真-1 に天然砂を使用したモルタルの破壊面を示す。また、写真-2, 写真-3 に Bg をそれぞれ 50%, 100% 置換したモルタルの破



写真-1 天然砂  
破壊面

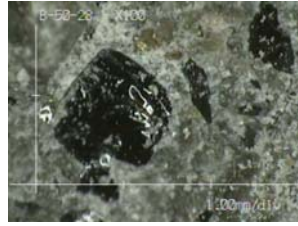


写真-2 Bg 破壊面  
(置換率 50%)

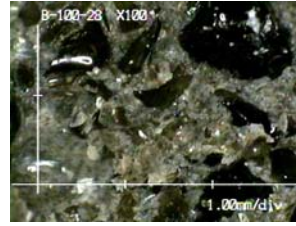


写真-3 Bg 破壊面  
(置換率 100%)

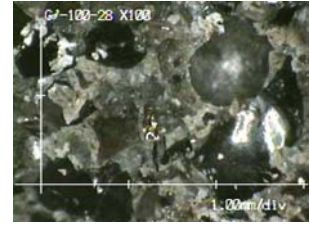


写真-4 Cg 破壊面  
(置換率 100%)

壊面の写真を示す。写真から、天然砂を使用したモルタル破壊面の骨材はセメントペーストが付着しているのに対し、Bg を置換したモルタル破壊面の骨材はセメントペーストがほとんど付着しておらず、骨材の露出が多く見られるのが分かる。これは、磨砕加工によりスラグ表面の凹凸が少なくなり、平滑度が向上したことによって、スラグとセメントペーストの付着力がより低下したことを示している。これは同様に写真-4に示す Cg を置換したモルタル破壊面にも言える。また、図-6に示すように、磨砕加工されたスラグを混入したモルタルは、単位水量が減少することにより細骨材の単位容積が増加していることが間接的に示されている。よって、細骨材の単位容積が増加することにより平滑なスラグの表面積が増加していることも強度増進を抑制する原因となっていると考えられる。

磨砕加工したスラグの利用は、単位水量を減少することが出来ることから、フレッシュコンクリートのコンシステンシー改善の効果が期待できると言える。しかしながら、強度発現性においては、スラグ表面の平滑度や粒形の向上がマイナス面に作用することにより、水セメント比及びモルタルフロー一定では強度増進につながらないことを示しており磨砕加工を行ったスラグを使用する際は注意が必要である。

なお、A はスラグの基本性状に関して、とりわけ粒形がよいわけでも粒子の強度が卓越しているわけでもないが、図-8に見られるように強度発現はもっとも良好であり、スラグ置換による影響が小さい。これは、粒子の強度や形状、平滑度が中庸ながら、バランスの良い状態のス

ラグであるためと解釈できる。一方、磨砕加工を行った Bg は粒子強度は十分であるが、粒子形状や平滑度が良く、強度発現が抑制される。よって、スラグの磨砕加工には最適な程度が存在することを示唆するものであり、磨砕加工のあり方を検討する上で重要視すべき問題と言える。

#### 4. 結論

本試験により得られた知見を以下に示す。

- (1) スラグの置換率の増加に伴い、モルタルの空気量、ブリーディングは増加し、凝結は遅延する。また、圧縮強度は低下する。
- (2) スラグを置換したモルタルの圧縮強度は、普通強度の範囲であればスラグ粒子の強度には依存しない。
- (3) 磨砕加工は、スラグ粒子の形状や硬さ及び粒度分布を調整し、スラグの物性の安定に有効な手段である。また、磨砕加工によりモルタルのコンシステンシーを改善することが可能である。しかしながら、磨砕加工により粒形を改善することによりスラグとセメントペーストの付着力の低下を招くため、強度を低下させる原因となる。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局東北技術事務所：溶融スラグの有効利用に係わるガイドライン（案），2003.3
- 2) 越川茂雄，伊藤義也，佐藤次郎，金子輝一：焼却灰溶融スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.11，No.2，pp.39-47，2000.5