

論文 フライアッシュを溶融添加した高炉スラグの物理的性質および細骨材としての適用性

高橋 勝也^{*1}・松下 博通^{*2}・佐川 康貴^{*3}・濱本 真吾^{*4}

要旨：現在、フライアッシュの新たな処理方法として、高炉から排出された溶融状態の高炉スラグ中にフライアッシュを添加する技術の開発が行われている。本研究はこの技術により製造された高炉スラグ細骨材（FA 溶融スラグ）の物理的性質および FA 溶融スラグを用いたモルタルのフレッシュ性状および強度について検討した。その結果、フライアッシュ添加率の増加に伴い粒子が密実になるため、同一の粒度を得るためには磨砕の程度を増す必要があること、また海砂に対する FA 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が良くなり、強度が増進することが明らかになった。

キーワード：フライアッシュ，高炉スラグ細骨材，フレッシュ性状，圧縮強度

1. はじめに

西日本地区では、コンクリート用細骨材は従来から海砂に大きく依存してきたが、環境保全の面から海砂の採取規制は厳しくなりつつあり、その供給不足の事態を生ずることが懸念され、海砂の代替細骨材の開発が急務となっている。

一方、石炭火力発電所における石炭の燃焼により発生するフライアッシュのリサイクル率は現状で約 90%¹⁾となっているものの、利用先の大部分はセメント原料・セメント混和材に偏っている。セメントの需要は年々減少傾向にあり、今後もフライアッシュの発生量は増加すると予測されることからフライアッシュの有効活用は今後さらに重要な課題となってくる。

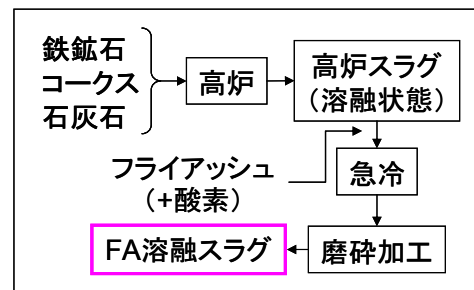
現在、フライアッシュの新たな処理方法として、溶融状態の高炉スラグ中にフライアッシュを溶融させる技術の開発が行われている。この技術によりできた細骨材を海砂の代替細骨材として用いることは、海砂に替わる細骨材の安定確保とフライアッシュの有効活用、という 2 つの課題を解決するのに効果的な手段であると考えられる。

えられる。

本研究では、フライアッシュを溶融添加した高炉スラグ細骨材（以下 FA 溶融スラグ）の物理的性質、また、FA 溶融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い、フライアッシュの添加による高炉スラグの改質効果について検討した。

2. FA 溶融スラグの製造方法

本研究で使用した FA 溶融スラグは、図－1 に示すように、高炉から排出された溶融状態の高炉スラグにフライアッシュを吹き込み溶融した後、水砕により急冷し、インペラブレーカーに



図－1 FA 溶融スラグの製造フロー

*1 九州大学工学部 地球環境工学科建設都市コース（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手 修士（工学）（正会員）

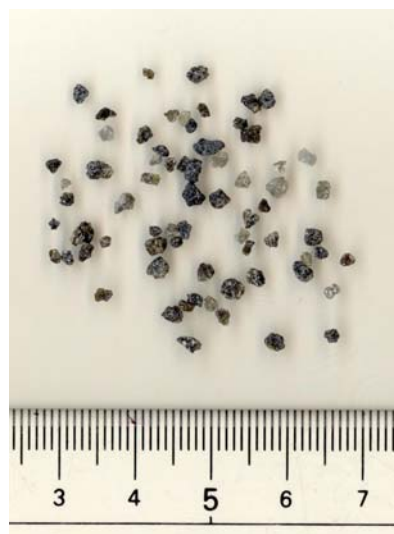
*4 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻（正会員）

表－1 骨材の物理的性質

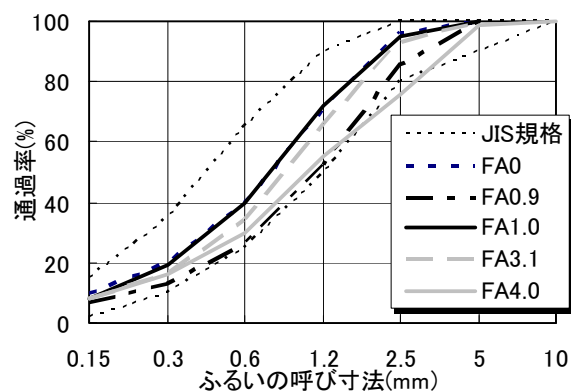
種類	記号	FA 添加率 (%)	酸素添加 の有無	F.M.	表乾 密度 (g/cm ³)	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粒形判定 実積率 (%)	実積率 (%)	微粒分量 (%)
高炉スラグ	FA0	0		2.63	2.85	2.81	1.30	57.7	66.7	0.8
FA溶融 スラグ	FA0.9	0.9	○	3.16	2.85	2.82	1.31	58.6	65.2	5.0
	FA1.0	1.0		2.66	2.83	2.80	1.07	57.3	66.7	4.1
	FA2.5	2.5		2.67	2.86	2.82	1.14	55.9	66.2	4.5
	FA3.1	3.1	○	2.83	2.86	2.83	1.00	58.2	65.8	5.6
	FA4.0	4.0		3.15	2.90	2.89	0.53	57.0	66.4	3.6
海砂	N	—		3.02	2.56	2.51	2.12	60.5	67.2	4.5

より角ばりを取った（磨砕加工）ものである。
また、磨砕加工に分級走操作は行っていない。
なお、フライアッシュ単体の融点は 1600℃であり、高炉スラグへの溶融が困難となり、融点を下げるため、フライアッシュの約 30%(質量比)に相当する焼却ダスト（酸化鉄）を混合している。

本研究では、フライアッシュの添加率の異なる 5 種類（0.9, 1.0, 2.5, 3.1, 4.0wt%）の FA 溶融スラグを使用した。なお、FA 溶融スラグは製造の際、多量のフライアッシュを添加すると溶融状態の高炉スラグの温度が下がり、粘性が高くなり取り扱いが困難になる。そのため、現状では高いフライアッシュ添加率の FA 溶融スラグを製造することは困難である。本研究では現状の設備で製造可能な最大添加率を 4.0wt%とし、それ以下の範囲で FA 添加率の影響について検討することとした。また、フライアッシュ添加率が 0.9, 3.1wt%のものは、フライアッシュ燃焼による温度低下抑制効果を高めるため、フライアッシュ吹込み時に同様に酸素を添加したものである。



写真－1 FA4.0 外観 粒径 1.2～2.5mm



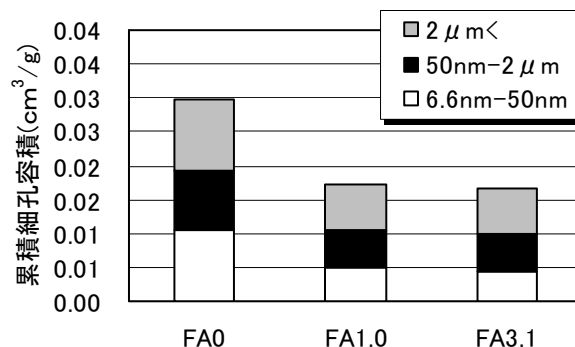
図－2 使用細骨材の粒度分布

3. FA 溶融スラグの物理的性質

3.1 FA 溶融スラグの外観および骨材試験結果

写真－1 に FA 溶融スラグの外観を示す。FA 溶融スラグは、海砂と比較して角ばった形状をしており、またガラス質な表面性状をしている。

本研究ではまず、FA 溶融スラグの物理的性質を明らかにするために JIS に規定される方法により各種骨材試験を行った。表－1 に骨材の物



図－3 使用細骨材の細孔容積

理的性質、図－2に粒度分布を示す。また、比較のためフライアッシュを添加していない従来の高炉スラグ細骨材、および海砂のデータも示す。

密度および吸水率試験結果より、フライアッシュ添加率が増加するのに伴い、密度が大きく、吸水率が小さくなっているのが分かる。また、図－3に示す各細骨材の細孔容積からも分かるように、FA 溶融スラグはFA の添加に従い密実となることが明らかとなった。実積率については、フライアッシュの添加による明確な差は現れなかった。

一方、図－2に示すように、フライアッシュ添加率が高いほど粒度は粗くなる傾向が認められた。本研究で用いたFA 溶融スラグは、回転速度などの運転条件をほぼ一定として磨砕加工を行っている。よって、フライアッシュ添加により骨材自身の硬さが大きくなっていると考えられた。

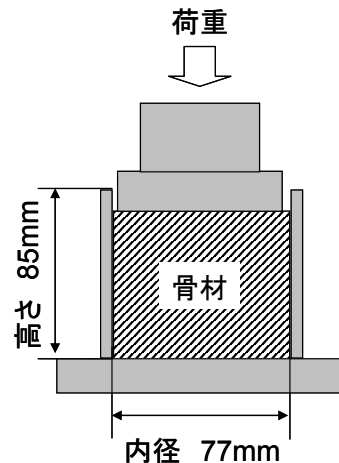
なお、FA0.9 と FA1.0 を比較すると、前者の方が粒度は粗くなっているものの、他の物性値には大差なく酸素吹き込みによる悪影響は認められなかった。

3.2 破砕値試験によるスラグ粒子強度の検討

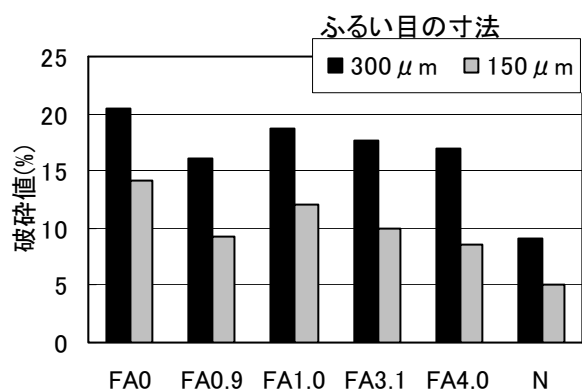
上述の通り、フライアッシュ添加率が高いほど、スラグ粒子が硬くなることが考えられた。そこで、本研究では、骨材の硬さを評価する手法として破砕値試験を行った。

試験は英国規格 BS 812-Part 110「Method of determination of aggregate crushing value(ACV)」を参考としたが、BSにおけるふるい目の寸法がJISに存在しないため、本研究では試験前の粒径を2.5～1.2mm とし、試験後のふるい目の寸法を150μm および300μm の2種類とした。

測定ではまず、決められた粒度にふるい分けた試料を絶乾状態となるまで乾燥させた。次に、図－4に示す鋼製の容器に試料を3層に分けて一定量詰め、骨材表面を平らにならした後、上部のプランジャーに荷重をかけて細骨材の破砕の状態を測定した。載荷速度は10分間で100kN



図－4 BS 破砕試験容器形状寸法



図－5 破砕値試験結果

の一定速度で行った。載荷終了後、前述した2種類のふるいで試料をふるい、式(1)により破砕値を算出した。

$$\text{破砕値 (\%)} = \frac{\left(\frac{\text{載荷後にふるいを通過したものの質量 (g)}}{\text{元の試料の全質量 (g)}} \right) \times 100}{1} \quad (1)$$

図－5に破砕値の試験結果を示す。図より、ふるいの種類に関係なく、フライアッシュの添加率が増加するほど、破砕値が小さくなる傾向にあることが分かる。つまり、フライアッシュ添加率が高いほどスラグ骨材が硬くなることが確認された。

このことから、FA 溶融スラグはコンクリート用細骨材としての品質を満たしているが、フライアッシュの添加率の高いものに関しては骨材の硬さが増し、一定の磨砕エネルギー条件下では粒度が粗くなるため、磨砕加工の程度を増し

たり、細砂との混合使用などの対策が必要であると考えられる。

4. モルタル試験

4.1 実験概要

モルタル試験は、FA0.9、FA1.0、FA3.1の3種類のFA溶融スラグ、また比較のため海砂を対象に行った。なお、FA溶融スラグの粒度分布は、各スラグの粒度の違いによる影響を排除するため、海砂の粒度分布に統一した。

セメントには高炉セメントB種（密度 3.02g/cm^3 、比表面積 $3900\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し、水セメント比 $W/C=50\%$ とした。海砂モルタルではフロー値が190となるよう砂セメント比を $S/C=2.65$ とした。FA溶融スラグを用いたモルタルでは、海砂モルタルの配合に対し、単位水量が一定となるよう単位細骨材量を変化させた。また、海砂とFA溶融スラグとの混合砂についても検討を行うため、FA溶融スラグを海砂に対し25、50、75、100%体積置換したモルタルを作製した。なお、骨材は全て表乾状態で用いた。また、本研究では混和剤は使用しなかった。

JIS R 5201 に示される方法でモルタルを練り混ぜ、フロー値を測定するとともに、モルタル用エアメータを用い空気量を測定した。また、JIS A 1123 を参考に、測定容器として JIS A 1104 に規定の細骨材用単位容積質量測定容器を用いブリーディング試験を行なった。さらに、JIS A 1147 に従い凝結時間試験を行なった。また、材齢7日、28日、91日においてモルタルの圧縮強さ試験、曲げ強さ試験を JIS R 5201 に従って行った。

4.2 フレッシュ性状

図-6に空気量測定結果を示す。図より、スラグ置換率が増加するに伴い空気量が増加することが分かる。本研究では混和剤を使用していないことから、空気量の増加はスラグの粒形の影響による、練混ぜ時のエントラップトエアの増加が原因と考えられる。

図-7にフロー試験結果を示す。図から、全

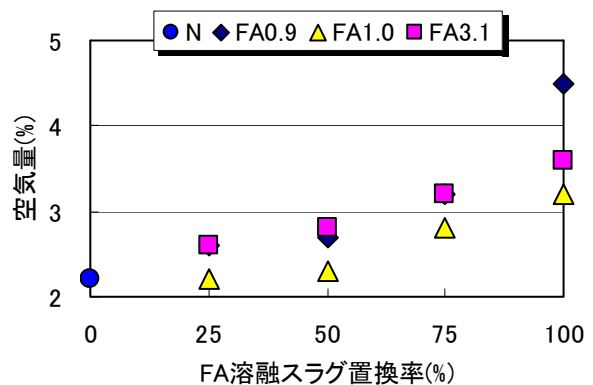


図-6 空気量測定結果

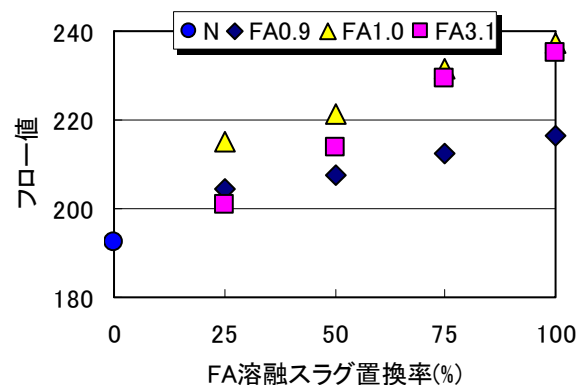


図-7 フロー値測定結果

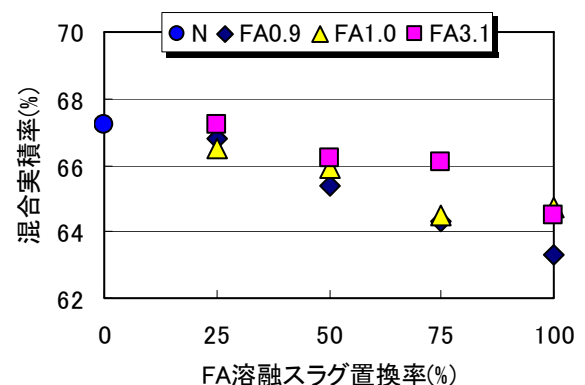


図-8 スラグ置換率と混合実積率の関係

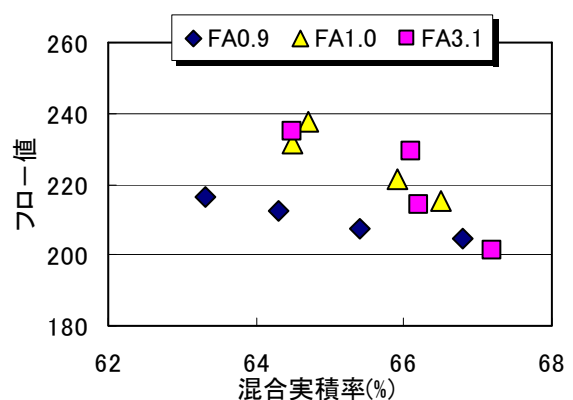


図-9 混合実積率とフロー値の関係

ての FA 溶融スラグについてスラグ置換率の増加に従い、フロー値は増加する傾向にあることが分かる。よって、FA 溶融スラグは、所要のフローを得るのに必要な単位水量を海砂に比べ減じることができると考えられる。

既往の研究により、粉体、粒体の混合物の実積率が最大となる近傍でモルタルの流動性は最大となることが知られている²⁾。そこで本研究においても、FA 溶融スラグを海砂に混合した混合砂の実積率（混合実積率）を JIS A 1104 の方法で求めた。

図-8 にスラグ置換率と混合実積率の関係を、図-9 に混合実積率とフロー値の関係を示す。本実験では海砂と FA 溶融スラグの粒度分布を同じにしているため FA 溶融スラグ置換率が高いほど混合実積率は低下する結果となった。また本研究の範囲内では混合実積率が高いほどフロー値は低下し、フローが最大となる混合実積率を明らかにすることはできなかった。さらに、フロー値の上昇は、FA 溶融スラグのガラス質で滑らかな表面性状にも依存していると考えられるため、骨材の詰め込みの程度と骨材表面の平滑度との両方を統一的に評価可能な手法について検討する必要がある。

図-10 にスラグ置換率とブリーディング率の関係を、図-11 に FA1.0 のブリーディング率の経時変化を示す。図から、置換率の増加に従いブリーディングの速度およびブリーディング率は増加し、また、ブリーディング終了時間は遅延する傾向にあることが分かった。なお、フライアッシュ添加率による差は認められず、同様の傾向を示した。一般的に、ブリーディングは単位水量、微粒分量が大きく影響しているといわれている³⁾。しかし本試験では、単位水量、微粒分量は等しいため、ブリーディングの増加は、FA 溶融スラグの保水性が低く、滑らかな表面性状が影響していると考えられる。

図-12 に凝結時間試験結果を示す。フライアッシュ添加率による凝結時間の顕著な違いはないものの、FA 溶融スラグを用いた場合にはスラ

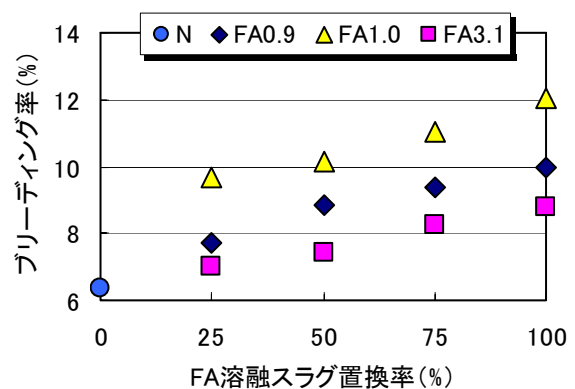


図-10 スラグ置換率とブリーディング量の関係

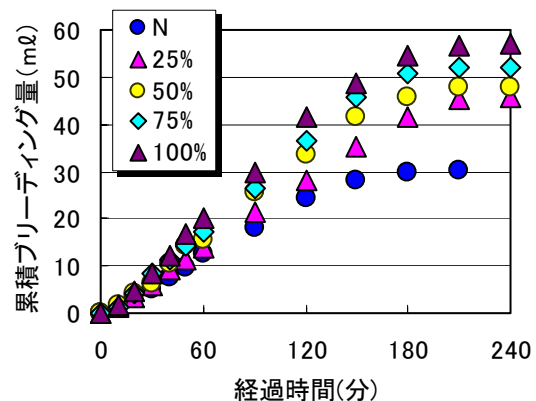


図-11 FA1.0 のブリーディング量の経時変化

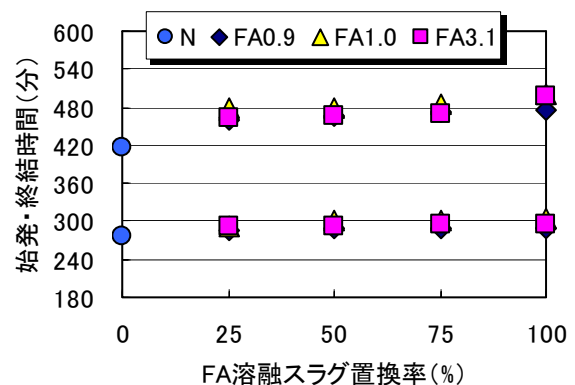


図-12 凝結時間測定結果

グ置換率の増加に従い始発・凝結時間ともに遅延している傾向にあるのが分かる。しかし、FA 溶融スラグ置換率の増加による大幅な凝結の遅延はなく、コンクリート用細骨材に適用した場合に大きく問題となることはないものと考えられる。

4.3 強さ

図-13 に圧縮強さ試験結果を示す。なお、圧縮強さ試験は、FA1.0, FA3.1 を対象に行った。

今回用いた FA 溶融スラグでは、初期強度、長期強度ともに、FA 溶融スラグ置換率の増加に従

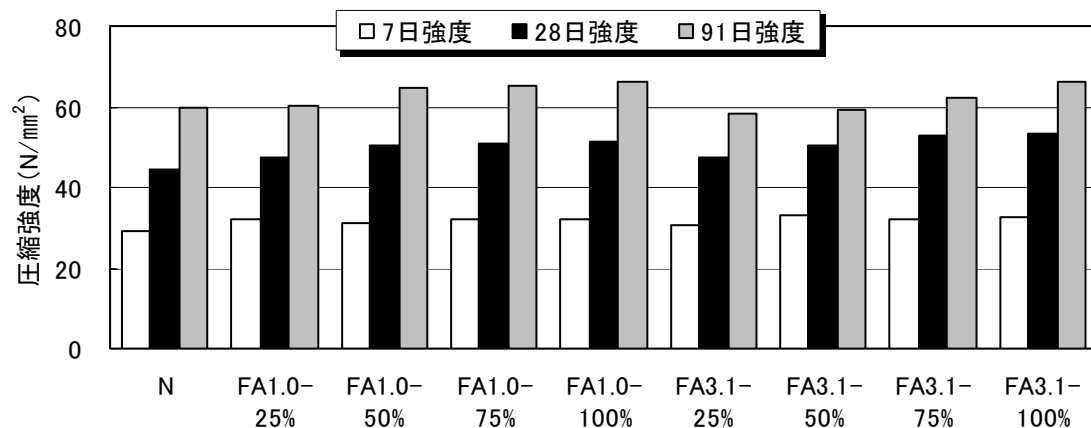


図-13 圧縮強さ試験結果

い、海砂モルタルよりも増加する傾向が確認された。さらに、フライアッシュ添加率の差による影響は見られなかった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)フライアッシュを高炉スラグに添加することで、スラグ骨材は密実になり、硬さが増すため、同一エネルギーで磨砕加工した場合、粒度が粗くなる傾向が見られる。よって、フライアッシュ添加率の高いFA 溶融スラグは、細砂との混合使用、もしくは磨砕加工の程度を上げるなどの対策が必要である。
- (2)FA 溶融スラグを細骨材として用いた場合、スラグ置換率の増加に従い空気量は増加する傾向にある。
- (3)FA 溶融スラグを細骨材として用いた場合、スラグ置換率が高いほどフロー値は大きくなった。このことから、FA 溶融スラグを用いることで、所要のフローを得るための単位水量を低減できる。
- (4)単位水量一定の場合、ブリーディングはやや増加し、また凝結時間は遅延する傾向にある。しかし、FA 溶融スラグ使用による問題は特になく考えられる。
- (5)FA 溶融スラグを用いたモルタルの強度は、海砂モルタルの強度に比べ、初期強度、長期強度ともに増進する。

制約条件により、フライアッシュの添加率の上限値が制限されている。このフライアッシュ添加率の範囲では、本研究の結果より、コンクリートやモルタルのフレッシュ性状および強度に悪影響はほとんどないと考えられる。よって、フライアッシュの更なる有効利用の観点からは、フライアッシュ添加率の増大が望ましいと考えられる。そのためには、フライアッシュを高炉スラグ中に多量に添加できる手法の検討が今後必要である。

謝辞：この研究を行なうにあたり、ご協力いただいた財団法人石炭エネルギーセンター並びに新日本製鐵株式会社八幡製鐵所に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書，2005
- 2) 三宅淳一ほか：余剰水膜によるモルタルおよびコンクリートのコンシステンシーの評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp306-319，2006
- 3) 古田敦史ほか：スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディング抑制方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp97-102，2005

現段階では、製造設備における熱対策などの