

論文 フライアッシュによる高炉スラグ骨材コンクリートの品質改善

吉野 公^{*1}・井上 正一^{*2}・黒田 保^{*3}・村山 真一^{*4}

要旨：本研究は、フライアッシュを高炉スラグ細骨材の一部として置換し、粗細骨材とも高炉スラグ骨材を用いたコンクリートの品質改善をすることを目的として行った。まず、モルタルにおいて、所定の流動性および空気量を得るためにフライアッシュ置換率と混和剤量との関係を明らかにし、その後、コンクリートにおいて、フレッシュ性状および硬化後の性質の検討を行った。その結果、高炉スラグ骨材を用いたコンクリートにフライアッシュを添加することによって、特にフレッシュ性状が改善された。また、練混ぜ方法によって AE 剤の添加量が少なくなることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ, 高炉スラグ骨材, 高性能 AE 減水剤, 混和剤添加量

1. はじめに

現在、石炭灰の約 1/4 は埋め立て処分され、残りの 3/4 程度はセメント・コンクリート分野を中心に有効利用されている。しかし、近年、灰捨て場として最終処分場の確保が困難になる状況や、一方においては有効利用の大半をセメント原料が占めているなか、セメント需要の低迷などの状況から、石炭灰の安定的な処理のため、新たな有効利用拡大技術の開発が急務となっている。

このような中でコンクリート骨材に目を向けると、環境的な問題からその資源の枯渇が問題化してきている。その対応策の一つとして、各種スラグ骨材の使用があげられるが、粒形が角ばっていること、ガラス質のため表面が滑らかであること等のために単体で用いた場合には特にフレッシュ性状に問題が生じる場合が多い。

そこで、フライアッシュの有効利用として、天然骨材の枯渇への対応という観点から注目されている高炉スラグ骨材を用いたコンクリートの品質改善に利用することに着目した。すなわち、高炉スラグ骨材コンクリートにフライア

ッシュを細骨材の一部として置換したコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の基本的性質について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で用いたフライアッシュの物理的性質を表-1に示す。フライアッシュ中の未燃炭素は内部に多くの空隙を有するが、ブレン法では未燃炭素の表面積を正確に測定できないと考えられ、窒素吸着による BET 比表面積を測定した。BET 比表面積の数値から 2 種類のフライアッシュとも未燃炭素量が多いものであることがわかる^{1), 2)}。セメントは、高炉 B 種セメントを用いた。

骨材として、細骨材には 2.5mm 高炉スラグ細骨材、粗骨材には高炉スラグ粗骨材 2005 を用い

表-1 フライアッシュの性質

種類		FA	FB
密度 (g/cm ³)		2.25	2.23
比表面積	ブレン (cm ² /g)	3,290	4,090
	BET (m ² /g)	5.48	8.74

*1 鳥取大学 工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)

*2 鳥取大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 鳥取大学 工学部土木工学科助手 工博 (正会員)

*4 大成建設

た。また、細骨材に砕砂・陸砂の混合砂（以下普通砂）、粗骨材に砕石を使用したコンクリートを比較用として練混ぜた。表-2に骨材の物理的性質を示す。

混和剤は、高炉スラグ骨材コンクリートでは、AE減水剤では、単位水量 175 kg/m³ で所定のスランプが得られないため、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と変性アルキルカルボン酸系の AE 助剤を用いた。また、比較用のコンクリートには通常の AE 減水剤（リグニンスルホン酸系）とアルキルアリルスルファン酸系の AE 助剤を用いた。

2.2 実験計画

研究を進めるのに先立ち、フライアッシュを混入しない高炉スラグ骨材コンクリートの練混ぜを行った。単位水量を 175 kg/m³ とし、水セメント比 60 および 65%において、スランプ 8±1.5cm を得るために、高性能 AE 減水剤や細骨材率を変化させて練混ぜたが、材料分離が見られ所定のスランプは得られなかった。そこで、本研究は、以下の項目に沿って実験を行った。

(1) フライアッシュ置換率および混和剤添加量がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響の検討

(2) フライアッシュ置換が高炉スラグ骨材コンクリートのフレッシュ性状および硬化後の性質に及ぼす影響の検討

(3) 練混ぜ方法の違いが混和剤添加量に及ぼす影響の検討

まず、(1) に関して、所定の流動性（フロー値）、空気量が得られるようフライアッシュの置換率ごとに高性能 AE 減水剤、AE 助剤の添加量を増やしていくことによって行った。ここで述べる所定の流動性とは、フロー値 200 mm を目安とした。この値は通常の骨材を用いた配合のコンクリートでスランプ 8cm となったモルタル部分のフロー値が 200mm 付近にあったことから、一つの目安として採用した。また、空気量も同様に比較用コンクリートの配合からモルタルで

表-2 骨材の物理的性質

骨材	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	FM	実積率 (%)
粗骨材	砕石	2.62	1.56	6.61	61.0
	高炉スラグ	2.52	3.68	6.62	60.0
細骨材	普通砂	2.64	1.84	2.78	66.6
	高炉スラグ	2.67	0.49	2.22	55.3

表-3 モルタルの実験要因

水セメント比 (%)	60, 65
フライアッシュ置換率 (%)	0, 5, 10, 15, 20

の空気量を計算し、9.0%と設定した。このモルタルの結果から、コンクリートでのフライアッシュの置換率の範囲を決定するとともに、高性能減水剤および AE 助剤の添加量の目安を得た。実験要因を表-3に示す。

つぎに、(2) に関しては、フライアッシュの置換率が、高性能 AE 減水剤、AE 助剤の添加量、スランプおよび空気量の経時変化、ブリーディング、凝結時間、圧縮強度、引張強度、静性弾性係数に及ぼす影響を検討した。

(3) に関しては、ペーストあるいはモルタルを試料とした場合には、フライアッシュにあらかじめ水を含ませる、練混ぜ水を分割して練り混ぜるなどの練混ぜ方法を取ったときに、混和剤の効果が大きくなる結果が得られている²⁾ ことから、コンクリートの練混ぜ方法を変え、混和剤添加量が低減できる可能性を探った。

3. 結果および考察

3.1 フライアッシュ置換率および混和剤添加量がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響

フロー値と高性能 AE 減水剤添加量の関係を図-1に示す。なお、図の凡例の記号は、例えば (FA-10-60) は前から、フライアッシュの種類-置換率-水セメント比を表す。

置換率 0%（細骨材として高炉スラグのみ使用）のものに関しては、図-1に示すとおり高性能 AE 減水剤を増やしてもフロー値に変化が

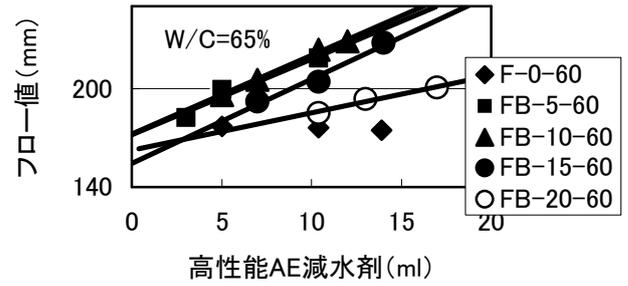
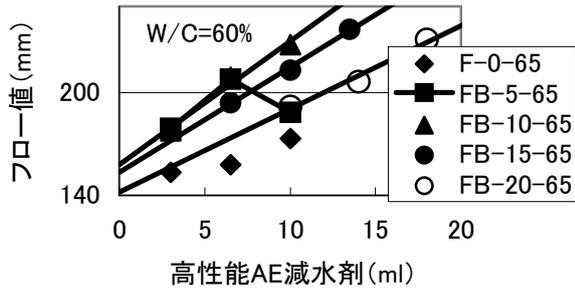


図-1 フロー値と高性能 AE 減水剤添加量の関係

見られず、写真-1に示すような材料分離が見られた。フライアッシュを置換しない場合に、コンクリートにおいて材料分離が見られ所定のスランプが得られなかったのは、モルタルにおいてすでに分離が見られることによるといえる。

高性能 AE 減水剤および AE 助剤の添加量とフライアッシュ置換率との関係を図-2および図-3に示す。図から明らかなように、フロー値 200 mm, 空気量 9.0%を得るための混和剤の添加量は、フライアッシュの置換率が大きくなるに伴って増えている。混和剤の添加量が増大してしまったコンクリートは、コストの面から考えると経済的なコンクリートとはいえない。具体的には W/C=60%ではスラグ置換率が 20%になると高性能 AE 減水剤の添加量が多くなり、扱いが難しく、さらにコストもかかるコンクリートといえる。

モルタルの結果から、コンクリートにおいては、表-4に示す置換率において、各種試験を行った。

3.2 フライアッシュ置換が高炉スラグ骨材コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

コンクリートの配合は、モルタルで得られた高性能 AE 減水剤量および AE 助剤量を初期値として、最適細骨材率、所定のスランプ値および空気量が得られる高性能 AE 減水剤量および AE 助剤量を試し練りによって決定した。図-4, 図-5に、フライアッシュ置換率とスランプ 8 ± 1.5 cm, 空気量 $5 \pm 1.0\%$ のコンクリートを得る

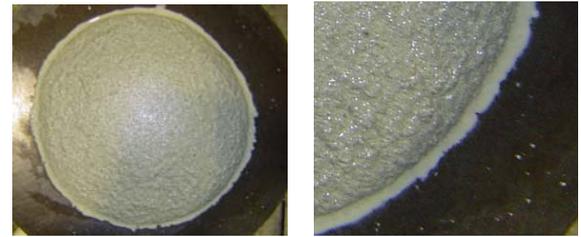


写真-1 W/C=60%置換 0% (右: 拡大)

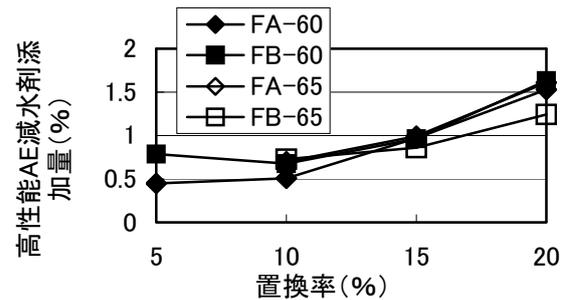


図-2 高性能 AE 減水剤添加量 (モルタル)

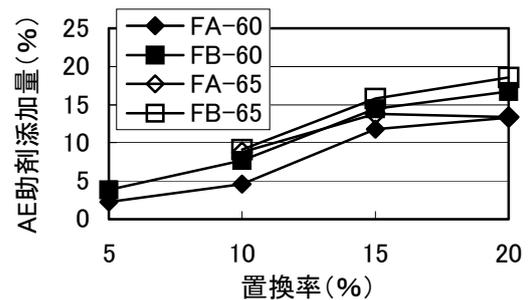


図-3 AE 助剤添加量 (モルタル)

表-4 フライアッシュ置換率

フライアッシュ置換率 (%)	
W/C=60%	W/C=65%
5, 10, 15	10, 15, 20

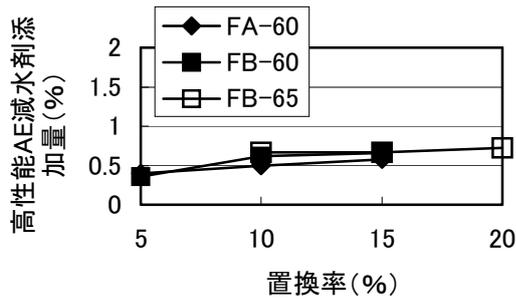


図-4 高性能 AE 減水剤添加量(コンクリート)

ために必要とした最終的な混和剤添加量の関係を示す。高性能 AE 減水剤量, AE 助剤量ともスラグ置換率が増加するにしたがって, 混和剤添加量は増加するが, 特に AE 助剤量は所定の空気量を得るためにはフライアッシュ置換率の増加にあわせてかなり増加させなければならないことがわかる。

なお, フライアッシュ置換率 5% の場合には分離傾向が見られた。

フライアッシュの置換がコンクリートのブリーディングに及ぼす影響を把握するため, フライアッシュ置換率を 10%, 15% と変化させたコンクリートに対してブリーディング試験を行った。その結果を図-6 に示す。図-6 より, 最終ブリーディング量は $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であり, ブリーディング終了時間とブリーディング量は, W/C やフライアッシュ置換率と関係なく, ほぼ同じ値を示した。

始発時間, 終結時間を表-5 に示す。表より, W/C が大きくなると凝結時間が遅延するが, フライアッシュの種類および置換率と凝結時間に相関関係は見られなかった。そこで, 高性能 AE

表-5 凝結時間

種類	始発時間		終結時間	
	h	m	h	m
FA-10-60	9	35	12	35
FA-10-65	12	20	16	10
FA-15-60	8	35	12	00
FB-10-60	9	40	11	00
FB-10-65	11	20	15	10
FB-15-60	10	40	15	00
FB-15-65	10	40	15	10

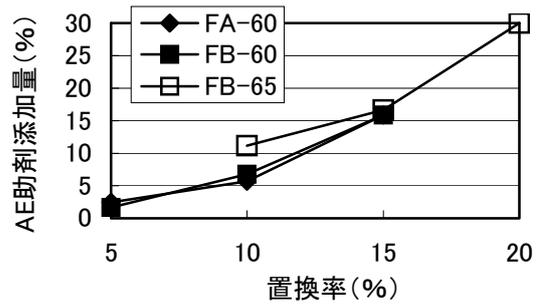


図-5 AE 助剤添加量 (コンクリート)

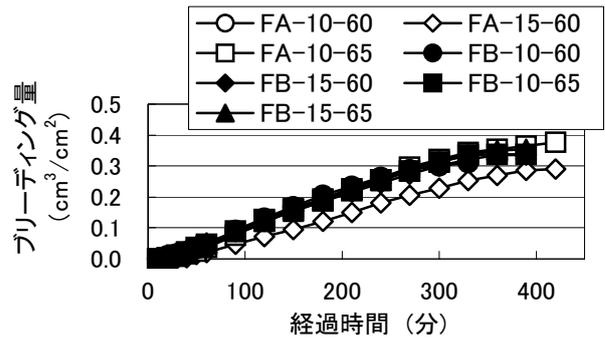


図-6 ブリーディング試験結果

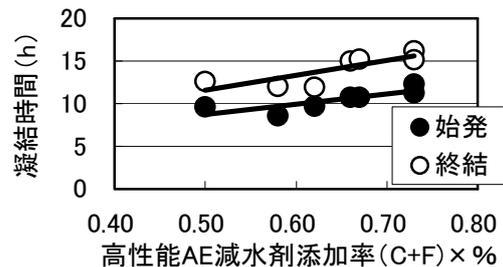


図-7 凝結時間と高性能 AE 添加率との関係

減水剤添加率が凝結時間に及ぼす影響を検討するために, 高性能 AE 減水剤添加率と凝結時間の関係を分析した結果を図-7 に示す。この図より, 高性能 AE 減水剤添加率と凝結の始発時間, 終結時間はほぼ比例しており, 高性能 AE 減水剤の添加率が増えると凝結時間は長くなる傾向にあることがわかる。

3.3 フライアッシュ置換が硬化コンクリートの諸性質に及ぼす影響

圧縮強度試験結果を図-8, 図-9 に示す。図より, いずれの材齢においても, 同じ水セメント比では, 高炉スラグ骨材コンクリートの方が普通骨材コンクリートよりも同等かあるいは

高い強度が得られた。高炉スラグ骨材コンクリートでは、高性能 AE 減水剤を用いており、セメントの分散がよいこと、またフライアッシュを混入したことによるポズラン反応の影響が考えられる。しかし、今回用いたフライアッシュでは、フライアッシュの置換率が多くなるほど強度が高くなることはなかった。

図-10に材齢28日における引張強度と圧縮強度との関係を示す。土木学会標準示方書の予測式で予測される引張強度-圧縮強度関係とほとんど一致していることがわかる。

図-11に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。なお、図中には参考のために、土木学会のコンクリート標準示方書で用いられている普通コンクリートに対する圧縮強度と静弾性係数の関係も併記している。図より、高炉スラグ骨材を用いたコンクリートの静弾性係数は、示方書で示される値よりも小さいことが分かる。

3.4 練混ぜ方法が混和剤添加量に及ぼす影響

フライアッシュ置換率 10%以上であれば、高炉スラグコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の性質にはほとんど差がなく、混和剤添加量はフライアッシュ置換率が増加するにしたがって増加することから、高炉スラグ細骨材へのフライアッシュの置換率は 10%程度が適当と判断できる。そこで、フライアッシュ置換率 10%のコンクリートにおいて、練混ぜ方法が混和剤の効果に及ぼす影響を検討した。

採用した練混ぜ方法を図-12に示す。分割練りのフライアッシュは、予備実験から得られた取り扱いやすいフライアッシュとなる 1 次水量でモルタルミキサを用いて練り混ぜた。

3 種類の練混ぜ方法において得られたコンクリートのスランプおよび空気量の結果を表-6、表-7に示す。スランプにおいては、練混ぜ方法の違

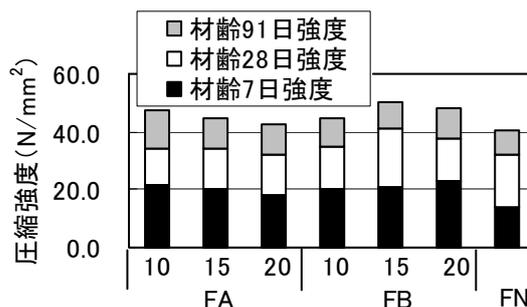


図-8 圧縮強度試験結果 (W/C=60%)

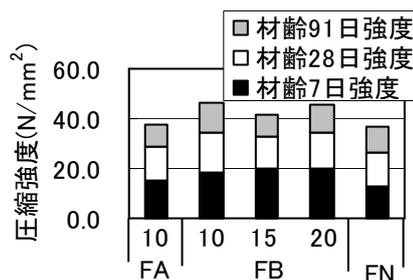


図-9 圧縮強度試験結果 (W/C=65%)

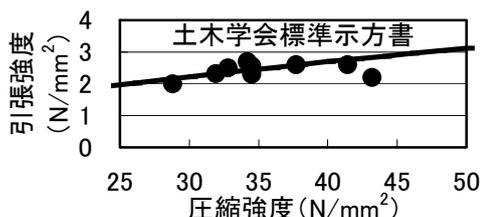


図-10 引張強度と圧縮強度との関係

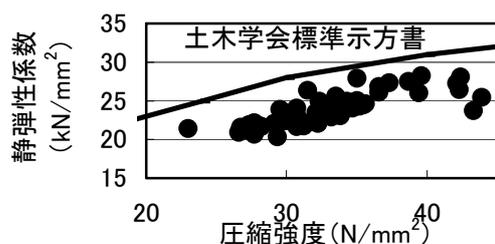


図-11 圧縮強度と静弾性係数の関係

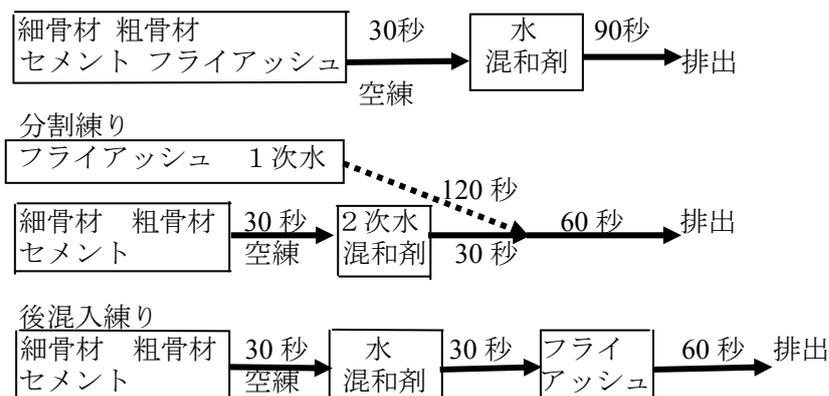


図-12 練混ぜ方法

この影響は見られなかったが、空気量は練混ぜ方法を変化させると、水セメント比、フライアッシュの種類に関係なく 2%程度増加していることが分かる。これより、分割練りおよび後混入練りは AE 剤を低減させるのに有効であるといえる。表-8 は FA-10-60 において AE 助剤添加量を 20%ずつ減らしていき、空気量 5%を目標とし打設したときの AE 助剤量である。表より、練混ぜ方法を変えることで 20%の AE 助剤添加量を減らすことができる。

また、図-13, 14 は練混ぜ方法を変えた場合のスランプおよび空気量の経時変化である。後混入および分割の AE 助剤量は標準×0.8 である。図より、普通コンクリートと同等の変化で練混ぜ方法の違いによる影響は見られなかった。

4. まとめ

スラグ骨材のみを用いたコンクリートでは、材料分離のため、スランプ 8cm が得られなかったが、細骨材にフライアッシュを置換することで改善された。その他得られた知見を以下に要約し、まとめとする。

(1) スラグ置換率が増加すると特に所定の空気量を連行するための AE 助剤量が増加する。

(2) フライアッシュの置換率とは関係なくブリーディング量はほぼ同じ値となり、凝結時間に相関性は見られなかったが、高性能 AE 減水剤添加量が凝結時間に影響を及ぼす結果がみられた。

(3) 今回用いたフライアッシュでは、フライアッシュの置換率が多くなるほど強度が高くなることはなかった。

(4) 上述の結果を踏まえると、本研究の範囲内では、高炉スラグ細骨材へのフライアッシュの置換率は 10%程度が適当である。

(5) セメントと骨材を先に練混ぜ、後でフライアッシュを入れる「後混入練り」と、水を分割し、フライアッシュペーストを後で入れる「分割練り」によって、AE 助剤添加量は 20%ほど減じられた。

表-6 練混ぜ方法の影響 (スランプ)

方法	FA-10-60	FB-10-60	FB-10-65
標準	7.0cm	9.0cm	7.5cm
分割	7.0cm	9.5cm	7.5cm
後混入	6.5cm	9.0cm	7.5cm

表-7 練混ぜ方法の影響 (空気量)

方法	FA-10-60	FB-10-60	FB-10-65
標準	5.0%	4.5%	5.7%
分割	6.3%	7.0%	8.2%
後混入	6.8%	6.2%	8.2%

表-8 練混ぜ方法の影響 (空気量)

	後混入		分割
添加量	標準×0.8	標準×0.6	標準×0.8
空気量	5.0%	4.0%	5.2%

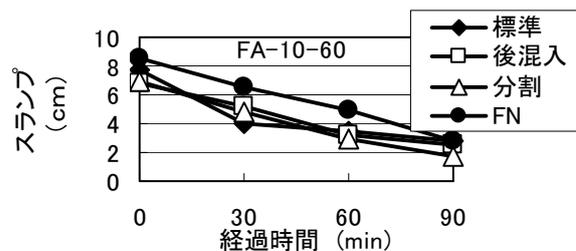


図-13 スランプの経時変化

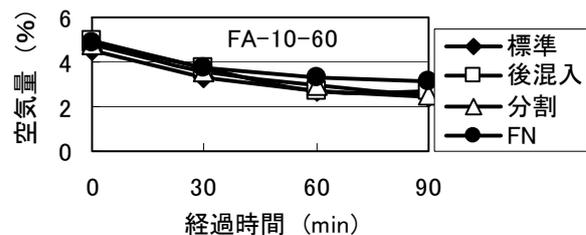


図-14 空気量の経時変化

参考文献

- 1) 松永 篤, 伊藤智章, 松嶋信行: 石炭灰を細骨材に置換して用いたコンクリートの流動性および空気連行性, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.336-372, 1999
- 2) 吉野 公, 井上正一, 黒田 保, 村山真一, フライアッシュの性質が混和剤の添加量に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.175-180, 2005