

産業副産物のモルタル・コンクリートへの有効利用に関する研究

ー循環流動層灰および粒形改善砕砂を用いたモルタル・コンクリートの物性ー

正会員 ○山下 紘太郎*¹
同 高山 長基*²
会員外 高山 長栄*³
正会員 濱 幸雄*⁴

1. 材料施工ー2. モルタル・コンクリートの物性

循環流動層灰、粒形改善砕砂、メチレンブルー吸着量、フレッシュ性状、圧縮強度、長さ変化

1. はじめに

フライアッシュは主に火力発電所の微粉炭燃焼ボイラーから出る排ガスに含まれている微粉粒子であり、コンクリートの混和材としてJISで規格化され、広く用いられている¹⁾。一方、循環流動層ボイラー(以下、CFBボイラー)は大規模な工場における自家発電ボイラーとして利用されており、燃焼効率の良さ、環境保護の観点からも関心が高まっている。CFBボイラーは固体粒子を流動化して燃焼する方式であり、発生する石炭灰は微粉炭燃焼ボイラーと比較して、低温で燃焼させ、同時に石炭に含まれる硫黄分を石灰石(CaCO₃)により脱硫を行うことから、フライアッシュとは組成、性状が異なる。循環流動層灰(以下、CFB灰)をコンクリートの混和材として用いることが出来れば、より環境負荷の低減になると考えられるが、CFB灰の性状およびモルタル、コンクリートの物性は十分に把握されていないのが現状である。

また、近年、天然細骨材の枯渇や、海砂の採取規制が進み良質な骨材の安定供給確保が重要な課題となっている。そこで天然砂の代替品として豊富に供給できる、砕砂が期待されている。しかし砕砂は表面が粗く、コンクリート用細骨材として使用した場合に単位水量が増加し、現状の砕砂を多く使用することは不可能である。そのため、細骨材を研磨する機械を通して、砕砂の表面を研磨した粒形改善砕砂をコンクリートの細骨材として使用する取り組みが行われている。

本研究では、産業副産物の有効利用の検討の一環として、CFB灰の品質変動およびCFB灰を混入

したモルタルおよびコンクリートの基礎性状を確認することと、粒形改善砕砂を混合したコンクリートについて、天然砂のみを使用したコンクリートと、その諸物性を比較することを目的としている。

2. CFB灰に関する実験

2-1 実験計画

図1に実験計画を示す。CFB灰の物性試験は、JIS A 6201で定められているフライアッシュの品質規格について定期的に行い、品質の安定性を確認した^{2) 3)}。さらに含有未燃炭素の指標となるメチレンブルー吸着量の測定を行った⁴⁾。以上の測定結果からCFB灰の品質を確認した。次に、モルタル試験を行い、CFB灰混合率変更によるフロー値比、圧縮強度、長さ変化への影響について検討した。続いて、実機プラントにてコンクリートの試験練りを行い、フレッシュ性状試験の結果から、最適な単位水量、細骨材率を決定した。決定したコンクリート調合表から実験室実験にて、フレッシュ性状、圧縮強度、長さ変化、質量変化試験を行い、CFB灰のコンクリートへの影響を確認した。

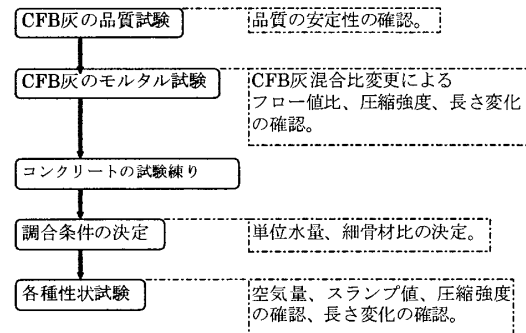


図1 実験計画(CFB灰)

Studies on the Utilization of Industrial By-products to Concrete and Mortar

Properties of Mortar and Concrete Using Circulating Fluidized Bed Ash and Crushed Sand Particle Shape Improves

YAMASHITA Kotaro et al.

2-2 使用材料および調査

モルタルおよびコンクリート実験における使用材料および調査を表1に示す。コンクリート実験における調査は、粗骨材の絶対容積が一定の条件下において、フレッシュコンクリートのスランプが 18.0 ± 1.0 cm、空気量が $4.5 \pm 0.5\%$ の範囲内になるように、単位水量および混和剤添加率を調整した。

2-3 結果および考察

2-3-1 CFB 灰の品質

フライアッシュ(II種灰)と7、10、11、12月に採取したCFB灰における湿分、強熱減量、フロー値比の結果と規格値を図2~4に示す。CFB灰は湿分、強熱減量、フロー値比において、フライアッシュの品質規格を満たさないことが確認された。

メチレンブルー吸着量試験結果を図5に示す。含有未燃分の指標となるメチレンブルー吸着量は変動が大きく、フライアッシュ(II種灰)の約2~5倍であることを確認した。未燃炭素はAE剤を吸着するため、コンクリートの混和材として用いた場合、AE剤使用量が増加すると考えられる。

また、湿分、強熱減量、メチレンブルー吸着量の試験結果からCFB灰は品質の変動が大きいと言える。

2-3-2 モルタル実験

モルタル実験におけるフロー試験を図6に、圧縮試験の結果を図8に示す。CFB灰を内割、外割ともに10%以上混入した場合、フロー値がフライアッシュ(II種灰)を混入したモルタルより小さくなることを確認した。また、圧縮試験結果においても、混合率10%までは圧縮強度は増加するが、混合率10%以降は強度発現が安定しないことを確認した。

表1 使用材料および調査

	水粉体比(%)	混和材混合率(%)	混和材	混和剤	測定項目
モルタル実験	50%	0%	-	-	フロー値 圧縮強度 長さ変化 質量変化
		内割5,10,15,20,25%	CFB灰	-	
		外割5,10,15,20,25,30%			
		内割5,10,15,20,25%	普通FA		
実機プラント コンクリート実験	55%	0%	-	-	フレッシュ性状 圧縮強度
		内割10,20%	CFB灰	AE剤	
実験室 コンクリート実験	40%	0%	-	-	フレッシュ性状 圧縮強度 長さ変化 質量変化
		外割5%	CFB灰	AE剤	
		外割10%			

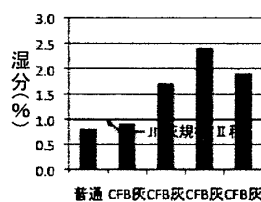


図2 湿分月別変動

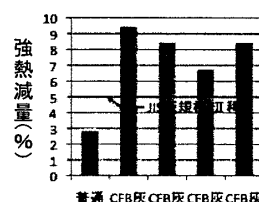


図3 強熱減量月別変動

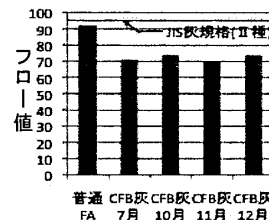


図4 フロー値比月別変動

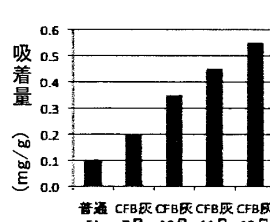


図5 メチレンブルー月別変動

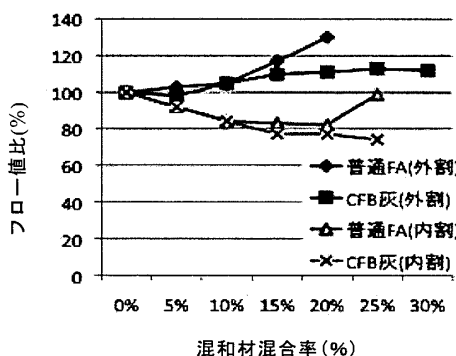


図6 モルタル試験におけるフロー試験結果

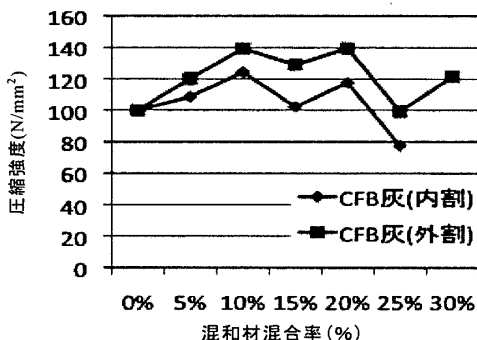


図7 モルタル試験における28日強度

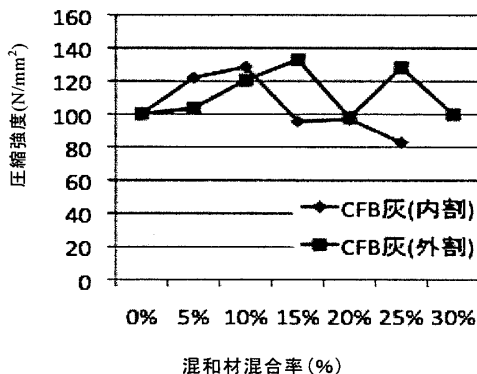


図8 モルタル試験における91日強度

2-3-3 コンクリート実験

実機プラント実験及び実験室実験におけるコンクリートのフレッシュ性状変化と圧縮試験結果を図9、図10に示す。フレッシュ性状において、CFB灰を混入したコンクリートは、基準試験体（CFB灰無混入）と比べて時間をおくことでスランプ値は1~2cm低下し空気量は約2%低下することが確認された。CFB灰は水分の存在下で自硬性がある⁴⁾。そのため、スランプ値と空気量が時間をおくことで低下したと考えられる。

圧縮強度はCFB灰を混入した場合、7日強度は低い、28日強度は基準試験体以上である。

2-3-4 長さ変化及び質量変化

CFB灰を内割で混入したモルタルの長さ変化と質量変化試験結果を図11に示す。CFB灰を内割で混入した試験体は基準試験体より乾燥収縮率が小さいが、質量減少率は大きい結果となった。

CFB灰を外割で混入したモルタルの長さ変化と質量変化試験結果を図12に示す。CFB灰を外割で混入したモルタルは基準試験体より乾燥収縮率が大きく、質量減少率も大きい。

コンクリート試験体の長さ変化と質量変化試験結果を図13、図14に示す。基準試験体に比べてCFB灰を外割5、10%で混入したコンクリート試験体は乾燥収縮率が大きくなり、質量減少率も大きい結果となった。

CFB灰を外割で混入した試験体の場合、モルタル試験体とコンクリート試験体ともに、CFB灰無混入の試験体より乾燥収縮率が大きく、質量減少率も大きいことが分かった。

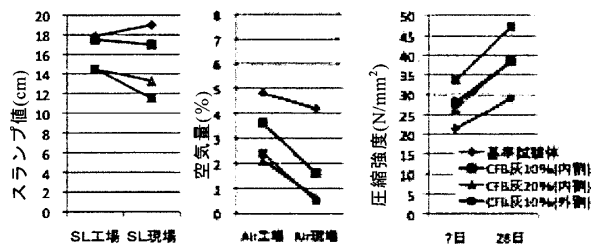


図9 実機プラント実験におけるフレッシュ性状変化と圧縮強度

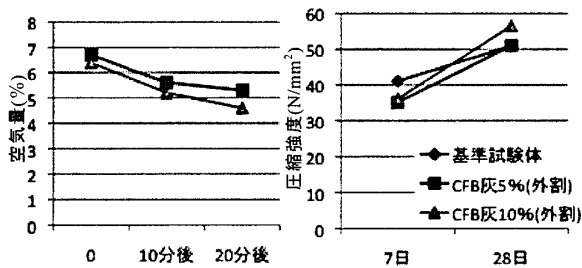


図10 実験室実験における空気量変化と圧縮強度

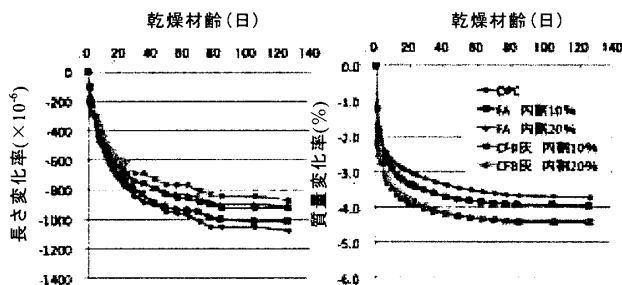


図11 モルタル試験体(内割)の長さ変化率及び質量変化率と乾燥材齢

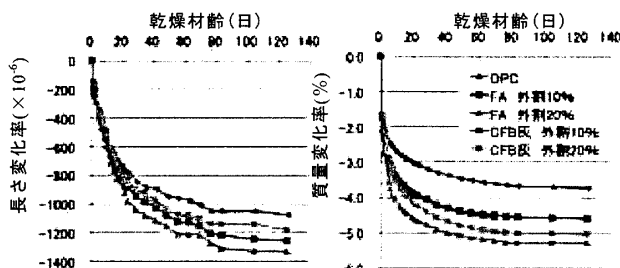


図12 モルタル試験体(外割)の長さ変化率及び質量変化率と乾燥材齢

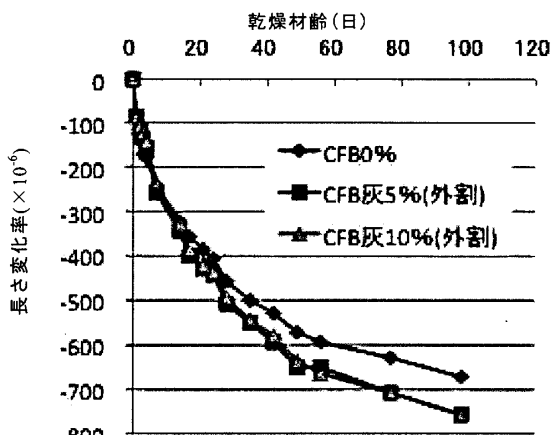


図13 コンクリート試験体の長さ変化率と乾燥材齢

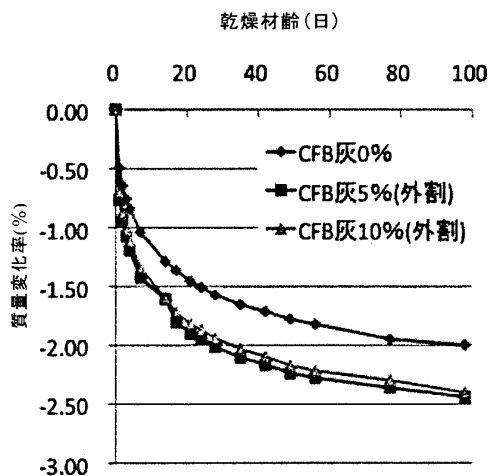


図14 コンクリート試験体の質量変化率と乾燥材齢

2-3-5 マイクロスコープによる CFB 灰の拡大結果

図 15、図 16 にフライアッシュ(II種灰)および CFB 灰をマイクロスコープによって、2000 倍に拡大したものを示す。フライアッシュは球形微細粒子であり、ベアリング効果により流動性を向上させる。しかし、CFB 灰の粒子形状は球形ではないため、フロー試験において、フライアッシュ(II種灰)を混入したモルタルよりフロー値が小さくなったと考えられる。

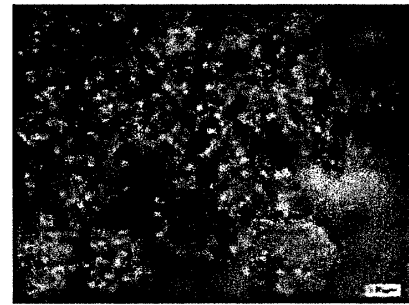


図 15 フライアッシュ (JIS II 種灰) 拡大画像

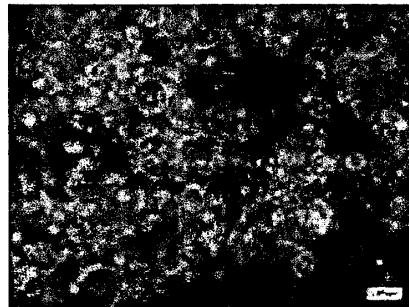


図 16 CFB 灰拡大画像

3. 粒形改善砕砂に関する実験

3-1 実験計画

表 2 に実験計画を示す。コンクリート試験では水セメント比 60、50、40%の三水準とした。さらに、それぞれ細骨材の混合比は 10 対 0、7 対 3、5 対 5 の三水準とし、各種測定項目について試験を行った。⁵⁾

3-2 使用材料および割合

細骨材のふるい分け試験結果を図 17~図 19 に示す。細骨材のふるい分け試験は JIA A 1102 に準じて行った。使用材料、割合およびフレッシュ性状を表 3 に示す。割合は、粗骨材の絶対容積が一定の条件下において、フレッシュコンクリートのスランプが 18.0±1.0cm、空気量が 4.5±0.5%の範囲内になるよう単位水量および混和剤添加率を調整した。また、細骨材の混合比は容積比とした。

3-3 結果および考察

3-3-1 粒度分布

細骨材試験結果を表 4 に示す。陸砂、粒形改善前の砕砂(原砂)および粒形改善砕砂のふるい分け試験結果を図 17~図 19 に示す。細骨材を研磨する機械を通して砕砂の表面を研磨したことで、陸砂に近い粒度分布になることを確認した。

表 4 細骨材試験結果

試験項目	陸砂	ガリバー砂(原砂)	ガリバー砂
表乾密度[kg/L] (JIS A 1109)	2.67	2.70	2.65
純乾密度[kg/L] (JIS A 1109)	2.63	2.64	2.61
吸水率[%] (JIS A 1109)	1.57	2.07	1.49
単位容積質量[kg/L] (JIS A 1104)	1.75	1.69	1.78
微粉分量[%] (JIS A 1103)	0.6	2.10	2.70

表 2 実験計画(粒形改善砕砂)

コンクリート試験	水セメント比(%)	細骨材の混合比(陸砂:ガリバー砂)	試験体寸法 (cm)	測定項目
	60	10対0 7対3 5対5		
50	10対0 7対3 5対5			
40	10対0 7対3 5対5			

表 3 割合およびフレッシュ性状

水セメント比(%)	細骨材の混合比(陸砂:ガリバー砂)	単位水量 (kg/m ³)	AE剤添加率 (G×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
60	10対0	178	0.4	18.6	4.4
	7対3	181	0.3	18.0	4.3
	5対5	180	0.25	17.0	4.0
50	10対0	176	0.5	18.5	4.4
	7対3	181	0.3	18.0	4.3
	5対5	185	0.2	19.0	4.2
40	10対0	188	0.5	17.5	4.2
	7対3 5対5	191 188	0.5 0.5	18.0 17.0	4.2

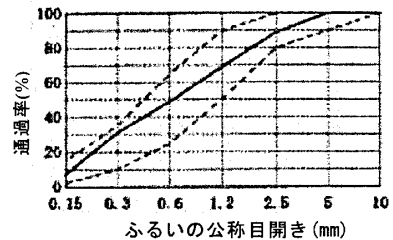


図 17 陸砂ふるい分け試験結果

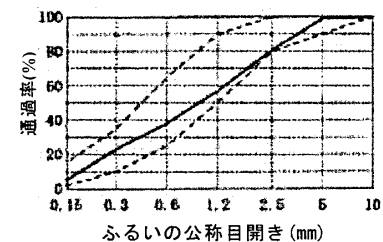


図 18 粒形改善前の砕砂(原砂)ふるい分け試験結果

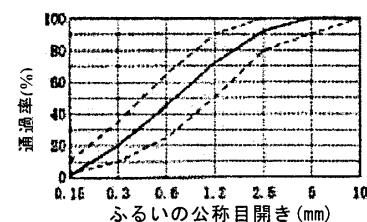


図 19 粒形改善砕砂ふるい分け試験結果

3-3-2 単位水量と粒形改善砕砂混合比との関係

図 20 に単位水量と粒形改善砕砂混合比との関係を示す。粒形改善砕砂の混合比を大きくすると単位水量も増加する。これは、粒形改善砕砂が砕砂であり粒形が天然砂より劣ることが原因と考えられる。

3-3-3 圧縮強度試験

粒形改善砕砂を混入した材齢 7 日、28 日コンクリートの圧縮試験結果を図 21 に示す。試験によるばらつきはあったものの、粒形改善砕砂混合比変更による圧縮強度の変化は小さい。したがって、粒形改善砕砂使用による圧縮強度への影響は小さい。

3-3-4 長さ変化及び質量変化

W/C=40 のコンクリート試験体の長さ変化と質量変化試験結果を図 22、図 23 に、W/C=50% のコンクリート試験体の長さ変化と質量変化試験結果を図 24、図 25 に示す。陸砂と粒形改善砕砂の混合比変更によるコンクリート試験体の長さ変化及び質量変化の変動は小さい。したがって、粒形改善砕砂使用による長さ変化の影響は小さい。

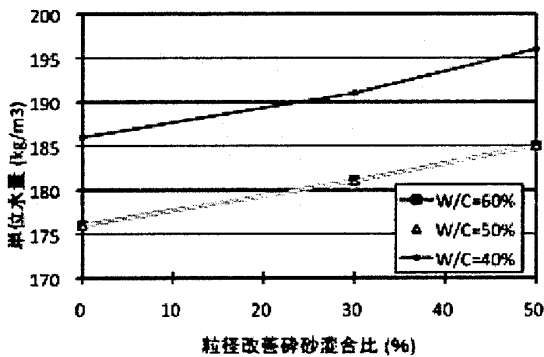


図 20 単位水量と粒形改善砕砂混合比との関係

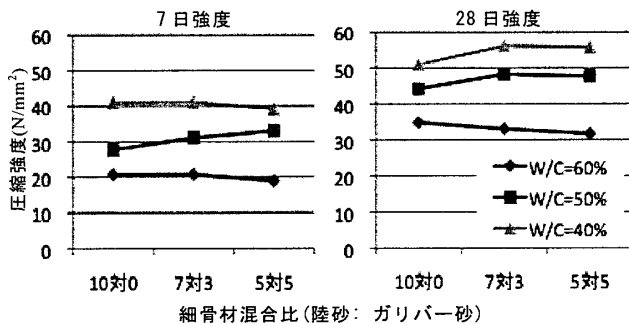


図 21 ガリバー砂を混入したコンクリートの圧縮試験結果

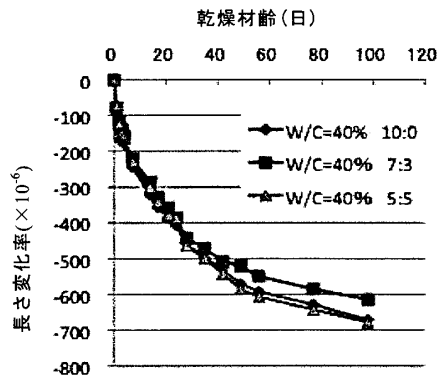


図 22 コンクリート (W/C=40%) の長さ変化率と乾燥材齢

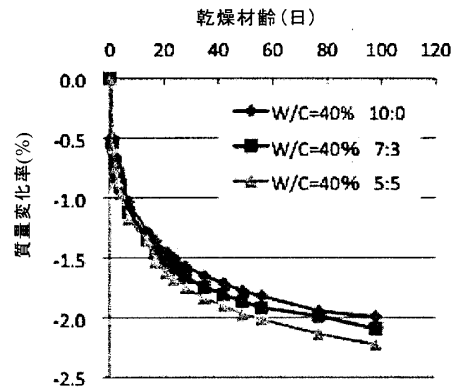


図 23 コンクリート (W/C=40%) の質量変化率と乾燥材齢

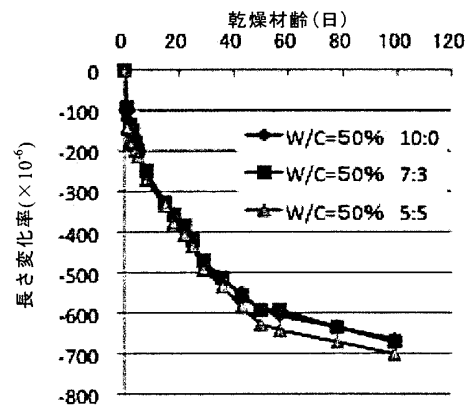


図 24 コンクリート (W/C=50%) の長さ変化率と乾燥材齢

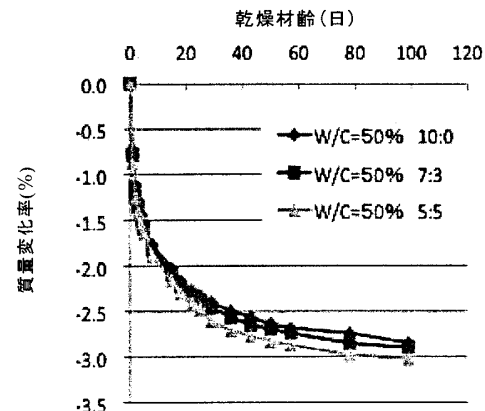


図 25 コンクリート (W/C=50%) の質量変化率と乾燥材齢

3-3-5 マイクロ스코ープによる拡大結果

粒径 2.5~5.0mm のマイクロ스코ープによる粒形改善前の砕砂の拡大画像(25倍)を図 26 に、粒形改善砕砂の拡大画像を図 27 に示す。

粒形改善砕砂は研磨する機械に通す前と比較して、粒子の形状が丸みを帯びていることを確認した。

4. まとめ

4-1CFB 灰について

(1) CFB 灰はフライアッシュの品質規格(JIS A 6201) に対して湿分、強熱減量、フロー値比が規格外であり、品質変動も大きい。また、含有未燃炭素の指標となるメチレンブルー吸着量は、普通 FA の 2~5 倍であった。

(2) CFB 灰を混入したモルタルのフロー値、圧縮強度は、混合率 10%までは普通フライアッシュと同等であるが、10%以上混入した場合、フロー値は低下し、強度発現は安定しない結果となった。

(3) CFB 灰を混入したコンクリートは、スランプロス、エアロスが大きい。

(4) CFB 灰を外割で混入したコンクリート試験体の 7 日強度は低いが、28 日強度は基準試験体以上となった。

(5) CFB 灰を外割で混入した試験体の場合、モルタル試験体とコンクリート試験体ともに、CFB 灰無混入の試験体より乾燥収縮率が大きくなり、質量減少率も大きい。

4-2 粒形改善砕砂について

(1) 高品質砕砂製造装置で砕砂の表面を研磨した粒形改善砕砂は、陸砂に近い粒度分布となる。

(2) 粒形改善砕砂を混合したコンクリートは、単位水量が増加するが、圧縮強度、および単位水量が増加したことで大きくなると推測される長さ変化率(乾燥収縮)には大きな影響を及ぼさなかった。

よって、この試験で行った範囲では、粒形改善砕砂を混合しても同等の品質を得られるものと考えられる。



図 26 粒形改善前の砕砂(原砂)拡大画像(×25)



図 27 粒形改善砕砂拡大画像(×25)

[謝辞]

本研究は、株式会社ケイホク、日本製紙株式会社白老事業所、ケイホクカーゴ株式会社飛生事業所との共同研究の一部として実施したものである。記して、関係諸氏に謝意を示す。

[参考文献]

- 1) JIS コンクリート用フライアッシュ(追補 1) JIS A 6201:2008 (日本フライアッシュ協会/JSA): 日本規格協会発行: 2008 年 10 月、社団法人セメント協会
- 2) コンクリート標準示方書: 規準編・JIS 規格集、2007 年制定、土木学会編・日本規格協会発行
- 3) 日本フライアッシュ協会ホームページ: フライアッシュの品質と性能, <http://www.japan-flyash.com/>
- 4) セメント協会標準試験方法 JCAS I-61:2008 フライアッシュのメチレンブルー吸着量試験方法
- 5) 山本商事グループホームページ, <http://www.yamaken-group.jp/gulliver.html>

*1 室蘭工業大学大学院

*2 株式会社ケイホク 飛生事業所 所長

*3 株式会社ケイホク 飛生事業所 課長

*4 室蘭工業大学 教授 博士(工学)

Graduate School, Muroran Institute of Technology.

Keihoku Co. Ltd.

Keihoku Co. Ltd.

Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.