

◇論文◇

フライアッシュの物理特性がモルタルの流動性に与える影響

Effect of the Physical Characteristics of
Fly Ash on Mortar Flowability

星 健 太*, 久 我 龍一郎*,
森 寛 晃**, 兵 頭 彦 次***

HOSHI, Kenta*; KUGA, Ryuichiro*;
MORI, Hiroaki **; HYODO, Hikotsugu***

要 旨

本研究では、フライアッシュの物理特性がマトリクスの流動性に与える影響を評価することを目的とした検討を行った。異なる火力発電所から副産され分級条件を変更した合計 14 種類のフライアッシュを用いてフライアッシュセメントを試製し、これを用いたモルタルの流動性を調べた。さらに、フライアッシュの物理特性を調べ、モルタルの流動性との相関性を評価した。その結果、フライアッシュの粒子が細かいほど流動性に優れ、特に 20~40 μ m 以下の粒子に流動性改善の効果があるものと推察された。また、流動性改善のメカニズムについて、フライアッシュセメントの充填率等の観点から検討したところ、20 μ m 以下のフライアッシュ粒子が多いほど、モルタルが所定の流動性を得るために必要なペースト量が少ないことがわかり、これを 20 μ m 以下の粒子の形状特性による影響と推察した。

キーワード：フライアッシュ, モルタル, 水結合材比, 粒度分布, 充填率, 粉体体積

*研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 海外技術グループ

International Technology Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

**研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 海外技術グループ リーダー

Manager, International Technology Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

***GX 推進部 GX 推進グループ リーダー

Manager, GX Group, GX Department

ABSTRACT

This research aims to clarify the effect of the physical characteristics of fly ash on the flowability of mortar. Fourteen types of fly ash were prepared, originating from different thermal power plants and subjected to various classification conditions, to produce fly ash cements. The flowability of mortars containing those cements was then evaluated. In addition, the physical characteristics of each fly ash were analyzed, and their correlations with mortar flowability were assessed. The results indicated that the finer the fly ash particles contained, the better the mortar flowability. In particular, particles smaller than approximately 20-40 μm were found to have a significantly positive effect on the improvement of mortar flowability. To further elucidate the mechanism of the flowability improvement, the packing density of fly ash cement and related parameters were examined.

It was found that mortars containing a higher proportion of particles smaller than 20 μm required a smaller amount of cement paste to achieve the same level of mortar flowability.

This phenomenon was attributed to the morphological characteristics of fine fly ash particles that could reduce internal friction within the mortar. These findings suggest that optimizing both the particle size distribution and the morphology of fly ash is a key factor in improving the flowability of mortar containing fly ash.

Keywords : *Fly ash, Mortar, Water to binder ratio, Particle size distribution, Packing density, Powder volume*

1. はじめに

フライアッシュ（以下、FA）は、石炭火力発電所等において石炭を燃焼した際に発生する副産物である。我が国におけるFAの発生量は年間で1,100万t程度であり、主にセメント原料やセメント混和材等として有効利用されている¹⁾。2050年までのエネルギー源としての石炭の利用については、先進国ではエネルギーシフトが進む一方で、インドや東南アジア等の新興国では石炭への依存が継続するとの予測がある²⁾。我が国においても、現在の1/3程度の石炭の利用があるとの見通されており²⁾、FAの発生も継続すると考えられる。このようにFAの有効利用が依然として求められるなか、カーボンニュートラルの観点からセメントのクリンカ比率を低減する意味でも、FAのセメント混合材としての利用が望まれる。

混合材としてのFAの利用による効果としては、流動性改善、水和発熱の低減、長期強度の増進、アルカリシリカ反応等に対する耐久性向上等が挙げられる。このうち流動性改善に関する研究は古くから行われており、ボールベアリング効果や充填率の向

上等によって流動性は向上する一方、FA中の未燃炭素の影響により化学混和剤が吸着され、流動性が低下する場合もある^{3), 4)}。

これらFAによる流動性改善に関する既往研究は、化学混和剤を添加したマトリクスにおいて、FAの混和による流動性の変化を評価したものが多く、FA中の未燃炭素も流動性に影響を与えている（例えば⁵⁾）。一方、FA自体の幾何学特性等の物理特性がマトリクスの流動性に与える影響を評価することができれば、FAの選定基準や品質管理、FAコンクリートの配合設計、あるいは、化学混和剤の最適化等に役立つ知見が得られる可能性がある。

そこで本研究では、FAの物理特性がマトリクスの流動性に与える影響を評価することを目的とした検討を行った。まず、14種類のFAを用い、ASTM C109に準じてモルタルの流動性を調べた。ASTM C109はセメント強さの試験方法である。水量一定でモルタルフローにより流動性を評価するJIS法とは異なり、同試験法は化学混和剤が無添加のモルタルフローの伸び率が $110 \pm 5\%$ となるように水量を調整するという特徴があり、モルタルの流動性は必要水量（水結合材比）によって表される。次いで、FAの物理特性

を調べ、モルタルの流動性との相関性を評価した。さらに、FA によるモルタルの流動性改善のメカニズムについて、FA セメントの充填率等の観点から考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験には、3か所の火力発電所から8つの原粉を採取し、内4つは強制渦型遠心分級機を用いて分級し、全14種類のFAを用意した。これによりFAの原粉種類および分級によるモルタルの流動性への影響を比較評価した。普通ポルトランドセメント(以下、OPC)および各FAの物理特性をTable 1に、粒度分布をFig. 1に示す。記号は、アルファベットが発電所の違いを、添え字が原粉の違いを、ハイフン以降の数字が分級処理の違い(この数字が大きいほど粉末度が高い)を示している。Fig. 1の通り粒度分布は原粉により大きく異なる。強熱減量(以下、ig. loss)、密度およびブレン比表面積は、それぞれASTM C311、ASTM C188およびASTM C204に準拠した方法、かさ密度は粉体特性評価装置(ホソカワミクロン株式会社 パウダーテスター PT-X)、BET比表面積は流動式比表面積自動測定装置(株式会社島津製作所 フローソーブ 2305)、粒度分布および平均径はレーザー回折粒度分布測定装置(マイクロトラック・ベル株式会社 マイクロトラック MT3300EX II)により測定した。なお本研究では、FAの物理特性の測定の一部をASTM規格に準拠して行ったが、JIS法と同等の値が得られることを事前に確認した。

細骨材はASTM C109およびASTM C778に規定される標準砂を使用し、化学混和剤は使用しなかった。

2.2 モルタル配合および試験方法

結合材は、OPCに対してFAでそれぞれ15、22.5、30および40質量%を置換したFAセメントとした。モルタル配合については、ASTM C109に準拠して、所定の質量の結合材および砂(砂結合材比は2.75で一定)に対し、ASTM C1437に従い測定したモルタルフローの伸び率が $110\pm 5\%$ となるように水量を調整した。練混ぜ方法は、ASTM C305およびASTM C1437に準じた。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルの流動性

所定のフローを得るための水結合材比をFig. 2に示す。FA置換率が増加すると水結合材比が小さくなる傾向がみられ、FAによる流動性の改善が確認できる。ただし、C₃-1およびC₃-2については、FA置換率の増加に伴い水結合材比は増加したか、あるいは変化がなく、他FAとは異なる傾向を示した。また、FA置換率の増加に伴う水結合材比の低減効果の程度はFA種類により異なった。

3.2 FA物理特性がモルタルの流動性に与える影響

所定のフローを得るための水結合材比とFAの物理特性との関係をFig. 3に、両者の相関係数および決定係数をTable 2に示す。ig. loss、かさ密度、密度およびBET比表面積は決定係数が最大でも0.39であり、水結合材比との間に明確な相関は認められず、モルタルの流動性にほとんど影響しないことがわかる。ig. lossについては、FA中の未燃炭素の増加に伴いペーストのフローも緩やかに減少するとの報告⁶⁾があるが、本研究で用いたFAのig. lossは0.7~3.1%と比較的小さく、この影響で水結合材比と

Table 1 The physical characteristics of OPC and FA
(OPC および FA の物理特性)

種類	Symbol	ig.loss (%)	Bulk density (g/cm ³)	density (g/cm ³)	Blaine specific surface area (cm ² /g)	BET specific surface area (m ² /g)	Mean diameter (μm)
OPC		2.6	1.65	3.15	3340	0.91	22.7
FA	A ₁ -1	3.1	1.27	2.22	3040	1.75	44.0
	A ₁ -2	3.0	1.29	2.22	3330	1.95	34.6
	A ₂ -1	3.0	1.06	2.22	2690	1.98	57.3
	A ₂ -2	3.2	0.94	2.27	3980	2.31	22.6
	A ₂ -3	3.2	0.93	2.30	4250	2.50	18.6
	A ₂ -4	2.8	0.93	2.34	4810	2.40	11.6
	B ₁	1.0	1.20	2.34	2910	0.83	29.7
	B ₂	1.0	1.17	2.41	3690	0.99	16.4
	B ₃ -1	2.3	0.92	2.20	2540	2.09	42.6
	B ₃ -2	2.3	1.20	2.21	2950	2.09	33.8
	C ₁	1.6	1.27	2.31	3540	1.93	26.2
	C ₂	1.0	1.34	2.28	2770	1.27	31.9
	C ₃ -1	0.7	1.37	2.35	2060	0.75	68.7
	C ₃ -2	1.0	1.30	2.30	2560	0.99	39.4

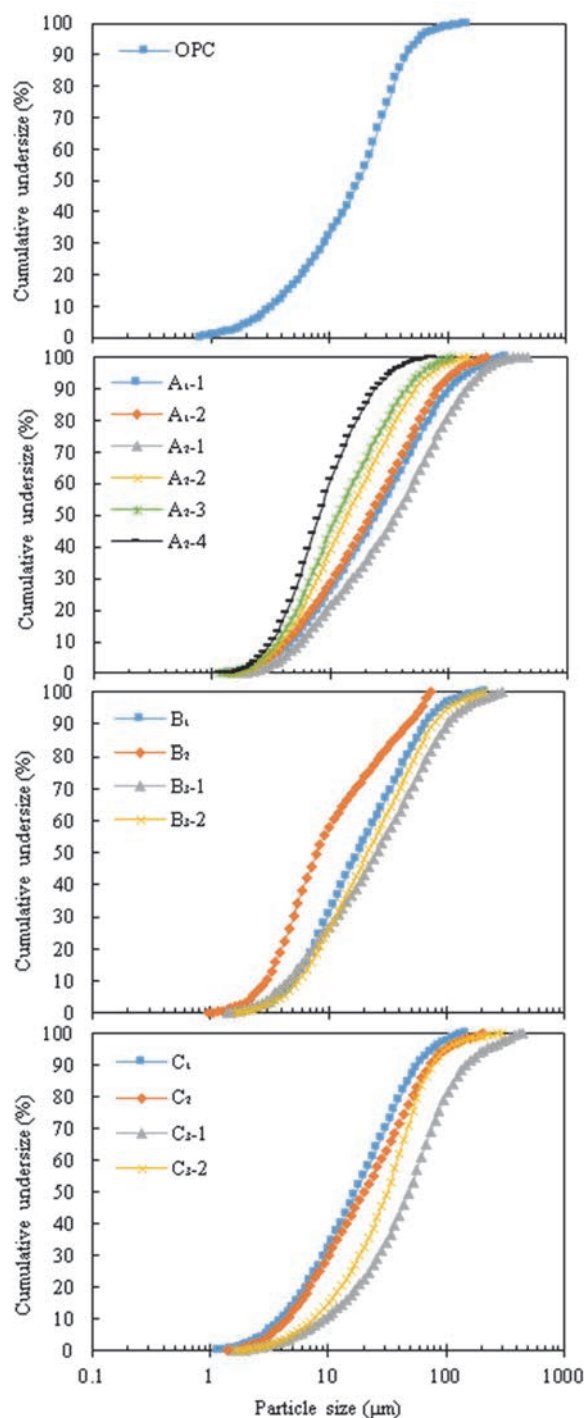


Fig.1 Cumulative undersize distribution of OPC and FA
(OPC および FA の粒度分布)

の間に相関がみられなかった可能性に留意する必要がある。

一方、ブレン比表面積および平均径と水結合材比の間には、それぞれ負および正の相関が認められ、それらの決定係数はいずれも最大で 0.8 程度と高い。これらの関係性は、いずれも FA の粒子が細かいほど

Table 2 Correlation and determination coefficients of fly ash physical characteristics with the water-binder ratio of mortar
(FA の物理特性と水結合材比の相関係数および決定係数)

FA replacement ratio (%)	15	22.5	30	40
ig. loss	-0.34	-0.45	-0.18	0.38
	0.12	0.20	0.03	0.15
Bulk density	0.24	0.60	0.47	0.23
	0.06	0.36	0.22	0.05
Density	-0.23	-0.16	-0.31	-0.78
	0.05	0.02	0.10	0.60
Blaine specific surface area	-0.83	-0.90	-0.78	-0.58
	0.69	0.82	0.60	0.33
BET specific surface area	-0.43	-0.62	-0.37	0.16
	0.19	0.39	0.14	0.03
Mean diameter	0.82	0.90	0.91	0.88
	0.67	0.81	0.83	0.77

※ Upper: correlation coefficient; Lower: coefficient of determination

水結合材比が小さいと解釈でき、既往の研究^{例えば 7)}と同様に FA に含まれる小径の粒子が流動性を改善する効果があることが示唆される。

なお、水結合材比との関係性がブレン比表面積と BET 比表面積で異なったのは、それぞれの測定機構の違いに起因する、FA に含まれる未燃炭素の影響であると推察される。すなわち、ガス吸着法 (BET 理論) では、試料表面の微細な空隙までを含めた比表面積が測定される一方で、ブレン比表面積は空気透過法で求められる簡易的な比表面積である。そのため、FA の BET 比表面積は、微細空隙の多い未燃炭素の影響を強く受けるため、FA 自体の幾何学的な特徴の傾向が表れにくく、水結合材比との相関が弱いことが推察される。また、Table 1 に示すように、BET 比表面積と ig. loss の間には相関が認められ、このことは未燃炭素が FA の BET 比表面積に影響していることを示唆している。

3.3 FA の粒度分布がモルタルの流動性に与える影響

前節より、FA の粒子が細かいほどモルタルの流動性改善の効果がみられたことを受け、本節では流動性と粒度分布との関係を調べた。粒度分布から求まる特性値としては、ロジン・ラムラー線図における n 値、平均径、累積体積および球換算比表面積等が

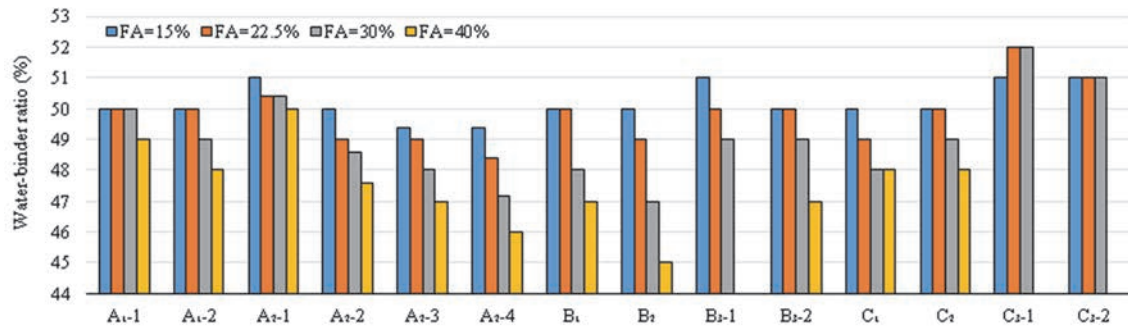


Fig.2 Water-binder ratio necessary to achieve the designated mortar flow
(所定のモルタルフローを得るための水結合材比)

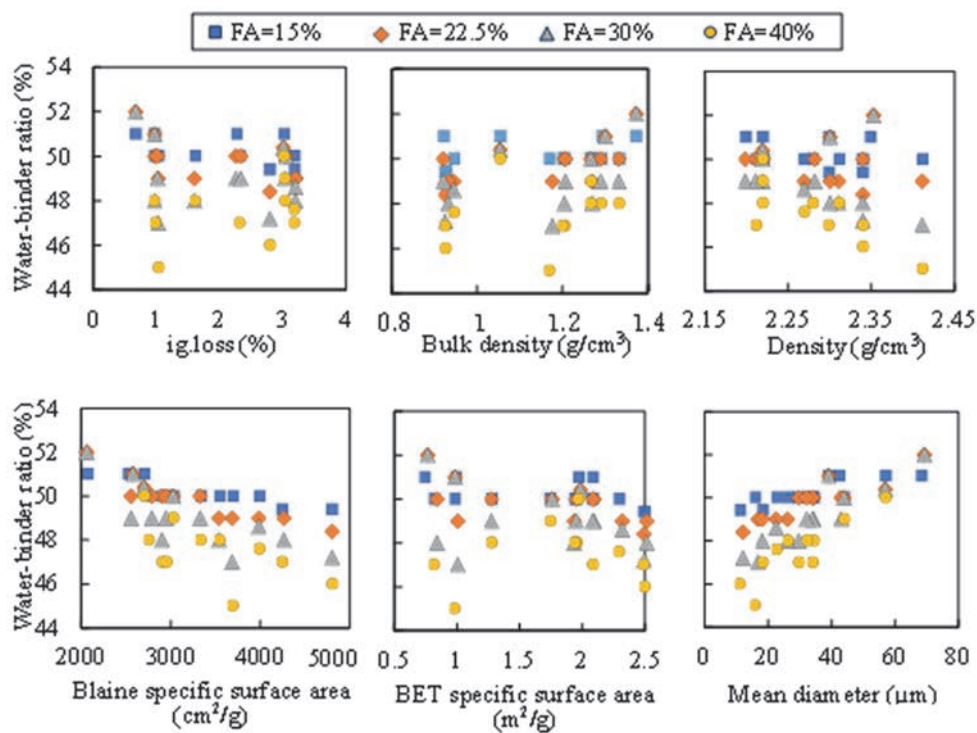


Fig.3 Relationship between the physical characteristics of fly ash and water-binder ratio of mortar
(FA の物理特性と水結合材比の関係)

ある。本研究では、これらの特性値とモルタルの水結合材比との相関関係を評価した結果、最も相関が強かった累積体積に着目し、以下の検討を行った。

まず、FA 置換率ごとに、FA の粒度分布から求められる累積体積と水結合材比を対象に（例えば FA 置換率 15% の場合、それぞれのデータ数は FA 種類の異なる 14 水準）、粒径ごとに両者の決定係数を算出した。決定係数は Fig. 4 に示すように、FA 置換率によらず粒径 20~40 μm 程度において極大となる傾向が認められた。したがって、20~40 μm 以下の FA の累積体積が大きいほど、所定のフローを得るための水結合材比が小さく、モルタルの流動性を改善する効果があるものと推察される。

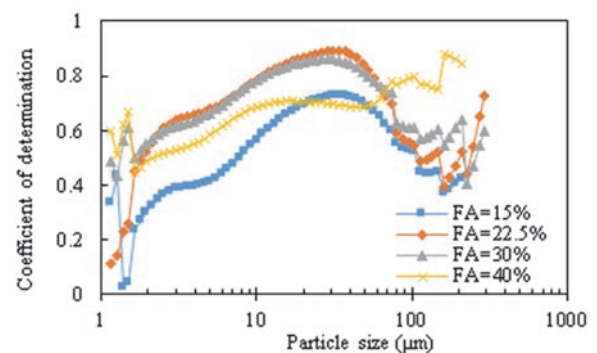


Fig.4 Coefficient of determination between the cumulative undersize distribution of fly ash and water-binder ratio of mortar
(FA の累積体積と水結合材比の決定係数)

次に、20～40 μm 以下の FA の累積体積とモルタルの流動性（すなわち、所定のフローを得るための水結合材比）の相関関係を統計的に評価した。まず、本研究では便宜的に 20 μm 以下の FA の累積体積を取り出し、水結合材比の関係を調べた。両者の関係は **Fig. 5** に示すとおりであり、FA 置換率ごとに直線的な強い相関性がみられる。また、FA 置換率が増大するに従い、近似直線の傾きが減少するという交互作用効果が認められる。すなわち、FA 置換率が高いほど、20 μm 以下の FA による水結合材比の低減効果が大きいといえる。続いて、20 μm 以下の FA の累積体積により統計的に水結合材比をどの程度説明可能かを調べるために、水結合材比を目的変数、FA 置換率および 20 μm 以下の FA の累積体積を説明変数とし、前述した交互作用効果を考慮した重回帰分析を行った。回帰式を式(1)に示す。

$$Y = -0.002 \cdot (X_1 \cdot X_2) + 52.016 \quad (1)$$

ここに、Y：水結合材比（%）、 X_1 ：20 μm 以下の FA の累積体積（%）、 X_2 ：FA 置換率（%）

Fig. 6 に水結合材比の実測値と回帰式による予測値の関係を示す。本研究の範囲では決定係数は 0.87 であり、モルタルが所定の流動性を得るために必要な水結合材比の変動の 8 割以上を、FA の置換率および 20 μm 以下の累積体積で説明できるという結果が得られた。

以上の検討より、FA に含まれる小径の粒子が流動性を改善する効果があり、特に 20～40 μm 以下の粒子

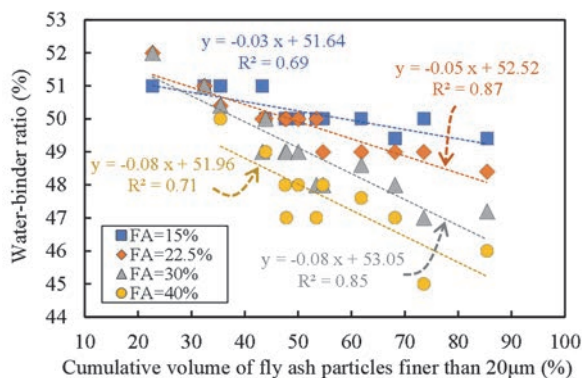


Fig.5 Relationship between the cumulative volume of fly ash particles finer than 20 μm and water-binder ratio of mortar (20 μm 以下の FA の累積体積と水結合材比の関係)

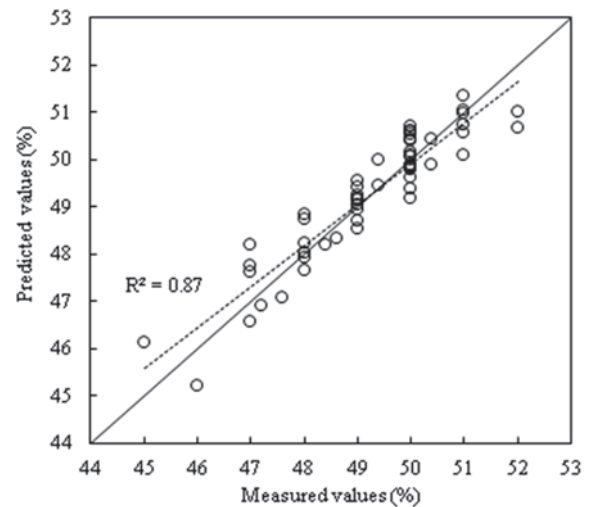


Fig.6 Comparison of predicted and measured values of water-binder ratio (水結合材比の実測値と予測値の比較)

の累積体積が強く影響することが判明した。FA の粒径と形状の関係に関する報告^{8),9)}に基づけば、FA の 44 μm 以下の粒子のほとんどは完全球状粒子であり、さらに小径であるほど完全球形に近いとされている。これと既往研究^{3),4)}に鑑みると、本研究において 20～40 μm 以下の FA の累積体積とモルタルの流動性に強い相関が認められたのは、完全球状粒子の増加による粒子間の摩擦力の低減（ボールベアリング効果）³⁾や、小径粒子が大径粒子の間に入り込むことによる FA セメントとしての充填率の増大⁴⁾によるものと推察される。本研究では、主に後者の要因について、以降に考察を加えることとした。

3.4 FA セメントの充填率および体積が流動性に与える影響

FA セメントとしての充填率を、粉体工学に立脚した数値シミュレーションである鈴木らのモデル¹⁰⁾を用いて計算した。鈴木モデルは、粒度分布を有する複数の粉体から構成される混合物の空隙率を算出するものであり、100%から空隙率を減じた値を FA セメントの充填率とした。なお、2.2 節にて作製した一部の FA セメントについて、粉体特性評価装置を用いて測定したかさ密度を基に式(2)により充填率を求め、この値と鈴木モデルに基づく充填率が直線的な相関関係にあることを事前に確認している (**Fig. 7** 参照)。この結果から、FA セメントの充填率は、鈴木モデルに基づき算出した値により評価できるものと判断した。

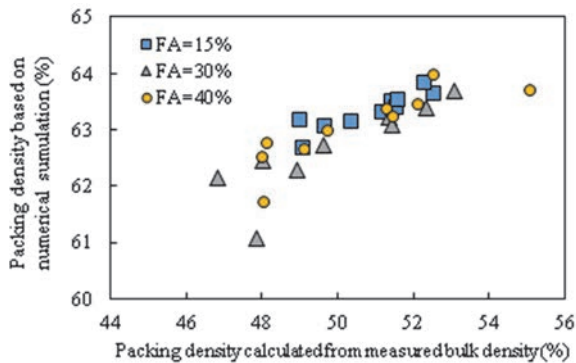


Fig.7 Comparison of packing density of fly ash cement
(FA セメントの充填率の比較)

$$P = \rho_b / \rho_d \quad (2)$$

ここに, P : FA セメントの充填率 (%), ρ_b : FA セメントのかさ密度 (g/cm^3), ρ_d : OPC および FA の密度と構成比率により算出した FA セメントの密度 (g/cm^3)

FA セメントの充填率と水結合材比の関係を Fig. 8 に示す. FA 置換率の増大に伴う充填率の変動は FA 種類により異なった. すなわち, 図中下部に下線とともに併記した $20\mu\text{m}$ 以下の FA の累積体積に着目すると, その累積体積が 47.9% 以上である FA は置換率の増大に伴い充填率は低下し, 逆に, 累積体積が 47.6% 以下である FA は置換率の増大に伴い充填率が

増大する傾向がみられた. これは, 粒子は小径であるほど凝集しやすく, 見かけ上, 充填率が低下することによるものと推察される¹¹⁾. また, 本研究においては, OPC と FA の粒径は近く, 小径粒子が大径粒子の間に入り込むことによる充填の作用がみられなかった可能性も考えられる. 凝集体の内部には水が拘束されやすいこと¹²⁾を考慮すると, FA セメントの充填率が低いほど水結合材比が大きくなるものと考えられるが, そのような関係性はみられなかった. 以上より, 本研究の範囲では, FA による流動性改善については, FA セメントとしての充填率の増大以外の要因の影響を受けたことが推察される.

ここで, 本研究では FA を OPC の質量に対して置換した. したがって, FA は OPC に比べて密度が小さいことから, FA の置換率の増加に伴い粉体体積が増加し, モルタルの流動性に影響している可能性が考えられる. そこで, セメントペーストの体積割合が流動性に与える影響を検討した. モルタル配合から算出したセメントペーストの体積割合と水結合材比の関係を Fig. 9 に示す. FA 置換率の増加に伴うセメントペーストの体積割合の変化は FA 種類により異なり, $20\mu\text{m}$ 以下の累積体積が 68.2% 以下の FA では増加または横ばい傾向である一方, $20\mu\text{m}$ 以下の累積体積が 73.6% 以上の FA では減少傾向であった. このことから, FA 置換率の増加に伴い FA の粉体体積は増加するものの, A_2-4 および B_2 は所定の流動性を得るための必要水量減少の影響が卓越し, セメントペーストの体積割合が小さくなったと考えられる. したがって, 本研究の範囲では, FA の置換率の増加に伴うモルタルの流動性改善の効果は, 粉体体積の増加よりもそれ以外の要因による効果が卓越したこ

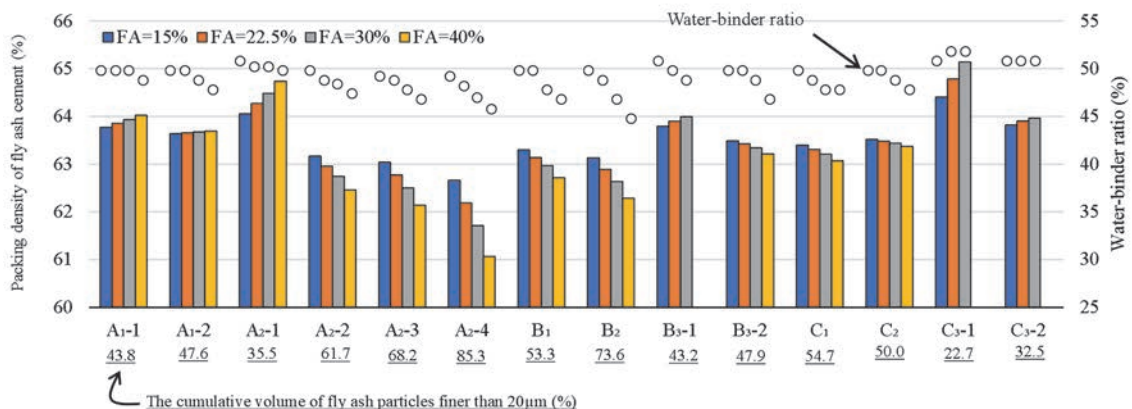


Fig.8 Relationship between packing density of fly ash cement and water-binder ratio of mortar
(FA セメントの充填率と水結合材比の関係)

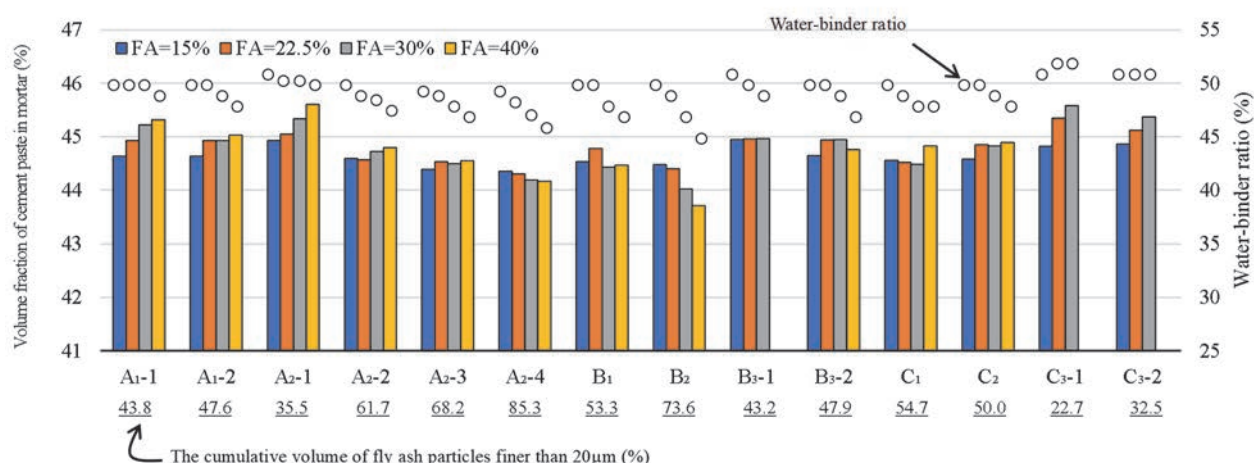


Fig.9 Relationship between volume fraction of cement paste in mortar and water-binder ratio of mortar (モルタルに占めるセメントペーストの体積割合と水結合材比の関係)

とが推察される。

以上の結果から、20～40μm 以下の FA 粒子がモルタルの流動性改善に及ぼす影響については、FA セメントの充填率や体積には表れない要因によるものと推察される。参考までに、20μm 以下の FA の累積体積とモルタルに占めるセメントペーストの体積割合の関係を Fig. 10 に示す。これによると、20μm 以下の FA の累積体積が大きいほど、セメントペーストの体積割合が小さい傾向がみられる。これより、FA 中の 20μm 以下の粒子が多いほどセメントペーストの流動性が改善され、少ないペースト量で所定の流動性が得られたものと考えられる。このような傾向を示した要因については、現時点で解明するに至っ

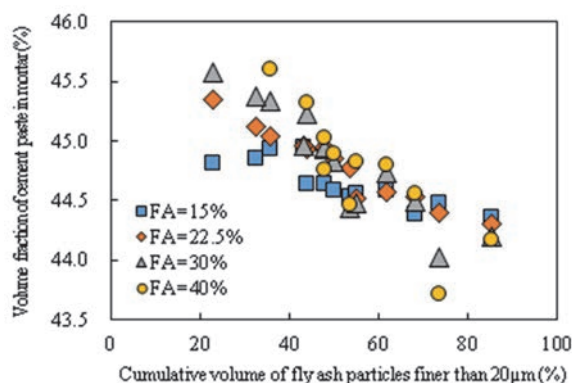


Fig.10 Relationship between the cumulative volume of fly ash particles finer than 20μm and volume fraction of cement paste in mortar (20μm 以下の FA の累積体積とモルタルに占めるセメントペーストの体積割合の関係)

ていないが、一因として前述した FA の粒子形状が考えられる。すなわち、既往知見^{8,9)}に基づけば FA 中の 20μm 以下の粒子のほとんどは完全球状粒子と考えられ、粒子は球状に近いほど摩擦力が小さいことから¹³⁾、FA 中の 20μm 以下の粒子により摩擦力が低減され、少ないペースト量でも所定の流動性が得られたと推察される。

4. まとめ

本研究では、14 種類の FA の物理特性を調べ、ASTM C109 に準じてモルタルの流動性との相関性を評価した。さらに、FA によるモルタル流動性改善のメカニズムについて、FA セメントの充填率等の観点から考察した。その結果、大要以下の知見が得られた。

- (1) FA の物理特性のうち、ig. loss, かさ密度、密度および BET 比表面積は水結合材比との間に相関がみられず、これらはモルタルの流動性への影響は小さいと考えられる。
- (2) FA の物理特性のうち、ブレン比表面積および粒度分布 (平均径) は水結合材比との相関がみられ、特に 20～40μm 以下の FA の累積体積がモルタルの流動性を改善する効果があるものと推察された。
- (3) 20μm 以下の FA の累積体積および FA 置換率を説明変数、モルタルの水結合材比を目的変数とした重回帰分析を行ったところ、決定係数は 0.87 であった。
- (4) FA セメントの充填率は、20μm 以下の FA の累積体積が大きいほど、FA 置換率に伴い流動性

は改善するものの減少した。このことから、FA中の小径の粒子の増加によるモルタルの流動性改善は、充填率の増加によるものではないと考えられた。

- (5) モルタルに占めるセメントペーストの体積割合は、20 μ m以下の粒子が多いFAほど小さく、少ないペースト量で所定の流動性が得られた。

参 考 文 献

- 1) カーボンフロンティア機構. 石炭灰全国実態調査報告書(2023年度実績). 2025.
<https://www.jcoal.or.jp/ashdb/upload/7a428fe019e8d37157155fa5f808316b88ecf2ab.pdf>,
(accessed 2025-10-31).
- 2) International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2024. 2024, p.245-288.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>,
(accessed 2025-10-31).
- 3) 土木学会. フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)(コンクリートライブラリー94). 1999.
- 4) 長瀧重義, 大賀宏行, 越智康介ほか. フライアッシュの品質とその評価に関する研究. コンクリート工学年次論文集. 1985, 7, p. 197-200.
- 5) 西 祐宜, 西田 朗, 戸田和敏ほか. 簡易測定法を用いたフライアッシュコンクリートの流動性予測に関する研究. コンクリート工学年次論文集. 2008, 30(1), p. 177-182.
- 6) 松田陽介, 名和豊春. フライアッシュ中の未燃カーボンが粉体の充填率およびペーストの流動性に及ぼす影響の検討. セメント・コンクリート論文集. 2003, 57, p. 414-420.
- 7) P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. Cement and Concrete Research. 2004, 34(7), p. 1087-1092.
- 8) 土肥浩大, 白浜暢彦, 山下牧生. 分級により粒度調整したフライアッシュの諸特性. セメント・コンクリート論文集. 2017, 71, p. 626-632.
- 9) 小沼利光, 菊地 正, 古谷佳一. 粒径-密度分離を行った石炭フライアッシュ粒子の形態特性化. 大気汚染学会誌. 1984, 19(1), p. 35-46.
- 10) 鈴木道隆, 市場久貴, 長谷川 勇ほか. 粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率. 化学工学論文集. 1985, 11(4), p. 438-443.
- 11) 緑川猛彦, 丸山久一, 下村 匠ほか. 粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価方法. 土木学会論文集. 1997, (578), p. 99-110.
- 12) 太田 顕, 名和豊春, 大沼博志. セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係. コンクリート工学年次論文集. 2001, 23(2), p. 271-276.
- 13) 広田満昭, 石原隆博, 菅井 淳ほか. 粉体層の摩擦特性に及ぼす粒子形状および粒径の影響. 粉体工学会誌. 1986, 23(9), p. 661-664.