

論文 海砂の粒度およびフライアッシュの外割混入率がコンクリートの流動性に及ぼす影響

福澤 祥宏^{*1}・松下 博通^{*2}・鶴田 浩章^{*3}・大屋 敦志^{*4}

要旨：コンクリートの性状改善とフライアッシュの有効利用を目的とし、細骨材の一部をフライアッシュで置換したコンクリートが提案されている。本研究では、海砂の粒度特性がフライアッシュ外割コンクリートの流動性に及ぼす影響を検討した。その結果、水セメント比50%、60%で、150 μ m未満の微粒分量が少ない細骨材を用いた場合、フライアッシュを細骨材の10%程度まで容積置換することで、流動性が向上した。さらに、コンクリートおよびモルタルの流動性は、フライアッシュと細骨材微粒分を含めたペースト部分の水粉体容積比と余剰ペースト量に大きな影響を受けることが明らかとなった。

キーワード：FA、水粉体容積比、細骨材置換、単位水量、フロー値

1. はじめに

フライアッシュ（FA）が抱える問題は、その有効利用の拡大である。電力需要の拡大に伴い、石炭火力発電設備の開発は現在も推進されている。これに伴い、石炭灰の排出量は、平成15年度末で約987万トンに達し、今後も増加傾向にある。

排出されたフライアッシュの80%以上は再利用されており、中でも特にセメント原料（粘土代替）としての利用が総利用量の約70%を占める¹⁾。しかし、セメント生産量は近年減少傾向にあり、セメント原料としての利用に大幅な増加を見込むことは難しい。また、環境保護への意識の高まりから、埋め立て処分用地の確保も困難になりつつある。したがって、今後のフライアッシュの排出量の増加に対し、土木分野での利用拡大が期待されている。

一方、コンクリート用細骨材を取り巻く情勢は資源の枯渇化、環境保全のための採取制限区域の拡大、良質な骨材の相対的な減少による全体的な品質の低下等、深刻な状況にある。特に、

瀬戸内海周辺県では、海砂の採取規制の強化が厳しく、代替骨材の検討が進められている。

海砂に代わる細骨材の安定確保および、フライアッシュの有効利用の拡大を目的として、フライアッシュを細骨材の一部に置換して用いたコンクリートが提案されている。これには土木学会四国支部から施工指針（案）²⁾が示されているものの、ベースとなる原細骨材の性状や、配合条件に対するフライアッシュの最適な置換率はまだ検討の余地があると考えられる。

以上のような背景のもと、本研究では、海砂にフライアッシュを外割混入したコンクリートについて、海砂の粒度とFAの置換率がフレッシュ性状に及ぼす影響について検討を行った。

また、FAを粗粒な細骨材の一部に置換した場合、細骨材の微粒分を補填ため、フレッシュ性状を改善すると推測される。しかし、その適正置換率は、原細骨材の粒度と配合量に影響を受ける。本研究では、海砂の150 μ m未満の微粒分量に着目し、これがFAを外割混入したモルタルの流動性に及ぼす影響について検討した。

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻（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 関西大学 工学部都市環境工学科助教授 博士（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）

2. 試験概要

2.1 使用材料

本研究で用いた材料を表-1に示す。細骨材に置換したフライアッシュ (FA) は、JIS のIV種として出荷されたものであるが、その物理的性質はII種の規格を満足するものであった。また、細骨材は粒度分布の異なる2種類の海砂 (S1, S2) に加え、S1の150 μ m未満の微粒分を取り除いたS1cutの計3種類の海砂を用いた。粒度分布を図-1に示す。コンクリート試験ではS1, S2を、モルタル試験では3種全ての海砂を用いた。また、粗骨材は、同一産地で採取時期の異なる碎石を数種使用した。混和剤はAE減水剤を用い、空気量は空気連行剤 (AE剤) を用いて調整した。FAを混入した配合では、FA用の空気連行剤を用いた。

2.2 コンクリートの試験項目および試験方法

試験項目は、スランプ試験、空気量試験、ブリーディング試験とし、それぞれJIS A 1101, JIS A 1128, JIS A 1123に準拠して行った。

2.3 コンクリートの配合決定試験

コンクリートは目標スランプを 8 ± 1 cm、目標空気量を $4.5\pm 1\%$ と設定した。S1を使用したものは、水セメント比を40, 50, 60%と変化させ、S2では50%のみ試験を行った。FAは、それぞれの配合について細骨材の容積に置換し、置換率

表-1 使用材料および物理的性質

使用材料		記号	物理的性質等
普通ポルトランドセメント		C	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3250cm ² /g
フライアッシュ IV種		FA	密度:2.24g/cm ³ 強熱減量:1.6% 比表面積:3840cm ² /g
細骨材	海砂	S1	表乾密度:2.55g/cm ³ 吸水率:1.92% 実積率:68.6% 粗粒率:2.57
		S1cut	表乾密度:2.55g/cm ³ 吸水率:1.92% 実積率:67.8% 粗粒率:2.79
		S2	表乾密度:2.58g/cm ³ 吸水率:1.55% 実積率:66.4% 粗粒率:3.11
粗骨材	碎石	G1	表乾密度:2.90~2.89g/cm ³ 吸水率:0.74% (20~10mm)
		G2	表乾密度:2.87~2.82g/cm ³ 吸水率:0.87~0.57% (10~5mm)
化学混和剤		AE減水剤:リグニンスルホン酸系	
		AE剤:アルキルアリルスルホン酸系	
		FA用AE剤:高アルキルカルボン酸系	

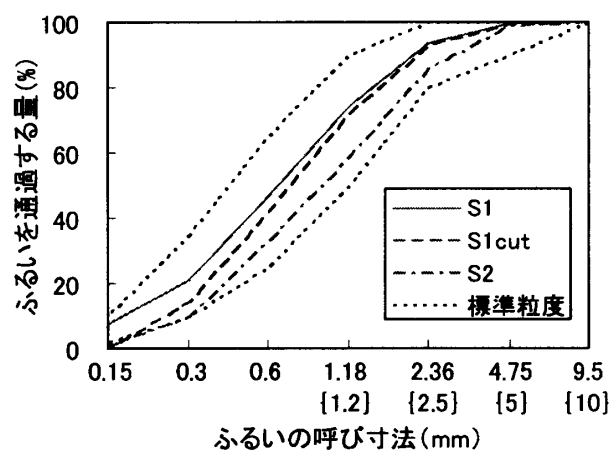


図-1 細骨材の粒度分布

表-2 コンクリートの配合決定結果

使用 細骨材	W/C (%)	FA 置換率 (%)	s _f /a (%)	s/a (%)	水結合 材比 W/B (%)	水粉体 容積比 V _w /V _p	単位量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (g)	AE剤 (ml/m ³)	試験結果	
							水 W	セメ ント C	フライ アッシュ FA	海砂 S	粗骨材				スラ ンプ (cm)	空気 量(%)
S1	40	0	34.5	34.5	40	1.12	171	428	0	571	742	495	(C+F) ×0.25%	27.7	8.0	4.1
		10	34.0	31.6	36	1.00	180	450	48	494	725	483		597.8	8.0	4.0
		20	37.0	32.2	33	0.92	197	493	100	454	649	432		710.8	7.5	4.5
	50	0	39.5	39.5	50	1.31	165	330	0	691	720	480		11.6	9.0	4.2
		5	39.0	38.0	46	1.20	165	330	30	648	718	479		10.8	9.0	4.7
		10	36.0	33.6	43	1.13	167	334	55	564	758	505		233.4	7.5	4.1
	60	20	38.0	33.1	38	0.99	177	354	113	516	709	473		560.9	7.5	4.3
		0	37.5	37.5	60	1.52	160	267	0	680	771	514		10.7	8.0	4.3
		5	39.5	38.5	54	1.33	158	263	32	683	741	494		88.5	8.0	5.3
		10	41.0	38.7	48	1.19	160	267	65	669	720	480		199.2	8.0	4.0
		20	40.0	35.1	42	1.05	172	287	124	565	710	473		492.9	9.0	5.5
		S2	0	46.0	46.0	50	1.54	168	336	0	808	636		424	0.0	8.0
10	41.0		38.5	41	1.20	160	324	64	661	709	472	116.3	8.0	4.7		
20	37.0		31.8	38	1.06	169	337	113	520	747	498	475.1	7.5	4.1		

は20%を上限として数種類変化させた。AE 減水剤は、セメント+FA の質量に対して 0.25%混和した。

コンクリートの練混ぜは、容量 55 リットルの二軸強制練ミキサを使用し、粗骨材、FA、セメント、細骨材の順で投入し、30 秒間空練りした後、水と混和剤を投入して 150 秒間練混ぜを行った。以下に、コンクリートの配合決定の手順を示す。

- (1) 細骨材率 s_f/a を一定で単位水量を変化させ、目標スランプ付近のコンクリートを作製した。
 - (2)(1)で求めた単位水量を一定とし、細骨材率 s_f/a を変化させることで、スランプが最大となる最適細骨材率を求めた。
 - (3)(2)で求めた細骨材率 s_f/a を最適細骨材率とし、さらに単位水量と AE 剤添加量を調整し、目標値を満たすコンクリートを作製した。
- 以上の手順で、表-2 に示すコンクリートの配合を決定した。なお、コンクリートの練り上がり温度は、20℃でほぼ一定であった。(2)では、練り上がり状態も考慮した上で、最適細骨材率を決定した。なお、 s_f は、海砂と FA の容積の和を表す²⁾。

3. コンクリート試験の結果および考察

3.1 FA 置換率と単位水量の関係

図-2 に FA の容積置換率 (FA 置換率) と単位水量の関係を示す。凡例は使用細骨材と水セメント比の値を表す。

S1-60 では FA 置換率 5% で単位水量が最小となり、S1-50 では 0, 5% で最小となっている。細骨材の一部として置換された FA は粉体として働くため、FA 置換率が 10% 以上では、所要のワーカビリティを得るための単位水量も大きくなる。これは、セメントと FA によるペースト部分の粘性が増加したためと考えられる。元々の水セメント比が小さい S1-40 では、FA 置換率の増加とともに単位水量が増加した。S2-50 では FA 置換率 10% で単位水量が最小となっている。これは、S1 と S2 の 0.15mm 未満の微粒分

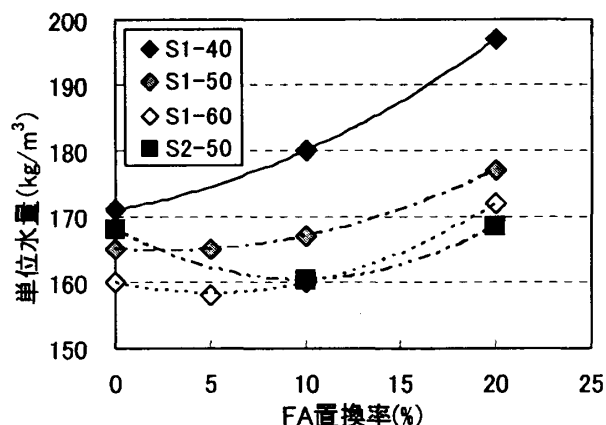


図-2 FA 置換率と単位水量の関係

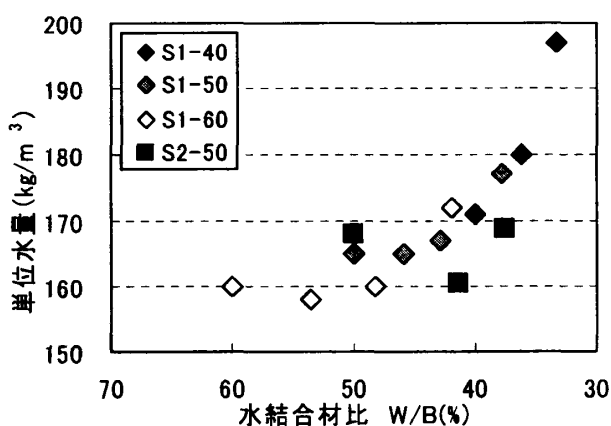


図-3 水結合材比と単位水量の関係

量の違いが影響したものであり、150 μ m 未満の細骨材粒子は事実上ペーストの一部を構成していることを示唆すると考えられる。

3.2 水結合材比および水粉体容積比

図-3 に水結合材比 W/B と単位水量の関係を示す。ここでの結合材は、セメントと FA の和を表し、フレッシュ状態であり粉体の水和活性は低く流動性に影響を及ぼさないものとした。全体として、W/B の減少とともに単位水量が増加した。細骨材の一部として置換した FA は粉体として挙動するため、水セメント比が一定の場合でも、FA 置換率の増大とともに W/B が小さくなることから、所要のワーカビリティを得るための単位水量が大きくなったと考えられる。ただし、細骨材の異なる S2 と S1 では同じ水結合材比での単位水量に差が生じた。加地らは、セメントと FA に細骨材の微粒分を含めた粉体の容積によって、単位水量の減水率を評価してい

る³⁾。減水率は、FA 無混入の場合の単位水量に対して FA を混入した場合の単位水量の減少割合を表すものである。本研究では、以下の式を用いて水粉体容積比を算出した。

$$\frac{V_w}{V_p} = \frac{w}{c + fa + s_{<150\mu m}} \quad (1)$$

V_w/V_p ：水粉体容積比

w ：単位水容積 (l/m^3)

c ：単位セメント容積 (l/m^3)

fa ：単位 FA 容積 (l/m^3)

$s_{<150\mu m}$ ：海砂 150 μm 未満の単位容積³⁾ (l/m^3)

図-4 に水粉体容積比と単位水量の関係を示す。 V_w/V_p が 1.20 より大きくなると、細骨材粒度や水セメント比の違いにより、同程度の V_w/V_p で単位水量に差が生じた。この領域では、水、セメント、FA、細骨材の微粒分から成るペーストの粘性が低いため、骨材量の違いによる噛み合いの差異がコンクリートの流動性に影響を及ぼしたと考えられる。しかし、 V_w/V_p が 1.20 以下では、ペーストの粘性の影響が大きくなるため、両者はほぼ単一な関係を示す。なお、土木学会コンクリート標準示方書における単位水量の上限値⁴⁾である 175 kg/m^3 を満足するのは、 V_w/V_p が 1.05 以上の場合であった。

さらに、図-5 に水粉体容積比と減水率の関係を示す。 V_w/V_p が 1.20 未満になると、減水率が負の値となり、単位水量の増加を招くことが分かる。したがって、FA を外割混入したコンク

リートのスランブは、ペーストの V_w/V_p に大きな影響を受けると言える。

3.3 ブリーディング

S1-50, S1-60 シリーズの配合についてブリーディング試験を行った。図-6 に経過時間とブリーディング率の関係を示す。凡例は FA 置換率を表す。S1-50 では、FA を置換することで終了時間が遅くなったが、最終ブリーディング率は FA 置換率 10% までほとんど変化しなかった。

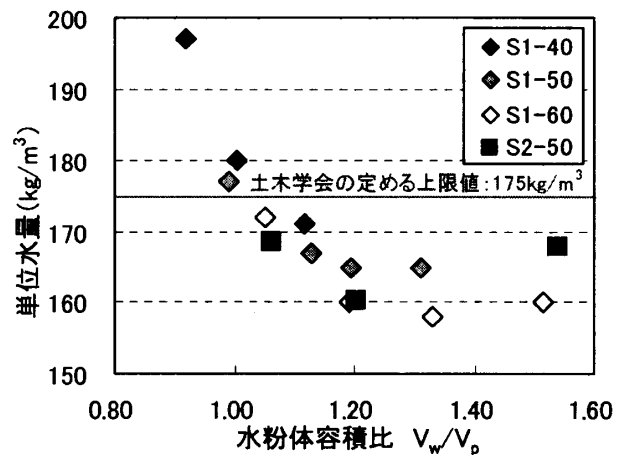


図-4 水粉体容積比と単位水量の関係

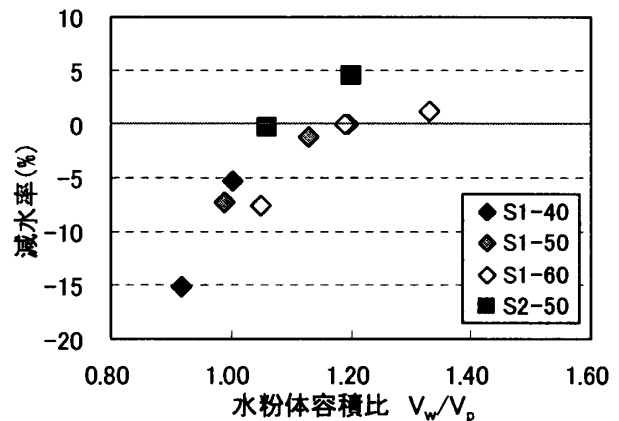


図-5 水粉体容積比と減水率の関係

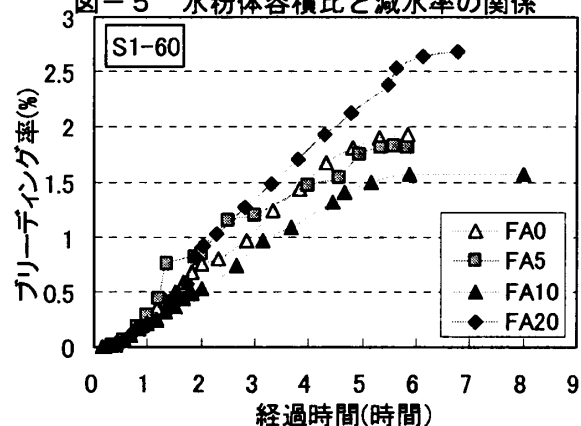
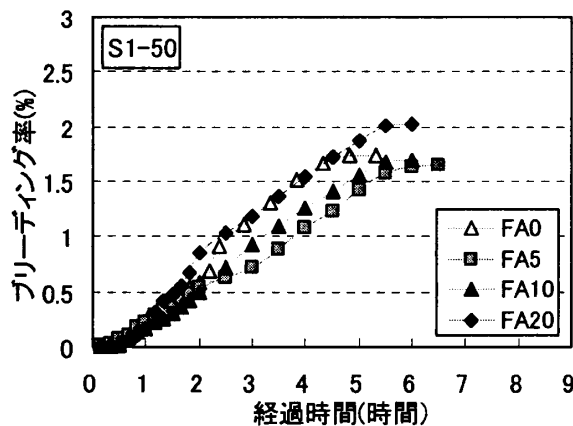


図-6 ブリーディング試験結果

S1-60 では、FA 置換率 10%まででブリーディングが抑制された。しかし、S1-50、S1-60 ともに、FA 置換率 20%では、無混入よりブリーディング率が増加した。FA 置換率 20%では、両者ともに無混入と比較して単位水量が 10kg/m^3 程度上昇する。このため、粉体量の増加によるブリーディング抑制効果に比べ、単位水量の増加による影響の方が大きいと言える。

4. FA 外割モルタルの流動性

4.1 はじめに

コンクリート試験の結果より、細骨材の粒度や $150\mu\text{m}$ 未満の微粒分量によって FA の適正な置換率が異なる。これに関してより詳細な検討を進めるために、モルタル試験を行った。

4.2 モルタル試験の項目および試験方法

モルタルのフロー試験は、JIS R 5201 に従った。

4.3 配合条件

モルタルの配合条件を表-3に示す。図-1に示した3種の細骨材を使用し、水セメント比を変化させた。表中の砂セメント比は、FA 無混入でフロー値が 190 となる値である。これをそれぞれの配合で一定とし、FA を 0~20%の範囲で置換した。

5. モルタル試験の結果および考察

5.1 FA 置換率とフロー値の関係

図-7に FA 置換率とフロー値の関係を示す。凡例は使用細骨材、水セメント比、基準 S/C を

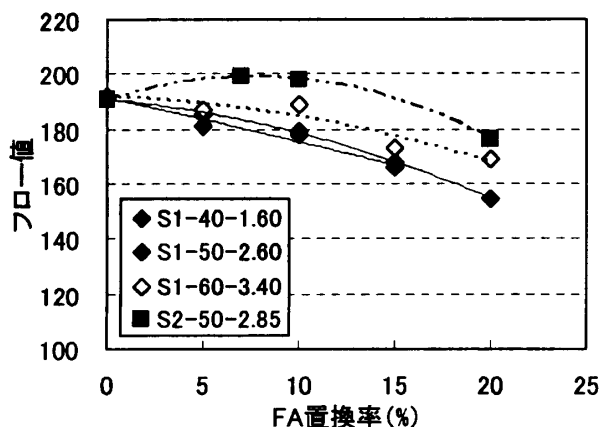


図-7 FA 置換率とフロー値の関係

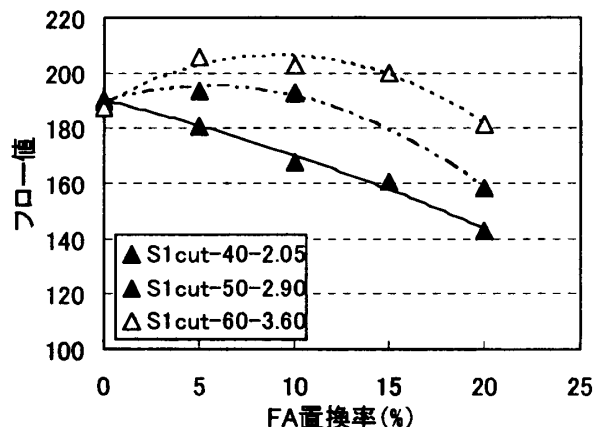
表す。S1cut-50、60 および、S2 は、FA 置換率 10%付近でフロー値が最大となった。特に S1cut-60 では、FA 置換率 15%まで流動性改善効果が見られた。しかし、S1cut-40 は FA 置換率の増加とともにフロー値が低下した。したがって、FA を細骨材に置換する場合、細骨材の微粒分量が少なく、比較的水セメント比の高い配合での混入が最も有効である。これはコンクリートの単位水量と同様の傾向であった。

5.2 水粉体容積比とフロー値の関係

図-8に水粉体容積比とフロー値の関係を示す。ここに、最大フロー値となる V_w/V_p は、1.20~1.60 の範囲に見られる。また、 V_w/V_p が 1.20 未満のペースト濃度が高い領域では、最大フロー値が得られなかった。S1cut-50、60 および、S2 に関して、それぞれ異なる V_w/V_p でフロー値が最大となった。 V_w/V_p を用いた場合、ペースト部分の性状は表現されるが、細骨材の粒度および量の影響が考慮されていない。そこで、これらの影響を考慮できる余剰ペースト量 V_{exp} にて評価した。モルタルの単位容積あたりの V_{exp} は次式

表-3 モルタルの配合条件

使用 細骨材	W/C (%)	砂セメント比 S/C	FA置換率 (%)
S1	40	1.60	0~20
	50	2.60	
	60	3.40	
S1cut	40	2.05	
	50	2.90	
	60	3.50	
S2	50	2.85	



により算出される⁵⁾。

$$V_{exp} = 1000 \left(1 - \frac{G_c}{G_0} \right) \quad (2)$$

V_{exp} : 余剰ペースト量 (cm³/l)

G_c : 細骨材の 150 μ m 以上の単位容積割合(%)

G_0 : 細骨材の 150 μ m 以上の実積率(%)

図-9に単位細骨材容積あたりの余剰ペースト量とフロー値の関係を示す。S-40-1.6 以外では、0.4 付近でフロー値が最大となった。

FA 置換率の増加に伴い単位骨材容積あたりの余剰ペースト量が多くなることは流動性を向上する方向に働くが、同時にペーストの粘性も増すため、FA 置換率が過大になればフロー値が低下する。逆に、同余剰ペースト量が少ない領域では骨材粒子どうしが接近し、骨材の噛み合いの影響によってフローが抑制される。このため、

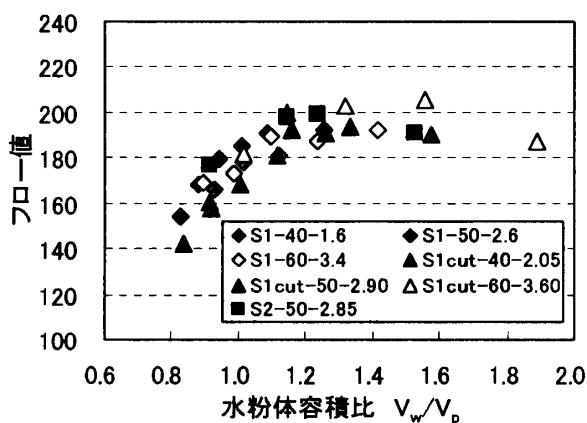


図-8 水粉体容積比とフロー値の関係

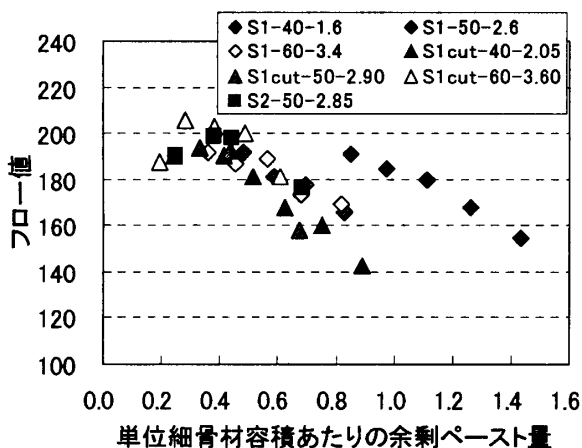


図-9 単位細骨材容積あたりの余剰ペースト量とフロー値の関係

ペーストの性状が異なる場合でも、0.4 付近でフロー値が最大になったと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 水セメント比 50%, 60%の配合のコンクリートに対して細骨材の一部を FA で置換する場合、容積置換率 10%程度で最も流動性が向上した。水セメント比が大きく、細骨材の微粒子分量が少ない場合、置換による流動性の向上効果が大きくなる。
- (2) FA の置換に伴い、コンクリートが同一スランプを得るために必要な単位水量が大幅に増加すると、無混入と比較してブリーディング率が増加した。ブリーディングの抑制に適した置換率は、5~10%程度であった。
- (3) モルタル試験において、FA 置換率が增大すると余剰ペースト量は増加するが、ペーストの水粉体容積比は低下して粘性が増す。一方、余剰ペースト量が少ないと細骨材粒子の噛み合いが大きくなりモルタルフローが抑制される。本研究の範囲では、ペーストの性状が異なる場合でも、フロー値が最大となる細骨材の 150 μ m 以上の単位容積あたり余剰ペースト量はほぼ同一であった。

参考文献

- 1) (財) 石炭エネルギー利用センターホームページ (<http://www.jcoal.or.jp/index.html>)
- 2) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針 (案), 2004.3
- 3) 加地 貴, 石井光裕, 岩原廣彦：FA を細骨材の一部に置換したコンクリートの配合に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1389-1394, 2002
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編], pp.377-378, 2002
- 5) Kennedy, C.T : The Design of Concrete Mixtures, Proceedings of ACI, Vol.36, pp.373-400, 1940