

論文 フライアッシュペーストのテーブルフロー試験による品質評価方法

西原 圭美*1・佃 勝二*2・西浦 潤*3・吉武 勇*4

要旨：フライアッシュ（FA）をコンクリート用混和材として活用する場合，FA の品質変化により，FA コンクリートのスランプや空気量の変動し，フレッシュ性状が安定化しないことがある。本研究では，さまざまな FA について，コンクリート用混和材として簡易的に適否判定できる評価法について検討する。まずテーブルフロー試験に基づく FA ペーストの流動性評価指標を定め，続いて異なる種類の FA を用いたレディーミクストコンクリートの空気量およびスランプとの関連性を調べた。その結果，特に空気量と本研究で提案する評価指標に相関性がみられた。

キーワード：混和材，フライアッシュ，レディーミクストコンクリート，空気量，スランプ

1. はじめに

近年増加傾向にある石炭火力発電の副産物であるフライアッシュ（FA）は，ポゾラン反応性を示し，コンクリートの流動性向上にも寄与することなどからコンクリート用混和材としてしばしば用いられている。しかしながら，石炭の産地・種類の違いにより FA の品質が異なるため，FA をレディーミクストコンクリート（以下，生コンクリート）に用いる場合，スランプや空気量などのフレッシュ性状および，その変化を適切に予測できない課題がある。コンクリートのフレッシュ性状を予測する研究¹⁾²⁾や AE 剤量を推定する研究³⁾⁴⁾においては，未燃炭素量に着目し相関性を調べたものが多いが，FA の品質がフレッシュコンクリートの性状へ与える影響については，まだ定量評価できていないのが現状である。これは FA の成分とコンクリートのフレッシュ性状を直接関連させることが困難であることが一因である。また，燃料コスト低減のため調達される石炭の多様化も進められており，さまざまな品質の FA においても簡易的な試験により，FA コンクリートのフレッシュ性状を推定できる評価法が望まれる。

本研究では，異なる種類の FA について，コンクリート用混和材として簡易的に適否判定するため，FA ペーストの流動性による評価指標の設定を行う。その評価指標を用いて FA コンクリートのスランプおよび空気量との関連性を調べることを主な目的とする。FA ペーストの流動性評価指標を設定するため，モルタルの流動性試験としてしばしば用いられるテーブルフロー試験および P 漏斗試験を実施した。それらの試験結果より得られた流動性評価指標に対する FA の影響因子について考察を加えた。さらに，テーブルフロー試験において流動性が大き

く異なった FA（3 種類）を用いて一般的な AE 減水剤を使用した生コンクリート，および 4 種類の FA を用いて FA 用 AE 減水剤を使用した生コンクリートのフレッシュ性状の経時変化を調べ，FA ペーストの流動性との相関性を調査した。これらの結果を基に FA の品質評価方法について考察した。

2. 使用した FA の品質

本実験において FA ペーストの流動性評価に使用した FA の成分を表-1 に示す。なお，生コンクリートの試験については，FA ペーストの流動性評価の結果に基づき，FA を選定した。生コンクリートのフレッシュ性状試験に使用した 17C，17H，17I，17J，18B，18C，18E の SEM 画像を図-1 に示す。1 枚の画像に多くの粒子形状を観察するため 500 倍で SEM 画像解析を行った。ほとんどの FA 粒子は球形状であり，外観上の差異はほとんどないが，セノスフェアと呼ばれる中空かつ球形の形状がみられた。これは 1.0 以下の低密度の粒子であり，FA 成分に影響を与えている可能性があり，生コンクリートのフレッシュ性状においても考慮する必要がある。しかしこの回収率は 1%程度⁵⁾とされることから，本研究では特に考慮しないこととした。

3. 簡易試験方法の決定

3.1 目的

FA ペーストの流動性を簡易的に評価できる試験方法として，P 漏斗試験およびテーブルフロー試験を実施し評価指標の設定を検討した。この指標を用いて，FA コンクリートの練上がり直後および経時変化について空気量およびスランプを予測し，コンクリート用混和材として

*1 山口大学大学院 創成科学研究科 建設環境系専攻 (学生会員)

*2 中国電力（株）エネルギー総合研究所 土木グループ

*3 中国電力（株）エネルギー総合研究所 土木グループ

*4 山口大学大学院 創成科学研究科准教授 博(工) (正会員)

表-1 本研究で使した FA の品質

記号	密度 (g/cm ³)	pH	湿分 (%)	強熱減量 (%)	ブレーン比表 面積 (cm ² /g)	45 μ mふるい残 分 (%)	フロー値比 (%)	MB 吸着量 (mg/g)	BET 比表面積 (m ² /g)
17A	2.22	7.5	<0.1	2.5	3050	20	103	0.25	2.89
17B	2.19	4.2	<0.1	5.0	3330	23	99	0.29	3.01
17C	2.24	4.4	<0.1	4.1	3600	23	104	0.27	4.12
17D	2.13	9.0	<0.1	3.0	3180	23	107	0.29	2.77
17E	2.27	11.4	<0.1	2.7	3860	14	105	0.30	3.48
17F	2.24	10.6	<0.1	3.2	3380	24	108	0.14	2.00
17G	2.29	9.4	13.5	4.1	3410	15	112	0.16	3.30
17H	2.19	4.4	<0.1	2.7	2900	12	110	0.31	2.12
17I	2.27	4.5	<0.1	7.6	4140	11	108	0.27	3.88
17J	2.22	9.5	12.0	3.5	3480	24	109	0.17	3.66
18A	2.11	10.6	<0.1	2.4	2790	36	107	0.48	2.35
18B	2.06	9.3	<0.1	2.4	2750	28	108	0.55	2.16
18C	2.04	9.8	<0.1	2.5	2410	39	98	0.53	3.70
18D	2.19	6.2	<0.1	2.5	3150	24	107	0.34	2.22
18E	2.15	4.3	<0.1	2.3	2530	34	110	0.20	1.41
18F	2.19	6.3	<0.1	2.5	3040	16	112	0.35	2.10
18G	2.21	10.5	<0.1	3.0	3020	22	109	0.45	2.56
18H	2.22	10.2	<0.1	2.4	2900	16	107	0.34	1.96

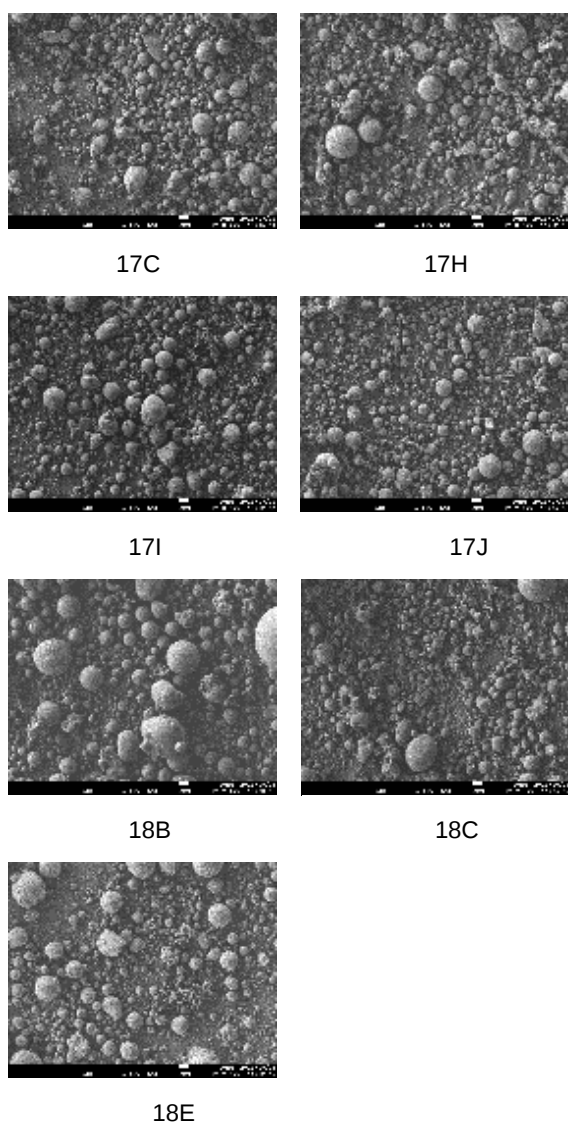


図-1 FA の SEM 画像

使用する FA の品質評価方法を定めることとした。

3.2 P 漏斗試験

(1) 試験方法・配合条件

17A～17J の 10 種の FA と水の合計体積を 1.0 とする配合でパン型小型ミキサを用いて 2～4 分間混練した。JSCE-F521-1999 に基づいて、流下時間の計測を各配合で 3 回実施し、その平均値を採用した。なお本論文では、FA 体積割合が 0.60 (水の体積割合は 0.40) の場合、FA 体積 0.60 のように表記する。

(2) 試験結果および考察

図-2 に流下時間と FA 体積を示す。FA 体積 0.50 以下の配合では、ほとんどが 10～20 秒程度の流下時間を示し、FA による差異はみられない。流動性に差異が生じた FA 体積 0.50 以上においては、粘性が高くなり流下時間の測定が困難であった。したがって、一定の関係式を求めることや一定の FA 体積で評価を行うなど指標を設定することが難しいことから、P 漏斗試験を用いてさまざまな品質の FA を評価することはできないと判断した。

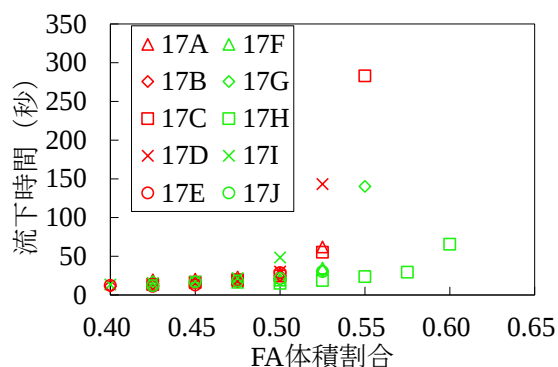


図-2 流下時間と FA 体積割合

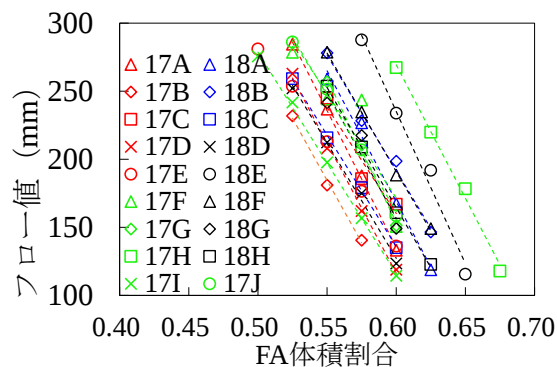


図-3 フロー値と FA 体積割合

表-2 Sq 値

FA	Sq (mm)	FA	Sq (mm)
17A	350	18A	367
17B	320	18B	380
17C	356	18C	341
17D	336	18D	337
17E	336	18E	406
17F	361	18F	380
17G	361	18G	358
17H	428	18H	363
17I	327		
17J	359		

3.3 テーブルフロー試験

FA ペーストを用いて練上がり直後に JIS R 5201 に基づき、テーブルフロー試験（以下、フロー試験と略記）を各配合において 2 回実施し、その平均値を採用した。17A～18H の FA を使用して水との合計体積が 1.0 となる配合で混練した。さらに、FA コンクリートのフレッシュ性状の経時変化との関連性を調査するにあたり、FA ペーストの経時変化も把握しておく必要がある。そこで、17A～17I のうち、図-3 に示す FA 体積 0.60 において流動性の最も高い 17H および比較的低い 17J を使用し、FA ペーストの練上がりから 0, 30, 60, 90 分におけるフロー試験（以下、経時フロー試験）を実施した。さらに、経時フロー試験と同じ FA とセメントを混和し、ペーストの練上がりから 0, 30, 60, 90 分におけるフロー試験（以下、セメント入り経時フロー試験）を実施した。配合方法に関しては、セメントを混和しない場合は、FA 体積 0.60 としてフロー試験を実施し、セメントと混和する場合は適当な流動性でフロー試験を実施できるよう、FA とセメントを体積 1:1 (W/C=0.63) として、0, 30, 60, 90 分において測定した。なお、試験開始前半日以上は温度および湿度一定の養生室内に FA を保管し、養生室内で材料の量測定および試験を実施した。

3.4 試験結果

(1) FA ペーストのフロー試験

フロー値と FA 体積割合を図-3 に示す。すべての FA において概ね直線関係を示しており、その傾きはほぼ同程度であった。このことから、FA ペーストのフロー値と FA 体積割合の直線回帰は、流動性の評価指標に利用できるものと考えた。

本研究では、FA ペーストの流動性指標として各 FA の性状の差異をできるだけ大きく且つ数量化できるように、式(1)に示される回帰直線と y 軸および $y=100$ における FA 体積割合 (x 軸) で囲まれる三角形の面積 (Sq 値) を用いることとした。ここで $y=100$ は、テーブルフロー試験に用いるフローコーン底面の直径 (100mm)、すなわちフロー値の最小値を表しており、その時の FA 体積割合 x は、 $x=(100-b)/a$ である。 Sq 値が大きい FA ほど流動性が大きいことを示している。なお、各 FA の回帰直線の傾きを一定とするため、全 FA の回帰式における傾きの平均値 ($a=-1792$) を用いた。すべての Sq 値を表-2 に示す。

$$y = ax + b \quad (1)$$

$$Sq = -(b-100)^2/2a \quad (2)$$

ここに y : フロー値, x : FA 体積割合であり, a, b は係数を表す。

本研究の範囲内において、 Sq 値の最も大きい FA は 17H、最も小さい FA は 17B であった。 Sq 値の差異は FA の品質の影響と考え、関連性のある FA の物性値を調査した。18 種類の FA について、pH および湿分を除く 7 つの物性を説明変数、 Sq 値を目的変数として変数減少法による重回帰分析を試みたところ、最も有意な成分はフロー値比およびブレン比表面積であった ($R^2=0.63$)。この分析結果に基づき、式(3)による推測値 Sq_1 を求めた。

$$Sq_1 = -0.034x_1 + 4.3x_2 + 3.3 \quad (3)$$

ここに、 x_1 : ブレン比表面積 (cm^2/g)、 x_2 : フロー値比 (%) を表す。

これらは他の成分と比べ、FA ペーストの流動性に直接的に影響を与える因子であることから、妥当な結果と考えられる。

Sq 値と Sq_1 値の比較を図-4 に示す。この結果に示すように FA ペーストの流動性 (Sq 値) について、直接的に影響すると考えられるフロー値比およびブレン比表面積のみでは、 $Sq \geq 400\text{mm}$ の FA について過大評価しており、FA 品質の適切な推定評価ができていない。そこで

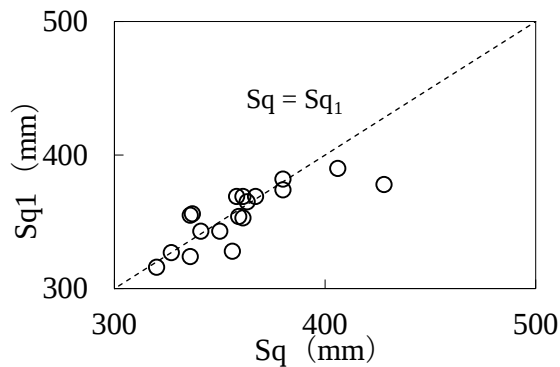


図-4 S_q 値と S_{q1} 値

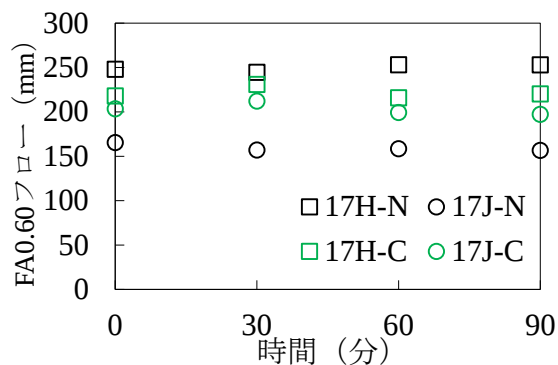


図-5 フロー値の経時変化

次章では、 S_q 値を独立した FA 品質指標と仮定して、 S_q 値と生コンクリートのフレッシュ性状の関連性を調べた。

(2) 経時フロー試験

生コンクリートのフレッシュ性状の試験を行うにあたり、流動性の経時変化におよぼす FA の影響を確認しておく必要がある。そこで、粉体の体積割合 60%とした FA ペースト単身およびセメント入り FA ペーストのフロー試験を実施した。経時フロー試験およびセメント入り経時フロー試験結果を図-5 に示す。ただし、凡例は FA 種類を表し、末尾の N はセメント無し、C はセメント有りを表す。

経時フロー試験によると、FA ペーストでは水和反応がないため 0 分と 90 分後におけるフロー値に変化がなく、ほぼ同程度の値を示した。さらにセメント入り経時フロー試験では、試験の簡易化を目的にセメントを 1:1 の割合で内割置換しているため、FA ペーストのフロー値に比べ、FA 毎の差異が小さくなり、経時変化もほとんどみられなかった。この結果は、FA をセメントの内割置換材料として一般的な 10~20%で生コンクリートに用いる場合、スランプなどの流動性に対して FA 種類がおよぼす影響が小さくなる可能性を示唆したものと考えられる。

4. 生コンクリートのフレッシュ性状試験

4.1 目的および試験方法

本試験の目的は、実機練りする生コンクリートに対して、FA の品質の相違がそのフレッシュ性状の変化に与える影響を調査することである。本試験では、生コンクリートで汎用される一般 AE 減水剤、および FA 用 AE 剤を用いて、FA コンクリートおよび FA を混和しないコンクリートのフレッシュ性状の経時変化を調べた。実現場への運搬時間を考慮して JIS A 5308 に定められている 1.5 時間を測定範囲とし、0, 30, 60, 90 分におけるスランプおよび空気量を測定した。FA 割合については一般的に FA が混和材として用いられるセメント質量 15~20 % の内割置換とした。

4.2 使用材料

(1) 一般 AE 減水剤を用いた生コンクリート

生コンクリートの配合を表-3 に示す。18A~18H のうち、フロー値が大きく異なった 2 種類およびその中間値を示した FA の計 3 種類を選定した。基準コンクリートである FA を混和しない 18ctrl. (27-12-20N) に対して、各 FA をセメント質量 19% (FA 量 : 60kg/m³) で内割置換した。なお化学混和剤の影響を低減し、 S_q 値の差異が与える影響を明確にするため、配合毎に調整せず、AE

表-3 一般 AE 減水剤を使用した生コンクリート

記号	18ctrl.	18E	18B	18C
W/B	0.54	0.54	0.54	0.54
s/a	0.48	0.48	0.48	0.48
単位量 (kg/m ³)	W	170	170	170
	C	315	255	255
	FA	0	60	60
	S	1	436	423
		2	434	423
	G	1005	196	196
		2010	291	291
		2005	483	483
	AE1	2.13	2.13	2.13
	AE2	0.016	0.016	0.016

表-4 FA 用 AE 剤を使用した生コンクリート

記号	17ctrl.	17H	17I	17J	17C
W/B	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
s/a	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48
単位量 (kg/m ³)	W	164	164	164	164
	C	278	240	240	240
	FA	0	38.5	39.9	39.0
	S	1	269	265	265
		2	269	265	265
		3	359	353	353
	G	1505	394	394	394
		2015	590	590	590
	Ad	0.075	0.075	0.075	0.075
	AE	1.37	0.33	0.33	0.33

剤を同量使用した。

(2) FA 用 AE 剤を用いた生コンクリート

同様に、生コンクリートの配合を表-4 に示す。17A～17J のうち、フロー値が大きく異なった 2 種類、およびそれらの中間の流動性を示した 2 種類の FA を選定した。基準コンクリートである FA を混和しない 17ctrl. (24-12-20N) のスランプおよび空気量が、JIS A 5308 の範囲内となるように AE 剤、Ad 剤を用いて調整を行った。また、FA コンクリートに関しては、平均的なフロー値を示した 17J, 17C を基準とし、スランプおよび空気量が同 JIS 規定範囲内に収まるように化学混和剤添加量を決定した。なお FA のセメント内割置換率は 14%程度である。これらの FA コンクリートに用いた (FA 用) AE 剤は市販の混和剤であり、高級脂肪酸系界面活性剤を主成分とする。

4.3 試験結果および考察

(1) 一般 AE 減水剤を用いた生コンクリート

スランプおよび空気量の経時変化を図-6 に示すとともに、これらの値と Sq 値の相関性を図-7、図-8 に示す。さらに、スランプおよび空気量と Sq 値の相関係数を表-5 にまとめて示す。図-6 に示すように、スランプは時間経過に伴い減少しているが、すべての FA について 90 分後も JIS A 5308 を満足している。これは経時フロー試験とほとんど相違ない。 $Sq=406\text{mm}$ の 18E については各時間において 18ctrl. と同程度のスランプを示していることから、一般 AE 減水剤を用いる場合は $Sq \geq 406\text{mm}$ であれば、基準コンクリートと同等に扱うことができると考える。また図-8 に示すように、 Sq 値と空気量について正の相関性がみられた。 $Sq=406\text{mm}$ の 18E では 0 分から 90 分まで空気量 3%以上を維持したが、 $Sq < 406\text{mm}$ の 18C, 18B については、生コンクリートの練上がり直後より、空気量が 3%を下回り、その後さらに低下した。JIS A 5308 において汎用的な生コンクリートの空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ と定められていることから、一般 AE 減水剤を使用する場合、 $Sq \geq 406\text{mm}$ の FA であれば、コンクリート用混和材として使用できる可能性がある。

(2) FA 用 AE 剤を用いた生コンクリート

スランプおよび空気量の経時変化を図-9 に示すとともに、これらの値と Sq 値の相関性を図-10、図-11 に示す。また、スランプおよび空気量と Sq 値の相関係数を表-6 にまとめて示す。図-9 に示すように、FA 用 AE 剤を用いた生コンクリートにおいても、スランプは時間とともに減少しており、特に 60 分から 90 分にかけての減少は顕著である。一般 AE 減水剤を用いた生コンクリートと同等に扱うことができる Sq 値を基準にすると、 $Sq < 406\text{mm}$ の FA と 17ctrl. は、約 23.5～52.9%と大きく減少している。しかし、 $Sq=428\text{mm}$ の 17H は約 12.5%の減少であり、約 1/2 以下の減少率に留まり、FA によるボー

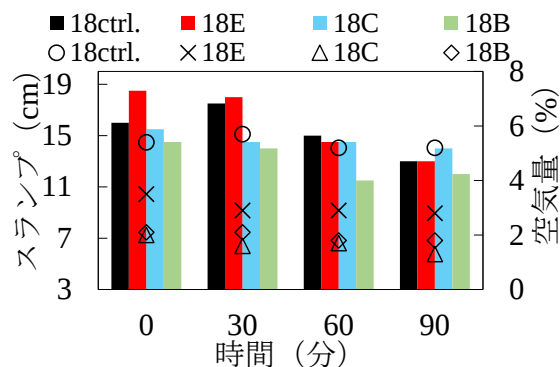


図-6 一般 AE 減水剤フレッシュ性状の経時変化

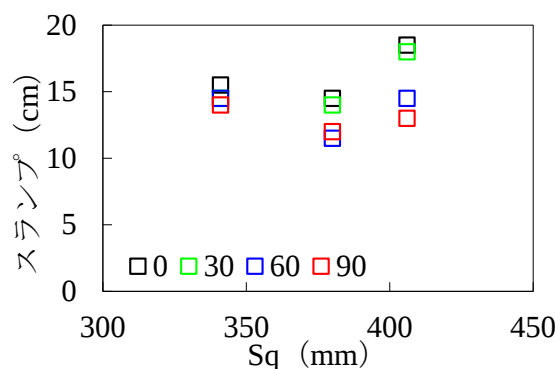


図-7 スランプと Sq 値

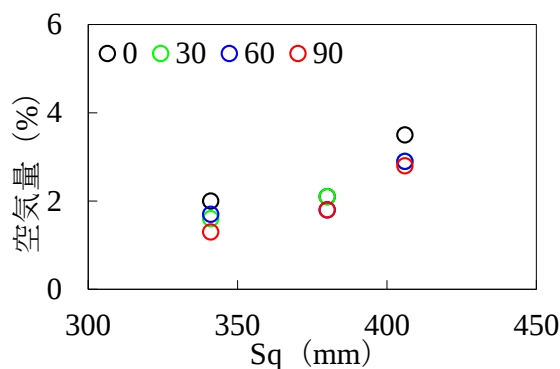


図-8 空気量と Sq 値

表-5 相関係数

スランプ	経過時間 (分)	0	30	60	90
	相関係数	0.405	0.532	0.0132	0.355
空気量	経過時間 (分)	0	30	60	90
	相関係数	0.701	0.940	0.715	0.910

ルベアリング効果と考える。また図-11 に示すように、 Sq 値と空気量について正の相関性がみられ、17ctrl. が各計測時において 4～5%程度の値を示している。17H および 17J については、30 分後に大きな増加がみられ、空気量 6%を超えた。FA 用 AE 剤は空気を混入させやすくするため、特に Sq 値の大きい FA が空気連行を促進しやす

いものと考えられる。したがって、 Sq 値が 406mm 以上の高い流動性を示す FA では、AE 剤の効果が顕著となり、空気量が高くなった。セノスフェアのように FA の成分評価に反映されていない影響因子を考慮するため、本研究で実施したような FA ペーストのテーブルフロー試験に基づく Sq 値による評価は有用と考えられる。

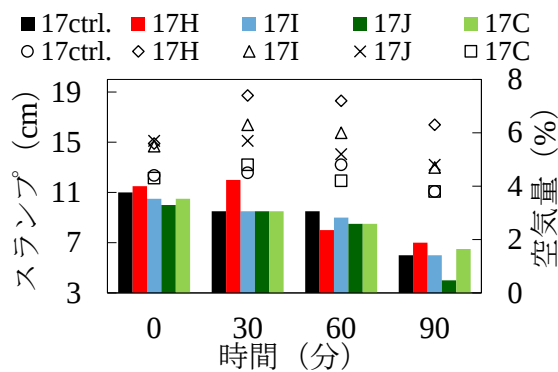


図-9 FA 用 AE 減水剤フレッシュ性状の経時変化

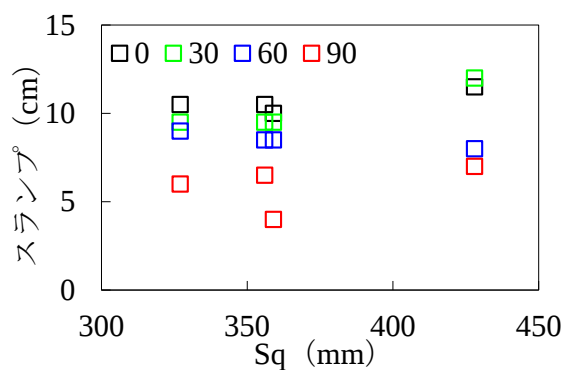


図-10 スランプと Sq 値

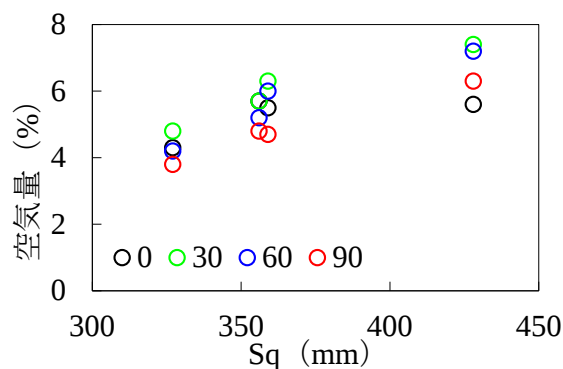


図-11 空気量と Sq 値

表-6 相関係数

スランプ	経過時間 (分)	0	30	60	90
	相関係数	0.641	0.887	0.927	0.180
空気量	経過時間 (分)	0	30	60	90
	相関係数	0.0094	0.546	0.544	0.569

特に、一般 AE 減水剤を用いた生コンクリートの場合、その空気量が JIS A 5308 を満足できるか否かを予測する一指標となる可能性が窺える。

5. まとめ

本研究では、FA をコンクリート混和材としての可否を評価するために FA ペーストのテーブルフロー試験を行い、それに基づく評価指標 (Sq 値) と FA コンクリートのスランプ値および空気量との関連性の検討を行った。本研究の範囲内で得られた結論に以下に列挙する。

- (1) FA の品質評価に用いるための FA ペーストの流動性試験として、テーブルフロー試験が適している。
- (2) テーブルフロー試験に基づき設定した評価指標 (Sq 値) は、FA 品質のフロー値比およびブレン比表面積と強い相関性がみられた。
- (3) 一般 AE 減水剤を用いた場合でも、 $Sq=406\text{mm}$ の 18E は 18ctrl. と各時間のスランプが同程度であった。本研究で提案する Sq 値を閾値 ($Sq \geq 406\text{mm}$) として、基準コンクリートと同等にスランプロスを推定できる可能性が窺えた。
- (4) Sq 値と生コンクリートの空気量には相関性がみられ、一般 AE 減水剤を用いた場合でも、 $Sq \geq 406\text{mm}$ において空気量は JIS 規定値を満足できたことから、FA コンクリートのフレッシュ性状を予測する一指標とできる可能性がある。

参考文献

- 1) 江藤弘之, 赤塚 剛, 山本 晃: フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.111-116, 2002
- 2) 西 祐宜, 西田 朗, 戸田和敏, 名和豊春: 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, Vol.30, No.1, pp.177-182, 2008
- 3) 楠 貞則, 添田政司, 大和竹史, 芦田広喜: フライアッシュコンクリートの配合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.189-194, 2008
- 4) Billen, M. and Kizgut, S.: Modeling of unburned carbon in fly ash and importance of size parameters, Fuel Processing Technology, Vol.143, pp.7-17, Mar.2016
- 5) 平島 剛ほか: 湿式選別法を用いた石炭燃焼灰からの中空球形粒子の回収, Journal of MMU, Vol.124, No.12, pp.878-884, 2008