論文　フライアッシュを内割り･外割り併用したコンクリートの基本的性質に関する研究

河野　栞[*1]・周藤　将司[*2]・中本　健二[*3]・高田　龍一[*4]

要旨：フライアッシュコンクリートは，内割り置換で用いる場合は初期強度が低減する。一方，外割り置換で用いることにより強度が増進することが，これまでの研究により明らかにされている。本研究では，内割りと外割りを併用することによりフライアッシュ混和前の配合と同等の強度発現を期待できるフライアッシュの配合比率についての検討を行った。その結果，JIS Ⅱ種に相当するフライアッシュをセメントに対して 30%混和する場合において，内割りの割合を 10～15%とする配合で 28 日強度がフライアッシュ混和前の配合と同程度となることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ，内割り置換，外割り置換，内割り外割り併用，圧縮強度

1. はじめに

フライアッシュ（以下，FA；Fly Ash）を混和または混合したコンクリートには，長期強度の増進，ワーカビリティーの向上，アルカリシリカ反応の抑制など多くの効果があることが知られている。一方で，初期強度は低下する傾向がみられる。一般に，コンクリートの強度管理は材齢 28 日の圧縮強度によって行われており，28 日強度を確保するためには初期の強度発現が重要である。

この初期強度が低下する傾向は，一般に FA の混合割合が増加するほど顕著である。これは，セメントの一部を FA に置換（内割り置換）して用いることにより，セメント量が低減されることで起こる事象である。一方，FA を細骨材に置換（外割り置換）して用いる場合では，強度発現性が向上することが報告されている[1), 2), 3)]。また，日本建築学会「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」では，改定において FA を細骨材置換したコンクリートに関する内容が新たに章立てされている[4)]。本指針においては，細骨材置換だけでなく，セメント置換と細骨材置換の併用，つまり内割りと外割りを併用する場合についても言及されている。

しかし, FA を内割りと外割りで併用したコンクリートに関する研究例[5)]は少ない。そこで本研究では，FA を内割り外割りでそれぞれ混和させた場合と，内割り外割りを併用して混和させた場合においてコンクリートの基本的性質について実験的検討を行った。最終的に，FA コンクリートにおいて初期強度の低減を抑制することができる FA の内割り・外割り比率についての検討を行った。

2. FA を内割り・外割りそれぞれで用いた実験

2.1 実験概要

ここでは，試料として用意した 5 種類の FA についてセメント内割りと外割りで置換したコンクリートを作製し，FA の品質の差異が及ぼす影響の有無を確認する。本研究の目的である内割りと外割りの併用を考える場合には，まず内割りの場合と外割りの場合の双方について単独で試験を行い，傾向を確認する必要がある。そこで，FA を内割り・外割りでそれぞれ 10，20，30%置換した配合のコンクリートでフレッシュ性状と圧縮強度（材齢 7，28，91 日；JIS A 1108 に準拠）の検討を行った。

2.2 材料と配合

実験では，5 種類の FA（記号の後ろに“-A”，“-B”，“-C”，“-D”，“-E”と付記することで区別する）を用いる。それぞれの主な品質を**表－1** に示す。実験で使用する 5 種類の FA は，すべて JIS A 6201 のⅡ種に相当するものである。しかし，一定品質であるとは言い切れず，強熱減量，比表面積，45μm ふるい残分には FA ごとに特徴がみられる。また，高田らの研究[3)]を参考に，各 FA30g を 70ml の蒸留水中で 1 分間撹拌してから pH を確認した。その結果，FA-A，FA-B，FA-C，FA-D はアルカリ性を示したのに対し，FA-E は酸性を示した。これより，本研究で用意した FA は，JIS Ⅱ種灰の中でも品質にある程度のばらつきがあることがわかる。

配合表を**表－2** に示す。本研究では，FA を混和しないベース配合に加え，各 FA をセメントに対して内割り・外割りで 10，20，30%置換した配合の計 31 配合で試験を行った。ここでのベース配合は，配合強度 24N/mm^2 とし，フレッシュ性状の目標値はスランプ 12.0cm，空気量

*1 松江工業高等専門学校専攻科　生産・建設システム工学専攻　(学生会員)
*2 松江工業高等専門学校　環境・建設工学科准教授　博士（農学）　(正会員)
*3 中国電力（株）　電源事業本部石炭灰有効活用グループ　マネージャー
*4 （株）藤井基礎設計事務所　技術顧問　農学博士　(正会員)

表－1　使用する FA の品質

	FA-A	FA-B	FA-C	FA-D	FA-E	JIS A 6201 II 種
pH	10.8	10.8	10.5	9.9	4.1	-
湿分(%)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	1.0 以下
強熱減量(%)	2.7	3.2	3.0	2.5	2.3	5.0 以下
密度(g/cm^3)	2.19	2.20	2.18	2.20	2.24	1.95 以上
比表面積(cm^2/g)	3,400	3,470	3,330	3,190	3,990	2,500 以上
45μm ふるい残分(%)	21	22	22	24	13	40 以下
フロー値比(%)	101	104	106	102	105	95 以上
二酸化けい素含有量(%)	63.1	67.1	67.0	64.4	66.5	45.0 以上
活性度指数 材齢 28 日(%)	83	84	83	82	87	80 以上
活性度指数 材齢 91 日(%)	96	95	97	95	100	90 以上

表－2　コンクリート試験配合表（内割り・外割りそれぞれ）

配合の種類			W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)								
						C	W	S1	S2	G1	G2	Add1	Add2	FA
ベース			55.5	-	46.6	299	166	416	414	595	398	2.69	0.00	0
FA-A	内割り	10%	-	55.5	46.7	269	166	414	414	590	395	2.84	0.60	30
		20%	-	55.5	46.6	239	166	411	411	587	393	2.69	2.99	60
		30%	-	55.5	46.6	209	166	409	409	582	393	2.54	4.78	90
	外割り	10%	55.5	-	45.5	299	166	398	396	595	398	2.84	1.05	30
		20%	55.5	-	44.4	299	166	380	380	595	398	2.99	2.99	60
		30%	55.5	-	46.5	299	166	362	362	595	398	3.14	5.98	90
FA-B	内割り	10%	-	55.5	46.7	269	166	414	414	590	395	2.84	0.90	30
		20%	-	55.5	46.6	239	166	411	411	587	393	2.69	2.99	60
		30%	-	55.5	46.6	209	166	409	409	582	393	2.54	5.98	90
	外割り	10%	55.5	-	45.5	299	166	398	396	595	398	2.84	1.79	30
		20%	55.5	-	44.4	299	166	380	380	595	398	2.99	4.19	60
		30%	55.5	-	43.2	299	166	362	362	595	398	3.14	7.18	90
FA-C	内割り	10%	-	55.5	46.7	269	166	414	414	590	395	2.84	0.90	30
		20%	-	55.5	46.6	239	166	411	411	587	393	2.54	2.99	60
		30%	-	55.5	46.6	209	166	409	409	582	393	2.39	5.98	90
	外割り	10%	55.5	-	45.5	299	166	398	396	595	398	2.69	1.20	30
		20%	55.5	-	44.4	299	166	380	380	595	398	2.84	3.59	60
		30%	55.5	-	43.2	299	166	362	362	595	398	2.99	6.58	90
FA-D	内割り	10%	-	55.5	46.7	269	166	414	414	590	395	2.54	0.60	30
		20%	-	55.5	46.6	239	166	411	411	587	393	2.54	2.39	60
		30%	-	55.5	46.6	209	166	409	409	582	393	2.39	3.59	90
	外割り	10%	55.5	-	45.5	299	166	398	396	595	398	2.69	0.60	30
		20%	55.5	-	44.4	299	166	380	380	595	398	2.99	2.39	60
		30%	55.5	-	43.2	299	166	362	362	595	398	3.14	3.59	90
FA-E	内割り	10%	-	55.5	46.7	269	166	414	414	590	395	2.54	1.79	30
		20%	-	55.5	46.6	239	166	411	411	587	393	2.24	5.98	60
		30%	-	55.5	46.6	209	166	409	409	582	393	1.94	7.18	90
	外割り	10%	55.5	-	45.5	299	166	398	396	595	398	2.24	2.09	30
		20%	55.5	-	44.4	299	166	380	380	595	398	2.39	4.78	60
		30%	55.5	-	43.2	299	166	362	362	595	398	2.54	11.96	90

※C：セメント（密度 3.16 g/cm^3），W：水（密度 1.00 g/cm^3），S1：細骨材 1（密度 2.57 g/cm^3），S2：細骨材 2（密度 2.57 g/cm^3），G1：粗骨材 1（密度 2.67 g/cm^3），G2：粗骨材 2（密度 2.69 g/cm^3），Add1：AE 減水剤，Add2：AE 剤（100 倍希釈），FA：フライアッシュ（密度は**表－1** による）

4.5%と設定した。FA コンクリートの W/C（または W/B）はベース配合と同じ値とし，スランプと空気量はベース配合と同じ目標値で配合を決定した。

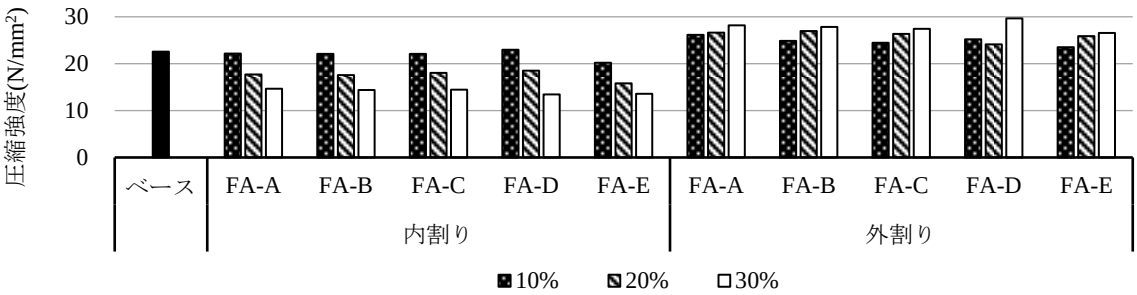
2.3 実験結果

(1) フレッシュ性状

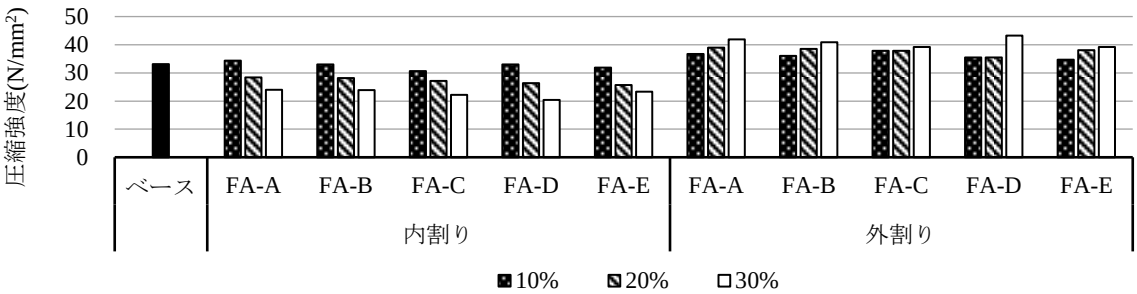
スランプと空気量の測定結果を**表－3** に示す。フレッシ

表－3　スランプ・空気量測定結果（内割り・外割りそれぞれ）

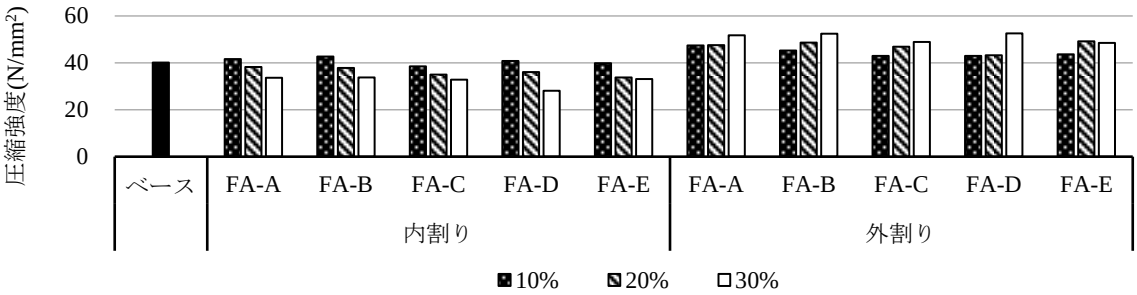
配合の種類	スランプ(cm)						空気量(%)					
	内割り			外割り			内割り			外割り		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
ベース	11.0						5.0					
FA-A	11.0	14.0	12.0	13.0	12.5	10.0	4.8	5.9	5.9	4.9	5.3	5.2
FA-B	10.5	13.0	13.5	13.5	13.0	10.5	4.1	4.0	4.3	4.4	4.8	4.4
FA-C	12.5	14.0	14.0	11.5	12.5	10.5	4.9	5.3	5.6	4.5	5.0	4.3
FA-D	10.0	12.0	12.5	10.5	12.5	11.5	4.5	5.8	5.5	5.2	4.9	5.1
FA-E	11.5	12.5	12.0	11.0	11.5	12.0	5.2	6.0	4.3	4.5	4.6	5.6



図－1　材齢 7 日圧縮強度試験結果（内割り・外割りそれぞれ）



図－2　材齢 28 日圧縮強度試験結果（内割り・外割それぞれ）



図－3　材齢 91 日圧縮強度試験結果（内割り・外割りそれぞれ）

ュ性状は，混和剤の使用量を調整することで，全ての配合において目標である 12.0±2.5cm，4.5±1.5%の範囲に収まった。ここで，**表－2** より AE 減水剤（Add 1）の使用量に着目すると，FA-E を除く FA では，外割りの方が AE 減水剤を多く使用する傾向にある。また，AE 剤（Add 2）の使用量に着目すると，全ての FA において内割り・外割りのどちらも置換率が増加すると使用量が増加している。これらの結果から，FA コンクリートにおいてフレッシュ性状をベース配合並みに保つためには，AE 剤の使用量が増加する傾向が確認された。

ここで，FA-E は他の FA と比較して，AE 減水剤の使用量はやや少なく，AE 剤の使用量は 2 倍程度となった。FA コンクリートにおける AE 剤の使用量については，FA の強熱減量，比表面積，メチレンブルー（MB）吸着量が影響することが報告されている [6]。しかし，**表－1** より FA-E の強熱減量，比表面積に特段の特徴は確認できなかった。加えて，MB 吸着量の確認を行ったところ，FA-A が 0.47mg/g，FA-B が 0.54mg/g，FA-C が 0.53mg/g，FA-D が 0.34mg/g，FA-E が 0.54mg/g であった。これより，MB 吸着量についても FA-E に特段の特徴は確認できな

表－4　コンクリート試験配合表（内割り・外割り併用）

配合の種類		W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)								
					C	W	S1	S2	G1	G2	Add1	Add2	FA
FA-A	内 10，外 20	-	55.5	44.5	269	166	380	378	590	395	2.99	4.78	30 / 60
	内 15，外 15	-	55.5	45.0	254	166	388	386	590	395	2.84	4.19	45 / 45
	内 20，外 10	-	55.5	45.5	239	166	393	393	587	393	2.69	3.59	60 / 30
FA-B	内 10，外 20	-	55.5	44.5	269	166	380	378	590	395	2.99	5.98	30 / 60
	内 15，外 15	-	55.5	45.0	254	166	388	386	590	395	2.84	5.38	45 / 45
	内 20，外 10	-	55.5	45.5	239	166	393	393	587	393	2.69	5.38	60 / 30
FA-C	内 10，外 20	-	55.5	44.5	269	166	380	378	590	395	2.84	5.38	30 / 60
	内 15，外 15	-	55.5	45.0	254	166	388	386	590	395	2.84	4.78	45 / 45
	内 20，外 10	-	55.5	45.5	239	166	393	393	587	393	2.69	4.78	60 / 30
FA-D	内 10，外 20	-	55.5	44.5	269	166	380	378	590	395	3.14	2.99	30 / 60
	内 15，外 15	-	55.5	45.0	254	166	388	386	590	395	2.99	2.39	45 / 45
	内 20，外 10	-	55.5	45.5	239	166	393	393	587	393	2.84	2.39	60 / 30
FA-E	内 10，外 20	-	55.5	44.5	269	166	380	378	590	395	2.39	7.18	30 / 60
	内 15，外 15	-	55.5	45.0	254	166	388	386	590	395	2.24	8.37	45 / 45
	内 20，外 10	-	55.5	45.5	239	166	393	393	587	393	1.94	7.77	60 / 30

※使用材料は 2.1 節と同様；FA の値は（内割り相当量 / 外割り相当量）を意味しており，単位量は 90kg/m^3 である。

かった。加えて，既往の知見[7), 8)]によれば，酸性灰では減水剤の効果が小さくなることが報告されている。これらのことから，AE 剤使用量においても FA の pH が影響している可能性があると考えられる。また，酸性灰の影響があったとしても，AE 剤の添加量を増やすことで他の FA の配合やベース配合と同程度の空気量を得ることができるといえる。

(2) 圧縮強度

材齢ごとに圧縮強度の測定結果を**図－1**，**図－2**，**図－3** に示す。

まず内割りについては，全ての材齢，全ての FA において FA の置換率増加に伴い圧縮強度は低下する傾向を示した。これは，セメント量が減ずるためである。ベース配合との比較では，置換率 10%では全ての材齢，FA で概ね同等の値を示すが，置換率が 10%を超えるとベース配合より低くなる傾向を得た。FA の置換率が 30%のときの材齢 28 日の圧縮強度は，ベース配合の 0.7 倍程度に留まった。

次に外割りについては，全ての FA コンクリートにおいて FA の置換率増加に伴い圧縮強度は増加する傾向を示した。この結果は，既往の知見[1), 2)]と一致するものである。ベース配合との比較では，全ての FA コンクリートの配合でベース配合より大きい圧縮強度が得られた。外割り 30%の圧縮強度は，いずれの材齢でも，ベース配合の 1.2 倍程度の圧縮強度が得られた。

ここで，フレッシュ性状の結果からは FA-E の混和剤使用量が多くなる傾向が確認されたが，圧縮強度試験結果においては，特段の傾向は確認されなかった。また，他の FA についても，品質の差異による傾向の違いは確認されなかった。

3. FA を内割り・外割り併用した実験

3.1 実験概要

2 章より, FA を内割りで混和すると圧縮強度が低下し，外割りで混和すると圧縮強度が増加することが確認された。この結果から，内割りと外割りを併用することでベース配合と同等の初期強度を得ることができると考えられる。また，ベース配合と同等の強度となる FA の置換比率も存在すると考えられる。そこで，FA の混和量を 30%とし，内割り・外割りの配合比率を変化させたコンクリートでフレッシュ性状と圧縮強度（材齢 7，28，91 日；JIS A 1108 に準拠）の検討を行った。

3.2 配合

FA をはじめとする使用材料は，2 章と同様である。配合表を**表－4** に示す。2 章と同一のベース配合に加え，各 FA を内割り：外割りで 10：20，15：15，20：10 の割合いで置換した配合のコンクリートで試験した。本論文では，内割り：外割りで 10：20 の配合を（内 10，外 20）と表記する。同様に，15：15 の配合は（内 15，外 15），20：10 の配合は（内 20，外 10）と表記する。フレッシュ性状の目標値は，2 章と同様である。

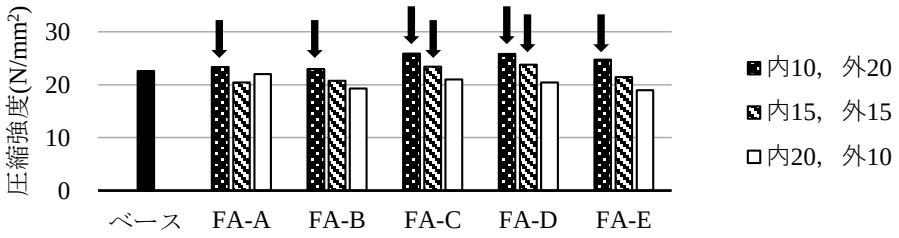
3.3 試験結果

(1) フレッシュ性状

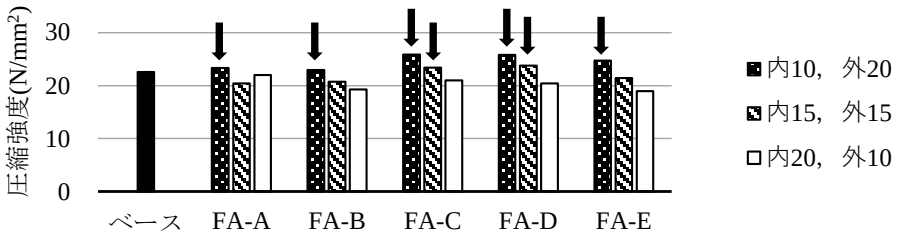
スランプと空気量の測定結果を**表－5** に示す。スランプ・空気量ともに，全ての配合において目標範囲内に収まった。ここで混和剤の使用量について，各 FA の（内 10，外 20）の配合では，AE 減水剤・AE 剤ともに 2 章の内割り 30%の配合と同程度の使用量となっている。また，FA-E を除く FA では，外割りの配合量が減少すると双方の混和剤（Add 1，Add 2）の使用量も減少する傾向が確認された。これは，全体の粉体量が減少しているためで

表－5　スランプ・空気量測定結果（内割り・外割り併用）

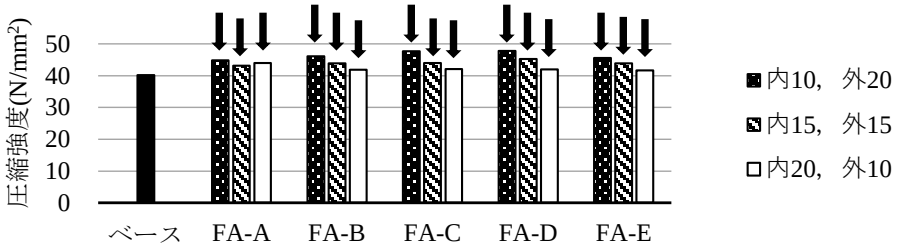
配合の種類	スランプ(cm)			空気量(%)		
	内 10 外 20	内 15 外 15	内 20 外 10	内 10 外 20	内 15 外 15	内 20 外 10
ベース	11.0			5.0		
FA-A	12.5	13.5	10.0	5.2	5.2	4.7
FA-B	12.5	12.0	12.0	4.6	4.5	4.1
FA-C	10.0	10.0	11.0	4.0	4.5	4.5
FA-D	11.5	12.0	12.0	4.6	4.5	4.5
FA-E	11.0	12.0	12.0	3.8	4.8	3.8



図－4　材齢 7 日圧縮強度試験結果（内割り・外割り併用）



図－5　材齢 28 日圧縮強度試験結果（内割り・外割り併用）



図－6　材齢 91 日圧縮強度試験結果（内割り・外割り併用）

ある。

ここで， FA-E は 2.3 節と同様に，他の FA と比較して多量の AE 剤を使用している。しかし，併用する場合は他の FA との使用量の差が小さくなっている。このことから，内割り・外割り併用の場合は酸性灰の特殊性を低減できる可能性が示唆される。

(2) 圧縮強度

材齢ごとに圧縮強度の結果を図－4，図－5，図－6 に示す。ベース配合との比較について，ベース配合の圧縮強度を上回る強度が得られているデータに矢印を付す。材齢ごとに確認すると，材齢 7, 28 日では（内 10, 外 20）でベース配合を上回る圧縮強度が得られた。FA-C，FA-D では（内 15，外 15）の配合でもベース配合を上回っている。特に FA-D は 2 章の結果からも強度発現性がやや優位な傾向は確認されるものの，品質などから考えると特段の優位性は確認されない。（内 20，外 10）では，全ての FA でベース配合の強度を下回った。一方，材齢 91 日では，内割りの比率が高まるにつれて強度が低くなる傾向は確認されるものの，全ての配合でベース配合を上回る圧縮強度が得られた。これは，FA のポゾラン活性によるものであると考えられる。

これより，内割りと外割りを併用して FA を 30%混和する場合，材齢 7 日や 28 日を基準とする際は，内割りが 10%～15%，外割りが 15%～20%程度でベース配合と等しい圧縮強度を得ることが可能といえる。また，91 日強度を基準とする場合であれば，内割りが 20%，外割りが

10%程度と内割りの割合が多くてもベース配合と同等の圧縮強度を得ることが可能といえる。

ここで，本実験で使用した 5 種類の FA は**表－1** に示すように，若干の品質の差異を有するものである。しかし, FA の違いによる傾向の大きな相違は確認されなかった。したがって，JIS Ⅱ種相当の FA を用いて同様な実験を行う場合には，本実験の結果と概ね同様な結果が得られるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では, FA を内割りと外割りで併用したコンクリートの基本的性質について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

(1) FA を内割り置換した場合において，FA の置換率増加に伴い，必要となる AE 剤の量は増加した。圧縮強度は，置換率増加に伴い低下するが，置換率 10%であればベース配合と同程度の強度を得ることが可能である。

(2) FA を外割り置換した場合において，AE 剤使用量の傾向は，内割り置換した場合と同様である。圧縮強度は，置換率増加に伴い増加し，全ての配合でベース配合より高い強度が得られた。

(3) FA を内割り置換と外割り置換で併用した場合において，外割り配合量が減少すると，AE 減水剤・AE 剤ともに使用量が減少する傾向が確認された。

(4) FA を内割り置換と外割り置換で併用した配合の圧縮強度は，FA の混和量が 30%の場合，内割り 10%～15%の配合であれば, ベース配合と同等の 28 日強度が得られる。よって，内割りと外割りを併用することにより，初期強度の低減を抑制することが可能である。

(5) 本研究の範囲において，JIS Ⅱ種の FA を用いれば，一定程度の FA の品質の差異による強度試験結果の違いは確認されなかった。そのため，JIS Ⅱ種相当の FA については本実験の結果が概ね当てはまると考えられる。しかし，FA が酸性の性質を示す場合には，AE 剤使用量が多くなることに留意する必要がある。

参考文献

1) 伊藤智章，松永篤，仲松照隆，佐久田朝男：フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.217-222，2000

2) 陶山裕樹，小山智幸，伊藤是清，松藤泰典：副産物系無機粉体を外割混合したコンクリートの強度発現性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.269-274，2006

3) 高田龍一，神門誠，宮本将太，周藤将司：湿式動圧ろ過装置により改質したフライアッシュを混和したコンクリートの品質向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.100-105，2022

4) フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，日本建築学会，pp.73-84，2024

5) 長枝健太，菅田紀之：フライアッシュを内割・外割混合した高強度コンクリートの強度および収縮特性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.133-138，2017

6) 本田悟，椎葉大和：各種フライアッシュがコンクリートの諸特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.351-356，1996

7) 田野崎隆雄，野崎賢二，白坂優，曽根徳明：コンクリート混和用石炭灰の品質について，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.333-338，1996

8) 宍道亮太，周藤将司，高田龍一，神門誠：湿式動圧ろ過分級によって改質されたフライアッシュのモルタル試験による基礎的性能の評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.95-100，2021