

論文 フライアッシュを活性フィラーとしたジオポリマーモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に関する研究

Batsuuri Ashidmaa^{*1}・犬飼 利嗣^{*2}・関谷 有紗加^{*3}

要旨：本研究では、フライアッシュを用いたジオポリマーモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時変化について実験的に検討した。その結果、微粉砕したフライアッシュと高濃度のメタけい酸ナトリウム水溶液を用いれば圧縮強さの増大が図れること、フロー値の経時変化や圧縮強さはメタけい酸ナトリウム水溶液の濃度、フライアッシュの微粉砕の有無、凝結遅延剤の添加率によって、それぞれ異なる傾向にあることが分かった。また、フライアッシュの微粉砕の有無によりフロックの形成状態が異なることを仮説し、メタけい酸ナトリウム水溶液量、フロー値の経時変化、および圧縮強さ特性に及ぼす影響について検証する必要があることを示した。

キーワード：フライアッシュ、ジオポリマー、メタけい酸ナトリウム、無水クエン酸、圧縮強さ、フロー値

1. はじめに

コンクリートは、建設現場で使用されている主要な材料の一つであり、結合材にはポルトランドセメントが多く用いられている。しかし、ポルトランドセメントは、その製造工程で大量のCO₂を排出するので、近年、地球温暖化に繋がる一因として問題視されている。また、排出されるCO₂の約6割は主原料である石灰石(CaCO₃)の熱分解によるものであり¹⁾、その排出は避けられない現状にある。したがって、ポルトランドセメントの代替となる結合材の開発が重要な課題として位置付けられている²⁾。一方、国内の石炭火力発電所から年間1000万トンを超えて発生する石炭灰の有効利用も重要な課題の一つであり、飛灰であるフライアッシュ(以下、FA)については、これまでにコンクリート用混和材として利用する研究が数多く行われてきた。しかし、実際に利用された実績は、排出される石炭灰の僅か3.5%程度に留まっている³⁾。

このような背景のもと、CO₂の排出量を削減するために、高炉スラグ微粉末(以下、BFS)やFAなどのアルミニウムシリケート粉末(活性フィラー)をセメントの代替材料とし非晶質の重縮合体を得る、ジオポリマー(以下、GP)に関する研究⁴⁾が注目されている。犬飼らも、より効率的に高強度な硬化体を得ることを目的として、これまでに水ガラスとBFSおよびFAを基本材料としたGPに関する基礎的な研究を進めてきた⁵⁻⁷⁾。しかし、活性フィラーとして微粉砕したFAを用いたGP、およびアルカリ水溶液の種類や濃度については詳細な検討は行っていない。

そこで本研究では、活性フィラーとしてJIS II種のFAと、既報^{8,9)}で検討したFAを7000cm²/g程度に微粉砕したFA7を用い、まず実験1として、メタけい酸ナトリウム(以下、NS)水溶液の濃度と水酸化ナトリウム(以下、NH)10

mol/L水溶液の質量混合比が、GPモルタルの圧縮強さ特性に及ぼす影響について検討した。つぎに実験2として、FAの微粉砕の有無がGPモルタルの圧縮強さ特性に及ぼす影響について検討した。さらに実験3として、凝結遅延剤とした無水クエン酸(以下、ST)が、GPモルタルのフロー値の経時変化と圧縮強さ特性に及ぼす影響について検討した。

2. NS水溶液の濃度とNH10mol/L水溶液の質量混合比がGPモルタルの圧縮強さ特性に及ぼす影響(実験1)

2.1 実験概要

(1) 実験要因

表-1に、実験要因を示す。実験要因は、NS水溶液の濃度とNH10mol/L水溶液の質量混合比とした。

(2) 使用材料および配合

表-2に使用材料を、表-3に配合を示す。活性フィラーにはFA7を用い、NSとNHは所定の濃度や質量混合比となるよう水に溶解して水溶液とした。また、配合はAW/FA7を50%、空気量を0%とし、アルカリ水溶液の密度を便宜上一律に1.0g/cm³として計算した。

(3) 練混ぜおよびフロー試験

練混ぜおよびフロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じて行った。また、1バッチあたりの練混ぜ量は1Lとした。

(4) 圧縮強さ試験

圧縮強さ試験は、JIS A 1142「有機不純物を含む細骨材のモルタルの圧縮強度による試験方法」に準じて行った。ただし、試料は2層に分け、テーブルバイブレータで各層を30秒間締め固めた。また、供試体は上面をラップした型枠内で、材齢28日まで20℃の封緘養生をした。

*1 岐阜工業高等専門学校 建築学科 (学生会員)

*2 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科

表-1 実験要因(実験1)

因子	水準
NS水溶液の濃度 (mol/L)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
NH10mol/L水溶液/ NS水溶液(質量比)	0 (NS水溶液単体), 1, 2, 3, 4

表-2 使用材料(実験1~3)

材料名	記号	種類	備考
活性フィラー	FA7	フライアッシュ	あり 比表面積 (cm ² /g): 7480 密度 (g/cm ³): 2.52
	FA	JIS II 種微粉砕	
細骨材	S	標準砂	絶乾密度 (g/cm ³): 2.64
アルカリ添加剤	NS	メタけい酸ナトリウム(無水)	密度 (g/cm ³): 2.61
	NH	水酸化ナトリウム	密度 (g/cm ³): 2.13
アルカリ水溶液	AW	NS水溶液, NH10mol/L水溶液	-
凝結遅延剤	ST	無水クエン酸	密度 (g/cm ³): 1.66

表-4 フロー値の測定結果(実験1)

NS濃度 (mol/L)	フロー値				
	NH/NS				
	0	1	2	3	4
0.5	185	181	192	197	192
1.0	182	186	194	202	196
1.5	205	188	188	196	201
2.0	207	202	186	194	198

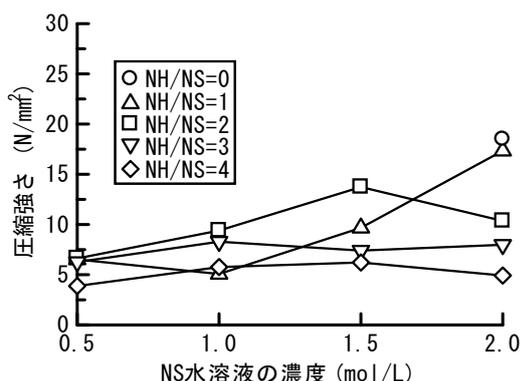


図-1 圧縮強さとNS水溶液の濃度の関係(実験1)

2.2 実験結果および考察

表-4に、フロー値の測定結果を示す。表-3に示した配合から分かるように、目標フロー値を得る単位アルカリ水溶液量は、NS水溶液の濃度が高くなるほど、NH水溶液の質量混合比が大きくなるほど増大する傾向にあった。

図-1に、圧縮強さとNS水溶液の濃度の関係を示す。なお、NS水溶液を単体(NH/NS=0)で用いたGPモルタルは、その濃度が1.5mol/L以下では、脱型時に破損した供試体が多数あったので、NS水溶液の濃度が2.0mol/Lの試験結果のみ示している。

図から分かるように、圧縮強さはNH水溶液の質量混合比によって異なり、NH水溶液の質量混合比が小さいほど、圧縮強さの最大値を得るNS水溶液の濃度が高くなる傾向がみられる。このような傾向は、NS水溶液単体の試験結果に示唆されるように、NS水溶液の濃度が高くなるとNH水溶液を用いる必要性が減少することを示している。したがって、NS水溶液を単体として用いれば圧縮強さの増

表-3 配合(実験1)

NS濃度 (mol/L)	NH/NS	Flow	Air (%)	AW/FA7 (%)	S/FA7	単位量 (kg/m ³)		
						FA7	AW	S
0.5	0	190 ± 20	0	50	3.63	440	220	1597
	1				2.71	520	260	1410
	2				2.03	600	300	1220
	3				1.51	680	340	1030
	4				1.11	760	380	840
1.0	0				3.20	474	237	1518
	1				2.47	546	273	1346
	2				1.89	620	310	1172
	3				1.40	700	350	982
	4				0.93	780	390	792
1.5	0				3.14	480	240	1505
	1				2.18	580	290	1267
	2				1.51	680	340	1030
	3				1.02	780	390	792
	4				0.63	880	440	557
2.0	0				2.91	500	250	1457
	1				2.03	600	300	1220
	2				1.40	700	350	982
	3				0.93	800	400	747
	4				0.57	900	450	510

表-5 実験要因(実験2)

因子	水準
NS水溶液の濃度 (mol/L)	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
FAの微粉砕	あり(FA7), なし(FA)

表-6 配合(実験2)

NS濃度 (mol/L)	FAの微粉砕	Flow	Air (%)	AW/F (%)	S/F	単位量 (kg/m ³)				外割(kg)
						F	AW	S	ST	
2.0	あり(FA7)	190 ± 20	2	50	3.55	450	225	1597	-	
	なし(FA)				2.31	560	280	1296	-	
2.5	あり(FA7)				3.23	480	240	1552	-	
	なし(FA)				2.12	590	295	1249	-	
3.0	あり(FA7)				3.05	500	250	1526	5.0	
	なし(FA)				2.08	600	300	1246	6.0	
3.5	あり(FA7)				2.37	580	290	1375	23.2	
	なし(FA)				1.72	660	330	1135	26.4	
4.0	あり(FA7)				2.11	620	310	1309	37.2	
	なし(FA)				1.42	720	360	1022	43.2	

表-7 NSAWの密度(実験2, 3)

NS水溶液の濃度 (mol/L)	NS水溶液の密度 (g/cm ³)
2.0	1.15
2.5	1.19
3.0	1.23
3.5	1.26
4.0	1.30

表-8 STの添加率(実験2)

NS水溶液の濃度 (mol/L)	Fに対するSTの外割添加率 (%)
3.0	1.0
3.5	4.0
4.0	6.0

大がより図れると考えられる。よって、次章以降の実験では、2.0mol/L以上の濃度としたNS水溶液の単体をアルカリ水溶液として用いることとした。

3. NS水溶液の濃度とFAの微粉砕の有無がGPモルタルの圧縮強さと特性に及ぼす影響(実験2)

3.1 実験概要

(1) 実験要因

表-5に、実験要因を示す。実験要因は、NS水溶液の濃度とFAの微粉砕の有無とした。

(2) 使用材料および配合

使用材料は実験1と同様(表-2参照)とし、表-6に配合を示す。配合は、AW/Fを50%、エントラップトエアを考慮し空気量を2%、NS水溶液(NSAW)の密度を表-7に示した値

表-9 フロー値および空気量の測定結果(実験2)

NS濃度 (mol/L)	FAの微粉砕	フロー値	空気量 (%)
2.0	あり (FA7)	180	2.3
	なし (FA)	203	0.2
2.5	あり (FA7)	197	1.9
	なし (FA)	202	0.5
3.0	あり (FA7)	181	1.5
	なし (FA)	192	0.8
3.5	あり (FA7)	209	1.5
	なし (FA)	202	0.7
4.0	あり (FA7)	196	0.9
	なし (FA)	202	0.2

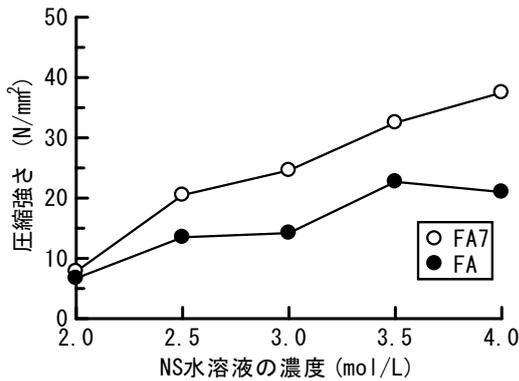


図-2 圧縮強さとNS水溶液の濃度の関係(実験2)

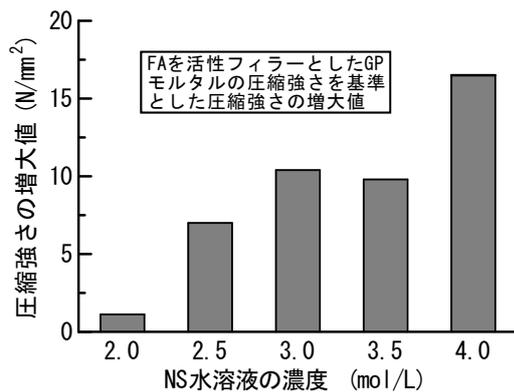


図-3 NS水溶液の濃度とFAの微粉末による圧縮強さの増大値(実験2)

で計算した。また、実験中にNS水溶液の濃度が2.5mol/Lになると凝結時間が短くなることが考察され、3.0mol/Lの濃度になるとGPモルタルが瞬結した。したがって、NS水溶液の濃度が3.0mol/L以上の配合には、FA7またはFAの外割でSTを適量添加することとした。供試体の製作に支障がない範囲で暫定したSTの外割添加率を表-8に示す。なお、表-6に示した配合は、いずれもFAを微粉砕することで単位NS水溶液量が大きく減少しているが、この点については一つの仮説をもって実験3で考察する。

(3) 練混ぜおよびフロー試験

練混ぜおよびフロー試験は、実験1と同様とした。ただし、FAを用いた配合は、NS水溶液の濃度が3mol/Lでは1分間、3.5と4.0mol/Lでは2分間練混ぜ時間を延長した。

(4) 空気量試験

空気量は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材

表-10 実験要因(実験3)

NS水溶液の濃度 (mol/L)	FAの微粉砕	FA7・FAに対するSTの外割添加率 (%)	フロー試験の開始時間 (分)
3.0	あり (FA7)	1.0, 1.5, 2.0	練混ぜ終了後 0, 30, 60, 90, 120
	なし (FA)		
3.5	あり (FA7)	3.5, 4.0, 4.5	
	なし (FA)		
4.0	あり (FA7)	6.0, 6.5, 7.0	
	なし (FA)		

表-11 配合(実験3)

NS濃度 (mol/L)	FAの微粉砕	ST添加率 (%)	Flow	Air (%)	AW/F (%)	S/F	単位量 (kg/m³)			外割 (kg)
							F	AW	S	
3.0	あり (FA7)	1.0	190 ± 20	2	50	3.05	500	250	1526	5.0
		1.5								7.5
		2.0								10.0
	なし (FA)	1.0				2.08	600	300	1246	6.0
		1.5								9.0
		2.0								12.0
3.5	あり (FA7)	3.5	190 ± 20	2	50	2.61	550	275	1436	19.2
		4.0								22.0
		4.5								24.8
	なし (FA)	3.5				1.78	650	325	1156	22.8
		4.0								26.0
		4.5								29.2
4.0	あり (FA7)	6.0	190 ± 20	2	50	2.25	600	300	1349	36.0
		6.5								39.0
		7.0								42.0
	なし (FA)	6.0				1.47	710	355	1045	42.6
		6.5								46.2
		7.0								49.7

表-12 フロー値の測定結果(実験3)

NS濃度 (mol/L)	FAの微粉砕	ST添加率 (%)	フロー値				
			練混ぜ終了後からの経過時間(分)				
			0	30	60	90	120
3.0	あり (FA7)	1.0	186	181	180	156	-
		1.5	189	188	180	177	169
		2.0	192	183	182	175	173
	なし (FA)	1.0	178	146	-	-	-
		1.5	196	190	185	181	-
		2.0	192	188	175	-	-
3.5	あり (FA7)	3.5	194	186	186	183	178
		4.0	195	191	185	179	179
		4.5	200	190	184	177	172
	なし (FA)	3.5	193	188	184	185	182
		4.0	189	185	178	180	177
		4.5	200	190	189	184	185
4.0	あり (FA7)	6.0	193	186	187	171	166
		6.5	193	186	180	175	174
		7.0	194	184	176	166	164
	なし (FA)	6.0	188	183	177	168	163
		6.5	188	182	174	158	142
		7.0	194	187	171	147	137

*) 表中の-は、フロー値の測定が不可能であったことを示す

(5. 12. d. モルタルの単位容積質量の測定)」に準じて単位容積質量を測定し、JIS A 1116「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量法)(6.2. 空気量)」により算出した。ただし、試料は2層に分け、テーブルバイブレータで各層を30秒間締め固めた。

(5) 圧縮強さ試験

圧縮強さ試験は、実験1と同様とした。

3.2 実験結果および考察

表-9に、フロー値および空気量の測定結果を示す。3.1(2)にも述べたが、目標フロー値を得る単位NS水溶液量は、FAを微粉砕することで、いずれの配合も50kg/m³程度減少(表-6参照)している。また空気量は、活性フィラーとしてFA7を用いると0.9~2.3%、FAを用いると0.2~

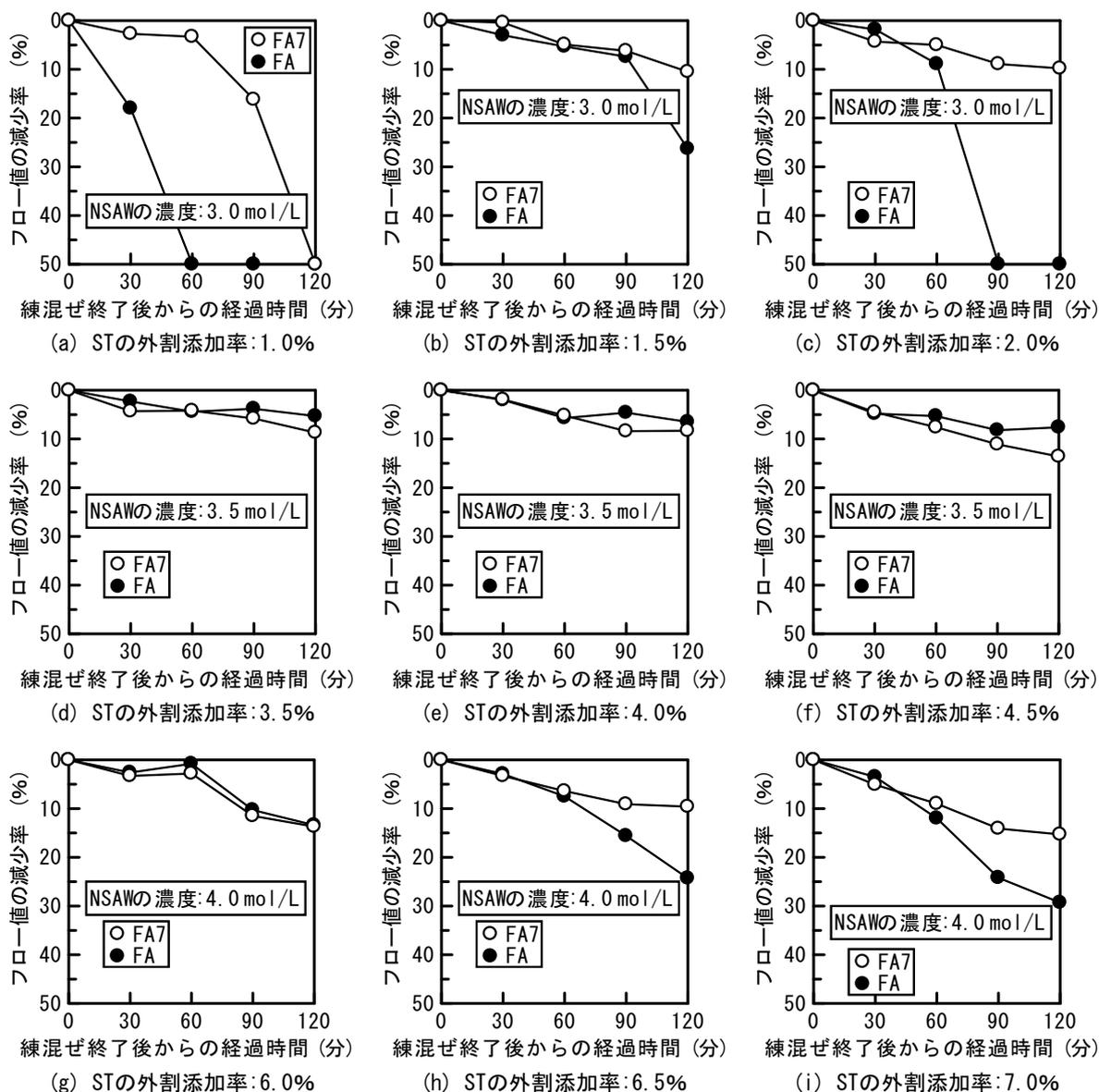


図-4 フロー値の減少率と練混ぜ終了後からの経過時間の関係(実験3)

0.8%の範囲にあり,FAを微粉砕するとエンラップトエアが増大する傾向にあった。

図-2に、圧縮強さとNS水溶液の濃度の関係を示す。図から分かるように、圧縮強さはNS水溶液の濃度が高くなると、FAの微粉砕の有無に関わらずいずれも大きくなる傾向にある。しかし、圧縮強さの増加傾向はFAの微粉砕の有無によって異なるようで、FA7ではNS水溶液の濃度に比例する直線的な増加傾向を示しているが、FAでは比較的緩やかな増加傾向となり、NS水溶液の濃度が3.5mol/Lで最大値に達している。このような傾向は、NS水溶液の濃度が高くなるほどFAの微粉砕による圧縮強さの増大値(図-3参照)が大きくなることを示しており、FAを活性ファイラーとしたGPモルタルの圧縮強さには、NS水溶液の濃度とFAの微粉砕の有無が大きく影響していると考えられる。なお、圧縮強さは、実験1や既報⁹⁾の実験結果と比較して小さな値ではあるが、これには明らかではないが、

配合設計条件やSTの外割添加率の違いなどが影響していると考えられる。

4. STがGPモルタルのフロー値の経時変化と圧縮強さ特性に及ぼす影響(実験3)

4.1 実験概要

(1) 実験要因

表-10に、実験要因を示す。実験要因は、NS水溶液の濃度、FAの微粉砕の有無、FA7またはFAに対するSTの外割添加率、およびフロー試験の開始時間とした。なお、NS水溶液の濃度は、STの添加によって凝結を遅延させる必要がある3.0~4.0mol/Lとした。また、STの外割添加率は、FAの微粉砕の有無では同一の値とし、NS水溶液の濃度ごとに実験2の考察をもって決定した。

(2) 使用材料および配合

使用材料は実験1と同様(表-2参照)とし、表-11に配合

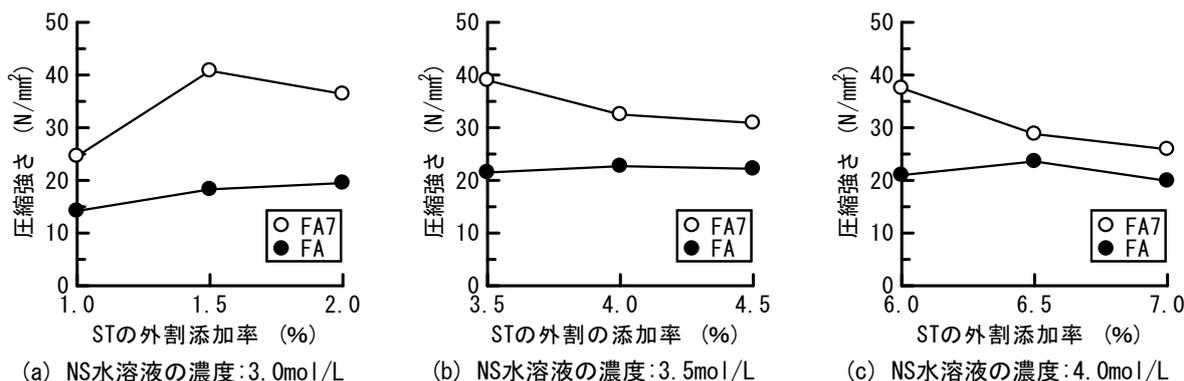


図-5 圧縮強さとSTの外割添加率の関係(実験3)

を示す。配合設計条件は、実験2と同様とした。

(3) 練混ぜおよびフロー試験

練混ぜおよびフロー試験は、実験2と同様とした。ただし、経時によるフロー値の測定は、測定を開始する直前に試料をさじで30秒間練り返してから行った。また、フロー値の減少率は、式(1)により算出した。

$$FLd = (FLs - FLt) / FLs \times 100 \quad (1)$$

ここに、 FLd : フロー値の減少率(%)

FLs : 練混ぜ終了直後のフロー値

FLt : 練混ぜ終了後から t 時間経過後のフロー値

(4) 圧縮強さ試験

圧縮強さ試験は、実験1と同様とした。

4.2 実験結果および考察

表-12にフロー値の測定結果を、図-4にフロー値の減少率と練混ぜ終了後からの経過時間の関係を示す。なお、流動性が低下しフロー値の測定が不可能となった場合は、フロー値の減少率を一律に50%として図中に示した。

図から分かるように、フロー値の減少率は、NS水溶液の濃度、FAの微粉碎の有無、およびSTの外割添加率によって異なり、本実験の範囲では一様な傾向にはない。NS水溶液の濃度が3.0mol/Lでは、STの外割添加率によるフロー値の経時変化に一様な傾向はみられず、添加率によっては経時によりフロー値の測定が不可能となるGPモルタルもあった。しかし、STの外割添加率を1.5%ないしは2.0%としたFA7や、1.5%としたFAのフロー値の減少率から分かるように、適切と判断できる良好な経時変化を得る添加率も確認されている。また、FAの微粉碎の有無に着目してみると、STの外割添加率がいずれの値であっても、FAを微粉碎すると経時によるフロー値の減少率は小さくなる傾向にある。一方、NS水溶液の濃度が3.5mol/Lでは、いずれも良好なフロー値の経時変化を示している。NS水溶液の濃度が3.0mol/Lや4.0mol/Lとは異なり、STの外割添加率がいずれの値であっても、FAの微粉碎の有無による影響はほとんどみられない。また、STの外割添加率が大きくなると、僅かではあるがFA7、FAのいずれもフロー値の減少率が大きくなる傾向にある。したがって、

最も良好な経時変化を得る添加率は、3.5%またはそれ以下の値になると推察される。NS水溶液の濃度が4.0mol/Lになると、FAの微粉碎の有無とSTの外割添加率により、再びフロー値の経時変化が異なる傾向を示している。FA7では、STの外割添加率が6.5%で最も良好なフロー値の経時変化を示しており、その前後の添加率ではフロー値の減少率が僅かに増大している。また、FAと比較すると経時によるフロー値の減少率は小さくなる傾向にある。しかしFAは、STの外割添加率が大きくなると、フロー値の減少率が大きくなる傾向にあり。最も良好な経時変化を得る添加率は、6.0%またはそれ以下の値になると推察される。

このように、良好なフロー値の経時変化を得るSTの外割添加率は、NS水溶液の濃度やFAの微粉碎の有無などの条件によって異なるので、最適な試験結果を得るにはより詳細な検討をする必要がある。

図-5に、圧縮強さとSTの添加率の関係を示す。図から分かるように、圧縮強さはFAの微粉碎の有無とSTの外割添加率によって異なる傾向を示している。NS水溶液の濃度が3.0mol/LのFA7の圧縮強さは、STの外割添加率が1.5%で既報⁹⁾と同程度となる最大値を示し、その前後の添加率では減少している。しかし、NS水溶液の濃度が3.0mol/Lと4.0mol/LのFA7の圧縮強さは、それぞれSTの外割添加率が3.5%、6.0%で最大値を示し、添加率が大きくなると減少する傾向にある。したがって、圧縮強さの最大値を得るSTの外割添加率は、NS水溶液の濃度3.0mol/Lでは1.5%、3.5mol/Lでは3.5%またはそれ以下の値、4.0mol/Lでは6.0%またはそれ以下の値になると推察される。一方、FAの圧縮強さにはSTの外割添加率による影響はなく、実験2と同様でNS水溶液の濃度が3.5mol/Lでほぼ最大値を示している。

このように、圧縮強さもフロー値の経時変化と同様で、STの外割添加率、NS水溶液の濃度、およびFAの微粉碎の有無などの条件によって異なるので、圧縮強さの増大を図るにはより詳細な検討をする必要がある。

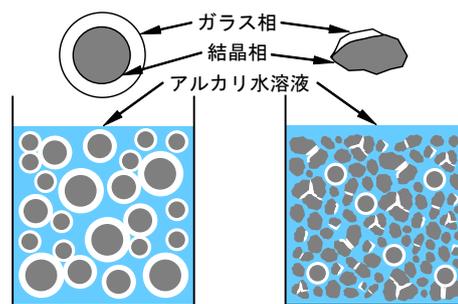
図-6は、FA粒子とFA7粒子の初期反応状態を模式的に表

したものである。今後、検証する必要があるが、上述した実験結果の考察から、FAを用いると単位NS水溶液量が大きく増大することを一つの仮説をもって推察する。FA粒子は粒子表面がガラス相で形成されているので、アルカリ水溶液との反応はガラス相から始まる。一方、FA7粒子はFA粒子の微粉砕により粒子表面に結晶相も存在するので、アルカリ水溶液との反応はガラス相と結晶相が同時期から始まると考えられる。また、高濃度のアルカリ水溶液中に存在するガラス相は、結晶相と比較して反応速度が大きくなると考えられるので、ガラス相に覆われているFA粒子はFA7粒子と比較して粒子同士が結合しやすい状態にあると推察される。さらに、FA粒子はFA7粒子と比較して粒子が大きいため、粒子同士が結合したフロックも大きくなると考えられる。このような仮説を踏まえ、FAを用いた配合はFA7を用いた配合と比較して、練混ぜ初期の段階から大きなフロックが多数形成されると考えられるので、単位NS水溶液量が増大したものと推察される。また、NS水溶液の濃度やSTの外割添加率による影響はあるが、FAを微粉砕すると経時によるフロー値の減少率が小さくなる傾向や圧縮強さが増大する傾向にも、このフロックの形成が影響していると推察される。

5. まとめ

本実験結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 微粉砕したFAでは、NS水溶液の濃度が高くなるとアルカリ水溶液としてNH10mol/L水溶液を用いる必要性は減少し、NS水溶液単体で圧縮強さの増大が図れる。
- 2) NS水溶液の濃度が3.0mol/L以上になると、FAの微粉砕の有無に関わらずSTを添加する必要がある。
- 3) NS水溶液の濃度が高くなると圧縮強さは大きくなり、さらにFAを微粉砕することで圧縮強さの増大値もより大きくなる。
- 4) フロー値の経時変化や圧縮強さは、NS水溶液の濃度、FAの微粉砕の有無、およびSTの外割添加率の条件によって様ではない異なった傾向を示すので、最適な試験結果を得るにはより詳細な検討をする必要がある。
- 5) FAを微粉砕し、NS水溶液の濃度とSTの外割添加率を適切な条件とすることで、常温養生で40N/mm²を超える圧縮強さが得られる。
- 6) 今後、検証する必要があるが、単位NS水溶液量、フロー値の経時変化、および圧縮強さには、FA7粒子やFA粒子によるフロックの形成が影響している推察される。今後は、NS水溶液の濃度やSTの外割添加率が、圧縮強さ特性、フロー値の経時変化、および凝結特性に及ぼす影響について、より詳細に検討していきたいと考えている。また、FAやFA7とNS水溶液およびSTとの反応メカニズムについても解明したいと考えている。



(a) FA粒子 (a) FA7粒子
図-6 FA粒子とFA7粒子の初期反応状態

謝辞

本研究費の一部は、平成27年度日本学術振興会学術研究助基金助成金・基盤研究(C) (研究代表者：犬飼利嗣) によった。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 李 柱国：ジオポリマーコンクリートの環境影響に関する定量的考察，建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題に関するシンポジウム論文集，pp. 43-50，2016. 6
- 2) 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会：中間報告書，日本コンクリート工学会，2016. 6
- 3) フライアッシュ有効活用小委員会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術－利用拡大に向けた設計施工指針試案－，土木学会，2009. 12
- 4) Joseph DAVIDOVITS：GEOPOLYMER CHEMISTRY AND APPLICATIONS，Institute GEOPOLYMER，2011
- 5) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光，犬飼利嗣：ジオポリマーペーストの凝結特性に関する基礎的研究，日本建築学会東海支部研究報告集，Vol. 53，pp. 29-32，2015. 2
- 6) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光，犬飼利嗣：ジオポリマーペーストのフロー値に関する基礎的研究，日本建築学会(関東)学術講演梗概集，A-1，pp. 33-34，2015. 9
- 7) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光，犬飼利嗣：ジオポリマーペーストのフロー値および圧縮強度発現性に関する基礎的研究，日本建築学会東海支部研究報告集，Vol. 54，pp. 89-92，2016. 2
- 8) 市川敬悟，犬飼利嗣：フライアッシュの活性度改善に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，pp. 184-189，2014
- 9) 芝 翔，澤田 陽，犬飼利嗣：ジオポリマーモルタルに関する基礎的研究(その1：アルカリ水溶液が圧縮強さ特性に及ぼす影響)，日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集，A-1，pp. 1495-1496，2016. 8