

# 報告 メタけい酸ナトリウムの添加方法と凝結遅延剤が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及ぼす影響

後藤 壮<sup>1</sup>・犬飼 利嗣<sup>2</sup>・上原 義己<sup>3</sup>・廣瀬 貴<sup>4</sup>

**要旨:** 本報では、粉体添加法(PM法)と水溶液添加法(AW法)によるメタけい酸ナトリウムの添加方法が圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、メタけい酸ナトリウム水溶液の濃度にして3.0mol/Lまでの範囲であれば、添加方法に関わらず濃度が高くなるほど、フライアッシュの比表面積が大きくなるほど圧縮強さは増大し約40N/mm<sup>2</sup>のジオポリマーモルタルが得られることが分かった。また、粉体添加法によるジオポリマーモルタルのフロー値の経時変化も、メタけい酸ナトリウムの添加量、フライアッシュの品種、および凝結遅延剤の外割添加率などによって異なった傾向を示すことを確認した。

**キーワード:** ジオポリマー、メタけい酸ナトリウム、添加方法、無水クエン酸、圧縮強さ、フロー値

## 1. はじめに

地球温暖化の主要因であるCO<sub>2</sub>の排出量削減は我が国にとっても重要な課題であり、建設業界においても積極的な取り組みがなされている。しかし、建設工事で排出されるCO<sub>2</sub>は材料を起源とする割合が多く、とくに膨大な量で使用されているポルトランドセメントは、その製造工程で大量のCO<sub>2</sub>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もされている。しかし、排出されるCO<sub>2</sub>の約6割は主原料である石灰石(CaCO<sub>3</sub>)の熱分解によるもので<sup>1)</sup>、その排出は避けられない現状にある。したがって、セメントコンクリートの代替となる硬化体の実用化に期待が寄せられている<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

このような背景のもと、CO<sub>2</sub>の排出量削減と産業副産物の有効利用を促進する上で、アルミナシリカ粉末(活性フィラー)とアルカリ溶液との縮重合反応によって硬化体を得る、ジオポリマー(以下、GP)に関する研究<sup>4)</sup>が注目されている。犬飼らも、FAの有効利用やGPに関する基礎的な研究<sup>5-7)</sup>を進めており、GPについては微粉碎したFAと高濃度のメタけい酸ナトリウム(以下、NS)水溶液を用いれば圧縮強さの増大が図れることなどを報告している<sup>7)</sup>。しかし、NS水溶液は取り扱いが難しく、密封状態であっても常温で保管すると比較的短時間で固化することがある(写真-1参照)。

そこで本研究では、NSを粉体で添加するPM法を試みた。まず実験1として、PM法によるNSの添加量が、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、PM法とNSを水溶液で添加するAW法により、GPモルタルの圧縮強さ特性を比較検討した。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、PM法によるGPモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に及ぼす影響について検討した。

## 2. PM法によるNSの添加量とFAの品種が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の添加量とFAの品種とした。なお、NSの添加量は、NS水溶液の濃度[練混ぜ水に粉体のNSが溶解し、NS水溶液になると仮定して算出された濃度(mol/L)]として換算している。



写真-1 固化したNS水溶液(4.0mol/L)

\*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 建築学科助教 修士(工学) (正会員)

\*4 株式会社丸治コンクリート工業所 取締役研究開発部長

表-1 実験要因(実験1)

因子	水準
NSの添加量 <sup>*</sup>	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
FAの品種	FA I, FA II, FA II 5, FA II 7

<sup>\*</sup>NS水溶液の濃度(mol/L)に換算

表-2 使用材料(実験1~3)

材料名	記号	品種	備考
フライアッシュ	FA I	A発電所 振動ミルによる	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g):5410
		JIS I種 微粉砕なし	密度 (g/cm <sup>3</sup> ):2.38
	FA II	A発電所 振動ミルによる	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g):4046
		JIS II種 微粉砕なし	密度 (g/cm <sup>3</sup> ):2.33
	FA II 5	A発電所 振動ミルによる	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g):5213
		JIS II種 微粉砕あり	密度 (g/cm <sup>3</sup> ):2.47
	FA II 7	A発電所 振動ミルによる	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g):7088
		JIS II種 微粉砕あり	密度 (g/cm <sup>3</sup> ):2.52
細骨材	S	標準砂	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> ):2.64
水	W	上水道水	-
アルカリ添加剤	NS	メタけい酸ナトリウム	密度 (g/cm <sup>3</sup> ):2.61
凝結遅延剤	ST	無水クエン酸	密度 (g/cm <sup>3</sup> ):1.66

表-3 FAの化学的品質(実験1~3)

FAの品種	mass%					lg. loss (%)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	
FA I	57.3	23.4	4.9	5.4	0.4	2.4
FA II	60.7	22.3	5.4	3.4	0.7	2.0

(2) 使用材料および配合

表-2に使用材料, 表-3にFAの化学的品質, 表-4にPM法の配合を示す。配合表のAWはW+NSを表記しており, AW/Fは50%, 空気量は2%とした。単位水量は, 目標フロー値(190±20)が得られるよう予備実験で決定した。また, NSの添加量がNS水溶液の濃度に換算して3.0mol/L以上の配合には既報<sup>7)</sup>を参考にしてFAの外割でSTを添加した。STの添加率はNSの添加量が3.0で2.0%, 3.5で6.0%, 4.0で8.0%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, 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。ただしNSは, あらかじめFAに添加し低速で1分間混合(空練り)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(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(質量方法)(6.2.空気量)」により算出した。ただし, 試料は2層に分け, テーブルパイプレータで各層を30秒間締め固めた。

(5) 圧縮強さ試験

圧縮強さ試験は, 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, テーブルパイプレータで各層を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。

表-4 PM法の配合(実験1, 2)

NSの添加量 <sup>*</sup>	FAの品種	Flow	Air (%)	AW/F (%)	S/F	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			外割 (kg) ST	
						F	AW			
							W	NS		
2.0	FA I	190 ± 20	2	50	4.08	408	161	43	1666	-
	FA II				3.27	466	184	49	1523	-
	FA II 5				3.46	456	180	48	1576	-
	FA II 7				3.48	456	180	48	1587	-
2.5	FA I				3.69	438	163	56	1616	-
	FA II				2.98	496	184	64	1476	-
	FA II 5				3.37	466	173	60	1571	-
	FA II 7				3.17	486	181	62	1539	-
3.0	FA I				3.25	476	167	71	1547	9.5
	FA II				2.80	516	181	77	1447	10.3
	FA II 5				3.07	496	174	74	1523	9.9
	FA II 7				2.89	516	181	77	1492	10.3
3.5	FA I	2.98	504	167	85	1502	30.2			
	FA II	2.56	546	181	92	1397	32.8			
	FA II 5	2.73	534	177	90	1457	32.0			
	FA II 7	2.64	546	181	92	1444	32.8			
4.0	FA I	-	-	-	-	-	-			
	FA II	2.12	606	189	114	1286	48.5			
	FA II 5	2.02	630	197	118	1272	50.4			
	FA II 7	1.80	670	209	126	1206	53.6			

<sup>\*</sup>NS水溶液の濃度(mol/L)に換算

\*\*)-は練混ぜが不可能であったことを示す

表-5 PM法のフロー値と空気量の測定結果(実験1)

NSの添加量 <sup>*</sup>	Flow				Air (%)			
	FAの品種				FAの品種			
	FA I	FA II	FA II 5	FA II 7	FA I	FA II	FA II 5	FA II 7
2.0	180	180	202	171	2.9	1.6	3.1	3.7
2.5	192	180	182	186	2.1	1.7	2.1	2.2
3.0	205	190	197	196	1.9	0.9	1.9	2.6
3.5	198	202	204	202	2.3	1.5	3.2	2.5
4.0	-	183	-	171	-	2.1	-	2.7

<sup>\*</sup>NS水溶液の濃度(mol/L)に換算

\*\*)-は練混ぜが不可能であったことを示す

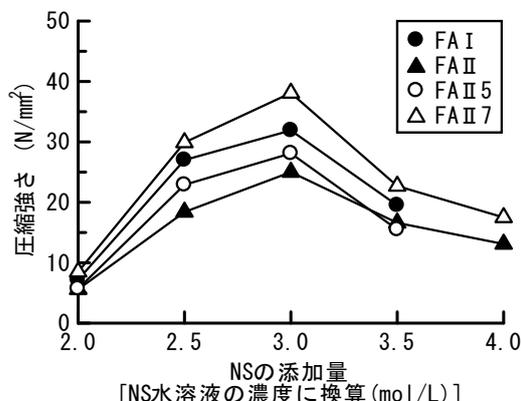


図-1 圧縮強さとNSの添加量の関係(実験1)

2.2 実験結果および考察

表-5に, PM法のフロー値と空気量の測定結果を示す。表-4に示したPM法の配合から分かるように, 目標フロー値を得る単位水量は, NSの添加量が多くなると大きくなる傾向にある。また, FAの微粉砕の有無による影響はみられないが, 最も小さい単位水量を示したのはFA Iである。一方, 空気量は, 比表面積が大きくなるとエントラップドエアが増大する傾向にあった。なお, FA IでNSの添加量が4.0の配合は, 本実験での練混ぜ方法では, 目標フロー値を得るGPモルタルが得られなかった。

図-1に, 圧縮強さとNSの添加量の関係を示す。NSの添加量が4.0のFA II 5は, 供試体間のバラツキが大きく試験値から除外している。図から分かるように, いずれの

表-6 実験要因(実験2)

因子	水準
NSの添加方法	PM法, AW法
NSの添加量 <sup>*</sup>	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
NS水溶液の濃度 (mol/L)	2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
FAの品種	FA I, FA II, FA II 5, FA II 7

<sup>\*</sup>NS水溶液の濃度 (mol/L) に換算

表-7 AW法の配合(実験2)

NS濃度 (mol/L)	FAの品種	Flow	Air (%)	AW/F (%)	S/F	単位置量 (kg/m <sup>3</sup> )			外割 (kg)
						F	AW	S	
2.0	FA I	190 ± 20	2	50	4.21	400	200	1684	-
	FA II				3.34	460	230	1536	-
	FA II 5				3.53	450	225	1589	-
	FA II 7				3.55	450	225	1597	-
2.5	FA I				3.80	430	215	1632	-
	FA II				3.04	490	245	1489	-
	FA II 5				3.44	460	230	1584	-
	FA II 7				3.23	480	240	1552	-
3.0	FA I				3.32	470	235	1560	9.4
	FA II				2.58	540	270	1394	16.2
	FA II 5				3.13	490	245	1534	9.8
	FA II 7				2.95	510	255	1505	10.2
3.5	FA I	3.02	500	250	1510	25.0			
	FA II	2.61	540	270	1410	27.0			
	FA II 5	2.76	530	265	1465	26.5			
	FA II 7	2.70	540	270	1457	27.0			
4.0	FA I	2.67	540	270	1441	37.8			
	FA II	2.16	600	300	1296	42.0			
	FA II 5	2.30	590	295	1357	41.3			
	FA II 7	2.25	600	300	1349	42.0			

表-8 AW法のフロー値と空気量の測定結果(実験2)

NS濃度 (mol/L)	Flow				Air (%)			
	FAの品種				FAの品種			
	FA I	FA II	FA II 5	FA II 7	FA I	FA II	FA II 5	FA II 7
2.0	173	187	198	186	2.8	1.7	2.7	2.0
2.5	175	208	182	196	2.6	0.5	2.4	1.8
3.0	198	182	188	197	1.7	1.2	2.2	1.7
3.5	197	202	204	192	2.1	0.7	2.4	2.4
4.0	192	200	201	194	2.9	1.3	3.6	2.9

FAもNSの添加量が3.0まで圧縮強さが増大する傾向にあり、それを超えると急激に減少する傾向にある。このような傾向は既報<sup>7)</sup>とは異なる傾向ではあるが、練混ぜ方法が異なるので次章の実験で検討する。一方、FAの品種に着目してみると、比表面積の最も大きいFA II 7が最も圧縮強さが大きく最大で約40N/mm<sup>2</sup>を示している。また、その他のFAも、概ね比表面積にともなった圧縮強さを呈している。したがってPM法では、NSの添加量が3.0までの範囲であれば、NSの添加量が多くなるほど、FAの比表面積が大きくなるほど圧縮強さは増大する傾向にあると考えられる。

### 3. NSの添加方法とFAの品種がGPモルタルの圧縮強さ特性に及ぼす影響(実験2)

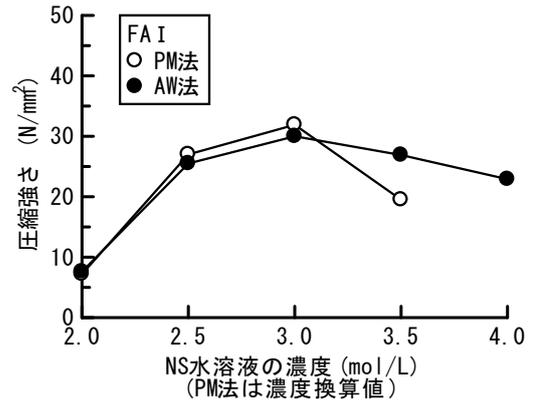
#### 3.1 実験概要

##### (1) 実験要因

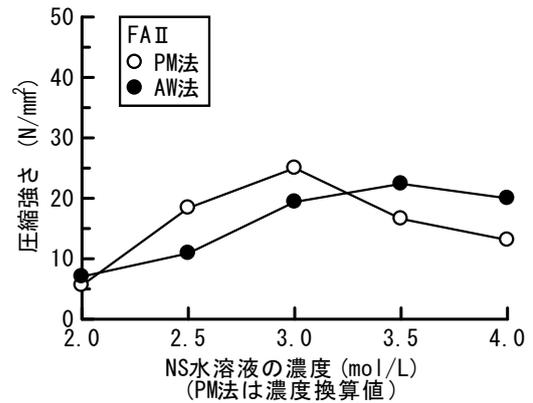
表-6に、実験要因を示す。実験要因は、NSの添加方法、NSの添加量またはNS水溶液の濃度、およびFAの品種とした。

##### (2) 使用材料および配合

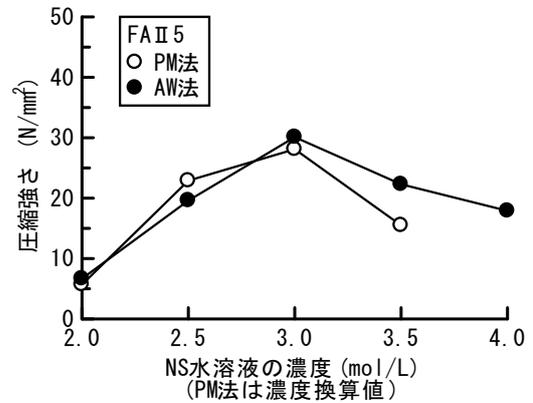
使用材料は実験1と同様(表-2参照)とし、表-4にPM法の配合を表-7にAW法の配合を示す。配合設計条件は



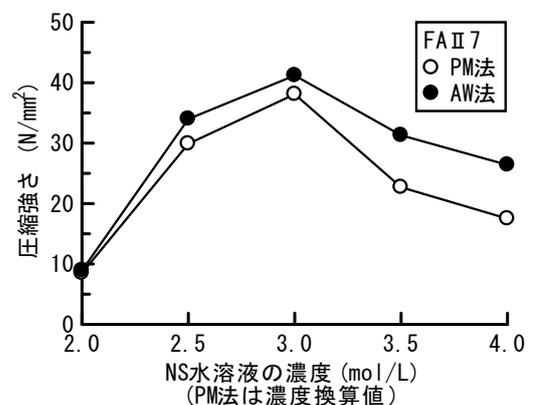
(a) FA I



(b) FA II



(c) FA II 5



(d) FA II 7

図-2 圧縮強さとNSの濃度の関係(実験2)

表-9 実験要因(実験3)

NSの添加量 <sup>*</sup>	FAの品種	Fに対するSTの外割添加率 (%)
3.0	FA I	2.0, 2.5, 3.0
	FA II	
	FA II 5	
	FA II 7	
3.5	FA I	5.0, 5.5, 6.0
	FA II	
	FA II 5	
	FA II 7	
4.0	FA I	7.0, 7.5, 8.0
	FA II	
	FA II 5	
	FA II 7	

<sup>\*</sup>)NS水溶液の濃度(mol/L)に換算

実験1と同様とし、STの外割添加率もNSの添加方法に関わらず実験1と同様とした。またAW法では、NSを所定の濃度(mol/L)となるよう水に溶解した水溶液を用いた(表-7のAW)。

(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。

(4) 空気量試験

空気量は、実験1と同様に測定した。

(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-8に、AW法のフロー値と空気量の測定結果を示す。表-7に示したAW法の配合から分かるように、目標フロー値を得る単位NS水溶液量は、FA I が最も小さく、その他のFAには大きな差はみられない。また、空気量は、比表面積が大きくなるとエントラップドエアが増大する傾向にある。この傾向は、既報<sup>7)</sup>やPM法(実験1)と同様である。

図-2に、圧縮強さとNSの濃度の関係を示す。図から分かるように、PM法とAW法のFA I, FA II 5, およびFA II 7の圧縮強さは、同様の傾向を示しており、NS水溶液の濃度にして3.0mol/Lまで圧縮強さが増大する傾向にあり、それを超えると減少する傾向にある。その減少量は、PM法のほうが大きく、NSの添加量の影響を大きく受けている。しかし、圧縮強さの最大値にはNSの添加方法による差はみられず、概ね比表面積にともなった値を示している。とくに比表面積の大きいFA II 7では、約40N/mm<sup>2</sup>の圧縮強さを示している。一方、FA IIはNSの添加方法によって他のFAとは異なる傾向となるようで、PM法ではNS水溶液の濃度にして3.0mol/Lで圧縮強さは最大値となるが、AW法ではNS水溶液の濃度が高くなるほど圧縮強さも大きくなる傾向を示している。このような傾向となる要因は、現時点では明らかではなく、今後、詳細に検討する必要がある。しかし、NS水溶液の濃度にして

表-10 PM法の配合(実験3)

NSの添加量 <sup>*</sup>	FAの品種	ST添加率 (%)	Flow	Air (%)	AW/F (%)	S/F	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				外割(kg)	練混ぜ時間(分)
							F	AW		S		
								W	NS			
3.0	FA I	2.0	190 ± 20	2	50	3.25	476	167	71	1547	9.5	4.0
		2.5									13.7	5.0
		3.0									16.4	5.0
	FA II	2.0									10.3	4.0
		2.5									14.8	5.0
		3.0									17.8	5.0
	FA II 5	2.0									9.9	4.0
		2.5									14.3	4.0
		3.0									17.1	4.0
	FA II 7	2.0									10.3	4.0
		2.5									14.8	4.0
		3.0									17.8	4.0
3.5	FA I	5.0	190 ± 20	2	50	2.98	504	167	85	1502	25.2	7.0
		5.5									29.9	6.0
		6.0									30.2	4.0
	FA II	5.0									27.3	5.0
		5.5									30.0	4.0
		6.0									32.8	4.0
	FA II 5	5.0									26.7	4.0
		5.5									29.4	4.0
		6.0									32.0	4.0
	FA II 7	5.0									27.3	4.0
		5.5									30.0	4.0
		6.0									32.8	4.0
4.0	FA I	7.0	190 ± 20	2	50	2.65	546	184	92	1444	-	-
		7.5									-	-
		8.0									-	-
	FA II	7.0									42.4	7.0
		7.5									45.5	9.0
		8.0									48.5	4.0
	FA II 5	7.0									44.1	5.0
		7.5									47.3	5.0
		8.0									50.4	4.0
	FA II 7	7.0									46.9	5.0
		7.5									50.3	4.0
		8.5									53.6	4.0

<sup>\*</sup>)NS水溶液の濃度(mol/L)に換算

<sup>\*\*</sup>)-は練混ぜが不可能であったことを示す

3.0mol/Lまでの範囲であれば、NSの添加方法に関わらず、NSの濃度が高くなるほど、FAの比表面積が大きくなるほど圧縮強さは増大すると考えられる。

4. STの添加率とFAの品種が圧縮強さ特性とフロー値の経時変化に及ぼす影響(実験3)

4.1 実験概要

(1) 実験要因

表-9に、実験要因を示す。実験要因は、NSの添加量、FAの品種、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(練混ぜ終了後、0, 30, 60, 90, 120分)とした。また、STはNSの添加量に応じて一様な外割添加率とすることを基本的な考え方とし、NSの添加量ごとに実験1の考察と予備実験をもって決定した。

(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-10にPM法の配合を示す。配合設計条件は、実験1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1と同様とした。ただし、練混ぜ時間は、状況によっては4分より延長した(表-10参照)。また、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。

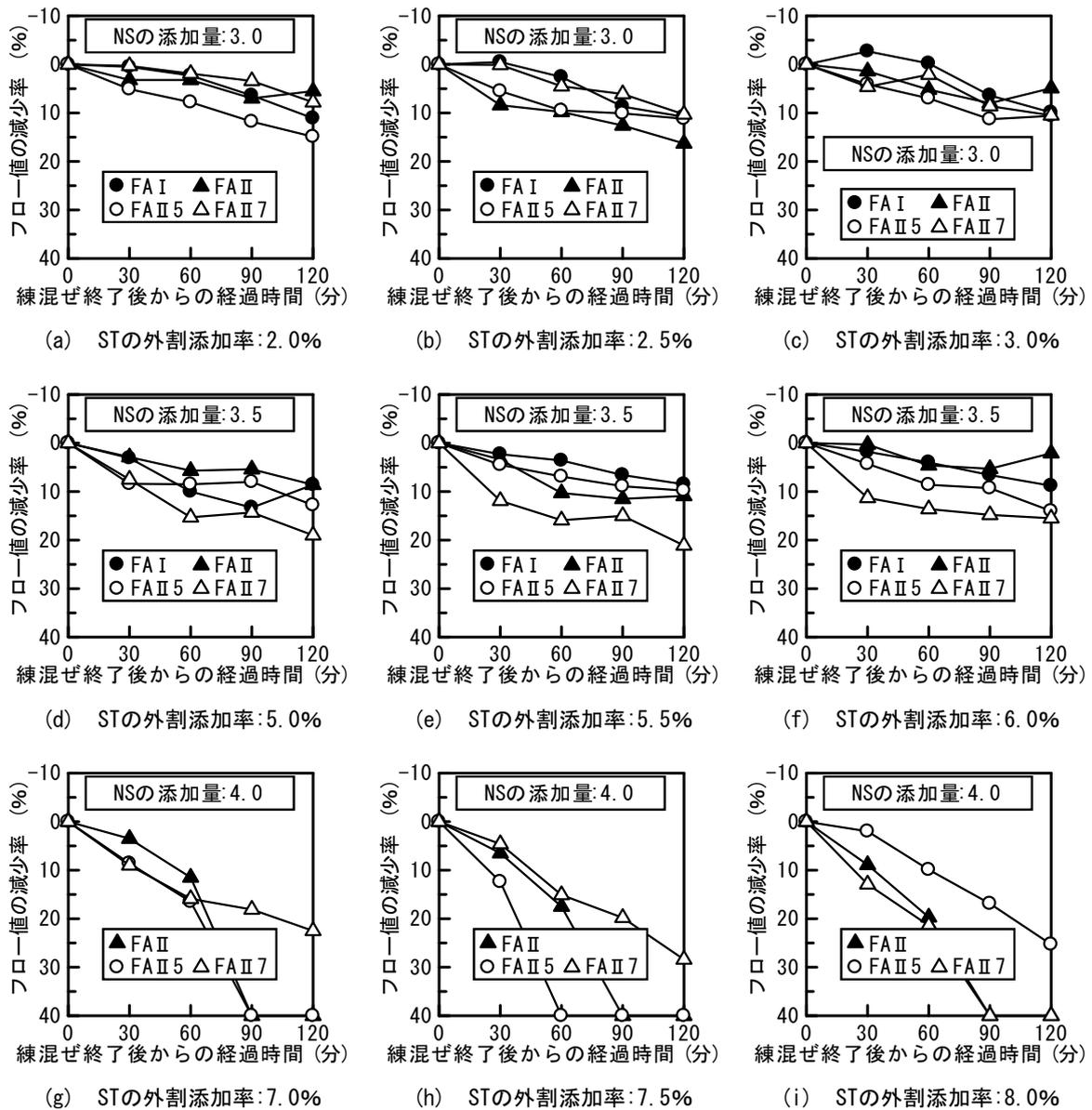


図-3 フロー値の減少率と練混ぜ終了後からの経過時間の関係(実験3)

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

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と同様に行った。

### 4.2 実験結果および考察

図-3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40%として図中に示した。また、NSの添加量は、NS水溶液の濃度(mol/L)換算値を表記した。

図から分かるように、フロー値の減少率は、NSの添加量、FAの品種、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の添加量が3.0ではSTの外割添加率に関わらず、いずれも比較的良好な

フロー値の経時変化を示している。FAの品種による影響は若干みられるが、練混ぜ終了後から120分経過したフロー値の減少率は、STの外割添加率が3.0%になると、いずれも10%以内まで改善されている。NSの添加量が3.5では、FAの品種による影響がより大きくなっている。STの外割添加率によって多少の違いはあるが、微粉碎なしのFA IとFA IIは微粉碎したFA II 5やFA II 7と比較して、経時によるフロー値の減少率は小さくなると考えられる。NSの添加量が4.0になると、FAの品種による影響が極端に大きくなり、FA IIとFA II 5は練混ぜ終了後から90分以内にフロー値の測定が不可能となっている。一方、比表面積の最も大きいFA II 7は、NSの添加量が3.5と比較すると、経時によるフロー値の減少率は10%以内の増加に留まっている。このような傾向の要因は、現時点では明らかではなく、今後の課題として詳細に検討する必要がある。このように、良好なフロー値の経時変化を得るSTの

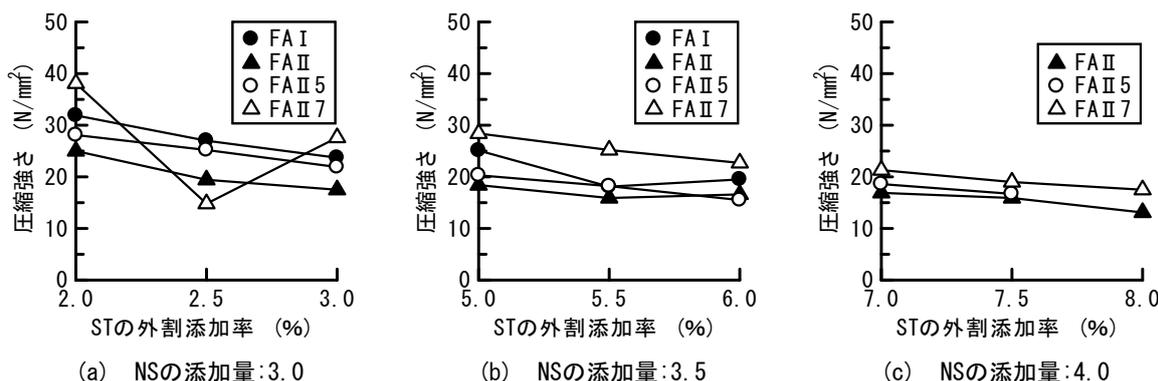


図-4 圧縮強さとSTの外割添加率の関係(実験3)

外割添加率は、NSの添加量、FAの品種など条件によって異なるので、最適な配合を得るにはより詳細な検討をする必要がある。

図-4に、圧縮強さとSTの外割添加率の関係を示す。NSの添加量は、NS水溶液の濃度(mol/L)換算値を表記した。

図から分かるように、いずれのFAもNSの添加量が3.0で圧縮強さは最大値を示し、STの外割添加率が増加すると減少する傾向にある。また圧縮強さは、NSの添加量やFAの品種に関わらず、FA II 7, FA I, FA II 5, FA IIの順で大きくなっており、比表面積にもなった傾向がみられる。

本実験結果を踏まえると、PM法ではNSの添加量と圧縮強さの関係が明確になれば、比表面積が7000cm<sup>2</sup>/g程度のFAを用い、NSの添加量を3.0としてSTを適量添加することで、常温養生であっても圧縮強さが約40N/mm<sup>2</sup>のGPモルタルが安定的に得られると考えられる。

## 5. まとめ

本実験結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) PM法では目標フロー値を得る単位水量は、NSの添加量が多くなると大きくなる傾向にある。
- 2) NS水溶液の濃度にして3.0mol/Lまでの範囲であれば、NSの添加方法に関わらず、NSの濃度が高くなるほど、FAの比表面積が大きくなるほど圧縮強さは増大する。
- 3) PM法では、比表面積が7000cm<sup>2</sup>/g程度のFAを用いNS添加量を3.0とすれば、適量のSTを添加することで、常温養生であっても圧縮強さが約40N/mm<sup>2</sup>のGPモルタルが得られる。
- 4) FAの比表面積が大きくなるとNSの添加方法に関わらず、空気量はエントラップドエアが増大する傾向にある。
- 5) PM法では、フロー値の経時変化は、NSの添加量、FAの品種、およびSTの外割添加率などの条件によって異なった傾向を示すので、最適な配合を得るにはより詳細な検討をする必要がある。

今後は、PM法の練混ぜ方法を詳細に検討するとともに

に、NSの添加量、FAの品種、およびSTの添加率が圧縮強さ特性やフレッシュ性状に及ぼす影響について、反応メカニズムも含めより詳細に検討したいと考えている。

## 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成金・基盤研究(C)(課題番号:15K06317)(研究代表者:犬飼利嗣)によった。また、本実験で使用したフライアッシュは、四電ビジネス株式会社よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

## 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: 報告書, 日本コンクリート工学会, 2017.9
- 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草案-, 土木学会, 2009.12
- 4) Joseph DAVIDOVITS: GEOPOLYMER CHEMISTRY AND APPLICATIONS, Institute GEOPOLYMER, 2011
- 5) 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
- 6) 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
- 7) Batsuuri Ashidmaa, 犬飼利嗣, 関谷有紗加: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2065-2070, 2017