

# 論文 品質の異なるフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状および初期強度発現性に及ぼす早強剤の影響

取違 剛\*1・山川 剛\*2・関 健吾\*3・横関 康祐\*4

**要旨:** フライアッシュを混和材として用いたコンクリートは、長期的な強度増進や耐久性の向上などの利点を有する一方、材齢初期の強度発現が小さいという課題がある。特に冬季はその影響が顕著に表れ、型枠の取り外しまでの日数を要する。本研究では、品質の異なるフライアッシュを用いたコンクリートに 10℃の低温環境下にて早強剤を添加し、フレッシュ性状ならびに初期強度発現性に及ぼす影響を評価した。その結果、フライアッシュの品質や W/C、養生温度によらず、早強剤の添加がフレッシュ性状に及ぼす影響は小さく、初期強度を大幅に改善でき、フライアッシュの品質によって初期強度改善効果が異なることを明らかにした。

**キーワード:** フライアッシュ, 早強剤, スランプ, 空気量, 強度, 温度

## 1. はじめに

資源循環や環境負荷低減の観点から、産業副産物であるフライアッシュに対してより一層の有効利用が望まれている<sup>1)</sup>。フライアッシュは、コンクリートの長期的な強度増進効果や遮塩性、アルカリ骨材反応に対する抵抗性の向上など、様々な面でコンクリートにとって利点を有する材料であることは周知の事実である。一方、フライアッシュを用いたコンクリートは初期強度発現性が低いことが知られている。土木学会 2017 年制定コンクリート標準示方書【施工編】では、型枠および支保工の取外しに必要なコンクリートの圧縮強度の参考値として、柱・壁・はりの側面であれば 5.0N/mm<sup>2</sup>、スラブ・はりの底面およびアーチの内面であれば 14.0N/mm<sup>2</sup> が示されており、実際の施工ではこれらの強度が確認されてから脱枠することとなる。フライアッシュを用いた場合、普通ポルトランドセメントに比べて脱枠までの日数が長くなり、工程上の制約が発生する。

このような背景を踏まえて筆者らは、早強ポルトランドセメント、フライアッシュおよび早強剤を組み合わせることで、低温時におけるフライアッシュコンクリートの初期強度発現性を高めつつ、コンクリートとしての耐久性、特に温度ひび割れを抑制できることを基礎実験によって明らかにし<sup>2, 3)</sup>、実際の構造物に適用したうえでその効果検証を進めてきた<sup>4)</sup>。さらに、フライアッシュセメント

B 種への早強剤の適用性についても検討を行い、同様に初期強度改善やひび割れ抑制に効果があることを基礎実験や数値解析にて確認している<sup>5)</sup>。

一方、フライアッシュの品質変動に伴うコンクリート品質のばらつきも、適用時の課題として挙げられる。本検討では、フライアッシュの品質が早強剤によるコンクリートの初期強度改善効果、ならびにフレッシュ性状に及ぼす影響を評価することを目的に、W/C や養生温度が異なるフライアッシュコンクリートに早強剤を添加した際のフレッシュ性状および強度発現性を確認した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。フライアッシュは産地の異なる 3 種類のものを用いた。フライアッシュの品質は表-2 に示すとおりであり、いずれもフライアッシュ II 種に相当する。FA2 は比表面積が最も大きく、FA1 は強熱

表-1 使用材料

使用材料	記号	摘要
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度=3.16 g/cm <sup>3</sup>
混和材	FA1	フライアッシュII種, 密度=2.18 g/cm <sup>3</sup>
	FA2	フライアッシュII種, 密度=2.45 g/cm <sup>3</sup>
	FA3	フライアッシュII種, 密度=2.32 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂, 密度=2.62g/cm <sup>3</sup> , FM=2.73
	S2	山砂, 密度=2.60g/cm <sup>3</sup> , FM=1.70
粗骨材	G1	硬質砂岩, 密度=2.65g/cm <sup>3</sup> , FM=7.01
	G2	硬質砂岩, 密度=2.64g/cm <sup>3</sup> , FM=6.17
混和剤	AD	AE 減水剤: リグニン誘導体とヒドロキシ系複合体
	AE	アニオン及びノニオン系特殊界面活性剤, 1A=5ml/C=100kg
早強剤	AC	アルカリ金属塩を主成分とする無機化合物

※AE 剤は所定の空気量が得られるように適宜調整

\*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士(工学) (正会員)

\*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士(工学) (正会員)

\*3 鹿島建設(株)東北支店 工事係 修士(工学) (正会員)

\*4 鹿島建設(株)土木管理本部 プロジェクト推進部 担当部長 博士(工学) (正会員)

減量が比較的多いという特徴を有する。エネルギー分散型の蛍光 X 線分析にて FA の化学組成を定量した結果を表-3 に示す。同表には、本検討で用いた普通ポルトランドセメントの化学組成の定量結果も併せて記載している。FA1 は SiO<sub>2</sub> 含有量が最も高く、FA2 は CaO 量が多量の、既往の研究<sup>6)</sup>における日本の主要な 14 箇所の石炭火力発電所から産出したフライアッシュの化学組成のばらつきを鑑みると、今回使用した 3 種類のフライアッシュは比較的類似した化学組成であると言える。

また、早強剤にはアルカリ金属塩を主成分とする白色粉体の無機化合物を用い、空気連行剤にはフライアッシュの未燃カーボンへの吸着による効果低減を鑑み、フライアッシュ用の AE 剤を用いた。

## 2.2 検討ケースおよびコンクリートの配合

検討ケースおよびコンクリートの配合を表-4 に示す。上述した 3 種類のフライアッシュをセメントの内割りで 15% 置換し、水結合材比 W/B は 45%, 50%, 55% に変化させた。コンクリートの養生温度は冬季を想定して 10℃ で一定とし、FA2 については養生温度をパラメータとして 20℃ 環境でも試験を行うこととした。これらの 12 配合について、早強剤の有無のパラメータとした全 24 ケースにて試験を行った。なお、早強剤は外割りで 6kg/m<sup>3</sup> 添加した。

## 2.3 試験項目および試験方法

フレッシュ性状としてスランブと空気量を測定した。早強剤を添加しない配合においては、強制二軸ミキサにて 90 秒コンクリートを練り混ぜ、スランブ 12±2.5cm になるようにフライアッシュ種類に応じて単位水量を調整し、表-4 に示した配合を選定した。その際、空気量は

4.5±1.5% となるように AE 剤で適宜調整した。早強剤を添加したケースについては、他材料と一緒に早強剤をミキサに投入して 90 秒練り混ぜたあと、スランブと空気量を測定した。この際にも、空気量は 4.5±1.5% となるように AE 剤で適宜調整し、早強剤が同一空気量を得るための AE 剤使用量に及ぼす影響を評価した。なお、練上り温度は養生温度と同等になるように調整した。

フレッシュ性状を確認したコンクリートにて φ100×200mm の円柱供試体を作製し、翌日脱型後、所定の温度にて水中養生を行った。材齢 1, 2, 3, 7, 14, 28 日にて圧縮強度を JIS A 1108 に準拠し、静弾性係数を JIS A 1149 に準拠して測定した。測定数は各材齢 3 体とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 早強剤がフレッシュ性状に及ぼす影響

各配合における、練上り温度 10℃ でのスランブを図-1 に示す。早強剤 AC を添加していない『AC 無し』に比べて、早強剤を添加した『AC 有り』のスランブは、多く

表-2 試験に用いたフライアッシュの品質

品質	単位	FA1	FA2	FA3	
SiO <sub>2</sub> 含有量	%	69.0	58.6	62.8	
湿分	%	0.2	0.2	0.14	
強熱減量	%	3.2	1.4	1.9	
粉末度	網ふるい法	%	9	1	3
	ブレン法	cm <sup>2</sup> /g	4,130	4,830	4,390
フロー値比	%	107	110	109	
活性度指数	材齢 7 日	-	82	-	-
	材齢 28 日		91	95	90
	材齢 91 日		103	106	95
MB 吸着量	mg/g	0.47	0.36	0.60	

表-3 普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュの化学組成 (%)

	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>
OPC	3.33	20.08	5.17	2.97	63.46	1.43	1.85	0.27	0.41	0.30	0.64	0.06	0.54
FA1	3.23	69.00	22.22	3.33	1.24	0.77	0.25	0.49	1.07	1.13	0.16	0.02	1.19
FA2	1.37	58.58	24.96	6.86	2.90	1.50	0.43	0.48	1.77	1.28	0.77	0.04	1.64
FA3	1.89	62.78	25.24	4.55	1.78	0.95	0.24	0.64	1.64	1.33	0.44	0.04	1.72

表-4 検討ケースとコンクリートの配合

No.	FA 種類	養生温度 (°C)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								AC (kg/m <sup>3</sup> )
					W	C	FA	S1	S2	G1	G2	AD	
1	FA1	10	55	43	165	255	45	636	139	603	435	0.75	0, 6
2			50	42		281	50	612	133	605	436	0.83	0, 6
3			45	41		312	55	587	128	604	436	0.92	0, 6
4	FA2	10	55	43	158	244	43	649	141	615	444	0.72	0, 6
5			50	42		269	47	625	136	617	445	0.79	0, 6
6			45	41		298	53	600	131	618	446	0.88	0, 6
7		20	55	43	158	244	43	649	141	615	444	0.72	0, 6
8			50	42		269	47	625	136	617	445	0.79	0, 6
9			45	41		298	53	600	131	618	446	0.88	0, 6
10	FA3	10	55	43	158	244	43	648	141	614	443	0.72	0, 6
11			50	42		269	47	624	136	617	445	0.79	0, 6
12			45	41		298	53	599	130	617	445	0.88	0, 6

※AE 剤は所定の空気量が得られるように適宜調整

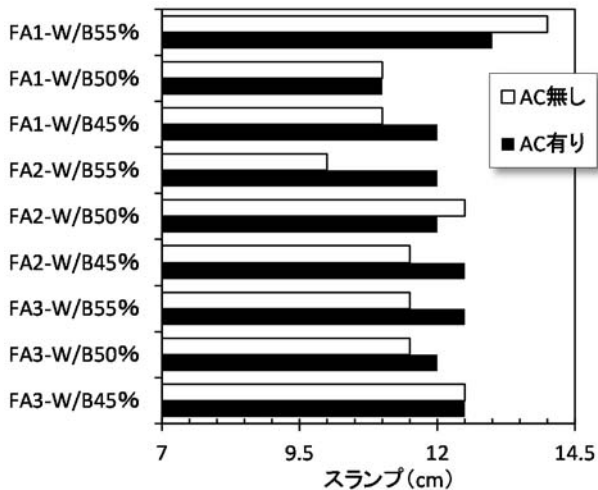


図-1 スランプ試験結果 (練上り温度 10°C)

の配合で増加傾向にあるものの、その差は最大でも 2cm である。また、W/B や FA 種類による傾向は確認されない。以上のことから、材料や配合によらず、早強剤の添加がフライアッシュコンクリートのスランプに及ぼす影響は小さいと考えられる。

次に、各配合における、練上り温度 10°C での空気量と AE 剤添加量の関係を図-2 に示す。図中の凡例について、たとえば白抜き『FA1』はフライアッシュに FA1 を用い、W/B の異なる No.1~No.3 の 3 ケースで早強剤 AC を添加していないものを一つの凡例で示している。塗りつぶしの『FA1+AC』は FA1 を用い、W/B の異なる No.1~No.3 の 3 ケースで早強剤 AC を添加したものを示している。同図によると、早強剤 AC を添加した配合は、早強剤を添加していない配合に比べて同等の空気量を得るための AE 剤添加量が少なくなっていることが分かる。本検討にて用いた AE 剤は陰イオン (アニオン) 系と非イオン (ノニオン) 系の界面活性剤を混合したフライアッシュ用の特殊 AE 剤であり、詳細なメカニズムは不明であるが、早強剤に含まれるアルカリの影響でアニオン系の界面活性効果が大きくなり<sup>7)</sup>、空気が連行されやすくなった可能性がある。

### 3.2 品質の異なるフライアッシュの初期強度改善効果に及ぼす早強剤の影響

10°C 環境にて養生した各配合における材齢と圧縮強度の関係を図-3、図-4、図-5 に示す。早強剤を添加していない配合 (図中の黒い破線の凡例) に着目すると、W/B によらず、材齢初期における強度発現性は同等である。既往の研究において、フライアッシュは 20°C 環境にて材齢 7 日程度までは反応しない<sup>8)</sup> とされており、同試験結果も同等の結果が得られている。一方、材齢 28 日においては、W/B=45%、55%において FA2 の圧縮強度が FA1 や FA3 に比べて 5N/mm<sup>2</sup> 程度大きい値となっている。このことから、FA2 のガラス化率やガラス相の組成に基

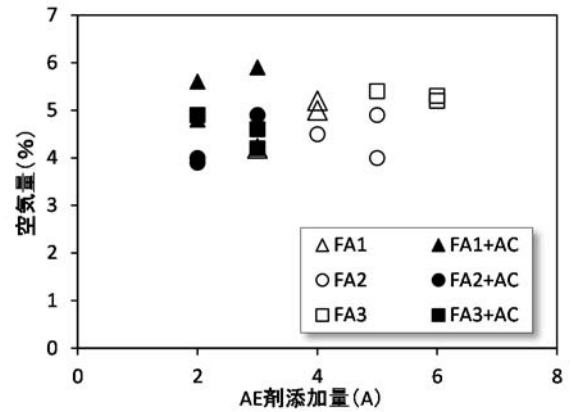


図-2 AE 剤添加量と空気量の関係 (練上り温度 10°C)

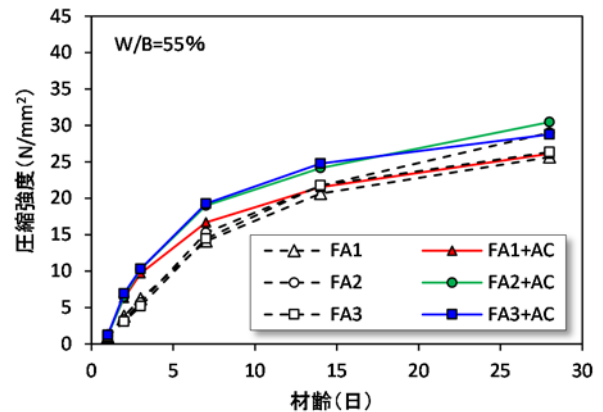


図-3 圧縮強度試験結果 (W/B=55%, 10°C)

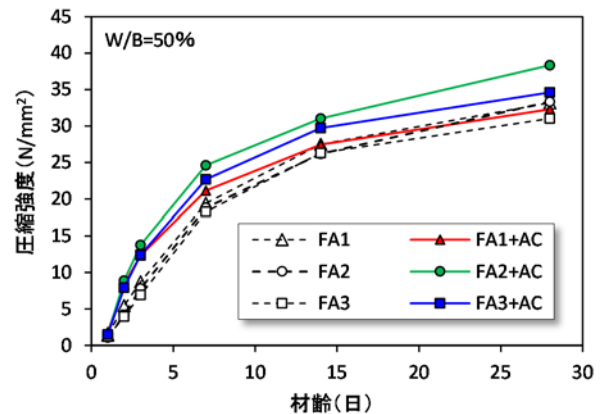


図-4 圧縮強度試験結果 (W/B=50%, 10°C)

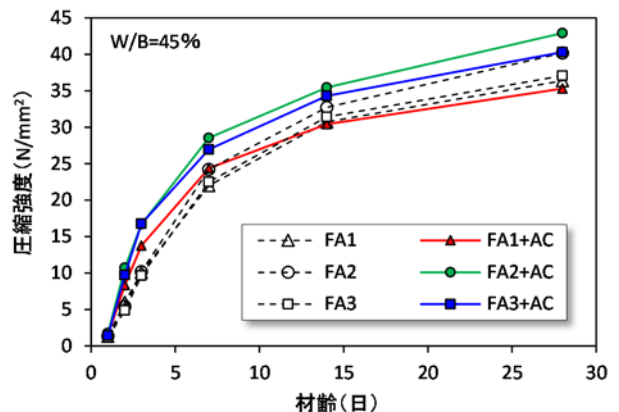


図-5 圧縮強度試験結果 (W/B=45%, 10°C)

づくポゾラン反応性が、他のフライアッシュに比べて高かった可能性がある。

次に、早強剤を添加した配合に着目すると、どのW/Bやフライアッシュ種類の場合でも、特に材齢1、2日で大きく強度が向上していることが分かる。早強剤は、W/Bやフライアッシュの種類によらず、フライアッシュコンクリートの初期強度改善に高い効果があることが確認された。これらの結果を踏まえると、冬季において、フライアッシュコンクリートに早強剤を添加することによって、前述したスラブ・はりの底面型枠および支保工の取外しに必要なコンクリートの圧縮強度  $14.0\text{N/mm}^2$  に達するまでの日数を、2~3日短縮できると考えられる。

また、初期強度改善効果の大きさについては、フライアッシュ種類によって異なる結果が得られている。W/Bによっても多少の差はあるものの、FA2が最も早強剤による初期強度改善効果が大きく、FA1の初期強度改善効果は小さい結果となった。これについては、フライアッシュの組成を含めて後ほど考察する。

FA2を用いた配合において実施した、 $20^\circ\text{C}$ 環境での圧縮強度試験結果を図-6に示す。同図より、 $20^\circ\text{C}$ 環境においても、W/Bによらず、早強剤の添加によって材齢7日までの圧縮強度が大きく向上していることが分かる。また、 $20^\circ\text{C}$ 環境においては、材齢1日においても初期強度改善効果が確認できており、養生温度 $10^\circ\text{C}$ での試験結果とは傾向が異なる。

### 3.3 早強剤による強度改善効果の積算温度依存性

各配合において、早強剤を添加したコンクリートの圧縮強度を、早強剤無添加における圧縮強度で除した値を『強度増加率』と定義し、フライアッシュ種類ごとに積算温度との関係で整理したものを図-7、図-8、図-9に示す。なお、同図における積算温度は、 $0^\circ\text{C}$ 基準にて求めた単純な温度と時間の積である。図-7によると、いずれのW/Bにおいても $500^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ のあたりで強度増加率が最大となり、 $3000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 以降の積算温度では強度増加率はほぼ1となる。また、W/Bの違いに着目すると、若干ではあるが、W/Bの高い配合ほど、強度増加率が高い傾向が見られる。

次に、図-7~図-9の3つの図を比較すると、フライアッシュの種類によらず $500^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 程度で強度増加率が最大となっており、 $3000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 以降の積算温度では強度増加率はほぼ1となる。さらに、FA2については図-8に養生温度 $20^\circ\text{C}$ のデータも併記しているが、養生温度 $10^\circ\text{C}$ のデータと同一線上にプロットされる結果となった。

これらのことから、早強剤添加による強度発現の時期は、フライアッシュの種類や養生温度によらず、積算温度にて規定され、積算温度が $500^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 程度の時に最大となり、 $3000^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ までに早強剤無添加のコンクリートと

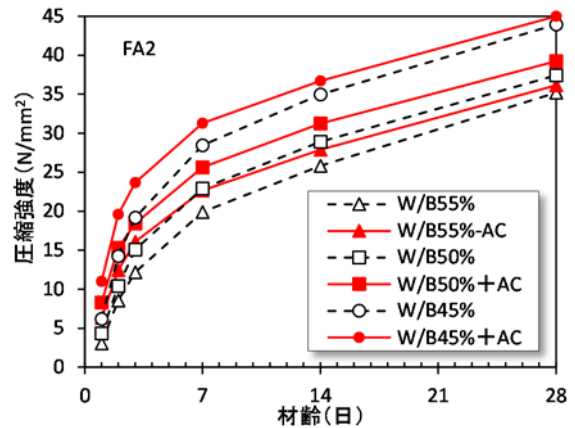


図-6 圧縮強度試験結果 (FA2,  $20^\circ\text{C}$ )

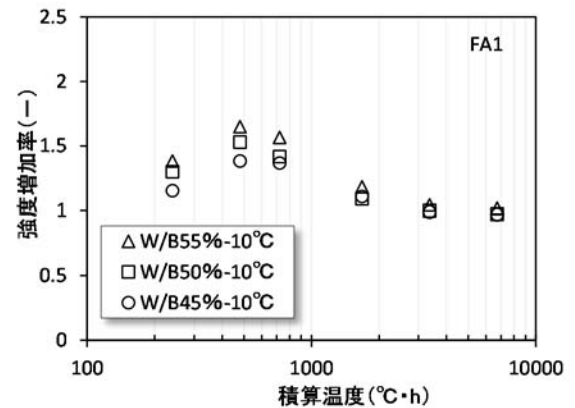


図-7 積算温度と強度増加率の関係 (FA1)

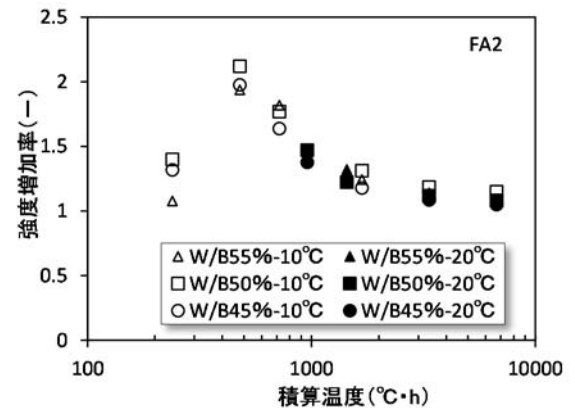


図-8 積算温度と強度増加率の関係 (FA2)

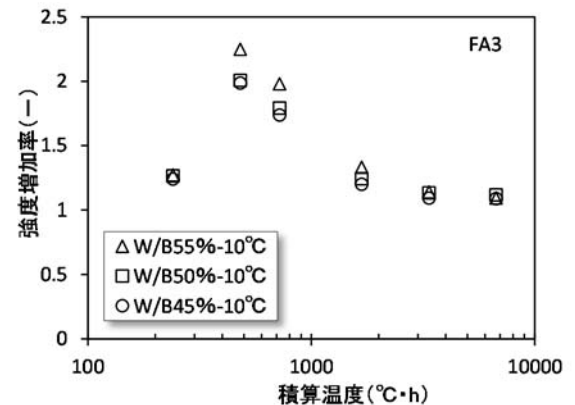


図-9 積算温度と強度増加率の関係 (FA3)

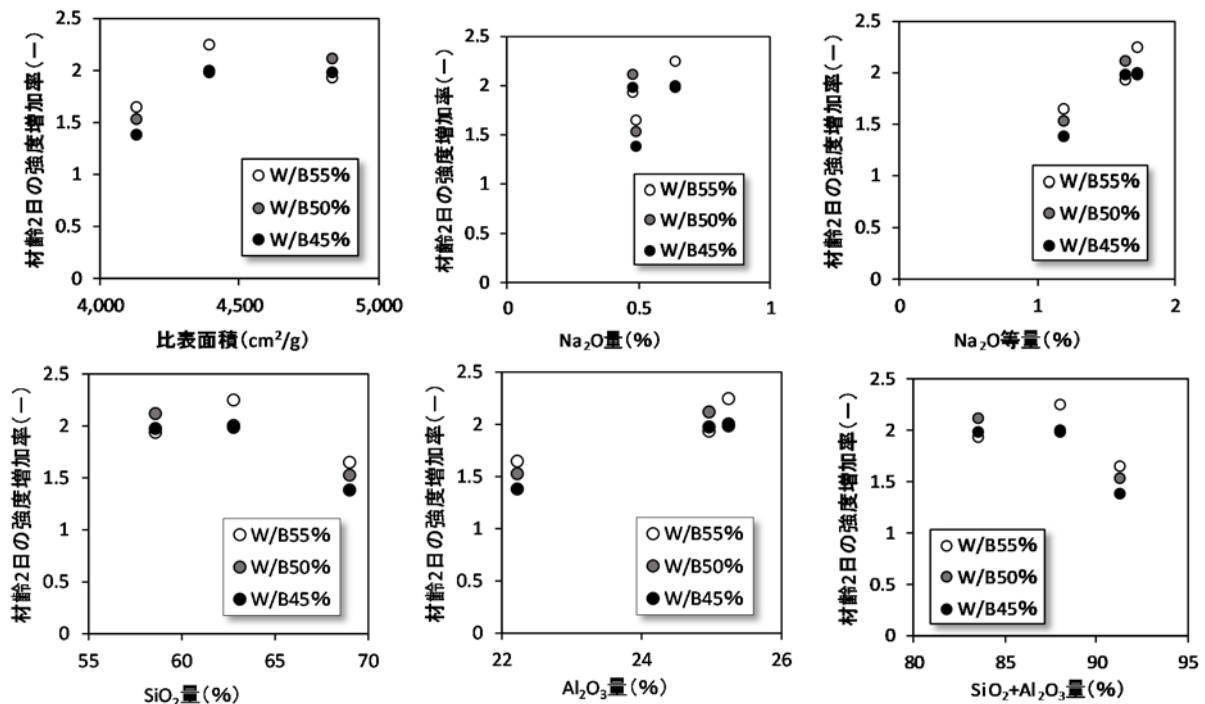


図-10 フライアッシュの品質が早強剤を添加したコンクリートの強度増加に及ぼす影響 (10°C養生)

同等の圧縮強度となることが分かった。

### 3.4 早強剤による初期強度改善効果のフライアッシュ品質との関係

前述のとおり、早強剤によるフライアッシュコンクリートの初期強度改善効果は、フライアッシュ種類によって異なる結果となった。そこで、強度増加率が最大となった材齢2日における強度増加率と、初期強度発現に寄与する可能性のあるフライアッシュの品質との関係を整理したものを図-10に示す。過去の研究において、早強剤を添加することで材齢初期におけるフライアッシュの反応率が向上しており<sup>2)</sup>、早強剤に含まれるアルカリがフライアッシュのガラス相に含まれるSiO<sub>2</sub>やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の溶出を助長していると考えられる。このことから、フライアッシュの化学組成のうち、溶出を促進する側であるNa<sub>2</sub>O量やK<sub>2</sub>Oまで含めたNa<sub>2</sub>O等量、および、アルカリの影響でフライアッシュから溶出するSiO<sub>2</sub>量、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量に着目して整理を行った。また、フライアッシュのポズラン反応は粒子の表面から徐々に起こる反応であることから、比表面積も早強剤の効果に対して重要な因子になると考えられ、同指標でも整理した。

図-10より、比表面積が4,130cm<sup>2</sup>/gと小さいFA1に比べて、比表面積4,390cm<sup>2</sup>/gのFA2や4,830cm<sup>2</sup>/gのFA3の強度増加率が高い。また、Na<sub>2</sub>O量やNa<sub>2</sub>O等量については、フライアッシュによる差自体が小さいものの、総じてフライアッシュのアルカリ量が多いほど強度増加率が高い結果となった。これらの傾向は、上述したポズラン反応を促進する方向と一致している。一方で、反応するSiO<sub>2</sub>量やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量が多いほどポズラン反応が進みやす

いため、強度増加しやすいと考えられるが、本試験においては、SiO<sub>2</sub>量の多いF1を用いたときの強度増加率が低くなった。これは、化学分析にて得られるSiO<sub>2</sub>の形態に起因していると考えられ、ガラス相の組成に着目した整理<sup>9)</sup>が必要と考えており、今後の課題である。

以上のことから、現時点では、比表面積が大きく、アルカリ総量が多いフライアッシュほど、早強剤による初期強度改善効果が高いという結果が得られた。今後さらに組成の異なるフライアッシュを用いたデータの蓄積と、フライアッシュのガラス相に着目した検討を行うことで、早強剤による初期強度改善効果のフライアッシュ品質依存性を明確にしていく必要がある。

### 3.5 早強剤を用いたコンクリートの静弾性係数

本研究にて取得した全データにおける、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-11に示す。同図には、土木学会2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】に示されている、圧縮強度と静弾性係数の関係式を併記した。また、JCI『マスコンクリートのひび割れ制御指針2016』に記載されている、標準的なヤング係数と圧縮強度の関係式( $E=6300 \times f_c^{0.45}$ )も記載した。早強剤AC添加の有無によらず、本試験結果はすべて既往の提案式と同等となった。すなわち、早強剤の添加によってコンクリートの静弾性係数に特別な変化は生じず、強度が増加した分だけ静弾性係数が増加する。

## 4. まとめ

本検討では、10°Cの低温環境においてフライアッシュの品質が早強剤によるコンクリートの初期強度改善効果、



ならびにフレッシュ性状に及ぼす影響を評価した。その結果、以下のことを明らかにした。

- ・早強剤の添加によってフライアッシュコンクリートのスランプは若干変化するものの、最大で 2cm であり、その影響は小さい。
- ・早強剤の添加によってフライアッシュコンクリートに空気が連行されやすくなる。
- ・早強剤は、W/B やフライアッシュの種類によらず、フライアッシュコンクリートの初期強度改善に高い効果がある。
- ・冬季において、フライアッシュコンクリートに早強剤を添加することによって、スラブ・はりの底面型枠および支保工を取り外すまでの期間を 2~3 日短縮することが可能となる。
- ・早強剤添加による強度発現の時期は、フライアッシュの種類や養生温度によらず、積算温度にて規定され、積算温度が  $500^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  程度の時に最大となり、 $3000^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$  までに早強剤無添加の配合と同等の強度となる。

#### 参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学会：混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究会 報告書，(社) 日本コンクリート工学会，pp.80-87，2015
- 2) 宮菌雅裕，小田部裕一，横関康祐，曾我部直樹：フライアッシュコンクリートの初期強度改善に関する基礎的検討，第 70 回セメント技術大会講演要旨，pp.266-267，2016
- 3) 宮菌ほか：早強性・低収縮を両立したコンクリートの基礎的性状，土木学会第 71 回年次学術講演会，pp.271-271，2016
- 4) 川崎文義，関健吾，取違剛，横関康祐：早強性と温度

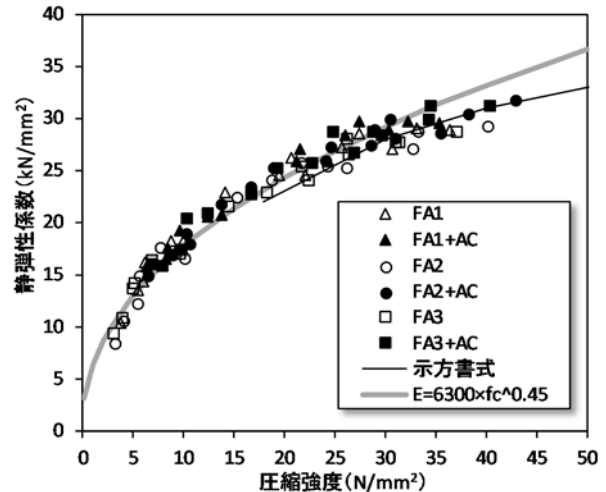


図-11 圧縮強度と静弾性係数の関係

ひび割れの抑制を両立させたフライアッシュコンクリートの構造物への適用と耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1893-1898，2018

5) 亀島ほか：早強性・低収縮性を有するコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎的検討，土木学会第 72 回年次学術講演会，pp.193-194，2017

6) 羽原俊祐，浅野慎吾，山本武志，野崎隆人：最近のフライアッシュのキャラクター（品質）変動と圧縮強度への影響，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.120-126，2009

7) 洞ノ上好一：AE セメントに関する 2, 3 の試験結果に就て，セメント技術年報，No.6，pp.218-223，1952

8) 宮原茂禎，大沢栄也，坂井悦郎，大門正機：フライアッシュセメント系の水和反応，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.50-55，2000

9) 大塚拓，森慎一郎，石川元樹，坂井悦郎：フライアッシュの鉱物組成とポゾラン反応性，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.16-21，2009