

フライアッシュコンクリート用添加剤の最適添加率 に関する検討

宮川, 美穂

岩城, 圭介

西村, 正

<https://doi.org/10.15017/1397768>

出版情報：都市・建築学研究. 23, pp.37-45, 2013-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン：

権利関係：

フライアッシュコンクリート用添加剤の最適添加率に関する検討

A study of optimization for using fly ash concrete additives

宮川美穂*, 岩城圭介**, 西村 正**

Miho MIYAKAWA, Keisuke IWAKI and Tadashi NISHIMURA

The enhancement of the 1 day mortar strength with triisopropanolamine (mark A), isopropanolamin derivatives (mark B) and tri-ethanolamine (mark C) was studied. Isothermal calorimetry was tested an influence of two types of alkanolamine. Mark C was highest 1 day strength ratio in all alkanolamine. Ordinary Portland cement blending with fly ash was tested in mortar with Mark C. When used 15% fly ash in cement, Mark C added at a rate of 0.04% by powder and 25% fly ash in cement, Mark C added at a rate of 0.06% by powder.

Keywords: Fly Ash, Early Strength, Fly Ash Concrete Additives, Heat of Hydration

フライアッシュ, 初期強度, フライアッシュコンクリート用添加剤, 水和熱

1. はじめに

環境負荷低減, 資源有効利用の観点から, コンクリートへのフライアッシュの有効利用に関する研究が多く行われている。

フライアッシュを混合することで, コンクリートの流動性改善や耐久性の向上が期待でき, 特にアルカリ骨材反応対策など, コンクリートの性状改善には効果的であるが, フライアッシュの使用量が増えることにより, 普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べると, 初期強度発現が遅れる傾向にある。特に, セメントの内割でフライアッシュを使用するフライアッシュセメントの場合は, その傾向が顕著である。フライアッシュセメントは, フライアッシュの分量によってA種, B種およびC種の3種類に分類されており, AおよびB種は使用実績も多いが, C種に関しては, セメントに対するフライアッシュの分量が多いため, 普通セメントと比較すると, 強度発現性の観点から, あまり使用されていないのが現状である。また, フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説(日本建築学会)では, フライアッシュの置換率が20%を超える場合, 設計基準

強度を割り増しすることを規定しており, 初期強度に関する注意を喚起している。このように, フライアッシュを使用したコンクリートに対しては, 特に初期材齢の圧縮強度に関する注意が必要であり, フライアッシュの使用量が増えると, 強度に与える影響も大きくなる。

一方, セメント製造における粉砕工程では様々な種類のセメント用添加剤が使われている。なかでもトリイソプロパノールアミンはコンクリートの強度増進に効果があることが知られており¹⁾, その応用研究がすすめられている²⁾。トリイソプロパノールアミンの強度増進機構は, フェライト相の水和により発生される水酸化鉄の溶解度を高め水和を促進するといわれている。しかし, 本研究のようにセメントの内割でフライアッシュを使用する場合, 総粉体量に対するセメント量が少なくなるため, セメントを単独で使用した場合と比較して, 圧縮強度の増進効果が期待できないことが想定される。

筆者らは, セメントの内割でフライアッシュを使用したコンクリートおよびモルタルの圧縮強度に増進効果がある材料を見だし^{2),3)}, その効果に関して研究を行っている。

フライアッシュを使用したコンクリートの初期強度増進効果を, 水和発熱速度の測定と初期の圧縮強度の関係から研究を行ってきた。

コンクリートの強度に影響を及ぼす主要因として,

* 空間システム専攻 博士後期課程

** グレースケミカルズ(株)

セメントと水の水和反応が挙げられる。この反応によって水和熱が生じ強度が発現するため、強度発現の早いセメントほど水和熱が高いのが一般的である。水和熱量はセメントの種類・練混ぜ温度によって大きく変化し、一定の材料と一定条件下で、水和反応と水和熱は比例するといわれており、水和発熱速度を測定することにより、セメントの水和反応速度を推察することが多い⁹⁾。

本研究では、セメントの内割でフライアッシュを置換したモルタルに、セメント用添加剤として使用されているトリイソプロパノールアミンを含むアルカノールアミン類を添加し水和熱を測定した。その結果から、強度発現効果がみられた添加剤を使用して、セメントを単独使用している基準調合と同じ初期強度発現が期待できる添加剤添加率ならびにフライアッシュ内割置換率に関して検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

表1に、使用材料を示す。

試験1では、セメントとして、普通ポルトランドセメントの3銘柄を等量混合したものを使用し、試験2では、特定銘柄の普通ポルトランドセメントを使用した。

表2に、フライアッシュの物性を示す。本研究では、異なる工場で製造された3種類のフライアッシュFA1、FA2およびFA3を使用した。なお、FA1ならびにFA2は、JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）規格外品であり、FA3はフライアッシュII種品である。

添加剤としては、A（トリイソプロパノールアミン）、B（イソプロパノールアミンの誘導体）、C（トリエタノールアミン）の3種類を使用した。

一般的にアルカノールアミン類は、セメントの製造時における粉砕効率の向上と、セメントの硬化促進を目的にセメント用添加剤として用いられている⁹⁾。しかし、JIS A 6204（コンクリート用化学混和剤）に規定されている硬化促進剤（例えば、亜硝酸カルシウムやロダン酸カルシウム等）と比較すると、その硬化促進効果はあまり高くない。また、セメント用添加剤は、セメント中のアルミネート系鉱物の水和を促進しているといわれているが、詳細な水和機構については明確になっていない。使用するアミンの種類によっては、コンクリートに添加して空気量が増加するものもあり、空気を消泡する材料に関しても、選定と注意が必要である。

2.2 調合

表3に、モルタルの調合を示す。JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）に準じて、水粉体比50%一定とし、普通ポルトランドセメント単独の基準調合モルタルとフライアッシュ調合モルタルにて試験を行った。フライアッシュ調合は、フライアッシュをセメント質量に対

して、試験1では25%、試験2では15%および25%を内割置換した。

添加剤は、粉体に対する有効成分の質量比で0.01～0.08%を添加した。また、全ての調合において、消泡剤を一定量添加した。

2.3 練混ぜ

練混ぜは、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて、ホバートミキサにて、所定の時間練り混ぜた。

2.4 圧縮強度用供試体の作製

JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に従って、表3に示す調合条件でモルタルを練混ぜ、40×40×160mmの型枠に成型後、1日間湿空養生を行い、成形後24時間および28日で圧縮強度試験を行った。

表-1 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)
水	W	水道水	-
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	S	掛川産陸砂	2.61
添加剤	A	トリイソプロパノールアミン	
	B	イソプロパノールアミンの誘導体	
	C	トリエタノールアミン	
消泡剤	-	一般市販品	

表-2 フライアッシュの物性

項目	JIS A 6201 規定値	フライアッシュの種類		
		FA1	FA2	FA3
二酸化ケイ素 (%)	45.0 以上	-	-	57.35
湿分 (%)	1.0 以下	-	-	0.5 以下
強熱減量 (%)	5.0 以下	1.2	3.3	1.7
比表面積 (cm ² /g)	2,500 以上	4,100	3,500	3,500
密度 (g/cm ³)	1.95 以上	2.29	2.23	2.27
フロー値比 (%)	95 以上	-	-	107
活性 度指 数 (%)	材齢28日	80 以上	-	93
	材齢91日	90 以上	-	106

表-3 モルタル調合

調合の種類	W/P (%)	単位量 (g)			
		W	C	FA	S
基準	50	225	450	0	1350
FA15%	50	225	382.5	67.5	1350
FA25%	50	225	337.5	112.5	1350

2. 5 水和熱の測定

表-3 に示す各調合にて、所定時間モルタルを練り混ぜた後、試料 100g 程度を採取・計量し、ただちに水和熱の測定を開始した。

水和熱の測定は、写真-1 に示すコンダクションカロリメータ (WR Grace & Co. 製⁸⁾) を使用して、水和時の環境温度は 20°C 一定とした。

水和熱の測定方法は、溶解熱の差から求める「間接法」と、反応の進行とともに温度の上昇や伝導熱量を測定する「直接法」があるが、本研究では、初期の水和速度を測定するために有効とされている直接法により、練上がりから 25 時間まで測定を行った。



写真-1 コンダクションカロリメータ

図-1 に、カロリメータを使用して測定した水和発熱速度の例を示す⁸⁾。本例は、水セメント比は 50% で ASTM Type I/II セメントを使用したセメントペーストの水和発熱速度であり、一般的なセメントと同様に二つのピークが認められる。第一ピークは、注水直後の数分間に現れる最も大きい発熱ピークであり (図中 I)、セメントの接触水和熱と、セメント中のカルシウムアルミネート系鉱物 C₃A および遊離石灰の水和によるエトリンサイト生成によるものであるといわれている。この発熱ピークは、環境温度およびセメント成分の影響を受けにくく実験ごとに異なる値を示す。

第一ピークの後、水和反応そのものが誘導期あるいは潜伏期といわれる停滞する期間に入り (図中 II)、その後、第二ピークが現れる (図中 III)。第二ピークは、セメント中のエアライト C₃S を主反応とする水和によるもので、水和熱全体の中で最も大きな割合を占めている。このピークは、セメントの種類にかかわらず、系の温度が高くなるほど大きくなるとともに、ピーク発現時間が早くなり、強度発現性への影響が大きいといわれている¹⁰⁾。第二ピークをむかえた後、C₃A 起源のエトリンサイトがモノサルフェートに転化する反応がゆっくり進行する (図中 IV)。本研究では、練上がりから 4 時間以降 16 時間以内までに出現する水和発熱速度の一番高い部分をピークとして、水和

発熱速度とピークの発現時間について検討を行った。

2. 6 試験項目および試験方法

各調合のモルタルを練り混ぜた後、モルタルのフロー値を、JIS R5201 (セメントの物理試験方法) のフロー試験に従って測定し、各調合のフロー値比を算出した。また、JISA 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)) に準じて、空気量の測定を行った。フローおよび空気量試験が終了した後、強度用供試体の作製を行った。

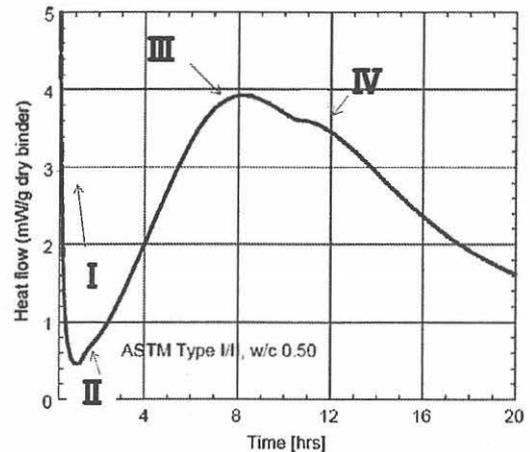


図-1 水和発熱速度測定例

(ASTM Type I/II 普通ポルトランドセメント使用)

3. 試験 1 試験結果および考察

3. 1 フレッシュ性状

表-4 に、各種添加剤を添加した基準調合ならびにフライアッシュ調合のフロー値比を示す。無添加の欄には、JISA 6201 (コンクリート用フライアッシュ) のフライアッシュの品質におけるフロー値比 (基準調合に対するフライアッシュ調合のフロー値比) を示し、添加剤 A, B および C に関しては、各調合の添加剤無添加を基準としたフロー値比を示す。フライアッシュのフロー値比としては、JIS A 6201 II 種の性能を満足している。また、全ての調合においてモルタルのフロー値は 200~230mm であった。各種添加剤を添加しても、フロー値比は同等であり、添加剤の種類および添加率による差異は認められなかった。

空気量は、消泡剤を一定量添加しているため、全ての調合において 1.0±0.5% の範囲内であり、添加剤の有無、添加剤の種類および添加率による差は認められず、消泡剤での調整が可能であった。

3. 2 圧縮強度

図-2 に、材齢 1 日および 28 日における各種添加剤を添加したモルタルの強度比を示す。ここで示す強度比は、各調合の添加剤無添加との比である。

材齢 1 日および 28 日では、添加剤無添加よりも添加剤を添加したもののほうが強度比は高い。今回使用したフ

ライアッシュを使用したモルタルでは、添加剤による強度増進効果が認められた。材齢1日では、添加剤の添加率を上げると強度比は高くなる傾向にあり、最も強度増進効果が高かったのは、FA1 調合の添加剤C トリエタノールアミンであった。

材齢28日では、材齢1日より強度比は低いものの、全ての添加剤で圧縮強度比が100%を超えており、材齢28日の圧縮強度においても増進効果がみられた。フライアッシュの種類に関しては、一部例外はあるものの、FA1 調合の強度比がFA2 調合に比べて小さくなる傾向にあり、その傾向は材齢28日においても同様であった。特に、添加剤Aのトリイソプロパノールアミンは、フライアッシュに対する強度増進効果が他の添加剤より低い傾向にあった。

冒頭にも述べたが、トリイソプロパノールアミンは、水酸化鉄の溶解度を高めることにより水和を促進するといわれており、鉄分の少ない白色セメントでは強度増進効果が得られないことが確認されている⁷⁾。しかし、JIS A 6201 (コンクリート用フライアッシュ) に規定されているフライアッシュII種の Fe_2O_3 含有量は2~8%程度¹¹⁾、普通ポルトランドセメントの Fe_2O_3 含有量は約4%とフライアッシュの Fe_2O_3 含有量は、普通ポルトランドセメントと比較して少なくない。

本研究で使用したフライアッシュ調合は、普通セメント単独である基準調合よりもセメント量が少ないため、トリイソプロパノールアミンの十分な強度増進効果が得られなかったことに加えて、本研究で使用したフライアッシュ中の鉄分が固定化されて溶出されなかったため、期待する強度増進効果が得られなかったのではないかと考えられる。しかし、添加剤A以外の添加剤Bおよび添加剤Cは、フライアッシュを使用した調合でも強度増進効果があったことから、添加剤Aのトリイソプロパノールアミンとは異なる機構で強度増進している可能性があると考えられる。

(3) 水和熱

図3に、基準調合ならびにフライアッシュ調合の添加剤無添加のモルタル水和発熱速度を示す。基準調合と比較して、フライアッシュ調合はFA1およびFA2両方とも水和発熱が低い結果であり、フライアッシュの種類による差は認められず同等であった。これはフライアッシュをセメントの内割置換していることに起因すると考えられる。

図4および図5に、FA1 調合およびFA2 調合に添加剤Aおよび添加剤Cを添加した場合の水和熱速度を示す。添加剤Aを添加した場合の水和発熱速度は、添加剤無添加と同様な傾向だったが、添加剤Cを添加した場合は、水和発熱速度が、添加剤無添加ならびに添加剤Aよりも大きくなっており、添加剤の添加率を上げると、水和発熱速度が大きくなる傾向であった。添加剤Aよりも添加

剤Cを使用したほうが水和発熱速度は大きいことから、フライアッシュを添加したモルタルの圧縮強度が高くなった要因のひとつであったと推察される。

表-4 モルタルのフロー値比

添加剤の種類	添加率 ((C+FA)×%)	調合の種類		
		基準	FA1	FA2
無添加	-	100	109	108
各調合の無添加を100%とした場合のフロー値比				
A	0.01	100	101	102
	0.02	101	101	100
B	0.01	102	100	99
	0.02	101	102	98
C	0.01	101	101	99
	0.02	102	98	101

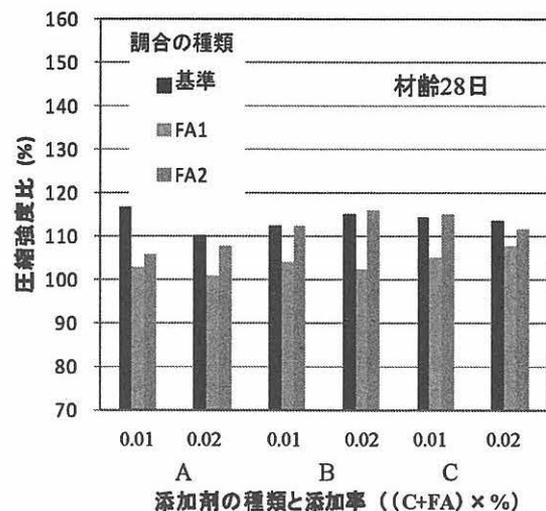
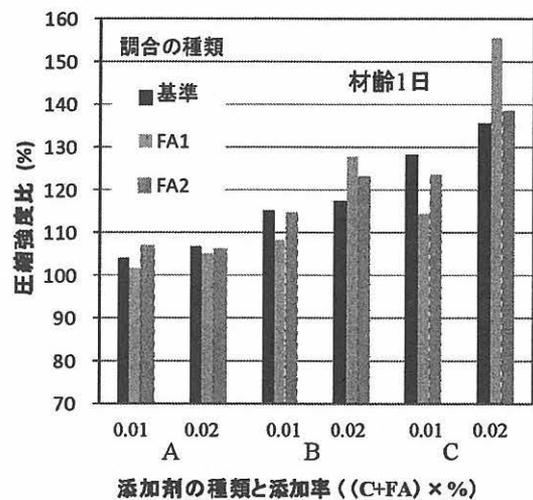


図-2 各添加剤を添加したモルタルの圧縮強度

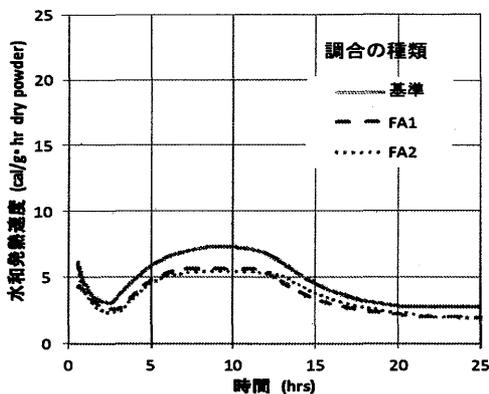


図-3 添加剤無添加のモルタル水和発熱速度

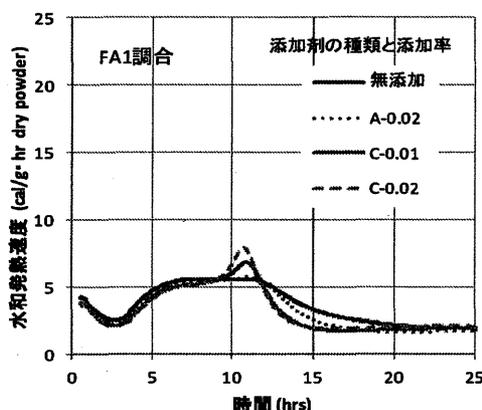


図-4 FA1 調合の水和発熱速度

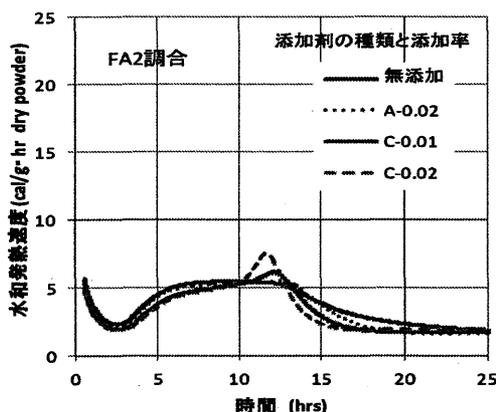


図-5 FA2 調合の水和発熱速度

ークが高くなるものの、その後、急激に低下するため25時間までの水和発熱量が低下したと考えられる。

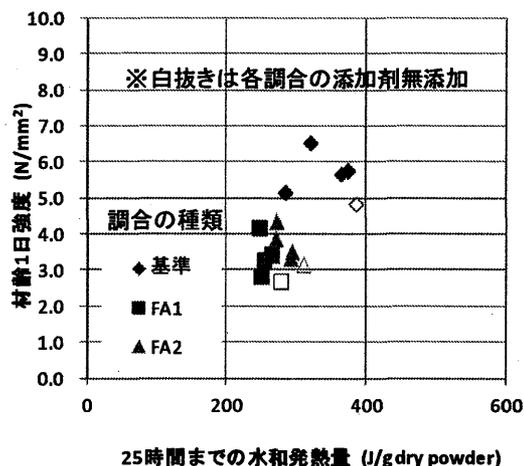


図-6 25時間までの水和量と材齢1日強度

図-7に、各調合の添加剤無添加、添加剤Aおよび添加剤Cにおける水和発熱速度がピークに到達した時間と材齢1日強度の関係を示す。一般的な硬化促進作用のメカニズムは、 C_3S の水和を促進し、誘導期を短縮することで加速期の急激な立ち上がりによってピークに到達する時間を早めることである。しかし、本研究で使用した各種添加剤は、強い硬化促進作用がないため、初期からの急激な立ち上がりは見られず、ピークに到達する時間は、添加剤無添加よりも遅い傾向があり、基準調合よりもフライアッシュ調合の方がさらに遅くなる傾向にあった。これは、主反応である C_3S の水和を促進するよりも C_3A 起源のエトリンガイトがモノサルフェートに転化し水和を促進しているため、基準調合よりもピークの時間が遅くなったのではないかと考えられる。

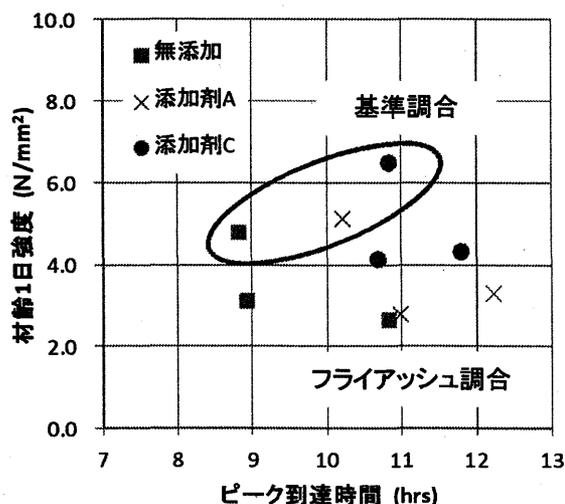


図-7 ピーク到達時間と材齢1日強度

図-6に、各調合における、練り上がりから25時間までの水和発熱量と材齢1日圧縮強度の関係を示す。25時間までの水和発熱量は、材齢1日強度との相関は認められなかった。しかし、水和発熱量は、添加剤を添加することで、添加剤無添加（グラフ内白抜き）より同等か低い傾向にあるにもかかわらず、圧縮強度比が高い傾向にあった。これは、フライアッシュ調合よりも基準調合の方が顕著であった。図4～図5に示す水和発熱速度曲線において、添加剤を添加することで、水和発熱速度はピ

図-8に、各調合における最大水和発熱速度と材齢1日の圧縮強度の関係を示す。本研究では、フライアッシュ調合で、基準調合の添加剤無添加と同等またはそれ以上の強度を目標としていることから、基準調合は、添加剤無添加の点のみを示す。図-6では、25時間までの水和量と材齢1日強度との間には相関は認められなかったが、最大水和発熱速度と材齢1日強度の間には、相関関係が認められ、最大水和発熱速度が大きいほど材齢1日強度が高い傾向であり、その関係は2種類のフライアッシュで同様に認められた。また、FA1調合よりもFA2調合の方が強度値は高いが、強度増進率は、FA1調合の方が大きい傾向にあった。一般的に使用されているセメント添加剤Aに比べて、今回使用した添加剤Cは、どの調合においても高い強度増進効果が得られた。

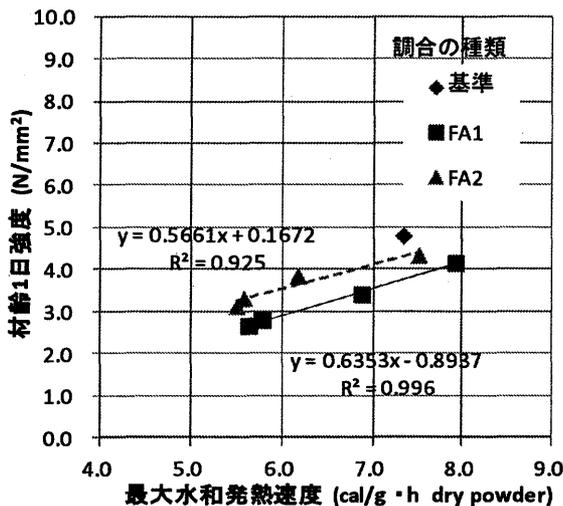


図-8 各調合の最大水和発熱速度と材齢1日強度

4. 試験2 試験結果および考察

4.1 フレッシュ性状

試験1で強度増進効果が高かった添加剤Cを使用して、JISA 6201 (コンクリート用フライアッシュ) のII種品であるFA3を使用して、添加剤の最適添加率の検討を行った。

表-3に示した調合で、添加剤Cを、粉体に対する有効成分の質量比で0.01~0.08%練り混ぜ水の一部として添加した。

表-5に、添加剤Cを添加したFA3調合のフロー値比を示す。フライアッシュのフロー値比としては、JISA 6201 II種の性能を満足している。また、全ての調合においてモルタルのフロー値は200~230mmであった。添加剤Cの添加率を変化させても、フロー値比は同等であり、添加剤の添加率による差異は認められなかった。また、空気量は、消泡剤を一定量添加しているため、全ての調合において1.0±0.5%の範囲内であり、試験1と同様であった。

表-5 モルタルのフロー値比

添加率 (P×%)	FA3置換率	
	15%	25%
0	109	114
0.01	108	-
0.02	110	110
0.04	107	113
0.06	108	114
0.08	-	114

4.2 圧縮強度

図-9に、材齢1日における添加剤Cの強度比を示す。ここで示す強度比は、フライアッシュ置換率15%および25%の添加剤無添加との比である。

フライアッシュのセメント内割置換率15%の場合、添加剤Cの強度比が最も高い添加率は、粉体に対して0.02%で、それ以上添加しても強度増進は見られなかった。同様にセメント内割置換率25%の場合、添加剤Cの強度比が最も高い添加率は、粉体に対して0.04%であった。よって、フライアッシュの置換率により、添加剤の最適添加率が存在するといえる。

図-10に、添加剤Cの添加率と最大水和発熱速度の関係を示す。添加剤Cの添加率を上げることで、最大水和発熱速度は上昇する傾向にあるが、フライアッシュのセメント内割置換率にかかわらず、添加剤Cの添加率が0.04%で最大水和発熱速度上昇が緩やかになり、上昇量も低下していることがわかる。

図-11に、フライアッシュのセメント内割置換率15%および25%の注水後5分から25時間までの水和発熱速度を示す。FA3調合の添加剤無添加と比較して、添加剤を添加することで、注水後約10時間が経過したところで、水和発熱速度の上昇が確認された。これは、フライアッシュのセメント内割置換率25%でも同様の傾向にあった。しかし、最大水和発熱速度は、フライアッシュ内割置換率15%の場合、粉体に対して0.04%が最も高く、フライアッシュ内割置換率25%では粉体に対して0.08%が最も高い結果となった。この結果は、図-9の材齢1日強度比が最も高い添加率とほぼ同じであり、圧縮強度増進の限界添加率は、水和発熱速度を上げる限界値でもあったと考えられる。

水和発熱曲線のピークが出現した部分は、試験1と同じ部分であった。このピークは、図-1の図中ⅢもしくはⅣのピーク (以下Ⅲピーク、Ⅳピークとする) であると考えられる。試験1では、Ⅲピークは、添加剤無添加よりもやや低い傾向にあり、添加剤Aよりも添加剤Cの方が低く、添加剤Cの添加率による差は認められなかった。しかし、Ⅳピークは、添加剤Aよりも添加剤Cの方が高く、添加剤Cの添加率が上がるほど高くなる傾向にあっ

た。試験2では、添加剤Cの添加率が上がれば上がるほど、IIIピークが低くなり、IVピークが上がる傾向にあった。その傾向は、フライアッシュ内割置換率15%よりも25%の方が大きい結果となった。添加剤を添加することで、本来IIIピークで水和熱が発生するはずの物質が、IVピークで水和しているのではないかと考えられる。このIIIピークとIVピークの主反応は C_3S で、IVピークでは C_3A の水和によって生成されたエトリングイトからモノサルフェートが生成されることから、添加剤Cが C_3S もしくは C_3A の水和に影響を及ぼし、水和発熱曲線のピークが、添加剤無添加よりも高くなり圧縮強度が増進したと考えられる。

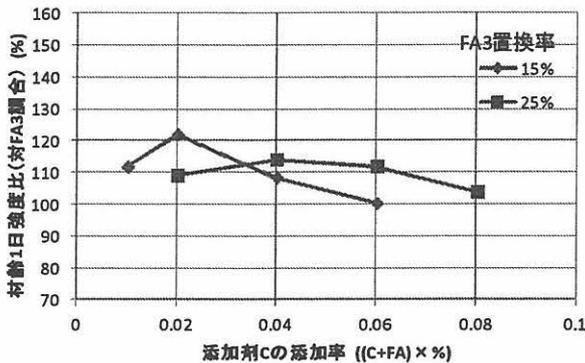


図-9 モルタルの材齢1日圧縮強度比 (対 FA3 調合)

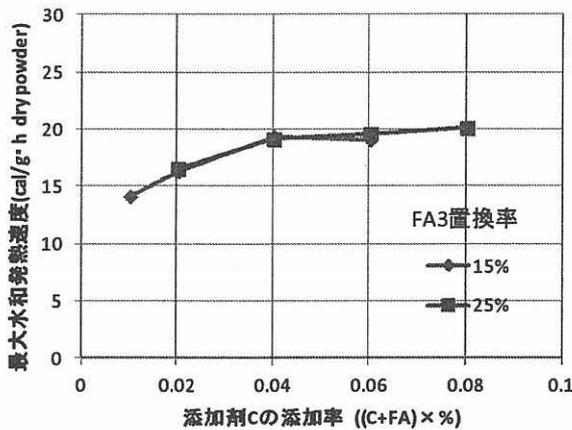


図-10 添加剤C 添加率と最大水和発熱速度

図-12に、各調合における、練り上がりから25時間までの水和発熱量と材齢1日圧縮強度の関係を示す。フライアッシュのセメント内割置換率25%では、基準調合と同等の強度を得ることは困難であったが、内割置換率15%では、基準調合の強度に近づけることが可能であると考えられる。また、フライアッシュをセメントの内割置換することで、25時間までの水和発熱量は、普通セメント単独の基準調合よりも低い傾向にあった。しかし、水和発熱量を、各フライアッシュ調合の添加剤無添加と比較すると、フライアッシュ内割置換率25%では同等か

やや高い傾向にあり、内割置換率15%では、高くなる傾向にあった。

図-13に、各調合の水和発熱速度がピークに到達した時間と材齢1日強度の関係を示す。試験1では、フライアッシュ調合は、基準調合と比較して、ピーク到達時間が遅くなる傾向にあったが、試験2では、基準調合と同等もしくは早くなる傾向にあった。この時間の違いは、試験1の圧縮強度レベルと試験2の圧縮強度レベルの違い、使用しているセメントならびにフライアッシュの種類が異なることが大きく影響しているのではないかと考えられる。

図-14に、最大水和発熱速度と材齢1日圧縮強度の関係を示す。最大水和発熱速度と強度には、相関性があるとはいえないがピークが存在する。添加剤Cの添加率が一定量以上になると、材齢1日圧縮強度は低下する傾向にあった。これは、添加剤Cを過度に添加すると異常凝結や凝結遅延が生じ、その限界添加率は、材料にもよるがセメントに対して0.1%といわれている¹²⁾ため、本研究で使用しているトリエタノールアミンも同様に、添加率を上げることで、水和に影響を及ぼし、結果強度増進を阻害したものと考えられる。

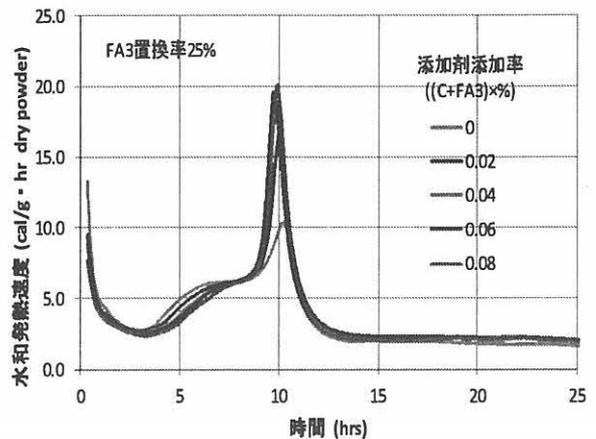
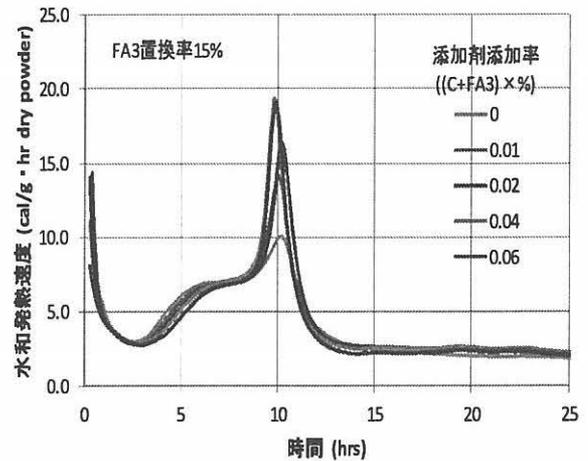


図-11 FA3 調合の水和発熱速度

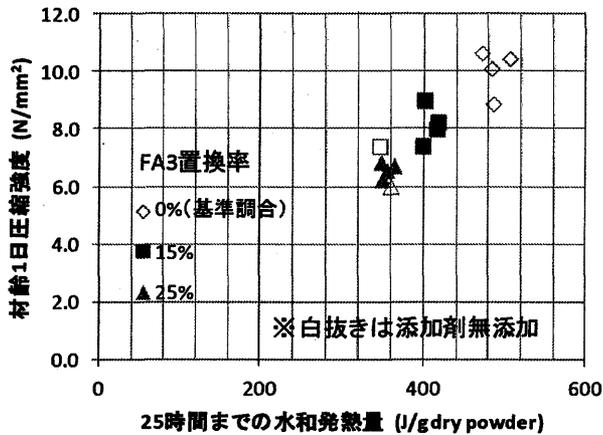


図-12 25時間までの水和発熱量と材齢1日強度

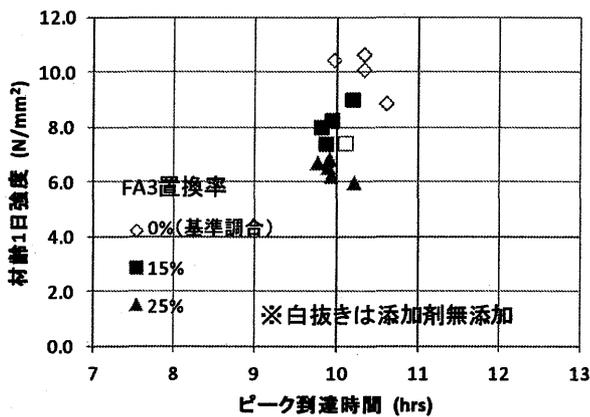


図-13 ピーク到達時間と材齢1日強度

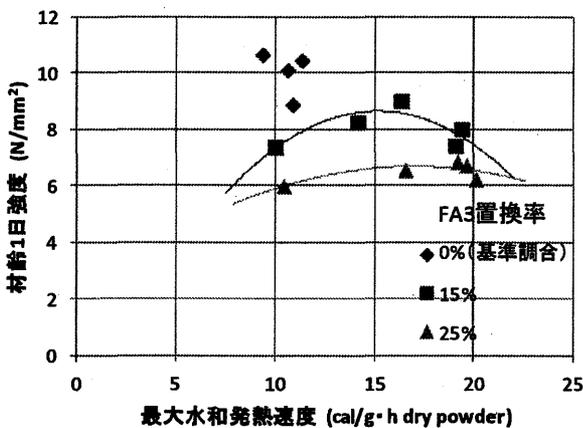


図-14 最大水和発熱速度と材齢1日強度

4. まとめ

(1) 本研究で使用した3種類のアミン類(トリイソプロパノールアミン, イソプロパノールアミンの誘導体およびトリエタノールアミン)を添加したモルタルのフロー値ならびに空気量は, 添加剤無添加とほぼ同程度であり,

大きな差異は認められなかった。

(2) イソプロパノールアミンの誘導体およびトリエタノールアミンの材齢1日モルタル強度は, 一般的にセメントの強度増進効果があるといわれているトリイソプロパノールアミンよりも, 高い増進効果が得られた。なかでもトリエタノールアミンの強度増進効果が高く, フライアッシュコンクリート用の添加剤として使用が可能である。

(3) 添加剤を使用したモルタルの, 材齢1日および材齢28日における圧縮強度比の結果から, 本研究で使用した材料では, どの添加剤を使用しても添加剤無添加との強度比が100%を超えており, 材齢1日以降の強度増進には悪影響を及ぼしていないことが分かった。

(4) トリイソプロパノールアミンの強度増進効果は, フェライト相の水和により発生する水酸化鉄の溶解度を高めているといわれているが, 本研究で使用したアミン類は異なる機構で強度増進していると考えられる。強度増進に最も効果があったトリエタノールアミンは, 水和発熱速のピークが, 添加剤無添加と比較すると高くなっており, C_3S もしくは C_3A の水和を促進し強度が増進したものと考えられる。しかし, ピークの大きさやピーク到達時間は, フライアッシュの種類や置換率で異なることから, 更なる検証が必要である。

(5) 最大水和発熱量は, 普通ポルトランドセメント単独調合と比較すると低い, フライアッシュ調合の添加剤無添加と比較すると, 同等もしくは高くなる傾向にあった。しかし, 添加剤の添加率を上げてても一定以上は高くならず, 添加剤の添加率と最大水和発熱速度には限界値が存在する。その限界値によって, 材齢1日強度の増進量が決定されると考えられる。

(6) トリエタノールアミンは, セメントに対する添加率が上がると水和を阻害する可能性が高くなる傾向にあった。本実験で使用した材料における材齢1日強度に対する添加率は, セメントの内割置換15%で, 粉体に対して0.04%, セメントの内割置換25%で, 粉体に対して0.06%であった。この添加率は, フライアッシュの種類ならびに置換率で変動する値であるため, 今後様々なフライアッシュにて試験を行い, 添加率の最適化を進める。

【参考文献】

- 1) E.Gartner and D.Myers: Influence of Tertiary Alkanolamines on Portland Cement Hydration, J.Am.Ceram.Soc 76, pp.1521-1529, 1993
- 2) 宮川美穂, 岩城圭介, 西村正: フライアッシュ用添加剤を使用したモルタルの強度増進効果, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第22号, 175-182, 2012年
- 3) 宮川美穂, 西村正, 岩城圭介: フライアッシュ用添加剤による初期強度増進に関する研究, 第66回セ

- メント技術大会講演要旨 2012, pp.272-273, 2012 年
- 4) 市川牧彦, 佐野奨, 小向雄人: セメントのキャラクターとトリイソプロパノールアミンによる強度増進効果の関連性, 第 50 回セメント技術大会講演要旨, pp.44-45, 1996 年
 - 5) C&C エンサイクロペディア[セメント・コンクリート化学の基礎解説], 社団法人セメント協会, pp.17-18, 1999 年
 - 6) 安藤哲也: 仕事がひろがるコンクリートの話, セメントジャーナル社, pp.55-58, 2008 年 10 月
 - 7) Ellis Gartner: CBA Processing additions for ordinary and blended Portland cements a technology update, Washington Research center July, 1996
 - 8) Paul sandberg : Use of Calorimetry to study cement-flyash hydration. ACI Spring Convention 2009
 - 9) Paul J. Sandberg and Lawrence R. Roberts, Cement-Admixture Interactions Related to Aluminate Control, Journal of ASTM International, Vol. 2, No. 6, June, 2005
 - 10) JCI-C39, セメント・コンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム 論文集 pp.15-17, 1996 年 5 月
 - 11) 石川嘉崇, 高田進治, 嵩英雄: フライアッシュ JIS II 種品の品質分布に関する調査, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, pp.1-4, 2006
 - 12) R.L. Angstadt, : Portland cement Hydration Status Report No.4, Washington Research Center, W.R.Grace & Co. 1962.

(受理: 平成 24 年 11 月 29 日)