

論文 FA コンクリートへのプレフォーム型 AE 剤の適用に関する基礎的研究

北辻政文^{*1}・青山宏昭^{*2}・小川誠一郎^{*3}

要旨：フライアッシュ(以下 FA という)は資源の有効利用および アルカリシリカ反応対策の観点から利用の拡大が期待されている。しかし、FA コンクリートは FA に含まれる未燃カーボンが AE 剤を吸着し、コンクリートの空気量を適正に管理することは難しいため、耐凍害性が低下する危険性がある。そこで本研究では、未燃カーボンの影響を受けにくいムース状のプレフォーム型 AE 剤を用いて、微細な空気泡を混入することにより、耐凍害性を高めることを試みた。研究の結果、プレフォーム型 AE 剤は FA コンクリートの気泡間隔係数を小さくすることが可能で、凍結融解作用に対し有効であることが確認された。

キーワード：FA コンクリート、プレフォーム型 AE 剤、気泡間隔係数、耐凍害性、高流動

1. はじめに

石炭火力発電所は、安定的な電力の供給源として、今後も大きな役割を担うことになるが、同時に産業副産物である石炭灰が大量に発生し、その処理が大きな問題となっている。2010 年には、わが国の石炭灰の発生量は 1000 万トンが見込まれている。石炭灰はフライアッシュ(以下 FA という)およびクリンカアッシュとして発生する。その大部分は FA であるため、FA の有効利用を進めなければならない。

FA を用いたフライアッシュセメントは、ポゾラン反応や発熱抑制効果があることから、これまでダムなどのマスコンクリートへ利用されてきた実績がある。さらに今後は、大量に発生する再生骨材や低品質な骨材の ASR 対策として期待されている¹⁾。しかし、一般構造物への利用は極めて少なく、2005 年度における FA セメントの生産量は 20 万トンを下回っている。この量は、全セメント量の 1%にも満たないものである。同じグリーン調達特定品目である高炉セメントの 1500 万トンに比べても極めて少ない量である。

FA の利用が少ない理由の一つとして、FA に含

まれる未燃カーボンの影響があげられる。未燃カーボン量は、産炭地の違いや発電時の負荷変動等によって、同一の発電所から排出した FA でも大きく変動する。このため AE 剤を練混ぜ時に投入し、連行させる現行の方法(アフターフォーム型：以下 AAE という)では FA に含まれる未燃カーボンが AE 剤を吸着し発泡作用を弱め、コンクリートの空気量を適正に管理することが難しくなる。このため、フレッシュコンクリートの性状や、耐凍害性が低下する危険性がある。

そこで本研究では、ムース状の微細な空気泡を先に生成したプレフォーム型の AE (以下 PAE という)を練混ぜ時に投入することにより、未燃カーボンの影響を低減し、耐凍害性を高めることを試みた。

2. プレフォーム型 AE 剤の生成と品質

プレフォーム型による空気の混入は充填材として用いられる気泡モルタル等では、すでに利用されている。しかし、これらの空気泡は、大きくかつ大量(30~40%)に使用されている点で、本研究の PAE とは異なる。

*1 宮城大学 食産業学部環境システム学科 助教授 博士(農学) (正会員)

*2 (株)ミルコン 技術開発室

*3 竹本油脂(株) 第 3 事業部



写真-1 PAEの生成装置

本研究で用いた気泡生成装置を写真-1に示す。装置は主として、エアーコンプレッサ部、液送り部、ミキシング部および気泡生成部からなる。気泡原液と圧縮空気は同時にミキシング部に送られ、混合後気泡生成部のフィルターを通過し、気泡が生成される。フィルターは、細かな気泡の生成が可能になるように独自の工夫がなされている。なお気泡原液はエーテル型アニオン活性剤を主成分とし、気泡膜強化剤が含有されている。

写真-2は生成された気泡とその顕微鏡写真である。100～500 μm の気泡が確認できる。また個々の気泡は数個の気泡が団粒状になって形成されている。これらの団粒気泡は練混ぜ時に分散され、より細かな独立気泡となると考えられる。

一方、PAEでは、生成された気泡が練混ぜ時に破泡しないような強固な気泡膜が必要である。そこで1000mlのメスシリンダーにPAEの気泡を充填し破泡状況を確認した。写真-3は20分および60分後のPAEの破泡状況である。20分経過後も気泡が破泡することは少なく、60分後に約1/2の体積となった。また、コンクリート中に練混ぜられた場合、大気と接する面積が少ないため、破泡量はさらに少なくなると考えられる。

3. プレフォーム型 AE 剤を用いたコンクリートの性質

実験では、PAEがコンクリートに使用できる



写真-2 PAEの泡



写真-3 破泡状況

かを確認するために、まず普通コンクリートに使用した場合のコンクリートの性状を検証し、続いてFAを用いた場合について検討した。

3.1 供試体の作製方法および試験項目

セメントは普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³）、FAはM発電所産（密度2.21 g/cm³、強熱減量2.8%）を用いた。粗骨材は最大寸法20mmの碎石（表乾密度2.68 g/cm³、吸水率0.67%、粗粒率6.73）、細骨材は陸砂（表乾密度2.60g/cm³、吸水率2.10%、粗粒率2.60）を用いた。また混和剤は水溶性コポリマーを主成分とするAE減水剤、ポリオキシエチレン系非イオン及び特殊アニオン活性剤を主成分とする普通コンクリート用AE剤、高級脂肪酸および非イオン系界面活性剤を主成分とするFA専用のAE剤、およびPAEを用いた。

普通コンクリート配合は土木用硬練りコンクリートの標準的な水セメント比55%、目標スランプ8cmとした。空気量は目的により2～5%とした。FAを用いたコンクリートでは、セメントに対するFAの置換率を質量比で10、20および30%とした。また、普通コンクリートに比べて強度が低下すると考えられたので、水結合材比は52%とした¹⁾。目標空気量は4%とした。これ

表-1 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								フレッシュコンクリートの性状	
			水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤 AD*	AE 剤		スランプ (cm)	空気量 (%)
				C	FA				AAE**	PAE		
AAE-5	55	44.7	162	295	—	802	1029	0.25	3.0	-	8.0	5.3
AAE-3.5		45.9				841		0.35	1.5	-	7.5	4.0
AAE-2		47.0				880		0.45	0.3	-	4.5	2.0
PAE-5		44.7				802		0.25	-	1.83	8.5	5.0
PAE-3.5		45.9				841		0.35	-	0.67	8.0	3.2
PAE-2		47.0				880		0.45	-	0.33	5.0	2.4
AAE-FA10	52	47.3	155	268	30	862	997	0.30	30	-	8.0	4.1
AAE-FA20		47.1		238	60	854		0.25	70	-	8.5	4.2
AAE-FA30		46.8		209	90	844		0.20	130	-	9.0	4.5
PAE-FA10		47.3		268	30	862		0.30	-	1.33	9.0	4.0
PAE-FA20		47.1		238	60	854		0.25	-	3.33	10.0	4.5
PAE-FA30		46.8		209	90	844		0.25	-	5.67	10.0	4.5

* B×%, **B×0.001%

らの配合をフレッシュコンクリートの性状試験結果とともに表-1 に示す。

練混ぜ方法は、AAE コンクリートの場合、粗骨材を除くすべての材料をミキサに投入し、30秒練混ぜ、その後粗骨材を投入し90秒練混ぜた。PAE コンクリートでは粗骨材および AE 剤を除くすべての材料をミキサに投入し、30秒練混ぜ、AE 剤を投入し、10秒練混ぜ、最後に粗骨材を投入し90秒練混ぜた。なお、PAE の気泡量は練混ぜにより約3倍の気泡群となる。

試験項目は、圧縮強度試験 (JIS A 1108 (材齢 7,28, 91 日)), 静弾性係数試験 (JIS A 1149 (材齢 28, 91 日)), リニアトラバース法 (ASTM C 457) による気泡間隔係数の測定、水銀圧入法による細孔分布の測定および凍結融解試験 (JIS A 6204 付属書 2) である。圧縮強度、静弾性係数および引張強度試験用の供試体はφ10×20cm の円柱とし、凍結融解試験用は 10×10×40cm の角柱供試体とした。脱型は打設翌日に行い、養生はすべて標準養生とした。

3.2 結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

普通コンクリートにおいては、空気量が2%の場合、ややスランプ値が小さかったが、その他のコンクリートは良好なフレッシュ性状が得られた。

図-1 にフレッシュコンクリートの空気量と

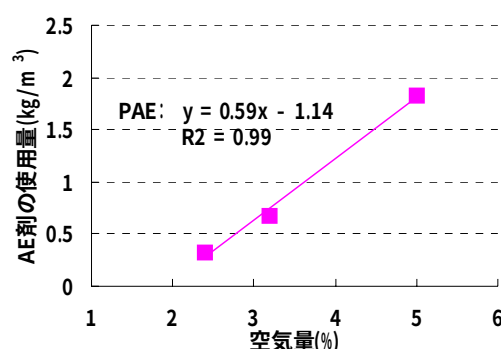


図-1 空気量と AE 剤の使用量の関係

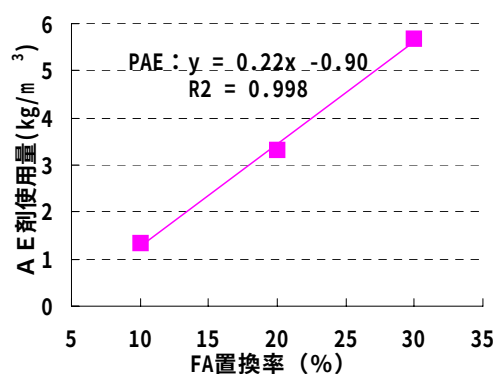


図-2 FA 置換率と AE 剤の使用量の関係

AE 剤の使用量の関係を示す。空気量 2～5%の範囲では、直線的な関係があり空気量のコントロールが容易であることがわかる。例えば、コンクリートの空気量を 1%増やすためには、PAE を 0.59kg/m³ 増やすことになる。

図-2 は空気量 4%を得るための FA 置換率と AE 剤の使用量の関係を示したものである。前図

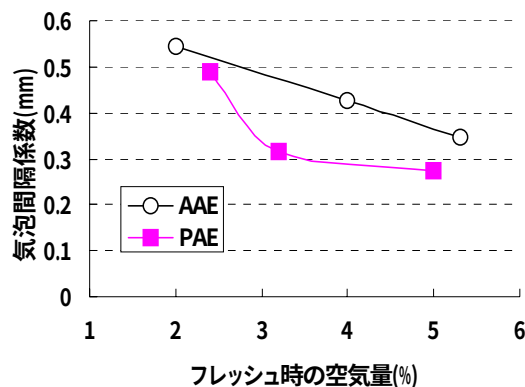


図-3 フレッシュ時の空気量と
気泡間隔係数の関係

と同様に、FA の置換率の増加に伴い AE 剤の使用量は直線的に増加している。このことから PAE は、FA に含まれる未燃カーボンによる消泡作用の影響を受けにくく、空気量のコントロールが容易であるといえる。

図-3 は普通コンクリートにおけるフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡間隔係数の関係を示したものである。この図から、空気量と同じ場合、AAE に比べて PAE コンクリートの気泡間隔係数が小さいことがわかる。これは、PAE の気泡が小さいことを意味している。このため、凍結融解抵抗性においては有効に機能すると推察される。

表-2 は FA コンクリートにおける 1000 μ m 以下の細孔分布の測定結果である。この結果からもメディアン径および平均細孔直径は、AAE に比べて PAE コンクリートが小さく、より細かな空気泡が含まれているといえる。

(2) 硬化コンクリートの強度特性

各コンクリート圧縮強度試験および静弾性係数試験結果を表-3 に示す。AAE および PAE の AE 剤の違いが強度特性に及ぼす影響は認められず、空気量および FA の置換率が同じ場合、両者は同等の強度特性を有しているといえる。

(3) 硬化コンクリートの耐凍害性

寒冷地コンクリートにおいて、耐凍害性が高いことは不可欠な条件である。そこで普通コンクリートについて凍結融解試験をおこなった。

表-2 細孔分布測定結果

試料	細孔 体積 (cm^3/g)	体積基準 メディアン径 (μm)	平均細 孔直径 (μm)
AAE-FA10	0.0851	0.116	0.037
AAE-FA20	0.0949	0.120	0.031
AAE-FA30	0.1006	0.143	0.036
PAE-FA10	0.0794	0.107	0.030
PAE-FA20	0.0972	0.108	0.026
PAE-FA30	0.1084	0.123	0.031

表-3 強度試験結果

配合名	圧縮強度 (N/mm^2)			静弾性 係数 (kN/mm^2)
	7日	28日	91日	91日
AAE-5	28.5	41.1	45.5	29.3
AAE-3.5	31.8	45.0	50.0	28.1
AAE-2	32.3	47.2	51.7	29.5
PAE-5	27.0	39.5	45.5	28.5
PAE-3.5	30.6	44.6	49.9	29.2
PAE-2	30.8	46.1	52.2	30.4
AAE-FA10	31.5	45.6	52.5	30.8
AAE-FA20	25.6	39.0	47.6	30.1
AAE-FA30	17.9	29.7	40.0	29.7
PAE-FA10	30.5	45.4	51.9	31.0
PAE-FA20	23.3	37.8	46.3	31.1
PAE-FA30	17.8	29.3	39.8	30.1

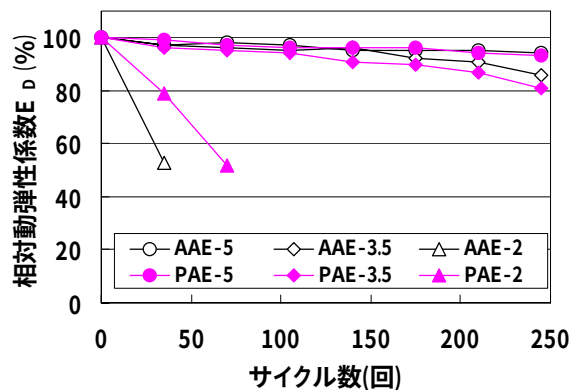


図-4 凍結融解試験結果

試験結果を図-4 に示す。なお、本試験は混和材料の凍結融解試験方法(JIS A 6204 付属書 2) に準じているので、200 サイクル終了時点において耐凍害性を判断した。

AAE および PAE コンクリートの両者において目標空気量 5 および 3.5%としたものは、200 サイクル終了時の相対動弾性係数が 85%以上であることから、これらのコンクリートの耐凍害性は大きいと判断される。とくに、PAE-3.5 のコン

表-4 コンクリート製品の基本配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	粉体 P		細骨材 S	粗骨材 G
				FA	LS		
50	51.7	170	340	85	143	809	740

クリートでは、空気量の実測値が 3.2%とやや少ない量であったが十分な耐凍害性を有している。これは前項で述べたように、気泡間隔係数が小さいことによると考えられる。しかし、空気量を 2.4%としたものは、PAE であっても耐凍害性の判断基準値である 80%を満足できなかった。

4. 高流動 FA プレキャスト製品への利用

4.1 材料および試験方法

前章までの室内試験に引き続き、コンクリート製品工場の実機を用いて高流動プレキャスト鉄筋コンクリート製品を作製し、実用の可能性について検討した。高流動コンクリートを対象とした理由は、エントラプトエアが少なくコンクリートの性状に及ぼすエントレインドエアの影響が大きいと考えたためである。また、プレキャスト製品の場合、強力なテーブルバイブレータで締め固めるため、連行した空気泡が抜けやすいことから、脱泡性状の確認がしやすいと考えたからである。

実験では工場で使用されている普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、T 発電所産 FA（密度 2.21 g/cm³、強熱減量 4.1%）、細骨材（川砂：表乾密度 2.58g/cm³、吸水率 2.47%、粗粒率 2.97）、最大寸法 20mm の碎石（表乾密度 2.62g/cm³、吸水率 1.57%、粗粒率 6.67）、石灰石微粉末（密度 2.71g/cm³）を用いた。また混和剤は前章と同様に水溶性コポリマーを主成分とする AE 減水剤、FA 専用の AE 剤(AAE)，および PAE を用いた。スランプフローは 70±10cm、空気量 2～4%とした。なお空気量の調整は混和剤量で調整し、基本配合は一定とした。基本配合を表-4 に示す。

試験項目は、テーブルバイブレータ（振動数

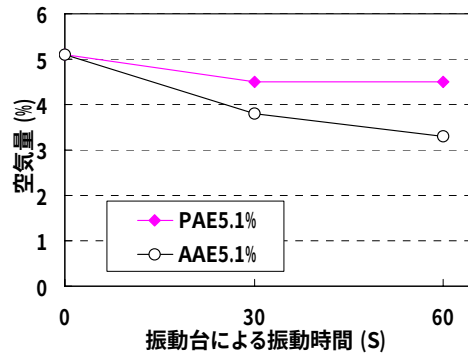


図-5 振動時間と空気量の関係

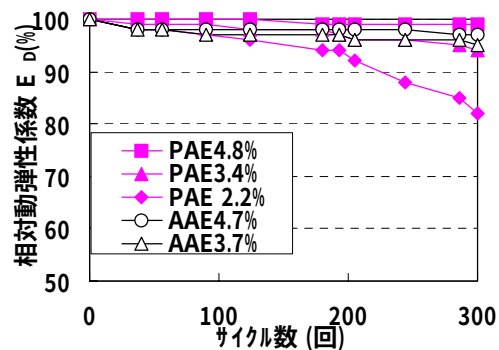


図-6 凍結融解試験結果

3000vpm、振幅 1.0mm) による脱泡性状の確認、リニアトラバース法 (ASTM C 457) による気泡間隔係数および細孔分布の測定、凍結融解試験 (JIS A 1148A 法) である。

4.2 実験結果および考察

振動時間と空気量の関係を図-5 に示す。ここで凡例の数値はフレッシュコンクリート時の空気量を示している (以下同様)。図から振動による空気量のロス PAE が小さいことがわかる。この理由は、一般に気泡径が大きいほど空気は抜けやすく、PAE の気泡が AAE の気泡径に比べて小さいことによると考えられる。

図-6 は空気量の異なるコンクリートの凍結融解試験結果である。すべてのコンクリートにおいて 300 サイクル終了時の相対動弾性係数が 80%以上であることから、いずれのコンクリートも高い耐凍害性を有している。とくに PAE2.2%のコンクリートの耐凍害性が高かったことは、注目すべきことである。すなわち、耐凍害性を有するコンクリートの空気量としては

極めて少ない空気量だからである。このコンクリートの硬化後の空気量は 2.2%で気泡間隔係数は 440 μm であり、必ずしも気泡間隔係数が小さいとはいえない。このことから耐凍害性が高かった理由として、高流動コンクリートであるためにエントラップトエアが少なく、凍害に対して有効なエントレインドエアの割合が多かったことが、および硬化の過程で空気が抜けなかったことによると考えられる。

図-7 は硬化コンクリートの気泡分布の一例である。硬化時の PAE および AAE の空気量はそれぞれ 3.3, 3.4%であった。この図から、同量の空気量であっても PAE の気泡が AAE に比べて、すべての範囲で個数が多いことがわかる。とくに 100 μm 以下の細かい空気量が異なる。なお、全体として AAE の空気量が多かったのは、細孔分布の測定時の観察によれば粗大な気泡が多く認められ、そのことの影響によると考えられる。

図-8 は前置き時間 30 分、蒸気養生温度 65 $^{\circ}\text{C}$ の過酷な条件で作製したコンクリート製品の凍結融解試験結果である。AAE4.2%のコンクリートでは、十分な空気量が確保されているにもかかわらず 140 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回り、耐凍害性が確保できなかった。これはバイブレータによる脱泡、高温養生による気泡径の膨張等により有効なエントレインドエアが確保されていなかったことによると考えられる。これに対して、PAE コンクリートは十分な耐凍害性を有している。これらのことから、PAE はコンクリート製品の製造において有効であると推察される。

また、プレキャスト製品では強度のみならず、その外観も評価対象となり、肌面が綺麗であることが要求される。PAE は微細な気泡であることから、PAE を用いたコンクリートの肌面は綺麗に仕上がっており、美観上も評価が高いと判断される。

5. まとめ

プレフォーム型 AE 剤の FA コンクリート用

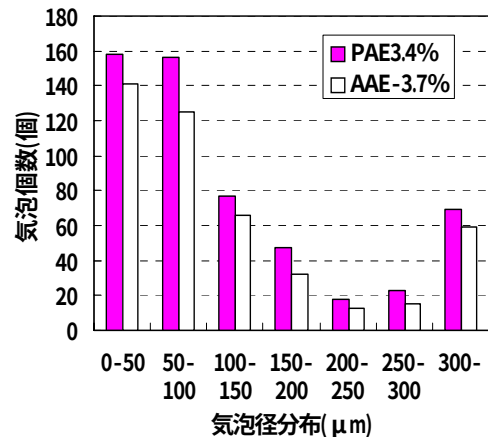


図-7 気泡径別の個数分布

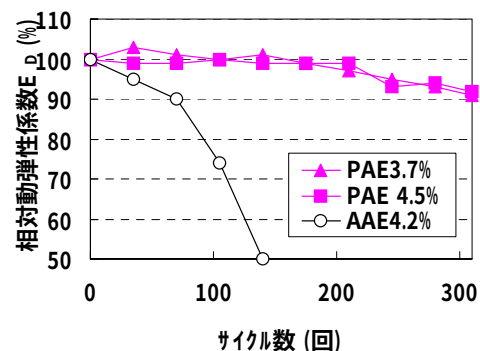


図-8 蒸気養生後凍結融解試験結果

AE 剤としての利用の可能性について検討し、以下のことが明らかとなった。

- 1) PAE はムース状の微細泡の集合体であり、普通コンクリートに使用した場合、コンクリートのフレッシュ性状、強度特性および耐凍害性は、AAE と同等かそれ以上である。
- 2) PAE は FA に含まれる未燃カーボンの影響を受けにくく、空気量のコントロールが容易である。また、PAE コンクリートの気泡間隔係数は AAE に比べて小さい。
- 3) PAE を用いた高流動 FA プレキャスト製品は、製造時の脱泡量が少なく、少ない空気量でも耐凍害性が確保できる。さらに製品の肌面も綺麗である。

参考文献

- 1) 北辻政文, 遠藤孝夫, 埴田正明, 万木正弘: 混合セメントおよび再生骨材のプレキャスト製品への利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.2, pp.589-594, 2005.7