

論文

[1174] 増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究

正会員○須藤裕司（北見工業大学大学院）

正会員 鮎田耕一（北見工業大学土木工学科）

正会員 佐原晴也（日本国土開発技術研究所）

正会員 竹下治之（日本国土開発技術研究所）

1. はじめに

通常のコンクリート材料に増粘剤と高性能減水剤を添加して、締固めが不要な程度まで高流動化したコンクリート（以下、SFコンクリートと称す）は、高い流動性と充填性、および材料分離抵抗性を有している[1][2]。SFコンクリートは、結合材、単位水量などの微妙な変動にあまり影響されず性状が安定しており、しかも生コンプラントあるいは現場においても製造可能であるという利点がある。しかし、耐凍害性が劣るとされており、SFコンクリートの実用化にあたってはこの点を明らかにする必要がある。

増粘剤を添加したコンクリートの耐凍害性に関する研究としては、水中不分離性コンクリートでは長合ら[3]、大和ら[4]、福留ら[5]によって、気中コンクリートでは大野ら[6]、著者ら[7]によって検討されている。これらの研究の結果、増粘剤を添加したコンクリートの耐凍害性の低い原因として、気泡組織の粗大化、半径数百 μ mの細孔の増加、毛細管空隙中の水の粘性の増大などが挙げられている。また、同時に気泡間隔係数が200 μ m以下だと耐凍害性が良好なこと、高炉スラグ微粉末の混合、アルミニウム粉末の添加が耐凍害性の向上に効果的であることなども述べられている。

本研究では、SFコンクリートの耐凍害性に関する基礎的な資料を得ることを目的に、消泡剤が混入されているメチルセルローズ系増粘剤と、消泡剤が無混入のメチルセルローズ系増粘剤を使用し、その添加量や空気量、その他混和剤との相性などについて検討した。

2. 消泡剤が混入されている増粘剤を用いた実験

メチルセルローズ系増粘剤は界面活性作用があり、その主成分のみをコンクリートに添加すると過剰な空気を連行する性質があるため、一般に空気量を調整するための消泡剤を用いている。ここでは、消泡剤が混入されている一般のメチルセルローズ系増粘剤を用いて、SFコンクリートの耐凍害性を検討した。

2.1 実験概要

(1) 実験計画

SFコンクリートの空気量、増粘剤の添加量、養生日数（20℃水中養生）が耐凍害性に与える影響について検討した。表-1に実験計画を示す。

表-1 実験計画

因子	水準
目標空気量	4.5, 5.5, 6.5 % ^{*1}
増粘剤添加量	W×0, 0.15, 0.3, 0.45 %
養生日数	14, 28 日

*1: SFコンクリート製造15分後の目標値

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（比重3.16）
細骨材	川砂と山砂の混合（比重2.58, 吸水率3.10%）
粗骨材	碎石（比重2.64, 吸水率0.72%）
AE減水剤	リガニンスルホン酸化合物・リオール複合体
AE剤	アキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤
増粘剤	セルローズ系水溶性高分子化合物（消泡剤混入）
高性能減水剤	高縮合トリジン系化合物

表-3 ベースコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
		W	C	S	G		
50	50.3	180	360	864	874	0.375 ^{*1}	0.004 ~ 0.006

*1: 増粘剤無添加のときは 0.25%

表-4 実験結果

記号	増粘剤 (W×%)	SFコンクリートの空気量 (%)				間隔係数 (μm)	比表面積 (cm^2/cm^3)	平均弦長 (μm)	耐久性指数	
		目 標	直 後	15分後	硬化後				14日	28日
A	0	5.5	5.3	5.4	4.0	221	250	160	89	90
B	0.3	4.5	6.0	4.1	3.7	367	156	257	6	4
C	0.3	5.5	7.5	5.4	3.2	315	194	206	25	25
D	0.3	6.5	11.0	6.2 ^{*1}	5.4	226	213	188	35	71
E	0.15	5.5	7.4	5.7 ^{*1}	5.5	205	233	172	64	—
F	0.45	5.5	10.5	5.8 ^{*2}	5.3	226	215	186	77	—

*1: SFコンクリート製造30分後の値, *2: SFコンクリート製造50分後の値

(2) 使用材料

表-2に使用材料を示す。ただし、増粘剤は空気量を所定の値とするため、主成分が同じで消泡剤量のみが違うものを3種類使用した。

(3) ベースコンクリートの配合およびSFコンクリートの製造

SFコンクリートは、目標スランプフローを60cmとし、目標スランプ12cmのベースコンクリートに増粘剤と高性能減水剤を後添加して、90秒間練り混ぜて製造した。表-3に、ベースコンクリートの配合を示す。

(4) 測定項目

フレッシュコンクリートの空気量の測定（製造直後と15～50分後に測定）、硬化コンクリートの気泡組織の測定（ASTMに規定されたリニアトラバース法で測定）、凍結融解試験（ASTM C 666 に準じた水中での急速凍結融解試験）を行った。なお、供試体の作成は空気量が所定の値となった時点でを行った。

2. 2 実験結果および考察

表-4に、空気量、硬化コンクリートの気泡組織および凍結融解試験の結果を示す。

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの空気量は15分後に所定の値になるように計画したが、D、E、Fは15分後では目標空気量より多く、その後時間の経過とともに減少し、30～50分後に目標空気量となった。

(2) 硬化コンクリート

硬化コンクリートの空気量は、SFコンクリート製造直後と比べて大幅に減少し、15～50分後の値と比べても減少する傾向がある。これは消泡剤の効果が長時間持続していることを示しており、D～Fのデータから製造後30～50分経過しないと硬化コンクリートの空気量は判断できないと言える。

図-1に、硬化コンクリートの空気量が3～4%の場合の気泡の大きさの分布を示したが、増粘剤が添加されたB、Cは、無添加のAと比べて100 μm 未満の微細な気泡が減少し、100 μm 以上の比較的大きな気泡が増加していることが分かる。また、図-2に示すように、硬化コンクリートの空気量が5%以上の場合も同様である。このように、SFコンクリートの気泡組織は若干粗大化する。

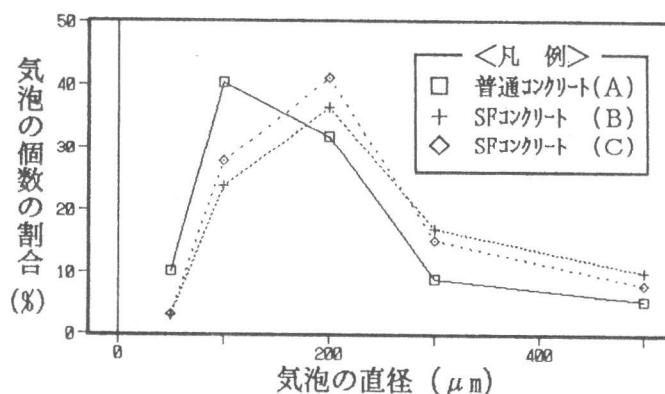


図-1 コンクリートの空気量が4%以下の場合の気泡分布

る傾向がある。これは、増粘剤で連行される気泡が比較的大きなものが多いことや、後述する実験結果からも示されるように、消泡剤がAE剤によって連行される微細な気泡も消してしまうことによるものと考えられる。

(3)凍結融解試験

14日間水中養生し、材令14日から試験を開始した供試体（A～F）の凍結融解試験の結果を図-3に、28日間水中養生し材令28日から試験を開始した供試体（A～D）の結果を図-4に示す。表-4および図-3、4から、A～Cにおいては、養生日数14日と28日の範囲では、養生日数の増加に伴う細孔構造の密化による耐凍害性の改善は認められないことが分かる。これは、ポルトランドセメントのペースト中の細孔構造が材令7日位でほぼ決定してしまい、その後の変化が少ないため[8]と考えられる。Dに関しては、28日養生の耐凍害性が大きいのにに対して14日養生では耐凍害性が小さくなっている。しかし、14日養生においても破壊の直前までE、Fと同様な挙動を示していること、他の供試体では養生日数による変化が少ないことを考慮すると、Dは本来良好な耐凍害性があると推定される。

以上から、SFコンクリートでは硬化コンクリート中の空気量が3～4%

（B、C）のときは耐凍害性が小さいが、5.5%程度（D、E、F）とすると耐凍害性が確保できると言える。しかし、表-4に示されるように消泡剤が混入された増粘剤を用いた場合には、硬化コンクリート中に5.5%程度の空気を導入するためには製造直後の空気量を8～11%にする必要があり、しかも確実に導入されたかどうかを判断するた

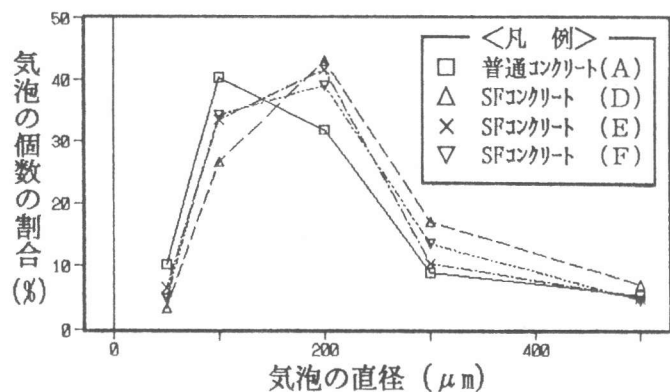


図-2 コンクリートの空気量が5%以上の場合の気泡分布

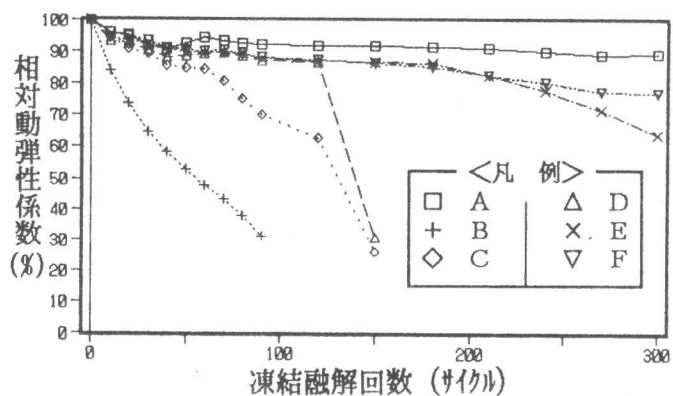


図-3 養生14日のコンクリートの耐凍害性

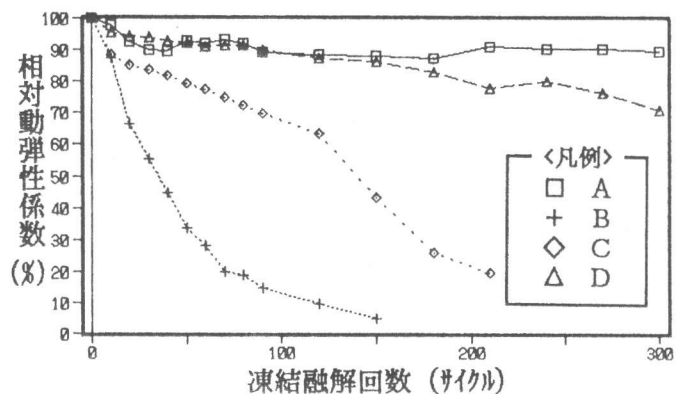


図-4 養生28日のコンクリートの耐凍害性

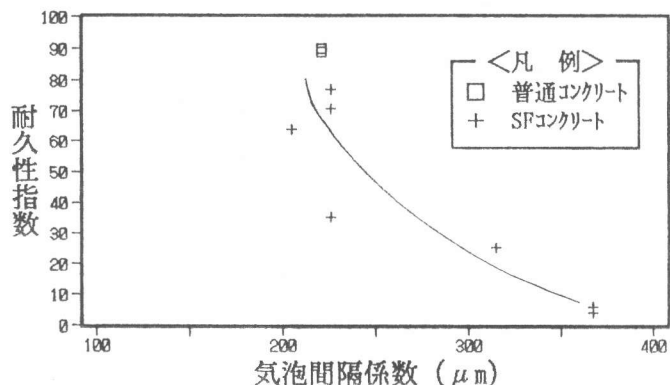


図-5 気泡間隔係数と耐凍害性

めには、製造後30～60分後に試験する必要がある等の問題点がある。

図-5に、気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。同図からSFコンクリートの場合も普通コンクリートと同様に、気泡間隔係数と耐凍害性との間には密接な関係があり、気泡間隔係数が200～220 μm 程度以下であればほぼ良好な耐凍害性が得られることが分かる。同様な結果は、水中不分離性コンクリートの研究[3][4]でも指摘されている。しかし、前述したように、SFコンクリートの気泡組織は若干粗大化する傾向があるため、所要の気泡間隔係数を得るのに必要な硬化コンクリートの空気量は、普通コンクリートに比べて増加する。本実験の範囲では、気泡間隔係数を220 μm 程度にするための空気量は、SFコンクリートでは約5.5%、普通コンクリートでは4%となっており1.5%増加している。

3. 消泡剤が無混入の増粘剤を用いた実験

2.の結果から、耐凍害性を安定的に確保するためには、消泡剤を使用しないでSFコンクリートを製造する必要があると判断された。ここでは、SFコンクリートの耐凍害性を改善するうえでの基礎的知識を得ることを目的に、消泡剤が全く混入されていない増粘剤を添加したコンクリートの気泡組織を検討した。

3.1 実験概要

(1)実験計画

消泡剤混入の有無、増粘剤の添加量およびその他の混和剤(AE減水剤、減水剤およびAE剤)がコンクリートに与える影響について検討した。表-5に実験計画を示す。

(2)使用材料およびベースコンクリートの配合

表-6に使用材料を示す。増粘剤はメチルセルロースを主成分とする消泡剤が混入されていないものを主に用いたが、一部消泡剤が混入されているものも使用した。表-7に、ベースコンクリートの配合を示す。混和剤としてAE減水剤を用いる場合は、AE剤は空気量を調整する補助AE剤として添加した。コンクリートの製造は、

2.1と同じ方法で行った。

(3)測定項目

フレッシュコンクリートの空気量の測定(コンクリート製造直後と15分後)と、硬化コンクリートの気泡組織の測定([9]の画像解析システムによる)を行った。なお、供試体の作成はSFコンクリート製造15分後に行った。

3.2 実験結果および考察

表-8に、フレッシュコンクリートの空気量と、硬化コンクリートの気泡組織の測定結果を示す。

(1)フレッシュコンクリート

消泡剤が無混入の増粘剤を添加したコンクリートは、ベースコンクリートと比べ空気量が1.5～2.0倍に増加して

表-5 実験計画

因子	水準
消泡剤	混入, 無混入
増粘剤添加量	W× 0, 0.15, 0.3, 0.5, 1.0 %
AE剤	AE ₁ , AE ₂ , AE ₃

表-6 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(比重3.16)
細骨材	川砂(比重2.63, 吸水率2.27%)
粗骨材	川砂利(比重2.66, 吸水率1.54%)
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
減水剤	ポリオール複合体
AE剤	AE ₁ :アクリルアミド化合物系陰イオン界面活性剤 AE ₂ :トリキシルキレンアルキルエーテル系アニオン界面活性剤 AE ₃ :天然樹脂酸塩
増粘剤	セルロース系水溶性高分子化合物(消泡剤無混入)
高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物

表-7 ベースコンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 or 減水剤 (C×%)	AE剤 (C×%)
		W	C	S	G		
(%)	(%)						
50	45	156	312	829	1024	0.2 ～ 0.3	0.008 ～ 0.025

表-8 実験結果

記号	増粘剤 添加量 (W×%)	AE減水剤 or 減水剤	AE剤	フレッシュコンクリートの空気量(%)			硬化コンクリートの気泡組織			
				ベース コンクリート	SFコンクリート		空気量 (%)	比表面積 (cm^2/cm^3)	間隔係数 (μm)	平均気泡径 (μm)
					直後	15分後				
a	0	AE減水剤	AE ₁	4.6	—	—	4.2	276	214	159
b	0.15	"	"	4.2	7.2	6.9	6.4	282	173	165
c	0.3	"	"	4.6	8.4	7.6	7.8	264	165	177
d	0.5	"	"	4.7	9.0	8.7	7.6	241	185	193
e	1.0	"	"	4.7	12.4 ^{*2}	11.0 ^{*2}	9.8	223	154	208
f	0.3	減水剤	"	5.0	9.2	8.4	8.2	296	150	158
g	"	"	AE ₂	4.8	8.4	7.8	6.6	307	151	153
h	"	"	AE ₃	5.5	8.8	8.4	6.5	303	156	155
i	0.3 ^{*1}	AE減水剤	AE ₁	4.5	2.6	2.0	2.0	319	255	147

*1: 消泡剤を混入した増粘剤を使用, *2: 重量法で測定

おり、増粘剤の空気連行性が表われている。しかし、消泡剤が混入されていないため、空気量の経時変化は少ない。

(2) 消泡剤の影響

図-6に、増粘剤無添加のコンクリート（普通コンクリート）、消泡剤が無混入の増粘剤および混入された増粘剤を添加したコンクリートの気泡の大きさの分布を示す。同図から、消泡剤が無混入のcは、耐凍害性の改善に有効な微細な気泡も、空気量の増加と共に同等の割合で増加していることが分かる。一方、消泡剤を混入したiは、消泡効果によって微細な気泡がベースコンクリートよりも減少している。この様に、消泡剤は増粘剤によって連行される比較的径の大きな気泡以外に、エントレインドエアも含めた微細な気泡も消去していることが分かる。

(3) 増粘剤の添加量による影響

図-7に、増粘剤（消泡剤無混入）

の添加量が、気泡の大きさの分布に与える影響を示す。同図から、増粘剤の添加量がW×0.15%, 0.3%のb, cは、添加量0.5%, 1.0%のd, eと比べ100 μm 以下の微細な気泡が多いことが分かる。すなわち、耐凍害性の改善に有効な微細な気泡を数多く連行するためには、増粘剤の添加量はW×0.3%程度以下とすると良いと言える。

(4) AE減水剤、減水剤およびAE剤の影響

図-8に、AE減水剤、減水剤およびAE剤が気泡の大きさの分布に与える影響を示す。同図から、「減水剤+AE剤」としたf, g, hは、「AE減水剤+補助AE剤」としたcに比べ100 μm 以下の微細な気泡が多くなっていることが分かる。したがって、混和剤の組み合わせを変え

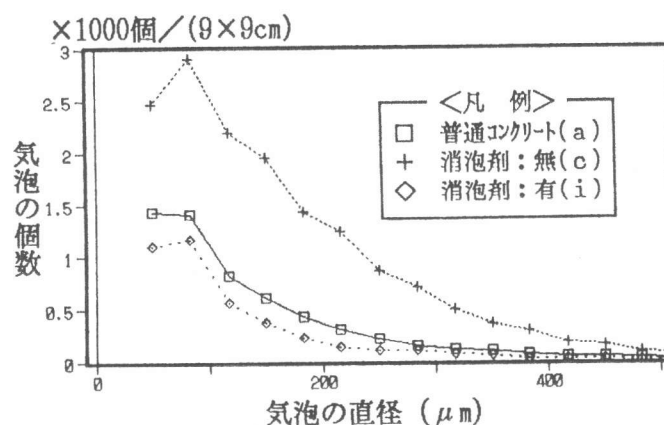


図-6 消泡剤が気泡分布に与える影響

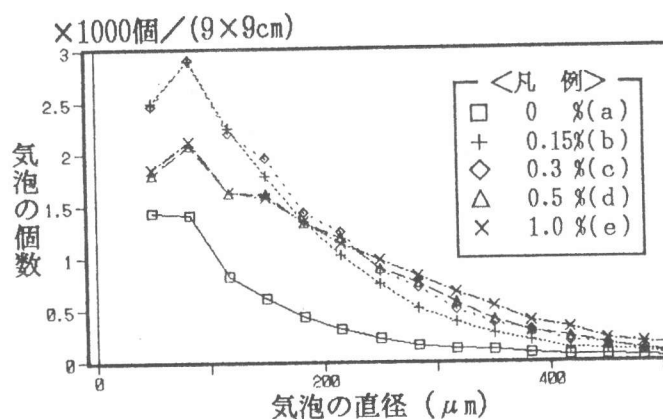


図-7 増粘剤添加量が気泡分布に与える影響

ることによって、増粘剤を添加したコンクリートの気泡組織をある程度コントロールすることができると考えられる。なお、AE剤の種類による違いは、空気量が同程度であれば、本実験で検討した範囲では大差が無いと言える。

4. まとめ

今回の実験の範囲で、次のことが明らかになった。

- (1) 消泡剤が混入されているメチルセルロース系増粘剤を添加したSFコンクリートの気泡組織は若干粗大化する傾向にある。また、SFコンクリート製造後30～60分程度経過しないと硬化コンクリートの空気量は判断できない。これらの原因は、消泡剤の作用が微細な気泡にまで及び、しかも長時間持続するためと考えられる。
- (2) 増粘剤（消泡剤混入）を添加したSFコンクリートでは、硬化コンクリートの空気量を5.5%程度にすると耐凍害性を確保できる。さらに、耐凍害性が確保されたコンクリートの気泡間隔係数を調べた結果200～220 μm 程度であった。ただし、このためにはフレッシュコンクリート製造直後の空気量を8～11%にする必要がある。
- (3) 消泡剤無混入の増粘剤を、コンクリートにW×0.3%以下の範囲で添加すると、空気量の増加とほぼ同じ割合で微細な気泡も増加する。また、「減水剤+AE剤」の組み合わせの方が「AE減水剤+補助AE剤」の組み合わせよりも、微細な気泡を数多く導入する。

【参考文献】

- 1) 竹下治之・佐原晴也・横田季彦：締固め不要な高流動コンクリートに関する基礎的研究、コンクリート工学論文集、Vol.1、No.1、pp143-153、1990.1
- 2) 佐原晴也・竹下治之・横田季彦：実構造物を対象とした締固め不要な高流動コンクリートの打設実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.291-296、1990.6
- 3) 長合友造・山本泰彦：水中不分離性コンクリートの耐凍害性に関する基礎研究、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、pp.167-174、1990.8
- 4) 大和竹史・江本幸雄・添田政司：水中不分離性コンクリートの耐凍害性、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、pp.161-166、1990.8
- 5) 福留和人・喜多達夫・宮野一也：高炉スラグ微粉末を混入した水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.685-690、1990.8
- 6) 大野俊夫・田沢雄二郎：水溶性高分子を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性、土木学会第44回年次学術講演会概要集、第5部、pp.624-625、1989.10
- 7) 須藤裕司・鮎田耕一：分離低減剤添加コンクリートの空隙構造と耐凍害性、土木学会第46回年次学術講演会概要集、第5部、pp.410-411、1991.9
- 8) 後藤誠史・大門正機：フレッシュペースト中へのイオンの拡散、セメント技術年報、Vol.39、pp.53-56、1985.5
- 9) 鮎田耕一・桜井宏・田辺寛一郎：コンクリート気泡組織の照度差による画像解析、土木学会論文集、第420号/V-13、pp.81-86、1990.8

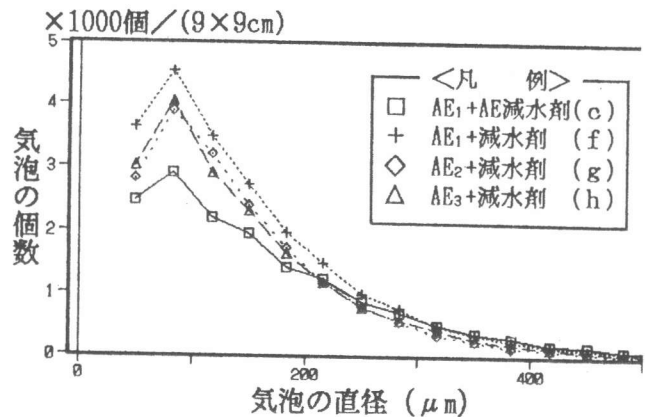


図-8 その他の混和剤が気泡分布に与える影響