

# [71] 乾燥収縮を低減する混和剤を用いたコンクリートの基礎的性状

正会員 ○杉山 雅 (藤沢薬品, 筑波コンクリート研究所)  
 正会員 田中 恭一 (藤沢薬品, 筑波コンクリート研究所)  
 正会員 佐久田昌治 (竹中工務店, 技術研究所 )  
 正会員 浦野 敏晴 (竹中工務店, 技術研究所 )

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、しばしば構造物にひびわれを発生させる原因となるため、これまでは主に材料、施工、設計面など工学的見地から改善が図られてきた。これに対し最近物理科学的手法によるものとして、乾燥収縮そのものを抑制する混和剤（以下、収縮低減剤）が開発され、これを用いた改善が試みられている。一方、コンクリートの凍結融解耐久性を改善する等の目的で空気を連行させたAEコンクリートは、対応するプレーンコンクリートに比べ単位水量が減じられているにもかかわらず乾燥収縮の面でほとんど寄与せず、却って収縮を増大する傾向を示すこともあると報告<sup>1)</sup>されている。すなわち、乾燥収縮を抑える観点からは必ずしもコンクリート中に空気を連行させる必要は無いと考えられる。

そこで従来の概念にとらわれず収縮低減作用を有し、しかもコンクリート中に空気を連行しなくても凍結融解耐久性を有する混和剤となり得る化合物について広く検討を行った結果、水に不溶のグリコールエーテル系の誘導体に極めて興味ある性能を見出した。今回これを用いたコンクリートの乾燥収縮と凍結融解耐久性を中心に、コンクリートの基礎的性状について報告する。

## 2. 実験方法

### 1) 使用材料およびコンクリートの調査

セメントは普通ポルトランドセメント 3 銘柄を等量混合し (ρ 3.16), 細骨材は富士川川砂 (ρ 2.63, FM 2.73), 粗骨材は笠間砕石 (最大寸法 20 mm, ρ 2.66) を使用した。またセメントの種類別の試験区では、フライアッシュ B 種 (ρ 2.92), 高炉 B 種 (ρ 3.01), 中庸熟 (ρ 3.19) を用いた。収縮低減剤は今開発した F 剤 (グリコールエーテル系の化合物を主成分とする比重 1.04 の水不溶性の液体) と比較対照品として A および B (低級アルコールエーテル誘導体) を用いた。添加方法は通常後添加とし、F 剤試験区はプレーンコンクリートに、比較対照品 A, B 試験区では AE 減水コンクリートに後添加した。なお強度については同時添加についても行った。調査を表 1 に示す。使用した AE 減水剤はリグニン系のものである。凝結およびブリージングの測定は、それぞれ ASTM C 403, JIS A 1123 に従った。

表 1. 調 合 表

添加法	コークレットの種類	W/C (%)	S/a (%)	W (Kg)	C* (Kg)	所 要	
						S1 (cm)	A <sub>1</sub> F (%)
後 添 加	プレーン	50	43	206	412	18	1
		60	45	198	330		
		70	48	198	283		
	AE 減水	60	45	173	288	8	1
		50	41	184	368	18	4
		60	44	170	283		
70	46	176	251				
同時	プレーン	64	50	206	320	18	1

\*普通ポルトランドセメント (同時、後添加ともに F 剤は単位水量の一部とした)

### 2) 乾燥収縮

試験体 (10×10×40cm) を 20℃, 湿度 60% の条件で放置し, JIS A 1129 に従い, コンパレータ法で測定した。

### 3) 凍結融解

試験体 (10×10×40cm) を材令 2 週を水中養生 (20℃) し, 20℃, 湿度 60% の条件で 0, 2, 4 および 7 日間放置後 ASTM C 666 に従い水中凍結水中融解試験を行った。試験は共振装置を用いたたわみ振動法により測定される相対動弾性係数および耐久性指数で評価した。

ここに, D.F. : 供試体の耐久性指数 (%)

P : 凍結融解 N サイクルにおける相対動弾性係数 (%)

N : P が特定の値 (60%) となるまでのサイクル数または試験を終了するサイクル数 (回)

M : 試験を終わらせる特定のサイクル数 (300 回)

$$D. F. = \frac{P \cdot N}{M} \times 100 (\%),$$

試験体の乾燥程度は主に湿潤率 (%) で把握し, これは飽水状態の供試体に含まれる水量 (試験体の全空腔量) に対する試験時の供試体に含まれる水量 (湿潤空腔量) の比とした。これらの値は, 凍結融解試験開始前に湿潤率測定用供試体の重量を測定し, 重量変化しなくなるまで炉乾燥 (105℃) して絶乾重量を求め, さらにこの供試体を容器に入れ真空ポンプで 1 日間脱気 (2~3 mmHg) 後 1 か月間吸水させて飽水重量を求めることで算出した。

4) 気泡間隔係数

ASTM C 457に従い、リニアトラバース法で測定した。

3. 結果および考察

1) フレッシュコンクリートの性状と強度

表2に収縮低減剤を添加したフレッシュコンクリートの性状と強度を示す。F剤を添加すると添加方法にかかわらず、空気量はほとんど変化せず、むしろ1%以下に小さくなる。対照品AやBがかなりの凝結遅延を示すのに比較し、F剤は添加量にかかわらず凝結に影響しない。また、強度はいずれの水セメント比でも、いずれの添加方法でも無添加と同様の強度を示すことなどから、このF剤はセメントの水和反応に対し、何等の悪影響を与えないことがわかる。

2) 乾燥収縮

各々対応する同スランブのAEコンクリートを対照に、プレーンコンクリートにF剤を1、2および4%添加したスランブ8cmのコンクリートの乾燥収縮を図1に、スランブ18cmの場合を図2に示す。また同時に試験した対照品の結果を図3に示す。

スランブ8および18cmの場合ともにF剤を添加したコンクリートは添加量の増大に伴い乾燥収縮は著しく低減しており、対照品Bとほぼ同程度である。

表2. フレッシュコンクリートの性状と強度

添加法	収縮低減剤 Cx %	W/C (%)	練上り		凝結		ブリーディング量 cc/cm	強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )			
			S1 (cm)	A1 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		1週	4週	3ヵ月	
後添加	F	0	18.0	1.5	/	/	/	310	494	487	
		2	18.0	0.8	/	/	/	306	438	502	
		4	17.5	0.9	/	/	/	304	429	504	
	F	60	0	18.0	1.2	6-22	8-36	0.27	236	355	411
			1	18.0	1.0	6-22	8-50	0.26	230	364	410
			2	19.0	0.9	6-40	9-02	0.28	232	346	409
		70	0	18.0	1.5	/	/	/	176	275	335
			2	17.5	1.2	/	/	/	177	280	335
			4	18.0	1.0	/	/	/	183	283	337
	同時	F	0	18.0	5.0	7-44	10-02	0.21	230	337	391
			A 4	19.0	5.0	8-48	12-16	0.26	/	/	/
			B 4	19.0	4.5	8-36	12-44	0.29	/	/	/
同時	F	0	18.0	1.4	/	/	/	194	312	366	
		2	18.0	1.2	/	/	/	200	312	363	
		4	18.0	1.0	/	/	/	199	311	365	

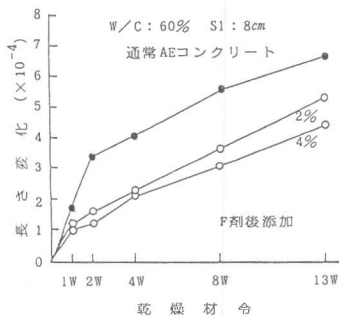


図1. スランブ8cmの乾燥収縮

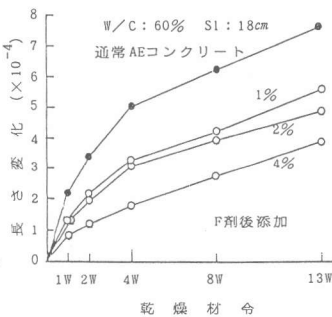


図2. スランブ18cmの乾燥収縮

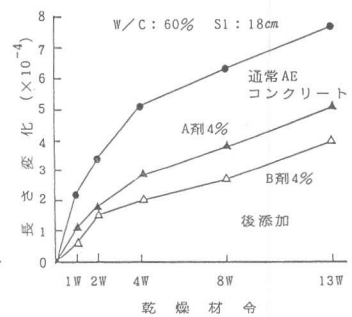


図3. 比較対照収縮低減剤の乾燥収縮

乾燥材令3ヵ月におけるF剤の添加効果を通常のAE減水コンクリートに対する比率で図4に示す。スランブ18cmでは水セメント比が小さいほど同一添加量での収縮低減効果大きい。水セメント比が60%と同一条件では、スランブ8および18cmの同一添加量における収縮低減効果はほぼ同等であり、各々1%添加で25%、2%添加で30%、4%添加で45%程度、収縮が抑えられた。

表3に水セメント比60%、スランブ18cmの一定条件でセメントの種類を変えた時の収縮率を無添加に対する比率で示す。

セメントの種類によりF剤の収縮低減効果に多少の相異はみられるが、図4の普通ポルトランドセメントの場合と同様、4%添加で40%程度の収縮低減の効果がみられた。

表4に普通セメントで水セメント比60%、スランブ18cmの乾燥収縮測定試験体の重量減少率を示す。F剤の添加量にかかわらず重量減少率は無添加と差はほとんど認められない。従ってF剤の収縮低減効果は水分の逸散を防止することによるものではない

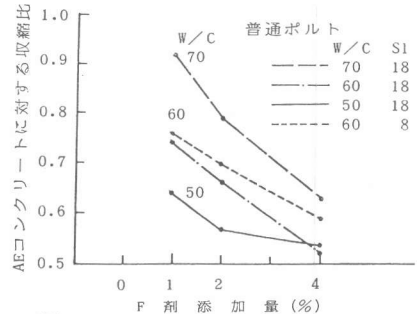


図4. AEコンクリートに対する添加効果 (3ヵ月)

表3. 無添加に対する収縮率 (3ヵ月)

FC1610 添加法	セメント種類	W/C (%)	S/a (%)	W (Kg)	C (Kg)	比収縮率
4% 後添加	フライッシュ B	60	45	183	305	0.56
	高炉B			189	315	0.65
	中庸熟			189	315	0.61

ことが明らかであり、このことは既往の研究<sup>2)</sup>にみられる傾向と同様である。

現在、このF剤の乾燥収縮低減の機構について検討中である。

### 3) 凍結融解

図5はF剤を1, 2 および 4%後添加したコンクリート試験体を水中養生2週後、0, 2, 4 および 7日間20℃、湿度60%空气中に放置した後、水中凍結水中融解試験を行った結果である。

F剤添加コンクリートは試験体打設時の空気量が0.9~1.0であるにもかかわらず、無添加に比べ添加量が増えるに従い凍結融解耐久性が改善されている。このことは乾燥処理0日でも認められ、さらに添加量が2%および4%試験区では2日以上乾燥により飛躍的に耐久性が向上している。一方、無添加は乾燥に伴って耐久性がやや増すがその程度は不完全で、7日間乾燥させても約100サイクルで破壊した。

図6は対照品Aを後添加した場合の凍結融解の結果であるが、試験体作製時の練り上り時の空気量が5.0%連行されているにもかかわらず比較的早いサイクルで劣化し、また乾燥処理後もF剤で認められた程度の耐久性の向上効果は認められなかった。

コンクリートを乾燥させることによりある程度凍結融解耐久性が改善されることは報告<sup>3)</sup>されているが、このことでF剤添加コンクリートで認められる軽微な乾燥による飛躍的向上を十分に説明することはできない。

乾燥を与えたコンクリートの含水程度と耐久性指数の関係を図7にまとめた。

湿潤率はコンクリート内部に存在する全空隙量に対して水が占める割合を表すのでコンクリートの空気量が異なっても含水程度または乾燥程度を相互比較できると考えられる。この結果からF剤を2%添加し、湿潤率が80%以下の乾燥程度であれば耐久性指数80以上の高い耐久性を示すことがわかる。

一方、既往の研究によると20℃、湿度85%の湿空中で乾燥が平衡に達したコンクリートの湿潤率は約50%、AEコンクリートが材令2年まで水中で養生された状態は湿潤率約90%に相当すると報告<sup>4)</sup>されており、また構造体コンクリートの各部位はつねに乾燥し、材令4週における外壁でも容積含水率で16%（湿潤率では75%と推定される）に乾燥していると報告<sup>5)</sup>されている。これらを考慮すると今回の実験で確認された湿潤率80%は構造体コンクリートでは比較的含水程度の高い状態であり、F剤を実構造物に適用した場合も十分に凍結融解耐久性を示すものと考えられる。

次に硬化コンクリートの気泡組織を知るため気泡間隔係数を測定した結果を図8に示す。

F剤、4%添加(S1=18cm)の硬化コンクリート中には、

表4. 重量の変化

W/C	S1	F剤	重量減少率 (%)				
			1W	2W	4W	8W	3M
60	18	0%	1.78	2.14	2.46	2.79	3.04
		1%	1.70	2.04	2.36	2.69	2.96
		2%	1.74	2.09	2.42	2.75	3.01
		4%	1.64	1.94	2.24	2.55	2.80

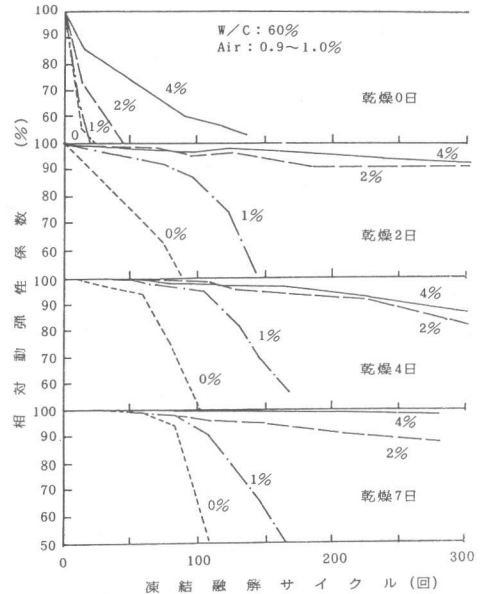


図5. F剤添加コンクリートの凍結融解耐久性

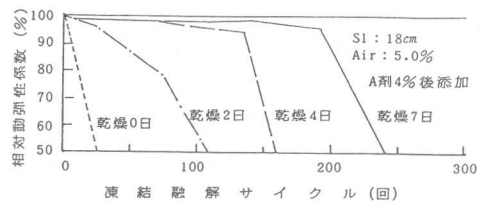


図6. 対照品A剤の凍結融解耐久性

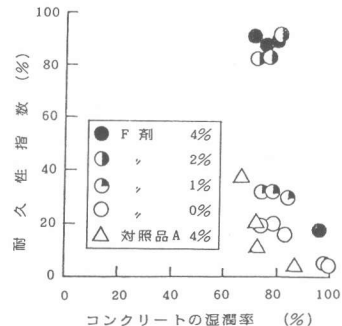


図7. 湿潤率と耐久性指数の関係

打設時ほぼ同程度の空気量(≒1%)であった無添加と比べ気泡分布の面で著しい相異が認められる。

すなわち無添加比べ、気泡の個数が13倍に増え、しかもその気泡がいずれも直径150 $\mu$ m以下の微細なものの(平均気泡径119 $\mu$ m)に限られており、凍結融解耐久性の指標と見られる気泡間隔係数でも194 $\mu$ mという極わだった特徴を示すことである。さらに空気量4.5%を連行させたAEコンクリートの平均気泡径(270 $\mu$ m)、気泡個数(590個)、気泡間隔係数(227 $\mu$ m)との比較からも、F剤を添加した硬化コンクリート中に極めて微細な孔が多数存在することがうかがえる。

これら顕微鏡下で観察された孔は、気泡として測定しているが水に不溶のF剤が硬化コンクリート中で油滴として残留していたものが気泡組織測定用の供試体を作成する切断、研磨の過程で脱落し生成した空隙とも考えられる。いずれにせよ、この微細な気泡が凍結融解耐久性向上に大きく寄与しているものと考えられ、この気泡特性と孔の形成過程も含めF剤の作用機構について検討中である。

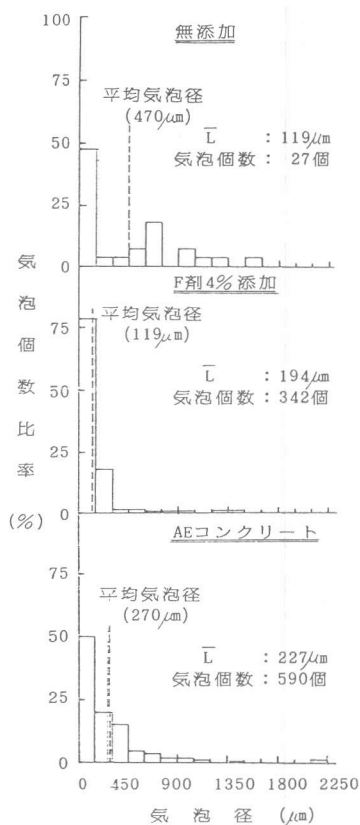
#### 4. まとめ

乾燥収縮の低減作用を有し、かつコンクリート中に空気を連行させないでも凍結融解耐久性を有する混和剤F剤を開発し評価した結果、次の知見が得られた。

- ① F剤は同時添加、後添加いずれでも空気連行性は無く、また凝結遅延性は認められない。
- ② 強度は無添加とほぼ同様である。
- ③ 乾燥収縮はその使用量に応じて低減し、硬練りコンクリートやセメントの種類が異なる場合にも同じ傾向である。
- ④ F剤を用いたコンクリートの耐凍害性は、軽微の乾燥により著しく向上する。この乾燥条件は、例えば供試体に2日以上乾燥を与えるものであり、これをコンクリート内部に存在する全空隙量に対する割合で表すと80%以下であることがわかった。この程度の含水量は構造体コンクリートでは比較的含水程度の高い状態と考えられる。
- ⑤ F剤を4%用いたコンクリートの空気量は、フレッシュの状態を圧力法で測定すると0.9%であるが硬化後の断面から平均気泡径119 $\mu$ mの微細な空隙(あるいは油滴の跡)が多数確認され、気泡間隔係数も194 $\mu$ mとAEコンクリートより小さいことがわかった。よってこれら微細な空隙が凍結融解耐久性の向上に何らかの寄与をしたものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) たとえば高英雄 他: 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和51, PP262.
- 2) 富田六郎 他: セメント技術年報37 昭和58, PP386~389.
- 3) たとえば鎌田英治 他: セメントコンクリートNo.383 1979 PP8~15.  
長谷川寿夫 他: 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和51, PP139~140.
- 4) 杉山 雅: 北海道大学学位論文(1981), PP37.
- 5) 中根 淳 他: 日本建築学会大会学術講演梗概集 昭和59, PP511~512.



	W/C (%)	スラッシュ (cm)	硬化コンクリート	
			フレッシュ空気量 (%)	気泡間隔係数
ブレーン			1.2	1197
F剤4%	60	18	0.9	194
AE減水			5.0	227

図8. F剤の気泡特性