

## 論文

## [1007] 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐久性に関する検討

正会員 ○藤原 浩 巳 (日本セメント(株)中央研究所)  
 正会員 富田 六 郎 (日本セメント(株)中央研究所)  
 正会員 下 山 善 秀 (日本セメント(株)中央研究所)

## 1. まえがき

低級アルコールアルキレンオキシド付加物を主成分とする収縮低減剤(以下単に低減剤と呼ぶ)を使用したコンクリートは、乾燥収縮が小さくなり収縮ひびわれの防止に対しても効果的であることがこれまでの研究で明らかになっている。<sup>1)</sup>

しかし耐久性に関しては、低減剤を使用したコンクリートにAE剤を添加して空気を連行しても、コンクリートが完全に飽水した状態ではASTM-C666に準拠した水中急速凍結融解試験を行うと、十分な耐久性を示さないという報告<sup>2)</sup>があるが、まだ十分な検討が行われていない。

本研究は、低減剤を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について、空気量、湿潤状態、添加量等の種々の条件を変えて試験を行い検討を加え、かつ実際の寒冷な気候条件下に5年間暴露した供試体の評価結果について報告するものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験計画

本研究は、次の4シリーズの実験からなる。

実験Ⅰ：低減剤を混和したコンクリートの空気量及び気泡間隔係数と凍結融解抵抗性の関係を検討した。

実験Ⅱ：低減剤の混和量及びコンクリートの湿潤状態と凍結融解抵抗性の関係を検討した。

実験Ⅲ：コンクリートの凍結時に発生する最大間隙水水圧に影響を与える諸要因(飽水度、毛細管間隙水の粘性係数、気泡組織)と凍結融解抵抗性の関係を検討した。

実験Ⅳ：低減剤を混和したコンクリートの寒冷地での暴露試験。

## 2.2 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：富士川産川砂(表乾比重2.64, F.M.2.69, 実験Ⅰ,Ⅱ)

富士川産川砂と木更津産山砂の8:2の割合の混合砂(表乾比重2.62, F.M.2.84, 実験Ⅲ)

我朗産砕砂と大野産川砂の1:1混合砂(表乾比重2.64, F.M.2.76, 実験Ⅳ)

粗骨材：青梅産碎石(最大寸法20mm, 表乾比重2.65, 実験Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ)

我朗産碎石(最大寸法20mm, 表乾比重2.70, 実験Ⅳ)

低減剤：A剤(低級アルコールアルキレンオキシド付加物、比重0.98 粘度20cps(20℃) 実験Ⅰ)

B剤(低級アルコールアルキレンオキシド付加物、比重0.99 粘度16cps(20℃))

減水剤：C剤(リグニンスルホン酸塩系, 実験Ⅰ)

AE助剤：D剤(アルキルアリルスルホン酸塩, 実験Ⅰ,Ⅱ,Ⅳ)

AE減水剤：E剤(リグニンスルホン酸塩ポリオール複合体系, 実験Ⅱ,Ⅳ)

## 2.3 配合

各実験におけるコンクリートの配合を表-1に示す。実験Ⅰでは空気量を変化させ

たことに伴うスランプの変動は無視し、実験ⅢはA E剤を用いないコンクリート（以下NON-A Eコンクリートと呼ぶ）である。

## 2.4 養生

各実験において凍結融解試験前の供試体湿潤状態を変えるため養生を次の方法で行った。

- (1) 実験Ⅰ．材令28日迄20℃の水中養生を継続。
- (2) 実験Ⅱ．
  - a) 標準養生：材令14日迄20℃の水中養生
  - b) 促進養生後水中：所要強度を早期に得るため、脱型後60℃で10時間保持の蒸気養生を2回行った後、材令7日迄20℃の水中養生。
  - c) 促進養生後気中：b)と同様の蒸気養生を行った後、20℃、RH60%の恒温恒湿室で材令7日迄気中養生
- (3) 実験Ⅲ．
  - a) 標準養生：材令14日迄20℃の水中養生
  - b) 標準養生後気中：材令14日迄20℃の水中養生を行った後、20℃、RH60%の恒温恒湿室で7日間気中養生
- (4) 実験Ⅳ．材令6日迄20℃の水中養生を継続。

表-1 コンクリートの配合

実験番号	コンクリートの配合						
	低減剤	低減剤量 (kg/m <sup>3</sup> )	他の混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	単セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水トセ比 メン (%)
Ⅰ	A	12.0	C	18	2.0	302	60.0
	B	7.5	D	12	8.0	300	55.0
Ⅱ	B	0 3.0	E・D	18	5.5	300	57.3
		7.5					55.0
						330	50.0
Ⅲ	B	0 3.4 6.9 13.8	-	18	-	344	60.0
Ⅳ	B	0 6.0 7.5	E・D	10	5.5	330	44.5

## 2.5 試験方法

- (1) 凍結融解（実験Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）：供試体は10×10×40cmの角柱を用い、ASTM C666に従い水中急速凍結融解試験を行った。動弾性係数の測定は共振装置により行い耐久性指数で評価した。
- (2) 硬化コンクリートの気泡組織：φ10×20cmの円柱供試体を用い供試体の上部5cmおよび下部5cmの位置から打設方向と水平に切り出し、研磨した面をリニアトラバース法に準じて気泡間隔係数及び平均気泡半径を測定した。
- (3) 飽水度及び湿潤度：飽水度とはコンクリートの空隙に含まれる水量の飽水状態での水量に対する比としたものである。凍結融解試験開始時の飽水度を求めるため、10×10×40cmの供試体を用いて下式により算出した。なお、飽水状態とは20℃の水中に浸漬し、一定重量になった時の状態で、空気泡は水で満たされないものと仮定した。また絶乾状態とは110℃の炉乾燥をして一定重量となった時の状態とした。

$$S = \frac{W_b - W_d}{W_s - W_d}$$

S：供試体の飽水度  
 W<sub>b</sub>：凍結融解試験開始前の状態の供試体重量 (kg)  
 W<sub>s</sub>：飽水状態の供試体重量 (kg)  
 W<sub>d</sub>：絶乾状態の供試体重量 (kg)

また飽水度を簡便に推測する目的で単に試験開始時の重量だけを用いて下式により湿潤度を算出した。

$$\text{湿潤度 } S.D = \frac{W_b}{W_s} \times 100 (\%)$$

- (4) 毛細管間隙水の粘性係数：混練直後のコンクリートを5mmのふるいでウェットスクリーニングして得られたモルタルを加圧して抽出水を採取、ろ過した後、そのろ液

を凝固点(約 $-2.0^{\circ}\text{C}$ )近くまで冷却した状態で回転粘度計により測定した。  
 (5) 屋外暴露試験(実験IV):  $\phi 15 \times 30$  cmの円柱供試体を作成して北海道K町に暴露し、動弾性係数と供試体重量の測定を継続して行っている。温度履歴は $30 \times 30 \times 30$  cm供試体中央部に熱電対を埋設し測定を行っている。なお、供試体の重量は前日までの天候の影響をできるだけ排除するため1日間 $20^{\circ}\text{C}$ の水中に浸漬し、ほぼ安定した後に測定し、この値と飽水状態の重量とから湿潤度を求めた。

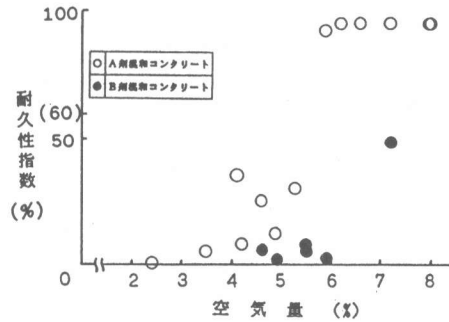


図-1 空気量と耐久性指数の関係

### 3. 実験結果及び検討

(1) 実験 I. 図-1 に空気量と耐久性指数の関係を示す。A剤を用いたコンクリートの場合、通常のAEコンクリートが十分な耐久性を示す3~4%の空気量では耐久性が劣るものの、それより1~2%多い5%以上で耐久性指数は急速に改善され、十分な耐久性を示した。すなわち、A剤を用いたコンクリートは通常のAEコンクリートより若干空気量を多く連行することにより十分な耐久性の得られることが分かった。一方、B剤を用いたコンクリートは5~7%まで空気量を増加させても十分な耐久性が得られていない。

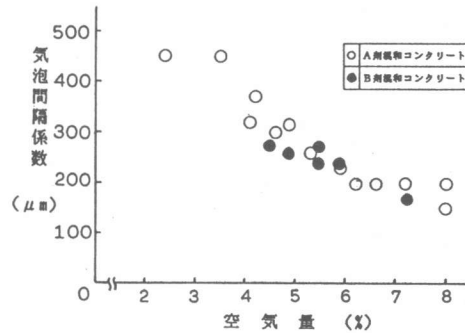


図-2 空気量と気泡間隔係数の関係

A剤およびB剤を用いたフレッシュコンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を図-2に示す。3~4%の空気量における気泡間隔係数は、通常のAEコンクリートの場合に比べて大きく、気泡が粗大であることを示している。しかし、空気量が5%を超えると気泡間隔係数は $200 \mu\text{m}$ 程度となり、A剤を用いたコンクリートの耐久性向上の理由はこのことで説明できる。一方、B剤を用いたコンクリートにおいてもA剤を用いた場合と同様な空気量と気泡間隔係数の関係を示すが耐久性は全般に低い。このことは、凍結によるコンクリート内部における応力発生メカニズムが従来のコンクリートとは異なる可能性を示唆しており、その原因としてA剤とB剤の物性(例えば粘性係数、分子量等)の違いが影響している可能性が考えられた。

表-2 実験IIの結果

B剤混和量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	メントセ量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	養生方法	フレッシュコンクリートの性状		湿潤度 (%)	耐久性 (%)
			空気量 (%)	スランプ (cm)		
0	300	a	4.1	17.0	100.0	97.3
3.0		a	5.5	19.0	100.0	32.0
		b			99.6	80.9
7.5		a	5.4	16.5	100.0	3.6
		b			99.5	17.2
		c			98.2	42.4
	a	5.3	13.5	100.0	7.2	
	b			99.6	36.8	
c		98.1	68.0			

(2) 実験Ⅱ．B剤を用いたコンクリートにおいて、試験開始時の供試体の湿潤度を変え耐久性を検討した。また、あわせてB剤の混和量および単位セメント量の影響も検討した。その結果の概要を表-2に示す。いずれの条件においてもコンクリートの湿潤度がわずかに低下するだけで耐久性は大幅に向上する傾向が見られる。また、同一条件においてB剤の混和量を少なくした場合および単位セメント量を多くした場合にも改善が認められる。このように低減剤を用いたコンクリートの場合、湿潤度が耐久性に及ぼす影響は非常に大きいことがわかった。またB剤の使用量の違いによる耐久性の差は、両者の空気量に差がないことから、毛細管間隙水の物理的な性状の差によると推測される。

(3) 実験Ⅲ．低減剤の使用量および湿潤度の影響を詳細に検討することを目的にNON-AEコンクリートとして試験を行った。また、ここでは飽水度、毛細管間隙水の粘性係数、気泡分布等を比較し検討

している。それらの測定結果を表-3に、また凍結融解試験結果を図-3に示す。コンクリートの湿潤度の差は明確で、いずれのB剤混和量においても湿潤度が1%程度下がることにより耐久性が顕著に向上することがわかったが、混和量の影響については明確な傾向は認められなかった。

パワーズは凍結融解作用によるコンクリートの劣化を毛細管間隙水の凍結によって生じる水圧がセメントゲルの引張強度より大きくなることによって生ずると説明しており、発生水圧に影響を及ぼす要因として毛細管間隙水の粘性係数、セメントペーストの飽水度、凍結速度、気泡組織等をあげ次式を提案している<sup>3)</sup>。この式をもとに各種要因の効果についてさらに検討を加えた。

$$P_{\max} = \frac{\eta}{3} \left(1.09 - \frac{1}{S}\right) \frac{u R}{K} \phi(L)$$

$P_{\max}$  : 毛細管間隙水の凍結によって生じる最大水圧 (dyn/cm<sup>2</sup>)

$\eta$  : 毛細管間隙水の粘性係数 (poise)

表-3 実験Ⅲの測定値

B 剤 混和量 (kg/m <sup>3</sup> )	湿潤度 (%)	飽水度 (S)	間隙水 粘性係数 ( $\eta$ ) (poise)	気 泡 組 織			試験前 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
				空気量 (%)	気泡間 隔係数 ( $\mu$ m)	平均気 泡半径 ( $\mu$ m)	
0	100.0	1.000	0.020	1.3	612	167	1.30
	99.0	0.850					
3.4	100.0	1.000	0.025	3.1	335	152	0.42
	99.2	0.891					
6.9	100.0	1.000	0.024	3.0	386	172	0.56
	99.2	0.883					
13.8	100.0	1.000	0.026	2.7	382	164	0.56
	99.1	0.871					

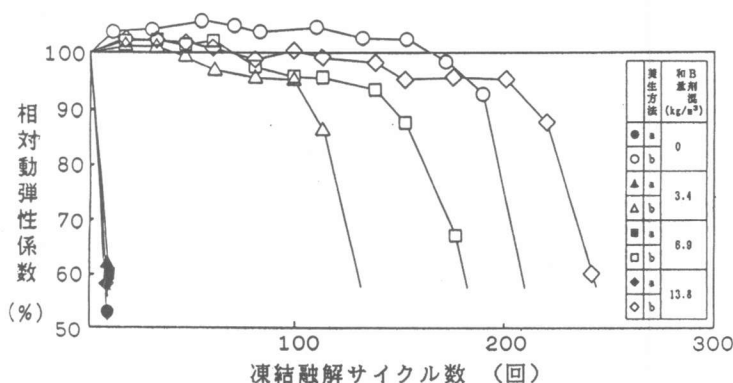


図-3 実験Ⅲの凍結融解試験結果

S : セメントペーストの飽水度  
 u R : 凍結速度 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>sec)  
 K : セメントペーストの透水性に関する係数  
 $\phi(L)$  : 気泡の大きさと影響範囲に関する係数

$$\phi(L) = \frac{L^3}{r_b} + \frac{3L^3}{2} \quad (\text{cm})$$

$r_b$  : 気泡の半径 (cm)  
 L : 気泡の影響範囲 (cm)

本試験における供試体の含水の状態を炉乾燥で求めた飽水度を用いて評価すると0.85~0.89であった。これらの値はコンクリート内部の間隙水に水圧を発生させる限界飽水度<sup>4)</sup>(0.917)と比較するとわずかに小さく、凍結融解作用を受けている初期には内部応力は生じにくい状況にあったものと考えられる。このため湿潤度による耐久性の差が大きく現われたと考えられる。しかし、コンクリートは徐々に吸水するため限界飽水度を越すようになり、凍結融解サイクルの進行とともに劣化し始めるものと考えられる。なお、混和量にかかわらずB剤の混和により毛細管間隙水の粘性係数は増加するが、この影響は飽水度の差と比べて小さく、本実験では耐久性の差となって現われなかったと思われる。また、気泡組織に関する値で、平均気泡半径は供試体間に差が見られず、気泡間隔係数はB剤無混和のコンクリートが大きくなっているが、これは空気量の差が原因と思われる。

しかし、NON-A Eコンクリートであるのでこの差には大きな意味がなく、また今回の実験では耐久性の差となって現われるとは考えにくい。したがって、凍結速度と透水性に関する係数にまだ検討の余地を残すものの耐久性へ影響を及ぼした要因は粘性係数以上に飽水度が卓越していたと考えられる。

飽水度の低い条件ではB剤の混和量の違いにより耐久性に若干の差が見られるが、この理由は吸水の速度差あるいは飽水度の差と思われる。図-4に絶乾状態のコンクリートの吸

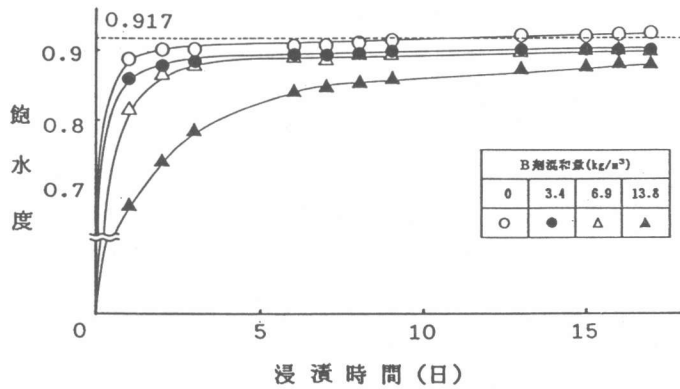


図-4 飽水度の経時変化

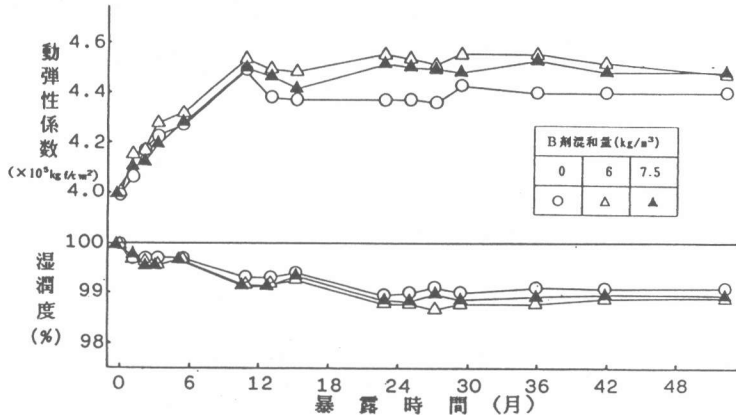


図-5 屋外暴露試験結果

水速度を示すが、B剤の混和量が多いものでは特に初期における吸水速度が遅くなる  
ことが認められ、わずかではあるが耐久性の差となって現われたものと考えられる。  
(4) 実験Ⅳ、図-5に寒冷地の屋外に暴露したコンクリートの動弾性係数及び湿潤度  
の変化を示す。コンクリートの受けた凍結融解サイクル数を2年間のコンクリート温  
度の実測データから推測すると約450回(そのうち凍結温度が $-10^{\circ}\text{C}$ 以下の回数は50  
回)である。暴露初期から1年にかけて材令の経過に伴う動弾性係数の増加が見られ、  
その後、劣化の傾向は全く現われておらず十分に耐久である。またコンクリートの  
湿潤度は99%程度と飽水度で約0.9の値で推移している。なお、単位セメント量 $300\text{kg}/\text{m}^3$ ( $W/C=50\%$ )  
の条件あるいは空気量4.5(%)の条件のコンクリートにも同様の傾向が見られている。

したがって、ASTM法による水中急速凍結融解試験では耐久ではなかったB剤  
を用いたコンクリートは、実際の自然環境においては飽水度が低下することや、凍結  
速度が1日1サイクルとASTM法に比べ緩慢なことから、耐久的なコンクリートを得  
ることは十分に可能であると考えられることができる。

#### 4. まとめ

乾燥収縮低減効果を有するA剤およびB剤を混和したコンクリートの凍結融解抵抗  
性について、主に飽水状態、空気量等の影響を中心に検討を加えた。凍結融解抵抗性  
の機構について、まだ解明すべき検討課題は多く残されているが、本実験の範囲では  
次のことが認められた。

① A剤を混和したコンクリートは、空気量を5%以上とすると気泡間隔係数が $200\mu\text{m}$   
程度となり、飽水状態でも十分な耐久性を示すが、B剤を混和したコンクリート  
は空気量を5~6%としても耐久ではない。これは、B剤を混和したコンクリートの  
毛細管間隙水の凍結融解時における諸物性が一般のコンクリートとは異なるためと  
推測される。

② B剤を混和したAEコンクリートは、飽水度の低下や、混和量の減少に従い耐久  
性指数は増加する。これら耐久性に影響を及ぼす要因のなかでは飽水度の影響が卓越  
しており、限界飽水度以下であればB剤を混和しても耐久性指数は大きくなる。

③ NON-AEコンクリートでも飽水度が低い場合、耐久性はかなり向上する。またB  
剤の混和量の違いにより耐久性指数に若干差が見られるが、これは吸水速度の差等に  
起因していると思われる。特に混和量が多い場合、吸水速度が遅くなり飽水度の増加  
を遅らせると考えられる。

④ B剤を混和したコンクリートを、寒冷地の屋外に5年間暴露した結果、約450回  
の凍結融解サイクルを受けたが劣化傾向を示さなかった。自然環境は常にコンクリ  
ートを飽水させる状態ではなく、また、凍結融解速度も緩慢なためASTM法で耐久  
ではないと判断されるコンクリートも十分な耐久性を示すと思われる。

#### 参考文献

- 1) 富田六郎他「収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮及びびびわれに関する  
実験研究」第5回コンクリート工学年次講演会論文集1983年
- 2) 杉山 雅他「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」  
第8回コンクリート工学年次講演会論文集1986年
- 3) Powers, T.C., Proc. Highw. Res. Bd [39], 1949
- 4) 岩崎訓明「コンクリートの特性」共立出版 P158