

論文

[1063] 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐久性に関する研究

正会員 ○藤原 浩巳 (日本セメント中央研究所)

正会員 富田 六郎 (日本セメント中央研究所)

正会員 下山 善秀 (日本セメント中央研究所)

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、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が¹⁾、その耐久性についてはAE剤を併用し十分と思われる量の空気を連行しても、飽水状態で水中急速凍結融解を繰り返すJIS A6204 付属書2による試験方法では十分な耐久性を示さないことが、これまでの研究で明らかにされている²⁾³⁾。

しかし、実際のコンクリート構造物は自然環境においては少なからず乾燥することから、これを想定し、若干の乾燥を受けた状態で水中急速凍結融解試験を行うと、低減剤混和コンクリートは無混和コンクリートに比べ吸水性が低く限界飽水度以上になりにくいため耐久性は大きく向上することが確認されている³⁾。従って、実際の自然環境では耐久性は問題とならないことが考えられる。

本研究は、単位セメント量、低減剤量、空気量等の配合条件を変えたコンクリートを実際の寒冷地(北海道 T市およびK町)に5年間暴露した結果と、飽水状態において実際の気候条件を想定した室内凍結融解試験を行った結果について報告を行うものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメント : 普通ポルトランドセメント (比重 3.16)

低減剤 : 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℃))

AE減水剤 : リグニンスルホン酸塩ポリオール複合体系

AE助剤 : アルキルアリルスルホン酸塩

粗骨材 : T 市 ; 静内川産砂利 (最大寸法25mm、表乾比重2.76)

K 町 ; 我朗産碎石 (最大寸法20mm、表乾比重2.70)

室内実験 ; 青梅産碎石 (最大寸法20mm、表乾比重2.65)

細骨材 : T 市 ; 浜厚真産川砂 (表乾比重2.70、FM2.77)

K 町 ; 我朗産砕砂と大野産川砂の1:1混合砂 (表乾比重2.64、FM2.76)

室内実験 ; 富士川産川砂 (表乾比重2.64、FM2.69)

2.2 配合

配合条件およびその組合せを表-1に示す。基本的な配合条件を配合No◎とし、低減剤量、単位セメント量および空気量の条件を変えて配合設計を行った。

2.3 練り混ぜ

暴露試験を行う2ヶ所では傾胴式ミキサーを用い、室内実験では強制練りミキサーで混練を行った。

2. 4 試験項目および方法

(1) 暴露試験

暴露開始前の基準としてφ10×20cm円柱供試体を用い JIS A 1108に準じた圧縮強度試験と、10×10×40cm角柱供試体を用い、曲げ強度および切片圧縮強度を JIS A 1106 および JIS A 1107に準じて行った。なお養生は材令28日までの20℃水中養生とした。また暴露用の供試体は温度履歴測定用に30×30×30cm供試体、その他の試験用には10×10×40cm角柱供試体を用い、材令7日まで20℃水中養生を行なった後、暴露を開始した。暴露方法は図-1に示すように地面から20cm以上離し、打設面を上にして屋外に暴露した。これらの供試体を用いて5年間の暴露期間において以下の試験を行なった。

① 温度履歴

供試体の中心部に熱電対を埋設し、温度履歴を測定した。

② 強度試験 (T市)

暴露後5年経過した供試体を1日20℃の水中に置いた後、曲げ強度および切片圧縮強度を前記と同様の方法で測定した。

③ 動弾性係数 (K町)

暴露開始より経時的に供試体の動弾性係数を1日水中浸漬後、JIS A 1127に準じて撓み振動により測定した。

④ 湿潤度 (T市、K町)

コンクリートの飽水度を推測するため、暴露開始時の飽水状態の供試体重量を基準とし、経時的に重量を測定し下式により湿潤度を算出した。なお、重量の測定も強度試験および動弾性係数の測定同様に、前日までの天候の影響をできるだけ取り除くため1日間20℃の水中に浸漬し、ほぼ安定した後に行った。

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

W_s : 飽水状態の供試体重量

W_b : 暴露中の供試体重量

⑤ 硬化コンクリートの気泡組織 (T市)

供試体の打設面より2.5cmおよび7.5cmの位置で打設面と水平に切り出し、研磨した面をASTM C457に従い、リニアトラバース法で空気量および気泡間隔係数を測定した。また、測定された弦長の分布よりspektorの方法を用いて、単位体積当りの気泡直径による個数分布を算出した⁴⁾。

⑥ 細孔径分布 (T市)

暴露した供試体の表層部分と内部について、水銀圧入式ポロシメーターにより細孔径分布を求めた。

表-1 配合条件と組合せ

配合 No.	低減 剤量 (kg/ m ³)	セメント 量 (kg/ m ³)	空気 量 (%)	スラン プ (cm)
①	0	300	4.5	12.0
②	0	330	5.5	
③	6.0	330	5.5	
④	7.5	300	5.5	
⑤	7.5	330	4.5	
⑥	7.5	330	5.5	
⑦	7.5	330	6.5	
⑧	7.5	360	5.5	

■ : 基準配合と条件の異なるもの

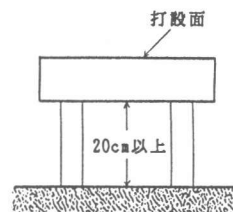


図-1 暴露方法

(2)室内凍結融解試験

配合No⑤と⑥において10×10×40cm角柱供試体を用い、材令14日まで20℃水中養生を行なった後、水を満たした容器内に供試体を入れ、1日1サイクルで凍結融解作用を与えた。凍結融解温度は可変式恒温槽の内部気温を自然環境に近い状態で変化させることにより凍結時最低温度を供試体中心部で-

18℃、融解時最高温度を5℃となるように調節した。耐久性の評価は、一定のサイクル数ごとに撓み振動法で動弾性係数を測定し、相対動弾性係数で行った。

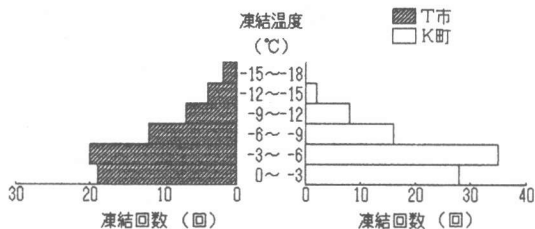


図-2 1年間の凍結融解回数と凍結温度

3. 実験結果および考察

3.1 暴露試験結果

図-2にT市およびK町の1年間の凍結融解回数とその時の凍結温度を示す。これにより一冬に受ける凍結融解回数はT市で約70回、K町で約90回であることがわかった。

次に表-2に暴露実験における配合結果、フレッシュコンクリートの性状および硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の測定結果を示す。T市暴露のフレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量を比較すると、硬化コンクリートの空気量が2~4%減少している。このため気泡間隔係数も一般に耐久的といわれる200μm程度を大きく上回る値となっており、凍結融解作用に対する抵抗性を示さないと推測された。これらの気泡組織について、その気泡径分布を図-3に示す。低減剤を混和しないコンクリートの気泡径分布は、100μm以下の微細な気泡が最も多く分布しているが、低減剤を混和すると微細な気泡が減少し、やや粗大な気泡組織となる傾向が見られる。

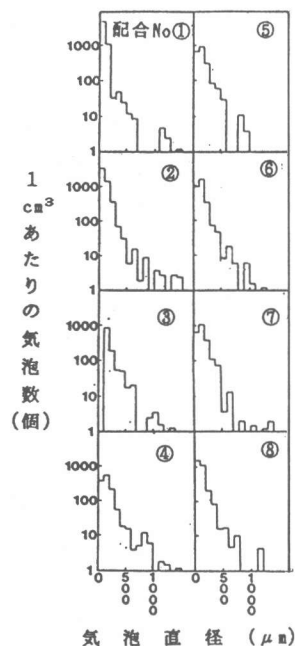


図-3 1cm³あたりの気泡直径による個数分布

表-2 配合、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状

配合 No.	K 町										T 市									
	フレッシュコンクリート					硬化コンクリート					フレッシュコンクリート					硬化コンクリート				
	単位 水量	水比	細骨 材比	スラ ンプ	空気 量	温度	φ10 ×20	10×10×40	σ _{ces}	σ _{bes}	単位 水量	水比	細骨 材比	スラ ンプ	空気 量	温度	φ10 ×20	10×10×40	空気 量	気泡 間隔 係数
	(kg/m³)	(%)	(%)	(cm)	(%)	(℃)	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(kg/m³)	(%)	(%)	(cm)	(%)	(℃)	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(μm)
①	150	50.0	48	8.5	4.9	19.5	411	57.0	438	158	52.7	45	11.5	4.4	18.0	325	51.7	443	2.8	390
②	150	45.5	44	12.5	5.2	17.5	448	68.5	489	158	47.5	43	10.5	5.5	18.0	408	54.2	438	3.5	351
③	150	45.5	44	9.0	5.1	18.5	442	80.8	468	158	47.5	43	12.5	5.3	17.0	347	51.8	451	2.5	528
④	150	50.0	45	13.5	5.3	18.0	368	49.6	413	150	50.0	44	10.5	5.3	18.5	348	48.9	449	2.4	565
⑤	150	45.5	45	11.0	4.0	18.0	435	84.8	515	158	47.5	44	11.0	4.4	17.0	403	55.1	452	2.8	438
⑥	150	45.5	44	11.0	5.2	18.0	418	55.7	451	153	48.4	43	11.5	5.7	18.0	340	51.5	418	3.0	384
⑦	150	45.5	43	14.0	6.2	18.5	407	58.9	421	150	45.5	42	12.5	7.0	18.0	348	51.4	394	2.8	408
⑧	150	41.7	43	13.5	5.4	19.0	436	82.5	498	153	42.5	42	12.0	5.1	17.5	380	53.8	464	2.7	435

一般に気泡の直径は、外界の圧と気泡の内圧および液の表面張力と次の式の関係がある。

$$(P - P_o) = \frac{4\gamma}{101.33 \times R}$$

γ : 表面張力(dyne/cm) P : 気泡の内圧(atm)
 R : 気泡直径(μ m) P_o : 外界の圧(1atm)

この関係より表面張力と気泡直径は比例関係にあり、表面張力が小さくなればより微細な気泡組織となると考えられる⁵⁾。一般に低減剤はコンクリート中のキャピラリー間隙水の表面張力を下げることが知られており、当然混練水の表面張力も低下していると考えられる。しかし、その気泡組織は粗大化しており前記の式とは相反する結果となっている。これは低減剤による表面張力低下の効果により、混練中の気泡は非常に微細に粉碎されるが、微細になればなるほど気泡の内圧が高まるために、溶けて大きな泡の中へ拡散していき、その結果大きな泡を更に拡大する効果を生み、粗大な気泡組織になったものと推測される。しかし、この現象の原因については不明な点が多く今後の検討を要する。

しかし、これらの凍結融解抵抗性にとって負の要因も暴露供試体の強度低下となつては現われなかった。T市暴露供試体の強度試験結果を図-4、5および6に示す。低減剤無混和のコンクリートは、暴露により圧縮強度が若干低下しているが、低減剤混和コンクリートはいずれも強度の増進を示しており、十分な耐久性を示している。このことは、図-7に示したK町に暴露した供試体の動弾性係数の経時変化についても同様といえる。圧縮強度が低減剤を混和することにより、無混和コンクリートのように低下しなかった原因としては、乾燥収縮の低減によるコンクリート内部の応力緩和が考えられるが、曲げ強度にはこのような現象が認められず、これだけでは説明できない。また、セメント量および空気量の差によつての暴露後の強度の差は、明確な傾向として現われていない。

次に図-8、9および10にこれらの

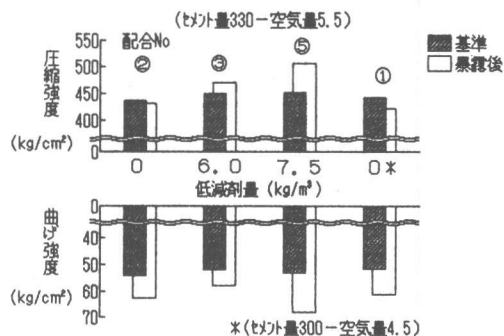


図-4 低減剤量の差による暴露前後の強度

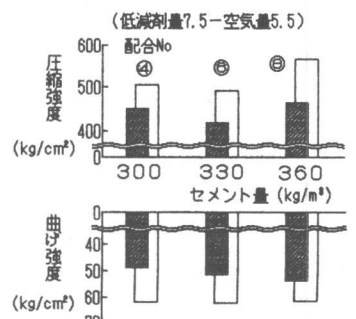


図-5 セメント量の差による暴露前後の強度

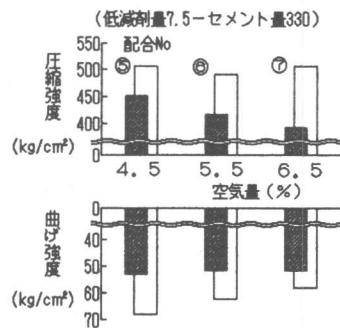


図-6 空気量の差による暴露前後の強度

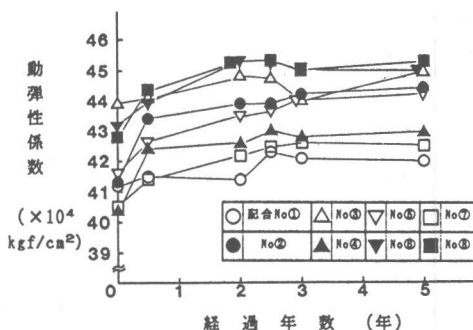


図-7 K町暴露供試体の動弾性係数の経時変化

暴露供試体の表層および内部の細孔量とその分布を示す。低減剤混和コンクリートは無混和のものに比べやや細孔量が減少する傾向が見られ、水和がより進んでいると考えられる。これは低減剤の混和により水の表面張力が低下し、セメント粒子間に浸滲しやすくなったためと推察され、このことも長期強度増進の原因のひとつと思われる。

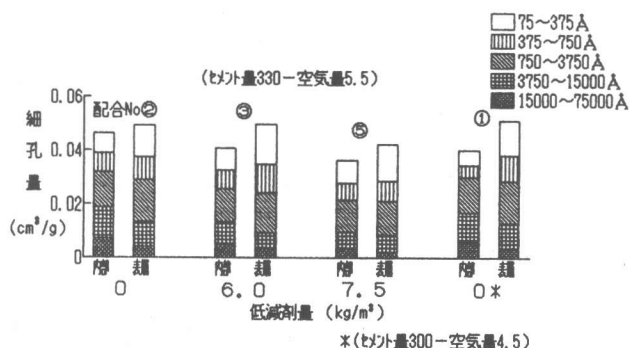


図-8 低減剤量の差による細孔量の変化

低減剤を混和したコンクリートの耐久性は、飽水度の影響が卓越していることは既に報告したが³⁾、今回の実験においても飽水度を推測するため湿潤度を測定した。その結果を図-11、12に示す。いずれの供試体も、凍結による間隙水圧を発生させる限界飽水度と推測される湿潤度99.3~99.4%³⁾を下回っており、このことが十分な耐久性を示した原因と考えられる。また、低減剤を混和したコンクリートは無混和コンクリートと比べ、一般に湿潤度が低い傾向が認められる。これは一度若干の乾燥を受けた低減剤混和コンクリートは無混和のものより吸水性が低いことを示しており、耐久性はむしろ高いと思われる。

3.2 室内凍結融解試験結果

表-3に供試体としたコンクリートの性状を示し、図-13に1日1サイクルの凍結融解試験の結果を示す。300サイクルまでの結果であるが、飽水状態にあっても全く劣化の傾向を示さなかった。これはJISによる試験方

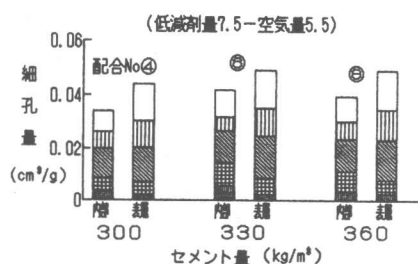


図-9 セメント量の差による細孔量の変化

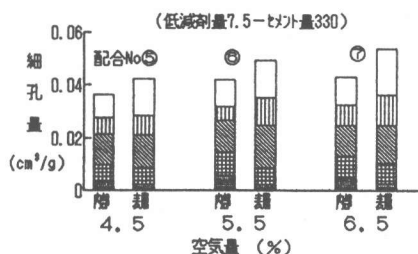


図-10 空気量の差による細孔量の変化

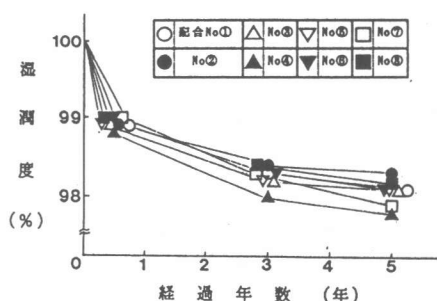


図-11 T市暴露供試体の湿潤度の経時変化

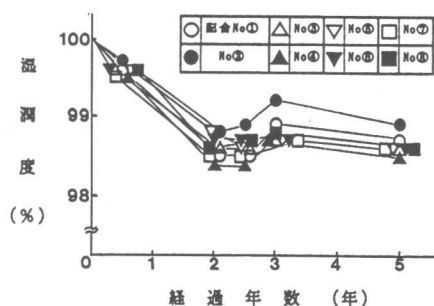


図-12 K町暴露供試体の湿潤度の経時変化

法が1サイクル3～4時間であるのに対し、今回の実験では24時間と非常に周期が大きくなっており、それに従い凍結速度が小さくなったためと思われる。凍結時に発生する間隙水水圧は凍結速度に比例しており、劣化の危険性はかなり低減される。このことより低減剤を混和したコンクリートは飽水状態であっても実際の自然環境程度の温度変化による凍結融解作用に対して十分耐久的であると考えられ、よって寒冷地にも十分な適用性を持つと思われる。

4. まとめ

本実験において低減剤を混和したコンクリートを実際の寒冷地環境に暴露し、その耐久性について検討を行うとともに、

飽水状態における1日1サイクルの凍結融解試験を行い自然界における凍結融解環境への適用性についての検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1)低減剤をコンクリートに混和すると気泡組織がやや粗大化する傾向がある。これは低減剤により混練水の表面張力が大きく低下するためと思われる。

(2)実際の寒冷環境に低減剤混和コンクリートを暴露した場合には十分な耐久性を示し、むしろ無混和のコンクリートよりも強度は増進している傾向が認められる。この原因としては低減剤の混和によりコンクリートの吸水性が低下したこと、乾燥収縮の減少による内部応力の低下および表面張力の低下による水和の進展等が考えられる。

(3)飽水状態においても1日1サイクル程度の凍結速度では低減剤混和コンクリートは十分な耐久性を示す。

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ひ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)藤原浩巳 他「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」第10回コンクリート工学年次講演会論文集1988年
- 4)A.G.Spektor「Analysis of Distribution of Spherical Particles in Non-Transparent Structures」Zavod.Lab.16(2):173(1950)
- 5)R.C.Mielenz, V-ISCC, Part IV, Sec.1 TOKYO(1968)

表-3 配合、フレッシュおよび硬化コンクリートの性状

配合 No.	室内試験								
	単位 水量 (kg/ cm ³)	水 セメント 比 (%)	細骨 材比 (%)	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート		
				スランプ (kg/ cm ³)	空気 量 (%)	温度 (℃)	$\phi 10 \times 20$ $\sigma_{c1.4}$ (kg/ cm ²)	空気 量 (%)	気泡 間隔 係数 (μm)
⑤	169	51.2	44	11.5	4.8	22.0	370	3.7	233
⑥	164	49.7	43	15.5	5.8	22.0	335	4.1	236

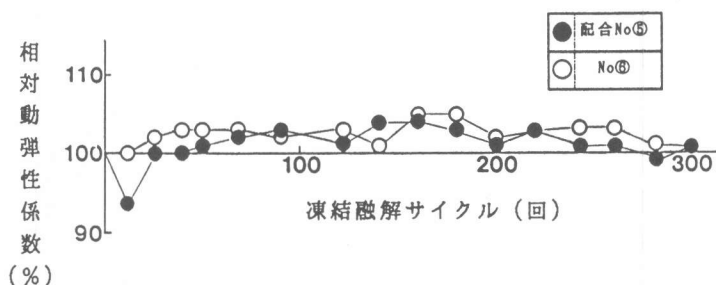


図-13 1日1サイクルの凍結融解試験結果