

論文 収縮低減剤を用いたコンクリートの耐凍害性を確保する AE 剤の検討

張友海*1・藤原忠司*2・小山田哲也*3・張英華*4

要旨：収縮低減剤を用いたコンクリートは，耐凍害性に劣ると指摘されている。その主な理由は，AE 剤による気泡の連行が収縮低減剤によって阻害されるためと考えられ，収縮低減剤の影響を受けにくい AE 剤の開発が問題解決のひとつの手段となり得る。本研究では，開発途上の AE 剤を対象に，その有効性を検討した。その結果，この AE 剤は微細な気泡を多数連行する性質を有し，気泡の保持性にも優れており，収縮低減剤と組み合わせても，収縮低減剤の種類や空気量によっては，優れた耐凍害性を確保できることが判明した。収縮低減剤の弱点を解決できる混和剤として，この AE 剤は有用であると考えられる。

キーワード：収縮低減剤，耐凍害性，AE 剤，気泡組織，気泡間隔係数，乾燥収縮

1. はじめに

収縮低減剤は，コンクリートの乾燥収縮を低減するために用いられるが，副的な作用として耐凍害性を損なわせるとの指摘があり¹⁾，寒冷地においては，この混和剤の使用が控えられているようである。コンクリートの乾燥収縮が問題視されている今日，収縮低減剤に対する期待が高まっており，この混和剤を用いても耐凍害性を確保できる方法の確立が望まれる。

筆者らの実験²⁾によれば，収縮低減剤は AE 剤の働きを阻害し，その結果，コンクリートの耐凍害性を損ねると推察された。そのため，耐凍害性を確保するためには，収縮低減剤の影響を受けにくい AE 剤の開発がひとつの手段となり得る。本研究では，耐凍害性のさらなる向上を目指して開発中の AE 剤を対象とし，収縮低減剤と組み合わせた場合のコンクリートの耐凍害性を調べ，収縮低減剤の弱点を解決できるかを検討した。また，乾燥収縮についても検討している。

2. 実験概要

2.1 使用材料

対象とした AE 剤は，特殊アルキルリン酸エステル系の開発途上のものであり，市販はされていない。ただし，これを用い，フレッシュコンクリートの目標空気量を 3% とした凍結融解試験では，市販品に比べ，相対的に優れた耐凍害性を示すとの結果が既に得られている。ここでは，この AE 剤を収縮低減剤と組み合わせた場合の耐凍害性を調べる。効果を明確にするため，市販品のアルキル系 AE 剤を用いた場合も検討し，比較する。市販品については AE-1，開発品については AE-2 の記号を用いる

こととする。

収縮低減剤としては，表 - 1 に示す 3 種類を対象にした。いずれも市販品であり，それぞれに主成分が異なる。SR-1 および SR-2 は空気連行性を有し，SR-3 には消泡作用があるとされている。収縮低減剤の使用量は，セメントに対する質量割合であり，それぞれのメーカーが推奨する標準値とした。

セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³），細骨材には川砂（表乾密度：2.66g/cm³）および粗骨材には碎石（表乾密度：2.90g/cm³）を用いた。

2.2 配合

フレッシュコンクリートの目標空気量は，4.5% と 6% の 2 水準とし，いずれも，許容差は±0.5% とした。空気量

表 - 1 使用した収縮低減剤

記号	主成分	使用量 (C×%)
SR-1	低級アルコールアルキレン オキシド付加物	2.0
SR-2	ポリエーテル誘導体	2.0
SR-3	グリコールエーテル系	1.5

表 - 2 コンクリートの配合 (空気量 4.5%)

記号	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
AE-1,AE-2	50	48	175	350	854	1008
SR-1			177	354	850	1004
SR-2			170	340	864	1021
SR-3			170	340	864	1021

*1 岩手大学大学院 工学研究科生産開発工学専攻 修(工) (正会員)

*2 岩手大学 工学部建設環境工学科教授 工博 (正会員)

*3 岩手大学 工学部建設環境工学科助教 博(工) (正会員)

*4 中国大連理工大学 土木水利学院准教授 博(工) (海外会員)

4.5%の場合の配合を表 - 2 に示す。フレッシュコンクリートのスランブを $8 \pm 1.5\text{cm}$ としたが、AE 剤のみを使用した AE-1 および AE-2 と同一配合でスランブの許容差内に収まった。配合 No. の SR-1 とは、AE 剤と収縮低減剤 SR-1 を組み合わせた配合であり、AE-1 および AE-2 と組み合わせても、同一配合で目標とするスランブを得ている。SR-2 および SR-3 についても同様である。ただし、用いた収縮低減剤のうち、SR-2 および SR-3 には減水作用があるためか、目標とする流動性を得るのに必要な単位水量は相対的に小さくなっている。

なお、空気量 6% の場合は、空気量 4.5% と同じ水セメント比および細骨材率とし、さらに単位ペースト量も同じにして、空気量が増える分は、骨材を減じて調節した。その結果、スランブは 11cm 程度と流動性が増したが、条件による差は小さかった。

2.3 実験方法

凍結融解試験は JIS A 1148 の A 法（水中凍結融解試験方法）に準拠して行った。供試体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱であり、JIS A 1138 によって作成した。材齢 28 日まで水中養生した後、凍結融解試験を開始し、30 サイクル毎に、動弾性係数と質量を測定した。

コンクリートの乾燥収縮試験は、凍結融解試験と同じ材齢で開始し、温度 20°C 、相対湿度 60% における長さ変化をダイヤルゲージ式コンパレータで乾燥 13 週まで測定した。用いた供試体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱である。

気泡組織は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体を用いて、打設面と垂直に 2cm の厚さに切り取り、研磨した後、ASTM C 457 に準拠し、リニアトラバース法で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 耐凍害性

図 - 1 は、市販品の AE-1 を用いた場合の凍結融解に伴う相対動弾性係数の変化を示している。空気量 4.5% の場合、AE 剤のみのコンクリートでは、凍結融解 300 サイクル終了時でも高い相対動弾性係数を維持しているのに対し、収縮低減剤を併用すれば、いずれのコンクリートも 30 サイクルですでに相対動弾性係数が 20% 前後に低下している。空気量を 6% としても、収縮低減剤を併用したコンクリートの相対動弾性係数の低下は僅かに遅れる程度で、急激に低下する傾向には変わりがない。

開発品の AE-2 を用いた場合の凍結融解に伴う相対動弾性係数の変化を示したのが、図 - 2 である。空気量 4.5% の場合、AE 剤のみでは凍結融解 300 サイクルを経ても 100% に近い相対動弾性係数を示している。一方、収縮低減剤を併用した場合には、その種類によって異なる変化を示し、SR-2 を併用したコンクリートは比較的若いサイクルで相対動弾性係数が急激に低下する。SR-1 の場合には、それよりサイクル数は延びるが、いずれ相対動弾性係数が急減に低下するのは同様である。これらに対し、SR-3 では、300 サイクル後も AE 剤のみと同程度の相対動弾性係

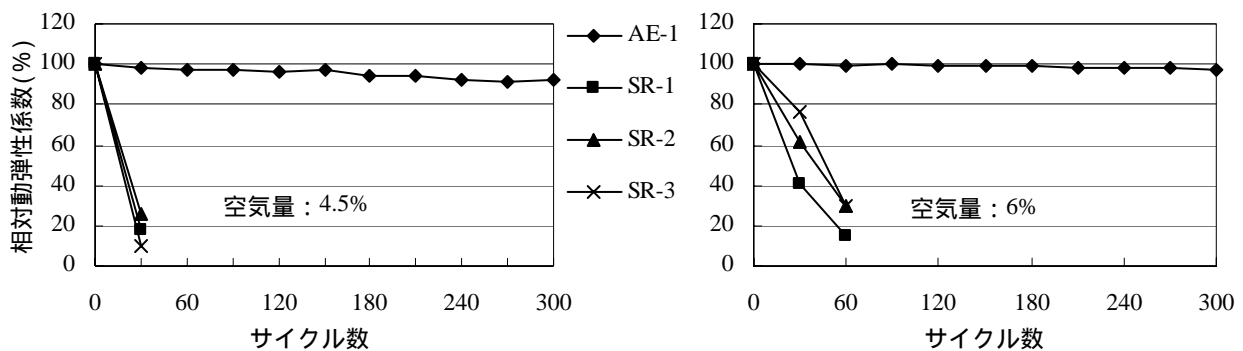


図 - 1 AE-1 を用いたコンクリートの凍結融解に伴う相対動弾性係数の変化

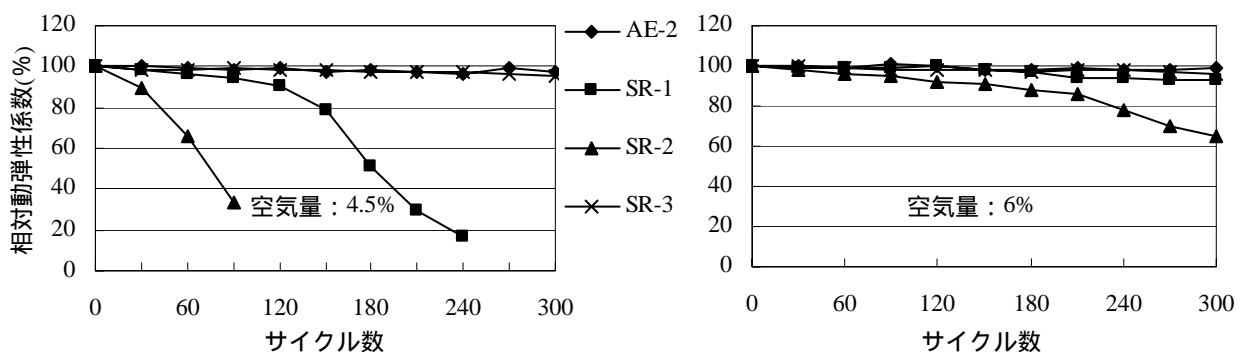


図 - 2 AE-2 を用いたコンクリートの凍結融解に伴う相対動弾性係数の変化

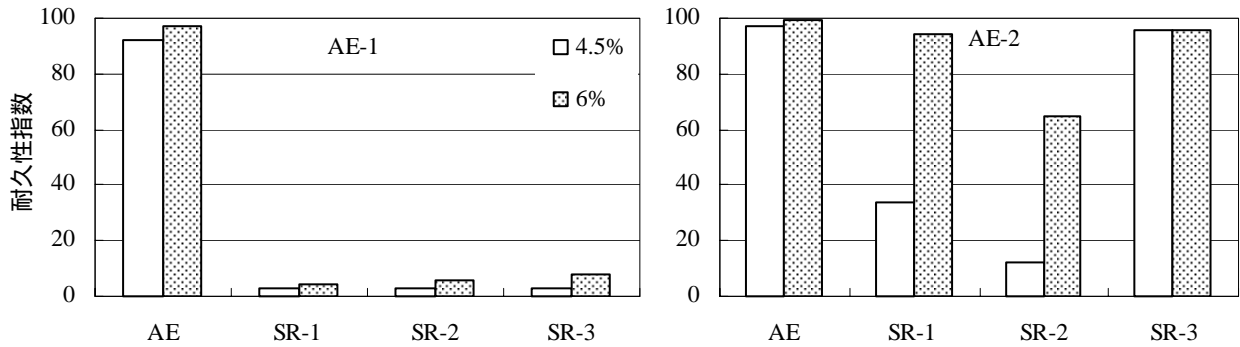


図 - 3 コンクリートの耐久性指数

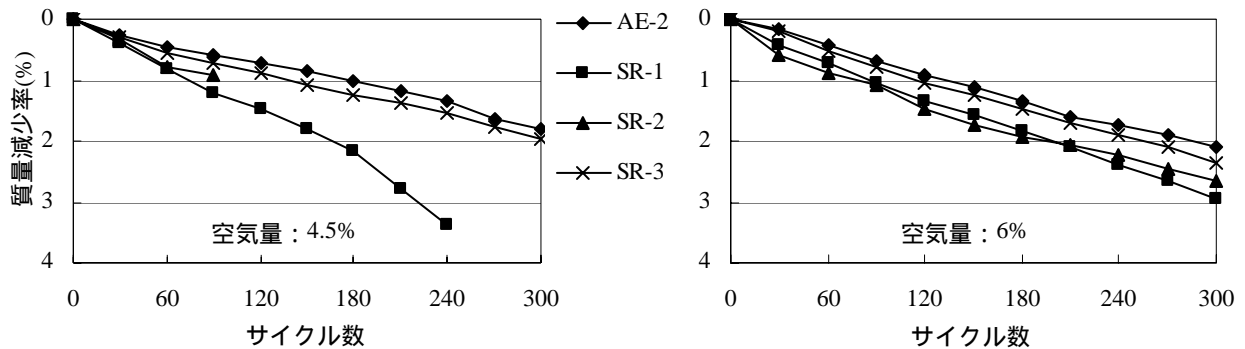


図 - 4 AE-2 を用いたコンクリートの凍結融解に伴う質量減少率

数を保持している。

空気量を 6% にすれば、収縮低減剤を併用しても、すべてのコンクリートが、300 サイクルを終了した時点で相対動弾性係数 60% 以上を確保できている。ただし、SR-2 の場合には、他に比べて相対動弾性係数が低下の傾向にある。

凍結融解に伴う相対動弾性係数の変化から耐久性指数を求め、比較したのが図 - 3 である。市販品の AE-1 を用いた場合、AE 剤そのものは耐凍害性の確保に寄与するものの、収縮低減剤を併用すれば、その働きが阻害され、耐凍害性が損なわれる。空気量を増やしても、耐凍害性はそれほど改善されず、空気量の調整は有効な手段となり得ない。

開発品の AE-2 を用いた場合 AE 剤単独使用でも AE-1 に比べ、やや大きな耐久性指数となっている。これに収縮低減剤を併用すれば、耐久性指数は収縮低減剤の種類によって異なっているが AE-1 と併用した場合に比較し、耐凍害性は格段に優れている。とくに、空気量を 6% とすれば、いずれの収縮低減剤を組み合わせても、耐久性指数 60 以上を確保し、SR-1 および SR-3 の場合には、AE-2 の単独使用に匹敵するような耐久性指数となっている。したがって、耐久性指数の観点からは、AE-2 は、収縮低減剤と組み合わせる AE 剤として、きわめて有用であると評価できる。

図 - 4 は AE-2 を用いた場合の凍結融解に伴うコンクリートの質量減少を示している。いずれの空気量においても、

SR-3 は、AE-2 の単独使用とほぼ同等の質量減少率となっている。一方、SR-1 および SR-2 では、300 サイクルまで測定可能であった空気量 6% の場合に着目すると、AE-2 の単独使用より、若干大きな質量減少率を示しており、スケールがやや著しくなる点に注意を要する。

3.2 気泡組織と耐凍害性の関連

一般に、コンクリートの耐凍害性は硬化後の気泡組織に深く関連する。図 - 5 は、AE-1 を用いた場合の硬化コンクリートの気泡数を示している。気泡数とは、リニアトラパース線 (90mm × 31 本) 上を横切った連行気泡の数である。図では、気泡径別の気泡数も識別できるようにしてある。

AE-1 の単独使用に比べ、いずれの収縮低減剤を併用した場合にも、総気泡数が大幅に減少する。AE-1 の単独使用によって連行される気泡の多くは、直径 200 μm 程度以下であり、収縮低減剤を併用すれば、とくにこれらの微細な気泡が減少する。

AE-2 を用いた場合の気泡数を図 - 6 に示す。AE-2 の単独使用では、AE-1 の単独使用に比べ、微細な気泡の数が多く、総気泡数でも、AE-1 を上回る。開発品である AE-2 は、従来の AE 剤よりも、微細な気泡をより多く連行する性質を有するといえる。

この AE-2 に収縮低減剤を組み合わせると、SR-1 および SR-2 の場合には、AE-2 の単独使用に比べ、微細な気泡が少なくなり、総気泡数も減少している。しかし、AE-1

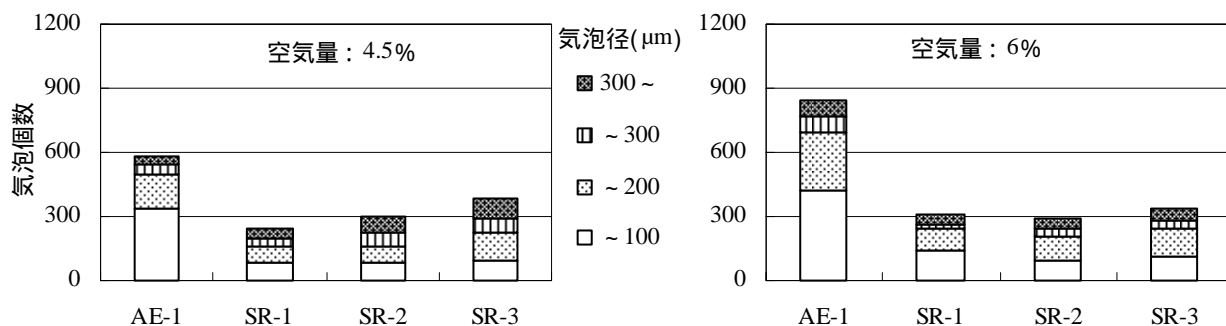


図 - 5 AE-1 を用いた硬化コンクリートの気泡数

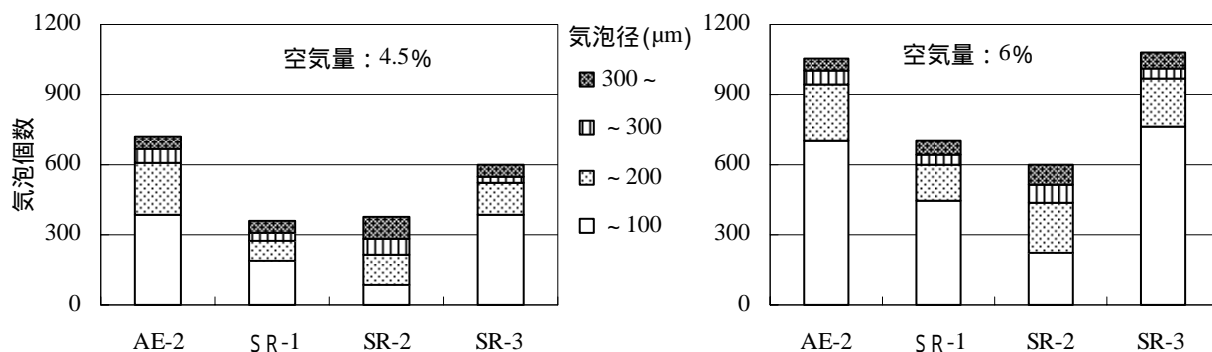


図 - 6 AE-2 を用いた硬化コンクリートの気泡数

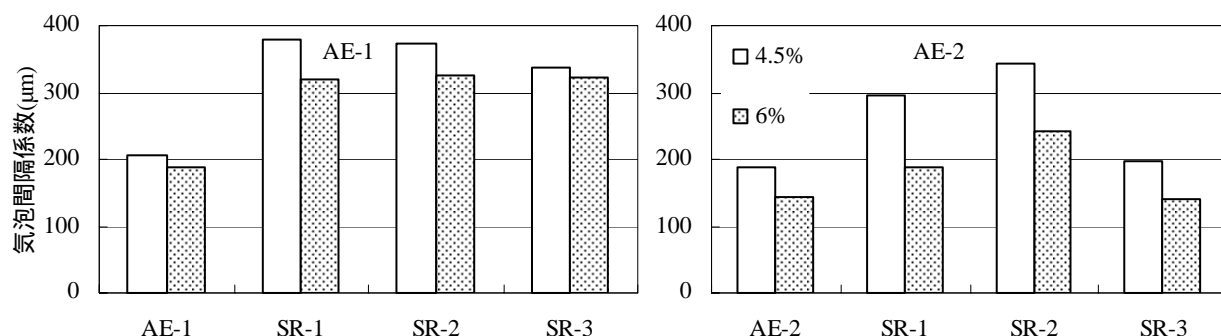


図 - 7 硬化コンクリートの気泡間隔係数

と組み合わせた場合よりは、気泡数が多い。そもそもAE-2によって連行される気泡が多く、そのため残留する気泡も多いと考えられる。SR-3を組み合わせた場合には、他の組合せよりも気泡数が多く、とくに空気量6%の場合には、AE-2の単独使用に匹敵する気泡数となっている。

コンクリートの気泡間隔係数を示したのが、図-7である。AE-1を単独使用した場合は、いずれの空気量でも200 μ m前後の小さな気泡間隔係数を示すのに対し、収縮低減剤を併用すれば、これが300 μ mを超えるような大きな値になり、空気量を増やしても、気泡間隔係数はそれほど小さくならない。

AE-2の場合、単独使用では、AE-1の単独使用より小さな気泡間隔係数となる。収縮低減剤と併用すれば、空気量4.5%で、SR-1とSR-2が300 μ m前後の気泡間隔係数となり、SR-3はAE-2単独に近い値を示す。空気量を6%

とすれば、いずれの収縮低減剤を併用しても、250 μ m以下の気泡間隔係数となり、空気量を増やすことの効果は大きい。

図-8は、AE剤と収縮低減剤を併用した場合の気泡間隔係数と耐久性指数との関係を示している。両者には、一定の関係が認められ、気泡間隔係数が小さいほど、耐久性指数は高く、耐凍害性に優れる。たとえば、耐久性指数60以上を得るには、気泡間隔係数を250 μ m程度以下に抑える必要がある。

AE-1と組み合わせた場合、いずれの収縮低減剤もこの条件を満たさず、そのため耐凍害性に劣ったことになる。これに対し、AE-2との組合せでは、収縮低減剤の種類および空気量によって、この条件を満たすものがあり、結果的に、これらは耐凍害性を確保できたことになる。

3.3 気泡組織に影響を及ぼす要因

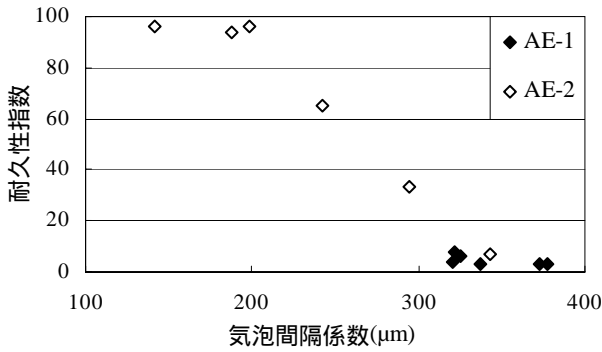


図 - 8 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

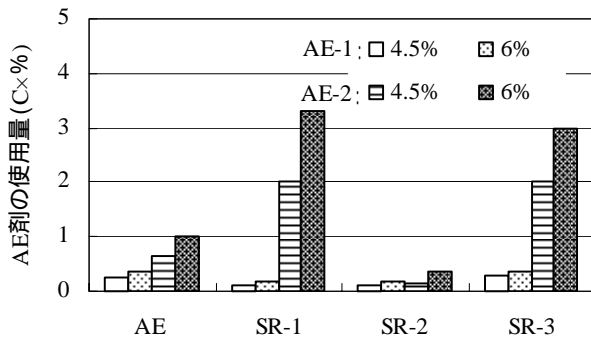


図 - 9 AE 剤の使用量

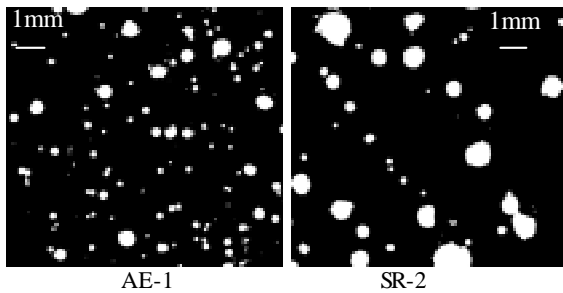


写真 - 1 硬化モルタルの断面 (空気量 : 5%)

以上のように、開発品の AE-2 を使用した場合は、収縮低減剤と組み合わせても、適切な気泡組織となる可能性があり、この点が市販品の AE-1 と異なる。この理由のひとつとしては、AE 剤の使用量が挙げられる。図 - 9 は、目標とするフレッシュコンクリートの空気量を得るために用いた AE 剤の量を示している。使用量は、原液を 100 倍に希釈した溶液のセメントに対する質量割合である。

たとえば、AE 剤単独で、4.5%の空気量を得るために必要な AE 剤の量は、AE-1 より AE-2 で多くなっているが、それぞれの AE 剤の濃度や作用の仕方などが異なっているためであり、この比較は意味を持たない。問題となるのは、それぞれの AE 剤を収縮低減剤と組み合わせた場合の AE 剤単独との比較である。

SR-2 は、空気連行性を有する収縮低減剤であるとされている。これを AE-1 および AE-2 のいずれと併用しても、AE 剤単独よりは、AE 剤の使用量が少なくなっており、たしかに SR-2 には、空気連行性があるといえる。

写真 - 1 は、それぞれ AE-1 および SR-2 を単独で使用し、目標空気量を 5%としたモルタルの硬化後の断面である。連行された気泡組織には違いが見られ、SR-2 の場合に、気泡径が大きく、気泡数が少ない。

収縮低減剤に空気連行性がある場合、フレッシュコンクリートの所定の空気量を確保するための AE 剤の使用量は少なく済むが、その分、微細な気泡は少なくなる。収縮低減剤によって連行された粗大な気泡は、フレッシュな段階で、コンクリートから抜け出す可能性もある。そのため、総気泡数も、微細な気泡数も少なく、気泡間隔係数が大きくなって、耐凍害性の確保が難しくなるといえる。事実、前掲の図 - 3 のように、SR-2 を AE-1 と組み合わせれば、耐凍害性はきわめて劣り、AE-2 との組合せでも、空気量 4.5%では、耐凍害性を確保できていない。空気量 6%で、耐久性指数が 60 を上回るのは、主として AE-2 によってもたらされた微細な気泡が、気泡間隔係数を 250 μm 以下にしたためであると考えられる。

SR-1 も、空気連行性を有するとされている。図 - 9 によれば、AE-1 と組み合わせた場合、たしかに AE 剤の使用量が少なくなっており、SR-1 の空気連行性が認められる。ところが、AE-2 と組み合わせた場合には、AE 剤の使用量が大幅に増大しており、AE-1 とはまったく逆の傾向にある。

図 - 10 は、SR-1 を用いた場合の AE-2 の使用量とフレッシュコンクリートの空気量との関係を示している。AE-2 を添加しなくても、空気量は 2.5%となっており、SR-1 には空気連行性があるといえる。これに、AE-2 を少量添加すれば、空気量は低下する。この傾向からすれば、SR-1 と AE-2 を組み合わせることにより、互いの、もしくは一方の空気連行性が阻害されると受け止めざるを得ない。この理由を把握できてはいないが、この組合せでは、AE-2 の量を大幅に増やさない限り、所要の空気量を確保できないことだけは確かである。空気量 4.5%の場合には、AE-2 の使用量を増やしても、図 - 3 のように耐凍害性を確保できていない。硬化後のコンクリートに残留する微細な気泡が少ないためであり、空気量を 6%にすれば、これが増大して、耐凍害性が確保されることになる。

SR-3 には、消泡作用があるとされている。これを AE-1 と組み合わせた場合、図 - 9 のように AE 剤の使用量が若干増える。しかし、この組合せでは、硬化後に適切な気泡組織とならず、耐凍害性を確保できない。

SR-3 と AE-2 の組合せでは、AE 剤の使用量が大幅に増大する。消泡作用には限度があり、それを上回って AE 剤を添加すれば、硬化後のコンクリートには、AE 剤による微細な気泡が残留することになり、耐凍害性が確保されると考えられる。実際にも、図 - 3 のようにこの組合せでは、空気量 4.5%であっても、優れた耐凍害性を示し

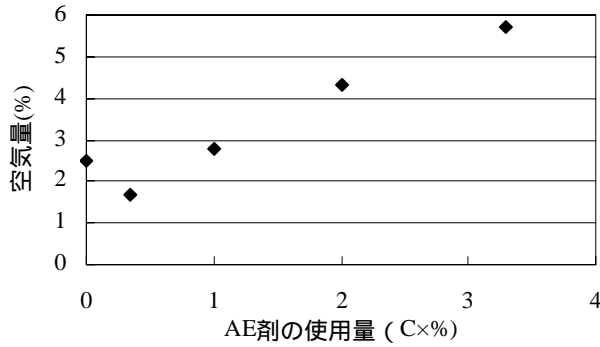


図 - 1 0 SR-1 の配合における AE-2 の使用量と空気量の関係

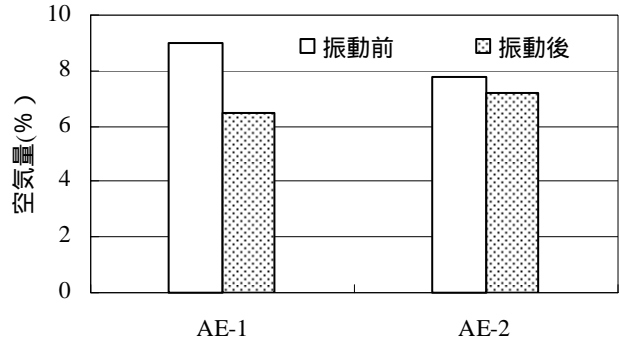


図 - 1 11 空気保持性

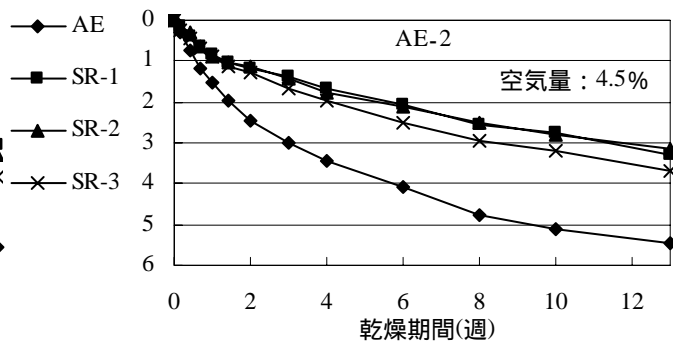
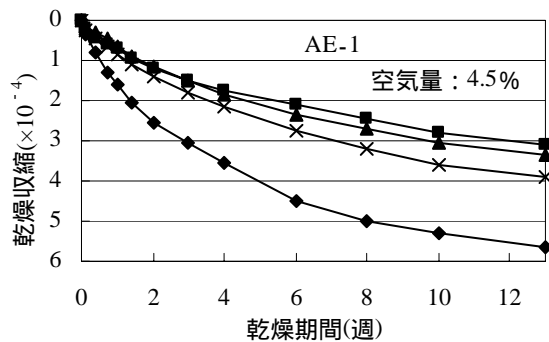


図 - 1 12 コンクリートの乾燥収縮

た。

以上のように、開発品である AE-2 を用いた場合、条件により耐凍害性を確保できるのは、基本的に、この AE 剤により、微細な気泡が多数連行されることにあると考えられる。ただし、空気連行性に優れていても、硬化前に気泡が消失すれば、硬化後に適切な気泡組織とはならない。図 - 1 11 は、空気の保持性を調べた結果である。モルタルを用い、通常通りに空気量を求めた場合と、テーブルパイプで 30 秒間振動を与えてから空気量を求めた場合とを比較した。

AE-1 および AE-2 とも、振動によって空気量は低下するが、AE-2 の方で低下の程度が小さく、この AE 剤は空気保持性に優れていると評価できる。この点も、耐凍害性の向上に寄与すると考えられる。

3.4 乾燥収縮

空気量を 4.5% とした場合のコンクリートの乾燥収縮を図 - 1 12 に示す。AE 剤単独で比較すれば、開発品である AE-2 を用いたコンクリートの乾燥収縮は、市販品である AE-1 を用いたコンクリートにほぼ等しい。収縮低減剤と組み合わせても、AE-2 のコンクリートは、AE-1 と同等の乾燥収縮となっており、AE-2 は、収縮低減剤の効果を損なわせることなく、条件によって耐凍害性を高める AE 剤であるといえる。

4. まとめ

収縮低減剤を用いたコンクリートの耐凍害性を確保する手段として、開発途上の AE 剤の効果を確認してみた。この AE 剤は、市販品よりも多くの微細な気泡を連行し、気泡の保持性にも優れている。この AE 剤に 3 種類の収縮低減剤を組み合わせたと、収縮低減剤の種類や空気量によって異なる耐凍害性を示したが、条件によっては、AE 剤単独使用に匹敵するような優れた耐凍害性が得られた。この AE 剤は、収縮低減剤の本来の目的である収縮低減の効果を損なうこともない。したがって、この AE 剤は、寒冷地で収縮低減剤を用いる際に耐凍害性を確保する混和剤として、有用であると評価できる。

謝辞：

本研究遂行に際し、開発中の AE 剤をご提供いただいた竹本油脂株式会社および種々ご教示・ご協力賜った岩手大学工学部の羽原俊祐准教授並びに小笠原霧子技術職員に深甚の謝意を表します。

参考文献：

- 1) たとえば、藤原浩巳ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.37-42，1988
- 2) 張友海ほか：コンクリートの耐凍害性に及ぼす混和剤の影響，セメント・コンクリート論文集，No.61，pp.364-371，2007