

論文 オートクレーブ養生した高強度軽量コンクリートの耐凍害性に関する研究

浜 幸雄^{*1}・三森敏司^{*2}・大楽隆男^{*3}・三田 卓^{*4}

要旨：本研究は、ALC のもつ軽量性などの特長を生かし、かつ高強度、高耐久性を目指して開発した絶乾密度 0.9 g/cm^3 前後の高強度 ALC の耐凍害性について検討したものである。その結果、高強度 ALC は気泡間隔係数 0.1 mm 前後の良質な気泡を有し、普通コンクリートと同様に気泡の混入により耐凍害性が向上することを確認した。また、ALC で見られるような激しいスケーリングや一面凍結持続試験での割れによる劣化も認められなかったことから、通常の使用環境下において凍結融解作用による劣化が生じる可能性は低いものと思われる。

キーワード：オートクレーブ養生、高強度軽量コンクリート、耐凍害性、気泡組織

1. はじめに

ALC（オートクレーブ養生した軽量気泡コンクリート）は、軽量性、断熱性、耐火性、施工性、寸法安定性に優れた建築材料として幅広く使用されている。しかしながら、ALC は吸水率が高く、その使用方法によっては比較的容易に凍害劣化を受けるため、寒冷地での使用においては十分な注意が必要である。ALC の凍害劣化には表面層のスケーリングと凍結点での割れという異なった2つの形態がある。普通のコンクリートの凍害は毛細管空隙内の水分凍結に起因し、コンクリート中の気泡は凍結時の水圧を緩和する役割を果たすが、ALC の場合には毛細管空隙と比較して気泡の量が卓越するため、気泡中の空気を封じ込める作用が弱く、気泡中にまで水が入り込み、高含水率となった表面層のみが崩壊し、スケーリングが生じる。また、水の浸入しうる状態で凍結点保持される条件では、凍結点に水が引き寄せられ、割れによる劣化が生じるといわれている¹⁾。また、絶乾密度 1.0 g/cm^3 前後の軽量コンクリートでも、ALC と同様に凍結融解によるスケーリングまたは一面凍結

持続試験での割れの劣化が見られると報告されている²⁾。

しかし、近年の住宅品質確保促進法や住宅性能保証制度の施行により、これまで以上に住宅用建材の高強度化、高耐久化が求められるようになり、ALC のもつ寸法安定性、耐火性、施工性などの特長を生かし、かつ高強度、高耐久性を目指した材料開発が行われている³⁾。

本研究では、高性能 AE 減水剤を用いてマトリックスを高強度化するとともに、繊維を混入することによって曲げ強度および靱性を高め、AE 剤により生成した気泡をスラリーに混入するプレフォームタイプのオートクレーブ養生した高強度軽量コンクリート（以下、高強度 ALC という）の基礎物性と耐凍害性について検討することを目的としている。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

(1) 使用材料

使用した材料は普通ポルトランドセメント ($\rho = 3.16 \text{ g/cm}^3$)、珪砂 ($\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$)、フ

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学学科助教授 博士（工学）（正会員）

*2 釧路工業高等専門学校 建築学科助教授（正会員）

*3 釧路工業高等専門学校 建築学科教授（正会員）

*4 (株) ミサワホーム総合研究所 住環境研究室（正会員）

表一 1 配合表

実験シリーズ		シリーズ1				シリーズ2		備考
試験体		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	
水粉体比		0.40				0.45		
粉体	セメント	44.0				37.5		全粉体中での割合 (wt%)
	珪砂	40.0		30.0		28.5		
	フライアッシュ	10.0		20.0		30.0		
	急硬材	6.0				4.0		
アラミド繊維		0.3				0.5		全粉体に対するwt%
気泡剤		0.0	0.38	0.75	0.75	0.50	1.00	セメント量に対する
高性能AE減水剤		0.3				0.3		wt%

ライアッシュ ($\rho = 2.20 \text{ g/cm}^3$), アラミド繊維, 急硬材, 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) および AE 剤である。

(2) 試験体の作製

混練りは, まず混練水, 高性能減水剤, AE 剤をミキサで 60 秒間攪拌して気泡を生成させ, セメントなどの粉体材料を投入し, 2 分から 2 分 30 秒間攪拌した後, 所定の寸法の型枠に鑄込み, 1 時間後に脱型し, 180°C, 10 気圧のオートクレーブ養生を 8 時間行った。

(3) 調査

実験はシリーズ 1 と 2 の 2 つのシリーズに分けて行った。表一 1 に各供試体の配合を示す。シリーズ 1 では高強度化したマトリックス自体の耐凍害性と AE 剤でプレフォームした気泡が耐凍害性に及ぼす影響を把握するために, 気泡量の異なる 4 種類の供試体を作製した。シリーズ 2 では, 実用を考慮して 0.9 g/cm^3 程度の絶乾密度を目標として作成した 2 種類の高強度 ALC と従来型 ALC (プレフォーム型: 以下, P-ALC という) を作製した。

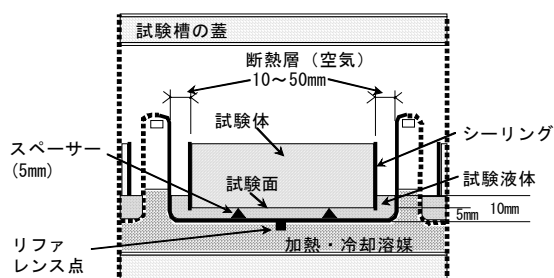
2.2 実験方法

作成した供試体を用いて, 絶乾密度, 圧縮強度, 曲げ強度などの基礎物性の測定と耐凍害性試験, 気泡組織の測定を行った。圧縮強度試験および曲げ強度試験は, $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の角柱供試体を用い, JIS R 5201 に準じて行った。また, 一般に ALC の耐凍害性を評価する際には, スケーリングに対しては気中凍結水中融解試験での体積減少率で, 割れに対しては一面凍結持続試験での割れ発生日数で評価されているが, 本研究

では, 全ての供試体について RILEM CIF 法⁴⁾によって剥離量と動弾性係数の変化を評価するとともに, シリーズ 2 では一面凍結持続試験で割れに対する耐性の評価も行った。

(1) CIF 試験

CIF 試験は $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ の梁型供試体を用いて, 所定の養生を行った試験体の側面をブチルゴム付のアルミテープでシールし, 20°C, 60% RH の恒温室中での 7 日間の下面吸水を行い, その後, 図一 1 に示す CIF 凍結融解試験装置で最高温度 20°C (1 時間保持), 最低温度 -20°C (3 時間保持), 温度勾配 $\pm 10 \text{ K/hour}$ で 1 日 2 サイクルの下面吸水状態での一面凍結融解を 100 サイクルまで繰り返した。測定項目は質量変化, 相対動弾性係数, 剥離量である。剥離量は, 各測定サイクル時に試験容器ごと 3 分間の超音波洗浄を行い, 溶液を濾過した後, 剥離片を 105°C で 24 時間乾燥させ, 剥離片の質量を測定した。相対動弾性係数は, たわみ振動法で測定した。



図一 1 CIF 試験槽内の試験体と試験容器

(2) 一面凍結持続試験

一面凍結持続試験装置を図一 2 に示す。φ 10 × 10 cm の円柱供試体を用い, 供試体の下部空間

に水槽を設置し、上面の空間を -20°C 、水槽中の水温を $+20^{\circ}\text{C}$ の一定に保持し、水槽にたらしただけおよび脱脂綿から供試体に常時水分を供給した。測定は、質量変化と目視による割れの観察であり、試験は125日間継続した。

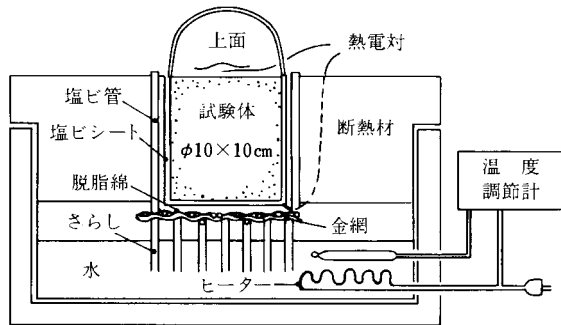


図-2 一面凍結持続試験装置

(3)気泡組織の測定

気泡組織の測定は、ASTM C 457 (リニアトラス法) に準じて行い、空気量、平均気泡径、気泡間隔係数を算出した。

3. 結果および考察

3.1 基礎物性

表-2に各供試体の基礎物性値を示す。供試体の絶乾密度は、シリーズ1の気泡剤無しの供試体 (No.1) で 1.47 g/cm^3 、高強度 ALC で $0.91\sim 1.11\text{ g/cm}^3$ の範囲で、シリーズ2の P-ALC で 0.58 g/cm^3 、高強度 ALC で 0.90 および 0.95 g/cm^3 であった。図-3に絶乾密度と圧縮強度の関係を示す。図-4に絶乾密度と曲げ強度の関係を示す。圧縮強度、曲げ強度ともに絶乾密度が高くなるほど直線的に増大しており、絶乾密度 1.0 g/cm^3 前後の高強度 ALC で圧縮強度 $20\sim 30\text{ N/mm}^2$ 、曲

げ強度 $5\sim 6\text{ N/mm}^2$ が得られており、比強度が大きいといわれている P-ALC と比較して、比強度が3倍程度まで増大している。

図-5に絶乾密度と空気量、平均気泡径、気泡間隔係数の関係を示す。高強度 ALC の空気量は絶乾密度に対応して $25.0\sim 38.3\%$ と広範囲にあるが、平均気泡径、気泡間隔係数のばらつきは比較的小さい。特に、気泡間隔係数は 0.1 mm 前後で、普通コンクリートと同様に評価すると耐凍害性に対して非常に良質な気泡組織であるといえる。また、P-ALC の気泡間隔係数は高強

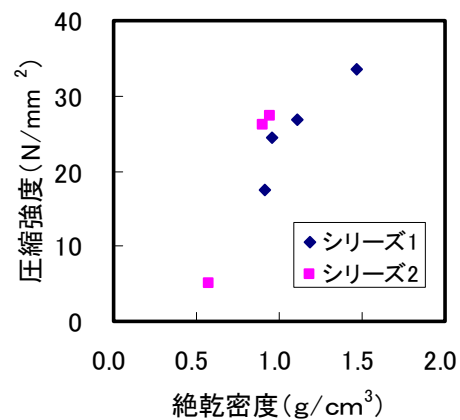


図-3 絶乾密度と圧縮強度の関係

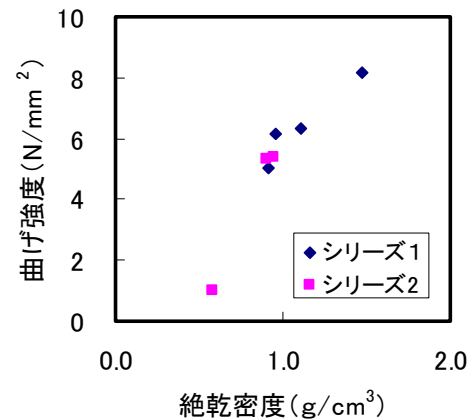


図-4 絶乾密度と曲げ強度の関係

表-2 基礎物性

実験シリーズ	シリーズ1				シリーズ2		
試験体	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No5	No6	PALC
絶乾密度 (g/cm^3)	1.47	1.11	0.96	0.91	0.95	0.90	0.58
圧縮強度 (N/mm^2)	33.6	26.9	24.5	17.5	27.4	26.0	5.0
強度比 (N/mm^2)	22.9	24.2	25.6	19.2	28.8	28.9	8.6
曲げ強度 (N/mm^2)	8.1	6.3	6.1	5.0	5.4	5.3	1.0
空気量 (%)	7.5	25.0	35.8	38.3	27.3	36.0	46.6
平均気泡径 (mm)	0.555	0.187	0.189	0.168	0.127	0.149	0.274
気泡間隔係数 (mm)	0.668	0.130	0.112	0.096	0.077	0.069	0.098

度 ALC とほぼ等しいものの、平均気泡径が大きくなっている。一方、気泡剤無しの供試体 (No.1) でも 7.5%のエントラップトエアがあるが、その平均気泡径および気泡間隔係数は他の供試体と比べてかなり大きい。

3.2 CIF 試験

(1) 相対動弾性係数の変化

図-6に CIF 試験における相対動弾性係数の変化を示す。密度の異なる高強度 ALC を用いたシリーズ1では、No.1が凍結融解開始直後から

相対動弾性係数が著しく低下し、30 サイクルで写真-1に示すようなひび割れが供試体上面に生じたのに対して、気泡を混入した供試体はいずれもほとんど相対動弾性係数は低下しなかった。このことから、高強度 ALC でも普通コンクリートと同様に、良質な気泡組織が耐凍害性を向上させているものと考えられる。また、P-ALC と比較したシリーズ2においても、高強度 ALC はシリーズ1と同様に、いずれも相対動弾性係数の低下はほとんど見られないのに対して、P-ALC は凍結融解開始直後から相対動弾性係数が低下する傾向を示した。

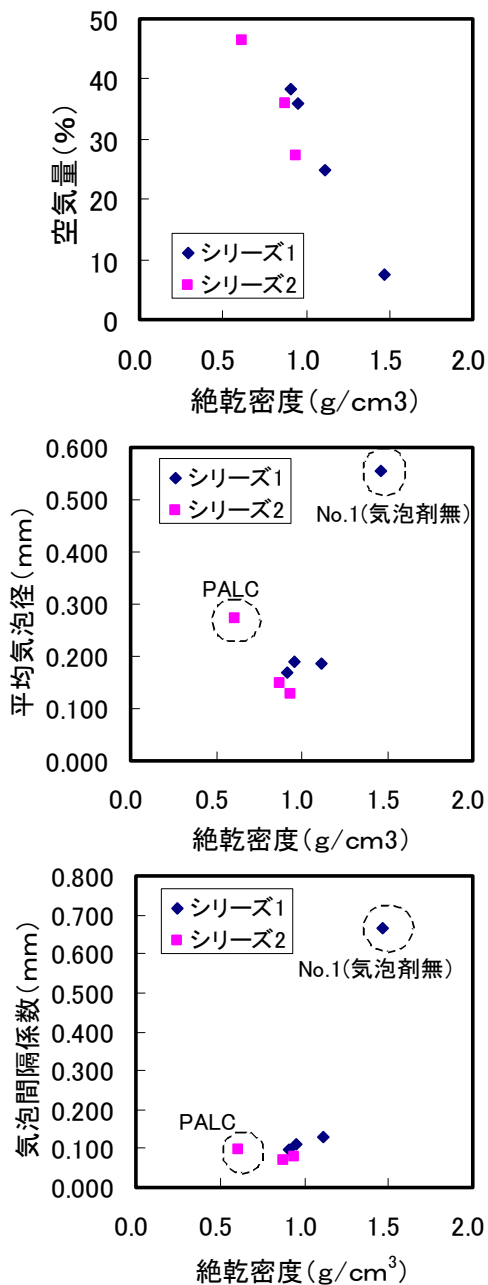


図-5 絶対乾密度と空気量、平均気泡径および気泡間隔係数の関係

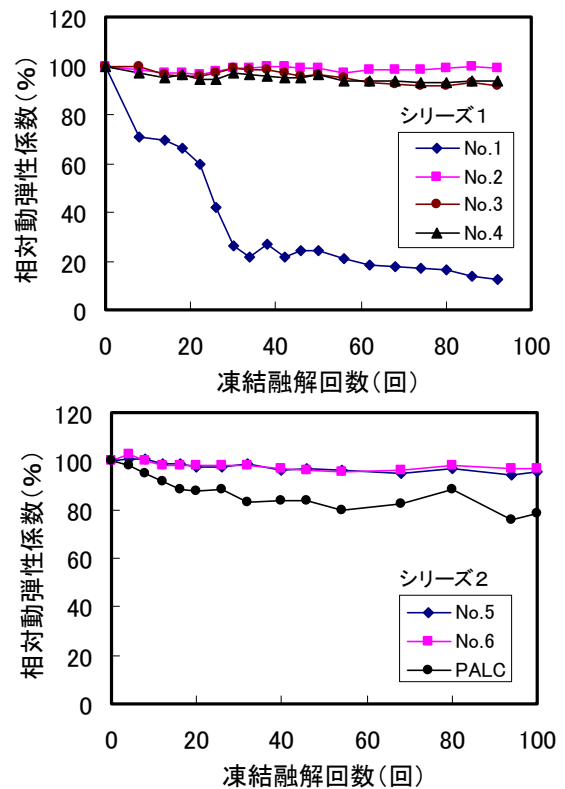


図-6 相対動弾性係数の変化



写真-1 CIF 試験における供試体上面のひび割れ (No.1)

(2) 剥離深さの変化

図-7に CIF 試験における剥離深さの変化を示す。シリーズ1では、No.4 の剥離深さがやや大きいものの、全ての供試体で 1.0mm 以下の軽微なスケーリングであった。シリーズ2でも、高強度 ALC はシリーズ1と同様に、1.0mm 以下の軽微なスケーリングだったが、P-ALC で凍結融解 20 サイクル前後から急激にスケーリングが激しくなり、試験終了時には剥離深さが 10.0mm を超えるほどになった。なお、高強度 ALC では剥離による繊維の毛羽立ちが多少目立った。

(3) 吸水率の変化

図-8に CIF 試験における吸水率の変化を示す。シリーズ1では、試験開始時の吸水率が各供試体で異なっているが、7日間の下面吸水での吸水率の増加は、各供試体ともに 10vol% 程度で大きな差は認められなかった。これは、下面吸水では毛管吸引が主であり、No.1~No.4 の供試体は同一の基本配合で気泡量を変化させただけなので、マトリックス部分には大きな違いが無いためと考えられる。しかし、その後の凍結融

解条件下では、No.1 と No.3 の吸水率の増加が大きいものに対して、NO.2 と NO.4 では 62 サイクル (38 日) 以降の吸水率はほとんど増加しておらずほぼ飽和状態となっている。シリーズ2では、2 種類の高強度 ALC の吸水挙動はほぼ同様であるのに対して、P-ALC は7日間の下面吸水時の吸水率の増加は小さく、その後の凍結融解条件下での吸水率の増加が顕著であった。

凍結融解による劣化は、吸水性状と密接な関係があることから、想定される環境下で限界飽水度 (劣化が起こらない限界の飽水度) に達する可能性の有無を判断することが重要となる。図-9は吸水率と相対動弾性係数の関係を示したものである。No.1 と P-ALC では凍結融解開始直後から相対動弾性係数が低下していることから、それぞれ下面吸水終了時の吸水率である 36vol%、25vol% が限界飽水度と判断でき、その後の劣化の進行にともなう組織の緩みによってさらに吸水が加速されている。一方、No.2~No.6 の高強度 ALC では、試験終了時にはほぼ飽水状態となっているにもかかわらず劣化が認めら

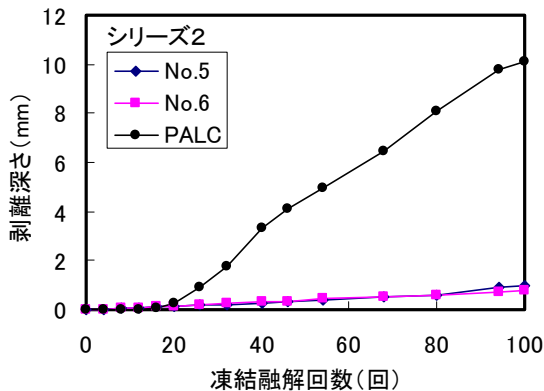
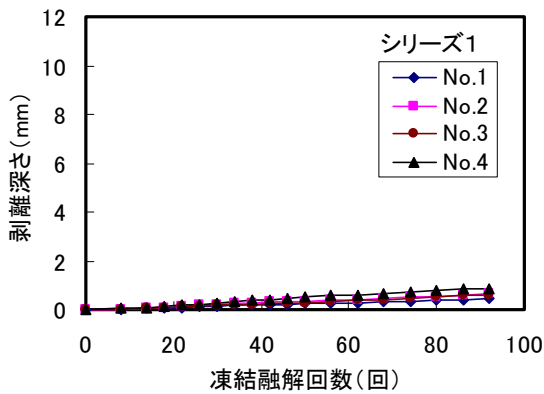


図-7 剥離深さの変化

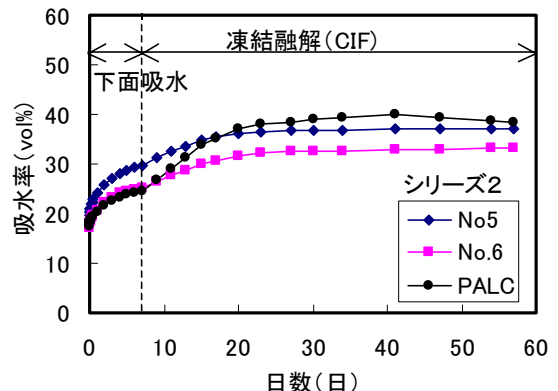
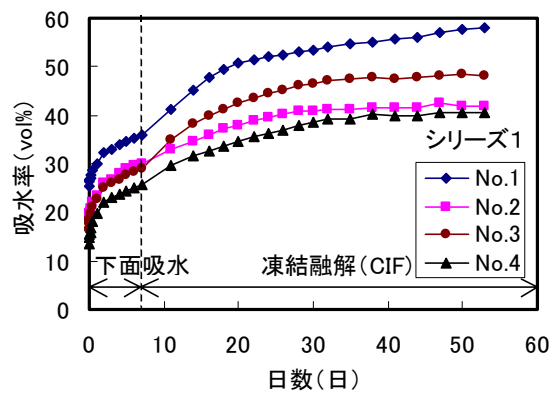


図-8 CIF 試験における吸水率の変化

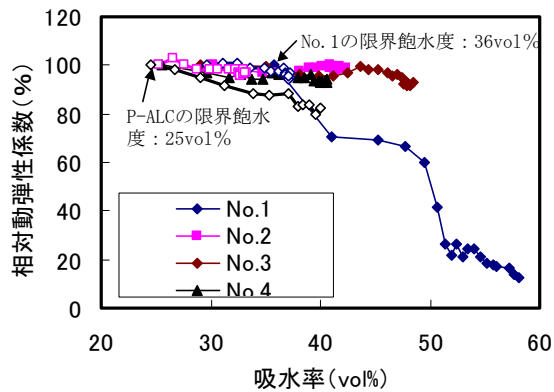


図-9 CIF試験における吸水率と相対動弾性係数の関係の変化

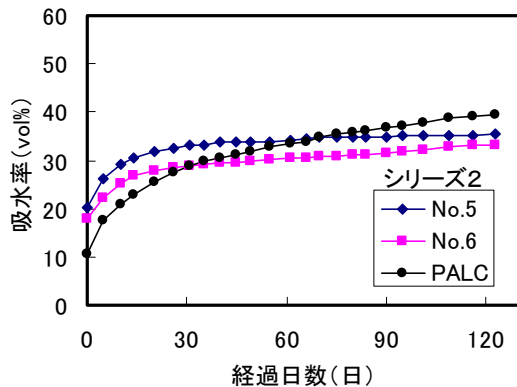


図-10 一面凍結持続試験における吸水率の変化

れないことから、限界飽水度を特定することはできないが、通常の使用環境下において凍結融解作用による強度低下や崩壊といった組織の緩みによる劣化が生じる可能性は低いといえる。

3.3 一面凍結持続試験

既往の研究によると、密度 0.5 g/cm^3 程度の撥水処理をしていない ALC 標準品では、一面凍結持続試験の試験期間 50 日程度までに吸水率が 35～40% 程度まで高まり、割れが発生するものが多い¹⁾。しかしながら、本研究では P-ALC、高強度 ALC のいずれにおいても試験期間 125 日までで割れの発生は認められず、優れた割れ耐性を示した。図-10 に一面凍結持続試験における吸水率の変化を示す。試験開始時の含水率が各供試体で異なるが、P-ALC では試験終了まで含水率が増加する傾向を示しているのに対して、高強度 ALC では試験日数 30 日以降の吸水率の増加は緩慢となっており、この傾向は CIF 試験

での吸水挙動と同様である。

4. まとめ

本研究では、ALC のもつ軽量性などの特長を生かし、かつ高強度、高耐久性を目指して開発した絶乾密度 $0.9 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ 程度の高強度 ALC の耐凍害性について以下の結論を得た。

- (1) 普通コンクリートと同様に気泡の混入により耐凍害性が向上する。
- (2) 気泡間隔係数は 0.1 mm 前後で、耐凍害性に対して非常に良質の気泡組織を有している。
- (3) P-ALC で見られるような激しいスケーリングは生じなかった。
- (4) 一面凍結持続試験での割れによる劣化も認められなかった。
- (5) 通常の使用環境下において凍結融解作用による強度低下や崩壊といった組織の緩みによる劣化が生じる可能性は低い

謝辞

本研究の実施にあたり、室蘭工業大学卒論生・佐藤友哉氏の協力を得た。記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 鎌田英治監修：ALC 外壁仕上塗り工事設計・施工マニュアルー寒冷地対策一，pp.57-66，工文社 1988
- 2) 田畑雅幸ほか：各種軽量コンクリートの耐凍害性に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A-1，pp.245-246，1988.10
- 3) 斎藤豪，坂井悦郎，三田卓，大門正機：ポルトランドセメント- α -石英-水系の水熱反応に及ぼす水粉体比の影響，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan 12, 2005
- 4) RILEM Recommendation “CIF-Test - Capillary Suction, Internal Damage and Freeze-Thaw test ; Reference Method and alternative Methods A&B”, Materials & Structure, 34, pp.515-525, 2001