

論文 凍結融解抵抗性に優れた軽量気泡コンクリートの開発

新 大軌^{*1}・三田 卓^{*2}・濱 幸雄^{*3}・坂井 悦郎^{*4}

要旨: 本研究では各種の気泡剤により導入される気泡の安定性評価により最適な気泡剤を選定し、さらにその気泡剤を用いて水粉体比の異なる軽量気泡コンクリートを作製し凍結融解抵抗性の評価を行った。また、その結果を気泡組織、吸水性状などの点から考察を行い、凍結融解抵抗性に優れた高耐久性軽量気泡コンクリートの開発を目的とした検討を行った。その結果、気泡を導入し水粉体比 0.4、絶乾密度 0.9g/cm^3 とした軽量気泡コンクリートは優れた凍結融解抵抗性を示した。これは気泡剤により比較的サイズの小さい気泡が導入されたことおよび空隙構造が変化し、吸水性が大きく変化したためであることを明らかとした。

キーワード: 軽量気泡コンクリート, 気泡安定性, 空隙構造, 凍結融解抵抗性

1. はじめに

建設・建築分野において、軽量気泡コンクリート ALC やケイ酸カルシウム水和物固化体が広く利用されている。その主要構成物質であるトバモライトは、工業的には高温高压養生である 180°C 、10 気圧のオートクレーブ養生による水熱反応によって合成される。トバモライトはカードハウス状の形態を有し、寸法安定性に優れており、耐火性、断熱性などの特性を持つことから、軽量気泡コンクリート ALC やケイ酸カルシウム水和物固化体はプレハブ住宅やマンション、高層ビルの外壁、内壁、天井、床材料として広く利用されている¹⁾。

一方、建設業界でも環境負荷低減は重要な使命であり、現在の‘つくっては壊す’消費型の社会から‘よいものを作って長く大切に使う’ストック型の社会への転換が求められている。これには数世代にわたって住み続けられる長期優良住宅を実現することが重要である。これに対応して、近年では住宅品質確保促進法や住宅性能保証制度が施行され、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っており、現在使用されている ALC のもつ寸法安定性、耐火性、施工性などの特長を生かし、さらに高強度、高耐久性を目指した材料開発が進められている。

しかし、ALC は、軽量性、断熱性、耐火性、施工性、寸法安定性には優れるが、吸水率が大きく比較的容易にスケーリングや凍結点での割れといった凍害劣化を受けることが報告されている²⁾。このために、ALC への耐凍害性の付与は寒冷地においては重要である。

これまでの研究から、凍結融解抵抗性を向上させるためには硬化体組織をち密化することおよび連行空気を制御することが重要であることが指摘されている^{3,4)}。これ

については、水粉体比の低減、および気泡の安定性が重要な要素となる⁵⁾。本研究ではポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤による水粉体比の低減、および起泡プロセスについて着目し、各種の気泡剤により導入される気泡の安定性の評価し、最適な気泡剤を選定し、さらにその気泡剤を用いて水粉体比の異なる軽量気泡コンクリートを作製し凍結融解抵抗性の評価を行い、吸水性状、気泡組織などの点から考察を行い、耐凍害性に優れた高耐久性軽量気泡コンクリートの開発を目的とした検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料は普通ポルトランドセメント ($\rho = 3.16\text{g/cm}^3$)、ケイ砂 ($\rho = 2.65\text{g/cm}^3$)、フライアッシュ IV 種 ($\rho = 2.20\text{g/cm}^3$)、アルミナセメント系急硬材、アラミド繊維、高性能減水剤 (ポリカルボン酸系) および気泡剤である。

2.2 気泡剤の選定

各種気泡剤により導入される気泡の安定性の評価を以下のように行い、気泡剤の選定を行った。

圧縮した空気と水で希釈した気泡剤を発泡機内で混ぜ合わせ、これを直径 5mm のガラスビーズを充填した起泡塔内を通じさせ、気泡を作製する。作製した気泡を底に穴をあけた 5L の手付きのビーカーに充填し、ビーカーの底の穴から、泡が液となり滴り落ちる時間とその質量変化を測定し離液性能を評価した。この方法により、気泡の安定性を評価した。気泡剤としてはポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩系 (PEA)、アルキルエーテルサルフェート塩系 (AES)、アルキルアリルスルホン酸塩系 (AAS) の 3 種類の界面活性剤を使用し

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科材料工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*2 (株) ミサワホーム総合研究所 材料・耐久研究室 博士(工学) (正会員)

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域 教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京工業大学 大学院理工学研究科材料工学専攻 教授 工学博士 (正会員)

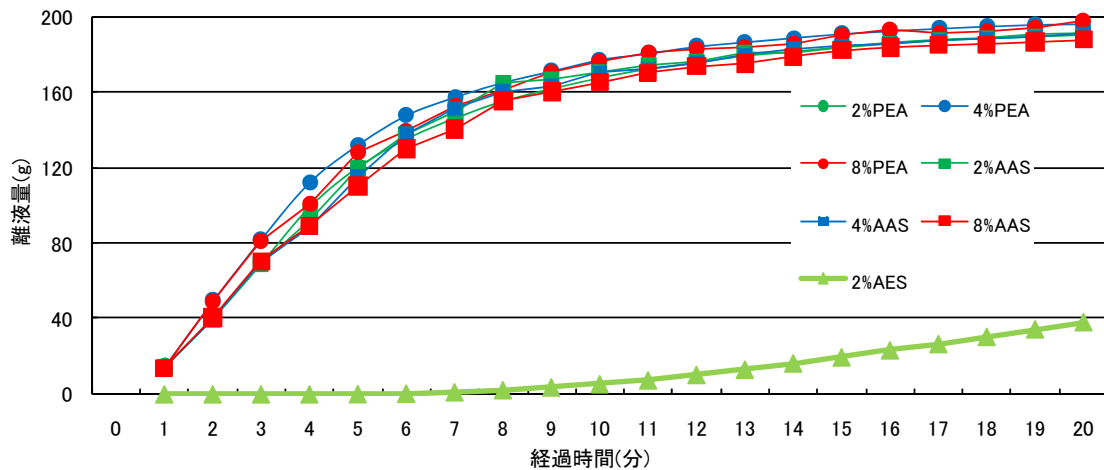


図-1 各種気泡剤を用い作製した気泡の離液量の経時変化

た。

次に気泡剤を用いて絶乾密度 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ を目標とし、試験体の配合を(普通ポルトランドセメント+急硬材)：シリカ：フライアッシュIV種 = 5：4：1、水粉体比 0.4 のスラリーを作製し、オートクレーブ養生を行い軽量気泡コンクリートを作製し、その試験体の絶乾密度を測定して気泡剤の安定性を検討した。

2.3 試験体の作製

(普通ポルトランドセメント+急硬材)：シリカ：フライアッシュIV種 = 5：4：1 とし、添加する気泡量を変化させ、水粉体比を 0.4 と 0.5 の絶乾密度の異なる試験体を作製した。

混練りは、まず混練水、高性能減水剤、凝結遅延剤をミキサーで 60 秒間攪拌を行い、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、気泡剤を用い発砲機にて気泡を作りモルタルスラリーに混入し、所定の密度に調整した後、型枠に casting し、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。試験体寸法は $40\times 40\times 160\text{mm}$ とした。

2.4 物性の測定

2.2 において選定した気泡剤を用いて、試験体を作製し、絶乾密度の測定と耐凍害性試験、気泡組織の解析を行った。

凍結融解抵抗性は、JIS A 1148A 法に準拠した凍結融解試験で動弾性係数の変化により評価した。さらに、凍結融解時の吸水及び剥離量を一面凍結融解試験 (RILEM CIF 試験) により評価した。RILEM CIF 試験は、限界飽水度による凍害を評価するものであり、試験体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 7 日間下面吸水を行い、その後、凍結融解試験装置で最高温度 $+20^\circ\text{C}$ を 1 時間保持、最低温度 -20°C を 3 時間保持、温度勾配 $\pm 10\text{K}/\text{hr}$ で 1 日 2 サイクルの下面吸

水状態での一面凍結融解試験を 56 サイクル繰り返し行った。

また、硬化体中の気泡径分布の測定を光学顕微鏡による画像解析により行った。さらに水銀圧入法により、細孔径の空隙構造の解析を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 気泡剤の選定および気泡安定性の評価

図-1 に各種気泡剤を用い作製した気泡の離液量の変化を示す。ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩系 (PEA)、アルキルアリルスルホン酸塩系 (AAS) の界面活性剤を気泡剤として用いた場合、離液量は時間の経過とともに急激に増加しており、離液しやすいことが明らかである。これは気泡の安定性が低いことを意味しており、破泡が起きたことによるものと推察される。一方、アルキルエーテルサルフェート塩系 (AES) の界面活性剤を気泡剤として用いた場合は、離液量は時間が経過してもほとんど増加していない。これは破泡が起きておらず、気泡の安定性が高いことを意味している。

次にこれらの気泡剤を使ってモルタルスラリーを作製し、オートクレーブ養生を行い、試験体の絶乾密度を $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ 程度に調整した軽量気泡コンクリート試験体により、気泡剤の安定性を検討した結果を図-2 に示す。

同一の方法で作製した 60 サンプルの絶乾密度を比較すると、ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩系 (PEA)、アルキルアリルスルホン酸塩系 (AAS) の界面活性剤を気泡剤として用いた場合、絶乾密度のバラつきが大きいことが分かる。一方、アルキルエーテルサルフェート塩系 (AES) の気泡剤を使用した場合は、絶乾密度のバラつきが、非常に少ない。これは先ほど検討した、離液性による気泡剤の評価と対応しているものと

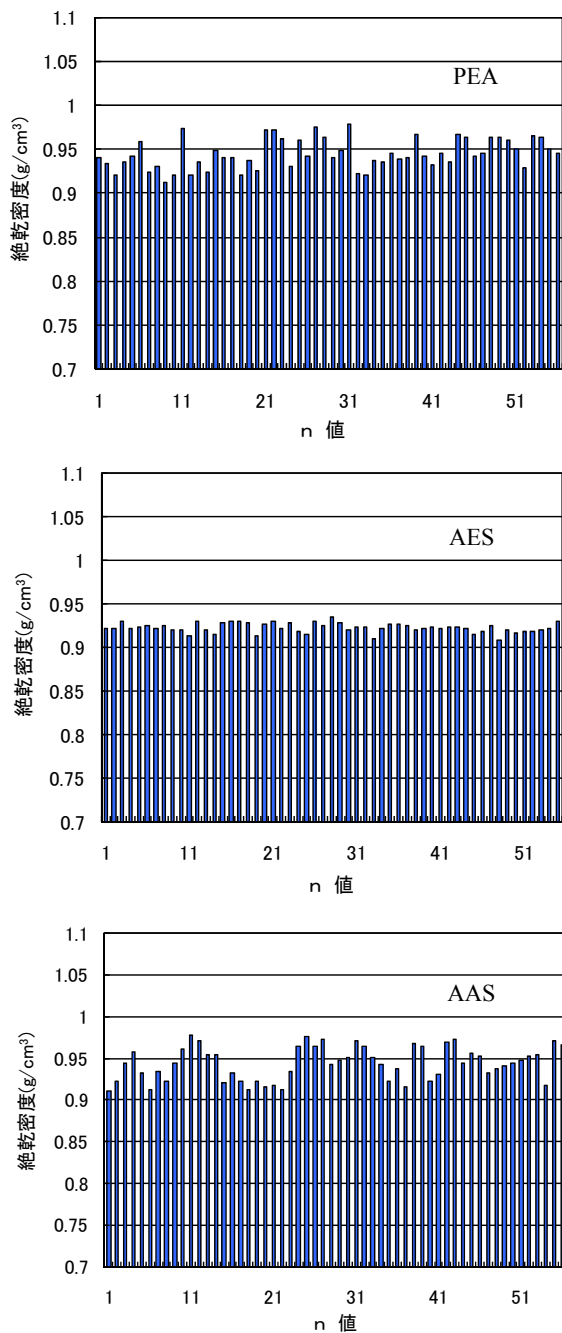


図-2 各種気泡剤を用い作製した軽量気泡コンクリートにおける密度安定性 (n は試験体数)

考えることができる。すなわち、気泡の安定性の高いアルキルエーテルサルフェート塩系(AES)の気泡剤では、破泡が起きにくく、オートクレーブ後も練り混ぜ時に連行された空気がモルタル中に導入されていると考えられるが、気泡の安定性が低いと推察されたポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸ナトリウム塩系(PEA)、アルキルアシルスルホン酸塩系(AAS)の気泡剤では、破泡が起きやすく練り混ぜ時にスラリー中に連行された空気がオートクレーブ後には安定に存在していないものと考えられる。

以上のようにアルキルエーテルサルフェート塩系

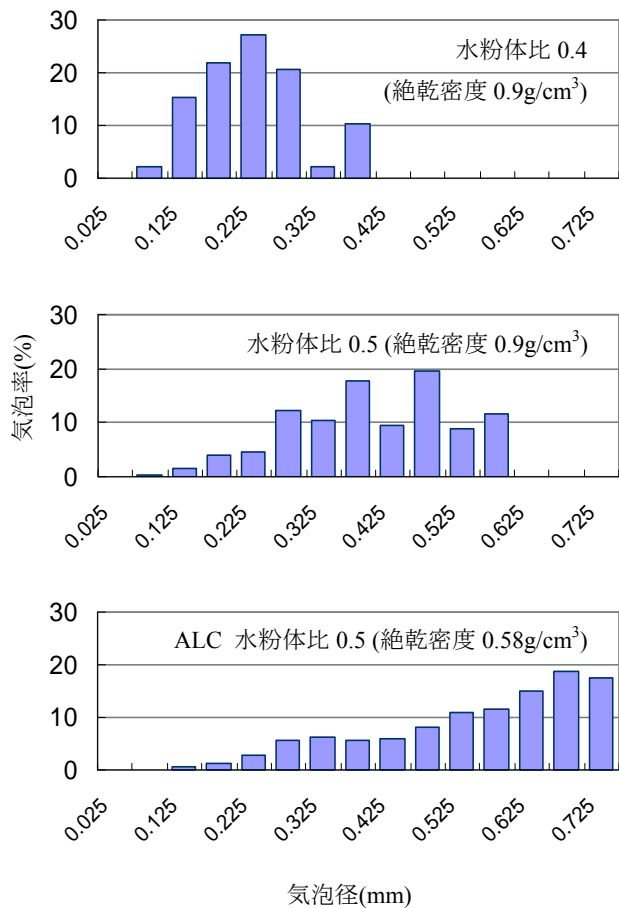


図-3 軽量気泡コンクリート硬化体中の気泡径分布

(AES)の気泡剤を選定することにより、絶対乾密度が 0.9g/cm^3 の軽量気泡コンクリート試験体を安定的に製造することが明らかとなった。以降はこのアルキルエーテルサルフェート塩系(AES)の気泡剤を用いて試験体を作製し、気泡組織、空隙構造、凍結融解抵抗性の評価を行うこととした。

3.2 軽量気泡コンクリート試験体中の気泡径分布

次に水粉体比を0.4および0.5の条件で作製した軽量気泡コンクリート試験体に導入された気泡の影響について検討するため、気泡コンクリート中に導入された気泡を光学顕微鏡を用いて観察し、気泡径ごとの分布量を算出した。その結果を図-3に示す。比較として現行の水粉体比0.5、絶対乾密度 0.58g/cm^3 であるALCの結果も記載した。

水粉体比0.4で絶対乾密度が 0.9g/cm^3 の試験体では、気泡径が $0.025\text{mm} \sim 0.375\text{mm}$ までの比較的小さいサイズの気泡が分布しており、とくに $0.125\text{mm} \sim 0.225\text{mm}$ の範囲の比較的小さな気泡が著しく多いことがわかる。これは、細かく同程度のサイズの気泡により気泡組織が構成されていることを示しており、耐凍害性に対して重要である気泡間隔係数も小さく良好な空気が導入されているもの

と考えられる。一方、水粉体比を 0.5 にした試験体では、気泡サイズは 0.025mm~0.575mm と広範囲に広がり、0.375mm~0.475mm 付近の径の気泡が多いことが分かり、水粉体比 0.4 のものと比較して気泡サイズが粗大である。また、ALC については、径が 0.025mm~0.725mm と、さらに広範囲に気泡が広がっており、0.675mm 程度の粗大な気泡も多く存在していることが明らかである。このように、水粉体比 0.5 の試験体および現行の ALC では気泡組織が粗大であり、気泡間隔係数も水粉体比 0.4 の試験体と比較して大きいものと推察される。

3.3 空隙構造解析

次に作製した気泡コンクリート試験体に対して、水銀圧入法による空隙構造解析を行った。なお、測定の結果、1 度目の水銀圧入量と排出量には大きな差があることが明らかとなり、これは既往の研究でも報告されているように、インクボトル型と称される独立した空隙が多数存在するためであると考えられる⁶⁷⁾。耐凍害性に大きな影響を及ぼす吸水性にはこうした独立空隙のみでなく独立空隙をつなぐ連通した空隙（連通空隙）も重要となることから、本研究では、1 度目の水銀圧入量と排出量の差を独立空隙、2 回目の水銀圧入の結果を連通空隙とし、この連通空隙量および分布を評価した。図-4 にその結果を示す。水粉体比 0.5 の試験体では総空隙量は 0.094ml/ml、0.4 の試験体では総空隙量は 0.073ml/ml であり、水粉体比 0.4 の試験体では、連通していると考えられる空隙が水粉体比 0.5 のものに比べ大きく低下していることが分かる。以上の結果から凍結融解による劣化の際に重要となる吸水性が大きく変化しているものと予想されることから、次に試験体の吸水性および吸水による剥離量について評価した。

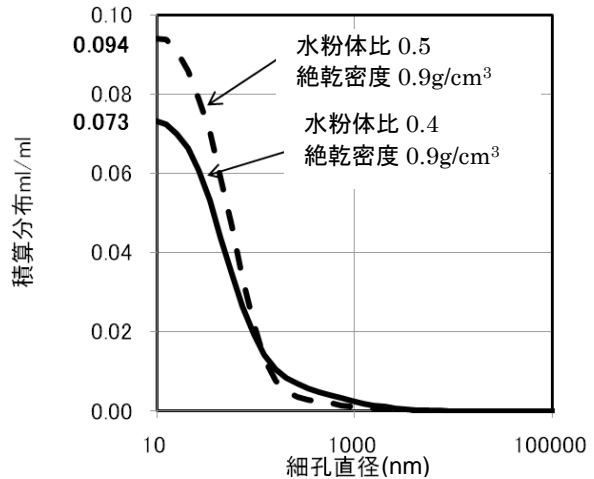


図-4 水銀圧入法による軽量気泡コンクリート硬化体の空隙構造解析結果

3.4 吸水率および剥離量の変化

図-5 に RILEM CIF 法による凍結融解試験での剥離量と吸水率の変化を示す。比較として水粉体比 0.5、絶対乾密度 0.58g/cm³ の現行の ALC の結果も記載した。

7 日間の下面吸水後、凍結融解試験が開始されると、ALC では凍結融解試験開始直後から吸水率が増加し、剥離量が著しく増加していることが明らかであり、ALC の凍結融解抵抗性（剥離抵抗性）は非常に低い。一方、水粉体比を 0.4 とした軽量気泡コンクリートについては、吸水率は凍結融解試験進行とともに増加しているものの凍結融解試験終了時の 56 サイクルにおける吸水率は現行の ALC に比べ低下しており、剥離量も凍結融解試験が進行しても増加せず、56 サイクルにおいてもほとんど剥離していない。これは水粉体比を 0.4 とした軽量気泡コンクリートでは、3.3 で示したように、独立空隙をつなぐ

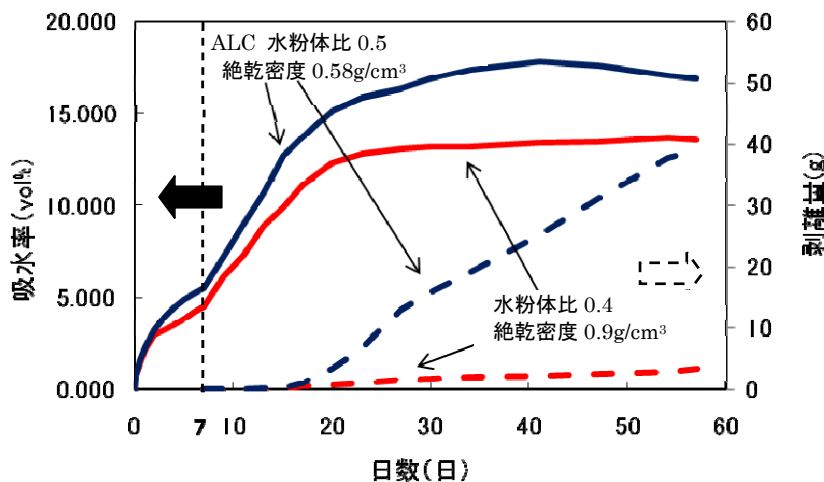


図-5 RILEM CIF 試験による軽量気泡コンクリートの吸水率および剥離量の変化(実線:吸水率、破線:剥離量)

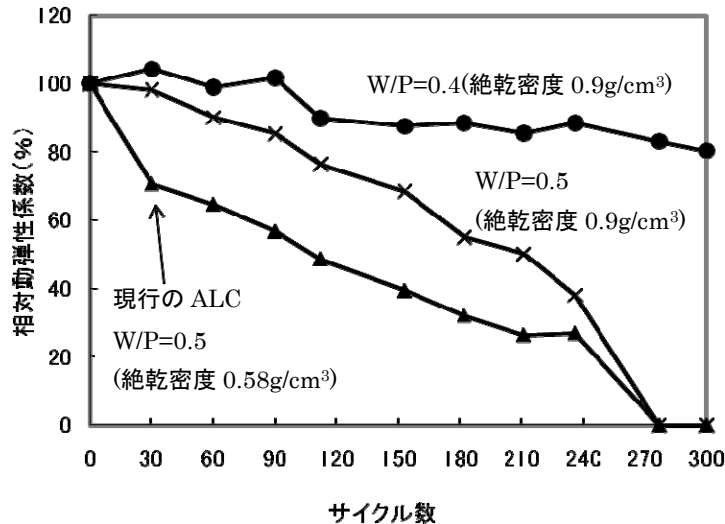


図-6 凍結融解試験における軽量気泡コンクリートの相対動弾性係数の変化

連通した空隙（連通空隙）が少ないために吸水性が大きく低下したためであると推察される。

3.5 軽量気泡コンクリートの凍結融解抵抗性

最後に、水粉体比を 0.4 および 0.5 の条件で作製した軽量気泡コンクリートの凍結融解試験を行った結果を図-6 に示す。

現行の ALC では凍結融解試験開始時から相対動弾性係数は大きく低下しており、60~90 サイクルの間で相対動弾性係数は 60%以下となり、270 サイクル程度で相対動弾性係数は 0%となっており、試験体は崩壊した。また、3.1において選定した破泡しにくい安定な気泡をモルタルに連行することが可能であるアルキルエーテルサルフェート塩系(AES)気泡剤を用いた場合でも、水粉体比が 0.5 の場合には、相対動弾性係数はサイクル数の増加とともに低下しており、180 サイクル程度で相対動弾性係数は 60%、現行の ALC と同様に 270 サイクル程度で相対動弾性係数は 0%になっている。一方、水粉体比(W/P)を 0.4 とした試験体では、凍結融解試験のサイクル数が増加しても相対動弾性係数に大きな低下は見られず、凍結融解試験終了時の 300 サイクルにおいても 80%以上の相対動弾性係数を維持しており、優れた耐凍害性を示していることが明らかである。

以上のように気泡組織および硬化体の空隙構造を制御することにより凍結融解抵抗性に優れた軽量気泡コンクリートを作製することが可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究ではポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤による水比の低減、および起泡プロセスについて着目し、各種の気泡剤により導入される気泡の安定性の評価し、最適

な気泡剤を選定し、さらにその気泡剤を用いて水粉体比の異なる軽量気泡コンクリートを作製し凍結融解抵抗性の評価を行い、吸水性状、気泡組織などの点から考察を行い、耐凍害性に優れた高耐久性軽量気泡コンクリートの開発を目的とした検討を行った。その結果、以下のことを明らかとした。

- (1) アルキルエーテルサルフェート塩系の気泡剤を選定することにより、絶対乾密度が 0.9g/cm^3 の軽量気泡コンクリート試験体を安定的に製造する事が可能である。
- (2) アルキルエーテルサルフェート塩系の気泡剤を使用し、水粉体比 0.4、絶対乾密度 0.9g/cm^3 としたことで、軽量気泡コンクリート硬化体中に $0.025\text{mm}\sim 0.375\text{mm}$ までの比較的小さいサイズの気泡が分布する気泡組織が構成できることを明らかとした。
- (3) 水粉体比 0.4 の場合は、0.5 のものに比べ連通していると考えられる空隙量(連通空隙量)が大きく低下していることが明らかとなった。
- (4) 気泡剤を用いて水粉体比 0.4、絶対乾密度 0.9g/cm^3 とした軽量気泡コンクリートは優れた凍結融解抵抗性を示した。
- (5) 優れた凍結融解抵抗性を示した理由は、水粉体比 0.4、絶対乾密度 0.9g/cm^3 とすることで、軽量気泡コンクリート硬化体の気泡組織および空隙構造が変化し、吸水性を低減させることが可能となるためであると考えられた。

参考文献

- 1) 光田武：水熱化学ハンドブック，技報堂出版，1997
- 2) 橋大介ほか：高強度軽量コンクリートの対凍結融解性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.6, pp.237-240, 1984

- 3) 飛坂基夫, 真野孝次: 低水セメント比コンクリートの耐凍結融解性の向上, 日本建築学会コンクリート構造物の凍害とその対策シンポジウム論文集, pp.19-26, 1992
- 4) 橋爪進, 榊田佳寛, 阿部道彦, 羽木宏: 高強度コンクリートの空気量が圧縮強度および耐凍害性に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演概要集(九州), pp.535-536, 1989
- 5) 濱幸雄, 田畑雅幸, 渡辺俊弘: 高比重化した軽量気泡コンクリートの耐凍害性能, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.624-629, 1992
- 6) 浅賀喜与志, 青木幸二, 加藤一樹, 菊間勲: 粒径をそろえた各種ポルトランドセメントの水和反応と硬化体組織, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.8-14, 2000
- 7) 吉田亮, 岸利治: 水銀圧入過程における内部空気泡の関与と水銀圧入の有効圧力範囲に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.68-75, 2006