促進炭酸化した ALC における 熱特性の評価

EVALUATION OF THE THERMAL PROPERTIES OF ALC SUBJECTED TO ACCELERATED CARBONATION

水谷吉克 — * 1 橘高義典 — * 2
松沢晃一 — * 3 菅谷典央 — * 1

Yoshikatsu MIZUTANI — * 1 Yoshinori KITSUTAKA — * 2
Koichi MATSUZAWA — * 3 Norio SUGAYA — * 1

キーワード：
ALC パネル, 促進炭酸化, 熱伝導率, 耐火性能

Keywords:
ALC panels, Accelerated carbonation, Thermal conductivity, Fireproof performance

This study deals with the thermal properties of ALC panels subjected to accelerated carbonation. Difference in the thermal conductivity of ALC subjected to accelerated carbonation was marginal, scarcely affecting its heat insulation design values. Also, up to a degree of accelerated carbonation of 70%, the temperatures within ALC panels including steel reinforcement were comparable to those of uncarbonated ALC panels during fire resistance testing. Accelerated carbonation therefore causes no appreciable difference in the heat- and flame-shielding performance of ALC panels evaluated by fire resistance testing.

1. はじめに

ALC パネルは, 昭和 40 年代に生産が本格化し, 鉄骨造建築物を中心に壁, 床, 屋根などあらゆる部位に広く用いられてきた。一般に使用されている ALC は, 珪石, 生石灰, セメントを主原料にし, アルミニウム粉末の反応による 70vol% 超の独立気泡を有し, 密度が 500kg/m^3 程度で, 構造部材に用いる窯業系建築材料としては極めて軽量であるとともに断熱性も高い。

ALC パネルは, 昭和 54 年の省エネルギー法制定後に省エネルギー協力製品として通産大臣から指定され, 同年の JIS A 5416 オートクレーブ養生された軽量気ほうコンクリート製品の改正では, 断熱性能に関する規定が追加されている。建築基準法に規定される耐火性能も有し, 建築基準法施行令第 107 条の規程に基づく昭和 39 年建設省告示第 1675 号の制定以来, 今日まで耐火部材として指定され, 高度成長期以降の建築物の防災化に大きく寄与してきた。

近年, 建築物の長寿命化が求められるようになり, 建築材料の耐久性に対する関心が高くなっている。ALC の特徴である軽量性, 耐火性, 断熱性についても, 経年化がそれら性能に与える影響に関する知見が求められている。

ALC の経年化による変質要因の一つに, 空気中の炭酸ガス(CO_2)との反応による炭酸化があり, それは主要鉱物であるトバモライト($\text{tobermorite } 5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)が CO_2 と反応し, シリカゲル($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)と炭酸カルシウム(CaCO_3)を生成することである¹⁾。炭酸化による ALC の収縮が微亀裂の発生原因となり, それに伴い物性低下を生じる事が報告されている²⁾。炭酸化による物性変化については, ALC の強度ならびに ALC パネルの曲げ強さに関する報告がされているが³⁾, ALC の特徴である断熱性や耐火性などの熱特性に関する報告は少ない。

そこで本研究では ALC の熱特性について, 促進炭酸化した ALC の断熱性能ならびに, 小型炉を用いた加熱試験による ALC 各部の温度測定を行い, ALC パネルの耐火性能の評価を行った。

2. 促進炭酸化した ALC の断熱性能の評価および密度変化

2.1 概要

ALC の炭酸化の進行度合いと熱伝導率の関係を確認するため, ALC の促進炭酸化を行い, 熱伝導率を測定した。

2.2 試験体寸法および試験体の促進炭酸化

試験体は, 各試験体の密度に大きな差異が生じないように, 製造時の発泡方向に対してほぼ中央部より採取した同一型枠で製造された ALC ブロック(無補強)を, $25 \times 200 \times 200(\text{mm})$ を目標寸法となるように採寸したものとした(図 1 参照)。試験体の促進炭酸化は, 密閉された容器(約 0.8m^3 , 内部攪拌送風機付)で, 湿度 90%, CO_2 濃度 1.0% の大気圧下にて行った。なお, 本試験に用いた ALC は, JIS に適合する ALC パネルと同一型枠から採取したもので, 絶乾密度が 489kg/m^3 のものである。

2.3 炭酸化の進行度合いの測定

本研究に用いる試験体 ALC の炭酸化の指標は, 飽和炭酸化反応状態を 100% とする炭酸化進行度(Carbonation Progression Degree, 以下 CPD) とし⁴⁾, 採取試料を飽和炭酸化状態とした場合に, ALC 中の CaCO_3 の熱分解により発生する CO_2 量に対する, 採取時試料

図 1 熱伝導率試験体採取状況

^{*1} クリオン(株)技術開発部
(〒488-0052 尾張旭市下井町下井 2035 番地)
^{*2} 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 教授・工博
^{*3} 建築研究所 博士(工学)

^{*1} Technology and Development Dept., Clion Co., Ltd.
^{*2} Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.
^{*3} Building Research Institute, Dr. Eng.

の同 CO₂ 量の割合とした。CPD の測定は、熱伝導率、含水率の測定後に試験体中央部から、コルクボーラーにて厚さ方向に貫通するように試料を採取し、文献 4) に準じて実施した。

2.4 熱伝導率等の測定

促進炭酸化した試験体は、20℃、相対湿度 60%にて質量変化がなくなるまで乾燥し、熱伝導率の測定に供した。熱伝導率は、JIS A 1412-2:1999 熱絶縁材の熱抵抗および熱伝導率の測定方法 - 第2部熱流計法(HFM 法)により測定し、各試験体の熱伝導率は3回測定した値の平均値とした。なお、試験体の含水率は、熱伝導率測定直後に実施した 105℃48 時間による乾燥前後の質量差を基に算出した値とするとともに、試験体寸法から絶対密度を算出した。

2.5 試験結果および考察

図 2 に、熱伝導率と CPD の関係を、各試験体の含水率とともに示す。各試験体の含水率は 2.05～2.23wt%で、試験体温度は 20℃であった。一般に気温 20℃、相対湿度 60%における ALC の平衡含水率は 2wt%前後とされ¹⁾、本試験体は平衡含水状態に近い含水率と判断される。促進炭酸化した ALC の熱伝導率は 0.129～0.135W/m・K の範囲にあった。ただし、ALC の CPD と熱伝導率変化との間には明確な相関関係は確認されない。JIS A 5416 ALC パネル²⁰⁰⁷では断熱性能は熱抵抗値で規定され、断面が均等な熱性能と仮定した場

合の熱伝導率換算値は 0.19W/m・K である。

本試験の結果では、促進炭酸化の有無ならびに CPD の大きさに関わらず、JIS 規格値を満足する結果が得られた。また、断熱設計を行う場合に一般的に用いられる ALC の熱伝導率値($\lambda=0.17\text{W/m}\cdot\text{K}$)⁵⁾に対しても、全ての測定値ならびに平均値(0.13 W/m・K)は、設計値に対しても大きく満足する値となった。これらのことから、促進炭酸化による ALC の熱性能の変化は、ALC の断熱性能の評価に影響を与えない程度と評価される。

図 3 に、試験体の絶対密度と CPD の関係を示す。前述のように ALC の炭酸化は、主要鉱物であるトバモライトが空気中の CO₂ と反応し、SiO₂・nH₂O と CaCO₃ を生成することであり、空気中の CO₂ の吸収と生成される H₂O の蒸散による質量差が、炭酸化による ALC の絶対質量の増加分となる。ALC の経年化が進むと密度が大きくなるとされているが、本試験結果でも炭酸化が進行すると密度が比例的に増加することが確認された。

3. 促進炭酸化した ALC パネルの耐火性能の評価

3.1 概要

ALC パネル(厚形パネル)を用いた建築物は、建築基準法第 2 条第 7 号の規定に基づき、非耐力の壁は 1 時間(75mm 厚以上)、床は 1 時間(100mm 厚以上)、屋根は 30 分(75mm 厚以上)の耐火構造として指定されている。耐火構造として必要な性能に、遮熱性、遮炎性そして非損傷性があり、部位に応じた性能が必要とされている。

耐火構造の性能評価(耐火試験)は、公的試験所などが定める耐火性能・評価業務方法書(一般社団法人 建材試験センター発行)などに基づき行う。

本研究では、促進炭酸化した ALC パネルの小型耐火炉を用いた加熱試験結果をもとに、ALC パネルの遮熱性能、遮炎性能などの耐火性能に対する促進炭酸化の影響について検討する。

3.2 試験体

試験体は、JIS A 5416 の規定に適合する ALC パネルから切り出した、寸法が 100×600×400(mm)の ALC パネルとし、CO₂濃度 0.3%、相対湿度 90%にて、表層部の CPD が 50%(試験体 No.2)と 70%(試験体 No.3)を目処とした促進炭酸化を行った 2 種類の試験体および、促進炭酸化を行わない試験体(No.1)の、計 3 体の試験体を加熱試験に供した。

3.3 試験方法

加熱試験は、LPG を熱源とした小型水平炉(内法:515×515×530(mm))に試験体となる ALC パネルを載置し、ISO834 に準拠した標準加熱曲線に従い、試験体の片面に 1 時間の加熱を行った(以下、耐火加熱)。試験体両側には塞ぎ材としてセラミックファイバーを介して ALC 材を配置した。各部の温度測定は、試験開始後から加熱終了後 2 時間まで測定した。耐火加熱試験の実施状況を図 4 に示す。

試験体の ALC パネルには、加熱側および加熱側裏面に、主筋(5φ)が配置(設計振り寸法 15mm)されている(図 5 参照)。本試験では、試験時における双方の補強筋の温度を測定するとともに、加熱面(炉内)および加熱裏面の ALC 温度ならびに、試験内部の温度として加熱面より 15,30,45,55,70,85mm の各位置の温度変化を測定した(図 6 参照)。試験体内部の各測定点の温度は、試験体の加熱側裏面より測定位置深さまで削孔(20φ)し、孔底あるいは鉄筋(防錆材は部分除

図 2 熱伝導率と炭酸化進行度

図 3 密度と炭酸化進行度

去)に接するように熱伝対を設置した。その後欠損部にセラミックスファイバーを密実に充填し、表面を無機質系の断熱パットとアルミ粘着テープで密閉した。熱伝対の設置状況を図 7 に示す。温度測定は各位置について 2 箇所とし、最高温度の高い方を当該深さ位置の測定温度とした。なお温度測定は、全ての測定点の温度上昇の停止を確認した上で終了した。

図 4 耐火加熱試験の実施状況

図 5 試験体パネル

図 6 温度測定位置

図 7 熱伝対設置状況

3.4 測定結果および考察

3.4.1 試験体の炭酸化進行度

各試験体の断面の CPD を図 8 に示す。フィールドにおける ALC パネルでは、断面の CPD は表層部と中心部の差異が小さいことが報告されている⁷⁾。また、CO₂が高濃度下での促進炭酸化では、表層部と中心部の炭酸化の進行度合いに明確な差異を生じる⁸⁾。0.3%濃度での本試験においても、表層部と中心部の差異が、表層部の CPD が 50.0%の試験体 No.2 で 17.2%, 同じく 72.7%の試験体 No.3 で 20.9%の違いを生じ、促進炭酸化を行っていない試験体 No.1 についてはその差異は 6.4%程度と小さかった。

3.4.2 炉内温度

本試験における試験体加熱面温度(炉内温度)と ISO834 に規定される標準加熱曲線を、試験体 No.3 を例に図 9 に示す。本試験における加熱温度は、防耐火性能・評価業務方法書(前出)に規定される許容誤差内に有り、他の試験体の加熱面温度についても ISO834 の標準加熱曲線に対する誤差は許容値内にあった。

3.4.3 遮炎性

試験終了・冷却後の各試験体の加熱面の状況を写真 1 に示す。全ての試験体の加熱面全体にひび割れが発生し、CPD が高くなるに従い、ひび割れ幅が広くなり、ひび割れ状況が明確となる。

図 8 試験体断面の炭酸化進行度

図 9 加熱温度曲線

試験体 No. 1 (促進炭酸化前)

試験体 No. 2 (表層部炭酸化進行度 50.0%)

試験体 No. 3 (表層部炭酸化進行度 72.7%)

写真 1 各試験体の加熱面の状況

これら加熱によるひび割れが加熱裏面側まで到達しパネル面に火炎の噴出または発炎を生じることはなく、防耐火性能・評価業務方法書(前出)に規定される遮炎性能を満足した。表層部の CPD が 73% までの 100mm 厚 ALC パネルにおいて、促進炭酸化は遮炎性に影響を及ぼさないと評価できる。なお、本試験はパネル面の遮炎性能を確認したもので、促進炭酸化した ALC パネルで構成される目地部の検証はしていない。耐火性能は複数枚のパネルにより構成する部位全体の性能であり、耐火性能検討にはパネル間目地部の検討・確認が必要で、今後の課題とする。

3.4.4 裏面温度

各試験体の裏面温度を、図 10 に示す。防耐火性能・評価業務方法書(前出)に規定される遮熱性能に関する判定基準は、試験体裏面上昇温度が、測定点の平均で 140K 以下、最高で 180K 以下である。本試験における裏面温度測定値の最大値は、促進炭酸化をしていない試験体 No.1 で 74℃、CPD が 50.0%の試験体 No.2 も 74℃、CPD が 72.7%の試験体 No.3 で 68℃であった。試験時の気温は 11℃～16℃で、全ての試験体の裏面上昇温度は 140K 以下で、試験体ごとの裏面温度の明確な差異はない。表層部の CPD が 73%までの 100mm 厚 ALC パネルは、促進炭酸化は ALC パネルの遮熱性に影響しないと評価される。

なお遮炎性と同様に、本試験はパネル面の遮熱性能を確認したもので、促進炭酸化した ALC パネルで構成される目地部の検証はしていない。目地部の検証は、今後の課題とする。

図 10 試験体の裏面温度

3.4.5 試験体内部温度

各測定位置の ALC 温度を、図 11 および図 12 に示す。各測定位置における測定温度の推移と CPD とには明確な関係は確認できない。促進炭酸化を行っていない試験体 No.1 の測定位置 15mm と 45mm の温度は他の試験体よりも高い推移を示すが、測定位置 30mm においては試験体 No.1 と No.3 は近似した温度の推移を示す。なお、55mm より加熱面に近い測定位置では、試験後の観察により測定部分に加熱面から貫通するひび割れが目視確認できる。

図 11 パネル内部温度(加熱面～45mm)

図 12 パネル内部温度(55mm～加熱裏面)

図 11 および図 12 では各測定位置に各試験体の最高温度の到達時間に若干の差異があり、それは加熱面側から測定点まで到達するひび割れの発生早さの違いによるものと推定する。図 13 に示す様に、各位置の最高温度は、試験体毎の顕著な差異はなく、加熱終了時のひび割れ到達状況に違いは無いと思われる。加熱面より 55mm 以上の位置では、近似した温度上昇過程を経ており、試験後の目視でも測定点にひび割れは確認されない。耐火試験における ALC パネル内部の温度に、促進炭酸化は影響を与えないと評価する。

3.4.6 パネルのたわみ進行予測

パネルの下面から加熱される床の耐火試験では、载荷加熱中の非損傷性能の確認として、加熱による試験体の鉛直方向のたわみの増加状況が評価の対象となる。促進炭酸化した ALC パネルは、ALC の圧縮強度が低下する傾向を示す為、加熱前の载荷時における初期たわみが増加するが⁹⁾、初期のたわみ量は耐火性能の評価とは無関係である。パネルの圧縮側 ALC の強度が、加熱による温度上昇により低下すると、たわみ量が増大する。図 13 によれば、中立軸より加熱裏面側の ALC 温度の温度は、CPD50%の場合の測定位置が 55mm における 229℃が最高値で、圧縮縁に近くなるほど温度は低下する(図 12 参照)。ALC は 400℃までの高温下において強度は低下せず、増大する傾向にあるとの知見がある¹⁰⁾。

図 13 ALC 各測定点の最高温度

図 14 補強鉄筋温度(主筋)

したがって、本加熱試験の ALC の温度上昇範囲では、ALC の強度上昇によるパネルたわみ減少の原因と成り得るかもしれないが、たわみ増大の要因の一つにはならないと考える。

本試験での鉄筋温度(主筋)を図 14 に示す。引張鉄筋の最高温度は、試験体 No.2 の 723℃である。より炭酸化が進行した試験体 No.3 では 591℃で、促進炭酸化を行っていない試験体 No.1 は 609℃である。鉄筋の温度上昇による熱膨張は、加熱時のたわみ増加に最も影響する。本試験では、CPD と最高温度との間の相関関係は確認されなかったが、本試験結果での最高温度が試験体 No.2 の 723℃であり、鉄筋の温度上昇速度が速いことにより、耐火試験におけるたわみ速度の上昇の可能性があるが、明確な傾向は確認できない。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本研究に用いた ALC は、CPD が 10%進行すると密度が 7.5 kg/m³増加する。
- (2) CO₂ 濃度 1.0%における促進炭酸化は、試験体温度 20℃での ALC の断熱性能評価に影響を及ぼさない。
- (3) CO₂ 濃度 0.3%による促進炭酸化を行った ALC パネルは、表層部が 70%程度までの促進炭酸化においては、1 時間の耐火加熱に対し、促進炭酸化を行っていない ALC パネルと近似した内部温度上昇傾向を示すとともに、促進炭酸化を行わない ALC パネルと同等の遮熱性、遮炎性を有する。
- (4) ALC 床パネルの载荷加熱試験における中立軸より加熱裏面側の ALC 上昇温度は、たわみの増加に影響を与えない。

参考文献

- 1) 落合 毅：オートクレーブ養生軽量気泡コンクリートの炭酸化、石膏と石灰、No.242, pp.22-31, 1993
- 2) 松下文明, 青野義道, 柴田純夫：オートクレーブ養生軽量気泡コンクリートの炭酸化収縮, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.463~468, 2005.6
- 3) 松下文明, 柴田純夫, 中村文彦, 浅野武彦：軽量気泡コンクリート(ALC)の耐久性向上, 軽量気泡コンクリート(ALC)の炭酸化判定法, 日本建築学会技術報告集第 9 号, pp.29-32, 1999.12
- 4) 水谷吉克, 橋高義典, 松沢晃一, 家田 芳幸, 松尾 憲樹：炭酸化飽和状態に基づいた ALC の炭酸化進行度の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 718 号, pp.1833-1839, 2015.12
- 5) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS21 ALC パネル工事, pp.37-38, 2005
- 6) 笠井芳夫/編：軽量コンクリート, 技術書院, p.216, 2002.11
- 7) 安井基浩, 中山友里, 中田佳伸, 河合智：駅舎における ALC 屋根の経年変化に関する実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1447-1448, 2013.8
- 8) 水谷吉克, 橋高義典, 松沢 晃一, 家田 芳幸：炭酸化が進行した ALC における各種仕上塗材の炭酸化抑制効果, 日本建築学会技術報告集, 第 22 巻, 第 51 号, pp.431-434, 2016.06
- 9) 白山和久, 上村克郎:気泡コンクリート, オーム社, pp.90-91, 1964.03

[2016 年 2 月 1 日原稿受理 2016 年 4 月 11 日採用決定]