

# 論文 促進炭酸化した ALC の高温下における力学的特性に関する研究

國枝 陽一郎\*1・高木 恵里\*2・橋高 義典\*3

**要旨：**本研究では、促進炭酸化した ALC 試験体の高温加熱下における圧縮試験により、経年化した ALC の耐火加熱における強度変化の推定ならびに耐火性能における非損傷性の保持能力の検討を行った。その結果、炭酸化進行度(CPD)が大きいほど圧縮強度およびヤング係数残存比は低下し、高温下においても両者は低下することが明らかになった。また、圧縮時の試験体含水率や加熱温度を考慮することで、ALC の高温下における圧縮強度の推定が可能であることが示された。

**キーワード：**ALC, 促進炭酸化, 圧縮強度, 高温加熱, 加熱時載荷

## 1. はじめに

ALC(Autoclaved Lightweight aerated Concrete)は軽量性・断熱性・耐火性・施工性等の多くの優れた性質を持っていることから、鉄骨造建築物を中心に幅広く使用されてきた。国内においては、特に建築基準法に規定される耐火性能を有していることから、内部に補強鉄筋を配したパネル建材が、耐火部材として帳壁(非耐力壁)に用いられることが多い。近年の国内出荷量は年間 160 万 m<sup>3</sup> 程度であり、一時期出荷量が大きく落ち込んだ年間約 145 万 m<sup>3</sup> から徐々に回復傾向にあり、出荷量および建築物のストック量の多い建築材料であるといえる。建築物の長寿命化が求められる近年において、ALC についても経年化がその性能に及ぼす影響に関する知見が求められている。ALC の経年化の主な要因として、空気中の CO<sub>2</sub> による炭酸化が挙げられる<sup>2)</sup>。ALC の耐火性能に関して、建築基準法により規定された耐火性能試験は原則として実部材と同一の形状および大きさの試験体を使用していることが必要とされているが、実構造物から経年化した ALC パネルを採取して耐火性能試験を行うことは非常に困難である。これに対し水谷らは、促進炭酸化により ALC の経年化を再現し、経年化による耐火性能への影響を実験室スケールの試験体を用いて検証し遮熱性や遮炎性に関する知見を得ている<sup>3)</sup>。

これに対し本研究では強度特性に焦点を当て、促進炭酸化した ALC の高温加熱下での圧縮試験により、経年化した ALC の耐火加熱における強度変化の推定ならびに耐火性能における非損傷性の保持能力の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

本研究で用いる試験体は、品質のばらつきを抑えるため、同一の型枠で製造された ALC ブロック(100×600×

500mm)から、ALC の発泡方向(600mm)に対して垂直となるように幅中央部を中心に 75×75×150mm を目標寸法として切り出した。図-1 に試験体の採取状況、および圧縮試験時の加力方向を示す。

試験体の含水率は、高温下での乾燥収縮によるマイクロクラックの発生などによる ALC 強度低減を防ぐため 50℃に設定した乾燥機を用いて調整した。含水率の計算は JIS A 5416:2016 軽量気泡コンクリートパネル (ALC パネル) に基づき行った。

試験体の促進炭酸化は温度 20℃、湿度 90%、CO<sub>2</sub> 濃度 1.0%の大気圧下にて、密閉された容器(0.8m<sup>3</sup>)にて行った。以降、本論文における試験体の呼称について、促進炭酸化を行っていない試験体を「プレーン試験体」、促進炭酸化を行った試験体を「促進炭酸化試験体」とする。

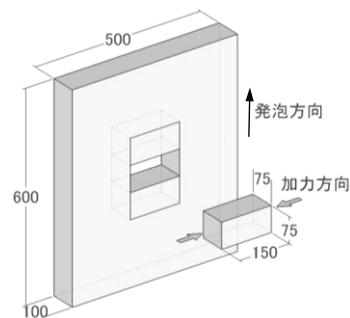


図-1 試験体採取状況および圧縮時の加力方向

### 2.2 炭酸化進行度(CPD)測定方法概要

本研究で用いる試験体の炭酸化の指標は、飽和炭酸化反応状態(すべての ALC 部材が炭酸化を完了している状態)を 100%とする炭酸化進行度(CPD(Carbonation Progression Degree))とし、採取試料を飽和炭酸化状態とした場

\*1 首都大学東京 都市環境学部都市環境学科建築都市コース助教 Ph.D. (正会員)

\*2 首都大学東京 都市環境学部都市環境学科建築都市コース

\*3 首都大学東京 都市環境学部都市環境学科建築都市コース教授 工博 (正会員)

合に対する ALC 試料中の  $\text{CaCO}_3$  の熱分解により発生する  $\text{CO}_2$  量の割合とした(式(1))。

$$\text{CPD}(\%) = (a/b) \cdot 100 \quad (1)$$

$a$  : 採取試料  $\text{CaCO}_3$  中の  $\text{CO}_2$  量  
 $b$  : 飽和炭酸化試料  $\text{CaCO}_3$  中の  $\text{CO}_2$  量

CPD の測定は、モニター用試験体において既往の研究<sup>4)</sup>に準じて実施し、本研究で用いる試験体の目標 CPD の水準は 50, 60, 70% の 3 種類とし、各水準につき 1 体の小口方向断面の CPD を測定し、試験体断面の表層部および中心部における CPD に大きな差がないことを確認した。目標 CPD の設定にあたっては、「促進炭酸化における炭酸化進行度が 50% を超えると ALC の圧縮強度が促進炭酸化前の初期強度を下回り始める」という水谷らの報告<sup>5)</sup>を参考にした。

### 2.3 試験項目および方法

はじめに予備試験として試験体寸法および含水率による強度影響の把握と本試験における加熱条件の決定を行った。本試験ではプレーン試験体における加熱温度による力学的特性への影響、および炭酸化進行度(CPD)による加熱の力学的特性への影響を把握するとして、CPD の異なる試験体の高温加熱下での圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。またそれを元に ALC の高温下における力学的特性の推定を試みた。

#### (1) 予備試験

##### (a) 試験体寸法による強度影響の把握

JIS A 5416 で規定された試験体寸法は  $100 \times 100 \times 100\text{mm}$  であるのに対し、本研究で用いる試験体は使用試験機の寸法より  $75 \times 75 \times 150\text{mm}$  に設定しているため、その寸法差による圧縮強度差の確認として、本試験体と同様の手法で各寸法の ALC 試験体を作成し、強度比較を行った。各試験体 5 体のうち最大値と最小値を除いた 3 体分の圧縮強度の平均値を比較した結果、JIS 規定の試験体寸法と本研究で使用する試験体寸法の差による圧縮強度差は、有意水準 5% で両側検定の t 検定を行ったところ、 $t(4) = -0.6, p = 0.57$  となり有意差は見られなかった。

##### (b) 試験体含水率による強度影響の把握

本試験において、加熱の条件により圧縮時の試験体含水率に差が生じる。試験体含水率による圧縮強度への影響を排除するため、異なる含水率における圧縮強度を測定し、加熱中および常温下の試験体の水分による強度影響を確認した。目標含水率は 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10% とし、それぞれ 2 体ずつの試験体を用いてその平均値を比較した。含水率の調整は、はじめにすべての試験体を  $50^\circ\text{C}$  に設定した乾燥機を用いて絶乾状態にし、温度  $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 、湿度 90% に設定した促進槽にて測定した絶乾質量から目標含水率に相当する質量になった時点で

試験を行った。

図-2 に示す実験結果から、プレーン試験体の常温下での含水率と圧縮強度との関係式(2)を定めた。近似式の立式方法として、実験結果の分布形状から含水率を係数とした累乗近似曲線と判断し、その始点を絶乾時強度  $5.5\text{N/mm}^2$ 、終点を収束値の  $4.0\text{N/mm}^2$  とした。これに最も計測値との誤差を最小にする固有係数 A の値を求めることで決定係数 0.9402 の近似式が得られた。含水率の差によるヤング係数の影響は見られなかったことから、含水率による補正を行う必要はないと判断した。なお、試験体寸法による強度影響の試験結果も、同様に含水率による補正を行っていることを追記する。

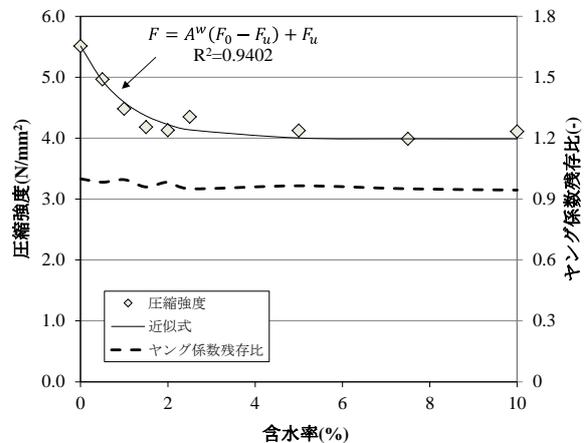


図-2 予備試験結果(試験体含水率による強度影響)

$$F = A^W(F_0 - F_u) + F_u \quad (2)$$

$F$  : 圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )  
 $A$  : 固有係数(ここでは 0.3944)  
 $W$  : 含水率(%)  
 $F_0$  : 含水率 0% における圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )  
 $F_u$  : 圧縮強度の収束値( $\text{N/mm}^2$ )

##### (c) 加熱条件の決定

加熱された ALC は、昇温速度により試験体の表層部と中心部とで温度差が生じ、熱膨張の差異による内部歪みによって圧縮強度に悪影響を与える可能性を考慮し、圧縮強度影響が十分小さい温度差となる昇温速度  $T_r$ 、および表層部が目標温度に到達後の中心部の目標温度到達までの保持時間  $T_m$  を検討した。加熱および圧縮試験の条件を表-1 に、実験結果を図-3 に示す。昇温速度  $T_r = 0.5, 1.0, 5.0(^\circ\text{C}/\text{min})$  における中心部目標温度到達保持時間  $T_m$  は、それぞれ  $T_m = 20, 30, 60(\text{min})$ 、圧縮強度はそれぞれ 4.1, 5.0, 4.2 ( $\text{N/mm}^2$ ) であった。昇温速度  $T_r = 0.5, 5.0$  における強度低下はそれぞれ加熱期間および昇温速度に由来する可能性があるとして、時間効率と安全性を考慮し、本試験の加熱試験における昇温速度を  $1.0(^\circ\text{C}/\text{min})$  とした。

図-4 に示す予備試験の  $T_r = 1.0(^\circ\text{C}/\text{min})$  の加温保持まで

の加熱履歴から、本試験の水準に用いる 200, 300, 400, 500°Cにおける中心部目標温度到達保持時間  $T_m$  を読み取り、本試験における加温保持時間とした。

表-1 要因と水準(加熱条件の決定)

要因	水準
目標温度(°C)	500
昇温速度 $T_v$ (°C/min)	0.5, 1.0, 5.0
目標加温保持時間 (min)	300(中心部目標温度到達保持時間 $T_m$ を計測)

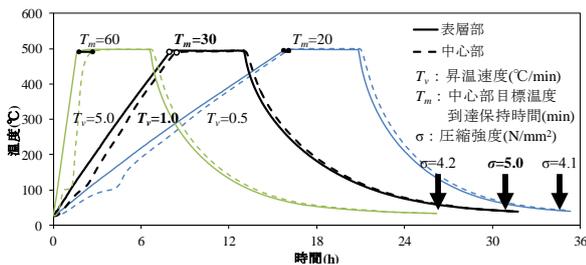


図-3 予備試験結果(加熱条件の決定)

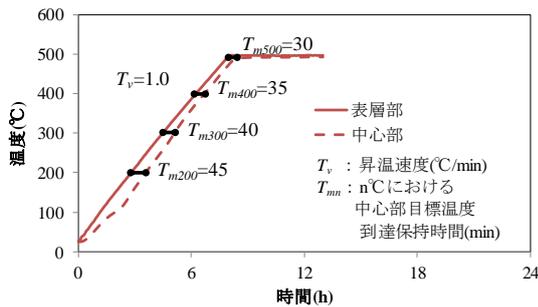


図-4  $T_v=1.0$ (°C/min) 加温保持までの加熱履歴

(2) 本試験

(a) 加熱温度による力学的特性への影響

本試験の要因と水準を表-2 に示す。促進炭酸化した ALC の高温下における力学的特性を確認するにあたり、まずはプレーン試験体における加熱温度による力学的特性への影響を確認する。試験は各目標温度における加温保持での圧縮試験と、加温保持後、常温まで自然冷却し

た後に圧縮試験を行う 2 種類について行い、それぞれで圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。比較のため、2.3.(1)(a) で圧縮試験を行った  $75 \times 75 \times 150$ mm 試験体の圧縮強度の平均値を、常温下における圧縮強度とした。試験体数は、加温保持は各目標温度につき 3 体ずつ、加温保持後冷却は 2 体ずつの平均値を比較した。なお 20°C の試験体については加温後温度が共に 20°C であるため結果を共有した。目標温度の設定にあたっては、既往の研究<sup>3)</sup>において床部材を想定した際の ALC パネルの耐火試験における加熱中の温度分布のうち、発生する曲げモーメントにおける圧縮側の ALC 内部の最高温度が 300°C 程度であったという報告を参考にした。加温保持での圧縮試験には、図-5 に示す高温加熱中における加力が可能な加熱炉設置型サーボコントロール式加力試験機 (MTS 社製) を用いた。加熱炉内で高温加熱中に圧縮試験を行うことから試験中の試験体の様子が目視できないため、安全性を考慮し載荷速度は変位制御によって行うこととした。予備試験における圧縮試験の結果から、JISA 5416 に規定される載荷速度  $0.1 \sim 0.2$  N/mm<sup>2</sup>/sec に相当する載荷速度  $0.031$  mm/sec を変位制御として設定した。最大荷重時における試験体変位はいずれも 1mm 前後であったことから載荷の終了点を変位 3mm とした。モニター用試験体を用いて設定速度における荷重制御への変換速度を算出し、整合性を確認した後に本試験を進めた。

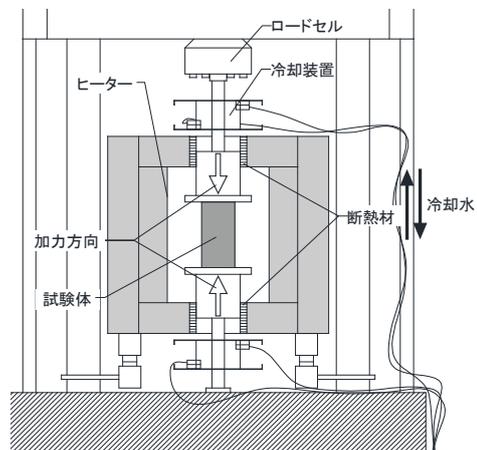


図-5 試験機概要

表-2 本試験の要因と水準

要因		水準				
目標温度(°C)		20	200	300	400	500
昇温速度(°C/min)		1.0				
目標加温保持時間(min)		—	45	40	35	30
プレーン	加温保持	○ <sup>1)</sup>	○	○	○	○
	加温保持後冷却	○	●	●	●	●
促進炭酸化 <sup>2)</sup>	加温保持	○	—	○	—	—

1) ○ : n=3, ● : n=2 2) CPD 水準 : 50, 60, 70%

なお、圧縮時の含水率に関して、加温保持は絶乾状態であるのに対し加温保持後冷却は若干の水分を含んだ状態になるため、試験体含水率による圧縮強度への影響を排除するために加温保持後冷却の圧縮強度について式(2)を用いて補正を行うこととした。

#### (b) 炭酸化進行度(CPD)による力学的特性への影響

促進炭酸化試験体における CPD による高温加熱時の力学的特性への影響を把握するため、CPD50, 60, 70%の試験体の 300℃加熱温度下での圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。比較のため、各 CPD について常温下における圧縮試験も行った。試験体は各水準につき3体ずつとし、それぞれの平均値を比較した。目標温度の設定にあたっては、プレーン試験体と同様に耐火試験中の圧縮側 ALC 内部の上昇温度についての報告結果<sup>3)</sup>から 300℃とした。

なお、圧縮時の含水率に関して、プレーン試験体と同様に式(2)を用い、絶乾強度へと補正を行った。これはプレーン試験体によって求められた補正式であるが、炭酸化による含水率が圧縮強度に与える影響は無視できるとの仮定に基づき適用した。その真偽においては結果において考察した。

### 2.4 本試験におけるヤング係数算出方法

JIS A 1149:2010 コンクリートの静弾性係数試験方法に規定されるヤング係数の算出方法では、圧縮試験時には試験体にひずみゲージを取り付ける必要があるが、本試験は高温加熱中の圧縮試験のためにひずみゲージを試験体に取り付けることが出来ないため、試験機の変位計測からヤング係数を算出することとした。JIS A 1149 で提案される最大応力比 1/3 点までの傾きの近似として最大応力比 1/6 点における傾きを本試験におけるヤング係数とした。該当点における傾きは、最大応力比 1/6 の点からその上下 1%区間の点を線形近似にて求め、3 点の傾きとして算出した。本試験におけるヤング係数に関する考察は、常温下でのヤング係数に対する残存比を用いて行うこととした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 加熱温度による力学的特性への影響

#### (a) 圧縮強度

プレーン試験体の加熱温度と圧縮強度との関係を図-6 に示す。20℃から 200℃の間には大きな強度低下が見られ、この理由として遠藤<sup>5)</sup>が実証した ALC 断面の高温加熱による荷重断面の減少が考えられる。200~500℃においては、加熱温度が高いほど圧縮強度が大きくなる。加熱による ALC の圧縮強度への影響については、強度低下の要因として乾燥収縮による微細なひび割れの発生が、強度向上の要因として含水率の減少や乾燥収縮によ

る変形の拘束効果が考えられる。これは ALC が 100℃以上 700℃未満までの加熱により圧縮強度が増加し、400℃付近で最大値を示すという Aroni ら<sup>6)</sup>の報告と合致する。

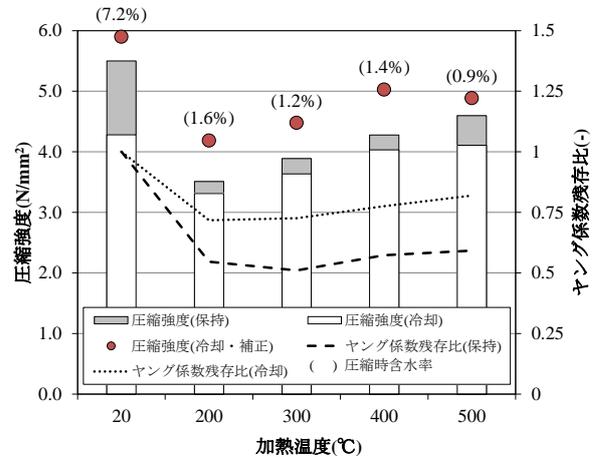


図-6 加熱温度と圧縮強度・ヤング係数残存比

また、加温保持後冷却において含水率による強度差への影響を排除するため式(2)による補正を行うと加温保持と近い値となった( $R^2=0.950$ )が、補正值の方が大きな値となっていることから、実際は加温保持においても圧縮時は絶乾状態ではなく若干の含水があったと考えられる。なお、温度が高くなるほど補正值との差が小さくなることより、加温保持圧縮時の含水率は温度が高くなるにつれて絶乾に近くなっているといえる。以上を踏まえ、今後式(2)を元に加温保持と加温保持後冷却とのより正確な関係性を立式し、相互間の推定を行うことも可能になると考えられる。

#### (b) ヤング係数残存比

図-6 に示す試験結果から、ヤング係数残存比においても加熱温度の差による変化は圧縮強度と同様の傾向を示し、200~500℃において、加熱温度が高いほどヤング係数残存比は大きくなるのがわかる。しかし、200~500℃のいずれの加熱温度においても加温保持と加温保持後冷却とで 20%程度の差がある。これより、加温保持の方が加温保持後冷却よりも圧縮時の変形量が大きく、その比率は加熱温度によらずほぼ一定であるといえる。これらの結果は高温下における ALC 部材のクリープ量変化の推測などに有益な知見と考えられる。

### 3.2 炭酸化進行度(CPD)による力学的特性への影響

#### (a) 圧縮強度

促進炭酸化試験体の CPD と圧縮強度との関係を図-7 に示す。常温下における圧縮強度は CPD が高いほど小さくなった。また、300℃加温保持においても同様に CPD の増加とともに圧縮強度は低下する傾向が見られたことより、加熱による圧縮強度低下は炭酸化が進行した ALC にも生じることがわかる。

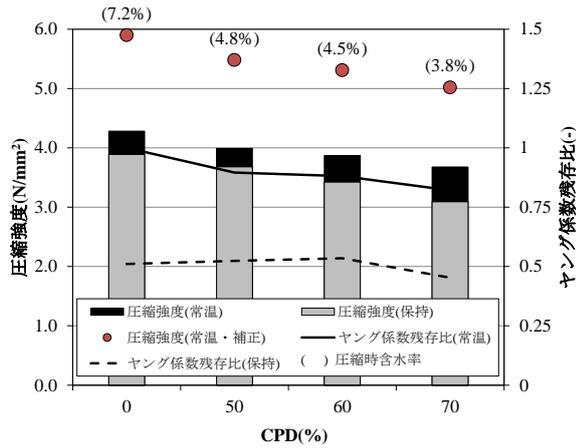


図-7 CPD と圧縮強度・ヤング係数残存比

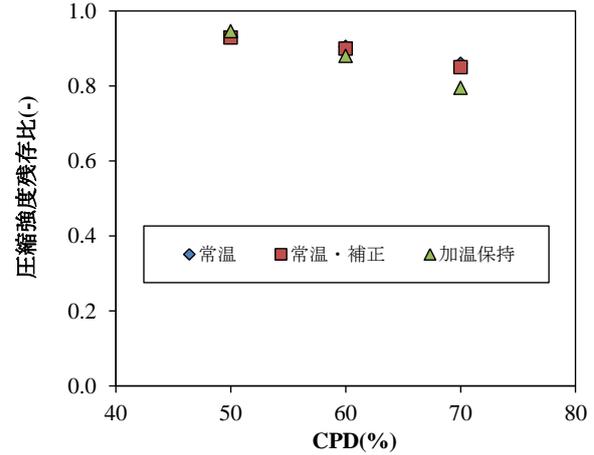


図-8 CPD による ALC の圧縮強度残存比

CPD による ALC の圧縮強度への影響としては、炭酸化によるトバモライトの結晶構造の変化が挙げられる。松下ら<sup>9)</sup>によると、炭酸化度(試料中の全 Ca 量に対する CaCO<sub>3</sub>中の Ca の割合)20%まではトバモライト結晶構造中の基本単位層間の Ca イオンの CaCO<sub>3</sub>化が進み圧縮強度は向上するが、炭酸化度 20%程度から基本単位層である Ca-O シート中の Ca イオンの溶脱が進行し、CaCO<sub>3</sub>の析出による強度上昇とトバモライト結晶の構造変化による強度低下の影響が高まり、炭酸化度 50%から 60%の間では特に顕著な構造変化が見られたと報告している。

水谷ら<sup>9)</sup>の報告によると、促進炭酸化した ALC の圧縮強度は CPD50%以降は CPD の増加に伴い圧縮強度残存率が線形関係を示して低下するとあり、その線形関係より下記の定義式(3)における回帰式(4)を得ている。

$$f_c = \text{圧縮強度の初期値} \times \text{圧縮強度残存率} \quad (3)$$

$$f_c : \text{促進炭酸化した ALC の圧縮強度(N/mm}^2\text{)}$$

$$x < 51.2 \quad \text{圧縮強度残存率}(\%) = 100 \quad (4)$$

$$51.2 \leq x \quad \text{圧縮強度残存率}(\%) = -0.71x + 132$$

$$x : \text{炭酸化進行度}(\%)$$

本試験における各 CPD ごとのプレーンに対する圧縮強度残存比を図-8 に、式(3)を用いた推定における各パラメータおよび推定値と実際の測定値の関係を図-9 に示す。なお、式(3)は常温下で含水率の影響も含めての推定式のため、本試験における常温下での圧縮(補正なし)のデータに対して適用した。

圧縮強度残存比においては、常温下での圧縮に比べ加温保持の方が圧縮強度残存比の CPD の増加に伴う低下率が高い。常温下での圧縮強度において式(3)による推定値と実際の測定値とを比較すると両者の R<sup>2</sup>値は 0.939 であった。本試験における常温下で圧縮強度の CPD による推移は、既往の知見と一致していたといえる。

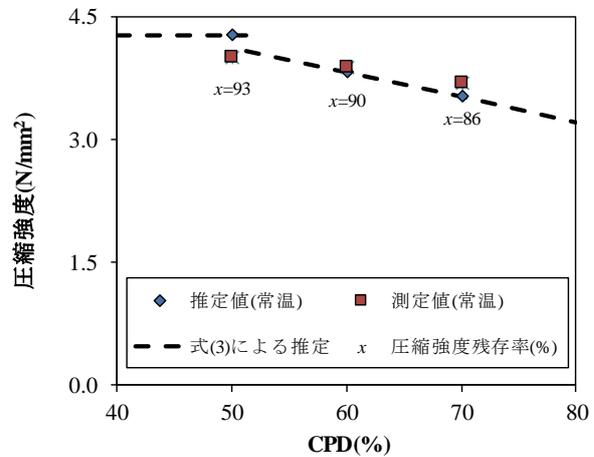


図-9 式(3)による推定値と測定値の関係

#### (b) ヤング係数残存比

図-7 に示す試験結果から、ヤング係数残存比は常温下と加温保持で圧縮強度と同様の傾向を示しており、CPD の増加に伴いヤング係数残存比は低下している。CPD 50%以降における常温下と加温保持での差はいずれも 40%程度であることから、加熱によるヤング係数低下は炭酸化により大きく影響を受けないことがわかった。

#### (c) 高温加熱下における CPD・圧縮強度の関係推定

加熱による強度低下に関して炭酸化が及ぼす影響を確認するため、常温下での試験結果に基づき加温保持における炭酸化進行度と圧縮強度との関係の推定式(5)を定めた。式(5)による推定値と測定値の関係を図-10 に示す。

$$\sigma_{(T,n)} = k_n \cdot \sigma_{(T,0)}, k_n = \frac{\sigma_{(20,n)}}{\sigma_{(20,0)}} \quad (5)$$

$\sigma_{(T,n)}$  : 温度  $T$  (°C), CPD $n$  (%)における圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

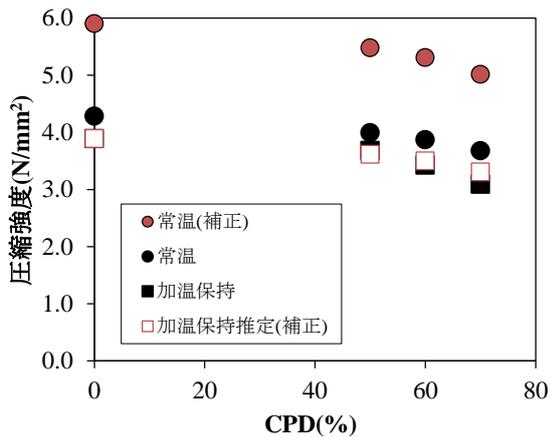


図-10 加温保持における推定値と測定値の比較

式(5)を用いた 300℃加温保持での圧縮強度の推定値は実際の測定値と近い値となった( $R^2=0.946$ )が、CPD60、70%においては推定値よりも測定値の方が小さい。常温下における CPD による圧縮強度の推移が高温加熱下でも同様となる前提の元に式(5)を定めたが、図-10 に示す結果より実際は加熱による強度変化において炭酸화가さらに強度低下に繋がる要因となっているといえる。

今回の推定において、常温下での圧縮強度を絶乾状態へ補正する式(2)はプレーン試験体の含水率 0~10%における圧縮強度試験データから立式したが、図-11 に示すように CPD が異なる場合の含水率ごとの強度推移の検証が不十分であることから、今後それらについて細かく検証することで、より正確な推定式の立式および炭酸化による加熱時の力学的特性の推定が可能と考えられる。

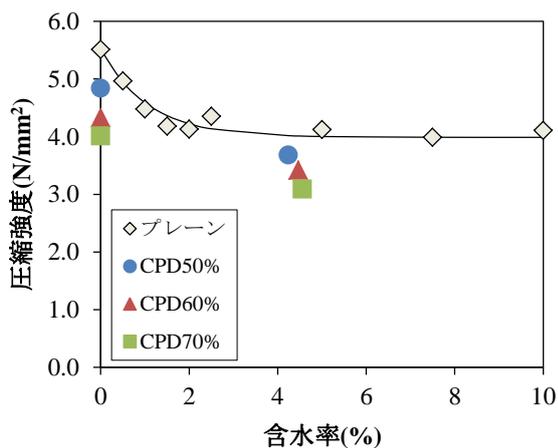


図-11 含水率と圧縮強度との関係

#### 4. まとめ

本研究の結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) プレーン試験体においては、200~500℃の温度範囲では加熱温度が高いほど圧縮強度およびヤング係数残存比は高くなる。
- (2) 圧縮試験時の含水率による強度差を考慮することで、プレーン試験体の加温保持と加温保持後冷却における圧縮強度の関係が推定可能と考えられる。
- (3) プレーン試験体のヤング係数残存比は、加温保持の方が加温保持後冷却よりも常にほぼ一定の比率で低いことより、圧縮時の変形量は加温保持の方が大きく、その比率は加熱温度による影響を受けない。
- (4) 促進炭酸化試験体において、常温下・加温保持共に炭酸化進行度(CPD)が大きいほど圧縮強度およびヤング係数残存比は低下する。
- (5) 促進炭酸化試験体の 300℃加温保持におけるヤング係数残存比の加熱による低下の割合は、CPD によらない。
- (6) 本研究の範囲において、試験体含水率の差はヤング係数残存比には影響を及ぼさない。
- (7) CPD の増加によって加温時の強度低下が増加する要因を特定することで、より正確な ALC の力学的特性の推定が可能となる。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省：生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編，生コンクリート統計年報，2015
- 2) 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
- 3) 水谷吉克，橘高義典，松沢晃一，菅谷典央：促進炭酸化した ALC における熱特性の評価，日本建築学会技術報告集，No. 52，p. 857-861，2016
- 4) 水谷吉克ほか：飽和炭酸化状態に基づいた 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，Vol.80，No.718，p.1833-1839，2015
- 5) 遠藤利二：ALC パネルの各種強度性状に及ぼす加熱の影響，博士論文、首都大学東京、2010
- 6) 水谷吉克，橘高義典，松沢晃一，家田芳幸：ALC の強度性状に及ぼす炭酸化の影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.81，No. 728，p. 1619-1625，2016
- 7) Aroni S., et al.:RILEM Recommended Practice, Autoclaved Aerated Concrete(Properties, Testing and Design), RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC, E & FN Spon, pp.12-46, 1993
- 8) 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