

# 論文 環境配慮コンクリートの加熱冷却後における力学性能および受熱温度推定に関する実験研究

加藤 雅樹\*1・清野 晶\*2・馬場 重彰\*3・加藤 優志\*4

**要旨:** 地球温暖化対策の一つとして、著者らは普通ポルトランドセメントを高炉スラグ等の副産物に置き換えた“環境配慮コンクリート”の開発を行っている。本論では 3 種の異なる調合の環境配慮コンクリートを対象に、火災後の力学性能および受熱温度推定手法の適用の可否を把握することを目的として、加熱冷却後の圧縮実験および非破壊実験を実施した。その結果、常温~800°Cにおける圧縮強度やヤング係数といった基本的な力学性能が普通コンクリートと概ね同等となることや、同温度とリバウンドハンマーによる反発度、色彩、引っかき傷幅との関係を把握し、ペースト量が反発度や傷幅に影響を与える可能性があることを示した。

**キーワード:** 火災, セメント, 高炉スラグ, 圧縮強度, ヤング係数, 火災診断, 非破壊

## 1. はじめに

地球環境負荷低減の観点から、日本政府は 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。世界でも同様の取り組みが行われており、二酸化炭素排出量削減技術の開発に対する社会的要請が高まっている。コンクリートの構成材料であるポルトランドセメントは製造時に二酸化炭素を大量に排出することが知られており、著者らは同セメントの一部あるいは全てを高炉スラグ等で置換して二酸化炭素排出量を低減したコンクリート（以下、環境配慮コンクリート）の開発および適用を進めている（例えば 1）。

火災を想定した高温加熱が環境配慮コンクリートの力学性能に与える影響を報告した研究として、宮本ら<sup>2)</sup>は普通ポルトランドセメントと高炉スラグに石灰系混和材をブレンドしたセメントを用いたコンクリートの加熱冷却後の圧縮試験結果を、太田ら<sup>3)</sup>はフライアッシュや高炉スラグ微粉末等の産業副産物を主材料としたジオポリマーコンクリートの加熱冷却後の圧縮強度を、辻ら<sup>4)</sup>は高炉スラグを高含有したコンクリートの火災時における爆裂抵抗性を報告しているが、未だ実験データが少なく未解明な点が多いのが現状である。また、建築構造物に用いられるコンクリート系部材が火災を受けた場合、受熱温度および補修・補強方法を検討するには日本建築学会による火災診断に関する指針<sup>5)</sup>が用いられているが、環境配慮コンクリートに適用できるかは不明である。

そこで本研究では、環境配慮コンクリートの加熱冷却後の圧縮試験を行い、基本的な力学性能を把握する。さらに、火災診断手法として文献 5) に記載されている複数の手法を実施し、受熱温度推定手法の適用の可否を把握することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-1 に示す。調合は 3 種類あり、高炉セメント B 種を使用した調合（以下、BB）、高炉セメント C 種相当（普通ポルトランドセメントの 65% を高炉スラグ微粉末で置換）を使用した調合（以下、BC）、セメントを使用せずに高炉スラグ微粉末にカルシウム系刺激剤を添加して硬化させる調合（以下、CZ）である。常温圧縮試験時の材齢は約 50 日であり、含水率は BB が 5.1%、BC が 5.7%、CZ が 6.3% である。

### 2.2 二酸化炭素排出量の比較

各調合のコンクリートを製造した場合の二酸化炭素排出量を算出する。構成材料ごとのインベントリデータとしては文献 6) に記載の値を用い、構成材料における排出量の割合が比較的大きな粉体および細骨材、粗骨材を対象に算出した。カルシウム系刺激剤は、製造過程で排出される二酸化炭素の大部分が石灰石焼成時であることから、普通ポルトランドセメントのインベントリデータを準用した。

算出結果を表-2 に示す。同表には比較のため、BB の高炉セメント B 種を普通ポルトランドセメントに全て置

表-1 コンクリートの調合

調合	空気量 [%]	W/P [%]	単位量[kg/m <sup>3</sup> ]						添加量		PP [kg/m <sup>3</sup> ]	
			水		粉体P			細骨材	粗骨材	Aw		Ae
			W	N	BB	BF	St	S	G	[P×%]		[P×%]
BB	4.5	38.0	170	-	448	-	-	723	954	1.5	0.011	-
BC	4.5	37.0	170	161	-	299	-	705	954	1.3	0.015	-
CZ	6.0	25.0	170	-	-	590	90	518	875	1.4	0.030	1.0

N: 普通ポルトランドセメント(密度3.16[g/cm<sup>3</sup>]), BB: 高炉セメントB種(密度3.04[g/cm<sup>3</sup>]), BF: 高炉スラグ微粉末4000(密度2.89[g/cm<sup>3</sup>]), St: カルシウム系刺激剤(密度2.47[g/cm<sup>3</sup>]), S: 陸砂(密度2.60[g/cm<sup>3</sup>]), G: 硬質砂岩砕石(密度2.65[g/cm<sup>3</sup>]), Aw: AE減水剤(BB,BC),高性能AE減水剤(CZ), Ae: AE剤, PP: ポリプロピレン繊維

\*1 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 大成建設 (株) 技術センター 修士 (工学)

\*3 大成建設 (株) 技術センター チームリーダー 博士 (工学) (正会員)

\*4 大成建設 (株) 技術センター 主任 修士 (工学) (正会員)

換した調査を N として示した。調査ごとに比較すると、N を基準とした場合に BB は約 4 割、BC は 6 割、CZ は約 7 割の二酸化炭素排出量が低減された。

### 2.3 供試体の形状と寸法

供試体の形状は後述する実験方法に応じて、直径が 100mm で高さが 200mm の円柱（以下、 $\phi 100 \times h200$ ）、一辺が 200mm の立方体（以下、 $\square 200$ ）、直径が 100mm で高さが 30mm の円柱（以下、 $\phi 100 \times h30$ ）の 3 種類ある。 $\square 200$  は同形状の木製型枠にコンクリートを打設することで、 $\phi 100 \times h30$  の供試体は  $\phi 100 \times h200$  の供試体を切断することで製作した。供試体はコンクリート打設後、各種実験に供するまでの期間、乾燥を防ぐためにラップ等で封かんし屋内で養生した。

### 2.4 実験方法

実験方法一覧を表-3 に示す。実験は大別して加熱冷却後の力学性能を把握するための圧縮実験と、受熱温度推定方法適用の可否を把握するための非破壊各実験の 2 種類である。具体的な内容は本節で順に詳述する。

#### 2.4.1 加熱冷却実験方法

供試体を材齢約 35 日で所定の温度に加熱し、冷却後に次項から示す各実験に供する。なお、BC の  $\phi 100 \times h200$

表-2 二酸化炭素の排出量

調査	粉体P				細骨材	粗骨材	合計	調査Nを1とした場合の比
	N	BB	BF	St	S	G		
	[kg/m <sup>3</sup> ]							
N	362	-	-	-	5	7	373	1.0
BB	-	211	-	-	5	7	223	0.6
BC	130	-	12	-	5	7	154	0.4
CZ	-	-	24	73	4	6	106	0.3

表-3 実験方法一覧

実験方法	供試体	加熱温度	冷却方法
圧縮実験	$\phi 100 \times h200$		炉冷
非破壊実験	反発度	$\square 200$	常温 200℃
	色彩	$\square 200$	400℃
		$\phi 100 \times h30$	600℃ 800℃
	引っかけ傷幅	$\square 200$	



写真-1 加熱方法 (BB の例)

の 400℃のみ材齢 100 日で加熱冷却した。加熱は、箱型電気炉を用いて炉内温度を初期温度から 2℃/分で昇温し、各加熱温度到達後に当該温度を 2 時間維持した後、常温まで冷却した。この加熱速度および温度維持時間により  $\phi 100 \times h200$  の断面中心が概ね表面と同温度になることを文献 7) で確認した。

加熱状況を写真-1 に示す。1 度の加熱で  $\square 200$  を 1 体、 $\phi 100 \times h200$  を 1 体、 $\phi 100 \times h30$  を 2 体同時に加熱した。 $\phi 100 \times h200$  の高さ方向中央表面に設置した熱電対により表面温度を測定した。

冷却方法について、表-3 に示した炉冷は加熱後に概ね常温まで炉内で冷却し、水冷は炉内温度約 200℃まで炉冷した後に炉から供試体を取り出し 5 分間常温の水に浸した。水冷は消火活動に伴う水の影響を把握するために実施した。

#### 2.4.2 圧縮実験方法

供試体を炉冷後、材齢約 50 日で圧縮実験に供した。BC の約 400℃は材齢 111 日で圧縮実験に供した。供試体数は常温のみ 3 体、その他は 1 体とした。加熱冷却する供試体数は 1 体のためばらつきの影響が大きい可能性があるが、これを考慮した上で、加熱温度による力学特性の変化・傾向を把握することとした。JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠し実験を行った。圧縮実験時に計測したひずみについて、縦ひずみはコンプレッソメータ、横ひずみはひずみゲージにより得た。

#### 2.4.3 非破壊実験方法

非破壊実験は文献 5) に記載されている、リバウンドハンマーによる反発度の測定、分光測色計による色彩測定、引っかけ試験器による引っかけ傷幅測定の 3 種類を、材齢約 50 日で実施した。供試体は  $\square 200$  と  $\phi 100 \times h30$  であり、 $\square 200$  は表面にペーストがあるコンクリート供試体の型枠面を、 $\phi 100 \times h30$  は表面にペーストと骨材がある供試体の切断面を、それぞれ測定した。

リバウンドハンマーによる反発度は、加速度計を取り付けたハンマーでコンクリート表面を打撃することで得た。炉冷した  $\square 200$  の 1 面中央を 30mm 間隔で計 16 か所、下向きに測定した。

分光測色計による色彩は、L\*a\*b\*表色系による定量値として得た。L\*は明度、a\*と b\*は色相と彩度を表し、L\*は白が 100、黒が 0、a\*は赤がプラス、緑がマイナス、b\*は黄がプラス、青がマイナスを表す。炉冷した  $\square 200$  の 1 面中央を 30mm の間隔で計 12 点、炉冷および水冷した  $\phi 100 \times h30$  の骨材を極力避けたセメントペースト位置を計 3 点測定した。文献 5) によると同測定は計 12 点以上計測する必要があるが、 $\phi 100 \times h30$  は供試体が小さく測定箇所が限られることから計 3 点測定した。

引っかけ傷幅は、日本塗料工業会の認定品である引

引っかき試験器を用いてコンクリート表面に一定の荷重(0.5kgと1.0kg)をかけて引っかき傷をつけ、その傷幅をクラックスケールで測定した。測定は、炉冷した□200と炉冷および水冷したφ100\* $h$ 30を対象に、一定の速さで長さ5~10cmの傷を計3か所与えることで行った。

### 3. 加熱冷却実験結果

加熱冷却実験の温度結果の一例(調合:BB)を図-1に示す。供試体の表面温度は制御温度よりもやや遅く上昇したが、最高温度は制御温度と概ね同等まで上昇した。BCとCZも概ね同じ温度となった。

炉冷したφ100\* $h$ 200と□200の加熱前後の質量変化を図-2に示す。加熱温度が高いほど加熱後の質量が大きく減少し、800℃では加熱後に質量が9%程度減少した。加熱前の密度はBBが2342[kg/m<sup>3</sup>]、BCが2317[kg/m<sup>3</sup>]、CZが2280[kg/m<sup>3</sup>]であった。

### 4. 圧縮実験結果

本章で加熱冷却後の圧縮実験結果について詳述するが、図-3~図-8の横軸に示した温度は、表-3に示した加熱温度ではなく、図-1に示した表面温度の、制御上最高温度を維持した2時間平均値とした。

#### 4.1 圧縮強度

加熱冷却後の圧縮強度残存比と加熱温度の関係を図-3に示す。同図および後述する図-4と図-7には、文

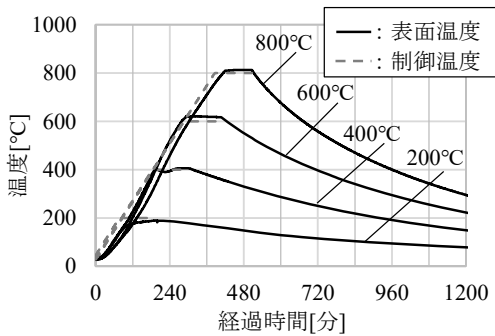


図-1 温度の経時変化 (BBの例)

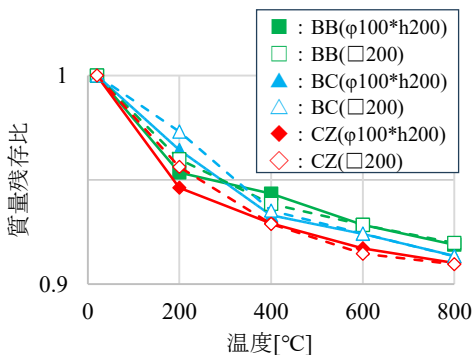


図-2 加熱前後の質量

献8)で提案されている値(以下、AIJ提案値)も示した。このAIJ提案値は、主に普通コンクリートを対象とした数多くの圧縮実験結果の概ね平均値を表しており、それらの実験結果に環境配慮コンクリートは含まれていない。

BB, BC, CZを比較すると、CZが約400℃でやや高い値となったが、それ以外は概ね同じ傾向を示した。BB, BC, CZとAIJ提案値を比較すると、CZの400℃を除く全ての温度でAIJ提案値をやや下回る結果となったが、概ねAIJ提案値と同じ、つまり普通コンクリートと同等の残存比となった。

#### 4.2 ヤング係数

加熱冷却後のヤング係数残存比と加熱温度の関係を図-4に示す。BB, BC, CZを比較すると、BBがやや大きくなり、BCとCZは概ね同じ傾向を示した。AIJ提案値と比較すると、概ねAIJ提案値と同じ残存比となった。約200℃ではAIJ提案値をやや下回っているが、AIJ提案値の基となる実験データは残存比約0.5~0.9の範囲に存

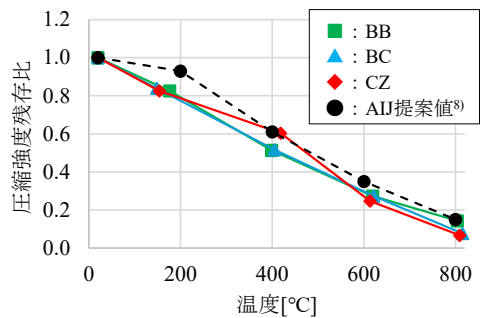


図-3 圧縮強度残存比と温度の関係

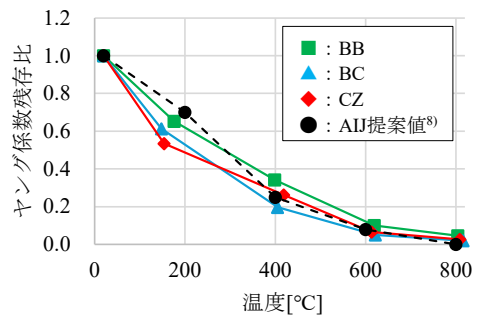


図-4 ヤング係数残存比と温度の関係

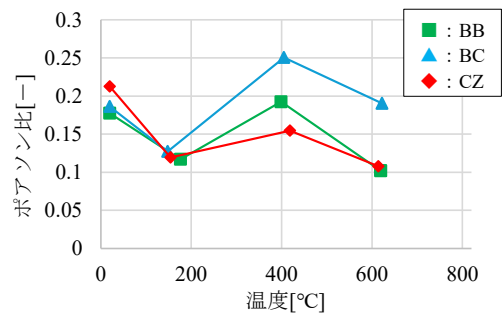


図-5 ポアソン比と温度の関係

在しており、本実験データもその範囲にあるため普通コンクリートと概ね同等の残存比であると考えられる。

### 4.3 ポアソン比

加熱冷却後のポアソン比と加熱温度の関係を図-5に示す。約800℃では加熱冷却後に供試体表面にひび割れが多く生じひずみゲージの貼付けが困難であったため、ポアソン比の測定は行っていない。BB, BC, CZを比較すると、約400, 600℃でBCが大きくなったが、他の温度では概ね同じ値となった。

### 4.4 応力度とひずみの関係

応力度とひずみの関係を図-6に、常温3体の圧縮試験結果平均値を表-4に、圧縮強度時ひずみ増加比と温度の関係を図-7に示す。本節で示すひずみはコンプレッソメータにより得た縦ひずみである。圧縮強度時ひずみは約600℃でBCとCZの値が大きくなり、BBは概ねAIJ提案値と同じ値となった。600℃のBCとCZは前後の温度帯における結果の傾向からも大きい値となっており、ばらつきの影響が表れた可能性があると考えられる。また、BC, CZは約800℃で圧縮強度時ひずみがAIJ提案値よりも減少しているが、加熱冷却後にひび割れが多く発生しており靱性が低下したためと考えられる。

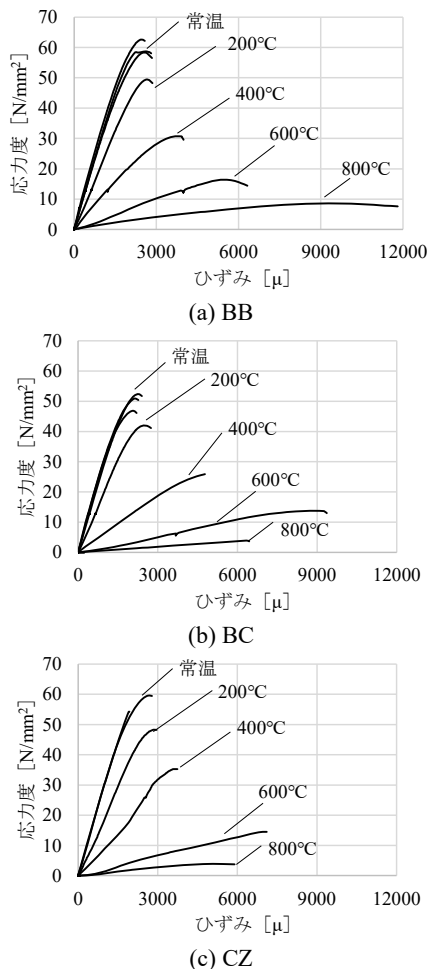


図-6 応力度とひずみの関係

応力度とひずみの関係について、対象となる供試体数は1体でありばらつきの影響が大きい可能性があるが、有限要素解析等における使用を目指し、Popovicsによる提案式(1)を用いてモデル化を行う。提案式を式(1)に示す。式(1)の $\sigma_T$ と $\varepsilon_T$ はそれぞれ図-3, 図-7, 表-4の値を用いて得られる。形状係数 $n_T$ は応力度とひずみの関係の形状を変化させることができることから、応力度とひずみの関係に最も近似する $n_T$ を最小二乗法により求める。この形状係数 $n_T$ と温度の関係を図-8に示す。BCの約800℃は応力度とひずみの関係が直線に近い形状となり、 $n_T$ が非常に大きい値となった。

$$\sigma = \sigma_T \frac{\varepsilon_\sigma}{\varepsilon_T} \frac{n_T}{n_T - 1 + \left(\frac{\varepsilon_\sigma}{\varepsilon_T}\right)^{n_T}} \quad (1)$$

$\sigma$ : 応力度,  $\varepsilon_\sigma$ : ひずみ,  $\sigma_T$ : 温度 $T$ における圧縮強度,  $\varepsilon_T$ : 温度 $T$ における圧縮強度時のひずみ,  $n_T$ : 温度 $T$ における形状係数

表-4 常温の圧縮試験結果

調査	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 [N/mm <sup>2</sup> ]	圧縮強度時ひずみ [μ]
BB	59.9	32068	2556
BC	50.0	32150	2158
CZ	58.5	34212	2020

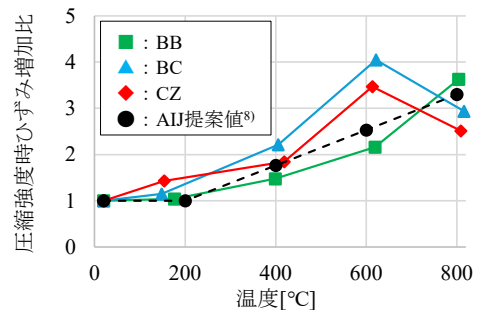


図-7 圧縮強度時ひずみ増加比と温度の関係

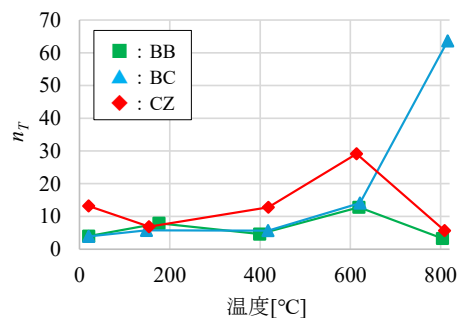


図-8 形状係数 $n_T$ と温度の関係

## 5. 非破壊実験結果

### 5.1 反発度

反発度の測定結果を図-9に示す。反発度はBBが最も大きく、CZが最も低い結果となり、表-4および図-3で示した調合間の圧縮強度との相関は見られなかった。反発度は粗骨材の影響を大きく受ける<sup>10)</sup>が、高炉スラグを含む粉体構成も影響している可能性も考えられる。本実験においては、水粉体比W/PについてCZが最も小さくBBが最も大きいため、本検討のように調合の単位水量を一定とした場合は、同程度の圧縮強度であってもW/Pが小さい調合ほどペーストの量が多く骨材が少なくなり、表層の反発度測定結果に影響を与えた可能性があると考えられる。反発度はいずれの調合も600°Cまでは常温と概ね同等となり、800°Cで大きく低下した。

### 5.2 色彩

温度とa\*とb\*の関係を図-10に、L\*と温度の関係を図-11に、加熱冷却後の供試体を写真-2に示す。図-10(a)の□200に関して、常温と200°Cで概ね同じ測定結果となったことから200°Cの結果は記載していない。□200は目視では400、600°Cでピンク色に、800°Cで灰色に変色していた。図-10(a)から赤さの程度を表すa\*の値は400、600°Cで大きく、800°Cで小さくなっており、目視と同様の傾向を示した。φ100\*h30では炉冷と水冷の差は見られず、400°C以上でピンク色となる傾向を示した。常温においては高炉スラグの配合量が多い調合ほど目視で白色となっており、図-11からも同様の傾向を示した。一方でL\*は加熱温度によらずに大きな変化はみられず、

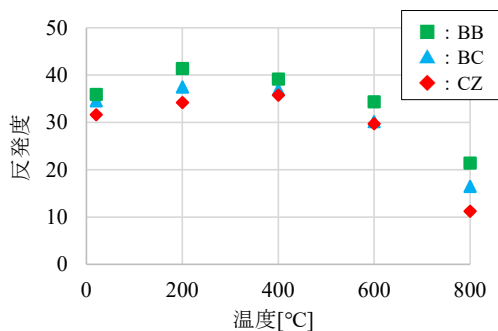


図-9 反発度と温度の関係

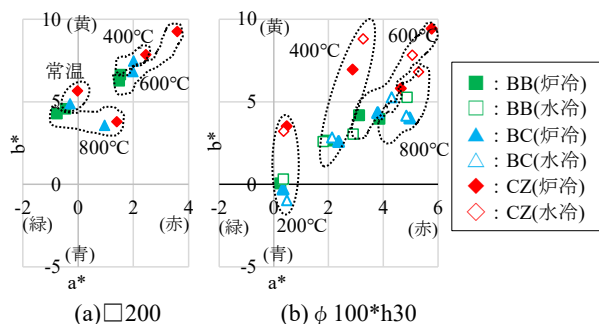


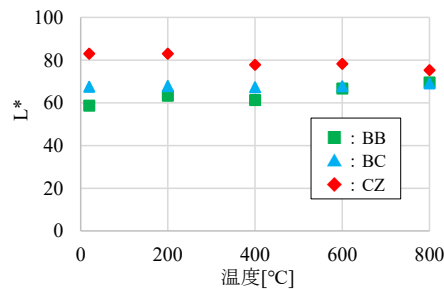
図-10 a\*とb\*の関係

炉冷と水冷を比較しても大きな変化は見られなかった。

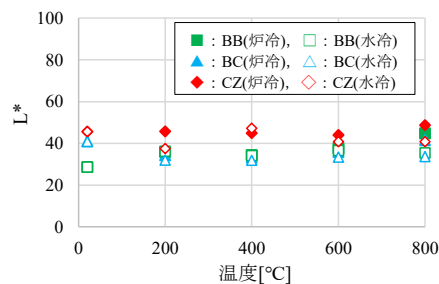
本結果から、火害診断に色彩の変化を用いる場合は、L\*ではなく加熱温度により明確な差が生じたa\*とb\*の関係が適切と考えられる。その際、□200とφ100\*h30、つまり型枠面と切断面ではa\*の値が大きくピンク色となる温度帯が異なることに留意する必要がある。

### 5.3 引っかき傷幅

引っかき傷幅と温度の関係を図-12に、引っかき傷の一例を写真-3に示す。全ての試験体で0.5kgよりも1.0kgの引っかき傷幅が明確に大きくなり、□200ではおよそ1.5~2.0倍ほどになった。また、引っかき傷幅は

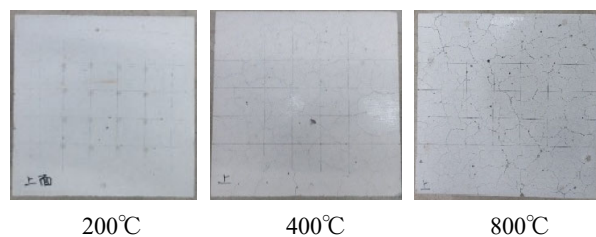


(a) □200



(b) φ100\*h30

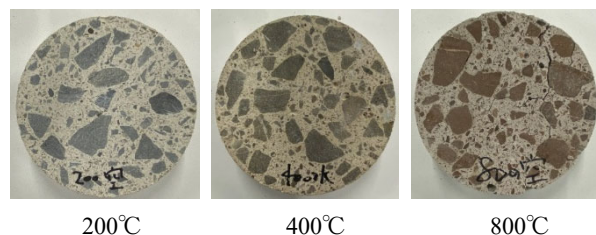
図-11 L\*と温度の関係



200°C 400°C 800°C

(供試体上の縦横4本の黒線は、反発度測定に使用した補助線であり、色彩は補助線の無い範囲で測定した)

(a) □200



200°C 400°C 800°C

(b) φ100\*h30 (空冷)

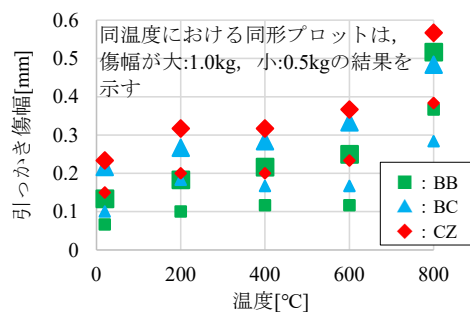
写真-2 加熱冷却後の供試体 (CZの例)

400℃までは変化が小さく、600～800℃で幅が大きくなる傾向が見られた。3 調合を比較すると CZ, BC, BB の順で引っかき傷は幅小さくなった。これは 5.1 節の反発度で見られた傾向と同様であり、ペーストおよび骨材量が傷幅に影響を与えた可能性があると考えられる。φ 100\* $h$ 30 の炉冷と水冷で大きな違いは見られなかった。

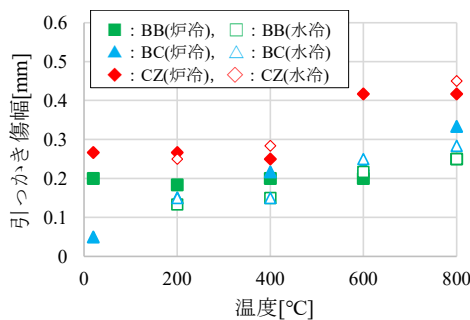
## 6. まとめ

環境配慮コンクリートを対象に、火災後の力学性能および受熱温度推定手法の適用の可否を把握することを目的とし、加熱冷却後の圧縮試験および 3 種の非破壊実験を行った結果、今回実験を行った調合および限られた供試体数ではあるが、以下の知見を得た。

- ・材料製造による二酸化炭素排出量は、セメントに全て普通ポルトランドセメントを使用した調合に対して、BB で約 4 割、BC で 6 割、CZ で約 7 割低減される。
- ・圧縮強度とヤング係数の加熱冷却後の残存比は、AIJ 提案値、つまり普通コンクリートと概ね同等の値を示す。
- ・応力度とひずみの関係は、Popovics による提案式を用いて圧縮強度、圧縮強度時ひずみおよび形状係数  $n_T$  を



(a) □200



(b) φ 100\* $h$ 30 (1.0kg の結果)

図-12 引っかき傷幅と温度の関係

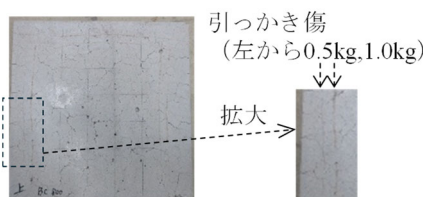


写真-3 引っかき傷を与えた□200 (BC, 800℃)

温度依存させることでモデル化できる。

- ・リバウンドハンマーによる反発度は、全ての調合で常温～400℃で常温とほぼ同等となり、600℃以上で大きく低下する。
- ・色彩は、表面にペーストがある□200 は 400～600℃以上で、表面にペーストと骨材があるφ 100\* $h$ 30 は 400℃以上でピンク色に変色する傾向がある。明度は加熱温度によらず変化は見られないが、高炉スラグ含有量が多いコンクリートほど明度が大きく白色に近くなる傾向があり、炉冷と水冷で違いは見られない。
- ・引っかき傷幅は、常温から 400℃まで大きな変化は無いが 600℃を超えると傷幅が大きくなる。表面にペーストと骨材があるφ 100\* $h$ 30 の炉冷と水冷で違いは見られない。

## 参考文献

- 1) 加藤優志, 一色裕二, 保坂正義, 小林圭: セメントを使用しない環境配慮コンクリートの建築物の構造部材への適用, コンクリート工学, Vol.62, No.2, pp.150-155, 2024.2
- 2) 宮本圭一, 西村光太, 笠井浩, 依田和久: 環境配慮型コンクリートの加熱冷却後の圧縮強度試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.191-192, 2017.8
- 3) 太田千陽, 柴山淳, 西山峰広: 高温加熱を受けたジオポリマーコンクリートの圧縮力学特性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.205-206, 2023.9
- 4) 辻大二郎, 小島正朗, 大塚勇介, 野口貴文: 高炉スラグ高含有セメントの SO<sub>3</sub> 量が火災時の爆裂抵抗性に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 84 巻, 第 756 号, pp.119-127, 2019.2
- 5) 日本建築学会: 建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説, 2024
- 6) 日本コンクリート工学会: セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書, p185, 2024.9
- 7) 加藤雅樹, 道越真太郎, 馬場重彰, 坂田弘安: 圧縮強度 110N/mm<sup>2</sup> 級高強度コンクリートの熱間圧縮試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp.195-196, 2017.8
- 8) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 2017
- 9) Sandor Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.3, pp.583-599, 1973.9
- 10) 斯波明宏, 高見錦一, 石川伸介, 林敬史: リバウンドハンマーによる強度推定式に及ぼす各種因子の影響, コンクリート工学, Vol.26, No.1, pp.1821-1826, 2004

## 謝辞

本研究は、東京理科大学工学部建築学科の卒業研究 (担当: 原田悠生君, 光安天舞君) として実施しました。