

## 6. 高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用したコンクリートの床部材実験

Experiment on Slab Member Made of Concrete Using Granulated Blast Furnace Slag as the Mineral Admixture in Various Ratios

村井克綺\* 加藤義明\*\* 林 晴佳\*

### －概要－

近年、環境負荷低減の観点から、セメントの一部に混和材を用いたコンクリートの開発・実用化が進められている。特に、高炉スラグ微粉末（記号：BF）を用いるコンクリートは、BF 使用率が多くなるほど二酸化炭素の削減量も大きくなるため、環境負荷低減への有効な対策とされている。

混合セメントのひとつである高炉セメントは、A～C 種のうち B 種は全国的に流通しているが、A 種および C 種の市場への流通は極めて少ない。必要に応じた任意の分量で BF を使用したコンクリートに関しても、製造・出荷している生コン工場は少なく、JIS マーク品としての取り扱いはほとんどない。

そこで、ゼネコン 13 社で構成する研究会において、BF を幅広い使用率で混和材料として用いたコンクリートの諸性状を確認するための実験を実施し、「CELBIC-環境配慮型 BF コンクリート-」（セルビック、Consideration for Environmental Load using Blast furnace slag In Concrete）と称する環境配慮型コンクリートを開発した。CELBIC は、生コン工場の選定やコンクリートの調合設計・施工マニュアルを整備し、一般財団法人日本建築総合試験所の建設材料技術性能証明を取得している（GBRC 材料証明第 20-04 号）。現在、研究会構成会社の各社において普及展開を行っている。

本報は、CELBIC を床のような薄型部材に適用した際の強度発現性を確認する目的で実機実験を実施し、検討した結果である。

### －技術的な特長－

CELBIC は、コンクリートの二酸化炭素排出量の削減を目的として、普通ポルトランドセメントに BF を 10～70%の範囲で混和材料として用いるコンクリートであり、BF 使用率に応じた各部位に求められる性能を満たす最適な環境配慮型コンクリートを適用することができる。

これまでは柱を模擬した試験体の強度発現性などについて実験的検討を行った。一方、壁や床のような薄型の部材については、柱よりも断面積が小さいためコンクリートの硬化過程で乾燥の影響を受けやすく、また、発熱量も小さいといったコンクリートの強度発現性に負の影響を与えることが考えられる。そこで、表 1 に示す実験の要因と水準で床を模擬した薄型部材の実機実験を実施し（写真 1）、BF 使用率や湿潤養生が床部材の強度発現性に及ぼす影響を把握した。

表 1 床模擬実機実験の要因と水準

要因	水準
BF 使用率	15%, 30% (A 種クラス)
	60% (B 種クラス)
	70% (C 種クラス)
打込み時期	標準期
水結合材比	目標呼び強度：33 相当



写真 1 床模擬試験体の打設や養生状況

※本研究は、長谷工コーポレーション、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、銭高組、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業の 13 社による共同研究の成果であり、本報の内容は、日本建築学会大会学術講演梗概集(2021.07.pp.389-394)で発表済である。

# 高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用したコンクリートの床部材実験 Experiment on Slab Member Made of Concrete Using Granulated Blast Furnace Slag as the Mineral Admixture in Various Ratios

○村井克綺\*                      加藤義明\*\*                      林 晴佳\*  
Katsuki MURAI                      Yoshiaki KATO                      Haruka HAYASHI

**ABSTRACT** To reduce the environmental load, concrete is being developed and put into practical use using an admixture as part of the cement. In this study, we have investigated concrete using granulated blast furnace slag as the mineral admixture at a wide usage rate. We have already reported laboratory experiments, actual experiments, etc., but we have not confirmed the properties of thin members such as walls and slabs. Therefore, we conducted an actual experiment on a thin member such as a slab and confirmed the effects of granulated blast furnace slag usage rate and wet curing on strength development.

**Keywords:** 環境配慮型コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 床部材, 養生条件  
*Environment-conscious concrete, Granulated blast furnace slag, Slab member, Curing conditions*

## 1. はじめに

本研究では、構造材料として最も使用量が多いコンクリートの二酸化炭素排出量の削減を目的として、高炉スラグ微粉末を混和材として使用することに着目し、幅広い使用率で用いたコンクリートについて検討を行ってきた。各種性状を把握する目的で実施した室内実験の結果<sup>1)</sup>、実機実験の結果とコンクリートの製造および施工性、耐久設計基準強度についての検討結果、さらに普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに対するCO<sub>2</sub>削減効果が9~63%であること<sup>2)</sup>は既に報告している。その中で実施した実機実験では、柱型を模擬した1000×1000×1000mmの試験体の温度履歴や強度発現性について実験的検討を行ってきた。一方で、壁や床のような薄型の部材については、柱よりも断面積が小さいため、コンクリートの硬化過程で乾燥の影響を受けやすく、また、発熱量も小さいといったコンクリートの強度発現性に負の影響を及ぼすことが考えられる。

そこで、本検討では、引き続き高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートについて、床を模擬した

薄型部材における強度発現性を確認する目的で、実機実験を実施した。本報では、この検討結果<sup>3)</sup>について報告する。

なお、本研究は「CELBIC—環境配慮型 BF コンクリート—」（セルビック、Consideration for Environmental Load using Blast furnace slag In Concrete）と称した技術の開発に向けて表1に示すゼネコン13社によるCELBIC研究会にて実施した実験である。

## 2. 床部材実験の概要

### 2.1 要因と水準

床部材実験の要因と水準を表2に示す。セメントに対して混和材として使用する高炉スラグ微粉末（以下、BFとする）は、使用率を15%、30%、60%および70%の計4水準とした。実験は標準期に実施した。

表1 共同研究への参加会社

青木あすなろ建設	浅沼組	安藤ハザマ
○奥村組	熊谷組	鴻池組
○五洋建設	銭高組	鉄建建設
○東急建設	東洋建設	◎長谷工コーポレーション
矢作建設工業	(五十音順、◎:主査、○:WG幹事)	

\*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 \*\*建設技術本部 建築エンジニアリング部 総合評価グループ  
※本報の内容は、日本建築学会大会学術講演会梗概集（2021.09.pp.389-394）にて発表済みである。

生コン工場の強度算定式と試し練りにおける圧縮強度試験結果を図1に示す。呼び強度に対応する水結合材比は、事前に実施した試し練りにより得られた圧縮強度と、工場が運用する JIS A 5308 の強度算定式との関係を確認し、BF 使用率 15%および 30%は普通ポルトランドセメントの強度算定式、60%は高炉セメント B 種の強度算定式から 3N/mm<sup>2</sup>、70%は高炉セメント B 種の強度算定式から 6N/mm<sup>2</sup>それぞれ切片をマイナス側に平行移動した式を用いて求めた。

### 2.2 使用材料

本実験における使用材料を表3に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末 4000 は JIS A 6206 (コンクリート用高炉スラグ微粉末) による規格値を満足するものを使用した。

### 2.3 コンクリートの調合

試し練りの結果から決定したコンクリートの調合を表4に示す。調合条件は、設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>を想定し、目標呼び強度 33、荷卸し地点におけるスランプは 18±2.5cm、空気量は 4.5±1.5%とし、各 BF 使用率で同一とした。

### 2.4 試験項目

#### (1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験項目および試験時期を表5に示す。試験時期は、練混ぜ完了を経時 0分として、経時 40分(荷卸し時)、60分、90分および 120分とした。

#### (2) 硬化コンクリート

圧縮強度用の試験体の種類と採取時期および試験材齢を表6に示す。現場封かん養生供試体は、①上面をラップで覆い屋内存置(屋内封かん)、②上面を開放し屋内存置(屋内解放)、③上面を開放し雨や日射を受ける屋外(屋外開放)、の3条件で養生した。床模擬試験体を図2に、打込み状況を写真1に示す。コンクリートの打込みは一輪車を用いて行い、コンクリート用棒形振動機を用いて締固めを行った。養生状況を写真2に示す。

表2 床部材実験の要因と水準

要因	水準	
BF 使用率	15%、30%	(A 種クラス)
	60%	(B 種クラス)
	70%	(C 種クラス)
打込み時期	標準期	
水結合材比	目標呼び強度：33 相当	

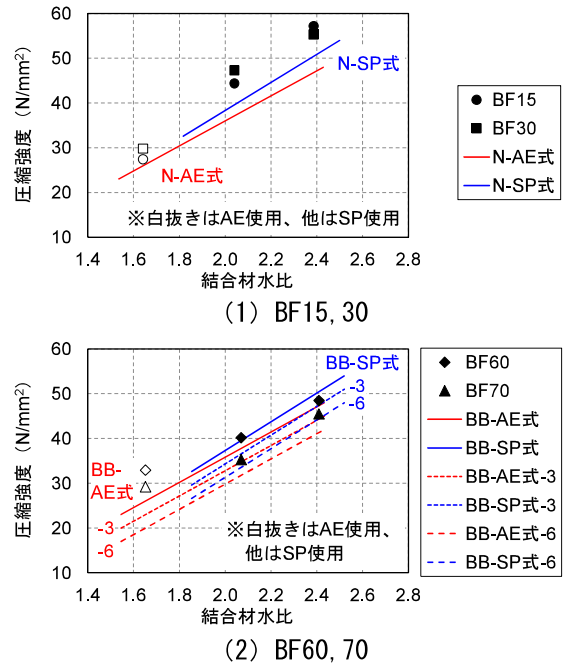


図1 生コン工場の強度算定式と試し練りにおける圧縮強度試験結果

表3 BFの品質

名称	種類/産地	記号	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材*1	砂(山砂)/千葉県君津市	S1	表乾密度：2.58g/cm <sup>3</sup>
	砕砂/東京都八王子市	S2	表乾密度：2.60g/cm <sup>3</sup>
	砕砂/東京都八王子市	S3	表乾密度：2.60g/cm <sup>3</sup>
	砕砂/埼玉県秩父郡	S4	表乾密度：2.64g/cm <sup>3</sup>
粗骨材*2	砕石 2005 東京都八王子市	G1	表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup>
	砕石 2005 東京都八王子市	G2	表乾密度：2.67g/cm <sup>3</sup>
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	BF	密度：2.89g/cm <sup>3</sup> (せっこう添加品)
練混ぜ水	地下水	W	—
		SP	—
化学混和剤	高性能 AE 減水剤	SPB	高炉スラグ微粉末高含有用

\*1 S1 : S2 : S3 : S4=20 : 28 : 28 : 24 (質量比)

\*2 G1 : G2=50 : 50 (質量比)

表4 調合

調合記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP/SPB*1 (B×%)
			W	C	BF	S	G	
BF15	49.0	51.2	170	295	52	911	875	1.0
BF30	49.0	51.0	170	243	104	906	875	1.0
BF60	45.8	50.3	168	147	220	882	878	1.0
BF70	43.4	51.2	168	116	271	861	878	1.0

\*1 BF15 と BE30 は SP、BF60 と BF70 は SPB を使用した

床模擬試験体の上面は、半分を 0.02mm のビニルシートで湿潤養生、もう半分は開放とした。作製後は、空調設備のない屋内で存置し、材齢 8 日で脱型した後も同一箇所存置した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フレッシュコンクリート試験結果

トラックアジテータ内におけるコンクリートの経時変化について、スランブを図 3 に、空気量を図 4 にそれぞれ示す。フレッシュコンクリート試験は、床模擬試験体などを作製した経過時間 60 分の時点では、スランブ、空気量ともに目標とした管理値の範囲であった。

スランブは、経過時間に伴い低下する傾向が見られ、BF15 および BF30 では経過時間 120 分までは管理値の範囲内であったものの、BF60 および BF70 では、90 分の時点で管理値以下であったことから、これらにおいては 120 分のフレッシュコンクリート試験を実施していない。このように BF 使用率の大きいコンクリートにおいては、スランブの経過時間に伴う低下が大きい場合があることから、あらかじめ、実機などで適切な運搬時間と計画調合などの関係を確認することが望ましいと考える。

空気量では、全てのコンクリートで試験実施内では管理値の範囲内であったが、全体的に経過時間に伴い空気量の増加する傾向が見られた。これらのフレッシュコンクリートの経時変化は、トラックアジテータのコンクリートの積載量が 2.0m<sup>3</sup> と少ないことが影響しており、スランブの低下と、これによる巻き込み空気が増大が生じたものと考えられる。

また、その他のフレッシュコンクリートの性状は、コンクリート温度は 19~21℃、塩化物量は 0.00~0.03kg/m<sup>3</sup>、単位水量は計画調合より +2.1~5.6kg/m<sup>3</sup>であった。

#### 3.2 コンクリート温度

各試験体の温度履歴を図 5 に示す。なお、図 5

表 5 試験項目

試験項目	試験方法	試験時期 (分)				
		0	40	60	90	120
スランブ	JIS A 1101	○	○	○	○	○
空気量	JIS A 1128	○	○	○	○	○
コンクリート温度	JIS A 1156	○	○	○	○	○
単位容積質量	JIS A 1116	○	○	○	○	○
単位水量	ZKT-210	○	—	—	—	—
塩化物含有量	JASS 5T-502	○	—	—	—	—

表 6 圧縮強度試験用供試体の種類・採取時期・試験材齢

対象	採取時期	試験方法	試験材齢*					
			σ 2	σ 4	σ 8	σ 28	σ 57	σ 91
標準養生供試体	0分	JIS A 1108	—	—	—	◎	—	—
	60分		—	—	◎	◎	◎	◎
	120分		—	—	—	◎	—	—
現場封かん養生供試体	60分	JIS A 1108	○	○	○	○△	○	○△
簡易断熱養生供試体			—	—	—	○	○	○
床模擬試験体			JIS A 107	—	—	—	●	—

※凡例 ◎：20℃水中 ○：封かん（屋内または簡易断熱）  
 △：屋内（上面開放） ▲：上面開放（屋外・日射下）  
 ●：屋内

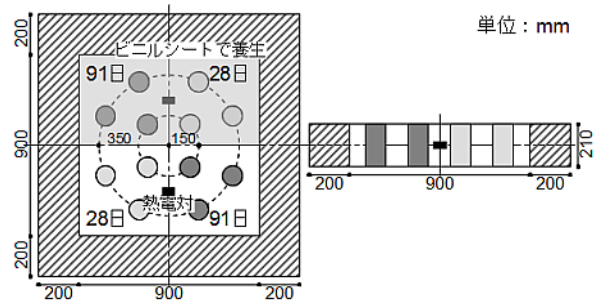


図 2 床模擬試験体



写真 1 打込み状況

写真 2 養生状況

(BF15) に示す屋外開放の温度履歴は、供試体の配置の前後により日射の当たり方が異なったことから、BF15~BF60 の平均値として示した。

コンクリートの温度履歴は、床模擬試験体と簡易断熱で大きく異なり、また、床模擬試験体においては上面処理における湿潤養生および開放の

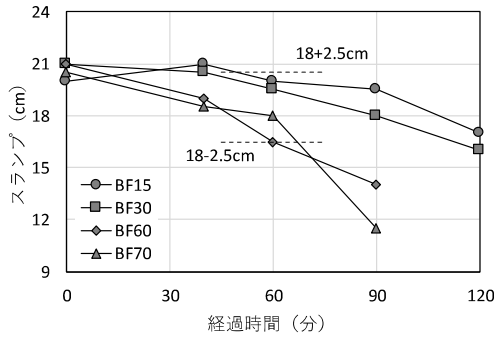


図3 スラップの経時変化

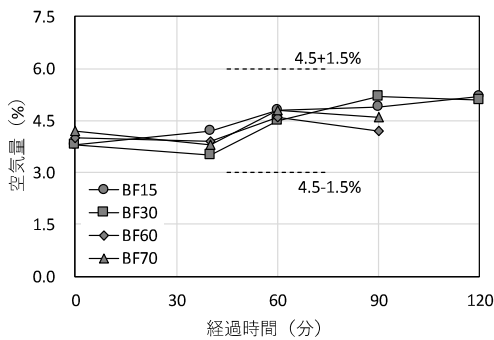


図4 空気量の経時変化

影響が見られ、材齢2~3日頃までは湿潤養生を施している側のコンクリート温度が高く、最高温度で約2℃の差が見られた。

供試体の温度履歴では、屋内開放では1日程度においてわずかに環境温度よりも高いものの、その後は環境温度と同様に推移した。一方、屋外開放では、日中の日射による影響でコンクリート温度の上下が大きかった。

各試験体の温度特性の一覧を表7に、BF使用率と温度上昇速度の関係を図6に示す。床模擬試験体の最高温度および温度上昇量は、簡易断熱では最高温度および温度上昇量が12~15℃程度、床模擬試験体よりも大きかった。柱模擬試験体における最高温度や温度上昇量は既往の実験結果<sup>4)</sup>で示したように、BF使用率にかかわらず簡易断熱よりも大きかったことから、床模擬試験体における発熱特性は柱模擬試験体と大きく異なった。また、簡易断熱では最高温度に到達する時間も床模擬試験体より20時間以上長かった。

一方で、温度の上昇速度では図6のとおり上面を湿潤養生とした床模擬試験体と同程度であっ

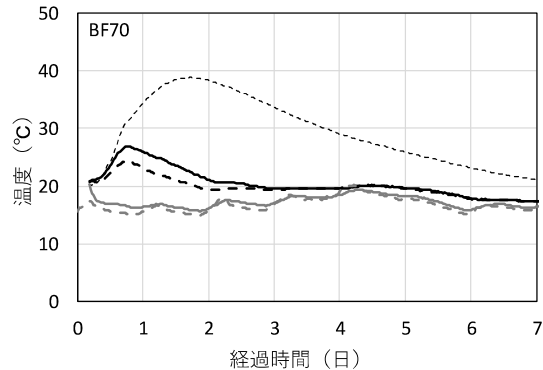
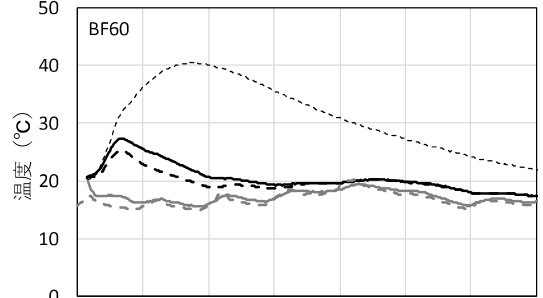
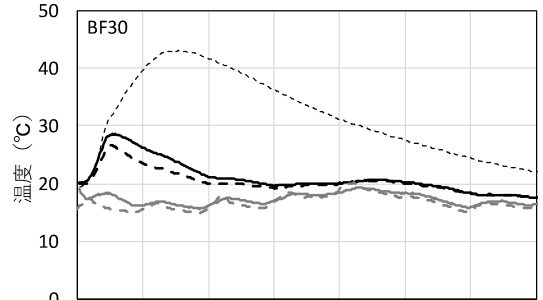
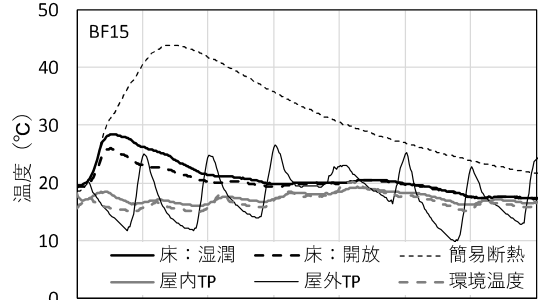


図5 各種試験体の温度履歴

た。湿潤養生および上面開放による、床模擬試験体のコンクリート温度の違いには、湿潤養生による乾燥抑制からの水和の促進、および外気との遮断による断熱効果が影響すると考えられる。本実験では湿潤養生に使用したビニルシートの厚さが0.02mmと薄い、このような効果が温度上昇量の増加に起因し、最高温度や温度上昇量の増加に寄与したものと考えられる。特に、表7で示し

たように、床模擬試験体の最高温度への到達時間が12時間前後であることを踏まえると、湿潤養生の効果は乾燥抑制よりも断熱による影響が大きかったものと推察される。

BF 使用率の影響については、簡易断熱養生では最高温度、温度上昇量および温度上昇速度はBF 使用率が大きくなるに伴い小さくなるが、最高温度への到達時間は長くなった。また、床模擬試験体では、簡易断熱ほど顕著ではないものの、BF 使用率の違いによる最高温度、上昇量および到達時間の差が同様に見られた。

### 3.3 圧縮強度試験結果

コンクリートの材齢と圧縮強度試験の関係について、標準水中養生を図7に、封かん養生を図8に示す。標準養生においては、BF 使用率の違いによる強度発現性の差は小さく、いずれにおいても材齢28日で目標とする呼び強度の強度値33N/mm<sup>2</sup>を上回る圧縮強度であった。また、BF 使用率が異なっても、材齢28日の圧縮強度は同等の値であり、過剰な強度発現を示すBF 使用率はないことから、工場が運用するJIS A 5308の強度算定式から設定した水結合材比が、合理的かつ経済的であったと考えられる。また、封かん養生においては、BF 使用率15%のみ僅かに圧縮強度が大きかったものの、いずれも同程度の強度発現性であり、長期的な強度発現の停滞などは認められなかった。

#### (1) 湿潤養生の影響

供試体の養生条件の違いによる強度発現性の違いについて検討するため、封かん養生と簡易断熱（高温履歴）および屋内外における上面開放の圧縮強度の関係を図9に示す。それぞれの養生条件における圧縮強度は、封かん養生に対して簡易断熱でやや大きく、屋外開放では同程度となった。一方で、屋内開放では、材齢4日の初期における圧縮強度は封かん養生と同程度であるが、材齢28日では3.1~5.5N/mm<sup>2</sup>、91日では5.7~7.0N/mm<sup>2</sup>小さかった。

表7 温度特性の一覧

BF 使用率 (%)	測定位置		練上り 温度 (°C)	最高 温度 (°C)	到達 時間 (h:m)	温度 上昇量 (°C)
15	床模擬 試験体	湿潤	19	28.5	13:00	9.0
		開放		26.1	12:00	6.8
	簡易断熱養生			43.8	34:00	24.9
30	床模擬 試験体	湿潤	20	28.6	12:00	8.4
		開放		26.6	11:00	6.6
	簡易断熱養生			43.1	34:30	23.7
60	床模擬 試験体	湿潤	20	27.4	12:30	6.7
		開放		25.3	12:30	4.9
	簡易断熱養生			40.4	36:00	20.2
70	床模擬 試験体	湿潤	20	26.9	13:00	5.9
		開放		24.5	13:00	3.7
	簡易断熱養生			38.9	35:30	18.6

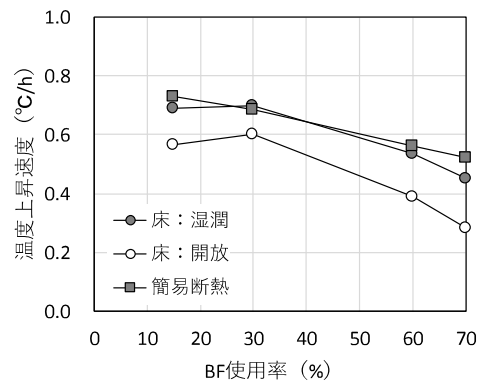


図6 BF 使用率と温度上昇速度の関係

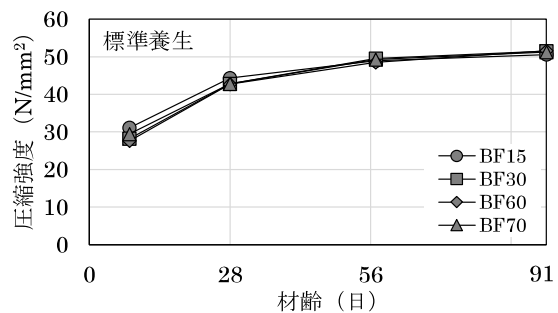


図7 材齢と圧縮強度の関係（標準水中養生）

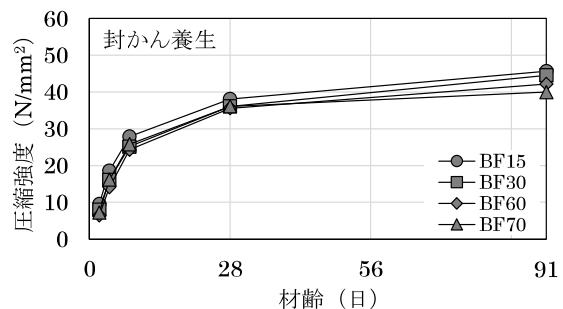


図8 材齢と圧縮強度の関係（封かん養生）

BF 使用率と床模擬試験体のコア強度の関係を図 10 に示す。床模擬試験体の強度発現性は、屋内外の各養生供試体と同様に上面処理による違いが見られ、いずれの条件においても上面開放では湿潤養生よりも圧縮強度は小さく、その差は材齢 28 日より 91 日で大きくなった。ただし、材齢 91 日においては、上面処理の違いにかかわらず、全ての BF 使用率で設計基準強度(30N/mm<sup>2</sup>)を満足した。

材齢 28 日および 91 日における床模擬試験体と簡易断熱供試体の圧縮強度の関係を図 11 に示す。また、以前に筆者らが実施した実験<sup>9)</sup>における柱模擬試験体と簡易断熱養生供試体の圧縮強度の関係を図 12 に示す。図 12 に示すように、簡易断熱養生供試体と部材厚の大きい柱模擬試験体は、同等の圧縮強度であることが認められた。しかし、図 11 からは床模擬試験体は柱模擬試験体とは異なり、簡易断熱よりも圧縮強度が小さい傾向が確

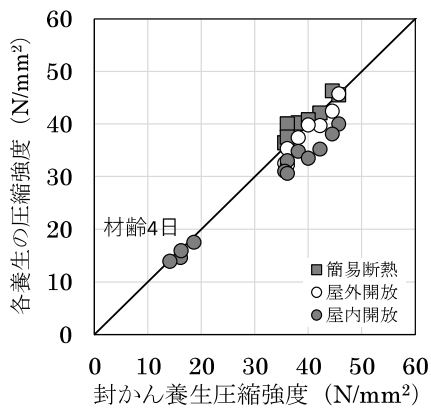


図 9 封かん養生と各養生の圧縮強度の比較

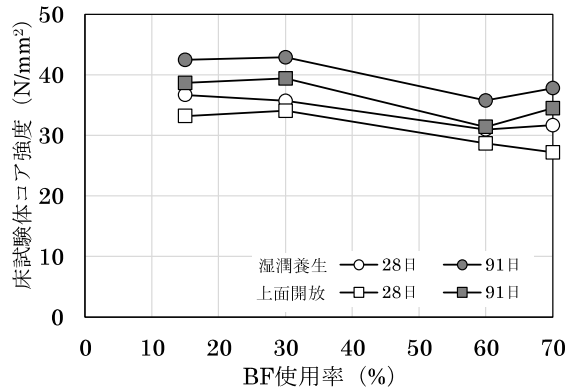


図 10 BF 使用率と床試験体コア強度の関係

認できる。これらの傾向から、部材厚の小さい床模擬試験体においては、部材厚の大きい柱形状よりも強度発現性は小さいことが伺えた。

(2) 標準水中養生と各養生条件における圧縮強度の差

標準水中養生供試体(材齢 28 日)と各養生条件における試験体(材齢 91 日)の圧縮強度の差

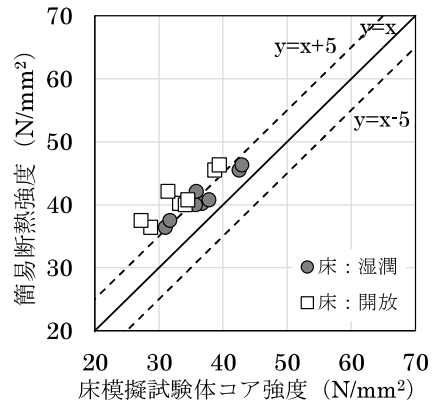


図 11 床試験体コア強度と簡易断熱強度の関係

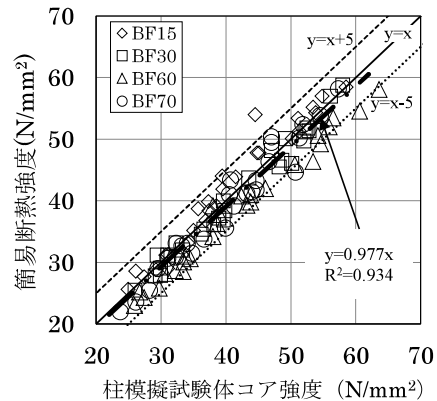


図 12 柱試験体コア強度と簡易断熱強度の関係

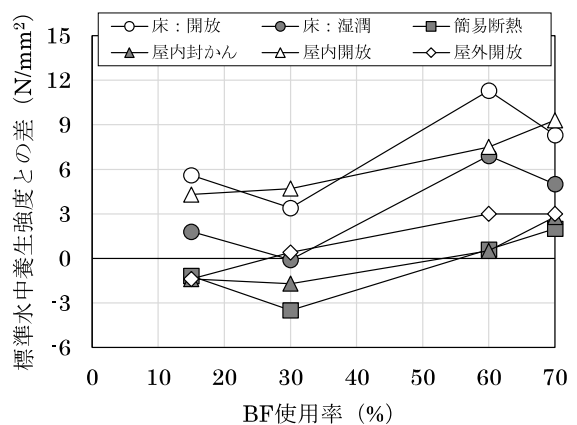


図 13 標準水中養生(σ28)と各養生条件(σ91)における強度差

を図13に示す。簡易断熱においては、全てのBF使用率で標準水中養生強度との差は $3\text{N/mm}^2$ 以下となり、筆者らが実施した実験<sup>6)</sup>と整合する結果であった。また、封かん養生の供試体も全てのBF使用率で、標準水中養生強度との差は $3\text{N/mm}^2$ 以下となり、高温履歴（最高温度 $38.9\sim 43.8^\circ\text{C}$ ）の有無にかかわらず、水分の逸散を抑制した養生環境下では同程度の強度発現性を示した。

一方で、床模擬試験体の上面開放および屋内開放供試体は、標準水中養生強度との差が $3\text{N/mm}^2$ を超える値であり、特にBF使用率60%および70%においては、大きい強度差であった。しかし、降雨の影響を受ける屋外開放した供試体では、全てのBF使用率で標準水中養生強度との差が $3\text{N/mm}^2$ 以下であり、養生中の水分の供給が影響したと考えられる。

#### 4. まとめ

実験から得られた結果を以下に示す。

- (1) フレッシュコンクリート試験結果および床模擬試験体を含むコンクリートの温度履歴について示した。その結果、柱模擬試験体と類似する温度履歴を示す簡易断熱と比較して、床模擬試験体の温度上昇量および最高温度への到達時間は顕著に小さかった。
- (2) BF使用率が増加するに伴い、床模擬試験体においても最高温度、上昇量および到達時間は小さくなった。
- (3) 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの養生方法の違いが圧縮強度に及ぼす影響について検討した結果、上面を開放し、水分の供給がない場合、圧縮強度が小さい傾向であり、特にBF使用率が大きい場合にその傾向が顕著であった。
- (4) シート養生や封かん養生などで湿潤状態を保つことで、BF使用率にかかわらず圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。よって、マットスラブのように部材厚が大きく内部が湿潤

状態に保たれるような部材に比べ、部材厚が小さく内部の乾燥が進みやすい床部材のような場合、湿潤状態の確保や水分の供給などを十分に配慮することが肝要であると考えられる。

#### 5. おわりに

建築材料分野における二酸化炭素排出量の削減、すなわちSDGsの達成につながる本研究成果に基づくコンクリートを今後、建築工事に展開していきたい。また、本成果がBFを用いたコンクリートのさらなる普及に役立てば幸いである。

#### 【謝辞】

本研究は、長谷工コーポレーション、青木あすなろ建設、淺沼組、安藤ハザマ、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、錢高組、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業の13社共同研究によるCELBIC研究会の成果である。また、本研究の実施にあたり、関東宇部コンクリート工業府中工場のご協力をいただきました。関係各位に謝意を表し、ここに記します。

#### 【参考文献】

- 1) 金子ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その1～その8、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp.535～pp.550、2019.9
- 2) 高橋ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その9～その18、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.467～pp.486、2020.9
- 3) 高橋ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その19～その21、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.389～pp.394、2021.9
- 4) 岸本ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その12、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.473～474、2020.9
- 5) 菌井ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その13、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.475～476、2020.9
- 6) 鈴木ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状その15、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.479～480、2020.9