

高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用した 環境配慮型コンクリートの床部材実験

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

山下 紘太郎*¹ 住 学*¹
Kotaro Yamashita Manabu Sumi

要旨

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料として用いた環境配慮型コンクリートについて検討を行ってきた。壁や床のような薄型部材では、柱よりも断面積が小さいことから、乾燥の影響を受けやすく発熱量も小さいため、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、床を模擬した薄型部材における環境配慮型コンクリートの強度発現性を確認する目的で、実機実験を実施した。その結果、床部材における強度発現性に及ぼす高炉スラグ微粉末の使用率の影響や湿潤養生の重要性等に関する知見を得た。

キーワード：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

1. はじめに

筆者らは、これまで構造材料として最も使用量が多いコンクリートの材料に由来する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（以下、BFと記す）を混和材として使用することに着目し、既報で幅広い使用率で用いた環境配慮型コンクリートについて検討を行ってきた。筆者らが実施した検討内容として、各種性状を把握する目的で実施した室内実験の結果^{1)、2)}、コンクリートの製造および施工性を把握する目的で実施した実機実験の結果³⁾、および耐久設計基準強度についての検討結果³⁾、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CO₂削減効果³⁾について報告した。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、既往の研究と同様にBFを用いたコンクリートについて、床を模擬した薄型部材（以下、床模擬試験体と記す）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。本報は、その検討結果⁴⁾をまとめたものである。

なお、本研究は、表1に示すゼネコン13社で組織された共同研究「環境配慮型コンクリートの諸性状および評価方法に関する研究会」において「CELBIC 環境配慮型 BF コンクリート」の開発に向けて実施したものである。

2. 床部材実験の概要

2.1 要因と水準

床模擬試験体を対象とした実験は、表2に示す要因と水準とした。セメントに対して混和材として使用するBF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（コンクリート温度で20±5℃の範囲の時期）に実施した。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、レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場と記す）が運用するJIS A 5308の強度算定式との関係を確認し（図1）、BF使用率15%および30%では普通ポルトランドセメント(N)の強度算定式を用い、60%では高炉セメントB種(BB)の強度算定式の切片から3N/mm²、70%では高炉セメントB種の強度算定式の切片から6N/mm²を減じた式を用いて求めた。

表1 共同研究への参加会社

青木あすなる建設	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	(合計13社、五十音順)	

表2 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

*1 技術研究所 つくばテクノセンター

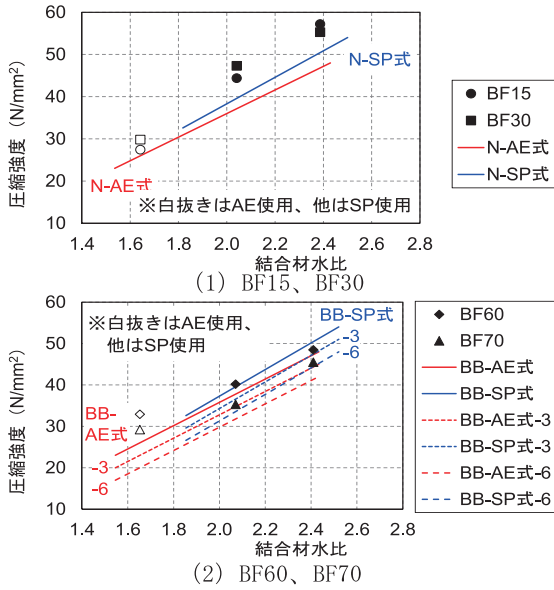


図1 生コン工場の強度算定式と試し練りにおける圧縮強度試験結果
(AE: AE減水剤, SP: 高性能AE減水剤)

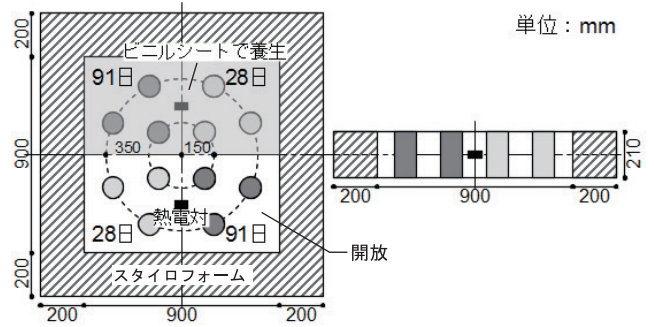


図2 床模擬試験体



写真1 打ち込み状況



写真2 養生状況

2.2 使用材料および調査

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、高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 (コンクリート用高炉スラグ微粉末) の高炉スラグ微粉末 4000 の規格値を満足するものを使用した。

試し練りの結果から決定したコンクリートの調査を表4に示す。調査条件は、設計基準強度 30N/mm² 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。

2.3 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。また、床模擬試験体を図2に示す形状とし、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(写真1)。なお、上面の半分を厚さ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(写真2)し、材齢8日で脱型した後も同一箇所に存置した。

表3 使用材料

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/cm³
細骨材*1	砂(山砂)/千葉県君津市	S1	表乾密度: 2.58g/cm³
	砕砂/東京都八王子市	S2	表乾密度: 2.60g/cm³
	砕砂/東京都八王子市	S3	表乾密度: 2.60g/cm³
	砕砂/埼玉県秩父郡	S4	表乾密度: 2.64g/cm³
粗骨材*2	砕石 2005/東京都八王子市	G1	表乾密度: 2.65g/cm³
	砕石 2005/東京都八王子市	G2	表乾密度: 2.67g/cm³
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	BF	密度: 2.89g/cm³ (せっこう添加品)
練混ぜ水	地下水	W	—
化学混和剤	高性能AE減水剤	SP	—
		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 調査

調査記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					SP/SPB*1 (Bx%)
			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 および BE30 は SP、BF60 と BF70 は SPB を使用

表5 試験項目

試験項目	試験方法	試験時期 (分)				
		0	40	60	90	120
スランプ	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	○	—	—	—	—

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車に積載した状態におけるコンクリートについて、スランプの経時変化を図3に、空気量の経時変化を図4に示す。床模擬試験体等を作製した経過時間60分の時点のフレッシュコンクリート試験結果は、スランプ、空気量ともに目標とした管理値の範囲内であった。

スランプは、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。筆者らが実施した実験⁵⁾でも同様の傾向が得られており、BF使用率の大きいコンクリートでは、スランプ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。

空気量は、全てのコンクリートで時間経過120分まで管理値の範囲内であったが、全体的に時間経過に伴い空気量の増加する傾向が見られた。

なお、本実験で使用したトラックアジテータ車（大型、4.5m³積み）のコンクリートの積載量が2.0m³と少ないことも、これらのフレッシュコンクリートの経時変化に影響を及ぼしていると考えられ、スランプの低下と巻込み空気量の増大が大きくなった要因と推察される。

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/m³、単位水量は計画調合より+2.1~5.6kg/m³であった。

3.2 コンクリート温度

表7に温度特性の一覧を、図5に各試験体の温度履歴を示す。なお、図5中BF15に示す屋外開放養生の供試体（屋外TP）の温度履歴は、供試体の配置状況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養生供試体で大きく異なった。また、床模擬試験体では上面の湿潤養生および開放の影響が見られ、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。

屋内開放養生の供試体の温度履歴は、材齢1日程度においてわずかに屋内環境温度よりも高いものの、その後は屋内環境温度と同様に推移した。一方、屋外開放養生の供試体の温度履歴は、日中の日射による影響でコンクリート温度の日内変動が大きかった。

床模擬試験体の最高温度および温度上昇量は、表7に示

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*					
			σ2	σ4	σ8	σ28	σ57	σ91
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	60分	JIS A 1107	—	—	—	●	—	●

※凡例 ◎：20℃水中 ○：屋内封かんまたは簡易断熱) △：屋内開放 ▲：屋外開放 ●：屋内存置（コア）

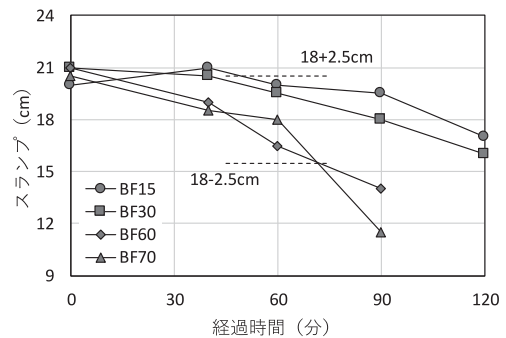


図3 スランプの経時変化

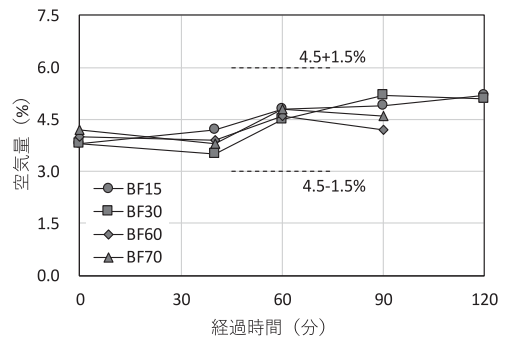


図4 空気量の経時変化

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
	試験体 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
	試験体 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
	試験体 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
	試験体 開放		24.5	13:00	3.7
	簡易断熱養生		38.9	35:30	18.6

すように、簡易断熱養生供試体よりも 12~15℃程度小さかった。既往の実験において、柱模擬試験体における最高温度や温度上昇量は、BF 使用率にかかわらず簡易断熱養生供試体よりも大きかったことから⁶⁾、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ていると言える。また、床模擬試験体では最高温度に到達する時間も簡易断熱養生供試体より 20 時間以上早かった。

一方、図 6 に示すように、上面を湿潤養生とした床模擬試験体の温度上昇速度は、簡易断熱養生供試体と同程度であった。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、湿潤養生により乾燥が抑制されることによる水和の促進、および外気が遮断されることによる断熱効果が影響すると考えられる。本実験において湿潤養生に使用したビニルシートの厚さは 0.02mm と薄いですが、水和の促進、および外気が遮断されることによる断熱効果により、最高温度や温度上昇量が増加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に到達する時間が 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みると、簡易断熱養生供試体では、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、最高温度に到達する時間は遅くなった。また、床模擬試験体では、簡易断熱養生供試体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、温度上昇量および最高温度に到達する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を図 7 に示す。標準水中養生では、BF 使用率の違いによる強度発現性の差は小さく、いずれの BF 使用率でも材齢 28 日で目標呼び強度の強度値 33N/mm² 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調査はなかった。そのため、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、屋内封かん養生では、BF 使用率 15%のみわず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。

3.4 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、図 8 に屋内封かん養生と簡易断熱養生(高温履歴) および屋内外における上面開放養生の供試体の圧

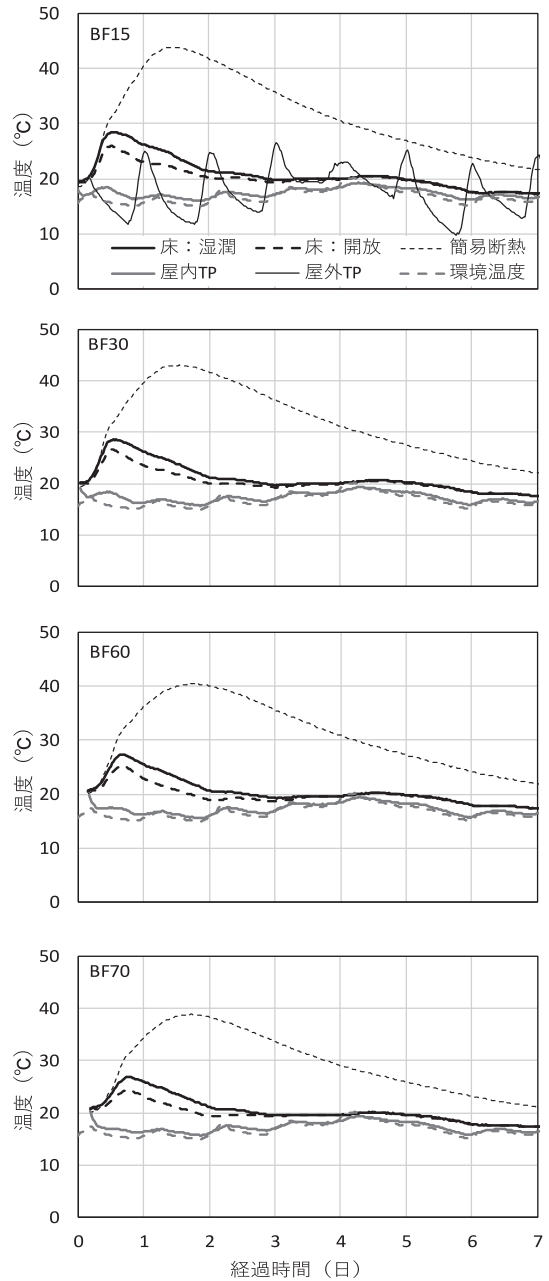


図 5 各種試験体の温度履歴

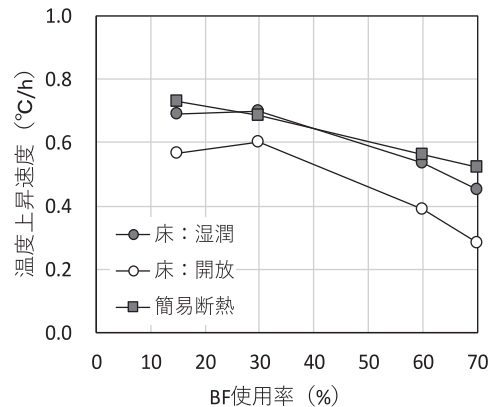
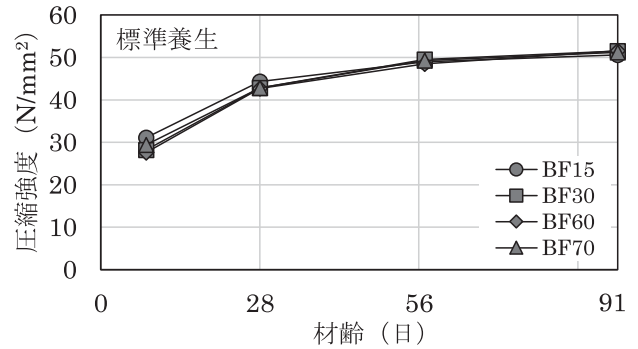


図 6 BF 使用率と温度上昇速度

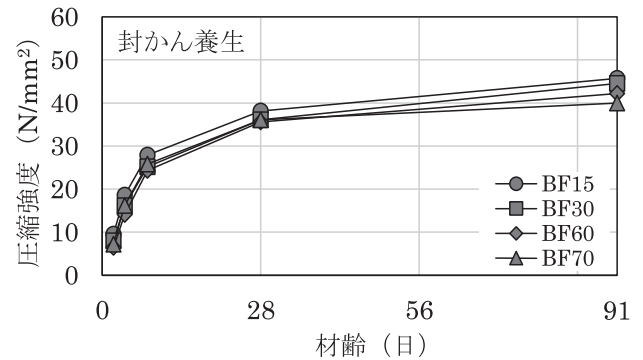
縮強度の関係を示す。それぞれの養生条件における圧縮強度は、屋内封かん養生に対して簡易断熱養生ではやや大きく、屋外開放養生では同程度となった。一方、屋内開放養生の場合、初期にあたる材齢 4 日の圧縮強度は、屋内封かん養生と同程度であるが、材齢 28 日では $3.1 \sim 5.5 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 91 日では $5.7 \sim 7.0 \text{ N/mm}^2$ 小さかった。

BF 使用率と床模擬試験体のコア強度の関係を図 9 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が小さく、その差は材齢 28 日より材齢 91 日で大きくなった。ただし、材齢 91 日では、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 (30 N/mm^2) 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養生供試体の圧縮強度の関係を図 10 に示す。また、筆者らが実施した実験⁷⁾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 11 に示す。図 11 に示すように、簡易断熱養生供試体と部材厚が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る。一方、図 10 に示すように、床模擬試験体は柱模擬試験体とは異なり、簡易断熱養生供試体よりも圧縮強度が小さい傾向を示した。



(1) 標準養生



(2) 屋内封かん養生

図 7 材齢と圧縮強度の関係

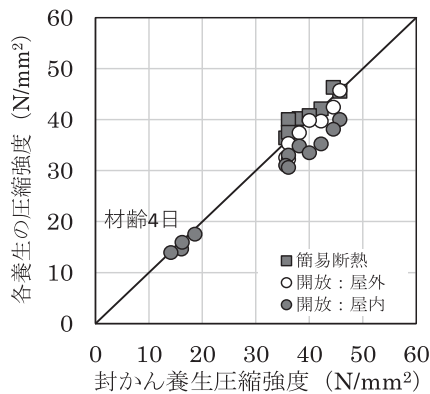


図 8 封かん養生と各養生条件の圧縮強度の関係

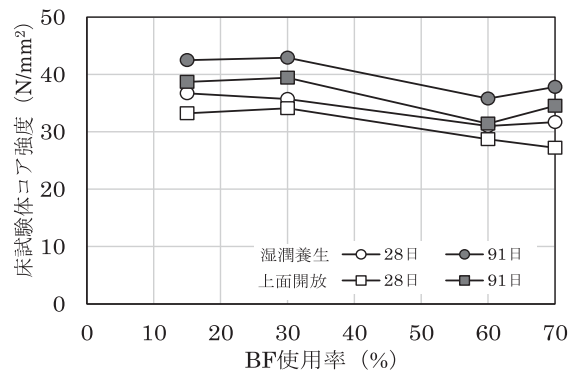


図 9 BF 使用率と床模擬試験体のコア強度の関係

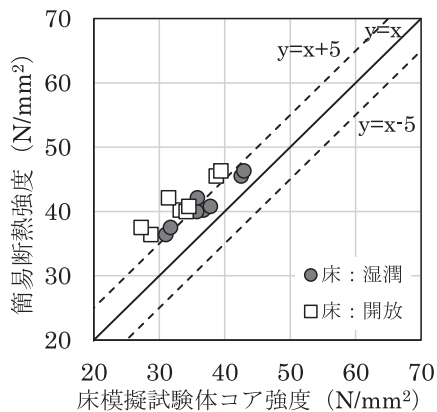


図 10 床模擬試験体コア強度と簡易断熱強度の関係

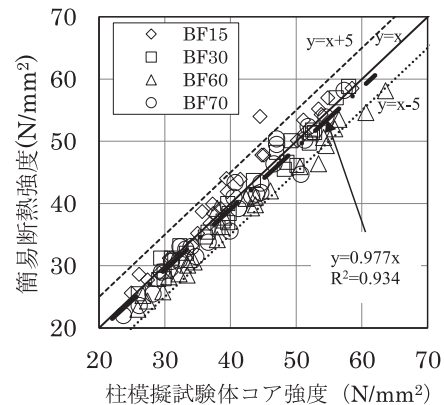


図 11 文献 7) による柱模擬試験体コア強度と簡易断熱強度の関係

3.5 標準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）の圧縮強度の差を図 12 に示す。簡易断熱養生供試体の圧縮強度は、全ての BF 使用率で標準水中養生強度との差が 3N/mm^2 以下となり、筆者らが実施した実験⁸⁾と整合する結果であった。また、封かん養生供試体の圧縮強度も、全ての BF 使用率で標準水中養生強度との差が 3N/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、床模擬試験体の屋内上面開放（床：開放）および屋内上面開放供試体の圧縮強度は、標準水中養生強度との差が 3N/mm^2 を超えており、特に BF 使用率 60% および 70% では、大きな強度差が発生した。しかし、降雨の影響を受ける屋外開放養生した供試体の圧縮強度は、全ての BF 使用率で標準水中養生強度との差が 3N/mm^2 以下であり、養生中の水分の供給が標準水中養生強度との強度差の低減に影響したと考えられる。

4. まとめ

本報では、BF を用いたコンクリートの床部材実験におけるフレッシュ性状、温度履歴、圧縮強度の結果について示した。本報で得られた知見を以下に示す。

- (1) 柱模擬試験体と類似する温度履歴を示す簡易断熱供試体と比較して、床模擬試験体の温度上昇量および最高温度に到達する時間は、顕著に小さかった。
- (2) BF 使用率が増加するに伴い、床模擬試験体の最高温度、温度上昇量および最高温度に到達する時間は短くなった。
- (3) BF 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。
- (5) (3) および (4) の知見から、マットスラブや柱部材のように、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、十分に配慮することが重要であると考えられる。

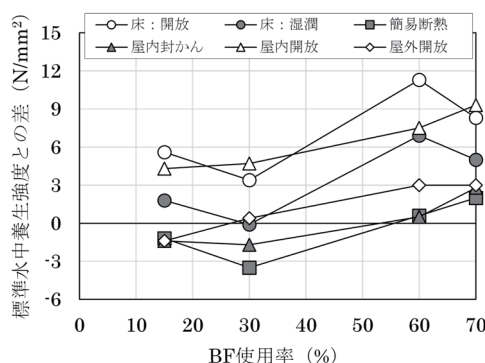


図 12 標準水中養生 (σ_{28}) と各養生条件 (σ_{91}) における差

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

本研究の実施にあたり、関東宇部コンクリート工業株式会社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) 金子樹ほか：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) 山下紘太郎ほか：高炉スラグ微粉末を各種割合で混和材として使用した環境配慮型コンクリートに関する研究, 鴻池組技術研究報告 2021, pp. 47～pp. 58, 2021. 11
- 3) 高橋祐一ほか：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
- 4) 高橋祐一ほか：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
- 5) 野中英ほか：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 11, 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）, pp. 471～pp. 472, 2020. 9
- 6) 岸本豪太ほか：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
- 7) 菌井孫文ほか：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
- 8) 鈴木好幸ほか：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