

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5 床部材実験

Effects of Granulated Blast-Furnace Slag as the Mineral Admixtures to Concrete Properties Part5. Experiments on Slab Member

藺井孫文*1

概要

建設業界においては、他業種よりエネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量が多く、特に構造材料として最も使用量が多いコンクリート分野では、二酸化炭素排出量の削減といった課題は重要であるとともにSDGsの達成につながると考えられる。そこで、これまでに高炉スラグ微粉末を幅広い使用率で混和材料として用いたコンクリートについて検討を行うことを目的として、その1、2では室内試験練り、その3、4では実機試験練りについて報告してきた。その5では、床部材における強度発現性を確認した実機実験について報告する。

key words : 環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、床部材、強度発現

1. はじめに

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料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。これまで、各種性状を把握する目的で実施した室内実験結果、実機実験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、および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削減効果が9~63%であることを報告した^{1), 2)}。しかし、実施した実機実験は、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であり、壁や床のような薄型の部材は対象としていなかった。壁や床は、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、発熱量も小さいなどコンクリートの強度発現に負の影響がおよぶことが懸念される。

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。

なお、本研究は、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」において実施したものである。

2. 床部材実験の概要

2.1 床模擬試験体

床部材を模擬した試験体の概要を図-1に示す。試験体(900×900×210mm)は、コンクリートの打込みに一輪車

を、締固めにコンクリート用棒形振動機を用いて作製した。作製状況を写真-1に示す。養生は、上面半分を0.02mmのビニルシートで湿潤養生、残り半分は開放とした。作製

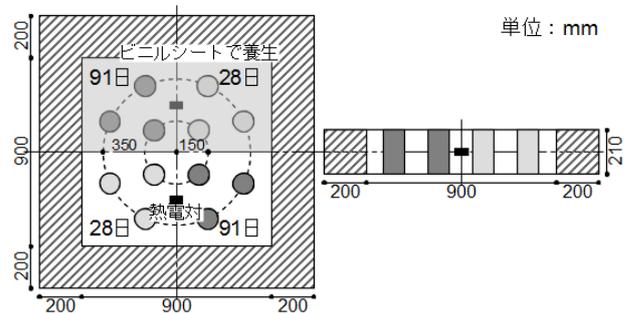


図-1 床模擬試験体



写真-1 打込み状況

写真-2 養生状況

表-1 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 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

後は、写真-2 に示す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 で存置した。

2.2 実験要因と水準

床部材実験の要因と水準を表-1 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 と称す)は、使用率を 15%、30%、60%および 70%の計 4 水準とした。実機実験は標準期に実施した。

2.3 使用材料

本実験における使用材料を表-2 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。

2.4 コンクリートの調合

呼び強度に対応する水結合材比は、図-2 に示す事前に実施した試し練りにより得られた圧縮強度と生コン工場が運用する 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/mm²、70%は高炉セメント B 種の強度算定式から 6N/mm² 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。試し練りの結果から決定したコンクリートの調合を表-3 に示す。調合条件は、呼び強度 33 (設計基準強度 30N/mm²)、荷卸し地点におけるスランプ 18±2.5cm、空気量 4.5±1.5%とし、各 BF 使用率で同一とした。

2.5 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-4 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

圧縮強度用供試体の種類と採取時期および試験材齢を表-5 に示す。現場封かん養生供試体は、①屋内封かん(上面をラップで覆い屋内存置)、②屋内開放(上面を開放し屋内存置)、③屋外開放(上面を開放し雨や日射を受ける屋外)の 3 条件で養生した。

表-5 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			-	-	-	◇	◇	◇
床模擬試験体			JIS A 1107	-	-	-	□■	-

*凡例 ◎:20°C水中 ○:屋内封かん △:屋内開放 ▲:屋外開放 □■:コア(床、湿潤□、開放■) ◇:簡易断熱養生

表-2 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/cm ³
細骨材 ^{*1}	砂(山砂)/千葉県君津市	S1	表乾密度:2.58g/cm ³
	砕砂/東京都八王子市	S2	表乾密度:2.60g/cm ³
	砕砂/東京都八王子市	S3	表乾密度:2.60g/cm ³
	砕砂/埼玉県秩父郡	S4	表乾密度:2.64g/cm ³
粗骨材 ^{*2}	砕石 2005/東京都八王子市	G1	表乾密度:2.65g/cm ³
	砕石 2005/東京都八王子市	G2	表乾密度:2.67g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	BF	密度:2.89g/cm ³ (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)

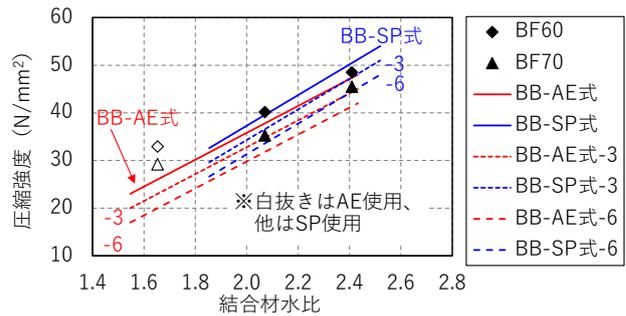
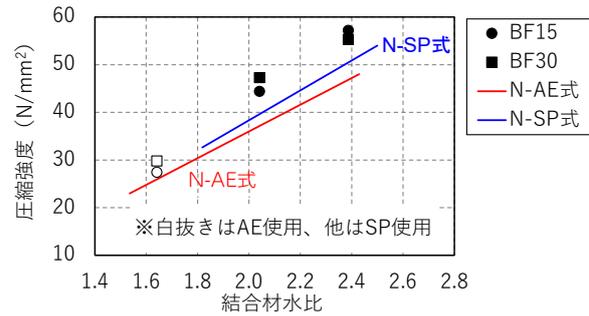


図-2 生コン工場の強度算定式と試し練りにおける圧縮強度試験結果 (上段: BF15・BF30/下段: BF60・BF70)

表-3 コンクリート調合

調査記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					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 および BF30 は SP、BF60 と BF70 は SPB を使用した

表-4 フレッシュコンクリートの試験項目

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. 実験結果および考察

3.1 コンクリートのフレッシュ性状

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に示す。コンクリートのフレッシュ性状は、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内であった。

スランブは、経過時間に伴い低下する傾向が見られるが、BF15 および BF30 は経過時間 120 分までは管理値の範囲内であった。しかし、BF60 および BF70 は、90 分の時点で管理値以下であった（120 分の試験は実施していない）。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。空気量は、全てのコンクリートで試験範囲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。また、その他のフレッシュ性状として、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。

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積載量が 2.0m³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。

3.2 床部材の温度特性

各試験体の温度履歴を図-5に示す。ここで、図-5 (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養生供試体で大きく異なる。また、床模擬試験体においては、上面条件における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。

現場封かん養生供試体の温度履歴は、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差が大きくなった。

床模擬試験体の最高温度および温度上昇量は、表-6に示すように、簡易断熱養生供試体より最高温度および温度上昇量が 12~15℃程度小さな値であった。柱模擬試験体における最高温度や温度上昇量は、筆者らが実施した実験³⁾で示したように、BF 使用率にかかわらず簡易断熱養生供試体よりも大きい結果であったことから、床模擬試験体における発熱特性は、柱模擬試験体より小さいと

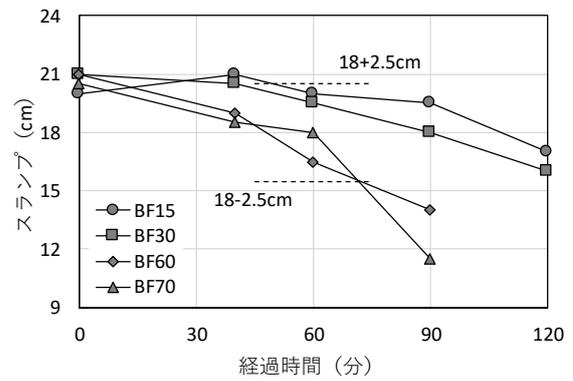


図-3 スランブの経時変化

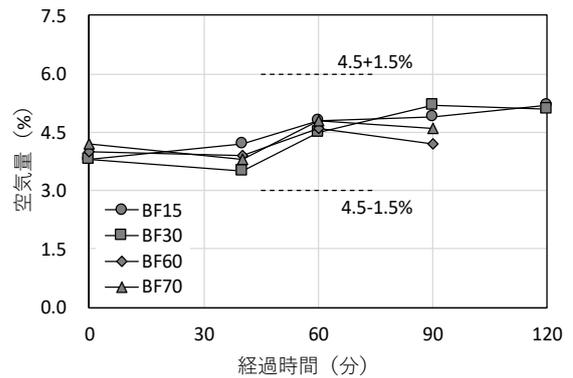


図-4 空気量の経時変化

考えられる。また、最高温度に到達する時間も床模擬試験体は、簡易断熱養生供試体より 20 時間以上短い結果であった。

一方、温度の上昇速度は、図-6に示す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 と薄いのが、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-6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考えられる。

BF 使用率の影響については、簡易断熱養生供試体では最高温度、温度上昇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、上昇量および到達時間の差が同様に見られた。

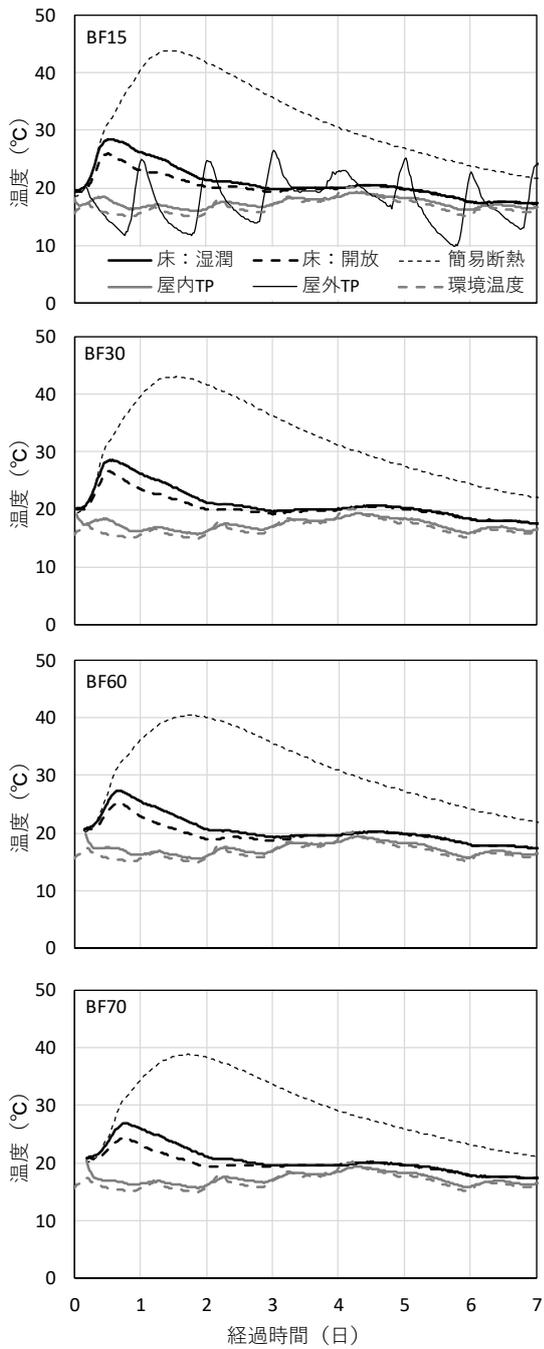


図-5 各種試験体の温度履歴

3.3 床部材の強度発現性

標準水中養生したコンクリートの強度発現性（材齢と圧縮強度の関係）を図-7に、現場封かん養生したコンクリートの強度発現性を図-8に示す。標準水中養生においては、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/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 BF 使用率はないことから、生コン工場が運用する 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

表-6 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

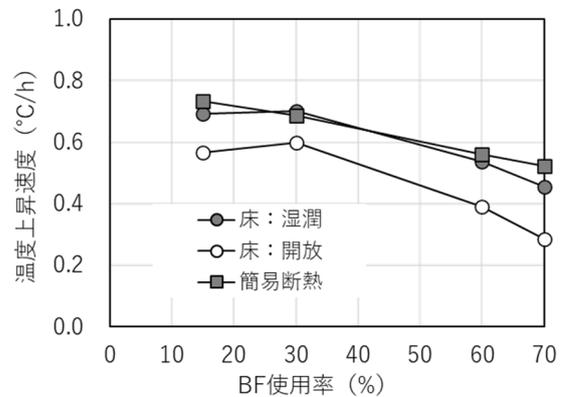


図-6 BF 使用率と温度上昇速度

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、図-9 に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の圧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、封かん養生に対して簡易断熱養生でやや大きく、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/mm²、材齢 91 日では 5.7~7.0 N/mm² 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-10 に示す。床模擬試験体の強度発現性は、屋内外の各養生試験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/mm²) を満足した。

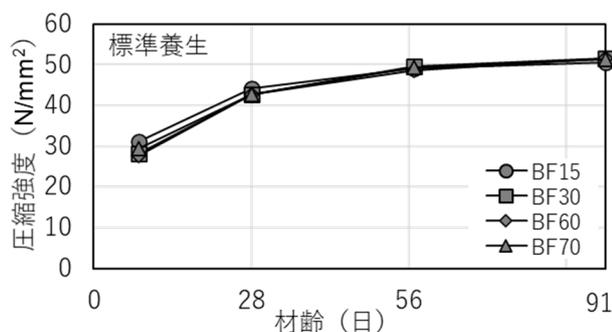


図-7 材齢と圧縮強度の関係 (標準水中養生)

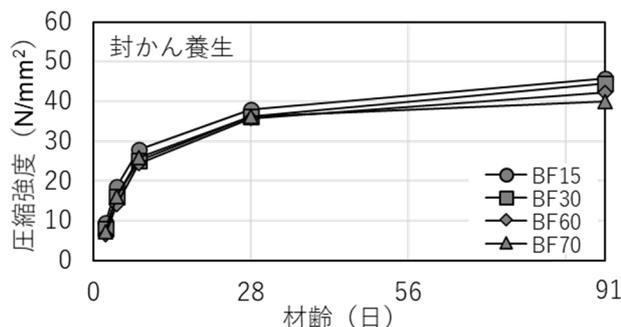


図-8 材齢と圧縮強度の関係 (現場封かん養生)

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-11 に示す。また、筆者らが実施した実験⁴⁾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。しかし、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にあった。これらのことから、部材厚の小さい床部材は、部材厚の大きい柱形状よりも強度発現性が小さく考えられる。

(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) の圧縮強度の差を図-13 に示す。簡易断熱養生においては、全ての BF 使用率で標準水中養生強度との差は 3N/mm² 以下となり、筆者らが実施した実験⁵⁾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 3N/mm² 以下となり、高温履歴 (最高温度 38.9~43.8℃) 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の供試体は、標準水中養生強度との差が 3N/mm² を超える値であり、特に BF 使用率 60%および 70%においては、大きい強度差があった。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 3N/mm² 以下であり、養生期間中の水分の供給が影響したものと考えられる。

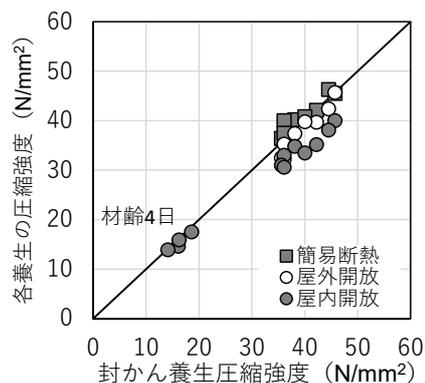


図-9 封かん養生と各養生条件の圧縮強度の関係

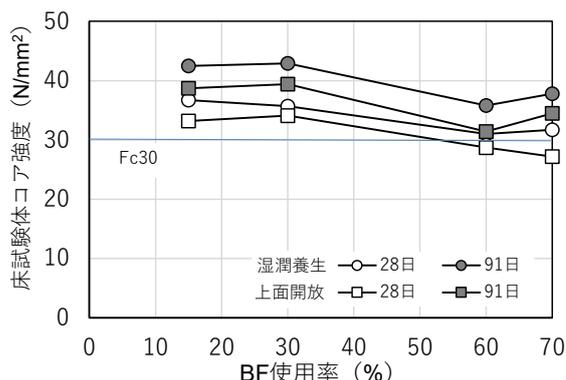


図-10 BF 使用率と床模擬試験体のコア強度の関係

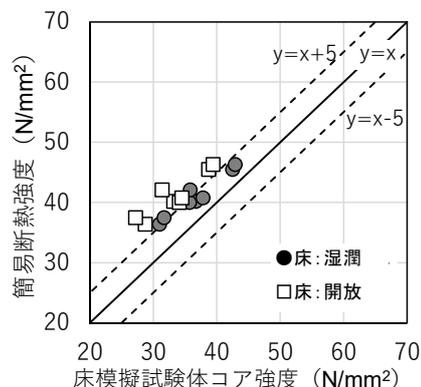


図-11 床模擬試験体コア強度と簡易断熱強度の関係

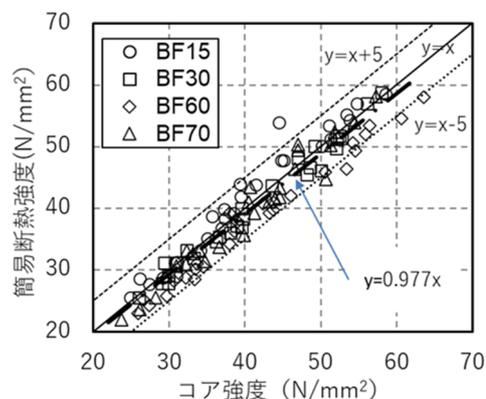


図-12 柱模擬試験体コア強度と簡易断熱強度の関係⁴⁾

4. まとめ

床部材を対象とした高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現性について、実機実験の結果、下記の知見を得た。

- ①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、柱模擬試験体（簡易断熱養生の温度履歴と類似）と比較して極端に小さい。
- ②床模擬試験体においても BF 使用率が增加するに伴い、最高温度、上昇量および到達時間は小さくなる。
- ③床模擬試験体は、上面を開放し水分の供給がない場合、圧縮強度が小さくなる傾向がある。特に、BF 使用率が大きい場合にその傾向が顕著である。
- ④床模擬試験体は、シート養生や封かん養生などにより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。

以上より、部材厚が薄く内部の乾燥が進みやすい壁や床のような薄型部材の場合、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部材に比べ、湿潤状態の確保や水分の供給などに十分配慮する必要があると考えられる。

【謝辞】

本研究は、当社と長谷工コーポレーション、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤・間、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業の13社の共同研究です。なお、前報までのその1～4において「CELBIC 環境配慮型 BF コンクリート」として、建設材料技術性能証明 (GBRC 材料証明 第 20-04 号) を取得しています。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ます。

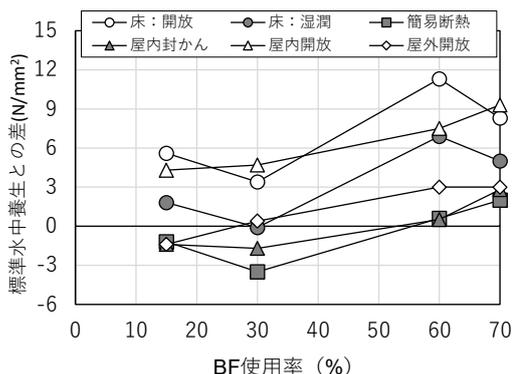


図-13 標準水中養生(σ28)と各養生条件(σ91)の差

【参考文献】

- 1) 菌井孫文：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2)、錢高組技報、No. 44、pp27-42、2019. 11
- 2) 菌井孫文：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3～その4)、錢高組技報、No. 45、pp17-34、2020. 11
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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