各種セメントを高炉スラグ微粉末で置換した環境配慮型コンクリートに関する基礎的な検討

A Fundamental Study on Eco-Friendly Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cement Replacement

峯　竜一郎*1，小宮　克仁*1
RYUICHIRO MINE, KATSUHITO KOMIYA

各種セメントの一部を高炉スラグ微粉末（BF）に置換した結合材を用いた環境配慮型コンクリートについて基礎的な検討を行った。具体的には，水結合材比（W/B）＝42.5～27.5%の範囲で BF 置換率を 0，30 および 50%としたコンクリートを室内で製造し，フレッシュ性状と圧縮強度の発現を確認した。検討の結果，本試験の範囲内において，セメント種類によらず BF で置換すると，(1)同一スランプ値を得るための化学混和剤添加率が小さくなる，(2)強度発現における養生時の水分供給の影響が大きくなる，(3)強度発現における温度依存性が，水結合材比を低減するもしくは BF 置換率を高めると大きくなる，ことがわかった。

キーワード：環境配慮型コンクリート，早強セメント，高炉セメント B 種，強度発現，温度依存性

A fundamental study was conducted on environmentally friendly concrete using binders in which a portion of various cement types (NC, HC, and BB) was replaced with ground granulated blast-furnace slag (BF). Specifically, concretes with BF replacement ratios of 0%, 30%, and 50% were produced in a laboratory at water-to-binder ratios (W/B) ranging from 42.5% to 27.5%, and their fresh properties and compressive strength development were evaluated. The following findings were obtained. Regardless of cement type, BF replacement resulted in: (1) a reduction in the dosage of chemical admixtures required to achieve the same slump value; (2) a greater influence of moisture supply on strength development; and (3) increased temperature dependence of strength development as the water-to-binder ratio decreased or the BF replacement ratio increased.

Keywords: Environmentally friendly concrete, High-early-strength cement, Blast-furnace slag cement type B, Strength development, Temperature dependency

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け，二酸化炭素排出量削減への取組みが必須である。建設産業においては建設資材の二酸化炭素排出量の削減が喫緊の課題である。コンクリート材料においては，その構成材料の一つであるセメントについて，製造時における二酸化炭素排出量が多いことから [1]，セメントを混和材（主に高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの産業副産物）で置換し，材料由来の CO_2 排出量を削減した環境配慮型コンクリートの開発が盛んに行われている [例えば 2]。著者らは，既報 [3]において環境配慮型コンクリートを用いたプレキャストコンクリート部材の実用化を目的とし，普通セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換した（置換率 30，50%）コンクリートのフレッシュ性状と養生温度が強度発現に与える影響（温度依存性）を確認している。一方，強度発現における温度依存性は，セメントの種類 [例えば 4] や混和材（高炉スラグ微粉末など）の置換率 [5] により異なることが知られている。そのため，環境配慮型コンクリートを実装するにあたり，養生温度条件が圧縮強度の発現に与える影響を確認・把握する必要がある。

*1 技術研究所技術開発推進部

本報では,室内試験で普通セメントを使用した配（調）合を基準とし,セメント種類と高炉スラグ微粉末置換率（以下，置換率と略記）を変えたコンクリートのフレッシュ性状と養生条件（温度，水分供給の有無)の違いが圧縮強度の発現に与える影響を確認した。

2. 使用材料とコンクリートの配（調）合条件

使用材料を**表-1** に示す。セメントは，普通ポルトランドセメント（NC)，早強ポルトランドセメント（HC)，高炉セメント B 種（BB）の 3 種類とした。BB は，NC に高炉スラグ微粉末 4000（BF）が混入されたセメントであり,混入率は 30%超～60%以下と規定されている。本報では，BB の BF 混入率（置換率）は，指針 [6]の値を参考に 45%と仮定している。HC は初期強度の増進，BB は低環境負荷を期待している。混和材は，一般的に流通している高炉スラグ微粉末 4000（BF）を使用した。細骨材は，硬質砂岩砕砂（S）を使用した。粗骨材は，最大寸法が 20 mm の硬質砂岩砕石（G）とした。化学混和剤は,主成分がポリカルボン酸系の高性能減水剤（Ad）と主成分がアルキルエーテル系の AE 剤（AE）を使用した。コンクリートの配（調）合条件を**表-2** に示す。水結合材比（W/B）は，42.5%，35.0%，27.5%の 3 水準で，W/B を同一とした条件で，セメント種類，BF 置換率を変えた場合の強度発現性の違いを検討した。設計基準強度（Fc）39～60 N/mm²を満たす調合管理強度となる比較的高強度なコンクリートを想定している。単位水量は 160 kg/m³とし，細骨材率（s/a）は各 W/B で同一とした。BF 置換率は, NC では質量比で 0%, 30%, 50%, HC では 30%，50%，BB では 0%とした。なお，フレッシュ性状の目標値として,スランプで 21.0 ±2.0 cm，空気量で 4.5±1.5%とした。

表-1　使用材料

分類	記号		種類	物性・成分他
セメント	B	NC	普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm³, 比表面積：3050cm²/g
		HC	早強ポルトランドセメント	密度：3.14g/cm³, 比表面積：4630cm²/g
		BB	高炉セメントB種	密度：3.04g/cm³, 比表面積：4240cm²/g
混和材		BF	高炉スラグ微粉末	密度：2.89g/cm³, 比表面積：4680cm²/g SO_3：2.15%
細骨材	S		硬質砂岩砕砂	表乾密度：2.62g/cm³, 粗粒率:2.99
粗骨材	G		硬質砂岩砕石	表乾密度：2.64g/cm³, 実積率：61.5%
化学混和剤	Ad		高性能減水剤 (標準型Ⅰ種)	ポリカルボン酸系
	AE		AE剤	アルキルエーテル系

表-2　コンクリートの配（調）合条件

No.	記号	セメント種類	W/B (%)	BF置換率 (wt%)	単位量（kg/m³） W	B					S	G
							NC	HC	BB	BF		
1	NC42.5	NC	42.5	0	160	376	376	0	0	0	788	990
2	NC35.0		35.0		160	457	457	0	0	0	733	979
3	NC27.5		27.5		160	582	582	0	0	0	664	943
4	NC42.5-30		42.5	30	160	376	264	0	0	113	784	985
5	NC35.0-30		35.0		160	457	320	0	0	137	728	973
6	NC27.5-30		27.5		160	582	407	0	0	175	659	935
7	NC42.5-50		42.5	50	160	376	188	0	0	188	782	982
8	NC35.0-50		35.0		160	457	229	0	0	229	725	968
9	NC27.5-50		27.5		160	582	291	0	0	291	655	930
10	HC42.5-30	HC	42.5	30	160	376	0	264	0	113	783	984
11	HC35.0-30		35.0		160	457	0	320	0	137	727	972
12	HC27.5-30		27.5		160	582	0	407	0	175	658	934
13	HC42.5-50		42.5	50	160	376	0	188	0	188	781	982
14	HC35.0-50		35.0		160	457	0	229	0	229	724	967
15	HC27.5-50		27.5		160	582	0	291	0	291	654	929
16	BB42.5	BB	42.5	-	160	376	0	0	376	0※	783	984
17	BB35.0		35.0		160	457	0	0	457	0※	726	970
18	BB27.5		27.5		160	582	0	0	582	0※	656	932

※：BB の BF 置換率は BB における BF 含有率 45%と同等と仮定

表-3　硬化コンクリートの試験項目

試験項目	供試体形状 (mm)	試験規格	養生方法	材齢（日） 若材齢※1	7	28	56	91
圧縮強度	φ100×200	JIS A 1108	標準水中	-	-	○	○	○
			5℃封かん	○	○	○	-	-
			10℃封かん	○	○	○	-	-
			20℃封かん	○	○	○	○	○
			35℃封かん	○	○	○	-	-

※1：注水時間を基点に，各養生温度で強度試験が可能と判断した材齢 18～48h の範囲

3. 実験方法

コンクリートの練混ぜは,強制二軸ミキサを用い，1 バッチの練量を 95 L とした。硬化コンクリートの試験項目を**表-3** に示す。圧縮強度試験は JIS A 1108 : 2018 に準拠した。養生手順を**図-1** に示す。供試体の養生方法は，20℃水中養生（以下，標準水中）と封かん養生（5，10，20，35℃）の 5 水準とした。封かん養生とした供試体は，フレッシュ試験後に供試体を作製し，各温度に設定した恒温槽（チャンバー）にすみやかに移動し，試験材齢まで一定の温度で養生した。封かん養生した供試体の試験材齢は，若材齢（注水

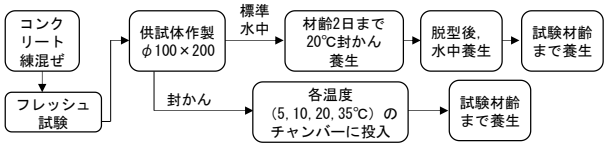


図-1　供試体の養生手順

時間を基点に，各養生温度で強度試験が可能と判断した材齢 18～48 h の範囲），7 日，28 日で強度試験を行った。なお，20℃封かん養生は，材齢 56 日，91 日でも強度試験を実施した。

4. 実験結果と考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験結果を**表-4**に示す。セメントを BF で置換した条件のものは，同一スランプを得るために必要な化学混和剤の添加率が低減されることを期待し，セメント単味のものよりも添加率を小さくしたが，一部（NC27.5-30，NC42.5-50，HC27.5-30，HC27.5-50，BB35.0）のスランプ値は目標範囲を逸脱した。しかし，材料分離等の異常は認められず，供試体の作製に支障はなかった。まず，Ad 添加率の影響に着目し，W/B＝42.5%を見ると，NC 単味の NC42.5 と比較して，BF を置換した条件のもの（NC42.5-30）は低い Ad 添加率で同等以上のスランプを示す傾向が確認された。この傾向は，セメント種類を HC や BB とした，BF 置換等による BF を含む場合も同様であった。W/B＝35.0%，27.5%においても，W/B＝42.5%と同様の傾向が認められた。以上の結果から，BF 置換により同一スランプを得るために必要な化学混和剤の添加量が低減されることが確認された。この傾向は HC を用いた場合も同様であった。一方で，NC42.5-50，BB35.0 のスランプ値は，それぞれ 11.0 cm，16.5 cm となった。セメント単味の条件と比較した場合，BF 置換等により BF を含有したものは，化学混和剤の添加量を僅かに低減しただけで急激にスランプが低下する場合があるため，注意が必要である。空気量は，W/B=42.5%で 4.2～5.6%，W/B=35.0%で 3.3～5.8%，W/B=27.5%で 3.6～4.5%の範囲であり，セメント種類や BF 置換率によらず，AE 剤の添加率を適宜調整することで，目標範囲内に制御可能であった。空気量とスランプとの関係を**図-2** に示す。一般に，AE 剤を添加したコンクリートは，空気量が増加するとスランプ値が大きくなると言われている。しかし，本実験の範囲では，そのような傾向は見られなかった。

表-4　フレッシュコンクリートの試験結果

No.	記号	Ad [B×%]	AE [B× 0.001%]	スランプ [cm]	空気量 [%]	練り上がり温度 [℃]	外気温 [℃]
1	NC42.5	0.90	4.0	21.0	5.3	22.4	20.5
2	NC35.0	0.90	4.0	20.5	3.3	23.5	20.9
3	NC27.5	1.05	5.0	21.5	4.5	25.0	20.4
4	NC42.5-30	0.85	4.0	22.0	5.6	22.7	20.4
5	NC35.0-30	0.80	4.5	22.5	5.8	22.9	20.3
6	NC27.5-30	0.95	5.0	25.0	3.6	24.1	20.7
7	NC42.5-50	0.75	3.5	11.0	4.2	23.5	20.1
8	NC35.0-50	0.75	4.0	22.5	5.1	25.0	21.5
9	NC27.5-50	0.80	5.5	23.0	4.0	26.8	21.2
10	HC42.5-30	0.85	3.0	20.0	4.5	22.4	20.6
11	HC35.0-30	0.85	4.0	22.5	5.8	23.1	20.6
12	HC27.5-30	0.90	4.0	23.5	3.7	24.3	20.7
13	HC42.5-50	0.80	3.0	20.5	4.5	22.2	20.8
14	HC35.0-50	0.80	3.5	23.0	5.2	22.8	20.7
15	HC27.5-50	0.85	4.0	24.5	3.3	23.5	20.9
16	BB42.5	0.80	3.0	22.5	4.7	22.4	20.3
17	BB35.0	0.80	3.5	16.5	4.8	22.7	20.8
18	BB27.5	0.85	4.0	23.0	3.7	23.7	20.5

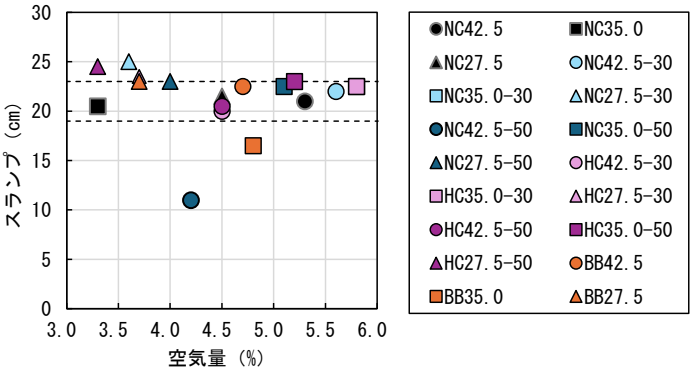


図-2　空気量とスランプの関係

(2) 圧縮強度

a) 標準水中養生

BF 置換率と標準水中の圧縮強度（以下，強度）の関係を**図-3** に示す。なお，圧縮強度試験結果については，空気量の変動による影響を除くため，既往文献 7)に基づき空気量による強度補正を実施した（補正空気量は 4.5%，強度低下率は空気量 1%あたり 4%とした）。材齢 28 日を見ると，NC 単味の条件と比べて，W/B＝42.5%では，NC42.5-50，W/B = 35.0%では，NC35.0-50，W/B = 27.5%では，NC27.5-30，BB27.5，NC27.5-50 の強度が低くなった。BF を置換した場合，NC をベースとした条件では，材齢 28 日における強度は，同等以下となる傾向が見られた。この傾向は，BF 置換率が大きくなると顕著になった。HC をベースとした条件では，BF 置換率を 50%とした条件でも NC 単味と同等以上の強度が得られた。材齢 91 日を見ると，W/B によらず，NC 単味の条件と比べ，NC をベースとした置換率 30，50%の一部で強度が低くなった。NC をベースとした条件では，高炉スラグ微粉末を混入することで，材齢 28 日以降の強度増進が期待できるが，セメント単味と比べ，若干ではあるが強度が低くなった。一方，HC をベースとした条件では，

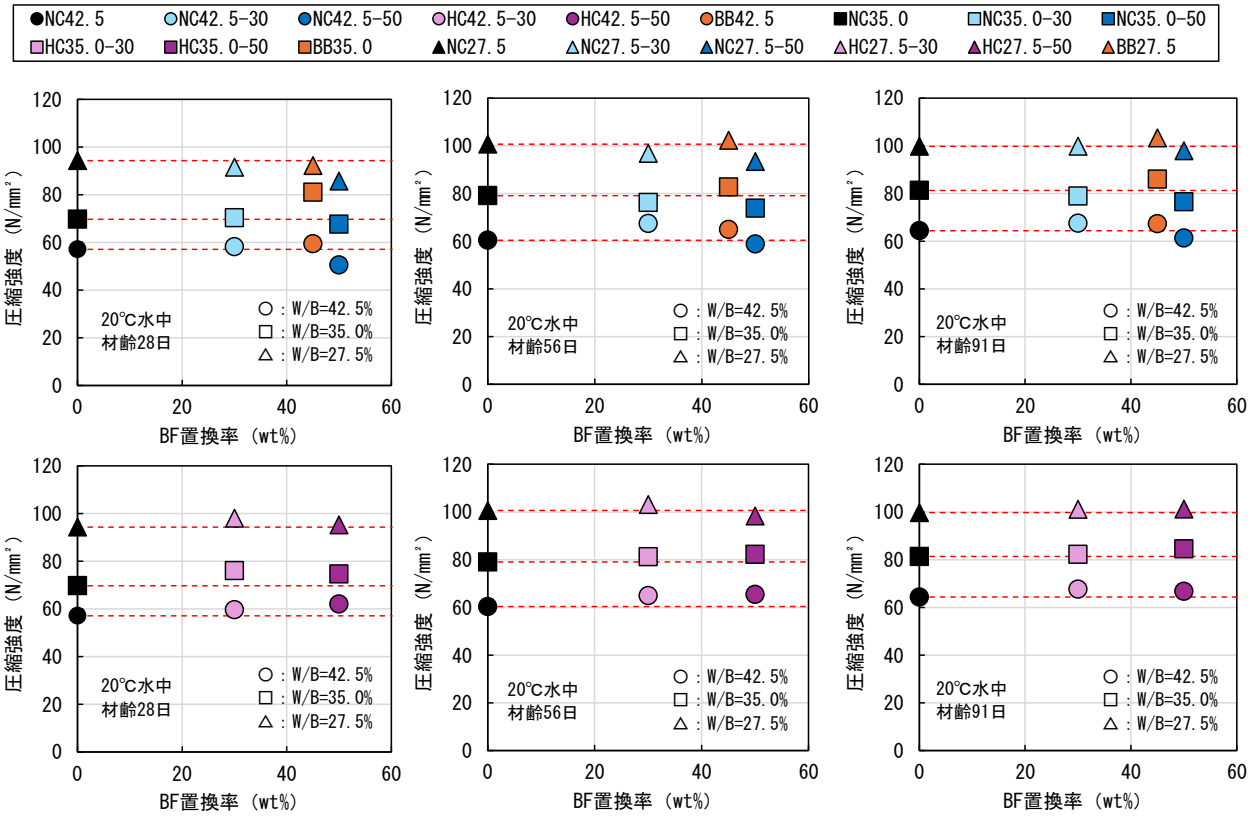


図-3　BF 置換率と圧縮強度の関係（標準水中）

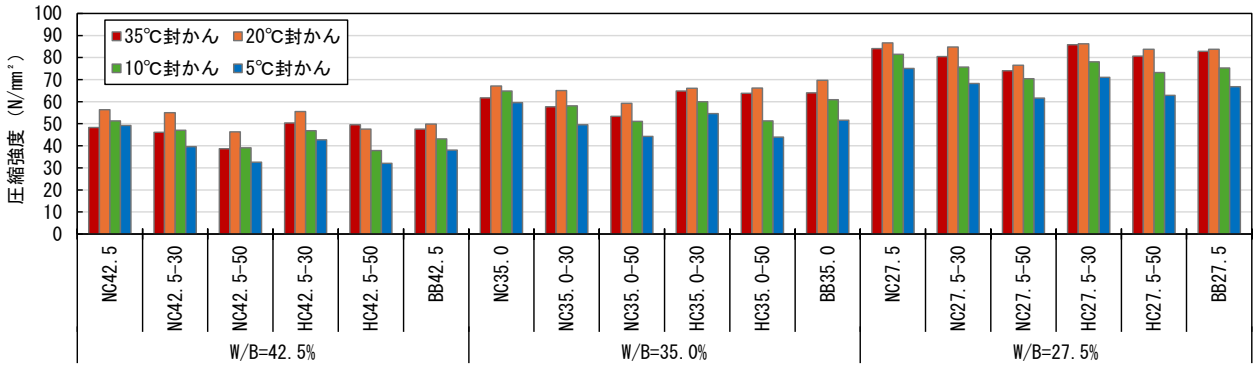


図-4　圧縮強度試験結果（5,10,20,35℃封かん，材齢 28 日）

NC 単味と同等の強度を示した。

b）封かん養生

封かん養生の強度試験結果を**図-4** に示す。圧縮強度は，セメント種類や BF 置換率によらず 5℃＜10℃＜20℃封かんとなり，5～20℃の範囲では養生温度が高いほど強度の増進は大きくなった。また，BF を置換した条件で NC と HC を比べると，HC の強度が高くなった。35℃封かんを見ると，セメント種類や BF 置換率によらず，すべての水準で 20℃封かんよりも強度が低くなった。

c）水分供給の影響

標準水中養生の強度と 20℃封かん養生の強度との関係を**図-5** に示す。図中には，既報 [3]のプロットに加え，BB と HC をベースとした条件のプロットを追記している。既報 [3]では，NC をベースとした条件において BF 置換率を高めると，標準水中と比べて 20℃封かんの強度が低下することから，BF 置換の場合には，NC 単味の場合と比べて強度発現に及ぼす水分供給の影響が大きくなる（水分供給がより重要となる）ことを確認している。この傾向は，皆川ら [8]や河上 [9]の報告と同様であった。HC をベースとした条件における強度の低下は，NC をベースとした条件と同程度であっ

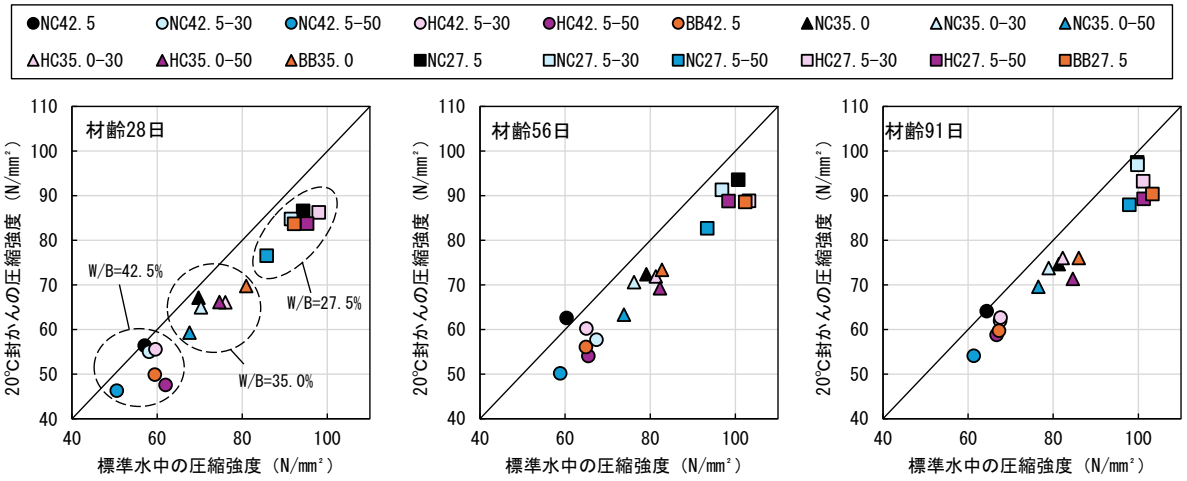


図-5　標準水中と 20℃封かんの圧縮強度の関係

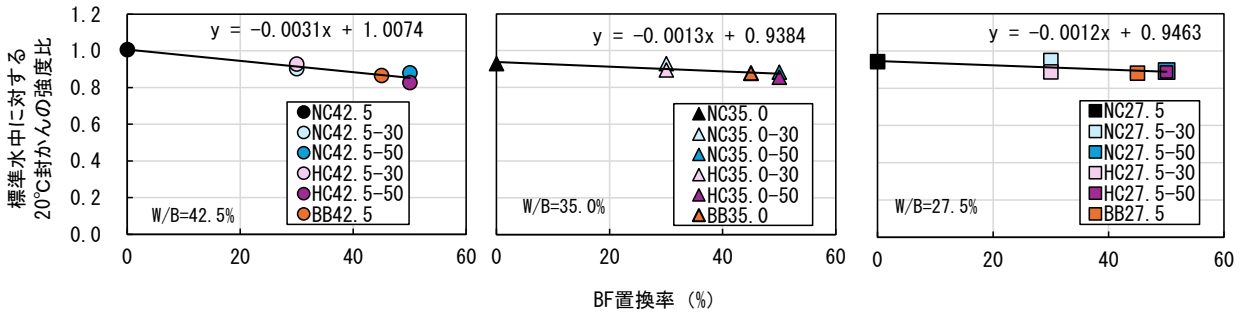


図-6　BF 置換率と近似直線の傾きの関係

た。また，BB の強度の低下は，NC をベースとした条件の置換率 30%と 50%の中間程度であった。

ここで，強度発現における水分供給の影響を確認するため，**図-5** に示した標準水中養生の強度と 20℃封かん養生の強度との関係（材齢 28，56，91 日）について，セメント種類・BF 置換率ごとに直線近似を行った。得られた近似直線の傾き（標準水中に対する 20℃封かんの強度比）を算出し，BF 置換率との関係を整理した結果を**図-6** に示す。W/B によらず，BF 置換率が高いほど傾きの値が小さく（すなわち標準水中よりも 20℃封かんの強度が低く），水分供給の影響が大きくなることが確認された。また，この傾向における W/B やセメント種類の違いによる影響は見られなかった。

d）強度発現の温度依存性

セメント種類と BF 置換率の違いが養生温度と強度発現の関係に与える影響を考察するため，文献 10)と同様に，各配（調）合の 20℃封かんの強度について，式(1)の形で有効材齢（式(2)）と強度発現との関係を回帰した。

$$F_T = F_\infty exp\left(a(t_e - t_0)^b\right) \tag{1}$$

$$t_e = \Sigma\left\{exp\left[-\frac{Ea}{R}\left(\frac{1}{273+T}-\frac{1}{293}\right)\right]\Delta t\right\} \tag{2}$$

ここで，F_T：養生温度 T の圧縮強度［N/mm²］

F_∞：最終到達強度［N/mm²］

a，b，t_0：実験定数

t_e：有効材齢［日］

E_a：見かけの活性化エネルギー［kJ/mol］

R：気体定数［8.314 J/(mol・K)］

T：養生温度［℃］

Δt：区間［日］

ただし，F_∞には材齢 91 日の結果を用いた。

HC をベースとしたものと BB を用いたものを式(1)の形で回帰した結果を**図-7** に示す。なお，図中で用いた Ea は，混和材の混入により一般的にセメントコンクリートで用いられる 33.5 kJ/mol よりも高くなることから 60 kJ/mol とした。また，35℃封かん養生としたものは，既報 [3]と同様に強度増進の停滞 [11]が見られたため検討からは除き，5，10，20℃封かん養生の試験結果のみをプロットしている。全体的な傾向として，既報 [3]と同様に，BB と HC をベースとした条件においても強度発現の温度依存性は，W/B が低下する，もしくは BF 置換率が増加することで高くなる（有効材齢で強度発現を予測するには，見かけの活性化エネルギーE_aを大きく設定する必要がある）ことが確認された。BB を用いたものを見ると，W/B によらず，すべての結果がおおむね回帰曲線上にプロットされている。BB の BF 含有割合は 45%程度であり，既報 [3] で示した NC をベースとし，BF 置換率 30，50%とした水準と同様に良好に回帰された。また，BB は NC に比べ，初期強度増進が遅延することが知られている。BB を用いたものは，Ea を 60 kJ/mol とすることで，特に 5，10℃封かんの低温養生における初期強度発現の推定精度が向上すると考えられる。次に，HC をベースにし BF 置換率 30%としたものを見ると，有効材齢 5.2 日（材齢 7 日）以前の試験結果が回帰曲線の上側にプロットされていることがわかる。BF 置換率 50%としたものも同様の傾向であった。これは，HC に BF を置換した結合材の場合，Ea の値が 60 kJ/mol では過大に見積もられているためと考えられる。谷口ら [12]によると，C_3S の割合が増加すると，Ea の値は小さくなる傾向が示されている。一般に HC は NC と比べて C_3S の割合が高いため，HC に BF を混入したものの Ea は，NC に BF を混入したものよりも低くなると考えられる。そこで，Ea を 5 kJ/mol ずつ小さくし，適合度を確認した。**図-8** に HC をベースとした条件の試験結果を Ea=45 kJ/mol として整理した結果を示す。有効材齢 5.2 日（材齢 7 日）以前の試験結果が回帰曲線に近づき，おおむね同一の曲線で評価可能になったと考えられる。ただし，BF 置換率 50%のものを見ると，有効材齢 5.2 日（材齢 7 日）以降のプロットが回帰曲線よりも下側にプロットされている。これは，HC に BF を混入した場合，文献 5)で示されているように，初期材齢と長期材齢のそれぞれに対して適切な Ea の値を設定する必要性があることを示唆している。これについては，今後の研究課題としたい。このように，セメント種類，混和

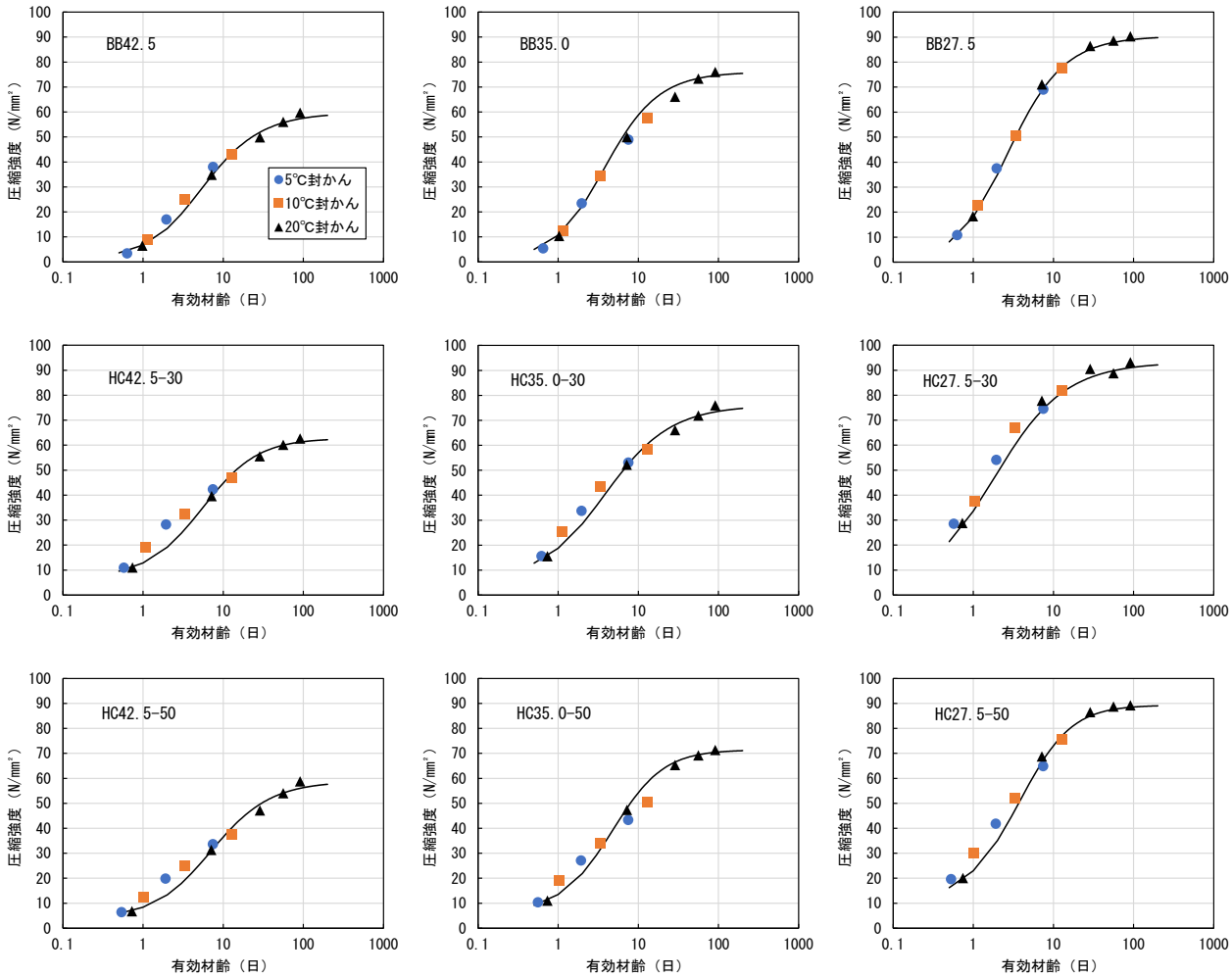


図-7　有効材齢と圧縮強度の関係（Ea=60kJ/mol）

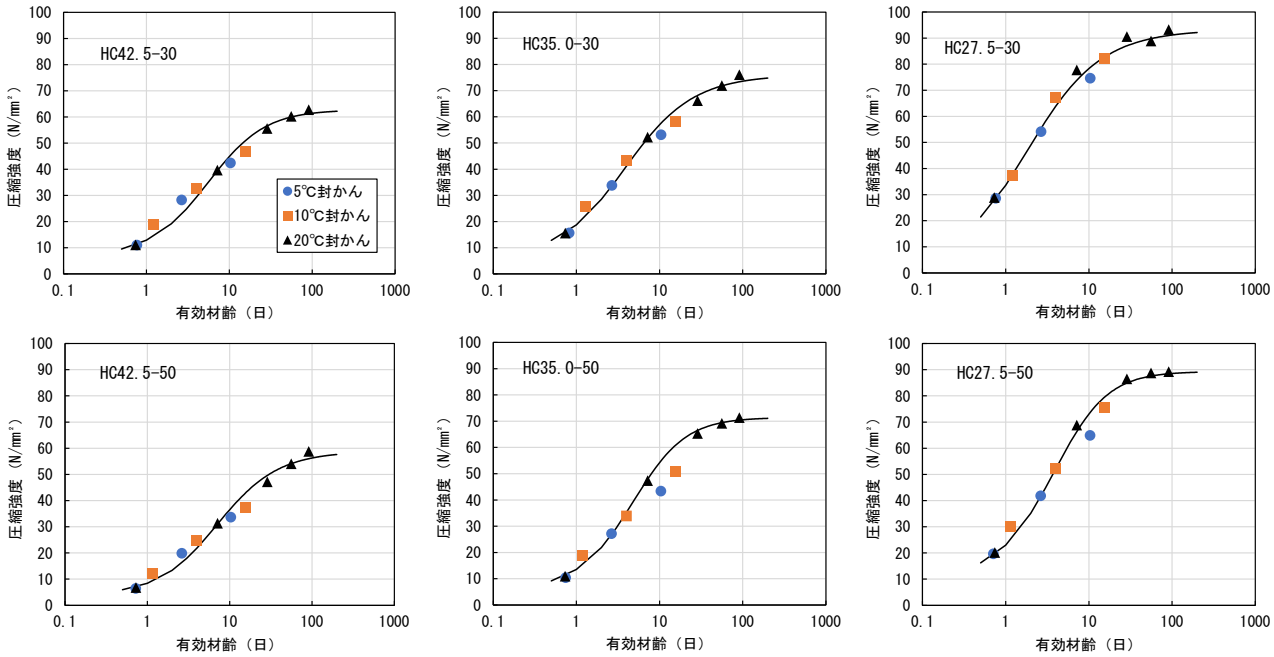


図-8　有効材齢と圧縮強度の関係（Ea=45kJ/mol）

材の混入率に対して適切な Ea の値を設定することで，特に初期材齢における強度発現性の推定が可能と考えられる。今後，実機試験で蒸気養生や構造体コアの強度発現性と温度の関係を確認し，脱型時の強度や品質管理に活用できるデータを取得予定である。

5. まとめ

水結合材比（W/B）を 42.5，35.0，27.5%とした環境配慮型コンクリートを対象に室内試験を実施し，フレッシュ性状，圧縮強度の発現における水分の供給と養生温度の影響を確認し，以下の知見を得た。

① 同一スランプ値を得るために必要な化学混和剤の添加率は，セメント種類によらず，BF 置換すると低減された。

② 強度発現における水分供給の影響は，セメント種類によらず，BF 置換率を高めると大きくなった。

③ 強度発現における温度依存性は，セメント種類によらず，水結合材比を小さくする，もしくは BF 置換率を高くすると大きくなった。

④ セメント種類と混和材の混入率に対して最適な Ea を設定することで，特に初期材齢の強度発現性の推定が可能になる。

謝辞：本実験の実施にあたっては，アルソシアプレコンクリート（株）茨城工場，シーカ・ジャパン（株）にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

1) 一般社団法人セメント協会：セメントの LCI データの概要，2022.3

2) 小林利充，一瀬賢一：高炉スラグ微粉末を主体とした環境配慮型のコンクリートの建築構造物への適用，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.420-425，2014.5

3) 峯竜一郎，小宮克仁，松田拓，若林信太郎：普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で置換した環境配慮型コンクリートに関する基礎的な検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.47，No.1，pp.264-269，2025

4) Carino, N. J and Tank, R. C., : Maturity functions for concrete made with various cements and admixtures, ACI Materials Journal, 89 (2), pp.188-196, 1992.

5) Taku Matsuda, Ryuichiro Mine, and Takafumi Noguchi, : Temperature Dependence Tendency of the Strength Development of Ultra-Low-Shrinkage and High-Strength Zero-Cement Concrete, Proceedings of the fib

Symposium 2023 Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient-Volume 1, pp397-407, 2023.6

6) 一般社団法人日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針（案）・同解説，2017.9
7) 建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建 築物の超軽量 ・超高層化技術の開発」：平成 4 年度高強度コンクリート分科会報告書，（財）国土開発技術研究センター，1993.3
8) 皆川淳，佐藤幸恵，桝田佳寛，河上浩司：構造体中でのコンクリート強度発現の変動に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.945-950，2002.6
9) 河上浩司：高強度コンクリートの施工性および構造体における強度発現性の評価と配（調）合設計に関する研究，宇都宮大学学位論文，2006
10) 桐山宏和，丸屋英二，吉田浩一郎，大西利勝，平田隆祥，河合研至，佐藤良一：C_3S 系セメントとポゾラン質微粉末を用いた超高強度モルタルの圧縮強度の温度依存性とその評価方法に関する研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.75，No.3，pp.157-168，2019.8
11) 吉野利幸，大楽隆男，鎌田英治：高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.370-375，1991.12
12) 谷口円，桂修，松村宇，吉野利幸：各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.357-362，2008.7