

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

Fundamental study on environmentally friendly concrete using part of
ordinary Portland cement replaced with ground granulated blast furnace slag

峯 竜一郎^{*1}, 小宮 克仁^{*1}, 松田 拓^{*2}

RYUICHIRO MINE, KATSUHIITO KOMIYA, TAKU MATSUDA

普通ポルトランドセメント（NC）の一部を高炉スラグ微粉末（BF）で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）＝27.5～42.5%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。本検討により、以下の結果を得た。NC を 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は、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。

キーワード：環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、強度発現、温度依存性

A fundamental study was conducted on eco-friendly concrete in which a portion of ordinary Portland cement (NC) was replaced with ground granulated blast furnace slag (BF). Specifically, concrete mixes with BF replacement ratios of 0, 30, and 50% were prepared in the laboratory with water-to-binder ratios (W/B) ranging from 27.5% to 42.5%, and their fresh properties and compressive strength development were evaluated. The results obtained from this study are as follows: (1) the required dosage of chemical admixture to achieve the same slump value decreased with BF replacement; (2) the influence of water supply on strength development increased with BF replacement; and (3) the temperature dependence of strength development became more significant with either a lower W/B ratio or a higher BF replacement ratio.

Keywords: Eco-friendly concrete, Ground granulated blast furnace slag, Strength development, Temperature dependence

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（以下、CO₂）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、建築資材の CO₂ 排出量削減が喫緊の課題である。コンクリート材料では、構成材料の一つであるポルトランドセメント（以下、セメント）の製造時における CO₂ 排出量が多いことが知られている¹⁾。そのため、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 CO₂ 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),3)}。一般的に、混和材として高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは、結合材がセメントのみ（以下、セメント単味）の配（調）合に比べ、①同一ワーカビリティを得るための単位水量が低減できる、②初期材齢の強度発現性が低く、湿潤養生期間が長くなるが長期強度が増進することが知られている⁴⁾。

^{*1} 技術研究所 技術開発推進部

^{*2} 技術研究所 技術統括部

本報は、普通セメントを使用した配（調）合を基準とし、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強度発現性を室内試験で確認した。

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）を使用した。混和材は、一般的に流通している、比表面積が $4,680\text{g}/\text{cm}^2$ 、せっこう（三酸化硫黄（ SO_3 ）量として質量比で 2.15%）が添加されている高炉スラグ微粉末（BF）を使用した。細骨材は硬質砂岩砕砂（S）、粗骨材は最大粒径が 20mm の硬質砂岩碎石（G）を使用した。化学混和剤は、ポリカルボン酸系が主成分の高性能減水剤とアルキルエーテル系が主成分の AE 剤を使用した。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 27.5, 35.0, 42.5% の 3 水準とした。設計基準強度（ F_c ）39～60 N/mm^2 の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 $160\text{kg}/\text{m}^3$ 、細骨材率（s/a）は各 W/B で同一とし、NC に対する BF 置換率は質量比で 0, 30, 50%とした。

表-1 使用材料

分類	記号	種類	物性・成分他
セメント	NC	普通ポルトランドセメント	密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積： $3050\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	BF	高炉スラグ微粉末	密度： $2.89\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積： $4680\text{cm}^2/\text{g}$ SO_3 ：2.15%
細骨材	S	硬質砂岩砕砂	表乾密度： $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 2.99
粗骨材	G	硬質砂岩碎石	表乾密度： $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ 、実積率：61.5%
化学混和剤	Ad	高性能減水剤 (標準形 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	W/B (%)	BF 置換率 (wt%)	s/a (%)	目標 スラン プ (cm)	目標 空 気 量 (%)	単位量 (kg/m³)					
							W	B		S	G	
								NC	BF			
1	NC42.5	42.5	0	44.5	21±2.0	4.5±1.5	160	376	376	0	788	990
2	NC42.5-30		30				160	376	264	113	784	985
3	NC42.5-50		50				160	376	188	188	782	982
4	NC35.0	35.0	0	160			457	457	0	733	979	
5	NC35.0-30		30	160			457	320	137	728	973	
6	NC35.0-50		50	160			457	229	229	725	968	
7	NC27.5	27.5	0	41.5			160	582	582	0	664	943
8	NC27.5-30		30				160	582	407	175	659	935
9	NC27.5-50		50				160	582	291	291	655	930

3. 実験方法

コンクリートの練混ぜは、強制 2 軸ミキサを用い、1 バッチの練量は 95L とした。硬化コンクリートの試験項目および養生方法を表-3に、養生手順を図-1に示す。圧縮強度試験は JIS A 1108 : 2018 に準拠した。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。強度試験の材齢は、標準水中の供試体は 28, 56, 91 日とした。封かん養生の供試体は、若材齢（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）、7 日、28 日とした。封かん養生のうち 20℃のものは、前述した材齢に加え、56 日、91 日で強度試験を実施した。なお、封かん養生の供試体は、フレッシュ試験後、各温度に設定した恒温槽（チャンバー）へすみやかに移動し、試験材齢まで一定の温度で養生した（写真-1）。

4. 実験結果と考察

(1) フレッシュ性状

フレッシュ試験結果を表-4に、スランプ試験後の状況の一例を写真-2に示す。W/B=42.5%では、NC 単味の NC42.5 と比べ、BF 置換率 30% の NC42.5-30 は、低い Ad 添加率はスランプが大きくなった。BF 置換率 50% の NC42.5-50 は、NC42.5-30 より粘性が低下することを想定し Ad 添加率をさらに低減したが、スランプは 11cm と小さくなり、目標値の

表-3 硬化コンクリートの試験項目および養生方法

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 : 2018	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

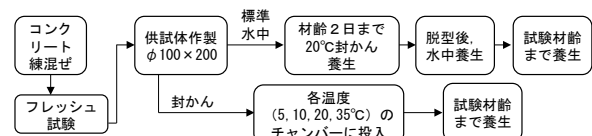


図-1 供試体の養生手順



写真-1 養生状況

21±2cmから外れた。しかし、目視の範囲で材料分離などは見られず、供試体作製に問題はないと判断した。

W/B=35.0%では、NC 単味の NC35.0 と比べ、NC35.0-30 と NC35.0-50 のどちらも低い Ad 添加率でスランプは大きくなった。この傾向は、W/B が小さい W/B=27.5%で顕著となった。今回の結果から、同一スランプを得るために必要な化学混和剤の添加量は、セメントを BF で置換すると低減されることが確認できた。このことから、1 章で述べた単位水量の低減効果、すなわち同一の流動性を得るための Ad 添加率の低減は、比較的高強度な領域でも得られると考える。一方で、化学混和剤の添加量は、僅かな低減でスランプが急激に低下する場合がある点に留意が必要である。

空気量を見ると、W/B=42.5%は 4.2～5.6%、W/B=35.0 は 3.3～5.8%、W/B=27.5%は 3.6～4.5%の範囲となった。空気量の変動に BF 置換率の影響は見られなかった。AE 剤の添加率を適宜に設定することで、目標範囲内の空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ で制御できた。なお、後述する圧縮強度試験結果は既往の文献 5) の空気量による強度補正を行った（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）。

(2) 圧縮強度

標準水中養生の圧縮強度（以下、強度）試験結果を図-2 に示す。W/B=42.5%を見ると、材齢 28 日の強度は、BF 置換率 0%と 30%が同等、BF 置換率 50%の強度は約 7N/mm^2 低下した。また、材齢 28 日から 91 日の強度増進は、置換率が高いほど大きくなった。W/B=35.0%を見ると、材齢 28 日の強度は BF 置換率によらず同等だが、材齢 56, 91 日の強度は BF 置換率が高いほど小さくなった。W/B=27.5%を見ると、材齢

表-4 フレッシュ試験結果

No.	記号	条件		結果				
		Ad [B×%]	AE [B× 0.001%]	スラ ンプ [cm]	スラ ンプ フロ ー [cm]	空気 量 [%]	練り 上がり 温度 [°C]	外気温 [°C]
1	NC42.5	0.90	4.0	21.0	-	5.3	22.4	20.5
2	NC42.5-30	0.85	4.0	22.0	-	5.6	22.7	20.4
3	NC42.5-50	0.75	3.5	11.0	-	4.2	23.5	20.1
4	NC35.0	0.90	4.0	20.5	-	3.3	23.5	20.9
5	NC35.0-30	0.80	4.5	22.5	-	5.8	22.9	20.3
6	NC35.0-50	0.75	4.0	22.5	-	5.1	25.0	21.5
7	NC27.5	1.05	5.0	21.5	-	4.5	25.0	20.4
8	NC27.5-30	0.95	5.0	25.0	60.0	3.6	24.1	20.7
9	NC27.5-50	0.80	5.5	23.0	50.5	4.0	26.8	21.2

スランプ : 21.0cm



1) No.1 NC42.5
(W/B=42.5% BF 置換率
=0% Ad=B×0.90%)

スランプ : 11.0cm



2) No.3 NC42.5-50
(W/B=42.5% BF 置換率
=50% Ad=B×0.75%)

スランプ : 21.5cm



3) No.7 NC27.5
(W/B=27.5% BF 置換率
=0% Ad=B×1.05%)

スランプ : 23.0cm



4) No.9 NC27.5-50
(W/B=27.5% BF 置換率
=50% Ad=B×0.80%)

写真-2 スランプ試験後の状況

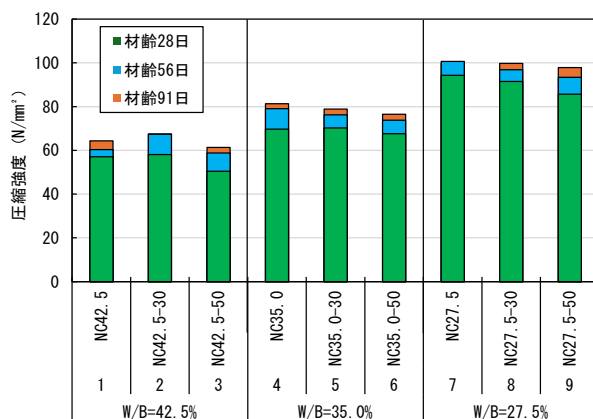


図-2 圧縮強度試験結果（標準水中）

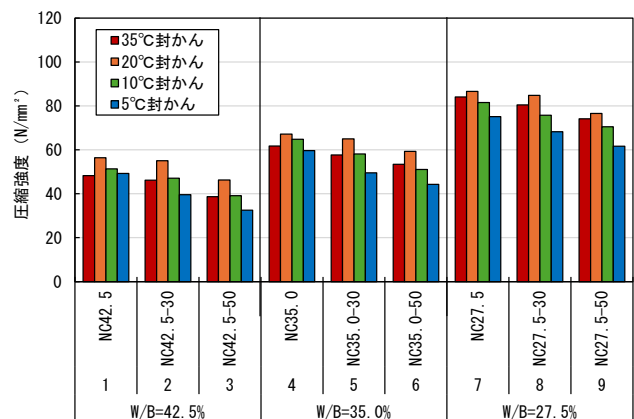


図-3 圧縮強度試験結果

(5, 10, 20, 35℃封かん材齢 28 日)

28, 56日の強度はBF置換率が高いほど小さく、材齢91日の強度はBF置換率によらず同等となった。BF置換した配（調）合の強度は、置換の影響で低下する傾向が見られた。しかし、28日以降の強度増進が期待できる結果となった。なお、W/B=35.0%において、NC単味と比べ、BF置換したものの強度増進が小さくなった明確な理由は不明である。また、材齢91日の強度を見ると、NC単味と比べ、BF置換率30%で最大2.4N/mm²、BF置換率50%で最大4.8N/mm²の強度低下となった。

封かん養生の強度試験結果を図-3に示す。BF置換率によらず、強度は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い。一方、本研究の範囲で養生温度が最も高い条件の35℃封かんを見ると、すべての水準で20℃封かんよりも強度が低くなった。これについては後述で考察する。

a) 水分供給の影響

皆川ら⁶⁾の研究を見ると、結合材がNC単味の場合、強度が60N/mm²を超える範囲で、20℃封かんの強度は標準水中の強度に比べて最大で20%程度低下している。また、河上⁷⁾の結果を見ても、強度が60～100N/mm²までの範囲では、20℃封かんの強度は標準水中の強度に比べて最大で20%程度低下する結果が示されている。この理由は、高強度コンクリートの場合、セメント量が多いため、内在する自由水だけでは水和に必要な水量が不足するためと考える。

本研究で得た標準水中養生の強度と20℃封かん養生強度の関係を図-4に示す。NC単味の条件では、W/B=42.5%の20℃封かんの強度は標準水中の強度と同等であった。W/B=35.0%は材齢56日時点、27.5%は材齢28日時点で、20℃封かん養生の強度が最大で8%程度低下した。これは、前述した既往の研究^{6), 7)}と同様の傾向であった。

次に、BF置換率の影響を見る。BF置換率30%は、20℃封かんの強度が最大で15%程度低下（材齢91日）しているが、既往の研究^{6), 7)}の傾向と同様のものと考え。一方、BF置換率50%は、20℃封かんの強度が最大で24%程度低下した（材齢56日）。今回得た結果は、BF置換率を一定程度高くすると、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）可能性を示唆するものであり、引き続き検討していく。

b) 強度発現の温度依存性

養生温度と強度発現との関係を考察するため、既往の研究⁸⁾を参考に、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。

$$F_T = F_{\infty} \exp(a(te - t_0)^b) \quad (1)$$

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

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 [℃]

ただし、 F_{∞} には材齢91日の結果を用いた。

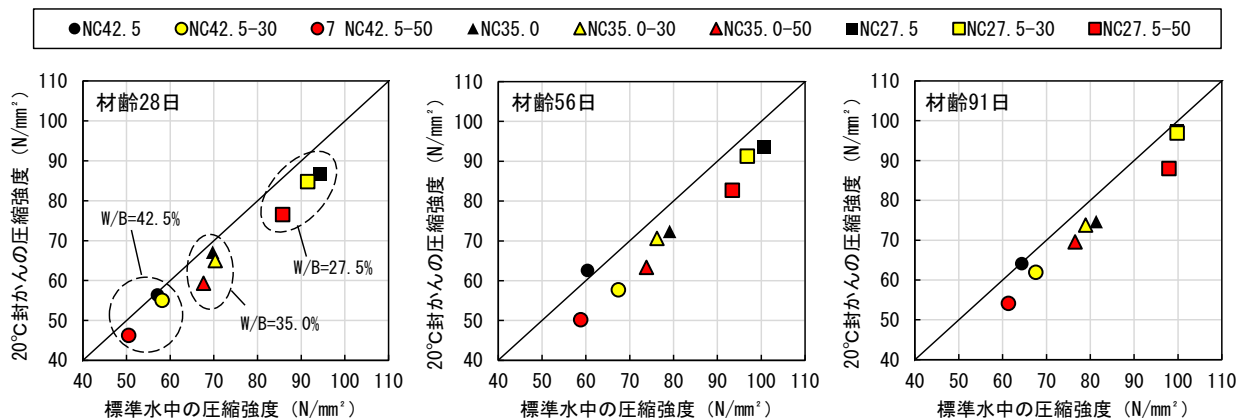


図-4 標準水中養生強度と20℃封かん養生強度の関係

養生温度ごとの強度試験結果を式(1)の形で回帰し、 F_{∞} で除すことで比率とした F_t/F_{∞} の結果を図-5に示す。なお、回帰曲線は、各配(調)合の20℃封かんの結果から算出し、 E_a は一般的にセメントコンクリートで用いる33.5 kJ/molとした。まず、 $W/B=42.5\%$ の結果を見る。結合材がセメント単味のNC42.5では、5℃、10℃の結果は概ね20℃の回帰曲線上にプロットされた。しかし、35℃の結果は、有効材齢14.4日(材齢7日)以降は回帰曲線よりも下方にプロットされた。高温条件における強度増進の停滞については従来から知られている⁹⁾。例えば、吉野ら¹⁰⁾はNC単味で本研究よりも W/B の大きい配(調)合(45,55,65%)で、養生温度別の積算温度と強度発現との関係を報告している。これを見ると、30,40℃の高温養生では初期材齢において5,10,20℃よりも強度が高いが、材齢の進行に伴い強度の伸びが緩慢になり、長期材齢では養生温度が高いものほど強度が低くなっている。このように $W/B=42.5\%$ の結果は、既報¹⁰⁾と同様の傾向を示すものと考えられる。

次に、NC単味の配(調)合でNC42.5→NC35.0→NC27.5と見ていくと、 W/B の低下に伴い35℃のプロットと回帰線との乖離は生じるが、その程度は小さくなった。この傾向は、BF置換率を増加させた場合も同様となった(NC42.5-30→NC35.0-30→NC27.5-30、およびNC42.5-50→NC35.0-50→NC27.5-50と見る)。一方、特に低温で養生した5℃の結果は、 W/B が低いもしくはBF置換率が高いほど温度依存性が大きくなる(強度発現が緩慢で回帰曲線の下方にプロットされる)傾向がみられる。

コンクリートの強度発現における温度依存性は、セメントの種類によって異なることが知られている(例えば¹¹⁾)。例えば図-6は、①ポルトランドセメントを使用せず、かつ超低水結合材比条件($W/B=15\%$)のモルタル(STC-Zero)、②結合材をNC単味とした $W/B=28.6\%$ のモルタル(H-Con)を、それぞれ一定の温度条件(5,10,20,40,60,80℃)で養生し強度発現を調べた結果である¹²⁾。これを見ると、H-Conの強度発現は、40℃以上の高温で養生されると停滞している。この結果は、本研究および既往の研究^{9),10)}と同様の傾向である。一方、STC-Zeroの強度発現は、高温養生による停滞が確認されないことに加え、H-Conに比べ温度依存性が非常に大きい(すなわち、強度発現は低温ほど遅く高温ほど速い)ことが分かる。

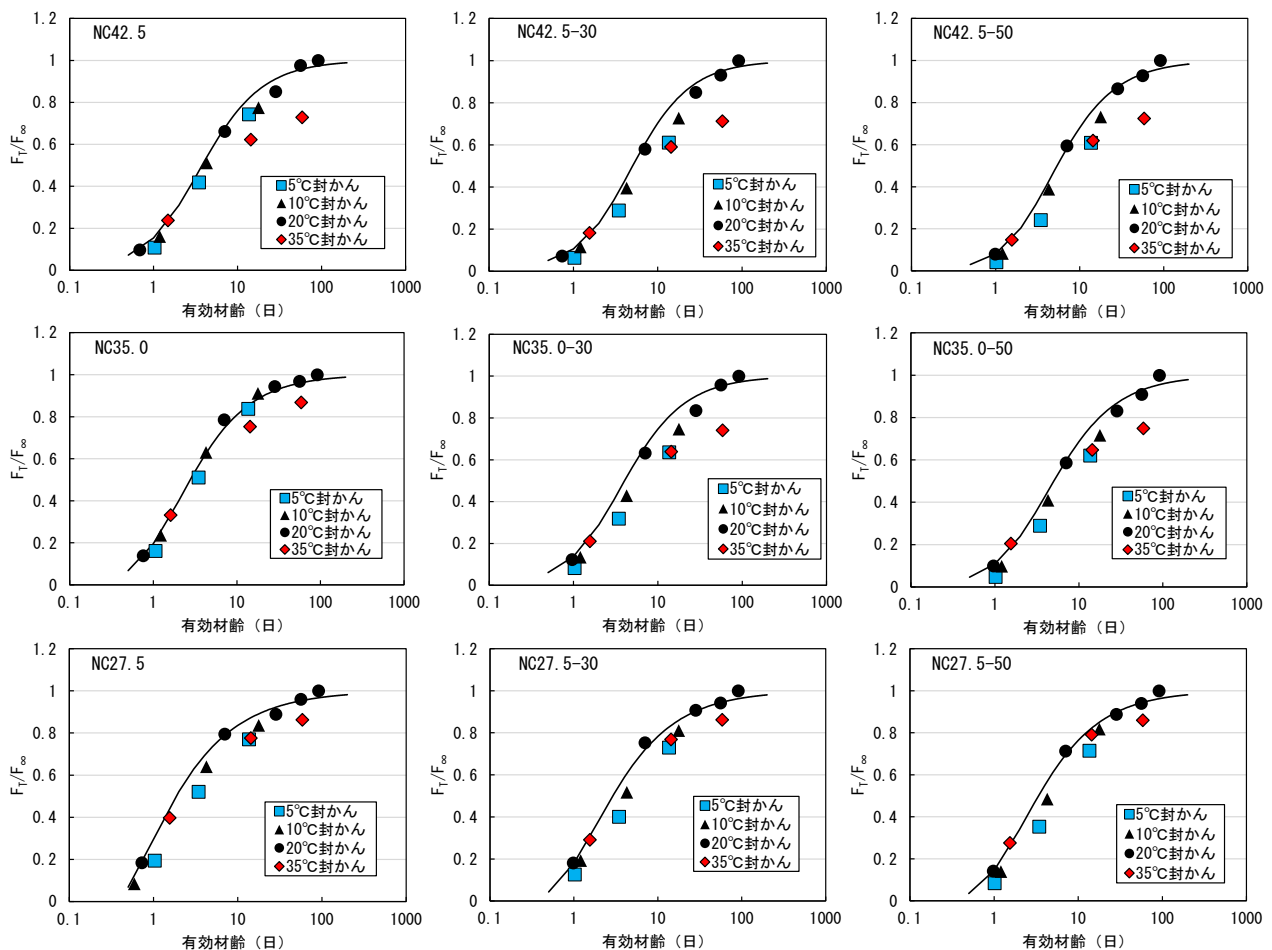


図-5 有効材齢 ($E_a=33.5\text{kJ/mol}$) と F_{∞} に対する比率の関係 (5, 10, 20, 35℃封かん)

既報 12)では、STC-Zero の異なる温度条件での強度発現を有効材齢で評価するには、 E_a を一般的な値である 33.5kJ/mol より大きく、かつ強度の発現度合いによって適切な E_a を与える（具体的には、初期材齢で 45kJ/mol、長期材齢で 65kJ/mol）ことが有効であることが示されている。図-7 は、図-5 の結果を $E_a=60$ kJ/mol として有効材齢を算出した結果である。なお、35℃のプロットは前述した高温養生による強度低下の影響が含まれるため除外している。まず NC27.5-50 の結果を見ると、5℃と 10℃のプロットはどちらも $E_a=33.5$ kJ/mol の場合（図-5）よりも回帰曲線に近づき、全てのプロットが養生温度によらず概ね同一の成長曲線を描いている。次に図-7 で NC42.5 の結果を見ると、図-5 で回帰曲線の下側にプロットされていた 5℃の結果が、回帰曲線の上側にプロットされている。このことは、NC42.5 の場合、 $E_a=60$ kJ/mol は過大ということを示唆する。さらに NC42.5→NC42.5-30→NC42.5-50、および NC42.5→NC35.0→NC27.5 と見ていくと、各温度条件のプロットは、それぞれ同一の曲線に近づく結果となった。

以上より、本研究で対象とした配（調）合範囲の強度発現における温度依存性は、W/B が低下する、もしくは BF 置換率が増加することで大きくなる（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

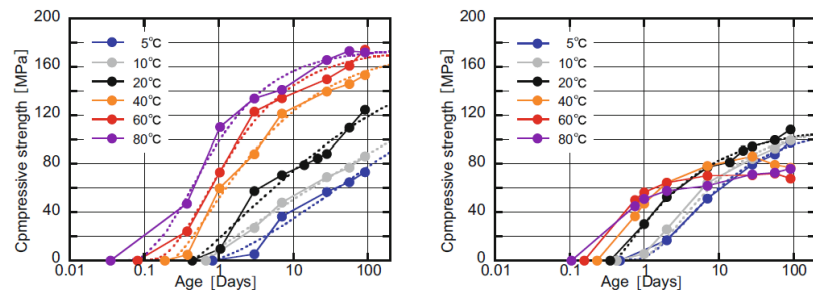


図-6 既報 12) の結果（左：STC-Zero，右：H-Con）

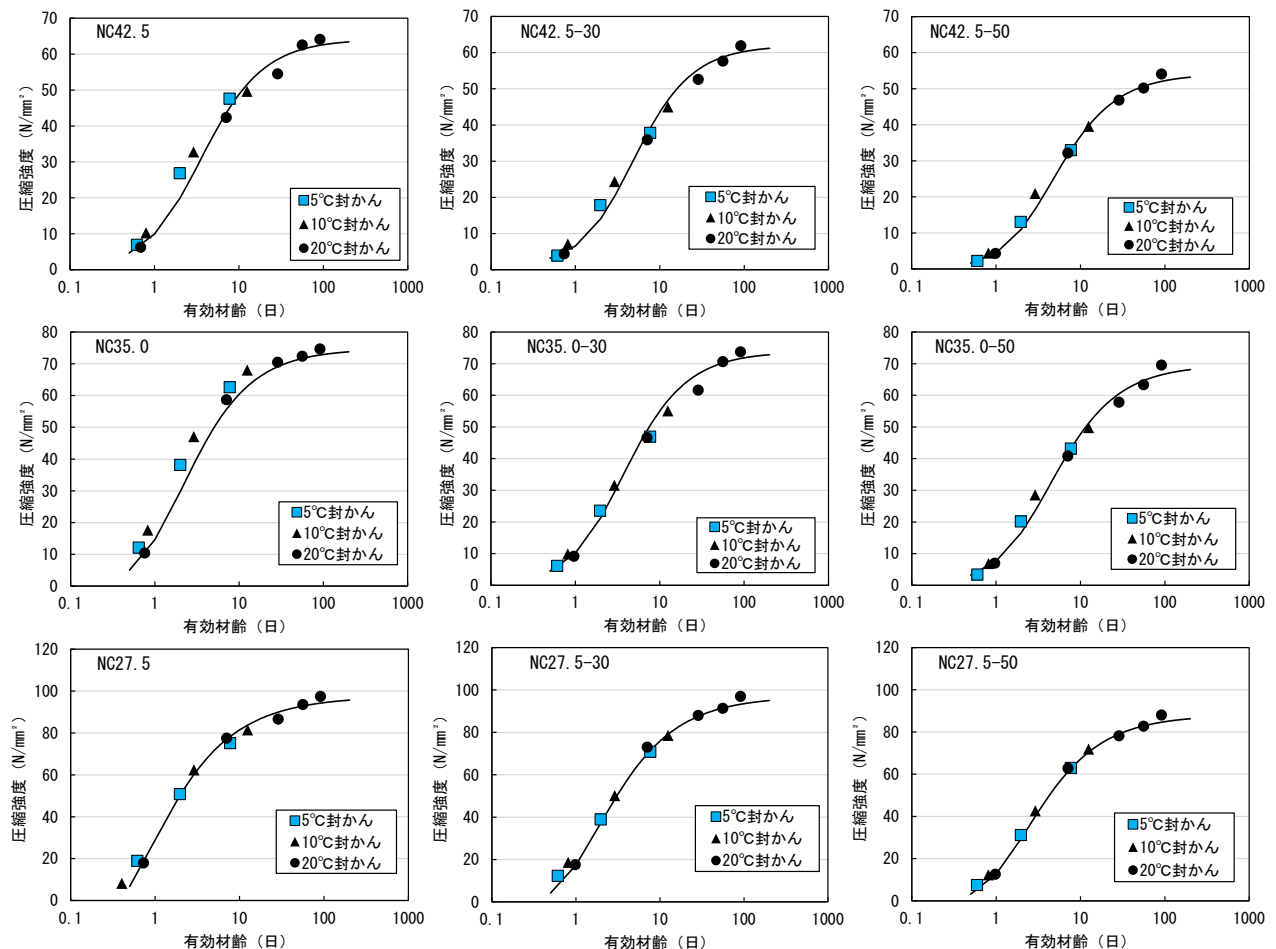


図-7 有効材齢 ($E_a=60$ kJ/mol) と圧縮強度の関係（5, 10, 20℃封かん）

きく設定する必要がある)ものとする。なお、本検討で得た知見は、材齢初期や外気温の低い条件での脱型や養生、運搬等の品質管理¹³⁾への活用が想定される。一方、部材の発熱や蒸気養生で高温となる条件では、別途検討が必要である。

5. まとめ

水結合材比(W/B) 27.5, 35.0, 42.5%の比較的高強度のコンクリートを対象に、高炉スラグ微粉末(BF)の置換率を0,30および50%とした環境配慮型コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度の発現を室内試験で確認し、以下の知見を得た。

- ① BFで置換することで、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が低減された。
- ② BF置換率が高まると、セメント単味のコンクリートに比べ、強度発現における水分供給の影響が大きくなる可能性が示唆された。
- ③ 強度発現における温度依存性は、水結合材比を小さくする、もしくはBF置換率を高めることで大きくなった。

謝辞：本実験にあたり、SMC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) 村井克綺ほか：各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた環境配慮型コンクリートの諸性状，日本建築学会技術報告集，Vol.28，No.69，pp.550-555，2022.6
- 4) 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
- 5) New RC 総プロ委員会：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
- 6) 皆川淳，佐藤幸恵，梶田佳寛，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
- 7) 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
- 8) 桐山宏和ほか：C₃S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
- 9) 友澤史紀，牛島栄：最近の積算温度方式の発展とその応用，セメント・コンクリート，No.527，1991.1
- 10) 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
- 11) 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.
- 12) 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
- 13) 一般社団法人日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事，2013.1