中庸熱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高強度コンクリートの強度発現性に関する検討

Study on Strength Development of Environmentally Friendly High-Strength Concrete Using Moderate-Heat Portland Cement Partially Replaced with Ground Granulated Blast-Furnace Slag

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

中庸熱ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末（BF）で置換した，高強度領域（水結合材比 W/B＝20～35%）を対象とする環境配慮型コンクリートの強度発現性について，有効材齢と複数の成長曲線を用いて検討した。その結果，成長曲線の種類によらず養生温度 5，10°C では，一般的に用いられる見かけの活性化エネルギーより大きい値を仮定することで, 20°C 封かん養生を基準とした強度発現性を比較的良好に表現できた。一方，養生温度 35°C では，W/B や BF 置換率の増加に伴い，強度増進過程と成長曲線の適合度が低下した。

キーワード：環境配慮型コンクリート，高強度コンクリート，高炉スラグ微粉末，温度依存性，有効材齢

The strength development of environmentally friendly high-strength concrete (water-to-binder ratios (W/B) of 20-35%), in which moderate-heat Portland cement was partially replaced with ground granulated blast-furnace slag (BF), was investigated using the concepts of equivalent age and several growth curve models. The results showed that, regardless of the type of growth curve employed, strength development at curing temperatures of 5°C and 10°C could be represented reasonably well, relative to the standard curve obtained under sealed curing at 20°C, by assuming an apparent activation energy greater than the value commonly adopted for concrete. In contrast, at a curing temperature of 35°C, the goodness-of-fit between the strength development process and the growth curves decreased with increasing W/B and BF replacement ratio.

Keywords: Environmentally friendly concrete, High-strength concrete, Ground granulated blast-furnace slag, Temperature dependence, Equivalent age

1. はじめに

近年，カーボンニュートラル社会の実現に向けて世界中でさまざまな取組みが行われている。コンクリート分野における取組みの一つに，セメントの一部を高炉スラグ微粉末（BF）で置換する環境配慮型コンクリートがある。BF を用いたコンクリートに関する既往研究では，長期的な強度増進，塩分浸透抵抗性の向上などの優位性を示している [1)]。一方で，BF 置換に伴う初期強度発現の遅れに加え，中性化抵抗性などの耐久性については，置換率，水結合材比，養生条件等に応じた検討が必要である [2),3)]。筆者らは既報 [4)]において，プレキャスト部材への適用を目的として，普通ポルトランドセメント（NC）をベースとし，水結合材比（W/B）27.5～42.5%の範囲で BF 置換の影響を検討してきた。高強度領域における BF 利用に関する先行事例として，例えば既往の研究 [5)]では，高炉セメント B 種（BB）を用いた W/B=24%のコンクリートを対象に検討が行われ，NC と比較して高温履歴の影響が顕著であることが報告されている。しかしながら，強度発現に及ぼす W/B や材料の単位量，材料種類等の配（調）合条件による影響は十分に明らかになっていない。そこで本報では，これらの知見を踏まえ，既報 [4)]の検討をより高強度領域（W/B=20～35%）へ拡張し，BF 置換が強度発現に及ぼす影響を検討した。BF 置換率が強度

*1 技術研究所技術開発推進部

発現性に及ぼす影響を評価するため，W/B を一定として BF 置換率を変化させる配（調）合とした。また既報 [4] よりも粉体量が多くなることから，水和熱を低減させるために中庸熱ポルトランドセメント（MC）を用いた。

2. 試験概要

(1) 試験因子と分析方針

コンクリート供試体の養生条件は，20°C 水中養生および複数温度条件下（5，10，20，35°C）での封かん養生とし，強度発現性を評価した。さらに，強度発現を有効材齢で整理して成長曲線により近似することで，BF 置換や W/B による差の統一的な説明を試みた。併せて，複数の成長曲線を比較し，温度依存性を定量化することで配（調）合ごとの最適な成長曲線に関して考察を行った。

(2) 使用材料・配（調）合

本報で対象とした配（調）合は，プレキャスト部材への適用を想定して設定したものである。コンクリートの使用材料を**表-1** に，配（調）合を**表-2** に示す。結合材として中庸熱ポルトランドセメント（MC）と BF を用いた。BF は高炉スラグ微粉末 4,000 を使用した。細骨材には栃木県鹿沼産の硬質砂岩砕砂（S），粗骨材には同産地の硬質砂岩砕石（G）を用いた。化学混和剤としては，結合材に MC のみを用いた水準に高性能減水剤（SP1）を，BF を置換した水準には，高強度領域であり，かつ BF の使用による自己収縮の増大が懸念されるため，収縮低減型の高性能減水剤（SP2）を使用した。本報は化学混和剤の種類による差異を評価することを目的としたものではなく，実用条件を想定して設定した各水準について強度発現性を検討対象としたものである。AE 剤にはアルキルエーテル系のものを使用した。配（調）合条件は W/B を 20，25，35%の 3 水準とした。これらは設計基準強度 70～90 N/mm²程度の部材への適用が想定される高強度領域に相当する水準である。BF 置換率が強度発現性に及ぼす影響を直接比較するため，W/B を一定として BF 置換率を変更した。BF 置換率は，結合材に対する BF の質量割合として 30%および 50%とした。目標スランプフローは W/B=25，35%において 60cm±10cm，W/B=20%において 65cm±10cm とした。また，目標空気量は W/B=25%, 35%において 4.5%±1.5%, W/B=20%において 2.0%＋1.0%とした。なお，目標値はアルソシアプレコン（株）茨城工場で用いられている管理値を参考として設定した。

表-1 使用材料

材料種類	記号		成分，物性等
水	W		上水道水，密度1.00g/cm^3
中庸熱ポルトランドセメント	B	MC	比表面積3160cm^2/g，密度3.22g/cm^3，SO_3 2.17%
高炉スラグ微粉末	B	BF	比表面積4690cm^2/g，密度2.89g/cm^3，SO_3 2.17%
細骨材	S		栃木県鹿沼産硬質砂岩砕砂，表乾密度2.62g/cm^3，実積率55.6%
粗骨材	G		栃木県鹿沼産硬質砂岩砕石，表乾密度2.63g/cm^3，実積率59.0%
高性能減水剤	SP	SP1	ポリカルボン酸エーテル系化合物
高性能減水剤（収縮低減型）	SP	SP2	ポリカルボン酸エーテル系化合物とグリコール系化合物の複合体
AE剤（Ⅰ種）	AE		アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 配（調）合

調合NO.	記号	W/B (%)	BF置換率 (%)	目標フロー (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量（kg/m³）				
							W	MC	BF	S	G
1	MC35.0	35	0	60	4.5	47.4	165	471	-	799	893
2	MC25.0	25	0	60	4.5	42.1	165	660	-	645	893
3	MC20.0	20	0	65	2.0	39.4	165	825	-	576	893
4	MC35.0-30	35	30	60	4.5	47.0	165	330	141	786	893
5	MC25.0-30	25	30	60	4.5	41.4	165	462	198	627	893
6	MC20.0-30	20	30	65	2.0	38.4	165	578	248	552	893
7	MC35.0-50	35	50	60	4.5	46.7	165	236	236	777	893
8	MC25.0-50	25	50	60	4.5	41.0	165	330	330	615	893
9	MC20.0-50	20	50	65	2.0	37.8	165	413	413	538	893

(3) 試験方法と養生方法

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 80L とした。練混ぜ手順は，結合材と細骨材による空練りを 30 秒行った後，水および化学混和剤を投入し，W/B=35%では 1 分間，W/B=25%では 2 分間，W/B=20%では 5 分間練混ぜを行い，その後，粗骨材を投入してさらに 2 分間練混ぜる手順とした。コン

表-3 養生条件・圧縮強度試験材齢

養生方法	試験材齢 (日)				
	2	7	28	56	91
20°C水中	-	○	○	○	○
5°C封かん	○	○	○	-	-
10°C封かん	○	○	○	-	-
20°C封かん	○	○	○	○	○
35°C封かん	○	○	○	-	-

クリートの練上り後，スランプフローおよび空気量を測定した。**表-3** に養生条件と圧縮強度の試験材齢を示す。スランプフローおよび空気量の測定後，φ100×200 mm の円柱供試体を作製し，各種養生を行った。封かん養生供試体は作製後直ちにポリエチレン製フィルムで打設面を覆い，各温度条件（5，10，20，35°C）の恒温槽に移動し，静置した。水中養生供試体は作製後直ちにポリエチレン製フィルムで打設面を覆い，材齢 2 日まで 20°C 環境にて養生し，その後脱枠し 20°C の水中にて試験材齢まで養生を行った。圧縮強度試験は JIS A 1108:2018，スランプフロー試験は JIS A 1150:2020，空気量試験は JIS A 1128:2020 に準拠して行った。

3. フレッシュ性状および圧縮強度の試験結果

(1) フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を**表-4** に示す。空気量はすべての水準で目標値を満足した。一方，一部の配（調）合ではスランプフローが目標値に達しなかった。しかしながら，材料分離などの異常は認められず，供試体作製に影響はない範囲の性状であり，圧縮強度試験の結果への支障はないと判断した。なお，目標範囲を満足しなかった水準においても，SP および AE 剤添加量を適切に調整することでフレッシュ性状を目標値内に収めることができると考えられる。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果を**図-1** に示す。図中には 20°C 水中養生と 20°C 封かん養生の関係を視覚的に比較するために，1:1 の直線を例示している。なお，圧縮強度は空気量補正後の値である。本報では BF 置換率が強度発現性に及ぼす影響を比較することを目的としている。一方，各配（調）合間で実測空気量に差異が認められた。そこで，空気量の差による強度への影響を除外し，結合材条件の影響を比較するため，既往文献 [6]に基づき空気量補正を行った。補正条件は，補正空気量 4.5%，強度低下率を空気量 1%あたり 4%とした [6]。材齢 7 日では，20°C 水中養生と封かん養生の強度はおおむね 1:1 の直線上に分布した。一方，材齢 91 日ではデータ点が全体的に直線の下側に分布し，水中養生は封かん養生に比べて強度が高い傾向を示した。水分供給条件による強度差は W/B が大きいほど大きく，W/B が小さく高強度になるほど比較的差が縮小し，BF 置換やセメント種類によらずおおむね同様の傾向を示した。また，W/B に関わらず BF 置換率が大きくなると圧縮強度は小さくなる傾向であった。これらの圧縮強度試験の結果は，強度域の異なる既報 [4]の傾向とも整合していることを確認した。

表-4 フレッシュ性状試験結果

調合 No.	記号	B	SP	SP [B×%]	AE [A]	フロー [cm]	空気量 [%]	練り上がり温度 [℃]
1	MC35.0	MC	SP1	0.60	2.50	33.4	4.3	22.9
2	MC25.0	MC	SP1	0.65	2.00	53.3	3.2	23.5
3	MC20.0	MC	SP1	0.80	0.00	57.1	1.1	26.4
4	MC35.0-30	MC+BF(7:3)	SP2	0.63	0.50	46.5	5.1	21.3
5	MC25.0-30	MC+BF(7:3)	SP2	0.65	1.75	41.5	3.9	23.4
6	MC20.0-30	MC+BF(7:3)	SP2	0.80	0.00	39.4	1.2	26.0
7	MC35.0-50	MC+BF(5:5)	SP2	0.60	0.75	51.1	5.0	21.1
8	MC25.0-50	MC+BF(5:5)	SP2	0.55	1.75	55.8	3.3	21.5
9	MC20.0-50	MC+BF(5:5)	SP2	0.65	0.00	75.8	1.3	23.5

4. 強度発現性に関する検討結果

(1) 有効材齢と成長曲線の適用

有効材齢は，温度履歴を考慮した強度発現の評価に用いられる概念である。国内では，例えば友澤ら [7]に

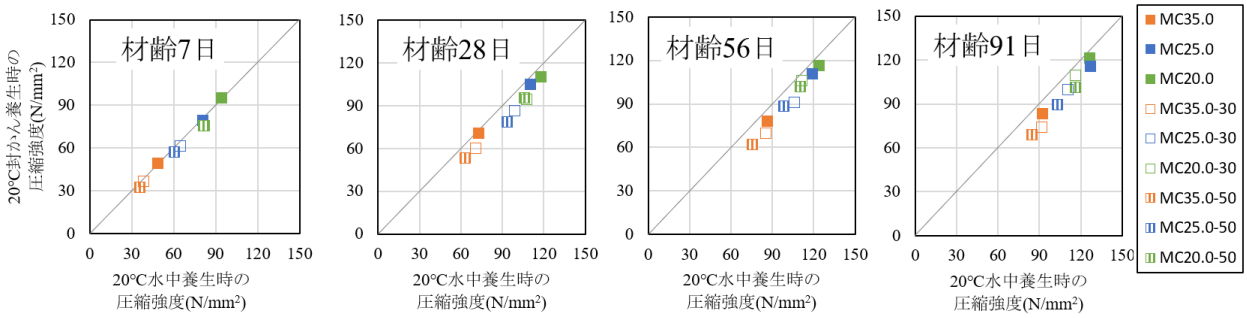


図-1 圧縮強度試験結果（20°C水中養生と 20°C封かん養生の比較）

より，アレニウス式を用いた積算温度（マチュリティ）法として整理され，標準養生 20°C での材齢に換算した材齢として表現される。これをもとに桐山ら [8]は修正有効材齢を提案している。式(1)は上記文献で示される有効材齢式に実験から推定される活性化エネルギーを代入したものである。

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

ここで，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（°C），Δt：養生温度 T が継続した期間（日）である。

本報では，有効材齢が 20°C における等価材齢として表されること，また水分供給条件を統一した温度依存性の比較を行う必要があることから，20°C 封かん養生の結果を各成長曲線で近似した曲線を標準曲線と定義した。また，養生温度の影響を比較することを目的としているため，外部からの水分供給の影響を除外する観点から，すべて封かん養生で統一された 20°C 封かん養生を基準とした。したがって，本報で用いる Ea は，標準曲線に対する各温度条件の実測値の適合度を評価するためのパラメータである。

本報では，式(1)から得られた有効材齢を用い，複数の成長曲線により強度発現性の検討を行った。一般に，コンクリートの強度増進過程は積算温度（本報では有効材齢を採用）を対数軸にとることで，S 字状の成長曲線として近似できることが知られている [9]。本報では，既往文献で提案されている成長曲線のうち，ロジスティック曲線（式(2)），ゴンペルツ曲線（式(3)），双曲線（式(4)），および既往文献式（式(5)）の 4 種類を選定した。ロジスティック曲線は変曲点を中心に点対称な形状を示す。一方，ゴンペルツ曲線は初期の立ち上がりが急で後半は緩やかに漸近する非対称型であり，初期材齢での強度増進過程においてより高い近似精度を示すと報告されている [9]。式(4)の双曲線は初期材齢においてほぼ線形的に強度が増加し，材齢の進行とともに増加率が低下して最終強度に漸近する式である [10]。式(5)の既往文献式は強度発現の遅延の程度に依存せず，材齢と強度の関係を比較的精度良く近似できる工学的関数である [11]。これらの曲線は，初期強度発現の再現性や後半の近似精度に差異があり，配（調）合条件や養生温度によって最適な式が異なることが予想される。

$$F_t = \frac{F_\infty}{1 + exp(-a \log t_e + b)} \tag{2}$$

$$F_t = exp(a \cdot {t_e}^b) \cdot F_\infty \tag{3}$$

$$F_t = \frac{a \cdot t_e}{1 + a \cdot t_e} \cdot F_\infty \tag{4}$$

$$F_t = (1 - exp(-a \cdot {t_e}^b)) \cdot F_\infty \tag{5}$$

ここで，F_t：養生温度 T での圧縮強度（N/mm²），F_∞：最終到達強度（N/mm²），a・b：実験定数である。

本報では，F_∞はすべての水準で共通とし，20 °C 水中養生における材齢 91 日の結果を用いることとした。

(2) ゴンペルツ曲線を用いた検討結果

図-2 には，一般的にセメントコンクリートで用いられる E_a = 33.5 kJ/mol[12]を用いて換算した有効材齢と強度比 Ft/F_∞の関係を示す。図中の曲線は，20°C 封かん養生の結果をゴンペルツ曲線で回帰した標準曲線である。本報では，複数の成長曲線のうち最も一般的に用いられており，かつ既報 [4]でも用いたゴンペルツ曲線を最初に取り上げる。なお，他の成長曲線についても検討を行っているが，紙面の都合上，**図-2** に関してはゴンペルツ曲線の結果のみを示す。20°C 封かん養生の結果は標準曲線上に整理される。一方，5，10，35°C 封かん養生では標準曲線からの乖離が認められた。具体的には，低温条件（5，10°C）では初期材齢における強度発現が標準曲線より遅く，高温条件（35°C）では初期から中期材齢にかけて標準曲線より強度の増進が速い傾向を示した。これは，一般的な E_a = 33.5 kJ/mol を用いた有効材齢換算のみでは，本報で対象とする温度依存性を十分に整理できない条件があることを示している。

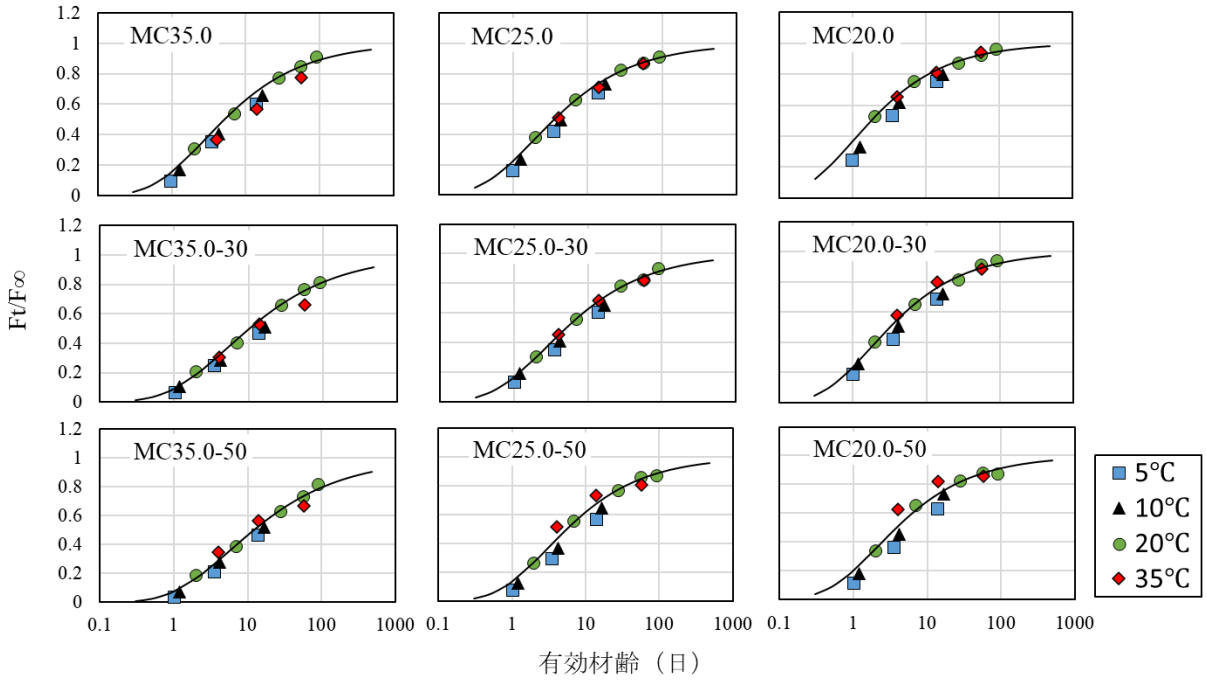


図-2　有効材齢（Ea = 33.5 kJ/mol）と強度比 Ft/F_∞の関係
（曲線は 20℃封かんの結果をゴンペルツ曲線で回帰したもの）

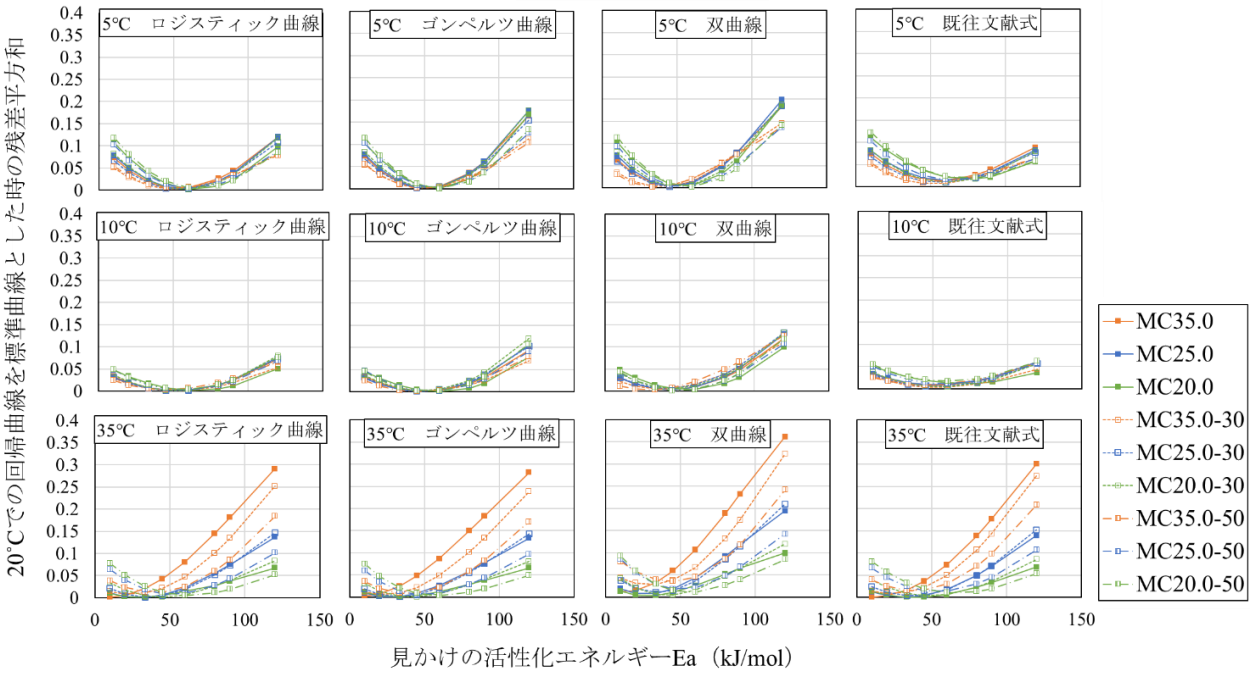


図-3　20℃での近似曲線を標準曲線とした際の残差平方和と Ea の関係

(3) 各種成長曲線を用いた検討結果

配（調）合および温度条件ごとに標準曲線との適合性を評価するため，各成長曲線について 20°C 封かん養生から得られた標準曲線を基準とし，他温度条件との残差平方和を算定した。なお，本報では残差平方和が小さいほど標準曲線との適合度が高いものと評価した。Ea は標準曲線に対する各温度条件の実測値の適合度を比較するためのパラメータであり，Ea は 10，20，33.5，45，60，80，90，120 kJ/mol の 8 水準を設定した。

20°C 封かん養生から得られた標準曲線に対する残差平方和 Ea の関係を**図-3** に示す。同図より，5，10°C では，

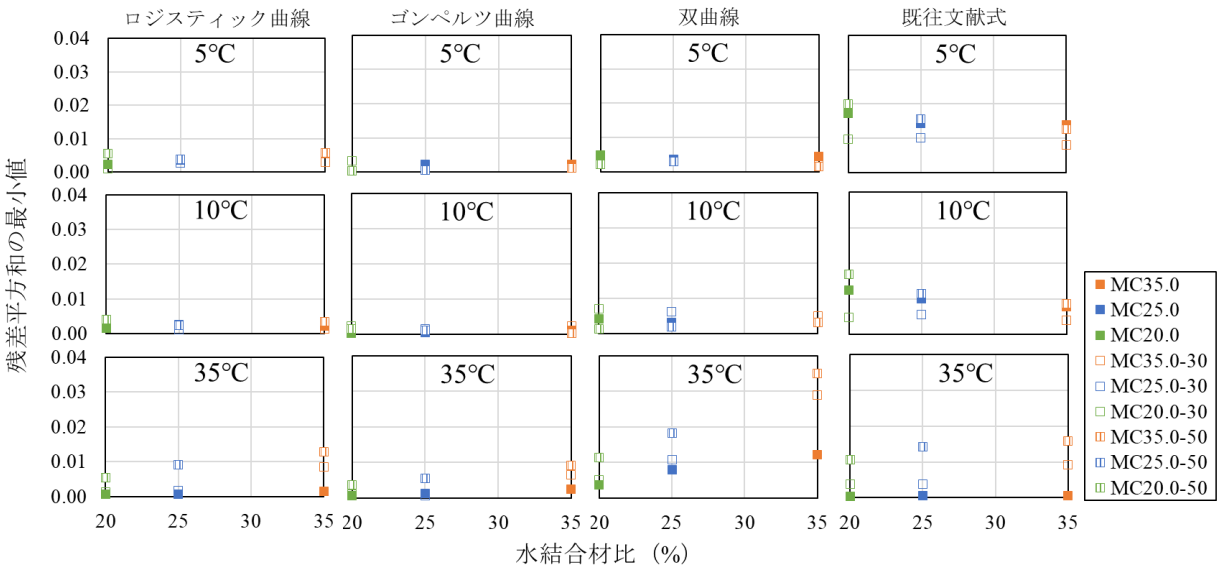
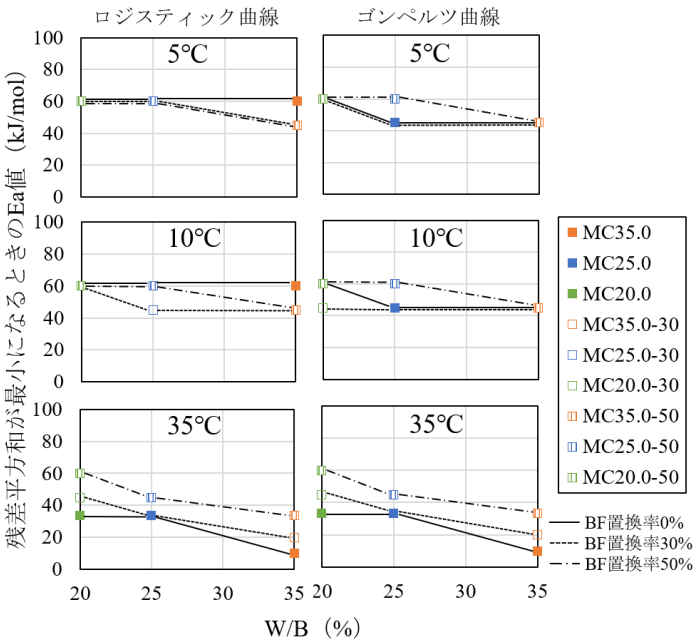


図-4　各種回帰曲線ごとの残差平方和の最小値

いずれの成長曲線においても 35°C と比較して適合度が高いことが確認できる。**図-4** は**図-3** をもとに算出した各成長曲線における残差平方和の最小値を示す。ロジスティック曲線およびゴンペルツ曲線は，全体として比較的残差平方和が小さく，特に低温条件ではゴンペルツ曲線が良好な適合性を示す水準が多かった。双曲線も低温域では比較的良好な結果を示したが，35°C 封かんでは他曲線に比べ適合度が低かった。既往文献式は低温域で適合度が低下したものの，35°C ではロジスティック曲線やゴンペルツ曲線と同等の結果となる条件もあった。

ここまでの検討結果から，水準にかかわらずロジスティック曲線とゴンペルツ曲線が比較的良好に近似できたため，二つの成長曲線において残差平方和が最小となる際の *Ea* を W/B を横軸として**図-5** に示す。W/B が小さいほど残差平方和が最小となる *Ea* が大きくなる傾向が認められ，高温域では特にその傾向が強かった。BF 置換率の違いから見ると一部の水準を除いて，BF 置換率を高めた場合，より大きな *Ea* を仮定した際に，残差平方和が小さくなった。



＊Ea=10，20，33.5，45，60，80，90，120 kJ/molで整理した結果

図-5　残差平方和が最小になるときの *Ea* 値

(4) 養生条件が強度発現に及ぼす影響

BF を多量に含むコンクリートは，特に低温封かん養生下での結合材の反応がセメント単味のコンクリートに比べ停滞し，初期強度の発現が遅延する傾向が顕著であることが報告されている [13]。これに加え，ゴンペルツ曲線は変曲点までの立ち上がりが他の曲線と比較し幾分急激であるため [14]，20°C 封かん養生から求めた標準曲線と低温条件（5，10°C）の初期強度発現との適合度が高くなると考えられる。

一方，35°C 封かん養生では，*Ea* を変化させても標準曲線との適合度が十分に改善しない水準が認められた。これは，高温条件下では初期材齢の反応促進だけでなく，封かん養生下における水分供給条件や，BF を含む結合材の反応停滞 [15]が強度増進過程に影響し，20°C 封かん養生を基準とした単一の成長曲線では十分に表現できなかっ

たためと考えられる。谷口ら[14]は，複数のセメントを対象としてゴンペルツ曲線による強度予測式を提案し，セメント種類や養生温度によって適用範囲が異なることを示している。本報では，セメント種類，強度領域および BF 置換率が異なるものの，低温条件では成長曲線により比較的良好に整理できる一方，35°C 封かん養生では適合度が低下する水準が認められた点で，既往研究と整合する傾向を示した。

5. 考察

本報の結果より，低温域（養生温度 5，10°C）においては，いずれの成長曲線を用いてもおおむね良好な強度発現の推定が可能であると考えられる。一方で，推定精度をより向上させるためにはゴンペルツ曲線を用いることが望ましい。特に，本報の範囲では，低温条件において *Ea* を 45～60 kJ/mol 程度と仮定した場合に，20°C 封かん養生から得られた標準曲線との適合度が向上した。BF 置換率が大きい場合は，より大きな *Ea* を仮定した際に残差平方和が小さくなり，適合度が向上する傾向が認められた。また，養生温度だけでなく，水分環境の違いによって実測値と成長曲線との間に乖離が生じた可能性があることを考慮すると，従来から重要であると指摘されていることではあるが，強度発現の正確な予測という観点からも，養生期間中は水分の逸散を極力抑制する管理が重要であることが改めて確認された。特に材齢初期における養生条件の影響は大きく，この期間を適切に管理することで，本報で得られた知見を品質管理に有効に活用できると考えられる。

一方で，実際の部材管理においては，養生期間の温度湿度の変動などの影響も考えられ，本報で得られた知見を実務へ適用するための検証が必要である。より実用的な強度発現予測を行うためには，材齢初期から中期にかけての強度増進に加え，材齢 91 日を超えた長期的な増進の評価も重要である。今後の検討課題として，温度依存性を考慮した *Ea* や各種パラメータを導入した拡張式，あるいは内部湿度を考慮した有効材齢の修正等が考えられる。

6. まとめ

本報は，中庸熱ポルトランドセメントを用いた配（調）合をベースとした，環境配慮型高強度コンクリートに関して，有効材齢と成長曲線とを用いてコンクリートの強度発現性を評価したものである。以下にまとめを示す。

① 成長曲線種類によらず，低温域（養生温度 5，10°C）では，一般的に用いられる *Ea* = 33.5 kJ/mol より大きな *Ea* を仮定することで，比較的良好に環境配慮型高強度コンクリートの強度発現性を表すことができた。特に本報の範囲では，ゴンペルツ曲線を用いて *Ea* を 45～60 kJ/mol 程度と仮定することで良好な適合度が得られた。また，W/B が小さいほど，良好な適合度が得られる *Ea* は大きくなる傾向を示した。

② 養生温度 35°C では，W/B や BF 置換率が大きくなると適合度が低下する傾向を示した。これは高温条件下では初期材齢の反応促進に加え，水分供給条件や BF を含む結合材の反応特性が強度増進過程に影響したためと考えられる。

謝辞：本実験を実施するにあたりアルソシアプレコン（株）とシーカ・ジャパン（株）にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 宮澤祐介，横室隆：高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの長期性状および耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.81-86，2018.6
2) 伊与田岳史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.409-414，2014.5
3) 三輪真也，金準鎬，崔亨吉，濱幸雄：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化による細孔構造と対凍害性の変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.943-948，2017.6
4) 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.264-269，2025.6

5) 宮原健太，小田部裕一，鈴木好幸，石川仲介：高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの強度発現に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1291-1296，2017.6
6) 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
7) 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，pp.66-74，1991.1
8) 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，Vol.75，No.3，pp.157-168，2019.8
9) 一般社団法人日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，pp.178-179，2024.2
10) 上野敦，國府勝郎，宇治公隆，小野聖久：養生温度および置換率がフライアッシュの反応性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.215-220，2006.6
11) 渡邉真史, 三本巖, 斉藤丈士：冬期における円柱供試体の強度推定に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.325-330，2015.6
12) 氏家勲, 大野浩二:各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討 , 土木学会論文集, No.798，VI-68，pp.51-61，2005.9
13) 岩城一郎，鈴木一利，三浦尚：低温養生を行った高炉スラグ混和コンクリートの強度回復特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.205-210，1998.6
14) 谷口円，桂修，濱幸雄，吉野利幸：水セメント比の適用範囲を拡張したコンクリート強度予測式の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.641，pp.1205-1210，2009.7
15) 佐藤幸恵，桝田佳寛，河上浩司，鹿毛忠継：高強度コンクリートの構造体内部での含水率の変化と強度発現性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1031-1036，2003.6