

論文 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの湿潤養生期間に関する研究

保坂 綱鎮^{*1}・榎田 佳寛^{*2}・檀 康弘^{*3}

要旨：高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートについて、必要な湿潤養生期間を定めるために、せき板の存置期間を変えて、その後の強度発現を実験し、湿潤養生終了時の圧縮強度を調べた。その結果、標準養生 28 日圧縮強度の 40~50%以上の強度に達した時点、積算温度が 130~200°D・D の時点、圧縮強度が 10.0~13.0N/mm² に達した時点で、湿潤養生を終了しても、材齢 28 日で、構造体コンクリートは標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上、材齢 91 日で、標準養生 28 日圧縮強度と同等の強度発現を示すことを明らかにした。
 キーワード：高炉スラグ微粉末、湿潤養生期間、構造体コンクリート、両端開放供試体、積算温度

1. はじめに

近年、省資源・循環型社会へ向けた動きが活発になっており、産業副産物の有効利用が図られてきている。高炉セメントや高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートも、二酸化炭素の削減に繋がるとして利用が推奨されている。

コンクリートが所要の性能を発揮するには湿潤養生が必要であり、JASS5 ではセメントの種類や計画供用期間の級に応じて必要な湿潤養生期間が定められており、早強および普通ポルトランドセメントに関しては、材齢によらず圧縮強度が 10N/mm² になれば湿潤養生を終了することができる^{1)~4)}と定められている。しかし、高炉セメントや高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは湿潤養生終了可能な圧縮強度に関しては規定がなく、湿潤養生期間の規定のみとなっている。高炉セメントや高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、初期の強度発現が低く、初期の湿潤養生が重要とされているものの、湿潤養生期間の規定にもとづいて養生を終了した場合、外気温によって養生終了時のコンクリートの強度発現が異なるため、その後の性質にも影響を及ぼすと考えられ、より合理的な規定が必要である。

そこで、本研究では長期材齢からの性能評価を行い湿潤養生終了可能な圧縮強度を明確にすることを目的とする。

2. 実験概要

表 - 1 に実験の要因と水準、表 - 2 に使用材料の品質、表 - 3 に実験の調合表を示す。実験は、スラグ置換率 42%、水結合材比 50%の BB50、スラグ置換率 42%で、水結合材比 60%の BB60、スラグ置換率 27%で、水結合材比 60%

の BA60 の 3 調合とした。また、養生条件は標準養生、現場封かん養生、壁状試験体(以下、構造体)から採取したコア、両端開放の 4 養生とした。

図 - 1 に構造体と両端開放の供試体の概要を示す。

コンクリートは 100L の強制式ミキサーを用い、各シリーズとも 5 バッチに分けて練混ぜた。各シリーズとも 1 バッチで 1 体の構造体を作製し、残りの 1 バッチで両端開放の供試体作製を行った。また、標準養生と現場封かん養生の供試体は全バッチとも、作製した。

構造体は、材齢をずらして、型枠脱型を行った。

図 - 2 に構造体のコア抜き概要図を示す。材齢 28, 91

表 - 1 実験の要因と水準

要因	水準
結合材種類	普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末
水結合材比(%)	50,60
スラグ置換率(%)	27,42
目標スランブ(cm)	18±2.5
目標空気量(%)	4.5±1.5
供試体寸法(mm)	φ100×200
	構造体:600×600×200
養生条件	水中、現場封かん、構造体、両端開放
試験材齢(日)	脱型時(4材齢)、28, 91

表 - 2 使用材料と品質

使用材料	記号	品質
普通ポルトランドセメント	OPC	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3310cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BS	密度:2.90g/cm ³ 比表面積:4000cm ² /g
大井川産川砂	S	表乾密度:2.51g/cm ³ 吸水率:1.99%
青梅産硬質砂岩砕石	G	表乾密度:2.66g/cm ³ 吸水率:0.77%
AE減水剤	WR	リグニンスルホン酸化合物 およびポリオール複合体
空気連行剤	AE	アルキルアリルスルホン 化合物系陰イオン界面活性剤

*1 宇都宮大学大学院 (正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻地球環境デザイン学コース 教授 博(工) (正会員)

*3 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター 技術開発グループ グループリーダー (正会員)

表 - 3 コンクリート調合表

調合名	スラグ置換率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					化学混和剤	
				W	C	BS	S	G	WR (B*%)	AE (A)
BB50	42	50	41.1	173	201	145	690	1046	0.01	1.0
BB60	42	60	42.7	173	167	121	737	1046	0.01	2.5
BA60	27	60	42.9	173	210	78	740	1046	0.01	2.5



図 - 1 構造体コンクリートと両端開放概要図

日にそれぞれ3本ずつコア供試体を採取して、構造体の圧縮強度を試験した。コア供試体の採取は、高さ方向の強度差や構造体全体の骨材の不均一性を考慮し、図-2の様に行った。また、コンクリート内部に熱電対を挿入し、コンクリート打込み後の温度を測定した。

両端開放供試体は、鋼製型枠を使用して構造体の脱型と同じ材齢で上面のシールおよび下面の蓋を取り外し、構造体の型枠脱型を模擬したものである。両端開放供試体は、ブリーディング終了後に横置きとし、所定の材齢で上下面脱型後、再び横置き静置とし養生を行った。また、脱型時判定のための圧縮強度試験は現場封かん養生供試体を用いて行った。

普通強度の 20~30N/mm² のコンクリートを対象として実験を行った。

実験は春、夏、秋、冬期の4シーズンで行い、各季節で材齢7日を基準に脱型材齢を調節し、強度発現性状の検討を行った。

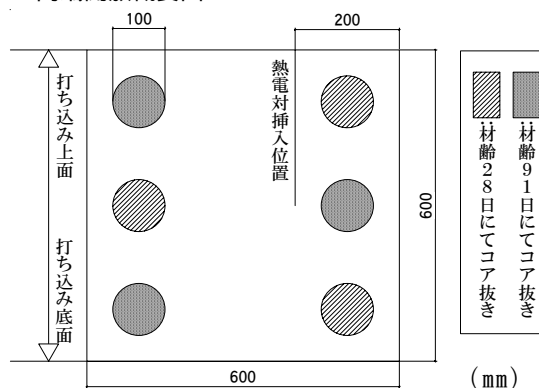


図 - 2 構造体コア抜き概要図

表 - 4 標準養生28日の圧縮強度全平均値と標準偏差

調合名	BB50	BB60	BA60
標準養生28日の平均圧縮強度(N/mm ²)	32.5	21.0	24.1
標準養生28日圧縮強度の標準偏差	4.80	1.85	2.41

表 - 5 各季節の脱型材齢

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

表-4に標準養生28日の圧縮強度の全平均値と標準偏差を示す。標準養生は 20±3 の水中で試験材齢まで行った。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、置換率が高い程、初期の強度発現が低くなるため、BB60よりも置換率の低いBA60の方が圧縮強度が高くなっていた。また、BB50では圧縮強度のバラつきが特に大きく、実験結果の整理を容易にするため、本研究では標準養生28日圧縮強度を基準とし、それに対する比により実験結果を整理した。

表-5に各季節の型枠脱型材齢を示す。脱型材齢は、水結合材比が小さく、気温が高い程、早くなるようにした。

調合名	脱型 No.	脱型材齢 (日)			
		春期	夏期	秋期	冬期
B B 5 0	脱型1	3	2	3	2
	脱型2	5	3	5	5
	脱型3	7	5	7	7
	脱型4	10	7	10	14
B B 6 0	脱型1	3	3	3	5
	脱型2	5	5	5	7
	脱型3	7	7	7	10
	脱型4	10	10	10	14
B A 6 0	脱型1	3	3	3	5
	脱型2	5	5	5	7
	脱型3	7	7	7	10
	脱型4	10	10	10	14

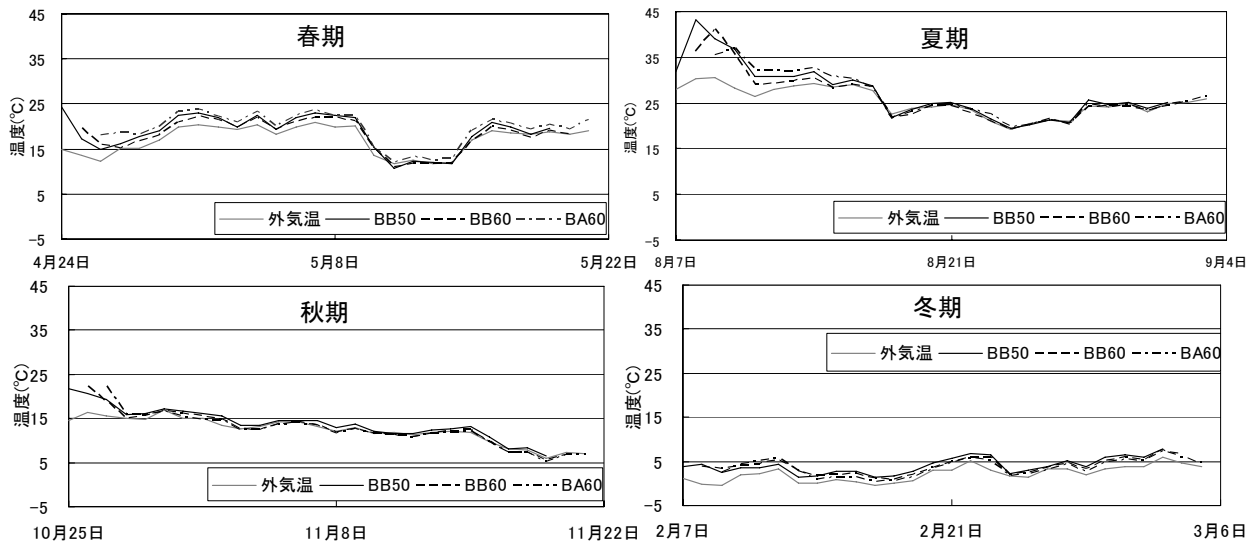


図 - 3 各季節の材齢 28 日までの外気温と構造体コンクリート内部の温度履歴

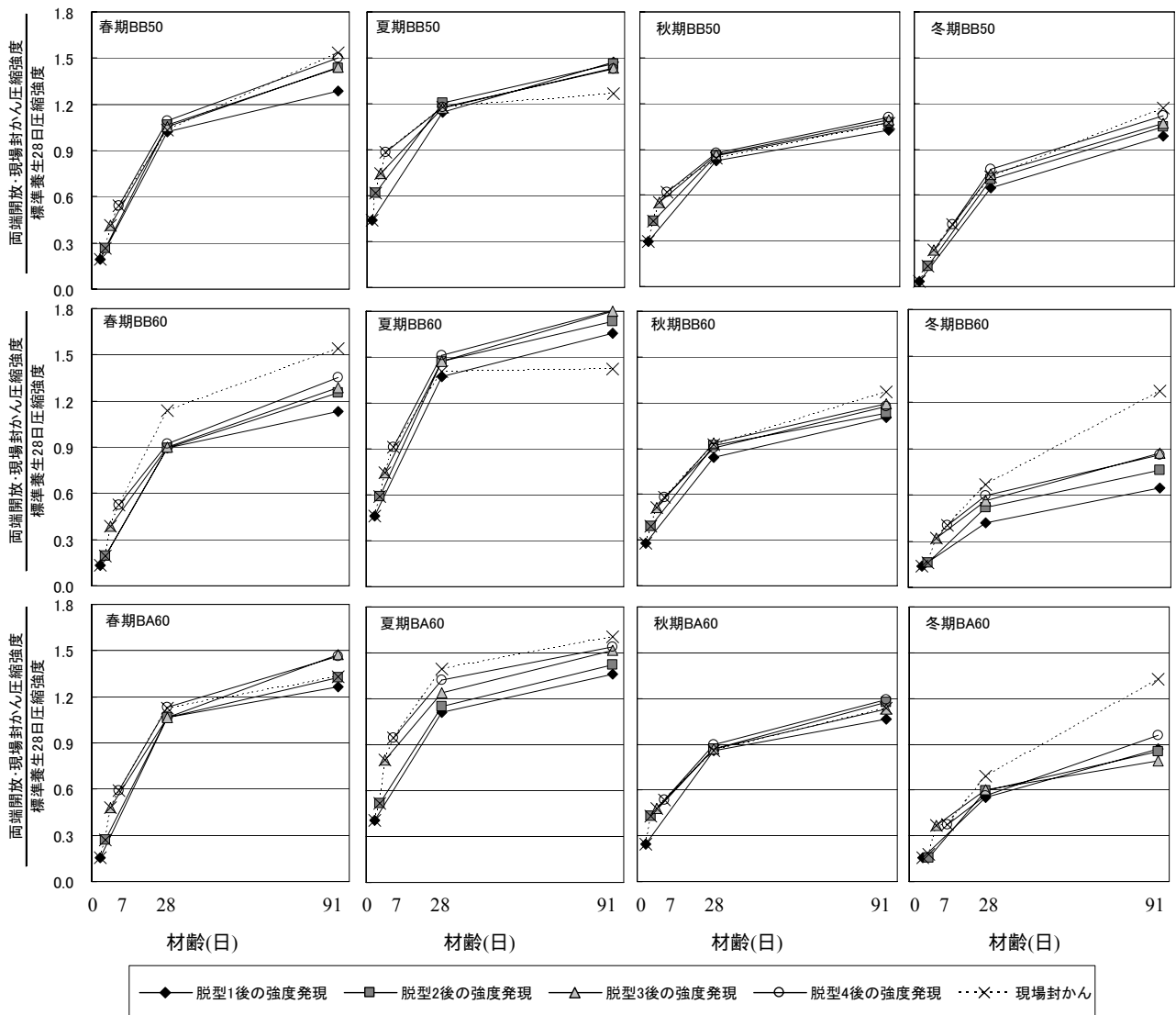


図 - 4 材齢と標準養生 28 日圧縮強度に対する両端開放および現場封かん圧縮強度の関係

図 - 3 に各季節の材齢 28 日までの外気温と構造体コンクリート内部の温度履歴を示す。構造体内部の温度発熱は、BB50 が最も高く、次いで BA60、BB60 となっていた。春

期や秋期などの標準期に比べ高温となる夏期では、45 程度の発熱がみられていた。

図 - 4 に標準養生 28 日圧縮強度に対する両端開放および

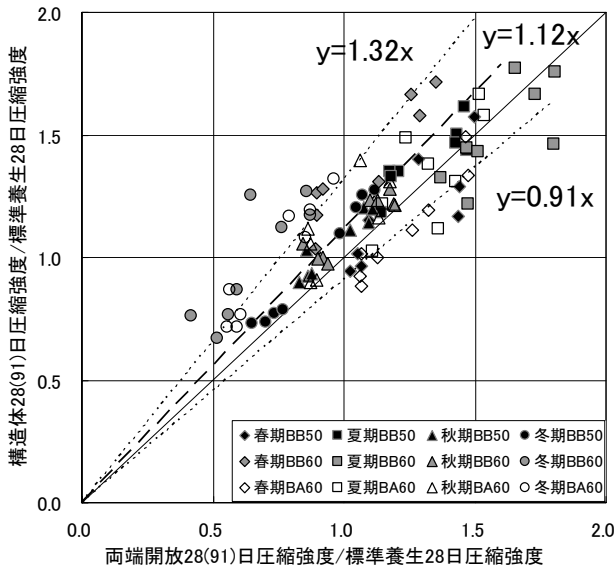


図 - 5 両端開放と構造体の圧縮強度比

び現場封かん養生供試体の強度発現の割合を示す。両端開放供試体の圧縮強度は、脱型材齢が遅くなるに従って、全体として材齢 28 日および 91 日における長期強度の増進が大きくなっている。標準期である春期と秋期では、脱型時圧縮強度の比は同等であっても、材齢 28,91 日と長期になるに従って、養生温度が高くなっていく春期の方が大きな強度比を示している。また、初期材齢では BA60 の方が BB60 よりも大きくなっているが、長期材齢では BB60 の方が大きな強度比となっていた。

図 - 5 に標準養生 28 日圧縮強度に対する両端開放 28・91 日圧縮強度と標準養生 28 日圧縮強度に対する構造体 28・91 日圧縮強度の関係を示す。図中の破線は平均値を、点線は平均値 ± 標準偏差の範囲を示す。両端開放強度に対する構造体強度比は平均で 1.12 倍で、0.91 ~ 1.32 倍に分布している。このことは、脱型後の強度発現の評価において、構造体強度が両端開放強度よりも大きくなる確率が約 75%、小さくなる確率が 25%であることを示している。このことから、せき板を除去した後の構造体コンクリートの強度発現は、両端開放供試体の強度でみておけば、概ね安全側に評価されるといえる。

3.2 脱型強度の判定

(1) 標準養生 28 日圧縮強度に対する両端開放強度比

3.1 より、両端開放供試体よりも構造体の圧縮強度の方が大きくなる傾向にあることが示されたので、以下では両端開放供試体について解析を行う。なお、建築基準法・同施行令・同告示に基づき、コアまたはこれに類する供試体として、両端開放が、材齢 28 日で標準養生 28 日強度の 70%以上の強度および材齢 91 日で、標準養生

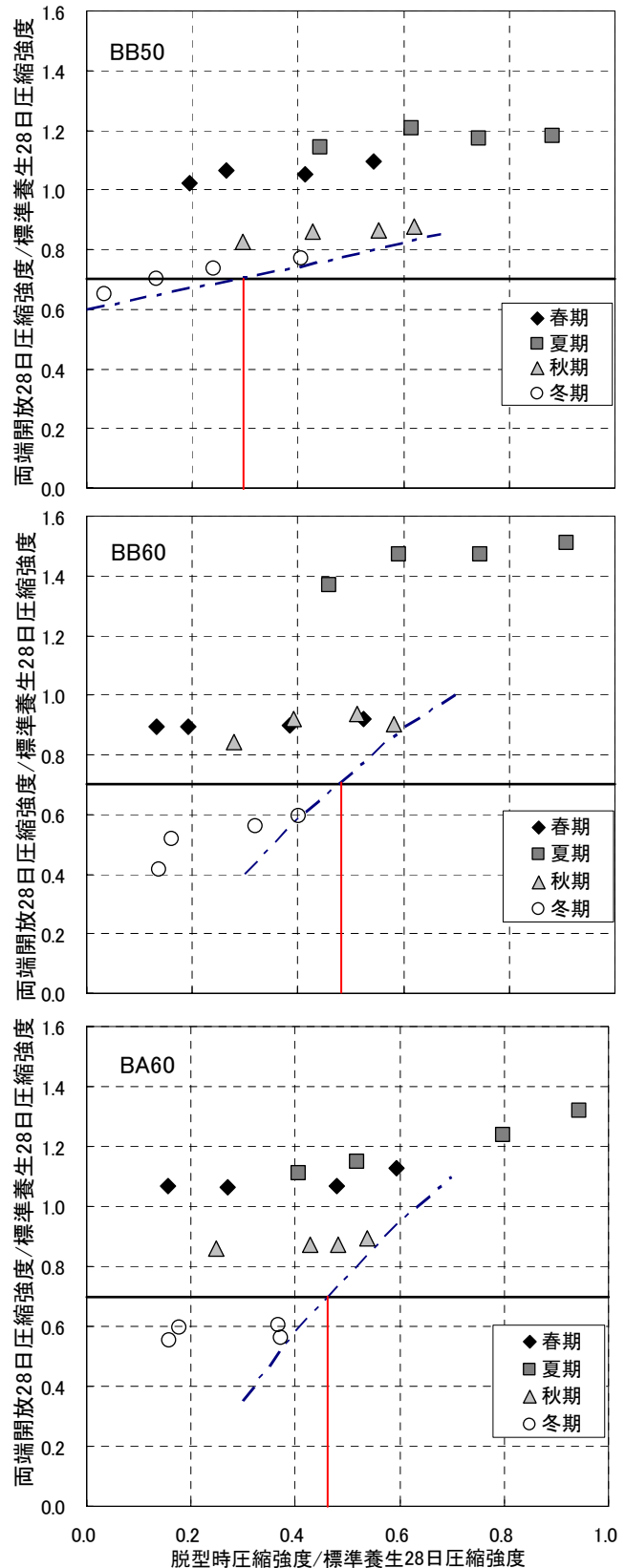


図 - 6 標準養生 28 日強度に対する脱型時強度と標準養生 28 日強度に対する両端開放 28 日強度の関係

28 日強度以上の強度を確保することが可能な型枠脱型圧縮強度の算定を行った。

図 - 6に標準養生 28 日圧縮強度に対する脱型時圧縮強度と標準養生 28 日圧縮強度に対する両端開放 28 日圧縮強度の関係を示す。調合ごとに若干のばらつきは出たが、材齢 28 日で、両端開放供試体が標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現するためには、BB50 で脱型時に標準養生 28 日圧縮強度の 30%以上の強度を、BB60 で 50%以上、BA60 で 45%以上の強度を有していればよいと分かる。

図 - 7に標準養生 28 日圧縮強度に対する脱型時圧縮強度と標準養生 28 日圧縮強度に対する両端開放 91 日圧縮強度の関係を示す。材齢 91 日で、両端開放供試体が標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現するためには、BB50 では脱型時に標準養生 28 日圧縮強度の 40%以上の強度を、BB60 で 50%以上、BA60 で 45%以上の強度を有していればよいと分かる。

このことから、安全側に検討を行い、両端開放供試体は、BB50 では脱型時に標準養生 28 日圧縮強度の 40%以上の強度を、BB60 では 50%、BA60 では 45%以上の強度を有していれば、材齢 28 日で標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現し、材齢 91 日で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現するといえる。

(2) 積算温度による判定

図 - 8に積算温度と標準養生 28 日圧縮強度に対する現場封かん養生供試体の強度発現の関係を示す。

積算温度 $M(°D \cdot D)$ は一般に(1)で表される。

$$M = \sum_{i=1}^n (\theta_i + 10) \quad (1)$$

ただし、 θ_i : 日平均養生温度(°C)、 t : 材齢(日)、 n : 日数(日) また、積算温度 M の対数と強度との関係はロジスティック曲線で表されるが、これを 3 本の折線で近似した時、第2折線の範囲の積算温度と圧縮強度の関係は(2)式で表される。

$$F = \alpha \cdot \log_{10} M + \beta \quad (2)$$

ただし、 F : 圧縮強度(N/mm²)、 α, β : 実験定数

夏期実験では初期養生時に高温履歴を受けたため積算温度と圧縮強度の関係に若干のズレが表れたが、春・秋・冬期の結果は養生温度が異なっても、水結合材比・スラグ置換率によらず積算温度の対数により直線的な強度発現を確認することができた。

3.2(1)の結果より両端開放供試体は脱型時に BB50 では、標準養生 28 日圧縮強度の 40%以上の強度を、BB60 で 50%以上、BA60 で 45%以上の強度を有していれば、材齢 28 日で標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現し、材齢 91 日で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現することが示されたので、ここでは圧縮強度を積算温度に換算し、評価を行った。図 - 8 より、BB50 では積算温度が約 130 °D・D、BB60 で約 200 °D・D、BA60

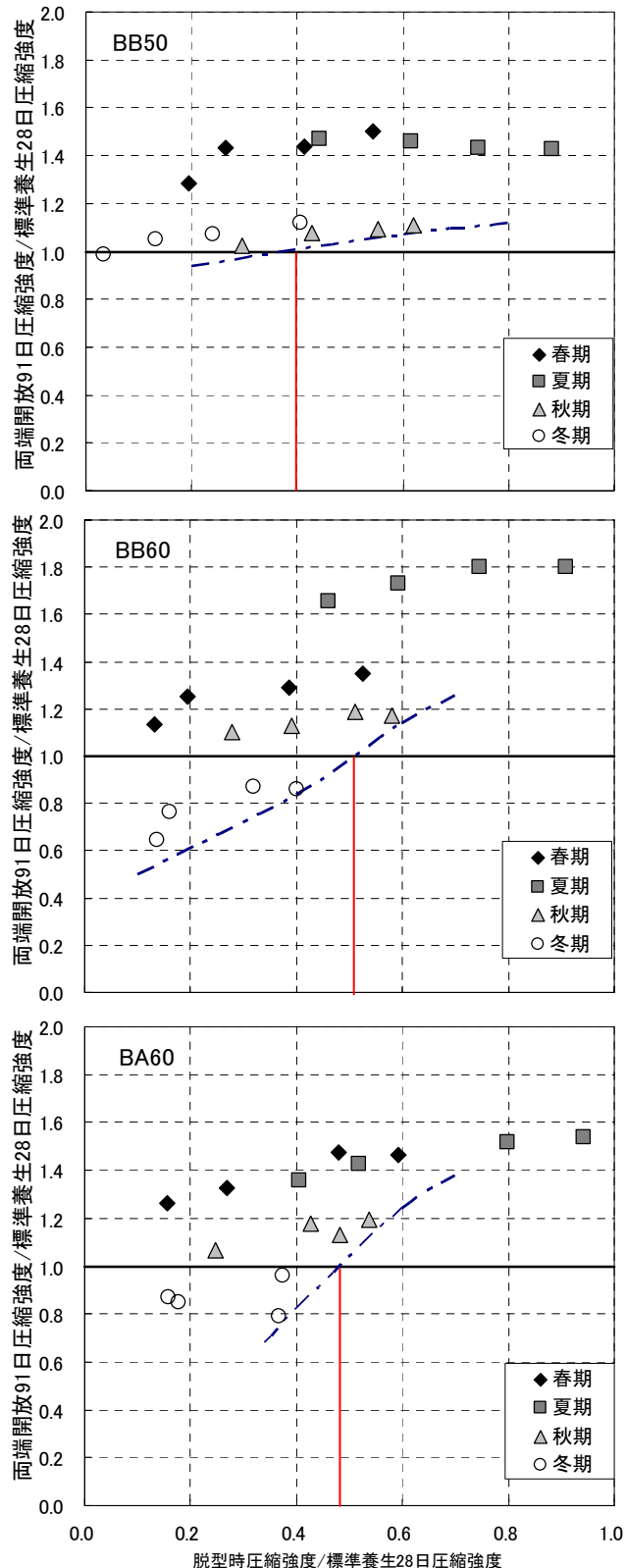


図 - 7 標準養生 28 日強度に対する脱型時強度と標準養生 28 日強度に対する両端開放 91 日強度の関係

で約 180 °D・D を超えていけば養生温度に関係なく脱型してよいといえる。

よって、両端開放供試体は積算温度が、BB50 では約

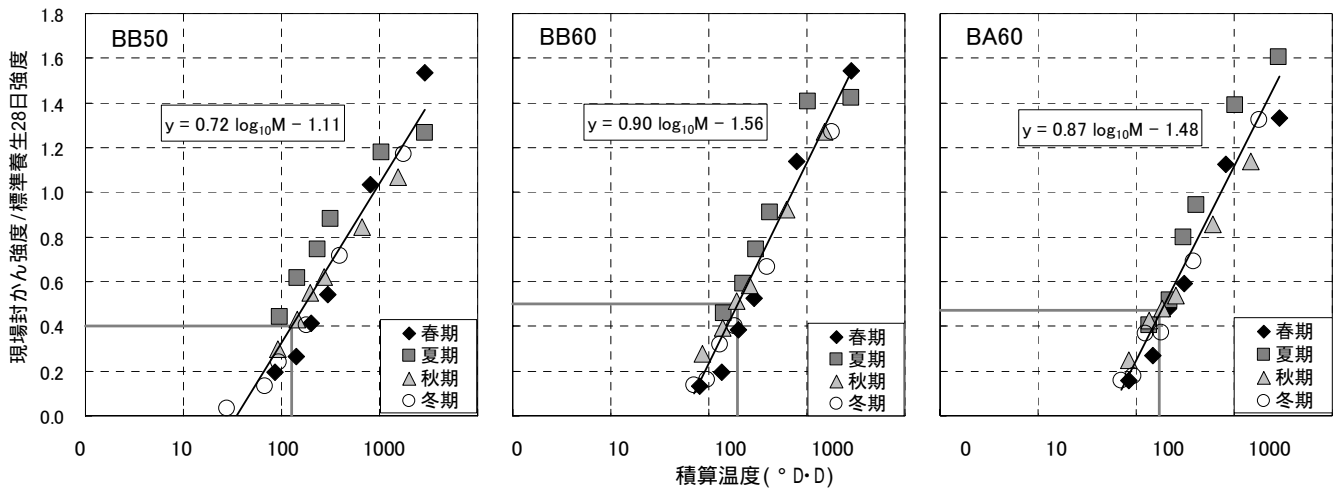


図 - 8 積算温度と標準養生 28 日圧縮強度に対する現場封かん圧縮強度

130 °D・D, BB60 で約 200 °D・D, BA60 で約 180 °D・D 以上であれば湿潤養生を終了しても, 標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現し, 材齢 91 日で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現するといえる。

また, 湿潤養生終了可能な圧縮強度は 3.2.(1)の標準養生 28 日圧縮強度に対する強度比と, 表 - 2 標準養生 28 日の平均圧縮強度より算出し, BB50 で 13.0N/mm², BB60 で 10.5N/mm², BA60 で 10.8N/mm²である。この圧縮強度以上であれば湿潤養生を終了しても, 標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現し, 材齢 91 日で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現するといえる。

4. 結論

本研究は, 高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの湿潤養生打ち切り可能な圧縮強度の検討を行い, 以下のことが示された。

- (1) 長期材齢での強度増進は, 湿潤養生期間が長いほど, スラグ置換率が高いほど大きくなる。
- (2) 両端開放供試体は, BB50 では脱型時に標準養生 28 日圧縮強度の 30%以上の強度を, BB60 では 50%, BA60 では 45%以上の強度を有していれば, 材齢 28 日で標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現する。
- (3) 両端開放供試体は, BB50 では脱型時に標準養生 28 日圧縮強度の 40%以上の強度を, BB60 では 50%, BA60 では 45%以上の強度を有していれば, 材齢 91 日で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現する。
- (4) 両端開放供試体は積算温度が, BB50 では約 130 °D・D, BB60 で約 200 °D・D, BA60 で約 180 °D・D 以上であれば湿潤養生を終了しても, 標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現し, 材齢 91 日

で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現する。

- (5) 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートでは, 現場封かん養生供試体で, おおよそ 10.5~13.0N/mm²の強度が得られれば, 湿潤養生を終了しても, 材齢 28 日において標準養生 28 日圧縮強度の 70%以上の強度を発現し, 材齢 91 日で標準養生 28 日圧縮強度以上の強度を発現する。
- (6) 両端開放供試体と構造体コンクリートでは構造体から採取したコア供試体の方が圧縮強度が高く, 両端開放供試体によって, 構造体コンクリートの圧縮強度を安全側に評価できる。

参考文献

- 1) 大倉真人, ほか: 各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験(その 1)~(その 8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.325-336, 2006.9
- 2) 和泉意登志, ほか: せき板の存置期間および初期養生が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集 No.449, 1993.7
- 3) 安部弘康ほか: 各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験(その 9)~(その 14), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.607-618, 2007.9
- 4) 吉岡昌洋, 榎田佳寛: 中庸熟ポルトランドセメントを用いたモルタルの含水率分布におよぼす湿潤養生期間の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.619-620, 2007.9