

論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種温度条件下における強度発現

佐藤 幸恵*1・榎田 佳寛*2・前田 悦孝*3・新沼 大史*4

要旨：建築分野において、調合強度を定めるための予想平均気温による強度補正值は JASS5 に規定されているが、現行の仕様書で使用されているデータは非常に古く、現在使用されている高炉セメント・高炉スラグ微粉末との置換率や強度発現特性の違いを確認する必要がある。本研究では、JASS5 の平均気温による強度補正值の見直しのための新たな資料とすべく実験を実施し、各種温度条件下における強度発現を把握するとともに、養生条件の違いによる積算温度と圧縮強度の関係について検討を行い、本研究の結果を用いた強度補正值と、現行の補正值との比較を行った。

キーワード：高炉スラグ微粉末, 高炉セメント B 種, 強度発現, 養生温度, 強度補正值

1. はじめに

高炉で銑鉄を生産する際に発生する副産物である高炉スラグは、セメントやコンクリート用骨材などとして利用されている。中でも、水砕スラグを粉砕・乾燥した高炉スラグ微粉末は、コンクリート用結合材として使用され、リサイクルなどの観点から年々その使用量も増加している。高炉スラグ微粉末は、フライアッシュと比べてセメントに対する置換率を大きくとれるが、養生温度に比較的左右されやすいとされ、冬期などの低温時における強度増進が緩慢になるために、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS5 と略す）」¹⁾では、強度補正を行わなければならない平均気温の範囲を他のセメントに比

べて高く設定している。しかし、JASS5 で示されている強度補正值は非常に古いデータを基にしており、最近の温度条件と強度発現との関係のデータが取り入れられていない。また、セメント自体の品質も変化してきており、加えて高炉セメント各種におけるスラグ置換率も、JASS5 の強度補正值算定に用いられた当時とは異なっている可能性もある。そこで、それらの各種要因が強度発現にどれだけの影響を及ぼしているか、基本的な強度発現の関係を確認しておく必要が生じてきた。そのため、本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種温度条件下における強度発現の関係についての実験を行い、今後の強度補正值改定のための新たな資料とすべく検討を行った。

表—1 使用材料

材料	種類	記号	品質
結合材	普通ポルトランドセメント	OPC	密度3.15g/cm ³ , 3社等量混合品
	高炉セメントB種	BB	密度3.03g/cm ³ , 3社等量混合品
	高炉スラグ微粉末4000	BS	密度2.89g/cm ³ , 4社等量混合品
細骨材	大井川産川砂	S	表乾密度2.59g/cm ³
粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石	G	表乾密度2.65g/cm ³
混和剤	AE減水剤		リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE剤		アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科 工博 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

*3 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科博士前期課程 大学院生 (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種は 3 社等量混合とし、高炉スラグ微粉末は 4 社製品を等量混合して用いた。

2.2 要因と水準

実験は、一定温度条件下での強度発現を対象としたシリーズ 1 と、途中の材齢で養生温度を変化させた条件下での強度発現を対象としたシリーズ 2 の 2 条件とした。実験の要因と水準を表-2に示す。シリーズ 1 では、高炉セメント B 種を用い、水セメント比を 3 段階に設定し、水中および封かん養生を行った。シリーズ 2 は、高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混合したもの、普通ポルトランドセメントのみの 3 種類を同一の水セメント比（水結合材比）として、途中の材齢で養生温度を 5℃から 20℃、20℃から 5℃に変化させる温度パターンで 8 種類の養生を行い、封かん養生のみで実験した。高炉スラグ微粉末のセメントに対する置換率は、高炉セメント B 種を想定して、42.0%とした。計画調合を表-3に、養生温度の設定条件を図-1に示す。両シリーズとも、コンクリートを型枠に打ち込んだ後、直ちに封かん状態にして注水から約 30 分以内に各温度条件下に置き、水中養生の供試体は、打込み翌日に脱型後、水中養生を開始した。所定の材齢において JIS

A 1108 に準じて強度試験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 強度発現性状

シリーズ 1 の材齢 28 日における各養生温度での強度発現結果の比較を図-2に示す。図より、

表-2 要因と水準

	要因	水準
シリーズ 1	セメント種類	BB
	水セメント比	40, 50, 60
	養生温度(℃)	5, 10, 20, 30
	材齢	3日, 1, 4, 13, 26, 52週
シリーズ 2	セメント種類	BB, OPC+BS, OPC
	水セメント比	50
	養生温度(℃)	5→20, 20→5
	材齢	3日, 1, 2, 3, 4, 13週
共通	打ち込み温度(℃)	20℃
	養生条件	水中, 封かん
	目標スランプ	18±2.5cm
	目標空気量	4.5±1.5cm
	供試体寸法	φ10×20cm

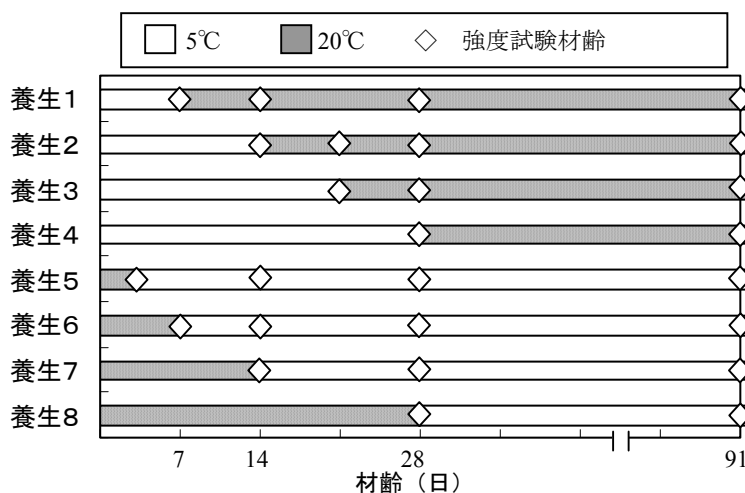


図-1 シリーズ 2 養生温度履歴

表-3 計画調合

シリーズ	W/C (W/B) (%)	結合材種類	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)	絶対容積(l/m³)				質量(kg/m³)			
					セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材
1	50	BB	42.2	176	116	-	280	383	352	-	725	1015
1	60	BB	44.6	170	94	-	308	383	283	-	799	1015
1	40	BB	38.8	180	149	-	243	383	450	-	630	1015
2	50	BB	42.2	176	116	-	280	383	352	-	725	1015
2	50	OPC+BS	42.2	176	65	51	280	383	204	148	725	1015
2	50	OPC	42.6	176	112	-	284	383	352	-	736	1015

水中養生では水セメント比が大きいほど、低温養生（5℃、10℃）と20℃との強度差が大きいことが読みとれる。日本建築学会の「高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説」²⁾では、15℃以下の水中で養生した場合は、養生温度の低下にともなう強度の低下が大きいと記述されていることに合致する結果となった。この差が封かん養生ではあまり見られなかったことについては、水中養生の場合、養生温度と湿潤条件が共に強度発現を促進するため、より大きい強度増進が期待できるということではないかと考えられる。

シリーズ2の圧縮強度の試験結果を養生履歴別に図-3に示す。いずれの養生においても高炉セメントB種と高炉スラグ微粉末42%置換のコンクリートはほぼ同等の強度発現となった。若干のばらつきを考慮しても、現在流通している高炉セメントB種のスラグ置換率は42%前後であり、プレミックスした高炉セメントも練り混ぜ時に高炉スラグ微粉末を使用した場合も同じ強度発現をすることが確認された。養生温度を5℃から20℃に変化させる養生1~4では、5℃養生の期間にかかわらずその後20℃に養生温度を高くすると、初期材齢では普通ポルトランドセメントとの差が大きい、91日には普通ポルトランドセメントとほぼ同程度の圧縮強度が得

られた。逆に、初期に20℃で養生し、その後5℃に温度を下げる養生5~8では、高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントの圧縮強度に及ばなかった。材齢28日まで20℃の養生を行う養生8のみが、材齢91日において普通ポルトランドセメントとほぼ同様の圧縮強度を得た。

3.2 積算温度との関係

コンクリートの圧縮強度は、次式で表される積算温度に対してS字状に増加するロジスティック曲線で表されることがよく知られている³⁾。

$$M = \Sigma (\theta z + 10) \quad (1)$$

ここにM：積算温度（°D・D）

θz ：材齢z日における日平均気温または平均養生温度（°C）

通常、標準養生のコンクリートと同一の積算温度まで養生を行えば同等の圧縮強度が得られるとされており、強度発現は1本のロジスティック曲線で表すことが出来ると考えられている。

シリーズ1, 2それぞれについて、積算温度を算出し、圧縮強度との関係を表したものを図-4に示す。図より、一定温度養生の場合は、養生温度の高いものほど、同一の積算温度であっても圧縮強度が高い傾向があった。温度を変えた養生では、積算温度が同一であっても、初期に低温で、長期材齢で高温になる養生が、長期

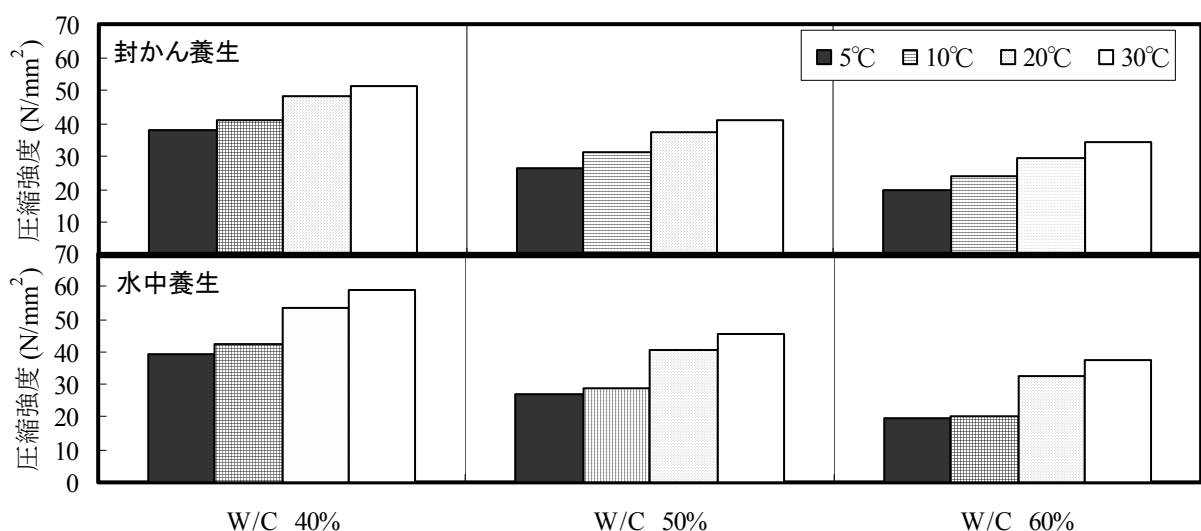


図-2 材齢28日圧縮強度の比較（シリーズ1）

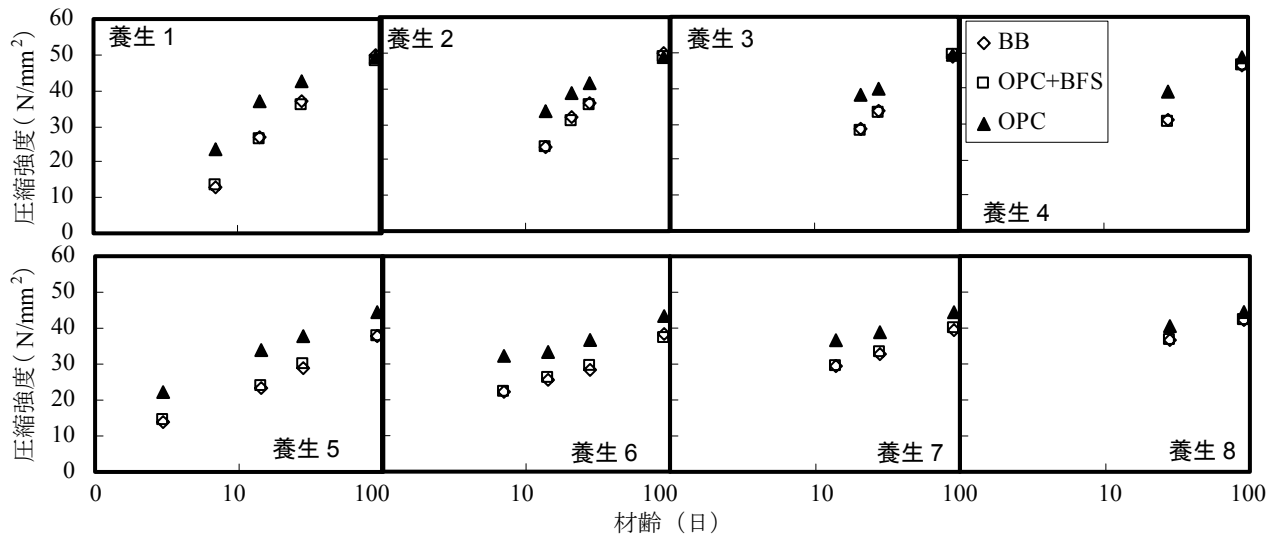


図-3 養生別強度発現の経時変化 (シリーズ 2)

材齢で低温にする養生よりも長期強度が高くなる傾向が見られた。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、初期材齢で温度の低い場合には、初期の強度発現が遅延しやすいといえる。

3.3 現行の強度補正值との関係

JASS5 では、調合強度を標準養生 28 日供試体の圧縮強度で表し、調合強度は、品質基準強度に、構造体コンクリートの強度管理材齢に応じた強度補正值を割り増して定めている。

平均気温と、各種温度水中・封かん養生と標準・20°C封かん養生の 28 日強度の差を図-5に、現場封かん養生 91 日強度と標準養生 28 日強度との差の関係を図-6 に示す。図-5 は、シリーズ 2 については各種温度水中養生 28 日強度が水準に無いため、温度条件のみでの比較として封かん養生 28 日強度と 20°C封かん養生 28 日強度の差をとった。図中に回帰線 (細線) と現行 JASS5 の補正值 (太線) を示した。回帰線と現行 JASS5 の補正值とはそれほど乖離せず、回帰線から強度補正值を求めた場合には、現行の補正值とはあまり差はない結果になると考えられるが、低温域ではばらつきが大きくなっていることがわかる。

一方、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事 (以下、JASS5N と略す)」⁴⁾ では、圧縮強度と積算温度の関係を次式で表し、

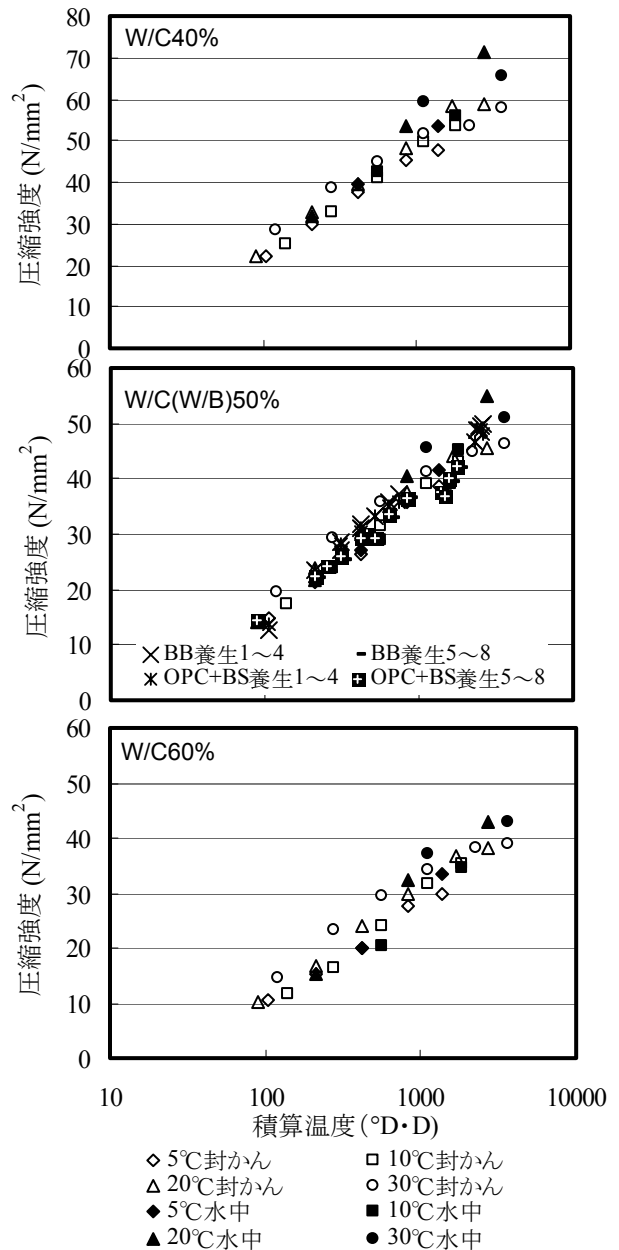
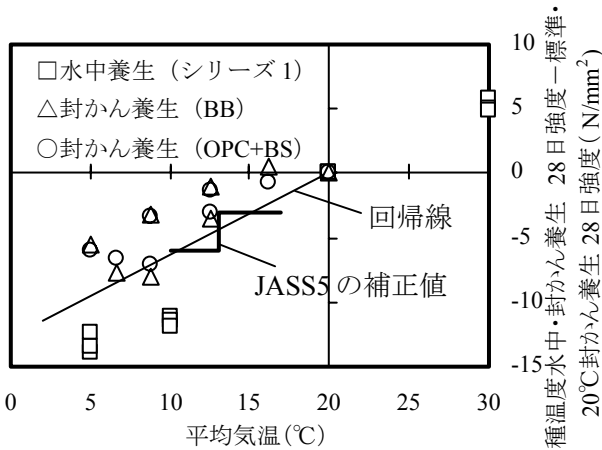
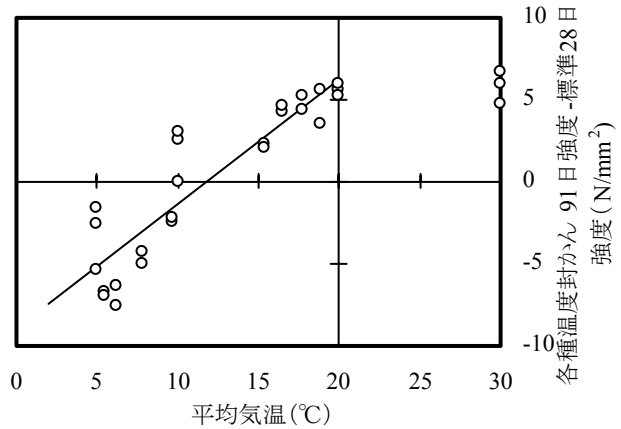


図-4 積算温度と圧縮強度の関係



図—5 平均気温と（各種温度水中・封かん養生 28 日強度－標準・20℃封かん養生 28 日強度）の関係



図—6 平均気温と（各種温度封かん養生 91 日強度－標準養生 28 日強度）の関係

強度補正が必要な平均養生温度の範囲を求めている。

$$F = A \log_{10}(M) + B \quad (2)$$

ここで、F：圧縮強度 (N/mm²)

A,B：実験定数

図—5, 6は、(1)の積算温度を求める式で考えると、基準温度が 0℃の場合であるといえる。以下に、(2)式の実験定数を各調合、各温度条件別に求め、JASS5N の方法を用いて平均養生温度の範囲を算出することとした。図—4 から、養生温度によって同一積算温度でも圧縮強度に差が見られたため、試みとして積算温度の基準温度を-5℃、0℃にした場合について同様の実験定数を求めた。なお、低温時を対象とするため、養生温度 30℃は除外して実験定数を求めた。それらの結果と相関係数を表—4 に示す。表より、積算温度の基準温度を-5℃にしたものが最も相関性が高くなった。積算温度の基準温度が-10℃であるのは、コンクリートは一度硬化すると、-10℃のような低温でもわずかながら強度発現することから、積算温度は-10℃程度から計算されるべきであると Saul⁵⁾が論文の注に記述したことに由来する。しかし、-10℃を基準とした場合、低温時において強度発現が緩慢になり易い低発熱形のセメントを用いたコンクリートでは、同一積算温度でも圧縮強度にばらつきが大きくな

表—4 実験定数と相関係数

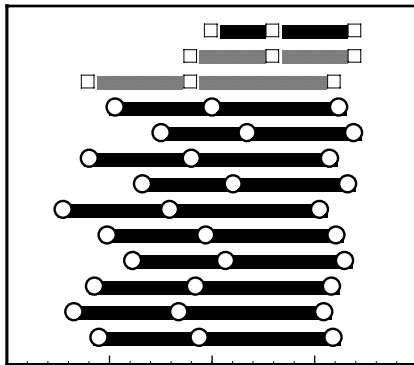
W/C (%)	養生	A	R ²	A	R ²	A	R ²
		M=Σ(θ+10)		M=Σ(θ+5)		M=Σθ	
40	封かん	25.75	0.98	25.51	0.99	23.88	0.97
40	水中	32.32	0.93	32.62	0.96	30.62	0.94
50	封かん	22.84	0.97	22.47	0.97	20.84	0.95
50	水中	29.41	0.95	29.61	0.98	27.68	0.95
60	封かん	20.28	0.98	20.09	0.99	18.81	0.96
60	水中	24.81	0.93	24.95	0.96	23.23	0.92
40	全体	28.01	0.94	27.85	0.96	26.13	0.94
50	全体	23.38	0.96	23.04	0.97	21.39	0.94
60	全体	21.30	0.96	21.15	0.97	19.81	0.95
全データ		23.88	0.73	23.61	0.74	22.00	0.72

ってしまい、よりの確に積算温度で強度発現を表現するためには、基準温度を検討する余地があると考えられる。

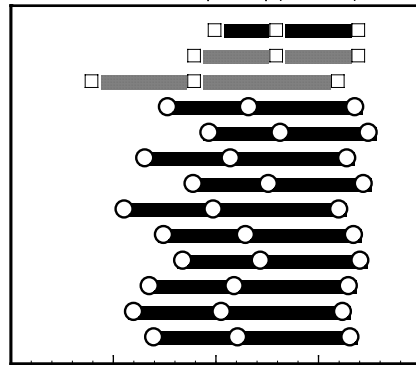
表—4 の結果から、基準温度-10℃と-5℃の実験定数を用いて、JASS5N 方式で予想平均気温の範囲を求めたものを図—7 に示す。本研究での結果と現行の強度補正值の比較すると、調合強度を定める材齢 28 日で構造体強度管理材齢 28 日の場合、今回の結果では、-10℃を基準温度とした場合、フライアッシュセメント B 種の予想平均気温の範囲に近いものとなった。これは、最近の高炉セメント B 種のスラグ置換率が 45% 以下であると想定されるため、このような傾向になったと考えられる。一方、基準温度を-5℃としたものについては、現行の範囲に近くなる傾向があった。

(a) 調合強度を定める材齢 28 日，構造体管理材齢 28 日の場合

基準温度 -10°C



基準温度 -5°C

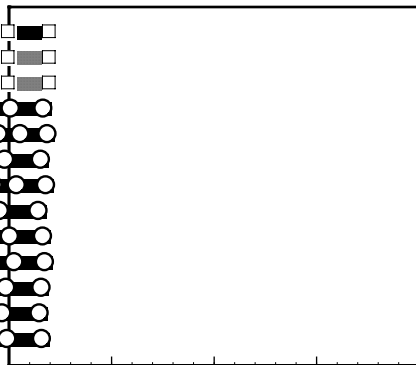
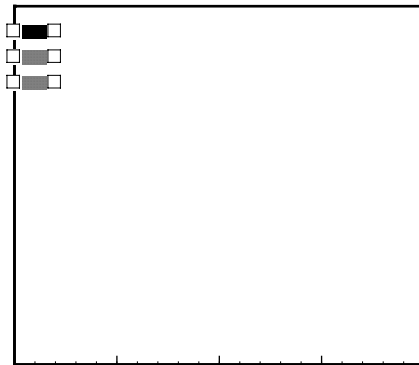


6N/mm² の補正が必要な範囲

3N/mm² の補正が必要な範囲

現行 高炉セメント B 種
 現行 中庸熱ポルトランドセメント
 現行 フライアッシュセメント B 種
 W/C40% 封かん
 W/C40% 水中
 W/B50% 封かん
 W/B50% 水中
 W/C60% 封かん
 W/C60% 水中
 W/C40% 全体
 W/C50% 全体
 W/C60% 全体
 全データ

(b) 調合強度を定める材齢 28 日，構造体管理材齢 91 日の場合



現行 高炉セメント B 種
 現行 中庸熱ポルトランドセメント
 現行 フライアッシュセメント B 種
 W/C40% 封かん
 W/C40% 水中
 W/B50% 封かん
 W/B50% 水中
 W/C60% 封かん
 W/C60% 水中
 W/C40% 全体
 W/C50% 全体
 W/C60% 全体
 全データ

0 5 10 15 20 0 5 10 15 20
平均気温 (°C)

図-7 予想平均気温の範囲の計算結果

4. まとめ

本研究では，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種温度条件下における強度発現について実験を行い，調合強度を定めるための強度補正值について検討を行った。その結果，手法によって算出される強度補正值が異なってくるため，今後さらに多くの条件下でのデータを用いて強度補正值算定手法などについても検討する必要があることがわかった。

謝辞

本研究は，鐵鋼スラグ協会の委託により行ったものであり，関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2003

- 2) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの調合設計・施工指針（案）・同解説，1996
- 3) 洪悦郎ほか：ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案—普通ポルトランドセメントの場合—，日本建築学会構造系論文報告集 No.367，pp.1-7，1986.9
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，2001
- 5) Saul,A.G.A：Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure，Magazine of Concrete Research,Vol.2,No.6，pp.127-140,1951