

論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの初期養生条件が強度発現に及ぼす影響

佐藤 幸恵*1・榊田 佳寛*2・檀 康弘*3・伊代田岳史*4

要旨：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の強度発現は、養生条件に大きく影響される。本研究では、一定温度養生や打込み時期を変えて現場養生を行ったコンクリートの強度発現についての実験結果をもとに、初期の強度発現から長期強度発現に及ぼす初期養生条件の影響について検討を行ったものである。水中養生と封かん養生の強度発現の差はスラグが混入したもののほど差が大きくなり、打込み時期の平均気温が低いほど、長期材齢までの強度発現の伸びは大きくなる傾向を明らかにした。また、JASS5,JASS5N による強度補正値を求め、現行の値との比較を行った。

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, 強度補正値

1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、高炉で銑鉄を生産する際に発生する高炉スラグを水砕して、微粉碎・乾燥したものであり、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。

高炉セメントや高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現は、養生温度に比較的左右されやすいとされており、特に、低温時の強度発現に大きく影響する。そのため、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、調合強度を定めるにあたって予想平均気温によるコンクリートの強度補正値を定めているが、その強度補正値が定められて以降、20 年以

上が経過し、最近のデータを取り入れて見直しを行う必要性が出てきた。そこで、各種温度条件ならびに水中、封かん養生の養生条件による長期強度発現性を明らかにするため、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の各種養生条件下における強度発現特性についての基礎的な実験を行い、初期の養生条件が長期材齢の強度発現に及ぼす影響について検討した。また、強度補正が必要な平均気温の範囲を求め、現行の範囲との比較を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料とその品質を示す。普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種は

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との複合体
	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 博士（工学）（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 グループリーダー（正会員）

*4 新日鐵高炉セメント（株） 技術開発センター 博士（工学）（正会員）

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、3つのシリーズを設定し、宇都宮大学工学部キャンパス内において、7, 8, 9, 10, 12, 2月の夏期から冬期にかけて6回打込みを行い、現場養生を行ったシリーズ1と、一定温度養生条件下での強度発現を対象としたシリーズ2、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3の3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、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末をセメントに対する置換率を変えて混和し、水結合材比は50%一定とし、現場水中および現場封かん養生を行った。シリーズ2は高炉セメントB種を用い、水セメント比を40,50,60%とし、水中および封かん養生を行った。シリーズ3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和したものおよび普通ポルトランドセメントの3種類を水セメント比(水結合材比)50%として途中の材齢で養生温度を5℃から20℃、20℃から5℃に変化される図-1に示す8種類の温度パターンで封かん養生を行った。高炉スラグ微粉末の置換率は高炉セメントA,B,C種を想定してそれぞれ27.0, 42.0, 67%とした。シリーズ1の各強度試験材齢までの平均養生温度を表-3に、計画調合を表-4に示す。シリーズ1は、コンクリートを型枠に打ち込んだ後、材齢2日まで室内で保管し、その後屋外の直射日光の当たらない建物の北側で現場水中および現場封かん養生を行った。シリーズ2,3は、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

表-2 要因と水準

要因		水準
シリーズ1	セメント種類	OPC+BS
	水結合材比(%)	50
	スラグ置換率(%)	0, 27, 42, 67
	材齢(日)	3, 7, 14, 28, 42, 56, 91, 147,
シリーズ2	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, 7, 28, 91, 182, 365
シリーズ3	セメント種類	BB, OPC+BS, OPC
	水セメント比(%)	50
	スラグ置換率(%)	42
共通	養生温度(℃)	5→20, 20→5
	材齢	3, 7, 14, 21, 28, 91
	養生条件	水中, 封かん
	目標スランプ(cm)	18±2.5
	目標空気量(%)	4.5±1.5
	供試体寸法(cm)	φ10×20

表-3 試験材齢までの平均気温(℃) (シリーズ1)

試験材齢(日)	7月	8月	9月	10月	12月	2月
3	26.6	24.3	20.9	16.9	-	-
7	32.2	26.7	24.1	18.0	6.5	1.4
14	32.7	-	21.6	17.8	5.5	3.4
28	32.5	26.2	19.7	15.6	4.0	4.7
42	31.2	25.9	18.2	14.3	-	-
56	-	-	-	-	2.8	6.4
91	27.3	20.8	13.9	8.6	3.6	10.0
147	-	-	-	-	-	15.5
182	-	-	-	8.1	10.2	-

して、約30分以内に各温度条件下に置いた。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。圧縮強度試験は、所定の材齢

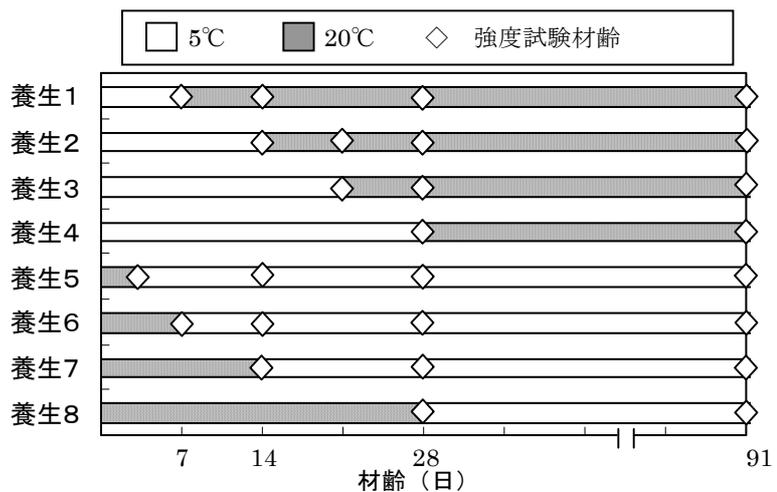


図-1 養生温度の履歴 (シリーズ3)

表-4 コンクリートの計画調合

シリーズ	W/C (W/B) (%)	結合材種類	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積(l/m ³)				単位量(kg/m ³)					
					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	10, 12, 2月	50	OPC	43.9	176	112	0	293	374	352	0	758	995	
			OPC+BS	43.7	176	82	33	290	374	257	95	751	995	
		7, 8, 9月	50	OPC	42.3	173	110	0	285	388	346	0	734	1030
				OPC+BS	42.1	173	80	32	282	388	253	93	728	1030
	2	50	BB	42.2	176	116	-	280	383	352	-	725	1015	
				60	44.6	170	94	-	308	383	283	-	799	1015
				40	38.8	180	149	-	243	383	450	-	630	1015
	3	50	BB	42.2	176	116	-	280	383	352	-	725	1015	
OPC+BS				42.2	176	65	51	280	383	204	148	725	1015	
OPC				42.6	176	112	-	284	383	352	-	736	1015	

においてJIS A 1108に準じて行った。

3. 実験結果と考察

3.1 強度発現性状

積算温度と強度発現の比の関係性をスラグ置換率ごとに図-2, 図-3に示す。積算温度は次式で表され、コンクリートの圧縮強度は積算温度に対して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。

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

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)

なお、打込み時期で調合が異なるため、各打込み時期の標準水中養生28日強度または20°C封かん養生28日強度で各々除して強度発現比として表した。図-2, 3より、スラグ置換率が大きくな

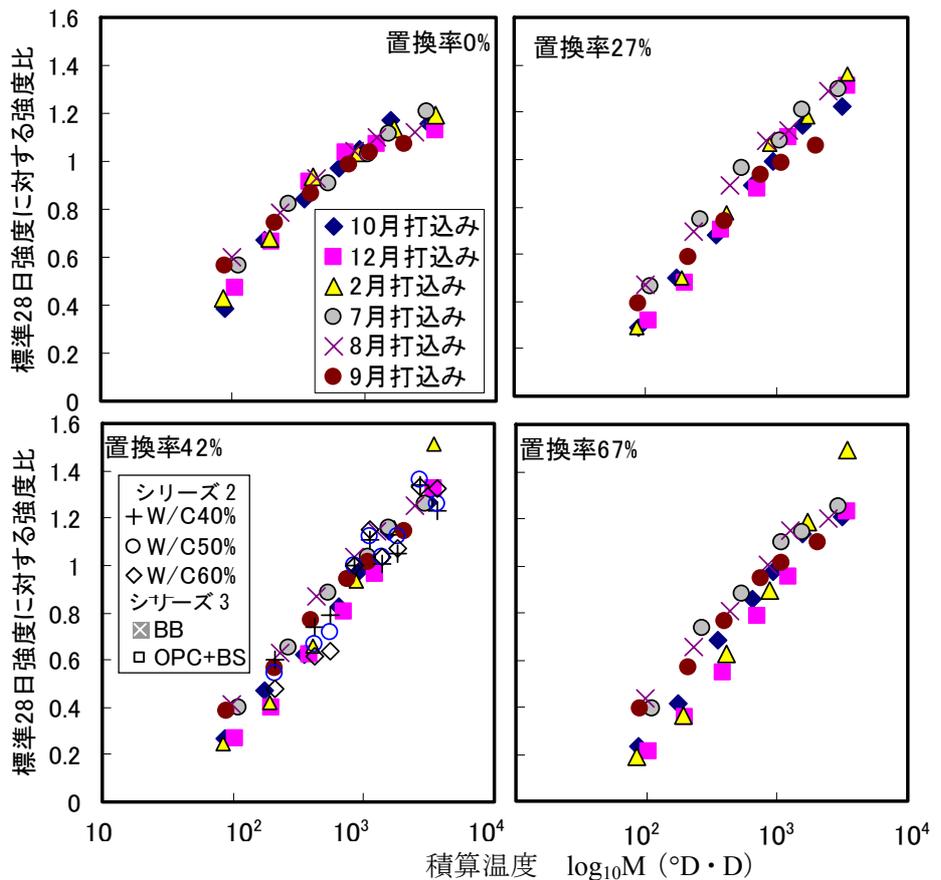


図-2 積算温度と標準養生材齢28日強度に対する強度比の関係 (水中養生)

ると、初期材齢における強度比のばらつきが大きくなる傾向がみられ、前報²⁾と同様の結果が得られた。置換率、打込み時期ごとに積算温度と

ると、初期材齢における強度比のばらつきが大きくなる傾向がみられ、前報²⁾と同様の結果が得られた。置換率、打込み時期ごとに積算温度と

強度発現比の関係を次式で近似し、その傾きを表-5に示す。

$$\frac{F}{F_{28}} = a \cdot \log_{10} M + b \quad (2)$$

表-5より、平均温度が最も低い時期である2月に打ち込んだコンクリートの傾きが最も高くなる傾向があり、夏期打ち込みの場合で強度発現直線の傾きが小さくなる傾向があった。係数aとスラグ置換率の関係を図-4に示す。図-4より、水中養生では、スラグ置換率が高く、かつ、打ち込み時期が低温なほど係数aが大きくなった。

封かん養生でも同様の結果が得られたが、現場水中養生ほど強度の伸びがなく、養生水の供給の影響もあると考えられる。また、9月に打ち込んだ場合は、スラグ置換率67%で係数aが若

干小さくなる傾向があった。9月に打ち込むと、長期材齢で低温期になるが、スラグ置換率が大いとき、長期強度発現も、初期の養生温度だけでなく、ある程度材齢が経過した後の養生温度

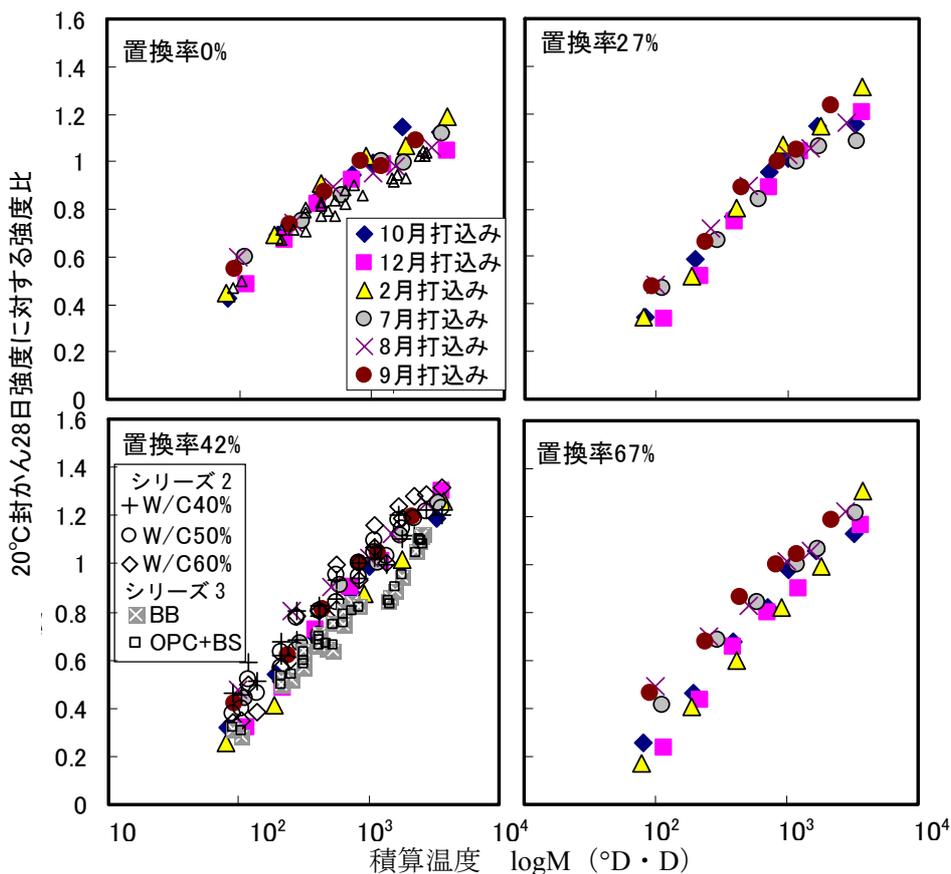


図-3 積算温度と20°C封かん養生材齢28日強度に対する強度比の関係（封かん養生）

表-5 式(2)の係数a一覧

置換率	置換率0%							置換率27%					
	1							1					
シリーズ													
打ち込み時期/水セメント比	10月	12月	2月	7月	8月	9月	W/C50%	10月	12月	2月	7月	8月	9月
水中養生	0.51	0.44	0.48	0.43	0.39	0.39	-	0.64	0.68	0.69	0.59	0.59	0.51
封かん養生	0.45	0.37	0.43	0.36	0.32	0.37	0.34	0.54	0.59	0.60	0.50	0.47	0.54
置換率	置換率42%												
	1						2			3			
シリーズ													
打ち込み時期/水セメント比	10月	12月	2月	7月	8月	9月	W/C40%	W/C50%	W/C60%	BB	OPC+BS		
水中養生	0.67	0.70	0.78	0.62	0.62	0.58	0.57	0.68	0.75	-	-		
封かん養生	0.57	0.66	0.60	0.54	0.51	0.55	0.49	0.57	0.66	0.52	0.51		
置換率	置換率67%												
	1												
シリーズ													
打ち込み時期/水セメント比	10月	12月	2月	7月	8月	9月							
水中養生	0.66	0.69	0.82	0.60	0.58	0.55							
封かん養生	0.58	0.61	0.66	0.56	0.50	0.47							

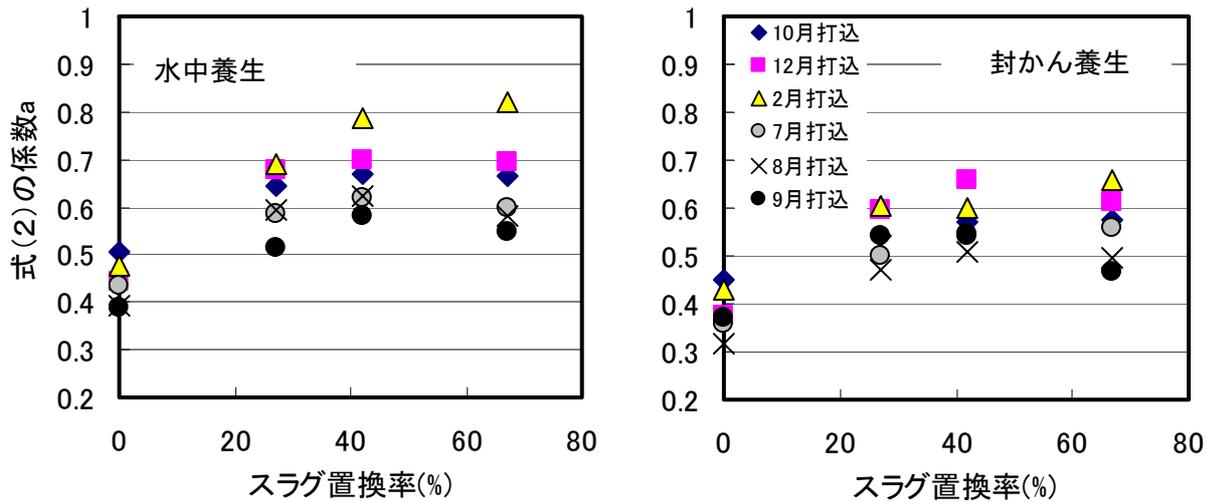


図-4 スラグ置換率と強度発現の関係

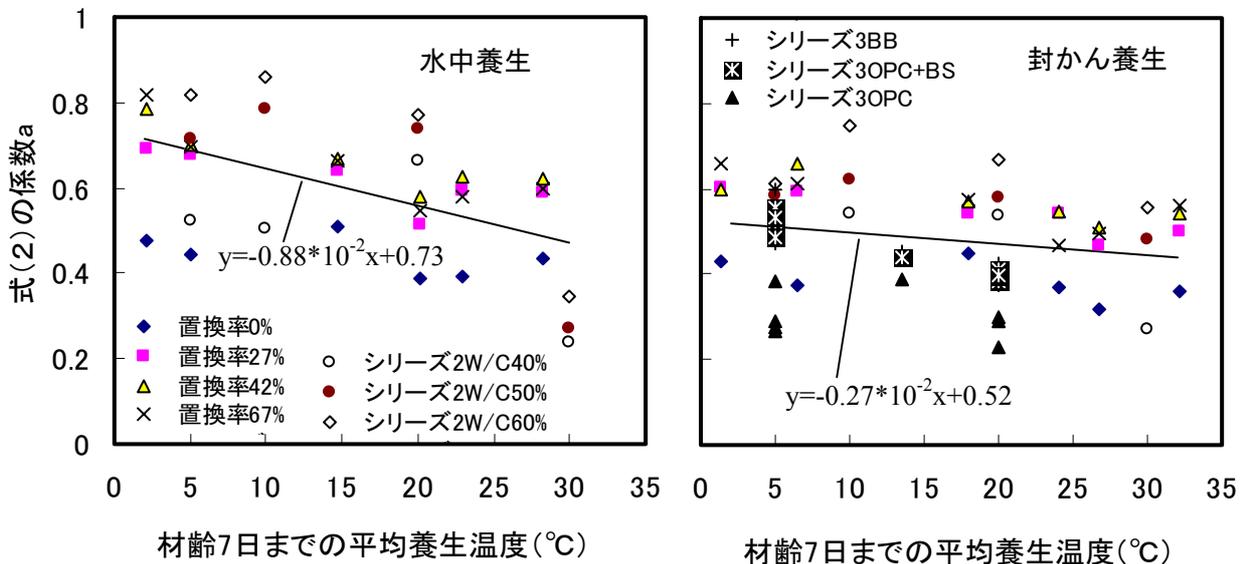


図-5 材齢7日までの平均養生温度と傾きの関係

にも影響を受けている可能性がある。

次に、材齢7日までの平均養生温度と強度発現比の直線の傾き（(2)式の係数a）との関係を図-5に示す。図中の直線は回帰直線である。図-5より、水中養生の場合は、材齢7日までの平均養生温度が低いと係数aが大きい傾向が封かん養生に比べて顕著に表れた。水中養生で養生水が十分にある場合には、低温時でもその後の強度発現の伸びが大きくなるが、封かん養生の場合は、低温時で若干係数aが大きくなるが、初期強度に対する長期強度の伸びはそれほど期待できないといえる。

3.2 現行の強度補正值との関係

前報²⁾では、シリーズ2,3のデータを用いてJASS5における強度補正が必要な平均気温の範囲を提案した。今回、シリーズ1のデータと併せて再度検討を行った。

平均気温と、各種温度水中・封かん養生と標準・20℃封かん養生の28日強度の差を図-6に示す。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。図中の太線は現行JASS5の補正值である。

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）」³⁾方式による平均気温の範囲を図-7に示す。

JASS5方式では、標準水中養生との差をとるため、強度発現により多くの水分が必要な高炉スラグでは、標準水中28日強度と現場水中養生の強度差が大きくなり、平均気温の範囲が高めになりやすいと考えられる。現場水中養生は条件の良い養生であるため、実際の構造体コンクリート強度を管理用供試体で評価する場合には、過大な割り増しをする可能性が大きくなると考えられる。JASS5N方式では、前報と同様に高炉セメントB種および高炉スラグ微粉末の置換率がそれと同じ程度の場合には、現行フライアッシュB種とほぼ同等の値が得られた。

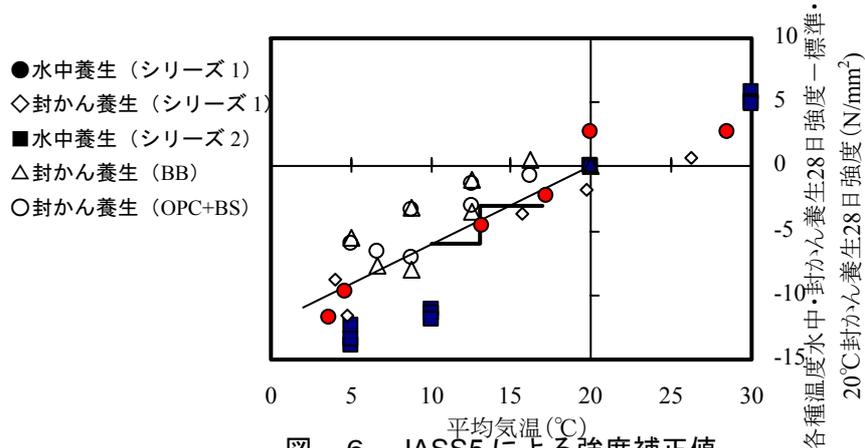


図-6 JASS5による強度補正值

調査強度を定める材齢28日、構造体管理材齢28日の場合

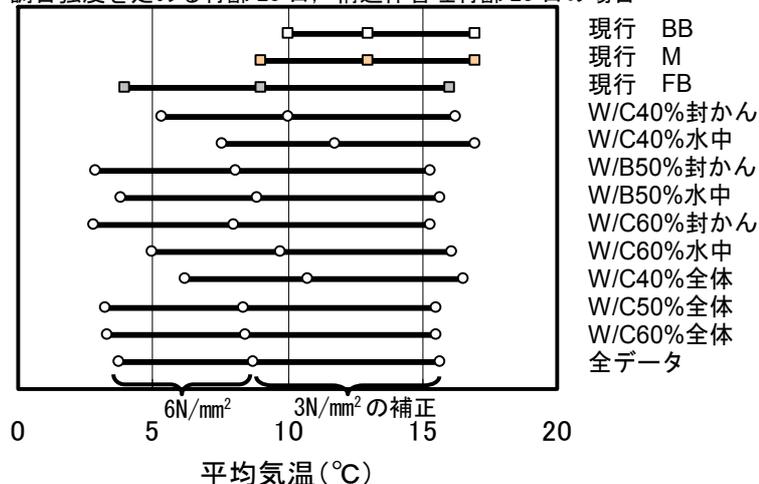


図-7 JASS5Nによる強度補正值

4 まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) スラグ置換率が高いほど初期強度発現に対する長期強度発現率は高いが、長期材齢において低温となる場合にはその強度発現が緩慢になる。
- (2) 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、水中養生と封かん養生を比較すると、水中養生の方が初期材齢に低温であった場合の影響を受けやすい。また、標準養生28日強度に対する初期強度発現比は小さくなる。
- (3) JASS5およびJASS5N方式で強度補正の必要な平均気温の範囲を求め、JASS5N方式では、高炉セメントB種および高炉セメントB種相当の高炉スラグ微粉末を使用した場合は、フライアッシュB種と同程度であることを提案した。

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) 佐藤幸恵ほか：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，日本コンクリート工学協会年次論文集，Vol.26, No.1, pp.147-152, 2004.7
- 3) 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

謝辞

本研究は、鐵鋼スラグ協会の委託によりおこなったものです。また、本研究を行うにあたり、新沼大史君、広瀬健二君（宇都宮大学修論生）の協力を得ました。ここに記して関係各位に謝意を表します。