論文 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの暑中期における構造体中での力学特性に関する実験的研究

佐藤 幸惠*1・閑田 徹志*2・小島 正朗*3・檀 康弘*4

要旨: 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートを用いて模擬部材と養生方法の異なる供試体を作製し、暑中期における強度発現特性についての部材実験を行った。模擬部材から採取したコアおよび簡易断熱養生供試体の強度試験結果と最高温度の関係から、スラグ置換率ごとに高温履歴から受ける強度発現への影響が異なることを明らかにした。これらの差が生じる要因に関して、コンクリートおよび粗骨材の見かけの線膨張係数に着目して検討を行った。その結果、コンクリート部材中の見かけの線膨張係数と使用した骨材の線膨張係数の差と、構造体における強度発現比率との間に相関性があることを見いだした。

キーワード: 高炉スラグ微粉末,強度発現性,構造体コンクリート強度,温度履歴,線膨張係数,暑中期

1. はじめに

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、副産物 利用の観点から環境負荷低減に有効であり、今後の利用 促進が期待されている。しかし、JIS 規格において規定 されている高炉セメントは B 種の利用が主体であり、A 種やC種といったスラグ分量の異なるセメントはほとん ど利用されていない。高炉セメントを使用したコンクリ ートはスラグ分量により特性が異なることが知られてい る。そのうち, A種はスラグ分量が少ないため, 普通ポ ルトランドセメントと同等の取り扱いが可能であると考 えられ, スラグ分量の多い C 種は地下躯体やマスコンク リートなどへの利用が考えられている。しかし、いずれ の場合も, 構造体を想定した場合に必要な基本特性であ る部材内部の温度履歴や収縮挙動、強度発現特性につい ては実験実績が乏しく, 構造体強度補正値などの建築用 構造部材に利用するために必要な規定値が設定されてい ないため、信頼できる資料が不足した状況にある。

そこで、本研究では、高炉セメントの利用拡大を目的 として、建築用構造部材への適用を想定した模擬部材お よび各種養生条件を設定した供試体を作製し、構造体コ ンクリートの力学的特性に及ぼす諸要因について検討を 行った。

2. 実験概要

2.1 要因と水準

本実験の要因と水準を表-1に、使用したコンクリートの調合を表-2に示す。本実験で使用した結合材は、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(石こう添加有)を JIS R 5211に規定する高炉セメント A~C 種に相当するスラグ分量をスラグ置換率として設定し、A 種相

当は 20%, B 種相当は 45%, C 種相当は 65%とした。スラグ置換率 0, 20, 45%の 3 水準については水結合材比を 55%のみとし、C 種相当としたスラグ置換率 65%については水結合材比を 55, 48, 38%とし、合計 6 種類のコンクリートを作製した。また、目標スランプは、C 種相当はマスコンクリートへの適用を想定して 15cm とし、それ以外の調合では 18cm とした。なお、化学混和剤は全調合で AE 減水剤高機能タイプ遅延形 I 種を使用した。使用材料の品質を表-3 に示す。なお、本実験は 2014 年 8 月 22 日に東京都内において打込みを行った。

2.2 供試体概要および実験項目

実験項目は、フレッシュ試験、圧縮強度試験、ヤング 係数試験と、模擬部材および簡易断熱養生供試体におけ る温度履歴、収縮計測、使用した骨材の線膨張係数試験

表-1 実験の要因と水準

	水準						
	標準水中養生(現場採取)W1						
	標準水中養生(工場採取)W2						
養生方法	現場封かん養生S						
(脱型材齢	簡易断熱養生						
(目)) /記号	壁模擬試験体(7)						
	(水結合材比 55%のみ)						
	柱模擬試験体 (7)						
水結合材比	55						
(%)	38*,48*(*スラグ置換率 65%のみ),						
スラグ置換率	0.20.45.65						
(%)	0,20,45,65						

^{*1} 東京都市大学 工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

^{*2} 鹿島建設(株)技術研究所 建築生産 Gr. グループ長 Ph.D (正会員)

^{*3 (}株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 修士(工学) (正会員)

^{*4} 日鉄住金高炉セメント株式会社 技術開発センター センター長 博士(工学) (正会員)

表-2 使用したコンクリートの調合

	スラグ	水結合			単位量	(kg/m^3)	混和剤		目標スラ	目標空気		
記号	置換率	材比	W	BS	С	S1	63	G	AE 減水剤	AE 剤	ンプ(cm)	量(%)
	(%)	(%)	W	ВЗ	Ü	51	S2	32 G	(×%)	(A)		
N55	0	55	184	-	335	476	325	972	1.3	6A	18.0	4.5
BA55	20	55	180	65	262	494	335	956	1.3	6A	18.0	4.5
BB55	45	55	175	143	175	502	340	956	1.3	7A	18.0	4.5
BC55	65	55	167	198	106	504	343	980	1.3	6A	15.0	4.5
BC48	65	48	171	231	125	471	319	983	1.3	6A	15.0	4.5
BC38	65	38	182	311	168	380	261	996	1.3	6A	15.0	4.5

表-3 使用材料の品質

材料	記号	物 性
普通ポルトランドセメント	С	密度 3.15g/cm³,比表面積 3340cm²/g
高炉スラグ微粉末	BS	密度 2.89g/cm³,比表面積 4420cm²/g,SO ₃ 2.0%,塩基度 1.90%
富津産山砂	S1	表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 2.01%, F.M.2.13
鳥形山産石灰砕砂	S2	表乾密度 2.66g/cm³, 吸水率 0.79%, F.M.3.46
鳥形山産石灰砕石	G	表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 0.35%, F.M.6.66
AE 減水剤高機能タイプ(遅延形)	AD1	変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体
AE 剤	AD2	ポリオキシエチレン系非イオン及び特殊アニオン活性剤

である。圧縮試験およびヤング係数試験の実施材齢を表 -4に示す。本実験で作製した供試体は、柱部材(柱コア)および壁部材(壁コア),簡易断熱養生、標準水中養生、現場封かん養生とした。柱部材は、上下を断熱材(発泡スチロール)で覆った $W1.00m \times D1.00m \times H1.00m$ の角柱とし、壁部材は $W0.95m \times D0.20m \times H0.90m$ とした。それ以外の供試体は $\phi100 \times 200mm$ の円柱供試体とした。

図-1 に、模擬部材の形状および熱電対、埋込みひずみ計 (T 社製 KM-100BT) の設置位置を示す。模擬部材については、N55 と BC48 の 2 調合において埋込みひずみ計を無応力容器に設置して部材内部に設置した。簡易断熱養生供試体の概要を写真-1 に示す。写真-1 に示すように、発泡スチロール製の容器に供試体を設置し周囲の隙間を発泡スチロールビーズで充填した。中心部に設置した供試体には、型枠面との摩擦を除去するためにテフロンシートを敷設し埋込みひずみ計を埋設した。

コンクリートは東京都内のレディーミクストコンク リート工場で製造し、打込み場所へは約1時間の運搬時間を要した。簡易断熱養生供試体については、製造した レディーミクストコンクリート工場で採取し、養生に供 したものであり、標準水中養生供試体は製造工場および 荷卸し地点の両方で採取した(工場採取、現場採取)。

表-4 圧縮・ヤング係数試験実施材齢

調合	供試体の	圧縮・ヤング係数試験実施材齢(日)									
即用口	養生方法	1	3	5	7	10	14	28	42	56	91
	柱コア							0			0
N55 BA55	壁コア(BC48, BC38は除く)							0			0
BB55	簡易断熱							0		0	0
BC55 BC48	標準水中(現 場採取)				0			0	0	0	0
BC38	標準水中(工 場採取)							0			0
N55 BA55	現場封かん	•	0	0	0	0		0			0
BB55 BC55	現場封かん		0	0	0	0	0	0			0
BC48 BC38	現場封かん		0	0	0	0		0			0

※●は圧縮強度のみ

熱電対による温度履歴および埋込みひずみ計による 温度・ひずみの計測は打込み終了直後から実施した。部 材のせき板の取り外しは、柱、壁ともに材齢7日で行っ た。コア供試体は、所定の材齢の2日前に採取して成型 し、試験までは湿潤養生とした。

骨材の線膨張係数試験は、田中らの方法¹⁾を参考に、 実験で使用した粗骨材を絶乾状態にして、表面を研磨し、 ひずみゲージを貼り付けた後、乾燥炉で80℃までの昇温 過程と降温過程から温度とひずみの関係を求めた。

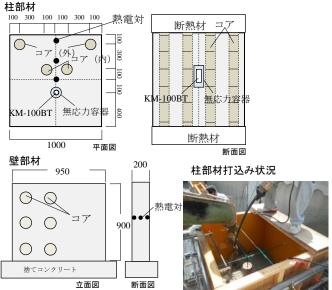


図-1 模擬部材の概要

3. 実験結果

3.1 フレッシュ試験および温度履歴測定結果

表-5 に、フレッシュ試験の結果を示す。打込み目(2014年8月22日)は最高気温34.6℃、最低気温27.6℃(気象庁発表による)の真夏日であり、荷卸し時のコンクリート温度はいずれも33~35℃となった。図-2にコンクリートの温度履歴測定結果の一例を示す。また、表-6 に各調合における温度計測結果の概要を示す。材齢28日までの平均養生温度も併せて表中に示す。断熱材の効果により簡易断熱養生の降温過程が緩やかであったため、部材温度の平均値である平均養生温度は簡易断熱養生のほうが高くなった。なお、模擬部材を設置した場所の平均気温は24.3℃となった。最高温度は同一水結合材比においてスラグ置換率が高くなるほど低くなった。また、簡易断熱養生の最高温度との差は6~11℃となった。

3.2 強度発現性状とヤング係数

図-3 に標準水中養生(工場および現場採取),現場 封かん養生,コア供試体(柱平均,壁平均),簡易断 熱養生の強度発現の経時変化を示す。

N55 および BA55 では、現場封かん養生において材齢 1 日で 16.2N/mm² および 13.9N/mm² の強度発現があり、それ以外の調合においても材齢 3 日で 20N/mm² 以上の強度発現となり、日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009(以下、JASS 5)²)に規定する湿潤養生期間の打ち切り判定基準となる圧縮強度(短期及び標準で 10N/mm²、長期および超長期 15N/mm²)には材齢 3 日以内に達すると考えられる。

 埋込み型ひずみ計の設置状況

 デフロンシート

 供試体設置状況

 一発泡ビーズ

 断熱材 (発泡スチロール)

写真-1 簡易断熱養生の概要

表-5 フレッシュ試験結果

	á	東上がり時	荷卸し時			
調合	スランプ	空気量	温度	スランプ	空気量	温度
	(cm)	(%)	(°C)	(cm)	(%)	(℃)
N55	21.0	4.4	33	18.5	4.7	35
BA55	21.5	4.6	33	18.5	5.0	33
BB55	21.5	5.5	33	18.0	4.6	33
BC55	21.0	5.3	33	13.0	5.0	33
BC48	22.5	5.1	32	16.0	4.0	33
BC38	23.0	5.3	32	17.5	4.8	33

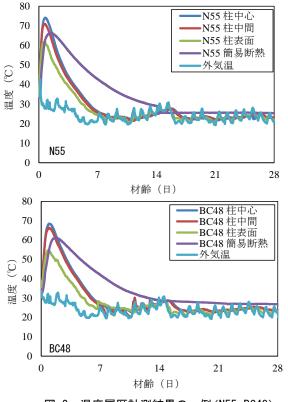


図-2 温度履歴計測結果の一例(N55, BC48)

また、図-3より、壁コアは現場封かん養生と近い強度 発現を示した。柱コアは最高温度の高いN55およびBA55 で現場封かん養生との差が大きくなり、BB55,BC55では 差が小さい傾向になった。

図-4 に柱コアおよび簡易断熱養生供試体のヤング係数と圧縮強度の関係を示す。図より、強度が高いとヤング係数も高くなり、また、結合材種類による違いは明確には現れなかった。供試体種別では、簡易断熱養生のほうがヤング係数が高い傾向がみられた。

3.3 高温履歴条件下における収縮挙動

図-5 に打込み時を起点とした全ひずみの経時変化を示す。図-5 に示す柱部材と簡易断熱養生の全ひずみはN55 ではほぼ同じ値を示したが、BC48 では柱部材の降温過程以降の全ひずみに差が生じた。また、N55 とBA55 は類似の傾向を示した。

3.4 粗骨材の線膨張係数

図-6 に、骨材の温度履歴とひずみゲージによるひずみ 計測結果の関係を示す。昇温降温過程において、温度と ひずみの関係はほぼ直線で表され、その傾きは 8.61 とな り、これを粗骨材の線膨張係数として用いることとした。

4. 考察

4.1 構造体強度発現特性

図-7 に現場封かん養生に対する構造体コンクリート 強度(ここではコア強度と簡易断熱養生強度)の同一材 齢における強度比を算出し、最高温度との関係を比較し たものを示す。標準水中養生ではなく現場封かん養生供 試体との比としたのは、後述する見かけの線膨張係数と の比較において、湿潤条件のなるべく近いものとし、線 膨張係数に及ぼす相対湿度の影響 ⁴⁾を極力排除するためである。図-7 より、材齢 28 日および 91 日のいずれにおいても、最高温度が高い方が現場封かん養生に対する強度比は低下する傾向にあった。N55 と BA55 は強度比が小さい傾向にあった。BB55,BC48 では強度比はおおむね

表-6 温度計測結果の概要

調合 部材箇所 最高温 到達時 温度上昇 で \mathcal{O} 生 \mathcal{O} またい \mathcal{O} も \mathcal{O} またい	28日ま)平均養 E温度 (℃)
	/
柱中心 74.1 18.39 39.1	
柱中間 70.9 16.39 35.9	31.3
N55 柱表面 61.8 15.39 26.8	
壁中心 57.7 9.39 22.7	26.4
簡易断熱 66.4 22.87 33.4	34.8
柱中心 71.9 20.13 38.9	
柱中間 69.1 18.88 36.1	31.7
BA55 柱表面 59.3 15.88 26.3	
壁中心 53.9 9.88 20.9	26.4
簡易断熱 51.5 24.91 18.5	35.0
柱中心 68.6 21.59 35.6	
柱中間 65.8 24.09 32.8	31.7
BB55 柱表面 56.0 21.59 23	
壁中心 49.4 8.59 16.4	26.4
簡易断熱 62.1 30.63 29.1	35.1
柱中心 64.7 24.49 31.7	
柱中間 61.6 21.74 28.6	31.1
BC55 柱表面 54.6 21.24 21.6	
壁中心 47.1 12.74 14.1	26.5
簡易断熱 57.7 27.28 24.7	33.6
柱中心 68.4 21.89 35.4	
BC48 柱中間 66.4 21.89 33.4	31.8
柱表面 54.7 18.89 21.7	
簡易断熱 61.1 26.34 29.1	34.2
柱中心 77.7 19.99 44.7	
PC28 柱中間 74.7 18.49 41.7	33.2
BC38 柱表面 65.2 17.99 32.2	
簡易断熱 68.6 22.44 36.6	35.3

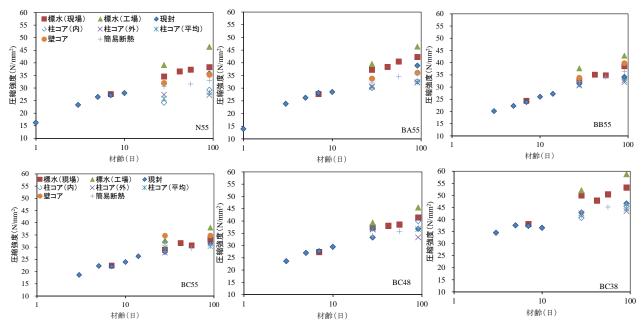


図-3 材齢と圧縮強度の関係

1 以上の値となり、温度履歴の影響は小さい結果となった。BC38 については N55 や BA55 ほどではないが、若干強度比が小さくなった。今回の実験実施日は真夏日であり、早強性の高い結合材ほど温度の影響を大きく受け強度増進が小さくなったものと考えられる。高炉セメントの特性として強度発現への温度依存性が知られているが、今回の暑中環境下では、最高温度の低減に対してはスラグ置換率が高いほど効果があり、結果として強度発現に有利になったと考えられる。ただし、冬期などの低温時にはこれらの効果がマイナスに作用する可能性が高いため、各種の実施工条件下での特性を把握する必要がある。

4.2 見かけの線膨張係数と強度発現性の関係

図-2 に示した温度履歴と、図-5 に示した全ひずみとの関係を図-8 に示す。図-8 から、見かけの線膨張係数を算出した。なお、ここでの線膨張係数は、全ひずみに温度ひずみと自己収縮ひずみを含んでいるため、見かけの線膨張係数と称することとした 3。ここで用いた温度結果は、柱部材については部材の温度履歴が外気温と一致する材齢 7 日までとし、簡易断熱養生についても同様に材齢 14 日までの温度履歴を用い、最高温度以降の温度降下過程の傾きから線膨張係数を算定した。

表-7 に見かけの線膨張係数の結果を示す。簡易断熱養生では、スラグ置換率が大きくなるほど見かけの線膨張係数は大きくなる傾向を示した。また、N55 では柱部材と簡易断熱養生での結果はほぼ近い値が得られたが、BC48 では柱部材と簡易断熱で差が生じ、柱部材での見かけの線膨張係数はN55 と同程度となった。調合別ではN55 とBA55 ではほぼ同等となった。

4.3 強度発現性状と見かけの線膨張係数の関係

図-9 にコア供試体と簡易断熱供試体の強度の同一材齢における現場封かん養生の強度発現比を示す。また、図-6 で示した骨材の線膨張係数と,表-7 に示した各調合における見かけの線膨張係数との差を求め、図中にプロットした。その結果、骨材の線膨張係数との差が大きい

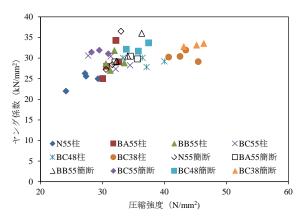


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

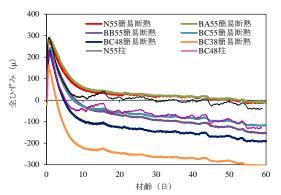


図-5 柱部材と簡易断熱養生における全ひずみの 経時変化

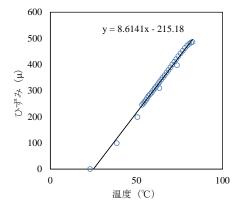
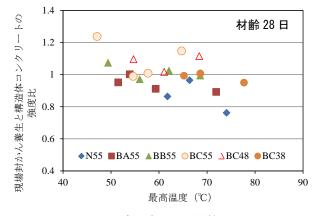


図-6 粗骨材における温度とひずみの関係



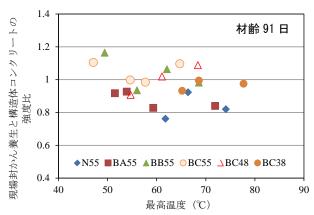
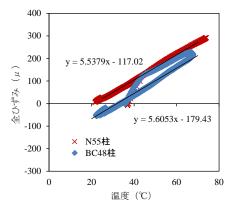


図-7 最高温度と同一材齢における現場封かん養生に対する構造体コンクリート強度との比の関係



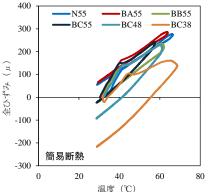


図-8 温度と全ひずみの関係

表-7 見かけの線膨張係数の 算定結果一覧

*温度下降時の傾き

線膨張係数* (μ /℃)						
N55柱	5.54					
N55簡易断熱	5.65					
BA55簡易断熱	6.19					
BB55簡易断熱	7.06					
BC55簡易断熱	8.32					
BC48柱	5.61					
BC48簡易断熱	8.65					
BC38簡易断熱	8.57					

ほど高温履歴を受けた場合の強度発現比が低下する傾向がみられた。これは、図-7の最高温度と強度発現比の傾向とも符合し、たとえば、BC38のようなコンクリートの見かけの線膨張係数が大きく、より高温履歴を受ける場合でも強度発現比の低下が小さいのは、スラグ置換率の効果に加え、骨材の線膨張係数と近い変形特性を有するためであると考えられる。

高温履歴が生じた場合、モルタルと骨材の界面では、線膨張係数の差から骨材による拘束が生じることとなり、それにより骨材周囲の界面には微細なクラックなどの損傷が生じるため強度発現比率の低下が生じた可能性が高いと考えられる。よってコンクリート内部でのモルタルー骨材の相互の変形特性が高温履歴条件下での強度発現性に及ぼす影響について詳細に検討する必要がある。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)暑中期施工条件では、高炉セメントA種相当(スラグ置換率20%)の場合、普通ポルトランドセメント単体と強度発現性状および部材内部の収縮挙動はほぼ同等の特性を示した。
- (2)暑中条件下における温度履歴と強度発現は、同一 水結合材比ではスラグ置換率の高いものの方が最高温度 を低減でき、長期材齢における強度停滞を生じにくい。
- (3) 実験で求めた粗骨材の線膨張係数と、構造体コンクリートの見かけの線膨張係数との差が大きいほど、高温履歴を受けた際の強度発現比率は低下することから、骨材およびモルタルの界面における相互の変形特性が高温履歴を生じた場合の強度発現特性を左右している可能性を見いだした。

謝辞

本実験は、日本建築学会「高炉スラグ微粉末・高炉セメントを使用するコンクリート研究小委員会」の一環と

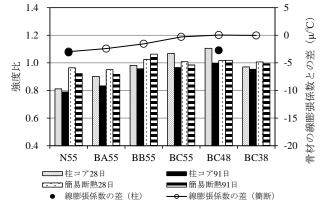


図-9 強度発現比と線膨張係数の差

して実施した。委員会関係諸氏および実験実施に際し多大な協力をいただいた鐵鋼スラグ協会に謝意を表する。 また,実験データのとりまとめは東京都市大学卒論生(当時)大川未希子さん,岡崎奈美さん,および佐藤研究室卒論生諸君の協力を得た。データの分析に関しては名古屋大学大学院環境学研究科 准教授 丸山一平先生にご指導をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1)田中博一, 橋田浩: 石灰石骨材を用いたコンクリート の乾燥収縮と骨材特性に関する研究, コンクリート工学 年次論文集, pp.553-558,Vol.31,No.1.2009
- 2)日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄 筋コンクリート工事 2009
- 3)閑田徹志,稲葉洋平,石関浩輔,小島正朗:高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討,コンクリート工学年次論文集,pp.1720-1725, Vol.36, No.1, 2014
- 4)寺本篤史, 山崎康太, 丸山一平, 鈴木雅博: 超高強度 コンクリートの自己収縮の温度依存性, コンクリート工 学年次論文集, pp.489-494, vol. 30, No.1, 2008