異なる養生温度条件下における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力の特性

臼井 達哉¹・宮原 茂禎²・丸屋 剛³・大友 健⁴

¹正会員 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: usitty00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: myhsgy00@pub.taisei.co.jp

³フェロー会員 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

E-mail: tsuyoshi.maruya@sakura.taisei.co.jp

⁴フェロー会員 大成建設(株) 土木本部 プロジェクト部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail: takeshi.ootomo@sakura.taisei.co.jp

水結合材比55%の高炉セメントコンクリートと普通ポルトランドセメントコンクリートに対して異なる養生温度条件下における自己収縮ひずみと鉄筋拘束による収縮応力を測定し、コンクリート温度がそれぞれの物性に与える影響について検討した。その結果、普通コンクリートは、コンクリート温度による自己収縮ひずみの変動が小さいのに対し、高炉セメントコンクリートでは、コンクリート温度による自己収縮のひずみ量、ひずみ速度の変動が大きく、普通コンクリートとは異なる傾向を示した。加えて、収縮応力試験結果をもとにヤング係数の補正係数を算出したところ、高炉セメントコンクリートは、20℃一定養生温度におけるヤング係数の補正係数よりも、40℃一定養生温度、マス養生温度履歴下の方が、大きな値となり、温度依存性があることが示唆された。

Key Words : blast furnace slag cement, autogeneous shrinkage, shrinkage stress, curing temperature

1. はじめに

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート(以下、「高炉セメントコンクリート」と略記)は、一般に、塩化物イオンの固定化能力に優れており、かつアルカリシリカ反応の抑制に有効であることから、コンクリート構造物の耐久性向上に大きく付与できる材料である。加えて、高炉セメントB種を用いたコンクリートのCO₂排出量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合の60%程度であり、環境負荷低減の観点から、積極的な利用が促進されてきた。しかし、近年、施工条件によって、普通ポルトランドセメントより発熱量や自己収縮ひずみが大きくなり、ひび割れが発生する場合があるという問題点が指摘されている¹⁾。これまでに著者らは、高炉セメントコンクリートでは、材齢初期に高温履歴を受けた際に、自己収縮ひずみが増進すること、自己収縮ひずみの差異が非常に大きいことについて報告してきている^{2), 3)}。

日本コンクリート工学協会マスコンクリートのひび割れ制御指針2008⁴⁾(以下、「JCI指針」と略記)では、高炉

セメントコンクリートの自己収縮ひずみを簡易断熱マスブロックにより評価する共通実験が行われ、経験最大温度をパラメータに加えた予測式⁵⁾が示されている。また、温度ひび割れ照査について3次元有限要素法を用いた温度解析、応力解析に基づいたコンクリートの引張応力度と引張強度の比であるひび割れ指数を用いることとしている。解析において、コンクリートのクリープの影響については、ヤング係数に低減係数としてヤング係数の補正係数を乗じた有効ヤング係数を用いることを標準としている。

本来、温度応力が作用した際のコンクリートのクリープは、コンクリートの収縮の影響を受けると考えられる。高炉セメントコンクリートでは、自己収縮ひずみの温度依存性が高いこと、コンクリート温度による自己収縮ひずみの差異が大きいことを考慮すると、養生温度や自己収縮ひずみの大小によって異なるクリープ特性を示し、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(以下、「普通コンクリート」と略記)とも異なる傾向を示すと考えられる。しかし、普通コンクリートのクリープに対

する養生温度の影響に関する検討は非常に少なく、さらに、高炉セメントコンクリートにおける養生温度の影響に関する検討は、ほとんどないのが現状である。

本研究では、水結合材比55%のコンクリートを対象とし、コンクリート温度がコンクリートの自己収縮ひずみおよび温度応力におけるクリープを考慮するためのヤング係数の補正係数に与える影響を把握することを目的に簡易断熱マスブロック試験と異なる養生温度条件下における各種試験を実施した。基礎試験として、銘柄の異なる4種類の高炉スラグ微粉末を用いた高炉セメントコンクリート、および普通コンクリートを使用し、簡易断熱マスブロック試験を実施し、簡易断熱環境下における温度履歴を受けたコンクリートの自己収縮ひずみを測定し、同一養生条件下における自己収縮ひずみの変動範囲の確認や自己収縮ひずみに与える高炉スラグ微粉末の影響因子について検討するとともに、異なる養生温度条件下における各種試験に使用する2種類の高炉スラグ微粉末を選定した。次に、選定した2種類の高炉スラグ微粉末を使用した高炉セメントコンクリートと普通コンクリートを使用し、異なる養生温度条件下における自己収縮ひずみと硬化物性および鉄筋拘束による収縮応力を測定した。コンクリート温度がコンクリートの自己収縮ひずみへ与える影響に関する検討に加え、拘束ひずみと鉄筋拘束試験による収縮応力をもとに有効ヤング係数およびクリー

プの影響を表すヤング係数の補正係数を算出し、コンクリート温度がそれらに与える影響について検討した。

2. 簡易断熱マスブロック試験

(1) 使用材料とコンクリートの配合

セメントは、普通ポルトランドセメント(OPC)を用いた。銘柄の異なる4種類の高炉スラグ微粉末(BFS)と普通ポルトランドセメントの物性と化学成分を表-1、表-2、粒度分布を図-1に示す。各銘柄の高炉スラグ微粉末は、ブレン比表面積、粒度分布、化学成分ともに異なるが

図-1 高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントの粒度分布

表-1 高炉スラグ微粉末の物性と化学成分

高炉スラグ微粉末 4000	密度 [g/cm ³]	ブレン 比表面積 [cm ² /g]	強熱減量	MgO	SO ₃	Cl ⁻	塩基度	石膏 の 添加
			[mass%]					
高炉A	2.88	4088	1.16	5.23	2.15	0.003	1.80	○
高炉B	2.92	4015	0.30	6.00	－	0.002	1.86	×
高炉C	2.92	3482	0.07	5.70	－	0.002	1.86	×
高炉D	2.90	4864	0.94	6.09	－	0.008	1.93	×
JIS A 6206 規格値	2.80以上	3000-5000	3.0以下	10.0以下	3.0以下	0.02以下	1.60以上	－

表-2 普通ポルトランドセメントの物性と化学成分

普通ポルトランド セメント	密度 [g/cm ³]	ブレン 比表面積 [cm ² /g]	強熱減量	MgO	SO ₃	Cl ⁻	全アルカリ量
			[mass%]				
	3.16	3320	1.92	1.27	2.10	0.018	0.52
JIS R 5210 規格値	-	2500以上	3.0以下	5.0以下	3.0以下	0.035以下	0.75以下

表-3 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	BFS 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	B		S	G	Ad
					OPC	BFS			
N	55.0	40.0	47.5	166	302	-	870	961	3.02
B(A)			47.5	164	179	119	869	961	2.98
B(B)			47.5	164	179	119	870	962	2.98
B(C)			47.5	164	179	119	870	962	2.98
B(D)			46.5	164	179	119	851	980	2.98

表-4 フレッシュ性状試験結果

配合	スランプ [cm]	空気量 [%]	コンクリート 温度 [°C]	単位 体積質量 [kg/m ³]
N	14.8	4.5	21.2	2305
B(A)	16.1	4.6	20.7	2295
B(B)	16.5	4.6	20.8	2296
B(C)	16.5	4.7	20.9	2296
B(D)	15.0	4.2	20.2	2304

JISA6206を満足する材料である。この中で、高炉A、高炉Bは、ほぼ同一のブレン比表面積であるが、高炉Aのほうが、粒子は細かい。高炉Cは、4銘柄の中で、最もブレン比表面積が小さく、粒子が粗いものである。高炉Dは、4銘柄の中で、最もブレン比表面積が大きいものである。

細骨材(S)は君津産山砂(表乾密度2.63g/cm³、吸水率1.69%、粗粒率、3.03)、粗骨材(G)は青梅産碎石(表乾密度2.65g/cm³、吸水率0.62%、粗粒率6.70)を使用した。

混和剤は、AE減水剤標準形(I種)(Ad)およびAE剤を用いた。コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメントのみを用いたN配合、各種高炉スラグ微粉末を内割で40%置換したB(A)~B(D)配合とし、水結合材比55%、スランプ15±2.5cm、空気量4.5±1.5%と設定し、配合を選定した(表-3)。表-4に簡易断熱マスブロック試験における各配合のフレッシュ性状試験結果を示す。

(2) 試験概要

周囲を厚さ200mmの発砲プラスチック保温材により断熱した450×450×450mmのマスブロック供試体(図-2)を作製し、コンクリートの中心部の温度と自由長さ変化を低弾性の測温付埋込み型ひずみ計(剛性：約40N/mm²)を用いて、材齢28日まで測定した⁹⁾。同一供試体においてコンクリートの表面部の温度を熱電対により測定し、中心部との温度差がないことを確認することにより、中心部で測定されたひずみには、コンクリートの温度差に起因する内部拘束が含まれていないことを確認した。測定終了後、マスブロック供試体からコアを採取し成形した供試体(φ100×200mm)を用いて、圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度を測定した。

マスブロック供試体を作製した同一の試料を用いて、凝結試験を20°C一定の恒温室内で実施するとともに、熱膨張係数測定用供試体(φ100×200mm)を作製した。

熱膨張係数の測定には、自己収縮がおおむね終了したと考えられる材齢28日以上経過した封緘養生を行った供試体を使用した。供試体を温度湿度制御槽に設置し、20~60°Cの温度上昇、温度降下を供試体中心部の温度と雰囲気温度が一致するように1°C/hrの温度勾配で2サイクル

図-2 簡易断熱マスブロック試験体

表-5 熱膨張係数の測定結果

配合名	N	B(A)	B(B)	B(C)	B(D)
	× 10 ⁻⁶ /°C				
温度上昇 1サイクル目	9.34	10.6	9.91	9.87	10.0
温度降下 1サイクル目	9.47	10.9	10.1	10.4	10.4
温度上昇 2サイクル目	9.21	9.86	9.41	9.61	9.60
温度降下 2サイクル目	9.50	11.4	10.2	11.0	11.0
平均値	9.38	10.68	9.89	10.21	10.26

図-3 コンクリート温度の経時変化

図-4 自己収縮ひずみの経時変化

与え、それぞれの温度上昇時、温度降下時のひずみを測定し、熱膨張係数を算出した(表-5)。材齢は、自己収縮ひずみ、鉄筋ひずみ、圧縮強度を評価する場合には、アレニウス式をもとにコンクリート温度20℃を基準反応速度とし、温度の影響を等価な材齢として評価する式(1)で算出される有効材齢⁴⁾を用いた。

$$t_e = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1)$$

ここに、 t_e ：有効材齢(日)、 Δt_i ：コンクリート温度が $T(^{\circ}\text{C})$ の期間(日)、 $T(\Delta t_i)$ ：期間 Δt_i のコンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)、 T_0 ：定数($=1^{\circ}\text{C}$)である。

(3) 試験結果

a) 自己収縮ひずみ

コンクリートの温度の経時変化と自己収縮ひずみの経時変化を図-3 および図-4 に示す。自己収縮ひずみは、全ひずみから熱膨張・熱収縮成分を差し引くことにより算出した。ひずみの起点は、既往の研究^{7, 8)}に基づき、極初期における温度-全ひずみ曲線の変曲点(図-5)とした。ひずみの起点時の有効材齢と凝結始発、終結の有効材齢を表-6 に示す。この中で、凝結始発、終結の有効材齢は、凝結試験を20℃一定の恒温槽にて実施したことから、試験試料の温度を20℃一定として算出した。

ひずみ起点時の有効材齢は、高炉スラグ微粉末の有無、種類にかかわらず、凝結終結時間と同程度かそれよりも長い結果となっており、既往の研究³⁾と同様の傾向を示した。

高炉スラグ微粉末の種類の違いが自己収縮ひずみに与える影響を検討する。測定結果から高炉セメントコンクリートB(A)～B(D)は、Nに比べ、自己収縮ひずみが大きいことがわかる。また、B(A)～B(D)配合において自己収縮ひずみ有効材齢40日時点で約 $100 - 160 \times 10^{-6}$ と明確な差異が確認された。既往の研究²⁾において、著者らは、骨材や環境が異なる条件における高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみについては、差異が大きいことを報告しているが、同一の水結合材比において、同一の骨材、養生であっても、自己収縮ひずみに差が生じることが確認された。

コンクリートが受けた温度履歴における最高温度である経験最高温度をパラメータとしたJCI予測式⁴⁾と本試験結果を比較すると、Nは、良好に一致していることが確認できる。高炉セメントコンクリートでは、経験最高温度の高いB(A)については、経験最高温度の低いB(C)やB(D)よりも自己収縮ひずみが大きくなっており、経験最高温度のパラメータは有効であると評価することができる。しかし、もう1つの経験最高温度の高いB(B)に関しては、経験最高温度の低いB(C)よりは、自己収

図-5 コンクリート温度と全ひずみの変化状態

表-6 凝結試験結果とひずみ起点材齢

配合	凝結 始発時間	凝結 終結時間	ひずみ 起点材齢
	有効材齢 [日]		
N	0.24	0.33	0.56
B(A)	0.27	0.38	0.59
B(B)	0.28	0.39	0.44
B(C)	0.29	0.41	0.41
B(D)	0.28	0.39	0.55

表-7 コア供試体の硬化物性

配合	材齢 [日]	圧縮強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [$\times 10^4$ N/mm ²]	割裂引張強度 [N/mm ²]
N	35	37.7	3.04	2.84
B(A)	35	43.3	3.32	2.81
B(B)	35	41.4	2.95	2.70
B(C)	35	42.7	2.99	2.70
B(D)	35	41.5	2.90	2.74

縮ひずみが大きい、B(C)と同等の経験最高温度であるB(D)よりは、有効材齢10日以降において自己収縮ひずみが小さく、必ずしも最高温度が高い方が自己収縮ひずみが大きいわけではないことがわかる。本実験の範囲内では、 SO_3 量や石膏の添加の有無よりも、図-1に示すように自己収縮ひずみが大きい高炉セメントコンクリートほど、相対粒子量40-60%における高炉スラグ微粉末の粒径が細かい結果となっており、粒径によって自己収

表-8 異なる練上り温度におけるフレッシュ性状試験結果

配合名	練上り目標温度 20℃				練上り目標温度 35℃			
	コンクリート温度	スランプ	空気量	単位容積質量	コンクリート温度	スランプ	空気量	単位容積質量
	[℃]	[cm]	[%]	[kg/m ³]	[℃]	[cm]	[%]	[kg/m ³]
N	21.4	16.4	4.5	2307	36.1	15.0	4.8	2309
B(A)	21.2	15.7	4.6	2302	35.7	16.0	4.5	2311
B(B)	21.3	17.5	4.7	2299	35.7	17.2	4.7	2307

表-9 試験ケース

試験名	養生温度条件			
	20℃	40℃	60℃	温度履歴
自己収縮試験	○	○	○	○
硬化物性試験 (圧縮強度, ヤング係数, 引張強度)	○	○	○	○
鉄筋拘束による 収縮応力試験	○	○	-	○

図-6 マス養生温度履歴における養生槽の設定温度

図-7 鉄筋拘束による収縮応力試験の供試体

縮ひずみの大小がを判別できる可能性があると考えられる。

b) 圧縮強度, ヤング係数, 割裂引張強度

硬化物性として, 圧縮強度, ヤング係数, 割裂引張強度の測定結果を表-7に示す。圧縮強度は, B(A)~B(D)配合がN配合に比べて大きな値となっているが, ヤング係数, 割裂引張強度に明確な差は, 見られなかった。また, B(A)~B(D)配合の自己収縮の差異が, 圧縮強度, 割裂引張強度, ヤング係数に影響していない結果であった。

3. 異なる養生温度条件下における自己収縮と硬化物性および鉄筋拘束による収縮応力

(1) 使用材料とコンクリートの配合

異なる養生温度条件下における各種試験では, 試験に使用していない高炉C, 高炉Dを除いて, 簡易断熱マスブロック試験と同一の材料を使用した。コンクリートの配合は, 自己収縮ひずみの大小がクリープ特性に与える影響を把握することを考慮し, 簡易断熱マスブロック試験において自己収縮ひずみが大きい結果であったB(A)と自己収縮ひずみが小さく, 発熱特性がB(A)と同程度であるB(B)および基準となる普通ポルトランドセメントのみを使用したNの3種類の配合を使用した。表-8にフレッシュ性状試験結果の一例を示す。練上り温度による影響が小さく, フレッシュ性状に差はなかった。なお, 練上り目標温度に関しては, 後述する試験ケースと養生方法に示す。

(2) 試験ケースと各種試験概要

a) 試験ケースと養生方法

試験ケースを表-9に示す。自己収縮試験および圧縮強度, ヤング係数, 割裂引張強度の硬化物性試験は, 20℃, 40℃, 60℃の一定養生温度と簡易断熱マスブロック試験におけるコンクリートの温度履歴(図-6, 以下マス養生温度履歴と記載)を与えた4ケースとした。鉄筋拘束による収縮応力試験は, 20℃, 40℃の一定養生温度とマス養生温度履歴を与えた3ケースの試験を実施した。養生温度20℃は, コンクリートの練上り目標温度を20℃とし, 20℃一定環境下にて養生した。養生温度40℃は, コンクリートの練上り温度を35℃とし, 40℃一定環境下にて養生した。養生温度60℃は, 既往の研究^{3), 9)}と同様に, コンクリートの練上り目標温度を35℃とし, 供試体作製後, 5時間後にコンクリート温度が60℃なるようにコンクリートの温度を上昇させた。その後, 60℃一定環境下にて養生を行った。マス養生温度履歴は, コンクリートの練上がり温度を20℃とし, 供試体作製後, マス養生温度履歴を与えた。20℃一定を除く試験ケースでは, 温度湿度制御槽を使用し, 温度の調整を行った。養生は, 打設直後に表面仕上げを行い, 上面をラップし, 型枠ごと供試体をビニール袋により封をした封緘養生とした。

b) 自己収縮試験

自己収縮ひずみ供試体の寸法は、100×100×400mmとし、各配合2体の供試体を作製した。型枠は、木製型枠とし、型枠表面に厚さ1mmのテフロンシートを貼付け、コンクリートとの縁切りを行った。

自己収縮ひずみは、供試体中央に設置した低弾性の測温付埋込み型ひずみ計(剛性：約40N/mm²)を用いて測定した¹⁰⁾。自己収縮ひずみの起点は、簡易断熱マスブロック試験時と同一の有効材齢(表-6)とし、熱膨張係数を用いて、温度によるひずみの補正を行った。各配合の自己収縮ひずみは、2体の供試体の平均値とした。

c) 圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度試験

軽量鋼製型枠を使用し、φ100×200mmの供試体を作製した。各試験において、JISA1107, JISA1149, JISA1113に準拠し、材齢1, 3, 7, 28日の圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度の測定を行った。各材齢ともに試験直前に型枠を脱型し、各試験を行った。

d) 鉄筋拘束による収縮応力試験

収縮応力試験の供試体の寸法は、100×100×800mmとし、各配合2体の供試体を作製した。この中でコンクリートと鉄筋の定着長およびリブと節を取り除き付着を除去した試験区間は、JCIの自己収縮研究委員会報告¹¹⁾および既往の研究成果^{12), 13)}をもとに、定着長を250mm, 付着除去区間を300mmとした(図-7)。

100×100mmの断面中央に異形鉄筋D32を埋設し、試験区間(付着除去区間)には、厚さ1mmのテフロンシートを2重に巻きつけコンクリートとの付着を除去した。試験区間における鉄筋中央部の裏表2か所にひずみゲージを貼り付け、測定し裏表2か所のひずみゲージの平均値を鉄筋のひずみとした。なお、試験区間の鉄筋の直径は、28 mm, 鉄筋の引張試験結果から鉄筋のヤング係数は、187 N/mm²であった。鉄筋のひずみの起点は、簡易断熱マスブロック試験時と同一の有効材齢(表-6)とした。

コンクリートの収縮応力は、式(2)¹¹⁾により算出した。

$$\sigma_c = (E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (2)$$

ここに、 σ_c ：コンクリートの収縮応力(N/mm²)、 E_s ：鉄筋のヤング係数(N/mm²)、 ε_s ：鉄筋のひずみ、 A_s ：鉄筋部の中央部断面積(mm²)、コンクリートの純断面積(mm²)である。

(3) 試験結果

a) 自己収縮特性

簡易断熱マスブロック試験時の自己収縮ひずみとマス養生温度履歴の自己収縮ひずみを図-8に示す。測定結果から、マス養生温度履歴の自己収縮ひずみと簡易断熱マスブロック試験体による測定結果の自己収縮ひずみの差は、有効材齢10日時点で、各配合とも 20×10^{-6} 以内、有

図-8 簡易断熱マスブロック試験時の自己収縮とマス養生温度履歴下の自己収縮ひずみの比較

図-9 Nの各養生温度における自己収縮ひずみ

図-10 B(A)の各養生温度における自己収縮ひずみ

図-11 B(B)の各養生温度における自己収縮ひずみ

効材齢45日時点では、各配合とも 10×10^{-6} 以内と差は非常に小さく、また、自己収縮ひずみの大小関係も自己収縮ひずみの大きい方から順に、B(A), B(B), Nと一致していることがわかる。これは、マスコンクリート内部は、収縮に関して封かん状態相当であること示している。封かん養生下において、任意の温度履歴を与えることにより、マスコンクリート内部の自己収縮ひずみを小型供試体により測定できることが確認された。

各配合毎に自己収縮ひずみの測定結果をまとめたものを図-9, 図-10, 図-11, 各養生温度毎にまとめたものを図-12, 図-13, 図-14, 図-15に示す。普通セメントコンクリートNの20, 40, 60℃一定養生温度における自己収縮ひずみは、有効材齢10日時点で、約 $50 - 70 \times 10^{-6}$ と養生温度による差が小さく、その後のひずみの経時変化を比較しても同じ変化傾向といえる。また、マス養生温度履歴の自己収縮ひずみと比較しても大きな差はないことがわかる。それに対して、高炉セメントコンクリートでは、B(A), B(B)ともに20℃養生と比較し、40℃, 60℃一定養生温度の方が、有効材齢10日程度までの自己収縮ひずみの進行が速く、収縮ひずみ量も増大している。

続いて、高炉スラグ微粉末の種類の影響について検討する。20℃, 60℃一定養生温度では、B(A), B(B)の自己収縮ひずみは、同等であるが、40℃一定養生温度では、高炉スラグ微粉末の粒径が細かいB(A)の方が、自己収縮ひずみ量が増大している。高炉セメントコンクリートの収縮量の大小を評価するためには、標準である20℃養生における自己収縮ひずみの測定のみでは、判別は難しく、40℃一定条件、温度履歴を受けた自己収縮ひずみを測定することが必要であることがわかった。また、20℃, 40℃, 60℃の一定養生温度条件では、有効材齢15 - 30日ではほぼ自己収縮ひずみが停止しているが、マス養生温度履歴を受けた場合には、有効材齢15 - 25日時点で、自己収縮ひずみが停滞し、その後、有効材齢30日以降に漸増している。同様の傾向は、既往の研究⁹⁾における試験結果においても確認されており、高炉セメントコンクリート特有の現象であると考えられる。これは、高炉セメントコンクリートのマスコンクリート構造物における自己収縮ひずみを評価する場合には、コンクリート温度に関わらず、一定養生温度での評価は難しく、温度履歴を与えた自己収縮ひずみを測定する必要があることを示している。

b) 圧縮強度, ヤング係数, 割裂引張強度

各配合毎に圧縮強度まとめたものを図-16, 図-17, 図-18に示す。圧縮強度とヤング係数, 圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-19, 図-20に示す。図-19, 図-20から割裂引張強度とヤング係数は、セメントの種類, 養生温度条件に関わらず、圧縮強度と一定の相関関係があった。圧縮強度の強度発現に着目すると、各配合とも、60℃一

図-12 20℃一定養生における自己収縮ひずみ

図-13 40℃一定養生における自己収縮ひずみ

図-14 60℃一定養生における自己収縮ひずみ

図-15 マス養生温度履歴における自己収縮ひずみ

図-16 Nの各養生温度における圧縮強度

図-17 B(A)の各養生温度における圧縮強度

図-18 B(B)の各養生温度における圧縮強度

定養生温度の強度発現は、既往の研究^{9), 14)}と同様に材齢7日以降の強度増進が頭打ちである傾向があり、他の養生温度条件とは、異なる強度発現であった。20°C、40°C一定養生温度およびマス養生温度履歴では、有効材齢で整理すると、普通コンクリートNは、同等の強度発現であるが、高炉セメントコンクリートでは、B(A)、B(B)ともに20°C、40°C一定養生温度よりもマス養生温度履歴のほうが、若干ではあるが、圧縮強度が高く、マス温度履歴を受けることにより圧縮強度が増進する結果であった。

c) 鉄筋拘束による収縮応力

鉄筋のひずみの経時変化を図-21、図-22、図-23、収縮

図-19 圧縮強度とヤング係数の関係

図-20 圧縮強度と割裂引張強度の関係

応力の経時変化を図-24、図-25、図-26に示す。

収縮応力は、すべての養生温度条件において高炉セメントコンクリートであるB(A)、B(B)の方が普通コンクリートNよりも大きい結果であった。これは、応力の発生要因である自己収縮ひずみが、高炉セメントコンクリートの方が大きいためであると考えられる。また、マス養生温度履歴のNでは、温度降下時となる有効材齢9.3日以降に収縮応力が徐々に低減し、有効材齢50日時点で、0.1 - 0.2 N/mm²となっている。収縮応力が低減した要因の概念図を図-27に示す。これは、温度降下時における鉄筋の温度ひずみの方が、コンクリートの温度ひずみと自己収縮ひずみを加算した自由収縮ひずみよりも大きいことにより、鉄筋に引張力が作用し、その結果、コンクリートに圧縮力が作用したため、収縮応力が低減したものと考えられる。そのため、熱膨張係数が大きく、自己収縮が大きいB(A)では、鉄筋の温度ひずみとコンクリートの自由収縮ひずみの差が小さいため、温度降下時におけるコンクリートの収縮応力の変動がほとんどない結果となっている。

次に、40°C一定養生温度におけるNとB(B)に着目すると、最大収縮応力発生時の自己収縮ひずみはNが 75.5×10^{-6} 、B(B)が 89.2×10^{-6} と、B(B)がNの1.18倍なのに対して、収縮応力は、Nが 0.31 N/mm^2 、B(B)が 0.49 N/mm^2 とB(B)がNの1.58倍と自己収縮ひずみの差よりも収縮応力の差の方が大きい結果であった。このように、自己収縮ひずみの

図-21 20°C一定養生における鉄筋ひずみ

図-24 20°C一定養生におけるコンクリートの引張応力

図-22 40°C一定養生における鉄筋ひずみ

図-25 40°C一定養生におけるコンクリートの引張応力

図-23 マス養生温度履歴における鉄筋のひずみ

図-26 マス養生温度履歴におけるコンクリートの引張応力

大小以外にも収縮応力が大きくなる要因があると考えられることから鉄筋拘束試験における拘束ひずみと鉄筋拘束試験による収縮応力から算出される有効ヤング係数とヤング係数を比較することによりクリープの影響を表すヤング係数の補正係数について検討した。

4. ヤング係数の補正係数のコンクリート温度依存性

(1) ヤング係数の補正係数の算出

JCI委員会報告¹¹⁾を基に拘束ひずみ(有効ひずみ)と収縮

図-27 収縮応力が低減した要因 (温度降下時)

応力の関係から有効ヤング係数を求め、ヤング係数との比からヤング係数の補正係数を算出した。

有効ひずみの算出の概要を図-28に示す。一般的な温度変化がない場合は、自己収縮ひずみと鉄筋拘束による収縮応力試験時に測定される鉄筋のひずみの差からコンクリートの有効ひずみを算出できる。しかし、本試験では、マス養生温度履歴による温度変化や温度一定条件において水和熱によるコンクリート温度の小さな変動があったことから、鉄筋とコンクリートの熱膨張係数の差を考慮し、コンクリートの拘束ひずみを算出した。なお、鉄筋の熱膨張係数は、 $12.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした¹⁵⁾。このコンクリートの拘束ひずみと収縮応力の関係を示す曲線の接線が有効ヤング係数となる。別途、有効ヤング係数と同一有効材齢におけるヤング係数を第3章の試験結果から算出し、両者の比からヤング係数の補正係数を求めた。有効ヤング係数は、収縮応力が発生しなければ算出できないことから、自己収縮ひずみによって収縮応力が上昇している材齢において有効ヤング係数およびヤング係数の補正係数を算出することとした。

(2) ヤング係数の補正係数のコンクリート温度依存性

収縮応力と拘束ひずみの関係を図-29、図-30、図-31、に示す。

この中で、 20°C 、 40°C 一定条件では、収縮応力と拘束ひずみは、線形関係となっているが、マス養生温度履歴では、NとB(B)において、変曲点が存在していることがわかる。この変曲点は、コンクリート温度の上昇がほぼ終了した材齢である1.23日(有効材齢2.7日)であった。JCI指針⁴⁾において、温度上昇時と降下時のヤング係数の補正係数が異なっていることを参考に、マス養生温度履歴では、変曲点を境に、温度上昇時(有効材齢2.7日以前)と温度変化が小さい温度停滞時(有効材齢2.7日以降)における有効ヤング係数およびヤング係数の補正係数を算出した。

自己収縮ひずみに起因する収縮応力から算出したヤング係数の補正係数を表-10、表-11、表-12、表-13および図-32に示す。まず、普通コンクリートでは、マス養生温度履歴の温度上昇時を除いてほぼ同一の値であった。

図-29 20°C 一定養生における拘束ひずみと引張応力の関係

図-30 40°C 一定養生における拘束ひずみと引張応力の関係

図-31 マス養生温度履歴における拘束ひずみと引張応力の関係

一般的な構造物の温度上昇時における自由ひずみは、膨張ひずみを示し、圧縮応力が作用することから、マス養生温度下における温度上昇時の収縮応力から算出しているヤング係数の補正係数を本考察から除くと、普通コンクリートNのヤング係数の補正係数は、コンクリート温度の影響により変動していないことがわかる。それに対して、高炉セメントコンクリートであるB(A)、B(B)は、20℃一定養生温度におけるヤング係数の補正係数よりも、40℃一定養生温度およびマス養生温度履歴下の方が、自己収縮ひずみの大小に関わらず同等か0.15程度大きな値となっている。高炉セメントコンクリートのヤング係数の補正係数は、コンクリート温度の影響により変動していることを示しており温度依存性があることが示唆された。20℃一定条件における高炉セメントコンクリートであるB(A)、B(B)と普通コンクリートNのヤング係数の補正係数に差がないことから、特にコンクリート温度が40℃を超える条件において自己収縮ひずみが同等の場合、高炉セメントコンクリートの方が、普通コンクリートよりも大きな引張応力が発生する傾向があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、水結合材比55%のコンクリートを対象とし、異なる養生温度条件下において自己収縮ひずみの大小2種類の高炉セメントコンクリートと普通コンクリートの自己収縮ひずみと収縮応力に関して実験的検討を行った。本研究の実験の範囲内で、以下の知見を得た。

- (1) 簡易断熱マスブロック試験結果から、自己収縮ひずみが大きい高炉セメントコンクリートほど、相対粒子量40 - 60%における高炉スラグ微粉末の粒径が細かい結果であった。
- (2) 普通コンクリートの自己収縮ひずみは、養生温度による大きな差はない。それに対して、高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみは、20℃一定養生温度よりも40℃、60℃一定養生温度、マス養生温度履歴の方が有効材齢10日程度までの自己収縮ひずみの進行が速く、収縮ひずみ量も増大した。
- (3) 普通コンクリートの圧縮強度は、20℃、40℃一定養生温度およびマス養生温度履歴において、同等であったが、高炉セメントコンクリートの圧縮強度は、20℃、40℃一定養生温度よりもマス養生温度履歴のほうが高く、温度履歴を受けることにより圧縮強度が増進する結果であった。
- (4) 普通コンクリートと高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみに起因するヤング係数の補正係数を比較すると、20℃一定養生温度では、普通コンクリートと高炉セメントコンクリートの値に差はないが、

表-10 20℃一定養生におけるヤング係数の補正係数

配合	試験体	(1)有効ヤング係数 [$\times 10^4$ N/mm ²]	(2)ヤング係数	(3)ヤング係数の補正係数 (1)/(2)	(3)の 平均値	N配合との差 (3)の平均値
N	1	1.50	2.84	0.53	0.50	0.00
	2	1.32	2.84	0.46		
B(A)	1	1.24	2.39	0.52	0.50	0.00
	2	1.12	2.39	0.47		
B(B)	1	1.17	2.44	0.48	0.48	-0.02
	2	-	-	-		

表-11 40℃一定養生におけるヤング係数の補正係数

配合	試験体	(1)有効ヤング係数 [$\times 10^4$ N/mm ²]	(2)ヤング係数	(3)ヤング係数の補正係数 (1)/(2)	(3)の 平均値	20℃ 一定条件との差
N	1	1.17	2.61	0.45	0.47	-0.03
	2	1.25	2.61	0.48		
B(A)	1	1.55	2.26	0.69	0.65	0.15
	2	1.37	2.26	0.61		
B(B)	1	1.20	2.26	0.53	0.58	0.10
	2	1.42	2.26	0.63		

表-12 マス養生温度履歴の温度上昇時(有効材齢1.0-2.7日)におけるヤング係数の補正係数

配合	試験体	(1)有効ヤング係数 [$\times 10^4$ N/mm ²]	(2)ヤング係数	(3)ヤング係数の補正係数 (1)/(2)	(3)の 平均値	20℃ 一定条件との差
N	1	1.59	1.94	0.82	0.86	0.36
	2	1.74	1.94	0.90		
B(A)	1	1.34	1.55	0.86	0.93	0.43
	2	1.55	1.55	1.00		
B(B)	1	1.46	1.59	0.92	0.95	0.47
	2	1.56	1.59	0.98		

表-13 マス養生温度履歴の温度停滞時(有効材齢2.7-9.3日)におけるヤング係数の補正係数

配合	試験体	(1)有効ヤング係数 [$\times 10^4$ N/mm ²]	(2)ヤング係数	(3)ヤング係数の補正係数 (1)/(2)	(3)の 平均値	20℃ 一定条件との差
N	1	1.38	2.60	0.53	0.50	0.00
	2	1.21	2.60	0.47		
B(A)	1	1.20	2.42	0.50	0.50	0.00
	2	1.21	2.42	0.50		
B(B)	1	1.54	2.39	0.64	0.64	0.16
	2	1.50	2.39	0.63

図-32 最高温度が異なる場合のヤング係数の補正係数

40℃一定養生温度およびマス養生履歴条件下では、高炉セメントコンクリートの方が普通コンクリートよりも同等か大きな値となった。高炉セメントコンクリートのヤング係数の補正係数は、コンクリート温度の影響により変動しており、温度依存性があることが示唆された。

参考文献

- 1) ライフサポート研究会：ひび割れ指数を用いた温度ひび割れの評価－事例紹介－，月刊下水道，Vol.27，No.14，pp.75-79，2004.11.
- 2) 臼井達哉，大友健，宮原茂禎，宮澤伸吾：マス養生温度履歴下で測定した自己収縮ひずみの評価方法と温度ひび割れに及ぼす影響に関する考察，コンクリート工学年次論文集，pp.1609-1614，Vol.31，No.1，2009.
- 3) 大友健，二戸信和，廣島明雄，宮澤伸吾：マスコンクリートに生じている自己収縮の実態とその制御対策の一例，コンクリート工学，Vol.44，No.3，pp.26-33，2006.3.
- 4) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.12.
- 5) 宮澤伸吾，佐藤良一，杉山淳司：高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートの自己収縮予測式，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.465-470，2008.
- 6) 二戸信和，廣島明男，大友健，宮澤伸吾：スラグ粒度と化学成分の異なる高炉セメント B 種を用いたコンクリートの特性，セメント・コンクリート論文集，Vol.59，pp.231-238，2005.
- 7) 田沢栄一：硬化時温度応力の問題点，コンクリート工学，Vol.24，No.12，pp.11-20，1986.5.
- 8) 武田均，岡本修一，丸屋剛：壁状コンクリート構造物中の無応力計のひずみに関する検討，土木学会年次学術講演会概要集 V，Vol.49，pp.712-713，1994.9.
- 9) 大友健，臼井達哉，宮原茂禎：任意の高温履歴下で養生したコンクリートの自己収縮ひずみの定量的評価方法に関する研究，日本コンクリート工学会耐久性力学に基づく収縮影響評価に関するワークショップ論文集，pp.29-36，2011.8.
- 10) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp.209-210，1994.5.
- 11) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.58-60，1996.11.
- 12) 林田都芳，大野義照，中川隆夫：コンクリートの自己収縮応力試験における拘束鉄筋と試験体長の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.733-738，1999.
- 13) 大谷俊浩，濱永康仁，上田賢司，佐藤嘉昭：鉄筋埋設拘束試験による混和材混入コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.221-226，2011.
- 14) 奥地栄祐，武若耕司，清川秀樹，長尾好幸：高温環境下へのシラスコンクリートの適用に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.681-686，2004.
- 15) 土木学会：2007 年度制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.62，2008.3.

(2013. 3. 27 受付)

STUDY ON AUTOGENEOUS SHRINKAGE AND SHRINKAGE STRESS OF CONCRETE USING GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG UNDER DIFFERENT CURING TEMPERATURE CONDITIONS

Tatsuya USUI, Shigeyoshi MIYAHARA, Tsuyoshi MARUYA and Takeshi OTOMO

The influences of concrete temperature with ground granulated blast-furnace slag on the autogenous shrinkage and on shrinkage stress are experimentally investigated. By measuring the autogenous shrinkage and shrinkage stress caused by restraint of reinforcement bar under different curing temperatures of concrete with ground granulated blast-furnace slag and of concrete ordinary portland cement, it is clearly shown as follow.

Although the variation of autogenous shrinkage of ordinary portland cement concrete due to temperature changes is less, that of blast furnace cement concrete depends notably on the concrete temperature. Moreover, as a result of calculating reduction constant for modulus of elasticity based on the shrinkage stress, reduction constant of blast furnace cement concrete is larger than that of ordinary portland cement concrete under the condition of high concrete temperature.