

論文 低熱高炉セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす石こう量および養生温度の影響

藤井 隆史^{*1}・檀 康弘^{*2}・細谷 多慶^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨：粒度が粗く、高炉スラグ量の多い低熱高炉セメントは、水和熱による温度上昇量が低く、マスコンクリート等への適用が期待されている。本論文では、このような低熱高炉セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも低く、とくに高温の履歴を受けたものは、より乾燥収縮ひずみが小さくなることを示す。また、高炉セメントの乾燥収縮ひずみに及ぼす石こう量の影響は大きく、とくに蒸気養生を行った場合には、適切な量の石こうを添加することで乾燥収縮ひずみをより小さくできることを示す。

キーワード：低熱高炉セメント、乾燥収縮ひずみ、石こう添加量、蒸気養生、マスコンクリート

1. はじめに

高炉スラグは、製鉄所の高炉で発生する副産物で、骨材、混和材および混合セメントとしてコンクリートに広く用いられている材料である。高炉スラグ微粉末や高炉セメントを用いたコンクリートは、化学抵抗性の向上が期待できる。とくに、結合材に高炉スラグ微粉末あるいは高炉セメント B 種を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いて低水結合材比で用いることで、耐硫酸性が向上し、下水道コンクリート構造物等への適用が期待できる¹⁾。高炉スラグ微粉末または高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントのみを用いたものに比べて、水和熱が少ない特徴もある。しかし、粉末度の高い高炉スラグ微粉末やそれを混合した高炉セメント B 種を用いたコンクリートの断熱温度上昇量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて高くなることもある^{2,3)}。粉末度を下げ、高炉スラグ微粉末の添加割合を高くした低熱高炉セメントを用いれば、従来のもの以上に水和熱の低減を図ることが可能である。

コンクリートのひび割れは、コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす重大な要因である。温度応力と乾燥収縮ひずみは、下水道構造物も含めたコンクリート構造物のひび割れの主要な原因であり、その適切な対策が望まれている。本論文は、低熱高炉セメントを用いたコンクリートの温度上昇および乾燥収縮ひずみの抑制効果について調べたものである。水結合材比が 25% の場合には、疑似断熱温度上昇試験において、低熱高炉セメントを用いたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べて最高温度を 20 以上低減することが可能であること、また、条件によっては、

乾燥収縮ひずみを半分にまで低減できることを示す。さらに、高炉セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、養生温度および石こうの添加量の影響を強く受け、適切な量の石こうを添加した場合、高温履歴を与えることにより、よりコンクリートの乾燥収縮ひずみを低減することが可能であることを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) コンクリート

実験に用いたコンクリートの配合を表 - 1 に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³, ブレーン値: 3,350 cm²/g) および低熱高炉セメント B 種(密度: 2.98 g/cm³, スラグ分量: 55%, 三酸化硫黄量: 3.4%, ブレーン値: 3,210g/cm²)を用いた。また、スラグ分量および三酸化硫黄量が低熱高炉セメント B 種と同じになるように、普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³, ブレーン値: 3,350 cm²/g), 高炉スラグ微粉末 4000(密度: 2.92g/cm³, ブレーン値: 4,100cm²/g, 石こう無添加), 工業用無水石こう(密度: 2.97g/cm³) および工業用二水石こう(密度: 2.30g/cm³)を混合したのもも実験に用い、粉末度の影響の検討を行った。細骨材には、硬質砂岩系砕砂(密度: 2.62g/cm³, 吸水率: 3.02%) および高炉スラグ細骨材(密度: 2.65g/cm³, 吸水率: 1.44%)を用い、粗骨材には、砂岩系砕石(密度: 2.74g/cm³, 吸水率: 0.37%)を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。コンクリートの配合は、水結合材比を 25% および 60% とし、単位水量および細骨材率は、それぞれ、175kg/m³ および 50.0% で一定とした。

*1 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻助教 工博 (正会員)

*2 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センターセンター長 工博 (正会員)

*3 ランデス(株) 本部技術センター副センター長 工博 (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻教授 工博 (正会員)

表 - 1 コンクリートの配合

結合材の種類	G _{max} (mm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)							高性能減水剤 (kg/m ³)	
					W	C	GGBF* ³	CaSO ₄ * ⁴	CaSO ₄ * ⁴ ·2H ₂ O* ⁵	S	BFS* ⁶		G
OPC* ¹	20	25.0	2.0	50.0	175	700	0	0	0	763	0	798	7.00
GGBF+OPC						276	385	1.57	37.6	745		779	
LBB* ²						700	0	0	0	0	755	781	
GGBF+OPC		60.0				115	160	0.65	15.7	926	0	968	
LBB						292	0	0	0	0	936	969	

*1 OPC: 普通ポルトランドセメント, *2 LBB: 低熱高炉セメント B 種, *3 GGBF: 高炉スラグ微粉末,

*4 CaSO₄: 無水石こう, *5 CaSO₄·2H₂O: 二水石こう, *6 BFS: 高炉スラグ細骨材

表 - 2 モルタルの配合

W/B (%)	GGBF/B (%)	CaSO ₄ /B (%)	C/B (%)	空気量 (%)	単用量 (kg/m ³)					高性能減水剤 (kg/m ³)	
					W	GGBF* ¹	CaSO ₄ * ²	C	S		
25.0	0.0	0.0	100.0	2.0	200	0	0	800	1,378	8.33	
25.0		3.0	97.0				24	775			
25.1		6.0	94.0				48	749			
25.1		9.0	91.0				72	724			
25.2		12.0	88.0				95	699			
25.2		15.0	85.0				119	674			
26.0	50.0	6.0	44.0				384	46			337
26.0	60.0	0.0	40.0				458	0			306
26.1		3.0	37.0				458	23			282
26.1		6.0	34.0				457	46			259
26.2		9.0	31.0				456	68			236
26.2		12.0	28.0				455	91			212
26.2		15.0	25.0				454	114			189
26.2		70.0	6.0				24.0	529			45

*1 GGBF: 高炉スラグ微粉末, *2 CaSO₄: 無水石こう

(2) モルタル

実験に用いたモルタルの配合を表 - 2 に示す。結合材には、高炉スラグ微粉末 4000 (密度: 2.92g/cm³, プレーン値: 4,100cm²/g, 石こう無添加) および普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm³, プレーン値: 3,350cm²/g) を用いた。石こうは、工業用無水石こう (密度: 2.97g/cm³) を用いた。細骨材には、硬質砂岩系砕砂 (密度: 2.62g/cm³, 吸水率: 3.02%) を用い、混和剤には、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。練混ぜ水、無水石こうを含めた結合材および細骨材の体積比が一定となるように、配合を決定した。

2.2 試験方法

(1) 乾燥収縮試験

コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定は、φ50 × 100mm のコア供試体を用いた。水中養生を行う供試体は、打設後、24 時間は型枠内で養生し、脱型後、材齢 4 日まで水中で養生を行った。蒸気養生を行うコンクリートは、打設後 24 時間は型枠内で養生し、脱型後、材齢 4 日まで水中で養生を行った。蒸気養生は、平成 8 年制定土

木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に示される方法³⁾に従い、コンクリートを打設後、前養生を 2 時間行った後、昇温速度を 20 /時間、最高養生温度を 65 , 最高養生温度保持時間を 4 時間の条件で行った。蒸気養生終了後、材齢 24 時間までは型枠内で養生し、脱型後、材齢 4 日まで水中養生を行った。材齢 4 日に 100 × 100 × 400mm の角柱供試体から直径 50mm のコアを抜き、φ50 × 100mm の供試体を作製した。コア供試体には、写真 - 1 に示されるように上下端面中央にコンタクトゲージを瞬間接着剤により貼り付け、周りをエポキシ樹脂によって保護した。エポキシ樹脂の塗布量の差をなくするために、コア供試体の上面および底面の全てにエポキシ樹脂を塗布し、側面のみを乾燥面とした。コア抜き後から長さ変化の測定を開始する材齢 7 日まで、コア供試体は、底面に水を張った密閉容器を用いて、湿度 95%以上の湿潤的环境下で貯蔵した。コア供試体の長さ変化の測定には、写真 - 1 に示すリニアゲージ (最小目盛り: 5/10,000mm) を用いた。

マスコンクリートを想定したコンクリートの乾燥収



写真 - 1 長さ変化に用いたコア供試体および測定器

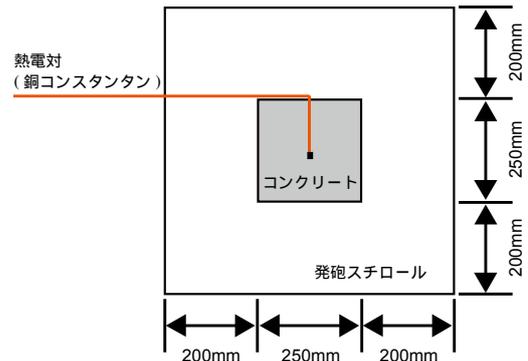


図 - 1 擬似断熱温度上昇試験に用いた容器

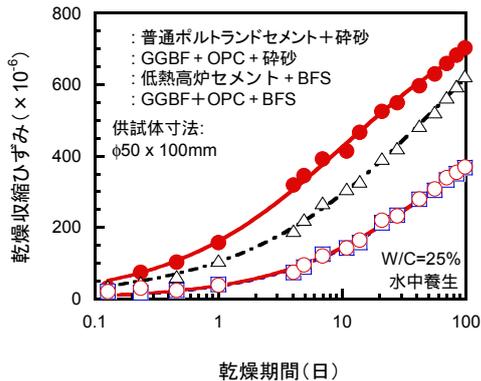


図 - 2 水中養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみ (W/B=25%)

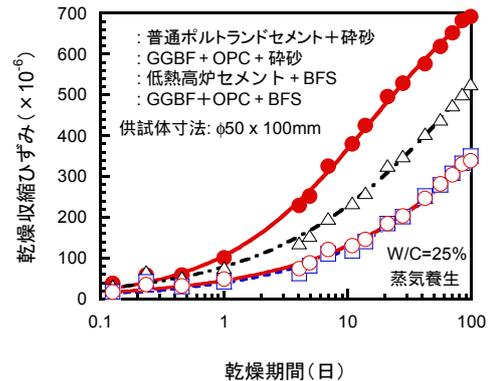


図 - 3 蒸気養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみ (W/B=25%)

縮ひずみを測定するために、疑似断熱温度上昇の測定を行った供試体からコア供試体を探取し、乾燥収縮ひずみの測定を行った。材齢 10 日に脱型し、直径 50mm のコアを探取し、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体を作製し、コンタクトゲージを接着した後、材齢 14 日より測定を開始した。コア抜き後から長さ変化の測定を開始する材齢 14 日まで、供試体は、湿度 95%以上の湿潤の環境下で貯蔵した。

モルタルの乾燥収縮ひずみの測定には、両端にゲージプラグを埋め込んだ $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を用い、全面を乾燥面として、JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化の測定方法 - 第 3 部: ダイヤルゲージ方法」によって行った。測定には、最小目盛りが $1/1,000\text{mm}$ のダイヤルゲージを用いた。モルタルを打設後、24 時間は型枠内で養生し、脱型後から測定を開始する材齢 7 日まで温度 20 ± 1 の水中で養生を行った。モルタルの蒸気養生は、モルタルを打設後、前養生を 2 時間行った後に、2 時間で所定の養生温度まで上昇させ、4 時間最高温度を維持した後 4 時間で 20 まで冷却した。

乾燥収縮ひずみの測定は、いずれの供試体も温度が 20 ± 2 で、相対湿度が $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿度室内で行った。なお、本論文の乾燥収縮ひずみは、自己収縮ひずみも含めた乾燥条件下における自由収縮ひずみである。

(2) 疑似断熱温度上昇試験

試験には、図 - 1 に示す厚さ 200mm の発泡スチロール

で作製した容器（内寸： $250 \times 250 \times 250\text{mm}$ ）を用いた。容器内にコンクリートを 15.6L 打設し、コンクリートの中心には、銅コンスタンタン熱電対を設置した。材齢 10 日まで測定を行った後、脱型し、コア供試体を作成し乾燥収縮ひずみの測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす養生の影響

図 - 2 および図 - 3 は、それぞれ、水中養生および蒸気養生を行った水結合材比が 25% のコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。図中の は、結合材には普通ポルトランドセメントのみを用い、細骨材には、砕砂を用いたコンクリートの結果を示している。

は、結合材に、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に砕砂を用いた結果を示している。 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた結果を示している。 は、結合材に低熱高炉セメント B 種を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた結果を示している。いずれの養生方法においても結合材に高炉スラグ微粉末あるいは低熱高炉セメント B 種を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いたものに比べて小さいことが分かる。また、骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、コンク

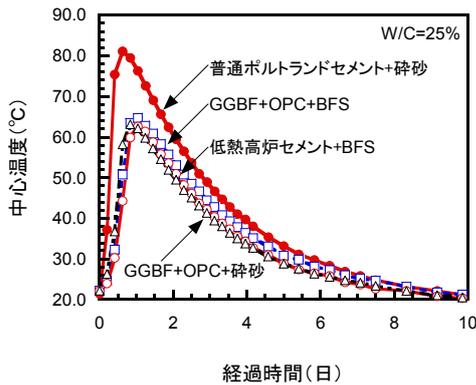


図 - 4 疑似断熱温度上昇試験の結果 (W/C=25%)

リートの乾燥収縮ひずみがさらに小さくなるのが分かる。いずれの種類のコングリートにおいても、蒸気養生を行ったコングリートの乾燥収縮ひずみは、水中養生を行ったコングリートの乾燥収縮ひずみに比べて小さくなっていることが分かる。

図 - 4 は、図 - 1 に示される型枠を用いて測定した水結合材比が25%の種々のコングリートの疑似断熱温度上昇の測定結果を示したものである。結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に砕砂を用いたコングリートが、最も温度の上昇が大きく、81.1 までコングリート温度が上昇している。一方、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に砕砂を用いたものは63.1 まで、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものは、64.7 までコングリート温度が上昇した。低熱高炉セメント B 種および高炉スラグ細骨材を用いたものは、62.6 まで温度が上昇している。粉末度の小さい高炉セメントを用いることで、上昇温度を低く抑えられている。図 - 5 は、図 - 4 に示される断熱温度上昇試験後の供試体から採取したコア供試体の乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。いずれのコングリートも、水中養生あるいは蒸気養生を行ったものに比べて、乾燥収縮ひずみがより小さくなっていることが分かる。なお、いずれのコングリートにも、ひび割れ等の変状は確認されなかった。図 - 6 は、図 - 2、図 - 3 および図 - 4 に示される水結合材比が 25%の種々のコングリートの乾燥期間 98 日目における乾燥収縮ひずみを比較して示したものである。図中の左から、水中養生を行ったもの、蒸気養生を行ったもの、図 - 4 に示される疑似断熱温度上昇試験後の供試体から採取したものの結果を示している。いずれのコングリートも、蒸気養生を行うことで、水中養生を行ったものよりも乾燥収縮ひずみが小さくなり、断熱状態で養生を行ったものは、さらに乾燥収縮ひずみが小さくなっている。また、高炉スラグ微粉末あるいは高炉セメントを用いたものの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いたもの

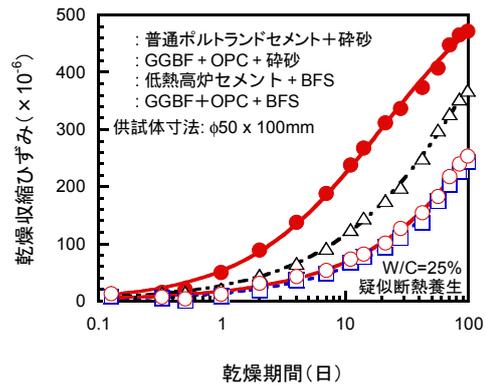


図 - 5 疑似断熱養生を行ったコングリートの乾燥収縮ひずみ (W/C=25%)

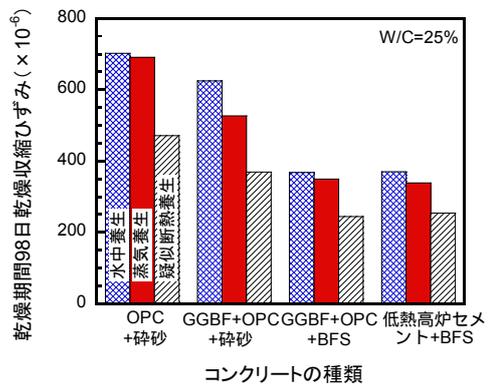


図 - 6 養生方法がコングリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響 (W/C=25%)

に比べて小さくなっている。したがって、マスコングリートのような高温状態に長くさらされたコングリートの乾燥収縮ひずみは、実験室で供試体を用いて測定した乾燥収縮ひずみに比べて小さいことが考えられる。

図 - 7 および図 - 8 は、それぞれ、水中養生および蒸気養生を行った水結合材比が60%の種々のコングリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。水結合材比が60%の場合においても、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いることで、砕砂を用いたものより、乾燥収縮ひずみが小さくなる。一方、水結合材比が60%のコングリートにおいても蒸気養生を行うことで、乾燥収縮ひずみが小さくなっていることが分かる。しかし、水結合材比が25%の場合と比べると、その差は小さい。

図 - 9 は、図 - 1 に示される型枠を用いて測定した水結合材比が60%の種々のコングリートの疑似断熱温度上昇の測定結果を示したものである。結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたものが最もコングリート温度が高く、44.0 まで上昇した。結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用い、細骨材に砕砂を用いたものは42.1 までコングリート温度が上昇し、低熱高炉セメント B 種および高炉スラグ細骨材を

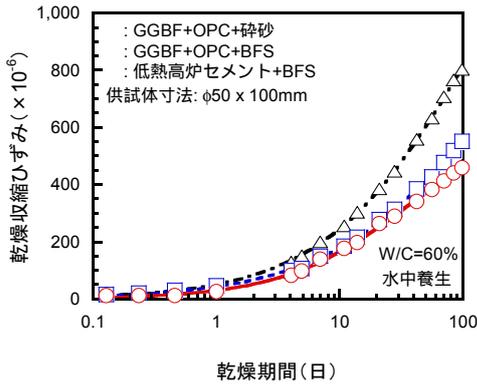


図 - 7 水中養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみ (W/C=60%)

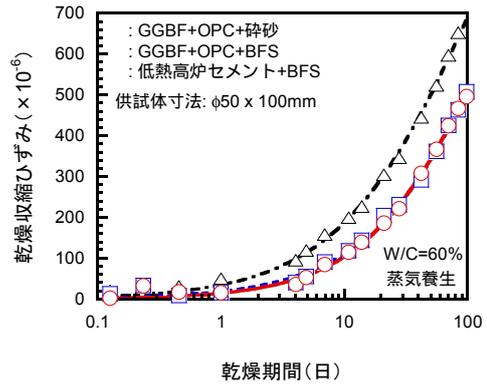


図 - 8 蒸気養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみ (W/C=60%)

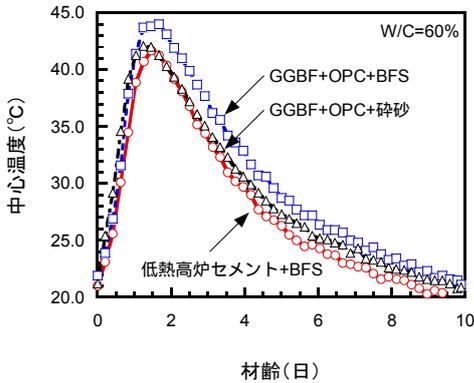


図 - 9 疑似断熱温度上昇試験の結果 (W/C=60%)

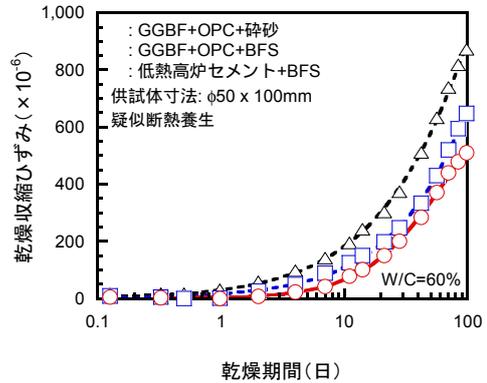


図 - 10 疑似断熱養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみ (W/C=60%)

用いたものの最高コンクリート温度が最も小さく、41.7 °Cであった。図 - 10 は、図 - 9 に示される断熱温度上昇試験後の供試体から採取したコア供試体の乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。水結合材比が60%のコンクリートでは、断熱状態で養生されたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、水中養生を行ったものとほぼ同程度であることが分かる。図 - 11 は、図 - 7、図 - 8 および図 - 10 に示される水結合材比が60%の種々のコンクリートの乾燥期間98日目における乾燥収縮ひずみを比較して示したものである。水結合材比が60%の高炉セメントを用いたコンクリートでは、蒸気養生を行うことで、水中養生を行ったものよりもコンクリートの乾燥収縮ひずみが小さくなること分かる。しかし、水結合材比が25%の場合と比べると、その効果は小さい。

3.2 石こう量がモルタルの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響

乾燥収縮ひずみへの養生温度の影響が表れやすい水結合材比が25%のモルタルを用いて、結合材中の石こう量が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響の検討を行った。図 - 12 は、結合材に普通ポルトランドセメントのみを用いたモルタルの乾燥収縮ひずみに及ぼす無水石こうの添加量の影響を示したものである。乾燥収縮ひずみの測定期間は98日である。図中の○は、20 °Cの室内で養生を行

ったものの結果を示している。○および△は、それぞれ、最高温度を40 °Cおよび60 °Cで蒸気養生を行ったものの結果を示している。普通ポルトランドセメントのみを結合材に用いた場合には、いずれの温度で養生を行った場合にも、無水石こうの添加量が3%程度までは、乾燥収縮ひずみが小さくなり、それ以上に増加すると、乾燥収縮ひずみは大きくなること分かる。一方、図 - 13 は、結合材に普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮ひずみに無水石こうの添加量が及ぼす影響を示したものである。結合材に占める高炉スラグ微粉末量は、質量比で60%と一定である。結合材に高炉スラグ微粉末と普通ポルトランドセメントを混合用いたモルタルにおいて、20 °Cの室内で養生を行った場合には、無水石こうの添加量が増加すると、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向にある。一方、40 °Cあるいは60 °Cで蒸気養生を行った場合には、無水石こうの添加量が質量比で結合材の6%程度までは、無水石こうの添加に伴いモルタルの乾燥収縮ひずみが小さくなっている。とくに、無水石こうの添加量が質量比で結合材の6%程度のモルタルを60 °Cで蒸気養生を行った場合には、最も乾燥収縮ひずみが小さくなっている。しかし、無水石こうの添加量が質量比で結合材の9%を超えると、

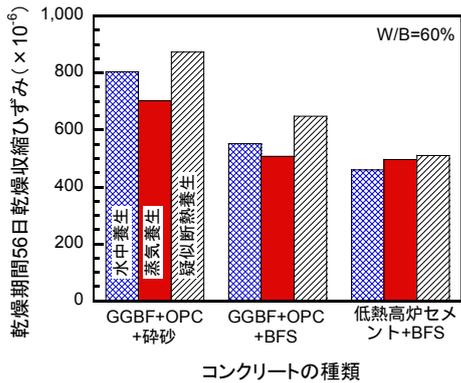


図 - 11 養生方法がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響 (W/C=60%)

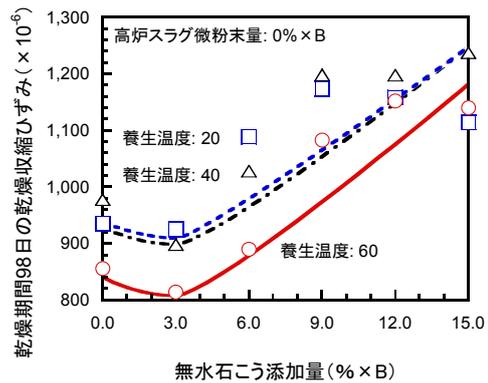


図 - 12 セメントのみを用いたモルタルの乾燥収縮ひずみに及ぼす石こう量の影響

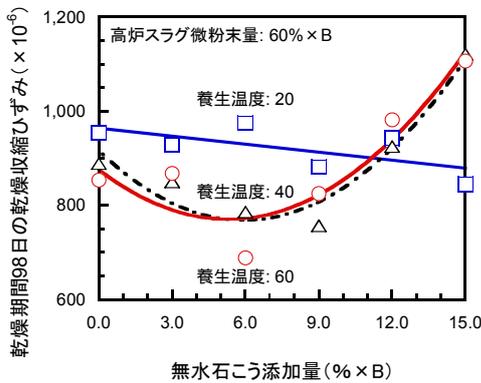


図 - 13 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮ひずみに及ぼす石こう量の影響

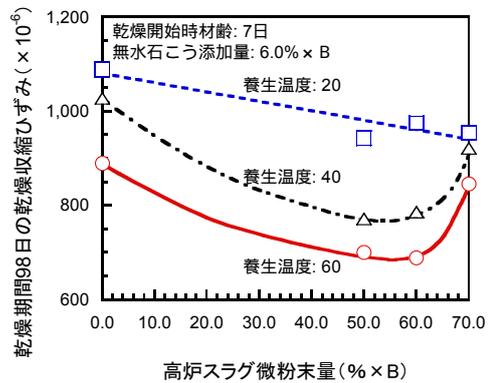


図 - 14 高炉スラグ微粉末量とモルタルの乾燥収縮ひずみの関係

モルタルの乾燥収縮ひずみは、無水石こうを添加しないものよりも大きくなる事が分かる。図 - 14 は、無水石こうの添加量が質量比で結合材の 6%の場合における高炉スラグ微粉末量と乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。20 の室内で養生を行った場合には、結合材中の高炉スラグ微粉末量が増加すると、モルタルの乾燥収縮ひずみは小さくなっている。蒸気養生を行った場合には、高炉スラグ微粉末量が質量比で結合材の 50~60%で最も小さくなる事が分かる。石こうの添加量がある程度までは強度が大きくなるが、これを超えると強度が下がることが報告されている⁵⁾。石こうの添加量が増加すると、エトリンガイトの生成量は増加する。しかし、組織が粗大になり空隙が多くなっているため、乾燥収縮ひずみが大きくなったものと推察される。また、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の構成成分および水和過程の違いから、石こうの添加の影響の程度が異なるものと思われる。

4. まとめ

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートに比べ、高炉セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは小さく、また、高い温度で養生することで、より

乾燥収縮ひずみが小さくなる。また、無水石こうを適切な量で添加し、高温で湿潤養生を行った場合に、乾燥収縮ひずみがより小さくなる。

参考文献

- 1) 藤井隆史, 細谷多慶, 松永久宏, 綾野克紀: 高炉水砕スラグを用いたセメント硬化体の耐硫酸性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp.847-852, 2009.7
- 2) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp.487-492, 2005. 6
- 3) 二戸信和, 羽原俊祐, 鯉淵清, 坂井悦郎: 断熱温度上昇に及ぼす高炉セメントの水和反応の温度依存性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp.59-64, 2010. 7
- 4) 土木学会コンクリート委員会: 平成 8 年制定コンクリート標準示方書[施工編], 土木学会, pp. 344-345, 1996. 3
- 5) 近藤連一: スラグ系セメントの製造に関する基礎研究, 東京工業大学学位論文, 1959