

論文 高炉スラグ高含有セメントの DEF に関する検討

久我 龍一郎*1・辻 大二郎*2・米澤 敏男*3・坂井 悦郎*4

要旨: 高炉 C 種クラスの高炉スラグ高含有セメント (BC) におけるエトリンタイトの遅延生成 (DEF) について、セメントの種類、無水石膏および硫酸カリウム添加による SO₃ 量、骨材の種類、W/C、高温養生の前置き時間、高温養生後の養生条件、AE 剤の添加を因子として、モルタル供試体を用いた長さ変化試験による実験的検討を行った。比較として用いた早強セメントではセメント中の SO₃ 量、高温養生の前置き時間、高温養生後の水分供給、AE 剤の有無等で膨張量は異なり、特に高温養生後の水分供給の影響が大きかったのに対して、BC ではいずれの条件においても DEF による膨張は確認されなかった。

キーワード: DEF, 高炉スラグ高含有セメント, 高炉セメント C 種, 高温養生, エトリンタイト

1. はじめに

近年、低炭素型社会構築に向けた取組みが国内外で活発化する中で、従来一般的に使用されてきた高炉 B 種やフライアッシュ B 種のような混合セメントよりも混合材の置換率の高い、いわゆる低環境負荷型の混合セメント・コンクリートに関する研究開発が盛んに行われている¹⁾。これに伴って流動性やワーカビリティなどのフレッシュ性状の確保や強度発現性状の改善、また各種耐久性の担保等を目的とした様々な材料・配合設計が検討されている^{2),3),4)}。

耐久性に関して、高炉スラグやフライアッシュ、天然ポズランなどの混合材は一般的にエトリンタイトの遅延生成 (DEF) による膨張を低減する効果があると言われている⁵⁾。その原因としては水酸化カルシウムの消費と空隙水中のアルカリ濃度の減少、組織の緻密化、材料からの活性アルミナの供給による SO₃/Al₂O₃ 比減少等の材料組成の変化などによると考えられている⁶⁾。混合材の置換率が高くなるほどこれらの影響は顕著になることから、低環境負荷型の混合セメントは基本的には DEF に対して抑制的なセメント設計であると考えられる。一方で初期強度の確保や収縮ひび割れ抑制等を目的として、低環境負荷型セメントでは石膏等の添加により材料中の SO₃ を増大させる設計を行う場合がある¹⁾。そのような場合、設計条件によっては混合材の置換率が高いにも関わらず SO₃/Al₂O₃ 比が比較的高い組成となる場合も想定される。また DEF による膨張を生じる要因はセメント組成以外にも数多くあり、その影響には未だ不明瞭なものも多い。

そこで本研究では、低環境負荷型セメントとして無水石膏 (CS) を添加した高炉スラグ高含有セメント (BC) を用いてモルタル長さ変化試験による実験的検討を行っ

た。試験はセメントの種類や、DEF に影響する様々な要因を実験条件として設定した。また長さ変化試験に供した試験体を用いて構成相の確認や顕微鏡観察を行った。これらの実験を通して得られたセメントの材料組成を初めとする様々な因子と DEF に関する諸特性について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験因子および水準

本研究では試験因子としてセメントの種類、BC に含まれる CS および硫酸カリウム (KS) の添加による SO₃ 量、骨材の種類、W/C、高温養生の前置き時間、高温養生後の養生条件、AE 剤の添加を因子とした。表-1 に試験因子と水準を、表-2 に水準表をそれぞれ示す。なお表-2 に○で記した箇所は実施した水準を表す。以下、これらの水準の詳細について説明する。

2.2 使用材料

(1) セメント, 混合材, 硫酸カリウム

BC は市販の普通ポルトランドセメント (OPC)、高炉スラグ微粉末 6000 (BFS) および CS を表-3 に示す所定の割合で混合した。BFS の置換率は最大 64.5%、CS の添加量は 3, 5 および 6.5% である。このとき BC 中の SO₃ 量は BC CS6.5% のとき 4.56% であり、これは JIS の規格外である。比較として市販の早強ポルトランドセメント (HPC) および高炉セメント B 種 (BB) をそれぞれ用いた。表-4 に各材料の化学組成および鉱物組成を示す。BC および HPC については DEF による膨張を促進させるために硫酸塩として KS を SO₃ 換算で 0.92, 2.0, 3.0% 添加した。

(2) 骨材, 混和剤

骨材は ISO 標準砂 (SS) を基本として一部の水準に石

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所研究開発 1 部 工修(正会員)

*2 (株) 竹中工務店 技術研究所 建設材料部 研究主任 工修(正会員)

*3 (株) 竹中工務店 技術研究所 リサーチフェロー Ph.D(正会員)

*4 東京工業大学 大学院材料工学専攻 教授(正会員)

表-1 試験因子と水準

因子	水準
セメントの種類	BC(CS: 3, 5, 6.5%), HPC, BB
KS 添加(% SO ₃)	0, 0.92, 2.0, 3.0
骨材の種類	ISO 標準砂 (SS) , 石灰砕砂 (LS)
W/C(%)	22, 30, 40, 50
空気量(%)	AE(6~8%), PL(1~3%)
前置き時間(hr)	4, 10
高温養生後の養生条件	封かん, 湿空, 水中

表-3 BCセメント配合

記号	セメント配合 (%)			SO ₃ (%)
	OPC	BFS	CS	
BC CS3%	32.5	64.5	3.0	2.52
BC CS5%	32.0	63.0	5.0	3.69
BC CS6.5%	31.5	62.0	6.5	4.56

表-2 水準表

セメント	砂	KS (%)	前置き (hr)	養生	W/C (%)							
					22	30	40	50				
					PL	AE	AE	PL	AE			
BC CS3%	SS	0	10	封かん	○	○	○	○	○			
湿空						○		○				
封かん						○						
						○						
BC CS5%				LS	0			○				
							○					
							○					
							○					
							○					
							○					
BC CS6.5%				SS	2	4	水中				○	
封かん									○			
			○									
水中			○					○				
			○					○				
封かん			○									
			○									
水中			○					○				
			○					○				
BB	SS	0	10				封かん			○		
								○				
								○				
					○							
					○							
					○							
HPC	SS	0.92	10	封かん			○					
						○						
						○						
						○						
						○						
						○						
HPC	SS	2	4	水中			○					
						○						
						○						
						○						
						○						
						○						
HPC	SS	3	10	水中			○					
						○						
						○						
						○						
						○						
						○						

表-4 セメント, BFSの化学組成および鉱物組成

記号	化学組成 (%)										鉱物組成 (% , XRD/Rietveld 法)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Gyp ^{*1}	Bas ^{*2}	Cal ^{*3}
OPC	21.51	5.55	3.25	63.79	2.04	2.34	0.37	0.32	0.26	0.12	66.1	9.7	4.8	13.3	1.9	3.0	0.5
HPC	20.49	5.16	2.57	65.09	0.88	2.98	0.35	0.33	0.29	0.36	66.1	10.9	9.6	7.7	0.0	3.9	1.1
BB	26.16	9.24	1.88	53.91	3.67	2.07	0.30	0.31	0.42	0.08	-	-	-	-	-	-	-
BFS	33.79	14.50	0.48	43.08	6.04	0.06	0.22	0.40	0.58	0.01	-	-	-	-	-	-	-

*1: Gyp = Gypsum, *2: Bas = Bassanite, *3: Cal = Calcite

灰砕砂 (LS) を用いた。また混和剤は W/C や目標空気量に応じて減水剤, 高性能減水剤, AE 剤および消泡剤を適宜使用した。

2.3 配合

モルタルの W/C および C/S は, W/C = 22, 30, 40, 50% に対してそれぞれ 1.1, 1.4, 2.0, 3.0 とした。KS の添加は SO₃ 換算で 0.92, 2 および 3% となるようセメントに対して内割で添加した。減水剤, 高性能減水剤, AE 剤および消泡剤の添加は, 目標空気量を AE 剤添加 (AE) の場合 6~8%, AE 剤無添加 (PL) の場合 1~3% として目標範囲内になるよう適宜添加した。

2.4 練混ぜ, 空気量測定および供試体の作製

モルタルの練混ぜは JIS R 5201 に準拠して行い, 空気量は練上がり直後に質量法にて測定した。供試体の作製は JIS A 1146 に準拠して行い, 両端面にゲージプラグを埋め込んだ 40×40×160 mm 角柱供試体を作製した。供

試体は 1 水準あたり 3 体作製した。

2.5 養生条件

20℃で練混ぜおよび成形を行った供試体は 20℃前養生を行い, その後 20℃/hr で昇温して最高温度 90℃, 保持時間 12 時間の蒸気養生を行った。前養生の時間はセメントの接水から 10 時間を基本とし, 一部の水準では 4 時間とした。蒸気養生終了後は 10℃/hr で 20℃まで降温した後に脱型し, 20℃で封かん, 湿空および水中養生を行った。一般に水中養生は他の養生と比べて膨張の発生が早く長期間にわたると言われている^{5), 6)}。一方で本検討の対象である BC の DEF 膨張が懸念される主な適用対象としては大断面の構造物等が想定されることから, BC は封かん養生を基本とした。ただし SO₃/Al₂O₃ モル比が 0.77 (KS 由来の SO₃ を含む) と最も高い, すなわち最も DEF 膨張を生じやすいと考えられる BC CS6.5% に KS を 2.0% 添加した水準では, より膨張を促進させる環

境で評価を行う目的で水中養生に供した。

2.6 試験項目

供試体は12ヶ月までJIS A 1146に準拠して長さ変化を測定した。所定の材齢経過後の供試体は1本を破断して、多量のアセトンを用いて水和を停止した後、X線回折法(XRD)による鉱物相の同定、走査型電子顕微鏡(SEM)による研磨面の反射電子像(BEI)観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 長さ変化試験

(1) 高温養生後の養生条件とセメント組成の影響

材齢12ヶ月における全水準の長さ変化とセメントの $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比を図-1に示す。なお $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比についてはKSの添加による SO_3 量の増大分を加味して算出している。全水準の膨張量は高温養生後の養生条件によって大別された。すなわち、封かん養生の場合には膨張量は小さく、むしろ多くの水準で自己収縮と見られる収縮挙動を示した。次いで湿空養生が僅かに膨張を示し、水中養生に供した水準が比較的大きな膨張を生じた。DEFが生じるには十分な水分の供給が必要であり、本検討の結果はこれと一致する。

次にセメントの組成に着目する。セメントの種類で比較するとBCやBBの膨張量はおおむねHPCと比べて低く、高炉セメントのDEF抑制効果が確認された。ここでセメントの $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比とDEFによる膨張の関係について、Heinz⁷⁾らは $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比が0.55以上の時に膨張量が大きくなること、Zhang⁸⁾らはモル比が1.0付近において膨張量が最大となることをそれぞれ報告している。本研究ではHPCの $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比は0.97~1.53、BCは0.28~0.77であった。つまりHPCの方がモル比は高く、膨張が大きくなるとされる領域により近いものの、BCに関しても、一部の水準については膨張が大きいとされる範囲に該当することが分かる。加えて前述のようにBCで最も $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比の高い $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3=0.77$ のセメントについては水中養生を行っている。しかしながらこのときの膨張量は0.08%程度であり、これはアルカリ骨材反応の判定基準(6ヶ月)である0.1%よりも小さい値である。既に述べたようにDEFにはセメントの組成以外にも様々な要因が影響するために慎重な議論が必要であるものの、本研究の範囲内において、BCは比較的高い $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比となる組成であってもDEFによる膨張を生じなかったことが明らかとなった。

(2) 硫酸塩の種類と SO_3 量の影響

BCのCSおよびKS添加と長さ変化の関係を図-2に、HPCのKS添加と長さ変化の関係を図-3にそれぞれ示す。なおBCは全て封かん養生、HPCは全て水中養生であり、各図はセメントの種類だけでなく水分供給量の違

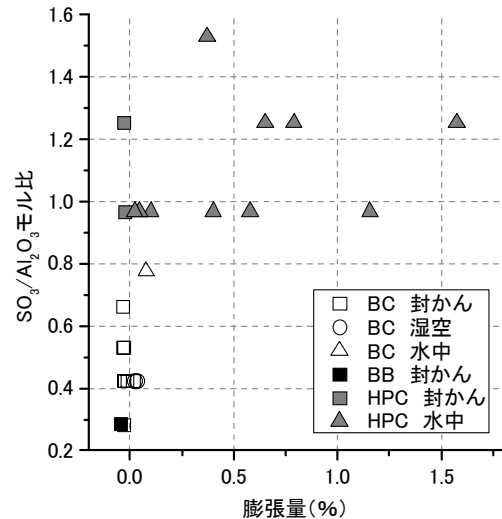


図-1 長さ変化とセメントの $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ モル比

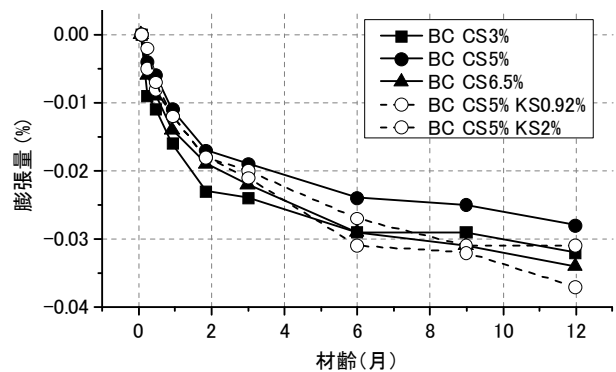


図-2 BCのCSおよびKS添加と長さ変化

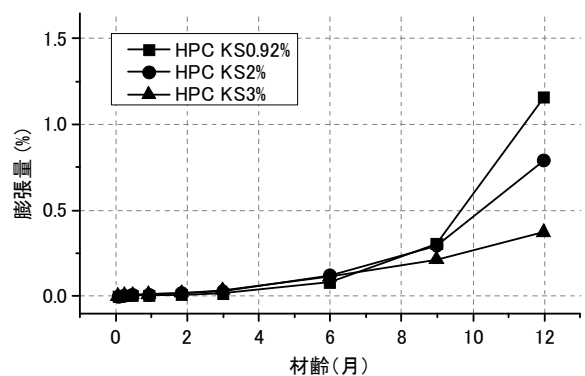


図-3 HPCのKS添加と長さ変化

いによる影響を受けている点に留意が必要である。BCではCSやKS添加によらず材齢12ヶ月まで収縮傾向を示し、膨張は生じなかった。HPCは全て膨張傾向を示し、KSの添加量が多い水準ほど膨張量は小さくなった。これは同様の検討を行った羽原ら⁹⁾と逆の傾向である。また、羽原らの検討では膨張は材齢20日程度で顕在化したのに対して、本研究では膨張開始までに4~6ヶ月程度を要し、材齢12ヶ月まで膨張が継続した。長さ変化試験は継続中であり、今後これらの終局的な膨張量について確

認が必要と考えられる。また本研究で用いた HPC には 2009 年の JIS R 5210 の改定により石灰石微粉末が含まれており、これが膨張を抑制した可能性がある。

HPC の材齢 12 ヶ月における長さ変化試験供試体の様子を写真-1 に示す。なお視覚の容易さを考慮して主なひび割れを白線で示した。BC については写真を掲載していないものの、全ての水準でひび割れ等は確認されなかった。HPC は KS の添加量が多い、言い換えれば膨張量が小さい KS の 2.0 ないし 3.0% 添加の場合に供試体に顕著なひび割れが生じていた。この原因について、KS の添加は長期強度発現性を低下させるとの報告がある¹⁰⁾。この要因と、多量の KS 添加によって水中養生による硬化体からのアルカリ溶出が大きくなった結果として硬化体内部と表層付近で膨張挙動に違いが生じた可能性が考えられるものの、詳細は更なる検討が必要である。

(3) 高温養生の前養生期間の影響

高温養生の前養生期間と長さ変化の関係を図-4 に示す。KS 添加量は全て 2.0%、養生は水中養生である。HPC の結果を見ると、既往の知見⁹⁾と同じく前養生期間が 4 時間の場合に最も大きな膨張を示した。一方、前養生期間を 4 時間とした BC CS6.5% では水中養生開始直後から材齢 2 ヶ月程までに 0.06% 程度の膨張が生じた。これは一般的に膨張が顕在化するまでに早くとも 20 日程度を要する⁹⁾ DEF の挙動と異なる。従って DEF の基本的な発生機構である「高温でモノサルフェート水和物へ変化したエトリンガイトが、その後常温に戻ると再び生成するという現象」⁹⁾ではなく、CS と KS の併用によって過剰に添加された SO₃ が、高温養生後も未反応のまま残存して常温下でエトリンガイト (AFt) を生成したものと考えられる。このとき用いた BC CS6.5% の SO₃ 量は前述のように JIS 規格を上回っており、さらに促進条件のために KS を添加したものである。従って実用上のセメント組成の範囲内においてこのような現象は生じにくいと考えられるものの、いわゆる低環境負荷型混合セメントにおいて初期強度の担保等のために過剰な SO₃ を添加すると、未反応の SO₃ が高温養生後に硬化体を膨張させる場合があることは認識しておく必要がある。

(4) W/C、細骨材の種類および AE 剤の影響

BC CS5% における W/C、骨材の種類および AE 剤の有無と長さ変化の関係を図-5 に、HPC における AE 剤の有無と長さ変化の関係を図-6 にそれぞれ示す。なお BC は全て封かん養生、HPC は全て水中養生である。図-5 より、BC について、W/C = 30% 以上では LS の使用や AE 剤の添加によらず膨張を示さなかった。W/C = 22% の場合には経時的な膨張が認められた。これは単位セメント量の増大によって膨張に寄与する物質の単位体積あたり量が増大したためと考えられる。ただし膨張量は材齢

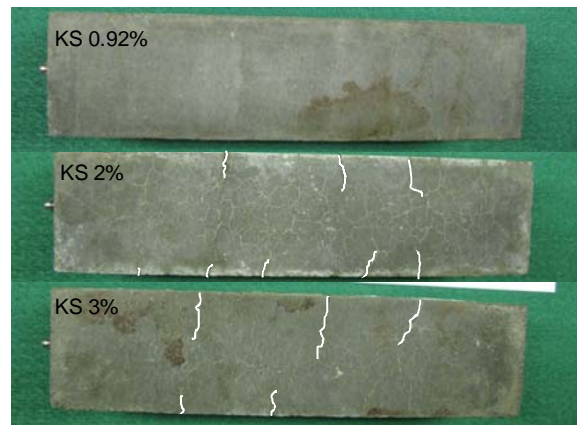


写真-1 HPC の KS 添加と供試体の様子

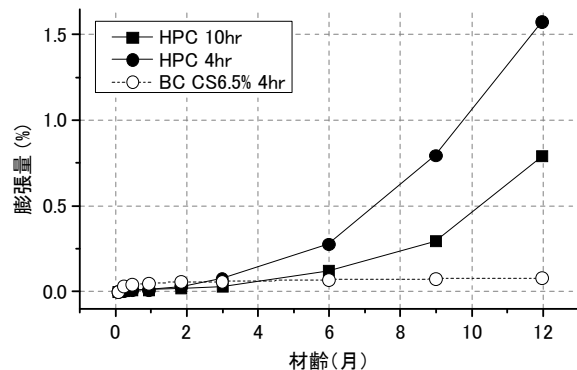


図-4 高温養生の前養生期間と長さ変化

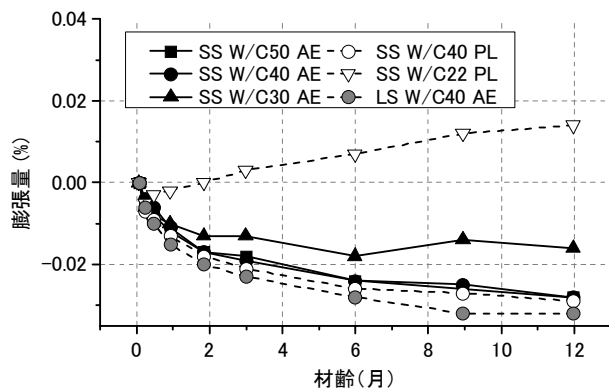


図-5 BC の W/C、細骨材、AE 剤の有無と長さ変化

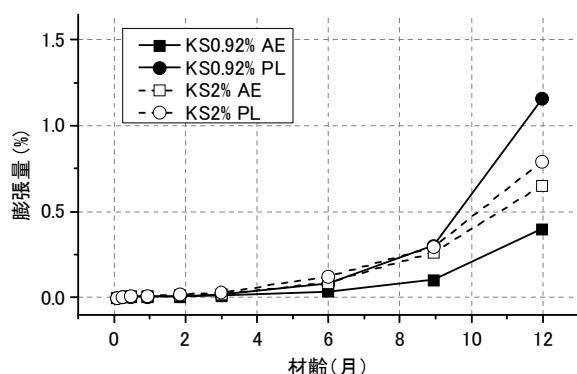


図-6 HPC の AE 剤の有無と長さ変化

12ヶ月で0.01%程度であり、アルカリ骨材反応の判定基準（6ヶ月で0.1%）と比べると十分に小さい値である。

図-6より、HPCではKSの添加量によらずAE剤による膨張の低減効果が確認された。AE剤がDEFによる膨張に及ぼす影響に関してはHime¹¹⁾が同様の知見を報告しているものの、検討例は極めて少ない。我が国におけるDEFによる劣化事例は欧米と比較すると少なく、この一因として国内のコンクリートが殆どの場合でAE剤を使用していることも寄与している可能性があることから、今後メカニズム解析などの詳細な検討が必要である。

(5) 長さ変化のまとめ

本検討ではBCを対象としてDEFに影響を及ぼすと考えられる様々な要因を因子として長さ変化試験を行った。特にKSの添加や蒸気養生の最高温度（90℃）などは、BCの材料設計や低発熱型のセメントであることを考慮すると、実際に想定される使用環境よりもDEFによる膨張を促進させた条件と考えられる。しかしながら、本検討範囲のいずれの条件においてもBCではDEFによる膨張は生じないことが確認された。

3.2 XRD

材齢12ヶ月経過後の長さ変化供試体のXRDを図-7に示す。HPCでは9.0°にAFtの明瞭なピークが認められた。BCの場合、CSやKSの添加によらず9.9°付近にモノサルフェート（AFm(S)）のピークが確認された。LSを使用した場合には、11.7°付近にカルシウムアルミネートモノカーボネート水和物（AFm(C)）のピークが確認された。AFtのピークは非常に不明瞭であり、CSを6.5%、KSを2%加えた場合にわずかに確認された。

以上のようにBCではAFmやAFtのピークはいずれも小さくブロードであるため、生成量は少なく、結晶性の低いあるいは微小な結晶を形成していることが推察された。ここで水酸化カルシウム（CH）に着目すると、HPCでは明瞭なピークが確認できるのに対して、BCではLSを使用した場合およびCSを5%、KSを0.92%添加した場合にわずかに確認できるものの、それら以外ではCHは確認されなかった。つまりBCの水準では余剰なCaがHPCと比べて非常に少なく、CSやKS添加によってSO₃が十分存在したとしてもカルシウムアルミネート系水和物が生成しにくい組成であると考えられる。またBCのいずれにおいても、他にSO₃を含む結晶相は確認できなかった。従ってAFt、AFm(S)を構成する以外のSO₃は主にC-S-Hへ収着しているものと考えられる。ただしAFtやAFm(S)の安定性やC-S-HへのSO₃の収着は液相のpHやイオン強度の影響を受けることから、詳細な検討には空隙水の分析等が必要である。

3.3 SEM

写真-2にKS添加2%、PL、高温養生の前養生4時間

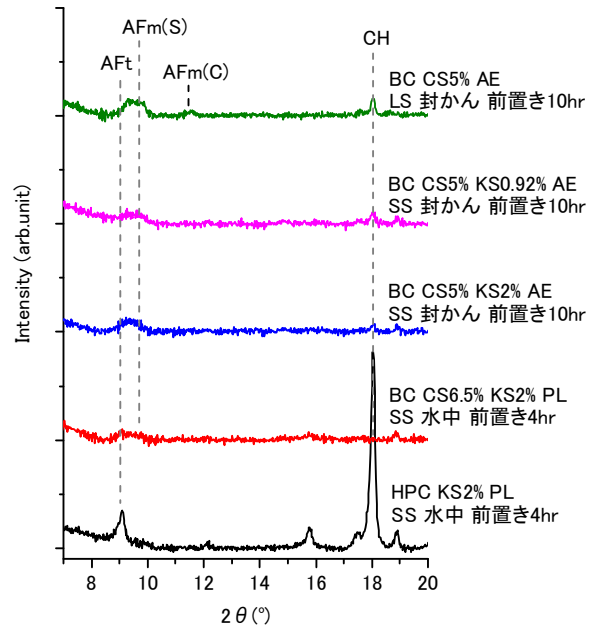


図-7 材齢12ヶ月経過後の長さ変化供試体のXRD

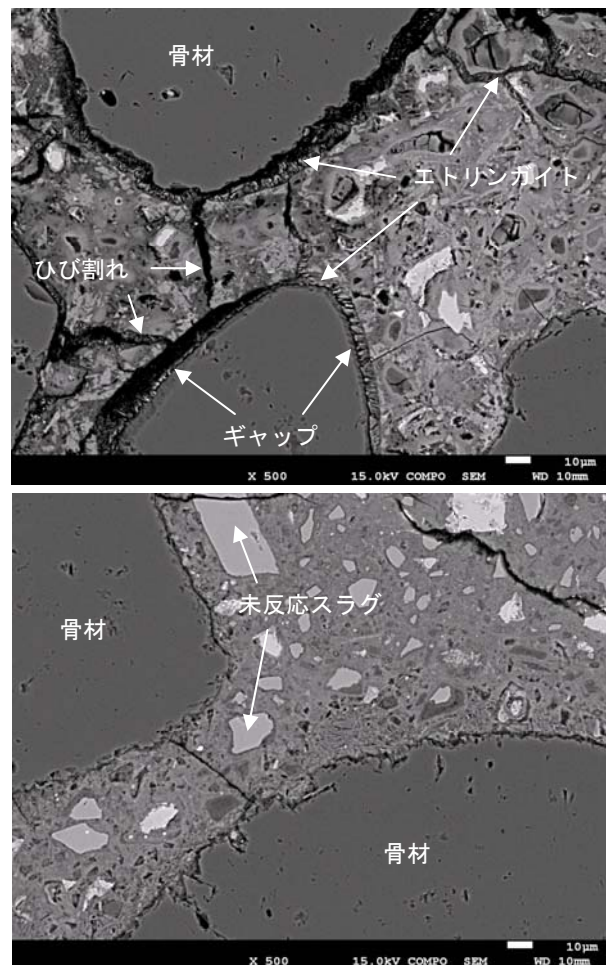


写真-2 HPC（上）およびBC CS6.5%（下）のBEI（KS添加2%、PL、高温養生の前養生4時間）

としたHPCおよびBC（CS量6.5%）のBEIを示す。HPCでは骨材-セメントペースト間に最大で20µm程度のギ

ギャップが認められ、骨材同士を連結するようなひび割れも多数確認された。骨材-セメントペースト間のギャップにはほとんどの場合において AFt の生成が認められた一方で、ひび割れ部においては AFt が確認されない部分も見られた。BC ではギャップやひび割れは確認されなかった。なお BC の写真の一部にもひび割れが見られるが、これは試料の水和停止や研磨時に発生したものと考えられる。前節の XRD による検討ではごく僅かに AFt のピークが確認されたものの、BEI からは AFt の生成は確認できなかった。セメントペーストの部分に着目すると、BC には未反応のslagも見られるものの HPC と比較して空隙の少ない緻密な組織を形成しており、物質移動に対する抵抗性の高さが示唆された。

4. まとめ

本研究では BC が DEF による膨張に及ぼす影響に関してモルタル長さ変化試験による実験的検討を行い、その結果として次の結論を得た。

- (1) BC は無水石こうや硫酸カリウムの添加、骨材の種類、W/C、高温養生の前置き時間、高温養生後の養生条件、AE 剤の添加によらず DEF による膨張を示さなかった。
- (2) 無水石こうを 6.5%とした BC にさらに硫酸カリウムを 2%添加した場合、過剰に添加された SO₃ が高温養生後にも未反応のまま残存し、エトリンガイトが生成することで 0.06%程度の初期膨張が生じた。また W/C = 22%とした BC では 0.01%程度まで経時的な膨張を示したものの、いずれの膨張量も小さいものであった。
- (3) 材齢 12 ヶ月において BC ではエトリンガイトはほとんどの場合観察されなかった。また水酸化カルシウムは極めて少ないか、あるいは全く確認されなかった。つまり BC では、無水石こうや硫酸カリウム添加により多量の SO₃ が存在する場合であっても、Ca が不足するためにエトリンガイトが生成しにくい材料組成になっていると考えられる。
- (4) SEM 観察において BC では骨材-セメントペースト間のギャップやひび割れは見られず、緻密な組織を形成している様子が確認された。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成による「省エネルギー革新技术開発事業/実用化開発/エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ、(株)竹中工務店、鹿島建設 (株)、(株)デイ・シイ、日鉄住金高炉セメン

ト (株)、太平洋セメント (株)、日鉄住金セメントおよび竹本油脂 (株) による共同研究として実施した。本研究の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉渕清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂・ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010
- 2) 辻大二郎, 小島正朗, 黒田萌, 坂田昇: 高炉slag高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.145-150, 2013
- 3) 閑田徹志, 依田和久, 米澤敏男, 黒田萌: 高炉slag高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度に関する実験検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.229-234, 2013
- 4) 木之下光男, 黒田萌, 橋本学, 松下哲郎: 高炉slag高含有セメントを用いたコンクリート用多機能混和剤の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.121-126, 2013
- 5) Heinz, D., Ludwig, U. and Nasr, R.: Modellversuche zur Klärung von Schadensursachen an wärmebehandelten Betonfertigteilen, Teil II, Wärmebehandlung von Mörteln und späte Ettringitbildung, TIZ-Fachberichte, Vol.106, No.3, pp.178-183, 1982
- 6) 平尾宙: 硫酸塩劣化事例 - エトリンガイトの遅延生成 (DEF) に関する研究 - コンクリート工学, Vol.44, No.7, pp.44-51, 2006
- 7) Heinz, D. and Ludwig, U.: Mechanism of Secondary Ettringite Formation in Mortars and Concretes Subjected to Heat Treatment, Concrete Durability, ACI SP-100, Vol.2, pp.2059-2071, 1987
- 8) Zhang, Z., Olek, J. and Diamond, S.: Studies on delayed ettringite formation in heat-cured mortars: II. Characteristics of cement that may be susceptible to DEF, Cement and Concrete Research, Vol.32, No.11, pp.1737-1742, 2002
- 9) 羽原俊祐, 福田峻也, 小山田哲也, 藤原忠司: DEF によるコンクリートの硫酸塩膨張現象について—材料, 蒸気養生および保管条件の影響—, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.335-341, 2006
- 10) J. Gebauer, and M. Kristman.: The Influence of the composition of industrial clinker on cement and concrete properties, World Cement Tech, March, pp.46-51, 1979
- 11) Hime, W. G.: Delayed Ettringite Formation - A Concern for Precast Concrete? PCI JOURNAL, Vol.41, No.4, pp.26-30, 1996