

# 報告 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートのレディーミクストコンクリート工場への適用検討

黒田 萌\*1・玉木 伸二\*2・米澤 敏男\*3・坂田 昇\*4

**要旨** : CO<sub>2</sub>の排出量削減を目的として高炉スラグ微粉末 (ブレン 4000cm<sup>2</sup>/g 級) の含有率を 65%程度まで高めたセメントを用いたコンクリートの研究を行っている。この研究の一環として、6 工場のレディーミクストコンクリートに高炉スラグ高含有セメントを適用し、コンクリートの性状を確認した。また、コンクリートの性状に与える影響について、水セメント比、スランプおよび混和剤の違いから検討し、一部の工場では普通ポルトランドセメントと比較した。その結果、工場毎に多少の違いはあるものの各性状の傾向はほぼ等しいことが確認され、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性状を把握することができた。

**キーワード** : 二酸化炭素, 高炉スラグ, 高炉スラグ高含有セメント, レディーミクストコンクリート

## 1. はじめに

近年、地球温暖化が問題になっており、CO<sub>2</sub>排出量の削減が求められている。そのため、セメントの一部に高炉スラグを置換した高炉セメントの利用拡大が期待されている。しかし、現状は高炉セメント B 種 (高炉スラグ置換率:30-60 質量%, 以下 BB と示す) の利用にとどまり、高炉セメント C 種 (高炉スラグ置換率: 60-70 質量%) や高炉スラグ置換率 70 質量%以上のセメントは、ほとんど利用されていない。

筆者らの研究グループは、CO<sub>2</sub>の排出量削減を目的として高炉スラグ微粉末の含有率を 65%程度まで高めたセメント (以下、BC と示す) を用いたコンクリートの研究を行っている<sup>1),2),3)</sup>。

本報告は、この研究の一環として、6 工場のレディーミクストコンクリートに BC を適用し、コンクリートの性状を確認した結果を報告する。また、コンクリートの性状に与える影響について、水セメント比 (以下、W/C と示す)、スランプおよび混和剤の違いから検討し、一部の工場では普通ポルトランドセメント (以下、N と示す) と比較した。

## 2. 実験概要

AE 減水剤調合 3 工場 (A-C 工場)、高性能 AE 減水剤調合 3 工場 (D-F 工場) に分け、実験を行った。実験の組合せを表-1 に、セメントの物理的性質と化学成分例を表-2 に示す。

AE 減水剤調合においては、A 工場では N および BC の 2 種類のセメントを用い、BC に既存の AE 減水剤 (AE1) を使用した時の性状を確認した。また、B および C 工場では、BC に BC 用として開発した AE 減水剤 (AE2<sup>4)</sup>) を用い、各性状を確認した。A および B 工場での目標スランプは 15cm、C 工場での目標スランプは 18cm である。

高性能 AE 減水剤調合においては、D 工場では N と既存の高性能 AE 減水剤 (SP1)、BC と BC 用として開発した高性能 AE 減水剤 (SP2、SP3<sup>3)</sup>) の組合せで各性状を確認し、BC を用いたコンクリートと既存のコンクリートとの比較を行った。また、E 工場では BC と SP2、SP3 を、F 工場では BC と SP1 を用い、各性状を確認した。D-F の工場での目標スランプは 18cm である。

### 2.1 使用材料

使用材料を表-3 に示す。

#### (1) セメント

BC は、高炉スラグ微粉末、N および無水石膏を構成成分として、スラグ粉末度 4000 級の高炉スラグ微粉末を

表-1 実験の組合せ

混和剤種類	工場	セメント-混和剤-目標スランプ	表記
AE減水剤 (減水率 10%以上)	A	N-既存品-15	N-AE1(A)
		BC-既存品-15	BC-AE1(A)
	B	BC-開発品-15	BC-AE2(B)
	C	BC-開発品-18	BC-AE2(C)
高性能 AE減水剤 (減水率 18%以上)	D	N-既存品-18	N-SP1(D)
		BC-開発品-18	BC-SP2,3(D)
	E	BC-開発品-18	BC-SP2,3(E)
	F	BC-既存品-18	BC-SP1(F)

表-2 セメントの物理的性質および化学成分例

セメント	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分(%)						
			ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
N	3.16	3390	2.26	21.1	5.47	3.21	63.7	2.00	2.28
BC	2.97	3930	0.98	28.6	11.4	1.04	49.8	4.03	3.49

\*1 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ 研究員 工修 (正会員)

\*2 竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 化学グループ マネージャー 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 鹿島建設(株) 土木管理本部 土木技術部長 博士 (工学) (正会員)

表-3 使用材料

種別	工場	記号	詳細	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	FM	
セメント	A	N	普通ポルトランドセメント(α社製)	3.16	-	-	
	D	N	普通ポルトランドセメント(β社製)	3.15	-	-	
	A-F	BC	高炉スラグ高含有セメント(γ社製)	2.97	-	-	
細骨材	A	S1	兵庫赤穂(砕砂)	S1:S2=7:3	2.59	1.68	2.85
	A	S2	大分津久見(石灰砕砂)		2.67	0.72	2.80
	B	S1	兵庫西島(砕砂)	S1:S2=6:4	2.58	1.75	2.84
	B	S2	福岡北九州(石灰砕砂)		2.69	0.72	2.45
	C	S1	賀唐津(海砂)	S1:S2=7:3	2.57	1.72	2.82
	C	S2	兵庫西島(砕砂)		2.60	1.15	3.00
	D	S1	佐賀小川島沖(海砂)	S1:S2=7:3	2.57	1.43	2.60
	D	S2	兵庫家島町西島(砕砂)		2.58	1.84	3.01
	E	S1	大分津久見(石灰砕砂)	S1:S2=3:7	2.65	1.03	2.90
	E	S2	兵庫家島(砕砂)		2.57	1.66	2.90
F	S1	佐賀小川島沖(海砂)	-	2.57	1.74	2.64	
粗骨材	A	G1	兵庫相生(砕石)	G1:G2=5:5	2.63	0.86	6.63
	B	G1	兵庫西島(砕石)		2.62	1.01	6.72
	B	G2	山口美祢(石灰砕石)	-	2.70	0.39	6.52
	C	G1	兵庫西島(砕石)	-	2.63	0.75	6.59
	D	G1	兵庫赤穂(砕石)	-	2.62	0.95	6.68
	E	G1	兵庫家島(砕石)	-	2.62	0.92	6.70
	F	G1	高知鳥形山(石灰砕石)	-	2.70	0.28	6.63
水	A,D	W1	回収水(上澄水)	-	-	-	
	B,E,F	W2	工業用水	-	-	-	
	C	W3	上水道水	-	-	-	
混和剤	A	AE1	既存品 AE減水剤(固形分20%)	1.08	-	-	
	B,C	AE2	開発品 AE減水剤(固形分20%)	1.08	-	-	
	D,F	SP1	既存品 高性能AE減水剤(固形分25%)	1.07	-	-	
	D,E	SP2	開発品 高性能AE減水剤(固形分25%,W/C=57.47%で使用)	1.08	-	-	
	D,E	SP3	開発品 高性能AE減水剤(固形分25%,W/C=40%で使用)	1.08	-	-	

65%程度混合した試作セメントである。高炉セメント C 種の規格に適合するセメントであるが、初期強度および収縮性能を改善するために無水石膏を混合し、セメント中の SO<sub>3</sub> 量を高めている。

比較用セメントとして対象工場常用の N を用いた。

(2) 化学混和剤

BC 用として使用した混和剤は、既存の混和剤 (AE1, SP1) と高炉スラグ高含有セメントを使用したコンクリートに生じる、流動保持性の低下を改善した開発品 (AE2, SP2, SP3) である。BC 用として開発した高性能 AE 減水剤を使用する水準においては、W/C によって使用する混和剤を選定した。

(3) 細骨材・粗骨材・水

細骨材、粗骨材および練混ぜ水は各工場常用のものを用了。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-4 に示す。目標空気量は、いずれも 4.5% とした。一般に高炉スラグ微粉末を混合した BB を用いたコンクリートの単位水量は、N を用いたコンクリートの単位水量から 3kg/m<sup>3</sup> 程度減じられている。そこで、高炉スラグ微粉末の混合量が BB より多い BC を用いたコンクリートの単位水量は、N を用いたコンクリ

表-4 コンクリートの調合

工場	セメント	混和剤	目標スランプ (cm)	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
					W	C	S1	S2	G1	G2
A	N	AE1	15	57	183	321	568	254	927	-
				49	184	376	536	240	927	-
				43	185	430	500	224	933	-
	BC			57	178	312	572	256	927	-
				49	179	365	538	240	927	-
				43	180	419	500	224	933	-
B	BC	AE2	15	57	178	312	489	340	467	481
				49	179	365	452	314	473	487
				43	180	419	437	303	477	491
C	BC	AE2	18	57	189	332	540	234	464	464
				49	191	390	502	218	464	464
				43	195	453	455	197	464	464
D	N	SP1	18	57	180	316	607	261	398	487
				47	180	383	555	240	406	495
				40	180	450	511	219	411	500
	BC			57	175	307	609	263	398	487
				47	175	372	560	240	406	495
				40	175	438	514	219	411	500
E	BC	SP2	18	57	175	307	276	627	432	430
				47	175	372	254	576	440	438
				40	175	438	233	529	445	443
F	BC	SP1	18	57	175	307	871	-	913	-
				47	175	372	799	-	929	-
				40	175	438	732	-	940	-

表-5 試験項目

試験項目		詳細	N	BC
フレッシュ 性状	スランプ	JIS A 1101	全水準	
	スランプフロー	JIS A 1150	全水準	
	空気量	JIS A 1128	全水準	
	コンクリート温度	JIS A 1156	全水準	
	経時変化	0,30,60分	W/C=49.47%のみ	
硬化物性	圧縮強度	標準養生	JIS A 1108 材齢2,7,28,56,91日 全水準	
		簡易断熱養生	JIS A 1108 材齢28,56,91日	W/C=49.47%のみ
	簡易断熱温度	JASS T-606に準拠	W/C=49.47%のみ 全水準	
	促進中性化	JIS A 1153に準拠	全水準	

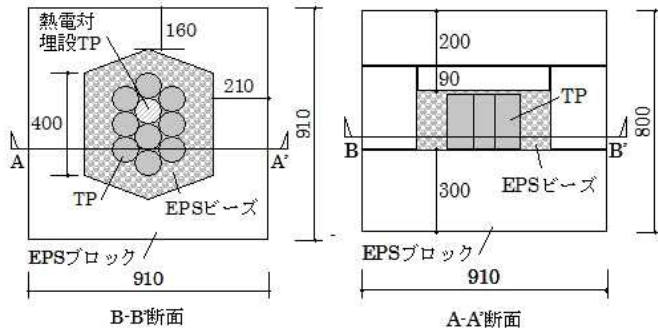


図-1 簡易断熱養生の概要

ートの単位水量から  $5\text{kg/m}^3$  減じた。粗骨材量は、Nを用いたコンクリートと同じとした。

### 2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、細骨材とセメントを投入した後、15秒空練りを行い、水を投入し45秒練混ぜを行った後、粗骨材を投入し、さらに60秒練り混ぜた。1バッチあたりの練混ぜ量は40Lとし、簡易断熱養生圧縮強度を採取した水準は2バッチを混ぜ合わせ80Lとした。D工場以外では60L練り強制二軸ミキサ、D工場では50L練り強制二軸ミキサを使用した。

### 2.4 試験項目

試験項目を表-5に、簡易断熱養生の概要を図-1に示す。簡易断熱養生は、材齢2週まで屋外に設置し、材齢2週で簡易断熱養生箱から取り出し、測定材齢までは室内で封緘養生を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ試験結果

フレッシュ試験結果を表-6に、目標スランプを得るための混和剤の添加量を図-2に示す。A工場においてNおよびBCにAE1を使用した結果、BCはNより  $5\text{kg/m}^3$  の単位水量を減じているにも関わらず、目標スランプを得るための混和剤の添加量が少なくなった(図-2(a))。また、F工場においてBCにSP1を使用した結果、DおよびE工場(SP2, SP3)と比べ、混和剤の添加量が大幅に少なくなった(図-2(b))。この結果は、既往の研究<sup>5)</sup>と同様の傾向であった。

経時変化試験結果を図-3に示す。BCとAE2またはSP2

表-6 フレッシュ試験結果

工場	セメント	混和剤	W/C (%)	混和剤添加量 (C×%)	経過時間 (分)	スランプ (cm)	空気量 (%)
A	N	AE1	57	0.50	0	16.0	4.9
					0	17.0	5.0
			49	0.55	30	16.5	4.0
					60	13.5	3.8
	BC	AE1	43	0.55	0	16.5	5.4
					0	15.5	4.2
			49	0.40	30	16.5	4.4
					60	15.0	4.0
B	BC	AE2	43	0.40	0	12.0	3.7
					0	15.5	3.9
			57	0.40	0	16.5	4.8
					0	17.5	4.6
			49	0.45	30	17.5	4.0
					60	15.0	3.8
C	BC	AE2	43	0.45	0	16.0	4.5
					0	19.5	4.1
			57	0.45	0	19.0	4.3
					30	18.5	3.5
			49	0.42	60	16.5	3.6
					0	20.0	4.5
D	N	SP1	57	0.60	0	18.0	4.6
					0	19.0	4.0
			47	0.60	30	16.5	4.5
	BC	SP2	40	0.60	60	14.5	4.4
					0	19.5	4.8
			57	0.80	0	19.5	4.3
					0	19.0	4.0
			47	0.70	30	20.0	4.2
					60	20.0	4.2
E	BC	SP2	40	0.60	0	20.0	3.9
					0	18.5	4.5
			57	0.95	0	18.5	4.5
					0	20.0	4.2
			47	0.95	30	22.0	3.9
F	BC	SP1			60	22.0	4.1
			40	0.80	0	20.5	4.7
					0	20.0	4.9
			57	0.33	0	20.0	4.9
					0	19.0	4.5
			47	0.28	30	14.5	3.9
					60	9.5	3.6
			40	0.28	0	19.5	4.2

を用いたコンクリートの流動保持性は、Nを用いたコンクリートの流動保持性と比べ同程度以上であり、いずれの工場でもBCを用いたコンクリートの流動保持性に問題がないことが確認された。BCにAE1を用いると、NにAE1を用いたものより、流動保持性が悪く(図-3(a))、

既往の研究<sup>6)</sup>と同様の傾向であった。これは前述したように、混和剤の添加量が少なくなったためだと考えられる。NにSP1を用いたものと、BCにSP2を用いたものを比較すると、BCの方が流動保持性が良好であった(図-3(b))。

### 3.2 圧縮強度試験結果

#### (1) 標準養生

材齢28日におけるセメント水比(以下、C/Wと示す)と標準養生圧縮強度の関係を図-4に示す。いずれの工場においても、BCを用いたコンクリートは、Nを用いたコンクリートと同様に、圧縮強度とC/Wの関係が線形であることが確認された。

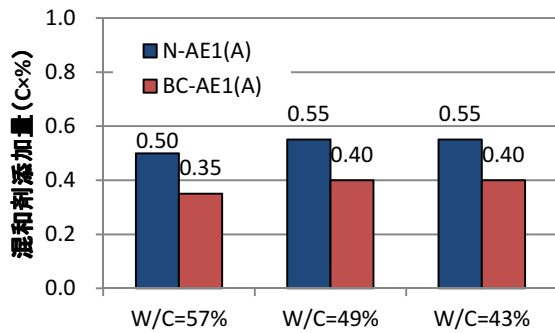
材齢と標準養生圧縮強度の関係を図-5に示す。BCを用いたコンクリートの工場間の圧縮強度差は小さかった。BCは初期の圧縮強度の伸びが小さく、材齢91日では、

同じW/CにおいてNを用いたコンクリートより圧縮強度が低くなることが確認された。BCに含まれるクリンカー分が少なく、水和反応に差があることが原因だと考えられる。この傾向は、工場、スランプ、混和剤が異なっても同様の傾向であった。BCを用いたコンクリートとNを用いたコンクリートとの圧縮強度差は、高性能AE減水剤調合ではAE減水剤調合より小さかった。

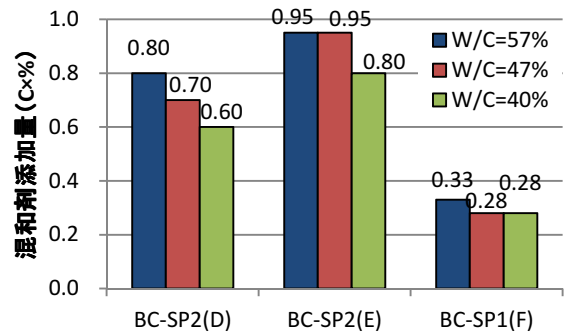
#### (2) 簡易断熱養生

材齢91日におけるC/Wと簡易断熱養生圧縮強度の関係を図-6に示す。簡易断熱養生においても、圧縮強度とC/Wの関係は線形であり、この傾向はいずれの工場においても確認された。

材齢28日標準養生圧縮強度と材齢91日簡易断熱養生圧縮強度の差(以下、 $_{28}S_{91}$ と示す)を図-7に示す。Nを用いたコンクリートとBCを用いたコンクリートの $_{28}S_{91}$

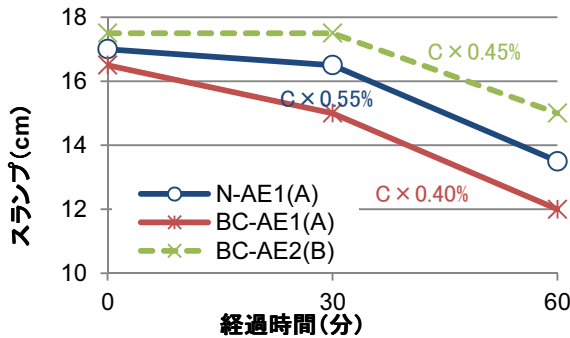


(a) NとBCの混和剤の添加量 (A工場)

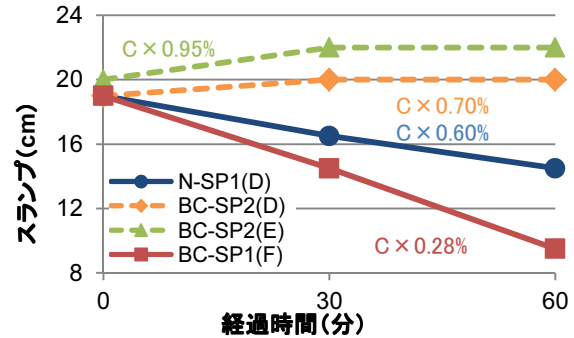


(b) 工場毎の混和剤の添加量 (高性能AE減水剤)

図-2 混和剤の添加量

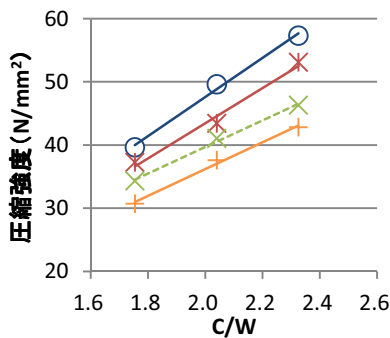


(a) AE減水剤 (W/C=49%)

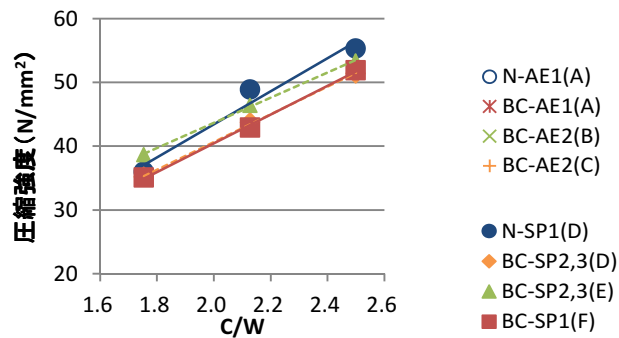


(b) 高性能AE減水剤 (W/C=47%)

図-3 経時変化試験結果



(a) AE減水剤



(b) 高性能AE減水剤

図-4 C/Wと圧縮強度の関係 (標準養生, 材齢28日)

は同程度であった。

### 3.3 簡易断熱温度履歴

簡易断熱温度の最高到達温度を図-8に示す。BCを用いたコンクリートでは、工場が異なっても同一W/Cでは最高到達温度が同程度であり、W/Cが小さくなると最高到達温度は高くなる傾向であった。また、BCはNよりも低発熱であることが確認された。これは、BCに含まれるクリンカーが少なく、水和反応速度に差があることが原因だと考えられる。BCはNよりも低発熱であることから、温度ひび割れ抵抗性に優れた性質を有していると言える。

### 3.4 中性化深さ

W/Cと中性化深さ(促進期間13週)の関係を図-9に示す。BCを用いたコンクリートでは、工場が異なっても同一W/Cでは中性化深さが同程度であり、W/Cが小さくな

ると中性化深さは線形に小さくなる傾向であった。また、BCを用いたコンクリートはNを用いたコンクリートより、中性化深さが大きくなる傾向にあった。ただし、自然暴露では高炉セメントA種～C種とNを用いたコンクリートで中性化の進行は大きく変わらないという報告<sup>7)</sup>もあり、今後更なる検証が必要である。

## 4. まとめ

高炉スラグ微粉末(スラグ粉末度4000級)を65%程度含有する高炉スラグ高含有セメント(BC)を使用したコンクリートの各物性について、異なるレディーミクストコンクリート工場で各性状を確認した。本実験の結果から、以下のことが確認された。

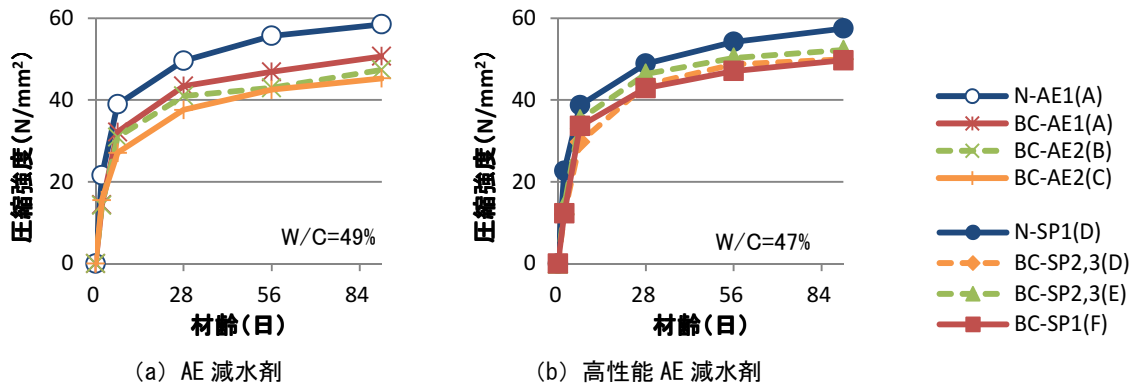


図-5 材齢と圧縮強度の関係(標準養生)

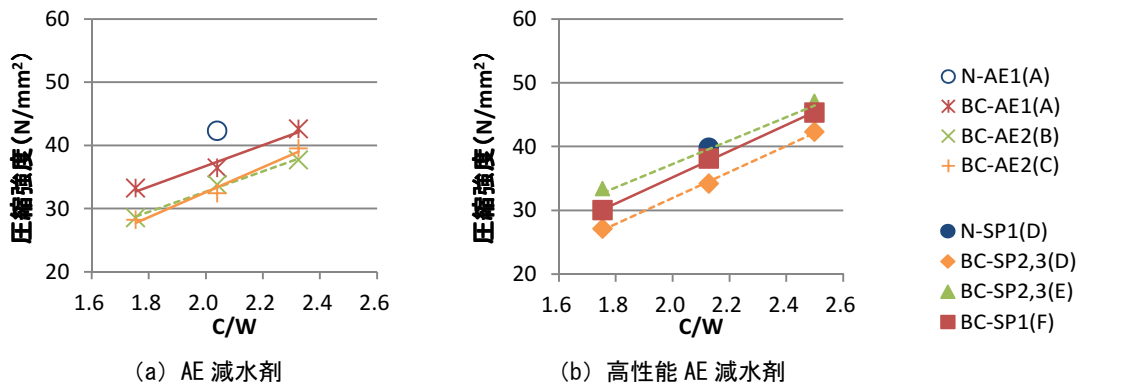


図-6 C/Wと圧縮強度の関係(簡易断熱養生, 材齢91日)

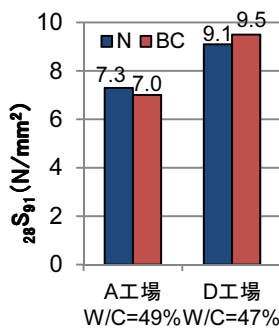


図-7 材齢28日標準養生圧縮強度と材齢91日簡易断熱養生圧縮強度の差( $_{28}S_{91}$ )

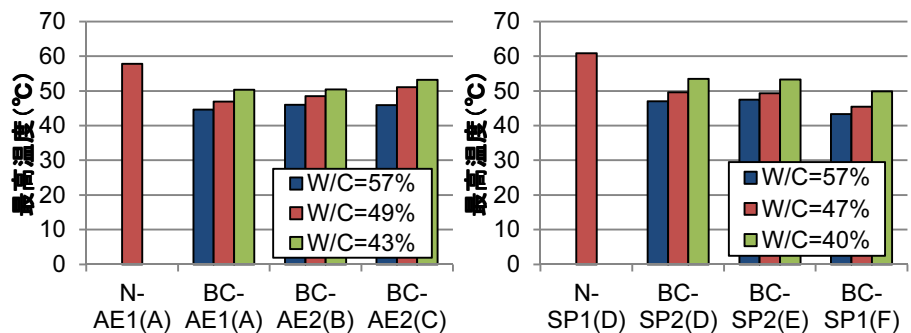


図-8 簡易断熱温度の最高到達温度



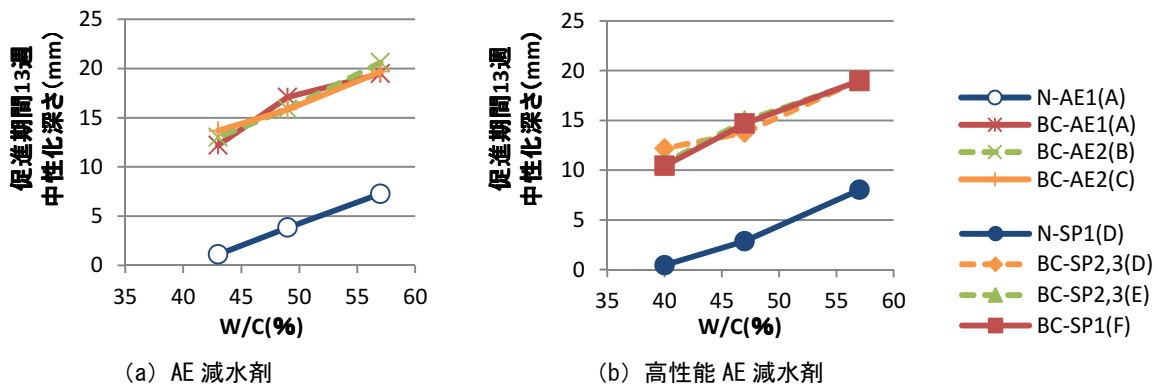


図-9 W/Cと中性化深さ (促進期間 13 週) の関係

- (1) 高炉スラグ高含有セメントは普通ポルトランドセメントよりも単位水量を減じた調合を設定することが可能である。
- (2) 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートも混和剤を適切に選定にすれば、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度以上の流動保持性が確保できる。
- (3) 標準養生、簡易断熱養生ともに、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの C/W と圧縮強度の関係は線形となる。
- (4) 標準養生、簡易断熱養生ともに、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの圧縮強度は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの圧縮強度に比べ、若干低下する傾向がある。
- (5) 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの  $_{28}S_{91}$  は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの  $_{28}S_{91}$  と同程度である。
- (6) 高炉スラグ高含有セメントは普通ポルトランドセメントに比べ、低発熱である。
- (7) 高炉スラグ高含有セメントを用いた同一 W/C のコンクリートの中性化深さは工場（使用材料など）が異なっても同程度であり、W/C と中性化深さの関係は線形となる。
- (8) 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの中性化深さは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの中性化深さに比べ、若干大きくなる傾向がある。

#### 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術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO<sub>2</sub> 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、(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 (株) および竹本油脂 (株) による共同研究として実施した。本研究に関わられた関係各位にお礼を申し上げます。

#### 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・CO<sub>2</sub> 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. 9
- 2) Toshio Yonezawa, Etsuo Sakai, Kiyoshi koibuchi, Mitsuo Kinoshita, "High-Slag Cement and Structures for Substantial Reduction of Energy・CO<sub>2</sub>", Proceedings, fib Symposium Stockholm, pp. 463-466, 2012. 6
- 3) 辻大二郎, 小島正朗, 黒田萌, 坂田昇: 高炉スラグ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. 7
- 4) 木之下光男, 黒田萌, 橋本学, 松下哲郎: 高炉スラグ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. 7
- 5) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 485-490, 2010. 7
- 6) 辻大二郎ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性 (その 1) 分散剤種類がフレッシュ性状及び硬化性状に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 205-206, 2011. 8
- 7) 依田彰彦: 40 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果, セメント・コンクリート論文集, No. 56, pp. 449-454, 2002