

環境配慮型コンクリート（高炉セメント C 種相当コンクリート）の開発

Development of environment-conscious concrete (concrete equivalent to blast furnace cement type C)

中村 雄太*

Yuta Nakamura

長井 智哉*

Tomoya Nagai

木村 仁治*

Yoshiharu Kimura

ボンマハーサイ パラミ*

Phommahaxay Palamy

要 約

本論文では、高炉セメント B 種と高炉スラグ微粉末を混合させて開発した環境配慮型コンクリート（高炉セメント C 種相当コンクリート）に関して、室内実験および実機実験によるフレッシュ性状、強度性状、耐久性、調合等を検討した。フレッシュ性状に関して現場到着を想定した経時変化では品質目標値内であることを確認し、強度に関して長期に渡って強度が増進することを確認した。また、実際の生コン工場で製造するにあたっては、一般的な生コンクリートの製造方法と同じく、水結合材比と標準養生の試験体による圧縮強度との関係式により調合設計ができることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 環境配慮型コンクリートの概要
- § 3. 室内実験
- § 4. 実機実験
- § 5. 調合検討
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

近年の地球温暖化などの気候変動への対策として、「混合セメントの利用拡大」が掲げられている¹⁾。混合セメントは、セメントの一部を高炉スラグやフライアッシュなどの副産物を置換させて製造したセメントであり、普通ポルトランドセメントに比べエネルギー起源による二酸化炭素の排出量が小さくなる。このような背景のもと、混合セメントの利用拡大に向け、特に高炉スラグを使用した環境配慮型のコンクリートの開発・実用が進められている。

そこで、昨今の社会情勢へ対応していくために、高炉スラグを使用した環境配慮型コンクリートとして、高炉セメント B 種（以下 BB と略記）および高炉スラグ微粉末（以下 BF と略記）を混合して製造する高炉セメント C 種相当の環境配慮型コンクリート（以下 BC コンと略記）を開発した。本報では、室内実験および実機実験を通して得られた BC コンの諸性状について報告する。

§ 2. 環境配慮型コンクリート（BC コン）の概要

高炉スラグを使用した高炉セメントは、表一に示すように、セメント内に含まれる高炉スラグ微粉末の分量により、JIS R 5211 では A～C 種に、日本建築学会（AIJ）指針²⁾ では A 種相当～C 種相当に分類される。高炉セメント B 種はセメントメーカーで製造され、既に流通している材料ではあるが、高炉セメント A 種および C 種については製品化しておらず、表一の分量となるよう普通ポルトランドセメント（以下 N と略記）に BF を混和材扱いとして置換して製造するのが一般的³⁾である。特に、高炉セメント C 種相当のコンクリートを製造する場合、BF の使用量が多くなることから、BF の運搬時や製造設備に関して生コン工場の負担が大きくなる。

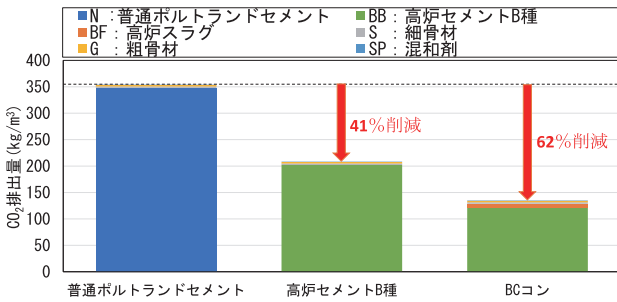
そこで、本開発のコンクリートは、BF 置換の対象になるベースセメントを N ではなく BB を用いて BC コンを製造することとした。BB は一般的に生コン工場に常備している。また、BB に含まれている BF の分量も考慮することができるため、混和材としてセメントに置換する BF の使用量を抑えられることから、生コン工場の負担を低減できるというメリットがある。

本開発のコンクリートは N 単体と比べ約 62% の CO₂ 排出量の削減が可能となる（図一）。

表一 高炉セメントの分類

種類	規格	混和材の分量 (%)		
		A種(A種相当)	B種(B種相当)	C種(C種相当)
高炉セメント	JIS R 5211	5を超え30以下	30を超え60以下	60を超え70以下
	AIJ指針 ²⁾	20以上30以下	40以上50以下	60以上70以下

* 技術研究所建築技術グループ



図一 BCコンのCO₂排出量削減率

表一 使用材料（室内実験）

材料	記号	産地・銘柄	密度(g/cm ³)
水	W	上水道	1.00
セメント	BB	高炉セメントB種	3.04
混和材	BF1	高炉スラグ微粉末4000	2.89
	BF2		2.89
細骨材	S1	陸砂	2.63
	S2	砕砂（硬質砂岩）	2.64
粗骨材	G	砕石（硬質砂岩）	2.64
混和剤	Ad	高性能AE減水剤	1.11

表一 使用材料（室内実験）

表三 コンクリートの調合一覧（室内実験）

調合	BF種類	結合材混合率(%)		BF混入率(%)	W/B(%)	かさ容積(m ³ /m ³)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)						Ad(C×%)	スランプ(cm)	空気量(%)
		BB	BF					W	BB	BF	S1	S2	G			
BB-45	-	100	-	40~45	45	0.55	50.0	170	378	-	591	258	879	0.80	18.5	4.6
BC-55-BF1	BF1	60	40	64~67	55	0.56	50.0	170	185	124	614	271	895	0.70	18.0	4.7
BC-45-BF1	BF1				45	0.55	49.0	170	227	151	586	258	879	0.80	20.0	4.8
BC-35-BF1	BF1				35	0.54	48.0	170	292	194	532	234	863	0.95	20.0	4.8
BC-45-BF2	BF2				45	0.55	49.0	170	227	151	586	258	879	0.80	18.5	4.4

§ 3. 室内実験

3-1 実験概要

BCコンの練り上がり性状，強度性状および耐久性性状を確認することを目的として室内実験を実施した。

3-2 実験計画

使用材料を表一に，コンクリートの調合を表三に，試験内容を表四に示す。BCコンはJIS R 5211に準拠し，高炉セメントC種相当のBF混入率となるようにBBとBFの混合率を60：40とし，水結合材比を55%，45%，35%の3水準とした。水結合材比45%のBCコンにおいては，比較のため製造メーカーが異なるBFも使用した。フレッシュコンクリートの試験は，スランプおよび空気量ともに品質目標値（スランプ18±2.5，空気量4.5±1.5）の範囲内であった。

3-3 実験結果

(1) 凝結性状・ブリーディング

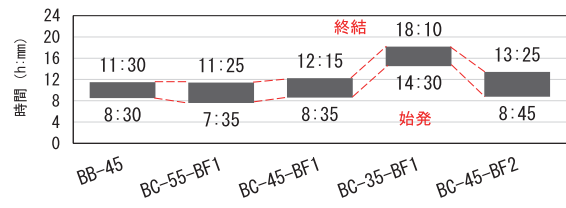
コンクリートの凝結時間を図二に，ブリーディング量を図三に示す。凝結試験では，BC-35-BF1のみ凝結が大幅に遅れた。これは，混和剤の添加率がW/B45%の調合に比べ0.15%多いことに加え，結合材の粉体量も多く添加量に1.6 kg/m³程の差があることから，混和剤中のリグニンスルホン酸塩等の凝結遅延成分が影響したことが原因と考えられる。ブリーディング量は，凝結が遅延したBC-35-BF1がもっとも大きく0.14 cm³/cm²となり，他調合は0.09~0.12 cm³/cm²となった。

(2) 圧縮強度・静弾性係数

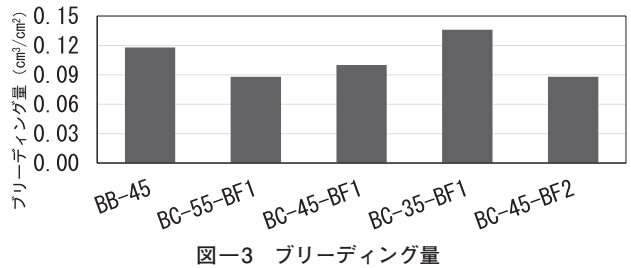
圧縮強度試験結果を図四に示す。W/B45%の調合で比較をすると，BF混入率が小さいBB-45が最も圧縮強度が大きく，材齢が進むにつれて，その差も広がった。BF混入率の多いBCでは強度発現性が低下する結果と

表四 試験内容（室内実験）

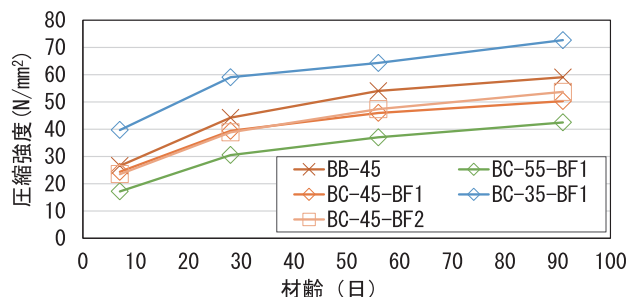
試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
単位体積質量	JIS A 1116
ブリーディング	JIS A 1123
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度、静弾性係数	JIS A 1108, JIS A 1149 標準養生 材齢7, 28, 56, 91日 計12本
長さ変化率	JIS A 1129-1 コンパレータ法(N=3)
自己収縮ひずみ	JCI「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」による(N=2)【養生:材齢91日まで封緘養生】
促進中性化試験	JIS A 1153(養生:水中4週+気中4週) 促進材齢(週):1,4,8,13,26
凍結融解試験	JIS A 1148 A法(養生:水中4週)



図二 凝結時間



図三 ブリーディング量



図四 圧縮強度試験結果（室内実験）

なり既往³⁾の研究の結果と同様の傾向を示すことを確認した。異なるBF種類を使用したBC-45-BF1とBC-45-BF2の比較ではいずれの材齢においても強度差は見られなかった。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。静弾性係数は、図中に併記したJASS5⁴⁾に示される建築学会予測式に沿って推移し、すべての値が式より大きく、0から+20%程度の間に入る値となった。

(3) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの測定結果を図-6に示す。自己収縮ひずみは、水結合材比の小さい割合ほど収縮ひずみが大きくなり、水結合材比が同じBB-45とBC-45-BF1とでは差は見られなかった。

(4) 長さ変化

長さ変化試験による乾燥材齢26週までの長さ変化率を図-7に、質量変化率を図-8に示す。BCコンの乾燥材齢26週の長さ変化率は -600×10^{-6} から -750×10^{-6} 程度の範囲で、W/Bが大きいほど長さ変化率も大きくなった。BC-45-BF1およびBC-45-BF2は同程度の長さ変化率となり、BF種類が長さ変化率に及ぼす影響は見られなかった。BB-45は、BC-45よりもわずかに長さ変化率が小さくなった。質量変化率は、W/Bが大きいほど質量減少も大きく、同一W/Bの割合ではほぼ同等の値となった。

(5) 中性化抵抗性

促進中性化試験結果を図-9に示す。W/Bが大きい割合ほど中性化深さは大きくなった。BB-45は、BC-45よりも中性化深さが小さくなり、同一W/BでBF種類のみ異なるBC-45-BF1とBC-45-BF2とでは、中性化深さに差は見られなかった。

鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説⁵⁾によると、温度20℃、湿度60%RHの大気中の中性化深さは、以下の式(1)で表される。

$$C = A\sqrt{CO_2}/5.0 \cdot \sqrt{t} \dots(1)$$

ここに、C：中性化深さ (mm)

CO_2 ： CO_2 濃度 (%)

A：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{週}$)

t：材齢

また、中性化に対する設計劣化外力として、 CO_2 濃度の標準値を、屋内0.1%、屋外0.05%としている。JASS5⁴⁾では、標準～超長期における柱・梁等で仕上げ無しの場合の最小かぶり厚さを、屋内で30mm、屋外で40mmとしている。そこで、各割合において、式(1)から求めた中性化速度係数と、その中性化速度係数を用いて中性化深さが屋内での最小被り厚さ30mmに達する年数を計算した結果を表-5に示す。中性化が30mmに達する年数は、BB-45で173年であるのに対し、BC-55-BF1では21年、BC-45-BF1では51年、BC-35-BF1では260年となった。BC-45-BF1とBC-45-BF2を比較すると、メーカー違いによる差は見られなかった。

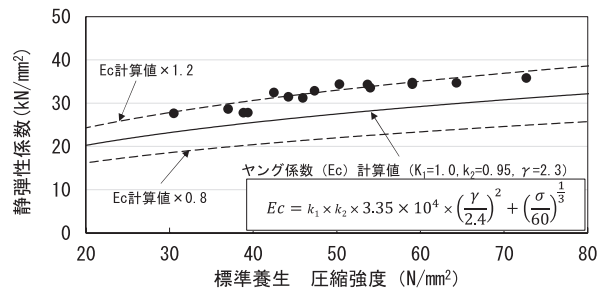


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

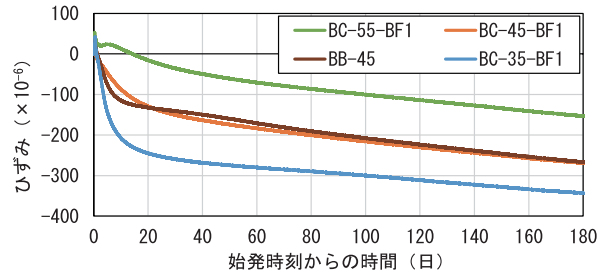


図-6 自己収縮ひずみ測定結果

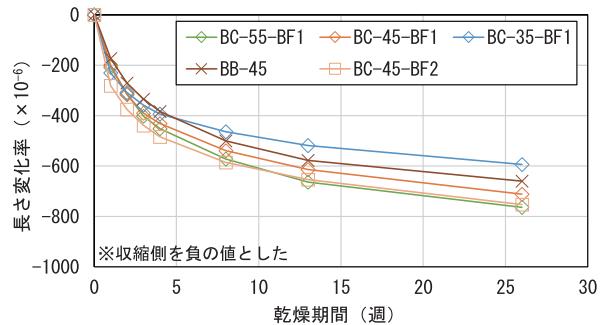


図-7 長さ変化試験結果

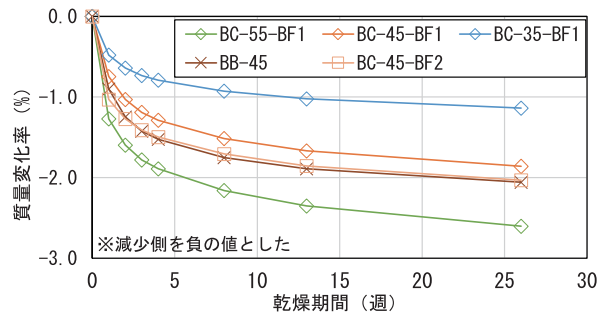


図-8 質量変化率（長さ変化試験）

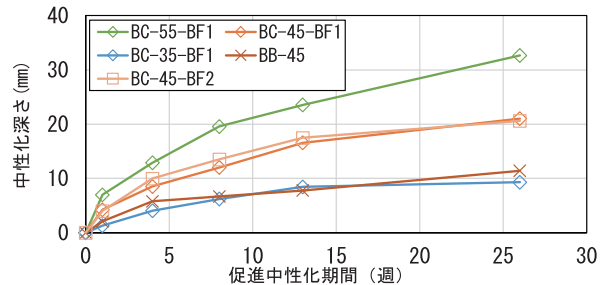


図-9 促進中性化試験結果

表-5 中性化深さ30mmに達する年数

割合	中性化速度係数 A(mm/ $\sqrt{週}$)	中性化深さ30mmに達する年数
BB-45	2.24	173
BC-55-BF1	6.41	21
BC-45-BF1	4.12	51
BC-35-BF1	1.82	260
BC-45-BF2	4.04	53

(7) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験による相対動弾性係数を図-10に、質量変化率を図-11に示す。BC-55-BF1のみサイクルが進むにつれて相対動弾性係数が低下していき、300サイクルで相対動弾性係数が39.2%となった。なお、各調合の空気量に大きな違いはなかったため、W/Bが大きいことが影響したと考えられる。その他の調合については、300サイクル後の相対動弾性係数が90%を超える結果となり、質量変化率は、いずれの調合においても0~1%となった。

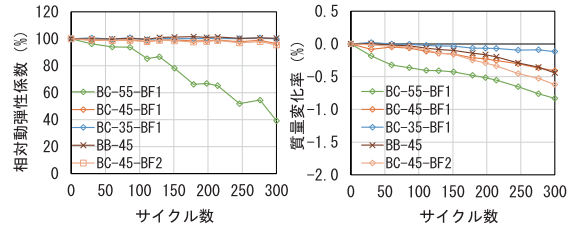


図-10 凍結融解試験結果 図-11 質量変化率(凍結融解試験)

§ 4. 実機実験

4-1 実験概要

本開発のBCコンの練上がり性状、強度性状および耐久性状を室内実験で確認した。次に、生コン工場の実機により、BCコンを製造し、フレッシュコンクリートの試験および硬化したコンクリートの試験を実施した。

4-2 実験計画

使用材料を表-6に、コンクリートの調合を表-7に、試験内容を表-8に示す。実験は3工場を実施し、A工場は3シーズン、B、C工場はフレッシュ性状比較の為に、標準期のみ行った。BCコンはJIS R 5211にある高炉セメントC種相当のBF混合率となるように、BBとBFをそれぞれ60%、40%とし、水結合材比を3水準とした。BCコンの3調合については練上がりから120分まで30分間隔で経時変化を確認した。なお、練混ぜから60分後を現場到着時間と想定し、運搬によるスランプおよび空気量のロスを見込んで練混ぜを行った。また、BCコン調合におけるコア強度の推定、構造物強度補正值の検討およびコンクリート内部における温度履歴の計測を目的に、柱模擬試験体、床模擬試験体および簡易断熱養生試験体を作製した。柱模擬試験体および床模擬試験体の概要図および温度計測のための熱電対の設置位置を図-12、13に示す。模擬試験体および簡易断熱養生試験体の圧縮強度試験体は、実際の現場到着時間を想定である練り混ぜから60分後において、フレッシュコンクリートの試験が品質管理値の範囲内であることを確認してから試験体の採取を行った。

表-6 使用材料 (実機実験)

記号	産地・銘柄	密度(g/cm³)	工場
水	地下水	1.00	A
	上水道水		B,C
セメント	高炉セメントB種	a社製	A,B
		b社製	C
混和材	高炉スラグ微粉末4000	a社製	A,B
		i社製	C
細骨材	S1 山砂	2.60	A
	S2 砕砂(石灰石)	2.66	B
	S1 混合砂(山砂70%+砕砂30%)	2.61	
	S1 山砂	2.60	C
粗骨材	G1 砕石(石灰岩)	2.66	A
	G2 砕石(硬質砂岩)	2.77	
	G1 砕石(硬質砂岩)	2.70	B
	G1 砕石(石灰岩)	2.70	C
混和剤	高性能AE減水剤	j社製	A,B
		i社製	C

表-8 試験内容 (実機実験)

試験項目	試験方法	
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	単位体積質量	JIS A 1116
	ブリーディング	JIS A 1123
	凝結時間	JIS A 1147(夏期のみ)
硬化	圧縮強度	JIS A 1108 標準養生 材齢7, 28, 56, 91日計12本 現場水中 材齢1, 7, 14, 28日計12本(BB, BC-45のみ) 封鎖養生 材齢7, 28, 56, 91日計9本(BB, BC-45のみ)
	静弾性係数	JIS A 1149
	長さ変化	JIS A 1129-1
	簡易断熱養生	JIS A 1108, JASS5-T-605 材齢28, 56, 91日, 熱電対により内部温度計測
	床模擬部材	JIS A 1108, JASS5-T-606 材齢28, 56, 91日, 熱電対により内部温度計測
	柱模擬部材	JIS A 1108, JASS5-T-606 材齢28, 56, 91日, 熱電対により内部温度計測

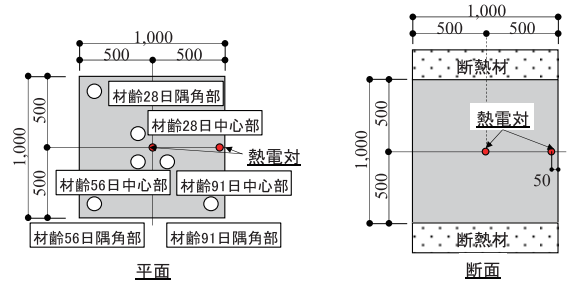


図-12 柱模擬試験体 概要図

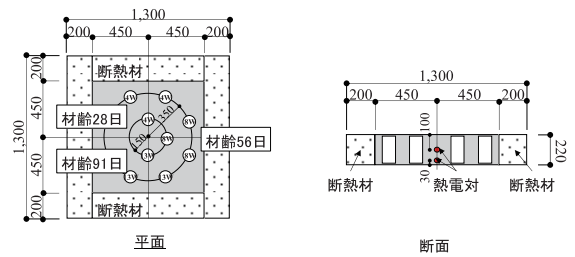


図-13 床模擬試験体 概要図

表-7 調合一覧 (実機実験)

調合 ¹⁾	時期	工場	結合材混合率(%)		BF混入率(%)	品質目標値		W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m³)						Ad(C%)			
			BB	BF		スランプ(cm)	空気量(%)			W	BB	BF	S1	S2	G1	G2	冬期	標準期	夏期
A-BB-45-冬,標,夏	冬期 標準期 夏期	A工場	100	0	40~45	18±2.5	4.5±1.5	45	46.5	170	328	-	598	205	471	478	0.75	0.80	0.85
A-BC-55-冬,標,夏			60	40	64~67			55	48.5	170	186	124	645	218	468	473	0.75	0.80	0.85
A-BC-45-冬,標,夏			60	40	64~67			45	46.5	170	227	151	598	202	468	475	0.75	0.80	0.85
A-BC-37-冬,標,夏			60	40	64~67			37 ²⁾	43.5	170	276	184	536	181	473	481	0.80	0.85	0.80
B-BB-45-標	標準期	B工場	100	0	40~45	18±2.5	4.5±1.5	45	47.8	170	378	-	825	-	932	-	-	1.30	-
B-BC-55-標			60	40	64~67			55	49.8	170	185	124	885	-	923	-	-	1.40	-
B-BC-45-標			60	40	64~67			45	47.6	170	227	151	817	-	932	-	-	1.40	-
B-BC-32-標			60	40	64~67			32 ³⁾	43.1	175	328	219	671	-	915	-	-	1.40	-
C-BB-45-標		C工場	60	40	64~67	21±2.0	4.5±1.5	45	49.8	173	384	-	510	348	888	-	-	0.70	-
C-BC-55-標								55	51.6	175	191	127	541	370	880	-	-	0.78	-
C-BC-45-標								45	49.3	175	233	156	499	340	888	-	-	0.73	-
C-BC-32-標								32 ³⁾	44.3	175	328	219	411	282	896	-	-	0.90	-

1)凡例: A-BB-45-標 ①:工場, ②:コンクリート種類, ③:水セメント比, ④:時期(冬:冬期, 標:標準期, 夏:夏期) 2)低W/Cは各工場の呼び強度45の実績による 3)生コン工場の実績を参考

4-3 実験結果

(1) フレッシュコンクリート

A工場におけるフレッシュコンクリートの試験結果を図-14に示す。いずれの季節区分、調合においても、スランプおよび空気量は品質目標値の範囲内であった。B工場およびC工場においても同様の傾向であった。

(2) 凝結時間

A工場の夏期におけるBB-45およびBC-45の調合にて実施した凝結時間の測定結果を図-15に示す。BC-45の始発時間は、BB-45と比較して1時間30分程度遅くなったが、始発から終結までの時間はBBコンと同程度であった。暑中コンクリート施工指針⁶⁾においては、夏期打重ね許容時間の目安である貫入抵抗値 0.5N/mm^2 に到達する時間が3.5時以上とされている。今回の試験で得られた貫入抵抗値 0.5N/mm^2 に達する時間はBB-45では約3.0時間、BC-45では約4.0時間であり、既往研究³⁾と同様にBCコンの凝結遅延効果が確認された。これにより、BBコンを使用するよりもBCコンを使用する方が、コールドジョイント防止に対して効果があると考えられる。

(3) 温度履歴

A工場における模擬試験体の最高温度を図-16に示す。いずれのシーズンにおいても、模擬試験体の最高温度は、柱の中心部で高く、床では柱よりも低かった。またW/Cが小さいほど最高温度は高く、最高温度がもっとも高い夏期のW/C 37%では 74.1°C であった。

(4) 圧縮強度・静弾性係数

3シーズンのBBおよびBCコン（W/B=45%）の圧縮強度試験結果を図-17に示す。冬期においては、養生条件を問わず、BBコンの方がBCコンより圧縮強度は大きく、その差は材齢が進行するにつれて広がった。一方、標準期および夏期においては、現場水中養生ではBCコンとBBコンが同等の結果であり、標準養生および現場封緘養生では、材齢28日以降BCコンの圧縮強度がBBコンと同等、もしくは大きくなった。柱模擬試験体のコア供試体の圧縮強度に対する床模擬試験体のコア供試体の圧縮強度および簡易断熱養生試験体の圧縮強度との関係を図-18に示す。柱模擬試験体と簡易断熱養生試験体は同程度の強度発現性を示したが、柱模擬試験体と床模擬試験体では、後者の強度の方が小さくなった。

静弾性係数は標準期の標準養生による材齢28日およびコア強度試験体による材齢91日の圧縮強度試験時にした。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-19に示す。静弾性係数は圧縮強度の増加に伴い増加し、図中併記の推定式に沿って推移した。

(5) 長さ変化

長さ変化試験は、A工場における標準期のW/B=45%のBB、BCコン調合で実施した。長さ変化率を図-20に、質量減少率を図-21に示す。BBよりもBCの方がわずかに小さいものの、ほぼ同等の結果であり、AIJ指針²⁾と同様の傾向が確認できた。

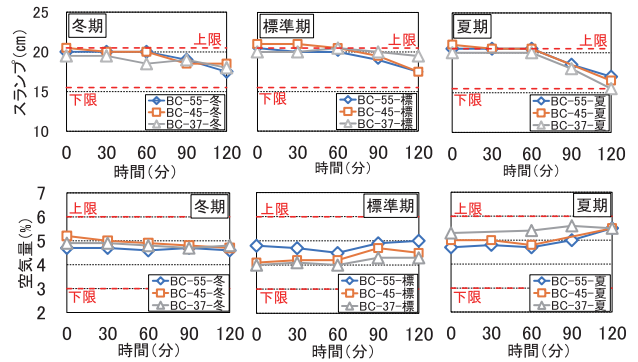


図-14 フレッシュコンクリート試験結果
(上段：スランプ経時変化 下段：空気量経時変化)

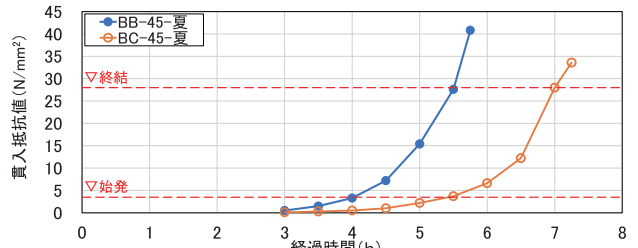


図-15 凝結試験結果

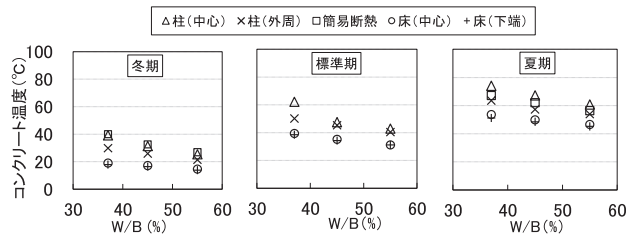


図-16 水結合材比と最高温度の関係

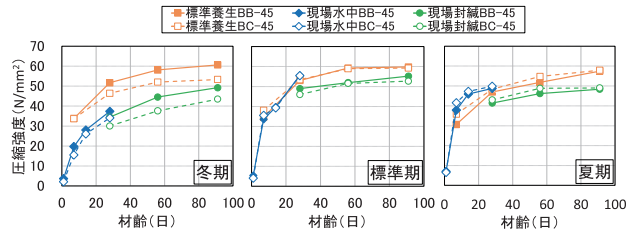


図-17 圧縮強度試験結果（実機実験）

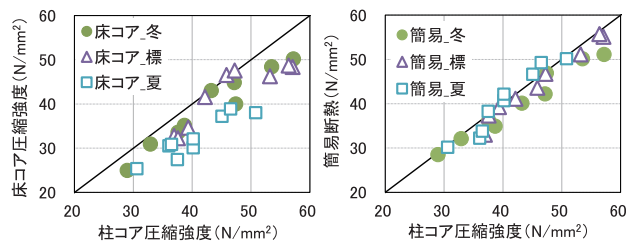


図-18 模擬試験体圧縮強度の関係

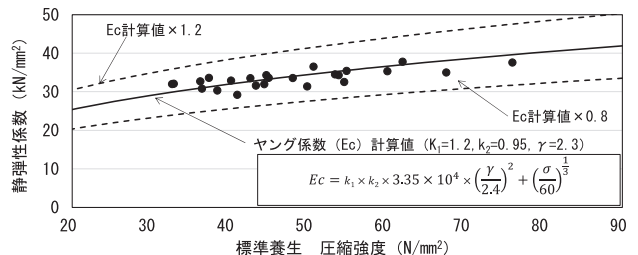


図-19 圧縮強度と静弾性係数

§5. 調査検討

(1) 結合材水比と圧縮強度の関係

標準養生28日での結合材水比と圧縮強度の関係を図-22に示す。これらの関係は直線的であり、一般的なコンクリートと同様に水結合材比と標準養生による圧縮強度の関係式にて調査設計が可能であると考えられる。これは、既往研究⁷⁾等と同様の傾向である。

(2) 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$

91日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係を図-23に示す。冬期においては、AIJ指針で示されている高炉セメントC種相当コンクリートの $_{28}S_{91}$ に概ね収まっているが、標準期および夏期はAIJ指針の範囲には収まらず、床模擬部材ではばらつきが大きく表れた。このことから、BCコンの $_{28}S_{91}$ は、生コン工場の実績値とする。

(3) 標準偏差

実機実験により得られた圧縮強度と標準偏差の関係を図-24に示す。BBは標準期のみ、BCは水結合材比ごとに3シーズンの試験で得られた圧縮強度を基に算出した。水結合材比（圧縮強度）にかかわらずJASS5⁵⁾による一般的な標準偏差 σ の指標である $0.1 \times F_m$ （調査管理強度）に比べ小さい値となった。

§6. まとめ

本報では、高炉セメントB種と高炉スラグ微粉末を混合することにより製造される環境配慮型コンクリート（高炉セメントC種相当コンクリート）の開発経緯と室内実験および実機実験を通して得られたコンクリートの性状を報告した。BBセメントを用いて製造する高炉セメントC種相当コンクリートについても、事前に生コン工場で試し練りを行い強度採用式、構造体強度補正值および標準偏差を検討することで、実出荷ができることを確認した。

本開発により、既報⁸⁾で開発した地上構造物で適用可能な高炉セメントA種相当コンクリートを含め、高炉スラグ微粉末を使用した環境配慮型コンクリートを建物全体に適用可能なメニューを取り揃えることが実現した。今後、建設技術審査証明の取得を予定しており、低炭素の社会の実現に向け、積極的に本技術を普及していく。

謝辞. 本実験にあたり、東京エスオーシー(株)芝浦工場、晴海小野田レミコン(株)、溝口瀬谷レミコン(株)溝ノ口工場の皆様には多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画，2016.5.13
- 2) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工

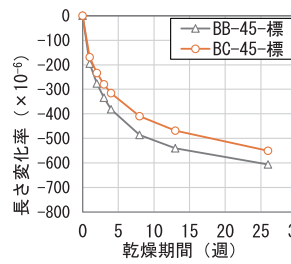


図-20 長さ変化試験結果

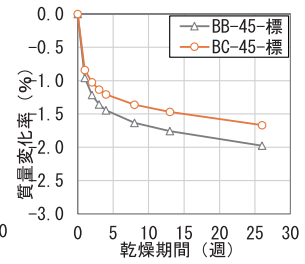


図-21 質量変化率 (長さ変化試験)

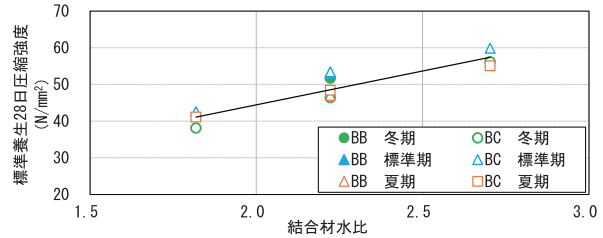


図-22 結合材水比と圧縮強度の関係

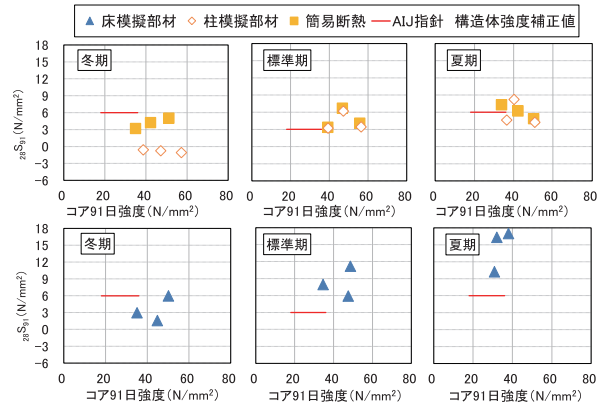


図-23 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

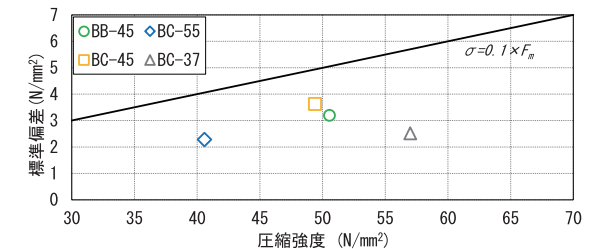


図-24 圧縮強度と標準偏差の関係

- 3) 椎名ら：高炉スラグ微粉末4000をセメント代替えとして積極利用した低炭素型コンクリート「スラグリート」の開発，西松建設技報 Vol. 40, 2017
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2018
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016
- 6) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針・同解説，2019年7月
- 7) 古川ら：高炉スラグ微粉末を高含有した環境配慮型コンクリートの基礎物性（その7 構造体強度補正值），日本建築学会学術講演梗概集（東北）2018年，pp. 725-726 など
- 8) 長井ら：環境配慮型コンクリート（高炉セメントA種相当コンクリート）の開発，西松建設技報 Vol. 45, 2022