

論文 異種セメントを混合して製造した高炉 A 種相当コンクリートの性状に関する実験的研究

右田 周平*1・久須美 真悟*1・木村 仁治*2・長井 智哉*2

要旨：建築物の上部構造部で広く使用できる環境配慮型コンクリートである高炉セメント A 種相当コンクリートについて、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合して製造し、室内実験や実機実験により各種性状を確認した。室内実験により、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合より、若材齢時の圧縮強度や中性化抵抗性は低下するものの、その他の耐久性については、大きな差は無かった。実機実験の結果、構造体強度補正値は普通セメントを使用したコンクリートと同等であった。また、製造時における計量のばらつきは±1%以内に収まり、フレッシュ性状や強度性状への影響は小さいことを確認した。

キーワード：環境配慮、高炉セメント B 種、高炉セメント A 種、圧縮強度、耐久性、構造体強度補正値

1. はじめに

近年、環境配慮の観点から、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で置換し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。そのため、筆者らは、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・実用を進めてきた²⁾。しかし、高炉スラグを高含有したコンクリートは、強度発現性の遅延や耐久性の低下が懸念され、限定的な使用に留まっている。そこで、建築物の上部構造部で広く使用できる環境配慮型コンクリートとして、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合して製造した高炉セメント A 種相当のコンクリート（以下 BA コン）に着目し³⁾、実験検討を実施した。本報では、室内実験および実機実験を通して得られた BA コンの諸性状について報告する。

2. 室内実験

2. 1 実験概要

2 種類のセメントを混合して製造したコンクリートに

ついて、フレッシュ性状、強度性状および耐久性性状を確認するために室内実験を実施した。使用材料を表-1 に、コンクリートの調合を表-2 に、試験項目を表-3 に示す。表-2 内の高炉スラグ微粉末（以下、BFS）の混入率は、普通ポルトランドセメント（以下 OPC）では 0～5%，高炉セメント B 種（以下 BB）では 40～45% が混入されているとして算出した。実験に用いた N と BB は、それぞれセメントメーカー主要 3 社の製品を等量混合して使用した。単位水量は 170kg，水結合材比（以下 W/B）は 50% とし、過去の実績等から、かさ容積を N および BA-35 は 0.57m³/m³，その他は 0.56m³/m³ とした。目標スラン

表-1 使用材料

水	W	水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント、 密度 3.16g/cm ³ (A 社、B 社)、 3.15g/cm ³ (C 社)
	BB	高炉セメント B 種、 密度 3.04g/cm ³ (A 社、B 社、C 社)
細骨材	S1	陸砂、表乾密度 2.58g/cm ³
	S1	砕砂、表乾密度 2.60g/cm ³
粗骨材	G	碎石、表乾密度 2.63g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 I 種

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュ試験結果

調合名	セメント 混合率 (%)		BFS 混入率 (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)
	OPC	BB			W	OPC	BB	S1	S2	G		
N	100	0	0～5	50	170	340	0	591	259	913	19.0	4.9
BA-35	65	35	14～19		170	221	119	589	259	913	20.5	4.7
BA-50	50	50	20～25		170	170	170	599	262	897	19.0	4.9
BA-65	35	65	26～31		170	119	221	596	262	897	20.5	4.8
BB	0	100	40～45		170	0	340	594	262	897	18.5	4.3

・*1 戸田建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

・*2 西松建設(株) 技術研究所 (非会員)

プは $18.0 \pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

2. 2 実験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-2 に併せて示す。スランプ，空気量ともに，いずれの調合も目標値を満足する結果となった。

ブリーディング試験の結果を図-1 に示す。いずれの調合も N と同等の結果であり，ブリーディング量に関して，セメント混合率による差異は小さかった。

凝結時間の測定結果を図-2 に示す。いずれの調合も N と同等の結果であり，凝結時間に関して，セメント混合率による差異は小さかった。

圧縮強度試験結果を図-3 に示す。材齢 7，28 日では BB の混合率が増加するに伴い，圧縮強度は低下する傾向となった。一方，材齢 56 日以降では，既往研究^{3), 4)}と同様に，N より圧縮強度が大きくなる傾向となった。高炉スラグによる潜在水硬性の影響によると考えれる。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4 に示す。静弾性係数は圧縮強度の増加に伴い増加し，図中に併記した，建築工事標準仕様書・同解説（以下 JASS 5）⁵⁾に示される推定式に沿って推移した。全ての値が推定式より大きくなったが，いずれも N と同等の静弾性係数であった。

自己収縮ひずみの測定結果を図-5 に示す。材齢 160 日での自己収縮ひずみは， $-150 \sim -175 \times 10^{-6}$ となり，セメント混合率による差異は小さかった。

乾燥材齢 26 週までの長さ変化率を図-6 に示す。乾燥材齢 26 週での長さ変化率は，N が最も大きく，BB が最も小さくなったが， 50×10^{-6} 程度の差しかなく，セメント混合率による影響は小さかった。

促進材齢 26 週までの中性化深さを図-7 に示す。促進材齢 26 週での中性化深さは，N が最も小さく 11.8mm，BB が最も大きく 21.4mm，BA コンはその中間となった。BB の混合率が多くなるにつれ，中性化深さが深くなる傾向

表-3 試験項目

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
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 7，28，56，91 日
長さ変化率	JIS A 1129-1
自己収縮ひずみ	JCI 超流動コンクリート委員会 「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」
促進中性化	JIS A 1153，水中 4 週＋気中 4 週， 促進試験時 CO ₂ 濃度 5%
凍結融解抵抗性	JIS A 1148 A 法

となった。

凍結融解試験による相対動弾性係数の測定結果を図-8 に，質量減少率の測定結果を図-9 に示す。いずれの調合も 300 サイクルでの相対動弾性係数は 90% を超えて

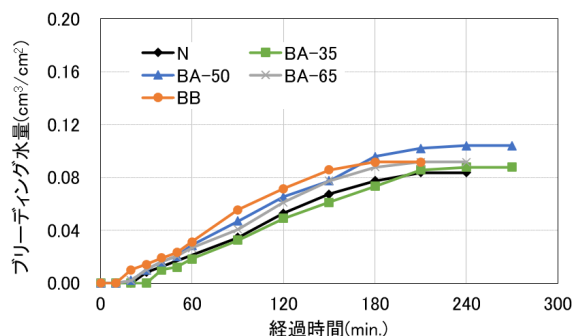


図-1 ブリーディング試験結果

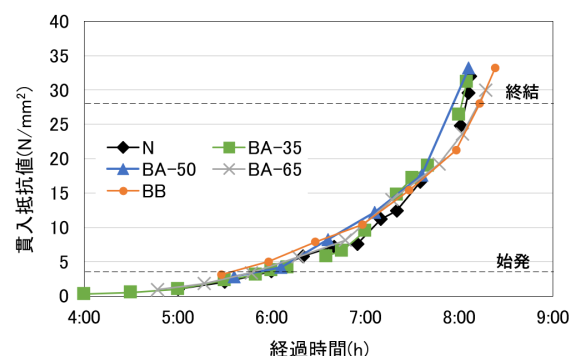


図-2 凝結試験結果

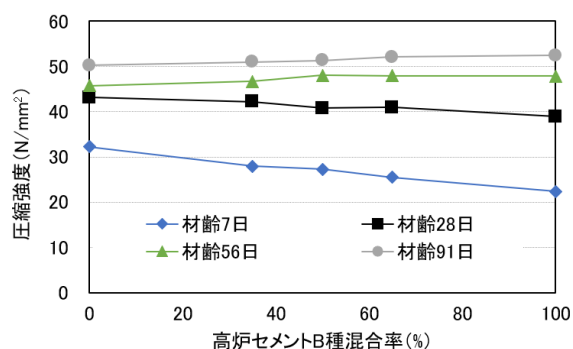


図-3 圧縮強度試験結果

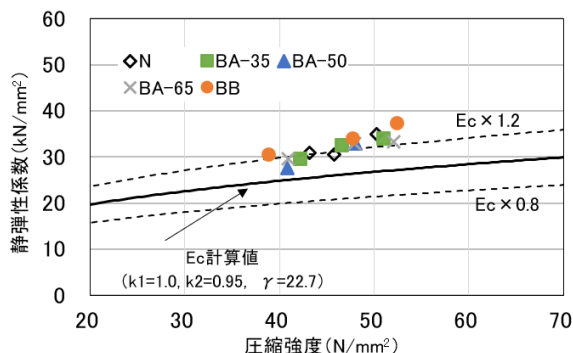


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

おり、また、質量減少率は1～2%程度となった。フレッシュ試験の結果から、各調合の空気量に大きな違いはないため、凍結融解抵抗性について、セメント混合率による差異は小さいと考えられる。

3. 実機実験

3. 1 実験概要

レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）の設備により、BA コンの製造、フレッシュコンクリートの経過時変化および模擬試験体を含む各種養生条件における強度発現性を確認するために、実機実験を実施した。生コン工場は、主要セメントメーカー3 社のセメントを使用している工場3 社とし、標準期、夏期、冬期の3 シーズンで実験を実施した。コンクリートの使用材料を表-4 に、調合を表-5 に示す。BA コンのセメント混合率は、室内実験の結果や、高炉セメント A 種相当と

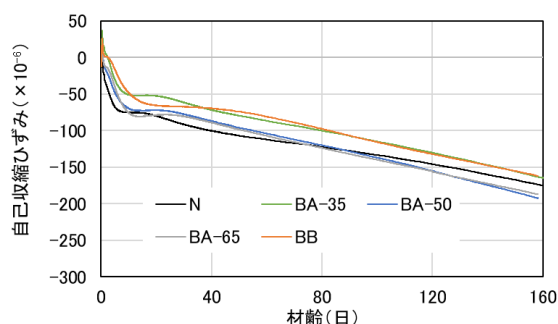


図-5 自己収縮ひずみ測定結果（収縮側を-表記）

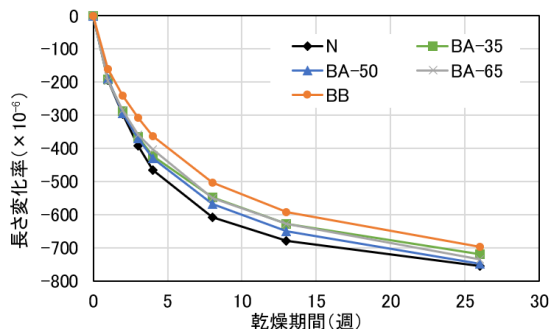


図-6 長さ変化率測定結果（収縮側を-表記）

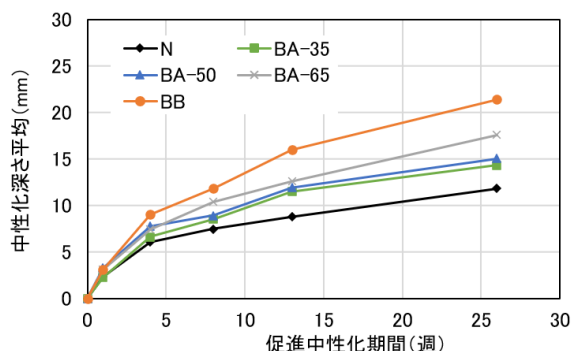


図-7 促進中性化試験結果

なる BFS 混入率となることを考慮し、OPC と BB をそれぞれ 50%で統一し、W/B は3 水準とした。なお、W/B が一番小さい調合については、各工場での BB のみを使用したコンクリートにおける呼び強度 45 の強度値となるものとして、工場実績より決定した。フレッシュコンクリートの試験項目は、表-3 に示すスランプ、空気量、コンクリート温度について実施した。BA コンの 3 調合では、練上がりから 120 分までフレッシュ性状の経過時間変化を確認した。練混ぜは、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実施した。圧縮強度は、全調合において標準養生（材齢 7, 28, 56, 91 日）、W/B=50%の N, BA コン調合において現場水中養生（材齢 1, 7, 14, 28 日）および現場封緘養生（材齢 28, 56, 91 日）を実施した。また、BA コン調合におけるコア強度を確認するために、JASS 5 T-605（コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法）および JASS5 T-606（簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法）に則して、柱・床模擬試験体および簡易断熱養生試験体を作成し、材齢 28, 56, 91 日にコア圧縮強度試験を実施した。

3. 2 実験結果

代表例として、3 シーズンにおける A 工場のスランプおよび空気量の測定結果を図-10 に示す。冬期の A-BA-34.5 のみ、経過時間 120 分でスランプが品質目標から外れたが、その他は品質目標の範囲内であった。また、夏

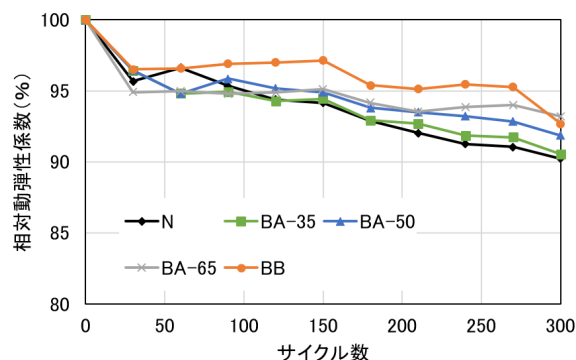


図-8 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

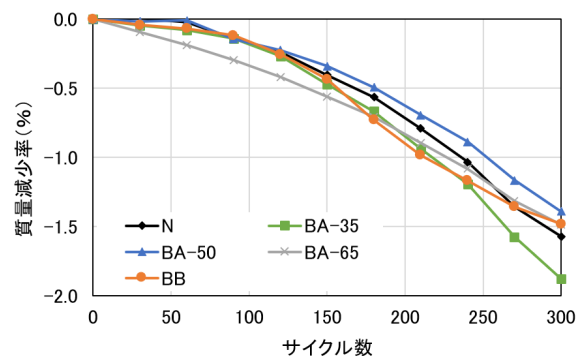


図-9 凍結融解試験結果（質量減少率）

期の練混ぜからの運搬時間の許容値である 90 分までにおいても、全配合においてスランプ、空気量ともに品質目標の範囲内であった。各工場における 3 シーズンの N および BA コン調合 (W/B=50%) の標準養生、現場水中養生および現場封緘養生の圧縮強度試験結果を図-11 に示す。標準養生供試体では、いずれの季節区分においても、材齢 7 日まで N より BA コンの方が圧縮強度が小

表-4 使用材料

A 工場		
水	W	水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	混合砂、表乾密度 2.61g/cm ³
粗骨材	G1	碎石、表乾密度 2.70g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 I 種
B 工場		
水	W	水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	山砂、表乾密度 2.59g/cm ³
粗骨材	G1	碎石、表乾密度 2.69g/cm ³
	G2	碎石、表乾密度 2.69g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 I 種
C 工場		
水	W	水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	山砂、表乾密度 2.60g/cm ³
	S2	砕砂、表乾密度 2.66g/cm ³
粗骨材	G1	碎石、表乾密度 2.70g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 I 種

さいが、材齢 28 日以降では、BA コンの圧縮強度は N に近づく、もしくは同等となる結果となり、生コン工場での設備により製造された BA コンにおいても、室内実験の結果と同様の傾向を示すことを確認した。

91 日コア強度と構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ の関係を図-12 に示す。 $_{28}S_{91}$ は冬期における床コア、標準期および夏期における柱コアで比較的大きくなる傾向となったが、いずれの季節区分においても、建設省告示 1102 号や JASS5 で示されている OPC の範囲内に概ね収まっていることから、BA コンに関しても、OPC と同様の $_{28}S_{91}$ を

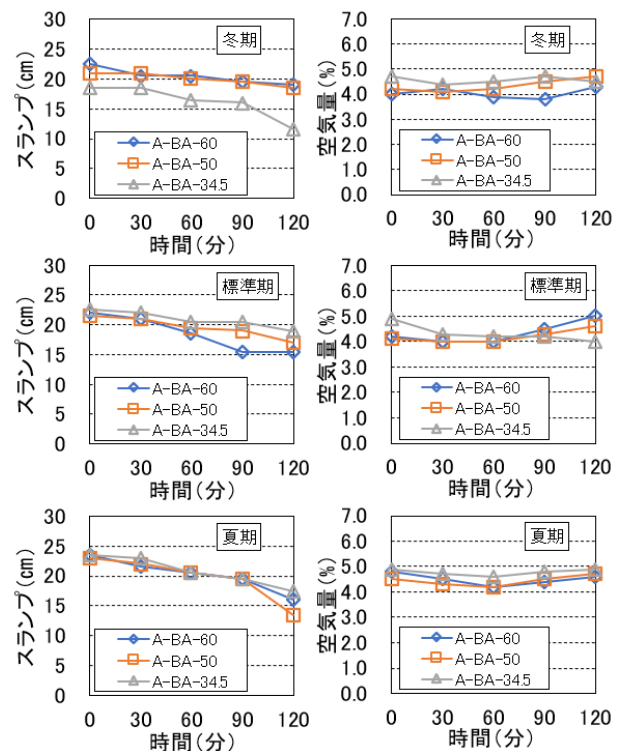


図-10 スランプおよび空気量測定結果

表-5 コンクリートの調査

工場	調合名	セメント 混合率 (%)		BFS 混入率 (%)	品質目標*1		W/B (%)	単位量(kg/m³)						
		OPC	BB		スランプ (cm)	空気量 (%)		W	N	BB	S1	S2	G1	G2
A	A-N-50	100	0	0～5	18±2.5	4.5±1.5	50	170	340	-	867	-	932	-
	A-BA-60	50	50	20～25			60	170	141	142	916	-	923	-
	A-BA-50						50	170	170	170	861	-	932	-
	A-BA-34.5						34.5	170	246	247	726	-	940	-
B	B-N-50	100	0	0～5	18±2.5	4.5±1.5	50	170	340	-	838	-	288	672
	B-BA-60	50	50	20～25			60	170	142	142	901	-	283	661
	B-BA-50						50	170	170	170	833	-	288	672
	B-BA-37.0						21±2.0*2	37	175	237	236	723	-	283
C	C-N-50	100	0	0～5	18±2.5	4.5±1.5	50	170	340	-	523	356	923	-
	C-BA-60	50	50	20～25			60	170	141	142	549	372	923	-
	C-BA-50						50	170	170	170	520	354	923	-
	C-BA-37.0						37	170	229	230	450	306	940	-

*1: 経過時間 60 分における品質目標

*2: B 工場のみ、骨材や混和剤の違いから、時間経過によるスランプ低下が大きくなると予想し、目標を 21±2.0cm とした

—■— 標準養生N —□— 標準養生BA —◆— 現場水中N —◇— 現場水中BA ● 現場封緘N ○ 現場封緘BA

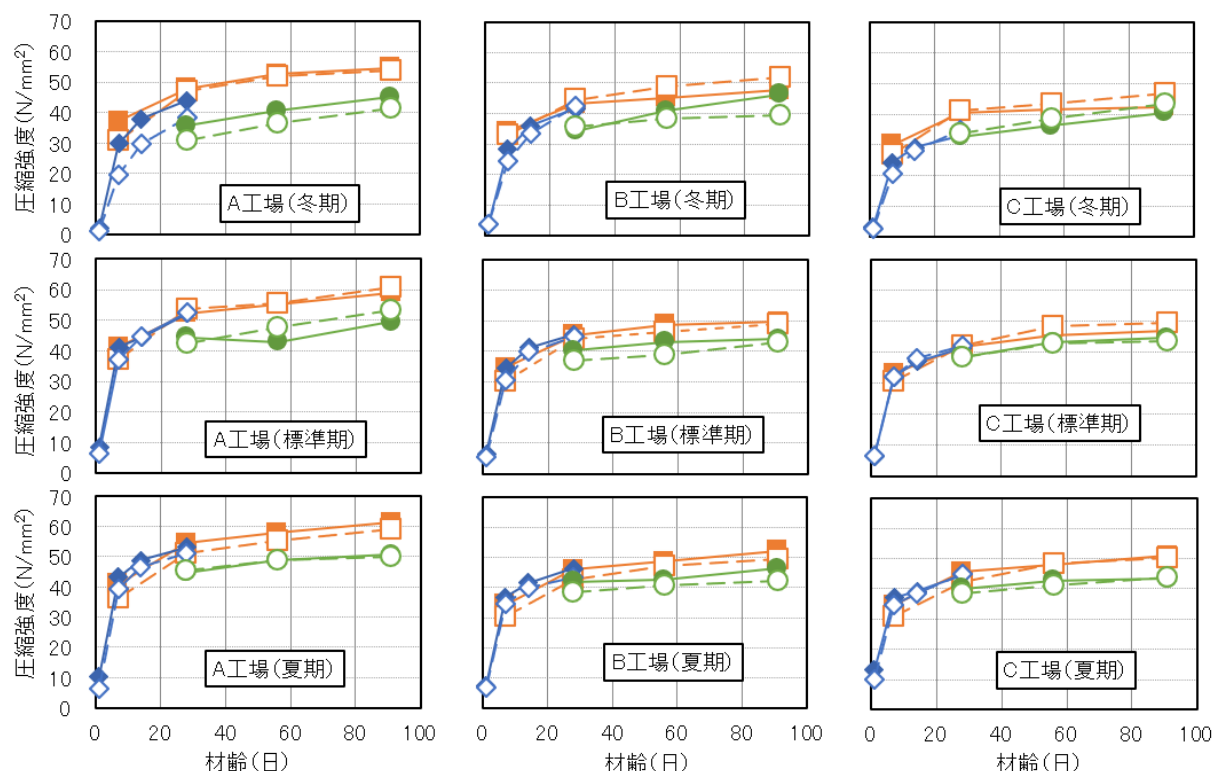


図-11 圧縮強度試験結果

▲ 床コア ◆ 柱コア ■ 簡易断熱 — 建設省告示第1102号OPC標準値

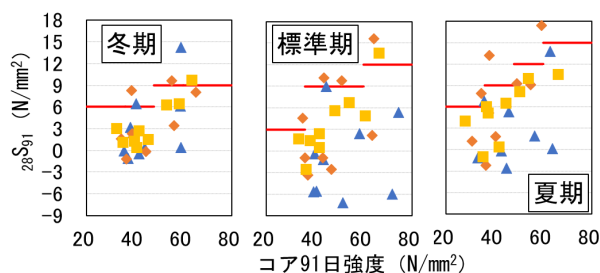


図-12 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

▲ N 冬期 ● BA 冬期 ▲ N 標準期 ● BA 標準期 ▲ N 夏期 ● BA 夏期

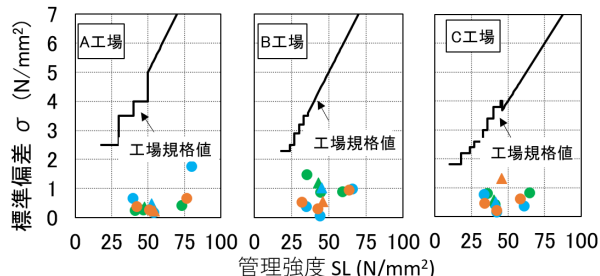


図-13 標準偏差

用いることができると考えられる。なお、冬期における床コアは、部材が薄く養生温度が上がらなかったことが、一方、標準期および夏期における柱コアは、養生温度が高温になったことが、 $_{28}S_{91}$ が大きくなった原因と考えられる。

各工場の3シーズン実機実験により得られた強度と標準偏差の関係を図-13に示す。標準偏差は、JIS 適合コンクリートの規格値として生コン工場で用いる値よりも小さかった。このことから、BA コンクリートにおいても、生コン工場が採用している標準偏差で問題ないと考えられる。

4. 計量ばらつき確認実験

4. 1 実験概要

本開発の環境配慮型コンクリートでは、OPC と BB の2種類のセメントを使用する。製造において別々の計量機でセメントの計量ができれば問題ないが、生コン工場の設備上、計量機1機で累加計量を行う場合もある。累加計量では、先行して計量するセメントの計量値、または混合後の計量値が誤差の許容範囲に収まるとしても、後から計量したセメントの計量値が許容範囲外となる可能性があるため、コンクリートの性状および品質に影響を及ぼすことが懸念される。

そこで、OPC と BB を累加計量した場合の計量誤差がコンクリートのフレッシュ性状および強度性状に及ぼす影響を確認するために、現場出荷実験を実施し、性状を確認した。実験は、出荷時の計量誤差のばらつきを把握するため、東京都内の物流倉庫の現場の捨てコンクリート部分に本開発のBAコンを適用し、実施した。コンクリートの調合を表-6に示す。計量は自動計量とし、OPC

表-6 コンクリートの調合

W/B (%)	セメント 混合率 (%)		単位量 (kg/m ³)				
	OPC	BB	W	N	BB	S	G
47.7	50	50	175	183	184	817	940

W:上水道水, N:普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm³,
BB:高炉セメント B 種, 密度 3.04g/cm³, S:千葉県富津市産
砂, 表乾密度 2.61g/cm³, G:山口県美祢市産砕石, 表乾密
度 2.70g/cm³, 実積率 61.0%, 高性能 AE 減水剤使用

を先行で計量し, その後 BB を累加計量した。トラック
アジテータ車ごとにフレッシュコンクリート試験 (スラ
ンプ JIS A 1101, 空気量 JIS A 1128) および圧縮強度の供
試体採取し, 圧縮強度試験 (JIS A 1108) は標準養生供
試体 (材齢 7, 28 日) で実施した。

4. 2 実験結果

セメントの, 1 回の計量ごとの計量誤差を図-14 に示
す。また, トラックアジテータ 1 台分 (2 バッチ分) に
おける, 各セメントおよび混合後の計量誤差と, スラン
プ, 空気量および圧縮強度 (材齢 28 日) の関係を図-15
~図-17 に示す。なお, 後から計量した BB の計量誤差
は, 混合後のセメント計量値から, 先行計量した OPC の
計量値を差し引いて算出した。今回の試験における各セ
メントの計量誤差は小さく, JIS A 5308 で定められてい
る許容誤差 $\pm 1\%$ ($\pm 1.5\%$ 未満) の範囲に十分納まった。
また, 計量誤差のばらつきに関わらずスランプ, 空気量
ともに品質管理値 (スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$) の範囲内であった。圧縮強度に関しても, 計量誤
差のばらつきに関わらず, 調合強度以上であった。この
時の標準偏差は 1.85 N/mm^2 と, 工場採用値 (3.0 N/mm^2)
と比べて小さかった。

5. まとめ

建築物に広く使用できる環境配慮型コンクリートの開
発を目指し, 普通ポルトランドセメントと高炉セメント
B 種を混合した BA コンについて, 実験により諸性状を
確認した。以下に得られた知見を示す。

- ・ブリーディング水量, 凝結時間, 乾燥収縮ひずみ, 自己
収縮ひずみ, 凍結融解抵抗性について, セメント混合率
による差は小さかった。
- ・圧縮強度は BB の混合率が多くなるほど, 若材齢での強
度は低下するが, 材齢 56 日以降は N より大きくなっ
た。
- ・促進中性化試験の結果, BB の混合率が多くなるほど,
中性化深さは大きくなった。
- ・構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ について, BA コンは OPC を使
用したコンクリートと同様の値を用いることができる
ことを確認した。

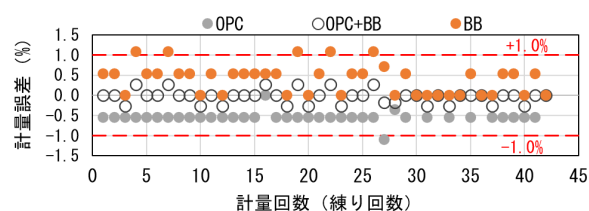


図-14 セメント計量誤差

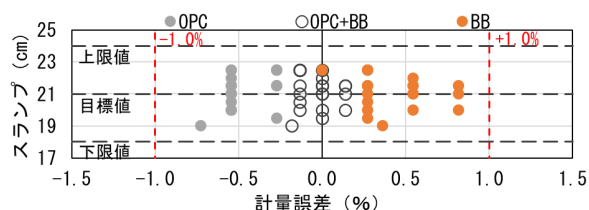


図-15 セメント計量誤差とスランプの関係

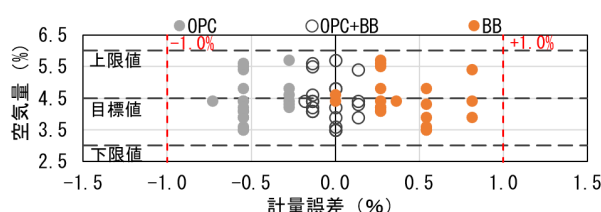


図-16 セメント計量誤差と空気量の関係

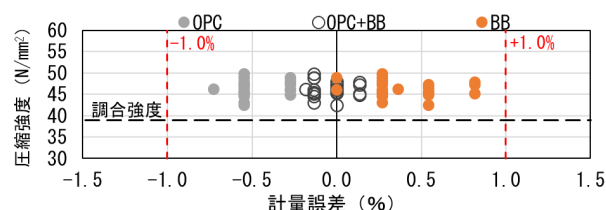


図-17 セメント計量誤差と圧縮強度の関係

- ・現場出荷実験について, OPC と BB の混合率をそれ
ぞれ 50% として累加計量した際の計量誤差は $\pm 1\%$ 以内で
あり, フレッシュ性状や圧縮強度への影響は小さかつ
た。

参考文献

- 1) 環境省: 地球温暖化対策計画, 2016.5.13
- 2) 土木研究所, 戸田建設株式会社, 西松建設株式会社:
低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研
究報告書 (V), 2016
- 3) 金子樹, 関新之介, 大倉真人, 梶田佳寛: セメント混
合による高炉セメント A 種相当コンクリートに関す
る実験的研究, コンクリート工学年次論文集, pp.201-
pp.206, 2018
- 4) 並木憲司, 中塚光一, 小林利充, 岩谷和男: 環境配慮
型のコンクリートの建築構造物への全面的な適用, コ
ンクリート工学, pp.1049-pp.1054, Vol.55, No.12, 2017
- 5) 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