

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

EXPERIMENTAL STUDY OF PROPERTIES OF BLAST FURNACE CLASS A EQUIVALENT CONCRETE PRODUCED BY MIXING DIFFERENT CEMENTS

右田周平^{*1}, 梅本宗宏^{*1}, 久須美真悟^{*1}
Shuhei MIGITA, Munehiro UMEMOTO and Shingo KUSUMI

Blast furnace cement Class A, an environmentally friendly concrete that can be widely used in the superstructure of buildings, was manufactured by mixing ordinary Portland cement and blast furnace cement Class B. Various properties were confirmed in laboratory tests and in tests on actual equipment. Laboratory tests showed that the compressive strength and neutralization resistance of the concrete at young ages were lower than those of ordinary Portland cement alone, but there was no significant difference in other durability properties. The results of the in-plant tests showed that the compensated structural strength was equivalent to that of concrete made with ordinary cement. The variation of the weights during the manufacturing process was within $\pm 1\%$, and it was confirmed that the impact on fresh and strength properties was small.

Keywords: Environment friendly, Blast furnace slag cement type B, blast furnace slag cement type A, Compressive strength, Durability, Strength correction value of concrete

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, 構造体強度補正值

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⁾。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研究を進め、土木研究所、西松建設と共同で、コンクリート製造時の二酸化炭素排出量を60~70%削減できる「スラグリート[®]」を開発し、実用化を進めてきた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、高炉スラグの含有量が比較的少なく、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、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。実験は、はじめに、BA コンの基礎的な性情を確認する室内実験を実施し、続いて、フレッシュ性情の経過時間変化、模擬部材での強度発現性を確認するための実機実験を実施した。さらに、BA コンを実際の現場に出荷し、計量のばらつきによる影響を確認した。本報では、一連の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

普通ポルトランドセメント（以下、OPC）と高炉セメント B 種（以下、BB）の 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、OPC では0~5%、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 OPC 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 OPC のみを使用した N および BA-35は0.57m³/m³、その他は0.56m³/m³とした。目標スランプは18.0±2.5cm、目標空気量は4.5±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

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	砕石、表乾密度2.63g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 I 種

* 1 戸田建設(株)技術研究所 修士 (工学)

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

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)						スランブ (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

表3 試験項目

試験項目	試験方法
スランブ	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

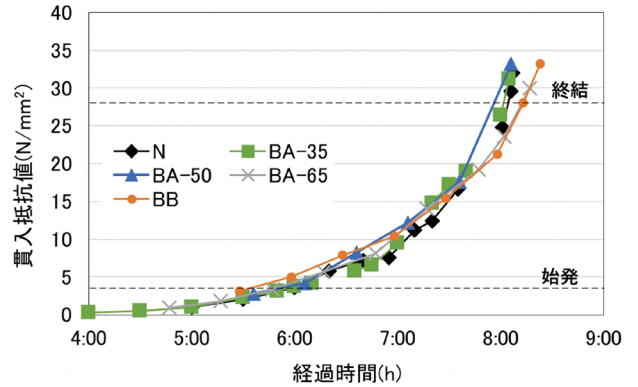


図2 凝結試験結果

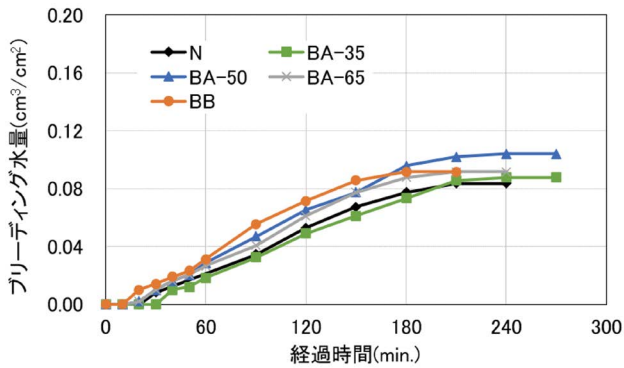


図1 ブリーディング試験結果

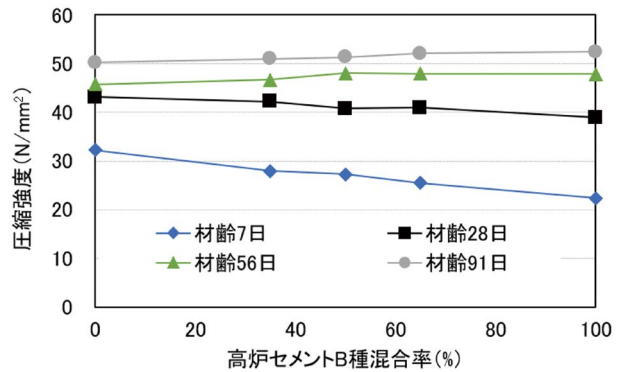


図3 圧縮強度試験結果

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られる。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と同等の値であった。

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%を超えてお

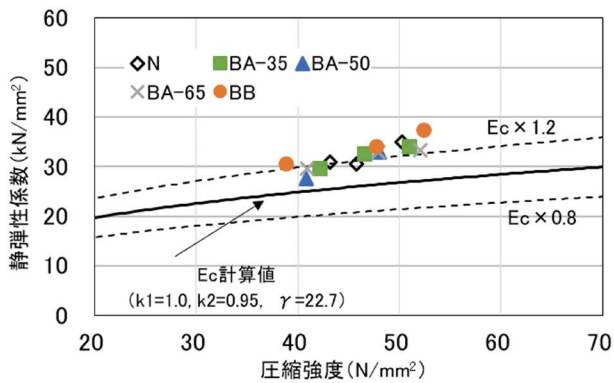


図4 圧縮強度と静弾性係数の関係

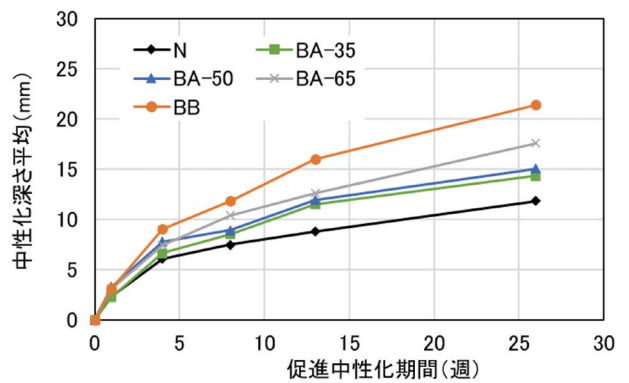


図7 促進中性化試験結果

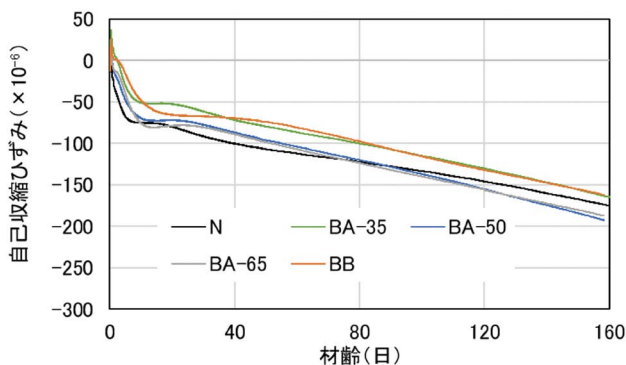


図5 自己収縮ひずみ測定結果 (収縮側を - 表記)

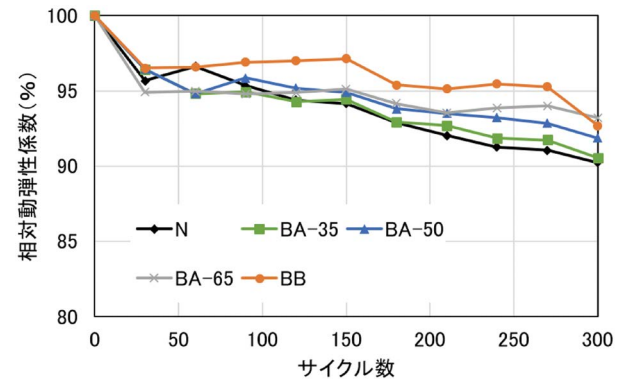


図8 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

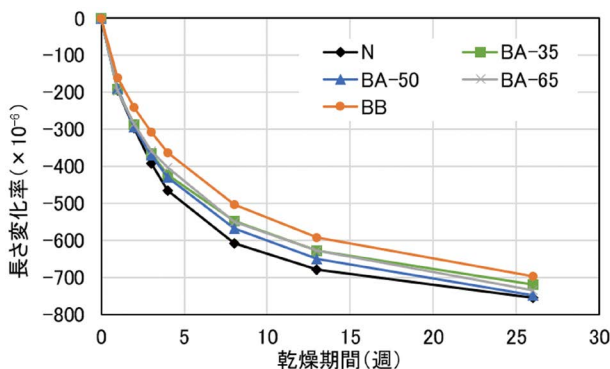


図6 長さ変化率測定結果 (収縮側を - 表記)

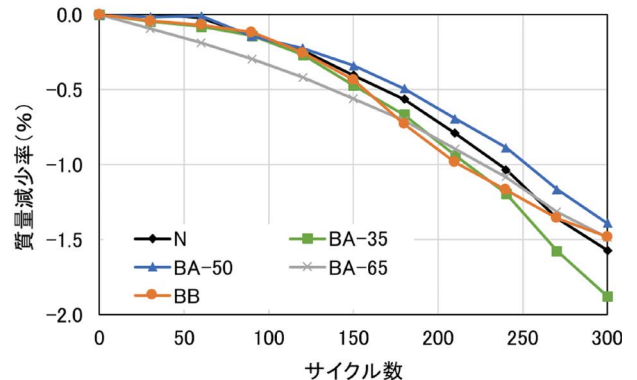


図9 凍結融解試験結果 (質量減少率)

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

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	G	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

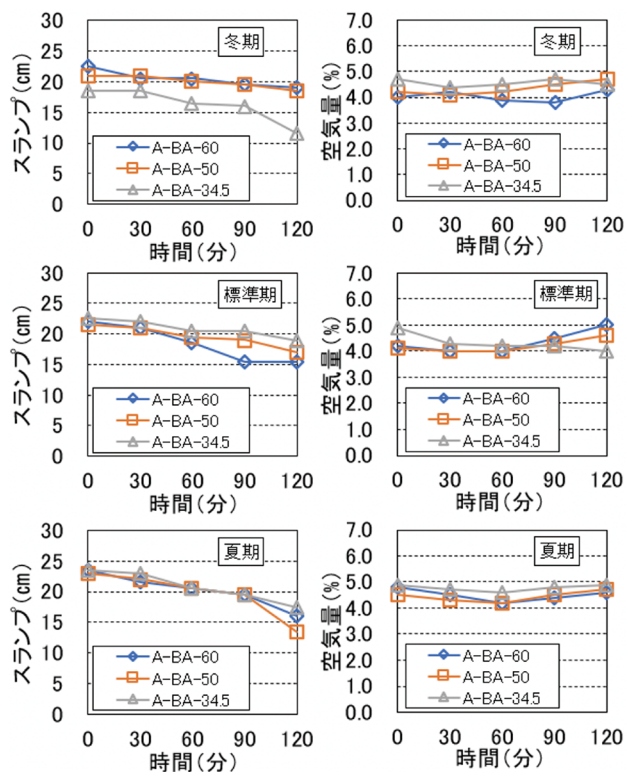


図10 スランプおよび空気量測定結果

表5 コンクリートの調合

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/m ³)						
		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						37	175	237	236	723	-	283	661
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

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、全調査において標準養生（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JASS 5 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製し、材齢28, 56, 91日に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

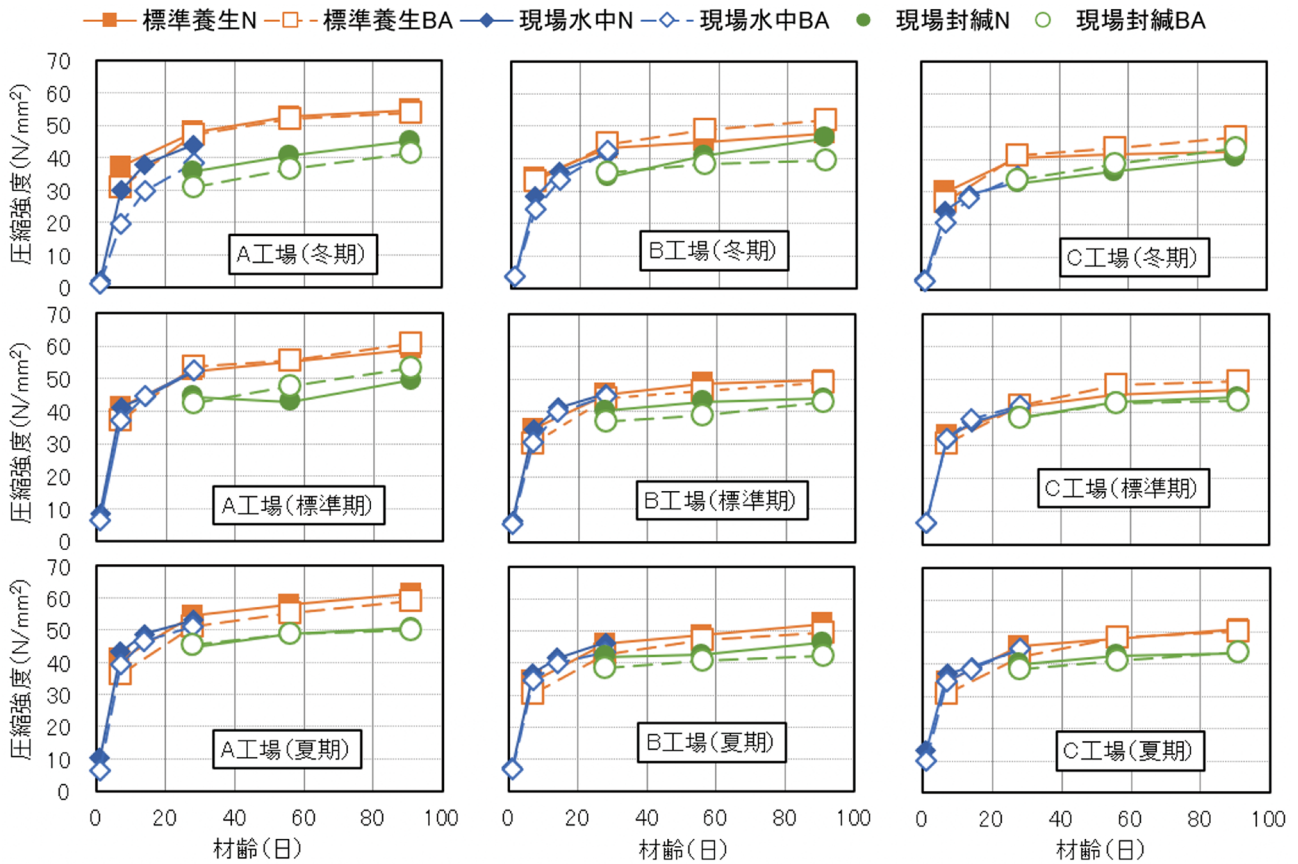


図 11 圧縮強度試験結果

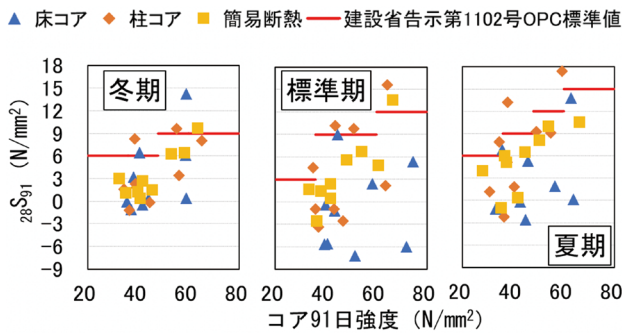


図 12 91日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

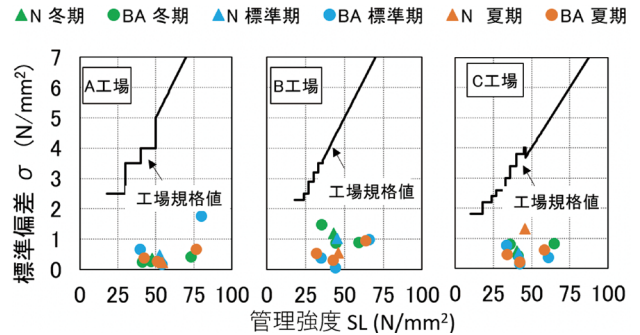


図 13 標準偏差

でも、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シーズンでの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。また、他の養生条件の供試体においても同様の傾向となった。

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については、部材が薄く養生温度が上がらなかったことが、標準期および夏期における柱コアについては、養生温度が高くなったことが、それぞれ $_{28}S_{91}$ 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

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: 山口県美祿市産砕石, 表乾密度

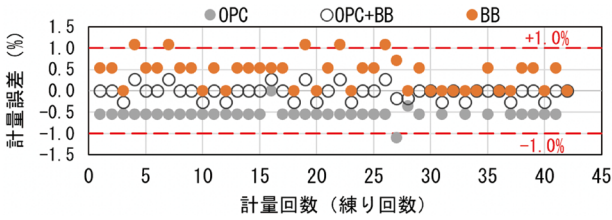


図14 セメント計量誤差

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を採用しても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 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 (スランブ 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

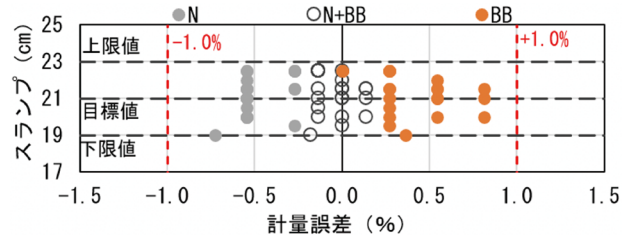


図15 セメント計量誤差とスランブの関係

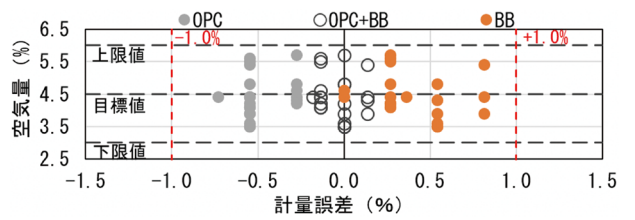


図16 セメント計量誤差と空気量の関係

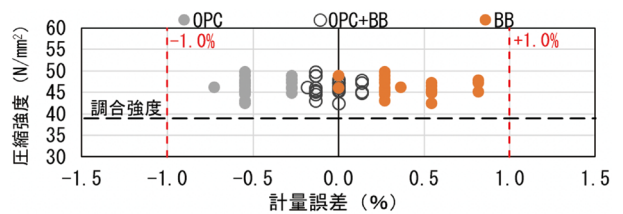


図17 セメント計量誤差と圧縮強度の関係

おける、各セメントおよび混合後の計量誤差と、スランブ、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±1% (±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ブ、空気量ともに品質管理値 (スランブ21±2cm, 空気量4.5±1.5%) の範囲内であった。圧縮強度についても、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/mm²と、工場採用値 (3.0 N/mm²) 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。
- 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±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った。

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, 榊田佳寛：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