

# 報告 改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートの実構造物への適用

橋本 学\*1・倉田和英\*2・坂井吾郎\*3・林 大介\*4

**要旨:** 改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートを沿岸部に位置するバースクレーン基礎の補強部の増厚コンクリートに土木用構造物として初適用した。改良型の高炉セメント C 種を用いたコンクリートは、セメント中に含まれる SO<sub>3</sub> 量を高め、水セメント比を調整することで初期強度、長期強度ともに高炉セメント B 種を用いたコンクリートよりも高くなることが確認された。また、標準期、夏期の施工において、専用の AE 減水剤を用いることで、運搬によるスランプロスを一般のコンクリートと同様にすることができ、打込み、仕上げといった施工性についても良好であることが確認された。

**キーワード:** 高炉セメント C 種、フレッシュコンクリート、スランプロス、圧縮強度

## 1. はじめに

地球温暖化の問題に対応するため、国ごとに目標を定めて CO<sub>2</sub> 削減を図る取組みが加速しつつある。地球温暖化対策の新たな国際的な枠組みとして 2015 年に合意した「パリ協定」や、パリ協定で合意した各国の目標値を実現に向けた具体的な手法を定めるための国際会議「COP24」にて議論が進められている。我が国においても様々な取組みが行われているが、建設分野では、全分野の排出量約 4% を占めるセメント製造時の CO<sub>2</sub> を削減することが課題と考えられる。

セメントに由来する CO<sub>2</sub> を削減する手段の一つとして高炉スラグ微粉末等の副産物の利用促進が挙げられる。高炉スラグ微粉末は製鉄所から副産物として生成され、原料からの CO<sub>2</sub> の排出がなく、ポルトランドセメントに混合することでほぼ全量が CO<sub>2</sub> 削減に寄与する。高炉スラグ微粉末に関しては、現在のところ、高炉スラグ微粉末を 40% 程度含む市販の高炉セメント B 種（以降、BB と称す）が広く使用されているが、CO<sub>2</sub> 削減の観点から、さらに高炉スラグ微粉末の含有率を高めた高炉セメント C 種（以降、BC と称す）を使用することが望まれる。しかし、BC を用いたコンクリートは、スランプロスが大きいこと、ブリーディングが多くなることや低温時において初期強度が低いこと、自己収縮や乾燥収縮といった収縮が大きくなるなどの課題があり、現状ではほとんど使用されていない。最近では、BC を用いたコンクリート特有のこれらの課題に対し、セメント中の SO<sub>3</sub> 量を増やすことや専用の化学混和剤を用いること等によって、BC が持つ課題を克服した「改良型の高炉セメント C 種」が開発されており、建築分野での実構造物への適用実績も増

えつつある。また、土木学会および建築学会から高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末に関する指針が刊行され、土木、建築両分野において高炉スラグ微粉末を積極的に利用する体制が整備され始めている。このような背景のもと低炭素社会の実現に向け、将来的には、現状において土木用構造物で汎用的に用いられている BB から BC へ徐々にではあるが移行していくものと考えられる。

著者らはこれらの知見を活かし、改良型の BC を用いたコンクリートを土木用構造物に適用するための検討を行ってきた<sup>1)</sup>。本報告では、沿岸部に位置するバースクレーン基礎の補強部の増厚コンクリートに、改良型の BC を用いたコンクリートを土木用構造物として初適用した実績と、実構造物において改良型の BC と BB のフレッシュコンクリートの性状および硬化物性を比較した結果について報告する。

## 2. 改良型の高炉セメント C 種の適用に至った経緯

今回、改良型の BC を用いたコンクリートを、図-1 に示す補強増打部へ 140m<sup>3</sup> 分を適用した。補強増打部は、断面幅 480mm、高さ 1,500mm、全長 140m の工場内にあるバースクレーン基礎の補強を目的としたもので、バースクレーン自体が現場の岸壁に位置することから、高い遮塩性が求められており、高い遮塩性と環境負荷低減という両方の利点を生かせる BC を採用することとなった。写真-1 に現場状況を示す。

BC を用いたコンクリートは、既往の研究<sup>2)</sup>において、海洋構造物で最も汎用的に用いられる BB と比較しても塩化物イオンの実効拡散係数が 1/4 以下となり、高い遮塩性を有していることが確認されている。

\*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修

\*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修

\*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ グループ長 博士(工学)

\*4 鹿島建設(株)技術研究所 土木構造グループ グループ長 博士(工学)

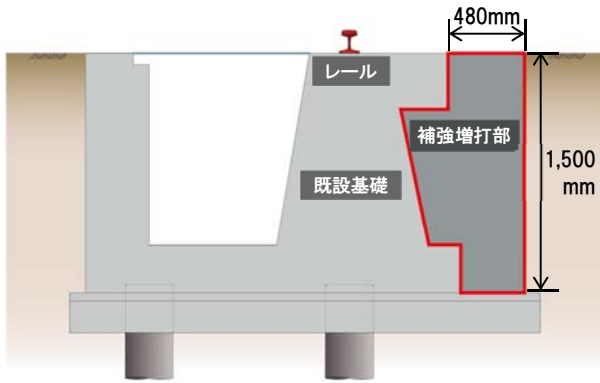


図-1 補強増打部（断面図）

表-1 セメントの物性

品質			BC	BB
密度	g/cm <sup>3</sup>		2.96	3.04
比表面積	cm <sup>2</sup> /g		3,990	3,830
安定性	パット法	—	良	良
	水量	%	30.1	29.5
凝結	始発	h-min	2-55	2-45
	終結	h-min	4-50	4-15
	3d	N/mm <sup>2</sup>	20.7	22.5
7d	34.9		37.4	
28d	54.2		63.1	
化学成分	MgO	%	3.87	3.13
	SO <sub>3</sub>		3.47	2.06
	igloss		0.94	1.78
	Cl量		—	0.009

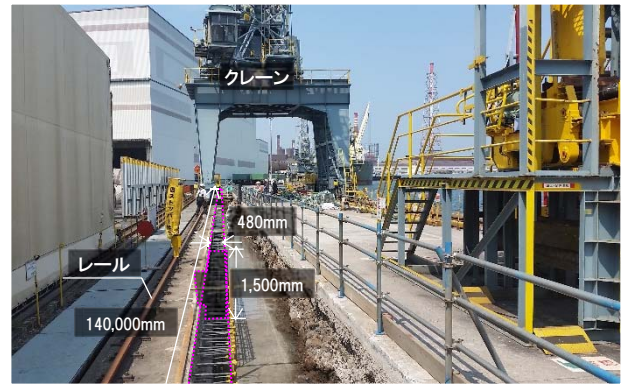


写真-1 現場状況

表-2 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	水道水
セメント	BC	改良型の高炉セメント C 種,密度:2.96g/cm <sup>3</sup>
	BB	高炉セメント B 種,密度:3.04g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	海砂: 北九州市白島産, 密度:2.60 g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率:2.00, 混合砂(海砂:長間北, 砕砂:柄杓田): 密度:2.61 g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率:3.35
粗骨材	G	砕石: 門司区柄杓田産, 2005, 密度:2.70 g/cm <sup>3</sup> , 実積率:58.0%
混和剤*	Ad1	高炉セメント C 種専用 AE 減水剤 標準形(主成分:変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン系化合物の複合体)
	Ad2	AE 減水剤 標準形(主成分:リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物)

※所定の空気量を満足するように、別途、空気量調整剤を使用した。

表-3 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	空気量 <sup>*</sup> (%)	スランブ <sup>*</sup> (cm)	単位量 (kg/cm <sup>3</sup> )					
					W	C	S	G	Ad1 C×%	Ad2 C×%
BC-53	53	47.2	4.5	12	161	304	851	986	0.8	—
BB-58	58	47.4	4.5	12	166	287	858	986	—	1.0

※ スランブおよび空気量の値は現着時点のもので練上がり時の目標値は 15cm および 5.0%とする。

### 3. 室内試験による配合選定

#### 3.1 実験概要

実施工に先立ち、室内試し練りにて BC および BB を用いたコンクリートの配合を選定した。表-1 に、今回使用した BC と BB それぞれのセメントの物性を示す。BC については、結合材中の SO<sub>3</sub> 量を増やすことで、初期強度および収縮特性を改善することができる。通常であれば SO<sub>3</sub> 量が 2.0%程度であるところを、今回使用した BC は 3.47%まで増加させている。なお、結合材中の SO<sub>3</sub> は無水セッコウで調整した。

表-2 に使用材料の一覧を示す。実際に製造するレディミクストコンクリート工場が保有する材料を用いた。混和剤に関して、BB は汎用の AE 減水剤を用いたが、BC については専用の AE 減水剤を使用した。BC 専用の AE 減水剤は汎用の AE 減水剤の成分に加えて、高炉スラグ微粉末への高い吸着特性を持つ分子構造のポリカルボン

酸化合物を含有している<sup>3)</sup>ため、BC のような高炉スラグ微粉末の割合が多いセメントに対しても混和剤添加量が少なくなり過ぎず、流動性を保持することが可能である。

表-3 にコンクリートの配合を示す。「BC-53」はセメントに BC を用いた水セメント比 W/C=53%の配合を示しており、BB-58 は工場が保有する JIS 認証のものであり、補強増打部の仕様を満足する配合である。既往の研究<sup>1)</sup>において、BB と BC を用いたコンクリートの耐久性のうち中性化に関して同等の性能を満足するために水セメント比を 5%程度低減させることを提案しており、それに倣って BB の 58%に対し、BC の水セメント比を 53%とした。また、高炉スラグ微粉末の高含有となることで、流動性が増すことが既往の研究<sup>4)</sup>で明らかとなっていることから、単位水量を BB の 166kg/m<sup>3</sup>から BC の 161kg/m<sup>3</sup>の 5kg/m<sup>3</sup>減じた。試し練り時に所定のスランブおよび空気量を満足するように、混和剤の添加量を適宜調整した。

室内試し練りでの実験項目は、JIS A 1101 のスランブ、

JIS A 1128 の圧力方法によるフレッシュコンクリートの空気量および JIS A 1108 のコンクリートの圧縮強度とした。また、練上がり時のコンクリート温度についても測定した。スランブは、運搬によるスランブロスを考慮して、練上がり時の目標スランブを 15cm とし、目標空気量は 5.0%とした。圧縮強度は 20℃標準水中養生とし、材齢 3 日、7 日、28 日および 91 日にて求めた。練混ぜ方法は容量 60L の強制二軸式ミキサを用い、練混ぜ時間は全材料投入後 90 秒とした。1 バッチあたりの練混ぜ量は 40L とした。

### 3.2 実験結果

表-4 にスランブおよびフレッシュコンクリートの空気量の結果を示す。練上がり後のスランブおよび空気量は、混和剤を調整することで所定の値を満足した。スランブ試験後にタンピングを実施した後の先端の分離状況を写真-3 に示す。BC-53 は BB-58 と同様に、タンピングによって先端にて材料分離等は生じず、良好な材料分離抵抗性を有していることが確認された。

図-2 に BC-53 と BB-58 の圧縮強度の比較を示す。BC-53 は BB-58 と比較してセメント中の SO<sub>3</sub> 量を増やしたことで、水セメント比を 5%低減させたことで初期強度の改善が図られており、材齢 3 日において BC-53 の 12.2N/mm<sup>2</sup>に対して、BB-58 では 10.9N/mm<sup>2</sup>と BC-53 の初期強度が高くなる結果であった。長期材齢においても BC-53 の強度増進が確認され、材齢 91 日時点で BC-53 の 38.4N/mm<sup>2</sup>に対し、BB-58 は 32.5N/mm<sup>2</sup>で長期材齢においても BC-53 の強度が高くなる結果であった。

以上の結果より、BC-53 はフレッシュコンクリートの性状および強度特性は、BB-58 と同等以上となることが確認されたことから、実構造物へ適用することとした。

### 4. 実機ミキサによる練混ぜおよび実施工

前述の室内試験により選定した BC-53 の配合を用いて、実機ミキサによる練混ぜおよび補強増打部の施工を行った。実機ミキサは 2.75m<sup>3</sup> 練りの強制二軸ミキサにて 1 バッチあたりの練混ぜ量を 2m<sup>3</sup> とし、練混ぜ時間を 30 秒とした。アジテータ車の積載量を 2 バッチ分の 4.0m<sup>3</sup> とし、練上がり直後および現場到着時点でのフレッシュコンクリートの性状を把握した。

補強増打部は全長 140m であり、クレーンを稼働させた状態で施工せざるを得ない状況であったことから、施工エリアを南側と北側の 70m の 2 つに分割して、5 月下旬（標準期）と 7 月下旬から 8 月上旬（夏期）にかけて施工を行った。また、70m のうち、1BL のスパン長 10m として、1,3,5,7BL (8,10,12,14BL) ( )内は北側の施工 BL) および 2,4,6BL (9,11,13BL) と 2 回に分けてコンクリートの打込みを行った。施工順序およびコンクリートの打

表-4 フレッシュコンクリートの性状

配合	練上がり温度 (°C)	スランブ (cm)	空気量 (%)
BC-53	23	14.0	4.8
BB-58	24	14.5	5.0



(i) BC-53 (SL=14.0cm) (ii) BB-58 (SL=14.5cm)

写真-2 スランブ試験後の状態



(i) BC-53 (ii) BB-58

写真-3 タンピング後の先端の分離状況

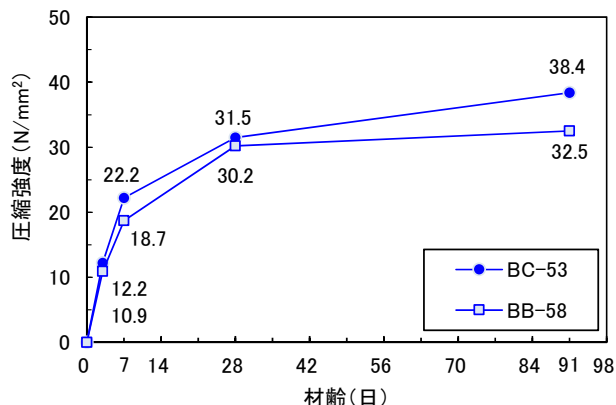


図-2 圧縮強度の比較

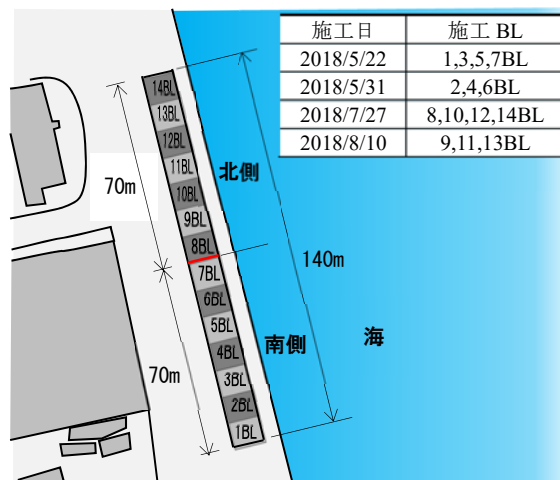


図-3 施工順序(平面図)およびコンクリートの打込み実績

表-5 練上がり時および現着時のスランプ  
および空気量の結果（標準期）

番号	コンクリート 温度 (°C)	スランプ (cm)		空気量 (%)	
		練上 がり時	現着時	練上 がり時	現着時
No.1	24	14.5	10.5	5.4	4.3
No.2	23	17.5	14.5	5.3	4.1
No.3	24	15.0	14.5	5.7	4.0
No.4	26	14.5	11.5	4.4	3.7
No.5	26	15.0	12.5	5.7	4.4
No.6	26	16.0	13.0	5.0	3.8

込みの実績を図-3 に示す。打込みには 8t 級のスクイズ式ポンプ（ブーム長 18m, 最大吐出量 50m<sup>3</sup>/h）を用いた。

（1）南側（標準期）の施工実績

標準期では外気温が 21°C から 25°C の範囲であったため、AE 減水剤は室内試験と同様に標準形を使用した。表-5 に練上がり時および現着時のスランプおよび空気量の結果を示す。表中に示す番号 No.1 から No.6 は 4.0m<sup>3</sup> 積みのアジテータ車 1 台ごとを示しており、生コン工場から現場までの運搬時間は 30 分から 40 分程度で、現着時点でスランプが 12±2.5cm, 空気量が 4.5±1.5% の範囲であることを現着時の受入れ検査にて確認した。写真-4 に No.3 のスランプ試験後の状態を示す。受入れ時のスランプの状態を目視にて確認したところ、No.1 から No.6 の全てにおいて、フレッシュコンクリートの性状は良好であり、スランプ試験後のタンピングによっても材料分離や先端にて水が分離している状況等は確認されなかった。以上より、実機ミキサにおいても良好なフレッシュ性状を有していることが確認された。

次に、練上がりから現着時までのスランプおよび空気量の変化を図-4 および図-5 に示す。No.3 のみのスランプロスが 0.5cm で最も小さい値であったが、その他については 2.5cm から 4cm 程度低下し、平均で 2.7cm であった。空気量については、ばらつきは少なく平均で 1.2% の低下が確認された。以上より、今回実施した試験の結果のみではあるが、改良型の BC および BC 専用の標準形の AE 減水剤を用い、スランプ 12cm 程度のコンクリートで運搬時間が 30 分程度の場合、スランプで 2.5cm 程度、空気量で 1.0% 程度のロスを見込み、練上がり時のスランプおよび空気量を設定することで適切な品質管理を行えることが確認された。

上記、品質管理試験を行った後に、補強増打部への打込みを行った。1 層あたりの打込み高さを 50cm とし、計 3 層（150cm）の層打ちとした。打込みの状況を写真-5 に示す。No.1 については筒先から排出した試料を採取し、スランプおよび空気量の測定を行った。現着時のスランプは表-5 に示したように、スランプ 10.5cm, 空気量 4.3% に対し、筒先から排出した試料については、スラン



SL=11.5cm タンピング後の状態  
写真-4 No.3 のスランプ試験後の状態

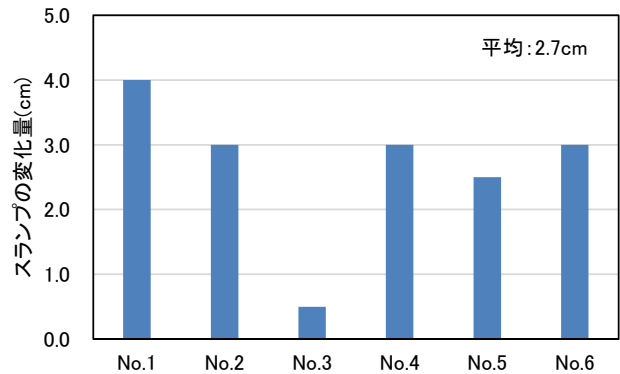


図-4 練上がりから現着時のスランプの変化

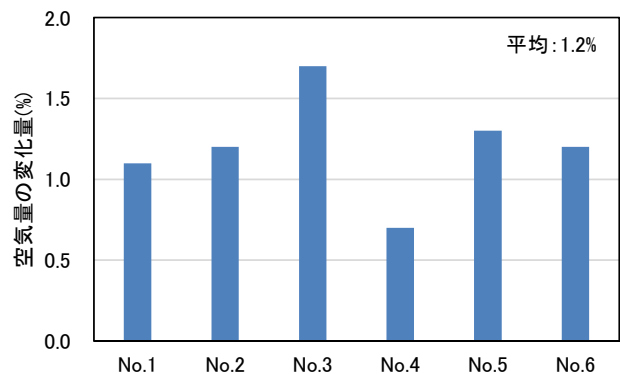


図-5 練上がりから現着時の空気量の変化

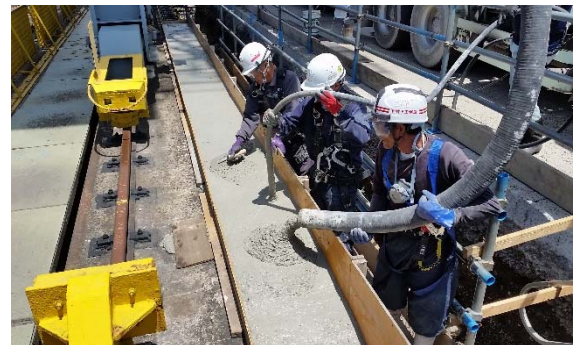


写真-5 コンクリートの打込みの状況

プ 9.5cm, 空気量 3.9% と同程度の結果が得られ、圧送によって材料分離等が生じることなく、良好なフレッシュ性状を有していることが確認された。また、締固めに関して、高周波パイプレータによって締め固めた際も、目視確認のみで定性的ではあるが、材料分離等は認められなかった。打込み後の天端の仕上げ面ではブリーディン



表-6 夏期におけるフレッシュ性状の結果

番号	コンクリート 温度 (°C)	スランプ (cm)		空気量 (%)	
		練上 がり時	現着時	練上 がり時	現着時
BC-No.1	31	18.0	14.5	6.5	5.5
BC-No.2	34	14.5	14.0	4.9	4.9
BC-No.3	30	17.0	15.0*	6.1	5.5
BC-No.4	34	15.0	14.0	6.2	5.8
BB-No.1	35	15.0	13.0	5.8	5.7
BB-No.2	35	14.0	13.5	5.7	5.6

※規格値の上限 14.5cm 以上であったが、材料分離等がなく、品質に問題がないことを確認した。

グ水は確認されず、凝結時間が遅くなるなどはなく、木ごてによる均し作業の施工性は、一般のコンクリートと同様であった。今回の施工では、外気温が 20°C を超える環境で施工したことから、過度なブリーディング水やコンクリートの凝結遅延等の問題は認められなかったが、BC のような混和材が高含有となるセメントを用いた場合、冬期の低温での施工時に過度なブリーディングが生じる可能性があるため、事前に実験等で確認するなどの対応が必要になるものと考えられる。

(2) 北側 (夏期) の施工実績

夏期となる北側の施工では、BC 専用の AE 減水剤を標準形から遅延形に変更した。12, 14BL については、BB を用いたコンクリートにて施工を行い、BC のフレッシュコンクリートの性状と比較した。なお、BB の配合についても室内試験時と同様の BB-58 を用いており、減水剤のみ標準形から遅延形へ変更した。

夏期におけるフレッシュ性状の結果を表-6 に、練上がりから現着時までのスランプおよび空気量の変化を図-6 および図-7 に示す。BC のスランプの変化量はばらつきがあるものの、平均で 1.8cm であった。BB については、データ数が 2 回のみ結果ではあるが、平均で 1.2cm と BC よりも小さい値であった。空気量については、BC の 1.2% に対して、BB は 0.1% であった。以上の結果より、外気温が 30°C を超える夏期の施工においても、BC 専用の遅延形の AE 減水剤を用いることで、スランプロスを 2.0cm 程度に抑えることができ、空気量で 1.0% 程度のロスを見込むことで適切な品質管理を行えることが確認された。

現場の打込み状況では、筒先から排出されたフレッシュコンクリートの性状は標準期と同様に良好で、締固めや仕上げといった施工性についても問題はなかった。

BC と BB について、10BL および 12BL の 5m のスパン中央部で、図-8 に示す断面中心部の温度と、図-9 に示す内部のひずみを測定した。なお、ひずみは BL の延長方向 (10m) を測定した値である。内部温度は BC, BB ともに、打込み後 1 日程度でピークを迎え、その後 7 日で 33°C 程度まで温度が収束している。BC は 0.5 日程度

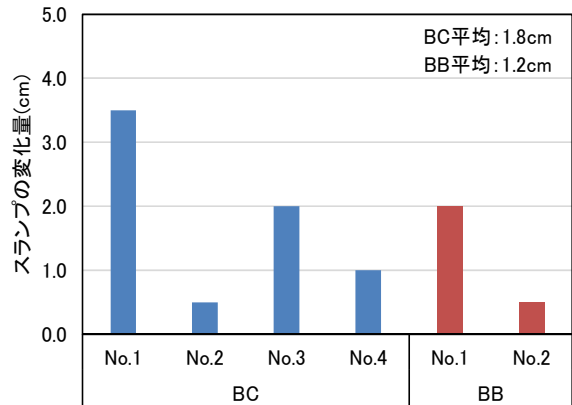


図-6 練上がりから現着時のスランプの変化

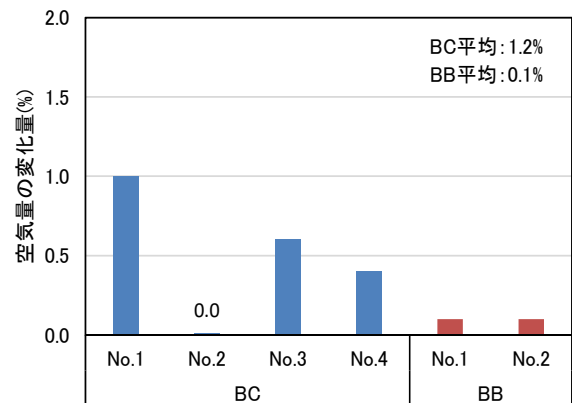


図-7 練上がりから現着時の空気量の変化

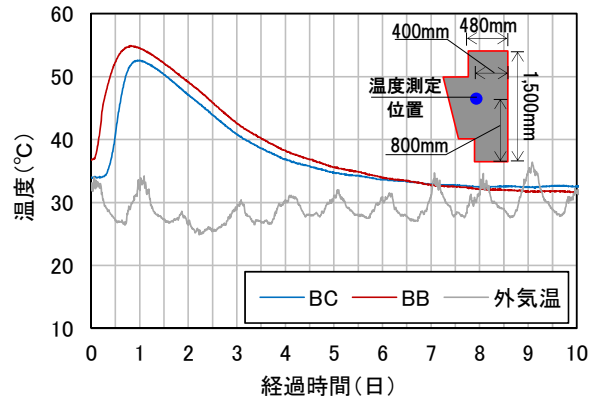


図-8 コンクリートの内部温度の比較

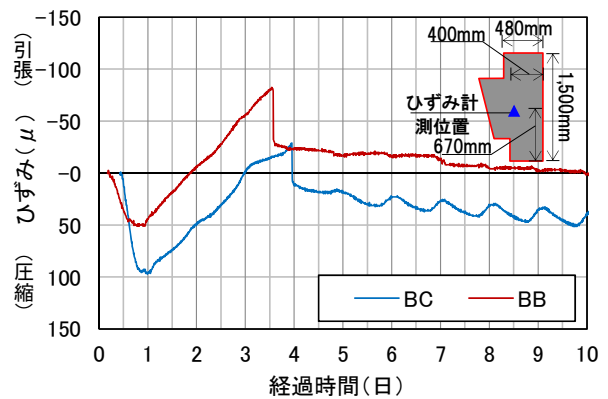


図-9 コンクリート内部のひずみの比較

まで 33℃付近で停滞しているが、この理由として、凝結が始まるまでの時間が BB と比較して遅くなる ことが考えられた。その後、52℃でピークとなり、BB の 55℃と比較して 3℃程度低くなった。

内部のひずみは BC, BB とともに、内部の温度がピークとなる 1 日程度までは圧縮側のひずみが増加し、その後、温度降下に伴って引張側へひずみが推移している。圧縮ひずみについて、BC の方が BB と比較して導入されるまでの時間が遅くなる理由は、凝結時間が BB に比べて BC の方が遅くなる ことが考えられた。また、圧縮ひずみの最大値が BB の 50 $\mu$  に対し、BC が 100 $\mu$  と大きくなっている理由として、BC の SO<sub>3</sub> 量が BB と比較して多く、エトリングaitの生成により初期材齢において膨張ひずみが生じたものと考えられる。BC のひずみは、引張側に移行した後、25 $\mu$  付近で圧縮側へ戻り、変動を繰り返す挙動を示した。この理由としてひび割れが発生したことで応力伝達がされず、ひずみがこのような挙動を示していることが考えられたが、後述のとおり、打込み後 7 日時点の目視確認においてひび割れは確認されていないことから、計測器の誤作動による可能性も考えられた。BC のひずみの値については、引き続き検討が必要である。

以上の結果より、BC の発熱特性は BB よりも低くなることと、BC の圧縮ひずみが BB よりも大きくなることと、BC の引張ひずみ自体を小さくできることから、マスコンの温度ひび割れ対策としても BC が有効である可能性が示唆される結果であった。今後、温度応力解析によってこれらの効果について検証を行っていく。

### (3) 強度特性

標準期、夏期施工時にそれぞれ 2 回、計 4 回の施工で現場にて供試体を作製し、標準水中養生の条件で材齢 2 日ないしは 3 日、7 日、28 日および 91 日での圧縮強度の結果を図-10 に示す。採取時期によってばらつきはあるものの、概ね室内試験と同程度の強度発現性を有しており、標準期および夏期の施工時期による強度発現性の違いは認められなかった。

## 5. まとめ

脱枠後の出来栄の状況を写真-6 に示す。初期欠陥やひび割れ等は確認されず、出来栄は良好であった。今回の実施工で得られた結果を以下に示す。

- (1) BC を用いたコンクリートは SO<sub>3</sub> 量を多くしたことと、BB よりも水セメント比を 5% 低減したことと、初期および長期強度ともに BB よりも高くなる。
- (2) 標準期、夏期の施工において、BC 専用の AE 減水剤（標準形および遅延形）を用いることで、スランプロスを抑制することができ、打込み、仕上げといった施工性についても良好である。

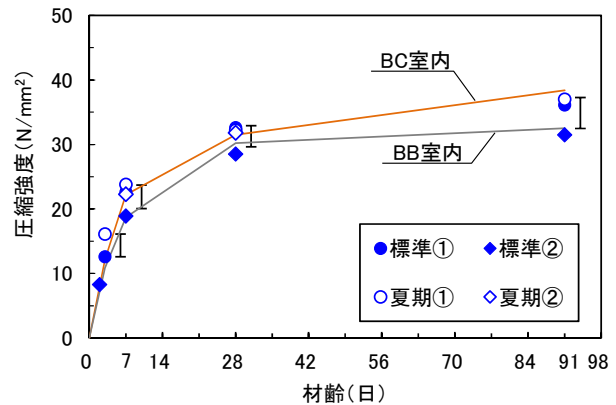


図-10 室内試験時と実施工時の圧縮強度の比較



写真-6 脱枠後の出来栄

- (3) 夏期の施工において、BC を用いたコンクリートは BB のそれと比較して、マスコンの温度ひび割れ対策としても有効となる可能性がある。

謝辞：今回の実施工にあたり多大なご協力を頂いた新日鉄住金（株）八幡製鉄所をはじめ、日鉄住金高炉セメント（株）および八幡生コン（株）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) Manabu HASHIMOTO et al. : Study on Concrete for Civil Engineering Structures Using High Volume Blast Furnace Slag Cement, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.14, pp.163-171, 2016
- 2) 佐川康貴, 渡辺総太, 井出貴仁 : 高炉スラグ微粉末を高置換率で用いたコンクリートの塩化物イオン拡散係数と ASR 抑制効果に関する研究, 第 5 回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム論文集, 2017.12
- 3) 新大軌, 玉木伸二, 宮内雅浩, 坂井悦郎 : 分子構造の異なる高分子系分散剤を添加した高炉セメントの流動特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.28-32, 2012
- 4) 鷹野明, 星秀明, 栗原通了 : 高炉スラグ微粉末コンクリートのスランブ低下傾向について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3