

# 低炭素型のコンクリートの各種構造物への適用

## クリーンクリート

新村 亮・竹田 宣典・小野 栄

セメント代替に高炉スラグ微粉末等の産業副産物を混和材として多量に使用することにより、コンクリート製造による CO<sub>2</sub> 排出量を大幅に削減可能な「クリーンクリート（以下「本材料」という）」を開発した。「本材料」は通常のコンクリートと同等の強度を有し、さらに低発熱、低塩分拡散性等の優れた性能を有している。本材料を設備・機械基礎や道路構造物など各種構造物へ適用し、施工性やコンクリートの品質が良好なことを確認した。

キーワード：コンクリート、低炭素化、品質、設備基礎、道路構造物、寒中施工

### 1. はじめに

地球温暖化対策として、各分野で CO<sub>2</sub> 排出量削減の取組みが進められている。建設分野においても資材の製造・運搬、機械の運搬・稼働、施工、建設後の運用、解体・廃棄など、社会資本整備全般にわたって CO<sub>2</sub> 排出量の削減は重要な課題である。2008 年の日本の 1 年あたり CO<sub>2</sub> 排出量は約 11.5 億 t とされているが<sup>1)</sup>、コンクリートの製造時における CO<sub>2</sub> 排出量の総計は 2,800 万 t 程度であり、日本の CO<sub>2</sub> 排出量の約 2.2% を占めている。このようなことから、コンクリート分野における CO<sub>2</sub> 排出量削減は極めて重要な課題である。そこで、コンクリートに用いる材料に CO<sub>2</sub> 排出量の少ない産業副産物を使用し、所要の品質が得られるように配合を定めることにより CO<sub>2</sub> 排出量の少ない、環境に配慮した低炭素型のコンクリートを開発し、実工事へ適用を行ってきた。本稿では、「本材料」の特徴と各種構造物への適用事例について述べる。

### 2. 低炭素型のコンクリートの概要

コンクリートに用いる材料の CO<sub>2</sub> 原単位を図-1 に示す<sup>2)</sup>。コンクリートの構成材料の中で、製造時に高温で燃焼して生産される普通ポルトランドセメント (OPC) の CO<sub>2</sub> 排出量は極めて大きな値である。一方で主に土木用コンクリートでは、水和熱の抑制、化学的抵抗性の向上などのコンクリートの性能を改善することを目的として、産業副産物である高炉スラグ微粉末 (BS)、フライアッシュ (FA)、シリカフェーム (SF) などが混和材料として OPC に置き換えて使用されてきた。これらの材料の CO<sub>2</sub> 排出量は OPC に比べてきわめて小さく、これらを用いることにより、コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を相当小さくすることが可能である。

一般に建設工事に使用されるコンクリートの 1 m<sup>3</sup> 当たりの CO<sub>2</sub> 排出量は約 200 ~ 300 kg 程度であるが、今回開発したコンクリートは、CO<sub>2</sub> 原単位が大きい OPC 量を結合材中の 15 ~ 30% まで低減し、BS、FA、SF など CO<sub>2</sub> 原単位の小さい産業副産物を混和材とし

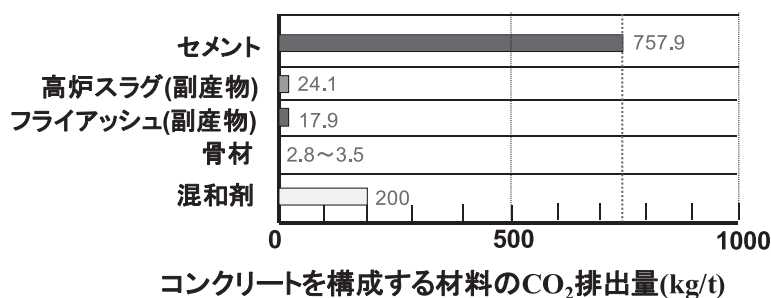


図-1 コンクリート用材料の CO<sub>2</sub> 原単位

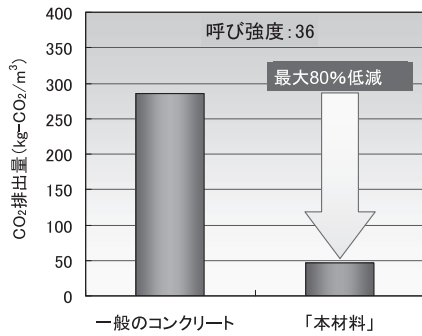


図-2 CO<sub>2</sub> 排出量の比較

で多量に使用することにより、CO<sub>2</sub> 排出量を一般のコンクリートに比べて最大 80% 程度削減できるものである (図-2)。

### 3. 低炭素型のコンクリートの特徴

通常、副産物を多量に使用すると、強度発現が遅くなるだけでなく、十分な強度を得ることが難しくなる。「本材料」では、図-3 に示す通り結合材水比を調整することにより、管理材齢 (28 日等) での必要な強度を確保することができる。

また、副産物を多量に使用し、セメント含有量が少ないことから、図-4 に示す様に結合材の水和発熱を低減することができ、マスコンクリートの温度ひび割れの発生防止に有効である。

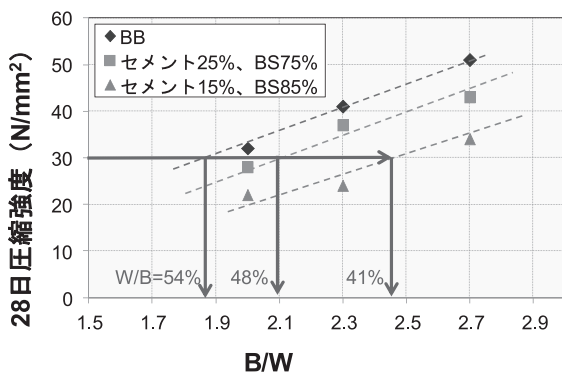


図-3 材齢 28 日標準養生強度と結合材水比の関係

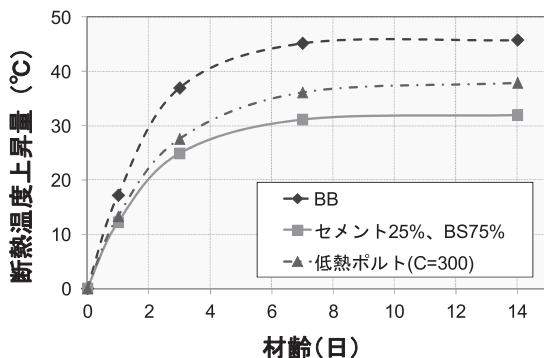


図-4 コンクリートの断熱温度上昇試験結果

高炉スラグ微粉末はコンクリートの水和組織を緻密化するため、塩分の拡散侵入の防止に効果があることが知られている。高炉スラグ微粉末を多量に使用した「本材料」は図-5 に示す通り塩分の拡散係数が小さく、コンクリート中の鉄筋などの鋼材の塩害腐食の発生防止に有効である。

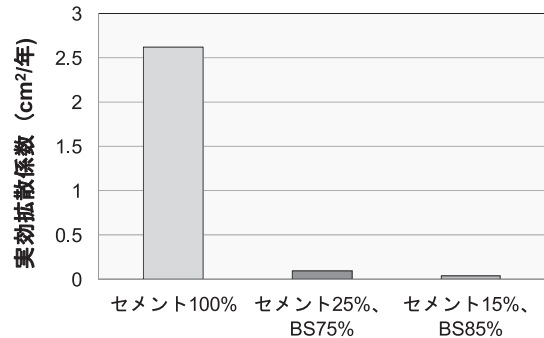


図-5 塩分の拡散係数試験結果

コンクリートの乾燥・自己収縮、凍結融解抵抗性等の耐久性に関わる性能は高炉スラグ B 種等の普通コンクリートと比べ同等以上である。

### 4. 各種構造物への適用

#### (1) 製鉄所基礎コンクリートへの適用

高炉スラグ骨材を使用し、材齢 28 日で圧縮強度 50 N/mm<sup>2</sup> が得られる本材料を、製鉄所の設備基礎構造物 (10 m × 15 m, 厚さ 1 m, 打設量 154 m<sup>3</sup>) へ適用した<sup>3)</sup>。

使用材料を表-1 に示す。結合材には、高炉セメント B 種 (BB) と高炉スラグ微粉末 (BS) を使用し、主にコンクリートのワーカビリティ改善のためにジルコニア起源のシリカフェーム (SF) を用いた。ジルコニア起源の SF は、エンジニアセラミックや電子部品、光学機器などに使用されているジルコニアを精製する際の副産物である。細骨材には高炉スラグ細骨材と海砂を 50 : 50 の混合比で使用し、粗骨材には高炉スラグ粗骨材をプレウエッティングして使用した。本材料の配合を表-2 とした。CO<sub>2</sub> 排出量は 103 kg/m<sup>3</sup> であり、普通ポルトランドセメントを使用した場合 (30-15-20N) に対して 65% の削減効果がある。

製造は、製鉄所内のレディーミクストコンクリート工場 (強制 2 軸練りミキサ) で行った。高炉スラグ微粉末の貯蔵には専用サイロを使用し、シリカフェームはミキサに直接投入した。コンクリートの運搬にはアジテータ車を使用した。

コンクリートは、ポンプ車のブーム (配管径 : 5 イ

表一1 使用材料

使用材料	記号	仕様	密度 g/cm <sup>3</sup>
高炉セメント B 種	BB		3.04
高炉スラグ微粉末	BS	ブレン値 4,620 cm <sup>2</sup> /g	2.89
シリカフェューム	SF	ジルコニア起源, ブレン値 106,000 cm <sup>2</sup> /g	2.23
細骨材	S1	高炉スラグ細骨材, FM2.20	2.83
細骨材	S2	海砂, FM2.60	2.60
粗骨材	G	高炉スラグ粗骨材, FM6.49	2.60

表一2 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							高性能 AE 減水剤 (B+SF×%)
				W	B		SF	S1	S2	G	
					BB	BS					
21	4.5	43	53.9	172	200	200	10	490	452	772	0.6

ンチ)により打ち込み、締固めは、通常の高周波振動機を用いた。打ち込み速度は平均 25 m<sup>3</sup>/時であり、約 6 時間で 154 m<sup>3</sup> を打設した。コンクリート打ち込み後、パラフィン系の膜養生剤を散布し、木ゴテにて打ち込み面の粗仕上げを行い、養生マットを用いて湿潤養生を 7 日間行った。

フレッシュコンクリートの品質試験結果（アジテータ車 13 台測定）を表一3 に示す。打ち込み場所におけるスランブは 21.5 ~ 23.0 cm、空気量は 3.5 ~ 5.1% の範囲にあり、コンクリート温度は 18 ~ 19℃ で安定していた。圧縮強度の材齢による推移を図一6 に示す。標準養生と現場封かん養生の圧縮強度の差異は小さく、材齢 28 日での目標強度の 50 N/mm<sup>2</sup> を上回った。また、材齢 7 日において 30 N/mm<sup>2</sup> 以上の十分な初期強度発現があった。

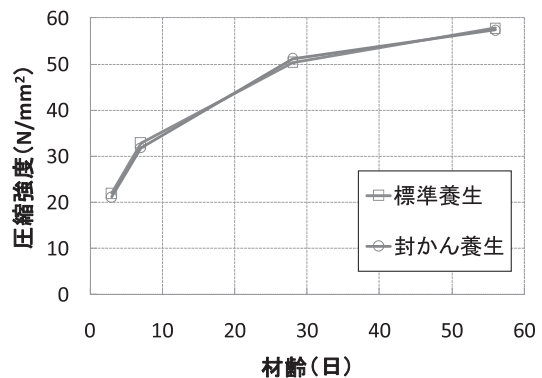
(2) 道路構造物への適用

高炉スラグ微粉末を多量添加した低炭素型のコンクリートを道路構造物へ試験的に適用した<sup>4)</sup>。使用した材料を表一4 に、コンクリートの配合仕様を表一5 に示す。一般的なコンクリートに比べ CO<sub>2</sub> 排出量を約 75 ~ 65% 削減している。設計基準強度 24, 21 N/mm<sup>2</sup> の 2 種類の配合を使用し、材齢 28 日で設計基準強度を満足するように室内試験練りにより W/B を決定した。C1 配合を掘割部鉄筋コンクリート底版へ、C2 配合を舗装下部レベル調整用の無筋調整コンクリートへ適用した。

実施工前に行った施工試験において、「本材料」を生コンクリート工場で製造し、アジテータ車で運搬後、各種の試験を行った。強度については、1 m × 1 m ×

表一3 フレッシュコンクリートの品質試験結果

	平均値 (N = 13)		
	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
出荷時	22.9	4.0	19.0
荷降し箇所	22.6	4.2	18.2
打ち込み箇所	22.4	4.5	18.8



図一6 圧縮強度の推移

1 m ブロック試験体、2 m × 2 m × 0.2 m スラブ供試体（写真一1）のコア強度を測定した。スラブ試験体には C1 配合を使用し、養生を 3 種類変えて、表面性状の観察、強度、表面の緻密さの指標として原位置透気試験（トレント法）を行った。フレッシュ性状の経時変化を表一6 に示す。コンクリート温度が 30℃ 程度と高いにもかかわらず、出荷 90 分後のスランブロス は 4 cm 程度であり、空気量も安定している。ブロック試験体のコア強度試験結果を表一7 に示す。上部の強度はやや低いものの、いずれのコアも設計基準強度を十

表—4 使用材料

使用材料	記号	仕様	密度 g/cm <sup>3</sup>
普通ポルトランドセメント	C		3.16
高炉スラグ微粉末	BS	ブレン値 4,000 cm <sup>2</sup> /g	2.89
シリカフェーム	SF	ジルコニア起源	2.23
細骨材	S	石灰砕砂・山砂混合	2.62
粗骨材	G	石灰砕石	2.66

表—5 コンクリートの配合仕様

配合名	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	W/B (%)	C/B (%)	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )
C1	24	15	45.0	25	80
C2	21	18	47.0	15	58

$$B = C + BS + SF$$

分に上回っている。スラブ試験体の試験結果を表—8に示す。膜養生と養生マットを併用した場合、表面ひび割れの発生は認められなかった。コア強度、テストハンマー強度、透気係数等全般にわたって、膜養生と養生マットを併用した場合が最も良好な結果となった。

底版はポンプ車のブームで打設し、調整コンクリートは定置式ポンプを使用し、φ125 mm、水平換算距離 300 m の配管で圧送した。コンクリートの粘性が



写真—1 スラブ供試体

表—6 フレッシュ性状経時変化

配合	測定工程	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
C1	出荷	19.5	4.9	30
	49分後	16.5	3.9	31
	60分後	17.5	4.5	31
	90分後	15.5	5.1	31
C2	出荷	21.5	4.8	30
	40分後	18.0	5.1	31
	60分後	18.0	5.2	31
	90分後	17.0	5.0	31

表—7 ブロック試験体コア強度試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

配合	C1	C2
上部	28.2	24.3
中部	35.8	26.3
下部	37.6	27.8
平均	33.1	26.1

通常よりもやや高いものの、圧送、打込み、締固め、仕上げとも通常のコンクリートとほぼ同様に問題なく行うことができた。養生には事前の施工試験の結果に基づき、膜養生剤と養生マットを併用した結果、ひび割れ等の発生は見られなかった。300 m ポンプ圧送前後において、スランプが最大 2.5 cm 程度低下したが、空気量、強度の変化はほとんど見られなかった。

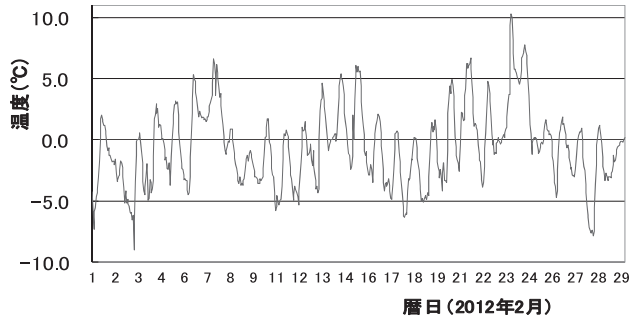
### (3) 寒冷期での震災廃棄物処理施設への適用

宮城県の災害廃棄物処理業務のうち巨理処理区の二

表—8 スラブ試験体試験結果

供試体	A	B	C
養生方法	養生なし	膜養生	膜養生 + 養生マット (1週間)
表面性状	微細な表面ひび割れが発生	一部に微細な表面ひび割れが発生	異常無し
コア強度 (N/mm <sup>2</sup> )	32.0	31.1	36.1
テストハンマー 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	25.3	29.9	29.6
透気係数 (m <sup>2</sup> ) × 10 <sup>-16</sup>	0.041	0.15	0.018

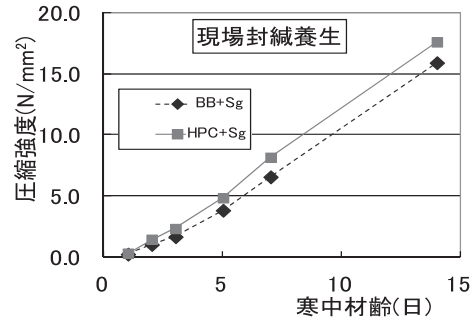
次処理施設破碎選別エリアの作業床、機械基礎となるベースマットに対し、寒冷期に低炭素型のコンクリートの施工を行った<sup>5)</sup>。総打設量は1193 m<sup>3</sup>であった。打設は2月1日～13日の10回に分けて実施した。現場付近の2月の気温を図一7に示す。



図一7 現場付近の外気温（2月度）

設計基準強度（材齢28日）は21 N/mm<sup>2</sup>であるが、寒冷期における材齢早期での機械基礎設置等が計画されるため、材齢7日の現場封緘養生供試体の強度で7 N/mm<sup>2</sup>以上を目標に設定した。また、初期凍害を受けない目安の強度（4～5 N/mm<sup>2</sup>程度）を早期に発現できる配合を選定した。その結果、セメント成分を早強型（HPC）に変えた配合（表一9）とした。事前の試験練りで図一8に示すように現場封緘養生の材齢5日で4.9 N/mm<sup>2</sup>、7日で8.2 N/mm<sup>2</sup>が得られた。

コンクリートの打設はピストン式のコンクリートポンプ車（ブーム付き）で行った。工場からの運搬時間が40分程度であり、運搬にはアジテータ車10台程度を使用したため、打設速度は30 m<sup>3</sup>/h程度であった。打設状況を写真一2に示す。一般に寒中施工では保



図一8 現場封緘養生供試体の強度発現性

温等の養生が必要であるが、「本材料」では特に保温養生が重要となる。今回の打設部位は床板厚さが20 cmと薄く、蓄熱しにくい構造のため、冷氣から表面を保護する目的で保温層付き養生シートと、厚手の養生シートをダブルで設置し養生を行った。

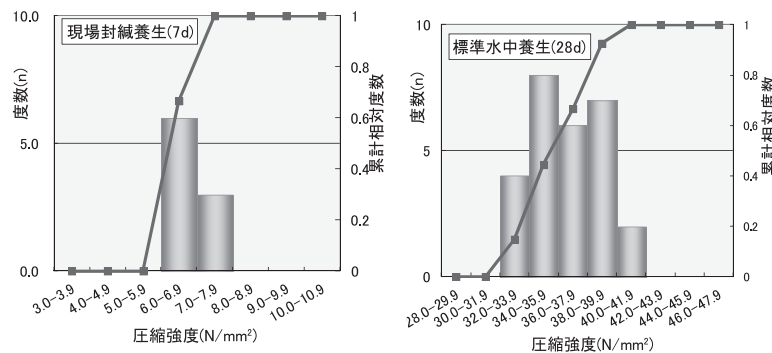
現場荷卸し試験の結果は、スランプが13～17 cm（平均14.8 cm）、空気量が3.9～4.8%（平均4.4%）、温



写真一2 打設状況

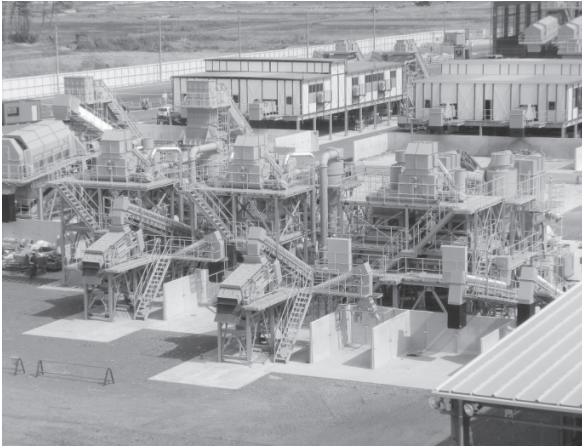
表一9 「本材料」の配合（冬期仕様）

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (B×%)
				W	B		S	G	
					HPC	BS			
15	4.5	43.0	45.3	175	118	289	742	968	1.0



図一9 封緘・標準水中養生供試体の強度分布

度が4.5～9.0℃（平均6.0℃）であった。また圧縮強度は、現場封緘7日強度が6.4～7.4 N/mm<sup>2</sup>（平均6.9 N/mm<sup>2</sup>），標準水中28日強度が32.0～41.4 N/mm<sup>2</sup>（平均36.5 N/mm<sup>2</sup>）となった。強度試験の結果を図—9に示す。約1年経過後もひび割れ等の不具合は認められていない。完成後の処理施設を写真—3に示す。



写真—3 完成後の破碎選別エリア

## 5. おわりに

産業副産物を多量に使用した低炭素型のコンクリート「クリーンコンクリート」を各種構造物へ適用し、異なる施工条件でもコンクリートの施工性、品質が十分に確保できることが確認できた。今後、低炭素型のコンクリートの活用を促進し、低炭素化社会の実現へ貢献したいと考えている。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) 国際エネルギー機関 (IEA) 「CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION」2010
- 2) 土木学会「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」、コンクリートライブラリー 125, 2005
- 3) 竹田宣典, 半田敬二, 近松竜一, 一瀬賢一「高炉スラグ系材料を用いた低炭素型のコンクリートの性質と適用」, アーバンインフラ・テクノロジー推進会議第23回技術研究発表会, 2011.11
- 4) 三浦律彦, 小野 栄, 新村 亮, 新開 千弘「震災廃棄物処理施設建設工事での低炭素型のコンクリートの冬期施工と品質管理」, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9
- 5) 新村 亮, 山下 徹, 三浦律彦「道路構造物への混和材高含有コンクリートの適用」, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9

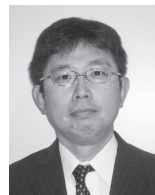
### 【筆者紹介】



新村 亮（しんむら あきら）  
 ㈱大林組  
 生産技術本部 技術第一部  
 主席技師



竹田 宣典（たけだ のぶふみ）  
 ㈱大林組  
 技術研究所 生産技術研究部  
 上席研究員



小野 栄（おの さかえ）  
 宮城県  
 環境生活部 震災廃棄物対策課  
 技術主幹