

# 低炭素社会の実現に寄与するコンクリート技術 —低炭素型セメント結合材の利用—

中村英佑\* 鈴木 聡\*\* 森濱和正\*\*\* 渡辺博志\*\*\*\*

## 1. はじめに

コンクリートは、水の次に人類が最も多く消費する物質と言われており<sup>1)</sup>、人類の活動に必要不可欠な建設材料として世界中で使用されている。しかし、コンクリートの主成分であるセメントの生産からは世界全体のCO<sub>2</sub>排出量の約5%が排出されることが報告されており<sup>2)</sup>、コンクリートの製造には相当量の環境負荷が伴うことも指摘されている。このため、持続可能な社会の実現に向けて、コンクリート分野では環境負荷低減のために様々な取り組みを実施している。例えば、セメント製造時には、原料や熱エネルギーとして多量の産業副産物や産業廃棄物を活用している。また、廃棄物の発生抑制や資源の有効利用の観点から、レディミクストコンクリート工場における回収水の利用や、破碎後のコンクリート塊から採取した再生骨材の使用を進めている。この他にも、化学混和剤の製造時に環境影響の小さい原料を使用することや破碎後のコンクリート塊からの六価クロムの溶出試験方法なども検討している。

こうした中、近年の地球温暖化問題に対する世界的な関心の高まりを受けて、コンクリート構造物のライフサイクルで排出されるCO<sub>2</sub>を削減するための取り組みに注目が集まっている。特に、コンクリートの製造過程で排出されるCO<sub>2</sub>を削減するためのひとつの方法として、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどを混和材として多量に使用することが検討されている。しかし、混和材を多量に使用したコンクリートの品質評価技術や構造計算に用いる設計値、現場での施工方法などは必ずしも確立されていない。

そこで、(独)土木研究所基礎材料チームは、平成23年度から「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」を国内8機関との共同研究として開始した(参加機関:(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設

(株)、前田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鐵鋼スラグ協会、電源開発(株))。本稿では、低炭素社会の実現に向けたコンクリート分野の取り組みの一例として、本共同研究の概要とこれまでに得られた結果の一部を紹介する。

## 2. 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究

### 2.1 低炭素型セメント結合材とは?

本共同研究では、ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を多量に混合した結合材を「低炭素型セメント結合材」と称している。混和材を多量に混合することによりポルトランドセメントの使用量を低減させ、その製造時に排出されるCO<sub>2</sub>を削減することができるためである。

表-1に、文献<sup>3)</sup>に示されたコンクリートの各構成材料1トンを生産する際に排出されるCO<sub>2</sub>の計算値を示す。高炉スラグ微粉末は製鉄所、フライアッシュは石炭火力発電所から排出される産業副産物である。一般に各事業所で発生する環境負荷は主生産品の製造に伴う環境負荷として計上されるため、ポルトランドセメントに比べて各混和材のCO<sub>2</sub>排出量は大幅に小さい。このため、混和材の混合率を増やすほど、CO<sub>2</sub>排出削減効果も大きくなると考えられている。

### 2.2 共同研究の目的と検討内容

本共同研究では、低炭素型セメント結合材を一般の鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物で利用するための技術指針を作成することを目的としている。研究期間は、平成23~27年度の5年間である。

平成23年度は、低炭素型セメント結合材を使用したコンクリートの強度特性と耐久性を把握するため、既報<sup>4)</sup>で紹介した暴露試験を開始するとともに、暴露供試体と同時に製作した供試体を使用して圧縮強度試験と室内促進試験を行った。このため、(独)土木研究所で26種類、共同研究参加機関で24種類の配合の供試体を製作した。本稿

では、(独)土木研究所が行った圧縮強度試験と室内促進試験の結果の一部を示す。

### 2.3 (独)土木研究所の製作した供試体

表-2に、(独)土木研究所の製作した26種類の供試体の概要を示す。セメントは早強ポルトランドセメント (HPC) と普通ポルトランドセメント (OPC) の2種類を使用した。混和材は、比表面積の異なる2種類の高炉スラグ微粉末 (SG4 : 4000cm<sup>2</sup>/g、SG6 : 6000cm<sup>2</sup>/g) とフライアッシュ (FA) を使用した。混和材の混合率は、混合セメントのJIS規格の上限値を超えるものも含むように設定した。スランブは12±2.5cm、空気量は4.5±1.5%を目標値とした。また、供試体の養生条件は、水中養生 (No.1~9、14~26) と蒸気養生 (No.10~13) の2種類とした。水中養生を行った供試体はコンクリート打設の翌日に脱枠し、蒸気養生を行った供試体は打設直後から蒸気養生を行い、こちらも打設の翌日に脱枠した。いずれの供試体も脱枠後は材齢28日まで約20℃の水中で養生し、その後は室内に静置した。なお、混和材の使用が強度特性や耐久性に与える影響を評価することを主目的としたため、単位水量と単位粗骨材量を全供試体で同一とした。

### 2.4 強度特性

図-1に、圧縮強度の試験結果を示す。水中養生を行った供試体は材齢7、28、91日、蒸気養生を行った供試体は材齢1、28、91日で、JIS A 1108に準拠して圧縮強度試験を行った。

混和材を使用した供試体の圧縮強度は、混和材を使用していない供試体と比べると小さい。しかし、混和材を使用した供試体では材齢28日から材齢91日の圧縮強度の増加量が大きく、混和材を使用した場合に圧縮強度が長期的に増加する傾向にあることを確認できる。なお、同時に製作した圧縮強度試験用の供試体を材齢91日以降で屋外に暴露しており、これらを用いて材齢1、3年の圧縮強度試験を行い、圧縮強度の長期的な推移を明らかにする予定である。

### 2.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

図-2に、土木学会規準JSCE-G 572に準拠して行った浸せき試験から求めた塩化物イオン拡散係数を示す。塩化物イオン拡散係数は、水中養生後の円柱供試体 (φ100×200mm) の中央部から厚さ150mmの部分を切り出し、濃度10%の塩化ナ

表-1 コンクリートの構成材量のCO<sub>2</sub>排出量<sup>3)</sup>

構成材量	CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /t)
ポルトランドセメント	766.6
高炉スラグ微粉末	26.5
フライアッシュ	19.6
天然細骨材	3.7
天然粗骨材	2.9

表-2 (独)土木研究所の製作した26種類の供試体

No.	セメント種類	混和材の混合率(%)			単位結合材量(kg/m <sup>3</sup> )	水結合材比W/B(%)
		SG4	SG6	FA		
1	早強	-	-	-	413	40
2		30	-	-		
3		50	-	-		
4		-	30	-		
5		-	50	-		
6		-	70	-		
7		-	-	10		
8		-	-	20		
9		-	-	30		
10		-	-	-		
11		30	-	-		
12		-	50	-		
13		-	-	20		
14	普通	-	-	-	471	35
15		50	-	-		
16		85	-	-		
17		-	-	20		
18		-	-	40		
19		-	-	-		
20		50	-	-		
21		70	-	-		
22		85	-	-		
23		-	-	20		
24		-	-	30		
25		-	-	40		
26		50	-	20		
				330	50	

\*単位水量 = 165 kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量= 968 kg/m<sup>3</sup>  
No.1~9、14~26 : 水中養生、No.10~13 : 蒸気養生

トリウム水溶液に6ヶ月間浸せきした後の塩化物イオン濃度の測定結果から求めたものである。

拡散係数は、混和材を使用していない供試体よりも混和材を使用した供試体で小さくなり、混和材の使用により塩化物イオン浸透抵抗性が向上したことがわかる。特に、高炉スラグ微粉末を使用した供試体では拡散係数が大幅に低下した。今回の実験では浸せき期間を1、2年とした浸せき試験も行っているため、今後、浸せき期間が異なる場合の拡散係数についても検討する予定である。

また、暴露試験や浸せき試験では試験に要する期間が長くなるため、迅速に結果を得るための新しい促進試験の開発も行っている。各試験から得

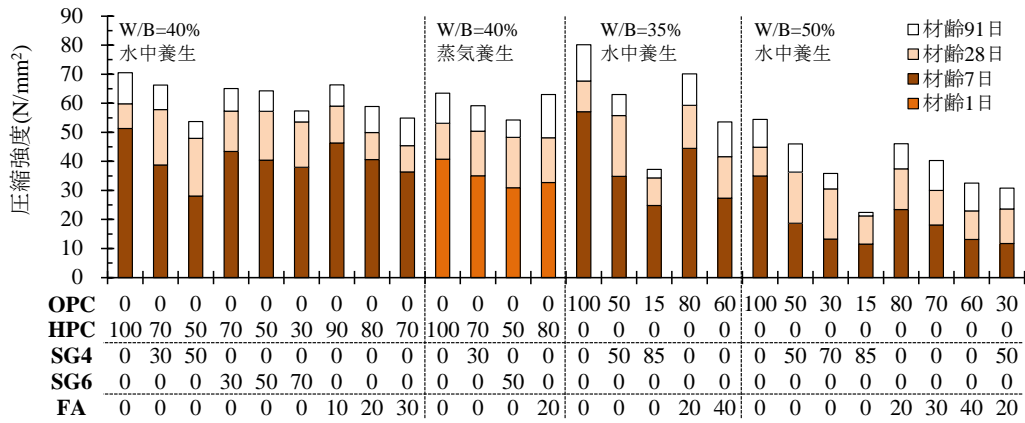


図-1 圧縮強度の実験結果

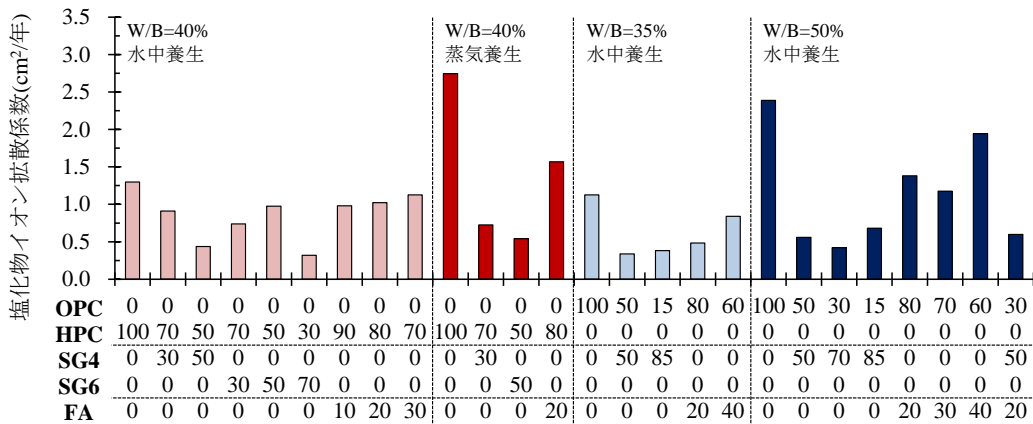


図-2 塩化物イオン拡散係数の実験結果

※図-1と図-2において、OPC、HPC、SG4、SG6、FAの値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

られた拡散係数を比較することより、低炭素型セメント結合材を使用したコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を明らかにし、促進試験の適用性についても検討する予定である。

### 2.6 中性化に対する抵抗性

図-3に、JIS A 1153に準拠して実施した促進中性化試験から得られた中性化速度係数と材齢91日の圧縮強度の関係を示す。

混和材の混合率の違いにかかわらず、材齢91日の圧縮強度と中性化速度係数は相関関係にあり、圧縮強度が大きいほど中性化の進行に対する抵抗性が向上したことがわかる。また、早強ポルトランドセメントを使用した供試体では、材齢91日の圧縮強度が大きく、中性化速度係数が小さくなった。混和材を多量に使用したコンクリートでは中性化に対する抵抗性が低下することが懸念されているが、ベースセメントとして早強ポルトランドセメントを使用することにより、材齢初期の圧縮強度を確保し、中性化に対する抵抗性を高めることができる可能性があると考えられる。

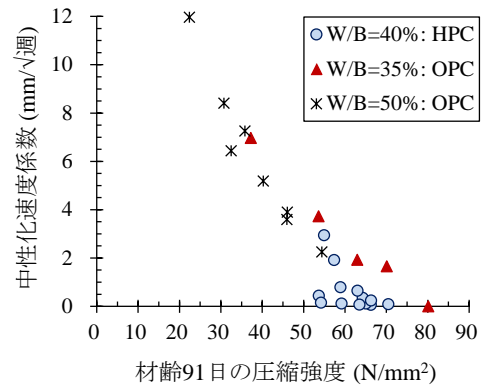


図-3 圧縮強度と中性化速度係数

促進中性化試験はCO<sub>2</sub>濃度5%の環境下で行われるため、実際にコンクリートが置かれる環境よりも苛酷な条件下での試験となっている。このため、暴露供試体の解体調査を行うことで実環境下における中性化抵抗性を把握し、促進中性化試験で得られた結果の妥当性を検証する予定である。

### 2.7 CO<sub>2</sub>排出削減効果の試算結果

図-4に、表-2に示した26種類の配合のコンクリートでのCO<sub>2</sub>排出量の試算結果を示す。ここでは、各コンクリートのCO<sub>2</sub>排出量を「1m<sup>3</sup>のコン

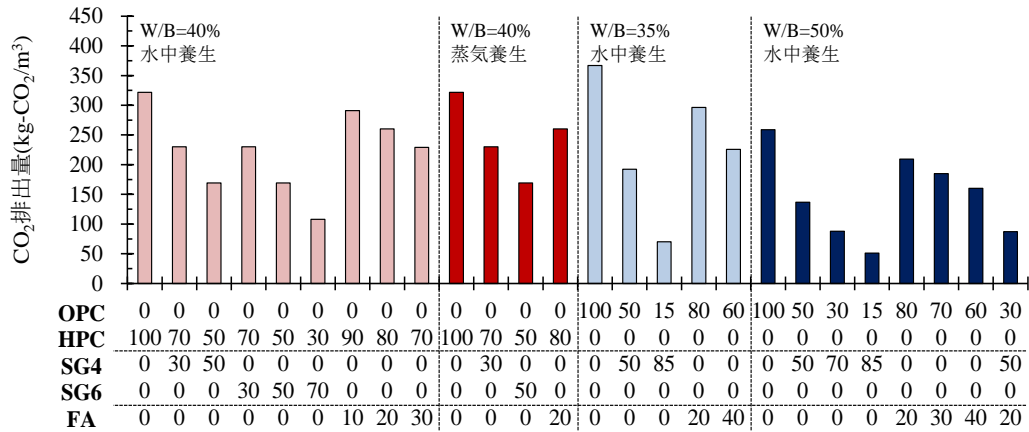


図-4 CO<sub>2</sub>排出量の試算結果

※図-4において、OPC、HPC、SG4、SG6、FAの値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

クリートを製造する際に使用する材料の生産時に排出されるCO<sub>2</sub>」と定義し、表-1のCO<sub>2</sub>排出量を各構成材料の使用量に乗じて積算した。

各混和材のCO<sub>2</sub>排出量がポルトランドセメントに比べて小さいため、混和材の使用量を増やすことでCO<sub>2</sub>排出量が低下する傾向にあることがわかる。すなわち、混和材の使用によりコンクリート製造時の材料面からのCO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減することができると考えられる。

### 3. まとめ

本稿では、低炭素社会の実現に向けたコンクリート分野の取り組みの一例として、(独)土木研究所と国内8機関の共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の概要を紹介し、強度特性と耐久性に関する実験結果の一部とCO<sub>2</sub>排出削減効果の試算結果を示した。

本共同研究では、本稿で紹介した内容に加えて、塩化物イオン浸透抵抗性を評価するための促進試験の開発、プレストレストコンクリート構造物の設計に不可欠なクリープ・収縮特性の把握、適切

な湿潤養生期間の設定方法などの検討も行っている。得られた研究成果をもとに低炭素型セメント結合材の利用技術指針を作成する予定である。

### 謝 辞

暴露試験では、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所及び内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所の関係各位の協力を得た。供試体製作では、BASFジャパン(株)の土谷正氏から化学混和剤について助言を得た。記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Gambhir, M. L.: Concrete Technology, Third Edition, Tata McGraw-Hill, 2006.
- 2) IPCC: Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press, 2007, pp.467-469.
- 3) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価(その2)、土木学会、コンクリート技術シリーズNo.62、p.39の差し替え表、2004.
- 4) 渡辺博志、森濱和正、中村英佑、鈴木聡：低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート供試体の暴露試験、土木技術資料、第54巻、第8号、pp.48~49、2012.

中村英佑\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所材料資源研究グループ 基礎材料チーム 研究員  
Eisuke NAKAMURA

鈴木 聡\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所材料資源研究グループ 基礎材料チーム 交流研究員  
Satoshi SUZUKI

森濱和正\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所材料資源研究グループ 基礎材料チーム 総括主任研究員  
Kazumasa MORIHAMA

渡辺博志\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所材料資源研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員、工博  
Dr. Hiroshi WATANABE