

## PC橋への低発熱収縮抑制型高炉セメントの適用による環境負荷の低減

中日本高速道路(株) 正会員 博士(工学) ○酒井 秀昭

### 1. はじめに

橋梁の建設においても、環境負荷の低減が可能な材料や施工方法を採用する必要性が高まっている。PC構造の橋梁上部工の建設時のCO<sub>2</sub>排出量について算出した事例<sup>1)</sup>によれば、橋長200mのPC4径間連続箱桁橋のCO<sub>2</sub>排出割合を図-1のとおり算定している。PC構造の橋梁上部工の建設時のCO<sub>2</sub>排出量は、材料に起因する割合がきわめて高く、エネルギー消費量も材料に起因する割合が高いものと推察される。また、橋脚等のRC構造物についても同様な傾向を示すものと思われる。したがって、橋梁の建設に起因する環境負荷を低減するためには、コンクリートなどの橋梁を構成する材料についてこれらの施策が可能な方法を検討することが重要となる。

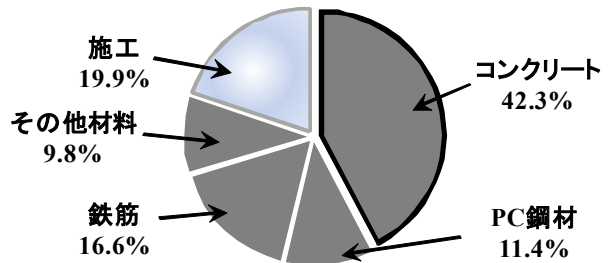


図-1 PC上部工 CO<sub>2</sub>排出割合の算定事例

日本においては、橋梁等の一般のコンクリート構造物に使用されるセメントとしては、普通ポルトランドセメントが広く用いられており、その製造過程においては、化石燃料の消費や二酸化炭素の排出などによる環境負荷が比較的多く発生する。高炉セメントは、製鉄所の銑鉄製造工程である高炉から生成する副産物である高炉スラグの微粉末と普通ポルトランドセメントを混合したセメントで、化石燃料の消費や二酸化炭素の排出などによる環境負荷の低減が可能となる。さらに、アルカリシリカ反応の抑制や塩化物イオンの浸透抑制に有効なセメント<sup>2)</sup>である。しかし、日本で使用されている高炉セメントは、初期強度が大きくなるように調整されているため、コンクリートの断熱温度上昇量が普通ポルトランドセメントよりも高くなること、自己収縮量が多くなることにより、水和熱や収縮に起因するひび割れが発生する可能性が増大する。したがって、高速道路橋などの大型のコンクリート構造物に高炉セメントを使用する場合は、有害なひび割れが発生する可能性が増大するため、使用の制限を受けるのが現状となっている。

これに対して低発熱収縮抑制型高炉セメントは、従来の高炉セメントおよび普通ポルトランドセメントと比較して、コンクリートの断熱温度上昇量が低減すること、セメントの水和に起因する収縮量が普通ポルトランドセメントを使用した場合と同程度になることから、水和熱や収縮に起因するひび割れが発生する可能性が減少する。さらには、高炉スラグの混入量が従来の高炉セメントよりも多いことから、高炉セメントと比較しても環境負荷の低減が可能となる<sup>3)</sup>。

本研究においては、本セメントの保持する性能、本セメントを使用したコンクリートの特性および環境負荷の低減の効果について検討を行った。さらに、橋梁の上部工、橋脚および基礎工のコンクリートに本セメントを採用した場合の効果についても検討を行った。

### 2. 低発熱収縮抑制型高炉セメントの特性

#### 2.1 従来の高炉セメントとの比較

日本で一般に使用されているJISで規定された高炉セメントB種(JIS R 5211)と低発熱収縮抑制型高炉セメントの比表面積、化学成分および高炉スラグ混入量を比較すると表-1のとおりとなる。低発熱収縮抑制型高炉セメントは、水和熱を減少させるため比表面積を小さくするとともに、高炉スラグの混入量を増大している。また、自己収縮量を減少させるため、三酸化硫黄を増加させるとともに、比表面積を小さくしている。

低発熱収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートは、従来の高炉セメントB種を用いたコンクリート

と比較して、材齢初期における強度発現が小さいが長期強度の増進が大きいため、従来の高炉セメントB種を用いたコンクリートの強度が供試体の材齢28日における強度試験値で評価しているのに対して、供試体の材齢56日以上での強度試験値で評価することが望ましい。

2. 2 断熱温度上昇特性

コンクリートの断熱温度上昇特性は、式(1)により算定できる<sup>4)</sup>ので、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>および製造会社の試験値をもとに、W/C=50%、セメント量320kg/m<sup>3</sup>、打込み時温度20°Cの場合の断熱温度上昇量を算定すると図-2のとおりとなる。図-2からわかるように低発熱収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートは、従来の高炉セメントB種や普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比較して、低発熱の性質を有しており、断熱温度上昇量が概ね70~80%程度となる。したがって、低熱ポルトランドセメントの代替として、有害な温度ひび割れのおそれがある個所にも温度ひび割れ対策として有効活用できる可能性が高い。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (1)$$

$Q(t)$  : 材齢t日における断熱温度上昇量(°C)

$t$  : 材齢(日)

$Q_{\infty}$  : 終局断熱温度上昇量(°C)

$r$  : 温度上昇速度の定数

2. 3 自己収縮特性

自己収縮特性については、JCIの報告書<sup>5)</sup>に示す方法でセメント種別ごとに試験を行った。試験は、W/C=50%、温度20°Cの条件で行った。試験結果を図-3に示す。図-3からわかるように低発熱収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートは、材齢初期に約100×10<sup>-6</sup>の膨張特性があり、従来の高炉セメントB種に比較して自己収縮量が低減される。また、普通ポルトランドセメントと比較しても、自己収縮量は小さくなる傾向にある。

2. 4 環境負荷の低減効果

低発熱収縮抑制型高炉セメントの環境負荷の低減効果については、材料の製造に起因するエネルギー消費量やCO<sub>2</sub>排出量等を算定し比較することが望ましいが、本文では、便宜的にCO<sub>2</sub>排出量原単位で評価する。評価は、既往の資料<sup>6)</sup>や製造会社の算定値をもとに行った。その結果を、表-2に示す。表-2からわかるように、低発熱収縮抑制型高炉セメントを使用すれば、セメントの製造に起因するCO<sub>2</sub>排出量を、普通ポルトランドセメントに比べて約60%、高炉セメントB種に比べて約30%削減することができる。

表-1 従来の高炉セメントとの比較

種類 品質	高炉セメントB種		低発熱・収縮抑制型高炉セメント	
	JIS規格値	実績例	規格値	実績例
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	3000以上	3930	3000以上 3500以下	3400
化学成分(%) 三酸化硫黄	4.0以下	2.04	3.5以上 4.0以下	3.9
スラグ混入量(%)	30超 60以下	42	56以上 60以下	58

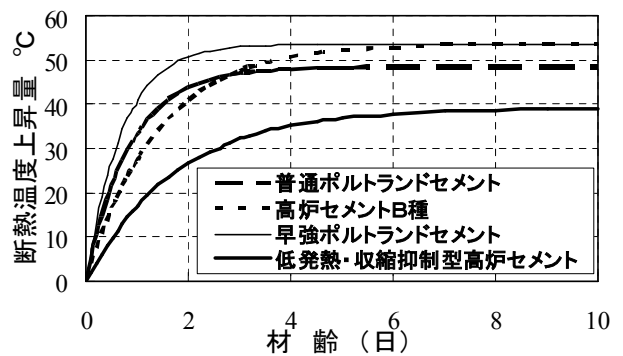


図-2 セメント種別ごとの断熱温度上昇量

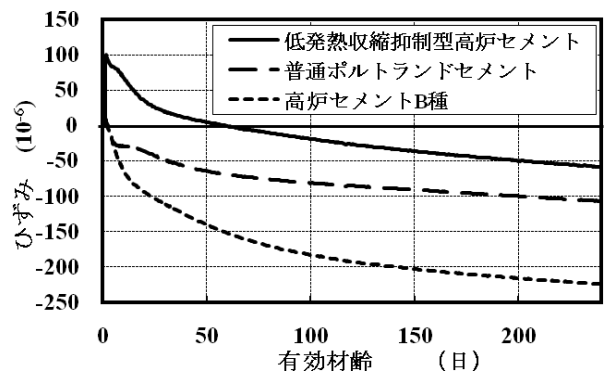


図-3 自己収縮特性

表-2 セメント種別ごとのCO<sub>2</sub>排出量原単位

セメント種別	CO <sub>2</sub> 排出量原単位 (kg/t)
普通ポルトランドセメント	765.5
高炉セメントB種	457.7
低発熱収縮抑制型高炉セメント	308.0

### 3. 低発熱収縮抑制型高炉セメントの実橋への適用

#### 3. 1 橋梁の概要

環境負荷の低減やセメントの水和に起因するひび割れを抑制することを目的に、低発熱収縮抑制型高炉セメントを首都圏中央連絡自動車道の裏高尾橋に採用した。裏高尾橋は、図-4に示すように橋長438mのPC鋼複合箱桁橋で、PC箱桁部のウェブには鋼波形鋼板ウェブが用いられている。また、橋脚は図-5に示す断面形状を有している。

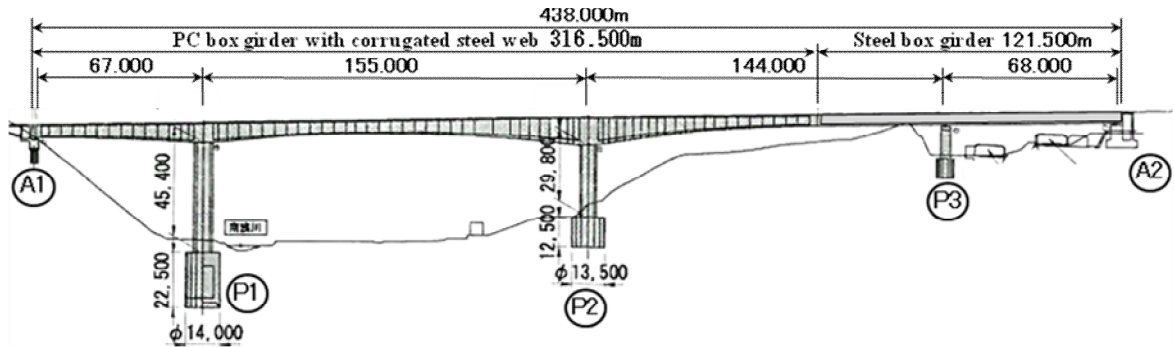


図-4 裏高尾橋側面図

#### 3. 2 低発熱収縮抑制型高炉セメントの適用

低発熱収縮抑制型高炉セメントは、環境負荷の低減やセメントの水和に起因するひび割れを抑制する効果があるが、材齢初期における強度がポルトランドセメントや従来の高炉セメントに比べて低下する。したがって、裏高尾橋においては、材齢初期における強度が比較的小さくても施工工程にあまり影響を与えない部材や、セメントの水和に伴う有害なひび割れの発生が懸念される個所に低発熱収縮抑制型高炉セメントを使用することとし、表-3に示すように橋台、橋脚、ケーソンの上部、上部工の支点部付近および上部工の橋梁壁高欄に低発熱収縮抑制型高炉セメントを使用した。

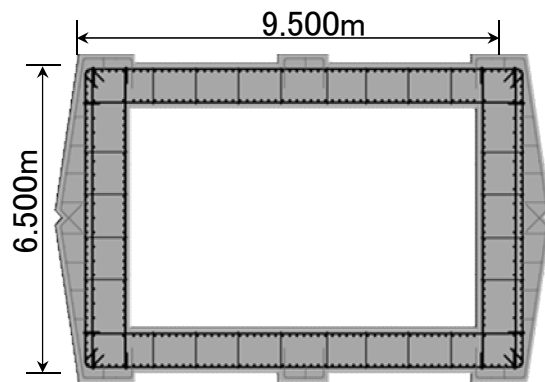


図-5 裏高尾橋 P1 橋脚断面図

その結果、裏高尾橋においては、使用するコンクリートの約 45%に低発熱収縮抑制型高炉セメントを採用する結果となった。低発熱収縮抑制型高炉セメントの使用重量は、合計で 4,521ton となり、環境負荷の低減効果を CO<sub>2</sub> 排出量の削減量で評価すれば、低発熱収縮抑制型高炉セメントの使用箇所においては、表-2の排出量原単位を基に算定した結果、ポルトランドセメントを使用した場合のセメントの製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量 3,461ton を 1,392ton (40%)に削減する効果があったことになる。また、裏高尾橋全体のセメントの製造に起因する CO<sub>2</sub> 排出量についても、概ね

表-3 裏高尾橋の使用セメント

名称	使用コンクリート量 (m <sup>3</sup> )			低発熱収縮抑制型高炉セメント		
	ポルトランドセメント	低発熱収縮抑制型高炉セメント	計	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント重量 (ton)	
A1 橋台	杭	146	0	146		
	橋台	0	716	716	328	235
P1 橋脚	ケーソン	1,884	2,389	4,273	292	698
	橋脚	0	2,577	2,577	328	845
P2 橋脚	杭	5,955	0	5,955		
	橋脚	0	2,244	2,244	328	736
P3 橋脚	杭	2,521	0	2,521		
	橋脚	0	1,479	1,479	328	485
A2 橋台	橋台	0	1,368	1,368	328	449
	上部工(PC箱桁)	6,750	2,299	9,049	365	839
壁高欄	0	740	740	316	234	
計		17,256	13,812	31,068		4,521
比率		55.5	44.5	100.0		

20%程度の削減が可能になる。

また、裏高尾橋においては、橋脚に使用する鉄筋について、従来の強度の2倍程度の強度の鉄筋を用いることにより鉄筋の使用量を50%以上削減し、鉄筋の製造に起因する環境負荷も大幅に低減している。

#### 4. まとめ

本研究の実施により以下に示す事項が明らかになった。

- ① 低発熱収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートは、従来の高炉セメント B 種やポルトランドセメントを使用した場合に比較して、低発熱の性質を有しており、断熱温度上昇量が概ね 70～80%程度となる。
- ② 低発熱収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートは、従来の高炉セメント B 種を用いたコンクリートに比較して自己収縮量が低減される。また、ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較しても、自己収縮量は小さくなる傾向にある。
- ③ 低発熱収縮抑制型高炉セメントを使用すれば、セメントの製造に起因する CO<sub>2</sub> 排出量を、普通ポルトランドセメントに比べて約 60%、高炉セメント B 種に比べて約 30%削減することができる。
- ④ 橋梁に適用可能であり、既往の採用事例によれば、CO<sub>2</sub> の排出などのセメントの製造に起因する環境負荷を大幅に削減することが可能である。

#### 5. おわりに

高炉セメントの使用は、環境負荷の低減に大きな効果があるが、現在わが国で使用されている高炉セメントB種は、部材寸法や拘束条件、環境条件等によっては、温度応力などによるひび割れ発生が増加するおそれがあるため、高速道路橋などの大型コンクリート構造物に使用することが困難な状況となっていた。これに対して低発熱収縮抑制型高炉セメントは、本文に示したとおり断熱温度上昇量が比較的小さく、自己収縮の影響も低減できることから高速道路橋等にも適用することが可能であるので、初期強度を比較的必要としない部材などに採用すれば、ポルトランドセメントを使用した場合に比べて、大幅な環境負荷の低減が可能となる。さらに、アルカリシリカ反応の抑制や塩化物イオンの浸透抑制に有効である。したがって今後は、低発熱収縮抑制型高炉セメントの有効活用が強く望まれる。

#### 参考文献

- 1) 手塚正道，梶原勉，齊藤謙一，河合研至：P C 橋上部工の CO<sub>2</sub> 排出量の見える化，コンクリート工学，Vol.48，No.9，Sep.2010，pp.91-94.
- 2) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp. 342-343，2007.
- 3) 酒井秀昭：橋梁への高性能材料の採用による環境負荷低減，コンクリート工学，Vol.48，No.9，Sep.2010，pp.43-46.
- 4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp. 342-343，2007.
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，2002.
- 6) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価(その 2)，コンクリート技術シリーズ No.62，2002.