

# 高炉スラグ微粉末を用いた PC 構造物の 耐久性向上技術

## — 高炉スラグ微粉末 6 000 の適用例 —

松山 高広\*1・石井 豪\*2

近年、プレストレストコンクリート（PC）構造物の耐久性を向上させる高性能コンクリートの開発が進んでいる。そのようななか、塩害、凍結防止剤、ASR の劣化抑制対策および環境負荷軽減として、高炉スラグ微粉末を用いた PC 橋の実績が増えてきた。そこで、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの効果・利点、最新の研究成果および施工実績、また現在の状況や今後の取組みについて報告する。

キーワード：塩害対策、ASR 抑制、凍結防止剤対策、環境負荷軽減、高炉スラグ微粉末、CO<sub>2</sub>削減

### 1. はじめに

平成 8 年に、土木学会から「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」が発刊され、高炉スラグ微粉末の特徴を生かし、高流動および高強度コンクリートに、高炉スラグ微粉末が利用されるようになった。本報は、高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物研究会（略称：BSPC 研究会）が約 10 年間に行ってきた調査・研究などの取組みから、研究成果および施工実績、現況、今後の取組みについて報告するものである。

### 2. 高炉スラグ微粉末とは

#### 2.1 高炉スラグ微粉末の製造工程

高炉スラグは鑄鉄炉（高炉とも呼ぶ）で鉄鉱石から銑鉄を製造する際に副生するものであり、図 - 1 に示すように銑鉄 1.0 t に対して約 0.3 t の高炉スラグが生成する。鑄鉄炉内ではコークスの燃焼によって発生した一酸化炭素ガス（CO）によって鉄鉱石に含まれる酸化鉄や硫化鉄が金属鉄（銑鉄）に還元され、熔融・滴下して鑄鉄炉底部に溜まっている。鉄鉱石に含まれる鉄以外の脈石成分とこれらの融点を下げるために添加される石灰石も熔融状態となって銑鉄の上に浮かんでいる。これが高炉スラグであり、主な化学成分は CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO からなる。測定例として

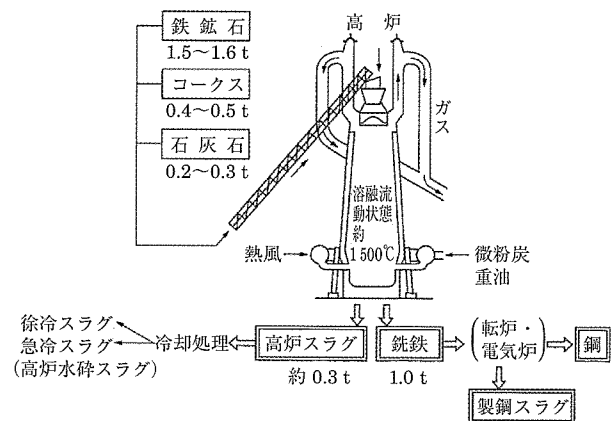


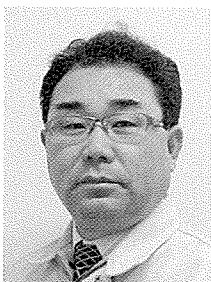
図 - 1 鑄鉄炉における高炉スラグの生成

10 工場で生産された高炉スラグ微粉末の化学分析値の平均、最大、最小を表 - 1 に示す。

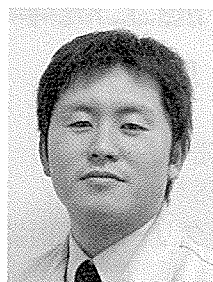
鑄鉄炉の操業では、銑鉄の成分を安定させるとともに銑鉄および高炉スラグの流動性を適度に保つことが重要であるため、つねに品質が一定となるように原料および燃焼の成分調整がなされている。その結果、高炉スラグの化学成分も安定しており、同一鑄鉄炉から発生する高炉スラグの化学成分の変動範囲は、もっとも多く含まれる CaO についても年間を通じて 2～3% である。

熔融状態の銑鉄と高炉スラグは鑄鉄炉下部の出鉄口から排出され、密度差によって分離される。熔融高炉スラグの冷却処理には徐冷と急冷があり、冷却方法によって高炉スラグの性質も異なってくる。

熔融状態の高炉スラグを自然に冷まして凝固させたものは徐冷スラグと呼ばれ、その鉱物組織はメリライトなどの結晶質がほとんどを占める。一方、図 - 2 のようなフローで高温の熔融高炉スラグに大量の加圧水を噴射して急冷・粒状化したものは高炉水砕スラグと呼ばれ、結晶への原子配列が行われないうまま急冷・凝固するため 100% 近いガラス質となる。2008 年度の国内高炉スラグ生産量は約 2 300 万 t で、約 8 割は急冷処理された高炉水砕スラグである。



\*1 Takahiro MATSUYAMA  
(株)安部日鋼工業 技術本部  
開発部



\*2 Tsuyoshi ISHII  
(株)安部日鋼工業 技術本部  
開発部

表 - 1 高炉スラグ微粉末の化学分析結果の一例<sup>2)</sup>

項目	化学成分 (%)														BR <sup>*2</sup>	R <sub>2</sub> O (%)	lg.loss (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	S <sup>*1</sup>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>					
平均	33.3	14.1	41.9	6.3	0.41	0.33	0.02	0.98	0.88	1.01	0.21	0.33	0.003	1.86	0.42	0.34	2.90	
最小	29.6	12.2	37.6	3.1	0.01	0.1	0.01	0.30	0.6	0.00	0.07	0.15	0.000	1.73	0.12	+ 1.28	2.86	
最大	35.7	16.2	44.8	8.7	1.1	0.65	0.05	2.1	1.8	3.2	0.47	0.59	0.008	2.06	0.59	2.00	2.94	

\*1 硫化物イオン \*2 高炉スラグ塩基度

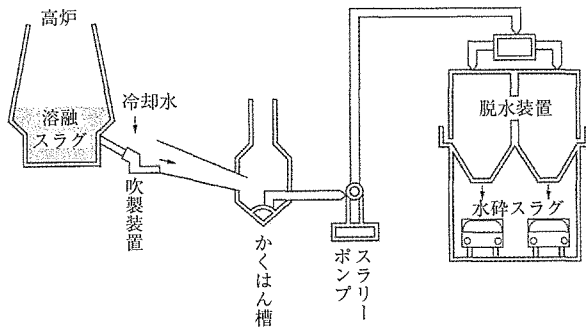


図 - 2 高炉水砕スラグの製造フロー

高炉スラグ微粉末は高炉水砕スラグを乾燥・微粉碎したものである。主な製造方法にはボールミル法とローラーミル法がある。以前は、乾燥機を通った高炉水砕スラグをボールミルで粉碎し、エアセパレータによって分級する方法がとられていた。近年は、図 - 3 に示すようにミル内で乾燥・粉碎・分級を同時に行うローラーミルの開発と改良が進み製造方式の主流となっている。

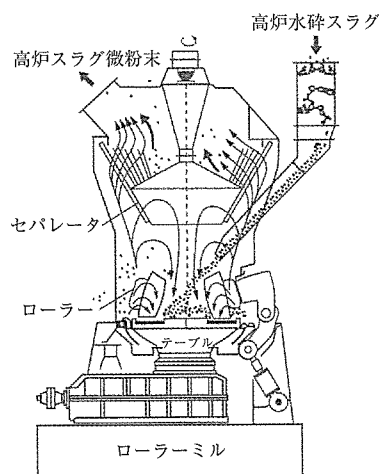


図 - 3 ローラーミルによる高炉スラグ微粉末の製造

## 2.2 高炉スラグ微粉末の潜在水硬性

高炉水砕スラグはガラス質ゆえに潜在水硬性を示す。これは高炉スラグ微粉末を高炉セメント原料やコンクリート混和材として使用するのためのもっとも重要な特長である。高炉スラグ微粉末を水と練り混ぜてもセメントのような水硬性は示さない。しかし、水酸化カルシウムなどのアルカリ成分や硫酸塩を添加し、OH<sup>-</sup>イオンやSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンを供給するとポルトランドセメントと同様に硬化を始める。この

水和反応は一旦始めるとスラグ自体もアルカリ成分を溶出させて水和を持続する。この性質を潜在水硬性と呼びフライアッシュなどのポゾラン反応と区別されている。高炉スラグ微粉末はポルトランドセメントの一部を置換するコンクリート混和材として使用される。ポルトランドセメントは水和により水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) を生成するので、高炉スラグ微粉末はこれを刺激剤として潜在水硬性を発揮する。

高炉水砕スラグの潜在水硬性に影響する品質要因の主なものとしては化学成分とガラス化率があげられる。化学成分の指標には次式で計算される塩基度が用いられている。

$$\text{塩基度} = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$$

ガラス化率はガラス含有量を%で表示したもので、スラグ中に含まれる結晶量を測定し全体から差し引いて求める。両指標とも高い方が反応性は高く、国内の高炉水砕スラグのガラス化率は95%以上、高炉スラグ微粉末の塩基度は1.7~2.1の範囲にある。

## 2.3 高炉スラグ微粉末の種類

表 - 2 は JIS A 6206 の品質規格を示したものであり、表 - 3 は品質実績の一例である。高炉スラグ微粉末の種類は、ブレン比表面積を指標として3つのグレードが設定されている。高炉スラグ微粉末4000は高炉セメントB種に使用されているものに相当しており、これより比表面積を大きくして水硬性を高めた高炉スラグ微粉末6000, 8000がある。

高炉スラグ微粉末の水硬性を評価する代表的な指標としては活性度指数がある。この指標は普通ポルトランドセメントを用いて作製したモルタル(基準モルタル)の圧縮強

表 - 2 品質規格 (JIS A 6206)

品質	高炉スラグ微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 6000	高炉スラグ微粉末 8000
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	3000 以上 5000 未満	5000 以上 7000 未満	7000 以上 10000 未満
活性度指数 (%)	材齢 7日	55 以上*	75 以上
	材齢 28日	75 以上	95 以上
	材齢 91日	95 以上	105 以上
フロー値比 (%)	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウム (%)	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下
三酸化イオン (%)	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下
強熱減量 (%)	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
塩化物イオン (%)	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下

\*この値は、受渡し当事者間の協定によって変更してもよい

表 - 3 品質実績 (2005 年度) <sup>3)</sup>

種類	項目	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	活性度指数			フロー値比 (%)
			3 日	28 日	91 日	
高炉スラグ 微粉末 4 000	平均	4 381	69	96	112	100
	最大	4 890	84	112	128	104
	最小	3 960	51	80	99	92
高炉スラグ 微粉末 6 000	平均	6 004	93	107	115	98
	最大	6 380	102	109	122	102
	最小	5 530	78	97	109	93
高炉スラグ 微粉末 8 000	平均	8 110	107	114	114	95
	最大	8 560	125	122	123	100
	最小	7 610	95	108	102	91

度に対する、普通ポルトランドセメントの 50 % を高炉スラグ微粉末で置換した結合材を用いて作製したモルタル（試験モルタル）の圧縮強度の比率で表したものである。JIS A 6206 では比表面積の大きいものほど活性度指数の下限値も大きく設定されている。3つのグレードのうち近年 PC 構造物への適用が進められているのは高炉スラグ微粉末 6 000 に適合するものである。

この規格の中で規定される三酸化イオウは高炉スラグ自体に含まれているものではなく、添加された石膏に由来するもので、高炉スラグ微粉末には石膏を添加したものと無添加のものがある。

#### 2.4 生産量と用途

高炉スラグ微粉末の製造工場は全国に 11 箇所あり、2005 年以降に高炉スラグ微粉末の形態で出荷された量は、輸出も含めると約 550 万 t 前後で推移している。表 - 4 は高炉スラグ微粉末の用途別販売高（国内）を示したものであり、大部分は高炉セメント用としてセメントメーカーに供給され、コンクリート混和材としての利用は 7 % 程度、建材・その他は 5 % 程度である。

表 - 4 高炉スラグ微粉末の用途別販売高 <sup>4)</sup> 単位 (1 000 t)

年度	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
セメント用	3 979	3 766	3 937	3 855	3 740
コンクリート用	350	297	310	286	279
建材・その他用	214	229	211	213	292
合計	4 544	4 291	4 458	4 354	4 310

### 3. 高炉スラグ微粉末 6 000 を使用したコンクリートの特徴

#### 3.1 塩害に強い

海上部や海岸線付近では、飛来塩分がコンクリート構造物中に蓄積し、構造物内部の鋼材が発錆し、耐力の低下を招くことがある。これを塩害というが、高炉スラグ微粉末 6 000 をセメントの 50 % 置換することで、コンクリート構造物が未混入のものより塩害に強いものとなる。この理由としては、高炉スラグ微粉末 6 000 を混入したコンクリートは、① 未混入のものよりも緻密となり、外部からの塩分がコンクリート内部へ浸透しにくくなること② 塩化物イオンを固定化するフリーデル氏塩の生成に必要な Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> がポ

ルトランドセメントより多く含まれており、フリーデル氏塩の生成量が多くなり、塩化物イオンの固定化される量が多くなることなどがあげられる。

以下に、塩害対策 S 区分の飛沫滞りに位置する橋梁で確認を行った、高炉スラグ微粉末 6 000 未混入のもの（早強セメント単味配合）と混入したもの（早強セメント：高炉スラグ微粉末 6 000 = 50 % : 50 %）の比較試験 <sup>5)</sup> の結果を紹介する。

写真 - 1 は、暴露 5 年目の試験体の電子線マイクロアナライザー（EPMA）による写真である。写真中の白い部分が塩化物イオンが浸透している範囲である。高炉スラグ微粉末 6 000 未混入のものが 25 mm の深さまで浸透しているのに対し、混入しているものは深さ 15 mm までに抑制されていることが分かる。

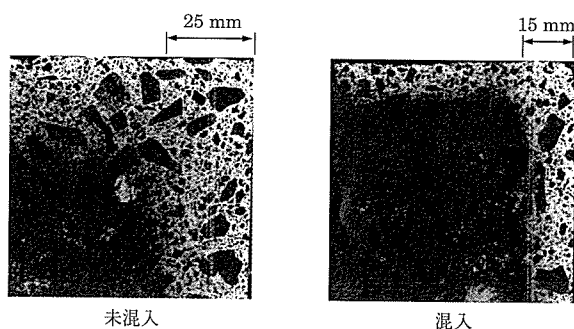


写真 - 1 塩化物イオン浸透深さの比較 (EPMA)

また、塩化物イオン濃度についての暴露 5 年目の分析結果を図 - 4 に示す。

図から、高炉スラグ微粉末 6 000 混入のものは、コンクリート表面では未混入のものより塩化物イオン濃度は若干大きい値を示しているが、内部 15 mm 以降は逆に小さな値となっている。このことから、高炉スラグ微粉末 6 000 を使用したコンクリートは、塩分が浸透しにくいコンクリートであることが分かる。

この塩化物イオン濃度の推移をもとに、塩化物イオンの

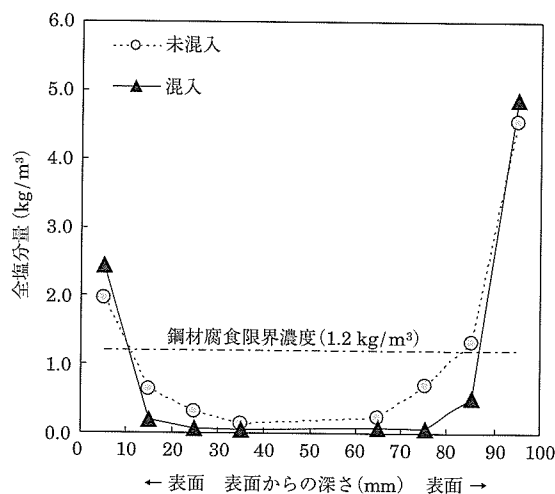


図 - 4 塩化物イオン濃度の比較 (化学法)

拡散係数を求めた結果は、早強セメント単味のものでは  $0.175 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、高炉スラグ微粉末 6000 を 50% 置換したものでは  $0.063 \text{ cm}^2/\text{年}$  の結果となった。これを基に供用 100 年後の塩化物イオン濃度の浸透深さを推定したところ、図 - 5 に示すとおり、鋼材腐食発生限界塩分量  $1.2 \text{ kg/m}^3$  に達する表面からの浸透深さは、早強セメント単味で 42 mm、高炉スラグ微粉末 50% 置換で 25 mm となる結果が得られた。

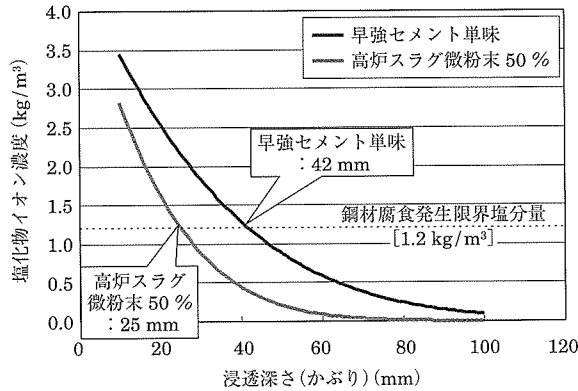


図 - 5 100 年後の塩化物イオン濃度の推定値

### 3.2 ASR 抑制効果が高い

高炉スラグ微粉末 6000 をセメントの 50% 置換したコンクリートは、アルカリシリカ反応 (以下 ASR) 抑制効果を有することが確認されている。

以下の 4 点が、ASR を抑制する要因として考えられる。

- ① 水酸化カルシウムが減少すること
- ② アルカリイオンの移動速度が減少すること
- ③ アルカリ希釈効果
- ④ 水和生成物がアルカリを内部に取り込むこと

以下に、高炉スラグ微粉末 6000 を早強セメントの 50% 置換したコンクリートの、ASR 抑制効果の確認試験結果を紹介する。

化学法およびモルタルバー法により、ASR 反応性が高いと判定された細骨材・粗骨材と、無害と判定された細骨材・粗骨材の 2 パターンについて、結合材を ① 早強セメント単味および ② 高炉スラグ微粉末 50% 置換の 2 種類を用いた比較を行った<sup>6)</sup>。

(本報では、無害と判定された骨材の試験結果については省略する。)

- ① 早強セメント単味：早強セメント 100% + 反応性骨材
- ② 高炉スラグ微粉末 50%：早強 50% + 高炉スラグ微粉末 50% + 反応性骨材

比較に用いた試験体は、 $150 \times 300 \times 3000 \text{ mm}$  のプレテンション桁で、図 - 6 に示した 6 箇所 (縦・横) の膨張量および超音波伝播速度と桁のそり量の 3 項目について、屋外暴露試験で定期的に計測を行った。

以下に、各計測結果を示す。なお、本試験においては、反応性を有する骨材を使用した配合については、ASR 膨張を促進させて発生させることを目的としており、NaCl を  $18.9 \text{ kg/m}^3$  (等価  $\text{Na}_2\text{O}$  量で  $10 \text{ kg/m}^3$ ) 添加している。これ

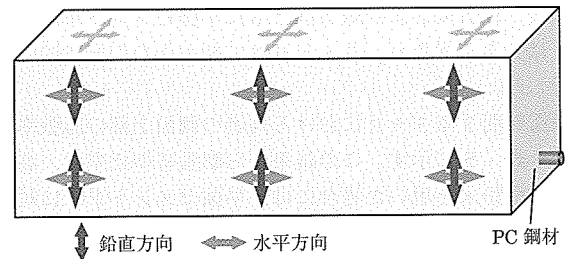


図 - 6 膨張量・超音波伝播速度計測位置

は、実際の自然環境下での構造物劣化の環境とは異なる。

#### (1) 膨張量

試験体の膨張量の変化を図 - 7 および図 - 8 に示す。図に示した膨張量の測定結果は、試験体種類ごとの部材側面上部鉛直方向 (縦方向)、水平方向 (横方向) のそれぞれの平均値のものである。

早強セメント単味は、暴露開始直後から膨張が生じ、とくに部材上部において顕著に現れている。これは、暴露開始時期が 7 月であり気温が高い時期であることから、暴露開始直後から ASR が急速に進行したが、試験体の下縁側については、プレストレスの影響により、膨張力が拘束されたと考えられる。

横方向および縦方向の膨張量を比較すると、全体的に縦方向は横方向の 2 倍程度の値を示している。

一方高炉スラグ微粉末 50% 置換については、暴露開始後 300 ~ 400 日頃に側面上部において若干の膨張が認められ、

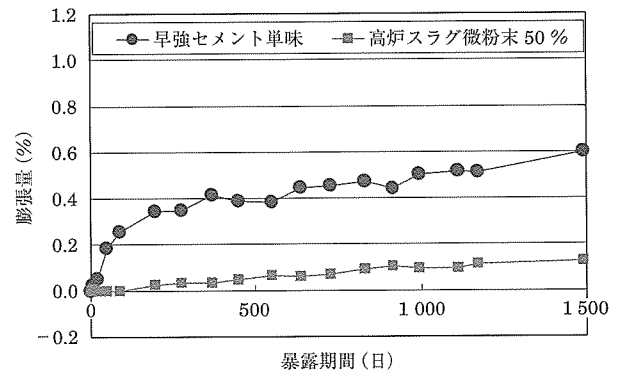


図 - 7 膨張量 (横方向)

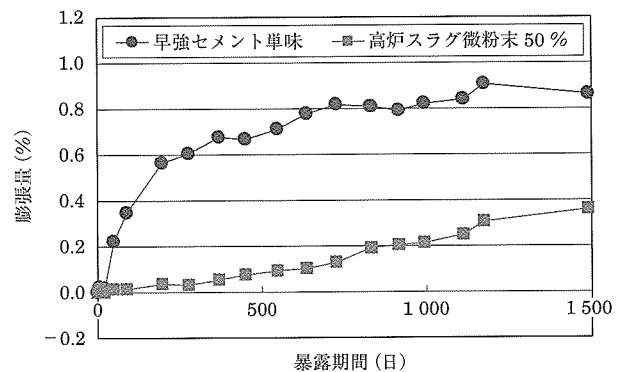


図 - 8 膨張量 (縦方向)

その後、横方向および縦方向ともに早強セメント単味の場合とは大きく異なり、約1年遅れて緩やかな勾配で膨張が進行した。

暴露期間3年3ヵ月における両者の側面上部の膨張率の比較を表-5に示す。この結果から膨張率の比率は、高炉スラグ微粉末を用いた場合には、早強セメント単味に対して、36%程度(約1/3)であることが分かる。

表-5 膨張率の比較

	膨張率 (%)		A/B
	(A) 高炉スラグ微粉末 50 %	(B) 早強セメント単味	
上側縦	0.334	0.896	0.373
上側横	0.162	0.490	0.331
平均	0.248	0.693	0.358

(2) 超音波伝播速度

英国 C.N.S. INSTRUMENTS LTD 製バンジットにより部材厚(150 mm)方向について行った計測結果を図-9に示す。早強セメント単味の超音波伝播速度は、暴露開始直後から低下し、暴露3ヵ月経過時点では、暴露開始時より10%程度低下し、その後4000 m/sec程度で安定している。一方高炉スラグ微粉末50%置換に関しては、暴露開始時より4500 m/sec程度を維持し、前述の膨張性状では、桁上部に膨張の進行が確認されたが、桁全体の平均超音波伝播速度としては大きな変化ではなく、ASR抑制効果が発揮されていると考えられる。

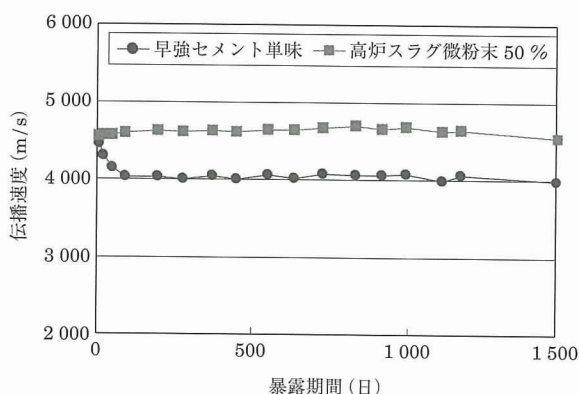


図-9 超音波伝播速度

(3) そり量

そり量の結果を図-10に示す。試験体下縁にプレストレスを導入しており、クリープ変形によりそりが進行する。早強セメント単味では、暴露開始直後から、ASRによる桁上部の膨張が始まると、そり量が穏やかに増加する傾向が確認され、暴露開始後3年3ヵ月時点では、約40 mm生じた。一方高炉スラグ微粉末50%置換については、暴露開始後1年ごろからそりの増加が始まり、暴露開始後3年3ヵ月時点で約14 mmとなり、早強セメント単味の約1/3程度であることが確認された。

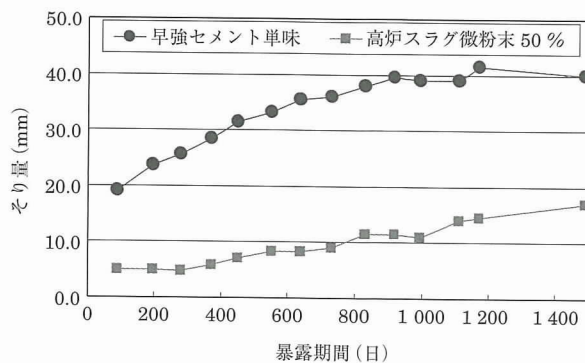


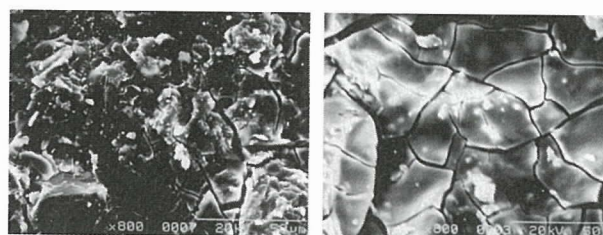
図-10 そり量

(4) 試験体から採取したコアの状況

採取したコアの状況を以下に示す。

写真-2より、ゲルの生成量は、高炉スラグ微粉末50%の方が早強セメント単味より著しく少ないことが分かる。

また、写真-3に示した蛍光樹脂含浸によるコア断面のひび割れの状況から、高炉スラグ微粉末50%は早強セメント単味と比較してひび割れの発生が少ないことが確認できる。



高炉スラグ微粉末 50%      早強セメント単味

写真-2 ゲルの生成状況

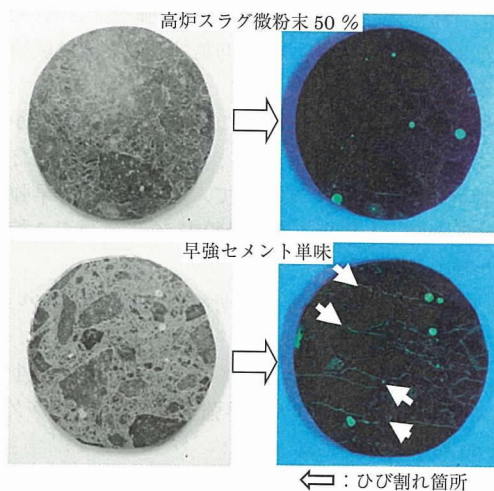


写真-3 コア断面のひび割れ状況

3.3 凍結防止剤に強い

塩化カルシウムやカルシウムマグネシウムアセテート等の凍結防止剤がコンクリート内部へ侵入すると、コンクリート硬化体から水酸化カルシウムが溶出し、コンクリート強度は低下する。この現象と凍結融解作用が複合して、コ

ンクリートは著しく劣化する。これに対して、高炉スラグ微粉末を混和することにより、コンクリート組織が緻密になるため、凍結防止剤が内部へ浸透しにくくなり、凍結防止剤による鋼材の腐食を抑制することができる。

以下に、凍結防止剤溶液中に浸漬させたコンクリート供試体の、早強セメント単味との比較結果を写真 - 4 および写真 - 5 に示す<sup>8)</sup>。

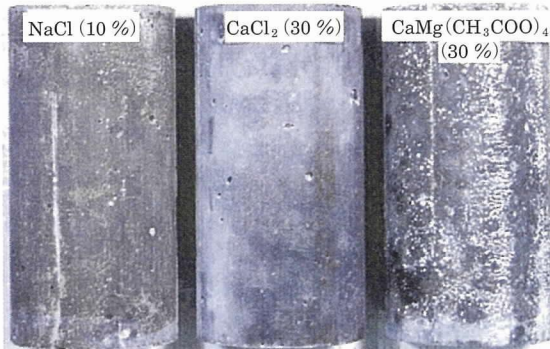


写真 - 4 凍結防止剤溶液浸漬 6 カ月 (高炉スラグ微粉末 6 000 を 50% 置換)

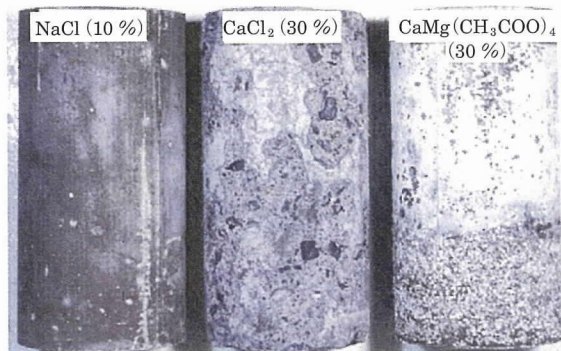


写真 - 5 凍結防止剤溶液浸漬 6 カ月 (早強セメント単味)

試験結果から、早強セメント単味については、塩分の浸透や表層部分にはく離が発生したが、高炉スラグ微粉末 50% 置換については異常は認められなかった。

### 3.4 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が高い

高炉スラグ微粉末は、「2.1 高炉スラグ微粉末の製造工程」でも記述したが、高炉で銑鉄を製造する際に発生する副産物である。

このため、表 - 6 に示すように、高炉スラグ微粉末の製造には、セメント製造で発生する石灰石起源や化石燃料起源の CO<sub>2</sub> は排出されない。このことから、高炉スラグ微粉末を使用することで、セメント単味よりも CO<sub>2</sub> 排出量を抑制できることが分かる。

表 - 7 にセメント単味の場合と、高炉スラグ微粉末 6 000 をセメントの 50% 置換したものの CO<sub>2</sub> 排出量の比較を示す。この結果から、セメント単味に対して、高炉スラグ微粉末 6 000 をセメントの 50% 置換した場合、結合材 1 t あたり約 42% の CO<sub>2</sub> 排出抑制効果があることが分かる。

このことを、身近な事例に置き換えると、片道 4 km の

表 - 6 結合材を製造する際に発生する CO<sub>2</sub> 量

結合材	CO <sub>2</sub> 排出量 (CO <sub>2</sub> - kg/t)			合計
	石灰石起源	化石燃料起源	購入電力 <sup>※3</sup>	
① ポルトランドセメント <sup>※1</sup>	479	319	14	817
② 高炉セメント B 種 <sup>※1</sup>	283	198	11	491
③ エスメントスーパー (高炉スラグ微粉末 6 000) <sup>※2</sup>	0	0	41	41
④ エスメント (高炉スラグ微粉末 4 000) <sup>※2</sup>	0	0	19	19
⑤ ① 50% + ③ 50%	239	160	28	427
① からの削減率 (%)				47.5 %
⑥ ① 50% + ④ 50%	239	160	16	416
① からの削減率 (%)				48.9 %

※1 セメント協会集計 2007 年度実績 セメント協会 LCI データ概要 (2009.6.19) より

※2 新日鐵高炉セメント(株) 2008 年度実績

※3 購入電力 (kwh/t) × 排出係数 1.033 (t-C/万 kwh) × 44 / 12  
排出係数 1.033 はセメント協会集計 2005 年度

表 - 7 結合材 1 t あたりの CO<sub>2</sub> 発生量

結合材 1 t あたりの CO <sub>2</sub> 発生量	CO <sub>2</sub> 排出量 (CO <sub>2</sub> - kg/t)		
	石灰石起源	化石燃料起源	購入電力 <sup>※3</sup>
①セメント (N) 単味 (1 t)	479	319	14
②高炉スラグ微粉末 6 000 を 50% 置換 (1 t)	セメント 50 %	239	7
	スラグ 50 %	0	21
	合計	239	28

結合材 1 t あたりの CO <sub>2</sub> 発生量	運搬 (1 000 km)	CO <sub>2</sub> 排出量	比率
	CO <sub>2</sub> - kg/0.5t	(CO <sub>2</sub> - kg/t)	② / ①
①セメント (N) 単味 (1 t)	0	812	100 %
②高炉スラグ微粉末 6 000 を 50% 置換 (1 t)	セメント 50 %	0	
	スラグ 50 %	46	
	合計	46	58 %

マイカー通勤を 1 年間やめた場合の CO<sub>2</sub> 削減量 (約 460 kg) や、アジテータ車の 1 台分を高炉スラグ微粉末 6 000 をセメントの 50% に置換とした場合の CO<sub>2</sub> 削減量 (約 400 kg) に相当する。

## 4. 高炉スラグ微粉末 6 000 を使用した PC 構造物の施工実績

### 4.1 全国の実績 (BSPC 研究会データより)

BSPC 研究会のデータによると、1998 年 12 月に完成した沖縄開発庁沖縄総合事務局発注の屋嘉比橋 (ポストテンション方式 2 径間単純中空床版橋) に高炉スラグ微粉末 6 000 が適用されたのを最初に 2009 年 4 月までに 271 物件の実績がある。

図 - 11 に発注者別実績および図 - 12 に全国の実績 (BSPC 研究会データ) を示すが、地方自治体と国土交通省が、約 93% を占めており、国、県および市町村など幅広い地域で採用されてきた。

図 - 13 に採用理由の年代別比率グラフを示す。採用理由の傾向としては、1998 ~ 1999 年が塩害対策、2000 ~ 2003 年が寒冷地における凍結防止剤による塩害対策、2004 ~

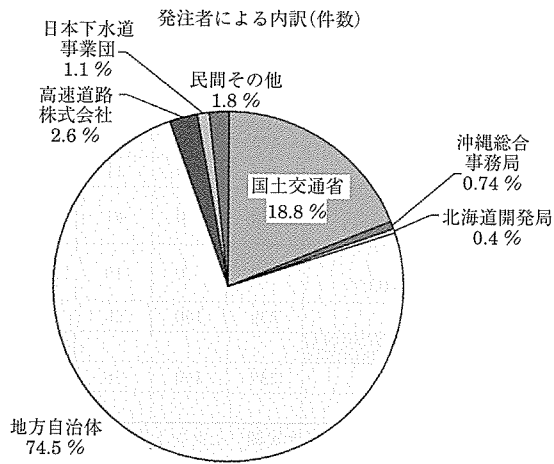


図 - 11 発注者別実績



図 - 12 全国の実績 (濃淡部)

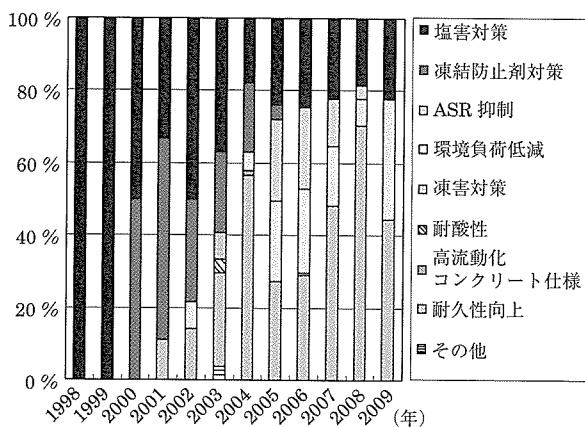


図 - 13 採用理由の年代別比率グラフ

2009年、ASR抑制、耐久性向上および環境負荷軽減を目的としたものが多くなっている。

1998年12月～2009年4月の間の271物件の実績のうち、269件については、PC工場製品であり、他の2橋については、現場打ちコンクリート製品である。

1橋は、岩手県内の塩害対策区分Sの海岸部に新設された水門管理橋(中空床版桁橋)で、施工が11月のため、冬季養生設備に蒸気設備を投入して行った。

他の1橋は、沖縄自動車道の竣工後約30年経過し、塩害により劣化した橋梁全体の耐久性を向上させる方法の一つとして、架替え桁に高炉スラグ微粉末6000を使用した事例である。塩化物イオンの浸透とアルカリ骨材反応の抑制を目的にプレテンション中空連結桁、場所打ち連結部および地覆・壁高欄に高炉スラグ微粉末6000を使用した。

## 5. 現況および今後の取組み

### 5.1 現況

前項の実績のとおり、PC橋を中心に高炉スラグ微粉末6000を使用したPC構造物の実績が、全国に広がってきたが、本材料の適用について以下のような留意点がある。

#### ① 現場打ちにおける生コン工場への供給

施工実績から分かるように、ほとんどがPC工場による工場製品である。現場打ちコンクリートへの適用については、高炉スラグ微粉末6000を貯蔵するサイロ等、現地生コン工場の設備の確認が必要である。

#### ② 現場打ちにおける養生

土木学会の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針では、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、打込み後、硬化に必要な温度および湿度条件を保ち、有害な作用の影響を受けないように、十分にこれを養生しなければならない」となっている。また、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、一般のコンクリートに比べて、初期の養生の良否がコンクリートの品質に大きな影響を与える。そのため、工場と環境条件が異なる現場打ちコンクリートへの適用については、現場環境に適した養生方法等について十分な検討を行う必要がある。

### 5.2 今後の取組み

BSPC研究会では、早強セメントの50%を高炉スラグ微粉末6000に置換した高耐久性PC構造物の発展のために、技術検討やASR抑制効果の確認試験を行ってきた。その結果、①塩害に強い、②凍結防止剤に強い、③ASR抑制効果が高い、④環境に優しい(CO<sub>2</sub>排出量削減効果が高い)などの特徴について明らかにして、高炉スラグ微粉末6000の有効性を確認してきた。近年、地球温暖化の問題がクローズアップされ、CO<sub>2</sub>削減を本格的に実行する動きとなってきた。今後はCO<sub>2</sub>削減を目的に、高炉スラグ微粉末を置換したコンクリートの活発な広報活動の展開と、前項で示した留意点について検討していく考えである。

## 6. おわりに

BSPC研究会は、平成12年に発足し、現在(株)安部日鋼工業、オリエンタル白石(株)、(株)ピーエス三菱、ピーシー橋

梁 (株)、前田製管 (株)、三井住友建設 (株)、新日鐵高炉セメント (株) の7社で構成している。発足後約10年が経過し、この間、発注機関へのプレゼンテーションおよび金沢大学の鳥居教授のご指導により、高炉スラグ微粉末のASR抑制効果などの有効性に関する確認試験等を行ってきた。

今後は、環境および人に優しいコンクリートとして、また社会および人のための高耐久なコンクリート構造物を建設するため、更なる技術の向上を図っていく次第である。

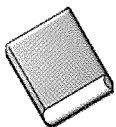
#### 参考文献

- 1) 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性PC構造物：BSPC研究会（パンフレット）
- 2) 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成21年度版）：鉄鋼スラグ協会，p.43～45
- 3) 紙田 晋：地球環境にやさしく、すぐれた材料，コンクリートテクノ，

Vol.26, No.5, pp.61～65, ④セメント新聞社，2007年5月

- 4) 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成21年度版）：鉄鋼スラグ協会，p.43～45
- 5) 石井豪ほか：高炉スラグ微粉末を用いたPC構造物の塩害劣化抵抗性に関する考察，17回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.111-114，2007
- 6) 松山高広ほか：高炉スラグ微粉末6000を用いたPC梁のASR劣化抑制効果の報告，18回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.189-192，2008
- 7) 稲垣崇秀ほか：ASR劣化PC梁試験体から採取したコアの力学的性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.1237-1242, 2009
- 8) ㈱日本材料学会，高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，pp.37-63, 1998

【2010年1月15日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

## 複合橋設計施工規準

定 価 6,825 円／送料 500 円

会員特価 6,000 円／送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編  
技報堂出版