

高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末の基本特性とその有効利用

Basic Property and the Method of Effective Use on Portland Blast-Furnace Slag Cement and Ground Granulated Blast Furnace Slag

野 畑 健 志^{*(1)}
Kenji NOBATA

植 木 康 知^{*(2)}
Yasutomo UEKI

抄 録

高炉セメントは製造時に発生する二酸化炭素排出量が少なく、その使用量も近年、増加傾向にある。また、コンクリートの特性に着目すると、耐塩害性能、耐化学性能、アルカリ骨材反応抑制効果などの耐久性も向上する。高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末の基本特性及びその特性を有効利用した製品について紹介した。

Abstract

The CO₂ emission to produce portland blast-furnace slag cement decrease by comparison with ordinary portland cement. And concrete to use slag cement improve the durability of damage by salt and chemical attack, and alkali-aggregate reaction. This report introduce about basic property and the method of effective use on portland blast-furnace slag cement and ground granulated blast furnace slag.

1. 緒 言

高炉セメントは、高炉スラグ微粉末を普通セメントと混合したセメントである。高炉スラグは、鉄鋼製造の副産物として全国で年間約2 300万 t 発生するが、その内約6 割が高炉セメントの原料として使用されている。

従来から高炉セメントは、アルカリ骨材反応抑制や水和熱低減等の機能を活かして、主に土木工事や建築の基礎工事等で幅広く用いられてきたが、最近では、製造時のCO₂排出量が小さい点で評価が高まっている。また、公共工事における補修費削減等ライフサイクルコスト合理化の動きの中で、長期強度や塩害抑制効果に優れた高炉セメントは、さらに利用分野が拡大しつつある。

本稿では、高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末の今後の利用可能性について、その特性や用途を中心とした概要を報告する。

2. 高炉セメント、高炉スラグ微粉末の規格

高炉セメントは、表1に示すように3つの種類がJIS R 5211高炉セメントで規格化されているが、流通している高炉セメントの殆どがスラグ混入量40～45%のB種であり、セメント会社間の品質上

表1 高炉セメントの規格(JIS R 5211)

種類	高炉スラグの分量(重量%)
A種	5を超え30以下
B種	30を超え60以下
C種	60を超え70以下

の差も少ない。高炉セメントの販売量は、アルカリ骨材反応抑制、省資源、省エネルギー、コスト縮減などを背景に、1980年頃から増加傾向にあり、現在では国内セメント全体の25%を占めている(図1参照)。

また、高炉スラグ微粉末も、表2に示すようにコンクリート混和材としてJISに規格化されており、必要に応じた粉末度および混合比率で使用できる。

3. 高炉スラグおよび高炉スラグ微粉末の製造

高炉スラグは、高炉からの発生時は高温熔融状態にあるが、圧力水で急激に冷却すると、ガラス質で砂状の水砕スラグ(急冷スラグ)となる。水砕スラグは潜在水硬性があり、さらに粉砕加工して高炉

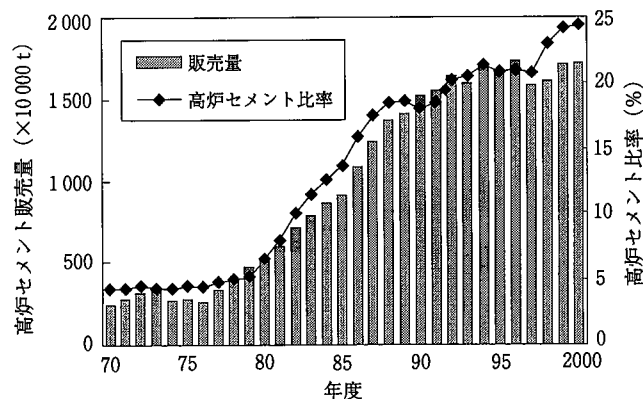


図1 高炉セメントの販売量の推移

^{*(1)} スラグ・セメント事業推進部 グループリーダー
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-6931

^{*(2)} スラグ・セメント事業推進部 マネジャー

表2 高炉スラグ微粉末の規格(JIS A 6206)

種類	比表面積(cm ² /g)
高炉スラグ微粉末4000	3 000以上 5 000未満
高炉スラグ微粉末6000	5 000以上 7 000未満
高炉スラグ微粉末8000	7 000以上 10 000未満

スラグ微粉末とすることで、水和反応して硬化するという普通セメント同様の性質が得られる。水砕スラグの使用用途は、こうした特徴を活用した高炉セメントの混合材用および高炉スラグ微粉末用がその大勢を占めている(図2参照)。

4. 高炉スラグ微粉末の特性

4.1 長期強度の増進

高炉スラグ微粉末は長期にわたり水和が進行するため、長期強度が増進する。図3のとおり、普通セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率を増加させると、初期強度は低下するが、28日以降の長期強度は改善する。この特性を活用して強度管理材齢を長期化すれば、単位セメント量が削減でき、水和熱低減やコストダウンを図ることができる。

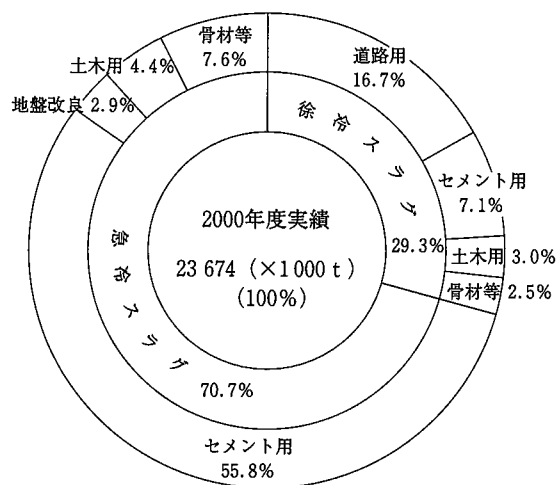


図2 高炉スラグの用途別使用量

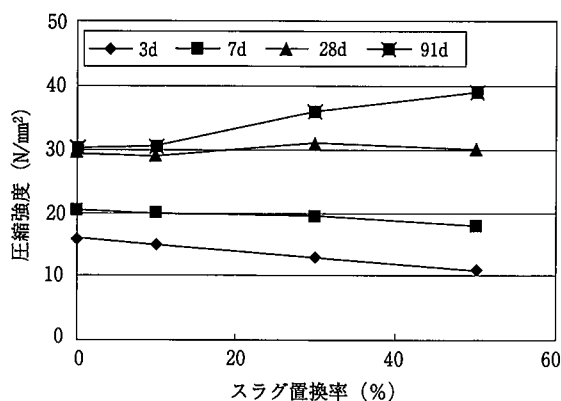


図3 普通セメントに対する高炉スラグ微粉末置換率とコンクリートの圧縮強度(W/C=61%)

4.2 塩害の抑制

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、普通セメントに比べて塩素イオンの遮蔽性能が優れているため、塩害抑制に効果がある。図4¹⁾に見られるように、高炉スラグ微粉末を混入した場合、普通セメントに比べて塩素の浸透が表層部に留まっている。

塩害抑制メカニズムは次のように考えられている。普通セメントは、水和時に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生成し、セメント硬化体体積の約25%を占めるが、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は塩素環境下では外部に溶解し、コンクリートを多孔化させるため塩素が内部に浸透していく。他方、高炉スラグは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と結合して非水溶性の石灰珪酸塩の水和物を生成する特性があるため、硬化体組織を緻密化するとともに、高炉スラグの水和物が塩素イオンを化学的に固定化することから、塩素侵入を効果的に抑制できる。

4.3 アルカリ骨材反応の抑制

アルカリ骨材反応とは、シリカが多い骨材を使用した場合に、セメント中の Na^+ 、 K^+ などの水酸化アルカリが、骨材中のシリカと反応してアルカリシリカゲルを生成することをいう。このアルカリシリカゲルは吸湿して膨張する特性があるため、コンクリートを内部から膨張崩壊させてしまう。

これに対して図5に示すように、普通セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率を増加させると、アルカリ骨材反応による膨張量は低下する。これは、スラグの置換によってセメント中の水酸化アルカリ量を希釈するとともに、それをスラグの水和物に固定化するためである。JISでも、アルカリ骨材反応が懸念される骨材を使用する場合には、スラグ置換率を40%以上とするよう規定されている。

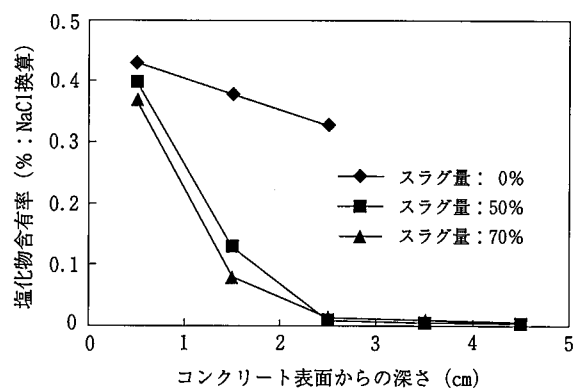


図4 海岸飛沫帯に5年間暴露した供試体の塩分浸透性(W/C=60%)

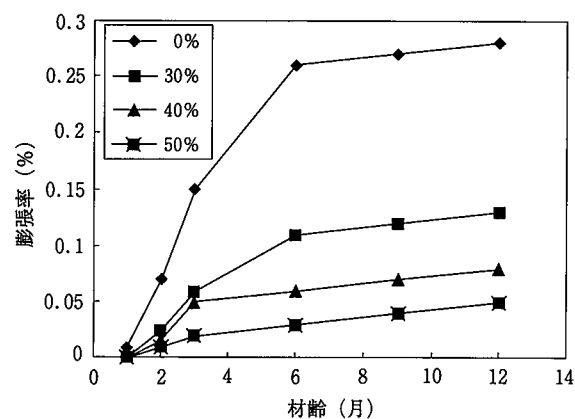


図5 普通セメントに対する高炉スラグ微粉末置換率とモルタルバー膨張量の関係

4.4 水和熱の低減

近年、コンクリート構造物は部材の大型化が進み、温度ひび割れ抑制対策が求められる場合が多い。高炉スラグ微粉末は、普通セメントに対する置換率を多くするほど、また粉末度を小さくするほど初期水和反応速度が遅くなるため、硬化時の水和熱を抑制できる。実使用にあたっては、部材寸法や工期を考慮の上、高炉スラグ微粉末の置換率や粉末度につき最適な配合を選択することが望ましい。

4.5 流動性の向上

高炉スラグ微粉末は、初期の水和反応速度が遅いため、コンクリートがフレッシュな時(まだ固まらない状態)の流動性が向上する。図6で見られるように、スラグ置換率の増加に伴って流動性(モルタルフロー値)も増大しており、充填性の向上にも有効である。また、モルタルの可使時間もスラグ置換率の増加によって長くなるため、さまざまな使用条件に対応できる。

5. 高炉スラグ微粉末の特性を有効利用した製品

こうした高炉スラグ微粉末の特性を活かして、現在、新日本製鐵グループにおいては、高炉セメントの他、様々な製品を販売している。次にその内の3製品の概要につき紹介する。

5.1 エスメントスーパー60

高炉スラグの混入は耐久性向上や流動性改善に寄与するが、特に初期強度が必要とされる部位には適用が困難であった。エスメントスーパー60は、初期強度問題を改善すべく、高炉スラグ微粉末の粉体比表面積を、通常の4 000(cm²/g)から6 000(cm²/g)に増加させ、水和反応性を高めたものである。

本製品は、例えば初期強度が要求される橋脚上部工等への塩害対策として使用することが可能である。近年、海岸構造物は塩害によりコンクリート上部工が劣化する事例が多数報告されている²⁾。また寒冷地では、1991年のスパイクタイヤの使用禁止に対応して凍結防止剤(NaCl, CaCl₂)が多用されているため、塩害による劣化が懸念されている。エスメントスーパー60を使用すれば、建設時の初期強度を確保しつつ、塩分遮断性能の向上により耐用年数を改善することができる。既に、1998年5月に沖縄県で初採用以来、その実績数は2001年12月までに全国で22件に及んでいる。

5.2 エスレベル

従来、建築コンクリートの床仕上げは、金ごて等により表面を平滑に仕上げる工法が取られてきたが、これには高度な技術と多くの人手が必要とされてきた。この作業を軽減するため、高炉スラグ微

粉末の流動性を活用して開発された床仕上げ材がエスレベルである。図7に示すフロー試験によれば、外気温5～40℃の範囲で、注水開始から6時間は使用可能であることから、ほぼ通年にわたって生コンクリートプラントから離れた広範囲の地域に材料を供給できる。また、高い流動性を有するため、一回で広大な面積を容易に施工できる。

5.3 高強度・高耐久性モルタル(NEM-RS)

下水道内では、バクテリアによる酸性の硫化水素の影響でコンクリートが劣化するケースが多い。NEM-RSは、高炉スラグ微粉末の耐酸特性を活かし、劣化補修・防食用モルタルとして開発されたものである。基本特性を表3に示す。図8³⁾に示す試験結果に見られるように、普通セメントだけでは酸による劣化から強度は低下するが、高炉スラグで置換すれば強度が改善し、粉末度を高めればさらに効果がある。これは、スラグ微粉末の水和により組織が緻密化され、酸の侵入を抑制するためである。

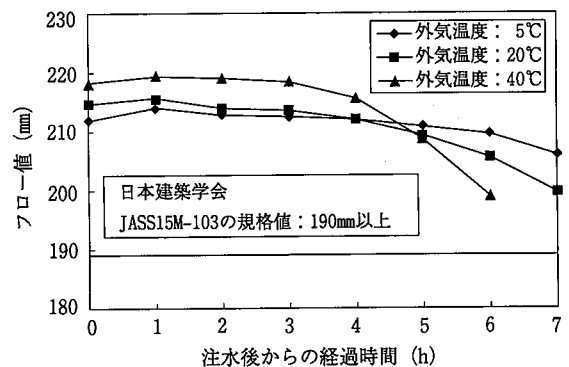


図7 エスレベルのフロー値の経時変化

表3 NEM-RS(耐硫酸型)の物性

要求性能項目		材齢(日)	東京都規準	NEM-RS
強度特性	圧縮強度(N/mm ²)	3	25以上	34
		28	45以上	52
	曲げ強度(N/mm ²)	3	3.0以上	4.0
		28	7.0以上	7.5
浸透抵抗性	硫酸浸透深さ(mm)	28	3.0以下	2.5
耐ひび割れ性	長さ変化率(%)	28	-0.1以上	-0.08
一体性	付着強度(N/mm ²)	28	1.5以上	2.0
耐硫酸性	質量変化率(%)	28	±10以内	-1.3

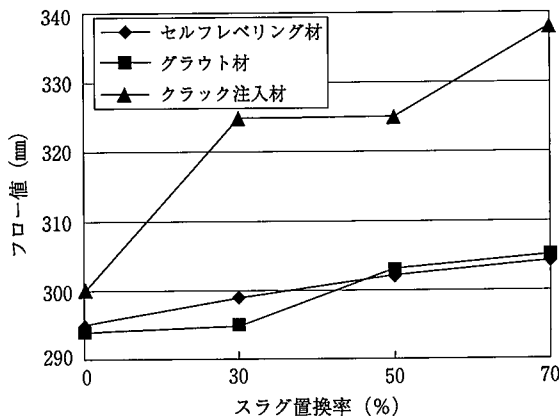


図6 各種モルタルにおけるスラグ置換率とフロー値との関係

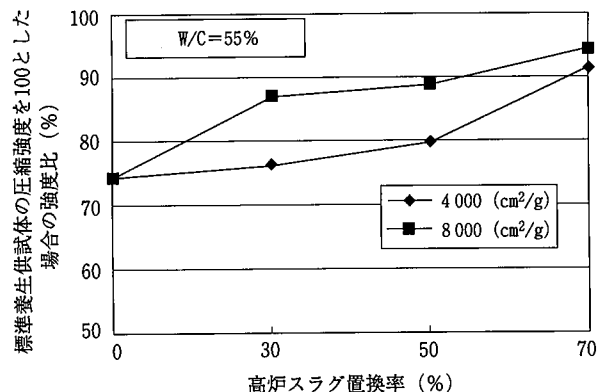


図8 普通セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率が耐酸性に及ぼす影響(2%・HCl溶液に1年間浸漬)

表4 セメント1 t当たりのCO₂発生量

		普通セメント (A)	高炉B種 (B)	削減量(%) (A-B)/A
石灰石使用量(kg)		1092.0	600.6	45
消費エネルギー	石炭(kg)	103.6	57.8	44
	電力(kWh)	99.2	72.6	27
CO ₂ 発生量(kg)		775.6	437.0	44

6. 環境負荷の低減

普通セメントを製造する際は、石灰石を焼成し粉碎する工程が必要であるが、水砕スラグは、粉碎したものを単に普通セメントに混合するだけで水硬性を発揮するため、製造時のエネルギー消費量ないし二酸化炭素発生量を削減できる。表4に示すとおり、普通セメント1 t製造時の二酸化炭素排出量は約800kgであるが、高炉セメントB種は普通セメントと高炉スラグ微粉末を約半量ずつ混合しているため、CO₂発生量をほぼ半減できる。このような効果から、高炉スラグ微粉末および高炉セメントはエコマークの商品類型(類型番号30)として登録されている。

7. 高炉セメントをめぐる国の動き

高炉セメントの環境負荷低減効果から、2001年4月に次の2つのことが実施された。

a) グリーン購入法に基づき公共工事で高炉セメントを指定

環境負荷の少ない持続可能な社会の構築を目的とする、グリーン購入法(国等による環境物品等の調達等に関する法律)に基づき施行された国の基本方針の中で、公共工事において重点的に調達を推進

する環境物品として、高炉セメント(高炉スラグの分量が30%を超えるもの)が品目指定された。

b) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修、公共建築協会：建築工事共通仕様書、2001年版の刊行

場所打ち杭には高炉セメントB種が標準仕様とされるとともに、建築躯体としても使用可能となった。

8. 結 言

最近、コンクリート構造物の耐久性に関心が集まる中で、コンクリートも仕様規定から性能規定に移行することにより、構造物の用途および供用期間中の環境条件の違いによって多種多様な要求性能が求められつつある。こうした中で、従来から広く用いられてきた高炉セメントに加え、今後は、高炉スラグ微粉末の普及拡大も期待される。即ち、その粉末度や普通セメントへの混入比率の違いによって、強度発現性、耐久性、発熱性状などをコントロールできるため、その特性を理解し品質を十分管理すれば、多種多様な環境条件に応じた最適なセメントを見出すことが可能となるからである。

今後とも、新日本製鐵グループとして、高炉スラグの特性や機能につき研究を進めるとともに、ニーズに合った商品開発に努めていきたい。

参考文献

- 1) 小林一輔：高炉セメントコンクリートの塩分遮蔽性能、41-6, 1989, p.56-59
- 2) 神田昌幸：東北・日本海沿岸におけるPC塩害橋の補修と更新、セメント・コンクリート、(656), 92-100(2001)
- 3) 高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説、日本建築学会, p.139-140