

高炉スラグ微粉末

コンクリート用混和材には、フライアッシュ、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末などが挙げられ、コンクリートの性能向上やCO₂排出削減などを目的に使用されます。政府によるカーボンニュートラル宣言以降、セメント業界ではクリンカー由来のCO₂削減を目的に、コンクリート用混和材の使用が加速しており、さらなる利用拡大に向けて現在も研究が進められています。そこで今回は、コンクリート用の「高炉スラグ微粉末」について解説します。

Q1

高炉スラグ微粉末とは何ですか。

A1

製鉄所の高炉で鉄を溶かす際に発生する副産物「高炉スラグ」を粉砕したもので、セメントと同様に硬化する性質を有していることから、コンクリートの混和材や混合セメントの構成材料として用いられている粉末状の材料です。

解説

製鉄所における高炉の操業は、鉄鉱石、コークス、石灰石を投入し、約1,200℃の熱風を酸素と一緒に吹き込んで湯のように溶かします。高炉スラグは、鉄鉱石中のSiO₂、Al₂O₃などの成分や、還元材として使われるコークスの灰が原材料の石灰石（主鉱物はCaCO₃）と結合したものです。密度が鉄鉄よりも低いため、上層がスラグ、下層が鉄鉄として分離され、鉄鉄1トン当たり約290kgの高炉スラグが生成されます。高炉から取り出されたスラグ



写真-1 高炉水砕スラグ¹⁾



写真-2 高炉スラグ微粉末²⁾

は約1,500℃の溶けた状態ですが、冷却方法によって「徐冷スラグ」と「水砕スラグ」という異なる種類のスラグが製造されます。このうち急冷処理を施した「水砕スラグ」（写真-1）を微粉砕したものが「高炉スラグ微粉末」（写真-2）であり、コンクリート用混和材や高炉セメントとして使用されます¹⁾（図-1）。

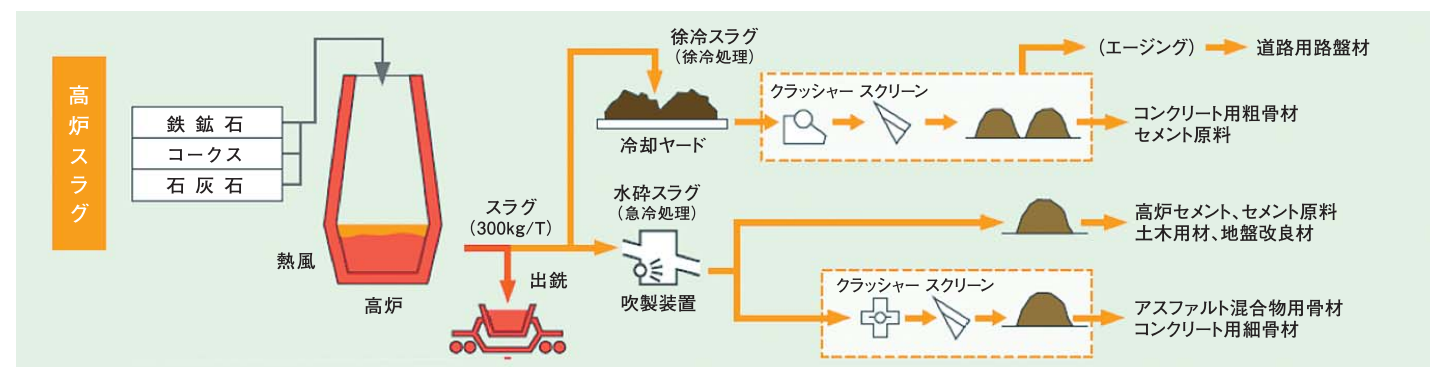


図-1 高炉スラグ製品の製造¹⁾

Q2

高炉スラグ微粉末の「潜在水硬性」とはどのようなものですか。

A2

潜在水硬性とは、水を加えただけで硬化しないが、刺激剤（アルカリ性物質や硫酸塩など）の添加により硬化し、水和物となる性質のことです。

解説

高炉水砕スラグの冷却時には急激に粘性が上がり、結晶への原子配列が生じないまま固体になりガラス質となります。このため、化学的に不安定な性質を持ち、アルカリや硫酸塩に接触すると水硬性を発揮します。水和のメカニズムは、高炉水砕スラグのガラス質を構成している不規則なO-Si-O-Al-O-の3次元網状構造体の結合状態がpH12以上の強アルカリ環境になると切断され、この網目構造内に取り込まれていたカルシウム（Ca）、マグネシウム（Mg）、アルミニウム（Al）などの修飾イオンが容易に溶出できるようにな

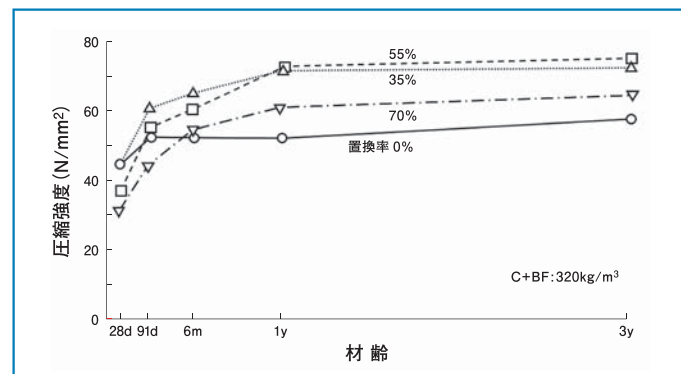


図-2 圧縮強度の経時変化⁵⁾

ります。いったん反応が始まれば、スラグ自身のアルカリ成分により高いpHを維持し、さらにスラグ中のCaOやSiO₂が溶出して、液相でポルトランドセメントの水和と同じような水和反応が生じ、CaO-SiO₂-H₂O系ゲルの水和物を生成するため、硬化が起こります³⁾。このように硬化する性質のことを「潜在水硬性」と言います。潜在水硬性とよく混同される性質として、「ポズラン反応」があります。フライアッシュやシリカフェームが硬化するのは、このポズラン反応によるもので、高炉スラグの硬化メカニズムとは異なります。SiO₂は、それ自体には水硬性はありませんが、CaO系の物質が加わると硬化する性質があります。いずれの混和材もSiO₂を溶出する点は共通していますが、フライアッシュやシリカフェームではCaO系の物質が溶出されず、セメント中のCaOを消費して反応します。すなわち、ガラス質がアルカリで溶解することは同じですが、フライアッシュやシリカフェームが水硬性を持たないのは、溶出してくるイオンの違いによるものです³⁾。

Q3

高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートの強度発現性について教えてください。

A3

普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートに比べて、初期強度の発現が遅れる傾向がある一方で、長期的な強度が増進するという特徴があります。

解説

高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートの強度発現性はスラグの粉末度や養生温度などの影響を大きく受けますが、多くの場合、普通ポルトランドセメントを単味で使用したコンクリートと比較して、初期強度の発現が遅れる傾向がみられます⁴⁾。しかし材齢28日以降の長期材齢になると、高炉スラグ微粉末が多いほど強度増進効果が大きく、普通ポルトランドセメントを単味で使用したコンクリートよりも高い強度を示す場合もあります（図-2）。さらに、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど水和反応は活発となり、潜在水硬性の発現が一層促進され、より優れた強度発現性を発揮すると考えられています（図-3）。

また、高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートは、周囲の温度が低い場合に初期の水和反応が著しく遅延します。一方で、高温時には高い初期強度発現性を発揮しますが、その場合は長期的な強度増進が衰退する傾向があります⁷⁾。

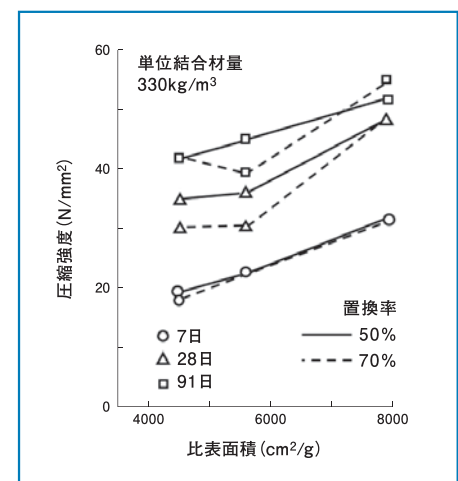


図-3 比表面積と圧縮強度⁶⁾

図-4 スラグ置換率と水和熱の関係の例¹⁰⁾

一般的にセメントの水和反応については周囲の温度の影響を受けることが知られていますが²⁾、高炉スラグ微粉末を混合した場合には、その傾向がより顕著になるため、冬季や夏季の養生では注意が必要です⁸⁾⁹⁾。

Q4

コンクリートに高炉スラグ微粉末を用いることでどのようなメリットがありますか。

A4

長期的な強度増進に加えて、水和熱の低減、アルカリシリカ反応の抑制、化学抵抗性・水密性の向上などの特徴があります。

解説

(1) 水和熱の低減

水和熱とは、セメントやスラグが水と反応した際に発生する熱を指します。この熱は、コンクリート内部の温度上昇を引き起こし、ひび割れや耐久性の低下につながります。高炉スラグ微粉末の水和熱は普通ポルトランドセメントよりも小さく、高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートでは、スラグ混合率が増加するほどこの水和熱を低減する効果があります（図-4）。ただし、前述した通り高炉スラグ微粉末は養生温度が高い場合や、粉末度が大きい場合には反応が活発化することから、条件によっては普通コンクリートよりも水和熱が上昇する場合があります。大型部材では

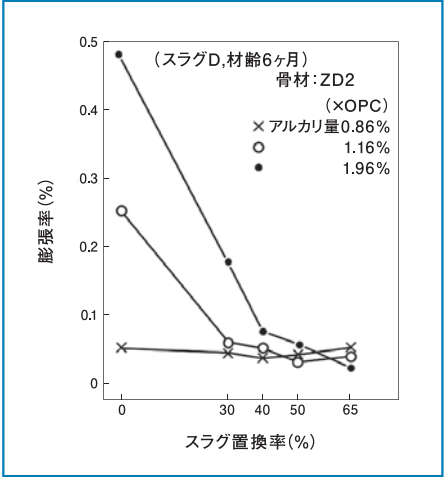


図-5 スラグ置換率と膨張率の関係の例¹²⁾

コンクリートの内部が高温となり、水和熱に伴うひび割れが発生することがありますので、使用部位によっては事前に検討しておくことが大切です¹¹⁾。

(2) アルカリシリカ反応の抑制

アルカリシリカ反応 (ASR) とは、コンクリート内部のアルカリと、反応性の高い骨材中のシリカが反応し、ゲル状の物質を生成する現象です。このゲルが吸水し膨張することでひび割れや剥離を引き起こし、耐久性を損ないます。高炉スラグ微粉

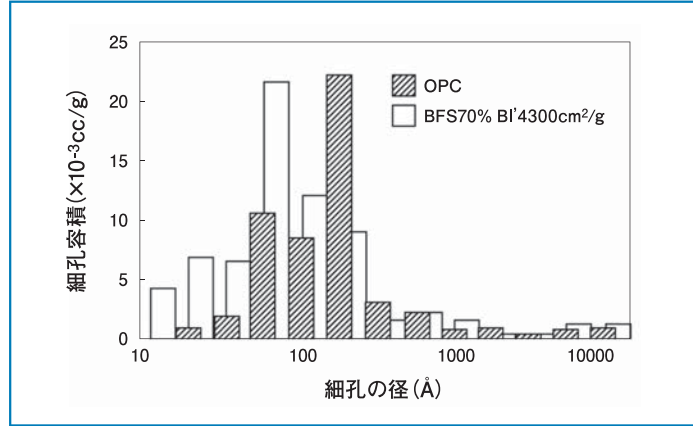


図-6 細孔の分布状況¹⁶⁾

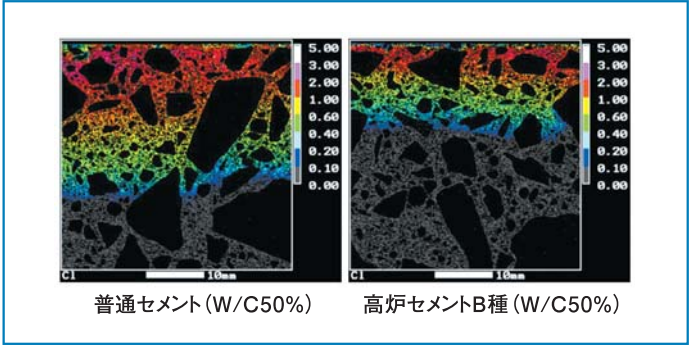


写真-3 塩化物イオン浸透深さの比較¹⁷⁾

末はこのASRを抑制する効果が認められており⁷⁾、スラグの混合率が大きいほどコンクリートの膨張が減少します(図-5)。JIS A 5308「レディーミストコンクリート」では、ASR抑制対策の方法として高炉スラグ微粉末を混合する場合の混合率は40%以上と定められています¹³⁾。高炉スラグ微粉末のASR抑制効果は、セメント由来のアルカリが希釈されることや、スラグの反応過程でコンクリート中の水酸化カルシウムが消費されることによるpHの低下、セメント硬化体中のアルカリイオンと水の移動が緻密な空隙構造により抑制されることによるものだと考えられています。¹⁴⁾¹⁵⁾

(3) 化学抵抗性・水密性の向上

コンクリートが酸、アルカリ、塩類、ガスなど、外部からのさまざまな化学物質の影響を受けると、セメント水和物(主に水酸化カルシウム)の変質や分解が生じ、コンクリートの強度や耐久性が低下します。高炉スラグ微粉末は、水酸化カルシウムと反応して硬化体組織を緻密化させるため、コンクリートの化学抵抗性は向上します。さらに、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により形成された硬化体は、十分な養生を行えば普通セメ

ント硬化体よりも小さな空隙が多くなる傾向があることから、水やガスが浸透しにくくなります(図-6、写真-3)。これにより、耐久性が向上し、長期にわたってコンクリート構造物を守ることができます。

Q5 高炉スラグ微粉末のCO₂排出削減効果について教えてください。

A5 高炉スラグ微粉末の製造におけるCO₂排出量は、普通ポルトランドセメントより極めて少なく、セメントと混合して使用することでその分のCO₂排出量を抑えることができます。

解説

セメント製造におけるCO₂排出は、製造にかかる電力・エネルギーなどの燃料由来のCO₂と、石灰石を焼成した際に発生する原料由来のCO₂があります。高炉スラグは銑鉄製造の過程で発生する副産物であり、製造後の粉碎・乾燥工程のみがCO₂排出として換算されることから、ポルトランドセメントと比較してCO₂排出量が極めて小さくなります。例えば普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を

表-1 セメント1トン当たりのCO₂排出量比較¹⁸⁾

CO ₂ 排出源	CO ₂ 排出量 (kg)		CO ₂ 削減量(kg) ①-②	CO ₂ 削減率 (%)
	① ポルトランドセメント	② 高炉セメント		
石灰石 (原料由来)	478	270	208	44
電力・エネルギー (燃料由来)	278	168	110	40
計	756	437	319	42

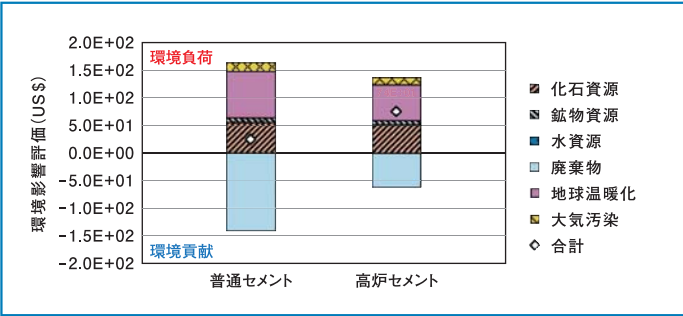


図-7 環境影響評価の比較²⁰⁾

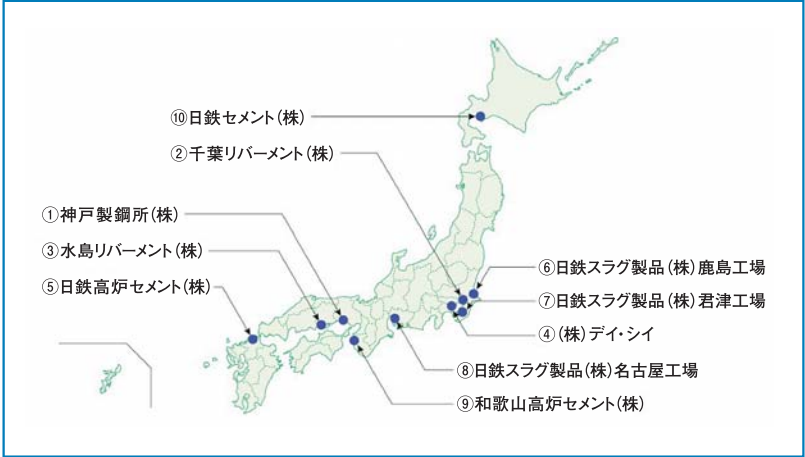


図-8 高炉スラグ生産工場²²⁾

表-2 高炉スラグ微粉末の適用事例

クリーンクリート [®]	(株)大林組
スラグリート [®]	戸田建設(株) 西松建設(株)
ECMコンクリート [®]	(株)竹中工務店
CO ₂ -SUICOM [®]	鹿島建設(株)

40%程度置換した高炉セメントの場合、高炉スラグ微粉末の混合量の分だけ普通ポルトランドセメントの使用量が少なくなるため、燃料由来のCO₂と原料由来のCO₂のどちらも40%程度が低減されることとなり、セメント1トン当たりでは319kgのCO₂が削減可能となります(表-1)。ただし、セメントの製造には、廃棄物を原料として活用できるメリットもあるため、混和材の置換がCO₂排出量削減に大きく貢献する一方、セメント使用量の減少により廃棄物の処理量も減少します。環境負荷および環境貢献の両者を統合したLIME3¹⁹⁾による環境影響評価値では、普通セメントよりも高炉セメントB種の環境負荷が大きいとされています(図-7)。

Q6 コンクリート分野における高炉スラグ微粉末の使用状況について教えてください。

A6 年間で約2,000万トンの高炉スラグが生産され、そのほとんどがセメント用として活用されています。

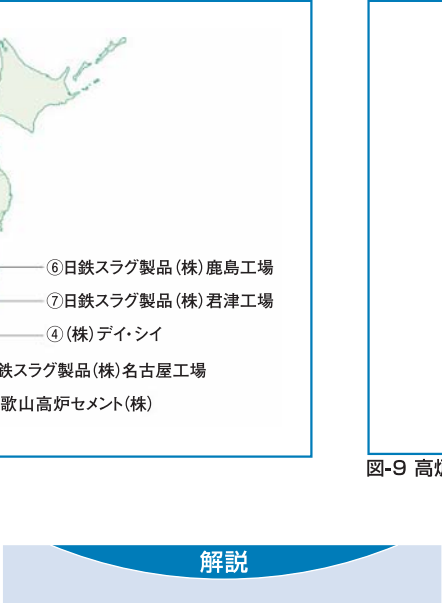


図-9 高炉スラグの用途別使用高(2023年度)²¹⁾

高炉スラグの利用は、わが国や欧州では主に高炉セメントとして普及しましたが、アメリカ・カナダ・イギリス・南アフリカ・台湾・韓国・シンガポールなどでは、生コン工場でコンクリート用混和材としてよく利用されています²¹⁾。現在、国内の生産拠点は10工場あります(図-8)。年間で、約2,000万トンの高炉スラグが生産され、そのほとんどが水砕スラグとして国内および国外のセメント用に利用されています(図-9)。近年では、環境配慮型のコンクリートに高炉スラグ微粉末を使用した事例も増加しているほか(表-2)、2024年度には、JISの改正に伴い混和材のセメントへの累加計量が認められたこと¹³⁾から、低炭素コンクリートの普及に向けた高炉スラグ微粉末の需要増加が予想されます。

太平洋セメント株式会社九州支店技術部 天野幹久

【参考文献】

- 1) 鉄鋼スラグ協会：環境資源高炉スラグ2019.12
- 2) JFEミネラル株式会社：高炉スラグ微粉末
- 3) 一般社団法人セメント協会：C&Cエンサイクロペディア, 1996.7
- 4) 笠井芳夫ほか：セメント・コンクリート用混和材料, pp19-73, 1993
- 5) 遠瀬裕悦ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長期強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, 1989
- 6) 長瀧重義ほか：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3
- 7) 公益社団法人土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, pp91-92, 1996.6
- 8) 落合榮司ほか：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの強度発現と養生方法との関係に関する研究, 土木学会・第50回年次学術講演会講演概要集, V-64, 1995.9
- 9) 伊代田岳史ほか：高炉スラグ微粉末を高含有したセメントの温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, 2005
- 10) 国府勝郎ほか：土木学会論文集, No.396/V-9, pp39-48, 1998
- 11) 公益社団法人日本コンクリート工学会：高炉スラグ微粉末～CO₂削減に貢献する混和剤～, 月刊コンクリート技術, 2022.3
- 12) 小林茂敏ほか：高炉スラグ微粉末のアルカリ骨材反応抑制効果について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 1987.3
- 13) 一般社団法人日本規格協会：JIS A 5308「レディーミストコンクリート」, 2024
- 14) 中部セメントコンクリート研究会編：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応, 理工学社発行, pp57-61, 1990
- 15) 川村満紀ほか：コンクリートの材料科学, 森北出版, pp185-189, 2002
- 16) 檀康弘ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性, セメント・コンクリート論文集, No.45, 1991
- 17) 多田克彦ほか：高炉スラグ微粉末を混合したエコセメントコンクリートの耐海水性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.67, pp1043-1044, 2012
- 18) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用, 2025
- 19) 伊坪徳宏ほか：LIME3グローバルスケールのLCAを実現する環境影響評価手法, 2018
- 20) 公益財団法人日本コンクリート工学会：セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書, pp212-213, 2024.9
- 21) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用, 2025
- 22) 鉄鋼スラグ協会：省資源・省エネルギー、地球にやさしい高炉スラグ微粉末, 2025