

# 新たなコンクリートスラグ骨材－石炭ガス化スラグ細骨材

松浦 忠孝

2021年、エネルギーと環境問題に貢献するクリーンコール技術である石炭ガス化複合発電（Integrated coal Gasification Combined Cycle, 以下「IGCC」という。）の大型商用機が福島県内で相次いで運転を開始した。石炭ガス化スラグ細骨材（以下、「CGS」という。）は、このIGCCの副生スラグから成る新たなコンクリート用スラグ骨材であり、現在、利用定着を目指して様々な研究・検討が展開されている。本稿では、CGSおよびこれを用いたコンクリートの特徴、ならびにJIS A 5011-5制定と設計施工指針作成への取り組みについて紹介する。

キーワード：クリーンコール, IGCC, 石炭ガス化スラグ, コンクリート用スラグ骨材, JIS A 5011-5, 設計施工指針

## 1. はじめに

SDGsやカーボンニュートラル社会の実現に向けて、環境負荷低減の機運は日々高まっている。エネルギー部門はその最たる対象であり、技術革新が世界的に求められている。IGCCは、高効率であるとともに、二酸化炭素の分離・回収技術の適用が比較的容易で、カーボンリサイクルとの掛け合わせによってカーボンニュートラルに貢献できる有用な発電方式である。そのため、IGCCの実用化と普及拡大は大いに期待されており、その実現には副生スラグの処理・有効利用方策の確立が不可欠である。一方、環境負荷低減が求められるのはコンクリート分野も例外ではない。コンクリートを構成する材料のうち骨材に着目すると、採掘によって生じる環境負荷を低減する必要があることはもちろんのこと、良質な天然骨材が世界的に枯渇していることも相まって、今後より一層の再生資源利用が求められることは不可避であると考えられる。

CGSは、この両者の課題解決に貢献する環境にやさしい建設資材である。2020年10月にJIS A 5011-5（コンクリート用スラグ骨材－石炭ガス化スラグ骨材）が制定され、2021年から流通を開始した正に新しい材料であるため、工事等への適用実績はまだ少なく、利用定着・拡大は継続的な課題である。

本稿では、CGSの利用定着に資するべく、CGSの骨材としての品質、およびCGSを用いたコンクリートの特徴を示すとともに、JIS A 5011-5制定、利用方

法の標準を示す土木学会および日本建築学会の設計施工指針作成への取り組みについて紹介する。

## 2. CGSの特徴

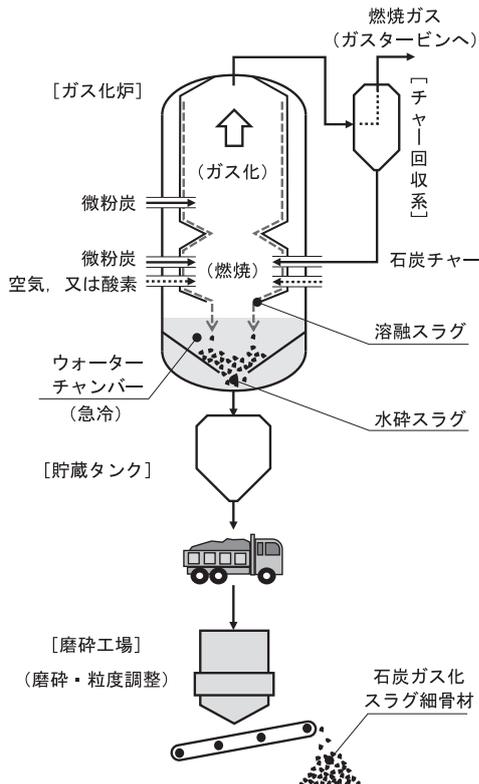
### (1) CGSの製造工程

図1にCGSの製造工程の例を示す。IGCCは、ガス化炉で生成した高温の石炭ガスを燃料とするガスタービン発電とその排熱を利用した蒸気タービン発電を組み合わせた複合発電方式である。ガス化炉内では石炭のガス化に伴って石炭中の灰分のみが高温熔融され、熔融スラグとして炉底部に流下する。流下した熔融スラグはウォーターチャンバーで急冷され、水砕スラグとして系外に取り出される。CGSは、この水砕スラグを磨砕などによって粒度・粒形を調整して製造される。

### (2) CGSの品質

#### (a) 化学成分

CGSの主成分は、二酸化ケイ素（ $\text{SiO}_2$ ）、酸化アルミニウム（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）、酸化カルシウム（ $\text{CaO}$ ）が占め、同じく石炭由来のフライアッシュに近い。ただし、IGCCには亜瀝青炭など低灰融点の石炭が用いられるため、国内に流通するフライアッシュと比べると $\text{CaO}$ はやや多い傾向にある。CGSの化学成分ごとの質量分率は、既往の文献<sup>2)</sup>のとおり石炭中の灰分組成に概ね依存する。すなわち、石炭種類（以下、「炭種」



図一 1 CGS の製造工程の例<sup>1)</sup>

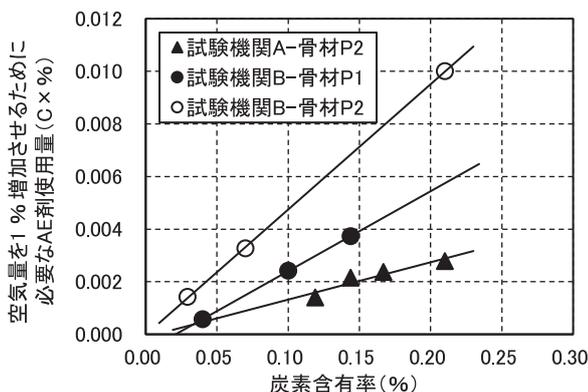
という。)を特定することによってCGSの化学成分をおよそ推定することができる。

(b) 炭素含有率

CGSには微量の炭素分が含まれる。図一2に示すように、炭素含有率(全試料に対する炭素分の質量分率)とコンクリートの空気量を増加させるために必要なAE剤の使用量には線形的相关が認められる。そのため、JIS A 5011-5では、AE剤の使用量が過剰にならない範囲でコンクリートの品質および配合が管理できるように炭素含有率の上限値0.10%が規定されている。

(c) 絶乾密度・吸水率

CGSの絶乾密度は、2.5～3.1 g/cm<sup>3</sup>の範囲に分布



図一2 炭素含有率とAE剤使用量の関係の例<sup>3)</sup>

する。JIS A 5011-5では、使用期間中の密度変化が利用の妨げとならないように、絶乾密度の推定値を見本値として予め示し、見本値に対する許容差を規定して一定の範囲に品質を管理するものとしている。絶乾密度の見本値は、利用する炭種の灰分組成から推定した値に実績を加味して製造事業者が設定し、その適用期間はIGCCプラントの燃料計画および在庫状況を踏まえた受渡当事者間の協議によって定められる。なお、同一炭種における絶乾密度の標準偏差は既往の実績において0.03 g/cm<sup>3</sup>程度である。

また、CGSの吸水率は、0.2～1.0%の範囲に分布し、フェロニッケル細骨材や銅スラグ細骨材など他のスラグ細骨材と比べても低いことが特徴である。

(d) 環境安全品質

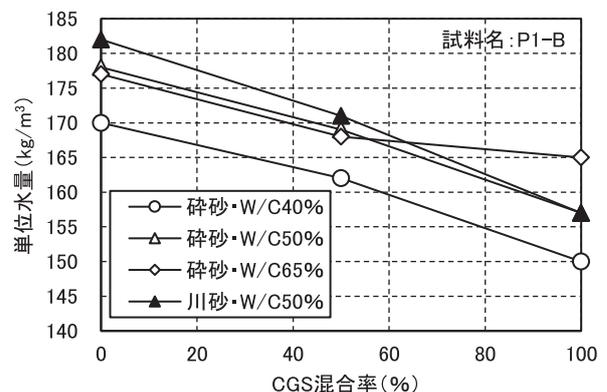
これまでに製造されたCGSは、重金属等の有害物質をほとんど含んでおらず、CGS単体で環境安全品質基準を満足している。なお、循環資材として環境安全性に配慮するために、JIS A 5011-5では、環境安全品質基準と試験方法が規定されている。

(3) CGSを用いたコンクリートの特徴

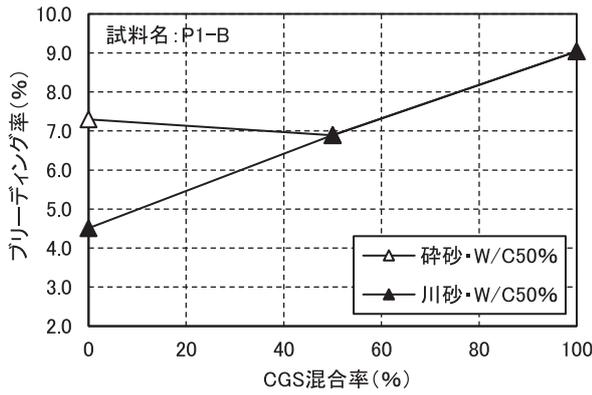
(a) フレッシュ性状

CGSを用いたコンクリート(以下、「CGSコンクリート」という。)は、全細骨材に対するCGSの容積比(以下、「CGS混合率」という。)を増やすと、同一コンシステンシーを得るための単位水量を低減できる場合がある。図一3にその事例を示す。これは、比較対象の細骨材にもよるが、CGSの粒度・粒形がよいこと、骨材表面が平滑であることが影響しているものと考えられ、CGS利用のメリットのひとつと言える。

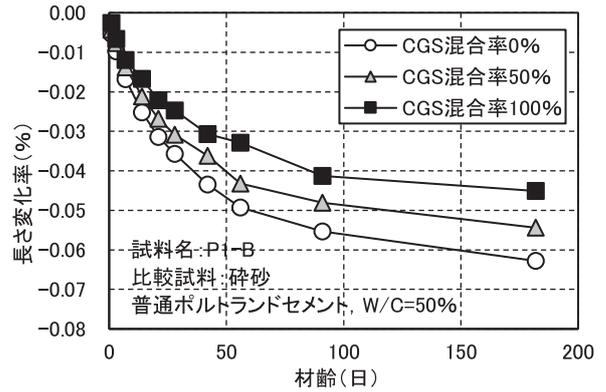
一方、CGS混合率を過度に増やすとブリーディングが増大する傾向が確認されている。図一4にその事例を示す。ブリーディングの増大は他のスラグ骨材でも同様の傾向<sup>4)</sup>が認められており、骨材密度がや



図一3 CGS混合率と単位水量の関係の例<sup>3)</sup>



図一四 CGS 混合率とリーディング率の関係の例<sup>3)</sup>

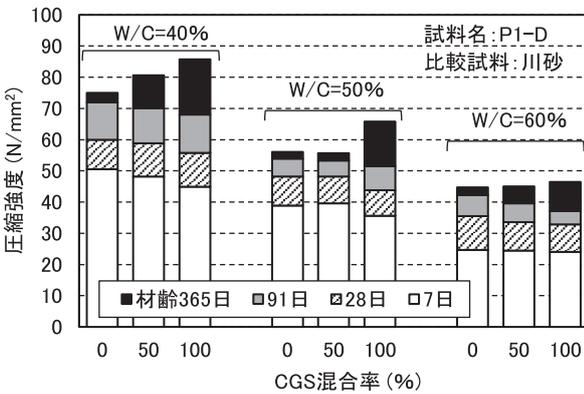


図一六 長さ変化試験結果の例<sup>3)</sup>

や大きいこと、骨材表面が平滑で保水能力が低いことに起因するものと考えられる。

(b) 強度, ヤング係数

CGS コンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日では天然骨材を用いたコンクリートと同等かやや低下する傾向が認められている。一方、CGS コンクリートの材齢経過に伴う強度増進は大きく、材齢 1 年に及ぶと天然骨材を用いたコンクリート以上の強度が得られるケースが多く認められている。図一五にその事例を示す。このような強度増進は、CGS の化学成分などから骨材界面のポズラン反応によるものと推察されており、現在詳細な研究が進められている。



図一五 CGS コンクリートの圧縮強度試験結果の例<sup>5)</sup>

(c) 体積変化

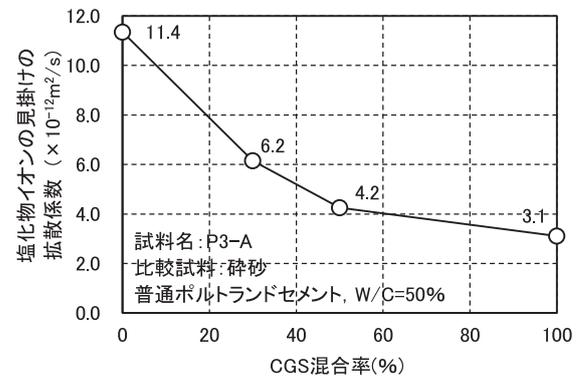
CGS コンクリートは、CGS 混合率を増やすと乾燥収縮が小さくなる傾向が認められている。図一六にその事例を示す。これは単位水量の低減による効果に加え、CGS 自身の吸水率が小さいこと、CGS コンクリートのヤング係数が大きいことが寄与しているものと推察される。

(d) 耐久性

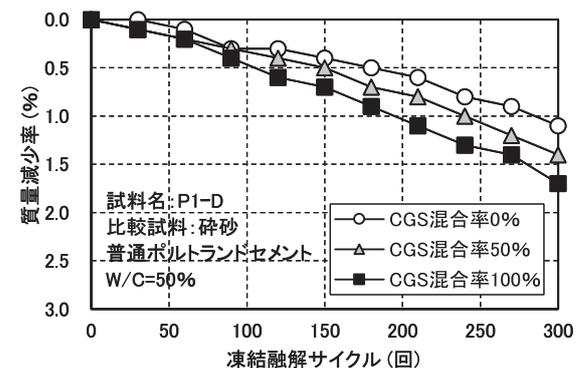
CGS コンクリートの塩化物イオンに対する見掛け

の拡散係数は、CGS 混合率の増大に応じて小さくなる傾向が認められている。図一七にその事例を示す。これは、物質移動抵抗性に影響を及ぼす遷移帯が CGS の反応性によって緻密化されたためと推察され、現在詳細な研究が進められている。

凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法) の質量減少率の結果の例を図一八に示す。この結果から CGS 混合率の増大に伴ってスケーリングによる質量減少が増大する傾向が認められる。スケーリングは、リーディングによる表面層直下の脆弱層によって誘発されることが知られており<sup>7)</sup>、CGS コンクリートにおいてもリーディングがスケーリングの増大要因と考えられる。



図一七 CGS 混合率と見掛けの拡散係数の関係の例<sup>6)</sup>



図一八 凍結融解試験 (質量減少率) の結果の例<sup>5)</sup>

### 3. 規格化・標準化への取組み

図一9にCGSの規格化・標準化への取組み工程を示す。東日本大震災後、IGCC大型商用機の建設計画を契機に、経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）の協力のもと、コンクリート用骨材としての利用定着を目指して、2015年から学識経験者、関係省庁、使用者及び電力関係事業者から成る委員会を組織し、以降の研究・検討を重ねた。この研究成果を踏まえて、2019年にJIS原案作成委員会（委員長：長瀧重義 東京工業大学名誉教授、分科会主査：阿部道彦 工学院大学名誉教授）を組織して、コンクリート用骨材としての品質および試験方法の審議がなされ、翌2020年にJIS A 5011（コンクリート用スラグ骨材）規格群の第5部として、JIS A 5011-5（石炭ガス化スラグ骨材）が規格化された。

	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25-
JIS A5011-5	経産省補助事業 有効利用検討委員会		NEDO事業			▼2020.10 JIS原案作成委員会	2020.JIS公示				
JIS A 5308						改定調査	原案作成	↑情報提供		▼JIS改正	
設計施工指針 ・土木学会 ・日本建築学会						NEDO事業 研究・調査 作成・審議					
コンクリート等への利用状態	廃棄物利用 (自ら利用が主体)					有価物利用 非JISコンクリート				JISコンクリート	

図一9 CGSの規格化・標準化と利用定着へのロードマップ

また、引き続き利用の標準化にも着手した。土木部門では、2020年6月から土木学会／コンクリート委員会／石炭ガス化スラグ骨材細骨材を用いたコンクリートの設計・施工研究小委員会（委員長：岩城一郎 日本大学教授）の活動を開始し、建築部門では、同年7月から建築研究振興協会／石炭ガス化スラグ骨材委員会、2021年4月からは日本建築学会／材料施工委員会／鉄筋コンクリート工事運営委員会／石炭ガス化スラグ骨材を使用するコンクリートの施工指針作成小委員会（委員長：小山明男 明治大学教授）の活動を開始し、先に述べたCGSコンクリートの特徴を踏まえて、設計、配（調）合、施工の標準化に向けた調査・研究、検討が進められている。指針としての発刊はいずれも2023年を予定しており、ここでは利用の優位性、または利用上の注意点を含めて示される予定である。指針の発刊によって、多くの方にCGSの特徴を理解いただき、利用が拡大されることを期待したい。

### 4. 実規模構造物等への適用例

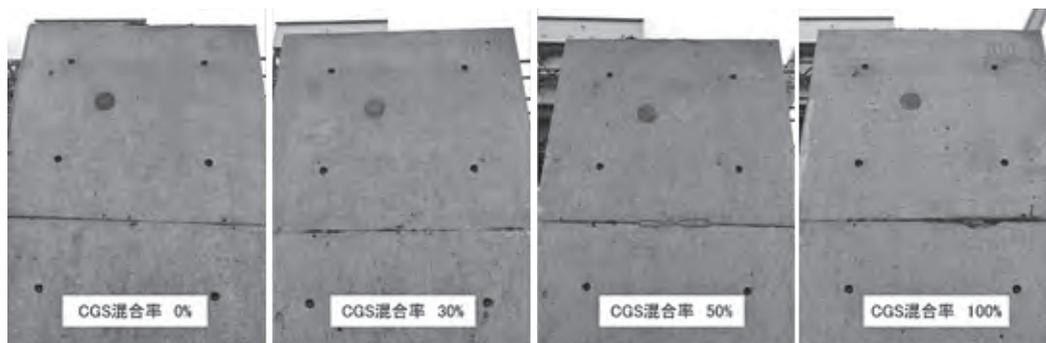
CGSは新しい材料であるため、現時点では採用事例に乏しい。今後、IGCCの立地地域を中心に、現場打コンクリート、プレキャストコンクリート製品の実績拡大を図っていく計画であるが、ここでは先行の採用事例を紹介する。写真一1は、プラント構内のコンクリート舗装である。CGS混合率50%で施工した結果、打上り面に色ムラ、痘痕、脆弱部はなく、仕上がりは極めて良好であった。また、乾燥収縮が小さいという特徴が活かされ、ひび割れ発生も少ないことが確認されている。写真一2は、高さ2m、部材厚0.3mのT形コンクリート擁壁である。コンクリートの打ち込みにはコンクリートポンプ車および圧送配管による施工が適用されている。この施工におけるコンクリートの品質および施工結果については、既往の文献<sup>8)</sup>で報告されており、適用した配合範囲（CGS混合率50%以下）であれば、概ね一般のコンクリートと同様に扱うことができ、十分な施工性を有することが確認されている。また、写真一3に示すように、コンクリートの仕上り面についても色ムラ・表面の荒れ・砂すじ等の発生はなく、CGSの利用によって外観上の品質に与える影響もほとんどないことが確認されている。



写真一1 コンクリート舗装への適用事例



写真一2 コンクリート擁壁への適用事例



※ 上部の補修痕は、試験のためにコア採取したもの

写真-3 CGS コンクリートの擁壁側面の外観

## 5. おわりに

本稿は、既報<sup>1), 9)</sup>を一部引用し、CGSの骨材としての品質、CGSコンクリートの特徴、規格化・標準化の取組みについて概説した。十分な利用実績に先立って規格化し、また、標準化を目指すその意義は、副生スラグの処理がエネルギー分野の技術革新と環境問題の障害になることなく、更にCGS有効利用の定着・拡大によって持続可能な社会の実現に貢献することにある。現在もCGSに関する研究は多岐に渡って展開されており、順次その成果が報告されるため、是非これらも参照されたい。本稿が今後のCGS利用普及の一助となれば幸いである。

JCM A

### 《参考文献》

- 1) 長瀧重義, 阿部道彦, 松浦忠孝: JIS A 5011-5 (コンクリート用スラグ骨材-第5部: 石炭ガス化スラグ骨材) の制定概要, コンクリートテクノ, pp.10-14, 2021.2
- 2) 松本宗浩, 古屋憲二: 石炭ガス化スラグの原料炭種による品質への影響, 土木学会第74回年次学術講演会, V-25, pp.1-2, 2020
- 3) NEDO: クリーンコール技術開発 石炭利用環境対策事業 石炭利用

環境対策推進事業 石炭ガス化溶融スラグ有効利用推進事業 2016年度～2018年度成果報告書, 2020.3

- 4) 上田敦, 國府勝郎, 宇治公隆: スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質向上に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.62, No.2, pp.462-476, 2006
- 5) 松浦忠孝, 鷲巢正樹, 前島拓, 岩城一郎: 石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性質に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.75 (投稿中)
- 6) 宮村優希, 岩波光保, 中山一秀: 石炭ガス化スラグを用いたコンクリートの強度特性および海洋環境下における耐久性に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.74, No.1, pp.207-214, 2020
- 7) 権代由範, 月永洋一, 庄谷征美, 阿波稔: コンクリート部材の断面厚さの相違が表層部脆弱層の形成に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.64, No.1, pp.391-397, 2010
- 8) 松浦忠孝, 木村博, 橋本紳一郎: 石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状の経時変化と圧送性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.47-52, 2021
- 9) 長瀧重義, 阿部道彦, 松浦忠孝: JIS A 5011-5 (石炭ガス化スラグ骨材) 制定の概要, コンクリート工学, Vol.59, No.6, pp.496-501, 2021.6

### 【筆者紹介】

松浦 忠孝 (まつうら よしたか)  
東京電力ホールディングス(株)  
技術・戦略ユニット 土木建築統括室  
総合エンジニアリンググループ

