

溶融スラグ骨材を用いたコンクリート

鈴木澄江（建材試験センター）

1. はじめに

日常生活で排出される一般廃棄物と文化・衛生的な生活基盤を支える下水道事業から排出される下水汚泥は、直接焼却する方式で処理・処分されており、これらの廃棄物を直接焼却処分した際に発生する焼却灰を安全に有効利用する方策が求められている。これらの廃棄物を1,200℃以上の高温で溶融処理した結果、副産した溶融固化物が溶融スラグ¹⁾である。

溶融スラグ骨材をコンクリート用骨材として有効利用することを目的に、2006年9月にJIS A 5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート溶融スラグ骨材（以下、溶融スラグ骨材と称す）」が制定された。また、このJIS A 5031を支援するために（財）建材試験センターにて組織した委員会において「溶融スラグ骨材利用マニュアル」²⁾を作成した。

ここでは、溶融スラグ骨材の製造及び品質、溶融スラグ骨材を使用したコンクリート（以下、溶融スラグコンクリートと称す）の品質と留意点ならびにコンクリート製品に関する情報等について紹介する。

2. 溶融スラグ骨材の製造及び品質

(1) 溶融スラグ骨材の製造

溶融スラグの製造方式は、一般廃棄物または下水汚泥を焼却し、その焼却残さを溶融する方法と一般廃棄物または下水汚泥を直接溶融する方法とに大別される。焼却残さ（焼却主灰と焼却飛灰）から溶融スラグができる過程を図1²⁾に、一般廃棄物あるいは下水汚泥を直接溶融して溶融スラグができる過程を図2²⁾に示す。いずれの行程においても発生する溶融飛灰は、特別管理一般廃棄物の処理に従って処理されている。

処理対象物の種類ごとに溶融方式の分類をすると、

表1 溶融方式の分類³⁾

処理対象	炉形式	中分類		分類
一般廃棄物	灰溶融炉 (焼却残さ溶融炉)	電気式		交流アーク式溶融炉
				直流電気抵抗式溶融炉
				交流電気抵抗式溶融炉
				プラズマ式溶融炉
				誘導式溶融炉
		燃料燃焼式		回転式表面溶融炉
				反射式表面溶融炉
				放射式表面溶融炉
				旋回流式溶融炉
				ロータリーキルン式溶融炉
	ガス化溶融炉	ガス化溶融炉	一体方式	シャフト炉式ガス化溶融炉
			分離式	キルン式ガス化溶融炉
		ガス化改質炉	一体方式	流動床式ガス化溶融炉
			分離式	シャフト炉式ガス化改質炉
下水汚泥	灰溶融炉		交流アーク式溶融炉	
			回転式表面溶融炉	
			旋回流式溶融炉	
			酸素バーナー火炎溶融炉	
			交流アーク式溶融炉	
	汚泥溶融炉		回転式表面溶融炉	
			旋回流式溶融炉	
			交流アーク式溶融炉	
			回転式表面溶融炉	
			コークスベッド式溶融炉	

一般廃棄物については、焼却施設より排出された焼却残さを溶融する灰溶融炉と一般廃棄物を直接溶融するガス化溶融炉の2種類がある。一方、下水汚泥溶融では下水汚泥溶融炉と灰溶融炉に分けられる。溶融炉の具体的分類を表1に示す³⁾。溶融施設の稼働状況は、2004年度で144件が稼働しており、2008年度までに170件超が稼働する予定である²⁾。一般廃棄物を溶融対象にする溶融施設は、灰溶融形式とガス化溶融形式があるが、施設数としては灰溶融形式が多いものの溶融炉数ではガス化溶融形式が多い。ガス化溶融形式炉の一例を図3に示す²⁾。

2002年度は約30万トンであった溶融スラグの生産

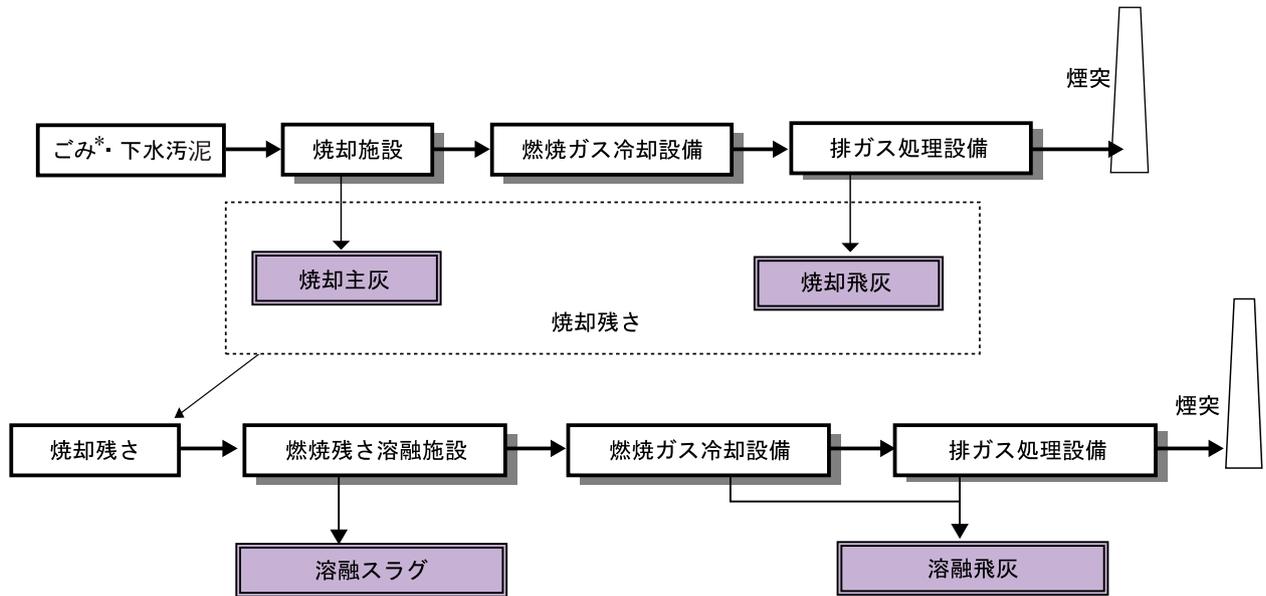
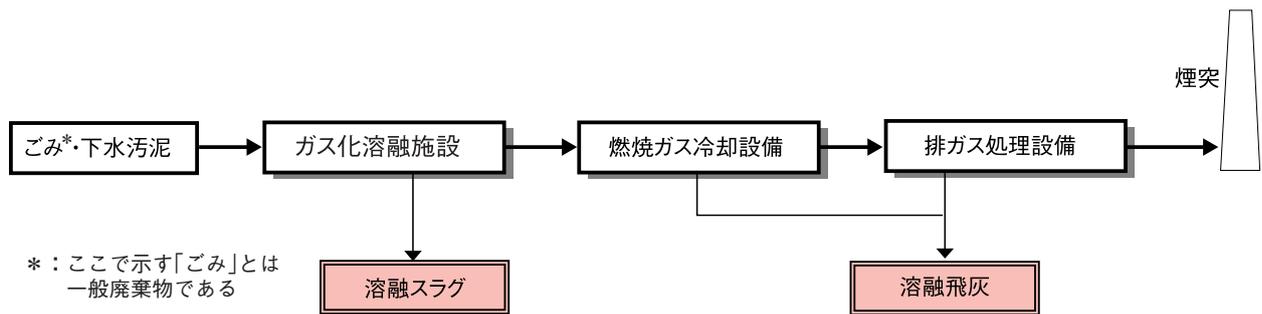


図1 溶融スラグの製造過程（焼却処理・焼却残さ処理）²⁾
 （一般廃棄物及び下水汚泥 → 焼却残さ → 溶融スラグ）



*：ここで示す「ごみ」とは一般廃棄物である

図2 溶融スラグの製造過程（ガス化溶融処理）²⁾
 （一般廃棄物及び下水汚泥 → 溶融スラグ）

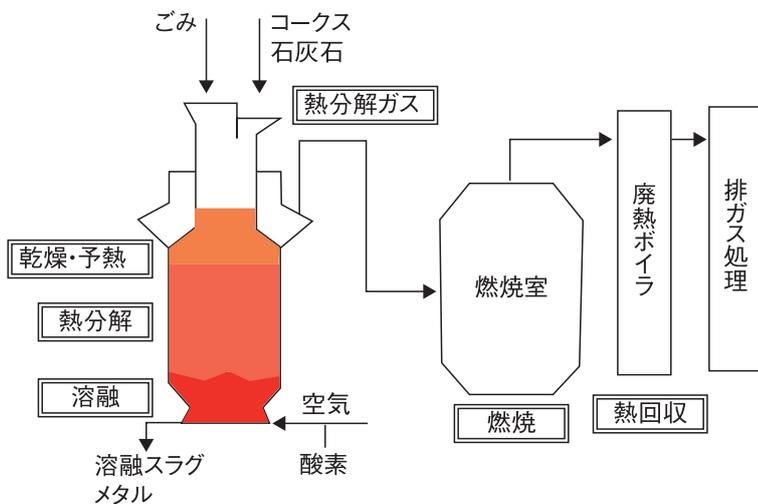


図3 溶融炉の一例（シャフト炉式溶融炉／コークスベッド式）²⁾

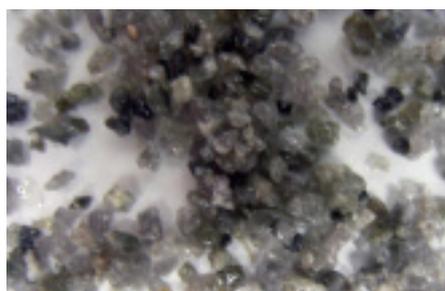
量は、2004年度において56.4万トン（内訳は一般廃棄物52.1万トン、下水汚泥4.3万トン）となり、溶融炉の稼働数が増加した2002年度から著しい増加をみせ

ている²⁾。

(2) 溶融スラグ骨材の品質

溶融スラグ骨材の物理的、化学的品質ならびに環境安全性に関する規定値は、2006年に制定されたJIS A 5031に定められている。アンケート調査により得られた溶融スラグ骨材の物理的性質の平均値⁴⁾とJIS A 5031の規定値を表2に示す。溶融スラグ骨材の物理的特徴は、絶乾密度が大きく、吸水率が小さいことである。溶融スラグ細骨材及び粗骨材の一例を写真1及び写真2に示す。溶融対象物や溶融方式が異なることにより、溶融スラグ骨材の外観も異なる。

JIS A 5031の化学成分に関する規定値を表3に、環境安全性に関する規定値を表4に示す。溶融スラグ骨



一般廃棄物溶融スラグ細骨材



下水汚泥溶融スラグ細骨材

←写真1 溶融スラグ細骨材の一例



一般廃棄物溶融スラグ粗骨材



下水汚泥溶融スラグ粗骨材



↓写真2 溶融スラグ粗骨材の一例

表2 溶融スラグ骨材の物理的性質とJIS A 5031の規定

区分	項目	JIS規定値	一般廃棄物	下水汚泥
細骨材	絶乾密度 g/cm ³	2.5以上	2.77	2.71
	吸水率 %	3.0以下	0.68	1.17
	安定性 %	10以下	2.15	4.50
	単位容積質量 kg/L	—	1.66	1.48
	粒形判定実積率 %	53以上	55.4	—
	微粒分量 %	7.0以下	2.34	0.43
粗骨材	絶乾密度 g/cm ³	2.5以上	2.78	2.84
	吸水率 %	3.0以下	0.49	0.14
	安定性 %	12以下	—	0.58
	単位容積質量 kg/L	—	1.74	1.65
	粒形判定実積率 %	55以上	—	—
	微粒分量 %	1.0以下	—	—

注)一般廃棄物及び下水汚泥の物理的性質は参考文献4)による

表4 溶融スラグ骨材の環境安全性の規定 (JIS A 5031)

項目	溶出量基準	含有量基準
カドミウム	0.01mg/L以下	150mg/kg以下
鉛	0.01mg/L以下	150mg/kg以下
六価クロム	0.05mg/L以下	250mg/kg以下
ひ素	0.01mg/L以下	150mg/kg以下
総水銀	0.0005mg/L以下	15mg/kg以下
セレン	0.01mg/L以下	150mg/kg以下
ふっ素	0.8mg/L以下	4000mg/kg以下
ほう素	1.0mg/L以下	4000mg/kg以下
試験方法	規格	JIS K0058-1
	試料	JIS骨材の利用有姿
		JIS K0058-2
		2mm以下

表3 溶融スラグ骨材の化学成分の規定 (JIS A 5031)

項目	粗骨材・細骨材
酸化カルシウム(CaOとして)	% 45.0以下
全硫黄(Sとして)	% 2.0以下
三酸化硫黄(SO ₃ として)	% 0.5以下
金属鉄(Feとして)	% 1.0以下

材に含まれる金属アルミニウムは、コンクリート中の水酸化カルシウムおよび水と反応し水素ガス (2Al + Ca(OH)₂ + 2H₂O → CaO · Al₂O₃ + 3H₂) を発生することがあるが、金属アルミニウムの含有量と水素ガスの発生量との相関は不明確であるため、JIS A 5031では、附属書1 (規定) による試験方法でモルタルの膨張率 (2%以下) を定め、制限している。さらに金属鉄 (Fe) は、1.0%以下に制限されている。金属鉄

は、溶融スラグ骨材表面に赤さびを発生させることがあるため、JIS A 5011-2 (フェロニッケルスラグ骨材) の規定値同様に定められたものである。下水汚泥を処理した溶融スラグには汚れに関与しないリン鉄のような化合物が含まれることがあり、それらを除いた金属鉄を精度良く定量するための試験方法としてJIS A 5031 附属書2 (規定) (コンクリート用溶融スラグ骨材の金属鉄分析方法) に示すメスbauer-分光分析法を規定している。

3. 溶融スラグコンクリートの品質

溶融スラグコンクリートの品質に関する特徴と留意点の概略を紹介する。

(1) 配合設計上の留意点とフレッシュ性状

溶融スラグコンクリートは、その使用実績や長期安定性に関するデータが未だ十分にそろっていないことから、コンクリート関係の製品を製造するにあたって設計基準強度の規定値がJIS A 5031の1. 適用範囲の備考に記されている。プレキャストコンクリート製品の場合では、設計基準強度は 35N/mm^2 以下、レディーミクストコンクリートの場合では、呼び強度33以下としている。また、JIS A 5364（プレキャストコンクリート製品—材料及び製造方法の通則）では、TR A 0016（一般廃棄物、下水汚泥等の溶融固化物を用いたコンクリート用細骨材）を対象として、設計強度 24N/mm^2 以下のプレキャスト無筋コンクリート製品への適用を定めている。いずれのJISにおいても、製品の要求性能を損なわないことが確認されている場合は、これ以上の強度レベルにおける適用も妨げられてはいないのが現状である。

1) 水セメント比

JIS A 5031では、溶融スラグコンクリートの水セメント比の上限を55%としている。これは、溶融スラグコンクリートの圧縮強度が、天然骨材（砂、碎石）を用いた場合に比べ60~80%程度であることが多いため、耐久性確保の観点から水セメント比の上限値を記したものである。水セメント比50%で作製した溶融スラグコンクリートの圧縮強度は、 $30\sim 40\text{N/mm}^2$ 程度得られると報告⁵⁾（図4参照）されており、用途や環境条件により適切に定めることが必要である。

2) 混合率

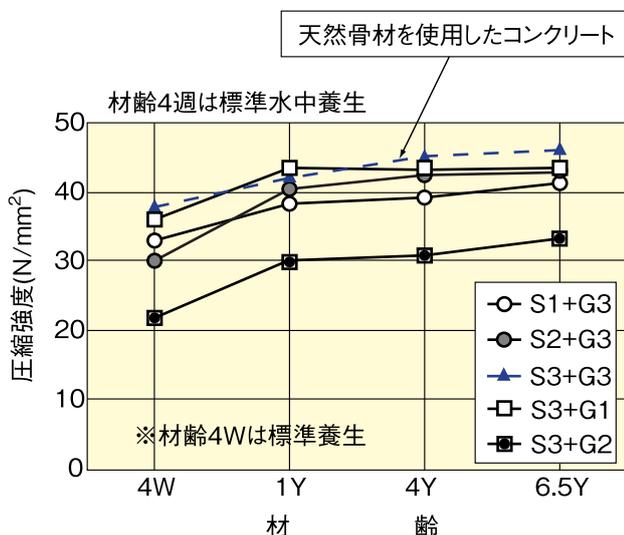


図4 溶融スラグ骨材を使用したコンクリートの圧縮強度⁵⁾（水セメント比50%）

溶融スラグ骨材の混合率は、プレキャストコンクリート製品あるいは構造体コンクリートの耐久性やその他の性能を満足するように定めることが必要である。JIS A 5031制定のための研究成果⁴⁾によると、スラグ混合率と諸性状の関係は、溶融スラグ細骨材の混合率が0~50%の範囲では、フレッシュコンクリートの性状に大きな差はないとされている。

しかし、圧縮強度や曲げ強度は、水セメント比50%のコンクリートであっても、溶融スラグ細骨材の混合率が30%の場合12%程度、溶融スラグ粗骨材の混合率が30%の場合8%程度低下することが確認されている。また、溶融スラグ混合率と耐久性に関するデータは未だ少なく、更に、2004年における溶融スラグ骨材の生産量は、年間60万トン弱と多くないのが現状である。

これらの点を考慮して、溶融スラグコンクリートのスラグ混合率は、細骨材および粗骨材ともに30%以下を標準として推奨されている。なお、小型のコンクリート製品、例えば「舗装・境界ブロック類I類（平板、境界ブロック、インターロッキングブロック）」の場合は、溶融スラグ骨材を全量使用している実績があるため、製品の要求性能が損なわれないことを確認して混合率を増して使用することも可能である。

3) ワーカビリティ

溶融スラグコンクリートのフレッシュ性状は、単位水量、スランプ、空気量、ブリーディング量、凝結時間等の必要な品質を確保し、かつ適切なワーカビリティを有するものでなければならない。同一調合で、溶融スラグ細骨材の混合率が増すと、混合率50%まではほとんど性状に変化はないが、それを超えるとスランプが低下する傾向が認められる（図5参照）⁶⁾。

また、図6に示すように、同一混合率でも水セメン

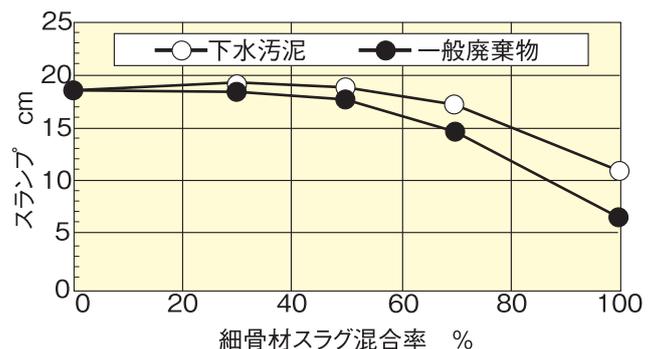


図5 溶融スラグ細骨材の混合率とスランプの関係⁶⁾

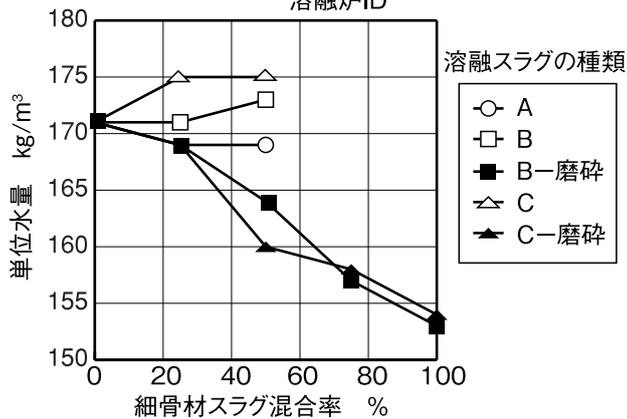
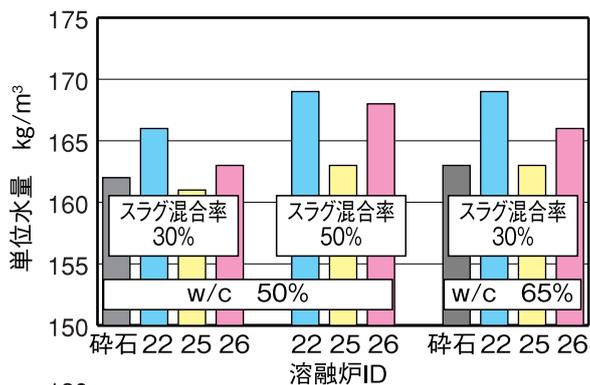
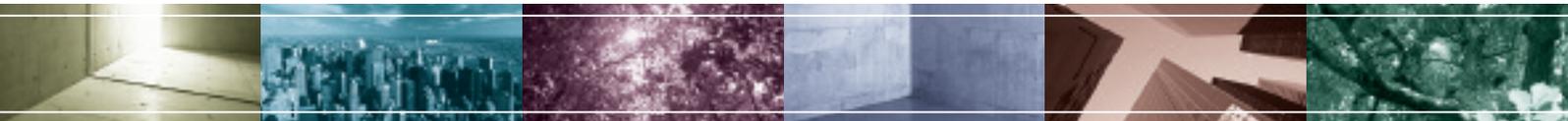


図6 溶融スラグ骨材の混合率と単位水量の関係⁶⁾

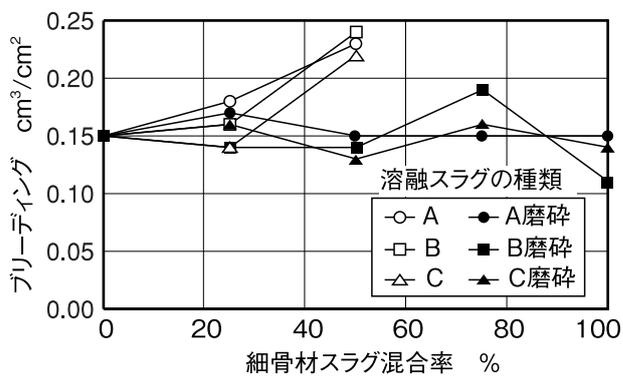
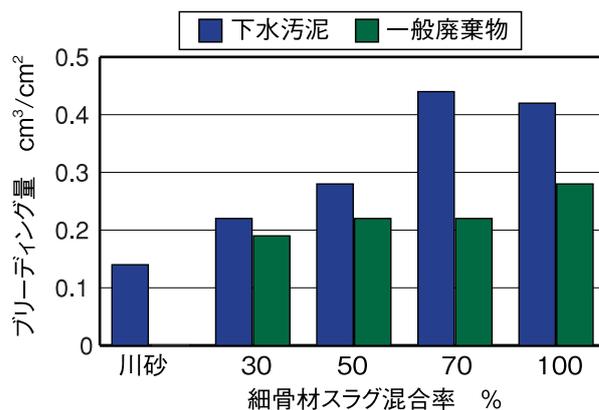


図8 溶融スラグ骨材の混合率

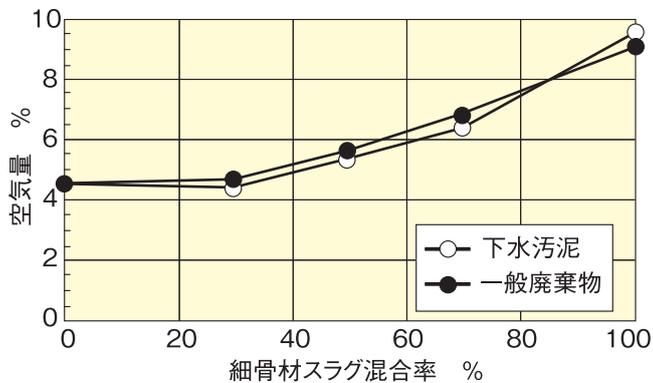


図7 溶融スラグ細骨材の混合率と空気量の関係⁶⁾

ト比が大きくなると単位水量が増加する傾向を示すスラグ骨材⁶⁾や、溶融スラグ細骨材を磨砕した場合には、混合率が増加すると単位水量が減少するという報告⁷⁾もある。使用する溶融スラグ骨材の品質を十分に把握し、良好なワーカビリティが得られる配合を選定することが重要である。

4) 空気量

溶融スラグ細骨材を混合したコンクリートの空気量は、溶融スラグ混合率が増すと増加する傾向が確認されている(図7)⁶⁾。スラグ細骨材の混合率30%では、空気量の増加は認められないが、使用するスラグ骨材の種類によって性状が変化することもあるため、試し

練りを行い、適切な配合を定めることが必要である。

5) ブリーディング

溶融スラグ細骨材の混合率とブリーディング量の関係を図8⁶⁾⁷⁾に示す。溶融スラグ細骨材の種類や表面処理等の影響によりブリーディング量は相違する。川砂を細骨材としたコンクリートよりも溶融スラグ細骨材を混合したコンクリートのブリーディング量は大きくなり、混合率が大きくなるとさらに増加する傾向を示す。溶融スラグ細骨材の混合率が50%程度までは、 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であり、コンクリートの性状に大きく影響しないといえる。

現実には、使用する溶融スラグコンクリートのブリーディングが実用上許容される範囲にあることが確認されれば問題ない。また、磨砕処理を施した溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、混合率が増加してもブリーディング量は増加せず、種類によっては減少する傾向を示すとの報告⁷⁾もある。溶融スラグ骨材の表面処理が有効である報告⁷⁾⁸⁾も近年あるため、今後の研究成果が待たれるところである。

(2) 硬化コンクリートの物性と留意点

1) 強度性状

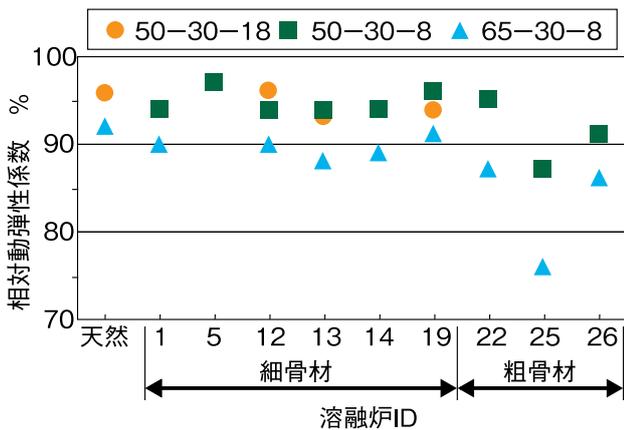


図9 溶融スラグ骨材の混合率と相対動弾性係数の関係⁴⁾

屋外に自然暴露した溶融スラグコンクリートの材齢6.5年までの圧縮強度試験結果を図4⁵⁾に示したが、その圧縮強度は長期的に増進する傾向を示している。水セメント比が50%以下であれば、溶融スラグ細骨材あるいは粗骨材を100%用いたコンクリートであっても33N/mm²以上の圧縮強度を示し、長期的に圧縮強度の増加が期待できると考えられる。ただし、溶融スラグ骨材の種類によっては、曲げ強度ならびに引張強度が著しく低いものもあり、曲げ強度が要求される製品等においては注意が必要である。

2) 耐凍害性

溶融スラグコンクリートの凍結融解試験結果を図9⁴⁾に示す。溶融スラグ骨材の混合率は30%であるが、水セメント比が大きくなると凍結融解抵抗性は低下する。また、溶融スラグ骨材の種類によっては、凍結融解抵抗性が大きく低下するものもあるため、耐凍害性が要求される地域あるいは製品においては、溶融スラグ骨材の種類及び配合により、溶融スラグコンクリートの耐凍害性を確認する必要がある。

3) 長さ変化

溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの長さ変化試験結果を図10⁴⁾に示す。溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの長さ変化率は、川砂・砕石を使用したコンクリートの長さ変化率と比べ小さい傾向を示し、長期材齢においてもその傾向は継続する結果が報告⁵⁾されており、寸法安定性に優れていると考えられる。

4) 中性化 (抵抗性)

溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの促進中性化深さ (促進期間26週) は、図11⁴⁾に示すように川砂・砕石を用いたコンクリートとほぼ同程度の結果

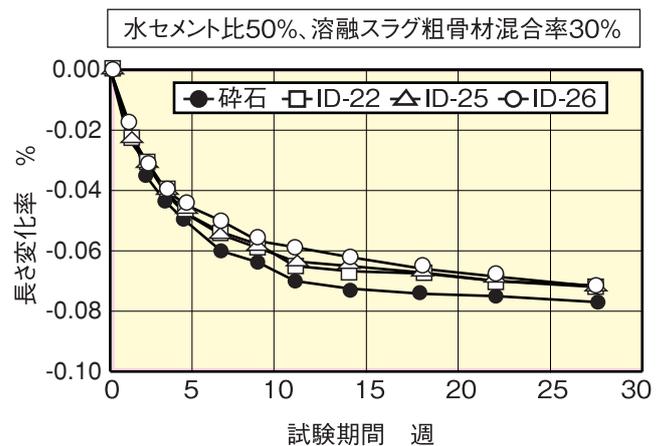
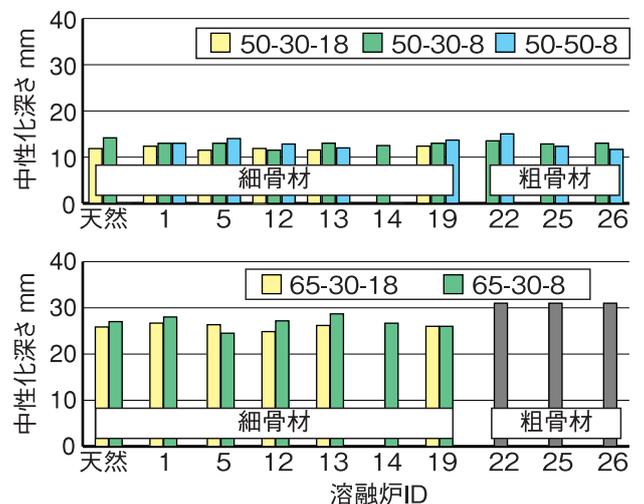


図10 溶融スラグ粗骨材の混合率と長さ変化率の関係⁴⁾



注) 記号の表示は、水セメント比-スラグ混合率-スラブを示す

図11 溶融スラグ骨材の混合率と中性化深さの関係⁴⁾

を示している。

溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの場合には、水セメント比が65%あるいは溶融スラグ混合率が50%の調合において、若干中性化が大きくなる傾向を示すことがある。そのため、中性化に対する抵抗性が要求されるコンクリート製品の場合には、事前にコンクリートの中性化深さを確認し、使用する溶融スラグ骨材ならびに用途に応じて耐久性が確保できる水セメント比を設計値とする必要がある。

5) ポップアウト

屋外暴露した溶融スラグ粗骨材コンクリート (下水汚泥に由来する溶融スラグ) において、写真3⁵⁾に示すようなポップアウト現象と思われる外観の異変が観察・報告⁵⁾されている。ポップアウトの中心部からは、カルサイト (CaCO₃) の存在が確認された⁵⁾。カルサイトは、溶融スラグ骨材中に潜在していた生石灰が消



写真3 溶融スラグ骨材を使用したコンクリートのポップアウト現象⁵⁾

石灰となり、その炭酸化により生成された可能性がある。生石灰から消石灰を生成する反応においては、その体積が2倍程度に膨張するため、ポップアウトが生じたものと推察される。

また、一般廃棄物に由来する溶融スラグ骨材においては、金属アルミニウムから生成された可能性があるベーマイト (A10(OH)) に起因すると思われるポップアウトが確認されている⁵⁾。溶融炉の形式により処理方法が異なるため、このようなポップアウトの要因となる成分がスラグ中に介在することがあり、使用する溶融スラグ骨材について、事前に確認をすることが大切である。

4. 溶融スラグコンクリート製品

JIS A 5364の改正(2004年3月)において、「溶融スラグ細骨材」のコンクリート用骨材としての適用範囲が示されたのを受け、都道府県の「リサイクル製品認定制度」等が推進され、溶融スラグ骨材を使用したプレキャストコンクリート製品が全国的に普及されるようになった。一部の自治体では、溶融スラグ骨材のコンクリート製品への有効利用に関する指針や認定基準の作成、有効利用マニュアルの整備が積極的に進められてきている²⁾。

2007年5月にJIS A 5364は、JIS A 5031との整合を図るため改正された。これにより、プレキャストコンクリート製品のJISマーク認証製品への溶融スラグ骨材の使用が、JIS Q 1012(適合性評価—日本工業規格への適合性の認証—分野別認証指針(プレキャストコンクリート製品))により可能になった。

(1) コンクリート製品の製造における留意点

溶融スラグコンクリート製品を製造する際には、製品のトレーサビリティが確認できるように記録・保管する必要がある。そのためには、溶融スラグコンクリート製品に係わる品質管理記録を、溶融スラグ骨材の生産者、使用者、使用製品の施工者、発注者が各々の責任範囲で保管することが必要である。例えば、溶融スラグ骨材の生産者は、JIS A 5031の5.試験方法に定める試験を行い、品質試験結果を保存し、溶融スラグ骨材の使用人は、コンクリート製品(JIS A 5371、5372あるいは自治体が定める仕様書等)の管理試験結果を記録し保存する。特に、安全性に関する確認記録は、永久保存が必要である²⁾。

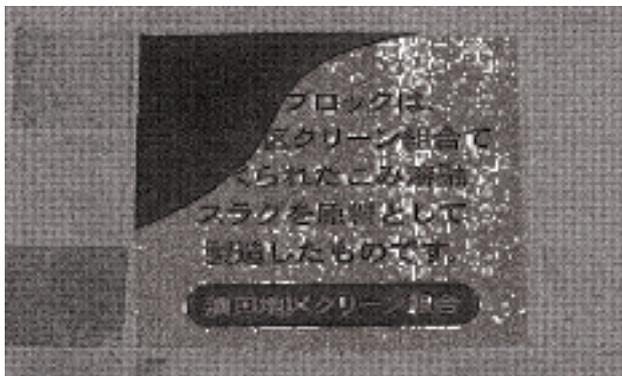
溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品を製造する上での留意点を下記に示す。

- ① 溶融スラグ骨材の受入れ確認(生産者、異物混入、粒度等)
- ② 溶融スラグ骨材の貯蔵管理(種類、粒度、生産者別)
- ③ 溶融スラグコンクリートの製造(計量精度、練混ぜ時・締固め時の分離)
- ④ 製品の養生(ブリーディング量の増加、凝結時間の遅延による前置き時間の延長)

溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品は、未だ実績が十分とはいえないため、試作品等を作製し、長期的な環境負荷に対する安全性および耐久性の確認を、適切な場所に暴露して観察することが必要である。

(2) 使用事例

溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品として製造されているものは、無筋コンクリート製品(URC製品)では、積みブロック、道路用境界ブロック、平板、L形側溝、インターロッキングブロック等である。鉄筋コンクリート製品(RC製品)では、U形側溝、RC積みブロック、暗きょ、マンホール、L形擁壁、ボックスカルバートなどがある。写真4に溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品(道路用境界ブロック)の例を示す。溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品には、リサイクル材料を使用したことがわかる表示がされている。また、溶融スラグ骨材を使用したインターロッキングブロックを施工した歩道等には、写真5に示すようなりサイクル表示のマークが表

写真4 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品の例²⁾写真5 リサイクル表示の例²⁾

示されている。

5. 今後の課題

溶融スラグ骨材及び溶融スラグコンクリートの技術的分野における課題は、有害物質の挙動の確認、長期性状の把握（暴露試験）、ポップアウトが発生するコンクリートの早期判定試験方法の確立、再利用・再々利用に関する研究などがあげられる。

また、普及に向けての政策課題としては、認証制度（JIS）の有効活用や広域型のリサイクル認定⁹⁾が推進され、国内における流通が促進されることであろう。

【参考文献】

- 1) 厚生労働省通達・生衛発第508号：一般廃棄物の溶融固化物の再生利用に関する指針（「一般廃棄物の溶融固化物の再生利用の実施の促進について」に添付），1998.3
- 2) (財) 建材試験センター：溶融スラグ骨材コンクリート利用マニュアル，コンクリート用溶融スラグ骨材の標準化の現状と展望，梗概集，2006.9.15
- 3) 建材試験センター：平成15年度経済産業省委託事業・新発電システム等調査研究「コンクリート用溶融スラグ骨材の耐久性評価の標準化調査研究」成果報告書，2004.3
- 4) 建材試験センター：平成16年度経済産業省委託事業・新発電システム等調査研究（コンクリート用溶融スラグ骨材の耐久性評価の標準化調査研究）成果報告書，2005.3
- 5) 例えば、川上勝弥、依田彰彦、横室隆、鈴木澄江：溶融スラグ骨材コンクリートの長期性状（材齢6.5年）、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），A-1，pp.1093-1094，2007.8
- 6) 鈴木澄江、中村則清、池永博威：溶融スラグ骨材を使用したコンクリートの基礎物性に関する研究（その1、フレッシュコンクリート），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），A-1，pp.15-16，2001.9
- 7) 横山拓也、堺孝司、西本祐三、錦織和紀郎：溶融方式が異なる溶融スラグのコンクリート用細骨材としての有効利用と磨砕の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.109-114，2005.6
- 8) 錦織和紀郎、堺孝司、松家武樹、藤森俊光：コンクリート用細骨材としての溶融スラグの磨砕の硬化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.69-74，2004.7
- 9) 川上勝弥、鈴木澄江、森田秀明、依田彰彦：溶融スラグ骨材コンクリートの普及に向けて—諸性状と性能、長期試験結果より—，セメント・コンクリート，No.730，Dec.2007，pp.21-31