報告　溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート製品の安全性と暴露試験について

岡崎　一寛*1・山岡　紘*2・荻須　雅夫*3・三浦　晃稔*4

要旨：平成 12 年から一般廃棄物溶融スラグを細骨材の一部として利用したコンクリート製品を製造し，公共工事に使用している。使用に際し，溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートが所定のフレッシュ性状，強度，耐久性を確保していること，重金属の溶出試験を実施して新たな汚染源にならないことを確認している。今回，新たに実環境における状態を考慮した重金属溶出試験と暴露供試体から採取したコアに対してアルカリ骨材反応による残存膨張性試験を実施した。その結果，すべてのケースにおいて重金属の溶出はごくわずかであり，またアルカリ骨材反応性についても極めて低いことが明らかとなったので報告する。

キーワード：溶融スラグ細骨材，自己充填コンクリート，重金属の溶出，アルカリ骨材反応

1.　はじめに

ダイオキシン類対策特別措置法により，予算化された一般廃棄物溶融固化施設が全国各地で建設されている。そこから排出される溶融固化物（以下溶融スラグと称す）は従来多くを最終処分していた焼却灰に比べ，有効利用しやすいとは言え，利用先の確保，流通や品質保証などの問題も多く残されている。岐阜県では平成 12 年から公共工事で溶融スラグを使用したコンクリート製品（道路用側溝，L 型擁壁，ボックスカルバート等）の使用を始めており，12 年度には排出された約 3,000t の溶融スラグの内，約 1,000t を有効利用することができた。その理由を以下に述べる。

(1)　価格とリサイクルとのバランス

これらコンクリート製品製造工場は，溶融固化施設の近くに位置しており，材料コストが天然骨材に比べ安価となる傾向にある。反面で管理費の増加する部分もあるため，このような製品の価格は天然骨材使用品と同程度で販売されている。しかし，これらリサイクル製品への発注者の理解度も高く，積極的に使用されている。

(2)　溶融スラグ細骨材を使用したコンクリート製品の品質

溶融スラグをコンクリート用細骨材として使用したコンクリート製品（以下溶融スラグ細骨材使用コンクリート製品と称す）は所定の強度，耐久性を確保し，天然骨材使用品とほぼ同等の性能を有している[1),2)]。しかし，基準等が存在しないため，各社での設定が必要となる。弊社における管理基準値を**表－1**に示す。

以上より岐阜県では溶融スラグの有効利用が比較的進んでおり，今後もその傾向は続く見通しである。しかし，溶融スラグの 2 次製品としての安全性の評価は最重要項目であるが，既存の文献でも触れられたのはわずか[3)]であり，筆者らも評価方法として溶融スラグに対して行う環境庁告示第 46 号（以下環告 46 号と称す）による方法を溶融スラグ細骨材使用コンクリート製品に流用しているにすぎない[2)]。また，溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの耐久性やアルカリ骨材反応性等データが不足している

*1 昭和コンクリート工業(株)　製造部生産管理課　(正会員)
*2 昭和コンクリート工業(株)　製造本部長
*3 昭和コンクリート工業(株)　製造部長　(正会員)
*4 昭和コンクリート工業(株)　岐阜支店　八百津工場　工場長

表－１　溶融スラグ細骨材使用コンクリート製品の社内基準

項　目	試験方法	基準値
圧縮強度	JIS A 1108	設計基準強度以上
曲げ強さ試験	設計曲げモーメントや断面の抵抗曲げモーメントと等価な試験荷重を載荷する	設計荷重においてひび割れのないこと
溶融スラグ細骨材の均一性	製品を切断し，5cm×5cm 程度の複数の視野を設定し，確認できる溶融スラグ細骨材の数を数える	視野間で溶融スラグ細骨材の数が 1.5 倍以下のばらつきであること
長さ変化試験	JIS A 1129	天然骨材のみを使用した設計基準強度が同程度のコンクリートとほぼ同等であること
凍結融解試験	JIS A 6204 付属書 2	
中性化試験	日本建築学会基準，高耐久鉄筋コンクリート造設計施工指針のコンクリートの促進中性化試験方法案	

事も懸念されるところである。そこで，本報告では溶融スラグ細骨材使用コンクリート製品の安全性評価として環告 46 号をベースに溶出溶媒の初期 pH を変化させた溶出試験を実施した。同時に平成 11 年 6 月に試作した L 型擁壁からコアを採取し，アルカリ骨材反応による残存膨張性試験を実施したので報告する。

写真－１　溶融スラグ細骨材を使用したボックスカルバート

2.　重金属の溶出

2.1　背景

平成 10 年に旧厚生省は再生利用を行う一般廃棄物溶融スラグに対して表－２に示すとおり，対象とする金属，目標とする溶出基準ならびに試験方法を定めている[4)]。この方法は重金属が含まれるとされる試料と溶媒（純水に塩酸を加え pH5.8～6.3 としたもの）から試料液を調整するが，貴田によると試料自体から溶出する主成分元素によって溶出時の pH が決定されるため，溶出液の pH を考慮して溶出量を評価しなければならない[3)]としている。よって溶融スラグ細骨材をコンクリート製品に使用する場合，細孔溶液の強いアルカリ性や酸性雨による影響等から，より現実に近い pH 条件を考慮する必要がある。また，環告 46 号では 2mm 以下の粒状物質からの溶出量を測定することとしており，溶融スラグ細骨材を保管する場合等であればそのような評価が適当であるが，コンクリート製品となった場合にも適当であるかには検討の余地がある。

このように溶融スラグ細骨材使用コンクリート製品の安全性評価とも言うべく重金属の溶出試験の方法は，未だ確立していないのが現状である。今後さらに溶融スラグの有効利用が必要になることと予想されるが，ごみを原料とする故，新たな汚染源となることが懸念され，その有効利用が進まないことが考えられる。そのため早期の安全性評価手法の確立が必要であると考える。

表－２　溶融スラグの目標基準

項目	溶出基準
カドミウム	0.01mg/リットル以下
鉛	0.01mg/リットル以下
六価クロム	0.05mg/リットル以下
砒素	0.01mg/リットル以下
総水銀	0.0005mg/リットル以下
セレン	0.01mg/リットル以下

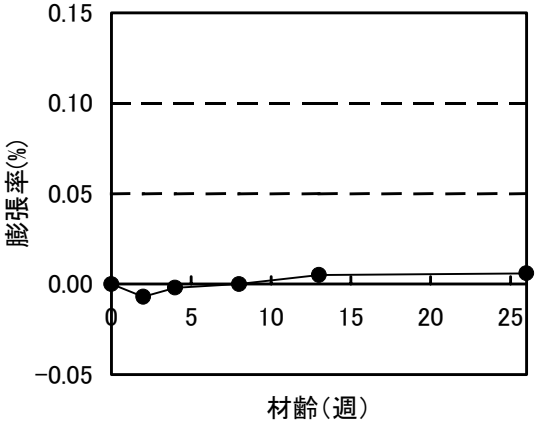
2.2　試験方法

(1)　使用材料

試験に用いた材料を**表－３**に示す。溶融スラグ細骨材に関し当初，ロット間の品質のばらつきが懸案された。フレッシュコンクリートの性状に最も影響を与える粗粒率において 0.2 程度の変動が確認されているが，特に目立った問題は起こっていない。また，溶融スラグ細骨材は回収水による水砕処理が行われるため，塩素イオンが多く付着しており[5]，コンクリート製品工場の骨材ヤードで水洗い処理を実施している。また、溶融スラグ細骨材のアルカリ骨材反応性は JIS A 5308 の付属書 8 モルタルバー法に準じて試験を実施しており，**図－１**に示すようにモルタルバーの膨張量は浸せき材齢13週で0.05%以下，26 週でも 0.10%以下であることから無害であると判断される。

表－３　使用材料

項　　目	仕　　様
セメント	普通ポルトランドセメント
高炉スラグ微粉末	粉末度 4,000cm^2/g
細骨材	川砂, 表乾密度 2.57, 粗粒率 2.85
粗骨材	川砂利，表乾密度 2.62，最大寸法 15mm
溶融スラグ細骨材	プラズマ式灰溶融炉，水砕，無処理品，表乾密度 2.82，吸水率 0.56，粗粒率 3.30,
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤



図－１　モルタルバー法試験結果

(2)　配合

試験に用いたコンクリートの配合を**表－４**に示す。本コンクリートは自己充填コンクリートであり，材齢 14 日で 60N/mm^2 以上の圧縮強度が発現する。このため溶融スラグ細骨材の使用に起因するコンクリートの強度低下に対し，セメント量を増加するなどの必要がないことから，コスト面で振動締め固めを必要とする一般的なコンクリートに対して優位性を見出している。また天然骨材に比べ若干密度が大きく，強度的に懸念される溶融スラグ細骨材をコンクリート中に均一に分散するには無振動打設の方が有利であり，過度な振動による溶融スラグ細骨材の偏在はコンクリート製品の部分的な強度低下を引き起こす危険性があると考えている。最後に本コンクリートはブリーディングがほとんど発生しないため，溶融スラグ細骨材にごくわずかに含まれる重金属類の周囲をセメント水和物で包む効果も期待できると考えている。

表－４　配合

配合種別	水粉体比(%)	単位量(kg/m^3)			
		高炉スラグ	溶融スラグ細骨材	細骨材	混和剤
天然骨材のみ	33.4	164	0	854	8.12
溶融スラグ使用	31.7	192	282	571	7.73

水：175 kg/m^3，セメント：360 kg/m^3，粗骨材：804kg/m^3

(3)　試験方法

溶出試験は一般に行われている環告 46 号をベースとし，溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートを 2mm 以下の粒に破砕した後，6 時間連続振とうして作成した検液に対し，溶出試験を実施した。対象とした重金属は**表－２**に示す 6 項目とし，試験条件は**表－５**に示すように初期 pH と酸性においては酸の種類を変化させることとした。溶媒の pH を維持しないこととしたのは 2mm 以下のコンクリート粒を酸で溶かすこと自体が現実的でないと考えたからである。

また，酸の種類を変化させることで，各種金属の溶解度の影響が考慮できる[3)]とされる。

表－５　試験条件

初期 pH	溶媒の種類			
	H_2CO_3	H_2SO_4	HCl	NaOH
2		○	○	
4	○	○	○	
5.8～6.3			○	
10				○
13				○

2.3　試験結果と考察

溶出試験の結果，カドミウム，砒素，総水銀，セレンはすべてのケースで溶出量が基準値の10分の1以下であったため省略する。一方，鉛と六価クロムの試験結果を**表－６**，**表－７**に示す。鉛，六価クロムは溶融スラグ細骨材の使用に関わらず，ともにアルカリ性側において溶出量が微増する傾向が確認された。前述の貴田の報告では溶融スラグは弱アルカリ性を示す場合が多く，鉛の溶出量は pH9~10 を極小とし，酸性側でもアルカリ性側でも多くなるパターンを示すとあり，これは2次製品についても同様である[3)]とされている。本報告と同じ溶融スラグを使用した岡らもアベイラビィティ試験の結果，酸性側で鉛が溶出しやすいことを報告[5)]している。本結果からは，鉛の溶出に関してアルカリ性側での傾向は貴田の結果に一致しており，六価クロムにも同様な傾向が確認された。また，酸性側については，セメント等の他材料からの成分や溶融スラグ細骨材に含まれるその他の成分の溶出により，最終 pH が強いアルカリ性に移行しているため，溶出量の評価は難しいが，天然骨材のみを使用した場合と試験結果がほぼ同等であり，厚生省の目標基準も満足していることから，一応の安全性の評価はできたものと考えられる。一方，酸の種類による影響については，その差が微量であることを考慮すると，特に認められないと判断される。

表－６　試験結果（鉛）単位(mg/L)

溶出条件	天然骨材のみ	溶融スラグ細骨材使用	最終 pH
H_2SO_4 pH2	0.001 未満	0.001 未満	12.5
HCl　pH2	0.001 未満	0.001 未満	12.8
H_2SO_4 pH4	0.001	0.001 未満	
HCl　pH4	0.001 未満	0.001 未満	13.0
H_2CO_3 pH4	0.001 未満	0.001 未満	12.0
pH5.8~6.3	0.001 未満	0.001 未満	
NaOH pH10	0.002	0.002	12.3
NaOH pH13	0.004	0.003	12.7
基準値	(0.01)	(0.01)	

表－７　試験結果（六価クロム）単位(mg/L)

溶出条件	天然骨材のみ	溶融スラグ細骨材使用	最終 pH
H_2SO_4 pH2	0.005 未満	0.005 未満	12.5
HCl　pH2	0.005 未満	0.005 未満	12.8
H_2SO_4 pH4	0.014	0.005 未満	
HCl　pH4	0.005 未満	0.005 未満	13.0
H_2CO_3 pH4	0.007	0.005 未満	12.0
pH5.8~6.3	0.006	0.005 未満	
NaOH pH10	0.007	0.005 未満	12.3
NaOH pH13	0.010	0.009	12.7
基準値	(0.05)	(0.05)	

3.　溶融スラグのアルカリ骨材反応性

3.1　背景

溶融スラグは焼却されるごみの種類や補助燃料といった原料の時点での違いや溶融炉の形式等各種条件によって施設間で異なるため，その化学成分や物理的性質が異なる傾向にある。本報告で取り上げるアルカリ骨材反応性についても当然個別の判定が必要であり，既に反応性の有無は JIS A 5308 の付属書7及び8により判定すること[6)]等が提案されている。このような試験の結果，モルタルバー法による結果は「無害」となっても，化学法の結果「無害でない」評価となった溶融スラグの存在が報告[7)]されており，アルカリ骨材反応性が潜在的にも起こりえないとは断定できない。また溶融スラグがコンクリートに適用された歴史もごく浅く，社会的にまだ認知されていない現状ではそれ以上の更なる検討が必要であると考えられる。

3.2　試験方法

(1)　コア供試体

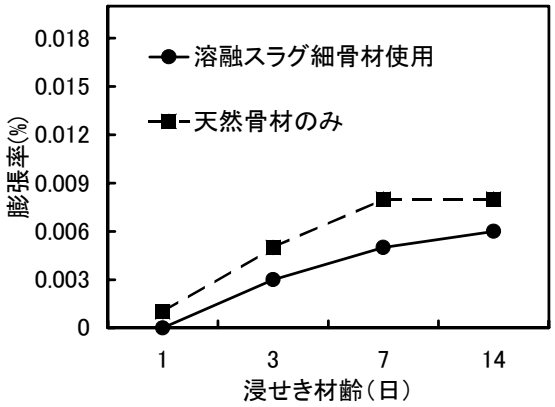
平成 11 年 6 月に試作し, 工場内のストックヤードで暴露中（試験時材齢 2 年 5 ヶ月）の溶融スラグ細骨材を使用した L 型擁壁から直径 5cm, 長さ 15cm のコアを採取した。暴露供試体に用いた材料とコンクリートの配合については前述と同じであり，天然骨材のみの配合と溶融スラグ細骨材を使用した 2 配合とした。

(2)　試験方法

前述のコアを用いて，カナダ規格 CSA A23.2-25A に準じ，80℃，1 規定 NaOH 溶液に浸せきし，コアの膨張量を測定した。本方法はコアにアルカリを外部から常に供給し反応を促進するため，短期間の試験により残存膨張性が評価できる利点があり，遅延型の膨張を示す骨材に対して有効であると言われている。

3.3　試験結果および考察

試験結果を**図－２**に示す。浸せき材齢 14 日で溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートのコアの膨張率は 0.006%であり，CSA の判定基準である「有害」とされる 0.15%以上の膨張率を大きく下回った。他の基準である ASTM1260 の判定基準からも「ほとんどの場合無害である」と判定された。また，天然骨材のみを使用したコアの膨張率についても材齢 14 日で 0.008%とごくわずかな値であり，両者の比較からも溶融スラグ細骨材を使用したことによるアルカリ骨材反応性への影響はほとんどないものと考えられる。



図－２　残存膨張性試験結果

4.　その他の項目

4.1　圧縮強度

(1)　背景

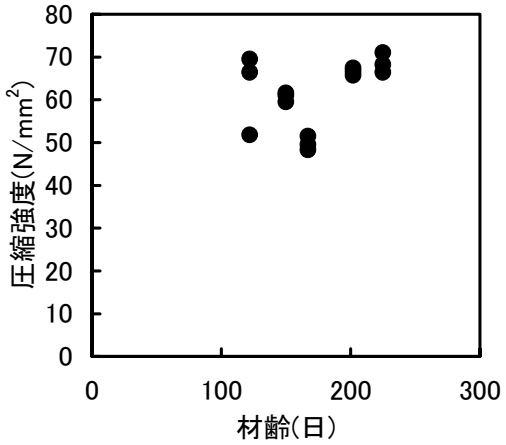
コンクリート製品の強度管理は材齢 28 日以前で行われるのが一般的であるが，溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの長期の強度発現性はよく分かっておらず，確認する必要があると考えた。

(2)　供試体

試験に用いた供試体は自然暴露中の 10cm×10cm×40cm の角柱供試体から採取した直径 5cm，高さ 10cm の円柱のコアを用いた。

(3)　試験結果及び考察

28 日を超えた材齢における圧縮強度の試験結果を**図－３**に示す。図より試験値にばらつきが認められるが，これはコアの支圧面の研磨処理を行っていないことやコア採取時にダメージを受けたこと等が原因として考えられる。しかし天然骨材のみを使用した自己充填コンクリートの強度発現が材齢 14 日で 60N/mm^2 程度であるため，本試験結果についても特に問題はないと考える。



図－３　圧縮強度試験結果

4.2　現場納入製品等の追跡調査

平成 12 年に公共事業に使用されたコンクリート製品について現地での追跡調査を行いつつある。調査項目は以下の項目であり，現在のところ特に異常は確認されていない。

・現地の状況（日照，水との接触の有無）

・外観（ひび割れ・表面の劣化などの異常がないか，溶融スラグ細骨材の使用を示すマーキングが消えていないか）

一方，コンクリート製品工場内ストックヤードにある暴露供試体に対して，定期的に鉄筋をはつりだしてその腐食や経年的な溶出試験の実施等，異常がないことを確認している。

以上のような追跡調査と促進条件による耐久性試験の結果と併せることで，溶融スラグのコンクリート用細骨材としての現時点での評価ができるものと考えている。

5. まとめ

特定の溶融スラグ細骨材を自己充填コンクリートに使用した本報告から得られた結論をまとめると以下のようである。

(1) 溶融スラグ細骨材使用の有無に関わらず，溶出溶媒の pH と重金属の溶出量は，ほぼ同様の関係が確認された。

(2) 溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートからの重金属の溶出量は広い pH の範囲においても厚生省の目標基準を満足し，実際の環境条件下での安全性が確認された。

(3) 溶融スラグ細骨材を使用したことによるアルカリ骨材反応性への影響はほとんどないと考えられる。

平成13年12月末の時点で13年度の溶融スラグの有効利用量は弊社だけで約 1,100t であり，他社や路盤材・アスファルト合材への有効利用量まで含めると，発生する溶融スラグのほぼ全量が有効利用された結果となっている。しかし，現在建設中の幾つかの溶融固化施設が稼動を始め，溶融スラグの排出量が増加すれば，供給過剰の状態になり，最終処分する必要が生じると予想される。本報告で取り上げた溶融スラグ細骨材は磨砕処理や粒度調整等の処理をしていない無処理品ながら，コンクリートへの使用に関して各種性状を損なわない範囲で使用が可能であるため，排出事業者側にそのようなコスト負担がかからないメリットがある。今後排出される溶融スラグについては，それぞれの地域条件で異なるが，有効利用する側の視点に立って，溶融スラグの品質を考えなければ容易には有効利用が進まないと考えられる。また，水素ガスの発生による膨張，エントラップトエアー，溶融スラグの分散性，長期における品質の問題など，溶融スラグをコンクリートへ利用する際に注意すべき項目等も多く存在しており，今後の課題である。

参考文献

1) 山瀬一博，山岡紘，森本博昭，島崎磐：一般廃棄物溶融スラグを用いた高流動コンクリートの特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp325-330，2001.6

2) 山岡紘，荻須雅夫，岡崎一寛，山瀬一博：コンクリート製品へのゴミ溶融スラグの利用とその安全性について，第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 1，pp539-541，2001.10

3) 貴田晶子：一般廃棄物スラグとエコセメントの安全性評価，焼却灰の適正処理と有効利用における安全性セミナー，2000.4

4) 厚生省生活衛生局水道環境部長：生衛発 508 号、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，1998.3

5) 岡正人，形見武男，安田裕，渡辺祐二，青山光治，後藤益宏，渡邊光雄：溶融スラグの土木資材利用時の環境影響評価，第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 1，pp561-563，2001.10

6) コンクリートへのリサイクル資材活用技術の標準化に関する調査研究委員会：一般廃棄物と下水汚泥を起源とする溶融スラグ骨材の JCI 規格(案)および砕石粉 TR 原案の概要，コンクリート工学，Vol.39，No.12，pp59-63，2001

7) 開進一，三宅淳一，井口敬次，佐々木正太郎：廃棄物発電事業における溶融スラグの再資源化調査の報告，第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 1，pp549-551，2001.10