

研究論文

シュレッダーダスト焼却灰溶融水砕スラグの セメント混合材としての利用

Use as Cement Mixture Material of Shredder Dust Incineration Ash Melting Granulated Slag

柿本 幸司*・山崎 竹博**・清水 恵助**・出光 隆**・中野 靖子***
Kohji Kakimoto Takehiro Yamasaki Keisuke Shimizu Takashi Idemitsu Yasuko Nakano

(原稿受付日2001年1月29日, 受理日2001年8月3日)

Abstract

Shredder dust is a residue from valuable ferrous metals found in auto-scrap and old electrical applications, and is an industrial wasteproduct which must be disposed of in regulated landfills.

Because it cost expenditure, it was examined to use it as a mixture material of cement to use this effectively though the method for the disposal of the shredder dust included melted method.

When having crushed to use it first of all as a mixture material of cement, a slaggy powder of 75 μ m or less was obtained because a metallic particle was removed by sifting out by the existence of metallic grain because making to a minute powder was difficult and it crushed again. When this was usually mixed with the Portland cement, and the mortar examination was executed, strength that there is no inferiority in strength cement original even when 30% was mixed was shown in long-term strength.

1. はじめに

現在, 産業廃棄物の発生は多岐にわたり, 処理困難な物質が多量に排出され, 廃棄・処理は困難を極め大きな社会問題となっている。現代社会の必需品である自動車や家電製品も, 耐用期間を過ぎれば厄介なゴミとして廃棄される。これらは回収・処理業者のもとで解体後, 部品等として再利用可能なものは回収される。しかし, 最終的に残る大部分のものはシュレッダーダストとして, 現段階では何処かに廃棄せざるを得ない¹⁻⁵⁾。シュレッダーダストとは, 廃自動車等をシュレッダーで破碎し鉄・非鉄金属等の有価物を回収する際に風力分別される不要物の呼称で, プラスチックの他, ゴム, ガラス, 繊維くず等から成る混合廃棄物である。

シュレッダーダストは過去においては安定型処分をされてきた。しかし, 表1^{4,6)}に示す溶出試験結果から明らかのように, シュレッダーダストから水銀や鉛などの有害物が漏洩する可能性があるとして⁷⁻¹⁰⁾, 1994年9月26日に廃掃法(廃棄物の処理及び清掃に関する法律)が改正¹¹⁾され, 一部, 自動車の窓ガラス, バンパー, タイヤ等は引き続き安定型処分が認められたものの, それら以外のものは1996年4月以降管理型処分をすることが義務づけられるに至っ

表1 シュレッダーダストの溶出試験結果例^{4),6)}

試験例 溶出成分	例 1		例 2	
	廃自動車起源	廃家電起源	廃自動車起源	廃家電起源
水 銀	1.0~2.1	1	1.0~2.1	1
カドミウム	0.004~0.007	0.02	<0.004~0.007	0.02
鉛	0.26~1.93	0.27	0.33~0.45	0.28
六価クロム	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ヒ素	0.9~3.0	0.5	0.9~3.0	0.5
銅	0.22~0.78	0.21	0.25~0.81	0.23
pH	7.0~7.3	6.8	7.0~7.3	6.7

濃度単位: 水銀およびヒ素は μ g/ ℓ , 他はmg/ ℓ , pHは無し

た。さらに, 安定型処分可能なものについても溶出規制が厳しくなり, 安定型処分から管理型処分へ, また管理型処分から遮断型処分へと処分方法を余儀なく変更せざるを得ないシュレッダーダストが増加してきている。そのため, 処分場自体が不足している上に, 現在の社会情勢を考慮すると, 新たな処分のための十分な場所を確保することはかなりの困難を伴う。

これらを解決する方策として, 有害物の溶出防止と同時に減量化という観点から, 多くの研究がなされてきているが, 薬品による有害物の溶出防止や, 減量のための焼却は経費の割には根本的な解決に至らず, また焼却処理ではダイオキシンの発生など新たな問題を引き起こしている。そのため非常に有用な方法として焼却灰の溶融処理が考案され実際に稼働しているが, 経費が多大にかかるという欠点がある。安全な処理のために費用がかかることは致し方な

*九州工業大学工学部物質工学科助手

** 〃 〃 建設社会工学科教授

*** 〃 〃 大学院工学研究科博士後期課程

〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1

第19回研究発表会(2000年6月15日~16日)及び第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(2001年1月25日~26日)にて発表

表2 各種スラグの化学分析値

分析項目 試料	分 析 成 分 (%)									
	Ig-loss	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO	CuO
水 碎 ス ラ グ	—	32.82	19.40	16.31	7.01	3.41	2.49	0.19	3.72	10.61
低粉末度水碎スラグ	+	37.15	18.83	19.06	7.96	3.96	2.90	0.21	2.94	2.30
高粉末度水碎スラグ	+	37.52	18.65	19.20	7.90	3.76	2.88	0.20	2.99	2.18
高 炉 ス ラ グ	0.34	33.30	0.41	41.90	14.10	6.30	0.21	0.33	—	—

分析成分 (%)										全アルカリ (R ₂ O) (%)	水砕 スラグ 塩基度
TiO ₂	PbO	BaO	P ₂ O ₅	MnO	SnO ₂	Cr ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	S	Cl		
1.78	1.40	0.28	—	0.28	0.08	0.12	—	—	—	2.62	0.81
1.97	1.15	0.32	0.30	0.30	0.09	0.13	0.10	0.23	< 0.01	3.04	0.83
1.90	1.13	0.36	0.28	0.31	0.08	0.13	0.08	0.25	< 0.01	3.01	0.87
0.98	—	—	0.02	0.33	—	—	—	0.88	0.0003	0.42	1.86

—：試験せず +：重量増加

 $R_2O = Na_2O + 0.658 K_2O$ 塩基度 = $(CaO + MgO + Al_2O_3) / SiO_2$

いとしても、シュレッダーダスト焼却灰溶融物を、そのまま廃棄するのは無駄であり、何らかの有効利用を考える必要がある。

過去の歴史において、製鋼の際に発生する高炉スラグに見られるように、スラグに水砕化や粉碎・分級などの処理を行い、セメントの混和材として有効利用されている例もあり、化学的組成と反応性、強度組成との関連の研究も多くある¹²⁻¹⁵⁾。

今回検討したシュレッダーダストも同様で、焼却溶融後、水処理することによりガラス状の水砕スラグとなっており、他のスラグ類とも類似した化学成分から成るため、セメントに混和できるのではないかと考えた。そこで著者らは有効利用の一方法として、このシュレッダーダスト焼却灰溶融処理物の水砕スラグを、セメントの混合材として有効利用するための検討を行った。

2. 使用原料および試料の調製方法

2.1 シュレッダーダスト水砕スラグ

K県U市のシュレッダー処理業者に設置されたT社製の溶融炉（公称処理温度1,650℃）より発生したシュレッダーダスト水砕スラグを原材料として用いた。同社は、廃自動車や廃家電品等をシュレッダーによって破碎し有価物を回収した後のシュレッダーダストを直接溶融炉によって焼却・溶融処理後、水中に投入することで水砕スラグとしている。また、溶融炉より発生するEP灰（電気集塵灰）も再度溶融炉に戻され再処理されている。

今回の実験に供した使用原料となる水砕スラグの化学成分を表2に示す。

含有量の多い順にSiO₂ (32.82%)、Fe₂O₃ (19.40%)、CaO (16.31%)、CuO (10.61%)、Al₂O₃ (7.01%) であった。

2.2 低粉末度および高粉末度水砕スラグの製造

水砕スラグを、回転式ボールミルを用いて1時間粉碎した。この粉碎したスラグ粉をふるい分けし、150 μmのふるい目を通したものを“低粉末度水砕スラグ”とする。

150 μm以上のものには目視によって球状の金属粒（図1）が多く確認され、この金属粒を別途湿式法により成分の検討を行ったところ、銅を約93.2%、鉄を約3.7%含有していた。これは廃自動車や廃家電品に主として電気配線用電線として用いられたハーネス部分の一部の銅が焼却前の処理において分別されず、水砕スラグ中に残存したものと考えられる。

さらに低粉末度水砕スラグを再度回転式ボールミルを用いて12時間粉碎した。この再粉碎したスラグ粉をふるい分けし、75 μmのふるい目を通したものを“高粉末度水砕スラグ”とする。

2.3 低粉末度および高粉末度水砕スラグの成分分析、鉱物種の特定制および溶出試験

低粉末度水砕スラグおよび高粉末度水砕スラグについて

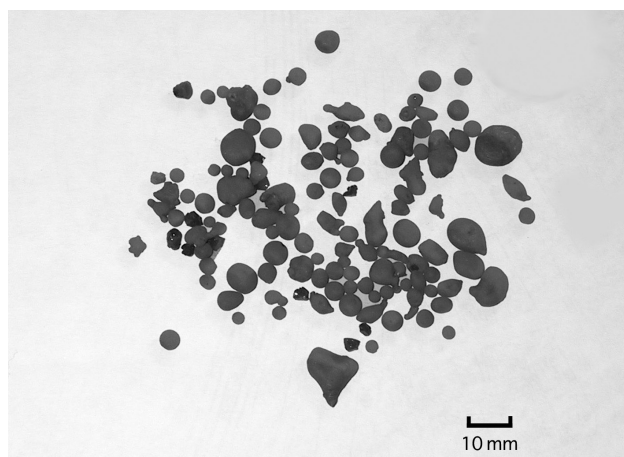


図1 水砕スラグ中の金属粒

て、JIS R 5202（ポルトランドセメントの化学分析法）およびK 0102（工場排水試験方法）を準用して湿式法で成分分析をし、さらに環境庁告示方法13号（産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法:昭和48年2月17日）にしたがって溶出試験を行った。また低粉末度水砕スラグについては、スラグを構成する鉱物種を特定するために粉末X線回折分析を実施した。

2.4 低粉末度水砕スラグおよび高粉末度水砕スラグの密度および粉末度の測定

JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて、低粉末度水砕スラグおよび高粉末度水砕スラグの密度をルシャテリエ法により測定した。また両試料について粉末度（ブレン値）を測定した。

3. 凝結・モルタル試験方法

普通ポルトランドセメントに低粉末度水砕スラグおよび高粉末度水砕スラグを置換材料として混合し、モルタル試験を実施した。スラグ置換率は結合材質量に対して内割で低粉末度水砕スラグについては1, 5, 10, 50%とした。また高粉末度水砕スラグでは、スラグ置換率を1, 5, 10, 20, 30, 50%とした。まず、JIS R 5201附属書1（セメントの試験方法－凝結と安定性の測定）にしたがい、セメントペーストについて標準軟度水量および凝結時間を測定した。次いで、JIS R 5201附属書2（セメントの試験方法－強さの測定）にしたがい、結合材料450g、水量225ml、標準砂量1,350gでモルタルを練り、40mm×40mm×160mmの角柱供試体を作製して曲げ・圧縮強度を求めた。

併せて、セメントモルタルについて、フロー試験を行い、安定性試験はパット法を用いて行った。また、環境庁告示方法（13号ロ）に準じ溶出試験を各材齢におけるモルタル供試体についても実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 低粉末度水砕スラグの成分分析、鉱物種の特定

成分分析結果を表2に示す。表には、セメントの混和材として使用されている高炉スラグ水砕の分析結果も併示した¹³⁾。

水砕スラグとその微粉末には、本来、成分の差はないはずであるが、同表によるとCuOやZnOに差が見られる。この原因は、前記したように、低粉末度水砕スラグを製造する際、それらを多量に含む150μm以上の粒子を除いたためである。

成分では、酸化物換算でSiO₂が最も多く、ついでCaO、Fe₂O₃の順となっている。これを、高炉スラグと比較すると、SiO₂はほぼ変わらないのに対し、CaOは約1/2程度しか含まれておらず、反応性の指標である塩基度は小さく、高炉スラグ水砕のような高い水硬性は期待できないようである。また、全アルカリ量が高炉スラグ水砕の7倍程度の値を示しており、アルカリ骨材反応の可能性がある骨材と併用する場合には注意を要する。注目されるのは、高炉スラグにほとんど含まれていないFe₂O₃が非常に多量に含まれていることである。このことが、鉄筋の発錆に何らかの影響を及ぼすのではないかと考えられるため、今後この点については検討する予定である。

各成分を構成する鉱物種を特定するため実施した粉末X線回折分析結果を図2に示す。急冷スラグの特徴であるガラスの形態を示すチャートは得られているが、この結果から構成鉱物種を同定するまでには至らなかった。

4.2 スラグ粉末の溶出試験結果

4.2.1 低粉末度水砕スラグの溶出試験結果

環境庁告示方法にしたがって溶出試験を行った結果、銅、六価クロム、カドミウム、鉛、亜鉛、マンガン、ヒ素、水

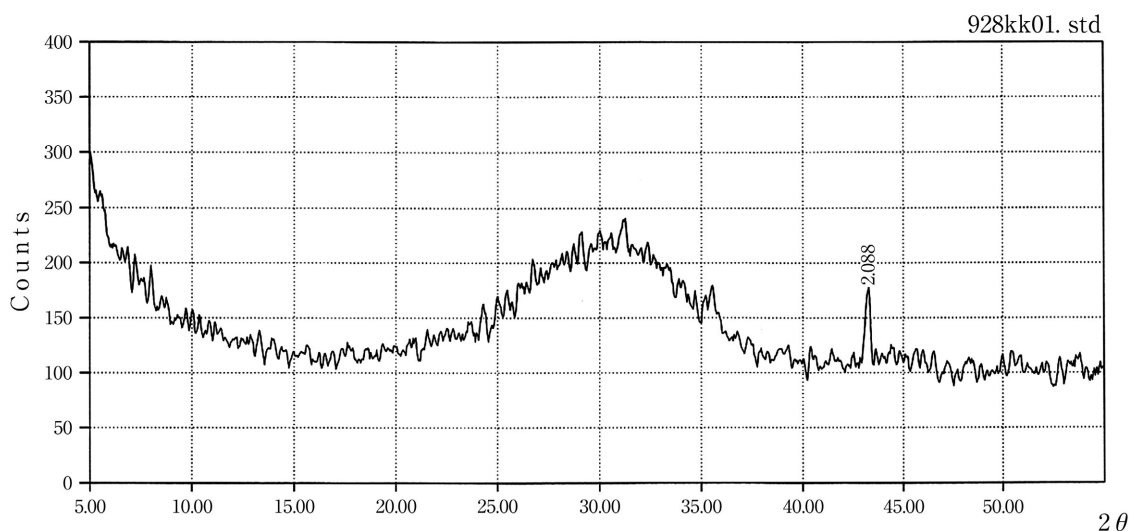


図2 低粉末度水砕スラグ粉末X線回折図

銀はいずれも不検出であり、溶出液のpHは11.7であった。またセメントに対して影響を及ぼすと考えられるフッ素が0.1mg/ℓ、アルミニウムが15mg/ℓ、リンは不検出であり、この程度の量であればセメントの混合材として使用しても問題はないものと考えられる。

4.2.2 高粉末度水砕スラグの溶出試験結果

再粉碎による粒子の微粒化に起因する有害重金属類の溶出を懸念して、再度環境庁告示方法にしたがって溶出試験を行ったところ、重金属類はいずれも低粉末度水砕スラグ同様不検出であり、溶出液のpHは11.5であった。アルミニウムが14mg/ℓの濃度で溶出しているが、リンおよびフッ素は不検出であり、低粉末度水砕スラグ同様セメントの混合材として使用しても問題はないものと考えられる。

4.3 低粉末度水砕スラグおよび高粉末度水砕スラグの密度および粉末度の測定結果

ルシャテリエ法によって測定した密度は両試料とも3.15g/ℓであった。これは使用した普通ポルトランドセメントと同程度の値であり、モルタル等の混合時に材料分離などの問題を生じないものであった。また粉末度については、低粉末度水砕スラグの粉末度（ブレン値）は1,680cm²/gを示し、高炉スラグセメントに使用されている高炉スラグ粉末に比して1/2弱の小さな値となった。粉碎が十分進まなかった原因は、金属粒が多く含まれていたためである。金属粒が水砕スラグに対して高強度であるため、脆性体である水砕スラグの破碎を妨げたと考えられる。したがって、これ以上の粉末度を得るには、途中で金属粒を取り除く必要がある。この目的のために、製造の際にふるい分けすることにより既に金属粒が除去されている低粉末度水砕スラグについて再粉碎を行った高粉末度水砕スラグの粉末度を測定したところ、4,120cm²/gを示し、高炉スラグセメントに使用されている高炉スラグ粉末とほぼ同程度の値となった。

4.4 凝結・モルタル試験結果

4.4.1 低粉末度および高粉末度水砕スラグ混合セメントの凝結試験およびフロー試験結果

低粉末度水砕スラグ混合セメントの凝結試験結果およびフロー試験結果を表3に示す。混合した低粉末度水砕スラグ量が増加すると、モルタルのフロー値は200mm～214mmとなり、また凝結試験の標準軟度水量は143ml（水結合材比28.6%）～127ml（水結合材比25.4%）と漸減している。これは低粉末度水砕スラグの粉末度（ブレン値）が1,680cm²/gと低いため、スラグ粒子に吸着される水量が少ないためと推察される。

また凝結時間については、基準となるポルトランドセメントの場合の凝結始発時間145分に対し、5%混合までは殆ど遅れはないが、10%で49分、50%では177分とかなり

表3 凝結試験およびフロー試験結果(低粉末度水砕スラグ)

置換率 %	凝 結 試 験			フ ロー 試 験	
	標準軟度水量 ml (%) ^{*1}	始発遅れ ^{*2} 分	終結遅れ ^{*2} 分	フロー値 mm	フロー値比 %
0	143 (28.6)	0	0	200	100
1	143 (28.6)	1	12	203	101
5	139 (28.8)	1	22	204	101
10	137 (27.4)	49	80	206	104
50	127 (25.4)	177	242	214	104

^{*1} 水結合材比

^{*2} 標準ペースト(置換率0%)の始発時間：145分
終結時間：218分

表4 凝結試験およびフロー試験結果(高粉末度水砕スラグ)

置換率 %	凝 結 試 験			フ ロー 試 験	
	標準軟度水量 ml (%) ^{*1}	始発遅れ ^{*2} 分	終結遅れ ^{*2} 分	フロー値 mm	フロー値比 %
0	142 (28.4)	0	0	201	100
1	142 (28.4)	0	6	199	99
5	141 (28.2)	8	8	204	101
10	139 (27.8)	25	31	207	103
20	136 (27.2)	55	82	211	105
30	138 (27.5)	113	139	210	104
50	131 (26.2)	205	230	211	105

^{*1} 水結合材比

^{*2} 標準ペースト(置換率0%)の始発時間：140分
終結時間：200分

の遅れを生ずる。終結時間についてはポルトランドセメントの場合が220分であるのに対し、スラグ1%混合で12分、5%混合で22分と徐々に遅れが大きくなり10%で80分、さらに50%では242分の遅れを生ずる。

高粉末度水砕スラグ混合セメントの凝結試験結果およびフロー試験結果を表4に示す。混合した高粉末度水砕スラグ量が増加すると、モルタルのフロー値は199mm～211mmとなり、また凝結試験の標準軟度水量は142ml（水結合材比28.4%）～131ml（水結合材比26.2%）と漸減している。これは高粉末度水砕スラグの粉末度（ブレン値）が4,120cm²/gと低粉末度水砕スラグの1,680cm²/gの約2.5倍となったにも拘わらず、スラグ粒子に吸着される水量は顕著には増加せず、粒子に吸着される水量が低粉末度水砕スラグと同様に少なくなり、低粉末度水砕スラグ混合セメントとさほど差を生じせしめないことを示す。

標準軟度水量とモルタルフロー値の関係を図3に示す。これによれば、高粉末度スラグの方にはばらつきが見られるものの、両者間には負の相関が見られる。相関係数は、

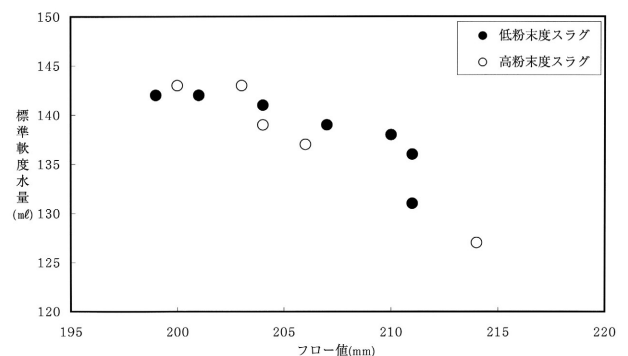


図3 フロー値と標準軟度水量の関係

低粉末度スラグで0.957, 高粉末度スラグで0.714であった。その中で, 高粉末度スラグ添加量が多くなると標準軟度水量は低下するものの, フロー値の伸びが見られなかった。これは, 微粉分の増加に伴う粘性の増大が影響しているものと思われる。

また凝結時間については, 基準となるポルトランドセメントの場合の凝結始発時間140分に対し, 5%混合までは殆ど遅れはないが, 10%で25分, 20%で55分, 30%で113分, 50%では205分とかなりの遅れを生ずる。終結時間についてはポルトランドセメントの場合が200分であるのに対し, やはり5%混合までは殆ど遅れはないものの, スラグ10%混合で31分, 20%で82分, 30%で139分, さらに50%では230分の遅れを生ずる。

4.4.2 低粉末度および高粉末度水砕スラグ混合モルタルの強度試験結果

表5, 6, 図4~7に低粉末度水砕スラグ混合モルタルの曲げ強度および圧縮強度試験結果を示す。なお図4, 6はセメントのみのモルタルの値に対する低粉末度水砕スラグ混合モルタルの曲げおよび圧縮強度比を活性度指数として百分率で表し, それらの値と材齢との関係を置換率別に示したものである。また, 図5, 7は同様に材齢別に示したものである。

曲げ強度においては, 低粉末度粉砕スラグの1, 5および10%混合では無混合時のほぼ90~100%の曲げ強度を示

表5 曲げ強度の低粉末度水砕スラグ置換率依存性

強度 置換率	材齢3日		材齢7日		材齢28日		材齢91日	
	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)
0	6.2	100	7.7	100	9.4	100	10.0	100
1	6.2	100	7.5	97.4	9.1	96.8	9.5	95.0
5	5.9	95.2	7.4	96.1	9.1	96.8	9.1	91.0
10	5.0	80.6	7.1	92.2	8.8	93.6	9.3	93.0
50	1.8	29.0	3.0	39.0	4.9	52.1	7.5	75.0

置換率：内割質量比率(%)

表6 圧縮強度の低粉末度水砕スラグ置換率依存性

強度 置換率	材齢3日		材齢7日		材齢28日		材齢91日	
	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)
0	36.3	100	51.0	100	63.5	100	68.6	100
1	35.4	97.5	49.8	97.6	63.8	100.5	66.3	96.6
5	33.4	92.0	47.1	92.4	62.0	97.6	63.8	93.0
10	30.5	84.0	44.0	86.3	57.3	90.2	61.9	90.2
50	11.0	30.3	17.5	34.3	27.0	42.5	39.3	57.3

置換率：内割質量比率(%)

しているが, 粉末スラグを50%混合した場合では3日および7日強度で30~40%程度, 28日強度で50~60%, 91日強度で75%となっている。

圧縮強度では, 混合量1%ではほぼ標準モルタルと同じ強度を示しているが, 5%混合では90~95%前後, 10%混合では85~90%を維持するのにに対し, 50%の混合量では3日強度および7日強度でそれぞれ30~35%程度を, 28日強度は40%を示し, 91日強度でおよそ60%を示した。

さらに表7, 8, 図8~11に高粉末度水砕スラグ混合モルタルの曲げ強度および圧縮強度試験結果を示す。表現方法は低粉末度水砕スラグと同様であり, 図8, 10は置換率別に, 図9, 11は材齢別に示したものである。

曲げ強度においては, 高粉末度粉砕スラグの1, 5および

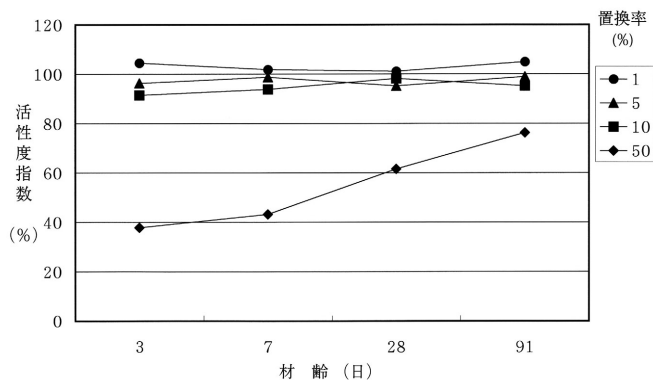


図4 曲げ強度の低粉末度水砕スラグ置換率依存性(置換率別)

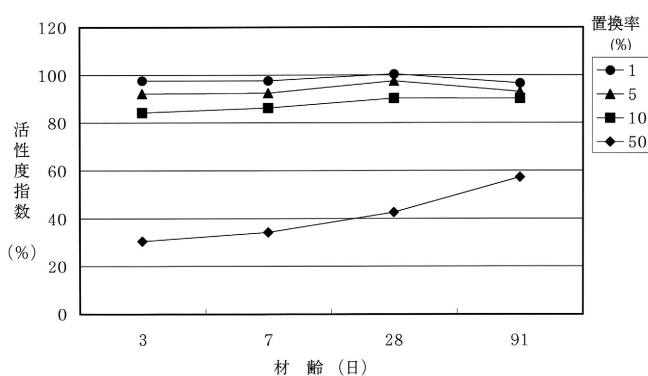


図6 圧縮強度の低粉末度水砕スラグ置換率依存性(置換率別)

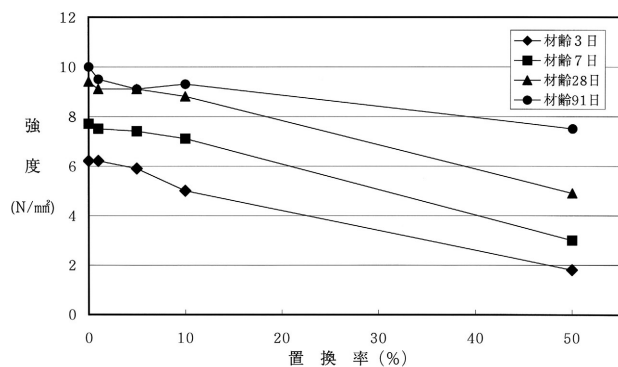


図5 曲げ強度の低粉末度水砕スラグ置換率依存性(材齢別)

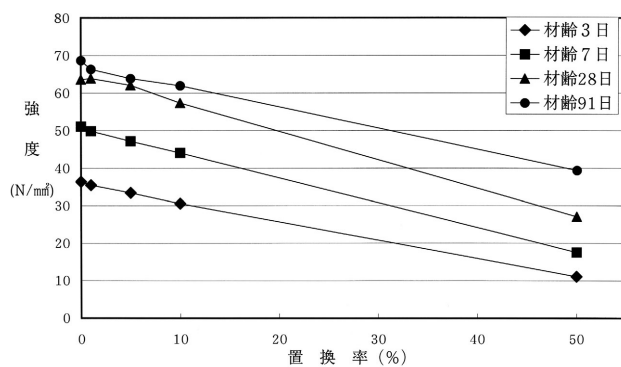


図7 圧縮強度の低粉末度水砕スラグ置換率依存性(材齢別)

表7 曲げ強度の高粉末度水砕スラグ置換率依存性

強度 置換率	材齢3日		材齢7日		材齢28日		材齢91日	
	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)
0	6.4	100	7.7	100	9.4	100	9.8	100
1	6.1	95.3	7.7	100	9.0	95.7	9.5	96.9
5	5.9	92.2	7.4	96.1	9.0	95.7	9.6	98.0
10	5.7	89.1	7.3	94.8	9.0	95.7	10.8	110.2
20	4.9	76.6	6.9	89.6	8.9	94.7	10.7	109.2
30	4.6	71.9	5.5	71.4	8.5	90.4	10.4	106.1
50	2.6	40.6	3.6	46.8	5.7	60.6	7.5	76.5

置換率：内割質量比率(%)

表8 圧縮強度の高粉末度水砕スラグ置換率依存性

強度 置換率	材齢3日		材齢7日		材齢28日		材齢91日	
	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)	N/mm ²	活性度指数(%)
0	30.6	100	46.8	100	62.0	100	66.1	100
1	29.7	97.1	45.7	97.6	60.2	97.1	68.4	103.5
5	28.4	92.8	43.5	92.9	59.6	96.1	67.7	102.4
10	27.9	91.2	42.8	91.5	58.7	94.7	66.2	100.2
20	23.8	77.8	37.8	80.8	55.6	89.7	68.9	104.2
30	19.3	63.1	30.4	65.0	51.0	82.3	65.2	98.6
50	9.5	31.0	17.2	36.8	29.5	47.6	41.5	62.8

置換率：内割質量比率(%)

び10%混合では無混合時のほぼ90～100%の曲げ強度を示しているが、20%混合では3日強度で75%、7日強度で90%、28日強度で95%と徐々に上昇し、さらに30%混合では3日および7日強度で70%とともにやや低い値を示すものの、28日強度では90%まで上昇するが、1%混合をはじめとして30%混合までは91日強度ではほぼ100%の強度を示した。しかし、高粉末度水砕スラグを50%混合した場合は3日および7日強度で40～45%と低く、28日強度で60%、91日強度でも75%程度の強度しか示さない。

圧縮強度も曲げ強度と同様な傾向を示した。混合量1%ではほぼ標準モルタルと同じ強度を示しているが、5%混

合では95%前後、10%混合でも90%以上を維持するのに対し、20%混合では3日および7日強度で80%前後、28日強度では90%、30%混合では3日および7日強度で65%前後、28日強度で80%を示したが、いずれの場合も91日強度はほぼ100%を示す。ただし、50%の混合量では3日および7日強度で35%前後を示し、28日強度は50%、91日強度も60%という低い値を示した。

比較のために高炉セメントA種（粉末度3,820cm²/g、混合率20～25%）およびB種（粉末度3,830cm²/g、混合率40～45%）について同時に検討したところ、それぞれ3、7日強度については普通ポルトランドセメント比でA、B種とも90%前後の値を示し28日、91日強度ではほぼ100%を示した。圧縮強度で検討する限り、高炉セメントA種の強度は今回検討した高粉末度水砕スラグで5～10%程度の混合比の強度に相当し、またB種では20～30%程度の混合比の強度に相当し、遜色無いものと言える。

4.4.3 低粉末度水砕スラグ混合ペーストおよび高粉末度水砕スラグ混合ペーストを用いた安定度試験結果

パット法による低粉末度水砕スラグを用いた安定性試験では、50%混合の試料において表面にわずかに微細なひび割れが観察されたが、これはセメントと低粉末度水砕スラグとの混合が不十分であったためと推測される。他のいずれの試料も割れやそり等は観察されず、安定性については問題はないと判断された。

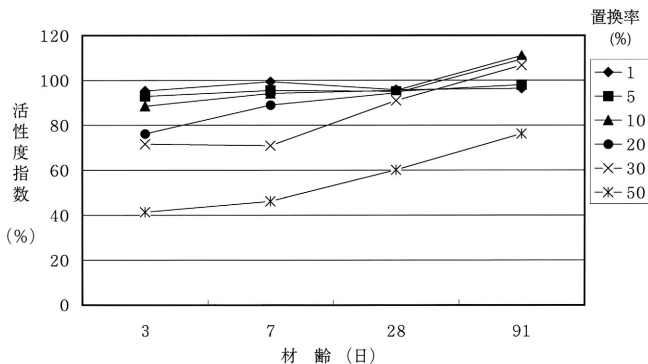


図8 曲げ強度の高粉末度水砕スラグ置換率依存性(置換率別)

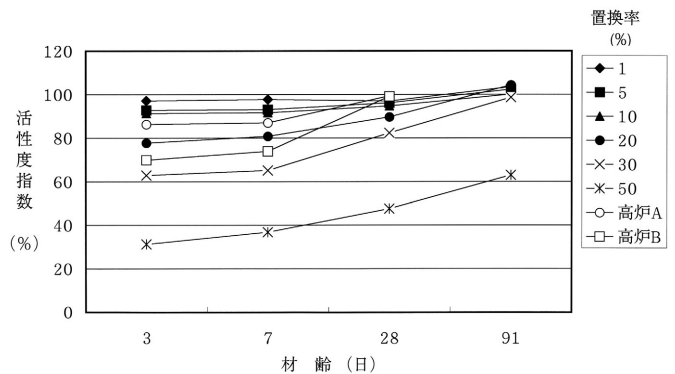


図10 圧縮強度の高粉末度水砕スラグ置換率依存性(置換率別)

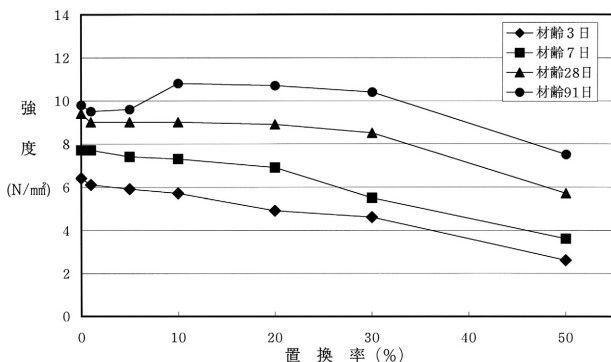


図9 曲げ強度の高粉末度水砕スラグ置換率依存性(材齢別)

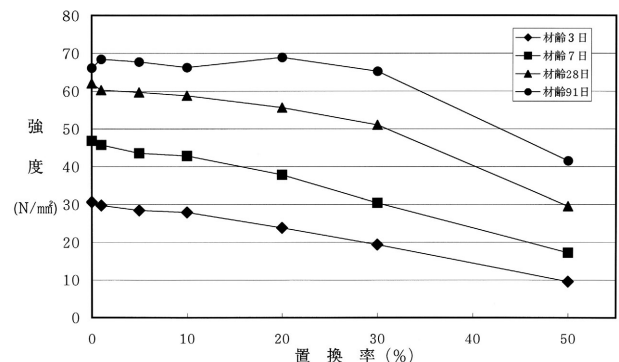


図11 圧縮強度の高粉末度水砕スラグ置換率依存性(材齢別)

一般に同一の材料であっても微粉末になると安定性は減ずるといわれているため、さらに高粉末度水砕スラグを用いて同様に試験を実施したところいずれの試料においても割れやそり等は観察されず、粉末度を上昇させた高粉末度水砕スラグを用いても安定性については問題はないと判断された。

4.5 低粉末度水砕スラグおよび高粉末度水砕スラグモルタル供試体の溶出試験結果

強度試験に使用した供試体を破砕し、環境庁告示の方法で溶出試験を行ったところ、材齢3日、7日、28日、91日いずれの供試体からも有害物質である銅、六価クロム、カドミウム、鉛、亜鉛、マンガン、ヒ素、水銀は検出されず、溶出液のpHは12.5前後を示した。すなわち、元の粉砕スラグに存在する有害物質は、粉砕スラグをモルタルとしてセメントに混和して使用しても溶出せず、有害物質の溶出に関しては、実際にセメントの混合材として利用しても問題のないことが示された。

5. まとめ

今回検討したシュレッダーダスト焼却灰溶融物の水砕スラグ化学組成の主成分は SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 でありセメント混合材に利用しうるものであった。しかし、高炉スラグと比較して SiO_2 はほぼ同程度であったものの、 CaO が約1/2程度しか含まれておらず、反応性の指標である塩基度は小さく、高炉スラグのような高い水硬性は期待できないと思われる。さらに全アルカリ量が高炉スラグの7倍程度の値を示すことからアルカリ骨材反応の可能性のある骨材と併用する場合には注意を要すること、また高炉スラグにはほとんど含まれていない Fe_2O_3 が多量に含まれていることから鉄筋の発錆にも何らかの影響を及ぼすことが予想され、さらに検討が必要である。

粉砕処理を実施しただけの水砕スラグには、丸みを帯びた金属粒が重量比で10%程度含まれ、その成分は90%以上が銅であり、資源としての再利用の可能性が見込まれる。

粉砕・ふるい分けした低粉末度水砕スラグは、ガラス状を呈し、溶出試験によっても有害物の溶出は確認されなかった。この低粉末度水砕スラグをセメントに混合してモルタル試験を行った結果、供試体からも問題となるような鉛などの重金属類の溶出はなく、凝結、流動性および強度の点においても、10%程度の置換率であれば使用可能であることが分かった。

粉末度を上げることでさらに有効な混合材とする目的から粉末度の上昇を試みたが、金属粒の存在により粉末度が

上昇しないことから、粉砕・ふるいわけによって得られた低粉末度水砕スラグ（150 μm 以下）を再度ボールミルによって粉砕することで高粉末度の高粉末度水砕スラグ（75 μm 以下）を得た。確認のために高粉末度水砕スラグについても溶出試験を実施したところ、やはり重金属類の溶出はみられず粉末度を上げ微粉化しても有害物の溶出が無いことが確認された。

高粉末度水砕スラグを用いたモルタル試験では、ポルトランドセメントへ内割で30%程度の混合であれば凝結、流動性および強度の点においてもほぼ満足する結果を得、供試体についての溶出試験でもやはり有害重金属類の溶出は確認されず、例えば長期にわたる強度を期待するような用途には十分使用に値するセメントとなることが示唆された。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、ご協力いただいた麻生セメント株式会社中央研究所に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高月 紘, 酒井伸一: 有害廃棄物, 中央法規出版, pp.67-94, 1993
- 2) 上野潔ら: 家電リサイクル, 工業調査会, pp.73-110, 1999
- 3) 河上 勇ほか: シュレッダーダスト処理・リサイクルの技術開発動向, エヌ・ティー・エス, pp.91-107, 1997
- 4) 柿本幸司ほか: シュレッダーダストの性状調査, 廃棄物学会誌, vol.10, No.3, pp.228-239, 1999.5
- 5) 財団法人クリーン・ジャパン・センター: 最新リサイクルキーワード第3版, 財団法人経済調査会, pp.18-39, 126-7, 158-9, 1997
- 6) 酒井伸一, 小川真佐子, 高月 紘: シュレッダー廃棄物の有害成分と適正処理, 廃棄物学会誌, vol.2, No.2, pp.33-42, 1991.3
- 7) 日刊工業新聞: 廃プラに有害金属 (東大生研), 1994.1.10
- 8) 朝日新聞: 処理場で水銀, 鉛流出 “車, 電化製品の残がいから” 1994.1.10
- 9) 日経産業新聞: 次世代型ごみ処理システム実用化へ, 1996.4.14
- 10) 産廃タイムス: シュレッダーダストの減量化, 安定化, 有効利用, 1996.4.15
- 11) 環境庁告示第5号等: 廃棄物の処理および清掃に関する法律施行令, 1992.7改正
- 12) 財団法人クリーン・ジャパン・センター: 最新リサイクルキーワード第3版, 財団法人経済調査会, pp.90-3, 172-3, 1997
- 13) 社団法人日本コンクリート工学協会九州支部専門委員会: コンクリート用混和材料の規格と性能評価, 社団法人日本コンクリート工学協会九州支部事務局, pp.26-35, 1999
- 14) 小野吉男, 河村繁雄, 伊藤隆夫: 高炉スラグのガラス化率, 塩基度と高炉セメントの強さとの関係, セメント技術年報, pp.77-80, vol.37, 1973
- 15) 竹村 明, 喜多一弘, 天野文夫: 高炉スラグの物性とその水和反応性について, セメント技術年報, pp.81-84, vol.37, 1973