処理施設の異なる不法投棄物溶融スラグを用いたコンクリートの物性

小山田哲也^{*1} 藤原忠司^{*1} 高橋佑介^{*2} 菅原龍江^{*3}

^{*1} 岩手大学 工学部建設環境工学科(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

^{*2} 戸田建設株式会社 東北支店工事部(〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町 3-7-23)

^{*3} 地方独立行政法人岩手県工業技術センター 環境技術部(〒020-0852 岩手県盛岡市飯岡新田 3-35-2)

要旨：岩手・青森県境の産業廃棄物の不法投棄物を、3つの施設で処理して副産された溶融スラグのコンクリート用骨材としての適用性について、有害物の溶出、骨材としての物性の評価および混合したコンクリートの物性に着目した実験を行って評価した。その結果、有害物の溶出は、土壌環境基準を超えることなく、安全に使用できることおよび骨材としての物性は、溶融スラグの適用に関する諸規格を満足することが分かった。また、溶融スラグの使用により圧縮強度は低下するが、この原因は、溶融スラグ表面が滑らかでペーストとの付着に劣ることによると考えられた。さらに耐凍害性も低下する場合があるが、試験前の供試体には、ひび割れや空隙が多く見られ、耐凍害性を損なう原因となるとの結果を得た。

キーワード：溶融スラグ、不法投棄物、強度特性、耐凍害性、表面粗さ、ひび割れ面積、磨砕処理

1. はじめに

岩手と青森の県境で産業廃棄物の不法投棄が発覚したのは1999年であり、岩手側だけでも、その量は約32万tに達する。岩手県は全量撤去の方針を立て、2004年8月から撤去を開始した。2009年3月末での撤去率は54%を超え、2012年度までに撤去を完了する予定である。現在、撤去された廃棄物は選別され、大部分はセメント工場に搬入されて、セメントの原料となっており、これに適さない少量の廃棄物は、県内2箇所の廃棄物処理施設で焼却・溶融されている。

筆者らはこれまで、実機プラントで試験的に溶融固化した水砕スラグおよび除冷スラグを、コンクリート用の骨材として適用できるかについて検討を行ってきた。その結果、スラグへの金属アルミニウムの残存およびフッ素の溶出等、通常の骨材では見られない問題が確認されたが、適切な溶融条件の見直し等により解決できることが分かった¹⁾。また、細骨材をスラグで置換したコンクリートの諸性質を調べたところ、徐冷スラグについては、格別の問題が見当たらず、コンクリート用細骨材としての適用性は高いと考えられた²⁾。一方、水砕スラグについては、凝結遅延、強度の低下および耐凍害性の低下の問題がみられたが、それぞれの原因を考察し、使用材料や配合等に配慮することで、それらを解決する方法を見出し、コンクリートとしての有効活用方法を提案している³⁾。

この研究で試験的に溶融した施設は、現在、実際に不法投棄物を溶融処理している施設とは異なる。施設が違えば、発生するスラグの性質も異なる可能性があり、試

験的な溶融で得られた知見をそのまま適用できるとは限らない。現に発生しているスラグの有効利用を図ることは急務であり、本研究では、その有効利用の可能性を検討することとした。

2. 実験概要

実験に使用した溶融スラグは、Table 1に示す3種類であり、それぞれのスラグに至る工程は異なるが、水砕スラグという点で共通している。

スラグAは過去に試験的に溶融してコンクリートの物性について報告したスラグ¹⁾である。現在、この施設は稼動していないが、スラグの性質を比較する上で有用であると判断し、検討に加えた。このスラグは、他の廃棄物とは混合せず、重油のみで表面溶融方式で処理したものである。溶融時の添加剤には石灰を混合した。溶融後は連続出滓され、水で満たされたスラグピットで水砕スラグとなる。これには、粗い粒子や針状等の不定形粒子も含まれるため、磨砕によって粒径や粒形を整えた。

スラグBおよびスラグCは、ごみ処理場で一般廃棄物と投棄物とを混合して処理する際に発生する。これらが、現在、実際に発生しているスラグである。溶融炉は同じ方式であり、添加物として石灰石およびコークスが加えられている。

スラグBは、溶融後にスラグAと同様の工程で水砕スラグとなり、磨砕処理も施される。一方、スラグCの場合は、溶融炉底部に貯留された溶融物を、水中に一気に落とし込む方法がとられている。また、磨砕処理は行わず、これらが、スラグBと異なる点となる。

これらの溶融スラグについては、環境省告示第 46 号法による溶出試験を実施し、有害物の溶出を確認し、安全性を評価した。また、骨材としての物性試験行い、測定結果を JIS A 5005(コンクリート用砕石および砕砂)および JIS A 5031(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)と比較し、コンクリート用骨材としての適用性を確認した。

溶融スラグを使用したコンクリートは、二次製品への適用を想定している。そこで、溶融スラグ以外の使用材料には、製品工場で実際に使用している Table 2 に示す材料を用いた。

配合を Table 3 に示す。基準としたのは、実際に製品工場で使用されている溶融スラグを混合しない配合である。これに、溶融スラグを細骨材の容積に対して 10、30、50 % 置換し、それ以外の条件は固定してスラグの特徴が比較できるようにした。各スラグについて合計 4 水準が実験の対象である。

高性能減水剤および AE 剤を使用し、コンクリートのスランプは $5.0 \pm 1.0 \text{ cm}$ 、フレッシュコンクリートの空気量は $5.0 \pm 0.5 \%$ とした。ただし、スラグ C は、粒径が大きく角張りがあったため、同一の配合とするのが困難であった。そこで単位水量を多くし、混和剤の調整により目標スランプに収められる配合とした。またスラグ A と B とでは、スラグを置換しないコンクリートにおいて混和剤量が異なる。これは混和剤のロットの変更によるものである。本実験ではスラグ置換による相違を明らかにするため、検討に加えた。

本研究の最終目的は溶融スラグの二次製品への適用にある。そこで、Fig. 1 に示す温度履歴で蒸気養生を施した硬化コンクリートについて圧縮強度および耐凍害性を検討した。蒸気養生後の供試体は、所定の材齢まで、温度 20°C 、湿度 60 % の恒温恒湿室で養生した。また、基礎的な性質を明らかにするため、コンクリートを材齢 1 日で脱型した後、 20°C にて材齢 28 日まで水中養生を施した供試体も対象とした。

試験方法は、それぞれ圧縮強度試験については JIS A 1108 に、凍結融解試験については JIS A 1148 の水中凍結融解試験方法(A 法)に準拠して行った。凍結融解試験は、水中養生および蒸気養生ともに材齢 28 日から開始した。

圧縮強度の結果は、骨材の表面状態により考察した。骨材の表面の凹凸に着目し、これを表面粗さによって定量的に評価しようと試みた。試験方法は、JIS B 0633 に準拠し、レーザー 3 次元表面粗さ測定装置で算術平均粗さを測定した。測定は、砕砂および各スラグの粒子を無作為にそれぞれ 10 個選定して行った。測定にあたっては、細骨材の出来るだけ平らな部分を対象とし、うねり部分は、補正処理を行った。測定面は、粒子の X 方向 $1\mu\text{m} \times Y$ 方向 $1\mu\text{m}$ の範囲とし、それぞれの分解能を $0.1\mu\text{m}$ として 1 つの粒子につき計 100 点のデータから平均の値を求めた。

Table 1 Used slags

Slag	Process	Type of furnace	Heat source	Temp. ($^\circ\text{C}$)	Cooling type
A	Incineration	Rotary kiln + Stoker	Waste plastics + Crude petroleum	>850	—
	Melting	Rotary surface	Crude petroleum	1300~1400	Water cooling
B	Incineration + Melting	Coke bed gasification	Waste + Cokes	1700~1800	Water cooling
C	Incineration + Melting	Coke bed gasification	Waste + Cokes	1700~1800	Water cooling

Table 2 Physical properties of materials used for concrete

Materials	Surface dried density	Other properties
Ordinary portland cement	3.16 g/cm^3 (Oven-dry)	Specific surface area by blaine : $3,310 \text{ cm}^2/\text{g}$
Crushed sand	2.94 g/cm^3	Absorption : 1.15 % Fineness modulus : 2.99
Crushed stone (13~20mm)	2.91 g/cm^3	Absorption : 1.11 % Fineness modulus : 7.99
Crushed stone (5~13mm)	2.86 g/cm^3	Absorption : 1.45 % Fineness modulus : 6.29
Water reducing agent (SP)	—	Poly carbonic acid ether type
Air entraining agent (AE)	—	Anionic surface activate type

Table 3 Mixture proportion of concrete

Slag	Replaced ratio (%)	W/C (%)	Unit quantity (kg/m^3)					C × (%)	
			W	C	S	Slag	G	SP	AE
A	0	44	150	340	877	—	1137	0.90	0.0050
	10				789	84		0.90	0.0030
	30				614	252		0.80	0.0030
	50				439	420		0.60	0.0015
B	0				877	—		0.70	0.0030
	10				789	84		0.68	0.0024
	30				614	252		0.66	0.0024
	50				439	420		0.65	0.0024
C	0		165	375	869	—	1044	0.47	0.0032
	10				782	86		0.47	0.0032
	30				608	259		0.45	0.0030
	50				440	437		0.42	0.0020

Fig. 1 Condition of steam curing

Table 4 Heavy metals concentration by elution test

Item	Cd	Cr ⁶⁺	As	T-Hg	Se	Pb	F	B
Slag A (mg/l)	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	0.04	0.15
Slag B (mg/l)	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	<0.065	<0.01
Slag C (mg/l)	<0.005	<0.02	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	<0.075	<0.01
Environmental soil standar	<0.01	<0.05	<0.01	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.8	<1

Table 5 Physical and chemical properties of the molten slag aggregate

Item		Slag A	Slag B	Slag C	JIS A 5005	JIS A 5032
Surface dried density (g/cm ³)		2.77	2.72	2.94	—	—
Absolute Dried Density (g/cm ³)		2.75	2.69	2.91	≥2.5	≥2.5
Fineness modulus		3.22	2.54	3.28	—	—
Absorption (%)		0.2	0.95	1.08	≤3.0	≤3.0
Soundness (%)		1.1	2.8	0.3	≤10	≤10
Content of materials finer than 75μm sieve (%)		1.2	3.2	0.3	≤7	≤7
Bulk density (kg/l)		1.47	—	—	—	—
Solid content (%)		53.0	54.6	54.4	—	—
Alkali-silica reaction (chemical)	Rc (mmol/l)	76	14	18	Rc>Sc	—
	Sc (mmol/l)	25	3	4		

凍結融解抵抗性の結果の考察では、ひび割れの総面積に着目した。ひび割れの面積の測定には、画像処理を用いた。画像処理に用いたのは、100×100×400mmの供試体の長手方向の中央部分を20mmに切断した供試体である。この供試体の100×100mmの断面に蛍光塗料を塗布し、塗料を硬化させる。硬化後、気泡とひび割れにのみ塗料が残るよう研磨して実験に供した。この供試体に紫外線を照射して、気泡およびひび割れを抽出して二値化する。さらに円形度により気泡とひび割れを分別した。ここで円形度とは、外接円の面積に対する気泡あるいはひび割れの面積であり、真円であれば1.0となり、ひび割れのように形状が扁平になるほどこの値が小さくなる。本研究では、この画像解析を用いてひび割れの面積を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 有害性の評価

Table 4に有害物質の溶出試験の結果を示す。いずれのスラグも土壌環境基準未満であり、安全に使用できるといえる。

3.2 骨材としての物性

Table 5は、コンクリート用骨材としての物性試験の結果である。スラグにより物性は異なるものの、JIS A 5005 および JIS A 5031 の規格を満足する。スラグ C は前述のように磨砕処理を施していない。そのため、粗粒率が幾分大きく、微粒分量が小さいと考えられる。

3.3 圧縮強度

Fig. 2に標準養生を施した材齢28日のコンクリートの圧縮強度を示す。

いずれのスラグを使用した場合も、スラグの置換割合が高くなるほど、圧縮強度は直線的に低下する傾向にある。試験後の供試体を観察すると、破壊面に無数のスラグがむき出しになっている様子が見られたが、スラグ自体は破壊していないことが確認された。

スラグの種類による強度低下の違いを確認したいが、そもそもスラグ置換率0%の強度が異なっており、結果の比較が困難である。そこで、スラグの混合率が0%を基準とし、各スラグを混合した場合の強度割合を相対圧縮強度として表すこととした。結果をFig. 3に示す。

この操作により、スラグの種類が異なることによる強度低下の程度は明瞭となった。特にスラグ C で強度低下率が大きく、置換率を50%とすると、強度は約20%も低下する。

材齢14日および91日の標準養生の相対強度をFig. 4に示す。これと材齢28日とを併せて検討すれば、強度は、材齢が進むほど低下する傾向にある。

蒸気養生した供試体の材齢14日および28日における相対強度をFig. 5に示す。スラグの混合による相対強度の低下の度合いは、置換率50%で約10~20%であった。

これらの強度低下の原因を、スラグの表面粗さに関連付けて検討してみる。Fig. 6に、本実験で使用した砕砂とスラグ A の表面のSEM画像を示している。砕砂の

Fig. 2 Compressive strength

Fig. 3 Compressive strength ratio

表面には凹凸が見られるのに対し、スラグの表面には凹凸はほとんど見られず、平滑である。

この表面の状態を3次元表面粗さ測定器により求めたのが、Table 6である。砕砂に比較し、いずれの溶融スラグであっても、表面の凹凸が少ないのは明瞭である。スラグは、砕砂と混合して用いている。そのため、表面粗さをコンクリートの強度と関連付けるためには、細骨材全体としての表面粗さを用いなければならない。そこで砕砂と溶融スラグのそれぞれの表面粗さと各配合で使用するそれぞれの容積とを掛け合わせ、それらの和をその配合における表面粗さ係数とした。

材齢28日の標準養生の場合について、表面粗さ係数と圧縮強度の関係を求めたのが、Fig. 7である。表面粗さ係数と相対圧縮強度との間には、明確な正の相関が見られる。したがって、総体的には細骨材全体の粗さが圧縮強度の支配的要因になり得るといえる。溶融スラグの粒子表面は平滑であり、これが硬化体に含まれると、セメントペーストとの界面部分の付着が弱くなり、強度上の弱点となり易くなるものと考えられる。

材齢14日と91日において、この関係を検討したのが、Fig. 8である。材齢によらず、相対強度と表面粗さには総体的に正の相関が認められる。前掲のFig. 4において、

Fig. 4 Compressive strength ratio

Fig. 5 Compressive strength ratio

材齢14日に比べ、材齢28日あるいは91日の相対強度でスラグ混合の影響が強く出る結果となったが、標準

(1) Crushed sand

(2) Slag A

Fig. 6 Electron microscope photograph

Table 6 Arithmetic mean deviation of the profile

	Crushed sand	Slag		
		A	B	C
Arithmetic mean deviation of the profile (μm)	3.1	1.4	1.2	0.8

養生の場合、材齢の進行に伴い、強度が高まるほど、付着の弱さが如実に反映されるためと考えられる。

蒸気養生した場合についても、細骨材の表面粗さ係数とコンクリートの圧縮強度との関連を求めたところ、標準養生の場合とほぼ同様の傾向がみられた。

スラグ間の比較では、スラグ C が最も表面粗さが小さく、強度低下の度合いが大きかった。表面粗さが小さかったのは、スラグ C のみが、磨砕を行っていないことに起因するものと推察され、コンクリート用骨材としての利用の観点からは、磨砕を施すのが望ましい。

ただし、Fig. 2 から Fig. 4 について、各スラグに着目して見直すと、表面粗さのみでは、解釈できない例もある。本実験で使用した溶融スラグは、形状や粒度分布も異なっており、これらが結果に影響を及ぼしている可能性もある。コンクリートの性質との関係も含め、今後、十分に検討していきたいと考えている。

3.4 凍結融解抵抗性

Fig. 9 に凍結融解 300 サイクル終了時の標準養生供試

Fig. 7 Relation between surface roughness factor and compressive strength

Fig. 8 Relation between surface roughness factor and compressive strength

体の耐久性指数を示す。いずれのスラグの場合にも、スラグの置換率に関わらず耐久性指数は 90 以上であり、コンクリートは耐凍害性を確保していると評価できる。

Fig. 10 は、凍結融解 300 サイクルにおける質量減少率の結果を示している。いずれの場合も、溶融スラグの置換率を上げるに従い、質量は減少する。この質量減少の程度は、使用するスラグにより相違が見られるが、特にスラグ C を使用した場合に大きく、スラグ置換率 50 % の場合で、無混合と比較して、2 倍以上とな

Fig. 9 Durability factor

Fig. 11 Concrete surface after freeze and thaw test

Fig. 10 Mass loss

Fig. 12 Durability factor

る。Fig. 9 と Fig. 10 の結果から、溶融スラグを使用し、適切な空気を連行させた供試体は、スケーリングが先行する凍害劣化を示すと考えられる。

耐凍害性は、一般に気泡間隔係数により判断できるが、これを各スラグの 50 % について調べたところ、スラグ A、B、C でそれぞれ $270\mu\text{m}$ 、 $260\mu\text{m}$ 、 $280\mu\text{m}$ であり、スラグ間の相違はほとんどなく、絶対値的にも耐凍害性を確保できる程度といえる。

また、この質量減少率を表面粗さ係数との関連で検討してみたが、両者には明確な相関が認められず、スケーリングを表面粗さで解釈するには無理がある。

ただし、凍結融解試験終了後の供試体表面を実体顕微鏡で観察すると、Fig. 11 の矢印の先端部のように、表面付近のスラグが露出してスケーリングが進行しており、この状況から判断して、スラグ表面とセメントペーストとの付着面が関係している可能性はある。

Fig. 12 には、蒸気養生における凍結融解 300 サイクル終了時の耐久性指数を示している。概ね耐久性指数は 100 程度であり、耐凍害性を確保しているが、スラグ A を 50 % 置換したコンクリートで耐凍害性を損なう結果となった。

スラグ A を用いたコンクリートの凍結融解試験前の切断面を Fig. 13 に示す。図中の灰色がセメントペーストであり、黒色がスラグおよび砕砂、白色が気泡、間隙

およびひび割れを示している。溶融スラグの周囲に間隙が見られ、これを繋ぐようにひび割れが生じている。これに対し、ここでは示していないが、スラグ B および C では、間隙やひび割れの量が少なく、この差が、凍結融解抵抗性の結果に影響を及ぼしたものと考えられる。

そこで、供試体の切断面について、画像解析を用いて気泡、間隙およびひび割れの面積を求めてみた。結果を Fig. 14 に示す。なお、スラグ置換率は、以降、細骨材に対しいずれも 50 % のものとする。ある円形度での面積は、その値以上の円形度の面積を累積したものであり、段階的に円形度を変化させてそれぞれの点の値を求めた。円形度が小さくなるにつれ、累積面積は増加するが、円形度 0.3 以下に着目すると、スラグ B および C では、面積がそれ以上増えないのに対し、スラグ A では増加の傾向がある。

円形度 0.4 から 0.1 までの面積の増分は、Fig. 13 で確認されたような骨材周囲の間隙あるいはひび割れによるものであるとみなし、この増分量と耐久性指数および質量減少率との関係を求めてみた。それを Fig. 15 に示す。

既往の研究では、蒸気養生により微細ひび割れが発生し、耐凍害性が確保できないとの報告⁴⁾がある。また、水砕スラグは表面が滑らかであり、ペーストとの付着に劣るとの例⁵⁾も見られる。3 点のみのデータで、確たる

Fig. 13 Microscope photograph

Fig. 14 Relation between circularity and void ratio

判断は難しいが、スラグ A の場合、骨材周囲の間隙やひび割れの量が多く、そのため耐久性指数の低下および質量の減少をもたらした可能性を示唆している。本実験では、前述のようにスラグ A の供試体にのみにひび割れが多く発生したが、この原因については現段階で定かではなく、今後の課題としたい。

4. おわりに

本研究では、処理施設の異なる岩手・青森県境不法投棄物を溶融したスラグのコンクリート骨材としての物性を明らかにし、適用性を検討した。

得られた結果によれば、安全性および骨材としての物性は、いずれも基準を満たしており、骨材としての使用は問題ないといえる。また、溶融スラグを細骨材として使用した実験では、養生方法に関わらず、コンクリートの圧縮強度は低下し、その程度は、スラグにより異なることが判った。この現象は、スラグの表面が平滑であることに起因していると考えられた。

凍結融解抵抗性については、スラグを混合した場合に、スケールが大きくなることが判明した。また、場合により耐久性指数の低下が問題となる可能性がある。これを骨材周囲の間隙やひび割れの面積との関連で検討したところ、面積が大きくなるほど、耐凍害性に劣る可能

Fig. 15 Relation between void ratio and the freeze and thaw test results

性が示唆された。

本研究の範囲では、溶融スラグを用いた場合のコンクリートへの正の付加価値は確認されなかった。ただし、今後、最終処分場を新たに求めることができない現状を考えると、溶融スラグの特徴を十分に考慮し、有効利用の方策を探索する必要があると言える。

謝辞：

本研究遂行に際し、ご教示・ご協力賜った岩手県久慈地方振興局の佐々木秀幸氏に深甚の謝意を表します。

参考文献：

- 1) 佐々木秀幸ほか：岩手・青森県境不法投棄物を溶融したスラグの骨材としての物性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 28, No. 1, pp. 107-112 (2006)
- 2) 佐々木秀幸ほか：不法投棄物を溶融した除冷スラグのコンクリート用骨材への適用性、セメント・コンクリート論文集、No. 60, pp. 526-533 (2007)
- 3) 佐々木秀幸ほか：岩手・青森県境不法投棄物を溶融したスラグのコンクリート用骨材への利用に関する研究、土木学会論文集 (掲載決定)
- 4) 大塚浩司ほか：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響、土木学会論文集、No. 585, Vol. 38, pp. 97-111 (1998)
- 5) 斉藤丈二ほか：ごみ溶融スラグの細骨材への有効利用に関する実験的検討、廃棄物のコンクリート

材料への再資源化に関するシンポジウム論文集、
pp. 121-126 (2002)

PHYSICAL PROPERTIES OF THE CONCRETE USING THE ILLEGAL DUMPED WASTE MOLTEN SLAG FROM WHICH A TREATMENT FACILITY DIFFERS

Tetsuya OYAMADA^{*1}, Tadashi FUJIWARA^{*1}, Yusuke TAKAHASHI^{*2} and Ryuko SUGAWARA^{*3}

^{*1} IWATE UNIVERSITY, Faculty of Engineering (4-3-5, Morioka-shi, Iwate 020-8551, Japan)

^{*2} TODA CONSTRUCTION, Tohoku Branch (3-7-23, Ichiban, Aoba, Sendai-shi, Miyagi 980-0811, Japan)

^{*3} IWATE INDUSTRIAL RESEACH INSTITUTE (3-35-2, Iiokashiden Morioka-shi, Iwate 020-0852, Japan)

ABSTRACT : It was investigated that the applicability as aggregate for concretes of molten slag which treated the illegal dumped waste in the prefectural border between Iwate and Aomori with three facilities. According to the result of this experiment, it was showed that elution of deleterious material did not exceed soil environmental standards. Moreover, the physical properties as aggregate of these slags have satisfied many standards about application of molten slag. However, compressive strength of concrete specimen reduces by use of molten slag. The observation of the microscope showed that the slag surface is smooth. It was guessed that the roughness on the surface of slag is related to the strength reduction of concrete. Furthermore, resistance to freezing and thawing may reduce, when slag is mixed in large quantities. In this experiment, many cracks and air bubbles were seen inside the specimen before freezing and thawing test. It was thought that the resistance to freezing and thawing of concrete was inferior with the cause of these cracks and air voids.

KEY WORDS : Molten slag, Illegal dumped waste, Compressive strength, Resistance to freezing and thawing, Surface roughness, Crack area, Grinding down by friction