

非鉄金属スラグのアスファルト混合物用

細骨材としての性状と品質について

日大生産工 ○加納 陽輔 日大生産工 秋葉 正一
日大生産工 栗谷川裕造

1. はじめに

近年、主要建設資材である骨材の枯渇が顕在化し、代替材料の安定供給が喫緊の課題となっている。一方、他産業発生材の舗装用骨材としての利用については、都市ごみ・下水汚泥を溶融固化したエコスラグをはじめ¹⁾、処分場の逼迫を背景に発生者を中心とした積極的な検討が進められている。中でも、非鉄金属を製錬する際、副次的に得られるスラグは、フェロニッケルスラグ（以下、FNS）として年間約 260 万 t、銅スラグ（以下、CUS）として年間約 240 万 t 産出されており、骨材としての一次利用や、屋根瓦・電柱類への二次利用等、用途と利用実績が拡大している。

非鉄金属スラグの舗装用骨材としての利用に関しては、主に FNS の表層・基層用骨材や路盤材への適性が概ね確認され²⁾、標準化に向けた取組みが進められている。しかしながら、これらを対象とした品質指標や配合舗装体に対する調査事例は少なく、特質に留意した管理基準や環境影響に関する報告は見当たらない。他産業発生材の骨材としての適否を判断する上では、環境保全や資源利用の観点のみに囚われることなく、舗装のライフサイクルを踏まえた安全性や耐久性、環境影響を十分に把握する必要がある。

本研究では、FNS および CUS のアスファルト混合物用細骨材としての管理と利用を検討するため、特質に留意した物性評価を実施するとともに、試験舗装における走行実験から、実用に沿った環境影響に関する調査を行った。

2. 非鉄金属スラグの環境安全性評価

他産業発生材は、原材料が不特定な場合が多く、これらの産出・管理工程とともに、環境に悪影響を及ぼし得る物質については、事前にその詳細を把握しなければならない。

本研究では、製造所の異なる FNS（以下、FNS1、FNS2）および CUS（以下、CUS1、CUS2）を用いて、砕砂（栃木県産硬質砂岩）、天然砂（茨城県産洗砂）との比較を行った。

(1) 非鉄金属スラグの産出工程

本研究に用いた FNS1 はエルケム法（電気炉法）、FNS2 はロータリーキルン方式によって製錬され、ニッケル分を回収した後に水砕したものである。他方、CUS1、CUS2 は自溶炉で溶融され、錬鋼炉で銅分と分離した後に水砕したもので、燃料消費量が少なく国内の約 7 割の銅がこの炉法に

表-1 含有量試験結果

分析項目	フェロニッケルスラグ		銅スラグ		土壌基準値
	FNS1	FNS2	CUS1	CUS2	
As	< 15	< 15	230	250	150
Pb	< 15	< 15	440	200	150
Cd	< 15	< 15	< 15	< 15	150
Se	< 15	< 15	< 15	< 15	150
B	< 400	< 400	< 400	< 400	4000
F	< 400	< 400	< 400	< 400	4000
Cr()	< 25	< 25	< 25	< 25	250

(mg/kg)

表-2 溶出量試験結果

分析項目	フェロニッケルスラグ		銅スラグ		土壌基準値
	FNS1	FNS2	CUS1	CUS2	
As	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.01
Pb	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.01
Cd	< 0.001	< 0.001	0.001	< 0.001	0.01
Se	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.01
B	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.0
F	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.8
Cr()	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.05

(mg/L)

よって生産されている。また、CUS2 を除く試料は、一次利用を目的とした破碎・分級等の整粒処理が施されている。

(2) 非鉄金属スラグの環境安全性

FNS および CUS の含有量試験（環境省告示第 19 号準拠）の結果を表-1 に、溶出量試験（環境省告示第 18 号準拠）の結果を表-2 に示す。有害物質の含有量は、FNS1、FNS2 ともに検出限界未満であり、土壌汚染対策法の基準値を満足している。一方、CUS1、CUS2 は、ヒ素、鉛の含有量が基準値を僅かに上回ることから、CUS を舗装用細骨材として用いる場合、これに留意した用途と配合の検討が不可欠と言える。なお、溶出量は、FNS、CUS ともに検出限界未満であり、土壌汚染対策法の基準値を満足する結果が得られた。

以上から、特に CUS に関しては舗装用細骨材としての実用に沿った環境影響について検証する必要があると考え、試験舗装における追跡調査を実施することとした。

Quality and Performance of Nonferrous Metal Slag As Fine Aggregate of the Asphalt Mixture

Yosuke KANO, Shoichi AKIBA, Yuzo KURIYAGAWA and Kazuyuki KURISU

3. 非鉄金属スラグの舗装用骨材としての物性評価

(1) 非鉄金属スラグの粒度と材質

舗装用砕石に定められている粒度と品質の目標値を参考として、ふるい分け試験 (JIS A 1102 準拠)、細骨材の密度および吸水率試験 (JIS A 1109 準拠) を実施した。また、材質や形質に関する特徴を明確にするため、単位容積質量および実積率試験 (JIS A 1104 準拠) を実施した。

a) 骨材のふるい分け試験

粒径加積曲線図を図-1 に示す。FNS1、CUS1 の粒度は砕砂に近く、スクリーニングスの粒度範囲を満足している。他方、整粒処理を施していない CUS2 は単粒かつ粒径が大きい。

以上から、水砕によって粒状化されたスラグは均質化や所要の粒度を得るためにも適切な整粒処理が重要と言える。

b) 細骨材の密度および吸水率試験

密度および吸水率を図-2 に示す。FNS の密度は一般的な細骨材に比べて高く、吸水率は砕砂と同等もしくは小さい傾向にある。一方、CUS は密度が $3.4\text{g}/\text{cm}^3$ 以上と天然砂の2~3割程度大きく、ガラス質な特徴から FNS に比べて吸水率が小さい。なお、FNS および CUS は舗装用砕石の目標値である密度 $2.45\text{g}/\text{cm}^3$ 以上、吸水率 3.0% 以下を満足した。

以上から、非鉄金属スラグの密度および吸水率を指標とした場合、舗装用骨材としての適性が認められるものの、特質に留意した他の指標についても検討を行う必要がある。

c) 単位容積質量および実積率試験

単位容積質量および実積率を図-3 に示す。非鉄金属スラグの単位容積質量は、砕砂、天然砂に比べて高く、高密度な特質が反映している。また、実積率は特に後処理の異なる CUS1 と CUS2 に差異が見られることから、非鉄金属スラグの形質に対する品質管理の必要性を示唆している。

(2) 非鉄金属スラグの形状

密度と吸水率は、砕石の材質判定の目安であり、スラグの適否判定に十分な指標とは言えない。また、細骨材の形状に関しては、評価法が示されておらず実施例も少ない。

本研究では、細骨材の形質を定量的に評価するため、目視による形状判別試験とロート通過形状試験を実施した。

a) 細骨材の形状判別試験

試験は、粗骨材の形状試験で定義される偏平と、突起が多く耐久性が懸念される形状を併せて脆形とし、全試料 (約 50g) に対する脆形混入率 (以下、脆形率) を評価した。

脆形率を図-4 に示す。CUS は針状や突起を有する形状が多く、後処理を施していない CUS2 は脆形率が大きい。

以上から、水砕スラグに対しては、整粒処理による高品質化をはじめ、形状に関する品質指標が不可欠である。

b) ロート通過形状試験

細骨材形状に関する試験として、ロート通過形状試験を実施した。試験は、図-5 に示す傾斜角 45° と 60° のロートを用い、充填した全試料がこれらを通る時間を測定した。なお、結果は粒度による充填の差異を考慮して、通過時間を実積率で除した単位実積率通過時間を評価した。

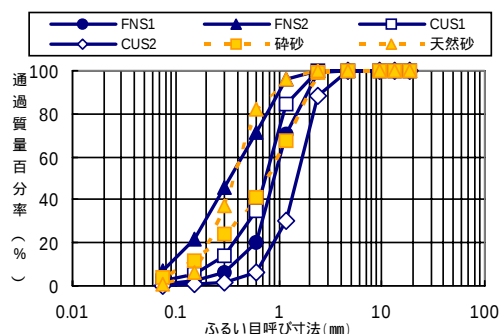


図-1 粒径加積曲線図

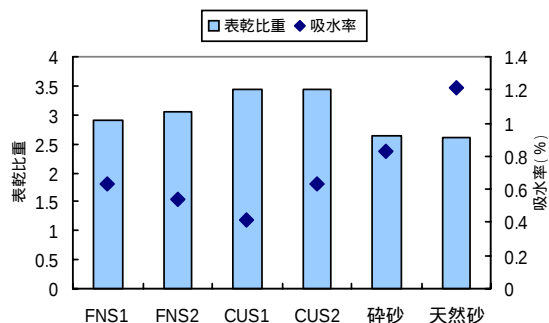


図-2 密度および吸水率

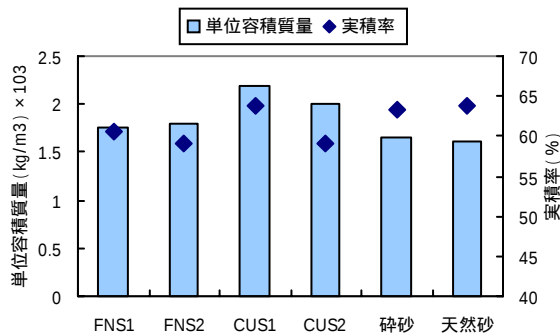


図-3 単位容積質量および実積率

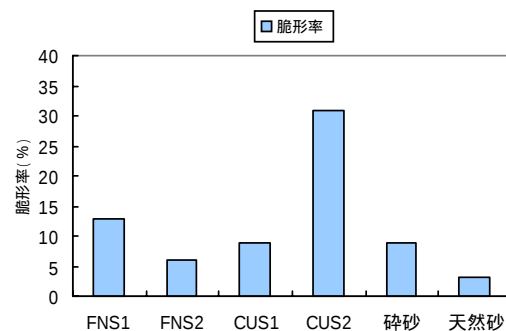


図-4 脆形率

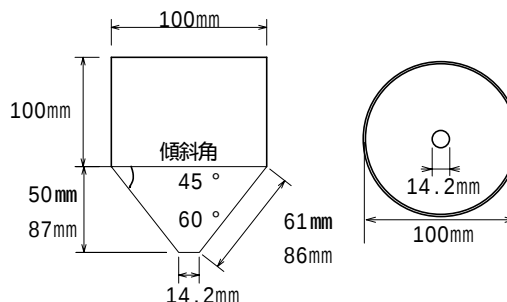


図-5 形状試験用ロート

単位実積率通過時間を図-6 に示す。FNS および CUS の単位実積率通過時間は、脆形率の傾向が反映しており、特に 45° における試験結果ではこの傾向が顕著である。

このことから、目視判定が困難な細骨材の形質に関してはロータ通過時間による判定が概ね可能と考えられる。

(3) 非鉄金属スラグの耐久性

細骨材の硬さに関しては、各機関で独自の評価が行われているものの、確立された手法は示されていない。本研究では、ロータップふるい振とう機によるすり減り試験から、摩耗や破砕に対する耐久性を評価した。また、微細なひび割れや凍結融解に対する耐久性評価として硫酸ナトリウムによる安定性試験（JIS A 1122 準拠）を実施した。

a) 細骨材のすり減り試験

試験は、500g の試料を振とう機（ふるい目：2.36, 1.20, 0.60, 0.30, 0.075 mm）に入れ、0.6 mmふるい上の鋼球（φ 25, 67g, 20 個）とともに 30min 振とうさせる。結果は、試験前後における 0.6 mm通過質量百分率の比（試験後 / 試験前）を求めて、これを細粒化率として比較評価した。

細粒化率を図-7 に示す。非鉄金属スラグの細粒化率は、脆形率が大きい CUS2 を除き、一般的な細骨材と同等である。

この結果は、スラグの形状と耐久性の関係を示唆しており、形質に留意した品質管理の重要性を示している。

b) 硫酸ナトリウムによる安定性試験

損失質量百分率を図-8 に示す。CUS2 は目標値である損失量 12% 以下（表層・基層）を満足するものの、一般的な細骨材に比べ耐久性にやや劣る傾向にある。他方 FNS1、FNS2、CUS1 は、一般的な細骨材に比べ良好な耐久性が確認された。

以上から、非鉄金属スラグの耐久性は形質に大きく左右されると考えられ、舗装用骨材としての高品質化を図るためにも、整粒処理による形質改善が有効と言える。

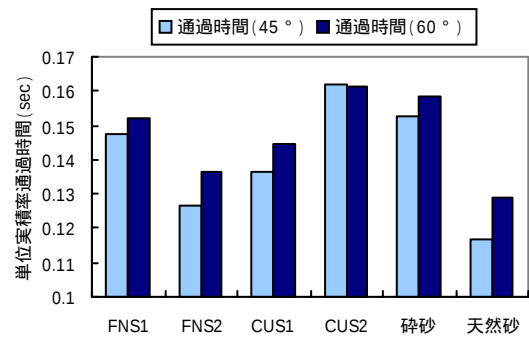


図-6 単位実積率通過時間

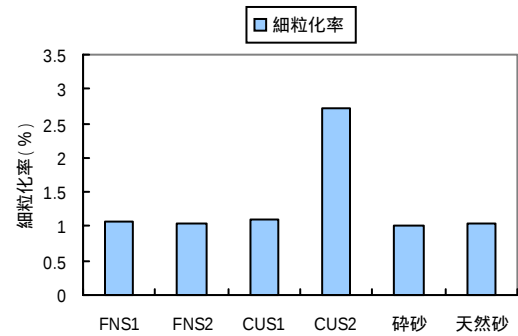


図-7 細粒化率

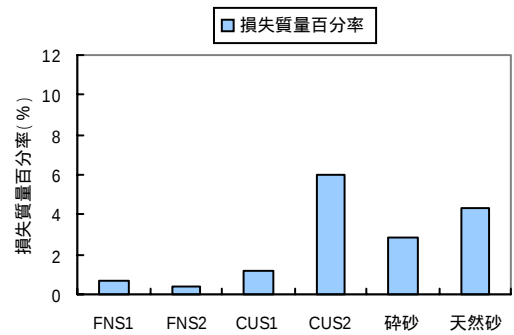


図-8 損失質量百分率

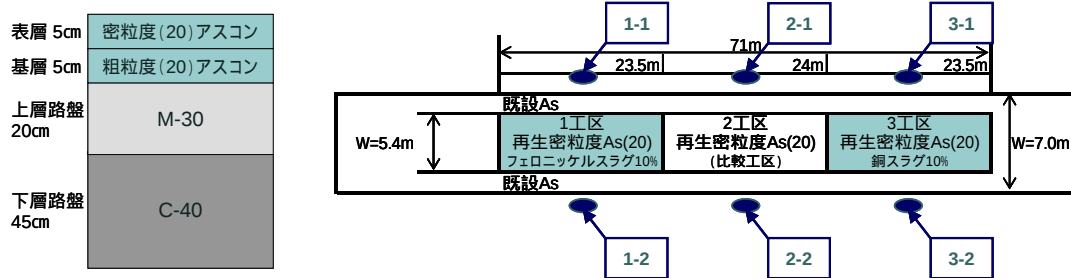


図-9 試験舗装の構成と調査地点配置図

表-3 混合物の物性値

	1工区 FNS1	2工区 比較工区	3工区 CUS1
アスファルト量 (%)	4.9	5.1	4.8
密度 (g/cm³)	2.510	2.477	2.557
空隙率 (%)	3.7	3.7	3.9
飽和度 (%)	75.5	76	74.5
マーシャル安定度 (kN)	14.02	16.13	13.75
フロー値 (1/100cm)	24	34	28
残留安定度 (%)	85.4	82.3	84.1
動的安定度 (回/mm)	1260	1370	1210

表-4 粉塵の全含有量分析結果

区分	計量の対象	単位	分析結果		
			No.1工区(1-2) 路面脇粉塵(土壌)	No.2工区(2-2) 路面脇粉塵(土壌)	No.3工区(3-2) 路面脇粉塵(土壌)
含有試験	二酸化ケイ素	%	55.4	40.0	51.5
	酸化アルミニウム	mg/kg(dry)	43000	41000	41000
	全鉄	mg/kg(dry)	31000	29000	27000
	酸化カルシウム	mg/kg(dry)	7800	27000	16000
	炭素	% (dry)	9.00	10.10	6.24
	ケイ素	% (dry)	25.9	18.7	24.0
	強熱減量	%	11	13	7.9

表-5 土壌分析結果（スラグ配合舗装施工前）

区分	計量の対象	定量 下限値	分析結果							基準
			1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	No.2工区(2-2) 路面脇粉塵 (土壌)	
溶出試験	カドミウム	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01以下
	六価クロム	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.05以下
	全シアン	0.1	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
	総水銀	0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005以下
	アルキル水銀	0.0005	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
	セレン	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.01以下
	鉛	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01以下
	ヒ素	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.01以下
	フッ素	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.8以下
	ホウ素	0.02	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	1以下
含有試験	カドミウム	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150以下
	六価クロム	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	250以下
	遊離シアン	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	50以下
	総水銀	0.02	0.04	<0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	<0.02	15以下
	セレン	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150以下
	鉛	5	6	7	7	6	7	6	8	150以下
	ヒ素	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150以下
	フッ素	50	160	91	120	120	190	110	420	4000以下
	ホウ素	5	<5	<5	<5	<5	5	<5	9	4000以下

単位：溶出量はmg/L、含有量はmg/kg (dry)

基準：土壌汚染対策法で定める指定基準で土壌溶出量基準

不検出は検出されないことを示す。

表-6 土壌分析結果（スラグ配合舗装走行実験後）

区分	計量の対象	定量 下限値	分析結果									基準
			1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	No.1工区(1-2) 路面脇粉塵 (土壌)	No.2工区(2-2) 路面脇粉塵 (土壌)	No.3工区(3-2) 路面脇粉塵 (土壌)	
溶出試験	カドミウム	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01以下
	六価クロム	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.05以下
	全シアン	0.1	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
	総水銀	0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005以下
	アルキル水銀	0.0005	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出
	セレン	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.01以下
	鉛	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.01以下
	ヒ素	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.01以下
	フッ素	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.8以下
	ホウ素	0.02	0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	1以下
含有試験	カドミウム	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150以下
	六価クロム	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	250以下
	遊離シアン	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	50以下
	総水銀	0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.04	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	15以下
	セレン	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150以下
	鉛	5	8	8	7	6	7	6	12	8	10	150以下
	ヒ素	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	150以下
	フッ素	50	110	60	120	74	170	80	89	340	170	4000以下
	ホウ素	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	7	5	4000以下

単位：溶出量はmg/L、含有量はmg/kg (dry)

基準：土壌汚染対策法で定める指定基準で土壌溶出量基準

不検出は検出されないことを示す。

4. スラグ配合舗装の環境影響評価

(独)土木研究所にて実施した試験舗装の構成と調査地点配置図を図-9に、混合物の物性を表-3に示す。FNS1、CUS1を容積比で10%配合した舗装の走行実験（49kN輪荷重、40万輪）から、粉塵および周辺土壌の環境影響を調査した。

(1) スラグ配合舗装の粉塵分析

粉塵の全含有量分析結果を表-4に示す。炭素量および強熱減量から、粉塵のおよそ10%強がタイヤ由来であり、その他の多くが土壌の一部であると推定される。

このことから、路面上の粉塵に関しては、スラグを配合したこと起因する環境影響は極めて少ないと言える。

(2) スラグ配合舗装の周辺土壌調査

施工前の分析結果を表-5に、走行実験後における分析結果を表-6に示す。施工前のNo.2工区路面脇に堆積していた粉塵は、ふっ素の含有量が他と比較して高いものの、含有量および溶出量は土壌基準を満足している。また、走行実験後の周辺土壌に関しては、施工前との大きな差異は生じておらず、土壌基準を十分に満足する結果が得られた。

以上から、スラグ配合舗装による土壌への影響は見られず、有害性は確認されなかった。今後は、路床土を含めた土壌への環境影響について調査を行う必要があると考える。

5. まとめ

本研究から得られた知見を以下に取りまとめる。

- 非鉄金属スラグは、高密度かつ低吸水性特質を有しており、舗装用骨材としての品質目標値を満足する。
- 非鉄金属スラグの耐久性は、形状に由来することから、形質に関する評価と指標が品質管理上、重要となる。
- 非鉄金属スラグ配合舗装は、堆積した粉塵や溶出物等による周辺土壌への環境影響を生じない。

以上から、非鉄金属スラグの舗装用細骨材として適性が認められるとともに、整粒処理による品質の向上からパイプロダクト材としての積極的な利用と用途拡大が望まれる。

参考文献

- 加納陽輔，栗谷川裕造，秋葉正一，河合紘茲：溶融固化物（スラグ）の舗装用骨材としての適正および品質に関する研究，土木学会舗装工学論文，Vol.9，（2004），pp.109-116。
- 加納陽輔，大野駿，栗谷川裕造，松島敏範：非鉄溶融固化物を用いたアスファルト混合物の工学的評価に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，Vol.60，（2005），pp.133-134。