

非鉄金属スラグのアスファルト混合物用 細骨材としての利用について

加納陽輔¹・秋葉正一²・栗谷川裕造³・栗栖一之⁴

¹正会員 博(工) 日本大学生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目2-1)

²正会員 博(工) 日本大学生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目2-1)

³正会員 博(工) 日本大学生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町一丁目2-1)

⁴正会員 日本鉱業協会 非鉄スラグ委員長 (〒210-8558 神奈川県川崎市川崎区小島町四丁目2-)

非鉄金属を製錬する際に副次的に得られる非鉄金属スラグは、これまで主にフェロニッケルスラグの表層・基層用骨材や路盤材等への利用を対象に、現場での実績でその適性が概ね確認されている。しかしながら、アスファルト混合物用骨材としての具体的な評価や配合舗装に対する調査事例は少なく、品質の違いが混合物に与える影響をはじめ、管理指標や環境影響についての報告は見当たらない。他産業発生材の舗装用骨材としての適否については、環境保全や資源利用の観点のみにとらわれることなく、資材としての供用性や安全性に留意して総合的に判断する必要がある。本研究では、フェロニッケルスラグおよび銅スラグのアスファルト混合物用細骨材としての利用を多角的かつ総合的に検討するため、非鉄金属スラグの骨材物性と配合混合物に関する室内試験を行い、配合舗装に対する走行実験から環境影響を評価した。

Key Words : *Nonferrous metal slag, fine aggregate, Asphalt mixture, reclaimed material, by-product*

1. はじめに

近年、主要な建設資材である骨材の枯渇が懸念されており、資源の採掘抑制や環境保全の観点から、代替骨材の安全かつ安定的な供給が喫緊の課題となっている。

他産業発生材の舗装用骨材としての利用に関しては、廃ガラスから製造したガラスカレットや廃タイヤを原料とするゴムチップ、都市ごみ・下水汚泥を溶融固化したエコスラグ等^{1)~3)}、最終処分場の延命化と資源の有効利用を推進する旨、発注者を中心とした検討が積極的に進められている。中でも、フェロニッケルや銅を製錬する際に副次的に得られる非鉄金属スラグは、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、原料となる鉱物や製造後の組成が比較的安定していることから、建築・建設用骨材としての一次利用をはじめ、屋根瓦・電柱類等への二次利用を前提に、副生資材としての用途と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ついては、主にフェロニッケルスラグの表層・基層用骨材や路盤材等への利用を対象に、室内および現場での検討でその適性が概ね確認されており^{4)~6)}、標準化へ向けた取組みが積極的に進められている。しかしながら、非鉄金属スラ

グのアスファルト混合物用骨材としての具体的な評価や配合舗装の調査事例は少なく、品質の違いが混合物に与える影響をはじめ、特質に留意した管理指標や実用上の環境影響に関する報告は見当たらない。他産業発生材の舗装用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とらわれることなく、資材として要求される耐久性や含有・溶出物質の安全性等、用途と利用体系に沿った具体的な検討が不可欠である。

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より多角的に検討するため、非鉄金属スラグの特質に着目した骨材物性を評価し、アスファルト混合物の諸性能との関係性を検討した。また、非鉄金属スラグを細骨材として配合した試験舗装の走行実験から、粉塵および溶出物等による環境影響について具体的な調査を行ったので、これらを報告する。

2. 非鉄金属スラグの環境安全性評価

非鉄金属スラグのアスファルト混合物用骨材としての利用を検討するにあたり、舗装のライフサイクルを踏まえた安全性や耐久性、更には環境影響等を確認しなければならない。特に、他産業発生材においては、様々なものを原材料とする場合も多く、これらの管理や産出過程

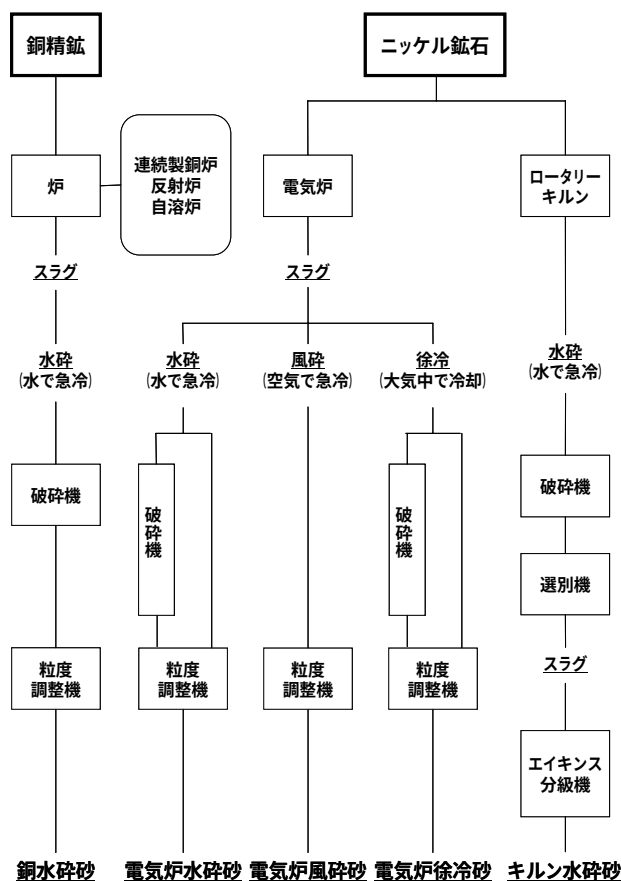


図-1 FNS および CUS の一般的な産出フロー

とともに、環境に悪影響を及ぼす可能性のある物質について、事前にその含有量や溶出量を把握する必要がある。

本研究では、製造所の異なる各 2 種類の FNS（以下、FNS1、FNS2）および CUS（以下、CUS1、CUS2）を用いて、一般的な人工砂である砕砂（栃木県産硬質砂岩）と、天然砂（茨城県産洗砂）との比較評価を行った。

(1) 非鉄金属スラグの産出工程

非鉄金属スラグの一般的な産出フローを図-1 に示す。本研究で使用した 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されたものである。他方、CUS1、CUS2 は自溶炉にて溶融され、錬鋳炉にて銅分と分離した後、水砕されたもので、この製錬法は硫化銅鉱の酸化熱をフルに活用することから、溶鉱炉、反射炉、電気炉に比べて燃料消費量が非常に少なく、国内の約 7 割の銅がこの炉法によって生産されている。また、特に CUS2 を除く試料については、一次資材としての再利用を前提とした破碎・分級等の後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。環境安全上の制約を要する有

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(VI)	< 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(VI)	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	≦0.05

(mg/L)

害物質の含有量は、FNS1、FNS2 とともに検出限界未満であり、土壌汚染対策法に規定される基準値を満足する結果が得られた。一方、CUS1、CUS2 に関しては、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利用する場合、このことに十分留意した管理と取扱いが不可欠と言える。なお、溶出量については、FNS、CUS と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。

以上から、特に CUS については舗装用細骨材としての実用に沿った環境影響を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。

3. 非鉄金属スラグの舗装用骨材としての物性評価

FNS および CUS のアスファルト混合物用細骨材としての利用を検討する上で、スラグ単体での骨材物性の把握が不可欠である。以下に、非鉄金属スラグの粒度と材質、形状、耐久性に関する評価結果を述べる。

(1) 非鉄金属スラグの粒度と材質

舗装用骨材の品質規格として定められている粒度と材質に関する目標値を参考として、骨材のふるい分け試験（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、非鉄金属スラグの材質や

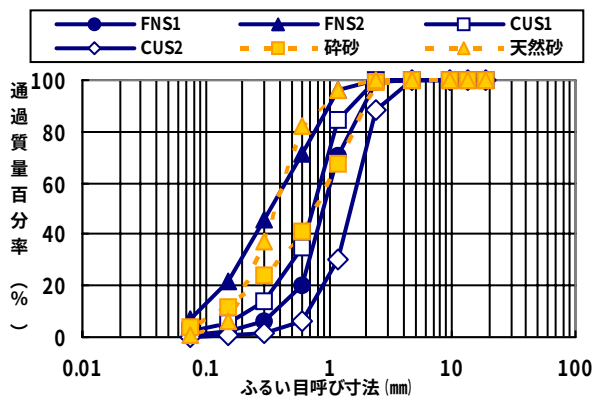


図-2 粒径加積曲線図

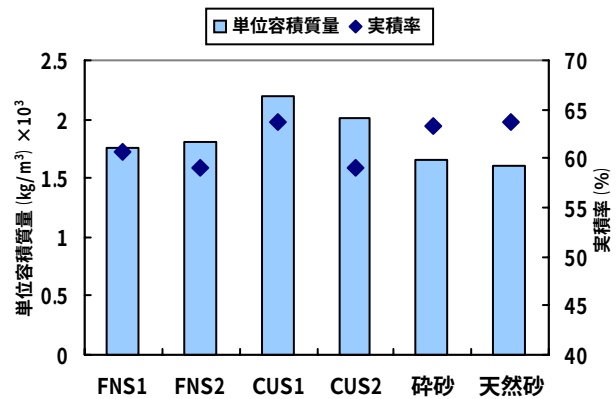


図-4 単位容積質量および実積率

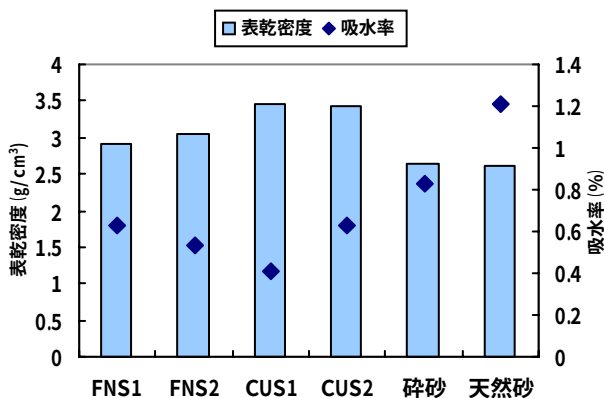


図-3 密度および吸水率



図-5 脆形骨材 (CUS2)

形質に関する特徴をより明確にするため、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-2 に示す。FNS1 および CUS1 の粒度は砕砂に近似しており、これらはスクリーニングスの粒度範囲を概ね満足している。FNS2 は、特に枯渇が懸念されている天然砂の粒度と類似することから、代替利用に適したものと言える。なお、骨材としての利用を目的とした後処理が施されていない CUS2 は、砕砂に比べて粒度が大きく、やや単粒的な傾向が見られる。

これらのことから、水砕によって粒状化された非鉄金属スラグに関しては、用途を踏まえた磨砕等の整粒処理を検討することによって、所要の粒度組成を得ることが可能と考えられる。

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-3 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比較的小さい傾向にある。一方、CUS は密度が 3.4 以上と砕砂、天然砂の 2~3 割程度大きく、吸水率はガラス質な特徴から FNS に比べて小さい。なお、FNS および CUS の材質は、ともに舗装用碎石の目標値である密度 2.45 以上、吸水率 3.0% 以下を満足しており、これらを指標とした場合、舗装用骨材としての適性が認められる。

以上から、非鉄金属スラグの舗装用骨材としての適否

については、舗装用骨材の規格値を満足するものの、特質に留意した適切な指標を検討し、判断する必要がある。

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-4 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、それぞれの傾向に高密度な特質が反映している。また、実積率に関しては、特に後処理の異なる CUS1 と CUS2 に大きな差異が見られることから、非鉄金属スラグの形質に関連した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

密度と吸水率の目標値は、舗装用碎石の材質を概略的に判断する目安であり、非鉄金属スラグの鉱物組成の違いから、その適否を判定するため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、具体的な評価手法とともに、混合物に与える影響が明示されておらず、検討例も極めて少ない^{7),8)}。本研究では、非鉄金属スラグの形質を簡便かつ定量的に評価するため、目視による細骨材の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、粗骨材の形状試験に定められている細長あるいは扁平形状と、図-5 に示すような突起部分が多く耐久性が懸念される形状を、併せて脆形骨材として区分し、全試料質量 (約 50g) に対する脆形骨材の混入率 (以下、

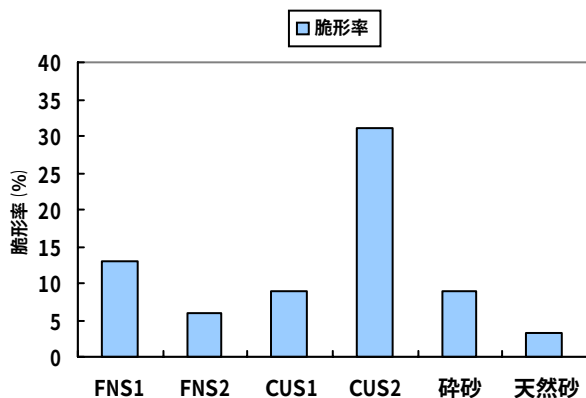


図-6 脆形率

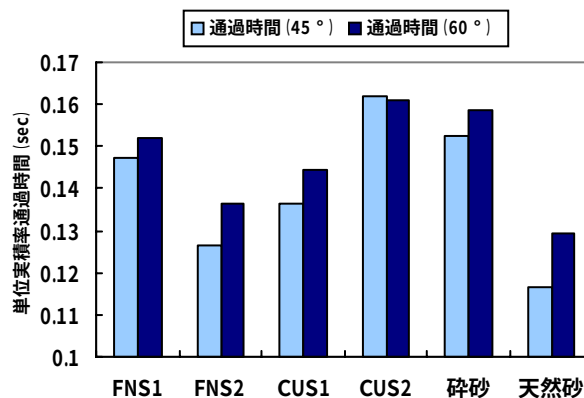


図-8 単位実積率通過時間

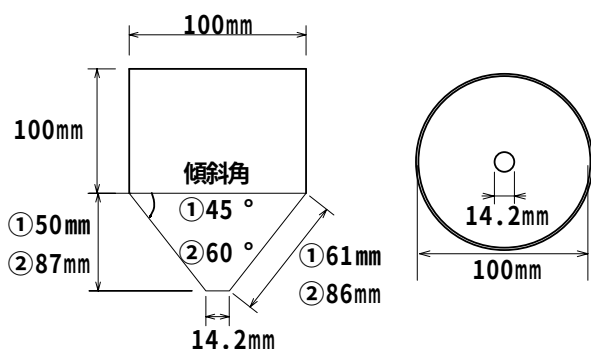


図-7 形状試験用ロート

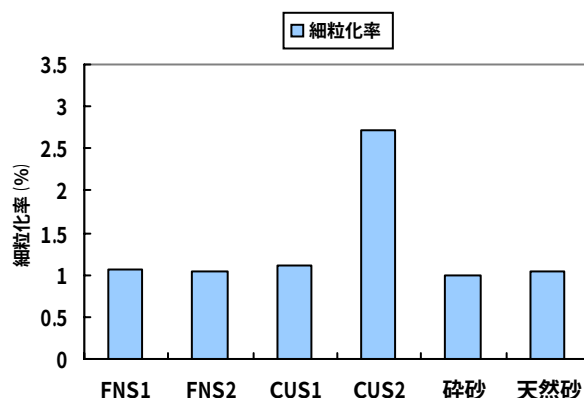


図-9 細粒化率

脆形率) から細骨材形状を評価した。なお、試験結果は3名の試験者による判別結果の平均値を用いた。

脆形率を図-6に示す。突起部を有する形状は、碎砂およびFNSに殆ど確認されることなく、これらに混在する脆形骨材の多くが扁平形状であった。一方、CUSにおいては逆に扁平形状は確認されず、針状や突起部を有する脆形骨材が多く見られた。特に後処理を施していないCUS2については、他に比べて脆形率が大きい。

以上から、水砕によって粒状化された非鉄金属スラグに対しては、整粒処理による舗装用骨材としての高品質化と均質化が十分に期待されると同時に、形状に関する品質管理項目が必要と考える。

b) ロート通過形状試験

細骨材形状に関する参考試験として、ロート通過形状試験を実施した。試験は、図-7に示す傾斜角が45°と60°の2通りのロートを用い、一方のロートで充填した同容積の試料が他方の試験用ロートを通過する時間を測定した。なお、試験結果は粒度や形質等による充填の差異に配慮して、通過時間を実積率で除した単位実積率通過時間を求め、3回の平均値から相対的に評価した。

単位実積率通過時間を図-8に示す。FNSおよびCUSの単位実積率通過時間は、脆形率の傾向を反映しており、特に45°における試験結果はこの傾向が顕著である。

このことから、目視による識別が困難な細骨材につい

ては、ロート通過時間による形状判定が概ね可能であると考えられ、今後、ロートの傾斜角や口径、結果の取扱い等に対する検討を重ね、細骨材形状に関するより多くのデータを蓄積する必要がある。

(3) 非鉄金属スラグの耐久性

細骨材の硬さに関しては、幾つかの機関で独自の評価が行われているものの^{9), 10)}、その手法は未だ確立されていない現況にある。本研究では、非鉄金属スラグの特徴的な形質に留意し、ロータップふるい振とう機による細骨材のすり減り試験から、摩耗や破碎に対する耐久性の評価を試みた。また、微細なひび割れや凍結融解作用に対する安定性と耐久性を評価するため、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ふるい上に銅球(φ 25, 67g, 20 個)を投入して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、これを細粒化率として比較評価した。

細粒化率を図-9に示す。非鉄金属スラグの細粒化率は、脆形骨材が多く混在していたCUS2を除き、一般的な細骨材と同程度である。

この結果は、非鉄金属スラグの形状と耐久性との関係

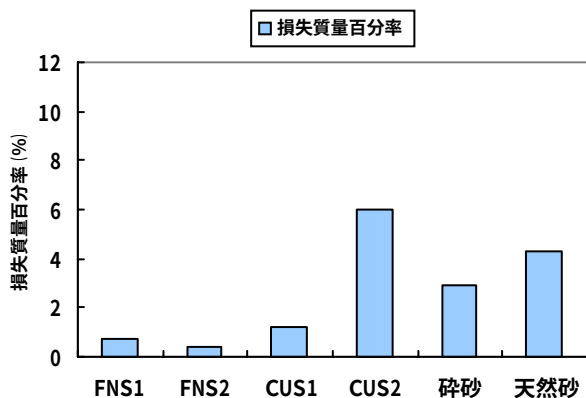


図-10 損失質量百分率

表-3 混合物の物性値

	FNS1	FNS2	CUS1	CUS2	標準試料
アスファルト量 (%)	5.6	5.6	5.4	5.6	5.3
密度 (g/cm ³)	2.385	2.396	2.432	2.409	2.386
空隙率 (%)	4.0	3.8	3.5	4.1	3.7
飽和度 (%)	76.4	77.2	78.4	75.9	76.7
フロー値 (1/100cm)	24	30	28	32	34

を示唆するものであり、密度や吸水率のみならず、特徴的な形質に留意した品質管理の重要性が認められた。

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-10に示す。脆形率および細粒化率が大きいCUS2は、耐久性の目標値である損失量12%以下（表層・基層）を十分満足するものの、一般的な細骨材に比べてやや劣る傾向にある。他方、FNS1、FNS2、CUS1については、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。

4. 非鉄金属スラグを配合した混合物の性能評価

供試体は、ストレートアスファルト 60-80 による密粒度アスファルト混合物（最大粒径 13mm）に対して、FNS1、FNS2、CUS1、CUS2 を重量比で各 10% 配合した 4 種類を作製し、剥離抵抗性能、ひび割れ抵抗性能、流動抵抗性能に関する室内試験結果から、一般的な細骨材を用いた混合物（以下、標準試料）との比較評価を行った。

混合物の物性値を表-3に示す。脆形率の大きいFNS1、CUS2を配合した混合物は、標準試料に比べて空隙率が大きく、飽和度が低下している。また、高密度なCUSを配合した混合物は、比較的密度が高い傾向にある。

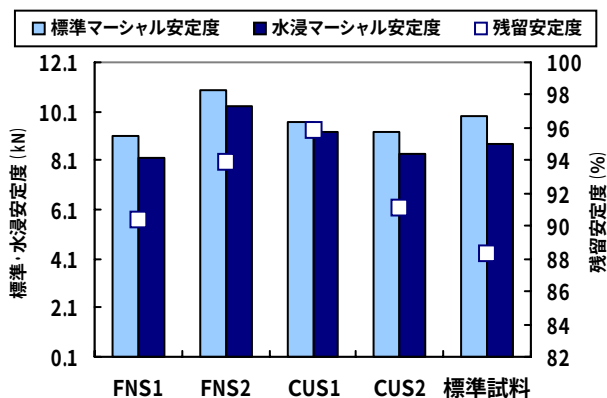


図-11 標準・水浸マーシャル安定度および残留安定度

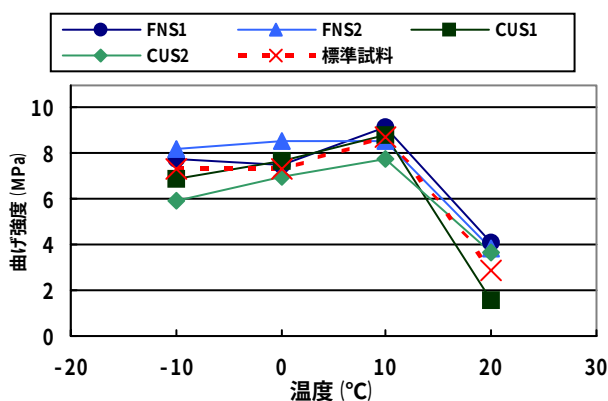


図-12 温度と曲げ強度の関係

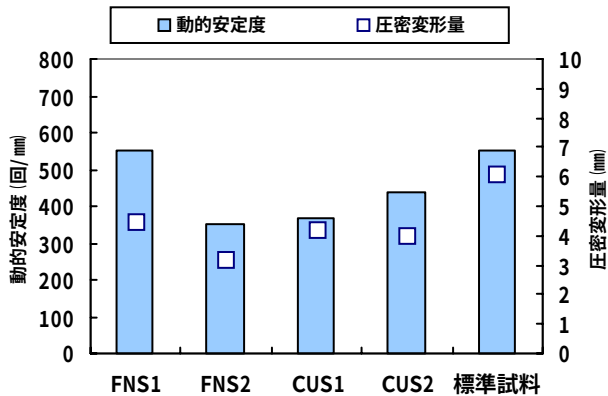


図-13 動的安定度および圧密変形量

(1) スラグ配合混合物の剥離抵抗性能

標準・水浸マーシャル安定度および残留安定度を図-11に示す。FNS および CUS を 10% 配合した混合物のマーシャル安定度は標準試料と同程度であり、水浸後においても安定度を比較的保持している。このため、非鉄金属スラグ配合混合物は、耐水性や耐剥離性の参考値である残留安定度が標準試料に比べて高い傾向にあり、目標値である 75% 以上を十分に満足する結果が得られた。

(2) スラグ配合混合物のひび割れ抵抗性能

非鉄金属スラグを配合した混合物の曲げ試験（試験温

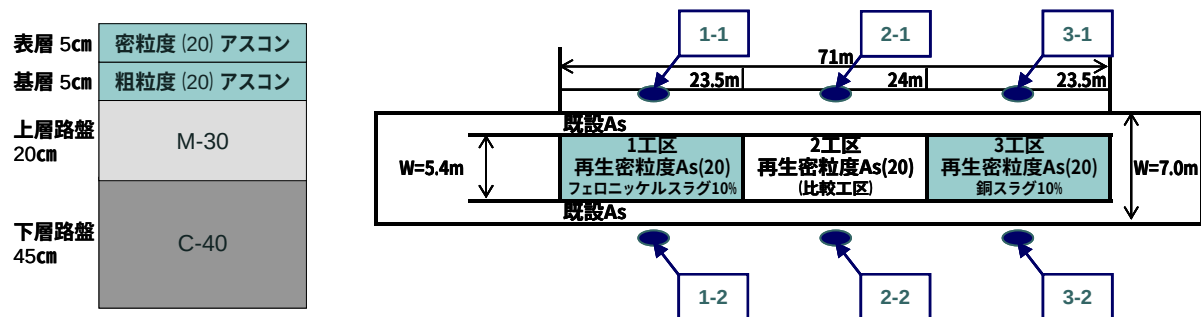


図-14 試験舗装の構成と調査地点配置図

表-4 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/cm ³)	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-5 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

度：-10, 0, 10, 20°C, 供試体形状：50×50×300 mm) を実施し、ひび割れ抵抗性能を評価した。

温度と曲げ強度の関係を図-12 に示す。FNS 配合混合物は、各温度下で標準試料と同等以上の曲げ強度が発現しており、中でも単体での耐久性に優れる FNS1 を配合した混合物は、0°Cおよび-10°Cで比較的高い曲げ強度が得られている。他方、CUS 配合混合物は、細粒化率と損失質量百分率の大きい CUS2 配合混合物が 10°C以下の弾性域においてやや脆弱であり、脆形率の低い CUS1 配合混合物は 10°C以上の流動域で強度低下が顕著である。

このことから、非鉄金属スラグの耐久性が弾性域の混合物性状に、噛み合わせを含めた形質傾向が流動域の混合物性状に、影響を及ぼす可能性が確認された。

(3)スラグ配合混合物の流動抵抗性能

非鉄金属スラグ配合混合物の流動抵抗性能を評価するため、ホイールトラッキング試験を実施した。

動的安定度および圧密変形量を図-13 に示す。非鉄金属スラグを配合した混合物は、圧密変形量が小さいものの、動的安定度が低下している。この傾向は、細粒化率の大きい CUS2 を配合した混合物を除き、脆形率およびロート通過時間の傾向に概ね類似することから、細骨材の形状に起因した噛み合わせ強さが、混合物の流動抵抗性に影響したと考えられる。

以上の結果から、特に非鉄金属スラグ単体の形質および耐久性が混合物の流動抵抗性能を左右する可能性が確認され、このことは形質と耐久性が関与した噛み合わせ強さに配慮した破碎・分級等の後処理の必要性和品質管理の重要性を示唆している。

5. スラグ配合舗装の環境影響評価

2. の含有試験から、CUS についてはヒ素および鉛の含有量が基準値を上回る結果が確認されている。このことから、特に CUS の細骨材としての利用を検討する上では、実用に沿った環境影響を検証する必要がある。

(独) 土木研究所の走行実験場において実施した試験舗装の構成と調査地点配置図を図-14 に、混合物の物性値を表-4 に示す。本研究では、骨材物性が良好であった FNS1 および 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) を実施し、路上の粉塵および周辺土壌の分析から環境影響を調査した。

(1) スラグ配合舗装の粉塵分析

走行実験後の路面上に堆積した粉塵を工区ごとで回収し、全含有量を分析した。

粉塵の全含有量分析結果を表-5 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、

表-6 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
含有試験	ホウ素	0.02	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	1以下
	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
含有試験	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-7 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
含有試験	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
	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
含有試験	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。

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、路面上の粉塵については、非鉄金属スラグの配合に起因する環境影響の可能性は極めて少ないと言える。しかしながら、非鉄金属スラグ配合舗装の粉塵に関しては、CUSの含有量の問題に留意して慎重に検証を進める必要があり、現在、走行時または切削時に回収した大気中の粉塵分析を行い、大気環境影響に関する実用に沿った評価を重ねている。

(2) スラグ配合舗装の周辺土壌調査

スラグ配合舗装の周辺土壌に関して、施工前と走行実

験後における含有量試験（環境省告示第19号準拠）、溶出量試験（環境省告示第18号準拠）を実施し、舗装体からの溶出物等による環境影響を評価した。

周辺土壌の施工前における分析結果を表-6に、走行実験後における分析結果を表-7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、施工前の分析結果と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、細骨材として非鉄金属スラグを配合したア

スファルト混合物舗装による周辺土壌への影響は確認されず、今回の調査において有害性は一切認められなかった。今後は、排水性舗装や透水性舗装を対象とした検討を行うとともに、路床土を含めた周辺土壌に対する環境影響について追跡調査を実施する必要があると考える。

6. まとめ

本研究では、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管理と利用を検討するため、骨材としての物性と配合混合物に関する室内試験を行い、配合舗装における走行実験から環境影響について評価した。

以下に得られた知見を取りまとめる。

- a) 非鉄金属スラグは、鉱物組成や産出工程に由来した高密度かつ低吸水性な特質を有しており、舗装用骨材としての品質目標値を十分満足する。
- b) 非鉄金属スラグの耐久性は、その形質に大きく左右されることから、形状に関する評価方法と品質管理指標に関する検討が望まれる。
- c) 非鉄金属スラグを配合したアスファルト混合物は、弾性域においてスラグの耐久性が性能に反映し、流動域においてスラグの形質が影響する可能性がある。
- d) 非鉄金属スラグ配合舗装は、堆積した粉塵による土壌環境への影響が見られず、含有物や溶出物等による周辺土壌の汚染を生じない。

以上から、非鉄金属スラグは枯渇が懸念される天然砂の代替材として十分なポテンシャルが認められるとともに、アスファルト混合物用骨材としての的確な品質管理により、パイプロダクト副生資材としての積極的な利用が望まれる。今後は、非鉄金属スラグ配合舗装の供用性や環境影響に関する追跡調査について、非鉄金属スラグの高品質化、均質化に対する検討結果と併せて報告する。

謝辞：本研究は(独)土木研究所および日本鉱業協会の多大な協力によって結実したものであり、ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 小川康夫：アスコン細骨材としての焼却灰溶融スラグの活用について、(社)日本アスファルト合材協会、アスファルト合材、No.61, p.22-28, 2002.
- 2) 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, p.109-116, 2004.
- 3) 飯島尚, 小島逸平：スラグの品質試験, 舗装, Vol.18, No.9, p.20-27, 1983.
- 4) 藤村彰, 松尾栄治, 樋野和俊, 浜田純夫：金属スラグと石炭灰を多量使用した転圧コンクリート舗装の現場施工, 中国支部研究発表会発表概要集, Vol.56, p.507-508, 2004.
- 5) 佐藤幸保, 小村弘, 田中利知, 井山浩：フェロニッケル水砕のアスファルト舗装への利用, 日本道路会議論文集, Vol.15, p.2, 1983.
- 6) 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, pp.133-134, 2005.
- 7) 神谷恵三, 竹田豪文：細骨材の粒形に関する研究, 日本道路会議論文集, Vol.21, No.5, p.294-295, 1995.
- 8) 小林正利, 水野卓哉, 久保和幸：細骨材の形状がアスファルト混合物に与える影響について, 日本道路会議論文集, Vol.21, No.5, p.298-299, 1995.
- 9) 井上武美：道路用細骨材の強硬さ試験方法の提案, 土木学会論文集, No.250, pp.133-136, 1976.
- 10) 飯島尚, 小島逸平：アスファルト混合物用細骨材の試験法, 舗装, Vol.18, No.6, pp.3-11, 1983.

THE APPLICATION OF NONFERROUS METAL SLAG AS FINE AGGREGATE OF THE ASPHALT MIXTURE

Yosuke KANO, Shoichi AKIBA, Yuzo KURIYAGAWA and Kazuyuki KURISU

This paper presents use of nonferrous metal slag as fine aggregate of the asphalt mixture. The nonferrous metal slag, which is produced in the process to smelt copper or ferronickel, was used at the experiment. Evaluations about the environment safety and the quality of the several slags were carried out in the experiment. As the results, the quality of the slag satisfied the standard of fine aggregate of the asphalt mixture, and the performance of a mixture satisfied using as the surface material fully. And, relationship between the quality of the slag and performance of the asphalt mixture became definite. In particularly, there was a slag that the content of several toxic substances exceeded its standard, but it was confirmed that is no problem by the environmental soil quality examinations at the field test.