

溶融スラグの凍結路面用防滑材利用のための基礎的研究*

佐藤 佳之** 菅原 龍江** 小野 元** 小向 隆志**

積雪寒冷地域である岩手県においては、道路管理者が凍結路面の滑り止めを目的として砂等の防滑材を散布している。本研究では、溶融スラグを防滑材として利用するため実験的な検討を行った。その結果、溶融スラグが砂と同等の滑り止め性能を有し、重金属類の溶出可能性は低く、防滑材としての利用可能性が十分あることがわかった。

キーワード：溶融スラグ、滑り抵抗性、冬季路面管理、重金属、溶出

Utilization of molten slug as an antiskid material on icy roads

SATO Yoshiyuki, SUGAWARA Ryukou, ONO Tsukasa and KOMUKAI Takashi

In Iwate prefecture, a cold and snow-covered region, road administrators sprinkle antiskid materials, such as sand, to prevent skidding on icy roads. An experimental study was conducted under which molten slug was used as an antiskid material. As a result, it was found that the antiskid effect of molten slug is equivalent to that of sand, with a low possibility of elution of heavy metals, thus presenting a high enough potential to be utilized as an antiskid material.

Key words: molten slug, skid resistance, winter road maintenance, heavy metals, elution

1 はじめに

岩手県のような積雪寒冷地域においては、積雪や気温の低下により雪氷路面が出現する。交通車両のスタッドレスタイヤ化に伴って除雪による幅員確保だけではなく、路面状態の管理が重要となっており、その対策として道路管理者は凍結抑制剤（塩化ナトリウム、塩化カルシウム等）の散布や、防滑材として主に洗い砂、または砕砂（以降「砂」と記載。）の散布を行っている。防滑材としての砂は、凍結抑制剤と異なり気温に左右されず即効性を持つため岩手県内でも特に寒冷な地域で使用されているが、砂は近年良質の原石が枯渇しつつあることから実勢単価が上昇傾向にあり、地域の需給バランスによっては一時的に入手困難となる場合もある。

一方、県内の廃棄物処理施設においては廃棄物の溶融処理が行われており、それに伴って発生する溶融スラグの有効利用が課題となっている。現在のところ利用用途が限定されていて引き取り手が少ない。岩手県における溶融スラグの実勢単価は 200 円/t 前後と、砂の 2,000 円/t 前後と比較し安価な価格で取引されており、かつ安定的に生産されているため、溶融スラグを砂の代替材として利用できれば供給側、需要側ともにメリットは大きい。

溶融スラグの利用用途は、一般的にはコンクリートやアスファルト用の骨材や路盤材として利用されることが多く、これまで我々もこれらの適用性について検討¹⁾を行ってきたところである。本報では、

上記で述べたような天然砂資源の枯渇、溶融スラグの有効利用という課題を踏まえ、新たな用途として防滑材としての利用検討を実験室規模で行ったので報告する。

2 実験方法

2-1 試料

試料として用いた溶融スラグは、県内にある 2 箇所の一般廃棄物処理施設（A 事業所、B 事業所）で現に発生しているものを用いた。表 1 にそれぞれの事業所における溶融処理を示す。どちらも溶融炉は同じ形式であり、溶融後は水で満たされたピットへ出滓され熱衝撃で水砕される。水砕に伴って粗い粒子や針状の不定形粒子が発生するが、これらの形状を整える磨砕処理の有無が両事業所間の主な違いである。

防滑性能の評価は、実際に防滑材として使用される天然砂を比較材として使用して行った。なお、防滑材としての品質に標準規格はなく、各道路管理者が任意に規格を指定し購入している。岩手県の場合、

表 1 溶融スラグ 2 種の溶融処理

| スラグの種類 | 溶融形式 | 出滓方法 | 磨砕処理 |
|----------------|------------------------------|----------------|------|
| スラグA (A事業所) | シャフト炉式ガス化溶融 (1700℃～1800℃) | バッチ式出滓 (水砕) | なし |
| スラグB (B事業所) | シャフト炉式ガス化溶融 (1700℃～1800℃) | 連続出滓 (水砕) | あり |

* 基礎的・先導的研究事業

** 環境技術部

コンクリート用骨材としての JIS 規格(洗い砂(JIS A5308)、砕砂(JIS A5005))への適合を発注時品質指定している。

今回用いた試料3種の粒度曲線を図1に示した。

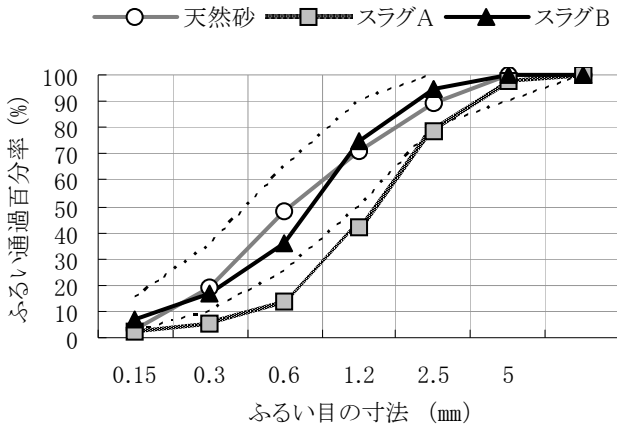


図1 試料の粒度曲線

図中に点線でコンクリート用骨材の規格粒度範囲を示した。スラグAがコンクリート用骨材としての砂の規格を外れている。しかし本来防滑材として求められる粒度としては、粉塵問題を起こす0.1mm以下の粒子が少ないもので、最大粒径は通行車両や除雪車への影響を考慮し5~8mm以下であるものが望ましい、とされている²⁾。したがってスラグAも十分に防滑材として利用できる可能性があるため試料として検討に加えた。試料の外観を図2に示す。



図2 試料写真(左からスラグA・スラグB・天然砂)

2-2 安全性の確認(溶出試験)

溶融スラグの安全性評価として、一般的には JIS K0058 (スラグ類の化学物質試験方法) によって確認が行われている。しかしながら JIS は品質保証の為に当事者間で利用されるため、法律上の規制や試験法は定められていない。したがって利用当事者が適切にリスクを確認しておく必要がある。

土壌や地下水への影響を評価する溶出試験 JIS K0058-1 に着目すると、「溶融スラグを用いた路盤材、アスファルト製品、コンクリート製品等の製品」を適用範囲としている。防滑材として利用される場合は路面に散布した防滑材が周辺の土壌と区別できない状態で残存し、超長期的には物理的破壊で粒子が微細化され、降雨に含まれる酸との直接接触が

考えられる。そこで通常の JIS K0058-1 による試験(以降「試験(1)」とする)を一部改変し、試料の微細化と降雨中の酸との接触条件を追加設定した試験(以降「試験(2)」とする)を行い、安全性の評価を試みた。試験(1)、試験(2)で定量分析した重金属類は、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、フッ素、ホウ素である。

試験(2)では、岩手県の10年分の降雨に含まれる酸とスラグとの接触を想定し、次のようにして酸性溶出溶媒を作成した。

- 1) 岩手県の降水中のイオン成分 (Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 測定結果³⁾から、過去10年分(平成9年~平成19年)の土壌沈着量 (meq/m^2) を算出した。
- 2) 土壌 1m^3 あたり乾土 $1,300\text{kg}$ とし、土壌 1kg 当たりに接触した過去10年間のイオン分量を硫酸、硝酸の重量に換算して求めた。
- 3) 溶出試験の液固比 ($10\text{L}/\text{kg}$) に応じて溶出溶媒に求めた重量の硫酸、硝酸を添加し、酸性溶出溶媒を作成した。

以上の手順で作成した試験(2)の酸性溶出溶媒の初期 pH は 4.2 であった。

さらに、環境中で溶出し得る重金属類の最大量を把握するため、アベイラビリティ試験⁴⁾(以降「試験(3)」とする)を実施した。これは環境中で考えられる範囲で物理的、化学的に最も厳しい条件を想定し、その範囲で溶出を抑制することのないよう粒径、pH、液固比を設定し、試料 1kg 当たりの溶出最大量 (mg/kg) を確認する試験方法である。(オランダ公定試験法: NEN 7371)

この試験では、試料を微粉碎し、無限量の酸との接触を想定し硝酸で滴定しながら pH7 に維持した状態で3時間(ステップ1)、その後 pH4 に維持した

表2 溶出条件一覧

| 試験NO. | (1) | (2) | (3) |
|---------|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| 試験名称 | JISK0058-1 (粗砕試料) | JISK0058-1 (改) | NEN 7371 |
| 試料粒径 | <2mm | <125 μm | <125 μm |
| 溶媒 | 塩酸溶液 | 硫酸+硝酸溶液 | 硝酸溶液 |
| pH | 6.0(初期) | 4.2(初期) | 7.0/4.0維持 |
| 試料量(g) | 50 | | 16 |
| 溶媒量(ml) | 500 | | 800+800 |
| 液固比 | 10 | | 50+50 |
| 溶出時間(h) | 6 | | 3×2回 |
| 溶出容器 | 1Lポリエチレンボトル | | 1Lビーカー |
| 溶出方法 | 平行振とう 200回/min | | スターラー攪拌 200rpm |
| ろ紙 | 0.45 μm メンブレンフィルター | | |

状態で 3 時間 (ステップ 2)、溶出と抽出操作をそれぞれ行い、溶出液の重金属類の濃度と液固比から最大溶出可能量(mg/kg)を、pH の維持に必要な硝酸の量から、試料の酸緩衝容量(mol/kg)を求めた。試験 (3) では、カドミウム、鉛、総クロム、砒素、総水銀、セレン、ホウ素の定量分析を行った。なお、カドミウム、鉛、総クロム、砒素、セレン、ホウ素の定量は高周波プラズマ質量分析装置 (パーキンエルマー (株)製 ELAN6100DRC)、総クロムの定量はフレイム原子吸光光度計 (株島津製作所製 AA-6300) を用いて行った。今回実施した試験の一覧を表 2 に示す。

2-3 滑り抵抗試験

防滑性能の評価には、英国で開発された振り子式スキッドレジスタンステストを利用した。これはエネルギー保存の法則を利用した滑り抵抗の測定器で、ゴムのスライダを取り付けた振り子を所定の高さから振り下ろし、振り子が路面を擦った後に振りあがった高さを読み取る。得られた値は BPN (British Pendulum Number) という値で表され、この値を 100 で割った値が 40km/h でのタイヤと路面のすべり摩擦係数になるとされる。

まず平滑な氷上に乾燥させた試料を均一に散布し、振り子式スキッドレジスタンステストで滑り抵抗値を測定した。砂の散布量は 100g/m² で十分効果があるとされており²⁾、持続性を考慮した散布量も想定して実験での散布量を 100g/m², 200g/m² とし、各試料の滑り抵抗値を比較した。

測定時の氷温は -1±1℃、気温は 0±2℃ の条件で試験を実施し、試験は各条件とも 3 回実施し、結果を平均値で評価した。



図 3 滑り抵抗試験状況

3 実験結果

3-1 溶出試験

試験 (1)、試験 (2) の結果を表 3 に、試験 (3) の結果を表 4 に示す。

表 3 試験 (1)、試験 (2) 結果

| 測定項目 | 基準値 (mg/L) | 試験結果(mg/L) | | | |
|-------|------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| | | スラグA | | スラグB | |
| | | 試験(A) JIS K0058-1 | 試験(B) JIS変法 | 試験(A) JIS K0058-1 | 試験(B) JIS変法 |
| ホウ素 | 1.00 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.06 |
| ヒ素 | 0.01 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| セレン | 0.01 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| カドミウム | 0.01 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 鉛 | 0.01 | <0.001 | <0.001 | 0.005 | <0.001 |
| 六価クロム | 0.05 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.022 |
| 総水銀 | 0.0005 | <0.00005 | <0.00005 | <0.00005 | <0.00005 |
| フッ素 | 1.00 | 0.25 | 0.34 | <0.2 | <0.2 |
| 初期pH | | 6.0 | 4.2 | 6.0 | 4.2 |
| 最終pH | | 10.3 | 11.2 | 10.6 | 11.0 |

表 4 試験 (3) 結果

| 測定項目 | 最大溶出可能量(mg/kg) | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | スラグA | | スラグB | |
| | Step1 pH7.0 | Step2 pH4.0 | Step1 pH7.0 | Step2 pH4.0 |
| 硝酸滴下量 (mol/kg) | 0.052 | 1.188 | 0.056 | 0.500 |
| ホウ素 | 1.57 | 31.69 | 1.21 | 6.25 |
| ヒ素 | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 |
| セレン | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 |
| カドミウム | <0.05 | <0.05 | <0.05 | <0.05 |
| 鉛 | <0.05 | 1.33 | <0.05 | 0.22 |
| 総クロム | <0.05 | 17.22 | <0.05 | 3.48 |
| 総水銀 | <0.0025 | <0.0025 | <0.0025 | <0.0025 |

促進曝露条件を想定した試験 (2) では試験 (1) よりフッ素、ホウ素の溶出量がわずかに高くなったものの、有害物質の溶出量に顕著な増加は見られなかった。

試験 (3) では、ホウ素、鉛、総クロムの溶出可能性があること、溶出液の pH が低い場合溶出量も多くなることがわかった。なお、試験 (3) は有害性リスク判定の一助とするために最大溶出量を把握する試験であり、特に基準値等は定められていない。この試験 (3) の結果から考察した溶融スラグの有害性リスクについては後述する。

3-2 滑り抵抗試験

滑り抵抗試験の結果を図 4 に示す。

スラグ A、スラグ B とともに天然砂とほぼ同等の滑り抵抗値が得られた。

4 考察

4-1 溶融スラグの溶出特性

溶融スラグ 2 種において、通常行われる溶出試験 (1)、促進曝露条件を設定した試験 (2) を行ったところ、問題となる量の重金属類の溶出は認められなかった。一方、超長期的な無限量の酸との接触を模擬した試験 (3) の結果から、スラグ A、スラグ B とともに

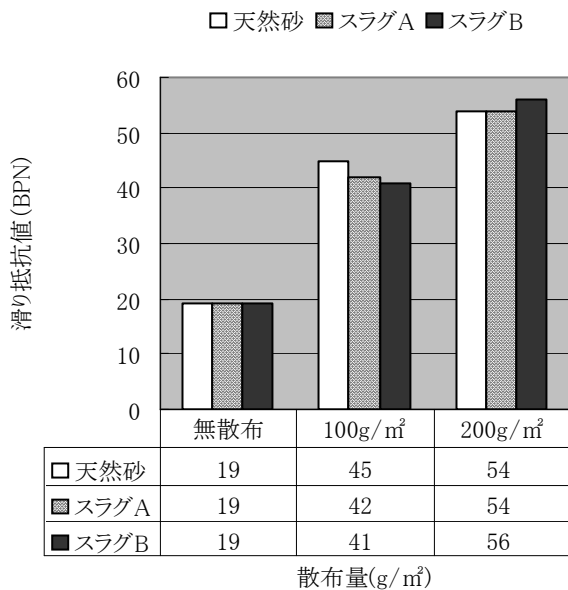


図4 滑り抵抗試験結果

スラグの酸緩衝容量を超えた酸と接触し溶出液のpHが低下した場合、ホウ素、クロム、鉛が溶出する可能性があることがわかった。この結果から、スラグの微砕化による溶媒との接触面積の増加は溶出量にさほど影響はなく、むしろ溶出液のpHの影響が大きいことがわかる。試験(1)、試験(2)では、早川⁵⁾が指摘しているように、スラグ自身の持つアルカリ度が高いため、溶出液のpHが高く、金属類の溶解度が低くなり、溶出が抑制された⁴⁾と考えられる。

ここで岩手県の降雨中イオン成分測定結果¹⁾から、1年間の降雨によって土壌が接する酸の量を模擬的に算出すると、硫酸イオン：0.000019mol/kg、硝酸イオン：0.000021mol/kgであり、スラグA、スラグBの持つ酸緩衝容量(表4中に記載)と比較し非常に小さい。したがって、現実的なタイムスケールでは降雨中の酸との接触でスラグの酸緩衝能が失われ、溶出液のpHが低下することで有害物質の溶出が起こることは判断できない。

今回は、肴倉⁶⁾が提案しているような乾湿繰り返しや、凍結融解等他の曝露条件については未検討である。また溶融対象のばらつき等も考慮すると、継続的な試験を行って最終的な安全性を判定することが必要であり、この点は今後の課題である。

4-2 溶融スラグの滑り抵抗

スラグA、スラグBともに砂とほぼ同等の防滑性能が得られることが明らかとなった。

今回の試験で用いた振子式スキッドレジスタンススタは路面に接するゴム切片が76mm、接地長は124~127mmという小さな摩擦面積で測定することから、氷面のわずかな凹凸や散布ムラで測定値の

ばらつきが発生する。また、大きめの粒子がゴムと氷面に咬みこまれずに弾き飛ばされ、滑り抵抗値に寄与しないことが認められたため、実車を用いた実用試験でも滑り抵抗性能を確かめておく必要があり、実車でのブレーキテストも実施した。

しかし速度やブレーキング等の運転条件の変動、制動の繰り返しによる路面の変化、外気温、日射の有無の影響を受け、測定値は振子式スキッドレジスタンススタでの測定以上にばらつきが見られ、評価は困難であった。実車による性能の測定と評価は、実験条件を再度吟味して行う必要がある。

5 まとめ

溶融スラグの新たな用途として防滑材としての利用を提案するため、滑り抵抗、環境安全性の二つの面から検討を行った。

溶融スラグを氷面に散布して得られる滑り抵抗値は、現在防滑材として使用されている天然砂と同等の値を示した。また、防滑材として利用した際の環境条件を加味した溶出試験を行った結果、今回の試験の範囲では問題となる重金属類の溶出はなかった。環境安全性は一系統の試料だけで判断することはできず継続的な評価が必要であるものの、溶融スラグの防滑材としての利用可能性は十分あることが分かった。

文 献

- 1) 平野高広, 菅原龍江, 佐々木秀幸, 藤原忠司, 小山田哲也: 岩手・青森県境不法投棄物溶融スラグのコンクリート及びアスファルト混合物への利用, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p642-644 (2005)
- 2) 宮本修司, 高木秀貴, 美馬大樹: 凍結路面对策としての滑り止め材の利用について, 開発土木研究所月報 No. 496, p38-42 (1994)
- 3) 岩手県環境生活部環境保全課: 平成19年度酸性雨測定結果の概要
- 4) Netherlands Normalization Institute Standard NEN 7371:2004 'The Maximum Availability Leaching Test'
- 5) 早川亮太: 溶出試験法と問題点, 水質汚濁研究, Vol. 13 No3, p155-159 (1990)
- 6) 肴倉宏史, 大迫政浩: 建設系再生製品を対象とした環境安全性評価試験システムの廃棄物学会規格化への取り組み, 廃棄物学会誌, Vol. 18, No6, p321-329 (2007)