

県境不法投棄物溶融スラグの市場化（最終報）*

菅原 龍江**、佐藤 佳之***

県境不法投棄物溶融スラグの市場化を図るため、不法投棄物の溶融処理で得られた2種類の溶融スラグについてコンクリート基礎試験、及びコンクリート二次製品の商品化試験を行った。その結果、2種類のスラグとも、市場化する上で問題ない十分なデータを得ることができた。

キーワード：不法投棄物、溶融スラグ、市場化

Making to Market of Molten Slag made from Prefectural Boundary Illegal Waste(The final report)

SUGAWARA Ryukou and SATO Yoshiyuki

In order to assure the market conversion of the prefectural boundary illegal waste molten slug, fundamental test of concrete and commercializing test of concrete secondary products it did concerning the melted slug of 2 types which are obtained with melting processing of illegal waste. As a result, also the slug of 2 types, it could obtain the sufficient data, it understood that it is not any problem when becoming a market.

key words : illegal waste, molten slag, market

1 緒言

平成11年、岩手・青森県境において、国内最大級の産業廃棄物不法投棄事件が発覚した。岩手県では不法投棄現場の原状回復を行うこととしており、平成16年8月から岩手県側の推定総量324,320トンに及ぶ不法投棄物の撤去作業が進められている。

これらの廃棄物処理の一環として、平成18年8月から溶融処理が行われているが、産業廃棄物や不法投棄物の溶融例はほとんどないため、発生する溶融スラグを土木工事用骨材の代替材として再利用するためには、確認すべき技術上の課題が多い。

そこで、溶融処理開始前に実施した不法投棄物の試験溶融により得られたスラグを用いて骨材試験等の各種試験を行ってきた^{1,2,3)}。しかし、その際の溶融対象物は、現在溶融処理されている溶融対象物とは性質が異なることから、県境不法投棄物溶融スラグの市場化を促進するため、現在の処理プロセスにより溶融して得られるスラグを用いた試験を行った結果、市場化のための実践的なデータを得ることができたので報告する。

2 研究方法

2-1 溶融対象の不法投棄物

平成15～16年度に実施した試験溶融は3溶融施設で行ったが、その際の溶融対象の不法投棄物は、ボーリング調査のコア等の試料分析結果から、平均

的な特性を示す地点を選定し、その地点の投棄物を溶融試験試料としていた⁴⁾。

その後、不法投棄物の撤去が本格化すると、投棄物の処理はセメント原料への利用が主となり、セメント原料に使用できない投棄物だけが溶融処理に回るため、溶融対象となる不法投棄物の性質は異なってきた。

今回、溶融処理の対象となった不法投棄物は、塩分の高い汚泥、フィルム状の廃プラスチック、廃プラスチックの小塊、金属くず、堆肥様汚泥の混合物である⁵⁾。

2-2 溶融処理

岩手県側の県境不法投棄物の溶融処理は、岩手県内にある一般廃棄物処理施設のA事業所及びB事業所で行われている。

両施設の溶融炉は、メーカーは異なるがいずれもシャフト式ガス化溶融方式で、溶融温度は1,700～1,800℃、副資材としてコークス及び石灰石を使用している。これらの施設では、通常処理している一般廃棄物と不法投棄物とを混合して溶融処理を行い、溶融炉からの出滓後に水中投入して固形化し、磁選機によりスラグとメタルを分離して砂状の水砕スラグを得ている（表1）。

今回、県境不法投棄物を溶融処理して得られたスラグをA事業所（スラグA）、及びB事業所（スラグB）から入手し、コンクリート基礎試験及びコン

* 産業廃棄物再資源化技術開発事業

** 環境技術部（現企画デザイン部）

*** 環境技術部

クリート二次製品の商品化試験を実施した。

表1 使用溶融スラグ

| 溶融スラグ | 混合割合 | 出滓方法 | 磨砕 |
|----------------|--------------|------------|----|
| A事業所 (スラグA) | 不法投棄物 5~6% | バッチ式 出滓 | なし |
| | 一般廃棄物 94~95% | | |
| B事業所 (スラグB) | 不法投棄物 7~8% | 連続出滓 | あり |
| | 一般廃棄物 92~93% | | |

3 研究結果

3-1 コンクリート基礎試験

3-1-1 コンクリートの配合

溶融スラグは、細骨材の容積に対し置換率を0%、10%、30%、50%として配合した。コンクリートの配合を表2に示す。この配合は岩手県内のコンクリート二次製品会社で使用されているものを基本とし、配合強度は37.5N/mm²とした。

また、目標スランプは5.0±1.0cm、目標空気量は5.0±1.0%とした。ただしスラグAでは粒径が大きく角張りがあり、同一の配合とすることが困難だったため単位水量と混和剤量を調整し目標スランプに収めた。

3-1-2 フレッシュコンクリート試験

スラグ置換率を0%、10%、30%、50%とした各コンクリート試料を作成し、練り混ぜ直後の状態を調べるため、凝結試験及びブリーディング試験を行った。

その結果、凝結試験ではスラグAではスラグ置換率が増加するほど凝結遅延が発生する傾向にあるのに対し、スラグBでは置換率が増加しても、凝結遅延はほとんど発生しなかった(図1、図2)。

次に、ブリーディング試験では、両スラグともスラグ置換率が増加するほどブリーディング量が増

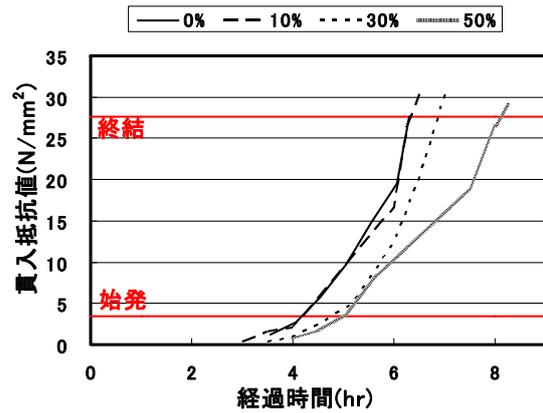


図1 スラグAの凝結試験結果

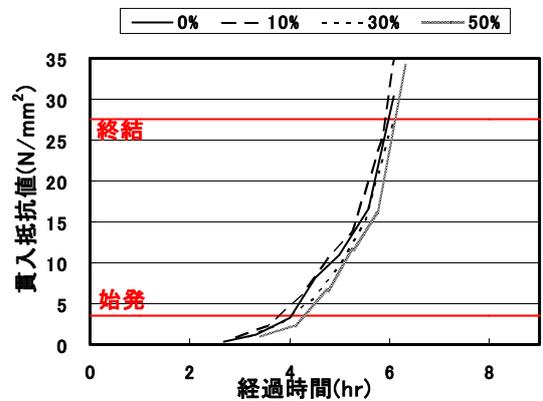


図2 スラグBの凝結試験結果

加する傾向が認められ、特にスラグAではスラグBの2倍程度のブリーディングが発生することが分かった(図3)。

表2 コンクリート基礎試験におけるコンクリートの配合

| スラグ置換率(%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位容積質量(kg/m ³) | | | | CX(%) | | |
|-----------|---------|---------|----------------------------|-----|-----|-----|-------|------|------|
| | | | W | C | 細骨材 | | 粗骨材 | 減水剤 | AE剤 |
| | | | | | 砕砂 | スラグ | | | |
| スラグA | 0 | 44 | 165 | 375 | 869 | 0 | 1044 | 0.47 | 0.32 |
| | 10 | | | | 782 | 86 | | | |
| | 30 | | | | 608 | 259 | | | |
| | 50 | | | | 440 | 437 | | | |
| スラグB | 0 | 44 | 150 | 340 | 877 | 0 | 1137 | 0.70 | 0.30 |
| | 10 | | | | 789 | 82 | | | |
| | 30 | | | | 625 | 247 | | | |
| | 50 | | | | 439 | 407 | | | |

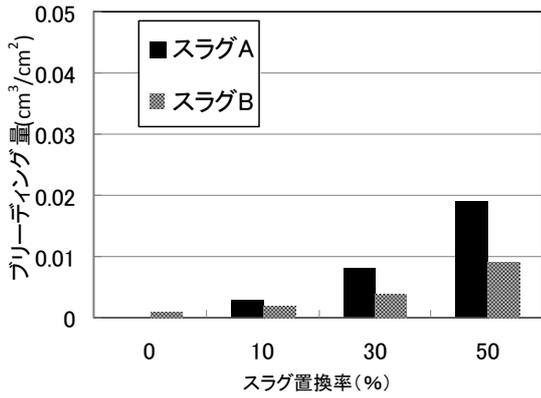


図3 ブリーディング試験結果

3-1-3 硬化コンクリート試験

スラグ置換率を0%、10%、30%、50%とした各コンクリート試料を作成し、硬化時の強度等を調べるため、圧縮試験、引張試験、曲げ試験、静弾性係数試験、凍結融解試験を行った。

その結果、圧縮試験、引張試験、曲げ試験では、両スラグともに、スラグ置換率が増加するほど強度低下が進むことが判明した（図4、図5、図6）。

また、静弾性係数試験では、スラグ置換率が増加するほど、係数率が低下する傾向が見られたが、減少率は僅かであった（図7）。

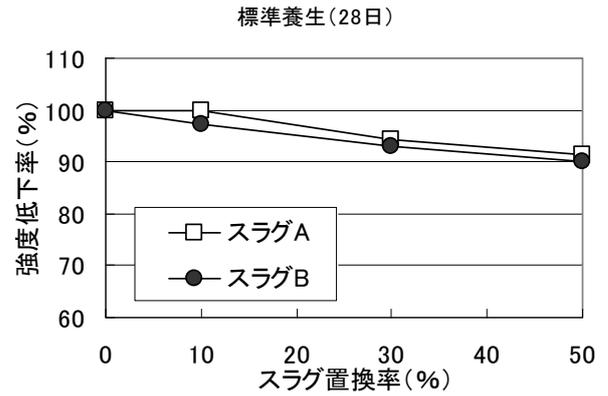


図6 曲げ試験における強度低下率（標準養生28日）

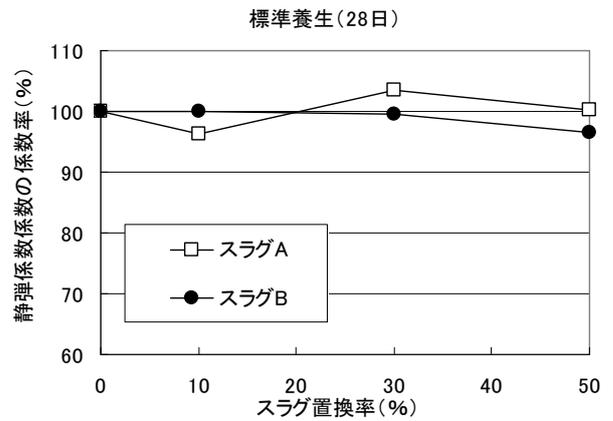


図7 静弾性係数の係数率（標準養生28日）

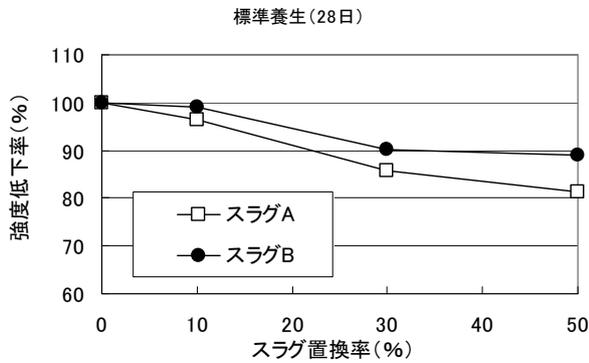


図4 圧縮試験における強度低下率（標準養生28日）

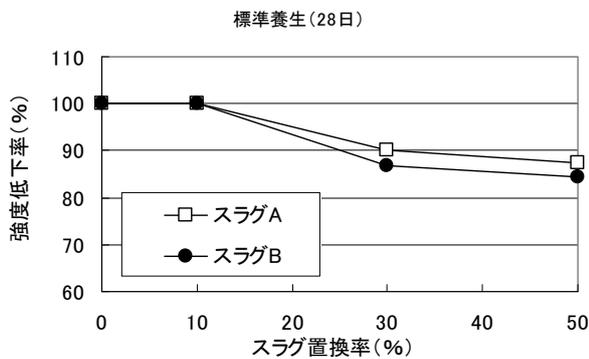


図5 引張試験における強度低下率（標準養生28日）

次に、凍結融解試験では、スラグ置換率を0%、10%、30%、50%とした各コンクリート試料を作成し、28日後の凍結融解0サイクルから凍結融解300サイクルまでの相対動弾性係数及び質量減少率を30サイクル毎に試験を行った（図8）。

その結果、スラグA及びスラグBとも、スラグ置換率やコンクリートの養生方法（標準、蒸気）にかかわらず、300サイクルの終了時まで相対動弾性係数が基準値85%を割ることはなく、十分な耐凍害



図8 凍結融解試験装置

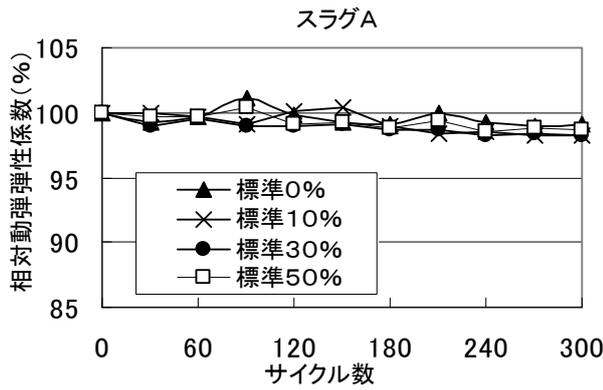


図9 凍結融解試験結果 (係数 85 以上で合格)

性を有していることが分かった。

スラグAの標準養生における凍結融解試験結果 (相対動弾性係数) を図9に示す。

3-2 コンクリート二次製品の商品化試験

3-2-1 材料試験

コンクリート二次製品試作時の共通データとなる材料試験として、スラグA及びスラグBについて細骨材物理試験 (絶乾密度、吸水率、単位容積質量、実績率、微粉分量) 及び骨材のふるい分け試験 (粗粒率) を実施した (表3)。

その結果、スラグAは粗粒率が高めであったが、粒度調整すれば骨材として利用できることが分かった (スラグBの粗粒率は適正)。

その他の材料試験項目については問題なかった。

3-2-2 U形側溝の商品化試験

コンクリート材料中の細骨材の一部をスラグに置換した配合を用い、実機にて落ちふた式U形側溝3種300A (以下、「U形側溝」という。) を試作し、商品としての性能を確認する試験を行った。

熔融スラグは、細骨材の容積に対し、スラグ置換率を0%、30%、50%として配合した。このU形側溝のコンクリート配合を表4に示す。この配合は試験を実施した工場の通常の配合を基本とし、スラグ置換率を考慮して設定した。

表3 熔融スラグの材料試験結果

| | 単位 | スラグA | スラグB | 規格値 |
|--------|-------------------|------|------|---------|
| 絶乾密度 | g/cm ³ | 2.95 | 2.69 | 2.5 以上 |
| 吸水率 | % | 1.08 | 0.77 | 3 以下 |
| 単位容積質量 | kg/L | 1.72 | 1.78 | 1.50 以上 |
| 実績率 | % | 58.4 | 66.3 | 53 以上 |
| 微粉分量 | % | 0.23 | 3.88 | 5 以下 |
| 粗粒率 | — | 3.60 | 2.70 | — |

表4 U形側溝のコンクリート配合 (kg)

| | スラグ置換率 | C | W | 砕砂 | 5号砕石 | 6号砕石 | スラグ | AE |
|------|--------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|
| スラグA | 0% | 350 | 160 | 802 | 652 | 434 | 0 | 3.85 |
| | 30% | 350 | 160 | 561 | 652 | 434 | 247 | 3.85 |
| | 50% | 350 | 160 | 401 | 652 | 434 | 413 | 3.85 |
| スラグB | 0% | 350 | 160 | 802 | 652 | 434 | 0 | 3.85 |
| | 30% | 350 | 160 | 561 | 652 | 434 | 243 | 3.85 |
| | 50% | 350 | 160 | 401 | 652 | 434 | 406 | 3.85 |

試験対象のU形側溝は、スラグA及びスラグBについて細骨材のスラグ置換率を0, 30, 50%として各々試作し、28日後に標準養生及び蒸気養生による圧縮強度試験 (JIS A5372 プレキャスト鉄筋コンクリート製品)、並びに蒸気養生による製品曲げ強度試験 (JIS A5372) を行った (図10)。

この結果をグラフ化して回帰直線を引き、各強度試験の規格値 (圧縮試験については、JIS では 27 N/mm² であるが、余裕を持たせた試験工場社内規格 30 N/mm² を採用) が得られるスラグの上限置換率を強度試験結果と合わせて表5に示す。



図10 U形側溝の製品曲げ強度試験

表5 U形側溝の強度試験結果とスラグ上限置換率

| | スラグ置換率 | 圧縮強度試験 (N/mm ²) | | 曲げ強度試験 (kN/2m) |
|------|--------|-----------------------------|------|----------------|
| | | 標準養生 | 蒸気養生 | |
| スラグA | 0% | 46.7 | 31.6 | 93.5 |
| | 30% | 40.9 | 29.1 | 75.0 |
| | 50% | 37.9 | 29.1 | 68.5 |
| | 上限置換率 | 50% | 25% | 40% |
| スラグB | 0% | 46.7 | 31.6 | 93.5 |
| | 30% | 44.0 | 30.0 | 92.5 |
| | 50% | 43.5 | 29.5 | 90.0 |
| | 上限置換率 | 50% | 30% | 50% |
| 規格値 | | 30.0 | 30.0 | 72.0 |

これらの結果から、U形側溝において各強度試験を全て満足できるスラグの上限置換率として、スラグAについては25%、スラグBについては30%の値を得ることができた。

3-2-3 インターロッキングブロックの商品化試験

コンクリート材料中の細骨材の一部または全部をスラグに置換した配合を用い、実機にてインターロッキングブロック（以下、「ILB」という。）を試作し、商品としての性能を確認する試験を行った。

溶融スラグは、細骨材の容積に対し、スラグ置換率を0%、30%、50%、100%として配合した。このILBのコンクリート配合を表6に示す。この配合は試験を実施した工場の通常の配合を基本とし、スラグ置換率を考慮して設定した。

試験対象のILBは、スラグA及びスラグBについて細骨材のスラグ置換率を0、30、50、100%として各々試作し、14日後に蒸気養生による製品曲げ強度試験（JIS A5371 プレキャスト無筋コンクリート製品）を行った。

この結果をグラフ化して回帰直線を引き、強度試験の規格値が得られるスラグの上限置換率を強度試験結果と合わせて表7に示す。

表6 ILBのコンクリート配合 (kg)

| | スラグ置換率 | C | W | 砕砂 | 5号碎石 | 6号碎石 | スラグ |
|------|--------|-----|-----|------|------|------|------|
| スラグA | 0% | 400 | 115 | 1150 | 473 | 316 | 0 |
| | 30% | 400 | 115 | 805 | 473 | 316 | 355 |
| | 50% | 400 | 115 | 575 | 473 | 316 | 593 |
| | 100% | 400 | 115 | 0 | 473 | 316 | 1184 |
| スラグB | 0% | 400 | 115 | 1150 | 473 | 316 | 0 |
| | 30% | 400 | 115 | 805 | 473 | 316 | 349 |
| | 50% | 400 | 115 | 575 | 473 | 316 | 582 |
| | 100% | 400 | 115 | 0 | 473 | 316 | 1163 |

表7 ILBの強度試験結果とスラグ上限置換率

| | スラグ置換率 | 曲げ強度試験(N/mm ²) |
|------|--------|----------------------------|
| スラグA | 0% | 6.19 |
| | 30% | 5.87 |
| | 50% | 5.31 |
| | 100% | 4.33 |
| | 上限置換率 | 60% |
| スラグB | 0% | 6.19 |
| | 30% | 5.75 |
| | 50% | 5.64 |
| | 100% | 5.54 |
| | 上限置換率 | 100% |
| 規格値 | | 5.0 |

これらの結果から、ILBにおいて規定の強度試験を満足できるスラグの上限置換率として、スラグAについては60%、スラグBについては100%の値を得ることができた。

4 考 察

4-1 コンクリート基礎試験

4-1-1 フレッシュコンクリート試験

スラグA及びスラグBとも、スラグ置換率を高くするとブリーディング量の増加が見られた。溶融スラグの表面はガラス質であり、表面積が小さく、さらに疎水性であることが原因であると考えられる。

次に、凝結試験における各スラグの凝結時間を見ると、遅延を起こすスラグと起こさないスラグとがあることが分かる。凝結遅延を起こすスラグについては、遅延を起こす可能性のあるイオンが溶融スラグからコンクリート中へ溶出しているか、あるいは砕砂に対しては吸着する混和剤が、溶融スラグへは吸着し難く、この余剰混和剤が凝結を阻害させる等が考えられるが、原因を明確にすることはできなかった。

4-1-2 硬化コンクリート強度試験

スラグ置換率が高まるにつれ、圧縮試験等の硬化コンクリート強度は低下する傾向がある。その原因を調べるため、骨材の平均表面粗さと圧縮試験相対強度を比較した（図11）。

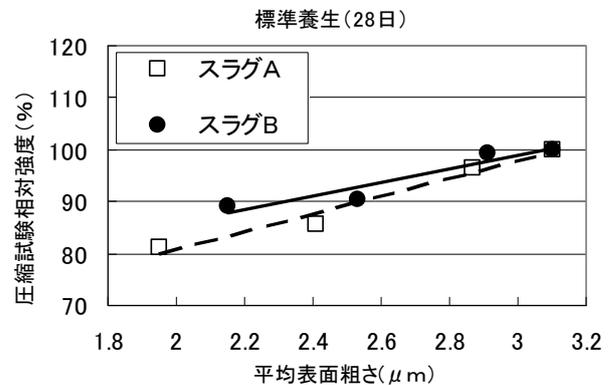


図11 平均表面粗さと圧縮試験相対強度

その結果、平均表面粗さが高くなるにつれ、圧縮試験相対強度も高くなることが分かった。溶融スラグは一般の骨材より表面粗さは低く、スラグ置換率が低いほど平均表面粗さは高くなることから、溶融スラグの表面粗さが圧縮強度に影響していると考えられる。

この傾向は、引張強度、及び曲げ強度でもほぼ同様であり、これらの強度も溶融スラグの表面粗さが影響しているものと考えられる。

溶融スラグの表面粗さを左右するのは、本試験の

範囲で、磨砕処理の有無による可能性が高い。すなわち、磨砕処理を施すことで、熔融スラグの鋭利な部分を除去するのみでなく、熔融スラグ特有の平滑な表面を粗くすることが可能となる。したがって、熔融スラグをコンクリート用骨材として使用する際には、磨砕処理が重要であると考えられる。

4-2 コンクリート二次製品の商品化試験

U形側溝の圧縮強度試験で、標準養生の場合と蒸気養生の場合とで試験結果に大きな差が出た。

標準養生では、強度試験実施時まで 20℃の水中で養生されるのに対し、蒸気養生では練り込み翌日の脱型後は気中養生となり、基本的に屋外での養生となる。

今回の試験は、12月から1月にかけてという厳冬期に実施されたため、蒸気養生の供試体は寒冷地特有の厳しい環境に置かれたと考えられる。

その結果、20℃で養生される標準養生の供試体と比べてコンクリート硬化や強度発現に大きな差が生まれ、このような結果になったのではないかと考えられる。

したがって、寒冷地において冬期間に屋外養生するスラグ入りコンクリート二次製品を製造する際は、このことを念頭に置いて適切に対応することが重要になると考えられる。

5 結 言

県境不法投棄物を熔融処理して得られたスラグ A 及びスラグ B について、コンクリート基礎試験を行ったところ、それぞれの留意すべき事項を考慮すれば、コンクリート用細骨材として適用性があることを確認できた。

また、コンクリート二次製品の商品化試験では、一定のスラグ置換率までの範囲では、各々の製品基準を満たしており、同スラグを市場化する上で問題ないことが分かった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、岩手大学工学部建設環境工学科(現 社会環境工学科)建設材料学研究室、岩手県生コンクリート工業組合及び岩手県コンクリート製品協会の皆様には大変お世話になりました。

本研究は、岩手県の循環型地域社会形成推進事業の産廃再資源化技術開発事業により行われたものです。

この場をお借りして、お礼申し上げます。

文 献

- 1) 佐々木秀幸、平野高広、藤原智徳、藤原忠司、小山田哲也、安部隆司、中南真理子：岩手・青森県境不法投棄物の焼却及び熔融特性、廃棄物学会論文誌 Vol. 16 No. 6, 492-500 (2005)
- 2) 菅原龍江、平野高広、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の分析と熔融処理、第 16 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 639-641 (2005)
- 3) 白藤裕久、平野高広、佐々木秀幸、藤原忠司、小山田哲也：不法投棄物熔融スラグの安全性評価とコンクリート用骨材への適用性、第 17 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 626-628 (2006)
- 4) 佐々木秀幸、藤原忠司、小山田哲也、平野高広、菅原龍江、白藤裕久、八重樫貴宗：岩手・青森県境不法投棄物を熔融したスラグの骨材としての特性、地方独立行政法人岩手県工業技術センター研究報告 Vol. 14, 100-105 (2007)
- 5) 菅原龍江、白藤裕久、八重樫貴宗、藤原忠司、小山田哲也：不法投棄物処理スラグの安全性と骨材特性、第 19 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, 648-650 (2008)