

報告 一般廃棄物溶融処理施設の実態に関するアンケート調査

齊藤 丈士^{*1}・中田 善久^{*2}・大塚 秀三^{*3}・串田 真基^{*4}

要旨: 本報告は、全国の一般廃棄物溶融処理施設を対象に行った溶融処理の実態に関するアンケート調査のうち、溶融処理の工程および固化後の溶融スラグの取扱いについて取りまとめたものである。この結果、ポップアウトの発生原因になり得る石灰石を塩基度調整剤に使用している溶融処理施設は全体の3割に満たないこと、固化後の溶融スラグに対して何らかの後処理を行い品質の向上や安定をはかっていると思われる場合が多いこと、また溶融処理施設担当者は、担当する溶融処理施設から産出する溶融スラグによってポップアウト現象が起こりうると考えているケースは少ないことなどが明らかとなった。

キーワード: アンケート調査, 溶融スラグ, ポップアウト, 塩基度調整剤, 後処理

1. はじめに

一般廃棄物に由来する溶融スラグ骨材は、様々な研究によりコンクリートに使用できる性質を有しているとされ¹⁾、2006年にコンクリート用骨材としてJIS規格化された²⁾。しかし、2008年に溶融スラグ細骨材の混入したレディーミクストコンクリートが建築基準法に違反して用いられ、構造体コンクリートに多量のポップアウトが発生し社会問題となった事件³⁾により、溶融スラグ骨材の内包する新たなリスクが明らかとなった。この影響もあり溶融スラグ骨材は現在に至ってもレディーミクストコンクリートに使用できる骨材に含まれない⁴⁾ため、地産地消の観点からは望ましいものの、レディーミクストコンクリートへの使用はできない。ポップアウトの発生原因は、国土交通省が設置した調査委員会によると、溶融スラグに含まれた酸化カルシウム（生石灰：CaO）とほぼ断定されている⁵⁾。現在はこれに対し酸化カルシウムを含む溶融スラグにおけるポップアウト発生量の確認試験方法⁶⁾や溶融スラグに含まれる酸化カルシウムの状態がポップアウトの発生に及ぼす影響⁷⁾などが検討され、溶融スラグの使用にあたりポップアウトのリスクを回避するための情報が整備されつつある。

一方で、酸化カルシウムは溶融スラグの製造過程で融液の塩基度を調整するために投入する石灰石（主成分は炭酸カルシウム：CaCO₃）が高温で酸化カルシウム（CaO）と炭酸ガス（CO₂）に分解した後、酸化カルシウムが溶融スラグと完全に溶け合わず残ったものである⁸⁾ため、酸化カルシウムの溶け残りを防止するなど溶融スラグの製造過程において仕様を変更することもポップアウトの予防につながる方法の一つと考えられる。しかし、これまでにコンクリート用骨材への用途を視野に入れた溶融スラグの製造過程への提案は見られておらず、さらには

実際の溶融処理施設の溶融スラグ製造過程における原料や塩基度調整剤、生成した溶融スラグの取扱いに関しては不明な点が多い。

そこで、筆者らは、一般廃棄物の溶融処理の実態を把握するために、全国の一般廃棄物を取り扱う溶融処理施設を対象に、各地域における一般廃棄物の概要や溶融処理施設の体制、溶融処理の工程、産出する溶融スラグの状態や取扱い等に関するアンケート調査を行った。本報告は、このアンケート調査のうち、溶融処理の工程および固化後の溶融スラグの取扱いについて取りまとめたものである。

2. アンケート調査の概要

2.1 アンケートの調査期間および対象者

アンケート調査は、平成26年10月～11月に実施した。また、アンケート対象者は、地方公共団体や一部事務組合等の自治体が運営する一般廃棄物を対象とする溶融処理施設とした。

2.2 実施方法

全国の一般廃棄物を溶融処理している廃棄物中間処理場に対して記入式のアンケート調査用紙を送付し、記入後のアンケート用紙を郵送で返送して頂いた。各地方におけるアンケート送付数は表-1の通りである。

表-1 アンケート送付数

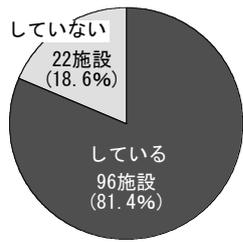
地方	送付数	地方	送付数
北海道地方	9	関西地方	20
東北地方	20	中国地方	12
関東地方	42	四国地方	12
中部地方	44	九州・沖縄地方	45
送付数合計			204

*1 日本大学 生物資源科学部 生物環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 日本大学 理工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

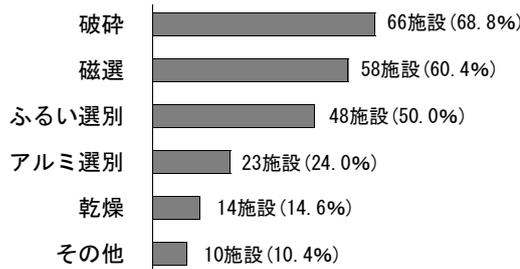
*3 ものつくり大学 技能工芸学部 建設技能工芸学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 日本大学大学院 理工学研究科 建築学専攻 博士前期課程 (学生会員)



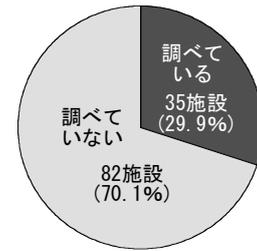
有効回答数：118

【ごみまたは焼却灰の前処理をしているか】



(回答数：96, 複数回答)

【前処理の内容】



有効回答数：117

【ごみまたは焼却灰が含有するCaOやSiO₂の量を調べているか】

図-1 ごみまたは焼却灰の溶融前における処理

図-2 原料のCaOやSiO₂測定の有無

2.3 調査項目

溶融処理の工程と溶融スラグの状態、取扱いの現状に関連する次の項目についてアンケート調査を行った。

- ・ごみまたは焼却灰の溶融前処理
- ・塩基度調整剤の使用と取扱い
- ・溶融スラグの後処理
- ・溶融スラグの保管・出荷
- ・溶融処理担当者の意識

3. 調査結果および考察

3.1 アンケート回収数

アンケートの回収数は146部であった(回収率71.6%)。このうち11のケースで「溶融施設は廃止し現在は溶融処理を行っていない」、「溶融施設を休止中で現在は溶融処理を行っていない」、「民間業者への委託事業のため状況を把握できない」、「一般廃棄物を取り扱っていないためアンケートの内容には回答できない」などの理由により回答が辞退されたため、有効なデータが記入された回答数は135となった。

3.2 ごみまたは焼却灰の溶融前処理

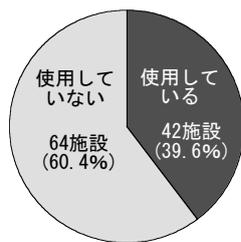
溶融スラグの原料である一般廃棄物(ごみ)またはその焼却灰について、これらを溶融する前に何らかの処理を行っているか、行っている場合にはどのような処理をしているか回答して頂いた結果を図-1に示す。有効回答数は118であり、このうち何らかの前処理を行っているとは回答したのは96施設、行っていないとは回答したのは22施設であった。また、前処理を行っている場合の処理の種類は、破碎、磁選が6割以上の施設で行われており、ふるい選別が半数の施設で行われている結果となった。なお、前処理の種類をその他として自由記述して頂いたものは、粗大なものを除去するとして件数が2件、直接溶融炉の場合に熱分解(ガス化)が4件、RDF(ごみ固形燃料)化が1件、灰溶融の場合に主灰と飛灰の混合割合調整が1件であった。この結果より、溶融前のスラグ原料の調整は多くの施設で行われており、またその

目的は、金属の回収以外には原料を均質にし熱量や化学成分の偏りを減少させ溶融処理を安定させることの場合が多いものと推察される。

ごみまたは焼却灰について、塩基度(CaO/SiO₂比で、この比により溶融スラグの融点温度や融液の粘性が変化)を算出するためにCaOやSiO₂の含有量を調べているか回答して頂いた結果を図-2に示す。有効回答数117のうち、調べているとした回答は35施設(29.9%)、調べていないとした回答は82施設(70.1%)であり、調べていない施設の方が圧倒的に多かった。後述する塩基度調整剤の部分と関連するが、この結果は、一般廃棄物の溶融処理において融液の粘性が取扱いに支障のない範囲であれば、塩基度の管理は必ずしも行わなくても工程管理が可能であることを示唆するものと考えられる。

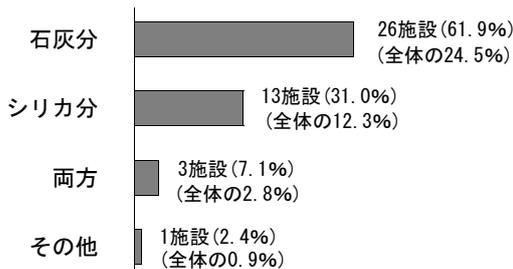
3.3 塩基度調整剤

溶融処理に当たり塩基度調整剤を使用しているか、また使用している場合は塩基度調整剤の種類を回答して頂いた結果を図-3に示す。有効回答数106のうち、塩基度調整剤を使用しているとしたのは42施設(39.6%)、使用していないとしたのは64施設(60.4%)であり、塩基度調整剤を使用していない処理施設の方が多かった。また、使用しているとした42施設のうち、石灰石砕砂などの石灰分を使用しているのは26施設(使用している施設の61.9%、全体の24.5%)、珪砂などのシリカ分を使用しているのは13施設(使用している施設の31.0%、全体の12.3%)、石灰分とシリカ分の双方を使用しているのは3施設(使用している施設の7.1%、全体の2.8%)であった。なお、その他と回答した1施設では、塩基度調整剤の名称は「びん残渣」と記述されていた。前述したように、ポップアウトの原因となる酸化カルシウムは塩基度調整剤の石灰石が高温で酸化カルシウムと炭酸ガスに分解し、酸化カルシウムが溶融スラグと完全に溶け合わず残ったものである⁹⁾ことから、塩基度調整剤として石灰分を添加する場合にのみ酸化カルシウムによるポップアウト発生のリスクがある。本調査の結果からは、この



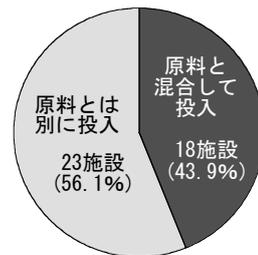
有効回答数：106

【塩基度調整剤を使用しているか】



(塩基度調整剤使用施設数：42)

【塩基度調整剤の種類】

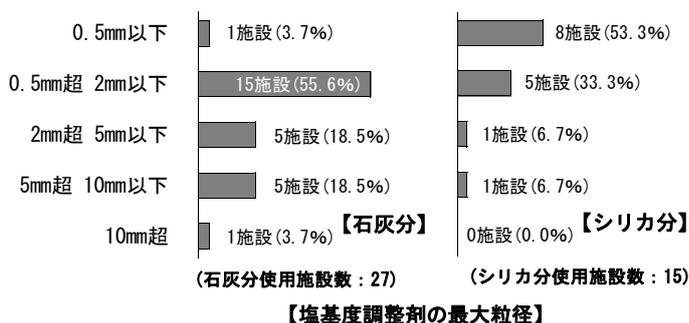


有効回答数：41

【塩基度調整剤の投入方法】

図-3 塩基度調整剤の使用の有無と使用している塩基度調整剤の種類

図-4 塩基度調整剤の投入方法

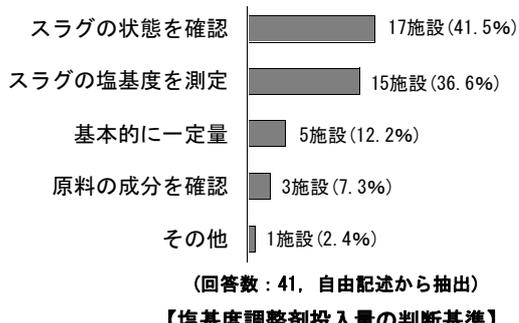


(石灰分使用施設数：27)

(シリカ分使用施設数：15)

【塩基度調整剤の最大粒径】

図-5 塩基度調整剤の最大粒径



(回答数：41, 自由記述から抽出)

【塩基度調整剤投入量の判断基準】

図-6 塩基度調整剤投入量の判断基準

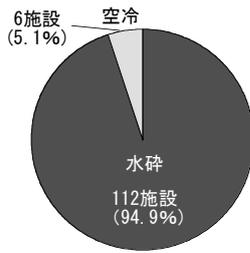
リスクを内包するケースは全体の3割に満たないことが明らかとなった（有効回答における X^2 検定の結果は1%水準で有意であった）。

塩基度調整剤を使用している場合について、塩基度調整剤の熔融炉への投入方法を図-4に示す。塩基度調整剤を使用しており、なおかつ本設問に回答して下さった41施設のうち塩基度調整剤を原料と混合してから熔融炉に投入するとしたのは18施設（43.9%）、原料とは別に熔融炉に投入するとしたのは23施設（56.1%）であった。ただし、塩基度調整剤の投入にどのような設備を用いているかは本調査の範囲では明らかでない。

塩基度調整剤の最大粒径について回答して頂いた結果を図-5に示す。塩基度調整剤の最大粒径は、石灰分を用いている場合の方がシリカ分を用いている場合よりも平均的に大きいですが、全体の8割弱は5mm以下であった。また石灰分で最も多かった回答は最大粒径1.0mmとするもので14施設、最も大きいものは1施設が最大20mmと回答していた。一方でシリカ分を使用している場合はいずれも1施設が最大粒径10mmおよび5mmと回答したほかはすべてが最大粒径2mm未満と回答していた。本アンケート調査では塩基度調整剤の粒径を調整する方法までは質問していないが、熔融処理施設において塩基度調整剤の粒度調整を行う事例は寡聞にして知らないことから、各熔融処理施設ではあらかじめ粒度の調整された塩基度調整剤を調達していると筆者らは考えている。なお、

石灰分またはシリカ分以外の塩基度調整剤として「びん残渣」を使用していると回答した場合（1施設）の最大粒径は50mmとされていた。

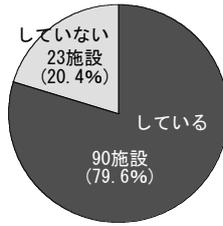
塩基度調整剤の投入量をどのように判断しているか回答して頂いた結果を図-6に示す。本設問は、自由記述で回答して頂いたものを分類しまとめ直したものである。熔融炉内における熔融スラグの状態や出湯（出滓）の状態、出滓口での熔融スラグの固着状態や閉塞状態などを目視により確認し粘性を確認して塩基度調整剤の投入量を判断するとした回答が最も多く17施設（41.5%）となった。また、次いで熔融スラグの塩基度を蛍光X線装置などを用いて測定し、その結果から判断するとした回答が15施設（36.6%）であった。あらかじめ定めた一定の投入量を採用しているとした回答は5施設（12.2%）からあったが、この中には熔融スラグの目視判断や塩基度測定を併用して適宜投入量を調整すると回答したものが複数含まれていた。なお、原料の成分（塩基度）を定期的に確認して随時投入量を決定するとした回答は3施設（7.3%）に留まった。塩基度調整剤は熔融スラグの塩基度（CaO/SiO₂比）を一定範囲とすることにより融点の安定および融液の粘性の低下を目的として添加するものであるが、本設問の結果と3.2に前述した結果（原料の塩基度を測定していない熔融処理施設の方が多）を併せて考えると、熔融処理施設の現場における塩基度の管理は、作業性や熔融スラグの取扱いを考慮して原料



有効回答数：118

【溶融スラグの冷却・固化方法】

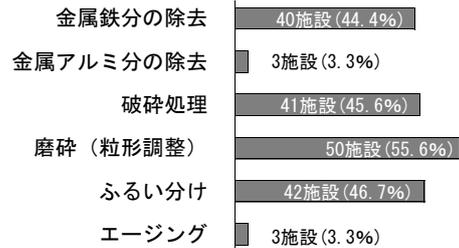
図-7 溶融スラグの冷却・固化方法



有効回答数：113

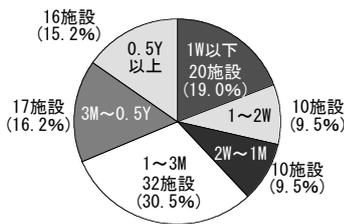
【溶融スラグが固化してから後処理を行っているか】

図-8 固化後の溶融スラグに対する後処理の有無と後処理の種類



(回答数：90、複数回答)

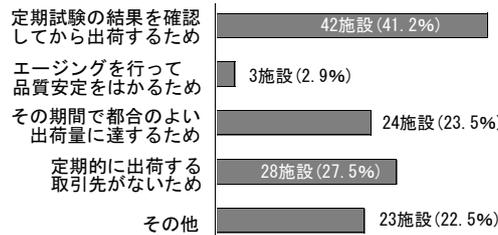
【溶融スラグに施す後処理の種類】



有効回答数：105

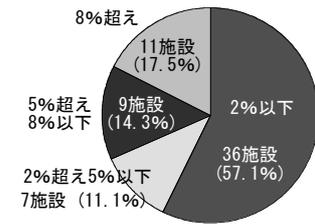
【溶融スラグの平均保管期間】

図-9 溶融スラグの平均保管期間とその期間になる理由



(有効回答数：102、複数回答)

【平均的な保管期間となる理由】



有効回答数：63

【保管中の溶融スラグの含水比】

図-10 保管期間中における溶融スラグの含水比

よりもむしろ溶融状態における溶融スラグの粘性を重視して行われているようである。

3.4 溶融スラグの取扱い

溶融スラグの冷却・固化方法を図-7に示す。溶融スラグの冷却・固化方法は、有効回答数118のうち大部分の112施設（94.9%）で水砕方法が採用されており、空冷を採用していると回答したのは6施設（5.1%）、徐冷・結晶化を採用していると回答した施設はなかった。また、空冷の場合でもそのうち5施設が固化後に破碎・摩砕やふるい分けなどにより粒度・粒径を調整していると回答していた。これより、国内で産出されている溶融スラグはその大部分が比較的細かい粒状で、コンクリート用骨材を用途とする場合には細骨材に分類されるものであることが推察される。

固化後の溶融スラグに対して後処理を行っているか、また行っている場合は処理の種類について回答して頂いた結果を図-8に示す。有効回答数113のうち、固化後の溶融スラグに対し何らかの後処理を行っているとした回答は90施設（79.6%）であった。また、後処理の種類として金属鉄分の除去（「磁選」と回答したものを含む）、破碎処理、磨砕およびふるい分けがいずれも40以上と多くの施設で採用されていた。特に破碎や磨砕ならびにふるい分けが多くの施設で採用されていることは、溶融処理施設が溶融スラグの用途を考慮して主に粒度や粒径の

面から品質の向上や安定に配慮していることを示唆する結果と考えられる。なお、固化後の溶融スラグに対して後処理を行っていないとした23施設はすべて溶融スラグの冷却・固化方法に水砕を採用していた。このことは、当該施設から産出する砂状の水砕された溶融スラグの品質が現状の用途に概ね適していることを示唆するものと考えられる。

溶融スラグを産出してから出荷するまで、ストックヤード等において溶融スラグを保管する期間の平均的な長さはどのくらいか、またその平均保管期間となるのはなぜかを回答して頂いた結果を図-9に示す。平均保管期間は溶融施設ごとに大きく異なり、短いものでは1週間以下、長いものでは半年以上であり、最も多かったのは1ヶ月～3ヶ月とする回答で32施設であった。またその保管期間となる理由として最も多かった回答は、「定期試験の結果を確認してから出荷するため」で42施設（41.2%）、次いで「定期的に出荷する取引先がないため」が28施設（23.5%）、「その期間で都合のよい出荷量に達するため」が24施設（23.5%）となった。定期試験の結果を確認してから出荷する場合には、溶融スラグの用途ごとに定められる品質規格において1ヶ月分を品質検査ロットとしている²⁾ことなどが影響していると考えられる。なお、平均保管期間の理由としてその他が23施設（22.5%）と比較的多かったが、その内容はバンカーや

ストックヤードの規模の制限や別保管場所への移動などの設備的なものを挙げたのが9施設と多く、また処理施設内で覆土に使用する、全量埋立最終処分するなど、一時的に保管する必要がないとの回答も複数見られた。

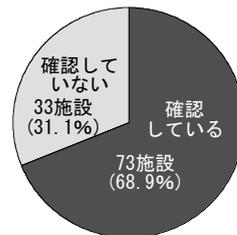
保管期間中における溶融スラグの含水比を図-10に示す。ここでは、含水比を溶融スラグに対する水の質量比(%)として回答して頂いた。保管期間中における溶融スラグの含水比については0.01~28.0%と極めて範囲の広い回答が得られた。また、有効回答数63のうち最も多かったのは、36施設(57.1%)が回答した含水比2%以下(比較的乾燥した状態)であった。筆者らの以前の研究では、ポップアウトの原因となり得る酸化カルシウム(人為的に高温で焼成・焼結させた最大粒径2.5mmの硬焼生石灰)を7日間湿潤状態で保管した後にモルタルに混入させても、酸化カルシウムが湿潤保管期間中にあらかじめ水と反応して膨張が収束するため、その後のポップアウトの発生は見られなかった⁹⁾。この例のように、保管期間中における溶融スラグの含水比を調整することによってポップアウトの発生を抑制できる可能性もあるため、今後は溶融スラグの用途ごとに各工程において工夫をしていくことで溶融スラグの品質を高められる可能性がある。

溶融スラグを出荷するとき、運搬車に積み込む溶融スラグに異物の混入等がないか確認を行っているかを回答して頂いた結果を図-11に示す。有効回答数106のうち、確認をしていると回答したのは73施設(68.9%)、確認していないと回答したのは33施設(31.1%)で、確認している施設の方が多い結果となった。確認していない施設数が比較的多いとも考えられるが、これは、前述したように用途が埋立最終処分等の場合には溶融スラグに要求される品質等がなく、異物の混入等に配慮する必要がないケースが含まれているためと考えられる。

3.5 溶融処理施設担当者の意識

回答者が担当している溶融処理施設から産出される溶融スラグにおいて、2008年の構造体コンクリートに多量のポップアウトが発生し社会問題となった事件と³⁾と同様の不具合が起こりうるかの考え(意識)を伺った結果を図-12に示す。有効回答数99のうち、同様の不具合が起こりうると回答したのは20施設(20.2%)、起こらないと回答したのは79施設(79.8%)で、起こらないと考えている担当者の方が圧倒的に多い結果となった。前述のように、塩基度調整剤として石灰分を用いている溶融施設が全体の3割に満たない現状から見ると概ね妥当な割合であることから、この結果は各担当者がポップアウトの不具合が塩基度調整剤として用いる石灰分に起因すると認識していることをうかがわせる結果と思われる。

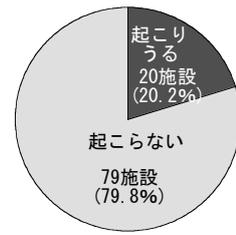
塩基度調整剤の石灰石等が溶け残り、溶融スラグに不



有効回答数：106

【溶融スラグの積込時に異物混入等を予防するため確認をしているか】

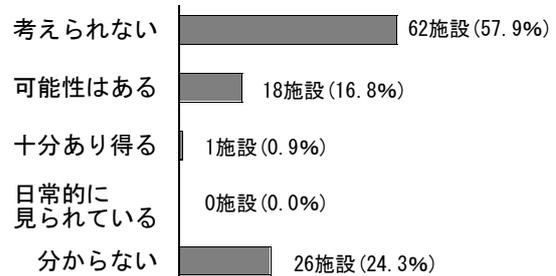
図-11 溶融スラグ積込時における確認の有無



有効回答数：99

【対象施設の溶融スラグに2008年の事件と同様の不具合「ポップアウト」は起こりうるか】

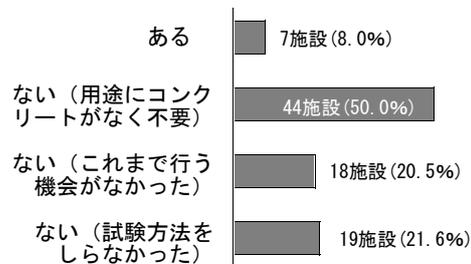
図-12 当該施設の溶融スラグにポップアウトは起こるか



(有効回答数：107)

【塩基度調整剤が溶け残り溶融スラグに不純物として混入すると考えられるか】

図-13 塩基度調整剤の溶け残りが溶融スラグに不純物として混入すると考えられるか



(有効回答数：88)

【ポップアウトの確認試験を行ったことがあるか】

図-14 ポップアウト確認試験を行ったことがあるか

純物として混入することは考えられるかを回答して頂いた結果を図-13に示す。有効回答数107のうち、考えられないと回答したのは62施設(57.9%)で最も多く、次いで分からないと回答したのが26施設(24.3%)、可能性はあると回答したのが18施設(16.8%)であった。また、1施設が十分あり得ると回答し、日常的に見られているとする回答はなかった。

一般財団法人 建材試験センターらが提案している溶融スラグを用いたコンクリートにおける表面剥離(ポッ

プアウト)の確認試験⁶⁾について、これまでにその試験を行ったことがあるかを回答して頂いた結果を図-14に示す。有効回答数88のうち、確認試験を行ったことがあると回答したのはわずか7施設(8.0%)であった。また、試験方法そのものを知らなかったとする回答が19施設(21.6%)にのぼり、当該試験方法が十分に周知されていないことをうかがわせる結果となった。

4. まとめ

全国の一般廃棄物溶融処理施設を対象にアンケート調査を行い、溶融処理の実態について検討した。本報告を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 溶融スラグの原料であるごみまたは焼却灰については、何らかの前処理をしている場合が多い。
- (2) 塩基度調整剤は、使用していない場合が多く、使用している場合にもポップアウトの原因になり得る石灰分を使用している割合は全体の3割に満たない。
- (3) 国内で生産されている溶融スラグは、そのほとんどが水砕で冷却されており、コンクリート用骨材を用途とする場合には細骨材に区分される粒径である。
- (4) 溶融処理施設で保管期間中の溶融スラグの半分以上が比較的乾いた状態である。
- (5) 当該施設から産出される溶融スラグではポップアウトは発生しないと考えている溶融処理施設の担当者が多い。

今後は、本調査の結果を活用して、溶融処理施設の処理工程において塩基度調整剤として石灰分を用いる場合は、その粒径を細かくして溶け残りを予防する、溶融処理施設で保管中の溶融スラグは湿潤状態とし、酸化カルシウムが混入した場合は保管中にその反応を収束させる、などのポップアウトの発生防止に結び付く工夫をしていくことが必要と考えられる。

謝辞

ご多忙の中、本アンケート調査にご回答頂きました皆さまに深く感謝の意を表します。また、アンケート調査の結果の集計にあたり、日本大学理工学部建築学科材料施工研究室および日本大学生物資源科学部生物環境工学

科環境土木施工工学研究室の学生諸君からご協力を得ました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、斉藤丈士ほか：ごみ溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第584号，pp.1-7，2004.10
- 2) JIS A 5031「一般廃棄物，下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材」，2006.7
- 3) 北辻政文：溶融スラグのfree-CaOに起因するコンクリートのポップアウト現象に及ぼす石灰石粒径および溶融時間の影響，第21回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.401-402，2010.11
- 4) JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」附属書A(規定)「レディーミクストコンクリート用骨材」A.5 スラグ骨材 注記，2014.3
- 5) 国土交通省 JIS規格不適合コンクリートを使用した建築物の対策技術検討委員会 中間報告，pp.1-2，2008.8.26
- 6) 例えば，鈴木澄江ほか：溶融スラグ骨材のポップアウトの確認試験方法に関する検討(その1 モルタル供試体による促進試験方法)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.693-984，2010.9
- 7) 例えば，串田真基ほか：溶融スラグ骨材を用いたモルタルにおけるポップアウトの発生に関する検討：(その4 硬焼石灰の吸水条件がポップアウトの発生に及ぼす影響)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.487-488，2013.8
- 8) (一社)日本産業機械工業会 エコスラグ利用普及委員会：2013年度版 エコスラグ有効利用の現状とデータ集，2014.5
- 9) 串田真基ほか：溶融スラグ骨材を用いたモルタルにおけるポップアウトの発生に関する検討(その4 硬焼石灰の吸水条件がポップアウトの発生に及ぼす影響)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，pp.487-488，2013.8