

溶融スラグを用いたコンクリートのポップアウト試験法に関する研究

北辻 政文*・丹野 恒紀

A Study on the Pop-out Test Method for Concrete Using Molten Slag

Masafumi KITATSUJI* and Koki TANNO

Abstract

In this study, we investigated methods of pop-out arising in concrete using molten slag. The following results were found:

- (1) The pop-out of mortar by free-CaO reappears by autoclave curing, and this is an effective rapid method.
- (2) There is little influence on pop-out on the dynamic character of mortar.
- (3) It is hard to generate pop-out when the particle diameter of free-CaO is 0.6mm or less.

(Received November 2, 2009 ; Accepted February 1, 2010)

Keywords : molten slag, free-CaO, pop-out, autoclave curing, concrete

キーワード : 溶融スラグ, free-CaO, ポップアウト, オートクレーブ養生, コンクリート

1. はじめに

ごみ溶融スラグ（以下溶融スラグ）の製造工場は、2008年現在、約200ヵ所、その生産量は80万トンを超え、今後も増加すると考えられている¹⁾。溶融スラグは、コンクリート骨材、アスファルト骨材、路盤材、埋め戻し材など主に建設材料として有効利用されている。2006年には道路用材料 (JIS A 5032) およびコンクリート用骨材 (JIS A 5031) としてそれぞれJIS規格に登録され、溶融スラグの利用率は飛躍的に高くなった。とくに東北地方では、溶融スラグの有効利用の推進を目的として、国土交通省東北地方整備局は溶融スラグの優先利用を明示しているため、溶融スラグの普及率が他の地域より高くなっている。

しかしながら、JIS化された溶融スラグ骨材においても課題が残っている。とくに、大量利用が期待されるコンクリート用骨材としての利用では、コンクリートの品質低下が懸念されている。たとえば、神奈川県の実験現場において溶融スラグを用いたコンクリート構造物にポップアウト現象が発生し、大きな社会問題となっている²⁾。この原因は究明されておらず、早急に対

策を講じる必要がある。

そこで、本研究では、溶融スラグを用いたコンクリートに発生するポップアウトのメカニズムの解明とその評価方法を検討したので報告する。

2. コンクリートのポップアウトについて

(1) 発生原因

コンクリートの表面部分が内部の膨張圧力により、部分的に飛び出し剥がれる現象をポップアウトという。一般的にポップアウトは、凍結融解作用、鉄筋の錆、反応性骨材などが原因となって発生するといわれている。

溶融スラグを用いたコンクリートの表面に発生したポップアウトを写真1に示す。ポップアウトがおこった部分には共通して白色物質が認められている。

この原因物質と見られる白色物質を取り出し、SEM-EDXによる定性分析をおこなった結果 (図1)、主成分がCaCO₃であることから、発生原因は溶融スラグのなかに残存したfree-CaOであると推測される。

* Corresponding author (E-mail: kitatsuj@myu.ac.jp)

(2) ポップアウト現象のメカニズム

溶融炉の形式により溶融スラグ製造時に塩基度調整剤として石灰石が添加される。石灰石は溶融炉の

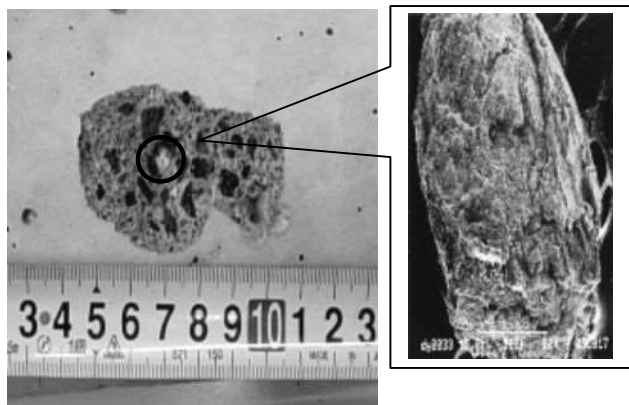


写真1 ポップアウト現象 (左)
白色物 (右)

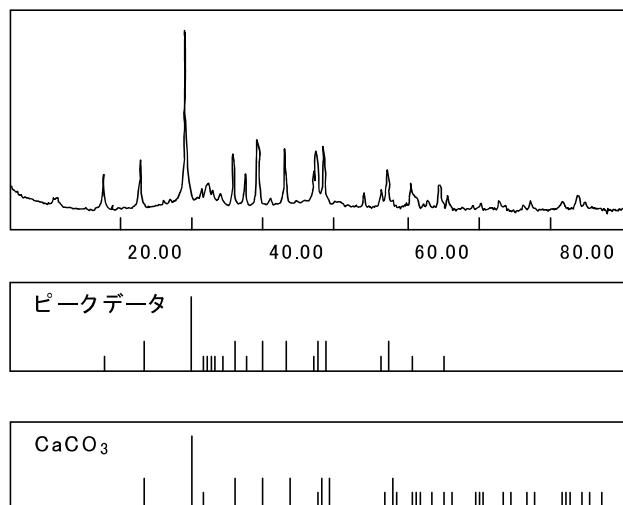


図1 白色物のSEM-EDXによる定性分析

高温環境 (1300~1500℃) の中で化学反応を起こし、生石灰 (CaO) になる。一般的に石灰石は粉状で添加されるため、溶融炉の中で他成分と混合溶融され、安定的な溶融物になる。しかし、石灰石の粒度が大きく、かつ炉内滞留時間が短い場合、生石灰はfree-CaOとして溶融スラグの中に残存することがある。ポップアウトのメカニズムとしては、先ずコンクリート表面近くにあるfree-CaOが水と反応してCa(OH)₂となる。このCa(OH)₂は生石灰と比べて体積が約2倍大きくなり、周りのコンクリートに膨張圧力をかける。次にその膨張圧力がコンクリートの引張強度を超えたとき、コンクリートの表面が部分的に飛び出し、ポップアウト現象がおこる。

3. 溶融スラグを用いたモルタルのポップアウト試験

溶融スラグを用いたコンクリートのポップアウトは脱型直後には発生せず、数ヵ月後以降に発生することが多い。このため溶融スラグの反応性を事前に把握する迅速なポップアウト試験方法が求められる。

化学分析試験方法により含有量を調べることが一般的であるが、free-CaOの含有量は1%未満と考えられるため、化学分析で評価することは難しい。一方、スラグ膨張試験の事例としては、製鋼スラグを用いたコンクリート用粗骨材の試験方法³⁾がある。しかし、この方法は、対象が製鋼スラグ粗骨材のみとなっているため、ごみ溶融スラグ細骨材には適応できない。さらに、80℃の温水で10日間養生することが必要となり、課題も多い。

そこで本研究では、JIS A 1804「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」(迅速法) で用いられるオートクレーブ養生装置を用いて検討した。

(1) 試験概要

モルタルのポップアウト試験には7サンプルの溶

表1 溶融スラグの物理試験結果

		Aスラグ	Bスラグ	Cスラグ	Dスラグ	Eスラグ	Fスラグ	Gスラグ	JIS規格値	
ふるい分け	FM	3.19	2.48	2.51	3.13	2.87	2.47	2.97	-	
粒形判定実績率	%	53	57	53.4	-	54.8	-	49.5	53以上	
密度	表乾	g/cm ³	2.72	2.80	2.73	2.98	2.92	2.81	2.68	-
	絶乾	g/cm ³	2.70	2.80	2.72	2.97	2.92	2.79	2.63	2.5以上
吸水率	%	0.58	0.11	0.33	0.25	0.42	0.97	1.88	3.0以下	
微粒分	%	0.96	5.56	3.89	0.10	2.06	0.14	2.31	7.0以下	
単位容積質量	kg/l	1.52	1.73	1.69	1.84	1.77	1.73	1.46	-	
実績率	%	56.4	61.9	62.8	61.8	60.8	62.1	55.3	-	
CaO量	%	37.8	38.1	30.8	35.1	28.7	20.8	31.2	45%以下	

融スラグを用いて試験をおこなった。それぞれの物理試験結果を表1に示す。物理試験結果では、Gスラグの粒径判定実績率がJIS規格値から外れているほかは、いずれもJIS規格値を満たしており、コンクリート用細骨材として良質であることがわかる。また、CaO含有量も基準値以下であった。

モルタルの配合はJIS A 5031の附属書1（規定）「コンクリート用溶融スラグを用いたモルタルの膨張率試験方法」に従い、水：セメント：細骨材＝1：2：2.25の質量比とした。細骨材は全量溶融スラグを用いた。

試験方法はJIS A 1804「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法」（迅速法）に準じた。オートクレーブ養生装置は温度127℃、圧力150kPaの高温高圧の環境を有する。なお、オートクレーブ養生装置による促進養生は、4時間を1サイクルとして5サイクルまで試験をおこない、サイクルごとに供試体の長さとして1次共鳴縦振動数を測定して、その変化を確認した。

評価方法としては、モルタル表面に発生したポップアウトの目視による計数評価と長さ変化率や相対動弾性係数の変化について計測評価をおこなった。

(2) 結果および考察

7サンプルの溶融スラグを用いてポップアウト試験をおこなった結果、AスラグとBスラグのモルタル供試体ともにポップアウトが発生した。写真2にポップアウト状況、図2に単位面積当たりのポップアウト（2mm以上）個数、図3、図4にそれぞれ長さ変化率と相対動弾性係数の変化を示す。

図2から、AおよびBスラグのポップアウトの発生量が多いことが分かる。とくにBスラグは発生量が多く、Aスラグに比べると4倍にも及ぶ。

長さ変化率は内部の弛緩の判断基準として0.1%の膨張が用いられるが、図3から、5サイクル終了

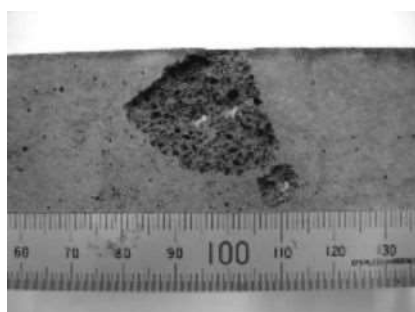


写真2 ポップアウトの状況 (Bスラグ)

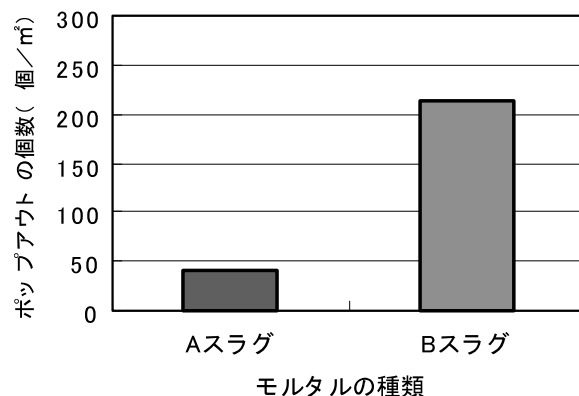


図2 単位面積あたりのポップアウト個数

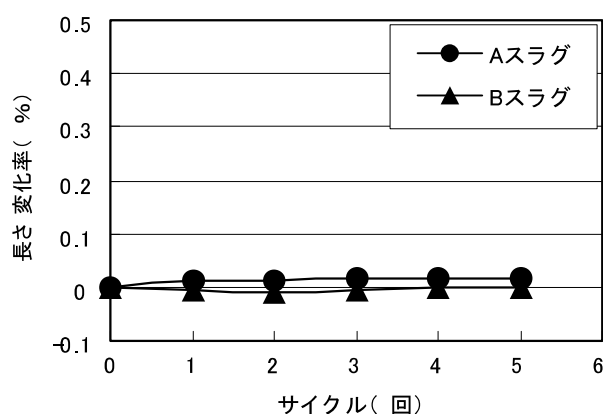


図3 長さ変化率

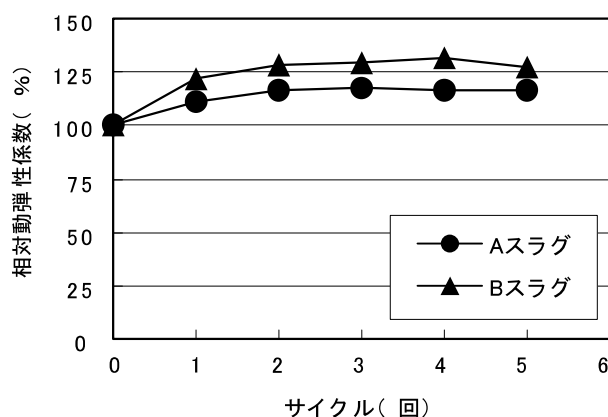


図4 相対動弾性係数の変化

時においても、その基準を大きく下回っている。図4は相対動弾性係数の試験結果である。この基準は85%以上であるが、前図と同様に低下は見られず、むしろ促進養生により相対動弾性係数が上昇していることから、組織がち密化していると判断される。こ

これらのことから、モルタル供試体の表面にポップアウトがおこっても内部の弛緩はないと判断される。

4. free-CaOを添加したモルタルのポップアウト試験

(1) 試験概要

前章では、オートクレーブ養生装置を用いてfree-CaO反応性が高い溶融スラグのポップアウトを確認することができた。しかし、溶融スラグの中に残存したfree-CaOの粒径や含有量を特定することができない。そこで、free-CaOの粒径や含有量がポップアウトにおよぼす影響を調べるため、本試験では溶融スラグにfree-CaOを意図的に添加してポップアウト試験をおこなった。添加したfree-CaOの粒径は0.3～0.6mm, 0.6～1.2mm, 1.2～2.5mm, 2.5～5.0mmの4水準で、それぞれ粒径ごとに添加割合(内割)を1, 2, 4および6%とした。

意図的にfree-CaOを添加するため、使用する溶融スラグはfree-CaO反応性がないと判断されたCスラグとした。

試験方法は前章のポップアウト試験方法と同様とした。ただし、評価は、目視のみをおこなった。

(2) 結果および考察

写真3にポップアウトの発生状況を、図5にポップアウトの面積割合を示す。小さなものも含めればいずれの粒径においてもポップアウトが発生していることがわかる。とくに粒径が大きい場合、ポップアウト部分の面積も大きく、また、亀裂も認められている。一方、free-CaOの粒径が0.3～0.6mmの場合、ポップアウト部分の直径が5mm以上のものはなく、2～3mmが大部分であった。

図5では、free-CaOの粒径が0.3～0.6mmと0.6～1.2mmにおいて、添加割合が増加するにつれて発生するポップアウト面積割合も大きくなっている。この結果からは、free-CaOの添加割合が増加することにより、ポップアウト面積割合も大きくなると判断される。また、粒径が0.3～0.6mm、添加割合が1%のときは、ポップアウトの面積割合が0.1%と極めて少ない。さらに添加率2～6%と増えても、面積割合は1%前後と少なく、ほぼ健全であると判断される。その他の配合では、2%を超えた場合、いずれもポップアウト面積割合が大幅に増加した。このことから、溶融スラグに残存するfree-CaOの粒径が0.6mm以下の場合、ポップアウトの発生は少なく、コンク

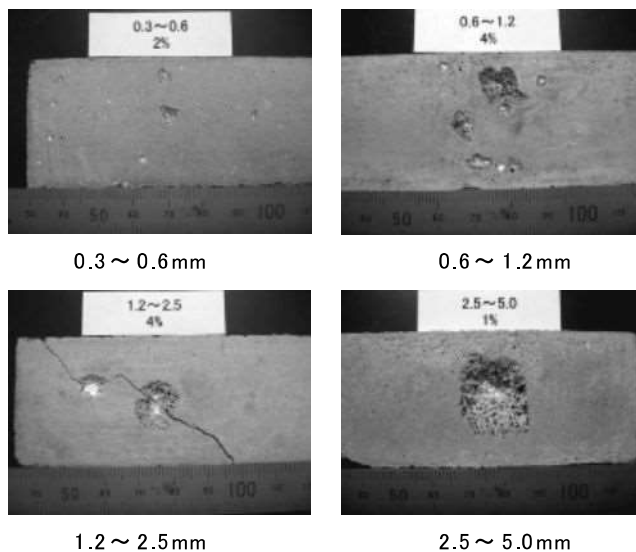


写真3 ポップアウトの状況

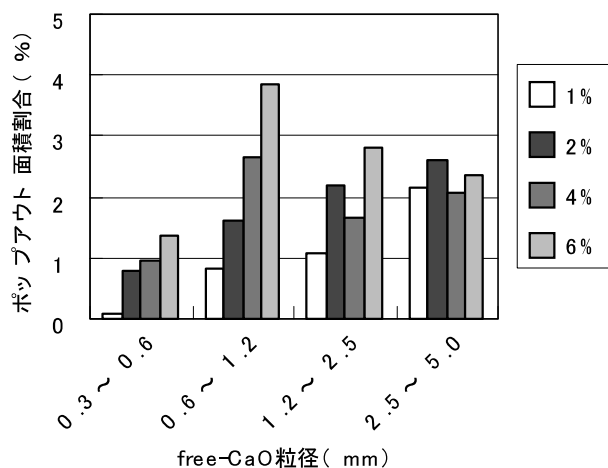


図5 ポップアウトの面積割合

リートの外観上の悪影響は少ないと判断される。

5. 摘要

溶融スラグのポップアウトに関する実験研究をおこなった結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) オートクレーブ養生装置はfree-CaOによるモルタルのポップアウトが再現でき、迅速法として有効である。
- (2) ポップアウトが起こってもモルタルおよびコンクリートの内部弛緩は認められず、力学的な性能におよぼす悪影響は少ない。
- (3) free-CaOの粒径が0.6mm以下の場合、モルタルの

外観に及ぼすポップアウトの影響は少ない。

神奈川県の実験現場において溶融スラグを用いたコンクリート構造物に起きたポップアウトは、溶融スラグの価値と信頼を大きく損なうことになった。しかし、廃棄物の溶融化技術は、わが国の産業における循環型社会の構築の上で欠くことのできない技術であり、今後も大きな期待が寄せられている。このため、関係者は、スラグの品質確保に努め、安心して利用できる建設材料としなければならない。

本研究で得られた結果が、溶融スラグのポップアウトの防止対策に役立つことを期待したい。

引用文献

- 1) 坪井晴人：エコスラグ有効利用の現状と利用普及活動，産業機械，No. 698，pp. 48-52 (2008)。
- 2) 朴仁哲ほか：溶融スラグを用いたコンクリートのポップアウト試験方法の検討，廃棄物学会東北支部第1回研究発表会講演要旨集，pp. 13-14 (2008)。
- 3) 沿岸開発技術研究センター：鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル—製鋼スラグの有効利用技術，沿岸開発ライブラリー No. 16，pp. 1-146 (2003)。