

論文 硬焼生石灰を添加したモルタル供試体によるポップアウトの確認試験方法に関する実験的検討

鈴木 澄江^{*1}・真野 孝次^{*2}・阿部 道彦^{*3}

要旨：溶融スラグ骨材を生産する工程において、溶融処理対象物として混入する貝殻ごみや塩基度調整に用いられる石灰石などが十分な融解状態に溶融せず反応性のCaO（生石灰）として残存し、コンクリートに混入した場合、ポップアウトが発生する可能性がある。しかし、生石灰が混入することにより発生するポップアウトをあらかじめ確認する試験方法は未だ確立されていない。ここでは、モルタル供試体に硬焼生石灰を混入し、促進試験によりポップアウトを実験的に確認する試験方法について検討するとともに、複数の機関による共通実験を実施し、ポップアウトを模擬的に確認できることを検証した。

キーワード：ポップアウト、溶融スラグ骨材、硬焼生石灰、モルタル供試体、促進法、煮沸法

1. はじめに

溶融スラグ骨材に含まれるポップアウトや異常な膨張の原因と考えられる成分は、金属アルミニウムや生石灰であると推定されている¹⁾。金属アルミニウムについては、JIS A 5031に規定されたモルタルの膨張率試験によって有害量を判定することが可能であるとされている。一方、生石灰については、溶融スラグ骨材の化学成分として酸化カルシウム(CaO)の規定値はあるものの、溶融スラグ骨材中に混入した生石灰を確認する方法は明確化されていない。平成20年に廃棄物由来の溶融スラグが混入した鉄筋コンクリート造建築物に発生したポップアウトの主な原因は、様々な調査結果によれば、溶融スラグ骨材に含まれる生石灰(CaO)であると指摘されている。

一般に、溶融スラグ骨材の製造工程において生石灰が存在する可能性として考えられるのは、溶融処理対象物として混入する貝殻ごみ、溶融炉内の塩基度(CaO/SiO₂)を調整する目的で投入される石灰石などである。これらの石灰質分が炉内で十分な融解状態に溶融せず残存し、溶融スラグとともにコンクリートに混在すると、ポップアウトが発生する可能性がある²⁾。溶融スラグ骨材とともにこれらの生石灰が混在した場合、ポップアウトの発生の有無を予め確認する試験方法は未だ標準化されていない。しかし、既往の研究^{1)~5)}によると、オートクレーブ試験や反応促進試験によってポップアウトの発生の有無が確認できることが報告されている。

本稿では、溶融スラグ骨材に生石灰が混入したことに起因するポップアウトを予め確認するための試験方法を模擬的に実験検討するとともに、試験方法の再現性の

検証を目的として複数の機関で共通実験を実施した。

2. 実験概要

実験は、モルタル供試体によるポップアウトの確認試験方法に関する検討（以下、ポップアウト確認実験と称す）および複数の機関における共通実験（以下、共通実験と称す）の2種類である。各実験の内容を2.1および2.2に示す。

2.1 ポップアウト確認実験

ポップアウト確認実験は、JIS R 5201に規定されている標準砂に生石灰（硬焼生石灰）を所定量混合（細骨材の質量に対する混合率で表示）してモルタル試料および供試体を作製し、型枠脱型時、標準養生終了時および促進試験終了後にポップアウトの発生状況を確認した。

(1) 実験の要因と水準

実験は、モルタル試料に混入させる硬焼生石灰の混合率と粒径の大きさを変化させ、それらがポップアウトの発生状況に及ぼす影響について検討を行った。硬焼生石灰の混合率ならびに粒径の水準を表-1に示す。

(2) 使用材料および配合条件

使用材料は、普通ポルトランドセメント（市販3社等量混合）、標準砂（JIS R 5201に規定）、水（精製水）お

表-1 実験の要因と水準

要 因	水 準
硬焼生石灰の混合率 (%)	2.0, 1.0, 0.5, 0.1, 0.05, 0.03, 0.02, 0.01, 0.005
硬焼生石灰の粒径 (mm)	5~2.5, 2.5~1.2, 1.2~0.6, 0.6~0.3

*1 (財) 建材試験センター 経営企画部調査研究課長 博士(工学) (正会員)

*2 (財) 建材試験センター 中央試験所材料グループ 統括リーダー (正会員)

*3 工学院大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

よび硬焼生石灰（焼成温度 1400～1500℃，焼成時間 27 時間程度）とした。硬焼生石灰は，溶融スラグが製造される温度に近似した焼成温度で製造されており，模擬的に実験検討するために使用したものである。硬焼生石灰の化学分析結果を表-2 に，外観を写真-1 に示す。

モルタルの配合条件は，JIS A 5031 の 5.9（アルカリシリカ反応性試験）に従い，質量比でセメント：水：標準砂＝1：0.5：2.6（ただし，1 バッチ当たりの各材料の使用量は，C=520g，W=260g，S=1350g）とした。

(3) 試験方法

モルタル試料は，JIS A 1146（骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法））に従って練り混ぜ，40×40×160mm の供試体 3 体を作製した。供試体の養生は，JIS A 1804（コンクリート生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（迅速法））に従い，成形後温度 20℃，相対湿度 95%以上の湿気箱中で 24 時間養生したのち脱型し，直ちに温度 20℃の水中で 24 時間養生した。促進試験は，JIS A 1804 に規定する反応促進装置（写真-2）を用いて行い，供試体を装置内の約 40℃の水中に浸漬し，40±10 分間で反応装置内のゲージ圧を 150kPa（127℃）に上げ，同圧力で 4 時間煮沸した。

(4) 供試体の外観観察とポップアウトの判定方法

供試体の外観観察は，型枠脱型時，標準養生終了後，および促進試験終了後に行った。ポップアウトの判定は，約 30cm 離れた位置から目視で観察し，白色または茶色の核が認められ，かつ，目視または指触により凹部と確認された箇所をポップアウトと判定した。

2.2 共通実験

共通実験は，同一材料を用いて，複数の機関でポップアウトの確認試験を実施し，試験結果の有意差を検証することを目的として実施した。共通実験に参加した機関は 6 機関（大学 2 機関，試験機関 4 機関）である。共通実験では，ポップアウト確認実験で用いた「促進法」に加え，特別な装置等が不要であり，簡易に試験が可能であるセメントの安定性試験に用いられる「煮沸法」でもポップアウトの発生が確認できるかを検討することとした。

(1) 使用材料および配合条件

使用材料は，普通ポルトランドセメント（市販 3 社等量混合），標準砂（JIS R 5201 に規定）及び硬焼生石灰（粒径 1.2～0.6mm）とした。練り混ぜ水以外のこれらの材料は，全て建材試験センターで準備し，モルタル 1 バッチ分の試料をそれぞれ袋詰めし，各機関に送付した。練り混ぜ水は，各機関が通常コンクリート等の実験に使用するものを用いた。

モルタルの配合は，2.1(2)と同様，JIS A 5031 の 5.9 に

表-2 硬焼生石灰の化学分析結果

化学成分	%	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
硬焼	白色	99.21	0.17	0.28	0.35
生石灰	褐色	96.99	0.97	1.34	0.70



写真-1 硬焼生石灰の外観



写真-2 促進試験に使用した反応促進装置（JIS A 1804）

表-3 モルタル 1 バッチ当たりの各材料の使用量

配合記号*	各材料の使用量 (g)			
	セメント	水	標準砂	硬焼生石灰
A(B)-0.03	520	260	1350	0.41
A(B)-0.01	520	260	1350	0.14
A(B)-0.005	520	260	1350	0.07

* 配合記号 A は「促進法」，B は「煮沸法」

従い，セメント：水：標準砂＝1：0.5：2.6（質量比）とした。硬焼生石灰の混合率は，標準砂の質量に対して 0.03%，0.01%および 0.005%の 3 水準とした。1 バッチ当たりの各材料の使用量を表-3 に示す。

(2) 試験方法

モルタルは，機械練り用練混ぜ機を用いて JIS A 1146 に従って練り混ぜた。試料は，標準砂（1/2），セメント（全量），硬焼生石灰（全量），標準砂（1/2）の順に入れ，30 秒間空練りした後，練混ぜ水（全量）を投入した。全材料投入後 30 秒間練り混ぜた後，20 秒間休止させ，再び 120 秒間練り混ぜた。なお，練混ぜは，全て低速回転で行った。

モルタル供試体の寸法は，40×40×160mm とし，1 配合の供試体数は 3 体とした。成形は JIS A 1146 に従って行った。モルタルは，練り混ぜ終了後，直ちに 2 層に分

けて詰め、突き棒を用いてその先端が 5mm 入る程度に、各層 15 回突固めた。最後に供試体を傷めないように余盛部分を削りとり、上面を平滑にした。モルタル供試体の脱型までの養生は、JIS A 1146 に従って行い、成形後温度 20℃、相対湿度 95%以上の湿気箱中で 24 時間養生したのち脱型した。なお、「促進法」の場合のみ、脱型後 20℃の水中にて 24 時間養生した。

供試体の促進試験は、「促進法」と「煮沸法」の 2 種類とした。「促進法」は、2.1(3)と同じである。なお、供試体は、反応促進容器内に立てて保存し、煮沸後は水中で室温まで自然冷却した。「煮沸法」は、JIS R 5201 の 9. 安定性試験に準じて煮沸させた。モルタル供試体を煮沸容器内の水中に沈め、徐々に加熱し 90 分間沸騰させ、その後自然冷却させた。なお、供試体は、煮沸容器内に立てて保存した。

(3) 供試体の外観観察とポップアウトの判定方法

モルタル供試体の外観観察は、①型枠脱型時、②標準養生終了後（「促進法」のみ）、および③促進試験終了後の 3 回（「煮沸法」では 2 回）とした。

外観観察は、供試体の全表面（6 面）を対象として実施した。ポップアウトの発生状況は、供試体表面を約 30cm 離れた位置から目視で観察し、白色または茶色の核が認められ、かつ、目視または指触によって凹部と確認された箇所をポップアウトと判定し、その数を測定面毎にデータシートに記録した。また、ポップアウトが認められた場合は、ポップアウトの外周にマジックで印を付け、その発生時期を記録した。

3. 実験結果および考察

3.1 ポップアウト確認実験

供試体の外観観察結果(ポップアウトの発生状況)を表-4 および図-1 に示す。また、供試体の外観状況を写真-3 および写真-4 に示す。

図-1 に示すように、ポップアウトの発生数は硬焼生石灰の混合率に比例して増加する傾向が認められた。また、硬焼生石灰の混合率が 0.1%を超えると、表-4 および写真-3 で判るとおり、ポップアウトの発生ではおさまらず、供試体に過大なひび割れが発生し、崩壊する場合のあることが確認された。硬焼生石灰の粒径とポップアウトの発生量の関係を見ると、図-1 および写真-4 のように硬焼生石灰の粒径が小さくなるほど、ポップアウトの発生数が多くなる傾向がある。これは、硬焼生石灰の粒径が小さくなるほど、ポップアウトの発生する深さは浅くなるが、その領域に含まれる硬焼生石灰の粒の数が増加するためと考えられる。

本実験結果によれば、骨材中に含まれる硬焼生石灰の混合率が 0.005%（1 バッチ 0.07g）、粒径 0.3mm 以上で

表-4 供試体の外観観察結果

硬焼生石灰		供試体の外観観察結果		
混合率 (%)	粒径 (mm)	ポップアウト(PO)ひび割れ発生状況		
		脱型時	水中養生後	促進養生後
2.0	2.5 ~ 0.1	脱型前に PO・ひび割れ発生 気中崩壊		
1.0		打設後 24 時間 PO 発生、 水中養生で崩壊		
0.5				
0.1	1.2	無し	PO 発生	PO・ひび割れ発生

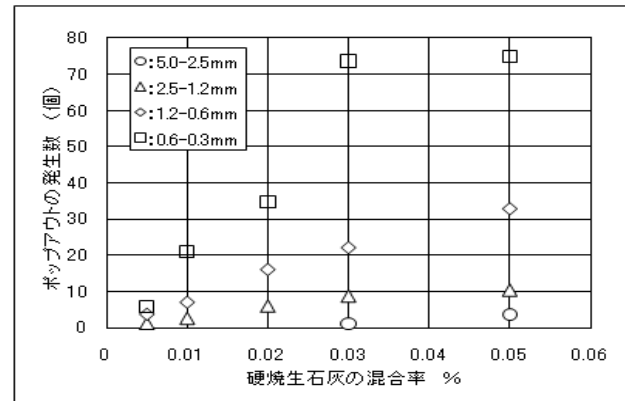


図-1 硬焼生石灰の混合率とポップアウトの発生数

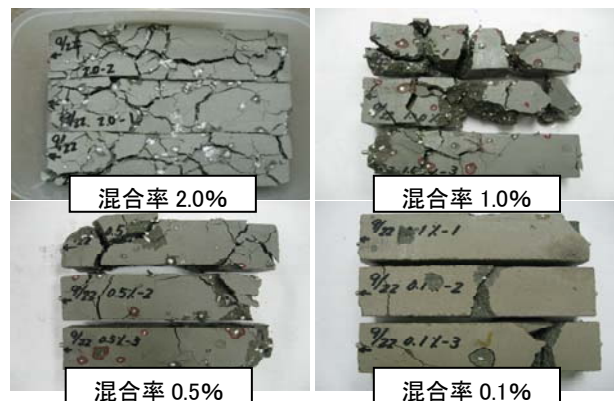


写真-3 ポップアウトの発生状況 (粒径 2.5~1.2mm)

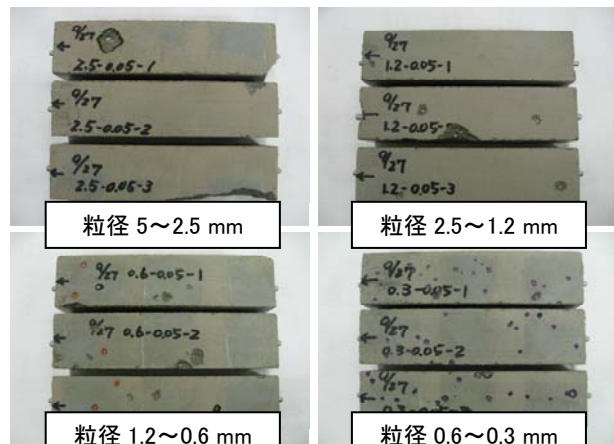


写真-4 ポップアウトの発生状況 (添加率 0.05%)

あれば、本促進試験方法によってポップアウトの発生可能性を予め評価できると考えられる。

3.2 共通実験

表-5 に各機関で実施した共通実験におけるポップアウトの発生数を示す。これによると、いずれの機関においても硬焼生石灰の混合率、試験方法にかかわらず、モルタル供試体にポップアウトの発生が確認された。ポップ

アウトの発生数は、実施機関によって、差があるものの、硬焼生石灰の粒径が 1.2~0.6mm で、硬焼生石灰の混合率 0.005%以上の場合、今回実施した試験方法（促進法、煮沸法）によって、ポップアウトの発生の有無を確認することが可能であるといえる。

表-5 供試体に発生したポップアウトの発生数(両端面を含む総発生数)

試験方法	配合記号	番号	全表面(6面)のポップアウトの発生総数 (個)						6 機関の差異(個)	
			機関①	機関②	機関③	機関④	機関⑤	機関⑥	平均値	標準偏差
促進法	A-0.03	1	20	7	14	8	8	13	-	-
		2	18	11	10	11	10	8	-	-
		3	16	16	15	15	11	9	-	-
		平均	<u>18.0</u>	11.3	13.0	11.3	<u>9.7</u>	13.0	12.8	2.9
	A-0.01	1	6	3	0	2	2	5	-	-
		2	6	3	6	2	5	6	-	-
		3	2	3	3	7	2	5	-	-
		平均	4.7	<u>3.0</u>	<u>3.0</u>	3.7	<u>3.0</u>	<u>5.3</u>	3.8	1.0
	A-0.005	1	1	4	1	3	0	5	-	-
		2	2	1	0	3	3	4	-	-
		3	1	2	6	2	4	3	-	-
		平均	<u>1.3</u>	2.3	2.3	2.7	2.3	<u>4.0</u>	2.5	0.9
煮沸法	B-0.03	1	13	9	14	16	9	13	-	-
		2	12	7	14	14	12	8	-	-
		3	17	10	11	17	13	16	-	-
		平均	14.0	<u>8.7</u>	13.0	<u>15.7</u>	11.3	12.3	12.5	2.4
	B-0.01	1	8	1	5	8	2	2	-	-
		2	6	1	6	10	5	4	-	-
		3	5	2	8	7	8	7	-	-
		平均	6.3	<u>1.3</u>	6.3	<u>8.3</u>	5.0	4.3	5.3	2.4
	B-0.005	1	0	1	3	2	3	2	-	-
		2	1	0	1	1	2	6	-	-
		3	6	1	6	2	3	3	-	-
		平均	2.3	<u>0.7</u>	<u>3.3</u>	1.7	2.7	3.7	2.4	1.1

注: 表中の下線は、ポップアウトの発生総数の最小値と最大値を示す。

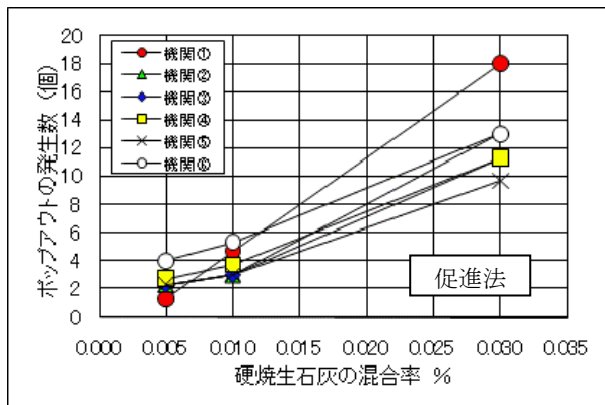


図-2 硬焼生石灰の混合率とポップアウトの発生数の関係

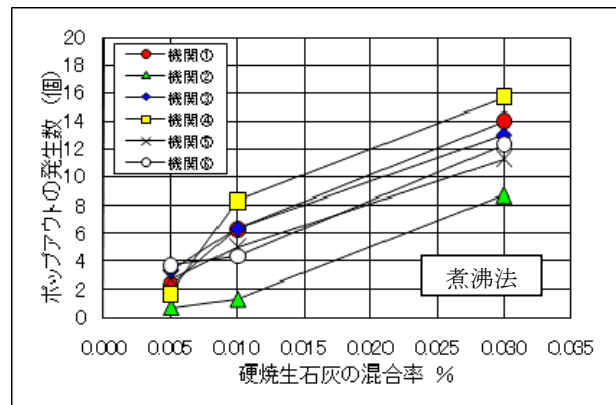


図-3 硬焼生石灰の混合率とポップアウトの発生数の関係

(1) 硬焼生石灰の混合率について

図-2 および図-3 に硬焼生石灰の混合率とポップアウトの発生数との関係を試験方法別に示す。図-2 の「促進法」の場合、実施機関によってポップアウトの発生数に差はあるが、両者には高い正の相関関係が認められる。また、図-3 の「煮沸法」の場合、「促進法」に比較して実施機関によるばらつきは大きいものの、「促進法」と同様に全体的な傾向として正の相関関係が認められる。

なお、表-5 に示した結果によれば、供試体間には差はあるものの、平均値で比較した場合、硬焼生石灰の混合率の増加に伴い、ポップアウトの発生数が低下する事例は認められなかった。

(2) 実施機関について

図-4 および図-5 に試験方法別の実施機関ごとのポップアウトの発生数を示す。図-4 の「促進法」の場合、機関①を除くと、硬焼生石灰の混合率にかかわらず、ポップアウトの発生数は同程度の値であり、実施機関における差は比較的少ないと判断される。機関①でポップアウトの発生数が増加したのは、打設面の処理方法（機関①だけ金ごて押さえ）およびポップアウトの確認方法に起因するものと考えられる。供試体の打設面処理については、実施機関により①金ごて押さえ、②未処理、③削り取りの3種類の方法が用いられた。写真-5 に示したように表面処理の違いから打設面の状態に差が生じ、ポップアウトの発生数に影響したことが推察される。ちなみに打設面以外では、同程度のポップアウトの発生数であり、このことから打設面処理について考慮する必要があると考えられる。また、ポップアウトの確認方法については、測定者によるばらつきもあるため、試験を実施した機関の間で差異が生じたものと考えられる。なお、他の機関で実施した供試体を回収して建材試験センターにおいて同一の測定者により再度ポップアウトの発生数を確認した場合には、実施機関の差は、図-4 および図-5 よりも小さくなる傾向が認められた。

一方、図-5 の「煮沸法」の場合、実施機関による差が「促進法」に比較して大きくなる傾向が認められた。実施機関による差が大きくなったのは、試験材齢および試験装置に起因するものと考えられる。「煮沸法」の試験では、供試体作製後、材齢1日で煮沸処理を行うため、モルタルの強度発現性がポップアウトの発生数に影響したものと考えられる。また、試験装置についても、「促進法」では、JIS A 1804 に規定されている反応促進試験装置が使用されるため、全ての機関で同一の試験装置により試験が実施できたのに対して、セメントの安定性試験に準じた「煮沸法」では、装置は特定されていないため、煮沸容器の容量や供試体の設置方法に差があったものと推察される。

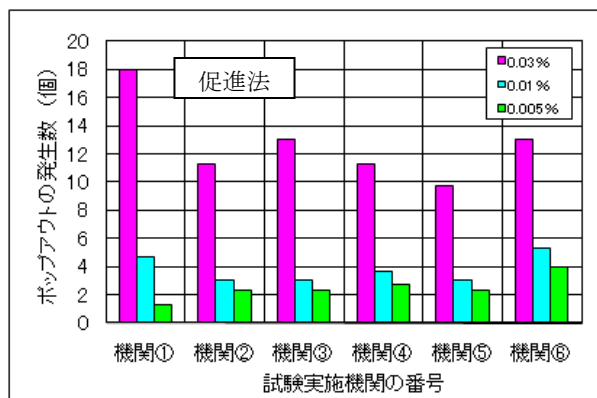


図-4 実施機関とポップアウトの発生数の関係(促進法)

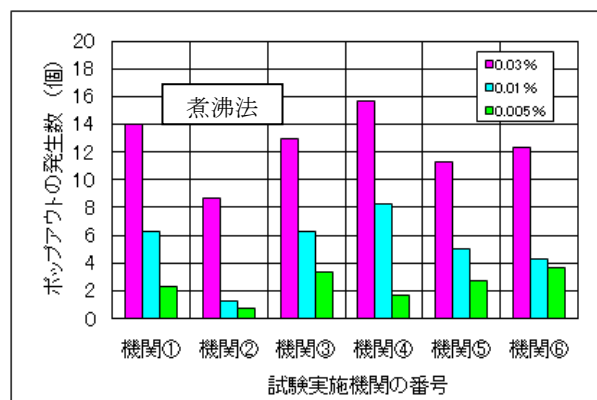


図-5 実施機関とポップアウトの発生数の関係(煮沸法)



写真-5 供試体の打設面の状況

(上段:金ごて仕上げ, 中段:未処理, 下段:削り取り)

(3) 試験方法について

図-6 に硬焼生石灰の混合率の違いによる各機関で実施した2種類の試験方法におけるポップアウトの発生数の関係を示す。図-7 には、試験機関ごとの2種類の試験方法におけるポップアウトの発生数の関係を示す。

なお、同図に示したポップアウトの発生数は、建材試験センターで全供試体について再度観察した結果を用いた。

図-6 によると、促進法と煮沸法でポップアウトの発生

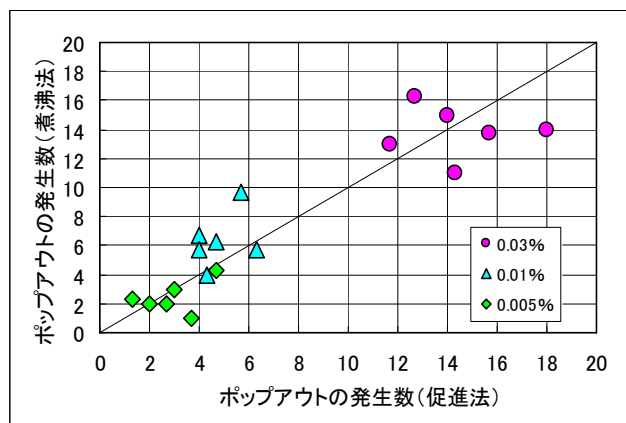


図-6 試験方法とポップアウトの発生数の関係(混合率)

数は概ね同程度であり、1:1の直線の上下に分布している。また、硬焼生石灰の混合率にかかわらずその傾向が認められる。試験を実施した機関ごとに試験方法間の関係を求めた図-7によると、機関②と機関①および機関⑥の一部（ポップアウトの発生数が多い場合）の結果については、「促進法」の方が「煮沸法」よりもポップアウトの発生数が多くなっている。しかし、全般的な傾向としては、「促進法」よりも「煮沸法」の方がポップアウトの発生数は増加する傾向にある。

「促進法」に比較して「煮沸法」の方がポップアウトの発生数が増加した原因としては、「促進法」の場合は、水中養生後の材齢2日に促進処理を行っているのに対し、「煮沸法」では材齢1日で煮沸処理を行っており、モルタルの強度に差があることが一因であると考えられる。

コンクリート構造物にポップアウトが発生するか否かを評価する場合は、モルタルおよびコンクリートの強度発現性（試験材齢）を考慮した試験方法の提案が必要である。しかし、今回の検討対象は、あくまでも、溶融スラグ骨材に生石灰が混入した場合において、ポップアウトが発生する可能性の可否を確認するための試験方法について模擬的に検討を行ったものである。従って、同程度の検出限界であれば、より迅速に、より簡便に実施できる試験方法で確認できることが望まれる。本実験結果の範囲においては、「促進法」および「煮沸法」のいずれの試験方法においても評価が可能であることが確認された。

なお、試験方法および実施機関によってポップアウトの発生数が異なることを考慮すると、「促進法」および「煮沸法」いずれの試験方法とも、ポップアウトの発生数を定量的に求めるための試験方法ではなく、ポップアウトの発生の有無を定性的に確認するための試験方法とすることが適していると考ええる。

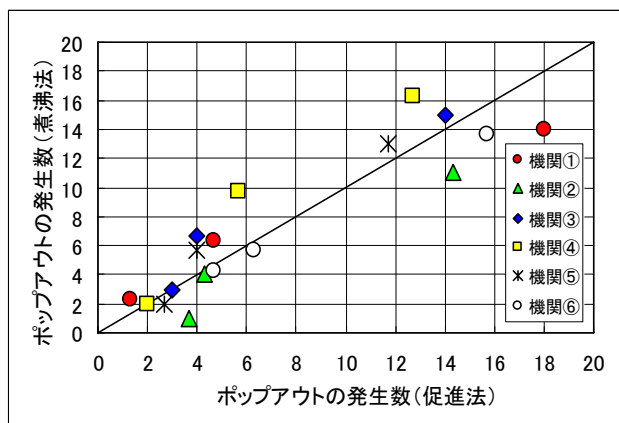


図-7 試験方法とポップアウトの発生数の関係(実施機関)

4. まとめ

溶融スラグ骨材に混入される可能性があると考えられる生石灰について、模擬的に硬焼生石灰を混入したモルタルを作製し、促進試験方法によるポップアウトの発生の可能性を実験的に検討した。

その結果、今回採用した二つの促進試験方法のいずれにおいても、硬焼生石灰の混入率が極微量であってもポップアウト発生の可能性を評価できることを確認した。

謝辞

本実験は、経済産業省の平成21年度および平成22年度の社会環境整備・産業競争力強化型規格開発事業（コンクリート用溶融スラグ骨材の試験方法等の標準調査）の一環として、建材試験センター内に設置した調査研究委員会（委員長 辻幸和 群馬大学教授）において実施したものである。本実験にご協力くださった関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 「コンクリート用溶融スラグ骨材の標準化の現状と展望」概要集, H18.9.15, 建材試験センター
- 2) 「平成21年度社会環境整備・産業競争力強化型規格開発事業（個別産業技術分野に関する標準化）コンクリート用溶融スラグ骨材の試験方法等の標準化調査成果報告書」, H22.2, 建材試験センター
- 3) 「平成16年度新発電システム等調査研究成果報告書」, H17.3, 建材試験センター
- 4) 池田尚治, 石川寿秋, 原田修輔, 菊地雅史: 溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの安全性に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.805~810, 2009
- 5) 「エコスラグ有効利用の現状とデータ集」, 社団法人日本産業機械工業会, エコスラグ利用普及センター, 2009年7月