調査研究報告

平成21年度社会環境整備・産業競争力強化型規格開発（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」

鈴木　澄江

1. はじめに

コンクリート用溶融スラグ骨材は，2006年7月に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）ならびにJIS A 5032（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道路用溶融スラグ）が制定され，コンクリート用骨材または道路用骨材としてのJIS認証品，JIS A 5371（無筋コンクリート製品）およびJIS A 5372（プレキャストコンクリート製品）用骨材，都道府県のリサイクル製品認定制度における再生資源等々，骨材としての利用が推進されている。しかし，2008年にJIS外品である産業廃棄物由来のスラグを利用したコンクリートが構造物に使用され，コンクリート表面にポップアウトの発生現象が生じる問題が起き，社会問題化した。

これらの背景を受け，コンクリート用溶融スラグ骨材のJIS化に携わった建材試験センターでは，経済産業省の平成21年度社会環境整備・産業競争力強化型規格開発（個別産業技術分野に関する標準化）の予算を受託し，「コンクリート用溶融スラグ骨材の試験方法等の標準化」に関する調査研究事業を行った。ここでは，これらの調査研究事業の内容を抜粋して紹介する。

2. 調査研究の内容

2.1 調査研究の概要

本調査研究は，平成21年度から2年間の計画で実施しているものである。コンクリートに使用する溶融スラグ骨材とは，JIS A 5031 に規定されている「コンクリート用溶融スラグ骨材」であり，これらの適切な利用と普及が前提とされている。調査研究内容は，社会問題化したコンクリートのポップアウトの発生原因ならびにポップアウトの発生を事前に確認するための試験方法の開発を目的として，「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委員会」を設置し，溶融スラグ骨材に関する実態調査，実験検討ならびにJIS A 5031の追補改正原案について審議を行ったものである。調査研究の成果物として「コンクリート用溶融スラグ骨材の試験方法等の標準化」成果報告書（CD-ROM）を作成した。なお，成果報告書は当センターのホームページ上にPDFファイルでアップされる予定であり，参照頂ければ幸いである。

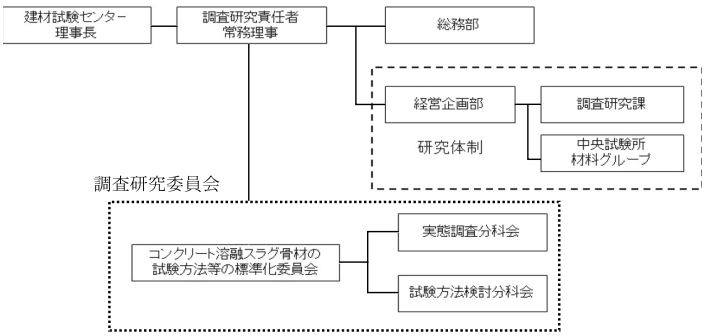


図1　調査研究の実施体制

2.2 実施体制

調査研究は，**図1**に示す体制で実施した。当センター内に設置したコンクリート溶融スラグ骨材の試験方法等の標準化委員会の下に，2つの分科会（実態調査分科会，試験方法検討分科会）を設置した。 また，ポップアウトの発生に関する実験検討は，当センターの中央試験所材料グループで実施した。

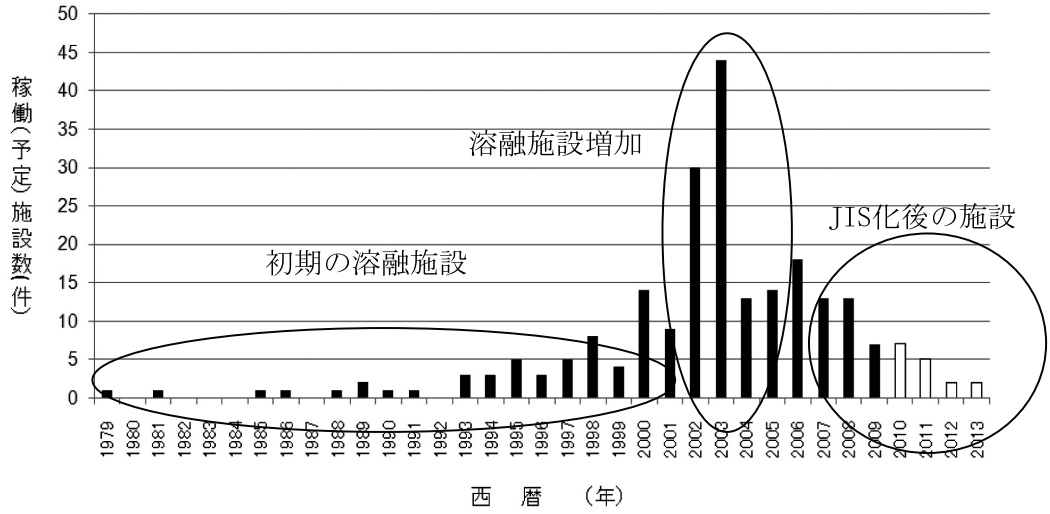


図2　稼動（予定）施設数の推移（炉メーカの回答より）

3.　溶融スラグに関する実態調査

3.1 実態調査の概要

調査研究委員会の実態調査分科会が実施した実態調査は，溶融スラグの製造及びコンクリート用骨材としての使用に関する実態を把握し，溶融スラグ骨材の適正使用を促進するためのものである。調査方式は，アンケート調査とし，溶融施設を設置・管理運営する自治体等の事業所（以下，自治体と称す），溶融炉を製造する企業（以下，炉メーカと称す）及び溶融スラグをコンクリート用骨材として使用する立場にあるコンクリート製品の製造企業（以下，コンクリート製品メーカと称す）を対象として，2009年11月に実施した。調査項目は，JIS A 5031の制定後の各調査対象における実態を把握する視点から次のように設定した。

自治体については，コンクリート用溶融スラグ骨材という工業製品を製造するという観点から，溶融原料および副資材，溶融炉の運転および溶融状態の確認，コンクリート用骨材を製造するための施設および管理等に関するものとした。炉メーカについては，溶融炉の目的，溶融方式と溶融スラグの特性との関係把握，JIS A 5031に適合するための施設としての対応等に関するものとした。コンクリート製品メーカについては，溶融スラグ骨材の使用を問わず，溶融スラグ骨材に対する意識，製造する製品の実情，溶融スラグ骨材に起因すると思われる不具合等に関するものとした。

3.2 実態調査結果

溶融スラグ骨材に関する実態調査結果の概要は次のとおりである。

（1）溶融炉の稼働状況について

① 溶融施設は，廃棄物の減容化や無害化を目的として建設された初期の施設，ダイオキシン対策で建設された2000年代初めの施設，JIS制定（2006年7月）以降の最新施設と推移し，引き続き建設中である（**図2**参照）。なお，2010年以降は建設予定。

② 溶融炉の使用目的は，減容化や無害化が主目的であるが，溶融スラグ骨材の製造も主要目的になってきている。

③ 溶融原料には，**図3**に示すように主灰，飛灰，可燃ごみ，下水汚泥，産業廃棄物等があり，下水汚泥を対象とする溶融施設では下水汚泥を単独で，一般廃棄物を対象とする溶融施設では多種の廃棄物を対象とする傾向がある。

④ 溶融温度は，設計溶融温度は1200℃以上であるが，運転時の溶融温度はその測定方法にもよるが1200℃を下回るものが僅かにある（**図4**，**図5**及び**表1**参照）。

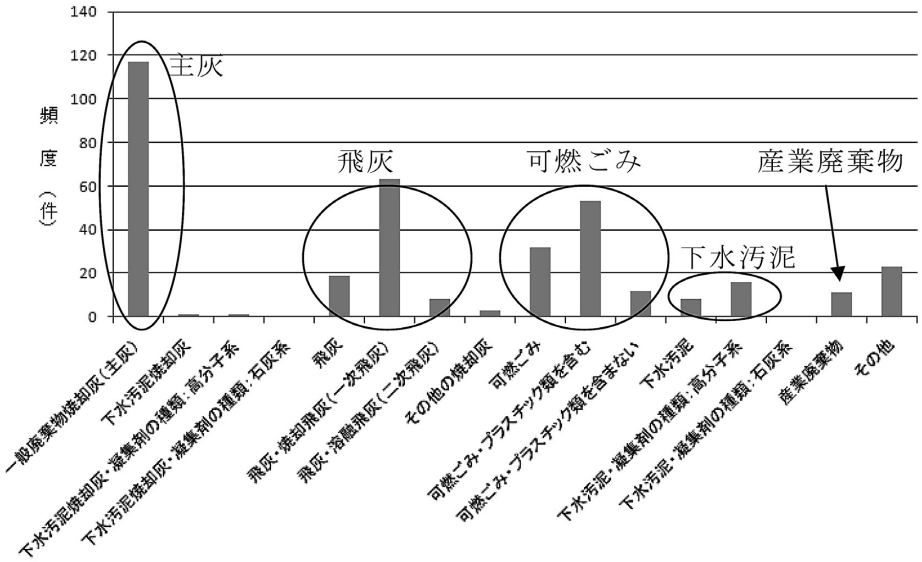


図3　溶融処理対象物について（炉メーカの回答より）

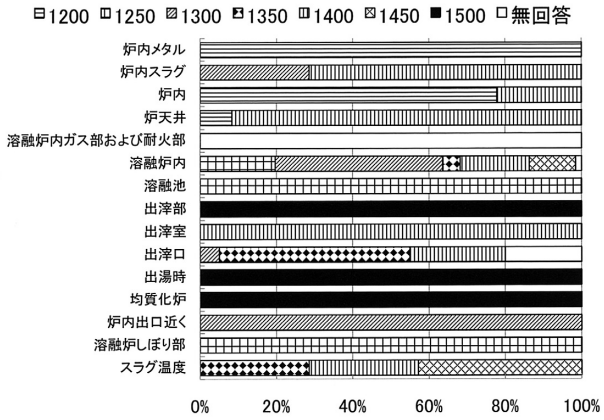


図 4　溶融温度の測定位置と溶融温度の下限値の分布
（炉メーカの回答より）

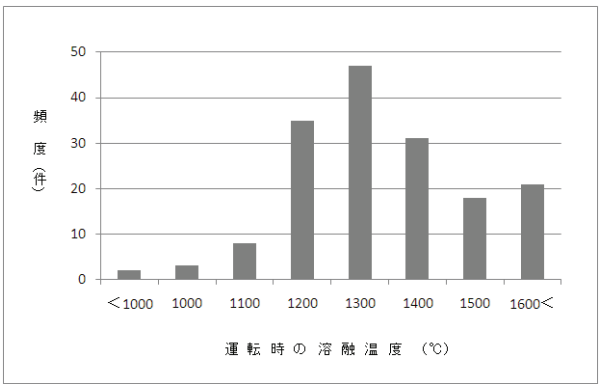


図 5　運転時の溶融温度と回答数（複数回答あり）
（自治体等の回答より）

（2）JIS A 5031への対応について

① JIS制定後は，溶融施設の発注仕様書で溶融スラグ骨材製造の仕様が一般化し，溶融施設の多くはJISに配慮した運転方法や設備に変わってきている。

② 溶融スラグ骨材に関するJIS製品認証の取得数は，JIS A 5031が2件，JIS A 5032が4件である。

（3）製造技術および運転について

① 炉メーカでは，JISの各項目に対応するための方策を取り入れている。

② 溶融スラグの有害物質の溶出量および含有量については，溶融条件の管理や溶融炉のインプット制御，水砕水の管理などにより対応している。

表1　溶融温度の測定方法（自治体等の回答より）

測定方法	回答数
熱電対	37
消耗型熱電対	9
赤外線温度計	2
放射温度計	28
測定しているが形式不明	3
測定していない	3

③ 溶融炉の運転指針が整備され，溶融スラグ製造における炉の運転管理項目の重点は，溶融温度，水砕水の状況，溶融スラグの粒度や整粒である。

④ 溶融スラグの安全性，品質等を確認するための分

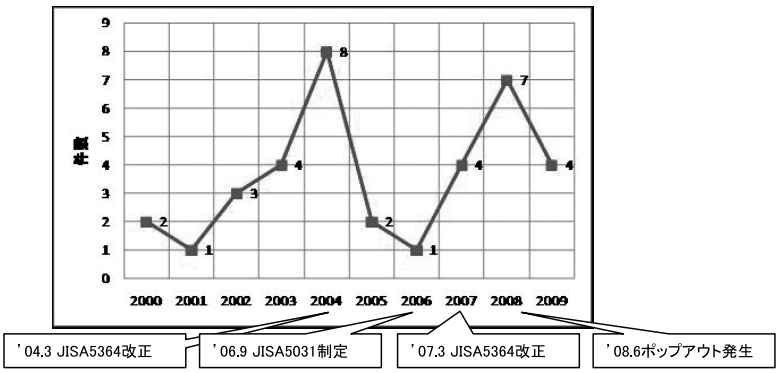


図6　製品メーカの溶融スラグ使用開始時期
（コンクリート製品メーカの回答より）

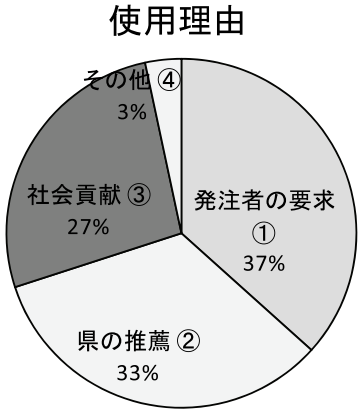
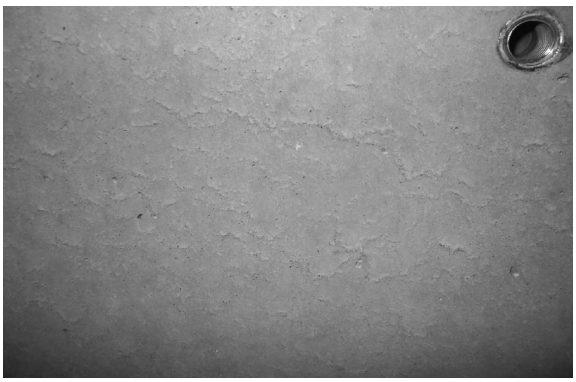


図7　溶融スラグの使用理由
（コンクリート製品メーカの回答より）



冬場、製品表面（縦壁）に、ブリーディングが原因と考えられる砂すじ状の波模様が発生した。

写真1　発生した不具合の状況
（コンクリート製品メーカの回答より）

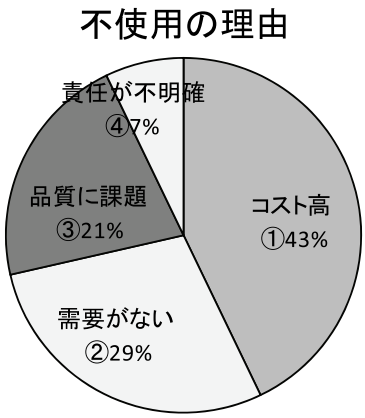


図8　溶融スラグの不使用の理由
（コンクリート製品メーカの回答より）

析試料および結果，並びに製造工程の管理記録の保管は，統一されていない。

（4）有効利用について

① 有効利用された溶融スラグ骨材の量は，製造量の66.8%である。

② JIS A 5031の制定以前から使用され，2006年～2007年に関連JISの制定や改正に伴い増加したが，2008年のポップアウトが発生した事件により使用は伸びていない（**図6**参照）。

③ 溶融スラグ骨材は，JIS A 5371及びJIS A 5372に規定される設計基準強度が30N/㎟以下のコンクリート製品，並びにこれらと同等の設計基準強度をもつコンクリート製品に，天然骨材に対する容積比で10～20%程度の混合率で使用されている。

④ 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品の出荷量は，東北地区の実績が多く，それ以外では愛知県，三重県などの中部地区が多い。

⑤ 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品は，地方自治体からの発注が主であり，地域の「優先使用」，「リサイクル製品の認定」や「特記仕様」など公的機関の後押しが大きな推進力である（**図7**参照）。

⑥ 溶融スラグ骨材の「使用を中断」あるいは「不使用」とした理由は，「製造コストの上昇」および「需要がない」が主たるものであり，他に「品質に課題」，「責任が不明確」である（**図8**参照）。

（5）コンクリートにおける不具合について

① 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品の不

具合は，アンケートに回答したコンクリート製品メーカの約20%が経験している（**写真1**参照）。

② 溶融スラグ骨材を使用したコンクリート製品の不具合には，コンクリート製品の表面に関するものが多く，溶融スラグ骨材中に残存する金属アルミニウムに起因することも原因のひとつと考えられる。

（6）JIS A 5031に関する意見・要望について

① 溶融処理対象物（含む，産業廃棄物）ごとに規格を定めるなど，適用範囲の拡大を要望している。

② 膨張性の試験方法および規格値の見直しが必要である。

（7）溶融スラグ骨材の用途拡大について

① 高い品質や性能を求めないコンクリート製品などへ活用する。

② 使用の拡大には，行政機関とりわけ「国」への期待が大きい。

4. 溶融スラグ骨材のポップアウト検証実験

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酸化カルシウム（生石灰）であると推定されている[1)]。JIS A 5031には酸化カルシウムの規定値（CaOとして45%以下）が定められており，コンクリート骨材として使用した場合に，ポップアウトは発生しないと考えられていた。しかし，2008年にコンクリート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。現時点では，溶融スラグ骨材について，ポップアウトの発生の有無をあらかじめ確認する試験方法は標準化されていない。しかし，既往の文献[1)~4)]によると，オートクレーブ試験や反応促進方法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。これらの既往の文献に基づき，試験方法分科会では，モルタル・コンクリートにおけるポップアウトの発生を予め確認するための試験方法を確立することを目的として検証実験を行った。検証実験では，モルタルにポップアウトの発生が確認できるか否かを，まず人工的に検証した。この人工的ポップアウトの発生を確認するために実施した実験は，「①硬焼生石灰を使用した場合の反応促進装置による試験方法の適用性の確認」である。この①の実験結果により，試験方法の適用性が確認され，「②溶融スラグ骨材を対象とした試験方法の適用性の確認」についても実験検討を行った。

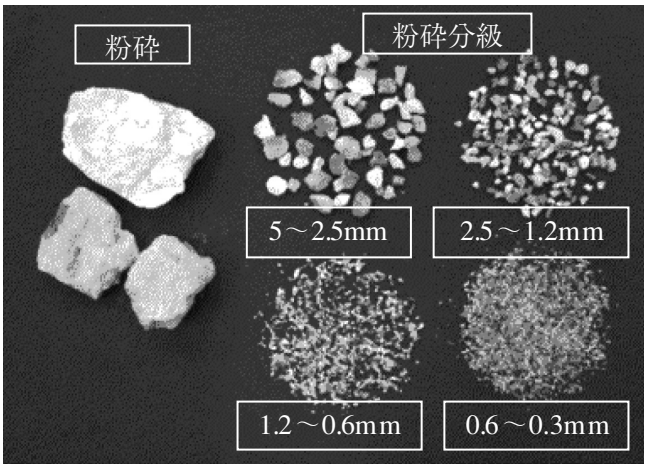


写真2　硬焼生石灰の外観

4.1 検証実験の概要

（1）硬焼生石灰を使用した場合の反応促進装置による試験方法の適用性に関する確認実験

モルタルに人工的に生石灰を混入してポップアウトを発生させるために，ここでは，標準試料として，通常よりも高温で焼成した「硬焼生石灰」（**写真2**参照）を対象としてその適用性を検討した。実験は，粉砕した硬焼生石灰（4水準の粒度）をJIS R 5201に規定される標準砂に質量比で添加（5水準の添加率）してモルタル試料及びモルタル供試体を作製し，型枠脱型時，標準養生終了時及び反応促進試験（JIS A 1804）後にポップアウトの発生状況を確認した。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1：水0.5：標準砂2.6（1バッチ練混ぜ量：C=520ｇ，W=260ｇ，S=1350ｇ）とした。モルタル試料は，JIS A 1146に従って練り混ぜ，3水準の供試体寸法（40×40×160㎜，100×100×10㎜，70×70×25㎜）でポ

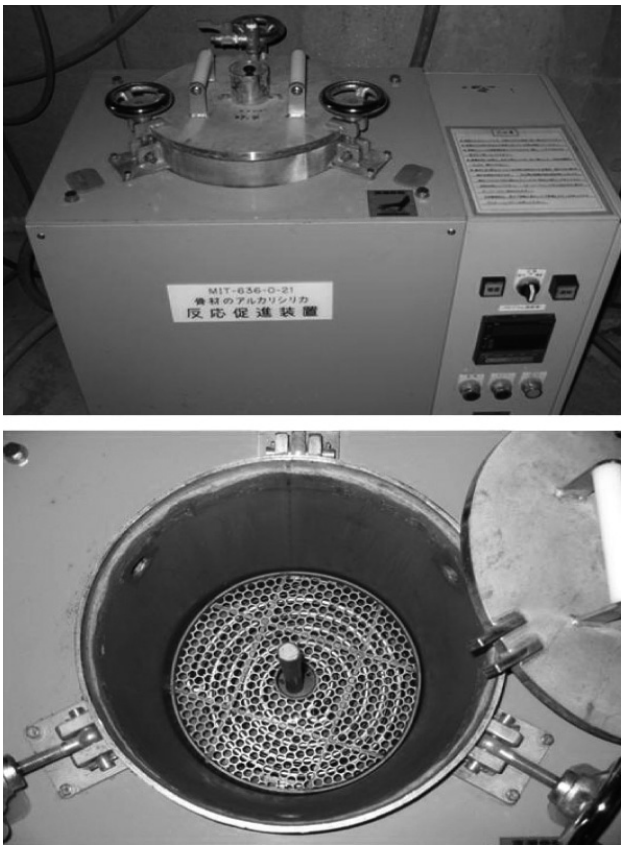


写真3　促進試験に使用した反応促進装置（JIS A1804）

ップアウトの発生状況を比較検討した。供試体の養生は，JIS A 1804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3**）を用いて行い，供試体を装置内約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，同圧力下で4時間煮沸した。ポップアウトの判定は，約30㎝離れた位置から目視で観察し，白色又は茶色の核が認められ，かつ，目視又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。なお，ポップアウトの観察は，型枠脱型時，標準養生終了後，促進養生終了後に行った。

また，試験装置の違いを確認するために上記の促進試験装置とともにオートクレーブ試験装置（JIS A 6205に準拠）でも確認実験を実施した。

促進試験方法により検討した主な項目は，以下のとおりである。

① 硬焼生石灰の粒径とポップアウトの発生状況
② 硬焼生石灰の添加率とポップアウトの発生状況
③ 供試体の形状・寸法とポップアウトの発生状況
④ 試験装置の相違点とポップアウトの発生状況

（2）溶融スラグ骨材を対象とした試験方法の適用性の確認実験

（1）の促進試験方法を用いて，21試料の溶融スラグ骨材を対象としてポップアウトの発生を確認する試験を実施した。

4.2 検証実験結果

（1）硬焼生石灰を使用した一連の実験検討結果

1）硬焼生石灰の粒径とポップアウトの発生状況の関係

両者の関係を**図9**に示す。硬焼生石灰の粒径が小さいほど，ポップアウトの発生数は多くなる傾向があった。同一質量の硬焼生石灰が混入すると想定した場合，硬焼生石灰の粒径が小さくなるほど供試体に含まれる粒の数が増加するため，発生数が多くなるものと考えられる。硬焼生石灰の粒径とポップアウトの程度（径）の関係を評価することは難しいが，ポップアウトの核（白色部分）は当初の数倍程度であり，ポップアウトの直径は，核の5～10倍程度の値である。なお，硬焼生石灰の混入位置とポップアウトの発生の関係については，今後ポップアウトの深さの詳細を検討して考察する必要があるが，概ね硬焼生石灰の粒径の2倍程度内（例えば，粒径が2.5㎜の場合は5㎜程度内）までポップアウトは発生すると推測される。ポップアウトの発生状況を**写真4**に示す。

2）硬焼生石灰の添加率とポップアウトの発生状況の関係

ポップアウトの発生数は，硬焼生石灰の添加率に比例して増加する傾向が認められた（**図10**参照）。ただし，粒径が0.3㎜の場合には頭打ち現象が認められた。また，硬焼生石灰の添加率が0.1％を超えると，ポップアウトでおさまらず，供試体に過大なひび割れが発生したり，崩壊する場合もある。本実験結果においては，硬焼生石灰の添加率0.005％以上の場合に，モルタル供試体の表面にポップアウトの発生が認められた。従って，溶融スラグ骨材に含まれる生石灰の添加

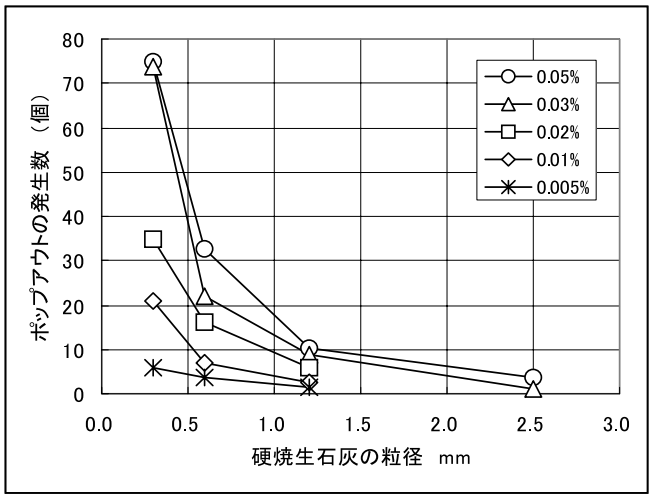


図9　硬焼生石灰の粒径とポップアウトの発生量の関係

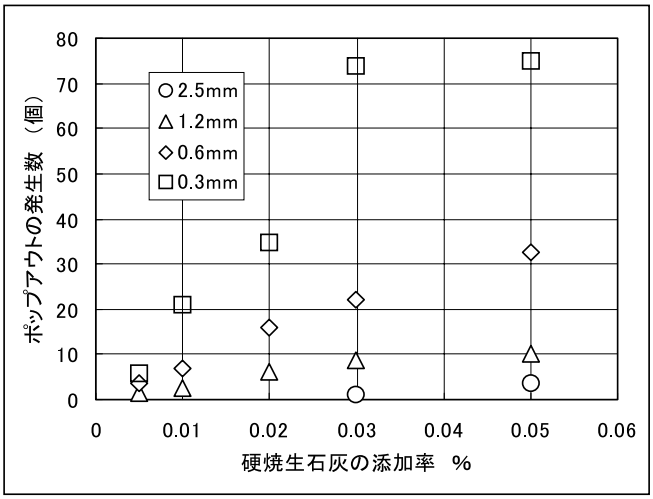


図10　硬焼生石灰の添加率とポップアウトの発生量の関係

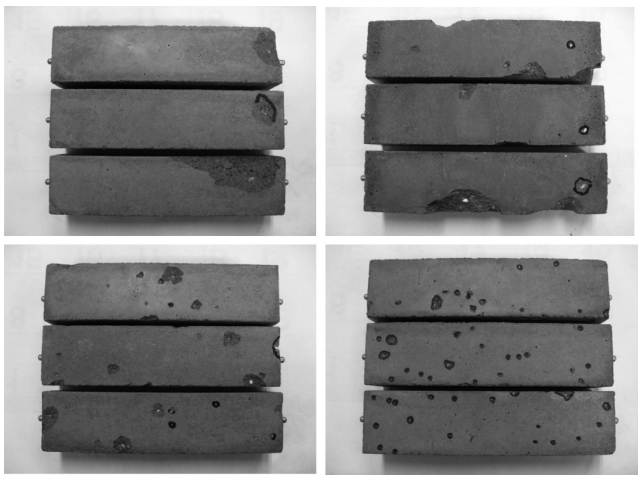


写真4　ポップアウトの発生状況の一例

率が0.005%以上であれば，本実験で採用した促進試験方法によって，ポップアウト発生の可能性をあらかじめ評価できると考えられる。なお，既往の研究成果によると，神奈川県の生コン工場で使用された溶融スラグ骨材に含まれる生石灰の含有率（推定値）は溶融スラグ骨材の質量に対して0.008～0.014%である。硬焼生石灰の添加率とポップアウトやひび割れの発生状況は，既往の研究成果と異なるが，これはモルタルの調合条件の違い（細骨材量が2.3倍程度→硬焼生石灰の添加量が2.3倍程度）と実験に用いた硬焼生石灰の反応の程度が異なることが要因と考えられる。従って，同一条件（配合条件，硬焼生石灰）で，複数の試験機関で共通試験を実施する等，試験の再現性を確認する必要があると考える。

3）供試体の形状・寸法とポップアウトの発生状況の関係

供試体の寸法が異なる場合の発生状況について観察した。当初，供試体の形状が版状に近い方がポップアウトの発生数が多くなると想定していたが，今回の実験の範囲では，ポップアウトの発生数は供試体の形状・寸法にかかわらず同程度であり，著しい差は認められなかった。試験の汎用性を考慮すると，供試体の形状・寸法は，40×40×160㎜が適切であると考えられる。

4）試験装置の相違点とポップアウトの発生状況の関係

反応促進方法（JIS A 1804に準拠）とオートクレーブ試験方法（JIS A 6205に準拠）の大きな違いは，促進養生条件である。両者の促進養生条件を比較すると，反応促進方法に比較してオートクレーブ試験方法の方が養生温度が高く，保持時間も長いため，より反応を促進させる条件（ポップアウトが発生しやすい条件）であると推測される。その他の相違点としては，試験日数の点が挙げられる。反応促進方法の場合は，促進養生当日に外観観察，質量及び長さの測定が可能であ

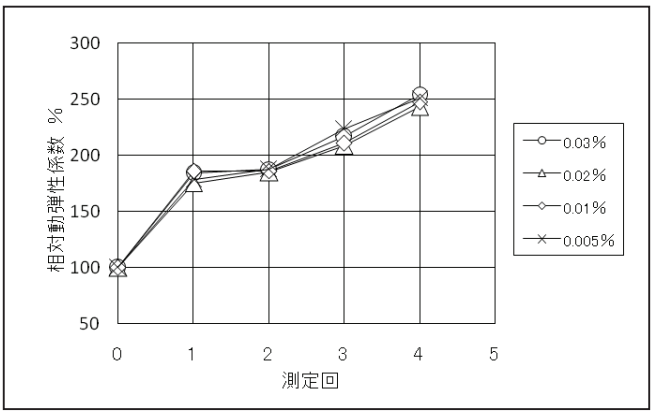


図11　測定回と相対動弾性係数の関係
［反応促進試験、硬焼生石灰：1.2㎜］

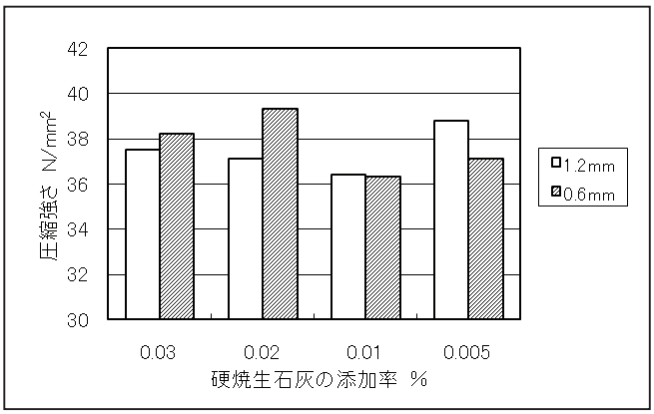


図13　硬焼生石灰の添加率と圧縮強さの関係
［反応促進試験］

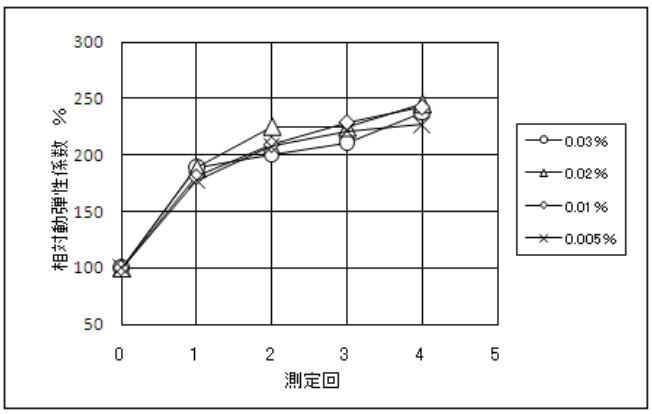


図12　測定回と相対動弾性係数の関係
［オートクレーブ試験、硬焼生石灰：1.2㎜］

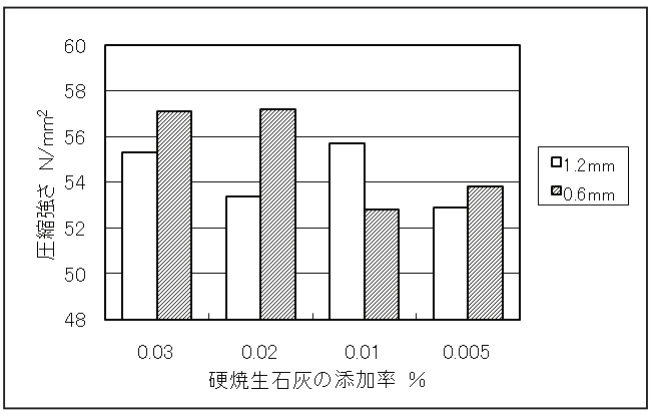


図14　硬焼生石灰の添加率と圧縮強さの関係
［オートクレーブ試験］

る。一方，オートクレーブ試験の場合は，自然放冷の関係で外観観察は翌日，供試体の状態（温度及び乾湿）の関係で，質量や長さの測定は促進養生の２日後となる点で大きな相違点がある。

ポップアウトの発生状況は，視覚的には試験方法による顕著な差は認められなかった。また，硬焼生石灰の添加率や粒径にかかわらず，いずれの条件でも両者にポップアウトが発生した。ポップアウトの発生数は，試験条件が厳しいと考えられるオートクレーブ試験の方が必ずしも多くなく，同程度，或いは逆転している場合も多数認められた。これは，供試体間のバラツキの影響も考えられるが，反応促進方法の養生条件（温度:127℃，保持時間：4時間）で，ポップアウトの発生条件を満足しているためと考えられる。また，両者の試験方法により処理したモルタル供試体の物理的性質（動弾性係数，圧縮強さ）を確認した結果を**図11～図14**に示す。

反応促進試験（JIS A 1804）の場合は，測定回数（材齢）に伴って相対動弾性係数は増加しており，硬焼生石灰の添加率（ポップアウトの発生状況）による差は認められなかった。特に，硬焼生石灰の粒径が0.6㎜の場合は，硬焼生石灰の添加率による影響は全く認められなかった。一方，オートクレーブ試験（JIS A 6205）の場合は，全体的な傾向として測定２回目以降（オートクレーブ以降），相対動弾性係数の増加は緩慢となった。また，バラツキはあるが，促進養生以降，相対動弾性係数が僅かに低下している事例も認められた。ただし，硬焼生石灰の添加率（ポップア

ウトの発生状況）と明確な関係は認められなかった。

圧縮強さについては，反応促進試験の場合は，硬焼生石灰の添加率の増加（ポップアウトの発生数の増加）に伴い，著しく断面欠損している供試体では，他に比較して圧縮強さは１割以上低下した。一方オートクレーブ試験の場合は，圧縮強さにモルタルの配合条件による差は認められたが，モルタル強度と硬焼生石灰の添加率（ポップアウトの発生状況）との間に明確な関係は認められなかった。

また，試験装置の普及率は，オートクレーブ試験装置よりも反応促進装置の方が高いと推察される。オートクレーブ試験装置の場合は，圧力容器の容積にもよるが，取扱い責任者は公的な資格が必要である。更に，試験日数を比較すると，反応促進方法の方が外観観察に限定した場合で１日，質量変化率や長さ変化率の測定を考慮すると２日間，試験期間を短縮することが可能である。

ポップアウト試験を定量試験ではなく，ポップアウトが発生するか否かの定性試験と位置づければ，反応促進方法で十分対応が可能であり，また，試験の汎用性だけを考慮すると，反応促進方法の方が合理的である。しかし，これだけでオートクレーブ試験の適用を否定するものではない。今後，コンクリートを対象として，両者の相違点を比較検討し，試験方法の標準化原案を検討する予定である。

今回は，反応促進試験及びオートクレーブ試験後のモルタル供試体を対象として強度試験を実施した。試験方法にかかわらず，ポップアウトの発生がモルタル強度に及ぼす影響はほとんど認められなかった。しかし，曲げ強さ及び圧縮強さの絶対値を比較すると，促進養生方法によって大きな差が認められた。

同一配合条件で比較すると，オートクレーブ試験の方が曲げ強さで２～３割程度，圧縮強さで４～５割程度高い値となった。試験方法の標準化に際しては，促進養生方法による強度や弾性係数の発現性の違いも考慮する必要があると考える。

(2) 溶融スラグ骨材を対象とした実験結果

実験対象とした溶融スラグ骨材（21試料）は，粒度や粒形については不明確であるが，モルタルの膨張率を除き，微粒分量，絶乾密度及び吸水率はJIS A 5031に適合したものである。本調査研究で提案した反応促進試験方法（JIS A 1804）によって，溶融スラグ骨材の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ことが確認できた。なお，当該試験によって著しいポップアウトが発生した試料は１試料だけであったが，その他２試料に軽微なポップアウトが確認された。

溶融スラグ骨材についてもポップアウトの発生が確認できたことから，これらの実験結果に基づいて，「溶融スラグ骨材のモルタルによるポップアウト確認試験方法（案）」を成果報告書内で提案した。なお，試験方法の運用，試験結果の判定値（規格値）等については，平成22年度の調査研究課題とした。

7. おわりに

平成21年度に当センターで実施した「コンクリート用溶融スラグ骨材の試験方法等の標準化」の調査研究事業について報告した。成果報告書については，当センターのホームページにアップされる予定（2010年7月末）であるので，興味がある方は是非，参照頂ければ幸いである。

【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

3) 池田尚治，石川寿秋，原田修輔，菊池雅史：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

4)「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

＊執筆者

鈴木 澄江（すずき・すみえ）

㈶建材試験センター 経営企画部
調査研究課　主幹　博士（工学）