

報告 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

池田 尚治*¹・石川 寿秋*²・原田 修輔*³・菊池 雅史*⁴

要旨：溶融スラグ細骨材は、資源リサイクルの観点からすれば、積極的に活用すべき材料である。しかし、同骨材の使用によりポップアウト現象が発生することがある。そこで、当該溶融スラグ細骨材の有害物質含有量および溶出量を測定すると共に同骨材を使用したコンクリートの力学的性状を実験によって求め、構造物の安全性について検討した。更に、生石灰によってポップアウトを人工的に発生させたコンクリートの力学的性状および解析によるポップアウト現象の力学的挙動について検討した。

キーワード：溶融スラグ細骨材, 生石灰, ポップアウト, 強度, 乾燥収縮, 中性化, 力学的解析

1. はじめに

溶融スラグ細骨材は、ごみ焼却炉から排出される焼却灰や下水処理場から排出される污泥等を 1,200℃以上で溶融後に固化した無機材料であり、資源リサイクルの観点からは今後積極的に活用していくべきと考えられる。しかしながら、溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートには、ポップアウト（以下、PO と称す）が発生する場合のあることが指摘されている¹⁾²⁾。また、溶融スラグ骨材自体は JIS 化され、レディーミクストコンクリートに適用可能であると示されているが³⁾、JIS A 5308 では使用可能な材料として規定されていない。最近では、神奈川県内のあるレディーミクストコンクリート工場が溶融スラグ細骨材を独断で使用した結果、住宅や公共施設のコンクリート構造物に PO が発生し、社会問題を招いた事実がある。

PO とは、コンクリート硬化体中に存在する膨張性物質の反応によって表面剥離が生じるものであり、溶融スラグ骨材に限らず、黄鉄鉱含有骨材⁴⁾、蛇紋岩骨材⁵⁾といった天然骨材の他にフェロニッケルスラグ骨材⁶⁾を使用した際にも起こり得る現象である。これら骨材に含まれる PO の原因物質は、硫化鉄や遊離酸化マグネシウムであり⁴⁾⁵⁾⁶⁾、溶融スラグ骨材に含まれる膨張性物質と類似している。それにも関わらず、上述した天然骨材やフェロニッケルスラグ骨材は、これらを規定する JIS の基準を満足しさえすれば、レディーミクストコンクリートへの使用が認められている。これら骨材と溶融スラグ骨材に対する扱いの違いは、ポップアウト現象に関する検討の程度の差に起因すると考えられる。溶融スラグ骨材についても、同骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響、PO が発生する化学的・力学的条件、PO の発生がコンクリートの性状に及ぼす影響等が十分吟味

されれば、同骨材の扱いは変わってくるものと考えられる。

そこで、問題となった溶融スラグ細骨材の有害物質含有量および溶出量を測定すると共に同骨材を使用したコンクリートの性状を実験で求め、溶融スラグ細骨材の使用上の安全性について検討した。更に、生石灰によって PO を人工的に発生させたコンクリートの力学的性状および解析による PO 現象の力学的挙動について検討し、安全性を評価することとした。

2. 研究の内容

今回の実験は、3つのシリーズに分けて実施した。シリーズ1では、溶融スラグ細骨材の有害物質含有量とその溶出量を測定すると共に、アルカリシリカ反応性について評価した。シリーズ2では、上記溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの性状について実験的に検討した。シリーズ3では生石灰によって PO を人工的に発生させたコンクリートの力学的性状を確認した。解析による PO 現象の力学的挙動に関する検討はシリーズ4とした。

2.1 溶融スラグ細骨材の有害物質含有量と溶出量およびアルカリシリカ反応性(シリーズ1)

(1) 使用材料

本実験で使用した溶融スラグ細骨材は、産業廃棄物の溶融固化施設で製造されたものであり、その化学成分は表-1に示す通りである。

(2) 実験方法

有害物質含有量と溶出量の測定において、検液の調整方法は JIS K 0058 に準拠した。定量物質とその方法は表-2に示す通りである。

当該骨材のアルカリシリカ反応性の評価は、JIS A

*1 横浜国立大学名誉教授 (株)複合研究機構 代表取締役 工博 (名誉会員)

*2 神奈川県生コンクリート工業組合 技術委員長 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副所長 (正会員)

*4 明治大学 理工学部教授 工博 (正会員)

表-1 溶融スラグ細骨材の化学成分

項目	測定値	JIS A 5031 基準値
酸化カルシウム (%)	19.6	45.0 以下
全硫黄 (%)	0.6	2.0 以下
三酸化硫黄 (%)	0.1 未満	0.5 以下
金属鉄 (%)	0.7	1.0 以下
塩化物量(NaCl) (%)	0.002	0.04 以下

表-2 定量物質と定量方法

物質名	定量方法
カドミウム	JIS K 0102 55.2 電気加熱原子吸光法
鉛	JIS K 0102 54.2 電気加熱原子吸光法
六価クロム	JIS K 0102 65.2.1 ジフェニルカルバジド吸光光度法
ひ素	JIS K 0102 61.3 水素化物発生 ICP 発光分光分析法
純水銀	JIS K 0102 66.1.1 還元気化原子吸光
セレン	JIS K 0102 67.3 水素化物発生 ICP 発光分光分析法
ふっ素	JIS K 0102 34.1 ランタン-アリザリンコンプレキソン吸光光度法
ほう素	JIS K 0102 47.3 ICP 発光分光分析法

1145 (化学法), JIS A 1804 (迅速法) に準拠した。

2.2 溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの性状 (シリーズ 2)

(1) 使用材料およびコンクリート配合

コンクリートに使用した材料は、セメントとして普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³), 細骨材として山砂(A 品: 表乾密度 2.59g/cm³, 吸水率 2.88%, F.M.2.93 B 品: 表乾密度 2.61g/cm³, 吸水率 2.71%, F.M.2.25)と表-1 に示した溶融スラグ細骨材(表乾密度 2.66g/cm³), 粗骨材として碎石(表乾密度 2.66g/cm³, 吸水率 2.60%, F.M.6.57)である。化学混和剤には、AE 減水剤に変性ポリオールとポリカルボン酸系化合物、高性能 AE 減水剤にポリカルボン酸系化合物をそれぞれ主成分としたものを使用した。これら材料を使用したコンクリート配合を表-3 に示す。

(2) 実験項目および方法

表-3 に示した各コンクリートを対象に、標準養生条件下の圧縮強度 (JIS A 1108) と静弾性係数 (JIS A 1149), 乾燥収縮による長さ変化率 (JIS A 1129), 促進中性化深さ (JIS A 1153) を測定した。長さ変化率の測定に用いたコンクリート供試体は、成型後 24 時間で脱型し、20°C の水中で材齢 7 日まで養生した。その後、20±3°C, 湿度 60±5% の恒温室に存置し、所定の材齢で長さ変化率を測定した。

2.3 PO を人工的に発生させたコンクリートの力学的性状(シリーズ 3)

(1) 使用材料およびコンクリート配合

このシリーズにおいてコンクリートに使用した材料は、セメントとして早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm³), 細骨材として陸砂(表乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 2.14%, F.M.2.60), 粗骨材として碎石(表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.60%, F.M.6.66)である。PO を人工的に

表-3 コンクリート配合 (シリーズ 2)

W/C (%)	溶融スラグ細骨材置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	
		水	セメント	山砂 A	山砂 B	溶融スラグ細骨材		碎石
40	0	175	438	474	316	0	893	0.9**
	15			358	318	119		
	30			240	320	240		
55	0	177	322	521	347	0	906	1.0*
	8			522	279	70		
	15			393	350	131		
	30			264	352	264		

*AE 減水剤, **高性能 AE 減水剤
注) Gmax=20mm, 練上がり温度: 22~23°C
目標スランブ: 21cm(W/C=40%), 18cm(W/C=55%)
目標空気量: 4.5%

表-4 コンクリート配合 (シリーズ 3)

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)
	水	セメント	陸砂	碎石	
40	172	430	762	928	1.0**
55	180	327	786	970	1.0~1.2*

*AE 減水剤, **高性能 AE 減水剤
注) Gmax=20mm, 練上がり温度: 19~21°C
目標スランブ: 18cm, 目標空気量: 4.5%

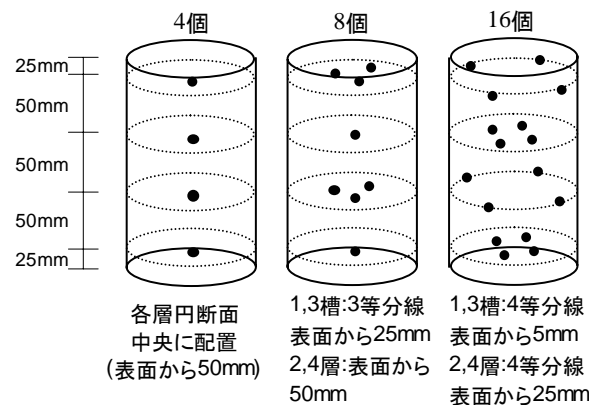


図-1 生石灰の配置方法

発生させるための生石灰は、炭焼石灰を使用した。この炭焼石灰の消化 (反応) 速度は、市販の硬焼石灰に比べると比較的緩やかであるが、セメントの反応速度に比べると極めて速い。よって、PO をコンクリート硬化後に発生させるため、早強ポルトランドセメントを用いると共に、炭焼石灰を 1,600°C で死焼し反応性を低下させた。

上述の材料のほか、化学混和剤には AE 減水剤に変性リグニンスルホン酸化合物、高性能 AE 減水剤にポリカルボン酸系化合物をそれぞれ主成分としたものを使用した。本シリーズで使用したコンクリートの配合を表-4 に示す。

(2) 生石灰の使用方法与養生条件

生石灰の使用方法の一つとして、粒径 1.2~2.5mm の生石灰を細骨材の 0, 0.005, 0.01, 0.02wt% 外割添加した。この添加方法はコンクリート練混ぜ時に所定量を練り込んだ。しかし、この方法では添加された生石灰の量が供試体間で変動し、PO の発生状況が供試体間で異なる

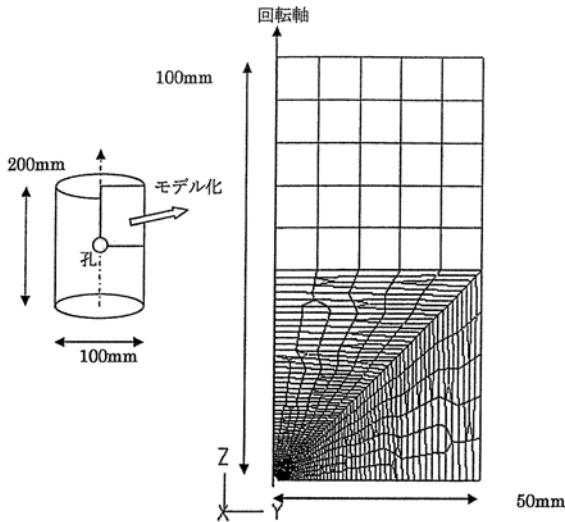


図-2 FEM 解析モデル

る。そこで、2.5mm の単一粒径の生石灰を上記添加量に相当する個数分 (0, 4, 8, 16 個) だけ図-1 のように埋め込んだケースの実験も行った。

上述のように本シリーズでは、生石灰を 2 通りの方法で添加した。これら各ケースについて、供試体を 20℃ 恒温室内に暴露状態で保管および 28 日間 20℃ 水中養生後にオートクレーブ養生 (AC) を実施する 2 通りの養生方法によって各実験を行った。

(3) 実験項目および方法

本シリーズでは、作製した供試体個々の PO 発生状況を確認すると共に、圧縮強度 (JIS A 1108) と静弾性係数 (JIS A 1149)、一部のケースでは割裂引張強度 (JIS A 1113) を測定した。

2.4 PO 現象の力学的挙動解析(シリーズ 4)

解析方法は、3 次元 FEM による弾性解析、弾性論による理論解析、ひび割れによる非線形性を考慮した解析の 3 種類である。また、下記のような基本的条件を設定して解析を単純化した。

- (1) 膨張粒子 (生石灰粒子) は球形とし、その直径を 2mm とした。
- (2) FEM による弾性解析では粒子の直径が 1.2 倍になった時のコンクリートの応力とひずみを求めた。
- (3) FEM による弾性解析では、直径 100mm、高さ 200mm のコンクリート円柱の中心に膨張粒子が 1 個存在するとした (図-2 参照)。
- (4) コンクリートの静弾性係数は 20kN/mm²、ポアソン比は 0.2 とした。

3. 実験および解析結果と考察

3.1 溶融スラグ細骨材の有害物質含有量と溶出量およびアルカリシリカ反応性(シリーズ 1)

溶融スラグ細骨材の有害物質含有量および溶出量の

表-5 溶融スラグ細骨材の有害物質含有量と溶出量

項目	物質名	測定値	JIS A 5031 基準値
含有量 (mg/kg)	カドミウム	1 未満	150 以下
	鉛	3 未満	150 以下
	六価クロム	2 未満	250 以下
	ひ素	1 未満	150 以下
	純水銀	0.01 未満	15 以下
	セレン	1 未満	150 以下
	ふっ素	21	4000 以下
溶出量 (mg/L)	ほう素	137	4000 以下
	カドミウム	0.001 未満	0.01 以下
	鉛	0.001	0.01 以下
	六価クロム	0.01 未満	0.05 以下
	ひ素	0.001 未満	0.01 以下
	純水銀	0.0001 未満	0.0005 以下
	セレン	0.001 未満	0.01 以下
ほう素	ふっ素	0.04	0.8 以下
	ほう素	0.1 未満	1.0 以下

表-6 溶融スラグ細骨材のアルカリシリカ反応性

項目	測定値	無害の判定基準	
JIS A 1145 化学法	アルカリ濃度減少量 R _C (mmol/L)	R _C < 700 S _C < 10	
	溶融シリカ量 S _C (mmol/L)		
	判定	無害	---
JIS A 1804 迅速法	相対動弾性係数 (%)	85 以上	
	外観検査	異常なし	異常なし
	判定	無害	---

表-7 材齢 13 週の長さ変化率と促進中性化深さ

W/C (%)	溶融スラグ細骨材置換率 (%)	長さ変化率 (×10 ⁻⁶)	促進中性化深さ (mm)
40	0	-810	5.0
	15	-780	4.3
	30	-760	3.9
55	0	-900	18.1
	8	-920	17.8
	15	-900	17.3
	30	-860	16.8

測定結果を表-5 に示す。同表から、今回使用した溶融スラグ細骨材の有害物質は、JIS A 5031 の基準値に照らし合わせると微量であり、溶出量も非常に少ないことが分かる。

溶融スラグ細骨材のアルカリシリカ反応性の評価結果を表-6 に示す。同表から、溶融スラグ細骨材はアルカリシリカ反応性について化学法、迅速法何れの評価においても無害であることが分かる。

3.2 溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの性状 (シリーズ 2)

溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの圧縮強度および静弾性係数の測定結果を図-3 に示す。同図か

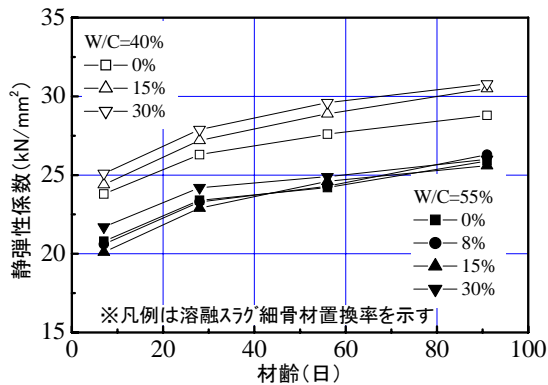
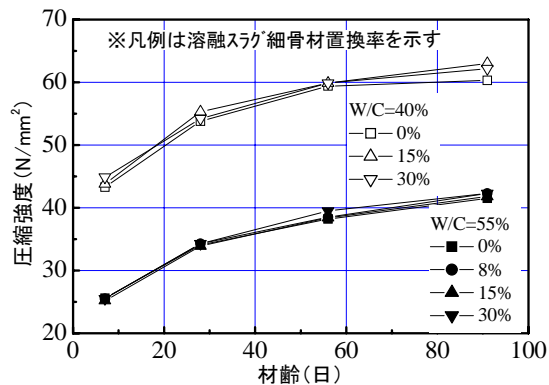


図-3 圧縮強度・静弾性係数測定結果

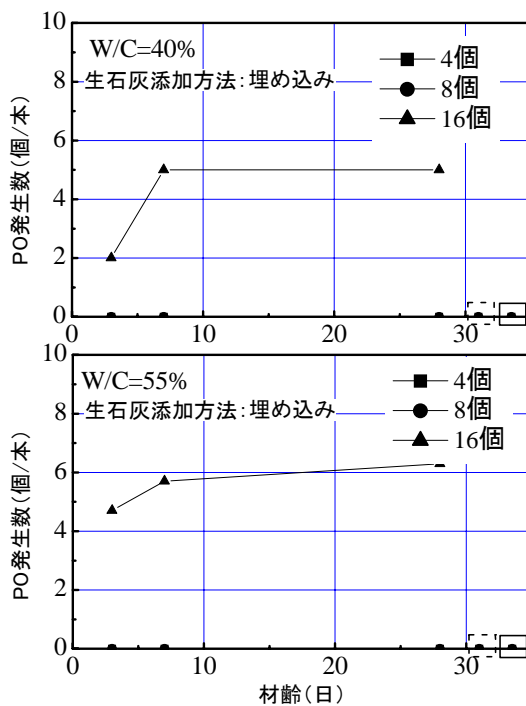
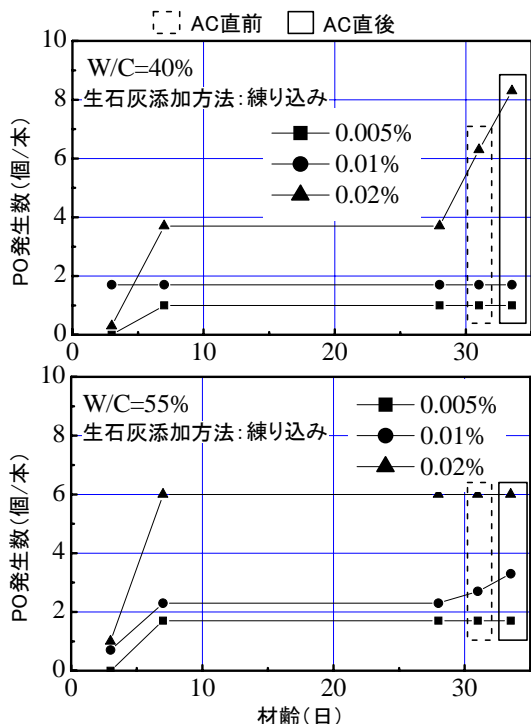


図-4 PO 発生数の経時変化の一例 (水中養生後に AC を施したケース)

ら、熔融スラグ細骨材の置換率毎の測定値に大きな違いは認められない。つまり、熔融スラグ細骨材の使用によって強度性状は変化しないと言える。

当該コンクリートに関する熔融スラグ細骨材置換率毎の長さ変化率および促進中性化深さを表-7 に示す。同表から、熔融スラグ細骨材の使用が乾燥収縮や中性化に及ぼす悪影響はないと言える。

本シリーズでは、熔融スラグ細骨材を使用したコンクリートの力学的性状について確認した。その結果として、熔融スラグ細骨材の使用がコンクリートの品質に悪影響を及ぼすようなことは確認されなかった。

3.3 PO を人工的に発生させたコンクリートの力学的性状(シリーズ 3)

PO 発生状況の一例として水中養生後に AC を施したケースの PO 発生数の経時変化を図-4 に示す。図中に



写真-1 PO 発生状況(W/C=40%,生石灰添加率 0.02%)

示した PO 発生数とは、各材齢で観測した供試体 3 本の平均である。また、発生数の経時変化を示す上で、前材齢の数が後材齢の数を上回る場合には、前材齢までの最

大数を記録とした。

図-4 から、生石灰の添加率(埋め込み数)が高い(多い)ほど PO 発生数が多くなっているのが分かる。特に、生石灰の添加率が 0.02%まで及ぶと供試体 1 本当たり約 8 個もの PO が発生する(写真-1 参照)。これは単位面積当りに換算すると 102 個/m²に相当し、非常に多くの PO 発生数であることが認識できる。また、今回の観察で発生した PO は、AC を施した場合でも表面付近に生石灰が存在したケースのみであり、生石灰が内部に存在する場合には PO は発生しなかった。そのため、生石灰を埋め込んだケースの 4、8 個では PO は発生していない。

図-5、図-6 は、AC 後もしくは材齢 28 日における PO 発生数と圧縮強度、静弾性係数の関係を表したものである。ただし、生石灰を内部に埋め込んだケース(埋め込み数 4、8 個)では、PO の発生が認められなかったため、このケースについては生石灰の埋め込み数と圧縮強度、静弾性係数の関係を示す。

図-5 から、PO 発生数もしくは生石灰の埋め込み数が増加しても圧縮強度はほとんど変化していないことが分かる。また、図-6 から、静弾性係数について PO 発生による有意差は生じていないことが分かる。

上述した圧縮強度、静弾性係数のほか、W/C=55%で生石灰を無添加、コンクリート供試体に生石灰を 4 個埋め込んだ条件において割裂引張強度を測定した。それぞれの測定値は、水中養生 28 日で 3.37N/mm²(生石灰無添加)、3.23N/mm²(生石灰 4 個埋め込み)、気乾養生 28 日で 3.11N/mm²(生石灰無添加)、3.01N/mm²(生石灰 4 個埋め込み)であった。生石灰の添加有無による測定値の差は僅かであり、生石灰の添加が引張強度に及ぼす影響はほとんどないことが明らかとなった。

本シリーズでは、生石灰をコンクリートに添加することで PO を人工的に発生させ、PO の発生がコンクリートの力学的性状に及ぼす影響について検討した。生石灰を細骨材の 0.02wt%まで添加した場合、φ100×200mm のコンクリート供試体に最大 8 個もの PO が発生したが、そのコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は生石灰無添加のケースのそれと大差がなかった。つまり、上述したような PO の発生では、コンクリートの力学的性状に悪影響を及ぼさないことが明らかとなった。

3.4 PO 現象の力学的挙動解析(シリーズ 4)

粒径 2mm の膨張粒子(生石灰粒子)の直径が 1.2 倍に体積膨張した場合の弾性体に生じる粒子の放射方向の圧縮応力と粒子の周方向の引張応力を図-7 に示す。同図からは応力が作用する範囲を把握するものとする。図-7 より、生石灰粒子の表面から 3mm 以上離れると周囲のコンクリートにほとんど応力が作用しなくなる

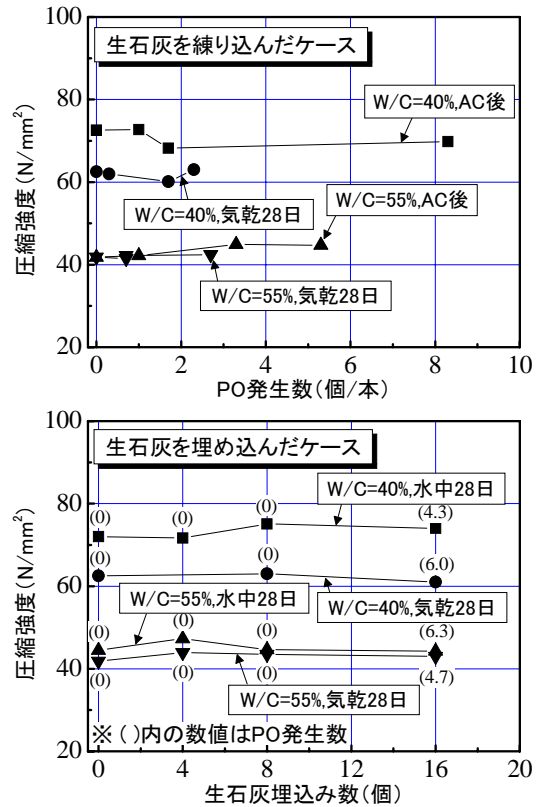


図-5 PO 発生数と圧縮強度の関係

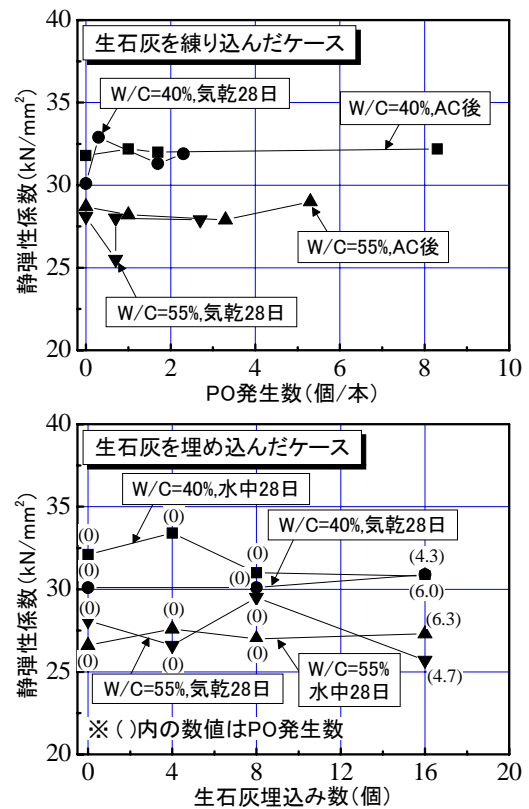


図-6 PO 発生数と静弾性係数の関係

ことが分かる。つまり、生石灰による膨張力は粒子近傍の局所的に作用することが明らかとなった。

また、PO の事例を参考に、非線形性を実用的に考慮

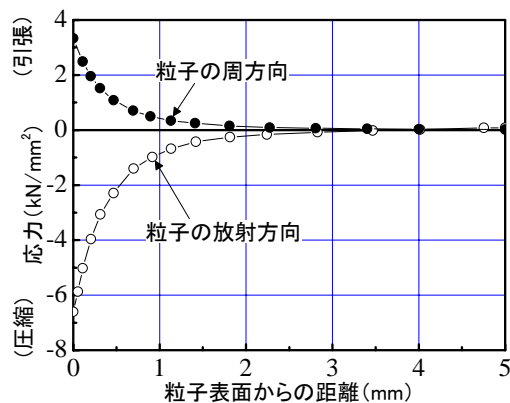


図-7 生石灰粒子周囲に作用する応力

した膨張圧による応力の分布の算定式を誘導した。粒径2mmの生石灰粒子を同一断面に100mm間隔で配列させた場合、断面内に生じる引張応力は 0.03N/mm^2 であり、コンクリートの引張強度のレベルからしてこの応力は断面にひび割れの発生を誘因するものでないことが示された。コンクリートの引張強度に相当する応力(3N/mm^2)が発生するには、生石灰粒子が10mm間隔で配置される必要があり、これは非現実的な条件である。以上の結果から、膨張粒子(生石灰粒子)の粒径が2mm程度であれば、それがコンクリート内部に存在した場合には、構造材料として劣化を起すには至らず、PO現象はコンクリート表面付近でのみ生じるものであることが明らかにされた。

4. まとめ

溶融スラグ細骨材およびそれを使用したコンクリートの安全性評価のため、同骨材の有害物質含有量、溶出量を測定すると共に、当該コンクリートおよびポップアウトを人工的に発生させたコンクリートの諸性状を実験によって求めた。また、ポップアウト現象の力学的挙動を解析によって求めた。これら検討を通じて得られた知見は以下の通りである。

- (1) 本実験に使用した溶融スラグ細骨材の有害物質含有量は、JIS A 5031の基準値と比べて微量であり、溶出量も同規格の基準値を大幅に下回る数値であった。また、溶融スラグ細骨材のアルカリシリカ反応性は「無害」の判定であった。
- (2) 溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートの強度、乾燥収縮、中性化は上記骨材を使用していないコンクリートのそれとほぼ同等であり、溶融スラグ細骨材の使用は当該コンクリートの品質に悪影響を及ぼさないことが確認された。
- (3) ポップアウトを人工的に発生させたコンクリートとそうでないコンクリートの強度はほぼ同等であり、コンクリート表面付近で発生するポップアウト

はコンクリートの力学的性能を低下させるものではないことが明らかにされた。

- (4) ポップアウト現象の力学的挙動の解析より、粒径2mmの生石灰粒子の膨張力は、粒子表面から3mm以内の局所にのみ作用するものであることが分かった。また、この粒子が同一断面に100mm間隔で配列された場合、断面内に生じる引張応力は 0.03N/mm^2 程度であり、ひび割れの原因にはなり難いことが明らかとなった。

本研究によって溶融スラグ細骨材を使用したコンクリートは、構造材料として安全であることが明らかとなった。今後は、溶融スラグ細骨材に含まれる膨張性物質の反応とポップアウト発生に関連について検討し、ポップアウト発生における諸条件についてより一層明らかにしていく。

謝辞

本研究は、神奈川県生コンクリート工業組合に設立された溶融スラグ細骨材を用いたコンクリートの調査対策委員会(委員長:第1著者,副委員長:第4著者)において実施されたものである。また、本文の取り纏めには住友大阪セメント 小田部裕一氏に多大な協力を得た。ここに、御協力頂いた関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 川上勝弥, 依田彰彦, 横室隆, 鈴木澄江: 溶融スラグ骨材コンクリートの長期性状(材齢6.5年), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1 材料施工, Vol.2007, pp.1093-1094, 2007
- 2) 鳥居和之, 山戸博晃, 野口陽輔, 鍵本広之: 溶融炉スラグの物理・化学的性質とアルカリシリカ反応性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.623-628, 2003
- 3) 「溶融スラグ骨材コンクリートの利用マニュアル」 「コンクリート用溶融スラグ骨材の標準化の現状と展望」梗概集, (材)建材試験センター, p.3, 2006
- 4) Pichai Nimityongskul: Surface Deterioration of Concrete Contaminated by Pyritic Aggregates: A Phenomenal Occurrence in Thailand, コンクリート工学, Vol.43, No.9, pp.20-22, 2005
- 5) 嵩英雄, 和泉意登志, 篠崎征夫, 奥野亨: 蛇紋岩骨材に起因するコンクリートのポップアウト, セメント・コンクリート, No.426, pp.8-15, 1982
- 6) 依田彰彦, 横室隆, 川島俊美: オートクレーブによるF.N.スラグのポップアウト現象について, 日本大学理工学部学術講演会講演論文集, Vol.30th, pp.193-195, 1986