

高炉スラグ細骨材の表面改質がモルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響

The effect of aggregate surface treatment of blast furnace slag fine aggregates on fresh mortar properties

北海道大学工学部環境社会工学科
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 鶴川慶次郎 (Keijiro Tsurukawa)
正会員 ヘンリーマイケル (Michael Henry)

1. 研究の背景

現在、地球全体において資源の枯渇が進み、限られた資源の有効活用が求められている。コンクリートの原料となる細骨材においても、近年良質なものを大量に生産することが困難となっており、代替物が必要となっている¹⁾。そこで、製鉄の際に副産物として産出される高炉スラグ細骨材に着目すると、省資源、省エネルギー、CO₂削減といった環境面においての利点に加え、骨材としてもアルカリ骨材反応を起こさず、有機不純物を含まない品質の良い材料だといえる²⁾。しかし、ブリーディングなどの面において欠点が見られ、コンクリートの材料として使うには様々な検討の余地がある²⁾。

一方、高炉スラグ細骨材は粒子の形状として角が多く、製造過程により空気を内包する構造となっている。そこで、細骨材の表面を改質して角を落とすことにより、形状が変化しコンクリートに及ぼす影響も変化すると報告されているが³⁾、表面改質の程度のコングリートの特性に及ぼす影響に関しては明らかにはなっておらず、適切な表面改質の状態を明らかにする必要がある。

以上により、表面改質された高炉スラグ細骨材の形状の変化とモルタルのフロー値への影響を調査することを本論文の目的とした。

2. 高炉スラグ細骨材の特性に及ぼす影響

2.1 空砕処理の概要

本研究では、高炉スラグ細骨材（表乾密度:2.76g/cm³、吸水率:0.29）2kg に対してモルタルミキサーを用いて回転速度 100Hz で 2 時間、4 時間、6 時間、8 時間の空砕処理（以下、空砕と表記する。）を行った、空砕の概念図を図-1 に示す。回収率（空砕前と空砕後の質量の割合）は 89%以上になったが、その原因として、空砕された細かい粒子が空气中に逃げやすくなり、質量に変化があったのではないかと考えられる。ゆえに、質量は 2kg より少ない状態で実験を行った。

2.2 試験概要および結果

(1) 粒度分布の変化

空砕を施した高炉スラグ細骨材 1kg に対して、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」に基づき、ふるい分け試験を行った。この試験により、空砕時間が長くなるほど大きい粒子の割合が減ることを確認できた。しかし、細かい粒子に関しては空砕処理の段階で吹き飛ばされた可能性があり、空砕時間が長くなるにつれこの影響が多くみられると考えられる。

ふるい分け試験の結果、粒度分布を JIS A 5011-1：2013「コンクリート用スラグ骨材-第1部：高炉スラグ

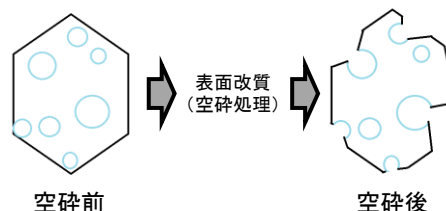


図-1 空砕の概念

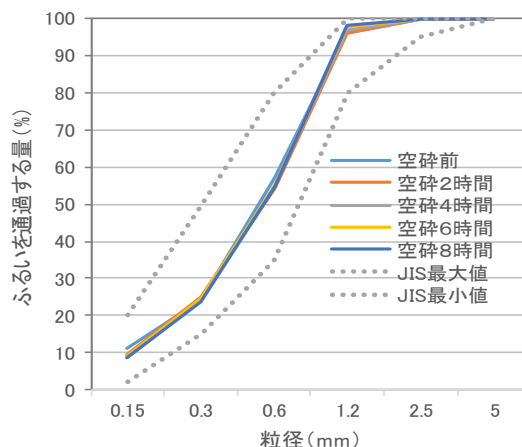


図-2 粒度分布

骨材」の規格範囲と共に図-2 に示す。この結果 JIS 規格の範囲内に収まっていることから、細骨材に適した材料だといえる。また、空砕により大きい粒子である 1.2mm より大きい粒子の質量の割合が減り、0.15mm より小さい粒子の質量の割合が増えていることが分かる。

空砕前的高炉スラグ細骨材に対する粒度分布の変化量を表した図-3 を示す。例外もあるが、通常は空砕時間が長いほど変化が見られやすい。特に大きい粒子である 1.2mm より大きい粒子はその傾向が顕著に表れている。前述のとおり高炉スラグ細骨材は生成過程によって角が多くあり、大きい粒子は粒子同士がぶつかり合いやすく、質量変化が大きいと考えられる。また、その過程で細かい粒子が生成されるので、0.3mm より小さく 0.15mm より大きな粒子は空砕前に対して割合が増えていると考えられる。0.15mm より小さい粒子は回転中のモルタルミキサーによって空气中に浮遊すると考えられ、0.15mm 以下の粒子の割合は空砕前のものと比べると減少している可能性がある。

ゆえに、全体の回収率もあまり高くないため、空砕の

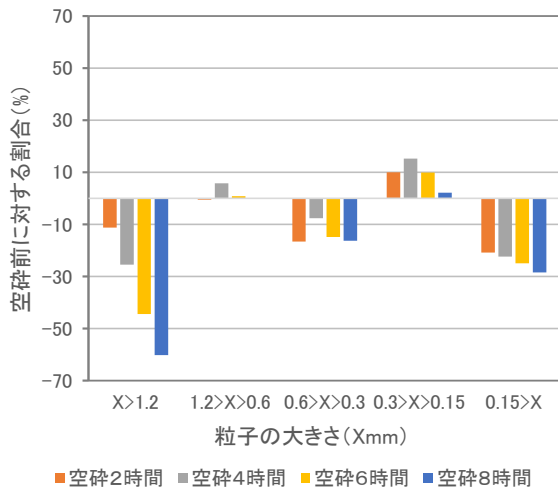


図-3 空砕前に対する変化量

方法には改善の余地があると考えられる。1.2mm より小さく 0.6mm より大きい粒子は 1.2mm より大きい粒子が細くなって量が増える一方、元々あった粒子自体もお互いにぶつかり合い、小さい粒子となっているため、結果的に見ると大きな変化はみられていない。この結果を考慮すると、1.2mm より大きな粒子と 1.2mm より小さく 0.6mm より大きな粒子に関して、粒子の形状が大きく変化していると考えられるので、次の段階としてはこの 2 種類に対しての画像分析による粒子の形状の解析が効果的であると考えた。

(2)画像分析による形状変化測定

高炉スラグ細骨材の粒子に対してマイクロスコープを用いて粒子の状態を観察・撮影した。これによって得られた画像をフリーソフトである ImageJ を用いて二値化処理を行い、粒子の形状を二次元で解析した³⁾。この処理をすることで二次元に映し出した粒子の円形度を求めることができる。その仕組みを図-4 に示す。円形度を R は次の式で表すことができる。

$$R = 4\pi \times \frac{S}{l^2}$$

ただし、 S :面積、 l :周囲長とする。円に近い図形ほど、値は 1 に近づくことで、空砕処理を施すと骨材の形状が円に近づき、円形度の値が上がると考え、これを検証した。

前節の粒度分布の結果を参考にし、1.2mm より大きな粒子と 1.2mm より小さく 0.6mm より大きな粒子に対して全種類を 16 粒ずつ観察し、二値化処理を行った。

空砕時間と円形度の関係を図-5 に示す。これによれば基本的に粒子の大きさに関わらず、空砕時間が長いほど円形度が大きくなっていることが明らかである。また、粒子の大きさを比べてみても、粒子が小さいほうが、若干円形度が大きい。これは細かい粒子の方が空砕から影響を受けたものが大きいためと考える。1.2mm より小さく、0.6mm より大きな粒子は、円形度のピークが空砕 6 時間に表れている。これは粒子における形状の特徴により、空砕処理を過剰に施しすぎると、内包されている空気の面が外に出ることにより、角張った形がまたみられ

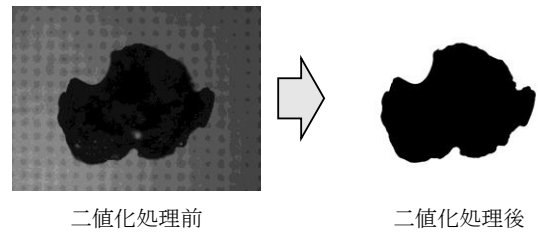


図-4 二値化処理の仕組み

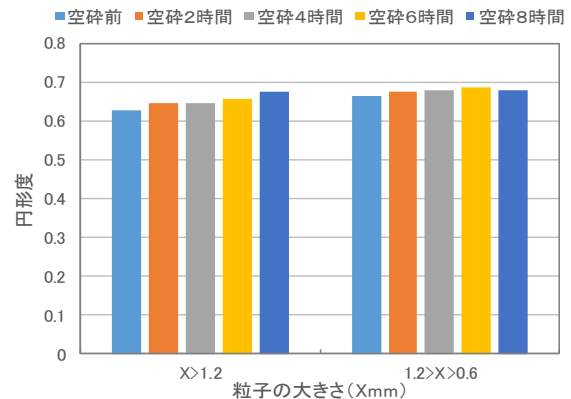


図-5 円形度

るのだと考える。

以上の円形度の測定結果は、ほぼ 0.5 から 0.8 の間に収まっていた。骨材の形状変化による円形度の変化とその例を示すため、図-6 に粒子の二値化処理を施した画像を示す。上段に 1.2mm より大きな粒子、下段に 1.2mm より小さく 0.6mm より大きな粒子を示しており、右に行くほど円形度が大きくなっている。これによれば、円形度が大きくなるにつれて、次第に角が取れ、円に近づいている。高炉スラグ細骨材は空砕前の状態だと、表の左側のような粒子を多く含んでおり、空砕処理によって右側のような粒子が増えている。

空砕処理による粒子形状の変化は、モルタルの特性に対して少なからず影響を与えると考えられる。

3. モルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響

3.1 モルタル作成の概要

本研究では、これまで骨材がモルタルのスランブフローに影響を与えることが報告されているため⁴⁾、モルタルのフレッシュ性状に関しての実験を行った。

モルタルを作るにあたって、水セメント比を 0.5、骨材セメント比を 2.3、空気量を 3.0% に設定した。セメントとして普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）を使用し、細骨材として空砕前と空砕後全種類を使用した。表-1 にモルタルの配合を示す。空砕処理をしても密度には変化はないことで一つの配合になっている。

3.2 試験結果

本研究ではモルタルのフレッシュ性状を図るため JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準拠してフロー値を測定した。試験結果を図-7 に示す。空砕 2 時間において最大を示し、以後空砕時間が長くなるとフロー値は小さくなっていった。空砕時間が長くなると細かい粒子が

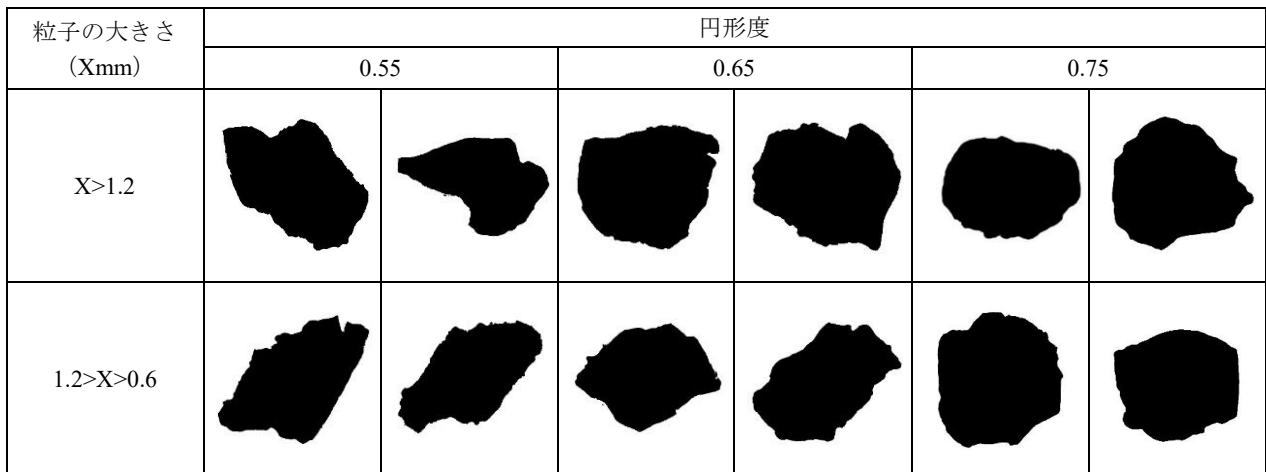


図-6 粒子の二値化処理画像

表-1 モルタルの配合

W/C	S/C	a(%)	単位量(kg/m ³)		
			W	C	S
0.5	2.3	*3.0	293	587	1352

*粒子の形状により、エントラップドエアとして3.0%を設定した。

増え、比表面積が大きくなるので、骨材に吸水されやすくなり、フロー値が減るという研究結果がある⁴⁾。よって、比表面積の拡大がフロー値に対して大きな影響を及ぼしたのだと考えられる。表面改質における粒子の形状とその粒度が、耐久性に及ぼす影響を検討することが今後の課題といえる。

4. 結論

空砕時間によってモルタルの圧縮強度のピークがあることは明らかになっている事項であるが、本報告では粒度分布において特に大きめの粒子がモルタルのフレッシュ性状に影響を及ぼしていることが明らかになった。ゆえに今後は三次元的な解析をすることで、高炉スラグ細骨材の最適な粒子の形状が把握できると考えられる。また、空砕処理の段階で粒度分布をもとのままに保つことが難しく、細かい粒子の扱い方やそれと共に実用性を考慮しながら研究を進めていく必要がある。

謝辞

本研究は、公益財団法人戸田育英財団の支援を受けて実施しました。また、本研究で使われた高炉スラグ細骨材の導入にあたり、北海道大学大学院工学研究院佐藤靖彦准教授に多大なご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) JFE 技報、No. 19 (2008 年 2 月) p. 47-48、コンクリート用高炉スラグ細骨材
- (2) 鉄鋼スラグ協会、鉄鋼スラグの特性と用途
<http://www.slg.jp/slag/usage.html>
- (3) ImageJ、<https://imagej.nih.gov/ij/>
- (4) 橋本勝文、上松瀬慈、ヘンリーマイケル、横田

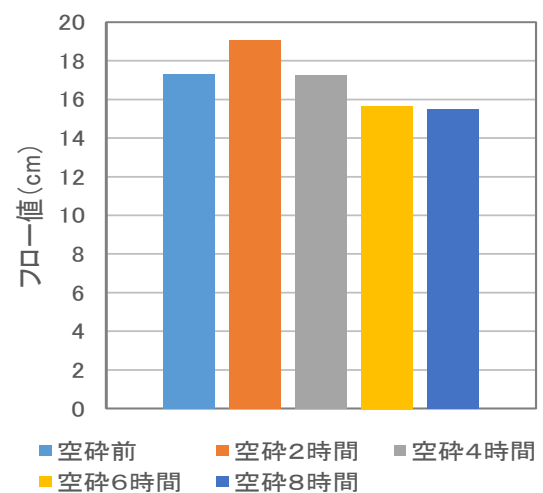


図-7 モルタルフロー値

弘：高強度モルタルの基礎的物性に及ぼす高炉スラグ細骨材の表面改質の影響