

高速気流中衝撃法により球形化した 超微粒子セメントグラウトの室内注入試験

佐藤 弘行^{1*}・山口 嘉一¹

¹土木研究所 水工研究グループ 水工構造物チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

*E-mail: h-sato@pwri.go.jp

ダム基礎地盤のグラウト材料にはセメント使用が基本であり、超微粒子セメントによっても遮水性改良が困難な微細亀裂やマサへの注入性向上を図るためのセメントの検討を行う必要がある。セメント粒子は非球形不規則形状をしており、それを球形化することにより、微細亀裂への注入性向上が期待される。そこで本研究では、高速気流中衝撃法で球形化处理をした超微粒子セメントグラウトを用いて、幅50 μ mの亀裂モデルへの室内注入試験を行った。その結果、球形化前後の粒度分布はほとんど変化していないものの、球形化处理後のセメント粒子は凹凸が少なく、丸みを帯びた粒子形状になった。また、球形化处理をした超微粒子セメントの亀裂への浸透性は低圧時にかなり向上することがわかった。

Key Words : dam foundation, grout, ultra-fine cement, laboratory injection test

1. はじめに

近年、超微粒子セメントでも遮水性改良が困難なダム基礎地盤があり、ダム基礎グラウチングの調査・設計・施工等により対応を図っているが、限界がある。ダム基礎地盤のグラウト材料にはセメント使用が基本¹⁾であり、超微粒子セメントによっても遮水性改良が困難な微細亀裂やマサへの注入性向上が期待できるセメントの検討を行う必要がある。

セメントの粒度に着目したグラウトの研究開発は多い²⁾が、セメントの粒子形状に着目したグラウトの研究はほとんど行われていない。セメント粒子は図-1のように、角張ったり凹凸のある非球形不規則形状をしている。非球形不規則形状の粒子を球形化することにより、微細亀裂への注入性が向上することが粉体工学等の知見により明らかになっている³⁾。そこで本研究では、グラウト材料としてのセメント粒子の球形化の基礎的検討として、表面改質方法の1つである高速気流中衝撃法により球形化を行い、球形化した超微粒子セメントを使用したグラウトの幅50 μ mの亀裂モデルへの室内注入試験を行った。

2. 高速気流中衝撃法による超微粒子セメントの球形化

(1) 高速気流中衝撃法^{4)・5)}

高速気流中衝撃法の概要は以下のとおりである。装置の模式図を図-2に示す。

装置内には数枚のブレードが設置されており、高速回転するローターによりブレードの最大外周速度は約100m/sになる。この高速で回転するブレードにより約100m/sの高速の気流が発生し、その中にセメントなど球形化处理したい微粒子を投入し、高速の気流中で粒子同士が衝突する際の衝撃力により、粒子が破碎したり球形化されたりする。装置には循環回路があるため、所要の時間、装置を稼働させることが可能である。

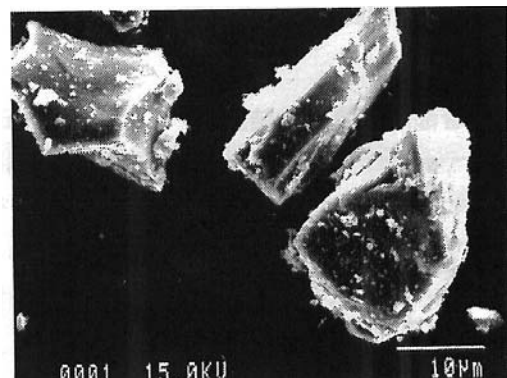


図-1 普通ポルトランドセメントの電子顕微鏡写真

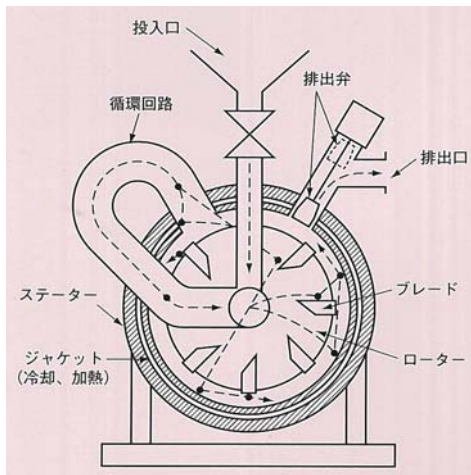


図-2 高速気流中衝撃法の模式図⁴⁾

(2) 高速気流中衝撃法による超微粒子セメントの球形化

本論文では、後述するように $50\mu\text{m}$ の微細亀裂へのセメントグラウトの室内注入試験を実施するため、最大粒径が $50\mu\text{m}$ よりも小さい $10\mu\text{m}$ 程度の日鐵セメント（株）製の超微粒子セメント（スーパーファイン）を使用した。

超微粒子セメントの球形化には（株）奈良機械製作所製のハイブリダーゼーションシステム NHS-3⁹⁾を使用した。事前の検討から、1バッチの球形化处理時間は60分、1バッチの処理量は800gとした。

レーザー回折式粒度分布測定装置による、超微粒子セメントと球形化处理前後の超微粒子セメントの粒度分布をそれぞれ図-3と図-4に示す。球形化处理前後の粒度分布には有意な差は見られない。

球形化处理前後の超微粒子セメントの電子顕微鏡写真をそれぞれ図-5と図-6に示す。高速気流中衝撃法により、超微粒子セメントの角が取れたり、粒子の凹凸が少なくなるなど、超微粒子セメントの粒子形状がやや球形化されていることが分かる。

球形化处理による粒子の形状を定量的に評価するため、画像解析により粒子の形状を評価した。ここではフロー式粒子画像解析装置シスメックス（社）FPIA-3000を用いて、球形化前後の円形度を評価した。円形度は式(1)により求められる値であり、0から1の値となり、1に近いほど球形に近いと評価される。

$$C = 2\sqrt{\pi A}/P \quad (1)$$

ここに、 C は円形度、 A は粒子面積、 P は粒子の外周長である。画像解析装置は可視光（波長 $0.38\mu\text{m} \sim 0.75\mu\text{m}$ ）により粒子の撮影、画像解析を行っているため、波長よりもやや大きい粒子の画像解析は精度が悪くなることから、粒子の面積や外周長の測定精度などを考慮して粒子径が $10\mu\text{m}$ 以上の粒子の円形度を求めた。表-1 に球形化前後の $10\mu\text{m}$ 以上の粒子の円形度を示す。表-1 を見ると、球形化前164粒子の円形度の平均は0.836であるが、球形化後148粒子の円

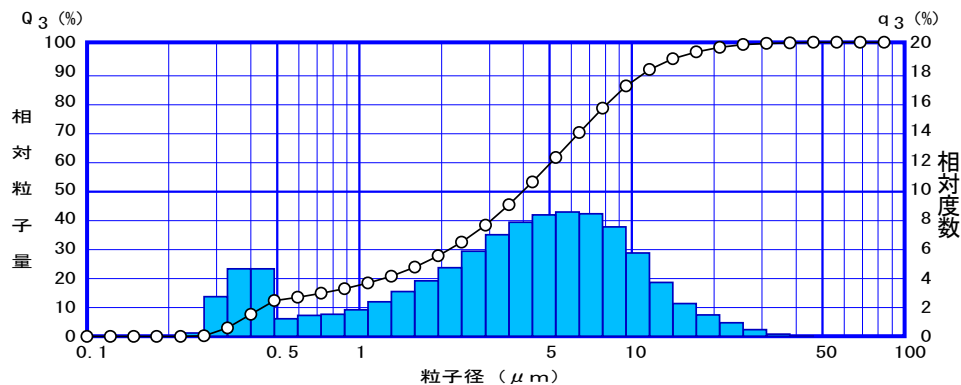


図-3 球形化处理前の超微粒子セメントの粒度分布

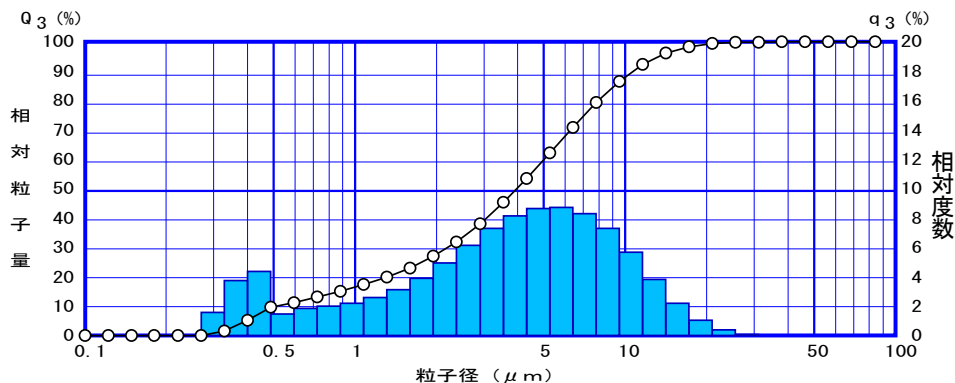


図-4 球形化处理後の超微粒子セメントの粒度分布

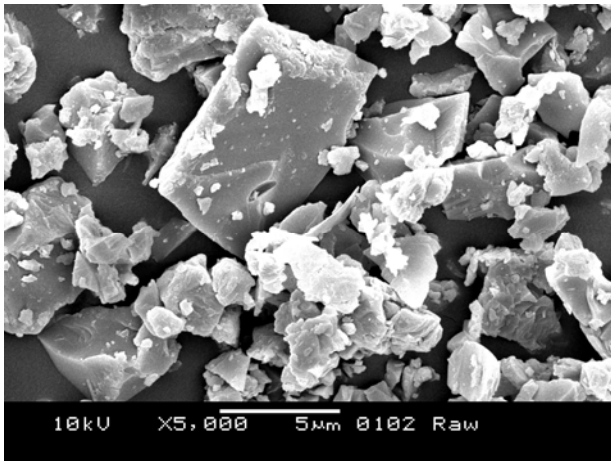


図-5 球形化処理前の超微粒子セメントの電子顕微鏡写真

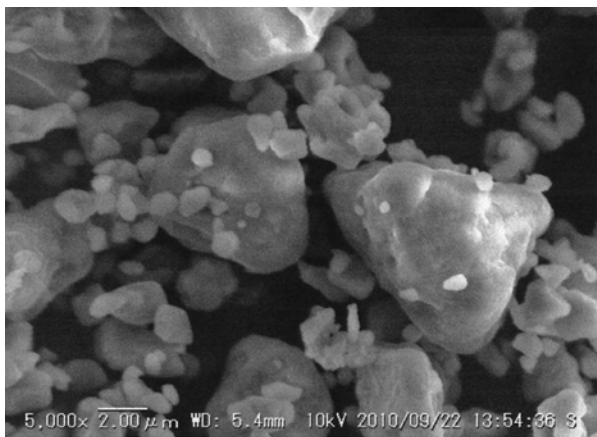


図-6 球形化処理後の超微粒子セメントの電子顕微鏡写真

表-1 画像解析による球形化処理前後の円形度

		球形化前	球形化後
全計測粒子数		22080	32885
うち10 μm 以上の粒子数		164	148
10 μm 以上の粒子の円形度	平均	0.836	0.882
	最低値	0.700	0.784
	最大値	0.938	0.950

形度の平均は 0.882 となっており、球形化処理により円形度が約 0.05 増加しており、球形化処理により超微粒子セメントの形状が球形化されたことを示唆している。

3. 球形化処理前後の超微粒子セメントグラウトを用いた基礎物性試験

球形化処理前後の超微粒子セメントを用いて、ブリーディング試験、一軸圧縮強さ、密度試験を行った。次章の室内注入試験と同じ水セメント比は2:1、分散剤は2wt%添加しそれぞれ試験を行った。表-2はブリーディング試験結果である。本研究では、セメント粒子の形状自体が亀裂への浸透特性に与える影響を検討するため混和剤は必要最

小限としたため、球形化処理前後ともにブリーディング率の値は比較的大きくなっているが、両者ともほぼ同程度となっており、後述の室内注入試験中には材料分離は見られなかった。一軸圧縮強さ試験の供試体は、ブリーディング袋に高さ40cmまでグラウト材を入れて養生し、7日および28日経過時にブリーディング袋から取り出し、上下端をそれぞれ3~3.5cmを切り取って、高さ10cm程度、直径約5cmの供試体を作製した。

表-2 ブリーディング率

	超微粒子セメント	球形化超微粒子セメント
1日経過時	63	70
7日経過時	63	68

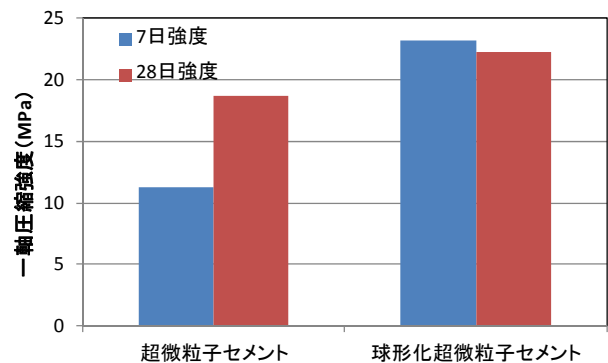


図-7 一軸圧縮強さの比較

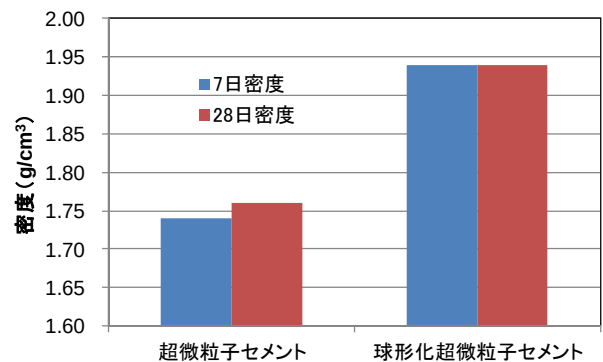


図-8 図-7の供試体密度の比較

図-7に球形化処理前後の超微粒子セメントの一軸圧縮強さ、図-8に図-7の供試体密度を示す。7日強度では球形化後の超微粒子セメントは、通常の超微粒子セメントの倍程度の強度となっており、28日強度においても球形化後の超微粒子セメントの方が強度が高くなっている。図-8を見ると、材齢によらず超微粒子セメントの密度は1.75g/cm³程度であり、球形化後の超微粒子セメントは1.94g/cm³となっており、球形化した超微粒子セメントの供試体の密度の方が1割程度大きくなっている。

4. 球形化処理前後の超微粒子セメントグラウトを用いた室内注入試験

(1) 試験方法

試験装置の概要を図-9に示す。スリット注入試験装置は図-10に示すとおりであり、外径138mm、高さ125mm、スリットでの注水孔径は46mm、注水孔から外面への浸透路長は46mmである。スリット注入装置の中央部に図-11のスリットを設けた。スリットは中央の注水孔から四方向に切削されており、開口幅は50 μ mである。試験においては、所定の圧力でグラウトを注入し、スリット外側に透過して落下したグラウトを集めて電子秤で計測した。

試験に用いたグラウトは、水セメント比2:1、分散剤には花王(株)マイティ150を使用し、B型粘度計による事前検討から2wt%添加し、計3リットルとなるように練り混ぜて作製した。注入圧力は0.1、0.3、0.5MPaの3ケースとし、試験開始から終了まで一定圧とした。試験中は攪拌子により圧力容器内のグラウトを攪拌した。

(2) 試験結果

図-12 から図-14 に各注入圧力での累積透過量を示す。

図-12の注入圧力が0.1MPaのケースでは、球形化した超微粒子セメントグラウトの累積透過量が多く、試験終了までスリット外側から灰色のグラウトが流出していることを確認した。一方、超微粒子セメントグラウトの透過量は徐々に少なくなり、試験途中の透過量が少なくなった後はスリット外部からの透過物は目視ではほぼ透明であった。図-15に試験終了後のスリット入口に残っていたフィルターケーキ⁷⁾を示す。超微粒子セメントを使用した試験ではスリット入口の全周にフィルターケーキが厚くできていたが、球形化した超微粒子セメントを使用した試験ではスリット入口の一部だけに薄く密実なフィルターケーキが点在していた。

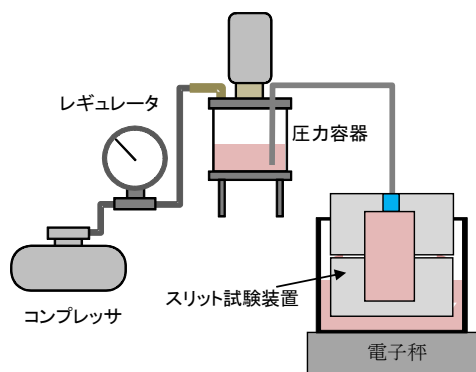


図-9 試験装置概要



図-10 スリット注入試験装置



図-11 スリット

図-13 の注入圧力が 0.3MPa のケースでは、試験初期では球形化した超微粒子セメントグラウトの累積透過量が超微粒子セメントの累積透過量よりも大きい。これは、球形化により粒子の角が滑らかになったことによる浸透性向上の影響と考える。しかし、球形化した超微粒子セメントは注入開始後約 120 秒で急激に透過量が少なくなった。これは、球形化した超微粒子セメントは粒子の角が滑らかになったためにフィルターケーキが密実になり、さらに注入圧力が高いと透過するセメント粒子数が多くなるためフィルターケーキが生成されやすくなることから、球形化した超微粒子セメントがスリット入口で密実なフィルターケーキを生成したために、透過量が急激に少なくなったものと考えている。なお、超微粒子セメントと球形化した超微粒子セメントともに、試験途中から透過量が少なくなった後はスリット外部からの透過物は目視ではほぼ透明であった。

図-14 の注入圧力が 0.5MPa のケースでは、球形化した超微粒子セメントは約 40 秒で急激に透過量が少なくなった。これは前述と同様に球形化した超微粒子セメントでは密実なフィルターケーキが急速に生成されたことが原因と考えている。超微粒子セメントの累積透過量は時間とともに徐々に増加しているが、試験後半での透過物は目視ではほぼ透明であった。図-16に試験終了後の

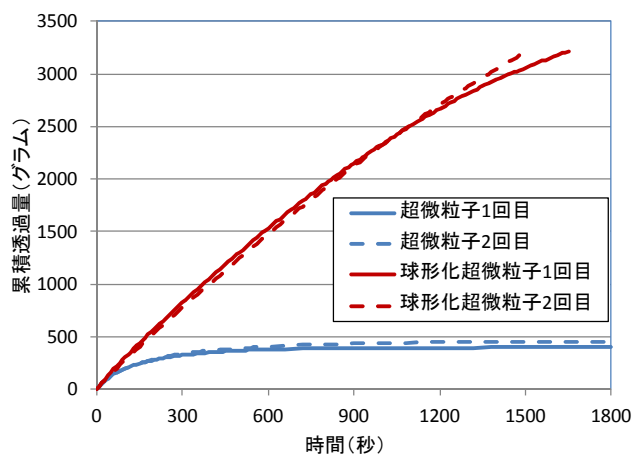


図-12 注入圧力 0.1MPa の時の累積透過量

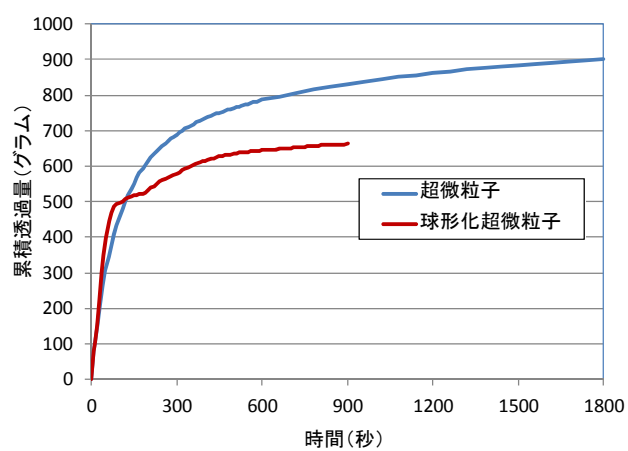


図-13 注入圧力 0.3MPa の時の累積透過量

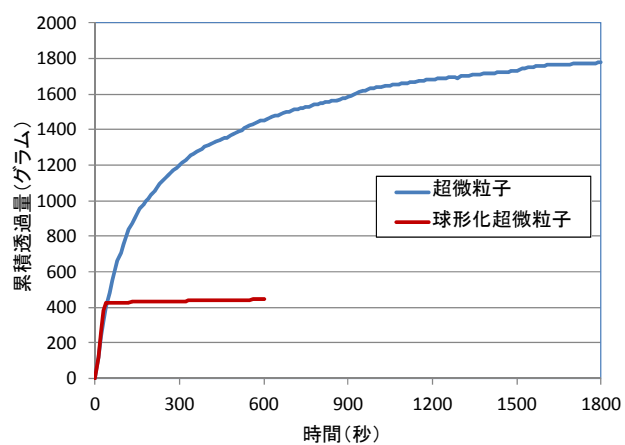


図-14 注入圧力 0.5MPa の時の累積透過量



図-15 試験終了後のスリット内側のフィルターケーキ
(注入圧力0.1MPa, 上: 超微粒子セメント, 下: 球形化した超微粒子セメント)



図-16 試験終了後のスリット内側のフィルターケーキ
(注入圧力0.5MPa, 上: 超微粒子セメント, 下: 球形化した超微粒子セメント)

スリット入口に残っていたフィルターケーキを示す。超微粒子セメントを使用した試験ではスリット入口の全周にフィルターケーキがかなり厚くできていたが、球形化した超微粒子セメントを使用した試験ではスリット入口の全周にフィルターケーキができていたものの比較的分厚くはなく、手触りでは比較的密実な感触であった。

5. まとめ

本論文では、グラウト材料としてのセメント粒子の球形化の基礎的な検討として、高速気流中衝撃法により球形化処理をした超微粒子セメントの室内浸透試験を行った。本論文により、以下の結論が得られた。

- ・高速気流中衝撃法により、顕微鏡写真による目視では、超微粒子セメントをある程度球形化することができた。しかし、粒度分布には有意な差は見られなかった。
- ・画像解析により、セメント粒子の円形度を評価した。高速気流中衝撃法による球形化により、平均的に約 0.05 程度円形度が増加しており、定量的にもセメント粒子の球形化を評価することができた。
- ・水セメント比 2:1 のセメントミルクから作製した供試体の一軸圧縮強さ、密度ともに球形化した超微粒子セメントの方が大きくなっており、セメント粒子を球形化することにより、セメント水和物は密実になり強度が増加することがわかった。
- ・水セメント比 2:1、注入圧力 0.1MPa の試験では、球形化した超微粒子セメントグラウトの浸透性は通常の超微粒子セメントよりも非常に高く、試験終了までセメントグラウトが試験装置の外部まで浸透した。これは、時間あたりの粒子数の通過数が少ない低圧条件では、若干の球形化による粒子摩擦などが低減することによ

り、亀裂での目詰まりが発生しにくくなったことが要因と考えられる。

- ・水セメント比 2:1、注入圧力 0.3MPa または 0.5MPa の試験では、球形化した超微粒子セメントグラウトの浸透性は試験開始直後はよいが、試験途中のある時から急激に浸透量が減少した。これは、時間あたりの粒子数の通過数が多い中圧あるいは高圧条件では、若干の球形化により目詰まりが密実になるため、目詰まりが発生しやすくなるとともに、目詰まりが壊れにくくなったことが要因と考えられる。

今後も引き続きセメント粒子の球形化方法とその物性に関する研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター編集：グラウチング技術基準・同解説，87p.，2003.
- 2) 例えば，金沢智彦，若杉伸一，西垣 誠，山本拓治，阿部義宏：極超微粒子注入材による地盤注入工法の開発－材料特性－，土木学会第 65 回年次学術講演会，III-479，2010.
- 3) 三輪茂雄：粉体工学通論，245p.，1981.
- 4) 田中 勲：高速気流中衝撃法を利用したセメントの濡れやすさの向上，ナノテクノロジー時代の含浸技術の基礎と応用（応用編），pp.581～595，2007.
- 5) 田中 勲，北村昌彦，小石眞純：球状化セメントの基本物性とコンクリートの基礎性状に関する研究，1992.
- 6) (株) 奈良機械製作所ホームページ，<http://www.nara-m.co.jp/product/particle/nhs.html>.
- 7) 延藤 遵，西垣 誠，見掛信一郎，小林伸司，佐藤稔紀：注入圧力によるグラウトの目詰まり現象抑制効果，土木学会論文集 C，Vol.64，No.4，pp.813-832，2008.

THE LABORATORY INJECTION TESTS OF SPHERONIZED ULTRAFINE CEMENT GROUT BY HIGH-SPEED ROTATIONAL IMPACT BLENDING

Hiroyuki SATOH and Yoshikazu YAMAGUCHI

Cement is a basic material of grouting in dam foundation. The cement particles have nonspherical and irregular shapes. If we make the cement particles spherical, dam foundation grouting will be more effective, so we should study the effects of spheronization of cement particles on injection of cement based grouts. In this paper, we spheronized ultrafine cement particles using high-speed rotational impact blending machine, and evaluated the shape of cement particles by electron-microscope and image analysis. We also conducted laboratory injection tests with 50μm-thick crack model and we found that spheronized ultrafine cement grout could be injected well in the low injection pressure condition.