

東京大学生産技術研究所 正会員 加藤 佳孝
東京大学生産技術研究所 フェロー会員 魚本 健人

1. はじめに

セメントの水和反応に関する研究は、幅広く行われており、水和反応のモデル化の例も多数存在している。しかし、ほとんどのモデル化における初期条件は、非常に理想的な状態となっている。つまり、与えられた配合条件が、コンクリート構造物の全ての箇所に適用されているということである。セメントの水和反応自体をモデル化するためには、理想的な状態として何の問題もないが、実構造物を考えた場合、ブリーディングなどの影響により、構造物の場所によって W/C などの特性が異なるという既往の研究^{[1][2]}からも、実際の初期状態がどのようにになっているか定量的に把握する必要がある。

本研究は、コンクリート内部における構成材料の場所的不均一性のモデル化を目指し、構成材料の沈降現象を定量化するために行った基礎的研究である。

2. 実験概要

構成材料の沈降現象を定量化するために、ペーストを対象にブリーディング試験を行った。実験方法は参考文献^[3]と同様な方法を用いた。粒度分布の違いが沈降現象に与える影響を把握するために、数種類の配合に関して実験を行った（表-1 参照：表中○印が今回行った実験）。使用した材料の特性値を表-2 に示す。また、各々の配合におけるブリーディング速度の算出方法も参考文献^[3]と同様な方法を用いた。

表-1：配合条件

	W/P (%)						平均粒径 (μm)
	40	50	60	75	100		
置ス 換ラ	○	○	○	○	○		15.4
率グ	30		○	○	○		13.2
(%)	50		○	○	○		11.7
	70			○	○		10.2

表-2：粉体の特性

	普通セメント	高炉スラグ
比表面積 (cm^2/g)	3300	5910
平均粒径 (μm)	15.4	8
密度 (g/cm^3)	3.15	2.9

3. 沈降現象の定量化

流体と粉体の運動系である沈降現象は既に定式化されており、セメントペーストのように粉体粒子の濃度が高い場合には、粉体の沈降速度として式(1)に示すように Steinour の式^[4]として提案されている。

$$u_{mc} = \frac{g(\rho_p - \rho) D_p^2}{18\mu} \varepsilon^{2.5} f(\varepsilon) \quad (1)$$

Stokesの終末速度

u_{mc} : 沈降速度
 g : 重力加速度
 ρ_p : 粉体の密度

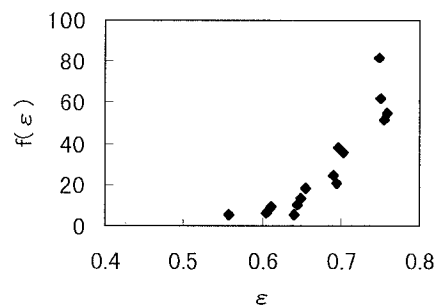
ρ : 液体の密度
 D_p : 粉体の粒径
 μ : 流体の粘度

ε : 懸濁液中の
液体の割合

(1)式中の $f(\varepsilon)$ は、 ε の関数として与えられているだけで、セメントペーストの場合には、定式化されていないため、粉体の沈降現象を定量化するためには $f(\varepsilon)$ を求めることが必要となる。本研究では、沈降速度をブリーディング速度と等しいものとし、 u_{mc} を実験によって求めることにより $f(\varepsilon)$ の定式化を行った。

$f(\varepsilon)$ の定式化

ブリーディング試験の結果を用いて、 ε と $f(\varepsilon)$ の関係を図-1 に示す。ここで、(1)式中の粉体の密度及び粒径は、セメントとスラグの混入率を考慮した平均値を用いた。図-1 より、ほぼ同一の ε に対して数種類の $f(\varepsilon)$ の値が存在することがわかり、これは Steinour の式から直接 ε と $f(\varepsilon)$ の関係を求めることができないことを示している。このように $f(\varepsilon)$ を定式化できない最も大きな原因としては、ペースト中のいくつかの粉体粒子が水中の水分を伴って1つの凝集体を形成することによって見かけ上生じる、粉体の平均粒径の

図-1： ε と $f(\varepsilon)$ の関係

増加及び懸濁液中の液体の割合（ ε ）が減少するような現象を式(1)では表現できないところにある。

このような現象を考慮するために、ブリーディング速度に関する T.C.Powers の理論を用いて、粉体粒子の凝集による移動不可能な水量及び凝集した粉体の見かけの比表面積を算出した（参考文献[3]参照）。移動不可能な水量を示すパラメータとして（非移動水分）／（粉体容積比）： α を用い、粉体の粒度分布の違いの代表値として粉体の平均粒径を用い、両者の関係を示したものが図-2 である。粉体の見かけの比表面積を示すパラメータとして（実際の比表面積）／（見かけの比表面積）： β を用い、これと平均粒径の関係を示したものが図-3 である。図-2,3 の結果より、 α, β ともに粒度分布を示す粉体の平均粒径と高い相関関係を持っていることがわかる。まず、求めた α から非移動水分量を算出し、ペースト全体の水量から差し引くことによって、実際に自由水として存在する水量を算出することができる。この水量のペースト全体に対する割合を、新たに懸濁液中の液体の割合（ ε ）と定義する。次に、比表面積と粉体の粒径は反比例関係にあるとし、求めた β から見かけの比表面積を算出し、さらに見かけの粉体の平均粒径を求め、これを新たに D_p と定義する。これにより、粉体の凝集効果を考慮した Steinour の式として表現することができる。この結果を用いて、 ε と $f(\varepsilon)$ の関係を図-4 に示す。これにより、両者の関係は(2) 式のような関係にあることがわかった（ a, b は定数）。

$$f(\varepsilon) = 10^{(a \cdot \varepsilon + b)} \quad (2)$$

4. まとめ

本研究は、コンクリート構成材料の沈降現象を定量化するためにに行った基礎的研究であり、以下に成果をとりまとめる。

- ① 粉体の凝集効果による非移動水量及び見かけの比表面積比は、ペーストを構成する粉体の平均粒径と密接な関係がある。
- ② Steinour の式に見かけの平均粒径と実際に自由水として存在する水量を用いて算出した懸濁液中の液体の割合を用いることにより、 $f(\varepsilon)$ を定式化することができた。
- ③ 以上より、ペーストにおける粉体の沈降現象の定量化が可能であることを示すことができた。

今後、比表面積の異なった粉体や、普通ポルトランドセメント及び高炉スラグ以外の粉体系を用いることにより、使用粉体に依存した凝集効果を定式化し、より一般化された改良 Steinour の式を構築していくことが必要である。また、骨材を混入した場合に関しても同様に研究を進め、コンクリートの沈降現象を定量的に評価できる式を提案していく。

<謝辞> 本研究の実験を手伝っていただいた千葉工業大学修士2年の井波良太君に感謝の意を表す。

[参考文献] [1]町田篤彦編：現代土木材料、オーム社、pp.109 [2]辻正哲ら：ブリーディングの発生機構に関する基礎的研究、セメント技術年報 37, pp229-232, 1983 年 [3]天下健二、魚本健人：ブリーディング挙動に対する高性能減水剤の影響、第 48 回セメント技術大会講演集, pp380-385, 1994 年 [4]三輪茂雄著：粉体工学通論、日刊工業新聞社

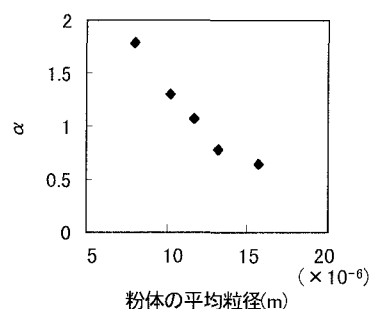


図 - 2 : α と粉体の平均粒径の関係

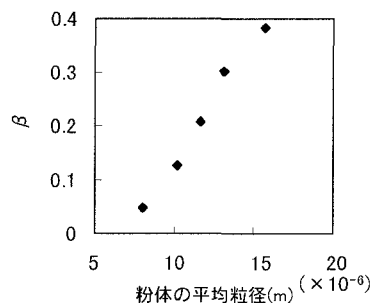


図 - 3 : β と粉体の平均粒径の関係

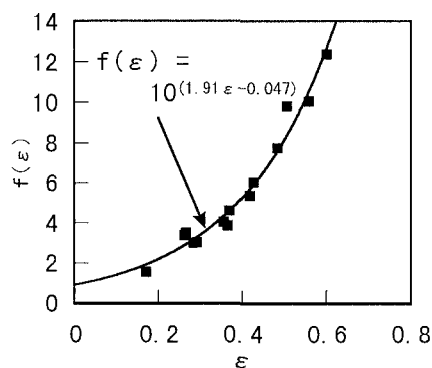


図 - 4 : ε と $f(\varepsilon)$ の関係