

論文 遠心脱水による浮き水量から考察される粒子の分散・凝集状態および流動挙動の関係

永峯 秀則^{*1}・岸 利治^{*2}

要旨：配合条件の異なるモルタルに遠心力を与え、浮き水量を測定した。この浮き水量を自由水量とし、粉体容積で除した百分率を自由水量粉体容積比(WfP)と定義した。フローの広がりから得られる変形性の指標は、 WfP と高性能 AE 減水剤の添加量によって、定式化可能であることを明らかにした。また、 WfP と V 漏斗流下時間から得られる粘性の指標とを比較した場合、両者には一定の相関関係が認められた。さらに、変形性や粘性を粒子の接触確率または粒子間摩擦の観点から捉え、接触確率を WfP で表すことによって、摩擦を評価することが可能となり、変形性に関わる摩擦と粘性に関わる摩擦の違いを見いだした。

キーワード：モルタル，遠心脱水，自由水，高性能 AE 減水剤，変形性，粘性

1. はじめに

フレッシュモルタルの変形性や粘性は、水セメント比や高性能 AE 減水剤（以下 SP と称す）の添加量などの配合条件の影響を受けて種々変化する。配合条件と流動性状には、ある一定の関係があるが、両者を結ぶ重要なファクターとして、粒子の分散・凝集状態がある。しかしながら、この粒子の分散・凝集状態を観測する事や定量的に扱う事は非常に困難である。

筆者ら¹⁾は、既に、遠心脱水による浮き水量の測定を行い、この浮き水量を自由水量として定義し、粒子の分散・凝集状態を示す指標として自由水量粉体容積比（ WfP , %）を提案した。本報告では、この WfP という指標を用いて粒子の分散・凝集状態を考察し、流動性との関係を明らかにする事を目的とした。

モルタルのような固液混相系の粘性に最も大きな影響を与えるパラメータは、固体粒子容積濃度であると言える²⁾。つまり、固体粒子同士の接触確率や接触時の摩擦の程度（以下、単に摩擦と称す）が非常に重要であると考えられる。

モルタルの変形性は、フローを例に挙げると、

無拘束状態のモルタルが自重によって移動することである。これが粒子同士の接触によって生じるエネルギーロスによって減衰し、やがて停止し、変形性が決定される。つまり、変形性は粘性と同様に接触確率と摩擦に起因する性状であると言える。両者の違いは、接触確率と摩擦の影響度合いが異なる点にあると考えられる。

図 - 1 に同じ水セメント比で凝集状態が異なる際のモデル図を示す。同じ水セメント比で凝集状態が異なる場合、流動性状も異なると考えられる。

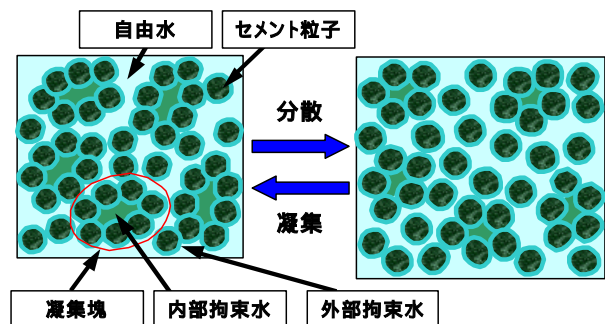


図 - 1 同じ水セメント比で凝集状態が異なるモデル図

*1 (株) エヌエムビー 中央研究所 副主任研究員 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 助教授 (博) 工 (正会員)

したがって、濃厚系スラリーの場合、粒子の分散・凝集状態は、粒子同士の接触確率と摩擦を介して、流動性状に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

モルタル中の水は、粒子または凝集塊に拘束される水（拘束水）と変形性や粘性に寄与する水（自由水）に分けることができるとされている³⁾。このうち自由水は（平均の）粒子間距離を拡げ、固体粒子の接触確率を減少させるため、粘性を低減させ、変形性を増大させると考えられる。大内ら⁴⁾や菅俣ら⁵⁾によると、SPの主な効果は、セメント粒子に吸着し、粒子の反発作用を増大させる事であるが、凝集塊に拘束されていた拘束水を解放し、自由水を増大させる作用も若干併せ持っている。つまり、SPは変形性増大をもたらすと同時に、粘性低減の効果も併せ持つ。これらのことは、モルタルフロー・漏斗流下時間から得られる変形性や粘性の指標である相対フロー面積比（ m ）や相対漏斗速度比（ Rm ）を用いて詳細な研究が行われている。

2. 実験概要

普通セメントを用いたモルタルを ASTM モルタルミキサに投入し、下記に示す練混ぜ方法でモルタルを練り混ぜた。

S+C - (10 秒) **+W₁** - (120 秒) **+W₂+SP**
 - (60 秒) **かき落とし** - (60 秒) **排出**

得られたモルタルを練混ぜ直後から 15 分後にフロー試験および漏斗試験を行った。また、練混ぜ直後から 10~20 分後の 10 分間にモルタルに遠心力を与え、浮き水量の測定を行った。同時に吸引濾過によって濾液を抽出し、濾液中の SP 残存量から、見かけの SP 吸着量を算出した。試験方法の詳細は次節以降に示す。

2.1 使用材料

使用材料を表 - 1 に示す。

2.2 配合条件

配合条件を表 - 2 に示す。

2.3 フロー試験，漏斗試験

図 - 2 に示すフロー試験，漏斗試験によって得

られる相対フロー面積比（ m ）と相対漏斗速度比（ Rm ）を式(1)および(2)によって算出し、それぞれ変形性と粘性の指標とした。なお、本研究では予備実験により変形性や粘性が安定化する時間を考慮して、練上りから 15 分後にフロー試験・漏斗試験を行った。ちなみに m は変形性の高さを、 Rm は粘性の低さを示す指標である。

$$m=(F^2-100)/100^2 \quad (1)$$

$$Rm=10/t \quad (2)$$

F：フロー値(mm)

t：V 漏斗流下時間(s)

表 - 1 使用材料

練混ぜ水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント(密度=3.15g/cm ³ ，ブレン比表面積=3,330cm ² /g)
細骨材	大井川水系産陸砂(表乾密度=2.60g/cm ³ ，吸水率=1.83%，粗粒率=2.51)
高性能 A E 減水剤	ポリカルボニ酸エーテル系

表 - 2 配合条件

温度 ()	Vw/Vp	Vs/Vm	SP/C (Cx%)
20	0.78 ~ 1.50	0.4	0.0 ~ 3.9

Vw/Vp：水粉体容積比

Vs/Vm：モルタル中の細骨材の容積比

SP/C：SPのセメント重量に対する添加量(Cx%)

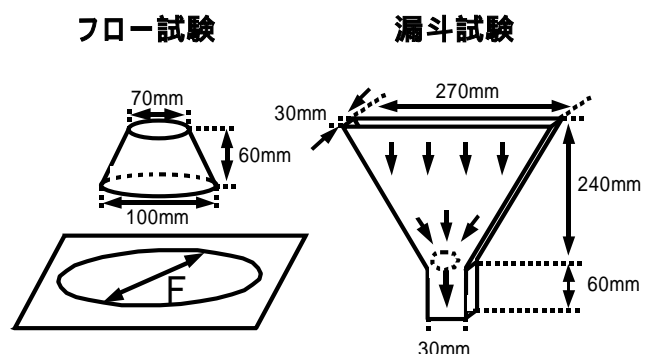


図 - 2 フロー試験，漏斗試験

2.4 遠心脱水による浮き水量の測定

モルタル中の自由水量を測定する事を目的として、遠心分離機（HITACHI社製高速遠心機「himac CR20」、アングルロータ：R19A）によってモルタル中の水を分離して、浮き水量の測定を行った。

この浮き水量から式(3)によって算出されるセメントなどに拘束されない水を自由水量(V_{wf})として、粉体の容積(V_p)で除した百分率を自由水量粉体容積比(WfP)とした。

$$WfP = V_{wf} / V_p \times 100(\%) \quad (3)$$

遠心条件は、3000rpm(928G)・10分とした。

なお、遠心容器の底部にステンレスメッシュや濾紙を敷いて、容器の下方方向に水を除去する方法も考えられるが、凝集塊間の空間を充填している水も排水されてしまうことが懸念された。これに対して、浮き水を測定する方法は、圧密が起こる可能性があるが、凝集塊間の空間を充填する水が排水され難く、余剰水のみが浮き出し易いと考えられたため、浮き水量を測定することとした。

2.5 SP吸着量の測定

練り混ぜられたモルタルを吸引濾過により液相部を抽出し、液相中の全有機炭素量を全有機炭素量測定装置（島津製作所製 TOC-V）で測定し、練混ぜ水中の有機炭素濃度との差から、見かけの吸着量を測定した。なお、測定は $V_w/V_p=0.88$ で、SP添加量をセメント重量に対して0.0、0.5、1.0、2.4、3.3、3.9、4.5%(以下、Cx%で表示する)添加したモルタルを対象とした。

3. 実験結果

3.1 自由水が変形性に及ぼす影響(WfP - m 関係)

$SP/C=Cx0.0 \sim 3.9\%$ の各SP添加量に対して、 V_w/V_p を変化させた場合の WfP と m の関係を図-3に示す。

図-3は同一のSP添加量で V_w/V_p を増減させた場合のプロットを同じマーカで示している。SP添加量毎では、 WfP と m は高い線形性

($R^2=0.95$ 以上)を示した。以下、この直線を WfP - m 直線と称す。SP添加量を増加させるにしたがって、 WfP - m 直線の傾きと切片が変化し、この直線が図の左側にシフトする傾向を示した。

図-4にSP添加量と WfP - m 直線の傾き・切片の関係を示す。傾き a および切片 b はSP添加量(SP/C)に対して以下の2次曲線の関係を示した。ただし、2次曲線で近似される理由については明確ではなく、今後の課題として残った。

$$a = 0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071 \quad (4)$$

$(R^2=0.9912)$

$$b = -0.099 \cdot SP/C^2 - 0.253 \cdot SP/C - 2.056 \quad (5)$$

$(R^2=0.8062)$

次に、 m を WfP と SP/C で定式化すると、式(6)となる。

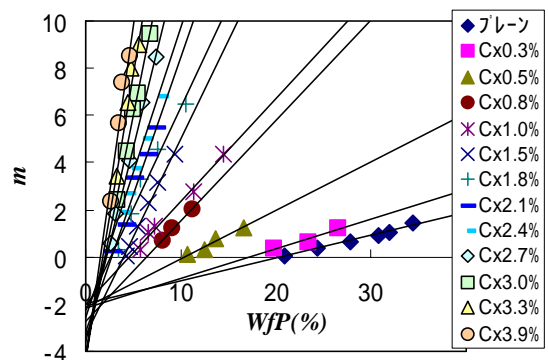


図-3 WfP と m の関係

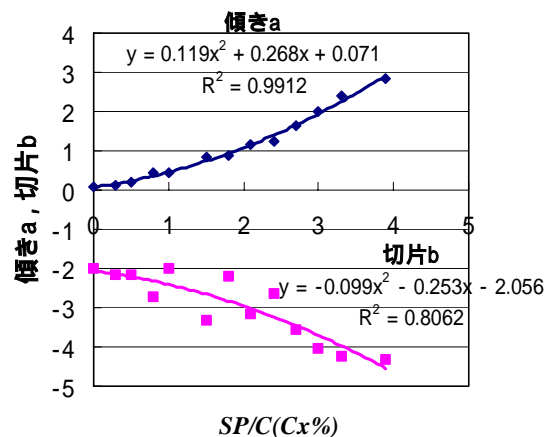


図-4 SP添加量と傾き・切片の関係

$$m = (0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071) \cdot WfP - (0.099 \cdot SP/C^2 + 0.253 \cdot SP/C + 2.056) \quad (6)$$

式(6)で定式化された 13 本の WfP - m 直線の焦点は、 $x_0=0.858 \sim 0.933$ 、 $y_0=-2.026 \sim -1.989$ の範囲にあり、平均すると $(x_0, y_0)=(0.88, -2.01)$ であった。したがって、式(6)は SP/C を含む 2 次の項と WfP を含む 1 次の項によって簡略化された式(7)によって表される。

$$m = (0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071) \cdot (WfP - 0.88) + 2.01 \quad (7)$$

式(7)は流動性状である m が、自由水量すなわち粒子間の空間または接触確率の低さを示す指標 WfP と主に粒子間摩擦に影響を及ぼす SP 添加量によって記述することが可能であることを示している。 WfP と式(7)で定式化された m との関係を図 - 5 に示す。定式化による m の推定値と実測値の関係は、高い相関性 ($R^2=0.967$) を示していた。

図 - 3 で WfP - m 直線が焦点を結ぶことから考えて、この焦点こそが、自由水として定義するものの原点 (自由水がゼロ) と考えるのが仮説として妥当であると考えられる。また、 WfP は遠心加速度と遠心時間によって変化し、焦点を結ぶ時の位置 (x_0) が異なることが予備実験により確認されている。この焦点が Y 軸上で交差する際の遠心加速度が、浮き水量=自由水量となる最適な加速度であると考えられる。本実験による焦点は X 座標が若干プラス側 ($x_0 = 0.88\%$) で焦点を結んでいることから、最適な加速度は、本実験で用いた 928G より若干小さい加速度であり、本報告中の WfP は真の WfP とは、僅かに異なると考えられる。

また、 m がマイナスの位置で焦点を結んでいた。マイナスの位置に焦点を結んでいるということは、フローの発現という観点から見た場合、自由水の中でも、見かけ上、変形性に寄与する水と寄与しない水があり、両者は SP 添加量や配合する水の量すなわち V_w/V_p に依存していると考えられる。

ただし、変形に寄与しない水も、見かけ上はフローの広がりとして現れていないが、焦点を結ぶ事実から考えると、変形し始める以前の粒子の分散・凝集状態に影響を及ぼしていると考えられる。したがって、本来、定義すべき変形に寄与する水は、見かけ上の変形に寄与しない水も含めた全自由水であると考えられ、流動性状を議論する際に欠くことのできない概念であると考えられる。

3.2 自由水が粘性に及ぼす影響 (WfP - R_m 関係)
 $SP/C=Cx0.0 \sim 3.9\%$ の各 SP 添加量に対して、 V_w/V_p を変化させた場合の WfP と R_m の関係を図 - 6 に示す。

SP 添加量が一定であれば、水セメント比を増減させると WfP と R_m は線形の関係にあった。

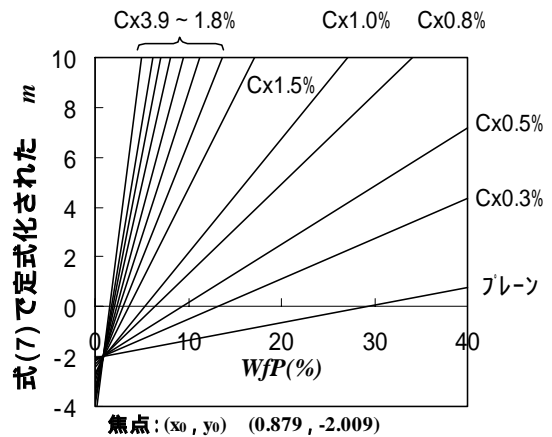


図 - 5 WfP と定式化された m の関係

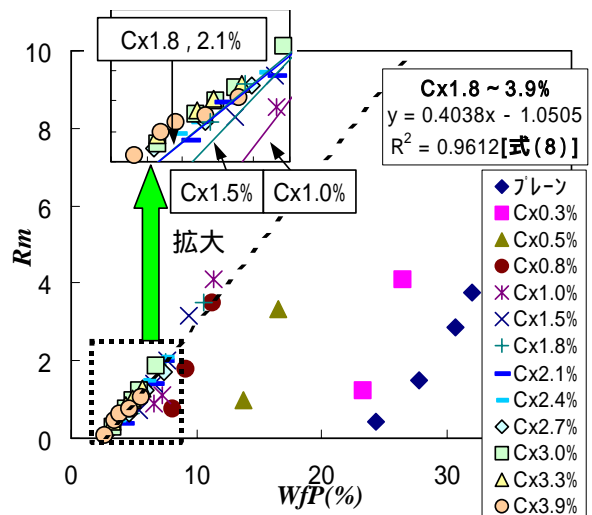


図 - 6 WfP と R_m の関係

以下、この直線を $WfP-Rm$ 直線と称す。この $WfP-Rm$ 直線は SP 添加量を増加させると図の左側にシフトするが、 SP 添加量が $Cx1.8\%$ 以上になると、見かけ上、式(8)で表される一定の線形関係に収束した ($R^2=0.9612$)。

$$Rm=0.4038 \cdot WfP - 1.0505 \quad (8)$$

$WfP-Rm$ 直線が、 SP 添加量によって、シフトする場合と収束する場合が見られたが、その境界は不明確であった。本報告では、粘性が WfP と SP 添加量の双方に依存する範囲A ($SP/C : Cx1.5\%$ 以下) と、 SP 添加量によらず WfP のみに依存する範囲B ($SP/C : Cx1.8\%$ 以上) に区分した。これは、粒子の凝集状態または表面状態の変化などの流動性状に与える要因が変化したためと考えられた。

4. 粒子の凝集構造および摩擦に関する考察

筆者ら¹⁾は、自己充填性を示すモルタルに対して、遠心脱水による浮き水量から得られる自由水量が、粒子の分散・凝集状態を示す指標である事を既に報告している。本報告では、更に WfP が粒子間の空間を示す量であり、粒子同士の接触確率の低さを示す指標であると仮定し、また、大内ら⁴⁾や菅俣ら⁵⁾の研究からも明らかのように、 SP 添加量は粒子同士の摩擦の程度を示す指標である事を考え合わせると、粘性は、範囲Aでは、粒子の接触確率と摩擦に依存して、範囲Bでは、接触確率のみに支配されていると言え、見かけ上、摩擦が一定となっていると考えられる。

図-7に固体粒子間の摩擦に関する概念図を示す。摩擦は、 SP の吸着による粒子反発の影響を受ける場合(このときの摩擦を Fpr とする)だけではなく、例えば、互いに大きな凝集塊同士の摩擦は、小さな凝集塊同士の摩擦より大きいように、粒子形状や凝集形態の影響を受ける場合(このときの摩擦を Ffl とする)も考慮する必要がある。

範囲Bで $WfP-Rm$ 直線が、式(8)で示す一定の直線関係に収束した理由は、 SP による凝集を解消する作用(拘束水の解放)が頭打ちになって

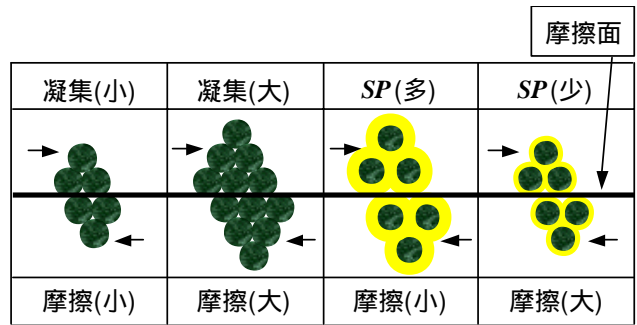


図-7 固体粒子間摩擦に関するモデル図

いるため、 Ffl が一定であるとする考え方や、 SP 添加量を増加させても、セメント粒子に対する SP の吸着量が飽和に達しているため、 Fpr が一定であるとする考え方がある。

前者の場合は、 SP 添加量を増加させても、凝集塊があまり変化しないため、見かけ上 Ffl が、ほぼ一定と見なせる状態にあると推察される。また、後者の場合は、 SP 添加量を増加させても、吸着量が飽和に達した等の理由で、見かけ上、 Fpr が、ほぼ一定と見なせる状態にあるものと推察される。

しかし、前述のように、 WfP と m の関係では、 WfP と Rm の場合で見られたような一定の直線に収束することはなかった。つまり、範囲Bにおいても、 SP 添加量の増加に伴って、 m が増加し、摩擦が低減され続けていた。 WfP と Rm の関係で得られた摩擦に関する推論を考えると、どちらか一方の摩擦の低減が頭打ちとなり、もう一方の摩擦は低減され続けている事になる。

範囲Bでは、仮に、 Fpr は変化しないが、 Ffl の減少が続いていると仮定すると、 SP 吸着量が頭打ちとなっているにもかかわらず、凝集塊を解消する作用は、なおも続いていることになり、明らかに不合理である。したがって、 SP 添加量を増加させても、 Ffl は変化しないが、 Fpr の減少が続いていると考える方が妥当である。

図-8に $Vw/Vp=0.88$ で、 SP 添加量を $Cx0.0 \sim 4.5\%$ とした場合の SP 添加量と SP 吸着量の関係を示す。モルタル試験で用いた SP 添加量の範囲では、添加量の増加に伴って、吸着量が直線的

に増加しており、飽和吸着に達していない事を示している。このことは、範囲Bにおいても Fpr の減少が続いている事を裏付けていると考えられる。

さらに、 Ffl と Fpr が、それぞれ変形性と粘性に与える影響が、同じではない可能性がある。

粘性に関わる摩擦は、漏斗試験を例に挙げると、拘束を受けた状態で粒子（凝集塊も含む）が接触するため、粒子同士が直接接触する際の摩擦と考えられ、 SP の粒子反発作用の影響よりも、粒子形状や凝集形態の影響をより強く受ける。これに対して、変形性に関わる摩擦は、より拘束が少ない状態で、粒子（凝集塊も含む）が接触するため、直接接触する際の摩擦というよりも、直接接触する以前から作用している SP の粒子反発作用の影響をより受け易いと考えることができる。

5. まとめ

本研究では、モルタルに遠心力を与えて得られる浮き水量を測定し、自由水量として定義し、粒子の分散・凝集状態を示す指標として自由水量粉体容積比（ WfP 、%）を提案し、以下のような知見が得られた。

- (1) WfP と変形性指標 m の関係において、配合に依存しない自由水の原点を見だし、遠心脱水による浮き水量の測定によって、自由水量を測定することが可能であることを示した。
- (2) WfP と粘性指標 Rm の関係において、 SP 添加量を増加させると、 Rm は WfP のみに依存することを示した。
- (3) m は WfP と SP 添加量によって、定式化されることを示した。
- (4) ある一定の SP 添加量を越えると、 SP による凝集塊の解消作用が頭打ちとなるが、粒子反発作用はなおも続いている事を示した。

以上の結果から、 WfP は、接触確率の低さを示す指標であることが示された。さらに、粒子

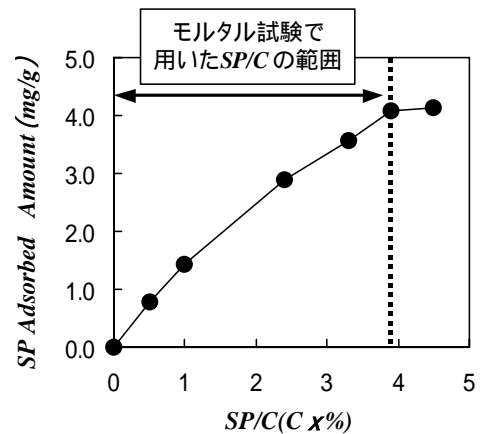


図 - 8 SP 添加量と SP 吸着量の関係

反発および粒子形状（凝集形態を含む）が固体粒子間摩擦に与える影響を、変形性や粘性の違いの観点から考察した結果、変形性に関わる摩擦は、粒子反発の影響を受け易く、粘性に関わる摩擦は、粒子形状や凝集形態の影響を受け易いと考えられ、 WfP を用いることによって粒子間の摩擦を評価することが可能であることが示された。

参考文献

- 1) 永峯秀則, 岸利治: フレッシュコンクリートの粘性に寄与する水に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.917-922, 2003
- 2) 例えば, 粉体工学会編: 粉体工学便覧, 日刊工業新聞社 P129, 1998.3
- 3) 例えば, 小澤一雅, 岡村甫: 自己充填コンクリートの配合の考え方, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.56-59, 1994.7
- 4) 大内雅博ほか: 自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤の効果の定量評価法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.355-360, 1998
- 5) 菅匠侯ほか: モルタルの変形性と粘性の関係を利用した高性能 AE 減水剤の粒子分散と粒子反発の作用に関する一考察, 土木学会第 29 回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.886-887, 2002