

論文 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

永峯秀則*¹, 岸利治*²

要旨：フレッシュコンクリートの流動性は、セメントなどに拘束される水を除いた粘性に寄与する水や化学混和剤の分散効果に大きく依存する。本研究において、自己充填コンクリートを対象としたモルタルの遠心脱水による浮き水量とV漏斗流下時間から得られる粘性の指標を比較した結果、両者には高い相関関係が認められた。この関係は試験温度が異なる場合にも見られ、遠心脱水による浮き水量から得られる自由水量比は粒子の分散・凝集状態をマクロ的に示していると考えられる。

キーワード：粘性、自由水、遠心脱水、V漏斗流下時間

1. はじめに

フレッシュコンクリートの粘性や変形性は、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。図-1, 2に水および SP によるセメントペーストの分散の概念図を示す。水セメント比が小さく、SP が添加されていない場合、セメント粒子は部分的に凝集構造を持つと考えられる。

配合条件の中で水量は粘性や変形性に影響を及ぼす最も大きな要因であり、図-1のように W/C が増加するということは、自由水の増加により平均粒子間距離（以下、単に粒子間距離と称す）が拡大し、接触頻度を減らし、粘性を低下させ同時に変形性を増大させていると考えられる。

なお、本研究では、セメントや細骨材の固体表面に拘束される水および凝集塊内に拘束される水等を単に拘束水として捉え、それ以外の粘性や変形性に寄与する水を自由水とした。

図-2のように SP は、セメント粒子表面に吸着し、粒子間の反発作用を高めることによって粒子間距離を大きく変えずに、変形性を増大させていると考えられる。また同時に、その反発作用によって、凝集塊内部に拘束されていた

水を解放する作用によって、自由水量を増加させるため、粘性を若干低下させると考えられている^{1),2)}。

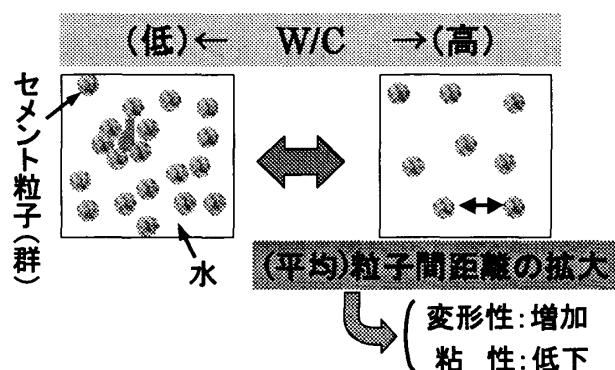


図-1 水による分散概念図

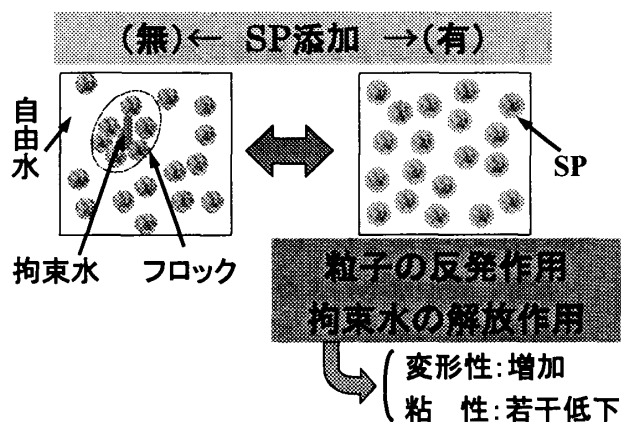


図-2 SPによる分散概念図

*1 (株) エヌエムビー 中央研究所 (正会員)

*2 東京大学助教授 生産技術研究所 博(工) (正会員)

一方、フレッシュ時における粘性の評価方法はコンクリートの場合、フロー速度や各種の漏斗流下時間が一般的である。これらは実際の施工条件を簡略化しているため、合理的であり確実である反面、多少の労力を必要とする。そこでモルタルやペーストを対象として、これをビンガム流体と見なし、回転粘度計等によって得られるビンガム定数（降伏値と塑性粘度）による評価を行う場合があるが、測定限界の問題や測定装置によってビンガム定数が大きく異なるなどの問題がある³⁾。

また、遠心脱水による浮き水量から粘性の評価を試みている例^{4),5)}もあるが、その因果関係を詳細に検討した例は少なく、粘性評価の決定的な手法が確立されていないのが現状である。

本研究では、自己充填コンクリートを対象としたモルタルの遠心脱水による浮き水量から得られる自由水量比（ WfR ）を測定し、比較的信頼できる粘性評価方法として、V漏斗流下時間を取り上げ、得られる相対漏斗速度比（ Rm ）を粘性の指標とし、これらを比較した。また、このときの粒子の分散・凝集状態を考察した。

2. 実験概要

本研究は、図-3に示すフロー試験・漏斗試験や遠心脱水による浮き水量の測定をシリーズ1～4の実験条件で行ったものである。

2.1 使用材料および練混ぜ方法

使用材料を表-1に示す。モルタルの練混ぜは下記に示すように分割練りとした。

S+C-(10 秒)→+W1-(120 秒)→+W2+SP-(60 秒)→かき落とし-(60 秒)→5 分静置→測定

なお、遠心脱水による浮き水量の測定は、試料調整等の都合上、さらに約5分間の時間を要した。

2.2 測定項目

(1) フロー試験・漏斗試験

図-3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（ Γm ）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を評価した。

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

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

F：フロー値(mm)

t：V漏斗流下時間(s)

(2) 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、遠心脱水による浮き水量の測定を行った。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を測定した。この浮き水量を用い、式(3)からセメントなどに拘束されない水を自由水量として、自由水量比（以下、 WfR と称す）を求めた⁴⁾。

$$WfR = Wb / Wt \times 100(\%) \quad (3)$$

Wb：遠心脱水による浮き水量

Wt：練混ぜ水量

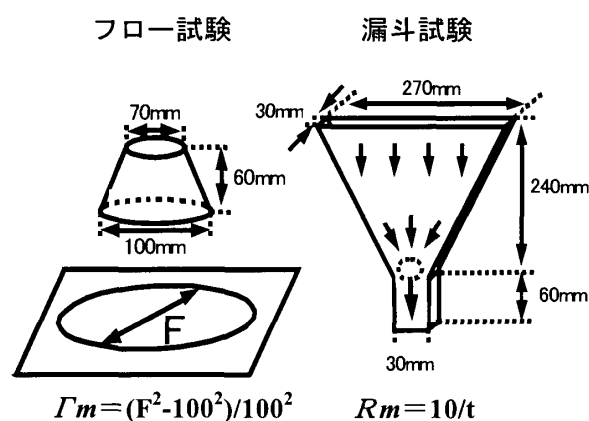


図-3 フロー試験と漏斗試験の概要

表-1 使用材料

水(W)	上水道水
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(密度=3.15g/cm ³ , ブレーン値=3300 および 3550cm ² /g)
細骨材(S)	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)
SP 剤(SP)	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

2.3 検討項目および実験条件

(1) 遠心脱水条件の設定（シリーズ1）

遠心脱水の条件設定を目的として、試験温度、水セメント容積比（以下、 V_w/V_c と称す）および SP 添加量を一定とした基準モルタルに対して、遠心脱水時の回転速度と回転時間を種々変化させた。このときの遠心条件と WfR との関係について調べた。実験条件を表-2に示す。

(2) 配合条件と自由水量比（シリーズ2）

V_w/V_c と SP 添加量を種々変化させたモルタルについて、 WfR と各要因 (V_w/V_c , SP 添加量, Γ_m , R_m) の関係について調べた。実験条件を表-3に示す。

(3) 温度条件と自由水量比（シリーズ3）

V_w/V_c を一定とし、SP 添加量を3水準変化させたモルタルに対して、試験温度を種々変化させた場合の WfR と R_m の関係について調べた。実験条件を表-4に示す。

(4) 温度条件と拘束水比（シリーズ4）

一般に直線関係が認められる V_w/V_c と Γ_m の関係における温度の影響について調べた。実験条件を表-5に示す。

なお、全てのモルタル配合に共通して、細骨材容積は、モルタル容積に対して 0.4 となる量とした。また、基準モルタルは自己充填コンクリートの性状を考慮して、 $\Gamma_m=5$, $R_m=1$ となるように調整した。シリーズ1,2とシリーズ3,4で基準モルタルの配合が異なるのは、セメントのロットが異なったためである。

表-2 シリーズ1の実験条件

試験温度	V_w/V_c	SP 添加量	回転速度	回転時間
20℃	0.79	Cx2.0%	1000rpm ～ 12000rpm	3分 ～ 15分

表-3 シリーズ2の実験条件

試験温度	V_w/V_c	SP 添加量	回転速度	回転時間
20℃	0.76 ～ 0.82	Cx1.8% ～ Cx2.2%	3000rpm	10分

表-4 シリーズ3の実験条件

試験温度	V_w/V_c	SP 添加量	回転速度	回転時間
5℃ 20℃ 30℃	0.88	Cx1.8% ～ Cx3.0%	3000rpm	10分

表-5 シリーズ4の実験条件

試験温度	V_w/V_c	SP 添加量	回転速度	回転時間
5℃ 20℃ 30℃	0.81 ～ 1.06	Cx2.25%	—	—

3. 実験結果

3.1 遠心脱水条件の設定（回転速度と時間）

図-4に回転速度と WfR の関係を示す。回転速度を高くするに従って WfR が増加しており、この結果からは、適切な回転数すなわち自由水量のみもしくはその一部を測定している回転速度を特定することはできなかった。しかし、回転速度が低い場合に浮き水にセメントが混入し易く、正確に浮き水量を測定できなかったり（図-4、5中○囲みプロット）、回転速度が

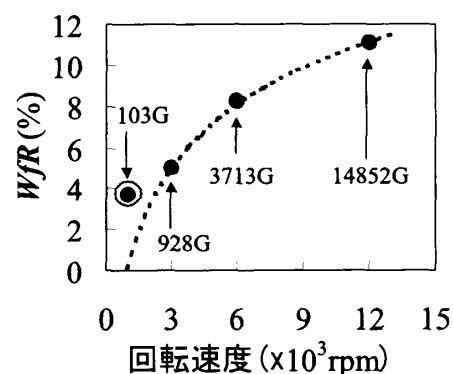


図-4 回転速度と WfR の関係

高い場合には定速となるまでに時間を要したため、3000rpm で測定することとした。この3000rpm という回転速度は約 1000G に相当する。

図-5 に回転時間と WfR の関係を示す。回転時間が短い場合に浮き水中にセメントが混入し易いため、 WfR が多くカウントされた。回転時間を長くすると一定の WfR に収束する傾向を示し、10 分程度の回転時間を採用すれば十分であると考えられた。

以上より、本研究では浮き水量の測定条件を 3000rpm・10 分とした。なお、浮き水へのセメント等の混入を考慮して、採取した浮き水は 105℃で乾燥させ、その減量を真の浮き水量とした。

3.2 各種配合条件による自由水量比の検討

(1) モルタルの配合条件と WfR

SP の添加量および Vw/Vc の配合条件と WfR の関係を図-6、7 に示す。

SP 添加量と WfR の関係は Vw/Vc が同一の場合に高い相関関係を示すが、全体的には相関が低かった(図-6 参照)。このことは SP が主に粒子の反発作用を担い、粒子間距離を広げる作用が小さいため、 WfR への寄与率が低いものと考えられる(図-2 参照)。

また、図-7 に示すように Vw/Vc と WfR は非常に高い正の相関がある。 WfR が Vw/Vc と高い相関関係にあるという事は、1 章で述べたように Vw/Vc は粒子間距離を示すと考えられるため、 WfR は粒子間距離を示す水量を測定していると考えられる。

(2) WfR とモルタル性状

WfR とモルタルの変形性や粘性の指標である Γ_m や R_m との関係を図-8、9 に示す。

Γ_m は WfR とやや相関がある結果を示した。これは、 Γ_m が変形性を示す指標であり、変形性は WfR だけでなく、SP による粒子の反発作用によって決定される事によると考えられる。

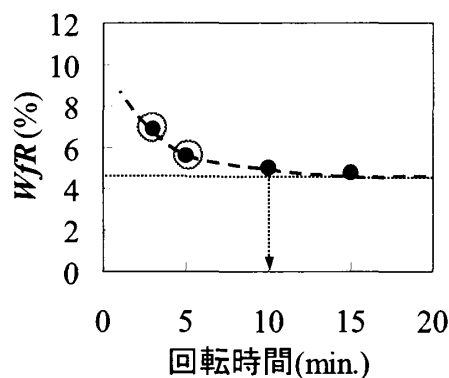


図-5 回転時間と WfR の関係

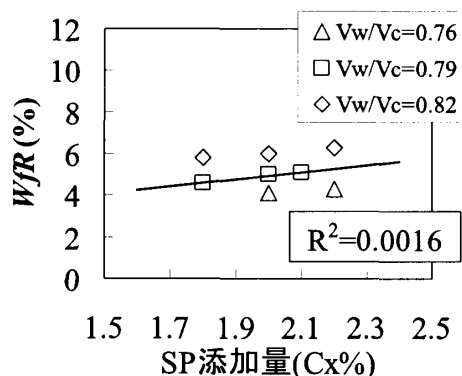


図-6 SP 添加量と WfR の関係

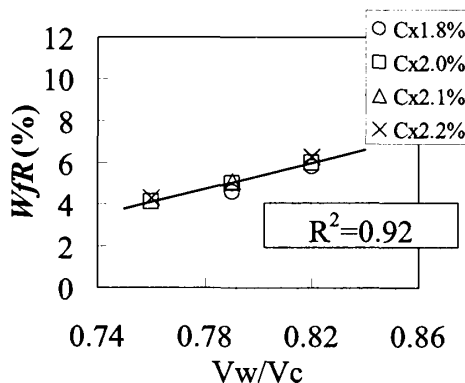


図-7 Vw/Vc と WfR の関係

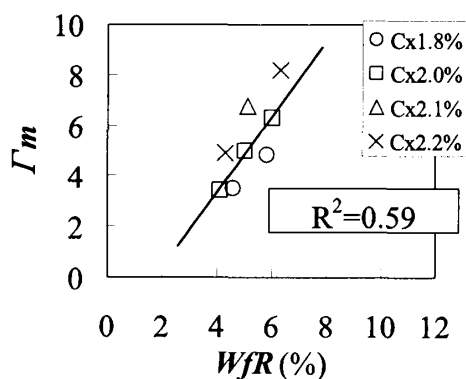


図-8 WfR と Γ_m の関係

また、 R_m は WfR と非常に高い相関関係を示した。 WfR が粘性を示す指標 R_m と高い相関関係にあるという事は、すなわち WfR は粒子の分散・凝集状態を示す指標となると考えられる。

なお、 WfR が V_w/V_c よりも R_m との相関が高いということは、SP の粒子反発作用が、粒子に拘束されない水すなわち自由水を増大させる作用を若干持っているため、 V_w/V_c と SP 添加量の双方の効果によって WfR が変化し、その結果として粘性指標である R_m が変化したものと考えられる。

3.3 各種温度条件による自由水量比の検討

V_w/V_c や SP 添加量が一定でも、粒子の分散・凝集状態が異なるケースとして、試験温度を変化させた場合について検討した。

著者らは、配合条件が一定で試験温度が異なるモルタルが、低温（5℃）・高温（30℃）時には、常温（20℃）に比べ粘性が増大し、見かけの W/C の減少に相当する変化を示し、自由水量が減少したのと考えられると報告している⁶⁾。

図-10に示すように同一配合で試験温度が異なる場合、低温・高温時に R_m が低下する傾向を示し、このときの WfR は R_m と非常に高い相関を示していた。

図-11は試験温度が異なるモルタルの SP 添加量を $Cx1.8\%$ ～ $Cx3.0\%$ までとしたときの全てのデータを示した。ここでも WfR は R_m と高い相関関係を保っていた。

以上より、配合条件が同一であるが、試験温度によって粒子の分散・凝集状態が変化するケースにおいても、 WfR はモルタルの性状を表す R_m と非常に高い相関関係を示すことから、 WfR は配合条件によって決定される量ではなく、モルタルの状態量すなわち粒子の分散・凝集状態を示す指標であることが示唆された。

3.4 各種温度条件による拘束水比の検討

岡村らはハイパフォーマンスコンクリート（自己充填コンクリート）の配合設計において、ペーストが流動を開始する水セメント容積比を拘束水比とし、これを配合設計に用いている⁷⁾。

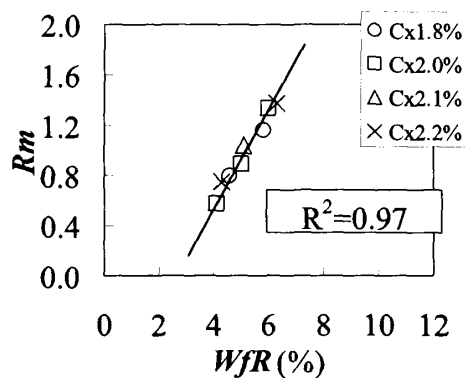


図-9 WfR と R_m の関係

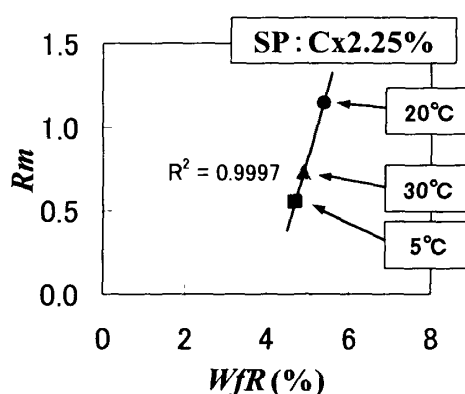


図-10 試験温度が異なるモルタルの WfR と R_m の関係（SP 添加量一定）

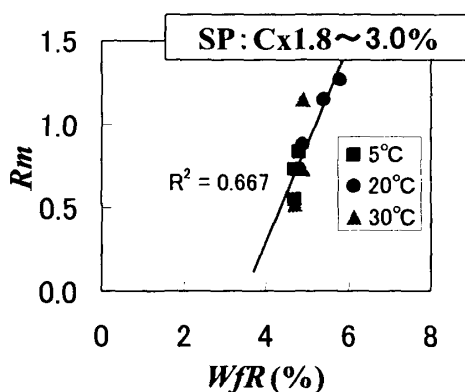


図-11 試験温度が異なるモルタルの WfR と R_m の関係（全体）

そこで、試験温度が拘束水比へ及ぼす影響について検討した。なお、本実験では SP を配合したモルタルを対象とした。

図-12に Γ_m と V_w/V_c の関係を示す。温度別に見ると、 Γ_m は V_w/V_c と線形関係にあった。

拘束水比とは流動を開始する水セメント容積比すなわち図中の Y 切片であり、温度によって、それぞれ $5^{\circ}\text{C} : 0.79$, $20^{\circ}\text{C} : 0.77$, $30^{\circ}\text{C} : 0.83$ と異なった。低温・高温時に拘束水比が若干大きくなっており、低温や高温時の流動性低下の一因であると考えられた。

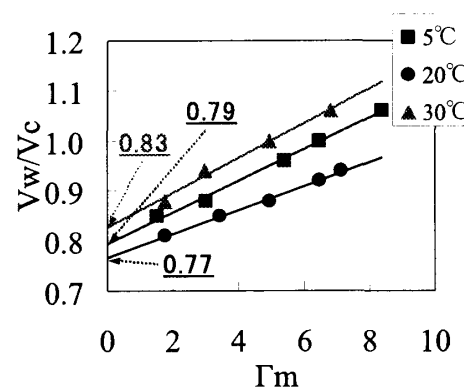
このことから、温度が流動性に与える影響を議論する上で、粒子の分散・凝集状態の視点でこれを捉えることが非常に重要であると言える。

4. まとめ

本研究では、粘性や変形性に寄与する自由水の量を測定することを目的に、遠心脱水による浮き水量の測定を行った。また、これから得られる自由水量比 (WfR) と V 漏斗流下時間から得られる相対漏斗速度比 (Rm) を比較した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 遠心脱水による浮き水量の測定条件は $3000 \sim 6000\text{rpm}$ 程度で 10 分以上とすることが望ましいと考えられた。
- (2) 配合条件を変えたモルタルに関して、 WfR は SP 添加量や変形性よりも、水セメント比や粘性と相関が高かった。
- (3) この傾向は、配合は同一だが、試験温度が異なるために、粘性が異なるモルタルの場合にも共通して見られた。

以上より、配合条件が異なるモルタルに対して、自由水量比 WfR が粘性の指標である Rm と高い相関があることから、 WfR は粒子の分散・凝集状態を表す指標として適当であるといえる。また、この関係は試験温度が異なる場合であっても成立し、粘性は温度に関わらず自由水量に支配されていると考えられる。



図－１２ 試験温度が異なるモルタルの Γ_m と V_w/V_c の関係

参考文献

- 1) 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
- 2) 菅俣匠ほか：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，第 29 回関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.886-887，2002
- 3) 土木学会編：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題，2000
- 4) 川上晃ほか：楕形高分子を添加した $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ サスペンションの流動特性，日本セラミック協会誌，Vol.106[11]，pp.1110-1113，1998
- 5) 浜田大輔ほか：高性能減水剤の構造と各種粉体の分散特性，第 54 回セメント技術大会講演要旨，pp.92-93，2000
- 6) 永峯秀則，岸利治：第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp.1455-1456，2002
- 7) 岡村甫，前川宏一，小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993.9