

第3章

本研究の基本概念と 研究のアプローチ

第3章 本研究の基本概念と研究のアプローチ

3.1 本研究の基本概念

1.2 項で述べたように配合や環境要因は、粒子の分散・凝集状態に影響を及ぼし、粒子の接触や摩擦といった動力的性質を介して流動性に影響を及ぼしていると考えられるため、配合や環境要因と流動性との関係を明らかにするためには、粒子の分散・凝集状態や粒子の接触や摩擦といった動力的性質を把握する必要がある。

コンクリートのような固液混相系における流動性状を決定するものは、固体粒子間の接触頻度と接触の際の摩擦の程度であると考えられる。接触頻度とは、言い換えれば、粒子間の距離ということであり、主に系内の流動相である水の量に比例する。なお、本研究では、これを水と粉体の容積比 (V_w/V_p) で議論する。しかし、配合した水の全てが流動相となるのではなく、粒子表面に吸着する水や水和反応によって消費される水あるいは凝集体の形成による水の拘束などによって、その一部は変形性に寄与しない水と見なさなければならない。

セメント系材料中の粒子の分散・凝集状態を直接は博することはほぼ不可能であるが、粒子間の相対的な間隔や粒子同士の接触頻度を代表すると考えられるバルク中の自由な水（流動に寄与する水）の量を、流動性状を記述するための指標として捉えることは十分に合理的な考え方である。

本研究では、モルタルに遠心力を加えたときの浮き水量の測定を行い、この浮き水量を遠心分離水量として定義し、粒子の分散・凝集状態を示す指標として遠心分離水量を粉体容積で除した百分率 ($WcsP$, %) を提案する。これは、遠心脱水による浮き水量が自由水量、すなわち粒子間の空間を表す量であり、流動性に対して直接的に影響を与えられられるためである。結論を言えば、自由水を示す指標は、正確には $WcsP$ ではなく、 $WcsP$ から導出される自由水比 (WfP) となるが、この WfP は動力的観点から捉えると、粒子同士の接触頻度に相当することとなる点が重要である。なお、本研究ではコンクリートの製造においては、分散剤の併用は不可欠である現状を踏まえ、更には今後主流となりつつある分散剤であるポリカルボン酸エーテル系の分散剤に限定した検討結果であることを付記しておく。

3.2 自由水と拘束水

これまで既往の研究を含め、拘束水に関する定義が大きく3つに分類されるが、本研究における自由水と拘束水の内容を含めてここで整理しておきたい。まずは、2.3節で述べた自己充填コンクリートの配合設計で用いられる“見かけの変形性”が発現する時の V_w/V_p を拘束水比とする定義（定義1とする）であり、次に2.4節で述べた遠心脱水により、遠心力の作用方向（下方向）に水を排水する事によって得られる水から拘束水を定義（定義2とする）するものであり、最後に本研究が提示するモルタルに遠心力を作用させたときに、遠心力の作用方向とは逆の方向（上方向）に水を分離し、この浮き水から自由水を求め、残りの水を拘束水とする定義である。

定義1による拘束水は、特にペーストにおいて、使用する粉体によって一意に決まることから、粉体のキャラクターを同定する上で、工学上、非常に有用な指標であることに間違いはない。しかし、見かけ上の変形性に寄与する水とそれ以外の水を分けているに留まるため、真の意味で変形性に寄与する水と寄与しない水を分けることができないと考えられる。

定義2による拘束水は、細骨材やセメントが拘束する水の観点からは、拘束水と非拘束水を定義する上で、最も正しい分け方であると考えられる。しかし、このときの拘束水には、後に述べる本研究で提示する変形に寄与しない水（拘束水）とは異なり、粒子の峽間に存在する水（峽間水）が含まれていない。したがって、粒子が拘束するか否かの点では正しい分け方であるが、この境界が変形に寄与する水か否かを本質的に指すものではないと考えられる。このことに関しては後に述べることとする。

定義1および定義2による拘束水では、ある定義によって先に拘束水を同定して残りの水を自由水と捉える点で共通しており、本研究では、逆に自由水を変形性に寄与する状態量として先に捉え、残った水を拘束水と定義する。したがって、あくまでも変形性に寄与するか否かの観点で分けることを主旨とするため、変形性に寄与する水を自由水、変形性に寄与しない水を拘束水と定義する。

本研究で定義する自由水とは、そもそも1Gの重力下における変形性に寄与する水であると考えられるため、遠心力を加えた浮き水との関連性は無いはずである。しかし、遠心力によって凝集構造が変化しないか、あるいは、変化するが凝集構造を残した状態の適度な遠心力のみが加えられたならば、十分に自由水を示す指標となり得ると考えられる。ただし、 $WcsP$ が自由水であるか否かについては慎重な議論が必要である。また、2.4節で示したように峽間水は、拘束水と見なすべ

きであると考えため、この $WcsP$ が自由水を示す指標であることが妥当である
と考える。

また、自由水と流動性との関連性については、第2章で触れたように数多くの
研究がある。しかし本研究は、流動性に寄与する自由水について精緻に検証する
ことに主眼を置いている点で、それらの研究とは大きく相違する。

3.3 本研究のアプローチ

本論文では、まず第4章までに $WcsP$ から導出される自由水比 (WfP) によっ
て、粒子の接触頻度を定量的に扱うことが可能となることを示す。

このことは、単にその言葉の意味だけに留まらない。第5章では、配合条件と
自由水比の関係および自由水比と流動性状との関係を詳細に考察し、これまで把
握することが困難であった粒子の分散・凝集状態に関する知見や、粒子間摩擦に
関する知見が得られる。更には、流動性状に及ぼす水や SP の役割をそれぞれ独
立した形で評価することが可能となると考えられる (図-3.1 参照)。

また、第6章において、本理論が使用材料や環境条件が異なる場合においても、
一定の関係を持つ普遍的な傾向を有していることが必要であるため、この $WcsP$
と流動性状 (Γm , Rm) との関係を深く考察し、その妥当性を検証する。同時に、
ここから見えてくる本理論の適用範囲について言及する。

第7章では、もう一方の拘束水の挙動に着目することによって、ある仮定に基
づいた水セメント毎の水和反応の様子について考察した。また、本研究で得られ
た粒子間摩擦に関する知見を基に、 SP の分散効果についてさらに検証した。

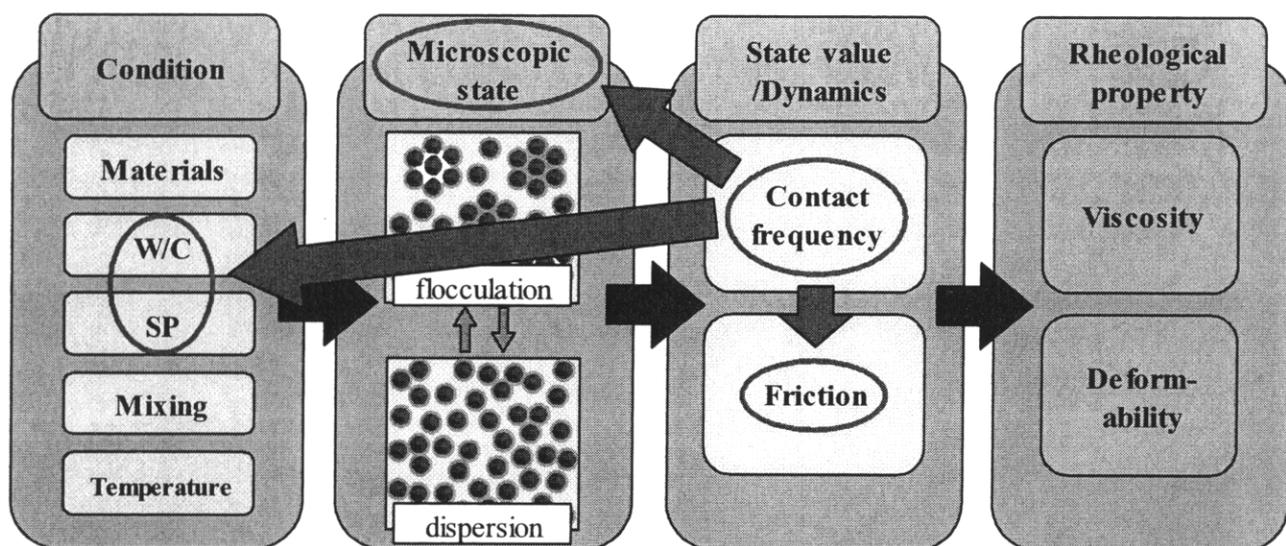


図-3.1 WfP によって明らかになる諸性状

第 4 章
遠心分離水比を用いた
流動性評価結果

第4章 遠心分離水比を用いた流動性評価結果

4.1 実験概要

4.1.1 使用材料および配合条件

使用材料を表-4.1に、配合条件を表-4.2に示す。

なお、今回の実験では、フレッシュモルタルの流動性と配合条件との関係を広範に確認するため、練混ぜが可能であり、著しい材料分離が生じない範囲で、可能な限り多様な V_w/V_p と SP の添加量（以下、 SP 添加量、あるいは、 SP のセメント重量に対する添加量として、 SP/C (Cx%) と表記）の組み合わせについて実験を行った。なお、本研究で用いた分散剤は、全てポリカルボン酸エーテル系の分散剤であり、 SP 添加量は分散剤有り姿の添加量である。

4.1.2 練混ぜ

普通ポルトランド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練り混ぜた（S：細骨材，C：セメント）。

S+C - (10 秒) → + W_1 - (120 秒) → + W_2 + SP - (60 秒) → かき落とし
- (60 秒) → 排出

なお、練混ぜ水は $W/C=20\%$ に相当する水量を一次水 (W_1) とし、残りの二次水 (W_2) と SP をその後に投入する分割練りとした。

4.2 測定方法

4.2.1 フロー試験

図-4.1 にフロー試験の概要を示す。JIS R 5201-1997「セメントの強さ試験」で用いられるフローコーンにモルタルを詰め、振動を与えない自重によるフローの広がり測定した。このフロー値 (F) から式 (4.1) によって得られる相対フロー面積比 (Γ_m) を変形性の指標とした [1]。

$$\Gamma_m = (F^2 - 100^2) / 100^2 \quad (4.1)$$

ここで、F：フロー値 (mm)

4.2.2 遠心分離水量の測定

遠心分離方法の模式図を図-4.2 に示す. HITACHI 社製高速遠心機「himac CR20」, アングルロータ: R19A によって, 遠心分離によるモルタルからの浮き水(遠心分離水)の量を測定した.

この遠心分離水の容積 (V_{wcs}) と粉体の容積 (V_p) から式(4.2)によって $WcsP$ を算出した.

$$WcsP = V_{wcs} / V_p \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

ちなみに, 遠心加速度 CF は回転数と回転半径 \bar{r} と回転数 N で式(4.3)によって表される.

$$CF (G) = 1.118 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{r} \cdot N^2 \quad (4.3)$$

$$\bar{r} = (r_{\max} + r_{\min}) / 2$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } \bar{r} &= 90 [\text{mm}], N = 3000 [\text{rpm}], r_{\min} = 67 [\text{mm}], \\ r_{\max} &= 113 [\text{mm}], h = 79.1 [\text{mm}], \theta = 35 [^\circ] \end{aligned}$$

試料の高さ h は, 回転半径に影響を及ぼし, 更には加えられる遠心加速度に大きな影響を及ぼすため, 試料高さは重要である. 本実験の範囲では試料の高さが平均で $79.1 [\text{mm}]$ (標準偏差 $1.2 [\text{mm}]$) であったため, 回転半径は, 最小で $67 [\text{mm}]$, 最大で $113 [\text{mm}]$ であり, 回転数が $3000 [\text{rpm}]$ の場合, 遠心加速度は最小で $674G$, 最大で $1137G$ となる. 以後, モルタルに加えられる遠心加速度を種々変化させた検討も行うため, 遠心加速度の表記は平均の値とする. ちなみにこの場合の(平均)遠心加速度は $906G$ である.

一方, 予備実験から, 遠心力を加える時間の増加に伴って, 遠心分離水量は一定値に収束する傾向を示し, 10 分間遠心力を加えれば, 遠心分離水量は十分に一定値に収束することが確認された[2]. そこで, 遠心力を加える時間(遠心分離時間)は, 10 分とした.

また, 練混ぜ直後にフローを測定した場合に, フローが変動するケースが, 予備実験で確認されたため, 安定化する 15 分後にフローを測定することとした. 遠心分離水量の測定は, これと時期を合わせるため, 練混ぜ直後から $10 \sim 20$ 分間に遠心力を作用させるよう時間を調整した.

表-4.1 使用材料

| | |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 練混ぜ水 (W) | 上水道水 |
| セメント (C) | 普通ポルトランドセメント (密度=3.15 g/cm ³ , ブレン比表面積=3,330 cm ² /g) |
| 細骨材 (S) | 大井川水系産陸砂 (表乾密度=2.60 g/cm ³ , 吸水 率=1.83%, 粗粒率=2.67, 実積率68.2%) |
| 高性能 AE減水剤 (SP) | ホリカルボン酸エーテル系化合物 |

表-4.2 配合条件

| 検討 項目 | 温度 (℃) | 粉体の 種類 | V_w/V_p (%) | V_s/V_m (%) | SP/C (Cx%) |
|----------|-----------|-----------|------------------|------------------|-----------------|
| 遠心条件の検討 | 20 | OPC | 88 | 0.4 | 2.4 |
| セメントモルタル | 20 | | 80~ 150 | | 0.0~ 3.9 |
| 加速度の影響 | 20 | | 84~ 150 | | 0.0~ 2.7 |

V_w/V_p : 水粉体容積比 (%)

V_s/V_m : モルタル中の細骨材の容積比 (%)

SP/C : SP 添加量 (Cx%) [分散剤有姿の添加量]

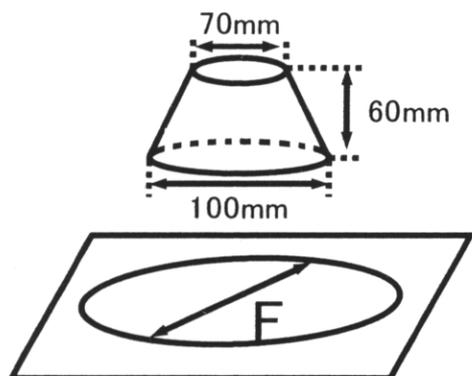


図-4.1 フロー試験

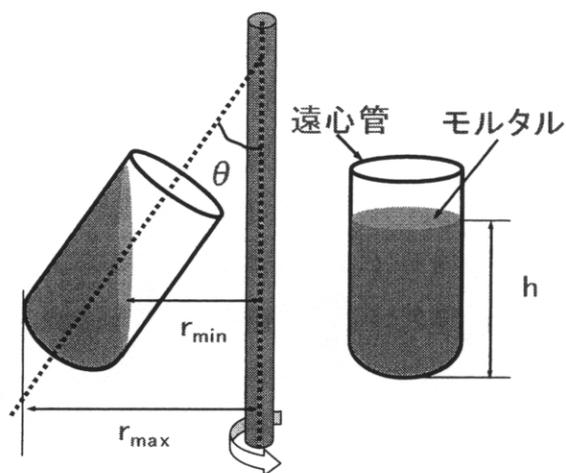


図-4.2 遠心分離方法の模式図

4.3 実験結果

4.3.1 水粉体容積比と変形性の関係 (V_w/V_p と Γ_m)

フレッシュモルタルの流動性状に影響を与える因子のうち、材料条件および環境条件を揃えた本実験では、流動性状の支配要因は、配合すなわち水粉体容積比と SP 添加量と考えられる。図-4.3 に水粉体容積比と変形性の関係を示す。 SP/C 毎に見ると、 V_w/V_p と Γ_m は非常に相関性の高い線形関係を示すことが明らかとなった。既に、 V_w/V_p と Γ_m の関係は線形の関係にあることが指摘されており、例えば、枝松 [3] は、細骨材容積比を変化させた場合のモルタルに関して、各々の細骨材容積比毎に見ると、それぞれ V_w/V_p と Γ_m は線形関係にあると報告しているが、本結果は、非常にこれと似た傾向を示した。ただし、ここで特筆すべきことは、この直線群の傾きが SP/C に応じて規則的に変化し、さらに、この直線群が Γ_m が負の領域で焦点を結ぶような傾向を示していることである。この傾向は、プレーンモルタルおよび極端に SP 添加量の少ない $SP/C=C \times 0.3\%$ の場合を除けば、一層明確である。

ところで、岡村・小澤ら [1] の拘束水は、 Γ_m がゼロの位置での V_w/V_p 、すなわち、図-4.3 の Y 切片の値から、材料条件などによって個別に定まるものであるが、これは、例えばフローコーンのサイズが異なれば自重の影響が異なるように、試験条件依存する、言うなれば、見かけ上の流動の開始点を以って定義される概念である。しかし、 SP/C 毎の V_w/V_p と Γ_m の関係がほぼ焦点を結ぶという事実は、見かけ上の流動が生じているかどうかに関わらず、また、 SP/C の値の如何に関わらず、この焦点位置が変形性を記述する上での起点を与える有意な状態である可能性を示唆している。この事実の発見により、本研究では、焦点位置に相当する V_w/V_p (70%付近) 以上の水こそが流動に寄与する水として定義すべき水であり、他方、これ以下の水は流動に寄与しない水として、 SP 添加量に関わらず一意に定義すべき水であるとの着想を持つに至った。

ただし、ここで認められた焦点性は、後述する $WcsP$ と Γ_m の関係における焦点よりは不明確なものである。これは、配合上の V_w/V_p が、変形性と直接的な因果関係を有する状態量と相当に高い対応関係を有するものの、 V_w/V_p そのものが変形性を記述する指標として最も相応しいわけではないためであると考えられる。そして、後述するように、変形性と直接的な因果関係を有する状態量とは、遠心分離水量から求めた $WcsP$ と Γ_m の対応関係から同定される流動性に寄与する水と粉体容積の比であり、 V_w/V_p と Γ_m の間には、流動性に寄与する水を介した間接的な対応関係が成り立っていると解釈するのが妥当である。

4.3.2 遠心分離条件の検討

本研究では、流動性を規定する流動性に寄与する水は、2.2.4項で述べたようにモルタルに遠心力を加えたときの浮き水として直接定量できるものと考え、遠心分離水比 $WcsP$ を指標として用いて、変形性および粘性の検討を行うこととした。

遠心分離水の量は、遠心加速度や遠心分離時間に応じて変化するため、まず、流動性に寄与する水と流動性に寄与しない水を区別するための適切な遠心分離条件を見い出す必要があると考え、 Vw/Vp および SP/C を一定とするモルタルに対して遠心加速度を変化させた実験を行った。図-4.4に遠心加速度と遠心分離時間10分での浮き水量から求めた $WcsP$ との関係を示す。

当初、流動性に寄与しない水に影響を与えずに、流動性に寄与する水のみを完全に浮き水として分離できる適切な遠心加速度が明確に存在すると考えた。つまり、流動性に寄与する自由水は容易に分離可能であるのに対して、流動性に寄与しない拘束水はより多くのエネルギーを必要とするため、遠心加速度と $WcsP$ との関係には、明確な変曲点ないし平らな部分のような特徴を有する関係が見い出し得るものと予想していた。しかし実際には、 $WcsP$ が遠心加速度の増加に伴い単調に増加したため、この検討からは、適切な遠心加速度を特定することはできなかった。そこで、暫定的に、遠心加速度は906G(3000rpm)を基本として、以後の実験を進めることとした。なお、本検討結果では、適切な遠心加速度を特定する事はできなかったが、以降に示す $WcsP$ と Γm の関係から適切な加速度の範囲が概ね特定できる。

4.3.3 遠心分離水比と変形性の関係 ($WcsP$ と Γm)

(1) 遠心加速度906Gにおける検討

$Vw/Vp=80\sim 150\%$ 、 $SP/C=C \times 0.0\sim 3.9\%$ の配合条件について、各 SP 添加量に対して、 Vw/Vp を変化させた場合の $WcsP$ と Γm の関係を図-4.5に示す。図-4.3の Vw/Vp と Γm の関係とは、 Γm の表記を X 軸から Y 軸に入れ替えているので注意されたい。ここで、 $WcsP$ と Γm の関係は、 SP 添加量毎に高い線形性 ($R^2=0.95$ 以上)を示した。以下、この直線を $WcsP-\Gamma m$ 直線と称す。なお、本検討では、相関性を示す指標として R^2 (寄与率)を用いることとするが、この寄与率の平方根が相関係数である。したがって、寄与率 R^2 が0.95以上とは、相関係数が0.97以上となり、極めて高い相関性があると言える。

$WcsP-\Gamma m$ 直線の傾きは、 SP 添加量に応じて規則的に変化し、これらの直線群は Γm が負の領域でほぼ焦点を結んでいることが分かる。この傾向は、図-4.3

に示した Vw/Vp と Γm の関係と同様であるが、明らかに $WcsP$ と Γm の関係の方が高い焦点性を示した。そこで、 $WcsP-\Gamma m$ 直線群は焦点を結ぶべきものと想定した上で、その規則性を明らかにするために、以下の処理を行った。

まず、 $WcsP-\Gamma m$ 直線の傾き a および切片 b と SP 添加量 (SP/C) の関係を整理したところ (図-4.6 参照)、それぞれ、式 (4.4)、(4.5) のように回帰された。

$$a = 0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071 \quad (4.4)$$

$$(R^2 = 0.9912)$$

$$b = -0.099 \cdot SP/C^2 - 0.253 \cdot SP/C - 2.056 \quad (4.5)$$

$$(R^2 = 0.8062)$$

なお、 SP 添加量と切片の関係は、相関が若干低いですが、これは、傾きの僅かな違いが、データ群から遠く離れた Y 切片には大きく影響するためと考えられる。次に、式 (4.4)、(4.5) を用いて、 Γm を $WcsP$ と SP/C で定式化すると、式 (4.6) のようになる。

$$\begin{aligned} \Gamma m = & (0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071) \cdot WcsP \\ & - (0.099 \cdot SP/C^2 + 0.253 \cdot SP/C + 2.056) \end{aligned} \quad (4.6)$$

本研究では、 SP 無添加の場合を含めて合計 13 段階の SP 添加量について実験を行っているので、式 (4.6) を用いて各 SP 添加量ごとの $WcsP-\Gamma m$ 直線を求め、この 13 本の直線の全ての交点 (x_i, y_i) を求めたところ、その座標は非常に狭い範囲 ($x_i = 0.86 \sim 0.93$, $y_i = -2.03 \sim -1.99$) に集中しており、その平均座標 (x_0, y_0) は (0.88, -2.01) であった (図-4.7 参照)。

以上のように、 $WcsP-\Gamma m$ 直線群が焦点を結ぶと仮定することは妥当なものと考えられるので、さらに、焦点を結ぶことを前提として、直線群の交点の平均座標 (0.88, -2.01) を焦点と見なして、式 (4.6) で表した Γm を再度定式化すると、式 (4.7) のように簡略に表すことができる。

$$\begin{aligned} \Gamma m = & (0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071) \\ & \cdot (WcsP - 0.88) - 2.01 \end{aligned} \quad (4.7)$$

そして、この式 (4.7) を用いて算定した Γm の値を実測値と比較したところ、図-4.8 に示すように、両者は高い相関 ($R^2 = 0.967$) を有することが確認され、この定式化の妥当性が裏付けられた。なお、この寄与率 R^2 は、図中の $y=x$ 直線に対する寄与率である。

以上の検討から明らかのように、 $WcsP$ と Γm は線形の関係にあり、各 $WcsP-\Gamma m$ 直線群が高い焦点性を示すことから、この焦点における X 座標 ($x_0 = 0.88$) 以上の $WcsP$ が、変形性を記述する上で実質的な意味を持つ水に対応しており、

この水こそ流動に寄与する水（従来理論における自由水概念に相当する）として定義するべきものと考えられる。この焦点の物理的意味に関しては、4.4.3項で述べることにする。

(2) 遠心加速度 509G における検討

4.3.2項で述べた遠心加速度と $WcsP$ の関係では、遠心加速度の大きさによって $WcsP$ が連続的に変化した(図-4.4 参照)。また、906Gでの浮き水量を使った $WcsP-\Gamma m$ 直線群の焦点は、 $WcsP$ が僅かながら正の値 ($x_0=0.88$) を取っており、906Gでの浮き水量は変形性を記述するのに最適な値よりも若干多くの水を浮き水として分離してしまっていると考えられた。すなわち、906Gの場合、加速度が大き過ぎるために、流動に寄与する水以外の流動に寄与しない水の一部も浮き水として分離し、これを $WcsP$ としてカウントしたため、焦点の X 座標が僅かに正の値を取ったものと考えられた。言い換えると、 $WcsP-\Gamma m$ 直線群の焦点性が極めて高く、なおかつ、丁度 Y 軸上で焦点を結べば、その時の $WcsP$ が変形性を記述するのに最も合理的な指標であると考えられ、そのような「浮き水量=流動に寄与する水量」を与える最適な加速度が存在すると考えられた。そこで、906Gよりも小さい遠心加速度での実験を追加して行うこととした。

図-4.9に遠心加速度を約509G(2250rpm)としたときの $WcsP$ と Γm の関係を示す。509Gの場合、遠心加速度が低いため、同じモルタルに対して、906Gの場合よりも、当然ながら浮き水量は少なくなる。ここで特筆すべきことは、509Gにおいても $WcsP-\Gamma m$ 直線群が焦点を結んだことと、その焦点は(-0.59, -2.55)付近に位置していることである。つまり、906Gでは X 座標が正の領域で焦点を結んだのに対して、509Gの場合には、 X 座標が負の領域で焦点を結ぶことが明らかとなった。

4.4 考察

4.4.1 $Vw/Vp-\Gamma m$ 関係から見た自由水との相違

自己充填コンクリートの配合設計[1]においては、 Vw/Vp と Γm の関係から、フローが発現し始める時 ($\Gamma m=0$ の時) の Vw/Vp をもって、この Vw/Vp に相当する水を拘束水とし、この Vw/Vp 以上に相当する水を自由水と定義している。つまり、見かけ上、フローが発現するのに最低限必要な水量以上の水のみを流動性に寄与する水と捉えている。しかし、このような見かけ上の基準によって同定される自由水が、流動に寄与する水に完全に対応したものであるかは、それが変

形性を記述する上で必要にして十分なものであるかという観点から、その妥当性を判断する必要があると考えられる。すなわち、工学上の有用性から見れば十分と考えられる定義ではあるが、機構面から見た厳密性を追求すれば、別途の検証が必要であると考えられる。

このような観点から見ると、フローが発現するのに最低限必要な水量以上の水としての自由水は、単一の $V_w/V_p - \Gamma m$ 直線においては、フローが発現し始めてからの関係を記述する上での有意なパラメータではあるが、その値自体が、粒子間距離や粒子相互の接触頻度を一意に代表して、種々の $V_w/V_p - \Gamma m$ 直線群を統一的に記述するのに適した指標であるとは言い難い。

一方で、図-4.5 および図-4.7 に見られるように、本研究で認められた $WcsP - \Gamma m$ 直線群の焦点性は極めて高いものであり、焦点以上の部分の $WcsP$ は、 SP 添加量に関わらず、種々の $WcsP - \Gamma m$ 直線を統一的に記述するのに適した指標であると考えられる。

なお、 V_w/V_p と Γm の関係を示した図-4.3 においても、ある程度の焦点性が認められることから、不鮮明ながらも、この焦点以上の V_w/V_p が、流動に寄与する水量を介して変形性を記述する上で一定の意味を有すると考えられることは、4.3.1 項において述べた通りである。

4.4.2 $WcsP - \Gamma m$ 関係から見た自由水

4.3.3 項で述べたように、 $WcsP$ と Γm の関係は、906G で分離した遠心分離水を用いた場合には X 座標が正の領域で焦点を結んでいたが、509G で分離した遠心分離水を用いた場合には、 X 座標が負の領域で焦点を結ぶことが明らかになった。したがって、変形性を記述するのに最も相応しい「浮き水量=流動に寄与する水量」となる $WcsP$ を与える最適な加速度、すなわち丁度 Y 軸上で焦点を結ぶ $WcsP$ を与える加速度は、厳密に言えば、906G より小さく、509G より大きいと考えられ、本実験条件では、700G 程度であると推定される。

しかし、906G 並びに 509G の遠心加速度で得られる $WcsP$ と Γm の関係では、焦点の X 座標こそ遠心加速度に応じて若干シフトするものの、それぞれにおける焦点性は極めて高いものである。そこで、それぞれの遠心加速度において、焦点を $WcsP$ の原点として取り直し、この焦点からの差として表される $WcsP$ を比較したところ、両者の値にはほとんど相違がないことが明らかとなった（図-4.10 参照）。

したがって、高い焦点性を示す有効な $WcsP$ を取得するという意味においては、906G から 509G 程度の遠心加速度の相違は何ら差し障りがなく、それぞれの焦

点を原点として $WcsP$ を取り直すことにより、真に変形性を記述する上で有意な流動に寄与する水量と粉体の容積比（自由水比）を同定することができる。そして、この自由水比を与える遠心分離水こそが、変形性を規定するという意味において、流動に寄与する水（自由水）として定義するに相応しいものと考えられる。

なお、このように、少なくとも 500G 程度から 1000G 程度までの遠心加速度条件において、 $WcsP-\Gamma m$ 直線群の高い焦点性が保持され、焦点を原点とすることで、変形性を記述するのに有意な自由水比を同定することができるということは、遠心分離水量は、圧密等の影響により、遠心加速度の増加に応じて単調に増加してしまうものの（図-4.4 参照）、同一の遠心加速度であれば、圧密等の攪乱要因の影響は粒子の分散・凝集状態によらずほぼ一様であり、その結果、データの焦点回帰性を含めて流動性に関わる規則性は、浮き水として取得される遠心分離水に良好に保持されていることを意味していると考えられる。したがって、本提案手法は、自由水比および自由水量の同定方法として、高い妥当性を有するものと考えられる。

4.4.3 自由水原点における負の Γm の物理的意味

$WcsP-\Gamma m$ 関係は、 Γm が負の領域（遠心加速度 906G の場合、 $y_0 = -2.01$ ）で焦点を結んでおり、焦点以上の $WcsP$ として定義される自由水比が、単に見かけ上の変形性から定義される指標でないことは明らかである。自由水比の物理的な意味を考えれば、粒子間の空間情報に関わる指標であり、具体的には、粒子間距離（粒子間隔）に関する状態を一意に表す指標と捉えるのが妥当であろう。動力学的観点から見れば、粒子相互の接触頻度を表す指標と考えられる。しかし、焦点における Γm の負の値および Γm の負の領域の物理的な意味とその妥当性については、別途議論を要する。

ここで、従来の自由水と拘束水という区分概念にならい、図-4.11 中の点 A に位置するモルタル中の自由水を考えた場合、これを「見かけ上は変形性に寄与しない自由水比（図中 α と表記）」と「見かけ上の変形性に寄与する自由水比（図中 β と表記）」の 2 つに区分して捉えることもできる。 α の「見かけ上は変形性に寄与しない自由水比」の影響は、見かけ上はフローの広がりとして現れないが、モルタルが変形し始める以前であっても、粒子間隔に関する粒子の状態には確実に変化をもたらしていると考えべきである。見かけ上、変形性を有するかどうかは、単にモルタルが自重によって流動変形するかどうかで判断されるが、この見かけ上の基準はフローコーンのサイズを変えて自重の影響の程度を変えれば異なるはずのものであり、機構面から見れば絶対的な基準とは言えない。

つまり、機構に基づいて定義すべき自由水比は、見かけ上は変形性に寄与していないように見える水粉体容積比 α も含めた、焦点以上の $WcsP$ であると言える。言い換えれば、フローが発現するのに最低限必要な水量以上の水という概念では、粒子間距離に関わる粒子の状態を捉え切れておらず、見かけ上の変形が開始する以前の粒子間距離の影響をも反映する“焦点以上の $WcsP$ ”は、より一般性の高い新たな自由水の概念と言える。

なお、負の Γm という概念は仮想的なものであり、 $WcsP$ - Γm 関係の焦点も、現実には実質的な練混ぜができない仮想の状態であるが、変形性を考える上では極めて重要な概念と考えている。図-12 に示すように、 $WcsP$ と Vw/Vp の関係は SP 添加量毎に線形の関係 (R^2 が 0.93 以上) にあることから、焦点 ($WcsP=0.88$) における Vw/Vp を各々算出すると、63.5~78.4%の範囲であった (平均: 74.06, 標準偏差 σ : 3.83)。 SP/C が極めて少ない ($< 0.3\%$) の場合に平均値との大きな乖離が生じたが、それを除けば、 σ は 2.24 であり、十分にほぼ一定の Vw/Vp を示していると判断される。一方で、焦点を結ぶと言うことは、 SP 添加量によらず (仮想の) Γm が一定であることを考え合わせると、この焦点では、配合条件に依存せず、変形性が一定である特異的な状態であると見なせる。つまり、この焦点では自由水がゼロの状態と解釈することもできる。

以上より、流動性状の支配機構に基づいて、流動に寄与する水 (自由水) と寄与しない水 (拘束水) を捉えると、焦点位置に相当する Vw/Vp (70%程度) 以外の水こそが自由水として定義すべき水であり、他方、これ以下の水は拘束水として、 SP 添加量に関わらず一意に定義すべき水 (絶対拘束水) であることが明らかとなった。なお、焦点位置に相当する Vw/Vp に関する詳細な検討は、第7章で述べることとする。

4.5 第4章のまとめ

モルタルに一定の遠心力を作用させたときの浮き水の量と粉体容積との比である遠心分離水比 $WcsP$ は、変形性 (Γm) や粘性 (Rm) といった流動性状と特徴的な関係を示し、また、配合条件に対しても特徴的な関係を示した。このことから、 $WcsP$ の持つ意義を詳細に考察した結果、以下の知見が得られた。

(1) $WcsP$ と Γm は直線関係にあり、 SP 添加量 (SP/C) に応じてその傾きと切片が変化し、この直線群は、 Γm が負の領域で焦点を結ぶように位置した。さ

らに、この焦点における V_w/V_p は、 SP/C によらずほぼ一定の値（70%程度）を示した。このことより、この焦点におけるモルタルの状態は、言うなれば“自由水がゼロ”の状態であり、この焦点を原点とする $WcsP$ こそが、流動性に寄与する自由水を定義するべきものであることを明らかにした。

（2）同時に、この焦点以下の V_w/V_p では、配合（ V_w/V_p や SP/C ）に依存せず流動性が一定であったことから、配合に依存せず一定の流動性に寄与しない拘束水（絶対拘束水）を見出した。

（3）このときの遠心加速度条件としては、概ね 500～1000G 程度であれば、最適な加速度条件を求めなくとも、本来定義すべき焦点からの $WcsP$ が自由水を示す指標（ WfP ）であり、十分に流動性を記述することが可能であることが分かった。

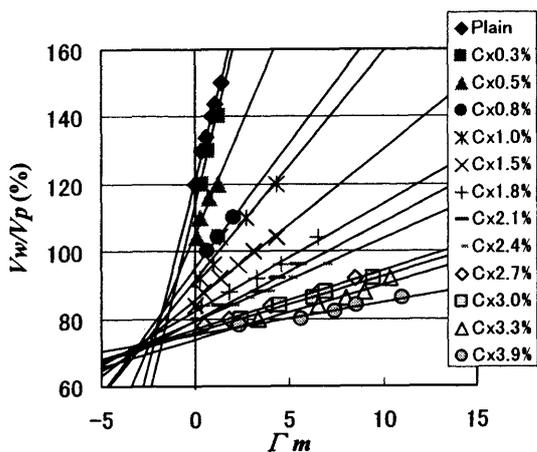


図-4.3 Γm と Vw/Vp の関係

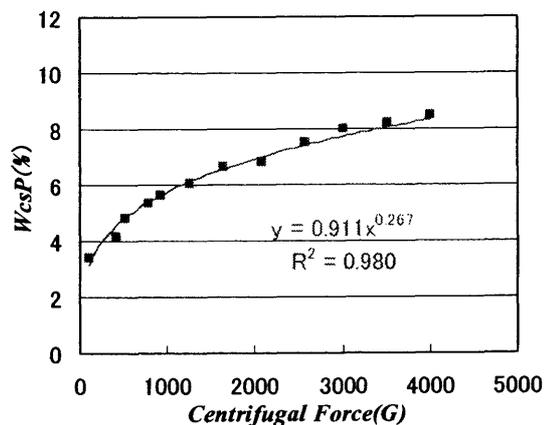


図-4.4 遠心加速度と $WcsP$ の関係

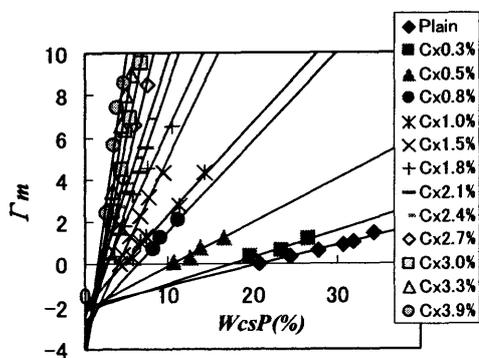


図-4.5 $WcsP$ と Γm の関係
(906G)

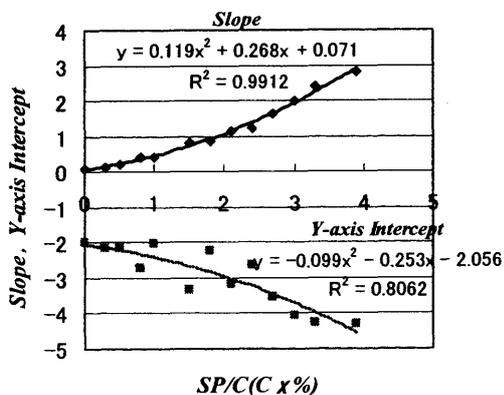


図-4.6 SP添加量と $WcsP$ - Γm 直線の
傾き・切片の関係 (Γm)

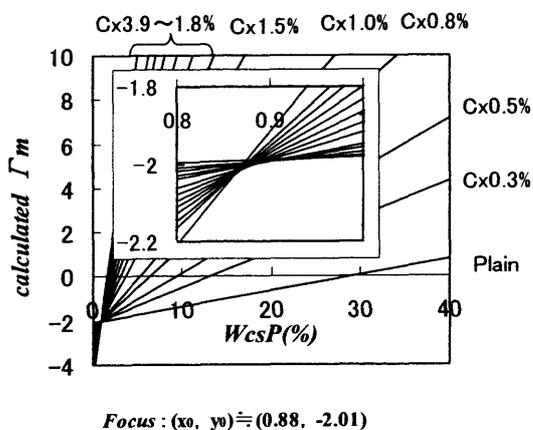


図-4.7 $WcsP$ と Γm の算定値との関係

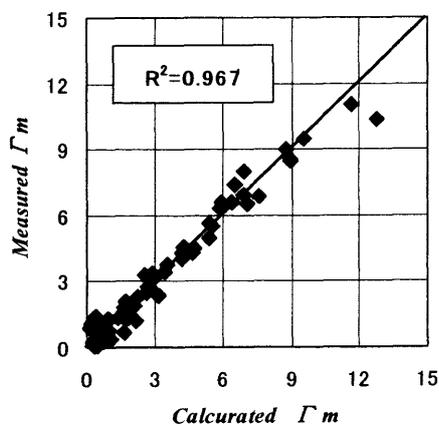


図-4.8 Γm の算定値と実測値
の関係

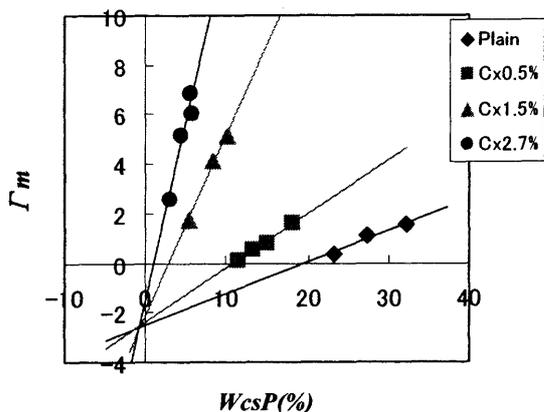


図-4.9 WcsP と Γ_m の関係 (509G)

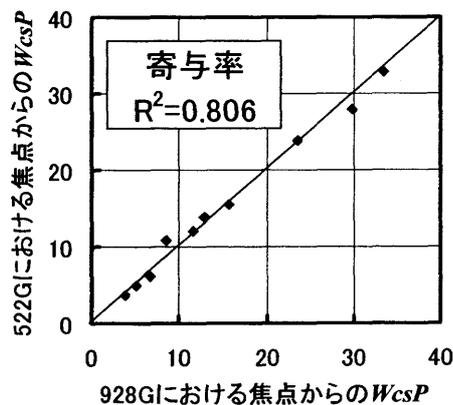


図-4.10 焦点からの WcsP (509G と 906G の比較)

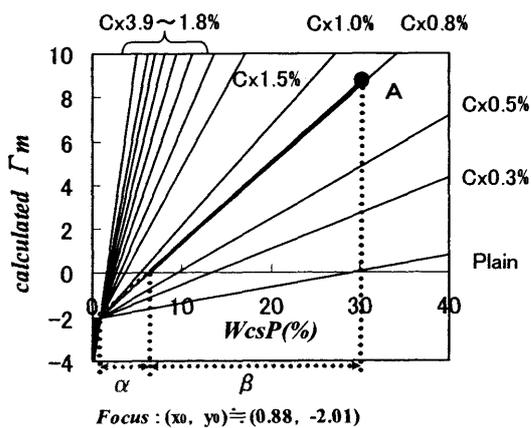


図-4.11 WcsP と Γ_m の算定値との関係

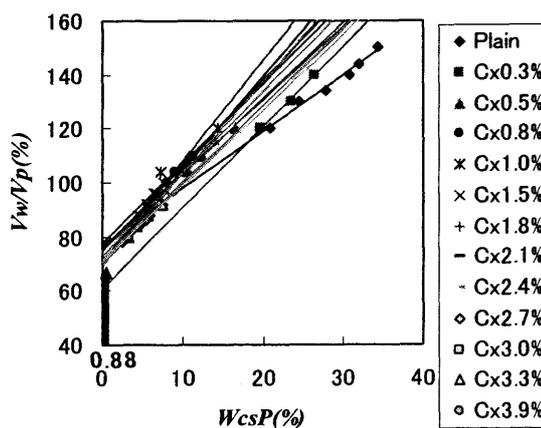


図-4.12 WcsP と V_w/V_p の関係

【参考文献】

- [1] 岡村甫ほか：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，pp. 39-42，1993. 9
- [2] 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考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25，2003
- [3] 枝松良展：モルタルの変形性を表す細骨材・粉体の材料特性の定量化，東京大学学位論文，pp. 8-14，1995. 9

第5章

自由水比を用いた粒子の 分散・凝集状態の考察

第5章 自由水比を用いた粒子の分散・凝集状態の考察

第4章で遠心分離水量から定義される遠心分離水比 ($WcsP$) は厳密には流動に寄与する水を示す指標ではなく、焦点からの差として表される $WcsP$ 、すなわち、 $WcsP$ から 0.88 を差し引いたものが、自由水比 (WfP) であることを述べた。本章では、実験概要は第4章と同様であるが、これに漏斗試験と SP 吸着量試験の結果を追加して、粒子の分散・凝集状態や粒子間の摩擦に関して考察する。

5.1 実験概要

実験概要は第4章と同様であるため、ここでは、漏斗試験と SP 吸着量試験の試験方法について示す。

5.1.1 漏斗試験

JSCE-F 512-1999「高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法(案)」に規定される高流動コンクリート用のV漏斗を参考として、図-5.1に示す寸法のV漏斗にモルタルを詰め、流下時間を測定した。

この流下時間 (t) から式 (5.1) によって得られる相対漏斗速度比 (Rm) を粘性の指標とした [1]。

$$Rm = 10/t \quad (5.1)$$

ここで、 t : V漏斗流下時間 (s)

5.1.2 SP 吸着量の測定

本研究で行った実験における SP/C の範囲内で、 SP 吸着量が飽和吸着に達して

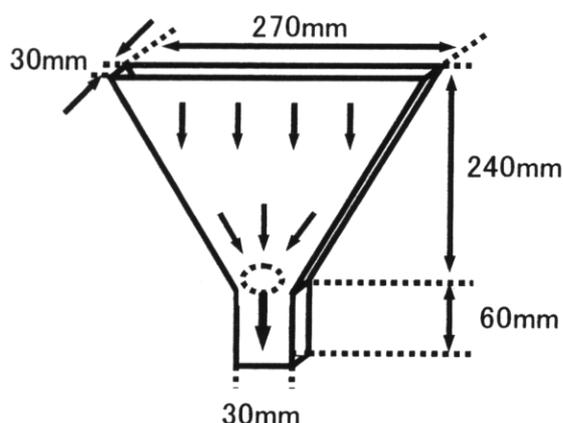


図-5.1 漏斗試験

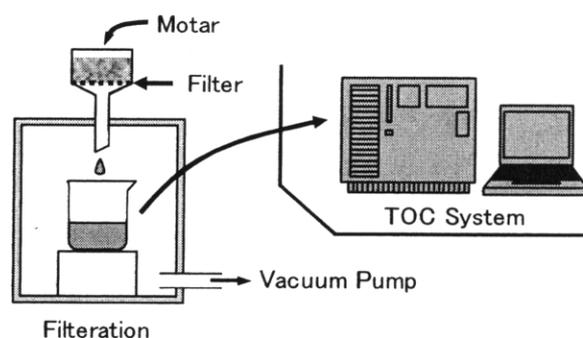


図-5.2 SP 吸着量の測定

いるか否かを確認する目的で、一部、 SP 吸着量の測定を行った。まず、吸引濾過により、練り混ぜられたモルタルの液相部を抽出し、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 $TOC-V$ ）で測定した。そして、練混ぜ水中の有機炭素濃度との差から、見かけの SP 吸着量を測定した。測定は、 $V_w/V_p=88\%$ 一定で、 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%としたモルタルを対象とした（図-5.2 参照）。

5.2 実験結果

5.2.1 自由水比と変形性の関係 (WfP と Γm)

新たに WfP を求め、 Γm との関係を図-5.3 に示す。

$WfP-\Gamma m$ 直線は SP 添加量の変化によって、 Y 軸上で焦点を結ぶように位置していることがわかる。このときの SP 添加量と各直線の傾きの関係は図-5.4 に示す通りとなり、式 (5.2) のように定式化される。

$$\Gamma m = (0.119 \cdot SP/C^2 + 0.268 \cdot SP/C + 0.071) \cdot WfP - 2.009 \quad (5.2)$$

5.2.2 自由水比と粘性の関係 (WfP と Rm)

(1) 遠心加速度 906G における検討

$V_w/V_p=80\sim 150\%$ 、 $SP/C=C \times 0.0\sim 3.9\%$ の配合条件において、各 SP 添加量ごとに、 V_w/V_p を変化させた場合の WfP と Rm の関係を図-5.5 に示す。

低い SP 添加量におけるデータ数が若干少ないが、 SP 添加量が一定であれば、 SP を添加しないプレーンモルタルの場合も含めて、 V_w/V_p の増減に伴う WfP と Rm の関係は線形となった。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していくが、ある SP 添加量を超えると、式 (5.3) で表される一定の線形関係に収束する傾向を示した ($R^2=0.953$)。

$$Rm = 0.417 \cdot WfP - 0.760 \quad (5.3)$$

図-5.6 に、各 $WfP-Rm$ 直線の傾きおよび切片と SP 添加量の関係を示す。なお、プレーンモルタルのデータのみ若干傾向が異なるため、図中に示した回帰式では、プレーンモルタルのデータは除いている。

$WfP-Rm$ 直線の変化の特徴は主に切片の変化に表れており、 SP 添加量の増加に伴い、 $WfP-Rm$ 直線が図中の左ないし上に大きくシフトしていく SP 添加量の範囲では、切片の変化に顕著な累乗の関係が見られ、式 (5.3) で表される一定の

線形関係に収束する SP 添加量の範囲では、当然ながら切片はほぼ一定となっている。この傾向は Y 切片ではなく、 X 切片で見れば、プレーンモルタルを含めても同様のことが言える。このように、 SP 添加量に応じて $WfP-Rm$ 直線の傾向が大きく異なる2つの領域が存在すると考えられる。

なお、2つの領域の境界付近では、 $WfP-Rm$ 直線のシフトの程度が小さくなるので、両者の境界となる SP 添加量を厳密に特定することはできないが、その境界は大よそ SP 添加量 $C \times 1.0\%$ と 1.5% の間あたりと考えられる。

一方、直線の傾きは、 SP 添加量の増加と共に僅かに減少するが、全域にわたりほぼ一定である。

ちなみに、 Rm を WfP と SP 添加量 (SP/C) を用いて表すと、以下の通りである。

$$Rm = (-0.179 \cdot SP/C + 0.917) \cdot WfP - 3.351 \cdot SP/C - 1.577 \quad (5.4)$$

なお、式(5.4)を用いた SP 添加量と WfP による Rm の推定値は、 $C \times 0.5\%$ 以上のデータに関しては高い寄与率 ($R^2=0.935$) を示すが、プレーンモルタルおよび SP 添加量 $C \times 0.3\%$ の場合には、実測値と乖離する。プレーンモルタルのデータは、傾向が大きく異なったので、そもそも定式化の際に考慮していないが、 SP 添加量 $C \times 0.3\%$ の場合の乖離が大きいのということは、この状態が、それ以上の SP 添加量の場合とは異なり、プレーンモルタルに近い状態であることを示唆していると考えられる。

(2) 遠心加速度 509G における検討

遠心加速度を 509G としたときの WfP と Rm の関係を図-5.7 に示す。509G の場合は、遠心加速度が低いため、同じモルタルに対しても、遠心によって浮き水として分離される水が 906G の場合より少なく、 $WcsP$ が小さくなるが、焦点からの $WcsP$ である WfP と Rm の関係を示す図-5.7 では、両者の $WfP-Rm$ 直線がほぼ一致することが分かる。

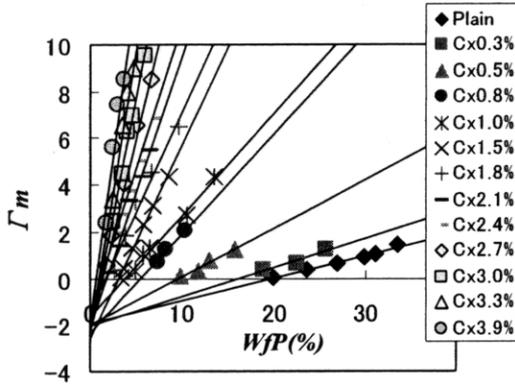


図-5.3 WfP と Γ_m の関係 (906G)

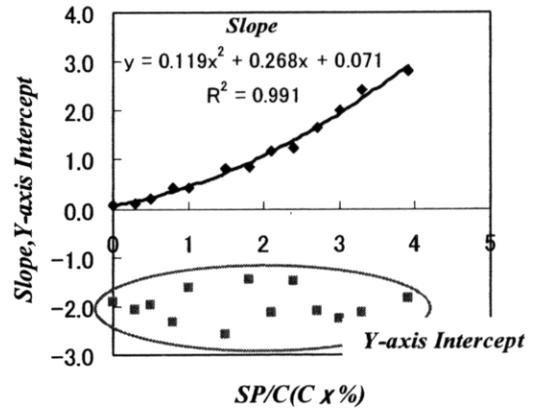


図-5.4 SP/C と傾き・切片 (Γ_m)

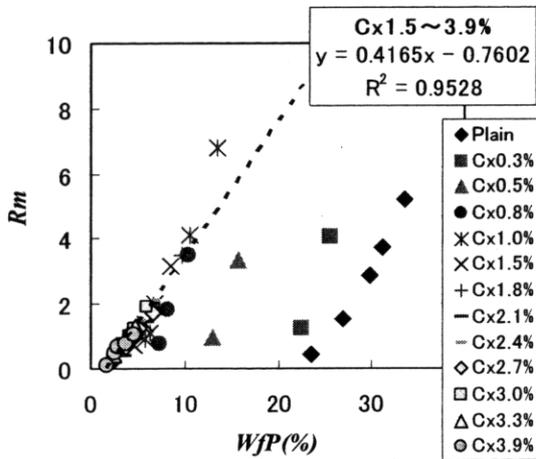


図-5.5 WfP と R_m の関係 (906G)

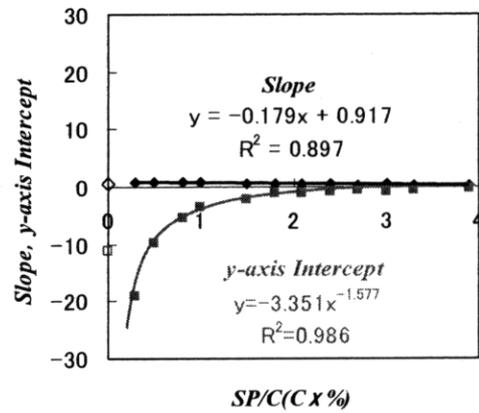


図-5.6 SP/C と傾き・切片 (R_m)

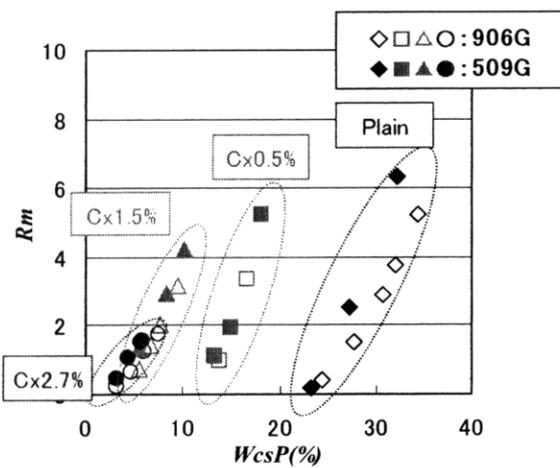


図-5.7 WfP と R_m の関係 (509G)

5.3 考察

自由水の定量化は、相対的な粒子間距離あるいは粒子の接触頻度を示す状態量の定量化であり、粒子の分散・凝集状態に関する情報を得るための非常に有効であると考えられる。一方で、変形性や粘性のような流動性状は、粒子の接触頻度と粒子同士の摩擦によって定まる性状であるため、接触頻度が定めれば摩擦に関する情報を得ることが可能であると考えられる（図-5.8 参照）。

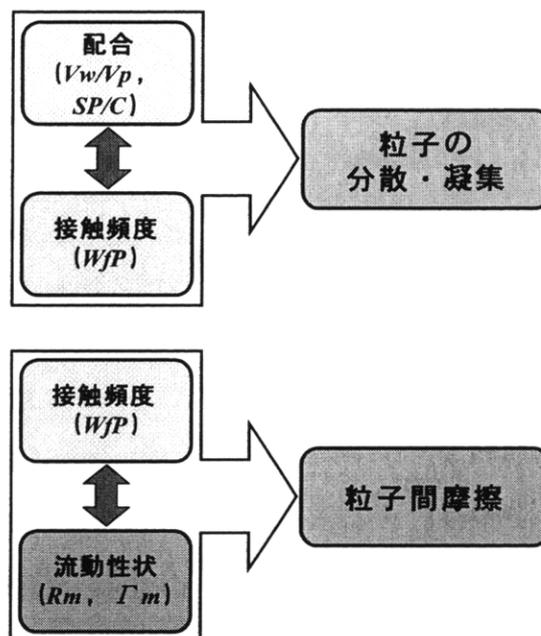


図-5.8 考察の流れ

5.3.1 配合条件と自由水並びに自由水と粘性の関係から見た凝集形態区分

フレッシュモルタルの自由水比 (WfP) の同定手法を確立したことにより、配合条件に応じた WfP の変化を分析することで、流動性状の支配機構に関わる様々な検討を行うことが可能となった。図-5.9 は、異なる Vw/Vp ごとの SP/C と WfP の関係を示したものである。

ここで着目すべき特徴は、 SP/C が低い領域では、 SP/C を増加させると、 WfP が減少する傾向を示すのに対して、 SP/C が高い領域では、 SP/C を増加させても、 WfP はほとんど変化しないことである。このことから、少なくとも、 SP 添加量が $Cx1.0\%$ と 1.5% の間付近を境として、配合条件、特に SP の添加が WfP に与える影響が大きく変化するものと考えられる。

次に、 SP/C ごとにマーカーを変えた

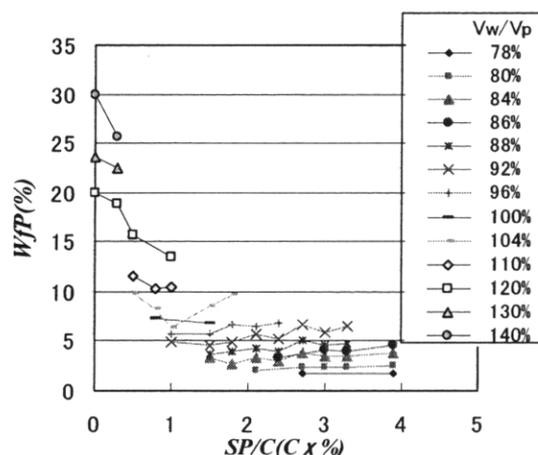


図-5.9 SP/C と WfP の関係

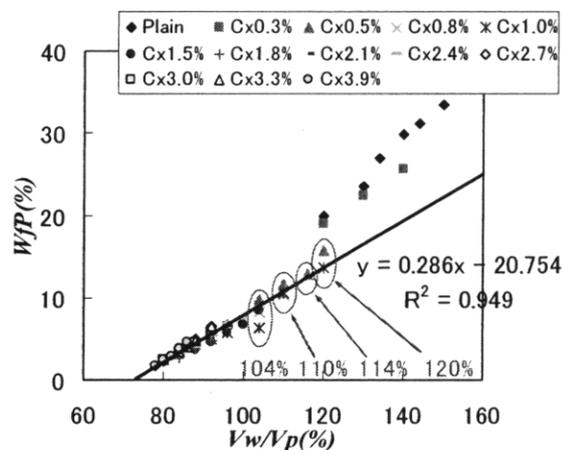


図-5.10 Vw/Vp と WfP の関係

V_w/V_p と WfP の関係を図-5.10 示す。ここで着目すべき特徴は、まず、 SP 添加量が $C \times 0.5\% \sim 3.9\%$ の広い範囲にわたって、 V_w/V_p と WfP の関係が、 SP/C に関わらず、以下に示す一定の線形性を示すことである。

$$WfP = 0.2858 \cdot V_w/V_p - 20.754 \quad (5.5)$$

また、プレーンモルタルと SP 添加量が微少である $C \times 0.3\%$ の場合は、 V_w/V_p と WfP の関係が、式(5.5)で表した線形関係から、 WfP が多い側に大きく外れることである。このことから、少なくとも、 SP 添加量が $C \times 0.3\%$ と 0.5% の間付近を境として、配合条件、特に SP の添加が WfP に与える影響が大きく変化するものと考えられる。

以上のように、 SP/C と V_w/V_p のそれぞれの配合条件変化に対する WfP の変化の傾向を分析したところ、 V_w/V_p の変化に対しては、 $C \times 0.3\%$ と 0.5% の間に変化の傾向が見られ、 SP/C の変化に対しては、 SP 添加量が $C \times 0.3\%$ と 0.5% の間付近および $C \times 1.0\%$ と 1.5% の間付近の2つの特異点の存在が認められる。

SP の添加は、粒子の反発作用を増大させると共に、粒子の凝集形態に大きな影響を及ぼすと考えられる。 WfP は粒子間距離や粒子相互の接触頻度を代表する指標であるが、粒子の反発作用の増大によって粒子間距離そのものが変化するとはいえにくいことから、 SP/C の変化に伴う WfP の変化の傾向は、主に凝集構造の特徴的な変化を示唆するものと考えられる。すなわち、 SP/C の変化に応じた粒子の凝集形態は、少なくとも、上記の2つの特異点を境界として、特徴の異なる3つの領域に区分できるものと考えられる。本論文では、 $C \times 0.0 \sim 0.3\%$ を強凝集領域、 $C \times 0.5 \sim 1.5\%$ を遷移領域、 $C \times 1.5\%$ 以上を分散領域と3つに区分した。以下に配合条件と自由水ならびに自由水と粘性の関係から見た凝集領域に関して詳細に述べる。

(1) 配合条件と自由水の関係から見た凝集領域区分

① 強凝集領域

まず、図-5.10に見られるように、プレーンモルタルおよび SP 添加量 $C \times 0.3\%$ の場合における V_w/V_p と WfP の関係は、明らかに式(4)で表される直線関係から外れており、なおかつ、この直線より WfP が多い側に位置していることが特徴である。自由水が著しく多いということは、逆に拘束水が極端に少ないことを意味しており、粒子の分散性が悪いと考えられるプレーンモルタルや SP 極低添加モルタルの特徴としては、吸蔵水を内包する凝集体を想定する従来の凝集解消の概念から考えると、一見して極めて不自然である(図-5.11 Case1 参照)。

しかし、プレーンないし SP 極低添加状態では、粒子の分散が極めて不十分で

あり粒子表面の濡れ性が十分に確保されず、ペンジュラーあるいはファニキュラー状態を残した状態、すなわち粒子表面に水と接触していない乾いた部分があり、凝集体内の一部に空気を内包していると考えれば、上記の一見奇異に見える自由水の傾向も辻つまが合う（図-5.11 Case2 参照）。つまり、図-5.10に見られるプレーンないし *SP* 極低添加の場合の傾向は、粒子と練混ぜ水との接触や

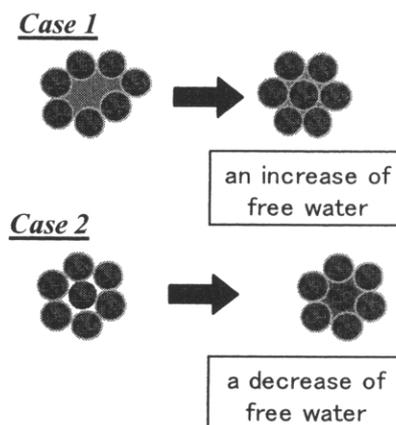


図-5.11 *SP* 添加に伴う凝集体の解消に関する概念図

粒子の分散が十分であれば、本来、粒子の表面吸着水や初期水和あるいは粒子間充填水として拘束水に分類されるべき水の一部が、自由水として自由空間に残存しているために、遠心分離によって浮き水として捕捉されたものと考えられる。

このような凝集状態の変化の考察は、田澤ら [2] が示した分割練りの際の一次水とセメントの比率 (W_1/C) に関して、最もトルクがかかる W_1/C では、単位容積重量が最大で、ブリーディングが最小となると報告していることと整合している。つまり、最もトルクがかかる W_1/C では、ペンジュラーあるいはファニキュラー状態といった水と非接触な凝集体に対して、最も効率的にせん断力が作用し凝集体を破壊するものと考えられる。このことは、比較的大きな機械的エネルギーを作用させて初めて凝集体が破壊に至るほど、強固な凝集体であることを示していることになるが、何れにしても、拘束水の増加（自由水の減少）をもたらす結果、単位容積質量が最大となり、ブリーディングが最小になることに繋がると考えられる。

なお、このように、水と接触していない面を内包した凝集体は、非常に強い凝集力によって形状が保持され、かつその寸法も比較的大きいと考えられるため、凝集体の噛み合いによる流動抵抗は非常に大きいと考えられる。したがって、図-5.10に見られるように、 V_w/V_p を相当に大きくしなければ、流動に必要な粒子間距離が確保されず、計測可能な流動性を得ることができないものと考えられる。

このように、プレーンないし *SP* 極低添加の場合に見られる凝集形態は、極めて特徴的かつ強固なものであり、「強凝集領域」と見なすことができる。

② 遷移領域

次に、*SP* 添加量が $C \times 0.5\%$ 程度から 1.0% 程度までの中間領域の傾向について

て考えてみる。この間の WfP の変化は、図-5.9 で見れば、 SP/C の増加に伴って WfP は減少していく傾向から WfP がほとんど変化しない傾向に変わる中間領域であることが分かる。また、図-5.10 で見ると、 SP 添加量が $C \times 0.5\%$ 以上であれば、式(5.5)で表される線形関係に十分に従っているように見受けられる。

しかし、この遷移領域を詳細に見てみると、図-5.9 で SP/C の増加に伴って WfP が減少していく傾向を示す $Vw/Vp=120\%$ および 110% や、 SP/C の増加に伴って WfP が変化しない $Vw/Vp=100\%$ や、減少傾向から一転増加傾向に転ずるように見える $Vw/Vp=100\%$ と SP/C 増加に伴う WfP の変化は様々である。特に、図-5.9 において右下がりの傾向を形作っている $Vw/Vp=104\%$ 、 $SP/C=C \times 1.0\%$ のデータは、図-5.10 では、式(5.5)で表される線形関係からの乖離が大きいこと、さらに、このときのモルタルの状態は、水セメント比がある程度高くなければ、測定可能な流動性を得ることが難しい状態であることなども考え合わせると、測定誤差の可能性も否定できない。つまり、この $C \times 0.5 \sim 1.0\%$ の SP 添加量の範囲では、配合条件に対して WfP の安定性が十分でない印象は拭えず、また、水セメント比がある程度高くなければ、測定可能な流動性を得ることが難しい状態であることなどから、この中間領域は、 WfP が減少から一定に転ずる領域、すなわち強凝集領域からの「遷移領域」と捉えるのが妥当と考えられる。

なお、この領域の特徴は、後述する WfP と Rm の関係において、より明確に確認することができる。

③分散領域

最後に、図-5.9 において、 SP 添加量が $C \times 1.5\%$ 以上の範囲で確実に認められ、 SP/C の変化に関わらず WfP がほぼ一定と見なすことができる安定領域について考えてみる。この SP 添加量の範囲では、 SP 添加量にまったく依らずに、 Vw/Vp のみで WfP が規定されていることから、凝集の分解が進んだ状態であると考えられる。また、 SP 添加量が $C \times 3.9\%$ という相当に粒子が分散していると考えられる SP 高添加域まで同様の傾向が安定的に認められることから、この領域は、セメント粒子の「分散領域」と見なすのが妥当と考えられる。

なお、これらの①強凝集領域、②遷移領域、③分散領域という領域区分の妥当性については、次項(2)で論じる WfP と Rm の関係における傾向も踏まえて、再度考察を行う。

(2) 自由水と粘性の関係から見た凝集領域区分

図-5.5 および図-5.7 に示した異なる SP 添加量ごとの WfP と Rm の関係を見れば、 $WfP-Rm$ 直線が、 SP 添加量の増加に伴って図の左側にシフトしていく領

域と、一定の線形関係に収束する傾向を示す領域の2つの領域が存在することは明らかである。そして、これら2つの領域の境界は、大よそ SP 添加量 $C \times 1.0\%$ と 1.5% の間付近と考えられ、これは、前項(1)で述べた配合条件と自由水の関係からみた凝集領域区分における遷移領域と分散領域の境界に合致している。したがって、配合条件と自由水の関係からみた凝集領域区分と同様に、 $WfP-Rm$ 直線がシフトしていく SP 添加量が $C \times 1.0\%$ 程度以下の領域を「強凝集領域」および「遷移領域」とし、また、一定の線形関係に収束する傾向を示す $C \times 1.5\%$ 程度以上の領域を「分散領域」として、以降の議論を進める。

なお、 SP の添加は、粒子の反発作用を増大させると共に、粒子の凝集形態に大きな影響を及ぼすことから、厳密に言えば、現段階では、粒子の反発作用と粒子の凝集形態変化のいずれもが、粘性を表す指標 Rm に影響を与える可能性を否定できない。しかし、配合条件と自由水の関係から見た凝集領域区分と、 WfP と Rm の関係における領域区分の範囲が一致したことから、 SP/C の変化に伴う Rm の変化の傾向も、主に凝集形態の特徴的な変化を示唆するものと考えて差し障りの無いものと考えられる。

① 強凝集領域

強凝集領域の存在については、前項(1)の配合条件と自由水の関係においては明確に認められたものの、図-5.5に示した WfP と Rm の関係では明確には認められない。しかし、 $WfP-Rm$ 直線の全体の傾向を捉えている Rm の推定式(5.4)を用いても、強凝集領域にあたるプレーンモルタルおよび SP 添加量 $C \times 0.3\%$ の傾向を再現できないことは、これらが遷移領域とは大きく異なる状態であることを示唆するものと考えられる。

② 遷移領域

前項(1)の配合条件と自由水の関係からのみでは、強凝集領域と分散領域の中間領域を「遷移領域」と断定するには遷移状況の確認が十分ではなかったが、 SP 添加量の増加に伴って $WfP-Rm$ 直線がシフトしていく様子は、この領域を強凝集領域から分散領域への遷移領域と捉えることの妥当性を強く示唆するものと考えられる。なお、この遷移領域における凝集形態変化については、後述する5.3.3(2)項において、より詳細に論じることとする。

③ 分散領域

SP 添加量が $C \times 1.5\%$ 程度以上では、 WfP と Rm の関係が、ほぼ式(5.3)で表される一定の線形関係を示すことは特筆に値する。 Rm は粘性を表す指標であるが、広い SP 添加量範囲にわたるこのような安定した性状は、 SP の効果により凝集が解消され粒子が十分に分散した状態でなければ認めにくいと考えられる。こ

のような特徴的な傾向も SP 添加量が $C \times 1.5\%$ 程度以上の領域を「分散領域」と捉えることの妥当性を裏付けるものと考えられる。

5.3.2 Γm および Rm と粒子間摩擦

(1) 2種類の粒子間摩擦 - 凝集体等表面摩擦と凝集体内部摩擦 -

強凝集領域・遷移領域は、粘性の指標である Rm が SP 添加量と WfP の双方に依存する領域で、分散領域は、ある一定の SP 添加量を超えた場合に、 SP 添加量によらず WfP のみに依存する領域と捉えることができる。一方で、 WfP は粒子同士の接触頻度を表す指標であり、 SP 添加量は粒子同士の摩擦の程度に支配的な影響を与える指標と考えられることから、強凝集領域・遷移領域では、粘性は粒子の接触頻度と摩擦に依存し、分散領域では、摩擦は既に一定に達し、粘性は接触頻度のみに依存すると捉えることもできる。

すなわち、 Rm に影響を及ぼす摩擦は、 SP 添加量が $C \times 1.5\%$ 程度までにはほぼ一定になっており、 SP 添加量を $C \times 1.5\%$ 程度以上に増やしても、もはや低減しないと考えられる。しかし、一方で、 SP 添加量が $C \times 1.5\%$ 程度以上の分散領域であっても、図-5.4 に示すように、 WfP - Γm 直線の傾きは SP 添加量の増加に伴って増加しており、 Γm に影響を及ぼす摩擦は、 SP 添加量が $C \times 1.5\%$ 程度以上の領域であっても継続的に低減していくと考えられる。このことから、主に Rm に影響を及ぼす摩擦と主に Γm に影響を及ぼす摩擦は、性格の異なるものであり、粒子間摩擦には2つの種類が存在すると考えられる。

2.2.6 項で、粘性、変形性ともに、粒子間の接触頻度と摩擦の程度に依存する性状であり、両者の違いは、接触頻度と摩擦への依存の度合いやその仕方や内容が異なる点にあると述べたが、実際には、両者に影響を及ぼす摩擦の種類が異なっていると解釈するのが妥当であると考えられる。

ここで、粒子間摩擦について再度整理すると、粒子間摩擦には粒子表面の粗度等の粒子形状による物理的影響を受ける摩擦のほかに、粒子表面の界面化学的な摩擦を考える必要がある。このとき、物理学的な影響を受ける摩擦とは、一つの粒子の表面粗度だけではなく、凝集体を形成する様な場合には凝集体の形状等によっても変化すると考えられる。本研究の範囲では、粒子個々の表面粗度は同じと考えるべきであり、物理的な影響とは凝集体の形状（凝集径）に依存すると考えて良いと考えられる。Stöber は、塊状あるいは、鎖状の凝集体について、その構成粒子数と動力学的形状係数（粒子に作用する流体抗力/同体積の球に対する抗力）との関係を実験的に示しており、粒子構成数が増加すると動力学的形状係数が増加すると述べている [3]。このことは、凝集形態に起因する粒子形状によ

っても、粒子間の摩擦が変化することを示していると考えられる。

SP の添加は、粒子の反発作用を増大させると共に、粒子の凝集体をほぐすと考えられるが、この効果を摩擦という観点から捉えれば、粒子の反発作用の増大は、粒子（凝集体を含む）の界面化学的な表面摩擦の低減と捉えられ、凝集をほぐす効果は、凝集体の形状や形態に起因する物理的な摩擦の低減と捉えられる。

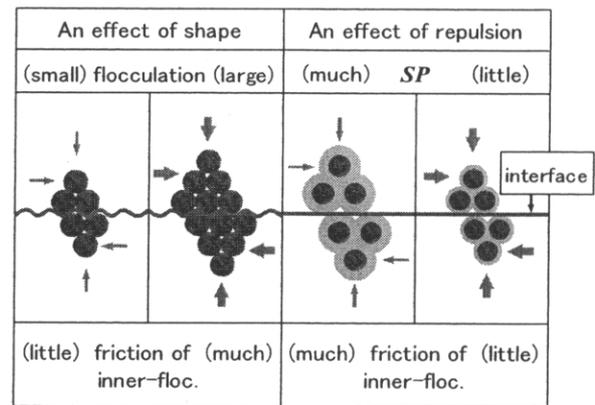


図-5.12 固体粒子間の摩擦に関する

図-5.12 に固体粒子間の摩擦に関する

概念図を示す。ただし、凝集体の形状に関わる摩擦は、凝集体内部の摩擦を考慮する必要があり、例えば凝集体内部の粒子間摩擦がゼロであれば、当然のこととして凝集体の形状に関わる摩擦もゼロである。したがって、より厳密にこれらの摩擦を定義するならば、凝集体を1つの粒子と捉え、凝集体表面の電気化学的摩擦（以下、凝集体等表面摩擦）と凝集体内部の摩擦（以下、凝集体内部摩擦）の2種類の摩擦が作用していると考えらるべきである。

なお、後者は内部の摩擦だけでなく、凝集体の径にも依存する摩擦である。

(2) Γm に影響する摩擦と Rm に影響する摩擦

ここまでの議論で、**SP** の添加には、凝集体等表面摩擦の低減と凝集体内部摩擦の低減の2つの異なる効果があり、また、主に Rm に影響を及ぼす摩擦と主に Γm に影響を及ぼす摩擦は別々のものと考えられることを述べてきた。そこで、 Rm と Γm のそれぞれに影響を及ぼす摩擦が、凝集体等表面摩擦と凝集体内部摩擦のいずれであるのかを簡単に論じておきたい。

結論から先に言えば、直感的に考えて、主に Γm に影響を及ぼす摩擦が凝集体等表面摩擦であり、主に Rm に影響を及ぼす摩擦が凝集体内部摩擦と推察される。

先に述べたように、分散領域では、 Rm に影響を及ぼす摩擦は既に定常に達しているが、 Γm に影響を及ぼす摩擦は、依然として **SP** 添加量の増加に伴って低減する。また、凝集体内部摩擦が定常に達する理由としては、**SP** による凝集解消作用が頭打ちになることが考えられ、凝集体等表面摩擦が定常に達する理由としては、セメント粒子に対する **SP** の吸着量が飽和に達することが考えられる。ここで、仮に、凝集体等表面摩擦が定常となった状態で、凝集体内部摩擦が低減され続けるとすれば、**SP** 吸着量が飽和に達しているにも関わらず、凝集の解消はなおも続いていることになり、明らかに不合理である。