

## 論文 モルタルの流動性保持機構に関する研究

前山篤史\*<sup>1</sup>・丸山久一\*<sup>2</sup>・坂田昇\*<sup>3</sup>・緑川猛彦\*<sup>4</sup>

**要旨:** 本研究は、モルタル中の自由水量および高性能減水剤残存量を基に、高流動コンクリートにおけるスランプフローロスメカニズムについて検討したものである。スランプフローロスは固体粒子が近づくことにより生じるという観点から、測定された自由水量や高性能減水剤残存量を、粉体粒子表面に作成される膜厚に換算することにより考察した。

その結果、モルタルのフローロスが大きくなるにつれて、自由水量や高性能減水剤残存量が低下していることが確認され、また、自由水量および高性能減水剤残存量と粒子間距離とを関係付けるモデルによりスランプフローロスメカニズムを説明することができた。

**キーワード:** 高流動モルタル, 水膜モデル, 自由水, 高性能減水剤

## 1. はじめに

現在まで、高流動コンクリートおよび高流動モルタルの流動性保持に関する研究が多く行われてきている<sup>1)</sup>。一般的に、高流動コンクリートの流動性を保持させる方策、言い換えればスランプフローロスを抑制する方策としては、高性能減水剤に徐放剤を添加し、高性能減水剤による粉体の分散効果を長期間持続させることが行われている。また著者らは、増粘剤としてウェランガムを用い、高性能減水剤を通常より多く添加することで、スランプフローロスの抑制を試み、実用に供している<sup>2)</sup>。

一方著者らは、高流動モルタルがスランプフローロスを生じるメカニズムについて検討し、既に報告している<sup>3)</sup>。この報告は、製造されたモルタルがスランプフローロスを生じる時、物質的な出入りが無いことから、モルタル内部の自由水量や高性能減水剤残存量 (SP 残存量) の変化が主な原因であるとしたものである。その結果、モルタル中の自由水量や SP 残存量がスランプフローロスに大きく影響していることが明らかになった。

これらの結果を踏まえ本研究は、自由水量や SP 残存量の変化が粉体粒子に及ぼす影響を、粒子間距離の観点から考察し、スランプフローロスメカニズムについて検討することとした。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料およびモルタルの配合

本実験に用いた材料を表-1 に示す。高性能減水剤は徐放剤を含まないものを使用した。モルタルの配合を表-2 に示す。モルタルの配合は細骨材容積比を 40% とし、水粉体容積比および高性能減水剤添加率はモルタルのフレッシュ性状を満足するように試験練りにより決定した。モルタルのフレッシュ性状は、スランプフロー値 65 cm およびコンクリート用 V 漏斗流下時間 15 秒を満足する、細骨材容積比=40%、粗骨材かさ容積比=50% の高流動コンクリートの配合から、粗骨材だけを取り除いて製造したモルタルのフレッシュ性状を参考に、モルタルフロー 270 ± 10 mm、モルタル用 V 漏斗流下時間 7 ± 1 秒とした。

## 2.2 実験方法

\*1 長岡技術科学大学大学院 工修 (正会員)

\*2 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 Ph.D. (正会員)

\*3 鹿島技術研究所 土木技術研究部材料・施工グループ 工博 (正会員)

\*4 福島工業高等専門学校助教授 建設環境工学科 工博 (正会員)

モルタルの練混ぜは、11.4 リットルホバートミキサを使用し、1 バッチ 5.5 リットルとした。練混ぜ方法は、細骨材・混和材・セメント・水+高性能減水剤の順で投入し、低速回 (106rpm) で 1 分間、高速回転 (196rpm) で 1 分間練り混ぜた。なお、モルタルの練上り温度は 20°C 一定とした。

モルタル製造 5 分後、モルタルフロー値および V 漏斗流下時間を測定し、以降モルタルフロー値が 200 mm 程度になるまで、30 分毎にモルタルフロー値の測定を繰り返した。

自由水率および SP 残存量の測定は、モルタルフロー値の測定と同時に採取した試料にて行った。採取した試料を遠心分離機 (3000rpm, 10 分間) にかけて、上澄水を自由水、モルタル中に留まる水を拘束水と定義した。自由水および拘束水の定義に先立って、モルタルのフロー試験より得られる相対フロー面積比と水粉体体積比との間には線形関係があるので、これを直線回帰して、相対フロー面積比が零となる水粉体体積比、すなわち直線の切片である拘束水比<sup>4)</sup>と今回定義した拘束水量との比較を数種類のモルタルについて行ったところ、両者に相関関係が見られた。よって、本研究においては、遠心分離により得られた上澄水を自由水と定義することとし、採取したモルタル中の全水量と自由水量との比率を自由水率とした。また、SP 残存量は上澄水に含まれる高性能減水剤の濃度を、紫外線吸光スペクトルにより測定し算出した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 モルタルフロー値の経時変化

図-1 にモルタルフロー値の経時変化および

自由水率、SP 残存量の経時変化を示す。モルタル製造 5 分後のフレッシュ性状を等しくしたにも関わらず各配合の経時変化は異なり、普通ポルトランドセメント単味 (OPC) や石灰石微粉末単味 (LS) のフローロスが小さく、普通ポルトランドセメント+石灰石微粉末 (OPC+LS) において最も大きくなるのが分かる。また、自由水率は経過時間に関わらず各モルタルともあまり変化がないが、SP 残存量は時間が経過するにしたがって減少する傾向を示している。

モルタル製造 5 分後の自由水率および SP 残存量を比較すると、セメント単味 (OPC) では自由水率が最も小さくかつ SP 残存量が最も大きくなっているものの、石灰石微粉末 (LS) では逆に、自由水率が最も大きくかつ SP 残存量が最も小さい傾向を示している。これらのモルタルのフレッシュ性状が等しいことを鑑みれば、用いる粉体の物理・化学的性質により自由水量や SP 残存量がモルタルのフレッシュ性状に与える影響の度合いが異なるのが分かる。言い換えれば、粘性を等しくしたモルタルにおいて同じフロー値を達成させる場合、セメント単味 (OPC) では SP 残存量により多く依存するのに対して、

表-1 使用材料

材料名	種類	主成分および物性値
セメント	普通ポルトランドセメント (OPC)	密度 3.16 比表面積 3,300cm <sup>2</sup> /g
	石灰石微粉末 (LS)	密度 2.70 比表面積 5,220cm <sup>2</sup> /g
混和材	高炉スラグ微粉末 (BS)	密度 2.89 比表面積 4,170cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュ (FA)	密度 2.31 比表面積 3,760cm <sup>2</sup> /g
	川砂 (信濃川産) (S)	密度 2.64 吸水率 1.74% F.M2.74
混和剤	高性能減水剤 (SP)	β-ナフタリンスルホン酸塩

表-2 モルタル配合

配合	混和材置換率 (%)	水粉体容積比 (%)	SP添加率 (powder x %)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )				フロー値 (mm)	V漏斗流下時間 (秒)
				W	C	P	S		
OPC	—	91.0	2.45	286	993	—	—	274	7.37
OPC+LS	50	83.0	1.60	272	518	443	1056	267	6.71
OPC+BS		89.5	1.50	283	500	458		275	7.44
OPC+FA		77.5	1.70	262	534	390		284	6.78
LS		100	72.0	0.22	251	—		942	277

石灰石微粉末 (LS) では自由水量により多く依存していることになる。

図-2 は SP 残存率の経時変化を示したものである。SP 残存率とはモルタル製造 5 分後の SP 残存量に対する各時間毎の SP 残存量の比率であり、高性能減水剤が消費される速さを相対的に表現したものである。高性能減水剤の消費速度はセメント単味 (OPC) において最も遅く、石灰石微粉末 (LS) において最も速い傾向を示している。これは、セメント単味 (OPC) においては SP 残存量の絶対量が多く、絶対量として多く消費してもまだ SP 残存量が多いためであり、一方、石灰石微粉末 (LS) は絶対量が少ないので少しの消費が SP 残存率に大きく影響するためである。セメント単味 (OPC) においてフロー値は SP 残存量に依存することから、セメント単味 (OPC) におけるフロー値の経時変化は高性能減水剤の消費速度に依存するものと考えられる。したがって、セメント単味 (OPC) においてフローロスが小さい要因は、高性能減水剤の消費速度が遅いことに起因しているものと考えられる。一方、石灰石微粉末 (LS) のフロー値は自由水量に依存することから、高性能減水剤の消費速度にあまり影響されないものと推察される。よって、今回の測定において自由水率の経時変化が小さいことが石灰石微粉末 (LS) のフローロスを小さくした要因であると考えられる。また、セメントと石灰石微粉末の混合 (OPC+LS) においては自由水率が 8% と小さくセメント単味 (OPC) に近い値であるにも関わらず、高性能減水剤の消費速度は石灰石微粉末 (LS) と同程度なため、フローロスもこれら両方の影響を受けフローロスが大きくなったものと推察される。

### 3.2 水膜モデルによる粉体粒子間距離の算定

前節において、モルタルのフロー値は粉体の種類により、自由水量と SP 残存量に依存する度合いが異なるため、これらの単純な比較のみでは、フローロスのメカニズムを解明することは困難であることを示した。フローロスの主な要因は、粉体粒子の凝集が主なものであるとの報

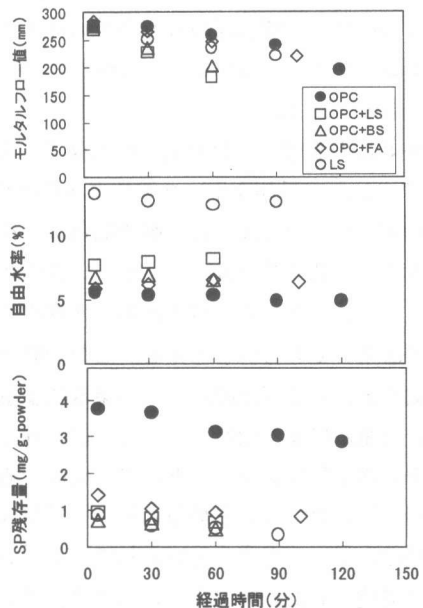


図-1 フレッシュ性状試験結果一覧

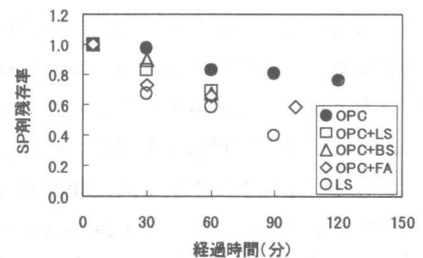


図-2 SP 残存率の経時変化

告<sup>5)</sup>もあるが、凝集現象も粒子間距離が近づくことであると考え、粒子間距離に着目しフローロスのメカニズムを検討することは有意義であると考えた。よってここでは、水膜モデルを用いて各粒子表面に作成される膜厚の算定を試みた。

#### (1) 粒子表面の膜厚とフロー値の概念

水膜モデル<sup>6)</sup>の基本概念は、「コンクリート中の水量は、粉体粒子表面に一定の厚さで固定される水の総和であると考え、粒子を取り巻く水膜の厚さが同じであれば、粉体の種類にかかわらずコンクリートは同じフレッシュ性状を示す」というものである。ただし、高流動コンクリートでは高性能減水剤が多量に添加されるため、高性能減水剤による粒子の電氣的反発力を仮定の膜と考え、この仮想膜厚と水膜厚との和

が等しければ、減水剤の有無や粉体種類に関わらずコンクリートのフレッシュ性状は等しいとするものである。

図-3に仮想膜および水膜の概念図を示す。表-2で求めた各粉体を用いたモルタルの配合は、水粉体容積比や高性能減水剤添加量は異なるもののすべて製造5分後のフレッシュ性状は同じである。したがって、粒子表面に作成される膜厚Sはすべて等しいと考える。この内訳は高性能減水剤による仮想膜厚*i*、拘束水による膜厚*r*、自由水による膜厚*f*である。高流動域のモルタルおよびコンクリートにおいては一般的に、フロー値は高性能減水剤量に依存しV漏斗流下時間は水量に依存するといわれている<sup>7)</sup>が、本研究で使用したモルタルにおいては、フロー値およびV漏斗流下時間が等しいことから、各モルタルにおいて*i*および*f+r*もすべて等しいことになる。これらの膜厚についてはある範囲内で一定としておけば良く、ここでは事前の検討<sup>8)</sup>より、 $f+r=0.162\mu\text{m}$ および*i*= $0.099\mu\text{m}$ と仮定した。配合上の水量や高性能減水剤添加量が異なるにも関わらず、各膜厚が等しくなる要因は、粉体の粒径および粒度分布、化学成分などの物理・化学的要因が異なるためである。

### (2) モルタル中の粉体粒子の特性値

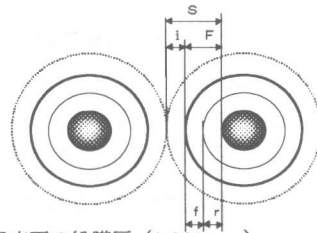
表-3に各粉体の特性を示す。この特性値は、測定された粒度分布を式(1)により表現した時のパラメータである<sup>8)</sup>。

$$V(D_p) = \rho \left\{ 1 - \exp(-BDp^C) \right\} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $V(D_p)$ ：累積質量分布関数 (%)

$D_p$ ：粒子径 (m)

$B, C$ ：分布形状を決定するパラメータ  
 パラメータBは粒子の細かさを表現するものであり数値が大きいものほど細かい粉体である。パラメータCは分布のなだらかさを表現するものであるが、 $C=1.000$ と固定することにより測定された粒度分布を良好に表現することができた。混合粉体の密度は混合割合による加重平均



- S：粒子表面の総膜厚 ( $0.261\mu\text{m}$ )
- F：水膜厚 ( $0.162\mu\text{m}$ )
- i：高性能減水剤による仮想膜厚 ( $0.099\mu\text{m}$ )
- r：拘束水による膜厚
- f：自由水による膜厚

図-3 仮想膜および水膜の概念図<sup>6)</sup>

表-3 各配合における粉体の特性値

粉体種類	密度	パラメータ B	パラメータ C	凝集比率 G
OPC	3.16	50865	1.000	3.884
OPC+LS	2.93	62227	1.000	5.786
OPC+BS	3.03	56943	1.000	4.653
OPC+FA	2.74	43482	1.000	3.936
LS	2.70	83035	1.000	10.630

とし、パラメータBは単味の粒度分布を加重平均し新たに算出した。

凝集比率の算定は、水膜が $0.162\mu\text{m}$ となるように各粉体の粒度分布を調整することにより行った。モルタル中の粉体はその粒径により、モルタル中であたかも1個の粒子のように振る舞う粒子群が存在すると考えられる。この粒子群に含まれる粒子個数を相対的な比較でとらえ、凝集比率と定義した。したがって凝集比率が大きいものほど数多くの粉体粒子が凝集しているというものである。

表-2の配合において水粉体容積比に着目する。これらの値はすべて異なっているが、モルタルのフレッシュ性状、特にV漏斗流下時間が等しいことから粒子周りの水膜厚( $f+r=0.162\mu\text{m}$ )はすべて等しくなる。逆に言えば、この水膜厚を等しくするようにそれぞれの粒度分布を評価すれば良いことになる。この時用いたパラメータが凝集比率であり、各モルタルについて計算した結果、表-3のようになった。この凝集比率は、経過時間とともに変化する自由水率やSP残存量により影響を受けると考えられるが、その影響は微小と考え、ここではモルタル

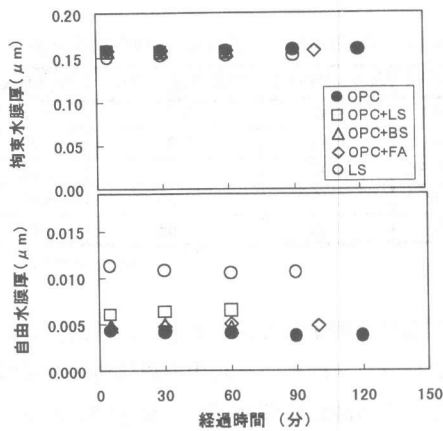


図-4 拘束水膜厚および自由水膜厚の経時変化

製造5分後の凝集比率が実験期間中変化しないと仮定した。

### (3) 粒子間距離とフローロスとの関係

各配合の水粉体容積比および時間経過後の自由水率から時間経過後の拘束水量を算定し、表-3の凝集比率を用いて、粒子周りの拘束水膜厚 $r$ を算定した。さらに水膜厚( $f+r=0.162\mu\text{m}$ )から $r$ を差し引くことにより自由水膜厚を算定した。図-4に拘束水膜厚および自由水膜厚と経過時間との関係を示す。拘束水膜厚に比較して自由水膜厚は低い値となっているが、これは流動性を付与するまでに粉体に多くの水量が必要となるためである。しかしながら、ある水量以上を与えて流動性を獲得した後のモルタルは自由水膜厚に非常に敏感であると考えられ、拘束水膜厚よりワンオーダー低い値で規定のV漏斗流下時間に達している。また、自由水率は経過時間に関わらず変化しなかった。このため拘束水膜厚および自由水膜厚とも経過時間とは無関係にほぼ一定値を示すこととなった。

高性能減水剤による仮想膜厚(SP膜厚)の算定は以下のような仮定に基づいて行った。モルタル製造後5分後の粒子に付着する水膜厚の外側に、 $0.099\mu\text{m}$ のSP膜厚を作成するために必要な水量を算定し、この水量とSP残存量が対応しているものと考え、単位SP残存量当りの水量を求めた。その後、時間経過後のSP残存量から

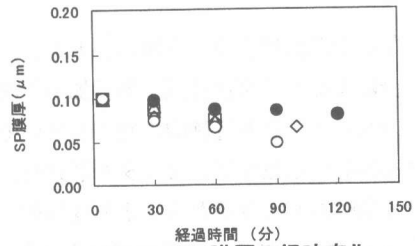


図-5 SP膜厚の経時変化

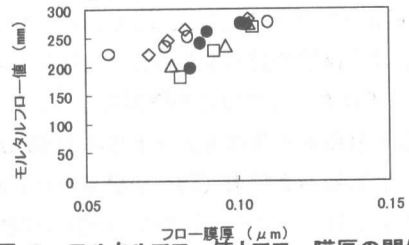


図-6 モルタルフロー値とフロー膜厚の関係

水量を逆算し、これを膜厚に変換した。図-5にSP膜厚の経時変化を示す。自由水膜厚に比較して、いずれのモルタルも時間の経過にともないSP膜厚は大きく低下して行くことがわかる。この図-5は先に示した図-2と同じ意味を持つものであるが、SP残存量と自由水率という異なる次元を持つものを距離という同次元の物理数に変換し比較しやすくしたことが本研究の特徴である。

一方、モルタルのフロー値は自由水膜厚とSP膜厚との和(フロー膜厚)に関係していると考えられる。図-6にフロー膜厚とフロー値の関係を示す。用いる粉体により傾きは異なるものの、モルタルのフロー値はフロー膜厚が小さくなるにしたがい低下して行くことがわかる。よって、フローロスのメカニズムは粉体粒子が近づくことによる降伏値の増加が主要因であると推察される。傾きの違いは高性能減水剤の消費速度を相対的な比(モルタル製造5分後のSP残存量に対する各時間毎のSP残存量の比率)として表現していることから生じると考えられ、より詳細に検討することによりこの差が少なくなり、フロー膜厚とモルタルフロー値が一意的に表現できるものと予想される。

### (4) モルタル練混ぜ時の高性能減水剤の消費高流動コンクリートを製造するに当たり、石灰

石微粉末などの混和材を用いた場合、セメント単味の場合に比較して高性能減水剤添加率が減少する傾向を示すことが経験的に知られている。このことを検討するために、モルタル製造時に添加される高性能減水剤量から求まる理論的SP残存量とモルタル製造5分後に測定されたSP残存量を比較することにより、モルタル練混ぜ時における高性能減水剤の消費量を比較した。表-4に各モルタルにおける消費量を示す。単位粉体質量当りの消費量はセメント単味(OPC)が最も多く、石灰石微粉末(LS)が最も少ない値となった。これは、セメント単味(OPC)が高性能減水剤を他の粉体に比較して多量に消費していることを示している。セメントの水和反応は接水直後一度大きく活性化し、その後ドルマント期に入り安定することが明らかになっている<sup>5)</sup>。このことから、セメント単味(OPC)を用いたコンクリートおよびモルタルについては、接水直後の数分間に高性能減水剤が多量に消費されるため、結果的に多量の添加量となることが明らかになった。

#### 4. 結論

高流動コンクリートにおけるスランプフローロスのメカニズムを検討するために、各種粉体を用いた高流動域のモルタルを用いて、自由水量や高性能減水剤残存量の経時的測定を行った。さらにその結果を踏まえ、粒子間距離の観点から考察した。本研究範囲内で明らかになった事項を以下に示す。

(1)モルタルのフロー値およびV漏斗流下時間を等しくした場合、用いる粉体により高性能減水剤や水量がそのフレッシュ性状に及ぼす影響の度合いが異なる。したがって、高流動域のモルタルのフレッシュ性状の変化について検討する場合には、高性能減水剤や水量の影響を表現する統一的な指標が必要である。

(2)このような観点から、粒子表面に作成される膜厚という物理的パラメータにより検討を行った結果、高流動域モルタルのフローロスのメ

表-4 各モルタルにおけるSP剤の消費量

粉体種類	理論SP残存量	SP残存量(5分後)	SP消費量
OPC	9.80	3.77	6.03
OPC+LS	6.40	0.91	5.49
OPC+BS	6.00	0.71	5.29
OPC+FA	6.80	1.39	5.41
LS	0.88	0.86	0.02

(単位: mg/g-powder)

カニズムを表現することができた。それによれば、フローロスとはモルタル中の粉体粒子が近くことによる降伏値の増加が主な原因であると推察される。

(3)普通ポルトランドセメントは、接水直後の水和反応が活発な時期に高性能減水剤を多量に消費すると考えられる。一方、石灰石微粉末は高性能減水剤をほとんど消費しないため、混和材として用いた場合には高性能減水剤添加量が少なくなる。

#### 謝辞

本研究の実施にあたりましては、花王(株)和歌山研究所 山室穂高氏・市川裕嗣氏、新日鐵関東エスメント(株)、長岡技術科学大学大学院 岡室雅士氏・柏木亮二氏に多大なるご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 福島正一・丸山久一・坂田昇・泉達男: 高流動コンクリートの流動性保持に関する一考察, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.1080-1081, 1995.9
- 2) 坂田昇・丸山久一・南昌義: 増粘剤ウエランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538, V-31, pp.57-68, 1996.5
- 3) 稲葉美穂子・丸山久一・皆口正一・坂田昇: 高流動コンクリートの流動性保持機構に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.129-134, 1996
- 4) 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, 1993.3
- 5) 服部健一: スランプロスのメカニズムおよびその対策, 材料, Vol.29, No.318, pp.240-246, 1980
- 6) 緑川猛彦・丸山久一・下村匠・桃井清至: 粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価方法, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.99-110, 1997.11
- 7) 大内雅博・日比野誠・小澤一雅・岡村甫: 自己充填コンクリート用モルタルの配合設計, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.19-24, 1997
- 8) 緑川猛彦: コンクリートに用いる粉体の保水機構と流動特性に関する基礎的研究, 長岡技術科学大学博士論文, 1998