論文 余剰水膜理論による摸擬セメントペーストおよび摸擬モルタルの流 動性の予測

寺西 浩司*1

要旨:余剰水膜理論によりペーストの流動性を表示することを目的とした検討を行い、(1)吸引法により粉体の実積率を測定した場合に、ペーストのフロー値を粒子分散距離により精度よく予測できる、(2)粉体の実積率が得られない場合には、ペーストの拘束水比に相当する粉体体積比を粉体の実積率と見なして粒子分散距離を計算することも可能である、などの結果を得た。また、余剰水膜理論を模擬モルタルの流動性予測に対しても適用できるかを併せて検討した結果、ペースト、模擬モルタルの区別にかかわらず、そのフロー値を、拘束水比から求めた粒子分散距離により予測できる可能性がある、などの知見を得た。 キーワード:高炉スラグ微粉末、粉粒体、粒度分布、実積率、フロー値、レオロジー定数

1. はじめに

コンクリートの流動性に対する構成材料や調合の影響 を、一つの簡単な指標を介して包括的に評価することを 最終目的とし、その構成要素であるセメントペーストの 流動性を水膜理論により表示しようとする試みがこれま でになされてきた^{1~3)}。この水膜理論は、ペースト中で セメントなどの粉体粒子が一様な厚みの水膜で覆われて いる状況を想定し、その水膜厚さがペーストの流動性を 決定すると考えるものである。

筆者らも, 既報⁴⁾において, 余剰水膜理論に基づく粒 子分散距離(粉体粒子間の平均的な距離で、水膜厚さの 2 倍) により、ペーストの流動性に対する粉体の粒度分 布や水粉体比の影響を包括的に評価できる可能があるこ とを報告した。ただし、筆者らの研究のように、最密充 填された粉体粒子の間隙に存在する水(以下、充填水と いう)はペーストの流動性に寄与しないと考えて、それ 以外の水(以下,余剰水という)を各粒子の水膜に配分 するとのアプローチを採る場合、粒子分散距離の計算に は粉体の実積率の値が必要となる。一方で、粉体は、粒 径が一定値より小さいと, 粒子間の摩擦が増大して最密 充填されにくくなり、実積率が見かけ上低く測定される ため⁵⁾, その値を一般的な実積率試験で簡単に測定する ことは困難である。そこで、本研究では、まず、粉体の 実積率を適切に測定する試験方法と、粉体の実積率の値 が得られない場合の粒子分散距離の計算方法について検 討した (実験1)。

次に、本研究では、余剰水膜理論をモルタルの流動性 予測に拡張して適用することを考えた。すなわち、モル タルを、粉粒体(粉体+細骨材)と水で構成される固液 2 相材料と見なし、その流動性をペーストの場合と同様 に粒子分散距離により表示できるかを検討した(実験 2)。 なお、モルタルの流動性予測には、従来、余剰ペースト 膜厚理論^のが利用されてきた。しかし、この理論は、モ ルタルを、ペーストと骨材から成る2相材料と見なすも のであるため、水セメント比などによりペーストの性質 が変化した場合には対応できない。余剰水膜理論をモル タルに適用できれば、このような難点も解消されるため、 そのメリットは大きいものと考えられる。

2. 摸擬セメントペーストを対象とした実験(実験1)

2.1 実験概要

(1) 試料

本実験では、粒度分布の異なる粉体の入手が容易なこ とから、セメントの代わりに高炉スラグ微粉末を粉体と して用いた。図-1および表-1に、使用した高炉スラグ 微粉末の粒度分布および物性値を示す。高炉スラグ微粉 末は、比表面積の異なる3種類のJISA 6206 規格品(石 こう無添加タイプ)、およびBS4とBS8を体積比1:1 で混合したものの計4種類とした。実験では、このほか に、摸擬セメントペースト(以下、単にペーストという) の水粉体体積比を適宜変化させた。

(2) 試験項目および試験方法

(a) 粉体の実積率試験

本実験では、粉体の実積率試験として、次の4種類の 方法を試行した。

①JIS 法: JIS A 1104 に規定された骨材の実積率試験に準拠して粉体の実積率を測定した。容器の容積は 1.8L とし, 試料の詰め方は棒突きによった。



表-1 粉体の物性値											
	種類	レーザー回折・散乱法			ブレーン法						
記号		メジア	平均	比表*1	比表	平均*2	密度				
		ン径	粒径	面積	面積	粒径	(g/cm^3)				
		(μm)	(μm)	(cm^2/g)	(cm^2/g)	(μm)					
BS4	高炉スラグ微粉末 4000	7.08	9.01	2288	4550	4.53					
BS6	高炉スラグ微粉末 6000	5.88	7.09	2908	5962	3.46	9.01				
BS48	BS4+BS8	5.14	5.71	3611	6269	3.29	2.91				
BS8	高炉スラグ微粉末 8000	3.70	4.32	4773	8440	2.44					

*¹ 比表面積=6/ (密度×平均粒径) の関係を用いて計算した値 *² 平均粒径 - ((密度×kま 天寺) の関係を用いて計算した値

*² 平均粒径=6/(密度×比表面積)の関係を用いて計算した値

②圧縮法:肉厚の鋼製円筒容器(内径 \$ 50mm,高さ 160mm)の内部に試料 100gを充填し,鋼製のシリンダ ーを介して,圧縮試験機で試料に100kNの荷重をかけた。 そして,載荷後の試料の体積から実積率を求めた。 ③振動法:モルタル用の使い捨て型枠(\$ 50×100mm) に試料を3層に分けて詰めた。その際,各層25回ずつ突 き棒で突いた。その後,表面をならし,蓋を被せて5分 間振動を加えた。そして,加振により体積が減少した分 に試料を新たに補填しつつ,この作業を4回繰り返し, 最終的に型枠内に充填された試料の質量から実積率を求 めた。

④吸引法:JIS R 5201 に規定されたブレーン空気透過装置のセル内に試料を充填し,セル上面をラップフィルムで覆ったうえで,セル下部から真空ポンプ(到達圧力 6.7kPa,実効排気速度 36L/min)で1分間真空引きした。そして,試料の体積が減少した分に試料を新たに補填しつつ,この作業を5回繰り返し,最終的にセル中に充填された試料の質量から実積率を求めた。

(b) ペーストのフロー試験

JIS R 5201 に準じてフロー試験を行った。ただし、本 実験では、試験の際に落下運動は与えなかった。また、 実験1では、フロー値が300を超える場合に備えて、フ ローテーブルではなく、スランプ板を用いた。

2.2 実験結果

(1) 粉体の実積率

図-2 に、粉体の実積率と平均粒径(レーザー回折・ 散乱法で得られた値)の関係を示す。実積率は、全体と して、粉体の粒度が粗いほど高くなる傾向となった。た だし、圧縮法や吸引法のような、試験時に大きな外力を 作用させる試験方法の場合は、粒度による実積率の差異 は小さかった。また、非常に大きな外力を作用させた圧 縮法の場合は、他の試験方法の場合に比べて、実積率が かなり大きな値となった。

(2) ペーストのフロー値

図-3 に、ペーストのフロー値と水粉体体積比の関係 を示す。同図によると、フロー値は、水粉体体積比の増 加に伴って直線的に増大している。また、全体として、 粉体の粒度が粗いほどフロー値が大きくなっている。



図-4 粒子分散距離

2.3 余剰水膜理論による考察

(1) 粒子分散距離の計算方法

既往の水膜理論による研究^{1)~4)}では,大別して,下記 の4種類の粒子分散距離の計算式が用いられてきた。こ のうちの式(1)と(2)または式(3)と(4)では,粉 体粒子の水膜に水を配分する際の計算方法に違いがある。 また,式(1)および(2)は,ペースト中の全ての水を 水膜に単に配分するものであるのに対し,式(3)および (4)は,図-4に模式図を示すように,充填水を除いた 余剰水を水膜に配分する点で異なっている。本研究では, 既報⁴⁾と同様に,最も精密なモデルであると考えられる 式(3)により粒子分散距離を計算した。



$$D_{ew} = \left(\sqrt[3]{\frac{1}{V_p}} - 1\right) D_p \tag{1}$$

$$D_{ew} = \left(\frac{1}{V_p} - 1\right) \frac{D_p}{3} \tag{2}$$

$$D_{ew} = \left(\sqrt[3]{\frac{C_p}{V_p}} - 1\right) D_p \tag{3}$$

$$D_{ew} = \left(\frac{1}{V_p} - \frac{1}{C_p}\right) \frac{D_p}{3} \tag{4}$$

ここに、 D_{ew} : 粒子分散距離 (μ m)、 C_p : 粉体の実積 率 (%)、 V_p : 粉体体積比 (ペーストに占める粉体の体積 比率、%)、 D_p : 粉体の平均粒径 (μ m)。

(2) 粉体の実積率の測定値の影響

図-5 に、フロー値と、吸引法および振動法による実 積率の測定値から計算した粒子分散距離の関係を示す (フロー値が110未満のデータは除いて表示した)。本実 験では、フロー値と粒子分散距離の関係における寄与率 は、吸引法、JIS法、圧縮法、振動法の順に、0.92、0.81、 0.80、0.77 となっており、どの試験方法の実積率を用い て粒子分散距離を求めたかにより差が生じた。また、吸 引法に基づいて粒子分散距離を計算した場合に、フロー 値との相関が最も高い結果となった。

いずれにしても,これらのことから,ペーストのフロ ー値を粒子分散距離により精度よく予測するためには, 粉体の実積率を適切に測定することが重要といえる。

(3) 拘束水比から求めた粒子分散距離による予測

余剰水膜理論では、前述のように、粉体粒子が最密充 填(すなわち、粉体体積比=実積率の状態)されたうえ で、さらに余剰の水が存在することによりペーストが流 動すると考える。このことを踏まえると、前項に示した ような、粉体の実積率の直接的な測定値を用いる方法と は異なる粒子分散距離の計算方法が考えられる。すなわ ち、水粉体体積比が増加して(すなわち、粉体体積比が 減少して)ペーストが流動を開始する時点の水粉体体積 比(以下、拘束水比という)に相当する粉体体積比をそ の粉体の実積率と見なして、粒子分散距離を計算するこ とが可能である。図-3 中に拘束水比(同図中に示した

表-2 実験要因とその水準

要因	水準
粉体の種類	高炉スラグ微粉末 4000 (BS4), 6000 (BS6), BS4+BS8(BS48), 8000 (BS8)
細骨材の粒度分布	JIS 規格値の上限,下限
目標フロー値	125, 175, 225

各回帰直線のx切片)を示す。

図-6 に、フロー値と、拘束水比から求めた粒子分散 距離の関係を示す。同図から、両者の関係は、拘束水比 から粒子分散距離を計算した場合でも、概ね一つの直線 で表されることがわかる。したがって、2種類以上の水 粉体体積比のペーストに対してフロー試験を行って、使 用する粉体の拘束水比を予め求めておけば、図-6 によ り、粒子分散距離との関係から、ペーストのフロー値を 予測することができる。

3. 摸擬モルタルを対象とした実験(実験2)

3.1 実験概要

(1) 実験要因とその水準

実験2では、実験1と同様の理由により、高炉スラグ 微粉末を粉体に用いた模擬モルタルを試料として実験を 行った。表-2に実験要因とその水準を示す。本実験で は、粉体の粒度分布を変化させるために、実験1と同一 の4種類の高炉スラグ微粉末を用いた。また、細骨材の 粒度分布をJISA5308附属書Aの規格値における上限お よび下限の2種類とした。さらに、事前に行った予備実 験の結果を参考にして、フロー値(落下運動なしの値) が125、175および225程度となるように、模擬モルタル の水粉粒体体積比(=水量/(粉体体積+細骨材体積)) を変化させた。

(2) 摸擬モルタルの調合

細骨材に対する粉体の体積比 (p/s) を 0.275 一定とし たうえで,目標フロー値の水準に応じて水粉粒体体積比 を設定した。

(3) 摸擬モルタルの使用材料

本実験では、単一粒度にほぼ調整された各種粒度の豊田産珪砂(表乾密度 2.61g/cm³)を用意し、それらを組み

合わせて所要の粒度分布の細骨材を作製した。図-7 および表-3 に,粉粒体(p/s=0.275)の粒度分布および物性値を示す。なお,化学混和剤は使用しなかった。

(4) 試験項目および試験方法

(a) 粉粒体の実積率試験

粉粒体(p/s=0.275)に対して、実験1と同様の方法に より、圧縮法および振動法の2種類の実積率試験を行っ た。ただし、圧縮法における試料は200cm³程度とした。

(b) 模擬モルタルに対する試験

模擬モルタルに対して,JIS R 5201 に準じてフロー試 験を行った。ただし,実験1の場合と同様に,試験の際 に落下運動は与えなかった。

このほかに,球引上げ試験によりレオロジー定数を測定した。試験では,容器(ϕ 15×30cm)に充填した試料中で,直径3cmの球を,1.14,2.25,3.46,4.59および5.67cm/sの5種類の速度で順次引き上げた。また,せん断応力およびひずみ速度は以下のAnsley式⁸⁾により計算し,降伏値および塑性粘度は,これらの関係に対する回帰直線の切片および勾配として求めた。

$$\tau = \frac{F}{12\pi r^2} \quad , \quad \dot{\gamma} = \frac{v}{2r} \tag{5}$$

ここに, *τ*:せん断応力 (Pa), *γ*:ひずみ速度 (1/s), *F*:引上げ荷重 (N), *v*:引上げ速度 (m/s), *r*:球の半 径 (m)。

3.2 実験結果

(1) 粉粒体の実積率

図-8 に、粉粒体の実積率と平均粒径の関係を示す。 同図によると、実積率は、実験1の結果と同様に、圧縮 法の場合に高く測定されている。また、いずれの試験方 法の場合も、粒度の粗い下限の細骨材を組み合わせた粉 粒体の方が、上限の細骨材を組み合わせた粉粒体よりも 実積率が高くなっている。

(2) 模擬モルタルのレオロジー定数

図-9 に、模擬モルタルの降伏値と水粉粒体体積比の 関係を示す。同図からわかるように、降伏値は、水粉粒 体体積比が大きいほど小さくなっている。すなわち、流 動性が増大している。また、粒度の粗い下限の細骨材を 用いた場合の方が降伏値が小さくなっており、特に下限 の細骨材を用いた場合には、粉体の粒度が粗いほど降伏 値が小さい傾向となっている。

図-10に、模擬モルタルの塑性粘度と水粉粒体体積比の関係を示す。塑性粘度は、降伏値と同様に、水粉粒体体積比が大きいほど小さくなっている。また、ばらつきは大きいが、粒度の粗い下限の細骨材を用いた場合の方が塑性粘度が小さい傾向となっている。

(3) 模擬モルタルのフロー値

図-11に、模擬モルタルのフロー値と水粉粒体体積比



表-3 粉粒体の物性値

細骨材	粉体	メジアン径 (μm)	平均粒径 ^{*1} (μm)	比表面積*2 (cm ² /g)	密度 (g/cm³)	
	BS4	296	21.7	1035	2.68	
	BS6		20.4	1100		
그며고	BS48		20.0	1121		
	BS8		13.9	1608		
	BS4	860	22.3	1004		
下阳	BS6		21.0	1069	9 60	
刘门	BS48		20.6	1090	2.68	
	BS8		14.2	1577		

*1 文献 7)に示された方法により計算した値

*² 平均粒径=6/(密度×比表面積)の関係を用いて計算した値





の関係を示す。同図によると、フロー値は、水粉粒体体 積比の増加に伴って直線的に増大している。また、粉体 および細骨材の粒度が粗いほど、フロー値が大きくなっ ている。図-12に、図-11中の粉粒体ごとに回帰直線を 描いた場合のx切片として求めた拘束水比を示す(ただ し、細骨材が下限で粉体がBS6およびBS8のケースにお ける目標フロー値225のデータは、傾向がやや異なって いたので除いて回帰した)。

3.3 余剰水膜理論による考察

実験2では、粉体を粉粒体(粉体と細骨材の混合物) に置き換えたうえで、式(3)により粒子分散距離を計算 した。図-13に、モルタルにおける粒子分散距離の模式 図を示す。

(1)レオロジー定数の予測

図-14に、降伏値と粒子分散距離の関係を示す。同図 によると、圧縮法による粉粒体の実積率の測定値から粒 子分散距離を求めた場合には、粒子分散距離が大きいほ ど降伏値は小さくなっており、両者の関係は一つの曲線 である程度表されている。このことから、モルタルの降 伏値に対する粉体・細骨材の粒度分布や水粉粒体体積比 の影響は、粉粒体の実積率が正しく測定されれば、粒子 分散距離により包括的に評価できることが期待される。

なお、塑性粘度と粒子分散距離の間にはほとんど相関 は見られなかった。

(2) フロー値の予測

(a) 粉粒体の実積率の影響

図-15 に、フロー値と粒子分散距離の関係を示す。両 者の間には、圧縮法による粉粒体の実積率の測定値から 粒子分散距離を求めた場合にある程度の相関が見られる が、寄与率は必ずしも高いとはいえない。また、振動法 から粒子分散距離を求めた場合は、関係性はほとんど見 られなかった。さらに、摸擬モルタルの場合は、図-5 に示したペーストの場合と比べても相関が低く、このこ とは、粉体のみよりも、粉体と細骨材の混合物を対象と した場合の方が実積率の測定がより難しいことを示唆し ているものと考えられる。

図-16に、フロー値と、拘束水比から求めた粒子分散 距離の関係を示す。同図から、粉粒体の粒度分布や水粉 粒体体積比にかかわらず,拘束水比から求めた粒子分散 距離により,模擬モルタルのフロー値を予測できること がわかる。

(b) 模擬モルタルとペーストの予測結果の比較

図-17に、実験1の図-6と実験2の図-16に示した データを重ねて示す。図中の回帰直線からわかるように、 フロー値は、粒子分算距離が同一であれば、ペーストの 方が模擬モルタルよりもやや大きくなっている。しかし、 全体としては、模擬モルタルとペーストのデータは比較 的近い位置にプロットされている。そして、このことは、 今後、粒子分散距離の計算精度が改善されれば、ペース ト、モルタルの区別にかかわらず、その流動性を、粒子 分散距離という一つの指標により予測できる可能性があ ることを示唆しているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、余剰水膜理論によりペーストの流動性を 予測することを目的として、粉体の実積率を適切に測定 する試験方法と、粉体の実積率の値が得られない場合の 粒子分散距離の計算方法について検討した。また、余剰 水膜理論により模擬モルタルの流動性をペーストの場合 と同様に予測できるかを検討した。本研究により得られ た知見は以下の通りである。

(1)ペーストのフロー値を粒子分散距離により精度よく 予測するためには、粉体の実積率を適切に測定すること が重要である。また、本実験の範囲では、吸引法により 実積率を測定した場合の精度が最も高かった。

(2) 粉体の実積率が得られない場合には、ペーストの拘 東水比に相当する粉体体積比を粉体の実積率と見なして 粒子分散距離を計算することも可能である。また、使用 する粉体の拘束水比は、2 種類以上の水粉体体積比のペ ーストに対してフロー試験を行えば、予め求めておくこ とができる。

(3) 模擬モルタルの降伏値に対する粉体・細骨材の粒度 分布や水粉粒体体積比の影響は,粉粒体の実積率が正し く測定されれば,粒子分散距離により包括的に評価でき るものと期待される。

(4) 粉体・細骨材の粒度分布や水粉粒体体積比にかかわ らず、拘束水比から求めた粒子分散距離により、模擬モ ルタルのフロー値を予測できる。

(5) 今後, 粒子分散距離の計算精度が改善されれば, ペースト, モルタルの区別にかかわらず, そのフロー値を, 粒子分散距離という一つの指標により予測できる可能性がある。



図-17 模擬モルタルとペーストの予測結果の比較

謝辞

本研究の実施に際し, JSPS 科研費 24560703 の助成を 受けた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 宮野和樹、桝田佳寛、中村成春:セメントペースト のレオロジー特性に及ぼす調合要因の影響、コンク リート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.355-360, 2000.6
- 2) 太田顕,名和豊春,大沼博志:セメント粒子の凝集 構造とセメントペーストの流動性の関係,コンクリ ート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.271-276, 2001.6
- 3) 岩崎美敏,松藤泰典,小山智幸,小山田英弘:中流 動コンクリートに関する基礎的研究 その9 保水 限界状態の推定,日本建築学会九州支部研究報告, No.44, pp.21-24, 2005.3
- 4) 今井悠介,寺西浩司:模擬セメントペーストの流動 性に対する粉体の粒度分布の影響(その1および2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.225-228, 2012.9
- 5) 椿淳一郎,鈴木道隆,神田良照:入門 粒子・粉体 工学,日刊工業新聞社,2002.9
- T.C.Powers : The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc., 1968.
- 7) 橋爪進,谷川恭雄,森博嗣:細骨材の寸法・形状および混入率がフレッシュコンクリートの降伏値に及ぼす影響,日本建築学会構造系論文集,No.558, pp.23-29,2002.
- 吉野公:流動性コンクリートのワーカビリティー評価に関する研究,名古屋大学学位論文, pp.29-32, 1994.5