

論文 モルタルを用いたモデル骨材に関する基礎的研究

近田孝夫^{*1}・前田悦孝^{*2}・松下博通^{*3}

要旨：骨材表面に余剰ペーストの膜が形成され、その膜厚によりコンクリートの流動性が定まるという余剰ペースト膜厚理論の考え方をモデル細骨材を使用したモルタルのフロー試験結果に適用し、フロー値が使用細骨材の粒度構成および平均粒子径によらず、余剰ペースト膜厚／細骨材粒子径比（以下、膜厚比と称す。）だけではほぼ定まることを確認した。また、降伏値は膜厚比の低下に伴って緩やかに増加する領域と急激に増大する領域があり、降伏値が急増し始める膜厚比はモルタルのフロー値が約150程度になるときの膜厚比に対応することなどを報告した。

キーワード：余剰ペースト膜厚理論、モデル細骨材、フロー値、流動曲線、降伏値

1. はじめに

フレッシュコンクリートをセメントペーストと骨材の2相材料と考えると、充填状態の骨材間空隙がペーストで満たされ、さらに余剰のペーストが存在することによって骨材が分散される。余剰ペースト膜厚理論では、骨材表面に余剰ペーストの膜厚が形成されると仮定し、膜厚とペースト性状がコンクリートの流動性を定めると考えられている[1]。

筆者らは、本理論の配合設計への適用化を検討しており、単一粒度細骨材を使用したモルタルのフロー値は余剰ペースト膜厚（以下、 δ と略す。）のみでなく、細骨材粒子径（以下、 d と略す。）との比である δ/d によって定まることを報告した[2]。

本研究は、この考え方を連続粒度骨材を使用した系に拡張するための基礎的検討として、1～3種類の単一粒度のガラスビーズから構成されるモデル細骨材を使用し、粒度構成や平均粒子径を変化させたモルタルのフロー値および流動曲線を測定し、 δ/d との関係を検討した。

2. 実験概要

セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。比重は3.15、粉末度は3550cm³/gである。図-1にレーザー回折型粒度分析計を用いて測定した粒度曲線を示す。累積通過重量90%に相当する粒子径（以下、 d_{90} と略す。）は、41.3μmであった。細骨材は、表-1に示す5種類の単一粒度のガラスビーズを単味または表-2に示す組み合わせで使用した。ガラスビーズの比重はいずれも2.47である。表中に示した粒子径 d_i および d_{av} は面積体積平均粒径である[3]。以下、本報告では、各材料を表-1～2の中の記号で示した。また、単一粒度細骨材を単味で使用した場

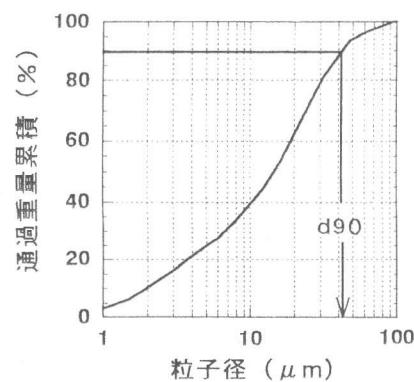


図-1 セメントの粒度曲線

*1 新日鐵化学(株)技術研究所高炉セメント技術センター 主任研究員（正会員）
 *2 新日鐵化学(株)技術研究所高炉セメント技術センター 研究員（正会員）
 *3 九州共立大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

合、2種類または3種類混合したものを使用した場合をそれぞれ総称して单一粒度系、二粒度混合系、三粒度混合系と称した。

図-2に、本実験における骨材粒子径と膜厚に関する考え方を三粒度混合系の場合についてモデル的に示す。各細骨材の表面に形成される余剰ペースト膜厚 δ_i は細骨材粒子径 d_i に比例し、大きな細骨材には大きな膜厚が形成され、小さな細骨材には小さな膜厚が形成されたとした。本実験では、その比例係数を δ/d と称し、 $\delta/d = \text{約}0.01 \sim 0.3$ となるようにモルタルの配合を定めた。尚、各混合細骨材の平均粒子径は d_{av} と称し、 d_i と区別した（单一粒度系では $d_i = d_{av}$ ）。W/Cは35%とした。

モルタルの練混ぜ方法、フロー試験の方法は「JIS R 5201」に従った。但し、練混ぜ量は、1.3 ℥とした。流动曲線は、音叉型振動式粘度計を使用し[4]、ずり応力 τ を31.8Pa/minの勾配で95.3Paまで上昇させて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 δ/d とフロー値の関係

試験結果の一例として、G1～G5を単味で用いた单一粒度系、G1とG5を組み合わせた二粒度混合系（以下、G1-G5系）の δ/d とフロー値の関係を図-3に示す。図中に[↓]を記したプロットは、フロー試験時にモルタルの一部が崩れたり、亀裂が生じるなどモルタルの広がり方が一体性に欠ける様子が観察されたことを示す。

单一粒度系、二粒度混合系ともに、 δ/d が約0.02～0.1の範囲においては、 δ/d の対数に従ってフロー値はほぼ直線的に変化し、細骨材の d_{av} が0.83mmより大きいものは δ/d とフロー値の関係がほぼ一致した。しかし、G1, G, G15-Aなど d_{av} が小さいものは、 δ/d が同一であっても $d_{av} \geq 0.83\text{mm}$ の細骨材を使用した場合よりフロー値が小さく、 δ/d が低下するほどその差は拡大した。一方、 d_{av} が大きいG5, G15-Cなどは $\delta/d_{av} = 0.02 \sim 0.03$ 以下でフロー値の低下割合が小さく、

表-1 単一粒度細骨材

記号	粒度 ^{*1} (mm)	d_i^{*2} (mm)	実積率 (%)
G1	0.15～0.30	0.216	62.5
G2	0.30～0.60	0.436	63.2
G3	0.60～1.18	0.833	62.6
G4	1.18～2.36	1.702	63.5
G5	2.36～4.47	3.446	63.1

*1ふるい目の開き

*2粒子径

表-2 2粒度及び3粒度細骨材

系列	組み合わせ			記号	混合割合(%)			d_{av} (mm)	実積率 (%)
	第一 粒度	第二 粒度	第三 粒度		第一 粒度	第二 粒度	第三 粒度		
2 粒 度	G1	G5	-	G15-A	70	30	-	0.3	70.3
				G15-B	20	80	-	0.86	72.1
				G15-C	7	93	-	1.68	66.4
	G2	G5	-	G25-A	70	30	-	0.59	69.1
				G25-B	45	55	-	0.84	73.4
				G25-C	15	85	-	1.69	68.9
3 粒 度	G3	G5	-	G25-D	5	95	-	2.56	64.7
				G35-C	33	67	-	1.69	70.2
	G4	G5	-	G45-E	40	60	-	2.44	66.3
				G135-B	14	30	56	0.85	74.6
3 粒 度	G1	G3	G5	G245-C	11	30	59	1.69	70.1

*混合細骨材の平均粒子径

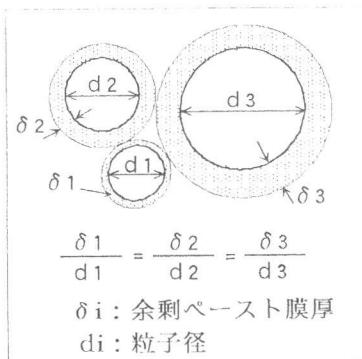


図-2 膜厚 δ と粒子径 d の関係

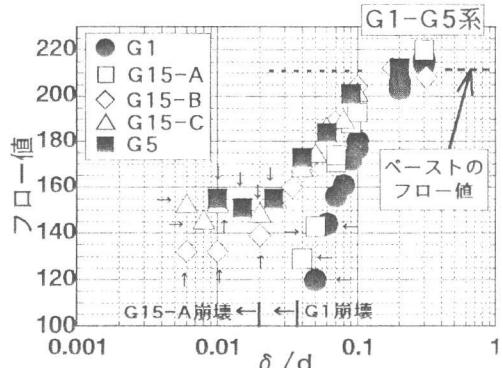
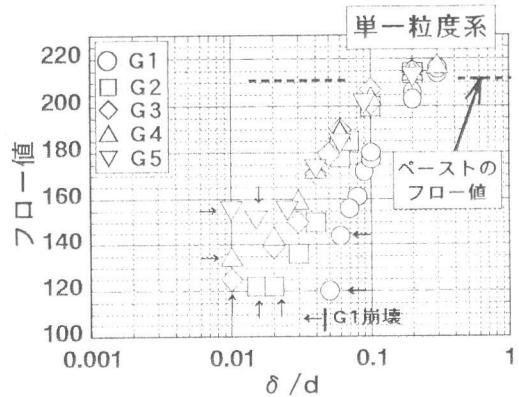


図-3 δ/d とフロー値の関係

モルタルの広がり方が一体性に欠ける場合が多く観察された。以上のように、 d_{av} の違いがフロー値に及ぼす影響は単一粒度系、二粒度混合系で傾向が一致した。

図-4に单一粒度細骨材と二粒度混合細骨材および三粒度混合細骨材のうち d_{av} がほぼ等しい場合の δ/d とフロー値の関係を比較した。 δ/d とフロー値の関係は二粒度および三粒度混合細骨材ともに单一粒度細骨材の場合と一致し、 d_{av} が等しければ、粒度構成によらず δ/d だけでフロー値がほぼ定まる結果となった。

以上の結果を踏まえフロー値が δ/d により定まる条件について検討した結果を次に述べる。

フロー値が δ/d のみで定まる場合は、 d_{av} が変化しても、フロー値が同じであれば δ/d も同じ値となる。そこで、各細骨材を用いたモルタルが同じフロー値をとるときの δ/d の値（以下、 $[\delta/d]_F$ と称す。）を求め、 d_{av} との関係を調べた。図-5に d_{av} とフロー値200, 190, 170に対応する $[\delta/d]_F$ の関係を示す。図中の直線は、 d_{90}/d_{av} の値を示しており、单一粒度系では、この直線より上側で余剰ペースト膜厚 δ が d_{90} ($=41.3\mu\text{m}$) より大きくなっている。

$[\delta/d]_F$ は、直線より上側では d_{av} が変化してもほぼ一定となり、フローが δ/d により定まる範囲は二粒度、三粒度混合系と单一粒度系で一致した。 $\delta > d_{90}$ のとき单一粒度系のフロー値が δ/d のみで定まることは既報でも示したが[2]、二粒度、三粒度混合系でも d_{av} に対応する平均膜厚を δ_{av} ($=d_{av} \times \delta/d$) とすると、 $\delta_{av} > d_{90}$ のときフローが δ/d により定まる結果となった。

3. 2 流動曲線の測定結果

測定結果の一例として、G2を単味で使用して δ/d を変化させたときの流動曲線とセメントペースト単味の流動曲線を図-6に示す。 δ/d の増加によりモルタルの降伏値は低下し、小さなずり応力で流動し始めるようになるが、流動曲線の傾きは、 δ/d の増加に伴ってむしろ大きくなる傾向がある。このため、 δ/d の大きいほうが常にずり速度が大きいとは限らない。また $\delta/d = 0.1, 0.2$ では、セメントペースト単味の形状に類似し、

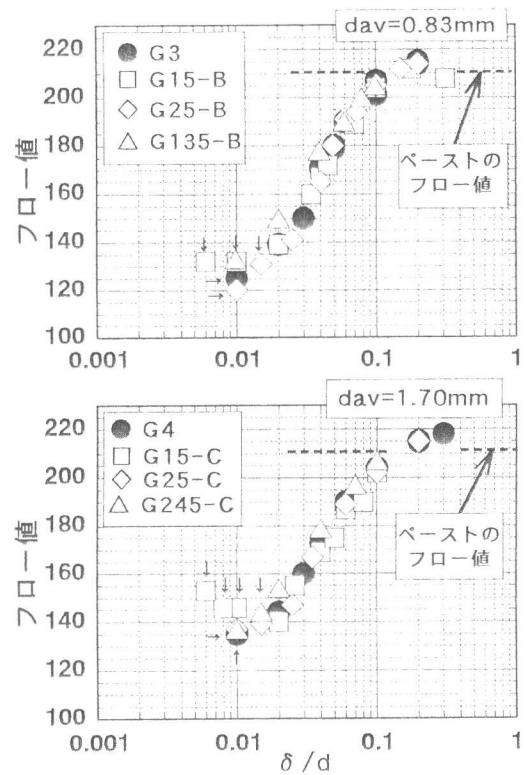


図-4 δ/d とフロー値の関係

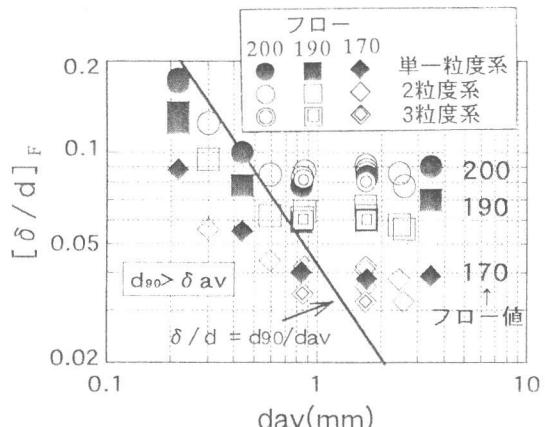


図-5 d_{av} と $[\delta/d]_F$ の関係

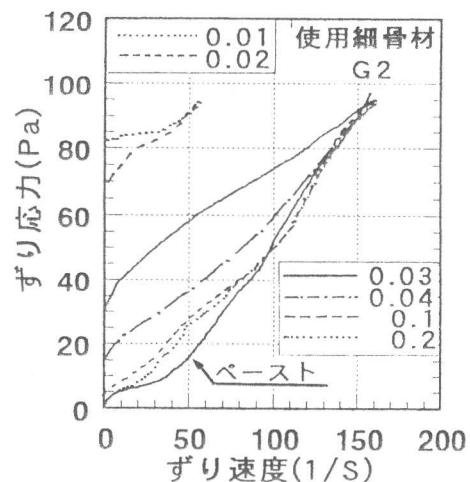


図-6 流動曲線測定結果

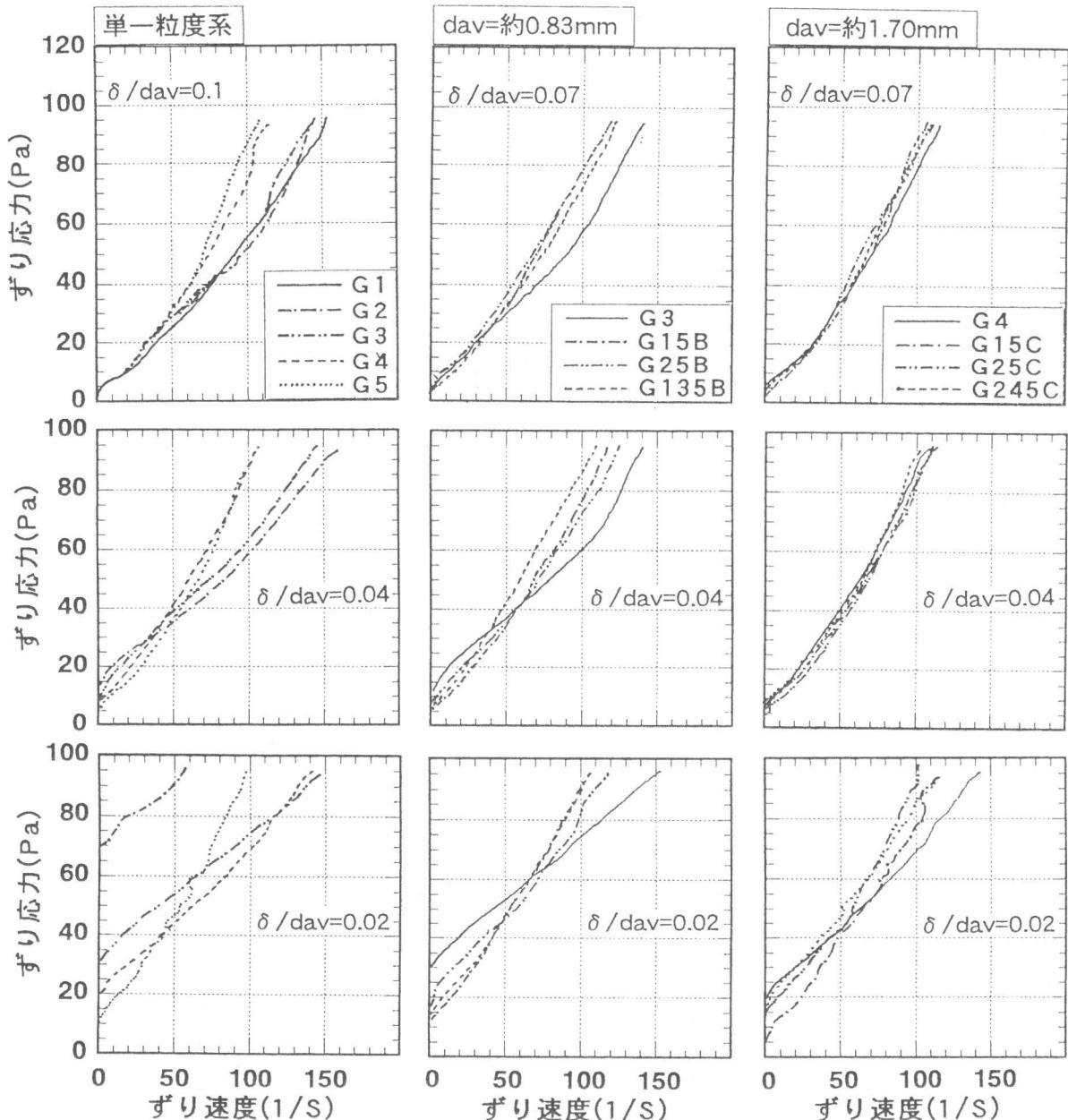


図-7 流動曲線測定結果

流動曲線の傾きがずり応力の大きさによって複雑に変化するようになった。

一方、 δ / d があまり小さい場合には、 $\delta / d = 0.01, 0.02$ の場合のような流動曲線が測定されており、これらは振動式粘度計の感應板と試料の間に滑りが生じたり、細骨材粒子どうしの固体間摩擦などの影響で感應板の振幅増加が不安定になることが原因と考えられる。このような流動曲線はモルタルの粘性流動をとらえたものではないと考えられる。

図-7は、单一粒度系の流動曲線および各種細骨材のうち d_{av} が約0.83mmと1.70mmに等しいものの流動曲線を比較したものである。单一粒度系では、 $\delta / d = 0.1$ のときは、G1~G5の降

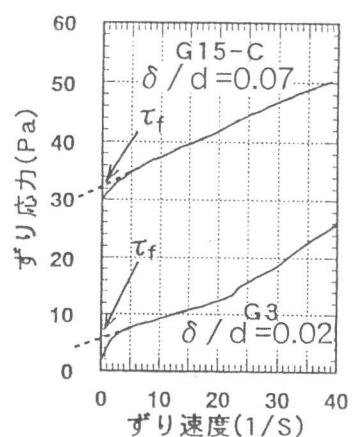


図-8 降伏値 τ_f の求め方

伏値と比較的ずり応力の小さい範囲における流動曲線はほぼ一致した。しかし、 d_{av} が小さい場合ほど δ/d の減少に伴う降伏値の増大が大きくなってしまい、 $\delta/d = 0.04, 0.02$ では d_{av} による流動曲線の違いが明瞭になった。

d_{av} が約0.83mmまたは約1.70mmに等しい各種細骨材を比較した場合においても、 δ/d の減少に伴って各流動曲線の違いが明瞭になるが、 d_{av} が異なる場合に比べて流動曲線の差異は小さく、特に $d_{av} =$ 約1.70mmの場合は、 $\delta/d = 0.04$ 以上では各流動曲線がほぼ一致している。

これらの傾向は、3.1にて述べたフロー値の場合と定性的には共通する点がある。そこで、3.3において各流動曲線の特徴を δ/d やフロー値とより定量的に関連付けることを試みた。

3.3 δ/d と降伏値、フロー値の関係

本実験で得られた流動曲線は、上述したように、降伏後のずり応力とずり速度が直線関係でない場合が多く、ビンガム体として塑性粘度を求めるには問題ある。一方、降伏値については、図-8に示すように、降伏後の比較的ずり速度の小さい範囲(20~50(1/s)以下)では、いずれの流動曲線においても、ずり応力とずり速度が直線関係になる領域が認められ、降伏値は、この部分の直線と縦軸との切片として機械的に定めることができる。従って、本研究では、このようにして求めた降伏値 τ_f について以下の検討を行った。

図-9は、それぞれ、単一粒度系、 d_{av} が約0.83mmの場合、 d_{av} が約1.70mmの場合において、 δ/d と降伏値の関係を比較したものである。これらの図において $\tau_f = 80\text{Pa}$ の線上にあるプロットは、流動曲線の測定において、降伏値が80Pa以上であって、振動式粘度計の感応板と試料の間に滑りが生じたと考えられるものである。

单一粒度系では、G1~G5のいずれを使用した場合でも、 τ_f は δ/d の減少に伴って漸増し、 δ/d がある値より小さくなると急激に増大した。降伏値が増大し始める δ/d は細骨材の d_{av} が小さいほど大きく、G1, G2, G3, G4, G5の順となった。

单一粒度細骨材と二~三粒度混合細骨材を用いた場合を d_{av} がほぼ等しい条件で比較すると、 τ_f が急激に増大し始める δ/d は、 d_{av} が約0.83mmの場合は0.03~0.04であり、 d_{av} が約1.70mmの場合は0.02~0.03程度となっており、粒度構成が異なっていても d_{av} が等しければ、降伏値が増大しはじめる δ/d の大きさはほぼ同程度になると考えられる。一方、 δ/d がこれらの値より小さい範囲では細骨材の種類によって τ_f の増加割合に差異が認められるようになるが、 d_{av} が約0.83mmと約1.70mmのどちらの場合も单一粒度細骨材を単味で使用した場合に比較して、二粒度または三粒度混合細骨材を使用した場合の方が τ_f の増加割合が小さくなった。これらの結果を図-3、図-4と比較すると、降伏値が

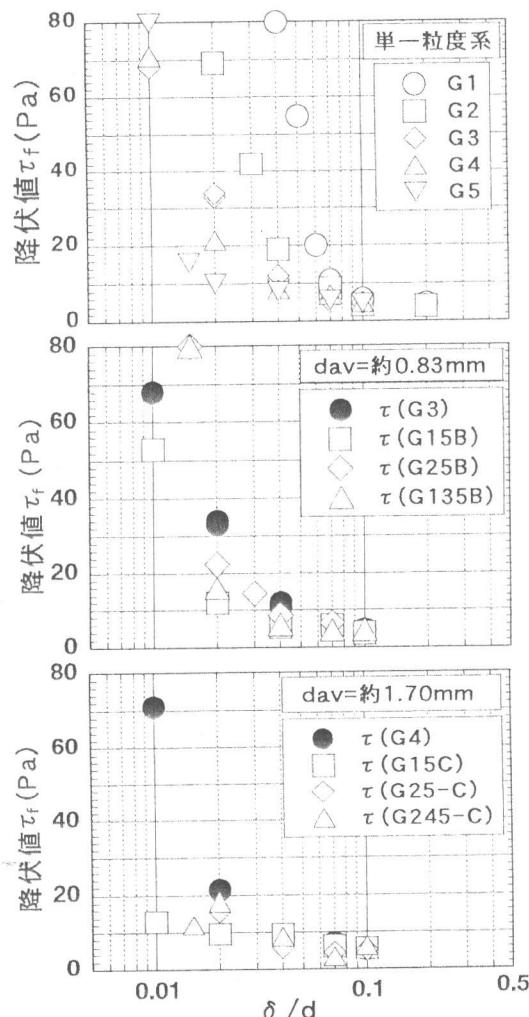


図-9 δ/d と降伏値 τ_f の関係

増大し始める δ/d は、フロー値が140~160となる δ/d に対応している。

図-10に降伏値 τ_f とフロー値の関係を示す。

[↓]を示したプロットは、モルタルの広がり方が一体性に欠けたり、流動曲線の測定の際に感応板と試料の間に滑りが生じたと考えられるものである。また、 $\tau_f = 100$ のプロットは最大ずり応力でも変形が測定されなかったものである。

降伏値 τ_f が約5~20Paおよびフロー値が約150~200の範囲では、フロー値は降伏値 τ_f の増加に従って低下するが、降伏値 τ_f が20Pa以上では、フロー値はあまり低下しなかった。

ここで、図-10と図-9を比較すると、図-10でフロー値が降伏値に従って直線的に低下する範囲は、図-9において降伏値 τ_f が δ/d の減少に伴って漸増した範囲に対応する。一方、降伏値 τ_f が20Pa以上でフロー値があまり低下しない範囲は、降伏値 τ_f が急増し始める δ/d 以下の範囲に対応しており、流動曲線の測定の際に感応板と試料の間に滑りが生じるなど粘性流動とは異なる挙動が観察されるものや本実験の最大ずり応力の範囲では変形が測定されないものが多く、フロー試験でもモルタルの広がり方が一体性に欠ける場合が多く観察されている。

これらのことから、フロー値が約150以下になると、フロー値の変化はモルタルの性状の変化をあまり反映しなくなると同時に、モルタルの変形のメカニズムもまたフロー値が約150に対応する δ/d の前後で大きく変化するのではないかと考えられる。

4. まとめ

各種単一粒度のガラスビーズから構成されるモデル細骨材を用いたモルタルの流動性について本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) フロー値は、粒度構成によらず δ/d と平均粒子径 d_{av} によってほぼ等しく定まり、また、 d_{av} に対応する平均膜厚を δ_{av} とすると、 $\delta_{av} > d_{av}$ であればフローは平均粒子径 d_{av} によらず δ/d のみで定まる考えることができる。
- (2) 細骨材の粒度構成や平均粒子径による流動曲線の違いは、 δ/d の減少に伴って明瞭になり、その違いは降伏値の増加や流動曲線の傾きの変化の違いとして把握された。また、 d_{av} が異なる場合に比較して、 d_{av} は同一で粒度構成が異なる場合の方が流動曲線の差異が小さくなつた。
- (3) 降伏値 τ_f は、 δ/d の低下に伴って漸増し、 δ/d がフロー値が150程度に対応する値よりも小さくなると急激に増大した。降伏値 τ_f が急増し始める δ/d の値は d_{av} が小さいほど大きくなるが、 d_{av} が等しい場合には粒度構成が変化してもほぼ同程度となつた。
- (4) 降伏値 τ_f は約5~20Paの範囲で、フロー値は約150~210に変化した。 $\tau_f > 20\text{Pa}$ では、フロー値はあまり低下せず、モルタルの広がり方が一体性に欠ける状況が多く観察された。

参考文献

- 1) T.C.Powers : The Properties of Fresh Concrete, Jhon Wiley and Sons, Inc., 1968.
- 2) 前田、近田、松下：単一粒度細骨材を用いたモルタルのコンシスティンシーに関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol16, pp.467-472, 1994.
- 3) 徳光善治：粉体のつめこみについて、粉体工学、pp29-34、1965.9
- 4) 石渡ほか：音叉型振動式粘度計を用いたセメントペーストの流動解析、第46回セメント技術大会講演集、pp152-157、1992.

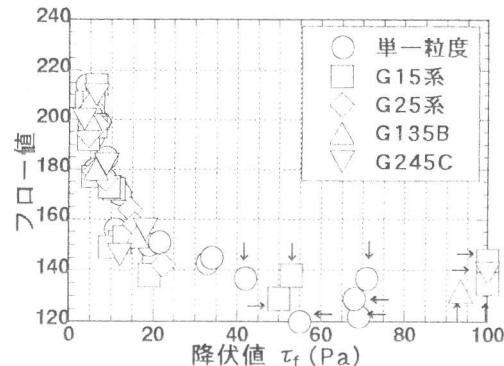


図-10 降伏値 τ_f とフロー値の関係