

[1076] 単一粒度細骨材を用いたモルタルのコンシステンシーに関する研究

前田悦孝*¹・近田孝夫*²・松下博通*³

1. はじめに

フレッシュコンクリートの理論的な配合設計方法の一つに余剰ペースト膜厚理論がある[1]。ここで、余剰ペーストとは、コンクリート中の骨材を最密充填状態にしたときの骨材空隙を充填するのに必要なペースト量を全ペースト量から差し引いた残りのペースト量のことである。この理論では、余剰ペーストによって骨材が分散し、骨材表面に形成される余剰ペーストの膜厚とセメントペーストの性質によりコンクリートの流動性が定まると考えられている。

筆者らは、本理論における骨材性状の取り扱い方に関する研究を進めるなかで、単一粒度細骨材を使用したモルタルでは、同一フロー値(210)を得るための膜厚が細骨材粒子径にほぼ比例して増大したことを報告した[2]。このことは、モルタルのフロー値が余剰ペースト膜厚 δ と細骨材平均粒径 d_{sv} の比である δ/d_{sv} により定まるとを示唆するものであった。

本研究は、この点についてさらに検討を進めたものであり、単粒度細骨材を用いたモルタルのフロー値を幅広く変化させて、 δ/d_{sv} とフロー値の関係を調査し、モルタルのフロー値が δ/d_{sv} により定まる条件についてペースト中の粉体粒子径やペースト性状の影響を調査した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に使用したセメントと高炉スラグ微粉末の品質、高性能減水剤の成分を表-1に示す。レーザー回折型粒度分析計を用いて測定したセメントと高炉スラグ微粉末の粒度曲線を図-1に示す。粒度曲線測定時の分散条件は、分散媒としてエチルアルコールを使用し、超音波(27kHz-75W)による分散時間を90秒とした。

細骨材は、表-2に示す単粒度のガラスビーズを使用した。これらは、数種類の市販品のガラスビーズを組み合わせたり、ふるい分けることで所定の粒度に調整したものである。比重は、いずれも2.47である。実績率は、『JIS A 1104 骨材の単位容積質量及び実績率試験方法』に従って測定した。以下、本報告では、各材料を表-1～2の中の記号で示した。

表-1 実験に使用したセメント、高炉スラグ微粉末、高性能減水剤

材 料	記号	種 類
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント, 比重:3.16, 粉末度:3550cm ² /g
高炉スラグ微粉末	S10	比重 2.90, 粉末度 10670cm ² /g
高性能減水剤	SP	ナフタリンスルホン酸系

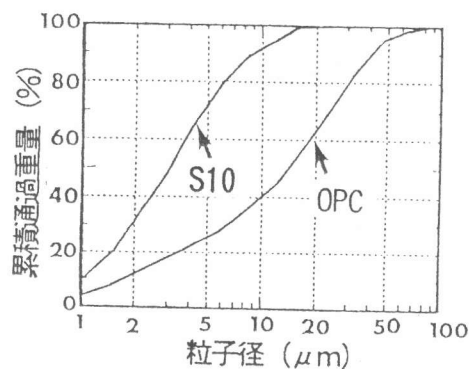


図-1 粉体材料の粒度曲線

*1 新日鐵化学(株)建材本部高炉セメント技術センター 課長代理(正会員)

*2 新日鐵化学(株)建材本部セメント部 部長代理(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)

2. 2 試験方法

モルタルおよびペーストの練り混ぜ方法およびフロー試験は、『JIS R 5201セメントの強さ試験』に準じた。練り混ぜ量は 1.3ℓとした。セメントペーストの見掛粘度は、振動式粘度計を使用し、ずり速度=1/80(1/s)のときの粘度を測定した。

2. 3 セメントペーストおよびモルタルの配合

ペースト部分の配合は、粉体として、OPC を使用した場合は、水/粉体重量比（以下、W/Pと称す。）=35, 45, 60wt%および W/P=35wt%においてSP添加率を $C \times 1.0\%$ とした4ケースとした。S10 は、OPCを W/P=35wt%で使用した場合と水/粉体容積比（=1.106）が同一になるように W/P=38wt%

%とし、SP添加率を粉体重量 $\times 0.55\text{wt}\%$ とした。ペースト単味の性状を表-3に示す。以下、本報告ではペーストの配合を表-3に示した記号を用いて、例えばS10-38-SP系と表現した。

モルタルの配合は、これら5種類のセメントペーストと6種類の各単粒度細骨材を組み合わせた合計30ケースにおいて、余剰ペースト膜厚を概略5~200 μm （最小2~最大4000 μm ）の範囲となるように単位細骨材容積を変化させた。余剰ペースト膜厚は参考文献[2]に示した方法で求めた。尚、S10は単味で使用了。

3. 実験結果

3. 1 余剰ペースト膜厚とフロー値の関係

実験結果として、余剰ペースト膜厚（以下、膜厚 δ と略記する。）とフロー値の関係を図-2に示す。これより、セメントペーストの配合がいずれの場合であっても、膜厚 δ とフロー値の関係は細骨材の粒子径によって異なっており、OPC-35-SPやOPC-60のようにセメントペースト単味のフロー値が大きく、見掛粘度が小さい場合には、各曲線が複雑に交錯する結果となった。このことから、幅広いフロー値の範囲においては、同一フロー値となる膜厚 δ は必ずしも細骨材の平均粒子径に比例しないことがわかった。

3. 2 モルタルの外観性状

図-2の中で ∇ を付けたプロットはペースト量不足による分離を起こしたことを示す。後述する図-3、図-5においても同様に表示した。本実験では、セメントペーストがしみ出したり、細骨材が沈降したりするWet Segregationは観察されなかった。

観察された分離状況のうち代表的な様子を写真-1, 2に示す。写真-1のような状況は、0.6mm以上のG3, G4, G5を用いた場合に見受けられ、個々の細骨材粒子が崩れ落ちるようにしてフローが広がる様子が観察された。写真-2は、G0を用いたモルタルで観察されたもので、フローテーブルの落下の衝撃によってモルタルの一部が崩壊したものである。このようなモルタルのフロー値は測定できないが、亀裂が生じて崩壊しない場合にはフロー値を測定した。

表-2 単粒度細骨材の性状

記号	粒 度 *1 (mm)	平均粒径*2 (mm)	実積率 (%)	比表面積 (cm^2/cm^3)
G0	0.036-0.075	0.055	62.3	1030
G1	0.15-0.30	0.216	63.2	287
G2	0.30-0.60	0.436	62.8	145
G3	0.60-1.18	0.833	62.8	73
G4	1.18-2.36	1.702	63.6	36
G5	2.36-4.47	3.446	63.2	18

*1 ふるい目の開き, *2 面積体積平均粒径

表-3 セメントペーストの配合および性状

記 号	粉体 種別	W/P *3 (wt%)	W/P *3 (vol%)	SP添加率 ($\times P\%$)	70- 値	見掛粘度*4 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
OPC-60	OPC	60	1.90	—	300	100
OPC-45	OPC	45	1.42	—	278	230
OPC-35	OPC	35	1.12	—	233	366
OPC-35-SP	OPC	35	1.12	1.0	>300	160
S10-38-SP	S10	38	1.12	0.55	265	526

*3 水/粉体重量比 *4 ずり速度 80(1/s)における見掛粘度

3. 3 膜厚 (δ) / 平均粒子径 (d_{sv}) と フロー値の関係

図-3に、余剰ペースト膜厚 δ と細骨材平均粒径 d_{sv} の比(以下、 δ/d_{sv} と略す。)とフロー値の関係を示す。ここで、平均粒径 d_{sv} は面積体積平均粒径[3]を用いた。

この図のなかで、S10-38-SP系とOPC-35系は、G0, G1を用いた場合を除くとフロー値が δ/d_{sv} によってほぼ定まる結果となった。しかし、OPC-35-SP, OPC-45, OPC-60では δ とフロー値の関係が細骨材平均粒子径(以下、単に粒子径と称す。)ごとに異なった。OPC-45系に比較して、ペースト単味のフロー値や、見掛粘度の小さいOPC-35-SP, OPC-60系の方が各曲線のばらつきが大きくなった。見掛粘度だけで、粘りけや粘着性などのセメントペーストのレオロジー特性を説明することはできないが、本実験では、見掛粘度が大きいほど、取り扱いの際も粘性が大きいと感じられた。そこで、これを一つの目安とすると、 δ/d_{sv} とフロー値の関係は、セメントペーストの見掛粘度が大きいほど一致しやすい傾向となっている。

これらの結果より、セメントペーストの配合が幅広い範囲では、 δ/d_{sv} だけでフロー値を一律に定めることは困難であることがわかった。

しかし、これらの図には、以下に述べるような

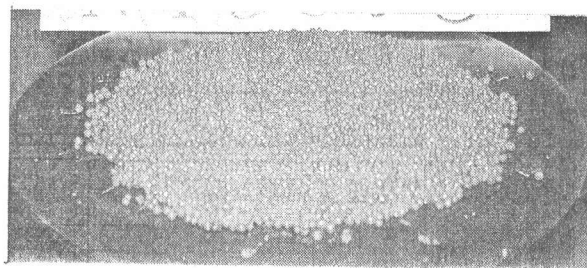


写真-1 OPC-45 細骨材: G5 $\delta=5\mu m$

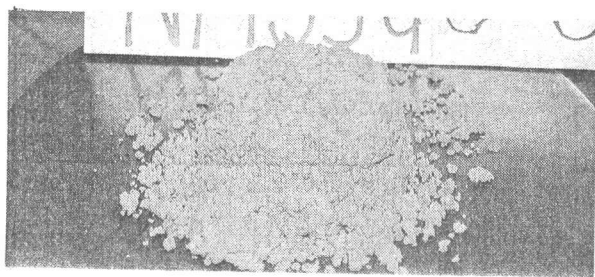


写真-2 OPC-35-SP 細骨材: G0 $\delta=5\mu m$

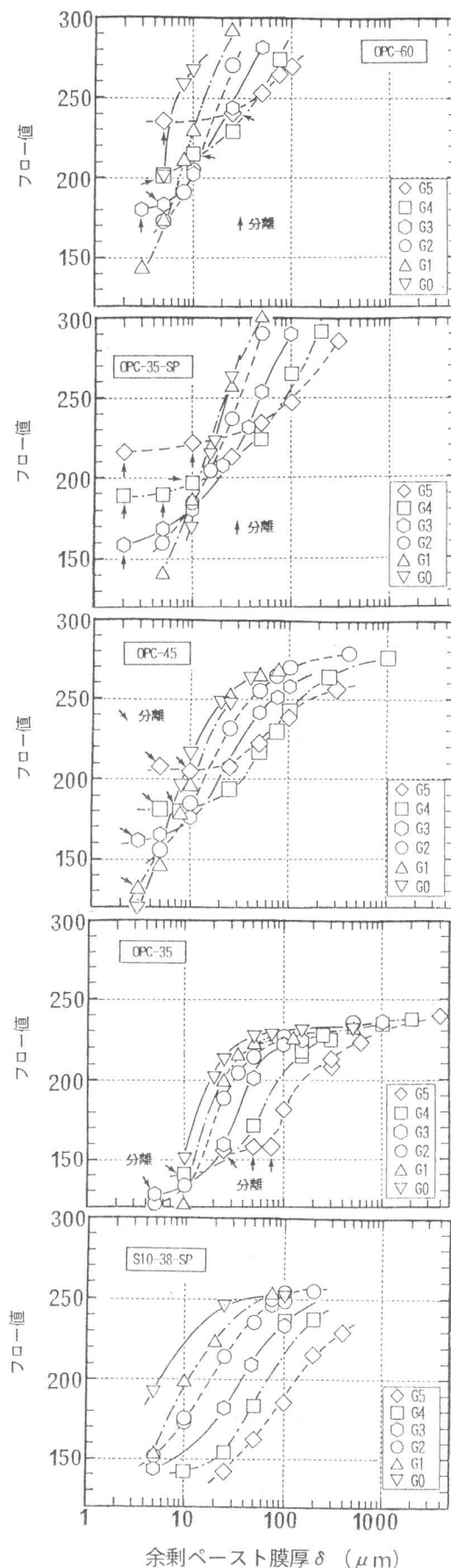


図-2 余剰ペースト膜厚 δ とフロー値の関係

幾つかの共通点と規則性が認められる。

OPC-35系と S10-38-SP系を比較すると、OPC-35系で G0, G1を用いた場合は、これらより大きな G2, ..., G5を用いた場合より、 δ/d_{sv} とフロー値の関係が δ/d_{sv} の大きい側に位置している。G0とG1ではG0の方がさらに δ/d_{sv} の大きい側にある。即ち、 δ/d_{sv} がある値より小さくなると、 δ/d_{sv} とフロー値の関係が下側へ離脱し、離脱が始まる δ/d_{sv} 値は粒子径が小さい場合ほど大きくなっている。そして、この離脱点より δ/d_{sv} の小さい範囲では、同一フロー値を得るための δ/d_{sv} は、粒子径が小さい場合ほど大きくなっている。このことは、S10-38-SP系でG0, G1を用いた場合にも当てはまる。また、OPC-35-SP系、OPC-45系、OPC-60系においても、 δ/d_{sv} とフロー値の関係は、G0, ..., G5と粒子径の小さいものから順に大きい側に位置している。

次に、OPC-35系、OPC-35-SP系、OPC-45系、OPC-60系では、各系ともG5, G4, G3の比較的粒子径の大きい細骨材を使用して、 δ/d_{sv} を小さくした場合に分離が生じている。これらのモルタルで、 δ/d_{sv} を小さくしてもモルタルのフロー値がある一定値以下にならないのは、分離によりフローが広がっているためである。

OPC-35系で、G4, G5を用いた場合に δ/d_{sv} とフロー値の関係が上側に離脱しているのはこのような理由によるものである。しかし、OPC-35-SP系、OPC-45系、OPC-60系では、フロー値が δ/d_{sv} によって一律に定まる領域が認め難いため、フロー値と δ/d_{sv} の関係が粒子径毎に異なることを、OPC-35系の場合と同じ理由によるものとすることはできない。

3. 4 平均粒子系 d_{sv} と

同一フロー値となる δ/d_{sv} の関係

粒子径によらずフロー値が δ/d_{sv} によって定まる場合は、同一フロー値となる δ/d_{sv} （以下、 $[\delta/d_{sv}]_F$ と略記する。）は細骨材粒子径によらず一定であるから、実験結果について d_{sv} と $[\delta/d_{sv}]_F$ の関係を調べ、図-3の結果と比較した。

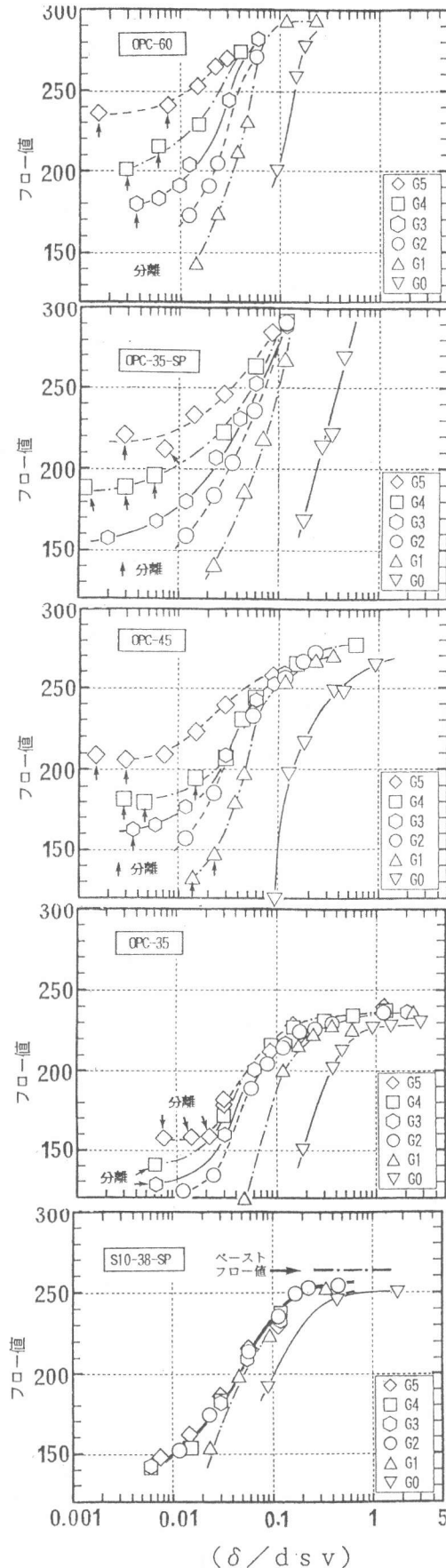


図-3 δ/d_{sv} とフロー値の関係

d_{sv} と $[\delta/d_{sv}]_F$ の関係を図-4に示す。図中の----は、ペースト中の粉体粒子の累積通過重量が90%となる粒子径（以下、 d_{90} と称す）を (d_{90}/d_{sv}) で示した。

これより、OPC-35系およびS10-38-SP系では、比較的フロー値が大きい場合、 $[\delta/d_{sv}]_F$ は、 d_{sv} によらずほぼ一定であり、フロー値が δ/d_{sv} だけで定まっている。

しかし、フロー値が小さくなるに従って d_{sv} の小さい方から順に $[\delta/d_{sv}]_F$ が増大している。このように、 $[\delta/d_{sv}]_F$ が増大するのは、OPC-35系、S10-38-SP系ともに、 $(d_{90}/d_{sv}) \geq (\delta/d_{sv})$ の領域である。即ち、これらのモルタルのフロー値は、余剰ペースト膜厚 δ がペースト中の粉体粒子に比べて十分に大きい場合（ $\delta > d_{90}$ ）は、 δ/d_{sv} により定まるが、膜厚 δ が粉体粒子の大きさと同程度（ $\delta \leq d_{90}$ ）まで減少すると、 δ/d_{sv} だけでは定まらなくなることが明らかとなった。この理由として、余剰ペースト膜厚が粉体粒子の大きさと同等以下になると、粉体粒子と骨材粒子との干渉などにより、粉体粒子の一部は余剰ペーストとして作用せず、流動性に寄与する実質的な膜厚 δ を確保するために、より多くの余剰ペーストが必要になるものと考えられる。

同一 δ/d_{sv} の場合、粒子径が小さい場合ほど膜厚 δ も小さい。従って、膜厚 δ がペースト中の粉体粒子径と同等になる δ/d_{sv} は、粒子径の小さい場合ほど δ/d_{sv} の値は大きい。図-3に示したOPC-35系とS10-38-SP系でG0, G1を用いたモルタルの δ/d_{sv} がある値以下で、 δ/d_{sv} とフロー値の関係が下側に離脱するのは、このような理由によるものと考えられる。S10-38-SP系の方が、G1を使用したときの δ/d_{sv} とフロー値の適合性が良いのは、S10-38-SPの方がペースト中の粉体粒子径が小さく、 δ/d_{sv} によってフロー値が定まる範囲が広いためである。

また、OPC-35-SP系、OPC-45系、OPC-60系でも粒子径の小さい場合ほど、 δ/d_{sv} とフロー値の関係が δ/d_{sv} の大きい側に位置する傾向があるのは、OPC-35系やS10-38-SP系と同じ理由による

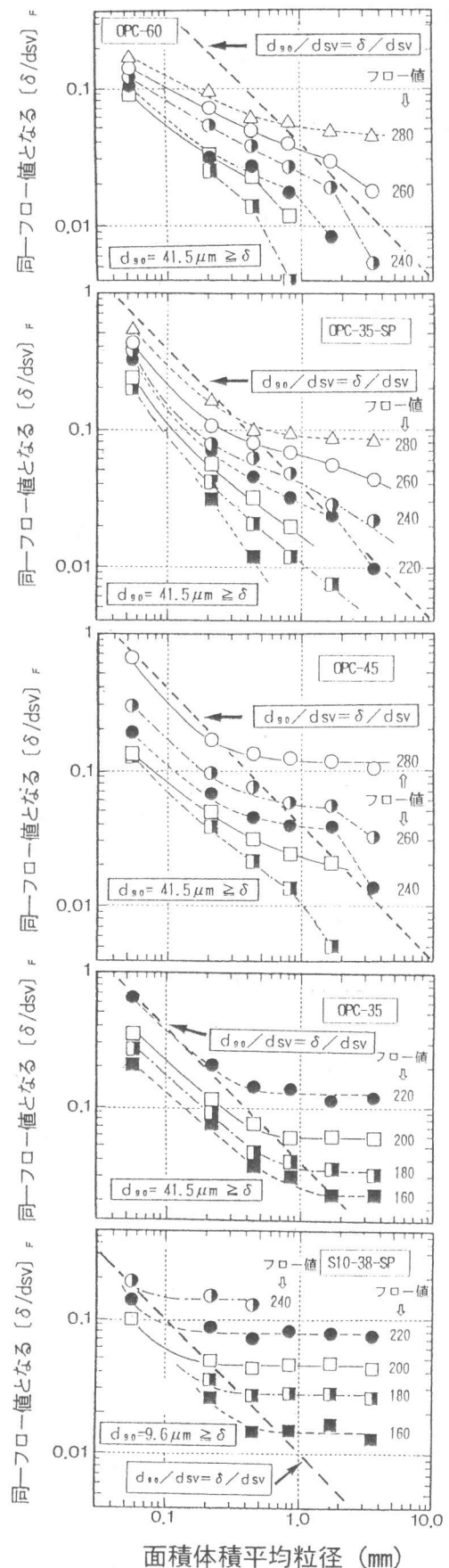


図-4 d_{sv} と同一フローとなる δ/d_{sv} の関係

ものと考えられる。

一方、OPC-45系では、 $\delta \geq d_{90}$ の範囲で、フロー値 280の $[\delta/d_{sv}]_F$ は、ほぼ一定の値となったが、フロー値が260, 240ではG5を用いた場合の δ/d_{sv} がG3, G4の値より小さくなった。

OPC-35-SP系でも、フロー値 280では、 $\delta \geq d_{90}$ で、 $[\delta/d_{sv}]_F$ はほぼ一定の値となった。しかし、これよりフロー値が小さい場合には、 $\delta \geq d_{90}$ であっても、 $[\delta/d_{sv}]_F$ は、 d_{sv} の増加に従って減少している。

OPC-60系は、OPC-35-SP系のフロー値 260以下の場合と同様であり、 $\delta \geq d_{90}$ であっても d_{sv} によらず $[\delta/d_{sv}]_F$ がほぼ一定の値になる範囲は認められなかった。

図-5は、G3, G4, G5の各粒子径毎に δ/d_{sv} とフロー値の関係を示したものである。図中の $\uparrow$ はOPCの d_{90} を示している。これより、分離を生じたモルタルのフロー値が δ/d_{sv} によらずほぼ一定となる値は、OPC-35-SP系, OPC-45系, OPC-60系の場合に大きく、粒子径が大きいほど大きくなることがわかる。しかし、これらの系では、 $\delta \geq d_{90}$ の範囲では分離は観察されていない。従って、 $\delta \geq d_{90}$ の範囲でOPC-35-SP系, OPC-45系, OPC-60系のフロー値と δ/d_{sv} の関係が粒子径によって異なる原因を目視で確認された分離状況と関連づけることはできなかった。

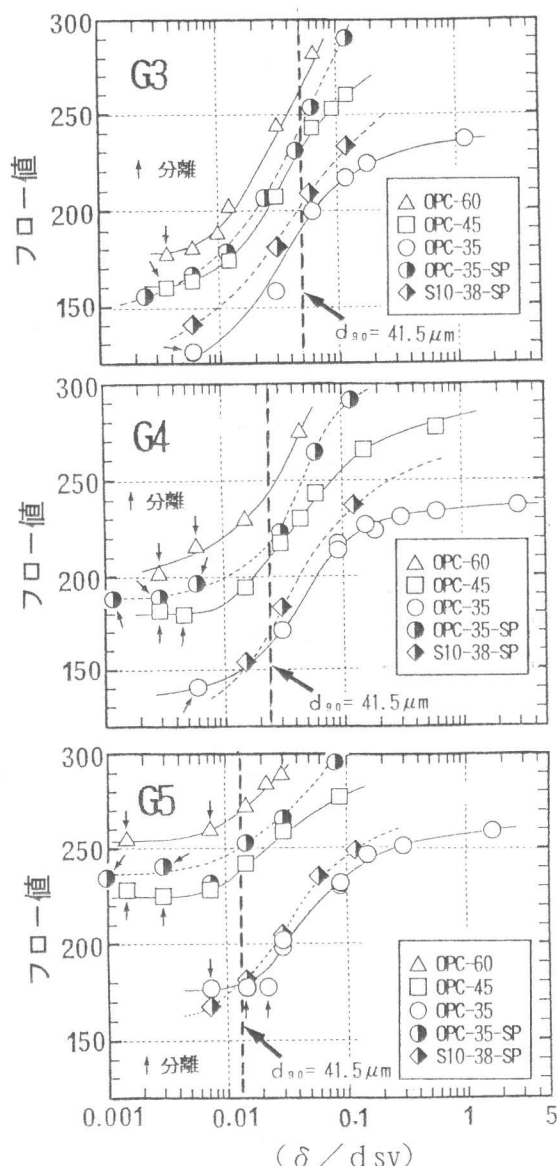


図-5 同一細骨材を用いた場合の δ/d_{sv} とフロー値の関係

4. まとめ

単一粒度の細骨材を用いたモルタルのフロー値は、比較的セメントペーストの粘性が大きなOPC-35系、S10-38-SP系では、 $[\text{ペースト膜厚 } \delta > \text{ペースト中の粉体粒子の最大径 (} d_{90} \text{)}]$ の範囲において分離が生じない場合に δ/d_{sv} によって定まることが明らかとなった。

しかし、OPC-35-SP系、OPC-45系、OPC-60系では、膜厚 $\delta > d_{90}$ の範囲においてもフロー値と δ/d_{sv} の関係が細骨材粒子径により異なる結果となった。この原因については、OPC-35系のようを目視観察で認められた分離状況と関連付けて考えることはできなかった。

[参考文献]

- 1) T. C. Powers : The Properties of Fresh Concrete, Jhon Wiley and Sons, Inc. 、 pp282-288, 1968
- 2) 松下博通ほか：モルタルのフロー値に及ぼす細骨材粒径と余剰ペースト膜厚の影響、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、 pp582-583、1992.9
- 3) 徳光善治：粉体のつめこみについて、粉体工学、 pp29-34、1965.9