

論文

[1010] モルタルフロー値に及ぼす粉体特性の影響

枝松良展*¹・下川浩児*²・岡村甫*³

1. はじめに

本研究は、締固め不要の自己充填コンクリートの配合設計法の確立に資することを目的として、粉体の特性がモルタルのフロー試験値に及ぼす影響を明らかにし、それを定量評価する方法を提案するものである。粉体はコンクリート構成材料の中で最も小さい固体粒子であり、その流動特性は自己充填性に大きく影響する。従って、粉体の流動特性を定量的に評価することは重要である。

2. モルタルのフロー試験

(1) 試験方法

モルタルのフロー試験は、JIS A 5201「セメントの物理試験方法」に規定されているフローコーンを用いて、水平な乾燥したガラス板上で行い、モルタルの振動を与えない水平な広がり測定し、これをフロー値とした。

(2) 練り混ぜ方法

モルタルの練り混ぜは、JIS A 5201に規定されているミキサを用い、粉体と一次水を低速回転で1分間、かき落とし、高速回転で1分間、細骨材と二次水を投入し低速回転で1分間、かき落とし、低速回転で1分間の順序で行った。一次水/粉体容積は粉体の標準軟度水量の1.1倍、1回の練り混ぜ量は1.5ℓ、高速回転は公転数140rpm、自転数285rpmである。

(3) 使用材料

使用した粉体は、中庸熟ポルトランドセメント (MC, 比重3.21, 3100cm²/g)、石灰石微粉末 (LS, 比重2.67, 4660cm²/g)、フライアッシュ (FA, 比重2.33, 3440cm²/g)、高炉スラグ微粉末 (BS6000, 比重2.89, 6440cm²/g)、中庸熟ポルトランドセメントに石灰石微粉末を60%混合したもの (LS60)、フライアッシュを60%混合したもの (FA60)、高炉スラグ微粉末 (BS4000, 比重2.89, 4370cm²/g) を80%混合したもの (BS80) である。使用した細骨材は、相馬産硅砂、富士川産川砂および木更津産山砂である (表-1, 図-1 参照)。

表-1 細骨材の特性

種類	表乾比重	実積率* (%)	吸水率 (Vol.%)	FM
相馬産硅砂	2.56	62.9	3.85	2.73
木更津産山砂	2.58	69.1	7.05	2.65
富士川産川砂	2.58	61.0	7.26	2.91

*) 0.15mm以下の粒子を取り除いた表乾状態の細骨材が単位容積当りに占める割合を示す。

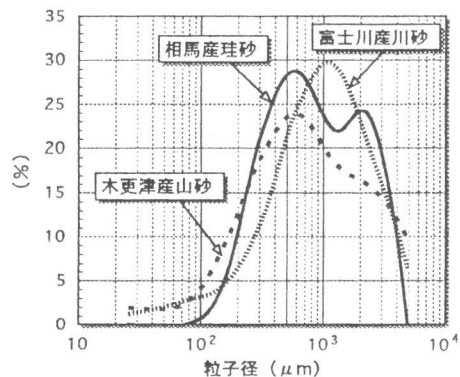


図-1 細骨材の粒度分布

ある粒子径範囲における分布値 (%) は、曲線をその範囲で積分したものである。なお、横軸は粒子径が2倍となる範囲を1とする。

*1 東京大学受託研究員 工学部土木工学科 (正会員)

*2 東京大学受託研究員 工学部土木工学科

*3 東京大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

3. 粉体の特性

(1) 粒度分布

2種類のレーザー回折型粒度分布測定装置（分散媒にはエタノールを使用）により測定した、MC, LS, FA, BS6000およびBS4000の粒度分布を図-2, 3に示す。これらの粒度分布は、測定により得られた累積値を以下に示す方法により処理したものである。また、図-1に示す細骨材の粒度分布も同じ処理を行ったものである。

①対数値で等間隔となるように粒径を定める。②各粒径における累積値を測定値から求める。ここで、測定値における粒径の隣り合う2点間の累積値は、2点間を直線近似し計算で求める。③各粒径間の分布値を累積値から求める。④粒径を対数として分布値をグラフにプロットする。ここで、分布値に対応する粒径の値は各粒径間の中心値となる。⑤各点をスプライン曲線で結ぶ。

図-2, 3に示すように、装置を変えて測定すると結果が異なることが認められる。しかし、同じ装置で測定されたもので、その分布形を比較することは可能である。そこで、各粉体の粒度分布特性を装置Aの測定結果から考察する。MCは粒径のピークが約30 μm 、ピークより小さい側はなだらかな分布、大きい側は急な分布、100 μm 以上の粗粒分は殆どない。BS4000, BS6000およびFAはMCと類似の分布であるが、BS4000のピークはMCより小さく約13 μm 、BS6000のピークはBS4000より小さく約9 μm 、FAのピークはMCより大きく約55 μm である。また、FAは100 μm 以上の粗粒分を多く含み、BS4000およびBS6000は0.1 μm 以下の粒子がMCより多い。LSは他の粉体と全く異なる分布をしている。ピークが約2 μm と約40 μm の位置に二つ存在し、その間はほぼ等間隔である。また、FAと同様に100 μm 以上の粗粒分を多く含む。

(2) 拘束水比および変形係数

ペーストのフロー面積比 ($\Gamma_p = (F_p/100)^2 - 1$ 、 F_p はペーストのフロー値 (mm)) と水粉体容積比 (V_w/V_p) との関係が線形関係にあることから、粉体の特性をその変形係数 (E_p) と拘束水比 (β_p) とで表せることが明らかにされている (図-4, 表-2参照) [1]。粉体の拘束水比または変形係数が小さい程、特性が良好なことを意味している。

LS系の拘束水比がMCより小さいのは、LSが不活性な粉体

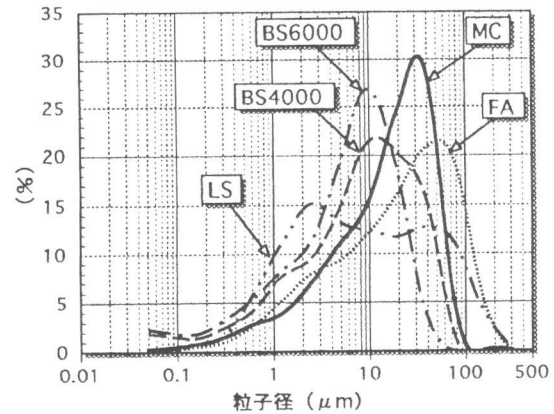


図-2 粉体の粒度分布 (測定装置A)

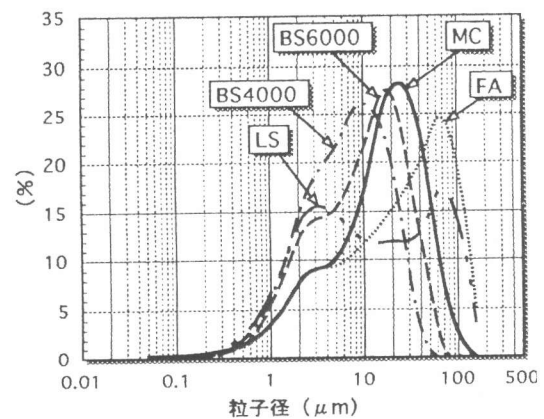


図-3 粉体の粒度分布 (測定装置B)

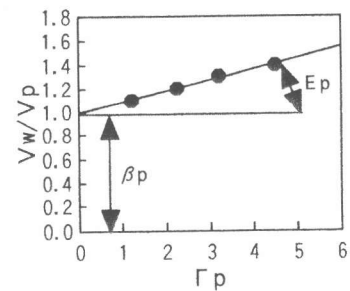


図-4 ペーストのフロー面積比 (Γ_p) と水粉体容積比 (V_w/V_p) との関係

表-2 粉体の特性値

粉体種類	拘束水比 β_p	変形係数 E_p
MC	0.99	0.092
LS	0.67	0.086
FA	0.54	0.033
BS6000	1.08	0.113
LS60	0.79	0.099
FA60	0.72	0.058
BS80	1.02	0.083

であること、粒度分布がなだらかなこと、粗粒分を多く含むことによると考えられる。FA系の拘束水比がMCより小さいのは、LS系と同様のことに加え、粒子形状が影響していると考えられる。このことは、FA系の変形係数が他の粉体より小さいことにも影響している。単独では不活性なBS系の拘束水比がMCと同程度なのは、BSが小さい粒子を多く含むためと考えられる。BS6000の変形係数が大きいのも粒子径の大きさが影響していると考えられる。

4. モルタルフロー値に及ぼす粉体特性の影響

4.1 モルタルフロー値の基本式

モルタルのフロー面積比は粉体と細骨材の特性値を用いて式(1)で表される[1]。これは、水粉体容積比と粗粒細骨材容積比とが一定の場合、粉体あるいは細骨材の特性値が小さい程、モルタルの流動性が良好であることを示している。

$$V_w / (V_p + V_{sf}) = E_m \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (1)$$

$$E_m = (1 - V_{sc}) (E_{p'} + E_{sc}) / \{1 - V_{sc} (1 + \beta_{sc})\} \quad (2)$$

$$\beta_m = \frac{\kappa_{pm} \cdot \beta_{p'} (1 - V_{sc}) + \beta_{sc} \cdot V_{sc} \{V_{sf} \cdot Q / (V_p + V_{sf}) + 1\}}{1 - V_{sc} (1 + \beta_{sc})} \quad (3)$$

$$E_{p'} = (E_p \cdot V_p + E_{sf} \cdot V_{sf}) / (V_p + V_{sf})$$

$$\beta_{p'} = (\beta_p \cdot V_p + \beta_{sf} \cdot V_{sf}) / (V_p + V_{sf})$$

$$V_p' = \{1 - (\kappa_{pm} \cdot \beta_{sf} \cdot V_{sf} + \beta_{sc} \cdot V_{sc} + V_s)\} / (\kappa_{pm} \cdot \beta_p + 1)$$

ここに、 V_w , V_p , V_{sc} , V_{sf} はモルタル中に占める水、粉体、粗粒細骨材、微粒細骨材の容積比率、 Γ_m はモルタルのフロー面積比 = $(F_m / 100)^2 - 1$ 、 F_m はモルタルのフロー値 (mm)、 E_m , β_m はモルタルの変形係数、モルタルの無変形状態における拘束水比、 E_p , β_p は粉体の変形係数、拘束水比、 E_{sc} , β_{sc} は粗粒細骨材の変形係数、見かけの拘束水比、 E_{sf} , β_{sf} は微粒細骨材の拘束水比、変形係数、 V_p' は無変形状態のモルタル中に占める粉体の容積比率、 κ_{pm} はペーストとモルタルの練混ぜ性能の相違による補正係数 (本研究では0.97の一定値を用いた。) Q は細骨材の吸水率 (容積比) である。

また、粗粒細骨材の見かけの拘束水比と変形係数は、それぞれ式(4)、式(5)に示す粗粒細骨材容積比の関数によって表される[1]。

$$\beta_{sc} = \beta_{sc0} + \beta_{scv} = \beta_{sc0} + A \left(\frac{1}{V_{scr} - V_{sc}} - \frac{1}{V_{scr} - V_{sci}} \right)^k \geq \beta_{sc0} \quad (4)$$

$$E_{sc} = B \left(\frac{1}{V_{sce} - V_{sc}} - \frac{1}{V_{sce}} \right)^{k_e} \quad (5)$$

ここに、 β_{sc0} , β_{scv} は粗粒細骨材の拘束水比、噛み合いによる変形拘束水比、 V_{scr} は拘束

水比における粗粒細骨材限界容積比、 V_{sci} は粗粒細骨材相互作用開始容積比、 V_{sce} は変形係数における粗粒細骨材限界容積比、 A 、 B は細骨材の種類により定まる定数、 k は定数（本研究では0.8の一定値を用いた。）、 k_e は粉体の種類により定まる定数である。

4.2 粗粒細骨材を用いたモルタルの流動性

モルタルの流動性はペースト試験から得られる粉体の特性値を与えれば、式(1)に示すように細骨材の特性値により定まるものである。ただし、細骨材の特性値はその容積比の関数で表され一定値ではない。そこで、 $150\mu\text{m}$ 以下の微粒を含んでいない相馬産硅砂を用いて、粉体を変えたモルタルのフロー試験を行い、モルタルの流動性に及ぼす粉体特性の影響を細骨材の特性値の変化から検討した。粗粒細骨材容積比を一定とし、水粉体容積比を変えたモルタルのフロー試験結果からその無変形状態における拘束水比と変形係数を求めると、粗粒細骨材の拘束水比と変形係数はそれぞれ式(2)、式(3)から、図-5および図-6に示す実験値として算定できる。図に示す実線は拘束水比と変形係数を表-3に示す材料定数を用いて、それぞれ式(4)、式(5)により求めたものである。モルタルのフロー面積比を表-3に示す材料定数を用いて式(1)により算出した結果の一例は、図-7に示すように実験値とほぼ一致している。これは、他のすべての場合にも同様であって、モルタルフローの基本式およびそれに用いる材料定数が妥当であることを示している。

粗粒細骨材の粗粒細骨材相互作用開始容積比と変形係数が使用する粉体によって異なることが図-5、6に示すように認められる。これは、モルタルの流動性が一定となる粗粒細骨材容積比が粉体により異なることを表しており、使用する粉体により自己充填性を満足させるための細骨材量の限度が異なることを示唆している。また、細骨材固有の特性を表している拘束水比 β_{sc0} は、粗粒細骨材容積比に関わらず一定値であるが、FAおよびBS6000の場合他の粉体の場合よりも小さくなっている。これは、ペーストの試験により得られた粉体の拘束水比より、このモルタル中での拘束水比の方が小さくなっているとも考えられる。BS6000はペースト試験では流動特性

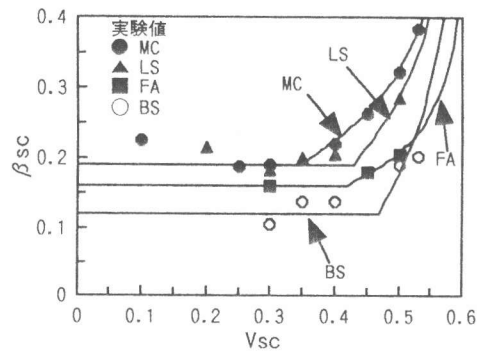


図-5 粗粒細骨材の見かけの拘束水比に及ぼす粉体の影響（粗粒硅砂の場合）

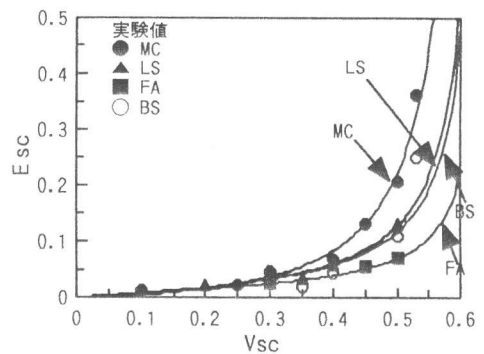


図-6 粗粒細骨材の変形係数に及ぼす粉体の影響（粗粒硅砂の場合）

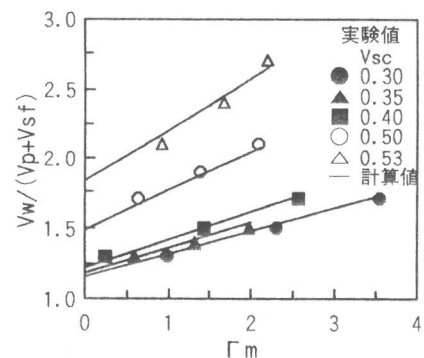


図-7 表-3に示す材料定数を用いて求めた水粉体容積比($V_w/(V_p+V_{sf})$)とフロー面積比(Γ_m)との関係と実験値の比較 (BS6000と粗粒硅砂を用いた例)

表-3 相馬産硅砂（粗粒分）の特性値に係わる材料定数

粉体	拘束水比 β_{sc}					変形係数 E_{sc}		
	β_{sc0}	V_{scr}	V_{sci}	A	k	V_{sce}	B	k_e
MC	0.19	0.629	0.35	0.043	0.8	0.629	0.025	1.20
LS	0.19		0.43	0.043			0.025	0.90
FA	0.16		0.42	0.020			0.020	0.70
BS6000	0.12		0.47	0.043			0.025	0.85

の悪い粉体と評価されるが、粗粒細骨材を用いたモルタルにすると必ずしも悪くない。これらのことは、以下に示すような粉体の粒形と粒度分布特性の影響によると考えられる。LSは粗粒分を多く含む粉体である。LSを粗粒細骨材に混合すると、その粗粒分によって見かけ上細骨材の実績率が大きくなる。これにより、細骨材同士の噛み合いが始まりモルタルの流動性が低下する粗粒細骨材相互作用開始容積比はMCの場合より大きくなると考えられる。FAはLSと同様に粗粒分を多く含む、また粒子形状が良い粉体である。これにより、細骨材同士の噛み合いや摩擦による変形抵抗の程度が緩和され、拘束水比、変形係数および定数AはMCの場合より小さくなり、粗粒細骨材相互作用開始容積比は大きくなる。BS6000は小さい粒径の粒子を多く含む粉体である。これにより、細骨材と合わせた系の粒度分布が良くなるため、拘束水比および変形係数はMCの場合より小さくなると考えられる。

4.3 微粉を含む細骨材を用いたモルタルの流動性

90 μ m以下の微粉を含む細骨材として富士川産川砂と木更津産山砂とを用いて、粉体を変えたモルタルのフロー試験を行い、モルタルの流動性に及ぼす粉体特性の影響を相馬産硅砂の場合と同様にして検討した(図-8, 9, 10, 11, 表-4参照)。ここで、90 μ m以下の微粉細骨材は拘束水比 $\beta_{sf}=1.0$ 、変形係数 $E_{sf}=0$ の粉体とし[1]、細骨材に関わらず一定値とした。表-4に示す材料定数から求めた拘束水比と変形係数とを用いて式(1)により算出した一例を図-12に示すが、実験値と極めて良く一致していることが認められる。他の例についても同様であって、表-4の材料定数が妥当であることを確認している。

微粉を含む細骨材を用いた場合にも、粉体によって細骨材の特性値が異なることが認められるが、その傾向は相馬産硅砂を用いた場合と相違している。また、LS60の場合、拘束水比 β_{sc0} がMCより大きくなっている。これらは、以下に示すことから説明できると考えられる。

LSは100 μ m以上の粗粉を多く含む粉体である。LS60の場合に拘束水比と変形係数がMCに比べ大きいのは、それに含まれている100 μ m以上の粗粉が細骨材の微粉と干渉し、モルタルの流動性が低下することによるものである。また、木更津産山砂より富士川産川砂の変形係数が大きいのは、両者の粒形の違いによる影響と考えられる。FAもLSと同

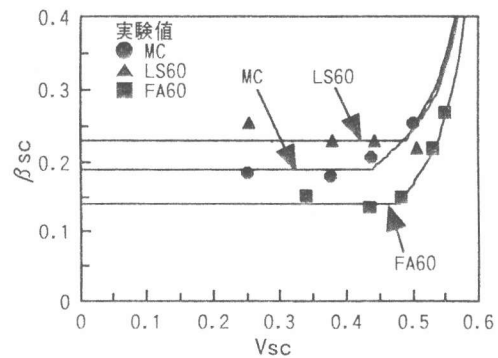


図-8 粗粒細骨材の見かけの拘束水比に及ぼす粉体の影響(富士川産川砂の場合)

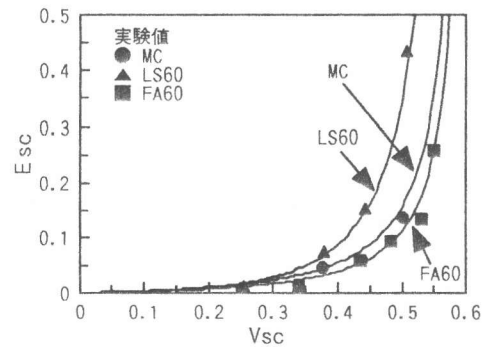


図-9 粗粒細骨材の変形係数に及ぼす粉体の影響(富士川産川砂の場合)

表-4 富士川産川砂および木更津産山砂の特性値に係わる材料定数

細骨材	粉体	拘束水比 β_{sc}					変形係数 E_{sc}		
		β_{sc0}	V_{scr}	V_{sci}	A	k	V_{sce}	B	k_e
富士川	MC	0.19	0.610	0.44	0.021	0.8	0.610	0.014	1.20
	LS60	0.23		0.49				0.014	1.60
	FA60	0.14		0.48				0.010	1.20
木更津	MC	0.14	0.691	0.48	0.031	0.691	0.030	1.20	
	LS60	0.20						1.25	
	BS80	0.14						1.20	

様に100 μ m以上の粗粉を多く含む粉体であるが、その粒子形状の良いことが干渉の程度を小さくし、拘束水比と変形係数の増加を抑制している。BS4000の粒子は100 μ m以下であり、粒度分布はMCと類似している。従って、BS80とMCの細骨材の特性値は一致する。このことは、約100 μ m以下の粉体が細骨材の微粒部分と干渉しないことを示し、また粉体の粒度分布特性が類似ならば、モルタルの流動性はペーストの試験から得られる特性値により評価できることを示している。

このように、粉体中の粗粒部分、本研究の範囲では約100 μ m以上の粒子は、細骨材の微粒部分の粒子と干渉し、モルタルの流動性を低下させると考えられるため、ペースト試験により流動特性が良好と評価される粉体でも、粗粒粒子を多く含むものはモルタルにするとう流動特性の悪い粉体となる。しかし、粒子形状の良い粉体は干渉が緩和され、モルタルの流動性は低下しないと考えられる。

5. まとめ

モルタルの流動性に及ぼす粉体特性の影響を細骨材の特性値の変化から検討した結果、以下に示すことが明らかになった。

(1) 粉体の粒度分布特性、粒子形状および粗粉部分の粒子はモルタルの流動性に影響を及ぼし、細骨材の特性値を変化させる。したがって、粉体の特性は、ペーストの試験から得られる特性値に加え、モルタル試験から得られる細骨材の特性値で評価する必要がある。

(2) 自己充填性を満足させるための細骨材量の限度は粉体により異なると思われるが、その量は粗粒細骨材容積比と粗粒細骨材の拘束水比および変形係数との関係から判断できる可能性がある。

(3) 粉体の粒度分布、粒子形状がモルタルの流動性に与える影響、ならびに粉体の粗粉と細骨材の微粒の干渉の程度を定量化することができれば、粉体の特性は粒度特性から計算により求められる可能性が高い。そのためには、粉体の粒度分布の測定方法を確立することが重要である。

参考文献

- 1) 山口昇三・枝松良展・岡村甫；モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集Vol.16、1994

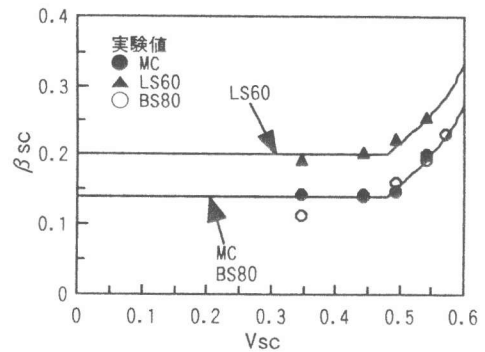


図-10 粗粒細骨材の見かけの拘束水比に及ぼす粉体の影響 (木更津産山砂の場合)

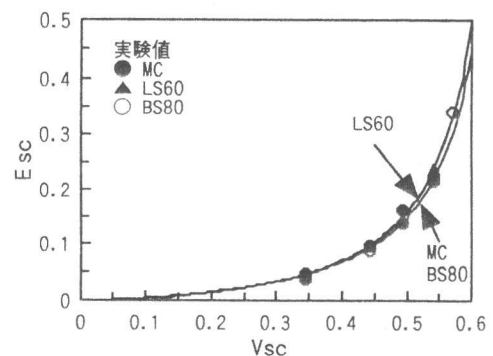


図-11 粗粒細骨材の変形係数に及ぼす粉体の影響 (木更津産山砂の場合)

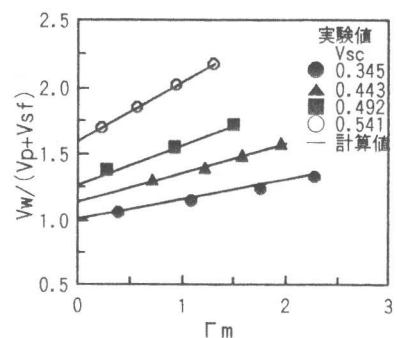


図-12 表-4に示す材料定数を用いて求めた水粉体容積比($V_w/(V_p+V_{sf})$)とフロー面積比(Γ_m)との関係と実験値の比較 (LS60と木更津産山砂を用いた例)