

## [1011] モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響

山口昇三<sup>\*1</sup>・枝松良展<sup>\*2</sup>・岡村甫<sup>\*3</sup>

## 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、細骨材の特性がモルタルのフロー試験値に及ぼす影響を定量評価する方法を提案するものである。形状や粒度分布等の細骨材特性が相違すると、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のは明らかであり、その限度を判断するには、モルタルのフロー試験値に及ぼすこれらの影響を定量化するのが有効であると考えたのである。

## 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を測定し、これをフロー値とした。

## (2) 練混ぜ方法

モルタルの練混ぜは、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

使用した細骨材は、富士川産川砂、木更津産山砂および粒度の異なる2種類の相馬産硅砂である（表-1参照）。硅砂2は硅砂1に0.15mm以下の粒子を26%混入したものと同等である。なお、本研究では細骨材の表面乾燥飽水状態を細骨材に1000Gの遠心力を20分間作用させたときの状態とした。遠心力による細骨材の脱水方法は、JIS A 1802「コンクリート生産工程管理用試験方法（遠心力による細骨材の表面水率試験方法）」を参考にした。使用した粉体は中庸熟ポルトランドセメントである（表-2参照）。

表-1 細骨材の特性

種類	表乾比重	実積率* (%)	吸水率 (Vol.%)	各ふるいに留まる量 (%)								FM
				5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.09	0.063	
相馬産硅砂1	2.56	62.9	3.85	0	0	35	51	87	100	100	100	2.73
相馬産硅砂2	2.55	63.1	4.80	0	0	26	37	62	74	78	88	1.99
木更津産山砂	2.58	69.1	7.05	0	14	31	51	77	92	96.4	97.6	2.65
富士川産川砂	2.58	61.0	7.26	0	9	34	67	87	94	96.5	98.5	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たりに占める割合を示す。

表-2 粉体（中庸熟ポルトランドセメント）の特性

比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結水量 (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	1g. los (%)	C3S (%)	C3A (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	R2O (%)	拘束水比 $\beta_p$	変形係数 $E_p$
3.21	3100	27.4	1.4	1.8	0.5	47	5	0.23	0.48	0.55	0.99	0.092

\*1 竹本油脂（株）第三事業部（正会員）

\*2 東京大学受託研究員 工学部土木工学科（正会員）

\*3 東京大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

### 3. ペーストフロー値の基本式

ペーストのフロー試験値は、粉体の特性と水粉体容積比によって定まり、フロー面積比と水粉体容積比とが式(1)で表される線形関係にあることが既に明らかにされている(図-1参照)[1]。ここで、粉体の特性は、変形係数と拘束水比とで表現され、これらの値が粉体によって定まる。なお、これらの値が小さい程、粉体の特性が良好であることを意味している。また、フロー値の増加に寄与しない拘束水量を全水量から差し引いたものを自由水量と定義すると、自由水粉体容積比とペーストのフロー面積比とは、式(2)のように、比例関係にある[1]。

$$V_w/V_p = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad (1)$$

$$V_{wf}/V_p = E_p \cdot \Gamma_p \quad (2)$$

$V_w/V_p$ : 水粉体容積比、 $V_{wf}/V_p$ : 自由水粉体容積比 =  $V_w/V_p - \beta_p$

$\Gamma_p$ : ペーストのフロー面積比 =  $(F_p/100)^2 - 1$

$F_p$ : ペーストのフロー値 (mm)

$E_p$ : 粉体の変形係数、用いた粉体は0.092

$\beta_p$ : 粉体の拘束水比、用いた粉体は0.99

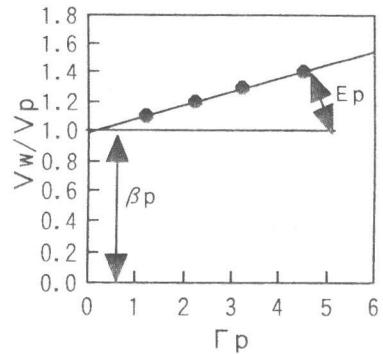


図-1 水粉体容積比( $V_w/V_p$ )とペーストのフロー面積比( $\Gamma_p$ )との関係は線形関係にあり、粉体の特性はその変形係数( $E_p$ )と拘束水比( $\beta_p$ )とで表される。

### 4. モルタルフロー値の基本式

細骨材の(モルタル流動に対する)特性も、その変形係数と拘束水比とで表現でき、モルタルのフロー面積比がその自由水粉体容積比と式(3)のような比例関係にあると仮定すると、細骨材容積を一定としたモルタルでは、その水粉体容積比とフロー面積比との関係は、式(4)で表される線形関係となる。

$$V_{wf}/V_p = (E_p + E_s) \cdot \Gamma_m \quad (3)$$

$$V_{wf} = V_w - \beta_p \cdot V_p - \beta_s \cdot V_s$$

$\Gamma_m$ : モルタルのフロー面積比 =  $(F_m/100)^2 - 1$

$F_m$ : モルタルのフロー値 (mm)

$V_s$ : 細骨材容積比、モルタル中に占める細骨材の容積比率

$E_s$ : 細骨材の変形係数、 $\beta_s$ : 細骨材の拘束水比

$$V_w/V_p = E_m \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (4)$$

$E_m$ : モルタルの変形係数

$$= [(1 - V_s)(E_p + E_s)] / [1 - V_s(1 + \beta_s)] \quad (5)$$

$\beta_m$ : モルタルの無変形状態における拘束水比

$$= [\kappa_{pm} \cdot \beta_p (1 - V_s) + \beta_s \cdot V_s] / [1 - V_s(1 + \beta_s)] \quad (6)$$

$\kappa_{pm}$ : 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。

0.15mm以下の微粒を含んでいない粗粒細骨材珪砂1を用いて、細骨材容積を一定として、水粉体容積比を変化させたモルタルのフロー試験を行った。その結果、モルタルの水粉体容積比とフロー面積比との関係は、細骨材容積比が0.10から0.53の広い範囲にわたった合計7種類の細骨材容積比において、いずれも線形と認められた（図-2参照）。このことは、モルタルのフロー値に関する基本式（3）が妥当であることを示している。

### 5. 細骨材の拘束水比と変形係数

モルタルフロー値の基本式における細骨材の拘束水比は、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を行い、その無変形状態における拘束水比を求める式（6）を変換した式（7）によって算定できる。

粗粒細骨材珪砂1を用いたモルタルのフロー試験の結果（図-2）から求めた細骨材の拘束水比は、細骨材容積比が小さい場合ほぼ一定であると認められ、この値が細骨材の特性値として意味をもつと考えられる（図-3参照）。しかし、この拘束水比は、細骨材容積比がある値、この場合は約0.35を越えると、細骨材容積比の増加に伴い急激に増加しており、細骨材が拘束する水だけとは考えにくい。細骨材の容積がある限度を越えると、細骨材どうしの接触の機会が増えて、互いに噛み合いが生じたり、摩擦による変形抵抗が増加することが考えられ、見かけ上拘束水比が増加することになる。この増加を始める細骨材容積比とその増加の程度を表す定数は、モルタルの流動性に及ぼす細骨材の特性と考えられ、これをも含めて細骨材の見かけの拘束水比と定義し、細骨材容積比に係わらない一定値と細骨材容積比の関数との和で表わした。後者は、細骨材の接触が増加し始める細骨材容積比と、これ以上の容積比とすると全くモルタルが変形しない限界の拘束比とを、細骨材の特性を表す材料定数とし、式（10）の形で表したのである。

モルタルフロー値の基本式における細骨材の変形係数は、細骨材どうしの接触や噛み合いによる変形抵抗の程度を示す特性値であり、細骨材容積

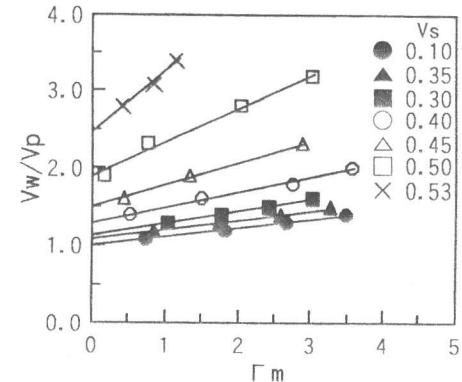


図-2 0.15mm以下の微粒を含んでいない粗粒細骨材珪砂1を用いて、細骨材容積比( $V_s$ )を一定とした場合、水粉体容積比( $V_w/V_p$ )とモルタルのフロー面積比( $\Gamma_m$ )とは線形関係にある。

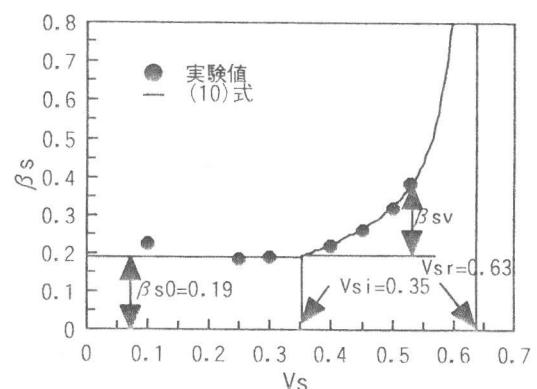


図-3 図-2の実験における $\beta_m$ を用いて(7)式によって求めた細骨材の拘束水比( $\beta_s$ )。細骨材容積比( $V_s$ )に係わらない一定値( $\beta_{s0}$ )と細骨材容積比の関数( $\beta_{sv}$ )との和で表される。

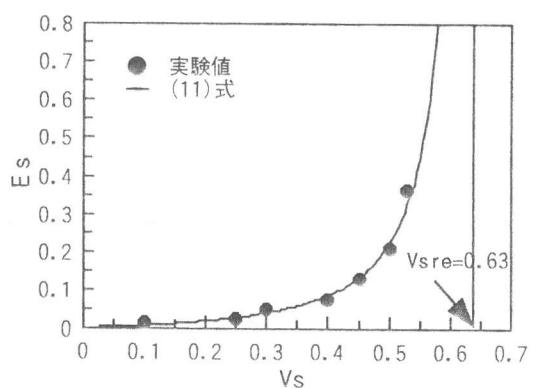


図-2の実験における $E_m$ と図-3の $\beta_s$ とを用いて(8)式によって求めた細骨材の変形係数( $E_s$ )。細骨材容積比( $V_s$ )の増加に伴い急激に増加する。

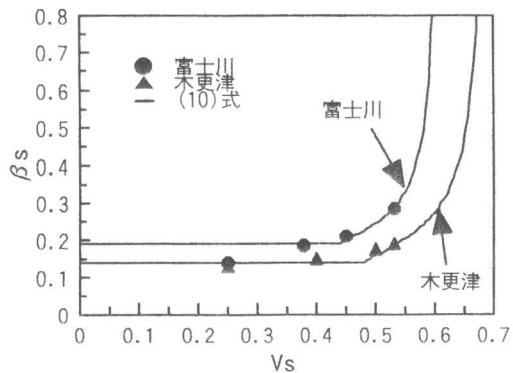


図-5 富士川産川砂および木更津産山砂を篩って、0.15mm以上の粒径のみを用いたモルタルのフロー試験から求めた拘束水比( $\beta_s$ )。

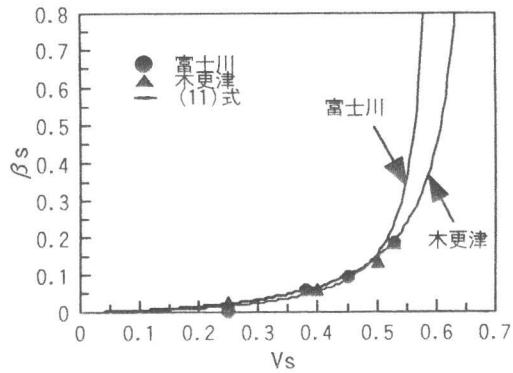


図-6 富士川産川砂および木更津産山砂を篩って、0.15mm以上の粒径のみを用いたモルタルのフロー試験から求めた変形係数(Es)。

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を行うと、(5)式を変換した(8)式によって求まる。

粗粒細骨材硅砂1を用いたモルタルのフロー試験の結果

(図-2)から求めた細骨材の変形係数は、細骨材容積比の小さい範囲では、細骨材どうしの接触確率が小さいため、細骨材容積比の増加に伴う増加率は小さいが、細骨材の接触機会が大きくなる細骨材容積比の大きい範囲では、その増加率が急激に大きくなる(図-4参照)。この関係は、式(11)の形で表すことができ、これ以上の容積比とするとモルタルの変形係数が無限大となる容積比および変形係数の増加の程度を表す定数は、細骨材の特性を表す材料定数と考えられる。

富士川産川砂および木更津産山砂を篩って、0.15mm以上の粒径のみを用いたモルタルのフロー試験から、それぞれの拘束水比と変形係数とを求めるとき、富士川産川砂は相馬産硅砂よりも小さく、木更津産山砂はさらに小さく、細骨材によってその流動特性値が異なることが明確に判断できる(図-5および図-6参照)。

なお、それぞれの材料定数を算出し(表-3参照)、これらを用いて、式(3)よりフロー面積比を計算し、実験値と比較し、両者が良く一致することを確認した(図-7参照)。

$$\beta_s = [(\beta_m - \kappa_{pm} \cdot \beta_p) / (1 + \beta_m)] \cdot [(1 - V_s) / V_s] \quad (7)$$

$$E_s = E_m [1 - V_s (1 + \beta_s)] / (1 - V_s) - E_p \quad (8)$$

$$\beta_s : \text{細骨材の見かけの拘束水比} = \beta_{s0} + \beta_{sv} \quad (9)$$

$\beta_{s0}$  : 細骨材の拘束水比

$\beta_{sv}$  : 細骨材の噛み合いによる変形拘束水比で、細骨材容積比の関数

$$= A [1 / (V_{sr} - V_s) - 1 / (V_{sr} - V_{si})] ^k \quad (10)$$

$V_{sr}$  : 拘束水比における細骨材限界容積比、 $V_{si}$  : 細骨材相互作用開始容積比

A : 定数

k : 定数で、0.8の一定値を用いた。

$$E_s = B [1 / (V_{sre} - V_s) - 1 / V_{sre}] ^{k_e} \quad (11)$$

$V_{sre}$  : 変形係数における細骨材限界容積比、B : 定数

$k_e$  : 定数で、1.2の一定値を用いた（粉体によって異なる）。

## 6. 細骨材の微粒分の取扱い

一般の細骨材は、当然のことながら、0.15mm以下の微粒分を含んでいる。その一部は、モルタルのフロー試験において、細骨材というよりもむしろセメントのような粉体としての役割をしていると考えられる。微粉分の拘束水比および変形係数は、その容積に係わらず一定値（図-1）となる。すなわち微粉分は、モルタルの流動性を考えるに際して、粗粒細骨材とは全く異なる性質のものである。そこで、粒径によって細骨材を粗粒と微粉とに大きく二つに分類することを考えた。微粉細骨材はある粒径よりも小さいもので、モルタルの流動性の観点からはセメント等の粉体と同様と考えることが適当なものである。

細骨材として0.15mm以上の粒度分布が硅砂1と同様であるが、0.15mm以下の粒径を含んでいる硅砂2を用いてモルタルのフロー実験を行い、粗粒と微粉の境界粒径を求めた。まず、境界粒径を、0.15mm、0.09mm、0.063mmおよび0.00mmとし、この境界粒径より

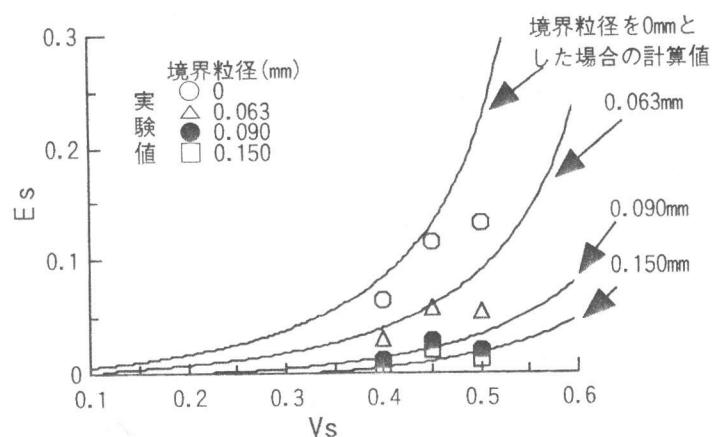


図-8 硅砂2のモルタルの変形係数( $E_m$ )の実験値から、境界粒径を変えて粗粒細骨材の変形係数( $E_s$ )を求める計算値と比較したもの。

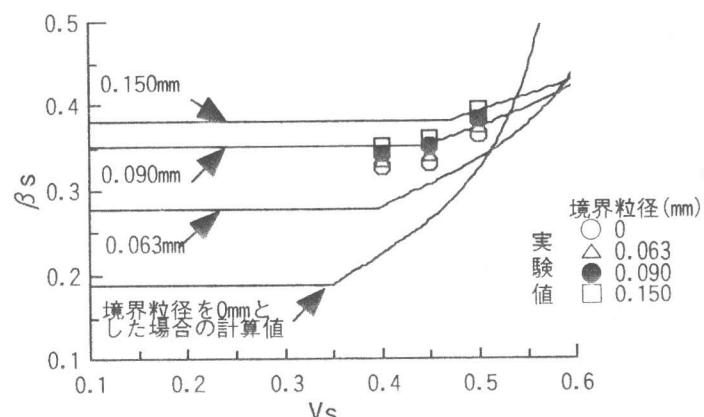


図-9 硅砂2のモルタルの拘束水比( $\beta_m$ )の実験値から、境界粒径を変えて粗粒細骨材の拘束水比( $\beta_s$ )を求める計算値と比較したもの。

大きい部分の粗粒細骨材の拘束水比および変形係数の計算値を硅砂1と同じであるとして求めた。ついで、モルタルの拘束水比と変形係数の実験値から、微粉細骨材の拘束水比をセメントと同程度の1.0とし、変形係数を0として、粗粒細骨材の拘束水比および変形係数を求め、これらを実験値とし、計算値と比較した。なお、微粉細骨材の変形係数を変化させても、境界粒径の判定には影響を与えないもので、実験値と計算値の適合性の良い0とした。このことは、微粉細骨材を混合した粉体の変形係数は、微粉細骨材の量が増えるにしたがって、減少することを意味している。

粗粒細骨材の変形係数の実験値は、境界粒径の採り方によって著しく相違するが、いずれの境界粒径に対してもほぼ計算値と一致し、その結果から、境界粒径を求めるることはできない（図-8参照）。一方、拘束水比の実験値は、境界粒径の採り方によつてほとんど変化せず、境界粒径を0.09mmとする場合の計算値とほぼ一致した（図-9参照）。また、境界粒径を0.09mmとして求めたモルタルフローの計算値は、実験値と極めて良い一致を示している（図-10参照）。このことは、実験に用いた細骨材の粒度分布の場合は、0.09mmを境界粒径としても良いことを示すものであるが、0.09mm前後の粒度分布が異なる場合には、必ずしも同様な結果が得られるとは限らない。しかし、ある境界粒径以下の細骨材を粉体と考える必要があることは確認されたのであって、今後この種の実験を追加することで、微粉細骨材の定義がより明確になると思われる。

## 7.まとめ

細骨材の特性がモルタルのフロー試験値に及ぼす影響を定量的に評価する方法を検討した結果、以下に示すことが明らかとなった。

- (1) モルタルのフロー値に及ぼす細骨材の影響は、見かけの拘束水比と変形定数とによって表すことができる。
- (2) 細骨材の見かけの拘束水比は、細骨材容積にかかわらず一定値をとる拘束水比と、細骨材容積比がある限度を越えて増加すると増え始め、やがて急激な増加を示す変形拘束水比よりなる。
- (3) 細骨材の変形係数は細骨材容積比が増すに従って徐々に増加し、やがて急激に増加する。
- (4) 細骨材中の微粒分は、モルタルの流動性を考えるに際して、粉体としての性質をもっている。その境界は0.09mm前後と考えられる。

## 参考文献

- 1) 大内雅博・小澤一雅：フッレッシュモルタルの変形性に及ぼす粉体特性の影響、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部、1991.9

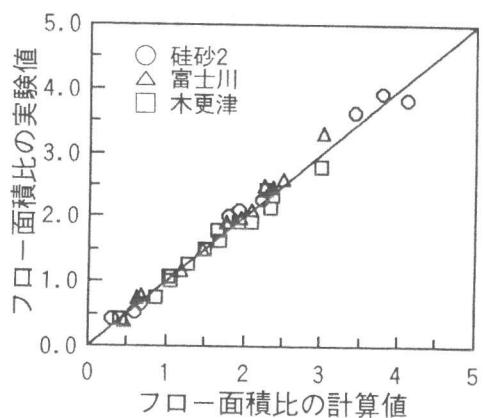


図-10 境界粒径を0.090mmとし、各細骨材の材料定数(表-3参照)を用いて、(3)式よりフロー面積比を計算し、実験値と比較したもの。