

# 論文 粉体・細骨材の物理的特性に影響されるモルタルの流動性の定量化

枝松 良展<sup>\*1</sup>・西田 直樹<sup>\*2</sup>・菅俣 匠<sup>\*3</sup>・大内 雅博<sup>\*4</sup>

**要旨:**水粉体容積比に影響されるフレッシュモルタルの流動性を、拘束水比（モルタルが流動を始めるのに必要な水粉体・水細骨材容積比）および単位流動水比（モルタルの流動指数を単位量変化させるのに必要な水粉体・水細骨材容積比）を用いて表し、これらに及ぼす粉体・細骨材の物理的特性の影響を検討した。拘束水比は、粒子の形状や大きさには大きな影響を受けず、水和反応の有無の影響を受けることが明らかとなった。単位流動水比は、粗粒率の大きい細骨材ほど、また比表面積が小さく粒子形状の丸い粉体ほど小さくなることが明らかとなった。

**キーワード:**フレッシュモルタル、流動性、細骨材、粉体、拘束水比、単位流動水比

## 1.はじめに

フレッシュコンクリートの自己充填性は、その変形性と材料分離抵抗性に支配される。自己充填コンクリートは、これらをバランスさせることによって実現できる。一方、フレッシュコンクリートの変形性および材料分離抵抗性は、コンクリート中のモルタルの粘性、変形性および粗骨材量に支配される<sup>1)</sup>。したがって、自己充填コンクリートを合理的に配合設計するためには、モルタル構成材料がモルタルの粘性および変形性、すなわち流動性に及ぼす影響を定量的に評価することが重要となる。

フレッシュモルタルの流動性を定量評価する手法として、流動性を表す指標の一つである変形性（相対フロー面積比）と水粉体容積比の直線関係から得られるモルタルフローに関わる材料特性値を用いる方法が筆者らにより提案されている<sup>2)</sup>。これにより、高性能AE減水剤などの混和剤を使用しないフレッシュモルタルの変形性に関わる材料評価が可能となった。しかし、混和剤を使用しないコンクリートは現実的でないことから、この材料特性値は配合設計に有効利用されていないのが現状である。

一方、フレッシュモルタルの粘性および変形性をそれぞれ独立に評価する指標を用いて、水あるいは混和剤によるモルタル構成粒子の分散の程度を評価する手法が提案された<sup>3),4)</sup>。これにより、混和剤を用いたモルタルの流動性に及ぼす水粉体容積比の影響を、混和剤添加率の影響と独立に評価できるようになった。

本研究は、この手法を利用して、水粉体容積比に影響されるフレッシュモルタルの流動性を評価し、粉体および細骨材の物理的特性がこの流動性に及ぼす影響を検討するものである。

## 2.モルタルの流動性評価指標<sup>3),4)</sup>

図-1に示すように、高性能AE減水剤添加率を固定し水粉体容積比を変化させた場合、またその逆の場合でも、相対漏斗速度比に代表されるフレッシュモルタルの粘性と相対フロー面積比に代表される変形性は、共に変化することが明らかにされている。したがって、水粉体容積比や高性能AE減水剤添加率がフレッシュモルタルの粘性または変形性に及ぼす影響を検討する場合には、これらを独立に評価することが重要である。

\*1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所

\*3 (株)エヌエムピー 中央研究所 主任 博士(工学) (正会員)

\*4 高知工科大学専任講師 工学部 社会システム工学科 博士(工学) (正会員)

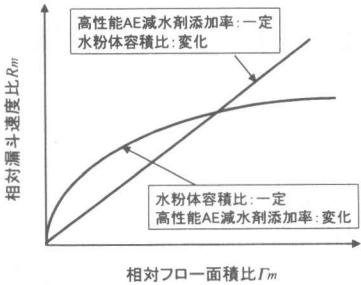


図-1 相対フロー面積比と相対漏斗速度比の関係に及ぼす水粉体容積比、高性能AE減水剤添加率の影響

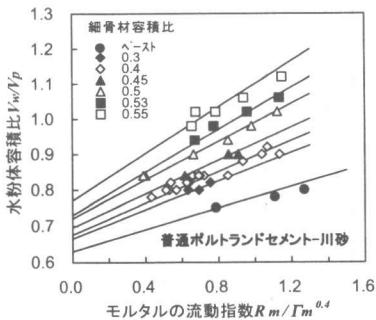


図-2 細骨材容積比を固定したモルタルの流動指数と水粉体容積比の関係

フレッシュモルタルの粘性を変形性に独立で評価する指標として、モルタルの相対漏斗速度比  $R_m$  をモルタルの相対フロー面積比  $\Gamma_m$  の 0.4 乗で除したモルタルの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  が提案されている。図-2 は、各細骨材容積比において、水粉体容積比および高性能 AE 減水剤添加率を任意に設定したモルタルおよびペーストの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  と水粉体容積比の関係を示したものである。流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  と水粉体容積比の関係は、高性能 AE 減水剤添加率に拘わらず細骨材容積比ごとに直線関係になる。すなわち、流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  により、フレッシュモルタルの流動性に及ぼす水粉体容積比の影響を高性能 AE 減水剤に独立で評価できるのである。そこで本研究では、フレッシュモルタルの流動性を流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  により評価した。また、モルタル流動に対して良好な粉体あるいは細骨材を、同一水粉体容積比および細骨材容積比において、流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  を大きくすることのできるものと定義した。

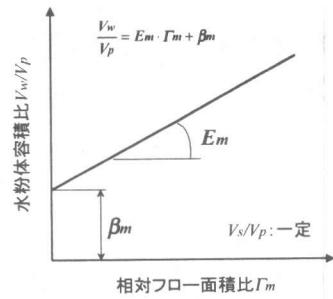


図-3 相対フロー面積比と水粉体容積比の直線関係<sup>2)</sup>

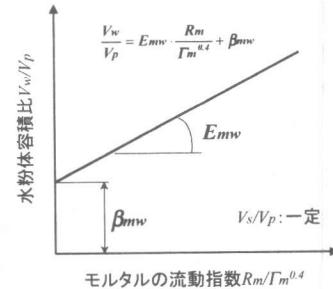


図-4 モルタルの流動指数と水粉体容積比の直線関係

### 3. モルタルの流動性の定式化

筆者らは、モルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比の直線関係（式(1)、図-3）を材料特性値（変形係数： $E_s$ 、 $E_p$ 、フローに関する拘束水比： $\beta_s$ 、 $\beta_p$ ）を用いて定式化し、モルタルフローに及ぼす粉体・細骨材特性の影響をこれらの材料特性値により評価した<sup>2)</sup>。そこで本研究でも、モルタルの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  と水粉体容積比の直線関係を同様に定式化し（式(4)、図-4），モルタル流動に関する材料特性値により粉体・細骨材特性を評価することとした。なお、式(1)は細骨材と粉体の容積比  $V_s/V_p$  が一定の下で成立するものであるが、モルタルの相対フロー面積比が 4 より小さい範囲では、細骨材容積比を一定とした場合でも、相対フロー面積比と水粉体容積比はほぼ直線関係になることが明らかにされている。また、V 漏斗試験により測定されるペーストあるいはモルタルの平均流下速度と水粉体容積比の関係は、直線関係になることが明らかにされている<sup>5)</sup>。そこで、本研究では、流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  が 1.4 より小さい範囲

において、細骨材容積比を一定とした場合にも式(1)を適用できると考えたのである。

式(4)では、式(1)におけるモルタルフローに関する材料特性値（変形係数、フローに関する拘束水比）に替わって、新たにモルタル流動に関する材料特性値（単位流動水比： $E_{sw}$ ,  $E_{pw}$ , 流動に関する拘束水比： $\beta_{sw}$ ,  $\beta_{pw}$ ）を用いた。ここで、単位流動水比は、モルタルの流動指数を単位量変化させるのに必要な水粉体・水細骨材容積比を意味し、流動に関する拘束水比は、モルタルが流動を始めるのに必要な水粉体・水細骨材容積比を意味する。したがって、これらの特性値が小さいものほど、同一配合条件における流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  は大きくなり、流動性は良好と評価される。

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

$$E_m = \left( E_p + E_s \cdot \frac{V_s}{V_p} \right) \frac{1 - V_s}{1 - V_s (1 + \beta_s)} \quad (2)$$

$$\beta_m = \frac{\beta_p (1 - V_s) + \beta_s \cdot V_s}{1 - V_s (1 + \beta_s)} \quad (3)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = E_{mw} \cdot \frac{R_m}{\Gamma_m^{0.4}} + \beta_{mw} \quad (4)$$

$$E_{mw} = \left( E_{pw} + E_{sw} \cdot \frac{V_s}{V_p} \right) \frac{1 - V_s}{1 - V_s (1 + \beta_{sw})} \quad (5)$$

$$\beta_{mw} = \frac{\beta_{pw} (1 - V_s) + \beta_{sw} \cdot V_s}{1 - V_s (1 + \beta_{sw})} \quad (6)$$

ここに、 $\Gamma_m$  はモルタルの相対フロー面積比、 $R_m$  はモルタルの相対漏斗速度比、 $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  はモルタルの流動指数、 $E_m$  はフローに関するモルタルの変形係数、 $\beta_m$  はフローに関するモルタルの拘束水比、 $E_p$  はフローに関する粉体の変形係数、 $\beta_p$  はフローに関する粉体の拘束水比、 $E_s$  はフローに関する細骨材の変形係数、 $\beta_s$  はフローに関する細骨材の拘束水比、 $E_{mw}$  はモルタルの単位流動水比、 $\beta_{mw}$  は流動に関するモルタルの拘束水比（以下、単にモルタルの拘束水比と呼ぶ）、 $E_{pw}$  は粉体の単位流動水比、 $\beta_{pw}$  は流動に関する粉体の拘束水比（以下、単に粉体の拘束水比と呼ぶ）、 $E_{sw}$  は細骨材の単位流動水比、 $\beta_{sw}$  は流

表-1 細骨材の特性

種類	表乾比重	実積率 (%)	粒形判定実積率 (%)	粗粒率	吸水率 (%)
川砂	2.56	66.9	60.0	3.03	1.17
碎砂	2.67	59.1	54.9	2.45	1.04
陸砂	2.64	68.1	60.8	2.42	0.82

動に関する細骨材の拘束水比（以下、単に細骨材の拘束水比と呼ぶ）、 $V_w$  はモルタル中に占める水容積比、 $V_p$  はモルタル中に占める粉体容積比、 $V_s$  はモルタル中に占める細骨材容積比（以下、単に細骨材容積比と呼ぶ）を表す。

#### 4. モルタルの流動性を表現する材料特性値

##### 4.1 細骨材の材料特性値

###### (1) 拘束水比

川砂（表-1）および普通ポルトランドセメント  $N$ （表-3）を用いて、細骨材容積比、水粉体容積比および高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）添加率を任意に変化させたモルタル実験結果（図-2）より、各細骨材容積比における川砂の拘束水比  $\beta_{sw}$  を以下の手順に従い算出した。

①細骨材容積比ごとに、モルタルの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  と水粉体容積比の関係を直線関係と見なし、直線の Y 軸切片（水粉体容積比）を求める。

② $N$  の拘束水比  $\beta_{pw}$  を、図-2 に示すベーストの Y 軸切片とする。この場合 0.63 とした。

③Y 軸切片をモルタルの拘束水比  $\beta_{mw}$  として式(6)に代入し、川砂の拘束水比  $\beta_{sw}$  を細骨材容積比ごとに算出する。

川砂の拘束水比  $\beta_{sw}$  と、同様にして求めた碎砂および陸砂の拘束水比  $\beta_{sw}$  を、細骨材容積比との関係で図-5 に示した。川砂および陸砂の拘束水比  $\beta_{sw}$  は、細骨材容積比が 0.5 より小さい範囲ではほぼ一定値となり、これより大きい範囲では増加した。このような細骨材容積比と拘束水比  $\beta_{sw}$  の関係を、モルタルフローに関する拘束水比  $\beta_s$  における関係式<sup>2)</sup>を参考にして、式(7)のように表した。図-5 に示す実線は各細骨材の拘束水比  $\beta_{sw}$  を式(7)で表したものである。

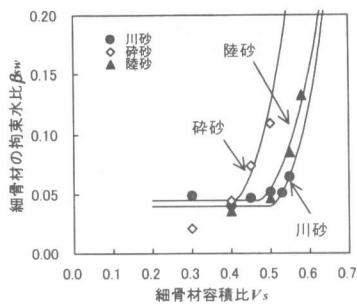


図-5 細骨材容積比と細骨材の拘束水比の関係 ( $N$  を使用)

また、式(7)に関わる各定数(表-2)は、式(4)から算出されるモルタルの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  の計算値が実験値とよく一致するように定めたものである(図-6)。流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  に及ぼす細骨材の物理的特性の影響を式(7)に係る各定数の相違から以下に考察する。

粉体の拘束水比  $\beta_{pw}$  と同様にその容積に影響されない細骨材の特性値と考えられる絶対拘束水比  $\beta_{sw0}$  はほぼ等しく、 $N$  ( $\beta_{pw}=0.63$ ) の  $1/15$  程度となった。拘束水比  $\beta_{sw}$  が増加を開始する細骨材容積比(以下、相互作用開始容積比  $V_{si}$  と呼ぶ)は、細骨材の実積率と平均粒子径から算出される細骨材の平均粒子間距離が、使用する粉体の最大粒子径程度となる細骨材容積比に相当することが報告されている<sup>6)</sup>。ここでも、相互作用開始容積比  $V_{si}$  は実積率および粗粒率の大きい川砂の場合最も大きくなり、逆にこれらの値の小さい碎砂では最も小さくなつた。

これらのことから、実積率および粗粒率の大きな細骨材ほど相互作用開始容積比  $V_{si}$  は大きく、細骨材容積比を大きくしても拘束水比  $\beta_{sw}$  の増加が小さいことから、モルタルが流動するために最低限必要な水は少なくなる。すなわち、このような細骨材はモルタル流動に対して良好なものと評価される。

$$\beta_{sw} = \beta_{sw0} + A \left\{ \frac{V_s(1 + \beta_{pw})}{1 + V_s(\beta_{pw} - \beta_{sw0})} - \frac{V_{si}(1 + \beta_{pw})}{1 + V_{si}(\beta_{pw} - \beta_{sw0})} \right\}^{1/5} \quad (7)$$

ここに、 $\beta_{sw0}$  は細骨材の絶対拘束水比、 $V_{si}$

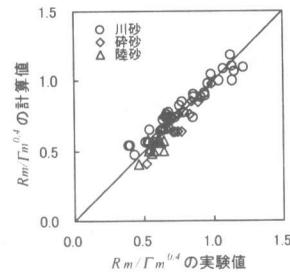


図-6 式(4)によるモルタルの流動指数の計算値と実験値の比較

表-2 細骨材の拘束水比(式(7))、単位流動水比(式(10))に係る定数

種類	式(7)			式(10)		
	$\beta_{sw0}$	$V_{si}$	$A$	$E_{sw0}$	$B$	$V_{sr}$
川砂	0.040	0.49	2.13	0.055	0.001	0.669
碎砂	0.045	0.40	2.14	0.080	0.001	0.591
陸砂	0.045	0.46	1.79	0.075	0.001	0.681

は相互作用開始容積比、 $A$  は定数を表す。

## (2) 単位流動水比

図-2に示すモルタル実験結果から、各細骨材容積比における川砂の単位流動水比  $E_{sw}$  を以下の手順に従い算出した。

- ①式(8)から、モルタル中に占める自由水(モルタル流動に寄与する水)容積比を求める。
- ② $N$  の単位流動水比  $E_{pw}$  を、図-2に示すべーストにおける直線の傾きとする。この場合 0.15 とした。
- ③式(4)および式(8)から導かれた式(9)に、モルタル中に占める自由水容積比、配合値および流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  を代入し、細骨材容積比ごとの単位流動水比  $E_{sw}$  を算出する。

$$V_{wf} = V_w - V_p \cdot \beta_{pw} - V_s \cdot \beta_{sw} \quad (8)$$

$$\frac{V_{wf}}{V_p} = \left( E_{pw} + E_{sw} \frac{V_s}{V_p} \right) \frac{R_m}{\Gamma_m^{0.4}} \quad (9)$$

ここに、 $V_{wf}$  はモルタル中に占める自由水容積比を表す。

川砂の単位流動水比  $E_{sw}$  と、同様にして求めた碎砂および陸砂の単位流動水比  $E_{sw}$  を、細骨材容積比との関係で図-7に示した。なお、ここに示す単位流動水比  $E_{sw}$  は、細骨材容積比ごとに実験値の平均を示したものである。川砂の単位流動水比  $E_{sw}$  が、実験した範囲においてほぼ一定となったのに対し、碎砂および陸砂では、

細骨材容積比が大きくなると増加した。このような細骨材容積比と単位流動水比  $E_{sw}$  の関係を、モルタルフローに関わる変形係数  $E_s$  における関係式<sup>2)</sup>を参考にして式(10)のように表した。  
図-7に示す実線は各細骨材の単位流動水比  $E_{sw}$  を式(10)で表したものである。また、式(10)に関わる各定数(表-2)は、式(4)から算出されるモルタルの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  の計算値が実験値とよく一致するように定めたものである(図-6)。流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  に及ぼす細骨材の物理的特性の影響を、式(10)に関わる各定数の相違から以下に考察する。

粉体の単位流動水比  $E_{pw}$  と同様にその容積に影響されない細骨材の特性値と考えられる絶対単位流動水比  $E_{sw0}$  は、粗粒率のほぼ等しい碎砂および陸砂では、 $N$  ( $E_{pw}=0.15$ ) の  $1/2$  程度となった。これらの細骨材より粗粒率の大きい川砂では小さくなった。単位流動水比  $E_{sw}$  は細骨材の実積率に相当する限界容積比  $V_{sr}$  で無限大となる。なお、相互作用開始容積比  $V_{si}$  は式(7)と同じ値とした。

これらのことから、粗粒率の大きい細骨材ほど、絶対単位流動水比  $E_{sw0}$  は小さく相互作用開始容積比  $V_{si}$  が大きくなることから、モルタルが流動するために必要な水は少なくなる。すなわち、このような細骨材はモルタル流動に対して良好なものと評価される。

$$E_{sw} = E_{sw0} + B \left( \frac{1}{V_{sr} - V_s} - \frac{1}{V_{sr} - V_{si}} \right) \quad (10)$$

ここに、 $E_{sw0}$  は細骨材の絶対単位流動水比、 $V_{sr}$  は限界容積比、 $B$  は定数を表す。

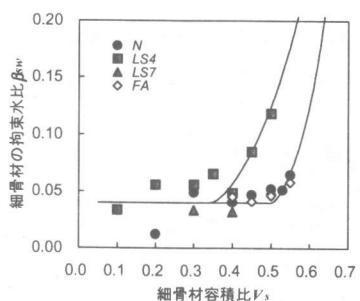


図-8 細骨材容積比と川砂の拘束水比および単位流動水比の関係

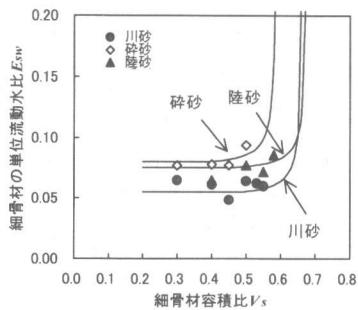


図-7 細骨材容積比と細骨材の単位流動水比の関係 ( $N$  の使用)

#### 4.2 粉体の材料特性値

川砂および各種粉体(表-3)をそれぞれ単独で用いて、細骨材容積比、水粉体容積比および高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)添加率を任意に変化させたモルタル実験結果より、各粉体の拘束水比  $\beta_{pw}$  および単位流動水比  $E_{pw}$  を求めた(表-4)。ここで、川砂の拘束水比  $\beta_{sw}$  (式(7))および単位流動水比  $E_{sw}$  (式(10))に係る各定数は、前述した  $N$  における定数に設定した(表-4、図-8)。なお、LS4の相互作用開始容積比  $V_{si}$  は、LS4に含まれる比較的粗い粒子の影響により、 $N$  のものよりも小さくなることが予想されたため<sup>6)</sup>、式(4)から算出されるモルタルの流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  の計算値と実験値がよく一致するように、別途定めたものである(図-9)。なお、表-4に示す定数  $A$  が粉体により異なるのは、この定数が粉体の拘束水比  $\beta_{pw}$  および限界容積比  $V_{sr}$  により定まるためである。流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  に及ぼす粉体の物理的特性の影響を拘束水比  $\beta_{pw}$  および単位流動水比  $E_{pw}$  の相違から以下に考察する。

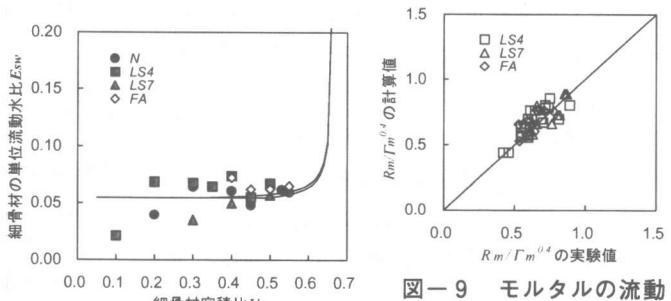


図-9 モルタルの流動指数の計算値と実験値の比較

$LS4$ ,  $LS7$ ,  $FA$  の拘束水比  $\beta_{pw}$  が同程度であったのに対し,  $N$  はこれより大きい値となった。これは、 $N$  が水和反応を起こすのに対し、他の粉体は単独では殆ど水和しないためと考えられる。また、 $LS4$  と  $LS7$  に見られる平均粒子径の相違、さらに  $FA$  における粒子形状の影響は、拘束水比  $\beta_{pw}$  には認められなかった。

単位流動水比  $E_{pw}$  は、 $FA$  を除いて、比表面積の高いものほど大きくなつた。これは、細骨材の単位流動水比  $E_{sw}$  における粗粒率の影響と同じ傾向である。すなわち、単位流動水比  $E_{sw}$  には粒子の大きさが影響するものと考えられる。 $FA$  の単位流動水比  $E_{sw}$  が小さいのは、その丸い粒子形状が影響しているためと考えられる。

以上のことから、比表面積が小さく粒子形状の丸い粉体ほど単位流動水比  $E_{sw}$  は小さく、モルタルを単位量流動させるために必要な水は少なくなるため、モルタル流動に対して良好なものと評価される。

## 5.まとめ

- (1) モルタルの相対フロー面積比  $\Gamma_m$  と水粉体容積比の関係式に基づいて、フレッシュモルタルの粘性を変形性と独立に評価する指標である流動指数  $R_m/\Gamma_m^{0.4}$  を定式化した。
- (2) モルタル流動に関する材料特性値として、モルタルが流動を始めるのに必要な水粉体・水細骨材容積比を意味する拘束水比、およびモルタルの流動指数を単位量変化させるのに必要な水粉体・水細骨材容積比を意味する単位流動水比を提案した。
- (3) 拘束水比は、粒子の形状や大きさには大きな影響を受けず、水和反応の有無の影響を受けることが明らかとなった。また、拘束水比が増加を始める細骨材容積比には、実積率と平均粒子径が影響した。
- (4) 単位流動水比は、粗粒率の大きい細骨材ほど、

表-3 粉体の特性

種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	平均粒子径 (μm)	直径 90μm 以上の粒子(%)
普通ポルトランドセメント	$N$	3.13	3630	13.1	0
	$LS4$	2.71	4330	26.2	18.5
	$LS7$	2.71	7340	4.4	0
石灰石微粉末	$FA$	2.34	4220	19.7	7.5

表-4 粉体の流動特性値および細骨材の拘束水比(式(7))、単位流動水比(式(10))に係る定数

種類	$\beta_{pw}$	$E_{pw}$	式(7)			式(10)		
			$\beta_{sw0}$	$V_{si}$	$A$	$E_{sw0}$	$B$	$V_{sr}$
$N$	0.63	0.15	0.040	0.49	2.13	0.055	0.001	0.49
	0.34	0.16		0.34	1.10			0.34
	0.38	0.21		0.49	1.82			0.49
	0.44	0.12		0.49	1.88			0.49

また比表面積が小さく粒子形状の丸い粉体ほど小さくなることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9
- 2) 枝松良展, 山口昇三, 岡村甫: モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.37-46, 1996.5
- 3) 大内雅博, 日比野誠, 小澤一雅, 岡村甫: 自己充填コンクリート用モルタルの配合設計法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.19-24, 1997.6
- 4) 大内雅博, 日比野誠, 菅侯匠, 岡村甫: 自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤の効果の定量評価法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.355-360, 1998.6
- 5) GYAWALI, T. R.: Multi-Phase Model for Flow Behavior of Fresh Concrete, 東京大学修士論文, 1993.9
- 6) 枝松良展, 山口昇三, 岡村甫: モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.131-147, 1997.

## 【モルタルの練混ぜ方法】



一回の練混ぜ量: 1.5 リットル

一次水 = 単位水量 × 0.85 - 細骨材の表面水  
ミキサ: JIS R 5201