

モルタルの変形性を表す 細骨材の材料特性の定量化

枝松良展¹・山口昇三²・岡村 甫³

¹正会員 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 (〒551 大阪市大正区南恩加島7-1-55)

²正会員 竹本油脂株式会社 第三事業部 (〒443 愛知県蒲郡市港町2-5)

³正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

モルタルの変形性を代表するフロー値に及ぼす細骨材特性の影響を定量的に評価するために、ペーストにおける相対フロー面積比と自由水粉体容積比の線形な関係を基に、モルタルフロー値の定式化を行った。その結果、モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響を、拘束水比（細骨材に拘束されると考えられる水）と変形係数（相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水細骨材容積比）によって定量的に評価できることが明らかとなった。

Key Words: mortar, sand, relative flow area, water retaining factor, flowing factor

1. はじめに

フレッシュコンクリートの変形性が、使用材料の特性や配合に影響されることとは、よく知られていることである。自己充填コンクリートの配合設計法を確立するためには、コンクリートの変形性に及ぼすこれらの影響を、定量的に評価することが必要である。本研究は、その定量評価の方策として、モルタルの変形性を代表するフロー値を構成材料の特性値を用いて定式化したものである。コンクリートの変形性を代表するスランプフロー値とモルタルのフロー値とは極めて密接な関係があり、使用材料の特性や配合がコンクリートの変形性に及ぼす影響を定量化するためには、まずモルタルの変形現象をモデル化し、モルタルのフロー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. ペーストフロー値の基本式

ペーストのフロー値から得られる相対フロー面積比（式（1））と水粉体容積比とが、粉体の種類に係わらず線形な関係にあることが既に明らかにされている（図-1）^{1), 2)}。

全水量からフロー値の増加に関与しない水量、すなわち粉体に拘束されると仮定した水量を差し引い

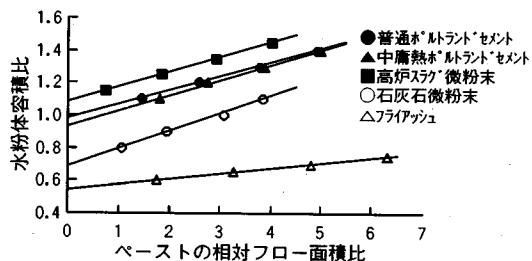


図-1 各種粉体を用いたペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係

たものを、ペースト中の自由水量と定義すると（式（2）），自由水粉体容積比は相対フロー面積比に比例する（式（4））²⁾。

なお、その比例定数を粉体の変形係数と呼んでおり、これは粉体の拘束水比と共に、粉体の特性を表す定数である（表-1）。拘束水比は粉体の活性度と粒度分布および粒子形状により定まり、変形係数は主に粒子形状に支配されるものと考えられる。フライアッシュの変形係数が小さいのは、その形状が球に近いためと考えられる。

式（2）と式（4）から、ペーストのフロー値は、式（5）に示すような基本式で表され、粉体の特性値である変形係数と拘束水比および水粉体容積比により定まるのである（図-2）。

表-1 各種粉体の材料特性値

粉体種類	拘束水比	変形係数	比表面積 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	0.98	0.09	3290
中庸熱ポルトランドセメント	0.94	0.09	3000
高炉スラグ微粉末	1.08	0.11	6010
石灰石微粉末	0.69	0.11	5600
フライアッシュ	0.54	0.03	3440

変形係数は、ペーストが変形する際のペーストの変形のし易さの程度を表わすものである。拘束水比は、ペーストが変形し始めるときの水粉体容積比である。これらの値が小さいほど、所定の相対フロー面積比を得るための水量は少なくなり、粉体の特性が良好であることを意味している。表-1に示すように、これらの粉体の中でフライアッシュの変形係数と拘束水比が最も小さく、フライアッシュが流動特性の良好な粉体であることが定量的に表現されているのである。

$$\Gamma_p = \left(\frac{F_p}{100} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{wf} &= V_w - V_{wp} \\ &= V_w - \beta_p \cdot V_p \end{aligned} \quad (2)$$

$$V_w + V_p = 1 \quad (3)$$

$$\frac{V_{wf}}{V_p} = E_p \cdot \Gamma_p \quad (4)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad (5)$$

ここに、 Γ_p はペーストの相対フロー面積比、 F_p は振動を与えない場合のペーストのフロー値(mm)、 V_{wf} はペースト中に占める自由水容積比、 V_w はペースト中に占める水容積比、 V_{wp} はペースト中に占める粉体に拘束される水の容積比、 V_p はペースト中に占める粉体容積比、 E_p は粉体の変形係数(相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水粉体容積比)、 β_p は粉体の拘束水比(ペーストの相対フロー面積比が0となるときの水粉体容積比)を表す。

3. 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を、粉体と同様に変形係数と拘束水比で表現し、ペーストの場合と同様にモルタルの相対フロー面積比(式(6))が、その自由水粉体容積比に比例すると仮定する。この場合、比例定数を粉体の変形係数と細骨材の変

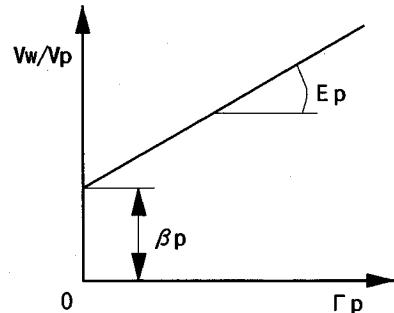


図-2 ペーストフロー値の基本モデル

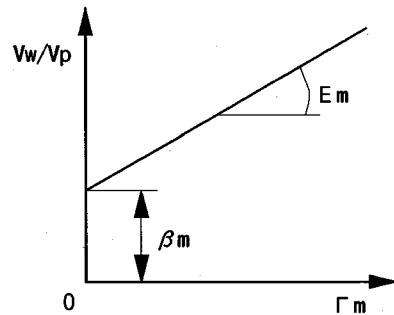


図-3 細骨材容積比を一定とした場合におけるモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との線形関係(モルタルフロー値の基本式より導かれる)

形係数との和で表したのである(式(7))。これをモルタルフロー値の基本式と呼ぶ。

モルタル中の自由水量をペースト中の自由水量と同様に定義すると、自由水量は全水量から粉体に拘束される水量と細骨材に拘束される水量を差し引いた量となる(式(8))。式(7)および式(8)から、モルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係は、式(9)により表される。式(10)を変形した式(11)と式(9)から、モルタルフロー値の基本式は、式(12)で表すことができる。

式(12)において、モルタルの相対フロー面積比にかかる係数、すなわち相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水粉体容積比をモルタルの変形係数と定義し、モルタルが変形し始める時の水粉体容積比をモルタルの拘束水比と定義すると、モルタルの変形係数および拘束水比は、それぞれ式(13)および式(14)により表される。

式(12)は、細骨材容積比を一定としたモルタルにおいて、その相対フロー面積比と水粉体容積比との関係が、線形関係にあることを示している(図-3)。また、細骨材の変形係数と拘束水比は、これらの値が小さいほど、モルタルの変形係数と拘束水比が小さくなり、細骨材の特性が良好であることを意味している。

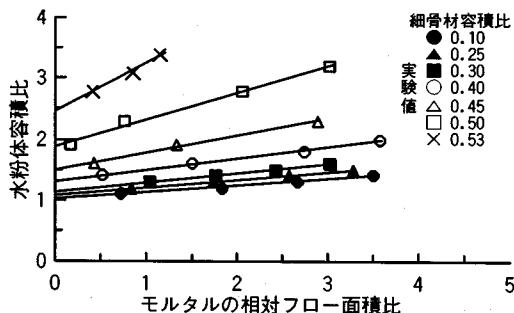


図-4 0.15mm以下の微粒細骨材を含まないモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係
(中庸熱ポルトランドセメントを使用)

細骨材の変形係数および拘束水比は、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、モルタルの変形係数と拘束水比を求める式(13)と式(14)を変形した式(15)および式(16)によって算定できる。

$$\Gamma_m = \left(\frac{F_m}{100} \right)^2 - 1 \quad (6)$$

$$\frac{V_{wf}}{V_p} = (E_p + E_s') \cdot \Gamma_m \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{wf} &= V_w - V_{wp} - V_{ws} \\ &= V_w - \beta_p \cdot V_p - \beta_s \cdot V_s \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = (E_p + E_s') \cdot \Gamma_m + \beta_p + \frac{\beta_s \cdot V_s}{V_p} \quad (9)$$

$$V_w + V_p + V_s = 1 \quad (10)$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{V_s}{1-V_s} \cdot \frac{V_w}{V_p} + \frac{V_s}{1-V_s} \quad (11)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = E_m \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (12)$$

$$E_m = \frac{(1-V_s)(E_p + E_s')}{1-V_s(1+\beta_s)} \quad (13)$$

$$\beta_m = \frac{\beta_p(1-V_s) + \beta_s \cdot V_s}{1-V_s(1+\beta_s)} \quad (14)$$

$$E_s' = \frac{E_m\{1-V_s(1+\beta_s)\}}{1-V_s} - E_p \quad (15)$$

$$\beta_s = \frac{(\beta_m - \beta_p)(1-V_s)}{V_s(1+\beta_m)} \quad (16)$$

ここに、 Γ_m はモルタルの相対フロー面積比、 F_m はモルタルのフロー値(mm)、 V_{wf} はモルタル中に占める自由水容積比、 V_w はモルタル中に占める水

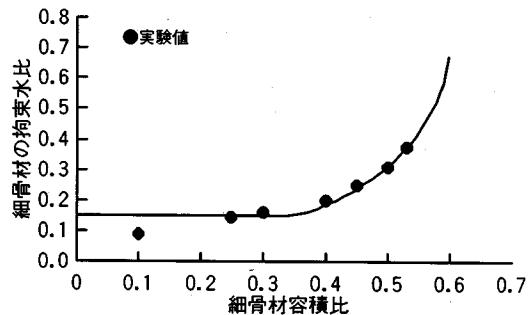


図-5 細骨材容積比と細骨材の拘束水比との関係
(中庸熱ポルトランドセメントを使用)

容積比、 V_p はモルタル中に占める粉体容積比、 E_s' は細骨材の変形係数、 V_{wp} はモルタル中に占める粉体に拘束される水の容積比、 V_{ws} はモルタル中に占める細骨材に拘束される水の容積比、 V_s はモルタル中に占める細骨材容積比、 β_s は細骨材の拘束水比、 E_m はモルタルの変形係数、 β_m はモルタルの拘束水比を表す。

式(12)で表されるモルタルフロー値の基本式より導かれた線形関係を検証するために、0.15mm以下の微粉を含んでいない細骨材を用いたモルタルのフロー試験を行った。ここで、0.15mm以下の微粉を含まない細骨材を用いたのは、モルタルの変形を考える際に、その微粉分が粉体と同様の働きをしている可能性があると考えたためである。図-4は、中庸熱ポルトランドセメント(表-1)を用い、細骨材容積比を一定として、水粉体容積比を変化させたモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係である。細骨材容積比が0.10から0.53の広い範囲にわたって、合計7種類の細骨材容積比において、モルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係は、線形な関係にあると認められる。このことは、モルタルフロー値に関する基本式(7)が妥当であることを示すものである。

これらの結果より、細骨材の拘束水比を式(16)から求めると、細骨材容積比と拘束水比との関係は、図-5に示すようになる。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持つと考えられる。この値は、中庸熱ポルトランドセメントの拘束水比の約15%であり、細骨材に拘束される水量は、粉体に比べて少ない。しかし、細骨材容積比がある値、この場合は0.34を越えると、細骨材容積比の増加に伴い拘束水比は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、細骨材同士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

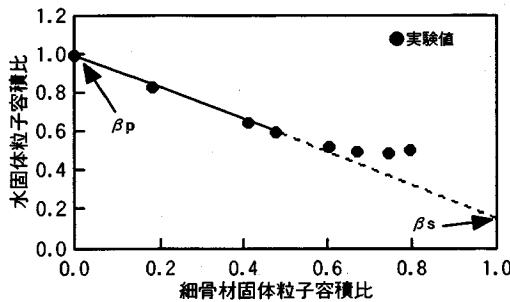


図-6 相対フロー面積比が0となる配合における細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係
(中庸熟ポルトランドセメントを使用)

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。細骨材の拘束水比の場合、拘束水比の増加が始まる点が、自己充填コンクリートの配合設計において重要な意味を持つと考えられる。なお、粉体の拘束水比は、粉体に拘束される水の粉体の絶乾容積に対する比であるが、細骨材の拘束水比は、細骨材に拘束される水の細骨材の表乾容積に対する比である。これは、コンクリートの配合設計を行う場合、粉体は絶乾容積で表し、細骨材は表乾容積で表すのが一般的であるからである。

一定値となる細骨材の拘束水比は、各細骨材容積比 (V_s) において、モルタルの拘束水比 ($\beta_p = V_w/V_p$) を求め、それを細骨材固体粒子容積比 ($V_s/(V_s + V_p)$) と水固体粒子容積比 ($V_w/(V_s + V_p)$) との関係で表すことにより求めることができる(図-6)。図-6において、細骨材固体粒子容積比が0となる点はペーストを意味し、1となる点は細骨材だけの場合を意味している。水固体粒子容積比は、細骨材固体粒子容積比が大きくなるほど、すなわち細骨材容積比が大きくなるほど、粉体の拘束水比から直線的に減少しているのが認められる。しかし、細骨材固体粒子容積比がある点より大きくなると直線からはずれる。水固体粒子容積比が線形的に変化するのは、細骨材同士の嗜み合いが生じていないためであり、直線からはずれるのは、細骨材同士の嗜み合いが生じ、見かけ上細骨材の拘束水比が大きくなっているためと考えられる。一定値となる細骨材の拘束水比は、この直線を細骨材固体粒子容積比が1となる点まで外挿したときの水固体粒子容積比である。この細骨材の場合、一定値となる拘束水比は0.15である。

細骨材の変形係数を式(15)から求めると、細骨材容積比と変形係数との関係は、図-7に示すようになる。細骨材の変形係数は、細骨材容積比の増加に伴い増加する。これは、同一の相対フロー面積比

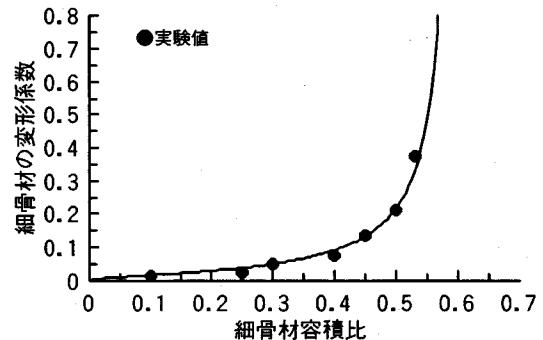


図-7 細骨材容積比と細骨材の変形係数との関係
(中庸熟ポルトランドセメントを使用)

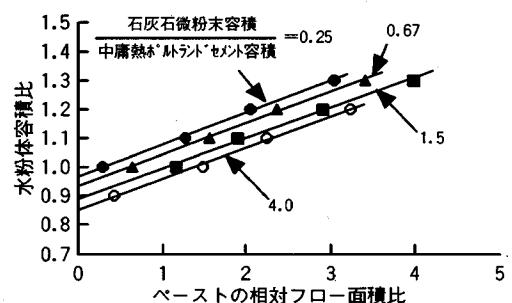


図-8 中庸熟ポルトランドセメントに石灰石微粉末を混合した粉体を用いたペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係

を得るためにには、細骨材容積比が大きいほど細骨材同士の接触や嗜み合いによる変形拘束が大きくなるため、ペーストの流動性を高くしなければならないことを示すものである。細骨材容積比の小さい範囲では、細骨材同士の接触確率が小さいため、細骨材容積比の増加に伴う変形係数の増加率は小さいが、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のである。変形係数の増加率の変曲点は、自己充填コンクリートの配合設計において重要な意味を持つと考えられる。

ここまでに示したように、粉体の拘束水比や変形係数がその容積比に係わらず一定値になるのに対し(図-1)，細骨材の拘束水比や変形係数はその容積比の関数になる。このことが、粉体と細骨材の違いであると考えられる。

図-8は、中庸熟ポルトランドセメント ($\beta_p = 1.01$, $E_p = 0.11$) に石灰石微粉末(表-1)を混合した4種類の粉体を用い、それらのペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係を、各粉体について示したものである。ここで、石灰石微粉末を細骨材と考え、式(15)および式(16)から変形

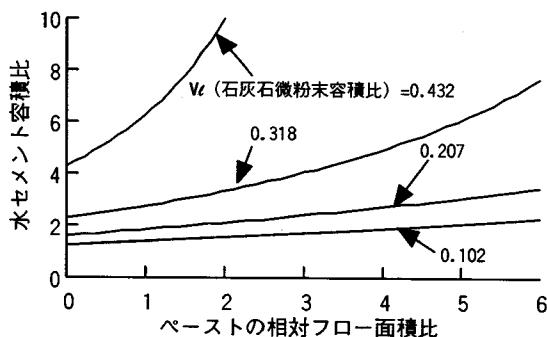


図-9 中庸熱ポルトランドセメントに石灰石微粉末を混合した粉体を用いたペーストの相対フロー面積比と水セメント容積比との関係（計算値）

係数と拘束水比を求めるに、石灰石微粉末は粉体であるため、これらはその容積比に係わらず一定値になると考えられる。石灰石微粉末の変形係数と拘束水比を求めるには、水粉体容積比を水セメント容積比とし、石灰石微粉末容積比を一定とした条件で、モルタルの変形係数と拘束水比を求める必要がある。図-8に示すペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係は、中庸熱ポルトランドセメントと石灰石微粉末の容積比が一定の条件で線形関係となっており、これらを石灰石微粉末容積比を一定とし、相対フロー面積比と水セメント容積比との関係で表すと、当然のことながら線形関係は成立しない。しかし、図-9に示す相対フロー面積比の範囲においては、線形関係と見なしてもよいと考えられる。そこで、図-9に示す関係から、モルタルの変形係数と拘束水比を求め、式(15)および式(16)から、石灰石微粉末の変形係数と拘束水比を算定した。なお、図-9に示す石灰石微粉末容積比は、図-8において、相対フロー面積比が0となる配合における石灰石微粉末の容積比である。

図-10に示すように、石灰石微粉末の拘束水比は、その容積比に係わらずほぼ一定値である。石灰石微粉末は、細骨材に比べて粒子径の小さい粒子であることから、粒子同士の噛み合いによる変形抵抗が小さく、その変形抵抗による見かけの拘束水よりも、表面に拘束される水量のほうが多いと考えられる。このようなことから、粒子径の小さい粒子すなわち粉体の拘束水比は、その容積比に係わらず一定値となるのである。ここで、一定値となる石灰石微粉末の拘束水比とペーストの試験から得られた拘束水比を比較すると、前者が0.81に対して後者は0.69である。中庸熱ポルトランドセメントに石灰石微粉末を混合することにより、中庸熱ポルトランドセメントの水和は促進される³⁾。従って、混合粉体の中庸熱ポルトランドセメントの拘束水比は、それを単体で用いて得られた拘束水比より大きくなっていると

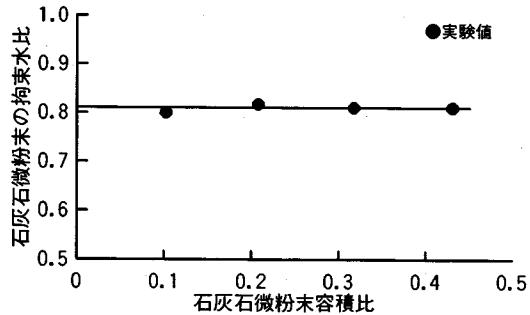


図-10 石灰石微粉末容積比と石灰石微粉末の拘束水比との関係

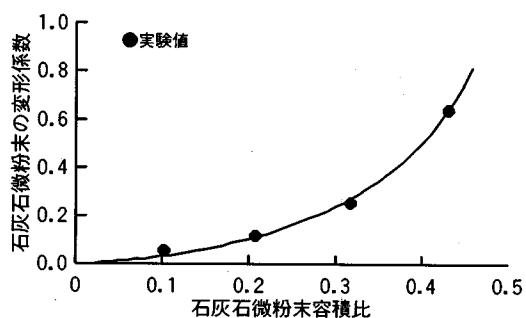


図-11 石灰石微粉末容積比と石灰石微粉末の変形係数との関係

考えられる。図-10に示す石灰石微粉末の拘束水比は、中庸熱ポルトランドセメント単体での拘束水比を、式(16)に代入して算定したものであるため、ペースト試験から得られた拘束水比より大きくなつたものと考えられる。

石灰石微粉末の変形係数は、図-11に示すように、その容積比の増加と共に大きくなつておらず、石灰石微粉末単体での試験結果（石灰石微粉末の容積比に係わらず0.11の一定値）と矛盾する。これは、石灰石微粉末単体のペーストの試験から得られる変形係数が、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水石灰石微粉末容積比を表しているのに対し、ここで定義している変形係数が、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水セメント容積比を表していることによるものと考えられる。そこで、細骨材の変形係数(E_s)を、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水細骨材容積比と定義し、モルタルフロー値を改めて定式化した。なお、図-11に示す実験値とは、図-9で相対フロー面積比が5となる水粉体容積比を各直線から近似して求め、それを式(12)、式(15)に代入し算定したものである。

ペーストフロー値の基本式（式(5)）において、粉体を中庸熱ポルトランドセメントと石灰石微粉末

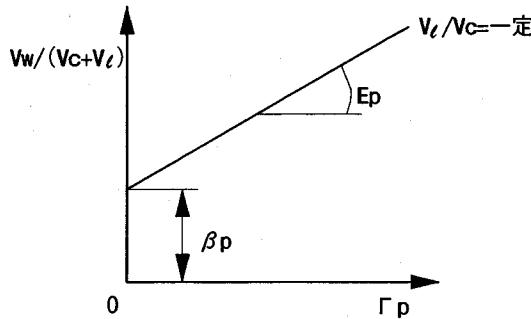


図-12 中庸熱ポルトランドセメントに石灰石微粉末を混合した粉体のペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係

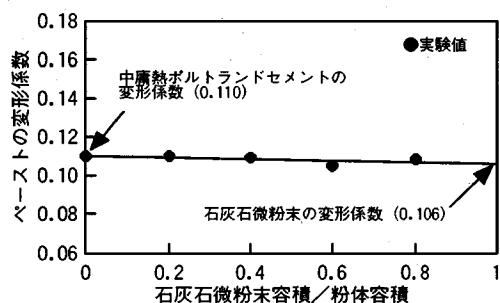


図-13 石灰石微粉末粉体容積比とペーストの変形係数との関係

とに分け、石灰石微粉末の変形係数を、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水石灰石微粉末容積比と定義すると、式(5)は式(17)のようになる。この式は、石灰石微粉末と中庸熱ポルトランドセメントの容積比を一定としたペーストにおいて、相対フロー面積比と水粉体容積比が線形関係にあることを示している。ペーストの変形係数と拘束水比は、式(18)および式(19)のようになる(図-12)。従って、図-8に示す各直線のペーストの変形係数と拘束水比は、式(18)および式(19)により表される。

$$\frac{Vw}{Vc + V\ell} = \frac{Ec \cdot Vc + El \cdot V\ell}{Vc + V\ell} \Gamma p + \frac{\beta c \cdot Vc + \beta \ell \cdot V\ell}{Vc + V\ell} \quad (17)$$

$$Ep = \frac{Ec \cdot Vc + El \cdot V\ell}{Vc + V\ell} \quad (18)$$

$$\beta p = \frac{\beta c \cdot Vc + \beta \ell \cdot V\ell}{Vc + V\ell} \quad (19)$$

ここに、 E_c は中庸熱ポルトランドセメントの変形係数、 E_ℓ は石灰石微粉末の変形係数、 β_c は中庸熱ポルトランドセメントの拘束水比、 β_ℓ は石灰石微粉末の拘束水比、 V_c は中庸熱ポルトランドセ

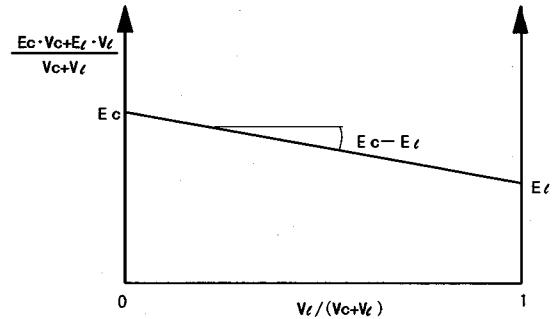


図-14 石灰石微粉末粉体容積比とペーストの変形係数との関係

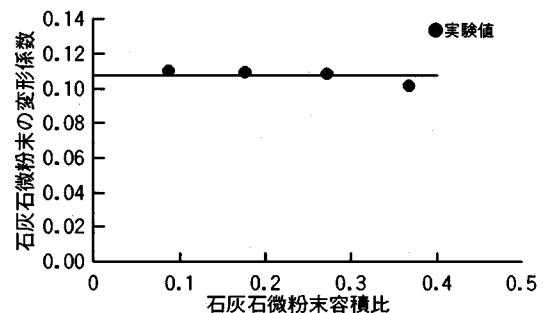


図-15 石灰石微粉末容積比と石灰石微粉末の変形係数との関係

メントの容積比、 V_ℓ は石灰石微粉末の容積比を表す。

石灰石微粉末と粉体の容積比と、式(18)で表されるペーストの変形係数との関係を図-13に示す。ここで、石灰石微粉末と粉体の容積比が0となる点は、中庸熱ポルトランドセメントの変形係数を意味し、1となる点は石灰石微粉末の変形係数を意味している。石灰石微粉末と粉体の容積比とペーストの変形係数との関係は、線形関係になっていると考えられる。この関係が線形関係になるのは、両者の変形係数の差が一定値となるからである(図-14)。中庸熱ポルトランドセメントの変形係数がその容積比に係わらず一定値になるとすると、この場合、石灰石微粉末の変形係数もその容積比に係わらず一定値である。石灰石微粉末の変形係数を、その容積比との関係で表すと、図-15に示すようになる。石灰石微粉末は中庸熱ポルトランドセメントと同様に粉体であるため、変形係数はその容積比に係わらず一定値となるのである。なお、図-15に示す実験値とは、図-8で相対フロー面積比が5となる水粉体容積比を各直線上から求め、式(18)から算定したものである。

式(17)において、石灰石微粉末を細骨材と考えると、自由水固体粒子容積比と相対フロー面積比と

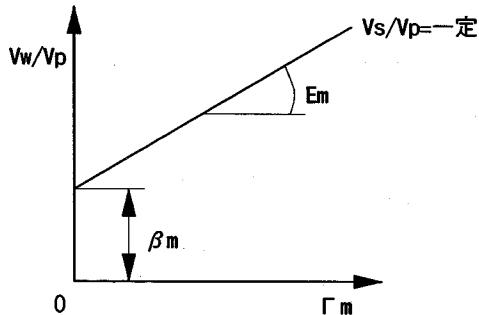


図-16 細骨材粉体容積比を一定とした場合におけるモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との線形関係

の関係は、式(20)のようになる。式(20)を自由水粉体容積比と相対フロー面積比との関係に変形した式(21)と式(8)から、式(22)が導かれる。この式は、細骨材粉体容積比を一定としたモルタルにおいて、その相対フロー面積比と水粉体容積比が線形関係にあることを示している。式(21)を式(7)の代わりに新たにモルタルフロー値の基本式とする。ここで、細骨材の変形係数(E_s)は、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水細骨材容積比を意味している。

モルタルの変形係数と拘束水比は、式(23)および式(24)により表される(図-16)。

$$\frac{V_{wf}}{V_p + Vs} = \frac{Ep \cdot V_p + Es \cdot Vs}{V_p + Vs} \Gamma_m \quad (20)$$

$$\frac{V_{wf}}{V_p} = \left(Ep + Es \cdot \frac{Vs}{V_p} \right) \Gamma_m \quad (21)$$

$$\frac{V_w}{V_p} = Em \cdot \Gamma_m + \beta_m \quad (22)$$

$$Em = \left(Ep + Es \cdot \frac{Vs}{V_p} \right) \frac{1 - Vs}{1 - Vs(1 + \beta_m)} \quad (23)$$

$$\beta_m = \frac{\beta_p(1 - Vs) + \beta_s \cdot Vs}{1 - Vs(1 + \beta_s)} \quad (24)$$

図-4に示すモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係は、細骨材容積比を一定とした場合に線形関係となる。式(22)で表される基本式は、細骨材容積比を一定とすると、線形関係にならない。しかし、図-17に示すように、モルタルの相対フロー面積比が小さい範囲では、線形関係とみてもよいと考えられる。従って、図-17に示す相対フロー面積比の範囲では、実験値を直線回帰して、その傾きをモルタルの変形係数とし、相対フロー面積比が0となる点をモルタルの拘束水比とすることは可能であると考えられる(図-18)。そこで、式(22)

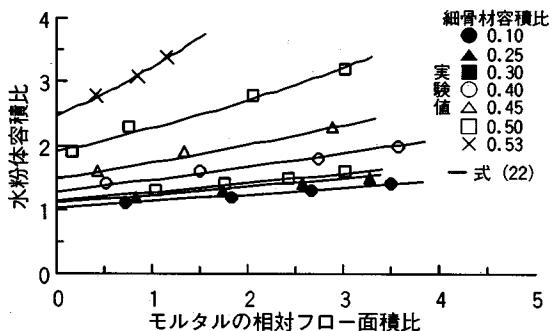


図-17 0.15mm以下の微粒細骨材を含まないモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係
(細骨材容積比を一定とした場合)

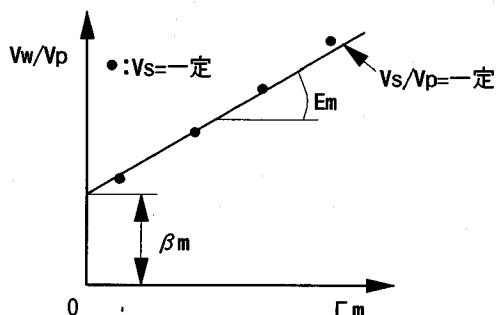


図-18 モルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係(細骨材容積比を一定とした場合)

を用いた場合の、細骨材の拘束水比および変形係数を以下に示す方法によって求めた。なお、図-17に示す実線は、各細骨材容積比において、細骨材の変形係数を一定値として、モルタルの相対フロー面積比を式(22)により計算したものである。

図-4に示すモルタル試験結果から、各細骨材容積比について、モルタルの拘束水比を求め、細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係で表したのが図-6である。ここで、細骨材固体粒子容積比が0となる点はペーストを意味し、1となる点は細骨材だけの場合を意味している。水固体粒子容積比は、細骨材固体粒子容積比が大きくなるほど、粉体の拘束水比から直線的に減少し、細骨材固体粒子容積比がある点より大きくなると直線からはずれる。水固体粒子容積比が直線的に減少するのは、粉体と細骨材の拘束水比の差が一定の場合である(図-19)。粉体の拘束水比は一定値であるので、この範囲の細骨材容積比では細骨材の拘束水比も一定値となるのである。一定値となる細骨材の拘束水比は、この直線を細骨材固体粒子容積比が1となる点まで外挿したときの水固体粒子容積比である。この細骨材の場合、一定値となる拘束水比は0.15である。また、細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係が、直線関係からはずれる点の細骨材固体粒子

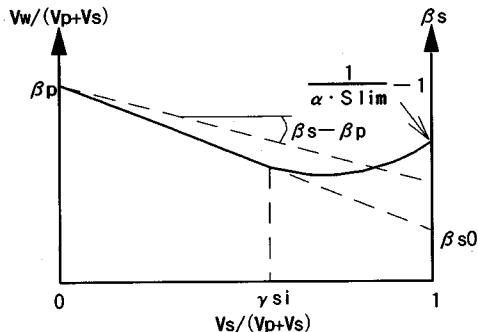


図-19 細骨材固体粒子容積比と水固体粒子容積比との関係（相対フローフ面積比 = 0 の場合）

容積比を相互作用開始細骨材固体粒子容積比 (γ_{si}) と定義した（この場合 $\gamma_{si}=0.53$ ）。細骨材固体粒子容積比が相互作用開始細骨材固体粒子容積比より大きくなると、水固体粒子容積比は徐々に直線からはずれ、やがて増加する。細骨材固体粒子容積比が 1 となる点では、細骨材容積比が細骨材を容器に自然落下させたときの実積率（細骨材の実積率の約 95%， $\alpha=0.95$ ， S_{lim} ：細骨材の実積率）に相当すると考えられることから、水固体粒子容積比はその細骨材容積比から算出できる（図-19）。この範囲における細骨材の拘束水比は、粉体の拘束水比と実験値を結ぶ直線を外挿し、細骨材固体粒子容積比が 1 となる水固体粒子容積比であり、これは細骨材固体粒子容積比の増加に伴って増加するのである。細骨材固体粒子容積比が 1 の場合、細骨材の拘束水比は最大となる。

このようにして求めた細骨材の拘束水比を、細骨材容積比との関係で表したのが図-20である。細骨材の拘束水比は、細骨材容積比が小さい範囲では一定値であり、細骨材容積比がある値より大きくなると、拘束水比は増加するのである。細骨材容積比が 0.1 の場合、拘束水比は小さくなっているが、これは、この細骨材容積比では粉体に比べて細骨材の量が少なく、粉体の拘束水比のわずかな誤差が、すべて細骨材の拘束水比の誤差となって表れるためである。拘束水比は、細骨材を容器に自然落下させたときの実積率に相当する細骨材容積比で最大となる。ここで、拘束水比が増加し始める細骨材容積比を、細骨材相互作用開始容積比 (V_{si}) と定義し（式（25），この場合 $V_{si}=0.34$ ），細骨材を容器に自然落下させたときの実積率に相当する細骨材容積比を細骨材限界容積比と定義した。細骨材相互作用開始容積比は、自己充填コンクリートの配合設計において重要な意味を持つと考えられる。このような細骨材容積比と拘束水比との関係を定式化したのが式（26）である。式（26）では、細骨材の拘束水比を、

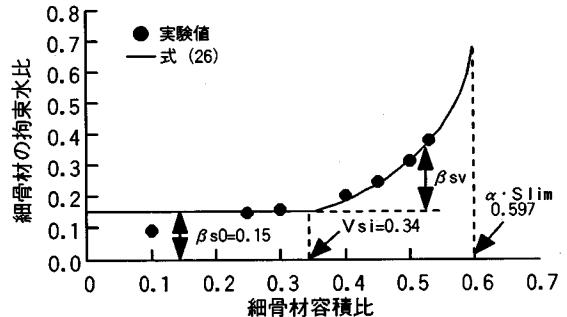


図-20 細骨材容積比と細骨材の拘束水比との関係

細骨材容積比に係わらない一定値（絶対拘束水比と呼ぶ）と、細骨材容積比の関数（式（27），噛み合いによる変形拘束水比と呼ぶ）との和で表した。絶対拘束水比は、細骨材の特性値として意味を持つと考えられる。

$$V_{si} = \frac{\gamma_{si}}{1 + \beta_p - \gamma_{si}(\beta_p - \beta_{s0})} \quad (25)$$

$$\beta_s = \beta_{s0} + \beta_{sv} \quad (26)$$

$$\beta_{sv} = A \cdot \left\{ \frac{V_s(1 + \beta_p)}{1 + V_s(\beta_p - \beta_s)} - \frac{V_{si}(1 + \beta_p)}{1 + V_{si}(\beta_p - \beta_{s0})} \right\}^{1.5} \quad (27)$$

ここに、 β_s は細骨材の拘束水比、 β_{s0} は細骨材の絶対拘束水比、 β_{sv} は細骨材の噛み合いによる変形拘束水比、 V_{si} は細骨材相互作用開始容積比、 γ_{si} は相互作用開始細骨材固体粒子容積比、 A は定数（1.6 を用いた）を表す。

図-4 に示すモルタル試験結果において、相対フローフ面積比が最大となるときの自由水固体粒子容積比を式（20）に代入し、その比例定数（以下 E_{ps} （式（28））とする）を各細骨材容積比について求め、細骨材固体粒子容積比との関係で表したのが図-21である。

$$E_{ps} = \frac{E_p \cdot V_p + E_s \cdot V_s}{V_p + V_s} \quad (28)$$

図-21において、細骨材固体粒子容積比が 0 となる点はペーストを意味し、1 となる点は細骨材だけの場合を意味している。従って、細骨材固体粒子容積比が 0 のときの E_{ps} は、粉体の変形係数であり、1 のときの E_{ps} は、細骨材の変形係数である。細骨材固体粒子容積比が小さい範囲では、 E_{ps} はほぼ直線的に減少していることが認められる。このように E_{ps} が直線的に減少するのは、この範囲において、粉体と細骨材の変形係数が一定値であるからと考えられ、細骨材の変形係数は、この直線を細骨材固体粒子容積比が 1 となる点まで外挿したときの E_{ps} で

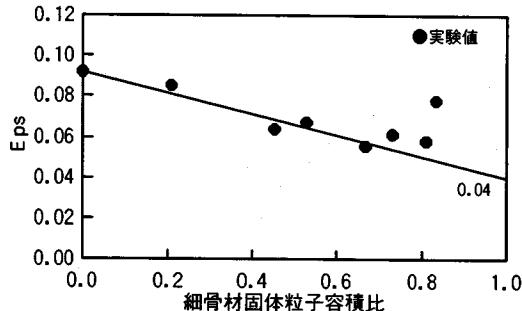


図-21 細骨材固体粒子容積比とEpsとの関係

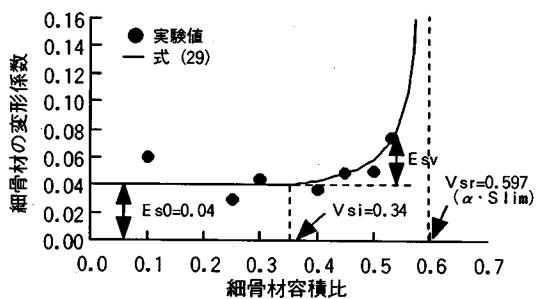


図-22 細骨材容積比と細骨材の変形係数との関係

ある。この細骨材の場合、変形係数は0.04であり、この値は中庸熱ポルトランドセメントの変形係数の約40%である。細骨材固体粒子容積比が、ある値より大きくなると、Epsは徐々に大きくなり直線からはずれる。これは、この範囲では細骨材容積比が大きく、細骨材同士の噛み合いによる変形拘束が生じているためと考えられる。この範囲における細骨材の変形係数は、粉体の変形係数と実験値を結ぶ直線を外挿し、細骨材固体粒子容積比が1となるEpsであり、細骨材固体粒子容積比の増加に伴って増加するのである。

このようにして求めた細骨材の変形係数を、細骨材容積比との関係で表したのが図-22である。細骨材の変形係数は、細骨材容積比が小さい範囲では、ばらつきは大きいがほぼ一定値であり、細骨材容積比がある値より大きくなると増加するのである。ばらつきが大きいのは、この範囲では、粉体に比べて細骨材の量が少なく、粉体のわずかな誤差が、すべて細骨材の誤差となって表れるためである。変形係数が増加し始める細骨材容積比は、細骨材の拘束水比が増加し始める細骨材相互作用開始容積比と同じ値である。変形係数は、細骨材限界容積比で無限大となる。これは、細骨材の拘束水比が最大値となる細骨材容積比と同じ値である。このような細骨材容積比と変形係数との関係を定式化したのが式(29)である。式(29)では、細骨材の変形係数を、細骨材容積比に係わらない一定値(絶対変形係数と呼

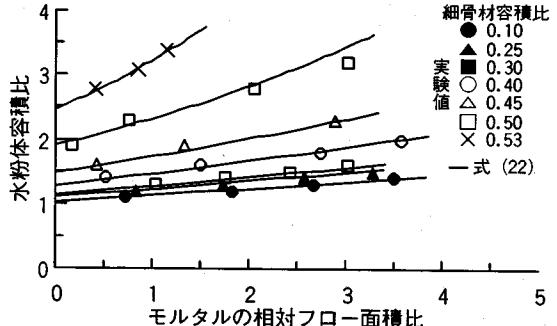


図-23 0.15mm以下の微粒細骨材を含まないモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係における実験値と計算値の比較
(細骨材容積比を一定とした場合)

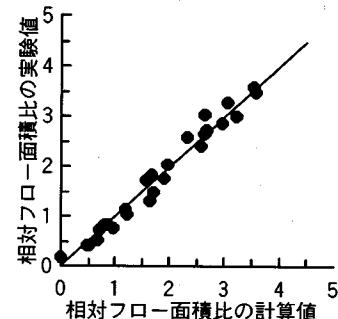


図-24 相対フロー面積比の計算値と実験値の比較

ぶ)と、細骨材容積比の関数(式(30)、噛み合いによる変形係数と呼ぶ)との和で表した。絶対変形係数は、細骨材の特性値として意味を持つと考えられる。

$$Es = Es0 + EsV \quad (29)$$

$$EsV = B \left(\frac{1}{Vsr - Vs} - \frac{1}{Vsr - Vs_i} \right) \quad (30)$$

ここに、 Es は細骨材の変形係数、 $Es0$ は細骨材の絶対変形係数、 EsV は細骨材の噛み合いによる変形係数、 Vs_i は細骨材相互作用開始容積比、 Vsr は細骨材限界容積比、 B は定数(0.003を用いた)を表す。

図-4に示すモルタル試験について、相対フロー面積比を式(22)により算出した。細骨材の拘束水比と変形係数は、式(26)と式(29)で算定されるものを用いた。モルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係を図-23に示す。また、相対フロー面積比の計算値と実験値との関係を図-24に示す。このように、相対フロー面積比の計算値と実験値はよく一致している。このことは、式(21)に示すモルタルフロー値の基本式、および式(26)と式

(29) に示す細骨材容積比と細骨材の拘束水比および変形係数との関係式が妥当であることを示すものである。

4.まとめ

本研究では、モルタルフロー値に及ぼす材料特性や配合の影響を定量的に評価するために、モルタルフロー値の定式化を行った。本研究をまとめると以下の通りである。

(1) ベーストにおける相対フロー面積比と自由水粉体容積比の線形な関係が、モルタルにおいても成立すると仮定し、粉体と同様に細骨材の特性を拘束水比と変形係数で表現することにより、モルタルのフロー値を定式化した。

(2) 0.15mm以下の微粉を含んでいない細骨材を用いたモルタルのフロー試験により、モルタルフロー値の基本式を検証した結果、細骨材容積比を一定としたモルタルの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係は、線形な関係にあり、基本式の妥当性が認められた。

(3) 細骨材容積比を一定として、水粉体容積比を変化させたモルタルのフロー試験から、細骨材の拘束水比と変形係数を算定した結果、拘束水比は細骨材容積比に係わらない一定値と、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も、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ことが明らかになった。

(4) 中庸熟ボルトランドセメントに石灰石微粉末を混合した粉体のベースト試験結果から、石灰石微粉末を細骨材と考え、石灰石微粉末の拘束水比と変形係数を求めた結果、拘束水比はその容積比に係わらず一定値となるが、変形係数は容積比の増加に伴い大きくなり、石灰石微粉末単体での試験結果と矛

盾することが明らかとなった。これは、ここで定義した変形係数が、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水粉体容積比であるからであった。そこで、変形係数の定義を、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水細骨材容積比とし、モルタルフロー値を定式化した。

(5) このモルタルフロー値の基本式は、細骨材粉体容積比を一定としたモルタルにおいて、水粉体容積比と相対フロー面積比が線形関係となるが、相対フロー面積比が小さい範囲では、細骨材容積比を一定とした場合においても、その関係は線形関係とみなせることが明らかとなった。

(6) 細骨材の変形係数を、相対フロー面積比を単位量大きくするために必要な水細骨材容積比と定義した場合、変形係数は、細骨材容積比に係わらない一定値と、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係数よりなることが示された。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、東京大学工学部小澤一雅助教授から、終始有益な御助言を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 廣瀬、豊田、竹林、上阪：最適骨材評価コンクリートの展望と今後の課題、ダム技術、No.50、1990.11.
- 2) 大内、小澤：フ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.
- 3) 小菅、高木、村井、坂井：微粉末炭酸カルシウムを添加したセメントの水和反応、第66回日本セラミックス協会年次講演集、1991.

(1995.4.3受付)

QUANTIFICATION OF SAND PROPERTY IN VIEW OF MORTAR FLOW

Yoshinobu EDAMATSU, Syozo YAMAGUCHI and Hajime OKAMURA

The objective of this research is to evaluate quantitatively the effect of sand property on the value of flow which represents deformability of mortar. On the basis of the correlation between relative flow area of paste and free water-powder ratio by volume, modeling of relative flow area of mortar was explained. From the result obtained, it became clear that the effect of sand property on the value of mortar flow can be evaluated quantitatively by the water retaining factor for sand (β_s , water retained by sand) and the flowing factor for sand (E_s , water - sand ratio by volume increase unit relative flow area of mortar).