

論文

[1075] モルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料の性質の影響

吉野 公^{*1}・西林新蔵^{*2}・井上正一^{*3}・黒田 保^{*4}

1. まえがき

フレッシュコンクリートのワーカビリティ評価を従来の定性的な評価ではなく、コンクリート施工のシステム化、ロボット化にもつながるようなフレッシュコンクリートの持つ物理量（レオロジー定数）による定量的な評価が求められるようになってきた。しかし、実際の施工への適用のためには多くの問題点が残されている。そのひとつとして要求されるレオロジー定数を持ったコンクリートの配合を求める手順の確立がある。これを検討する上で、フレッシュペースト、モルタル、コンクリートを連続相と分散相からなる高濃度サスペンションと考え、分散相の濃度、連続相および分散相の性質によってフレッシュペースト、モルタルあるいはコンクリートのレオロジー定数を考察することは有効であり、この考え方を基にしていくつかの研究が行われている[1],[2]。しかし、これらの研究は混和剤を添加しないものがほとんどであり、流動化剤あるいは高性能A E減水剤を添加した流動性のあるペースト、モルタルあるいはコンクリートに関してはほとんど研究されていない。

本論文は、混和剤の種類および骨材の物理的性質がモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響を明らかにし、骨材の性質および配合から、モルタルのレオロジー定数とくに塑性粘度の予測手法に関して検討した結果について述べたものである。

2. 使用材料および実験条件

本研究では、モルタルをセメントペーストが連続相、細骨材が分散相となるサスペンションと考えて検討を行った。連続相となるペーストの配合は、水セメント比0.40と一定とし、分散相となる細骨材には5種類の骨材を用い、各骨材で骨材容積割合を4水準に変化させた。

使用したセメントは、普通ポルトランドセメントである。化学混和剤は、A E減水剤(WR)、流動化剤(SP)および高性能A E減水剤(HAE1)を使用した。なお、化学混和剤の添加量は、A E減水剤の場合は規定の添加量（単位セメント量 $C \times 0.25\%$ ）、流動化剤の場合には、水セメント比0.40、細骨材率44%、スランプ 8 ± 1 cmのA Eコンクリートが同時添加における流動化後 18 ± 1 cmとなるような添加量（ $C \times 0.75\%$ ）、高性能A E減水剤の場合には、流動化剤の場合と同配合のコンクリートが練り上がり後 18 ± 1 cmとなるような添加量（ $C \times 1.25\%$ ）とした。なお、流動化剤を添加した試料にはA E減水剤も添加している。

使用した細骨材の物理試験結果を表-1に示す。細骨材Aは砕砂と陸砂の混合砂、細骨材Bは川砂と陸砂の混合砂であり、細骨材C～Eはそれぞれ物理的性質の異なる砕砂である。骨材に対する試験としては、ふるい試験、単位容積重量試験および定水位透水試験を行い、F.M.、実積率および比表面積を求めた。細骨材の比表面積の算定は、JIS に規定されている定水位透水

*1 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 鳥取大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*4 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

試験から得られた透水係数と、その時の試料の空隙率から、以下に示すLoudonの実験式[3]を用いて行った。

$$\log(kS^2) = 1.365 + 5.15n \quad (1)$$

ここで、 S は比表面積 (cm^2/cm^3)、 k は透水係数 ($\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm}^2$)、 n は空隙率である。

モルタルの練混ぜには容量10ℓのモルタルミキサを用い、1回の練混ぜは7ℓとした。

練混ぜはJIS-R-5201に準じて行い、この時のパドルの回転数は自転140rpm、公転62rpmであった。また、混和剤の添加方法は、練混ぜ水と同時に添加する同時添加とした。試料のレオリージ一定数は球引上げ粘度計を用いて行った。なお、試験中の試料の温度は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。

表-1 細骨材の物理的性質

骨 材	種 類	比重	F.M.	実績率 (%)	比表面積 (cm^2/cm^3)
A	砕砂+陸砂	2.65	2.81	67.5	341
B	川砂+陸砂	2.58	2.81	65.5	291
C	砕 砂	2.68	3.01	66.8	288
D	砕 砂	2.66	3.01	66.5	255
E	砕 砂	2.68	3.45	63.8	232

3. 結果および考察

3.1 細骨材容積割合がモルタルのレオリージ一定数に及ぼす影響

分散相の濃度すなわち細骨材容積割合とモルタルの塑性粘度との関係の一例を図-1に示す。図より、どの混和剤および細骨材を使用したモルタルにおいても、塑性粘度は細骨材容積割合の増加に伴い指数関数的に増加する傾向が認められた。また、降伏値においても同様であった。したがって、モルタルのレオリージ一定数を、各混和剤および各骨材ごとに細骨材容積割合の関数として、最小自乗法を用いて一次の対数式で近似すると次式が得られる。

$$\log R = A_1 V_s - B_1 \quad (2)$$

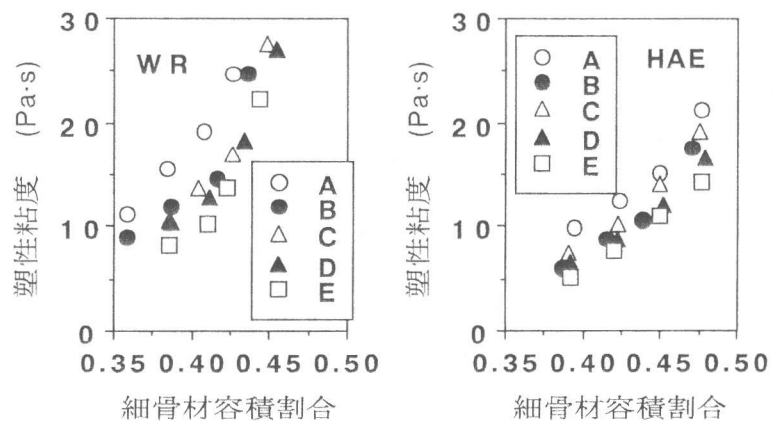


図-1 細骨材容積割合と塑性粘度との関係

ここで、 R はモルタルのレオリージ一定数（塑性粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) あるいは降伏値 (Pa)）、 V_s は細骨材容積割合、 A_1 、 B_1 は係数である。これらの式によって、モルタルのレオリージ一定数は、細骨材容積割合の関数として表すことが可能であると考えられる。しかしながら、これらの式には使用材料の性質が含まれていないほかに、式の係数が使用した混和剤および骨材の種類ごとに異なるため、一般的に使用できるレオリージ一定数式とはいえない。

そこで、同一塑性粘度 ($12\text{Pa}\cdot\text{s}$) および降伏値 (100Pa) における細骨材容積割合を(2)式を用いて計算することにより、細骨材の種類がモルタルのレオリージ一定数に及ぼす影響を検討した。図-2は塑性粘度一定における各細骨材の細骨材容積割合 (V_s) を、図-3は降伏値一定における各細骨材の細骨材容積割合 (V_s) を示したものである。図より、塑性粘度一定、降伏値一定の条件とも細骨材Aを用いたモルタルが最も細骨材容積割合が小さく、以下B、C、D、Eの順

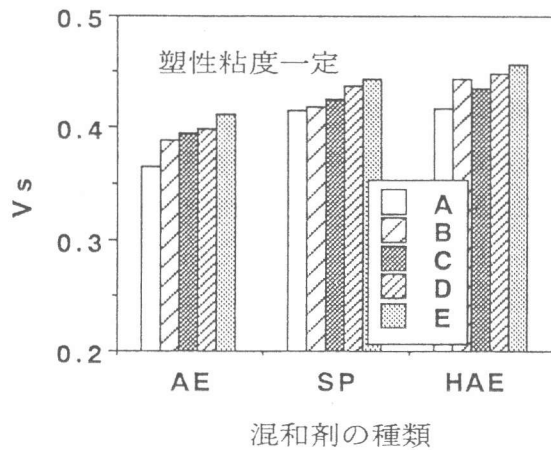


図-2 塑性粘度一定における各細骨材の細骨材容積割合

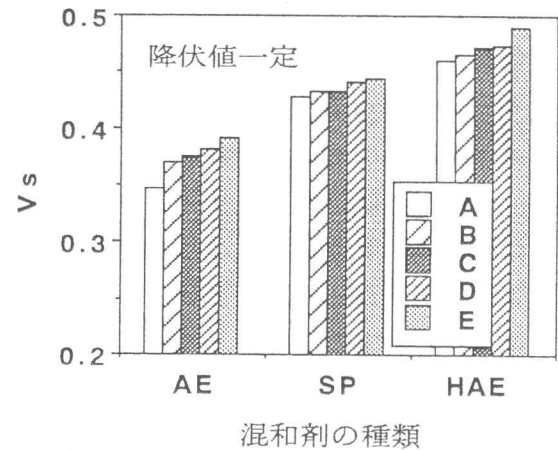


図-3 降伏値一定における各細骨材の細骨材容積割合

に細骨材容積割合は大きくなっている。これは細骨材の比表面積の大きさと一致している（表-1）。すなわち、骨材の比表面積はモルタルのレオロジー定数に影響を及ぼし、同じレオロジー定数を得るためには、比表面積の大きな骨材ほど細骨材容積割合を小さくしなければならないものと考えられる。

3.2 細骨材の性質がレオロジー定数に及ぼす影響

前述したように、細骨材容積割合同様、細骨材の比表面積がフレッシュモルタルのレオロジー定数に影響する重要な要因であると考えられることから、モルタルのレオロジー定数を表わすパラメータとして、細骨材容積割合と細骨材の比表面積をともに考慮した細骨材の総表面積を考える。細骨材の総表面積とは、単位容積のモルタル中に存在する個々の細骨材の表面積の和であり、細骨材の性質である比表面積と分散相の濃度とを含んだパラメータとなる。細骨材の総表面積は次式によって得られる。

$$Sa = Ss \times Vs \times 100 \quad (3)$$

ここで、 Sa は細骨材の総表面積 (m^2/m^3)、 Ss は細骨材の比表面積 (cm^2/cm^3)、 Vs は細骨材容積割合である。

図-4に細骨材総表面積とレオロジー定数との関係の一例を示す。これらの図から、各細骨材ごとに細骨材の総表面積が大きくなるのに伴い、レオロジー定数が指数関数的に増大する傾向が認められる。しかし、細骨材総表面積とレ

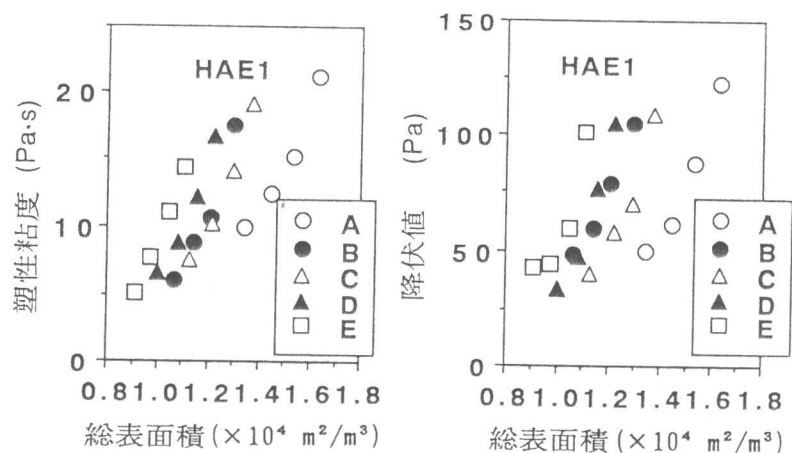


図-4 細骨材総表面積とレオロジー定数との関係

オロジー定数との関係は細骨材の種類ごとに異なり、同じレオロジー定数を得るのに要する細骨材総表面積は細骨材Aを用いたものが最も大きく、Eを用いたものが最も小さくなっている。したがって、細骨材総表面積すなわち細骨材の比表面積と細骨材容積割合の2つのパラメータ以外にモルタルのレオロジー定数に影響を及ぼす細骨材の性質があるものと思われる。

後藤[4]は、コンクリートのフレッシュ状態の性質に影響を及ぼす骨材の性質は表面積以外に実積率もそうであることを指摘している。また、Kennedy[5]はフレッシュコンクリートのコンシステンシーに及ぼすセメントの性質および骨材の性質の影響について、プラスチックなコンクリート中のセメントペーストは骨材間の空隙を満たし、さらに骨材の表面を覆わなければならないとしたうえで、コンクリートのコンシステンシーは、セメントペーストのコンシステンシーと骨材表面に形成されるペースト膜の厚さすなわち余剰ペースト膜厚により定められるとしている。この余剰ペースト膜厚は次式で求められる。

$$F_p = \frac{S_s \times V_s \times 100}{1 - V_s / S_{vs} \times 100} \quad (4)$$

ここで、 F_p は余剰ペースト膜厚 (μm)、 S_s は細骨材の比表面積 (cm^2/cm^3)、 V_s は細骨材容積割合、 S_{vs} は細骨材の実積率 (%) である。したがって、余剰ペースト膜厚は細骨材の比表面積と実積率の2つの骨材の性質を表わすパラメータと、分散質濃度を表わす細骨材容積割合の3つのパラメータを同時に含むものである。

図-5に余剰ペースト膜厚とレオロジー定数との関係の一例を示す。図より、モルタルのレオロジー定数は余剰ペースト膜厚が大きくなるにともない指数関数的に減少する傾向が認められる。さらに、レオロジー定数に及ぼす要因として余剰ペースト膜厚を採り挙げることによって、細骨材の種類の違いによるレオロジー定数の違いがほとんどなくなる。すなわち、細骨材の種類に関係なく、任意の余剰ペースト膜厚によってひとつの塑性粘度あるいは降伏値が決定される。したがって、塑性粘度あるいは降伏値は余剰ペースト膜厚の関数として混和剤ごとに次式で近似できる。

$$\log R = A_2 F_p + B_2 \quad (5)$$

ここで、 R はモルタルのレオロジー定数、 F_p は余剰ペースト膜厚、 A_2 および B_2 は係数である。

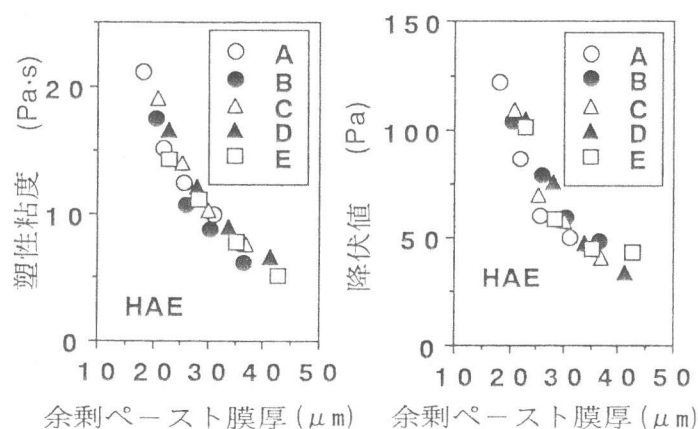


図-5 余剰ペースト膜厚とレオロジー定数との関係

3.3 モルタルの粘度式

(5) 式は、細骨材の性質の違いお

よび配合の違いを余剰ペースト膜厚を用いて比較的良く表わせたが、混和剤の種類あるいは添加量によって式の係数が異なる。これは、余剰ペースト膜厚理論で指摘されているように、余剰ペースト膜厚とともにモルタルのコンシステンシーはセメントペーストのコンシステンシー

表-2 ペーストのレオロジー定数

混和剤 の種類	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
WR	8.35	82.7
SP	5.14	21.5
HAE1	3.95	14.4

に大きく影響されるからである。各セメントペーストのレオロジー定数を表-2に示す。

そこで、他の分散系で行われてい

る[6] ように、モルタルの塑性粘度を相対粘度で表わすことを試みた。ここで、相対粘度とは、サスペンション（モルタル）の塑性粘度を連続相（ペースト）の塑性粘度で除したものである。また、降伏値に対しても相対降伏値の適用を試みた。

図-6に、細骨材Cを用いたモルタルの相対粘度および相対降伏値と余剰ペースト膜厚との関係を示す。図より、相対粘度を用いると混和剤の種類の影響がほとんどなくなることがわかる。すなわち、相対粘度と余剰ペースト膜厚との関係は、混和剤の種類にかかわらず、骨材ごとにひとつの関係式で表わすことができる。一方、相対降伏値では、同一余剰ペースト膜厚において、A E減水剤（WR）を用いたモルタルの相対降伏値がそれ以外の混和剤を用いたモルタルの相対降伏値よりもかなり小さい値を示した。すなわち、相対降伏値を用いても混和剤の影響が残ったままであり、相対降伏値の概念は適当でないと考えられる。したがって、降伏値に関しては、セメントペーストの降伏値を考慮した予測式の確立には相対降伏値以外のアプローチが必要であり、今後さらに検討する必要がある。

相対粘度と余剰ペースト膜厚との関係が、各細骨材ごとに、混和剤の種類にかかわらずほぼひとつの関係式で表わされることから、相対粘度と余剰ペースト膜厚との関係は、混和剤の種類および細骨材の種類にかかわらず、ひとつの関係式で表わされることが予想される。そこで、すべての試料に対して、相対粘度と余剰ペースト膜厚との関係を図示した（図-7）。図-7より、相対粘度と余剰ペースト膜厚との関係は、混和剤の種類および細骨材の種類にかかわらず、ひとつの式で表わすことが可能と考えられ、次式が得られる。

$$\log(\eta_r) = -2.38 \times 10^{-2} F_p + 1.06 \quad (7)$$

ここで η_r は相対粘度、 F_p は余剰ペースト膜厚である。なお、(7) 式の相関係数は0.962 であった。この (7) 式は混和剤および細骨材の種類に関

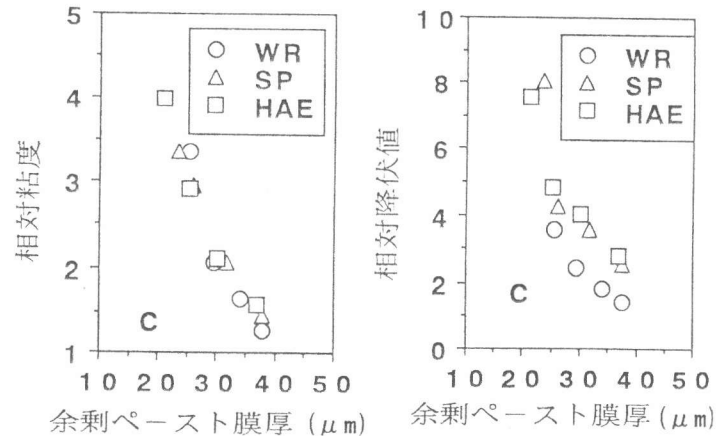


図-6 余剰ペースト膜厚と相対粘度、相対降伏値との関係

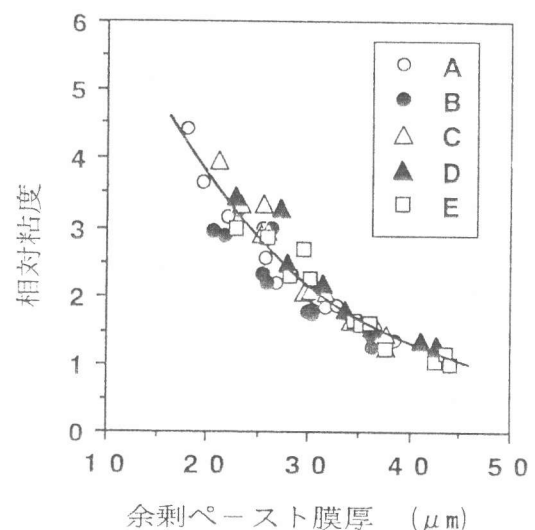


図-7 全試料における余剰ペースト膜厚と相対粘度との関係

係なく、余剰ペースト膜厚から
相対粘度を推定できるので、よ
り一般的な式であるといえる。

本研究において、モルタルの
塑性粘度を推定する式として
(7) 式を提案したが、この式の
精度を検討するため、(7) 式を
用いて計算した推定値と実測値
との比の平均値、変動係数を計
算した。データの個数は60個で
ある。計算した推定値と実測値
との比の範囲は0.82~1.25、変

動係数は10.2%と比較的よい精度であった。したがって、セメントペーストの塑性粘度がわか
れば、細骨材の性質および配合を考慮してモルタルの塑性粘度がかなりの精度で推定できるも
のと考えられる。本研究において提案したモルタルの塑性粘度の推定方法のフローチャートを
図-8に示す。

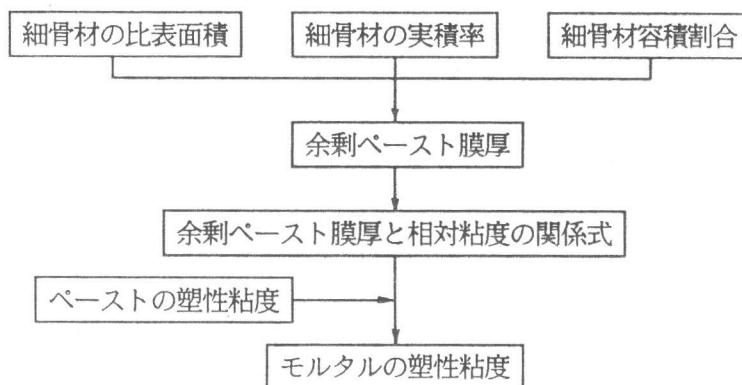


図-8 モルタルの塑性粘度の推定方法

4. まとめ

本研究では、骨材の物理的性質がモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響を明らかにし、骨
材の性質および配合から、モルタルのレオロジー定数とくに塑性粘度の予測手法に関して検討
を行った。本研究で得られた結果を列挙し、まとめとする。

(1) 細骨材の物理的性質である比表面積、実積率および配合要因である細骨材容積割合から計
算される余剰ペースト膜厚とモルタルのレオロジー定数との関係はセメントペーストのレオロ
ジー定数が同じであれば、細骨材の種類に関係なく1本の式で近似できる。

(2) 相対粘度（モルタルの塑性粘度／セメントペーストの塑性粘度）と余剰ペースト膜厚との
関係は、混和剤および細骨材の種類に関係なく、1本の近似式で表わされる。

<参考文献>

- [1] 角田 忍, 藤井 学, 明石外世樹: フレッシュコンクリートの粘度式について, セメント
技術年報, NO.33, 1979, pp.227 ~230.
- [2] 菊川浩治: モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究, 土木学会論文集, No.
414, 1990, pp.109 ~118.
- [3] A.G. Loudon: The Computation of Permeability from Simple Soil Tests, Geotech-
niq. 1952, pp.165 ~183.
- [4] 後藤知以: コンクリート骨材の実積率の算出に関する実験的研究(第1報) - 骨材の実積
率に及ぼす粒度の影響 -, 日本建築学会論文報告集, No.280, 1979, pp.1~9.
- [5] C.T. Kennedy: The Design of Concrete Mixes, Jour. of ACI, Vol.36, 1940, pp.373~
400
- [6] 中川鶴太郎: レオロジー, 岩波全書, 1978, pp.126~128.