

論文

[1018] 流動化コンクリートのレオロジー的性質に及ぼす骨材特性の影響

正会員 西林新蔵 (鳥取大学土木工学科)
 正会員 井上正一 (鳥取大学土木工学科)
 正会員 ○吉野 公 (鳥取大学土木工学科)
 中村将之 (大林組)

1. はじめに

最近、コンクリートの性状は極めて多様化してきている。これは流動化剤、高性能AE減水剤等の化学混和剤の進歩、高炉スラグ微粉末やシリカフェームなどの混和材の混入などによるものである。それに伴って、フレッシュコンクリートのワーカビリティの判定方法の再検討が要望されている。

フレッシュコンクリートの性質を物理量として表現することは、新しいコンクリートや施工法の開発に役立つものである。現在、物理量としての物性を把握する手法としてはレオロジー的解析が多くなされている [1]。また、レオロジー量を用いたフレッシュコンクリートの流動挙動のシミュレーションに関する研究も行われている [2]。しかし、現段階ではレオロジー定数を測定する装置がいずれも大型で現場試験には不向きなこと、配合要因とレオロジー定数との関係が明確にされていないことなど多くの問題点が残されている。

本研究は、流動化コンクリートを対象として、骨材の粒径、粒度等の性質が流動化剤あるいは高性能AE減水剤を添加したモルタルあるいはコンクリートに及ぼす影響について実験的に検討するとともに、骨材特性がレオロジー定数に及ぼす影響を表わす指標について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。化学混和剤としては、AE減水剤(WR)、流動化剤(S)および高性能AE減水剤(H)を使用した。各化学混和剤の主要成分を表-1にそれぞれ示す。骨材は最大寸法10mmのもの

表-1 混和剤の主成分

記号	種類	主成分
WR	AE減水剤	リグニンスルホン酸塩、ポリオール複合体
S	流動化剤	ナフタリンスルホン酸カルシウム系化合物
H	高性能AE減水剤	変性リグニアルキルアリルスルホン酸塩および活性持続ポリマーの複合体

を除き天然砂(比重:2.57, 吸水率:2.24%)を用いた。骨材の粒径に関する実験では、JIS規格によるふるいで分級した6種類の粒径の細骨材A₁~A₆を用いた。これらの粒径の範囲を表-2に示す。骨材の最大寸法に関する実験では、最大寸法0.6~10mmの5種類の骨材B~Fを用いた。これらの粒度分布を図-1

表-2 骨材の粒径範囲

骨材の記号	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
ふるい目(mm)	~ 0.15	~ 0.3	~ 0.6	~ 1.2	~ 2.5	~ 5.0

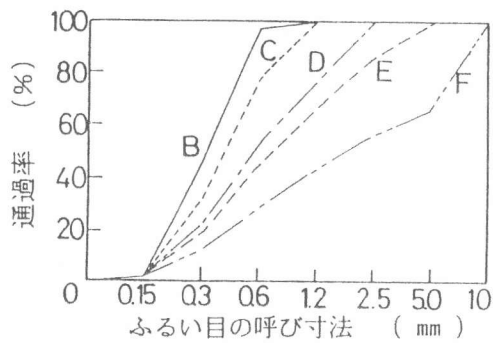


図-1 粒度分布 (最大寸法)

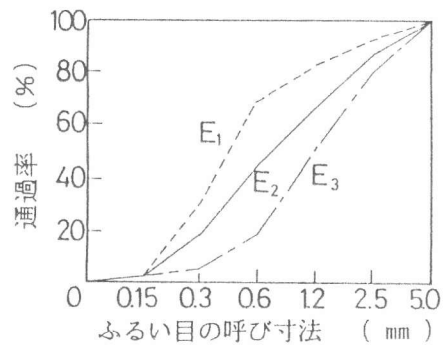


図-2 粒度分布 (F.M.)

に示す。なお、最大寸法が10mmの骨材Fにおいては粒径 5~10mmは碎石 (比重: 2.68, 吸水率: 0.89) である。骨材の粒度に関する実験では、最大寸法が5mmの3種類の骨材E₁~E₃を用いた。これらの粒度分布を図-2に示す。各実験に用いた骨材の種類を一括して表-3に示す。なお、骨材EとE₂とは同じものである。

表-3 使用骨材

項目	使用骨材
粒径	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , A ₅ , A ₆
最大寸法	B, C, D, E, F
粒度	E ₁ , E ₂ , E ₃

2.2 実験条件

A E減水剤および高性能A E減水剤は練り混ぜ水と同時に添加する同時添加とし、流動化剤は同時添加および練り後 60分における後添加を行なった。なお、流動化剤の場合にはベースモルタルあるいはコンクリートとしてA E減水剤を添加した試料に、さらに流動化剤を添加している。また、混和剤の添加量は、A E減水剤の場合は規定の添加量 ($C \times 0.25\%$)、流動化剤の場合には、スランプ 8 ± 1 cmのベースコンクリートが流動化後スランプ 18 ± 1 cmとなるような添加量 (同時: $C \times 0.75\%$, 後: $C \times 0.50\%$)、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直後にスランプ 18 ± 1 cmとなるような添加量 ($C \times 1.25\%$)とした。各試料の配合は、最大寸法およびF.M.に関する実験では、W/Cを0.40と一定とし、各骨材で骨材容積割合を4~6水準変化させた。また、骨材粒径に関する実験はW/Cが0.45のプレーンモルタルで行った。

2.3 試験項目

各骨材に対して単位容積重量試験を行ない、実績率を求めた。また、レオロジー定数の測定は、球引上げ式粘度計 [3] を用いて行った。

3. 結果および考察

3.1 骨材の粒径の影響

図-3はペーストにおけるセメントの容積濃度と塑性粘度との関係を示したものである。なお、図中のSの添字は添加量を示すものである。ペーストのレオロジー式として、ペーストを高濃度サスペンションと考え、セメ

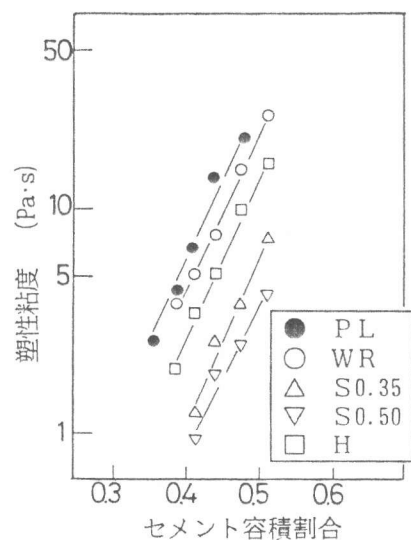


図-3 混和剤の影響 (ペースト)

ントの容積濃度と塑性粘度あるいは降伏値との関係式で表わすことが有効であるといわれている [4]。図より、同じ材料を用い、セメントの容積濃度すなわち水セメント比が変化するだけであれば、セメント容積濃度と塑性粘度との間には指数関係式が成り立つ。しかし、混和剤の種類あるいは添加量が変われば、同一セメント容積濃度における塑性粘度は変化する。これは、ペーストにおいてセメント粒子が完全には分散せず、粒子が数個ずつ吸着して団粒をなして挙動するからであり [5]、セメント粒子の分散の程度は混和剤の種類あるいは添加量によって変化するからである。したがって、セメント容積濃度とレオロジー定数との関係式を一般的なペーストのレオロジー式に発展させるには多くの問題点が残されている。

図-4は W/Cが 0.45 のペーストに粒径が異なる細骨材 A₁ ~ A₆ を混入した場合の塑性粘度の変化を示したものである。なお、図の横軸にはセメントと細骨材を合わせた固体容積濃度を取っている。また、図中の○はプレーンペーストの測定値である。図より、粒径が 0.15mm 以下の A₁ (平均粒径 0.04mm) の混入による塑性粘度の増加傾向はペーストと同様であり、粒径 0.15 mm 以上の A₂ ~ A₆ とかなり異なっている。粉体工学によれば、微粒子分の挙動はある境界の粒子径を境として変化するため、これ以上の粒子径のものを粒体、以下のものを粉体として区別しており、その境界の粒子径は 0.01 ~ 0.10 mm の範囲にあるとされている [5]。したがって、細骨材においてもその微粒子分はコンクリートのレオロジー定数に対してセメント粒子と同様な影響を及ぼすが、粒子径が 0.15mm 以上の細骨材がレオロジー定数に及ぼす影響は、セメント粒子とは全く異なるものと考えられる。

3. 2 骨材の最大寸法および粒度の影響

各最大寸法の骨材ごとのレオロジー定数と骨材容積割合 (V_s) との関係の一例を図-5に示す。図より、塑性粘度と骨材容積割合との関係は骨材の最大寸法にかかわらず、片対数グラフ

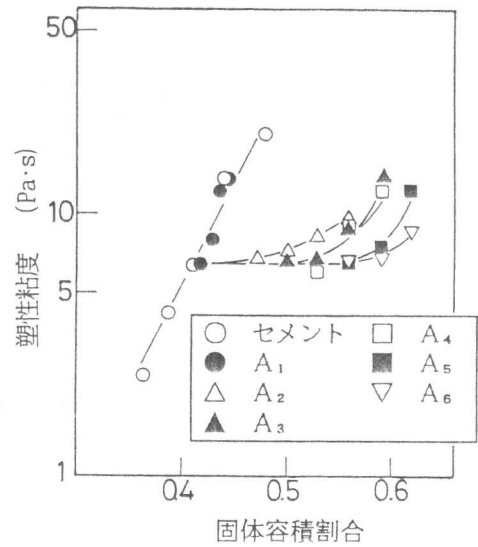


図-4 骨材粒径の影響

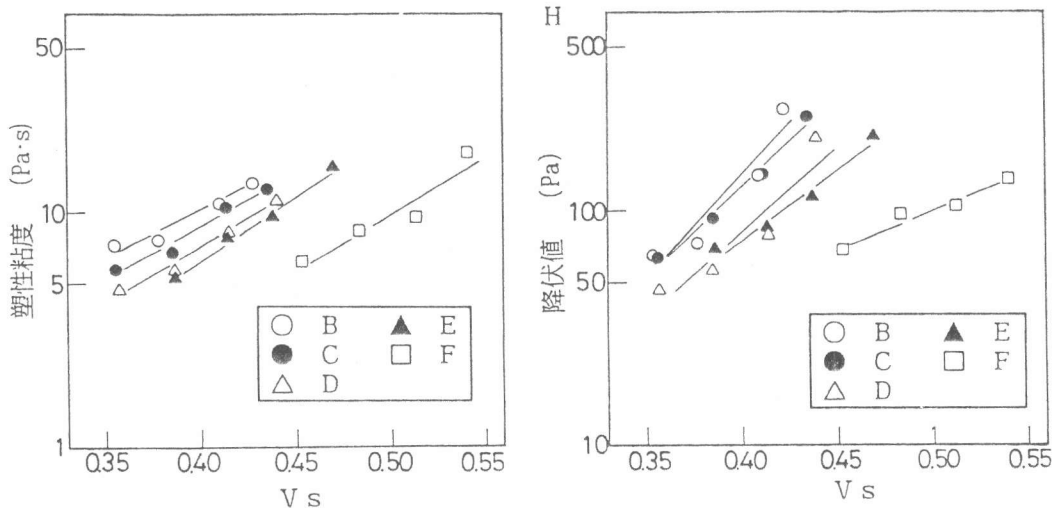


図-5 骨材最大寸法の影響 (混和剤 H)

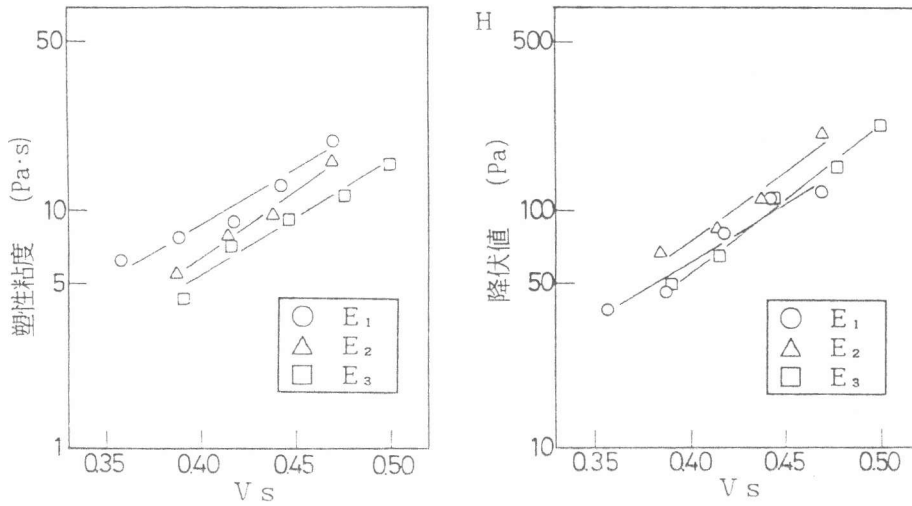


図-6 F.M.の影響 (混和剤H)

上で直線となる指数関数的関係にある。また、同一の塑性粘度で比較すると、骨材の最大寸法が大きくなるほど骨材容積割合は高くなっており、最大寸法の大きな骨材を用いると、塑性粘度の増加の傾向すなわち傾きは変化せずプロット点が右に移動しただけの結果となっている。

一方、降伏値と骨材容積割合との関係も塑性粘度の場合と同様に指数関数的関係にあり、最大寸法が大きくなるほど同一の降伏値を得る骨材容積割合は高くなっている。しかし、塑性粘度の場合と異なり、最大寸法が大きくなるに従って骨材容積割合の増加に伴う降伏値の増加の程度は少なくなる傾向にある。

各 F.M. ごとのレオロジー一定数と骨材容積割合 (Vs) との関係の一例を図-6 に示す。図より、塑性粘度と骨材容積割合との関係は F.M. にかかわらず指数関数的関係にあり、F.M. が大きな骨材を用いるほど同一塑性粘度を得る骨材容積割合は高くなっている。また、最大寸法を変化させた場合と同様に、骨材容積割合の増加に伴う塑性粘度の増加の傾向すなわち傾きはほとんど同じである。

一方、降伏値と骨材容積割合との関係も塑性粘度の場合と同様に指数関数的関係にあるが、F.M. の大きさが降伏値に及ぼす影響はほとんど見られない。

以上の結果から、塑性粘度 η_{pl} に関しては次式で近似を行うと、

$$\log(\eta_{pl}) = a(Vs) - b \quad (1)$$

(ここで、a, bは実験定数)

となり、係数 a は用いた骨材にかかわらず一定の値をとり、係数 b に骨材の最大寸法あるいは F.M. の影響が表れるものと推察される。

図-7 は混和剤ごとの塑性粘度と骨材容積割合との関係の一例を示したものである。なお、図中の S-0 は流動化剤を同時添加したものを、S-60 は後添加したものを示す。図より明らかなように、混和剤の種類あるいは添加時期によって同じ骨材容積割合における塑性粘度は異なる。これは、ひとつにはセメントペースト

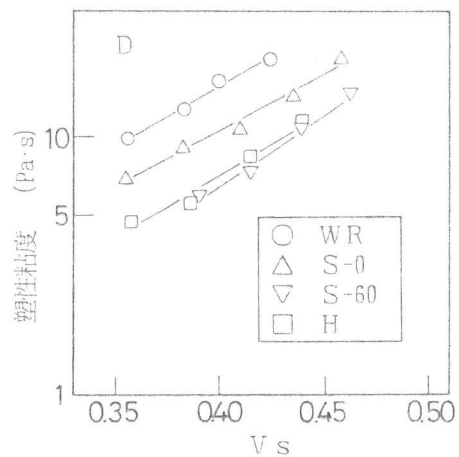


図-7 混和剤の影響 (骨材D)

の塑性粘度が異なるためであると考えられる。そこで、相対粘度 η_r (モルタルあるいはコンクリートの塑性粘度/ペーストの塑性粘度) を用いて、ペーストの塑性粘度を考慮に入れ、相対粘度と骨材容積割合との関係を見ると、図-8 に示すような関係が得られた。すなわちS-60を除く試料においては、相対粘度と骨材容積割合との関係は混和剤の種類にかかわらず、以下に示す一本の近似式で表すことができる。

$$\log(\eta_r) = a(V_s) - b \quad (2)$$

そこで、各骨材ごとにS-60を除くデータを用いて (2) 式の係数を求めた。その結果を表-4 に示す。なお、S-60が他の試料に比べて同一骨材容積割合において相対粘度が高くなった原因としては、S-60における混和剤の添加時期が他の試料と異なることが考えられるが、明確な原因については不明である。

表-4 の a, b をみると、係数 a は骨材による影響は見られないが、b は骨材の最大寸法、F.M. あるいは実績率の増加に伴って大きくなる傾向が見られる。このことから、各骨材の係数 a の平均値 a_m を求め、 $a = a_m$ と一定として各骨材ごとに係数 b をあらためて計算し、この b と骨材の物理的特性値との関連を検討した。ここでは、骨材の物理的特性値として F.M. および実績率を取り上げた。これらと係数 b との関係を図-9 に示す。図より、骨材の F.M. あるいは実績率が大きくなるにしたがって、b の値も大きくなっており、しかも F.M. と b、実績率と b の間には線形関係が認められる。したがって、係数 b を骨材の物理的性質を表す値として骨材係数 b とすると、b は以下の式で表すことができる。

$$b = c x + d \quad (3)$$

ここで、x は F.M. あるいは実績率であり、c, d は定数である。

以上の結果から、骨材の性質を含んだ相対粘度と骨材容積割合の式として、

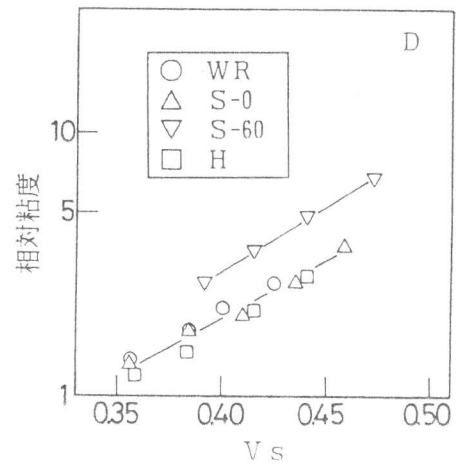


図-8 相対粘度と V_s との関係 (骨材 D)

表-4 近似式の係数

骨材	M.S. (mm)	F.M.	実績率 (%)	a	b	r
B	0.6	1.58	57.3	4.24	1.23	0.93
C	1.2	1.90	59.2	4.63	1.44	0.86
D	2.5	2.47	61.4	4.38	1.48	0.94
E	5.0	2.81	62.6	4.69	1.65	0.91
F	10.0	3.91	70.0	4.57	1.87	0.97
E ₁	5.0	2.22	60.7	5.10	1.69	0.95
E ₃	5.0	3.42	64.6	4.58	1.69	0.91

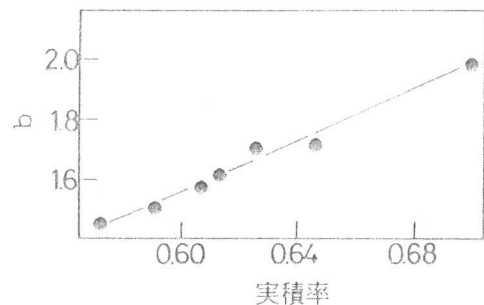
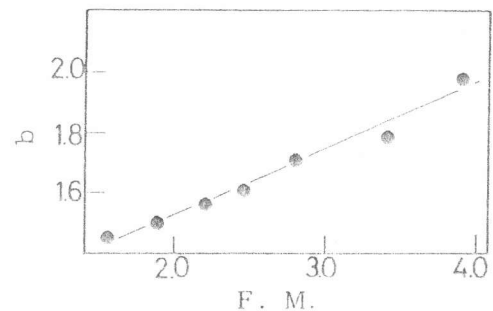


図-9 骨材特性と b との関係

$$\log(\eta_r) = 4.60(Vs) - 0.22(F.M.) - 1.09$$

$$\log(\eta_r) = 4.60(Vs) - 4.42(Sv) - 1.07$$

が得られた。ここで、Svは実積率である。上述の二式によって得られる塑性粘度の推定値と実測値との関係の検討を推定値と実測値との比で行った。その結果、F.M.を骨材の特性値とした場合には、推定値と実測値の平均は 1.01、変動係数 16.8%であった。また、実積率を骨材の特性値とした場合には、平均は 1.04、変動係数 17.4%であった。本実験で用いた骨材は F.M.が増加するにしたがって実積率も増加しているため、F.M.、実積率どちらを骨材の特性値として用いても同じ様な結果となった。本研究の範囲内では、多少変動係数は大きい、実用上塑性粘度のある程度の推定は可能であると思われる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた主な結果を列挙し、本論文のまとめとする。

- 1) 細骨材においてもその微粒子分はコンクリートのレオロジー定数に対してセメント粒子と同様な影響を及ぼすが、粒子径が 0.15mm 以上の細骨材がレオロジー定数に及ぼす影響は、セメント粒子とは全く異なる。
- 2) 最大寸法の大きな骨材を使用した試料ほど同一骨材容積割合でのレオロジー定数は小さくなる。また、最大寸法が同じ場合には F.M. が大きくなるほど同一骨材容積割合での塑性粘度が小さくなる。
- 3) 混和剤の添加時期が同時添加である場合には、相対粘度とすることで混和剤の種類に関係なく、使用骨材ごとに骨材容積割合をパラメータとする次式が成り立つ。
$$\log(\eta_r) = a(Vs) - b$$

ここに、 η_r : 相対粘度、Vs : 骨材容積割合、a, b : 実験定数である。
- 4) 上式の傾き aは混和剤の種類、骨材の種類に関係なくほぼ一定であり、b は骨材の F.M.あるいは実積率と線形関係を有する。

《参考文献》

- [1] 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，No.378，V-6，pp.21～33，1987.
- [2] 谷川恭雄ほか：サスペンション要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.257～262，1990
- [3] 西林新蔵ほか：流動化コンクリートのフレッシュ状態での特性評価に関する一実験，土木学会フレッシュコンクリートに関するシンポジウム論文集，pp.25～32，1983
- [4] 村田二郎，菊川浩治：ポルトランドセメントの粘度式に関する研究，土木学会論文集，No.354，V-2，pp.109～118，1985
- [5] 角田 忍，明石外世樹：セメントペーストの粘度式について，セメント技術年報 32，pp.88～91，1978
- [6] 松下博通，田中邦博，近田孝夫：砕砂コンクリートの細骨材率に関する一考察，セメント技術年報，42，pp.88～91，1988