

論文 コンクリートのレオロジー定数に及ぼす使用材料の影響

吉野 公*1・西林新蔵*2・井上正一*3・黒田 保*4

要旨：本研究は、粉体、骨材の物理的性質および配合が高流動コンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を大型化した球引上げ粘度計によって実験的に明らかにし、その結果に基づいて、使用材料の性質および配合から流動性の高いコンクリートのレオロジー定数、特に塑性粘度を予測する手法に関して検討した。その結果、コンクリートの塑性粘度は、モルタルの塑性粘度および粗骨材の比表面積、実積率、容積割合から求まる余剰モルタル膜厚によって予測できる可能性があることが明らかとなった。
 キーワード：塑性粘度、余剰モルタル膜厚、高流動コンクリート、球引上げ粘度計

1. はじめに

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。

粉体あるいは細骨材の性質がフレッシュペーストおよびモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響に関してはかなりの研究が行われているが、コンクリートのレオロジー定数に関する使用材料の影響を検討した研究は少ない。これは、一般的にコンクリートのレオロジー定数の測定がコンクリート中の骨材の容積割合が大きいことあるいは大きな粒径の骨材を含むことによって困難になることにひとつの要因がある。

本論文では、粗骨材量が少なく、レオロジー定数の測定が比較的精度よく行える粉体系の高流動コンクリートを対象として、粉体、骨材の物理的性質および配合がコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を実験的に検討した。また、その結果に基づいて、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る方法によって、使用材料の性質および配合からコンクリートのレオロジー定数、特に塑性粘度を予測する手法に関して検討した。

2. 使用材料および実験条件

本研究で使用した粉体の種類は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグおよび石灰石微粉末である。これらの物理的性質を表-1に示す。高炉スラグは普通セメントに対し

表-1 粉体の物理的性質

粉体の種類	比重	粉末度 (cm ² /g)
普通セメント	3.15	3330
高炉スラグ	2.89	6020
石灰石微粉末	2.73	5010

- *1 鳥取大学助手 工学部土木工学科、工博（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）

て置換率50%で、石灰石微粉末は置換率30%で用いた。また、化学混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用した。

使用した粗骨材および細骨材の物理試験結果を表-2、3に示す。また、その粒度分布を図-1、2に示す。

粗骨材は最大寸法の異なる3種類の砕石を使用した。物理的性質のうち粗骨材の比表面積は、投影法[1]を採用した。これは、任意の立体の投影面積の平均は、全表面積の1/4であることを利用している。本研究では、2枚の透明なガラス板の間にジアゾ感光紙をはさみ、その上に粗骨材をセロファンテープで固定し、平行光線である太陽光を約10秒間感光させ現像して投影図を求めた。測定した粗骨材の投影方向は、骨材粒子の長軸方向を基準として、互いに直行する方向、すなわち短軸方向および長軸直角方向の計3方向であり、投影面積はプランメーターを用いて測定し、その平均を4倍することによって表面積を求めた。さらに、投影面積を求める試料は前もって質量を測定し、比重によって絶対体積を計算し、表面積と絶対体積から比表面積を求めた。

細骨材は砕砂と陸砂の混合砂である。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[2]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。

コンクリートの配合は、水結合材比を0.30および0.35の2水準とし、粉体ごと、粗骨材の種類ごとにモルタルの配合一定で粗骨材の容積割合を3水準にとった。このモルタルの配合は、単位水量 $170\text{kg}/\text{m}^3$ 、細骨材率49%、スランプフロー $55\pm 5\text{cm}$ のコンクリートの配合のモルタル

表-2 粗骨材の物理的性質

粗骨材の種類	最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	F.M.	実積率 (%)	比表面積 (cm^2/cm^3)
A	20	2.69	0.80	6.81	58.0	6.1
B	15	2.69	0.80	6.71	57.9	6.2
C	10	2.69	0.80	6.52	56.9	6.5

表-3 細骨材の物理的性質

比重	吸水率 (%)	F.M.	実積率 (%)	比表面積 (cm^2/cm^3)
2.67	1.40	2.72	67.3	394.2

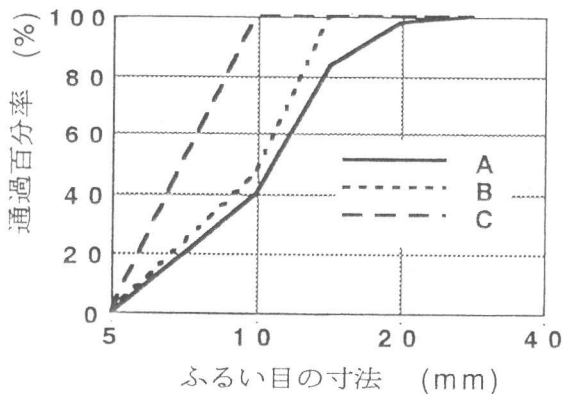


図-1 粗骨材の粒度分布

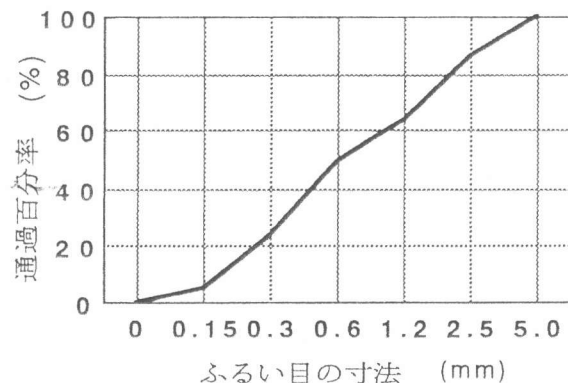


図-2 細骨材の粒度分布

部分のものとした。したがって、使用した粉体および粗骨材ごとに高性能AE減水剤の添加量は異なる。基準としたコンクリートの配合を表-4に示す。

コンクリートの練混ぜは容量100ℓパン型ミキサを用い、モルタルを60秒間練り混ぜた後粗骨材を加え、さらに90秒間練り混ぜた。また、1回の練混ぜは50ℓとした。

練上がり直後のコンクリートおよびそれをウェットスクリーニングしたモルタルに対して、球引上げ粘度計を用いてレオロジー定数の測定を行った。測定に用いた球引上げ粘度計の寸法を表-5に示す。

3. 結果および考察

3.1 使用材料の違いがコンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響

粗骨材の種類が異なった場合の粗骨材容積割合とコンクリートのレオロジー定数との関係を図-3に示す。図より、どの粗骨材を使用したコンクリートにおいても、レオロジー定数は粗骨材容積割合の増加に伴い増加する傾向が認められた。しかし、粗骨材容積割合の増加に伴うレオロジー定数の増加の程度は使用した粗骨材の種類によって異なることがわかる。また、粗骨材容積割合が最も大きい配合においては、スランプフローが一定になるように高性能AE減水剤の添加量を調整していることから、降伏値は粗骨材の種類にかかわらず同様な値を示しているが、塑性粘度は粗骨材の種類によって異なり、最大寸法が小さい粗骨材を用いたコンクリートが大きな塑性粘度を示した。したがって、コンクリートのレオロジー定数は、粗骨材容積割合および粗骨材の性質に影響を受けることがわかる。

図-4は使用した粉体の種類がコンクリートの塑性粘度に及ぼす影響を検討したものの一例で

表-4 基準としたコンクリートの配合

W/P	s/a (%)	V _G	単位容積重量 (kg/m ³)					
			W	C	SG	LS	S	G
0.30	49	0.309	170	567	0	0	790	831
		0.304		283	283	0	782	818
		0.304		397	0	170	780	818
0.35	49	0.322	170	486	0	0	825	866
		0.318		243	243	0	817	855
		0.318		340	0	146	814	855

V_G: 粗骨材容積割合、SG: 高炉スラグ、LS: 石灰石微粉末

表-5 球引上げ粘度計の寸法

試料	球の直径	容器
モルタル	3.14cm	φ15×30cm
コンクリート	9.98cm	φ50×50cm

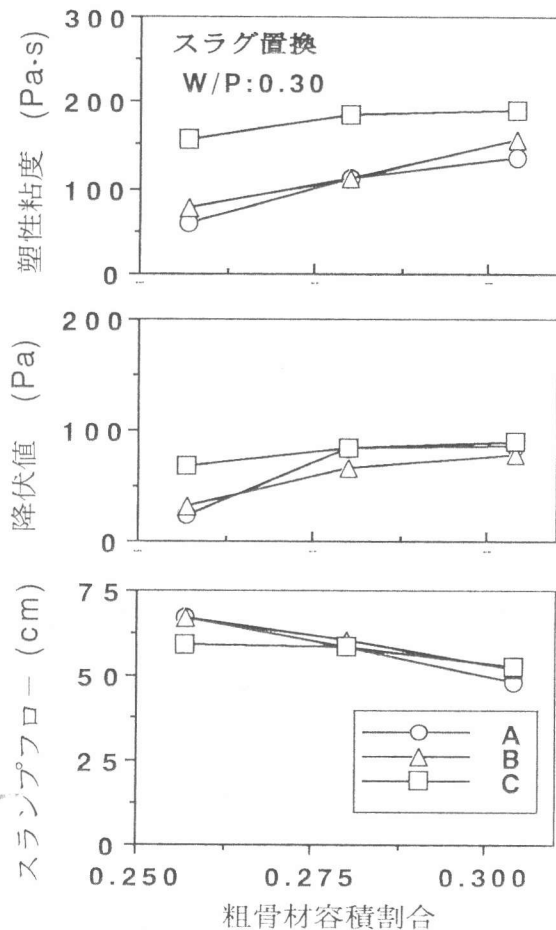


図-3 粗骨材容積割合とレオロジー定数との関係

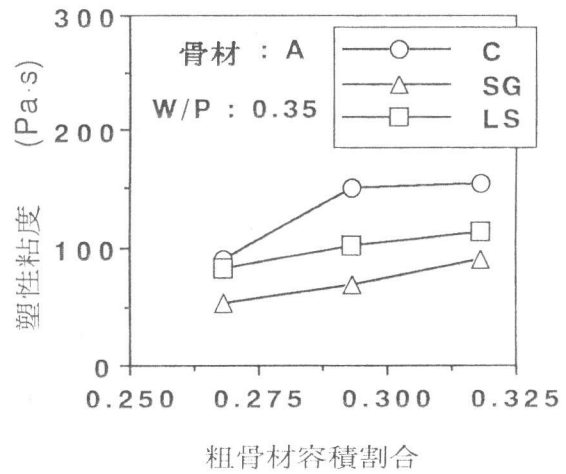
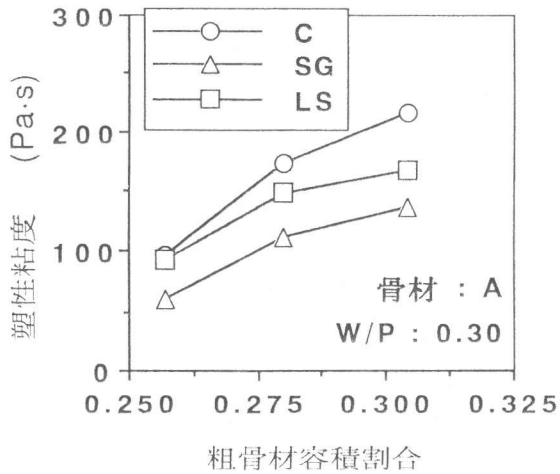


図-4 粗骨材容積割合と塑性粘度との関係

ある。図より、用いた粉体の種類および水結合材比によってコンクリートの塑性粘度は異なることがわかる。図-5はウエットスクリーニングモルタルの塑性粘度を示したものであるが、粉体の種類および水結合材比が塑性粘度に及ぼす影響はコンクリートと同様である。これらの要因はコンクリート中のペースト部分の塑性粘度に影響を及ぼすものであり[3]、その結果として、コンクリートの塑性粘度の違いとなったものであると考えられる。本研究の結果から、コンクリートのスランプフローあるいは降伏値が同じ場合であっても、粉体の種類あるいは水結合材比によって塑性粘度は異なることがわかる。

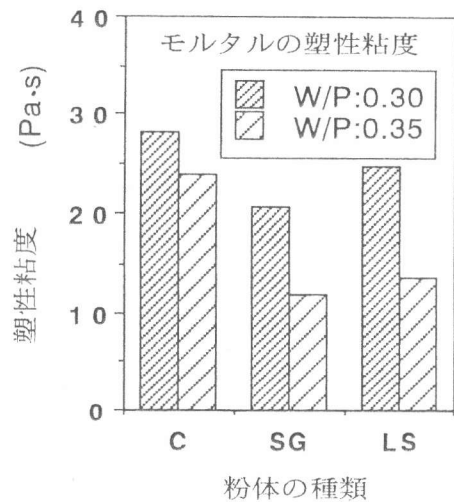


図-5 モルタルの塑性粘度

3.2 コンクリートの粘度式の検討

コンクリートの粘度式を検討する上で、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コンクリートの塑性粘度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[4]。コンクリートを連続相と分散相からなる2相材料であると考えた場合、図-6に示すモデルを想定した研究が多い。山口ら[5]によれば、粒径0.09mmを境界値として粒子の影響が変化することを示しており、粉体と粒径0.09mm以上の細骨材および粗骨材とは区別してその影響を取扱うのが妥当と思われるが、細骨材および粗骨材は余剰ペースト膜厚理論[6]で行われているように分散相をまとめて骨材として取扱うことも可能と考えられる。しかしながら、本研究で対象としたスランプフロー50cm以上

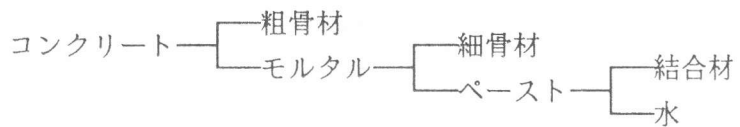


図-6 コンクリートの高濃度サスペンションモデル

の高流動コンクリートにおいては、そのペースト部分のレオロジー定数の測定は、測定中に粉体が沈降する分離が生じ測定が困難となった。そこで、本研究においては、コンクリートを連続相がモルタル、分散相が粗骨材である2相材料と考えて粘度式の検討を行った。

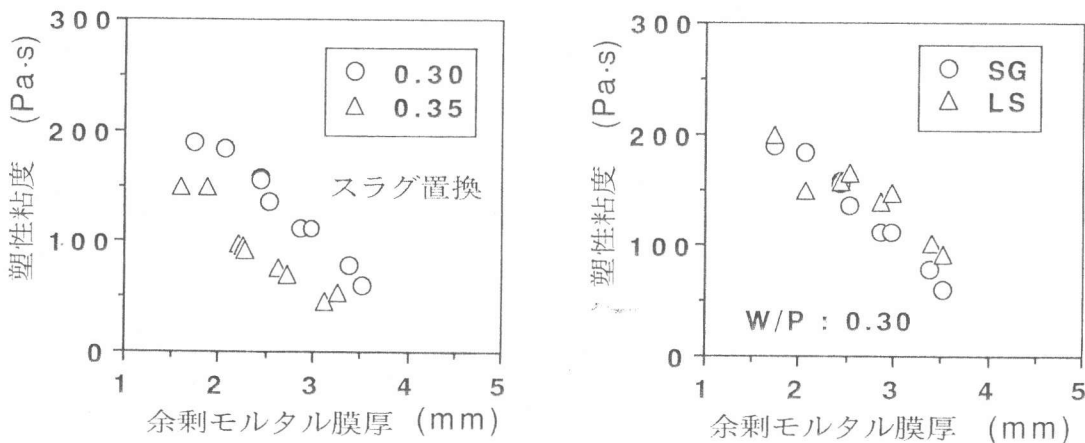
著者らはモルタルの粘度式を検討する上で、細骨材の物理的性質である比表面積、実積率および配合要因である細骨材容積割合から計算される余剰ペースト膜厚とモルタルのレオロジー定数との関係はペーストのレオロジー定数が同じであれば、細骨材の種類に関係なく1本の式で近似できることを示した[7]。本研究では、この結果を考慮して粗骨材の比表面積、実積率および粗骨材容積割合から計算される余剰モルタル膜厚とコンクリートの塑性粘度との関係を検討した。余剰モルタル膜厚は次式で計算できる。

$$F_m = (1 - V_g \times 100 / S_{vg}) \times 10 / (S_g \times V_g) \quad (2)$$

ここで、 F_m は余剰モルタル膜厚 (mm)、 S_g は粗骨材の比表面積 (cm^2/cm^3)、 V_g は粗骨材容積割合、 S_{vg} は粗骨材の実積率 (%) である。したがって、余剰モルタル膜厚は比表面積と実積率の2つの粗骨材の性質を表わすパラメータと、分散質濃度を表わす粗骨材容積割合の3つのパラメータを同時に含むものである。

図-7に余剰モルタル膜厚とコンクリートの塑性粘度との関係の一例を示す。図より、粉体の種類および水結合材比ごとに、コンクリートの塑性粘度は余剰モルタル膜厚が大きくなるのに比例して減少する傾向が認められる。さらに、塑性粘度に及ぼす要因として余剰モルタル膜厚をとり挙げることによって、粗骨材の種類の違いによる塑性粘度の違いがほとんどなくなることがわかる。しかし、粉体の種類あるいは水結合材比、混和剤の添加量によって同じ余剰モルタル膜厚であってもコンクリートの塑性粘度は異なる。これは、先にも述べたようにコンクリートの塑性粘度は余剰モルタル膜厚とともにモルタル（ペースト）のコンシステンシーに大きく影響されるからである。

そこで、他の分散系で行われているように、コンクリート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（コンクリート）の塑性粘度を連続相（モルタル）の塑性粘度で除したものである。



(a) 粉体の種類一定 (スラグ)

(b) 水結合材比一定

図-7 余剰モルタル膜厚とコンクリートの塑性粘度との関係

図-8は、すべての試料に対して相対粘度と余剰モルタル膜厚との関係を図示したものである。図より、相対粘度と余剰モルタル膜厚との関係は、ひとつの式で表わすことが可能と考えられ、混和剤の種類および細骨材の種類にかかわらず、次式が得られる。

$$\log(\eta_r) = -0.290 F_m + 1.59 \quad (3)$$

ここで η_r は相対粘度、 F_m は余剰モルタル膜厚である。なお、式(3)の相関係数は0.90であった。この式を用いて余剰モルタル膜厚から相対粘度を推定できることから、モルタルの塑性粘度がわかれば、粗骨材の性質および配合を考慮してコンクリートの塑性粘度がある程度推定できるものと考えられる。

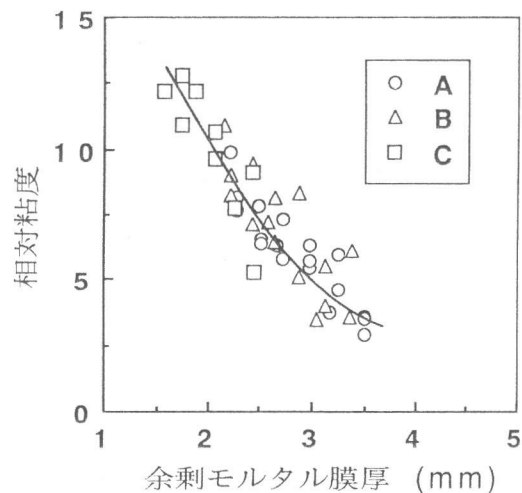


図-8 余剰モルタル膜厚と相対粘度との関係

4. まとめ

本研究では、粗骨材の物理的性質および粉体の種類が高流動コンクリートのレオロジー定数に及ぼす影響を明らかにし、粗骨材の性質および配合からコンクリートの塑性粘度を予測する手法について検討をなした。その結果、相対粘度（コンクリートの塑性粘度／モルタルの塑性粘度）と粗骨材の比表面積、実積率および粗骨材容積割合から計算される余剰モルタル膜厚との関係は1本の近似式で表されることがわかった。したがって、モルタルの塑性粘度がわかれば、粗骨材の性質および配合を考慮してコンクリートの塑性粘度がある程度推定できることが明らかとなった。

<参考文献>

- 1) 水口裕之：フレッシュコンクリートの流動特性に関する基礎的研究，京都大学博士論文，p.91, 1984.2
- 2) Loudon, A. G.: The Computation of Permeability from Simple Soil Tests, Geotechnique, pp.165 ~183, 1952.
- 3) 吉野 公, 西林新蔵, 井上正一, 黒田 保：結合材の性質がペーストの塑性粘度に及ぼす影響，材料, Vol.43, No.491, pp.930~935, 1994.8
- 4) 日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告集, p.12, 1990.
- 5) 山口昇三, 枝松良展, 岡村 甫：モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.83 ~88, 1994.
- 6) Powers, T. C.: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc., pp.501~503, 1968.
- 7) 吉野 公, 西林新蔵, 井上正一, 黒田 保：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，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.461~466, 1994.