

論文 高流動コンクリートの流動性予測に関する実験的研究

須藤 栄治*¹・五味 信治*²・松尾 暁*³・榎田 佳寛*⁴

要 旨：高流動コンクリートを高流動モルタルと粗骨材との 2 相系材料と考え、高流動コンクリートの流動特性をモルタルのレオロジー特性値と粗骨材量に関する特性値とで表そうとする予測式がいくつか提案されている。しかしながらこれらの予測式に用いるモルタルについては統一された定義がなされていない。本研究は、コンクリート中でのモルタルのレオロジー特性をどう考えるかを検討する資料を得るためにコンクリートをウェットスクリーニングして得られるモルタルをコンクリート中のモルタルとし、そのレオロジー特性値と粗骨材の絶対容積から高流動コンクリートの流動特性を表せるかを検討したものである。その結果、ウェットスクリーニングしたモルタルのレオロジー特性で高流動コンクリートの流動性を評価できることがわかった。

キーワード：スランプフロー、50cm フロー時間、粗骨材の絶対容積、降伏値、塑性粘度

1. はじめに

高流動コンクリートの流動特性は、コンクリートを構成する結合材ペースト¹⁾²⁾、細骨材および粗骨材の性質³⁾ならびにそれらの単位量の影響を受けると考えられる。そこで、高流動コンクリートが高流動のモルタルと粗骨材から成り立つ 2 相系材料であるとみなすと高流動コンクリートの流動特性は、コンクリート中のモルタルのレオロジー特性と粗骨材量で表すことができる。その考え方をもとにした 2 相系の解析モデル⁴⁾⁵⁾もいくつか提案されている。しかしながらこれらの研究では、最も重要であるコンクリート中のモルタルが何であるかについては統一した定義がなされていない。これはコンクリート中のモルタルのレオロジー特性値を直接測定することが難しいためである。コンクリート中のモルタルとして一般的には調合から粗骨材を除いたモルタル（以下、調合モルタルという。）が考えられることが多い。しかし、コンクリート中のモルタルの状態を考えた場合、

セメントペースト、水および混和剤等が粗骨材に吸着することでモルタルのレオロジー特性が変化することが考えられる。したがって調合モルタルのレオロジー特性値で表すことは難しいと考えられる。そこで本研究では、3 水準の粘性の調合モルタルを用いて作った高流動コンクリートからウェットスクリーニングしたモルタルのレオロジー特性値と粗骨材の絶対容積から高流動コンクリートのスランプフローおよび 50cm フロー時間をよく評価できるかを検討した。

2. 実験計画概要

2.1 対象とした高流動コンクリートのタイプ

本研究で対象とした高流動コンクリートは、結合材として普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を使用した。さらに分離低減剤によって材料分離抵抗性を付与するタイプのものである。

*1 日産建設(株) 技術研究所 研究員 工修

*2 日産建設(株) 技術研究所 主席研究員

*3 日産建設(株) 九州支店 工修

*4 宇都宮大学 工学部建設学科 教授 工博

表-1 実験要因と水準

要因	水準
モルタルの種類	粘性高, 粘性中, 粘性低
粗骨材の絶対容積 (ℓ/m ³)	100, 200, 259, 305, 330, 351

表-2 使用材料

材料名	品質
セメント	普通ポルトランドセメント(比表面積3200cm ² /g, 密度3.16g/cm ³)
水	水道水
細骨材	川砂(表乾密度2.59 g/cm ³ , 吸水率1.72%)
粗骨材	硬質砂岩(表乾密度2.64 g/cm ³ , 吸水率0.59%, 実積率61%)
混和材	高炉スラグ微粉末(密度2.89 g/cm ³ , 比表面積4000cm ² /g)
混和剤	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸) 分離低減剤(メチルセルロース系)

表-3 調合およびフレッシュコンクリート試験結果

調合名	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)					添加率 (%)		フレッシュコンクリート	
		水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤 ¹⁾	分離低減剤 ²⁾	スランプフロー (mm)	50cmフロー時間 (秒)
351-A	45	163	181	181	896	926	1.5	0.20	460~575	22.9
351-B							1.4~1.5	0.14	551~620	10.1~16.6
351-C							1.5	0.09	643	8.88
330-A		169	188	188	923	871	1.5	0.20	593	15.5
330-B							1.4	0.14	565	10.1
330-c							1.3	0.09	450	—
305-A		175	194	194	963	805	1.5	0.20	650	10.0
305-B							1.4~1.5	0.14	648~658	7.8~8.8
305-C							1.3~1.5	0.09	598~639	4.9~6.0
259-A		187	208	208	1023	684	1.5	0.20	673	10.0
259-B							1.4	0.14	690~723 ³⁾	4.5~5.0
259-C							1.3	0.09	608	5.1
200-A	202	225	225	1111	528	1.5	0.20	725 ³⁾	4.7	
200-B						1.5	0.14	763 ³⁾	4.0	
200-C						1.5	0.09	770 ³⁾	3.0	
100-A	228	254	254	1253	264	1.5	0.20	828 ³⁾	2.5	
100-B						1.5	0.14	833 ³⁾	2.3	
100-C						1.5	0.09	835 ³⁾	2.0	

注1) 添加率は、セメント量に対する百分率

注2) 添加率は、水量に対する百分率

注3) 目視でコンクリートが分離状態でない試料について実験を行った。

表-4 試験項目および試験方法

種類	試験項目	方法
モルタル	降伏値	B型回転粘度計による測定
	塑性粘度	
コンクリート	スランプフロー	JASS 5T-503
	50cmフロー時間	「スランプフロー試験方法」による

2.2 要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。モルタルの粘性高、中、低は、分離低減剤の添加率による分類である。分離低減剤および高性能AE減水剤の添加率は、目標スランプフローが65cm、粗骨材の絶対容積が305ℓの高流動コンクリート

で50cmフロー時間が10秒を超える場合の添加量のモルタルを粘性高、5秒を超え10秒以下のものを粘性中、5秒以下のものを粘性低とした。

2.3 材料および調合

高流動コンクリートの使用材料を表-2に、調合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表-3に示す。コンクリートの水結合材比は45%で、細骨材の容積とモルタルの容積の比は、0.55で一定となるようにした。なお、高性能AE減水剤の添加率は、スランプフローを合わせる

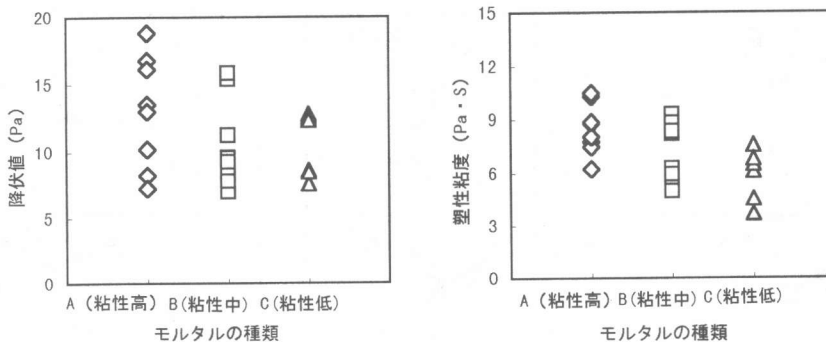


図-1 ウェットスクリーニングしたモルタルのレオロジー的特性

ために高性能 AE 減水剤の添加率を一部調整した。表-3 の調合名は、数字が粗骨材の絶対容積、英字がモルタルの種類 (A: 粘性高, B: 粘性中, C: 粘性低) を示す。

2.4 練混ぜおよび実験方法

高流動コンクリートの練混ぜ手順は、モルタルを 60 秒練混ぜ後、粗骨材を投入し 60 秒練混ぜた。試験項目および試験方法を表-4 に示す。コンクリート練混ぜ後、スランプフローおよび 50cm フロー時間の試験を行った。

モルタルは、高流動コンクリートから 5mm のフルイを用いてウェットスクリーニングで採取した。その採取したモルタルでは、降伏値および塑性粘度の測定を行った。これらの試験は、練混ぜ後約 15 分後から開始した。試料は 400ml 採取し、容器は 500 ml のビーカーを用いた。降伏値および塑性粘度の測定は、内円板型回転粘度計で、直径 35mm のローターを用いて、2.5 rpm → 5 rpm → 10 rpm → 20 rpm → 50rpm → 20rpm → 10 rpm → 5 rpm → 2.5 rpm の順序で行い、それぞれの回転数で 60 秒間測定した。下降域の 50rpm → 20rpm → 10 rpm → 5 rpm → 2.5 rpm の実測値からせん断速度 (ずり速度) およびせん断応力度 (ずり応力度) を計算し、その計算値から最小二乗法により切片および勾配を求めた。その切片を降伏値とし、その勾配を塑性粘度とした。

3. 実験結果および考察

3.1 ウェットスクリーニングしたモルタルの性質

練混ぜた高流動コンクリートからウェットスクリーニングして得られたモルタルの降伏値および塑性粘度の測定結果を図-1 に示す。粘性高、中および低のモルタルの降伏値はそれぞれ 7.2~18.8Pa, 7.0~15.8Pa および 7.5~12.8Pa の範囲にある。また、塑性粘度は、それぞれ 6.3~10.3Pa·s, 5.0~9.3Pa·s および 3.7~7.6 Pa·s の範囲にあった。

3.2 降伏値・塑性粘度および粗骨材の絶対容積がスランプフローに及ぼす影響

降伏値がスランプフローに及ぼす影響を図-2 に示す。モルタルの降伏値が大きくなるとスランプフローは小さくなる傾向にある。降伏値の増大に対するスランプフローの低下の割合は、粘性高よりも粘性低が大きい傾向が認められる。

塑性粘度がスランプフローに及ぼす影響を図-3 に示す。塑性粘度が大きくなるとスランプフローは小さくなる傾向にある。しかし塑性粘度の増大に対するスランプフローの低下の割合は、降伏値の場合と異なり、モルタル種類の違いでは一定の傾向がみられなかった。

粗骨材の絶対容積がスランプフローに及ぼす影響を図-4 に示す。粗骨材の絶対容積が増加するとスランプフローは低下する傾向にある。

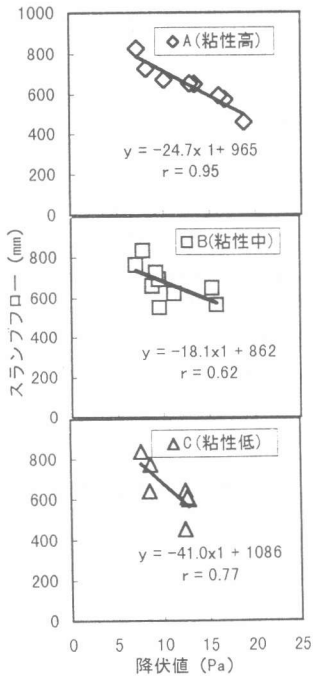


図-2 降伏値がスランプフローに及ぼす影響

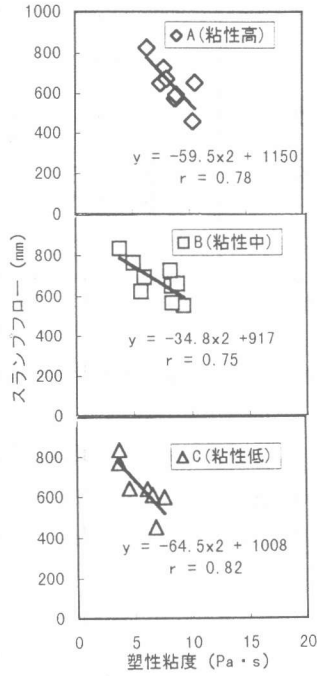


図-3 塑性粘度がスランプフローに及ぼす影響

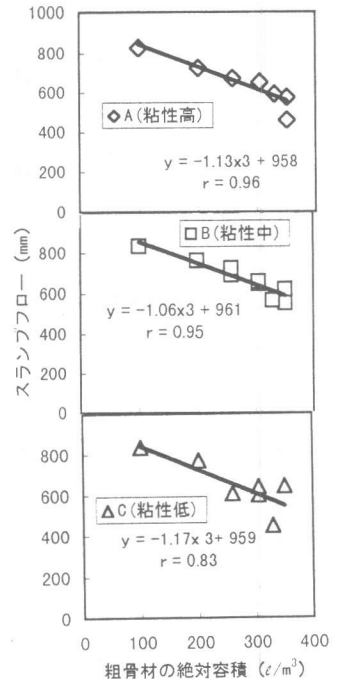


図-4 粗骨材の絶対容積がスランプフローに及ぼす影響

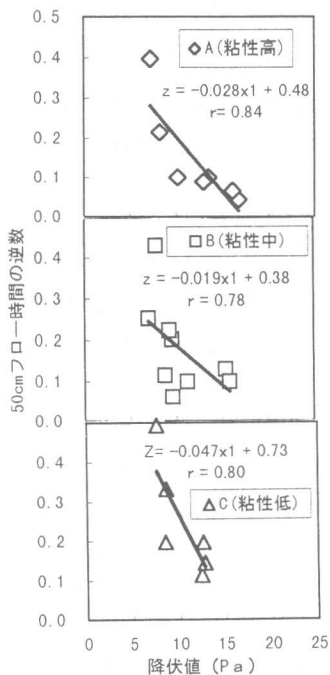


図-5 降伏値が50cmフロー時間に及ぼす影響

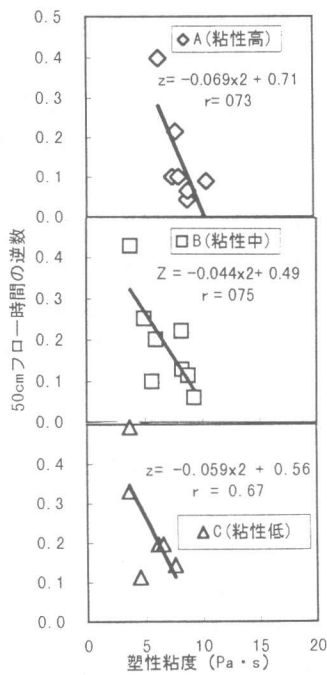


図-6 塑性粘度が50cmフロー時間に及ぼす影響

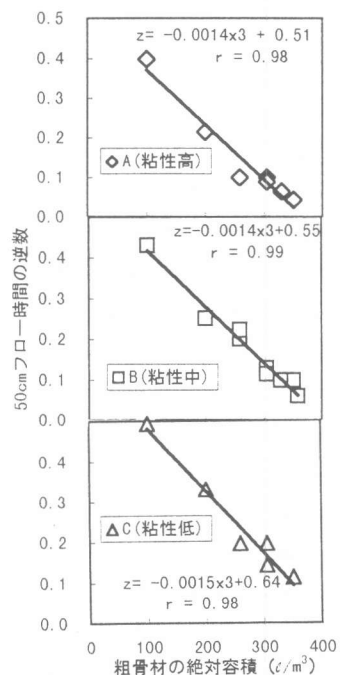


図-7 粗骨材の絶対容積が50cmフロー時間に及ぼす影響

表-5 重回帰分析の結果

目的変数	説明変数	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)	粗骨材の絶対容積 (ℓ/m ³)	定数
スランプフロー (mm)	偏回帰係数	-7.36	-4.38	-0.834	998
	標準回帰係数	-0.241	8.60×10^{-2}	-0.657	—
	偏相関係数	-0.363	-0.150	-0.707	—
50cm フロー時間 時間の逆数 (1/秒)	偏回帰係数	8.94×10^{-5}	2.00×10^{-2}	-1.06×10^{-3}	0.599
	標準回帰係数	2.15×10^{-3}	-0.301	-0.668	—
	偏相関係数	3.40×10^{-3}	-0.472	-0.690	—

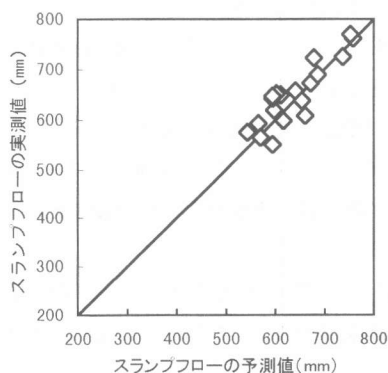


図-8 スランプフローの予測値と実測値の比較

これは粗骨材量が多いと粗骨材同士の噛み合わせや粗骨材とスランプ板との摩擦の影響によると考えられる。またモルタルの種類の違いによる影響はあまりみられなかった。

3.3 降伏値・塑性粘度および粗骨材の絶対容積が 50cm フロー時間に及ぼす影響

降伏値が 50cm フロー時間に及ぼす影響を図-5 に示す。降伏値が大きくなると、50cm フロー時間の逆数は小さくなる傾向にある。

塑性粘度が 50cm フロー時間に及ぼす影響を図-6 に示す。塑性粘度が大きくなると、50cm フロー時間の逆数は小さくなる傾向にある。

粘性高のモルタルでは、50cm フロー時間の逆数は小さい方に分布し、粘性低の場合は大きい方に分布しており、スランプフローがモルタルの分類にかかわらず、ほぼ同じ範囲に分布していたのと異なる傾向を示している。

粗骨材の絶対容積が 50cm フロー時間に及ぼす影響を図-7 に示す。粗骨材の絶対容積が増

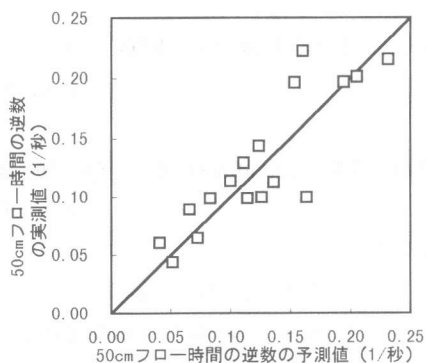


図-9 50cm フロー時間の予測値と実測値の比較

加すると 50cm フロー時間は、直線的に低下することが認められる。また、直線回帰した相関係数は 0.95~0.98 となり、粗骨材の絶対容積の 50cm フロー時間に及ぼす影響が非常に大きいと考えられる。

3.4 スランプフローおよび 50cm フロー時間の予測式提案

実験結果からスランプフローおよび 50cm フロー時間は、降伏値、塑性粘度および粗骨材の絶対容積と相関性があることがわかった。そこで重回帰分析をもちいて、スランプフローおよび 50cm フロー時間の予測式を求めることとした。スランプフローおよび 50cm フロー時間の逆数を目的変数とし、降伏値、塑性粘度および粗骨材の絶対容積を説明変数とした。重回帰分析の結果を表-5 に示す。スランプフローの予測式では、粗骨材の絶対容積および降伏値の標準回帰係数が大きく、このことから粗骨材の絶対容積と降伏値がスランプフローに及ぼす影響

が大きいと考えられる。50cm フロー時間の逆数の予測式では、粗骨材の絶対容積および塑性粘度の標準回帰係数が大きく、このことから粗骨材の絶対容積と塑性粘度が 50cm フロー時間の逆数に及ぼす影響が大きいと考えられる。今回はデータ数が少ないため、t 検定で棄却できる説明変数も含む式で評価した。スランプフローの予測式を式(1)、50cm フロー時間の予測式を式(2)に示す。

$$Y = -7.36X_1 - 4.38X_2 - 8.34 \times 10^{-1}X_3 + 998 \quad (1)$$

(r:0.90)

$$Z = 8.94 \times 10^{-5}X_1 - 2.00 \times 10^{-2}X_2 - 1.06 \times 10^{-3}X_3 + 0.599 \quad (2)$$

(r:0.89)

ここに、

Y : スランプフロー (mm)

Z : 50cm フロー時間の逆数 (1/秒)

X₁ : 降伏値 (Pa)

X₂ : 塑性粘度 (Pa·s)

X₃ : 粗骨材の絶対容積 (l/m³)

スランプフローの予測値と実測値の比較を図-8 に示す。スランプフロー 550mm~750mm の範囲内で予測値と実測値は概ね一致している。

50cm フロー時間の予測値と実測値の比較を図-9 に示す。50cm フロー時間の逆数 0.05 (50cm フロー時間では 20 秒) ~0.25 (50cm フロー時間では 4 秒) の範囲では、予測値と実測値は概ね一致している。これらのことからスランプフローおよび 50cm フロー時間は、モルタルの降伏値、塑性粘度および粗骨材の絶対容積を用いた予測式で評価できることがわかった。

4. おわりに

コンクリートをモルタルマトリックスと粗骨材から成り立つ 2 相系材料と仮定した場合、コンクリートの流動性は、コンクリート中のモルタルと粗骨材量で評価できると考えられている。しかしながらコンクリート中のモルタルの種類

については統一された定義がなされていない。本研究ではウェットスクリーニングしたモルタルをコンクリート中のモルタルと仮定した。そのモルタルのレオロジー特性値と粗骨材の絶対容積で高流動コンクリートの流動特性の関係について検討した。その結果を以下に示す。

- 1) スランプフローでは、粗骨材の絶対容積とウェットスクリーニングしたモルタルの降伏値の影響が大きい。
- 2) 50cm フロー時間では、粗骨材の絶対容積とウェットスクリーニングしたモルタルの塑性粘度の影響が大きい。
- 3) スランプフローおよび 50cm フロー時間の予測値は、実測値とほぼ一致する。

謝辞：本研究の実施に際して、宇都宮大学 工学部建設学科 宮野 和樹氏には御協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 江 東・藤原忠司ら：各種粉体を用いたペーストおよびモルタルの流動特性、高流動コンクリートシンポジウム pp.19-24, 1996.3
- 2) 日々野誠・山崎竹博・出光隆：ペーストの性質が高流動コンクリート中のモルタルの流動性に及ぼす影響に関する研究、高流動コンクリートシンポジウム pp.19-24, 1996.3
- 3) 吉野 公・西林新蔵・井上正一・黒田 保：高流動コンクリートのレオロジー定数に及ぼす配合要因の影響、コンクリート工学年次大会論文報告集 Vol.20 No.2pp.343-348, 1998
- 4) 社団法人日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書 pp135,1996.4
- 5) 三島直生・谷口恭雄・黒川善幸・寺田謙一：2次元モデルによるフレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する研究、コンクリート工学年次大会論文報告集 Vol.20 No.2pp.289-294, 1998