

論文 分離低減剤を用いた高流動コンクリートの調合に関する実験

五味 信治*1・岡本 将昭*2・榊田 佳寛*3・宮野 和樹*4

要旨：分離低減剤を用いた高流動コンクリートを対象にして、水結合材比、モルタル中の細骨材容積比および粗骨材絶対容積を変化させ調合要因による影響とレオロジー特性を測定し、それらの調合要因がコンクリートの流動性に与える影響を実験的に検討した。その結果、水結合材比、細骨材容積比、粗骨材絶対容積、ウェットスクリーニングしたモルタルの降伏値と塑性粘度を使用して、高流動コンクリートのスランプフローとスランプフロー速度を推定する予測式を導き、回帰分析によって各要因の影響度を検討し最も妥当な予測式を提案した。

キーワード：分離低減剤, 高流動コンクリート, 降伏値, 塑性粘度, 回帰分析

1. はじめに

高流動コンクリートのフレッシュ時における施工性評価の指標は、スランプフローとスランプフロー速度で表される。これらの指標はフレッシュコンクリートをビンガム流体と仮定した時の降伏値と塑性粘度に深く関係する。そのため、高流動コンクリートの流動性の評価は降伏値と塑性粘度の両者を考慮する必要があるが、その両者を同時に満足する一般的な調合方法は確立されていない¹⁾。高流動コンクリートの流動性を満足する調合方法を確立するためには、何が影響するのか明らかにしておくことが必要である。筆者らは、コンクリートを構成するモルタルのレオロジー的性質と粗骨材の絶対容積が高流動コンクリートの流動性に影響を及ぼすと考え検討を重ねてきた。昨年度はこれらの要素では説明しきれない部分を補足するためモルタル中の細骨材容積比を要素の一つに加えて推測式の精度を向上させ²⁾、今年度は従来一つだった水結合材比を3段階に分けて、さらに広い範囲でこれらの推測式が適用可能かを調べた。

本研究は、分離低減剤を用いた高流動コンクリートを対象に、モルタルのレオロジー的性質

と流動性に及ぼす調合要因の影響度を水結合材比、細骨材容積比および粗骨材絶対容積を変化させ、回帰分析によって各要因の影響度を分析し最も妥当な予測式の提案を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合条件

本研究で対象とした高流動コンクリートは、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を質量比で1:1に混合したものを結合材とし、細骨材は川砂を使用し、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である。水結合材比は40%から50%まで5%刻みで、モルタル中の細骨材容積比を49%から55%まで3%刻みで、粗骨材絶対容積を各水結合材比と細骨材容積比において260 l/m³から340 l/m³まで

表-1 実験要因と水準

要因	水準
水結合材比 (%)	40, 45, 50
細骨材容積比 (%)	49, 52, 55
粗骨材絶対容積 (l/m ³)	260, 300, 340

*1 日産建設 (株) 技術研究所 主席研究員 (正会員)

*2 日産建設 (株) 技術研究所 工修

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科 工修 (正会員)

表-2 使用材料

材料名	種類	特性・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	比表面積 3310cm ² /g, 密度 3.15g/cm ³
水	水道水	
細骨材	川砂	表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.27%
粗骨材	硬質砂岩	表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 1.42%, 実積率 60.1%
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.88 g/cm ³ , 比表面積 4340cm ² /g
混和剤	高性能 AE 減水剤 分離低減剤	ポリカルボン酸系 メチルセルロース系

表-3 調合例（水結合材比 40%の場合）

水結合材比 (%)	細骨材容積比 (%)	粗骨材絶対容積 (L)	単位量 (kg/m ³)					高性能 AE 減水剤 (%)	分離低減剤 (%)	空気量 (%)
			水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材			
40.0	49.0	260	200	251	251	910	689	0.80	0.14	2.0
		300	189	237	237	860	795			
		340	178	223	223	809	901			
	52.0	260	189	236	236	966	689	0.92	0.09	
		300	178	223	223	912	795			
		340	168	210	210	859	901			
	55.0	260	177	221	221	1022	689	1.10	0.04	
		300	167	209	209	965	795			
		340	157	197	197	908	901			

注) 高性能 AE 減水剤の添加率はセメント量に対する百分率, 分離低減剤の添加率は水量に対する百分率を示す。

40 l/m³ 刻みで変化させた。分離低減剤および高性能 AE 減水剤の添加率は、粗骨材絶対容積が 300 l/m³ の時、スランプフローが 650±50mm, 500mm フロー到達時間が 5~8 秒となる添加量とした。実験の要因と水準を表-1 に、使用した材料を表-2 に、水結合材比が 40% の場合の調合例を表-3 に示す。

2.2 試験項目および試験方法

高流動コンクリートの流動性を評価する試験項目は、スランプフロー、スランプフロー速度およびウェットスクリーニングしたモルタルの降伏値と塑性粘度とした。コンクリート中のモルタルのレオロジーをウェットスクリーニングしたモルタルで評価することは、流動性の評価指標であるスランプフロー、スランプフロー速度とウェットスクリーニングしたモルタルのレオロジーが良い相関関係²⁾にあることによる。

但し、ウェットスクリーニング時に作用するせん断力等でモルタルの性状が変化することも考えられるが、それらの影響については今後の課題としここでは考慮していない。

スランプフローおよび 500mm フロー到達時間の試験については以下に示す手順で行った。高流動コンクリートの練混ぜを温度 20±1℃ の室内で容量 50 l のパン型強制練ミキサを用いて行い、1 回の練り混ぜ量は 40 l とした。練り混ぜは、細骨材、セメントおよび高炉スラグを 15 秒空練りし、水と混和剤を入れてモルタルを 90 秒練り混ぜ後、粗骨材を投入し 90 秒練混ぜた。コンクリート練混ぜ後、5 分静置して試験を行った。

また、モルタルの降伏値と塑性粘度の測定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ものをを使用した。これらの測定は、練混ぜ後の約 15 分

表-4 実験結果の例（水結合材比 40%の場合）

調 合			コンクリートの性質		ウエットスクリーニングしたモルタルの性質		空気量 (%)
水結合材比 (%)	細骨材容積比 (%)	粗骨材絶対容積 (L)	スランプフロー (mm)	スランプフロー速度 (mm/s)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)	
40.0	49.0	260	733	34.97	8.10	9.27	1.5
		300	650	24.51	9.16	13.19	1.6
		340	533	12.76	10.07	23.69	1.8
	52.0	260	765	44.12	5.74	7.08	1.7
		300	675	29.64	6.84	8.50	1.7
		340	588	13.76	6.95	12.10	1.8
	55.0	260	743	32.82	4.24	7.51	1.5
		300	658	18.99	5.02	9.10	1.9
		340	540	7.97	5.42	17.23	2.4

から開始し、内円盤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、それぞれ 60 秒間回転し、下降域のせん断速度（ずり速度）およびせん断応力度（ずり応力度）を直線回帰し、その切片を降伏値、勾配を塑性粘度とした。

3. 実験結果

高流動コンクリートの調合要因として水結合材比、細骨材容積比および粗骨材絶対容積を変化させ、コンクリートの性質としてスランプフロー、スランプフロー速度、ウエットスクリーニングしたモルタルの性質として降伏値と塑性粘度についての実験結果の例を表-4 に示す。

4. 考 察

4.1 解析概要

コンクリートの流動性を表す指標として、スランプフローとスランプフロー速度を考えると、これらに影響を及ぼす調合要因として今回新たに加えた水結合材比とこれまで検討してきた細骨材容積比、粗骨材絶対容積、モルタルの降伏値と塑性粘度が考えられる。スランプフローとスランプフロー速度に及ぼす各種要因の影響は、以下のような考え方で解析することにした。

$f_i()$, $g_i()$ は関数型を示し $()$ の中はその変数を示す。 C_i は定数を表す。

$$S_F = f_0(W/B, S/M, G, Y, Z) \\ = f_1(W/B) + f_2(S/M) + f_3(G) + f_4(Y) + f_5(Z) + C_1 \quad (1)$$

$$F_T = g_0(W/B, S/M, G, Y, Z) \\ = g_1(W/B) + g_2(S/M) + g_3(G) + g_4(Y) + g_5(Z) + C_2 \quad (2)$$

ここで、

S_F : 高流動コンクリートのスランプフロー [mm],
 F_T : 高流動コンクリートのスランプフロー速度 [mm/sec],
 W/B : 水結合材比, S/M : モルタル中の細骨材容積比 [%],
 G : 粗骨材の絶対容積 [l/m^3], Y : ウエットモルタルの降伏値 [Pa],
 Z : ウエットモルタルの塑性粘度 [$Pa \cdot s$].

4.2 粗骨材絶対容積が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響

粗骨材絶対容積とスランプフローまたはスランプフロー速度およびウエットスクリーニングして得られたモルタルの降伏値や塑性粘度との関係を各細骨材容積比ごとに水結合材比で層別したものを図-1 に示す。スランプフローとスランプフロー速度については一般的に粗骨材絶対容積が大きくなるほどスランプフローとスラン

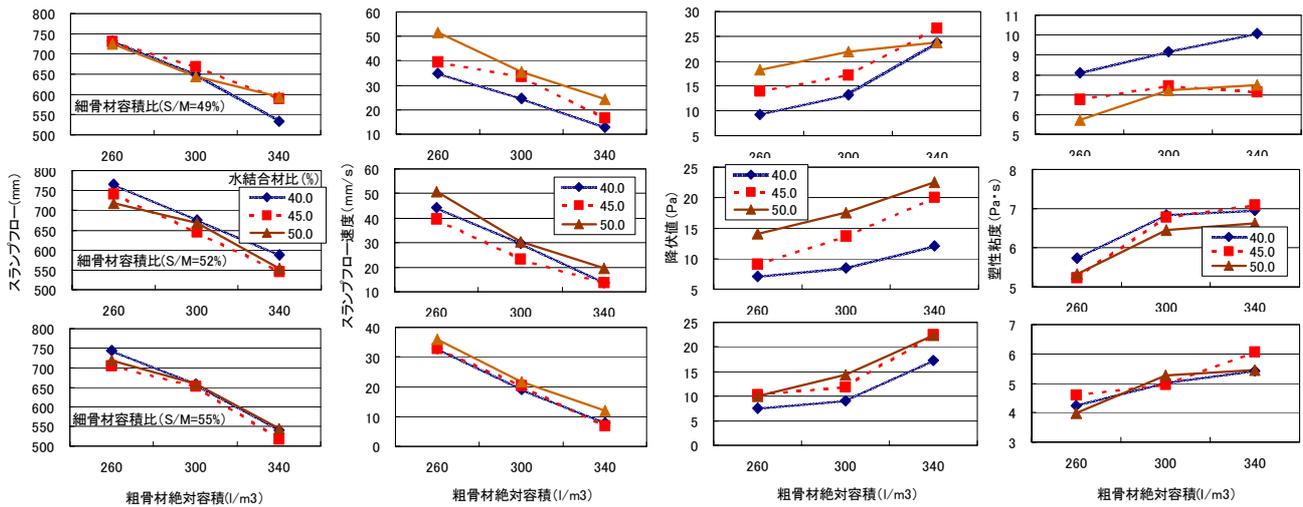


図-1 粗骨材絶対容積とスランプフロー，スランプフロー速度，モルタルの降伏値および塑性粘度の関係

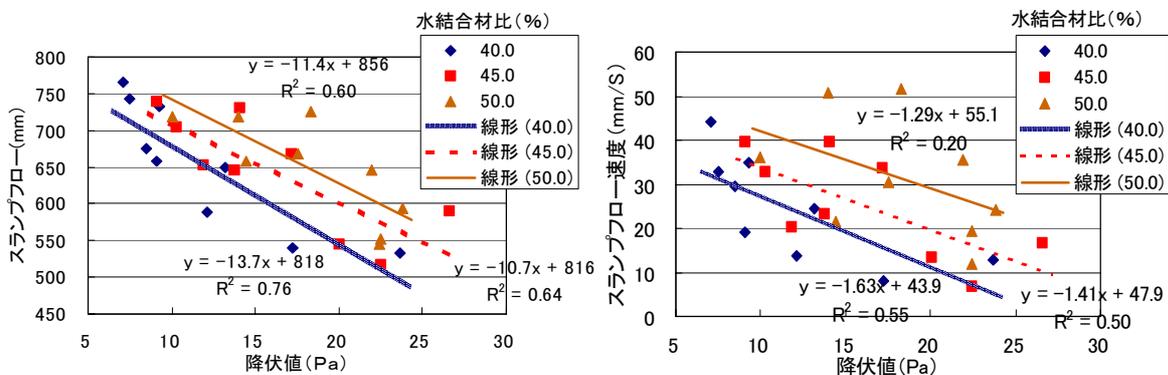


図-2 降伏値とスランプフロー，スランプフロー速度の関係

プフロー速度は減少する挙動を示し、水結合材比が変化してもその挙動はあまり変わらない。これらの挙動は粗骨材の容積に比例しているため粗骨材絶対容積の変化とコンクリートの流動性の間には強い相関があると考えられる。

モルタルの降伏値および塑性粘度については粗骨材絶対容積によって整合が取れないものもあるが粗骨材絶対容積が大きくなるほど降伏値と塑性粘度は増加する挙動を示し、水結合材比の変化に対応してその挙動を変化させている。これらの挙動は粗骨材絶対容積の変化によりモルタル部分の水量が変化したことやウェットスクリーニング等による影響と考えられる。図-1のいずれの関係も比例関係にあると仮定した。

4.3 降伏値と塑性粘度が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響

(1) 降伏値の影響

降伏値とスランプフローおよびスランプフロー速度との関係を水結合材比で層別したものを、図-2に示す。降伏値が大きくなるほどスランプフローは低下しスランプフロー速度は小さくなる傾向にある。降伏値が同一の場合、水結合材比が小さいほどスランプフローとスランプフロー速度は小さい傾向がみられる。いずれの関係も比例すると仮定し、直線で近似した。

(2) 塑性粘度の影響

塑性粘度とスランプフローおよびスランプフロー速度との関係を水結合材比で層別したものを、図-3に示す。塑性粘度が大きくなるほどスランプフローは低下しスランプフロー速度は小さくなる傾向にある。塑性粘度が同一の場合水結合材比が小さいほどスランプフローは大きい傾向がみられる。昨年度の実験²⁾では、水結合

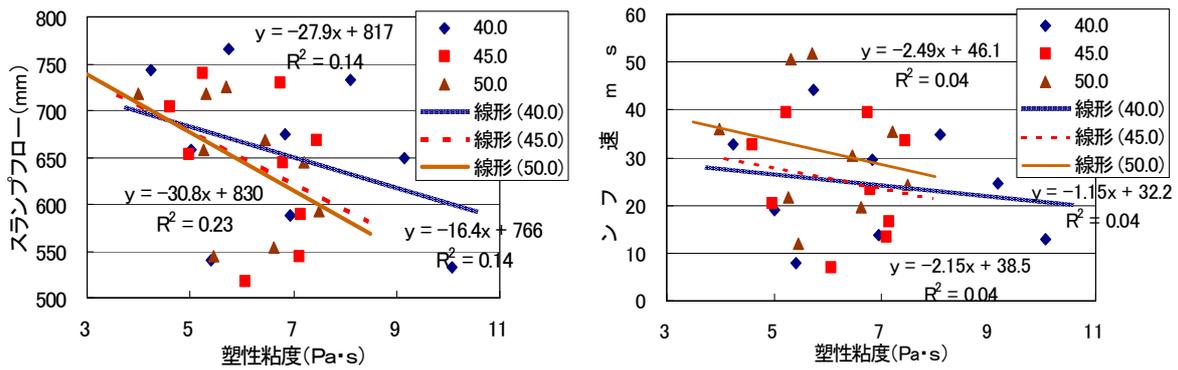


図-3 塑性粘度とスランプフロー，スランプフロー速度の関係

表-5 説明変数の選択

流動性指標	分類式	データ数 (n)	説明変数(X)					説明変数 の個数 (k)	重相関係 数 (R)	赤池の情報 量基準 (AIC)
			水結合材 比(X1)	細骨材容 積比(X2)	粗骨材絶対 容積(x3)	降伏値 (X4)	塑性粘度 (X5)			
スランプフロー (S)	(1)	27	●	●	●	●	●	5	0.986	227
	(2)	27		●	●	●	●	4	0.985	226
	(3)	27	●	●	●	●		4	0.979	235
	(4)	27		●	●	●		3	0.975	238
	(5)	27			●	●		2	0.967	243
	(6)	27			●			1	0.963	244
スランプフロー速度 (F)	(1)	27	●	●	●	●	●	5	0.968	151
	(2)	27	●	●	●		●	4	0.966	151
	(3)	27		●	●	●	●	4	0.958	156
	(4)	27		●	●		●	3	0.958	154
	(5)	27			●			2	0.929	166
	(6)	27			●			1	0.867	173

材比は一定で、モルタル中の細骨材容積比と粗骨材絶対容積を変化させて行い、細骨材容積比で層別した場合、塑性粘度とスランプフローおよびスランプフロー速度との関係は比較的良好な相関関係にあった。今回の実験では、水結合材比を変化させた場合良好な相関関係は見られなかったが、水結合材比の影響を評価するためにいずれの関係も比例すると仮定し、直線で近似した。

4.4 解析検討

解析概要に示した考え方で全て一次の関数で表すことにした。スランプフローとスランプフロー速度が水結合材比、細骨材容積比、粗骨材絶対容積、降伏値および塑性粘度で説明できるとすれば、以下の重回帰分析式で表される。

$$S = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6 \quad (3)$$

$$F = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6 \quad (4)$$

ここに、S：スランプフロー，F：スランプフ

ロー速度， $a_1 \sim a_5$ $b_1 \sim b_5$ ：偏回帰係数， X_1 ：水結合材比， X_2 ：細骨材容積比， X_3 ：粗骨材絶対容積， X_4 ：降伏値， X_5 ：塑性粘度

スランプフローとスランプフロー速度を重回帰分析における非説明変数とし、水結合材比、細骨材容積比、粗骨材絶対容積、降伏値および塑性粘度を説明変数とした場合、説明変数の中で非説明変数に強く影響しているものを重回帰分析で分析し最適な回帰式を求めることができる³⁾。説明変数を絞り込む方法は、全説明変数を組み込んだ状態から1つずつ減らしていく変数減少法を使用した。説明変数の重要性の判断は、係数の危険率(p値)と回帰係数の視点で考察し決定した。その手順は、最初に全ての説明変数を組み込んだ重回帰分析を行い、次に危険率が最も大きい説明変数を1項目減少させて重回帰分析を行い、以下同様な手順で説明変数が1項目になるまで繰り返し、赤池の情報量基準(AIC)が最小なものを最適推測式とする方法で行った。

表-6 説明変数 4 項目の場合の推定式における重回帰分析結果

流動性指標	分類式	決定係数 (R^2)	偏回帰係数 a_i b_i					
			1	2	3	4	5	6
スランプフロー(S)	(2)	0.97		-1.33E+01	-1.35E+00	-4.23E+00	-1.69E+01	1.92E+03
	(3)	0.96	2.49E+00	-6.33E+00	-1.55E+00	-4.99E+00		1.41E+03
スランプフロー速度(F)	(2)	0.93	2.95E-03	-1.86E-02	-1.85E-03		-1.85E-02	1.69E+00
	(3)	0.92	-3.19E+00	-2.75E-01	1.43E-01	-3.91E+00		2.98E+02

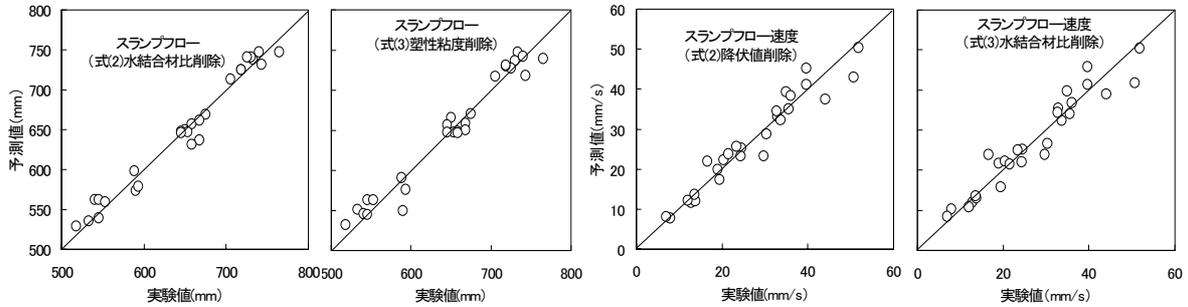


図-4 分類式(2)と(3)におけるスランプフローとスランプフロー速度の実験値と予測値との関係

表-5 に分析結果と水結合材比を除いた場合の計算結果を示す。統計学における評価基準には様々なものがあるが、赤池の情報量基準を使用した場合分類式(2)が最も精度が高く、その時スランプフローは水結合材比を除き、スランプフロー速度は降伏値を除いた場合であるという結果となった。表-6 にこれらの分析結果を示す。また、分析結果から求めた式の中で、赤池の情報量基準で評価した分類式(2)と昨年度と同様に水結合材比を除いた分類式(3)について計算した予測値と実験結果の実測値との関係を図-4 に示す。これらの結果から、概ね分類式(3)でも評価できると考えられる。

5. まとめ

分離低減剤を用いたタイプの高流動コンクリートのスランプフローとスランプフロー速度に及ぼす調合要因について、本実験の範囲内では以下の知見を得た。

(1) スランプフローを推測する場合、調合要因の中で粗骨材絶対容積、細骨材容積比、降伏値、塑性粘度、水結合材比の順に影響は小さくなる。

(2) スランプフロー速度を推測する場合、調合要因の中で粗骨材絶対容積、細骨材容積比、

塑性粘度、水結合材比、降伏値の順に影響は小さくなる。

(3) スランプフローとスランプフロー速度に及ぼす各種調合要因の影響は、水結合材比、細骨材容積比、粗骨材絶対容積、降伏値および塑性粘度があるが、昨年の結果と同様にほぼ水結合材比を除いた 4 変数の一次関数で表現できると考えられる。

謝辞

実験にあたっては宇都宮大学の鈴木亮、森戸玲奈両君の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岩井伸彰, 榊田佳寛: 高流動コンクリートのスランプフロー時間に及ぼす調合要因の影響に関する検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No.503, pp.9-16, 1998.1
- 2) 五味信治, 榊田佳寛他: 分離低減剤を用いた高流動コンクリートの調合に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.1003-1008, 2001.7
- 3) 清水功次: マーケティングのための多変量解析, 産能大学出版部, pp.99-114, 2000.1