

論文 高流動モルタルの調合とレオロジー特性に関する実験

宮野和樹*1・榊田佳寛*2・五味信治*3・須藤栄治*4

要旨: 分離低減剤を用いるタイプの高流動コンクリートを対象に、それを構成する高流動モルタルの降伏値と塑性粘度に及ぼす調合要因について、実験的に検討した。その結果、高流動モルタルの降伏値、塑性粘度は、水結合材表面積比、すなわち結合材の粒子の周囲に存在する水膜の厚さの影響を大きく受けること、また、高流動モルタルの降伏値、塑性粘度を高性能 AE 減水剤の添加量、分離低減剤の添加量などの幾つかの調合要因から推測できることが明らかとなった。

キーワード: 高流動モルタル、降伏値、塑性粘度、水結合材表面積比、ペースト細骨材比

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であるスランプフロー、50cm フロー時間などは、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形状・寸法・絶対容積などの関数として表される¹⁾と考えられる。そのため、高流動コンクリートの構成要素である高流動モルタルのレオロジー的性質について明らかにしておくことは重要である。本研究では、分離低減剤を用いるタイプの高流動コンクリートを対象に、それを構成する高流動モルタルのレオロジー的性質、特に降伏値および塑性粘度と調合との関係について実験的に検討したものである。

2. 対象とした高流動モルタル

対象とした高流動モルタル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、細骨材に川砂を用い、分離低減剤を用いるタイプのスランプフローが 65±5cm の高流動コンクリートを構成するモルタルである。

モルタルの水結合材比は 38~45%、結合材細骨材比は 33~40%、高性能 AE 減水剤の添加率は結合材の質量に対して 1.0~1.5%とした。また、分離低減剤の添加率は、対象とした高流動コンクリートの 50cm フロー時間が 5 秒以下、5 秒を超えて 10 秒以下、10 秒を超えるの 3 種類となるように変化させた。

モルタルの使用材料を表-1 に示す。

表-1 使用材料

材料	特性・主成分
結合材	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3200cm ² /g) 高炉スラグ微粉末 (密度: 2.89g/cm ³ 比表面積: 4000cm ² /g)
水	水道水
細骨材	川砂 (表乾密度: 2.59g/cm ³ 吸水率: 1.72% 粗粒率: 2.72%)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
分離低減剤	水溶性メチルセルロース系

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 日産建設 (株) 工事技術本部技術研究所第 1 研究室室長 (正会員)

*4 日産建設 (株) 工事技術本部技術研究所第 1 研究室担当主任研究員 工修 (正会員)

3. 実験概要

3.1 試験項目および試験方法

モルタルのレオロジー的性質を評価するための試験項目は、降伏値および塑性粘度とし、内円板型回転粘度計を用いて試験した。測定は各調合とも2回ずつ行い、その差が著しく大きいものは除いた。なお、目視で試料とロータ

ーとのスリップの有無の確認をし、スリップがないように試験した。

3.2 モルタルの練混ぜ

モルタルの練混ぜは、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の室内で、容量 50l のパン型強制練りミキサーを用いて行い、1回の練混ぜ量を 30l とした。練混ぜ手順は、セメント、高炉スラグ微粉末、分離低減剤およ

表-2 実験結果

調合 番号	結合材	細骨材	高性能 AE 減水剤	分離 低減剤	降伏値 [Pa]	塑性 粘度 [Pa·s]	調合 番号	結合材	細骨材	高性能 AE 減水剤	分離 低減剤	降伏値 [Pa]	塑性 粘度 [Pa·s]
1	0.74	2.13	33.3	3.5	6.27	6.30	48	0.74	2.34	33.3	2.0	18.92	11.56
2	0.74	2.13	27.8	3.5	10.51	7.69	49	0.74	2.44	33.3	2.0	20.30	10.59
3	0.74	2.13	25.1	3.5	18.64	8.11	50	0.75	2.17	34.0	2.0	10.24	9.43
4	0.74	2.13	22.2	3.5	20.01	9.36	51	0.75	2.28	34.0	2.0	8.28	8.65
5	0.77	2.21	34.7	3.5	7.32	8.86	52	0.75	2.38	34.0	2.0	16.90	13.01
6	0.77	2.21	28.9	3.5	16.52	9.42	53	0.77	2.21	34.7	2.0	6.36	9.55
7	0.77	2.21	23.1	3.5	24.23	12.09	54	0.77	2.32	34.7	2.0	11.09	11.10
8	0.80	2.31	36.2	3.5	7.95	9.42	55	0.77	2.38	34.7	2.0	9.67	13.08
9	0.80	2.31	30.1	3.5	22.94	12.80	56	0.77	2.43	34.7	2.0	16.34	13.76
10	0.80	2.31	24.1	3.5	22.66	16.94	57	0.78	2.37	35.4	2.0	11.41	13.87
11	0.83	2.41	37.8	3.5	11.18	12.97	58	0.80	2.31	36.2	2.0	14.33	14.11
12	0.83	2.41	31.5	3.5	27.85	18.00	59	0.80	2.45	36.2	2.0	9.90	14.09
13	0.83	2.41	25.2	3.5	30.31	22.67	60	0.83	2.41	37.8	2.0	22.70	15.42
14	0.88	2.53	39.7	3.5	27.83	13.34	61	0.88	2.53	39.7	2.0	47.15	17.27
15	0.88	2.53	33.1	3.5	33.27	23.15	62	0.74	2.13	31.1	1.4	7.26	5.68
16	0.88	2.53	26.5	3.5	37.82	22.97	63	0.74	2.44	31.1	1.4	11.64	8.41
17	0.74	2.13	33.3	2.5	9.60	3.07	64	0.74	2.55	31.1	1.4	20.81	9.14
18	0.74	2.13	27.8	2.5	8.82	5.73	65	0.75	2.38	31.7	1.4	11.01	8.72
19	0.74	2.13	26.2	2.5	12.59	6.37	66	0.77	2.21	32.4	1.4	6.42	7.37
20	0.74	2.13	25.5	2.5	12.91	6.37	67	0.80	2.31	33.7	1.4	12.45	10.43
21	0.74	2.13	25.1	2.5	13.78	7.52	68	0.80	2.54	33.7	1.4	19.27	11.71
22	0.74	2.13	22.2	2.5	14.84	8.01	69	0.88	2.53	37.1	1.4	19.40	15.21
23	0.77	2.21	34.7	2.5	4.93	5.64	70	0.74	2.13	28.9	0.9	6.94	5.44
24	0.77	2.21	28.9	2.5	13.24	7.32	71	0.74	2.23	28.9	0.9	7.85	3.40
25	0.77	2.21	23.1	2.5	18.98	9.03	72	0.74	2.34	28.9	0.9	12.53	5.98
26	0.80	2.31	36.2	2.5	6.41	7.73	73	0.74	2.44	28.9	0.9	17.14	8.29
27	0.80	2.31	30.1	2.5	15.29	9.04	74	0.75	2.17	29.4	0.9	12.50	6.77
28	0.80	2.31	24.1	2.5	20.17	10.69	75	0.75	2.38	29.4	0.9	26.25	9.24
29	0.83	2.41	37.8	2.5	10.27	10.23	76	0.77	2.21	30.0	0.9	8.56	6.15
30	0.83	2.41	31.5	2.5	19.86	9.70	77	0.77	2.32	30.0	0.9	12.21	8.36
31	0.88	2.53	39.7	2.5	13.96	12.24	78	0.77	2.43	30.0	0.9	13.59	8.23
32	0.74	2.13	33.3	1.5	7.38	3.73	79	0.80	2.31	31.3	0.9	19.60	13.15
33	0.74	2.13	27.8	1.5	10.07	4.98	80	0.80	2.54	31.3	0.9	21.25	9.69
34	0.74	2.13	26.6	1.5	9.48	4.53	81	0.83	2.41	32.7	0.9	15.19	10.22
35	0.74	2.13	25.1	1.5	12.64	5.47	82	0.88	2.53	34.4	0.9	27.62	13.28
36	0.74	2.13	22.2	1.5	13.48	5.88	83	0.74	2.13	33.3	2.0	3.63	6.42
37	0.77	2.21	34.7	1.5	6.51	4.62	84	0.74	2.13	31.1	1.4	1.11	5.55
38	0.77	2.21	28.9	1.5	12.24	5.59	85	0.74	2.13	28.9	0.9	6.47	4.31
39	0.77	2.21	23.1	1.5	11.92	6.58	86	0.74	2.13	33.3	2.0	1.72	6.77
40	0.80	2.31	36.2	1.5	5.79	6.03	87	0.74	2.13	31.1	1.4	1.15	5.96
41	0.80	2.31	30.1	1.5	15.11	6.95	88	0.74	2.13	28.9	0.9	1.33	4.16
42	0.80	2.31	24.1	1.5	14.30	7.88	89	0.74	2.13	33.3	2.0	5.64	6.06
43	0.83	2.41	37.8	1.5	7.46	7.81	90	0.74	2.13	31.1	1.4	1.89	4.96
44	0.83	2.41	31.5	1.5	16.85	9.61	91	0.74	2.13	28.9	0.9	6.59	3.66
45	0.88	2.53	39.7	1.5	12.79	9.68	92	0.74	2.13	33.3	2.0	4.84	5.88
46	0.74	2.13	33.3	2.0	6.72	8.40	93	0.74	2.13	31.1	1.4	5.58	4.49
47	0.74	2.23	33.3	2.0	11.15	9.10	94	0.74	2.13	28.9	0.9	6.94	3.35

注1) 結合材と細骨材は水の容積を1としたときの容積比である。

注2) 高性能AE減水剤と分離低減剤は水量を1gとしたときの質量で単位は[mg/g]である。

び細骨材投入後 10 秒間空練りし、水および高性能 AE 減水剤を投入し 90 秒間練り混ぜた。フレッシュモルタルの試験は、排出直後および 5 分後に行ったが、排出直後の値は安定しなかったため、5 分後の試験値を用いた。

4. 実験結果

モルタルの降伏値および塑性粘度の測定結果を表-2 に示す。

5. 考察

5.1 降伏値に及ぼす調合の影響

(1) 解析方法

モルタルの降伏値に及ぼす調合要因として、水結合材比、ペースト細骨材比、高性能 AE 減水剤および分離低減剤の添加量が考えられる。膜厚理論によれば²⁾、粒子の周囲に存在するマトリックスの厚さが各種の性質に影響を及ぼすと考えられる。水結合材比については、質量比や容積比を指標とすることも考えられるが、結合材表面積に対する水の比、すなわち水膜の厚さ [μm] を指標とする方が妥当と考えられる。そこで、水結合材比の代わりに水結合材表面積比を指標とすることとした。ペースト細骨材比についても、ペースト (容積) 細骨材表面積比を用いるのが妥当と考えられるが、細骨材表面積を正確に測定できないのでペースト細骨材容積比を用いることとした。これは、水およびセメントと高炉スラグ微粉末の容積の和を細骨材の容積で除した値である。

降伏値に及ぼす調合の影響は次のように解析することとした。 $f_i(\)$ は関数型を表し、 $(\)$ の中はその変数を表す。

$$Y_M = f_0(Y_P, P/S) = f_0(W/S_B, SP, V, P/S) \quad (1)$$

$$\text{ただし, } Y_P = f_1(W/S_B, SP, V) \quad (2)$$

ここで、 Y_M : モルタルの降伏値 [Pa], Y_P : ペーストの降伏値 [Pa], P/S : ペースト細骨材容積比 [%], W/S_B : 水結合材表面積比 [μm], SP : 高性能 AE 減水剤の添加量 [mg/g], V : 分離低減剤の添加量 [mg/g] である。

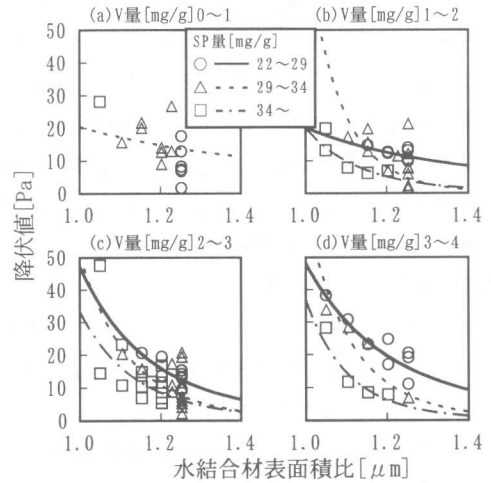


図-1 水結合材表面積比と降伏値の関係

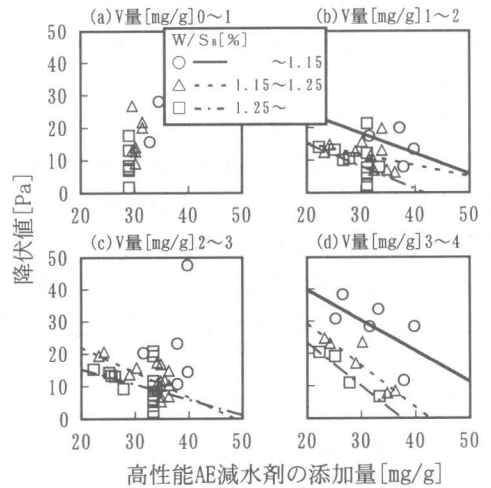


図-2 高性能AE減水剤の添加量と降伏値の関係

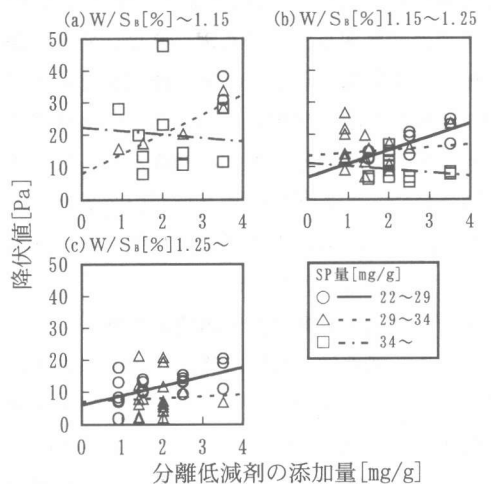


図-3 分離低減剤の添加量と降伏値の関係

(2) 水結合材表面積比の影響

水結合材表面積比と降伏値の関係を高性能 AE 減水剤 (SP) と分離低減剤 (V) の添加量で層別したものを図-1 に示す。水結合材表面積比が大きくなると降伏値は小さくなり、その関数は直線的ではなく、指数関数的に変化している。そこで、この関係を、式 (3) のような指数関数で近似した。

$$y = a \cdot x^b \quad (3)$$

ここで、 x : 水結合材表面積比 [μm], y : 降伏値 [Pa], a, b : 定数である。

指数 b は、 -2 から -12 の間の値をとり、中央値は約 -7 程度となった。そこで指数 b を -7 として、以下の検討を進めた。すなわち、降伏値は、水結合材表面積比の 7 乗分の 1 という関数で表すこととした。

(3) 高性能 AE 減水剤の影響

高性能 AE 減水剤の添加量と降伏値の関係を水結合材表面積比 (W/S_B) と分離低減剤 (V) の添加量で層別したものを図-2 に示す。高性能 AE 減水剤の添加量が大きくなると降伏値は小さくなる、この関係についても指数関数及び直線式で近似したところ、指数関数による近似は相関が悪く、直線で近似することとした。

(4) 分離低減剤の影響

分離低減剤の添加量と降伏値の関係を水結合材表面積比 (W/S_B) と高性能 AE 減水剤 (SP) の添加量で層別したものを図-3 に示す。分離低減剤の添加量が大きくなると降伏値は高性能 AE 減水剤の添加量が多い場合にやや減少の傾向が見られる以外は増加の傾向が見られ、この関係についても指数関数及び直線で近似したところ、指数関数による近似は相関が悪く、直線で近似することとした。

(5) ペースト細骨材容積比の影響

ペースト細骨材容積比と降伏値の関係を水結合材表面積比 (W/S_B) と高性能 AE 減水剤 (SP) の添加量で層別したものを図-4 に示す。ペースト細骨材容積比が大きくなると降伏値は小さくなる。この関係についても、直線で

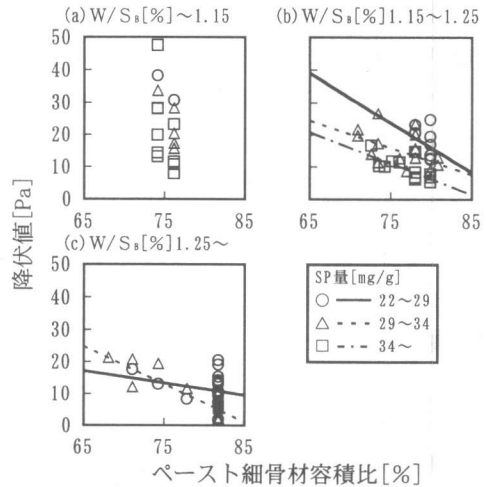


図-4 ペースト細骨材容積比と降伏値の関係

表-3 重回帰分析結果

重相関係数 R	偏回帰係数 a_i				
	1	2	3	4	5
0.841	30.0	-0.943	2.12	-1.11	116

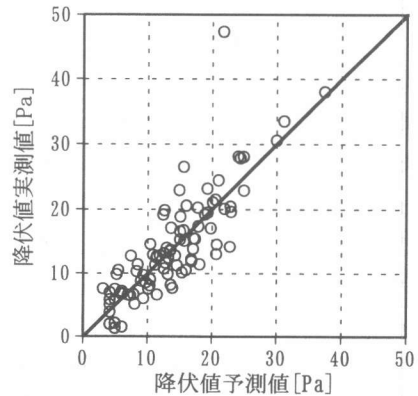


図-5 降伏値の予測値と実測値の関係

近似することとした。

(6) 重回帰分析

降伏値に及ぼす調査の影響を定量評価するために重回帰分析を行うこととした。説明変数を、(2) から (5) で取り上げた水結合材表面積比、高性能 AE 減水剤の添加量、分離低減剤の添加量およびペースト細骨材容積比とした。モルタルの降伏値がこれらの因子により説明できるものとする、以下のような重回帰分析式で表されと考えられる。

$$Y = a_1 \cdot x_1^{-7} + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \quad (4)$$

ここで、 Y : 降伏値, $a_1 \sim a_5$: 偏回帰係数, x_1 :

水結合材表面積比, x_2 : 高性能 AE 減水剤の添加量, x_3 : 分離低減剤の添加量, x_4 : ペースト細骨材容積比である。

表-3 に分析結果を, 図-5 に予測値と実測値の関係を示すがよく近似している。

5.2 塑性粘度に及ぼす調合の影響

(1) 解析方法

モルタルの塑性粘度に及ぼす調合要因の影響についても, 降伏値と同様に, 水結合材表面積比, ペースト細骨材容積比, 高性能 AE 減水剤および分離低減剤の添加量を考え, 塑性粘度に及ぼす調合の影響を次のように解析することとした。 $g_i(\)$ は関数型を表し, $(\)$ の中はその変数を表す。

$$Z_M = g_0(Z_P, P/S) = g_0(W/S_B, SP, V, P/S) \quad (5)$$

$$\text{ただし, } Z_P = g_1(W/S_B, SP, V) \quad (6)$$

ここで, Z_M : モルタルの塑性粘度 [Pa·s], Z_P : ペーストの塑性粘度 [Pa·s], P/S : ペースト細骨材容積比 [%], W/S_B : 水結合材表面積比 [μm], SP : 高性能 AE 減水剤の添加量 [mg/g], V : 分離低減剤の添加量 [mg/g] である。

(2) 水結合材表面積比の影響

水結合材表面積比と塑性粘度の関係を高性能 AE 減水剤 (SP) の添加量と分離低減剤 (V) の添加量で層別したものを図-6 に示す。水結合材表面積比が大きくなると塑性粘度は指数関数的に小さくなっている。そこで, この関係を指数関数で近似した。指数は-2 から-8 の間の値をとり, 中央値は約-5 程度となったので, 指数を-5 として, 以下の検討を進めた。すなわち, 塑性粘度は, 水結合材表面積比の 5 乗分の 1 という関数で表すこととした,

(3) 高性能 AE 減水剤の影響

高性能 AE 減水剤の添加量と塑性粘度の関係を水結合材表面積比 (W/S_B) と分離低減剤 (V) の添加量で層別したものを図-7 に示す。高性能 AE 減水剤の添加量が大きくなると塑性粘度は分離低減剤の添加量が多い場合に減少の傾向が見られる以外は増加の傾向が見られ,

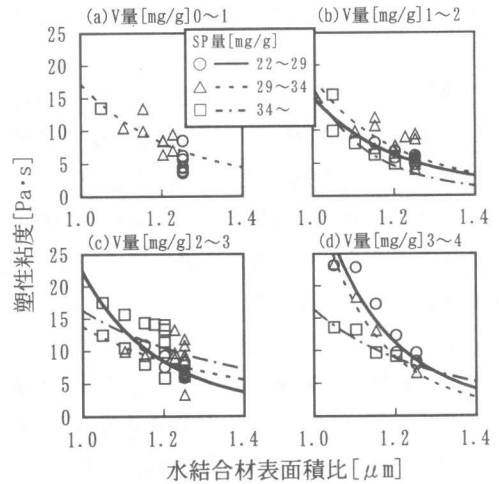


図-6 水結合材表面積比と塑性粘度の関係

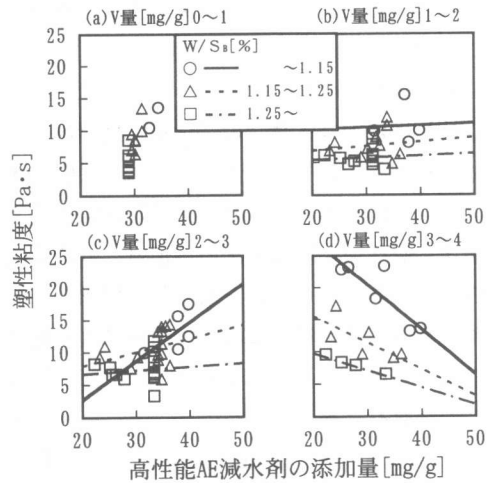


図-7 高性能AE減水剤の添加量と塑性粘度の関係

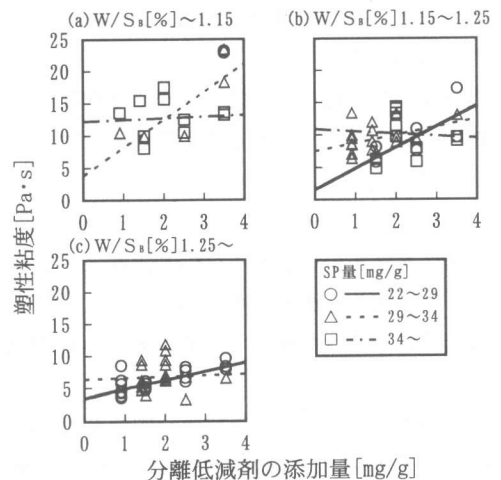


図-8 分離低減剤の添加量と塑性粘度の関係

この関係については直線で近似することとした。

(4) 分離低減剤の影響

分離低減剤の添加量と塑性粘度の関係を水結合材表面積比 (W/S_B) と高性能 AE 減水剤 (SP) の添加量で層別したものを図-8 に示す。分離低減剤の添加量が大きくなると塑性粘度は若干大きくなり、この関係についても、直線で近似することとした。

(5) ペースト細骨材容積比の影響

ペースト細骨材容積比と塑性粘度の関係を水結合材表面積比 (W/S_B) と分離低減剤 (V) の添加量で層別したものを図-9 に示す。ペースト細骨材容積比が大きくなると塑性粘度は小さくなり、この関係についても、直線で近似することとした。

(6) 重回帰分析

塑性粘度に及ぼす調合の影響を定量評価するために重回帰分析を行うこととした。説明変数を、(2) から (5) で取り上げた水結合材表面積比、高性能 AE 減水剤の添加量、分離低減剤の添加量およびペースト細骨材容積比としたモルタルの塑性粘度がこれらの因子により説明できるものとする、以下のような重回帰分析式で表されると考えられる。

$$Z = b_1 \cdot x_1^{-5} + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \quad (7)$$

ここで、 Z : 塑性粘度, $b_1 \sim b_5$: 偏回帰係数, x_1 : 水結合材表面積比, x_2 : 高性能 AE 減水剤の添加量, x_3 : 分離低減剤の添加量, x_4 : ペースト細骨材容積比である。

表-4 に分析結果を、図-10 に予測値と実測値の関係を示すがよく近似している。

6. まとめ

分離低減剤を用いるタイプの高流動コンクリートを構成する高流動モルタルの降伏値と塑性粘度に及ぼす調合要因について本実験の範囲内では、次のようにまとめられる。

(1) 高流動モルタルの降伏値、塑性粘度は、水結合材表面積比、すなわち結合材の粒子の周囲に存在する水膜の厚さの影響を大きく受け、

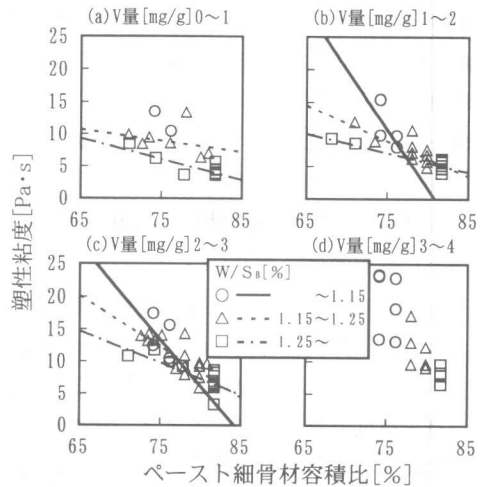


図-9 ペースト細骨材容積比と塑性粘度の関係

表-4 重回帰分析結果

重相関係数 R	偏回帰係数 b_i				
	1	2	3	4	5
0.851	14.0	-0.146	1.91	-0.525	44.8

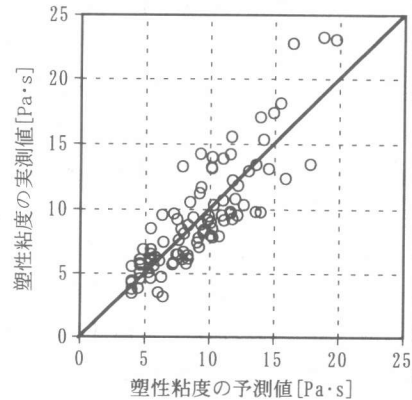


図-10 塑性粘度の予測値と実測値の関係

それぞれ、7乗あるいは5乗に反比例する。

(2) 高流動モルタルの降伏値、塑性粘度は、水結合材表面積比、高性能 AE 減水剤の添加量、分離低減剤の添加量およびペースト細骨材容積比の関数で表現できる。

参考文献

- 1) 岩井伸彰, 榎田佳寛: 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集, No.503, pp.9~16, 1998.1
- 2) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書Ⅱ, 1994.5