

論文 高流動コンクリートからウエットスクリーニングしたモルタルに関する実験

五味 信治*1・米奥 久貴*2・榊田 佳寛*3

要旨：高流動コンクリートの流動性を簡易に評価する方法として、粗骨材を混入する前のモルタルの降伏値、塑性粘度で評価する方法について検討してきた。一方、コンクリートの流動性とウエットスクリーニングして採取したモルタルの降伏値、塑性粘度との間には相関関係¹⁾があることも報告している。本報では、粗骨材混入以前のモルタルとウエットスクリーニングして採取したモルタルの関係について検討した。その結果、モルタルの降伏値、塑性粘度の比、細骨材/水で両者の関係を表現することが示され、粗骨材混入以前のモルタルからウエットスクリーニングして採取したモルタルを簡易に評価、推定する近似式が得られた。
キーワード：高流動コンクリート、ウエットスクリーニング、降伏値、塑性粘度

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流動性評価の指標は、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大きく関連している。高流動コンクリートをモルタルマトリックスと粗骨材とで構成される二相系材料と考えた場合、その流動性を評価するためには、モルタルの流動特性を把握することが重要である。コンクリートを構成するモルタルには、粗骨材を混入する前のモルタル（以下、調合モルタルと称す）とコンクリートからウエットスクリーニングして採取したモルタル（以下、スクリーニングモルタルと称す）とがある。筆者らは、コンクリートを構成するモルタルの流動特性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。その結果、スクリーニングモルタルと評価指標には相関関係が成立することがわかった¹⁾。しかし、簡易評価を可能にするためには、コンクリートを試験練りせずに調合モルタルの降伏値と塑性

粘度を測定することでスクリーニングモルタルの予測ができることが必要である。これにより、コンクリートの試験練りをせずに調合モルタルのみを調べるだけで流動性評価の指標を推定することができる。

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、調合モルタルとスクリーニングモルタルの関係を各種影響要因で推定し、近似的に簡易な流動性評価手法を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

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)	220*, 260, 300, (320), 340

注 1) *は細骨材容積比が 52% のみの場合に実施

注 2) ()は粗骨材絶対容積が 340 l/m³ でスランプフローが 500mm に達しない場合に実施

*1 りんかい日産建設（株）技術研究所 所長（正会員）

*2 りんかい日産建設（株）技術研究所 研究員（正会員）

*3 宇都宮大学 工学部建設学科 教授 工博（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 3330cm ² /g, 密度 3.16g/cm ³
細骨材	川砂	表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.07%
粗骨材	硬質砂岩	表乾密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 1.41%, 実積率 60.0%
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.90 g/cm ³ , 比表面積 4740cm 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 45%の場合）

水結合材比 (%)	細骨材容積比 (%)	粗骨材絶対容積 (l/m ³)	単位量(kg/m ³)					高性能AE減水剤 (C×%)	分離低減剤 (W×%)	空気量 (%)
			水	セメント	高炉スラグ	細骨材	粗骨材			
45.0	49.0	220	223	248	248	961	581	0.83	0.26	2.0
		260	212	235	235	910	686			
		300	200	222	222	860	792			
		320	194	216	216	834	845			
	52.0	220	210	234	234	1020	581	0.88	0.17	
		260	199	222	222	966	686			
		300	188	209	209	912	792			
		320	183	203	203	885	845			
	55.0	220	197	219	219	1078	581	1.11	0.11	
		260	187	208	208	1022	686			
		300	176	196	196	965	792			
		320	171	190	190	937	845			

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。

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。水は水道水を使用し, 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 220l/m³ から 340l/m³ まで 40l/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 300l/m³ の時, スランブフローが 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, 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から得られるモルタルを評価する試験項目は, 降伏値と塑性粘度とし, 降伏値および塑性粘度は内円盤型回転粘度計

(ローター部の直径は 34.7mm, 厚さは 1.65mm) を用いて試験した。高流動コンクリートの練混ぜは, 温度 20±1℃ の室内で, 容量 50l 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 40l とした。練り混ぜ手順は, 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 秒練混ぜ後, 粗骨材を投入し 90 秒練混ぜた。練混ぜ後の約 15 分到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モルタルの降伏値と塑性粘度を測定した。降伏値および塑性粘度の測定は, 2.5rpm→5rpm→10rpm→20rpm→50rpm→20rpm→10rpm→5rpm→2.5rpm 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。

次に, 5mm ふるいに残留した粗骨材に付着す

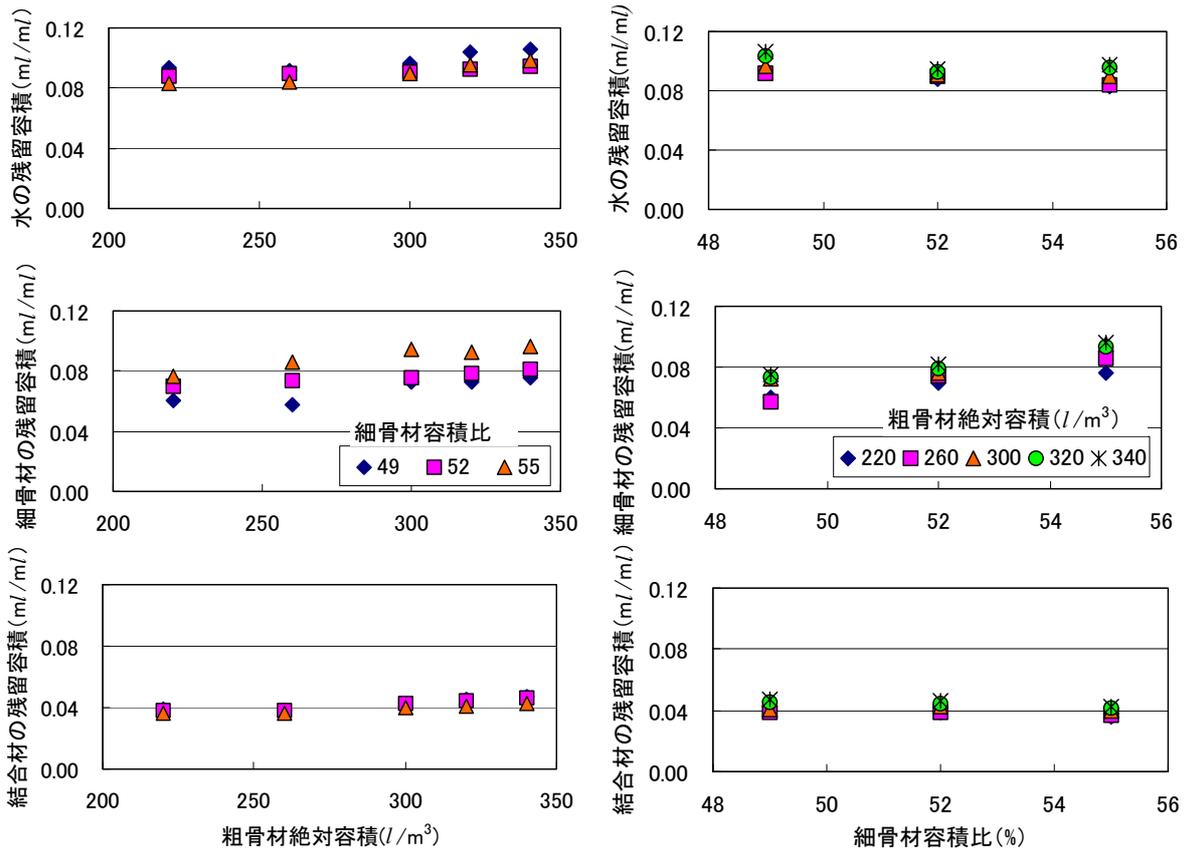


図-1 粗骨材に付着したモルタル分の分析結果例 (W/B=45%の場合)

るモルタル分を分析した。分析方法は粗骨材に付着したモルタル分を電子レンジで恒量まで乾燥して、細骨材と粗骨材の吸水分を引いた後の水量を5mmふるいに残留した単位水量とした。乾燥後のモルタル分は5mmふるいを使い粗骨材を洗い出し、ウェスで表面の水をふき取り表乾重量を計る。次に、0.074mmふるいを用い、細骨材とセメントを分け、乾燥させた細骨材の吸水量を補正し、表乾状態の細骨材とする。各単位量は分析結果質量を各材料密度で除して容積を算出し、この容積で分析結果質量を除して求めた。

3. 実験結果

5mmふるいに残留した粗骨材に付着しているモルタル分の水、細骨材、結合材の容積を粗骨材絶対容積で除して各付着容積量を算出した。粗骨材に付着するモルタル分の分析結果例を図-1に示す。粗骨材絶対容積が220/l³から

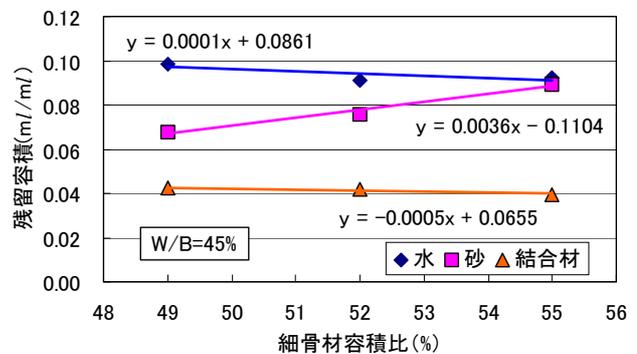


図-2 細骨材容積比に対する残留体積の変化例

340 l³まで増加すると、水と結合材はほぼ一定であるが、細骨材については細骨材容積比が大きくなるにつれて増加する傾向がある。また、細骨材容積比が49%から55%へ増加すると細骨材は増加するが水と結合材はほぼ一定である。この結果から、粗骨材に付着する水、結合材の容積はほぼ一定であり、細骨材の容積は細骨材容積比と共に増加することが分った。残留したモルタル分の水、細骨材、結合材の細骨材容積比に対する変化

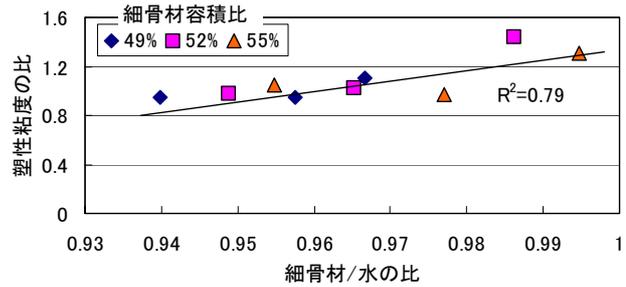
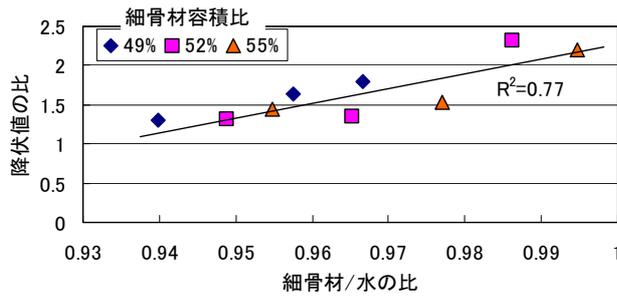


図-3 モルタルの降伏値および塑性粘度の比と細骨材/水の比の例 (W/B=45%)

例を図-2 に示す。この結果から粗骨材に付着する水、細骨材、結合材の容積は図の近似式で求めることができる。こうして求めた容積を当初の調査から減じてモルタルを作製 (以下、このモルタルを補正モルタルと称す) した。

4. 考察

4.1 実験結果の考察

調合モルタルの初期容積から粗骨材に付着したモルタル分を近似式で求めて減じ、補正モルタルの容積を算出し、水、細骨材、結合材の量的変化がモルタルの降伏値と塑性粘度にどのような影響を与えているかを各細骨材容積比について調べた。図-3 に補正モルタルとスクリーニングモルタルとの降伏値および塑性粘度と細骨材/水についてそれらの比を求めたものを示す。補正モルタルとスクリーニングモルタルの比の関係は相関係数(R^2)が示すように、降伏値と塑性粘度共に細骨材/水と良い相関関係にある。ほぼ一次比例と仮定すれば、補正モルタルの降伏値および塑性粘度と細骨材/水の比がわかればスクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度を推定することができる。

次に、調合モルタルと補正モルタルの関係については、細骨材/水とモルタルの降伏値と塑性粘度を調べた。結果を図-4 に示す。これらの結果は、いずれも良い相関関係にあり一次比例と仮定すれば、調合モルタルの細骨材/水と降伏値および塑性粘度から補正モルタルの推定を行い、さらに補正モルタルからスクリーニングモルタルの推定をすることができる。これらの関係を概念図として図-5 に示す。

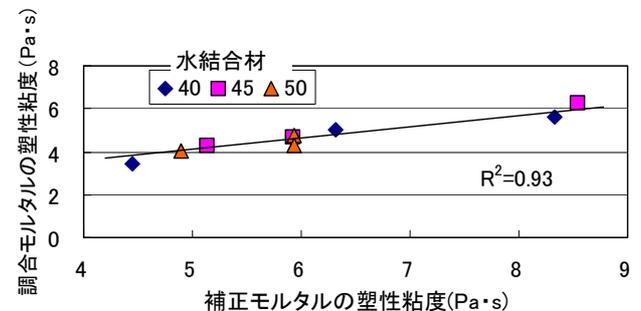
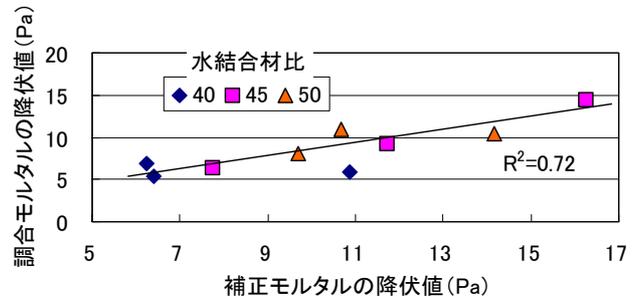
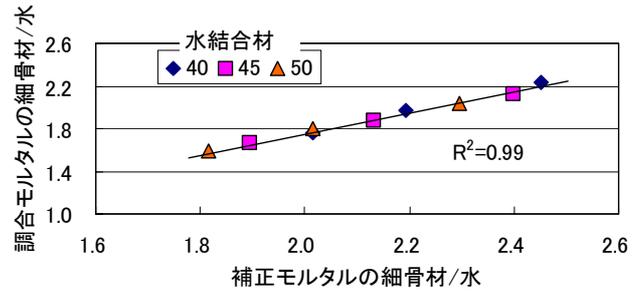


図-4 補正および調合モルタルの物性比較

4.2 モルタルの降伏値および塑性粘度と各種要因についての基本概念

通常のコンクリートでは調合モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度には良い相関関係があるという文献²⁾もあるが、筆者らの一連の実験結果では調合モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度には直接的な相関関係がなかったため³⁾、調合モルタルとスクリーニングモルタルの間に補正モルタルという中間パラメーターを介することによって

両者の間に良い相関が得られた。これらの結果から、補正モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値および塑性粘度は各々の細骨材/水の比で近似的に表現でき、近似式として式(1),(2)を示す。

$$\tau_{yw} / \tau_{yc} = f(S/W) \quad (1)$$

ここに、

τ_{yw} : スクリーニングモルタルの降伏値 (Pa)

τ_{yc} : 補正モルタルの降伏値 (Pa)

$f(S/W)$: 細骨材/水の関数

S/W : 補正モルタルの細骨材/水とスクリーニングモルタルの細骨材/水の比

$$\eta_{yw} / \eta_{yc} = g(S/W) \quad (2)$$

ここに、

η_{yw} : スクリーニングモルタルの塑性粘度 (Pa·s)

η_{yc} : 補正モルタルの塑性粘度 (Pa·s)

$g(S/W)$: 細骨材/水の関数

また、補正モルタルと調合モルタルの細骨材/水、降伏値と塑性粘度は良好な相関関係にあることから一次比例と仮定すると近似式として式(3)~(5)を示す。

$$(S/W)_{ys} = h \{(S/W)_{yc}\} \quad (3)$$

$$\tau_{ys} = i(\tau_{yc}) \quad (4)$$

$$\eta_{ys} = j(\eta_{yc}) \quad (5)$$

ここに、

$(S/W)_{ys}$: 調合モルタルの細骨材/水

$h \{(S/W)_{yc}\}$: 補正モルタルの(細骨材/水)の関数

τ_{ys} : 調合モルタルの降伏値 (Pa)

η_{ys} : 調合モルタルの塑性粘度 (Pa·s)

$i(\tau_{yc}), j(\eta_{yc})$: 補正モルタルの降伏値、塑性粘度の関数

補正モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値、塑性粘度および細骨材/水の比と補正モルタルと調合モルタルの細骨材/水、降伏値および塑性粘度の関係を明らかにすることで、スクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度を調合モルタルの降伏値と塑性粘度で推定できると考えられる。

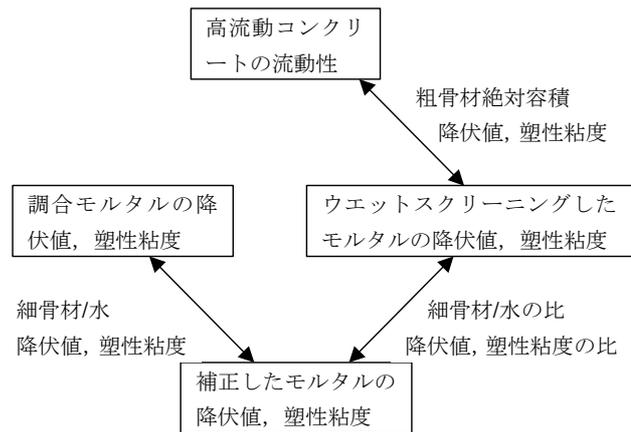


図-5 各モルタル間の相関概念図

表-4 推測式における単回帰分析結果

非説明変数	相関係数	偏回帰係数 a_i b_i	
		1	2
降伏値の比	0.75	10.10	-8.18
塑性粘度の比	0.84	6.88	-5.57

4.3 解析検討

実験結果から、補正モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度および細骨材/水は一次比例の関係があることがわかった。式(1),(2)の考え方で一次の関数で表すことにした。補正モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度の比が細骨材/水の比で説明できるとすれば、以下の単回帰分析式で表される。

$$f(S/W) = a_1 X_1 + a_2 \quad (6)$$

$$g(S/W) = b_1 X_1 + b_2 \quad (7)$$

ここに、

$a_1 \sim a_2, b_1 \sim b_2$: 偏回帰係数, X_1 : 細骨材/水の比

補正モルタルとスクリーニングモルタルの降伏値および塑性粘度の比を回帰分析における非説明変数、細骨材/水の比を説明変数として回帰分析を行なった。表-4に分析結果を示す。また、実験した各 Case 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-6に示す。この結果では、データが正規分布に従うと仮定した場合、予測値は確率密度関数上で 1.5σ (σ : 標準偏差) で 86% の確率で、降伏値の比は傾き $\pm 20\%$ 、塑性粘度の比は傾き $\pm 13\%$ 以内に入る結果となった。

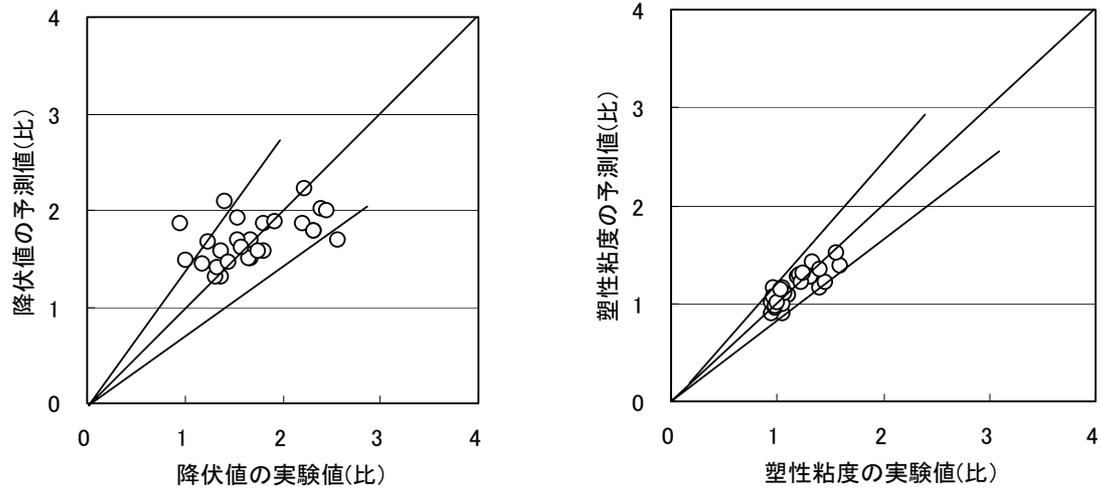


図-6 モルタルの降伏値および塑性粘度の比に関する実験値と予測値の関係

次に、補正モルタルと調合モルタルの細骨材/水と降伏値および塑性粘度の関係は、式(3)~(5)の考え方で一次の関数で表すと以下の近似式で表される。

$$(S/W)_{ys} = c_1 \{(S/W)_{yc}\} + c_2 \quad (8)$$

$$\tau_{ys} = d_1 (\tau_{yc}) + d_2 \quad (9)$$

$$\eta_{ys} = e_1 (\eta_{yc}) + e_2 \quad (10)$$

ここに、 $c_1 \sim c_2, d_1 \sim d_2, e_1 \sim e_2$: 係数

表-5 に相関分析結果を示す。式(6),(7)と式(8)~(10)の結果から、補正モルタルを中間パラメータとしてスクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度を調合モルタルの降伏値と塑性粘度で近似的に表すことができる。

5. まとめ

高流動コンクリートのスクリーニングモルタルと調合モルタルの降伏値と塑性粘度の関係について、本実験の範囲内では以下の知見を得た。

(1) 粗骨材に付着したモルタル分の容積を粗骨材絶対容積で除した値は、細骨材容積比が大きくなるのに伴って細骨材は増加するが水と結合材はほぼ一定である。

(2) スクリーニングモルタルの降伏値と塑性粘度は中間パラメータとして補正モルタルを使用すると、調合モルタルの降伏値および塑性粘度

表-5 相関分析結果

要因	相関係数	係数 c_i d_i e_i	
		1	2
細骨材/水	0.98	0.97	-0.17
降伏値	0.72	0.74	0.89
塑性粘度	0.93	0.58	1.23

と細骨材/水の関係から推定することができる。
 (3) 上記(1), (2)により高流動コンクリートの流動性を調合モルタルの降伏値と塑性粘度から簡易に推測ができる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 山田一夫, 小津博他: 高性能減水剤を用いたペースト-モルタル-コンクリートの流動性の相関関係とその関係の作用機構, 土木学会コンクリート委員会, コンクリート技術シリーズ No. 47, コンクリート用化学混和剤の性能評価, pp. II-11- II-20, 2002.12
- 3) 須藤栄治, 五味信治他: 高流動コンクリートにおけるウェットスクリーニングしたモルタルの基礎的性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), A-1, pp.907-908, 1998.9