

論文 フレッシュモルタルのレオロジー的性質に及ぼす調合要因の影響

宮野 和樹^{*1}・榊田 佳寛^{*2}・中村 成春^{*3}

要旨: 高流動コンクリートを構成するセメントペースト, モルタルの流動性を把握するために, セメント種類, 水セメント比, 高性能 AE 減水剤の添加率, 分離低減剤の添加率, 細骨材量を変化させてレオロジー特性, 流動特性を測定し, それらの要因の影響を実験的に検討した。その結果, セメントペースト, モルタルの塑性粘度およびフローは, セメント種類別に, 水セメント比, 高性能 AE 減水剤の添加率, 分離低減剤の添加率および細骨材モルタル比の調合要因の関数で表現できることが示された。

キーワード: セメントペースト, モルタル, 塑性粘度, 降伏値, フロー, 細骨材モルタル比

1. はじめに

高流動コンクリートは, 材料分離を起こすことなく高い流動性をもち, 自己充填性を有するコンクリートである。高流動コンクリートのフレッシュ時における施工性は, スランプフロー, 50cm フロー時間, 漏斗流下時間などによって評価されるが, そ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したときのそれぞれの塑性粘度および降伏値に大きく関連する¹⁾²⁾。そのため, 高流動コンクリートの流動性の評価は塑性粘度と降伏値の両方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³⁾⁴⁾。そこで, 高流動コンクリートの流動性に及ぼす調合の影響を明確にするためにはコンクリートの構成要素であるセメントペースト, 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が重要である。

本研究では, セメントペースト, モルタルの塑

性粘度・降伏値ならびにフローに及ぼすセメント種類, 水セメント比, 高性能 AE 減水剤の添加率, 分離低減剤の添加率, 細骨材量などの調合要因の影響を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 要因と水準および使用材料

セメントは, 普通ポルトランドセメント (普通セメント) および高粉末度タイプの低熱ポルトランドセメント (低熱セメント) の2種類とした。水セメント比は 35, 40, 45% の3水準, 高

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	普通ポルトランドセメント 低熱ポルトランドセメント
水セメント比(%)	35, 40, 45
高性能AE減水剤の添加率(C×%)	0, 0.5, 1.0
分離低減剤の添加率(W×%)	0, 0.1, 0.2
細骨材モルタル比(%)	0, 15, 30, 45

表-2 使用材料

材料	種類	記号	特性・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度3.16g/cm ³ , 比表面積3270cm ² /g
	低熱ポルトランドセメント		密度3.20g/cm ³ , 比表面積4240cm ² /g
水	水道水	W	
細骨材	鬼怒川産川砂	S	表乾密度2.61g/cm ³ , 粗粒率2.79
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	分離低減剤	V	セルロースエーテル系

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻 工修 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

性能 AE 減水剤の添加率はセメントの質量に対して 0,0.5,1.0%の3水準, 分離低減剤の添加率は水の質量に対して 0,0.1,0.2%の3水準とした。細骨材は細骨材とモルタルの容積比を細骨材モルタル比(s/m)として, 0%から 45%まで 15%刻みで変化させた。実験の要因と水準を表-1に, 使用材料を表-2に示す。

2.2 試験項目および試験方法

モルタルの試験項目として, フロー試験とレオロジー試験を行った。フロー試験は, JIS R 5201 のセメントの物理試験方法のフローコーンを用い, 落下運動を 0 回として行った。レオロジー試験は, 内円板型回転粘度計 (フルスケールトルク : $5750\mu\text{N}\cdot\text{m}$, 測定範囲 : $400\text{mPa}\cdot\text{s}$ ~ $64\text{kPa}\cdot\text{s}$) を用いて行い, 塑性粘度および降伏値を測定した。測定中は, 目視で試料とローターとの滑りの有無を調べ, 滑りが見られる試料についてはその測定値を除外した。

モルタルの練混ぜは, 温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$ の室内で, セメント試験用ミキサを用いて, 1 回の練混ぜ量を 2 リットルで行った。練混ぜ手順は, s/m が 0% (セメントペースト) では, 材料を練り鉢に投入後, 低速で 60 秒間, その後ミキサやパドルに付着したセメントペーストをかき落とし, 高速で 90 秒間練り混ぜた。s/m が 15,30,45% のモルタルにおいては, 水とセメントを練り鉢に投入後, 低速で 30 秒間, 細骨材を投入後さらに低速で 30 秒間練り混ぜた。次に, 高速にし, 引き続き 30 秒間練混ぜを続けた。その後, 90 秒間休止し, その間にミキサやパドルに付着したモルタルをかき落とし, 再び高速で 60 秒間練り混ぜた。

3. 実験結果

3.1 レオロジー一定数測定結果

モルタルのレオロジー一定数の測定結果を図-1に示す。ここで, SP の添加率が 0%のものについては, モルタルの粘性が高すぎたために, 試料とローターとの間に滑りが生じ, 正確な値が測定できなかった。そこで, SP の添加率が

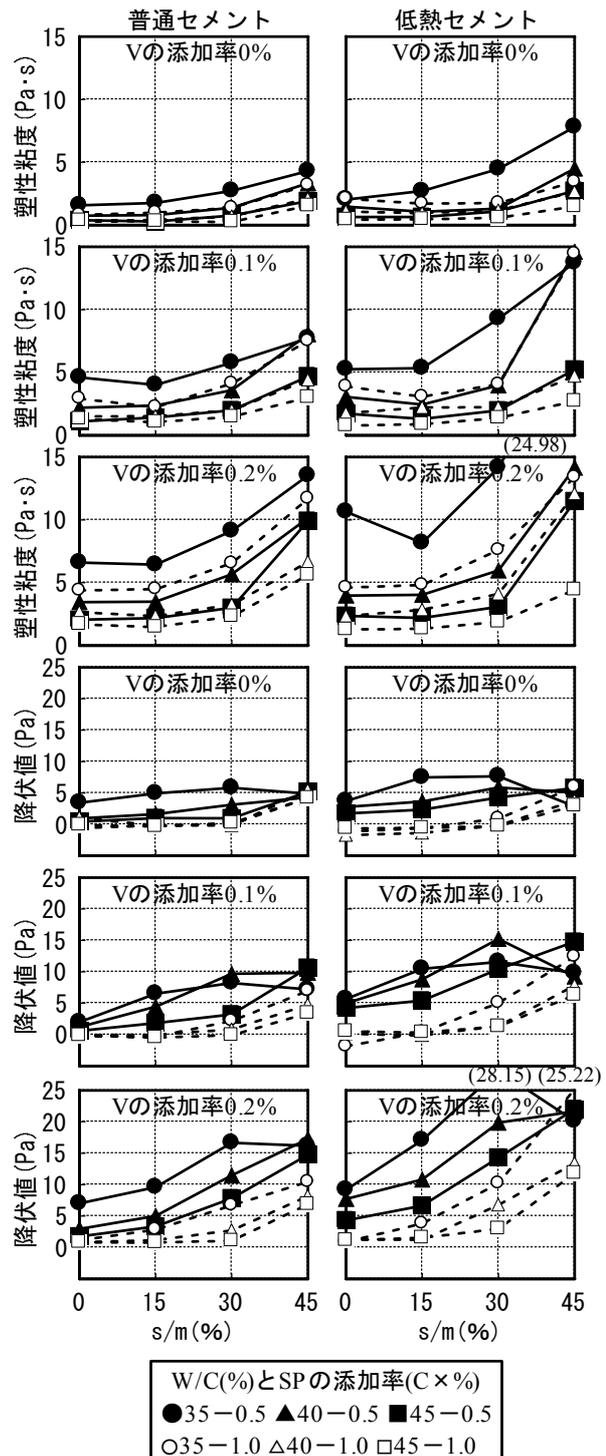


図-1 レオロジー一定数測定結果

0%のものは除外した。s/m と塑性粘度および降伏値の関係において, 塑性粘度と降伏値は, W/C, SP の添加率が大きくなると, 小さくなる傾向が見られる。また, 塑性粘度と降伏値は, V の添加率, s/m が大きくなると大きくなる傾向が見られる。一方, 降伏値の測定結果では, W/C が大きく, SP の添加率も大きい場合, 負の値を示すものがあり, また, W/C が小さい場合, s/m

を大きくしても小さくなるものがあった。これは、ひずみ速度測定値の外挿により降伏値を求めたことによると考えられる。そこで、今回は降伏値の考察は行わないこととした。

3.2 フロー測定結果

モルタルのフローの測定結果を図-2に示す。s/mとフローの関係において、フローは、W/C、SPの添加率が大きくなると大きくなる傾向が見られる。また、フローは、Vの添加率、s/mが大きくなると、小さくなる傾向が見られる。一部、s/mが0%のフローより、15%のフローの方が大きい値を示すものがある。これは、モルタル自体の降伏値は同程度の値であるが、s/mが大きくなることによって、モルタルの密度が大きくなり、初期にかかる自重が大きくなるために、フローが大きくなったと考えられる。

4. 考察

4.1 解析方法

モルタルの塑性粘度、フローに影響を及ぼす調合要因として、セメント種類、W/C、SPの添加率、Vの添加率、s/mが考えられる。ここで、セメント種類については、セメントの化学成分等、流動性に複雑に関わってくる要因が多数存在するためセメント種類ごとに解析することとし、要因は、W/C、SPの添加率、Vの添加率、s/mとした。モルタルの塑性粘度、フローに及ぼす調合の影響は次のように解析することとした。 $f_i()$ 、 $g_i()$ は関数表現を意味し、 $()$ の中はその変数を表す。

$$\eta_m = f_0(\eta_p, s/m) = f_1(\eta_p) \cdot f_2(s/m) \quad (1)$$

$$\eta_p = f_3(W/C, SP, V) \quad (2)$$

$$F_m = g_0(F_p, s/m) = g_1(F_p) \cdot g_2(s/m) \quad (3)$$

$$F_p = g_3(W/C, SP, V) \quad (4)$$

ここで、 η_m :モルタルの塑性粘度(Pa·s)、 η_p :セメントペーストの塑性粘度(Pa·s)、 F_m :モルタルのフロー(mm)、 F_p :セメントペーストのフロー(mm)、 s/m :細骨材モルタル比(%), W/C :水セメント比(%), SP :高性能AE減水剤の添加率(C×%), V :分離低減剤の添加率(W×%)。

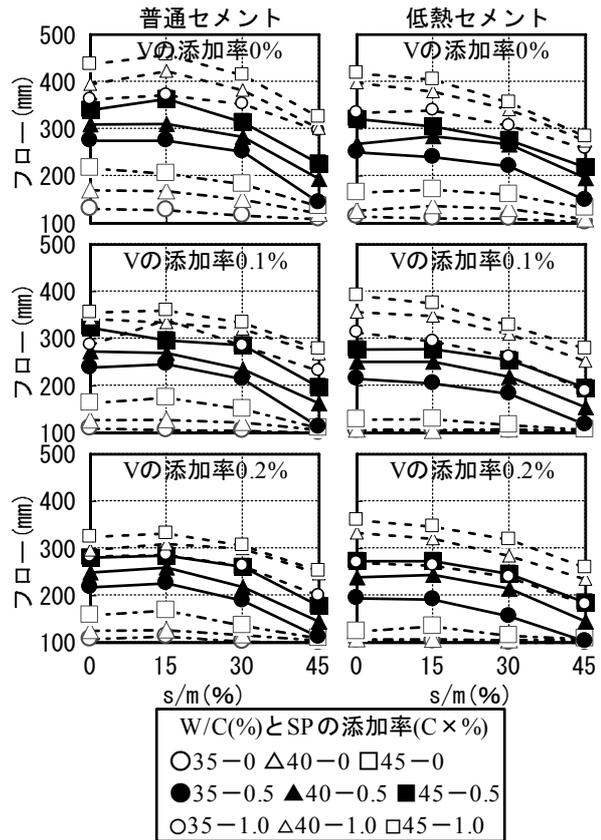


図-2 フロー測定結果

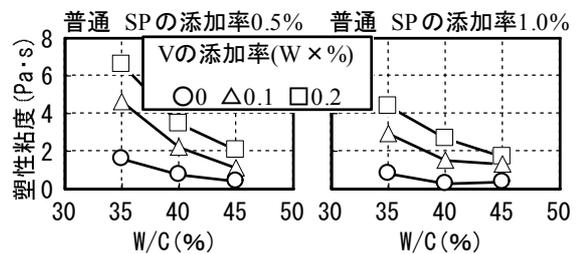


図-3 セメントペーストのW/Cと塑性粘度の関係例

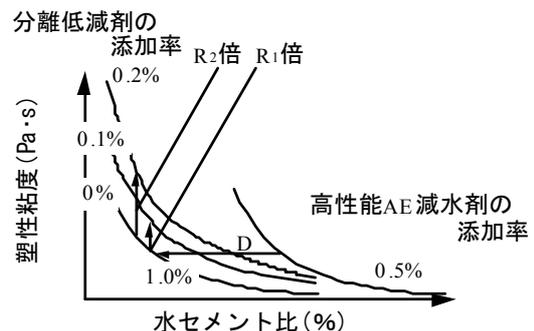


図-4 R, D算出の概念図

4.2 塑性粘度の評価

(1) 分離低減剤の影響

セメントペーストのW/Cと塑性粘度の関係例を図-3に示す。Vの添加率が大きくなると、塑性粘度は相似的に大きくなる傾向にある。そこで、Vの添加率ごとのW/Cと塑性粘度の関係

を図-4のようにR倍で正規化できるように、各添加率における塑性粘度と添加率が0%の塑性粘度との比Rを算出した。Vの添加率とRの関係を図-5に示す。図-5の近似線より得られたセメントペーストの塑性粘度におよぼすVの添加率の影響係数 $C_{V\eta}$ は次式のようにになった。

$$C_{VO\eta} = 1 + 23.7V \quad (5)$$

$$C_{VL\eta} = 1 + 10.7V \quad (6)$$

ここで、 $C_{VO\eta}$ ：普通セメントの影響係数、 $C_{VL\eta}$ ：低熱セメントの影響係数。

(2) 高性能 AE 減水剤の影響

SPの添加率の影響を評価するために、SPの添加率ごとの水セメント比と塑性粘度の関係が互いに重なるよう図-4のように平行移動すると、SPの添加率を考慮した仮想水セメント比 W'/C'_η は次式のようにになった。

$$W'/C'_{O\eta} = W/C + 6.96(SP - 0.5) \quad (7)$$

$$W'/C'_{L\eta} = W/C + 6.80(SP - 0.5) \quad (8)$$

ここで、 $W'/C'_{O\eta}$ ：普通セメントの仮想水セメント比、 $W'/C'_{L\eta}$ ：低熱セメントの仮想水セメント比。

SPの添加率を考慮した仮想水セメント比 W'/C'_η とセメントペーストの塑性粘度 η_p を分離低減剤の添加率の影響係数 $C_{V\eta}$ で除した値の関係を図-6に示す。 W'/C'_η が小さくなると $\eta_p/C_{V\eta}$ は急激に大きくなるので、この関係を指数関数で近似した。この関係より、セメントペーストの塑性粘度は次式のように表すことができた。

$$\eta_{pO} = 1.25 \times 10^7 C_{VO\eta} (W'/C'_{O\eta})^{-4.54} \quad (9)$$

$$\eta_{pL} = 1.67 \times 10^9 C_{VL\eta} (W'/C'_{L\eta})^{-5.68} \quad (10)$$

ここで、 η_{pO} ：普通セメントを用いたセメントペーストの塑性粘度計算値、 η_{pL} ：低熱セメントを用いたセメントペーストの塑性粘度計算値。

(3) 細骨材モルタル比の影響

SPの添加率を考慮した仮想水セメント比 W'/C'_η とモルタルの塑性粘度 η_m をVの添加率の影響係数 $C_{V\eta}$ で除した値の関係をs/mごとに示したものが図-7である。s/mの影響を評価するために、式(9)、(10)を考慮して次のような

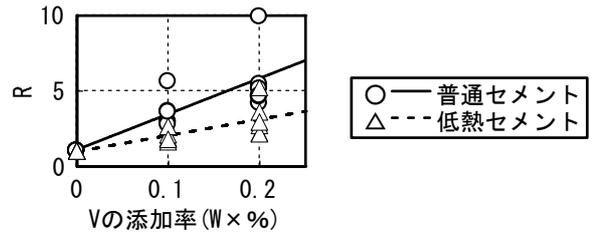


図-5 Vの添加率とRの関係

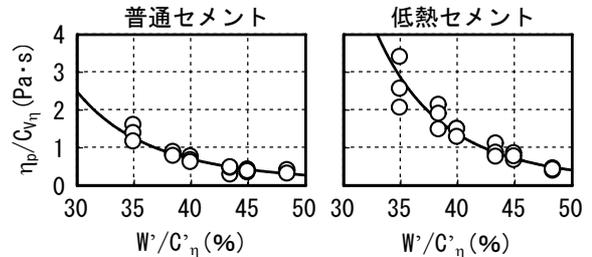


図-6 W'/C'_η と $\eta_p/C_{V\eta}$ の関係

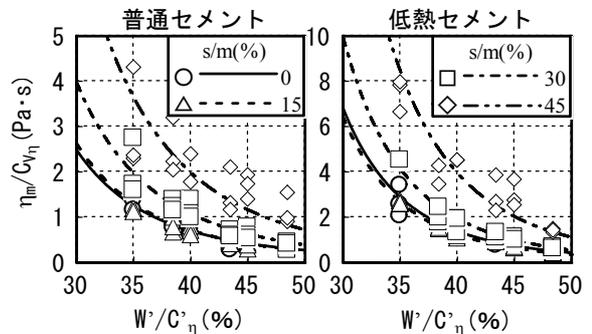


図-7 W'/C'_η と $\eta_m/C_{V\eta}$ の関係

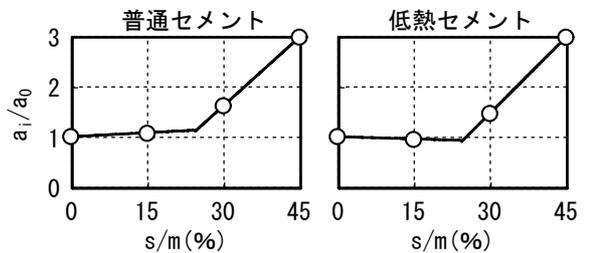


図-8 s/m と a_i/a_0 の関係

指数関数で近似した。

$$\eta_m/C_{VO\eta} = a_i (W'/C'_{O\eta})^{-4.54} \quad (11)$$

$$\eta_m/C_{VL\eta} = a_i (W'/C'_{L\eta})^{-5.68} \quad (12)$$

ここで、 $i=0,15,30,45$

s/m と各 s/m の a_i と s/m が 0% の a_0 との比の関係を図-8に示す。図-8より s/m が 0,15% と 30,45% では、s/m の影響の大きさが異なることがわかる。そこで、s/m が 0,15% と 30,45% で区別してバイリニアにより s/m の影響を考慮した。2点を通る直線式を用いて、各直線の適用範囲はバイリニアの交点までとし、最終的にモルタルの塑性粘度は以下のような式で表すことができた。

$$\eta_{mO} = \{4.26 \times 10^{-3}(s/m) + 1\} \eta_{pO}, 0 \leq s/m \leq 24 \quad (13)$$

$$\eta_{mO} = \{9.10 \times 10^{-2}(s/m) - 1.12\} \eta_{pO}, 24 \leq s/m \leq 45 \quad (14)$$

$$\eta_{mL} = \{-3.97 \times 10^{-3}(s/m) + 1\} \eta_{pL}, 0 \leq s/m \leq 24 \quad (15)$$

$$\eta_{mL} = \{1.01 \times 10^{-1}(s/m) - 1.57\} \eta_{pL}, 24 \leq s/m \leq 45 \quad (16)$$

ここで、 η_{mO} ：普通セメントを用いたモルタルの塑性粘度の計算値、 η_{mL} ：低熱セメントを用いたモルタルの塑性粘度の計算値。

モルタルの塑性粘度の計算値と実測値の関係を図-9に示す。概ねよく評価できていると考えられる。

4.3 フローの評価

(1) 分離低減剤の影響

セメントペーストの W/C とフローの関係例を図-10に示す。Vの添加率が大きくなると、フローは相似的に小さくなっている。Vの添加率ごとの W/C とフローの関係を図-11のようにR倍で正規化できるよう、各添加率においてのフローと添加率が0%のフローとの比Rを算出した。Vの添加率とRの関係を図-12に示す。図-12の近似線より得られたセメントペーストのフローに及ぼすVの添加率の影響係数 C_{VF} は次式のようにになった。

$$C_{VOF} = 1 - 1.23V \quad (17)$$

$$C_{VLF} = 1 - 0.876V \quad (18)$$

ここで、 C_{VOF} ：普通セメントの影響係数、 C_{VLF} ：低熱セメントの影響係数。

(2) 高性能 AE 減水剤の影響

SPの添加率の影響を評価するために、SPの添加率ごとの W/C とフローの関係が互いに重なるよう図-11のように平行移動すると、SPの添加率を考慮した仮想水セメント比 W'/C'_F は次式のようにになった。

$$W'/C'_{OF} = W/C + 30.3SP \quad (19)$$

$$W'/C'_{LF} = W/C + 37.4SP \quad (20)$$

ここで、 W'/C'_{OF} ：普通セメントの仮想水セメント比、 W'/C'_{LF} ：低熱セメントの仮想水セメント比。

SPの添加率を考慮した仮想水セメント比 W'/C'_F とセメントペーストのフロー F_p をVの添加率の影響係数 C_{VF} で除した値の関係を図-13

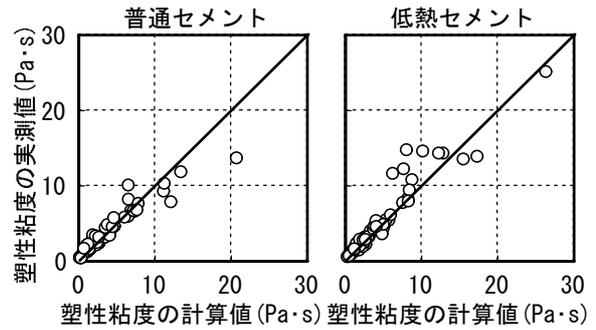


図-9 塑性粘度の計算値と実測値の関係

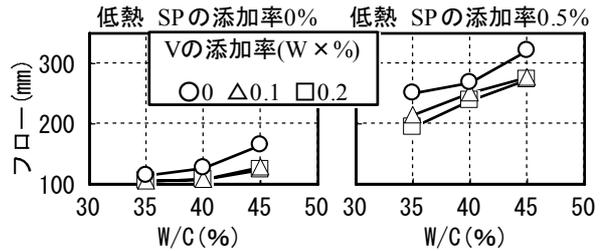


図-10 セメントペーストの W/C とフローの関係例

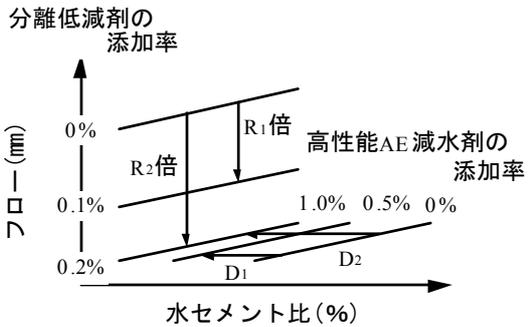


図-11 R, D算出の概念図

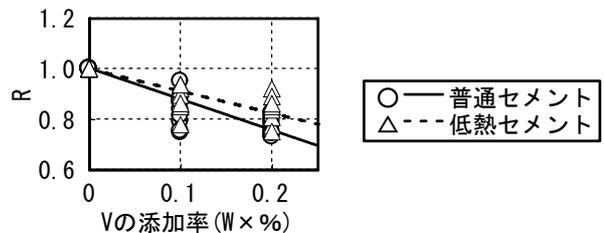


図-12 Vの添加率とRの関係

に示す。 W'/C'_F が大きくなると F_p/C_{VF} は直線的に大きくなるため、この関係を線形近似した。この関係よりセメントペーストのフローは次のように表すことができた。

$$F_{pO} = C_{VOF} \{7.42(W'/C'_{OF}) - 118\} \quad (21)$$

$$F_{pL} = C_{VLF} \{6.82(W'/C'_{LF}) - 134\} \quad (22)$$

ここで、 F_{pO} ：普通セメントを用いたセメントペーストのフロー計算値、 F_{pL} ：低熱セメントを用いたセメントペーストのフロー計算値。

(3) 細骨材モルタル比の影響

SPの添加率を考慮した仮想水セメント比

W'/C'_F とモルタルのフロー F_m を V の添加率の影響係数 C_{VF} で除した値の関係を s/m ごとに示したものが図-14 である。 s/m の影響を評価するために、式(21), (22)を考慮し次式で近似した。

$$F_m/C_{VOF}=a_i(W'/C'_{OF})-118 \quad (23)$$

$$F_m/C_{VLF}=a_i(W'/C'_{LF})-134 \quad (24)$$

ここで、 $i=0,15,30,45$

s/m と各 s/m の a_i と s/m が 0% の a_0 との比の関係を図-15 に示す。図-15 より塑性粘度と同様に s/m が 0,15% と 30,45% では、 s/m の影響の大きさが異なることがわかる。そこで、 s/m が 0,15% と 30,45% で区別してバイリニアより s/m の影響を考慮した。2点を通る直線式を用いて、各直線の適用範囲はバイリニアの交点までとし、最終的にモルタルのフローは以下のような式で表すことができた。

$$F_{mO}=\{1.35 \times 10^{-3}(s/m)+1\}F_{pO}, 0 \leq s/m \leq 22 \quad (25)$$

$$F_{mO}=\{-1.07 \times 10^{-2}(s/m)+1.27\}F_{pO}, 22 \leq s/m \leq 45 \quad (26)$$

$$F_{mL}=\{-9.78 \times 10^{-4}(s/m)+1\}F_{pL}, 0 \leq s/m \leq 23 \quad (27)$$

$$F_{mL}=\{-8.41 \times 10^{-3}(s/m)+1.17\}F_{pL}, 23 \leq s/m \leq 45 \quad (28)$$

ここで、 F_{mO} ：普通セメントを用いたモルタルのフローの計算値、 F_{mL} ：低熱セメントを用いたモルタルのフローの計算値。

モルタルのフローの計算値と実測値の関係を図-16 に示す。概ねよく評価できていると考えられる。

5. まとめ

セメントペースト、モルタルのレオロジー特性、流動特性に及ぼす調合要因の影響を検討した結果、セメントペースト、モルタルの塑性粘度、フローは、セメント種類別に水セメント比、高性能 AE 減水剤の添加率、分離低減剤の添加率および細骨材モルタル比の調合要因の関数で表現できることが示された。

謝辞

実験に際しては、平成 13 年度宇都宮大学卒業生 鈴木亮君、森戸玲奈さんの協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

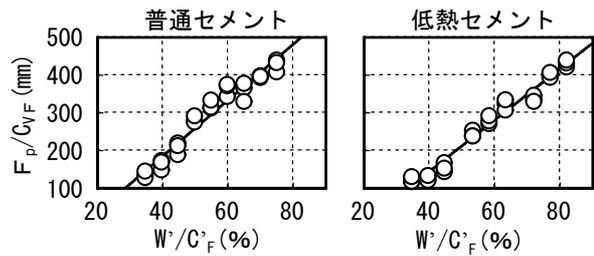


図-13 W'/C'_F と F_p/C_{VF} の関係

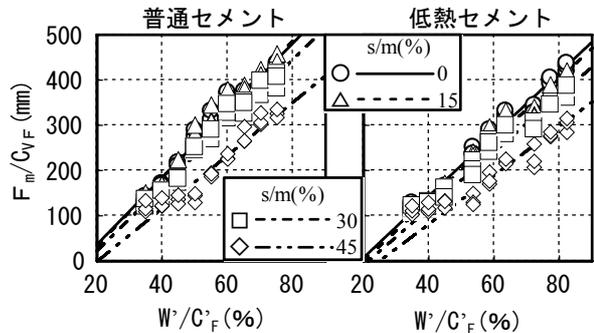


図-14 W'/C'_F と F_m/C_{VF} の関係

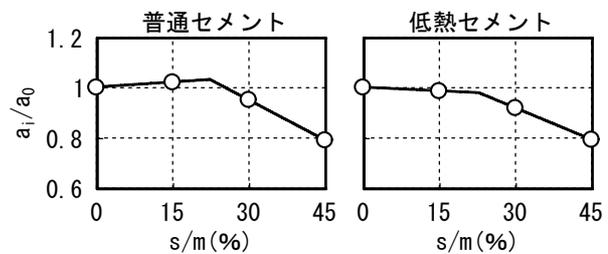


図-15 s/m と a_i/a_0 の関係

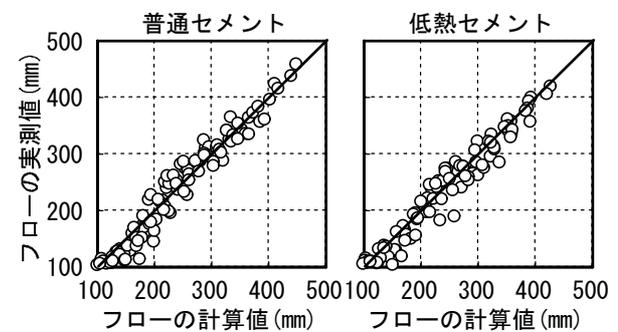


図-16 フローの計算値と実測値の関係

参考文献

- 1) 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書，1990.3
- 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
- 3) 岩井信彰，樹田佳寛：高流動コンクリートのスランプリ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
- 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力学モデル研究小委員会報告書，1996.4