

論文 フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料及び配合の影響

呉 承寧*¹・今井 昌文*²・手塚 正道*³

要旨: 高流動コンクリートの流動特性についての研究の一環として、フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼすセメント、高性能AE減水剤、増粘剤、混和材、細骨材などの使用材料及び配合の影響を検討した。研究の結果、セメントの比表面積と構成化合物の組成、混和材の比表面積と置換率、高性能AE減水剤及び増粘剤の添加率、細骨材の寸法、モルタルの配合などの要因がフレッシュモルタルの流動特性に与える影響を、レオロジー定数を用いて評価することができた。

キーワード: レオロジー定数、セメント、高性能AE減水剤、増粘剤、混和材、細骨材

1. はじめに

従来のコンクリートに比べ、変形性及び分離抵抗性の高い高流動コンクリートの流動性を評価するには、コンクリートのスランプ値、スランプフロー値などの工学量のみでは、十分ではなく、コンクリートの塑性粘度及び降伏値などのレオロジー定数を用いた解析を行うのが非常に重要であることが多数の文献で報告されている[1]。高流動コンクリートの流動性には、モルタルがコンクリートの一部分として、大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、高流動コンクリートの流動特性を解明するためには、フレッシュモルタルのレオロジー定数に関する研究が重要だと思われる。

筆者らはフロー値またロート流下時間などの工学量を用いて、セメント及び高性能AE減水剤の高流動モルタルの流動性に及ぼす影響を検討してきたが[2]、各種材料特性と配合などの要因の影響による高流動コンクリートの流動特性をより正確に把握するためには、レオロジー定数を用いて、モルタルの流動性に及ぼすセメント、高性能AE減水剤、増粘剤、混和材、細骨材などの使用材料の影響について、更に検討する必要があると考えられる。

そこで本研究は、塑性粘度と降伏値を用い、モルタルの流動特性に及ぼすセメント、高性能AE減水剤、増粘剤、混和材、骨材など使用材料及び配合の影響を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

代表的なセメントとして4種類のポルトランドセメントを使用した。これらのセメントの構成化合物組成と比重及び比表面積の一覧を表-1に示す。

混和材には、シリカフェーム(SF)、高炉スラグ微粉末(BFS)、フライアッシュ(FA)、石灰石微粉末(LS)を使用した。混和材の化学主成分及び比重と比表面積を表-2に示す。

高性能AE減水剤(SP)はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤、増粘剤(VA)はセルロース系の

* 1 オリエンタル建設(株) 技術研究所 主任研究員 工博 (正会員)

* 2 同上 主任研究員 (正会員)

* 3 同上 主任研究員 (正会員)

増粘剤を使用した。

表-1 セメントの構成化合物組成及び物性

細骨材 (S) には、3、4、5 号の相馬硅砂 (細骨材の影響を検討する場合)、及び3種混合の相馬硅砂 (他の場合) を使用した。細骨材の物理的性質を表-3 に示す。

2.2 ペースト及びモルタルの配合

ペーストの流動性に及ぼすセメント種類の影響を検討するためには、混和材及び高性能AE減水剤を添加されていないプレーンペーストを用いた。モルタルは、高強度と普通強度の高流動コンクリートのモルタルを想定して、表-4 に示す配合とした。その中、水粉体比 (W/P) 及び高性能AE減水剤の添加率 (SP/P) が粉体系の高流動コンクリート中に使われた代表的な値である。

2.3 試験項目と方法

2.3.1 ペースト及びモルタルの混練

練混ぜは、セメント、混和材及び細骨材を30秒で空練った後、水及び高性能AE減水剤を入れて、60秒練混ぜて、そして、ミキサに付着したモルタルをかき落とし、さらに、60秒練り混ぜるという手順で行う。

2.3.2 レオロジー定数測定試験

ペースト及びモルタルのレオロジー定数の測定には、DPV-II 型の回転粘度計 (外筒回転式、外筒寸法: φ70×90mm、内筒寸法: φ30×48mm、スリップを防止するために、内筒の表面に厚さ1mm、格子の寸法2×2 mmのステンレススチルのメッシュを貼っている) を使用し、ピンガムモデルを仮定した次式からレオロジー定数を計算した [3]。

$$\eta_{pl} \theta = \frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) + \tau_i \ln \frac{r}{R} \quad (1)$$

ここに、 η_{pl} : 試料の塑性粘度、 θ : 回転粘度計の内筒に接する試料の角速度、M: トルク、h: 内筒の長さ、r: 内筒の半径、R: 外筒の半径、 τ_i : 試料の降伏値で表される。

2.3.3 モルタルのフロー試験

セメントの種類	略称	記号	構成化合物の組成 (%)				比重	比表面積 cm ² /g
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
早強セメント	早強	●	64	11	8	8	3.14	4450
普通セメント	普通	■	52	23	9	9	3.16	3310
高強度型の低熱セメント	低熱1	▲	35	46	3	9	3.20	4150
低熱セメント	低熱2	◆	29	55	2	8	3.22	3470

表-2 混和材の化学主成分及び物性

混和材の種類	記号	比重	比表面積 cm ² /g	化学主成分 (%)					
				L. O. I	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
シリカフェウム	□	2.20	200000	1.8	92.5	0.2	0.5	0.7	0.6
高炉スラグ微粉末	○	2.92	6170	0.0	33.7	42.2	15.1	6.1	0.6
フライアッシュ	△	2.38	5560	3.0	57.0	5.7	24.5	---	6.2
石灰石微粉末	◇	2.60	3840	43.6	1.0	53.1	0.1	1.7	0.1

表-3 細骨材の物理的性質

細骨材種類	最大寸法 (mm)	粗粒率 F. M.	実績率 (%)	比重
3号	1.19	4.00	64.2	2.58
4号	0.59	1.76	62.9	2.58
5号	0.30	1.53	57.1	2.58
3種混和	1.19	2.47	65.4	2.58

表-4 高流動モルタルの配合

モルタル種類	W/P	S/P	SP/P (%)	VA/P (%)
高強度	0.25	1.0	1.5~3.0	0
普通強度	0.35	1.8	1.2	0~0.1

注: 表中の比率は重量比で、Pは粉体 (セメント+混和材) である

フレッシュモルタルのフロー試験はJIS R 5201 によって行った。ただし、フローテーブルの代わりに、水平な鉄板の上でフロー値の測定を行った。

3. 試験結果と考察

3.1 レオロジー定数に及ぼすセメントの種類の影響

高性能AE減水剤及び混和材が添加されていないプレートのペーストの塑性粘度及び降伏値に及ぼすセメントの影響を、それぞれ図-1、図-2に示す。これらの図より、フレッシュペーストの塑性粘度及び降伏値は、用いたセメントの種類によって異なることがわかる。特に、セメントの種類によるレオロジー定数の差は、ペーストの水セメント容積比の小さい場合に顕著になる。普通ポルトランドセメントを用いたペーストの塑性粘度及び降伏値が一番低く、早強ポルトランドセメントを用いたペーストの塑性粘度及び降伏値が一番高い。表-1に示したように、普通ポルトランドセメントの比表面積が一番低く、早強ポルトランドセメントの比表面積が一番高いことより、セメントペーストのレオロジー定数が用いたセメントの比表面積とある程度の間接的な関係があることが推定される。その理由は、比表面積が高くなると、セメントの吸水率が高くなるほか、ペースト中のセメント粒子間の余剰水膜が薄くなるためと思われる。しかし、高性能AE減水剤を用いた場合は、セメントの比表面積だけでなく、セメントの構成化合物組成も、フレッシュモルタルのレオロジー定数に影響を与える。図-3及び図-4は、高性能AE減水剤を用いた各種のセメントモルタルの塑性粘度と降伏値である。これらの図より、同じ配合条件でも、用いたセメントの種類によって、フレッシュモルタルのレオロジー定数に大きな差があることが分かる。高性能AE減水剤を添加しない場合、普通セメントペーストは低熱セメント（高強度型の低熱セメント（低熱1）、低熱セメント（低熱2））ペーストより、塑性粘度及び降伏値が低いにもかかわらず、高性能AE減水剤を添加した場合には、逆に、普通セメントを用いたモルタルの塑性粘度及び降伏値は低熱セメントを用いたモルタルより高くなった。高性能AE減水剤を用いたフレッシュモルタルの塑性粘度及び降伏値は、早強セメントモルタル>普通セメントモルタル>高強度型の低熱セメント（低熱1）モルタル>低熱セメント（低熱2）モルタルの順である。これはモルタルの塑性粘度及び降伏値に与える影響

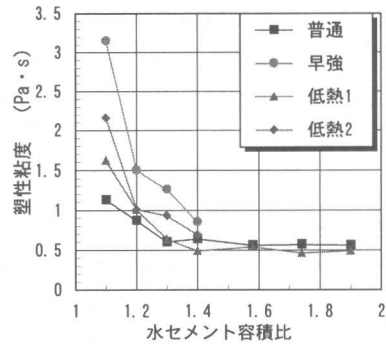


図-1 ペーストの塑性粘度とセメントの種類の関係

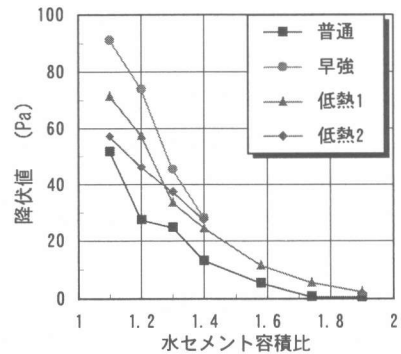


図-2 ペーストの降伏値とセメントの関係

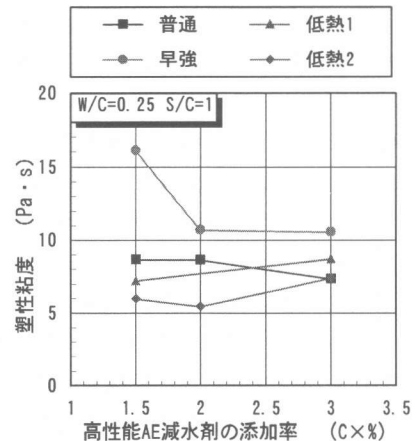


図-3 塑性粘度と高性能減水剤の関係 (図-3～7のセメント種類の凡例が同じ)

がプレーンのセメントペーストの流動性に加えて、用いる高性能AE減水剤との相互作用により決まるためと考えられる。表-1に示したように、低熱セメントの構成化合物中の空隙質相(C₃A、C₄A F)の含有率は普通セメントまた早強セメントより少ない。低熱セメントの高流動化は、空隙質相量の低減による空隙質相に吸着する高性能AE減水剤量の低減により、セメント粒子への高性能AE減水剤の吸着層が均一になることによるものと考えられる[4]。

3.2 レオロジー一定数に及ぼす高性能AE減水剤の影響

図-3、4に示したように、フレッシュモルタルのレオロジー一定数に及ぼす高性能AE減水剤の影響は、セメントの種類によって違うが、添加量の増大によるレオロジー一定数の減少傾向はセメントが相違しても同じである。高性能AE減水剤は、フレッシュモルタルの塑性粘度よりも降伏値に強く影響している。図-5に示すように、モルタルの降伏値とフロー値は良好な相関関係があり、高性能AE減水剤の添加は、モルタルの降伏値を低減させ、モルタルのフロー値を高められることが確認できる。一方、高性能AE減水剤の添加はモルタルの塑性粘度には、大きく影響がしないようである。

3.3 レオロジー一定数に及ぼす増粘剤の影響

図-6は各種のセメントを用いたフレッシュモルタルの塑性粘度と増粘剤の添加率の関係を示す。この図に示すように、フレッシュモルタルの塑性粘度は増粘剤の添加率の増加に従って、大きくなる。これにより、増粘剤の添加によるフレッシュモルタルの分離抵抗性を向上させることができると考えられる。しかしながら、図-7に示すように、増粘剤の添加は、フレッシュモルタルの塑性粘度を上げるのと同時に、モルタルの降伏値も増加させ、モルタルの流動性を低下させてしまう。そこで、モルタルの流動性に影響する増粘剤の副作用を減らすため、余分の高性能AE減水剤を添加することが必要となる。また、図-7から、フレッシュモルタルの降伏値に及ぼす増粘剤の影響は、ほかのセメントに比べ、早強セメントを用いたモルタルの方が明らかに大きい。

3.4 レオロジー一定数に及ぼす混和材の影響

普通ポルトランドセメントを混和材で置換したモルタルでは、図-8及び図-9に示すように、混和材がモルタルのレオロジー一定数に影響を与える。少量のシリカフ

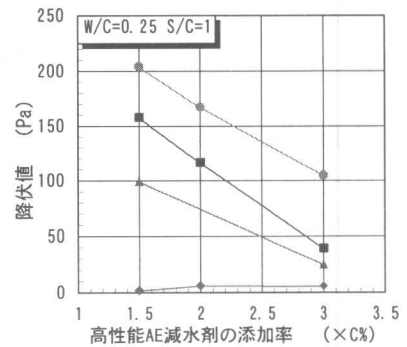


図-4 降伏値と高性能減水剤の関係

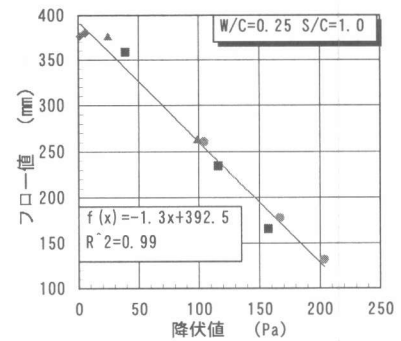


図-5 降伏値とフロー値の関係

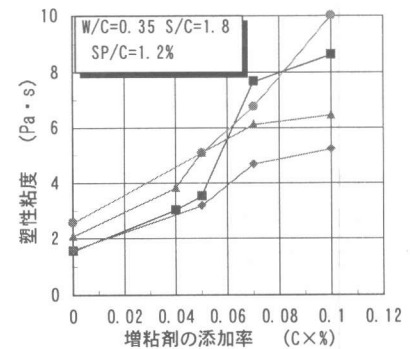


図-6 塑性粘度と増粘剤の関係

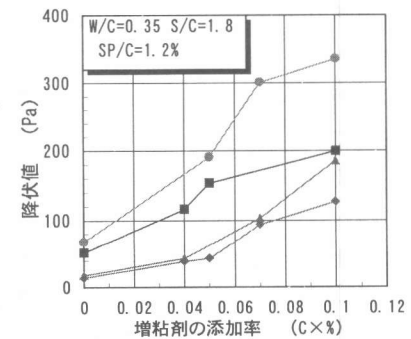


図-7 降伏値と増粘剤の関係

ュームを混和した場合、モルタルのレオロジー定数が極めて大きくなる一方で、石灰石微粉末を混和したものは、レオロジー定数が低くなる。シリカフュームを混和した場合、シリカフュームの比表面積が非常に大きいことより、フレッシュモルタルのペースト部分の粒子間の余剰水膜の厚さが減少することに加えて、シリカフュームへの高性能AE減水剤の吸着量が増加するため、モルタルのレオロジー定数が高くなる。同様に、高炉スラグ微粉末とフライアッシュは、普通ポルトランドセメントより、比表面積が大きいので、セメントを置換すると、フレッシュモルタルのペースト部分の粒子間の余剰水膜の厚さを低減させ、モルタルの塑性粘度を増加させる。同じ理由で、石灰石微粉末は、普通ポルトランドセメントと同程度の比表面積を持つため、セメントを置換しても、モルタルの塑性粘度がほとんど変わらない。一方、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、及び石灰石微粉末は、普通セメントより、水和反応がずっと遅いため、高性能AE減水剤を吸着する量が少なく、モルタルの降伏値を低減させると考えられる。

3.5 レオロジー定数に及ぼす細骨材の影響

レオロジー定数に及ぼす細骨材の影響を検討するために、大きさの違う3種類の細骨材（3号、4号、5号相馬硅砂）を使用した。フレッシュモルタルの塑性粘度は、図-10に示すように、細骨材のF.M.値が異なるにもかかわらず、細骨材の体積比との相関関係があることが明らかになった。一同のペーストに対して、モルタル中の細骨材の体積比が大きいほど、フレッシュモルタルモルタルの塑性粘度が高い。しかしながら、図-11に示したように、フレッシュモルタルの降伏値は、モルタル中の細骨材の体積比だけでなく、細骨材のF.M.値にも左右される。則ち、一同のペーストに対して、フレッシュモルタルの降伏値は、細骨材の体積比が大きいほど、細骨材のF.M.値が小さいほど、高い。

実際に、フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす細骨材の影響要因は、細骨材の体積比だけでなく、細骨材の比表面積（F.M.値と関係がある）及び実積率でもある。これらの要因を考えた余剰ペースト膜厚理論について研究がいくつか行われている[5]。仮りに、細骨材は球形とすると、余剰ペースト膜厚は次の近似式で表される。

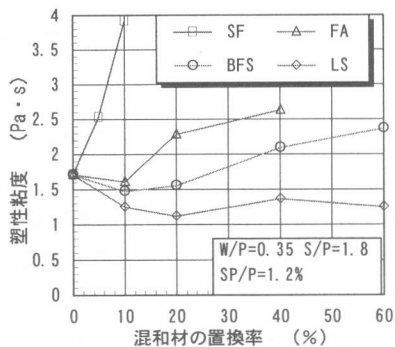


図-8 塑性粘度と混和材の関係

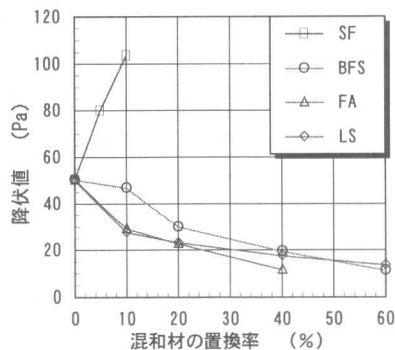


図-9 降伏値と混和材の関係

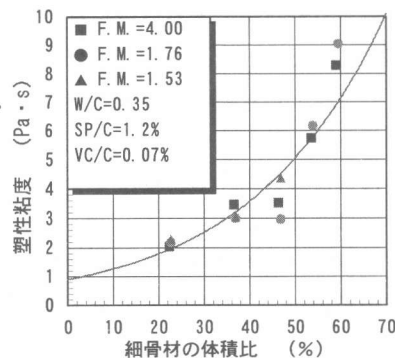


図-10 塑性粘度と細骨材体積比の関係

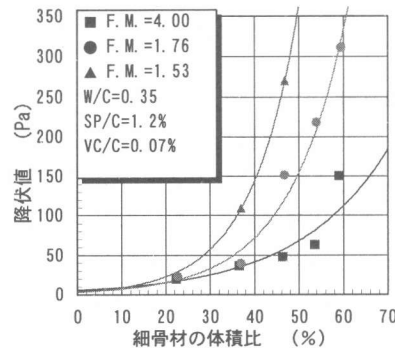


図-11 降伏値と細骨材体積比の関係

$$D_p = [1 - (2-G) V_s] / [(6/\gamma_s) \sum_{i=1}^n (W_i/d_i)] \quad (2)$$

ここに、 D_p ：余剰ペースト膜厚の近似値、 G ：細骨材の実績率、 V_s ：細骨材の単位容積、 γ_s ：細骨材の表乾比重、 W_i ：寸法 d_i の篩い上に留まる細骨材の重さ。図-12に示すように、フレッシュモルタルの降伏値は、細骨材のF.M.が違ってても、余剰ペースト膜厚と良好な相関関係がある。セメントペーストの配合が同じであれば、細骨材の寸法と無関係に、余剰ペースト膜が厚いほど、降伏値が低い。特に、この傾向は膜厚の0.1 mmの範囲内で顕著である。一方、フレッシュモルタルの塑性粘度と余剰ペースト膜厚の関係は、図-13に示すように、細骨材の寸法に影響される。ペーストの配合及び余剰ペースト膜厚が同じでも、フレッシュモルタルの塑性粘度は、細骨材の大きさによって、異なり、細骨材が大きいほど、大きくなる。

4. まとめ

本研究は高流動モルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料及び配合の影響を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) セメントの比表面積が大きいほど、ペーストのレオロジー定数は大きい。
- 2) 高性能AE減水剤を用いたモルタルでは、セメント中の間隙相質量が低いほど、モルタルの降伏値が低い。
- 3) 高性能AE減水剤は、降伏値を大きく減少させるが、塑性粘度にはあまり影響しない。
- 4) 増粘剤は、フレッシュモルタルの塑性粘度だけでなく、降伏値にも影響する。
- 5) 混和材は、種類によって、フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす影響が相違する。
- 6) ペーストの配合が同じであれば、細骨材の寸法にかかわらず、モルタルの塑性粘度と細骨材の体積比、及びモルタルの降伏値と余剰ペースト膜厚には、良好な相関関係がある。

参考文献

- [1] ｺﾝｸﾘｰﾄ工学会、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、pp. 3-5、1996
- [2] 呉 承寧・手塚正道・今井昌文・堀越直樹：高流動モルタルの性状に及ぼすセメント及び高性能AE減水剤の影響、ｺﾝｸﾘｰﾄ工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 57-62、1996
- [3] 村田二郎：まだ固まらないｺﾝｸﾘｰﾄのレオロジーに関する基礎研究、ｺﾝｸﾘｰﾄ工学、Vol. 15、No. 1、pp. 25-34、1977
- [4] 名和豊春：高ピーライト系セメントの現状、ｺﾝｸﾘｰﾄ工学、Vol. 34、No. 12、pp. 16-25、1996
- [5] Powers, T. C.: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, pp. 121-124, 1968

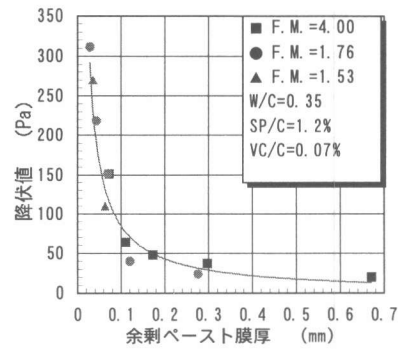


図-12 降伏値と余剰ペースト膜厚の関係

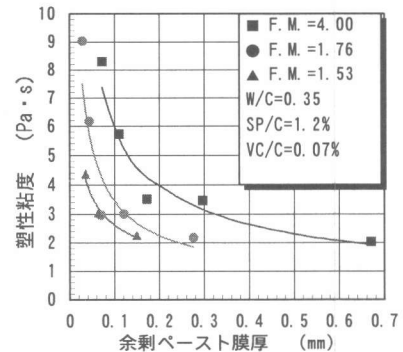


図-13 塑性粘度と余剰ペースト膜厚の関係