

論文 セメントペーストのレオロジー特性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の流動性を把握するために、コンクリートの構成要素であるセメントペーストのセメントの種類、水セメント比、高性能 AE 減水剤及び分離低減剤の添加率を変化させてレオロジー特性を測定し、それらの要因の影響を粒子の周囲に存在する水膜の厚さと関連づけて実験的に検討した。その結果、セメントペーストの降伏値、塑性粘度は、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を考慮した仮想水膜の厚さにより推測できることが明らかとなった。

キーワード: セメントペースト、降伏値、塑性粘度、仮想水膜厚さ

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流動性は、スランプフローおよび 50cm フロー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降伏値および塑性粘度に大きく関連する。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。

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、セメントペーストの降伏値、塑性粘度に及ぼす調合要因の影響をセメン

ト粒子の周囲に存在する水膜の厚さと関連づけて²⁾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

セメントは、普通ポルトランドセメントおよび高粉末度タイプの中熟熱ポルトランドセメントの2種類とした。水セメント比は、30%から50%まで5%刻みで、高性能 AE 減水剤の添加量はセメントの質量に対して 0%から 2.0%まで 0.5%刻みで、分離低減剤の添加量は水の質量に

表-1 要因と水準

要因	水準
セメントの種類	普通ポルトランドセメント, 中熟熱ポルトランドセメント
水セメント比 (%)	30, 35, 40, 45, 50
高性能AE減水剤の添加率 (C×%)	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
分離低減剤の添加率 (W×%)	0, 0.1, 0.2

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3420cm ² /g
	中熟熱ポルトランドセメント		
水	水道水	W	
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 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

対して0%から0.2%まで0.1%刻みで変化させた。実験の要因と水準を表-1に、使用した材料を表-2に示す。

2.2 試験項目および試験方法

セメントペーストのレオロジー的性質としてフロー値、降伏値および塑性粘度を測定した。測定は、内円板型回転粘度計を用いて行い、目視

で試料とローターとの滑りの有無を調べ、滑りがみられる試料についてはその測定値は除外した。

セメントペーストの練混ぜは、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、材料を投入後、低速で60秒間、その後ミキ

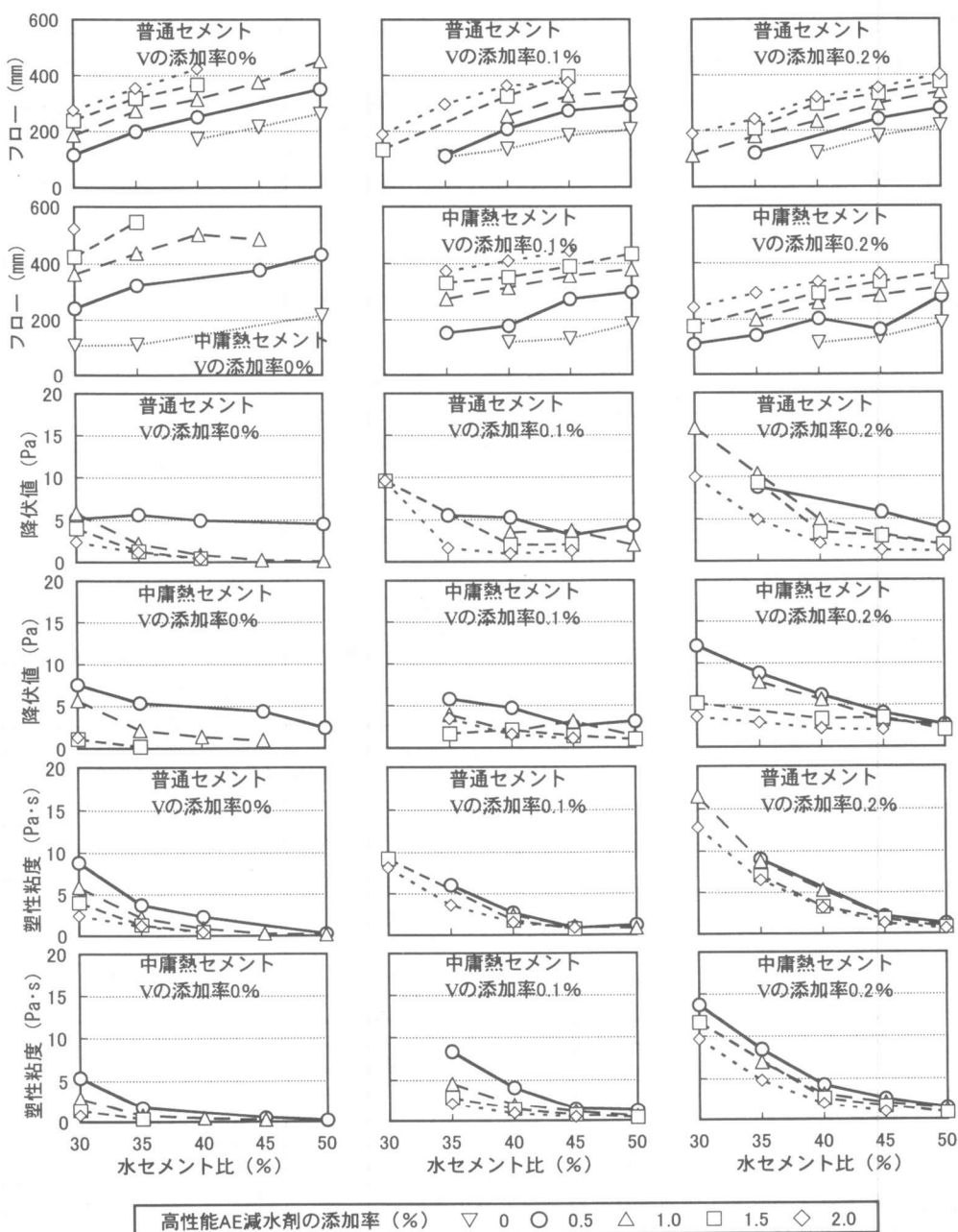


図-1 測定結果

サヤ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秒間練混ぜた。

3. 実験結果

セメントペーストのフロー値、降伏値、塑性粘度の測定結果を図-1に示す。高性能AE減水剤の添加率が0%のものについては、水セメント比が40%以下ではすべて滑りが生じており、水セメント比が45%については滑りの有無が確認できなかった。フロー値以外はすべて除外することとした。また、高性能AE減水剤の添加率が0.5%以上のものについても滑りが生じたものは除外した。図-1から水セメント比が小さくなるにつれ、降伏値、塑性粘度ともに急激に増加することがわかる。また、降伏値は高性能AE減水剤が、塑性粘度は分離低減剤が大きく影響する傾向がみられる。

4. 考察

4.1 仮想水膜厚さの算出

フレッシュなセメントペーストのように液体の中に粒子が高密度で分散している系の粘性は液体の粘性と粒子密度に関係すると考えられる。粒子密度は粒子を単一粒径と仮定すると1つの粒子に対する平均液体量に反比例する。粒子を単一粒径の球と仮定したとき1つの粒子の周囲に存在する液体が水膜(仮想水膜)を構成する³⁾と考え、その仮想水膜の厚さ d は次のように求められる。

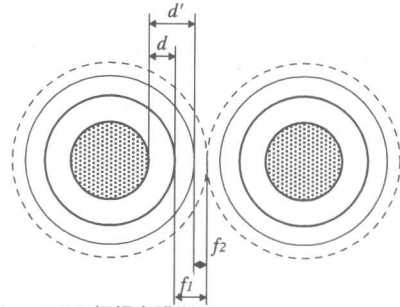
$$\frac{\frac{4}{3}\pi(r+d)^3N - \frac{4}{3}\pi r^3N}{\frac{4}{3}\pi r^3N\rho} = \frac{W}{C} \quad (1)$$

これを d について解くと次のようになる。

$$d = r \left(\sqrt[3]{\frac{W}{C}\rho + 1} - 1 \right) \quad (2)$$

ここで、 r :セメント粒子の半径、 N :セメントペースト1gあたりの粒子数、 ρ :セメントの密度、 W :水の質量、 C :セメントの質量である。

また、球と仮定したセメント粒子の半径 r は、次のように求めた。



d : 仮想水膜厚さ
 d' : 総仮想水膜厚さ
 f_i : 高性能AE減水剤による増加分厚さ
 f_2 : 分離低減剤による減少分厚さ

図-2 仮想水膜モデル

$$\frac{4}{3}\pi r^3 N \rho = 1 \quad (3)$$

$$4\pi r^2 N = 1 \times a \quad (4)$$

式(3),(4)よりセメント粒子の半径 r は次のようになる。

$$r = \frac{3}{a\rho} \quad (5)$$

ここで、 N :セメント粒子1gあたりの粒子数、 ρ :セメントの密度、 a :セメント粒子の比表面積である。

式(2),(5)より、仮想水膜の厚さ d は、次のように求められる。

$$d = \frac{3}{a\rho} \left(\sqrt[3]{\frac{W}{C}\rho + 1} - 1 \right) \quad (6)$$

4.2 仮想水膜厚さに及ぼす各種要因

仮想水膜モデルを図-2に示す。仮想水膜厚さ d はセメント種類、水セメント比によって定まるが、高性能AE減水剤の添加率や分離低減剤の添加率の影響を受けると考えられる。ここで、高性能AE減水剤は、セメント粒子どうしを分散させる作用があることより、仮想水膜厚さを f_i 増加させる作用があると考え。また分離低減剤は、液体の粘性を増大させ、これは、仮想水膜厚さを f_2 減少させる作用があると考えられ、最終的に粒子表面の総仮想水膜厚さは d' となる。

4.3 水膜モデルにおける降伏値の評価

(1) 高性能AE減水剤の影響

セメントペーストの仮想水膜厚さ d と降伏値の関係を高性能AE減水剤の添加率ごとに示し

たものが図-3である。いずれの添加率でも仮想水膜厚さ d が大きくなると降伏値は小さくなり、その関係は直線的ではなく、負の指数を持つ指数関数状に変化している。そこで、この関係を指数関数で近似した。

高性能 AE 減水剤の添加率の影響を調べるために、高性能 AE 減水剤ごとの仮想水膜厚さと降伏値の関係線を互いに重なるように図-4のように平行移動すると、高性能 AE 減水剤の添加率と平行移動すべき D の関係は図-5のようになる。図-5における直線の傾きに高性能 AE 減水剤の添加率を掛けたものが高性能 AE 減水剤による補正量 f_1 となる。

(2) 分離低減剤の影響

セメントペーストの仮想水膜厚さ d と降伏値の関係を分離低減剤の添加率ごとに示したものが図-6である。この関係についても指数関数

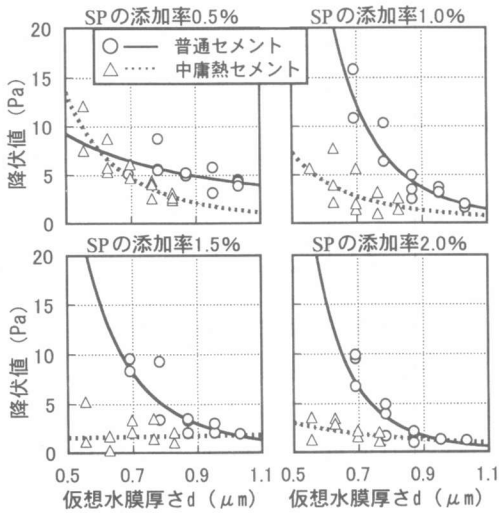


図-3 仮想水膜厚さ d と降伏値の関係

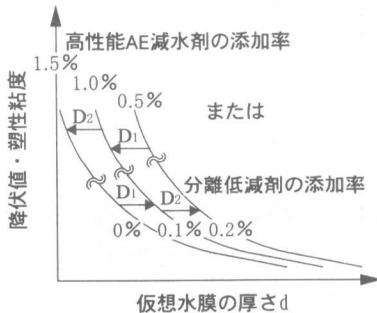


図-4 D 算出の概念図

で近似し、高性能 AE 減水剤の時と同様に傾きに分離低減剤の添加率を掛けたものが補正量 f_2 となる D を算出した。分離低減剤の添加率と D の関係を図-7に示す。

(3) 総仮想水膜厚さ

以上の結果、普通セメントと中庸熱セメントを用いたセメントペーストの降伏値に対する総仮想水膜厚さ d' は式(7)、(8)のようになる。

$$d' = d + 0.178p - 1.065q \quad (7)$$

$$d' = d + 0.124p - 0.483q \quad (8)$$

ここで、 d : 仮想水膜の厚さ (μm)、 p : 高性能 AE 減水剤の添加率 (%), q : 分離低減剤の添加率 (%) である。

セメントペーストの総仮想水膜厚さ d' と降伏

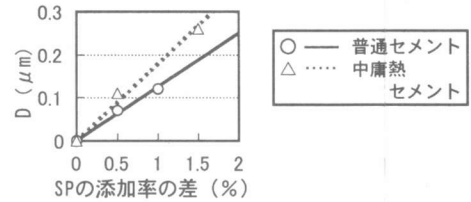


図-5 SPの添加率の差と D の関係

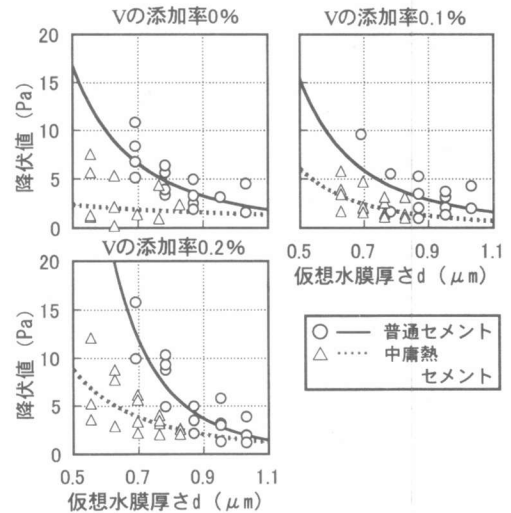


図-6 仮想水膜厚さ d と降伏値の関係

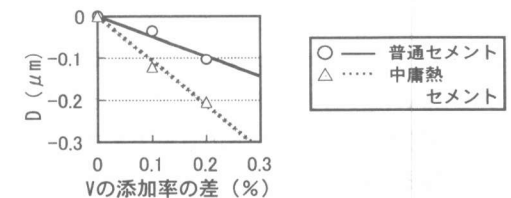


図-7 Vの添加率の差と D の関係

値の関係を図-8に示す。この関係について指数関数で近似した。指数の中央値は約-4 となったので、指数を-4 として以下の検討を進めた。

(4) 回帰分析

降伏値に及ぼす調合要因の影響を定量評価するために説明変数を総仮想水膜厚さ d' とし、次のような回帰分析式を得た。

$$Y = a(d')^{-4} + b \quad (9)$$

ここで、 Y : 降伏値(Pa), d' : 総仮想水膜厚さ(μm)である。

分析結果を表-3に、予測値と実測値の関係を図-9に示すが、概ね良く評価できている。

4.4 水膜モデルにおける塑性粘度の評価

(1) 分離低減剤の影響

セメントペーストの仮想水膜厚さ d と塑性粘度の関係を分離低減剤の添加率ごとに示したものが図-10である。いずれの添加率でも仮想水膜厚さ d が大きくなると塑性粘度は小さくなり、

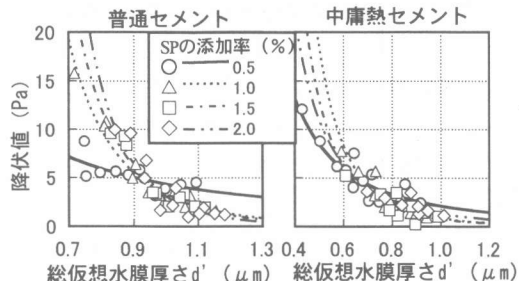


図-8 総仮想水膜厚さ d' と降伏値の関係

表-3 回帰分析結果

セメントの種類	決定係数 R^2	回帰係数 a, b	
		a	b
普通	0.667	3.420	0.131
中庸熱	0.832	1.012	0.768

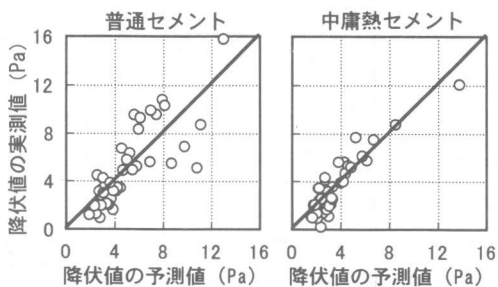


図-9 降伏値の予測値と実測値の関係

その関数は直線的ではなく、負の関数を持つ指数関数的に変化している。そこで、この関係についても指数関数で近似し、傾きに分離低減剤の添加率を掛けたものが補正量 f_2 となる D を算出した。分離低減剤の添加率と D の関係を図-11に示す。

(2) 高性能 AE 減水剤の影響

セメントペーストの仮想水膜厚さ d と塑性粘度の関係を高性能 AE 減水剤の添加率ごとに示したものが図-12である。この関係についても指数関数で近似し、傾きに高性能 AE 減水剤の添加率を掛けたものが補正量 f_1 となる D を算出した。高性能 AE 減水剤の添加率と D の関係を図-13に示す。

(3) 総仮想水膜厚さ

普通セメントと中庸熱セメントを用いたセメントペーストの塑性粘度に対する総仮想水膜厚さ d' は式(10), (11)のようになる。

$$d' = d - 0.720q + 0.053p \quad (10)$$

$$d' = d - 1.060q + 0.073p \quad (11)$$

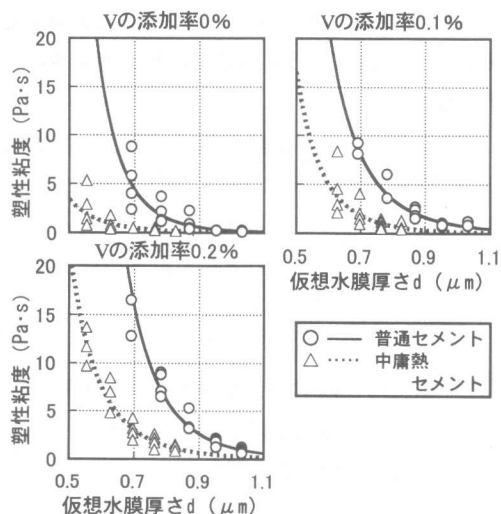


図-10 仮想水膜厚さ d と塑性粘度の関係

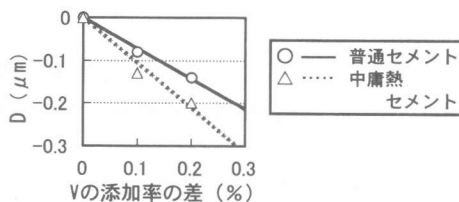


図-11 Vの添加率の差と D の関係

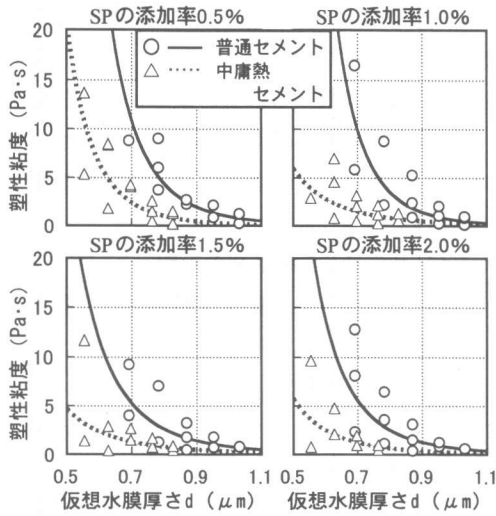


図-1 2 仮想水膜厚さdと塑性粘度の関係

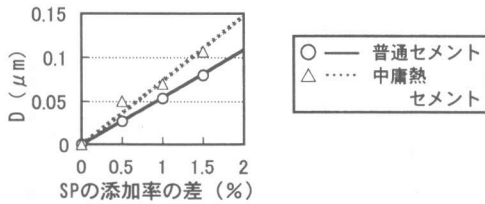


図-1 3 SPの添加率の差とDの関係

ここで、 d : 仮想水膜の厚さ(μm), p : 高性能 AE 減水剤の添加率(%), q : 分離低減剤の添加率(%)である。

セメントペーストの総仮想水膜厚さ d' と塑性粘度の関係を図-14に示す。この関係について指数関数で近似した。指数の中央値は約-7 となったので、指数を-7 として以下の検討を進めた。

4) 回帰分析

塑性粘度に及ぼす調査要因の影響を定量評価するために説明変数を総仮想水膜厚さ d' とし、次のような回帰分析式を得た。

$$Z = a(d')^{-7} + b \quad (12)$$

ここで、 Z : 塑性粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$), d' : 総仮想水膜厚さ(μm)である。

分析結果を表-4に、予測値と実測値の関係を図-15に示すが、概ね良く評価できている。

5. まとめ

本研究の範囲内で明らかになったことは、以

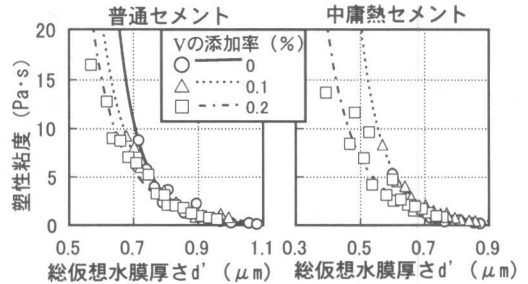


図-1 4 総仮想水膜厚さ d' と塑性粘度の関係

表-4 回帰分析結果

セメントの種類	決定係数 R^2	回帰係数 a, b	
		a	b
普通	0.916	0.544	0.609
中庸熱	0.628	0.018	1.883

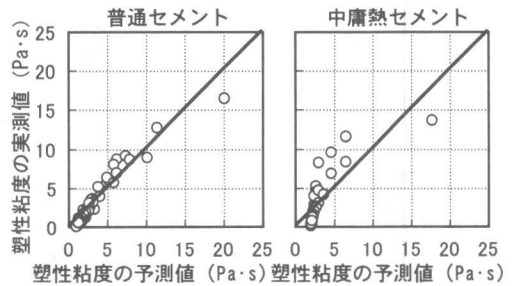


図-1 5 塑性粘度の予測値と実測値の関係

下のようにまとめられる。

- (1) 高性能 AE 減水剤の添加率は、セメントペーストの降伏値に大きく影響を及ぼす。
- (2) 分離低減剤の添加率は、セメントペーストの塑性粘度に大きく影響を及ぼす。
- (3) セメントペーストの降伏値、塑性粘度は、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から考えられる仮想水膜厚さ d' の影響を大きく受け、 d' の指数関数で表現できる。

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査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) 前山篤史, 丸山久一他: モルタルの流動性保持に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.331~336, 1999.6
- 3) 宮野和樹, 榎田佳寛他: 高流動モルタルの調合とレオロジー特性に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.493~498, 1999.6