

# 論文 ろ過理論によるマトリックスモルタルの流出過程に関する基礎的研究

王 迎華\*1・谷川 恭雄\*2・森 博嗣\*3・黒川 善幸\*4

要旨：本研究では、コンクリートが空隙部を通過する際の粗骨材とモルタルの分離抵抗性を定量的に評価することを目的として、ケーキろ過理論に基づいたフレッシュコンクリート中のマトリックスモルタルの流出分離試験を行うとともに、モルタルの先送り現象に関連する材料分離抵抗性の定量化を試みた。本研究では、マトリックスモルタルをニュートン流体で近似しているが、この試験方法を用いることにより、材料分離抵抗性のある程度評価できることが明らかとなった。

キーワード：フレッシュコンクリート,マトリックスモルタル, 分離抵抗性, ケーキろ過理論

## 1. まえがき

振動締固め作業を行わなくても型枠の隅々まで充填できる高流動コンクリートの開発・実用化にとめない、流動性の重要な構成要素である変形抵抗性については、レオロジーに基づいた把握・評価の有効性が認識されつつある。また、すべり抵抗性についても、系統的なデータの蓄積が不足しているものの、その概念は明確に定義されている。しかしながら、この種のコンクリートにとってクリティカルな性能といえる材料分離抵抗性については、定性的な評価にしか行われておらず、特に、流動時の粗骨材とモルタルの分離現象に関しては、目視で確認するといった程度の曖昧な管理しかなされていない。したがって、スランプ値のみによる管理が可能であった領域を超えた場合には、技術者の勘と経験だけが頼りとならざるを得ないのが実状である[1]。

本研究では、モルタルの先送り現象に関連する材料分離抵抗性を定量的に評価する手法について基礎的な検討を行うため、ケーキろ過理論[2]に基づいたフレッシュコンクリートのマトリックスモルタル流出分離試験を試行した。

## 2. ケーキろ過理論

ケーキろ過に関する工学的・体系的な研究は、1920年代のB.F.Ruthに始まり、その後、実験と理論の両面から発展してきた。

### 2.1 ケーキろ過現象

ケーキろ過は、固体と液体を分離するための操作の一種である。ケーキろ過では、図-1に示すように、最初はろ材のみによるろ過が行われ、ろ過の進行とともに、沈殿した固形分粒子からなる粒状層ケーキが形成され、清澄なる液がこのケーキ部を透過して、固液分離が進行する。ケーキの構造は、上面では疎であり、ろ材に近づくにしたがって密になる。

### 2.2 Ruthの定圧ろ過理論

#### (1) Darcy式

Darcyは粒状層の中の流れに関する次のような理論式(1)を導いた。

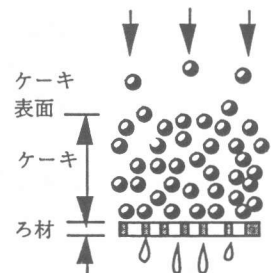


図-1 ケーキろ過現象

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修 (正会員)  
 \*2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)  
 \*3 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)  
 \*4 名古屋大学助手 工学研究科建築学専攻、工修 (正会員)

$$q = \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta p}{\mu L} \quad (1)$$

ここに、 $q$ ：見かけの平均流速 (m/s)、 $Q$ ：流量 (m<sup>3</sup>/s)、 $A$ ：粒状層の断面積 (m<sup>2</sup>)、  
 $L$ ：粒状層の厚さ (m)、 $\Delta p$ ：圧力差 (Pa)、 $\mu$ ：粘度 (Pa・s)、 $k$ ：透過率 (m<sup>2</sup>)

Darcy則は粒状層中の流れであるが、円形断面をもつ毛細管中の流れに適用するPoiseuille則とは、基本的に同じことを表現している。Reynoldsの法則により、一般に流速が小さい流れは層流であることがわかっている。ケーキろ過では、ケーキ中の間隙をろ液が通過する。そこで、ケーキろ過を理論的に取り扱うため、ケーキ内に並列する一群の毛細管を考え、Darcy式(1)を適用すると、式(2)のようになる。

$$\frac{\mu}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{r} \quad (2)$$

$$\Delta p = \Delta p_m + \Delta p_c, \quad r = r_m + r_c \quad (3)$$

ここに、 $A$ ：ケーキの断面積 (m<sup>2</sup>)、 $\Delta p$ ：圧力差 (Pa)、 $r$ ：単位面積あたりのろ過抵抗 (m<sup>-1</sup>)、  
 $\Delta p_m, \Delta p_c$ ：ろ材およびケーキによる圧力損失 (Pa)、  
 $r_m, r_c$ ：単位面積あたりのろ材抵抗およびケーキ抵抗 (m<sup>-1</sup>)

## (2) Ruthの定圧ろ過式

Ruthは、原液が均一に分散している場合、ろ材を流出するろ液の体積は、ケーキとして残る固形分質量に比例すると仮定した。ろ液体積  $V$ (m<sup>3</sup>)と固形分質量  $W$ (kg)との関係を式(4)に示す。

$$W = \frac{s \rho V}{1 - m s}, \quad W_m = \frac{s \rho V_0}{1 - m s} \quad (4)$$

ここに、 $W$ ：ケーキ固形分質量 (kg)、 $W_m$ ：ろ材抵抗に相当するケーキ固形分質量 (kg)、  
 $s$ ：原液中の固形分濃度 (kg/kg)、 $\rho$ ：ろ液の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $m$ ：ケーキ湿乾質量比 (kg/kg)、  
 $V$ ：ろ液量 (m<sup>3</sup>)、 $V_0$ ：ろ材抵抗により損失するろ液量 (m<sup>3</sup>)

単位面積あたりのろ過抵抗  $r$ が、ケーキ固形分質量  $W$ と線形の関係にあるとすると、単位質量あたりのケーキのろ過抵抗の平均値である平均比抵抗  $\alpha$ を用いて、次式のように表される。

$$r = r_m + r_c = \frac{(W_m + W) \alpha}{A} = \frac{s \rho (V + V_0)}{1 - m s} \cdot \frac{\alpha}{A} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha$ ：ケーキの平均比抵抗 (m/kg)

式(2)に式(5)を代入すると、式(6)を得る。

$$\frac{\mu}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p (1 - m s) A}{s \rho (V + V_0) \alpha} \quad (6)$$

式(6)が、Ruthによって導かれた定圧ろ過の速度式である。圧力差  $\Delta p$ を一定として、式(6)を積分すると、時間  $t$ とろ液体積  $V$ の関係を表す式(7)が得られる。これを時間微分した式(8)は、Ruthの求めた実験

式と一致する。

$$(V + V_0)^2 = K(t + t_0), K = \frac{2 \Delta p (1 - m s) A^2}{s \rho \mu \alpha} \quad (7)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K}{2(V + V_0)}, V + V_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{dt}{dV} \quad (8)$$

ここに、 $t$ :ろ過時間 (s)、 $t_0$ :  $V_0$ となる時のろ過時間 (s)、 $K$ : Ruthの定圧ろ過係数 ( $m^6/s$ )

式(8)のろ液量  $V$  とろ過速度の逆数  $dt/dV$  の関係は線形であり、直線の勾配の2倍が定圧ろ過係数  $K$  となる。

### 3. 実験概要

上記の理論に基づいて、粗骨材によって形成されたケーキに対して、マトリックスモルタルの分離流出の平均比抵抗  $\alpha$  を求め、モルタルの性質がこの値に及ぼす影響について考察した。

#### 3.1 実験方法

マトリックスモルタルの性質を定量化するため、1/2サイズのスランブ試験およびLフロー試験の二つのコンシステンシー試験を行った。

マトリックス流出分離試験に使用した装置を図-2に示す。本試験では、容器底面に内径が200mmの10mm網ふるいを設置し、容器内に充填した試料上面に6.74kgのおもりを載せてマトリックス分を底面から押し出した。流出したマトリックスモルタルの質量は5秒ごとに測定した。

#### 3.2 使用材料

試料の作製には、普通ポルトランドセメント、ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤、川砂およびモルタル製の球形モデル粗骨材を用いた。モデル粗骨材の直径は  $d=15 \sim 20$ mm であり、密度はマトリックスと同じ  $\rho=2200 \text{kg/m}^3$  である。

#### 3.3 調合

マトリックスモルタルの調合を表-1に示す。Sシリーズでは、水セメント比を  $W/C=0.32$  とし、砂セメント比を  $S/C=1.0, 1.4, 2.0$  の3段階に変化させた。Wシリーズでは、砂セメント比を  $S/C=1.4$  とし、水セメント比を  $W/C=0.27, 0.32, 0.40$  の3段階に変化させた。Hシリーズでは、水セメント比を  $W/C=0.39$ 、砂セメント比を  $S/C=1.4$  とし、高性能AE減水剤の添加量を  $HAE/C=1.16, 1.48, 2.37\%$  の3段階に変化させた。表-1には、1/2サイ

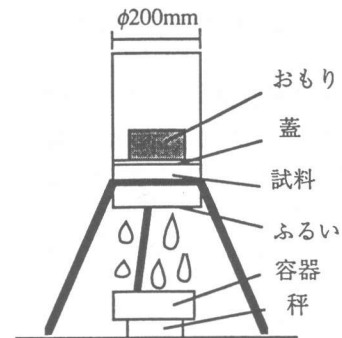


図-2 マトリックス流出分離試験装置

表-1 モルタルの調合およびコンシステンシー試験結果

| Series | No. | W/C  | S/C | HAE/C(%) | mSf  | mL <sub>t5-10</sub> | mL <sub>t10-15</sub> |
|--------|-----|------|-----|----------|------|---------------------|----------------------|
| S      | 1   | 0.32 | 1.0 | 0.75     | 36.5 | 0.20                | 0.23                 |
|        | 2   | 0.32 | 1.4 | 1.19     | 36.8 | 0.29                | 0.40                 |
|        | 3   | 0.32 | 2.0 | 5.31     | 37.0 | 0.37                | 0.61                 |
| W      | 4   | 0.27 | 1.4 | 2.84     | 37.0 | 0.78                | 1.08                 |
|        | 5   | 0.40 | 1.4 | 0.66     | 36.5 | 0.08                | 0.08                 |
| H      | 6   | 0.39 | 1.4 | 1.16     | 32.5 | 0.29                | 0.27                 |
|        | 7   | 0.39 | 1.4 | 1.48     | 40.0 | 0.22                | 0.17                 |
|        | 8   | 0.39 | 1.4 | 2.37     | 42.0 | 0.17                | 0.12                 |

[Notes] W/C: Water-cement ratio, S/C: Sand-cement ratio, HAE: High-range water reducing AE agent, mSf: 1/2-Size slump-flow value (cm), mL<sub>t5-10</sub>, mL<sub>t10-15</sub>: 1/2-Size L- flow time (s).

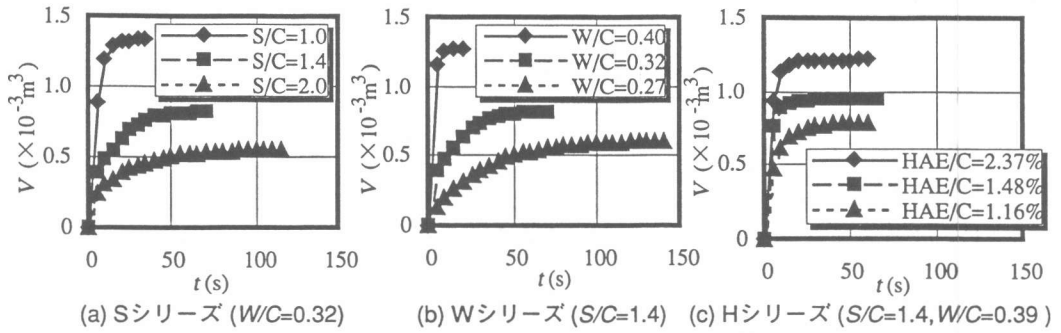


図-3 モルタル流出量 $V$ と流出時間 $t$ の関係

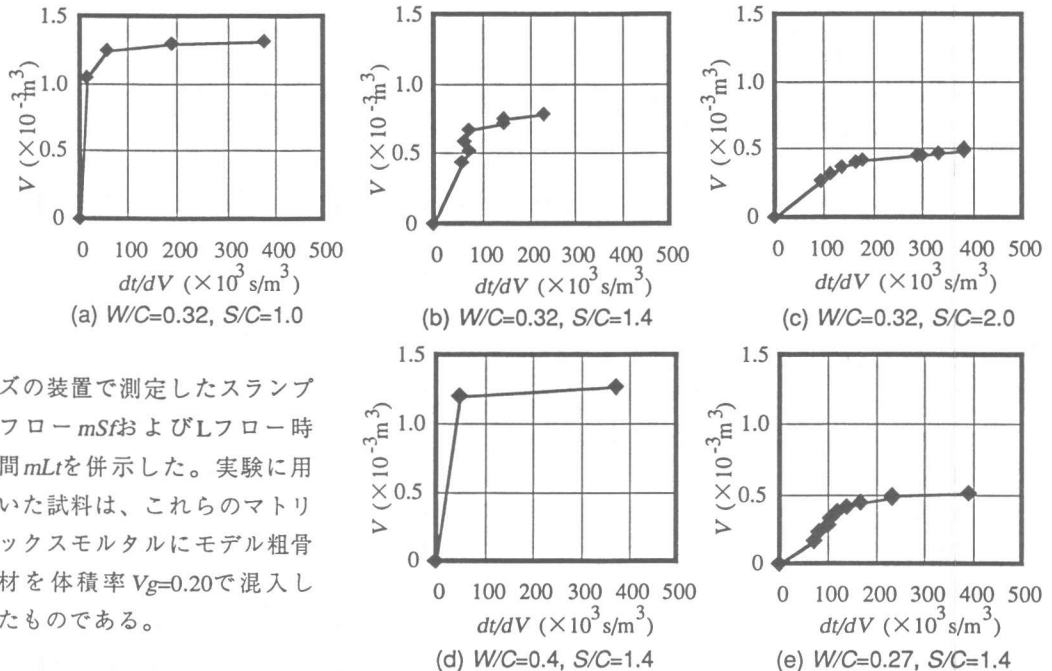


図-4 マトリックスモルタル流出量 $V$ と流出速度の逆数 $dt/dV$ の関係

ズの装置で測定したスランプフロー $mSf$ およびLフロー時間 $mLt$ を併示した。実験に用いた試料は、これらのマトリックスモルタルにモデル粗骨材を体積率 $V_g=0.20$ で混入したものである。

#### 4. 実験結果

##### 4.1 モルタルの性質

表-1に示すように、 $1/2$ スランプフロー値 $mSf$ が同一の場合、Lフロー時間 $mLt$ は、Sシリーズでは、砂セメント比 $S/C$ の増加とともに増加し、Wシリーズでは、水セメント比 $W/C$ の増加とともに減少する。つまり、モルタルの降伏値が同じ場合、塑性粘度は、砂セメント比の増加および水セメント比の減少とともに増加する。Hシリーズでは、高性能AE減水剤の増加によって両方の値はともに減少する。

##### 4.2 マトリックスモルタル流出分離試験

図-3に、S, WおよびHシリーズのマトリックスモルタル流出量 $V$ と流出時間 $t$ の関係を示す。砂セメント比 $S/C$ の増加および水セメント比 $W/C$ の減少にしたがって流出速度が減少し、流出時間が長くなるが、Hシリーズの流出時間はほぼ同じである。

図-4に、マトリックスモルタルの流出量 $V$ と流出速度の逆数 $dt/dV$ の関係を示す。いずれの試料においても最終的な流出量に近づくにしたがって流出速度が急速に低下するため、その部分のデータを除外して、図の曲線の立ち上がり付近の勾配を求めた。

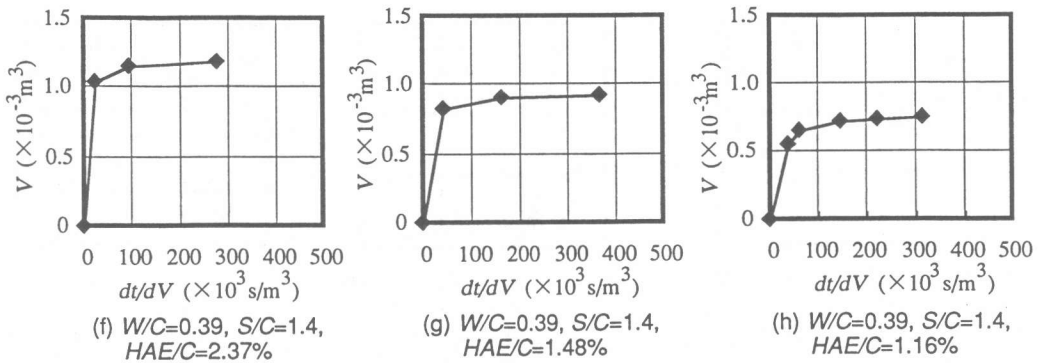


図-4 マトリックスモルタル流出量Vと流出速度の逆数dt/dVの関係

表-2に、実験によって求められた各種の値を示す。表中の降伏値 $\tau_y$ および塑性粘度 $\eta$ は、スランプフロー値 $mSf$ およびLフロー時間 $mLt_{5,10}$ から、以下の推定式(9)によって求めた値である[3, 4]。粗骨材の平均比抵抗 $\alpha$ は、式(7)の解である式(10)を用いて算出した。ただし、ここでは、粘度 $\mu$ として塑性粘度 $\eta$ を用いた。

$$\tau_y = \frac{\rho G Vol}{25\sqrt{3}\pi Sf^2} \times 10^8, Lt_{5,10} = \left[ \left( \frac{8.33 \times 10^{-5}}{\rho} - 2.35 \times 10^{-8} \right) \tau_y^2 + \frac{3.78}{\rho} - 4.98 \times 10^{-5} \right] \eta \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{2 \Delta p (1 - m s) A^2}{s \rho \mu K} \quad (10)$$

ここに、 $\tau_y$ : 降伏値 (Pa)、 $\rho$ : マトリックスモルタルの密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $G$ : 重力加速度 ( $\approx 9.8\text{m/s}^2$ )、 $Vol$ : スランプコーンの容積 ( $\text{m}^3$ )、 $Sf$ : スランプフロー値 (mm)、 $\eta$ : 塑性粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )、 $Lt_{5,10}$ : Lフローが5cm~10cm間の流動時間 (s)

図-5に、マトリックスモルタルの最終流出量Vと塑性粘度 $\eta$ の関係を、また図-6に、定圧ろ過係数Kと塑性粘度 $\eta$ の関係を示す。マトリックスモルタルの流出量Vおよび定圧ろ過係数Kは、いずれのシリーズも、塑性粘度 $\eta$ の増加にともなって減少するが、水セメント比W/Cを変化させたW

表-2 モルタル流出分離試験結果

| No. | A      | $\Delta p$ | m    | s     | $\rho$ | $\tau_y$ | $\eta$ | K                     | $\alpha$           |
|-----|--------|------------|------|-------|--------|----------|--------|-----------------------|--------------------|
| 1   | 0.1256 | 525.9800   | 3.19 | 0.188 | 2260.3 | 84.09    | 116.48 | $1.33 \times 10^{-7}$ | $1.01 \times 10^3$ |
| 2   |        |            | 3.77 | 0.194 | 2299.9 | 84.17    | 172.22 | $1.64 \times 10^{-8}$ | $3.57 \times 10^3$ |
| 3   |        |            | 4.11 | 0.200 | 2310.1 | 83.63    | 220.98 | $4.77 \times 10^{-9}$ | $6.12 \times 10^3$ |
| 4   |        |            | 2.81 | 0.190 | 2225.6 | 82.80    | 45.87  | $5.75 \times 10^{-8}$ | $6.92 \times 10^3$ |
| 5   |        |            | 4.16 | 0.196 | 2335.9 | 84.57    | 471.19 | $5.81 \times 10^{-9}$ | $2.46 \times 10^3$ |
| 6   |        |            | 3.73 | 0.188 | 2222.8 | 104.35   | 92.74  | $2.18 \times 10^{-8}$ | $5.87 \times 10^3$ |
| 7   |        |            | 3.39 | 0.188 | 2219.7 | 68.79    | 56.45  | $3.81 \times 10^{-8}$ | $6.71 \times 10^3$ |
| 8   |        |            | 2.88 | 0.188 | 2211.2 | 62.16    | 40.87  | $8.44 \times 10^{-8}$ | $5.31 \times 10^3$ |

[Notes] A: Area of aggregate layer ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta p$ : Pressure difference (Pa), m: Dry-wet mass ratio of aggregate, s: Mass fraction of aggregate,  $\rho$ : Density of matrix mortar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\tau_y$ : Yield value of matrix mortar (Pa),  $\eta$ : Plastic viscosity of matrix mortar ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ), K: Constant pressure filtration coefficient ( $\text{m}^6/\text{s}$ ),  $\alpha$ : Average specific resistance of aggregate ( $\text{m/kg}$ ).

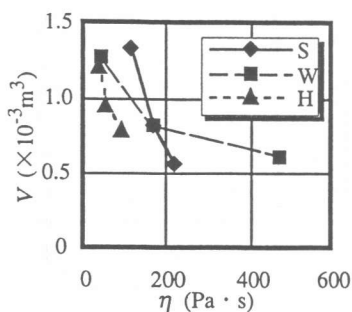


図-5 モルタルの最終流出量 $V$ と塑性粘度 $\eta$ の関係

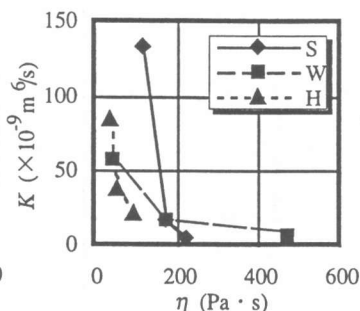


図-6 定圧ろ過係数 $K$ と塑性粘度 $\eta$ の関係

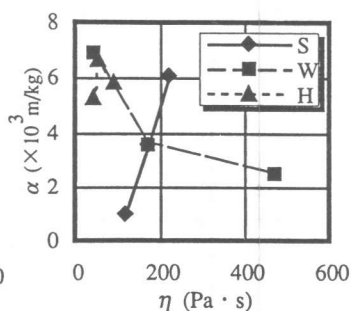


図-7 粗骨材平均比抵抗 $\alpha$ と塑性粘度 $\eta$ の関係

シリーズでは減少傾向が緩やかである。

図-7に、粗骨材の平均比抵抗 $\alpha$ と塑性粘度 $\eta$ の関係を示す。マトリックスモルタルの降伏値が同一の場合、砂セメント比 $S/C$ を変化させた $S$ シリーズの平均比抵抗値 $\alpha$ は、塑性粘度の増加とともに増加する傾向が認められるが、水セメント比 $W/C$ を変化させた $W$ シリーズではこの傾向は認められない。

## 5. まとめ

フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性を定量的に評価するため、ケーキろ過理論に基づくマトリックス流出分離試験を提案し、若干の実験を行った。本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) マトリックスモルタルの降伏値が同じ場合でも、塑性粘度によって分離性状は大きく異なる。
- 2) 水セメント比の変化と砂セメント比の変化は分離性状に異なる影響を与えるため、分離抵抗性を粘性だけで評価することはできない。

今後、ビンガムモデルを用いた理論を構築し、フレッシュコンクリートの分離抵抗性の合理的な評価方法について検討を行う予定である。

## 【謝辞】

本研究に際して、波木智司君（名古屋大学大学院生）と水柿洋之君（名古屋大学学生）の助力を得た。また、本研究費の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)（研究代表者：友澤史紀・東京大学教授）および同・基盤研究(A)、同・奨励研究(A)によった。付記して謝意を表す。

## 【引用文献】

- [1] 黒川善幸・谷川恭雄・森博嗣：フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性に関する一考察，フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.43-48，1996.4.
- [2] 杉本泰治：ろ過—メカニズムとろ材・ろ過助剤，地人書館，1992.
- [3] Tanigawa, Y., Mori, H., Kurokawa, Y. and Komura, R.: Rheological Study on Slumping Behavior of Fresh Concrete, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.14, pp.1-8, 1992.12.
- [4] 黒川善幸・谷川恭雄・森博嗣・西之園一樹：フレッシュコンクリートのビンガム定数に与える粗骨材容積比の影響に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.453-458, 1996.7.