

# 論文 高温環境下におけるフレッシュコンクリートのスランプロス解析

上原 義己\*1・山田 義智\*2・崎原 康平\*3・赤嶺 糸織\*4

**要旨:** 本研究では、高温環境下におけるフレッシュコンクリートのスランプロスを有限要素法で解析的に再現することを試みた。ここでは、回転粘度計を用いて、様々な温度環境および経過時間毎のセメントペーストの見掛けの粘度を測定し、この値よりコンクリートのレオロジー定数（降伏値と塑性粘度）を推定した。そして、得られたレオロジー定数を用いて有限要素法により各温度環境におけるスランプロス解析を行い、経過時間に伴うスランプロスの再現性を確認した。

**キーワード:** ペースト粘度, 温度, スランプロス, 有限要素法

## 1. はじめに

近年、我国における暑中環境は過酷化かつ長期化しており、暑中コンクリートの種々の問題が従来に比べて顕在化する傾向にある<sup>1)</sup>とされている。暑中に行われるコンクリートの打設工事においては、その高温環境がコンクリートの施工性に影響を与えると考えられ、高温環境下におけるフレッシュコンクリートの流動性変化を把握することは、合理的なコンクリート工事を行うために必要である。

暑中の高温環境下においては、フレッシュコンクリートのスランプロスが大きいことが知られている<sup>2)</sup>。高温環境下においてスランプロスが大きくなる要因としては、水合の促進や水分の蒸発、凝集の促進等が考えられる。これらはすべてセメントペースト（以後、ペーストと略す）で生じており、骨材の物性が暑中の高温環境程度ではほとんど変化しないことを考えると、上記の要因によるペーストの流動性変化が高温環境下におけるフレッシュコンクリートのスランプロスに影響を与えていると考えられる。しかし、高温環境下におけるペーストの見掛けの粘度の経時変化に関する研究は数少なく、スランプロスを解析的な視点で解明しようとした研究も筆者の知る限り見当たらない。

そこで、本研究では、様々な温度環境下において経過時間に伴って変化するペーストの見掛けの粘度から、フレッシュコンクリートのレオロジー定数（降伏値および塑性粘度）を文献<sup>3)</sup>による手法を用いて推定し、得られたレオロジー定数を用いて有限要素法により各温度環境下におけるフレッシュコンクリートの経過時間に伴うスランプロスの再現を解析的に試みたので報告する。

## 2. ペーストの粘度試験

### 2.1 使用材料とペースト調合

ペーストの粘度試験に使用したセメントはR社製の普通ポルトランドセメントを用いた。表-1にセメント試験成績表を示す。

ペーストの練り混ぜには上水道水を用い、500mlのビーカー内で金属製の匙を用いて、斑が生じないように手練にて2分間丁寧に混ぜて試料を作製した。全試料においてセメント量は200gとし、水量も90gで統一してW/Cは45%とした。また、今回の研究においては混和剤（材）を用いた調合を対象としなかった。これは、混和剤（材）による流動性への影響を除くためである。

表-1 セメント試験成績表

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.16	酸化マグネシウム (%)	1.27
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	3300	三酸化硫黄 (%)	2.09
凝結水量 (%)	29.9	強熱減量 (%)	2.36
凝結始発 (h-min)	2-00	全アルカリ (%)	0.52
凝結終結 (h-min)	3-11	塩化物イオン (%)	0.01

### 2.2 温度環境および経過時間

本研究では、(a)ペーストの練り上がり目標温度を23℃として静置時の環境温度の目標値を23℃とした試料（以後、23-23試料と称す）、(b)練り上がり目標温度を23℃として静置時の環境温度の目標値を35℃とした試料（以後、23-35試料と称す）、(c)練り上がり目標温度を35℃として静置時の環境温度の目標値を35℃とした試料（以後、35-35試料と称す）の3パターン温度環境を設定した。

ここで、23-23試料は終始常温にある場合を想定し、23-35試料は、練り上がり直後は常温であるが、高温環境下で次第にペースト温度が上昇する場合を想定しており、35-35試料はペーストが練り上がり直後から終始高温下にある場合を想定した。

これら試料の温度管理はホットバスを用いた湯煎で

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (学生会員)

\*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 那覇市役所 元琉球大学大学院 (正会員)

行った。また、湯煎に際しては、ペースト試料を入れたビーカー（500ml のビーカー（φ90×120mm））をラップで封をして水分の流入および蒸発を防いだ。なお、実際の粘度試験に用いたペーストの練り上がり温度は、練り上がり目標温度 23℃の試料は 22.5±1.2℃、練り上がり目標温度 35℃の試料は 36.2±1.0℃の範囲であった。また、30 分静置後の各温度環境下におけるペースト温度は 23-23 試料では 23.2±0.3℃、23-35 試料では 33.2±0.4℃、35-35 試料では 33.8±0.3℃であった。同様に 90 分静置後の各試料の温度は 23-23 試料では 23.1±0.3℃、23-35 試料では 34.0±0.2℃、35-35 試料では 33.9±0.2℃であった。

各温度環境下において静置されたペースト試料の練り上がり 0 分、30 分および 90 分後に粘度試験を行った。

### 2.3 ペースト粘度の測定試験

粘度測定試験には、外円筒回転式の共軸二重円筒形回転粘度計を用いた。外円筒のサイズは φ70×120mm であり、内円筒のサイズは φ65×35mm である。測定に際しては、粘度校正用標準液を用いて内円筒底面の影響を見積もり、ペースト粘度測定の際にこの影響分を補正した。

ここでは、連続的にせん断ひずみ速度を作用させ、経時的にせん断応力がほとんど変化しないほぼ定常状態とみなせるぎり時間 300 秒後のせん断応力とせん断ひずみ速度の関係から見掛けの粘度を求めた<sup>4)</sup>。

なお、外円筒の回転速度は 5、10、20、60、100rpm の 5 つの回転速度である。表-2 に回転速度とせん断ひずみ速度の対応表を示す。

本試験では、表-2 に示すそれぞれのせん断ひずみ速度に対して試料を 3 組準備し、300 秒間一定の回転速度を付加した後にせん断応力の測定を行った。そして 3 試料のせん断応力の平均値とせん断ひずみ速度の関係よりペーストの見掛けの粘度を求めた。

表-2 回転速度とせん断ひずみ速度の関係

回転速度 (rpm)	5	10	20	60	100
せん断ひずみ速度 (1/s)	7.1	14.2	28.3	84.9	141.6

※内円筒 φ65mm、外円筒 φ70mm の場合

### 2.4 各温度環境における経過時間毎のペースト粘度性状

各温度環境における経過時間毎のペーストの粘度性状を図-1 に示す。図中の横軸はせん断ひずみ速度であり、縦軸は見掛けの粘度である。図中の菱形記号は練り上がり直後（経過時間 0 分）の結果であり、三角記号は経過 30 分後、四角記号は経過 90 分後の見掛けの粘度の測定結果である。

低せん断ひずみ速度域において見掛けの粘度は高いが、せん断ひずみ速度の上昇に伴い低下していることが確認される。この見掛けの粘度の低下現象は凝集体の破壊で

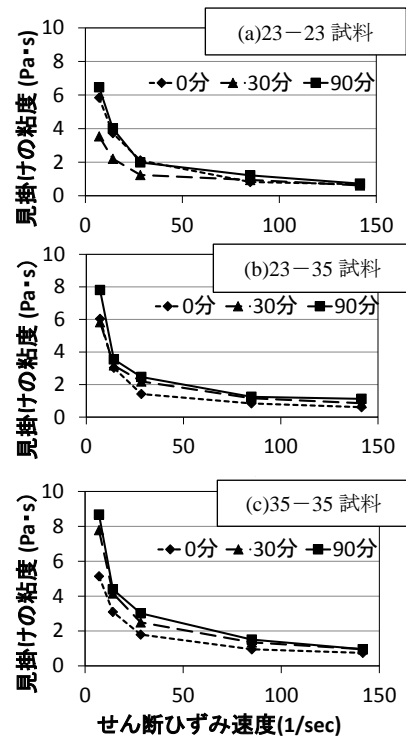


図-1 各温度環境および経過時間別のペースト粘度性状

説明される<sup>5)</sup>。なお、見掛けの粘度の低下はせん断ひずみ速度が高くなると次第に一定値に収斂する傾向があり、この値は温度条件や経過時間に関わらずほぼ同じである。この一定値におけるペーストにおいては、結合力の弱い凝集体 (floc)<sup>6)</sup> がせん断ひずみ速度で破壊され、結合力の強い凝集体 (agglomerate)<sup>6)</sup> が残っている状態であると筆者らは考えている。

図-1 より、ほとんどの場合で経過時間の増加に伴い粘度が増大する傾向が認められたが、23-23 試料の経過時間 0 分と 30 分においては、経過時間の長い 30 分の方が粘度は低下する結果となった。この条件の試料については、再度粘度試験を行ったが同様な結果であった。ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (PC) を用いたセメントペーストでは、20℃の温度で時間経過によるフローの増加が確認されており、この現象は PC の吸着量が増加することが原因とされている<sup>7)</sup>。しかし、本研究では PC は添加しておらず、この理由は現時点で不明である。

ペーストの温度環境が見掛けの粘度に及ぼす影響について図-2 に示す。ここでは、見掛けの粘度差が大きい低・中せん断ひずみ速度域 (7.1~28.3 (1/s)) における見掛けの粘度の経過時間変化を示す。練り上がり直後（経過時間 0 分）では温度環境の違いによる見掛けの粘度の差は小さいが、経過時間 30 分以降に温度環境による見掛けの粘度に差が生じている。ここでは、35-35 試料の見掛けの粘度が特に大きくなる傾向がある。

文献 8) によると、セメント粒子を分散させて凝集の影響が無い場合、練り上がり 90 分後の水和生成物の増加

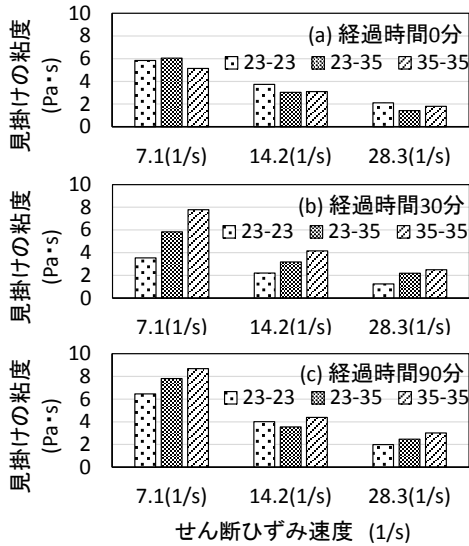


図-2 低・中せん断ひずみ速度域のペースト粘度

による粘度の上昇値は  $0.2\text{Pa}\cdot\text{s}$  程度と小さい。したがって、今回の粘度増加の大半は、セメント粒子および水和生成物も含む凝集の影響と考えられる。特に、経過時間 0 分で水和生成物の少ない場合において、温度環境別の粘度に大きな差が無く、エトリンタイトの生成が活発となる過程をへた、経過 30 分の時点でその差が大きくなることから、水和生成物（主にエトリンタイト）も関わった凝集体の影響が示唆される。

### 3. レオロジー定数推定方法と有限要素法の概要

#### 3.1 モルタルとコンクリートの粘度式

モルタル粘度式とコンクリート粘度式を式(1)、式(2)に各々示す<sup>3)</sup>。これらの粘度式は Roscoe 式に基づいており、モルタルの粘度式では細骨材を懸濁質とし、ペーストを懸濁媒とする。同様にコンクリートの粘度式では粗骨材を懸濁質としモルタルを懸濁媒とする。

$$\eta_m = \eta_p \left(1 - \frac{a\phi_s}{\phi_m^s}\right)^{-\beta_s} \quad (1)$$

$$\eta_c = \eta_m \left(1 - \frac{b\phi_g}{\phi_m^g}\right)^{-\beta_g} \quad (2)$$

上式において、 $\eta_p$  はペーストの見掛けの粘度である。また、 $\eta_m$  および  $\eta_c$  はモルタルおよびコンクリートの見掛けの粘度、 $\phi_s$  と  $\phi_g$  はそれぞれ細骨材および粗骨材の体積分率、 $\phi_m^s$  と  $\phi_m^g$  はそれぞれ細骨材および粗骨材の実積率である。 $\beta_s$  と  $\beta_g$  はそれぞれ細骨材と粗骨材の形状係数と称し、骨材の形状がいびつであったり、比表面積が大きくなるほどその値が大きくなり、結果として見掛けの粘度を高くする効果がある<sup>3)</sup>。また、係数  $a$ 、 $b$  は、固体化係数と称し、ペーストやモルタルが締め固められたり、骨材表面に固着することによって流動しない固体(懸濁質)になることを表す係数である。なお、固体化係数に関し

ては十分な検討がなされておらず、今回は係数  $a$ 、 $b$  とともにその値を 1.0 とした。

#### 3.2 各相に作用するせん断ひずみ速度

懸濁質（粗骨材および細骨材）は変形せず、溶媒（モルタルおよびペースト）で見掛けのせん断ひずみ速度が生じるものとした。ここでは、コンクリートに作用するせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_c$  を基準に、モルタルのせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_m$  とペーストのせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma}_p$  をそれぞれ次式で求める<sup>3)</sup>。

$$\dot{\gamma}_m = \frac{1}{(1-b\phi_g)} \dot{\gamma}_c \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_p = \frac{1}{(1-a\phi_s)} \dot{\gamma}_m \quad (4)$$

#### 3.3 レオロジー定数の推定方法

式(1)に粘度試験で求めたペーストの見掛けの粘度を代入し、得られたモルタルの見掛けの粘度を式(2)に代入することでコンクリートの見掛けの粘度を求める。また、粘度試験でペーストに与えたせん断ひずみ速度と式(4)よりモルタルに作用するせん断ひずみ速度を求め、さらに式(3)よりコンクリートに作用するせん断ひずみ速度を求めた。以上により、コンクリートのせん断応力（＝見掛けの粘度×せん断ひずみ速度）とせん断ひずみ速度の関係性を求め、これらの値をビンガムモデルで近似することで、コンクリートのレオロジー定数（降伏値と塑性粘度）を各々決定した。この概念図を図-3 に示す。

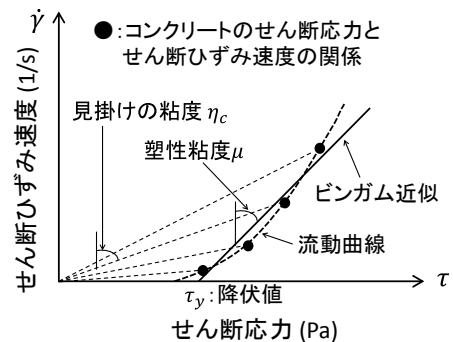


図-3 ビンガム近似によるレオロジー定数推定方法

#### 3.4 有限要素法の概要<sup>3)</sup>

##### (1)流動構成式について

本解析では、降伏前の流動基準以下のひずみ速度では非常に高い粘性とする bi-viscosity モデルを適用した。このモデルによる降伏前の構成式は式(5)の下側のように記される。

$$\left. \begin{aligned} \text{降伏後: } \tau_{ij} &= 2 \left( \mu + \frac{\tau_y}{\sqrt{2\Pi}} \right) e_{ij} \quad , \quad \Pi \geq \Pi_c \\ \text{降伏前: } \tau_{ij} &= 2 \left( \mu + \frac{\tau_y}{\sqrt{2\Pi_c}} \right) e_{ij} \quad , \quad \Pi < \Pi_c \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\mu$  は塑性粘度、 $\tau_y$  は降伏値、 $e_{ij}$  はひずみ速度、 $\tau_{ij}$  は

偏差応力成分を表し、 $\Pi = e_{ij} \cdot e_{ij}$ である。 $\Pi_c$ は流動基準で、流動限界せん断ひずみ速度 $\pi_c$ より次式で定まる。ここで、流動限界せん断ひずみ速度 $\pi_c$ の値は 0.5 (1/sec)とし、全要素がこの値以下になると流動停止と判断した。

$$\Pi_c = \pi_c^2 \quad (6)$$

### (2)運動方程式と有限要素法による離散化

本研究では、スランプ試験を解析対象としている。そこで、軸対称問題を想定すると、運動方程式は式(7)のように示される。また、本研究ではフレッシュコンクリートが非圧縮性を有すると仮定するので、式(8)の連続の式を満足する必要がある。

$$\left. \begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}}{r} \right) + F_z \\ \frac{Dv}{Dt} &= \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \right) + F_r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\rho$ は流体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $u$ は円柱軸方向 $z$ の流速 ( $\text{m/s}$ )、 $v$ は半径方向 $r$ の流速 ( $\text{m/s}$ )である。また、 $\tau_{ij}$ は応力成分、 $F$ は体積力成分である。

本解析では、式(7)の実質微分項の非線形加速度項を省略し、線形部分の加速度項のみを考慮した。式(7)の右辺を有限要素法により離散化し、左辺の加速度項(線形部分)を線形加速度法で離散化すると次式となる。

$$\left[ \frac{2}{\Delta t} [C] + [K] \right] \{u\}^{t+\Delta t} = [C] \left( \frac{2}{\Delta t} \{u\}^t + \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \right\}^t \right) + \{G\} \quad (9)$$

ここで、 $[C]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は粘塑性マトリックスであり、 $\{u\}$ 、 $t$ 、 $\Delta t$ はそれぞれ節点速度ベクトル、時間、時間刻みである。

本解析では、ビンガムモデルに起因する非線形剛性方程式の解法として直接反復法を用いた。

### (3)マーカー粒子移動方法および要素分割と境界条件

本解析では、流体の存在と移動を物理量を持たないマーカー粒子で表した。なお、スランプ形状を表す為に用いたマーカー粒子数は 14949 個とした。

マーカー粒子移動法は、まず要素内に存在する各マーカー粒子の位置を考慮して式(10)で各マーカー粒子の速度を求める。そして、次にこの速度に計算時の時間刻みを乗じて移動距離を計算してマーカー粒子を移動させる。このマーカー粒子を追跡することで流動を表す。

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \sum_{i=1}^4 N_i u_{ri} \\ u_z &= \sum_{i=1}^4 N_i u_{zi} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $u_r$ および $u_z$ は要素内における任意マーカー粒子の半径方向と円柱軸方向の粒子速度であり、 $N_i$ は形状関数である。また、下添え字 $i$ はマーカーの存在する要素の 4 つの節点を表す。 $u_{ri}$ 、 $u_{zi}$ はそれぞれの節点における半径方向と円柱軸方向の節点速度である。

本解析においては、全要素数を 420 要素とし、全節点数を 462 節点とした。境界条件としては、円柱軸上を自由すべり条件とし、スランプの底面については固着条件として解析を行った。

## 4. 有限要素法によるスランプロス現象の再現と検討

### 4.1 コンクリート調査

2章で示したように、今回の試験で用いたペーストは W/C45% (混和剤なし) であるので、スランプロスを検証するコンクリート調査も同様に W/C45% (混和剤なし) とした。また、練り上がり直後のスランプが 15cm となるように調査を計画した。表-3 に調査表を示す。なお、レオロジー定数の推定には、使用材料の体積が必要となるので、調査は絶対容量で示した。また、細骨材の実績率は 68.6%、粗粒率は 2.60 とし、粗骨材の実績率は 60.4%、粗粒率は 6.49 を想定した。

表-3 コンクリートの調査例

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 ( $\text{kg/m}^3$ )	絶対容量 ( $\text{kg/m}^3$ )		
						セメント	細骨材	粗骨材
15	4.5	45	20	38.6	126	251	399	

※混和剤添加なし

### 4.2 レオロジー定数の推定結果

前述の 3.1 節~3.3 節の手法により、表-3 に示す調査のコンクリートのレオロジー定数を求めた。

文献 3) において、実測スランプを再現するように求めた降伏値とスランプの関係を図-4 に示す。同図のスランプ値は文献 3) で示された実験値であり、また降伏値は文献 3) において本論文の 3.1 節~3.3 節で述べた方法と同じ方法で計算した値である。今回スランプは 15cm を目標とするが、練り上がり直後であっても温度条件でペーストの見掛けの粘度が異なり、その影響がコンクリートのスランプの差として表れるため、JIS A 5308 で規定されている許容差を参考にスランプ誤差を  $\pm 2.5\text{cm}$  見積もった。そのため、経過時間 0 分の各温度におけるコンクリートの降伏値が 1000~1600Pa・s 程度となるように、粗骨材の形状係数 $\beta_g$ を設定した。この値は定数であり、今回の場合は $\beta_g = 2.0$ とした。また、モルタルの見掛けの粘度を求める際に必要になる係数 $\beta_s$  (式(1)参照)は細骨材の粗粒率より求めた<sup>3)</sup>。なお、今回の係数 $\beta_s$ の値は 3.0 であった。

図-5 に各温度環境下におけるコンクリートの経過時間に伴うせん断応力とせん断ひずみ速度の関係およびビ

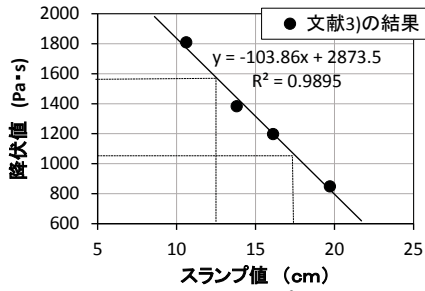


図-4 文献3)のスランプと降伏値の関係

ンガム近似結果を示す。同図は3.1節～3.3節に示した方法で作図しており、式(1)の $\eta_p$ に2章の実験で求めたペーストの粘度が適用されている。なお、図-5は前出の図-3の縦軸と横軸を入れ替えている。これは、直線近似をビンガム近似に対応させるためである。ここで、図中の近似直線の定数項が降伏値となり、傾きが塑性粘度に対応する。得られたレオロジー定数を表-4にまとめる。

図-6には、得られた降伏値と塑性粘度の値を温度環境と経過時間毎に比較する。同図より、降伏値は23-23試料の経過30分後を除いて時間進行とともに増大する傾向が見られた。23-23試料の経過30分後に降伏値が低下する理由は、図-1(a)で示した様にペーストの見掛けの粘度が低下していることが影響している。

塑性粘度は、23-35試料を除く2試料で経過30分後よりも90分後にわずかに低下している。これは、図-5に示すせん断応力とせん断ひずみ速度の関係において非ビンガム性状（軟化性状）が強い結果をビンガム近似した

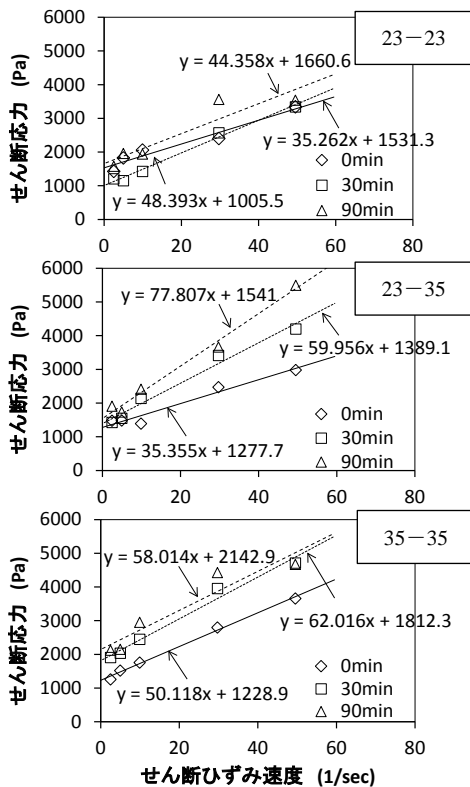


図-5 ビンガム近似によるレオロジー定数推定

表-4 推定レオロジー定数

経過時間	23-23		23-35		35-35	
	$\tau_y$ (Pa)	$\mu$ (Pa·s)	$\tau_y$ (Pa)	$\mu$ (Pa·s)	$\tau_y$ (Pa)	$\mu$ (Pa·s)
0分	1531.3	35.3	1277.7	35.4	1228.9	50.1
30分	1005.5	48.4	1389.1	60.0	1812.3	62.0
90分	1660.6	44.4	1541.0	77.8	2142.9	58.0

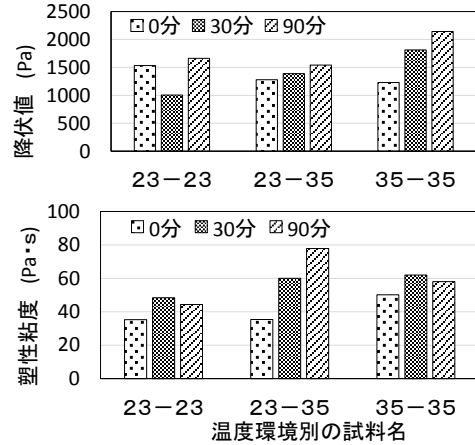


図-6 降伏値と塑性粘度の変化

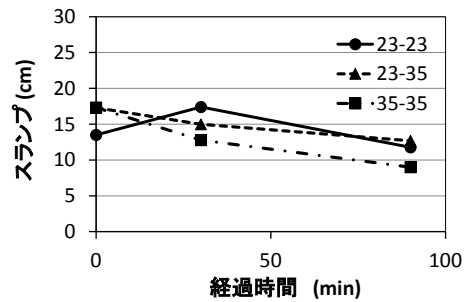


図-7 有限要素法解析によるスランプの経過時間変化

ことが原因である。この非ビンガム性状を有するせん断応力とせん断ひずみ速度のビンガム近似は、降伏値を大きく見積もる可能性もあると考えられる。非ビンガム性状が大きい23-23試料の経過時間0分の結果が、低せん断速度でペーストの見掛けの粘度がほぼ同じ（図-2参照）であった23-35試料の経過時間0分よりも降伏値が大きくなる理由はこれが原因と考えられ、より精度の高い解析を行う為の検討課題である。

#### 4.3 有限要素法によるスランプロス解析結果と考察

目標スランプ  $15 \pm 2.5$ cm のコンクリートのスランプの経過時間変化を求めるために、表-4に示す各温度環境および経過時間毎の降伏値と塑性粘度を用いて有限要素法解析を行った。図-7に有限要素法解析で得られた結果を示す。同図の横軸は経過時間であり、縦軸は経過時間に対応したスランプである。

図-7より、経過時間0分では設定通りにスランプ  $15 \pm 2.5$ cm の範囲に解析結果が収まっている。なお、23-23試料は経過0分のスランプが他より小さいが、これは前述したように非ビンガム性状の結果をビンガム近似したことにより降伏値が高くなったためと考えられる。

また、同図より 23-23 試料の経過時間 30 分後を除いては、経過時間とともにスランプロスの傾向が解析で再現されている。なお、23-23 試料の経過時間 30 分後にスランプが大きくなっている原因は、試験で得られたペーストの見掛けの粘度が低くなるためであり、現時点でそれが生じる理由は不明である。

経過 90 分後の 35-35 試料のスランプロスは、8.3cm と大きい。また、温度環境が 23-23 試料および 23-35 試料においては、経過 90 分後のスランプロスがそれぞれ 1.7cm と 4.6cm であり、温度環境の高温化に伴いスランプロスが大きくなっている。文献 2) によれば、コンクリート温度が 30℃を超える場合、経過 60 分でスランプロスが 5cm 以上となることがあるとされており、今回の有限要素法による解析結果と対応している。しかし、実際の生コンクリート運搬の際には、常時コンクリートが攪拌されており、今回の実験のようにペーストが静置されていないことや、空気量の低下の影響が今回の解析では考慮されていないこともあり、更なる検討が必要である。

なお、本手法を用いて、様々な種類のセメントを使用した場合やフライアッシュ等の混和材を添加した場合、さらには高性能 AE 減水剤等を使用した時の経過時間に伴うスランプロスを解析的に再現できる可能性もあり、これらの問題への適用についても検討を考えている。

## 5. まとめ

本研究では、異なる温度環境下のペーストの見掛けの粘度を測定し、その値を用いてコンクリートのレオロジー一定数を推定し、有限要素法解析を用いてスランプロスの再現を試みた。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) ペーストの見掛けの粘度は、経過時間の増加に伴い増大する傾向が認められたが、23-23 試料の経過時間 0 分と 30 分においては、経過時間の長い 30 分後の方が粘度は低下する結果となった。この理由は現時点で不明である。
- (2) ペーストの温度環境が粘度に及ぼす影響については、低・中せん断ひずみ速度域 (7.1~28.3 (1/s)) において顕著に現れた。ここでは、温度が高く、かつ、経過時間が長くなるほど見掛けの粘度が大きくなった。この原因としては水和生成物が関わった凝集体の影響が示唆される。
- (3) 実験で求めた W/C45% のペーストの見掛けの粘度を用いてコンクリートのレオロジー一定数を推定した。降伏値は温度環境が高くなると 23-23 試料の経過 30 分後を除いて経過時間とともに増大する傾向が認められた。得られたせん断応力とせん断ひずみ速度の関係には非ビンガム性が認められ、ビンガム

近似を行う際に、塑性粘度や降伏値に影響を与える。

- (4) 有限要素法の解析結果は、経過時間 0 分ではスランプは設定範囲の  $15 \pm 2.5$ cm に収まっている。また、23-23 試料の経過時間 30 分後を除いては、経過時間とともにスランプロスの傾向が有限要素法解析で再現されている。なお、23-23 試料の経過時間 30 分後にスランプが大きくなる原因は、ペーストの見掛けの粘度が低く測定されたためである。
- (5) スランプロスを有限要素法で解析的に求めた結果、コンクリート温度に応じてスランプロスが大きくなり、実際の傾向に対応した結果が得られた。しかし、今回のペースト粘度試験においては実際の生コンクリートの運搬状況を再現したものではなく、空気量の低下の影響も考慮していないため、さらなる検討が必要である。

## 謝辞

元琉球大学大学院生の伊波咲子氏および山田研究室卒論生諸氏には実験にご協力頂いた。本研究は、JCI 九州支部研究専門委員会「温暖化環境下におけるコンクリート施工品質の確保に関する調査研究(代表: 小山智幸九州大学准教授)」の一環として行った。各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 小山智幸ほか：暑中コンクリートの現状と対策，コンクリート工学，Vol.50, No.3, pp. 239-244，2012.3
- 2) 日本建築学会近畿支部大阪広域生コンクリート協同組合：技術報告会 2012—大阪広域生コンクリート協同組合での技術的課題への取組み—，2012.7
- 3) 山田義智ほか：フレッシュコンクリートのレオロジー一定数推定に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, pp661-668, 2012
- 4) 東條良太ほか：セメントペーストの流動構成式に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.32, No.1, pp.1881-1186, 2010.6
- 5) 赤嶺糸織ほか：凝集や水和によるセメントペーストの粘度変化に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, pp653-660, 2012
- 6) 社団法人セメント協会：流動性研究委員会報告書，pp.30-34,2003.9
- 7) 柳澤太一ほか：練混ぜ温度が高流動コンクリートの流動性に及ぼす影響の作用機構，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp547-552, 1999.6
- 8) 赤嶺糸織ほか：高温環境下におけるセメントペースト粘度の経時変化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.35, No.1, pp.1189-1194, 2013