

# 論文 フレッシュコンクリートの流動性の経時変化に関する解析的研究

曹 国棟\*1・李 柱国\*2・郭坤\*3

**要旨:** フレッシュコンクリートの流動性の経時変化特性は、コンクリートの施工に大きな影響を与える。本研究では、流動性の経時変化の予測手法の開発を目指して、まず、理論的考察を行い、フレッシュコンクリート中の微小な粒子の物理的凝集とセメントの水和反応による粒子の接触数量を明らかにした。また、粒子凝集とセメントの水和反応の影響を反映する DEM モデルを構築し、経時変化の予測手法を提案した。さらに、フレッシュモルタルのロータ試験を行い、試料の流下速度の試験結果と解析結果を比較することによって、解析手法の妥当性を検証し、提案した予測手法は混和材を使用する場合にも適用できることを確認した。

**キーワード:** フレッシュコンクリート, 個別要素法(DEM), 流動性, 経時変化, ロータ試験

## 1. はじめに

近年、コンクリートの使用材料の多様化、構造物の配筋量の増加および施工方法の変化に伴って、施工品質を確保するためにフレッシュコンクリートのワーカビリティは益々厳しく要求されている。セメント粒子の凝集と水和反応および練混ぜ水の蒸発などによって、フレッシュコンクリートの流動性は時間と共に低下する。いわゆるスランプロス現象である。スランプロスが大きいと、コンクリートの打設は困難になり、施工品質不良の原因ともなる。

また、フレッシュコンクリートの流動性は型枠工事に大きな影響を与える。流動性が高いほど、コンクリートの側圧が増加するため、型枠と支保材の強度要求は高くなる。しかし、前述のように、フレッシュコンクリートは静置されると、セメント粒子の凝集と水和反応などによって流動性は低下する。このチクソトロピー性や経時変化特性を考慮した合理的な型枠工事を行うべきであると思われる。しかし、現在コンクリートのフレッシュ性状の経時変化を予測する手法はまだない。

この背景を踏まえて、筆者らは、セメントなどの微小な粒子の物理的凝集を考慮して、個別要素法(DEM)を改良し、フレッシュコンクリートの流動性の経時変化の予測を試みた<sup>1)</sup>。しかし、フレッシュコンクリートの性状の経時変化は主にセメントの水和反応に起因するものである。そこで、本研究では、微小な粒子の物理的凝集とセメントの水和反応による粒子の接触数量の増加を理論的に考察した上で、時間依存型DEMモデルを提案する。さらに、提案した解析手法によって3種類のフレッシュモルタルのロータ試験をシミュレートし、解析手法の妥当性を検証する。

## 2. 解析モデルの提案

### 2.1 個別要素法

個別要素法は非連続体をシミュレーションするための一手法であり、有限要素法や境界要素法のような連続体を解析する手法ではない。DEMは、粒状材料の挙動を扱うのに適しているため、フレッシュコンクリートに適用可能であると考えられる。DEMでは、要素の変位は隣接の要素との接触点のみで生じるものとし、この接触点を通じて粒子間力の伝達が行われるものとしている。要素ごとに独立な運動方程式をたて、時間領域で漸進的に解き、個々の要素の運動を追跡していく。また、要素の接触点に弾性スプリング、粘性ダッシュポットおよびスライダがあることを想定することで材料の線形や非線形力学挙動を表現する。要素に作用する力とモーメントは、式(1)と式(2)で表される。

$$F=m(x''-g) \quad (1)$$

$$M=I\omega' \quad (2)$$

ここに、 $F$ : 粒子に作用する力,  $m$ : 粒子の質量,  $x''$ : 並進加速度,  $g$ : 重力の加速度,  $M$ : 粒子に作用するモーメント,  $I$ : 慣性モーメント,  $\omega'$ : 角加速度

### 2.2 従来の DEM モデル

前述のように、DEMでは、解析対象となる材料は要素粒子に構成されるものと見なされる。要素粒子間の接触は、外力による粒子間の作用力がある限界を超えると、破壊され、消失する。このような接触は可逆接触と呼ばれる。粒子間の作用力は弾性と粘性項に分解される。弾性項はパラレルボンドモデル(parallel bond model, **Fig.1 (a)**)を表されて、粘性項は粘性減衰モデル(damping viscous model, **Fig.1 (b)**)を表される。要素粒子が接触すると、接触点で力とモーメント  $M_i$  が発生する。粒子間の相互作用は、接平面の法線とせん断方向において区分され。

\*1 山口大学 大学院理工学研究科 情報・デザイン工学専攻 博士課程後期 院生 (正会員)

\*2 山口大学 大学院創成科学研究科 工学系学域感性デザイン分野 教授 (正会員)

\*3 山口大学 大学院創成科学研究科 建設環境系専攻 博士課程前期 院生 (非会員)

パラレルボンドモデルに関して、5つのパラメータによって表される、それぞれ法線とせん断方向のばね定数  $k_n$ ,  $k_s$ , ばね強さの限界値  $\sigma_c$ ,  $\tau_c$ , および接触半径係数  $l$  である。これらのばねによって粒子の可逆接触を表現する。また、接触半径  $r$  は、接触している要素粒子  $i$  と  $j$  の半径  $r_i$ ,  $r_j$  の最小値と  $l$  の積である。従来の DEM では法線及びせん断方向のばね定数を不変量としている。

時間増分  $\Delta t$  に対して作用力  $F_i$  とモーメント  $M_i$  の増分を  $\Delta F_i$ ,  $\Delta M_i$  とすると、法線とせん断方向の  $\Delta F_i$ ,  $\Delta M_i$  は、それぞれ式(3)~(6)で表される。

$$\Delta F_i^n = -k_n A \Delta U_i^n \quad (3)$$

$$\Delta F_i^s = -k_s A \Delta U_i^s \quad (4)$$

$$\Delta M_i^n = -k_s J \Delta \theta_i^n \quad (5)$$

$$\Delta M_i^s = -k_n I \Delta \theta_i^s \quad (6)$$

ここに、 $\Delta F_i^n$ ,  $\Delta F_i^s$ ,  $\Delta M_i^n$ ,  $\Delta M_i^s$ : それぞれ法線(n)とせん断方向(s)の作用力  $F_i$  とモーメント  $M_i$  の増分,  $\Delta U_i^n$ ,  $\Delta U_i^s$ : それぞれ法線とせん断方向における相対変位の増分,  $\Delta \theta_i^n$ ,  $\Delta \theta_i^s$ : それぞれ法線とせん断方向の相対回転角の増分,  $A$ : 要素粒子の接触断面積,  $k_n$ ,  $k_s$ : それぞれ法線とせん断方向の単位接触面積あたりのばね定数(N/m)/m<sup>2</sup>,  $J$ : 断面2次モーメント,  $I$ : 慣性モーメント,  $A$ ,  $J$  および  $I$  は式(7)~式(9)により算出される。

$$A = \pi r^2 \quad (7)$$

$$J = \frac{1}{2} \pi r^4 \quad (8)$$

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4 \quad (9)$$

接触点に作用する引張応力  $\sigma$  とせん断応力  $\tau$  は式(10)と式(11)によって算出される。 $\sigma \geq \sigma_c$  or  $\tau \geq \tau_c$  の場合、要素粒子の接触は破壊され、接触点における作用力は消える。

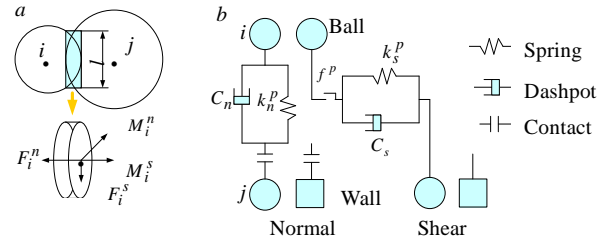
$$\sigma = \frac{F_i^n}{A} + \frac{|M_i^s|}{I} r \quad (10)$$

$$\tau = \frac{F_i^s}{A} + \frac{|M_i^n|}{I} r \quad (11)$$

また、粘性を有する場合、エネルギーの消散は時間が必要である。このため、粘性減衰モデルではばねのほか、ダッシュポットが設けられる。ダッシュポットは、法線とせん断方向の減衰係数  $C_n$ ,  $C_s$  によって表される。要素間の減衰力は、式(12)で求められる。

$$D_n = C_n |V_n|, \quad D_s = C_s |V_s| \quad (12)$$

ここに、 $D_n$ ,  $D_s$ : 法線とせん断方向の減衰力,  $V_n$ ,  $V_s$ : 法線とせん断方向の要素間の相対運動速度,  $C_n$ ,  $C_s$ : 法線とせん断方向の減衰係数



(a) パラレルボンドモデル (b) 粘性減衰モデル

### 2.3 時間依存型 DEM モデル

本研究では、従来の DEM をベースにして、フレッシュコンクリートがマトリックス(セメントペーストまたはモルタル)粒子と骨材粒子から構成されるものと見なして、それに適用する新たな DEM モデル(ここに、時間依存型 DEM モデルと呼ぶことにする)を提案した。時間依存型 DEM での要素は、マトリックス粒子と骨材粒子を表す3次元球形粒子要素と壁要素粒子としている。壁要素は、フレッシュコンクリートの流動境界を表すために使用されるものである。

フレッシュコンクリート中のセメントなどの微小な粒子は練混ぜによって分散するが、一旦静置すると、再び凝集する。また、微小な粒子の物理的凝集と共に、セメントの水和反応が生じるため、粒子間の接触が増強していく。物理的凝集による粒子の接触を攪拌などの外力によって破壊することができるため、ここにこの種類の接触を可逆接触と呼ぶ。しかし、水和反応生成物による粒子の接触は外力で簡単に破壊されないため、ここに不可逆接触と称する。この不可逆接触を反映するために、時間依存型 DEM では clump 粒子を導入した。Clump 粒子は、水和反応生成物によって結合され、外力で分散されない要素粒子の集合体である。Clump 粒子の質量は、結合されている粒子の質量の総和である。Clump 粒子内の粒子接触は外力に壊れず、一つの剛体として存在する。なお、Clump 粒子は、粒子間力によって式(1)と式(2)に従う中心点の並進運動と全体の回転運動を示す。

物理的凝集と水和反応の進行と共に、粒子の可逆接触と不可逆接触は増加するため、全体要素の接触は時間とともに増強する。したがって、フレッシュコンクリートの場合、DEM モデルのばね定数  $k_n$ ,  $k_s$ , ばねの強さ  $\sigma_c$ ,  $\tau_c$  を不変量とするのは不合理であると思われる。このため、本研究の時間依存型 DEM では、ばねの強さ  $\sigma_c$  と  $\tau_c$  を定数としているが、ばね定数  $k_n$ ,  $k_s$  を可逆と不可逆接触粒子数の増加に伴って増大することにした。

#### 2.3.1 水和生成物による不可逆接触粒子数

セメントと水を混合した後に、エトリンガイトが速やかに生成する。この種類の水和生成物は最初にコンクリート中の粒子の接触や結合を増加する。しかし、エトリンガイト結晶は少なく弱いため、粒子間の結合は振動や攪拌などの外力によって破壊されやすい<sup>2)</sup>。したがって、初期状態として、練混ぜ直後に水和物生成物による

化学的結合粒子(不可逆接触)の数  $N_h$  がゼロであると仮定している。しかし、セメント水和反応の進化に伴い、 $N_h$  が増加する。

セメントの水和率は、材齢と共に増大し、一般に式(13)によって表わされる<sup>3)</sup>。

$$\alpha(t_e) = \alpha_\infty \cdot \exp\left(-\left[\frac{\Psi}{t_e}\right]^\chi\right), \alpha(t_e) \leq 100\% \quad (13)$$

ここに、 $t_e$ : 環境温度が基準温度と異なる場合における等価材齢(min.),  $\alpha(t_e)$ : 等価材齢  $t_e$  時点の水和率,  $\alpha_\infty$ : 基準温度の場合の最大水和率,  $\chi$ : 水和率の経時変化曲線の形状を表すパラメータ,  $\Psi$ : 水和反応速度に関わる定数

凝結始発までの誘導期において、水和率の経時変化式は、式(14)のように線形関係と近似することができる<sup>4)</sup>。

$$\alpha(t) = \omega \cdot t_e \quad (14)$$

ここに、 $\omega$ : 比例定数である

20℃を基準とする等価材齢  $t_e$  は、式(15)によって計算される<sup>3)</sup>。

$$t_e = t \cdot \exp\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \quad (15)$$

ここに、 $T$ : 環境温度(℃),  $E$ : 結合材の活性化エネルギー(J/mol),  $R$ : 気体定数(8.3144J/mol/K),  $t$ : 温度  $T$  における実際材齢

凝結始発までの結合材の活性化エネルギー  $E$  は、結合材の比表面積、セメントの化合物の割合および混和材料の種類と添加率に依存し、式(16)によって表わされる<sup>3)</sup>。

$$E = 22100 \cdot f_e \cdot P_{C3A}^{0.30} \cdot P_{C4AF}^{0.25} \cdot B^{0.35} \quad (16)$$

ここに、 $P_{C3A}$ ,  $P_{C4AF}$ : それぞれセメントの  $C_3A$  および  $C_4AF$  の含有量(質量比),  $B$ : 結合材のプレーン比表面積 ( $m^2/kg$ ),  $f_e$ : 混和材料を使用した場合の補正係数であり、式(17)で求められる<sup>3)</sup>

$$f_e = 1 - 1.05 \cdot P_{FA} \cdot \left(1 - \frac{P_{FACao}}{0.40}\right) + 0.40 \cdot P_{slag} \quad (17)$$

ここに、 $P_{FA}$ ,  $P_{slag}$ : それぞれフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の置換率(質量比),  $P_{FACao}$ : フライアッシュ中の  $Cao$  の含有量(質量比)

文献5)によって、コンクリートの凝結が始発する時の水和率は、水結合材比に依存する。環境温度が 21.1℃の場合、凝結始発(貫入抵抗: 3.4MPa)時の水和率は、式(18)によって表わされる。

$$\alpha_i = 0.15 \frac{W}{CM} \quad (18)$$

ここに、 $\alpha_i$ : コンクリートの凝結始発時の水和率,  $W$ : 単位水量,  $CM$ : 単位結合材量

式(18)を式(14)に代入すると、環境温度が約 20℃の場合における  $\omega$  は、式(19)に示すように得られる。

$$\omega = \frac{0.15 W}{t_i CM} \quad (19)$$

ここに、 $t_i$ : 20℃の凝結始発時間(min.)

水和反応生成物による不可逆接触の粒子数  $N_h$  は水和率  $\alpha(t)$  に比例すると仮定すると、 $N_h$  は式(20)で求められる。

$$N_h = c \cdot N \cdot \alpha(t) \quad (20)$$

ここに、 $c$ : 定数であり、 $N$ : フレッシュコンクリート中の粒子の総数

凝結始発の時点で、フレッシュコンクリート中のすべての粒子が結合されると考えられ、すなわち  $N_h = N$ 、このとき、水和率は式(14), (15), および(19)から式(21)のように与えられる。

$$\alpha(t_i) = \frac{0.15W}{CM} \exp\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \quad (21)$$

したがって、定数  $c$  は、式(20)と式(21)により式(22)のように求められる。

$$c = \frac{1}{0.15} \frac{CM}{W} \cdot \exp\left[-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T}\right)\right] \quad (22)$$

### 2.3.2 物理的凝集による可逆接触粒子数

フレッシュコンクリート中の粒子は、練り混ぜた直後に分散していると仮定する。ブラウン運動とファンデルワールス引力のため、一部の分散粒子は時間とともに物理的に再凝集する。物理的凝集による分散粒子の減少速度は、式(23)で与えられる<sup>6)</sup>。

$$\frac{dN_d}{dt} = -\frac{8kTN_d^2}{3\eta} \quad (23)$$

ここに、 $N_d$ : 分散粒子の数,  $t$ : 練混ぜ後の経過時間,  $k$ : ボルツマン定数,  $\eta$ : 練混ぜ水の粘度である

式(23)を積分すると、時刻  $t$  における分散粒子の数は下式のように求められる。

$$N_d = \frac{3\eta N_{d0}}{8kTtN_{d0} + 3\eta} \quad (24)$$

ここに、 $N_{d0}$ : 練混ぜ直後の分散粒子数であり、コンクリート中の粒子総数  $N$  に等しい

式(20)と式(24)に基づいて、可逆と不可逆接触粒子の数  $N_f$  は式(25)で求められる。

$$N_f = N \cdot \left[1 - c \cdot \alpha(t) - \frac{3\eta}{8kTtN + 3\eta}\right] \quad (25)$$

前述したように、物理的凝集粒子と水和反応生成物による化学的結合粒子の増加に伴い、粒子間の平均結合力が増加するため、粒子間の接触が壊れ難くなる。本研究では、この変化を、法線とせん断方向のばね定数  $k_n$  と  $k_s$

の増加で表現し、 $k_n$  と  $k_s$  が式(26)と式(27)に示すように接触粒子数  $N_f$  に比例して増加すると仮定した。

$$k_{nt} = \left[ 1 - c \cdot \alpha(t) - \frac{3\eta}{8kTNt + 3\eta} \right] \cdot \Delta k_n^{pb} + k_{n0} \quad (26)$$

$$k_{st} = \left[ 1 - c \cdot \alpha(t) - \frac{3\eta}{8kTNt + 3\eta} \right] \cdot \Delta k_s^{pb} + k_{s0} \quad (27)$$

ここに、 $k_{nt}$ 、 $k_{st}$ : それぞれ時刻  $t$  の法線とせん断方向のばね定数、 $k_{n0}$ 、 $k_{s0}$ : それぞれ  $t=0$  の時の法線とせん断剛性、 $\Delta k_n^{pb}$ 、 $\Delta k_s^{pb}$ : それぞれパラレルボンドモデルの法線とせん断方向のばね定数  $k_n$  と  $k_s$  の増分

### 3. フレッシュモルタルのロート試験

上記の時間依存型 DEM 解析手法の妥当性を検証するために、フレッシュコンクリートを用いる試験を行うべきであるが、コンクリート中の骨材量が多く、セメント粒子の凝集と水和反応によるフレッシュ性状の時間依存性は骨材の影響で顕著ではなくなり、考察され難いおそれがあるため、本研究では検証試験としてフレッシュモルタルのロート試験を行った。

#### 3.1 使用材料と調合

3 シリーズのモルタルの調合を **Table 1** に示す、普通ポルトランドセメントと豊浦砂を用いた。ブリーディングを生じさせず、ロート試験に必要な流動性を確保するために、減水剤の添加が必要となる。また、異なる静置時間後のロート試験を実施できるように流動性の時間に伴う過大な低下が生じないと共に、水和反応が遅延剤によって抑制されすぎないように、標準型と遅延型 AE 減水剤を同時に添加した。また、混和材を使用したコンクリートへの

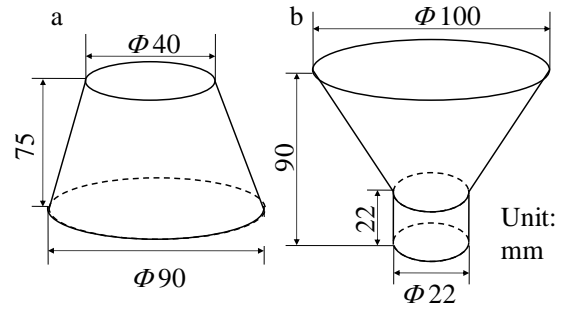
**Table 1** モルタル試料の調合

シリーズ	W/BI	S/BI	FA/BI	BFS/BI	標準型 AE 減水剤	遅延型 AE 減水剤	
①	0.5	1.5	0	0	BI×0.5%	BI×0.7%	
②			0.2				
③			0				0.5
単位質量(kg/m <sup>3</sup> )							
シリーズ	W	C	FA	BFS	S	標準型 AE 減水剤	遅延型 AE 減水剤
①	356	688	0	0	1020	3.4	4.8
②		551	138				
③		344	0				

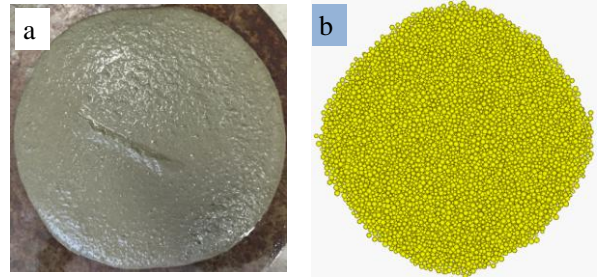
[注] W: 水, C: 普通ポルトランドセメント, S: 砂, BI: 結合材

**Table 2** セメント, FA および BFS の化学組成

含有量(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Others
セメント	22.3	5.6	3.0	63.7	2.4	2.2	0.8
FA	60.8	23.5	6.8	2.8	0.9	0.7	4.2
BFS	34.45	15.25	0.5	42.49	5.92	0.0	1.39



**Fig.2** フロー試験のコーン(a)とロート(b)の寸法



**Fig.3** 調査①フロー試験の状況:(a) 試験, (b) 解析

時間依存型 DEM の適用性を検証するために、シリーズ No. ②と No.③では、一部のセメントは JISII 種のフライアッシュ(FA)または JIS8000 級の高炉スラグ微粉末に代替された。FA と BFS の化学組成を **Table 2** に示す。

#### 3.2 試験方法と結果

モルタルの練混ぜ方法として、セメントと砂をモルタルミキサーに投入して1分間練り混ぜた、次いで混和剤を溶解しておいた水を投入し、3分間練り混ぜた。JIS A 1171 に準じてモルタルのフロー試験を行った。試験に用いたフローコーンのサイズを **Fig.2(a)** に示す。練混ぜ直後の No. ①, No.②および No.③の0打(無振動)のフロー値(3回試験の平均値)は、それぞれ 265, 295, 305 mm であった。また、水和反応の影響を反映するために、シリーズ No.①の練混ぜ直後から5分後の0打(無振動)フロー試験も行った。その試験状況を **Fig.3(a)** に示す。

また、調査ごとに5つのロートにモルタル試料を同時に充填した。用いたロートの寸法は **Fig.2(b)** に示す。ロートに充填されたモルタル試料の質量は 355g であった。

ロートに試料を装入した直後に1回目の試験を行ったが、試料を装入したほかのロートを 20±2°C, R.H.60±5% の室内において静置した。試料を練り混ぜた直後から試験開始までの経過時間を静置時間とした。2回目以降のロート試験は所定の時間間隔で行った。時間間隔は各試料の流動性の経時変化によって予備試験で決められた。所定の静置時間になると、ロートの出口を開放してロート内の試料がデジタル天秤上に置いた容器に流下した。各シリーズの流下質量と流下時間の関係についての試験結果を **Fig.5~7** に示す。

Table 3 要素と境界の入力パラメータ

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$r$ (mm)	$k_n^p, k_n^v$ (N/m <sup>2</sup> )	$k_s^p, k_s^v$ (N/m <sup>2</sup> )	$f^p, f^v$
粒子要素	2088	1~2	500	200	0.2
境界	—	—	2×E+06	2×E+06	0.4

Table 4 接触モデルの入力パラメータ

シリーズ	$k_{no}^{pb}$ (N/m <sup>3</sup> )	$k_{so}^{pb}$ (N/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (N/m <sup>2</sup> )	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	$l$	$\Delta k_n^{pb}$ (N/m <sup>3</sup> )	$\Delta k_s^{pb}$ (N/m <sup>3</sup> )
①	5500	600	550	22	0.5	3000	500
②	3500	200					
③	2000	300					

Table 5 混和材の入力パラメータ

シリーズ	$T$ (°C)	$E$ (J/mol)	$t_i$ (min.)	$f_e$	$P_{C3A}$	$P_{C4AF}$	$B$ (m <sup>2</sup> /kg)	$N$	$c$	$\Delta t$ (min.)	$\eta$ (Pa·s)
①	22	44977	360	1.0	0.09	0.09	356	2×E+15	12.4	5	0.001
②		36593	420	0.8					12.6		
③		53972	480	1.2					1.23		

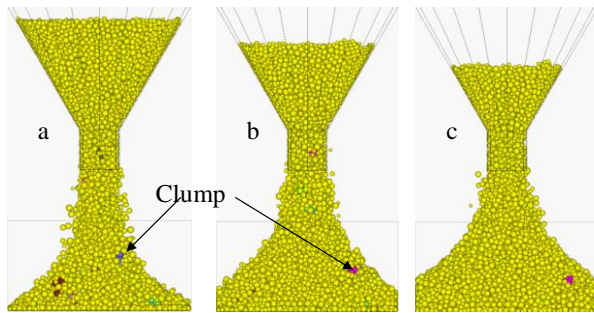


Fig.4 各シリーズの6s時点の流動状況

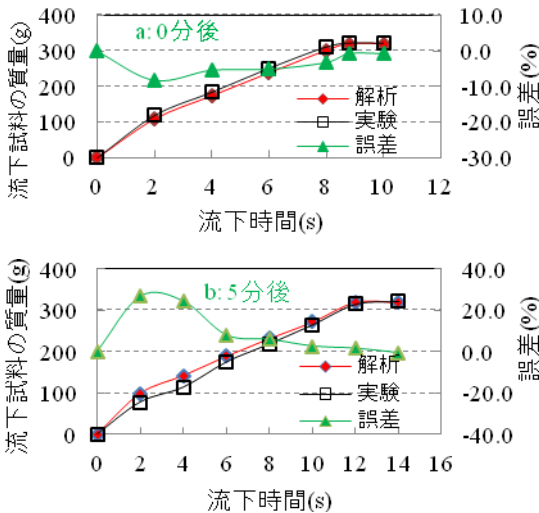


Fig.5 シリーズ No. ①のロート試験と解析結果

#### 4. 時間依存型 DEM によるロート試験シミュレーション

##### 4.1 解析入力パラメータのキャリブレーション

試行錯誤で時間依存型 DEM による数値解析の入力パラメータを決定した。具体的に、まず、計算時間に配慮しながら、モルタルの粒子分布に基づいて要素粒子の半径( $r$ )の範囲および半径係数( $l$ )を設定した。また、要素粒子がモルタルの流動境界を越えないように要素粒子と壁要素粒子のばね定数( $k_n^p, k_n^v, k_s^p, k_s^v$ )を設定した。なお、可逆接触の破壊限界強さ( $\sigma_c, \tau_c$ )が一定であると考えられ、予備解析の結果を基に設定した。次に、上記の各パラメータの値を固定して、フロー試験の解析結果を Fig.3(a)

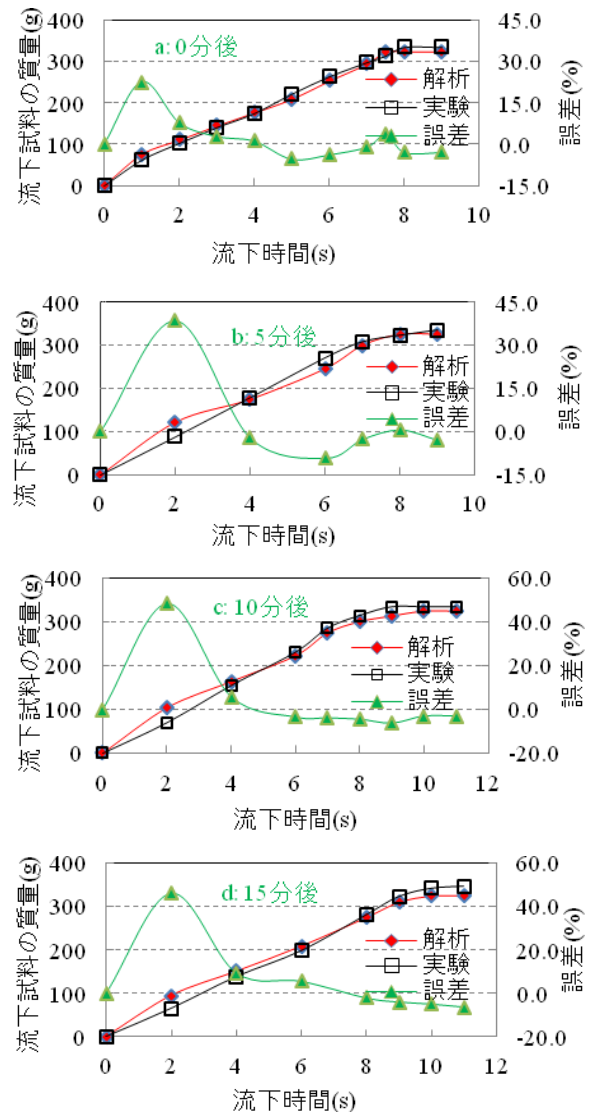


Fig.6 FA を添加した No. ②のロート試験と解析結果

に示す No.1 の試験結果と一致させるように、パラレルボンドモデルのばね強さの初期値( $k_{no}^{pb}, k_{so}^{pb}$ )および凝集粒子の増加による増量( $\Delta k_n^{pb}, \Delta k_s^{pb}$ )を調整した。解析に用いた要素粒子の数は 14777 であった。得られた入力パラメータを Table 3 と 4 に示す。これらのパラメータと Table 5 に示す混和材のパラメータを用いたフロー試験のシミュレーション結果を Fig.3(b)に示す。

## 4.2 ロート試験の流動解析結果

Table 3~5 に示すパラメータを用いて、ロート試験のモルタル流下挙動をシミュレートした。解析に用いた要素粒子の数は 12777 であった。粒子のサイズ 1~2 mm, 3 シリーズの 6 秒時点の流下状況を Fig.4 に示す。流下試料の質量と時間の関係に関する数値解析結果をそれぞれ Fig.5, Fig.6, Fig.7 に示す。これらの図に示すように、流動停止時点の数値解析の結果は、混和材の使用有無に拘わらず、±10%の誤差内で試験結果と一致しており、本研究で提案した時間依存型 DEM 手法がモルタルの流動性の時間依存性の予測に適用しうると判断している。

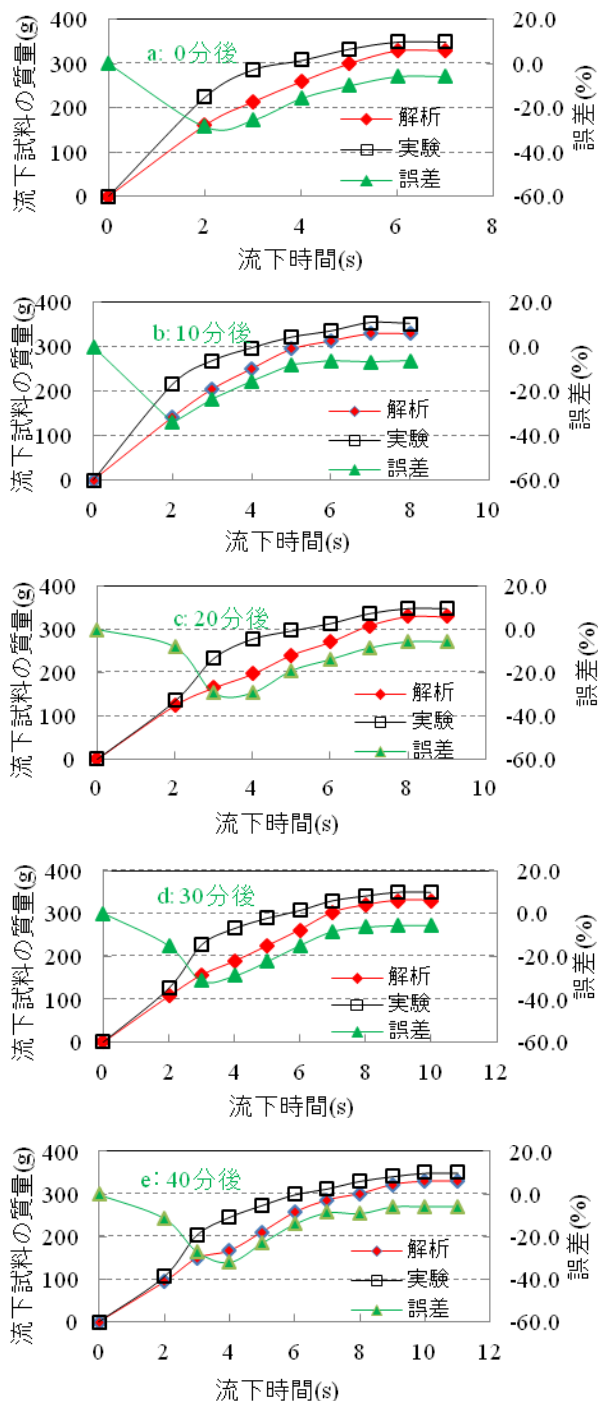


Fig.7 BFS 添加した No. ③のロート試験と解析結果

## 5. まとめ

セメント粒子の凝集と水和反応によってフレッシュコンクリートの流動性は時間の経過に伴って低下する。本研究では、この時間依存特性を予測する方法の開発を目指して、新しい DEM 手法 (時間依存型 DEM) を提案した。時間依存型 DEM では、フレッシュコンクリートが仮想マトリックス粒子 (セメントペーストまたはモルタル) と骨材粒子 (細骨材または粗骨材) で構成されると見なした上で、セメントの水和反応を考慮して粒子接触が破壊できない clump 粒子 (不可逆接触粒子) を導入し、また物理的凝集粒子と clump 粒子の増加の影響を反映するために、粒子の接触程度を表す法線とせん断方向のばね定数を、式(26)と式(27)に示すように凝集粒子と clump 粒子の増加に伴って増加する変数としている。なお、理論的考察を行い、式(20)と式(25)のように、物理的凝集粒子と clump 粒子数を明らかにした。

時間依存型 DEM の有効性を検証するために、モルタルのフロー試験によって、解析入力パラメータを校正した。さらに、得られた入力パラメータに基づいて、混和材使用有無別のフレッシュモルタルの異なる静置時間後に行われたロート試験における流下挙動をシミュレートした。得られた解析結果と試験結果の一致性が確認された。また、この手法は FA や BFA を用いたフレッシュモルタルにも適用できることを検証した。

## 参考文献

- 1) Cao, G. D., Li, Z. G., Tan, Y. Q., Analytical Study on the Thixotropy of Fresh Concrete Using Discrete Element Method, Proceeding of the Japan Concrete Institute, Vol.37, No.1, pp. 1039-1044, Jul.2015
- 2) Tattersall, G. H., Banfill, P. F. G., The rheology of fresh concrete, Pitman Books Limited, Great Britain, 1983
- 3) Schindler, A. K., Prediction of concrete setting, Proceedings of the RILEM International Symposium on Advance in Concrete through Science and Engineering, Vol.3, pp.1-14, 2004.
- 4) Tan, T. S., Loh, C. K., Yong K. Y., et al, Modeling of bleeding of cement paste and mortar, Advances in Cement Research, Vol.9, No.34, pp.75-91, 1997.
- 5) Chandra, D., Sereda, J. P., Swenson, E. G., Hydration and strength of neat portland cement, Magazine of Concrete Research, Vol.20, No.64, pp.131-136, Sep.1968
- 6) Everett, D. H., Basic principles of colloid science, the Royal Society of Chemistry (Kyoto, Japan), pp. 23-27, 2000.