

# 論文 個別要素法による高流動コンクリートの流動性状評価に関する研究

平野 優\*1・白岩 誠史\*1・中島 有一\*2・町田 篤彦\*3

**要旨：**L形フロー試験装置を用いて、高流動コンクリートの流動試験を行い、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適している個別要素法によって、その流動性状を再現できるかどうかを検討した。その結果、最大Lフロー値や沈下量については、実験と解析は同様の傾向を示し、また粒子単体を追跡したことによって、コンクリートの細部の挙動をとらえられることが分かった。Lフローイング曲線についても、解析で精度良く表現することが可能であった。

**キーワード：**個別要素法, L形フロー試験, Lフローイング曲線

## 1. はじめに

高流動コンクリートは、流動性、充てん性などが優れており、施工時に人為的要因による影響を受けにくいことにより、現場での省力化や合理化ができ、それによって、コストの低下や、品質の向上も可能である。しかし、高流動コンクリートの流動性状は十分解明されているとは言いがたく、また、そのシミュレーション技術も確立されていない。もし、解析によってフレッシュ時のコンクリートの流動性状が予測できれば、実構造物に適用する前に流動状況や充てん状況が把握できるので、施工時における作業効率を上げることや、これまで必要だった実験回数削減も可能となる。

そこで、本研究では広範に流動性を変えた高流動コンクリートについて、L形フロー試験装置<sup>1)</sup>による流動実験を行い、数値解析と比較して、解析による流動性状予測の可能性について検討を加えた。個別要素法 (Distinct Element Method: DEM) は粒状材料の動的挙動を扱うのに適した解析手法であるが、フレッシュコンクリートを粒状材料の集合体とすれば、球引き

上げ試験その他のシミュレーションが可能であることが示されている<sup>2),3)</sup>。本研究においては、解析によってLフローイング曲線や要素の移動状況を把握することができた。

## 2. 実験概要

本研究に用いたコンクリートは、いわゆる粉体系高流動コンクリートである。表-1に使用材料及びその物性を示し、表-2に実験に用いたコンクリートの配合とスランプフロー、最大Lフロー、沈下量を示す。実験したものの中には、一部高流動コンクリートの範疇に入らないものもあるが、比較のために掲載した。コンクリートの練混ぜには、練混ぜ容量 100 (l) のパン型ミキサを用いた。練混ぜにあたっては、まずセメント・高炉スラグ微粉末・細骨材をミキサに投入し、2分間の空練りを行い、その後あらかじめ混和剤を溶解した水を加えて4分間の練り混ぜを行って、最後に粗骨材を投入し、2分間練混ぜた。

図-1にLフロー試験装置を示す。この装置は、流動状況を目視できるように、全てアクリ

\*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 埼玉大学 工学部建設工学科

\*3 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

ルを用いて作製したものである。

試験は図-1の仕切りゲートの部分に障害のないものと、仕切りゲートの開口部前方にφ10mmの丸棒を40mm間隔で水平に並べた、障害のあるものの2通りについて行った。試験方法は土木学会高流動コンクリート施工指針のL形フロー試験方法に基づいて行ったのであって、コンクリートを突固めや振動を与えずに、投入部に一層で詰め、仕切りゲートを引き上げて、最大Lフロー値とコンクリート投入部の沈下量を測定した。さらに、コンクリートの流出開始後からのLフロー値の時刻変化であるLフローイング曲線を測定するために、流動途中の状況をビデオ撮影によって記録した。その後ビデオにより、仕切りゲートからの距離が10～60cmまで、10cmごとに区切られた地点へ到達する時間を測定した。また、そのほかにもコンクリートの流動が停止した時点での経過時間も測定した。

試験結果の一例を図-2に示す。どの配合に関しても、Lフローイング曲線の傾きは流動開始直後が最も大きくなっている。

表-1 使用材料および物性

材料	材料特性
水(W)	上水道水
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15(g/cm <sup>3</sup> )
混和材(BS)	高炉スラグ微粉末 密度: 2.91(g/cm <sup>3</sup> )
細骨材(S)	入間川産川砂 密度: 2.55(g/cm <sup>3</sup> )、吸水率: 2.5% 粗粒率: 2.24
粗骨材(G)	入間川産川砂利 密度: 2.61(g/cm <sup>3</sup> )、吸水率: 1.5% 粗粒率: 6.49、最大寸法: 20mm
混和剤(SP)	高性能AE減水剤 主成分: ポリカルボン酸エーテル系

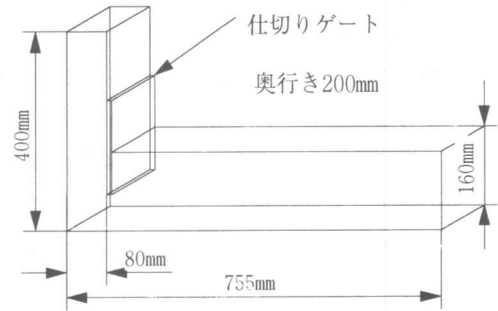


図-1 L形フロー試験装置

表-2 配合および実験結果

配合番号	水粉体比 W/P	細骨材率 s/a	スラグ置換率 BS/P	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 SP P%	スランプリューロ (cm)	Lフロー (cm)	沈下量 (cm)	Lフロー (cm)	沈下量 (cm)
				水 W	セメント C	スラグ BS	細骨材 S	粗骨材 G			障害無し	障害有り		
1	0.31	0.43	50	220	356	356	598	809	0.6	53.0	60.5	32.7	51.8	30.6
2	0.31	0.45	50	210	340	340	651	809	0.7	61.9	63.1	33.1	53.7	31.3
3	0.31	0.47	50	200	324	324	704	809	0.8	61.7	66.2	33.3	58.3	31.6
4	0.31	0.48	50	190	308	308	757	809	0.8	50.7	44.7	30.9	33.5	25.2
5	0.31	0.48	50	190	308	308	757	809	0.9	63.2	63.2	33.1	57.2	31.3
6	0.31	0.50	50	180	291	291	809	809	1.0	61.0	55.2	32.4	49.9	31.0
7	0.24	0.47	50	174	363	363	704	809	1.3	56.2	48.7	32.4	36.9	26.8
8	0.27	0.47	50	186	344	344	704	809	1.0	56.4	53.9	32.5	41.6	28.7
9	0.34	0.47	50	211	307	307	704	809	0.6	55.4	49.0	31.9	39.9	28.4
10	0.39	0.47	50	224	288	288	704	809	0.5	59.4	59.9	32.9	47.5	30.1
11	0.31	0.43	50	191	310	310	673	887	0.8	58.2	58.2	32.8	49.9	30.1
12	0.31	0.40	50	183	296	296	643	966	0.8	54.7	50.8	31.8	41.7	27.7
13	0.30	0.47	30	200	460	197	704	809	0.8	62.7	61.9	33.1	54.1	31.7
14	0.31	0.47	40	200	392	261	704	809	0.8	63.7	61.0	33.2	60.5	31.6
15	0.31	0.47	60	200	257	385	704	809	0.8	59.5	59.7	32.9	55.0	31.5
16	0.31	0.47	70	200	191	446	704	809	0.8	55.1	47.2	31.7	32.1	25.2
17	0.31	0.47	50	200	324	324	704	809	0.7	47.3	38.0	29.0	33.0	25.8
18	0.31	0.47	50	200	324	324	704	809	0.6	40.8	28.2	27.6	11.7	13.6

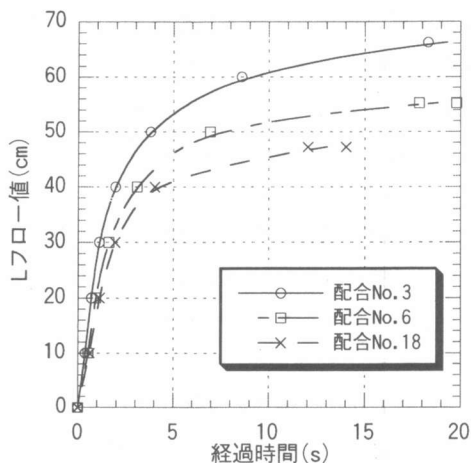


図-2 Lフローイング曲線

### 3. 個別要素法の概要<sup>2)</sup>

個別要素法は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く、非連続体を扱う一手法であり、粒状材料の動的挙動を扱うのに適している。個別要素法では、要素の変形は別の要素との接点のみで生じるものとし、この接点を通して粒子間の力の伝達が行われるものとして、各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ものである。そして物質の線形・非線形は、要素の接点に弾性スプリング・粘性ダッシュポット・スライダを想定することで表現する。要素の接点モデルは、図-3 に示すように Voigt 型である。ここで、 $K$ ：ばね定数， $\eta$ ：ダッシュポット定数， $\mu$ ：摩擦係数， $\lambda$ ：引張許容百分率である。以

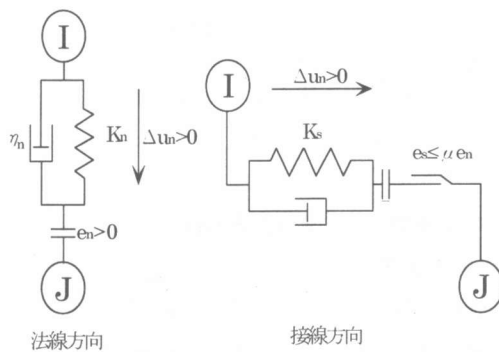


図-3 個別要素法の接点モデル

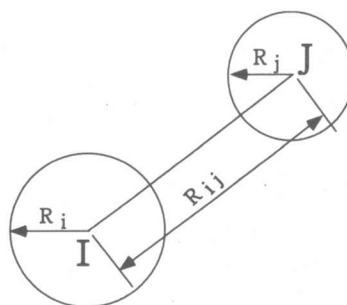


図-4 引張許容百分率の定義

下、これらを DEM パラメータという。

個別要素法をフレッシュコンクリートに適用するにあたって、コンクリートを粗骨材の周辺にモルタルが付着した粒子の集合体とした。上記の引張許容百分率とは、コンクリートが流動する場合のモルタル部分の役割を表現するために設けたもので、要素が離れようとしたとき、その値の割合までばねの引張力を認め、それ以後を 0 とし、 $\lambda$  を次式のように定義し図-4 に示す。

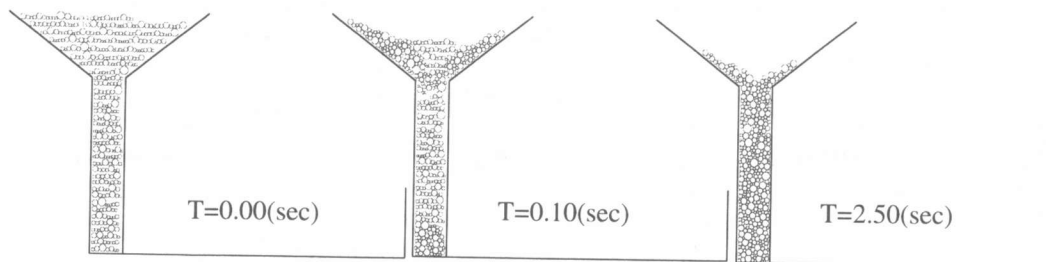


図-5 要素のパッキング

$$\lambda = \frac{R_{ij} - R_i - R_j}{R_i + R_j} \times 100\%$$

ここで、 $R_{ij}$ ：要素間距離、 $R_i, R_j$ ：要素 I・J 半径。

#### 4. 個別要素法による流動解析

##### 4.1 要素のパッキング

解析にあたっては、まず、ランダムに要素を発生させ、さらに L 形フロー試験装置の形状に合わせてその要素を領域中に並べる。その後、並べた要素を自由落下させて、全要素が停止するまで解析した。これは、コンクリートを L フロー試験装置に充てんする過程を模擬したもので、以下パッキングという。パッキング時の要素の動きを図-5 に示す。

##### 4.2 流動シミュレーション

パッキングの解析が終了したのち、L 形フロ

ー試験装置の仕切りゲートに相当する部分の壁要素を取り除き、障害あり、無し両方について流動シミュレーションを行った。DEM パラメータの推定方法については提案されているものの<sup>3)</sup>、精度が低く決定的なものではないため、ここでは、試行錯誤で定めた DEM パラメータを用いた。表-3 にその一例を示す。また、No.1 のパラメータを用いて行った解析の流動状況を図-6 に示す。

図-6 によれば、個別要素法によって L 形フロー試験におけるコンクリートの流動状況が良好に表現されていることが分かる。特に、障害のあるものについては、要素が障害の上を通過して流動する様子についても確認できる。

ここで、コンクリートが停止した時に得られる、最大 L フロー値と沈下量の関係を図-7 に示す。ここに示す解析値は、表-3 をもとにばね定数、ダッシュポット定数、摩擦定数、引張

表-3 DEMパラメータ

No.	法線方向ばね定数 (N/mm)	法線方向ダッシュポット定数 (N・s/mm)	接線方向ばね定数 (N/mm)	接線方向ダッシュポット定数 (N・s/mm)	要素数	要素間摩擦定数	要素と壁の摩擦定数	引張許容百分率	タイムステップ	解析時間
1	$2.36 \times 10^{-1}$	$4.90 \times 10^{-3}$	$5.90 \times 10^{-2}$	$5.88 \times 10^{-3}$	345	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	0.85%	$2.0 \times 10^{-5}$ s	15.0s
2	$1.18 \times 10^{-1}$	$3.92 \times 10^{-3}$	$2.95 \times 10^{-2}$	$4.70 \times 10^{-3}$	345	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	0.01%	$2.0 \times 10^{-5}$ s	20.0s
3	$1.18 \times 10^{-1}$	$4.90 \times 10^{-3}$	$2.95 \times 10^{-2}$	$5.88 \times 10^{-3}$	345	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$	0.75%	$2.0 \times 10^{-5}$ s	18.0s

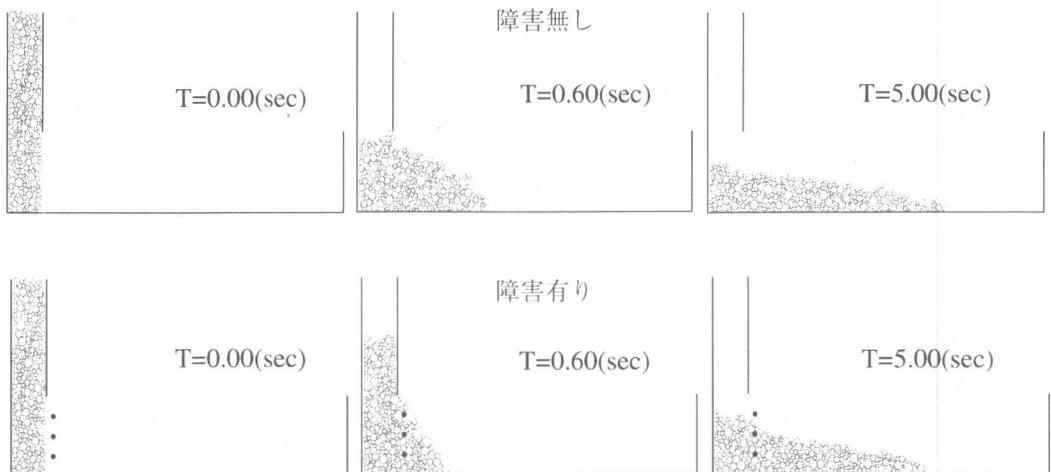


図-6 流動シミュレーション

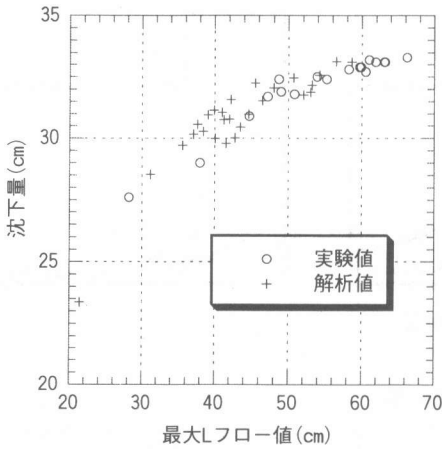


図-7 最大Lフロー値と沈下量

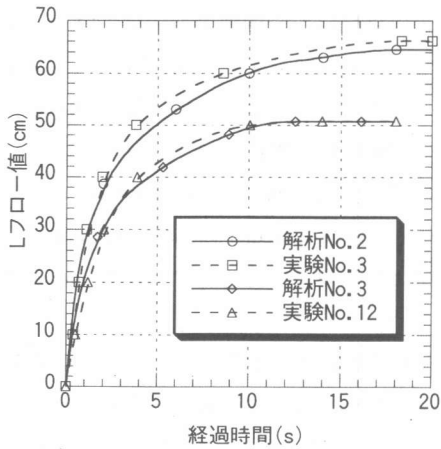


図-8 実験と解析のLフローイング曲線

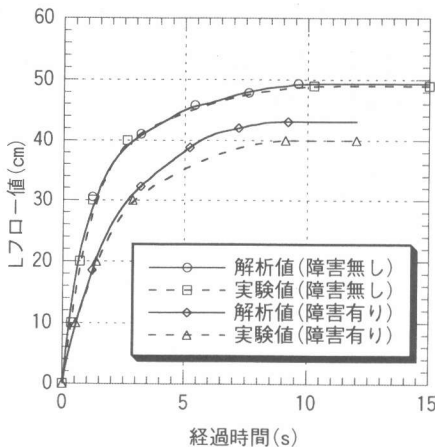


図-9 障害の有無によるLフローイング曲線

許容百分率を変化させて得られたものを使用した。図-7より実験値と解析値はほぼ同様の傾向を示すことがわかった。これらのことから、最終形状に関して、DEMパラメータを適切に定め得れば、個別要素法の解析によって良好な精度で推定できるということが出来る。

次に、流出開始後からのLフロー値の時刻変化であるLフローイング曲線を図-8に示す。実験は配合No.3, No.12, 解析パラメータはそれぞれ表-3のNo.2, No.3である。

図-8から最大Lフロー値のみならず、流動途中のLフローイング曲線の傾き、つまりコンクリートの流動速度についても、実験と一致する結果を得られると言うことができる。

同じパラメータを用いて解析した図-6のLフローイング曲線を図-9に示す。障害有りの解析についてのLフローが実験よりやや大きい値となっているが、障害により流動しなくなっていることを表している。

さらに、仕切りゲートのある開口部付近の縦220mm×横250mmの領域(図-10)に注目して高さの異なる3地点から各々3点の粒子の動きを流動開始直後から流動停止まで追跡したものが、図-11である。ここで用いた解析結果は、最大Lフロー値約46cmとなるものである。

既往の研究<sup>9)</sup>で、コンクリートの可視化実験が行われており、それによるとL形フロー試験では隅角部に停滞域が存在するとしているが、

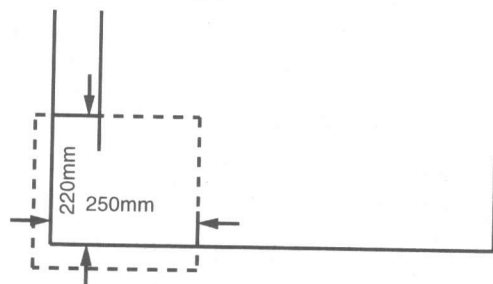


図-10 注目する領域

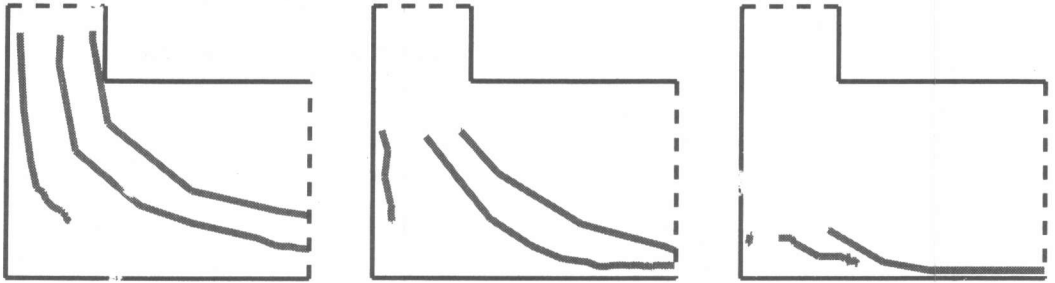


図-11 要素の軌跡

解析においても隅角部の粒子の動きはほとんど無く、実験同様に停滞域を確認することが可能であった。また、開口部の上段、中段、下段に関わらず、開口部に近い粒子ほど水平変位が大きく、開口部から離れた粒子ほど水平変位が小さいといった現象についても解析で表すことができた。

## 5. まとめ

本研究では、フレッシュ時における高流動コンクリートの流動性状について、L形フロー試験装置を用い、個別要素法によって評価することができるか検討した。

- (1)個別要素法を用いた解析を行うことによつて、全体的な動きとともに、要素が障害の上を通過する様子についても表すことができ、コンクリートの流動状況を的確に表現できた。また、本研究で行ったL形フロー試験による、時刻変化におけるLフローイング曲線についても、パラメータを適切に設定することにより、個別要素法を用いて再現することができた。
- (2)一部の要素に注目することにより、要素の移動状況を把握することができることから、流動状況の解明に役立てることができると考えられる。
- (3)今後、コンクリートの配合条件をもとにして、パラメータを決定する精度の良い方法の確立が必要である。

## 参考文献

- 1)土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針，土木学会，pp170-171，1998.7
- 2)鍋田克巳ほか：個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション，コンクリート工学年次論文集，vol.16，No.1，pp479-484，1994
- 3)CHU,H:Investigation on Property of Fresh Concrete by Distinct Element Method,埼玉大学大学院理工学研究科博士論文，pp63-69，sep.1997
- 4)小林秀徳ほか：個別要素法による高流動コンクリートの流動解析用パラメータに関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.21，No.2，pp505-510，1999
- 5)佐藤良一ほか：超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験の可視化，コンクリート工学年次論文集，vol.16，No.1，pp189-194，1994