

論文 フレッシュコンクリートの流動解析におけるパラメータ設定に関する研究

白岩 誠史*1・中島 有一*2・町田 篤彦*3・牧 剛史*4

要旨: 2次元個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) を用い、フレッシュコンクリートの流動解析を行った。実際の実験における配合や粘度試験, 付着試験の結果を可能な限りダイレクトに解析パラメータに反映させるため, 物理的根拠のある解析パラメータの設定法を提案した。また主に同配合で行ったL形フロー試験, V漏斗試験の実験結果を同一のパラメータにより DEM で再現することで, 本研究で提案したモデル, 解析パラメータの設定法の妥当性を検討した。

キーワード: 2次元個別要素法 (DEM), 付着試験, モデル化, パラメータ設定

1. はじめに

高流動コンクリートは, 流動性, 充填性などに優れ, 施工時に人為的要因を受けにくいと見られ, 現場の省力化, コスト削減, 品質向上が望める。しかし高流動コンクリートの流動性状は十分解明しているとは言い難く, そのシミュレーション手法も確立されていない。そこで本研究では, 粒状材料の動的解析に適した2次元個別要素法を用いて, そのシミュレーション手法の確立を目的とした。

本論では, DEM をフレッシュコンクリートに適用するために, そのモデル化, パラメータの設定方法を提案した。これらの手法を構築するにあたっては, 物理的意味のある DEM パラメータの設定に留意し, 実際の実験における配合や粘度試験, 付着試験の結果と DEM パラメータを可能な限りダイレクトに結び付けようと試みた。

これらの妥当性の確認は, L形フロー試験, V漏斗試験の実験結果と解析結果を比較することによって行った。

2. 実験概要と結果

本研究では, 粉体系高流動コンクリートを使用した。表-1 に使用材料及びその物性を示し, 18 配合において実験を行った。表-2 に実験に用いたコンクリートの配合, 配合から求めたモルタル膜厚 (後述), モルタル密度の一例を示す。

表-1 使用材料

材料	材料特性
水(W)	上水道
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(太平洋セメント株式会社製) 密度:3.15(g/cm ³)
混和材(BS)	高炉スラグ微粉末, 密度:2.91(g/cm ³) 比表面積6000(cm ² /kg)級
細骨材(S)	入間川産川砂, 密度:2.55(g/cm ³) 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 ³), 実績率:63.7% 吸水率:1.5%, 粗粒率:6.49, 最大寸法:20(mm)
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

表-2 配合及びモルタル膜厚の一例

配合No.	単位量(kg/m ³)					SP P%	水粉体比 W/P	細骨材率 s/a	モルタル膜厚 Sp(mm)	モルタル密度
	W	C	BS	S	G					
18	200	324	324	704	809	0.6	0.31	0.47	2.71	2.25
16	200	324	324	704	809	0.7	0.31	0.47	2.71	2.25
2	200	324	324	704	809	0.8	0.31	0.47	2.71	2.25
17	183	296	296	643	966	0.8	0.31	0.40	1.85	2.25

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

*3 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 埼玉大学助手 工学部建設工学科 工修 (正会員)

コンクリートの練混ぜには、容量 100 l のパン型ミキサーを用いた。練り混ぜについては、まずセメント、高炉スラグ微粉末、細骨材をミキサーに投入し、空練りを 2 分間行い、その後、混和剤を溶解した水を加え、4 分間練り混ぜ、粗骨材を投入し、2 分間練り混ぜた。

表-3 にそれぞれの試験結果の一例を示す。スランプフロー、Lフロー試験は町田らによる実験結果¹⁾を引用した。球引き上げ粘度試験は、モルタルについて行い、Ansley の式によりビンガム定数(降伏値： τ_y 、塑性粘度： η)を求めた^{2), 3)}。V漏斗試験は図-1 のような装置で、流下時間： V_t を計測した。

付着試験は、図-2 のような装置で行った。まず、容器にモルタルを詰め、そのモルタルの表

面に一辺 15cm の正方形のアクリル板をしかりと付着させ、アクリル板を引き上げ、アクリル板にかかる抵抗力と変位を測定した。その結果の一例を図-3 に示す。付着特性は引き上げ速度 3.5mm/s 以下では速度の変化に依存しない⁴⁾ことが報告されており、本研究では、引き上げ速度を約 3mm/s とした。抵抗力の最大値を、付着強度： A_s 、抵抗力最大をとる変位を、付着変位： A_d として求めた。

図-4 に本研究で行った全ての配合 (18 配合) におけるLフロー試験と付着、粘度試験の実験結果の関係を示す。付着強度はフロー値、30cm 到達時間ともに明らかな関係が見られなかった

表-3 実験結果の一例

配合No.	スランプフロー SIF(mm)	Lフロー(障害無し)		Lフロー(障害有り)		V漏斗試験 Vt(s)	球引き上げ粘度試験		付着試験	
		Lフロー値	30cm到達時間	Lフロー値	30cm到達時間		降伏値	塑性粘度	付着強度	付着変位
		Lfn(mm)	Lt30n(s)	Lfa(mm)	Lt30a(s)		τ_y (Pa)	η (Pa*s)	A_s (N/mm ²)	Ad(mm)
18	408	282	**	117	**	10.77	404.1	1113.5	3.57E-04	10.1
16	473	380	2.53	330	6	9.01	259.4	508.7	3.88E-04	10.0
2	617	662	1.11	583	2.28	6.15	56.3	114.0	4.17E-04	16.8
17	679	675	1.27	675	1.55	6.22	42.4	48.6	2.65E-04	20.1

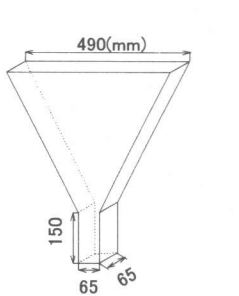


図-1 V漏斗試験装置

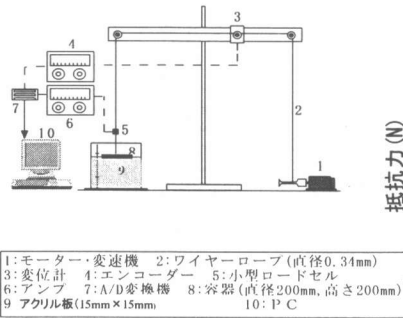


図-2 付着試験装置

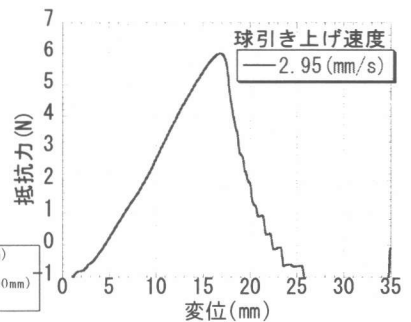


図-3 付着試験結果の一例

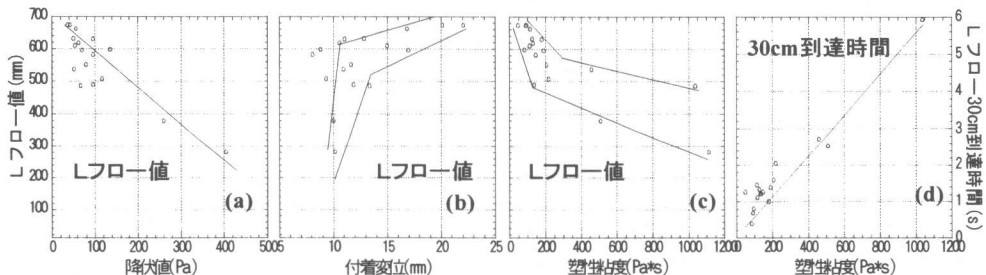


図-4 Lフロー試験と粘度、付着試験の関係

3. 個別要素法適用に際する

フレッシュコンクリートのモデル化

3. 1 要素モデル

個別要素法とは一つの粒状体を各個別要素の集合体と考え、各要素間に独立な運動方程式をたて、時間領域で前進的に解いていく手法である。要素モデルとして、本研究では、フレッシュコンクリートを粗骨材とモルタルからなる2相材料と仮定し、円形の粗骨材要素を等厚のモルタル膜で包んだ2相系モデル⁵⁾を適用した。また、モルタルの付着力を考慮するため、モルタル膜の外側に要素同士が離れていくときに限り、ある距離まではバネの引張力を認める厚さDの引張層を設けた(図-5)。

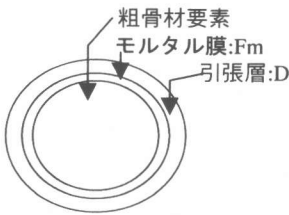


図-5 要素モデル

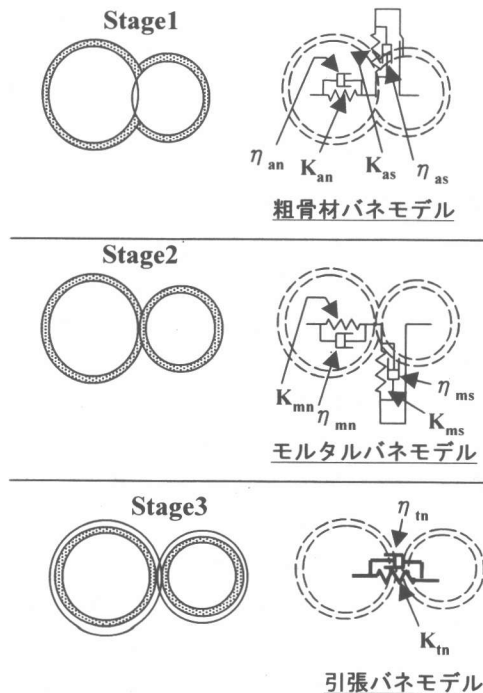


図-6 接触点モデル

3. 2 接触点モデル

粒状体の要素の変形は別の要素との接触点のみで生じるものとし、この接触点に発生する接触点モデルを通して粒子間の力の伝達が行われる。本研究ではこの接触点モデルに骨材間の接触による閉塞を表すことができる図-6のようなVoigt型を用いた。法線方向、接線方向にそれぞれ並列にバネ、ダッシュポットが発生し、それぞれ2要素間の相対距離によって、粗骨材同士が接触しているときは粗骨材バネモデル(Stage1)、モルタル膜同士が接触しているときはモルタルバネモデル(Stage2)、引張層同士が接触しているときは引張バネモデル(Stage3)が発生する(図-6)。粗骨材同士の接触時にのみ、スライダーを配したのは粗骨材の形状を考慮するためである。(ここで、Kはバネ係数、ηはダッシュポット定数、aは粗骨材、mはモルタル、nは法線方向成分、sは接線方向成分を表す。)

4. 個別要素法適用に際する

フレッシュコンクリートのパラメータ設定

4. 1 要素モデルのパラメータ設定

骨材半径は実験で使用した粗骨材の粒度分布に合わせ、ランダムに設定した。モルタル膜厚は余剰モルタル膜厚⁶⁾に等しいとし、以下の式で求められる。

$$Fm = \frac{1 - Vg * 10^2 / Cg * 10}{Sg * Vg}$$

ここで、Fmは余剰モルタル膜厚(mm)、Vgは粗骨材の容積割合、Cgは粗骨材の実績率(%), Sgは粗骨材の比表面積(cm²/cm³)である。この式を用い、余剰モルタル膜厚を求め、表-1に示す。

4. 2 接触点モデルのパラメータ設定

法線方向、接線方向の粗骨材バネ係数:K_{an}, K_{as}(図-6)は粗骨材の波動伝播速度⁷⁾を用いた理論により、以下の式で求まる。

$$\mu_L = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\lambda_L = \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\gamma}}, \quad V_p = \sqrt{\frac{\lambda_L + 2G}{\gamma}}$$

$$K_{an} = \frac{1}{4} \pi \rho V_p^2, \quad K_{as} = \frac{1}{4} \pi \rho V_s^2$$

ここで、Eはヤング率、 ν はポアソン比、Gは剛性率、 γ 、 ρ は密度、 λ_L はLameの定数、 V_s はS波速度、 V_p はP波速度である。それぞれの変数の値、求めたバネ係数は表-4に示す。

法線方向のモルタルバネ係数: K_{mn} はモルタルの圧縮部分を受け持ち、モルタルの降伏値に大きく関係する。この値を決めると、接線方向のモルタルバネ係数: K_{ms} は、減衰係数:Sを導入して以下の式で求められる。

$$K_{ms} = S \cdot K_{mn}$$

法線方向の引張バネ係数: K_{tn} は、付着試験から求められる付着強度に大きく関係し、モルタルの引張に対する強度を表す。接線方向の引張バネ係数: K_{ts} はゼロとした。また、本研究ではこれまでの解析結果から $S=0.25$ で一定とした。

図-7に本研究で仮定した法線方向バネ係数と2要素間相対距離の関係を示す。2要素間の接触力を求めるのに、Stage1の範囲では粗骨材の接触により、粗骨材バネ係数を用い、Stage

表-4 粗骨材バネ係数

変数		バネ係数(N/mm ³)	
E	6.886*10 ⁹	K _{an}	1.242*10 ⁸
ν	0.14	K _{as}	5.197*10 ⁷
γ	2610		

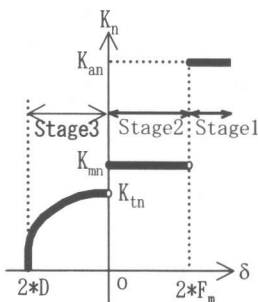


図-7 法線方向バネ係数

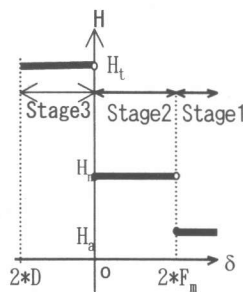


図-8 減衰定数

2ではモルタルバネ係数, Stage3では引張バネ係数を用いる。図-7において、引張バネ係数をこのような2次式にしたのは、引張バネにかかる力: $F=K \cdot \delta$ をグラフに表したときに、その曲線の形状特性が付着曲線(図-3)と等しくするためである。

ダッシュポット定数は、モルタル膜、引張層ともに、要素間の接触をバネとダッシュポットの1質点系と想定し、以下の式によって求めた。

$$\eta = 2 \cdot H \sqrt{m \cdot K}$$

ここで、mは粗骨材、モルタルの比重から求めた要素の質量、Kはバネ定数、Hは減衰定数である。減衰定数の値は計算の安定と塑性粘度に大きく関係する。減衰定数は2要素間の相対距離によって変わる。図-8に本研究で仮定した減衰定数と2要素間の距離の関係を示す。2要素間のダッシュポット定数を求めるのに、Stage1の骨材が接触しているときは、粗骨材の減衰定数: H_a 、Stage2のモルタル膜が接しているときはモルタルの減衰定数: H_m 、Stage3の引張層が接触しているときは、引張層の減衰定数: H_t を用いる。

引張層の厚さ:Dはモルタルの変形性を表し、付着試験から求められる付着変位と大きく関係づけられる。

5. 個別要素法を適用した流動解析

5.1 各パラメータの妥当性の確認

本研究では解析パラメータを設定するのに、実験結果から求められるフレッシュコンクリートの性質と関連させて決めた。ここで、解析パラメータが、それぞれ試験結果と関連づけて良いのか確認するために、各パラメータをそれぞれ変化させて障害なしのLフロー試験解析とV漏斗試験解析を行った。26ケースのパラメータで各解析を行い、表-5に解析で用いたパラメータの一部を示すとともに、その結果を示す。太字の値が変えたパラメータである。

図-9に解析パラメータとLフロー値の変化を示す。 K_{tn} は明らかな結果が見られなかった。

表-5 パラメトリックスタディの結果

解析パラメータNo	K _{mn}	K _{tn}	H _m	H _t	D	Lフロー試験 (障害無し)		Vロート試験
	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm*s)	(N/mm*s)	(mm)	Lfn(mm)	Lt30(s)	Vt(s)
1	1.62E-03	6.38E-02	1.00E-02	1.00E-01	2.00E-01	327.6	3.0	**
2	1.62E-03	6.38E-02	1.00E-02	1.00E-01	1.00E-01	432.9	1.0	**
3	1.62E-03	6.38E-02	1.00E-02	2.00E-01	1.00E-01	438.75	2.5	7.7
4	3.58E-03	1.62E-01	4.00E-02	3.00E-01	2.00E-01	280.8	*	閉塞
5	3.58E-03	6.38E-02	4.00E-02	3.00E-01	2.00E-01	292.5	*	**
6	3.58E-03	6.38E-02	2.00E-02	3.00E-01	2.00E-01	321.75	9.0	**
7	1.62E-03	6.38E-02	5.00E-03	1.00E-01	1.00E-01	479.7	1.0	**
8	6.52E-03	6.38E-02	5.00E-03	1.00E-01	1.00E-01	450.45	1.0	**
9	6.52E-03	6.38E-02	1.00E-02	1.00E-01	2.00E-01	280.8	*	**
10	3.65E-02	6.50E-03	2.00E-02	2.00E-01	1.00E-01	386.1	7.0	8.5

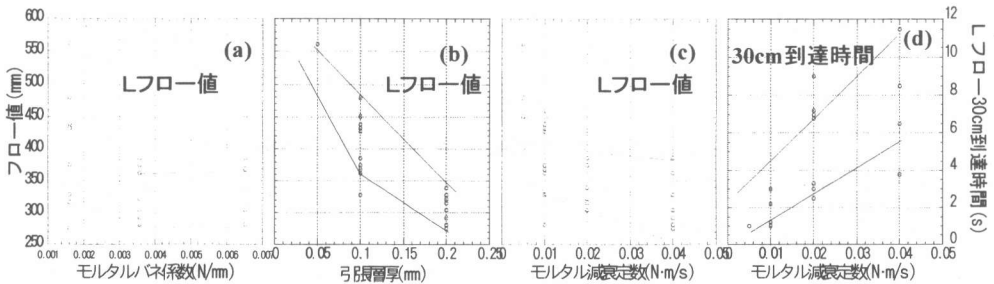


図-9 各パラメータとLフロー試験解析結果の関係

ここで、これらの結果から各パラメータの物理的意味を検証する。図-4(a)と図-9(a)を比較すると K_{mn} が小さい範囲では、 K_{mn} 、 τ ともに大きくなると Lfn が小さくなり、コンクリートが固くなることが分かる。図-4(b)と図-9(b)、図-4(d)と図-9(d)をそれぞれ比較すると η 、 H_m ともに大きくなると $Lt30n$ は大きくなり、 Lfn は小さくなり、コンクリートが固く、粘度が高くなることが分かる。図-4(c)と図-9(c)を比較すると、 D は大きくなると変形性が低いことを表し、 A_d は大きくなると変形性が高いことを表すから、どちらの場合も変形性が低い方に変化すると、 Lfn が小さくなっている。よって、これらの結果から、ここで比較した実際のフレッシュコンクリートの物理的性質を表す指標 (τ 、 η 、 A_s 、 A_d) と DEM プログラム上のフレッシュコンクリートの性質を表す解析パラメータ (K_{mn} 、 K_{tn} 、 H_m 、 H_t 、 D) はフレッシュコンクリートの流動に対してそれぞれほぼ同じ影響を及ぼしていると考えられる。

5. 3 実験結果の流動解析

降伏値と K_{mn} 、塑性粘度と H_m 、 H_t 、付着強度と K_t 、付着変位と D を関連付けて配合 No.18, No.2 の解析パラメータを決定する。

配合 No.16 の実験結果と解析パラメータ No.10 の Lフロー試験解析 (図-10(a))、V漏斗試験解析が良く一致した。そこで、配合 No.16 の値を基準にそれぞれの試験結果が No.16 の値から変化した分だけ、解析パラメータも No.10 の値を変化させて決める。そして、以下のような実際の物理的指標から解析パラメータを決定する式を提案する。()内の数字 16 は配合 No.16 の値であることを表す。X はこれから求める解析 No.を示す。

$$K_{mn}(X) = \frac{\tau_y(16)}{\tau_y(X)} \times K_{mn}(16) \quad K_{tn}(X) = \frac{A_s(16)}{A_s(X)} \times K_{tn}(16)$$

$$H_m(X) = \frac{\eta(16)}{\eta(X)} \times H_m(16) \quad H_t(X) = H_t(16) - (H_m(16) - H_m)$$

$$D(X) = \frac{A_d(X)}{A_d(16)} \times D(16)$$

表-6 に配合 No.18, 16, 2 の解析パラメータ 27, 10, 28 と、その V漏斗、L形フロー試験の解析結果を示す。図-10 にはそれぞれの障害無

表-6 配合No.18, 2の解析結果

解析パラメータNo	Kmn	Ktn	Hm	Ht	Sp	Lフロー試験		Vロート試験
	(N/mm)	(N/mm)	(N/mm*s)	(N/mm*s)	mm	Lfn(mm)	Lfa(mm)	Vt(s)
27	5.69E-02	5.97E-03	4.38E-02	2.24E-01	9.86E-02	315.9	292.5	10.5
10	3.58E-03	6.50E-03	2.00E-02	2.00E-01	1.00E-01	386.1	327.6	8.5
28	7.92E-03	6.98E-03	4.48E-03	4.48E-02	5.96E-02	526.5	421.2	4.7

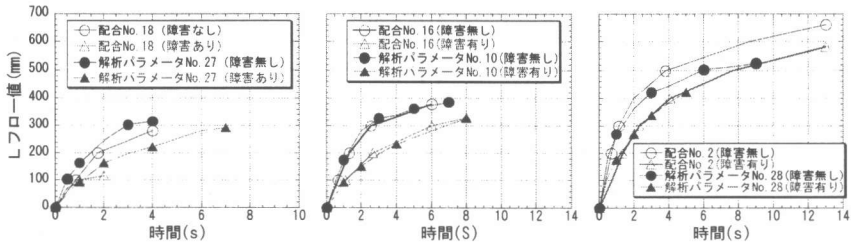


図-10 Lフローイング曲線による実験結果と解析結果の比較

し、障害有りの2通りのLフローイング曲線を示し、L形フロー試験の実験結果と解析結果の比較を行った。これらの結果から、全ての解析において、実験結果の傾向を表すことができる。しかし、配合No.27の障害有り、配合No.28の障害無しにおける解析結果は、まだまだ検討しなくてはならない。

6. まとめ

本研究では以下のことが分かった。

(1). 本研究で提案したモデル、パラメータ設定法は、Lフローイング曲線の前半部の傾き、Vロート流下時間が、ほぼ精度良く解析できることから、実験結果の傾向を追うことができたと言える。

(2). 本研究で提案したモデルにおいて、モルタルバネと降伏値、引張バネと付着強度、減衰定数と塑性粘度、引張層厚と付着変位等、これらの解析パラメータと実際のフレッシュコンクリートの性質を結び付けることにより、物理的意味を考慮したパラメータの設定ができた。

参考文献

1) 平野優ほか：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，コンクリ

ート工学年次論文集, vol.22, No.2, pp907-912, 2000

2) 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

3) H.CHUほか：Verification of Application of DEM to Fresh Concrete by Sphere Dragging Viscometer, Vol.19, No.1, pp463-468, 1997

4) 吉野公ほか：高流動コンクリートの鉄筋間通過性に関する研究，コンクリート工学年次論文集, vol.18, No.1, pp93-98, 1996

5) 牧ほか：吹き付けコンクリートのリバウンド評価に対する2次元個別要素法の適用，土木学会論文集, Vol-43, No.620, pp109-118, 1999.5

6) 吉野公ほか：高流動コンクリートのレオロジー一定数に及ぼす配合要因の影響，コンクリート工学年次論文集, vol.20, No.2, pp343-348, 1998

7) 目黒公郎：個別要素法によるコンクリート構造物の破壊解析，東京大学地震研究所彙報, Vol.63, 1988