

論文 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

小林秀徳*¹・平野優*¹・白岩誠史*²・町田篤彦*³

要旨：球引上げ粘度計で求めたビンガム定数を用いて、粉体系高流動コンクリートの流動性状、および個別要素法による解析結果との比較を行い、解析に用いる入力パラメータの決定方法について考察した。その結果、配合表とスランプフローおよびOロート流下時間から、高流動コンクリートのビンガム定数や、個別要素法の入力パラメータを大まかに予測することが可能であることが分かった。

キーワード：球引上げ粘度計、ビンガム定数、個別要素法

1. はじめに

高い自己充填性と材料分離抵抗性を保有し、振動による締固めが不要である高流動コンクリートのフレッシュ時の施工性、および作業能率などを詳しく把握することは、現場におけるコンクリート打設の合理化・省力化を考える場合、特に不可欠である。本研究では、高流動コンクリートをビンガム流体と仮定し、球引上げ粘度計によるビンガム定数の測定および個別要素法 (Distinct Element Method ; DEM) を用いた解析を行った。そして実験と解析の結果を比較することにより、コンクリートの配合要因などから、フレッシュ時の流動性状を把握することを目的とし、そのための手法について提案した。個別要素法を採用した理由は、個別要素法がその性格上、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適しており、改良を加えた上で高流動コンクリートにも適用できると判断したためである。そして、実験によるビンガム定数の測定値と、解析で求めたビンガム定数の予想値を組み合わせることにより、配合表や簡単な試験値などから得られる数値から個別要素法の入力パラメータ

を推測するための手法を提案し、その結果についての考察を行った。

なお、増粘剤系については既に成果が得られたため¹⁾、今回は粉体系高流動コンクリートについて主に研究を行った。

2. 実験概要

表-1に本研究で使用した材料とその特性を示し、表-2にコンクリートの配合と実験結果を示す。粗骨材の粒径は5~20mmであり、細・粗骨材とも土木学会粒度範囲のものを使用した。また、練混ぜ水がフレッシュコンクリートに与える影響を考慮して、水温はほぼ一定になるように配慮した。練混ぜには、パン型ミキサ (容量 100 l) を使用し、練混ぜ方法は、まずセメント・高炉スラグ微粉末・細骨材を投入し、2分間空練りを行い、その後あらかじめ混和剤を溶解した水を加えて3分間練混ぜを行った。最後に粗骨材を投入し、3分間練り混ぜた。

図-1に球引上げ粘度計の装置を示す²⁾。引上げ速度は3~30mm/sで約3mm/sごとに設定し、それぞれの速度で引上げたときの抵抗力Fと

*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)

鉄球の上昇速度 v を測定した (図-2)。抵抗力 F は、鉄球の変位 20~80mm において鉄球が受ける力の平均とした。1 回の引上げごとに試料をよく混ぜ、粗骨材が沈み容器底面にたまるのを防いだ。

本研究では高流動コンクリートをビンガム流体と仮定しており、Ansley による次の式に実験値を代入することでコンクリートの持つせん断ひずみ速度とせん断応力が求められる³⁾。

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{2r} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F}{12\pi r^2} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$:せん断ひずみ速度、 v :引上げ速度 (mm/s)、 r :鉄球の半径 (mm)、 τ :せん断応力 (N/mm²)、 F :抵抗力 (N)である。

ここで求めたせん断ひずみ速度を縦軸、せん断応力を横軸にとり、プロットしたものを直線回帰してコンシステンシー直(曲)線を求めた。このグラフと横軸との切片が降伏値 τ_f 、傾きの逆数が塑性粘度 η である (図-3)³⁾。

表 1 使用材料と物性

使用材料	材料特性
水 (W)	上水道水(水温:14.5~16.0℃)
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 比重3.15
混和材 (BS)	高炉スラグ微粉末 密度:2.91(g/cm ³), 粉末度:6490(cm ² /g)
細骨材 (S)	利根川産川砂 比重2.56, 吸水率3.52%, 粗粒率2.48
粗骨材 (G)	入間川産川砂利 比重2.65, 吸水率0.00%, 粗粒率6.83
混和剤 (SP)	高性能A E減水剤 主成分:ポリカルボン酸エーテル系

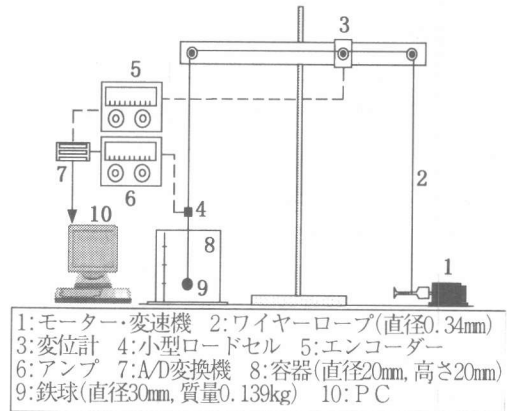


図 1 球引上げ粘度計の実験装置

表 2 粉体系高流動コンクリートの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 ³)					混和剤 SP P×%	ス ラ ン グ フ ー ー (cm)	O ー ー 下 時 間 (s)	ビンガム定数		
				水 W	セ メ ン ト C	ス ラ グ * BS	細 骨 材 S	粗 骨 材 G				降 伏 値 τ_f (Pa)	塑 性 粘 度 η (Pa·s)	相 関 係 数 R
1	0.35	0.48	0.50	193	275	275	771	870	1.0	56.8	6.96	29.57	17.35	0.922
2	0.30	0.50	0.50	167	275	275	837	870	1.2	53.5	10.92	23.74	244.61	0.984
3	0.27	0.51	0.50	148	275	275	888	870	1.8	74.3	19.61	9.66	73.14	0.993
4	0.30	0.50	0.50	165	279	279	837	870	1.6	62.3	10.59	9.98	101.96	0.968
5	0.33	0.51	0.50	165	252	252	882	870	1.6	62.0	10.66	33.21	209.66	0.979
6	0.36	0.52	0.50	165	230	230	920	870	1.4	35.3	19.03	136.25	419.19	0.886
7	0.25	0.50	0.50	149	298	298	844	870	2.2	69.3	26.09	1.94	110.95	0.978
8	0.35	0.50	0.50	178	254	254	844	870	1.1	42.3	14.33	114.39	150.07	0.875
9	0.40	0.50	0.50	190	237	237	844	870	0.7	32.5	8.68	226.68	382.62	0.971
10	0.29	0.50	0.25	165	420	140	844	870	1.8	66.0	12.07	21.43	130.50	0.990
11	0.30	0.50	0.50	165	275	275	844	870	1.8	73.8	15.65	4.53	59.73	0.982
12	0.31	0.50	0.75	165	135	404	844	870	1.8	74.3	18.03	6.79	59.74	0.972
13	0.30	0.53	0.50	172	286	286	879	795	1.7	72.5	13.28	14.98	40.15	0.960
14	0.30	0.46	0.50	157	261	261	804	954	1.7	65.8	18.80	3.52	144.10	0.970
15	0.30	0.43	0.50	150	249	249	766	1034	1.7	56.3	41.29	20.32	313.83	0.959

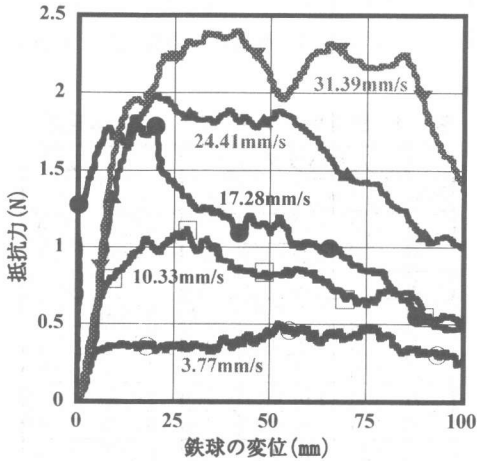


図-2 球引上げ試験の測定結果 (配合5)

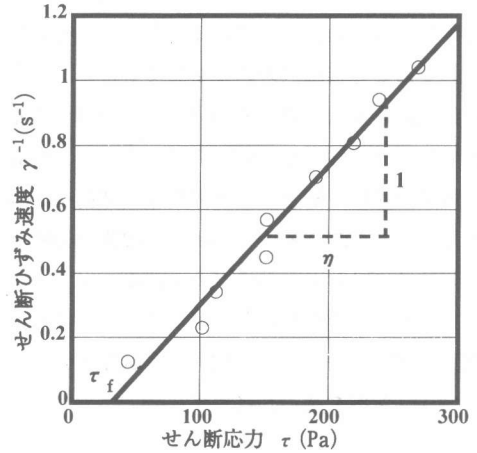


図-3 コンシステンシー直線 (配合5)

3. 入力パラメータの決定

3.1 実験によるビンガム定数の決定

本研究では、表-2に示す配合と、スランプフロー、およびOロート流下時間の測定値を独立変数(X_m)に用いて、直線回帰により、従属変数(Y_m)であるビンガム定数を推定する式での各係数(a_m)を決定した。

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_m X_m$$

なお、粗骨材については、単位重量ではなく単位体積(コンクリート $1m^3$ 中の粗骨材の体積)を用いた。その理由は、①単位容積を用いたほうが回帰分析の精度が良いため、②実験配合を決定する際に粗骨材の分量だけは体積をもとに行ったためである。

また当初、配合表から読み取れる数値のみを独立変数に用いたが、その場合、推定式の相関係数がそれほど高くならなかったため、独立変数にOロート流下時間およびスランプフローを追加した。その結果、比較的高い相関係数を持つ推定式を決定することができた。

このことから、配合データのみで練混ぜ後の流動性状を予測することはまだまだ難しいものの、配合表のデータに加えてスランプ試験およびOロート流下試験の結果を用いることにより、

高流動コンクリートの流動性状を判断することが可能になるといえる。

今回行った球引上げ試験は、図-1からも分かるとおり必要な測定機器が多く、全体としても多少大がかりであり、測定者の労力や時間的拘束も大きいものであった。そのため、現場などで実用化するのほとんど不可能であるため、この試験を行うことなく、精度よくビンガム定数を推定できるようになったことは、意義のあることであるといえる。表-3に今回決定した推定式での各係数を示す

表-3 配合などによるビンガム定数の推定

	τ_f	η
定数項	0.000	0.000
W(kg/m ³)	1.361	-0.845
P(kg/m ³)	-0.377	-0.164
S(kg/m ³)	0.367	0.372
G(m ³ /m ³)	-437.492	1474.046
SP(W×%)	-29.823	191.104
スランプ70-(cm)	-2.190	-11.343
O75time(s)	1.875	-1.251
重相関 R	0.936	0.893
重決定 R ²	0.877	0.798

3.2 個別要素法によるビンガム定数の決定

(1) 個別要素法の概要⁴⁾

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、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適している。各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、この接触点を通じて粒子間の力の伝達が行われる。各要素ごとに独立した運動方程式を立て、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。物質の線形・非線形は、要素の接触点に弾性スプリング、粘性ダッシュポット、スライダ等を想定することで表現する。要素の接触点モデルを図-4に、球引上げ試験のシミュレーション例を図-5に示す。

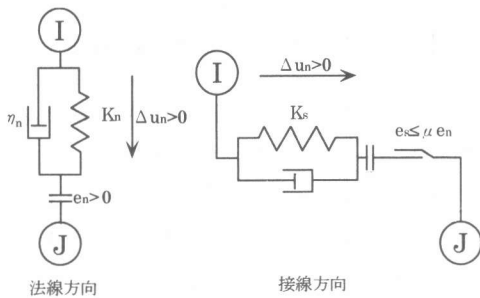


図-4 個別要素法の接触点モデル

ここで、 K_R :バネ定数、 η_d :ダッシュポット定数、 μ :まさつ係数、 λ :引張許容百分率とする。

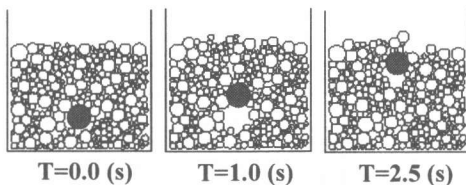


図-5 シミュレーション例

(2) ビンガム定数の決定¹⁾

14組のパラメータを個別要素法のプログラムに入力して球引上げ試験の流動解析を行い、そのときに設定した球の引上げ速度 v と、および解析により算出される鉄球が受けるコンクリートの抵抗力 F から、3.1と同様の方法により解析によるビンガム定数を求めた。表-4に今回の解析で用いた入力パラメータ、およびそれぞ

れのパラメータを入力することによって求められたビンガム定数(解析による推定値)を示す。

表-4 解析用パラメータ・ビンガム定数

No.	入力パラメータ				ビンガム定数	
	K_R	η_{dR}	μ	λ	τ_f	η
1	1.0	1.0	0.01	0.6	45.53	26.93
2	1.0	0.1	0.01	0.6	22.06	21.52
3	2.0	1.0	0.01	0.6	45.51	101.13
4	1.0	2.0	0.01	0.6	96.04	19.14
5	1.0	1.0	0.10	1.5	50.15	79.42
6	1.0	1.0	0.01	1.5	37.61	38.00
7	1.0	1.0	0.01	2.5	59.32	60.38
8	1.0	1.0	0.20	1.5	63.99	122.41
9	1.5	1.0	0.01	0.6	63.33	59.18
10	1.0	1.0	0.01	5.0	76.55	88.89
11	1.0	1.0	0.01	3.5	63.77	71.70
12	3.0	1.0	0.01	0.6	60.74	159.40
13	1.0	1.0	0.30	0.6	65.87	139.55
14	1.0	1.0	0.30	1.5	75.95	145.94

表-4を用いて、3.1と同様、回帰分析手法により、入力パラメータと解析によるビンガム定数との関係を求める式を推定した。ただし、まさつ係数 μ については本研究で行った回帰分析による方法では精度が低くなった。この理由は、球引上げ試験がコンクリートのまさつやすべりの測定には適していないためと考えられる。しかしながら、今回はコンクリートのすべり抵抗やまさつなどに関する性質の測定を目的とした実験を行わなかったため、既往の提案式⁹⁾を用いた。それ以外の式については、表-4のデータを回帰分析することにより求めた。以下に個別要素法入力パラメータの推定式を示す¹⁾。

$$\eta_d = 0.026 \eta - 0.231 \quad (R=0.894)$$

$$\mu = 0.75 (W/C) - 0.085$$

$$K_R = 0.0169 \tau_f - 5.427 \mu + 0.136 \quad (R=0.880)$$

$$\lambda = 0.0535 \tau_f - 4.038 K_R - 20.064 \mu + 3.244 \quad (R=0.998)$$

なお、計算時間などの理由により、ここで用いている表-4およびそれによる入力パラメータ推定式は、文献1)から引用したものであ

る。

3.3 個別要素法入力パラメータの決定

3.1, 3.2 から, 配合の特性値および簡単な実験を行うだけで, 個別要素法の入力パラメータを直接求めることが可能になる。

そして, この手法を用いることにより, 今回実際に実験に用いたコンクリートの配合および簡単な実験によって得た測定値 (W, P, S, G, SP, スランプフロー, O ロート流下時間) を使って, 個別要素法シミュレーションに必要な入力パラメータ (K_R , η_{dR} , λ , μ) の算出を試みた。その一例を表-5 に示す。

なお, 今回の解析に用いた最小時間刻み Δt は 7×10^{-6} (s) に設定した。

表-5 配合による推定入力パラメータ

配合	5
W(kg/m ³)	165
P(kg/m ³)	504
S(kg/m ³)	882
G(m ³ /m ³)	0.328
SP(W×%)	1.6
SLF(cm)	62.0
O75T(s)	10.66
推定 τ_f	51.24
推定 η	178.67
推定 η_{dR}	4.415
推定 μ	0.161
推定 K_R	0.131
推定 λ	2.236

4 解析結果と実験結果の比較

実験結果における鉄球の引上げ速度と抵抗力の一例を取り上げ, その速度および 3.3 で決定した入力パラメータを, 実際に個別要素法のシミュレーションに入力し, 流動解析を行った。つまり同一の引上げ速度における実験および解析で, 鉄球が受ける抵抗力を比較した。なお, 今回取り上げた実験値は配合 5 における, 引上げ速度 17.28mm/s のものである。

比較の結果を図-6 に示す。

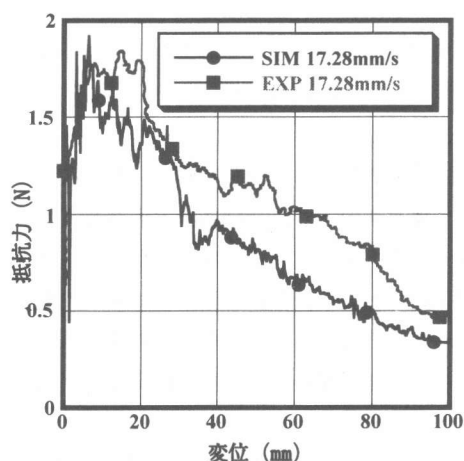


図-6 実験値と解析結果の比較 (配合 5)

この図から, 解析による結果は, グラフの形状に注目した場合, 実際の流動性状を比較的近いものであるといえる。引上げ初期の抵抗力についても, 両者は比較的近い値になっている。

しかしながら, 実験, 解析の両方で, 1 つの速度における抵抗力の算出に用いた鉄球の変位, つまり変位 20~80mm の範囲では, 解析結果は実験値よりもやや低めに算出されていることが分かる。実際にこの範囲で抵抗力の平均値を求めてみたが, 実験値が 1.132 (N) であるのに対し解析値は 0.840 (N) となった。

また, 他の速度でも同様の比較を行ったが, 実験結果と解析結果が比較的良く一致しているものと離れているものがあり, この理由を考えていくことが今後の課題として重要である。

5 パラメータ推定式の適用性

推定式による入力パラメータを用いた流動解析, および実験による測定値との比較から, 今回提案したパラメータ推定方法により, まだまだ確実ではないものの, 大まかな流動性状を表現できるパラメータを求められるといえる。

実際, 入力パラメータをランダムに用いた場合, 計算途中で要素が発散し, 解析としては失敗となることが多々ある。しかし, 今回

の推定手法を用いることにより、このような発散などによる致命的な失敗を未然に防ぐことが可能になったといえる。

今後の課題としては、今回用いた手法にさらに検討を加えて、高い精度で最適な入力パラメータを決定できる手法を開発することが望まれる。また、今回は球引上げ試験の解析にとどまったが、今後はその他の流動試験に関しても個別要素法による解析を行い、流動試験全般にわたって適用できる入力パラメータおよびその推定式を確立させる必要がある。

6 まとめ

本研究では、粉体系高流動コンクリートのフレッシュ時の流動性状に着目し、その流動特性を個別要素法で解析する場合の、入力パラメータの決定方法、およびその適用性について検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを以下に示す。

- (1) 配合要因のみでビンガム定数を推定しようとする場合、回帰分析による推定式では、精度の点で問題があり、配合要因のみでは推定式を決定するまでには至らなかった。
- (2) 配合要因にスランプフローおよびOロート流下時間を加えた条件では、高い精度でビンガム定数を推定する式を得ることが出来た。
- (3) ビンガム定数から個別要素法の入力パラメータ推定式を求める場合、バネ定数、ダッシュポット定数、および引張許容百分率に関しては精度良く求められたが、まさつ定数に関しては今回の方法では求められなかった。まさつ係数の決定に関しては、球引上げ試験やビンガム定数に拠らない決定方法が必要であるといえる。
- (4) 今回用いた推定手法は、個別要素法による流動解析を成功させるためのパラメータを決定する上で、非常に有効であるといえる。しかしながら、実際に推定されたパラ

メータを用いて解析を行った結果は、フレッシュ時の高流動コンクリートの性状を確実に予測できるとはいいい難いため、今後はデータ数を増やして回帰分析の信頼性を高めたり、実験値と解析値の相違の原因についてさらに検討を加え、推定式の精度を高めていく必要がある。

この研究は、文部省科学研究費補助金（基盤研究（B）（2））「フレッシュコンクリートの材料分離特性に関する研究」によって行ったものである。ここに記して、厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 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, pp.63-69, Sep.1997
- 2) CHU, H., MACHIDA, A., and KOBAYASHI, H.: Verification of Application of DEM to Fresh Concrete by Sphere Dragging Viscometer. Proceedings of the JCI, Vol.19, No.1, pp.463-468, 1997
- 3) フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会:フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp98,1996.4
- 4) 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講演会論文集, Vol.16, No.1, pp479-484, 1994
- 5) 谷川恭雄ほか:スランプ試験およびすべり抵抗試験によるフレッシュコンクリートのレオロジー定数の測定, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.7, pp381-384, 1986