

論文

[1123] フレッシュコンクリートのテーパー管内流動に関するサスペンション要素法解析

正会員 谷川恭雄 (三重大学工学部)
 正会員 森 博嗣 (三重大学工学部)
 正会員 ○渡辺健治 (三重大学大学院)
 三輪正保 (三重大学大学院)

1. まえがき

近年、フレッシュコンクリートの各種挙動を、レオロジー的立場から解明しようとする研究[1]が数多く報告されている。しかし、フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関しては、現場での実用性を検証するための実験的な研究報告[2, 3]は数多くみられるものの、レオロジー理論に基づく解析的な研究[4, 5]は比較的少ない。最近、流動化コンクリート、水中施工コンクリート、繊維補強コンクリート、高強度コンクリートなど、従来のコンクリートとは流動性状が著しく相違する各種のコンクリートが実用化されているが、これらのコンクリートのポンプ圧送性を予測する手法を確立することは、この分野における重要な課題の一つである。

筆者らは、フレッシュコンクリートの汎用的な流動シミュレーションの一手法として、粘塑性有限要素法に基づく解析方法を提案し[6]、これまでに、各種コンシステンシー試験、各種レオロジー試験および型枠内でのフレッシュコンクリートの流動に関するシミュレーションを行い[7, 8]、解析手法の妥当性を確認するとともに、その適用範囲を示してきた。しかし、この解析手法では、フレッシュコンクリートを均質な連続体と仮定しているため、粗骨材の挙動に深く関わるような現象を正確に捉えることが困難であった。このため本研究では、筆者らが新たに開発したサスペンション要素法(SEM)[9]を用いて、テーパー管内を流動するフレッシュコンクリートの挙動に関するシミュレーションを行い、その流動性状について解析的な観点からの考察を行った。

2. 解析方法

2.1 サスペンション要素法の概要

本解析方法の詳細と妥当性については、既報[9]で報告したので、ここでは、その概要のみを述べる。

フレッシュコンクリートの流動は、骨材間のマトリックス部の変形によるものである。本解析方法は、粘塑性流体中に点在するある大きさの球体(剛体)の運動をシミュレートするため、図-1に示すように、ある程度接近した2つの骨材の間に粘塑性性質をもつ円柱形の要素(サスペンション要素)を設け、各要素の変形量から全骨材の移動量を計算する。また、外部壁面に接近し

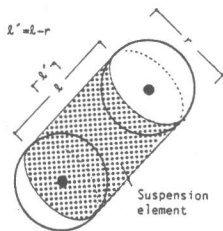


図-1 サスペンション要素

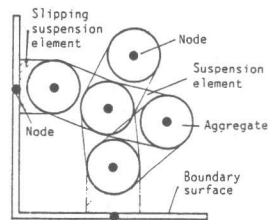
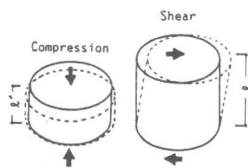


図-2 サスペンション要素の構成

た骨材と壁面間には、図-2に示すように、すべりサスペンション要素が構成され、コンクリートと壁面の間に働くすべり抵抗力[10]を表現する。サスペンション要素は、自動的に発生・消滅させるため、マトリックス部に体積の概念はなく、粗骨材の周囲に付着した領域として取り扱われる。本解析では、離散剛要素法[11]と類似の解析モデルを使用しているが、フレッシュコンクリートを取り扱うために、粘塑性体の構成則を用いる点、また、計算の手法として、図-3に示すように、既に提案した非定常粘塑性解析手法[12]に基づくアルゴリズムを用いる点が離散剛要素法と異なる。

2.2 解析手順

今回の解析では、単純な2次元モデルテーパ管を対象にシミュレーションを行った。圧送方法は、テーパ管を水平に設置したHシリーズ、垂直に設置したVシリーズの2種類である。図-4および表-1に、解析に使用したモデルテーパ管の形状・寸法を示す。コンクリートは管の入口付近(断面S)で発生させ、出口付近(断面E)で消滅させている。また、ポンプ圧力に相当する合力を等分し、図-4中に示した断面Aより手前にある骨材に、管軸方向に節点力を加えた。

表-2に、ポンプ圧力、コンクリートのマトリックス部のレオロジー性質およびすべり抵抗力に関する入力データを示す。すべり抵抗力に関する

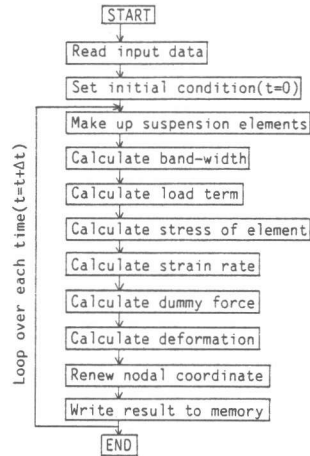


図-3 サスペンション要素法のフローチャート

表-1 モデルテーパ管の形状および寸法

Series name V T 6 4 - 10

Direction	Shape	Entrance(P_i)	Exit(P_o)	Tapered ratio(T_r)	
H Horizontal	S Straight	6	6.0	3 3.0	05 5%
V Vertical	T Tapered			4 4.0	10 10%
				5 5.0	20 20%
				6 6.0	IN ∞

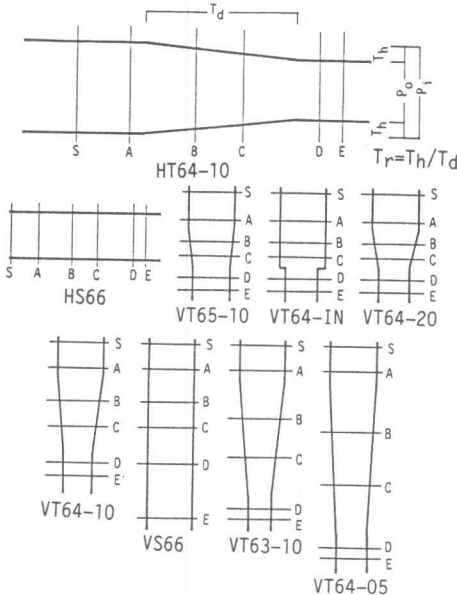


図-4 モデルテーパ管の形状と流速算定断面

Series	S~A	A~B	B~C	C~D	D~E
HS66	3.5	4.3	3.3	4.8	1.5
VS66	3.5	4.3	3.3	4.8	6.5
HT64-10	3.5	4.3	3.3	4.8	1.5
VT64-IN	3.5	2.7	1.7	3.2	1.5
VT64-10	3.5	4.3	3.3	4.8	1.5
VT63-10	3.5	6.0	5.0	6.5	1.5
VT65-10	3.5	2.7	1.7	3.2	1.5
VT64-05	3.5	7.7	6.7	8.2	1.5
VT64-20	3.5	2.7	1.7	3.5	1.5

Unit:cm.

表-2 解析に用いた試料の入力データ

A_g (mm)	η (kPa·s)	τ_y (gf/cm ²)	
10	0.05~0.10	1.0~10.0	
S_1	S_2	S_3	S_4
0.00~0.04	0.0~0.7	0.1~0.3	0.7~2.5

[Notes]
 A_g : Size of aggregate, η : Plastic viscosity, τ_y : Yield value, $S_1 \sim S_4$: Parameters in the following equations: $\sigma_h = S_1 B \sigma_n + S_2 B + S_3 \sigma_n + S_4$, σ_h : Slipping resistance stress (gf/cm²), B : Slipping velocity (cm/sec), σ_n : Normal stress (gf/cm²).

る入力データは、実験[10]によって得られたものである。粗骨材の寸法は10mmの一定とした。

3. 解析結果とその考察

3.1 水平に設置されたテーパ管内の流動状況

図-5に、Hシリーズのモデルテーパ管に関する解析結果の一例を示す。この図には、個々の骨材の移動を示すため、特定の骨材に印を付けてあるが、管内を圧送されるコンクリートのプラグフローが観察できる。解析結果によれば、水平に設置した場合、管壁とコンクリートの間に働くすべり抵抗力が流動状況に複雑な影響を及ぼすが、本報では、主として試料のレオロジー性質とテーパ管の形状が流動に及ぼす影響を調べるため、水平管に比べてすべり抵抗力の影響の少ない、垂直モデルテーパ管（Vシリーズ）内の挙動について考察した。

3.2 垂直に設置されたテーパ管内の流動状況

図-6に、Vシリーズのモデルテーパ管に関する解析結果の一例を示す。解析結果から、管内の各位置における流速を算出し、以下の考察を行った。

図-7は、管内を流れる全骨材の流速と管内の断面位置(x)の関係を示した一例であるが、管軸方向について同位置であれば、入口付近を除いてほぼ一定の流速を示している。すなわち、本解析で用いたような入力データの範囲では、全断面が、いわゆるプラグフローの状態で流動する。

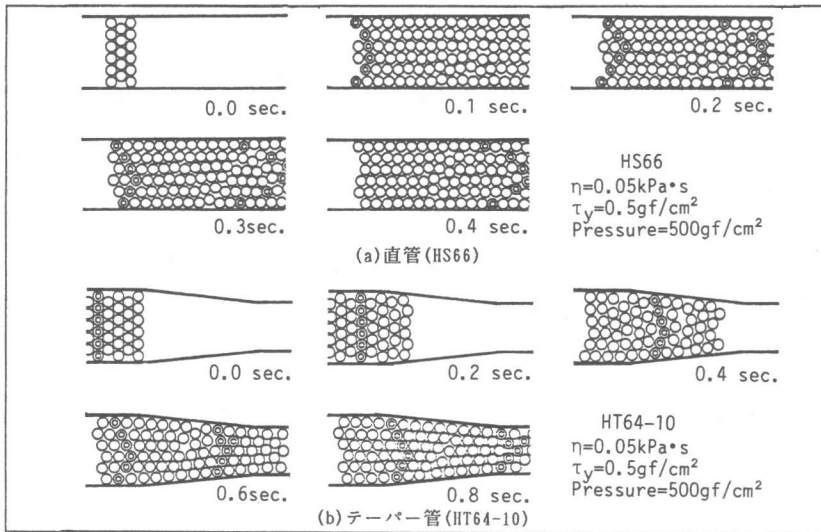


図-5 モデルテーパ管内の流動シミュレーション結果の一例（Hシリーズ）

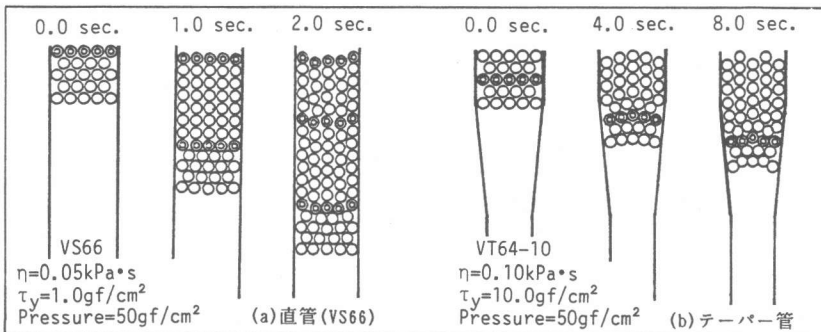


図-6 モデルテーパ管内の流動シミュレーション結果の一例（Vシリーズ）

図-8は、各断面における平均流速と時間の関係を示したものである。流速を算定した断面位置は、図-4中に示す断面A～Dである。図-8から明らかなように、各断面を通過する試料の流速は、時間の経過にしたがって次第に遅くなり、やがて流動は定常状態となって、流速は一定値に収束する傾向を示す。

図-9は、断面A～Dにおける流速を、直管(VS66)とテーパ管(VT64-10)で比較したものである。一般に、ポンプ圧力が同じであれば、直管に比べてテーパ管の方が流速は小さくなる。また、コンクリートと壁面との摩擦のため流速は次第に減少するが、テーパ管の場合は、出口に近づくにしたがって管が細くなるため流速が増す傾向が加わり、断面B～Dの間では、流速はほぼ一定となる。

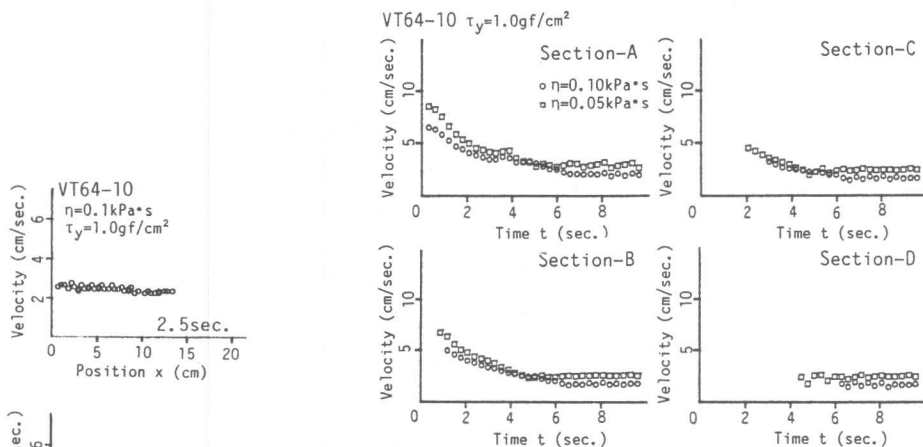


図-8 流速と時間(t)の関係

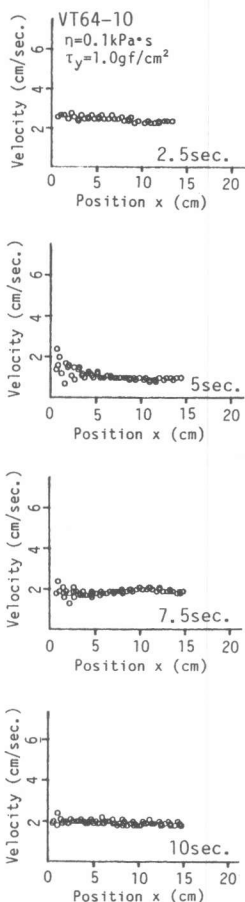


図-7 流速と位置(x)の関係

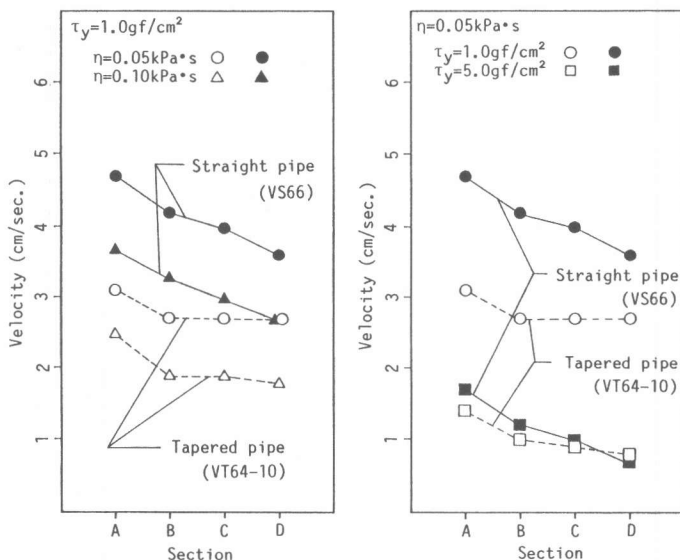


図-9 直管とテーパ管における流速の比較

3.3 レオロジー定数が流速に及ぼす影響

図-10および図-11は、同一形状のモデルテーパー管内を流れるコンクリートの降伏値(τ_y)および塑性粘度(η)を変化させた場合の流速を比較したものである。これらの図より明らかなように、降伏値および塑性粘度が大きくなるほど流速は小さくなり、閉塞にいたるものもある。

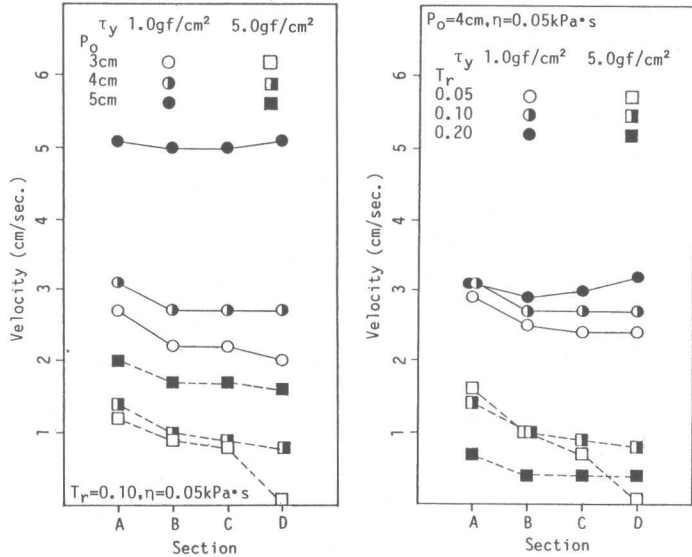
3.4 テーパー管の形状が流速に及ぼす影響

図-10(a)および11(a)によれば、テーパー率(T_r)が同じ場合は、当然のことながら出口部の口径(P_o)が小さいほど流速は遅くなり、流動に対する抵抗が大きくなる。

一方、出口径が同じでテーパー率(T_r)を変化させた場合を比較した図-10(b)および11(b)によれば、降伏値(τ_y)および塑性粘度(η)が小さい場合は、テーパー率が大きいほど、テーパー部通過後の流速は速くなっている。しかし、図-10(b)に示すように、降伏値(τ_y)

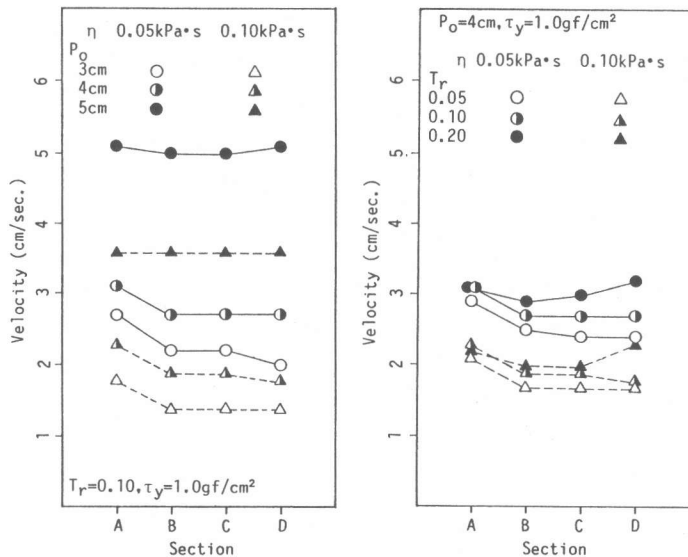
が大きい場合は、逆にテーパー率が大きいものほど流速は小さくなる。つまり、テーパー管の場合は、試料のレオロジー性質に応じて最適のテーパー率が存在すると考えられる。次に、径の相違する管を直接ジョイントした場合の各断面位置における流速と、テーパー管の場合とを比較した一例を図-12に示す。この図から、ジョイント部では閉塞には至っていないものの、テーパー管の場合よりも流速はかなり小さくなるのがわかる。

前掲の図-2, 3や既往の実験的研究[5]でも



(a) 出口径(P_o)を変化させた場合 (b) テーパー率(T_r)を変化させた場合

図-10 降伏値が流速に及ぼす影響



(a) 出口径(P_o)を変化させた場合 (b) テーパー率(T_r)を変化させた場合

図-11 塑性粘度が流速に及ぼす影響

明らかなように、テーパ管内を圧送されるコンクリート中の粗骨材は、テーパ部で集積する傾向を示す。今回の解析では、粗骨材同士の接触面に働く摩擦抵抗力を考慮していないため、完全な閉塞を再現することはできなかったが、今後、粗骨材の接触抵抗を導入した解析を行うことによって、閉塞機構に及ぼす各種要因の影響を明らかにすることができるものと思われる。

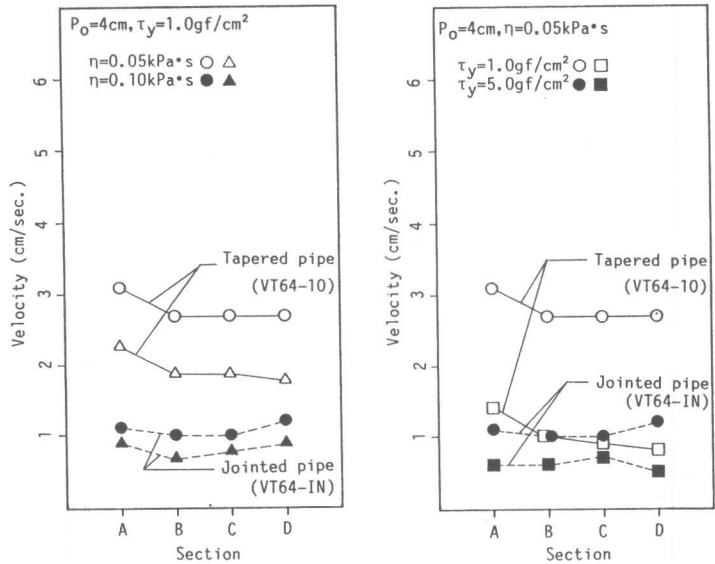
4. 結論

本研究では、テーパ管内におけるフレッシュコンクリートの流動状況をサスペンション要素法を用いて解析的に検討した。テーパ管内を流動するフレッシュコンクリートの流速は、試料のレオロジー性質と管の形状によって複雑な影響を受けるが、これらの特性をサスペンション要素法解析によって定量的に把握することが可能である。今後、粗骨材寸法や、ポンプ圧力などの条件を考慮した、より正確なシミュレーションを実施し、閉塞を誘発する要因を明らかにする必要がある。

[謝辞]

本研究費の一部は、日本スパンクリート協会研究助成金によった。付記して謝意を表する。

[引用文献] [1]Tattersall, G.H. and Banfill, P.F.G., The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, 359pp. 1983. [2]村田・鈴木, 土木学会論文集, No. 384, pp.129-136, 1987. [3]橋本・丸山・清水, コンクリート工学, Vol.26, No.2, pp.17-25, 1988. [4]烏田・高木・森永・高田・成田, 日本建築学会論文報告集, No.177, pp.1-5, 1970. [5]Nanayakkara, A., Gunatilaka, D., Ozawa, K., and Maekawa, K., コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.819-824, 1988. [6]森・谷川, 日本建築学会構造系論文報告集, No.374, pp.1-9, 1987. [7]森・谷川, 日本建築学会構造系論文報告集, No.377, pp.16-26, 1987. [8]森・谷川, 日本建築学会構造系論文報告集, No.388, pp.18-27, 1988. [9]谷川・森・中村・梅本・渡辺, フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集, JCI, pp.67-72, 1989. [10]谷川・森・田中・梅本・黒川, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.111-112, 1987. [11]木山・藤村, 土木学会論文報告集, No.333, pp.137-146, 1983. [12]Tanigawa, Y. and Mori, H., Jour. of Engineering Mechanics, Proc. of ASCE, Vol.115, No.EM-3, pp.493-508, 1989.



(a) 塑性粘度を変化させた場合

(b) 降伏値を変化させた場合

図-12 異径ジョイント管とテーパ管における流速の比較