

論文

[1177] 変形管内を流れるフレッシュコンクリートの流動解析

渡辺健治^{*1}・森博嗣^{*2}・谷川恭雄^{*3}

1. まえがき

ポンプ圧送技術の発展を背景として、コンクリート施工におけるポンプ工法の採用が一般的となっている。最近では、分岐・開閉弁など、配管計画もより複雑となりつつあり、水平・垂直圧送を含めて圧送距離が数百mに及ぶ事例も珍しくない。

日本建築学会コンクリートポンプ工法施工指針案[1]によれば、コンクリートのスランプ値と圧送管の径に応じて圧力損失を略算することができるが、この推定法の根拠となっているものは、従来のコンクリートによる実験データであり、近年新しく開発された各種の高流動タイプのコンクリートには適用できない場合が多いことが指摘されている[2]。また、管内を圧送されるフレッシュコンクリートの挙動を模擬材料を用いて可視化する手法が報告されており[3]、圧送管内における流動挙動を理論的に解明するためには、これらのモデル実験や数値解析によって現象を十分に観察・把握しておくことが重要である[4]。

筆者らは既に、直管やテーパ管内におけるフレッシュコンクリートの圧送性に関する理論的・解析的研究をいくつか報告してきたが[5-7]、粗骨材の挙動が問題となる、ベント管やテーパ管内における流動性状については不明瞭な点が多い。本研究では、固体粒子の運動をトレースできる粘塑性サスペンション要素法(VSEM)を用いて、ベント管およびテーパ管内を流れるフレッシュコンクリートの流動シミュレーションを行った。

2. 解析手法の概要

2.1 構成則

本解析では、マトリックスモルタルの構成則としてビンガムモデルを用いているが、粘塑性サスペンション要素法(VSEM)では、コンクリートを粗骨材とマトリックスモルタルの二相材料として取り扱っているため、粗骨材同士の接近によるインターロック現象が流動に与える影響を表現することができる。

ベント管内流動のシミュレーションの際には、高流動タイプのコンクリートを想定し、マトリックスモルタルの降伏値(τ_y)を0としたもの(Type-A)を主として取り扱ったが、圧力

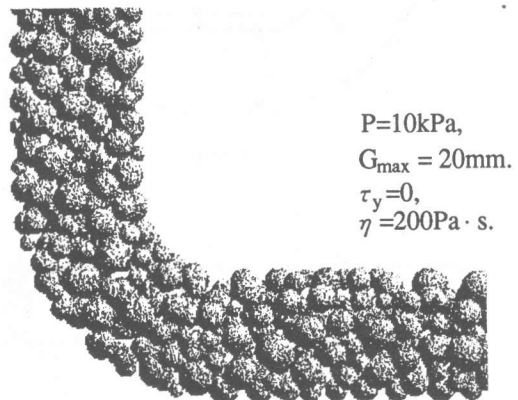


図-1 3次元流動シミュレーション

*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修 (正会員)
 *2 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)
 *3 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

に依存して降伏値が大きくなる現象を考慮するため、マトリックスモルタルの降伏値が1kPaという極端に大きい場合(Type-B)の解析も行った。塑性粘度(η)の値としては、いずれの場合も比較的高粘性のコンクリートに相当する200Pa·sを用いた。ベント管内流動シミュレーションに用いた粗骨材の最大寸法(Gmax)は20mmである(図-1参照)。

テーパ管内流動のシミュレーションの際には、粗骨材体積比(Gv)およびマトリックスモルタルのレオロジー定数(τ_y, η)を変化させた。解析に用いたパラメータを表-1に示す。今回は、計算容量の都合から20mm未満の粗骨材はマトリックスモルタルの一部として考え、この解析に用いた粗骨材の最大寸法(Gmax)は40mmとした。表-1中の粗骨材体積比(Gv)は、一般に用いられているコンクリートより若干少ないが、粒度曲線を単純な線形に仮定すれば通常の粗骨材重量は表中の値の2~3倍となるので、超流動コンクリートから超硬練りコンクリートまでをカバーした範囲といえる。

本研究で用いた解析手法は、粘塑性サスペンション要素法による3次元静的解析であり、その詳細については、既報[8]を参照されたい。

2.2 ベント管・テーパ管の形状

流動解析に用いたベント管の形状・寸法を図-2に示す。管径は100mmの一定とした。本報では、便宜上

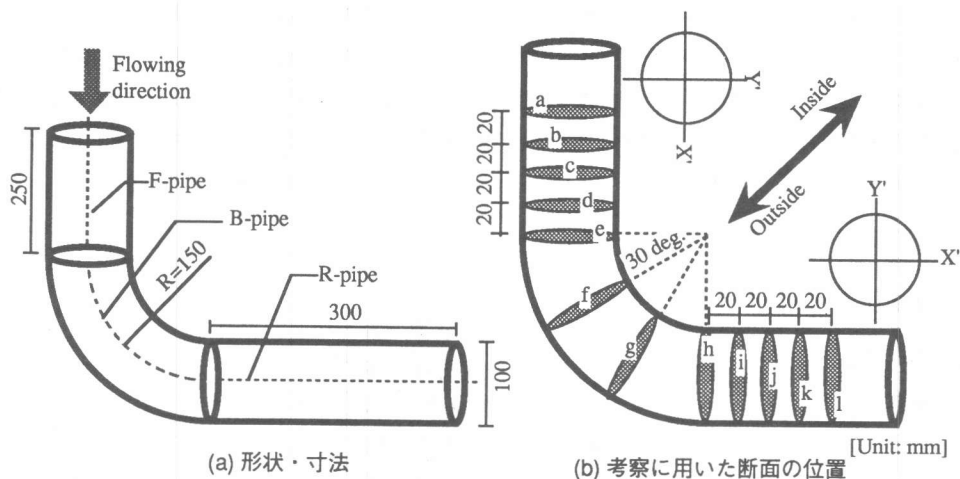


図-2 ベント管の形状・寸法

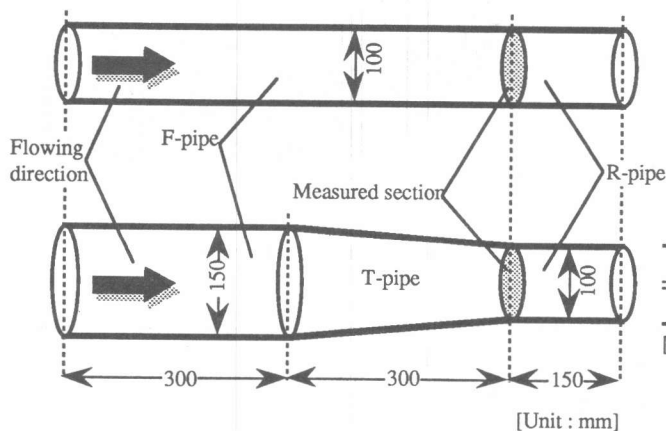


図-3 テーパー管の形状・寸法

表-1 入力パラメータ

τ_y (Pa)	η (Pa·s)	Gv (%)
100 - 800	100 - 400	10.6 - 33.1

[Notes] τ_y : Yield value,
 η : Plastic viscosity,
 Gv : Volume ratio of coarse aggregate.

コンクリートが流入する側の直管をF管、ベント管をB管、流出する側の直管をR管と呼ぶ。F管およびR管の長さは、それぞれ250mmおよび300mmとしたが、以下の考察で述べるように、ベント部における流動挙動の乱れの影響が及ばない長さとして直管部の長さを設定した。F管とR管のなす角度は90度、B管の中心軸の回転半径(R)は150mmである。ポンプによる圧力は一様であると仮定し、圧力をコンクリートが流入する位置(F管入口)で10kPa(約100gf/cm²)、R管出口で0に設定して、定常流のシミュレーションを行った。

流動解析に用いたテーパー管の形状・寸法を図-3に示す。便宜上テーパー部分をT管と呼ぶこととする。F管の直径は150mm、R管の直径は100mmである。テーパー管内での流動挙動に関しては既に理論解などが報告されており、本研究では、複相材料がテーパー部を通過する際に生じる閉塞現象などを把握する目的から、実際のテーパー管よりもT部の絞り込みは厳しく、粗骨材の影響を受けやすくした。ポンプ圧力は1kPa(約10gf/cm²)の定常流とし、脈動などは考慮していない。

3. 解析結果とその考察

3.1 ベント管の管軸方向の流動挙動(1次流れ)

図-2(b)に示した各断面における全骨材の管軸方向流速(節点変位速度の面外方向)成分を取り出したものの

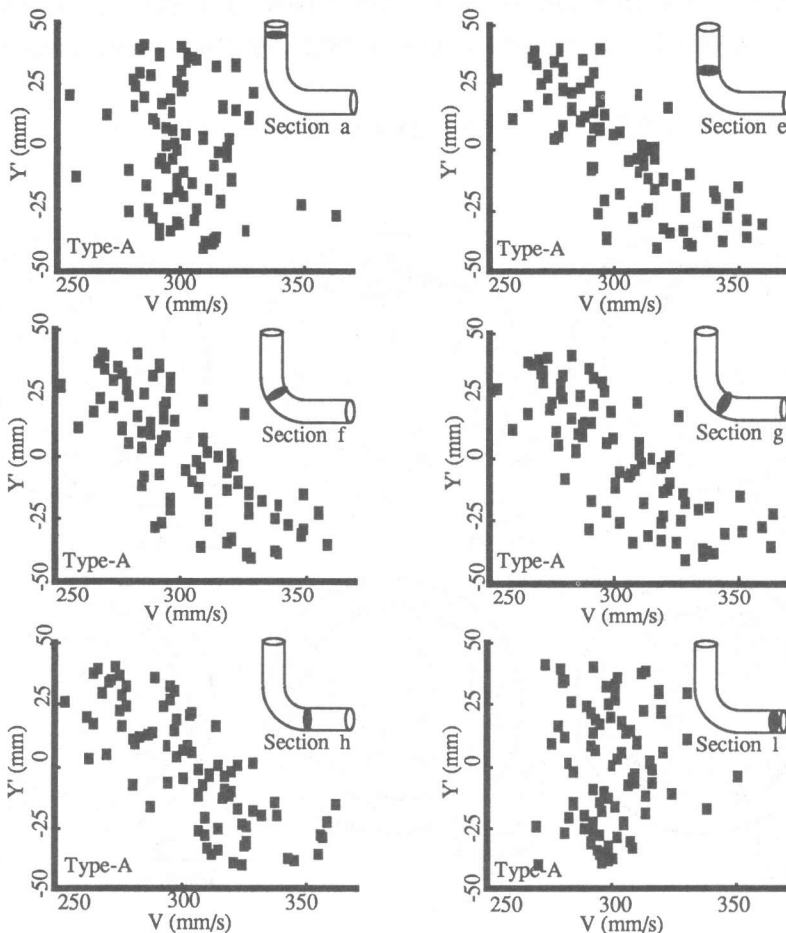


図-4 各断面における1次流れの流速分布の一例(Type-Aの場合)

一例を図-4に示す。同図では、断面のX'方向の位置における流動速度を平均し、この平均流動速度(V)の断面Y'方向の分布を示している。VSEMでは、乱数的に粗骨材が断面を通過するため、偶発的に速い速度で断面を通過する骨材が観察され、流速のバラツキが生じている。F管部の断面aでは、栓流に近い状態で流れているが、ベント部に差しかかった断面eでは、既に栓流ではなく、外周側の流速が内周側より大きくなっている。このような流速分布の不均衡は、コンクリート内部におけるせん断変形を強制するため、変形抵抗の大きいコンクリートでは、大きな圧力損失が生じるものと思われる。また、この現象がみられる領域は、ベント管自体の長さよりも長くなっていることが解析結果より明らかである。

3.2 ベント管の断面内の流動挙動(2次流れ)

ベント管内における流動現象で注目される挙動として、断面内の流れ(2次流れ)が挙げられる。シミュレーションより得られた2次流れのベクトルの大きさと位置をプロットしたものの一例を図-5および図-6に示す。図-6より明らかなように、F管からB管の前部までの領域(断面a~e)では、降伏値を零としたType-Aの場合、B管に近付くにつれて2次流れは速くなり、B管内ではほぼ一定速度の2次流れが観察されている。一方、降伏値の大きいType-Bの場合は、B管入口付近で流速が最高速度に達している。この結果より、マトリックスモルタルの降伏値が、直管部での2次流れをある程度拘束するが、強制的なせん断変形を伴うベント部入口では2次流れが増加すると考えることができる。降伏値を零としたType-Aでは、ベント管内ではほぼ一様の2次流れ速度を維持するが、Type-Bでは、降伏値の影響で流速が減少する。再び直管となるR管部に入ると、Type-Aでは、乱流と思われる2次流れの一時的な増加がみられるが、2次流れが急激に小さくなる様子がみられる。

以上のような2次流れの発生は、ベント管を通過する際に損失エネルギーとなり、主流れ(1次流れ)のみ

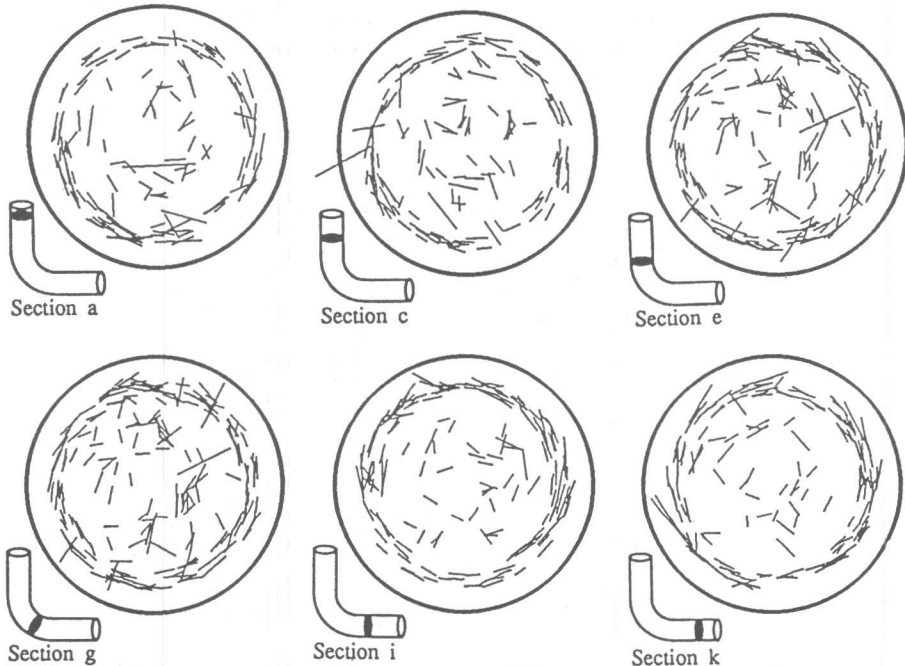


図-5 各断面における2次流れの流速分布の一例 (Type-Aの場合)

によって推定された値よりも大きな圧送圧が必要となる可能性があり、この点は、特に降伏値の小さい高流動タイプのコンクリートでは注意が必要である。

3.3 ベント管内の応力分布

ベント管内では、1次流れの不均衡に加えて、2次流れが生じるため、コンクリートには栓流の場合とは異なるせん断応力分布が発生している。図-7は、粗骨材間に作用する平均垂直応力(I_1)および偏差応力2次不変量($\sqrt{J_2}$)と断面位置の関係を示したものである。骨材間の圧縮力に関しては、全体を通して線形に減少する傾向にあるが、ベント管内では、線形性を逸脱して圧縮力が若干大きくなる部分が見られる。また、 $\sqrt{J_2}$ で示したせん断応力成分の分布に着目すると、全体として、応力が減少することによって、流動モードがせん断変形流(層流)から栓流に変化していく様子が観察されるが[9]、ベント部では一時的にせん断応力の減少率が小さくなり、前述の強制せん断流の影響が現れている。

3.4 テーパー管を通過する粗骨材

図-8に、テーパー管内の粗骨材がT部からR部へ移る時の平均速度(V_a)と粗骨材体積比(G_v)の関係を示す。同図中の白丸および黒丸はそれぞれ、直管およびテーパー管を通過した際の流動速度を示している。データにバラツキがあるのは、乱数的に発生した粗骨材が次々と流入してきており、流動が均一でないためである。今回のテーパー管内流動のシミュレーションでは、粗骨材体積比 $G_v=27.4\%$ のものの一部が途中で閉塞を起こしている。直管を通過する粗骨材の流動速度は、マトリックスモルタルのレオロジー定数によ

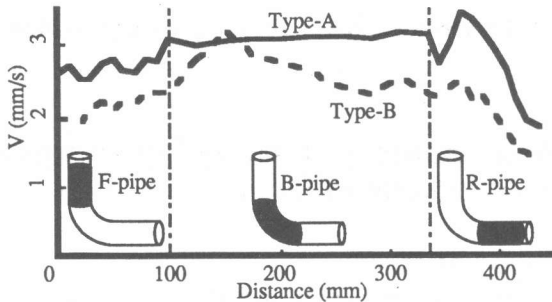


図-6 2次流れの流速と流動距離の関係

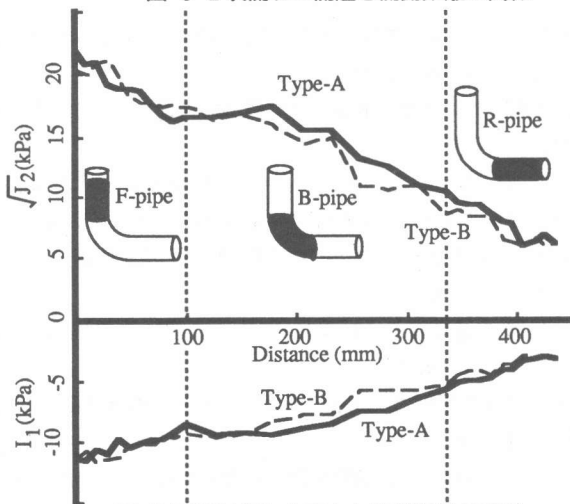


図-7 要素に加わる応力と流動距離の関係

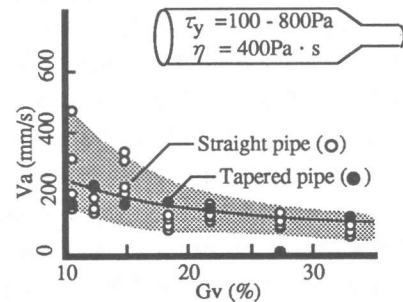
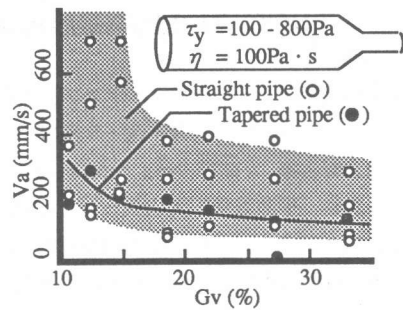


図-8 流動速度と粗骨材量の関係

て変化しており、図-8中にその分布範囲をトーンで示してある。直管の場合、レオロジー定数や粗骨材量が小さいほど流動速度が大きくなり、マトリックスモルタルの物性がコンクリート全体の流動に影響している。また粗骨材の体積比(Gv)が増加することによって、マトリックスモルタルの物性は同じでも、コンクリートのレオロジー定数がみかけ上増加すると考えられ、直管においては、コンクリートを均質な連続体と仮定して流動性質を議論することができると考えられる。一方、今回の解析で用いたようなテーパ管内では、コンクリートの流動速度はマトリックスモルタルのレオロジー定数(特に降伏値)にはほとんど影響されず、図中に示した1本の曲線で近似できる。テーパ部では粗骨材量が流動速度に対して主導的となる現象は、テーパ管の圧送性を、均質な連続体を用いた解析で算出することが困難であることを示唆している。

4.まとめ

本研究では、3次元粘塑性サスペンション要素法(VSEM)を用いて、フレッシュコンクリートがベント管およびテーパ管内を通過するときのシミュレーションを行った。ベント部を通過するフレッシュコンクリートの流速は、ベント部の外周側で速くなる傾向を示し、この傾向はベント部の前後の直管部にも及んでいる。さらに、ベント部を通過する際には、管軸方向に垂直な面内での流れ(2次流れ)が顕著となることが明らかとなった。また、テーパ部を通過する粗骨材の流動挙動は、直管部における、マトリックスモルタルのレオロジー定数と粗骨材量の両者による流動速度への影響とは異なり、マトリックスモルタルの性質よりも粗骨材量の影響が顕著になることが明らかとなった。

本解析は定常流を扱った静的解析である。実際には、ポンプの脈動運動のため、コンクリートの瞬間流速はさらに大きくなり、この効果を解析的に検討する必要がある。今後、これらを考慮した動的な解析を行い、さらに研究を進める予定である。

[謝辞] 本研究費の一部は、平成4年度文部省科研費・奨励研究(A)、同一般研究(B)、同特別研究員奨励研究、ならびに牧田国際育英会学術研究助成金によった。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- [1]日本建築学会: コンクリートポンプ工法施工指針案・同解説, 1979.
- [2]三浦律彦・近松竜一・青木茂・十河茂幸: 高速流動コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.185-200, 1991.6.
- [3]橋本親典・平井秀幸・丸山久一・辻幸和: コンクリートポンプの滑り弁内を流れるコンクリートの可視化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.95-100, 1991.6.
- [4]烏田専右・高木隼二・森永繁・高田博尾・成田一徳: コンクリートポンプの管内圧送性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.177, pp.1-5, 1970.11.
- [5]谷川恭雄・森博嗣・渡辺健治・三輪正保: フレッシュコンクリートのテーパ管内流動に関する粘塑性サスペンション要素法解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.727-732, 1989.6.
- [6]谷川恭雄・森博嗣・野田豊・渡部哲巳: フレッシュコンクリートのポンプ圧送に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.421-426, 1992.6.
- [7]谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・野田豊: テーパー管を通過するフレッシュコンクリートの挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.427-432, 1992.6.
- [8]森博嗣・渡辺健治・梅本宗宏・谷川恭雄: 二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.427, pp.11-21, 1991.9.
- [9]谷川恭雄・森博嗣・野田豊: フレッシュコンクリートのポンプ圧送性に関する理論的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.203-208, 1991.6.