

II-195 離散要素法を用いた漸縮管内を落下する粒子流の3次元数値解析

電中研 正会員 牛島 省・田中伸和

1. はじめに

粒子濃度の高い固気あるいは固液混相流や多数の粒子が移動する粒子流などを数値解析により評価するためには、個々の粒子の運動、特に粒子間および粒子と境界面との接触を適切に考慮することが不可欠である。このような粒子の挙動は、固体粒子相を連続体として扱う従来のモデルでは正確に評価できないため、著者らは、離散要素法¹⁾に基づく粒子解析を3次元境界適合座標系上で行う計算手法を提案した²⁾。

本報では、この解析手法を用いて、漸縮管内を落下する粒子流の数値解析を行った。計算により得られた投入粒子数に対する通過粒子数の関係は、従来観察された傾向と同様となることを示す。

2. 数値解析手法

質量 m の固体粒子の運動方程式は、3次元空間中の並進運動と回転運動に対するものから構成される。

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_C \quad (1)$$

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{T}_L + \mathbf{T}_C \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{F}_L$ 、 $\mathbf{F}_B$ および $\mathbf{F}_C$ は、それぞれ周囲の流体から受ける力、重力などの外力、そして壁面や他の粒子と接触することにより発生する接触力である。また、 I は粒子の慣性モーメント、 $\boldsymbol{\omega}_p$ は粒子の角速度ベクトルであり、 $\mathbf{T}_L$ 、 $\mathbf{T}_C$ は、それぞれ周囲の流体から受けるモーメント、壁面や他の粒子と接触することにより発生するモーメントを表す。

(1) 式の $\mathbf{F}_L$ に対しては、ここでは固体粒子と周囲の流体との密度差が十分大きいことから、既報²⁾と同様に抗力と Magnus 力のみを扱う。一方、(2) 式の $\mathbf{T}_L$ については、周囲の流体の粘性効果を考慮する。

粒子間あるいは粒子と壁面の間の接触力に関しては、Cundall and Strack¹⁾と同様にバネ・ダッシュポットモデルを用い、特に接線方向には、接触時の滑りを模擬するための摩擦スライダを加えた。粒子間の接触力を計算する際には、田中ら³⁾と同様に、写像空間中において計算領域をセル分割し、対象とする粒子が含まれるセルを取り囲むセル内の粒子が接触しているかどうかを調べることで計算効率を向上させた。

3. 漸縮管内の粒子流の解析

図1に示す漸縮管内を落下する粒子流の計算を行った。次元量は、漸縮管の下端径、粒子質量、重力加速度で正規化した。粒子径は0.2、他の物性値は、反発係数 $e = 0.75$ 、摩擦係数 $\mu_t = 0.4$ 、法線方向および接線方向ばね定数 $k_n = k_t \approx 9.28$ とし、計算領域内の粒子数 N をパラメータとして単位時間の通過粒子数 n_T を求めた。漸縮管の下端を通過した粒子は、上端面のランダムな (y, z) 座標から初速度0で再び落下を開始する条件とし、粒子流がほぼ定常となってから一定時間にわたり下端を通過する粒子数をカウントした。

計算の結果、図2に示すように、 $N \leq 300$ の領域では、 n_T は N とほぼ比例して増加し、 $N \geq 450$ では粒子は漸縮部上部に停滞して n_T はほぼ一定の値となる。これらの間の領域では、粒子の停滞を起こす N 値よりわずかに低い N において、最大の n_T が生じている。投入粒子数が多い場合、通過粒子数がほぼ一定となるのは粒子流の特徴で、この原因は漸縮部に動的なブリッジが形成されるためであるとされている。図3は、 N を変化した場合の漸縮管部の粒子流の通過および停滞の状況を示すスナップショットである。本計算手法では、粒子解析の途中経過を図3のような形で連続的に表示する可視化機能も付加されている。

4. おわりに

漸縮管形状を境界適合座標系を用いて表現し、離散要素法を利用して管内を落下する粒子流の3次元数値解析を行った。その結果、投入粒子数が増加すると、通過粒子数がほぼ一定になるという傾向が再現された。

キーワード：固気混相流、離散要素法、3次元境界適合座標系、漸縮管
連絡先：〒270-1194 我孫子市我孫子1646(財)電力中央研究所 水理部。Email: ushijima@criepi.denken.or.jp

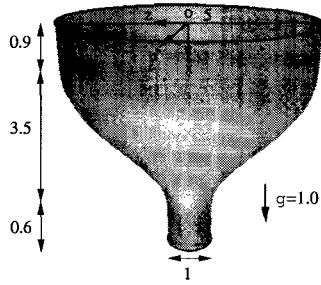


図 1 漸縮管の形状

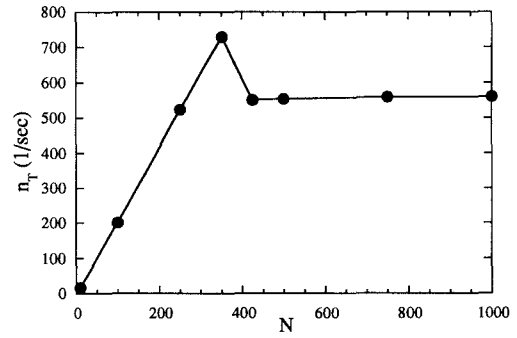


図 2 投入粒子数と通過粒子数の関係

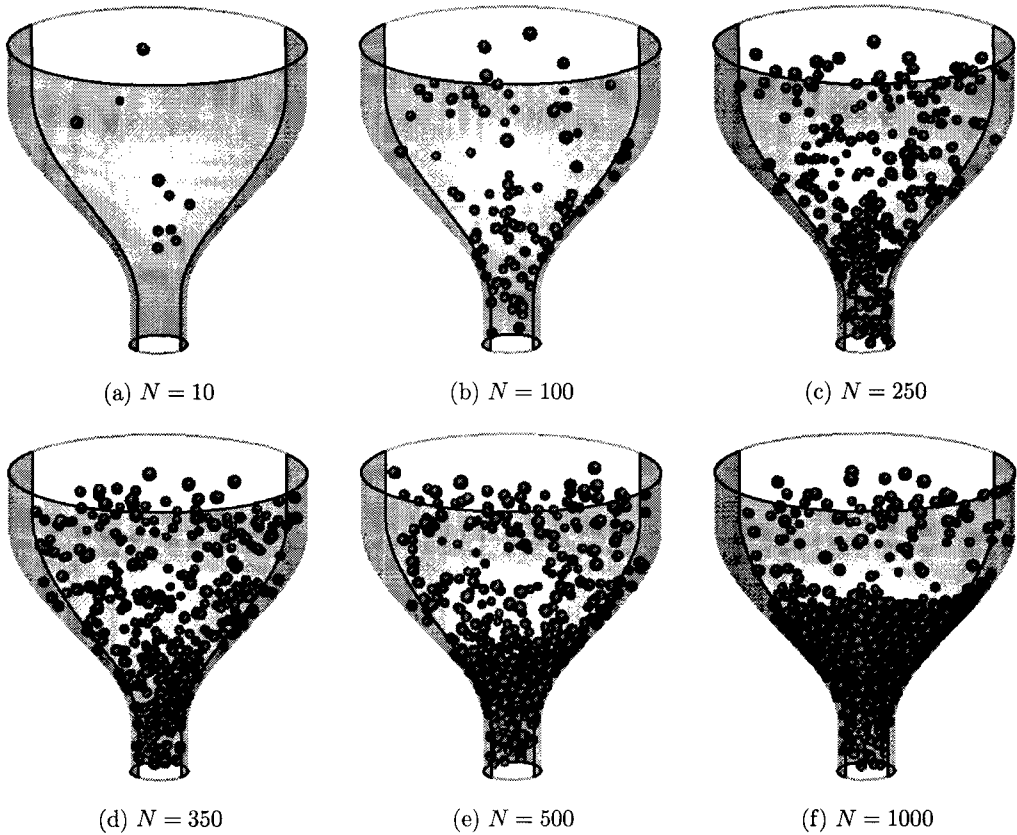


図 3 投入粒子数を変えた場合の粒子流の通過および停滞の状況

参考文献

- 1) P. A. Cundall and O. D. L. Strack. *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 2) 牛島省. 水工学論文集, 第 43 卷, 1999 年.
- 3) 田中敏嗣・門野啓一郎・辻裕. 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 56, No. 531, pp. 3210-3216, 1990.