

Cundall モデルによる岩質粒状体の重力流動の解析

鳥取大学 正員 ○木山英郎
鳥取大学 正員 藤村 尚
鳥取大学 学員 西村 強

1 はじめに

岩質粒状体の流動圧の数値解析に、Cundall の離散剛要素法 (DBM) を応用する試みについて報告する。

2 DBM の概要

2つの岩塊が衝突するとき、岩塊は完全な弾性体ではないし、また接触点近傍の局所的な塑性変形や破壊などのために、不完全弾性衝突となる。そこで、岩塊を剛体とみなし、岩塊のもつ弾性的および非弾性的性質は接触点間に挿入した弾性スプリング (剛性 K) と粘性ダッシュボット (粘性 η) で代表させる。このとき、一つの岩塊 (質量 m) に注目すれば、その運動方程式は式 (1) の形に略記される。

$$m\ddot{u} + \eta\dot{u} + ku = 0 \quad (1)$$

これは減衰振動を表し、与えられたすべての岩塊についての同様な運動方程式を連立して解くことによって、運動状態から静止状態に至る岩塊の挙動を解析できる。以下、DBMにおける陽型差分近似の式筋を述べる。

円形要素 i の時刻 $(t - \Delta t)$ から t に至る Δt 間

の変位; $\Delta U_i, \Delta V_i, \Delta g_i$ を図-1 (a) のように表示する。この要素 i が、図-1 (b) に示すように要素 j に接触するとき、2要素間の法線方向および接線方向の相対変位 $\Delta U_m, \Delta U_s$ は式 (2) で計算でき、このときの接触力は、式 (2) ~ (6) を用いて、結局式 (7) のように計算される。

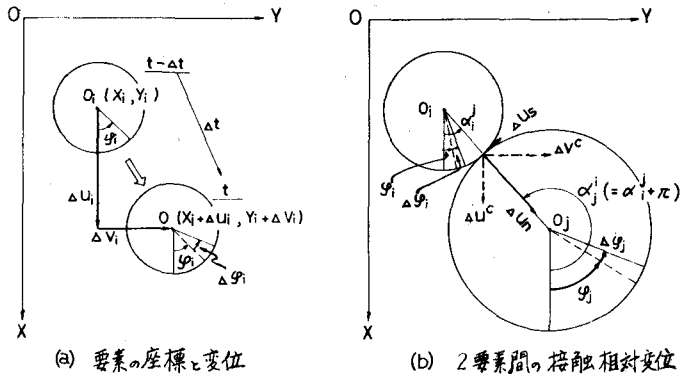


図-1 $\Delta U_i, \Delta V_i, \Delta g_i$ と $\Delta U_m, \Delta U_s$

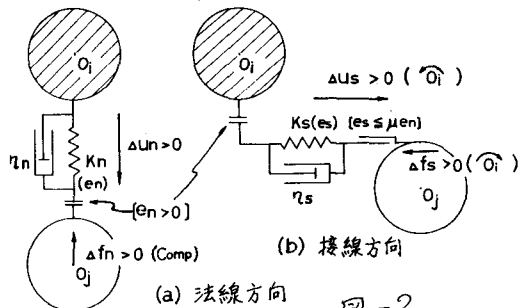


図-2

表-1	法線方向	接線方向
接触相対変位	$\Delta U_m = (\Delta U_i - \Delta U_j) \cos \alpha_i^j + (\Delta V_i - \Delta V_j) \sin \alpha_i^j$	$\Delta U_s = -(\Delta U_i - \Delta U_j) \sin \alpha_i^j + (\Delta V_i - \Delta V_j) \cos \alpha_i^j + (r_i \Delta g_i + r_j \Delta g_j)$ (2)
スプリング	$\Delta e_n = K_n \Delta U_m : e_n^{(t)} = e_n^{(t-\Delta t)} + \Delta e_n$	$\Delta e_s = K_s \Delta U_s : e_s^{(t)} = e_s^{(t-\Delta t)} + \Delta e_s$ (3)
ダッシュボット	$\Delta d_n = \eta_n \Delta U_m / \Delta t : d_n^{(t)} = \Delta d_n$	$\Delta d_s = \eta_s \Delta U_s / \Delta t : d_s^{(t)} = \Delta d_s$ (4)
スライタ		if $ e_s^{(t)} > \mu e_n^{(t)} : e_s^{(t)} = \mu e_n^{(t)} \cdot \text{SIGN}[e_s^{(t)}], d_s^{(t)} = 0$ (5)
n.t. ジョイント	if $e_n^{(t)} < 0 : e_n^{(t)} = d_n^{(t)} = 0$	if $e_n^{(t)} < 0 : e_s^{(t)} = d_s^{(t)} = 0$ (6)
接触力合力	$f_n^{(t)} = e_n^{(t)} + d_n^{(t)}$	$f_s^{(t)} = e_s^{(t)} + d_s^{(t)}$ (7)

こうして注目する要素 i に作用する x 方向の力 X_i , y 方向の力 Y_i , 中心回りのモーメント M_i は、これに接するすべての要素 j についての総和 (Σ で表示) をとって、式 (8) のように求まる。

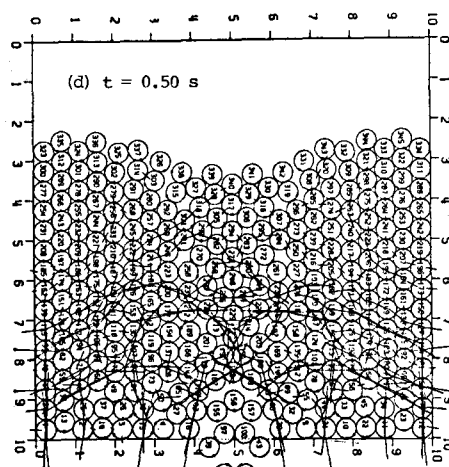
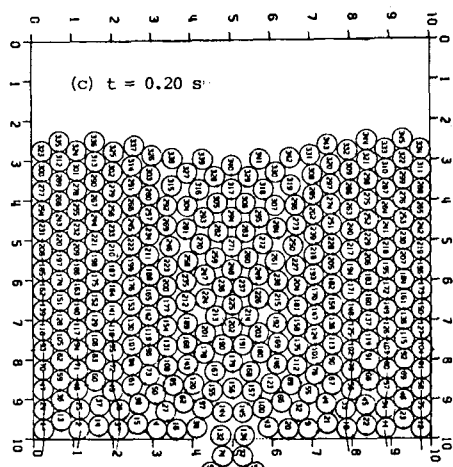
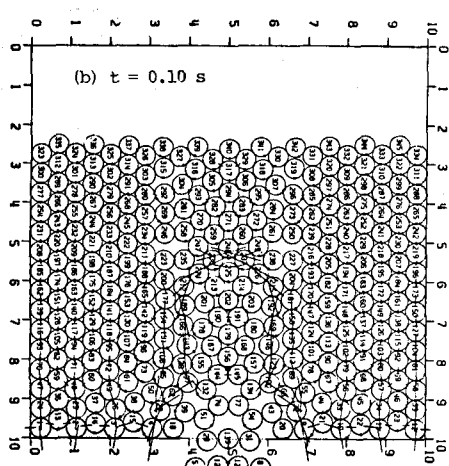
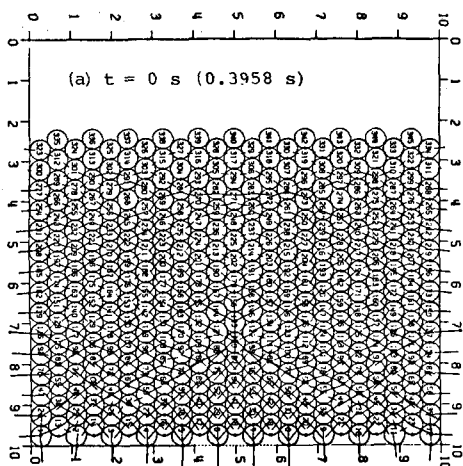


図-3 [11/12] 配列

$$X_i^{(t)} = \sum_j \{-f_m^{(t)} \cos \alpha_i^j + f_s^{(t)} \sin \alpha_i^j\} + m_i g, \quad Y_i^{(t)} = \sum_j \{-f_m^{(t)} \sin \alpha_i^j - f_s^{(t)} \cos \alpha_i^j\}, \quad (8)$$

$$M_i^{(t)} = \sum_j \{-r_i f_s^{(t)}\}$$

上式より、要素 i の加速度成分が式(9)で近似計算できる(I_i : 慣性モーメント)。

$$\ddot{X}_i^{(t)} = X_i^{(t)} / m_i, \quad \ddot{Y}_i^{(t)} = Y_i^{(t)} / m_i, \quad \ddot{\theta}_i^{(t)} = M_i^{(t)} / I_i \quad (9)$$

これを積分することによって、次の Δt 間($t \sim t + \Delta t$)の新しい変位; Δu_i , Δv_i , $\Delta \theta_i$ が定められる。

以上の操作を繰り返すことによって、各要素の位置・速度・接触力などが Δt 間隔で順次計算できる。

3 解析例

40 cm × 40 cm の平底ビン模型(スリット幅: 8 cm)について、粒子半径 $r = 1.0$ cm、密度 $\rho = 2.65$ g/cm³、 $E = 750$ kgf/cm² [73.5 MPa]、 $\nu = 0.3$ 、 $\Delta t = 10^{-4}$ s として、諸定数を表-2のように算定し、DBM 解析した結果の一例を図-3に示す。

表-2

	粒子-粒子	粒子-壁面
$K_n / \rho g (\text{cm})$	3.64×10^4	7.28×10^4
$\eta_n / \rho g (\text{cm/s})$	1.53×10^5	3.06×10^5
$K_s / \rho g (\text{cm})$	0.91×10^4	1.82×10^4
$\eta_s / \rho g (\text{cm/s})$	0.765×10^5	1.53×10^5
$\mu [\phi]$	$0.577 [30^\circ]$	$0.176 [10^\circ]$