

京都大学工学研究科 学生員○原田英治

京都大学工学研究科 正会員 後藤仁志

京都大学工学研究科 正会員 酒井哲郎

1. まえがき

流体・粒子間および複数粒子間の相互作用を記述するツールは、流砂・漂砂特性を計算力学的に明らかにしようとする「数値流砂力学」にとって必要不可欠である。複数粒子間の相互作用すなわち粒子間衝突のモデルとしては、個別要素法が唯一の現実的選択肢と位置付けられるが、個別要素法の流砂過程等の適用に対しては、モデル定数の合理的決定の困難さを理由に適用性自体を疑問視する見解も見られる。その一方で、近年のハードウェアの目覚ましい進歩は、限定された条件下では移動床の3Dの非定常計算さえ可能としつつあるし、2Dのシミュレーションについては、パーソナルコンピュータですら容易に行える状況である。本稿では、このような状況に鑑み、流砂量の観点から、個別要素法型の移動床シミュレーターの最適モデル定数設定に関して検討を加える。

2. モデル定数の設定プロセス

流砂現象を対象に水流中の砂粒子の鉛直2次元の運動を、並進および回転の運動方程式系で記述する。粒子間接触を表現するために個別要素法を用いると、少なくとも5個の定数（法線方向および接線方向のバネ定数と粘性定数、接触面の摩擦係数）が必要とされる。ここでは接触面の摩擦係数は0.577と与え、その他の4つの定数の決定法を以下に述べる。質点 m の物体の上下にバネを配した1自由度振動系（バネ定数 k ）の固有周期 T は、

$$T = 2\pi\sqrt{m/2k} \quad (1)$$

である。また、質点 m の物体にバネ k とダッシュポット η を配したVoightモデル1自由度振動系の臨界減衰の条件を基準にして

$$\eta = 2\sqrt{m \cdot k} \quad (2)$$

の関係が得られる。以上より、固有周期 T が与えられればバネ定数 k が得られ、臨界減衰の条件式からダッシュポットを示す定数である粘性定数 η を逆算して求めることができる。また法線方向と接線方向のバネとダッシュポットの関係は、縦弾性係数 E と横弾性定数 G の関係式

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

が成立するとして求めている（ ν ：poisson比）。流砂現象は、多体衝突の現象であるため1自由度ではない。そこで式（1）、（2）に α_n 、 α_{cn} なるパラメータをそれぞれ考慮し

$$\Delta t = T / \alpha_n ; \quad T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (4)$$

$$\eta = \alpha_{cn} \cdot 2\sqrt{m \cdot k} \quad (5)$$

のように補正することとする。これらの一連の流れを図-1に示す。

表-1 計算条件

粒径	d=0.5 mm
計算時間ステップ	$\Delta t = 2.0 \times 10^{-5}$
鉛直方向粒子数	10
水平方向粒子数	5

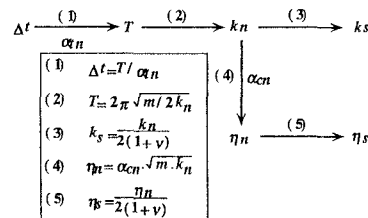


図-1 モデル定数設定プロセス

3. 定数チューニング

個別要素法では、計算を安定させるために底面に敷き詰められた粒子配列に重力の作用だけを与えて粒子配列を安定させる作業を行う。計算条件が表-1である場合、粒子の鉛直方向の重心座標 y_{gc} は、パラメータ α_m が20.0のとき最も速やかに安定することが図-2よりわかる。また $\alpha_m = 20.0$ の値を保ったままパラメータ α_{cn} の値を変化させると $\alpha_{cn} = 1.3$ のとき最も速やかに安定することが図-3よりわかる。これらのパラメータの値を使用することにより数ケースの剪断力を粒子に作用させて、それぞれの流砂量との関係を求めたものが図-4である。この図よりシミュレーション結果が、特に底面せん断力が大きい値をとるにしたがって既往の実験結果から乖離することがわかる。そこで、パラメータ α_m と α_{cn} に β なる係数を乗じて計算をした。 β の値を変化させて底面せん断力と流砂量の関係を計算してみると、 β の値が15.8のとき既往の研究結果に近い値が得られることがわかる。図-5にその結果を示す。上記のようにしてパラメータ α_m ($\alpha_m = \alpha_m \cdot \beta$) と α_{cn} ($\alpha_{cn} = \alpha_{cn} \cdot \beta$) を決定することができる。

4. あとがき

本稿では、個別要素法の定数決定プロセスを検討した。得られた定数よりシミュレーションされた流砂量が、実験値の傾向を良好に示す事が、確かめられた。今後、より広範囲な条件（粒径・粒子配列）での要素定数決定についても検討していきたい。

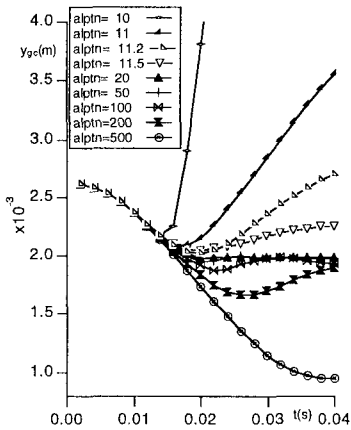


図-2 α_m による y_{gc} の時系列

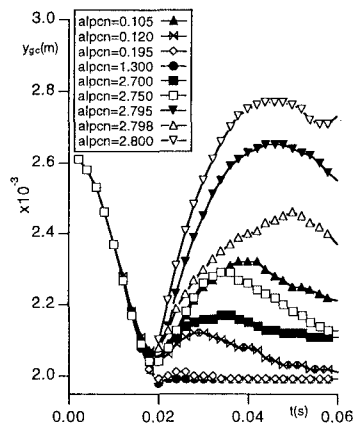


図-3 α_{cn} による y_{gc} の時系列

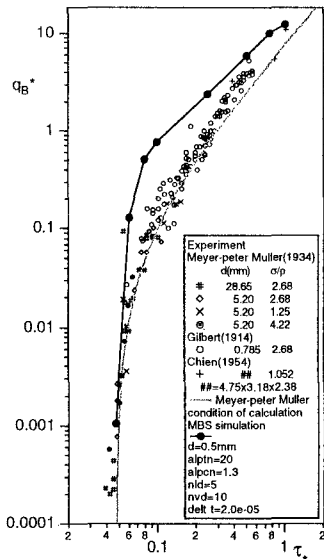


図-4 底面せん断力-流砂量

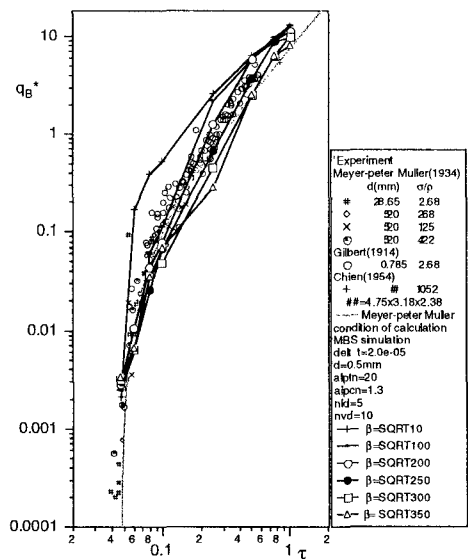


図-5 底面せん断力-流砂量 (β)