

飛砂における砂粒の反発機構の数値解析

戸田建設

正会員○秋山 誠司

徳島大学工学部

正会員 三島 豊秋

京都大学防災研究所

正会員 土屋 義人

1. はじめに 飛砂における砂粒の床面での反発機構の特徴は、砂と流体の密度比が大きいため砂粒の慣性力が大きく、splashと呼ばれる現象を伴うことである。この現象は、運動砂粒と粗度砂粒の交換作用に関係し、Bed material load としての飛砂の解析するためには欠くことのできない現象である。本研究では、一様粒径の球状砂粒で2次的に構成された仮想的な床面に流体力を作用させた場合の飛砂のsplash現象を数値シミュレーションする。その際、特に実験では調べるのが困難なsplashを起こす砂粒の個数、跳出し速度および跳出し角を解析する。

2. 計算方法 splashを解析するためには移動床を構成している砂粒の挙動まで解析する必要がある、ここではDiscrete Block Method (DBM)を用いる。計算を簡単化するために一様球状砂粒を仮定すると、流体力が作用するときのDBMにおける運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\pi}{6}\sigma D^3\ddot{\mathbf{x}} + \eta\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = \frac{\pi}{8}\rho D^2 C_D |\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}|(\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}) + \frac{\pi}{8}\rho D^2 C_L |\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}|(\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}) + \frac{\pi}{6}D^3 C_M \frac{d}{dt}(\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}) - \frac{\pi}{6}D^3(\sigma - \rho)g \quad (1)$$

$$\frac{\pi}{60}\sigma D^5\ddot{\phi} + \frac{\pi}{60}\rho D^5 C_M \ddot{\phi} + \eta \frac{D^2}{4}\dot{\phi} + K \frac{D^2}{4}\phi = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\mathbf{x}$ および ϕ は砂粒の位置ベクトルおよび回転角、 $\mathbf{u}$ は流速、 K および η は砂粒間に作用する接触力に関する剛性係数および粘性係数、 C_D 、 C_L 、および C_M はそれぞれ抗力、揚力、および仮想質量力係数、 σ および ρ は砂粒および流体の密度、また D は砂粒の粒径である。

床面に作用する流体力は、主に表層にある砂粒にのみ作用する無次元せん断力 τ^* として評価される。そこで、無次元せん断力が直接式中に現れるよう式(1)および(2)を無次元化し、さらに隣接する砂粒の遮蔽効果と主に表層の砂粒のみに流体力を作用させるために遮蔽係数を抗力および揚力項に乗じて差分化する。

3. 計算結果および考察 図-1は3ケースの床面の無次元せん断力に対する砂の移動確率の変化を示したものである。この図より移動確率が0となる限界シールズ数は0.03程度であることが解る。この値は、これまでの飛砂の実験結果と流砂の実験結果の中間の値であり、飛砂としてはやや大きめの値である。

作用させる無次元せん断力の値は限界シールズ数を含む0.01から0.05までの値で調べることにする。図-2は入射速度および角度が10および15度で無次元せん断力が異なる場合の砂粒の挙動を比較したものである。この図より無次元せん断力が大きくなるに従って大きく広い範囲にわたって砂粒が動いていることが解る。また、図-3は入射角が15度のときのsplashのよって跳出す砂粒の個数を入射速度

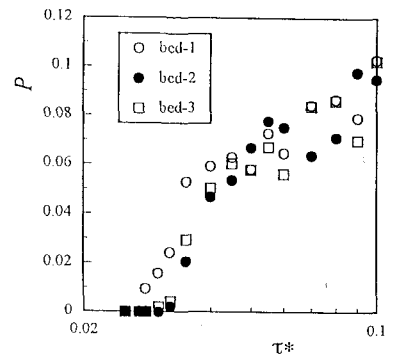


図-1 移動確率

をパラメタに無次元せん断力の関数として示したものである。入射速度および無次元せん断力が大きいほど跳出す砂粒の個数は多くなる傾向にあり、特に入射速度の影響は大きく出ている。飛砂におけるsplashの特徴は衝突された砂粒に隣接する砂粒も移動を開始する点にある。飛砂における砂粒の初期移動を考える場合には流体力以外にも運動砂粒によって作用する力も無視できないことが解る。一般に定常状態における飛砂

の底面せん断力は移動限界時の値近傍に固定されることが知られている。しかしながら、非定常もしくは不等流状態のときには移動限界時より大きな値になっていると考えられ、このような場合にはsplashによる初期移動が多く起こっていると考えられる。これは、飛砂における定常状態への立ち上がりが流砂に比べ速く起こることを意味している。

図-4に入射角が10度の際の入射速度ごとのsplashによる跳出し速度の平均と分散を無次元せん断力の関数として示す。砂粒の跳出し速度の平均は、無次元せん断力が大きくなるに従って減少するが、移動限界を越えたあたりからそれぞれの入射速度ごとに一定値になる傾向にある。分散については無次元せん断力の影響をほとんど受けていない。splashによって初期移動する砂粒は、衝突した砂粒の運動量の一部が床面に流れ、床面を構成している砂粒の運動量に変化したものである。図-3の結果とこれらの結果を考慮

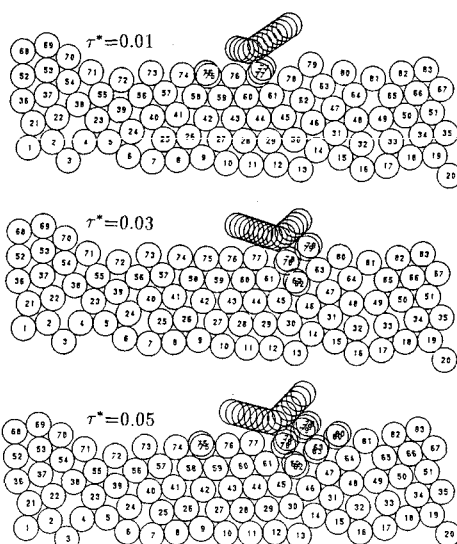


図-2 衝突時の砂粒の挙動

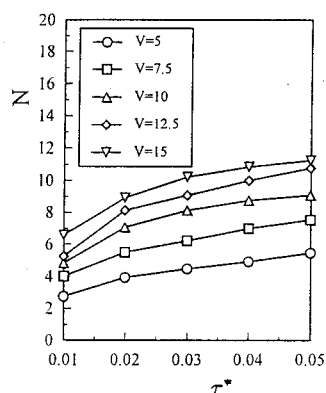


図-3 splashによる跳出し個数

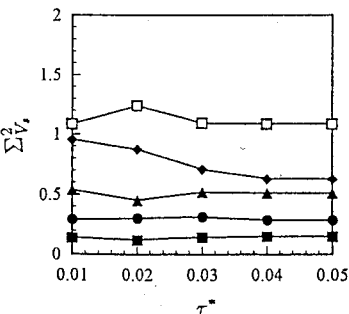
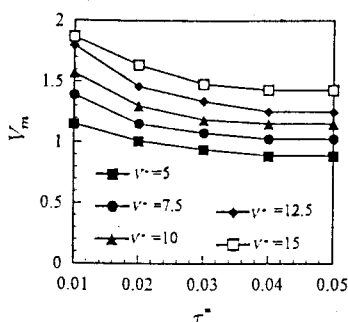


図-4 splashによる跳出し速度の平均と分散

すると、無次元せん断力が限界シールズ数を超えたあたりからは個々の砂粒の速度ではなく運動を開始する砂粒の個数として衝突した砂粒の運動量の一部が受け持たれると考えられる。また、両者とも入射速度が大きくなるに従い増加する傾向にあり、入射速度の影響は大きく現れている。跳出し速度に関しては入射速度の影響は無次元せん断力以上に重要であると言える。

図-5は入射角10度の際の入射速度ごとのsplashによる砂粒の跳出し速度を平均と標準偏差で規格化したときの分布関数を示したものである。このとき、無次元せん断力は移動限界あたりの0.03になっている。砂粒の跳出し速度の分布関数は指数的に1に漸近しており、一種の指数関数になっていことがわかる。また、入射速度の影響はほとんど現れていないことから平均と分散のみでこの分布関数は評価できることが解る。

4. おわりに 本研究では理想化した砂粒と計算によって状況を設定したため現実とは異なっているが、このような計算によって飛砂におけるsplashの基本的な特性を知ることはできる。今後はこれを反発機構に取込んだsaltationの軌道計算へと発展させる予定である。

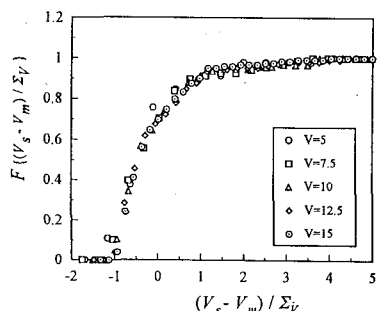


図-5 跳出し速度の分布関数