

飛砂の非平衡状態における飛砂量分布と風速分布の数値解析

金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎
金沢大学大学院 学生員○渡辺治久

1. まえがき

近年の海岸においては海岸線の侵食が問題となっているが、防止工としての離岸堤や養浜によって海岸砂浜幅が増加し、逆に季節風による砂の飛散によって海岸沿いの自転車道に代表される人工構造物が埋没するという問題も生じている。著者らは飛砂の制御の観点から、飛砂と風の相互作用に着目し、これをモデル化して風と飛砂の運動を同時に解析する方法を研究してきた¹⁾。今回は水際から発達する飛砂の非平衡状態における飛砂の濃度分布と風速分布の発達過程についての数値解析方法を提案する。

2. 飛砂とそれを伴う風の数値解析

本報では以下の条件で数値解析を進める。(1)球状で均一な粒径の十分乾燥した砂粒で形成された平坦砂面で、(2)その上の風は粗面乱流で、(3)跳躍中の粒子間の相互干渉は無視でき、(4)飛砂の運動saltationで代表する。ここで、既知のパラメータは砂の径 d 、密度 σ 、空気の密度 ρ 及び砂面に働く全せん断応力 τ_0 であるとする。非平衡状態をいきなり解くことは、 u_p 、 f_B が (x, y) の変数であるため非常に困難である。そこで、 u_p 、 f_B が十分に発達した平衡状態の分布型を第一近似とする逐次近似法を開発する。

2.1 飛砂の平衡状態

水際から流下方向に進むにつれて砂面から砂粒子が飛び出し途中で停止することなく移動を続ける。そしてある距離に達したときに空気中の砂粒子が飽和状態となり、新たな砂の飛び出しがなくなる状態を平衡状態と呼ぶ。この平衡状態の数値解析は、(i)個々のsaltationの解析、(ii)飛砂を含む風の解析、(iii)平衡条件、の順に計算を進め、解が安定するまで繰り返し計算を行う。一つのsaltationは粒子が砂面に衝突すると反発し次のsaltationに入るが、ここでは簡単のため個々のsaltationの初速度はZingg²⁾が指摘しているように鉛直方向のみ期待値の周りに分布する確率変数として与えた。初速度の期待値は次の河村式³⁾で与え、shape parameterが2.0のガンマ分布に従う初速度を乱数で与えた。

$$E[v_{p0}] = K(u_{*0} + u_{*c})$$

ここで、 u_{*c} : 移動限界での摩擦速度、 K : 反発機構を考慮した継続跳躍モデルで検討された値である。

2.2 飛砂の非平衡状態

非平衡状態の数値解析に当たり(1)まず、飛砂量の流下方向分布を次式で仮定する。(0次近似)

$$q_{s0}(x) = q_{se}(1 - \exp(-x/\Lambda))$$

ここで q_{se} は平衡飛砂量、 Λ は定数であり、今回の解析では100とした。(2) 第一近似として、存在確率密度 $f_{B0}(y)$ と平均砂粒子移動速度 $u_{p0}(y)$ の両者を平衡状態の分布型 $f_{Be}(y)$ 、 $u_{pe}(y)$ で与える。このとき、飛砂数密度が次式で表せる。

$$v_{B1}(x) = \frac{q_{s0}(x)}{\sigma A_3 d^3 \int_0^\infty f_{B0}(y) u_{p0}(y) dy}$$

(3) 次に飛砂数密度 $v_{B1}(x)$ 、存在確率密度 $f_{B0}(y)$ 、平均砂粒子移動速度 $u_{p0}(y)$ の条件下で風の解析を行う。この結果、風速分布の第一近似 (U_1, V_1) が導ける。(4) 砂の運動を風速分布 (U_1, V_1) の下で計算し、砂の運動特性値である存在確率密度 $f_{B1}(y)$ 、平均砂粒子移動速度 $u_{p1}(y)$ を求める。ここで、砂の輸送率(飛砂量)が次式で与えられる(第一近似)。

$$q_{s1}(x) = \sigma A_3 d^3 v_{B1}(x) \int_0^\infty f_{B1}(y) u_{p1}(y) dy$$

(5) 風の解析を $v_{B1}(x)$ 、 $f_{B1}(y)$ 、 $u_{p1}(y)$ の下で行い、風速分布が (U_2, V_2) に更新される。(6) 砂の運動を風速 (U_2, V_2) の下で計算する。これによって、存在確率密度、平均砂粒子移動速度も $f_{B2}(y)$ 、 $u_{p2}(y)$ に更新される。

従って、飛砂数密度が次式によって修正される。

$$v_{B3}(x) = \frac{q_{s1}(x)}{\sigma A_3 d^3 \int_0^\infty f_{B2}(y) u_{p2}(y) dy}$$

(7) $v_{B3}(x)$ 、 $f_{B2}(y)$ 、 $u_{p2}(y)$ の条件下で風の解析を行い、風速分布が (U_3, V_3) に更新される。(8) 風速 (U_3, V_3) の下で砂の運動を計算し、存在確率密度、平均砂粒子移動速度も $f_{B3}(y)$ 、 $u_{p3}(y)$ に更新される。そして、再び砂の輸送率が次式で求められる。

$$q_{s3}(x) = \sigma A_3 d^3 v_{B3}(x) \int_0^\infty f_{B3}(y) u_{p3}(y) dy$$

その後(5)から(7)の行程を繰り返し、この行程が指定した繰り返し計算回数に達したところで結果を出力した。

風の解析はk-ε乱流モデルを用いて行った。このモデル中では、粒子の存在は実体でなく形状抵抗に置き換えて考慮する。導入する付加項は、簡単のため流下方向のみ考慮することにした。

$$F_x = f_{B1}(y) v_{B1}(x) D_{1x}$$

流れの基礎方程式は次の通りである。

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2(v_t + \nu) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v_t + \nu) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\} - \frac{v_B f_B D_x}{\rho}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2(v_t + \nu) \frac{\partial U}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (v_t + \nu) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right\}$$

$$U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} + P_k - \varepsilon + C_{fk} \frac{v_B f_B D_x}{\rho} U$$

$$U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{1\varepsilon} \left\{ P_k + C_{f\varepsilon} \frac{v_B f_B D_x}{\rho} U \right\} - C_{2\varepsilon} \varepsilon \right]$$

ここに、 p ：圧力偏差、 k ：乱れエネルギー、 ε 、 P_k ：乱れエネルギーの逸散率及び生成率、 ν ：動粘性係数、 $v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$ ：渦動粘性係数である。モデル定数については、 C_{fk} 、 $C_{f\varepsilon}$ 以外については標準推奨値を用いた。すなわち、 $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。 C_{fk} 、 $C_{f\varepsilon}$ については植生を伴う流れの計算と水路実験の比較⁴⁾から $C_{fk} = 1.0$ 、 $C_{f\varepsilon} = 1.3$ と決めた。

4. 計算結果の考察

図1は飛砂量の流下方向分布を示している。Nは繰り返し計算の回数を示す。第一近似の値と更新計算後の値の整合性は良いと言える。繰り返し計算は5回目ではほぼ収束している。図2は風速分布、図3は砂粒子平均移動速度、図4は存在確率密度の分布である。それぞれ平衡状態の解との整合性を見るために今回平衡距離を仮定した $x=900\text{cm}$ 付近での解との比較を行なっている。まず、風速分布についてだが、Zinggによって指摘されているfocal pointも併示した。風速が水際から発達し、砂に運動量を奪われて徐々に減速していく様子が解る。非平衡解は平衡解に合致するには到っていないが形状は類似したものになっている。砂粒子平均移動速度は非平衡解が大きな値を取っており、風速分布において平衡解より非平衡解が大きい値を取っていることがそのまま再現されている。存在確率密度は流下方向に大きな変化はない。これらの結果より、砂と風の相互作用を考慮した飛砂の非平衡状態の数値解析法を示すことができたと言える。

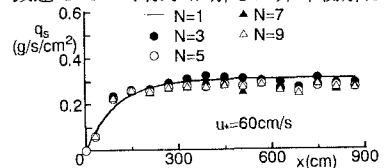


図1 飛砂量の流下方向分布

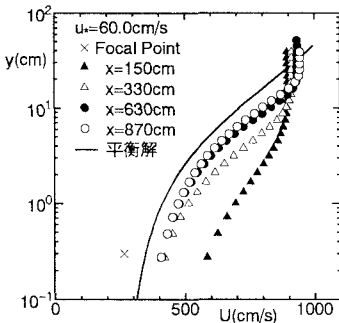


図2 風速分布

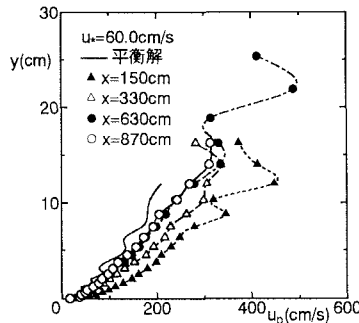


図3 砂粒子平均移動速度

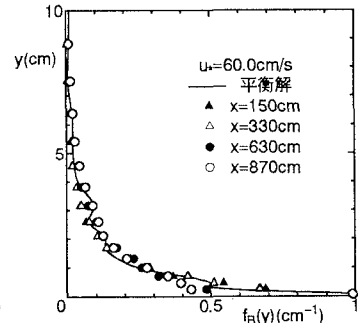


図4 存在確率密度

5. あとがき

非平衡状態の飛砂についての数値解析方法を提案することが出来たわけだが、今後植生等による飛砂の制御に関する研究も進め、風洞における実験値との比較検討も今後行っていく、この非平衡数値解析法の実現象の再現性についても調べていきたい。

参考文献：1) 辻本・赤城：海岸工学論文集，第41巻，1994，2) Zingg, A.W.：Actions Eolians, 1953, 3) 河村：東大理工学研報，5巻，1951，4) 清水・辻本・中川：土木学会論文集，No.477/II-19，1992。