

II-278

非平衡状態の飛砂と風の数値解析

金沢大学大学院 学生員 渡辺治久

金沢大学工学部 正 員 辻本哲郎

1. まえがき

近年の海岸における砂の飛散による人工構造物の埋没等の飛砂問題は離岸堤や養浜による砂浜幅の回復に伴って顕著になってきた。飛砂対策には経験的なものが多く、まだ明確な指針がない。著者らは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飛砂の制御の観点から研究してきた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検討する。

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を想定、(2)その上の風は粗面乱流、(3)跳躍中の粒子間の相互干渉は無視、(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 及び飛砂のない状態で砂面に働く全せん断応力 τ_0 とする。非平衡状態をいきなり解くことは、砂粒子平均移動速度 u_p 、存在確率密度 f_B が (x, y) の関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し、風洞実験の結果と比較する。

3. 飛砂の平衡状態

海からの風が海岸に到達すると、砂面から砂粒子が飛び出し始める。その砂粒子群は風の運動量を奪いながら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。この状態を平衡状態と呼ぶ。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。個々のsaltationは砂面に衝突すると反発しランダムな上向き速度を得るが、ここでは個々のsaltationの初速度は簡単のためZingg²⁾の観察結果より鉛直方向のみに期待値の周りに分布する確率変数として与えた。その期待値は河村のモデル³⁾で用いられている次式で与え、shape parameterが2.0のガンマ分布に従う初速度を乱数で与えた。

$E[v_{p0}] = K(u_{s0} + u_{sc})$; ここで、 $u_{s0} = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 、 u_{sc} ：移動限界での摩擦速度、 K ：実験定数である。

平衡条件は、底面Reynolds応力が移動限界に等しいと考え次式で評価した。以下添字eは平衡状態での値を示す。

$$v_{Be}(x) = (\tau_0 - \tau_c) \int_0^{y_e} \{f_B(y) D_x(y)\} dy ; \quad v_B: \text{飛砂数密度}, \tau_c: \text{底面Reynolds応力の移動限界値}$$

飛砂数密度はシミュレーションの収束判定に用いられ、収束解が得られたときの平衡飛砂量が次式で求められる。

$$q_{se} = v_B \sigma A_3 d^3 \int_0^\infty f_B(y) u_p(y) dy$$

4. 飛砂の非平衡状態

飛砂が平衡状態に到るまでの遷移過程を非平衡状態と呼ぶ。

(1)非平衡状態の数値解析を行うに当たり、まず u_p と風速の比、及び f_B が平衡状態の分布型のまま流下方向に相似であり、更に飛砂量が流下方向に指数関数的に増加すると仮定し、その分布型を次式で定義する。

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

ここで Λ ：平衡距離で q_{se} の99%の値を取るように決定した定数である。

このとき、第1近似の飛砂数密度が次式で表せる。

$$v_{B1}(x) = q_{s1}(x) / \sigma A_3 d^3 \int_0^\infty f_{B1}(y) \phi_1(y) U(y) dy \dots (a)$$

ここで $\phi_1(y) = (u_p(y)/U(y))$ ：基準化された粒子移動速度

$\phi_1(y)$ は図1の平衡状態の解析解より $\phi(y) = K_\phi \sqrt{y/d}$ で近似される。($K_\phi = 0.019$: 定数)

(2)次に $v_{B1}(x)$ 、 $f_{B0}(y)$ 、 $u_{p0}(y)$ 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。

(3)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 $f_{B1}(y)$ 、 $u_{p1}(y)$ を求める。ここで、飛砂量が次式で与えられる(第一近似)。

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

(4)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。

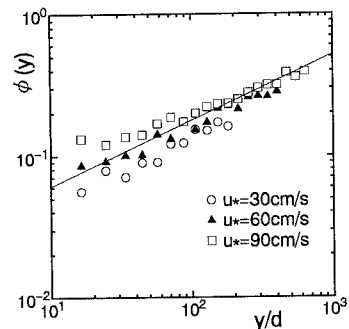


図1 $\phi(y)$ の分布

- (5) 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(a)式によって $v_{B3}(x)$ に修正される。
- (6) $v_{B3}(x)$, $f_{B2}(y)$, $u_{p2}(y)$ 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。
- (7) 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(b)式で求められる。その後、(4)から(7)の行程を繰り返し、この行程が所定の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。粒子1個あたりに作用する抗力 D は(c)式、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、(d)式で与えた。

$$D_{x1} = \frac{1}{2} \rho C_D A_2 d^2 U^2 (1 - \phi)^2 \dots (c) \quad , \quad F_x = f_{B1}(y) v_{B1}(x) D_{1x} \dots (d)$$

5. 計算結果の考察

図2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であり、仮定値と更新計算後の値の整合性は良い。繰り返し計算は5回目以降収束している。図3は風速分布、図4は砂粒子平均移動速度分布である。それぞれ平衡解と非平衡解を併示している。まず、風速分布については風が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 $x=600\text{cm}$ 以降ほぼ平衡状態に達しつつある。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、個々の粒子が完全な平衡状態に達するには、まだ距離が不足しているものと考えられる。

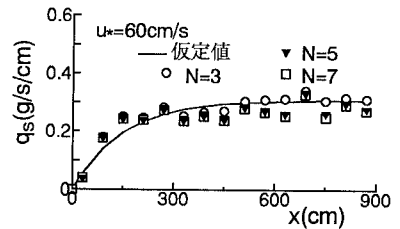


図2 飛砂量

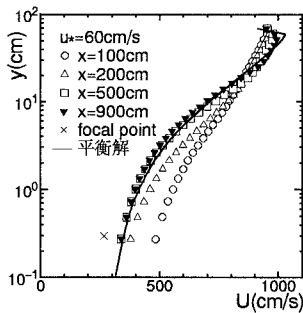


図3 風速分布

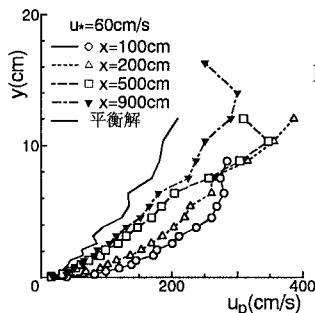


図4 砂粒子平均移動速度

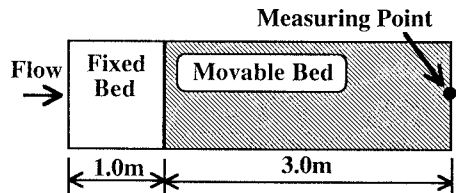


図5 実験概略図

6. 風洞実験

金沢大学工学部に設置されたゲッチンゲン型風洞（実験区間4.0m、断面80cm×80cm）において風速分布を計測した。図5に示すように固定床として粗度付けたビニール板を敷き、その下流に十分乾燥した砂（石川県松任海岸で採取、中央粒径約0.3mm）を厚さ3cm、長さ3mに亘って敷き詰めた。固定床粗面と移動床面は同一面とした。移動床上流端より3mの位置で熱線式風速計を用い風速の鉛直分布を測定した計測結果を図6に示す。計算値と比較するため実験値の勾配から摩擦速度を求めて数値解析を行い、非平衡解の $x=300\text{cm}$ での値と併示した。図に示されるように非平衡状態での飛砂層を伴う風の特徴が良く再現されている。

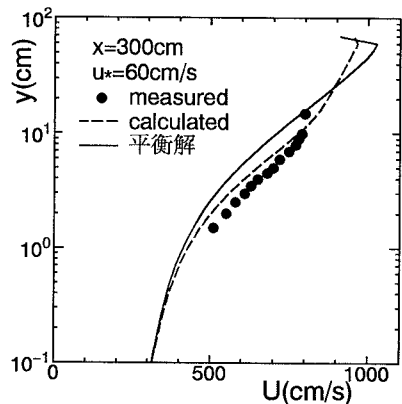


図6 実験値と計算値の比較

7. 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が、実験値と比較するためには実験区間が3mしか取れず、満足な比較が出来たとは言いがたい。今後実海浜での風速測定も行って整合性の向上に努めたい。また、植生等による飛砂層への影響についても研究を進め、飛砂の制御の研究を進展させていかねばならない。

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。