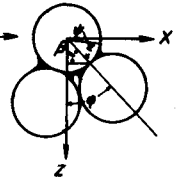


京都大学防災研究所 正員 河田 恵 昭

" 正員 土屋 義 人

1. 緒 言 降雨中あるいは降雨後の湿潤状態の砂面においても、強風によって飛砂が発生し、気乾状態の場合に比べて飛砂量がかなり減少することは従来からよく知られていることである。この原因の1つとして、砂粒の付着水による反発係数などの砂面条件が変化することなどのほかに、とくに砂粒の限界掃流力が砂粒間に作用する表面張力のために、気乾状態のものに比べて大きくなることによるものと考えられる。本研究は、後者の立場から、表面近傍の砂層の含水比と表面張力との関係を明らかにし、砂粒の移動限界時において表面張力を考慮した静的つり合いの関係から限界掃流力を求め、これを用いて飛砂量に及ぼす含水比の影響について考察したものである。

2. 砂粒の移動限界に及ぼす含水比の影響 一般に、含水比が比較的小さい低水分層 u において保持される水は、砂粒接点あるいは最近接部に自由表面を形成するウェッジ液とそれ以外の砂粒表面に塗布状に存在する付着液とが考えられるが、砂粒の移動限界には前者のみが影響すると考えれば、近似的に次式が成立する。 $W' = \alpha_2 W$ ($0 < \alpha_2 \leq 1$)



----- (1) ここに、 W' および W ：それぞれウェッジ液および真の含水比である。いま、図-1砂粒を同一径の球体として表面砂層を模式的に考える。図-1において、砂粒中心軸と表面砂層の模式図水平とのなす角を β 、ウェッジ液を見込む中心角を ψ とすれば、砂粒に働く表面張力は次式のように表される。

$f = \pi d T \sin \psi$ ----- (2) ここに、 d ：粒径および T ：単位長さ当りの表面張力である。一方、対象とする砂粒が n 個の砂粒と隣接しているとすれば、これらの接点に働く表面張力の合力の水平方向成分は平均的に0であり、鉛直方向成分 F は近似的につぎのように表される。 $F = n \pi d T \sin^2 \psi_m \sin \beta_m$ ----- (3)

ここに、記号 m は平均を示す。したがって、砂面上の1つの砂粒に働く流体力とその砂粒の摩擦力および表面張力の鉛直方向成分がつり合ったときを移動限界とすれば、静的なつり合い関係から次式が成立する。ただし、砂粒に働く流体力では乱れの影響も考慮すべきことはいうまでもないが、ここでは表面張力の効果を検討する立場からこれらを省略して取扱うことにする。 $\{(\pi/6) d^3 (\sigma - p_a) g + n \pi d T \sin^2 \psi_m \sin \beta_m\} (\tan \varphi \cos \theta + \sin \theta) = (\pi/8) p_a C_D d^2 u^2$ ----- (4)

ここに、 σ および p_a ：それぞれ砂粒と空気密度、 g ：重力の加速度、 φ ：砂粒の静止摩擦角、 θ ：砂面の傾斜角および C_D ：砂粒の抵抗係数である。式(4)において u として、砂面近傍の風速であることから、近似的に摩擦速度 u_* を用いて $u = A r u_*$ として式(4)を変形すれば、砂粒の無次元限界掃流力 T_{xc} はつぎのように表される。 $T_{xc} = A^2 \{ \sin(\theta + \varphi) / \cos \varphi \} \{ 1 + 6 n T \sin^2 \psi_m \cos \varphi / (\sigma - p_a) g d^2 \}$ ----- (5) ここに、 u_{xc} ：限界摩擦速度、 $A = 2 / (\sqrt{3} C_D A r)$ および $A r$ ：完全粗面乱流の場合約8.5の値をとる定数である。さて、砂粒が不規則に充てんしている場合、ウェッジ液についての含水比 W' および残留平衡飽和度 S はそれぞれ次式のように与えられている。¹⁾ $W' = 100 \varepsilon p_w S / (1 - \varepsilon) \sigma$, $S = (3/4) \{ (1 - \varepsilon) / \varepsilon \} n \int_0^{\pi/2} (\sec \psi - 1)^2 [1 - \{(\pi/2) - \psi\} \tan \psi] \cos \beta d \beta$ ----

----- (6) ここに、 ε ：空隙率および p_w ：水の密度である。一般に、 ψ と β は独立の関係にあり、しかも含水比が小さく $\psi \ll 1$ と考えられる場合、式(6)からウェッジ液を見込む中心角 ψ_m と含水比 W' との関係および砂面最上層の砂粒の接点数 n と下層の砂粒の接点数 n_m は近似的に次式で与えられる。 $\sin^2 \psi_m = (2/5\sqrt{3}) \sqrt{W' / (p_w / \sigma)}$, $n = \alpha_2 n_m$ ($0 < \alpha_2 \leq 1$) ----- (7)

式(7)を式(6)に代入すれば、砂粒の限界掃流力 T_{xc} はつぎのように表される。 $T_{xc} = A^2 \{ \sin(\theta + \varphi) / \cos \varphi \} \{ 1 + (4\sqrt{3}) \sqrt{\alpha_2 n_m (\cos \varphi)} T_k \}$, $T_k = \sqrt{p_w / \sigma} T \sqrt{W' / (\sigma - p_a) g d^2}$ ----- (8) ここに、 T_k は無次元掃流力とウェーベ数の逆数との積によって表される

が、流速があらわに入らない新しいパラメーターと言える。図-2は砂粒の限界掃流力に及ぼす含水比の影響を示したものであって、図中の曲線は静止摩擦角 ϕ をパラメーターとして式(8)による計算結果を示す。ただし、ここで用いた実験定数は以下のようにして決定した。すなわち、 $W=0$ は乾燥砂の限界掃流力に対応するが、粒径が約0.2mm以上になると、実験値はかなりのばらつきはあるが、比較的式(8)の関係が成立するようであるので、この場合飛砂量の存在しない限界掃流力の平均値を用いて、 $A^2=0.01$ とした。さらに、不規則充てんの砂粒層は、立方型充てんと最密型充てんの2つによって構成されると考えれば、砂粒1個

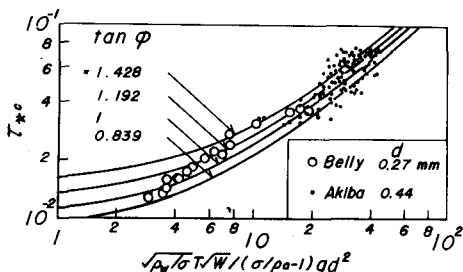
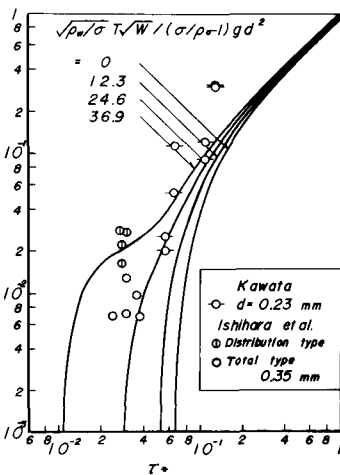


図-2 含水比による限界掃流力の変化

当りの平均接点数 n_m は空隙率の関数として次式で与えられている。 $n_m = 12 - 6(\varepsilon - 0.260)/0.216$ ---- (9) ここに、 $\varepsilon = 0.4$ の場合 n_m の値は約8.2となる。図中の実験値はBellyおよび萩葉らのものであるが、含水比と限界掃流力の関係が式(8)によってかなり説明でき、粒径が0.3mm程度では、含水比が10%で $\tau_{*c} \approx 0.1$ となり、乾燥砂の場合の約10倍になることが示され、含水比の増加によって砂粒の無次元限界掃流力が著しく大きくなることがわかる。

3. 飛砂量に及ぼす含水比の影響 著者らは、最近plane bedを対象とした気乾状態での飛砂量則を誘導した。すなわち、飛砂層内の運動砂粒を第1, 2および定常跳躍の3つの集団に分けた場合、その関係は次式で示される。 $q_{B*} = 4.62 \{1 + 0.495(1 - 1.05e)(1 - 1/r^2)\} \sqrt{0.028 + 0.470[1 + e - (1 - e)\sqrt{1 + 0.355/$

$\{(1 - e)\tau_*\}^2(1 - 1/r^2)^2(\tau_* - \tau_{*c})$ ---- (10) ここに、 $q_{B*} = q_B/u_*d$, $\tau_* = u_*^2/(\sigma/p_a - 1)gd$, $e = 0.95/(1 + 5.47\tau_*)$, $r = 0.95(1 + 65.0\tau_*)/(1 + 5.47\tau_*)$ であり、反係数などの実験定数は著者らの飛砂のsaltationの実験結果から求めたものである。図-3は飛砂量に及ぼす含水比の影響を示したものであり、図中の曲線は式(8)を式(10)に代入し、 $\phi = \pi/4$ および $\theta = 0$ として計算し、 $\sqrt{p_w/sigma} * T * W / ((\sigma - p_a)gd^2)$ をパラメーターとして図示したものである。この図から、同一の無次元掃流力に対して、無次元飛砂量は $\sqrt{p_w/sigma} * T * W / ((\sigma - p_a)gd^2)$ が大きくなる程減少するが、無次元掃流力が0.2以上になるとこの影響が少くなり、乾燥砂の場合の飛砂量に近づくことがわかる。図中には、河田三治および石原らによる湿潤状態の砂面での飛砂量の実測値を示した。これらの値はかなりばらついているが、その原因としてはつぎのことが考えられる。すなわち、現地では平均風速から推定した摩擦速度が一般に小さく



なるので、無次元飛砂量が実際の値より大きくなる可能性があることおよび観測者によって飛砂量の測定方法が異なることのほかに、砂面の含水比が場所的に変化することなどが考えられる。したがって、図-3に示した計算結果と実測値とを比較する場合、後者の含水比が求められていないことおよび上述した理由から、定量的な比較検討を行うことは困難であるが、定性的にはある程度一致するように思われる。

4. 結 語 以上、飛砂量に及ぼす含水比の影響を、表面張力による限界掃流力の変化として考察し、湿砂の飛砂量則を表示することと試みたが、今後湿砂の飛砂量の実験値を用いて定量的な検討を行いたいと考えている。

参考文献 1) 大山義年・山口賢二：重カ場における粒3層の平衡含水量について、理研報告、第38巻、第4号、B377, pp.392-400. 2) 土屋義人・河田恵昭：砂粒のSALTATIONに基づく飛砂量則について、第9回水理講演会論文集、B350, pp.7-12.