

斜面における砂の移動について On Sand Movement on Slopes

埼玉大学 正会員 ○ 池 田 駿 介
埼玉大学 宮 下 修 一

1. 序 論

斜面における土砂移動は河道側岸部の侵食、河道の拡幅、安定横断形状、あるいは流路変動のような河川工学上極めて重要な問題と深くかかわりあっているにもかかわらず、平坦河床における土砂移動と比較して研究例が少く、基本的な移動機構が十分に解明されていないのが現状である。

斜面における限界掃流力に関しては Lane (1955) の先駆的研究以来、Stevens・Simons (1971)、Christensen (1972) 等によって理論研究がなされているが、実験による証明がなされておらず、未だ定説のない状態である。一方、直線流路の側岸侵食機構については 芦田・村本・奈良井 (1971)、平野 (1973)、長谷川 (1978)、藤田 (1979) によって寄与がなされているが、実験についてはいずれも開水路で行われており、河床剪断力が横断方向に急激に変化することや横断方向流砂量を直接測定することの困難さなどから流砂量については信頼しうるデータが十分に蓄積されているとはいえない。

本研究では掃流力が横断方向にほぼ一定となる斜面を作り、その装置を用いて限界掃流力や横断方向流砂量を測定したので、その結果を報告し、併わせて検討を行うこととする。

2. 実験装置とその特性

斜面において一様な剪断力を得るには閉管路としなければならないが、水路は製作・実験が困難であるので横断方向に回転可能な回転式風洞を用いて実験を行った (写真 1)。風路部は横断方向に 0° から 40° まで連続的に傾斜を変えることができ、 $10\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ の断面と約 5 m の長さを有している。風速は 0 m/s から 30 m/s まで連続的に変化させることが可能であり、風速分布はプラントル型ビート管とアスカニア型微差圧計を用いて測定した。その一例を図 1 に示すが、左右対称の分布形が得られていることが知られ、又この分布型は風路を横断方向に傾けても変化しなかった。底面に働く摩擦力は圧力降下を測定することによって測定し、力の釣り合い式、 $\tau_b = A_b / B \cdot d\bar{p} / dx$ から算定した。ここに A_b は砂の底面が剪断力を受け持っている部分の断面積、 B は風路巾である。 A_b の算定には足立 (1962) の方法を用いた。

実験には三種類の極めて均等性の高い珪砂を用いた。それらの中央粒径は夫々、 $d_{50} = 1.3\text{ mm}$ 、 0.42 mm 、 0.26 mm である。装置や砂の詳細は文献 9.) に記述されている。

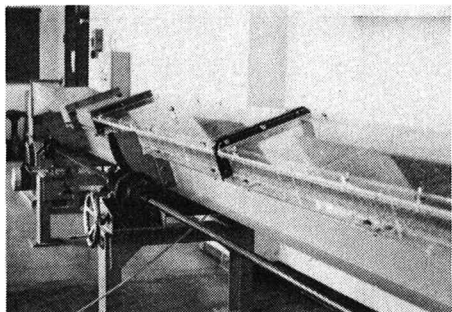


Photo 1. Rotary wind tunnel.

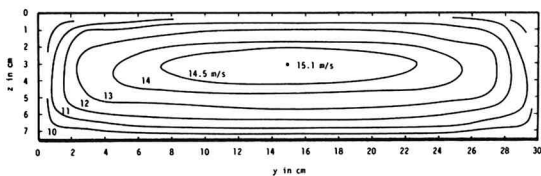


Fig. 1. An example of isovels of axial velocity. The sand $d_{50}=1.3\text{ mm}$ is attached to the bed.

3. 斜面における限界掃流力

岩垣 (1956) の方法を用いて砂粒子に働く流体力は文献 9) において次のように評価されている。

$$\hat{L} = \frac{L}{\rho \pi u_*^2 d^2} = \frac{1}{8} C_L f^2 + 0.1914 \left(1 - \frac{\delta}{d}\right) \left(\frac{r}{d}\right)^2, \quad \hat{D} = \frac{D}{\rho \pi u_*^2 d^2} = \frac{1}{8} C_D f^2 + 0.3414 \frac{r}{d} \quad \dots (1)$$

ここに L = 揚力、 u_* = 摩擦速度、 d = 砂粒子の直径、 C_L = 揚力係数、 $f = \bar{u}_1 / u_*$ 、 $\bar{u}_1$ = 砂粒子中心高さにおける平均流速、 δ = 粘性底層厚さ、 r = 粘性底層外縁における砂粒子の直径、 D = 抗力、 C_D = 抗力係数、および r = 乱流部に突出している砂粒子断面積の割合である。 $\hat{L}$ および $\hat{D}$ の値および $\alpha = L/D$ の値は $u_* d / \nu$ の関数として図 3 に示されている

図 2 を参照して斜面に置かれた砂粒子に働く力の釣り合いは

$$F_S^2 = D^2 + (W \sin \theta)^2 \quad \dots (2)$$

ここに F_S は砂粒子と斜面の間に働く静止摩擦力であり、 ϕ を砂粒子の水中安息角、 θ を斜面の傾きとすれば $F_S = \tan \phi (W \cos \theta - L)$ と表わされる。これらを (2) 式に代入すれば、

$$(\hat{D} - \hat{L} \tan^2 \phi) \tau_*^2 + 2 \hat{L} \tan^2 \phi \cos \theta \tau_* + (\sin^2 \theta - \tan^2 \phi \cos^2 \theta) = 0 \quad \dots (3)$$

となる。ここに $\tau_* = \rho u_*^2 / (\rho - \rho_s) g d$ である。(3) 式の解は

$$\tau_{*c\theta} = \frac{1}{\hat{D}} \frac{-\alpha \tan^2 \phi \cos \theta + (\tan^2 \phi \cos^2 \theta + \alpha^2 \tan^2 \phi \sin^2 \theta - \sin^2 \theta)^{0.5}}{1 - \alpha \tan^2 \phi} \quad \dots (4)$$

となる。ここに $\tau_{*c\theta}$ は傾斜角 θ の場合の限界掃流力である。水平河床 ($\theta = 0$) の場合には、(4) 式は

$$\tau_{*co} = \frac{\tan \phi}{\hat{D} + \hat{L} \tan \phi} \quad \dots (5)$$

となる。Lane (1955) と同様に斜面係数 $K = \tau_{*c\theta} / \tau_{*co}$ を定義すれば、

$$K = \frac{-\alpha \tan^2 \phi \cos \theta + (\tan^2 \phi \cos^2 \theta + \alpha^2 \tan^2 \phi \sin^2 \theta - \sin^2 \theta)^{0.5}}{\tan \phi (1 - \alpha \tan \phi)} \quad \dots (6)$$

を得る。上式は斜面係数 K が $u_* d / \nu$ 、 ϕ および θ の関数となることを示しているが、

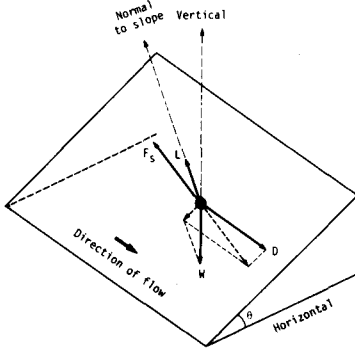


Fig. 2. Definition diagram.

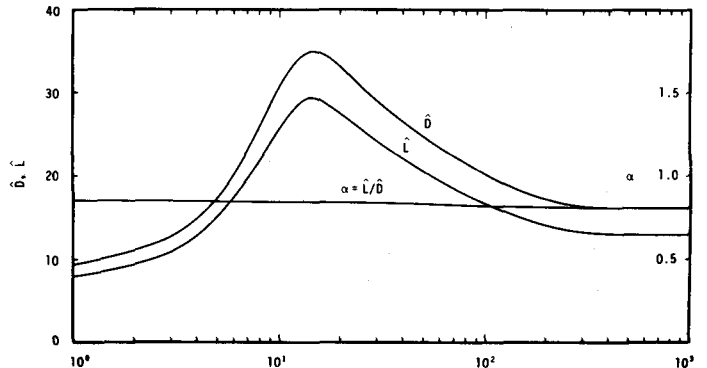


Fig. 3. Relation between $\hat{D}$, $\hat{L}$, α and $u_* d / \nu$.

実際に計算を行ってみると $u_* d / \nu$ に対してはほとんど独立であり、 ϕ と θ のみの値によって決定されることが知られる。特に $\alpha = \hat{L} / \hat{D} = 0$ の場合には(6)式は

$$K = \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \theta}{\tan^2 \phi}} \cos \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、Lane (1955) が導いた結果と全く一致する。即ち Lane の関係式は $u_* d / \nu$ の広い領域に対して、成立することがわかる。

限界掃流力の測定は砂を 2.5 cm の厚さに敷つめて行った。水平床の場合の結果を図 4 に示す。土屋・河田 (1970) も指摘しているように空気流に対する限界掃流力は水流のそれと比較してかなり小さく、左下に現われている。Chepil (1945) はこの相違を *impact threshold* と *fluid threshold* と名付けて区別している。筆者等は限界掃流力付近の飛砂の様子を観察し、この相違は次のような両者の間の運動形態の差に基くものであると考えた。即ち、水流の場合には砂粒子は砂面上を転動し、ごく僅かの距離を移動するにすぎないのに対し、空気流の場合には $u_* d / \nu$ の値が同じであっても u_* が大きい為に砂面近傍の速度勾配が極めて大きく、ある点で一つの砂粒子が動き始めると、そのごく僅か浮き上った砂粒子は上方の空気流から大きな運動量を受け、次の衝突点でそこに存在する砂粒子に大きな力を与える。このようにして飛び出した砂粒子は次々と下流側にある砂の運動を誘発する。飛砂では限界掃流力付近でもその移動形態はほとんど跳躍であり、水流の場合のように転動はほとんど見られない。このように砂粒子の跳躍という運動形態を通して上方の大きな運動量を砂面に持ち込み、有効な掃流力を特に限界掃流力付近で増大させていると考えられる(写真2)。従って砂の移動量は下流側へ向って増大し、一定値となっていく。又、限界掃流力付近では水流の場合のようにある面内で個々の砂粒子が定常的に同じ確率で動いている状態ではなく、砂粒子は間歇的に移動し、移動している間は全面的に移動し、その間ではほとんど停止しているというような非定常的な輸送形態を持っている。

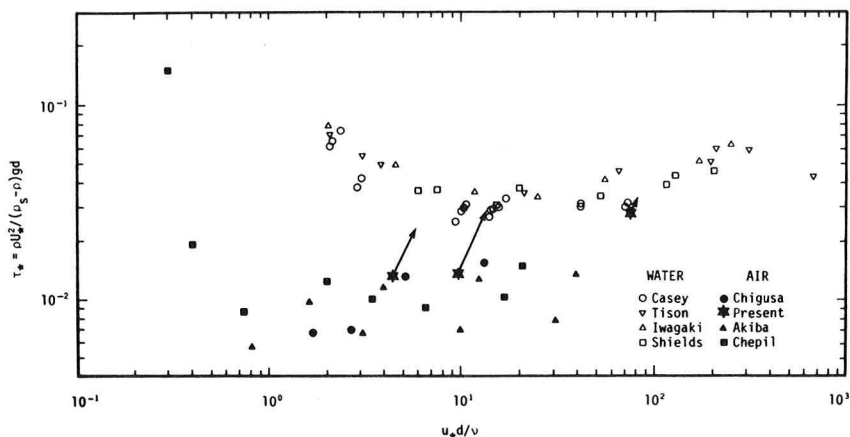


Fig. 4. Diagram of critical shear stresses for water and air flow. Arrows indicate the displacement of critical shear stress for blown sand, if the added shear stress due to collision of sand particles to the bed is counted from the photographs such as shown in Photo 2.



Photo 2. An example of sand movement at critical condition. 0.26mm sand.

図5は斜面係数Kについての計算結果を比較したものである。(7)式、Laneの式、が最も大きな値を与え、揚力を考慮した(6)式はや、小さ目の値を与えている。これに対し、Christensen (1972)の式はかなり小さ目の値を与え、砂粒子が斜面でより動きやすいことを示している。図6、図7は夫々 $d_{50} = 0.42 \text{ mm}$ 、 1.3 mm の砂に対する斜面係数Kの測定値を斜面の傾き θ に対してプロットしたものである。最も簡単な(7)式の適合性がよいが、限界掃流力付近の砂粒子の挙動が空気流と水流の場合で相当異っていることを考えると、式(7)をただちに水流の場合に適用できるとは即断できないが、一応の目安を与えていると考えることはできる。

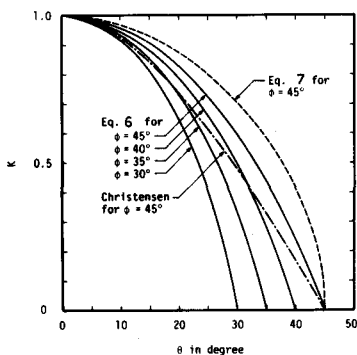


Fig. 5. Calculation of slope factor K.

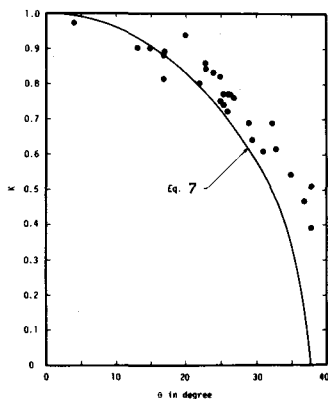


Fig. 6. Measured slope factor for 0.42mm sand.

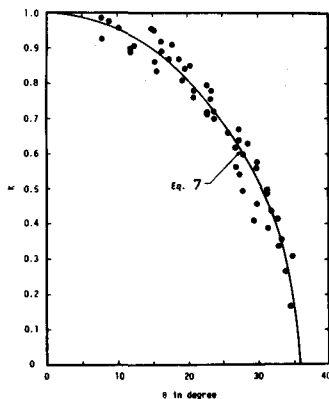


Fig. 7. Measured slope factor for 1.3mm sand.

4. 斜面における横断方向流砂量

水平床における流砂量は風路末端で全て採取し、横断方向流砂量については風路内を区切り、その区切りに長方形の砂流入口を設けて砂を集めた。その際に区切りに沿って流下してくる流砂は直前に同様な長方形孔を設けて排砂し、流砂量が見かけ上増大することを防いだ。又、風がそのような孔を通して風路外に抜けると横断方向流砂量が增大するので砂が横断方向へ流出してくる部分は外から密閉し、風は全量、風路を流下するようにした。図8に水平床の場合の流下方向流砂量の測定結果を示す。限界掃流力付近の τ_* に対する立ち上りが水流の場合と比較して極めて急激であることがわかる。図9は水流の場合の芦田・道上 (1972) の式

$$q_* = 17 \left(1 - \tau_{*c} / \tau_* \right) \left(1 - u_{*c} / u_* \right) \tau_*^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

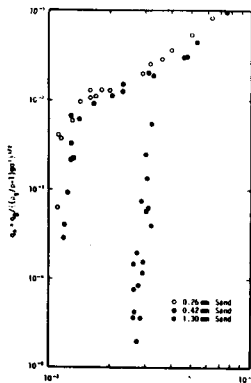


Fig. 8. Relation between q_* and τ_* .

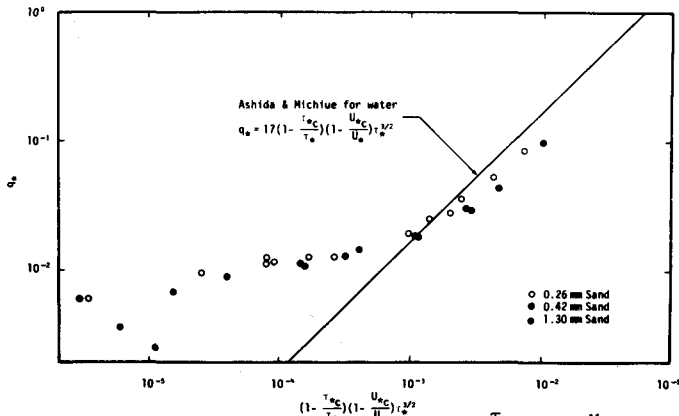


Fig. 9. Relation between q_* and $\left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*} \right) \tau_*^{3/2}$.

と飛砂量の測定結果を比較したものである。掃流力が限界掃流力よりもやゝ大きい領域では実測値は式(8)よりもかなり大きい値を与えるが、掃流力が増大するにつれて測定値は式(8)によって表わされるようになる。このことは限界掃流力付近では空気流と水流では砂粒子の運動形態が異っているものゝ、水流でも掃流力が増大するにつれてその移動形式は Saltation となり、飛砂の運動形態と似てくる為であると考えられる。

横断方向の流砂量については平野 (1973) が理論的な検討を行っている。(2)式を基に斜面上の砂粒を動かそうとする力と抵抗力の比 T_*

$$T_* = \frac{\sqrt{D^2 + (W \sin \theta)^2}}{F_s} \dots\dots\dots (9)$$

を考え、 D 、 W および F_s の値を代入して、 θ が小さい条件の下に、 $T_* = \tau_* / (\tau_{*c} \cos \theta)$ を得ている。これから流砂量式

$$\frac{q_{B1}}{u_* d} = A (T_* - 1)^m = \frac{A}{\tau_{*c}} \left(\frac{\tau_*}{\cos \theta} - \tau_{*c} \right)^m \dots\dots\dots (10)$$

を提案している。更に定常状態に達した後の砂粒子の運動方向に関する考察から単位巾当り横断方向流砂量 q_{B1} として

$$\frac{q_{B1}}{u_* d \tan \theta} = \frac{A}{\mu} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} (\tau_* - \tau_{*c})^m \dots\dots\dots (11)$$

を得ている。ここに A 、 μ は定数である。平野によれば $A = 2.7$ 、 $\mu = 0.8$ であり、指数 m は 1 となる。

図10、図11は夫々 $d_{50} = 0.26\text{mm}$ 、 0.42mm の均一な砂に対する横断方向流砂量の測定値をプロットしたものである。流砂量は $\tan \theta$ によってよく整理されうること示しており、傾斜角の増大とともに、横断方向流砂量は $\tan \theta$ によって増大していくことが知られ、(11) 式の妥当性を裏付けている。図12は(11)式に基づいて $q_{B1} / (u_* d \tan \theta)$ と $\sqrt{\tau_{*c} / \tau_*} (\tau_* - \tau_{*c})$ の関係をプロットしたものである。掃流力が限界掃流力よりも少し大きい領域では水平床における流下方向流砂量と同様に実測値が予測値よりも大きく、(11)式の形式に従わないことが知られるが、掃流力が増大するにつれて、(11)式の表現によってよく表わされるようになってくる。本実験では $A / \mu = 9$ の場合が最も実験値をよく表現した。

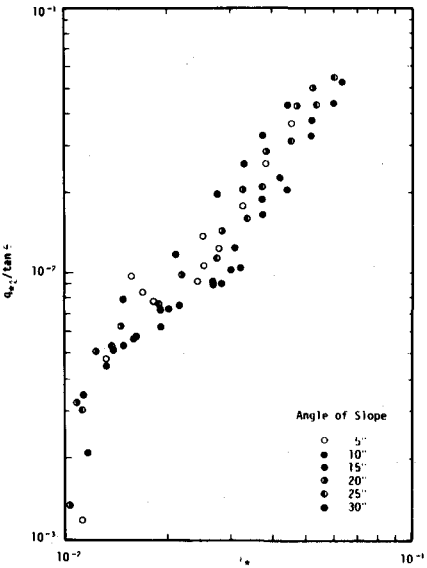


Fig. 10. $q_{*0}/\tan\theta \sim \tau_*$ relation for 0.26mm sand.

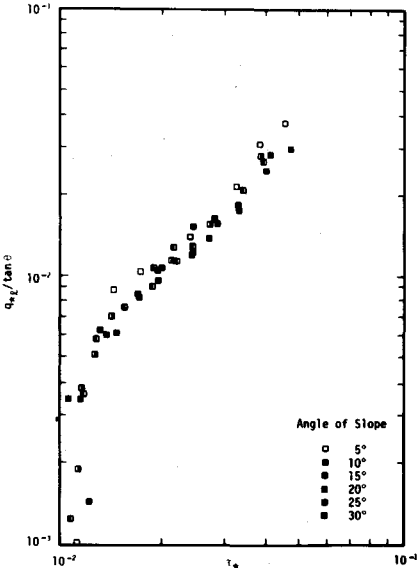
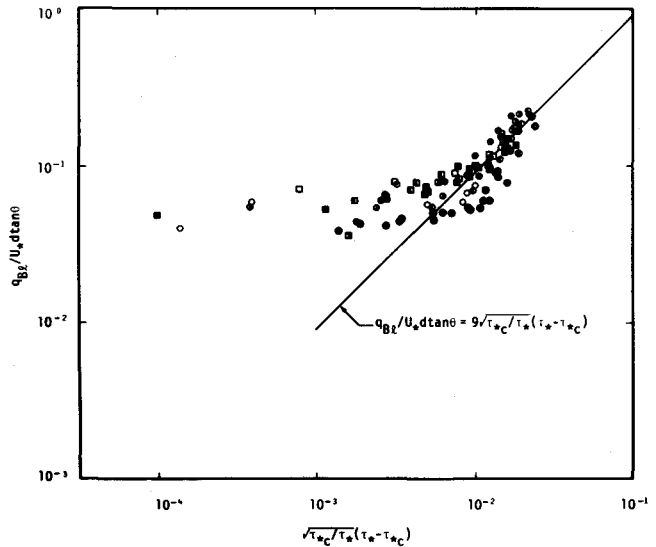


Fig. 11. $q_{*0}/\tan\theta \sim \tau_*$ relation for 0.42mm sand.

Fig. 12. Test of Eq. 11.
Symbols are as in Figs.
10 and 11.



5. 結 語

以上の結果から次のことが知られた。

飛砂における限界掃流力は水流のそれと較べるとはるかに小さく、その原因は限界掃流力付近における運動形態の違いによると考えられるが、この点については更に検討が必要である。斜面の限界掃流力は、Laneの式によってよく表現される。横断方向流砂量は $\tan \theta$ によって増大し、掃流力の大きい領域ではほぼ τ_* に比例して増大する。

本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究、扇状地における洪水・土砂災害の発生とその防止・軽減に関する研究（代表者芦田和男京都大学教授）、の補助を受けて行ったものである。又、装置の設計・実験に際しては中村広昭助手、草野晋輔技官の手を煩した。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Lane, E.W., Design of Stable Channels, Trans. ASCE, Vol. 120, 1955.
- 2) Stevens, M.A. and Simons, D.B., Stability Analysis for Coarse Granular Material on Slopes, River Mechanics, Colorado, 1971.
- 3) Christensen, B.A., Incipient Motion of Cohesionless Channel Banks, Sedimentation, Colorado, 1972.
- 4) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二, 河道の変動に関する研究, 京大防災研年報, 14 B, 1971.
- 5) 平野宗夫, 拡幅を伴う流路変動について, 土木学会論文報告集, 210号, 1973.
- 6) 長谷川和義, 直線状流路の側壁浸食機構に関する研究, 第33回土木学会年次学術講演会講演集, 1978.
- 7) 藤田祐一郎, 直線流路の側壁浸食機構, 京大防災研年報, 22 B - 2, 1979.
- 8) 足立昭平, 長方形断面水路の側壁効果に関する研究, 土木学会論文集, 81号, 1962.
- 9) Ikeda, S., Incipient Motion of Sand Particles on Slopes, Tech. Rep., Dept. of Foundation Engineering, Saitama Univ., 1980.
- 10) 岩垣雄一, 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 41号, 1956.
- 11) Chepil, W.S., Dynamics of Wind Erosion II, Soil Science, Vol. 60, 1945.
- 12) 土屋義人・河田恵昭, 飛砂における運動機構(1), 京大防災研年報, 13 B, 1970.
- 13) 芦田和男・道上正規, 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 206号, 1972.