

第三章 砂礫の流動

第一節 水中の土砂含有量が流速に及ぼす影響

土砂の流動に關して同一の狀況にては土砂を含む水は土砂なき水よりも其の流速遅きものなり、即ち

Q は土砂なき水の一秒時に或る一定斷面を流るゝ流量にして、

r は水の比重とすれば、

$Q \cdot r$ は一秒時間に其の斷面を流るゝ土砂なき水の重さなり。

然るに此の水が水と土砂との容積の比に於て、 α だけの土砂を含み、土砂の比重を d とすれば、重さに於て $\alpha \cdot Q \cdot d$ だけの土砂を混じ、水の重量 $\alpha \cdot Q \cdot r$ は減少す、従て

$$\alpha \cdot Q \cdot d - \alpha \cdot Q \cdot r = \alpha \cdot Q (d - r)$$

は水中に土砂を含みしため増加せし重量なり。

此の斷面に於ける土砂なきときの、水の平均流速を毎秒 V とし、土砂を含みし後の平均流速を毎秒 V_1 とすれば、定流運動なるためには

$$r \cdot Q \cdot V = \{r \cdot Q + \alpha \cdot Q (d - r)\} V_1$$

即ち
$$V_1 = V \frac{r}{r + \alpha (d - r)} \dots\dots\dots (1)$$

此式は土砂なき場合と、土砂を流す場合との平均流速の關係を明にせるものなるが、

$d - r$ は常に (+) なるが故に

$$\frac{r}{r + \alpha (d - r)}$$

は 1 より小なり、故に V_1 は V よりも小なり、即ち土砂を含むに從つて水の流速は減少するものなり。

一般に平均流速の公式は $V = c \sqrt{R \cdot J}$ にて示し得るが故に、土砂を含む水の

平均流速式は、 R 及び J が變化せざるものと考ふれば

$$V_1 = c_1 \sqrt{RJ}$$

故に
$$\frac{V}{V_1} = \frac{c}{c_1} = \frac{r + a(d-r)}{r} \dots\dots\dots(2)$$

此式にて水中に含有する砂礫の割合が、平均流速を如何に變化するかを知り得可し。

第二節 砂礫に對する水の押力 及砂礫の抵抗關係

静止せる物體に對する水の押力は

$$S = (k+k_1) r \cdot F \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(3)$$

なる式を以て表すことを得べく、式中 F は物體に水の衝突する面積、 V は平均流速、 r は水の比重、 g は物體の重力加速度、 k 及び k_1 は水の衝突する物體の衝突面の形狀及物體の形に關する形狀係數にして、 k は水が衝突する物體の前面に於ける係數、又、 k_1 は物體の後面に於ける係數なり。

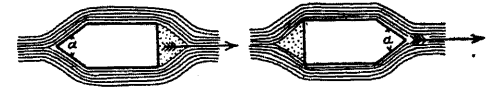


第 5 圖

此式より流體の密なる程又衝突する面の大なる程水の押力は大にて、之に反する場合には其だけ抵抗は大なり。

形狀係數の大きさは Dubuat 氏 Eytelwein 氏及 Sternberg 氏等によりて實驗上より定め Dubuat 氏は薄板、立方體、柱體の三者につき、何れも水の衝突面は $0,325 m^2$ にて、板の厚さは $9 mm$ 、柱體の長さは $0,75 m$ とし、流速は毎秒 $0,975 m$ にて實驗の結果 k の價は二者共に $1,19$ 、 k_1 の價は板は $0,67$ 、立方體は $0,27$ 、柱體は $0,15$ にて k_1 の價は物體の長さに反比例して減少することを知れり。之等の三者の場合に於ける、 $k+k_1$ の平均數は $1,5$ なり。又球體にては $k+k_1$ の價は $0,5$ なり。Sternberg 氏は長軸 b が、短軸 a の二倍に等しき楕圓體につ

きて實驗し $k+k_1$ の價は $0,8$ とせり。又物體の前面が尖れる場合には $k+k_1$ の價は其の尖りが鋭角なる程減少す。物體の後面の尖れるときも同様なれども、其の減少する割合は前面の尖れる時の如く著しからず。(第



第 6 圖

6 圖)

上に述べたる形狀係數の平均數 $k+k_1 = 1,5$ を用ひ $g = 9,81$ として 3 式に代用すれば

$$S = \frac{1,5}{2 \cdot 9,81} \cdot r \cdot F \cdot V^2 = 0,076 \cdot r \cdot F \cdot V^2 = 0,076 \cdot r \cdot a \cdot c \cdot V^2 \dots\dots(4)$$

同式中 a 及び c は水の衝突する物體面の高さ、及び横の大きさを示すものとす。

次に抵抗に關して石が α の角にて傾斜せる河床上に静止する場合(第 7 圖)

石の重さを G とすれば、之を二つの分力 G_1 、及び G_2 に分ちて

$$G \cdot \sin \alpha = G_1$$

は石の動かんとする力。

$$G \cdot f \cos \alpha = G_2 \cdot f = W$$

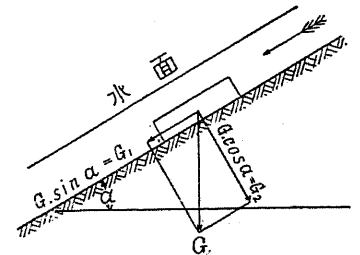
は石が水の押力に對する抵抗 (W) と看做し得べきものにて、 f は傾斜面上に於ける摩擦係數とす。此際石の大きさを高さ a 横 c 長さ b とすれば、 G なる重さは d を石の比重とすれば $G = (d-r) \cdot a \cdot b \cdot c$ なり。

即ち石の抵抗 W は

$$W = (d-r) \cdot a \cdot b \cdot c \cdot f \cdot \cos \alpha \dots\dots\dots(5)$$

分力 $G_1 = G \cdot \sin \alpha$ の價は小なるが故に省略して考ふれば、4 及び 5 式より、石の初めて流動するがためには少くとも

$$0,076 \cdot r \cdot a \cdot c \cdot v^2 > (d-r) \cdot a \cdot b \cdot c \cdot f \cdot \cos \alpha$$



第 7 圖

の関係あり。之より土砂の動くべき一般条件式として

$$V > \sqrt{\frac{(d-r) \cdot b \cdot f \cdot \cos \alpha}{0,076 \cdot r}} \dots\dots\dots(6)$$

或は一般に

$$V > \sqrt{\frac{\beta(d-r) \cdot b \cdot f \cdot \cos \alpha}{r}} \dots\dots\dots(7)$$

此の β は水の衝突する物体の形状に関する係数とす。尙此式は d, r, f 及 α が定数なれば

$$V > K_0 \sqrt{b}$$

の如く簡略に示し得べくして、Leslie 氏は立方體に對しては $K_0 = 3,23$ 球體に對しては $K_0 = 4,58$ として一般に使用し得べきものとせり。

尙 Du Boys 氏は砂利層の静止すべき条件式として

$$V \leq \frac{1}{n} \cdot \frac{1000 H i}{(d-1) \tan \alpha} \dots\dots\dots(8)$$

なる式を公にせり。式中 V は一個の砂利の體積、 d は砂利の比重、 n は水平に考へし一平方米上にある砂利の數量 α は静水中にて砂利が轉動せしとする場合の河床の傾斜角とす。

$n \cdot V = e$ は砂利層の平均の厚さにて、即 n 個の砂利の有する體積が一平方米上に平等に分布して、 e なる砂利の厚さをなせるものとすれば

$$e \leq \frac{1000 H i}{(d-1) \tan \alpha} \dots\dots\dots(9)$$

なり。

(6) 及 (7) 式にて知るが如く、水の比重は土砂の運動上に影響する所大にして、即ち此比重が増大すれば $\sqrt{\frac{d-r}{r}}$ の式中分子は一層小となり、分母は一層大となりて二重に作用するものなり。故に他の條件は同一なるものとして、茲に $\sqrt{\frac{d-r}{r}}$ につきて考ふるに、石の一立方メートルに對し $d = 2000 \text{ kg}$ とし、土砂なき場合の水の比重を $r = 1000 \text{ kg}$ とせば、

$$\sqrt{\frac{d-r}{r}} = \sqrt{1.0} = 1$$

然るに水に土砂が混じて、 $r = 1,200 \text{ kg}$ となれば

$$\sqrt{\frac{d-r}{r}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \doteq 0.8$$

又 $r = 1600 \text{ kg}$ となれば

$$\sqrt{\frac{d-r}{r}} = 0.5 \text{ なり。}$$

一般に土石流の場合には、水の比重は 1800 kg になり得るが故に、此場合には清水に比し $1/3$ となるものなり。

故に土石流は多量の土砂を混じて非常に大なる比重を有するを以て、巨大なる岩石を易々として下流に流動し得る理なり。

(7) 式により、水の衝突面は同様な形状の石に就き、只其比重 d_1 及 d_2 を異にし、又長さ b_1 及 b_2 を異にする二個の石が他の條件は同一なる場合に、水流のため流さることなきためには

$$\sqrt{\frac{(d_1-1000) \beta \cdot b \cdot f \cdot \cos \alpha}{1000}} = \sqrt{\frac{(d_2-1000) \beta \cdot b_2 \cdot f \cdot \cos \alpha}{1000}}$$

又は $(d_1-1000) b_1 = (d_2-1000) b_2$

即ち $\frac{b_1}{b_2} = \frac{d_2-1000}{d_1-1000}$

此に $\beta \cdot f$ 及び $\cos \alpha$ の價は、變化せざるものとせしも、石の長さに応じて形状係数は變化するが故に、 β を不變となす事を得ず、而し Kreuter 氏によれば、立方體の形状係数は何れも同一なるが故に

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{b_1^3}{b_2^3} = \left(\frac{d_2-1000}{d_1-1000} \right)^3$$

にて重さ G は

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{V_1 \cdot d_1}{V_2 \cdot d_2}$$

故に $\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{d_2-1000}{d_1-1000} \right)^3 \cdot \frac{d_1}{d_2}$

例えば花崗岩の $d_1 = 2800 \text{ kg/m}^3$ 、石灰岩の $d_2 = 2400 \text{ kg/m}^3$ とすれば

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{1,4}{1,8}\right)^3 = 0,47$$

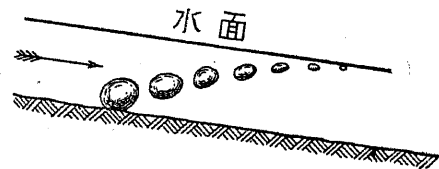
又
$$\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{1,4}{1,8}\right)^3 \cdot \frac{2,8}{2,4} = 0,55$$

即ち捨石に石灰岩の代りに花崗岩を使用すれば、容積の 47%、重量の 55% にて、石灰岩を用ふると同様の効果あるものなり。

第三節 水の限界流速及平均勾配

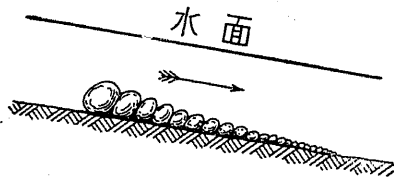
前節によりて明なるが如く砂礫は密度形状大き等により其々相違すれども、水の押力に對して静止して、流動し得ざる流速あり。此の流速を其礫に對する限界流速と稱す。此に各種の土砂石礫が河中を流るゝ場合に、平均流速が其物の限界流速以上なれば土砂は河床上に静止せずして流下し、限界流速以下なれば土砂は

河床上に沈堆するものなり、而して輕小なる土砂程容易に流下するが故に自然と流送砂礫の分類をなすものにして、之を水の單獨運動と稱す。(第 8 圖)



第 8 圖

然して水中を流るゝ砂礫は、水の平均流速の減少すると共に、最も重き砂礫より流動を中止して河床上に静止し、流速の引續き減退するに従つて、輕小なる砂礫も順次静止するものにして、大なる砂礫は上部、小なるものは下部に丁度第 9 圖の如き形態を示すものなり。

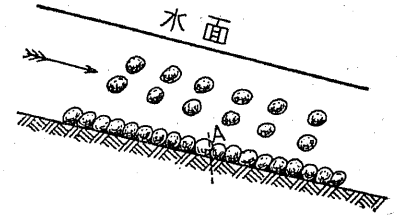


第 9 圖

次に水の平均流速が、第 10 圖に於て河床の礫 α に相當する限界速度よ

り大なるときには、此の α なる礫を流送する事は既に明なることなり、然るに水中に砂礫を混入するときには流速の減するが故に、水は無限に河床より礫を取

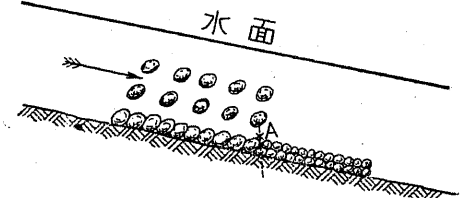
り上げて流送する事を得ず、即ち水の平均流速が其の砂礫の限界流速に等しくなりしときには、より多くの砂礫の流送を許さざるものにて、之を水が土砂を以て飽和されたる状態となす。故



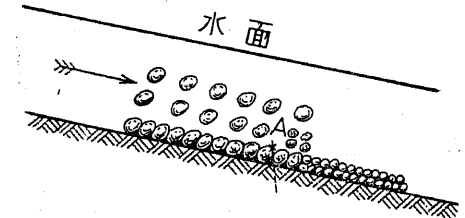
第 10 圖

に此の飽和状態に於ては、何等河床の浸蝕を起さざるものにて、此の場合は河床の抵抗力と、水の押力との間に平衡状態の成立せるものなり。之を圖示せば第 10 圖に於て、或る礫に相當する限界流速を以て、A 點まで來れる水流は、其より下流に於ても土砂の沈積、或

は掘り取りをなさざるものなり而し第 11 圖の如く、A 點より下流部の河床上の土砂が、A 點まで流し來れる土砂より小なるときには、水の流速は小なる土砂の限界流速より大なること明なるが故に、第 12 圖の如く之等の小礫を河床より取り上げて流送するものなり、而し水が斯



第 11 圖



第 12 圖

く小なる礫を取り上げる結果は、水中の土砂含有量を増加して、流速の減少をなすが故に、A まで流送し來れる水中の大礫を引續き流送することを得ずして、之を河床に沈積し、結局河床上の小礫と置換するに過ぎざるものにて A 點まで流送し來れる砂礫の容積と、A 點より下流に流送する砂礫の容積とは何等相異なく、又河床の縦断面は變化せず、而して斯く石礫の交代を起すも、河床勾配に變化を來さざる勾配を天然勾配、或は平均勾配と稱す。

土砂を含有せざる水に對しても、水力と河床の抵抗力との間に平衡状態を形成

すべく、即ち天然勾配の存在すべきものにて、此の場合の天然勾配は天然勾配中にて最小値をとるものにて、特に之を平衡断面と稱す。

溪流に工事を施すに當つては堰堤、床固等により溪床の固定す可き平均勾配を豫め算定し、以て之等工作物の位置、並に其の數量を定むべきものにして、平均勾配を知らんには上述の第 7 式より

$$V = \sqrt{\frac{\beta \cdot (d-r) \cdot b \cdot f \cdot \cos \alpha}{\gamma}}$$

は限界流速なり。

水の平均流速の一般式は

$$V = \sqrt{R \cdot J}$$

にて、 J を河床の傾斜角 α の \sin とすれば

$$\sqrt{R \cdot \sin \alpha} = \sqrt{\frac{\beta(d-r) \cdot b \cdot f \cdot \cos \alpha}{\gamma}}$$

又は
$$\tan \alpha = \frac{\beta(d-r) \cdot b \cdot f}{\gamma \cdot e^2 \cdot R} \dots\dots\dots(10)$$

$\beta \cdot f$ を係数 σ にて示せば

$$\tan \alpha = \frac{d-r}{r} \cdot \frac{b}{e^2 R} \cdot \sigma \dots\dots\dots(11)$$

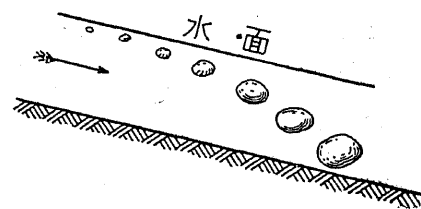
Thiery 氏は平均勾配式として、 $\gamma = 1000, f = 0,76$ となし

$$\tan \alpha = \frac{d-1000}{100} \cdot \frac{b}{e^2 R} \dots\dots\dots(12)$$

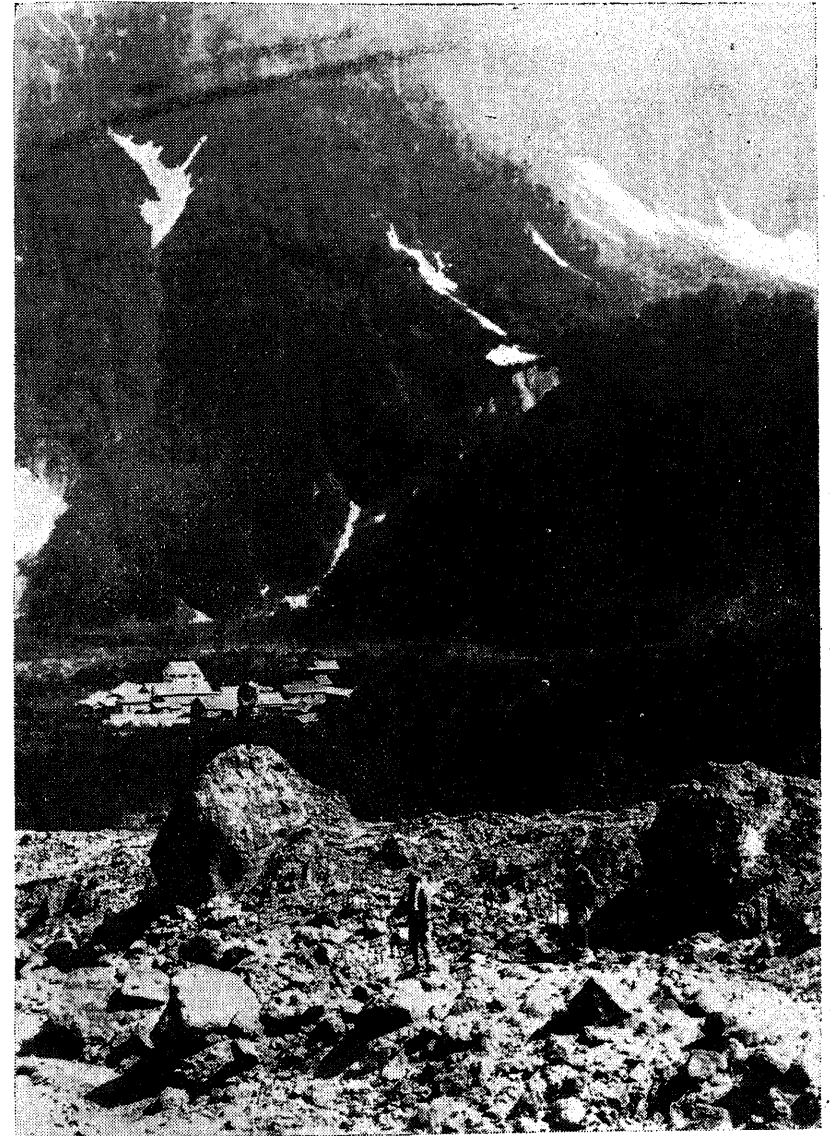
式を採用せり。

一般に平均勾配は濕潤界に比例し、水量に反比例するものなり。

以上は普通土砂流動の原則なれども、山崩による土石流に對しては、水分よりもむしろ水中の含有土砂量等のために、水の押力による流送土石の分類をなさずして、最大なる石

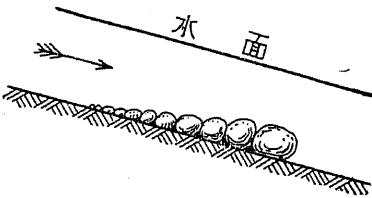


第 13 圖



土石流に因り大なる石の流出の状況 (富山縣上新川郡大山村常願寺川水源泥谷)

礫は其れ自體の大なる動力のため、他の小なる砂礫よりも前進するものにして、上述の各個運搬とは全く逆に進むこと第13圖の如く、従て之等の流動石礫の河床に堆積する状況は第14圖の如く全く各個運搬とは反對に、大なる石礫は前方に堆積するものにて、斯く堆積の状況を見て、容易に其の溪流に土石流の有無を識別し得可し。

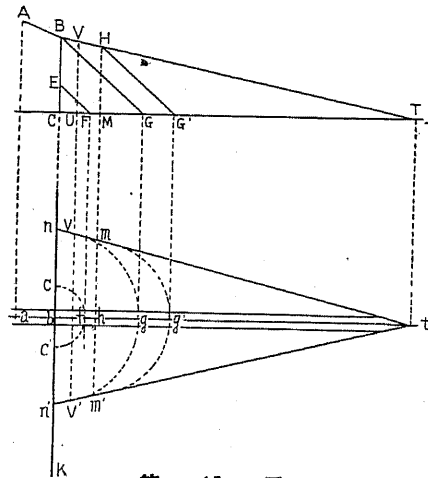


第 14 圖

第四節 砂礫圓錐

溪流の區域を別ちて其の下流部に砂礫圓錐地なる名稱を附せることは既に述べたる所なり。元より此の砂礫圓錐地は溪流の大きさ、地形、荒廢の状況等によりて、必ずしも圓錐狀を呈せざることあれども、夏季出水の際に新しく上流部が崩壊して、溪口に多量の土砂を流出せし箇所又は現在にては桑畑或は部落地として山麓に沿ひて傾斜せる土地を精細に注意すれば、圓錐形をなして土砂の堆積せるを容易に知る可く、之即ち砂礫圓錐地にして之が成立の状況を述べんに、砂礫圓錐の成立發達は三期に別ち得可く、

第一期は第15圖に於て AB は溪口の溪床とす、土砂を流送せる水が上流より流出して B に達せば、 BC なる溪口の絶壁より直下して、此場合水平と考へ得可き CD なる平面に達し、水は四方に分流して折角持ち來れる土砂は BC なる壁の下部に



第 15 圖

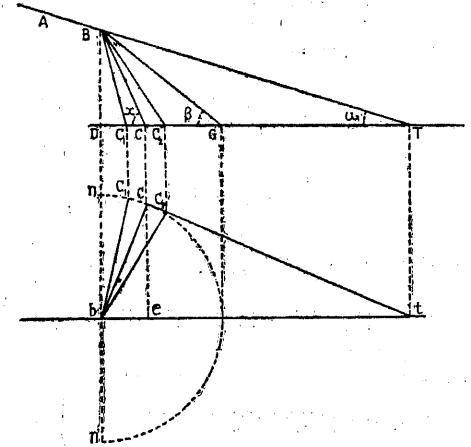
O を中心として此に洪水勾配を以て堆積し、 CEF の如き三角形をなし、其が平面は b を中心とし $cf'c'$ となる、然るに追々土砂を流出するに従ひて堆積の頂點 E は高まりて遂に B 點に達し、三角形は BCG となり、之が平面は ngn' なる半圓を示すものなり。之第一期發達の終りにして、

第二期は上流より尙引續き土砂を流出する時に、土砂は B 點より高く堆積せんとする傾向あれども、流出する水力の爲めに B より高まることを得ずして、却て前方に流路を作つて堆積するものにて、其の堆積の状況は BG と平行に層をなして進み、

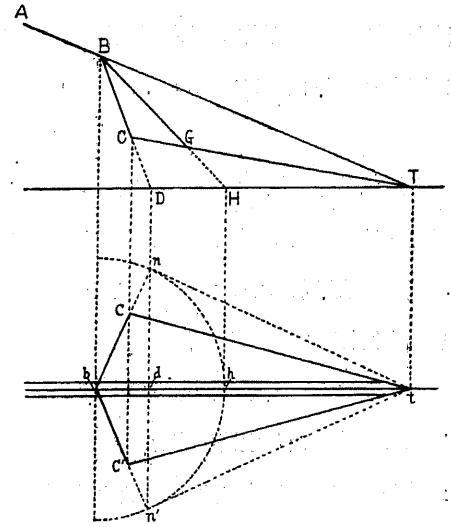
上部の勾配 BH は水力と流出土砂量による平衡勾配をなすものなり、同時に兩側の堆積土砂は洪水勾配を以て進む、斯くて遂に T に達するものとす。此の場合縦断面は BCT の如き三角形を示し、平面は ntn' となる之第二期の終りなり。

第16圖にて最初土砂の流下する面が BC の如く傾斜せる場合には、第一期は BCG となり、第二期は BGT となるものなり。

BC 面の傾斜せるとき、即ち之が



第 16 圖



第 17 圖

平面圖 bc は砂礫の堆積に關係を有するものにて其狀況は tc は bc に直角なり。

$$\text{故に } bc^2 = bd \cdot bt$$

$$\text{即ち } DG^2 = DC \cdot DT$$

$$\frac{BD^2}{\tan^2 \beta} = \frac{BD}{\tan x} \cdot \frac{BD}{\tan \alpha}$$

$$= \frac{BD^2}{\tan x \tan \alpha}$$

$$\text{又は } \tan x = \frac{\tan^2 \beta}{\tan \alpha}$$

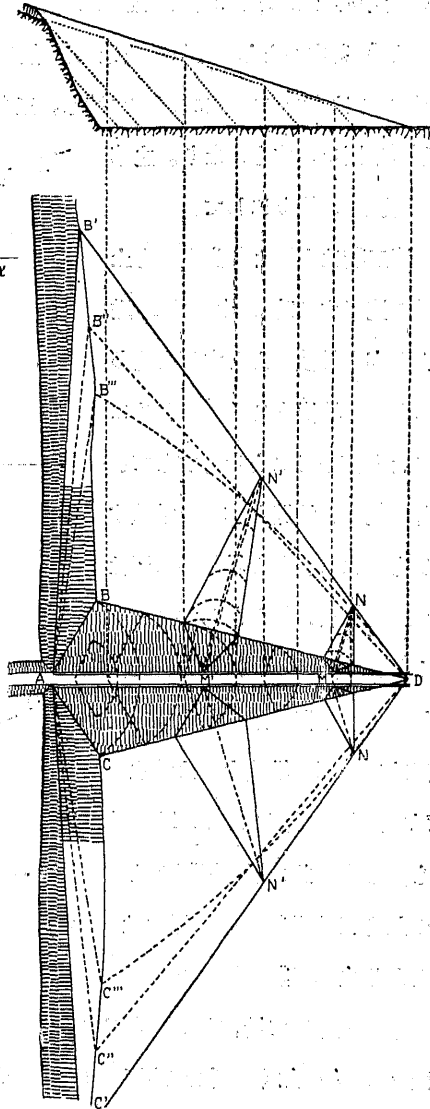
式中 β は洪水勾配にて α は平均勾配なり。

而して x 角が増大すれば、三角錐體は同錐片 BC_1C を兩側に増加し、平面圖にて bcc_1 だけ増加し、 x が減少すれば、圓錐片 BCC_2 を兩側に減少し、平面圖にて bcc_2 だけ減少す。

上述の砂礫圓錐の發達狀態は谷が垂直又は傾斜面 BC ならずとも、又堆積地が水平ならずして傾斜せるときにも同様とす。(第 7 圖)

第三期は第 18 圖の砂礫堆積上に成立せる AD なる水路は淺きが故に

土砂が尙流出する時には、 D より容易に流出し得ずして、此の水路を土砂にて充たし、其の結果土砂は水路より左右に氾濫流出して、 MNN 、 $M'N'N'$ 等の如

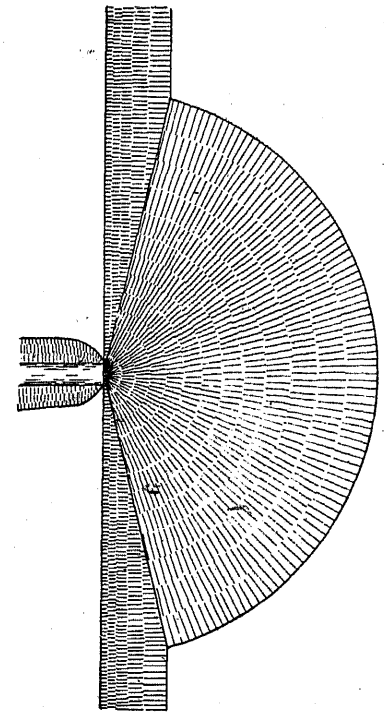


第 18 圖

き三角錐體をなして、其の發達は上述の BCD なる三角錐體の成立と何等異なる事なし。而して之等各三角錐體の大きさは、水溝 AD より流出する點、即 MM' 等の高さに比例するものなり。又 MN 、 $M'N'$ 等の線は平均勾配をなすこと BT の如し。斯て左右に土砂流出せる結果は平面圖にて $B'C'D'$ となるものにて、谷が平面なるときには N' 、 N' 、 N' 、 N' 等の點は一直線上にあり。而し一般に谷は下部に降下して傾斜をなすが故に、 MN 、 $M'N'$ 等は同一の關係にて延長するものにあらずして多少曲線狀を呈し DC'' 、 DC''' の如き丸味を有するものなり、以上によりて第 19 圖の如き圓錐形の土砂堆積をなすものにて、其の表面は何れの方にも同様な平均勾配をなす、而して流出砂礫の形狀が大なる程、砂礫圓錐は急傾斜をなすべきものなり。尙土砂の流出多き場合には、 A なる上端は砂礫圓錐の高まるに従ひて遂に溪口より谷の内部に進むことあり。

此の砂礫圓錐の成立に關して第二期の發達後、兩側に土砂の氾濫するを防止せんがために水溝の兩側に築堤すれば、土砂は益々前進すると共に、水溝を高め、既述の大井川をなすことは世人のよく知る所にて、彼の滋賀縣栗太郡の草津川の如き好例なり。

又第二期發達の G 點にて本流に接し、上流より流出する土砂を容易に本流に吐出する場合、又は CT 間に本流の存在する場合は之又前者と同様の理由により共に第三期の發達を防止するものとす。此外上流地に砂防工事の施行により



第 19 圖

て、土砂の流出を減少する場合には、緩勾配となつて水流は砂礫圓錐上を浸蝕低下するものなり。