

河床砂礫に對する限界掃流力に就て

正員 境 隆 雄*

要 旨

本文は限界掃流力に就ての著者の見解を述べ、特に Kramer の公式に於ける係數 M 検討すると共に、砂礫の篩分曲線に就ての解析的考察をなし、更に砂礫の摩擦係數に對する考察を加へ、之より新公式を提案したものであつて、實地觀測に照して見た結果をも併せて述べたものである。

目 次

- | | |
|-------------------|----------------|
| 1. 砂礫の移動と掃流力理論 | 4. 限界掃流力新公式の提案 |
| 2. 限界掃流力に關する従來の公式 | 5. 富士川に於ける觀測 |
| 3. 篩分曲線の解析的考察 | 結 論 |

1. 砂礫の移動と掃流力理論

流水により固形物の運搬される方法を大別すれば、床面流下と浮游運搬との2つであるが、後者に就ては此際觸れないこととする。

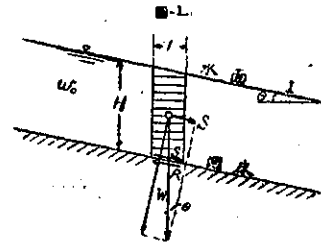
掃流力理論は du Buat¹⁾により始めて提唱せられ、du Boys²⁾により發展せしめられたもので、その基本觀念は齊流の場合河床面に沿ふて流水の動く力は河床と流水との間の摩擦抵抗に等しいといふのであつて、前者は即ち水の重量の流れの方向の分力に外ならず、且之は流水の河床に對して作用する力であつて、之を掃流力 (Schleppkraft) と名付ける。

今河床の單位面積に作用する掃流力を S 、流水と河床との摩擦抵抗を R 、水深を H 、勾配を I 、水の單位重量を w_0 とすれば、掃流力は次式で表はされる。

$$R = S = w_0 H I \quad \dots \dots \dots (1)$$

上式は嚴密には水深に比し幅員の極めて大なる場合にのみ適用されるのであり、又 $\sin \theta \doteq \tan \theta = I$ としてゐる(圖-1)。

流水の掃流力 S が小なる時は河床砂礫は靜止してゐるが、 S が或る程度大となれば平衡が破れて砂礫は移動を始める。その時の掃流力を限界掃流力といふ。而して一定の砂礫に對しては之に對應する一定の限界掃流力が存在することが Kreuter³⁾により論ぜられ、續いて Schoklitsch, Gilbert, Krey, Kramer⁴⁾等は之を實驗的に證明した。近くは安藝・佐藤兩氏の實驗⁵⁾



に於ても之は明瞭に確められて居り、法則として信頼するに足るものであるといへる。即ち掃流限界點に於ては、限界掃流力 S_0 は一定の砂礫に對しては定數であるから、水深と勾配とは反比例することになる。

次に掃流力と鈎合ふ砂礫の抵抗力 R を考へる。砂礫層の厚さを d 、その空隙率を α 、單位重量を w 、摩擦係數を f とすれば

$$R = f(w - w_0)(1 - \alpha)d \quad \dots \dots \dots (2)$$

で表はされ、掃流限界に於ては $R = S_0$ であるから

$$d = \frac{S_0}{f(w - w_0)(1 - \alpha)} = m S_0 \quad \dots \dots \dots (2a)$$

du Boys は砂礫の粒徑 d_0 が (2a) 式の與へる d よりも小なる時は、總厚が d に等しい n 層の砂礫が同時に動くものと考へ、 $d = n d_0$ として次式を與へた。

$$S_0 = f(w - w_0)(1 - \alpha) n d_0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

この場合砂礫は掃流作用を受けて順次上層から動き出し、その速さは上層ほど大で、漸次餘力を下層に及ぼして總厚 d なる砂礫層が同時に動くものと假想された。然し Schoklitsch の實驗によればその事實は認

* 工學士 内務技官 内務省關東土木出張所

められず、安藝氏も砂礫粒の移動は極めて表面的で、上部にあるものから流れ去つて次第にその移動が深部に達するものであると論じて居られるが、まことに妥當な見解と思はれる。

移動する砂礫は一般に砂澁を形成しつつ流下するのであるが、その移動状況は砂礫の大きさ並に細粗粒の混合割合によつて著しく異なることが安藝・佐藤兩氏の實驗のに於て明らかにされた。之は頗る興味深いことであつて、限界掃流力を考へる場合當然考慮に入れるべき事項であらう。

之等の考察によれば、(2)或は(3)式の含む假定には實際と符合せぬ點があり、又砂礫の性質に就て考慮すべき大切な要素を缺いて居る。従つて之等の式は直ちに實用に供し難いものではあるが、限界掃流力公式の基本形として注目すべきものである。

2. 限界掃流力に關する從來の公式

限界掃流力に關する問題を純理論的に解決することは到底困難で實驗により從來多くの研究が行はれて來た。今その主なるものに就て簡単に述べる。

Schoklitsch の式:—

$$S_0 = \sqrt{0.00385(w-w_0)w_0^2 V} \dots\dots\dots(4)$$

茲に S_0 は gr/cm^2 , w 及 w_0 は夫々砂礫及水の比重, V は粒子體積 (cm^3), ϕ は粒子の形状による係數で、球 (磁器粒) 1.0, 自然砂 1.3, 角のあるもの (鑽石粉) 3.1, 薄片 (岩片) 4.4 であつた。この式は粒徑一樣の場合に就て求めたものであるが、粒子の形状による影響を加味した點は注目すべきである。

Krey の式:—

$$S_0 = \frac{1}{13}(w-w_0)d \dots\dots\dots(5)$$

茲に S_0 は kg/m^2 , d は粒徑 (mm) である。

混合砂礫に對しては(5)式の d の代りに、平均粒徑 d_m 又は d'_m を提唱した。茲に d_m 及 d'_m は粒徑 d を横距に取り、 d より小なる砂礫の重量百分率 (即ち d の篩目を通過せるもの $\%$) p を縦距に取れば、次の如くである。

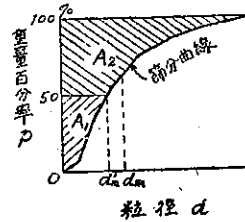
$$\left. \begin{aligned} d'_m &= d[p=50\%] \\ d_m &= A/100 \\ \text{茲に } A &= A_1 + A_2 = \sum_{p=0}^{p=100} d \Delta p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

Kramer の式³⁾:—

$$S_0 = \frac{100}{6} \cdot \frac{d_m(w-w_0)}{M} \dots\dots\dots(7)$$

茲に S_0 は gr/m^2 , d_m は平均粒徑 (mm), M は砂礫の混合状態を示す係數 (均一係數又は混合比) で、圖-2 に於て $M=A_1/A_2$ として求められ

圖-2,



$$M = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sum_{p=0}^{p=50\%} d \Delta p}{\sum_{p=50\%}^{p=100\%} d \Delta p} \dots\dots\dots(8)$$

Kramer は 3 種の混合砂を用ひて實驗したが、この公式を導くに當り、曾て Hummel がコンクリートの強度を骨材の篩分曲線から求めた方法を應用したのであつて、粒徑及空隙比に影響され、而もこの両者は相反する影響を與へると考へた。彼の實驗に於ては、粒徑の微細なるものを含む砂の方が、之を缺く砂よりも、 d_m の比較に拘らず大なる S_0 を示した。細粒を加へると、一方に於ては d_m を小ならしめ砂の移動性を増すことになるが、他方に於ては空隙を減じ稠密度を増し、従つて砂の移動性を減じしめると Kramer は考へた。混合比 M はこの考へに基いて考案された係數である。

Indri の式:—

$$\left. \begin{aligned} S_0 &= 13.3 d_m \frac{w-w_0}{M} + 12.16 & d_m < 1 \text{ mm} \\ S_0 &= 54.85 d_m \frac{w-w_0}{M} - 78.48 & d_m > 1 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

Indri は S_0 と d_m との關係が全體的に見て一つの直線ではなく、 d_m の大きい場合には S_0 はより急激に増大すると見たのであるが、式を 2 分した結果、 M の或る値以外には $d_m=1mm$ に於て兩式の S_0 が一致せず、而も相當大きい喰違ひを示すところに缺陷があり、又 $d_m=0$ の時にも S_0 が或る値を取ることになる。

安藝・佐藤兩氏の式³⁾:—

$$S_0 = k(w-w_0)\lambda d_m \dots\dots\dots(10)$$

茲に k は定數, λ は平均粒徑以下の重量百分率とそれ以上の重量百分率との比である。

安藝氏は後に k に次の數値を與へた。

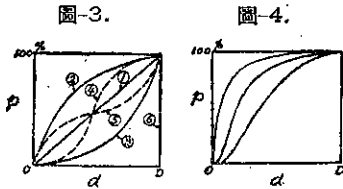
$$S_0 = 55.7(w-w_0)\lambda d_m \dots\dots\dots(10a)$$

茲に λ は (10) 式の λ の逆数である。

Kramer の研究に就て見ると、 M の性質は殆んど究明されて居らず、 M が果して數理的に適當な係數であるか否かは疑問なのである。之を検討する爲に著者は篩分曲線に就て解析的考察を試みた。

3. 篩分曲線の解析的考察

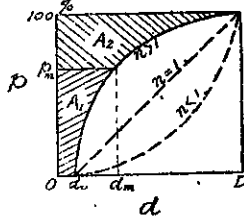
砂礫の篩分曲線は、圖-3 に示す如く、大體(1)~(6)



の如き型が考へられる。(1)は直線的變化をなすもの、(2)は比較的細粒の多いもの、(3)は比較的粗粒の多いもの、(4)は中粒の多いもの、(5)は中粒の少ないもの、(6)は粒径一様なるものである。

自然河川に於ける砂礫は多くは(2)型であつて、只 $d=0$ の近くに於て僅かに反向曲線をなしてある(圖-4)。

圖-5.



今篩分曲線を取扱ふ爲に次の如く假定する(圖-5)。

$$p = 100 \left(\frac{d-d_0}{D-d_0} \right)^{1/n} \dots\dots\dots(11)$$

茲に p は重量百分率、 d は粒径、 d_0 は最小粒径、 D は最大粒径、 n は正の數とする。

(11) 式を書換へて d 及び d_m を求めると

$$d = 100^{-n} (D-d_0) p^n + d_0 \dots\dots\dots(12)$$

$$d_m = \frac{1}{100} \int_0^{100} d \cdot dp = \frac{D-d_0}{n+1} + d_0 \dots\dots\dots(13)$$

d_m に相當する p_m を求めると、

$$p_m = 100 \left(\frac{1}{n+1} \right)^{1/n} = \frac{100}{\sqrt[n]{n+1}} \dots\dots\dots(14)$$

n の値により p_m の値を検して見ると、

- $n=1$: $p_m=50\%$ (直線)
- $n>1$: $p_m>50$ (上凸曲線)
- $n<1$: $p_m<50$ (上凹曲線)
- $n=\infty$: $p_m=100$ (上凸曲線極限)
- $n=0$: $p_m=0$ (上凹曲線極限)

(15) により明らかなる如く、 p_m の値は篩分曲線の曲率 n の如何により、 $0\sim 100\%$ に變化する。従つて若し重量百分率 100% を p_m で兩分し、その上下%の比(安藝氏公式の λ) を取るならば、その値は $0\sim \infty$ に變化することが可能で、之を S_0 公式の係數として用ひるならば、混合型の如何により S_0 に大きな影響を與へることは明らかである。

次に試みに圖-5 に於て、 p_m を通る水平線により區切られた面積 A_1, A_2 の比を取らば如何。

$$A_1 = \left\{ \frac{D-d_0}{100^n(n+1)} p_m^{n+1} + d_0 \right\} p_m \dots\dots\dots(16)$$

$$A_2 = \left\{ \frac{D-d_0}{100^n(n+1)} (100^n + d_0) - 100 - A_1 \right\} \dots\dots\dots(16a)$$

$$\therefore \frac{A_2}{A_1} = \left\{ \frac{(D-d_0)100^n + 100^n(n+1)d_0}{(D-d_0)p_m^n + 100^n(n+1)d_0} \right\} \frac{100}{p_m} - 1 = \alpha - 1 \dots\dots\dots(17)$$

n の變化による A_2/A_1 の極限值を求めると、(15) により

$$\left. \begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} A_2/A_1 &= \lim_{p_m=100} A_2/A_1 = 0 \\ \lim_{n \rightarrow 0} A_2/A_1 &= \lim_{p_m=0} A_2/A_1 = \infty \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

$d_0=0$ なる時は(17) から

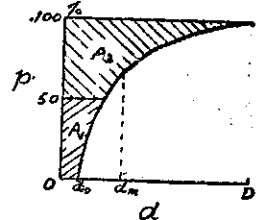
$$A_2/A_1 = \left(\frac{100}{p_m} \right)^{n+1} - 1 \dots\dots\dots(19)$$

となるが、この場合も極限值は(18)と同様である。

以上の如く面積比 A_2/A_1 の値は $0\sim \infty$ に變化するから、之を S_0 公式に用ひるならば、重量百分率の比と同様の事が言へる。

然らば次に Kramer 公式の M の如く、 $p=50\%$ を以て區切る時の面積比 A_2/A_1 は如何(圖-6)。

圖-6.



(17) に $p_m=50\%$ を代入すれば

$$\frac{A_2}{A_1} = 2^{n+1} \left\{ \frac{D-d_0 + (n+1)d_0}{D-d_0 + 2^n(n+1)d_0} \right\} - 1 \dots\dots\dots(20)$$

$$\left. \begin{aligned} n=0 : A_2/A_1 &= 2-1=1 \\ n=\infty : A_2/A_1 &= 2-1=1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

であるから、 n が 0 と ∞ の中間に於て A_2/A_1 の極大或は極小値が存在する筈である。今之を求めると

$$D = a d_0 \text{ 或は } a = D/d_0 \dots\dots\dots(22)$$

と置けば(20)式は次の如く書換へられる。

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2^{n+1}(n+a)}{2^n(n+1)+a-1} - 1 \dots\dots\dots(23)$$

$$\frac{d}{dn} \left(\frac{A_2}{A_1} \right) = \frac{2^{n+1}(a-1)\{-2^n+(n+a)\log_e 2+1\}}{2^n(n+1)+a-1} = 0$$

之より次の關係を得る。

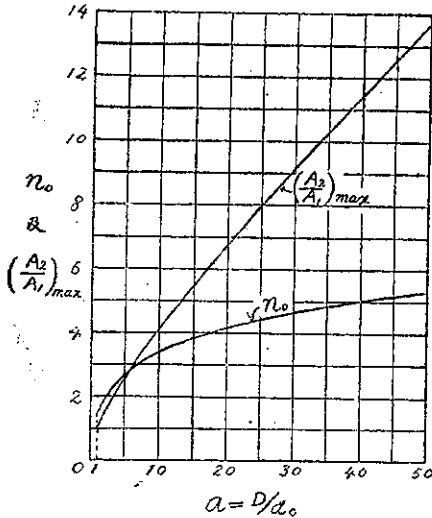
$$\left. \begin{aligned} 2^n(n+1)+a-1 &= \infty \\ 2^{n+1} &= 0 \\ a-1 &= 0 \\ -2^n+(n+a)\log_e 2+1 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(24)$$

(24) の中意義のあるものは第 4 式で

$$-2^n+0.693(n+a)+1=0 \dots\dots\dots(25)$$

a の種々なる値に對し、漸近法により (25) を解いて n の値 n_0 を求め、之に對する A_2/A_1 の値を (23) より算出すれば圖-7 の如くであつて、以上により A_2/A_1 の値は a と n によつて支配されるが、 a が頗る

圖-7.



大即ち d_0 が D に比し頗る小なる時は、曲率の増すと共に A_2/A_1 は著しく大となり、極限值は ∞ である。而も自然砂礫に於ては、 $d_0 \neq 0$ と見做し得る場合が多いのであるから、曲率の如何により A_2/A_1 は頗る大幅に變化する。

例へば粒徑一樣なる時は $A_2/A_1=1$ であるが $d_0=0$ $a=\infty$, $n=3$ の時は (26) により

$$A_2/A_1 = 2^3 - 1 = 15$$

となる。Kramer の式では $1/M = A_2/A_1$ を係數としてゐるから、 d_m が等しくても上記の場合は粒徑一樣

なる時に比し 15 倍の限界掃流力を有するといふことになるのであるが、果して實際にかゝる大きな差違があるであらうか。 A_2/A_1 が理論上 ∞ となり得ることは不合理である。實際の砂礫の節分曲線は、本論で假定した (11) 式と完全に一致するものではないが、大體の傾向は以上で窺はれるのであつて、 $1/M = A_2/A_1$ が S_0 に對し過大影響を與へることは斷言し得ると思ふ。

4. 限界掃流力新公式の提案

一般に限界掃流力を決定する要素として考へられるものは、砂礫粒の大きさ、混合割合、稠密度(空隙)、比重、形狀、摩擦角等であるが、之等の中には或程度相聯繫するものがあるから、適宜の取捨按配が必要である。

掃流力と鈞合砂礫の抵抗力 R_s は前述の如く (2) 式であつて、掃流限界に於ては $R = S_0$ である。 $1-a$ は密度を示す因數であるが、之の代りに混合割合を示す係數として従來用ひられたのが M (或は λ) である。 M は前節で解析した如く不合理を免れないのであるが、面積比を取るといふ方法には捨て難い妙味がある。著者は次の如き係數を考へた。

$$\beta = \frac{A+A_2}{A+A_1} \dots\dots\dots(26)$$

$$\text{茲に } A = A_1 + A_2$$

β は砂礫の混合割合を表はすのみでなく、或程度稠密度と關聯したものと考へたのである。自然砂礫の密度 ρ は従來の調査によれば大體

$$\rho = 0.45 \sim 0.70 \quad \rho_{\max}/\rho_{\min} = 1.56$$

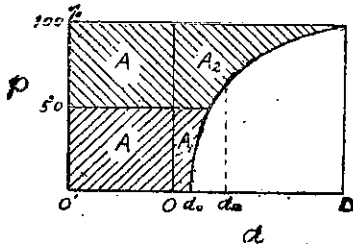
であつて、 β の變化幅を考へる上に參考となる。次に節分曲線の形と密度との關係は、従來骨材の最大密度曲線に就ては Fuller の實驗式があり、又藤井博士の實驗がある。之等によれば大體曲率 $n=2$ の時に最大密度となるやうである。然し Gilbert によれば、 S_0 と ρ とは必ずしも平行せず、安藝氏、石原氏の實驗に於ても、 n が 2 より大なるものが S_0 の大なる値を示してゐるやうに思はれる。之はやはり細粒を多く含むものは、粒子間の接觸面積が大となり、細粒が結合材的に働く爲かと思はれる。

β は以上の考察により考案したのであつて、その最大値は $A_2/A_1 = \infty$ の時

$$\lim_{A_2/A_1 \rightarrow \infty} \beta = 2 \dots\dots\dots(27)$$

である。(26)式によつて表はされる β の幾何學的意味は、圖-8 に於て、 O を原點とする面積比 A_2/A_1 を

圖-8.



取る代りに O' を原點とする面積比 $(A+A_2)/(A+A_1)$ を取ることに外ならない。而して

$$A = A_1 + A_2 = 100 \cdot d_m = 50 \cdot O'O$$

であるから $O'O = 2d_m$ である。

次に (2) 式に於ける f の値は不明であるが、砂礫の水中に於ける摩擦角 (息角) を θ とすれば、 f_0 は $\tan \theta = f_0$ に比例するものと考え、次の如く假定する。

$$f = \mu f_0 = a \tan \theta \dots \dots \dots (28)$$

$\tan \theta$ の値は粒子の形状、大きさ等により異り、球形に近いものよりは稜角のあるもの、不整形のものが大なる値を示すと共に、一般に粒径小なる砂よりは粒径大なる礫の方が大きい。之は自然の磨滅作用により粒径小なるもの程球形に近くなる筈と考へられる。故に自然砂礫の粒径を考へることは、同時に或程度形状をも考へることになる。

粒径と θ との関係は未だ明確にされてゐないが、Resal, Krey 等を参考とし普通に行はれる分類法により、表-1 の如く假定する。而して f_0 と d_m との関係を次の如く假定する。

表-1.

| 種類 | 粒径(mm) | d_m (mm) | θ | $f_0 = \tan \theta$ |
|-----|------------|------------|----------|---------------------|
| 細砂 | 0.05 ~ 0.5 | 0.2 | 15° | 0.268 |
| 粗砂 | 0.5 ~ 2.0 | 1.0 | 20 | 0.364 |
| 小砂利 | 2.0 ~ 5.0 | 3.0 | 25 | 0.466 |
| 砂利 | 5.0 ~ 25.0 | 12.0 | 30 | 0.577 |
| 礫 | 25.0 以上 | 30.0 | 35 | 0.700 |

$$f_0 = C_1 d_m^{1/5} \dots \dots \dots (29)$$

最小自乗法により數値を求めると

$$f_0 = 0.364 d_m^{1/5} \dots \dots \dots (30)$$

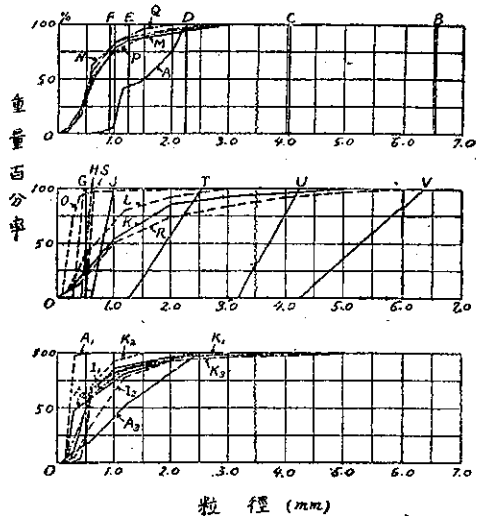
茲に於て (2) 式の d の代りに d_m を用ひ、 $(1-a)$

の代りに (26) 式の β を用ひ、 f の代りに (28) 及 (29) を入れると

$$S_0 = R = C(w-w_0)\beta d_m^{0.5} \dots \dots \dots (31)$$

茲に係數 C の値は實驗資料から求められる。そこで従來の資料 (2), (3), (4) に據ることとし、之を示せば表-2 の如くであつて、更に之等資料の篩分曲線を示せば圖-9 の如くである。

圖-9.



各資料の比重 w の値は殆んど一定であるから、今縦軸に觀測値 S_0 を取り、横軸に計算値 $\beta d_m^{0.5}$ を取つて見ると、圖-10 の如く大體直線關係が認められる。之より C を求めると結局次式が得られる。

$$S_0 = \frac{100}{3}(w-w_0)\beta d_m^{0.5} \dots \dots \dots (32)$$

茲に S_0 は限界掃流力 (gr/m^2)、 w 及 w_0 は夫々砂礫及水の比重、 d_m は平均粒径 (mm)、 β は係數で (26) 式による。

5. 富士川に於ける觀測

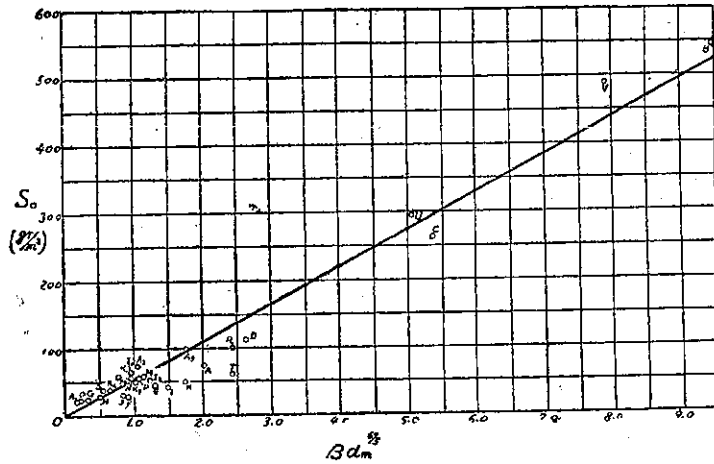
河床を構成する砂礫は、河川の横断面内に於ても變化ある様相を呈し、洪水時に運搬され堆積した部分があれば、現に流水の作用を受けて移動しつつある部分もある。掃流力が砂礫の抵抗力よりも大ならば洗掘が起り、小ならば洗滌が起る。故に現在當時水の流れてゐる所では流水の掃流力は現在其處に在る砂礫の限界掃流力を或程度示してゐる筈である。

表-2.

| 資料 | 観測値 S_0 (gr/m ²) | 比重 w | d_m (mm) | $d_m^{6/5}$ | A_1 | A_2 | β | $\beta d_m^{6/5}$ | 實驗者 |
|----------------|-----------------------------------|-----------|---------------|-------------|-------|-------|---------|-------------------|-------------|
| A | 75 | 2.65 | 1.54 | 1.68 | 55.4 | 98.2 | 1.20 | 2.02 | Schaffernak |
| B | 544 | 2.6 | 6.52 | 9.48 | 326.0 | 326.0 | 1.00 | 9.48 | Schoklitsch |
| C | 263 | " | 4.05 | 5.37 | 202.4 | 202.4 | 1.00 | 5.37 | " |
| D | 113 | " | 2.25 | 2.64 | 112.8 | 112.8 | 1.00 | 2.64 | " |
| E | 44 | " | 1.24 | 1.30 | 62.0 | 62.0 | 1.00 | 1.30 | " |
| F | 28 | " | 0.92 | 0.91 | 45.8 | 45.8 | 1.00 | 0.91 | " |
| G | 24 | 2.68 | 0.38 | 0.31 | 17.0 | 20.6 | 1.07 | 0.33 | Krey |
| H | 28 | 2.61 | 0.53 | 0.47 | 24.4 | 28.2 | 1.05 | 0.49 | " |
| J | 32 | 2.57 | 0.80 | 0.77 | 35.0 | 45.0 | 1.09 | 0.84 | " |
| K | 51 | 2.65 | 1.15 | 1.18 | 24.2 | 91.2 | 1.48 | 1.75 | P. E. I.* |
| L | 42 | " | 0.85 | 0.83 | 18.4 | 66.2 | 1.78 | 1.48 | " |
| M | 58 | " | 0.84 | 0.81 | 21.0 | 62.8 | 1.40 | 1.13 | " |
| N | 56 | " | 0.74 | 0.70 | 21.2 | 33.2 | 1.33 | 0.93 | " |
| O | 24 | " | 0.24 | 0.18 | 7.4 | 17.0 | 1.30 | 0.23 | " |
| P | 56 | " | 0.81 | 0.78 | 21.2 | 59.4 | 1.37 | 1.07 | " |
| Q | 50 | " | 0.69 | 0.64 | 20.4 | 48.2 | 1.31 | 0.84 | " |
| R | 100 | 2.65 | 1.48 | 1.60 | 27.6 | 120.8 | 1.53 | 2.45 | Engels |
| S | 39 | 2.69 | 0.58 | 0.52 | 27.2 | 30.4 | 1.04 | 0.54 | Gilbert |
| T | 61 | " | 1.91 | 2.18 | 79.4 | 111.2 | 1.12 | 2.44 | " |
| U | 295 | " | 3.71 | 4.83 | 172.2 | 198.8 | 1.05 | 5.07 | " |
| V | 490 | " | 5.30 | 7.40 | 238.4 | 291.2 | 1.07 | 7.92 | " |
| K ₁ | 52 | 2.70 | 0.71 | 0.66 | 18.6 | 52.0 | 1.38 | 0.91 | Kramer |
| K ₂ | 39 | " | 0.56 | 0.50 | 17.6 | 38.2 | 1.23 | 0.64 | " |
| K ₃ | 49 | " | 0.80 | 0.77 | 23.4 | 56.6 | 1.32 | 1.02 | " |
| A ₁ | 22 | 2.7 | 0.22 | 0.16 | 8.9 | 13.1 | 1.14 | 0.18 | 安藝・佐藤氏 |
| A ₂ | 75 | " | 0.70 | 0.65 | 10.8 | 59.2 | 1.60 | 1.04 | " |
| A ₃ | 98 | " | 1.22 | 1.27 | 32.0 | 90.0 | 1.38 | 1.75 | " |
| I ₁ | 65 | 2.58 | 0.71 | 0.66 | 16.0 | 54.8 | 1.45 | 0.96 | 石原氏 |
| I ₂ | 53 | 2.59 | 0.92 | 0.91 | 25.6 | 66.5 | 1.35 | 1.23 | " |

* Prussian Experiment Institute for Hydraulic Engineering.

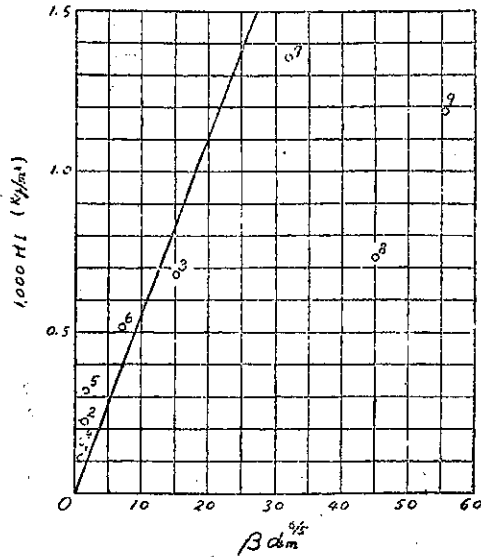
圖-10.



著者はこの考へから、富士川及其の支川に於て、なるべく水流が齊整で勾配が一樣なる箇所を選び、河床表面深さ約 15 cm、重量 10 kg 内外の砂礫を水中より採取し、標準篩（骨材試験篩）を以て之を篩分け、且その箇所の水深及勾配を測定した。その結果は表-3、表-4 及 圖-11 に示す如くであつた。

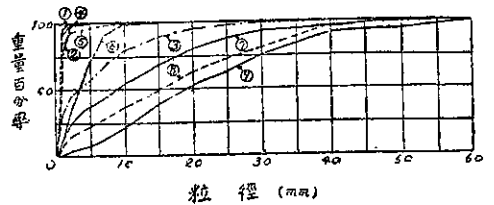
之より d_m 、 $\beta d_m^{6/5}$ 等を算出すれば表-4 の如くである。そこで 1000 HI を縦軸、 $\beta d_m^{6/5}$ を横軸に取れば圖-12 の如くであつて、(32) 式の S_0 線を引いて

圖-11.



見ると、大體之等と平行して居ることが認められる。之等の中で線の左上側に在るものは、現在その箇所の掃流力が限界掃流力を超えてゐることを示すもので、實地観測に於ても砂礫の移動しつつあるのが認められた。

圖-12.



6. 結 論

限界掃流力公式として従來發表されたものは多くあるが、未だ完全なものはない。殊に Kramer の式は、係数 M に看過し難い不合理を含んでゐる。著者は新公式として (32) 式を求めた。然し本問題に就ては尚今後の研究に俟たねばならないのであつて、更に精密且多數の實驗並に實測を必要とするであらう。

表-3.

| 番 號 | 河 川 名 | 場 所 | 平 均 粒 徑 d_m (mm) | 水 深 H (m) | 勾 配 I | 観測年月日 |
|-----|-------|-----------|-----------------------|----------------|------------|--------------|
| 1 | 笛 吹 川 | 0/33 左岸寄 | 0.78 | 0.11 | 1/1000 | 昭. 18. 6. 1. |
| 2 | " | " 流 心 | 1.04 | 0.40 | 1/1333 | " |
| 3 | " | " 右岸寄 | 5.99 | 0.80 | 1/1200 | " |
| 4 | 富 士 川 | 14/32 左岸寄 | 0.85 | 0.30 | 1/1875 | " 6. 5. |
| 5 | " | " 流 心 | 1.05 | 0.60 | " | " |
| 6 | 大 柳 川 | 9~10 間 | 3.86 | 0.29 | 1/563 | " |
| 7 | " | 1~2 間 | 12.02 | 0.18 | 1/133 | " |
| 8 | 芦 川 | 0/22 | 16.96 | 0.14 | 1/192 | " |
| 9 | " | 0/20.5 | 21.61 | 0.18 | 1/152 | " |

表-4.

| 番 號 | $1000 HI$ (kg/m ²) | d_m (mm) | $d_m^{6/5}$ | A_1 | A_2 | β | $\beta d_m^{6/5}$ |
|-----|-----------------------------------|---------------|-------------|-------|--------|---------|-------------------|
| 1 | 0.110 | 0.78 | 0.74 | 25.2 | 53.0 | 1.27 | 0.94 |
| 2 | 0.300 | 1.04 | 1.05 | 31.4 | 72.7 | 1.30 | 1.37 |
| 3 | 0.677 | 5.99 | 8.62 | 55.1 | 543.6 | 1.75 | 15.09 |
| 4 | 0.160 | 0.85 | 0.82 | 26.8 | 58.6 | 1.28 | 1.05 |
| 5 | 0.320 | 1.05 | 1.06 | 23.1 | 82.0 | 1.46 | 1.55 |
| 6 | 0.515 | 3.86 | 5.06 | 93.6 | 292.3 | 1.41 | 7.13 |
| 7 | 1.354 | 12.02 | 19.72 | 173.1 | 1028.8 | 1.62 | 31.95 |
| 8 | 0.730 | 16.96 | 29.85 | 326.9 | 1369.2 | 1.51 | 45.07 |
| 9 | 1.184 | 21.61 | 39.80 | 534.6 | 1626.8 | 1.40 | 55.72 |

脚 註

- 1) 鶴見一之: "砂礫の運動" 土木學會誌, 第 15 卷第 2 號 (昭. 4.)
- 2) 石原藤次郎: "橋脚による河床洗掘に關する實驗的研究" 土木學會誌, 第 24 卷第 1 號 (昭. 13.)
- 3) 安藝皎一・佐藤清一: "砂粒河床模型實驗の基本に關する實驗並に限界掃流力に關する研究" 土木試驗所報告, 第 48 號 (昭. 14.)
- 4) H. Kramer: "Sand Mixtures and Sand

Movement in Fluvial Models." Proc. Am. Soc. C. E. (1934)

- 5) 安藝皎一: "河相論, 主として河相と河川工法との關聯性に就ての研究" (其の二), 土木學會誌, 第 27 卷第 11 號 (昭. 16.)

- 6) 藤井眞透: "骨材の最大密度の粒度に就て" 土木試驗所報告, 第 37 號 (昭. 12.)

(昭. 19. 4. 10. 受付)