

(11) 天井川発達過程の実験的研究

大阪大学工学部 田 中 清
大阪大学工学部 室 田 明
大阪大学大学院 ○ 劉 世 燁

1 概説:

一般に河床勾配の急な山腹から流下する急流が平野部に出ると直ちに流送砂礫の大部分を急激に沈積せしめ、いわゆる扇状地形を形成する。此の扇状砂礫を人為的築堤に依つて流の方向を一次元的にしぼつたものが天井川の根本的生因である。従つて此の天井川の発生過程を検討するに当つて、勾配急変部での輸送砂の挙動を研究する必要がある。現在多く行われている掃流砂の理論はほとんど等流状態と之に近い流れの状態について解析を行つてゐるが、勾配が急激に変動する場合については其等の解析を適用する事は出来ない、更に此の様な場合について何故輸送砂の急激な沈積が起るかという説明もほとんどなされてゐない現状である。等流時には河床剪断力で代表される重力加速度が輸送現象に卓越して作用するのは勿論であるが、一般に不等流の場合、慣性項: $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x}$ の内、空間に関する慣性項: $u \frac{\partial u}{\partial x}$ は流況の変化が急な場合は重力加速項に比して、省略する事が出来ない。然るに天井川の如き、勾配急変部に於いては $u \frac{\partial u}{\partial x} < 0$ であり、従つて輸送自身に負の空間加速度が作用する事と成る。勾配急変部での掃流砂の急激な沈積が起る事は恐らく此の様な理由ではないかと考えられる。之故に我々は以上の考察に基づいて上流側を射流勾配、下流側を常流勾配とする如き勾配急変部を持つ矩形断面直線水路を用い、その奥で跳水をせしめ上流から掃流型式で輸送される砂礫の運動形状と勾配変化部での砂堆発生の速度、又その砂堆発生に伴う流況変化の変動について観察を行い、天井川の流況特性について若干の定量的な検討を行うものとする。

2a: 砂堆形成に及ぼす流れの慣性項の効果: 既述の通り慣性項の効果を探求する爲に基礎的な研究として、掃流型式で輸送される砂礫が跳水に依つて沈積する様子をまず基礎的に説明をした。此の実験水路の上流勾配: $1/20$, 下流勾配: $1/65$, 流量: $20 \text{ l/sec} \sim 25 \text{ l/sec}$ とする。図-1と図-2は此の実験記録の一例である。投入砂量: 15 g/sec , 実験用砂 $\rho_s = 2.6$, $d_m = 1.4 \text{ mm}$ 。同二図から判る様にほとんど100%の砂が跳水地奥に堆積し、砂堆の移動はなく、或る一定の堆砂高で下流側に発生して行くようである。

2b: 砂粒運動に及ぼす不等流効果の検討: 砂粒に関する運動方程式は次の如である。

$$\rho_s \frac{\pi d^3}{6} \frac{du_g}{dt} = \frac{\pi d^3}{4} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) d + \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \rho_s C_0 (u_b - u_g)^2 - \left\{ (\rho_s - \rho) g \frac{\pi d^3}{6} - R_L \right\} \tan \phi \quad (1)$$

但し; u_g : 砂粒速度, u_b : 底面流速, d : 平均粒径, ρ_s : 砂の密度, ρ : 水の密度。

R_L : 揚力, C_0 : 抵抗係数, ϕ : 水中に於ける砂の摩擦角。

$(u_b - u_g)^2 = u_b^2 - (1 - \frac{2u_g}{u_b})$ と表し、範囲を境界層外に取れば

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_s \frac{du_b}{dt}, \quad (1) \text{式に代入して, } R_L \text{ を省略すると:}$$

$$\frac{DU_b}{dt} = \frac{3}{2\lambda} \frac{DU_b}{dt} + \frac{3}{4} \cdot \frac{C_0}{\lambda} \cdot \frac{U_b^2}{d} (1 - 2 \frac{U_g}{U_b}) - (1 - \frac{1}{\lambda}) g \tan \phi \quad (2)$$

但し、入：水中に於ける空隙率。
然るに粗面に於ける流速分布は

$$\frac{U}{U_*} = 8.45 + 5.75 \log \frac{z}{\varepsilon}$$

で与えられる。我々の場合 $z \approx d \approx \varepsilon$ と考えれば

$$U_b \approx \alpha U_* \quad \text{但し } \alpha \approx 8.5 \approx 10 \quad (3)$$

更に実験に依って $\tan \phi \approx 1.0$ である事を認められ

(2)と(3)から

$$\frac{DU_b}{dt} = \frac{3}{2\lambda} \left\{ \alpha \frac{DU_*}{dt} + \frac{\alpha^2}{2d} C_0 U_*^2 (1 - \frac{U_g}{\alpha U_*}) \right\} - (1 - \frac{1}{\lambda}) g \quad (4)$$

不斉流の運動方程式は：

$$U_*^2 = H \left\{ g \left[I_0 - \frac{\partial}{\partial x} (H + S) \right] \right\} - \frac{DU}{dt} \quad (5)$$

跳水の際流水断面の変化は急激であるから

$$\frac{\partial U_g}{\partial t} \ll U_g \frac{\partial U_g}{\partial x}, \quad \frac{\partial U}{\partial t} \ll U \frac{\partial U}{\partial x}$$

又(5)式に於いて $I_0 \ll \left| \frac{\partial}{\partial x} (H + S) \right|$ を考えると

(4)と(5)から

$$\frac{1}{2} \frac{dU_g^2}{dx} = \frac{3}{2\lambda} \left[\frac{\alpha^2}{2d} C_0 U_*^2 (1 - \frac{U_g}{\alpha U_*}) + \frac{\alpha}{2} \frac{dU_*^2}{dx} \right] - (1 - \frac{1}{\lambda}) g \quad (6)$$

$$U_*^2 = -H \left\{ g \frac{d}{dx} (H + S) + \frac{1}{2} \frac{dU_*^2}{dx} \right\} \quad (7)$$

$$= -gH \frac{d}{dx} (E + S)$$

但し $E = \frac{U^2}{2g} + H$ 。更に跳水の際 E の場所的变化はほぼ一定的と考えるから

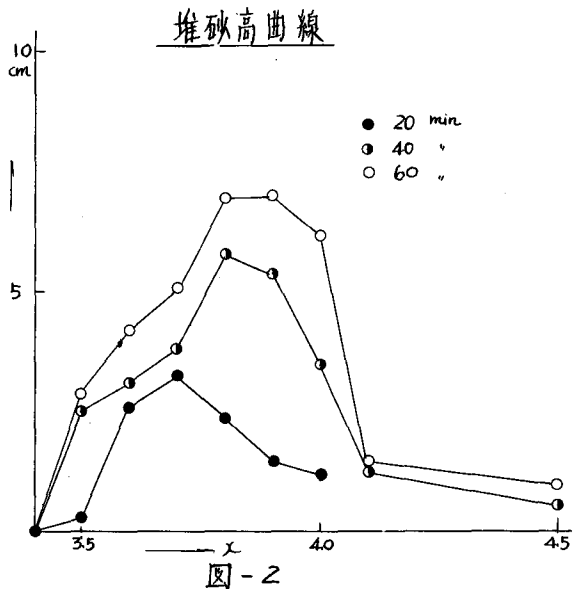
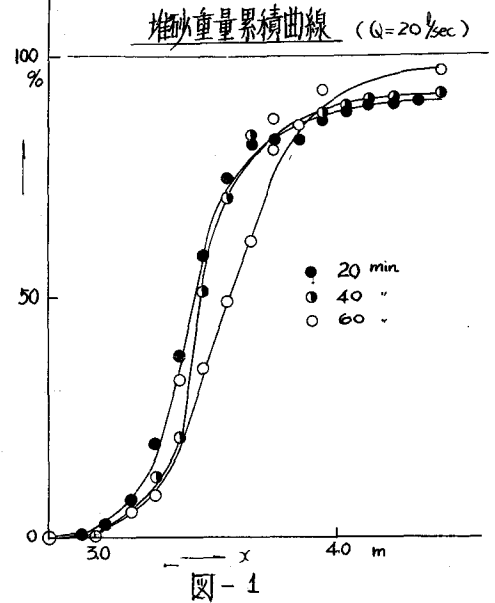
$$\frac{d^2 E}{dx^2} \approx 0$$

を考えると、(7)式を(6)式に代入すると：

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} U_g^2 = -\frac{3gH}{2\lambda} \left\{ \frac{\alpha^2 C_0}{2d} (1 - \frac{U_g}{U_*}) \frac{d}{dx} (E + S) + \frac{\alpha}{2} \frac{d^2 S}{dx^2} \right\} - (1 - \frac{1}{\lambda}) g \quad (8)$$

(8)式は近似的に次式で表わされる。

$$U_g^2 = U_{g0}^2 + \frac{3g}{\lambda} \cdot \frac{\alpha^2 C_0}{2d} \left(\frac{H^2}{2} + \frac{g^2}{gH} \right) \left(\frac{U_{g0}}{\alpha U_*} - 1 \right) + \frac{3g}{\lambda} \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{3}{2H} \frac{dU}{dx} - 2(1 - \frac{1}{\lambda}) gH \frac{dH}{dH} \\ - \frac{3g}{\lambda} \cdot \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{3}{2H} \frac{dH}{dx} + 2(1 - \frac{1}{\lambda}) gH \cdot \frac{dH}{dH} \quad (9)$$



(9)式を数値計算すれば跳水地真で直ちに砂粒の運動速度が0となる。式中第三項が不斉流効果を与える。

3.天井川発達過程の実験装置及び実験方法：図-3に示す様に透明の塩化ビニール製の矩形断面(巾:30cm, 高さ:25cm, 有効長:16m)の水路を用い、給砂器は4個のコックの開度によって調整する、なお実験水路壁面粗度: $n=0.0106$ であり、之に対する限界勾配: $I_c = 1/220 \sim 1/230$ である。実験用砂の真比重: $\gamma_s = 2.6$, 平均粒径: $d_m = 0.95\text{mm}$, 含水率: $w = 1.4\%$, 流水中の堆積空隙率: $\lambda = 40\%$ である。

実験方法：下流側常流部は床勾配に対応する芽流水深を作るものとする。此の時の初期水深を予め設置した尺で測り、次に上流側-4.0m真に設けた給砂装置依り連続的に一定量の砂を投入し、10分間隔に各真に於ける堆砂高と水位を測定した。又堆砂下流端と跳水地真での移動も3~5分間隔に測定し、その時の現象を観察し、8mmシネと35mmカメラで撮った。水路勾配流量と給砂量は予備計算に依って決定し、その組合せは表-1の如くである。

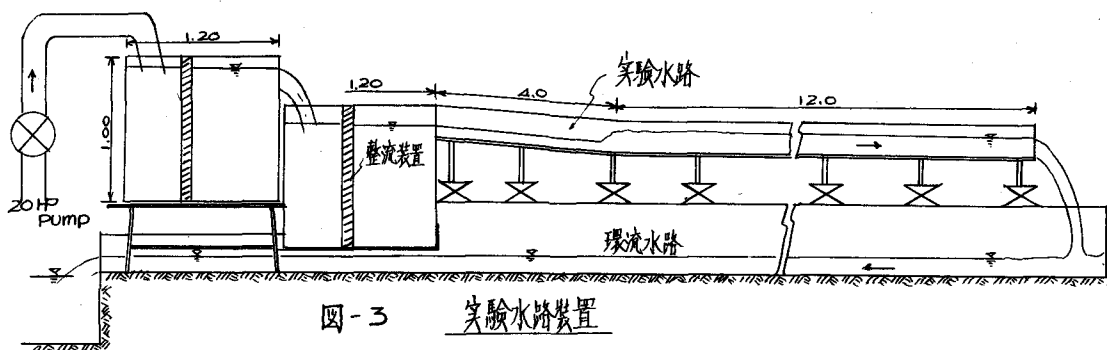


図-3 実験水路装置

4. 実験結果及び検討：図-4から判る様に波状跳水に於いて砂を供給した時、砂粒は第一波跳水の下に沈積し、ある高さに達すると跳水前端が碎れ、跳水前端は上流に移り、直ちに砂堆はフラッシュされ、跳水地真は又原真の少し上側に後退する、此の週期は一定に近い、但しNo.4に対しては此の現象

実験NO	流量 l/sec	給砂量 g/sec	上流勾配	下流勾配
1	5.25	6.92	$1/60$	$1/600$
2	5.50	13.82	"	"
3	7.05	11.83	"	"
4	5.42	10.87	$1/44$	$1/1000$

表-1

は顕著でない、此れは跳水の性質に依るものと考えられる。給砂間もなく、堆砂の形状は図-4の如く跳水波頂波谷に対応する顕著な砂漣が見られた。図-5で判る様に跳水地真での水深と堆砂高はある時間に達すると一定に、又緩かに上昇していく様に、堆砂床勾配と水位は平行に上昇していく傾向が見られた。なお下流側常流水深の増加は流砂に依る抵抗の原因と思われる。砂漣形成時の粗度係数: $n=0.031$ であった。図-6は芽流条件元での河床状態に関する実験資料を $\frac{U_b}{U_c}$ と河床勾配について Plotしたもので、No.3, No.4の下流側各時に対応するものを Plotした所、各真は Dune と Transition 領域の下側に落ち、時間的に勾配が増加していく平衡勾配に漸近するものと認められる。図-7は堆砂総体積の百分率で約80%の体積は下流に輸送堆積され、20%は上流側に残留して砂堆前面を上流側に発達せしめる傾向が見られる。

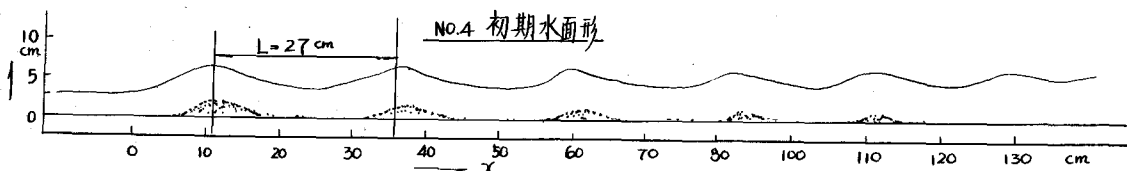


図-4

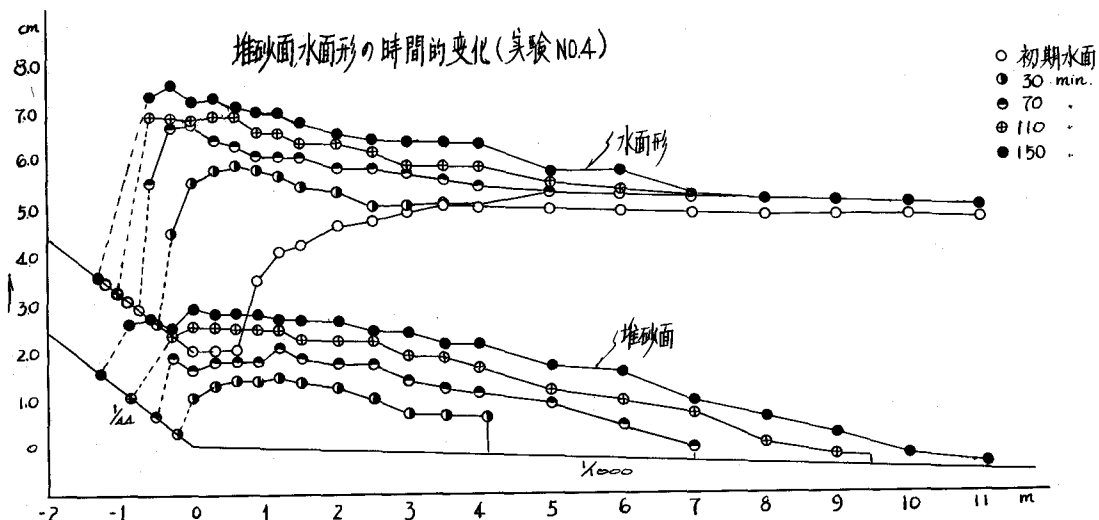


図-5

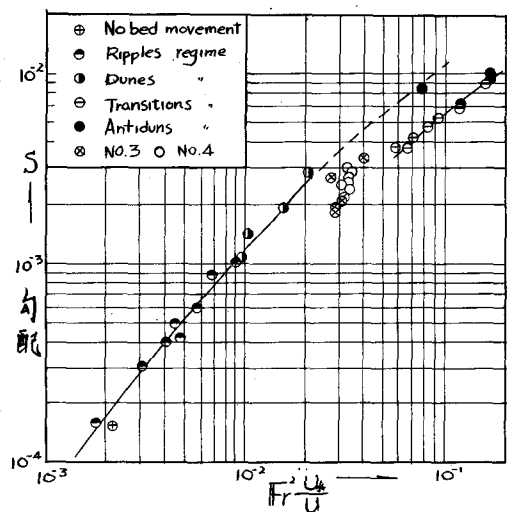


図-6. 平衡勾配に対応する $Fr \frac{\lambda}{U}$ 曲線

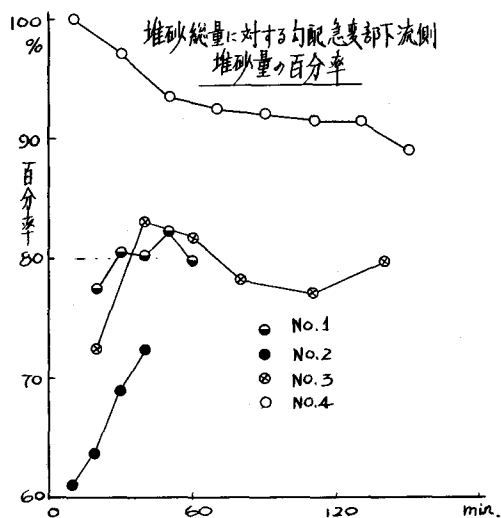


図-7

なお、本研究は昭和34年、35年文部省科学研究費の補助を受けて行つたものであり、ここに記して謝意を表する。