

牧田川の模型実験について

岐阜大学工学部

増田 重臣

河村 三郎

(1) 緒言

牧田川は揖斐川の支川で流路の延長40 km, 流域面積182 km², にして古来度々の災害を蒙っている。近くは昭和28年の13号台風により氾濫し計画流量850 m³/secをはるかに上廻る1200 m³/secと推定される洪水の爲各所で破堤17本の橋梁の中5本が流失し下流部の堆積砂礫は500000 m³と推定され特に河心に沿つて多量に堆積した。河床は堤内地より高く通常殆んど地下となり水は流れていない, 河床勾配は1/80~1/1000である。昭和30,31年度に長さ1/250, 巾1/200, 垂直1/130の固定河床模型を製作し洪水流量の検討, 洪水波の伝播速度, 河道貯溜量, Peakの流量遞減等について実験を行つたが本論文は31年度後半より水平1/250, 垂直1/130の移動河床模型を製作し, 河床の洗堀堆砂を定性的に調べたものである。この河川は多くの地畠(中流部に多い)に於いて河川の中心に砂礫が堆積し堤防の両岸が洗堀されて横堤等が大きな被害を受けている。そこで水制, 床固, 横堤等の河川構造物により砂礫を両岸に堆積させ流心が河川の中心を通る様にするための河川構造物の大約の規模とその位置を実験に依り推定し実河川中, 下流部全体に亘る治水対策を実験研究したものである。

(2) 模型と実験装置

1) 模型製作

模型は水平1/250, 垂直1/130, とし実験が砂の洗堀, 移動, 堆砂状態を実験するものであるから模型の型板横断面を図-(2)の如くにした。表面は1.5cm程度の厚さにモルタルを塗り図-(3)の如く模型を製作した。実験場平面図を図-(4)に示す。

2) 模型河川構造物の製作

河川構造物即ち横堤, 床固, 改良アシク水制, 改良合掌水制, 阻柱式水制等は木製の型枠を作製してモルタルを流し込み所要の形状のものを製作した。その形状は図-(5)に示す。

水制等の上部には針金を立てて阻柱の動をさせ流水に対する抵抗を増加させた。

3) 実験装置

a) 流量調節

流量の調節は送水管の途中に挿入した4分円ノズルの上、下流の圧力差の高さに従つてバルブにより調節する事とした。

ℓ) 流速測定 現地河川下流の浮子による流量観測地桌に相当する地桌にピトー管を設置して流速を測定した。

c) 模型河川の横断面測定 模型水路側壁の外側に水平なガイドレールを設置して、これに測定装置をのせて測定する。

(3) 相似律とその検討

1) 現地河川砂礫篩分曲線

30年8月牧田川の各地桌に於いて河床を1m程度掘り下げた所の砂礫を各々横断方向に2〜3ヶ所別々に砂礫を採取し篩分試験を行った。

これら各地桌の篩分試験の結果を図-(6)に示す。

2) 相似律

a) 限界掃流力による場合

これは河床砂礫の運動を相似ならしめその時の粗度係数に何らかの関係をづけて Manning 公式により流量等に関する相似計算を行おうとするものである。模型用砂の粒径を掃流力に関して相似的に決定するには Du. Boys の式を利用する。限界掃流力を F_0 とすれば、実河川の限界掃流力 F_{01} は $F_{01} = \gamma_0 H_1 I_1$ 、模型に於けるそれを $F_{02} = \gamma_0 H_2 I_2$ 、ここで F は単位面積についての掃流力、 γ_0 は水の単位重量、 H は水深、 I は勾配である。今模型を水平方向に $1/m$ 、垂直方向に $1/n$ に縮小せるものとすれば、 $L_1 = m L_2$ 、 $B_1 = m B_2$ 、 $H_1 = n H_2$ 、但し L は長さ、 B は巾である。従つて、

$$\frac{F_{01}}{F_{02}} = \frac{H_1 I_1}{H_2 I_2} = \frac{H_1 \frac{H_1}{L_1}}{H_2 \frac{H_2}{L_2}} = \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{L_2}{L_1} = \frac{n^2}{m}$$

$$\therefore \frac{F_{01}}{F_{02}} = \frac{n^2}{m} \quad \text{----- (1)}$$

然るに H. Kramer に依れば

$$F_{01} = \frac{100}{\delta} \cdot \frac{dm_1(\gamma_1 - \gamma_0)}{M_1}, \quad F_{02} = \frac{100}{\delta} \cdot \frac{dm_2(\gamma_2 - \gamma_0)}{M_2}$$

$$\frac{F_{01}}{F_{02}} = \frac{dm_1(\gamma_1 - \gamma_0) M_2}{dm_2(\gamma_2 - \gamma_0) M_1} = e \cdot D \cdot \mu \quad \therefore \frac{F_{01}}{F_{02}} = e D \mu \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{但し } e = \frac{dm_1}{dm_2}, \quad D = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma_2 - \gamma_0}, \quad \mu = \frac{M_2}{M_1}$$

で dm は砂礫篩分曲線の平均粒径、 M は混合比である。

$$(1) \text{と}(2) \text{式より } \frac{n^2}{m} = e \cdot \nu \cdot \mu, \quad \therefore e = \frac{n^2}{m \nu \mu} \dots\dots\dots (3)$$

模型に使用する砂の篩分曲線を実河川砂礫の篩分曲線と相似なる如く適当に大小粒混合して模型用砂を作ると、 $\mu = 1$ 、となり又材質として同一自然砂を使用する時は、 $\nu = 1$ で

$$e = \frac{n^2}{m} \dots\dots\dots (4)$$

Manning 公式に依りて流量の関係を見出すと

$$V_1 = \frac{1}{n_1} R_1^{\frac{2}{3}} I_1^{\frac{1}{2}}, \quad V_2 = \frac{1}{n_2} R_2^{\frac{2}{3}} I_2^{\frac{1}{2}}, \quad \text{であるら}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{R_1 I_1}{R_2 I_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{H_1 B_1}{S_1} \frac{S_2}{H_2 B_2} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{H_1 B_1}{S_1} \frac{S_2}{H_2 B_2} \frac{I_1}{I_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{H_1}{H_2} \frac{S_2 B_1}{S_1 B_2} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{H_1 I_2}{H_2 I_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S_2 B_1}{S_1 B_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{H_1 I_2}{H_2 I_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S_2 B_1}{S_1 B_2} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$= \left(\frac{n_2}{n_1} \right) n^{\frac{1}{6}} (e \nu \mu)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S_2 B_1}{S_1 B_2} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\therefore \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) e^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{1}{2}} n^{\frac{1}{6}} \alpha^{-\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{ここに } R = \frac{HB}{S}, \quad S \text{ は潤辺である又 } \alpha = \frac{S_1}{S_2} \quad \text{又}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{V_1 H_1 B_1}{V_2 H_2 B_2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) e^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{1}{2}} n^{\frac{1}{6}} \alpha^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{H_1 B_1}{H_2 B_2} \right)$$

$$\therefore \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) e^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{1}{2}} n^{\frac{7}{6}} m \alpha^{-\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで $\nu = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma_2 - \gamma_0}$ の値が不明のため現地河川の砂礫並びに模型用砂の比重を

調べて次の値を得た。牧田川砂礫比重 2.585, 模型用砂の比重 2.590.

$$\text{故に } \nu = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma_2 - \gamma_0} \div 1, \quad \text{次に } \mu = \frac{M_2}{M_1} \text{ に関しては模型に使用する砂の}$$

篩分曲線が実河川砂礫の篩分曲線と相似する砂であれば $\mu = 1$ であるから揖斐川産、牧田川産、長良川産の砂を種々配合検討した結果牧田川産、揖斐川産の砂を 1:1 に配合し模型用砂を作つて使用する事とした。故に近似的に $\mu \div 1$ として、

$$(4) \text{式より } e = \frac{dm}{m} = \frac{n^2}{250} = 67.6, \quad \therefore dm_2 = \frac{dm_1}{67.6} \dots\dots\dots (7)$$

実河川砂礫篩分曲線の平均粒径 dm_1 を $1/67.6$ にする事は篩分曲線の相似なる

場合最大粒径を $1/67.6$ にする事と同一であるから実河川砂礫篩分曲線の横軸を $1/67.6$ にしたものに近い砂を利用する事とした。揖斐川産砂、牧田川産砂及びこれ等を 1:1 に配合した時の篩分曲線を図(7)に示す。(5),(6)式に於いて,

$$n_1 = 0.035, \quad n_2 = 0.011, \quad e = 1/67.6, \quad \nu = 1, \quad \mu = 1,$$

$$n = 130, \quad m = 250, \quad \frac{S_2}{S_1} = 0.0041$$

$$\lambda = \frac{\frac{S_1}{S_2}}{\frac{m}{n}} = \frac{\frac{1}{0.0041}}{250} = 0.976, \quad \text{を代入すれば,}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{0.011}{0.035} \right) (67.6)^{\frac{1}{2}} (250)(130)^{\frac{7}{2}} (0.976)^{-\frac{2}{3}} = 192324$$

$$\therefore \frac{Q_1}{Q_2} = 1.92 \times 10^5 \quad \text{----- (8)}$$

$$\text{又 } \frac{V_1}{V_2} \text{ は, } \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{0.011}{0.035} \right) (67.6)^{\frac{1}{2}} (130)^{\frac{1}{2}} (0.976)^{-\frac{2}{3}} \div 5.92$$

$$\therefore \frac{V_1}{V_2} = 5.92 \quad \text{----- (9)}$$

ℓ) 固定河床模型の場合の相似律に依る場合

(Froude による相似律), 固定河床模型にて開水路乱流の基本式から導いた流量, 流速に関する関係は,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{B_1 H_1}{B_2 H_2} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = 250 \times 130 \times \sqrt{130} \div 3.71 \times 10^5$$

$$\therefore \frac{Q_1}{Q_2} = 3.71 \times 10^5 \quad \text{----- (10)}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = \sqrt{130} = 11.40$$

$$\therefore \frac{V_1}{V_2} = 11.40 \quad \text{----- (11)}$$

℃) 相似律の検討

実河川と模型河川との流量に関する相似律は Manning 流速公式による相似律と Froude による相似律との間にあると思われる。そこで Froude によるもの, Manning によるものの二つの相似律を検討して見るに実河川に於ける量水標の水位記録を, それに相当する模型の水位にして通水した時の模型河川に於ける流速測定記録と現河川の流速観測記録を比較すると,

$$\text{実河川流速} \quad V_1 = 1.82 \sim 2.27 \text{ m/sec}$$

$$\text{模型河川流速} \quad V_2 = 0.357 \text{ m/sec}$$

$$\therefore \frac{V_1}{V_2} \div 6.36, \quad \text{然るに Froude による場合 } \frac{V_1}{V_2} = 11.40,$$

Manning による場合 $\frac{V_1}{V_2} = 5.92$, であるからこの実験に於いては

Manning 公式による相似律を適用する事とする。

(4) 粗度係数検定実験

実験室内の中 0.3 m, 長さ 8.5 m, の水路に模型用砂を厚さ 5 cm 程度敷均らして実験を行った。水路勾配は実験の対象である実河川の勾配に順応させるため次の3つの勾配に分けて実験を行った。即ち, 下流部分 $1/213$, 上流部分 $1/108$, 全体の平均河床勾配 $1/139$ である。

この実験の水深と粗度の関係を図-(8)に示す。これによると勾配の変化にも拘らず粗度の変化は小さく, この実験の範囲内では水深 1 cm 以上に於いて一定と考えて良く模型河川粗度係数は 0.011 として以後の実験を行った。

(5) 本実験と実験方法

予備実験として最初に昭和30年の牧田川実測図により構造物の模型を設置して普通洪水程度に相当する流量を定常的に流下して砂の洗掘, 移動, 堆砂を観察しつつ行い, 流下時間は洗掘状況を見て適当に打切る事とし流下時間中は砂の移動流下した量に相当するものを最上流にて投砂補給した。通水後基礎水路内に満水して水位を適当に加減しつつ自糸を使用して 0.5 cm 間隔に等高線を設置してこれをカメラにて撮影して記録を取った。この記録が現在の牧田川の河状にほぼ一致している事を確かめて次の実験を進めた。尚通水実験中に現地河川の流量観測地点に相当する場所でピトー管により流速を測定した。以後は岐阜県庁河川課で立案された改修計画平面図等を参考にして河床断面を変えたり, 構造物の設置, 移動, 除去, を行い数回実験を繰返して良好な結果を得られる様な断面と構造物の位置, 大き, を決定して最後の実験を行った。予備的実験の2回目からは通水前と通水後に模型全体の等高線を 0.5 cm 毎に設置して撮影し種々検討した。最後の3回の実験記録を示せば 表-(1)の如くで又最後の実験記録図は図-(9), (10)である。

流量 (cm^3/sec)	実河川 換算流量 (m^3/sec)	ピトー管 圧力差 (cm)	流速 (cm/sec)	通水時間 (min)	投砂量 (cc)	単位時間 投砂量 (cc/min)
3,000	880	0.55	32.8	40	14,400	360
3,000	880	0.55	32.8	60	12,000	200
3,550	1050.8	0.78	39.1	50	18,000	360

(6) 実験結果

現在迄の実験では図-(10) に示されている各種の河川構造物の位置とその規模

が適当だと思われる。この実験範囲で最も危険な場所はT杭126~132番に相当する地臭の右岸、彎曲地臭でこの地臭に多くの実験を行い図-(10)の如きものが良好なる状態を示した。又T杭116~120番に相当する地臭の左岸が洗堀甚しかったが横堤水制の設置でほぼ安定なる状態にする事が出来た。堆砂状態は河川の流心に堆砂する傾向が非常に強かったが兩岸に堆砂する様になり河道がほぼ一定となり安定性を増加させる事が出来た。実験中に流下した砂を補充するために最上流で投砂したがこの投砂量を現地流出土砂量に換算する事は相似律が成立しないため定量的に示す訳に行かないが現地河川では洪水時がなりの流出土砂があると思われる。