

II-67

緩勾配河川区間に対する移動床歪模型相似則の適用と問題点

北見工業大学大学院 ○学生員 魏 炳乾
 北見工業大学工学部 正会員 内島邦秀
 北見工業大学工学部 正会員 早川 博

1. はじめに

著者らはこれまでいくつかの急流河川を対象とし、砂州形成領域区分図の両軸の無次元パラメータを模型と原型で一致させることによって導出された移動床歪模型の相似則に基づいて、砂と軽量河床材料を用いた河床形の再現実験を行い、良好な検証結果を得てきた^{1) 2) 3)}。本研究では、まず、一次元の流れの運動方程式と連続式及び流砂の連続式と流砂量式より、相似則を導き、これまでの相似則と比較検討する。続いて、緩勾配河川を対象とした、歪模型実験を行い、原型河川の河床形状を再現できるかどうかについて検討し、移動床歪模型相似則の適用と問題点を検討する。

2. 1次元の基本方程式に基づいた歪模型の相似則

一次元の流れの運動方程式と連続式は式(1)、(2)であり、流砂の連続式は式(3)である。流砂量式は、式(4)のBrown型を用いる。

$$-I + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{U^2 N^2}{h^{4/3}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t_s} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{q_s}{u_d} = k(\tau_* - \tau_{*c})^b \quad (4)$$

ここで、 h : 水深、 B : 川幅、 Q : 流量、 U : 平均流速、 I : 河床勾配、 u_* : 摩擦速度 ($= \sqrt{gh} J$: エネルギー勾配)、 t : 時間、 N : 粗度係数、 g : 重力加速度、 x : 流れ方向にとった長さ、 z : 河床高、 d : 河床材料の平均粒径、 t_s : 河床変形の時間、 λ : 河床砂の空隙率、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{*c} : 無次元限界掃流力、 q_s : 単位幅、単位時間当たりの流砂量、 k と b : 定数である。

水理量の(原型値/模型値)を縮尺比、その逆数を縮尺と定義する。以後、原型値、模型値及び縮尺比をそれぞれ添字 p , m , r で表す。式(1)、(2)、(3)、(4)が原型と模型でともに成立することによって、縮尺比の定義より、式(1)から次の式が得られ、

$$I_r = \frac{h_r}{x_r} = \frac{U_r}{g_r t_r} = \frac{U_r^2}{g_r x_r} = \frac{U_r^2 N_r^2}{h_r^{4/3}} \quad (5)$$

式(2)および式(3)から、それぞれ式(6)、(7)が得られる。

$$\frac{h_r}{t_r} = \frac{Q_r}{B_r x_r} \quad (6) \quad \frac{z_r}{t_{sr}} = \frac{q_{sr}}{(1-\lambda)_r x_r} \quad (7)$$

式 (4) から、次の式が得られる。

$$\frac{q_{sr}}{u_{*r}d_r} = k_r (\tau_* - \tau_{*c})_r^{b_r} \quad (8)$$

つぎに、水平方向縮尺比を $B_r (=x_r)$ 、鉛直方向縮尺比を $Y_r (=h_r=z_r)$ として、歪比 n を $n=B_r/Y_r$ と定義する。これによれば、水路勾配の縮尺比 I_r は $I_r=n^{-1}$ となる。したがって、 $g_r=1$ であるから、式 (5) から次の相似条件式が求められる。

$$\frac{nU_r}{t_r} = 1 \quad (9) \quad \frac{h_r^{4/3}}{N_r^2 U_r t_r} = 1 \quad (10) \quad \frac{h_r^{4/3}}{nU_r^2 N_r^2} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{U_r^2}{h_r} = 1 \quad (12) \quad \frac{h_r^{1/3}}{nN_r^2} = 1 \quad (13)$$

$Q_r=B_r h_r U_r$ であるから、式 (6) から相似条件式 (14) が求められ、 $K_r=1$ 、 $(1-\lambda)_r=1$ として、式 (7) から相似条件式 (15) が求められる。

$$\frac{B_r}{U_r t_r} = 1 \quad (14) \quad \frac{h_r B_r}{q_{sr} t_{sr}} = 1 \quad (15)$$

模型の河床材料を砂とすれば、 $s_r=1$ (s : 河床材料の水中比重) となる。式 (8) に流砂量の相似条件 $\tau_{*r}=1$ 及び $\tau_{*cr}=1$ 、即ち、 $\tau_*=hi/sd$ を考慮して、式 (17) より、相似条件式 (16) が得られる。

$$\frac{q_{sr} n^{1/2}}{d_r h_r^{1/2}} = 1 \quad (16) \quad \frac{h_r I_r}{d_r} = 1 \quad (17)$$

以上の相似条件式をまとめて示すと、式 (14)

は常に成り立つから、

$$\left. \begin{aligned} t_r &= n U_r \\ N_r^2 U_r t_r &= h_r^{4/3} \\ U_r^2 &= h_r \\ h_r^{1/3} &= n N_r^2 \\ h_r^{4/3} &= n U_r^2 N_r^2 \\ h_r B_r &= q_{sr} t_{sr} \\ q_{sr} n^{1/2} &= d_r h_r^{1/2} \\ h_r I_r &= d_r \end{aligned} \right\} (18)$$

となる。

相似条件式(18)の中には9個の未知数が存在する。よって、そのうちの1個の物理量を

決めれば他の水理量の縮尺比を導ける。ここでは、模型を実験室に収めるための水平縮尺比 B_r をあらかじめ決めると、式 (18) から表-2 に示すの相似式 (19) ~ (26) が求められる。相似式 (26) は相似条件式(12) を基づいて得られたフルード相似式である。また、表-2 には、鮭川らの領域区分図の両軸の無次元パラメータから得られた相似則も表記した。

二つの相似則を比べてみると、 d_r 、 h_r 、 t_{sr} の相似式は同じであることが分かる。式 (29) と式 (21) が

表-1 移動床歪模型の相似則

本節	式番号	鮭川らの移動床歪模型の相似則	式番号
$d_r = n^{-2} \cdot B_r$	(19)	$d_r = n^{-2} \cdot B_r$	(27)
$h_r = n^{-1} \cdot B_r$	(20)	$h_r = n^{-1} \cdot B_r$	(28)
$U_r = n^{-1/2} \cdot B_r^{1/2}$	(21)	$U_r = n^{-5/6} \cdot B_r^{1/2}$	(29)
$t_r = n^{1/2} \cdot B_r^{1/2}$	(22)	$t_r = n^{5/6} \cdot B_r^{1/2}$	(30)
$N_r = n^{-2/3} \cdot B_r^{1/6}$	(23)	$N_r = n^{-1/3} \cdot B_r^{1/6}$	(31)
$Q_r = n^{-3/2} \cdot B_r^{5/2}$	(24)	$Q_r = n^{-11/6} \cdot B_r^{5/2}$	(32)
$ts_r = n^2 \cdot B_r^{1/2}$	(25)	$ts_r = n^2 \cdot B_r^{1/2}$	(33)
$Fr_r = 1$	(26)	$Fr_r = n^{-1/3}$	(34)

違うのは、式 (29) は砂州上の流れの抵抗則として Manning-Strickler 型公式を用いて導かれたもので、摩擦抵抗と形状抵抗を含むが、式 (21) は摩擦抵抗のみと考えられる。したがって、抵抗に関する式 (21)、(23) により、抵抗を相似にすることは難しい。

3. 模型実験条件と実験方法

緩勾配河川区間に対して歪模型相似則の適用と問題点を検討するために原型河川である一級河川常呂川を対象とし、移動床歪模型実験を行った。相似則は表-1の式 (27) ~ (34) を用いた。

模型水路は、平面形状を相似にした常呂川の水平縮尺 $1/B_t = 1/600$ の側岸及び高水敷を固定した複断面水路で、対象区間は KP3.0~KP11.8 であり、上流側の 800m (KP11.8~KP11.0) を助走区間とした。

実験条件は次のように決定した。原型の河床材料の平均粒径は $d_p = 4.36\text{mm}$ 、平均河床勾配は $I_p = 1/2360$ であり、模型の河床材料にほぼ均一な平均粒径は $d_m = 0.22\text{mm}$ の標準砂を用いることにして、式 (27) より歪比 $n = 5.5$ 、模型水路勾配 $I_m = 1/429$ 、鉛直縮尺 $1/Y_r = 1/109$ に決定した。低水路内の初期河床面位置は次のようにして決定した。対象区間の「高水敷高-平均河床高」の平均値は 3.68m であり、鉛直縮尺より 3.4cm となる。そこで模型高水敷から 3.4cm 低い位置を初期河床面とした。

模型における洪水流量は、常呂川の上川沿観測所 (KP11.0) における平成 4 年 9 月の洪水流量ハイドログラフ (最大流量 $886.97\text{m}^3/\text{s}$) を図-1 のように段階的増・減水流量で近似して、式 (32) より決定した。

模型洪水流量の通水時間は、洪水流量ハイドログラフにおいて $120.06\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量が $t_{sp} = 90$ 時間継続しているので、式 (33) から求めると、 $t_m = 7$ 分 17 秒となる。ここで、注意を要するのは、歪比 n の値が大きいため t_m は河床が安定するまでの所要時間より短く、河床形の再現が困難になる。そこで、再現実験を行う前に、支配流量⁴⁾ (即ち、低水路満杯模型流量) を通水して河床が安定するまでの時間を計ったところ、15 分であり、逆に式 (33) により原型の時間を求めると、185 時間 14 分となる。それゆえ、洪水期間も含んだ 185 時間 14 分の流量を用いて、通水 15 分の模型実験を行った。以上の実験条件を表-2 にまとめて示す。また、再現水位ハイドログラフを付図に示す。

模型の河床形を測定し、 $B_t = 600$ 、 $Y_r = 109$ によって、原型値に換算した。

4. 河床形の再現による歪模型相似則の適用と問題点について

図-2 は洪水流下後に止水し、自然排水した後各断面について測定した歪模型の横断河床形状と平成 8 年に実測した河床形状の比較図であり、平均河床高を一致させて比較している。この図において、原型河床形を実線で、歪模型の非常流実験結果を破線で、定常流実験 ($Q_m = 1.85 \text{ l/s}$) 結果を点線で示す。こ

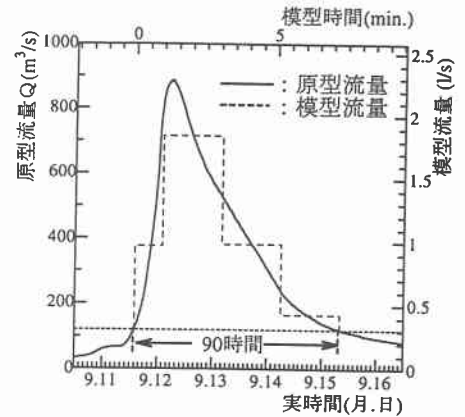


図-1 平成 4 年 9 月洪水流量ハイドログラフ (上川沿)

表-2 実験条件

物理量	原型	歪模型
水平縮尺	—	1/600
鉛直縮尺	—	1/109
歪比	—	5.5
勾配	1/2360	1/429
河床粒径	4.36mm	0.22mm
流量	120.06 (m³/s) 376.53 715.21 381.30 165.65	0.31 (l/s) 0.97 1.85 0.98 0.43
通水時間	(90 時間) 185 時間 14 分	(7 分 17 秒) 15 分

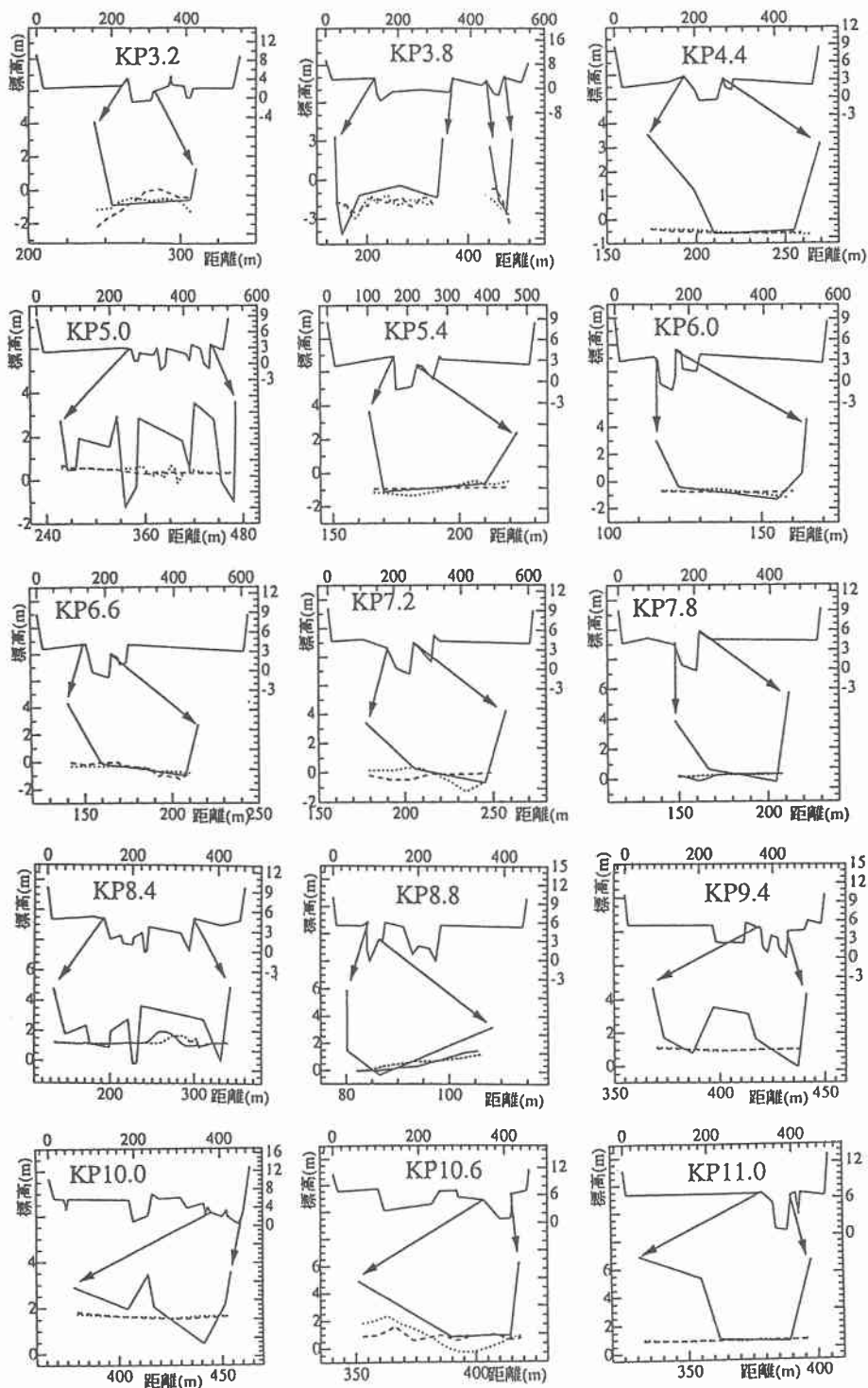


図-2 横断河床形状の比較図 (KP11.8~KP11.0は助走区間)

の図を見ると、蛇行部の頂点の僅か下流に位置する KP3.8~KP3.6, KP6.4, KP8.8~KP8.6 の河床は原型とよく一致していることが分かる。また、ほぼ直線の河道あるいは幅広いの部分においても、例えば、KP3.2, KP4.2, KP4.4, KP5.2~6.8, KP7.2, KP8.0, KP8.4, KP10.2~KP11.0 は原型河床と同様な河床形となっている。KP4.6~KP5.0, KP7.0, KP8.0, KP8.2, KP9.2~KP10.0 において、原型の小さな中州は再現されていない。原型の中州が再現できないのは、まず、原型の河床形は平成 8 年の観測結果であるが、模型の河床形は平成 4 年 9 月の洪水流量に基づいた実験結果であること、また、原型の低水路側岸は法勾配を持つのに対し、模型のそれは低水路法肩から直立な側壁にしたためと考えられる。

緩勾配河川区間に対して、歪模型実験を行う際には、一番大きい問題点は通水時間である。式 (27) より、 B_r を一定とすると、歪比 n は小さいほど d_r は大きくなる。一般に緩勾配河川区間の河床砂粒径は小さい、そうすると、 d_r の値は大きくなるにつれて、 d_m はかなり小さくなる。例えば、 $B_r=600$, $n=3$, 原型粒径 $d_p=4.36$ の場合、 d_m は 0.06mm となる。一方、 B_r を一定として、もし大きい粒径の砂を用いるために n の値を大きく取ると、式 (33) により、模型の通水時間は非常に短くなる。河床が安定するまでの所要時間より短い通水時間で原型の河床形を再現することは困難である。もし模型の河床材料に比重の小さい材料を用いれば、 $s_r > 1$ であるから、 $d_r = s_r^{-1} \cdot n^{-2} \cdot B_r$ 式³⁾ により、砂より模型粒径の選択範囲が大きくなる。しかし、 $t_{sr} = s_r \cdot n^2 \cdot B_r^{1/2}$ 式³⁾ により、模型の通水時間は砂の場合と比べると、もっと短くなることが分かる。

通水時間に関する歪比の限界を時間歪比係数 α の概念を導入して考察する。 $\alpha = t_{sr}/t_r$ と定義される。中国における大縮尺歪模型実験は、 $\alpha = 5 \sim 30$ で行われている⁵⁾。これにより、鮭川らの移動床歪模型の相似則を用いる場合 $4 < n < 18.4$ となり、2 節の相似則を用いる場合 $3 < n < 9.6$ となる。したがって、歪比 n の限界値は 5 くらいと考えられる。

5. おわりに

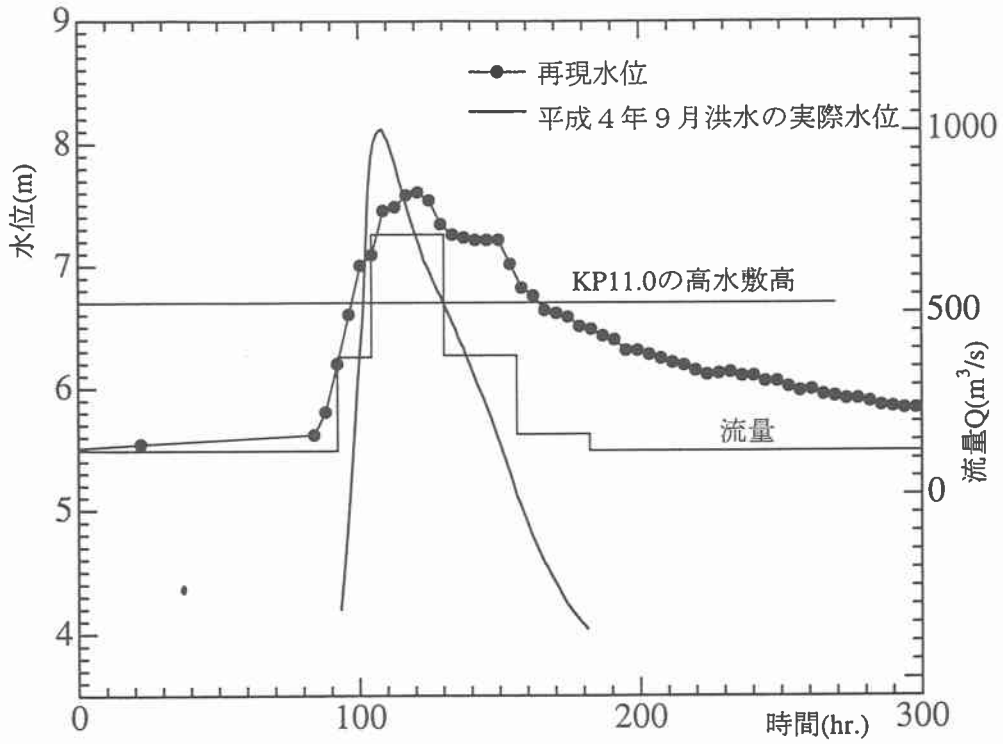
以上、本研究では、まず、一次元の流れの運動方程式と連続式及び流砂の連続式と流砂量式より、相似則を導き、砂州形成領域区分図のパラメータから得られる移動床歪模型の相似則と比較検討した。続いて、緩勾配河川区間である常呂川下流を対象とした歪模型実験を行い、原型河床形状の再現性に関わる歪模型相似則の適用と問題点を検討した。その結果、特に、歪比が大きい時の通水時間は、河床変形時間の相似則に拘らず、模型の予備実験によって河床が安定するまでの時間を十分に検討して対処すべきことを明らかにした。

謝辞：北海道開発局開発土木研究所の河川研究室より貴重な資料を提供して頂いた。

ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内島邦秀・井出康郎・加治昌秀・宇山幹紀・早川博：忠別川の移動床歪模型実験，土木学会北海道支部論文報告集，第 51 号 (B)，pp. 178-183, 1995.
- 2) 内島邦秀・高木厚・井出康郎・加治昌秀・早川博：移動床歪模型実験による洪水時河床変動の検討，水工学論文集，第 41 巻，pp. 1003-1010, 1997.
- 3) 魏炳乾・内島邦秀・早川博：比重の小さい河床材料を用いた移動床歪模型実験の有効性，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，第 2 部，pp. 444-445, 1998.
- 4) 河村三郎：支配流量の一計算法，第 12 回水理講演会講演集，pp. 79-84, 1968.
- 5) WANG, ZHAOYIN and WOLFGANG KRON, Time Distortion in Large Scale Sediment Model Tests, Journal of Hydraulic Research, Vol. 29, No.2, pp.161-178, 1991.



付図 段階的増・減水流量ハイドログラフと上川沿
観測所(KP11.0)の再現水位ハイドログラフ