II－66

模型砂の限界掃流力を考慮した歪模型実験

北見工業大学工学部　○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

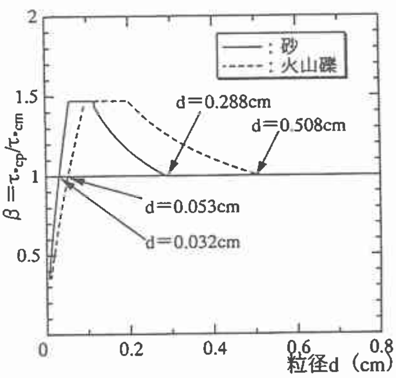
1.　はじめに

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ー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，模型砂の限界掃流力を考慮した移動床歪模型の相似則を導き，続いて，緩勾配河川である常呂川下流部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を検証する．

2.　模型砂の限界掃流力を考慮した移動床歪模型の相似則

2．1　限界掃流力

無次元限界掃流力 τ_{*c} は，$\tau_{*c}=u_{*c}^2/(s\cdot g\cdot d)$（ここで，$s$：河床砂の水中比重，$g$：重力加速度，$d$：砂の粒径）であり，無次元限界摩擦速度 u_{*c} は岩垣の式により求められ，τ_{*c} は河床砂の粒径に左右される．以下，原型値，模型値をそれぞれ添え字 p，m で表すと，一般に原型の平均粒径が 0.288cm より大きいので，τ_{*cp}=0.05 と見なしてよい．一方，著者らが行ってきた水平縮尺 1/600 程度の小縮尺の歪模型実験では模型砂の平均粒径は 0.288cm より小さく，τ_{*cm} は必ずしも 0.05 と一致しない．したがって，$\tau_{*cp}/\tau_{*cm}=\beta$ とおくと，$\beta\neq1$ となる．岩垣公式によれば d と β との関係は図-1 で表される．この図において，砂，火山礫（比重 1.34）をそれぞれ実線，破線で表す．この図から，砂と火山礫の粒径はそれぞれ 0.032cm，0.053cm，あるいは 0.288cm，0.508cm より大きくなると，β が 1 になることが分かる．



図－1　粒径dと$\beta(=\tau_{*cp}/\tau_{*cm})$の関係

2．2　移動床歪模型の相似則

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．以下，縮尺比を添え字 r で表す．また，水平方向縮尺比を L_r，鉛直方向縮尺比を y_r として，歪比 n を $n=L_r/y_r$ と定義すると，水路勾配の縮尺比 I_r は，$I_r=n^{-1}$ となる．

著者らは，これまで，移動床歪模型の水理相似則を鮭川らの砂州形成領域区分図の両軸の無次元パラメーター（u_*/u_{*c}～$B\cdot I/h$）および砂州上の流れの抵抗則として Manning－Strickler 型の式を原型と模型で一致させるという相似条件より導出したが，その際 $u_*/u_{*c}=(\tau_*/\tau_{*c})^{0.5}$ であるから，$(u_*/u_{*c})_r=1$ の条件を $\tau_{*cr}=1$ として $\tau_{*r}=1$ の条件に置換している．前節で述べたように $\tau_{*cr}(=\beta)\neq1$，即ち，原型と模型の τ_{*c} が等しくない場合では，この相似条件式は

Distorted Model Experiments in Consideration of the Critical Tractive Force of the Model Sands
by Bing Qian WEI , Kunihide UCHIJIMA and Hiroshi HAYAKAWA

$$\tau_{*r} = \frac{h_r I_r}{s_r d_r} = \beta \tag{1}$$

であり，したがって，相似条件式は以下の3式となる．

$$\left.\begin{array}{r} \dfrac{h_r I_r}{s_r d_r} = \beta \\ \dfrac{B_r I_r}{h_r} = 1 \\ u_r = d_r^{-1/6} \cdot h_r^{2/3} \cdot I_r^{1/2} \end{array}\right\} \tag{2}$$

相似条件式(2)には，3個の式の中に6個の未知数が存在する．よって，そのうちの3個の物理量を決めれば他の水理量の縮尺比を導くことが可能となる．ここでは，模型を実験スペースに収めるための水平縮尺比 B_r と I_r，即ち，歪比 n 及び s_r をあらかじめ決めると，他の縮尺比は相似条件式（2）の3式を連立させて解くことにより，表−1 に示されている式(3)〜(5)が得られる．さらに，式（3）〜（5）より流量 Q $(=B \cdot h \cdot u)$，時間 t（＝距離/流速）及びフルード数 Fr $(=u/\sqrt{gh})$ の縮尺比は表−1 の式（6）〜（8）となる．

表−1　移動床歪模型の相似則

$\tau_{*r}=\beta$ の場合の相似則	式番号
$h_r = n^{-1} B_r$	(3)
$d_r = \beta^{-1} s_r^{-1} n^{-2} B_r$	(4)
$u_r = \beta^{1/6} s_r^{1/6} n^{-5/6} B_r^{1/2}$	(5)
$Q_r = \beta^{1/6} s_r^{1/6} n^{-11/6} B_r^{5/2}$	(6)
$t_r = \beta^{-1/6} s_r^{-1/6} n^{5/6} B_r^{1/2}$	(7)
$Fr_r = \beta^{1/6} s_r^{1/6} n^{-1/3}$	(8)
$q_{s_r} = \beta s_r^{-1} n^{-3} B_r^{3/2}$	(11)
$t_{s_r} = \beta^{-1} s_r n^2 B_r^{1/2}$	(12)
$H_r = n^{-1} \cdot B_r$	(13)

次に，流砂の連続式および Brown 型の掃流砂量式が模型と原型でともに成立することによって，式(9)と式（10)が得られる．

$$\frac{q_{s_r} t_{s_r}}{B_r h_r} = 1 \tag{9}$$

$$\frac{q_{s_r}}{u_{*r} d_r} = k_r \cdot \tau_{*c_r}^{\ 2} = k_r \cdot \beta^2 \tag{10}$$

ここで，q_s：単位幅，単位時間当たりの流砂量，t_s：河床変形の時間，k：定数である．

k_r=1 として，式(9)と(10)より，表−1 に示している流砂量 q_s および河床変形時間（通水時間）t_s の相似則が得られる．また，砂州波高 H の相似則は表−1 の式（13）となる[4]．

以上の相似則の歪比 n と $\beta=1$ の場合の歪比 n' には，式(4)により $n=\beta^{-1/2}n'$ の関係があり，$\beta>1$ の時，n は小さくなり，さらに，式(12)より模型の通水時間 t_{sm} が長くなることが判る．

3．　模型実験条件

模型砂の限界掃流力を考慮した移動床歪模型の相似則を実験的に検証するために常呂川下流部を対象として移動床歪模型実験を行った．

模型水路は，既報[5]の実験と同じく平面形状を相似にした常呂川の水平縮尺 $1/B_r$ =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=4.36mm，平均河床勾配は I_p=1/2360 である．d_m=0.53mm 模型砂を用いることにして，β=1.39 と定まる．式（4）より歪比 n=7.3 となり，模型水路勾配 I_m=1/326，鉛直縮尺 $1/Y_r$=1/83 に決定される．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 3.683m であり，鉛直縮尺より 4.58cm となる．そこで模型高水敷から 4.58cm 低い位置を初期河床面とした．

表−2　実験条件

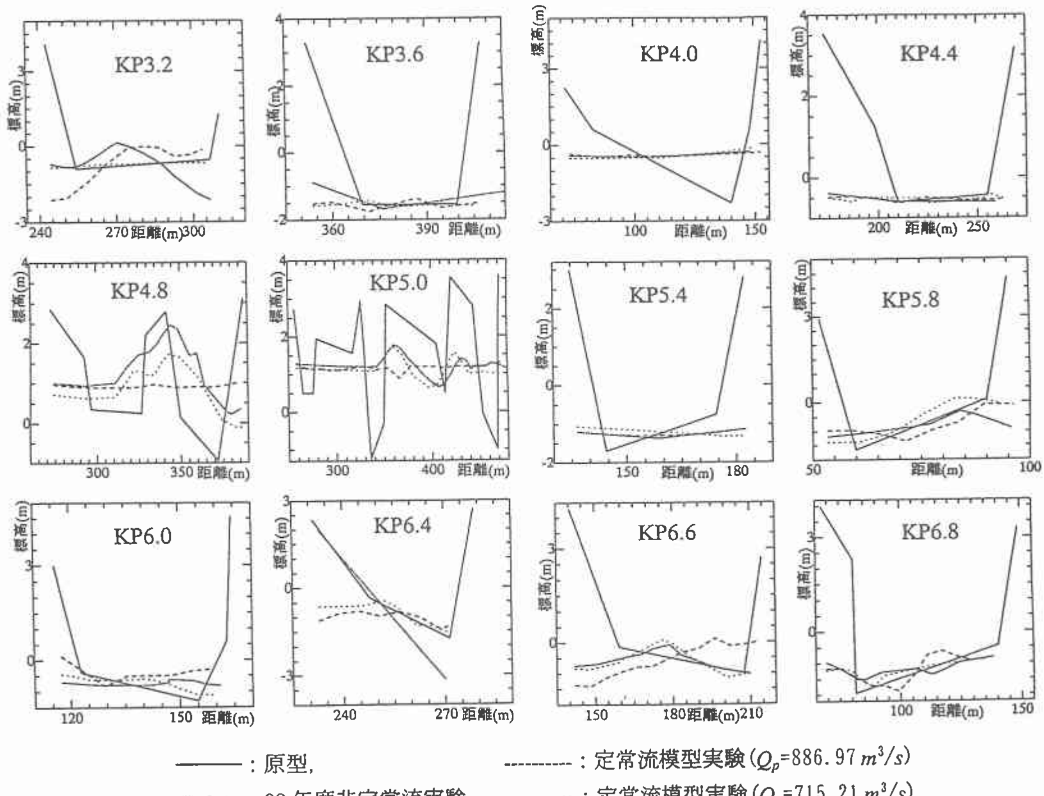
物 理 量	原　型	歪 模 型
水平縮尺	———	1／600
鉛直縮尺	———	1／83
歪　比	———	7.3
水路勾配	1／2360	1／326
河床粒径	4.36mm	0.53mm
無次元限界掃流力	0.05	0.036
流　量	715.21（m^3/s） 886.97	2.90（l/s） 3.59
通水時間	90時間	5分50秒

模型流量は，常呂川の上川沿観測所(KP11.0)における平成4年9月の洪水最大流量886.97（m^3/s）と低水路満杯程度の流量715.21（m^3/s）を原型流量とし，式(6)からそれぞれ2.9（l/s）と3.59（l/s）に決定した．

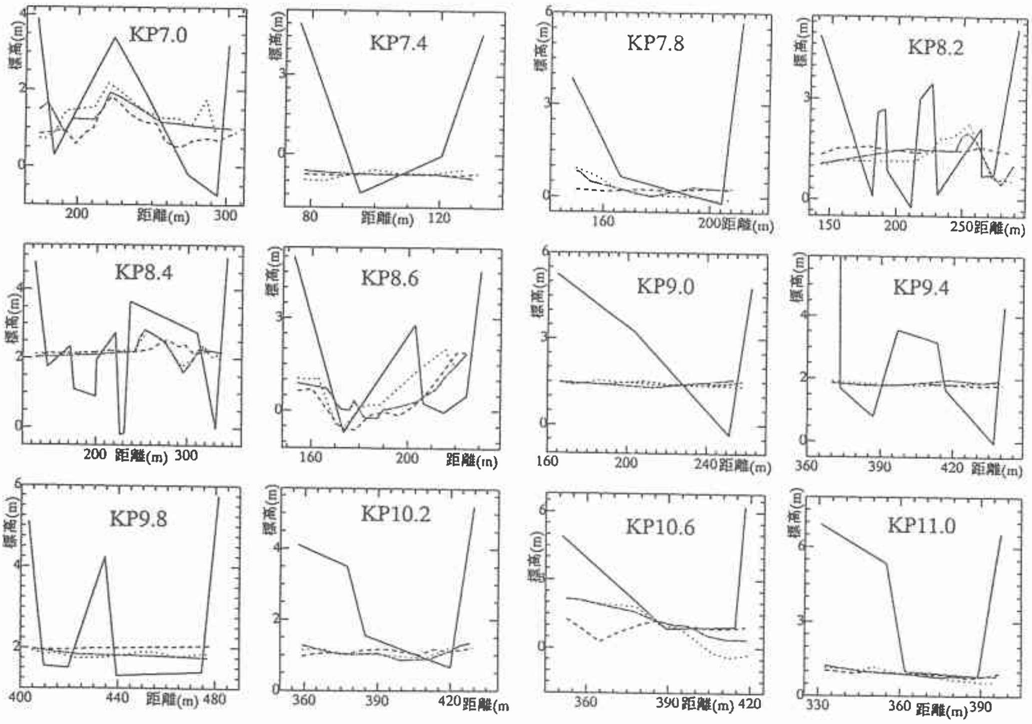
模型流量の通水時間は，実際の洪水がt_{sp}＝90時間継続しているので，式（12）からt_{sm}＝5分50秒と求まり，二つ流量に対する定常流実験を行った．以上の実験条件を表－2にまとめて示す．

4. 河床形の再現による歪模型相似則の検証

図－2は洪水流下後に止水し，自然排水した後に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，Q_m＝2.90（l/s）の定常流実験結果を一点鎖線で，Q_m＝3.59（l/s）の定常流実験結果を点線で，昨年度の歪模型の非定常流実験結果を破線で示す．この図を見ると，水路の中流部に位置するKP3.6，KP3.8，KP4.2，KP4.4，KP4.8～KP6.0，KP6.8，KP7.0，KP8.2～KP8.8の河床は原型とよく一致していることが分かる．特に，模型砂の限界掃流力を考慮した移動床歪模型の相似則に基づいた今回の移動床歪模型実験は原型河川の中州の再現ができた．また，上流部においても，例えば，KP10.2～KP11.0，原型河床と同様な河床形となっている．模型で再現された中州の規模は実際のそれと多少違う，この理由は，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り，この間，原型において種々の流量変動があり，河床変動の履歴を模型ではシミュレートできなかったためと考えられる．下流端に近い断面の河床は原型とあまり一致していないのは模型の下流端断面からの排水による水面低下が原因と考えられる．



図―2　横断河床形状の比較図



———：原型，　　　　　　　　　　………：定常流模型実験(Q_p=886.97 m^3/s)
- - -：98 年度非定常流実験，　　　—·—·—：定常流模型実験(Q_p=715.21 m^3/s)

図―2　横断河床形状の比較図（続き）（KP11.0～KP11.8 は助走区間）

5．おわりに

以上，本研究では，模型砂の限界掃流力を考慮した移動床歪模型の相似則に基づいて常呂川の下流部の歪模型実験を行い，原型河川の河床形状を比較的良好に再現できる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，第 53 回年次学術講演会論文報告集，第 2 部，pp. 444－445，1998.
4) 内島邦秀：中規模河床形態の相似則，1995 年度（第 31 回 ）水工学に関する夏期研修会講義集，A4，pp. 1－16，1995.
5) 魏炳乾・内島邦秀・早川博：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，土木学会北海道支部論文報告集，第 55 号（B），pp. 314－319，1999.