



潮流泥沙模型冲淤时间比尺研究*

吴道文

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210024)

摘要: 物理模型试验中, 由于模型缩尺效应及采用的模型沙与天然沙不一致, 导致河床水流时间比尺与河床冲淤时间比尺不一致。因此, 在潮流泥沙模型试验中针对不同的研究问题, 需要选取不同的冲淤时间比尺。研究表明: 以冲刷为主的模型, 与以淤积为主的模型时间比尺存在差异; 潮汐河段和径流河段冲淤时间比尺的确定存在差别, 当河床演变受径潮流共同作用, 时间比尺确定的依据根据水流造床作用来判断; 风暴潮冲淤时间比尺, 主要考虑其水流泥沙输移特性, 一般采用冲淤时间比尺等于水流运动时间比尺, 而含沙量比尺需作相应的调整。

关键词: 模型; 冲淤时间比尺; 水流时间比尺

中图分类号: TV 149.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0021-04

Study on time scale of scouring and silting in tidal flow-sediment model

WU Dao-wen

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In model test, due to the model scale effect and the difference of model sand and natural sand, the time scale for flow and riverbed scouring and silting are inconsistent. Therefore, it is necessary to select different scouring and silting time scales for different tidal flow-sediment models. Researches show that the time scale for the erosion model is different from the one for the deposition model, so does for the tidal reach and runoff reach; when the riverbed evolution is controlled by both tide and runoff, the time scale is determined according to the bed-forming role of the flow; when selecting the scouring and silting time scale of the storm surge, the characteristics of flow and sediment transportation are always considered, and the equal time scale for scouring and silting and flow are generally used, while the sediment volume scale needs to be adjusted accordingly.

Key words: model; time scale of scouring and silting; time scale of flow

在河口海岸模型中, 由于模型场地等限制, 模型平面比尺较小, 变率相对较大。模型沙需要满足悬浮、沉降、起动相似, 只能使用轻质沙。要满足河床变形相似, 模型冲淤时间比尺与水流时间比尺一般不相等。另外受时间因素等限制, 模型放水冲淤时间不可能很长, 为此, 在满足模型研究要求的基础上如何确定冲淤时间比尺, 是模型试验的重要任务。

1 基本相似条件

模型应满足重力相似性:

$$\alpha_u = \sqrt{\alpha_H} \quad (1)$$

河口段模型还需满足阻力相似:

$$\alpha_u = \frac{1}{\alpha_n} \alpha_H^{7/6} \alpha_L^{1/2} \quad (2)$$

水流惯性相似: $\alpha_{t_1} = \frac{\alpha_L}{\alpha_u} \quad (3)$

悬浮相似: $\alpha_\omega = \alpha_{u'_*} \quad (4)$

收稿日期: 2013-07-29

*基金项目: 西部项目基金 (201132874660)

作者简介: 吴道文 (1963—), 男, 高级工程师, 从事河流动力学研究。

沿降相似: $\alpha_\omega = \alpha_u \cdot \frac{\alpha_H}{\alpha_L}$ (5)

河床变形相似: $\alpha_{t_2} = \frac{\alpha_L \alpha_{\rho_0}}{\alpha_u \alpha_S}$ (6)

由 $\alpha_{u_*} = \frac{n_d \sqrt{gu}}{H^{1/6}}$ (7)

设 $n_d = 0.045 d_{95}^{1/6}$ (8)

$\alpha_{u_*} = \frac{u}{7.14 \left(\frac{H}{d_{95}}\right)^{1/6}}$ (9)

$\alpha_{u_*} = \frac{\alpha_u}{\left(\frac{\alpha_H}{\alpha_d}\right)^{1/6}} = \alpha_\omega$ (10)

$\alpha_u = \frac{1}{\alpha_n} \cdot \frac{\alpha_H^{7/6}}{\alpha_L^{1/2}}$ (11)

$\alpha_n = \alpha_d^{1/6}$ (12)

则 $\alpha_n = \frac{\alpha_H^{2/3}}{\alpha_L^{1/2}} = \alpha_d^{1/6}$ (13)

$\frac{\alpha_u}{\alpha_H^{1/6}} \cdot \frac{\alpha_H^{2/3}}{\alpha_L^{1/2}} = \alpha_\omega^{[1]}$ (14)

悬浮相似: $\alpha_\omega = \alpha_u \sqrt{\frac{\alpha_H}{\alpha_L}}$ (15)

2 模型冲淤相似时间比尺

流量: $Q = Au = BHu$ (16)

输沙率: $Q_s = BHuS$ (17)

输沙量: $Q_{sp} = BHuST$ (18)

模型输沙量: $Q_{sm} = B_m H_m u_m S_m T_m$ (19)

天然沙量体积: $V_{sp} = \frac{BH_uST}{\rho_{0p}}$ (20)

模型沙量体积: $V_{sm} = \frac{B_m H_m u_m S_m T_m}{\rho_{0m}}$ (21)

原型与模型沙量体积比尺:

$\alpha_{V_s} = \alpha_V = \alpha_L \alpha_L \alpha_H = \frac{\alpha_L \alpha_H \alpha_u \alpha_S \alpha_t}{\alpha_{\rho_0}}$ (22)

$\alpha_L = \frac{\alpha_u \alpha_S \alpha_t}{\alpha_{\rho_0}}$ (23)

则 $\alpha_{t_2} = \frac{\alpha_L \alpha_{\rho_0}}{\alpha_u \alpha_S}$ (24)

当 α_{t_2} 变大则 α_S 变小, 当 α_{t_2} 变小则 α_S 变大;

天然泥沙和模型泥沙 ρ_s 不同, 淤积干密度 ρ_0 不一致, 但淤积后的体积应是相似的。在模型冲淤相似验证中, 虽然冲淤时间比尺及加沙量可调, 但不是任意的, 应满足 $\alpha_{V_s} = \alpha_V$ 。即天然来沙量确定后, 模型加沙总量应不变。

由沉降相似比尺 $\alpha_\omega = \alpha_u \cdot \frac{\alpha_H}{\alpha_L}$ 和糙率相似比尺

$\alpha_n = \frac{\alpha_H^{2/3}}{\alpha_L^{1/2}}$, 采用长江常用挟沙力公式^[2]:

$S = 0.025 \cdot \frac{\rho_s \rho u^3 n^2}{(\rho_s - \rho) g H^{4/3} \omega}$ (25)

$\alpha_S = \frac{\alpha_{V_s} \alpha_\rho \alpha_u^3 \frac{\alpha_H^{4/3}}{\alpha_L}}{\alpha_{\rho_s - \rho} \alpha_u \cdot \frac{\alpha_H^{4/3}}{\alpha_L}} = \frac{\alpha_{\rho_s}}{\alpha_{\rho_s - \rho}}$ (26)

$\alpha_{t_2} = \frac{\alpha_L \alpha_{\rho_0}}{\alpha_u \alpha_S} = \alpha_{t_1} \cdot \frac{\alpha_{\rho_0} \alpha_{\rho_s - \rho}}{\alpha_{\rho_s}}$ (27)

悬浮相似: $\alpha_\omega = \alpha_u \sqrt{\frac{\alpha_n}{\alpha_L}}$ (28)

$\alpha_S = \frac{\alpha_{V_s} \alpha_\rho \alpha_u^3 \cdot \frac{\alpha_H^{4/3}}{\alpha_L}}{\alpha_{\rho_s - \rho} \cdot \alpha_u \cdot \frac{\alpha_H^{4/3}}{\alpha_L}} = \frac{\alpha_{V_s} \alpha_\rho \alpha_u^3 \cdot \frac{\alpha_H^{4/3}}{\alpha_L}}{\alpha_{\rho_s - \rho} \cdot \alpha_u \sqrt{\frac{\alpha_H}{\alpha_L} \cdot \alpha_H^{4/3}}} = \frac{\alpha_{\rho_s} \alpha_u}{\alpha_{\rho_s - \rho} \sqrt{\alpha_L}}$ (29)

$\alpha_{t_2} = \alpha_{t_1} \cdot \frac{\alpha_{\rho_0}}{\alpha_{\rho_s}} \cdot \frac{\alpha_{\rho_s - \rho} \sqrt{\alpha_L}}{\alpha_V} = \alpha_{t_1} \cdot \frac{\alpha_{\rho_0}}{\alpha_S} \alpha_{\rho_s - \rho} \cdot \eta^{1/2}$ (30)

$\alpha_{t_2} = \alpha_{t_1} \cdot \frac{\alpha_{\rho_0}}{\alpha_{\rho_s}} \cdot \frac{\alpha_{\rho_s - \rho} \sqrt{\alpha_L}}{\alpha_u} = \alpha_{t_1} \cdot \frac{\alpha_{\rho_0}}{\alpha_S} \alpha_{\rho_s - \rho} \cdot \eta^{1/2}$ (31)

如模型为正态, 则模型满足悬浮相似冲淤时间比尺等于满足沉降相似冲淤时间比尺; 若模型为变态则满足沉降相似冲淤时间比尺不等于满足悬浮相似冲淤时间比尺。因变率 η 一般大于 1, 所以满足悬浮相似模型河床冲淤时间短, 对于冲刷试验放水时间相对较短; 而满足沉降相似模型时间相对较长, 即淤积试验相对时间较长。

正态模型冲淤时间比尺:

$$\alpha_{t_2} = \alpha_{t_1} \cdot \frac{\alpha_{\rho_0}}{\alpha_{\rho_s}} (\alpha_{\rho_s - \rho}) \quad (32)$$

正态模型水流时间 α_{t_1} 与变态模型不同,

$$\text{正态模型} \quad \alpha_{t_1} = \frac{\alpha_L}{\alpha_u} = \alpha_H^{1/2} \quad (33)$$

$$\text{变态模型} \quad \alpha_{t_1} = \frac{\alpha_L}{\sqrt{\alpha_H}} = \alpha_H^{-1/2} \alpha_L \quad (34)$$

当模型几何比尺确定后, 选择不同的模型沙, 河床冲淤时间比尺不同, 采用轻质沙则

$$\frac{\alpha_{\rho_0}}{\alpha_{\rho_s}} \alpha_{\rho_s - \rho} > 1 \quad (35)$$

因 $\alpha_{\rho_s - \rho} > \alpha_{\rho_s}$, $\alpha_{\rho_0} > 1$, 模型沙 α_{ρ_s} 接近于 1, α_{t_2} 越小, 即模型放水冲淤时间越长。 α_{ρ_s} 越大, 模型放水时间越短。

3 潮流泥沙模型冲淤时间比尺确定方法

3.1 冲淤时间比尺之含沙量调整

当上游来沙总量确定后, 模型沙总量也随之确定, 但模型单位时间加沙量可适当调整。在天然河道中含沙量大都处于非饱和状态, 模型加沙主要为河床中的造床泥沙, 其含量一般相当于悬沙量的 10% 左右。当模型 S_m 调整后 t_m 也相应有所变化。

含沙量的调整范围受到水流挟沙能力的限制, 采用公式计算与实际水流挟沙能力存在差异, 在试验中可针对不同流量级水动力条件进行挟沙试验, 观测水流挟沙能力。在试验中, 含沙量的调整不得超过模型相应水动力条件下的挟沙能力, 首先 α_s 和 α_{t_2} 调整应满足加沙总量不变, 其次无论如何调整需达到模型冲淤和天然冲淤验证相似, 满足试验有关规程要求。

3.2 悬浮相似与沉降相似冲淤时间比尺

对于冲刷为主的模型试验, 以悬浮相似为主, 河床冲刷达到平衡要求的时间一般较短, 如采用 $\alpha_L = \alpha_H = 100$ 在桥墩局部冲刷试验中, 冲刷坑的形成、发展至基本稳定形态时间一般在 1 ~ 2 h, 据实测资料分析, 天然大洪水作用下冲刷坑发展到最大尺度的时间一般为 7 ~ 15 d。

而河床淤积试验主要以沉降相似为主, 对于河床淤积环境, 泥沙落淤过程相对较长, 上游悬沙不断补充落淤。对于底沙运移为主的淤积, 如底沙输移距离较远, 底沙落淤需要有一个较长过程。上游边滩切割下移, 心滩移动, 有可能需历经几个水文年。

因此, 河床冲刷和淤积时间效应是不一致的, 局部冲刷和整体冲刷也不一致, 研究对象不同, 冲刷时间也不一样, 局部冲淤变化还是整体冲淤变化; 是长河段冲淤变化, 还是在其节点段内滩槽变化等。

3.3 潮汐河工模型水流时间比尺与冲淤时间比尺关系

在潮汐河段涨落潮冲淤时效应也有所不同。由于涨落潮时间不同, 在河口段一般落潮时间大于涨潮时间, 模型在缩尺后涨落潮时间缩短, 涨潮时间更短, 如以涨潮为主的支汊, 河床冲淤变化主要是涨潮来沙影响, 涨潮时间短, 底沙、悬沙没有足够时间和水流充分交换扩散, 涨潮流就已转为落潮流, 所以一个潮汐过程时间不宜过短, 否则泥沙起动、落淤、悬浮等很难做到与天然相似。据实测资料及有关试验结果分析, 一般 $\alpha_{t_1} < 60$ 。

潮汐河段动床试验中, 下游控制潮型曲线采用中偏大潮, 一般采用累积频率 85% 的潮差, 潮型曲线取上游径流时段相应下游潮型曲线。由潮汐河段水动力特性可知, 长江下游三沙河段如无潮动力, 即潮差等于零或很小。福姜沙河段径流在 30 000 m³/s 以下, 河床底沙基本不起动; 通州沙河段径流在 50 000 m³/s 以下, 底沙基本不动; 白茆沙河段径流在 60 000 m³/s 以下, 底沙基本不动。由大通年径流分析可知, 多年平均流量仅 28 400 m³/s, 多年平均洪峰流量 56 800 m³/s, 说明潮汐对河床冲淤变化不可忽略, 越往下游影响越大。与径流河段不同, 潮汐河段虽然总体冲淤时间比尺为 α_{t_2} , 而潮汐河段每个涨落潮过程, 即潮波传播采用的时间比尺等于水流时间比尺 α_{t_1} , 一个全潮过程冲淤时间比尺等于水流时间比尺,

但天然潮型个数与模型是不一致的。当上游径流较小,下游潮差较小相耦合后对河床冲淤变化是不起明显作用的;当潮汐对河床冲淤变化起的作用较大时,当潮汐河段 $\alpha_{t_2} \geq 10\alpha_{t_1}$ 有时也是可能接受的^[2]。

但下游潮型采用 85% 累计频率潮差,仍可能存在一定问题。对于枯季来说,中小潮造床作用不明显,潮差小于 85% 累计频率潮差对河床冲淤影响不大。而在洪季,当径流较大时,中小潮对河床冲淤仍有影响。对于落潮为主的河床冲淤时间应多偏于洪季,而对于涨潮为主的河床冲淤时间应多偏于枯季,即枯季涨潮流强。

在径流河段动床试验,河床冲淤试验可不考虑枯季较小流量,仅考虑洪季流量,因为枯季较小流量一般不起造床作用。在潮汐河段,上游径流与下游潮型耦合后其水动力应起到造床作用,对造床作用影响不明显的水动力条件可不进行试验。

3.4 风暴潮骤淤冲淤时间比尺

风暴潮骤淤主要是风暴潮增水及携带大量泥沙,与平时相比含沙量大增,实测资料分析表明,一般可达 10 倍以上。模型放水时间如取冲淤时间比尺,因一个风暴潮过程一般就 3 d 左右,如 $\alpha_{t_2} = 10\alpha_{t_1}$,还不到一个全潮过程的 1/3 时段,无法进行模拟试验,为此模型必须与天然潮型数一致,即越过工程区的涨落潮次数相等,而含沙量进行相应调整,即模型冲淤时间比尺 $\alpha_{t_2} = \alpha_{t_1}$,而 α_s 相应调整变大^[3]。原型含沙量比平时可能增加十到几十倍,但在风暴潮模型试验中模型含沙量并非能增加相应倍数,这与模型沙输沙特性有关。

4 结语

河道输沙一般处于非饱和状态,需要分析感潮河段挟沙能力及模型挟沙能力,在模型试验中调整含沙量比尺、时间比尺相应变化。冲淤时间长,模型含沙量将有所减小;而冲淤时间缩短,模型含沙量加大;但模型冲淤时间比尺与水流时间比尺相差不宜过大。

在模型设计中,寻求较合适的模型沙,动床范围在满足研究问题的要求条件下尽可能小;冲淤时间比尺与含沙量比尺的调整,最终应满足河床冲淤相似的要求。冲淤时效应考虑以下影响因素:1) 模型沙粒密度影响到河床冲淤时间比尺;2) 受模型输沙能力限制;3) 模型动床范围影响,动床范围大,加入沙量与河床泥沙沿程交换需一定时间,冲淤时间不宜过短;4) 在变态模型中,悬浮相似与沉降相似不能同时满足,对以冲刷为主的研究与淤积为主的研究问题,冲刷和淤积的时效是不一致的;5) 不同类型研究问题,冲淤时间比尺有所不同。

参考文献:

- [1] 李昌华,金德春.河工模型试验[M].北京:人民交通出版社,1981.
- [2] 吴道文,夏云峰,杜德军.长江南京以下 12.5 m 深水航道建设工程一期工程(太仓—南通段)潮流泥沙动床模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
- [3] 吴道文,夏云峰.江苏国华陈家港电厂一期工程外航道工程动床模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2008.

(本文编辑 武亚庆)

