

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.004

魏炳乾, 龚秀秀, 严培, 等. 基于水流黏滞性的模型沙选择[J]. 水利水电工程学报, 2016(4): 27-31. (WEI Bing-qian, GONG Xiu-xiu, YAN Pei, et al. Model sand selection based on water flow viscosity[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 27-31.)

基于水流黏滞性的模型沙选择

魏炳乾¹, 龚秀秀¹, 严培¹, 王非¹, 庞洁², 胡红胜¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 对于研究泥沙问题的全沙动床模型试验, 模型沙的设计是整个模型试验的关键。当原型泥沙粒径过小, 不考虑模型与原型的水温差异时, 按比尺计算得到的天然模型沙粒径太小, 通常不易获得。因此在满足悬移相似条件下, 通过控制试验水温, 根据不同温度及不同水黏滞系数 ν , 得到合理的颗粒粒径从而优化模型选沙。在原温和变温两种条件下分别计算所选泥沙的沉速和沉速比尺, 表明改变温度所选的模型沙粒径是合理的, 用较大粒径天然沙模拟原型较细沙, 既满足沉速相似也满足悬移相似要求。试验验证结果表明模型沙选择满足设计要求, 模型设计合理。

关键词: 水流黏滞性; 动床试验; 模型沙; 粒径; 悬移相似

中图分类号: TV142

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)04-0027-05

河工模型试验是在远小于原型的模型中进行, 以研究河流在天然状态下或在建筑物作用下的水流结构及河床变形。对于研究泥沙运动的全沙动床模型试验, 模型沙的设计至关重要, 它对模型试验冲淤相似性有直接影响, 因此在河工模型动床试验中, 模型沙既要满足水流运动相似中床面糙率相似, 还要满足泥沙运动相似中的悬移及起动相似^[1]。床面糙率相似可通过合理有效边界加糙来满足, 而同时要考虑悬移和起动相似两个因素选择模型沙, 相对来说比较困难。

随着泥沙模型试验理论和实践的发展, 针对模型沙所进行的研究也越来越多。文献[2-6]多是研究较粗颗粒模型沙的物理特性及选择原则, 而对较细颗粒模型沙研究甚少, 且无直接利用天然沙模拟原型沙, 而文献[7-10]则是选择木屑、电木粉或陶粒等替代模型中的细颗粒, 如此得到的轻质模型沙虽能满足细颗粒的要求但存在以下缺点:

(1) 塑料沙易滑动, 水下休止角小, 亲水性差, 成形困难; 电木粉在试验中均发现较细部分因絮凝、板结, 起动有一定困难, 颜色灰暗, 不易观察, 且可能造成环境污染。再者这些轻质沙价格昂贵, 加工不方便, 不易达到粒配要求。

(2) 对模拟类似黄河这样的高含沙河流, 若采用轻质沙将导致模型浑水中固液体积比相对于原型严重失真, 使得模型试验无法满足重要的流态相似。

(3) 轻质模型沙引起的河床冲淤时间比尺与水流运动时间比尺不一致, 使得模型水流运动过程发生扭曲、河道槽蓄及泥沙运移发生偏离, 从而导致模型河床冲淤变形不相似且其黏性与原型不相似。

本文根据水温不同黏性系数不同, 沉速也不一样的原理, 在原型沙较细时, 使用天然沙作为模型沙也可满足沉速相似要求。

收稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2011CB403305); 陕西水利科技计划资助项目(2014skj-14); 陕西省教育厅科学研究计划项目(11JK0739)

作者简介: 魏炳乾(1963—), 男, 陕西兴平人, 教授, 博士, 主要从事河流工程泥沙研究。E-mail: weibingqian@xaut.edu.cn
通信作者: 龚秀秀(E-mail: 614451732@qq.com)

1 水流黏滞性对模型沙的影响

在动床河工模型试验中,模型沙既要满足水流运动相似中床面糙率相似,还要满足泥沙运动相似中的悬移及起动相似。床面糙率相似通过边界加糙解决,所以要使模型能较好地模拟原型,必须同时满足水流运动相似以及泥沙运动相似中的悬移和起动相似。

$$\text{水流运动相似条件: } \lambda_U = \lambda_n^{-1} \lambda_H^{2/3} \lambda_J^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{泥沙悬移相似条件: } \lambda_\omega = \lambda_U \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{起动相似条件: } \lambda_U = \lambda_{U_c} \quad (3)$$

式中: λ_L 为水平比尺; λ_H 为垂直比尺; λ_n 为糙率比尺; λ_J 为坡降比尺; λ_U 为流速比尺; λ_{U_c} 为临界流速比尺; λ_ω 为泥沙沉速比尺。

当原型沙粒径过小,不考虑模型与原型的温度差异时,若按比尺计算得到的模型沙(天然沙)粒径太小,通常不易获得,且过细的天然沙在模型中很难达到与原型相似的要求。这是因为:①按比尺缩小后的模型沙中含有部分极细成分,会造成模型沙的黏结,而原型沙粒径较粗无黏性,从而使得模型沙与原型沙受力不相似;②同温下极细模型沙沉速太小,与原型沙沉速之比和利用泥沙悬移相似条件,即式(2)计算的 λ_ω 相差较大,不满足沉速相似;③无黏性天然沙的 d_{50} 下限为 $(0.05 \pm 0.002) \text{ mm}^{[1]}$,而当原型沙较细时,模型沙若按比尺缩小,容易造成河岸滩淤积形态与原型有较大偏差。

目前解决这些问题的方法主要是采用陶粒、木屑、塑料沙等轻质沙,但轻质沙不仅价格高且加工不方便,不易达到粒配要求,故本文仍选用文献[6]中易于就地取材且廉价的天然沙作为模型沙。通过控制试验水温,利用水流黏滞性对模型沙的影响优化模型选沙,选出一些粒径相对较大的模型沙,既能使模型与原型悬移质泥沙运动相似,又能避免所选模型沙过于细小而影响模型与原型相似的问题。

悬移相似条件在悬移质动床模型试验中,主要用于控制对模型沙的选择。决定悬移相似条件的两个比尺关系式^[12]都包含有泥沙沉速比尺 λ_ω 。而泥沙沉速与泥沙粒径及密度直接相关,可通过静水沉速公式,建立泥沙粒径与密度比尺、沉速比尺、流速比尺、几何比尺之间的关系,以此作为选沙的依据。

悬移质泥沙一般都较细,例如黄河、长江中下游的悬移质中值粒径通常约 0.03 mm ,因而可认为原型沙基本上处于滞流区内,通常情况下模型沙沉速均比原型沙小,也应处于滞流区内。在推求比尺关系式时,在滞流区(即 $Re_d < 0.5$,或在常温下 $d < 0.1 \text{ mm}$)采用滞流区静水沉速公式^[1],即:

$$\omega = 0.039 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g \frac{d^2}{\nu} \quad (4)$$

$$\text{写成比尺关系式为: } \frac{\lambda_\omega \lambda_\nu}{\lambda_{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \lambda_d^2} = 1 \quad (5)$$

式中: ν 为黏滞系数,其值与温度 t 有关,可由下式确定

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (6)$$

图1为不同温度时水的黏滞系数。由图1可知,黏滞系数 ν 随温度的降低而增大,由式(4)和(5)可以看出,对于某一沉速 ω ,水温越低,水的黏滞系数 ν 越大,得到的颗粒粒径就越大,因此在某些原型沙为极细沙的河工模型中,为避免轻质沙带来的麻烦,在将天然沙选定为模型沙的条件下,可根据模型试验时的水温,调整模型沙粒径,如夏天减细,冬天加粗。

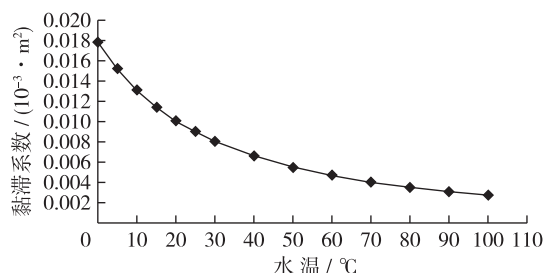


图1 水的黏滞系数随温度变化曲线

Fig. 1 Changes in viscosity coefficients with temperature

2 应用

2.1 试验概况

根据泸灞河橡胶坝群试验资料,综合考虑水流与泥沙相似条件、试验场地及模型最小水深的限制等因素,确定采用的模型几何比尺为:平面比尺 240,垂直比尺 60,原型悬沙中值粒径 $d_{50} = 0.075$ mm。考虑张红武得到的泥沙悬移相似条件式(2)并结合式(5)可得

$$\lambda_d = \lambda_H^{\frac{1}{2}} \lambda_v^{\frac{1}{2}} / \lambda_{\rho_s - \rho}^{\frac{1}{2}} \lambda_L^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

原型年均水温约 13.3 ℃,由于模型试验主要考虑汛期,而汛期一般集中在夏秋季,水温比年均温度稍高,为 15 ℃,黏滞系数为 0.011 41 cm²/s。由于选择天然沙作为模型沙,因此密度比尺为 1,具体结果见表 1。

表 1 不同温度条件下模型沙计算结果

Tab. 1 Calculated results of model sand under various temperature conditions

温度	λ_L	λ_h	ν	λ_v	λ_d	d_p	$d_m = d_p / \lambda_d$	ω_p	ω_m	λ_ω	$\lambda_U = \lambda_H$	$\lambda_{\omega \text{ 计算}} = (\lambda_H / \lambda_L)^{0.5} \lambda_U$
原温(15 ℃)	240	60	0.011 4	1.000	1.97	0.075	0.038	0.319 1	0.079 8	3.895 4	7.746 0	3.873 0
变温(5 ℃)	240	60	0.015 1	0.755	1.71	0.075	0.044	0.319 1	0.080 3	3.873 2	7.746 0	3.873 0

由表 1 可知,当不改变温度选择模型沙时,得到的模型天然沙粒径为 0.038 1 mm,其粒径太小不易获得,一般选择轻质沙。考虑到轻质沙价格太昂贵,于是考虑在北方冬季进行模型试验,即设计模型试验在平均水温为 5 ℃的条件下进行,相应黏滞系数为 0.015 12 cm²/s,由计算可知,此时的模型沙粒径为 0.044 mm,这种粒径的沙在自然界较易获得。

由表 2 可知,在原温和变温两种条件下根据式(4)分别计算泥沙沉速并计算沉速比尺与式(2)计算所得沉速比尺相比,变温条件下两种沉速比尺 $\lambda_\omega \approx \lambda_{\omega \text{ 计算}}$ 其值非常接近,说明改变温度所选的模型沙粒径合理。

因此经比较和选配,采用中值粒径为 0.044 mm 的模型悬沙,其级配曲线如图 2 所示。所以当原型沙为极细沙时可利用改变水温或调整试验时间优化选择模型沙,使其可用天然沙进行模拟且满足悬移相似条件。

2.2 推移质模型沙选择

模型沙设计不仅要满足悬沙悬移相似还要满足床沙起动相似。试验河段推移质中值粒径 $d_{p50\text{床}} = 7.44$ mm,水深 $h_p = 1.15$ m, $h_m = 1.9$ cm。

考虑起动相似确定推移质泥沙粒径,起动流速可用沙莫夫简化计算公式:

$$U_c = 4.6 d^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

式中: U_c 为起动流速; d 为粒径(mm); h 为水深(m)。

经比较和选配,采用的模型推移质的中值粒径为 0.49 mm,其级配曲线如图 2 所示。

此时可求得 $\lambda_d = 15.18$, $\lambda_n = \lambda_d^{1/6} = 1.63$, $\lambda_j = \lambda_H / \lambda_L = 0.25$ 。流速比尺: $\lambda_U = \lambda_n^{-1} \lambda_H^{2/3} \lambda_j^{1/2} = 4.87$ 。

利用式(8)计算可分别得到原型沙起动流速为 9.192 cm/s,模型沙起动流速为 1.873 cm/s,比值为 4.91,接近 4.87,所以模型沙选择合适。

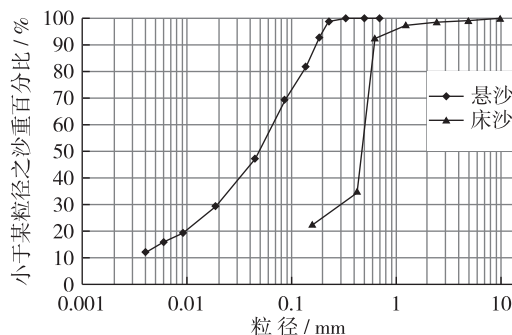


图 2 模型沙级配曲线

Fig. 2 Composition of model sands

3 试验结果分析

图 3 为验证河段的平衡河床沿程变化,其中上下游边界为橡胶坝断面。将 2001 年西北水科所的灞河入渭口的正态物理模型试验部分河段资料作为原型,以验证本模型的可靠性。首先依据该河段 2005 年实测河道地形图塑造动床模型地形,然后在动床模型河道中按灞河设计丰水丰沙 10 年系列施放试验水沙过程。根据橡胶坝设计资料可知,河段上下游橡胶坝坝基座顶面高程分别为:386.36 和 382.2 m。由图 3 可知,在放水前 5 年里,下游河床逐年抬升,且床面淤积抬升速率较快,约至第 6 年基本平衡,之后库区有冲有淤,呈微淤态势,这说明下游坝区在 6 年后达到冲淤平衡。库区淤积由快趋慢的原因为随着沙波逐渐向坝前推进,库容越来越小,坝前水深也越来越小,以致坝前水流流速有所增大,使得悬移质泥沙在坝前越发难以沉积。

由图 3 可知,库区达到冲淤平衡后的历年平均断面高程为 385.81 m,最大断面平均高程为 386.49 m,西北水科所的正态河工模型试验结果为 386.41 m,因此变态模型所得的平衡河床与西北水科所试验结果较为接近。试验研究表明模型设计合理,模型比尺选定合适,选用天然沙作为模型沙也是合理的。这为灞河橡胶坝群工程河工模型试验结果的正确性提供了可靠保证。

4 结 语

本河工模型试验模型沙设计是在满足悬沙悬移相似并兼顾床沙起动相似两个条件下,根据温度不同其黏滞系数不同的原理,改变温度使其可使用粒径稍大的天然沙作为模型沙模拟粒径太小情况下的原型沙。计算表明悬沙模型沙与原型沙满足沉速相似要求。设计选配的推移质模型沙,起动流速比尺与水流流速比尺接近,满足起动相似要求。通过对灞河河工模型进行试验验证,证明了模型沙选择合理,因此利用水流黏滞性选择模型沙是对全沙模型沙的一种新的尝试,可供类似工程参考借鉴。

参 考 文 献:

- [1] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 68-70. (ZHANG Rui-jin. River sediment dynamics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1998: 68-70. (in Chinese))
- [2] 尹健梅, 程伍群, 严磊, 等. 滦河迁西县城段河工模型试验的模型沙设计[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(2): 42-44. (YIN Jian-mei, CHENG Wu-qun, YAN Lei, et al. The model sands design of the river model test of Luan River reach through Qianxi county[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(2): 42-44. (in Chinese))
- [3] 杨亚伦, 戴梅. 南水北调中线淳沱河河工模型试验模型沙的选择与设计[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 17-20. (YANG Ya-lun, DAI Mei. Model sand's design and choice of the Hutuohe River model experiment in the South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 17-20. (in Chinese))
- [4] 王勤香, 何江. 南水北调中线与安阳河交叉工程河段概化模型[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 129-131. (WANG Qin-xiang, HE Jiang. South-to-North Water Transfer Project and Anyang River crossing project of generalized model[J]. Yangtze River, 2007, 38(6): 129-131. (in Chinese))
- [5] 杨华, 吴明阳, 刘国亭. 波流泥沙淤积模型相似律及选沙研究[J]. 水道港口, 1998(4): 31-39. (YANG Hua, WU Ming-yang, LIU Guo-ting. Study on model similarity of sediment accumulation under the joint action of wave of current and model

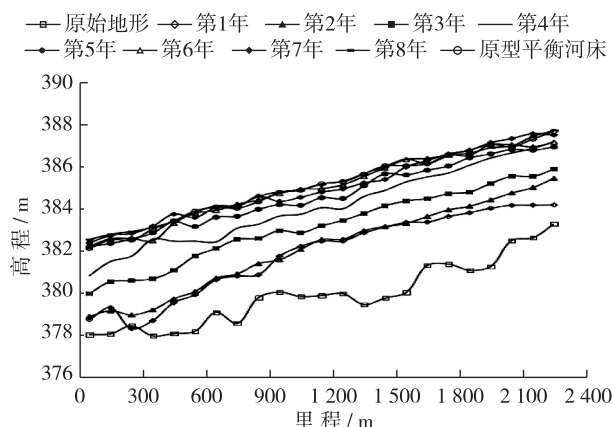


图 3 试验河床的变化与验证平衡河床对比

Fig. 3 Comparison between experimental river bed evolution and validation of balancing riverbed

- material selection[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1998(4): 31-39. (in Chinese))
- [6] 汪明娜,孙贵州,郑文燕. 新型塑料合成沙物理和运动特性试验研究[J]. 科技导报, 2007, 25(10): 39-43. (WANG Ming-na, SUN Gui-zhou, ZHENG Wen-yan. Experimental research on physical and kinetic characteristics of the new compound sand made from plastic[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(10): 39-43. (in Chinese))
- [7] 黄志文,鲁博文,邬年华. 塑料模型沙起动流速试验研究[J]. 江西水利科技, 2012, 38(1): 16-19. (HUANG Zhi-wen, LU Bo-wen, WU Nian-hua. Study on incipient velocity of sediment in model test[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2012, 38(1): 16-19. (in Chinese))
- [8] 李发政,孙贵州,渠庚. 长河段河工模型时间变态影响及水沙过程控制方式研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 75-80. (LI Fa-zheng, SUN Gui-zhou, QU Geng. Research on influence of time scale distortion and control mode of water-sediment process in long river reach physical model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(3): 75-80. (in Chinese))
- [9] 李涛,蒋思奇,李清珍,等. 小浪底水库动床模型实验研究[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2012. (LI Tao, JIANG Si-qi, LI Qing-zhen, et al. Research on movable-bed model tests of Xiaolangdi reservoir on Yellow River[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012. (in Chinese))
- [10] 高亚军,窦希萍. 波浪作用下细颗粒泥沙密实起动试验[J]. 水利水运工程学报, 2004(1): 49-52. (GAO Ya-jun, DOU Xi-ping. Experiment on compact process and threshold of fine sediment under wave action[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(1): 49-52. (in Chinese))
- [11] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京:水利电力出版社, 1990. (XIE Jian-heng. River simulation[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990. (in Chinese))
- [12] 魏炳乾,王新宏,吴巍,等. 西安市浐灞河橡胶坝群工程河工模型试验研究报告[R]. 西安:西安理工大学, 2007. (WEI Bing-qian, WANG Xin-hong, WU Wei, et al. The research report of river model experiment of rubber dam group of Chanba River in Xi'an[R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))

Model sand selection based on water flow viscosity

WEI Bing-qian¹, GONG Xiu-xiu¹, YAN Pei¹, WANG Fei¹, PANG Jie², HU Hong-sheng¹

(1. College of Hydraulic and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China)

Abstract: For the studies of the total-load movable-bed model tests, the design of the model sand has become a key to the whole model testing. As the prototype sediment particle size is much small, ignoring the temperature differences between the model sand and the prototype sand, it is difficult to get the suitable natural model sand if the particle size of the natural sand calculated by the model scales is too small. So by controlling the flow temperature for the model experiments, under the conditions of different temperatures and different water flow viscosities, the reasonable sediment particle size can be got, so as to select optimized model sand in conditions satisfying suspension similarity. The sediment settling velocities and sediment settling scales have been simulated under the conditions of original and variable temperatures. And the model testing analysis results show that the choice of the model sand particle size in variable temperature conditions is available, and that the natural coarse sand used for simulation of the prototype finer sand not only meets the similarity requirements of the settling velocities, but the suspension similarity as well. The results of model testing validation indicate that the model sand selection has met the requirements of design and that the model design is reasonable.

Key words: flow viscosity; movable-bed model tests; model sand; particle size; suspension similarity