

基于沙粒佛汝德数相似原理推算沙波河床上推移质输沙率

魏炳乾¹, 孙小军¹, 早川博²

(¹ 西安理工大学 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 陕西 西安 710048;

² 北见工业大学 土木开发工学科, 日本 北见 090-8507)

[摘要] 基于沙粒佛汝德数相似原理, 首先推导出利用模型试验结果估算原型沙波河床上推移质输沙率的推算公式; 然后塑造与原型较为一致的床面形态, 利用模型试验对推算公式进行了验证。结果表明, 在保证原型与模型的粒径比尺较大, 且模型与原型床面形态一致的条件下, 运用该方法推算沙波河床上的推移质输沙率时, 可以取得较为满意的结果。

[关键词] 沙粒佛汝德数相似原理; 推移质输沙率; 沙波河床; 模型试验

[中图分类号] TV142+.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)06-0207-04

Estimation of bed load transport rate based on grain Froude similarity considering the existence of sand waves

WEI Bing-qian¹, SUN Xiao-jun¹, HIROSHI Hayakawa²

(¹ The Key Lab of Northwest Water Resource and Environment of MOE at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

² Kitami Institute of Technology, Kitami 090-8507, Japan)

Abstract: It is very important for reservoir management to estimate the sedimentation amount deposited in a reservoir. In this paper, firstly, the formula for estimating the bed load transport rate in the bed of sand waves of prototype by model experiment based on the similarity of grain Froude number was inferred. Secondly, the bed forms similar to the prototype were built, and the formula was verified by using model experiment. Results showed when the ratio of grain diameter in the prototype and model was great enough, and the bed form in the model was similar to that in the prototype, a satisfactory result could be obtained by using the estimation formula to estimate the bed load transport rate of the sand wave bed.

Key words: grain Froude similarity; bed load transport rate; sand wave bed; model experiment

水库清淤排沙和河渠疏浚工程措施的实施频度与地点的依据之一, 是泥沙的淤积量及淤积位置。目前, 泥沙淤积量的测报方法主要有: 断面法或地形法。该方法是大中型水库泥沙淤积量测算的常用方法, 其淤积量依据前后两期的库容互差获得, 此法虽然操作简单, 但受前提假设的制约, 精度难以保

证^[1]。输沙量平衡法。该方法是根据蓄水后入库水文站逐年输沙量, 利用出、入库站在蓄水前建立的沙量关系, 推求出出库水文站蓄水后逐年假定未受水库蓄水影响的输沙量, 并与出库站相应逐年实测输沙量相减, 其差值即为逐年淤积量, 各年份的淤积量累加即为水库蓄水后某一时段的总淤积量, 该方

[收稿日期] 2006-08-01

[基金项目] 陕西省教育厅科学研究计划项目(04JK230)

[作者简介] 魏炳乾(1963-), 男, 陕西兴平人, 副教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

法在龙羊峡水库泥沙淤积量估算上得到了论证和应用^[2]。GPS + GIS + 测深仪方法。该方法虽然在精度上和作业效率上优于传统方法^[3],但仪器、软件等的配置成本较高,在一些中小型水库难以实现。

水力模型法^[4]。该方法运用沙粒佛汝德数相似原理,推导出推移质输沙率的推算公式以计算水库淤积量,并以实例进行了验证。以上 4 种方法中,方法和基于测量原理,其结果为全沙淤积量;方法属水文方法,其结果为悬沙淤积量,然后再按推悬比推求全沙淤积量;方法为河流动力学方法,其结果为推移质淤积量,主要适用于以推移质淤积为主的水库淤积问题。

文献[4]提出的基于沙粒佛汝德数相似原理,利用模型试验推算原型河川的推移质输沙率方法中,其沙粒佛汝德数的定义为:

$$Fr_* = \sqrt{\tau_*} = \frac{u_*}{\sqrt{sgd}}$$

式中: τ_* 为包括沙粒阻力和形状阻力在内的无量纲拖曳力; u_* 为摩阻流速; s 为泥沙的有效重度常数; g 为重力加速度; d 为平均粒径。文献[4]也仅对平整河床(河床无沙波)的情形进行了探讨,并用实例进行了验证,其验证结果优于按经验公式直接计算的结果。但是,当床面上有沙波存在时,仍用文献[4]的公式将会使推算结果偏大。考虑到床面沙波影响推移质的输移,本文针对沙纹或沙垄床面形态,在忽略形状阻力而考虑对推移质输移有重大影响的沙粒阻力的条件下,推导出了沙纹或沙垄河床上的推移质输沙率计算公式,并用大型直线水槽的试验结果作为原型进行验证,以期对沙波河床上推移质输沙率的计算和水库排沙疏浚工作提供支持。

1 沙波河床推移质输沙率的推算

1.1 沙粒佛汝德数相似原理

若以下标 p 、 m 、 r 分别表示原型量、模型量和比尺,定义模型与原型的无量纲沙粒佛汝德数相等为沙粒佛汝德数相似,那么沙粒佛汝德数相似的条件式为 $\sqrt{\tau_*} = 1$,即:

$$\tau_* = \frac{\tau_p}{\tau_m} = 1 \quad (1)$$

当床面不存在沙波,即平整床面时,Brown 型推移质输沙率公式可表示为:

$$\frac{q_B}{u_* d} = k(\tau_* - \tau_{*c})^p \quad (2)$$

式中: q_B 为以体积计的单宽推移质输沙率, τ_{*c} 为无

量纲拖曳力, k 为常数, p 为指数。根据比尺定义及式(1)可得:

$$q_{Bp} = k_r d_r^{\frac{3}{2}} q_{Bm} \quad (3)$$

式中: q_{Bp} 、 q_{Bm} 分别为原型、模型以体积计的单宽推移质输沙率, d_r 为粒径比尺, k_r 为常数比尺。

由文献[4]可知, $k_r = d_r^{0.4}$,代入式(3)有:

$$q_{Bp} = d_r^{1.0} q_{Bm} \quad (4)$$

由式(4)可知,若确定了粒径比尺 d_r 和模型的单宽推移质输沙率 q_{Bm} ,则可计算出原型单宽推移质输沙率 q_{Bp} 。由于式(4)是建立在河床无沙波情形下的推移质输沙率,当河床有沙波时难以适用。

1.2 沙波河床上推移质输沙率的推算公式

沙波河床上水流运动所受的动床阻力包含沙粒阻力和沙波阻力两部分,即:

$$\tau_* = \tau_{1*} + \tau_{2*} \quad (5)$$

式中: τ_{1*} 为动床阻力, τ_{2*} 为沙波阻力。由于床面形态随水流条件而异,相应的沙粒阻力与沙波阻力的大小对比也不同,因而动床阻力随之不同。以拖曳力为主要参数的梅叶-彼德推移质单宽输沙率公式表明^[5],对推移质输移起主要作用的是与沙粒阻力有关的拖曳力,而不是全部拖曳力,也即与沙波阻力有关的拖曳力对推移质的输移不起作用。本文将对推移质输沙率起作用的沙粒阻力称为有效拖曳力 τ_{*e} (有效阻力)。为了计算出不含形状阻力(相当于无沙波)的有效拖曳力,本文首先采用芦田-道上^[6]的流速分布公式计算有效摩阻流速 u_{*e} ,有

$$\frac{u}{u_{*e}} = 6.0 + 5.75 \log \left(\frac{R}{u_{*e}^{1+2\tau_*}} \right) \quad (6)$$

式中: u 为水流的平均流速, R 为水力半径。利用式(6)所得的 u_{*e} ,可按式(7)确定无因次有效拖曳力 τ_{*e} :

$$\tau_{*e} = \frac{u_{*e}^2}{sgd} \quad (7)$$

以上分析表明,当河床有沙波时,通过从总阻力中剥离出无因次有效拖曳力 τ_{*e} 后,可采用式(4)计算推移质输沙率。虽然式(4)推算的原型推移质输沙率 q_{Bp} 为有效拖曳力作用下的推移质输沙率,但也可认为是包含形状阻力影响的推移质输沙率。本文针对沙纹、沙垄的床面形态,使模型与原型的 τ_{*e} 相等,然后用模型的推移质输沙率对原型的输沙量进行验证。

2 模型试验分析

试验所用直线水槽的宽为 30 cm,长为 14 m,水

槽纵坡降可以调节。试验水槽中铺沙厚度 7 cm, 铺沙平均粒径 0.022 cm。为了使水槽河床上出现沙纹和沙垄的小尺度河床波形态, 水槽坡降 I 在 $1/300 \sim 1/500$ 变化时, 根据加德-拉吉的小尺度床面形态判别图^[7] (图 1), 可得相应坡降时的水深值。图 1 横纵坐标轴的 I/s 和 R/d 均为无量纲量 (s 为泥沙的有效重度常数, d 为平均粒径)。对于某一设定坡降, 可根据图 1 确定使床面形态从沙纹、沙垄到平整床面的水深, 流量按 0.25 L/s 或 0.5 L/s 间隔递增。各试验的平均水位 H 用测针测定, 河床高程 Z 用自制的河床地形测量装置测定, 则模型水深 $h_m = H - Z$ 。推移质输沙率是在各试验放水 30 min, 河床达到冲淤平衡后在水槽下游出口采集所排的泥沙, 并烘干称质量获得。

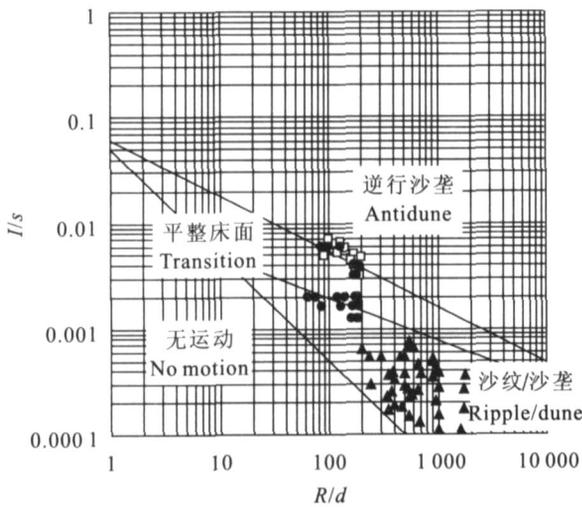


图 1 加德-拉吉小尺度床面形态判别图

● 本次试验结果; ○ 与本试验条件基本相同的文献[8]的试验结果; △ 文献[9-10]的试验数据

Fig. 1 Small scale bed form diagram of Garde-Raju

● Author's experiment result; ○ Results of Kinui Shinohara's experiment; △ Results of Guy and Nordin's experiments

由图 1 可知, 本试验除部分数据表明床面形态为沙纹或沙垄外, 仍有部分试验数据和 Shinohara 等^[8]的基本一致, 表明床面形态为平整床面或逆行沙垄。本文主要讨论的沙纹、沙垄床面形态下的水流条件属于低水流能态区, 水流佛汝德数 Fr 小于 0.8。

由于试验的沙粒雷诺数 Re_s 小于 20, 可判断床面形态为沙纹河床。要确定式 (4) 中的 q_{Bp} , 即原型以体积计的单宽推移质输沙率, 只要通过试验确定了无因次有效拖拽力 τ_* 与其作用下的推移质输沙率 q_{Bm} 的关系式即可。因此, 可将试验测定的 q_{Bm} 和 τ_* 点绘于图 2, 利用最小二乘法原理, 得:

$$q_{Bm} = 4.41 \tau_*^{1.63} \quad (8)$$

式中: q_{Bm} 为以质量计的单宽推移质输沙率 ($g/(cm \cdot s)$)。由于本试验中, 大值的 τ_* 数据不足, 所以引入了 Shinohara 等^[8]的试验数据, 将式 (8) 代入式 (4) 后可得无量纲有效拖拽力作用下的原型推移质输沙率为:

$$q_{Bp} = 4.41 d_r^{11/10} \tau_*^{1.63} \quad (9)$$

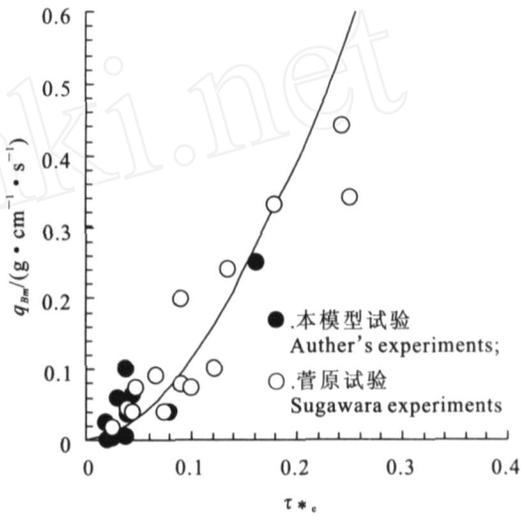


图 2 模型推移质输沙率 q_{Bm} 与无量纲有效拖拽力 τ_* 的关系

Fig. 2 Relation of q_{Bm} and τ_* in the model experiments

3 沙波河床上的推移质输沙率验证

为了验证式 (9) 的结论, 本研究采用大型水槽试验的推移质输沙率作为原型。本文采用的原型有: (1) Guy 等^[9]的试验结果, 其试验条件为: 水槽宽分别为 60.96 cm 和 243.84 cm, 床沙粒径分别为 0.019, 0.027, 0.028, 0.032, 0.033, 0.045, 0.047 和 0.054 cm 等 8 种。(2) Nordin^[10]的试验结果, 其试验水槽宽 244 cm, 床沙粒径 0.114 cm。

将以上 2 种大型水槽的试验数据点绘于图 1, 用符号“○”表示。这些试验所塑造床面形态与作为模型值的本试验床面形态一致, 即均为沙纹和沙垄床面形态。

图 3 为模型与原型无量纲有效拖拽力一致时的推算值与原型值的比较。其中图 3(a) 和图 3(b) 的原型值分别为 Guy 等^[9]槽宽 60.96 cm 和 243.84 cm 时的研究结果, 图 3(c) 为 Nordin^[10]在槽宽 244 cm 时的试验结果。由图 3 可知, 图 3(a) 和图 3(b) 的推算值大于原型值, 这是因为: (1) 作为原型的 Guy 等^[9]的试验中, 其粒径与本试验所用粒径较为接近, d_r 均为 1。(2) 式 (4) 中所用 k_r 与 d_r 的关系式是文献[4]按试验结果回归分析所得, 虽然从理论

上讲,沙粒佛汝德数相似中,当 $d_r = 1$ 时 k_r 必须为 1,但从文献[4]的试验结果不难发现, $d_r = 1$ 时 k_r 值多小于 1。本文所用 Guy 等^[9]的试验也是如此, k_r 值也较回归分析时的小,所以估算的推移质输沙率偏大。(3)从图 1 可知,作为原型的床面形态基本为

沙纹或沙垄,而模型的床面形态除部分试验结果与原型一致外,另一部分数据表明床面为动平整或逆行沙垄。已有研究表明^[5],逆行沙垄时的输沙率小于沙纹河床时的推移质输沙率,因此由模型估算的输沙率小于原型值。

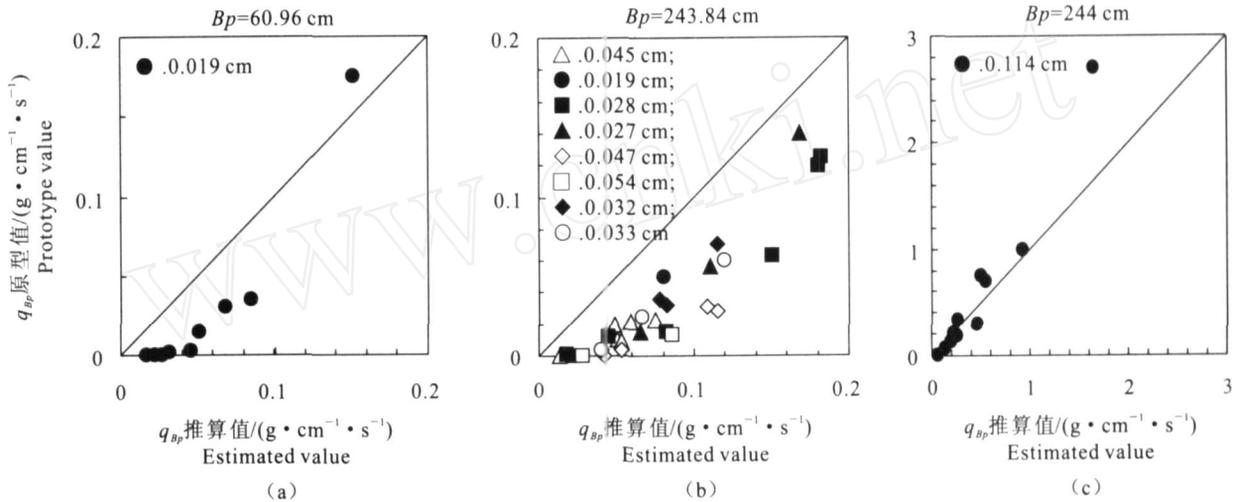


图 3 推移质输沙率原型值与推算值的比较

Fig. 3 Comparison between prototype value and estimated value of bed load transport rate

图 3(c) 的推算结果与原型值符合较好。这是因为 Nordin^[10]试验中 $d_r = 5.1$, 较 Guy 等^[9]试验的 d_r 大,求出的 k_r 与用回归式 $k_r = d_r^{0.4}$ 所得值较为符合,所以估算结果的精度较好。

综上所述,如果原型为以推移质输沙为主的实际河川, d_r 必然远大于 1,此时所得 k_r 与回归关系可能符合较好,在保证模型所塑造的床面形态与原型基本一致的前提下,则推移质输沙率的推算精度可望得到保证。

4 结束语

本文基于沙粒佛汝德数相似原理,对沙波河床上推移质输沙率的推估方法进行了探讨。结果表明:(1)推移质输沙率仅与沙粒阻力有关,用本文的方法不但可以推估原型为平整床面(无沙波)时的推移质输沙率,也可预测沙纹、沙垄床面上的推移质输沙率。(2)推算精度取决于原型与模型的粒径比尺 d_r , d_r 越大,则所求推移质输沙率公式中的系数比尺 k_r 与回归分析的结果越接近,进而有望保证推移质输沙率的推算精度。

[参考文献]

[1] 张红梅,赵建虎. 水库库容和淤积测量技术研究[J]. 水利学报,

2002, 315(12): 33-36.

- [2] 高学军,冯玲. 龙羊峡水库泥沙淤积量估算[J]. 泥沙研究, 2002(1): 78-80.
- [3] 周建郑,杨中利. GPS 实时动态测量在故县水库水下地形测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2002, 22(3): 32-34.
- [4] 魏炳乾,内岛邦秀,早川博,等. 根据沙粒佛汝德数相似原理推算推移质输沙率[J]. 黑龙江水专学报, 2000, 27(4): 21-24.
- [5] Meyer Peter E, Miller R. Formula for bed load transport rate[C]. Stockholm: Proceedings of 2nd General Meeting, IAHR, 1948: 39-64.
- [6] 芦田和男,道上正规. 移动床流れの抵抗と扫流砂量に関する基础的研究[C]. 日本土木学会论文报告集. 东京:日本土木学会水理委员会, 1972: 59-69.
- [7] Garde R J, Albertson M L. Characteristics of bed forms and regimes of flow in alluvial channels[R]. Colorado: Colorado State University, 1959: 18-27.
- [8] Shinohara K, Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of the open channels and rivers[J]. Reports of Research Institute for Applied Mechanics, 1959, 7(25): 15-44.
- [9] Guy H P, Simons D B, Richardson E V. Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956 - 1961 [R]. Washington: United States Government Printing Office, 1966: II-196.
- [10] Nordin C F. Flume studies with fine and coarse sands [R]. Washington: United States Government Printing Office, 1976: 76-762.