

鄱阳湖实体动床模型设计

黄志文, 邬年华, 许新发

(江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘要: 模型沙选择是动床模型设计的关键因素. 鄱阳湖模型变率大、入湖泥沙细, 动床模型宜选用轻质模型沙. 本文采用泥沙运动相似条件的研究成果, 进行模型沙粒径比尺的初步设计, 结合水槽起动力速试验, 选取适合的模型沙, 并和国内几种轻质塑料沙起动力速计算公式对比, 推荐了估算塑料沙起动力速的计算公式. 经选取的模型沙满足起动力速相似, 全沙相似条件较好, 各相似比尺合理, 为提高动床模型试验模拟精度奠定了基础.

关键词: 鄱阳湖; 实体模型; 轻质塑料沙; 动床设计

中图分类号: TV131.61+6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2015)02-0099-04

1 鄱阳湖模型概况

鄱阳湖位于江西省的北部、长江中游南岸, 承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五河及博阳河等支流来水, 经调蓄后由湖口注入长江, 是一个过水型、吞吐型、季节性湖泊。

鄱阳湖模型试验研究基地湖区模型主要模拟范围包括鄱阳湖湖区(指湖口水位站防洪控制水位 22.50 m (冻结吴淞高程)所影响的环鄱阳湖区)、五河尾闾、湖口及部分长江段(武穴至彭泽河段, 长约 100 km), 鄱阳湖湖区实体模型示意图见图 1。模型平面比尺 1:500, 垂向比尺 1:50, 变率 e 为 10。试验模型采用露天模型, 最大长度 346 m, 最大宽度 140 m, 最小宽度 6 m, 模型占地面积 60 000 m², 其中模型水面面积约为 18 000 m², 模型平均水深约 17 cm。

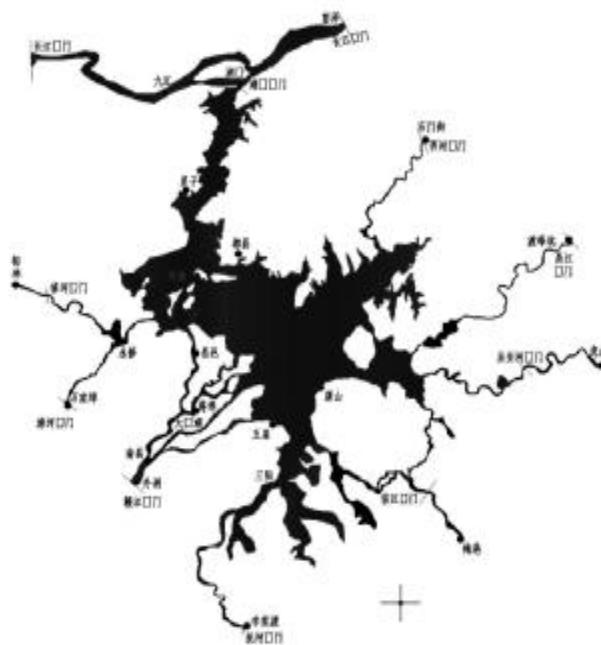


图 1 鄱阳湖湖区实体模型示意图

2 泥沙模型相似条件

2.1 水流运动相似

(1) 弗氏数相似(重力相似)

$$\alpha_U = \alpha_h^{1/2} \quad (1)$$

(2) 阻力相似(阻力重力比相似)

2.2 泥沙运动相似

(1) 起动相似

$$\alpha_n = \alpha_h^{2/3} / \alpha_L^{1/2} \quad (2)$$

$$\alpha_{U_0} = \alpha_U \quad (3)$$

(2) 泥沙悬移相似

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会基金项目(No.51369011)。

作者简介: 黄志文(1979-), 男, 硕士, 高级工程师。

$$\alpha_{\omega} = \alpha_U / e^m \quad (4)$$

悬移质泥沙运动相似条件有两个:沉降相似和悬浮相似。若按泥沙沉降相似,沉速比尺应满足:

$$\alpha_{\omega} = \alpha_U \frac{\alpha_h}{\alpha_1} \quad (5)$$

若按泥沙悬浮相似,有:

$$\alpha_{\omega} = \alpha_U \left[\frac{\alpha_h}{\alpha_1} \right]^{1/2} \quad (6)$$

对变态模型从这两个相似条件得到的结果难以同时满足要求,需做适当取舍。而鄱阳湖流域五河来沙多数是以淤积为主,因此重点考虑泥沙的悬浮相似。指数 m 是原型泥沙悬浮指标的函数,变化区间(0.5, 0.75),平均可取 0.63^[1]。

(3)悬移质河床变形相似

$$\alpha_{t_{z(悬)}} = \frac{\alpha_L \alpha_{\gamma_0}}{\alpha_V \alpha_S} \quad (7)$$

(4)推移质河床变形相似

$$\alpha_{t_{z(推)}} = \frac{\alpha_L \alpha_{\gamma_0} \alpha_h}{\alpha_g} \quad (8)$$

2.3 起动流速 U_0 的确定

(1)原型沙起动流速 U_{0p}

目前大多数细沙起动流速公式缺少天然河流实测资料检验,原则上不能用于估算原型天然河流。如果有实测推移质输沙率与流速关系曲线,可将其顺势延长至输沙率接近为 0 的点,近似认为此点的流速就是起动流速;如果没有实测资料,李昌华和窦国仁根据经验都曾建议采用沙玉清公式估算^[2-3],即

$$U_0 = 0.512 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} [D^{3/4} + 2.5(0.7 - \varepsilon)^4 / D]^{1/2} h^{1/5} \quad (9)$$

式中: γ_s 及 γ 为泥沙及水的容重(kg/m^3); D 为泥沙粒径,取 D_{50} 以 mm 计; ε 为淤沙孔隙率,一般取 0.4; U_0 、 h 分别以 m/s 、 m 计。天然河流的来水、来沙及床沙粒径都是变化的,因此无论用什么方法确定 U_0 也都是近似的。

(2)模型沙起动流速 U_{0m}

模型沙无粘性可用沙漠夫公式估算,即

$$U_{0m} = 1.14 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gD} \left| \frac{h}{D} \right|^{1/6} \quad (10)$$

模型沙有粘性可仍用沙玉清公式。模型沙起动流速不仅与 γ_s 及 D 有关,而且还与材料的物理、化学性质有关,仅能用于估算,求出原型和模型沙起动流速和流速比尺应较为接近,模型选沙基本合理,最后模型沙起

动流速还需要通过水槽试验进行确定。

3 悬移质粒径比尺设计

根据张瑞谨沉速公式反求出粒径比尺为:

$$\alpha_d = 0.0179 \frac{d_p \omega_p}{\nu \alpha_{\omega}} \left[\left[1 + 121.6 \frac{\gamma_{sm} - \gamma}{\gamma} g \nu \left(\frac{\alpha_{\omega}}{\omega_p} \right)^3 \right]^{1/2} - 1 \right] \quad (11)$$

原型沉速用沙玉清公式计算:

当粒径等于或小于 0.062 mm 时,在层流区沉速 ω 较成熟的理论公式采用斯托克斯公式计算:

$$\omega = \frac{g}{18} \frac{\gamma_{sm} - \gamma}{\gamma} \frac{d^2}{\nu} \quad (12)$$

当粒径为 0.062 ~ 2.0 mm 时,采用沙玉清紊流区天然沙沉速公式计算:

过渡期:

$$[\lg(S_s) + 3.790]^2 + [\lg(\varphi) - 5.777]^2 = 39.0 \quad (13)$$

沉速判数:

$$S_a = \frac{\omega}{g^{1/3} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{1/3} \nu^{1/2}} \quad (14)$$

粒径判数:

$$\phi = \frac{g^{1/3} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^{1/3} d}{\nu^{2/3}} \quad (15)$$

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (16)$$

当粒径大于 2.0 mm 时,采用沙玉清紊流区沉速公式计算:

$$\omega = 1.14 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (17)$$

4 模型沙选择和几何比尺

4.1 模拟范围

泥沙粒径模拟范围直接涉及模型试验成果。在河道演变过程中,悬移质中参与河床交换的泥沙粒径下限值在同一河段不同区域是不同的,对于主槽和流速较大的区域,粒径下限要粗些,对于洲滩、缓流区和回流区,粒径下限要细些。在模型选沙过程中模型沙粒径越细越难选沙,因为极细的沙存在絮凝现象,且不易满足起动相似,控制也不方便。为方便选沙,在满足试验研究成果的

基础上,尽量不模拟极细的泥沙。根据相关研究成果,鄱阳湖湖区床沙模拟下限为 0.01 mm,悬移质粒径下限模拟范围亦为 0.01 mm。

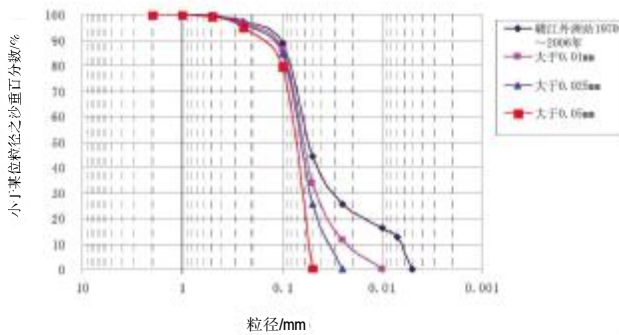


图 2 赣江入湖泥沙级配曲线

4.2 模型沙选择

4.2.1 起动流速试验

选取轻质塑料沙为模型沙,模型沙比重为 1.15 t/m³,干容重为 0.6 t/m³,在水槽中做起动流速试验,最后根据泥沙粒径比尺,经反复计算和配制的模型沙基本可满足起动和沉降相似,并使模型沙和原形沙级配曲线基本平行(见图 3)。以赣江入湖泥沙为例,按上面粒径比尺计算,粒径比尺 λ_d=0.49;表 1 为入湖赣江泥沙起动流速计算和试验值。

从表中,可以看出选用的模型沙,各个水深下,起动流速比尺接近流速比尺,基本满足起动流速相似条件,模型沙选取基本合理。

4.2.2 起动流速试验值与公式计算对比

根据文献^[4]中提供的塑料沙起动流速计算公式(18),文献^[9]王延贵提出的模型沙计算公式(19)和张瑞谨公式(20)分别计算出个模型沙起动流速,与实测值比较。

$$v_0 = k \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \quad (18)$$

$$v_0 = \left(\frac{h}{d} \right)^{1/7} \left(17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 0.000000275 \gamma_s^{0.8} \frac{10+h}{d^{0.331 \gamma_s^{0.8}}} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$v_0 = \left(\frac{h}{d} \right)^{0.14} \left(29d + 0.000000605 \frac{10+h}{d^{0.72}} \right)^{0.5} \quad (20)$$

式中: v₀为起动流速(m/s); d为沙样中值粒径(mm), γ_s为沙样比重(t/m³), γ为水比重(t/m³)。

公式(20)是主要以天然沙的起动流速资料为基础的,用于塑料沙(模型沙)的计算时,会出现很大的偏差;公式(18)和公式(19)相对较为准确,且计算结果较为相近,但与实测起动流速仍有一定的差距;仅从本文选取的轻质塑料沙来说,公式(18)存在不小偏差,所以在需要对模型沙起动流速的粗略预估时,推荐使用公式(19)。

4.3 模型比尺确定

由于原型实际上长期缺乏推移质泥沙观测资料,在试验中对推移质输沙进行定量模拟是相当困难的。不过,根据对原型情况分析后认为,由悬移质泥沙运动所引起的冲淤变化构成了湖区河床变形的主要部分,且推移质泥沙时常与悬移质泥沙交换,进入悬移质运动的行列中,因此本模型仅考虑悬移质输沙量变化的影响。另外,一般试验只模拟悬移质中的床沙质,但对于原型情况,悬移质中的冲泻质在河滩造床过程中起到了很大的作用。在试验中若相应扣除来沙量中的冲泻质,不仅使滩地淤积难以相似,而且还会使主槽变形产生偏离。因此本试验不再对悬移质中的床沙质和冲泻质加以区划。模型比尺见表 2。

表 1 原形沙和模型沙起动流速计算

原型沙		模型沙		比尺		
γ _s = 2.65 t/m ³		γ _s = 1.15 t/m ³		d ₅₀ = 0.124 mm		
d ₅₀ = 0.061 mm		d ₅₀ = 0.124 mm		α _d = 0.49		
H/m	V _f / (cm/s)	H/cm	V _f / (cm/s) (式 19 计算)	V _f / (cm/s) (试验)	α _{vf} (计算)	α _{vf} (试验)
2.75	54.29	5.5	8.66	8.18	6.27	6.55
5.25	61.79	10.5	9.64	9.11	6.41	6.69
7.75	66.79	15.5	10.29	9.72	6.49	6.77
10.25	70.64	20.5	10.78	10.18	6.55	6.84
12.75	73.79	25.5	11.18	10.56	6.60	6.89
15.25	76.48	30.5	11.52	10.88	6.64	6.93

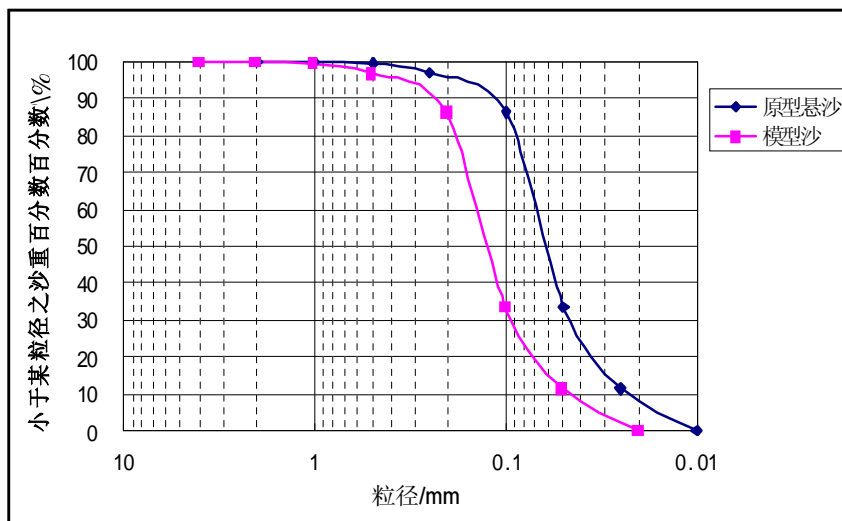


图 3 赣江来沙悬移质原型沙和模型沙级配曲线

表 2 湖区模型比尺汇总表

项目	名称	比尺符号及关系式	比尺数值
模型	平面长度、宽度	α_L	500
	水深	α_h	50
水流	流速	$\alpha_v = \alpha_h^{1/2}$	7.07
	糙率	$\alpha_n = \alpha_h^{2/3} / \alpha_L^{1/2}$	0.61
	流量	$\alpha_Q = \alpha_L \alpha_h \alpha_v$	176 750
	时间	$\alpha_t = \alpha_L / \alpha_v$	70.72
悬移质	沉速	$\alpha_\omega = \alpha_v \frac{\alpha_h}{\alpha_L}$	2.9~3.5
	粒径	α_d	0.25
	起动流速	$\alpha_{v0} = \alpha_v$	6.92~7.21
	扬动流速	$\alpha_{v0} = \alpha_v$	6.90~7.23
	含沙量	$^* \alpha_S = \frac{\alpha_{\gamma S}}{\alpha_{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}}}$	0.21
	干容重	α_{γ_0}	2.40
	冲淤时间	$^* \alpha_{t2} = \frac{\alpha_L \alpha_{\gamma_0}}{\alpha_v \alpha_S}$	784
沙质	沉速	$\alpha_\omega = \alpha_v \frac{\alpha_h}{\alpha_L}$	2.4~3.5
	粒径	α_d	0.21
	起动流速	$\alpha_{v0} = \alpha_\gamma$	6.92~7.21
推移质	单宽输沙率	$\alpha_{qb} = \frac{\alpha_{\gamma_0}^{2/3} \alpha_h}{\alpha_{\gamma_0}}$	73.92
	干容重	α_{γ_0}	2.40
	冲淤时间	$^* \alpha_{t1(沙)} = \frac{\alpha_L \alpha_{\gamma_0} \alpha_h}{\alpha_{qb}}$	811.69

注:带 * 的比尺具体数值由验证试验确定。