

珠江三角洲八塘尾潮汐河段动床模型设计

李福田, 王志良, 徐锡荣, 肖 洋, 周汝盛, 徐和兴, 唐洪武

(河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 根据八塘尾碍航浅滩位于潮汐河口段以及河床淤积既有推移质又有悬移质泥沙的特点, 模型设计从不稳定流的水流运动方程和连续方程、悬沙和底沙运动方程以及河床变形方程出发, 考虑河床泥沙的起动、沉降和含沙量的相似条件, 导出了潮汐河口悬沙和底沙冲淤模型试验相似律. 试验中, 潮汐放水过程按冲淤时间比尺控制, 单潮周期按水流时间比尺控制, 以保证水流运动相似. 验证试验表明, 模型设计、模型沙选择及时间比尺处理是合理的.

关键词 珠江三角洲; 八塘尾潮汐河段; 动床模型设计; 时间比尺

中图分类号 :TV149.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2000)02-0036-04

1 河道概况及水沙特性

八塘尾河段位于沙湾水道与浮莲岗水道交汇处. 由于这两条水道以锐角相交, 洲尾形成回流淤积, 从而造成沙湾水道转向浮莲岗水道的航道曲率半径小的碍航局面. 为解决通航问题, 需对洲尾浅滩切嘴工程诸多方案进行比较试验, 并提出合理的推荐方案.

沙湾水道造床动力是由径流和潮流形成的, 洪水期以径流为主, 多年平均流量约 $550 \text{ m}^3/\text{s}$, 山潮比汛期一般大于 1, 枯期一般小于 1. 浮莲岗水道作为狮子洋的一条支汊, 其山潮比与狮子洋基本保持一致, 汛期仅个别月份山潮比大于 1, 其余绝大部分时间山潮比小于 1. 八塘尾河段汛期泥沙主要来自北江. 北江多年平均输沙量为 817 万 t. 其中汛期输沙量占全年的 97%, 枯季泥沙主要由潮汐自海域挟带而来. 潮汐输沙对八塘尾河段的冲淤演变有重要的影响. 实测含沙量资料表明: 沙湾水道三沙口水文站涨潮最大含沙量为 $0.24 \text{ kg}/\text{m}^3$, 平均为 $0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$. 落潮最大含沙量为 $0.22 \text{ kg}/\text{m}^3$, 平均为 $0.14 \text{ kg}/\text{m}^3$. 悬沙中值粒径为 0.03 mm , 推移质中值粒径为 0.18 mm . 试验河段的河道概况见图 1, 动床试验范围及断面布置见图 2.

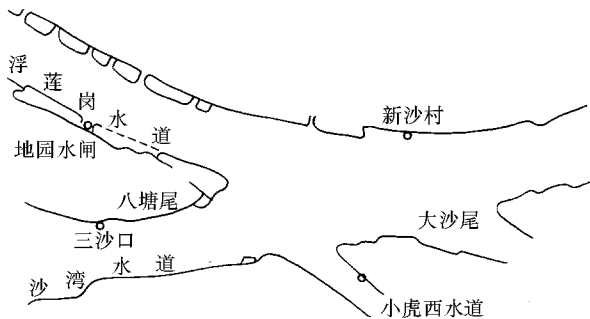


图 1 河道概况

Fig.1 Waterway survey

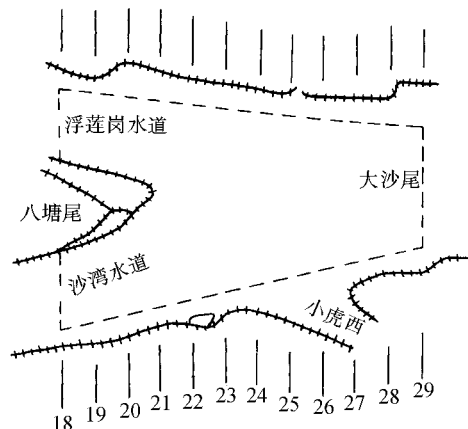


图 2 模型动床范围及断面布置

Fig.2 Scope of mobile bed and section arrangement

2 模型设计

根据试验任务的要求,模型的平面比尺和垂向比尺分别取 $\lambda_L = \frac{l_p}{l_m} = 200, \lambda_H = \frac{h_p}{h_m} = 70$, 因此模型变率 $\frac{\lambda_L}{\lambda_H} = 2.86$.

八塘尾河段河床演变的泥沙既有来自径流的悬沙和底沙又有潮汐流携带的悬沙,严格地讲,模型设计既要满足不稳定流的悬沙运动相似条件又要满足底沙运动相似条件. 考虑到本研究河段以悬沙淤积为主的特点,在模型沙选择和试验中均以悬沙为主、底沙为辅.

2.1 水流运动相似

由潮汐河道不稳定流运动方程 $-\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V|V|}{C^2 R}$ 导出的流速比尺、糙率比尺和时间比尺分别为

$$\lambda_V = \lambda_H^{1/2} \quad \lambda_n = \lambda_H^{2/3} / \lambda_L^{1/2} \quad \lambda_{t_1} = \lambda_L / \lambda_H^{1/2}$$

2.2 泥沙运动相似

根据潮汐河口一维不平衡悬沙输运方程 $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(AS)}{\partial t} Q = -\alpha\omega\beta(S - S_*)$ 和河床变形方程 $\frac{\partial(QS)}{\partial x} = -\gamma_0\beta\frac{\partial Z}{\partial t}$, 运用相似变换导出的泥沙沉降相似比尺、挟沙能力相似比尺和冲淤时间比尺分别为

$$\lambda_\omega = \lambda_H^{3/2} / \lambda_L \quad \lambda_S = \lambda_{S_*} \quad \lambda_{t_2} = \lambda_{\gamma_0} \cdot \lambda_L / (\lambda_S \lambda_V)$$

上述 $A, B, Q, S, S_*, \omega, \alpha, Z$ 和 γ_0 分别为过水断面面积、河宽、流量、断面平均含沙量、水流挟沙能力、沉降速度、泥沙沉降几率、河床高程和泥沙干容重.

底沙运动相似,根据窦国仁提出的单宽输沙率公式^[1] $q_{sb} = \frac{k_0}{C_0^2} \frac{\gamma_S \cdot \gamma}{\gamma_S - \gamma} (V - V_k) \frac{V^3}{g\omega}$ 和河床变形方程导出的输沙率相似比尺、起动流速比尺和底沙冲淤时间比尺分别为

$$\lambda_{q_{sb}} = \frac{\lambda_{\gamma_S}}{\lambda_{\gamma_S - \gamma}} \frac{\lambda_V^4}{\lambda_{C_0}^2 \cdot \lambda_\omega} \quad \lambda_V = \lambda_{V_k} \quad \lambda_{t_3} = \lambda_{\gamma_0} \cdot \lambda_H \cdot \lambda_L / \lambda_{q_{sb}}$$

式中: k_0 ——综合系数; C_0 ——无尺度谢才系数; γ_S 和 γ ——泥沙颗粒和水的容重; V ——平均流速; V_k ——用平均流速表示的泥沙起动临界流速; ω ——泥沙颗粒沉速.

2.3 模型沙选择

本模型推移质泥沙按起动相似条件选取,悬移质泥沙按起动相似和沉降相似选取. 经多种模型沙分析比较,选取中值粒径为 0.12 mm 的木粉作为推移质模型沙,选取中值粒径为 0.065 mm 的木粉作为悬移质模型沙. 木粉容重 $\gamma'_S = 11.5 \text{ kN/m}^3$, 木粉淤积干容重 $\gamma_0 = 4 \text{ kN/m}^3$.

原型和模型悬移质泥沙沉降速度采用沙玉清公式^[2]

$$\omega = \frac{1}{24} - \frac{\gamma_S - \gamma}{\gamma} g \frac{d}{\nu}$$

式中: d ——泥沙粒径; ν ——水流运动粘滞系数,其它符号含义同前.

由上式计算的悬移质泥沙沉降比尺为 $\lambda_\omega = 3.04$.

原型沙和模型沙的起动流速采用唐存本提出的计算公式^[1]

$$V_0 = \frac{m}{m+1} \left(\frac{h}{d}\right)^{1/m} \left[3.2 \frac{\gamma_S - \gamma}{\gamma} g d + \left(\frac{\gamma'}{\gamma'_0}\right)^{10} \frac{c}{pd} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中: $m = 4.7 \left(\frac{h}{d}\right)^{0.06}$, 天然河道 $m = 6$; $c = 2.9 \times 10^{-4} \text{ g/cm}$; $p = 1.02 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{s/cm}^4$; $\gamma'_0 = 16 \text{ kN/m}^3$; γ' ——泥沙干容重; h ——水深; d ——泥沙粒径.

用上式计算的起动流速比尺为 $\lambda_{V_0} = 8.03 \sim 8.41$. 这与要求值 8.36 极为接近.

2.4 对潮汐时间变态的处理

对于潮汐河口泥沙模型,为了满足泥沙的起动和沉降相似,不得不采用轻质沙,但导致 $\lambda_{t_2} > \lambda_{t_1}$, 出现时

间变态问题.若潮汐周期按 λ_{t_2} 均匀缩短,则潮型将变得极其尖瘦,流速过程会受到极大的歪曲,因此泥沙运动也难以相似.由于天然潮汐有大、中、小潮之分,模型不可能全部复演,因此选用若干代表潮来进行试验,从而为试验中合理处理 λ_{t_2} 和 λ_{t_1} 间的关系提供了条件.

为了解决采用轻质沙引起的时间变态问题,试验中选择包括大、中、小潮且具有周期代表性的连续潮型,按冲淤时间比尺 λ_{t_2} 控制总潮放水时间,按水流时间比尺 λ_{t_1} 控制单潮周期,以保证水流运动相似;也可取有实测泥沙资料且代表性较好的若干个潮组成基本单元,基本单元数即试验总潮汐时间应服从 λ_{t_2} 的要求.

3 验证试验

验证试验依据八塘尾河段1996年3月和1997年4月航道测图进行.两次测图时间间隔约13个月,两次测图水位均为-1.6m(珠江基准面).采用1996年3月河道地形作为动床起始地形,按照水流运动时间比尺和冲淤时间比尺确定潮流单元时间和总放水时间,连续施放由若干个枯水潮、中水潮和洪水潮组合成的验证潮流过程,同时按含沙量比尺计算的加沙量连续加悬沙和底沙.在试验中,用等深线法和动床地形仪施测河道地形,并与1997年4月原河道地形相比较.同时还对河道冲淤部位和冲淤量以及河床淤积泥沙级配进行了验证.模型冲淤地形与1997年4月实测河道地形绘于图3;典型断面冲淤验证成果见图4;断面冲淤量比较见表1.

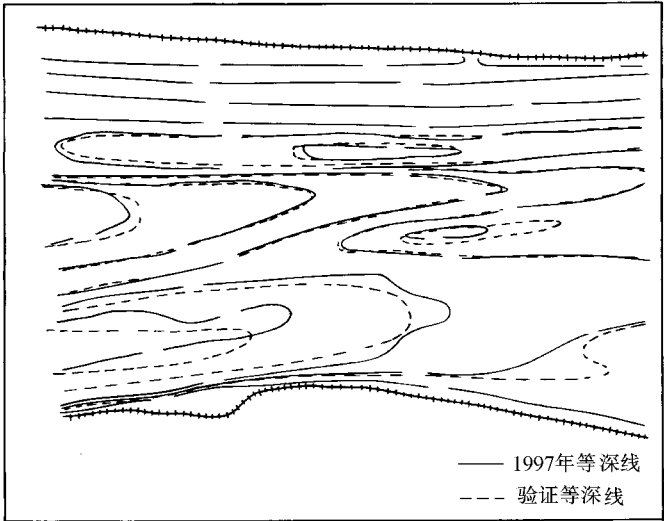


图3 动床地形验证示意图

Fig.3 Mobile bed topography test and verification

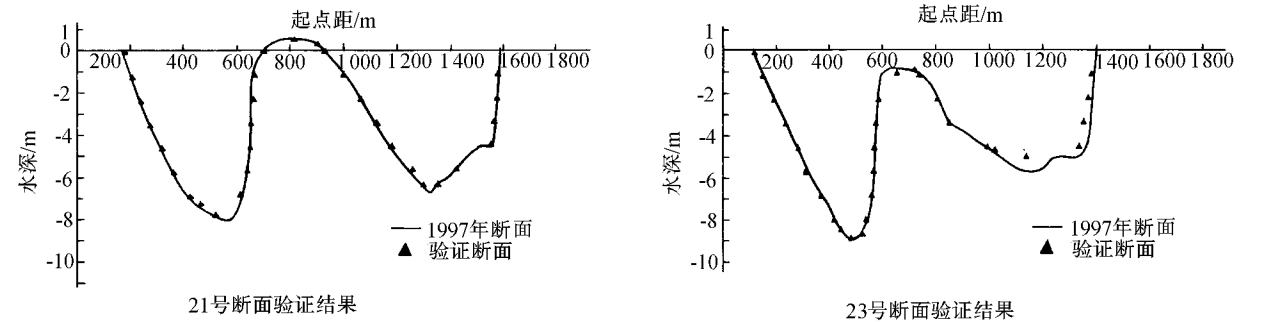


图4 典型断面冲淤验证

Fig.4 Erosion-siltation test and verification for a typical section

表 1 原型和模型断面冲淤量比较

断面号	原型			模型			误差/%	
	冲/m ³	淤/m ³	合计/m ³	冲/m ³	淤/m ³	合计/m ³	冲	淤
21	- 128.33	+ 207.42	+ 79.09	- 141.50	+ 247.37	+ 105.87	- 10	+ 19
22	- 118.94	+ 176.20	+ 57.26	- 102.95	+ 204.20	+ 101.25	+ 13	+ 16
23	- 86.50	+ 245.30	+ 158.80	- 101.20	+ 227.60	+ 126.40	- 17	- 7
24	- 71.55	+ 422.92	+ 351.37	- 56.95	+ 486.70	+ 429.75	+ 20	+ 15
25	0	+ 670.15	+ 670.15	- 35.08	+ 705.17	+ 670.09		+ 5
26	- 27.85	+ 932.52	+ 904.67	- 32.50	+ 808.51	+ 776.01	- 17	- 13
27	0	+ 474.50	+ 474.50	0	+ 586.12	+ 586.12		+ 24

上述验证试验结果表明,无论是河床的冲淤部位和典型断面冲淤量,还是河床淤沙的粒径级配,均与原型基本一致.由此可见,本模型相似比尺设计和模型沙选择是正确的,成果是可信的,冲淤时间比尺处理是合理的.

4 结 语

- a. 从不稳定流的水流运动方程、连续方程、悬沙和底沙的运动方程及河床变形方程出发,考虑到河床泥沙的起动、沉降和含沙量的相似条件,导出了潮汐河口悬沙和底沙冲淤模型试验相似比尺.
- b. 验证试验表明,在满足水流和泥沙相似律的前提下,抓住造成本河段河床冲淤是由悬移质引起的这一主要矛盾,并按模型设计时间比尺放水试验,不仅可使河床冲淤部位、冲淤数量与原型基本一致,而且淤沙粒径级配也与原型相似.可见,本模型相似比尺设计是合理的.
- c. 在变态潮汐河段动床模型试验中,水流运动时间比尺和泥沙冲淤时间比尺相差较大,为了解决因时间比尺变率引起的动床流速场与定床流速场不相似问题,潮单元组合和放水时间比尺分别按水流运动时间比尺和冲淤时间比尺控制.

参考文献：

[1] 中国水利学会泥沙专业委员会.泥沙手册[M].北京:中国环境科学出版社,1992.176~164.
[2] 武汉水利电力学院.河流泥沙工程学[M].北京:水利电力出版社,1980.26.

Design of Tidal Movable Bed Model for Batangwei Reach in Pearl River Delta

LI Fu-tian, WANG Zhi-liang, XU Xi-rong, XIAO Yang, ZHOU Ru-sheng, XU He-xing, TANG Hong-wu
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract Batangwei is located at the estuary of the Pearl River Delta. It is not only affected by tide but also by flow from the upstream. Therefore, the similitude conditions are very complicated. The similitude of suspended sediment for the Batangwei reach is presented in the paper. The time scale for flow, scouring, and deposition is discussed. The monitoring-controlling system of unsteady flow with multi-boundary is adopted.

Key words Pearl River Delta; Batangwei tidal reach; movable bed model; time scale