

淤泥质海床上人工岛水流冲刷试验

王 俊, 莫思平, 徐 群

(南京水利科学研究院 水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 港珠澳大桥人工岛局部冲刷是大桥工程设计亟待解决的关键技术问题。在现场资料分析与物理模型验证的基础上, 采用正态系列模型延伸法, 在潮汐宽水槽中研究了淤泥质海床上人工岛周围流态变化和局部冲刷的发展过程。研究结果表明, 在洪季大潮情况下, 东、西人工岛最大冲深分别为10.3 m和9.0 m, 冲刷坑集中在岛桥结合部和隧道防护段及防撞墩附近; 最大冲刷深度与人工岛的几何形状、流速、工程水域的沙土特性以及水深等相关, 冲刷坑的平面形态则与岛型、水流夹角、涨落潮流速差以及潮流历时有关。

关键词: 港珠澳大桥; 系列模型; 局部冲刷; 人工岛

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0007-004

Muddy seabed scouring test on artificial island

WANG Jun, MO Si-ping, XU Qun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Local scour of the Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge artificial island is a key technical problem to be solved in bridge project design. Based on the field data analysis and physical model validation, using the normal extension method of series models, we study the flow pattern variation and local scour around the artificial island. The results show that in the flood season of spring tide situation, the maximum scouring depth of the east and west island is 10.3 m and 9.0 m respectively, and the scour concentrates in the island bridge and tunnel with protective section and near the anti-collision pier; The maximum scour depth relates to the artificial island geometry, flow velocity, sand characteristics of the engineering water area and depth of such related, and the scouring plane form relates to the island type, flow angle, speed difference of the rising and falling tide, and tidal duration as well.

Key words: Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge; series model; local scour; artificial island

流域来沙中一部分粒径比0.06 mm细得多的黏土和粉沙成为冲泻质, 以悬移形式一泻千里, 进入河口环境遇盐水后絮凝沉降, 使大量的细颗粒有时也可能含有机质, 在絮凝状态下粘结, 成为黏性泥沙。黏性泥沙包括淤泥质、浮泥和黏土, 统称为淤泥。我国大江大河较多, 在河口及临近海岸多数为淤泥质沉积物, 在河口治理、港口建设、航道维护等海岸工程中都要遇到复杂的淤泥问题, 而淤泥具有与无黏性泥沙不同的起动和沉

降特点、固结结构和水力特性^[1]。

港珠澳大桥的人工岛两端分别连接桥和隧道, 所在海区的底质为淤泥质黏土, 在这种海域建造的人工岛周围将发生局部冲刷, 其局部冲刷具有如下特点: 一是人工岛所在处的水深远远小于人工岛直径, 人工岛周围的整个流场将要发生变化; 二是底质为淤泥、淤泥质黏土和淤质黏土夹砂, 成分复杂, 具有与细粉砂不同的物理力学性质, 泥沙的起动机理亦不同。

收稿日期: 2012-10-30

作者简介: 王俊(1978—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事河口海岸工程研究。

1 模型设计

由于模型和原型泥沙运动的不相似，会导致试验成果发生偏差，可以通过做由小到大的系列模型，将试验结果外延来加以消除。这样的模型试验方法称为系列模型延伸法，实质上是利用不相似的模型取得相似试验结果的一种有效方法。

1.1 系列模型延伸法原理^[2-3]

设完全符合相似条件的正态模型几何比尺为 λ_{H_0} ，系列模型拟选用的不相似模型几何比尺为 λ_H 。当模型完全满足正态模型相似条件时， $\lambda_{h_s}=\lambda_H=\lambda_{H_0}$ (λ_{h_s} 为冲刷深度比尺)；而当模型偏离正态模型相似条件时 $\lambda_{h_s}\neq\lambda_H\neq\lambda_{H_0}$ ， λ_{h_s} 之所以偏离 λ_H ，是由于 λ_H 偏离 λ_{H_0} 造成的， λ_{h_s} 偏离 λ_H 的程度取决于 λ_H 偏离 λ_{H_0} 的程度，它们的函数关系如下：

$$\frac{\lambda_{h_s}}{\lambda_H} = \left(\frac{\lambda_{H_0}}{\lambda_H}\right)^a \tag{1}$$

用原型沙进行系列模型试验时， $\lambda_{H_0}=1$ ，试验结果延伸到 $\lambda_H=\lambda_{H_0}=1$ ，即为原型冲刷结果。模型沙为非原型沙时， $\lambda_{H_0}\neq 1$ ，而是等于按相似关系求出的一个数值，系列模型结果应延伸至 $\lambda_H=\lambda_{H_0}$ ，此时 $\lambda_{h_s}=\lambda_H$ 。

冲淤深度比尺 $\lambda_{h_s}=h_p/h_m$ ，式(1)可改成为：

$$h_p = h_m \lambda_H \left(\frac{\lambda_{H_0}}{\lambda_H}\right)^a \tag{2}$$

在对数纸上以 h_m 为纵轴， λ_H 为横轴，作图后成直线关系，当 $\lambda_H=\lambda_{H_0}$ 时， $h_p = h_m \lambda_H$ 即可求出原型冲刷深度 h_p ；亦可直接利用两个比尺模型的 h_m 及 λ_H 值求出 a 值，即：

$$a = [\lg(h_{m_2}\lambda_{H_2}) - \lg(h_{m_1}\lambda_{H_1})] / (\lg\lambda_{H_2} - \lg\lambda_{H_1}) \tag{3}$$

再用式(4)直接计算原型冲刷深度：

$$h_p = h_m \lambda_H \left(\frac{\lambda_{H_0}}{\lambda_H}\right)^a \tag{4}$$

1.2 宽水槽设计

大比尺局部正态模型利用大型往复流宽水槽，长50 m，宽24 m。该模型采用尾门式生潮系统和双向泵往复流系统联合运作，潮位和潮流都实现了闭环控制，可以产生试验所需要的潮汐水流过程。模型平面尺度和布置见图1。

1.3 模型沙选择

由于本次试验是研究人工岛附近冲刷坑深度

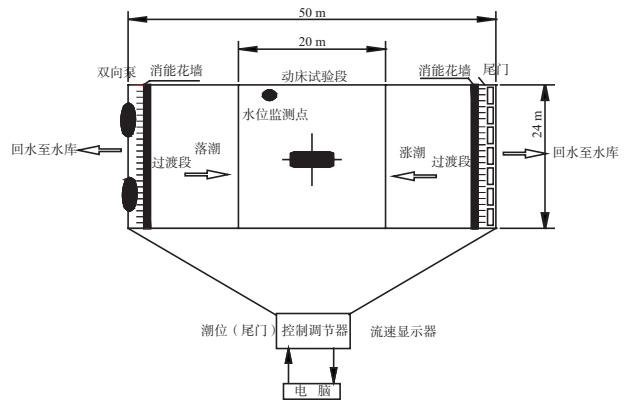


图1 往复流宽水槽

及形态，因此模型沙选择主要考虑泥沙起动相似 $\lambda_{v_c}=\lambda_v$ ，以及水下泥沙休止角的相似。根据港珠澳大桥人工岛附近的多个孔原状土取样结果，分别对表层及以下各层的物理力学指标进行统计分析，并对各层进行概化处理，确定人工岛处具有代表性的分层特点，试验或计算各土质的起动流速。试验时为考虑工程安全，主要考虑淤泥、淤泥质黏土和淤泥质黏土夹砂影响。在水深12~33 m时，起动流速为1.01~3.35 m/s。

人工岛区域床面底沙中值粒径为0.005~0.018 mm，原状土取样深度3~7 m，泥沙中值粒径0.007~0.028 mm。经过相似条件下的比尺计算和模型沙性质的比选，模型沙采用木粉，试验前进行了脱脂处理，筛分试验得到的中值粒径 $d_{50}=0.20$ mm， $\rho_s=1.15$ t/m³。为使冲刷试验得出的结果偏于安全，选取原状土起动试验中摩阻流速最小所对应的中值粒径 $d_{50}=0.015$ mm作为原型的代表粒径。

对于水流作用下泥沙起动研究成果相对较多，目前沿用的做法大多采用相对成熟的公式进行计算。本次试验选用原武汉水院公式计算起动流速，即：

$$v_c = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10+h}{d^{0.72}}\right)^{1/2} \tag{5}$$

港珠澳大桥人工岛所处水深在5~11 m，通过试算得出模型采用模型沙满足水流泥沙起动相似条件的几何比尺 λ_{h_0} 约为50。在缺乏原型资料进行验证对比的情况下，人工岛采用100和150两种比尺进行试验，以便比较分析。

1.4 试验条件概化

本试验主要研究平常潮流动力下的局部冲刷问题, 从而弥补整体物理模型对人工岛局部冲刷研究方面的不足^[4]。伶仃洋的潮流属于不正规半日混合潮流类型, 潮差不大, 湾内涨潮平均流速一般为0.4~0.5 m/s, 落潮平均流速约在0.5~0.6 m/s。在一个潮周期过程中有相当一段时间潮位变化很小, 相应时段的流场也很弱。在试验过程中, 相当一段时间内模型沙可能处于不起动的状态。为了更有效地进行冲刷试验, 利用一个实测潮周期过程中潮差较大的半日潮构造新的潮型, 作为局部冲刷试验的动力条件。

1.5 水槽边壁对水流的影响

东西人工岛长625 m, 按1:100比尺模型长为6.25 m, 人工岛模型在水槽的布置见图2。在人工岛冲刷试验前, 用三维超声波多普勒测速仪(ADV)测量水槽两侧流速, 结果表明, 距水槽两侧边壁3~4 m范围内顺水流流速与上下断面流速基本一致, 垂直水槽方向流速较小, 见表1, 可见水槽两侧边壁对水流的影响较小。

表1 水槽流速测量

测流位置	测点号	流速/(m·s ⁻¹)	
		顺水槽X向	垂直水槽Y向
人工岛左侧与水槽边壁之间测点	1 [#]	-0.40	-0.08
	2 [#]	-0.48	-0.09
	3 [#]	-0.47	-0.11
	4 [#]	-0.45	0
	5 [#]	-0.45	-0.03
上游不受工程影响处测点	11 [#]	-0.44	0.09
	12 [#]	-0.46	0.10
	13 [#]	-0.45	0.05
人工岛右侧与水槽边壁之间测点	6 [#]	-0.42	0.17
	7 [#]	-0.44	0.10
	8 [#]	-0.42	0.11
	9 [#]	-0.41	0.12
	10 [#]	-0.40	0.10
下游不受工程影响处测点	14 [#]	-0.41	-0.04
	15 [#]	-0.45	-0.10
	16 [#]	-0.43	-0.09

2 人工岛冲刷试验

2.1 人工岛附近水流结构

人工岛对水流的影响是错综复杂的。从平面

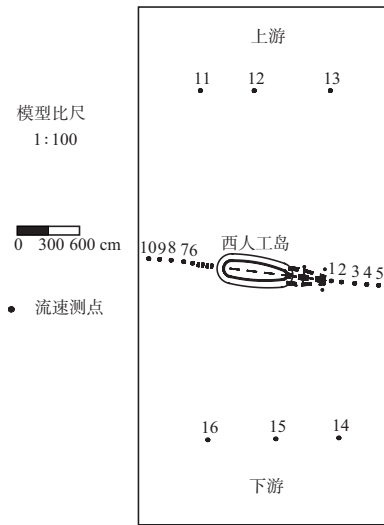


图2 水槽中人工岛以及流速测点位置

上观察, 存在流速场的收缩与扩散, 岛体上下游回流区及纵横水面比降变化, 人工岛两侧作用下周期性旋涡的发生、下移及合并等。立体地看, 岛体附近的水流中还同时并存着横轴螺旋流, 混有螺旋流的人工岛上下前沿水流与岛体受阻的水流交汇后产生一股较强的下沉水流冲击槽底, 使人工岛两侧挑流作用加强, 它是导致两侧冲刷坑较深的原因。

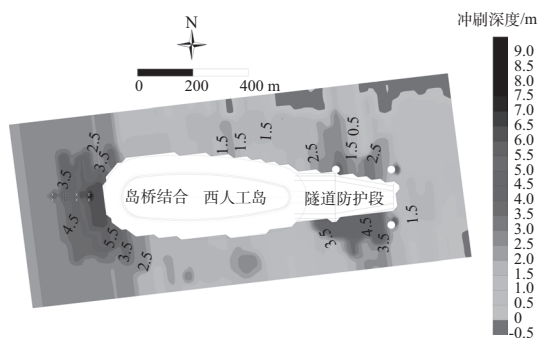
2.2 人工岛局部冲刷过程

动床试验表明, 人工岛两侧冲刷坑中的水流并非沿床面流动, 泥沙亦非由水流的托曳力而运动。受岛体阻挡的水流沿岛两边流动, 至隧道和岛桥结合附近与岛体头部受阻的水流交会后, 产生一股较强的下沉水流带走上游来沙和冲击河底与冲刷坑坡壁而抛起泥沙, 使之加深与扩大。冲刷坑中的流态是紊乱而复杂的, 横向环流与竖轴漩涡并存。可认为, 水流与人工岛相互作用产生的涡流是导致局部冲刷的主要动力, 随着冲刷的进行, 冲刷坑向深处拓展, 坑底处的流速逐渐减小, 直至坑内泥沙输移平衡, 冲刷停止, 此时冲刷坑保持稳定的形状^[5]。

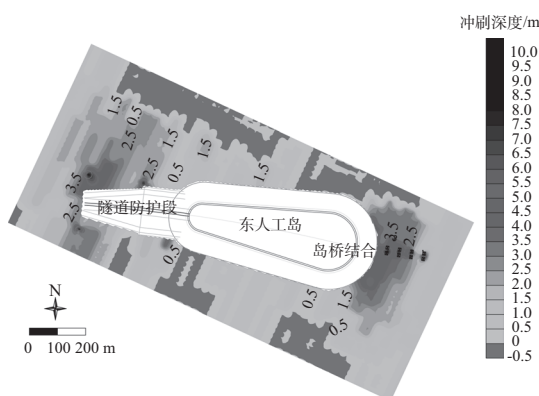
2.3 人工岛冲刷的平面形态

从图3中可以看出, 人工岛的最大冲刷坑位置主要集中在岛桥结合部和隧道防护段及防撞墩附近, 东西人工岛的最大局部冲刷深度发生在距离人工岛最近的桥墩处, 冲刷深度达到10 m。冲深3 m的范围分布在东人工岛东南端附近350 m ×

200 m区域、西北边隧道防护段两侧300 m × 100 m区域、防撞墩附近局部区域,分布在西人工岛西端附近400 m × 250 m区域、东边隧道防护段两侧200 m × 200 m区域、防撞墩附近局部区域。西人工岛冲刷量为159万m³,东人工岛冲刷量为121万m³。



a) 西人工岛



b) 东人工岛

图3 局部冲刷分布

根据不同比尺的模型试验冲刷深度的对数关系延伸图得出的人工岛天然最大冲刷深度,见图4和表2。

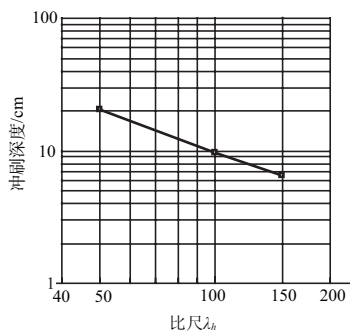


图4 东人工岛系列模型延伸图

表2 洪季大潮人工岛最大冲刷深度

人工岛	流速/(m·s ⁻¹)		最大冲刷深度/m
	落潮	涨潮	
东人工岛	1.40	-0.8	10.3
西人工岛	1.25	-0.8	9.0

3 结语

1) 系列模型试验结果表明,人工岛的局部冲刷过程类似于桥墩冲刷,初期冲刷坑发展较快,当冲刷到一定深度时,冲刷减慢,并逐渐趋向相对平衡。冲刷坑的平面形态与岛型、水流夹角、涨落潮流速差以及潮流历时有密切关系,其最大冲刷深度与岛体的几何形状、流速、工程水域的沙土特性以及水深等相关。

2) 本研究利用系列模型延伸法合理地解决了目前国内外较难解决的淤泥质海床上人工岛周围局部冲刷的问题。本研究主要面临两个问题,一是人工岛周围水体不仅存在平面的绕流,而且人工岛周边的大流场呈现三维的立体变化;二是人工岛底质为淤泥质黏土,其起动机理错综复杂。因此,本研究具有一定的工程价值,亟希望以后有更深入的研究。

参考文献:

- [1] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 李昌华, 金德春. 河工模型试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981.
- [3] 高正荣, 黄建维, 卢中一. 长江河口跨江大桥桥墩局部冲刷及防护研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [4] 徐群, 莫思平, 季荣耀, 等. 港珠澳大桥工程对珠江口港口航道影响物理模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [5] 秦崇仁, 肖波, 高学平. 波浪水流共同作用下人工岛周围局部冲刷的研究[J]. 海洋学报, 1994(5): 130-138.

(本文编辑 武亚庆)