



局部正态物理模型在潮汐河口中的应用研究*

刘猛, 张宏伟, 李为华

(上海河口海岸科学研究中心, 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201)

摘要: 首次在潮汐河口采用局部正态物理模型研究了局部冲刷问题, 结果表明: 采用局部正态物理模型研究潮汐河口相关工程问题是可行的, 试验水力条件的选择、模型边界的确定以及模型的整体变坡是将局部正态模型应用于潮汐河口的关键技术, 提出了简便易行且效果良好的模型边界的确定方法, 阐述了模型整体变坡的必要性及方法。

关键词: 局部正态物理模型; 潮汐河口; 局部冲刷; 水力条件; 模型边界; 模型整体变坡

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)11-0106-05

Application of local normal physical model in tidal estuary

LIU Meng, ZHANG Hong-wei, LI Wei-hua

(Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: The local normal physical model is adopted to study the local scour (problems) on project in the tidal estuary for the first time. The results show that: 1) It is feasible to apply the local normal physical model to study the engineering problems in the tidal estuary; 2) Choice of the test hydraulic conditions, determination of model boundary condition and entire variable slope of the model are the key techniques to apply the local normal physical model to the engineering problems in the tidal estuary; 3) A simple and feasible method to determine model boundary condition is presented; 4) The necessity and method of applying entire variable slope of the model are expounded.

Key words: local normal physical model; tidal estuary; local scour; hydraulic condition; model shoreline; total variable slope of model

开展正态物理模型试验是目前用于研究局部冲刷^[1-5]等三维流场问题的可靠手段, 其主要包括正态系列物理模型、整体正态物理模型和局部正态物理模型。长江南京以下12.5 m深水航道一期工程白茆沙水道工程(图1)在局部冲刷研究中创新了试验方法, 首次将局部正态物理模型成功应用于潮汐河口, 并攻克了模型设计中的一系列难题。模型的成功设计不仅较好地服务于白茆沙水

道工程局部冲刷问题的研究, 也为该模型在潮汐河口进一步推广应用打下了良好的基础。

1 局部正态物理模型在潮汐河口应用难点分析

目前尚无局部正态物理模型在潮汐河口应用的先例, 若采用该方法开展白茆沙水道工程局部冲刷研究, 必须合理地解决以下两个难题:

1) 合理的试验水力条件选择。局部正态物理

收稿日期: 2013-08-25

*基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301020); 上海市科学技术委员会科研计划项目(11231202300); 交通运输部科技项目(2011328A0670)

作者简介: 刘猛(1983—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事河口水沙运动及河口航道治理研究。

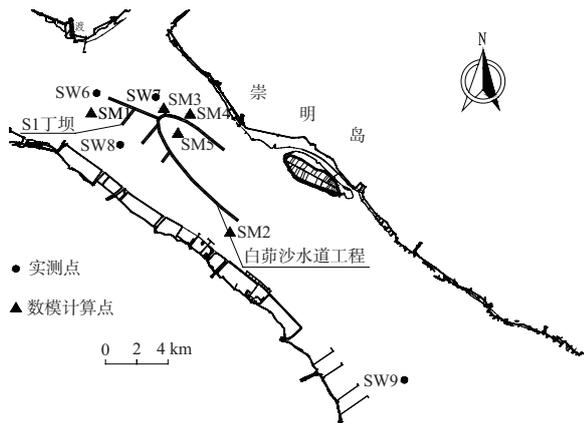


图1 白茆沙水道工程平面布置

模型一般只能模拟恒定流, 而白茆沙水道工程所在区域是潮流起主导作用的非恒定往复流, 因此选择合理的试验水力条件是应用局部正态物理模型开展试验研究必须解决的难题。

2) 试验水力条件在模型上的实现。由于潮棱体的存在, 潮汐河口潮量沿程不守恒。如何选择模型边界, 既能确保模型沿程流量守恒, 又能较好地模拟目标试验水力条件是模型设计首先要解决的技术难题; 其次由于材料限制, 正态模型糙率偏高, 模型水面坡度无法与目标水力条件相似, 采用怎样的措施才能使模型上各处水深均与目标水力条件一致也是模型设计必须解决的技术难题。

2 试验水力条件选择及其特征

2.1 试验水力条件选择依据

文献[6]采用正态系列物理模型对长江口深水航道治理工程丁坝头部冲刷进行了研究, 取得一些重要认识, 主要有: 1) 工程区域洪季大潮落急流速大于涨急流速, 落潮流历时为涨潮流历时的1.5~2.0倍, 落急流速发生在较低潮位, 涨急流速发生在中潮位之上, 坝头冲刷以落潮水流为主; 2) 与采用落急流速的恒定流试验相比, 潮流条件下坝头冲刷平衡的历时延长3~4倍, 最大冲刷深度有所减小, 约为恒定流条件下最大冲刷深度的0.85倍, 采用落急流速的恒定流试验可以满足研究需求; 3) 针对工程丁坝坝头的潮流特点, 可采用落急流速进行稳定流试验, 坝头防冲范围采用对称布置, 以防涨潮流侧的冲刷。

与长江口深水航道治理工程相比, 白茆沙水道整治工程亦具有相似特征: 1) 工程重要区域护排布置采用对称布置方式; 2) 白茆沙水道工程处于长江口深水航道治理工程的上游, 落潮流优势相对更加显著, 工程区域洪季大潮落急流速大于涨急流速, 落潮流历时显著大于涨潮流历时, 落急流速发生在较低潮位, 涨急流速发生在中潮位之上。

2011年10月12日—13日口外潮型为大潮, 大通流量为22 000 m³/s, 现场实测点具体位置见图1, 现场实测点SW6, SW7, SW8及SW9流速过程线见图2。

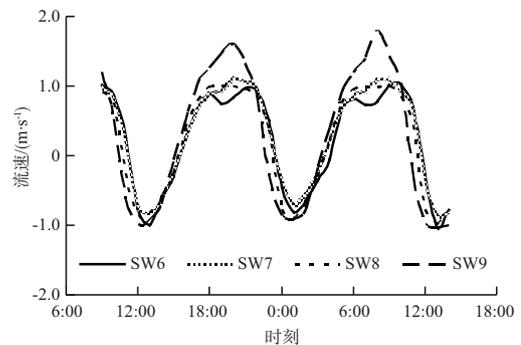


图2 实测流速过程线

由图2可见, 即使在大通流量仅为22 000 m³/s (枯季平均流量约为16 000 m³/s, 洪季平均流量约为36 000 m³/s) 时, 各测点落急流速均超过涨急流速, 持续时间约是涨急流速持续时间的2~3倍, 落急流速发生在较低潮位, 涨急流速发生在中潮位之上。

从以上分析可见, 对于白茆沙水道整治工程的局部冲刷问题研究, 采用具有代表性的落急流速开展恒定流试验是可行的, 既满足安全需求也能加快研究进度。鉴于白茆沙水道整治工程重要性, 拟采用防洪设计洪水 (径流量为100 400 m³/s) 大潮落急流速开展局部冲刷问题的试验研究。

2.2 试验水力条件特征

1) 在防洪设计洪水大潮条件下, 工程区域落潮流优势极为显著。

在防洪设计洪水流量 (100 400 m³/s) 条件下, 数模计算点SM1和SM2流速过程线见图3, 数模

计算点具体位置见图1, 需要说明的是本文涉及到的数模计算结果均考虑了白茆沙水道工程作用。

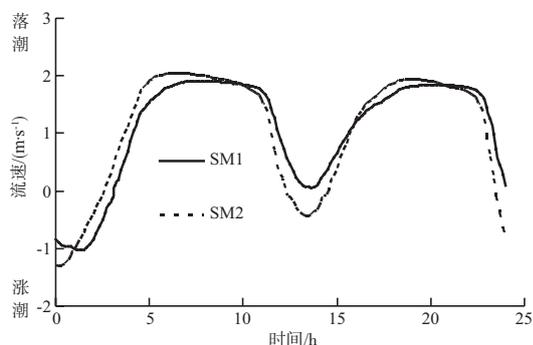


图3 数模计算流速过程线

由图3可见, 在洪水大潮期间, 落急流速更大, 落潮高流速持续时间也更长, 当上游径流为防洪设计洪水流量时, 各测点落急流速约是涨急流速的2倍, 落潮高流速持续时间约是涨潮的4~8倍, 落潮流速过程线上出现一个“高流速平台”。

2) 落急时段工程区域跌水现象显著, 有利于较强的局部冲刷现象产生^[5]。

在防洪设计洪水和大潮条件下, 白茆沙水道工程围堤头部内外侧潮位(85高程, 下同)变化过程见图4, 各测点位置见图1。

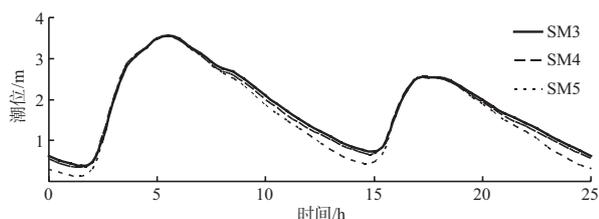


图4 围堤头部内外侧潮位变化过程

由图4可见, 在防洪设计洪水大潮条件下, 落潮期间, 落急流速大, 水位低, 潜堤、潜坝两侧存在较大水位差, 易产生明显跌水现象, 如落急时刻围堤头部外侧水位较内侧高出约0.3 m, 跌水现象将增强工程附近水体的紊动, 有利于工程附近局部冲刷的产生^[5]; 而涨潮期间, 涨急流速小, 水位高, 围堤内外侧无明显水位差, 亦无明显的跌水现象产生, 不利于显著的局部冲刷现象产生。

从以上分析可见, 选择防洪设计洪水大潮落急流速作为试验水力条件开展白茆沙水道整治工程局部冲刷问题研究是合理的。在防洪设计洪水大潮落潮条件下流速过程线上出现一个“高流速平台”, 在该过程中流速变化虽然不大, 但潮位变化明显。考虑白茆沙水道工程建筑物顶部高程变化特征, 拟选择两个特征水位下的水力条件作为模型的试验水力条件, 一个是工程区域平均水位约1.7 m的落急流场, 与“高流速平台”最大值基本对应; 另一个是工程区域平均水位约0.7 m的准落急流场, 与“高流速平台”末端拐点基本对应, 接近最低潮位。试验成果取两种试验水力条件下工程附近最不利局部冲刷情况的组合, 这种试验水力条件的组合可以基本同时确保堤顶高程较低的丁坝、潜堤和堤顶高程较高(1.0 m)的围堤、护滩带局部冲刷达到最不利状态。

需要说明的是, 本文提及用于局部正态模型试验的流场不是瞬时流场而是潮波自下而上传播过程中工程区域各点同一相位时刻的水流运动组成的流场, 它反映的是潮波运动过程中某个相位的水流运动的传播过程, 在这个传播过程中, 工程上每个点流速均达到或接近目标值, 可以在模型上采用恒定流较好的模拟(后文的水流验证将予以证明), 而瞬时流场是非恒定流的一个瞬间状态, 不宜在模型上用恒定流模拟。为了方便, 在下文模型设计和水流验证中仅以防洪设计洪水大潮落急流场(对应工程区域平均水位约1.7 m)为例进行说明。

3 模型设计

在潮汐河口采用局部正态模型研究局部冲刷问题时, 模型设计不仅涉及常规的模型比尺选取、模型沙选择和建筑物模拟等, 还需涉及模型边界的确定和模型的整体变坡。根据试验特性、模型场地、模型沙选择及实验室供水能力等综合考虑, 选择白茆沙水道工程局部正态模型几何比尺 $\lambda_L = \lambda_H = 125$, 其流速比尺 $\lambda_V = 11.18$ 。

3.1 模型边界确定方法

在径流河段采用局部正态模型可以直接将

流线作为岸线,但在潮汐河口情况则不同,由于潮棱体的存在,潮汐河口两岸之间潮通量沿水流方向是变化的,越往口外潮量越大,若采用某个试验流场的流线直接作为岸线,流线之间潮量也是变化的,不符合开展恒定流试验对流量沿程不变的基本要求,因此,若想在潮汐河口开展局部正态模型试验,必须解决模型边界确定的技术难题,选择的模型边界必须满足以下两点:

1) 对于选定的目标试验流场,若统计模型边界范围以内流量时,沿程流量应基本相等。

2) 对于选定的目标试验流场,模型边界各处切线方向与流向夹角应尽可能小,否则会影响目标试验流场,根据规范要求,其最大夹角不应超过 10° 。

下面对白茆沙水道工程局部正态模型采用的岸线确定方法及效果进行介绍,模型边界确定方法可总结为3个步骤(图5),即选流线、画断面和移交点,具体如下:

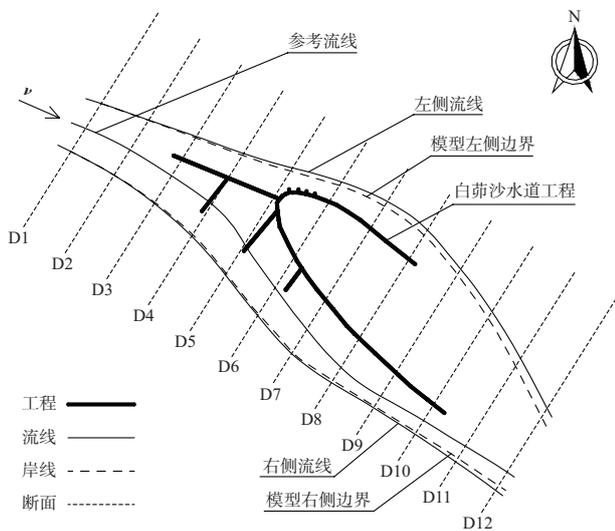


图5 模型边界确定示意图

1) 选流线。在目标试验流场中提取3根流线,分别为左侧流线、右侧流线和参考流线,左侧流线和右侧流线分别作为模型左侧岸线和右侧岸线最终确定的初始位置,参考流线位置在模型入流处尽可能将左侧流线和右侧流线之间流量均分为二。

2) 画断面。在目标试验流场中顺水流方向布

置了12个断面(断面越多,最终确定的模型边界位置越精确,但计算量也相应增加),每个断面均与左侧流线、右侧流线和参考流线相交。

3) 移交点。在每个断面上分别对左侧流线和右侧流线与断面的交点位置进行调整,既要确保每个断面上新得到左侧交点至参考流线之间的流量基本相等,也要确保每个断面上新得到右侧交点至参考流线之间的流量基本相等,将各断面上左右两侧新得到的交点分别平顺连接,便得到需要的模型边界。

通过上述岸线的确定,模型边界之间的流量沿程基本相等,而调整前左侧流线与右侧流线之间的流量在进口与出口位置相差超过20%;比较模型边界与目标流场发现,模型边界各处切线方向与流向夹角基本在 3° 以内,最大仅为 5° ,完全满足规范^[7]小于 10° 要求,可见按照上述方法确定的模型边界是可以满足白茆沙水道工程局部正态模型设计的要求,目标试验流场可以在模型中较好地复演。

上述分析表明在潮汐河口开展局部正态模型试验,模型边界问题是可以较好地解决的。上述的模型边界确定方法简便易行且效果好,可以在解决类似问题中使用。最终确定的白茆沙水道工程局部正态模型最长约140 m,最宽约54 m,面积为 $3\,522\text{ m}^2$,折合天然约 55 km^2 。

3.2 模型整体变坡必要性和变坡坡度确定

为了满足模型水流运动与天然相似,通常情况下模型设计应满足糙率相似条件,即:

$$\lambda_n = \lambda_H^{2/3} / \lambda_L^{1/2} \quad (1)$$

式中: λ_n 为糙率比尺; λ_H 为垂直比尺; λ_L 为平面比尺。

当 $\lambda_L = \lambda_H = 125$ 时, $\lambda_n = 2.236$,白茆沙水道河段河床天然糙率在 $0.01 \sim 0.02$ ^[8],根据糙率相似准则,模型糙率应在 $0.004 \sim 0.009$,受到制作材料的糙率限制,模型糙率是无法满足的,因此需进行模型的整体变坡处理。

长江口特征水面坡度,如平均潮位面坡度、最高潮位面坡度、最低潮位面坡度以及其它潮波是由传播过程中的相同相位点组成的

(如落急流场)潮位面坡度均较小,坡度一般在0.01‰~0.02‰。在防洪设计洪水大潮落急流场条件下,白茆沙水道工程天然水面坡度约为0.018‰,表明整个工程区域上下游最大水位差约为0.18 m。

若在局部正态物理模型上模拟防洪设计洪水大潮落急流场,其水面坡度可采用下面公式计算^[9]:

$$i = v^2 n^2 h^{-\frac{4}{3}} \quad (2)$$

式中: i 为水面坡度; v 为平均流速(m/s); n 为模型糙率; h 为水深(m)。

根据式(2)计算,白茆沙水道工程局部正态物理模型水面坡度在0.2‰~0.3‰,这表明模型中整个工程区域上下游最大水位差约为2.0~3.0 m,可见若不进行变坡处理,模型上无法复演目标试验流场。考虑到在模型中增加糙率较为容易而减少糙率难以实施,为了便于模型水流的验证,白茆沙水道工程局部正态模型整体变坡坡度确定为0.3‰。

4 水流验证

前文对白茆沙水道工程局部正态模型设计进行了详细的阐述,模型设计的优劣最终需通过水流验证的效果来证明,下面对白茆沙水道工程局部正态模型水流验证情况进行介绍。

在防洪设计洪水大潮落急流场条件下根据两侧岸线之间的潮通量计算,模型上游径流施放量约为0.31 m³/s,换算至天然为54 000 m³/s。

经过模型河床糙率局部调整后,模型水面平均坡度最终约为0.32‰,折算至天然约为0.02‰,与天然0.018‰的水面坡降基本吻合,模型各处水深达到目标水深要求。

白茆沙水道工程局部正态模型水流验证测点位置见图6,在模型上游进口断面和工程重点区域共布置16个流速验证点,各点流速验证情况见表1。可见,模型上各验证点流速和流向均较好地满足规范^[7]要求。

从水流验证的效果可见,白茆沙水道工程局部正态物理模型较好地复演了目标的试验水力条件,表明该局部正态物理模型设计取得了成功。

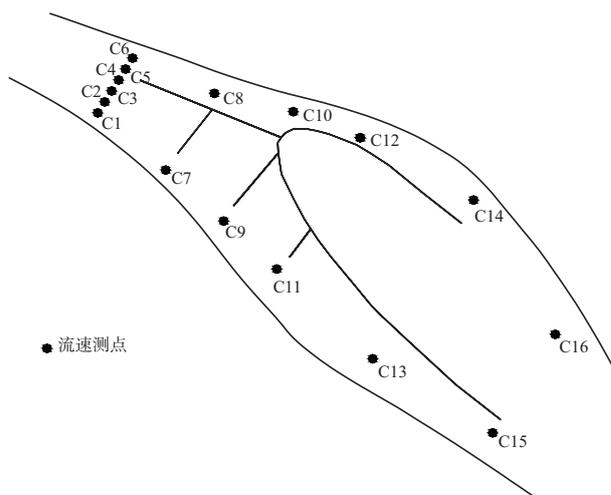


图6 验证测点位置

表1 各测点水流验证情况统计

测点	流速/(m·s ⁻¹)		流速 偏差/%	流向/(°)		
	测量值	目标值		测量值	目标值	偏差
C1	1.80	1.75	2.8	121	123	2
C2	1.75	1.76	-0.4	121	123	2
C3	1.77	1.80	-1.7	123	122	1
C4	1.58	1.59	-0.5	120	120	0
C5	1.62	1.55	4.5	115	116	1
C6	1.65	1.58	4.0	110	113	3
C7	1.78	1.78	0.5	132	137	5
C8	1.37	1.38	-0.6	112	115	3
C9	2.34	2.29	1.8	149	146	3
C10	1.50	1.54	-2.2	101	97	4
C11	2.25	2.19	2.6	140	137	3
C12	1.64	1.58	4.1	119	114	5
C13	1.71	1.65	3.8	132	136	4
C14	2.40	2.31	3.8	136	138	2
C15	2.79	2.69	3.9	120	123	3
C16	1.45	1.43	1.5	152	150	2

5 结论

1) 采用局部正态物理模型研究潮汐河口工程局部冲刷等三维流场问题是可行的。与其它模型设计相比,局部正态模型设计中需处理好3个技术难题,即试验水力条件选择、模型边界确定和模型整体变坡。

2) 白茆沙水道工程局部正态模型选取两种试验水力条件开展局部冲刷问题研究是合理的,试验成果取两种试验水力条件下工程附近最不利局部冲刷情况的组合,成果更加可靠。

(下转第129页)