



长江南京以下12.5 m深水航道一期工程白茆沙水道工程局部冲刷试验研究——Ⅰ：模型设计

刘 猛, 吴华林, 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: 长江南京以下12.5 m深水航道一期工程白茆沙水道工程局部冲刷研究工作表明: 1) 采用局部正态模型研究潮汐河口工程局部冲刷问题是可行的; 2) 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等是将局部正态模型应用于潮汐河口工程局部冲刷问题研究需解决的关键技术问题; 3) 白茆沙水道工程局部正态模型较好地复演了目标试验水力条件, 具备开展进一步试验的条件; 4) 提出了简便易行且效果良好的模型边界确定方法。

关键词: 长江南京以下12.5 m深水航道; 白茆沙水道工程; 局部冲刷; 局部正态模型

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0005-07

Model study on local scour in Baimaosha channel project of the first phase of the Yangtze River deep water channel project from Nanjing: I. Model design

LIU Meng, WU Hua-lin, LI Wei-hua

(Shanghai Estuarine and Coastal Research Center Key Laboratory of

Estuarine & Coastal Engineering Ministry of Transports, Shanghai 201201, China)

Abstract: Model studies on local scour in Baimaosha channel project of the first phase of the Yangtze River deep water channel project from Nanjing showed that: 1) It is feasible for adopting local normal model to study local scour on project in tidal estuary. 2) Choice of the test hydraulic conditions, determination of model shoreline and total variable slope of model, etc. are the key technical issues to be addressed for adopting local normal model to study local scour on project in tidal estuary. 3) The target test hydraulic conditions are well simulated in the local normal model of Baimaosha channel project and the model can be used for carrying out further tests. 4) This paper presents a simple and good method to determine model shoreline.

Key words: the Yangtze River deep water channel project from Nanjing; Baimaosha channel project; local scour; local normal model

长江南京以下12.5 m深水航道一期工程主要通过实施长江太仓—南通河段内洲滩关键部位守护整治工程并结合疏浚措施, 实现12.5 m深水航道由太仓(荡茜闸)上延至南通(天生港区), 并为深水航道的稳定畅通运行和继续上延创造条件。为控制滩槽格局, 稳定目前较为有利的总体河势, 形成建设12.5 m深水航道的有利条件, 故实施白茆沙水道工程, 其功能为: 固滩防冲, 调整

归流。白茆沙水道工程主要在白茆沙上部高滩边缘布置护滩圈围潜堤, 在白茆沙头部及向上游局部延伸区域布置潜导堤, 从而达到护滩的效果, 在潜导堤及圈围潜堤南侧布置丁坝以归顺水流、调整流态。白茆沙水道工程区域地质表层多为粉细砂, 抗冲刷能力差, 护底工程是堤坝安全的关键, 且工程费用中护底部分所占比例大, 科学确定护底范围对工程安全和投资节省意义重大。

收稿日期: 2012-07-13

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

长江南京以下12.5 m深水航道一期工程白茆沙水道工程在局部冲刷研究中创新了试验方法，首次将局部正态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 局部正态模型特征及其在潮汐河口应用难点分析

工程局部冲刷机理复杂，至今尚未形成统一的认识^[1-6]，目前与今后相当长时期内尚难建立起较为理想的计算公式^[6]。开展正态物理模型试验仍是目前用于研究局部冲刷问题的可靠手段，其主要包括正态系列模型、整体正态模型和局部正态模型，每种模型各具特点，有不同的适应条件(表1)。

表1 正态物理模型特征

类别	工程模拟	河宽限制及岸线模拟	水流模拟及效果	地形模拟	试验场地	对工程平面布置及研究部位要求	模型沙选择	安全与投资节约满足情况	试验成本
正态系列模型	取工程易于冲刷的较小部位，如坝头进行模拟研究，模拟范围的顺水流方向天然长度一般不宜超过1 000 m*	无河宽限制，无岸线模拟	模拟恒定流，一般情况下只能确保研究对象某个点或局部小范围的水流相似 ^[7]	概化模拟	试验场地小	平面布置简单，研究部位少	无限制	安全需求满足好，投资节约需求满足较差	较低
整体正态模型	取工程全部范围进行模拟研究	有河宽限制，全部岸线模拟	模拟天然实际水流，工程各区域均可达到相似	精确模拟	试验场地大	平面布置无限制，研究部位无限制	有限制	安全需求满足好，投资节约需求满足好	较高
局部正态模型	取工程全部或有机整体进行模拟研究	无河宽限制，无岸线模拟或部分岸线模拟	模拟恒定流，工程各区域均可达到相似	精确模拟	试验场地大	平面布置无限制，研究部位无限制	有限制	安全需求满足好，投资节约需求满足较好	较高

注：模拟范围的顺水流方向天然长度一般不宜超过1 000 m，是根据模型水深相似估算的结果。正态系列模型不适合对工程平面结构复杂、地形复杂以及关注部位多且防护工程平面布置方案多的研究；整体正态模型和局部正态模型适合对工程平面结构复杂、地形复杂以及关注部位多且防护工程平面布置方案多的研究。

虽然整体正态模型模拟精度高且其它优点较多，但受白茆沙区段河宽以及试验场地和模型沙选择的限制，采用整体正态模型开展白茆沙水道工程局部冲刷研究目前是不现实的，可选择方法只有正态系列模型和局部正态模型。

白茆沙水道工程规模庞大且平面布置较为复杂(图1)，由围堤、护滩带、丁坝及潜堤等组成，工程长约11.6 km，宽约3.1 km。综合考虑白茆沙水道工程平面布置复杂、局部冲刷防护范围广且方案多的特点以及满足工程安全与投资节约的需求，选择局部正态模型开展局部冲刷研究。

目前尚无局部正态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开展本研究必须解决的难题。

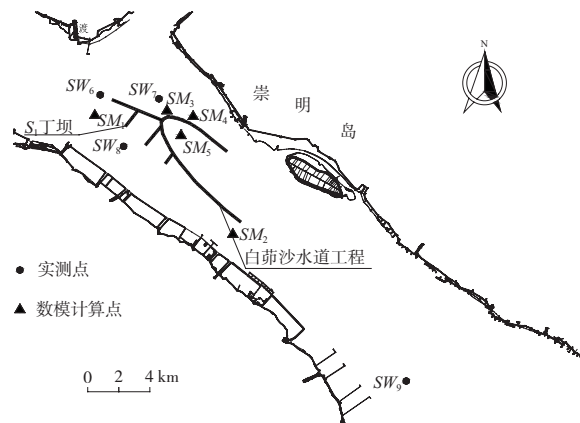


图1 白茆沙水道工程平面布置

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[7]采用正态系列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。

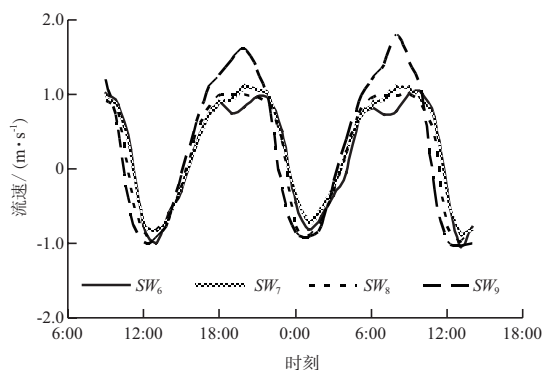


图2 实测流速过程线

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,需要说明的是本文涉及到的数模计算结果均考虑白茆沙水道工程作用。

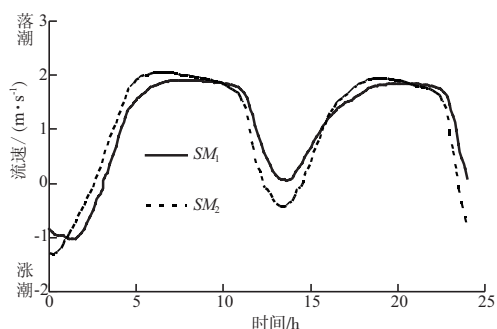


图3 数模计算流速过程线

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。

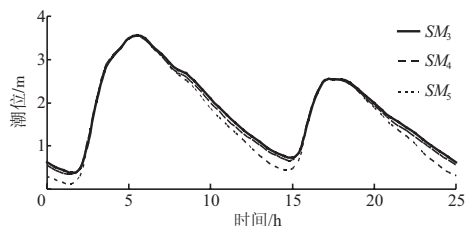


图4 围堤头部内外侧潮位变化过程

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。

3.1 模型比尺及模型沙选择

采用局部正态模型研究工程局部冲刷问题,要达到模型的水流、泥沙运动相似^[8]。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 $\lambda_v=11.18$ 。

现场勘探资料表明,工程研究区域泥沙中值粒径主要分布在0.1~0.2 mm,平均中值粒径约为0.15 mm。计算泥沙起动流速的公式较多,当长江口泥沙中值粒径大于0.04 mm时,各家公式计算结果趋同,且均较符合实际^[9],以沙玉清公式^[10]为例进行计算,工程区域不同水深泥沙起动流速为0.64~0.91 m/s,利用水槽对 $\rho_s=1.11\text{ t/m}^3$ 和 $d_{50}=0.35\text{ mm}$ 木粉进行起动流速试验,得到起动流速为0.055~0.083 m/s,则 $\lambda_{v_0}=10.96\sim11.64$,与 $\lambda_v=11.18$ 较为接近,可达到泥沙起动基本相似要求。

对于局部冲刷问题研究,模型沙选择除满足泥沙起动相似外,还应满足模型沙与天然沙水下休止角基本相等,这样可以较好地模拟冲刷形态。

原型沙水下休止角按张红武天然沙公式^[11]($d_{50}=0.061\sim9\text{ mm}$)计算:

$$\varphi=35.3d^{0.04} \quad (1)$$

按天津大学室内试验成果,当 $d_{50}=0.2\sim4.37\text{ mm}$,休止角与模型沙粒径关系式如下:

$$\varphi=32.5+1.27d \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)计算,原型沙休止角约为32.7°,模型沙休止角约为32.9°,可见原型沙和模型沙休止角是基本相似的。综合以上分析可见,上述模型沙选择是可以满足试验需求的。

3.2 建筑物模拟

与采用其它试验方法研究局部冲刷问题相同,采用局部正态模型也需要对相关建筑物进行模拟,研究主要对潜堤、丁坝、围堤、护滩带及护排等进行模拟。

模型上潜堤、丁坝、围堤和护滩带均采用混凝土制作,其平面位置严格按照工程平面设计放样,断面结构按照几何相似进行模拟,严格控制

堤顶高程、顶宽及边坡坡度。

根据试验特征及目的,模型上护排必须模拟天然护排的保护性和贴附性,保护性是指护排必须起到保护下面沙体不被上部水体直接冲刷带走的作用;贴附性是指在河床产生局部冲刷变形后,护排可立刻紧密下垂贴附,以适应河床变化。为了满足保护性和贴附性要求,模型护排采用棉布模拟排垫^[12],采用密度为 $2\,700\text{ kg/m}^3$ 的铝片模拟混凝土压载体,棉布与铝片之间用环氧树脂粘结。模型护排与天然护排尺寸、质量、孔隙率(压载体之间空隙总面积占护排面积比例)严格按比尺关系保持相似。

3.3 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。

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。

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

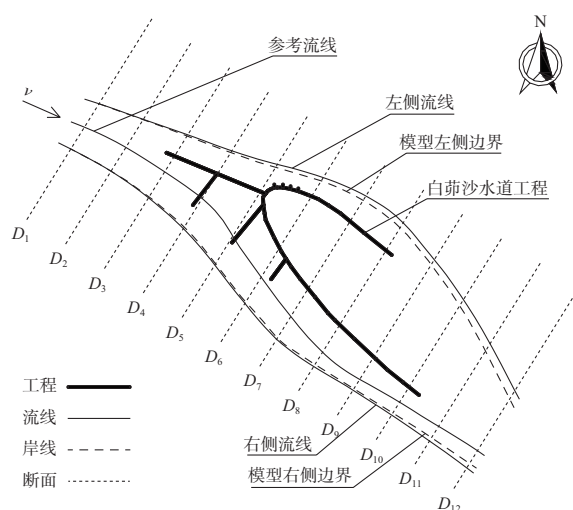


图5 模型边界确定

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^[8]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110 m,最宽约43 m,面积为 $3\,522\text{ m}^2$,折合天然面积约 55 km^2 。

3.4 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:

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

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 $0.01 \sim 0.02^{[13]}$ ，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在传播过程中相同相位点组成的（如落急流场）潮位面坡度均较小，坡度一般在 $0.01\text{‰} \sim 0.02\text{‰}$ 。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^[14]：

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

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（4）计算，白茆沙水道工程局部正态物理模型水面坡度在 $0.2\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$ ，这表明模型中整个工程区域上下游最大水位差约为 $2.0 \sim 3.0\text{ m}$ ，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 $0.31\text{ m}^3/\text{s}$ ，换算至天然流量为 $54\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

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‰ ，折算至天然水面平均坡度约为 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2。可见，模型上各验证点流速和流向均较好地满足规范^[8]要求。

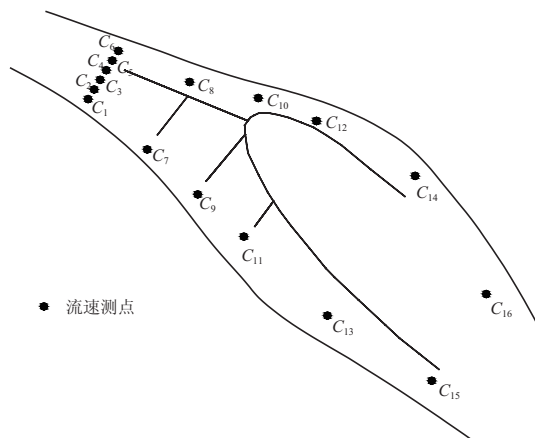


图6 验证测点位置

表2 各测点水流验证情况统计

测点	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		流速偏差/%	流向/(°)		
	测量值	目标值		测量值	目标值	偏差
C ₁	1.80	1.75	2.8	121	123	2
C ₂	1.75	1.76	-0.4	121	123	2
C ₃	1.77	1.80	-1.7	123	122	1
C ₄	1.58	1.59	-0.5	120	120	0
C ₅	1.62	1.55	4.5	115	116	1
C ₆	1.65	1.58	4.0	110	113	3
C ₇	1.78	1.78	0.5	132	137	5
C ₈	1.37	1.38	-0.6	112	115	3
C ₉	2.34	2.29	1.8	149	146	3
C ₁₀	1.50	1.54	-2.2	101	97	4
C ₁₁	2.25	2.19	2.6	140	137	3
C ₁₂	1.64	1.58	4.1	119	114	5
C ₁₃	1.71	1.65	3.8	132	136	4
C ₁₄	2.40	2.31	3.8	136	138	2
C ₁₅	2.79	2.69	3.9	120	123	3
C ₁₆	1.45	1.43	1.5	152	150	2

从水流验证的效果可见，白茆沙水道工程局部正态模型较好地复演了目标的试验水力条件，具备开展进一步试验的条件。

5 结论

1) 采用局部正态模型研究潮汐河口工程局部

冲刷问题是可行的。考虑白茆沙水道工程平面布置复杂、局部冲刷防护范围广且方案多的特点以及满足工程安全与投资节约的需求, 并结合试验场地、模型沙选择等限制的条件, 局部正态模型亦是当前开展白茆沙水道工程局部冲刷研究最为合理的选择。

2) 局部正态模型在潮汐河口工程局部冲刷问题研究中是可以应用的, 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。

3) 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, 两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的围堤、护滩带局部冲刷达到最不利状态, 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。

4) 文中提出了确定模型边界的方法, 该方法简便易行且效果好。

5) 水流验证的效果表明, 白茆沙水道工程局部正态模型较好地复演了目标试验水力条件, 具备开展进一步试验的条件。

致谢: 本文所涉及的数值计算工作得到了顾峰峰副研究员的鼎力支持, 同时郭文华、胡志峰和刘高峰副研究员亦为相关物理模型试验工作提供了大量帮助, 在此一并谨致谢忱!

参考文献:

[1] 方达宪, 王军. 丁坝坝头床沙起冲流速及局部最大冲深

计算模式的探讨[J]. 泥沙研究, 1992(4): 77-84.

[2] Chiew Y M, Mellive B W. Local scour around bridge piers[J]. J of Hydraulic Research, 1987(1): 115-122.

[3] Raudkivi J, Robert Ettma. Clear-water scour at cylindrical piers[J]. J of Hydraulic Engineering, 1983(3): 98-106.

[4] 詹义正, 潘军峰, 曹志芳, 等. 非淹没丁坝坝头冲刷深度的计算[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002(4): 27-30.

[5] 高桂景. 丁坝水力特征及冲刷机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2006.

[6] 周哲宇, 陶东良, 哈岸英, 等. 丁坝局部冲刷研究现状与展望[J]. 人民黄河, 2010(6): 18-21.

[7] 赵晓冬, 吴丽华, 陈志昌, 等. 河口整治工程建筑物局部冲刷试验研究[J]. 海洋工程, 2005(1): 47-52.

[8] JTJ/T 232—1998 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规范[S].

[9] 中国科学院力学研究所. 长江口深水航道原状土及表层泥沙冲刷试验[R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1998.

[10] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1996.

[11] 张红武, 汪家寅. 沙石及模型沙水下休止角实验研究[J]. 泥沙研究, 1989(3): 90-96.

[12] 曹民雄, 李青云, 蔡国正, 等. 长江口岸直水道鳊鱼沙心滩头部守护工程局部冲刷水槽概化试验研究 I: 水槽概化与护滩建筑物模拟设计[J]. 水运工程, 2011(7): 106-112.

[13] 罗小峰. 长江口水流盐度数值模拟[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005.

[14] 李家星, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.

(本文编辑 武亚庆)

欢迎投稿 欢迎订阅