

文章编号:0559-9350(2019)06-0753-08

多沙河流中群桩塔基局部冲刷平面尺度模型试验研究

曹帅¹, 张红武^{1,2}, 朱明东², 张廷伟²

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学 黄河研究中心, 北京 101309)

摘要: 局部冲刷平面尺度是对塔基附近可能受冲刷面进行精准防护的指导依据, 也是预测群桩局部冲刷结果的重要组成部分。结合泥沙运动学理论, 根据试验观察分析规则分布的群桩局部冲刷平面形态演变及其干扰因素, 提出了一个可综合反映水流强度与塔基结构影响的局部冲刷强度指标。在此基础上, 采用物理模型试验方法, 通过统计不同强度指标下的塔基局部冲刷平面结果, 回归分析得到了二者之间的相关关系。最后, 采用黄河下游两组工程实例对局部冲刷平面尺度关系式进行了试验验证。其结果表明, 拟合公式的计算值与实测值比较符合, 误差并不大于10%, 可为多沙河流中规则分布群桩塔基周围的床面防护提供参考。

关键词: 群桩; 局部冲刷; 平面尺度; 模型试验; 规则分布; 多沙河流

中图分类号: TV149.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20190019

1 研究背景

建立在河道内的塔基会对其周围水流结构产生显著影响, 表现为桩基周围泥沙的强烈扰动, 从而形成局部冲刷^[1]。过度的局部冲刷常常造成高压线位倾塌或威胁通航安全, 是涉河工程必须解决的重要问题。在多沙河流中, 群桩塔基附近的局部冲刷坑实际上是绕桩水流挟带其周围泥沙向下游运输的结果。已有的局部冲刷研究大多是围绕局部冲刷深度^[2-7], 而常常忽视局部冲刷的平面影响尺度。根据目前理论和实践研究^[3], 随着水流紊动强度的增加, 桩群局部冲刷坑的平面范围及深度均呈正向增大, 二者具有一定的内在关系。可见, 局部冲刷坑的平面尺度与深度在冲刷过程中紧密相关, 均反映了局部冲刷的强度大小, 也都是局部冲刷结果的重要组成部分。

多沙河流内塔基一般由若干承台基础组成, 支撑承台的桩群多采用规则分布形式^[4,6], 即桩群纵横间距及排列数目均一致。鉴于承台间距较大而其下的桩间距较小, 则局部冲刷现象主要发生在每个承台周围。为减弱桩基的阻、壅水效果, 承台下桩群对角线或外边线常设计为正对来流方向。研究表明, 群桩塔基局部冲刷主要与桩群结构及水流强度有关, 且承台出露地面时更易受到冲刷^[7]。因此, 对于承台外露且桩群分布规则的塔基局部冲刷情形可作为本研究的重点。

为避免过度冲刷造成基础破坏, 以往的解决思路多为设计较大的桩基埋深来保证冲刷后塔基的安全。由于现有方法繁多且计算过程复杂, 一些公式在应用于多沙河流局部冲刷时可靠性值得商榷^[8-10]。故为了工程安全, 在工程实践中采用的埋深方案常常比较保守而耗资过巨。桥墩防护研究表明^[11-12], 若适当提高桩基附近可能发生冲刷的河床抗冲能力, 则在同等水流强度下局部冲刷深度便会大大减小。类似的, 河道中为防丁坝根基根石走失, 常在局部冲刷最严重的坝头附近采取抛石、铅丝锚固等措施来增强工程抗冲性。如此一来, 便不必单纯依靠过大的埋深来保证桩基安全。可见, 作为桩基埋深方案的补充措施, 对塔基周围床面进行精准防护、增强抗冲能力亦是避免过度冲刷的可行办法。

收稿日期: 2019-01-04; 网络首发时间: 2019-05-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190520.1631.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402500); 延安市重大科技项目(2016CGZH-14-03)

作者简介: 曹帅(1988-), 博士生, 主要从事黄河下游河道整治研究。E-mail: caos14@mails.tsinghua.edu.cn

为避免因防护过多造成投资浪费或防护区域不足引发塔基失稳风险，关键是确定需要精准防护的床面范围，即塔基局部冲刷的平面影响尺度。目前关于群桩局部冲刷的平面尺度研究多为定性的分析，而定量的结果较少，加上其现场观测困难且冲刷机理尚不明确，导致原型数据匮乏、数学模拟精度较低。因此，本研究采用相对可靠的物理模型试验方法，对分布规则的群桩塔基在多沙河流中局部冲刷的平面尺度进行定量观测分析，以期为解决过度冲刷所造成的涉河工程安全问题提供技术依据。

2 局部冲刷分析

2.1 冲刷模式 以往的很多学者在研究桩柱局部冲刷时通常依据一种基本概念，如能量转换、有效作用水体、量纲分析及土体分层等，然后根据成因分析方法建立一些局部冲刷的经验或半经验公式^[13-18]。这些成果使局部冲刷研究得到了很大的发展。然而，由于实测数据匮乏，以往的桩基冲刷物理模型又缺乏合适的运动学和动力学尺度标准，这些经验或半经验公式的计算结果与实际情况往往存在较大误差。同时，已有研究中关心群桩局部冲刷物理过程的结果较少。事实上，只有在局部冲刷模式相对清晰的前提下，采取合理的模型设计得到的结果才能在应用于工程实践时不再受限。

通过观察规则分布的群桩塔基局部冲刷过程发现：初始时承台下的每个桩基附近均会出现局部冲刷现象并随时间向外发展(图1左)；之后，由于桩间距较小，毗邻的单桩冲刷坑发展到一定程度便逐渐相互连接，直至承台下所有单桩冲刷坑连成一片；最终，充分冲刷后形成一个围绕塔基承台的整体冲刷坑(图1右)。此外，由于上、下游相邻承台群桩基础相互影响，处在上游的承台桩基对下游承台产生一定的掩蔽作用，因此，同一塔基的上游承台局部冲刷条件相对下游承台更为不利。

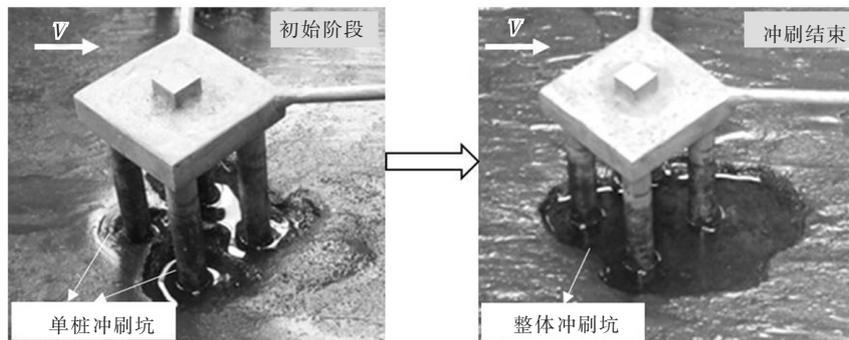


图1 某塔基承台桩基局部冲刷坑随时间的演变过程(以2×2型为例)

本文作为初步探索，主要研究常见的规则分布时的群桩局部冲刷平面形态。试验表明，在多沙河流中规则分布的桩群，当其外边线或对角线正对来流方向时，群桩周围形成的局部冲刷坑在平面上均可近似为椭圆形。结合工程实践，通过物理图像分析，可对上述两种情形下塔基局部冲刷坑的平面形态进行几何概化。以桩群对角线正对水流方向的塔基为例，承台附近的冲刷坑平面概化形式见图2。

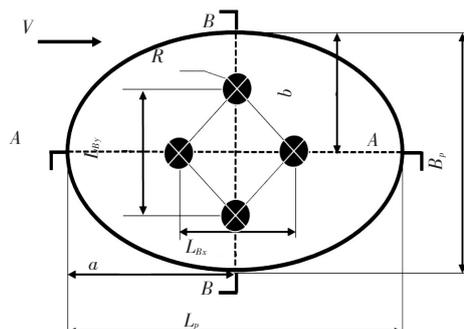


图2 塔基局部冲刷坑平面形态的概化形式

图2中 R 为承台下桩基半径； L_p 和 B_p 分别为冲刷平衡后塔基周围局部冲刷坑的长度与宽度； a 、 b 分别为椭圆长、短半径； L_{Bx} 、 L_{By} 分别为塔基承台下 x 、 y 方向的桩群间距，即最外侧两桩基轴心的水平距离，这里 x 、 y 分别平行、垂直于水流流向；定义桩群最大间距 $L_B = \max\{L_{Bx}, L_{By}\}$ 。

2.2 冲刷机制 目前，对圆柱单桩局部冲刷机理基本形成共识^[19]：桩基阻水后在其上游附近形成向下的螺旋水流；两侧绕流出现马蹄形漩涡；同时在塔基下游附近激发出涡流；漩涡或涡流将周围床面泥沙卷起并挟带至下游，从而形成局部冲刷坑(见图3)。然而，当多个桩间距较小时，由于群桩效应，其局部冲刷物理机制比单桩要复杂的多，附近的水沙运动很难用数学方程进行表达，至今仍无成熟的理论解析方法。

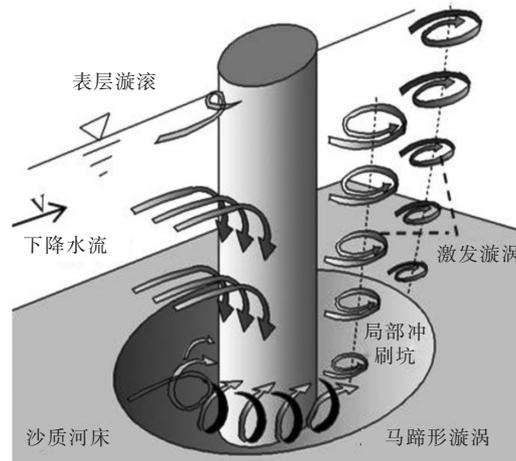


图3 圆柱单桩椭圆状局部冲刷机制示意

结合泥沙运动学，通过观察群桩局部冲刷试验并分析其物理机制可知，局部冲刷坑的形成主要是桩基附近垂向与纵向流速共同作用下形成的横轴旋涡将受影响区域内的床面泥沙不断转移到下游的结果。桩群上游附近水流作用于床面时，近底水流的扬沙能力代表了水流输沙强度，表现为床面泥沙受到的上举力与自身惯性力的较量。同时，试验中发现当横向相邻桩的间距小于 $12R$ 时，桩与桩之间的水流将被压缩，其流场的改变对冲刷深度及平面形态都有重要影响。因而，群桩局部冲刷坑平面形态的主要影响因素可归结为水流扬沙能力和桩群几何结构。一些学者的研究成果也与该观点相似^[20-21]。

水流扬沙能力主要与塔基上游附近的行近流速 V 及床沙粒径 D 有关，反映的是床面泥沙起动后向下游输移的浓度。桩群几何结构由于对水流结构的影响也使床面泥沙起动和输移的状态发生改变，从而最终体现在局部冲刷坑的平面形态上。桩群几何结构特征可采用桩群最大阻水宽度 $L_{Bm} = L_B + 2R$ 。当 $L_B = 0$ 时，实际就是单桩冲刷情形。

基于局部冲刷平面尺度影响分析，结合已有研究成果^[2,22]，本研究提出一个综合反映塔基局部冲刷强度的指标 ψ ，其结构形式如下：

$$\psi = \left(\frac{L_{Bm}}{L_0} \right) \left(\frac{V}{V_c} \right) \quad (1)$$

式中： L_0 为桩群特征长度，与群桩分布形式有关，在群桩分布规则时取 $L_0 = 1 \text{ m}$ ； V_c 为泥沙起动流速；式子右侧两项可看作桩群结构因子(L_{Bm}/L_0)和水流强度因子(V/V_c)，分别反映了桩群几何结构和塔基附近水流扬沙能力对冲刷的影响。

根据上文分析可知，塔基局部冲刷平面尺度应是局部冲刷强度指标 ψ 的函数，则局部冲刷坑的长度 L_p 和宽度 B_p 可分别表示为：

$$L_p = L_0 f_1(\psi) \quad (2)$$

$$B_p = L_0 f_2(\psi) \quad (3)$$

3 物理模型试验

上文通过物理机制分析定义了塔基局部冲刷平面尺度与局部冲刷强度指标之间的函数关系。在多沙河流中，该函数式的具体结构及相关参数可采用物理模型试验予以确定。本研究的塔基冲刷模型试验在清华大学黄河研究中心顺义基地开展。

3.1 试验平台 根据研究问题的性质，试验需采用正态模型，取其几何比尺 100，主要进行动床局部冲刷变形研究。河道模型平台的来水来沙与河床边界条件需要能够代表多沙河流的特性，因此，参考黄河下游的河道比降 0.12‰ 对初始河床予以概化，同时，河床泥沙中值粒径选为 0.1 mm。在正式试验时，桩群外边线或对角线布置为正对来流方向，则实际主要对塔基前主流流速进行控制，而且仅需模拟对塔基局部冲刷有直接影响的主流带流动状况，故模型试验平台可以建成水槽形式。

模型试验水槽长 38 m、宽 2.3 m、深 0.8 m，其平面布置及供水系统设计见图 4。试验水槽进口处布设安装了 30 kW 的离心泵供水设备，最大出流量为 700 m³/h，通过输水管路与进口电磁流量计连接；水流经过消能、稳流、调整后进入有效试验段，有效观测段长 30 m，主要观测长度 25 m；水槽尾部布设了可以调节控制尾部水位高低的尾门装置。

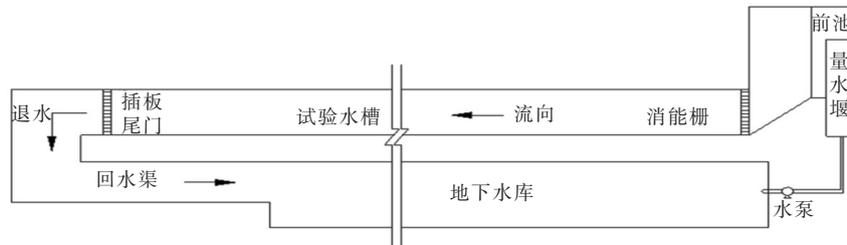


图 4 塔基冲刷试验模型水槽及其供水系统设计

3.2 模型设计 本研究采用张红武提出的局部冲刷模型设计方法^[23]，该方法在开展南水北调中线穿黄渡槽墩局部冲刷试验时曾利用黄河京广铁桥冲刷资料进行过验证，因此，用来开展塔基局部冲刷试验是可靠的。对于多沙河流中发生的局部冲刷，模型沙的选择至关重要，其水下容重是影响泥沙运动相似性的重要指标。根据已往局部冲刷研究经验，并综合考虑河道水流、泥沙运动特征，拟选用容重为 1.9 t/m³ 的拟焦作为模型床沙。实践表明，拟焦作为天然沙的模型具有干容重小、凝聚力弱、起动流速小、不易板结及能满足模型长时间放水试验等优点，可以较好地模拟多沙河流床面层及附近的泥沙运动。由于滩地水流对局部冲刷变形影响较小，局部试验往往只选取主槽或主槽的一部分作为研究对象，悬沙中床沙质的存在对局部冲刷平面形态发展具有一定影响，但那些冲泻质对冲刷并无贡献，因此可不必考虑^[2]。此外，作为最不利条件的主流带冲刷过程，“少沙大水型”水沙条件的试验成果会略偏于安全，本试验进口水流含沙量按 3 ~ 5 kg/m³ 左右控制。计算主流带床沙质分界粒径为 0.026 mm，在悬沙级配中小于该粒径的沙重约占 30%，则实际悬沙含量为 9.9 ~ 16.5 kg/m³，显然满足多沙河流的要求。塔基局部冲刷模型试验设计的比尺汇总见表 1。

表 1 模型试验设计的比尺汇总

比尺名称	数值	依据	比尺名称	数值	依据
水平比尺 λ_L	100	场地状况	含沙量比尺 λ_s	1.85	水流挟沙相似
垂直比尺 λ_H	100	试验要求	悬沙干容重比尺 λ_{r0}	1.86	淤积物资料
流速比尺 λ_V	10	$\lambda_V = \sqrt{\lambda_H}$	推移质干容重比尺 λ_{rb}	1.63	原型及模型沙
流量比尺 λ_Q	100000	$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_H \lambda_V$	推移质输沙率比尺 λ_{gb}	1370	推移质输沙相似
起动流速比尺 λ_{Vc}	11	$\lambda_{Vc} = \lambda_V$	悬沙河床变形时间比尺 λ_{t2}	10.86	$\lambda_{t2} = \lambda_{r0} \lambda_{t1} / \lambda_s$
时间比尺 λ_{t1}	10	$\lambda_{t1} = \lambda_L / \lambda_V$	推移质河床变形时间比尺 λ_{t3}	11.90	河床变形相似

3.3 试验方案 根据类似局部冲刷试验可知^[23]，多沙河流中发生大洪水时，塔墩冲刷在初始阶段一般发展迅速；之后，随着历时增加冲刷坑平面变化逐渐减缓；当到达某一历时后冲刷坑形态基本趋于稳定。本研究在试验过程中主要通过观察与测量分析，确定冲刷不再发展后停水，从而保证河床达到稳定状态。临界起动流速采用可同时适用于光滑河床和粗糙河床条件并能体现含沙量对泥沙起动影响的张红武临界起动流速公式^[24]进行计算。同时，为避免或减小水深差异的影响，通过进口流量与尾门开度使每种水流强度的初始水深基本保持在10 m左右。试验中，塔基结构采用工程实践中最常见的2×2型及4×4型两种设计形式，且桩群外边线或对角线正对来流方向。

塔基模型试验主要以不同水流强度(粒径与水深确定，主要为流速)和桩群最大阻水宽度(桩间距与桩半径)作为控制条件。其中，承台桩群最大阻水宽度 L_{Bm} 共有7种，原型大小分别为1、3、4.6、4.8、6、8和10 m。对其中的每一种群桩结构，分别进行2.33、2.58、3.85、4.50、5.78、6.80、7.79、8.45和9.42等9个水流相对强度(V/V_c)的试验。目的是研究不同承台桩群结构在不同水流强度下塔基局部冲刷稳定后的平面形态。为保证实测数据的统计准确性，对每组工况均进行重复试验，结果取均值。塔基局部冲刷模型试验情景见图5所示。

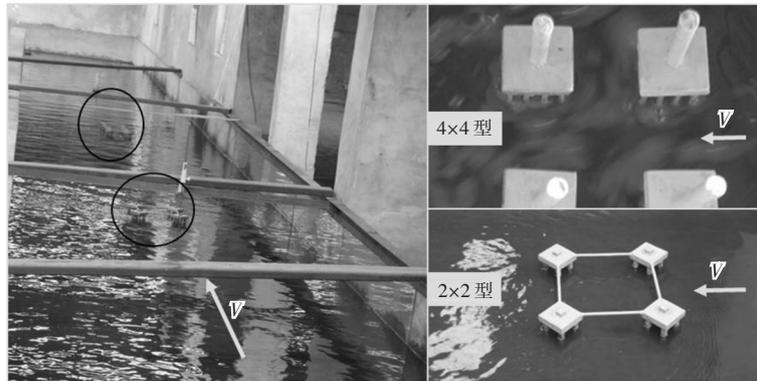


图5 两种塔基模型在水槽中冲刷试验情景

3.4 结果分析 前文提及河道内塔基局部冲刷坑的平面形态主要与塔基自身结构及水流相对强度有关。根据局部冲刷物理机制的内涵关系，得到了局部冲刷平面长度和宽度的函数形式。按照试验方案中设计的水流强度与塔基结构进行组合，并对每种组合工况进行试验。将承台桩群在充分冲刷后的局部冲刷坑平面形态试验结果进行统计分析，可得到局部冲刷强度指标 ψ 与塔基局部冲刷坑的纵向长度 L_p 及横向宽度 B_p 的散点关系。为使量纲和谐，纵坐标均采用无量纲参数，如图6、图7所示。

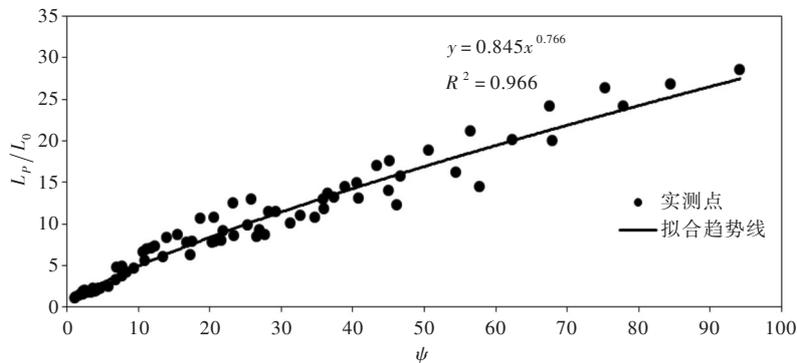


图6 塔基局部冲刷平面长度与局部冲刷强度指标的关系

图6和图7表明：(1)经充分冲刷后，河道内塔基承台周围的局部冲刷平面尺度与局部冲刷强度指标呈正相关关系，即水流相对强度和桩群阻水宽度共同决定了塔基周围局部冲刷的平面尺度大小，揭示了局部冲刷的影响因素及冲刷程度反映在平面形态结果上的内在机制；(2)随着局部冲刷强度的增加，局部冲刷坑长度和宽度的散点都趋向于幂式增长，实测数据紧密分布在趋势线附近，故其函数关系可近似拟合为指数结构。

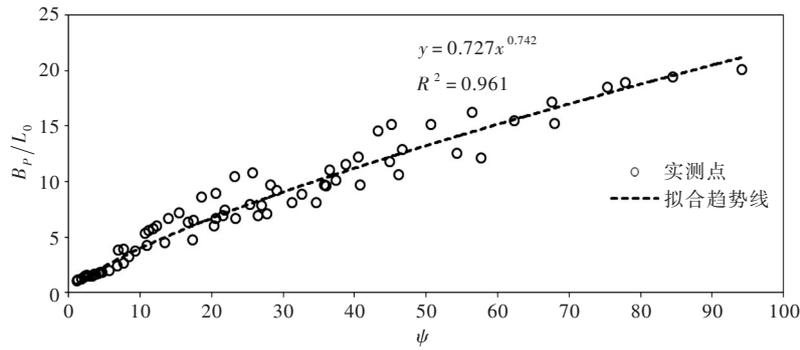


图7 塔基局部冲刷平面宽度与局部冲刷强度指标的关系

根据塔基试验平面尺度统计结果进行相关分析,可回归得到式(2)和式(3)的具体表达形式,分别如下:

$$L_p = 0.845L_0\psi^{0.766} \quad (4)$$

$$B_p = 0.727L_0\psi^{0.742} \quad (5)$$

式(4)和式(5)的可决系数 R^2 分别为0.966和0.961,说明回归曲线对观测值的拟合程度较好,即回归方程在预测塔基承台下桩群局部冲刷的平面长度与宽度时具有较好的精度。

4 工程实例验证

采用黄河下游两个输电线路大跨越工程(可分别称为“晋-苏线”及“蒙-鲁线”)的群桩塔基局部冲刷试验资料^[25-26],对本文的塔基局部冲刷平面尺度公式进行验证。“晋-苏线”和“蒙-鲁线”工程各有3座塔基,均为单线(单塔基)和并线(双塔基)两种布置形式。塔基建在黄河下游河道内,床沙中值粒径基本接近0.1 mm,根据张红武公式^[24]计算得床沙临界起动流速约为0.263 m/s。两跨河工程中塔基的布置及结构基本情况见表2;试验工况及水力要素见表3。

表2 两跨河工程的塔基布置及结构情况

塔基名称	布置方式	群桩分布	桩半径 R/m	群桩最大间距 L_B/m	群桩最大阻水宽度 L_{Bm}/m
晋-苏线	单塔基在上游	2×2型	0.75(单、双)	7.07(单)、6.36(双)	8.57(单)、7.86(双)
蒙-鲁线	双塔基在上游	2×2型	0.6(单)、0.8(双)	6.36(单)、7.86(双)	7.56(单)、9.06(双)

表3 两跨河工程的塔基试验工况及水力要素

工程名称	试验工况	洪水频率	流量 $Q/(m^3/s)$	行近流速 $V/(m/s)$		局部冲刷强度指标 ψ	
				单塔基	双塔基	单塔基	双塔基
晋-苏线	工况1	设防流量	17500	1.60	1.54	52.14	46.02
	工况2	百年一遇	13000	1.17	1.16	38.13	34.67
	工况3	五十年一遇	11400	1.03	0.98	33.56	29.29
蒙-鲁线	工况4	设防流量	11000	1.75	1.85	50.30	63.73

根据式(4)和式(5)对两组塔基的局部冲刷平面长度与宽度进行计算,并与模型试验实测值进行比较,结果见表4。

从表4中两组塔基4种试验工况的对比结果看,计算结果与实测值较为符合,误差基本控制在10%以内,说明拟合公式的计算精度良好。

5 结论

基于泥沙运动学理论,本文采用物理模型试验手段对规则分布的群桩塔基局部冲刷平面尺度进

表4 塔基局部冲刷实测值与计算值比较

(单位: m)

试验工况	塔基形式	局部冲刷坑长度 L_p			局部冲刷坑宽度 B_p		
		计算值	实测值	误差/%	计算值	实测值	误差/%
工况1	单塔基	17.47	17.10	2.14	13.67	12.50	9.33
	双塔基	15.87	15.40	3.08	12.46	12.00	3.82
工况2	单塔基	13.74	13.90	-1.13	10.83	10.30	5.19
	双塔基	12.78	13.50	-5.35	10.10	10.70	-5.64
工况3	单塔基	12.46	13.10	-4.85	9.86	10.50	-6.13
	双塔基	11.23	10.50	6.94	8.91	8.50	4.81
工况4	单塔基	16.99	18.00	-5.59	13.31	14.20	-6.28
	双塔基	20.37	20.00	1.85	15.86	15.20	4.36

行了研究, 主要得出以下结论:

(1) 通过试验观察与分析, 对规则分布的群桩塔基局部冲刷坑平面形态进行概化, 并提出了一个综合反映水流强度与桩群结构影响的局部冲刷强度指标。

(2) 对7种结构的塔基分别在9级水流强度下进行模型试验, 统计并点绘了其局部冲刷平面尺度与局部冲刷强度指标的关系曲线, 得到了与实测数据拟合较优的回归方程。

(3) 采用两组2×2型工程实例对塔基平面尺度回归公式进行试验验证, 其结果显示公式计算值与实测值比较符合, 误差小于10%。

本文在理论分析的基础上, 通过物理模型试验统计回归了常见规则分布的群桩塔基局部冲刷平面尺度公式, 并验证了其在黄河下游中常见塔基形式的适用性。然而, 塔基工程实践中的群桩分布并非全部规则, 因此尚需要进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] DENG L, CAI C S . Bridge scour: prediction, modeling, monitoring, and countermeasures: review[J] . Pract . Period . Struct . Des . Constr . , 2010, 15(2): 125-134 .
- [2] 张红武, 马建业, 张俊华, 等 . 河流桥渡设计[M] . 北京: 中国建材工业出版社, 1993 .
- [3] JOHN E RICHARDSON, VIJAY G PANCHANG . Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(5): 530-540 .
- [4] 张浙杭, 傅剑鸣, 朱天浩, 等 . 舟山大跨越输电工程海中输电塔塔基局部冲刷研究[J] . 电力建设, 2011, 32(1): 41-44 .
- [5] 王金权, 李最森 . 杭州湾跨海大桥海中平台与匝道墩局部冲刷及防护试验研究[J] . 中外公路, 2013, 33(5): 84-88 .
- [6] 李磊, 谷洪钦, 于万春 . 波流作用下输电线路海中立塔局部冲刷计算方法[J] . 人民长江, 2015, 46(5): 47-49 .
- [7] 侯志军, 伊晓燕, 孙一, 等 . 多沙河流高压输电塔基冲刷试验研究[J] . 人民黄河, 2017, 39(7): 55-60 .
- [8] 董文虎, 段文忠 . 国内外非黏性土桥墩局部冲刷计算方法综述[J] . 郑州工业大学学报, 1997(2): 94-97 .
- [9] 黄建维, 高正荣, 卢中一, 等 . 大型群桩基础局部冲刷防护技术专题报告[R] . 南京: 南京水利科学研究所, 2006 .
- [10] 祝志文, 喻鹏 . 中美规范桥墩局部冲刷深度计算的比较研究[J] . 中国公路学报, 2016, 29(1): 36-43 .
- [11] 江胜华, 周智, 欧进萍 . 桥墩局部冲刷防护的石块起动[J] . 泥沙研究, 2013(4): 63-67 .
- [12] 周玉利, 崔洪才 . 桥墩局部冲刷护坦防护的试验研究[J] . 西安公路交通大学学报, 1999(3): 36-38 .
- [13] 雅罗斯拉夫采夫 N A . 桥渡局部冲刷计算[M] . 交通部勘测设计院译 . 北京: 交通部勘测设计院, 1958 .
- [14] 阚译 . 桥渡冲刷[M] . 北京: 中国铁路出版社, 2004 .
- [15] TISON T J . Local scour in rivers[J] . Journal of Geophysical Research . 1961, 66(12): 4227-4232 .
- [16] 阚译, 曹瑞章 . 桥渡一般冲刷计算公式的改进[R] . 北京: 铁道科学研究院, 1964 .

- [17] BAKER C J . Theoretical approach to prediction of local scour around bridge piers[J] . Journal of Hydraulic Research, 1980, 18(1): 1-12 .
- [18] 刘宝山 . 桥墩局部冲刷 65-1 式在某桥多层土壤中的应用[J] . 桥梁建设, 1982(1): 69-75 .
- [19] LES HAMIL . Bridge Hydraulics[M] . London: E&FN Spon, 1999 .
- [20] MOHAMMED T A, MEGAT M J, NOOR M, et al . Physical modeling of local scouring around bridge piers in erodable bed [J] . King Saud University, 2007, 19(2): 195-207 .
- [21] SOLAIMANI N, AMINI A, BANEJAD H, et al . The effect of pile spacing and arrangement on bed formation and scour hole dimensions in pile groups [J] . International Journal of River Basin Management, 2017, 15 (2) : 219-225 .
- [22] 钱宁, 万兆惠 . 泥沙运动力学[M] . 北京: 科学出版社, 1983 .
- [23] 长江委勘测规划设计院和黄委勘测规划设计院穿黄工程联合项目组 . 南水北调中线一期穿黄工程可行性研究阶段方案比选报告[R] . 2004 .
- [24] 张红武 . 泥沙起动流速的统一公式[J] . 水利学报, 2012, 43(12): 1387-1398 .
- [25] 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 水利部黄河泥沙重点实验室 . 山西 ~ 江苏±800kV 特高压直流输电线路黄河大跨越塔基基础冲刷模型试验报告[R] . 2015 .
- [26] 清华大学 . 内蒙古扎鲁特 ~ 山东青州±800kV 特高压直流输电线路黄河大跨越工程群桩基础局部冲刷模型试验报告[R] . 2016 .

Experimental study on local scour plane size around the pile groups of tower foundation in sandy rivers

CAO Shuai¹, ZHANG Hongwu^{1, 2}, ZHU Mingdong², ZHANG Tingwei²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Yellow River Research Center, Tsinghua University, Beijing 101309, China)

Abstract: The plane size of local scour pit is the guiding basis for protecting the riverbed that may be scoured in sandy rivers, and it is also an important component for predicting the local scour results of pile groups. Based on the theory of sediment kinematics, this paper analyzed the evolution and influencing factors of regularly distributed pile groups in the local scour process, and put forward a local scour intensity index which can comprehensively reflect the influence of water flow intensity and tower foundation structure. On this basis, the physical model test method is adopted, and the correlation between local scour intensity index and plane size was obtained through statistical analysis. Finally, the regression equations were verified by two groups of river-crossing engineering examples. The results show that the calculated value of the fitting formula is in good agreement with the measured value with an error of less than 10%, which can provide a technical reference for the protection of the bed surface around regularly distributed pile groups in sandy rivers.

Keywords: pile groups; local scour; plane size; physical model test; regularly distributed; sandy rivers

(责任编辑: 李福田)