

上游河床地形对桥墩局部冲刷的影响

魏松, 戴齐超, 章飞凡, 肖淑霞, 陈清

The influence of upstream riverbed topography on local scouring around bridge piers

WEI Song, DAI Qichao, ZHANG Feifan, XIAO Shuxia, CHEN Qing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240319003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

进占方式对戽堤局部冲刷影响的三维数值模拟

Three-dimensional numerical simulation of the influence of advancement patterns on local scour around dike
水利水电工程学报. 2023(1): 53 <https://doi.org/10.12170/20210309004>

跨海桥梁基础冲刷特征研究

Scour features of sea-crossing bridge piers
水利水电工程学报. 2021(4): 131 <https://doi.org/10.12170/20210105002>

天然河道丁坝群局部冲刷三维数值模拟

Three-dimensional numerical simulation of local scour based on spur dikes in a natural river
水利水电工程学报. 2020(1): 59 <https://doi.org/10.12170/20180920001>

波流作用下淹没圆柱局部冲深影响因素分析

Research on the influencing factors of scour depth around submerged cylinder under combined action of wave and current
水利水电工程学报. 2019(6): 69 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.008>

长江下游河段桥墩压缩冲刷预测研究

Prediction of bridge pier compression scour in lower reaches of Yangtze River
水利水电工程学报. 2019(3): 16 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.003>

考虑长径比及冲刷的单桩基础侧向承载特性分析

Analysis of lateral bearing behaviors of scoured monopile foundations considering the influence of length-to-diameter ratio
水利水电工程学报. 2023(5): 95 <https://doi.org/10.12170/20220419001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240319003

魏松, 戴齐超, 章飞凡, 等. 上游河床地形对桥墩局部冲刷的影响[J]. 水利水运工程学报, 2025. (WEI Song, DAI Qichao, ZHANG Feifan, et al. The influence of upstream riverbed topography on local scouring around bridge piers[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(in Chinese))

上游河床地形对桥墩局部冲刷的影响

魏松¹, 戴齐超¹, 章飞凡², 肖淑霞¹, 陈清¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 河道内采砂、疏浚、筑坝等人类活动所形成高低起伏的河床地形改变了河道水流流态、威胁下游桥梁基础安全, 河床地形对桥梁基础局部冲刷影响的研究甚少。采用概化平床、凹床和凸床等 3 种墩前河床地形, 考虑凹、凸河床地形尺寸、与桥墩间距离、来水流速等因素, 进行室内水槽试验, 就河床地形对下游桥墩墩周局部冲刷的影响进行研究。结果表明: 与平床相比, 凹床使得墩前水平流速梯度减小、凸床则增大; 凹、凸床地形均导致墩周局部冲刷进程加快、冲刷程度加剧; 凹、凸床地形对墩前流速分布和墩周冲刷坑形态的影响程度与地形相对高度呈正相关、与地形变化点和桥墩距离呈负相关。基于试验数据, 得到考虑地形因素的桥墩局部冲刷深度计算公式, 提出了上游河床地形影响桥墩局部冲刷界限距离的概念及预测方法, 可为实际工程管理提供参考。

关键词: 河床地形; 局部冲刷; 模型试验; 冲刷深度; 地形影响界限距离

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号:

河道采砂、疏浚、筑坝等工程措施会导致水生态环境破坏、下游河床下切和河道整体退化^[1-2]等问题, 甚至可能威胁附近涉水建筑物的安全^[3-4]。桥梁是常见涉水建筑物, 位于河道中的桥墩在水流作用下易发生基础局部冲刷并损伤或损毁桥梁。地形改变将使河道水流紊动加剧, 所造成的桥墩基础局部冲刷影响规律不明, 需要进一步开展研究。Barman 等^[5-6]利用水槽试验模拟了采砂河床的形态变化和水流特性, 发现采砂坑及下游区域的雷诺剪切应力和湍流强度大于上游区域; Lade 等^[7-8]利用室内水槽试验对比了有、无采砂坑工况的下游桥墩冲刷情况, 认为采砂坑的存在会使桥墩附近的冲刷深度和范围增大, 且这种影响会随着桥墩与采砂坑间距离的减小而加剧; Daneshfaraz 等^[9]利用 Flow-3d 软件模拟了采砂坑对上、下游群桩局部冲刷的影响, 观察到下游群桩的局部冲刷深度大于上游群桩, 认为采砂活动造成了下游桥墩周围河床的过度侵蚀; 齐梅兰等^[10]研究了由于河道采砂而产生的溯源冲刷对上游桥墩局部冲刷的影响, 发现在溯源冲刷影响范围内的桥墩总冲刷深度是局部冲刷的数倍。此外, HEC-18 报告^[11]也指出, 大型河流上存在河床沙丘、凹槽分别会导致桥墩最大冲刷深度比公式预测值大 30%、10%。

综上所述, 河床地形的改变对河道既有桥梁桥墩基础冲刷存在显著影响, 已有研究主要针对凹床地形对桥墩局部冲刷的影响开展, 但实际工程中凹凸地形均存在, 考虑不同地形条件的综合影响和探讨内在作用机理的研究较少。因此, 开展不同河床地形因素对河道和涉水构筑物影响的研究, 对指导采砂等河道的运行管理活动具有重要的理论意义和实践价值。本文针对概化的平床、凸床、凹床等 3 种地形, 考虑不同凸床和凹床地形尺寸, 开展桥墩局部冲刷的水槽试验, 拟通过对流场和冲坑演化的分析, 探究河床地形与桥

收稿日期: 2024-03-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3202502)

作者简介: 魏松(1970—), 男, 安徽霍邱人, 副教授, 博士, 主要从事水力学相关研究工作。

E-mail: weisong@hfut.edu.cn 通信作者: 戴齐超(E-mail: 2903256430@qq.com)

墩局部冲刷间内在机理和量化规律,为河道管理提供理论支撑。

1 试验条件

试验采用侧壁透明玻璃矩形水槽。水槽全长 27.6 m,宽 0.6 m,高 0.6 m,纵断面如图 1 所示。水槽通过首端溢流槽进水阀调节入槽流量,通过末端尾门控制水槽内水深和流速。试验开始前,在水槽底部铺设中值粒径 $d_{50}=0.45$ mm、厚度 10 cm 的床沙。参考相关文献^[2]采用直径 D 为 4 cm 的单圆柱作为模型桥墩,布设在水槽中轴线的中段。

本研究拟定平床、凹床和凸床 3 种地形,采用不同的凹床深度和凸床高度 H 以考虑凹凸程度因素,同时考虑近墩地形变化点与桥墩间距离 L 的影响。试验中设定了凹床和凸床地形段范围均为 100 cm,凹床上游和下游斜坡均为 1:3、梯形断面;凸床采用三角形地形,上、下游坡水平长度分别为 75、25 cm。试验水深为 $h=20$ cm,采用 3 种水流行进流速 V ,最大流速为 20 cm/s。根据沙莫夫公式^[13]计算可得泥沙起动流速为 $V_c=0.278$ m/s,本次试验流速小于起动流速、为清水冲刷试验。

根据沙床地形,试验分为 A、B、C、D、E 共 5 组。A 组为平床地形;B、C 组为凹床地形,深度 H 为 -4、-10 cm(负值表示低于沙床面);D、E 组为凸床地形,高度 H 为 4、8 cm(正值表示高于沙床面)。根据 4 个近墩地形变化点与桥墩间距离 L 、3 个水流行进流速 V ,B~E 组中每组设置了 12 个工况。试验分组、工况代号及对应参数见表 1,水槽沙床地形及桥墩布置见图 2。

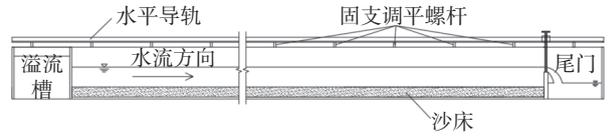


图 1 水槽纵剖面示意

Fig. 1 Longitudinal section of the flume

表 1 试验分组及对应参数

Tab. 1 Experimental grouping and corresponding parameters

地形类型	工况代号	H/cm	L/cm	$V/(cm/s)$	地形类型	工况代号	H/cm	L/cm	$V/(cm/s)$	地形类型	工况代号	H/cm	L/cm	$V/(cm/s)$
平床	A1	0		15	凹床	C3	-10	120	15	凸床	D8	4	160	18
	A2	0		18		C4	-10	160	15		D9	4	40	20
	A3	0		20		C5	-10	40	18		D10	4	80	20
凹床	B1	-4	40	15		C6	-10	80	18		D11	4	120	20
	B2	-4	80	15		C7	-10	120	18		D12	4	160	20
	B3	-4	120	15		C8	-10	160	18		E1	8	40	15
	B4	-4	160	15		C9	-10	40	20		E2	8	80	15
	B5	-4	40	18		C10	-10	80	20		E3	8	120	15
	B6	-4	80	18		C11	-10	120	20		E4	8	160	15
	B7	-4	120	18		C12	-10	160	20		E5	8	40	18
	B8	-4	160	18		D1	4	40	15		E6	8	80	18
	B9	-4	40	20		D2	4	80	15		E7	8	120	18
	B10	-4	80	20	D3	4	120	15	E8	8	160	18		
	B11	-4	120	20	D4	4	160	15	E9	8	40	20		
	B12	-4	160	20	D5	4	40	18	E10	8	80	20		
C1	-10	40	15	D6	4	80	18	E11	8	120	20			
C2	-10	80	15	D7	4	120	18	E12	8	160	20			

试验中采用局部冲刷最大深度 30 min 内变化率小于 5% 作为冲刷平衡标准,与文献^[4]中标准相符。当达到局部冲刷平衡状态时,开始测量冲刷坑深度、形态和墩周流速分布。采用钢尺和水位测针分别测量冲刷坑宽度和深度,采用声学多普勒流速仪(ADV)测量水流水平流速。

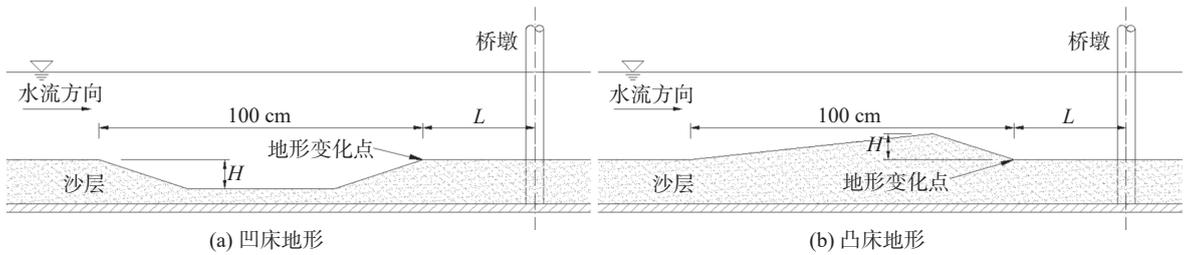


图2 水槽沙床地形及桥墩位置示意

Fig. 2 Sandbed topography and pier location in the flume

为深入研究地形因素对桥墩局部冲刷的影响, 试验中沿水槽轴线在桥墩前后各 40 cm 范围内, 采用 10 cm 等间距布置流速测点, 在深度方向按距离沙床面 $0.15h$ 、 $0.25h$ 、 $0.35h$ 、 $0.45h$ 、 $0.55h$ 、 $0.65h$ (本次试验水槽水深 $h=20$ cm) 高度处布置测点, 测点在纵、横方向形成垂直、水平测线, 垂直测线布置有 6 个测点、水平测线有 8 个测点, 各测线布置见图 3。

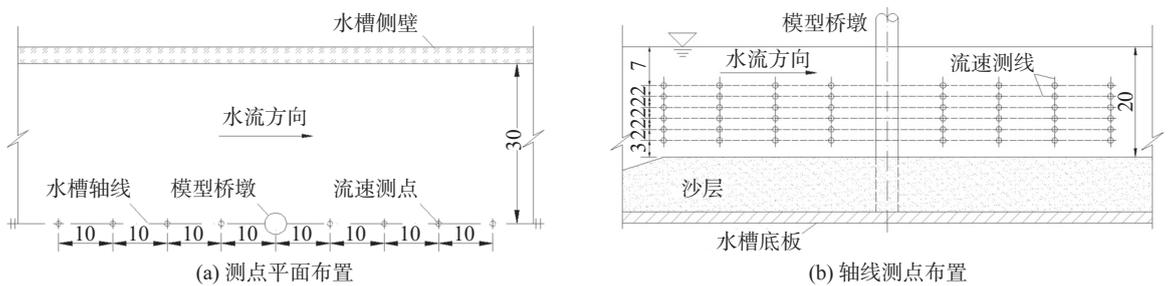


图3 水槽流速测段及测点布置(单位: cm)

Fig. 3 Flow velocity measurement sections and points in the flume (unit: cm)

2 考虑地形因素的桥墩上下游水平流速分析

桥墩使其附近水流发生显著变化, 墩周将形成扰流区域^[15], 形成墩前壅水、马蹄形漩涡、向下射流和尾迹涡流的流场水流结构^[16-17]。主要对桥墩上、下游 40 cm 范围内的测点水平流速进行分析, 探究凹凸河床地形、近墩地形变化点与桥墩间距离 L 及地形高度 H 对桥墩附近水流的影响。

2.1 河床地形因素影响分析

图 4 给出了水槽行进流速 $V=15$ cm/s 时, 平床 A1 工况、桥墩与近墩地形变化点间距离为 40 cm 的凹床 B1 ($H=-4$ cm) 及凸床 D1 ($H=4$ cm) 工况下沿水槽轴线不同高度水平测线的测点流速。

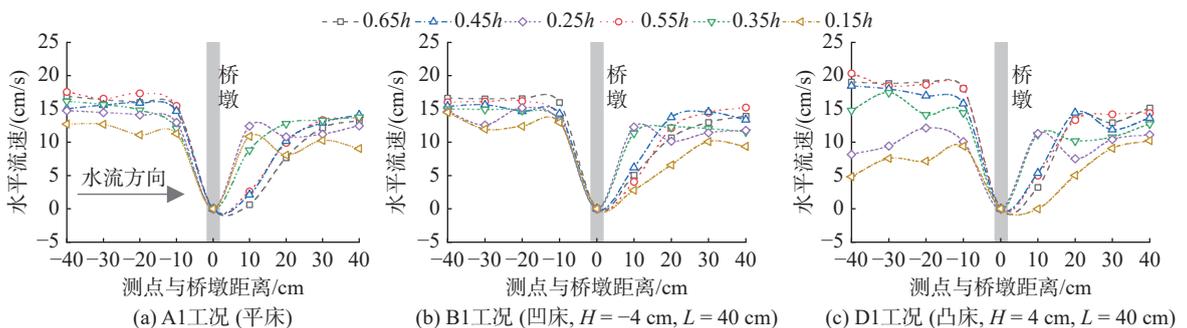
图4 不同地形下水槽轴线流速分布 ($V=15$ cm/s)Fig. 4 Flow velocity distribution along the flume axis for different topographies ($V=15$ cm/s)

图 4(a) 显示,平床 A1 工况下,桥墩上游区域同一水深的流速沿程变化不大,而墩后区域水平流速变化较大,水平流速沿程、随水深变化都更为剧烈。图 4(b) 显示,凹床 B1 工况时,墩前-40~ -20 cm 段中上层水流水平流速基本稳定、规律与平床基本一致,但墩前-10 cm 的底层流速和水平流速平均值较平床稍有增加,这表明凹床中斜向上坡面引导坑内下层水流向上流动对墩前水流有一定顶托助推作用。图 4(c) 显示,凸床 D1 工况时,墩前水流水平流速较前两种地形变化明显,中上层水流水平流速基本稳定但流速较平床要大,下层水深内的水流流量值变化梯度加大,特别是下层 1/3 高度的测点流速降低,只有行进流速的 1/3~1/2,这主要由于凸床地形上游坡面引起的挑流导致了上层水流流速增大、下层流速减小,造成了流速明显的变化梯度。

综上所述,桥墩对墩前水流水平流速的影响主要体现在近墩-20 cm 之后,在墩前 5D 范围内桥墩对水流的扰动作用逐渐加剧,文献 [18] 中墩前 60% 墩长处形成明显下降水流的结论亦位于上述范围内。这说明本文墩前测点范围能涵盖主要影响区域,布置合理。此外,相对于平床,凹、凸床地形条件下均存在坡面地形对水流的挑流作用,凸床影响更加剧烈。可认为地形对墩周流态的影响将与桥墩阻水形成叠加效应,将对桥墩局部冲刷造成一定的影响。

2.2 近墩地形变化点与桥墩间距离影响分析

从前述 $L=40$ cm 桥墩距离地形最近试验工况分析可见, L 是地形对桥墩上下游水平流速影响的重要表征,为此需要对 L 的影响进行针对性分析。图 5 给出了 $V=18$ cm/s 下凹床地形 $H=-4$ cm 和凸床地形 $H=4$ cm 时, L 分别为 40、80、120、160 cm 对应各工况的水槽轴线水平流速分布。

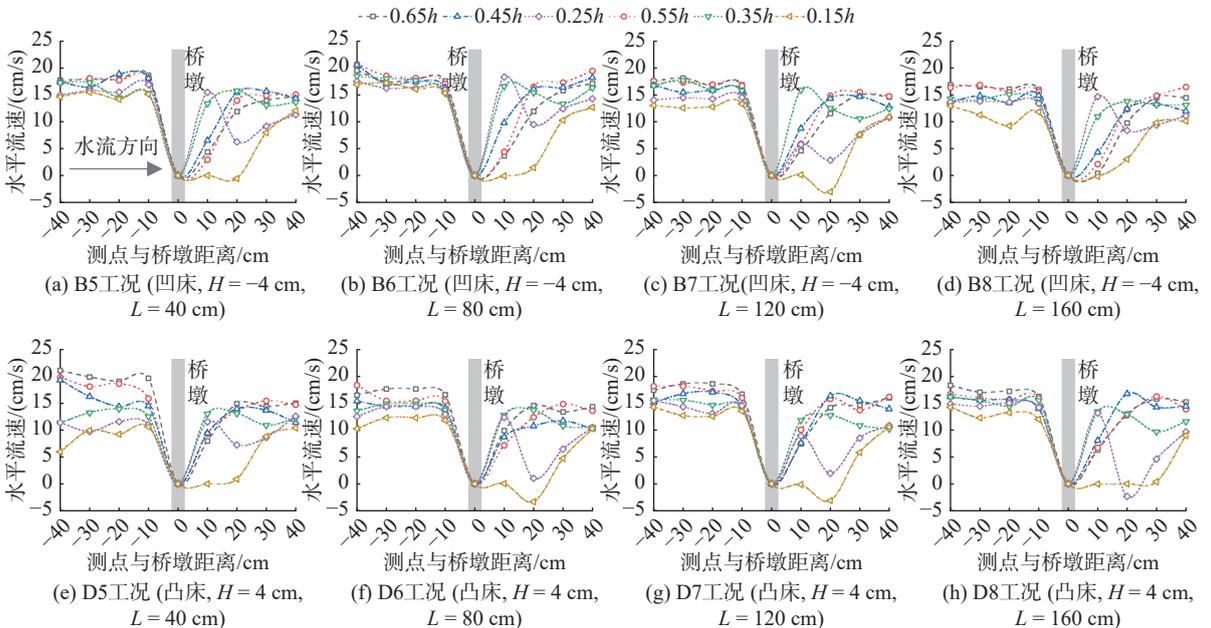


图 5 间距 L 不同时水槽轴线流速分布 ($V=18$ cm/s)

Fig. 5 Flow velocity distribution along the flume axis at different distances L ($V=18$ cm/s)

对于凹床地形, $L=40、80$ cm 时墩前各水深的水平流速值较为接近;随着地形变化点与桥墩距离 L 的增加,墩前水平流速梯度逐渐变大,而测线平均流速和近底流速逐渐减小; $L=160$ cm 时水平流速分布特征基本与平床类似。这是由于水流由地形凹槽内流向近墩地形变化点时,坡面引导坑内下层水流向上流动,导致下层流速增大,而上层水流受影响较小,因此靠近地形变化点处水流流速梯度较小;随着距离 L 的增加,凹床地形对水流的影响不断减小,水流特性逐步过渡到与平床地形类似。

对于凸床地形, $L=40$ cm 时墩前水平流速随水深变化幅度较大,尤其 D5 工况墩前-40 cm 处,正位于地形变化点,0.15h 流速仅约为 0.65h 流速的 30%;随着距离 L 的增加,上层流速开始逐渐稳定,下层流速增

大,各水深流速值的差异逐渐减小, $L=160\text{ cm}$ 时墩前 $0.15h$ 流速保持在 $0.65h$ 流速的70%以上,与平床工况下基本相同。这是由于凸床地形上游坡面引起的挑流导致下游的上层水流流速增大,下层流速减小,形成了上下层流速较大的流速梯度,在近墩地形变化点处最为显著;地形变化点后,凸床对水流的影响沿程不断衰减,流速分布沿程逐渐向平床转变。

上述分析可知,凹、凸床地形对下游墩前流速有明显影响,凹床地形会使下游的水流流速梯度减小,凸床地形会使下游的水流流速梯度增大,随着地形变化点与桥墩间距离 L 的增加,这种影响会逐渐降低,在 $L=160\text{ cm}$ 时影响已有限。

2.3 河床地形相对高度影响分析

图6给出了 $V=15\text{ cm/s}$ 下凹床地形 $H=-4$ 和 -10 cm 的B1、C1工况,以及 $V=18\text{ cm/s}$ 凸床地形 $H=4$ 和 8 cm 的D6、E6工况水槽轴线水平流速分布,以分析地形相对高度不同时的水平流速分布特征。

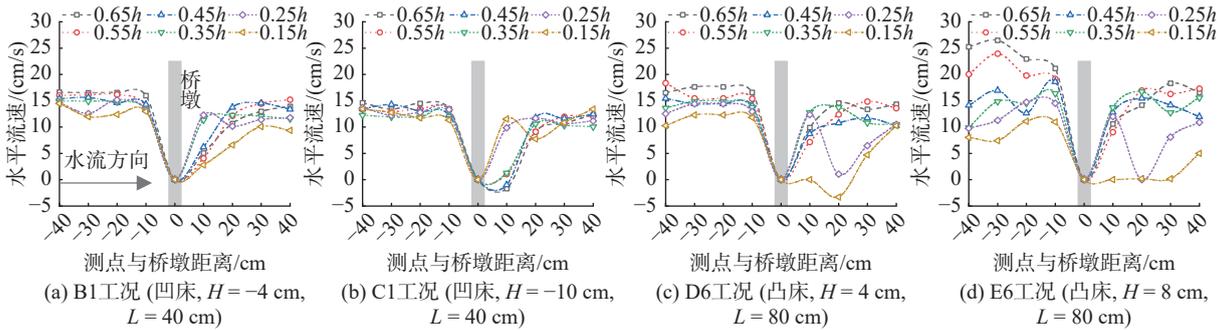


图6 地形相对高度 H 不同时水槽轴线流速分布

Fig. 6 Flow velocity distribution along the flume axis for different relative topography heights H

凹床地形下, $H=-10\text{ cm}$ 的地形相较于 $H=-4\text{ cm}$ 的墩前水平流速随水深变化更小,基本为 $12\sim 15\text{ cm/s}$,各测点的流速梯度更小,墩前流速沿程趋于平稳不变。这主要是因为凹槽深度的增大导致凹床地形内的过流面积变大,使得该段整体水流流速更小,水流接近地形变化点时表层流速也 smaller,但底部的水流在经过下游斜坡时因断面束窄而加速,最终导致凹槽较深的工况下墩前表层流速更低,流速梯度更小。

凸床地形下, $H=8\text{ cm}$ 的地形相较于 $H=4\text{ cm}$ 墩前表层流速和整体流速梯度更大, $0.65h$ 流速接近 $0.15h$ 的2倍,且各水深的流速沿程变化更剧烈。凸床的存在将减小过流面积,使得顶点处断面平均流速和表层流速增大,而在水流继续向地形变化点流动的过程中,断面逐渐扩展,底层流速不断减小,表层流速变化不大,导致 H 越大下游的表层流速和底层流速的差异越大,流速梯度也越大。

3 墩周冲刷坑形态及演变规律

3.1 墩周局部冲刷坑形态随时间变化

墩前下降水流优先影响墩前冲刷深度^[19],导致试验过程中观察到最大冲刷深度大多出现在墩前,所以本文主要采用墩前冲刷深度来表征冲刷的程度。图7为A2、B6、C6、D6和E6等5种工况下墩前冲刷坑深度随时间变化,可见各地形的墩前冲刷深度在前30 min内发展迅速,第30~240 min内冲刷深度仍在增加但增速有所下降,第240 min时凹、凸

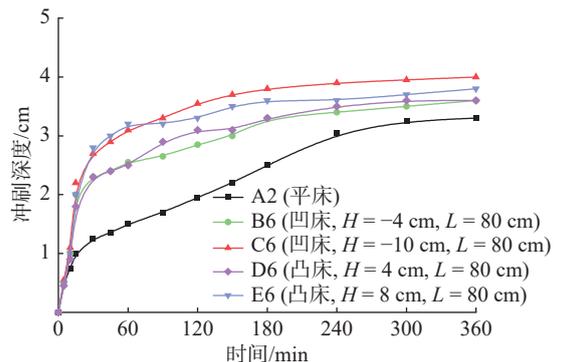


图7 墩前冲刷深度随时间变化情况

Fig. 7 Variation of scour depth in front of the pier over time

床地形的冲刷基本趋于平衡,平床的冲刷深度仍在增长,直到试验开始后第 360 min 冲刷基本达到平衡。

相较于平床,凹、凸床地形的墩前冲刷深度在试验前期发展更为迅速,在第 60 min 的冲刷深度就已经达到平衡冲刷深度的 70% 左右,而平床地形此时的冲刷深度仅约为平衡冲刷深度 50%,这也导致在整个试验历程中平床地形的冲刷深度都低于凹床和凸床。整体上看,凹、凸床地形的存在不仅会加剧桥墩附近的局部冲刷,而且会加快冲刷进程,使局部冲刷更早达到平衡。此外,同种地形下平衡冲刷深度比较: $C6 > B6$ 、 $E6 > D6$,说明地形相对高度也会对平衡冲刷深度产生影响。

图 8 为 $V=18 \text{ cm/s}$ 、 $L=80 \text{ cm}$ 的 A2、B6、D6 等 3 种不同地形下平衡冲刷坑形态。试验观察到该 3 种工况下的平衡冲刷坑形态存在明显差异:平床工况下墩周的冲刷坑和墩后的堆积沙丘均有出现,但尺寸较小;相较于平床工况,凹床工况下的平衡冲刷深度更大、冲刷坑范围更广、桥墩暴露更加严重。此外,凹床工况下墩后堆积沙丘的高度明显大于平床;凸床工况下的平衡冲刷深度和冲刷坑范围也明显大于平床,墩后沙丘并不明显。值得注意的是,凸床地形下游出现了类似沙波的床面形态,这说明凸床地形的存在可能使下游出现床面附近局部扰动引起的近壁流层波动或紊流拟序结构现象^[20],而平床和凸床地形下除了墩周出现冲坑以外,其余区域仍较平坦。

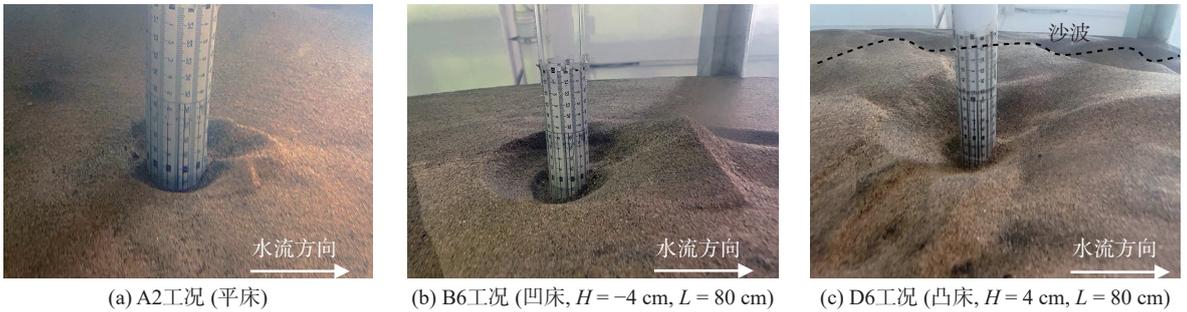


图 8 典型工况下桥墩局部冲刷平衡时坑形态($V=20 \text{ cm/s}$)

Fig. 8 Pit morphology at equilibrium local scour around the pier under typical conditions ($V=20 \text{ cm/s}$)

3.2 墩前冲刷深度及冲坑宽度试验结果分析

为探求河床地形对下游桥墩局部冲刷的影响,需要对冲刷坑特征进行分析,试验选择墩前平衡冲刷深度 d_s 和横向冲坑宽度 w_s 来表征桥墩冲刷坑特征,所有试验工况下的量测结果如表 2 所示。

表 2 不同工况冲刷坑深度和宽度统计

Tab. 2 Statistical data on depth and width of scour pits under different conditions

单位: cm

H/cm	$V=15 \text{ cm/s}$ 时平衡冲刷坑深度和宽度				$V=18 \text{ cm/s}$ 时平衡冲刷坑深度和宽度				$V=20 \text{ cm/s}$ 时平衡冲刷坑深度和宽度			
	$L=40 \text{ cm}$	$L=80 \text{ cm}$	$L=120 \text{ cm}$	$L=160 \text{ cm}$	$L=40 \text{ cm}$	$L=80 \text{ cm}$	$L=120 \text{ cm}$	$L=160 \text{ cm}$	$L=40 \text{ cm}$	$L=80 \text{ cm}$	$L=120 \text{ cm}$	$L=160 \text{ cm}$
0	2.0/10.8				3.3/15.5				4.3/18.5			
-4	3.0/12.0	2.8/10.5	2.4/9.7	2.2/9.6	4.2/18.1	3.6/15.4	3.6/14.3	3.5/15.0	5.2/20.8	4.75/20.6	4.6/19.8	4.4/18.6
-10	3.3/15.6	2.95/15.8	2.3/12.1	2.3/12.7	4.4/20.9	4.0/19.3	4.1/19.2	3.6/16.9	5.4/21.8	5.1/22.9	4.8/22.3	4.6/19.5
4	2.6/13.2	2.4/12.4	2.0/10.8	2.2/11.3	3.8/18.7	3.6/17.4	3.4/17.2	3.2/17.9	5.0/21.3	4.6/20.5	4.5/18.8	4.4/18.6
8	2.8/15.7	2.6/16.0	2.8/16.4	2.2/14.2	4.3/21.7	3.8/19.4	3.7/17.2	3.6/17.9	5.6/23.9	5.3/22.6	4.7/18.2	4.5/18.1

注: “/” 前后数值分别为冲刷坑的深度和宽度。

分析表 2 数据可知,就冲刷深度而言,在同一流速条件下,凹床和凸床地形下的冲刷深度基本都大于平床,说明受凸床和凹床影响的水流对下游桥墩的冲刷作用更强; $L=40 \text{ cm}$ 时,凹、凸床地形下墩前平衡冲刷深度 d_s 最大,相较于平床的增幅最低为 15.1%,最高达 50%;随着地形变化点与桥墩间距离 L 的增大,墩前

平衡冲刷深度逐渐减小,数值上越来越接近平床下的冲刷深度, $L=160\text{ cm}$ 时凹、凸床地形下平衡冲刷深度最大相较于平床的增幅最高也仅为15%。冲坑宽度 w_s 随 L 的变化规律基本与冲刷深度变化规律一致,整体上呈现 w_s 随着 L 的增大而减小的趋势,但也存在几组偏差较大的数据;相较于平衡冲刷深度 d_s ,冲坑宽度 w_s 和 L 的相关性稍小。

结合前文对流速的分析,可得出如下推论:凸床地形不仅使下游水流流速梯度增加,而且加剧了水流紊动,而凹床地形则使下游墩前的平均流速和底层流速有所增大,这两种地形对水流的影响均加剧了下游桥墩冲刷;越靠近地形变化点,水流受地形影响越明显,但随着距离的增加,水流沿程逐渐稳定并过渡到与平床地形类似,对应的冲刷深度也逐渐降低,由此推断当地形变化点与桥墩间距离超过某个区域,上游地形对下游桥墩局部冲刷的影响可以忽略。

分析表2河床地形相对高度 H 不同时、同一行进流速下的墩前平衡冲刷深度及冲刷坑宽度可知,在各流速条件下,墩前平衡冲刷深度 d_s 总体上表现为随着凹床 H 加深、凸床 H 增高而增大,冲刷深度最小值均在 $H=0\text{ cm}$ (平床)时出现。可见凹床、凸床地形下的冲刷深度均大于平床,且地形相对高度 H 越大,墩前平衡冲刷深度 d_s 越大,原因可能是河床地形相对高度越大,凹、凸河床地形迎水坡面的挑流作用越明显,加剧了下游的水流紊动,使冲刷深度有所增加。

冲坑宽度变化规律与冲刷深度相比存在一定差异,主要体现在凸床地形上。从表2可以看出,凹床地形下局部冲刷宽度基本随地形相对高度的增加而增加,但凸床地形下流速较大的两组并不能体现该规律。结合试验观察,推测这可能与前文提到的沙波有关,凸床地形下出现的沙波可能与冲刷坑叠加,形成的冲刷坑的宽度会受到沙波的干扰。

3.3 考虑地形条件的桥墩冲刷深度回归分析

目前国内外使用较多的桥墩局部冲刷计算公式有Melville公式^[21]、中国65-1修正式和65-2式^[22],以及美国HEC-18中的CSU方程^[11]等,其中CSU方程考虑了地形条件对桥墩冲刷深度的影响,其公式如下:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (1)$$

式中: y_s 为桥墩局部冲刷深度; y_1 为桥墩上游行进水深; a 为桥墩宽度; K_1 为桥墩墩形系数; K_2 为水流冲击角修正系数; K_3 为河床条件修正系数; K_4 为泥沙尺寸分布系数; Fr 为弗劳德数, $Fr=V_1/(gy_1)^{0.5}$, V_1 为桥墩上游水流平均流速, g 为重力加速度。具体取值如表3所示。从河床条件分类来看,系数 K_3 的取值主要考虑了沙丘的高度,但没有体现沙丘与桥墩间距离的影响,也没有考虑凹槽地形,因此计算结果不能完全反映地形条件对桥墩冲刷深度的影响。

表3 河床条件修正系数 K_3

Tab. 3 Riverbed condition correction coefficient K_3

河床条件	沙丘高度/m	K_3	河床条件	沙丘高度/m	K_3
清水冲刷	不适用	1.1	中沙丘	$3 \leq H < 9$	1.1~1.2
平坦和沙坑河床	不适用	1.1	大沙丘	$H \geq 9$	1.3
小沙丘	$0.6 \leq H < 3$	1.1			

本试验共进行了平、凹、凸3种地形条件共51组室内冲刷试验,得到各组试验平衡冲刷深度。参考Song等^[23]采用无量纲因子来构建桥墩冲刷计算公式,针对本试验获得的数据,从地形相对高度、地形变化点与桥墩间距离及水流弗劳德数3个方面研究河床地形条件与下游桥墩冲刷深度的关系,上游地形影响下的桥墩平衡局部冲刷深度计算式可表示为:

$$\frac{d_s}{D} = f\left(\frac{H}{D}, \frac{L}{D}, Fr\right) \quad (2)$$

式中: d_s 为墩前平衡冲刷深度; D 为桥墩直径; H 为地形相对高度(凹床地形 H 为负值); L 为地形变化点与

桥墩间距离; Fr 为弗劳德数, $Fr=V/(gh)^{0.5}$, V 为桥墩上游行进流速。经过线性回归分析, 得到冲刷深度的回归公式:

$$\text{平床: } d_s/D = -1.222 + 16.326Fr \quad (3)$$

$$\text{凹床: } d_s/D = -0.878 - 0.036(H/D) - 0.007(L/D) + 15.315Fr \quad (4)$$

$$\text{凸床: } d_s/D = -1.136 + 0.085(H/D) - 0.005(L/D) + 16.326Fr \quad (5)$$

图9为平床、凹床、凸床情况下桥墩平衡冲刷深度的公式预测值与实测值的对比结果, 可以看出公式的计算结果与试验结果较为吻合, 上述拟合公式在平床、凹床、凸床下的相关系数分别为0.99、0.98和0.97。

从前述分析可知, 当地形变化点与桥墩间距离增大到一定值时, 地形对下游桥墩局部冲刷的影响可以忽略。理论上, 此时平衡冲刷深度应与同一流速下平床地形的冲刷深度相当, 可以定义该距离为上游河床地形影响桥墩局部冲刷界限距离(用 L_{lim} 表示)。鉴于前述拟合所得公式有较高相关性, 现提出一种计算 L_{lim} 的思路: 在已知河道断面尺寸、行近流速 V 、桥墩直径 D 和凹床(或凸床)地形相对高度 H 的情况下, 利用式(3)计算出平床局部冲刷深度 d_{sp} , 再将平床平衡冲刷深度 d_{sp} 和其他已知条件代入式(4)、(5), 求出未知量 L 即为 L_{lim} 。可以认为, 在地形变化点与桥墩间距离超过 L_{lim} 后, 上游地形将不对桥墩局部冲刷产生影响。利用该方法计算出本文试验各工况下 L_{lim} 的预测值见表4。

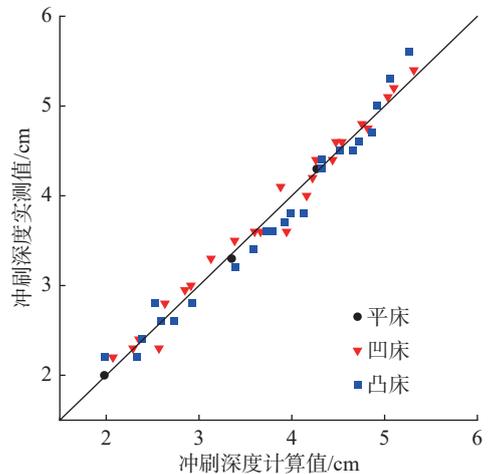


图9 平衡冲刷深度实测值与计算值对比

Fig. 9 Comparison between measured and calculated values of equilibrium scour depth

表4 地形影响局部冲刷的界限距离 L_{lim} 预测值

Tab. 4 Predicted values of boundary distance L_{lim} for topographical influence on local scour

地形凹凸高度	L_{lim} 预测值/cm			地形凹凸高度	L_{lim} 预测值/cm		
	$V=15$ cm/s	$V=18$ cm/s	$V=20$ cm/s		$V=15$ cm/s	$V=18$ cm/s	$V=20$ cm/s
凹床	$H=-4$ cm	168	172	凸床	$H=4$ cm	160	176
	$H=-10$ cm	200	204		$H=8$ cm	224	244
						164	232

对于表4中的预测值, 基本呈现 $V=20$ cm/s 工况下的较 $V=18$ cm/s 的小, 此规律可做如下分析: 考虑到试验误差, 表4中预测值存在一定偏差, 但凹(凸)床地形下的 L_{lim} 在 $V=15\sim 18$ cm/s 区间的规律基本符合一般认知, 即凹床(凸床)高度越大、 L_{lim} 越长; 但对于同一地形工况下 $V=20$ cm/s 的 L_{lim} 小于 $V=18$ cm/s 的 L_{lim} , 而且凹、凸床规律相同, 这表明界限距离 L_{lim} 与流速 V 并非呈单调正相关。表2中凸床 $H=8$ cm、 $L=160$ cm(试验中 L 最大工况)工况下冲刷深度, 流速 18 cm/s 下的为平床的 109.1%、流速 20 cm/s 下为 104.6%, 这说明 L 较大时偏大流速 ($V=20$ cm/s) 较偏小流速 ($V=18$ cm/s) 下的冲刷深度更接近平床工况, 表2中其他工况下的规律也基本类似。

需要说明的是, 本文提出的公式及预测方法主要基于室内特定条件下的清水冲刷试验, 尚未对水深、床沙粒径等因素进行充分考虑, 同时可能存在一定的试验误差。因此, 应用上存在局限性, 不同条件下的适用性需要进一步论证。

4 结 语

基于室内水槽试验,本文研究了上游不同地形条件下的地形相对高度、地形变化点与桥墩间距离对局部冲刷的影响,主要结论如下:

(1)相较于平床地形,凹床地形会使墩前水平流速梯度减小,凸床地形会使墩前水平流速梯度增大,且无论凹床、凸床地形,对墩前流速的影响都随着地形相对高度的增大而增大,随着桥墩与地形间距离的增大而减小。

(2)凹、凸床地形不仅会加快局部冲刷进程,而且会增加墩周冲刷深度和冲坑宽度。凹、凸床地形对墩周平衡冲刷坑深度和宽度的影响基本一致,即在一定范围内,地形相对高度越大,冲刷深度和冲坑宽度越大;随着桥墩与凹凸床地形间距离的增大,冲刷深度和冲坑宽度逐渐减小,最终达到平床水平。凹、凸床地形对墩前流速分布和墩周冲刷坑形态的影响程度与地形相对高度呈正相关、与地形变化点距桥墩间距离呈负相关。

(3)实际工程中,应合理控制河床采砂、疏浚、筑坝等工程以避免上游河床地形对桥墩局部冲刷影响加剧,工程建设点应与下游桥梁之间保持足够的距离,新建桥梁选址也应尽量远离凹、凸河床地形区域。(参考文献 [11] 格式有误,该文献不是期刊论文,应该是一个报告,请按照实际文献格式修改???)

参 考 文 献:

- [1] LU J, LIU C, GUAN J, et al. Sand and gravel mining in upstream of the Yangtze river and its effect on the Three Gorges Reservoir[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015: 1821-1830.
- [2] CHEN D, LIU M. One and two dimensional modelling of deep gravel mining in the Rio Salado[C]//Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2009: 3462-3470.
- [3] YANMAZ A M, CICEKDAG O. Channel mining induced stream bed instability around bridges[C]//Watershed Management and Operations Management 2000. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2001: 1-8.
- [4] 齐梅兰, 孟国清. 河道采沙对大桥基础安全影响研究[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2005, 20(6): 750-754. (QI Meilan, MENG Guoqing. Study on the effect of sandpits at riverbed on bridge foundation safety[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(6): 750-754. (in Chinese))
- [5] BARMAN B, SHARMA A, KUMAR B, et al. Multiscale characterization of migrating sand wave in mining induced alluvial channel[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 199-206.
- [6] BARMAN B, KUMAR B, SARMA A K. Turbulent flow structures and geomorphic characteristics of a mining affected alluvial channel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(9): 1811-1824.
- [7] LADE A D, DESHPANDE V, KUMAR B, et al. On the morphodynamic alterations around bridge piers under the influence of instream mining[J]. *Water*, 2019, 11(8): e1676.
- [8] LADE A D, KUMAR B. Streambed instabilities around a bridge pier in a dredged channel[J]. *River Research and Applications*, 2020, 36(7): 1360-1365.
- [9] DANESHFARAZ R, GHADERI A, SATTARIYAN M, et al. Investigation of local scouring around hydrodynamic and circular pile groups under the influence of river material harvesting pits[J]. *Water*, 2021, 13(16): e2192.
- [10] 齐梅兰, 邹艳荣. 河床溯源冲刷影响下的桥墩冲刷[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 791-798. (QI Meilan, KUAI Yanrong. Pier scour under influence of headcut erosion of sand pit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 791-798. (in Chinese))
- [11] AMESON L A, ZEVENBERGEN L W, LAGASSE P F, et al. Evaluating Scour at Bridges. Fifth Edition. [J]. Bridge Superstructures, 2012.
- [12] CHIEW Y M, MELVILLE B W. Local scour around bridge piers[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1987, 25(1): 15-26.
- [13] 张新燕, 吕宏兴, 沈波. 圆柱桥墩局部冲刷机理试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 34-41. (ZHANG Xinyan, LV Hongxing, SHEN Bo. Experimental studies on local scour mechanism of cylinder bridge piers[J]. Hydro-Science and

Engineering, 2012(2): 34-41. (in Chinese))

- [14] 王顺意, 牟力, 魏凯, 等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(3): 425-431. (WANG Shunyi, MOU Li, WEI Kai, et al. Experimental study on local scour of cylindrical pier under different hydraulic conditions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(3): 425-431. (in Chinese))
- [15] ZDRAVKOVICH M M. Flow around circular cylinders[M]. Oxford: Oxford University Press, 1988.
- [16] MELVILLE B M. Local scour at bridge sites[D]. New Zealand: University of Auckland, 1975.
- [17] ETTEMA R. Scour at bridge piers[D]. New Zealand: University of Auckland, 1980.
- [18] 祖小勇. 圆端形桥墩周围水流紊动特性及紊流宽度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009. (ZU Xiaoyong. Experimental study of turbulent flow width and the characteristic of the turbulence around round-ended pier[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009. (in Chinese))
- [19] 吴继熠, 郭健, 翁博文. 跨海桥梁圆柱墩局部冲刷动态演变试验[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 407-418. (WU Jiyi, GUO Jian, WENG Bowen. Experimental investigation on local scouring dynamic evolution of cylindrical piers of sea-crossing bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 407-418. (in Chinese))
- [20] 唐立模, 孙会东, 刘全帅. 明渠紊流与床面形态相互作用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 77-84. (TANG Limo, SUN Huidong, LIU Quanshuai. Research development of the interaction between turbulence structure and bedforms in open channel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 77-84. (in Chinese))
- [21] MELVILLE B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(2): 125-136.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Hydrological specifications for survey and design of highway engineering: JTG C30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [23] SONG F H, WANG J, ZHANG Z H, et al. Local scour around side-by-side double piers in channel bends under ice-covered conditions—an experimental study[J]. *Water*, 2023, 15(13): 2317.

The influence of upstream riverbed topography on local scouring around bridge piers

WEI Song¹, DAI Qichao¹, ZHANG Feifan², XIAO Shuxia¹, CHEN Qing¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Human activities such as sand mining, dredging, and dam construction have altered the topography of riverbeds, creating irregular undulations that change the flow patterns in rivers and pose risks to the safety of downstream bridge foundations. Research on the impact of riverbed topography on local scouring around bridge foundations remains limited. This study investigates the effects of three types of riverbed topography—flat, concave, and convex—on local scouring around downstream bridge piers through laboratory flume experiments. Factors considered include the size of the concave and convex topographies, the distance from the bridge pier, and the flow velocity. Results show that, compared to flat riverbeds, concave topographies reduce horizontal velocity gradients in front of piers, while convex topographies increase them. Both concave and convex topographies accelerate the scouring process and increase scouring intensity around the piers. The influence of riverbed topography on velocity distribution upstream of the piers and the morphology of scour pits is positively correlated with the relative height of the topography and negatively correlated with the distance between the topography transition point and the pier. Based on experimental data, a formula for calculating local scour depth considering topographical factors is proposed. The concept and prediction method for the boundary distance of topographical influence on local scour are also introduced, providing a reference for practical engineering management.

Key words: riverbed topography; local scouring; model experiments; scour depth; topographical influence boundary distance