

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.03.014

不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究*

王顺意¹, 牟力², 魏凯¹, 秦朗², 向琪芪¹

(1. 西南交通大学桥梁工程系, 四川 成都 610031; 2. 四川藏区高速公路有限责任公司, 四川 成都 610015)

摘要: 桥墩冲刷是导致桥梁水毁的主要原因, 研究不同水力条件下局部冲刷对桥梁的影响具有重要意义。通过开展不同流速和水深下圆柱桥墩模型冲刷试验, 研究了圆柱桥墩周围泥沙的局部冲刷发展规律, 特别是流速和水深对桥墩局部冲刷的影响。试验研究表明: 随着时间的发展, 最大冲刷深度与冲刷坑范围在前期急剧发展, 随后发展逐渐缓慢, 直到冲刷处于近似平衡阶段。最大冲刷深度最开始出现在墩前侧方, 随后始终出现在墩正前方附近, 最小冲刷深度出现在墩的正后方附近, 墩后的冲刷深度不足墩前深度的50%。流速和水深是影响桥墩的局部冲刷的关键因素, 最大冲刷深度和冲刷坑的范围随着流速和水深增大而增大, 相比于水深, 冲刷深度和冲刷坑范围受流速的影响较大。

关键词: 桥墩冲刷; 水力条件; 试验; 冲刷深度; 平衡阶段

中图分类号: U442.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)03-0425-07

Experimental Study on Local Scour of Cylindrical Pier under Different Hydraulic Conditions

WANG Shunyi¹, MOU Li², WEI Kai¹, QIN Lang², XIANG Qiqi¹

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Tibetan Area Expressway Co., Ltd., Chengdu 610015, China)

Abstract: The local scour of pier is the main cause of bridge damage by water. It is of great significance to study the influence of local scour on bridges under different hydraulic conditions. Based on the flume scour test of cylindrical pier in difference flow velocity and water depth, this paper explores the local scour development around the cylindrical pier, especially the influence of flow velocity and water depth on the local scour. The experimental results showed that the maximum depth and scour hole range developed rapidly in the early stage. Then the development gradually slowed down until the local scour is in an approximate equilibrium stage. The maximum scour depth appeared on the side of the pier and eventually in front of the pier around. The minimum scour depth was directly behind the pier. The minimum scour depth behind the pier was less than 50% of the maximum scour depth. The flow velocity and water depth are the key factors affecting the local scour of the pier. The maximum scour depth and scour depth increases with the increase of velocity and depth of flow. Compared with water depth, the scour depth and scour hole range were affected more by flow velocity.

Keywords: bridge pier scour; hydraulic conditions; test; scour depth; equilibrium stage

* 收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978578, 51708455)、四川省重点研发项目(2019YFG0460)资助

作者简介: 王顺意(1994-), 男, 硕士。主要从事桥梁基础局部冲刷与防护研究。Email: shunyiwang@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 魏凯(1984-), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事深水大跨桥梁研究。Email: kaiwei@home.swjtu.edu.cn

引言

桥墩局部冲刷是水流受桥梁墩台或基础的阻拦,在基础附近发生的冲刷,泥沙从桥梁墩台或基础周围被带走,使墩台或基础附近形成冲刷坑的灾变过程。局部冲刷是造成桥梁结构破坏甚至水毁的主要原因之一。美国高速公路管理局在1973年的一项调查显示:在全美383起桥梁事故案例中,有75%的桥梁涉及基础破坏^[1]。K. Wardhana等^[2]研究了美国在1989~2000年发生的500次桥梁结构破坏,发现超过50%的桥梁故障归因于洪水和其他水力因素造成的冲刷。易仁彦等^[3]收集了中国2000~2014年发生的桥梁坍塌事故信息,发现106起桥梁坍塌事故中,有30%以上是由于冲刷造成的破坏。而桥梁冲刷破坏在我国西部山区时有发生。仅2018年7月以来,四川眉山岷江大桥和四川茂县叠溪镇境内国道213线K2012+100较场1号中桥先后因洪水冲刷发生桥梁垮塌。因此,桥梁局部冲刷越发引起人们的关注。

国内外学者对桥墩局部冲刷进行了许多理论分析和试验研究。张新燕等^[4]开展模型试验探索了圆柱桥墩局部冲刷机理;祝志文等^[5]开展了三维数值模拟来预测圆柱形桥墩周围的局部冲刷坑形态和发展;詹义正等^[6]基于桥墩局部冲刷的实际情况,提出了适用于桥墩局部冲刷的绕流挤压流动模式,建立了桥墩局部冲刷深度的计算公式。

但是上述研究多集中于桥墩局部冲刷最大冲刷深度的研究,对桥墩周围泥沙的局部冲刷发展规律研究尚不充分。此外,桥墩局部冲刷是水流从桥梁墩台和基础周围淘掘并带走泥沙的过程,受水深、流速影响很大。因此,开展不同流速和水深对圆柱桥墩周围泥沙的局部冲刷试验研究十分必要,对于提高土体对桩基的侧向支撑能力、保障桥梁结构安全具有重要指导意义。

1 试验概况

本文通过水槽试验研究了不同流速与水深下圆柱桥墩周围泥沙的局部冲刷变化规律。试验从以下几个方面研究流速和水深对冲刷的影响:(1)研究流速和水深不变条件下,单墩局部冲刷的发展规律;(2)研究水深不变条件下,不同流速对桥墩局部冲刷的影响;(3)研究流速不变条件下,水深对桥

墩冲刷的影响。

1.1 试验装置

试验在西南交通大学深水大跨桥梁实验室中型波流水槽中进行,水槽长60 m、宽2 m、深1.8 m,如图1所示。

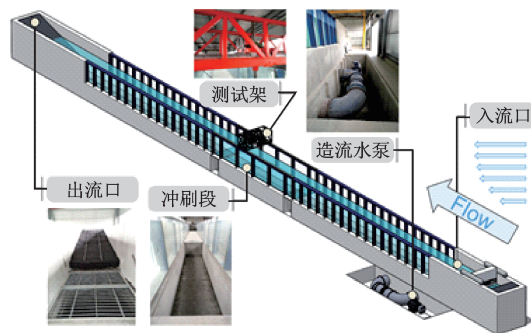


图1 波流水槽试验系统

Fig. 1 Wave flow tank test system

水槽中间底面设有长7.5 m、深0.4 m的冲刷试验沙池。研究选取均匀河沙作为河床材料,中值粒径为0.23 mm,平均粒径为0.324 mm,河沙密度为 2.65 g/cm^3 。每次试验开始前,都将冲刷段河沙抹平并静置一段时间,桥墩模型采用外径为0.1 m的圆柱亚克力板制成,在桥墩模型上方用螺栓将其与测试架紧固,保证冲刷过程中模型的稳定,冲刷试验模型布置如图2(a)所示。流速沿水深的分布采用Vectrino+型多普勒流速仪进行测定,容许最大流速4 m/s。流速仪布置如图2(b)所示。

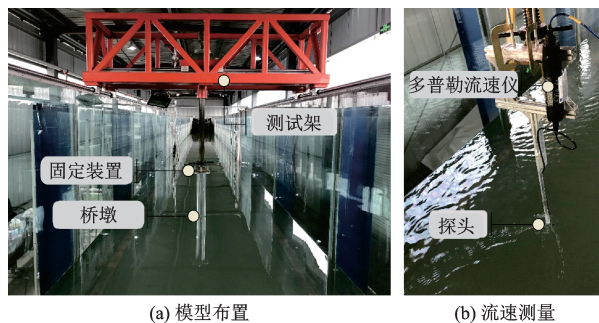


图2 冲刷试验模型布置与多普勒架设

Fig.2 Layout of the scour test model and Doppler erection

1.2 流速测定

图3给出了0.5 m水深、0.35 m/s流速时,将多普勒流速仪的探头置于距水面0.1 m处测得的流速变化曲线,仪器采样频率100 Hz。由图可知,20 s内的流速变化不明显,故选取20 s平均流速作为该高度的流速值。

采用上述方法,以0.02 m为高度增量,依次测量不同高度处的流速,将水槽流速沿高度的分布绘于图4。由图4可知,边界层高度约为0.3 m。当流速仪距水面距离小于0.2 m时,所测流速基本稳定在最大值附近。因此,后续试验中多普勒流速仪的探头将被固定于距水面0.1 m处以得到水槽流速。

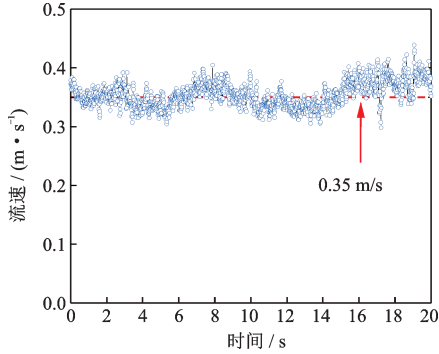


图3 水下0.1 m处的流速测定

Fig. 3 Determination of flow velocity in water at 0.1 m depth

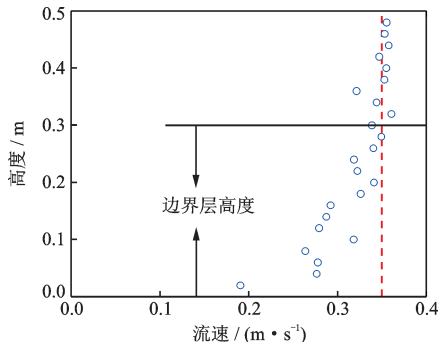


图4 不同高度流速分布情况

Fig. 4 Flow velocity distribution at different heights

2 试验方案

2.1 泥沙起动流速计算

通过公式(1)、(2)给出的临界希尔兹数和公式(3)~(5)给出的希尔兹数^[7],当希尔兹数 θ_s 等于临界希尔兹数 θ_{cr} ,可计算出本文试验所用泥沙的起动流速。

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055 \left[1 - \exp(-0.020D_*) \right] \quad (1)$$

$$D_* = [g(s-1)/\nu^2]^{1/3} d_{50} \quad (2)$$

式中, θ_{cr} 为临界希尔兹数; D_* 为无量纲直径; g 为重力加速度,取9.8 m/s²; s 为泥沙比重,取2.65; ν 为水的黏性系数,取10⁻⁶ m²/s; d_{50} 为平均粒径,取0.324 mm。

$$\theta_s = \frac{\tau_s}{\rho g(s-1)d_{50}} = \frac{U_{fs}^2}{g(s-1)d_{50}} \quad (3)$$

$$\tau_s = \rho C_D \bar{U}^2 \quad (4)$$

$$C_D = \left\{ \kappa / \left[\ln(z_{0s}/h) + 1 \right] \right\}^2 \quad (5)$$

式中, θ_s 为表面摩擦引起的希尔兹数; τ_s 为剪应力,Pa; U_{fs} 为摩擦流速,m/s; \bar{U} 为垂线平均流速,m/s; C_D 为对数关系; h 为水深,m; κ 为卡曼系数,取0.4; z_{0s} 为粗糙高度,取 $z_{0s} = d_{50}/12$ 。

当 $\theta_s < \theta_{cr}$ 时,为清水冲刷;当 $\theta_s > \theta_{cr}$ 时,为动床冲刷。通过以上计算,发现不同水深情况下的起动流速计算结果见表1,计算出泥沙起动的垂线平均流速约为0.3 m/s,结合试验中实际观察的泥沙起动现象,发现泥沙起动时的流速仪的探头所测流速约为0.3 m/s,此时试验中的垂线平均最大流速小于0.3 m/s,可见公式计算出的流速结果略微有所偏大。

表1 泥沙起动的流速计算结果

Table 1 Flow velocity results of sediment moving

水深/m	0.4	0.5	0.6
垂线平均流速/(m·s ⁻¹)	0.295 4	0.303 1	0.309 3

2.2 平衡冲刷时间计算

B. M. Melville^[8]将冲刷分为起始阶段、主要冲刷阶段和平衡阶段。根据平衡冲刷时间计算公式(6)~(8)^[9],将冲刷达95%时所需时间作为平衡冲刷时间。

$$S(t) = S_0 (1 - \exp^{-t/T}) \quad (6)$$

$$T = \frac{D^2}{[g(s-1)d_{50}^2]^{1/2}} T^* \quad (7)$$

$$T^* = \frac{\delta}{2000D} \theta_s^{-2.2} \quad (8)$$

式中, $S(t)$ 为冲刷深度; S_0 为平衡冲刷深度; T 为冲刷的时间尺度; T^* 为冲刷的无量纲时间尺度; D 为圆形桥墩的直径; δ 为边界层厚度。

根据流速分布知边界层高度约为0.3 m,计算得到的最大平衡冲刷时间约为55 min。

2.3 数据采集方法与试验工况

在桥墩模型周围均匀布置12个测点,监测桥墩周围的冲刷深度变化情况,如图5所示,其中4号测点为桥墩迎水侧的最前方测点。在试验过程中,采用GoPro防水摄像机对测点进行了数据采集,根据数据结果,探讨水流对桥墩冲刷的影响规律。在冲

刷试验开始后的前 60 min 内,每隔 10 min 测量一次,之后每隔 30 min 测量一次。

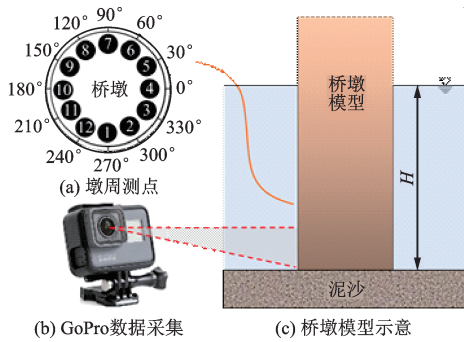


图5 桥墩周围测点布置

Fig. 5 Layout of the measuring points around the pier

多普勒流速仪还具备测量距离的功能,采用流速仪通过移动扫描地形的方式来测量冲刷坑信息,根据流速仪测量探头中间的声波发射传感器发射声波至底部,每次试验开始前,将冲刷段河床抹平并静置一段时间,通过流速仪测深功能来判断初始河床面的平整度,每次试验结束后也可用来测试基础周围冲刷坑的形态(范围及高度)。试验过程中所测得的冲刷宽度,是桥墩两侧冲刷坑边缘之间的距离,而冲刷长度是桥墩上游冲刷坑边缘到墩后堆积最高点之间的距离。利用多普勒流速仪进行深度探测的相关照片如图6所示。

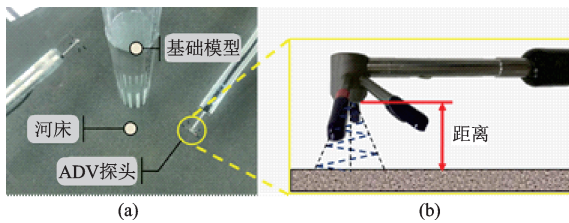


图6 多普勒冲刷坑测量

Fig. 6 Scour hole measurement by Doppler

基于上述起动流速和平衡冲刷时间计算结果,本文采用动床冲刷方案,每个工况总试验时间共取为 180 min。考虑流速和水深两个水力参数,研究流速和水深对冲刷特性的影响情况,本文共设置 5 个工况,见表 2。

表2 试验工况参数设置

Table 2 Setting of test condition parameters

工况	流速/(m·s ⁻¹)	水深/m
1	0.30	0.5
2	0.35	0.5
3	0.40	0.5
4	0.35	0.4
5	0.35	0.6

3 试验结果与分析

3.1 单墩冲刷试验

经过多组工况的水槽试验,选取一组代表性的试验结果进行单墩局部冲刷分析可知,桥墩在 0.35 m/s 流速、0.5 m 水深情况下,桥墩周围主要测点的冲刷深度随时间发展变化特性曲线情况如图 7 所示。由图可知,最大冲刷深度基本都发生在桥墩的正前方 4 号测点位置。在前 30 min 内,冲刷迅速发展,最大冲刷深度快速增加,30 min 的最大冲刷深度达到 5.8 cm,随后发展逐渐速度减慢,120 min 的最大冲刷深度达到 7.6 cm,到 180 min 时最大冲刷深度达到 8.2 cm。最大冲刷宽度为 41.2 cm,最大冲刷长度为 56.0 cm。在冲刷初期冲刷深度发展迅速,前 60 min 最大冲刷深度达到 180 min 冲刷深度的 80% 以上,随着时间的增长,冲刷深度发展逐渐变缓,冲刷深度增长率减小。

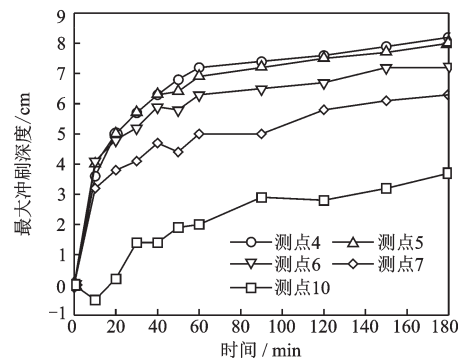


图7 单墩主要测点冲刷深度

Fig. 7 Maximum scour depths of main measuring points

桥墩周边各测点读数随时间的变化情况如图 8 所示,由数据可知,前 10 min 内,最大冲刷深度发生在墩前侧方位置,2、3、5、6 号测点读数明显大于 4 号的测点读数,可见冲刷初始阶段,墩前侧方位置附近的冲刷强度最大。在 20 min 至 180 min 过程中,最大冲刷深度都发生在 4 号测点,180 min 时 4 号测点的冲刷深度读数为 8.2 cm,从墩前到墩侧的测点读数依次降低,在 1 号和 7 号测点的读数分别为 6.4 cm 和 6.3 cm,呈现近似对称分布。随着时间的推移,冲刷坑不断发展,最大冲刷强度出现在墩正前方附近,最小冲刷深度出现在正后方附近,在前 10 min,甚至会出现部分沉积,导致墩正后方测点读数

为负值, 180 min时冲刷深度达到 3.7 cm, 不足 4 号测点冲刷深度的 50%。由于桥墩的遮挡作用, 使得该处的流速和床面剪应力较小, 导致冲刷强度始终较弱。

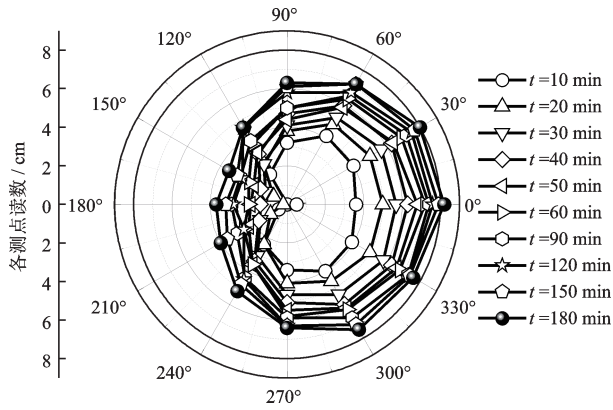


图 8 墩周各测点变化情况

Fig. 8 Development of each measuring point

马丽丽等^[10]开展圆柱单桩水槽试验, 发现圆柱单桩基础周围的最大冲刷深度首先出现在圆柱的侧前方。Q. Zhan 等^[11]利用 CFD 软件开展数值模拟, 发现最大冲刷深度的值出现在桩前侧方 45°位置附近, 这种现象类似于 B. M. Melville 等^[8]开展的水槽实验结果。K. Debnath 等^[12]通过试验发现冲刷深度在桩前最大, 桩后最小, 桩两侧深度对称规律。这些试验现象都与本文的圆柱单墩冲刷深度的试验结果十分接近, 说明本文的单墩冲刷特性结果较好。试验中间过程的冲刷坑发展情况如图 9 所示。

3.2 不同流速下冲刷试验分析

在上述单墩冲刷的基础上, 保证水深 0.5 m 不变, 通过改变初始流速, 探讨流速对冲刷的影响, 本次试验考虑 0.30、0.35、0.40 m/s 三种不同流速。

以 1、4、7、10 四个测点的情况为例, 不同流速作用下的主要测点冲刷深度和最大冲刷深度的发展情况如图 10 所示。结果表明: 随着水流速度的增大, 各测点的冲刷深度读数会随流速增大而增大, 最大冲刷深度和冲刷范围也会相应增大, 但总体趋于冲刷平衡阶段的时间相差不大, 冲刷发展规律一致, 不同测点的冲刷深度发展情况有所差异。

在墩前的 4 号测点, 可近视代表最大冲刷深度的发展情况, 仅在最开始的冲刷深度稍有差异。冲刷深度在墩前变化最大, 墩后的发展情况较为缓慢, 在正后方甚至会因为堆积出现负读数, 但当流速增大到 0.4 m/s 时, 墩后一开始无堆积情况, 这也

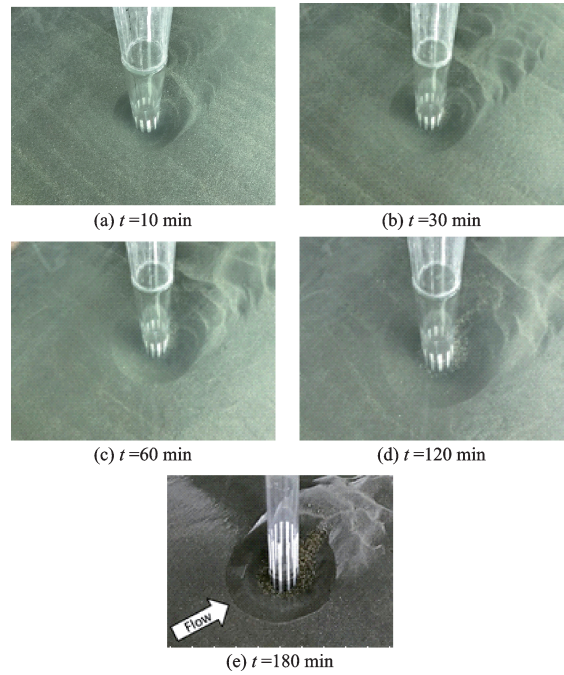


图 9 中间过程的冲刷形态

Fig. 9 Scour form of intermediate process

与桥墩周围的流场与流速分布情况吻合。

根据床面剪应力的定义可知, 剪应力与剪切速度的平方成正比, 即剪切速度大的地方剪应力也越

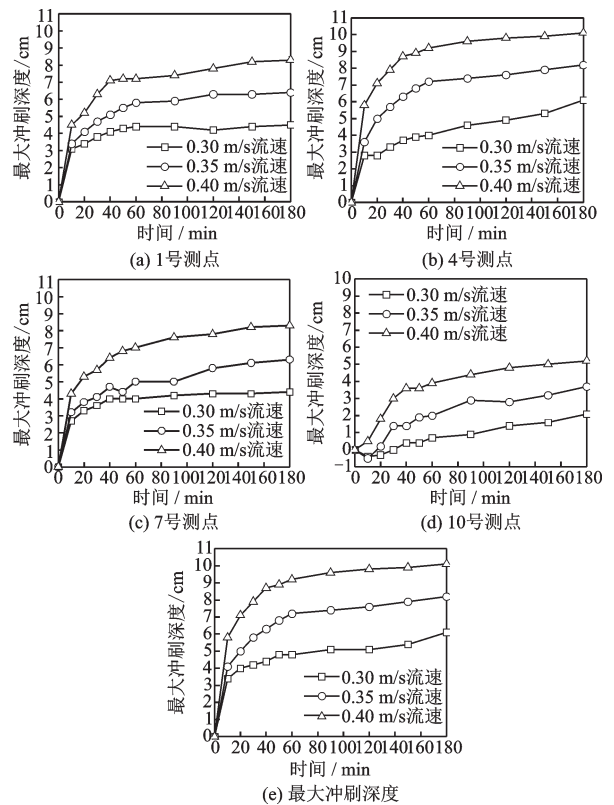


图 10 不同流速下冲刷深度情况

Fig. 10 Scour depths in difference flow velocity

大,结果也间接表明冲刷产生的部分原因是由于床面剪切速度或剪应力较大造成的,而流速的增大,导致床面剪应力增大,导致最大冲刷深度和范围的增大。由于流速的增大,导致桥墩前的水流紊动增加,墩侧水流对河床泥沙产生强大的切应力,使得桥墩两侧成为局部冲刷最为严重的部位。不同流速下冲刷3h后各测点情况如图11所示,最大冲刷深度与范围见表3。

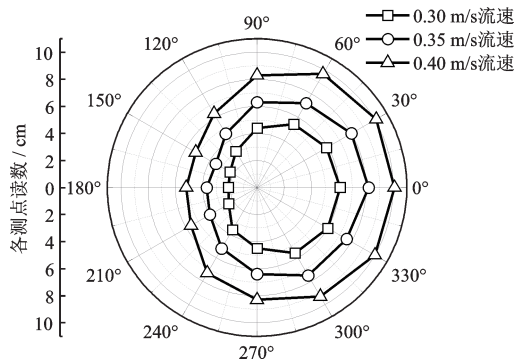


图11 不同流速下冲刷3h后各测点情况

Fig.11 Measuring point condition after 3h scour with difference flow velocity

表3 不同流速下冲刷3h的最大冲刷深度与范围

Table 3 Maximum scour depths and scopes after 3h scour with difference flow velocity

流速/(m·s ⁻¹)	水深/m	深度/cm	宽度/cm	长度/cm
0.30	0.5	6.1	32.1	43.4
0.35	0.5	8.2	41.2	56.0
0.40	0.5	10.1	45.1	72.4

3.3 不同水深下冲刷试验分析

在上述单墩冲刷的基础上,保证流速0.35 m/s不变,通过改变初始水深,探讨水深对冲刷的影响,本次试验考虑0.4、0.5、0.6 m三种水深。

不同水深作用下的主要测点冲刷深度和最大冲刷深度的发展情况如图12所示。结果表明:当水深大于四倍桥墩外径时,水深对冲刷深度相较于流速影响较小,随着初始水深的增大,最大冲刷深度略微增大,冲刷范围变化不明显。

与不同流速情况下的类似,墩前4号测点处可近似代表最大冲刷深度,不同测点的发展情况存在差异,但相同测点之间的读数差异十分小。随着水深的增加,各测点冲刷深度的读数也略微增大,但是冲刷深度增加不明显,仅相差数毫米。在流速不变的情况下,水深在小范围内的增加,不会过多的影响

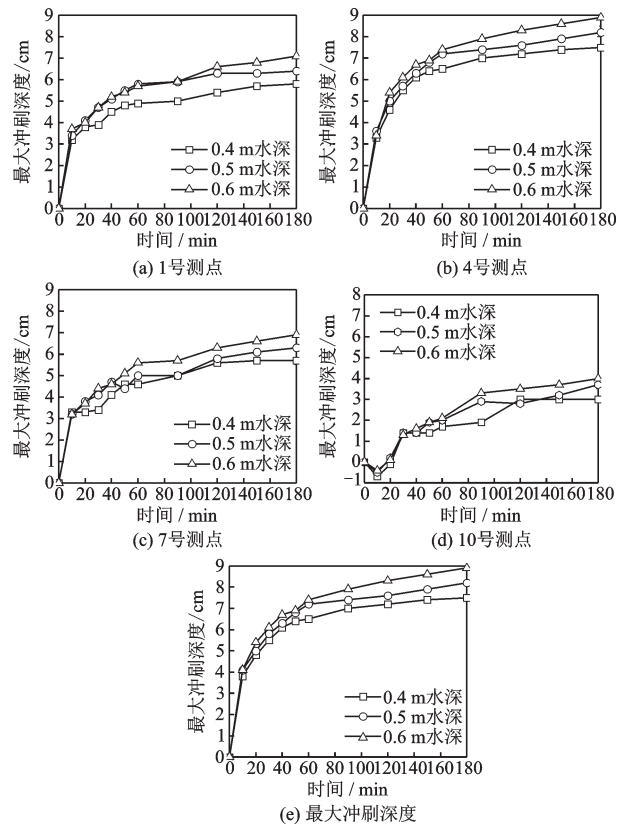


图12 不同水深下冲刷深度情况

Fig. 12 Scour depths with difference water depths

床面剪应力的变化,试验水深从0.4 m增加到0.6 m,结果导致最大冲刷深度略有增大,局部冲刷深度随着水深的增加而增加。

A. J. Raudkiv等^[13]认为桥墩局部冲刷的深度随着水深的增加而增加。下潜水流是对桥墩局部冲刷起主要作用的流场,随着水深的增加,墩前下潜水流也就相应增加,导致局部冲刷深度增加^[14]。不同水深作用下冲刷3h后各测点情况如图13所示,冲刷深度和范围对比见表4。

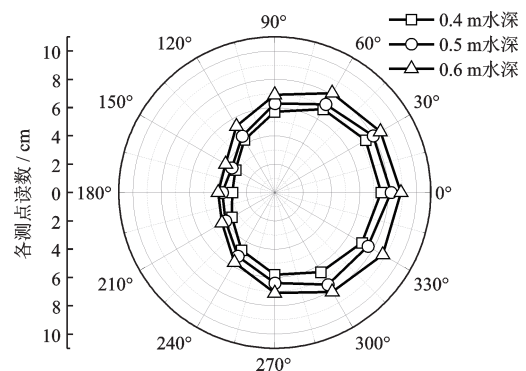


图13 不同水深下冲刷3h后各测点情况

Fig.13 Measuring point condition after 3 h scour with difference water depths

表4 不同水深下冲刷3h的最大冲刷深度与范围

Table 4 Maximum scour depths and scopes after 3h scour with difference water depths

流速/(m·s ⁻¹)	水深/m	深度/cm	宽度/cm	长度/cm
0.35	0.4	7.5	39.8	56.4
0.35	0.5	8.2	41.2	56.0
0.35	0.6	8.9	41.6	55.2

4 结 论

(1)针对单墩冲刷,随着时间的发展,最大冲刷深度与冲刷坑范围在前期急剧发展,随后发展逐渐缓慢,直到冲刷处于近似平衡阶段。

(2)单墩冲刷试验中,初始最大冲刷深度发生在墩前侧方附近位置,该位置的冲刷强度最大,随着冲刷阶段的不断发展,最大冲刷深度出现在墩正前方,最小冲刷深度出现在墩正后方,墩后的冲刷深度不足墩前深度的50%。

(3)同一水深作用下,最大冲刷深度随着流速的增加而加深;流速不变的情况下,最大冲刷深度随着水深的增加而增加。

(4)流速和水深都是影响桥墩局部冲刷的关键因素,相比于水深,冲刷深度和范围受流速的影响较大。

本研究在开展水深影响研究时,未考虑水深变化对流速分布的影响。后续试验研究中应重视在不同水深情况下的流速分布。

参考文献:

[1] Barbhuiya A K, Dey S. Local scour at abutments: a review[J]. Sadhana, 2004, 29(5):449-476.

[2] Wardhana K, Hadipriono F C. Analysis of recent bridge failures in the United States[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(3):144-150.

[3] 易仁彦,周瑞峰,黄茜.近15年国内桥梁坍塌事故的原因和风险分析[J].交通科技,2015(5):61-64.
Yi R Y, Zhou R F, Huang Q. Reason and risk of bridge collapse in recent 15 years [J]. Transportation Science & Technology, 2015(5):61-64. (in Chinese)

[4] 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 X Y, Lyu H X, Shen B. Experimental studies

on local scour mechanism of cylinder bridge piers [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012 (2) : 34-41. (in Chinese)

[5] 祝志文,刘震卿.圆柱形桥墩周围局部冲刷的三维数值模拟[J].中国公路学报,2011,24(2):42-48.
Zhu Zh W, Liu Zh Q. Three-dimensional numerical simulation for local scour around cylindrical bridge pier [J]. China Journal of Highway & Transport, 2011, 24 (2):42-48. (in Chinese)

[6] 詹义正,王军,谈广鸣,等.桥墩局部冲刷的试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2006,39(5):1-4,9.
Zhan Y Zh, Wang J, Tan G M, et al. Experimental study on bridge pier local scour [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(5):1-4,9. (in Chinese)

[7] Soulsby R. Dynamics of marine sands [C] //London: Thomas Thelford Publications, 1998.

[8] Melville B M. Local scour at bridge sites [D]. New Zealand: University of Auckland, 1975.

[9] Sumer B M, Christiansen N, Fredsoe J. Time scale of scour around a vertical pile [C] //The Second International Offshore and Polar Engineering Conference, [s.l.]: International Society of Offshore and Polar Engineers, 1992.

[10] 马丽丽,国振,王立忠,等.单向流条件下单桩桩周冲刷过程特征试验研究[J].海洋工程,2017,35(1):136-146,156.
Ma L L, Guo Zh, Wang L Zh, et al. Scour characteristics at the periphery of a vertical pile under steady flow [J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(1):136-146, 156. (in Chinese)

[11] Zhang Q, Zhou X L, Wang J H. Numerical investigation of local scour around three adjacent piles with different arrangements under current [J]. Ocean Engineering, 2017, 142:625-638.

[12] Debnath K, Chaudhuri S. Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds [J]. Engineering Geology, 2010, 111(1-4):51-61.

[13] Raudkivi A J, Ettema R. Clear-water scour at cylindrical piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(3):338-350.

[14] 李成才.桥墩局部冲刷试验及计算理论研究[D].南京:河海大学,2007.
Li Ch C. Experimental study and calculations on the local scour of piers [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)

(本文责编:池营营)