

圆柱基础扰流环冲刷防护实验研究

陈 兵^{*1}, 胡 涛¹, 苏宗周²

(1. 大连理工大学 建设工程学部 港口与近海工程研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 佛罗里达大西洋大学 海洋与机械工程学院, 美国 佛罗里达 33431)

摘要: 马蹄涡对圆柱基础局部冲刷有重要影响. 通过模型实验, 研究了利用扰流环影响马蹄涡的发展, 从而减弱局部冲刷的效果. 实验中, 扰流环安放在圆柱底部距离沙面不同位置处. 实测数据结果表明: 在均匀来流作用下, 扰流环能不同程度地抑制马蹄涡, 减小立柱基础的局部冲刷, 效果最佳时泥沙冲刷量能减小 40%. 这种新的冲刷防护措施简单、实用、适应性强, 为桩柱基础的冲刷防护提供了有用的参考依据.

关键词: 局部冲刷; 马蹄涡; 圆柱基础; 扰流环; 冲刷防护

中图分类号: U169.65

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201401012

0 引言

桩柱是港口工程和海洋工程中常见的构件, 广泛用于高桩码头、海洋平台等建筑结构. 桩柱基础在海流作用下产生局部冲刷, 从而减小了桩柱的入土深度, 降低了桩的承载力, 影响了结构的稳定性, 工程中必须正视这个问题并采取相应的措施. 马蹄涡对桩柱基础前的局部冲刷有重要影响^[1], 研究马蹄涡及削弱它的方法具有重要工程意义.

减小马蹄涡对桩柱基础局部冲刷影响的本质是通过改变局部流动来控制流体动力的作用, 以达到防护桩柱基础局部冲刷的目的. 为控制桩柱前的水流扰动, 人们采用了许多方法.

Chiew^[2]提出开缝防冲刷的保护方法, 桩柱上开缝使得下冲水流转向离开沙床或减小下冲水流对沙床的冲击, 开缝的宽度、长度和位置是其非常重要的参数. 例如开缝的位置有靠近沙床和靠近水面两种, 这两种位置的开缝造成的水流特性有所不同. 当然, 若水流中有碎石, 就会导致开的缝被碎石部分阻塞甚至全部阻塞, 而降低其防护的效率. Singh 等^[3]指出可以把马蹄涡遏制在形成阶段, 采取填补板或者在墩外围加套筒的方法, 此方法的原理也是改变桩柱前的水流, 改变下冲

水流流向或削弱下冲水流对泥沙床面的冲击. Wang 等^[4]针对桥墩的冲刷防护问题, 提出一种环形塔器装置, 放在桥墩来流方向前面的一段距离处扰流以防冲刷, 这种方法效果显著, 但是适应性不强, 水流流向稍微改变, 效率就会明显降低. Tang 等^[5]在研究桥墩冲刷防护时提出四面体框架方法. Dey 等^[6]研究了分流板和缆线缠绕方法防冲刷. 这些方法的基本原理都是使用不同的措施削弱桩柱前的马蹄涡, 达到对桩柱基础的冲刷防护效果.

本文根据这些措施的思路及实际问题, 提出一种新型的冲刷防护装置, 尝试利用扰流环来抑制马蹄涡, 并在均匀来流作用下进行物理模型实验, 研究此方法的可行性, 并对此法进行初步研究.

1 物理模型实验

本实验研究水槽中圆柱周围的局部冲刷防护, 冲刷实验耗时间较长, 为节省时间尽快得到结果, 查看有、无扰流环情况下立柱前后起动涡的状态及冲刷效果, 18 min 组次实验并没有达到冲刷平衡, 目的是研究各种扰流环在冲刷中间状态达到的防护效果, 更重要的是选择最佳防护效果时

扰流环的位置参数,进而选择防护效果最佳的工况参数有针对性地进行长时间冲刷实验,冲刷达到平衡状态后,进一步研究此扰流环装置的冲刷防护效果.

实验采取单向均匀流作用模拟桩柱基础冲刷,圆立柱模型采用表面光滑的有机玻璃,立柱直径 80 mm,实验使用的扰流环有两种:圆截面扰流环的截面为圆形,环内径 140 mm,外径 160 mm;扁截面扰流环的截面是扁的,环内径 140 mm,外径 160 mm,图 1 所示为扁截面扰流环的截面形状及实验中所使用的两种形式,外形为圆形和方形.

实验在大连理工大学水利工程学院港工实验室的波浪水流实验水槽中进行.实验水槽的主要尺寸:长 47 m、宽 1 m、深 1.3 m.在实验水槽中段设有 1.5 m 长、1.0 m 宽的实验段,模型区是深度为 0.30 m 的沙盘,盘内填满实验用沙,实验用沙的中值粒径 $d_{50}=0.32\text{ mm}$.实验段中央埋置用有机玻璃制作的直立圆柱体,立柱大概位于水槽宽度方向中央位置,圆柱体底端设有支座,使得圆柱体在水流作用下不致发生移动和摇晃.实验段及圆柱体的布置如图 1 所示.实验中主要的测量和控制项目有流速、冲淤地形、冲深监测点的最大冲刷深度、扰流环的形状和安放位置.测量流速采用的是 LGY-II 型智能流速仪,实验中要求流速控制在预定要求值,而且在模型区域内无建筑物模型时的横断面上均匀分布,流速取的是平均流速,

实验过程中实时监测.冲淤地形用日本生产的淤厚仪测量,某点的地形冲淤值是实验开始前该测点的高程读数与测定时该点的高程读数之差.

为测量立柱周围冲刷前后的地形,布置了几套测点:

(1)如图 2 所示,测区范围 $800\text{ mm}\times 600\text{ mm}$;冲刷范围边沿部分基本测点间距为 50 mm ,其他部分测点加密 1 倍,测点间距为 25 mm ,共计 588 个地形测点.

(2)为了观察冲刷发展过程,在立柱周围设置了 4 个冲深监测点,如图 2 所示.在施加流的过程中每隔 20 min 测量一次,计算冲淤值,得到 4 个监测点的冲刷深度随时间的历程曲线.

(3)每个组次实验结束后,水放干,确定最大冲深点并用钢尺测量最大冲深值及冲坑范围.

根据上面测得的离散点数据,计算出每组次实验立柱周围的泥沙冲刷量,作为重要的比较指标.

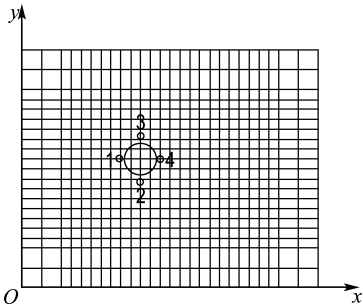


图 2 地形测点分布图及最大冲深监测点分布图
Fig. 2 Distribution of inspection points for topography and positions of inspection points for maximum scour depth

正式实验开始时,首先安放模型,将泥沙整平,然后加水至指定深度,用淤厚仪测量原始床面的标高,按实验要求造流,当冲刷达到时间要求实验结束时,再次用淤厚仪测量床面的标高.长时间冲刷实验过程中,为了监测冲刷发展过程,还要求每隔 20 min 测量特征点的床面高程.

2 实验结果及分析

2.1 18 min 实验

实验分 3 个大组次,基本参数如表 1 所示,主要研究两种不同截面扰流环的冲刷防护效果,以及防护效果最佳时环的安装位置参数.

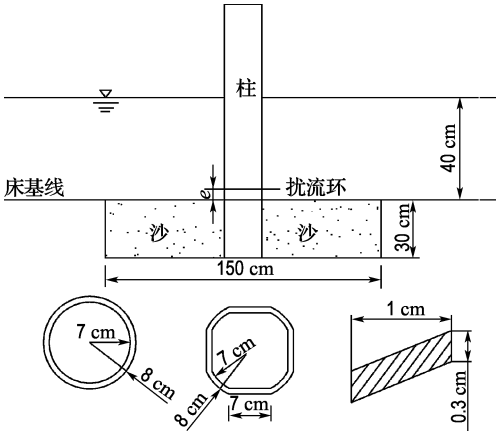


图 1 实验布置及扰流环截面示意图
Fig. 1 Experimental setup and the cross-sectional view of the controlling ring

表 1 18 min 实验组次及基本参数
Tab.1 Parameters in the 18 min model test

组次	扰流环类型	e/cm	水深/ cm	平均流速/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1-1	—	—	40	30
1-2	圆截面扰流环	3	40	30
1-3	—	—	40	24
2-1	扁截面扰流环 (窄口朝上安装)	12	40	24
2-2		9	40	24
2-3		6	40	24
2-4		3	40	24
2-5		0	40	24
3-1	扁截面扰流环 (窄口朝下安装)	12	40	24
3-2		9	40	24
3-3		6	40	24
3-4		3	40	24
3-5		0	40	24

注：表内扁截面扰流环外形为方形，见图 1 右下； e 表示扰流环下沿距沙面距离；平均流速为距离沙面 10 cm 处的平均流速，此表中冲刷时间均为 18 min，实验来流由 X 负向向正向传播。“—”表示没有扰流环的单一立柱对照实验组次

表 2 是圆截面扰流环的实验结果，可以看出，1-2 组泥沙冲刷量比 1-1 组大，表明圆截面扰流环没有防护效果，而且造成泥沙冲刷量反而比立柱没有防护时更大。这是由于圆截面扰流环的圆形

截面导致水质点的扰动更加强烈，不能起到削弱马蹄涡的作用。

实验结果显示扁截面扰流环具有明显的冲刷防护效果，因而将各组次实验所产生的立柱(直径为 D)周围冲坑范围内的冲刷量绘制成图加以比较。从图 3 可以看出，安置扁截面扰流环，与没有任何防护措施的单一立柱冲刷相比，立柱周围冲坑的泥沙冲刷量都不同程度减小，实验中的实测结果也表明安置扁截面扰流环组次的冲深监测点的冲刷深度基本都有减小的趋势，冲坑范围基本有变小趋势。与表 2 圆截面扰流环组次实验结果对比，表明扰流环的截面形状对冲刷防护的效果影响显著，原因如下：圆截面扰流环的圆形截面增大了马蹄涡的波动；扁截面扰流环扁截面的翼形抑制了马蹄涡运动，吸引了马蹄涡绕环运动，削弱了马蹄涡的分离、生长，进而减小了下冲水流对立柱基础沙床的冲击，从而减小了对立柱基础的冲刷。翼形截面吸引马蹄涡的原理可以参考 Su 等^[7]的研究成果，这种抑制马蹄涡的控制方法灵活实用，对桩柱基础冲刷防护的研究有重要启示。

表 2 18 min 圆截面扰流环的效果
Tab.2 Effect of circle controlling ring in 18 min model test

组次	监测点 1		监测点 2		监测点 3		监测点 4	Q/cm^3
	d/cm	h/cm	d/cm	h/cm	d/cm	h/cm	h^*/cm	
1-1	10.5	6.6	9.7	5.8	9.6	6.2	7.6	1 363.9
1-2	9.5	9.2	9.0	7.6	9.1	6.9	6.0	1 460.8

注：表内数据为实验结束统计的冲刷坑范围、监测点处的最大冲坑深度和立柱周围冲刷坑范围内冲刷掉的泥沙量； d 为测点处的最大冲坑深度， h 为圆柱表面到冲坑外沿距离； h^* 为淤积最大高度

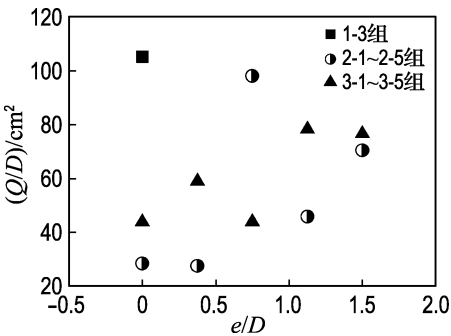


图 3 18 min 各组次冲刷量随环距离床面高度变化关系

Fig. 3 The relationship between the erosion mass quantity and mounting height of ring in 18 min model test

进一步分析图 3 的数据可以看出，扰流环的安放位置不同，冲刷防护的效果也不同：环离沙床面距离 e 为柱径 1.5 倍左右时，对冲刷防护效果很弱，由涡融合原理^[8]可知，这是因为扰流环离床面过高，已经远离了马蹄涡运动的涡核位置，对马蹄涡起不到很强的抑制作用。当扰流环离沙面距离是柱径的 0~0.75 倍时，防护效果相对比较好。扰流环安放位置高度 e 是柱径的 0.375 倍时，其冲刷形态图见图 4(b)、4(c)，由图明显可以看出与单一立柱的冲刷形态图 4(a)相比，冲刷深度明显减小，冲坑的范围也减小，由图 3 知冲刷量也明显减少，比同等条件下无任何防护措施的立柱的冲刷量分别能减少 70%、40%。

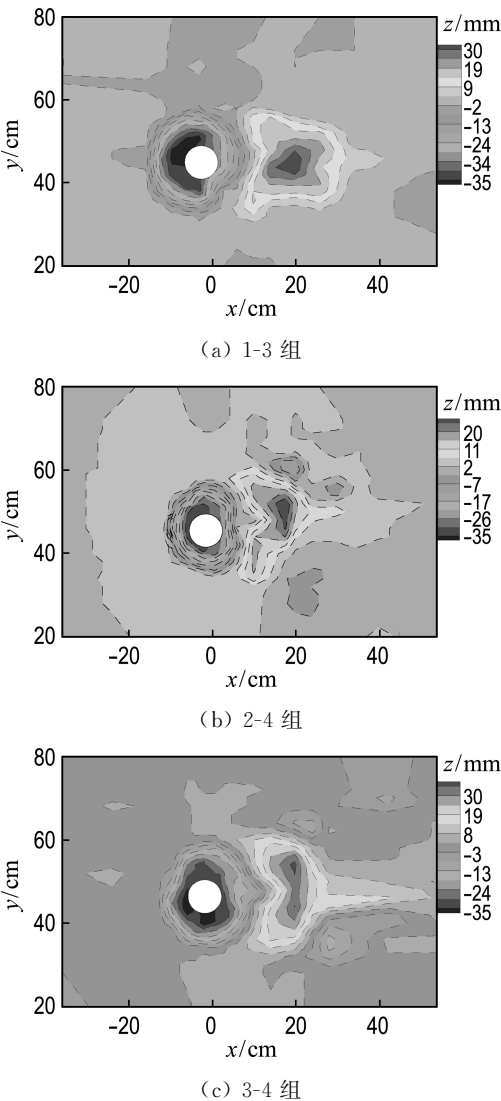


图 4 冲刷形态图
Fig. 4 Scour patterns

实验结果表明扁截面扰流环窄口朝上时防护效果较好,原因可能是在这个固定位置,窄口向上时,环的截面更容易抑制马蹄涡,从而冲刷防护效果更好一些.从图 3 可以看出,这两种安装方式的防护效果有一定差别,但总体都比单一立柱的冲刷程度小.

18 min 冲刷并没达到平衡,扰流环与立柱同心固定在立柱靠近沙床的位置上,通过沿立柱上下移动扰流环的位置,分别进行不同组次的实验,并与同等条件下没有任何防护措施的立柱实验进行对比,观察分析了立柱周围的冲刷情况,以此确定扁截面扰流环对立柱局部冲刷防护有效果,扁截面扰流环改变了柱前的流态,达到了减小冲刷的效果.

2.2 长时间实验

由 18 min 实验可知扁截面扰流环有冲刷防护效果,扰流环距沙面位置 e 与柱径比值在 $0\sim 0.75$ 、环窄口朝上安装时效果较好,针对这些结论选取参数进行长时间冲刷实验:扁截面扰流环的窄口朝上安装,实验组次设计及其参数见表 3,每组实验都达到冲刷平衡,为增加扰流环的抑制马蹄涡效果,选取的扁截面扰流环外形为方形,具体尺寸和截面见图 1 右下.

表 3 实验组次及基本参数

Tab. 3 Parameters in the model test

组次	e/D	平均流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	冲深监测点最大冲刷深度/mm				冲刷量 Q/cm^3
			1	2	3	4	
1-1	—	14	50	35	18	8	875.4
1-2	0.250	14	45	32	6	4	711.7
1-3	0.375	14	47	31	8	—6	721.9
2-1	—	20	90	91	58	44	6 223.2
2-2	0.250	20	82	71	51	37	4 267.5
2-3	0.375	20	80	66	37	26	3 451.3

注:平均流速为距离沙面 10 cm 处平均流速,最大冲刷深度为负值表示此点是淤积状态.冲刷量的计算方法采取的是土方工程量的计算方法^[9]

由表 3 中实验结果可以看出,在不同流速下,扰流环都能起到减小冲刷的作用,装有扰流环的实验组次监测点的最大冲深有不同程度减小,冲刷量也有减小,并且冲刷防护效果最佳时能减少 40% 的冲刷量.

通过对图 5 与 6,图 7 与 8 的冲刷地形和冲深监测点冲深历时曲线进行分析,可以得到 1-1 组与 1-3 组、2-1 组与 2-3 组实验结果的对比.在水深、流速相同条件下,带扰流环的组次达到平衡时间短,冲刷稳定时间短,最大冲深减小,冲刷坑范围减小,冲刷量也降低.这是因为扰流环使得马蹄涡运动变弱、柱前下冲水流冲击作用减小,直接起到冲刷防护的作用.在冲刷开始短时间内扰流环加速了冲刷达到稳定状态,从图 5、6 来看,相同条件下,单一立柱冲刷平衡时间明显长于带扰流环的立柱,原因可能是在扰流环作用下,只是总体降低了冲向沙床的水流速度,保持在稳定大小状态,但是开始阶段的速度并不比单一立柱开始阶段速度低.

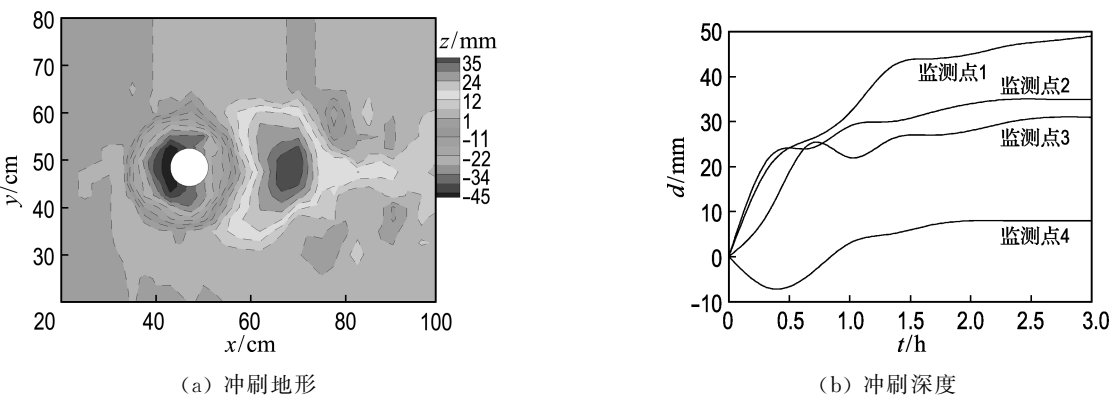


图 5 平衡状态冲刷地形及冲深监测点冲刷深度历时曲线(1-1 组, 流速 14 cm/s, 单一立柱)

Fig. 5 Scour pattern in equilibrium and scour depth at scour depth monitoring points versus time curves (Test 1-1, 14 cm/s, single column)

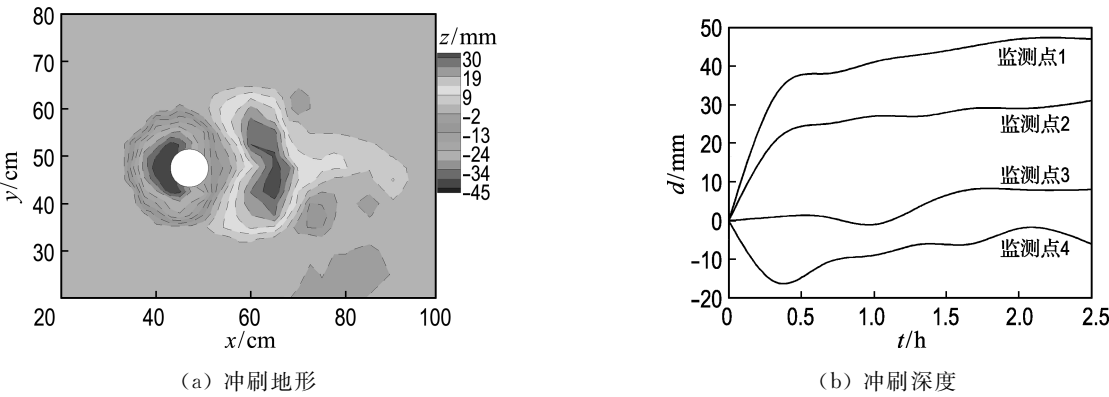


图 6 冲刷地形图及冲深监测点冲刷深度历时曲线(1-3 组, 流速 14 cm/s, $e/D=0.375$)

Fig. 6 Scour pattern and scour depth at scour depth monitoring points versus time curves (Test 1-3, 14 cm/s, $e/D=0.375$)

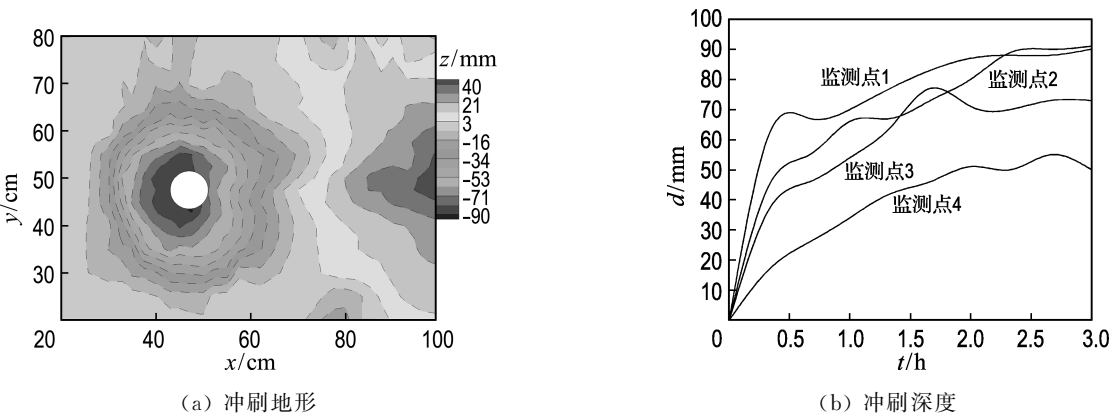
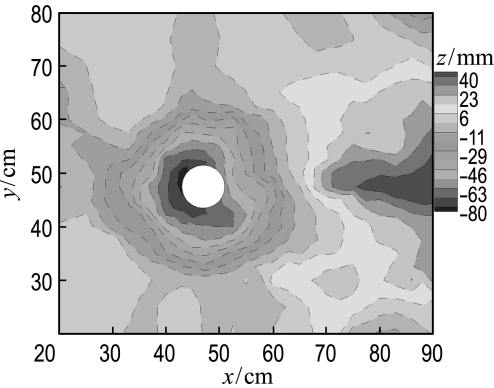


图 7 平衡状态冲刷地形及冲深监测点冲刷深度历时曲线(2-1 组, 流速 20 cm/s, 单一立柱)

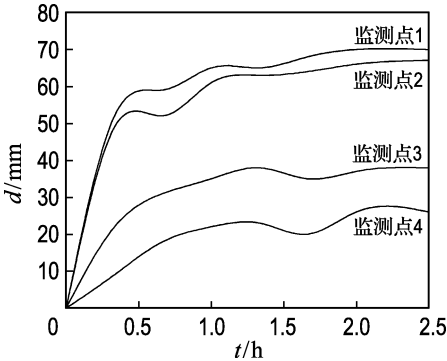
Fig. 7 Scour pattern in equilibrium and scour depth at scour depth monitoring points versus time curves (Test 2-1, 20 cm/s, single column)

由表 3 可知,在有扰流环的立柱冲刷达到平衡时,扰流环距沙面的距离与柱径比值为 0.250 和 0.375 时,防护效果均较好,这是因为此范围是柱前马蹄涡的运动范围^[10],扰流环在此范围内才

能抑制削弱马蹄涡的运动,故当柱径比选为 0.250、0.375 时,防护效果很明显,由 18 min 实验也可看出,当柱径比超出一定范围,对立柱基础冲刷防护的效果明显降低.



(a) 冲刷地形



(b) 冲刷深度

图 8 平衡状态冲刷地形及冲深监测点冲刷深度历时曲线(2-3 组,流速 20 cm/s, $e/D=0.375$)

Fig. 8 Scour pattern in equilibrium and scour depth at scour depth monitoring points versus time curves (Test 2-3, 20 cm/s, $e/D = 0.375$)

当扰流环与沙面距离 e 是柱径的 0.250、0.375 倍时,从 18 min 时的防护效果来看,是有一些差距的,从达到冲刷平衡状态的最后结果来看,防护效果差别不大,这实际反映了扰流环在冲刷开始阶段对冲刷速度的影响,总体来看,在达到冲刷平衡的整个冲刷状态下扰流环对柱基础的冲刷起到的是防护作用.

不同流速下,冲深监测点 4 冲刷深度历时曲线的走势差异很明显,图 5、6 中显示监测点 4 处地形先淤积后冲刷,图 7、8 中显示一直处于冲刷

状态,这是因为流速为 14 cm/s 时,监测点 4 开始处于淤积区,随着冲刷的发展,冲坑逐渐变大,监测点 4 变为冲刷区;当流速增大至 20 cm/s 时,开始冲刷状态监测点就处于冲刷区.

本次实验研究桩柱基础的冲刷防护,关注的是扰流环的防护效果,所以对实验过程中桩柱基础的局部冲刷的发展过程及冲刷形态不再赘述,详细见文献[10].

3 结 论

(1)设置扰流环后,无论是冲刷未达到平衡状态还是冲刷达到平衡状态,在一定范围内扰流环可以有效减小立柱局部冲刷冲坑深度、范围与泥沙冲刷量.

(2)在本次实验中发现,扁截面扰流环窄口朝上时防冲刷效果较好,通过调整扰流环与沙面距离,实验中冲刷防护效果最佳时能减小 40% 的冲刷量.

(3)本文提出的扰流环防冲刷方法适用于各个方向的来流,也不改变桩柱本身的结构,扰流环结构简单,制造和安装成本低,有着广泛的应用前景.

本文实验研究单向流作用下圆柱基础的冲刷,鉴于实验数据的有限及实验本身的探索性质,还不能定量地给出最佳防护效果下扰流环尺寸与柱径的关系式.进一步地,还应考虑扰流环在波流共存状态、水深等因素变化下的圆柱、方柱、椭圆截面立柱等桩柱基础的冲刷防护效果,更复杂的研究工作,作者将在下一步研究中完成.

参考文献:

[1] Simpson R L. Junction flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, **33**:415-443.

[2] Chiew Y M. Scour protection at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, **118** (9): 1260-1269.

[3] Singh C P, Setia B, Verma D V S. Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier [C] // *XXIX IAHR Congress Proceedings*. Beijing:IAHR, 2001:202-210.

- [4] Wang Chuan-yi, Cheng Jen-hao, Shih Han-peng, *et al.* Ring columns as piers scour countermeasures [J]. **International Journal of Sediment Research**, 2011, **26**(3):353-363.
- [5] TANG Hong-wu, DING Bing, Chiew Yee-meng, *et al.* Protection of bridge piers against scouring with tetrahedral frames [J]. **International Journal of Sediment Research**, 2009, **24**(4):385-399.
- [6] Dey S, Sumer B, Fredsøe J. Control of scour at vertical circular piles under waves and current [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006, **132**(3):270-279.
- [7] Su T C, Wu C, Lin Y K. Control of junction flow by vortex fusion [C] // **Hydrodynamics 5: Theory and Applications-Proceedings of the 5th International Conference on Hydrodynamics**. Tainan:[s n], 2002.
- [8] Li Q, Liu C, Hong H. Experimental study on scour protective equipment around pile of bridge under wave and current [C] // **Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference**. Beijing:IOPEC, 2010.
- [9] 交通部第一航务工程局. 港口工程施工手册[M]. 北京:人民交通出版社, 1994:81-85.
- The First Navigational Engineering Bureau of Ministry of Communications. **Port Engineering Construction Manual** [M]. Beijing: China Communications Press, 1994:81-85. (in Chinese)
- [10] 陈 兵,邵 学,韩丽华,等. 海洋立管的局部冲刷实验[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, **31**(6):712-719.
- CHEN Bin, SHAO Xue, HAN Li-hua, *et al.* Local scour experiment of marine riser [J]. **Journal of Shenyang University of Technology**, 2009, **31**(6):712-719. (in Chinese)

Research on scour protection around pile foundation with controlling ring

CHEN Bing^{*1}, HU Tao¹, Su Tsung-chow²

(1. Institute of Harbor and Offshore Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Department of Ocean & Mechanical Engineering, Florida Atlantic University, Florida, 33431, the United States of America)

Abstract: Horseshoe vortex plays an important role in the problem of local scour around the foundation of a pile. A controlling ring is attached to the lower part of a circular pile to weaken the horseshoe vortex so as to reduce the local scour around the pile. The effects of the controlling ring are investigated through laboratory experiments. Uniform flow is used in experiments and the controlling ring's vertical positions are varied to adjust its distance from the sea bed. The experimental data show that the controlling ring can weaken the horseshoe vortex, and reduce the seabed material removal up to 40%. This scour protection measure is simple and practicable, and is adaptable to uncertain flow direction, and can provide valid reference for scour protection of pile foundation.

Key words: local scour; horseshoe vortex; pile foundation; controlling ring; scour protection