

# 上覆粗砂层河床群桩基础冲刷特性试验

梁发云<sup>1,2</sup>, 彭 君<sup>1,2</sup>, 王 琛<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 采用波流水槽试验, 针对上覆粗砂层双层砂土进行局部冲刷机理研究, 并与中国和美国规范的局部冲刷深度计算方法对比分析. 试验研究表明: 由于上覆粗砂层的存在, 冲刷前期进展缓慢, 后期主要为细砂层冲刷, 发展较快; 而上覆粗砂层对下卧细砂层冲刷起到抑制作用, 粗砂层越厚, 抑制效果越明显; 中美规范对于上粗下细双层砂土局部冲刷深度计算结果偏大, 应进行适当折减, 以更为合理地反映粗砂层对细砂层冲刷的影响.

**关键词:** 波流水槽; 砂性土; 冲刷深度; 规范对比

**中图分类号:** TU475<sup>+</sup>.9

**文献标志码:** A

## Flume Tests of Local Scour Around Pile Groups in Composite-sandy Soils

LIANG Fayun<sup>1,2</sup>, PENG Jun<sup>1,2</sup>, WANG Chen<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper, flume model test on local scour around piles embedded in composite sand was performed, and comparisons and discussions of such predictions of local scour depth in current China and America were also made. The test results show that the scoring progress is slow because the main scoured parts are coarse sand in the early stage. However, in the later stage, as the fine sand becomes the main scoured parts, the progress is faster. The upper-layer coarse sand can help to keep the lower-layer fine sand from being scoured, and the thicker the coarse sand layer was slower than the fine sand will be scoured. The present design codes of China and USA both work well, but these codes often lead to a much exaggerated results. Therefore, to reflect the effects of the coarse sand on the fine sand, the scour depth should be reduced.

**Key words:** flume; non-cohesive soils; scour depth;

comparison of specifications

冲刷是水流作用将河床堤岸、桥墩或桥台周边泥沙剥蚀带走的一种自然现象. 统计资料表明, 洪水冲刷是造成桥梁灾害主要的原因之一, 超过半数的桥梁破坏与水流冲刷有关<sup>[1-4]</sup>. 上世纪 50 年代以来, 桥梁冲刷的研究受到了高度重视, 但绝大部分研究仅是针对单一地层开展的. 然而, 实际上桥梁工程所处的地质条件较为复杂, 河床地层通常为分层沉积. 典型的如黄河中下游地区泥沙粗细不同形成了河床的垂直二元结构, 使得河床呈现明显的分层现象<sup>[5]</sup>; 永定河床砂粒径级配曲线呈“躺椅”型, 即床砂仅含有粗颗粒和细颗粒砂而缺乏中等颗粒, 分层现象明显<sup>[6]</sup>; 美国科罗拉多河胡佛坝、帝国坝等区段在水流的分选作用下形成“上粗下细”的分层结构<sup>[7]</sup>; 在新西兰 Rangitiker 河床中, 细颗粒床砂上覆约 1 m 厚的砾石层<sup>[8]</sup>.

随着跨江跨海桥梁的大量建设, 分层土中桥墩局部冲刷问题逐渐受到了国内外学者的重视. 黄崇佑等<sup>[9]</sup>采用解析方法推导出恒定流条件下分层土中桥墩局部冲刷深度计算方法; Briaud 等<sup>[10]</sup>提出采用 SRICOS-EFA (sour rate in cohesive soil-erosion function apparatus) 法计算分层土的冲刷深度; 而我我国《公路工程水文勘察设计规范: JTG C30—2002》<sup>[11]</sup>则建议采用逐层渐进法计算分层土最大冲刷深度.

实际工程中, 河床中不均匀砂随着冲刷的进行, 部分粗颗粒砂将聚集在细砂层表面, 形成一层耐冲刷面, 对冲刷的继续发展具有限制作用<sup>[12]</sup>. Guo<sup>[13]</sup>的研究表明, 粗粒泥沙掩盖下, 细粒泥沙不易被扬起参加跃移或悬移运动, 增大了细砂层的抗冲能力. 然而, 上述文献或规范<sup>[9-11]</sup>对冲刷深度的计算均忽略了

上覆粗砂层的影响,其计算思路大致是将各土层的冲刷深度进行简单叠加.针对该现象,Dey等<sup>[14-15]</sup>开展了上覆粗砂层条件下桥台和单桩的冲刷模型试验;Wu等<sup>[16]</sup>通过桥台局部冲刷室内模型试验,认为最大冲刷深度随着上覆粗化层粒径的增加而逐渐减小;Deva<sup>[17]</sup>提出了一种计算上覆粗化层冲刷深度的简化方法.

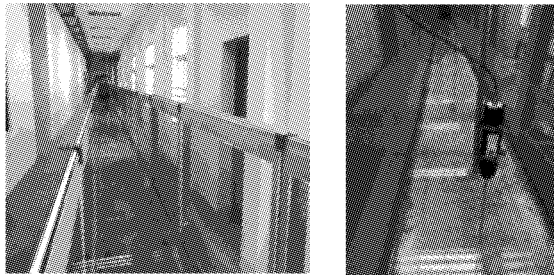
目前对于此类上覆粗砂层的分层砂中群桩基础冲刷问题尚缺乏深入了解,有必要对此开展研究.本文采用波流水槽对上覆粗砂层河床中的群桩基础开展冲刷试验,分析其与单一细砂层的区别.

## 1 试验概述

### 1.1 试验仪器和设备

(1) 波流水槽:在同济大学水利港口综合实验室的波流水槽中开展试验,使用该装置的造流功能.水槽长50 m、宽0.8 m、深1.2 m,水槽中部设置沉砂池,深1.0 m、宽0.65 m、长2.7 m.水槽底部为混凝土结构,槽体采用钢架结构,如图1a所示.

(2) ADV(多普勒点式流速仪):高精度声学多普勒点式流速仪,布置在水槽的上游,用于测量水流流速,如图1b所示.



a 波流水槽

b ADV

图1 试验水槽和设备

Fig.1 Flume and equipment

### 1.2 模型试验材料

(1) 试验砂土:河床双层砂土结构的形成主要是因为非均匀的砂质河床受到砂波运动而发生的粗化现象<sup>[18]</sup>,根据弗洛德数(Froude Number)相似,经比选,试验采用中值粒径比 $d_s = d_1/d_2 = 5.3$ 的两种砂土作为模型砂(其中 $d_1$ 、 $d_2$ 分别为粗砂和细砂的中值粒径).为便于观察,粗砂采用玫红色彩砂,用筛分法进行泥砂粒径分析.颗粒级配曲线表明,中值粒径 $d_{50} = 0.8$  mm,不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 3.8 < 5.0$ (其中 $d_{60}$ 、 $d_{10}$ 分别为累计质量百分比达到60%和10%的粒径);细砂采用 $d_{50} = 0.15$  mm的标准

砂,不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 3.1 < 5.0$ .

本文以新西兰 Rangitiker 河为原型缩尺<sup>[8]</sup>,水深15 m.模型相似准则遵循重力相似原则,即满足模型与原型的弗洛德数相等.

$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{gL_p}} \quad (1)$$

式中: $g$ 为重力加速度; $V$ 、 $L$ 分别为物体的速度和尺寸;下标 $m$ 、 $p$ 分别代表模型和原型.模型长度比尺 $\lambda_L = L_p/L_m$ ,根据试验条件,取 $\lambda_L = 100$ .

对式(1)进行量纲分析,可得:① 时间比尺 $t_p/t_m = \sqrt{\lambda_L} = 10$ ;② 水深比尺 $\lambda_h = \lambda_L = 100$ ;③ 流速比尺 $\lambda_v = \sqrt{\lambda_L} = 10$ .

因此,模型试验水深 $h = 15/100 = 0.15$  m.

(2) 模型桩:采用直径为3 cm、长度为60 cm的铝合金管,桩间距为 $2D$ ( $D$ 为模型桩直径).

### 1.3 试验方案设计

试验在不同粗砂层厚度条件下,分别对单桩、前后串排双桩、左右并排双桩以及双排四桩(a、b、c、d)等4种情况进行冲刷试验,根据模型桩布置形式和粗砂层厚度设计为11组试验,布置形式如表1所示,其中T1、T4、T7和T10作为对照组.

根据窦国仁<sup>[19]</sup>泥沙启动流速公式计算,在水深15 cm恒定流条件下,粗砂的启动流速为 $25.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,考虑到试验水槽的最佳工作状态,通过多次预试验,将试验流速设定为 $26.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

主要试验步骤如下:① 在砂槽中布置模型桩和分层砂土,ADV布置在水槽上游,先向砂槽中注水使砂土静置饱和,再将试验用水加注到15 cm;② 运用造流仪进行造流,水流速度设定为 $26.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;③ 根据预试验观测结果,确定试验冲刷平衡时间为2 h,由于粗砂层冲刷速度较慢,每10 min对试验结果观测1次,并记录数据.

## 2 试验结果与分析

冲刷过程达到平衡后,测得各桩周前、后、左、右等关键测点的最终冲刷深度,如表1所示.

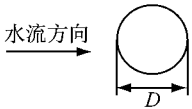
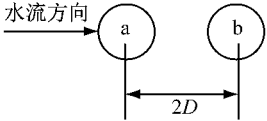
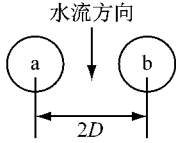
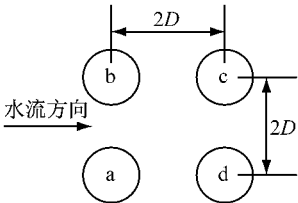
### 2.1 单桩

单桩冲刷结果如表1中的T1、T2和T3所示.

单层细砂中桥墩基础在单向流作用下的局部冲刷过程中,由于行近水流受到桥墩的阻碍作用,墩周水流形成马蹄形漩涡,墩前水流则顺着桥墩下切侵蚀床面泥沙,墩周以及墩前泥沙明显被水流卷起挟走,而墩后由于桥墩的阻水作用,马蹄形漩涡强度较

表 1 上覆砂土层河床的最终冲刷深度

Tab.1 Final scour depth in composite-sandy soil

试验组别	模型桩布置形式	粗砂层厚度/cm	桩号	最终冲刷深度/cm			
				前	后	左	右
T1		0		3.8	2.7	3.5	3.5
T2		0.5		2.2	1.6	2.1	2.2
T3		1.0		1.9	1.3	1.8	1.9
T4		0	a	4.1	3.3	3.8	3.8
			b	2.8	1.0	1.7	1.5
T5		0.5	a	2.2	1.5	1.8	2.0
			b	1.6	0.4	1.3	1.5
T6		1.0	a	1.7	1.2	1.5	1.4
			b	0.9	-0.4	0.8	0.6
T7		0	a	4.9	3.8	4.2	4.0
			b	4.8	3.4	4.5	4.2
T8		0.5	a	2.5	1.8	2.3	2.2
			b	2.3	1.7	2.3	2.2
T9		1.0	a	2.0	1.5	2.0	2.0
			b	1.9	1.5	1.8	1.9
T10		0	a	5.1	4.3	4.8	5.0
			b	5.0	4.5	5.0	4.9
			c	4.5	2.4	3.5	3.0
			d	4.3	2.5	3.2	3.5
T11		1.0	a	1.8	1.2	1.5	1.7
			b	1.8	1.4	1.4	1.5
			c	1.0	-0.5	0.4	0.5
			d	0.9	-0.6	0.5	0.5

小,仅卷起少量的泥沙.与此同时,上游水流卷起的泥沙在墩后马蹄形漩涡强度较低处落淤,墩后出现明显的泥沙淤积堆,如图 2a 所示.

明显加快,范围也逐渐增大.

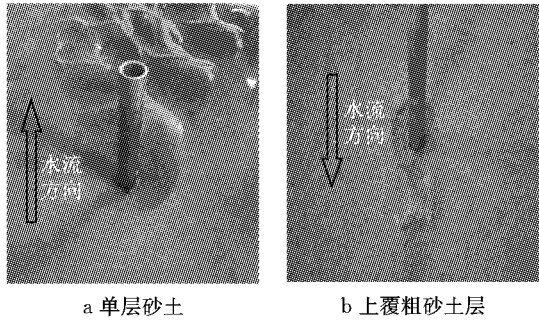
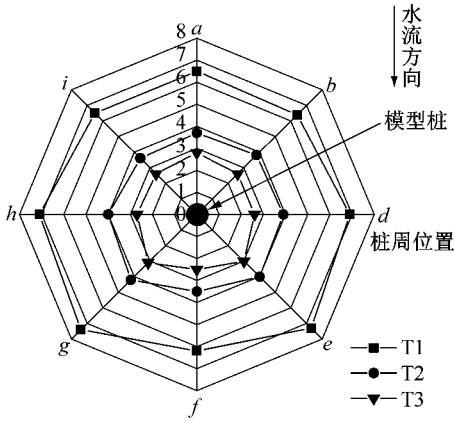


图 2 单桩冲刷形态

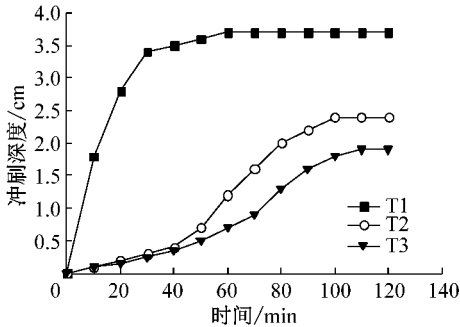
Fig.2 Scour hole of monopile

上覆粗砂层桥墩局部冲刷过程中,除在桩周冲刷坑范围内,床面其他位置并未发生明显变形,未出现类似于单层细砂冲刷的尾坑,如图 2b 所示.

图 3a 为不同粗砂层厚度下最终冲刷坑的范围.由于上层粗砂的覆盖,约束了冲刷坑范围的发展,粗砂层厚度越大,其约束效果越明显.图 3b 给出了不同粗砂层条件下冲刷深度随时间的发展曲线,试验伊始,粗砂层先受到冲刷,冲刷进展较为缓慢;当冲刷突破了粗砂层后,细砂层接着发生冲刷,冲刷进展



a 不同粗砂层厚度冲刷范围



b 不同粗砂层厚度冲刷发展曲线

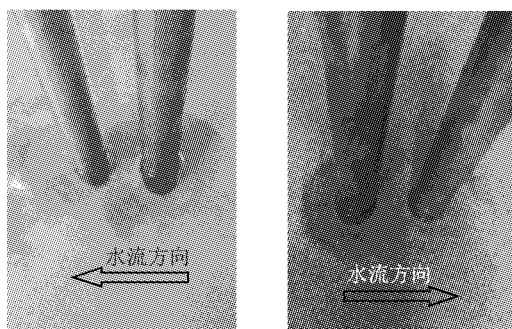
图 3 单桩冲刷发展曲线

Fig.3 Scour process of monopile

就最终冲刷深度而言,上覆粗砂层的情况要明显小于单层细砂,且粗砂层越厚,冲刷深度越小。当冲刷进行到细砂层时,冲刷坑上游坡面的粗砂,不时地落入冲刷坑内。由于坑底流速降低,粗颗粒泥砂不易被水流扬起而发生悬移和跃迁运动,随着冲刷坑的加深,粗颗粒逐渐在坑底聚集,坑内泥沙发生粗化,当粗颗粒泥砂聚集足够多时,在坑底便再次形成了粗化层,称之为次生粗砂层(secondary armor layer)<sup>[14]</sup>。图3b中的T2和T3曲线表明,当冲刷突破粗砂层后,开始冲刷下卧细砂层,冲刷速率 $v_t$ ( $v_t$ 定义为单位时间的冲刷深度)增大,曲线出现较为明显的拐点。随着冲刷的不断发展,便逐渐形成了次生粗砂层,这会明显有助于减缓下卧细砂层的冲刷进展,并减小其冲刷深度,该现象与文献[14]的研究一致。

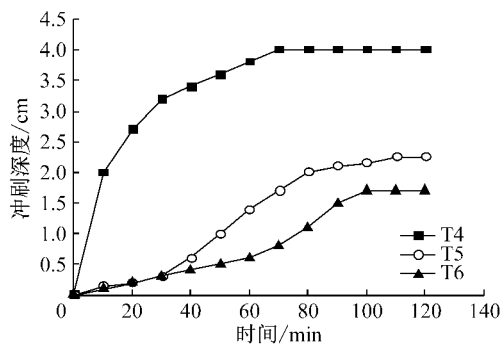
## 2.2 前后串排双桩

前后串排双桩局部冲刷结果如表1中的T4、T5、T6所示。单向流作用下,水流由于受到前后两桩的先后阻挡,前桩周围所形成的马蹄形漩涡在后桩的影响下变得更为复杂,后桩的阻水作用所形成的马蹄形漩涡强度相对较弱,因此前后两桩周围冲刷坑不尽相同,如图4a和4b所示。



a 单层砂土

b 上覆粗砂土层



c 不同粗砂层厚度冲刷发展曲线

图4 串排双桩冲刷形态和发展曲线

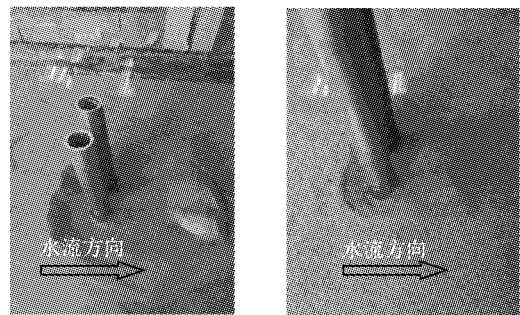
Fig.4 Scour hole and process of cascaded double-pile

从图4c中可以看出,前后串排双桩冲刷进程随

时间的发展情况与单桩基本类似。但在单向流条件下,前桩对后桩起到了遮蔽作用,使后桩受到水流的冲刷作用变小。因此,后桩的局部冲刷深度较前桩小,周围冲刷坑范围明显比前桩窄;同时,粗砂在坑底紊流的带动下滚动至后桩附近,在后桩周围淤积,抑制了后桩冲刷坑深度的加大。

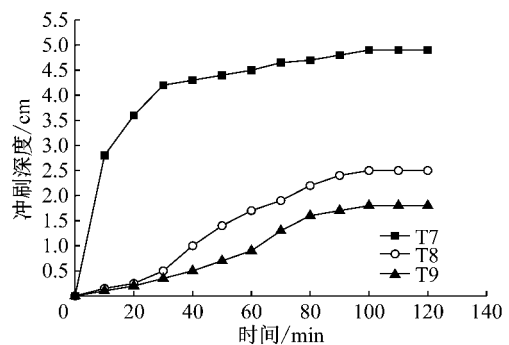
## 2.3 左右并排双桩

左右并排双桩局部冲刷结果如表1中的T7、T8、T9所示。在单层细砂中形成冲刷坑的形态如图5a所示,这与图5b的上粗下细双层砂土中形成的冲刷坑形态大致相似。但两者的明显区别是,当存在上覆粗砂层时,冲刷坑范围明显缩小,桩后的淤积点位置前移。



a 单层细砂冲刷形态

b 复合砂土冲刷形态



c 不同粗砂层厚度冲刷发展曲线

图5 并排双桩冲刷形态和发展曲线

Fig.5 Scour hole and process of shunted double-pile

图5c为不同粗砂层厚度的冲刷深度发展曲线,从冲刷发展的角度看和单桩类似,这里不再赘述。不容忽视的是并排双桩之间的相互影响:一方面,当来流穿过两桩中间时,因为断面收缩流速增大,形成射流效应;另一方面,并排双桩的阻水面积较单桩翻倍,桩周所形成的马蹄形漩涡强度更大。因此,与单桩相比冲刷速率更大且冲刷效果更明显,并排双桩最终冲刷深度也同样更大。

## 2.4 双排四桩

双层砂土2×2型四桩冲刷试验仅针对粗砂为

1.0 cm 情形,其冲刷结果如表 1 中 T10 和 T11 所示。

图 6a 为单层细砂冲刷坑形态,四桩冲刷特性同时表现出了前后串排和左右并排双桩的遮挡效应和射流效应。冲刷过程中,前排桩局部冲刷明显先于后排桩,前排桩周被马蹄形漩涡卷起的泥沙在后排桩周落淤,直接减缓了后排桩的冲刷发展速度。随着时间的推进,前排桩周冲刷坑范围不断扩大,各桩开始形成的小冲刷坑逐渐连接成一个完整的冲刷坑,冲刷坑继续发展,直到冲刷达到平衡状态。

图 6b 表明上覆粗砂层对下卧细砂层冲刷有着显著的影响,前桩周粗砂在后排桩很快落淤下来,落淤速度甚至超过后排桩的冲刷速度,在四桩桩间形成一个“小沙堆”,四桩周冲刷坑的联接受到阻碍,联动作用发挥不出来,冲刷坑范围扩展受限,很快冲刷达到平衡状态,各模型桩周围冲刷坑最大深度的发展曲线如图 6c 所示。

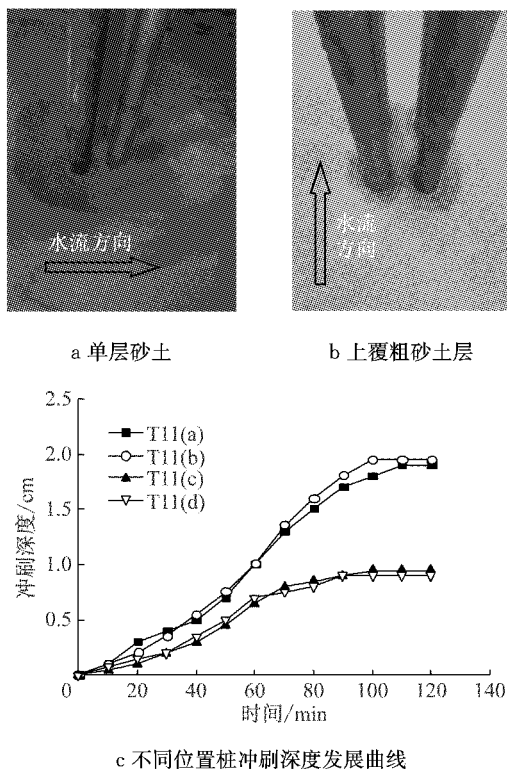


图 6 双排四桩冲刷形态和发展曲线

Fig.6 Scour hole and process of four piles

### 3 上覆粗化层冲刷深度计算方法对比

目前对于分层土中冲刷深度的计算方法主要有 SRICOS-EFA 法<sup>[10]</sup>和我国《公路工程水文勘察设计规范:JTG C30—2002》<sup>[11]</sup>,下文对此进行对比分析。

#### 3.1 中国规范

我国《公路工程水文勘察设计规范:JTG C30—2002》<sup>[11]</sup>,建议当桥下河床由多层成分不同的土质组成时,桥墩冲刷深度计算采用逐层渐进计算法,针对上粗下细复合土层主要计算思路如下:

(1)  $d_1 > d_2$ ,即上粗下细,如图 7 所示。先采用我国规范 65-1 修正式或 65-2 公式计算冲刷深度,其中粒径采用  $d_1$ ,若计算结果  $h_p$  位于  $d_1$  层, $h_p$  即为所求冲刷深度。

(2) 若按  $d_1$  所得冲刷深度位于  $d_2$  层,改用  $d_2$  计算冲刷深度,所得计算结果即为所求。

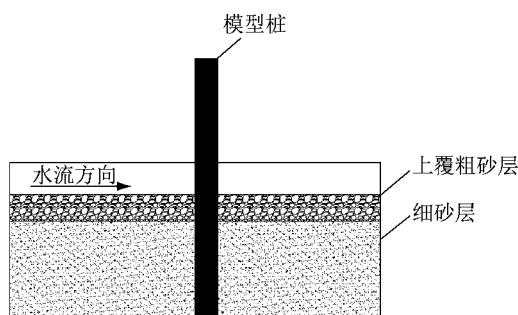


图 7 上粗下细分层河床

Fig.7 Stratified soil bed

#### 3.2 美国 SRICOS-EFA 方法

美国联邦公路管理局(FHWA)建议复合土层中桥墩局部冲刷深度采用 SRICOS-EFA 法<sup>[10]</sup>,该方法还可以用来预测冲刷深度与时间的关系。

SRICOS-EFA 法的主要思路是根据计算得到的最大冲刷深度和冲刷速率,建立预测某一时刻冲刷深度计算公式如下:

$$y_s(t_0) = \frac{t_0}{1/\dot{y}_i + t_0/y_s} \quad (2)$$

式中: $t_0$  为冲刷持续时间; $y_s$  为最大冲刷深度; $\dot{y}_i$  为冲刷速率; $y_s(t_0)$  为  $t_0$  时刻冲刷深度。

对于复合土层情况,首先采用 SRICOS-EFA 法得到均匀粗砂和均匀细砂中单桩的冲刷深度随时间的发展曲线,如图 8a 和图 8b 所示。然后比较上层粗砂厚度与其冲刷深度的关系,如果上层粗砂厚度  $y_0$  小于最大冲刷深度  $y_{mi}$  时,冲刷会突破粗砂层,进入细砂层接着冲刷,下卧细砂层冲刷发展曲线从 B 开始,即可得到图 8c 的复合土层冲刷曲线。

#### 3.3 对比分析

我国规范主要是从各土层的冲刷深度入手,逐层计算后对比分析得到最终冲刷深度,计算过程相对简单,所涉及参数也较少;而美国 SRICOS-EFA 法则从冲刷发展的角度考虑,将上、下两层土的冲刷

曲线进行叠加组合,得到复合土层的冲刷曲线.该方法既能得到最大冲刷深度,也可得到任意时刻的冲刷深度.实际上两国规范对于复合土层冲刷深度的计算思路并无差别,其区别仅在于各层土冲刷深度的计算方法不同.

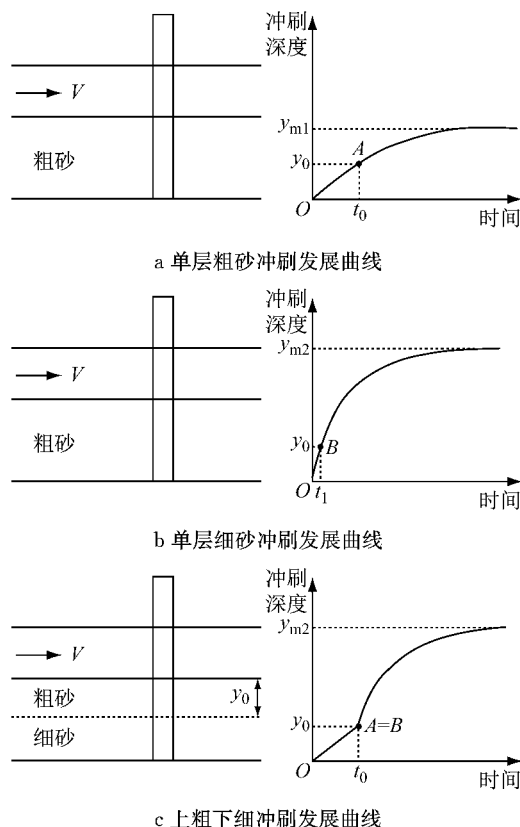


图8 复合砂土冲刷深度发展示意图

Fig.8 Development of scour depth in composite-sandy soil

将本次试验结果和中美两国的计算结果进行对比,如表2所示.由于本次试验中冲刷已突破粗砂层进入至下卧细砂层,按中美规范计算得到的最大冲刷深度实际上就是均匀细砂的计算结果,不能考虑上覆粗砂层的影响.

文献[14]考虑了上覆粗砂层颗粒粒径对于冲刷深度的影响.为进一步对比现有规范的计算结果,图9给出了文献[14]试验结果与中美规范计算值的对比曲线.计算结果表明,随着粗砂与细砂粒径比的增大,中美规范计算的冲刷深度均呈增大趋势.然而,文献[14]实测的冲刷深度则随着粗砂与细砂粒径比的增大而减小,中美规范都忽略了上覆粗砂层的存在对下卧细砂层冲刷的影响(需要注意的是,试验中采用的水流流速根据粗砂层颗粒粒径的临界流速调整,粒径越大,设定的流速就越大.美国SRICOS-EFA法与粒径无关,与流速有关;在中国规范中,流

速相对于粒径的影响更大,计算结果都是随粒径的增大而增大).

因此,本文试验和文献[14]的试验均表明,上覆粗砂层对下卧细砂层冲刷的影响不容忽视,粗砂颗粒落入冲刷坑,在下卧层表面逐渐形成次生粗砂层,一定程度上抑制了冲刷的发展,最终冲刷深度小于单层均匀细砂局部冲刷深度.

表2 中美规范计算冲刷深度与本试验结果的偏差

粗砂层厚度/cm	本试验结果/cm	中国规范 65-1 计算值/cm	中国规范 65-1 偏差/%	中国规范 65-2 计算值/cm	中国规范 65-2 偏差/%	美国规范 计算值/cm	美国规范 偏差/%
0	3.2	7.7	140.6	8.2	156.2	8.5	165.6
0.5	2.2	6.7	204.5	7.2	227.2	7.5	240.9
1	1.9	3.0	236.8	6.4	263.1	7.2	278.9

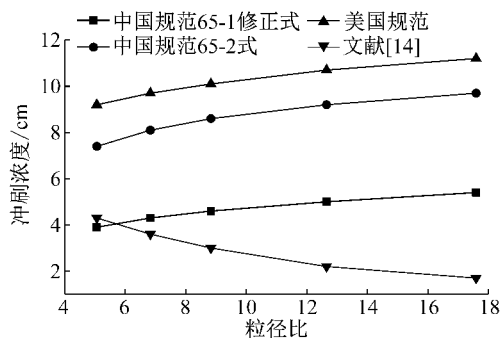


图9 中美规范计算冲刷深度与文献[14]试验结果对比

Fig.9 Comparison of scour depth in composite-sandy soil

## 4 结语

本文通过波流水槽模型试验,研究了上粗下细双层砂土条件下,单桩、串排双桩、并排双桩和双排四桩的冲刷发展过程,对比分析现有分层砂土冲刷深度计算方法,得到主要结论如下:

(1)由于上覆粗砂层的存在,冲刷速率的变化在两砂层的交界位置较为明显,且上覆粗砂层不仅减小了最终冲刷深度,还将冲刷达到平衡的时间往后推移,粗化层的存在使得河床抗冲刷性能提高,为冲刷防护留出了更多的时间.

(2)双层砂土群桩基础冲刷过程中,同时表现出双层砂土和群桩基础冲刷的特性.前桩对后桩有遮蔽效应,后桩冲刷深度明显低于前桩;左右桩间的断面收缩,产生射流效应,加强冲刷效果,这与单层均匀砂土冲刷特性一致.

(3)现有规范对于上覆粗砂层的双层砂土局部冲刷深度较大时,忽略了上层土较大的抵抗力和大

小颗粒间的相互作用,导致计算结果偏大.因此,应当考虑上层粗砂对下卧细砂层冲刷的影响.目前相关研究资料仍然比较少,针对此类地质条件桥梁基础的计算公式尚未明确提出,还需进一步对各类复合土层进行冲刷试验和理论研究.

## 参考文献:

- [1] LAGASSE P F, CLOPPER P E, ZEVENBERGEN L W, *et al.* NCHRP Report 593: countermeasures to protect bridge piers from scour [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2007.
- [2] WARDHAHA K, HADIPRIONO F C. Analysis of recent bridge failures in the United States [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 2003, 17(3): 144.
- [3] KHAN M, AZAMATHULLA H M, TUFAIL M, *et al.* Bridge pier scour prediction by gene expression programming [J]. *Proceedings of the ICE-Water Management*, 2012, 165(9): 481.
- [4] 梁发云,李彦初,陈海兵.冲刷作用下单桩循环加载特性的模型试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(10): 1511.  
LIANG Fayun, LI Yanchu, CHEN Haibing. Influence of scour depth on vertically cyclic behaviors of single pile with model tests [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(10): 1511.
- [5] 叶青超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994.  
YE Qingchao. Researches on environmental changes of the yellow river basin and laws of water and sediment transportation [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1994.
- [6] 尹学良. 清水冲刷河床粗化研究[J]. *水利学报*, 1963, 2(1): 15.  
YIN Xueliang. Study on riverbed armoring by clear water [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1963, 2(1): 15.
- [7] 钱宁. 黄河下游河床的粗化问题[J]. *泥沙研究*, 1959, 4(1): 16.  
QIAN Ning. Change of bed material composition in a degraded bed and its effect on the stabilization of stream channel [J]. *Journal of Sediment Research*, 1959, 4(1): 16.
- [8] RAUDKICI A J, ETTEMA R. Scour at cylindrical bridge piers in armored beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 111(4): 713.
- [9] 黄崇佑,王群,林桂宾,等. 分层土壤桥墩局部冲刷的计算[J]. *泥沙研究*, 1993, 3(1): 22.  
HUANG Chongyou, WANG Qun, LIN Guibin, *et al.* The computation on local scour around bridge pier in layered soil bed [J]. *Journal of Sediment Research*, 1993, 3(1): 22.
- [10] BRIAUD J L, CHEN H C, KWAK K W, *et al.* Multifold and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers [J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2001(2): 114.
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30—2002[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.  
The Ministry of Communications of PRC. Hydrological specifications for survey and design of highway engineering: JTG C30—2002 [S]. Beijing: China Communication Press, 2002.
- [12] HARRISON A S. Report on special investigation of bed sediment segregation in a degrading bed [R]. Berkeley: University of California, 1950.
- [13] GUO J. Pier scour in clear water for sediment mixtures [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(1): 18.
- [14] DEY S, RAJKUMAR V R. Clear-water scour at piers in sand beds with an armor layer of gravels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(6): 703.
- [15] DEY S, BARBHUIYA A K. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(7): 622.
- [16] WU Peng, HIRSHFIELD F, SUI Jueyi. Armour layer analysis of local scour around bridge abutments under ice cover [J]. *River Research and Applications*, 2015, 31(6): 736.
- [17] DEVA K B. Scour-depth prediction under armoring conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989, 115(10): 1421.
- [18] 王艳红,程小兵,乐培九. 粗化层厚度及其级配的研究[J]. *泥沙研究*, 2013, 6(3): 14.  
WANG Yanhong, CHENG Xiaobing, YUE Peijiu. Thickness and gradation of armoring layer [J]. *Journal of Sediment Research*, 2013, 6(3): 14.
- [19] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. *泥沙研究*, 1999, 6(1): 1.  
DOU Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. *Journal of Sediment Research*, 1999, 6(1): 1.