

堤基管涌发生发展过程的试验模拟

李广信 周晓杰

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

摘要 通过比例为 1:100 的有机玻璃模型槽进行模型试验,模拟二元堤基条件及不同防渗墙深度下,堤基内管涌的发生和发展过程.利用拍照还原等方式,得到管涌出口出砂面积,并采用彩色砂作为示踪材料,切片观察测量管涌发生后试样的局部剖面.从而验证了二元结构堤基的渗透破坏模式为:首先在上层弱透水层中发生流土,然后在强、弱透水层之间发生自下游向上游的逐步潜蚀冲刷,并且从试验得到了一些悬挂式防渗墙深度及堤基土密度与管涌发展之间的定量关系.

关键词 堤基 管涌 潜蚀 接触冲刷 流土 模型试验

中图分类号:TV139.16 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2005)06-0021-04

Laboratory simulation on generation and evolution of piping in embankment foundation//LI Guang-xin, ZHOU Xiao-jie
(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A model test in an organic glass flume with a scale of 1:100 was performed to demonstrate the generation and evolution of piping in embankment foundation with different depths of cut-off wall. The area of sediment outflow caused by piping was obtained by photo reproduction, and the local cross-sections of samples after the occurrence of piping were observed and measured with colored sediment taken as tracers. Thus, the piping-induced failure of two-layer foundation was verified as that: mass flow firstly appears in the upper weakly permeable layer, and then underground erosion and scouring gradually occur from downstream to upstream between the seriously and weakly permeable layers. Moreover, the quantitative relationships among the depths of hanged cut-off wall, the density of foundation soil, and the piping evolution were also derived from tests.

Key words: embankment foundation; piping; underground erosion; internal scouring; soil flow; model experiment

“98 洪水”使全民熟悉了一个土力学名词——管涌,可是这种叫法在严格意义上并不准确.以长江堤防为例,其地基属于二元结构,即在均匀的(细)砂层上,有弱透水的粉土或黏性土层.众所周知,在黏性土中不会发生管涌,而下部细砂一般级配相当均匀,实际上也不会发生管涌.那么实际发生的大多数属于流土,或者堤基及堤身的孔洞的冲蚀^[1,2].对于单层堤基和双层堤基来讲,分别有不同的渗透变形形式(图 1).张家发等人利用室内模型试验,模拟了单层堤基(图 1(a))条件下的渗透变形及破坏,得出了悬挂式防渗墙虽然对渗流控制效果不大,但是对渗透变形的扩展具有明显的抑制作用的结论^[3,4].文献[5]介绍了堤防侵蚀速度的试验,分析了与堤防侵蚀速度相关的一些因素.总的说来,堤基管涌会沿着强弱透水层的交界面由下游向上游发展,这一现象一般称为接触冲刷或者潜蚀(internal scour),这一点已基本达成共识.为了说明方便,本文也使用管涌

来代表一般渗透破坏.

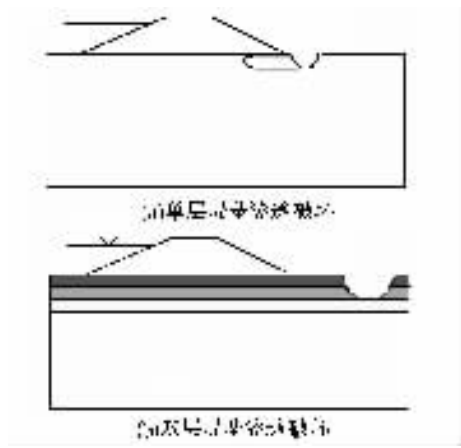


图 1 堤基破坏模式

本文利用有机玻璃模型槽试验,研究二元结构堤基(图 1(b))在一定水头情况下发生渗透变形的内部过程.堤基的渗透变形是否会导致堤防的破坏,取决于堤基内部的集中水流通道的否达到或者接近

上游堤基.通过观测在一定水头条件下,管涌口出砂量随时间的变化过程和管涌通道的发展位置,研究不同防渗墙深度条件下管涌的发展规律.

1 试验方法及内容

试验模型如图 2 所示.上游砂砾石竖向布置使试样全断面进水,代表河床切割砂层.水头变化范围为 0~50 cm.在本试验中,采用统一的水头 40 cm,保证试验条件的一致性.用粉质黏土模拟堤身,下游表层用正常固结黏土模拟弱透水层.出口水位由模型右侧的固定高度溢水口控制.模型槽全部采用有机玻璃制成,以便于观察实验现象.模型槽一侧安装两排测压管可以用来观测试样内部各点水头的变化情况.实验槽尺寸 120 cm×25 cm×80 cm,内部装填砂样尺寸 110 cm×25 cm×20 cm.设备示意图见图 2.

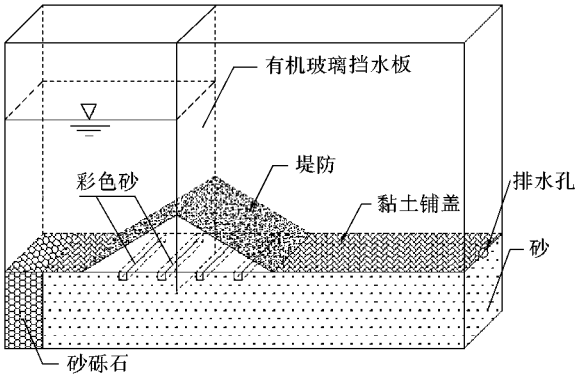


图 2 模型示意图

取中细砂进行试验(级配曲线见图 3). $d_{50} = 0.19\text{ mm}$, $C_u = 3.47$, $C_c = 1.15$, $k = 2.59 \times 10^{-3}\text{ cm/s}$.采取水下水平分层撒砂的方式进行制样.防渗墙用 10 mm 厚有机玻璃板代替.

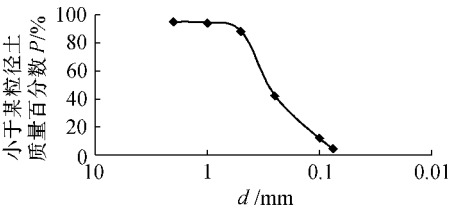


图 3 砂的级配

试样下游面的弱透水层采用黏土泥浆自然沉积后风干 12 h 的方法制备.用此方法有两个优点:①可以得到一层正常固结黏土,保证了表层黏土的黏聚力与实际情况相比成比例,可较好地消除比尺效应;②可以保证黏土与砂土之间紧密结合,没有初始缝隙.

试验采用彩色砂进行试样内部砂颗粒示踪.如图 4 所示,在水中分层撒砂之后,沉积黏土泥浆之前,在试样中竖向布置不同颜色的彩色砂,之后再在砂土表面沉积黏土.在试验过程中,观察彩色砂从管

涌出口的流出情况.在试验结束之后,将试样表层深 6 cm 的砂土保持原形取出,冷冻后切片观察彩色砂的流动情况.从而得到堤基在发生管涌之后,内部砂颗粒的运动情况.因为模型制样采用水下抛填,为保证彩色砂与试样砂结合紧密,并且保证彩色砂条在砂中形状规则,试验采取预先制备彩色砂冰矩形条块,之后嵌入砂中的方法.

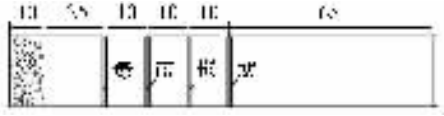


图 4 彩色砂分布情况(俯视,单位:cm)

试验用粉质黏土筑堤,按比例模拟真实情况下的压重以及堤身渗流情况.

试验过程中,先加较小水头,通过测压管观察土体内部水头情况,等到土体基本饱和,再加高水头(40 cm)进行试验.

2 试验方案

试验方案 1:研究不同防渗墙深度条件下的渗透变形发展情况,将防渗墙插入堤基中的深度分别为 0、5 cm、10 cm(堤基中砂层总深度为 20 cm).

试验方案 2:研究在不同制样条件下管涌的发展情况.在同一种防渗墙深度条件下,做 3 次试验,分别是:①撒砂,水下沉积制样;②首次试验后取走上层 6 cm 厚湿砂,撒砂沉积补充取出的砂土进行第 2 次试验;③重复步骤 2,再进行第 3 次试验.从时间上来讲,分别是试样在固定防渗墙深度条件下,首次试验中沉积砂土完成后,静置 12 h、48 h 以及 72 h 这 3 种试验条件.各个试验的具体条件见表 1.试验主要计划观察管涌发生后试样内部的变化情况,每个试验加固定高水头 50 min,若还没有发生整体的渗透破坏,则停止试验,把试样切片观察.

表 1 试验方案

试验号	防渗墙 试样静置 深度/cm 时间/h		制备方法	最终情况	
第一组	1-1	0	12	全撒砂沉降	破 坏
	1-2	0	48	表层 6 cm 试样撒砂沉降	不破坏
	1-3	0	72	表层 6 cm 试样撒砂沉降	不破坏
第二组	2-1	5	12	全撒砂沉降	不破坏
	2-2	5	48	表层 6 cm 试样撒砂沉降	不破坏
	2-3	5	72	表层 6 cm 试样撒砂沉降	不破坏
第三组	3-1	10	12	全撒砂沉降	不破坏
	3-2	10	48	表层 6 cm 试样撒砂沉降	不破坏
	3-3	10	72	表层 6 cm 试样撒砂沉降	不破坏

3 试验结果

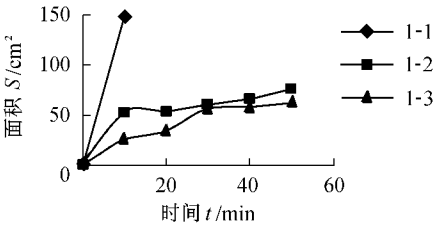
3.1 试验现象

在开始加水头初期,下游弱透水层即首先被抬

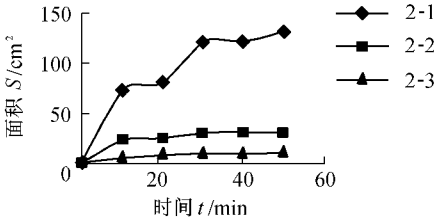
起,形成裂缝,并形成水流集中出口.在靠近堤脚处形成管涌出口.随着上游水位抬高,强、弱透水层之间形成水流通路,砂从其中不断被水流带出,集中水流通路不断向上游方向发展,如果水头足够大,试验时间足够长,则发生渗透破坏.

3.2 管涌口的出砂量

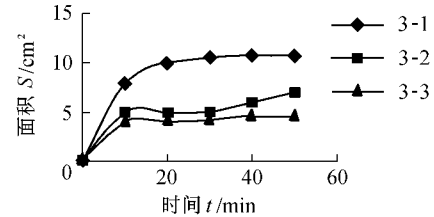
根据试验观察,管涌口的环形砂一般成圆形或者椭圆形.试验过程中,每隔固定的时间,就利用固定位置的照相机拍摄一张管涌口的照片.数据分析时,利用比尺关系还原试验出砂口大小.图5~7所示的管涌口面积数据是管涌口横向和纵向两个方向最大尺寸的乘积.



(a)第一组试验管涌口面积记录(防渗墙深度为0)



(b)第二组试验管涌口面积记录(防渗墙深度为5cm)



(c)第三组试验管涌口面积记录(防渗墙深度为10 cm)

图5 同一防渗墙深度条件下3次试验管涌口面积随时间的变化

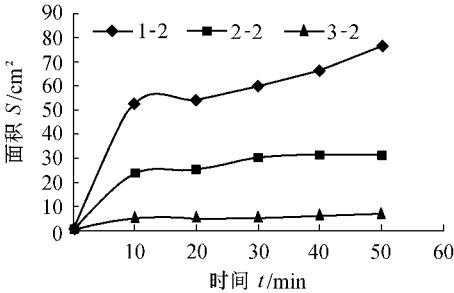


图6 不同防渗墙深度条件下(其他条件相同)出砂面积随时间的变化

3.3 管涌口彩色砂流出情况

观察管涌口是否有彩色砂颗粒出现,并记录颜

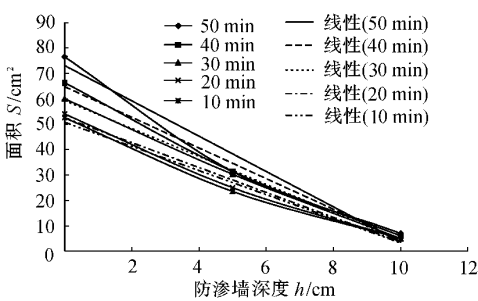


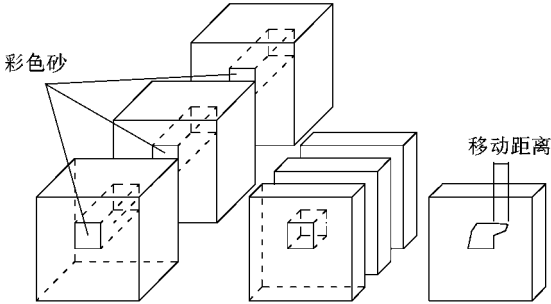
图7 不同防渗墙深度条件下(其他条件相同)出砂面积与防渗墙深度的线性拟合(取试验1-2,2-2,3-2)色,见表2.

表2 管涌口彩色砂出现情况记录

试验号	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
1-1	紫、橙、蓝、绿	破坏	破坏	破坏	破坏
1-2	紫	紫、橙	紫、橙	紫、橙	紫、橙
1-3	紫	紫、橙	紫、橙	紫、橙	紫、橙
2-1	紫	紫	紫	紫	紫
2-2	无	紫	紫	紫	紫
2-3	无	无	无	紫	紫
3-1	无	无	无	紫	紫
3-2	无	无	无	无	无
3-3	无	无	无	无	无

3.4 试验结束后切片观察彩色砂流动情况

将试验结束后的土体用方形铁盒分块取出,冷冻后,切片观察彩色砂流动情况.沿堤防轴线方向,每条彩色砂做10个切面(取样方法如图8),量取每个切面彩色砂的移动距离.最后将10个切面彩色砂的移动距离相加,得到表3.



分3段用铁取出彩色砂 冷冻后切片 量测彩色砂移动情况

图8 试验后取样测量

表3 试验结束后彩色砂流动情况记录

试验号	彩色砂流动总距离 l/mm			
	紫	橙	蓝	绿
1-1	整体破坏			
1-2	142	27	18	0
1-3	105	15	10	0
2-1	103	35	0	0
2-2	170	0	0	0
2-3	75	0	0	0
3-1	25	0	0	0
3-2	15	0	0	0
3-3	15	0	0	0

3.5 试验结果分析

根据试验结果,可分析如下:

a. 如图 6 所示,当防渗墙深度相同,试样在第 1 次、第 2 次和第 3 次试验时,管涌口处的出砂量逐次变少.主要是由于随着试样放置时间的加长,以及土体扰动等方面的原因,土体变得越来越密实.越是密实的砂土越不容易发生管涌.

b. 当其他条件都相同时,防渗墙的深度对于管涌口出砂量有明显影响.将不同防渗墙深度和管涌口出砂面积进行线性拟合发现,两者具有较明显的线性关系(见图 7),即 $S = a + bh$,相关系数在 0.97 以上.

c. 随着防渗墙深度的增加,土体内部的砂粒越来越难以从土体中被带出(表 3).可能有两方面的原因:①防渗墙截断了最不利的渗透破坏通道;②防渗墙对于出水量的影响,即防渗墙的加深使流量逐步减小,管涌通道内水的流速降低.根据泥沙动力学相关知识,流速的降低将导致水的携砂能力下降,无法将砂颗粒冲走.

d. 防渗墙的作用不仅仅体现在保护防渗墙外的土体,通过表 3 也可以看到,当防渗墙达到一定深度时,彩色砂中,仅仅只有紫色砂发生运动,其他颜色的砂都静止不动了.即随着防渗墙的加深,发生渗透破坏的土体就仅仅局限在堤脚附近的狭小区域了,而内部的堤基则没有破坏.

4 结 论

通过本文试验可以得到一些初步结论,同时也

还存在一些值得进一步研究的问题:①二元结构堤基的渗透破坏很大一部分实际上是:首先在弱透水层中发生流土,然后在两层土之间发生接触冲刷.②试验成果说明悬挂式防渗墙对于管涌出砂量有控制作用,并且在试验中管涌口环形出砂面积与防渗墙深度线性相关.③砂土的密实程度对于管涌的发生和发展有一定的影响.试验中,同一防渗墙深度条件下,取同一试样做第 2 次、第 3 次试验时,由于砂层中水头反复变化,并且试验过程中有方方面面的扰动,砂层逐渐变得密实.从试验观测结果来看,管涌的发展趋势也越来越弱.④试验中悬挂式防渗墙对于堤基的保护作用不仅仅体现在上游侧,对下游侧堤基内部管涌的发展也有一定的抑制作用.

参考文献:

[1] 李广信,周晓杰.土的渗透破坏及其工程问题[J].工程勘察,2004(5):10—14.
[2] 吴昌瑜,丁金华.九江长江干堤溃口段破坏机理及处理措施[J].岩土工程学报,2001,23(5):557—562.
[3] 张家发.堤防加固工程中防渗墙的防渗效果及应用条件研究[J].长江水利水电科学院院报,2001(5):56—60.
[4] 张家发,吴昌瑜,朱国胜.堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J].水利学报,2002(9):108—111.
[5] Chi Fai Wan, Robin F. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dam[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004(4):373—380.

(收稿日期 2005-02-28 编辑:马敏峰)

(上接第 16 页)

参考文献:

[1] 王劲峰.中国自然灾害影响评价方法研究[M].北京:中国科技出版社,1993.
[2] 贺军,谈为雄.基于 GIS 的水电规划决策支持系统框架设计[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):78—80.
[3] 周成虎.洪水灾害评价信息系统研究[M].北京:中国科技出版社,1993.1—32.
[4] 中国防汛抗旱总指挥部办公室,水利部南京水文水资源研究所.中国水旱灾害[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
[5] 魏一鸣,金菊良,杨存建,等.洪水灾害风险管理理论[M].北京:科学出版社,2002.
[6] 向素玉,陈军.基于 GIS 城市洪水淹没模拟分析[J].中国地质大学学报,1995,20(5):575—580.
[7] 刘学,王兴奎,王光谦.基于 GIS 的空间过程模拟建模方法研究[J].中国图像图形学报,1999,4(6):476—480.

[8] 唐常青,吕宏伯.数学形态学方法及其应用[M].北京:科学出版社,1990.
[9] 董朝霞,张少军,王乘,等.数字流域防洪模糊优化调度的应用研究[J].水利水电技术,2004,4(4):60—62.
[10] 白薇.城市洪水风险分析及基于 GIS 的洪水淹没范围模拟方法的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2001.
[11] 丁志雄,李纪人,李琳.基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析[J].水利学报,2004(6):56—60.

(收稿日期 2004-09-17 编辑:骆超)

