

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.06.005

双层堤基上覆层对堤基渗透破坏影响的试验

梁 越^{1 2 3} 陈建生^{2 3} 陈 亮^{1 2 3} 沈坚强^{2 3}

(1.重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;
2.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;3.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 根据上覆层与下伏砂层的协调变形情况,将上覆层概化为完全不变形的刚性上覆层以及下伏砂层始终协调变形的柔性上覆层,并利用室内试验对这 2 种极端情况进行模拟。通过对试验过程中的土体破坏情况、渗透流量、涌砂粒径以及破坏后土体的颗粒组成等方面进行分析,发现具有刚性上覆层的双层堤基在接触面上易形成空洞,而柔性上覆层较刚性上覆层具有更强的抗渗透破坏能力,同时,具有刚性上覆层的堤基发生渗透破坏时粗颗粒更易流失。对渗透破坏过程中的渗流场进行数值模拟,对比了不同渗透破坏阶段的水力梯度分析情况,简要分析造成 2 组试验差异的原因所在。研究结果表明,使上覆层与下伏砂层保持协调变形是控制渗透破坏发展的有效方法,建议在堤基建设时尽量增加上覆层柔性,使上覆层与下部土体有协调变形的能力。

关键词 渗透破坏;协调变形;双层堤基;颗粒分析;水力梯度

中图分类号:TV139.16 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)06-0015-05

Effect of superstratum on seepage failure in two-stratum dike foundations//LIANG Yue^{1 2 3}, CHEN Jian-sheng^{2 3}, CHEN Liang^{1 2 3}, SHEN Jian-qiang^{2 3} (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Water Conservancy and Water Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Based on the situation whether or not the superstratum and the underlying sand layer have compatible deformation, the superstratum was conceptualized as the rigid one without deformation and the flexible one with compatible deformation. The two kinds of extreme conditions were simulated by laboratory tests for the seepage failure in two-stratum dike foundations. The soil failure, the seepage discharge, the grain size of piping sands and the composition of eroded soils were analyzed. It was found that cavities easily occurred on the contact surfaces in the two-stratum dike foundation with the rigidity superstratum during the seepage failure. The dike foundations with the flexible superstratum had stronger anti-seepage failure capability. Meanwhile, the grain composition analysis of the piping sands and eroded soils indicated that coarse particles easily drained from the dike foundations with the flexible superstratum during the seepage failure. The seepage fields during the seepage failure were simulated, and the hydraulic gradients at various seepage failure stages. The causes for the difference in tests on the two kinds of superstrata were analyzed. A comparison between the two tests indicated that the compatible deformation of the superstratum and the underlying sand layer could effectively prevent the seepage failure. The flexible superstratum was suggested for the construction of two-stratum dike foundations so as to improve the compatible deformation of the superstratum and the underlying soils.

Key words : seepage failure; compatible deformation; two-stratum dike foundation; grain size analysis; hydraulic gradient

双层堤基在河流堤防中十分常见,其结构主要由弱透水的上覆层(一般为黏土层)和强透水的下伏砂层组成,如图 1(a)所示。在堤基渗透破坏以前,上覆层承受上游水位作用下的静水压力,由于砂层的强透水性,上覆层所受的静水压力大小主要与上游水位有关,当上游水位上升到一定程度时,上覆层薄弱处被顶破而发生渗透破坏,如图 1(b)。上覆层

顶破后堤基渗流场分布^[1]、渗透破坏发生机理、发展过程以及发生的临界条件等是渗透破坏研究的热点^[2-9],一些研究成果已成功应用在堤坝防渗治理中^[10-12]。在渗透破坏发生后,下伏砂层中颗粒流失会导致砂层顶面沉降,此时,由于上覆层变形能力不同,可能出现以下 2 种情况:①上覆层变形能力强,下伏砂层顶面沉降后,在上部堆载作用下上覆层与

下伏砂层协调变化,与下伏砂层顶面始终保持良好接触;②上覆层变形能力差,下伏砂层顶面沉降后,在上部堆载作用下上覆层仍保持原来状态,则上覆层与下伏砂层间形成一定规模的空洞。以上2种情况为2种极端状态,实际情况一般为以上2种情况的折中,即上覆层发生一定的形变,但未必能与下伏砂层的沉降相协调。在上述2种情况下,渗流场分布有很大的差异,从而导致不同的渗透破坏现象。本文通过室内试验的方法,采用2种不同的上覆层形式,分别对上述2种极端情况进行模拟,即:刚性上覆层,下伏砂层沉降后上覆层保持在原来位置;柔性上覆层,上覆层随下伏砂层沉降而发生竖向位移,始终与下伏砂层保持良好接触,从而研究上覆层变形协调性的不同对渗透破坏的影响。

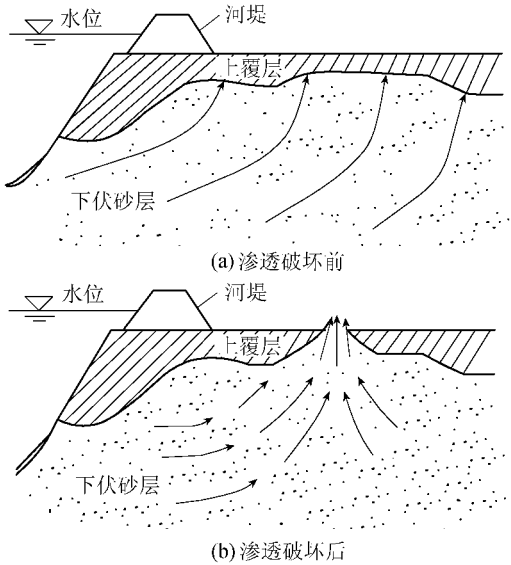


图1 双层堤基结构及破坏形式

1 试验准备与试验过程

1.1 试验模型与试样制备

试验在长方形有机玻璃槽内进行(图2),试验槽高500 mm,宽300 mm,厚100 mm,试样高度为300 mm,利用隔砂透水板支承上部试样。试样上顶面中部设置高、宽、厚都是100 mm的出水口,出水口中填入粒径为20~50 mm的粗砂,出水口与下伏砂层顶面接触。出水口两侧用黏土填实以模拟上部堆载。黏土垫层与试样之间用不同的介质隔开以模拟不同的上覆层形式:①利用玻璃板分隔堆载与下伏砂层,玻璃板只有向上的自由度,不随下伏砂层的沉降而变形,以实现刚性上覆层的模拟;②利用橡皮膜分隔堆载与下伏砂层,橡皮膜可以随下伏砂层的沉降而协调变形,始终与下伏砂层表面良好接触,以实现柔性上覆层的模拟。玻璃板与橡皮膜均不透水,以模拟弱透水的上覆层。

制样时,按一定颗粒组成配制试样,并将试样土体分层装入模型槽并压实至所要求的密实度,在达到试样尺寸要求后,加水饱和24 h。待试样完全饱和,根据试验要求设置不同的接触面,并在接触面上填筑黏土垫层以及出水口,完成试验的前期准备工作。试验开始后,通过逐级增加入水水头以驱动渗流及渗透破坏的发生,当在某一级水头下渗透稳定后,再抬高水头进行下一步试验。试验过程中,记录每级水头的数值,同时记录给定水力梯度下的流量情况。在渗透破坏发生后,对涌出的砂粒进行收集,烘干后进行颗粒分析试验。在试验结束后,对剩余试样进行分层开挖,并对比分析管涌发生前后试样内颗粒组成的变化。试验试样所采用的土体级配曲线见图3,土体基本物理参数如下: $d_{10} = 0.26 \text{ mm}$, $d_{30} = 1.28 \text{ mm}$, $d_{60} = 3.1 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u = 11.9$,曲率系数 $C_c = 2.03$,土粒相对密度 $G_s = 2.68$,孔隙比 $e = 0.46$ 。

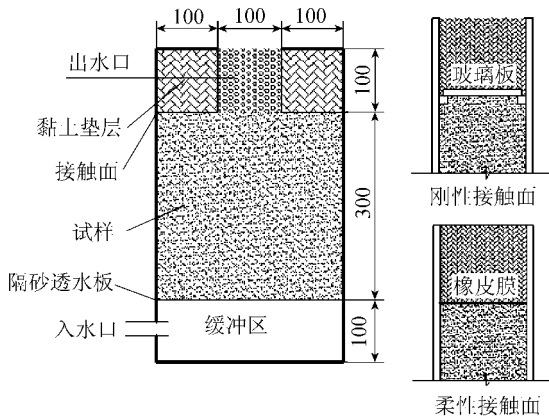


图2 试验模型及上覆层形式(单位:mm)

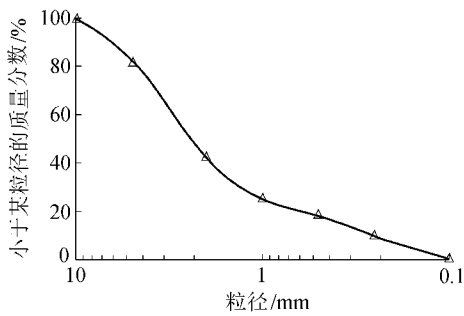


图3 试样级配曲线

1.2 试验过程

1.2.1 刚性上覆层试验

试验开始后,当水力梯度 J 达到0.51时,在出水口与砂层试样交界面处首先出现细小颗粒的翻动,但并未被带出土体,只在土体的大孔隙内上下翻动;当水力梯度达到0.61时,接触面上多处出现细小颗粒的翻动,并有部分细颗粒在水流的作用下沿着接触面向中间的输砂通道移动,细小颗粒逐渐填充

出水口内粗砂的孔隙,并最终被带出。由于细颗粒被带出,接触面上盖板与试样之间逐渐形成一层空洞层(图4),空洞层由出水口两侧向两边发展,最终上覆层与试样脱离。随着上游水头的增加,空洞的范围、涌砂的程度以及渗透流量也不断增加。当水力梯度增加到0.7时,接触面上涌砂量急剧增加,流量变化曲线出现转折。当上游水头进一步增加时,试样在接触面下部出现断层现象,断层上部土体上移,导致接触面处的空洞减小直到愈合;当水力梯度达到1.3时,试样上部黏土垫层被顶出,试样发生流土破坏。

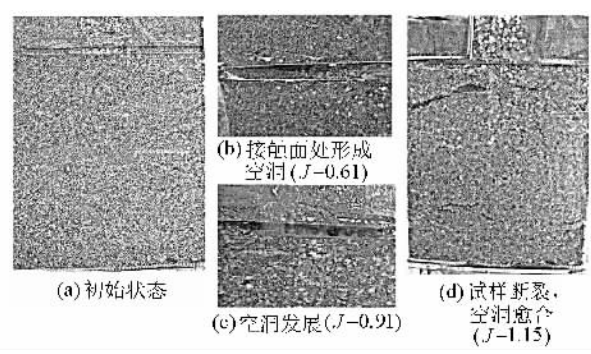


图4 刚性上覆层试验过程

1.2.2 柔性上覆层试验

试验开始后,当水力梯度达到0.47时,在出水口与试样的接触面上首先出现细颗粒翻滚现象,但颗粒的运动不剧烈且范围很小,仅限于出水口与试样的接触面上。随着上游水头的增加,颗粒运动的范围及剧烈程度有小幅度的增加。当水力梯度达到1.26时,出水口与试样接触面下5cm处慢慢出现1条集中涌水通道(图5),通道宽度约3mm,与水平面约成15°夹角。在通道形成后,土体内不断有细颗粒向上移动并被带出,同时水的流动对通道的上下边缘激烈冲刷,通道宽度增加,长度也不断延伸,冲刷下流失的细颗粒沿通道到达试样顶部并被带出。当水力梯度达到1.7时,通道贯穿整个横断面,试样分为2截,细颗粒剧烈涌出,流量急剧增大;水力梯度增加到1.95时,试样整体上涌,发生流土破坏。

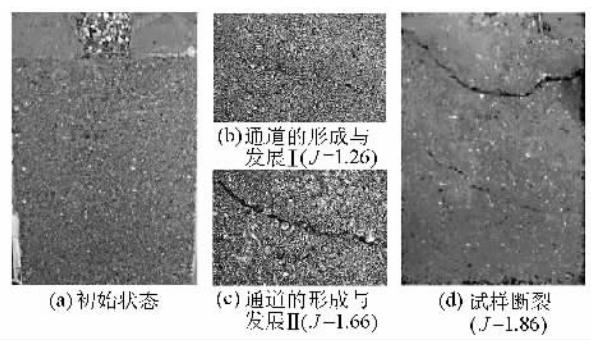


图5 柔性上覆层试验过程

2 试验结果分析

2种不同的上覆层形式导致的渗透破坏过程有着很大的差异。对于柔性上覆层,由于在上部堆载的作用下,上覆层一直与下伏砂层保持协调变形,因此没有出现刚性上覆层试验中接触面上形成空洞的情况,其渗透破坏程度也较刚性上覆层缓和得多。在刚性上覆层试验中,由于颗粒流失比柔性上覆层试验中严重,因此其最终抵抗整体渗透破坏的能力较柔性上覆层试验低得多。2组试验的差异还表现在流量、涌砂级配以及土体颗粒组成的变化等3个方面。

2.1 流量的对比

施加某一级水头后,通过测量单位时间内的涌水量可得到试验的渗透流量,见图6。当水力梯度小于0.7时,2组试验具有基本相同的流量,且流量与水力梯度之间呈线性关系,说明这一阶段处于稳定的达西渗流阶段;当水力梯度增加到0.7以上时,2组试验的流量曲线出现偏离,刚性上覆层试验中流量~水力梯度曲线向上偏转,流量随水力梯度的增加加速增长,而柔性上覆层试验中的流量~水力梯度曲线继续沿直线变化,直到水力梯度达到1.76时,流量急剧增加,呈现出与刚性上覆层试验中类似的流量曲线偏转。如果以流量~水力梯度曲线的拐点为土体整体渗透破坏的判别依据,那么柔性上覆层试验破坏临界水力梯度的比值为 $1.76/0.7=2.5$,即柔性上覆层土体具有更强的抗渗透破坏能力。

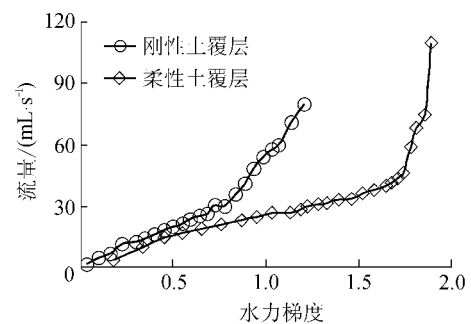


图6 试验过程中流量随水力梯度的变化曲线

2.2 涌砂级配的对比

在渗透破坏过程中,对2组试验中的涌出砂进行收集,并进行颗粒分析,得到2组试验中涌砂颗粒组成质量分数,并与原样土相同颗粒的质量分数进行对比,见表1。由表1可以看出,2组试验中涌出砂的粒径都集中在0.1~0.5mm之间,其中,刚性上覆层试验中0.25~0.5mm的粒组质量分数较柔性上覆层试验中的多,而0.1~0.25mm的粒组质量分数较少,说明刚性上覆层试验中有更多的大颗粒流失。

表 1 不同上覆层情况下涌砂颗粒组成

上覆层	质量分数/%			
	0.075 ~ 0.1 mm	0.1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 1 mm
柔性	2.60	56.58	35.43	5.40
刚性	5.20	40.57	45.68	8.54
原样土	0.54	9.02	8.74	6.70

2.3 渗透破坏对土体颗粒组成的影响对比

在试验结束后对试样土体进行了分层开挖,开挖厚度每层 2.0 cm,对开挖出的土体进行颗粒分析,分析试样渗透破坏对土体颗粒组成的影响。图 7 给出了其中 7 层中小于 1 mm 的细颗粒组成情况。在 2 组试验中,底层(28 ~ 30 mm)土体细颗粒质量分数最小,而顶层(0 ~ 2 mm)最大,即底层土体中细颗粒流失最为严重,在渗透过程中,表层土体中细颗粒也一直在流失,但由于得到下层土体的细颗粒补给,试验结束后,一部分细颗粒留存在上层土体中,从而导致了上下层细颗粒组成的差别。刚性上覆层试验中小于 1 mm 的细颗粒组成较柔性上覆层试验具有更

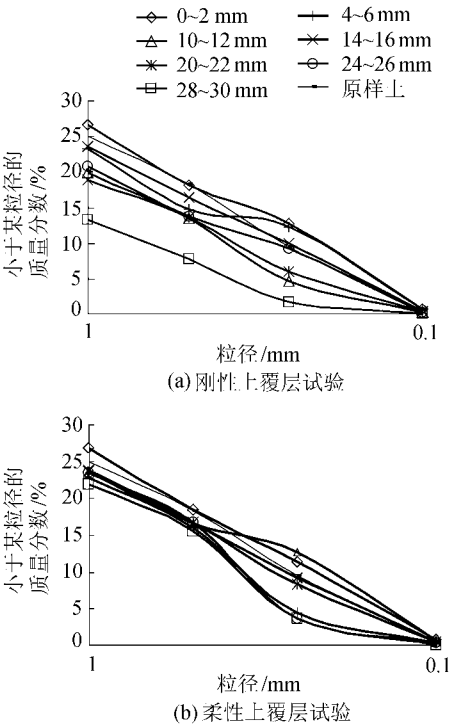


图 7 试验结束后不同层位土体级配曲线(≤1 mm)

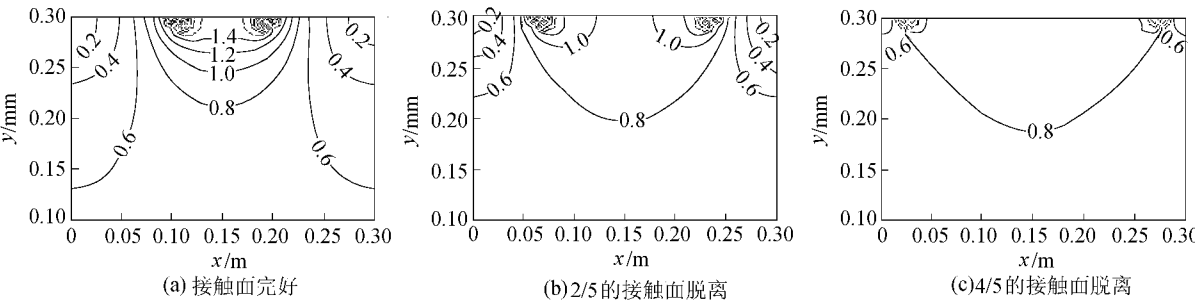


图 8 不同空洞范围条件下土体内部水力梯度分布

强的离散性,尤其是较大的 2 个粒组(0.25 ~ 0.5 mm 及 0.5 ~ 1.0 mm),而小于 0.25 mm 的粒组颗粒组成基本相同,说明柔性上覆层试验中的试样在破坏过程中主要是较小颗粒的流失。

3 试验结果分析与讨论

当水力梯度升高到某一程度时,水流的拖曳力破坏了土体颗粒的静力平衡,使颗粒流失并引发渗透破坏。由于 2 组试验上覆层协调变形能力不同,流量、涌砂量等参数都有着显著的差异,而且水力梯度是渗透破坏的驱动力,因此试验结果不同的根本原因在于上覆层形式对水力梯度的影响。在刚性上覆层试验中,试样顶面与下游水头直接连通,缩短了渗径,从而使试样整体水力梯度分布发生了变化。将文中试验概化为二维渗流情况,利用有限单元法对刚性上覆层试验中的渗流场进行模拟,得到渗流场中的水力梯度分布。假定上下边界都为定水头边界,下边界水头为 24 cm,上边界水头为 0,即整体水力梯度为 0.8。对以下 3 种情况进行模拟:①接触面完好,没有空洞;②接触面有 2/5 脱离形成空洞;③接触面有 4/5 脱离形成空洞。在模拟过程中,假定一旦形成空洞,则空洞与下游水面连通,从而下游水头直接作用在空洞范围内的试样顶面上。模拟得到的整体水力梯度分布见图 8,水力梯度分布如图 9 所示。

试样中管涌出口两侧是水力梯度的集中区域,在接触面上,空洞两侧与未破坏土体接触位置处具有最大的水力梯度。当水头差为 24 cm 时涌水口两侧的水力梯度值达到 3.29,而当接触面脱离 2/5 及 4/5 时的最大水力梯度值为 2.46 和 1.62。在刚性上覆层试验中,由于模型中上覆层没有向下移动的自由度,当颗粒流失后形成空洞,空洞的形成虽然会使最大水力梯度值变小,但相对于其他位置处仍是最大值,这就十分有利于空洞向两侧扩展,从而使接触面上覆层与试样脱离,造成整个试样顶面与下游水头直接连通,加速了试样的破坏,而对于柔性上覆层试验,虽然在涌水口两侧同样存在较大的水力梯

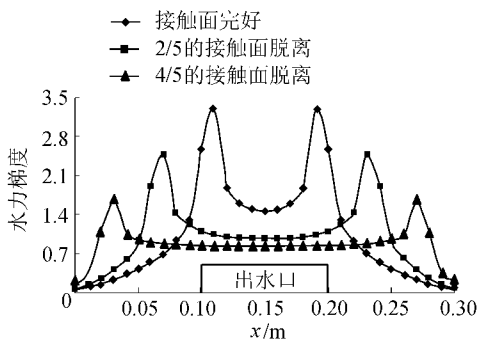


图9 不同空洞范围条件下试样顶面水力梯度分布曲线度值,但在颗粒流失以后,上覆层始终与下伏砂层表面协调变形,阻碍了渗透破坏向出水口两侧的发展,从而始终保持如图8中接触面完好的状态,因此具有较刚性上覆层试验大得多的破坏临界水力梯度,同时粗颗粒流失量较少,更能抵抗渗透破坏的发生。

4 结 语

针对双层堤基地层结构特点,对其渗透破坏过程中上覆层与下伏砂层协调变形的能力进行了讨论。将上覆层与下伏砂层的变形情况概化为2种极端情况,即完全不变形的刚性上覆层与完全变形的柔性上覆层,并在试验室中对这2种情况下的渗透破坏过程进行模拟,对比了2种情况下渗透破坏的特点与差异,发现上覆层与下伏砂层的协调变形能力对渗透破坏有着很大的影响。试验发现,柔性上覆层试验中整体渗透破坏的临界水力梯度比刚性上覆层试验中的临界水力梯度大得多,说明具有柔性上覆层堤基的抗渗透破坏能力更强。同时,通过对涌出砂及破坏后土体的颗粒分析可以得出,具有刚性上覆层的堤基发生渗透破坏时,粗颗粒较柔性上覆层更容易流失。涌水口处存在的局部高水力梯度是造成颗粒流失并形成空洞的主要因素,具有刚性上覆层的双层堤基在接触面上的细颗粒流失后易形成空洞。上覆层与下层土体的脱离使得具有刚性上覆层的双层堤基渗透性增强,而柔性上覆层,由于其能与下伏砂层始终保持协调变形,渗透破坏很难向出水口两端发展,因此其有着更强的抗渗透破坏能

力。因此,在渗透破坏的防治过程中,加强上部堆载,使上覆层与下伏砂层良好接触可以有效地阻止渗透破坏的快速发展,同时在堤基的建设施工中,应当尽量考虑使上覆层与下伏砂层之间具有很好的协调变形能力的方法。需要再次指出的是,在现实情况下,并不存在完全刚性或完全柔性的上覆层,由于上覆层材料组成的不同,上覆层随颗粒流失而发生竖向位移的能力也有所差别。因此,在尽量增加上覆层柔性的同时,要做好上覆层的防渗处理,当土体管涌口将要发生破坏时,要做好管涌口周围的减压工作,避免渗透破坏区域向周围扩张。

参考文献:

- [1] 陈建生,李兴文,赵维炳.堤防管涌产生集中渗漏通道机理与探测方法研究[J].水利学报,2000,31(9):48-54.
- [2] 吴世余.双层堤基的非稳定渗流[J].水利学报,2002,33(8):82-86.
- [3] WAN Chi-fa. Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(3): 295-303.
- [4] 毛昶熙,段祥宝,蔡金傍,等.堤基渗流无害管涌试验研究[J].水利学报,2004,35(11):46-53.
- [5] 毛昶熙,段祥宝,蔡金傍,等.堤基渗流管涌发展的理论分析[J].水利学报,2004,35(12):46-50.
- [6] 姚秋玲,丁留谦,孙东亚,等.单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J].水利水电技术,2007,38(2):13-18.
- [7] 丁留谦,吴梦喜,刘昌军,等.双层堤基管涌动态发展的有限元模拟[J].水利水电技术,2007,38(2):36-39.
- [8] 周健,姚志雄,张刚.管涌发生发展过程的细观试验研究[J].地下空间与工程学报,2007(5):842-848.
- [9] 李广信,周晓杰.堤基管涌发生发展过程的试验模拟[J].水利水电科技进展,2005,25(6):21-24.
- [10] 张华,沈振中,李琛亮.某分洪道堤防渗流特性及减压井布置方案研究[J].水利水电科技进展,2010,30(2):67-69.
- [11] 陆付民,李建林,郭永成.荆南长江干堤堤基防冲加固措施[J].水利水电科技进展,2007,27(2):37-39.
- [12] 陈鸿飞,朱逢春,高荔,等.垂直铺塑及其在堤基防渗处理中的应用[J].水利水电科技进展,2000,20(2):52-53.

(收稿日期 2010-01-07 编辑 骆超)

· 简讯 ·

青年科学家论坛“波浪研究前沿问题及其对沿海开发和防灾减灾的影响”在南京召开

由中国科学技术协会主办、河海大学承办的中国科协青年科学家论坛“波浪研究前沿问题及其对沿海开发和防灾减灾的影响”于2010年11月在南京召开。论坛的主要议题有:①气系统与波浪的生成与传播演变机制;②波浪与建筑物的相互作用;③灾害异常浪的生成机制及其影响;④现代波浪数值模拟及其关键技术;⑤波浪相互作用和波流相互作用;⑥波浪对泥沙输运和岸滩地貌的影响;⑦波浪的工程应用及其存在问题;⑧沿海开发和防灾减灾相关科学问题。

(本刊编辑部供稿)