第2期	
2015 年 4	月

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.02.011

陆一忠,陈生水,米占宽. 防汛抢险训练场渗透破坏段设计方案试验分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 67-72. (LU Yi-zhong, CHEN Sheng-shui, MI Zhan-kuan. Design analysis of a seepage failure segment for the flood control training field of Jiangsu Province[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 67-72.)

防汛抢险训练场渗透破坏段设计方案试验分析

陆一忠1,陈生水2,米占宽2

(1. 江苏省防汛防旱指挥部办公室, 江苏 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:建设仿真性的防汛抢险训练场,提供有实战氛围的防汛抢险演练环境,在国内外尚属首次。为支撑江苏 省防汛抢险训练场渗透破坏段方案设计,基于土体渗透破坏的基本理论并考虑到防汛演练的实际需求,首先确 定用于堤坝填筑土料的料源,并对此进行了物理力学特性试验研究,根据粒径分布曲线推求非饱和渗流分析参 数。然后开展两种不同比尺的水工模型渗透破坏试验,并与数值计算结果进行对比,验证数值分析的可靠性和 合理性。最后对演练模型进行数值分析,根据上述试验和数值分析结果对设计方案提出相应的建议。上述设 计方案基于均质土,实际填筑过程中土料的不均匀性较大,其合理性尚有待于实际工程的进一步验证。

关 键 词:防汛抢险训练场;渗透破坏;水工模型;数值分析 中图分类号:TV641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2015)02-0067-06

防汛抢险训练场的结构设计与常规水利工程结构设计的最大区别在于,前者需满足结构的整体安全外, 在不发生整体破坏的前提下,从局部区域出现病险到发生破坏的时间上需能予以控制,以给防汛抢险演练提 供一定的反应时间。这就需要对土性、结构断面设计和水力条件予以控制,使三者能协调统一。为此必须开 展相应的试验研究和数值模拟分析,为工程设计提供技术支撑。

江苏省防汛抢险训练场项目建设地点位于南京市六合区瓜埠镇滁河红山窑水利枢纽附近。建设场地分 为训练演练区与训练辅助区,分别位于滁河两岸,红山窑水利枢纽的交通桥连通两地。训练演练区布置于滁 河右岸,训练辅助区设于滁河左岸红山窑水利枢纽管理处内。

防汛抢险演练设计包含堤坝的渗透破坏、管涌、溃决漫顶和堤坝整体破坏等内容,限于篇幅,本文仅介绍 有关渗透破坏的设计方法。

1 土性选择

1.1 选择依据

土可以粗略地分为两大类:黏性土和无黏性土。一般而言,黏性土较之无黏性土抗渗透破坏能力较强^[1],而无黏性土虽抗渗透破坏能力较弱,但可通过控制外部的水力条件来控制渗透破坏的时间,因此渗透 破坏的土体宜采用无黏性土。无黏性土中粗粒土的抗渗透破坏能力较细粒土要大^[2],故而细粒土作为渗透 破坏演练土的填筑材料是最好的选择。由于填筑堤坝需要的土方量较大,还必须有足够的储量且易于开采。 经多方调研,填筑土料确定为泰州引江河二期工程河床疏浚土,弃土区域距离训练场水路距离约为 90 km, 可通过船只直接运送至训练场。

1.2 疏浚土物理力学特性

泰州引江河二期工程河床疏浚土样的物理力学特性见表1。由试验结果可以看出,粒径大于0.075 mm

收稿日期: 2014-07-24

作者简介: 陆一忠(1962-),男,江苏海门人,高级工程师,主要从事防汛防旱工作。E-mail: jsfbxx@126.com 通信作者:米占宽(E-mail: zkmi@nhri. cn) 的颗粒含量略大于 50%,属粉土~粉砂。不均匀系数 C₁=9.6,曲率系数 C₂=1.16,级配良好。

表1 疏浚土的物理力学性质

Tal	b. 1	l Pl	hysical	and	mecl	hanical	pro	perties	of	dred	lged	soil	L
							- F - F				0		

	质量分数/%				相对密度/(g·cm ⁻³)		渗透试验		渗透变形试验		
密度/ (g・cm ⁻³)	粒径> 0.250 mm	0. 075~ 0. 25 mm	0. 005~ 0. 075 mm	<0. 005 mm	最大干 密度	最小干 密度	制备 干密度/ (g・cm ⁻³)	渗透 系数/(10 ⁻⁴ cm・s ⁻¹)	制备 干密度/ (g・cm ⁻³)	临界 破坏 比降 比降	
							1.33	4.59	1.260	0.663 0.738	
2.71	0.5	53.2	40.7	5.6	1.51	1.19	1.37	2.25	1.355	0. 688 0. 813	
							1.44	1.24	1.465	0. 813 0. 938	

经验表明,砂性土的渗透系数 k 与孔隙比 e 之间的关系,以 k 与 e³/(1+e)的线性关系最好^[3](见图 1)。 临界比降和破坏比降与干密度的关系可以用幂函数来拟合(见图 2)。上述拟合关系式可用于不同制样密实 度下物理模型的破坏判别以及渗流数值分析时计算参数的选取。









2 渗透破坏水工模型试验及数值模拟

由于疏浚土的渗透系数在 10⁻⁴ cm/s 数量级,如何尽可能缩短演练前的等待时间并能在预定时间内发生 渗透破坏,是设计必须解决的问题。为此本文开展了堤高分别为 0.5 和 1.0 m 的缩尺水工模型试验,并开展 了数值模拟分析,在此基础上验证了数值模拟的可靠性,为演练实体模型设计提供技术支撑^[4]。限于篇幅, 本文仅介绍堤高为 1.0 m 的试验和数值分析结果。

2.1 模型设计

上游坡比1:0.6,下游坡比1:3;堤顶宽度和长度分别为25 cm和2.0 m,高1.0 m,在轴向方向设置3 根 直径为6 cm的镀锌管(见图3)。堤坡填筑材料分为黏土和疏浚土,分界线的坡比为1:2,为缩短出现渗透 破坏的时间且使渗透破坏仅发生在疏浚土内,镀锌管穿过黏土插入疏浚土中70 cm。采用逐层夯实方法进 行制模,制模完成后,从5个不同部位取样测得粉砂平均干密度为1.34 g/cm³,含水量为13.0%,饱和度约为 34%。





2.2 试验结果

第2期

考虑到渗径长度及临界比降,初始水头差△h按50 cm考虑。由于初始含水量较低,为缩短渗透时间,试验开始前在下游坡面进行了人工洒水。

渗透破坏试验表明, $\Delta h = 0.50$ cm, 下游坝脚渗水, 但未出现渗透破坏迹象; $\Delta h = 0.60$ cm, 3.5 h 后中间部位 发生渗透破坏; $\Delta h = 0.65$ cm, 4.35 h 后右侧管发生渗透 破坏; $\Delta h = 0.95$ cm, 6.78 h 后左侧管发生渗透破坏。由 于初始含水量不同,发生渗透破坏的时间也有所不同。

图 4 给出了渗透破坏过程与水位持续时间的关系。



2.3 有限元渗流分析

根据图 1 的渗透系数 k 与孔隙比 e 之间的关系曲线,可求得干密度为 1.34 g/cm³(孔隙比 e=1.02)时的 饱和渗透系数为 $k=3.714\times10^{-4}$ cm/s。

由于本文未开展粉砂填筑土的非饱和特性试验,采用经验方法来确定非饱和渗流分析所需的参数。

研究表明,对于粉土和砂土,土的颗粒粒径分布情况与土水特征曲线具有很好的相关性,可以从土的颗 粒粒径分布情况推求土水特征曲线。L. M. Arya 等^[5]根据土水特征曲线与土颗粒累积分布曲线在形状上相 似的特点,首先提出了根据土的粒径分布和干重度来计算土水特征曲线的物理经验模型。采用该方法推求 的干密度为1.34 g/cm³的土水特征曲线见图5。

渗透性函数采用 Green-Corey 方法^[6]进行估算, Green & Corey 于 1971 年提出通过沿整个体积含水量函数进行积分即可得到渗透系数函数,采用该方法推求的渗透性函数见图 6, 图中还给出了采用 Gardner^[7-8]建议的渗透系数与基质吸力关系式拟合得到的曲线。











采用三维有限元渗流分析方法^[9-10]计算得到的各个典型阶段的浸润线(实线)和水力梯度(虚线)分布 见图 7。对比图 4 和图 7 可以看出:

(1)水头差△h=50 cm,持续 2.75 h 情况下,计算得到的下游坡部位最大水力梯度约 0.5,根据表 1,干 密度为 1.34 g/cm³时的临界比降约为 0.68,故此时未发生渗透破坏,计算结果与试验结果一致;

(2)水头差△h=60 cm,持续45 min 后,计算得到的下游坡部位最大水力梯度约0.63,该值与试验得到的临界比降较为一致,此时中间管部位发生渗透破坏,计算结果与试验结果一致;

(3)水头差△h=65 cm,持续4.33 h后,计算得到的右侧管坡部位最大水力梯度约0.6,此时发生渗透破坏,计算结果与试验结果基本一致;

(4) △h=95 cm,持续 6.78 h 后,计算得到的左侧管坡部位最大水力梯度约 0.72,该值比试验得到的临 界比降略大一些,计算结果与试验结果基本一致;

(5)需要说明的是试验开始时,由于制模时的砂含水量较低,试验开始时在下游坡表面进行了洒水,中 间部位洒水较多,右侧次之,左侧最少。因而中间部位最先发生破坏,右侧次之,左侧则最后发生破坏。另外 制模时压实度不完全一致也可能对试验结果有一定影响,但总体上计算结果与试验结果具有较好的一致性。



Fig. 7 Phreatic line and hydraulic gradient distribution in different stages

3 演练模型设计及数值模拟

从水工模型试验结果可以看出,由于疏浚土的渗透系数较小,如果采用点渗透的方法,则预渗透时间过 长,使得演练前的等待时间过长。为此,将演练模型修改为面渗透。

3.1 演练模型设计

几何尺寸:渗透破坏的填筑土体采用粉砂,底高程9.0m,顶高程12.0m,顶宽0.5m,下游坡比1:3。

水力条件:采用 DN110 进水管将上游库水导入演练土体内的水箱(水箱周围每隔 20 cm 开 *q*20 的孔) 中,在高程为 9.0 和 9.5 m 的纵横向分别设置 *q*50 花管,纵横向间距分别为 3.25 和 1.45 m。上游设计库水 位 11.5 m,最高水位 11.65 m。

需要解决的问题:当上游设计库水位为11.5 m时,需要多长时间下游会出现渗透破坏迹象?也即在实际演练前,需要提前多长时间进行预渗透,以便在演练开始后,通过调整上游水位,使得出现渗透破坏的时间 控制在 30 min 左右。

3.2 渗流数值模拟

由于沿堤轴线方向布置了一排水箱和花管,且水箱 和花管均设计有孔洞,即渗透方式为面渗透,可按平面 问题考虑。

假定演练土体粉砂干密度为 1.34 g/cm³,含水量为 10%,在上游恒定水位为 11.5 m 时,计算得到的各个典 型阶段的浸润线和水力梯度分布见图 8 和 9 所示,图中 粉红色区域表示水箱和花管。





计算结果表明,在恒定上游水位高程为11.5 m条件下,1.5 h后,浸润线已经从下游坝脚出逸,此时的临 界坡降已超过0.7,开始出现渗透破坏。随着渗透时间的发展,浸润线的位置逐渐升高,渗透破坏的高程也 逐渐抬升。从上述分析结果来看,演练段预渗透时间可控制在演练前1 h。



图 9 演练模型不同阶段水力梯度分布 Fig. 9 Hydraulic gradient distribution of a training model in different stages

4 结 语

基于土渗透破坏的基本理论,同时考虑到防汛演练的实际需求,首先确定了训练场场地用于堤坝填筑土 料的料源——泰州引江河二期工程河床疏浚土,在此基础上开展了渗透破坏水工模型试验和数值模拟分析, 并对演练模型进行了渗流数值模拟分析,通过上述工作,得出如下结论和建议:

(1)相比较黏性土,粉砂临界坡降较小、渗透系数较大,在不高的外部水力条件就可发生渗透破坏,故将 粉砂作为渗透破坏的演练土体是可行的。

(2)为尽可能缩短演练前的等待时间和达到渗透破坏的目的,建议如下:①需将水管插入粉砂中;②试 验前在低水头下使试样预先饱和;③考虑到演练土体的不均匀性和演练时间的可调节性,上游水位应具有可 调节性。

上述设计方案是基于单一均质土来进行的,实际填筑过程中土料的不均匀性较大,其合理性尚有待于实际工程的进一步验证。

参考文献:

- [1] 刘运化,杨超,段祥宝,等. 无粘性土及粘性土渗透破坏试验与渗透变形分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31 (7):104-107.
 (LIU Yun-hua, YANG Chao, DUAN Xiang-bao, et al. Seepage failure experiment of non-cohesive and cohesive soil and analysis of seepage deformation[J]. Water Resources and Power, 2013, 31 (7):104-107. (in Chinese))
- [2] 何建新,张敬东,刘亮. 无粘性粗粒土大型水平渗透试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(5):453-456.(HE Jian-

xin, ZHANG Jing-dong, LIU Liang. Research on the experiment of large horizontal permeability of cohesionless coarse-grained soil[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(5):453-456. (in Chinese))

- [3] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994. (CHEN Zhong-yi, ZHOU Jing-xing, WANG Hong-jin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. (in Chinese))
- [4] 米占宽,李国英. 江苏省防汛抢险训练场关键技术试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2014. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying. Experimental research for key technology of flood control training field of Jiangsu Province[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [5] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1023-1030.
- [6] GREEN R E, COREY J C. Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1971, 35(1): 3-8.
- [7] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [8] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯等,译. 北京:中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Translated by CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jiong, et al. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [9] 毛昶熙,段祥宝,李祖贻,等. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京:河海大学出版社,1999: 72-76. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, LI Zu-yi, et al. Numerical computation in seepage flow and programs application [M]. Nanjing: Hohai University Press, 1999: 72-76. (in Chinese))
- [10] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京:中国建材工业出版社,2000: 45-67. (GU Wei-ci. The calculation principle of seepage and its application[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2000: 45-67. (in Chinese))

Design analysis of a seepage failure segment for the flood control training field of Jiangsu Province

LU Yi-zhong¹, CHEN Sheng-shui², MI Zhan-kuan²

Office of Flood Control and Drought Prevention Headquarters of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The construction of a flood control training field to provide a real drill ground for simulating flood control environment is the first at home and abroad. In order to support the design analysis of a seepage failure segment for the flood control training field of Jiangsu Province, based on the basic theory of soil seepage failure and taking into account the actual needs of the flood control training, the filling material of the embankment is determined firstly. The physical and mechanical property tests are conduted, and then the unsaturated seepage analysis parameters are estimated from the grading curves. Two different scale models for the seepage failure are established, and the model test results are compared with the numerical calculation results to verify the reliability of the numerical analysis. Finally, the seepage numerical analysis of the practice model is performed. According to the above experimental and numerical analysis results, the corresponding conclusions and recommendations are put forward for the design scheme. The suggested design scheme is based on the homogeneous soil, and its rationality remains to be further verified in the actual projects because the inhomogeneity of the actual filling material is larger.

Key words: flood control training field; seepage failure; a hydraulic model; numerical analysis