

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.047



多元结构坝基双排防渗墙控渗效果试验研究

王正成¹, 毛海涛^{1,2}, 彭钰洁³, 申纪伟¹, 吴恒滨¹

(1. 重庆三峡学院 土木工程学院, 重庆 404100; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072;
3. 贵州建设职业技术学院 建筑设备学院, 贵阳 551400)

摘要:双排防渗墙已广泛应用于西南地区强弱互层深厚覆盖层地基,但双排防渗墙的间距及布置形式如何选择,控渗效果如何等都值得深入研究。基于非饱和土体渗流理论,以强弱互层深厚覆盖层坝基为研究对象,针对双排防渗墙进行试验研究,得出渗流量和出逸坡降,探讨各布置形式下双排防渗墙的控渗效果。研究表明:“前长后短”、“前短后长”、“前后同长”3种布置形式下总渗流量和出逸坡降都随着间距的增加而降低,“前长后短”、“前后同长”布置形式降低明显。坝体渗流量以间距 $L=13.2、16.5$ cm 为分界线,先增大后降低;坝基渗流量以间距 $L=13.5、17.5$ cm 为分界线,先降低后增大。双排防渗墙中深度较大的防渗墙消减的水头更大,两防渗墙深度一致时,前后防渗墙分别消减水头 37.5%、50%。当前后防渗墙的深度之和一定时,双排防渗墙采用“前短后长”的布置形式相比采用“前长后短”的布置形式,能更有效降低渗流量和抑制出逸坡降,建议优先采用。

关键词:深厚覆盖层;坝基;双排防渗墙;渗流量;出逸坡降

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)03-0032-09

Experimental study on seepage control using double cut-off walls on multiple-structure dam foundation

Wang Zhengcheng¹, Mao Haitao^{1,2}, Peng Yujie³, Shen Jiwei¹, Wu Hengbin¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, P. R. China;
2. School of Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China;
3. Construction Equipment College, Guizhou Polytechnic of Construction, Guiyang 551400, P. R. China)

Abstract: Double cut-off walls have been widely used in deep overburden foundation with alternating interlayered soils in Southwest China. However, how to determine the spacing and the layout of double cut-off walls, and the effect of seepage control need to be further investigated. In this paper, based on the

收稿日期:2018-09-05

基金项目:国家自然科学基金(51309262);重庆市科委基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjA0300, cstc2015jcyjA00022);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601024);重庆市高校创新团队建设计划(CXTDX201601034);重庆三峡学院青年项目(18QN01)。

作者简介:王正成(1991-),男,主要从事土石坝渗流机理研究, E-mail:wangzhengcheng194@163.com。
毛海涛(通信作者),男,教授,博士, E-mail:maohaitao1234@163.com。

Received:2018-09-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51309262); Chongqing Science & Technology Commission Basic and frontier research projects (No. cstc2015jcyjA0300, cstc2015jcyjA00022); Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No. KJ1601024); Innovation Team Construction Project of Chongqing (No. CXTDX201601034), Youth Project of Chongqing Three Gorges University(18QN01).

Author brief: Wang Zhengcheng (1991-), main research interest: earth-rock dam percolation mechanism, E-mail:wangzhengcheng194@163.com.
Mao Haitao (corresponding author), professor, PhD, E-mail:maohaitao1234@163.com.

unsaturated seepage theory, taking the deep overburden dam foundation with alternating interlayered soils as an example, double cut-off walls are experimentally studied. The seepage discharge and exit gradient were obtained, and seepage control effect of cut-off walls under different layouts was discussed. Results show that the total seepage discharge and the exit gradient decrease with the distance. The seepage discharge of dam body is divided by the spacing of 13.2 and 16.5 cm, which increases at first and then decreases. Seepage discharge of dam foundation is divided by the spacing of 13.5 and 17.5 cm, which decreases at first and then increases. The wall with deeper penetration depth reduces the head of water more. The front and back walls reduce 37.5 percent and 50 percent, respectively, when the depth of two cut-off walls are same. It is found that given the same total penetration depth of two cut-off walls, the arrangement form with short in front and long in back decreases seepage discharge and controls exit gradient more effectively, which is therefore recommended for priority.

Keywords: deep overburden; dam foundation; double cut-off walls; seepage discharge; exit gradient

在中国西南地区的水电工程开发中常遇到深厚覆盖层地基,地基中往往同时存在强透水层(漂石、砂卵砾石、砂类土)和弱透水层(黏土、粉质黏土),两种土层交替分布^[1-2]。受水资源开发条件等因素的限制,部分水电工程被迫建在深厚覆盖层地基上^[3-4]。由于混凝土防渗墙具有强度高、成型快、耐久性好、渗透系数小等优点,已广泛应用于深厚覆盖层地基的防渗工程中,其深度从20世纪60年代的20 m已经发展到目前的140 m以上^[5-10]。

但部分地质条件复杂、高水头的水利工程,由于坝高的发展和允许渗流梯度的限制,一道防渗墙难以满足渗控要求,越来越多的水利工程采用双排防渗墙,如瀑布沟水电站^[11]、三峡工程二期围堰、加拿大马尼克3号坝^[12]、六库水电站、长河坝、九甸峡混凝土面板堆石坝。学者们针对双排防渗墙展开研究,邱祖林等^[13]借助三维非线性有限元软件分析了软弱覆盖层地基中双排混凝土防渗墙的应力变形特性。吴梦喜等^[14]从渗透坡降及变形的角度,针对瀑布沟水电站心墙堆石坝双排混凝土防渗墙与土质心墙几种连接方案进行了研究。郭成谦^[15]针对双排防渗墙渗流的水力学特性进行了分析,并提出防渗墙的渗透系数对控渗效果的影响。高莲士等^[16]针对三峡工程二期围堰进行了非线性应力应变计算。路晓婷^[17]利用Midas GTS分析瀑布沟电站双排防渗墙对渗流、应力和位移的影响。刘麟^[18]采用有限元软件分析了云南省怒江州六库水电站的双排防渗墙的内力、应力分布和变形。颜国卿^[19]分析了大渡河长河坝双排防渗墙的应力、应变及变形。吕生玺^[20]基于有限元模型分析了九甸峡混凝土面板堆石坝采用单排防渗墙柔性连接、双排防渗墙柔性连接、双排防渗墙刚性连接3个方案下防渗墙的应力

及变形。

学者们主要利用有限元软件分析了双排防渗墙的应力、应变和位移,以及防渗墙与土质心墙、坝体及坝基的连接形式;在渗流控制方面,分析了防渗墙的渗透系数及连接形式对控渗效果的影响,并未涉及双排防渗墙的深度、间距、布置形式对控渗效果影响等方面的研究。有学者甚至提出双排防渗墙间会产生较大的渗流梯度,使下游防渗墙失去应有的防渗作用,没有必要采用双排防渗墙。随着深厚覆盖层上高坝的建设,双排防渗墙的应用越来越广泛,因此,双排防渗墙的深度、间距及布置形式对渗流场的影响规律急需探明。

本文以典型强弱互层深厚覆盖层地基为研究对象,设置不同的双排防渗墙控渗方案,开展渗流砂槽试验,探索双排防渗墙的间距、深度、布置形式(前长后短、前短后长、前后同长)对渗流的影响,探明双排防渗墙的控渗效果,以期为采用双排防渗墙控渗的工程提供理论支撑,在防渗墙深度一定的情况下提高控渗效率。

1 材料与方法

中国西南地区深厚覆盖层地基具有明显的层状结构^[21],强弱透水层交替分布,土层的厚度及基本特征如表1所示。

1.1 材料特性

基于表1中的典型剖面,建立深厚覆盖层坝基砂槽模型。试验材料:砂土和黏土分别作为强透水材料和弱透水层材料,土工布作为垂直防渗墙。土体均取自长江堤防重庆万州段左岸,黏土和砂土各3份,经风干、分散后进行室内筛分试验,土体的颗粒级配曲线^[22-23]如图1所示。

表 1 土层厚度及基本特征

Table 1 Soil thickness and basic characteristics

地基层序	土体	厚度/m	基本特征描述	地基层序	土体	厚度/m	基本特征描述
1	现代河流漂卵石	13~20	由漂卵石夹砂、砾质砂、纯砂组成,分选性较好,浑圆状或半浑圆状。	4	细粉砂、粉质壤土	≤20	薄层状构造。下部多为深灰、灰黑色粉质壤土,上部为褐黄色粉细砂。
2	细砂、粉质壤土	20	部分河段以架空结构分布,结构和物质成分显示了冰缘堆积的基本特征。	5	漂卵石	10~20	以半浑圆状至次棱角状的漂卵石为骨架,其间充填砂砾石。结构比较紧密。
3	漂卵石或卵石	<20	以半浑圆状和次棱角状的漂卵石为主,其次为中细砂。结构比较紧密。	6	含泥砂卵(碎)石	≤50	粒径大小不一,颗粒以 $d=30\sim70\text{mm}$ 的碎石为主,其次为细粉砂和砂壤土,大漂石呈散粒状分布。结构一般紧密。

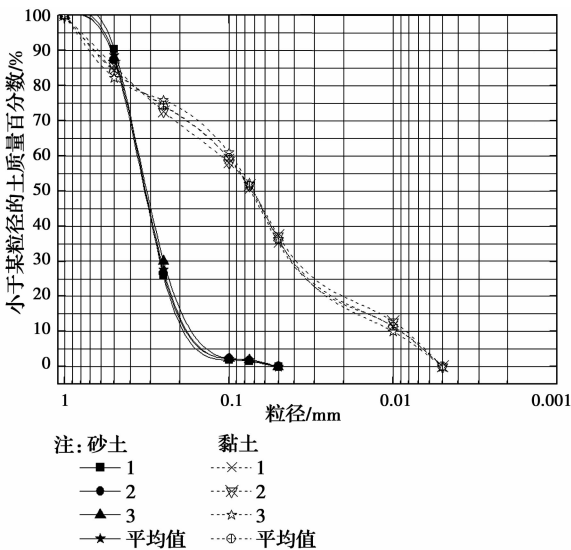


图 1 试验土的颗粒级配曲线

Fig. 1 The grading curves of trial soil

由图 1 中砂土的平均颗粒级配曲线可得,砂土的有效粒径 $d_{10}=0.14\text{ mm}$ 、中值粒径 $d_{30}=0.23\text{ mm}$ 、限制粒径 $d_{60}=0.36\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}=2.57$,曲率系数 $C_c=\frac{d_{30}^2}{d_{10}\times d_{60}}=1.05$ 。同理,求得黏土的不均匀系数 $C_u=35$ 、曲率系数 $C_c=9.11$ 。

借助液、塑限联合测定仪获取土样的液、塑限,通过烘干法测得土体的含水率 ω 、干密度 ρ_d ,基于常水头法测得土体的渗透系数,将土体的基本参数列入表 2。

由表 2 可知,砂土层的渗透系数 ($3.28\times 10^{-3}\text{ cm/s}$)为黏土 ($2.57\times 10^{-5}\text{ cm/s}$)的 127.63 倍,黏土可视为相对弱透水层,以下简称弱透水层。砂土和黏土的渗透性能较好模拟强弱互层地基的渗流特性,具有代表性,且符合水工试验模拟标准。

表 2 砂土和黏土的基本参数

Table 2 Basic parameters of sand and clay

土体	含水率 $\omega/\%$	孔隙率 $n/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	有效粒径 d_{10}/mm	中值粒径 d_{30}/mm	限制粒径 d_{60}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	液限 $\omega_L/\%$	塑限 ω_p	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
砂土	8.94	33	2.42	0.14	0.23	0.36	2.57	1.05			3.28×10^{-3}
黏土	9.42	42	1.98	0.007	0.125	0.245	35	9.11	35.8	24.2	2.57×10^{-5}

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置 砂槽尺寸为 $200\text{ cm}\times 100\text{ cm}\times 130\text{ cm}$ 。根据西南地区强弱互层深厚覆盖层地基的典型断面,结合砂槽的实际尺寸设置试验,如图 2 所示。土体自上而下分别为:砂土、黏土、砂土、黏土、砂土、黏土,厚度分别为 17、20、20、20、15、18 cm,模型比尺为 1:100。设置坝基时,保证土体充分固结沉降;坝体填筑过程中参照《碾压式土石坝设计规范》进行分层压实。大坝高 20 cm,坝顶宽 5 cm,上下游坝坡均取 1:2,坝轴线距上游砂槽端部 100.5 cm,距下

游砂槽端部 99.5 cm,集水池的尺寸为 $63\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 53\text{ cm}$ 。试验中上下游水头差为定值,坝基和防渗墙在消杀水头方面能体现出规律,下游段设置长度符合要求。

砂槽中布置 87 个多孔进水型铝管测压计,并与测压管相连接,得出各监测点的孔隙水压力值^[24]。上游水头 $h=16\text{ cm}$,下游水头 $h_2=0\text{ cm}$;由于渗流量较小,3 个出水口能保证下游水头为 0 cm。根据地层的分布特点,防渗墙主要目的在于截断强透土层,嵌入弱透土层,形成半封闭式防渗墙,具有较好

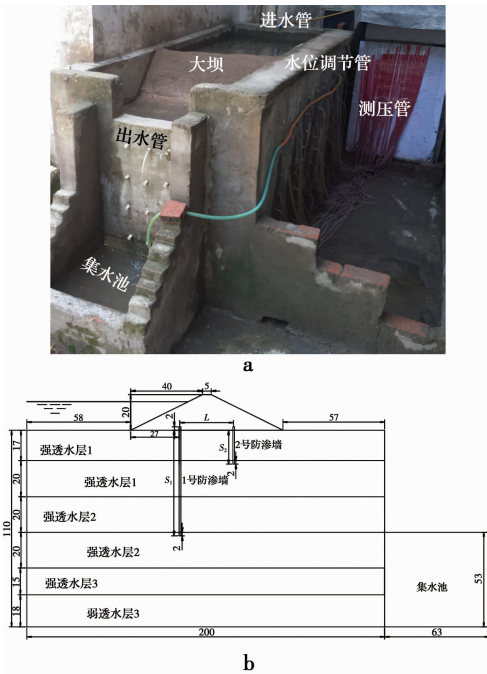


图 2 砂槽模型试验布置图

Fig. 2 Arrangement plan of sandbox model test

的隔水效果^[25];防渗墙模型比尺为 1:100,设置深度分别为 19、59、94 cm,如图 2 所示。1、2 号防渗墙的深度分别为 S_1 、 S_2 ,为研究防渗墙的布置形式及深度对渗流场的影响,共设置 7 种工况如表 3 所示。防渗墙的间距 $L=2\sim 30$ cm,每 2 cm 取一值,共计 11 种。

表 3 双排防渗墙的布置形式

Table 3 Arrangement form of two cut-off walls

工况	S_1 /cm	S_2 /cm
①	19	19
②	59	19
③	19	59
④	59	59
⑤	94	59
⑥	59	94
⑦	94	94

各工况下,防渗墙底端皆嵌入弱透土层 2 cm,顶端嵌入坝体 2 cm。坝体为均质土坝,材料为黏土。水位调节管和进水管共同调控上游水位,始终保持上游水位恒定。砂槽下游末端设置了 3 个出水孔,高程与建基面一致,皆为 100 cm。测压管中滴入红色试剂,便于精确读数。用纱布包裹多孔进水型铝管测压计,防止进水孔被堵塞。

1. 2. 2 试验步骤

1) 布置双排垂直防渗体。垂直防渗体采用土工

膜,借助木条和钢钉将土工膜固定在砂槽侧壁,并用橡皮泥堵塞缝隙,防止接缝处渗漏及侧渗。

2) 坝基、坝体填筑及测压计的安装。坝体填筑通过干密度、土料含水率控制,分层压实;填筑过程中,在 87 个测压监测点安装多孔进水型铝管测压计。

3) 蓄水及测压管排气。打开进水阀蓄水,排净测压管中的气体。

4) 上下游水位调节。水位调节管与进水管共同调控坝前水位至 116 cm,排水管调控坝后水位至 100 cm。

5) 读数。通过烧杯量测排水管的流量,即得到总渗流量;为精确读取孔隙压力水头,读数前应将测压管中的气泡排净,为减小孔隙压力水头 h 的读数误差,进行多次读数,求取均值 \bar{h} 。

6) 改变防渗墙的间距 $L(2\sim 30$ cm),重复步骤 1)~5)。

7) 改变防渗墙的布置形式(前长后短、前短后长、前后同长),重复步骤 1)~6)。

2 试验结果与分析

2. 1 渗流量分析

2. 1. 1 总渗流量 Q 为了更清楚地揭示各工况下总渗流量 Q (下文简称渗流量)随防渗墙的间距 L 的变化规律,根据试验结果作渗流量 Q 的变化曲线,如图 3 所示。

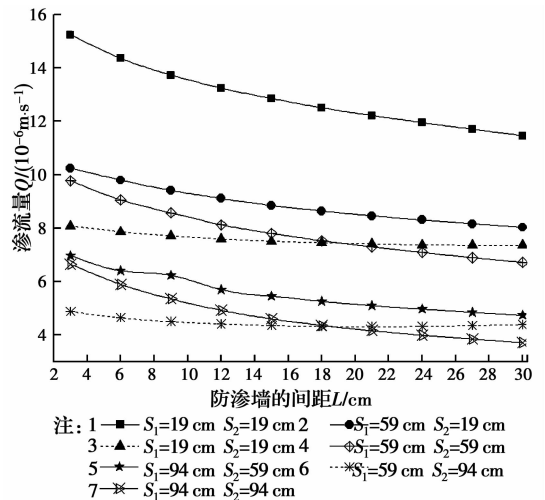


图 3 渗流量随防渗墙间距的变化曲线

Fig. 3 The curves of seepage discharge changing with spacing of double cut-off walls

由图 3 可知,各工况下渗流量均随着间距的增加而降低。对比各曲线不难发现,曲线 1、2、4、5、7 的斜率 dQ/dL 较大,曲线 3、6 的斜率 dQ/dL 较小。当间距由 3 cm 增大至 30 cm 时,工况①~⑦对应的

渗流量分别降低 24.75%、21.65%、8.9%、31.24%、31.95%、10.12%、44.14%；由此可见，工况③、工况⑥（前短后长）对应的渗流量降低量 ΔQ 明显低于其他工况。工况⑦（前后同长）下 $L=30\text{ cm}$ 对应的渗流量最小 $3.7147 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

总的渗流量包括坝体和坝基渗流量，在防渗墙深度较大时，会有更多的水体通过坝体渗向下游。因此，为了更清楚地反映出双排防渗墙对坝体和坝基渗流的影响，将进一步分析坝体和坝基渗流量的变化规律。

通过试验，绘制各工况下的流网图，各工况下流网图的绘制方法及步骤一致，以工况① ($L=30\text{ cm}$) 为例，如图 4 所示。

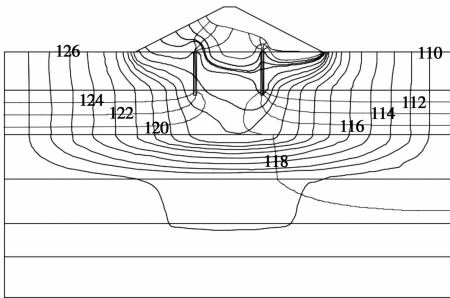


图 4 流网图

Fig. 4 Flow net chart

流网法计算渗流量的表达式^[26]为

$$Q = \frac{n}{N}kH \quad (1)$$

式中： H 为上下游水头差， cm ； k 为土体渗透系数， cm/s ； n 为沿垂直流动方向的网格数； N 为沿流动方向的网格数。基于图 4 和式(1)计算得出坝体渗流量 Q_1 和坝基渗流量 Q_2 。

2.1.2 坝体渗流量 Q_1 为了分析双排防渗墙间距及布置形式对坝体渗流量的影响，作坝体渗流量变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知，各曲线的变化规律类似，近似于正态分布，曲线 1、2、4、5、7 和曲线 3、6 分别以间距 $L=13.2\text{ cm}$ 和 $L=16.5\text{ cm}$ 为界，在该点达到最大值，左侧随间距增加而增大，右侧随间距增加而减小。此外，曲线 1、2、4、5、7 对应的坝体渗流量降低至最小值时间距 $L=30\text{ cm}$ ，而曲线 3、6 在间距 $L=3\text{ cm}$ 时坝体渗流量最小。

对比曲线不难发现，工况③在间距 $L=3\text{ cm}$ 时对应的坝体渗流量最小为 $6.5171 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ；工况⑦在间距 $L=13.2\text{ cm}$ 时对应的坝体渗流量最大 $2.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。其原因在于双排防渗墙都嵌入弱透水层，形成封闭的隔水空间，水体不易通过坝基渗向下游，坝体成为了渗流优先通道。

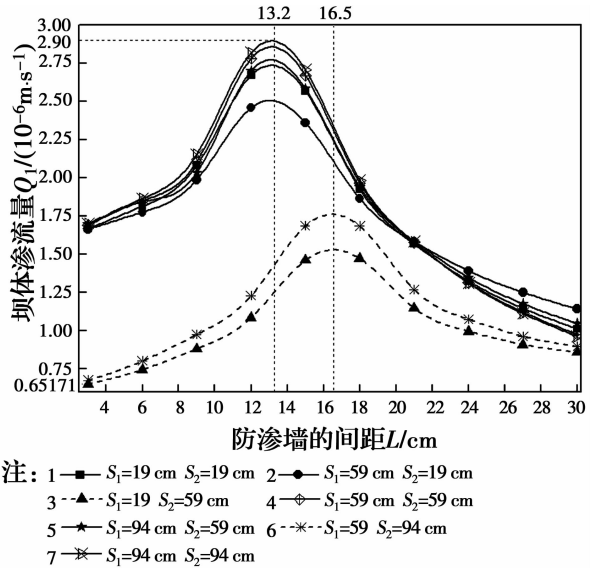


图 5 坝体渗流量随防渗墙间距的变化曲线

Fig. 5 The curves of seepage discharge of dam changing with spacing of double cut-off walls

2.1.3 坝基渗流量 Q_2 在分析了总渗流量 Q 和坝体渗流量 Q_1 的基础上，进一步分析坝基渗流量 Q_2 ，作坝基渗流量变化曲线如图 6 所示。

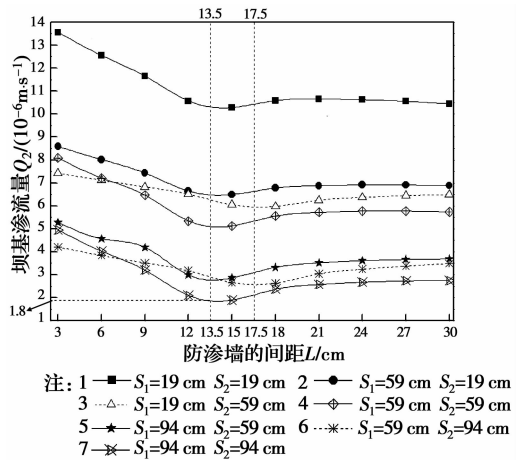


图 6 坝基渗流量 Q_2 随防渗墙间距的变化曲线

Fig. 6 The curves of seepage discharge of dam foundation changing with spacing of double cut-off walls

由图 6 可得，各曲线的变化规律类似，都随着间距 L 的增加先降低后增大。对比不难发现，曲线 1、2、4、5、7 在 $L=13.5\text{ cm}$ 时达到最小值，而曲线 3、6 在 $L=17.5\text{ cm}$ 降低至最小值。工况⑦在 $L=17.5\text{ cm}$ 时，坝基渗流量降低至最小值为 $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2 渗透坡降分析

根据各测压管的压力水头值，计算得出出逸坡降 J ，作出逸坡降变化曲线如图 7 所示。

由图 7 可知，各曲线的变化规律与图 3 类似，出逸坡降 J 随防渗墙间距的增加而降低。对比不难发现，曲线 1、2、4、5、7 的斜率 dJ/dL 较大，曲线 3、6 的斜率

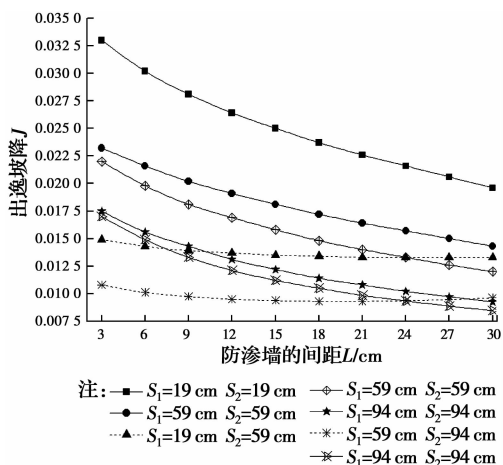


图 7 出逸坡降 J 随防渗墙间距的变化曲线
Fig. 7 The curves of exit gradient changing with spacing of double cut-off walls

dJ/dL 较小。当两防渗墙的间距 L 由 3 cm 增大至 30 cm 时,工况①~⑦对应的出逸坡降分别降低 40.61%、38.36%、10.74%、45.45%、47.14%、11.02%、50.18%。由此可见,工况③、工况⑥(前短后长)对应的出逸坡降降低量 ΔJ 明显低于其他工况。

由此可见:

1) 坝体渗流量以 $L=13.2, 16.5$ cm 为分界线,先增大后降低;坝基渗流量以 $L=13.5, 17.5$ cm 为分界线,先降低后增大。

2) 当 1 号防渗墙的深度大于或等于 2 号防渗墙 ($S_1 \geq S_2$) 时,渗流量和出逸坡降随间距增大降低明显;坝体渗流量 Q_1 在 $L=13.2$ cm 时出现极大值;坝基渗流量 Q_2 在 $L=13.5$ cm 时出现极小值。

3) 当 1 号防渗墙的深度 S_1 小于 2 号防渗墙的深度 S_2 时,渗流量和出逸坡降随防渗墙间距的增加变化不显著;坝体渗流量 Q_1 和坝基渗流量 Q_2 分别在 $L=16.5, L=17.5$ cm 时出现极小值。

3 水头消减和防渗墙形式分析

3.1 水头消减分析

当防渗墙深度 S 一定时,间距 L 对渗流量和出逸坡降存在一定的影响,但对等势线分布的影响不显著,因此,在分析孔隙水压力分布规律时取 $L=30$ cm。基于测压管的压力水头,利用 Sufer 绘制各工况下渗流等势线分布图,如图 8 所示。

由图 8 可得,各工况下渗流等势线的分布规律类似,等势线主要集中在防渗墙和弱透水层内部,绝大多数的水头被弱透水层和防渗墙形成的联合防渗体系消减,残余水头较小。水体渗过强透水层后,水头变化较小,可见,强透水层在消减水头方面的效果

不显著。鉴于渗流路径的区别,渗流量 (Q, Q_1, Q_2) 和出逸坡降 J 存在差异。

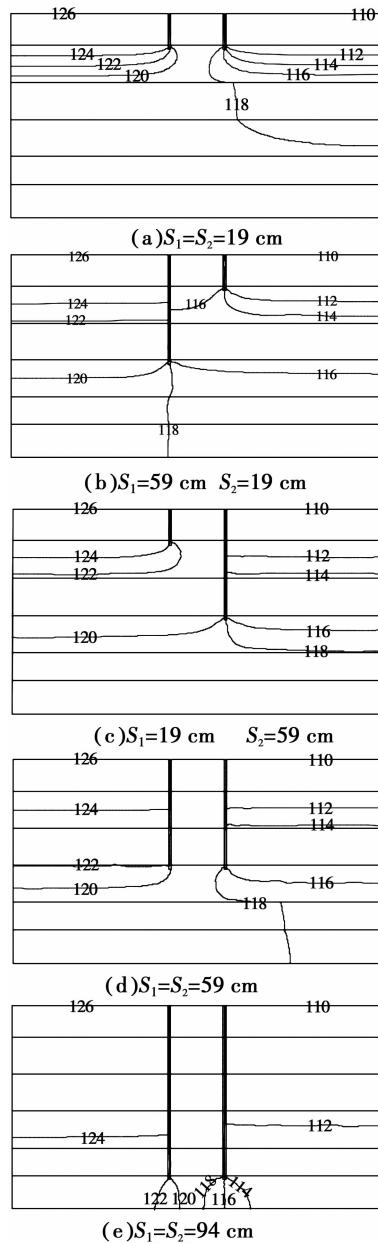


图 8 坝基渗流等势线分布图

Fig. 8 Distribution map of seepage equipotential lines for dam foundation

基于图 8(a)~(e) 计算得出各工况下双排防渗墙消减的水头,列入下表 4。

表 4 水头消减值

Table 4 Water head setback value

防渗墙深度/cm		消减水头/cm	
S_1	S_2	1号防渗墙	2号防渗墙
19	19	6	8
59	19	10	4
19	59	4	10
59	59	6	8
94	94	6	8

由表4可得,当双排防渗墙深度一致时,1号防渗墙消减水头6 cm,2号防渗墙消减水头8 cm,分别占总量的37.5%和50%,余下12.5%的水头由坝基土体消减。当前后防渗墙深度不一致时,以 $S_1 = 59$ cm、 $S_2 = 19$ cm进行阐述说明(另外一种工况规律一致),1号防渗墙消减水头10 cm,2号防渗墙消减水头4 cm,分别占总量的62.5%和25%,剩余的12.5%的水头同样被坝基自身消减。

由此可见,当两防渗墙的深度一致时,靠近上游的防渗墙消减的水头要小于下游防渗墙;当两防渗墙深度不同时,深度较大的防渗墙(与位置无关)消减更多的水头。此外,坝基土体中也存在3层弱透水层,同样消减了部分水头;由于强透水层渗透系数较大,消减的水头可忽略不计。

3.2 防渗墙形式分析

试验中设置了7种防渗墙形式,归纳总结可分为3种:1)“前长后短”,工况②、工况⑤;2)“前短后长”,工况③、工况⑥;3)“前后同长”,工况①、工况④、工况⑦。对比3种类型防渗墙的控渗效果,展开如下分析。以工况②($S_1 = 59$ cm、 $S_2 = 19$ cm)、工况③($S_1 = 19$ cm、 $S_2 = 59$ cm)、工况④($S_1 = S_2 = 59$ cm)为例,进行渗流量和渗透坡降分析。当间距 $L = 30$ cm时,基于图3和图7,对比工况②~工况④下渗流量 Q 和出逸坡降 J 如图9所示。

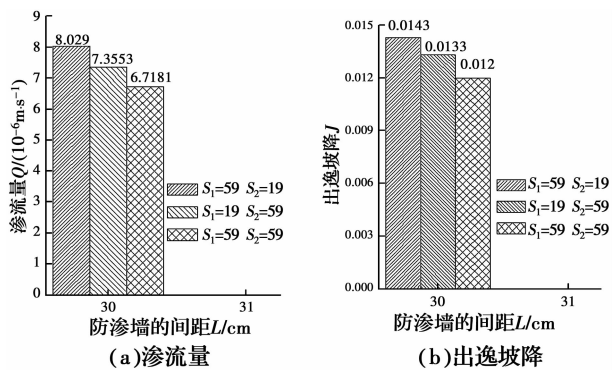


图9 各工况下渗流量和出逸坡降对比图

Fig. 9 Compared graphs of seepage discharge and exit gradient under various work conditions

由图9(a)可得,当间距 $L = 30$ cm时,“前长后短”工况对应的渗流量最大 $8.029 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,“前短后长”工况次之,“前后同长”工况最小。从防渗墙造价角度考虑,“前长后短”和“前短后长”工况造价相近(两防渗墙的总深度一致),但“前短后长”工况在控制渗流量方面的效果明显更佳,应优先考虑。

同理,对比图9(a)和图9(b),具有类似的规律,都是“前长后短”工况最大,“前短后长”工况次之,

“前后同长”工况最小。

综上所述,从降低工程造价的角度考虑,双排防渗墙采用“前短后长”的布置形式,能有效降低渗流量和抑制出逸坡降。

4 讨论

4.1 弱透水层对渗流的影响

本文旨在探讨双排防渗墙的间距及布置形式对渗流的影响,并未着重考虑弱透水层的控渗特性,而弱透水层的渗透系数、厚度、埋藏深度、连续性对渗流场有较大的影响。因此,在后续研究中应结合防渗墙和弱透水层进行综合分析,探讨二者形成的联合防渗体系的控渗效果。

4.2 防渗墙布置形式分析

“前长后短”和“前短后长”两种布置形式在消减水头方面无显著差异,都是深度大的防渗墙消减的水头较大,与位置无关。但从降低工程成本的角度考虑,当前后两防渗墙的总深度一定时,“前短后长”在降低渗流量和抑制出逸坡降方面的效果更显著,应优先考虑。

4.3 防渗墙间距分析

由2.1和2.2节分析得出,双排防渗墙采用“前长后短”、“前短后长”、“前后同长”的布置形式,总渗流量和出逸坡降皆随着防渗墙间距的增大而减小。但实际工程中,防渗墙往往设置在廊道内部,且部分坝型(如土石坝)并不能在坝体中设置廊道,因此,防渗墙的间距的设置应根据实际工程情况,在工程允许的条件下尽可能地增大间距。

4.4 坝体浸润线分析

渗流控制有两个目的,一是渗流量和渗透坡降,二是坝体的浸润线。本试验重点分析防渗墙深度对坝基渗流的影响,对坝体浸润线的影响较小。坝体的浸润线主要受坝体控渗方案、坝体排水、坝体构造等因素的影响。

5 结论

以多元结构深厚覆盖层坝基中的双排防渗墙为研究对象,通过砂槽试验,分析防渗墙的布置形式及间距对渗流的影响,得出以下结论。

1)当双排防渗墙采用“前长后短”、“前短后长”、“前后同长”布置形式时,渗流量和出逸坡降都随着间距的增加而降低,其中“前短后长”方案对应的渗流量和出逸坡降降低趋势不显著。

2)坝体渗流量变化趋势近似呈正态分布,先增

大后降低;坝基渗流量的变化趋势与坝体渗流量刚好相反,先降低后增大。当双排防渗墙都嵌入弱透水层,形成封闭的隔水空间,水体不易通过坝基渗向下游,坝体成为了渗流优先通道。

3)当两防渗墙的深度一致时,靠近下游的防渗墙消减的水头更大;两防渗墙深度存在差异时,深度更大的防渗墙消减更多的水头,且与位置无关。

4)当双排防渗墙的总深度一定时,采用“前短后长”的布置形式相比“前长后短”,更能有效降低渗流量和抑制出逸坡降。

参考文献:

- [1] 王正成,毛海涛,龙顺江,等. 流固耦合的多元结构深厚覆盖层透水地基的力学特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 151-159.
WANG Z C, MAO H T, LONG S J, et al. Mechanical properties of multiple-structure thick overburden pervious foundation based on fluid-solid coupling [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(3): 151-159. (in Chinese)
- [2] 吴梦喜,余挺,张琦. 深厚覆盖层潜蚀对大坝应力变形影响的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2087-2095.
WU M X, YU T, ZHANG Q. Finite element simulation of influence of deep overburden suffusion on dam stress and deformation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2087-2095. (in Chinese)
- [3] 杨玉生,刘小生,李小泉,等. 固结应力状态对超深厚覆盖层深埋砂土动强度参数的影响[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 518-526.
YANG Y S, LIU X S, LI X Q, et al. Effects of effective confining stresses on cyclic resistance ratio of deep buried sands in deep alluvial soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4): 518-526. (in Chinese)
- [4] 杨玉生,刘小生,赵剑明,等. 考虑原位结构效应确定深厚覆盖层土体的动强度参数[J]. 水利学报, 2017, 48(4): 446-456.
YANG Y S, LIU X S, ZHAO J M, et al. Determination of liquefaction resistance of deep alluvial soils considering in-situ structure effects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(4): 446-456. (in Chinese)
- [5] DAL LAGO B, MUHAXHERI M, FERRARA L. Numerical and experimental analysis of an innovative lightweight precast concrete wall [J]. Engineering Structures, 2017, 137(4): 204-222.
- [6] HENRY R S, SRITHARAN S, INGHAM J M. Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system [J]. Engineering Structures, 2016, 115(6): 28-41.
- [7] KAZUHIRO I, JUNICHI T, YASUTAKA M, et al. Experimental study on placing of high-fluifity concrete into wall with obstructions [J]. Plant Biology, 2016, 18(Sup1): 3-4.
- [8] KIM D H, KIM M K, MOON D Y, et al. Experimental study of steel pipe and reinforced concrete wall connections under lateral loading [J]. Engineering Structures, 2017, 145(4) 211-233.
- [9] ZHANG X C, SHAN W C, ZHANG Z W, et al. AE monitoring of reinforced concrete squat wall subjected to cyclic loading with information entropy-based analysis [J]. Engineering Structures, 2018, (4) 165: 359-367.
- [10] ABDOULHALIK A, AHMED A A. The effectiveness of cutoff walls to control saltwater intrusion in multi-layered coastal aquifers: Experimental and numerical study [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 199(6): 62-73.
- [11] 陈刚,马光文,付兴友,等. 瀑布沟大坝基础防渗墙廊道连接型式研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(3): 32-36.
CHEN G, MA G W, FU X Y, et al. Research for the joint type by gallery between dam imperious wall and core wall of Pubugou project [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science edition), 2005, 37(3): 32-36. (in Chinese)
- [12] 路文波. 深覆盖层心墙坝的应力变形研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
LU W B. Stress-deformation analysis for the core dam constructed on deep overburden [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] 邱祖林,陈杰. 深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形特性[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 72-76.
QIU Z L, CHEN J. On the stress and deformation of cut-off wall in the deep overburden [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 72-76. (in Chinese)
- [14] 吴梦喜,余学明,叶发明. 高心墙堆石坝坝基防渗墙与心墙连接方案研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(9): 59-64.
WU M X, YU X M, YE F M. Research on conjoining scheme for anti seepage wall of high rockfill dam with earth core [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(9): 59-64. (in Chinese)

- [15] 郭成谦. 论双排防渗墙的设计[J]. 水力发电, 1992(9): 18-22.
GUO C Q. The discussion of design of double cutoff wall [J]. Water Power, 1992(9):18-22. (in Chinese)
- [16] 高莲士, 罗先平. 三峡工程二期围堰中双排混凝土防渗墙与堰体联合作用研究[J]. 长江科学院院报, 1987(3):22-30.
GAO L S, LUO X P. A study on combined action of two line concrete cores and shell in the 2ne-stage cofferdam of the Three Gorge Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1987(3): 22-30. (in Chinese)
- [17] 路晓婷. 深厚覆盖层上土石坝防渗墙研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
LU X T. Impermeable wall research of earth-rock dam on deep overburden layer [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2017. (in Chinese)
- [18] 刘麟. 六库水电站纵向碾压混凝土围堰堰基应力应变及稳定性分析[D]. 成都: 四川大学, 2005.
LIU L. Analysis of stress-strain and stability for longitudinal RCC cofferdam foundation in Liuku hydropower station [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [19] 颜国卿. 心墙坝有效应力与总应力算法的对比研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
YAN G Q. Comparing study on the total stress method and effective stress method of the core wall dams [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [20] 吕生玺. 九甸峡混凝土面板堆石坝河床防渗结构研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 64-67.
Lü S X. Study on impervious structure of riverbed for concrete faced rock-fill dam of Jiudianxia water control project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(3): 64-67. (in Chinese)
- [21] 丰赞, 沙椿. 面波联合勘探在深厚覆盖层地区应用实例分析[J]. 物探与化探, 2018, 42(2): 392-397.
FENG Z, SHA C. Combined use of active and passive surface waves in the deep overburden area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(2): 392-397. (in Chinese)
- [22] MARTINEAU B. Formulation of a general gradation curve and its transformation to equivalent sigmoid form to represent grain size distribution [J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18(1): 199-207.
- [23] TABIBNEJAD A, HESHMATI A, SALEHZADEH H, et al. Effect of gradation curve and dry density on collapse deformation behavior of a rockfill material [J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 19(3): 631-640.
- [24] 吴宏平. 土石坝事故成因与测压管观测资料分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
WU H P. Research on the causes of embankment dam accidents and data analysis of piezometric tube [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [25] 王正成, 毛海涛, 姜海波, 等. 基于流固耦合的坝基中弱透水层对渗流的影响分析[J]. 水动力学研究与进展(A辑). 2017, 32(3): 316-324.
WANG Z C, MAO H T, JIANG H B, et al. Analysis on characteristics of influence of aquitard in dam foundation on seepage based on fluid-solid coupling [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(3): 110-116. (in Chinese)
- [26] 习和忠, 潘建楠. 求解渗流量的新方法—等效渗流量法[J]. 天津大学学报:(自然科学与工程技术版), 1984(4):91-100.
XI H Z, PAN J N. A new method for the solution of seepage discharge - equivalent seepage discharge method [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 1984(4):91-100. (in Chinese)

(编辑 胡玲)