

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.027



深厚覆盖层中弱透水层厚度及连续性对渗流场的影响

王正成¹,毛海涛^{1,2},王晓菊^{1,3},申纪伟¹,唐鑫¹,刘阳⁴

(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. 河海大学 环境学院,南京 210098;4. 新疆农业大学 水利与土木工程学院,乌鲁木齐 830052)

摘要:中国西北地区的深厚覆盖层坝基中常存在厚度不均和不连续的弱透水层,弱透水层的厚度、不连续形式及开口大小对坝基渗流场有一定的影响,其规律需要深入研究。基于非饱和土渗流理论,借助 Seep/w 进行渗流求解,探讨中间位置处弱透水层的厚度及连续性对单宽渗流量和出逸坡降的影响规律,并结合工程实例进行对比分析。研究表明:单宽渗流量和出逸坡降都随着中间位置处弱透水层厚度的增加而降低;弱透水层厚度对采用半封闭式防渗墙控渗时的渗流场影响最大,悬挂式防渗墙次之,全封闭式防渗墙最小。开口在上游的弱透水层与防渗墙形成的半封闭式联合防渗体系的控渗效果最好,开口在下游的弱透层次之,防渗墙上下游都存在开口时效果最差。单宽渗流量和出逸坡降随弱透水层上游开口长度的增加而增大,但开口长度对渗流场影响不显著,其原因在于各防渗体系上下游弱透水层仅起到微弱的隔水作用。建议防渗墙和下游弱透水层形成半封闭式联合防渗体系,避免防渗墙上下游弱透水层均存在缺口的不利情况。基于监测值和模拟值得出的误差满足规范要求,表明采用的计算方法和得出的结论皆可靠。

关键词:弱透水层;连续性;单宽渗流量;出逸坡降

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)02-0036-09

Influence of thickness and continuity of aquitard in deep overburden on seepage field

Wang Zhengcheng¹, Mao Haitao^{1,2}, Wang Xiaoju^{1,3}, Shen Jiwei¹, Tang Xin¹, Liu Yang⁴

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, P. R. China;

2. Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China;

3. College of environment, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China;

4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, P. R. China)

Abstract: Aquitard with uneven thickness and discontinuities commonly occurs in thick-overburden dam base in Northwest China. The seepage field in dam foundation is affected by the thickness, discontinuity form

收稿日期:2017-07-16

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项目(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:2017-07-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51309262); Chongqing Science & Technology Commission Basic and Frontier Research Projects (No. cstc2015jcyjA1204, 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(No. 18QN01)

Author brief: Wang Zhengcheng(1991-), main research interests: earth-rock dam percolation mechanism research,E-mail:wangzhengcheng194 @163.com.

Mao Haitao(corresponding author), professor, PhD, E-mail:maohaitao1234@163.com.

and opening size of the aquitard, which is needed to be studied in depth. In this paper, based on the seepage theory of unsaturated soil and seepage solution in Seep/w, we aim to obtain the influence of thickness and continuity of a aquitard in the middle position on the discharge per unit width and exit gradient, and compare with engineering practices. Results show that discharge per unit width and exit gradient decrease as the aquitard thickness increases. The influence of aquitard thickness on seepage field decreases in order of semi-closed cut-off wall, suspended cut-off wall and totally enclosed cut-off wall. The semi-closed joint anti-seepage system formed by aquitard and cut-off wall at the upstream is of the best control effect, followed by aquitard that opens at the downstream, case in which opens at both the upstream and downstream is the worst. The discharge per unit width and exit gradient increase with the opening length of aquitard. But at the upstream seepage system, since the weak layer only plays a weak role in water separation, therefore the opening length has little influence on seepage field. It is suggested that a semi closed joint anti-seepage system formed by cut-off wall and downstream aquitard is a doable measure, which can avoid the adverse condition that opens of aquitard both at the upstream and downstream. It is found that, compared with the monitoring result, the simulating error meets the codes. Therefore, the calculation method and conclusions of this paper are reliable.

Keywords: aquitard; continuity; seepage discharge per unit width; exit gradient

在中国西北地区建坝,常遇到深厚覆盖层^[1],如察汗乌苏水电站、下坂地水利枢纽工程、500 水库。此类坝基不仅仅局限于中国, Tarbela Dam(巴基斯坦)、Aswan High Dam(埃及)、Morelos Dam(墨西哥)和 Wolf Creek Dam(美国)的坝基也同样是深厚覆盖层^[2-3]。调查研究表明,中国西北深厚覆盖层中常存在弱透水层,该土层透水性差,隔水作用显著^[4],但往往存在厚度较薄和不连续等缺陷。

学者们针对深厚覆盖层中连续且等厚的弱透水层开展了相关研究。吴梦喜等^[5-6]研究表明,含弱透水层的深厚覆盖层坝基采用垂直防渗墙控渗时,弱透水层对渗流场有较大的影响。汪斌等^[7]提出弱透水层的饱和渗透系数、土水特征函数和坡体结构系数共同决定水位升降过程中土体孔隙水压力、浸润线的分布。王正成等^[8]研究表明,埋藏较深的弱透水层与防渗墙形成的半封闭式防渗体系,相比位置较浅的更能有效降低渗流量和抑制出逸坡降。采用 ADINA 针对上江坝工程进行分析,研究表明,当坝基采用半封闭式防渗墙时,渗流量、渗透坡降和应力-应变均小于允许值,该弱透水层能作为控渗依托层^[9]。目前,关于弱透水层的厚度及连续性方面的研究鲜见,仍需开展大量研究工作深入研究。

本文借助有限元软件 Seep/w 建立数值模型,计算得出单宽渗流量及出逸坡降,并结合实际工程对比分析,探讨深厚覆盖层坝基中弱透水层的厚度、开口形式(开口在上游、开口在下游、上下游都有缺口)及开口长度对渗流场的影响,以期对含有弱透水层的深厚覆盖层坝基控渗方案的选择提供理论支撑,防止坝基发生渗透破坏。

1 非饱和土体渗流理论

非饱和土体的体积含水率 θ_w 及渗透系数 k 均为基质吸力 u_m 的函数^[10]。非饱和土体中,水的表面张力使得土体孔隙中的水、气截面产生弯液面,水和气承受不同的压力,孔隙气压力和孔隙水压力的差值称为基质吸力^[11]。土-水特征曲线可表征非饱和土体体积含水率与基质吸力的关系,非饱和土渗流方程可表征渗透系数与基质吸力的关系。

基质吸力可以用 Laplace 公式来计算。

$$u_m = u_a - u_w = T_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

式中: u_m 为基质吸力, kPa; u_a 为孔隙气压力, kPa; u_w 为孔隙水压力, kPa; T_s 为表面张力, 75 kPa; r_1 和 r_2 为弯液面的短轴和长轴的半径。

非饱和土壤水分特征曲线方程^[12]为

$$\theta_w = \begin{cases} \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + \alpha_w (u_m)^{n_w}]^{m_w}} + \theta_r & (\theta_w < 0) \\ \theta_s & (\theta_w \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_w 为体积含水率; θ_s 为土体饱和体积含水率; θ_r 为土体残余体积含水率; α_w 为与进气值倒数相关的参数; n_w 为超过进气值后土-水特征曲线斜率相关的模型参数; m_w 为与非饱和土残余状态相关的模型参数,与 n_w 的关系式为

$$m_w = 1 - \frac{1}{n_w} \quad (3)$$

非饱和土渗流方程^[13]为

$$k = k_s \frac{\{1 - (-\alpha_w u_w)^{n_w-1} [1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}]^{-m_w}\}^2}{[1 + (-\alpha_w u_m)^{n_w}]^{0.5m_w}} \quad (4)$$

式中： k 为土体渗透系数； k_s 为饱和渗透系数。

Seep/w 中的公式能较好地反应饱和和渗透系数与土体孔隙率之间的关系，文中采用该计算模型。

$$k_s = k_{s0} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{1-n_0}{1-n} \right)^2 \quad (5)$$

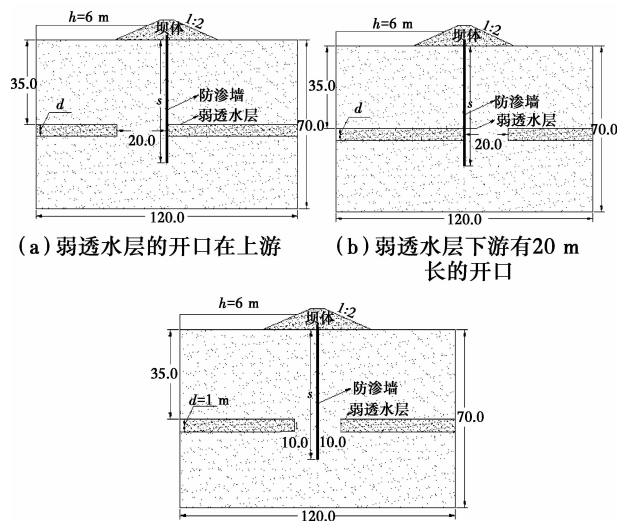
式中： k_{s0} 为土体初始饱和渗透系数； n 为土体孔隙率； n_0 为土体初始孔隙率。

2 数值模型的建立

2.1 模型概况

黏土均质坝坝高 8.3 m，坝顶宽 6 m，坝前水头为 6 m。坝基厚 70 m，为深厚覆盖层坝基，坝基中间位置处有一层黏土（弱透水层），埋藏深度为 35 m；除黏土层外均为砂土，坝体和坝基中的黏土层为同一种材料。坝基采用垂直防渗墙进行防渗，厚度为 0.8 m，嵌入坝体 2 m。模型断面如图 1 所示。

为探讨弱透水层厚度对渗流场的影响，模拟中，厚度取 1~10 m，每次增加 1 m，共计 10 种。探讨弱透水层不连续形式渗流场的影响，分为以下 3 种情况：1) 工况 a。弱透水层上游开口长度为 20 m，厚度 $d=1$ m，如图 1(a) 所示。2) 工况 b。弱透水层下游开口长度为 20 m，厚度 $d=1$ m 时，如图 1(b) 所示。3) 工况 c。上、下游弱透水层皆短缺 10 m，厚度 $d=1$ m，如图 1(c) 所示。弱透水层上游开口长度 $L=0 \sim 60$ m，每次延长 5 m，共计 13 种。防渗墙深度为 10~70 m，根据防渗墙是否穿过弱透水层和底端所在土层的性质，防渗墙可分为悬挂式防渗墙、半封闭式防渗墙和全封闭式防渗墙^[14]。



(c) 防渗墙上、下游弱透水层都有 10 m 长的开口

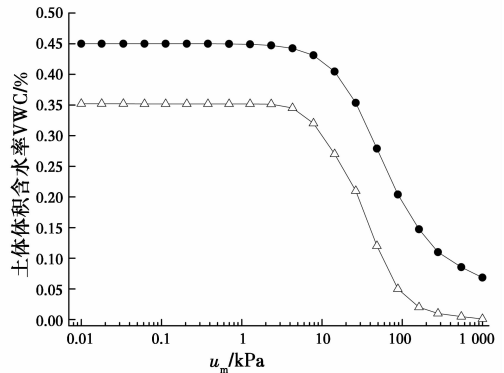
注：S 为防渗墙的深度，m；d 为弱透水层厚度，m；L 为弱透水层开口长度，m；h 为坝前水头，h=6 m。

图 1 模型断面图

Fig. 1 Model section map

2.2 计算参数

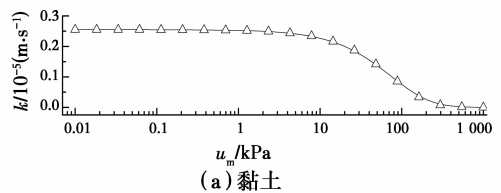
非饱和土渗流过程中，土体含水率 θ_w 和渗透系数 k 随基质吸力变化， θ_w 、 k 与基质吸力 u_m 的关系曲线，如图 2、图 3 所示。



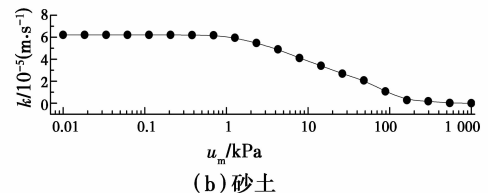
注：△—黏土 ●—砂土

图 2 土体体积含水率随基质吸力的变化曲线

Fig. 2 Varying curves of soil volumetric water content with matric suction



(a) 黏土



(b) 砂土

图 3 土体渗透系数随基质吸力的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of permeability coefficient of soil with matric suction

将黏土、砂土和防渗墙的孔隙率、干密度、重度、凝聚力和渗透系数等基本物理参数列入表 1。

表 1 材料的基本物理指标

Table 1 Physical property of materials

材料	孔隙率 $n/\%$	干密度 $\rho d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
黏土	44	1.93	19	—
砂土	28	2.34	23.1	—
防渗墙	5.6	2.2	24	2.24×10^{-6}

3 数值模拟结果及分析

分别计算得出各工况下渗流量和出逸坡降。以 $d=1$ m、 $L=20$ m 和 $S=50$ m 为例，作等势线图，如

图 4 所示。

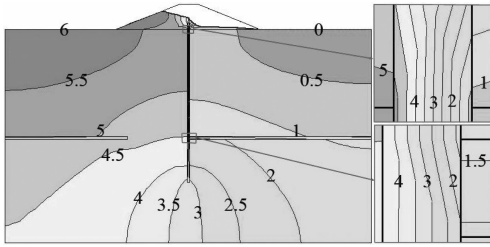


图 4 大坝等势线

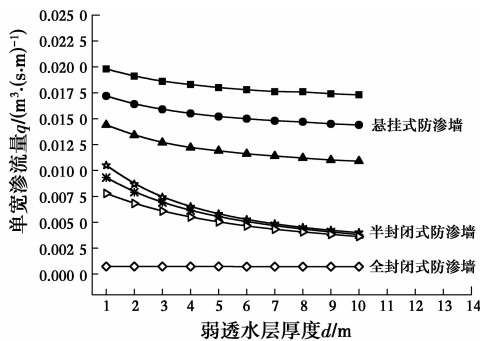
Fig. 4 Equipotential line of dam

由图 4 可知,等势线 5~1 集中在防渗墙内部,等势线 5、2、1.5 和 1 集中在弱透水层内部,可见,防渗墙和弱透水层能在很大程度上消减水头势能。

根据各工况数值模拟结果,分析渗流量和出逸坡降的变化情况,探讨弱透水层厚度和连续性对坝基渗流的影响。

3.1 弱透水层厚度对坝基渗流的影响

分析弱透水层厚度 d 对坝基渗流的影响时,弱透水层连续分布,埋藏深度 35 m,处于坝基中间位置。作单宽渗流量随弱透水层厚度的变化曲线,如图 5 所示。



注: 防渗墙深度: ■—10 m ▲—30 m *—50 m ◇—70 m
●—20 m ★—40 m ▽—60 m

图 5 单宽渗流量随弱透水层厚度的变化曲线

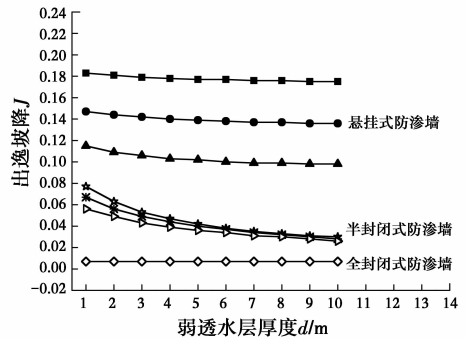
Fig. 5 Change curves of seepage discharge per unit width with aquitard depth

由图 5 可知,各曲线的变化规律一致,单宽渗流量随弱透水层厚的增大而降低。当防渗墙深度 $S=10\sim 70$ m 时,随着弱透水层厚度的增大,单宽渗流量分别减小 12.63%、16.28%、24.31%、61.9%、58.97%、53.47% 和 0.14%。由此可见,坝基分别采用悬挂式防渗墙、半封闭式防渗墙和全封闭式防渗墙控渗,弱透水层厚度由 1 m 增大至 10 m 时,单宽渗流量 q 分别降低 12.63%~24.31%、53.47%~61.9%、0.14%。采用半封闭式防渗墙时曲线斜率最大,采用悬挂式防渗墙次之,采用全封闭式最小。

由此可得,处于中间位置处的弱透水层厚度对

采用半封闭式防渗墙控渗时的单宽渗流量影响最大,悬挂式防渗墙次之,全封闭式防渗墙最小。

出逸坡降 J 随弱透水厚度 d 的变化曲线如图 6 所示。



注: 防渗墙深度: ■—10 m ▲—30 m *—50 m ◇—70 m
●—20 m ★—40 m ▽—60 m

图 6 出逸坡降随弱透水层厚度的变化曲线

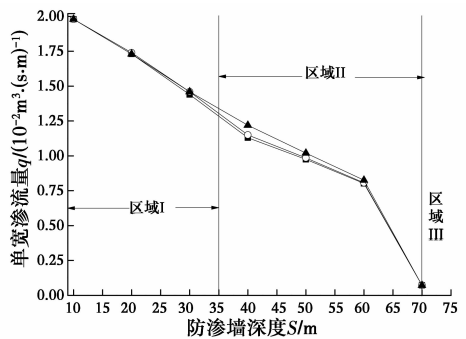
Fig. 6 Change curves of exit gradient with aquitard depth

由图 6 可知,各曲线的变化规律同图 5 一致,都是随着弱透水层厚度 d 的增加而减小。当防渗墙深度 $S=10\sim 70$ m,弱透水层厚度 d 由 1 m 增大 10 m 时,渗透坡降 J 分别减小 4.37%、7.48%、14.78%、61.04%、58.21%、53.57% 和 0%。坝基采用悬挂式防渗墙、半封闭式防渗墙和全封闭式防渗墙时,渗透坡降分别降低 4.37%~14.7%、53.57%~61.04%、0%。

由此可得,处于中间位置处的弱透水层厚度对采用半封闭式防渗墙控渗时的出逸坡降影响最大,悬挂式防渗墙次之,全封闭式防渗墙最小。

3.2 弱透水层的不连续形式对坝基渗流的影响

分别计算得出工况 a、b、c 对应的单宽渗流量和出逸坡降。作单宽渗流量随防渗墙深度的变化曲线,如图 7 所示。



注: ■—工况a ◇—工况b ▲—工况c

图 7 单宽渗流量随防渗墙深度的变化曲线

Fig. 7 Change curves of seepage discharge per unit width with cutoff wall depth

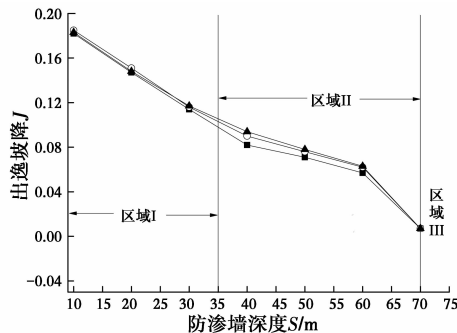
当防渗墙深度为 10~30 m(区域 I)时为悬挂

式防渗墙,工况 a、b、c 对应的单宽渗流量仅相差 $0 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$;当防渗墙深度为 70 m(区域 III)时为全封闭式防渗墙,工况 a、b、c 对应的单宽渗流量相等,为 $7.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 。

当防渗墙深度 $S=40 \sim 60 \text{ m}$ (区域 II)时,工况 a 中,下游弱透水层和防渗墙形成半封闭式防渗体系,工况 b 中,上游弱透水层和防渗墙形成半封闭式防渗体系,工况 c 为悬挂式防渗体系。工况 a、b 对应的单宽渗流量 q 分别为 $8.03 \times 10^{-3} \sim 1.13 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 和 $8.07 \times 10^{-3} \sim 1.15 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$,工况 c 对应的单宽渗流为 $8.26 \times 10^{-3} \sim 1.22 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 。

可见,工况 c 对应的单宽渗流量高于工况 a、b,工况 a、c 的差值为 $2.3 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$,工况 b、c 的差值为 $1.9 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$;工况 b 对应的单宽渗流量高于工况 a,差值为 $2 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ 。

作出逸坡降随防渗墙深度的变化曲线,如图 8 所示。



注: —■— 工况a —○— 工况b —▲— 工况c

图 8 出逸坡降随防渗墙深度的变化曲线

Fig. 8 Change curves of exit gradient per unit width with cutoff wall depth

图 8 的变化规律同图 7 一致,当 $S=10 \sim 30 \text{ m}$ (区域 I)时为悬挂式防渗墙,工况 a、b、c 对应的出逸坡降仅相差 $0.001 \sim 0.004$ 。当 $S=70 \text{ m}$ (区域 III)时为全封闭式防渗墙,工况 a、b、c 对应的出逸坡降均为 0.007 。当 $S=40 \sim 60 \text{ m}$ (区域 II)时,工况 c 对应的单宽渗流量高于工况 a、b,工况 a、c 的差值分别为 $0.006 \sim 0.012$,工况 b、c 的差值分别为 $0.001 \sim 0.004$ 。工况 b 对应的渗透坡降高于工况 a,差值为 $0 \sim 0.008$ 。

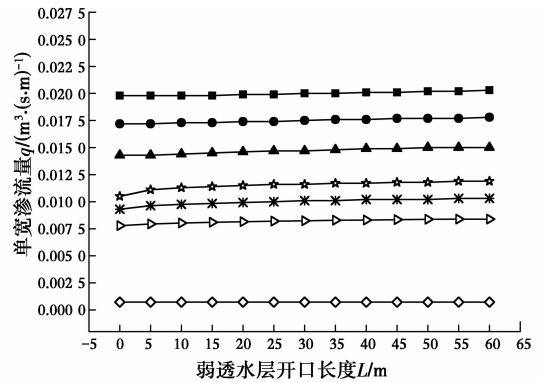
综上所述,工况 a 在控制单宽渗流量和抑制出逸坡降方面的效果最好,工况 b 次之,工况 c 最差。

3.3 弱透水层上游开口长度对坝基渗流的影响

由于工况 a(上游开口长度为 20 m)在控制单宽渗流量和抑制出逸坡降方面的效果优于工况 b、c,

因此,针对弱透水层上游的开口长度作进一步分析。分析弱透水层上游开口长度对坝基渗流的影响时, $d=1 \text{ m}$,埋藏深度为 35 m。

作单宽渗流量随弱透水层上游开口长度的变化曲线如 9 所示。



注: 防渗墙深度: —■— 10 m —▲— 30 m —*— 50 m —◇— 70 m
—●— 20 m —★— 40 m —▷— 60 m

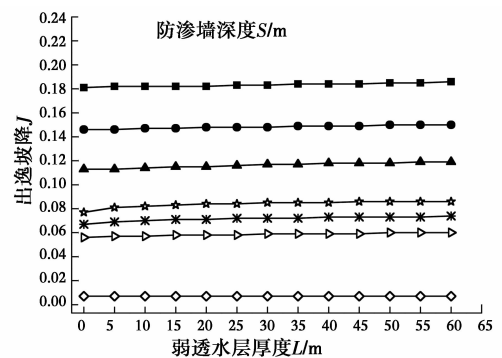
图 9 单宽渗流量随弱透水层开口长度的变化曲线

Fig. 9 Change curves of seepage discharge per unit width with open length of aquitard

由图 9 可得,各曲线变化规律一致,单宽渗流量随 L 增加而增大。以防渗墙深度 $S=60 \text{ m}$ 为例, $L=0 \sim 60 \text{ m}$ 对应的单宽渗流量 q 为 $7.78 \times 10^{-3} \sim 8.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$,降低了 7.84% 。

当 $S=10 \sim 50 \text{ m}$ 和 70 m 时, L 由 0 增大至 60 m 时, q 分别增大 2.53% 、 3.49% 、 4.9% 、 1.33% 、 1.06% 、 0% ,曲线的斜率 $i=0 \sim 2.33 \times 10^{-5}$ 。综上所述,弱透水层上游开口长度的大小对单宽渗流量 q 影响较小。

作出逸坡降 J 随弱透水层上游的开口长度的变化曲线,如图 10 所示。



注: 防渗墙深度: —■— 10 m —▲— 30 m —*— 50 m —◇— 70 m
—●— 20 m —★— 40 m —▷— 60 m

图 10 出逸坡降随弱透水层开口长度的变化曲线

Fig. 10 Change curves of exit gradient with open length of aquitard

图 10 和图 9 中各曲线的变化规律一致, J 随 L 的增加而增大。当 $S=10 \sim 70 \text{ m}$, L 增大至 60 m

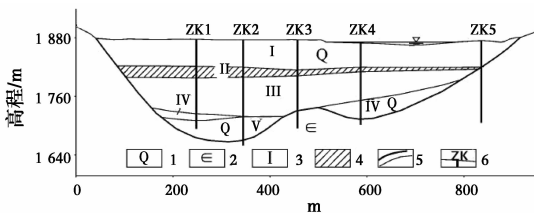
时,出逸坡降分别增大 2.76%、2.74%、5.31%、11.69%、10.45%、7.14%、0%,曲线的斜率 $i=0\sim 1.5\times 10^{-4}$ 。 L 增加至 60 m 时,出逸坡降 J 增大 $0\sim 0.009$ 。可见,弱透水层的上游开口长度对出逸坡降的影响不显著。

弱透水层开口长度增大,单宽渗流量和出逸坡降仅增大。 $0\sim 1.4\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0\sim 0.009$,可见,弱透水层的开口长度对单宽渗流量和出逸坡降影响较小。

4 算例分析

4.1 弱透水层厚度对坝基渗流的影响

某大坝(工程 a)坝顶高程为 2 108 m,坝顶宽 10 m,建基面高程为 1 859 m,水库正常蓄水位为 2 100 m。心墙顶端高程为 2 107.6 m,墙顶宽 3 m,心墙料为黏土,防渗墙深度为 56 m,厚度为 1 m。坝基从上至下分为五层: I 岩组为漂卵石,厚 49.7~58.3 m; II 岩组为低液限黏土,厚 9.4~24 m; III 岩组为砾卵石,厚 59.6~71.5 m; IV 岩组为碎块石,厚 14.0~38.4 m; V 岩组为砂砾石,厚 0~52.1 m;深厚覆盖层坝基坐落于寒武岩。岩层分布如图 11 所示。



注: 1.第四系;2.寒武系;3.岩组编号;4.低液限黏土; 5.岩层界限;6.钻孔编号。

图 11 坝基岩层分布

Fig. 11 The rock distribution of dam foundation

II 岩组为低液限黏土层,以黏粒和粉粒为主,可视为弱透水层。坝体、深厚覆盖层坝基、黏土心墙和防渗墙的渗透系数如表 2 所示。

表 2 坝体及坝基渗透系数

Table 2 The calculation parameters of dam and dam foundation

区域	渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	区域	渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
I 岩组	1.82×10^{-2}	V 岩组	4.33×10^{-1}
弱透水层	1.72×10^{-5}	黏土心墙	1.12×10^{-5}
III 岩组	8.37×10^{-3}	防渗墙	2.24×10^{-6}
IV 岩组	2.17×10^{-2}	堆石坝体	4.24×10^{-1}

分析弱透水层厚度对渗流的影响,拟定 2 种工况。1)工况 1(ZK1)。I~V 岩组的厚度分别为:

56、24、70.5、14 和 33.15 m,防渗墙深度为 57 m,如图 12(a)所示。2)工况 2(ZK4)。I~IV 岩组的厚度分别为:50.29、11.43、60.15 和 36.58 m,该断面没有 V 岩组,防渗墙深度为 57 m,如图 12(b)所示。

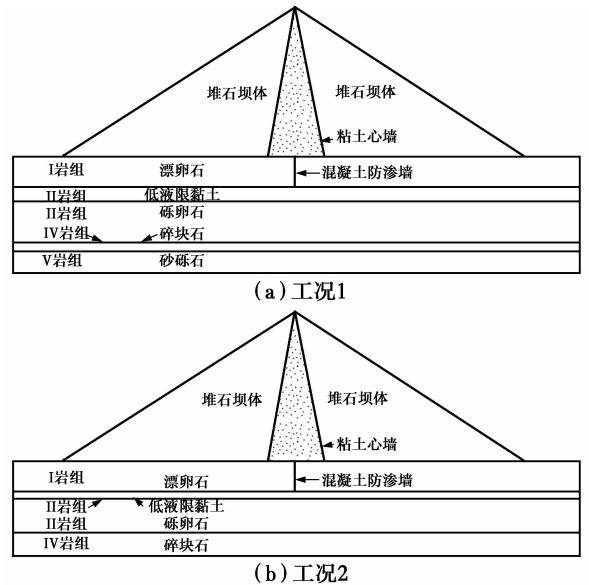


图 12 大坝断面图

Fig. 12 Section map of dam

计算得出工况 1、2 对应的单宽渗流量和出逸坡降,列入表 3。

表 3 单宽渗流量和出逸坡降

Table 3 Seepage discharge per unit width and exit gradient

工况	单宽渗流量 q / ($10^{-2} \text{ m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$)	出逸坡降 J
工况 1($d_{II}=24 \text{ m}$)	8.98	0.45
工况 2($d_{II}=11.43 \text{ m}$)	9.01	0.46

由表 3 可得,当防渗墙深度一定时,弱透水层厚度由 11.43 m 增大至 24 m 时, q 由 $9.01\times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 降低至 $8.98\times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$,降低了 $3\times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$,为初始量的 0.33%; J 由 0.46 减小至 0.45,减小了 0.01,为初始量的 2.22%。可得弱透水层厚度 d 越大,单宽渗流量 q 和出逸坡降 J 越小。

结合 3.1 节综合分析,数值模拟中弱透水层厚度增大, q 和 J 分别减小 0.14%~61.9%、0%~61.04%。数值模拟和工程实例分析可得出一致结论,单宽渗流量和出逸坡降随弱透水层厚度的增加而减小。

4.2 弱透水层连续性对坝基渗流的影响

某大坝(工程 b)最大坝高 78 m,坝顶宽 10 m,筑坝材料为砂砾石,坝顶高程为 2 966.00 m,设计水位为 2 745.00 m。坝基覆盖层厚 150 m,坝体和坝

基均采用厚 1 m 的混凝土防渗墙控渗。坝基中黏土层厚度为 3.97 m,埋藏深度为 73 m(处于坝基中间位置),长度为 243.5 m。大坝剖面如图 13(a)所示。

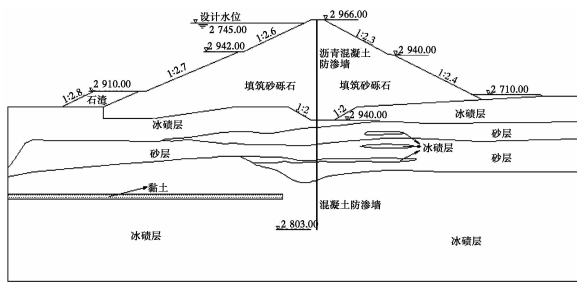
坝体料、深厚覆盖层坝基、混凝土防渗墙、石渣的计算参数如表 4 所示。

表 4 坝体及坝基渗透系数

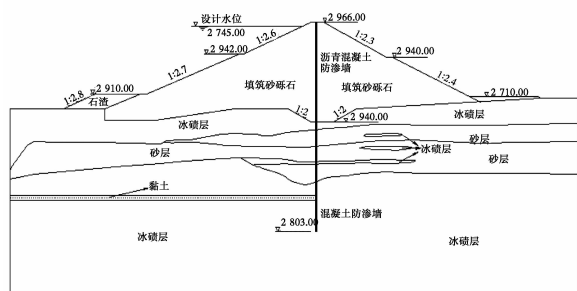
Table 4 Permeability coefficient of dam and dam foundation

材料名称	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	材料名称	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
砂层	1.44×10^{-2}	黏土	1.24×10^{-5}
坝体料	3.23×10^{-5}	石渣	1×10^{-1}
冰碛层	3.86×10^{-2}	防渗墙	2.24×10^{-6}

由表 4 可得,黏土可视为弱透水层。为探讨坝基中弱透水层的连续性对渗流的影响,增设计况 2 作对比分析。1)工况 1。弱透水层上游开口长度为 30.5 m,如图 13(a)所示。2)工况 2。弱透水层从上游贯穿至防渗墙,如图 13(b)所示。



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 13 大坝断面图

Fig. 13 Section map dam

计算得出工况 1、2 对应的单宽渗流量 q 和出逸坡降 J ,将结果列入表 5。

表 5 单宽渗流量和出逸坡降

Table 5 Seepage discharge per unit width and exit gradient

工况	单宽渗流量 $q/(10^{-3} \text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1})$	出逸坡降 J
工况 1	1.45	0.39
工况 2	1.38	0.37

当坝基中弱透水层的开口长度由 0 m 增大至

30.5 m 时, q, J 分别增大 5.07% 和 5.41%。可见,单宽渗流和出逸坡降随弱透水层开口长度的增加而增大。

结合 3.3 节综合分析,数值模拟中当开口长度由 0 m 增大至 60 m 时,单宽渗流量和出逸坡降分别增大 0%~7.84% 和 0%~10.45%。由此可得,单宽渗流量和出逸坡降随弱透水层开口长度增加而增大,但影响较小。

4.3 数值模拟的精确性验证

为了验证数值模拟的可靠性,将模拟值与实测值进行对比分析,文中工程 a 和 b 的工况 1 与工程实际一致,实际中也均有详实的渗流观测资料。将实测值和模拟值对比如下表 6 所示。

表 6 渗流量和出逸坡降实测值和模拟值

Table 6 Measured and simulation value of seepage discharge and exit gradient

工程	渗流量 $q/(\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1})$		出逸坡降 J	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值
工程 a	9.42×10^{-2}	8.98×10^{-2}	0.46	0.45
工程 b	1.37×10^{-3}	1.45×10^{-3}	0.41	0.39

由表 6 可得,工程 a 和工程 b 渗流量的误差分别为 4.67% 和 5.84%,出逸坡降的误差分别为 2.17% 和 4.88%。二者误差均在 5% 左右,该计算精度在水利工程中是符合规范要求的。误差可能是文中将部分覆盖层进行简化所致。

5 讨论

5.1 弱透水层埋藏深度分析

当弱透水层埋藏较浅时,其防渗作用相当于水平铺盖,以二元结构为突出代表,该类结构坝基的研究已经较为成熟^[15]。当弱透水层埋藏较深时,建议做成全封闭式。当弱透水层处于坝基中间位置时,渗流规律尚不明朗,需要深入研究。因此,在分析弱透水层厚度对坝基渗流的影响时,弱透水层埋藏深度为 35 m,处于中间位置,具有代表性。

5.2 弱透水层的连续性对渗控的影响

对比分析弱透水层的不连续形式,工况 a 在控制单宽渗流量和抑制出逸坡降方面的效果最好,工况 b 次之,工况 c 最差。因此,若坝基中存在不连续的弱透水层,在设置垂直防渗墙时,应尽可能使下游弱透水层和垂直防渗墙形成半封闭防渗体系,利于坝基控渗,杜绝防渗墙上下游弱透水层均存在缺口的不利情况。

5.3 防渗墙形式对渗控的影响

弱透水层上游的开口长度对单宽渗流量和出逸坡降影响较小,可以借助坝基控渗形式进行解释,当 $S=10\sim 30$ m时,坝基采用悬挂式防渗墙控渗,已有研究表明悬挂式防渗墙在控制渗流量和抑制出逸坡降方面的效果不显著^[16];当 $S=40\sim 60$ m时,下游弱透水层与防渗墙已经形成半封闭式联合防渗体系,上游弱透水层是否连续对坝基渗流影响较小;当 $S=70$ m时,为全封闭式,防渗墙几乎承担了全部隔水任务,弱透水层的隔水效果微弱;综合分析可得,渗流场受弱透水层上游开口长度影响较小。

6 结论

基于非饱和土体渗流理论,建立数值模型针对弱透水层的厚度及连续性进行研究,并结合实际工程进行分析,得出以下结论:

1)单宽渗流量和出逸坡降随中间位置处弱透水层厚度增加而降低,分别降低 $0.14\%\sim 61.9\%$ 、 $0\%\sim 61.04\%$ 。此外,弱透水层厚度对采用半封闭式防渗墙控渗时的渗流场影响最大,悬挂式防渗墙次之,全封闭式防渗墙最小。

2)针对中间位置处弱透水层的不连续形式进行分析可得,开口在上游的弱透水层与防渗墙形成的半封闭式联合防渗体系的控渗效果最优,开口在下游的弱透层次之,防渗墙上下游都存在开口时效果最差。工程中设置防渗墙时,建议下游弱透水层和防渗墙形成半封闭式联合防渗体系,避免防渗墙上下游弱透水层皆存在缺口的不利情况。

3)单宽渗流量和出逸坡降随中间位置处弱透水层上游开口长度增加而增大,分别增大 $0\%\sim 7.84\%$ 和 $0\%\sim 10.45\%$;曲线斜率小,增大幅度小,可见,弱透水层的开口长度对渗流场影响较小,其原因在于,3种防渗墙形式下上下游弱透水层隔水作用微弱。

参考文献:

[1] 刘启旺,杨玉生,刘小生,等.考虑原位结构效应确定深厚覆盖层土体的动力变形特性参数[J].水利学报,2015,46(9):1047-1054.
LIU Q W, YANG Y S, LIU X S, et al. Test of dynamic deformation parameters of deep alluvial soils considering in-situ structural effects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1047-1054. (in Chinese)

[2] ABID M, SIDDIQI M U R. Multiphase flow simulations through Tarbela Dam spillways and tunnels

[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2010, 2(6): 532-539.

- [3] ELSAHABI M, NEGM A, HAMID M H EL TAHAN A. Performances evaluation of surface water areas extraction techniques using landsat ETM+ data: case study Aswan High Dam Lake (AHDL) [J]. Procedia Technology, 2016, 22(4): 1205-1212.
- [4] 沈振中,田振宇,徐力群,等.深厚覆盖层上土石坝心墙与防渗墙连接型式研究[J].岩土工程学报,2017,39(5):939-945.
SHEN Z Z, TIAN Z Y, XU L Q, et al. Reasonable connection type for cutoff wall and core wall of earth-rock dams on deep overburden layers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 939-945. (in Chinese)
- [5] 吴梦喜,杨连枝,王锋.强弱透水相间深厚覆盖层坝基的渗流分析[J].水利学报,2013,44(12):1439-1447.
WU M X, YANG L Z, WANG F. Seepage analysis of a dam foundation with deep deposit composed of strong and weak permeable layers alternately [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12): 1439-1447. (in Chinese)
- [6] WU M X. A finite-element algorithm for modeling variably saturated flows [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(3): 315-323.
- [7] 汪斌,唐辉明.含弱透水层岸坡地下水渗流特征的数值分析[J].岩土力学,2006,27(10):194-197.
WANG B, TANG H M. Numerical analysis of characteristic of seepage field in reservoir slope containing relative impermeable intercalated bed [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 194-197. (in Chinese)
- [8] 王正成,毛海涛,姜海波,等.弱透水层深度对深厚覆盖层坝基渗流的影响研究[J].人民长江,2016,47(7):54-58.
WANG Z C, MAO H T, JIANG H B, et al. Effect of aquitard depth to seepage prevention of dam foundation on thick overburden layer [J]. Yangtze River, 2016, 47(7): 54-58. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 张磊,张璐璐,程演,等.考虑潜蚀影响的降雨入渗边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2014,36(9):1680-

- 1687.
- ZHANG L, ZHANG L L, CHENG Y, et al. Slope stability under rainfall infiltration considering internal erosion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1680-1687. (in Chinese)
- [11] 朱晓源. 考虑非饱和土体的土石坝渗流与坝坡稳定分析研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- ZHU X Y. Investigation on earth-rock fill dams seepage and slope stability considering the effect of unsaturated soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [12] FATHI H, RAOOF A, MANSOURI S H, et al. Effects of porosity and water saturation on the effective diffusivity of a cathode catalyst layer [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017(4): 298-305.
- [13] SEGAL E, KUSHNIR T, MUALEM Y, et al. Microsensing of water dynamics and root distributions in sandy soils [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(3): 1018-1026.
- [14] 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)
- [15] LIU S H, WANG L J, WANG Z J, et al. Numerical stress-deformation analysis of cut-off wall in clay-core rockfill dam on thick overburden [J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3): 219-226.
- [16] 王保田, 陈西安. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(Sup1): 2766-2771.
- WANG B T, CHEN X A. Research on effect of suspended cut-off wall with simulation test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup1): 2766-2771. (in Chinese)

(编辑 胡玲)