

深厚覆盖层中局部强透水层对渗流的影响研究

王正成¹, 毛海涛^{1,2}, 申纪伟¹, 黄海均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, 湖北 武汉 430072)

摘要: 中国西部地区的深厚覆盖层坝基中常存在局部强透水层,其孔隙比大和渗透性强等特点对坝基渗流存在不利影响,是渗流控制中的薄弱环节。基于非饱和土渗流理论,借助有限元软件 Seep/w 建立数值模型,得出渗流量和坝踵处渗透坡降、出逸坡降,分析强透水层深度、厚度、连续性对渗流场的影响。结果表明:当强透水层深度大于防渗墙时,渗流量和坝踵处渗透坡降随强透水层深度的增大而减小;反之,渗流量则随着强透水层深度的增加而增大,坝踵处渗透坡降先降低后增大。渗流量、坝踵处渗透坡降、出逸坡降皆随着强透水层厚度的增加而增大。渗流量和出逸坡降随着强透水层上游开口长度的增加而增大;坝踵处渗透坡降以上游开口长度 50 m 为分界线,先增大后降低。渗流量和坝踵处渗透坡降以下游开口长度 40 m 为分界线,先增大后降低;出逸坡降随强透水层下游开口长度的增加而增大。当防渗墙深度小于 55 m 时,渗流参数随强透水层底端开口长度的增加而显著增大;当防渗墙深度为 60~100 m 时,渗流参数仅有较小幅度增大;当采用全封闭式防渗墙时,渗流参数随着底端开口长度的增大反而降低。

关键词: 坝基; 深厚覆盖层; 局部强透水层; 渗流量; 渗透坡降; 深度; 厚度; 连续性

中图分类号: TV223.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0159-08

Study on effects of local strong permeable stratum characteristics in deep overburden on seepage field

WANG Zhengcheng¹, MAO Haitao^{1,2}, SHEN Jiwei¹, HUANG Haijun¹

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

2. Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Local strong permeable stratum often appear in thick overburden dam base in China's west regions. The large pore ratio and permeability coefficient adverse effect on seepage of dam foundation, and it is a problem in seepage control. This paper obtained seepage discharge and exit gradient, seepage gradient at dam heel based on seepage theory of unsaturated soil and using numerical model by Seep/w. The effects of depth, thickness, and continuity of strong permeable stratum characteristics on seepage field were studied. The results showed that seepage discharge and seepage gradient at dam heel decreased with the increased of the depth of the strong permeable stratum, when the depth of strong permeable stratum is greater than cut off wall. Instead, seepage discharge augmented as the depth of strong permeable stratum increased, seepage gradient at dam heel decreased firstly and then increased. Seepage discharge and exit gradient, seepage gradient at dam heel augmented as the thickness of strong permeable stratum increased. Seepage discharge and exit gradient augmented as open length of strong permeable stratum at upstream increased. When open length of strong permeable stratum at upstream is 50 m, which is boundary for seepage gradient at dam heel, it increased firstly and then decreased. The seepage discharge and seepage gradient at dam heel are divided by the 40 m opening length downstream, which increases first and then decreases. The escape gradient increases with the increase of opening length downstream of strong permeable

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602367); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2018jcyjA); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601017); 重庆三峡学院青年项目(18QN01)

作者简介: 王正成(1991-),男,重庆开州人,硕士,助理实验师,主要从事土石坝渗流机理研究工作。

通讯作者: 毛海涛(1980-),男,山西平陆人,博士,教授,硕士生导师,主要从事水工建筑物渗流机理研究工作。

layer. When the depth of cut off wall is less than 55 m, seepage parameters augmented as open length of strong permeable stratum at bottom increased. When the depth of cut off wall is between 60 and 100 m, seepage parameters increased slightly. When totally enclosed cut-off wall was adopted, seepage parameters decreased as open length of strong permeable stratum at bottom increased.

Key words: dam foundation; deep overburden layer; local strong permeable stratum; seepage discharge; seepage gradient; depth; thickness; continuity

1 研究背景

深厚覆盖层地基广泛分布于我国西南、西北地区^[1],随着水利水电工程的迅速发展,基岩出露或薄覆盖层的地基越来越少,受到地基的约束,越来越多的水利工程不得不建立在深厚覆盖层地基上^[2]。研究表明,深厚覆盖层地基中往往存在局部强透土层,强透土层具有孔隙大、透水性强等特性,其特性决定了强透土层是渗流的优先和集中通道,是控渗工程的薄弱环节^[3]。因此,为了保证工程的安全稳定,制定合理可靠的渗控方案,局部强透土层对大坝渗流的影响规律亟待探明。

大量学者以局部强透土层为研究对象,开展了研究。谢辉^[4]借助 Seep3D 针对底部为强透水的特殊基坑工程进行了三维非稳定渗流模拟,结果表明防排结合的方式能有效控制基坑内的降水。常明云等^[5]提出针对砂卵石地层复杂强透水地层进行处理时,应针对强透水通道进行回填充填灌浆堵漏处理。崔永高^[6]研究表明含有强透水层的超大面积基坑在降水时存在着较强的群井效应。刘晓庆等^[7]针对强透水地基上土石坝进行非饱渗流数值模拟,得出辐射井和集水廊道联合作用能有效收集水库渗水。李桂荣等^[8]针对郑州引黄灌溉调蓄池的强透土层进行研究,提出了“塑性混凝土+水平壤土铺盖”联合控渗方案。叶青^[9]研究表明采用止水帷幕针对强透水基坑进行控渗处理时,随着帷幕深度增大,控渗效果越佳。李来祥等^[10]提出采用高喷帷幕截渗方案对高瞻泵站的强透水地基进行控渗处理,效果显著。曹洪等^[11]以双层强透土层堤基为研究对象,研究表明强透土层间的垂向渗流作用较弱,强透水层层内流动及越流补给作用显著。综上所述,已有研究成果主要集中在强透水基坑及地基存在的弊端及处理方式,或优化渗流计算模型。但针对深厚覆盖层中局部强透土层深度、厚度及连续性等特性对渗流场的影响尚缺乏系统的研究,需深入探讨。

2 非饱和土体渗流理论

土-水特征曲线(SWCC)用于描述饱和-非饱

和土中土体体积含水率与基质吸力间的函数关系,本文采用 Van Genuchten 提出的数学模型^[12]:

$$V_{ws} = \left[\frac{1}{1 + (au_m)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中: V_{ws} 为标准化体积含水量; a 为进气压力值的倒数; u_m 为基质吸力; n 为与土体孔径分布相关的参数; m 为 SWCC 曲线的整体对称性参数。

孔隙水在表面张力作用下,在水、气截面产生弯液面,水和气承受的压力存在差异,该差异值称为基质吸力,此力是非饱和土的一个重要指标,通过 Laplace 公式可求解得出^[13]:

$$u_m = u_a - u_w = T_s \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

式中: u_a 为孔隙气压力, Pa; u_w 为孔隙水压力, Pa; T_s 为表面张力, N; r_1 和 r_2 为弯液面短轴和长轴半径, m。

非饱和渗透特征曲线可采用 Gardner^[14]提出的非饱和渗透系数与基质吸力关系式:

$$k = \frac{k_s}{1 + a(u_m/\gamma_w)^n} \quad (3)$$

式中: k 为表征土体的非饱和渗透系数; k_s 为饱和渗透系数; γ_w 为水的容重, kg/m³。

土体孔隙率、饱和渗透系数和初始饱和渗透系数间的关系为:

$$k_s = k_{s0} \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{1 - n_0}{1 - n} \right)^2 \quad (4)$$

式中: k_{s0} 为初始饱和渗透系数; n 为孔隙率; n_0 为初始孔隙率。

非饱和土渗流控制微分方程^[15]为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_s k_r(h_c) \right] + S_Q = [C(h_c) + \beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (5)$$

式中: $k_r(h_c)$ 为相对透水率, 非饱和区 $0 < k_r < 1$, 饱和区 $k_r = 1$; h_c 为压力水头; S_Q 为源汇项; $C = \partial V_{ws} / \partial h_c$, 为容水度; β 为选择参数; S_s 为饱和土体单位贮水系数; t 为时间, s。

3 模型建立

3.1 模型概况

坝体为黏土均质土坝, 坝高 20 m, 坝顶宽 5 m,

坝前和坝后水头为 16 和 0 m;上下游坝坡均为 1: 2。深厚覆盖层地基厚度为 110 m,为典型的强弱互层地基,由砂土(强透水层)和黏土(弱透水层)构成,坝体和坝基中的黏土为同一种材料;坝基的控渗方案为混凝土防渗墙,防渗墙嵌入坝体内 2 m,墙体厚 1 m,深度 S_2 为 0 ~ 110 m(图 1)。

3.2 计算工况

经调查研究表明,由于受到地质成岩作用、地质构造运动等因素的影响,深厚覆盖层坝基中局部强透水层的埋深(深度)、厚度、连续性存在较大差异,且局部强透水层往往是渗流的集中通道,是控渗工程的重点处理对象,决定整个控渗工程的成败的关键因素。

基于强透水层特性(深度、厚度和连续性)的差异,建立数值模型:(1)厚度:强透水层厚度 $d = 1$ m,深度 $S_1 = 10 \sim 100$ m,如图 1(a)所示;(2)深度:强透水层深度 $S_1 = 55$ m,厚度 $d = 1 \sim 10$ m,如图 1(b)所示;(3)连续性:强透水层深度 S_1 和厚度 d 分

别为 55 和 1 m,其上游、下游和底端开口长度分别用 L_1 、 L_2 和 L_3 表征,在 10 ~ 100 m 间取值,如图 1(c) ~ 1(e) 所示。

3.3 计算参数

将黏土、强透水层和防渗墙的基本物理参数列入表 1。

表 1 数值模型土体的基本物理指标

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(弱透水层)	44	1.93	19	见图 2(b)
砂土(强透水层)	28	2.34	23.1	见图 2(b)
混凝土防渗墙	5.6	2.2	24	2.24×10^{-8}

非饱和砂土和黏土在渗流作用下,流体和固体发生耦合作用,体积含水率 V_{ws} 和渗透系数 k 随基质吸力变化,变化曲线如图 2 所示。

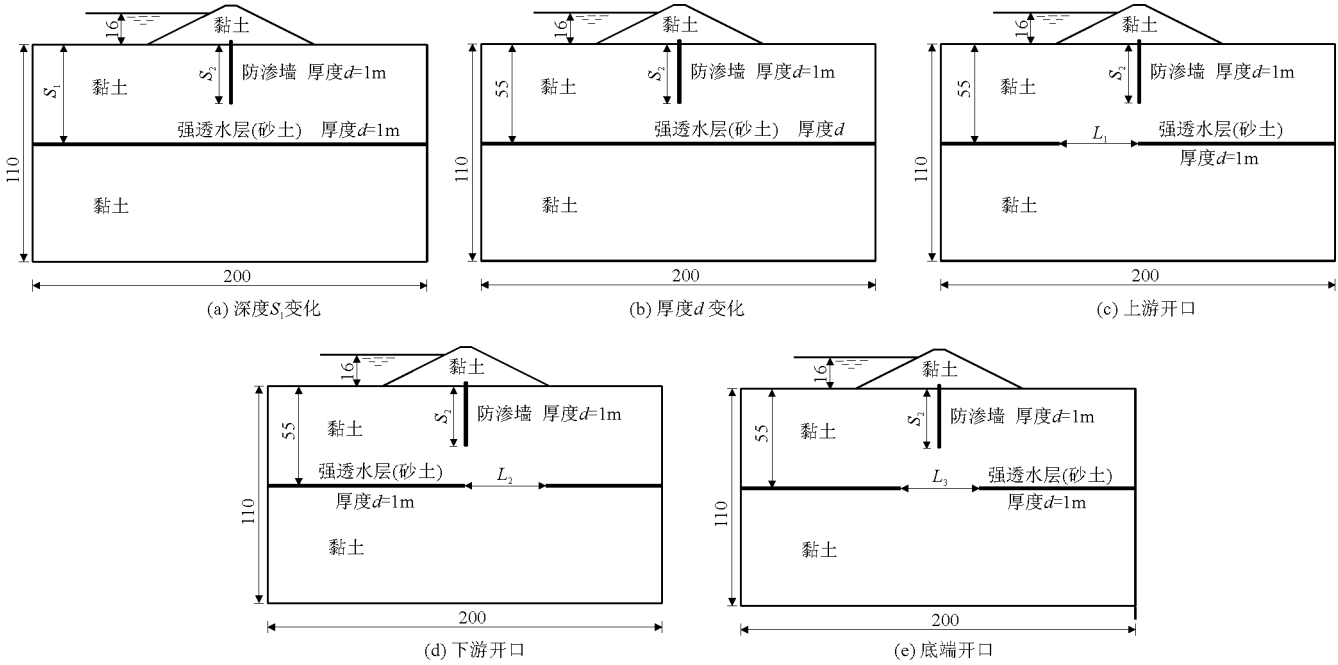


图 1 5 种工况模型横断面图

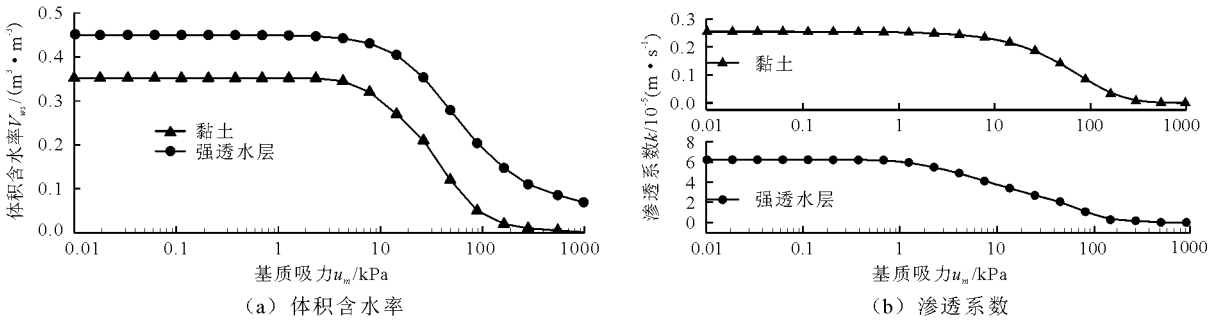


图 2 体积含水率和渗透系数随基质吸力的变化曲线

4 模拟结果与分析

基于上述数值模型,分别计算出各工况下渗流量 Q 、坝踵处渗透坡降 J_1 、出逸坡降 J_2 ,旨在分析强透水层深度 S_1 、厚度 d 和连续性对大坝渗流的影响。

4.1 强透水层深度分析

作渗流量 Q 随强透水层深度 S_1 的变化曲线,如图 3 所示。

由图 3 可得,(1)曲线 1~2 变化规律类似,渗流量 Q 随强透水层深度 S_1 的增大而减小;当 S_1 由 10 m 增大至 100 m 时,曲线 1、2 对应的渗流量 Q 分别降低 20.06%、21.36%,且初始降低速度较快。(2)曲线 3~11 变化规律类似,存在明显的分界线,当 $S_1 \leq S_2$ 时(分界线以下区域),渗流量随 S_1 增加而增大,增幅为 8.61%~18.26%;当 $S_1 \geq S_2$ 时(分界线以上区域),渗流量随 S_1 的增大而降低,降幅为 1.04%~14%。(3)当 $S_2 = 110$ m 时,为全封闭式防渗墙,曲线近似水平;当 S_1 由 10 m 增加至 100 m 时,渗流量仅增大 1.6%。

进一步分析坝踵处渗透坡降 J_1 的变化规律,其变化曲线如图 4 所示。

对比图 3 与 4 可得,渗流量和坝踵处渗透坡降的变化规律类似,皆存在明显的分界线,但也存在些许差异。(1)当 $S_1 \geq S_2$ 时(分界线以上区域),坝踵

处渗透坡降 J_1 随 S_1 的增大而降低,降幅为 7.92%~33.49%;(2)当 $S_1 \leq S_2$ 时(分界线以下区域),坝踵处渗透坡降 J_1 先降低,随后近似趋于稳定,最后再增大;以曲线 5($S_2 = 40$ m)为例进行阐述说明,当 S_1 由 10 增大至 20 m 时,坝踵处渗透坡降 J_1 降低 15.67%; S_1 由 20 增大至 30 m 时, J_1 仅增大 1.38%; S_1 由 30 增大至 40 m 时, J_1 增大 40.74%。

进一步分析出逸坡降 J_2 随强透水层深度 S_1 的变化规律,其变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可得,各曲线的变化特征存在共性,总体呈下降趋势,且初始下降速度较快,随后逐渐趋于稳定;当 S_1 由 10 m 增加至 100 m 时,出逸坡降 J_2 降低 6.17%~6.81%。但对比各曲线也存在一定差异:(1)当防渗墙深度 $S_2 \leq 20$ m 和 $S_2 = 110$ m 时,出逸坡降呈下降趋势;(2)当 $30 \leq S_2 \leq 100$ m 时,出逸坡降 J_2 曲线存在明显的分界线, J_2 先降低后增大,随后再降低,最后趋于稳定;(3)当 $S_1 = S_2$ 时,出逸坡降 J_2 增大,增幅为 0.05%~0.48%。

基于各渗流参数随强透水层深度 S_1 的变化特性,进一步分析渗流参数随强透水层厚度 d 的变化规律。

4.2 强透水层厚度分析

当强透水层深度 $S_1 = 55$ m 时,作渗流量 Q 随强透水层厚度 d 的变化曲线如图 6 所示。

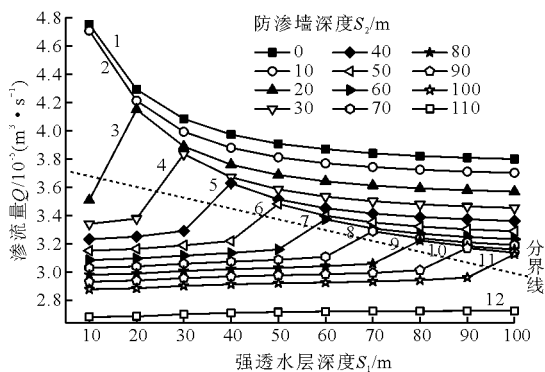


图 3 渗流量随强透水层深度的变化曲线

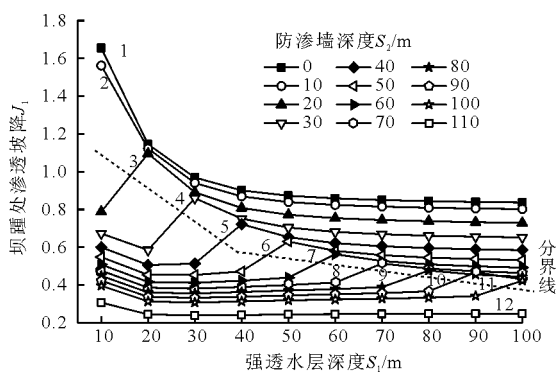


图 4 坝踵处渗透坡降随强透水层深度的变化曲线

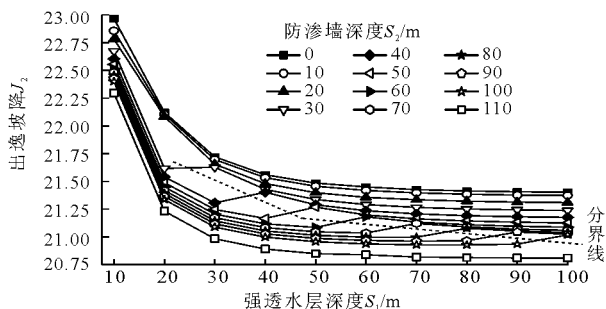


图 5 出逸坡降随强透水层深度的变化曲线

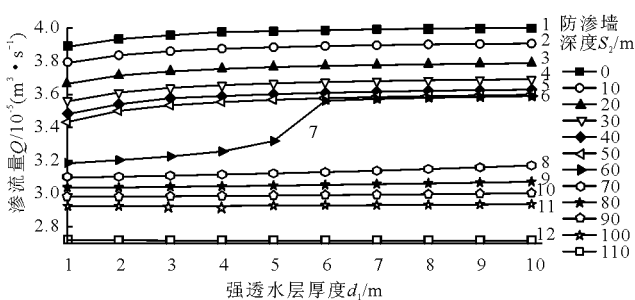


图 6 渗流量随强透水层厚度的变化曲线

由图6可得:(1)当防渗墙深度 $S_2 = 0 \sim 50$ m < $S_1 = 55$ m时(曲线1~6),渗流量逐渐增大,随后逐渐趋于稳定;当强透土层厚度 d 由1 m增加至10 m时,渗流量增大2.96%~4.78%。(2)当防渗墙深度 $S_2 = 60$ m时(曲线7),以厚度 $d = 6$ m为分界线,左端呈增大趋势,增幅为11.88%;右端趋于平稳,强透土层厚度 d 从6 m增大至10 m,渗流量仅增大0.76%;当防渗墙厚度由5 m(防渗墙底端位于分层界面)增加至6 m(防渗墙底端位于强透土层)时,渗流量增大7.32%。(3)当 $S_2 = 70 \sim 100$ m > $S_1 = 55$ m时(曲线8~11),防渗墙穿过强透土层,渗流量曲线变化平缓,当 d 由1 m增大至10 m时,渗流量 Q 仅增大0.38%~2.39%。(4)当 $S_2 = 110$ m时(曲线12),为全封闭式防渗墙,曲线近似水平,当 d 由1 m增大至10 m时,渗流量 Q 仅减小0.07%。

进一步分析坝踵处渗透坡降 J_1 的变化特征,其变化曲线如图7所示。

对比图6与7可得,渗流量和坝踵处渗透坡降曲线的变化规律类似,当防渗墙深度 $S_2 = 0 \sim 50$ 、70~100 m时,强透土层厚度由1 m增加至10 m时,坝踵处渗透坡降 J_1 增大0.31%~11.67%;当防渗墙深度 $S_2 = 60$ m时, d 由1 m增加至10 m时, J_1 增

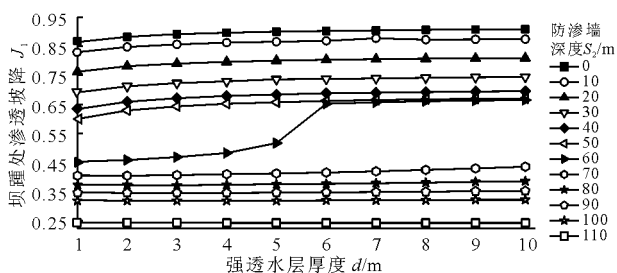


图7 坝踵处渗透坡降随强透土层厚度的变化曲线

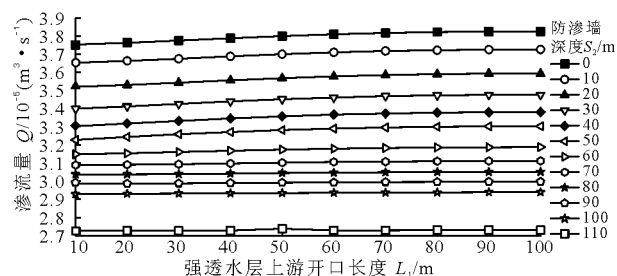


图9 渗流量随上游开口长度的变化曲线

由图10可得,各曲线变化规律类似,变化平缓,波动较小;以上游开口长度 $L_1 = 50$ m为对称轴;(1)当 $L_1 \leq 50$ m时,坝踵处渗透坡降 J_1 随左端开口长度 L_1 增大而增大,增幅为0%~4.51%;(2)当上游开口长度 $L_1 \geq 50$ m时, L_1 从50 m增大至100 m时,坝踵处渗透坡降 J_1 降低1.19%~2.31%。(3)

大46.8%;当防渗墙深度 $S_2 = 110$ m时, d 由1 m增加至10 m时, J_1 降低0.82%。当 d 由5 m增大至6 m时,曲线7对应的渗流量增大26.11%。

作出逸坡降 J_2 的变化曲线如图8所示。

对比图6~8不难得出,3个渗流参数的变化规律类似,出逸坡降 J_2 的特性参照 J_1 和 Q 的变化规律,不再赘述。但出逸坡降明显大于坝踵处渗透坡降, $J_1 = 0.243 \sim 0.908$, $J_2 = 20.837 \sim 21.521$ 。

基于上述规律,进一步分析强透水层的连续性对渗流场的影响,设定3种工况:强透土层上游开口、下游开口、底端开口。

4.3 强透土层连续性分析

4.3.1 强透土层开口在防渗墙上游 作渗流量 Q 随强透土层上游开口长度 L_1 (下文简称“上游开口长度”)的变化曲线如图9所示。

由图9可得,各曲线变化规律类似,曲线平缓。当 $S_1 = 0 \sim 100$ m, Q 随上游开口长度 L_1 的增加而增大,增幅为0.31%~2.36%。当防渗墙深度 $S_1 = 110$ m时,为全封闭式防渗墙, Q 随着 L_1 的增大上下波动,但总体呈增大趋势,增幅为0.15%。

作坝踵出渗透坡降 J_1 随强透土层上游开口长度 L_1 的变化曲线,如图10所示。

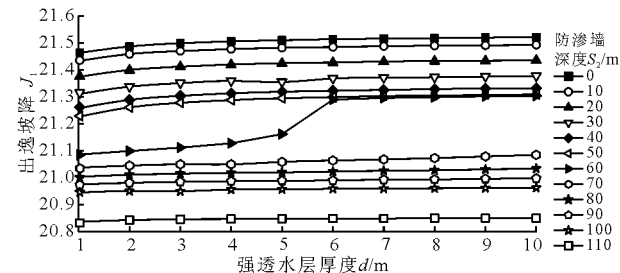


图8 出逸坡降随强透土层厚度的变化曲线

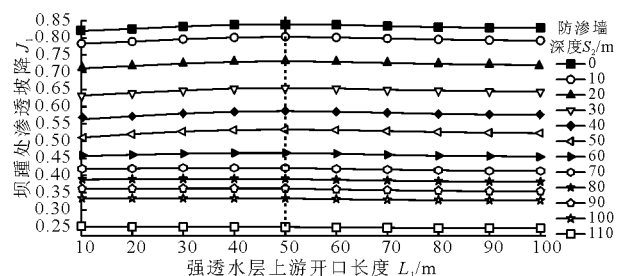


图10 坝踵处渗透坡降随强透土层上游开口长度的变化曲线

当防渗墙深度 $S_2 = 110$ m时,为全封闭式防渗墙,对应的 J_1 较小(0.247~0.25)。

当强透土层厚度 $d = 1$ m,深度 $S_1 = 55$ m时,作出逸坡降 J_2 的变化曲线如图11所示。

由图11可看出, J_2 与 Q 的变化规律类似。出逸坡降 J_2 随强透土层上游开口长度 L_1 的增大而增加,

增幅为 0.005% ~ 0.2%; 且防渗墙深度 $S_2 = 110$ m 对应的出逸坡降曲线近似水平, 变化幅度最小。

4.3.2 强透水层开口在防渗墙下游 进一步分析渗流量 Q 和渗透坡降随强透水层下游开口长度 L_2 (下文简称“下游开口长度”)的变化规律, 渗流量曲线如图 12 所示。

由图 12 可得, 各曲线变化规律类似, 都以强透水层下游开口长度 $L_2 = 40$ m 为对称轴, 呈先增大后降低的趋势; 当下游开口长度 L_2 由 10 m 增大至 40 m 时, 渗流量 Q 增大 0 ~ 0.71%; 当 L_2 由 40 m 增大至 100 m 时, 渗流量 Q 降低 0.33% ~ 0.59%。且采

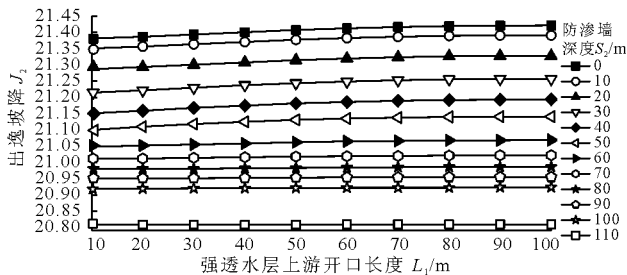


图 11 出逸坡降随强透水层上游开口长度的变化曲线

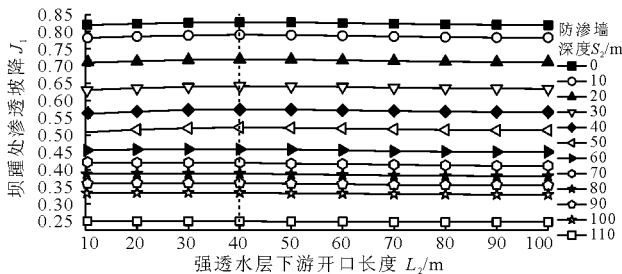


图 13 坝踵处渗透坡降随强透水层下游开口长度的变化曲线

由图 14 可得, 出逸坡降 J_2 随下游开口长度 L_2 的增加而增大, 增幅为 0.06% ~ 0.13%; 且采用全封闭式防渗墙 ($S_2 = 110$ m) 时, J_2 增大最为显著 (0.13%), 其余曲线近似水平。

综上所述, 渗流量 Q 、坝踵处渗透坡降 J_1 、出逸坡降 J_2 曲线变化平缓, 可见强透水层下游开口对渗流影响较小。

4.3.3 强透水层开口在防渗墙底端 进一步分析渗流参数随强透水层底端开口长度 L_3 的变化曲线, 如图 15 所示。

由图 15 可得, 渗流量曲线大致分 3 类, “显著上升曲线”、“平缓上升曲线”、“平缓下降曲线”。(1) 当 $S_2 = 0 \sim 50 < S_1 = 55$ m 时 (防渗墙未穿过强透水层), L_3 由 10 m 增加至 100 m 时, 渗流量增大 2.82% ~ 5.45%; (2) 当 $S_2 = 60 \sim 100 > S_1 = 55$ m 时 (防渗墙穿过强透水层), L_3 由 10 m 增加至 100

用全封闭式防渗墙控渗时 ($S_1 = 110$ m), 控渗效果明显优于其他工况。

作坝踵处渗透坡降 J_1 随强透水层下游开口长度 L_2 的变化曲线如图 13 所示。

对比图 12 与 13 可知, 两者变化规律类似, 以下游开口长度 $L_2 = 40$ m 为对称轴, 在该处达到极大值; 当 L_2 由 10 m 增大至 40 m 时, 坝踵处渗透坡降 J_1 增大 0 ~ 2.76%; 当 L_2 由 40 m 增大至 100 m 时, J_1 降低 0.8% ~ 2.14%。

作出逸坡降 J_2 的变化曲线如图 14 所示。

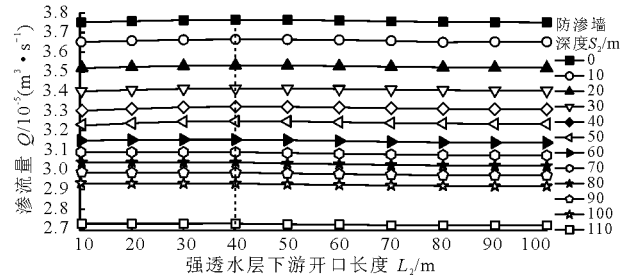


图 12 渗流量随强透水层下游开口长度的变化曲线

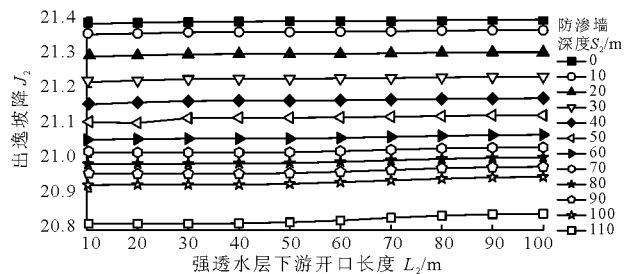


图 14 出逸坡降随强透水层下游开口长度的变化曲线

m 时, Q 增大 0.03% ~ 1.05%; (3) 当 $S_2 = 110$ 时, 为全封闭式防渗墙, L_3 由 10 m 增加至 100 m 时, Q 反而降低 0.07%。

作坝踵处渗透坡降 J_1 随底端开口长度 L_3 的变化曲线如图 16 所示。

由图 16 可得: (1) 当 $S_2 = 0 \sim 50 < S_1 = 55$ m 时, 防渗墙未穿过强透水层, J_1 随 L_3 增加而增大, 增幅为 6.95% ~ 19.73%; (2) 当 $S_2 = 60 \sim 100 > S_1 = 55$ m 时, 防渗墙穿过强透水层, L_3 由 10 m 增大至 100 m 时, J_1 增大 0.28% ~ 3.29%; (3) 当 $S_2 = 110$ m 时, 为全封闭式防渗墙, L_3 由 10 m 增大至 100 m 时, J_1 降低 0.4%。

作出逸坡降 J_2 的变化曲线如图 17 所示。

对比图 15 ~ 17 不难得出, 三者变化规律类似, J_2 的变化规律不再详细赘述。(1) 当 $S_2 = 0 \sim 50 < S_1 = 55$ m 时, J_2 增大 0.28% ~ 0.49%; (2) 当 S_2

$=60 \sim 100 \text{ m} > S_1 = 55 \text{ m}$ 时, J_2 增大 $0.02\% \sim 0.1\%$; (3) 当 $S_2 = 110 \text{ m}$ 时, J_2 反而降低 0.01% 。

前文已经详细分析了强透土层上游、下游、底端开口长度对渗流量 Q 、坝踵处渗透坡降 J_1 、出逸坡降 J_2 的影响规律,但何种开口形式对控渗工程更不利尚不明确,需展开对比分析。

4.3.4 强透土层开口形式分析 以强透土层厚度 $d = 1 \text{ m}$ 、深度 $S_1 = 55$ 、开口长度 $L_1 = L_2 = L_3 = 50 \text{ m}$ 为例,针对强透土层开口形式作对比分析。作不同开口形式下渗流量 Q 随防渗墙深度 S_2 的变化曲线,如图 18 所示。

分析图 18 不难看出, (1) 各曲线变化规律类似, 渗流量 ($Q_{\text{上}}$ 、 $Q_{\text{下}}$ 、 $Q_{\text{底}}$) 随着防渗墙深度 S_2 的增加而减小; S_2 由 0 增大至 110 m , $Q_{\text{上}}$ 、 $Q_{\text{下}}$ 、 $Q_{\text{底}}$ 分别降低 27.95% 、 27.68% 、 28.28% 。 (2) $Q_{\text{上}}$ 、 $Q_{\text{下}}$ 、 $Q_{\text{底}}$ 分别为 $2.738 \times 10^{-5} \sim 3.8 \times 10^{-5}$ 、 $2.722 \times 10^{-5} \sim 3.764 \times$

10^{-5} 、 $2.726 \times 10^{-5} \sim 3.801 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 可见 $Q_{\text{下}}$ 明显低于 $Q_{\text{上}}$ 和 $Q_{\text{底}}$, 下游开口对渗流量 Q 影响最小。 (3) 当 $S_2 = 0 \sim 50 \text{ m}$ 时, 防渗墙未穿过强透土层时, 各曲线并未重合; 当防渗墙穿过强透土层 ($S_2 = 0 \sim 60 \text{ m}$) 时, 各曲线近似重合; 可见当防渗墙穿过强透土层后, 强透土层的开口形式对渗流量影响较小。

当强透土层开口长度 $L_1 = L_2 = L_3 = 50 \text{ m}$ 时, 作坝踵处渗透坡降 J_1 变化曲线如图 19 所示。

对比图 18 与 19 不难看出, 渗流量 Q 曲线和坝踵处渗透坡降 J_1 曲线变化规律类似, 其变化规律不再赘述。此外, $J_{1\text{上}}$ 、 $J_{1\text{下}}$ 、 $J_{1\text{底}}$ 分别为 $0.25 \sim 0.839$ 、 $0.249 \sim 0.827$ 、 $0.25 \sim 0.851$, $J_{1\text{底}} > J_{1\text{上}} > J_{1\text{下}}$, 可见对坝踵处渗透坡降影响从大到小排序为: 底端、上游、下游。

当强透土层开口长度 $L_1 = L_2 = L_3 = 50 \text{ m}$ 时, 作出逸坡降 J_2 变化曲线如图 20 所示。

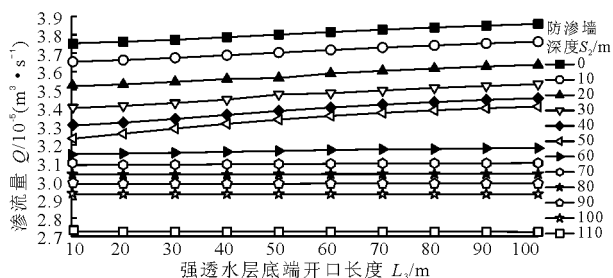


图 15 渗流量随强透土层底端开口长度的变化曲线

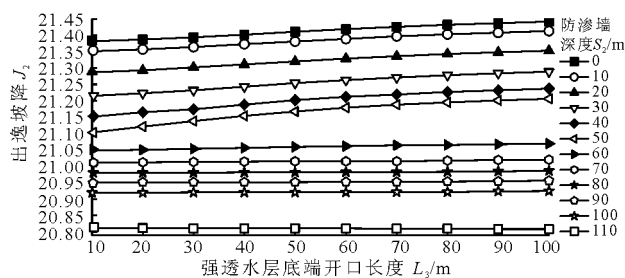


图 17 出逸坡降随底端开口长度的变化曲线

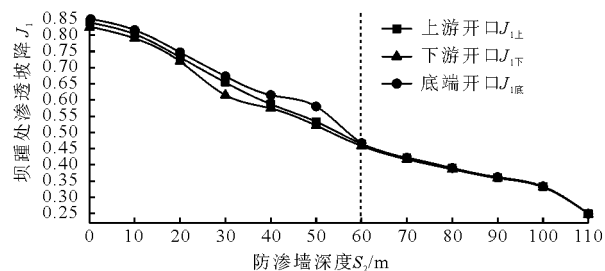


图 19 不同开口形式坝踵处渗透坡降随防渗墙深度变化曲线

对比图 18 ~ 20 可得出, Q 、 J_1 和 J_2 的规律类似, 随着 S_2 的增大而降低。当 S_2 由 0 增大至 110 m 时, $J_{2\text{上}}$ 、 $J_{2\text{下}}$ 和 $J_{2\text{底}}$ 分别降低 2.8% 、 2.7% 和 2.82% 。当 $S_2 = 0 \sim 50 \text{ m} < S_1 = 55 \text{ m}$ 时 (防渗墙未穿过强透水

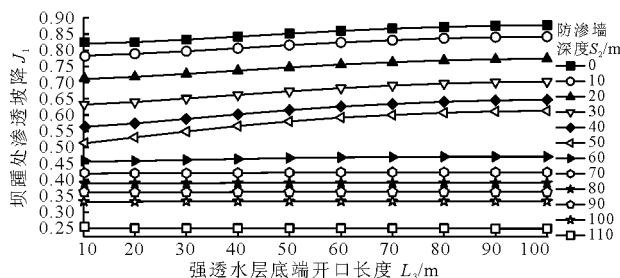


图 16 坝踵处渗透坡降随底端开口长度的变化曲线

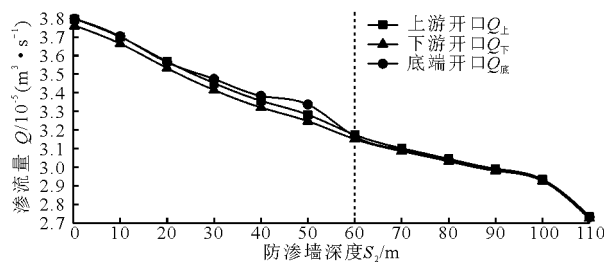


图 18 不同开口形式渗流量随防渗墙深度变化曲线

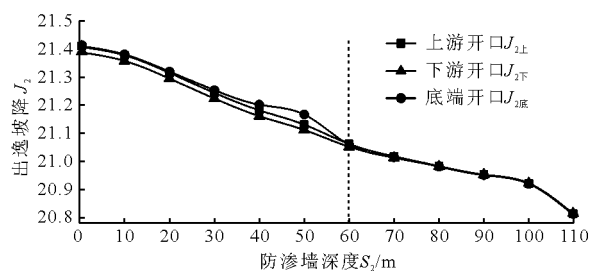


图 20 不同开口形式出逸坡降随防渗墙深度变化曲线

层), $J_{2\text{上}}$ 、 $J_{2\text{下}}$ 、 $J_{2\text{底}}$ 分别为 $21.131 \sim 21.408$ 、 $21.112 \sim 21.389$ 、 $21.167 \sim 21.411$, 可见 $J_{2\text{底}} > J_{2\text{上}} > J_{2\text{下}}$; 当防渗墙穿过强透土层时 ($S_2 = 60 \sim 110 \text{ m} > S_1 = 55 \text{ m}$), 3 曲线近似重合。

5 讨 论

5.1 平缓曲线分析

由 4.3 节可知,在分析强透水层对渗流场的影响规律时,图 9~17 中渗流参数曲线变化平缓,展开如下讨论。

(1)当防渗墙未穿过强透水层时($S_2 = 0 \sim 50 \text{ m} < S_1 = 55 \text{ m}$),防渗墙与上层弱透水层(位于强透水层之上)形成封闭式联合防渗体系,强透水层开口长度的变化对渗流参数影响较弱。

(2)当防渗墙穿过强透水层时($S_2 = 60 \sim 110 \text{ m} > S_1 = 55 \text{ m}$),防渗墙与下层弱透水层(位于强透水层下部)形成封闭式联合防渗体系,强透水层开口长度的改变对渗流参数影响较小。

5.2 防渗墙设置分析

本文深厚覆盖层坝基主要由弱透水层(黏土)构成,局部区域的强透水层为渗流集中通道,为控渗工程中的“薄弱环节”。在分析强透水层特性(S_1 、 d 、 L_1 、 L_2 、 L_3)对各渗流参数的影响时不难得出,当防渗墙穿过强透水层时对应的渗流参数(Q 、 J_1 、 J_2),明显低于未穿过时对应的各参数;此外,当采用全封闭式防渗墙时($S_2 = 110 \text{ m}$),渗流参数都降至最低。因此,针对局部区域存在强透水层的深厚覆盖层地基,防渗墙设置时应穿过强透水层,形成相对封闭的联合控渗体系;若仍不能满足控渗要求时,建议做成全封闭式防渗体系。

6 结 论

基于非饱和土渗流理论,探讨深厚覆盖层坝基中局部强透水层特性对渗流场的影响规律,得出以下 5 点结论。

(1)当强透水层深度大于防渗墙深度时,渗流量、坝踵处渗透坡降和出逸坡降随着强透水层深度增大而减小;反之,随着强透水层深度增大,渗流量逐渐增大,坝踵处渗透坡降先降低后增大,出逸坡降降低。

(2)渗流量、坝踵处渗透坡降、出逸坡降皆随着强透水层厚度的增加而增大;且当防渗墙底端位于强透水层时,渗流参数显著增大。

(3)随着强透水层上游开口长度增大,渗流量和出逸坡降逐渐增大,坝踵处渗透坡降先增大后降低;随着强透水层下游开口长度增大,渗流量和坝踵处渗透坡降先增大后降低,出逸坡降逐渐增大;各渗流参数随强透水层底端开口长度的增加而增大,全封闭式防渗墙除外。

(4)当强透水层处于坝基中间位置,且厚度和开口长度一定时,各渗流参数随防渗墙深度的增加而降低;各开口形式对渗流参数影响从大到小排序为:底端、上游、下游。

(5)针对深厚覆盖层中存在局部强透水层的特殊地基,设置防渗墙时应穿过强透水层,形成相对封闭的联合控渗体系;若仍不能满足控渗要求时,建议做成全封闭式防渗体系。

参考文献:

- [1] 沈振中,田振宇,徐力群,等. 深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.
- [2] ELSAHABI M, NEGM A, ABDEL H M H E T. Performances evaluation of surface water areas extraction techniques using landsat ETM + data: case study Aswan High Dam Lake (AHDL) [J]. Procedia Technology, 2016, 22: 1205-1212.
- [3] 曹洪,张挺,陆培炎. 北江大堤石角段强透水堤基渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 855-855.
- [4] 谢辉. 底部深厚强透水基坑的非稳定渗流数值模拟与控制研究[D]. 广东:广东工业大学, 2007.
- [5] 常明云,赵明,魏秀秀. 强透水砂卵石复杂地层的高压旋摆喷灌浆处理技术[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1409-1414.
- [6] 崔永高. 深厚强透水含水层超大基坑降水群井效应研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 574-579.
- [7] 刘晓庆,陈峰,吴宇峰. 强透水地基上土石坝非饱和渗流数值分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(8): 120-122+125.
- [8] 李桂荣,平文敏,许文峰,等. 强透水地基大型调蓄池开挖与防渗方案优选[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 109-111.
- [9] 叶青. 强透水地层基坑降水开挖变形规律研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [10] 李来祥,舒立华,王兴英. 强透水地层泵站施工降水方案探究[J]. 中国农村水利水电, 2007(7): 115-117.
- [11] 曹洪,张挺,陈小丹,等. 多层强透水地基渗流计算的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1185-1185.
- [12] NING L, WILLIAM J L. Unsaturated soil mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [13] 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]. 浙江:浙江大学, 2006.
- [14] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density; the diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. Geophysics, 1985, 39(6): 770-780.
- [15] LIU Yang, HU Zhigen. An improved iterative method of saturated-unsaturated unsteady seepage numerical simulation[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 405(3): 363-368.