

文章编号:1673-9469(2024)04-0009-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.002

波动水位下河道堤防壤土斜墙截渗分析

赵薇¹,单建军²,杨正玉³,杨斌²,李思远¹,孙树林^{1*}

(1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100;2. 淮河工程集团有限公司,江苏徐州 221400;
3. 江苏省地质矿产局第三地质大队,江苏南京 212000)

摘要: 考虑水位波动和防渗墙的尺寸结构对堤防渗流特性的影响,共设计了28种工况,对比分析波动水位下防渗墙的厚度、防渗墙的嵌入深度和堤基的渗透性对堤防的渗流量、膜后浸润线高度、防渗墙底部及溢出点水力坡降的影响。结果表明,相比防渗墙的厚度变化,增加防渗墙的嵌入深度更能有效控制堤防渗流量、降低膜后浸润线高度和溢出点水力坡降;当嵌入深度为0~2 m时,水力坡降随嵌入深度的增加而减少,且呈现先快后慢的变化趋势,当嵌入深度超过2 m以后,水力坡降随嵌入深度的增加而增加,且在5 m时达到峰值,超过5 m时水力坡降骤降;此外,对于悬挂式防渗墙设计,当坝基渗流量控制在75%时,溢出点水力坡降均小于0.25,防渗墙嵌入深度与坝基渗透系数之间存在强对数线性关系,所建拟合公式可用于类似代建工程防渗墙嵌入深度的初步设计或已建工程的渗流控制评估。

关键词: 波动水位;无粘性砂土;河道堤防;壤土斜墙;渗流分析

中图分类号:TV 641.2+6

文献标识码:A

Seepage Interception Analysis of Loam Slope Walls in Riverbank Levees Under Fluctuating Water Levels

ZHAO Wei¹, SHAN Jianjun², YANG Zhengyu³, YANG Bin², LI Siyuan¹, SUN Shulin^{1*}

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;
2. Huaihe Engineering Group Company, Xuzhou, Jiangsu 221400, China; 3. Third Geological Brigade
of Jiangsu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Nanjing, Jiangsu 212000, China)

Abstract: Considering the influence of water level fluctuations and the dimensional structure of impermeable walls on the seepage characteristics of embankments, 28 scenarios were designed to compare and analyze the effects of the thickness of impermeable walls, the embedding depth of impermeable walls, and the permeability of the embankment based on the seepage flow, the height of the seepage line behind the membrane, and the hydraulic slope at the bottom and overflow point of impermeable walls under fluctuating water levels. The results indicate that, compared to changes in the thickness of impermeable walls, increasing the embedding depth of impermeable walls can more effectively control seepage flow of embankments, reduce the height of the seepage line behind the membrane, and decrease the hydraulic slope at overflow points. For embedding depths ranging from 0 m to 2 m, the hydraulic slope decreases initially with increasing depth, showing a trend of rapid decline followed by a slower decrease. Beyond 2 m, the hydraulic slope increases with depth, reaching its peak at 5 m before sharply declining when exceeding 5 m. Additionally, in suspended-type impermeable wall designs, when controlling the dam base seepage at 75%, the hydraulic slope at the overflow point remains below 0.25. A robust logarithmic-linear relationship exists between the embedding depth of the impermeable wall and the dam

收稿日期:2023-12-01

基金项目:中央高校科研业务费专项资金资助项目(2109B42214);江苏省研究生科研与实践创新及项目(SJCX23_0181);国家自然科学基金资助项目(41674113)

作者简介:赵薇(1996-),女,贵州凯里人,硕士研究生,主要从事堤防渗流分析与控制方面的研究。

*通信作者:孙树林(1963-),男,江苏建湖人,博士,教授,主要从事岩石力学与工程、环境岩土工程方面的研究。

表 1 数值模型中不同材料渗透系数

Tab.1 Permeability coefficients of different materials in the numerical model

材料	坝体	坝基	弱透水层	防渗斜墙	土工布
渗透系数/ ($m \cdot s^{-1}$)	5×10^{-5}	2.7×10^{-5}	4.4×10^{-7}	1.12×10^{-8}	5×10^{-10}

1.2 波动水位施加过程

利用 ABAQUS 有限元建立网格模型,模型采用空隙流体/应力耦合的 CPE8P 八节点平面应力四边形单元,其中单元数为 1 487 个。模型使用位移约束,坝基两侧边界条件为水平位移约束,坝基底部边界为水平和竖向位移约束,上游坡面和坝基表面为已知水头边界,下游坡面和坝基表面为可能溢出边界,其余为不透水边界(图 3);模型除了受重力荷载外,迎水侧还受波浪压力作用,即变化水头荷载,该变化荷载通过创建随时间呈周期变化的孔隙压力来实现,并以孔隙压力的形式施加到计算模型中。

堤防上游静水位为设计洪水位,取 4 m。计算风速 V_{max} 取汛期期间的最大风速 22.5 m/s,等效风区长度取 1 000 m,流域平均水深 H_0 取 4 m,堤防前迎水面水深 H_m 近似取 4 m;采用莆田试验站经验公式^[20] 计算该研究区波浪的平均高度 h_m 为 0.327 m,平均波浪周期 T_m 取 2.54 s,平均波长 L_m 为 10.13 m。堤防迎水侧坡面粗糙渗透系数 k_{Δ} 取 0.85,经验系数 k_w 取 1.25,坡度系数 m 取 2.5,平均浪爬高度按规范中公式计算得 $R_m = 0.72$ m,最大风壅水面高度 $e_{max} = 0.023$ m。堤防迎水侧水位在风力作用下随时间呈周期变化,此处用正弦函数近似模拟波浪水位周期变化^[21],见式(1)。

$$H(t) = H_0 + (R_m + e) \sin(2\pi t/T_m) \quad (1)$$

式中,静水头 H_0 取 4 m,平均浪爬高度 R_m 取 0.72 m, e 取最大风壅水面高度 0.023 m, t 为水位变化时间(s), T_m 取 0.72 s,则波浪水头作用下,堤防上游水头边界函数为

$$H(t) = 4 + (0.72 + 0.023) \sin(2\pi t/0.72) \quad (2)$$

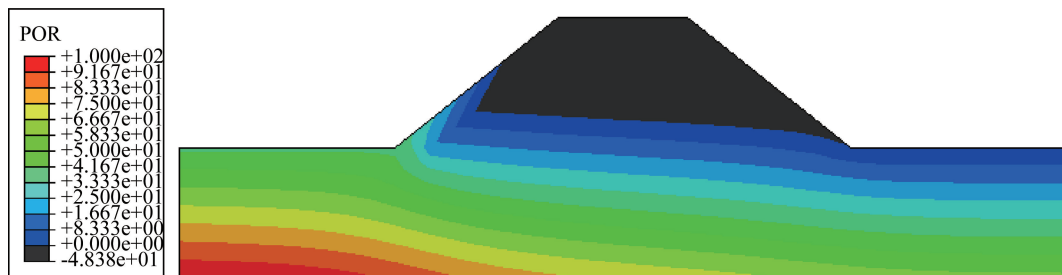


图 3 水位 4 m 时孔隙压力云图

Fig.3 Cloud map of pore pressure at a water level of 4 m

1.3 计算方案

防渗措施主要指用渗透系数较小的材料在坝体和坝基内部做成防渗体,通过改变防渗体的厚度、嵌入深度来降低通过坝身和坝基的渗流量、水力坡降和膜后浸润线的高度。

1.3.1 土工布厚度等量换算

为保证有限元计算精度,划分单元的长宽比不可过于悬殊,而实际工程中土工布的厚度只有 1 mm,若以此长度来划分有限单元,不仅计算精度不能保证,且单元畸形易导致计算不收敛。因此,在实际计算应用中必须增大土工布的计算厚度,满足计算精度要求,通过土工布的单宽渗流量为^[22]

$$Q_l = k_l i = k_l \frac{\Delta H_l}{T_l} \quad (3)$$

式中: Q_l 为土工布单宽渗流量(m^3/s); k_l 为土工布渗透系数(m/s); i 为土工布水力比降; ΔH_l 为土工布上下游水头差(m); T_l 为土工布的厚度(m)。

由式(3)可知,土工布的单宽渗流量 Q_l 与渗透系数 k_l 、土工布的厚度 T_l 有关,将渗透系数 k_l 、土工布的厚度 T_l 同时乘以相同倍数,对渗流量计算结果没有影响,因此,可以通过等效变换解决单元畸形问题。本次计算将渗透系数为 $1 \times 10^{-12} m/s$ 、厚度为 1 mm 的土工布等效为厚度 0.5 m,渗透系数 $5 \times 10^{-10} m/s$ 的防渗单元。

1.3.2 防渗墙厚度

堤防工程中防渗墙的设计一般以 20 年一遇洪水水位作为设计水位,防渗墙的厚度决定了堤防抵抗渗透破坏的能力,防渗墙越厚其抗渗透变形的能力越强,但防渗墙过厚会导致施工成本增加,墙体厚度可按式(4)估算^[23]

$$d = \frac{\Delta H}{J_{\text{允}}} \quad (4)$$

式中: d 为墙体厚度(m), ΔH 为上下游水头差(m),本文所研究无粘性砂土堤防的上下游最大水头差 ΔH 为 4.74 m; $J_{\text{允}}$ 为墙体材料的允许坡降,防

渗墙材料为壤土,取值范围为4~6,此处取4,估算所需墙体厚度为1.19 m。本文以0.5、1、2、3 m四种厚度进行研究。

1.3.3 防渗墙嵌入深度

由于无粘性砂土存在防洪性和抗渗稳定性差的工程地质问题,因此在砂土层上筑堤需将防渗墙常嵌入至不透水层;可大量工程实践发现,防渗墙的深度并不是越深越好,而是存在一个临界值。防渗墙的深度超过该临界值时,防渗墙底部与不透水层之间的通道口减小,水力坡降急剧增大,易在防渗墙底部出现局部渗透破坏。研究区坝基主要为双层结构,上层由松散细砂组成,平均层厚为5 m;下层为弱透水层,厚度为1 m,由于弱透水层渗透系数为土层渗透系数的 $\frac{1}{100}$,可视为相对不透水层。在研究防渗墙嵌入深度时,最大的研究深度设置到弱透水层处即可,故采用0、1、2、3、4、5、6 m的嵌入深度,并与不设置防渗墙的状况进行对比分析。

1.3.4 研究参考点选取

由图4可以看出,未设置防渗墙时,坡面迎水侧水位波动处和坝脚溢出点流速较大,水力坡降集中;设置防渗墙后,由于防渗墙渗透性差,水流沿着防渗墙向下渗透至防渗墙底部并发生绕渗,该处流速较大,水力坡降集中,易发生局部渗透变形破坏的情况,故选择防渗墙底部和坝脚溢出点两处作为研究参考点;为分析波动水位对防渗墙

底部和溢出点渗流速度的影响,设波动水位作用时长为10个周期,如图5所示,防渗墙底部和溢出点流速随时间呈锯齿状变化,防渗墙底部流速在5 s后呈周期性变化,其峰值和谷值趋于稳定;溢出点流速在40 s后呈周期性变化,峰值和谷值趋于稳定。为此,在后续的模拟研究中防渗墙底部和溢出点的水力坡降均取峰值。依据防渗墙设计原则,确定了防渗墙设计的模拟工况见表2,结合工程实际剖面,采用已知数据及实验数据,对堤防的渗流情况进行数值模拟。

2 计算结果分析

堤防工程的设计需要对渗流场内水力坡度、渗流量、膜后浸润线位置等因素进行计算分析,从而选择出满足防渗要求且经济合理的防渗方案。斜墙背水侧坝身和坝基主要为无粘性砂土,在水力作用下易发生渗透破坏。增加防渗墙的嵌入深度及厚度,能延长绕渗路径,降低水力坡降和渗流量,从而满足防渗要求;模拟计算不同工况下膜后浸润线高度、渗流量、防渗墙底部及溢出点水力坡降,并根据计算结果绘制曲线图如图6—图10。

2.1 渗流量和膜后浸润线与嵌入深度的关系

研究区内砂质堤防不设防渗墙时的渗流量为 $0.351 \text{ m}^3/\text{h}$,当嵌入深度为1 m时,渗流量为 0.209 、

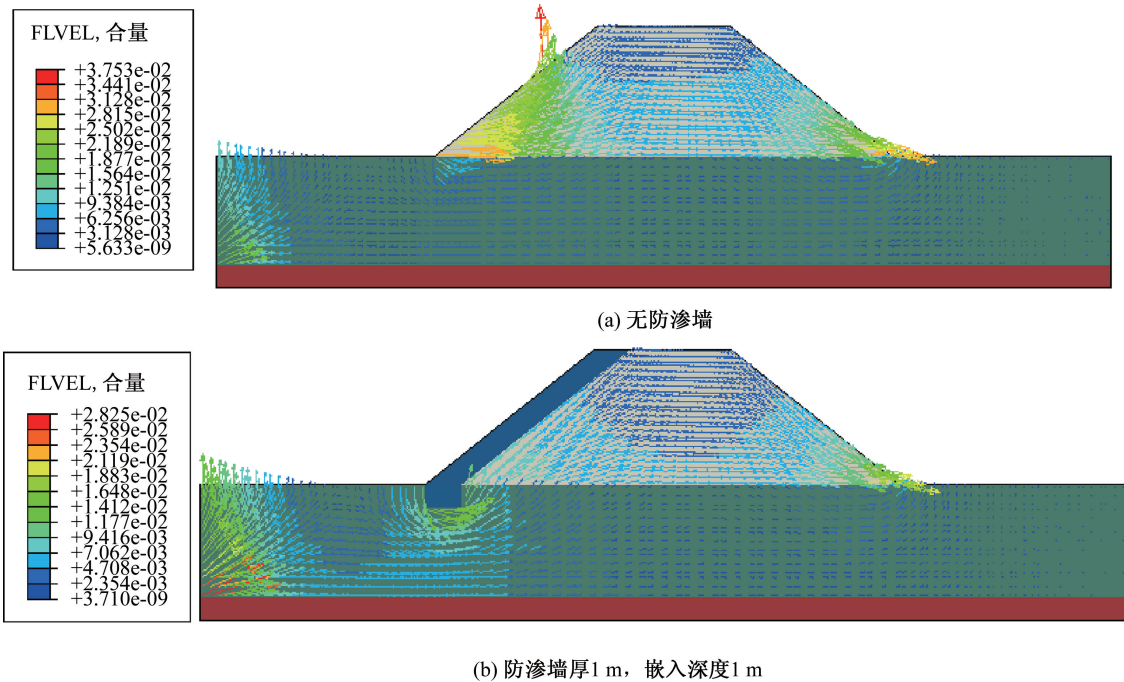


图4 不同工况下堤防渗流场演化矢量图

Fig. 4 Evolution vector diagram of dam seepage field under different working conditions

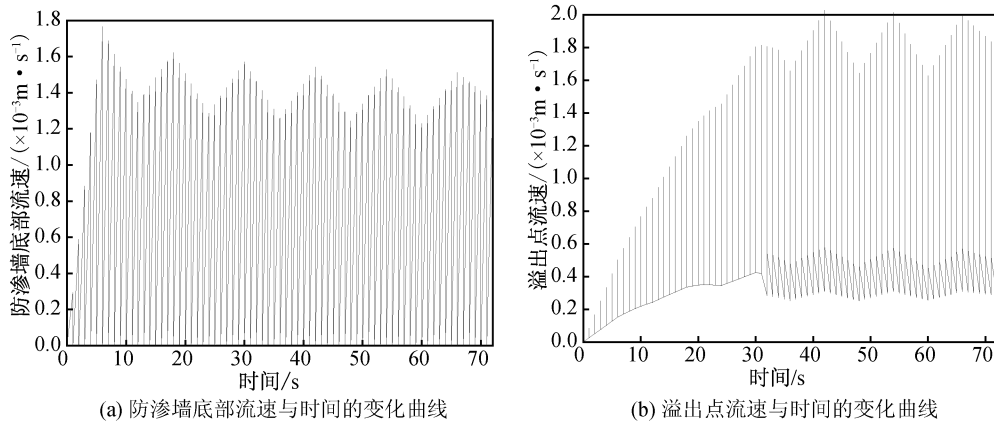


图 5 防渗墙厚 1 m, 嵌入深度 1 m 渗流场演化流速图

Fig. 5 Flow velocity diagram of seepage field evolution for impermeable wall with a thickness of 1 m and an embedded depth of 1 m

表 2 研究区防渗墙设计模拟工况

Tab. 2 Simulated working conditions of the cut off wall for the design in the research area

工况	防渗墙厚度/m	防渗墙嵌入深度/m	工况	防渗墙厚度/m	防渗墙嵌入深度/m	工况	防渗墙厚度/m	防渗墙嵌入深度/m
1	0.5	0	11	1.0	3	21	2.0	6
2	0.5	1	12	1.0	4	22	3.0	0
3	0.5	2	13	1.0	5	23	3.0	1
4	0.5	3	14	1.0	6	24	3.0	2
5	0.5	4	15	1.0	0	25	3.0	3
6	0.5	5	16	2.0	1	26	3.0	4
7	0.5	6	17	2.0	2	27	3.0	5
8	1.0	0	18	2.0	3	28	3.0	6
9	1.0	1	19	2.0	4			
10	1.0	2	20	2.0	5			

0.198、0.189、0.174 m³/h, 渗流量降低了 40.22%、43.20%、46.08%、50.18%, 见图 6, 说明增加防渗墙的厚度和嵌入深度能够有效减少渗流量; 但相比增加防渗墙厚度而言, 增加防渗墙嵌入深度, 延长绕渗路径, 更能起到良好的防渗作用。随着防渗墙厚度和嵌入深度的增加, 渗流量在不断减少, 当防渗墙嵌入深度为 5 m 时防渗墙底部与弱透水层接触, 防渗墙下部绕渗量几乎为 0, 水流仅能从墙体穿过, 渗流量大幅度降低。

膜后浸润线高度变化规律和渗流量呈现相同的变化规律, 见图 7。嵌入深度为 0 m 的工况时, 膜后浸润线高度分别为 2.406、2.319、2.170、2.066 m, 增加防渗体厚度对于膜后浸润线高度的降低并没有显著的效果; 嵌入深度为 1 m 的工况时, 膜后浸润线高度分别为 2.132、2.064、1.931、1.834 m, 浸润线高度分别降低 0.274、0.255、0.239、0.232 m; 当防渗墙嵌入深度到达 5 m 时, 膜后浸润线几乎为 0 m, 出现这种现象的主要原因在于防渗墙与无粘性砂土之间渗透性相差 10³ 倍, 在水头压力及重力

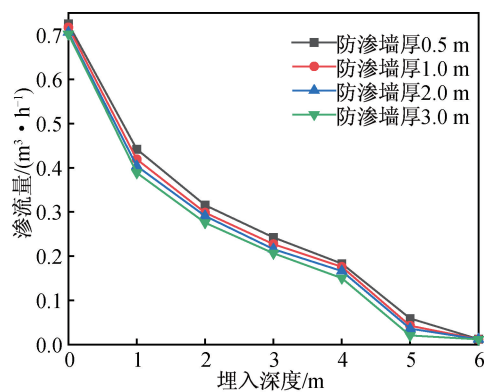


图 6 渗流量与嵌入深度的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of seepage discharge with embedded depth

的作用下, 水流更倾向于向无粘性砂土层中渗透, 故沿着防渗墙向下运动并在底部绕渗, 增加防渗墙嵌入深度能够延长渗流路径, 降低渗流速度, 减少渗流量和膜后浸润线高度, 防渗效果更佳。

2.2 渗流量控制率与嵌入深度的关系

防渗墙嵌入深度和厚度的变化均会对渗流量

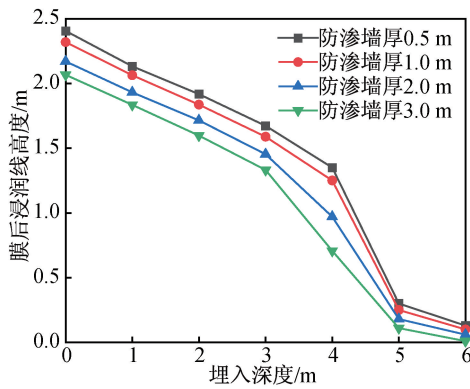


图7 浸润线高度与嵌入深度关系

Fig. 7 Relationship between infiltration line height and embedded depth

造成影响,从而影响渗流量控制率 ρ ,为满足防渗要求,其渗流量控制率要达到75%以上。

$$\rho = \frac{Q_0 - Q_x}{Q_0 - Q} \quad (5)$$

式中: Q_x 、 Q_0 、 Q 分别为悬挂式防渗墙、无防渗墙、和截断式防渗墙所对应的渗流量。

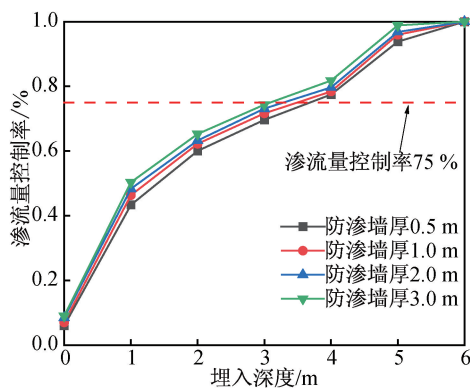


图8 渗流量控制率与嵌入深度的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of seepage control rate with embedded depth

由图8可知,渗流量控制率随着防渗墙嵌入深度和厚度的增加而递增,且呈现先快后慢的增长趋势。当防渗墙嵌入深度达到5 m时,防渗墙底部与弱透水层接触,渗流量控制率均大于90%,说明防渗墙的嵌入深度越大,厚度越厚,防渗性能越好。但相同嵌入深度时,增加防渗墙的厚度对于提高渗流量控制率并不明显。如在嵌入深度为1 m的工况下,当防渗墙厚度为1 m时,渗流量控制率为43.35%;防渗墙厚度为2 m时,渗流量控制率为46.24%;防渗墙厚度增加1倍,渗流量控制率仅提升2.89%,这主要原因是防渗墙未嵌入至弱透水层之前,绝大部分渗流量为防渗墙底部的绕渗,增加防渗墙的厚度虽能提高防渗墙的抗渗能力,

但不能有效降低防渗墙底部绕渗量,而加大防渗墙的嵌入深度能够延长渗流路径,有效控制渗流量。

2.3 水力坡降

2.3.1 防渗墙底部水力坡降

在以往的工程案例中认为,当坝基的渗透性较大时,需把防渗墙嵌入不透水层内0.5至1 m,形成截断式防渗墙,才能有效防渗,但这不仅会增加工程成本也会导致施工困难。从图9可知,嵌入深度为0 m时,防渗墙底部水力坡度分别为0.684、0.551、0.423、0.384 m,水力坡度随着防渗墙厚度的增加而降低;当防渗墙厚度超过2 m时,增加防渗墙厚度,其底部水力梯度变化幅值降低,即防渗墙的厚度存在一个最佳值。水力梯度随着防渗墙厚度降低的原因在于防渗墙的厚度越大,抗渗透性越强,通过防渗墙的渗流量减少,从而水力梯度降低;与此同时,防渗墙厚度增加也会增加渗流路径长度,从而导致渗流速度降低,这是防渗墙底部水力梯度减少的另外一个原因。防渗墙嵌入深度为0~2 m时,防渗墙底部水力坡降随着防渗墙嵌入深度的增加而降低;当嵌入深度超过2 m时,其底部水力坡降又缓慢增加,直到防渗墙嵌入深度至5 m时(弱透水层),水力坡降达到最大值,随后又骤降。防渗墙底部水力坡降随嵌入深度先降后升再降的主要原因是:随着防渗墙嵌入深度的增加,渗流路径延长,流速和流量降低,水力梯度减小;当防渗墙嵌入深度超过无粘性砂土层一半时,防渗墙底部渗流通道有效流动面积减小,水力半径缩减,渗流速度增加,从而水力坡度随着嵌入深度的增加而增大;当深度到达5 m时,防渗墙与弱透水层接触,其下部

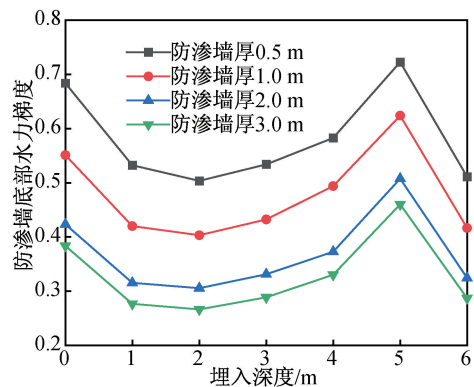


图9 防渗墙底部水力坡降与嵌入深度的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of hydraulic gradient with embedded depth at the bottom of the anti-seepage wall

的渗流通道极小,将产生较大的渗流速度,形成较大的水头损失,使防渗墙下部水力坡降达到峰值;防渗墙嵌入弱透水层后,其端部绕渗流量骤降,水力梯度降低。因此,防渗墙的嵌入深度并非越深越好,而是存在一个最优深度。

2.3.2 溢出点水力坡降

从图1可知 d_5 、 d_{20} 分别为0.09和0.32,不均匀系数 C_u 为5.13,曲率系数为 C_c 为1.05,土粒比重 G_s 为2.65,孔隙率 n 为0.331,渗透破坏类型为管涌,由式(6)和式(7)^[24]可计算出临界水力坡降 i_{cr} 为0.455,允许水力坡降 $[i]$ 为0.227。

$$[i] = \frac{i_{cr}}{F_s} \quad (6)$$

$$i_{cr} = 2.2 \times (G_s - 1)(1 - n)^2 \times \frac{d_5}{d_{20}} \quad (7)$$

式中: $[i]$ 为允许水力坡降; i_{cr} 为临界水力坡降; n 为孔隙率; F_s 为安全系数,取2; G_s 为土粒比重; d_5 、 d_{20} 是土颗粒含量分别为5%和20%时所对应的粒径(mm)。

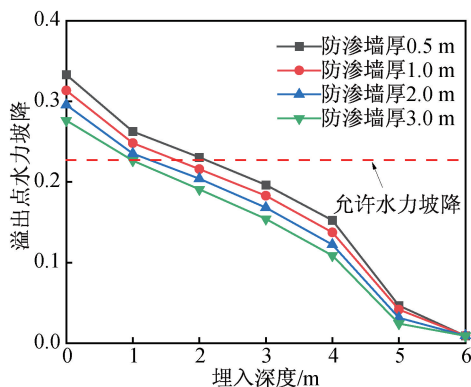


图10 溢出点水力坡降与嵌入深度的变化曲线
Fig. 10 Variation curve of hydraulic gradient with embedded depth at the overflow point

从图10可知,坝脚溢出点的水力坡降随着防渗墙嵌入深度的增加而减小,当防渗墙的嵌入深度至5 m时,形成截断式防渗墙,溢出点水力坡降几乎为0。在未设防渗墙的工况下,坝脚溢出点水力坡降为0.333、0.314、0.297、0.276。防渗墙嵌入深度为1 m时,各溢出点水力坡降分别为0.263、0.248、0.235、0.226,溢出点水力坡降下降了21.14%、20.82%、20.45%、18.06%,说明增加防渗墙的嵌入深度及厚度能够降低坝脚溢出点的水力坡降,从而有效控制堤防发生渗透破坏。由图10也可以看出,当防渗墙嵌入深度相同时,增加防渗墙的厚度对于溢出点水力坡降的影响不大。

当设计防渗墙厚度为2 m,嵌入深度为1 m时,溢出点水力坡降满足设计要求,继续增加防渗墙的嵌入深度或厚度,不仅增加施工成本与难度,还会增加防渗墙底部水力坡降与渗流速度,使防渗墙底部细颗粒被冲向下游部位,形成局部空洞,渗透性进一步增大,不利于堤防的渗透稳定性。

2.4 渗流量及溢出点水力坡降控制讨论

将坝基的渗透系数分别假定为 1×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-4} 、 5×10^{-5} 、 1×10^{-5} 、 1×10^{-6} m/s,探究坝基渗透系数对堤防渗流场的影响。如图11(a)可知,随着渗透系数的减小,单位时间内通过坝基的渗流量降低;当坝基渗透性较高时(大于 5×10^{-5} m/s),需要足够的嵌入深度才能达到理想的渗流量控制效果。例如,坝基渗透系数取 1×10^{-3} m/s时,防渗墙的嵌入深度需达到4.5 m,与坝基厚度之间的相对防渗深度需要大于0.9,才能满足渗流量控制率要求;当坝基渗透系数较低时(小于 1×10^{-5} m/s),较小的防渗深度便能达到理想的渗流量控制效果,例如坝基渗透系数取 1×10^{-6} m/s时,防渗墙嵌入深度只需大于1.5 m就能使渗流量控制率大于75%,如图11(b)。截断式防渗墙虽然能达到理想的防渗效果,但研究区属于雨源性山洪河道,洪水主要集中在主汛期(夏季),秋冬春季一般少雨,截断式防渗墙会造成过度防渗,增加施工成本和施工难度,并不是最佳防渗方案。堤防工程设计时,根据工程要求,由可接受的渗流量及溢出点的水力梯度来确定防渗墙的最小深度。对于渗透破坏形式为管涌,级配连续的无粘性土,参考相关工程经验^[25]可知,坝脚溢出点允许水力坡降取值为0.15~0.25,取0.25为临界允许水力坡降。提取图11(b)中不同渗透性下渗流量控制率等于75%的防渗墙嵌入深度和图11(c)中不同渗透性下溢出点水力坡降等于0.25的防渗墙嵌入深度,绘制防渗墙嵌入深度与坝基渗透系数的散点图,见图11(d)。由于渗透系数变化范围较大,采用半对数坐标系对数据点进行拟合可分别得到:

$$H_1 = 7.749 + 0.467 \ln k, R_1^2 = 0.997 \quad (8)$$

$$H_2 = 7.453 + 0.621 \ln k, R_2^2 = 0.997 \quad (9)$$

式(8)和式(9)的相关系数均达0.997,表明堤防渗流控制率为75%及临界允许水力坡降为0.25时,防渗墙嵌入深度与渗透系数之间强对数线性相关。由图11(d)可知,防渗墙嵌入深度与

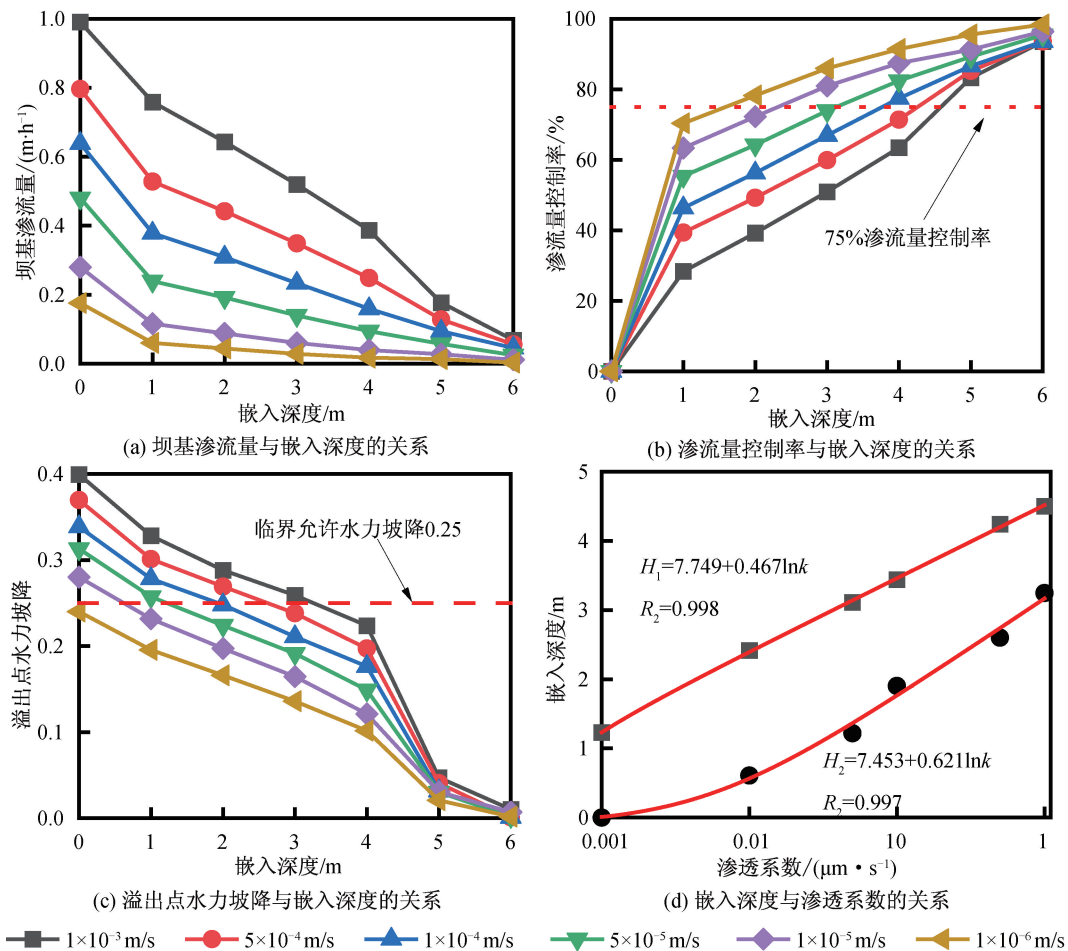


图 11 坝基渗流量、渗流量控制率、堤防溢出点水力坡降及渗透系数与嵌入深度的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of dam foundation seepage discharge, seepage flow control rate, hydraulic gradient of embankment overflow point, and permeability coefficient with embedded depth

坝基渗透性呈对数线性递增,且曲线 H_2 整体在曲线 H_1 下方,说明渗流量控制率为 75% 时,其溢出点水力坡降均小于 0.25,满足设计要求。对无粘性砂质坝基进行初步地质勘察并获得坝基渗透系数后,可利用式(8)获得渗流量控制率为 75% 时对应的防渗墙嵌入深度,供防渗墙初步设计时快速选择。此外,对于已建的类似堤防工程,亦可通过坝基渗透系数或防渗墙嵌入深度,结合式(8)和式(9),初步判断堤防的防渗效果和溢出点水力坡降,若得到的数据点位于图 11(d) 所示的 H_1 曲线下方,则表明该工程坝基渗流量控制率未达到 75%;若数据点位于曲线 H_1 和曲线 H_2 之间,则表明该工程溢出点水力坡降满足临界允许水力坡降 0.25 要求,但渗流量控制率低于 75%,说明坝基防渗控制效果较差。

3 结论

本文对波动水位下壤土斜墙堤防的渗透特性

进行了多工况的计算分析,研究不同防渗墙的嵌入深度、防渗墙的厚度和坝基渗透性对坝体渗流场的影响,所得结论如下:

1) 随着防渗墙厚度和嵌入深度的增加,坝基的渗流量、土工膜后浸润线高度和溢出点水力坡降不断减小,相比防渗墙的嵌入深度,防渗墙厚度变化对防渗性能的提升并不明显。

2) 防渗墙嵌入深度为 0~2 m 时,防渗墙底部水力坡降随防渗墙深度的增加而降低,且变化趋势为先快后慢;当防渗墙嵌入深度超过 2 m 时,防渗墙底部水力坡降随着嵌入深度的增加而增大,直至 5 m 时,防渗墙底部水力坡降到达峰值,随后又逐渐降低。因此,对于有限深度的层压透水层坝基,防渗墙的嵌入深度并不是越深越好,而是存在一个临界值。

3) 当坝基渗流控制率为 75% 时,防渗墙嵌入深度与坝基渗透系数之间呈强对数线性关系,且溢出点水力坡降均小于 0.25。本文提出的拟合公

式可用于类似水文地质条件的代建工程的防渗墙嵌入深度的初步设计或已建工程的渗流控制评估。

参考文献:

- [1] GREGORETTI C, MALTAURO A, LANZONI S. Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(11):868-879.
- [2] JIANG X G, ZHU Z Y, CHEN H Y, et al. Natural dam failure in slope failure mode triggered by seepage[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 698-723.
- [3] CUI Y F, ZHOU X J, GUO C X. Experimental study on the moving characteristics of fine grains in wide grading unconsolidated soil under heavy rainfall[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(003):417-431.
- [4] XIE Q Y, LIU J, HAN B, et al. Experimental and numerical investigation of bottom outlet leakage in earth-fill dams[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, 33(3): 04019037.
- [5] JIANG X G, WEI Y W, WU L, et al. Laboratory experiments on failure characteristics of non-cohesive sediment natural dam in progressive failure mode[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 1-14.
- [6] MAN X, SHA G, HU S, et al. Experimental study on permeability characteristics of geotubes for seepage analysis on safety assessment of dams[J]. *Structural Durability & Health Monitoring*, 2020, 14(4): 339.
- [7] 谢兴华,王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(9):2708-2712.
- [8] 党发宁,田红梅,王振华. 基于平衡防渗原理的土石坝防渗帷幕优化设计[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(4):44-48,64.
- [9] WEN L F, LI Y L. Seepage control effect of a concrete face rockfill dam on a deep overburden foundation[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2020, 531(1): 012038.
- [10] YE S H, DAN H B, TANG Y D, et al. The application of vertical anti-seepage in modern landfill[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 610: 1751-1755.
- [11] 黄梅琼,柴军瑞,白勇,等. 深覆盖层地基防渗措施对渗流场影响数值分析[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(10):126-128.
- [12] SALMASI F, NOROUZI R, ABRAHAM J, et al. Effect of inclined clay core on embankment dam seepage and stability through lem and fem[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(6): 6571-6586.
- [13] FAEZAMPOUR A, SALMASI F, MANSURI B. Optimum size for clay core of Alavian earth dam by numerical simulation[J]. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 2014, 5(3):240-246.
- [14] SRIVASTAVA A, BABU G L S, HALDAR S. Influence of spatial variability of permeability property on steady state seepage flow and slope stability analysis[J]. *Engineering Geology*, 2010, 110(3-4):93-101.
- [15] JADID R, MONTOYA B M, BENNETT V, et al. Effect of repeated rise and fall of water level on seepage-induced deformation and related stability analysis of Princeville levee[J]. *Engineering Geology*, 2020, 266: 105458.
- [16] CHEN X, ZHANG X W, CHEN J L, et al. Seepage and stability analysis of unsaturated core-wall earth dam with fluctuating water level[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 609-613.
- [17] 江沅,王丽艳. 耿湾淤泥堆场粘土斜墙坝稳定渗流场有限元分析[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(12): 78-80.
- [18] 郎金慧. 粘土斜墙在双拥水库加固中的应用[J]. *江淮水利科技*, 2011(04): 10+26.
- [19] 姜海波. 复合土工膜心墙与斜墙高土石坝应力应变研究[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(01): 53-57+76.
- [20] 中华人民共和国水利部. 碾压式土石坝设计规范:SL 274—2002[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [21] 李银发. 随机波作用下土质边坡动态稳定分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2009.
- [22] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社 2000:130.
- [23] 高钟璞. 大坝基础防渗墙[M]. 北京:中国电力出版社,2000:22,31.
- [24] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [25] 顾慰慈. 堤防工程设计计算简明手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.

(责任编辑 周雪梅)