

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.017

超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度研究

刘雨婷,王照杰,王睿齐,罗玉龙

(河海大学水利水电学院)

摘要:针对现有研究缺少含隔水层超深厚多层地基防渗墙最优深度分析、高外水压力下的渗流规律尚不明确的问题,以某水电工程为依托,建立了垂直防渗概化模型,通过分析不同防渗墙深度的坝基渗流场,探讨了超深厚复杂多层地基中防渗墙深度变化对坝基渗流场的影响规律,并在此基础上,提出了同时满足土体渗透稳定和渗流量控制标准的防渗墙最优深度。研究表明,超深厚复杂多层地基中是否有隔水层对防渗墙端部最大坡降的演变规律影响显著:当坝基不含隔水层时,防渗墙端部最大坡降随贯入比的增大呈 U 形变化趋势,其中当贯入比小于 0.2 或大于 0.7 时变化显著;当坝基含隔水层时,在隔水层以上,防渗墙端部最大坡降随贯入比的增大呈 U 形变化趋势,当贯入比小于 0.2 或大于 0.7 时变化显著;在隔水层中,防渗墙端部最大坡降随贯入比的增大快速减小;在隔水层以下时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比的增大缓慢增大,当贯入比大于 0.7 时,端部最大坡降快速增加。考虑超深厚覆盖层地基深部可能存在的不均匀性和不确定性,结合已有工程案例,最终建议防渗墙深度为 200 m。

关键词:深厚覆盖层;多层地基;悬挂式防渗墙;最优深度;渗透稳定

Research on optimal depth of cutoff walls in ultra-deep complex multilayer foundations

Liu Yuting, Wang Zhaojie, Wang Ruiqi, Luo Yulong

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: In view of the problems that existing research lacks an analysis on the optimal depth of cutoff walls in ultra-deep multilayer foundations containing an impermeable layer, and the influence laws of seepage under high external water pressure remain unclear, a generalized vertical anti-seepage model was established based on a hydropower project. By analyzing the seepage fields of the dam foundation under different cutoff wall depths, the influence laws of cutoff wall depth variations on the seepage field of the dam foundation in ultra-deep complex multilayer foundations were discussed, and on this basis, an optimal cutoff wall depth satisfying the standards of both soil seepage stability and seepage discharge control was proposed. The results indicate that the presence or absence of an impermeable layer in ultra-deep complex multilayer foundations significantly influences the evolution laws of the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip. When the dam foundation does not contain an impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip shows a U-shaped trend with an increase in the penetration ratio and changes significantly when the penetration ratio is less than 0.2 or greater than 0.7. When the dam foundation contains an impermeable layer, above the impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip shows a U-shaped trend with an increase in the penetration ratio and changes significantly when the penetration ratio is less than 0.2 or greater than 0.7; within the impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip decreases rapidly with an increase in the penetration ratio; below the impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip increases slowly with an increase in the penetration ratio and increases rapidly when the penetration ratio is greater than 0.7. Considering the possible inhomogeneity and uncertainty in the deep parts of the ultra-deep overburden foundation, combined with existing engineering cases, a final cutoff wall depth of 200 m is recommended.

Key words: deep overburden foundation; multilayer foundation; suspended cutoff wall; optimal depth; seepage stability

深厚覆盖层的地基结构特征是决定悬挂式防渗墙最优深度的关键因素。目前,针对防渗墙埋深对渗流场分布规律的影响有不同的认识,主要存在两种观点^[1]:一种观点侧重于防渗墙对整体渗流的阻截,认为增大防渗墙深度可有效延长渗流路径,降低覆盖层内部水力坡降,提升整体渗透稳定性;另一种观点则关注防

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502603);国家自然科学基金项目(51679070);中国科学院青海盐湖研究所基础研究青年创新交叉团队项目(isIJCTD-2022-2);湖南省水利科技项目(XSKJ2022068-37,XSKJ2024064-41)

作者简介:刘雨婷(2002—),女,博士研究生,主要从事岩土体渗流研究。E-mail:240802010010@hhu.edu.cn

通信作者:罗玉龙(1980—),男,教授,博士,主要从事岩土体渗流及渗透稳定性研究。E-mail:lyl8766@hhu.edu.cn

渗墙端部与局部地层的相互作用,指出防渗墙深度存在临界值,超过该值后墙端位置水力坡降将显著抬升,若继续加深墙体,极易在墙端区域引发潜蚀等渗透破坏^[1-3]。这种最优深度的分歧,在很大程度上源于不同研究对地基结构复杂程度的考量差异。

现有多数研究是针对单层地基工况开展防渗墙最优深度分析,并给出最优贯入比(防渗墙深度与覆盖层厚度的比值)推荐取值,相关研究结论趋于统一,普遍认为最优贯入比约为 0.7;毛昶熙等^[4]的研究表明,悬挂式防渗墙对减小渗流量作用有限,直到墙深达透水地基的 0.8 时才开始显著;谢兴华等^[1]研究了防渗墙深度变化对防渗墙端部水头、坡降的影响规律,认为防渗墙的深度并非越深越好,而是存在一个最优贯入比,约为 0.7;温立峰等^[5]的研究表明,防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度增大呈先减小后增大的规律,贯入比为 0.7 时端部坡降最小,从防渗墙端部渗透稳定的角度看最优贯入比约为 0.7;罗玉龙等^[6]对中等透水地基中防渗墙深度变化对防渗墙端部和下游坝脚坡降的影响进行了研究,发现防渗墙最优贯入比为 0.7;Salmasi 等^[7]系统探讨了不同防渗墙深度对坝基渗流控制的影响,发现防渗墙深度取为地基厚度的 0.7 是最优选择;岑威钧等^[8]发现当覆盖层渗透系数大于或等于 10^{-2} cm/s 时,防渗墙贯入比应大于 0.9;而当覆盖层渗透系数小于 1×10^{-4} cm/s 时,防渗墙贯入比只需大于 0.4 即可;金伟等^[9]通过对均匀砂土地基和内部不稳定的砂砾石地基的研究,发现防渗墙的最优贯入比也为 0.7。部分研究探讨了双层地基中悬挂式防渗墙最优贯入比:王晓燕等^[10]基于大渡河某水电站围堰工程,探讨了防渗墙深度对施工工期、下游出逸坡降和堰体渗流量的影响,提出了防渗墙的最优贯入比为 0.79;黄梅琼等^[11]的研究表明,只有当悬挂式防渗墙贯入比大于 0.75 时,才能取得较好的防渗效果;Chen 等^[12]发现悬挂式防渗墙贯入比达到 0.79 时,覆盖层最大水力坡降和闸基渗流量得到显著降低。

此外,还有少量研究探讨了防渗墙在含隔水层的多层地基中的最优深度:罗谷怀等^[13]研究认为当防渗墙进入隔水层,会与之形成联合防渗体系,渗流控制效果明显优于悬挂式防渗墙,防渗墙在相对隔水层中存在最优贯入比,约为 0.3,同时发现防渗墙端部附近的隔水层承受了较大坡降,在墙土接触面存在接触冲刷破坏的可能,应予以重视;吴梦喜等^[14]研究认为防渗墙端部区域弱透水土层内的渗透坡降数倍于允许坡降,然而这些部位在防渗墙完整的前提下渗透破坏的风险不大;王正成等^[15]研究认为防渗墙刚穿过隔水层的深度即为最优深度,此后再增加防渗墙深度已无意义。上述研究均是针对水头差小于 10 m 的低水头挡水建筑物,相关研究结论能否适用于百米以上的高坝有待深入研究。从实际工程应用来看,国内外已有多项在深厚覆盖层上采用悬挂式防渗墙的工程案例,例如瑞士卡斯提勒托心墙坝(最大覆盖层厚度大于 100.0 m,防渗墙最大深度 52.0 m)、中国冶勒沥青混凝土心墙坝(最大覆盖层厚度 420.0 m,防渗墙最大深度 140.0 m)以及中国旁多沥青混凝土心墙坝(最大覆盖层厚度 420.0 m,防渗墙最大深度 158.0 m)等。这些工程的防渗墙深度多基于地质条件、渗流控制要求和当时的施工技术水平综合确定,但其地层结构相对简单,且均未系统考虑含薄隔水层、高外水压力下的渗流演化机理。

综上,目前单层地基中悬挂式防渗墙贯入深度对渗流场影响规律的研究成果相对比较一致,但对含薄隔水层的超深厚复杂多层地基中防渗墙深度的变化对渗流场,尤其是在高外水压力条件下的影响规律还不清楚。为此,本文以某工程为背景,建立垂直防渗概化模型,通过开展大量敏感性分析,探讨超深厚复杂多层地基中防渗墙贯入深度对坝基渗流场的影响规律,并在此基础上,提出同时满足土体渗透稳定和渗流量控制标准的防渗墙最优深度,以期为工程设计提供参考。

1 工程概况

某水电工程为混凝土面板堆石坝,坝址区河床覆盖层深厚,层次结构复杂,是一种含相对隔水层的多层中等透水地基^[16]。自下而上依次为:①层、②层、③层、④层,如图 1 所示。①层和②层均为粗粒土;③层为河湖相沉积砂土层,从下到上又可细分为③-1 层、③-2 层和③-3 层,③-1 层和③-3 层均为含砾中粗砂层,为中等~弱透水性;③-2 层为弱~微透水性,具有隔水层特性,该层上下部分略有差异,上部为砂质粉土③-2-2 层,下部为粉质黏土③-2-1 层。④层由灰黄色粉土、砂及砂卵砾石组成,为强~中等透水性。坝基覆盖层的渗漏及渗透稳定问题突出,设计安全可靠的坝基防渗体系,是保障工程安全的关键^[17-19]。目前已确定采用悬挂式防渗墙作为坝基渗流控制措施,其深度的科学选取直接关系到坝基渗流安全和工程投资^[20]。

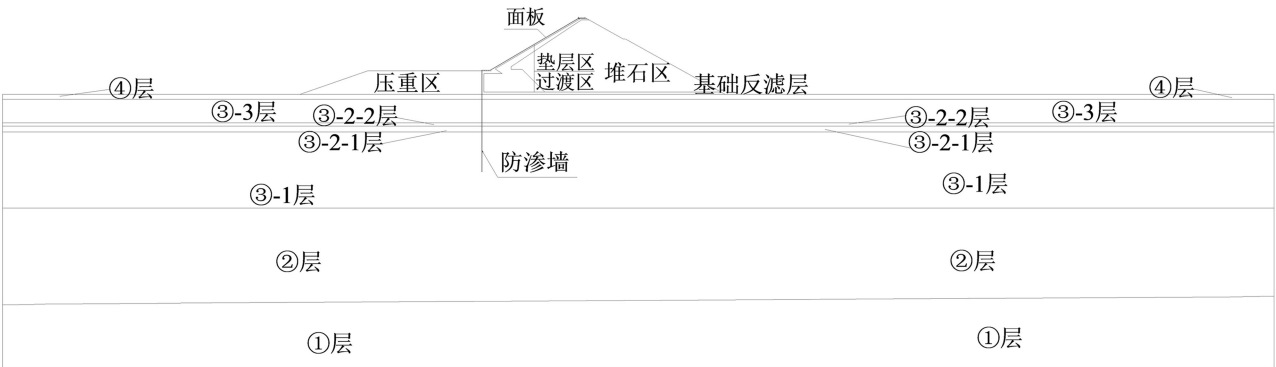


图 1 某工程概化地质剖面

Fig. 1 Generalized geological profile of a project

2 研究方法

2.1 垂直防渗模型概化

本文采用渗流有限元分析软件 Geostudio 进行建模与计算^[21-22]。基于图 1 建立了垂直防渗概化模型,概化模型范围:上游边界取至坝轴线上游约 3 000 m,下游边界取至坝轴线下游约 4 500 m。模型模拟的主要地层包括河床覆盖层①~④层,模拟的主要水工建筑物包括混凝土面板、趾板、连接板、防渗墙、垫层区、过渡区、堆石区、压重区、基础反滤层等。防渗墙端部是坝基渗透稳定评价的关键区域,亦是渗流场梯度发生急剧变化的核心位置。为精准捕捉防渗墙端部水力坡降,数值模型中采用高精度高阶单元对防渗墙进行模拟,并对防渗墙本体及其端部周边土体实施网格加密处理。

2.2 渗流计算参数及边界条件

渗流计算的相关参数见表 1,边界条件如下:上游库水位 3 070. 15 m,下游水位 2 932. 65 m,上游低于库水位的库内、两岸地表边界为已知水头边界,水头为 3 070. 15 m;下游水位以下河床、两岸地表边界为已知水头边界,水头为 2 932. 65 m;高程介于 2 932. 65~3 070. 15 m 的下游坝坡为可能出逸边界。

2.3 坝基渗流控制标准

坝基渗流控制标准是合理确定坝基防渗墙最优深度的“尺子”,传统渗流控制标准包括两方面:坝基覆盖层土体的坡降应小于各自允许坡降,同时渗流量应小于允许渗流量^[23]。本文允许渗流量采用刘杰^[23]提出的控制标准,即坝址处河道多年平均流量的 1%~3%,缺水地区采用 1%,一般地区用 3%。根据坝址区河流水文资料,本文工程的总渗流量应小于 13. 95 m³/s,单宽渗流量应小于 6. 34×10⁻³ m²/s。

表 1 坝体、坝基覆盖层渗流计算参数

Table 1 Seepage calculation parameters of dam body and overburden layers of dam foundation

区域	渗透系数 (cm/s)	允许坡降
混凝土	1. 0×10 ⁻⁷	
垫层区	1. 0×10 ⁻³	
过渡区	1. 0×10 ⁻²	
压重区、堆石区	1. 0×10 ⁻¹	
基础反滤层	1. 0×10 ⁻³	
④层	2. 0×10 ⁻²	0. 17
③-3 层	5. 0×10 ⁻³	0. 48
③-2-2 层	2. 0×10 ⁻⁵	2. 50
③-2-1 层	3. 5×10 ⁻⁶	3. 40
③-1 层	5. 0×10 ⁻³	0. 63
②层	2. 0×10 ⁻³	0. 55
①层	1. 0×10 ⁻⁴	1. 10

3 结果与分析

3.1 含隔水层的超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度

为系统厘清含隔水层超深厚多层坝基内防渗墙深度对坝基渗流安全的影响规律,突破现有防渗墙 200 m 施工极限^[24],增设超深防渗墙计算工况,防渗墙最大深度达到 480 m,接近完全封闭②层。共设置了 30 个防渗墙深度工况进行敏感性分析,具体而言,在③-3 层(深度范围:60~105 m)、③-2 层(111. 2~124 m)、③-1 层(130~242 m)以及②层(260~480 m)中,分别设置了 6、7、9、8 个特征深度。

由图 2 可知,防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度演化过程大致分 3 个阶段:第 1 阶段,在隔水层③-2 层以上的地层中,随着防渗墙深度增大,防渗墙端部最大坡降呈现 U 形变化趋势,即先减小后增大,与单层地基中的变化趋势类似^[1,5-6],但在防渗墙即将进入隔水层时,坡降增大幅度比单层地基更为显著;第 2 阶段,

在隔水层③-2 层中,随着防渗墙深度的增大,端部最大坡降快速减小;第 3 阶段,在隔水层③-2 层以下的地层中,如③-1 层和②层,随着防渗墙深度的增大,端部最大坡降呈现逐渐增大的趋势。

a. 第 1 阶段,防渗墙进入③-3 层后,当防渗墙深度介于 60~70 m (贯入比 0~0.2) 时,随着深度增大,防渗墙端部最大坡降快速减小。防渗墙深度为 60、70 m 时,端部最大坡降分别为 5.45 和 4.63,均远超过③-3 层允许坡降 0.48;当防渗墙深度介于 70~90 m (贯入比 0.2~0.6) 时,随着深度增大,防渗墙端部最大坡降缓慢变化,端部最大坡降范围为 4.39~4.63;当防渗墙深度介于 90~111.2 m (贯入比 0.6~1.0) 时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大开始快速增大,当防渗墙刚刚封闭③-3 层时,防渗墙端部最大坡降突然增大到 57.07,防渗墙端部所处的地层也由③-3 层变为③-2-1 层,同时③-3 层最大坡降也迅速增至 17.68。

b. 第 2 阶段,防渗墙进入③-2 层后,随着防渗墙深度的增大,防渗墙端部最大坡降快速减小,防渗墙深度为 111.2、114、116 m 时,防渗墙端部最大坡降分别为 57.07、20.7、15.01。

c. 第 3 阶段,防渗墙进入③-1 层后,当防渗墙深度介于 130~210 m (在③-1 层中的贯入比小于 0.7) 时,随着防渗墙深度的增大,防渗墙端部最大坡降线性增大,由 130 m 时的 0.11 增大到 210 m 时的 0.4,均低于③-1 层允许坡降 0.63,满足防渗墙端部渗透稳定要求;当防渗墙深度介于 210~242 m (贯入比大于 0.7) 时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大而显著增大,防渗墙深度 242 m 时,端部最大坡降为 0.76,已超过允许坡降,不再满足防渗墙端部的渗透稳定要求。防渗墙进入②层后,变化规律与③-1 层类似。当防渗墙深度介于 260~420 m (在②层中的贯入比小于 0.7) 时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大缓慢增大;当防渗墙深度介于 420~480 m (贯入比大于 0.7) 时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大快速增大。此外,防渗墙进入②层后,防渗墙端部最大坡降均超过②层允许坡降。

综上,基于防渗墙端部土体渗透稳定的角度评价,可以得到关于防渗墙最优深度的初步结论:防渗墙端部不能位于③-3 层,防渗墙端部附近③-3 层最大坡降介于 4.39~17.68,均远超其允许坡降 0.48,坝基渗流安全无法保障,会因渗径过短存在较大渗透破坏风险。防渗墙端部也不能位于③-2 层,防渗墙端部附近③-2 层的最大坡降多在 10 以上,最大达到 57.07,远超过③-2-2 层、③-2-1 层的允许坡降,且超限范围大,③-2-2 层坡降超过允许坡降的区域介于防渗墙上游侧 1415 m 至下游侧 1025 m;③-2-1 层坡降超过允许坡降的区域介于防渗墙上游侧 1593 m 至下游侧 1127 m,坝基渗透稳定性难以满足要求。防渗墙端部应该位于③-1 层,防渗墙进入③-1 层后,在当前防渗墙施工水平(深度 200 m 左右)下,③-1 层的最大坡降均低于其允许坡降,满足渗透稳定要求。

为了进一步评价可行性,整理了防渗墙深度介于 130~200 m 时,其他坝基覆盖层土体的最大坡降和单宽渗流量,结果如表 2、图 3 所示。由表 2 可知,在防渗墙深度介于 130~200 m 时,④层、③-3 层、③-1 层、②层的最大坡降均小于各自允许坡降,满足渗透稳定要求。由图 3 可知,单宽渗流量低于允许渗流量,③-2 层起到了很好的坝基防渗作用,坝基渗流量主要从③-2 层以上的③-3 层经过,随着防渗墙逐渐封闭③-3 层,单宽渗流量快速减小,尤其当防渗墙深度介于 105~111.2 m 时,单宽渗流量骤然减小,由 $5.1\times10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ 减

表 2 ③-2 层完好时防渗墙位于③-1 层对坝基渗流控制效果影响统计

Table 2 Statistics of effects of cutoff wall located in layer ③-1 on seepage control of dam foundation under intact layer ③-2

防渗墙深度/m	坝基覆盖层最大坡降					
	防渗墙端部(③-1 层)	③-2-1 层	③-2-2 层	③-3 层	下游出溢点④层	②层
130	0.11	7.94	5.17	0.01	0.03	0.04
150	0.22	7.89	5.16	0.01	0.03	0.04
170	0.28	7.84	5.14	0.01	0.03	0.05
190	0.35	7.78	5.11	0.01	0.03	0.05
200	0.37	7.75	5.09	0.01	0.03	0.06

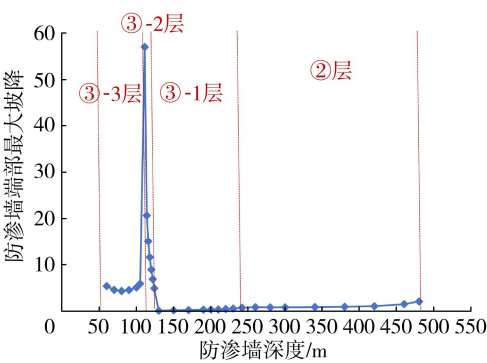


图 2 防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度演化规律
Fig. 2 Evolution laws of maximum hydraulic gradient at cutoff wall tip with cutoff wall depth

小至 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。之后,随着防渗墙深度的增大,单宽渗流量缓慢减小,防渗墙深度达到 480 m 时,减小至 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

这里需要特别说明的是,以上关于防渗墙最优深度的论证基于一个前提,即③-2-2 层、③-2-1 层均能起到很好的防渗作用,然而实际上③-2-2 层、③-2-1 层的最大坡降均远超允许坡降且超限范围很大。以防渗墙深度 200 m 为例,如图 4 所示,此时③-2-2 层最大坡降 5.09,超限范围介于防渗墙上游侧 1 455 m 至下游侧 1 016 m;③-2-1 层最大坡降 7.7,超限范围介于防渗墙上游侧 858 m 至下游侧 633 m。因此,③-2-2 层、③-2-1 层可能存在大面积失效风险。综上,当坝基隔水层③-2 层完好的条件下,防渗墙的最优深度要求为防渗墙穿过③-2 层进入③-1 层即可,如 130 m。

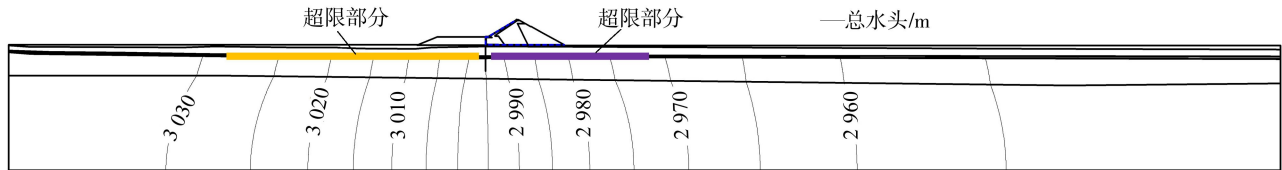


图 4 防渗墙深度 200 m 时渗流场及③-2 层坡降超限范围

Fig. 4 Seepage field and exceedance range of hydraulic gradient in layer ③-2 under cutoff wall depth of 200 m

3.2 隔水层失效情况下超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度

假设③-2 层因承担坡降过大,且因超限范围大而彻底失效,考虑到③-2 层是夹在③-1 层和③-3 层之间的一个薄层,即使发生渗透破坏,其渗透性也会小于或等于③-1 层、③-3 层,因此这里取最不利情况,假设③-2 层完全失效,其渗透系数等于③-1 层和③-3 层,同时③-2 层允许坡降也将降低,假设与③-1 层相同,为 0.63。需要说明的是,由于③-3 层与③-1 层渗透系数相同,同时③-2 层又完全失效变为③-1 层,因此防渗墙深度介于 60~242 m 时,防渗墙端部均在同一地层中。与第 2.1 节一致,本节共计开展了 30 个防渗墙深度的分析。

由图 5 可知,防渗墙位于③层或②层中时,防渗墙端部最大坡降的变化趋势类似,均呈 U 形,即当防渗墙在③层或②层中的贯入比小于 0.2 时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比的增大快速减小;当贯入比介于 0.2~0.7 时,防渗墙端部最大坡降缓慢减小;而当贯入比大于 0.7 (②层)或 0.8 (③层)时,端部最大坡降又快速增大,总趋势与单层地基中的变化趋势类似^[1,5-6]。

防渗墙进入③层后,当防渗墙深度介于 60~90 m (在③层中的贯入比小于 0.2)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大而快速减小,防渗墙深度为 60、90 m 时,端部最大坡降分别为 4.58 和 3.21,均远超过③-3 层允许坡降 0.48;当防渗墙深度介于 90~210 m (贯入比 0.2~0.8)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大而缓慢减小,防渗墙深度 210 m 时,端部最大坡降 2.6,远超过③-1 层允许坡降 0.63;当防渗墙深度超过 210 m (贯入比 0.8~1.0)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大又快速增大,如防渗墙深度 230 m 时,防渗墙端部最大坡降迅速增至 3.36。

防渗墙穿过③层进入②层后,当防渗墙深度介于 260~300 m (在②层中的贯入比小于 0.2)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增加快速减小,防渗墙深度为 260、300 m 时,端部最大坡降分别为 3.97 和 3.17,均远超过②层允许坡降 0.55;当防渗墙深度介于 300~420 m (贯入比介于 0.2~0.7)时,防渗墙端部最大坡降随着

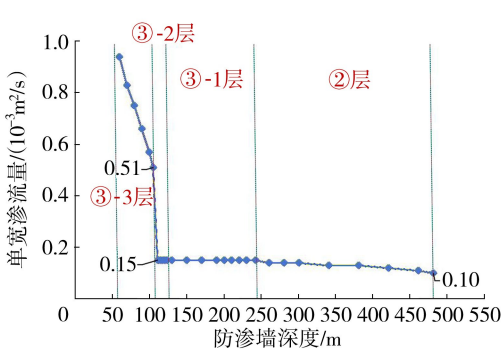


图 3 单宽渗流量随防渗墙深度演化规律

Fig. 3 Evolution laws of unit-width seepage discharge with cutoff wall depth

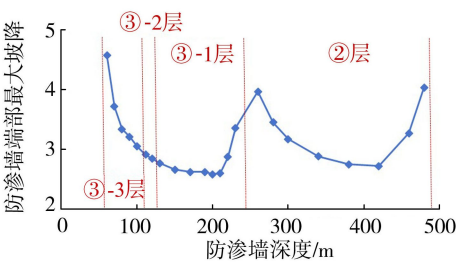


图 5 隔水层失效时防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度演化规律

Fig. 5 Evolution laws of maximum hydraulic gradient at cutoff wall tip with cutoff wall depth under impermeable layer failure

深度增大缓慢减小,防渗墙深度 420 m 时,端部最大坡降为 2.72,仍然远超过②层允许坡降;当防渗墙深度大于 420 m(贯入比介于 0.7~1.0)时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大再次快速增大,如防渗墙深度 480 m 时,防渗墙端部最大坡降迅速增至 4.04。

由图 2、图 5 可知,超深厚复杂多层地基中是否存在隔水层对防渗墙端部最大坡降的演变规律影响显著。当坝基中不存在隔水层时,在各地层中,随着防渗墙贯入比的增大,防渗墙端部最大坡降均呈现 U 形趋势。当坝基中存在隔水层时,在隔水层以上的地层中,随着防渗墙贯入比的增大,防渗墙端部最大坡降均呈 U 形趋势;在隔水层中,随着防渗墙贯入比的增大,端部最大坡降快速减小;在隔水层以下的地层中,随着防渗墙贯入比的增大,端部最大坡降逐渐缓慢增大,当贯入比大于 0.7 时,端部最大坡降快速增大。

由图 5 可知,当隔水层③-2 层失效变为③-1 层时,防渗墙端部最大坡降均超过③层允许坡降,但相对来说,防渗墙深度介于 130~200 m 时渗透坡降较小,因此在防渗墙深度介于 130~200 m 的范围内寻找最优深度。由图 6 可知,从防渗墙端部最大坡降角度评价,防渗墙最优深度为 170 m;随着防渗墙深度增大,端部最大坡降呈分级线性减小的趋势,130~170 m 区间下降速度更快,当防渗墙深度超过 170 m 时,端部最大坡降减小不明显,仅从 170 m 时的 2.62 减小为 200 m 时的 2.58。尽管防渗墙端部最大坡降远大于③-1 层的允许坡降 0.63,但超限范围有限,仅集中在防渗墙端部附近 19 m 的范围,考虑到③-1 层土体为颗粒组成较为均匀的内部稳定土体^[2],在防渗墙端部附近无明显渗流出口的条件下,③-1 层内部的细颗粒没有向下游移动的空间,因此综合评价认为防渗墙端部附近③-1 层土体能够满足渗透稳定要求。

由图 7 可知,从坝基覆盖层最大坡降角度评价,防渗墙最优深度为 170 m;随着防渗墙深度的增大,③-2-1 层、③-3 层最大坡降均呈现分级线性减小趋势,130~170 m 区间下降速度更快,当防渗墙深度超过 170 m 时,③-2-1 层、③-3 层最大坡降减小不明显,且均小于各自允许坡降,满足渗透稳定要求。下游出溢点附近④层土体的最大坡降呈线性减小趋势,当防渗墙深度 170 m 时,最大坡降 0.19,大于④层允许坡降 0.17,在下游出口做好反滤保护后,④层土体也能满足渗透稳定要求。此外,③-2-2 层的坡降介于 0.07~0.08,②层坡降介于 0.21~0.36,均小于其允许坡降,也都满足渗透稳定要求。从单宽渗流量角度评价,防渗墙最优深度为 130 m。随着防渗墙深度的增大,单宽渗流量呈线性减小趋势,防渗墙深度分别为 130 m 和 200 m 时,单宽渗流量分别为 9.3×10^{-4} m²/s 和 7.3×10^{-4} m²/s,均小于允许渗流量 6.34×10^{-3} m²/s。综上,当坝基隔水层③-2 层失效的情况下,防渗墙最优深度应为 170 m。

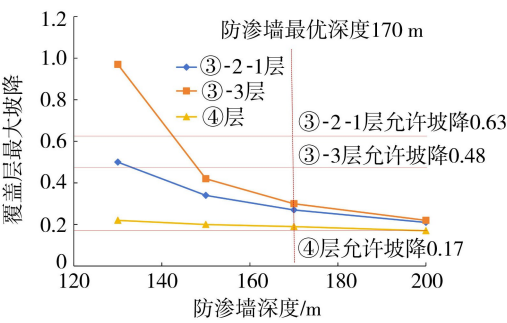
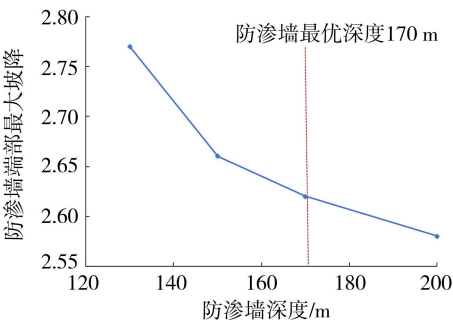


图 6 防渗墙端部最大坡降与防渗墙深度的关系
Fig. 6 Relationship between maximum hydraulic gradient at cutoff wall tip and cutoff wall depth

图 7 坝基主要覆盖层最大坡降与防渗墙深度的关系
Fig. 7 Relationship between maximum hydraulic gradient in main overburden layers of dam foundation and cutoff wall depth

3.3 最优深度建议值

假设隔水层③-2 层完好,防渗墙最优深度为穿过③-2 层进入③-1 层即可;假设坝基隔水层③-2 层因大范围超过允许坡降而发生完全失效变为③-1 层,防渗墙最优深度为 170 m。前者为理想状态,后者对应坝基渗流的最不利状态,而实际情况应该是介于两者之间,即大坝蓄水后,坝基隔水层③-2 层局部可能出现失效破坏,但是一旦局部失效后,渗透压力就会得到释放,不会导致③-2 层完全失效变为③-1 层,因此从优化分析的角度确定,防渗墙的最优深度应为 170 m,该深度可以确保坝基的渗流安全。

此外,由于本工程坝基覆盖层超深厚,地基深部的地质条件可能无法通过有限地质勘察完全掌握,且深厚覆盖层本身的不均匀性比较显著,加大防渗墙深度可以最大限度地减小这种不确定性因素对坝基渗流安全的不利影响,同时结合已有工程案例,西藏旁多水电站,坝高仅 73 m,覆盖层厚度超过 420 m,防渗墙深度

158 m^[24];新疆大河沿水库,坝高仅 75 m,覆盖层厚度 180 m,防渗墙深度 186 m^[25]。因此,从工程不确定性、已有工程经验角度,建议坝基防渗墙深度应达到 200 m。

4 结 论

a. 当超深厚复杂多层地基中存在隔水层时,在隔水层以上的地层中,随着防渗墙深度增大,防渗墙端部最大坡降均呈 U 形变化趋势,即当防渗墙在该地层中的贯入比介于 0~0.2 时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比增大快速减小;当贯入比介于 0.2~0.6 时,端部最大坡降随着贯入比增大缓慢变化;当贯入比介于 0.6~1.0 时,端部最大坡降随着贯入比增大又开始快速增大;在隔水层中,随着防渗墙贯入比的增大,端部最大坡降快速减小;在隔水层以下的地层中,随着贯入比的增大,端部最大坡降先缓慢增大,当贯入比大于 0.7 时,端部最大坡降开始快速增加。

b. 当超深厚复杂多层地基中不存在隔水层时,在各地层中,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙贯入比的增大均呈现 U 形变化趋势,即当防渗墙在该地层中的贯入比小于 0.2 时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比的增大快速减小;当贯入比介于 0.2~0.7 时,防渗墙端部最大坡降缓慢减小;而当贯入比大于 0.7(②层)或 0.8(③层)时,端部最大坡降又会随着贯入比的增大开始快速增大。

c. 考虑坝基隔水层③-2 层可能因承担坡降过大而局部失效的不利影响,确定了防渗墙的最优深度为 170 m,在此基础上,同时考虑本工程超深厚覆盖层地基深部可能存在的不均匀性和不确定性,结合已有工程案例,最终建议本工程防渗墙的深度为 200 m。

参考文献:

[1] 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. (Xie Xinghua,Wang Guoqing. A study of anti-seepage wall depth in thick overburden dam base[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(9):2708-2712. (in Chinese))

[2] 罗玉龙,张兴杰,张海彬,等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学,2022,43(11):3094-3106. (Luo Yulong,Zhang Xingjie,Zhang Haibin,et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(11):3094-3106. (in Chinese))

[3] 金伟,邱子源,张丹,等. 泸定水电站坝基覆盖层深部潜蚀对土骨架变形影响评价试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(4):705-715. (Jin Wei,Qiu Ziyuan,Zhang Dan,et al. Experimental study and evaluation on influence of deep alluvium foundation suffusion on deformation of soil skeleton in foundation of Luding Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(4):705-715. (in Chinese))

[4] 毛昶熙,段祥宝,毛佩郁. 堤基悬挂式截墙的防渗作用[C]//长江护岸工程(第六届)及堤防防渗工程技术经验交流会. 武汉:中国水利水电出版社,2001:313-317.

[5] 温立峰,范亦农,柴军瑞,等. 深厚覆盖层地基渗流控制措施效果数值分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):127-132. (Wen Lifeng,Fan Yinong,Chai Junrui,et al. Numerical analysis on effect of seepage control measure for deep overburden foundation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2014,25(1):127-132. (in Chinese))

[6] 罗玉龙,孔祥峰,罗斌,等. 深厚覆盖层中新型扩底防渗墙对防渗效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):140-145. (Luo Yulong,Kong Xiangfeng,Luo Bin,et al. Influence of a new cutoff wall of expanded base type on the seepage controlling in deep overburden foundation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (2) : 140-145. (in Chinese))

[7] Salmasi F,Nouri M,Abraham J. Upstream cutoff and downstream filters to control of seepage in dams[J]. Water Resources Management,2020,34(13):4271-4288.

[8] 岑威钧,赵昱豪,李邓军,等. 深厚覆盖层土工膜防渗堆石坝渗流场影响因素分析[J]. 长江科学院院报,2023,40(4):95-99. (Cen Weijun,Zhao Yuhao,Li Dengjun,et al. Factors influencing seepage field of geomembrane faced rockfill dams on deep overburden[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2023,40(4):95-99. (in Chinese))

[9] 金伟,张子豪,陈秋怡,等. 悬挂式防渗墙地基渗透破坏特征研究[J]. 人民长江,2025,56(4):169-175. (Jin Wei,Zhang Zihao,Chen Qiuyi,et al. Seepage failure characteristics of foundations with suspended cut-off walls[J]. Yangtze River,2025,56(4):169-175. (in Chinese))

[10] 王晓燕,党发宁,田威,等. 大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的确定[J]. 岩土工程学报,2008,30(10):1564-

1568. (Wang Xiaoyan, Dang Fanning, Tian Wei, et al. Determination of depth of suspended cut-off walls in cofferdam of a hydraulic power station in Dadu River [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (10) : 1564-1568. (in Chinese))

[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. (Huang Meiqiong, Chai Junrui, Bai Yong, et al. Numerical analysis for influence of anti-seepage measure of deep overburden foundation on seepage field[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10) : 126-128. (in Chinese))

[12] Chen Kaikun, Chen Yifeng, Yu Hao, et al. Optimized control of seepage and deformation in a dam foundation on thick overburden deposits considering coupled hydromechanical effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25(8) : 04025158.

[13] 罗谷怀,罗玉龙,彭华. 洞庭湖区堤防垂直防渗模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8) : 2287-2291. (Luo Guhuai, Luo Yulong, Peng Hua, et al. Study of vertical cutoff wall model for levees in Dongting Lake region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (8) : 2287-2291. (in Chinese))

[14] 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 Mengxi, Yang Lianzhi, Wang Feng. 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))

[15] 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控的影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(7) : 54-58. (Wang Zhengcheng, Mao Haitao, Jiang Haibo, et al. Effect of weak aquifer depth to seepage prevention of dam foundation on thick overburden layer[J]. Yangtze River, 2016, 47(7) : 54-58. (in Chinese))

[16] GB 50287—2016 水利发电工程地质勘察规范[S].

[17] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4) : 22-28. (Zhu Ruiheng, Cen Weijun, Xue Yang, et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4) : 22-28. (in Chinese))

[18] Xi Niannian, Tong Fuguo, Liu Gang, et al. Finite element analysis of dam foundation seepage effect on cutoff wall depth of Guxue Concrete Gravity Dam[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1073-1076 : 1729-1732.

[19] 柴军瑞,曹靖,丁卫华,等. 黄河流域库坝系统渗透破坏孕灾机理与安全防控研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (5) : 26-35. (Chai Junrui, Cao Jing, Ding Weihua, et al. Review of disaster-causing mechanism and safety prevention and control of seepage failure in reservoir-dam systems of the Yellow River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5) : 26-35. (in Chinese))

[20] 沈振中,邱莉婷,周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5) : 27-35. (Shen Zhenzhong, Qiu Liting, Zhou Hualei. Review of seepage control of earth-rockfill dams on thick overburden layer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5) : 27-35. (in Chinese))

[21] Shakouri B, Mohammadi M. Evaluation of penetration depth for cutoff walls in the core of earth dams[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(1) : 151-167.

[22] 岑威钧,魏江梁,郑长海,等. 深厚软土覆盖层固结特性对面板堆石坝安全的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2) : 39-46. (Cen Weijun, Wei Jiangliang, Zheng Changhai, et al. Influence of consolidation characteristics of deep soft soil overburden on the safety of a CFRD[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2) : 39-46. (in Chinese))

[23] 刘杰. 砂砾石地基上闸坝渗流控制原理与方法[J]. 水电站设计, 1997, 13(4) : 12-19. (Liu Jie. Sluice seepage control principle and method on sand-gravel foundation[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1997, 13(4) : 12-19. (in Chinese))

[24] 宗敦峰,刘建发,肖恩尚,等. 水工建筑物防渗墙技术 60 年 II : 创新技术和工程应用[J]. 水利学报, 2016, 47(4) : 483-492. (Zong Dunfeng, Liu Jianfa, Xiao Enshang, et al. 60 years' perspective of the diaphragm wall technology for seepage control, Part II. Innovation and applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4) : 483-492. (in Chinese))

[25] 李江,柳莹,贾洪全,等. 新疆深厚覆盖层坝基超深防渗墙建设关键技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(1) : 47-56. (Li Jiang, Liu Ying, Jia Hongquan, et al. Key technology for construction of super deep cut-off wall of dam foundation with deep overburden layer in Xinjiang[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1) : 47-56. (in Chinese))