

航运枢纽防渗措施优化*

谢罗峰, 唐志坚, 段祥宝, 李景娟

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 姚家枢纽是钱塘江中上游衢江干流六级梯级开发的最后一级航运枢纽。针对枢纽强透水地基渗流控制问题开展三维渗流数值模拟分析, 比较渗流控制措施的具体几何尺寸及其防渗效果, 优化防渗形式, 并预报防渗措施下的浸没、绕渗和渗漏。结果表明: 地基粉细砂和砂砾石为主要渗透通道, 易发生渗透变形, 枢纽三维绕渗特征明显, 两岸地下水水位较高, 两侧边坡出逸位置较高。防渗墙水平长度越长, 堤防坡脚处渗透坡降越小, 但防渗效果随着延伸长度逐步降低, 建议选取合理的防渗长度为400~600 m。防渗墙措施下游边坡依然有出逸, 需采取包括护坡反滤在内的多种防渗措施, 提高渗透稳定性。

关键词: 姚家航运枢纽; 渗流控制; 渗透坡降; 防渗墙; 渗透破坏

中图分类号: U 69

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0121-05

Optimization of seepage control for shipping hub

XIE Luo-feng, TANG Zhi-jian, DUAN Xiang-bao, LI Jing-juan

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Yaojia shipping hub is the last downstream hub on the middle and upper reaches of Qiantang river main stream cascade development. In view of the seepage control of seriously permeable foundation, we carry out the 3-D seepage analysis, compare the geometry size of the cutoff wall and the anti-seepage effect, optimize the anti-seepage mode, and predict the immersion, shoulder seep and leakage. The results show that the fine sand and sandy gravel lay are the main leaking path, the feature of shoulder leak is obvious, the groundwater level at both banks and leak out height on slopes are high. The longer the horizontal length of the cutoff wall, the smaller the seepage gradient at the slope foot and the less obvious the anti-seepage effect. The length of cutoff wall is recommended to be no longer than 600 m. Leakage still exists on the lower side slope under the anti-seepage measures, so, various anti-seepage measures, such as inverted filter, shall be taken to enhance the seepage stability.

Keywords: Yaojia shipping hub; seepage control; seepage gradient; cutoff wall; seepage failure

内河航运枢纽蓄水后抬高水位引起渗漏及库区浸没, 不仅影响枢纽正常安全运行、降低内河通航标准, 而且对枢纽区库岸稳定以及两岸农田地下水环境产生较大影响。

钱塘江中上游姚家航运枢纽工程位于衢江干

流金华段, 是以航运为主、兼顾发电、结合改善水环境及灌溉条件等综合利用的枢纽工程, 正常蓄水位为28.50 m, 设计洪水位标准为50 a一遇, 校核洪水位标准为100 a一遇, 设计洪水位为34.48 m, 校核洪水位为34.38 m^[1]。

收稿日期: 2016-09-19

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401901); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放基金(201506); 水利部公益性行业科研专项(201401083); 水利部“948”项目(201403)

作者简介: 谢罗峰(1985—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事渗流水力学研究。

工程区原堤防堤基条件差，堤基大多为强透水砂卵石；堤身含沙含砾量大，建筑质量不佳，为原民堤加高培厚而成，透水性较强。枢纽建成后，坝址处水位较常水位抬高 5 m 左右。因此，开展枢纽库区三维渗流控制措施模拟计算分析，控制枢纽两岸堤身浸润线、堤后地下水水位、下游覆盖层承压水头，保证堤身及枢纽基础渗流稳定；控制枢纽防护堤堤身、堤基和枢纽地基的渗透坡降，防止渗透变形破坏，保证下游边坡和下游地面的渗流稳定^[2]，为枢纽防渗设计和浸没控制提供技术支撑。

1 枢纽工程地质条件

姚家枢纽区堤岸及两侧的 I、II 级阶地上部由粉质黏土、黏质(砂质)粉土及粉细砂等组成，结构松散，透水性强；下部为砂砾石、卵砾石层，厚 2.50~12.00 m。原江堤的防洪标准为 20 a 一遇，库区内堤防设计级别为 4 级。枢纽区原堤防迎水面无护坡，局部因采砂河漫滩地萎缩严重，堤身由砂砾(卵)石人工填筑而成，较松散，为中等-强透水性。下伏砂砾(卵)石层为中等-强透水，在洪水期或蓄水后高水位的冲蚀、浸泡和渗流作用下，易发生坍塌，堤防稳定性较差^[3]。在 1989 年洪水期间，该段防洪堤曾发生决口溃坝。

根据室内渗透试验成果和现场注水试验，选取各土体渗透性(表 1)。

表 1 各土体单元渗透性试验成果

土层	岩土名称	渗透系数 $k/(cm/s)$	
		最大值	最小值
① ₋₂	砂卵(砾)石	3.90×10^{-3}	3.60×10^{-3}
① ₋₃	黏质粉土	8.90×10^{-5}	8.90×10^{-5}
③ ₋₁	粉质黏土	5.70×10^{-5}	8.00×10^{-6}
③ ₋₂	含砂黏质粉土	7.90×10^{-7}	4.40×10^{-7}
③ ₋₃	粉细砂	4.02×10^{-3}	1.16×10^{-4}
③ ₋₄	砂砾(卵)石	3.00×10^{-2}	5.07×10^{-4}
④	泥质粉砂岩	1.60×10^{-5}	5.00×10^{-6}

2 渗控效果三维数值模拟及渗控措施优化

2.1 三维渗流数值模型

渗流数值模拟计算采用三维渗流有限元计算程序 UNSS3。计算中土体透水性均概化为非均质各向异性不可压缩土体，渗流量计算采用中断面法^[4]。

枢纽坝址上下游各 1 000 m，顺河流方向向外侧考虑 1 500 m。总体模拟面积为 6 km²。总结点 25 500 个，四面体单元 132 300 个。计算网格充分考虑了场区各土层分布和结构形式分布状况及防洪堤、帷幕、防渗墙、管理区、电站和泄洪闸等建筑物的位置(图 1)。

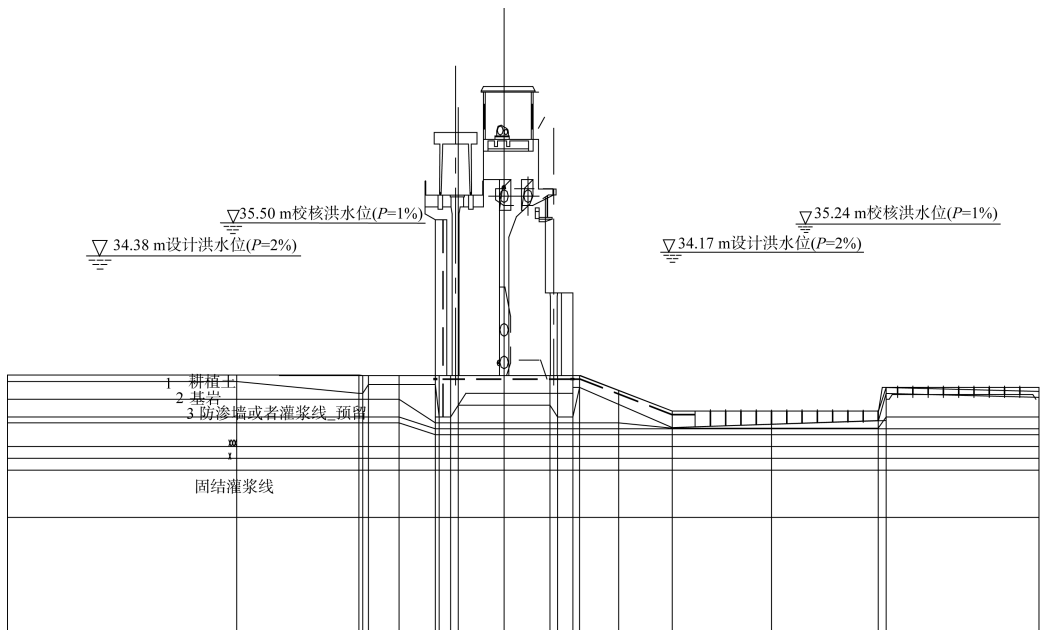


图 1 河床典型断面(泄洪闸部位)分区

2.2 运行期无防渗措施渗流场模拟

图 2 和图 3 分别为无防渗措施时运行期枢纽平面等水位线和泄洪闸典型断面等水位线分布, 水库总渗漏量达 1 804. 19 m³/d。

2.3 运行期防渗墙方案渗流场模拟

垂直防渗方案: 根据防渗需要提出沿上游岸线堤防顶部营造混凝土截渗墙, 与泄洪闸地基防渗体共同组成一个 U 形防渗体^[5]。考虑防渗墙沿上游库岸延伸长度分别为 1 000、800、600、400 和 200 m 防渗墙, 防渗墙厚度 T 分别为 0.25、0.3、0.4、0.5 和 0.6 m, 泄洪闸底部灌浆。

三维渗流数值模拟中, 防渗墙深度按实际钻孔揭示相对不透水层深度来模拟^[6], 考虑防渗墙深入基岩约 1 m。结果表明: 正常蓄水位下 800 m 长防渗墙措施时水库渗漏量为 1 080. 47 m³/d, 比

无防渗墙措施 1 804. 19 m³/d 降低了 39. 7%。

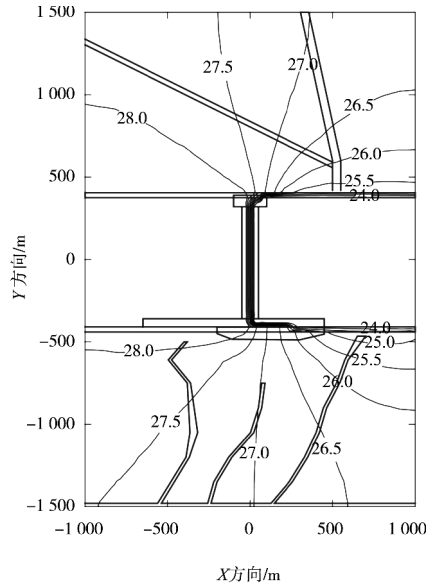


图 2 堤防无防渗措施工况运行期平面等水位线分布

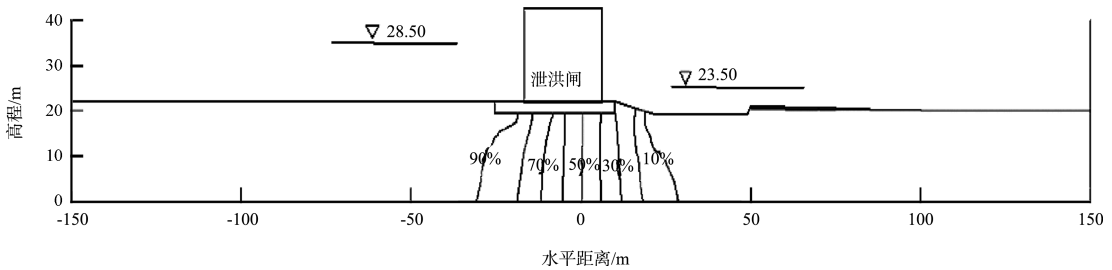


图 3 堤防无防渗措施工况运行期泄洪闸典型断面等水位线分布

图 4 为防渗墙长度 L 及厚度 T 与渗漏量的关系; 图 5 为不同防渗墙厚度建筑物下游水平渗透坡降 J_x 与防渗墙厚度 T 的关系; 图 6 为右岸下游堤防边坡堤脚处水平渗透坡降 J_y 与防渗墙厚度 T 的关系; 图 7 为右岸下游堤防边坡堤脚处垂直渗透坡降 J_z 与防渗墙厚度 T 的关系; 图 8 为枢纽下游侧河床垂直渗透坡降 J_z 与防渗墙厚度 T 的关系。

原堤防左右岸均无防渗措施时, 堤后地下水位均接近正常蓄水位; 设置防渗墙后, 堤后地下水位大大降低。堤外 200 m 处, 防渗墙长度大于 200 m 时, 堤后地下水位降低 0.5~1.8 m(图 9)。

1) 防渗墙厚度防渗效果。

防渗墙厚度对建筑物底部扬压力和水平渗透坡降影响程度较低^[7], 对堤防坡脚处水平和垂直渗透坡降有一定影响, 越接近坝轴线, 影响越大。当防渗墙厚度达 0.3 m 以上时, 厚度对渗透坡降的影响逐渐降低。因此, 可选择厚度在 0.3 m 以内防渗措施。

2) 防渗墙延伸长度防渗效果。

选择 300 mm 厚度的防渗体模拟防渗墙长度。

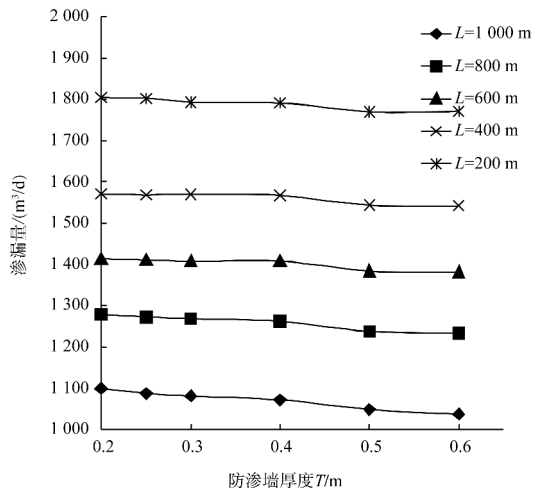


图 4 防渗墙长度 L 及厚度 T 与渗漏量关系

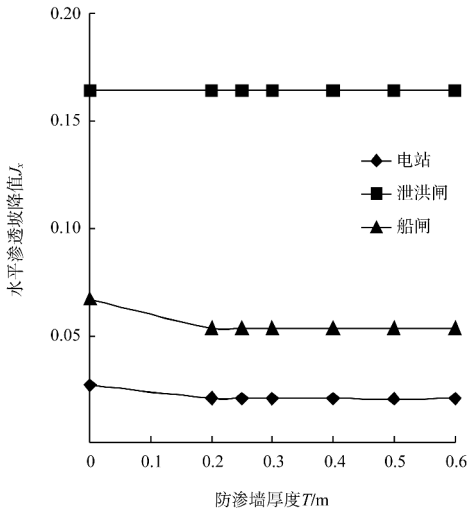


图5 不同防渗墙厚度建筑物下游水平渗透坡降 J_x 与防渗墙厚度 T 的关系 ($L=800$ m)

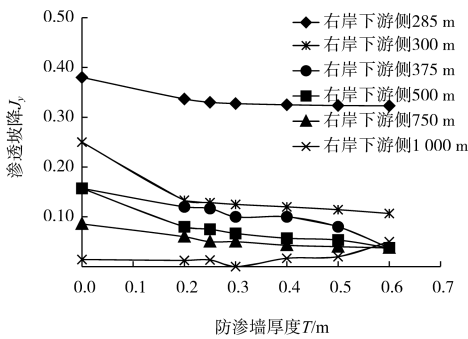


图6 右岸下游堤防边坡堤脚处(基岩)水平渗透坡降 J_x 与防渗墙厚度 T 的关系

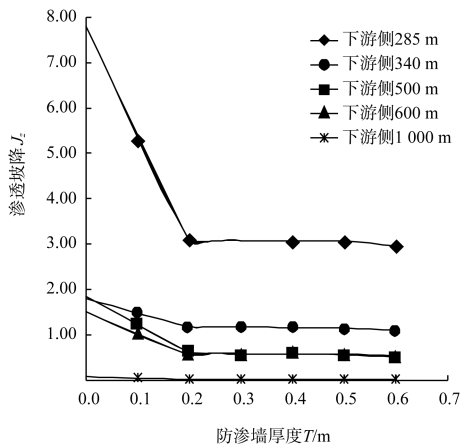


图7 右岸下游堤防边坡堤脚处垂直渗透坡降 J_z 与防渗墙厚度 T 的关系

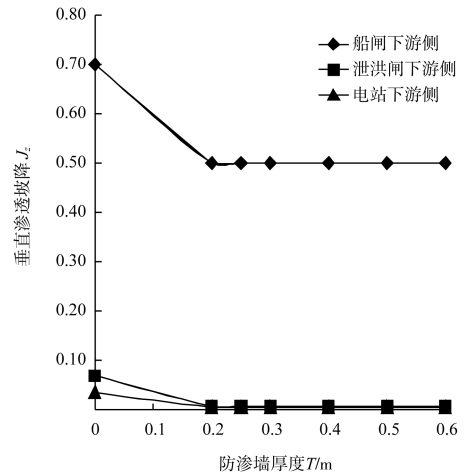
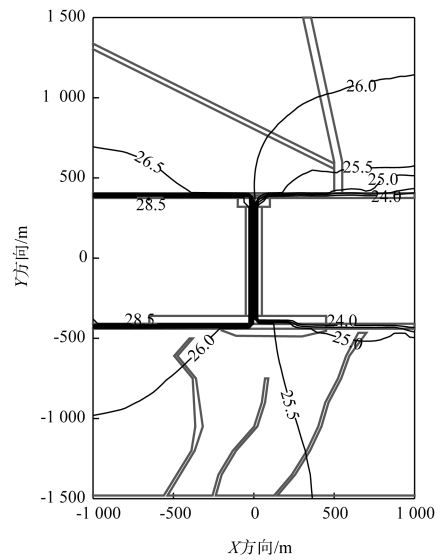
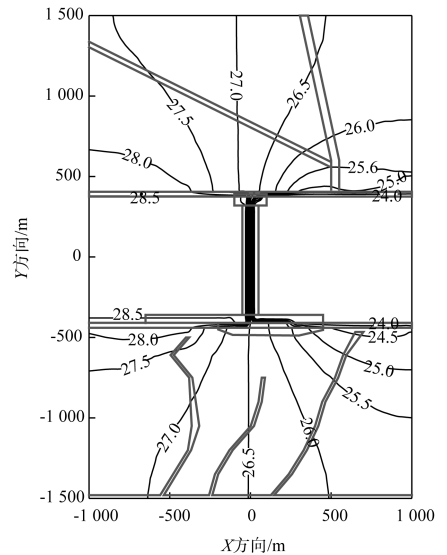


图8 枢纽下游侧河床垂直渗透坡降 J_z 与防渗墙厚度 T 的关系



a) 防渗墙长度 $L=1000$ m



b) 防渗墙长度 $L=400$ m

图9 正常蓄水运行期平面等水位线分布 (单位: m)

防渗长度越长, 堤防坡脚处水平渗透坡降和垂直渗透坡降就越小。由于右岸堤身主要为砂砾石层, 防渗体能消散 10%~20% 的水头差, 降低下游坡脚处水平渗透坡降值和垂直渗透坡降值, 越往下游侧延伸, 影响程度越小, 下游侧 1 000 m 处, 与下游水位接近; 而船闸出口处基岩的水平渗透坡降, 接近 0.4。防渗长度逐渐增大后, 此处渗透坡降降低较为明显。可见, 防渗墙长度对边坡和下游坡脚比降影响较大。防渗长度在 400 m 后, 各部位渗透坡降降低值逐渐减小, 600 m 后, 各部位渗透坡降值均与 800 m 和 1 000 m 防渗长度的效果接近, 因此, 建议防渗合理长度为 400~600 m(图 10、11)。

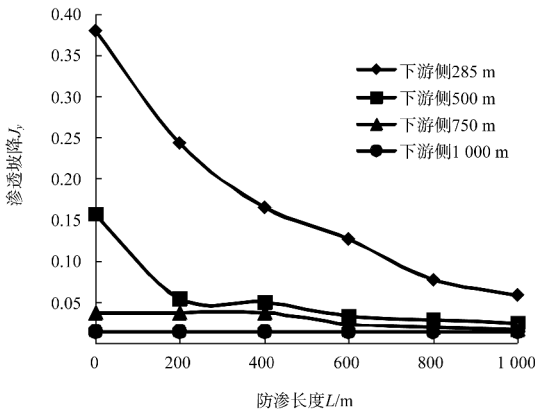


图 10 正常蓄水位运行期右岸下游堤脚处水平渗透坡降 J_y 与防渗长度 L 的关系

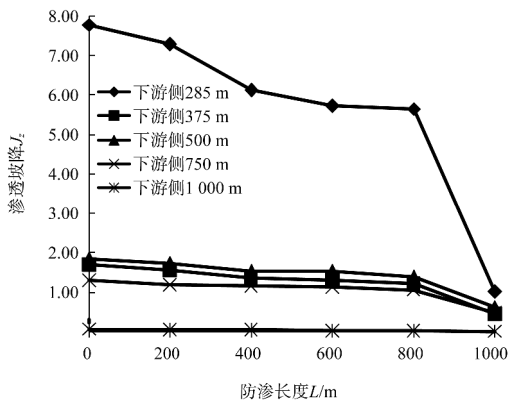


图 11 正常蓄水位运行期右岸下游堤脚处垂直渗透坡降 J_z 与防渗长度 L 的关系

3) 左右岸反滤护坡。

左右两岸出逸位置位于砂砾石层中, 均高于下游正常蓄水位 23.50 m, 不能满足堤防边坡渗流稳定的控制标准, 因此, 必须采取包括护坡反滤在内的多种防渗措施(表 2)。

表 2 采取防渗措施后堤后 200 m 处地下水位降低值

距坝轴线距离 x/m	水位降低值/m	
	右岸 $L=600/m$	左岸 $L=600/m$
-850	0.41	0.05
-200	0.93	1.04
-110	0.97	1.21
-65	0.98	1.29
-19	0.98	1.18
0	0.98	1.09
15	0.97	1.02
50	0.96	0.89
150	0.90	0.50
300	0.79	0.39
500	0.70	0.25
600	0.66	0.24
1 000	0.47	0.80

因此, 建议左右两岸设置部分防渗措施, 降低下游出口出渗透坡降, 同时结合反滤排水和护坡等多重防护措施, 降低下游边坡在砂砾石层出逸的影响^[8]。

3 结语

1) 对姚家航运枢纽防渗措施效果开展数值模拟, 优化了防渗措施。枢纽地基为强透水层, 易发生渗透变形, 需要进行垂直防渗措施。在枢纽周边排水沟条件下选择适度防渗的思路, 提出沿堤防岸线营造防渗体的方案。

2) 综合防渗墙长度和厚度的效果, 防渗墙厚度影响较小。防渗长度越长, 堤防坡脚处水平渗透坡降和垂直渗透坡降就越小, 防渗墙长度对堤防边坡和下游坡脚影响较大。但延伸长度一定范围以后效果不明显, 建议防渗长度为 400~600 m。

3) 采取防渗措施后, 下游边坡依然有出逸, 需采取护坡反滤措施提高渗透稳定性。