



汉江雅口航运枢纽管袋砂过水围堰 稳定性分析*

朱凡^{1,2}, 童富果^{1,2}, 肖艳斌³, 李彪^{1,2}

(1. 三峡大学, 湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 中国葛洲坝集团股份有限公司, 湖北 武汉 430033)

摘要: 雅口航运枢纽二期围堰是采用河砂填筑、管袋砂护坡、复合土工膜防渗、土工布反滤、丙纶布防冲的新型复合结构, 过水条件下易诱发围堰失稳问题。以试验数据为支撑, 从渗流、应力变形、稳定性角度分析复杂工况下围堰稳定安全性, 对比土工布、丙纶布与管袋砂层间稳定性。结果表明: 围堰过水对坡脚处渗透梯度影响明显, 加固后可增强局部抗渗透破坏的能力; 过水条件对围堰基坑侧边坡稳定最不利, 加固后应力变形、整体稳定性满足规范要求; 丙纶布与管袋界面摩擦作用小, 存在层间滑动的可能, 在丙纶布与管袋砂间布置土工布可有效提高层间稳定性。经 2021 年秋季汉江特大洪水考验, 围堰在挡、过水工况下均能稳定安全运行。

关键词: 过水围堰; 管袋砂; 渗流分析; 应力变形; 整体稳定性; 层间稳定性

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0188-08

Stability of overtopped cofferdam with tubes of sand filling in Yakou navigation hub of Hanjiang River

ZHU Fan^{1,2}, TONG Fuguo^{1,2}, XIAO Yanbin³, LI Biao^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. China Gezhouba Group Co., Ltd., Wuhan 430033, China)

Abstract: The second phase cofferdam of Yakou navigation hub adopts a new composite structure featuring river sand filling, slope protection with tube of sand filling, composite geomembrane anti-seepage, geotextile anti-filtration, and polypropylene fabric anti-scouring, and the overtopped condition is easy to induce the instability of cofferdam. Based on the experimental data, this paper analyzes the stability and safety of cofferdam under complex working conditions from the perspectives of seepage, stress and deformation, and stability and compares the stability of geotextile, polypropylene fabric, and tube of sand filling layer. The results show that the effect of an overtopped cofferdam on the slope foot seepage gradient is obvious, and the local resistance to seepage damage can be enhanced after reinforcement. The overtopped condition is the most unfavorable to the stability of the side slope of the foundation pit of the cofferdam, but the overall stability and stress and deformation meet the requirements of the code after reinforcement. The friction between polypropylene fabric and tube of sand filling is small, and there is the possibility of interlayer displacement, but the geotextile between polypropylene fabric and tube of sand filling can effectively improve the stability between layers. After the test of the severe Hanjiang River flood in the autumn of 2021, the cofferdam can run stably and safely under water retaining and overtopped conditions.

Keywords: overtopped cofferdam; tube of sand filling; seepage analysis; stress and deformation; overall stability; stability between layers

收稿日期: 2022-09-09

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51939004)

作者简介: 朱凡 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水工结构数值计算。

雅口航运枢纽二期围堰位于汉江流域,由于周边填筑材料短缺,从经济环保角度考虑,采用河床上覆盖的粉砂、粉细砂代替土石料作为主要材料填筑围堰。雅口二期围堰有过水要求,河砂填筑料在过水条件下较难成型,可采用土工管袋砂护坡、复合土工膜防渗、土工布反滤、丙纶布防冲的新型复合结构形式。但围堰会经历挡水、基坑充水、过水等复杂工况,围堰有发生局部渗透破坏、剪切破坏、边坡失稳破坏的可能,以及多种材料诱发的层间稳定性问题,不利于管袋砂复合围堰稳定性。

目前国内外集河砂填筑、管袋砂护坡、复合土工膜防渗、土工布反滤、丙纶布防冲为一体的复合过水围堰并不多见,工程经验较少。胡志根等^[1]确定划分溢流工况围堰设计风险率计算方法,提出提高围堰安全过流的建议;田静杰等^[2]通过开展过水围堰溢流条件下数值模拟研究,提出改善围堰结构设计的措施并提高了围堰过流稳定性。这些研究成果对围堰结构较为简单的情况具有重要指导意义。对于包含土工材料的复合围堰结构,Recio等^[3]通过模拟试验和数值计算研究在波浪作用下管袋结构的变形和失稳过程,提出水力稳定性公式;满晓磊等^[4]研究波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝稳定性问题,提出波浪工况下吹填管袋砂结构的失稳判定方法。这些研究主要针对管袋边坡结构的稳定性,不涉及多种土工材料组合的结构形式和围堰过水引起的复杂挡过水工况,而不同土工材料的渗流和力学特性相差较大,对围堰结构稳定性影响较大,需要进一步研究集多种土工材料为一体的新型复合围堰的过流安全稳定性。

本文以雅口二期管袋砂过水围堰为研究对象,对填筑料、土工材料界面开展试验,获取不同土工材料与土工管袋间界面摩擦特性和填筑料的剪

切力学特性,采用有限单元法和刚体极限平衡法,从渗流、应力变形、稳定性角度分析不同运行工况下管袋砂过水围堰稳定安全性,对比土工布、丙纶布与管袋砂层间稳定性,旨在为类似过水围堰工程结构设计和稳定性计算提供参考。

1 工程概况

雅口二期过水围堰可能会经历围堰挡水、子堰自溃、基坑充水和围堰过水等情况,设计挡水标准为 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$,过水标准为 10 a 一遇洪水,相应设计流量为 $1.35\text{ 万 m}^3/\text{s}$ 。二期过水围堰是典型的集河砂填筑、管袋砂护坡、复合土工膜防渗、土工布反滤、丙纶布防冲为一体的新型复合结构围堰,其上、下游围堰结构如图1所示。堰体材料包括粉细砂、砂石、管袋砂、多种土工材料等,河道侧边坡上、下游子堰均采用砂袋护坡、复合土工膜防渗,底部过水围堰采用抛石护坡压填、丙纶布和土工布防渗防冲刷;过流后子堰自溃,基坑充水,上、下游过水围堰基坑侧边坡叠放有宽 2.5 m 管袋砂防护。与传统围堰相比,雅口二期围堰采用当地河床覆盖层上的粉细砂、砂卵石填筑,就地取材,污染小、施工简便、极大程度地节省了工程费用;采用多种土工材料防渗,使得复合围堰有较好的防渗防冲效果;采用管袋砂护坡利于围堰成型和堰坡稳定运行。新型复合围堰结构形式对深水环境、软土地基等复杂工程条件具有较好的适应性,可以广泛应用于水利工程围堰、港口海岸护坡和垃圾填埋场等工程领域^[5]。为确保过水充水时管袋砂围堰的稳定性,上、下游围堰基坑侧边坡均采取加固措施,采用填筑料坡脚压重结构,上游围堰基坑侧边坡设置有 3 m 宽马道,下游围堰设置有 5 m 宽马道,铺设丙纶布和土工布起防渗、防冲刷作用^[6],并布置铅丝网、抛石护底。

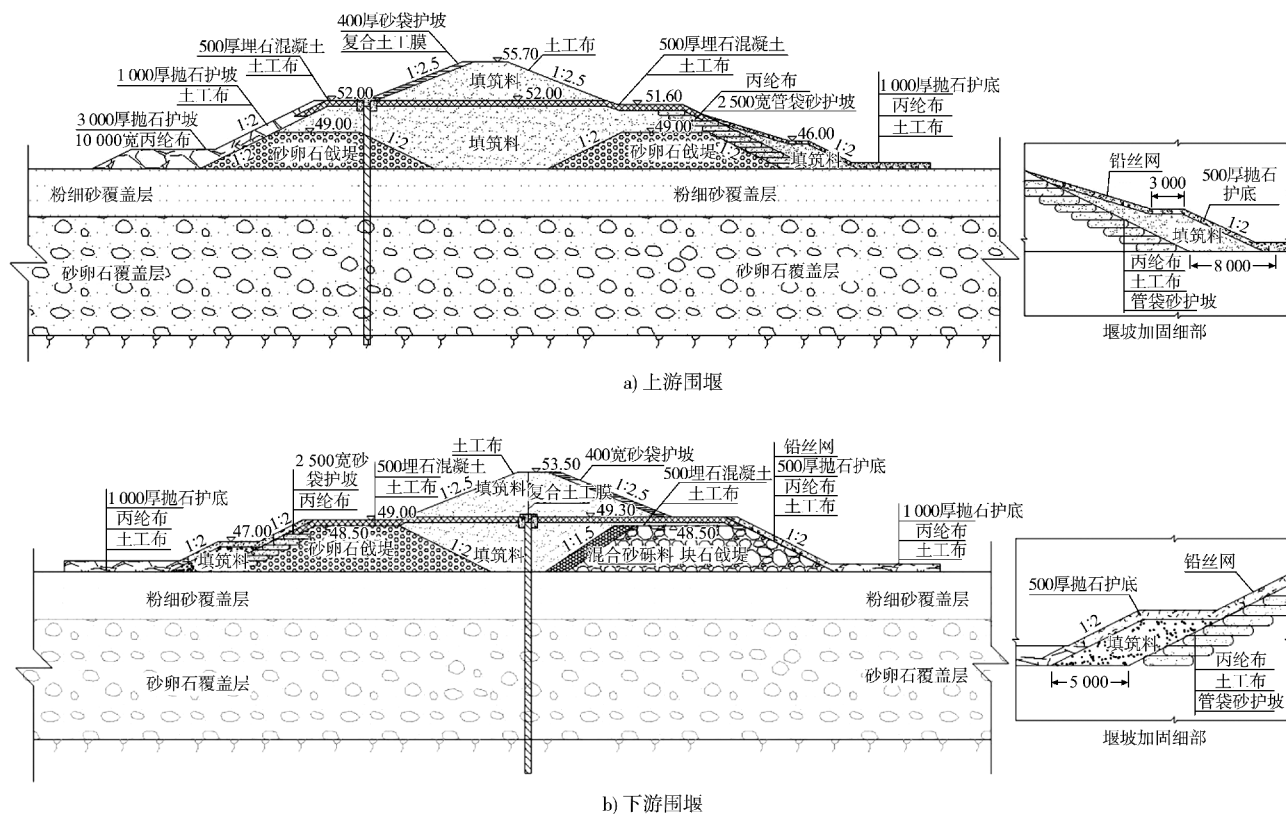


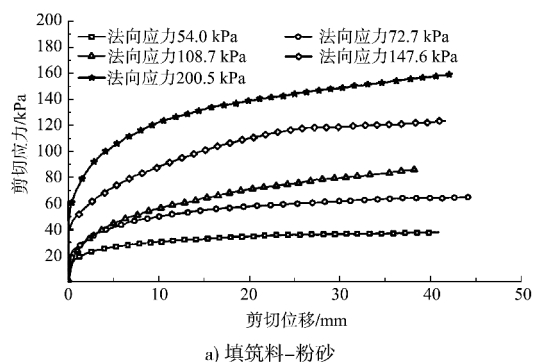
图1 雅口二期上、下游围堰结构 (高程: m; 尺寸: mm)

2 围堰材料力学参数获取

雅口工程过水围堰的填筑料为粉砂、砂石，围堰边坡上存在土工管袋、丙纶布、土工布、复合土工膜接触界面。基于围堰的稳定性和层间抗滑稳定性计算的需要，开展围堰填筑料和土工材料层间剪切力学特性的直剪试验以获取其内摩擦角。试验主要包括以下部分：围堰填筑料的内摩擦角、土工管袋与管袋的界面摩擦角、土工材料（丙纶布、土工布、复合土工膜）与土工管袋的界面摩擦角、土工布与丙纶布的界面摩擦角。

围堰填筑料的剪切应力-剪切位移关系曲线见图 2a)、b)。可以看出, 曲线单调递增, 整体呈现上升趋势: 在同一法向应力下, 随着填筑料的剪切位移增大, 所需的剪切应力越大, 剪切应力-剪切位移曲线斜率先大后小, 在剪切位移达到一定程度后, 曲线逐渐趋于平缓; 总体来说, 法向应力越大, 达到相同剪切位移所需的剪切应力越大。

土工管袋和土工材料的剪切应力-剪切位移关系曲线见图 2c)、d)。可以看出, 曲线整体呈现上升趋势, 随着剪切位移增大, 剪切应力越大; 在同一法向应力下, 土工管袋间达到相同剪切位移所需的剪切应力远大于其他土工材料界面产生的剪切应力; 层面剪切应力-位移曲线存在明显的第二次上升过程, 可能是由于土工材料剪切位移较大时剪切盒的约束作用导致的。不同土工材料的剪切力学特性存在差异, 土工布与丙纶布、土工管袋界面之间的极限剪切应力较大, 土工管袋与复合土工膜极限剪切应力最小。



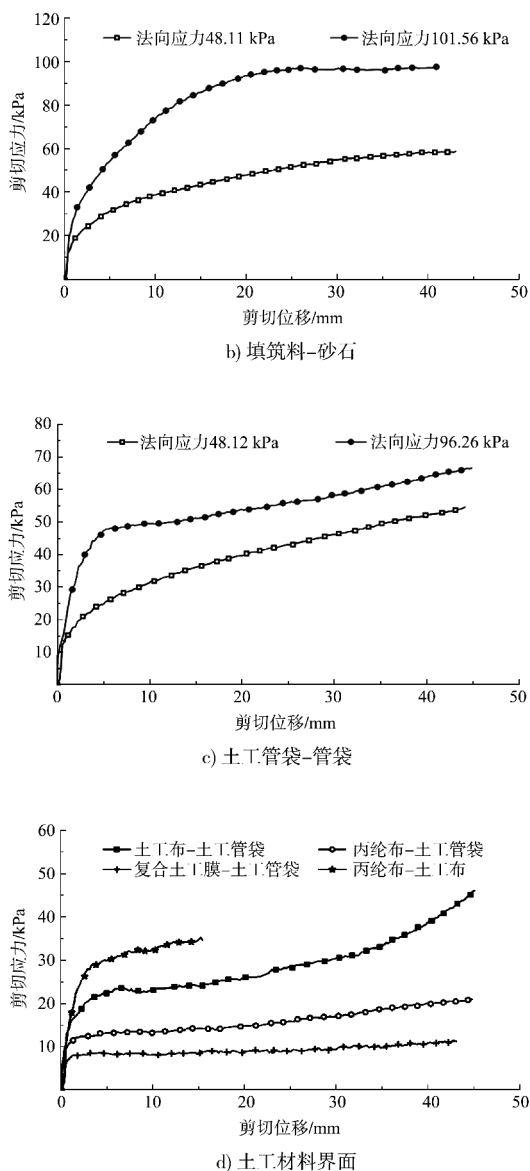


图 2 堰体材料间剪切应力-位移关系曲线

根据文献[7], 若无明显峰值点或稳定值, 则取剪切位移为 10 mm 时的剪切应力为材料的抗剪强度 τ_f ; 考虑粉砂、砂石和土工材料间的黏聚力很小^[8], 即 $c \rightarrow 0$, 根据库仑公式, 可计算得到材料的摩擦角 φ :

$$\varphi = \arctan(\tau_f / \sigma) \quad (1)$$

式中: σ 为剪切应力。

根据剪切试验结果, 计算得到填筑料和土工

材料间的摩擦角, 见表 1。可知土工管袋间界面摩擦角大于填筑料内摩擦角, 且填筑料在过水条件下难以成型, 采用管袋砂结构利于围堰边坡的整体稳定性。土工材料剪切试验结果表明, 土工管袋界面间摩擦角最大, 摩擦作用最大; 摩擦角较小的土工材料组合分别为复合土工膜与土工管袋、丙纶布与土工管袋, 界面摩擦角分别为 8.19° 、 13.97° , 不利于围堰层间稳定性。

表 1 填筑料和土工材料间的摩擦角

材料	$\varphi / (^\circ)$
粉砂	25.00
砂石	27.00
河床覆盖料	26.00
土工管袋-管袋	30.00
土工布-土工管袋	28.35
丙纶布-土工管袋	13.97
复合土工膜-土工管袋	8.19
土工布-丙纶布	30.09

3 围堰稳定性分析

3.1 渗流分析

挡水、过水工况下上游围堰渗流梯度矢量图见图 3。可以看出, 在运行工况下围堰河道侧边坡渗流梯度总指向坡内, 而基坑侧边坡渗流梯度指向坡外, 坡脚处渗透梯度方向向上, 对坡脚存在顶托作用, 易发生局部渗透破坏。挡水条件下防渗墙和土工膜的防渗体系能够有效降低围堰内浸润线位置, 过水条件下水流的堰顶绕渗作用, 使围堰防渗体系失效, 在基坑侧边坡产生顺坡向和向上的渗透力。与挡水工况相比, 过水工况下管袋砂坡脚附近最大渗透梯度增大, 坡脚可能出现局部渗透破坏。采用坡脚压重加固, 设置土工布反滤保护, 加固体自身重力作用可有效增加围堰局部抵抗渗透破坏的能力, 提高围堰基坑侧边坡渗流稳定性。

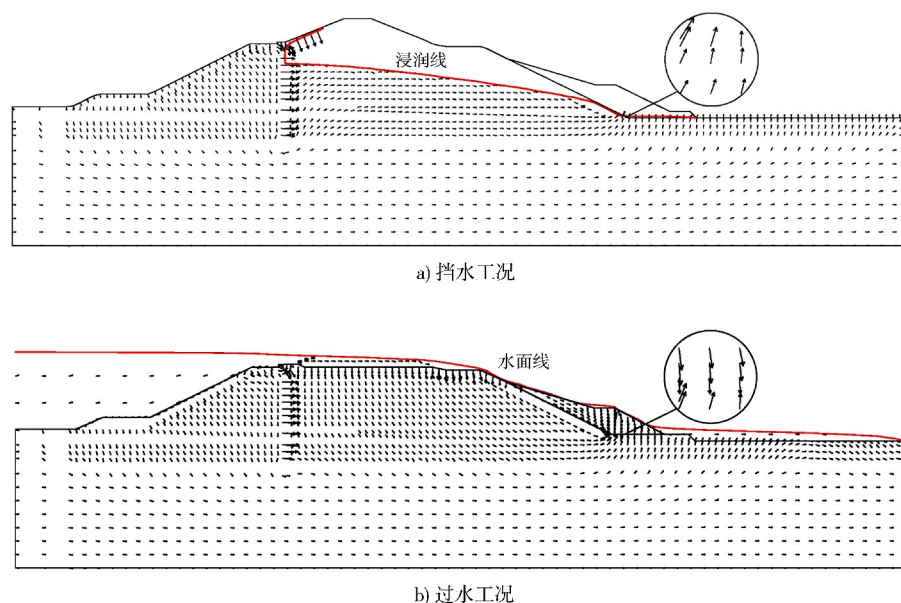


图3 挡、过水工况上游围堰渗流梯度矢量图

3.2 应力变形分析

过水工况下上游围堰竖向及顺河向位移云图见图4。可以看出,围堰竖向位移以沉降为主,子堰冲毁后围堰最大沉降位移在堰体填筑料处,最大值为290 mm,最小竖向位移在防渗墙处,最小值为12.6 mm,过水围堰出现不均匀沉降现象,围堰顶部盖板存在剪切破坏的可能。在过水条件下围堰河道侧边坡顺河向位移较小,基坑侧边坡顺

河向位移较大;顺河向位移最大值在围堰两侧边坡处,河道侧边坡顺河向位移最大值为80.8 mm,方向指向坡外,基坑侧边坡顺河向位移最大值为96.3 mm,方向也指向坡外,两边坡顺河向位移变形方向相反,但均在工程安全范围内。在过水条件下,子堰冲毁后水流渗流及冲刷作用影响顺河向滑动,基坑侧边坡变化规律与边坡滑动方向相同,水流作用促进边坡顺河向滑动。

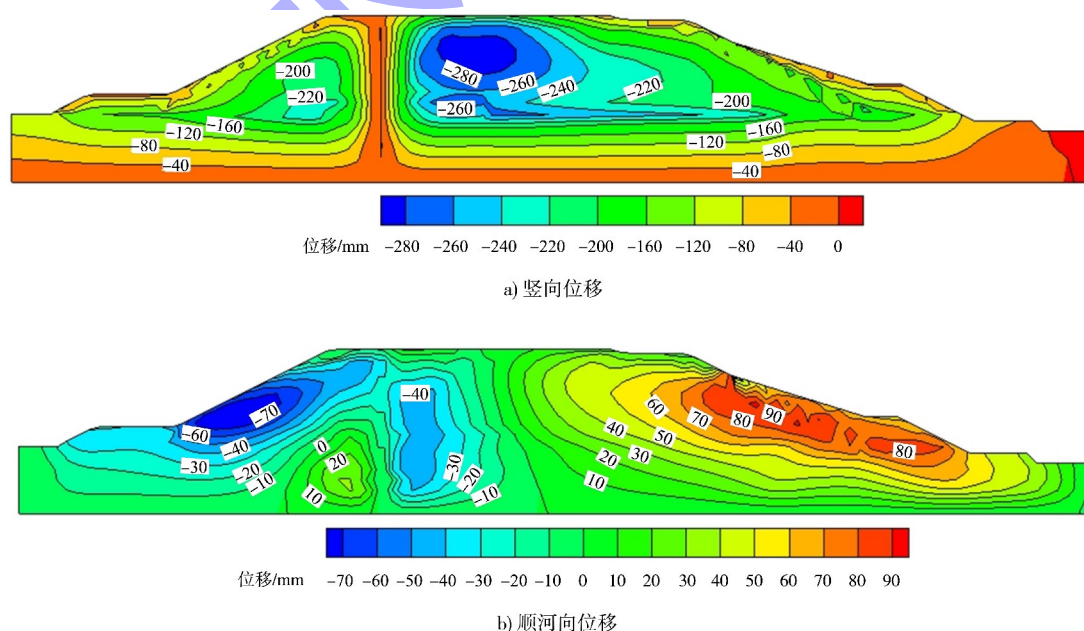


图4 过水工况下上游围堰位移云图

上、下游围堰最大压应力、拉应力、应力水平及其分布位置见表 2。表明过水工况下上、下游围堰最大压应力出现在混凝土防渗墙底部, 最大拉应力出现在混凝土盖板处, 上游围堰防渗墙顶

部拉应力也较大。上、下游围堰应力水平最大值均在坡脚加固体处, 最大值为 0.57 MPa, 发生剪切破坏的可能性较小, 对围堰稳定安全运行影响较小。

表 2 上、下游围堰最大压应力、拉应力、应力水平及其出现位置

围堰	压应力		拉应力		应力水平	
	最大值/MPa	出现位置	最大值/MPa	出现位置	最大值/MPa	出现位置
上游围堰	1.2	防渗墙底部	0.04	混凝土盖板及防渗墙顶部	0.57	坡脚加固体
下游围堰	0.9	防渗墙底部	0.20	混凝土盖板	0.45	坡脚加固体

3.3 整体稳定性分析

针对上、下游围堰在挡水、基坑充水、过水、反向挡水工况下计算围堰整体稳定性, 选取特征断面, 上、下游围堰横向段长度分别为 546、789 m, 由于上、下游围堰有 400 m 以上靠近岸坡, 故计算断面选在 0~400 m。视纵向围堰与上、下游横向围堰交界处为断面 SK0、XK0, 上游围堰选取距 SK0 断面 150 和 250m 处的 SK0+150 和 SK0+250 断面, 下游围堰选取距 XK0 断面 250 和 350 m 处的 XK0+250 和 XK0+350 断面, 利用刚体极限平衡法计算得到各工况下的安全系数, 见表 3。《水电

工程围堰设计导则》^[9]、《水利水电工程围堰设计规范》^[10]要求边坡稳定安全系数不低于 1.15, 故河道侧边坡各工况整体稳定性安全系数均能满足相应要求, 而未加固的上、下游围堰基坑侧边坡面临着失稳的风险, 上游围堰过水工况(极端情况)、下游围堰基坑充水工况均不满足要求。针对围堰过水条件分析得, 基坑侧边坡在水的渗流作用下渗流梯度指向坡外, 顺河向位移与边坡滑动方向相同, 不利于边坡稳定性。采用坡脚压重, 辅以土工材料防渗防冲的加固方式能保证稳定性(图 1), 经验算加固后 2 种工况均能达到规范的稳定性要求。

表 3 各工况下围堰边坡安全系数

工况	断面编号	河水流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	堰前水位/ m	基坑水位/ m	安全系数		
					河道侧 边坡	基坑侧边坡	
挡水	SK0+150	0.90	55.70	无水	1.45	1.18	-
	SK0+250				1.52	1.27	-
	XK0+250	0.90	52.43	无水	1.74	1.52	-
	XK0+350				1.68	1.38	-
基坑充水	XK0+250	0.80	52.00	无水	3.18	0.75	1.26
	XK0+350				2.82	0.96	1.52
	SK0+150	0.80	54.26	无水	1.46	0.80	1.16
	SK0+250				1.42	0.77	1.16
过水	SK0+150	1.35	55.68	54.41	1.27	1.24	-
	SK0+250				1.30	1.20	-
	XK0+250	1.35	53.15	54.41	1.60	2.81	-
	XK0+350				1.47	2.06	-
反向挡水	SK0+150	0.10	47.13	49.30	1.18	1.25	-
	SK0+250				1.18	1.29	-
	XK0+250	0.10	47.13	49.30	1.41	3.16	-
	XK0+350				1.32	2.30	-

上游围堰基坑侧边坡过水工况及下游围堰基坑充水工况下,各断面最危险滑动面如图 5 所示。可以看出,过水工况滑动面破坏形式、坡面陡缓、滑体体积差异不大,滑动上缘随着安全系数的减小稍向上移,但滑动面剪出口一致,均从马道位置切出。基坑充水工况最危险滑动面形态具有一定差异性,滑动面剪出口位置均为加固后的坡脚附近,稳定安全系数相对较大,出现整体失稳的可能性较小^[11]。

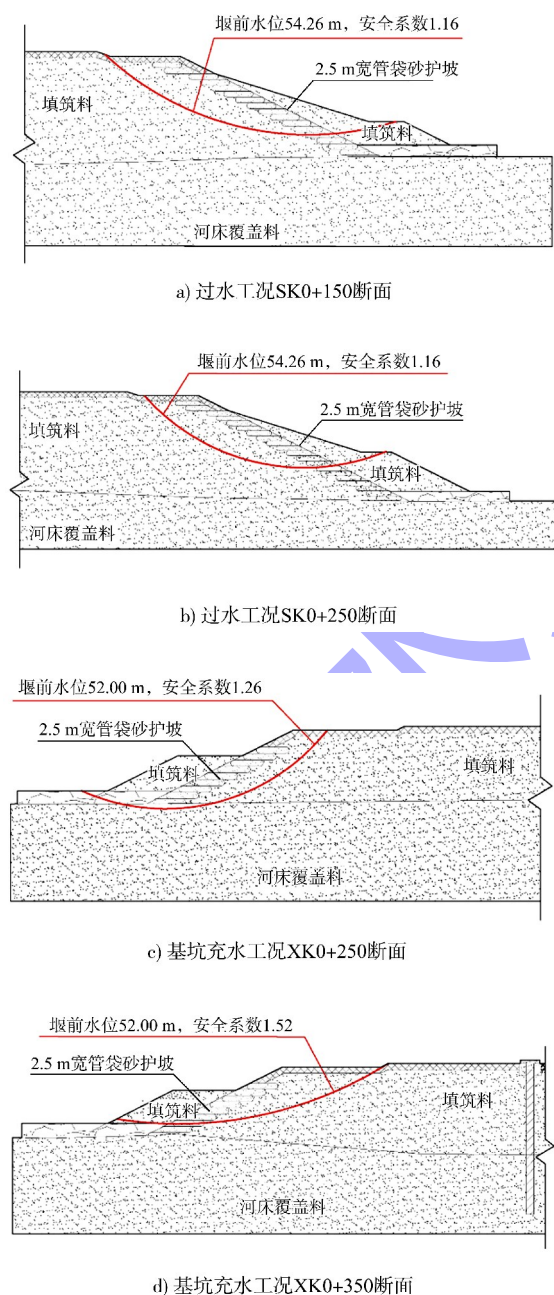


图5 不利工况最危险滑动面

3.4 层间抗滑稳定性分析

雅口围堰边坡层间稳定性主要由土工材料界面摩擦特性控制。根据试验结果可知,复合土工膜与土工管袋间、丙纶布与土工管袋间界面摩擦角较小,但复合土工膜存在于子堰上,表面无覆盖且两端均锚固,过水条件下子堰冲毁,复合土工膜与土工管袋间不存在层间滑动的可能,应对丙纶布与土工管袋间进行沿土工膜和堰体接触面的抗滑稳定分析。

加固前、后过水围堰基坑侧边坡层面抗滑稳定安全系数见表4。《水电工程围堰设计导则》《水利水电工程围堰设计规范》要求层间抗滑稳定安全系数不低于1.15,所以未加固前的丙纶布与管袋砂间层间稳定安全系数不满足相应要求,基坑侧边坡可能发生沿丙纶布的顺层滑动。丙纶布与土工布间摩擦角为 30.09° ,土工布-管袋砂的层间摩擦角为 28.35° ,选择加固方案为在管袋砂与丙纶布间增加土工布,使土工布上下两接触面的摩擦作用增大,加固后土工布与丙纶布、管袋砂袋间的摩擦作用能有效地提高层间稳定性,经验算围堰边坡层面抗滑稳定安全系数满足规范要求。

表4 层间抗滑稳定安全系数

断面编号	基坑侧边坡稳定安全系数	
	加固前丙纶布与管袋砂间	加固后土工布与管袋砂间
SK0+150	0.70	1.40
SK0+250	0.66	1.43
XK0+250	0.86	1.24
XK0+350	0.79	1.25

4 结论

1) 过水条件下水流通过堰顶绕渗使防渗体系失效,基坑侧坡脚处出现了较大的渗透梯度,采用坡脚压重并设置土工布反滤后,可增强坡脚抵抗渗透破坏的能力,提高围堰渗流稳定性。

2) 过水围堰竖向及顺河向位移均在工程允许范围内。根据应力计算分析可知,最大应力水平在坡脚加固体处,量值为 0.57 MPa ,堰体不易发生局部剪切破坏。

3) 过水围堰填筑材料的内摩擦角较大,在挡水和反向挡水工况下稳定安全系数均能满足稳定性要求,但在过水和基坑挡水工况下,由于渗流作用,围堰过水对基坑侧边坡稳定不利,采用坡脚压重加固处理,能够有效提高围堰稳定性。

4) 丙纶布与土工管袋间的界面摩擦角为 13.97° ,远小于围堰坡角,易出现沿层面的滑动失稳;丙纶布与土工布间的界面摩擦角为 30.09° ,土工布与管袋砂袋的层间摩擦角为 28.35° ,在丙纶布与管袋砂之间铺设土工布,可以有效增加围堰层间稳定性。

5) 这种新型复合结构可就地取材,经济环保,用于各工程领域,如水利工程围堰、港口海岸护坡和垃圾填埋场等低水头、临时性建筑物中,保证工程稳定安全运行。2021年8月汉江流域洪峰最大流量达到 $1.3 \text{万 m}^3/\text{s}$,雅口二期过水围堰经受住了汛期过流考验,运行情况良好。

参考文献:

- [1] 胡志根,胡建明,李燕群.过水土石围堰下游护坡的溢流设计风险率模型[J].水科学进展,2003,14(5): 622-625.
- [2] 田静杰,陈云良,杨秀玲,等.过水围堰溢流场试验与数值模拟分析[J].水电能源科学,2015,33(9): 99-

101, 98.

- [3] RECIO J, OUMERACI H. Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers[J]. Geotextiles and geomembranes, 2007, 25(4/5): 278-292.
- [4] 满晓磊,束一鸣,曹明杰,等.管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验[J].水利水电科技进展,2018,38(1): 28-35.
- [5] 张春元.吹砂围堰对现浇桥梁施工和受力性能影响研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [6] 秦威中,殷立中,袁俊青.土工合成材料在吹填造地工程中的应用[J].水运工程,2019(S2): 124-128.
- [7] 杨春山,莫海鸿,魏立新,等.土工模袋砂界面摩擦特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(1): 26-32.
- [8] 侯娟,邢行,徐东,等.土工膜-土工布界面动力剪切特性试验研究[J].岩土力学,2022,43(2): 365-376.
- [9] 中国水电顾问集团,北京勘测设计研究院有限公司.水电工程围堰设计导则:NB/T 35006—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [10] 长江勘测规划设计研究院.水利水电工程围堰设计规范:SL 645—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [11] 史尧,卢超,刘守花.深井降水条件下的高边坡土石围堰稳定性分析[J].水运工程,2021(1): 207-214.

(本文编辑 王璁)

(上接第179页)

- [14] 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.
- [15] 侯晓萍,徐青,杨志明.黄河山坪电站船闸地基渗控措施优化[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(5): 584-589.
- [16] 蔺宏岩.水利工程土石围堰稳定性计算[J].绥化学院学报,2019,39(8): 154-156.
- [17] XU F, LI S C, ZHANG Q Q, et al. Analysis and design implications on stability of cofferdam subjected to water wave action[J]. Marine georesources & geotechnology,

2016, 34(2): 181-187.

- [18] 陈东辉.基于渗流场和应力场耦合作用的岸坡稳定性分析[D].广州:暨南大学,2015.
- [19] 崔清强.围堰封底混凝土与钢管桩粘结力模型试验研究[J].桥梁建设,2014,44(6): 69-74.
- [20] 吴代生.深水裸岩河床条件下无封底双壁钢围堰的设计问题与施工风险控制[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [21] 刘小虎.均质土截流围堰施工安全稳定性验算[J].水利技术监督,2020(1): 64-67.

(本文编辑 王传瑜)