

基于GeoStudio的汛期土石围堰稳定性分析

潘 贺

(中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050001)

摘要: 根据2024年7月的洪水汛期水位变化,采用有限元软件GeoStudio对某大桥上游土石围堰在丹江口汛期期间的稳定性敏感进行分析。汛期内迎水侧水位越高,堰坡安全系数越大。降雨强度增大会导致围堰表面土体孔隙水压力增大,降低围堰稳定性,降雨历时也会影响围堰稳定性,但整体稳定性大于1.15且满足规范要求。上游水位暴雨期间上升并变化率显著,导致土石围堰水平位移急剧增加,但未见明显下沉或开裂情况;后期上游水位下降后,围堰水平位移趋于稳定,未出现明显滑移或开裂情况,围堰顺利渡过洪水期。

关键词: GeoStudio; 汛期; 土石围堰; 稳定性; 监测

中图分类号: U445.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0385-05

Analysis on Stability of Earth Rock Cofferdam in Flood Season Based on GeoStudio

PAN He

(CSCEC Road and Bridge Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050001, China)

Abstract: Based on the water level changes during the flood season in July 2024, the finite element software GeoStudio was used to analyze the stability and sensitivity of the upstream earth rock cofferdam of a bridge during the flood season of Danjiangkou. The higher the water level on the water-facing side during the flood season, the greater the safety factor of the cofferdam slope. An increase in rainfall intensity would lead to an increase in pore water pressure on the surface soil of the cofferdam, reducing its stability. The duration of rainfall would also affect the stability of the cofferdam, but the overall stability was greater than 1.15 and met the standard requirements. The upstream water level rose significantly during the rainstorm and the change rate was obvious, resulting in a sharp increase in the horizontal displacement of the earth rock cofferdam, but no obvious subsidence or cracking was found. After the upstream water level dropped in the later stage, the horizontal displacement of the cofferdam tended to stabilize without obvious sliding or cracking. And the cofferdam successfully passed the flood period.

Keywords: GeoStudio; flood season; earth rock cofferdam; stability; monitoring

0 引言

土石围堰是水利工程中常用的一种临时性或半永久性水工建筑物,由土石材料填筑形成挡水屏障,以防止水流或波浪侵蚀岸坡或保护下游区域,具有一定的防渗和稳定性能^[1-2]。而针对汛期的土石围堰稳定性研究则涉及多个方面,包括渗流稳定性分析^[3]、变形安全风险预警^[4-5]、土石围堰的稳定性计算^[6-7]等。河南省内某大桥土石围堰为不过水围堰,因汛期暴雨以及上游水库放水导致土石围堰被淹没,为评估汛期期间土石围堰堰坡稳定性,采用有限元GeoStudio软件,依据丹江口水库库区最高洪水位

(2024年汛期)的水位涨落变化对围堰稳定性的影响,对依托工程的上游围堰,基于数值模拟技术进行堰坡稳定性敏感性分析,确定汛期前后围堰的安全系数变化规律,并基于计算结果和实时监测数据进行评估,确保围堰结构的长期稳固与安全。

1 工程概况

1.1 项目背景

河南省南阳市某森林公园建设项目(一期)位于城市中心城区南部。该项目工程建设范围面积399.64 hm²,控制高程为丹江口水库库区管理范围线171 m(吴淞高程)。其中,依托工程桥梁全桥总长513 m,共设置3联。其中第一联和第三联为引桥,采用2×17 m现浇混凝土连续板;第二联为主桥,采用30 m+40 m+5×60 m+40 m+30 m变截面预应力混凝土连续梁。

收稿日期: 2025-01-02

作者简介: 潘贺(1990—),男,本科,工程师,从事工程项目管理工作。

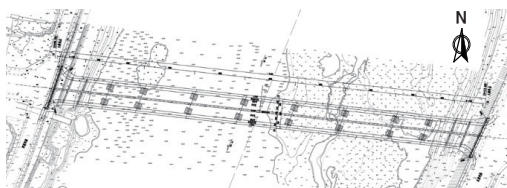


图1 桥梁平面图

2.2 项目背景

围堰采用拦蓄结合导流施工排水,分别在拟建桥址上下游各布设一道施工围堰,围堰做为连接南北两岸施工便道使用,堰顶内侧两桥墩之间设置长度为10 m、宽度3 m的错车台,方便施工车辆错车和吊车吊运模板、混凝土等物资,堰顶两侧设置网状护栏并悬挂安全、质量和环保等标志标牌。围堰内侧设置6道集水沟,1 m×1 m×1.5 m集水坑4个,收集堰内渗水,每个集水坑安装一台污水泵随时抽水。导流排水采用3×φ2 m预制混凝土管,根据河水深度及混凝土管直径,混凝土管预埋在河水最深处,管顶填筑厚度不小于0.5 m,以保证车辆正常通行。

依据《水利水电工程围堰设计规范》(SL 645—2013),根据现场实际情况,围堰采用土石围堰,围堰内部填料以石渣为主,增强其稳定性,如图2所示,堰顶高出水面常水位1 m,标高为165.308 m(高出下游拦水坝1 m)。围堰堰顶上游宽度5 m,下游宽度5 m,迎水面边坡1:2,堰内边坡1:1.5,总长度为419 m,围堰中心所在老鹳河河道桩号为K0+256.500。

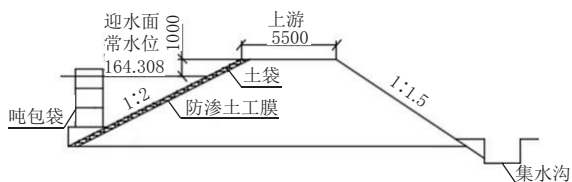


图2 围堰横断面图

1.3 水文及地质条件

1.3.1 气候特征

该项目位于河南省西南部,属于北亚热带向暖温带过渡的季风性气候区。这里四季分明,春季回暖迅速,多偏东南风,气温变化剧烈;夏季降雨集中,旱涝不均;秋季凉爽,连阴雨较多;冬季干冷,西北风盛行。由于秦岭、伏牛山等天然屏障的阻挡,该地区的年平均气温比同纬度东部地区高出约2℃,无霜期约为228 d。该地区年降雨量在391.3~1 423.7 mm之间,多年平均降雨量为804.3 mm,汛期降雨量占全年的大部分,且地域分布不均,西北地区多于东南地区。

1.3.2 工程地质

依托工程的桥位处河床及漫滩宽约450 m,地面高程161.0~167.0 m,两岸Ⅰ级阶地地面高程164~168.5 m,阶地前缘为滨河路。第四系覆盖层厚1.8~13.8 m,主要为第四系砂卵砾石及滨河路路基回填土;下伏上第三系地层,成岩较差,厚度大于83.4 m。主要包括碎石土夹砾砂、粉质黏土、中砂、泥钙质胶结砾岩、砂岩等。

1.3.3 洪水汛期

2024年7月项目部所在地区进入雨季,并多次发布暴雨红色预警信号,期间最大降雨量达100 mm,且因上游水库加大放水,导致洪水淹没项目工地(见图3),桥址所在河道断面的汛期水位平均水深4.32 m,最大水深5.58 m,平均流速1.02 m/s,局部最大流速1.53 m/s。



图3 洪水期现场照片

2 有限元分析

2.1 有限元模型及边界条件

在研究围堰边坡与多样水位与降雨环境下的渗流稳定特性时,选取中段土石围堰典型断面进行分析,并基于GeoStudio软件建立模型^[8-9],其网格总共划分为4 303个节点、4 181个单元,如图4所示。

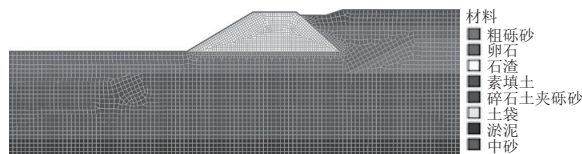


图4 有限元模型示意图

2.2 工况选取

依据汛期水文信息以及工程水文地质等资料,选取如下水位工况:常水位^[10],+0.65 m水位,+1.38 m水位(淹过围堰),-1.35 m水位;基于水文地质中历年降雨情况以及汛期降雨情况等资料,选取的降雨强度工况^[5]为:50、75、100、125 mm/d(后续降雨时长参考汛期降雨,选择24 h);对降雨历时工况进行选取,具体为:12、24、36、48 h;根据相关研究可将降雨

持续时间和降雨总量相同的降雨条件^[7]划分为前峰型、中峰型、后峰型和均匀型等降雨雨型工况。

3 多因素稳定性分析

土石围堰的稳定性分析是一个复杂且关键的过程,涉及多个因素,这些因素共同影响着围堰结构的整体稳定性和安全性。

3.1 迎水侧水位变化

基于2.2节中迎水侧水位工况,分别计算不同迎水侧水位下围堰体及其基础内部孔压的分布情况,4种水位工况下的围堰孔压分布相似,土体孔隙水压力的递减,同步促进了基质吸力的显著增强,其等值线演变轨迹与浸润线相吻合,展现出相似的动态趋势。基于不同迎水侧水位的渗流作用,对各工况下的土石围堰进行堰坡稳定性计算,以+1.38 m迎水侧水位(淹没围堰)为例,其围堰潜在滑动面如图5所示。对比当土石围堰受到水的渗透作用,将会降低堰体材料的抗剪强度,随着迎水侧水位高度的上升,受到水影响的区域就越大;虽然渗透作用会降低围堰的稳定性,但河水在迎水侧产生的水压作用会提高该侧的抗滑能力。当迎水侧水位越高,堰坡的安全系数越大,如图6所示,水压作用对土石围堰稳定性的影响比渗透作用大。

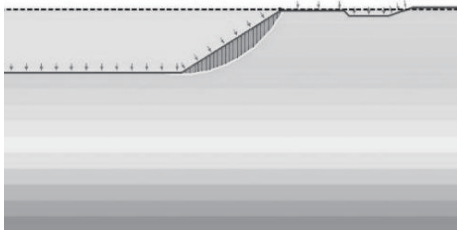


图5 +1.38 m迎水侧水位(淹没围堰)围堰潜在滑动面示意图

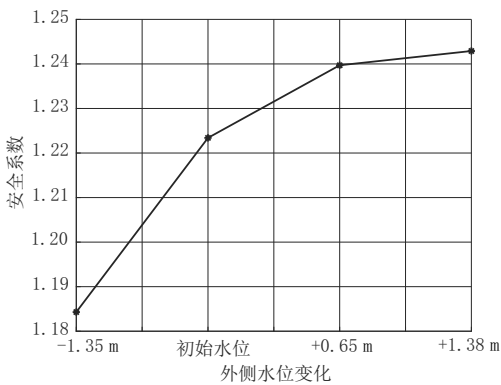


图6 不同迎水侧水位条件下围堰安全系数

3.2 降雨强度

基于2.2节中降雨强度的选取(降雨时长取24 h),不同降雨强度下围堰体的表层孔压分布规律相似,

但随着雨势的加剧,围堰表层土体的孔隙水压力持续攀升;围堰体内部则均存在高压区域,且连在一起,如以降雨强度 $S_r=100\text{ mm/d}$ 为例,其孔压如图7所示。基于不同降雨强度的渗流作用,对各工况下的土石围堰进行堰坡稳定性计算,从图8可以看出,在不同降雨强度下各工况围堰的潜在滑动面基本相似,且随着降雨强度的增大,土石围堰的安全系数在不断减小,主要原因是降雨渗透进入围堰主体,致使土体材料的抗剪能力降低,从而减小堰坡的稳定性;但是,当降雨强度到达一定强度后,此时水压作用对土石围堰稳定性的影响比渗透作用大,土石围堰的安全系数反而上升,如图9所示。

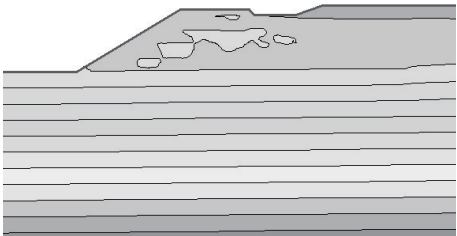


图7 降雨强度 $S_r=100\text{ mm/d}$ 下的孔压分布示意图

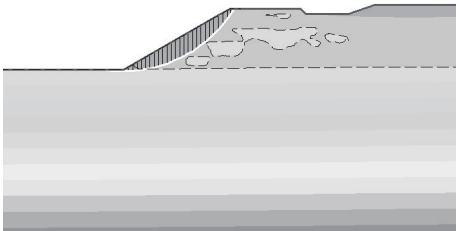


图8 不降雨强度 $S_r=100\text{ mm/d}$ 下的围堰潜在滑动面

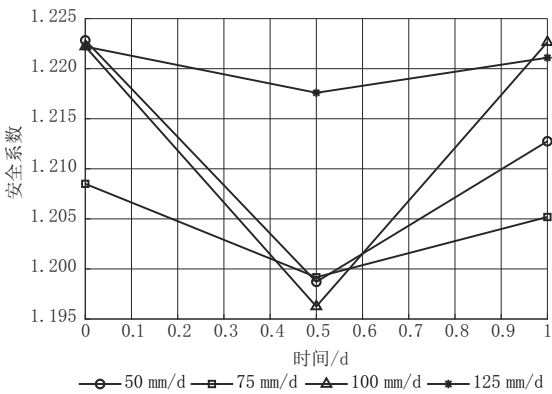


图9 不同降雨强度条件下围堰安全系数

3.3 降雨历时

基于2.2节中降雨历时工况,不同降雨强度下围堰体的表层孔压分布规律相似,在同一高度上越靠近围堰堤身轴线的右侧土体,其孔压值越大,但围堰体内部则均存在高压区域,且多连在一起,如图10所示。基于不同降雨历时的渗流作用,对各工况下的土石围堰进行堰坡稳定性计算,由图11可得,受到初始水位以及不同降雨历时的渗透作用,各工况

围堰的潜在滑动面基本处于围堰主体上,土石围堰的安全系数减小,产生这一变化的原因在于,外部雨水渗透至围堰的内部,使非饱和土体的饱和度增大,而基质吸力在减小,致使土体材料的抗剪能力降低,从而导致土石围堰的稳定性下降。但是随着降雨历时的增加,土石围堰的安全系数反而增大,如图12所示,这是由于雨水渗透进入围堰内部和右侧的土体中,而此时水压作用对土石围堰稳定性的影响比渗透作用大,反而提高该侧的抗滑能力。



图10 降雨时间 $T_t=12\text{ h}$ 下孔压分布

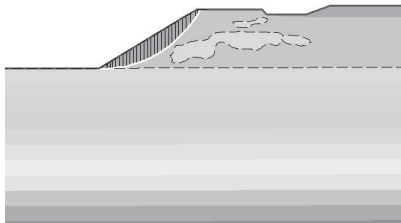


图11 降雨时间 $T_t=36\text{ h}$ 围堰潜在滑动面

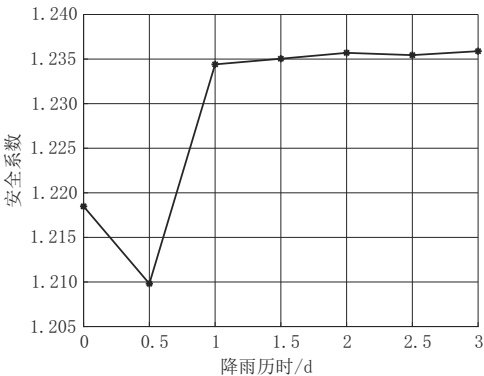


图12 不同降雨历时下围堰安全系数

3.4 降雨雨型

基于2.2节中降雨雨型(降雨时间24 h,降雨总量200 mm),计算获得降雨雨型下围堰体及其基础内部孔压的分布情况,如图13所示,围堰浸润线位置基本未发生改变,但是围堰表层一定深度的土体其孔隙水压力的变化量在后峰、中峰、前峰工况下依次减小,主要原因是降雨峰值发生得越早,表层土体的非饱和区域渗入量越大,但随着降雨历时的增加,土体的渗出量也会提高。而后期峰值到来,土体的渗入的水量来不及排出,而此时水压作用对土石围堰稳定性的影响比渗透作用大。

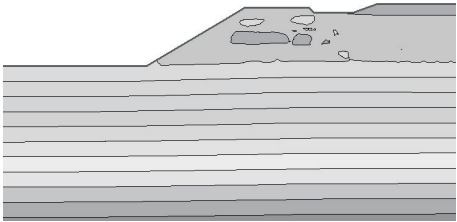


图13 后峰型雨型下孔压分布

基于不同降雨雨型的渗流作用,对各工况下的土石围堰进行堰坡稳定性计算,由图14可知,各工况中围堰的安全系数在前、中、后和均匀四种雨型下依次增加,其中通过前、中、后3种雨型工况进行解释,主要原因是当降雨时间与总量相同时,若降雨峰值出现得越晚,在降雨过程中通过围堰主体向迎水侧渗出的雨水越少,围堰主体以及右侧土体含水量增加,而此时水压作用对土石围堰稳定性的影响比渗透作用大,因此安全系数会依次增大,如图15所示。

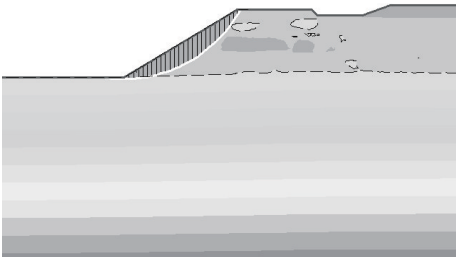


图14 后峰型雨型下围堰潜在滑动面

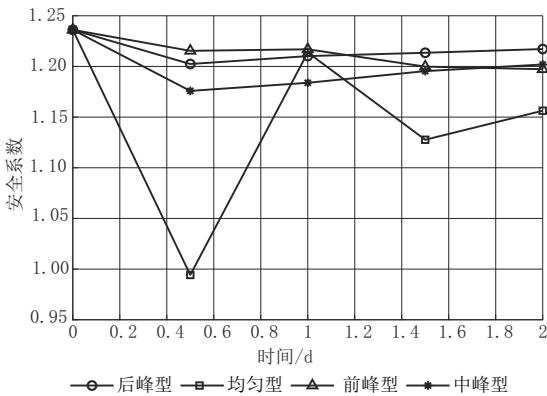


图15 不同降雨雨型下围堰安全系数

4 围堰自动监测分析

上文深入探讨了汛期环境下,针对土石围堰的稳定性,进行了详尽的数值模拟分析,揭示了在不同水位及其涨落变化情境下,围堰稳定性所展现出的动态变化规律。为保证围堰整体稳定和施工顺利进行,项目部通过高精度、全天候的监测,实时捕捉围堰的细微变化,为工程管理人员提供及时、准确的状态信息,有效预防安全隐患的累积,迅速触发预警机

制,降低安全事故的发生风险。

4.1 监测项目

鉴于场地限制、施工工艺、土壤性质、重力作用及水位波动等复杂因素的交织作用,土石围堰的全年运行状态与安全性面临持续变化与高度不确定性^[11]。若堰体突发异常,而现场人员未能迅速洞察其本质与动态,围堰的突然崩溃将直接威胁施工人员生命安全,后果难以估量。为此,亟须整合多种监测技术与策略,实施对土石围堰的全方位监控与即时预警^[12],以保障施工与运营阶段围堰的稳固与安全。

表 1 土石围堰边坡实时监测项目及内容

监测项目	监测内容	监测位置	理论值	监测设备
水平位移监测	用于测量堰体水平位移动态,以查明滑移面位置和方向	每隔 20 m 一个界面	最大水平位移值≥20 mm 或位移变形速率≥1.5 mm/d	固定式测斜仪
堰体水位监测	用于测量堰体内部渗压水位变化动态	每隔 20 m 一个点	最大渗透压≥280 kPa	渗压计
降雨量监测	用于测量围堰现场的降水量、降水强度	项目部区域	降雨量≥75 mm/d	翻斗式雨量计
堰外水位监测	实时记录堰外水位变化动态,提供汛期高水位预警	项目部侧河岸	相对水位≥1.3 m	超声波水位计

4.2 预警阈值

当土石围堰的水位、渗流、变形等监测值超过预设的警戒值时,系统自动触发预警。而警戒值的设定则基于工程设计、历史数据、专家经验等多方面因素,确保既不过于敏感导致误报,也不过于迟钝而延误预警^[12-13]。一旦触发预警,立即通过短信、电话、广播等多种方式向相关单位和人员发布预警信息,明确预警级别、影响范围、建议措施等,并根据预警级别和实际情况,启动相应的应急预案,组织抢险救援队伍赶赴现场进行处置。依据预警等级的不同严峻程度,该项目规划了如下三级应急预案响应机制,旨在高效应对各类紧急情况。

4.3 预警分析

中段土石围堰埋设有测斜管并每 10 min 采集围堰水平位移数据,相关测点从上往下依次为 WY01、WY02、WY03、WY04。通过对汛期内 7 月 14 日—15 日共计 2 d 的监测数据进行分析,上游水位以及中段土石围堰的水位位移曲线如图 16 所示。上游水位于 14 日下午水位上升并变化率显著,对应的土石围堰水平位移急剧增加,但未见明显下沉或开裂情

表 2 三级应急预警响应机制表

等级	I 级(特别重大)响应	II 级(重大)响应	III 级(一般)响应
触发	理论值的 95% 及以上	理论值的 85%~95%	理论值的 75%~85%
解释说明	围堰边坡已临滑边缘,有失稳危险。必须封锁施工区域,紧急疏散人员,保障安全。需准备溃滑后的处理方案	立即警告施工方,制定加固排险方案,加强监测、注浆加固、清理松散体、设置排水系统等措施	立即警告施工方,组织专家团队勘查,加强安全管理,确保人员安全撤离和应急物资准备充足

况;后期上游水位下降后,围堰水平位移趋于稳定,未出现明显滑移或开裂情况,围堰顺利渡过洪水期。

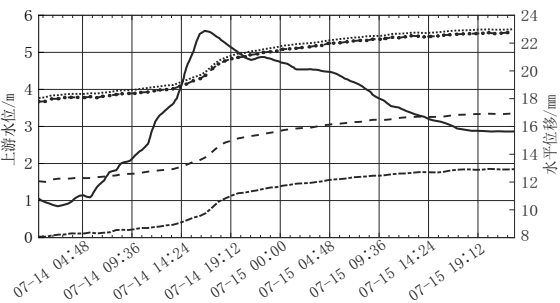


图 16 中间段土石围堰测点位移历时曲线图

5 结 语

土石围堰的稳定性分析较为复杂,涉及水位变化、降雨强度和降雨历时等因素。本文基于依托工程土石围堰有限元分析模型,围绕汛期水文信息对土石围堰稳定性进行分析,得出以下结论:

(1)以石渣为主填料形成的土石围堰,采用坡度为 1:1.5~1:2 的平缓围堰边坡,通过削坡设置反压平台形成的堰体结构,在汛期条件下,其稳定性整体均大于 1.15 且满足规范要求。

(2)结合汛期信息并通过有限元的模拟分析,汛期内水位变化会影响围堰的稳定性和安全性,迎水侧水位越高,堰坡的安全系数越大,而降雨强度增大会导致围堰表面土体的孔隙水压力增大,从而降低围堰的稳定性,降雨历时也会影响围堰的稳定性。

(3)汛期内上游水位于 14 日下午水位上升并变化率显著,对应的土石围堰水平位移急剧增加,但未见明显下沉或开裂情况;后期上游水位下降后,围堰水平位移趋于稳定,未出现明显滑移或开裂情况,围堰顺利渡过洪水期。

参考文献:

[1] 黄北圪. 饱和粉质粘土夹淤泥质土围堰抛填成型及稳定性模型试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.

(下转第 398 页)