

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.252



开放科学(资源服务)标识码OSID:



# 抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土围堰稳定性分析

江平<sup>1</sup>, 杨航<sup>2a</sup>, 朱碧堂<sup>2a,2b</sup>, 黄建宇<sup>3</sup>, 王浩<sup>4</sup>, 黄勇<sup>5</sup>, 刘斯浩<sup>6</sup>

(1. 江西省港航建设投资集团 港航运输有限公司, 南昌 330008; 2. 华东交通大学 a. 土木建筑学院;  
b. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013; 3. 南昌龙行港口集团有限公司, 南昌  
330029; 4. 江西交运物流有限公司, 南昌 330029; 5. 江西省路港工程有限公司, 南昌 330029;  
6. 江西省航道工程局, 南昌 330000)

**摘要:**江西信江双港航运枢纽采用导流明渠开挖的饱和粉质黏土夹淤泥质土进行围堰填筑, 施工过程中, 水下围堰由明渠浚挖土直接采用挖泥船进行水上抛填, 饱和粉质黏土受浚挖和抛填双重扰动, 强度低且堰体内分布极不均匀, 不仅围堰难于成型, 且运行期内易发生堰坡失稳。为了评估这类围堰堰坡的稳定性、探究水位涨落条件下抛填饱和粉质黏土围堰边坡的变形破坏模式, 采用有限元软件 PLAXIS 对信江双港航运枢纽上下游围堰开展不同水位及不同水位升降速率条件下的稳定性计算分析; 针对抛填形成的围堰土体强度变化范围大、受环境影响明显的特性, 开展堰坡稳定性的敏感性分析, 同时, 基于安全系数接近于 1.0 时的坡体最大侧向变形随时间的变化曲线, 提出堰体稳定自动监控的预警和报警值。结果表明: 采用坡度为 1:4~1:5 的平缓围堰边坡, 通过设置反压平台, 围堰在正常水位涨落条件下处于稳定状态; 抛填土的强度降低会诱发滑动体从背水面坡脚贯通到堰顶; 由于抛填饱和粉质黏土围堰的强度低和不均质性, 为确保围堰稳定, 须进行侧向变形、渗压及降雨量监测实时监控预警; 抛填饱和粉质黏土围堰侧向变形报警值和预警值宜取 1.5~2.0、1.1~1.5 mm/d。

**关键词:** 饱和粉质黏土; 围堰; 堰坡稳定性分析; 围堰稳定预警值

**中图分类号:** TV641.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2022)06-0022-11

**收稿日期:** 2021-07-28

**基金项目:** 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010、2019C0011); 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室资助项目(20161BCD40010)

**作者简介:** 江平(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事公路与桥梁工程研究, E-mail: 46559239@qq.com。

朱碧堂(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: btangzh@hotmail.com。

**Received:** 2021-07-28

**Foundation items:** Jiangxi Provincial Department of Transport Key Engineering Science and Technology Projects (No. 2019C0010, 2019C0011); Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Safety and Control in Jiangxi Province Funded Project (No. 20161BCD40010)

**Author brief:** JIANG Ping (1979-), senior engineer, main research interests: highway and bridge engineering, E-mail: 46559239@qq.com.

ZHU Bitang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: btangzh@hotmail.com.

## Stability analysis of cofferdam built with dredged saturated silty clay with soft clay dumped by boats

JIANG Ping<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>2a</sup>, ZHU Bitang<sup>2a,2b</sup>, HUANG Jiangyu<sup>3</sup>, WANG Hao<sup>4</sup>,  
HUANG Yong<sup>5</sup>, LIU Sihao<sup>6</sup>

(1. Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group Co., Ltd, Nanchang 330008, P. R. China; 2a. School of Civil Engineering and Architecture; 2b. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 3. Nanchang Longhang Port Group Co., Ltd, Nanchang 330029, P. R. China; 4. Jiangxi Jiaoyuan Logistics Co., Ltd, Nanchang 330029, P. R. China; 5. Road and Port Engineering Co., Ltd. of Jiangxi Province, Nanchang 330029, P. R. China; 6. Jiangxi Waterway Engineering Bureau, Nanchang 330000, P. R. China)

**Abstract:** Jiangxi Shuanggang Shipping & Navigation Project attempted to use the saturated silty clay with soft clay dredged from the open diversion channel to build the cofferdam. During construction, the dredged saturated silty clay was dumped by boats above the water, resulting in disturbed and non-homogenous silty clay with soft clay. This results in the difficulties to form the cofferdam with the desired gradients and failure of the cofferdam during operation. To assess the cofferdam stability during construction and operation with water level fluctuations, extensive numerical modelling using the finite element program PLAXIS was carried out. Further considering the non-uniformity of the dumped saturated silty clay and the variation of its strength with rainfall and evaporation, sensitivity analyses on the soil strength parameters were carried out. Based on the maximum lateral deformation curve of the cofferdam with the factor of safety close to 1.0, the yellow and red alarm levels were proposed for the remote real-time monitoring. The results indicate: the cofferdam with a slope of 1:4-1:5 and berms is stable at normal water levels; the reduction in strength of the dumped soil would induce instability of the downstream cofferdam slope from the toe to the top; due to the non-uniformity and low strength of the dumped saturated silty clay, remote real-time monitoring shall be carried out on the cofferdam lateral deformation, seepage pressure, and rainfall; based on the deformation curve with the factor of safety, the red and yellow alarm levels are 1.5-2.0 mm/d and 1.1-1.5 mm/d respectively.

**Keywords:** saturated silty clay; cofferdam; stability analysis of cofferdam; trigger levels for cofferdam stability

在水利水电和航运枢纽工程中,围堰是为了进行施工导流、保证水工或航运建筑进行干地施工或检修的重要临时性挡水建筑物<sup>[1-2]</sup>。围堰的安全与稳定不仅可保证整个工程施工的顺利进行,且对下游居民的生命和财产安全具有重要意义<sup>[3]</sup>。

围堰的破坏包括渗透破坏和堰体失稳破坏。迄今为止,有关围堰的渗透破坏和堰体失稳破坏及整治措施尚未形成完整、系统的评估体系<sup>[4-5]</sup>,且现有评估体系很少涉及黏性土围堰填料强度的时变特性<sup>[6]</sup>,不能有效、真实地反映抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土围堰堰坡的变形和稳定性状态。另外,随着传感器技术和数据远程传输技术的发展,自动化监测与失稳预警技术在边坡工程中得到了广泛应用<sup>[7-8]</sup>,但在临时围堰工程中应用较少,尚未建立围堰边坡稳定性的预警指标和安全评判指标。

初步设计时,江西省信江双港航运枢纽工程采用土石围堰,但由于周边填筑材料短缺,且临近汛期,工期紧,最终决定采用导流明渠浚挖的饱和粉质黏土夹淤泥质土代替土石料,采用挖泥船水上抛填作业,形成围堰,进行施工导流。饱和粉质黏土受浚挖和抛填双重扰动,强度低且在堰体内分布不均匀,不仅围堰难于成型,且运行期内易发生堰坡失稳。目前有关饱和粉质黏土全年围堰成功经验极少。为了评估这类围堰堰坡的稳定性、探究水位涨落条件下抛填饱和粉质黏土围堰边坡的变形破坏模式,采用有限元软件PLAXIS,依据信江最高洪水水位年(1998年)双港坝址流量资料并考虑全年水位涨落变化对围堰稳定性的影响,对信江双港航运枢纽上下游横向围堰开展不同水位及不同水位升降速率条件下的稳定性计算分析,针对抛填形成

的围堰土体强度变化范围大、受降水和蒸发影响明显的特性,开展堰坡稳定性的敏感性分析,基于数值模拟分析和安全系数与堰体变形的关系,提出对堰体进行远程自动监控的预警和报警值。

## 1 工程概况

### 1.1 施工概况

江西信江双港航运水利枢纽围堰为全年围堰,全长2 454 m,包括450 m上游横向围堰、1 459 m中游纵向围堰和545 m下游横向围堰。根据《水利水电工程围堰设计规范》(SL 645—2013)参考引用的规定,围堰设计级别为Ⅳ级,土石结构导流建筑物相应的设计洪水标准为10 a一遇。根据信江流域水文资料统计分析,双港航运枢纽枯水时段围堰设计流量 $Q$ 按 $7\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 设计,对应水位为13.92 m,洪水时段流量 $Q$ 按 $12\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 设计,10 a一遇设计洪水水位为19.94 m。围堰顶高按发生10 a一遇洪水考虑,考虑1.0 m的爬高,堰顶设计高程取为21 m。围堰工程布置如图1所示。

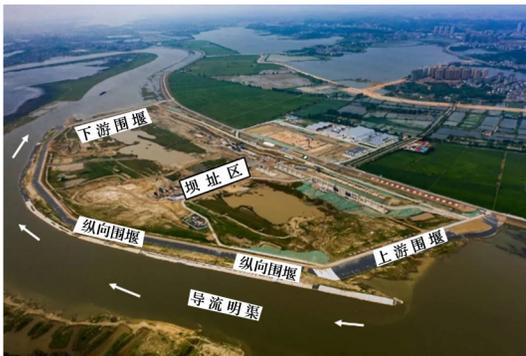


图1 围堰工程总体布置

Fig. 1 Overall arrangement of cofferdam project

上下游围堰迎水面坡度为1:5,布置袋装砂护坡和土工布组合防渗,背水面坡度为1:4,围堰内部闭气结构为单排水泥搅拌桩止水帷幕+单排高压旋喷桩防渗墙组合防渗。

上下游围堰水下部分采用明渠开挖的饱和粉质黏土,采用挖泥船进行水上抛填成型,水上以外购山皮土为主,分层堆筑而成。明渠开挖采用挖泥船进行疏浚,开挖的土层以黄色饱和粉质黏土(图2)为主,夹杂着灰色淤泥质土(图3)。通过现场观察可见,由于受开挖和水流影响,浚挖的土体表面含水量高、强度低,而内部存在未扰动的土块,导致土体强度极度不均。同时,采用挖泥船在水面直接抛填,土体在水中崩解、分散下沉,受到二次扰动,

导致用于填筑围堰的粉质粘土夹淤泥质土软化严重(图4)。



图2 浚挖的粉质黏土

Fig. 2 Dredged silty clay



图3 浚挖的淤泥质土

Fig. 3 Dredged soft clay



图4 抛填的粉质黏土

Fig. 4 Dumped silty clay

### 1.2 水文及地质条件

在信江水文监测中,未在双港坝址处设水文观测站。因此,双港坝址处逐日水位由坝址上游波阳及下游龙口水文站插值得到。考虑到1978年前后河道整治和近年来湖区及河道内挖沙对水位下切的影响以及资料的连续性,采用1991年以后的同期波阳、龙口站实测水位和推算的双港坝址流量资料进行水位流量关系分析。图5为历史最高洪水水位年(1998年)逐日水位变化关系曲线图,最高水位为20.84 m,发生在8月份,平均涨幅0.64 m/d。

据地面调查和钻探揭露,坝址河床地层主要由第四系全新统冲积层( $Q_4^{al}$ )及第三系新余群( $E_{3n}$ )组

成。原河床岩性自上而下依次划分为:①粉质黏土,约 2.5 m 厚;②淤泥质土,约 0.6 m 厚;③-1 中砂,约 3.6 m 厚;③-2 砾砂,约 1.05 m 厚;④圆砾,约 6 m 厚;⑤强、中风化泥质粉砂岩。第②层呈透镜体和尖灭分布形态,导致水下围堰填筑材料以粉质黏土为主,夹杂淤泥质土。

### 1.3 围堰填筑材料力学特性

根据抛填施工概况的描述,上下游围堰材料包括水下部分抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土和水上堆填的山皮土(以粉质黏土为主)。值得说明的是,在围堰填筑过程中发现,上、下游横向围堰在河流主槽处堰体填筑高度大,在后续填筑材料自重作用下,轴线处先期填筑的饱和粉质黏土夹淤泥质土不

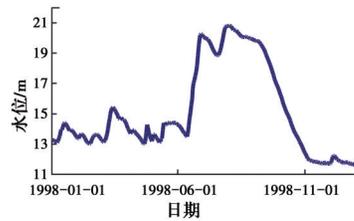


图 5 1998 年最高水位年逐日水位变化关系曲线

Fig. 5 Daily water level change curve in highest water level year 1998

断向围堰外侧和基坑内侧挤出,围堰长时间达不到稳定,最后通过削坡设置马道反压平台,稳定堤心,才形成了坡度为 1:4~1:5 的平缓围堰堰体。通过对成型稳定后的围堰进行钻孔分析,围堰最终的填筑形状近似如图 6 所示。

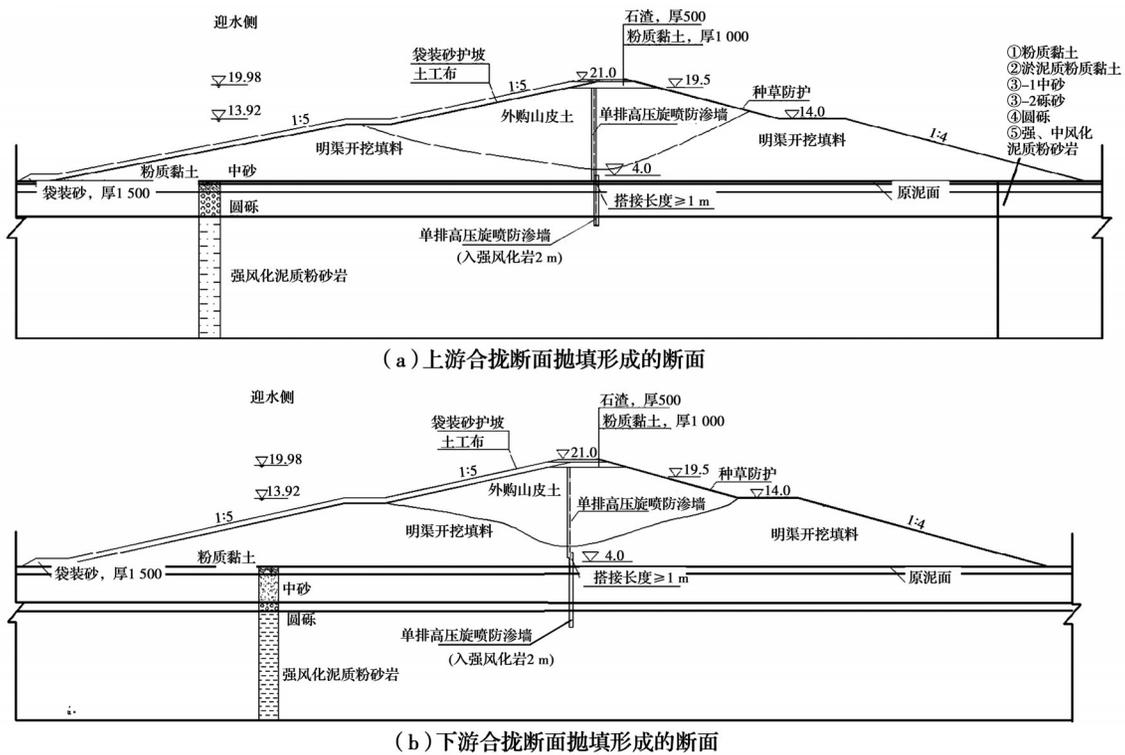


图 6 主槽处上下游围堰实际填筑形状

Fig. 6 Actual filling shape of the upstream and downstream at the main groove

为了解围堰抛填土体的力学特性,先后通过原位地质钻孔取样、挖泥船中取样和在成型稳定后的围堰上取样,进行室内测试分析。表 1 为在不同阶段得到的围堰抛填材料固结不排水剪强度参数。浚挖后土体强度远比原位取土得到的强度小,也比抛填成型后的强度小,并且浚挖和抛填后的土样强度变化范围大,不均匀性高。这反映了随机抛填以及浚挖和抛填双重扰动引起堰体材料离散性大的力学特

性,同时,容易受夏季降雨和水分蒸发等多种因素的影响(注:抛填成型后取土在 2019 年 9 月—10 月枯水期进行,围堰已固结 3 个月)。

## 2 围堰边坡稳定性分析

围堰的稳定性对保证整个工程施工的顺利进行和下游居民生命财产安全意义重大。除了自重作用下的稳定性外,在围堰内外水位差条件下,由

表 1 围堰抛填材料不同阶段强度参数  
Table 1 Strength parameters of cofferdam backfill material at different stages

取样阶段	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角/(°)
原位地勘	25.10~33.00	11.40~15.20
浚挖土样	6.87~20.20	4.12~9.80
抛填成型	12.50~26.70	7.00~11.90

于渗流也会导致堰体失稳<sup>[9-14]</sup>。笔者通过有限元数值模拟分析围堰堰体、堰基和防渗墙的安全性,为围堰的实时监控提供安全预警。

## 2.1 计算方法

采用 PLAXIS 2D 岩土工程有限元分析软件,对堰体、堰基材料选用 Mohr-Coulomb 本构模型、高压旋喷防渗墙采用弹性材料,对抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土围堰边坡进行稳定性分析。根据《水利水电工程围堰设计规范》(SL 645—2013)<sup>[15]</sup>,围堰设计级别为 IV 时,围堰边坡抗滑稳定安全系数取  $K \geq 1.05$ 。

由于围堰内外水位的涨落瞬态变化,在对围堰渗透稳定性分析时需考虑瞬态渗流和流固耦合<sup>[16]</sup>,即考虑渗流场与应力场的相互耦合作用。在 PLAXIS 渗透分析时,假设土体中孔隙水流动符合 Darcy 定律。

围堰的稳定计算采用强度折减法,即通过引入土体强度折减系数  $\Sigma M_{sf}$ ,使土体的强度参数  $c$  和  $\varphi$  及抗拉强度逐步减小,直到土体发生破坏。 $\Sigma M_{sf}$  定义为

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (1)$$

式中: $\varphi_{input}$ 、 $c_{input}$  分别为输入的土体内摩擦角和黏聚力; $\varphi_{reduced}$ 、 $c_{reduced}$  分别为拆减后的土体内摩擦角和黏聚力。如果计算模型不收敛,表明堰体或堰基达到完全破坏,相应的安全系数为

$$F_s = \text{可用强度} / \text{破坏强度} = \text{破坏时的} \Sigma M_{sf}$$

运用强度折减法计算围堰边坡的稳定问题时,判别边坡发展演化是否达到临界状态是关键之一。失稳判据主要有 3 种:

- 1) 以有限元计算过程中力和位移是否收敛作为判断标准。
- 2) 认为边坡内塑性区域或广义剪应变贯通即为边坡失稳。
- 3) 以选取特征点的位移发生突变为失稳破坏标志。

为观察围堰边坡滑移面形状和破坏机制是否得到充分发展,选取判据 2) 和判据 3) 作为围堰失稳破坏的判别标准。

## 2.2 工况设置

依据现场钻孔获取的围堰地层断面图,选取上下游河流主槽内的合拢段进行分析计算,相应的堰体和堰基地质剖面如图 6 所示。材料模型参数见表 2,考虑到围堰材料的高度不均匀性,有限元分析时采用抛填成型后的最不利指标(最小值)。考虑到影响围堰材料强度参数多(包括浚挖、抛填扰动、降雨和蒸发、自重固结等),在敏感性分析中进一步考虑了强度参数的增减。

表 2 围堰堰体和堰基材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the materials in cofferdam body and base

围堰材料	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	天然容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/kPa	泊松比
上游外购土	21.30	10.70	$6.17 \times 10^{-5}$	18.40	19.30	10 240	0.3
下游外购土	18.70	8.10	$6.17 \times 10^{-5}$	18.40	19.30	10 240	0.3
明渠开挖土	12.50	7.00	$6.17 \times 10^{-5}$	19.70	19.70	8 820	0.3
粉质黏土	20.00	13.00	$7.0 \times 10^{-5}$	18.80	20.00	8 640	0.3
中砂	0	28.00	$1.0 \times 10^{-3}$	18.00	19.00	12 000	0.3
圆砾	0	35.00	$1.0 \times 10^{-2}$	18.60	19.60	36 000	0.3
防渗墙			$5.0 \times 10^{-6}$	22.00	23.00	300 000	0.2
强风化岩	100	35.00	$1.0 \times 10^{-4}$	20.00	21.00	300 000	0.3

为模拟围堰竣工后的全年运营情况、在水位变化情况下边坡稳定系数的变化,计算工况包括枯水期(工况 A1)和洪水位(工况 B2)稳定渗流、水位以不同速度从枯水期水位上涨至洪水位(工况

C3~C6)、水位以不同速度从枯水期水位上涨至洪水位后以不同速率降至枯水位(D7~D10)等 10 个工况,如表 3 所示。

表 3 围堰稳定计算工况  
Table 3 Calculation cases of cofferdam stability analysis

计算工况	说明	$V_a/(m \cdot d^{-1})$	$V_d/(m \cdot d^{-1})$
A1	枯水位稳定渗流		
B2	洪水位稳定渗流		
C3	从 13.92 m 上升到 19.94 m	0.05	
C4	从 13.92 m 上升到 19.94 m	0.1	
C5	从 13.92 m 上升到 19.94 m	0.2	
C6	从 13.92 m 上升到 19.94 m	0.6	
D7	0.1 m/d 上升到 19.94 m 后下降到 13.92 m		0.2
D8	0.1 m/d 上升到 19.94 m 后下降到 13.92 m		0.6
D9	0.2 m/d 上升到 19.94 m 后下降到 13.92 m		0.05
D10	0.2 m/d 上升到 19.94 m 后下降到 13.92 m		0.1

注:表中  $V_a$ 、 $V_d$  分别代表水位上升、水位下降。

2.3 计算结果分析

各计算工况所得围堰稳定安全系数列于表 4, 部分典型工况的安全系数和滑移面(红色箭头标识部分为滑动体)示于图 7~图 10。

表 4 各工况稳定安全系数计算结果

Table 4 Calculation results of stability safety factor of each working case

计算工况	上游围堰		下游围堰	
	$F_s$	失稳侧	$F_s$	失稳侧
A1	1.195	背水面	1.265	背水面
B2	1.162	背水面	1.188	背水面
C3	1.167	背水面	1.210	背水面
C4	1.168	背水面	1.213	背水面
C5	1.170	背水面	1.220	背水面
C6	1.176	背水面	1.233	背水面
D7	1.187	背水面	1.245	背水面
D8	1.182	背水面	1.231	背水面
D9	1.191	背水面	1.257	背水面
D10	1.189	背水面	1.253	背水面

1)采用抛填成型后的最小强度参数,所有计算工况的安全系数均大于 1.05;在设计枯水位、设计洪水位及不同水位涨落条件下,抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土围堰稳定性均满足规范要求。这表明采用坡比很小(1:4~1:5)的抛填软粘土围堰,通过削坡设置马道反压平台,可确保围堰的安全稳定;

2)所有工况发生潜在滑移的土体均位于背水侧堰体内,背水侧坡度较大,为渗透出流面。对于上游围堰,滑移面位于马道平台以下,而下游围堰滑移面从坡脚贯通到堰顶,主要是两者最终形成的堰体土层分布不同。相应地,下游围堰的安全系数

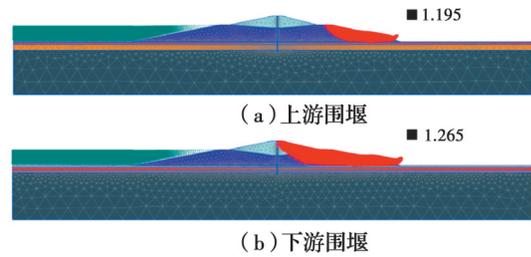


图 7 枯水期安全系数与危险滑移面位置(工况 A1)  
Fig. 7 Safety factor and location of dangerous slip plane at dry season (LC A1)

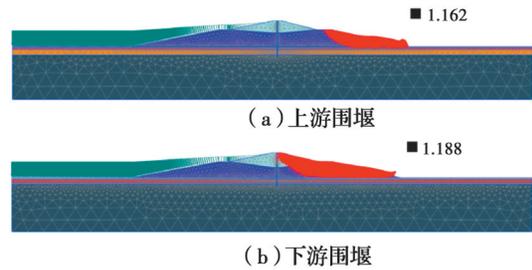


图 8 洪水期安全系数与危险滑移面位置(工况 B2)  
Fig. 8 Safety factor and location of dangerous slip plane at flood period (LC B2)

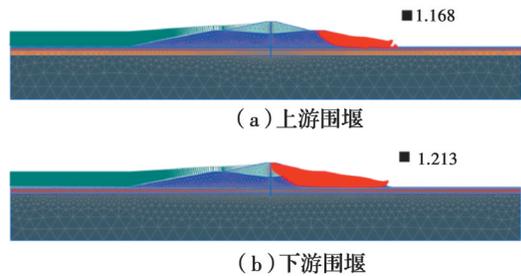


图 9 水位以 0.1 m/d 上升时安全系数与危险滑移面位置(工况 C4)  
Fig. 9 Safety factor and location of dangerous slip plane for water level rising at 0.1 m/d (LC C4)

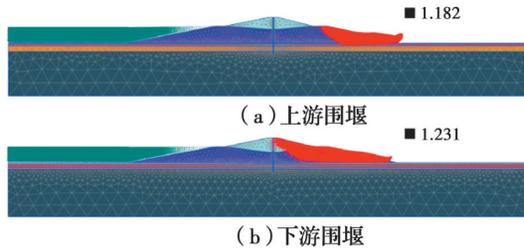


图10 水位以0.6 m/d快速下降时安全系数与危险滑移面位置(工况D8)

Fig. 10 Safety factor and location of dangerous slip plane for water level dropping at 0.6 m/d (LC D8)

比上游围堰的安全系数大。从安全角度考虑,应降低围堰背水面坡度;

3)汛期高水位稳定渗流工况(B2)的安全系数为1.162,小于枯水位稳定渗流工况A1的1.195。这主要是由于在高水位条件下,堰内渗透压力增大的缘故。但在工程实践中,还必须考虑水位上升后,围堰黏性填筑材料由于浸水后抗剪强度降低,从而引起围堰的失稳破坏;

4)堰外水位上升(工况C3~C6)时的安全系数小于枯水位稳定渗流工况A1,随着水位上升速度的增加,安全系数稍有增加。这主要是高水位上升速度小于低水位上升速度条件下的堰体渗透力。总的来看,水位上升速度对堰体的稳定安全系数影响不大;

5)堰外水位下降(工况D7~D10)得到的安全系数小于水位上升的工况(C3~C6),并且下降速度越快,围堰的安全系数越小。这主要是由于黏性填筑材料较低的渗透性,当堰外水位消落时围堰内部水位来不及排出,使得堰体重量增大,并存在未能及时消散且梯度变化较大的孔隙水压力,形成向坡外的非稳定渗流,不利于围堰稳定,特别是对于坡比较陡、水位临空的背水面边坡,易出现贯通的滑弧破坏。

6)总的来看,水位涨落对抛填粉质黏土夹淤泥质土的围堰堰体稳定安全系数影响较小,该结果与常规土石围堰结果不同,因为一般认为水位降落对土石坝或围堰的安全系数影响较大。主要原因可能是由于抛填粉质黏土和外购山皮土的渗透系数均很小,在瞬态渗流分析时,背水面处的渗透压力变化不大。图11给出了几种典型工况下背水面马道边缘处的孔隙水压力沿深度的分布曲线,可见,各工况之间的渗压差别不大。

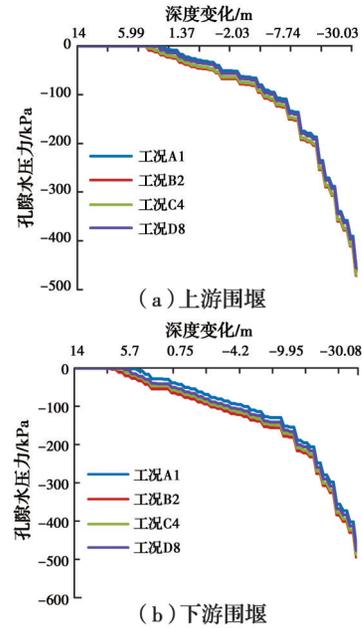


图11 上下游马道边缘处孔隙水压力沿深度分布(工况A1、B2、C4和D8)

Fig. 11 Distribution of pore water pressure along depth at the edge of upstream and downstream bridgeway (LC-A1, B2, C4 and D8)

### 3 围堰边坡参数敏感性分析

#### 3.1 敏感性分析方案

由于浚挖和随机抛填双重扰动、运营期间降雨和蒸发以及自重固结等多因素影响,饱和粉质黏土堰体强度呈现高度不均匀性。因此,有必要对围堰边坡稳定进行敏感性分析<sup>[17-19]</sup>。

以工况C3为例,依据先导孔勘报告土样检测结果,计算得出堰体土层主要参数指标的平均变化幅值,在此基础上进行敏感性分析,包括明渠开挖土(抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土)内摩擦角(增大和降低 $2^\circ$ )、黏聚力(增大或降低3 kPa)、渗透系数(增大或降低10倍),外购土内摩擦角(增大和降低 $2^\circ$ )、黏聚力(增大或降低5 kPa)和渗透系数(增大或降低10倍),防渗墙渗透系数(增大或降低10倍),其余参数及边界条件与基本工况相同。

#### 3.2 敏感性分析结果讨论

图12~图18分别给出了堰体明渠开挖土内摩擦角、黏聚力、渗透系数,外购土内摩擦角、黏聚力、渗透系数以及防渗墙渗透系数对围堰稳定安全系数 $F_s$ 的影响。

1)明渠开挖土内摩擦角、黏聚力显著影响围堰边坡稳定性。随着明渠开挖土内摩擦角和黏聚力的增长,围堰稳定安全系数近似线性增长,当明渠

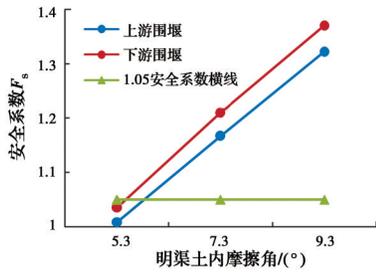


图 12 明渠开挖土内摩擦角对围堰安全系数影响  
Fig. 12 Effect of internal friction angle of dredged soil on cofferdam safety factor

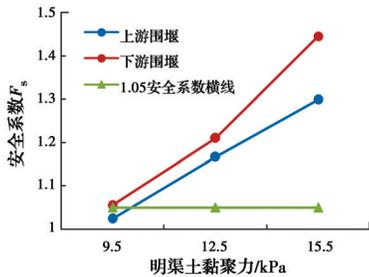


图 13 明渠开挖土黏聚力对围堰安全系数影响  
Fig. 13 Effect of cohesion of dredged soil on cofferdam safety factor

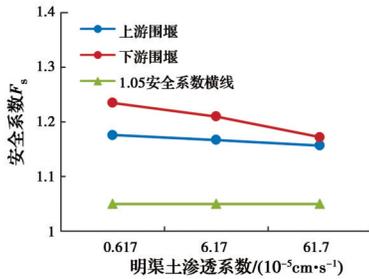


图 14 明渠开挖土渗透系数对围堰安全系数影响  
Fig. 14 Effect of permeability of dredged soil on cofferdam safety factor

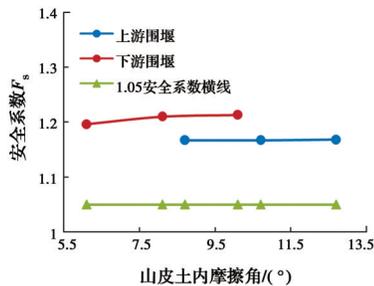


图 15 山皮土内摩擦角对围堰安全系数影响  
Fig. 15 Effect of internal friction angle of hill-skill soil on cofferdam safety factor

开挖土内摩擦角降低 2°或黏聚力降低 3 kPa时,上下游围堰的稳定安全系数均小于 1.05,不满足规范设计要求。因此,强度是控制围堰失稳的关键

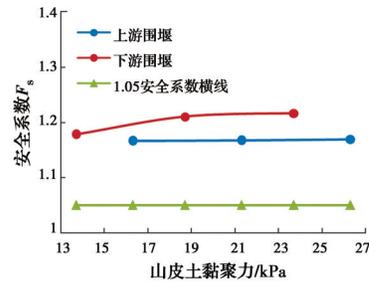


图 16 山皮土黏聚力对围堰安全系数影响  
Fig. 16 Effect of cohesion of hill-skill soil on cofferdam safety factor

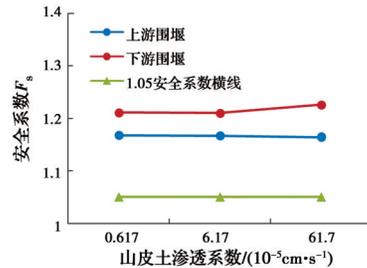


图 17 山皮土渗透系数对围堰安全系数影响  
Fig. 17 Effect of permeability of hill-skill soil on cofferdam safety factor

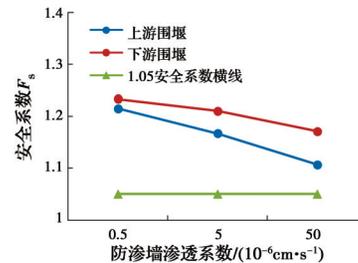


图 18 防渗墙渗透系数对围堰安全系数影响  
Fig. 18 Effect of permeability of cut-off wall on cofferdam safety factor

因素。

2)当明渠开挖土渗透系数为  $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{cm/s}$  量级时,围堰稳定性程度会随着其数值的增大而减小,但由于上下游围堰填土的分布差异,渗透系数变化对上游围堰稳定性安全系数的影响较小,而对下游围堰安全系数影响则较为明显。

3)由于围堰失稳主要发生在背水面抛填饱和粉质黏土夹淤泥层内,围堰安全稳定性受外购山皮土内摩擦角、黏聚力和渗透系数的变化影响差异不大。

4)防渗墙渗透系数在一定范围变动时,上下游围堰的安全系数只降低了 4%~6%,这是由于抛填粉质黏土和外购山皮土的渗透系数( $10^{-5} \text{cm/s}$ )较小、

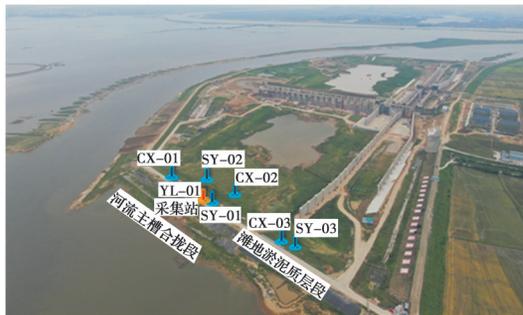
可视为不透水堰体的缘故。

综上所述,影响围堰边坡稳定的因素依次为:明渠土内摩擦角、黏聚力、防渗墙渗透系数、明渠土渗透系数、山皮土内摩擦角、山皮土黏聚力、山皮土渗透系数。

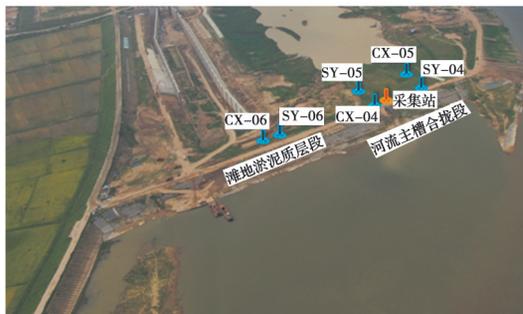
### 4 实时监测与预警值

通过参数敏感性分析发现,抛填粉质黏土夹淤泥质土的强度决定了围堰的稳定性,然而由于开挖和抛填双重扰动、运营期间降雨和蒸发以及自重固结等多因素影响,堰体黏性土强度极为不均,为围堰的稳定安全控制带来极大隐患。因此,对围堰进行实时变形监控预警是确保围堰安全运营的重要手段,而实时监控预警的关键在于预警值的确定。

以下游围堰为例,当抛填土内摩擦角、黏聚力分别降低 3°和 4 kPa 时,在最不利工况 B2(高洪水位渗流)条件下,围堰稳定安全系数从 1.188 下降至约 1.0,整个背水面边坡处于临界破坏状态(表 5)。因此,建议对上下游横向围堰背水面边坡(河流主槽段和滩地淤泥质层段)进行全方位的侧向变形、渗压及降雨量远程自动监控,随时获知围堰的变形稳定状态<sup>[20-23]</sup>。图 19 所示为上游和下游围堰自动监



(a) 上游围堰



(b) 下游围堰

图 19 围堰边坡实时监测测点布置

Fig. 19 Real-time monitoring of cofferdam slopes

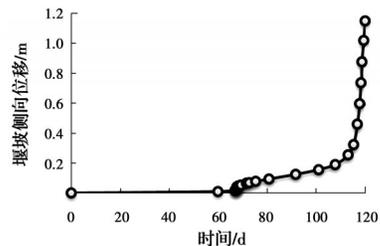
控位置,上、下游围堰背水面边坡区域共布设 13 个监测点,其中,除了 5 个在围堰轴向线外,另 7 个布置在背水面不稳定滑坡主体的马道处。

表 5 工况 B2 降低强度参数与原参数稳定性对比

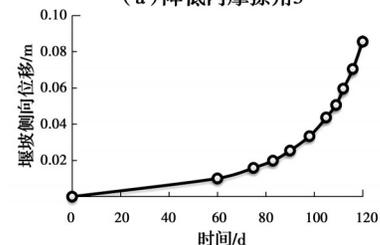
Table 5 Comparison of stability between reduced strength parameters and initial parameters under condition B2

计算工况 B2	安全系数	塑性区分布
原参数	1.19	位于马道下方
内摩擦角降低 3°	1.00	背水面坡脚贯通到堰顶
黏聚力降低 4 kPa	0.97	位于马道下方

此外,对边坡失稳进行预警预测时,选择坡体特征点位移量作为变形预警的界定依据是评估滑坡稳定性的有效方法。如图 20 所示,当围堰接近失稳破坏时,背水面马道坡顶处最大侧向变形随着时间的变化经历了初始固结变形阶段、早期等速变形阶段、破坏前加速变形阶段和破坏时急剧加速阶段。



(a) 降低内摩擦角 3°



(b) 降低黏聚力 4 kPa

图 20 下游围堰合拢处背水面最大侧向变形随时间变化关系 ( $F_s < 1.0$ )

Fig. 20 Relationship between the maximum lateral deformation of the back water surface at the berm of downstream cofferdam and time ( $F_s < 1.0$ )

结合图 21 分析结果,在实施自动监控预警时,可将破坏时的急剧变形速率作为堰坡失稳的报警值<sup>[24-25]</sup>,依据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497—2019)<sup>[26]</sup>,取 70% 报警值为预警值。相应的围堰侧向变形报警值和预警值分别为 1.5~2.0、1.1~1.5 mm/d。

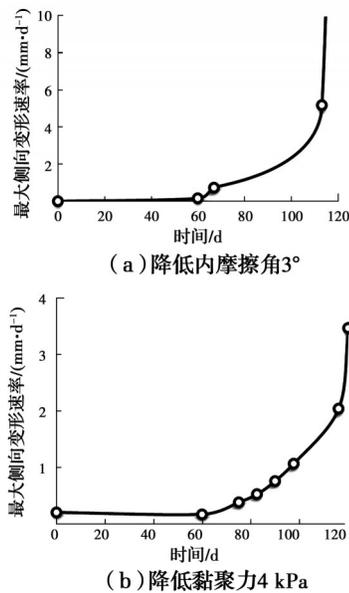


图21 下游围堰合拢处背水面最大侧向变形速率随时间变化关系(FOS<1.0)

Fig. 21 Relationship between the maximum lateral movement rate of the back water surface at the berm of the downstream cofferdam and time (FOS<1.0)

## 5 结论

以江西信江双港航运枢纽工程上下游围堰为例,研究抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土围堰在不同地质截面、不同水位、不同水位变化速度工况下的围堰边坡稳定问题,并针对抛填土体的强度的高度不确定性,对影响围堰稳定的主要因素开展了敏感性分析,并通过围堰边坡临界状态(安全系数接近1.0)条件下的变形分析,给出了确定围堰实时监控的预警值。通过计算分析得出以下结论:

1)水下抛填形成的饱和粉质黏土夹淤泥质土围堰,通过水上堆填外购黏土稳定堤心,采用坡度为1:4~1:5的平缓围堰边坡,通过削坡设置反压平台形成的堰体结构,在河道水位周期涨落条件下,其稳定性满足规范要求。

2)抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土和上覆外购黏土形成的围堰,其稳定性受抛填饱和粉质黏土夹淤泥质土的强度控制,但由于抛填土受开挖和抛填双重扰动以及环境因素影响,其强度不确定性大,主体结构施工期间,为确保围堰全年稳定,应对围堰侧向变形进行实时监控预警。

3)对江西信江双港航运枢纽工程上下游围堰工程提出围堰最大侧向变形预警和报警值分别为1.1~1.5、1.5~2.0 mm/d。

## 参考文献

- [1] 张嵩云,毛卉.洪水过程的菲律宾Kauswagan电站围堤渗流及边坡稳定分析[J].水运工程,2020(5):55-60.  
ZHANG S Y, MAO H. Dike seepage and slope stability analysis of Philippines's Kauswagan Power Plant in flood process [J]. Port & Waterway Engineering, 2020(5): 55-60. (in Chinese)
- [2] DALMORA C T, OTA J J. Study of the flow around cofferdams constructed in running water through computational model [J]. RBRH, 2018, 23.
- [3] 刘明洋.超标洪水对上游土石围堰产生漫顶溃决的过程研究[D].湖北宜昌:三峡大学,2018.  
LIU M Y. Research on the process of the upstream earthrock cofferdam break by overtopping [D]. Yichang, Hubei: Three Gorges University, 2018. (in Chinese)
- [4] 陈凌伟.软基上大砂袋围堰的变形与失稳模式研究[D].广州:华南理工大学,2016.  
CHEN L W. Deformation and failure mode of the large-scale geotextile sand container cofferdam on soft foundation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 张超.高土石不过水围堰边坡失稳风险分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(Sup2):4157-4163.  
ZHANG C. Risk analysis of slope instability of high earth no-overflow-cofferdam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup2): 4157-4163. (in Chinese)
- [6] 罗立哲,胡志根,刘全,等.高土石围堰施工-运行过程边坡稳定性分析[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(1):84-88.  
LUO L Z, HU Z G, LIU Q, et al. Slope stability analysis of high earth-rock cofferdam considering construction and working processing [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(1): 84-88. (in Chinese)
- [7] XU J B, LI H, DU K, et al. Field investigation of force and displacement within a strata slope using a real-time remote monitoring system [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(15): 1-11.
- [8] 赵焯锋.自动化监测系统在水电站库区滑坡监测中的研究与应用[D].北京:中国地质大学(北京),2018.  
ZHAO Y F. Research and application of automatic monitoring system in landslide monitoring in reservoir area of water power station [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [9] 吴梦喜,宋世雄,吴文洪.拉哇水电站上游围堰渗流与应力变形动态耦合仿真分析[J].岩土工程学报,2021,43(4):613-623.  
WU M X, SONG S X, WU W H. Dynamic coupled simulation analysis of seepage and stress deformation of

- upstream cofferdam of Lava Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 613-623. (in Chinese)
- [10] MADANAYAKA T A, SIVAKUGAN N. Adaptation of method of fragments to axisymmetric cofferdam seepage problem [J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(9): 06017012.
- [11] 王克忠, 金志豪, 杨麦珍, 等. 取水塔基坑开挖过程倒悬岩坎围堰渗流稳定性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 415-422.  
WANG K Z, JIN Z H, YANG M Z, et al. Permeability stability study of overhang rock cofferdam during excavating foundation pit of water intake tower [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup2): 415-422. (in Chinese)
- [12] DENG Y, HE C H, FU S J, et al. Finite element analysis on earth-rock cofferdam behavior during pumping and drainage of foundation pit [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 376: 012022.
- [13] SULOVSKA M, STACHO J, KOPECKY M. The stability analysis of a cofferdam using the numerical modelling [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 960: 022068.
- [14] 董存军. 考虑渗流效应的大型土石围堰稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
DONG C J. Research on stability of large earth-rock cofferdam under the seepage effect [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [15] 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.  
Design code for cofferdam of water resources and hydropower engineering: SL 645-2013 [S]. Beijing: China WaterPower Press, 2013. (in Chinese)
- [16] 叶琪, 简文彬, 张登, 等. 驳岸岸坡渗流及其稳定性有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 38-42.  
YE Q, JIAN W B, ZHANG D, et al. Finite element analysis on seepage and stability of revetment bank slope [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(4): 38-42. (in Chinese)
- [17] 张珂峰. 库水位骤降联合降雨边坡稳定敏感性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 17-20.  
ZHANG K F. Sensitivity analysis of slope stability with combined rainfall and sudden drop of reservoir water level [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(6): 17-20. (in Chinese)
- [18] 贺新星, 王瑞骏, 闫菲. 厚层淤泥质地基高土石围堰边坡抗滑稳定敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 196-201.  
HE X X, WANG R J, YAN F. Analysis of slope stability sensitivity of high earth-rock cofferdam on the thick silt foundation [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 196-201. (in Chinese)
- [19] 王睿星, 王瑞骏, 赵叶. 深覆盖层上高土石围堰渗流场的敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 215-218, 225.  
WANG R X, WANG R J, ZHAO Y. Sensitivity analysis of seepage field of high earth-rock cofferdam in deep overburden [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 215-218, 225. (in Chinese)
- [20] 刘汉东, 王四巍. 小浪底水利枢纽东苗家滑坡预警系统研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(9): 1-9.  
LIU H D, WANG S W. Early warning system of Dongmiaojia landslide body in Xiaolangdi water control project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(9): 1-9. (in Chinese)
- [21] 陈明杰, 桑登峰, 娄学谦. 素咬合止水桩土石围堰监测及变形分析[J]. 水运工程, 2020(8): 195-201.  
CHEN M J, SANG D F, LOU X Q. Monitoring and analysis of deformation for earth-rock cofferdam with pure concrete linked water cut-off pile [J]. Port & Waterway Engineering, 2020(8): 195-201. (in Chinese)
- [22] CUI H B, LIU B X, ZHANG C L, et al. Discussion on deformation monitoring method of asphalt concrete core wall of high earth-rock dam [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 525: 012163.
- [23] 伍琪琳, 焦淑贤. 基于监测系统的某干施工围堰渗漏的发现及处理[J]. 水运工程, 2018(10): 189-193, 206.  
WU Q L, JIAO S X. Detection and treatment for leakage of a dry-construction cofferdam based on monitoring system [J]. Port & Waterway Engineering, 2018(10): 189-193, 206. (in Chinese)
- [24] 任杰, 苏怀智, 杨孟, 等. 边坡位移预警指标的实时估计与诊断[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 30-36.  
REN J, SU H Z, YANG M, et al. Real-time estimation and diagnosis of early warning indicator of slope displacement based on POT-catastrophe theory [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 30-36. (in Chinese)
- [25] JU N P, HUANG J, HE C Y, et al. Landslide early warning, case studies from Southwest China [J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105917.
- [26] 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Technical standards for building foundation pit engineering monitoring: GB 50497-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)