doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2022.05.015

基于 Geo-studio 的尾矿库加高扩容后坝体稳定性分析

王 峰[1],杨 勇[1],王宇驰[1],王薪荣[2],胡 军[3],杨 斌[3]
(1.鞍钢集团矿业弓长岭有限公司露采分公司,辽宁 辽阳 111000;
2.辽宁科技大学 矿业工程学院,辽宁 鞍山 114051;
3.辽宁科技大学 土木工程学院,辽宁 鞍山 114051)

摘 要:加高已有尾矿坝是扩大尾矿库库容的一种经济可行的办法,但尾矿库等级升高,溃坝风险增大。以辽宁某尾矿库为例,通过现场勘查和室内试验获得堆积层基本物理力学参数;对比实测浸润线,利用 Geo-studio 软件模拟分析尾矿坝加高前后渗流场并优化渗透系数,进一步分析坝体静力稳定性和地震动力响应。结果表明:尾矿库浸润线最小埋深在 10 m 以上,符合规程要求;采用瑞典圆弧法和简化 Bishop 法计算的安全系数均高于允许最小安全系数,地震对坝体安全性影响较小,只有局部液化;加高后最危险滑面位于初期坝附近 370 m 标高以下,主要为深层圆弧形滑移,原因是尾粉土渗透性较低导致浸润线升高,建议实时监测尤其是洪水期浸润线高度,必要时采取相应措施降低浸润线,有效杜绝渗透破坏。

关键词:尾矿坝;稳定性;加高扩容;动力响应;安全系数
中图分类号:TD926.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-4172(2022)05-0090-09

Stability analysis of tailings dam after heightening and capacity expansion based on Geo-studio

WANG Feng[1], YANG Yong[1], WANG Yuchi[1], WANG Xinrong[2], HU Jun[3], YANG Bin[3]
(1. Open-pit Mining Branch of Ansteel Mining Gongchangling Co., Ltd., Liaoyang Liaoning 111000, China;
2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China;
3. School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China)

Abstract: It is an economic and feasible method to enlarge the capacity of the tailings pond by heightening the existing tailings dam. However, the grade of the tailings pond increases, and the risk of dam break increases. Taking a tailings pond in Liaoning province as an example, the basic physical and mechanical parameters of the accumulation layer are obtained through field investigation and laboratory tests. Compared with the measured phreatic line, the seepage field of the tailings dam after heightening is simulated and analyzed by Geo-studio software, the permeability coefficient is optimized, and the static stability and seismic dynamic response of the dam are further analyzed. The results show that the minimum buried depth of the saturation line of the tailings pond is more than 10 m, which meets the requirements of regulations. The safety factors calculated by the Swedish slip circular method and simplified Bishop method are higher than the allowable minimum safety factor. The earthquake has little impact on the safety of the dam, and only local liquefaction is found. The most dangerous sliding surface of the heightened tailings dam is located near the initial dam and below the elevation of 370 m. The reason is that the permeability of tail silt is low, increasing by increasing phreatic line. It is recommended to monitor the height of the phreatic line in real-time, especially during the flood period. If necessary, take corresponding measures to reduce the phreatic line, to effectively prevent seepage damage.

Key words: tailings dam; stability; heightening and capacity expansion; dynamic response; safety factor

尾矿库是矿山建设不可或缺的重要组成部分。因场址位置选择、堆积高度、尾矿水渗流作用、岩土体弱化等,尾矿坝存在溃坝危险,一旦溃坝容易造成人造泥石流等重大事故。近年来,国内外均有报道尾矿库溃坝事故,如 2000 年罗马尼亚乌鲁尔金矿因

收稿日期:2022-05-18
基金项目:辽宁省教育厅重点项目(2017LNZ003);辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0322)
作者简介:王 峰(1973—),男,工程师,主要从事金属矿山开采技术与管理等工作。
通信作者:王薪荣(1988—),男,博士、讲师,主要从事矿山岩体力学及边坡稳定性研究。

连续降雨使废水漫坝,1 万多立方米含氰化物等重金属的污水流经之处所有生物无一生还;2009 年 8 月俄罗斯 Karamken 尾矿库因强降雨发生溃坝,造成至少 1 人死亡 11 座房屋摧毁[1]。

随着矿产资源快速开采,排出尾矿激增,所需尾矿库容也逐步增加。为了保证矿山持续安全生产,必须新建尾矿库或加高已有尾矿库。新建尾矿库需要重新征用紧缺的土地资源,必然会耗费大量资金。相比之下,加高并扩大现有尾矿库是更为经济可行的办法。尾矿坝的加高又会面临更大安全风险,尾矿坝稳定性研究一直是矿山生产安全研究的重点和难点问题[2]。尾矿坝的稳定性监测与维护占用大量资金,严重影响矿山企业经济效益,同时尾矿库溃坝可能威胁到下游居民的生命财产安全[3]。国内外学者应用自动化监测、物理实验、理论分析、数值分析、不确定性分析等方法[4-7],考虑堆积土层分布、岩土体物理力学性质、水渗流及其对岩土体弱化作用、地震或洪水等极端天气影响[8-12],分别从不同角度分析了影响尾矿坝稳定性的因素及其影响程度。综合现有研究表明,尾矿坝结构特征、渗流、地震液化等因素是尾矿坝溃坝的主要因素[13]。不同尾矿库类型、原始地层结构、堆积层分布、水源补给和施工管理等都存在很大差异,因此针对要研究的尾矿库需要综合不同方法有针对性分析尾矿坝稳定性。

据此,本研究在现场勘察、室内试验基础上,通过 Geo-studio 软件模拟分析辽宁某尾矿库加高扩容前后渗流场、长期稳定性和地震动力响应。分析复杂地层中库内浸润线变化规律及形成原因,计算坝体在正常运行、洪水运行和地震载荷组合作用下的稳定性,揭示尾矿坝可能存在的失稳破坏形式,并提出应对措施,为尾矿库安全管理提供参考。

1　工程概况

辽宁某尾矿库三面环山,位于低山丘陵间“V”字型沟谷中,属于山谷型尾矿库(图 1)。无不良地质作用,无较大规模崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。矿区内无较大地表水体,主要为山间融水和基岩裂隙水和大气降水。尾矿库初期设计坝高为 88 m,库容约 900 万 m^3,为三等尾矿库。初期坝坝脚标高 290.05 m,坝顶标高 308.5 m,坝高 23.5 m,外坡比 1∶2,初期坝为透水堆石坝,外坡采用块石护坡,并种有植被(图 2)。尾矿库现状堆积标高为 373.0 m,高约为 64.5 m,堆积坝外坡平均坡比 1∶5,库内水位标高 368.68 m,干滩长度约为 279.0 m,平均干滩坡度为 1%。排水系统采用排水井-排水管方式,排水管下游出口设有消力池。采用上游式筑坝工艺堆筑子坝,坝体外坡面已形成 11 级马道,马道宽为 2～60 m 不等,坝面采用山皮土覆盖,种有植被。

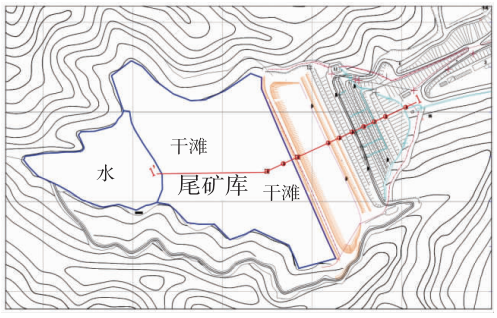

图 1　尾矿库平面布置图

Fig. 1　Layout plan of tailings pond

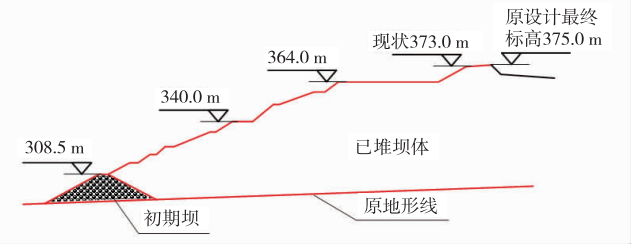

图 2　尾矿坝现状典型断面图

Fig. 2　Typical section of tailings dam

现状堆积标高为 373.0 m 邻近设计标高 375.0 m。为保证选矿厂尾矿的正常排放,满足矿山安全运营要求,经现场踏勘并依据相关规程,对尾矿库进行加高扩容设计。设计加高后坝顶标高增至 424.0 m,增高 49 m,新增库容约 1 020 万 m^3,总坝高 139.0 m,总库容约 1 954.63 万 m^3。按照最新《尾矿设施设计规范》(GB 50863－2013),尾矿库增高扩容后为二等库。

2　尾矿坝渗流场模拟计算

尾矿坝稳定性受水渗流和外部载荷耦合作用,尾矿库内水位变化是尾矿坝稳定性的重要影响因素之一。库内水在坝体内由高处向低处渗透流动,驱使部分岩土颗粒移动而产生渗透变形,进而形成洞穴或渗流通道。随着尾矿坝逐渐升高,库内积水面积增大,坝体内浸润线和岩土体力学性质发生变化。在渗流、自重应力和地震作用下,若安全系数低于临界值,则尾矿坝可能溃坝决堤。因此,通过监测或计算坝体内浸润线等指标,了解尾矿坝渗流场是尾矿坝稳定性分析的关键一步。

2.1 计算方法及方案

Geo-studio 软件是一套模拟地质工程和地质环境的仿真软件,SEEP/W 模块可以模拟任何复杂的孔隙介质材料渗流问题,可以直接将渗流模拟结果导入 SLOPE/W 模块模拟不同工况下边坡稳定性[14]。本次计算以实测浸润线为准,选取尾矿坝中轴线方向的剖面为典型断面,进行渗流和稳定性分析。首先基于渗透性试验得到的基本参数,通过 Geo-studio 软件的 SEEP/W 模块模拟渗流场及浸润线;其次对比实测浸润线,修正渗透系数;在此基础上模拟分析尾矿坝加高后长期稳定性。

2.2 渗透系数修正

如图 1 所示,选取尾矿坝中轴线方向相对最不利的 1-1 剖面为典型断面,依据勘察规范钻取各层岩土试样,进行基本物理力学试验获得各层岩土主要物理力学参数见表 1。如图 3 所示,建立数值模拟模型,首先模拟计算现状坝顶标高为 373.0 m 时浸润线及渗流场,现状正常运行库内水位标高为 368.68 m。

表 1 修正前后各材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials before and after correction

地层编号	地层名称		重力密度 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	抗剪强度指标		修正前垂直渗透系数 $K_v/(cm\cdot s^{-1})$	修正后垂直渗透系数 $K_v/(cm\cdot s^{-1})$	垂直与水平渗透系数比 K_v/K_h
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(°)$			
①	素填土		21	15	32	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	1.0
①$_1$	碎石	初期坝	23	1	36	5.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}	1.0
②	尾中砂	水上	20	5.5	31	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	0.3
	尾中砂	水下	22	5	28	1.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}	0.3
③	尾细砂	水上	19	6	30	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.2
	尾细砂	水下	21	5.5	27	8.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}	0.2
④	尾粉砂	水上	19	6.5	29	8.0×10^{-5}	8.0×10^{-5}	0.3
	尾粉砂	水下	21	6	27	7.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}	0.3
④$_1$	尾中砂	水上	21	5.5	32	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	0.3
	尾中砂	水下	22	5	29	1.3×10^{-3}	1.9×10^{-4}	0.3
④$_2$	尾细砂	水上	19	6	30	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.2
	尾细砂	水下	21	5.5	27	8.0×10^{-5}	1.3×10^{-4}	0.2
⑤	尾粉砂	水下	23	6	28	7.5×10^{-5}	3.0×10^{-5}	0.3
⑤$_1$	尾中砂	水下	22	5	30	1.2×10^{-3}	9.7×10^{-4}	0.3
⑥	尾粉土	水下	22	16	22	2.0×10^{-6}	2.0×10^{-6}	0.4
⑦	片岩	强风化	24	8	35	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0
⑧	片岩	中风化	27	5	65	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0

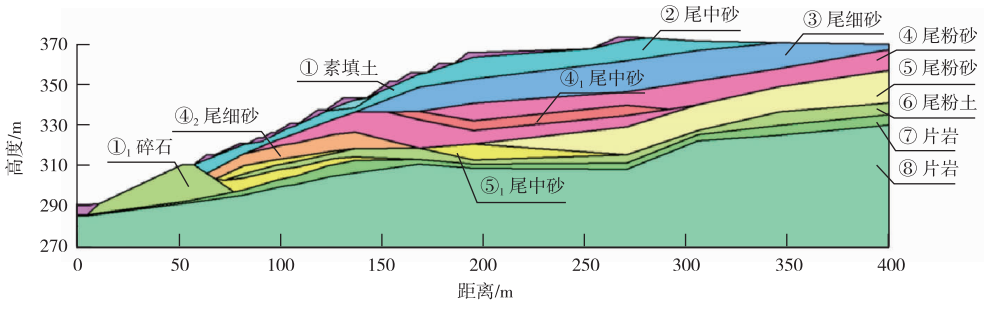

图 3 尾矿坝地质结构

Fig. 3 Geological structure of tailings dam

如图 4(a)所示,模拟计算得到的浸润线与实测浸润线有一定差异。由图 4 可知,浸润线有差异主要是由于④$_1$层尾中砂位于尾粉砂夹层中,渗透系数偏高。水力坡降较大位置位于距离初期坝顶水平距离 200 m 以外尾粉砂内,浸润线在渗透速率较大的尾中砂中近似水平。由于取样的随机性,测定的渗透系数不能完全反映实际堆置各岩土层性质。因此需要结合实测浸润线对各岩土层渗透系数进行修正,再次模拟以接近实测浸润线。如图 4(b)所示,经修正后模拟计算得到的浸润线与实测浸润线基本一致,因此修正后材料渗透系数可以为后续加高渗流场分析和尾矿坝长期稳定性分析所采用。

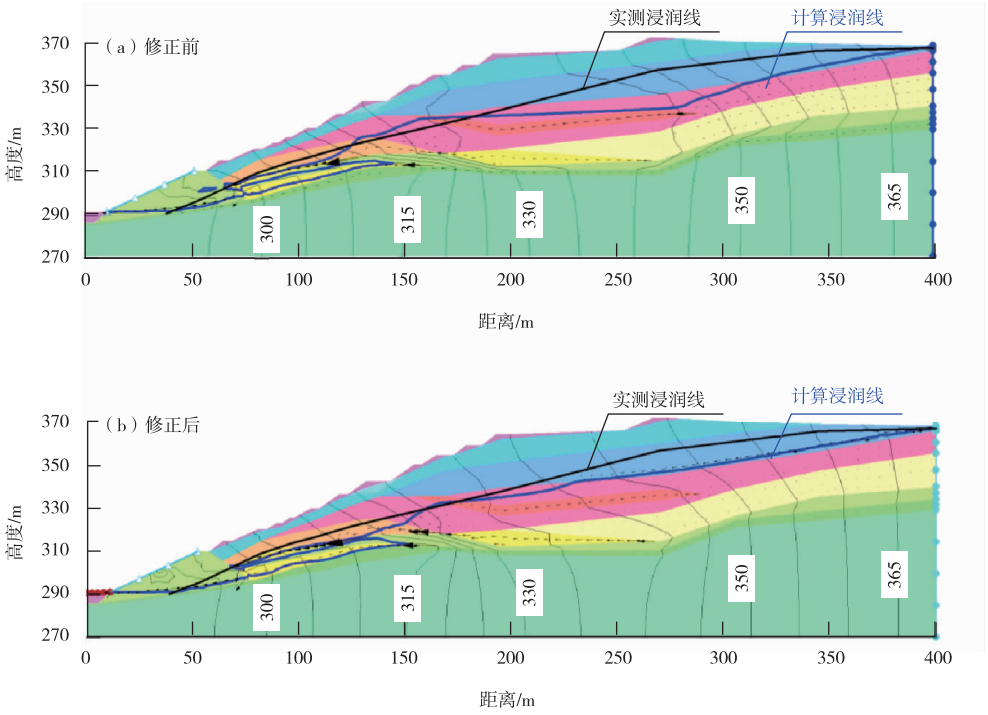

图 4　现状修正渗透系数前后计算浸润线与实测浸润线位置

Fig. 4　Calculated and measured phreatic line positions before and after correction of permeability coefficient

2.3　加高扩容后渗流场模拟

采用修正后的渗透系数,模拟计算加高后坝顶标高 424.0 m 时正常运行和洪水运行工况下的浸润线。根据设计单位对加高后调洪演算得到的正常水位和洪水水位分别为 419.00 m 和 420.11 m,干滩长度分别为 250 m 和 139 m。

图 5(a)、(b)分别为加高后坝顶标高 424.0 m 正常运行和洪水运行工况下的浸润线及渗流场计算结果图。计算结果表明加高后浸润线最小埋深均在 10 m 以上,满足《尾矿设施设计规范》规定的浸润线最小埋深要求。其中洪水运行工况下浸润线有所抬升,部分邻近坡面。洪水运行工况仅为洪水期偶见情况,短期内库区内的水将会排走,不会形成稳定渗流。

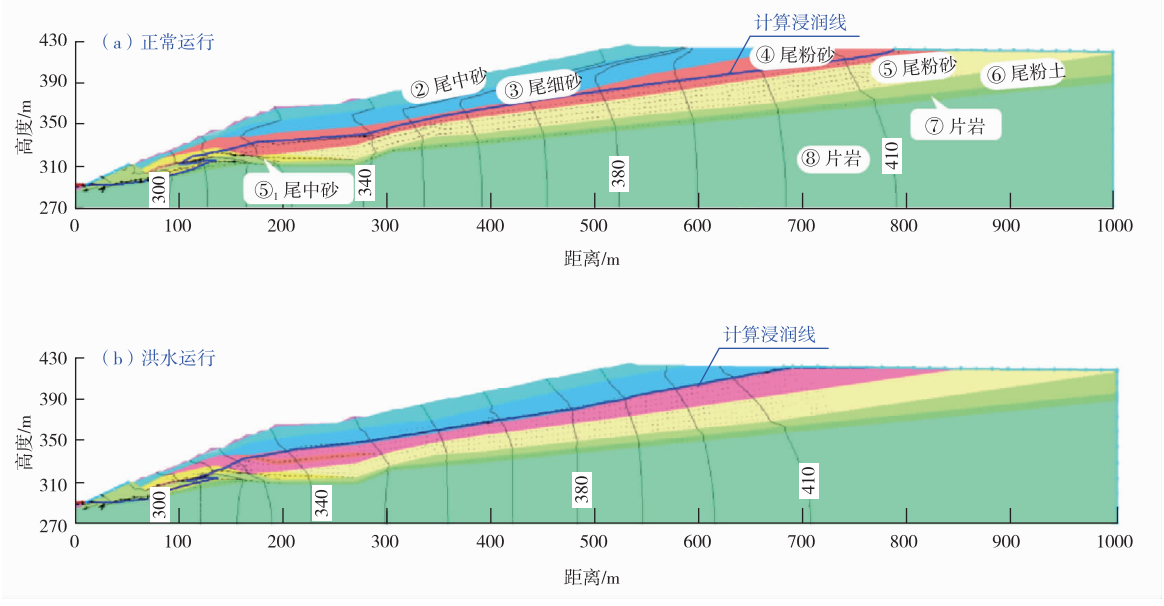

图 5　坝顶 424 m 标高正常运行和洪水运行工况浸润线位置

Fig. 5　Phreatic line under normal operation and flood operation with dam crest elevation of 424 m

3 尾矿坝稳定性分析

3.1 计算工况及参数

极限平衡法中瑞典圆弧滑动法和 Bishop 法是矿山尾矿坝稳定性分析常用的方法,也是规范要求的主要分析方法[13]。在渗流场模拟基础上应用 SLOPE 模块,首先采用瑞典圆弧滑动法和 Bishop 法模拟分析现状坝顶 373.0m 标高正常运行(坝体自重+实测水位的荷载组合)、洪水运行(坝体自重+最高洪水位的荷载组合)和特殊运行(坝体自重+实测水位+地震荷载组合)三种工况下坝体稳定性,然后基于现状参数预测加高后坝顶标高 424.0 m 时三种工况条件下坝体抗滑稳定性。计算模型底部、两侧固定约束。通过对现场地质钻探,室内基本物理力学试验、尾矿颗粒分析等试验,得到各岩土层物理力学参数详见表 1。

3.2 计算结果分析

计算得到现状三种工况下瑞典圆弧法和 Bishop 法计算的安全系数均大于允许最小安全系数。如图 6 和图 7 所示,以正常运行工况为例,采用瑞典圆弧滑动法和 Bishop 法计算得到安全系数分别为 1.477 和 1.525。根据设计规范,现状为三级尾矿库,两种方法允许坝坡稳定性最小安全系数分别为 1.20 和 1.30。现状坝坡安全系数有一定富余,坝坡整体稳定。坝体潜在滑移面主要表现为浅层滑移破坏,滑移面形状为圆弧形。

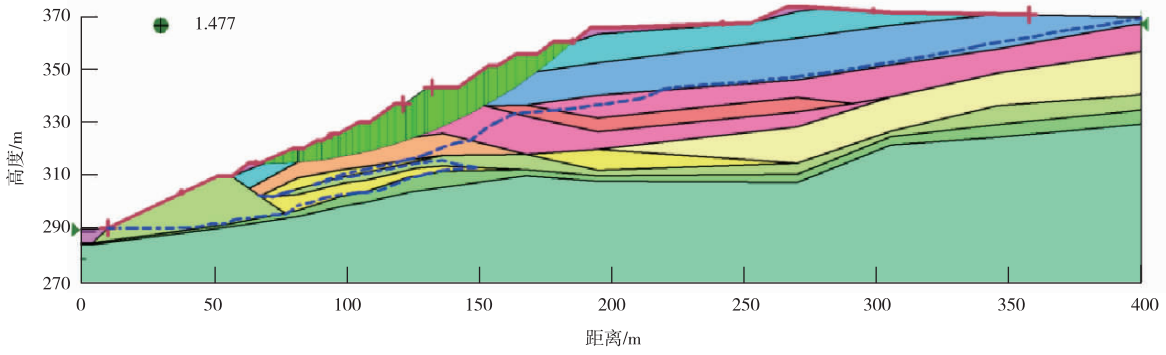

图 6 正常运行条件下坝体瑞典圆弧法稳定性计算结果图

Fig. 6 Stability of tailings dam by Swedish slip circular method under normal operation conditions

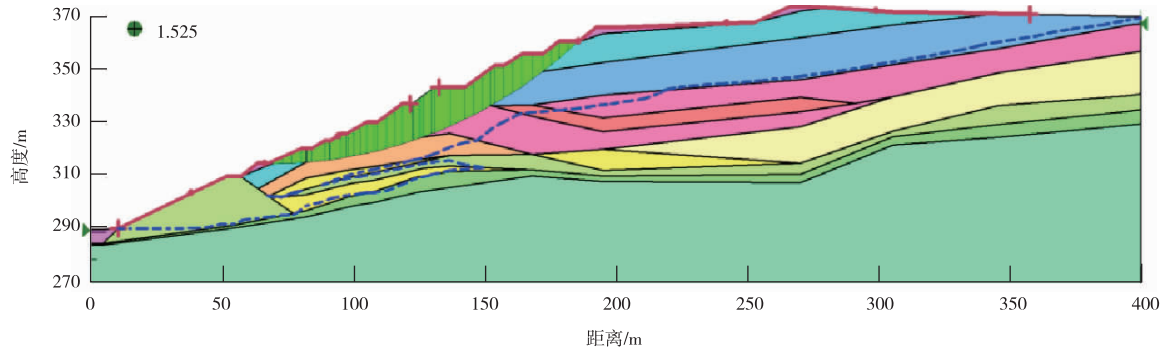

图 7 正常运行条件下坝体 Bishop 法稳定性计算结果图

Fig. 7 Stability of tailings dam by Bishop method under normal operation conditions

在现状岩土层参数基础上,根据设计方案建立数值模拟模型,应用两种方法分别计算加高后坝顶标高 424.0 m 时正常运行、洪水运行和特殊运行三种工况下坝体稳定性。采用瑞典圆弧滑动法和 Bishop 法计算三种工况下得到尾矿坝安全系数与允许最小安全系数对照(表 2)。以瑞典圆弧滑动法为例,计算得到的三种工况下坝坡滑面及稳定系数如图 8 所示。

表 2　尾矿坝抗滑稳定性安全系数汇总表

Table 2　Summary of stability safety factors of tailings dam

坝顶标高/m	计算工况	干滩长度/m	计算方法	允许最小安全系数	计算安全系数
现状 373.0	正常运行	250	瑞典圆弧法	1.20	1.477
			Bishop 法	1.30	1.525
	洪水运行	93	瑞典圆弧法	1.10	1.469
			Bishop 法	1.20	1.517
	特殊运行	250	瑞典圆弧法	1.05	1.210
			Bishop 法	1.15	1.253
最终 424.0	正常运行	250	瑞典圆弧法	1.25	1.404
			Bishop 法	1.35	1.444
	洪水运行	139	瑞典圆弧法	1.15	1.347
			Bishop 法	1.25	1.388
	特殊运行	250	瑞典圆弧法	1.05	1.140
			Bishop 法	1.15	1.174

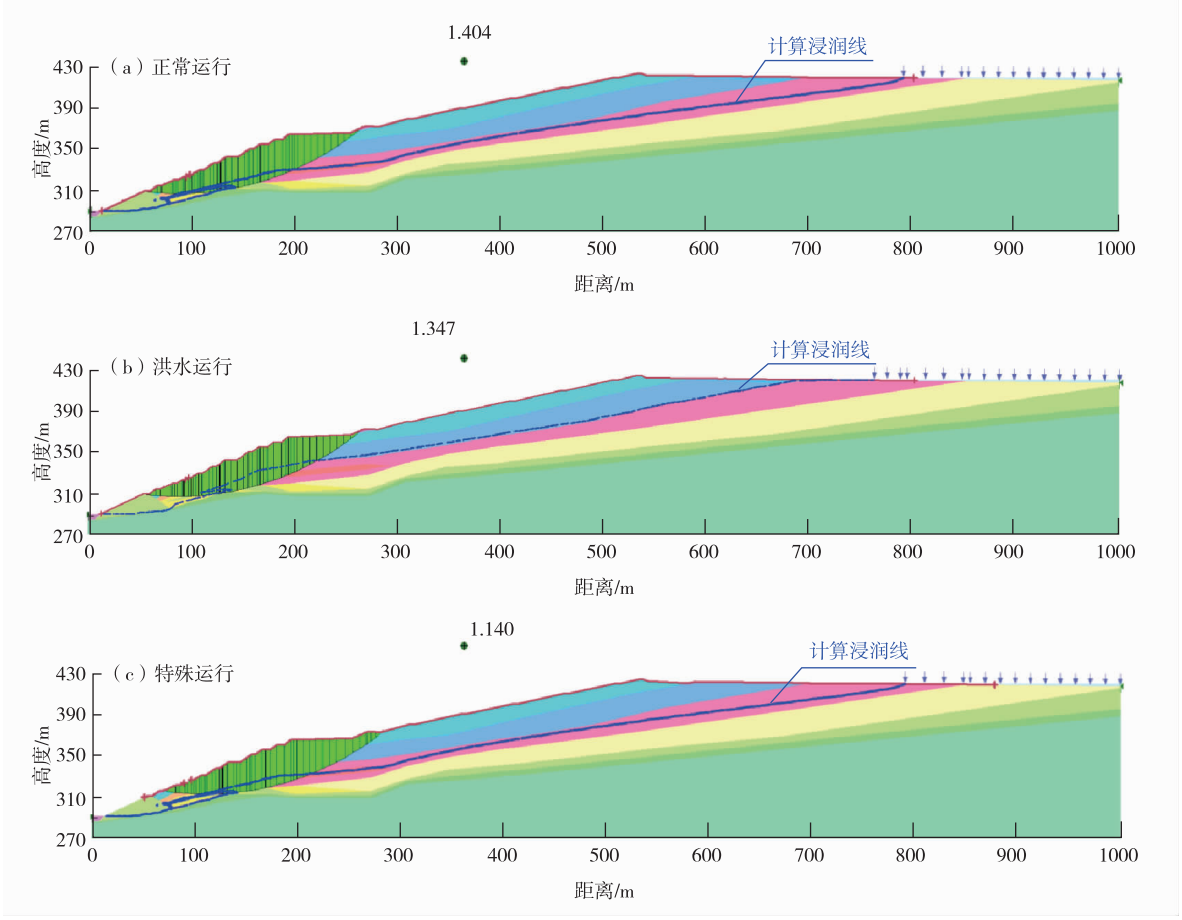

图 8　正常运行、洪水运行和特殊运行条件下坝体瑞典圆弧法稳定性

Fig. 8　Stability of tailings dam by Swedish slip circular method under normal operation, flood operation and special operation conditions

由图 8 可知,各工况下尾矿坝抗滑稳定安全系数满足规范规定值。但需要注意的是,加高后安全系数相对于允许安全系数都不是很大,尤其在特殊工况下两种方法计算的安全系数都略大于允许最小值。根据模拟结果,加高后最危险滑面均位于370 m标高以下。相比较加高前滑移面,加高后滑移面向深层扩展,主要为深层滑移破坏。最危险滑移面在初期坝附近主要原因是初期坝附近靠近基岩处主要为尾中砂与尾粉土互层,尾中砂有较好的渗透性,但尾粉土降低了整体的渗透性,导致靠近初期坝附近浸润线升高。建议实时监测浸润线高度,必要条件下需要采取相应措施加固坝体并加强排水,降低浸润线高度。

4 尾矿坝地震动力响应

增高子坝建在尚未完全固结的尾矿料上,由于尾矿料颗粒细,级配均匀,密度较小,而且基本都处于饱和状态,在地震作用下极易液化,危及坝体安全。因此需要根据场区地震烈度,在坝体地震动力反应分析基础上评判和确定库内液化区的深度及范围,从而全面地评价坝体稳定性。本次计算在静力稳定性分析基础上应用 QUAKE/W 模块模拟分析尾矿坝动力稳定性。

4.1 动力计算参数

场区地震设防烈度为 7 度,基本地震加速度值为 0.15 g,等效振动周次为 12 次,卓越周期为0.2 s,振动持续时间为 20 s。以 1975 年海城地震记录为基础,按前述地震参数生成地震时程曲线,生成人工地震波后使用软件对地震波进行了基线校正并归零处理,得到基岩输入地震时程曲线如图 9 所示。

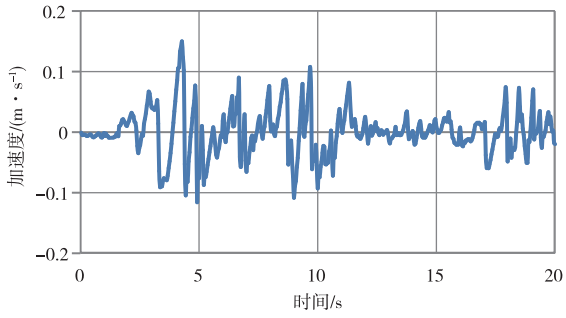

图 9 输入水平地震时程曲线

Fig. 9 Time history curve of horizontal earthquake

根据现状堆积地层,易液化区主要为尾细砂、尾粉砂。采用等效线性化方法描述坝体土料的动力非线性特征。模拟动力学参数取值参考《某尾矿库增高扩容之动三轴试验报告》,试验测得最大动剪切模量 $G_{max}=15.35$ MPa,其他动力学参数见表 3。

表 3 动剪切模量比、阻尼比与动剪应变关系

Table 3 Relationship between dynamic shear modulus ratio, damping ratio, and dynamic shear strain

剪应变 γ_d/%	动剪切模量比 G/G_{max}	阻尼比 λ
0.016 7	1.00	0.02
0.027 1	0.66	0.03
0.046 1	0.41	0.03
0.081 8	0.28	0.04
0.145	0.19	0.05
0.247	0.13	0.07
0.439	0.09	0.09
0.745	0.06	0.14

4.2 计算结果分析

图 10 给出了加高后坝顶 424 m 标高正常运行时地震载荷作用下响应。加高后正常运行时水平加速度最大值为 0.507 g,加速度放大了 3.38 倍,最大峰值加速度大致位于坝顶位置。垂直加速度最大值为 0.113 g,且只有局部放大,整体放大效应不明显。因地震波周期性,坝体表面每隔一定距离都出现较大峰值加速度。因选取的人工合成地震波,不同地震波峰值加速度最大值位置也不完全相同。

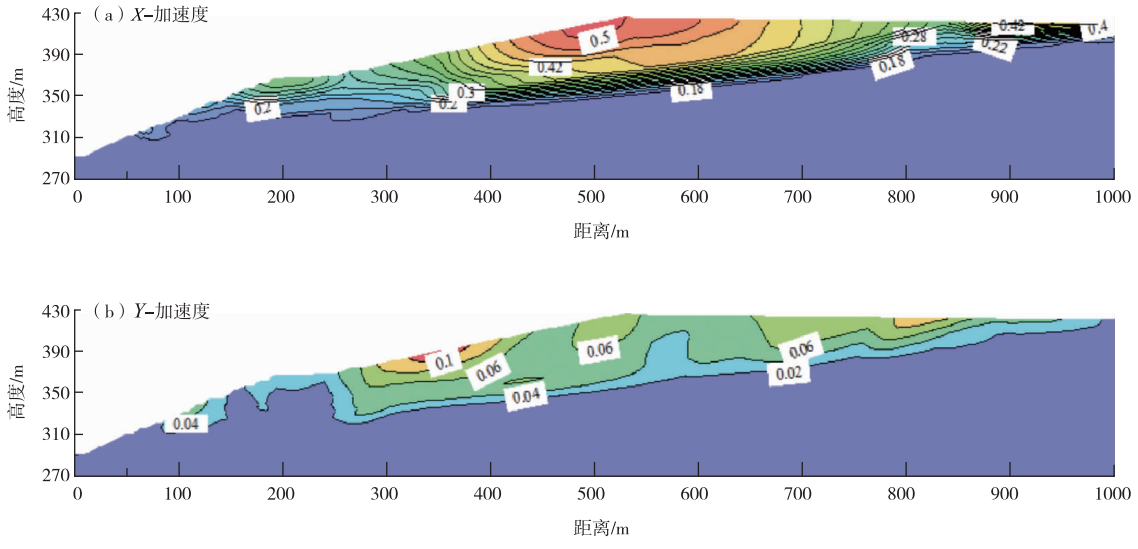

图 10 加高后正常运行期加速度云图

Fig. 10 Cloud chart of acceleration during normal operation after heightening

图 11 分别给出了加高后正常运行期峰值动剪应力和水平位移云图。从峰值动剪应力云图 11(a)看出,加高后正常运行工况下最大峰值剪应力在坝体内中间岩层的尾粉砂内,最大动剪应力为 1 388 kPa,对尾矿坝的安全影响不大。从位移云图 11(b)看出,加高后最大水平峰值位移 0.438 cm,位于坝顶位置,对坝体影响是很小的。

如图 12 所示,在地震动力响应分析基础上,采用应力对比法计算断面可能存在的液化区域[15],得到液化区分布范围。液化区结果表明,坝体断面内有局部液化,但液化区位于库区内,且未出现大范围液化现象。总体分析,尾矿坝在地震动力作用下不会出现大面积地震液化,不会引起地震动力破坏。但在尾矿库运营过程中,也需及时关注容易液化区域,对判定有可能液化的土层,应尽可能及时挖除并填充不易液化的土料。也可以考虑采取人工加密措施,增加尾矿料固结程度,加强排水等防护设施。

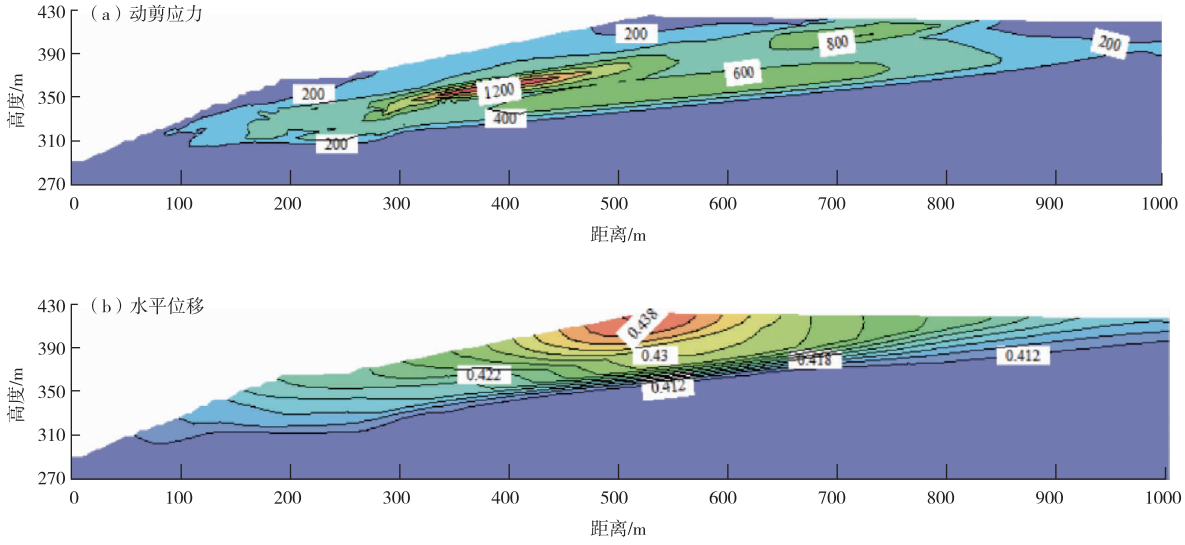

图 11　加高后正常运行期峰值动剪应力(单位:kPa)和水平位移(单位:m)云图

Fig. 11　Cloud chart of peak dynamic shear stress and horizontal displacement during normal operation period

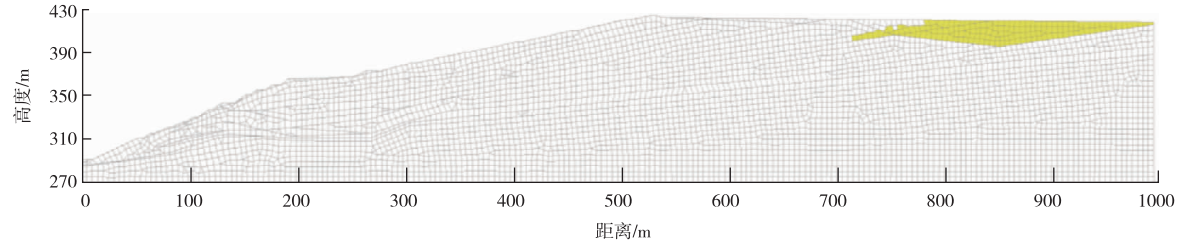

图 12　加高后尾矿库液化区

Fig. 12　Liquefaction area of tailings pond after heightening

5　结论与建议

通过现场勘察、室内试验获得尾矿库堆积层基本物理力学参数,通过 Geo-studio 模拟了尾矿库加高扩容后尾矿库渗流场、坝体长期稳定性和动力响应,得到结论如下:

1)尾矿库加高前后浸润线最小埋深均在 10 m 以上,符合规程要求。洪水运行工况的浸润线相比正常运行工况向上适当抬高,有部分邻近坡面,但洪水运行工况仅为洪水期偶见情况,短期内库区内的水将会排走,不会形成稳定渗流。

2)采用瑞典圆弧滑动法和简化 Bishop 法模拟了坝体加高前后三种工况下的稳定性,并模拟了加高后 7 级地震对坝体安全性的影响。结果表明所有工况下安全系数均大于规范允许值,坝体稳定。综合静动力计算结果,7 级地震对坝体安全性影响较小,库区内有局部液化但影响不大,运营过程中加强监管,及时处理可能液化的土层。

3)加高后尾矿坝抗滑稳定安全系数也满足规范规定值,但安全系数整体偏小,尤其在特殊工况下安

全系数略大于允许最小安全系数。加高后最危险滑面仍位于坝体标高370 m以下,主要是因为初期坝附近靠近基岩处为尾中砂与尾粉土互层,尾中砂有较好的渗透性,但尾粉土降低了整体的渗透性,导致靠近初期坝附近浸润线升高。建议实时监测浸润线高度,尤其加强洪水期监测,防止浸润线抬升过高导致坝体不稳定,必要条件下需要加强排水并加固坝体以降低浸润线高度。

参 考 文 献

[1] 王昆,杨鹏,Hudson-Edwards Karen,等.尾矿库溃坝灾害防控现状及发展[J].工程科学学报,2018,40(5):526-539.
WANG Kun,YANG Peng,HUDSON-EDWARDS K,et al. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents[J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(5):526-539.

[2] 吴顺川,赵志强,张小强,等.某尾矿库加高扩容工程的坝体加固设计与稳定性分析[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(1):36-44.
WU Shunchuan,ZHAO Zhiqiang,ZHANG Xiaoqiang,et al. Stability analysis and reinforcement design of tailings dam expansion engineering[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Sciences),2021,46(1):36-44.

[3] 李洪梁,王立娟,尹恒,等.金属矿山高速率筑坝尾矿库稳定性分析[J].矿业研究与开发,2020,40(1):95-102.
LI Hongliang,WANG Lijuan,YIN Heng,et al. Stability analysis on high-speed damming of tailing pond in a metal mine[J]. Mining Research and Development,2020,40(1):95-102.

[4] 缪海波,殷坤龙,郭付三,等.金属矿山尾矿坝渗流场模拟及稳定性数值分析[J].金属矿山,2010(3):134-138.
MIAO Haibo,YIN Kunlong,GUO Fusan,et al. Seepage field simulation and numerican analysis of stability of metal mine tailings dam[J]. Metal Mine,2010(3):134-138.

[5] 胡军.基于Internet-Intranet的尾矿坝自动化安全监测系统[J].金属矿山,2010(2):124-127,132.
HU Jun. Automatic safety monitoring system of tailings dam based on Internet-intranet[J]. Metal Mine,2010(2):124-127,132.

[6] 孔祥云,眭素刚,王光进,等.库水位变动条件下的尾矿库溃坝模型试验研究[J].有色金属工程,2021,11(6):101-108.
KONG Xiangyun,SUI Sugang,WANG Guangjin,et al. Model test study on tailings dam break under the condition of reservoir water level fluctuation[J]. Nonferrous Metals Engineering,2021,11(6):101-108.

[7] 李苗,张红军,陈唐军,等.灰色-突变理论在尾矿坝失稳预测中的应用[J].矿业研究与开发,2014,34(5):66-68.
LI Miao,ZHANG Hongjun,CHEN Tangjun,et al. Application of grey-catastrophe theory in instability prediction of tailings dam[J]. Mining Research and Development,2014,34(5):66-68.

[8] 李全明,段志杰,于玉贞,等.尾矿坝沉积结构特征与性能演化规律研究进展[J].中国安全生产科学技术,2022,18(2):6-19,2.
LI Quanming,DUAN Zhijie,YU Yuzhen,et al. Research progress on deposition structure characteristics and performance evolution law of tailings dam[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(2):6-19,2.

[9] 孙从露,徐洪,郭晓霞.基于Geo-studio的尾矿坝渗流及地震动力响应研究[J].矿冶工程,2017,37(6):30-34.
SUN Conglu,XU Hong,GUO Xiaoxia. Seepage calculation and seismic dynamic response analysis fora tailings dam based on Geo-studio[J]. Mining and Metallurgy Engineering,2017,37(6):30-34.

[10] 董贺伟,王洋,吴永刚.某尾矿库坝体稳定性综合判定方法[J].有色金属(矿山部分),2020,72(4):58-62.
DONG Hewei,WANG Yang,WU Yonggang. Comprehensive determination method for the stability of a tailings storage facility dam body[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2020,72(4):58-62.

[11] 何锦龙,伍跃胜,刘泽东,等.不同降雨量对尾矿坝稳定性的影响规律分析[J].金属矿山,2015(8):150-153.
HE Jinlong,WU Yuesheng,LIU Zedong,et al. Influence law analysis of different precipitation to the stability of tailings dam[J]. Metal Mine,2015(8):150-153.

[12] 甘海阔,毕乾,崔旋.复杂库型条件下高堆上游法尾矿坝三维渗流场分析[J].有色金属(矿山部分),2018,70(5):26-30.
GAN Haikuo,BI Qian,CUI Xuan. Three-dimensional seepage field analysis of high-stack tailings dam by upstream method under complex reservoir type condition[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2018,70(5):26-30.

[13] 刘迪,李俊平.尾矿坝安全研究方法综述[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(6):910-918.
LIU Di,LI Junping. Revies on the research methods of tailings dam safety[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology(Natural Science Edition),2017,49(6):910-918.

[14] 邢晓彬,于占海.某尾矿库加高扩容后坝体稳定性分析[J].有色矿冶,2018,34(2):55-57,38.
XING Xiaobin,YU Zhanhai. Stability analysis of the dam body after heightening and expansion a tailings dam[J]Non-ferrous Mining and Metallurgy,2018,34(2):55-57,38.

[15] SEED H B,IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1971,97(9):2149-1273.

(编辑:郭文晶)