

深厚覆盖层一次建坝尾矿库的沉降变形分析

Analysis of Settlement and Deformation of Tailings Pond With
Dam Constructed at One Go on Deep Overburden

李云清, 李松(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 10038)

摘要:深厚覆盖层具有较大的压缩性,在其上修建尾矿坝,尤其采用一次建坝形式,会产生较大的沉降表现。本文以青海某尾矿库为例,Geostudio软件的SIGMA/W模块对尾矿坝的沉降进行模拟计算。结果表明:增加清基开挖深度可减少坝体及坝基的沉降,但效果不明显;深厚覆盖层上修建尾矿坝设计时应充分考虑超高,在坝体施工完成,坝体沉降基本完成后,保证坝顶标高满足设计要求。

关键词:一次建坝;沉降变形;SIGMA/W

中图分类号: TD926 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)03-0078-05

Abstract: Tailings dam built on deep overburden with great compressibility will result in great settlement, especially by adopting the form of damming at one go. By taking a tailings pond in Qinghai as an example, SIGMA/W module of Geostudio software performs a simulation calculation on the settlement of tailings dam. The result shows that increasing excavation depth of foundation clearing can reduce the settlement of the dam body and dam foundation, but the effect isn't obvious; superelevation should be fully considered in design of tailings dam built on deep overburden. After completion of dam body construction and basic completion of dam body settlement, it is guaranteed that the dam crest elevation meets the design requirement.

Key words: dam constructed at one go; settlement and deformation; SIGMA/W

1 前言

尾矿库是指用以贮存金属、非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿的场所。尾矿坝是指用于拦挡尾矿和水的尾矿库外围构筑物。《防范化解尾矿库安全风险方案》中要求:新建四等、五等尾矿库必须采用一次建坝方式。一次建坝是指全部用除尾矿以外的筑坝材料一次或分期建造的尾矿坝^[1]。对于青海、甘肃等地区,表层第四系覆盖层比较厚,且多为砂砾石,覆盖层地区采用一次建坝的尾矿筑坝形式,覆盖层的厚度、物理特性,是否液化、是否具有湿陷性等都会影响坝体的稳定。有的地区覆盖层很深,能达到将近40 m,将覆盖层全部挖除,会大幅增加工程投资和延长工程的工期^[2-3],但是直接修建在深厚覆盖层上,尾矿坝的坝基渗漏、沉降变形、坝坡稳定等问题就是亟待解决的问题。尾矿库通过全库铺膜防渗的方法既可以解决尾矿的环保问题也可以保证坝体的渗流稳定,但是在施工期及运行期产

生较大的沉降变形,将导致坝体预留超高不足,可能会造成洪水漫顶等问题^[4]。

2 工程概况

某尾矿库位于青海西部,属于大陆性干旱气候,库区内植被稀疏,呈典型的高山荒漠地貌。尾矿坝采用一次建坝,分期建设,库区内采用全库铺设土工膜防渗,尾矿库使用标高为3 250~3 320 m,最大坝高75.5 m,最终库容约 $6\,660 \times 10^4 \text{ m}^3$,占地面积约 2.25 km^2 ,汇水面积为 5.061 km^2 。

一期坝:尾矿坝坝顶高程3 295 m,坝高45 m,坝顶宽8 m,上游坡比1:2,每隔10 m设一道锚固平台,宽2 m;下游坡坡比为1:2.2,每间隔13 m设一级马道,马道宽2 m。内坡脚设置反压平台,平台标高3 258 m,宽40 m,外坡脚设置反压平台,平台标高3 256 m,宽95 m。

二期坝:坝顶标高3 310 m,坝60 m,坝顶宽8 m。内坡坡比为1:2.0;外坡坡比为1:2.2,每间隔13 m设一级马道,马道宽2 m。外坡脚反压往外延伸55 m。

三期坝:坝顶标3 320 m,坝高70 m,坝顶宽8 m。内坡坡比为1:2.0;外坡坡比为1:2.2,每间隔13 m

[作者简介] 李云清(1988-),男,硕士,工程师,主要从事矿山配套尾矿库工程设施的设计与研究工作。

[引用格式] 李云清,李松.深厚覆盖层一次建坝尾矿库的沉降变形分析[J].中国矿山工程,2022,51(3):78-82.

设一级马道,马道宽 2 m。外坡脚反压平台往外延伸 40 m。

坝体区域表层以第四系 (Q_4^{col+dl}) 风坡积层为主,主要为灰黄色细砂、粗砂砾砂、角砾,覆盖层最大深度可达 45 m,覆盖层岩组强度低,尤其是表层 3 ~ 4 m 呈松散状,承载力差,具有一定的湿陷性,5 m 以下均无湿陷性。下部为变质砂岩和花岗岩,岩石力学强度高,坝体下部埋深较深。

本文以一次建坝的尾矿库为例,使用 Geostudio 软件的 SIGMA/W 模块对尾矿坝不同时期、不同清基深度的沉降进行模拟。

3 沉降分析模拟研究

3.1 计算模型及计算软件介绍

邓肯—张 (Duncan—Chang) 模型 E-B 模型为非线性模型,该模型能较好地反映土体的非线性状态,概念清楚,易于理解,材料参数只需常规三轴试验即可确定,并且适用的土类比较广,所以在岩土工程和土石坝等结构数值分析中得到广泛应用,成为最普及的本构模型之一^[5]。邓肯—张 E-B 模型参数可按照式(1)~式(4)进行计算。

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 KP \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{wr} = K_{wr} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta l g \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right) \quad (4)$$

邓肯张 E-B 模型共 7 个参数,其中: E_t 为切线弹性模量; B_t 为切线体积模量; c 为土体黏聚力; φ 为土体内摩擦角; P_a 为大气压力; R_f 为破坏比; k 为

初始模量系数; n 为初始模量指数; K_b 为体积模量系数; m 为体积模量指数; K_{wr} 为卸载模量系数。

计算采用的 GEOSTUDIO 为一款工程计算仿真商业软件,有边坡稳定性分析模块、渗流分析模块、岩土应力变形分析等模块。本文采用岩土应力变形 (SIGMA/W) 模块对尾矿坝在深厚覆盖层上的沉降变形进行模型, SIGMA/W 可分析线弹性变形问题和非线性弹塑性有效应力问题。

3.2 计算模型建立

尾矿坝为堆石坝,一期坝体采用分区设计,分为强风化区域和中风化区域,二期及三期坝体全部采用中风化石料堆筑,内外坡脚压坡采用中风化石料,强风化和中风石料均来自采矿场废石。

通过 Geostudio 软件进行尾矿坝最大断面的建模,用于模拟坝体及坝基的沉降变形,模型中通过激活不同单元格对坝体施工分层加载以及不同的工况进行计算,共 8 318 个节点数,单元数 8 236 个。模型如图 1 所示。

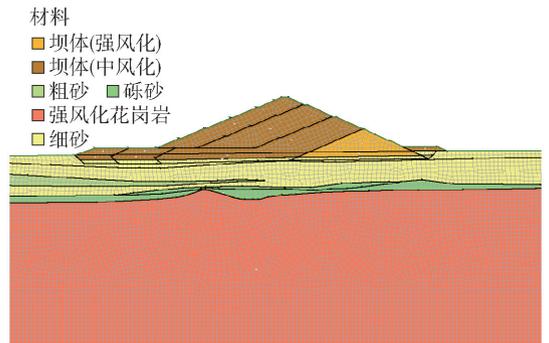


图 1 尾矿库最大断面图

3.3 边界条件

地基采用 XY 向约束,两侧采用 X 向约束,坝体与覆盖层计算采用的邓肯—张模型的参数见表 1,材料参数通过室内三轴试验取得。

表 1 Duncan E-B 模型参数

材料名称	$\rho/g \cdot cm^{-3}$		c/kPa	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m
	湿	饱和								
强风化石料填筑区 (初期坝)	1.90	2.09	0	42.2	5.7	500	0.36	0.65	240	0.30
中风化石料填筑区 (一期~三期坝)	0.77	2.24	0	48.4	8.8	700	0.33	0.65	320	0.28
细砂	1.50	1.95	0	38.3	4.95	194	0.80	0.76	80.8	0.56
粗砂	1.55	2.00	0	39.0	2.0	253.6	0.71		105.7	0.50
砾砂	1.69	2.05	0	41.1	0.46	328.6	0.62	0.79	137	0.48
角砾	1.70	2.10	0	44.0	2.5	435.5	0.50	0.80	180	0.35

3.4 计算工况

本次计算工况见表2,分别计算一期坝、二期坝、三期坝不同坝高下的不清基、清基深度为5m,清基深度为10m的坝体及坝基的沉降变形。每期坝体分10步进行加载,以模拟坝体的分层施工,尾矿库采用全库防渗形式,故不考虑浸润线对于坝体的影响。

表2 计算工况表

工况		清基深度	
一期坝	不清基	清基5m	清基10m
二期坝	不清基	清基5m	清基10m
三期坝	不清基	清基5m	清基10m

3.5 计算结果

(1)当坝基底部不清基工况时,一期坝、二期坝、三期坝坝基沉降等值线如图2、图3、图4所示,沉降值见表3。沉降的最大值位于坝顶,坝顶沉降主要是由大坝堆填体与砂砾石地基的压缩所引起,砂砾石覆盖层在大坝堆填体荷载下产生较大的压缩变形,进而使坝体的沉降量增加,二期坝、三期坝沉降加大主要由于二期坝体、三期坝体的填筑,导致上部荷载增加,进而增加整个坝体的沉降,坝体沉降分布以坝轴线为中心对称分布,符合基本的沉降变形规律。一期坝坝高47m,沉降量为1.42m,占坝高的3.02%;二期坝坝高62m,沉降量为1.72m,占坝高的2.77%;三期坝坝高72m,沉降量为1.92m,占坝高的2.67%,沉降量均超过坝高的1%,沉降量较大。

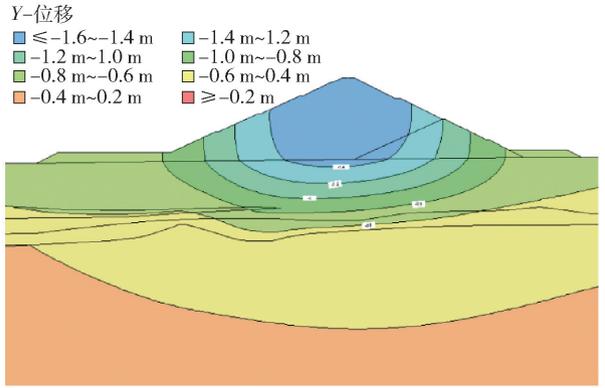


图3 不清基工况二期坝沉降图

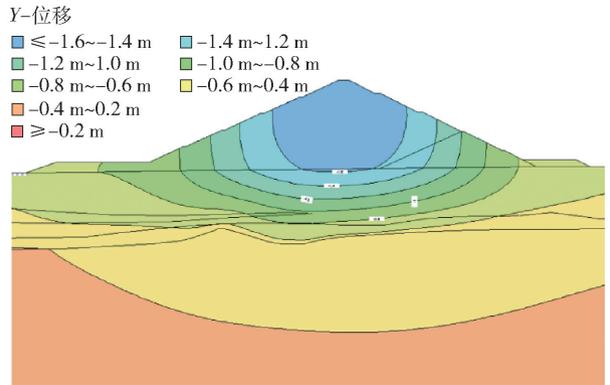


图4 不清基工况三期坝沉降图

表3 各工况坝体各期沉降值

坝期数	坝高/ m	不清基工况		清基5m工况		清基10m工况	
		竖向最大 沉降/m	占比/ %	竖向最大 沉降/m	占比/ %	竖向最大 沉降/m	占比/ %
一期坝	47	-1.42	3.02	-1.38	2.94	-1.34	2.85
二期坝	62	-1.72	2.77	-1.66	2.67	-1.62	2.61
三期坝	72	-1.92	2.67	-1.85	2.57	-1.80	2.50

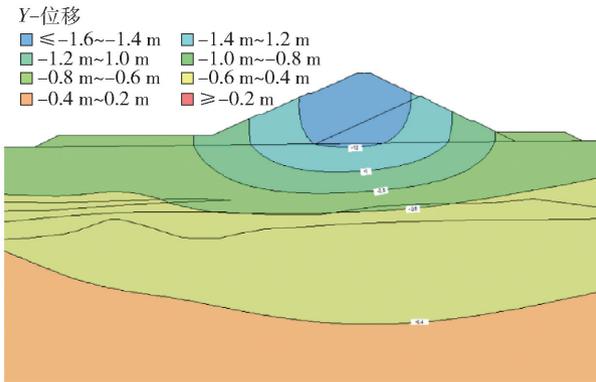


图2 不清基工况一期坝沉降图

(2)当将坝基底部的清基5m工况时。一期坝、二期坝、三期坝坝基沉降等值线如图5、图6、图7所示,沉降值见表3。沉降的最大值位于坝顶,以坝轴线为中心呈对称分布,符合基本的沉降变形

规律。一期坝坝高47m,沉降量为1.38m,占坝高的2.94%;二期坝坝高62m,沉降量为1.66m,占坝高的2.67%;三期坝坝高72m,沉降量为1.85m,占坝高的2.57%,沉降量较不清基工况时有所减少,但是沉降量均超过坝高的1%,沉降量较大。

(3)当将坝基底部的清基10m工况时,一期坝、二期坝、三期坝坝基沉降等值线如图8、图9、图10所示,沉降值见表3。沉降的最大值位于坝顶,以坝轴线为中心呈对称分布,符合基本的沉降变形规律。一期坝坝高47m,沉降量为1.34m,占坝高的2.85%;二期坝坝高62m,沉降量为1.62m,占坝高的2.61%;三期坝坝高72m,沉降量为1.80m,占坝高的2.50%,沉降量较不清基工况以及清基5m工况时减少,但效果不明显,沉降量均超过坝高

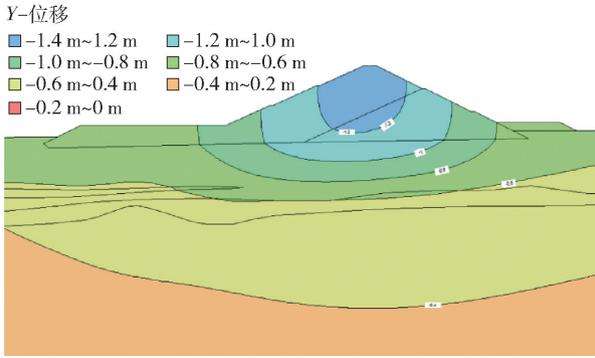


图5 清基5m工况一期坝沉降图

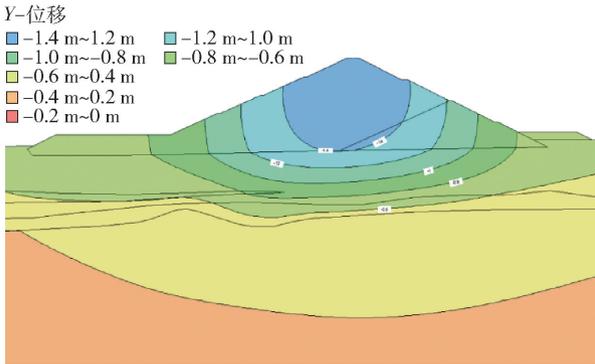


图6 清基5m工况二期坝沉降图

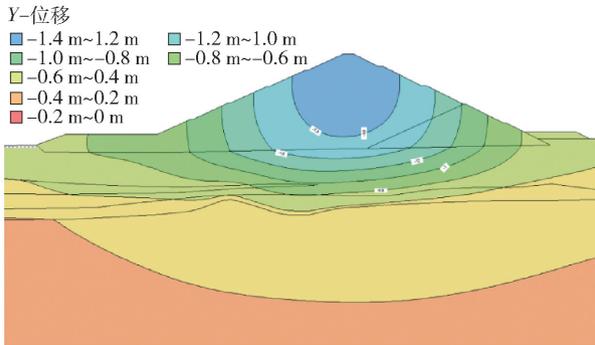


图7 清基5m工况三期坝沉降图

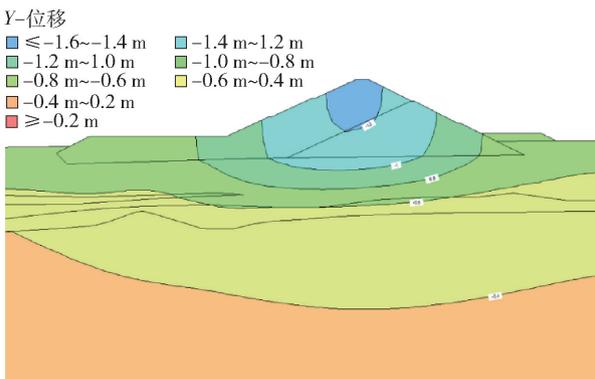


图8 清基10m工况一期坝沉降图

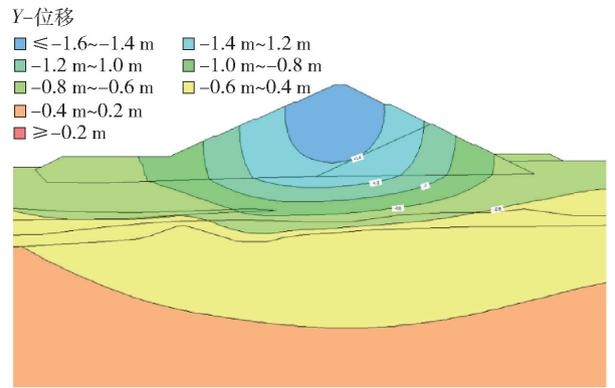


图9 清基10m工况二期坝沉降图

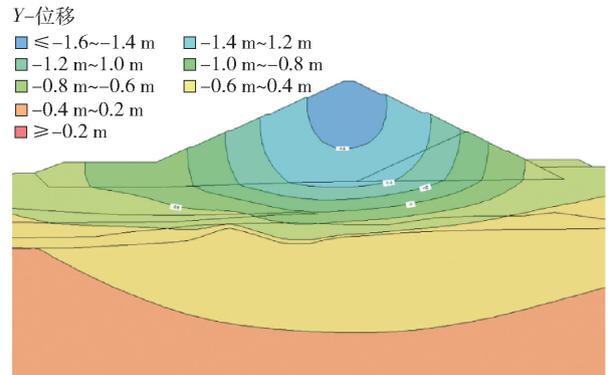


图10 清基10m工况三期坝沉降图

规范》中推荐的方法进行计算。

假定坝基内应力分布从坝基面向下作45°扩散,并每个水平面上按三角形分布,三角形顶点与坝体自重合力作用线吻合,则计算层面上的最大竖向应力按式(5)计算

$$P_{max} = \frac{2R}{B + 2y} \quad (5)$$

式中: P_{max} ——计算层面上的最大竖向应力,kPa;

R ——坝自重合力,kN;

B ——坝底宽度,m;

y ——计算点坝基深度,m。

坝体和坝基的最终沉降量可用式(6)估算

$$S_{\infty} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i h_i}{E_i} \quad (6)$$

式中: S_{∞} ——坝体或坝基的最终沉降量;

P_i ——第*i*计算土层由坝体荷载产生的竖向应力;

E_i ——第*i*计算土层的变形模量;

h_i ——第*i*计算土层的厚度。

坝基土层主要为细砂、粗砂、砾砂和角砾,不同深度的坝基土层的变形模量表按表4取值。

的1%,沉降量较大。

3.6 公式法计算

尾矿坝坝基沉降计算可以按《碾压土石坝设计

表4 坝基土层变形模量统计表

深度/m	变形模量/MPa
0~5	6.67
5~10	9.50
10~15	12.50
15~20	16.00
20~25	18.40
25~30	21.16
30~35	24.33
35~40	27.98
40~45	32.18
45~50	37.00

计算未清基工况下,各期坝体侧沉降值,见表5。

表5 尾矿坝沉降计算结果表

各阶段尾矿坝	一期坝	二期坝	三期坝
坝自重合力/kN	116 740.00	201 560.00	272 640.00
坝底宽度/m	227.00	300.00	348.00
计算点坝基深度/m	50	50	50
最终沉降量/m	1.40	1.89	2.15

一期坝软件计算与公式计算结果相差0.02 m,结果基本相同;二期坝软件计算与公式计算结果相差0.17 m,公式计算沉降值较大;三期坝软件计算与公式计算结果相差0.23 m,公式计算沉降值较大。

3.7 结果分析

(1)根据沉降变形结果,不清基工况、清基5 m 工况、清基10 m 工况下,一期坝、二期坝、三期坝的沉降变形量较大,均超过了坝高的1%。随着清基深度的增加,坝体的沉降变形量有所减少,清基10 m 工况下仅仅比不清基工况下初期坝沉降减少0.07 m,二期坝沉降减少0.11 m,三期坝沉降减少0.11 m,但是效果不明显,如果继续加大坝体清基深度,坝体的沉降会有所减少,但由于覆盖层的天然承载力较低,清基的深度并不是减少坝体沉降的主要因素,在施工时只需将表层的特殊土层清除即可。

(2)本项目坝体所在区域表层覆盖有湿陷性土层,为特殊土,本次计算时并没有考虑表层的湿陷性土层,此部分土层遇水时将会产生很大的变形,故本

工程坝体区域采用清基5 m,将表层的湿陷性土层全部挖除,然后对地基进行碾压,这样可以有效的减少坝体的沉降变形。

(3)对比 GEOSTUDIO 软件与公式计算结果,一期坝两者计算的结果基本相同,二期坝和三期坝两者的计算结果相差较大,主要原因为软件计算时考虑了坝体施工时分步加载以及前期坝体施工对于后期坝体沉降的影响,公式计算时默认为一次性加载,故软件计算结果较为合理,公式法计算方便,可以用来初步估算坝体沉降值。

4 结论

(1)对于承载力较低而厚度较深的覆盖层,增加清基开挖深度可减少坝体及坝基的沉降,但效果不明显,而把覆盖层全部清除会大幅增加工程投资和延长工程的工期。

(2)深厚覆盖层对于一次建坝尾矿库坝体沉降影响很大,在尾矿坝设计时应充分考虑超高,在坝体施工完成,坝体沉降基本完成后,保证坝顶标高满足设计要求。

(3)建议对于在深厚覆盖层的尾矿坝坝体基础减少开挖,只需将表层特殊土进行处理,处理后进行碾压夯实。

(4)为减少坝体及坝基沉降,可对深厚覆盖层进行工程处理,如挖除置换、重锤夯实、排水固结、振冲加密、帷幕灌浆等,改善土体的物理力学性质,满足建筑物对其承载力、变形、稳定性等要求。

[参考文献]

- [1] 余翔. 深厚覆盖层上土石坝静动力分析方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [2] 邹敏,杨宏伟,徐杨,等. 浅析深厚覆盖层坝基上土石坝渗流控制技术[J]. 甘肃水利水电技术,2018,54(5):34-37.
- [3] 党林才,方光达. 深厚覆盖层上建坝的主要技术问题[J]. 水力发电,2011,37(2):24-28.
- [4] 潘盛泽,陈敏涛,严克渊. 砂砾石覆盖层上的面板堆石坝施工期沉降变形分析[J]. 地下水,2017,39(5):177-179.
- [5] 郭元明. 河床深厚覆盖层特性及坝基工程处理措施[J]. 甘肃水利水电技术,2020,56(3):30-33.