

陶家沟尾矿坝三维静力和动力稳定性分析

王平, 胡再强, 田春亮, 李兆伟
(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 尾矿坝是金属矿山和非金属矿山重要的生产设施, 同时又是重大的危险源, 为了保证尾矿库的生产安全, 需对尾矿库进行系统稳定性评价。采用邓肯-张模型对陶家沟尾矿坝进行了三维静力和动力有限元分析。得到坝坡的静力稳定最小安全系数为 1.26, 地震反应结束时的动力边坡稳定安全系数为 1.16。分析结果表明, 陶家沟尾矿坝在静力状态下是稳定的, 在动力作用下尾矿坝的边坡仍然是稳定的, 此研究可为尾矿坝施工设计提供参考。

关键词: 尾矿坝; 稳定性; 三维有限元法

中图分类号: TV649

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2010)01-0053-03

3-D Static and Dynamic Analysis on Stability of Taojiagou Tailing Dam

WANG Ping, HU Zai qiang, TIAN Chun liang, LI Zhao wei

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In order to ensure the safe production of a tailing dam, the systematic stability assessment for it is needed. The 3-D finite element analysis is performed by applying Duncan model to evaluate the stress and deformation of the tailing dam of Taojiagou project. The results show that the minimum safety factor for static stability of the dam slope is 1.26, and for dynamic stability of the dam slope, it is 1.16, indicating that the tailing dam of Taojiagou project is stable both in static state and dynamic action. The study could provide references for the construction design of tailing dams.

Keywords: tailing dam; stability; 3-D finite element method

中国是一个矿业大国, 每年选矿产生的尾矿约 3×10^8 t, 除一部分作为矿山填充或综合利用外, 绝大部分要堆存于尾矿库, 据统计中国目前已形成一定规模的尾矿坝约 1 500 余座^[1]。尾矿坝是金属矿山和非金属矿山重要的生产设施, 同时又是重要的危险源。历史上大小事故频繁发生, 危害性极大, 事故教训惨重。从 1950 年~2005 年, 世界上出现大约 100 座重要的尾矿坝破坏, 由于尾矿库区尾矿有许多重金属和一些有害物质, 对周围环境也造成一定影响。因此, 做好尾矿坝稳定性评估工作尤为重要。

本文旨在对陶家沟尾矿库三维的静力和动力稳定分析计算, 用三维静力和动力计算分析结果分别揭示静荷载和地震荷载作用条件下尾矿坝的静、动应力应变特性, 并对尾矿坝的静力、动力稳定性及坝体液化的可能性进行评价。

1 工程概况

陶家沟尾矿库区位于洛南县驾鹿乡页岭村陶家沟内, 初期坝设计为透水堆石坝, 坝高 33 m, 坝顶宽 4 m, 底宽 119.5 m, 坝顶长度 110.24 m; 初期坝上游坝坡为 1:1.6, 下游坝坡为 1:1.75; 初期坝坝顶标高为 1 035 m, 在 1 024 m, 1 013 m 高程处各设一级马道, 马道宽 3 m。

后期堆积坝采用尾矿砂堆筑, 由于该区属于 7 度地震区, 且最终坝高较高, 故设计尾矿向上游方向堆放即采用上

游式筑坝方法, 根据地形设计坝坡为 1:4.5, 高差每隔 5m 设一级马道, 马道宽 3 m; 因此后期堆积坝的平均坝坡为 1:5.1; 最终堆积标高 1 160 m, 后期堆积高度为 125 m。包括初期坝在内的最终总坝高为 158 m, 总库容为 1263.1×10^4 m³。

根据工程设计要求, 建立的模型总的高程为 1 160 m, 它们涉及到的材料种类包括尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉土、尾粉质粘土共 5 种材料。按照金堆城铝业公司要求, 本分析采用 7 度地震设防。为了进行动力分析, 坝区设计地震加速度时程系采用《金堆城铝业公司栗西尾矿坝加高扩容工程场地地震安全性评价报告》(陕西大地地震工程勘察中心) 中 50 a 超越概率 10% 设防概率水平下的合成场地基岩地震动加速度时程确定, 峰值加速度 $a = 0.141 g$, 特征周期 0.34 s, 具体的地震加速度时程曲线如图 1 所示。

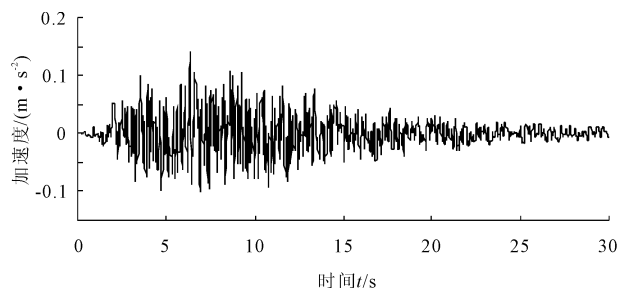


图 1 输入地震时程曲线

收稿日期: 2009 10 15

作者简介: 王平(1982—), 男(汉族), 湖北公安人, 在读硕士, 主要研究方向为数值模拟及计算。

通讯作者: 胡再强(1964—), 男(汉族), 陕西周至人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程试验及分析计算工作。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

2 计算方法

结合坝体的结构特点设置单元类型, 采用中点增量法模拟土体逐层填筑的非线性变形特征^[2 3]。采用了沈珠江院士编写的 EFES3D 程序, 该程序静力计算具有 $E-B$ 非线性模型, 南水双屈服面弹塑性模型, 动力计算采用等效粘弹性模型^[4], 可计算出残余变形并利用孔压模型可计算出残余孔压。该程序经过大量实际工程验证, 可以很好的模拟工程的实际情况, 计算结果比较真实可靠。

根据程序的设定, 计算中坐标系取为: X 轴以左岸到右岸方向为正, Y 轴以指向下游为正, Z 轴以向上为正。计算时对坝的实体模型用四面体单元进行有限元离散, 其实体图与网格图如图 2 所示。单元数为 24 030, 节点数为 18 361 个。坝体共分 15 级填筑。模型的约束, 在上游端部为侧向约束, 左右侧及底部为全约束。坝体的三维有限元网格如图 2 所示, 断面分布如图 3 所示。各种材料的静力、动力特性计算参数见表 1、表 2。

表 1 各种材料的静力特性计算参数

坝体材料	K	K_{ur}	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)	R_f	n	K_b	m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
尾中砂 1	150	536	5	34	0.84	0.87	68	0.41	20.1
尾中砂 2	227	522	4	32	0.71	0.51	68	0.41	18.8
尾细砂	214	657	14	26	0.86	0.65	107	0.18	17.5
尾粉砂	210	527	9	29.5	0.66	0.73	85	0.28	18.3

表 2 各种材料的动力特性计算参数

坝体材料	K_2	λ_{\max}	μ	K_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
尾中砂 1	580	0.22	0.48	9.1	0.002	0.70	1.0	0.9	1
尾中砂 2	570	0.21	0.48	9.1	0.002	0.75	1.1	0.9	1
尾细砂	556	0.19	0.48	8.6	0.002	0.75	1.3	0.7	1
尾粉砂	338	0.16	0.48	12	0.002	0.75	1.2	0.8	1

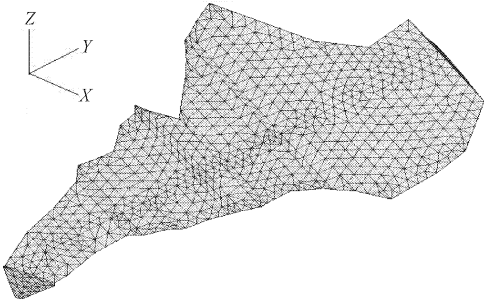


图 2 整体有限元网格

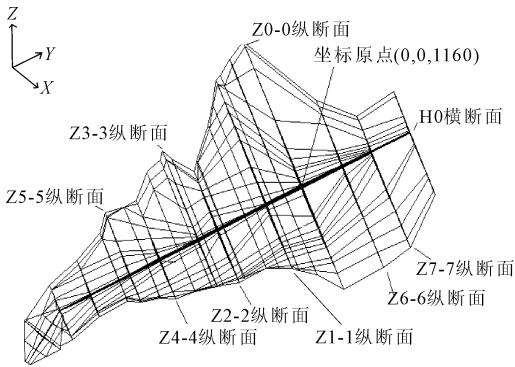


图 3 坝体断面

3 计算结果及分析

3.1 静力计算结果及分析

(1) 静力计算分析表明, 堆坝标高 1 160 m 坝体内所有各单元应力水平都小于 1, 无拉应力区出现, 边坡稳定分析计算采用滑弧搜索法, 利用有限元动力计算结果结合危险滑弧搜索法确定最小的安全系数, 此时滑动面上不同单元处的法向应力 σ'_n 和切向应力 τ'_n 分别为:

$$\sigma'_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - u_w + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\beta - \tau_{xy}\sin 2\beta$$
$$\tau'_n = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\beta + \tau_{xy}\cos 2\beta$$

(1)

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, u_w$ 为坝体地震后 25 s 动力计算的应力场和孔压场, β 为相应单元滑动面切向与水平向的夹角。这种计算的安全系数为:

$$F_s = \frac{\sum(\sigma'_n + \text{tg} \phi'_i + c'_i l_i)}{\sum \tau'_n l_i}$$

(2)

式中: c'_i, ϕ'_i 和 l_i 分别为滑动面上第 i 单元的有效粘聚力、有效内摩擦角和滑动面通过 i 单元的长度。最危险滑弧见图 4, 计算得到的坝坡最小的安全系数 F_s 为 1.26, 说明尾矿坝在静力状态下是稳定的。

(2) 通过分级加载计算, 坝体的最大竖向位移分别约为 0.9 m 左右, 且最大沉降出现在最大坝高坝体偏上部位。

(3) 由计算结果可知, 坝坡顺河向, 向下游最大水平位移 0.5 m, 鼓胀 1.2 m。

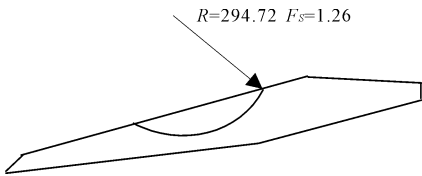


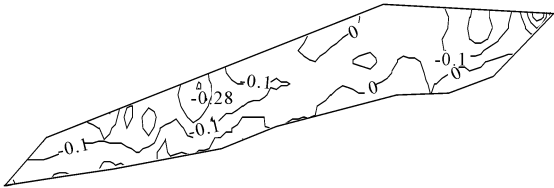
图 4 最危险滑弧

3.2 动力计算结果及分析

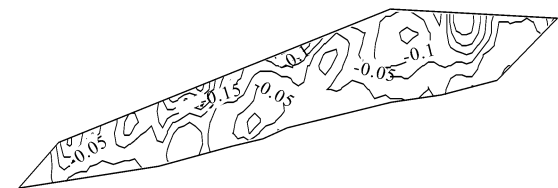
3.2.1 坝顶动力反应

尾矿坝加速度反应见图 5。如图可见, 在地震发生的 30 s 以内, 由于坝体与库内矿泥连在一起, 体积比土坝大得多, 再加上堆积料的密度低, 剪切模量也低, 坝体自重周期相当长, 在 2 s 以上, 地震反应分析结果有坝顶放大现象。但随着

孔隙水压力增加和动模量的降低, 地震剪应力难以向上传播, 坝体的自振周期则逐渐增大, 且与输入地震波的卓越周期相差越来越远^[5], 因此, 坝体的动力反应逐渐减弱。依据



(a) 地震6.5 s时Y向加速度等值线



(b) 地震8 s时Y向加速度等值线

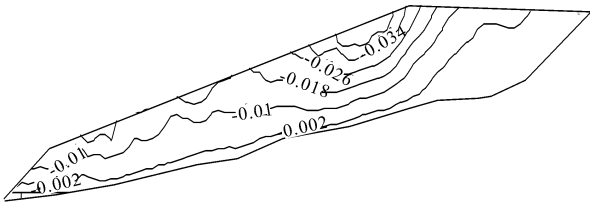
图 5 地震加速度反应图(单位: m/s²)

3.2.2 地震永久变形

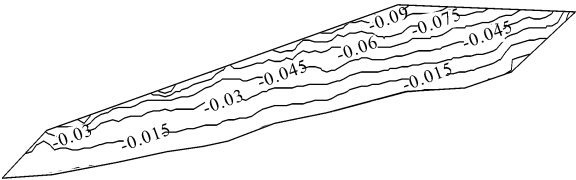
地震永久变形见图 6。

顺河水平向最大残余应变发生在坝坡面的中间靠下游部位, 地震结束时最大值- 0.034 m, 垂直向最大残余应变发

生在坝顶附近, 地震结束时最大值- 0.09 m。地震永久变形量在地震开始后 15 s 内增长幅度较大, 随后的地震永久变形量继续增加, 但幅度较小。在震后静力作用下孔压消散阶段永久变形量增长幅度更小。



(a) 地震30 s时Y方向残余变形等值线



(b) 地震30 s时Z方向残余变形等值线

图 6 坝体地震永久变形 (单位: m)

3.2.3 地震液化分析

文中用孔压比法方式来作为液化的判别标准, 其孔压比法是用孔压除以震前平均应力^[6,7], 孔压比的计算采用如下公式:

$$k_s = \frac{u_w}{\sigma_m} \tag{3}$$

对于三维问题, 震前平均应力的计算采用下式计算。

$$\sigma'_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \tag{4}$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为地震前的应力分量, u_w 为孔压场。如果算得的 k_s 等于 1, 则表示该单元发生液化。

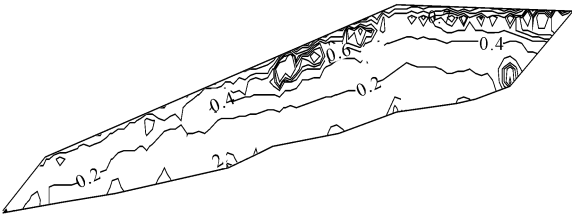


图 7 地震 30 s 孔压水平等值线图

图 7 是地震期 30 s 时的孔压水平等值线图。尾矿坝的坝坡中部浸润线下局部部位在地震反应结束时的最大孔压比值较大, 达到 0.8, 接近于液化; 但考虑到计算为完全不排水条件, 但由于尾矿料的渗透系数 ($10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/s) 较大, 使实际地震过程中产生一定程度的排水, 加之原状尾矿料的

动力抗震特性比扰动样有一定的提高, 因此结合实际条件尾矿坝坝坡液化的可能性很小。

3.2.4 边坡稳定分析

边坡稳定分析计算采用滑弧搜索法, 地震反应结束时的动力边坡稳定最小安全系数为 1.16, 表明动力作用下尾矿坝的边坡仍然是稳定的。最危险滑弧见图 8。

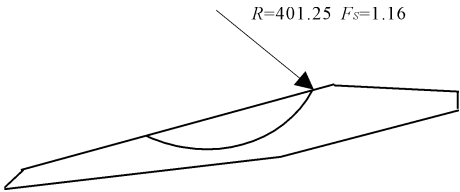


图 8 最危险滑弧图

4 结 语

- (1) 陶家沟尾矿坝在静力条件下是稳定的;
- (2) 在 7 度地震条件下, 尾矿坝的加速度反应较小, 其放大倍数为 1.67;
- (3) 陶家沟尾矿坝内动剪应力和动孔压绝大部分是随着地震历时的增加而逐渐增大, 在坝顶干滩靠近库区水的边线上部孔压比值均比较大, 接近于 1, 有局部液化的可能性, 但不会影响尾矿坝体的稳定。为了保证尾矿坝的安全, 坝坡必须采取排渗措施, 降低坝坡地下水位, 以杜绝尾矿砂的液化根源; 加强放矿管理, 保证坝前沉积为中、细砂, 有利于排水固结, 可提高坝体抗震能力。

(下转第 59 页)

表 3 尾矿库常见故障及处理措施参考表

迹象	原因	处理措施
坡脚隆起	坝脚基础变形 浸润线过高	先降库水位, 坡脚压重 先降库水位, 加长沉积干滩, 采取降低浸润线措施。
后期坝坡 渗水及沿 泽化	不透水初期坝导致 浸润线高矿泥夹层 引起水的逸出	在高于初期坝顶部位设贴坡 排渗设施或增设排渗管并穿 透矿泥夹层。
坝坡或坝 基冒砂	渗流失稳	先降库水位, 铺反滤布, 压上 碎石或块石, 设导流沟, 必要 时加排渗设施。
坝坡隆起	边坡太陡 矿泥集中、强度低	先降库水位, 再放缓边坡或加 固定边坡; 先降库水位, 加排渗设施或加 固定边坡。
坝坡向下 游位移或 沿坝轴向 裂缝	基础强度不够 边坡剪切失稳	先降库水位, 坝坡脚压重加固 基础 先降库水位, 再降低浸润线或 加固边坡
堆积坝塌 陷	排水管破坏或漏矿 排渗设施破坏	先降库水位, 加固或新建排水 管, 再填平塌坑; 开挖处理或做反滤后回填。
洪水位过 高	调洪库容小或泄 流能力小	先降低库内水位, 改造排洪设 施, 增大泄洪能力或采取截洪 分流设施。

3.2 库区安全监督管理

对尾矿库的正常运行来说, 库区安全管理也是一项至关重要的环节。为确保安全生产, 依据国家安全生产的相关规定, 应成立专门尾矿坝管理班组, 并建立严格的奖惩制度, 按下述要求执行: (1) 当实际情况与设计要求不符时, 应在汛前及时通知设计单位进行调洪演算和泄流能力复核, 以指导防洪工作; (2) 执行巡坝和护坝制度。遇到坝体出现裂缝、滑坡、沉陷等现象时, 要查明原因, 妥善处理并做好记录; 要经常观测坝体浸润线及逸出点的位置以及渗水量与水质, 当出现浸润线骤升或渗漏浑水等异常现象时, 要查明原因, 妥善处理并做好记录; (3) 尾矿库的排洪设施需经常进行检查, 确保排洪畅通; (4) 做好坝体位移、沉降、渗水和库水位等的观测记录, 出现异常, 立即报告; (5) 汛期前, 必须对排洪系统进行全面检查, 发现问题, 及时解决。加强值班和巡视, 密切注视库内水情变化和坝体两侧沟谷地表径流动态, 发现险情及时报告, 采取紧急措施, 严防事态恶化; (6) 尾矿

库使用期满而停止使用时, 应进行闭库设计。库内不宜蓄水, 防范发生溃坝和污染环境的危害事故。

3.3 其他安全措施

对于尾矿坝坝区内地质灾害的防范、化学污染物监测、粉尘处理、库区水质检测等细节问题也需要考虑。入库水流中不可避免地含有化学药品的残留物, 管理不善会酿成严重事故。如果进入尾矿库的化学药品残留物超标, 若尾矿库调洪库容小、水在库内停留曝气时间短、尾矿库的回水利用率低、尾矿库外泄水量大, 都会造成污染物的超标排泄。可以采取设置水质监测井的措施, 随时对水质进行检测, 企业设专职人员对污染物进行检测分析, 为进行环境管理、评价企业的环境质量、防止污染、保护和改善环境提供依据。尾矿坝的粉尘主要来自于库内的干滩扬尘, 需要定期洒水, 避免大风天气粉尘飞扬, 污染周围的空气环境。

4 结 语

从设计、管理两方面对尾矿坝的稳定性进行分析, 有助于提高坝体稳定、确保尾矿坝安全万无一失。我国已建的尾矿坝安全问题较为突出, 在今后的勘察和设计工作中, 只要做到严谨、科学、合理, 加强施工过程的规范化, 严把质量关, 剔除一切违规操作, 并把尾矿坝的日常管理和监督作为一项长期任务去抓, 采取妥善处理方式, 防患于未然, 就可以将尾矿坝溃坝造成的损失减小到最低程度, 有效维护社会稳定和人民生命财产安全。

参考文献:

[1] 杨丽红, 李全明, 程五一, 王云海. 国内外尾矿坝事故主要危险因素的分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(5): 28-31.
[2] 徐宏达. 我国尾矿库病害事故统计分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 69-71.
[3] 赵杰, 李淑英. 尾矿坝浸润线控制[J]. 西部探矿工程, 2005, (2): 69-70.
[4] 赵坚, 沈振中. 尾矿坝复杂排水系统渗流计算方法的改进[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 110-113.
[5] 祝进兵, 孙亮, 郑小毅, 卢雪松. 某尾矿坝抗滑稳定性分析[J]. 中国水运, 2007, 5(1): 62-63.
[6] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 233-245.
[7] 陈殿强, 王来贵, 李根. 尾矿坝稳定性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(3): 359-361.

水利学报, 2006, 37(10): 1224-1229.
[4] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
[5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
[6] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
[7] 高艳平, 王余庆, 辛鸿博. 尾矿坝地震液化简化判别法[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 72-79.

(上接第 55 页)
参考文献:
[1] 腾志国. 关于尾矿坝地震稳定性的分析及评价[J]. 河北冶金, 2003, (1): 16-17.
[2] 罗晓辉, 白世伟, 万凯军, 等. 尾矿坝渗透静力稳定分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 560-564.
[3] 潘建平, 孔宪京, 邹德高. 尾矿坝地震液化稳定的简化分析[J].