

DOI: 10.11779/CJGE2016S2008

# 上游式尾矿坝的固结及静动力稳定分析

胡再强, 于 淼, 李宏儒, 张 壮

(西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 结合四方金矿尾矿库工程项目研究碎石桩加固初期坝地基对坝体稳定性的影响。首先, 采用限动层加振冲碎石桩的方案对初期坝地基进行加固, 并通过排水固结法计算了碎石桩在不同深度时, 固结度随时间的变化规律, 确定了最优的加固方案; 其次, 基于实际工程地质勘察和室内试验的研究成果, 利用 SEEP3D 反演分析了其渗流结果; 最后, 采用基于有效应力法的 EFES-3D 计算程序对尾矿库初期坝地基在碎石桩加固前后进行了静动力计算和坝坡稳定性分析。可以看出, 利用碎石桩加固初期坝可以使坝体沉降量增大, 坝坡顺河向位移减小, 并且降低了坝体液化的可能性, 使坝体的抗滑稳定明显提高。

**关键词:** 上游式尾矿坝; 碎石桩; 边坡安全系数; 静动力稳定分析

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2016)S2 - 0048 - 06

**作者简介:** 胡再强(1964 - ), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程及数值计算方面的工作。E-mail: huzq@xaut.edu.cn。

## Consolidation and static-dynamical stability of upstream tailings dam

HU Zai-qiang, YU Miao, LI Hong-ru, ZHANG Zhuang

(School of Civil Engineering and Architecture, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The influence of gravel pile foundation reinforcement for the initial tailing dam of goldmine of Sifang Company on the dam stability is investigated. First, the foundation of the initial tailings dam is strengthened by combining the stopper layer with the gravel pile reinforcing system. The variation of the degree of consolidation with time for the gravel pile at different depths is revealed using the drainage consolidation method. The optimal reinforcing scheme is proposed. Second, based on the actual and experimental data, the seepage behavior is analyzed inversely by means of SEEP3D. Furthermore, by using the effective stress method in the EFES-3D software, static and dynamic stability of the dam is calculated and the slope stability is analyzed. The results show that gravel pile foundation reinforcement may lead to increase of the settlement and decrease of the dam slope displacement. It provides a method for reducing the possibility of the dam liquefaction and improving the stability against sliding of tailings dam.

**Key words:** upstream tailings dam; gravel pile; safety factor; static and dynamic stability analysis

## 0 引 言

尾矿库运营的好坏, 不仅影响到一个矿山企业的经济效益, 而且与库区下游居民的生命财产息息相关<sup>[1]</sup>。因此, 尾矿库的渗流及稳定性分析<sup>[2-3]</sup>一直是尾矿库在设计和研究中最重要的问题之一。据统计, 浸润线每下降 1 m, 可使尾矿库的静力稳定安全系数增加 0.05 甚至更多; 浸润面如果在坝面 8 m 及以下, 在发生 7 级地震时基本上不会产生振动液化的现象<sup>[4-5]</sup>。考虑到坝体的整体稳定性, 上游式尾矿坝的初期坝大多是修建在稳定基岩上的。这样不仅可以使坝体沿顺河方向的位移减少, 增强坝体的抗滑稳定性, 而且在地震时, 地基不易产生液化, 从而减小溃坝的风险<sup>[6]</sup>。但在特殊的情况下, 如基岩的风化深度较深或新尾矿初期坝

建立在原尾矿库的堆积坝上, 就要采取一定措施加强地基的稳定性, 来提高尾矿坝的整体稳定性。

地基处理常用的方法有: 强夯法、置换法和密实法<sup>[7]</sup>。强夯法是利用强大的夯击能, 在地基中产生强烈的冲击力, 使土动力固结密实, 多采用于碎石土、粉土和杂填土等<sup>[8]</sup>; 置换法采用专门的技术措施, 以砂、碎石等置换地基中的软弱土, 形成复合地基, 从而提高地基承载力, 该方法多采用于黏性土、冲填土、粉砂、细砂等; 密实法是在振动挤密过程中, 回填砂、碎石等, 使土体孔隙减小, 强度提高的方法, 该方法

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目 (2014SZS15-Z02)

收稿日期: 2016 - 05 - 19

多适用于松砂、粉土、杂填土及湿陷性黄土等<sup>[9]</sup>。

## 1 加固方案的确定

四方金矿尾矿库的初期坝建在原尾矿库(已闭库)尾砂面上, 为增强坝体的整体稳定性, 经过认真地比较安全性、可靠性、工期、造价及质量等诸多因素, 最后决定采取振冲碎石桩加固地基的方法。

本次设计和计算所采用的方案(为计算工况①)见图 1 所示。其初期坝建在原尾矿库(已闭库)尾砂面上, 采用堆石碾压坝型。初期坝坝高 16.0 m, 坝底标高 974.0 m, 坝顶标高 990.0 m, 下游坝坡 1:2, 上游坝坡 1:1.75, 坝顶宽 4.0 m, 筑坝方量为 12 万 m<sup>3</sup>。采用上流法最终冲填至 1030.0 m, 冲填高度 40.0 m, 总坝高为 90.0 m, 堆积坝平均外边坡为 1:4.25。在初期坝下设碎石桩, 其中, 碎石桩的设计方案为(为计算工况②): ①初期坝下限制层(土工布及土工格栅碎石层), 厚度为 2 m; ②限制层下设碎石桩: 桩距 1.8 m, 采用正方形布置, 桩径 0.8 m, 共 38×106=4028 个。

限制层的主要作用有: ①渗流作用: 限制层是由碎石堆砌而成, 故有较高的渗透系数, 对坝体的渗流有促进作用; ②加筋作用: 限制层将整个初期坝与碎石桩复合地基连接为一个整体, 当发生固结沉降时, 限制层可承担剪应力, 使初期坝整体沉降趋于均匀; ③反滤作用: 限制层中的土工布可以过滤渗流时带出的泥砂, 起反滤的作用。

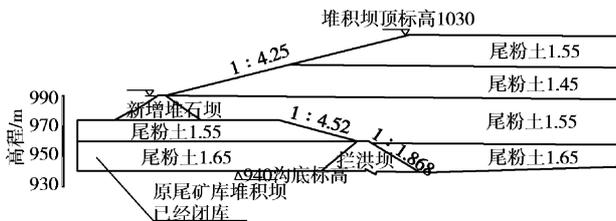


图 1 尾矿库剖面图及材料分区

Fig. 1 Profile and material partitioning of upstream tailings dam

下面对碎石桩的深度方案进行探讨。根据试验结果, 取初期坝下尾粉土的固结系数为  $C_v=C_h=3.36 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

计算碎石桩在不同深度(0, 6, 12, 18 m)时(不含限制层), 固结度随时间的变化规律, 计算结果见图 2。

由图 2 可以看出: 当碎石桩深度为 12 m 时, 初期坝下可压缩尾矿砂层在一年后的固结度为 0.67; 尾矿库在运行结束(20 a)时, 其固结度达到 0.96。满足设计要求。综合考虑地基在施工过程的固结度及工程造价, 选用碎石桩深度为 12 m 作为本次设计计算的最优方案。

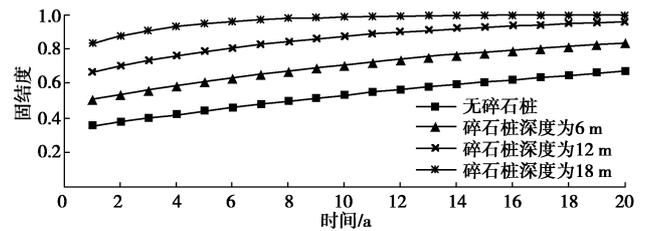


图 2 固结度随时间的变化曲线

Fig. 2 Consolidation-time curves

根据以上的分析, 确定碎石桩的加固方案如图 3 所示。

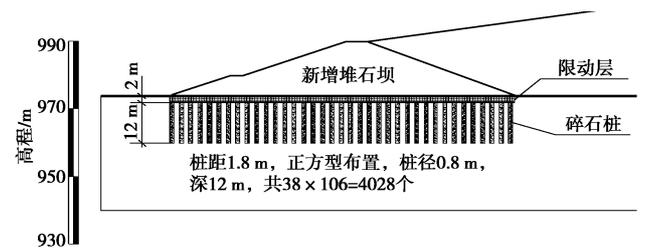


图 3 碎石桩加固方案图

Fig. 3 Gravel pile reinforcement scheme

## 2 数值模拟计算

为降低浸润面, 在坝体内设排渗井, 干滩长度取洪水运行时的干滩长度 100 m, 下游水位取地表处, 用 SEEP3D 模拟其渗流结果<sup>[10]</sup>。根据设计方提供的坝址平面布置图、尾矿库剖面图和材料分区(图 1)及渗流计算结果, 通过 ANSYS 分别建立两种工况下的三维有限元分析模型(图 4)。并对坝体用线性六面体单元进行离散, 模型的单元数为 11744, 节点数为 13685。

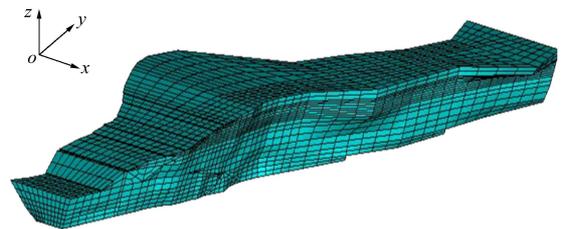


图 4 坝体模型网格划分图

Fig. 4 Mesh elements of dam model

本模型涉及到的材料包括初期坝和堆积坝两大类。其中堆积坝材料包括干密度分别为 1.45, 1.55, 1.65 g/cm<sup>3</sup> 的尾粉土和干密度为 1.55 g/cm<sup>3</sup> 的尾粉砂以及碎石桩复合地基共 5 种材料。各材料静力计算参数和动力计算参数(由室内静、动三轴试验确定)分别见表 1 和表 2。

## 3 输入地震时程

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001)



表1 各种材料的静力特性计算参数

Table 1 Calculated values of static analysis of materials

土类	干密度 (g·cm <sup>-3</sup> )	E-μ模型8个参数							
		K	n	R <sub>f</sub>	c/kPa	φ/(°)	G	D	F
尾粉土	1.45	128.66	0.71	0.81	30	30.5	0.3	2.7	0.12
	1.55	129.81	0.85	0.93	38	30.1	0.35	1.84	0.08
	1.65	162.24	0.87	0.96	40	31	0.4	1.88	0.17
尾粉砂	1.55	107.14	0.75	0.79	15	33.9	0.35	2.13	0.25
碎石桩复合地基	2.0	193.50	1.27	0.75	10	32	0.47	1.65	0.23
初期坝	2.2	800.00	0.60	0.65	0	35.0	0.5	1.50	0.35

表2 各种材料的动力特性计算参数

Table 2 Calculated values of dynamic analysis of materials

土类	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	K <sub>2</sub>	λ <sub>max</sub>	μ	K <sub>1</sub>	C1	C2	C3	C4	C5
尾粉土	1.45	488	0.27	0.5	12.7	0.002	0.75	1.2	0.8	1
	1.55	541	0.261	0.5	14.5	0.002	0.75	1.2	0.8	1
	1.65	571	0.246	0.5	14.4	0.002	0.75	1.2	0.8	1
尾粉砂	1.55	526	0.236	0.5	13.8	0.002	0.75	1.3	0.7	1
碎石桩复合地基	2.0	810	0.230	0.5	13.0	0.002	0.75	1.3	0.8	1
初期坝	2.2	950	0.212	0.5	12.6	0.002	0.75	1.3	0.8	1

注：C1、C2、C3、C4、C5 为残余变形计算的 5 个参数。

表3 静力计算各个指标的特征值

Table 3 Characteristic values of static analysis

工况	指标特征值								
	坝体最大 沉降量/m	坝坡顺河方 向位移/m	初期坝最大 沉降量/m	初期坝顺河 方向位移/m	坝水平向河 谷位移/m	垂直方向有效 应力 σ <sub>z</sub> /MPa	最大主应力 σ <sub>1</sub> /MPa	最小主应力 σ <sub>3</sub> /MPa	应力 水平
①	1.7	1.2	1.0	0.6	0.15	0.80	0.85	0.45	0.7
②	2.1	0.9	0.6	0.6	0.20	0.90	0.90	0.50	0.7

划分，本场地所在区域地震动峰值加速度值为 0.15g，相应的基本烈度为 7 度。根据坝区设计地震加速度时程中 50 a 超越概率 10% 设防概率水平合成场地地震动加速度时程，峰值加速度 a=0.141g，放大 1.06 倍，反应谱特征周期为 0.55 s，具体的地震加速度时程曲线如图 5 所示。

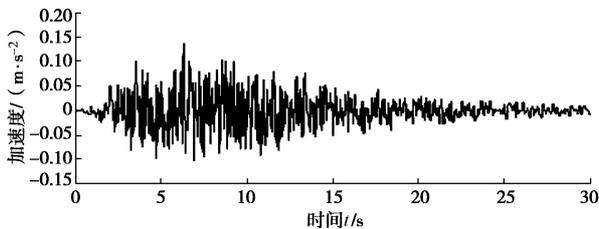


图5 输入地震时程曲线  
Fig. 5 Time history of earthquake

### 4 三维静力、动力计算与分析

采用基于有效应力法的 EFES-3D 三维有限元计算程序对该尾矿坝进行了静动力稳定计算，得到静力

作用下的位移场和应力场，动力作用下的动剪应力场、加速度场和孔压比场等。

在上述计算结果的基础上，采用圆弧法，计算尾矿坝下游坝坡的整体滑动安全系数，对两种工况下游坝坡的静动力稳定性进行评价。

#### 4.1 计算结果整理

根据静力计算结果，分别绘出两种工况下尾矿坝最大横断面上水平变形 U<sub>y</sub>，竖向变形 U<sub>z</sub>，大主应力 σ<sub>1</sub>，小主应力 σ<sub>3</sub> 和静应力水平 d<sub>1</sub> 的等值线分布图。

根据动力计算结果，分别绘出在地震中（10 s）两种工况下尾矿坝最大横断面上的动剪应力场 τ<sub>d</sub>，y 方向的地震反应加速度场、z 方向的地震反应加速度场和孔压比场。

#### 4.2 静力计算结果及分析

图 6 和图 7 分别为两种工况下最大横断面的静力场与位移场。表 3 为两种工况下的静力计算各个指标的特征值。

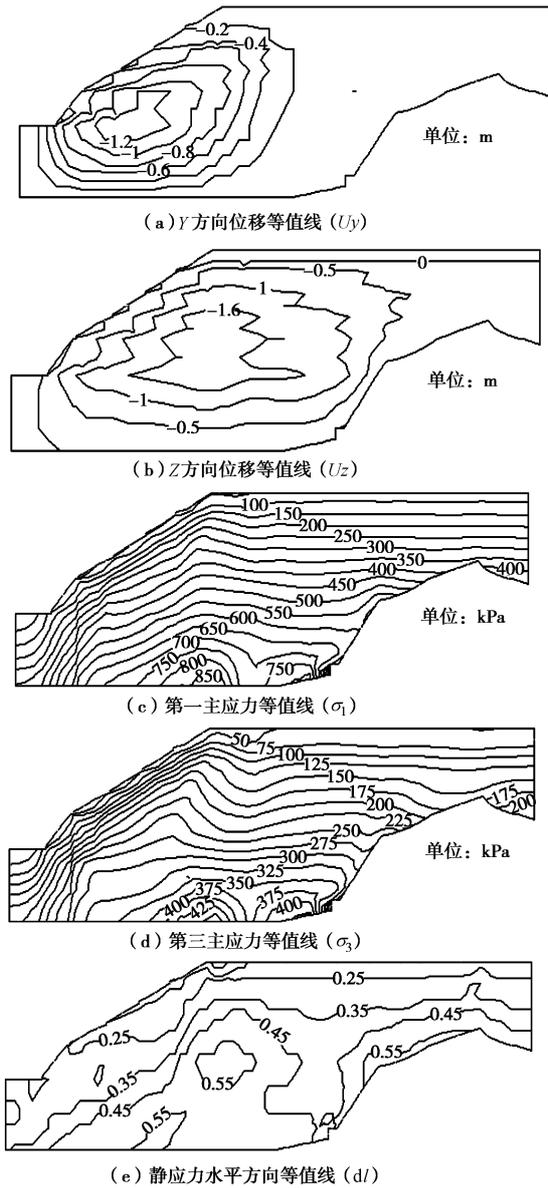


图 6 工况①最大横断面上的静应力场与位移场

Fig. 6 Static stress and displacement fields of maximum cross-section of working condition 1

由计算结果图 6 和图 7 可以看出, 两个工况最大横断面的位移场分布规律都相似: 最大沉降都发生在最大坝高的中部, 坝坡顺河方向位移在堆积坝前中部较大。两个工况下最大横断面的的应力场分布规律也都相似: 断面处中下部各应力都比较大, 向上依次减小。两种工况下小主应力未出现小于 0 的单元, 说明坝体中不会存在拉裂情况发生; 应力水平较低, 未出现大于 0.9 的情况, 说明单元没有出现破坏情况, 坝体在静力作用下处于安全状态。

由表 3 可知用碎石桩加固初期坝后, 尾矿坝体整体竖向沉降量增大, 坝坡顺河方向位移减小。这是因为碎石桩的渗透系数大, 加快了坝体的固结速率, 使坝体的竖向沉降增大; 又由于固结速率增大使坝体的有效应力增大, 并且碎石桩也具有较高的抗剪强度,

使得坝体向顺河方向的位移减小, 这使坝体的抗滑稳定有所提高。

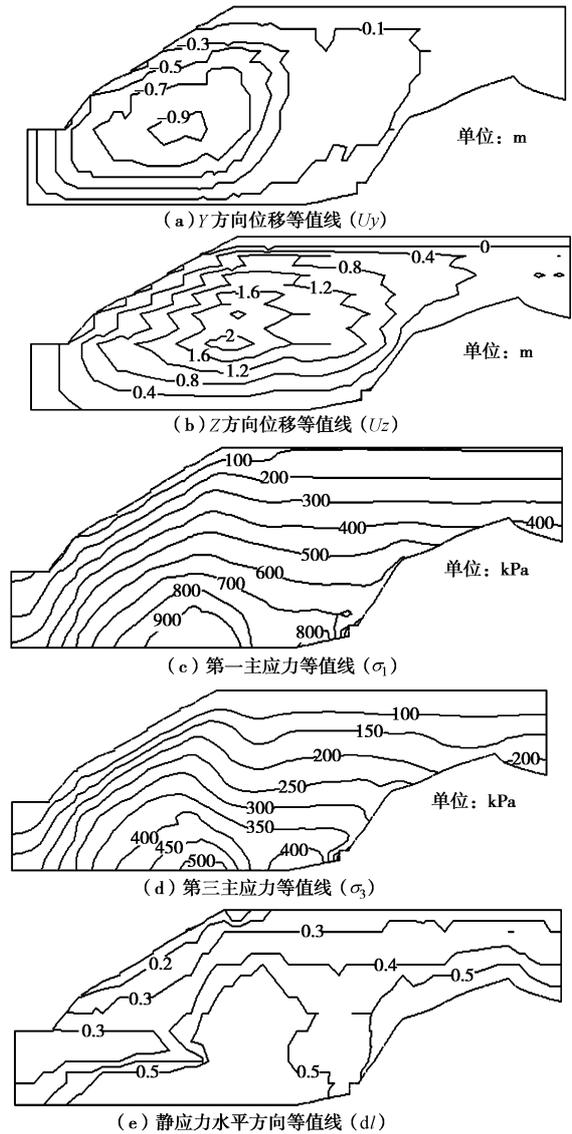


图 7 工况②最大横断面上的静应力场与位移场

Fig. 7 Static stress and displacement fields of maximum cross-section of working condition 2

由表 3 可知用碎石桩加固初期坝后, 初期坝的竖向沉降量和顺河方向的位移均减小。这是因为碎石桩的压缩模量较大, 从而增大了初期坝下复合地基的压缩模量, 使得初期坝的竖向沉降减小, 顺河方向的位移减小。

#### 4.3 动力计算结果及分析

图 8 和图 9 分别为两种工况下最大横断面的动力计算结果。表 4 为两种工况下的动力计算各个指标的特征值。

由图 8 和图 9 可以看出, 两种工况下最大横断面上动剪应力的分布规律相似: 坝体中下部附近较大, 向上逐渐减小。坝体的反应加速度的最大值都发生在坝体顶部, 竖向加速度明显小于水平向加速度。

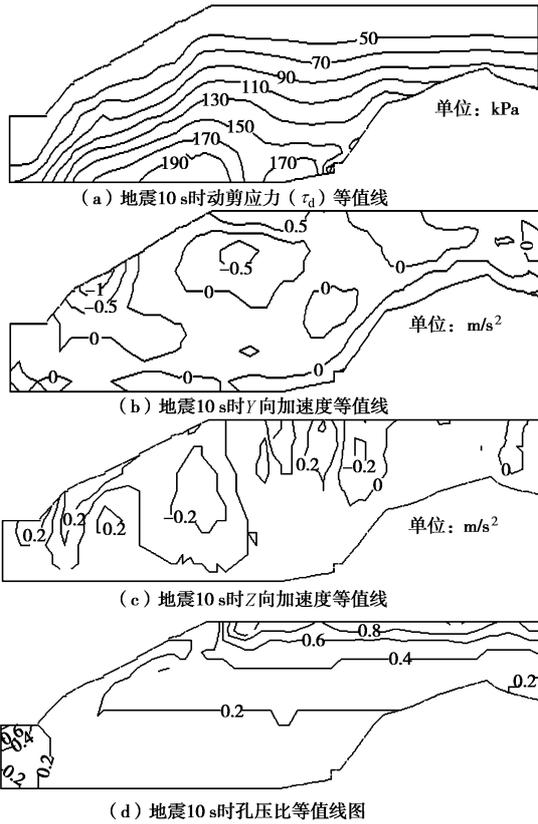


图 8 工况①最大横断面上的动力计算结果图

Fig. 8 Dynamic shear stress and acceleration and pore pressure ratio fields of maximum cross-section of working condition 1

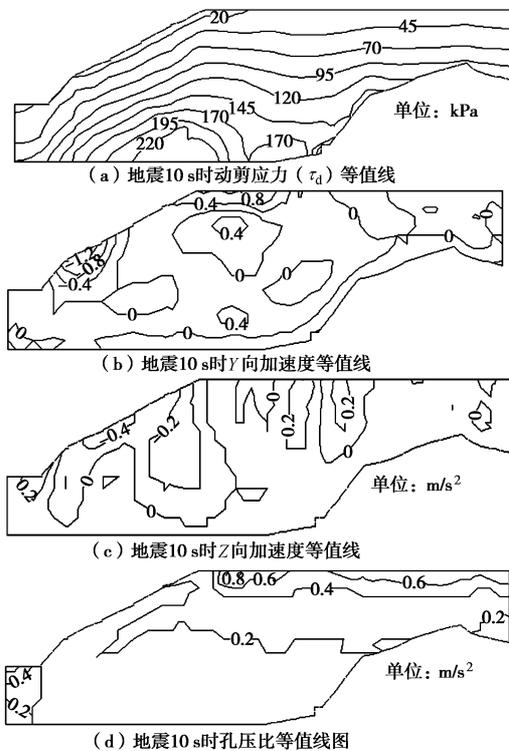


图 9 工况②最大横断面上的动剪应力场与加速度场和孔压比等值线图

Fig. 9 Dynamic shear stress and acceleration and pore pressure ratio fields of maximum cross-section of working condition 2

通过对比两种工况下地震时的加速度场可知：用碎石桩加固后，发生地震时，初期坝及其附近尾矿的加速度增大，说明其在地震过程中，震动作用明显。这是因为无加固措施的地基因其固结速率慢，地震剪切波传递速率慢，整体呈现出“液态”的特性；而碎石桩复合地基固结速率快，使得整体呈现出“固态”的特性，地震剪切波传递速率快，抗剪性能增强，这有利于坝体的整体稳定性。

由孔压比分布场可以看出，两种工况的孔压比都显示下部小，上部大的规律性，符合实际地震反应的规律。随着地震时长的增长，工况①坝体沉积区附近孔压比最大值等于 1.0，说明地震过程中沉积区坝顶局部范围的矿渣发生了液化，而工况②孔压比均小于 1.0，没有发生液化现象，说明用碎石桩加固后对抗震有促进的作用。

表 4 动力计算各个指标的特征值

Table 4 Characteristic values of dynamic analysis

工况	指标特征值			
	孔压比	动剪应力 $\tau_d/\text{MPa}$	最大断面水平方向地震反应加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	最大断面竖直方向地震反应加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
①	1.0	0.19	1.3	0.4
②	0.8	0.22	1.2	0.4

### 4.4 边坡稳定分析

由数值计算结果，对两种工况下静力和动力坝体的边坡进行了稳定计算，得出：初期坝下无加固措施时，尾矿库下游坝坡的静力安全系数  $F_S=1.41$ ，滑弧半径为 110.47 m，圆心坐标为 (162, 1051)；动力安全系数  $F_S=1.13$ ，滑弧半径为 100.55 m，圆心坐标为 (188, 1080)。初期坝下采用碎石桩加固后，尾矿库下游坝坡的静力安全系数  $F_S=1.53$ ，滑弧半径为 88.08 m，圆心坐标为 (168, 1063)；动力安全系数  $F_S=1.18$ ，滑弧半径为 95.72 m，圆心坐标为 (171, 1083)。

由以上分析可以看出：在初期坝下增设碎石桩加固措施可以明显提高尾矿库坝坡的安全稳定性，使其满足工程规范的要求。这是因为碎石桩具有较高的渗透性和较强的抗剪性，不仅可以加速坝体的固结，而且可以增强地基的稳定性。当固结度增大时，坝体的有效应力也随之增大，当发生地震时，尾矿不易液化。这对于尾矿库的整体安全稳定也具有促进作用。

## 5 结 论

(1) 通过对比①、②工况的边坡安全系数，用碎石桩加固初期坝可以明显提高坝体边坡的稳定性。

(2) 通过对比①、②工况坝体沉降量和坝坡顺河

方向位移, 可以看出用碎石桩加固初期坝后, 尾矿坝坝体竖向沉降量增大, 坝坡顺河方向位移减小。这是因为碎石桩的渗透系数大, 加快了坝体的固结速率, 使坝体的竖向沉降增大; 又由于固结速率增大使坝体的有效应力增大, 并且碎石桩也具有较高的抗剪强度, 使得坝体向顺河方向的位移减小, 这使坝体的抗滑稳定有所提高。

(3) 坝体在给定的地震力作用下, 两种工况坝体的动剪应力最大值均发生在坝体中下部, 且向上依次减小; 坝体的反应加速度的最大值都发生在坝体顶部, 且竖向加速度反应均明显小于水平向加速度反应。

#### 参考文献:

- [1] 沈楼燕, 魏作安. 探讨矿山尾矿库闭库的一些问题[J]. 金属矿山, 2002, 6: 47 - 48. (SHEN Lou-yan, WEI Zuo-an. On problems in the closure of tailings dams[J]. Metal Mine, 2002, 6: 47 - 48. (in Chinese))
- [2] 赵 坚, 纪 伟, 刘志敏. 等. 尾矿坝地质剖面概化及其对渗流场计算的影响[J]. 金属矿山, 2003(12): 24 - 27. (ZHAO Jian, JI Wei, LIU Zhi-min, et al. Surveying of geological sections of tailings dams and its effect on seepage field calculation[J]. Metal Mine, 2003(12): 24 - 27. (in Chinese))
- [3] 李宏儒, 胡再强, 陈存礼, 等. 金堆城尾矿坝加高方案数值模拟及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008(4): 1138 - 1142. (LI Hong-ru, HU Zai-qiang, CHEN Cun-li, et al. Numerical simulation and slope stability analysis in Jinduicheng tailings dam to be designed to increase the dam height[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(4): 1138 - 1142. (in Chinese))
- [4] 尹光志, 余 果, 张东明. 细粒尾矿库地下渗流场的数值模拟分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005(6): 81 - 83. (YIN Guang-zhi, YU Guo, ZHANG Dong-ming. Numerical calculation analysis about seepage field of fine grained tailings pool[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005(6): 81 - 83. (in Chinese))
- [5] 倪尤运, 林启祥, 吴光富, 等. 浸润线对上游法尾矿坝地震液化区影响[J]. 现代矿业, 2011(6): 109 - 111. (NI You-yun, LIN Qi-xiang, WU Guang-fu, et al. The influence of saturation line to earthquake liquefaction area of upstream method tailings dam[J]. Express Information of Mining Industry, 2011(6): 109 - 111. (in Chinese))
- [6] 魏作安. 细粒尾矿及其堆坝稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004. (WEI Zuo-an. The study of fine tailings dam stability[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese))
- [7] 孟庆山, 王吉利, 汪 稔, 等. 采用不同加固方案处理软土地基的对比研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 375 - 377, 381. (MENG Qing-shan, WANG Ji-li, WANG Ren, et al. Contrast study on consolidation of soft clay foundation with different methods[J]. Rock And Soil Mechanics, 2002, 23(3): 375 - 377, 381. (in Chinese))
- [8] 张平仓, 汪 稔. 强夯法施工实践中加固深度问题浅析[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 76 - 80. (ZHANG Ping-cang, WANG Ren. A study of dynamic consolidation depth in engineering practice[J]. Rock And Soil Mechanics, 2000, 21(1): 76 - 80. (in Chinese))
- [9] 李鸿镇. 压密灌浆法处理建筑物不均匀沉降施工实例[J]. 探矿工程-岩土钻掘工程, 2001(5): 13 - 14. (LI Hong-zhen. Treatment of the uneven subsidence of a building with compact grouting[J]. Exploration Engineering, 2001(5): 13 - 14. (in Chinese))
- [10] 路美丽, 崔 莉. 复杂地形尾矿坝的三维渗流分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1177 - 1180. (LU Mei-li, CUI Li. Three-dimensional seepage analysis for complex topographical tailings dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1177 - 1180. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)