

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.009

基于液化判别的尾矿坝动力稳定性分析

张富有^{1,2}, 李刘操², 徐松²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学土木与交通学院安全与防护工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:在连续降雨并输入水平、竖直方向地震波的工况下,模拟尾矿坝坝体的动力反应,分析坝基覆盖层和尾矿砂层的液化情况,提出一种考虑液化区域影响的尾矿坝动力稳定性计算方法,并将此方法用于海口镇尾矿坝下游坝坡的动力稳定性分析中。结果显示:连续降雨时的动力稳定安全系数比无降雨时低 0.07 左右,考虑液化区域的动力稳定安全系数比不考虑液化区域的小 0.10 左右。
关键词:尾矿坝;液化区域判别;动力稳定性;动力稳定安全系数;有限元法
中图分类号:TV649 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0648-05

Dynamic stability analysis of tailings dam based on liquefaction evaluation

ZHANG Fuyou^{1,2}, LI Liucuo², XU Song²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: By simulating a tailings dam under the condition of continuous rainfall and taking into account seismic waves in horizontal and vertical directions, the dynamic responses of the tailings dam were analyzed and the liquefaction of the dam foundation layers and tailing slag were evaluated. A dynamic stability analysis method for the tailings dam, which considers the effect of liquefaction, was applied to the dynamic stability analysis of the downstream slope of the tailings dam at Haikou Town. The results show that the safety factor decreased by about 0.07 in the case of continuous rainfall compared with that without rainfall, and the safety factor, when considering the liquefaction of the dam foundation, was 0.10 lower than that without considering the liquefaction.
Key words: tailings dam; liquefaction evaluation; dynamic stability; safety factor of dynamic stability; finite element method

随着科学技术的发展、筑坝经验的积累、土地资源的短缺,大坝逐渐向高坝方向发展,对其坝体抵抗外界环境影响的要求也越来越高。张爱军等^[1]对粉煤灰坝的研究表明,在地震作用下粉煤灰坝不会发生液化。但是,以尾矿砂为主要材料、采用上游筑坝法填筑的尾矿坝坝体抗震性能较差。近年来,尾矿坝坝体的动力稳定性分析一直是研究的热点^[2]。李兆炜等^[3]基于渗流理论对尾矿坝坝体的稳定性进行分析,并提出考虑浸润线影响的尾矿坝稳定性计算方法。潘建平等^[4]对地震作用下考虑液化区域的尾矿坝稳定性进行简化分析,并得到简化计算公式。尹光志等^[5]对尾矿坝溃坝进行相似模拟试验,确定了泥浆冲击力对溃坝的影响。

收稿日期: 2011-12-07
基金项目: 国家自然科学基金(50808067)
作者简介: 张富有(1972—),男,河南驻马店人,副教授,博士,主要从事土石坝工程抗震、结构隔震减振研究。E-mail: fyzhangsy@hhu.edu.cn

尾矿坝失稳破坏造成的政治影响和社会危害极大,纵观尾矿坝失事原因,多为遭遇连续暴雨或地震。地震作用下尾矿砂和坝基有可能发生液化,而连续暴雨能使土体抗剪强度降低、液化区域扩大,加剧其失稳破坏。以往用来分析尾矿坝在地震作用下坝坡稳定性的拟静力法不考虑尾矿砂液化区域或者认为尾矿砂区域为液化区,这可能导致稳定性分析的结果偏于危险或保守。笔者将连续降雨因素考虑到尾矿坝动力有限元时程分析中,然后进行液化区域的判定,在判定液化区域的基础上对坝体及坝基进行动力稳定性分析。

1 基于液化判别的动力稳定性分析

1.1 动力时程分析与液化判别

在尾矿坝地震反应分析中,视土体为黏弹性体^[6],其动力平衡方程为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = -M\ddot{\delta}_g \tag{1}$$

式中: M, C, K ——坝体的总质量矩阵、总阻尼矩阵和总刚度矩阵; $\dot{\delta}, \ddot{\delta}, \delta$ ——坝体结点的速度列阵、加速度列阵和位移列阵; $\ddot{\delta}_g$ ——输入地震波的加速度列阵。

考虑到坝体材料的非线性,采用等效线性模型,即动剪切模量和阻尼比均为剪切应变 γ 的函数。动剪切模量 G 采用文献^[7]中的公式:

$$G = kP_a^{1-n}\sigma_m^n \frac{G}{G_{\max}} \tag{2}$$

式中: k, n —— $G_{\max}$ 对应的试验常数; P_a ——大气压力; σ_m ——平均有效应力; $G/G_{\max}$ ——动剪切模量与最大动剪切模量的比值,为剪切应变 γ 的函数,由试验及类比法确定。

Pan 等^[8]提出尾矿砂抗液化应力比,Cetin 等^[9]给出一般砂土水平场地动力下的应力折减系数。笔者采用 Seed 等^[7]提出的剪切应力对比法进行液化稳定分析,即通过比较计算得到的坝体地震剪切应力和液化试验测定的抗液化剪切应力判断砂土是否液化。在 t 时刻对土体单元进行液化判断时,首先由动力计算确定时段 $0 \sim t$ 间产生的最大动剪切应力 $|\tau_{\max}|$ 、动剪切应力峰值 τ 出现的次数 n ;其次,计算团体 $|\tau/\tau_{\max}|$,并根据这些比值得出相应的转换系数 β ;最后,求抗液化安全度 $F = \tau_i / (0.65 |\tau_{\max}|)$ 。如果 $F > 1$,则认为该单元没有液化,若 $F \leq 1$ 则认为该单元产生液化。

1.2 动力稳定性分析

在动力时程分析过程中,如果计算单元产生液化,则将液化单元的动剪切模量、抗剪切强度参数分别修改为有效应力降低时的剪切模量值和 0,以模拟出现液化区的实际情况。动力抗滑稳定性分析是在静力、动力计算的基础上采用逐步搜索法进行的。逐步搜索法首先假设滑弧,然后计算与滑弧相交土体单元的静正应力 σ_s 与动正应力 σ_d 的和、静剪切应力 τ_s 与动剪切力 τ_d 的和,最后根据滑弧通过单元的总抗剪力与总剪切力的比值来计算滑弧的安全系数。设滑弧通过单元 i 的长度为 l_i ,该单元的抗剪强度为 τ_{fi} ,剪应力为 τ_i ,则整个滑弧的动力稳定安全系数为

$$F_s = \frac{\sum \tau_{fi} l_i}{\sum \tau_i l_i} \tag{3}$$

对于连续降雨造成的尾矿库水位上升、坝体浸润线发生变化的工况下的动力稳定分析,是在渗流分析的基础上进行的。渗流分析采用河海大学岩土工程研究所编制的 US3D 三维有限元程序进行,获得浸润线后用于动力稳定计算^[10],限于篇幅这里不再介绍渗流计算。

2 尾矿坝动力稳定性分析

2.1 坝体和坝基土

本文研究的尾矿坝位于昆明市西山区海口镇石马哨村西南约 1 km 处的库区下游沟口处,为一次性筑坝方法筑成,处于烈度为 8 度的强震区。坝顶标高为 +2055 m,最终坝高为 85 m,坝顶长度为 648.68 m,坝顶宽度为 6.00 m,水库总库容为 1762.02 万 m^3 。坝基主要地层有黏土、粉质黏土、强风化白云岩等,如图 1 所示。受沉积环境影响,局部地段存在透镜体夹层和薄夹层。软弱黏土层在坝址位置较厚,在坝址下游沟谷地带厚度约为 15~20 m。沟谷地带存在 1 层很薄的粉砂层,厚度约 2~3 m,局部厚 4 m,标准贯入试验判定此粉砂层为液化土。

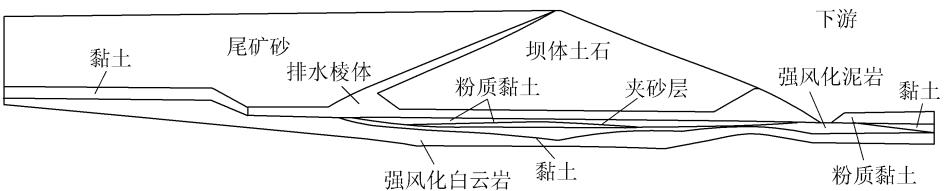


图1 坝体处地层分布

Fig. 1 Stratigraphic distribution of dam

2.2 地震波的输入

尾矿坝设计地震烈度为8度,将遭遇连续降雨和地震设为最不利工况。对于二类工程,采用50 a超越概率10%的加速度进行计算分析,地震动时程峰值为 1.92 m/s^2 ,地震波从基岩顶部输入。根据文献[11],地震波需要考虑顺河水平向与竖向双向输入,竖向加速度取水平向加速度的 $2/3$,遇合系数为0.5。计算所用地震波需要持续时间为20 s,时间间隔为0.02 s。计算断面为尾矿坝沟谷中心垂直于坝轴线的典型横断面,该断面网格剖分如图2所示。

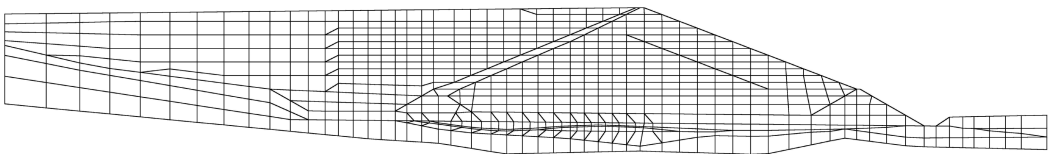


图2 尾矿坝沟谷断面二维有限元网格

Fig. 2 Two-dimensional finite element grid of gully cross-section of tailings dam

2.3 动力稳定性分析参数选取

通过共振柱和动三轴试验,可得到尾矿砂、坝基粉质黏土、黏土和粉砂的动力计算参数^[12]。各土质最大剪切模量所对应的参数见表1,抗液化剪切应力参数见表2。连续降雨工况下,采用渗流计算得出浸润线。浸润线上升则尾矿砂的密度增加,湿化后土体剪切模量减小10%,抗剪强度指标中湿化后的摩擦角降低 2° ^[13]。

表1 不同土质最大剪切模量所对应的参数

Table 1 Maximum shear modulus parameters for various materials

土 质	k	n	土 质	k	n
尾 矿 土	480.73	0.582	坝基黏土	348.42	0.457
粉质黏土	362.24	0.609	全风化泥岩	1000.00	0.600
坝基粉砂	465.82	0.447	全风化白云岩	1200.00	0.690
筑坝料(砂砾)	676.00	0.530	排水棱体(碎石)	1200.00	0.690

表2 不同土质抗液化剪切应力参数

Table 2 Shear-stress parameters against liquefaction for various materials

土料	初始应力比	破坏面上 $\tau_L \sim \sigma_{f0}$ 关系曲线斜率			破坏面 $\tau_L \sim \sigma_{f0}$ 曲线截距 τ_{L0}/kPa		
		5 周次	10 周次	20 周次	5 周次	10 周次	20 周次
尾矿土	0	0.3275	0.3085	0.2910	0.3867	0.3733	0.2233
	0.1	0.3667	0.3493	0.3363	0.7933	0.7233	0.4733
	0.2	0.4060	0.3900	0.3816	1.2000	1.0733	0.7233
	0.3	0.4496	0.4313	0.4206	1.7360	1.5930	1.0200
地基粉砂	0	0.3025	0.3010	0.2950	0.8933	0.3833	0.2333
	0.1	0.3222	0.3215	0.3177	1.1833	0.6566	0.3450
	0.2	0.3420	0.3420	0.3404	1.4733	0.9300	0.4566
	0.3	0.3661	0.3647	0.3619	1.6266	1.1100	0.6533

2.4 计算结果与分析

在地震烈度为8度情况下,分别对上游水位高程为2052 m、下游水位高程为1970 m的无降雨工况和上

游浸润线高程为 2 054 m、下游水位高程为 1 971 m 的连续降雨工况进行二维有限元动力稳定分析,结果见图 3、图 4。

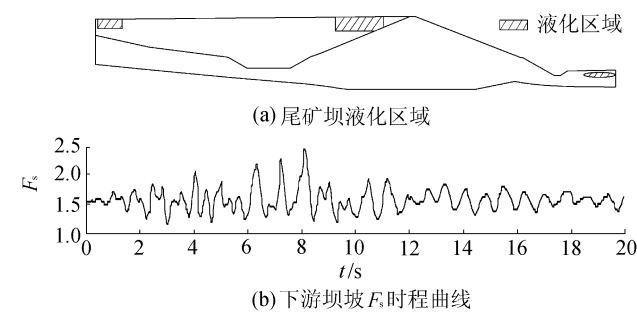


图 3 无降雨工况下输入地震波坝体的稳定性
Fig. 3 Dam seismic stability without rainfall

从图 3(a) 和图 4(a) 可以看出,在地震作用下,坝体下游坝脚覆盖层及坝体上游的尾矿砂层部分区域发生液化。连续降雨工况下,由于湿化土的剪切模量减小,地震作用下原状土周围固结压力急剧变化使剪切变形也发生改变,而无降雨情况下非液化区域土的有效应力在动力作用下也急剧减小。另外,连续降雨时,坝体中孔隙水应力增大,土粒在水中近乎为悬浮状态,因此,其液化区域比无降雨工况下的大。

由于动剪切力随震动时间而不同,因此,下游坝坡的动力稳定安全系数是随时间变化的(图 3(b) 和图 4(b))。在无降雨和连续降雨工况下,动力稳定安全系数时程曲线上的最小值分别为 1.173 和 1.103;对应的滑弧位置及圆心见图 5,滑弧半径 R 均约为 241 m。

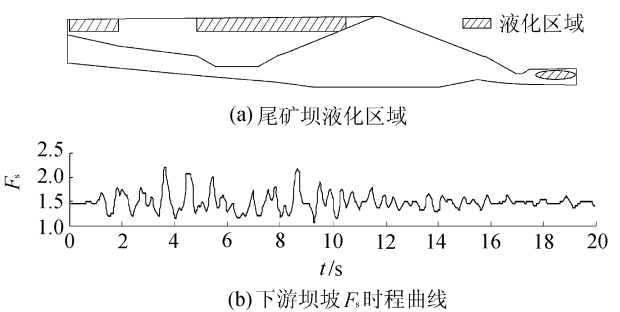


图 4 连续降雨工况下输入地震波坝体的稳定性
Fig. 4 Dam seismic stability with continuous rainfall

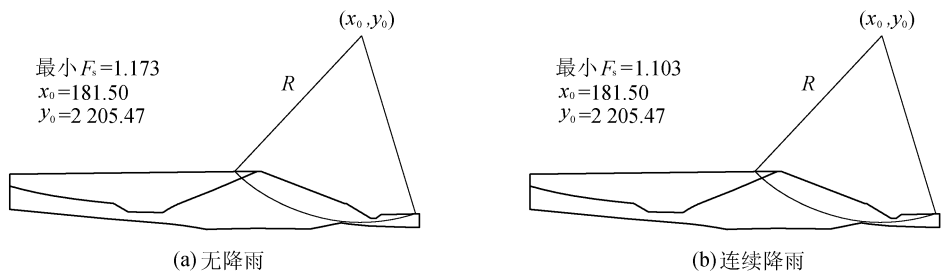


图 5 地震作用下下游坝坡最小 F_s 对应的滑弧
Fig. 5 Slippery arc corresponding to minimum seismic safety factor of downstream slope of tailings dam

不考虑液化区域计算的动力稳定安全系数一般会偏大,笔者模拟出不考虑液化区域的最小动力稳定安全系数为 1.201(图 6),比考虑液化区域时大 0.1 左右。由于地震波传播时间的差异性,滑坡体与滑面外的加速度不同步,从而影响地震影响系数取值,导致安全系数也有所偏差。

3 结 语

在连续降雨并输入水平、竖直方向地震波的情况下,模拟尾矿坝对地震作用下坝体的动力反应。模拟结果表明,将湿化后土体模量减小 10%、摩擦角降低 2°是合理的。在连续降雨工况下,坝基覆盖层和尾矿砂层的液化区域存在一定程度的扩展;浸润线上升对尾矿砂的湿化和周围固结压力的突变影响不可忽视,直接影响计算结果的可靠性。液化土粒呈分散状态致使有效应力减小,从而导致考虑液化区域时的最小动力稳定安全系数值要比不考虑液化区域时小,因此在重大工程中不能忽略液化因素。

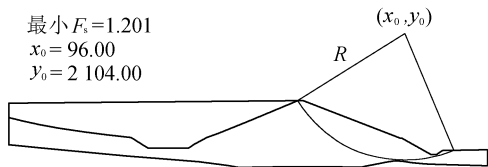


图 6 连续降雨及地震作用下不考虑液化区域下游坝坡最小 F_s 对应的滑弧
Fig. 6 Slippery arc corresponding to minimum seismic safety factor of downstream slope of tailings dam without considering liquefaction and with continuous rainfall

参考文献:

[1] 张爱军,刘宏泰,郭敏霞. 粉煤灰坝动力稳定性有限元分析[J]. 水利水电科技进展, 2010,30(5):61-64. (ZHANG Aijun, LIU Hongtai, GUO Minxia. Finite element analysis for dynamic stability of fly-ash dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2010,30(5):61-64. (in Chinese))

[2] 曹林卫,彭向和,李德,等. 变形场和渗流场耦合作用下的尾矿坝静力稳定性分析[J]. 重庆建筑大学学报,2007,92(5):112-118. (CAO Linwei, PENG Xianghe, LI De, et al. Analysis of the static stability of tailings dam under coupled deformation and seepage fields[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2007,92(5):112-118. (in Chinese))

[3] 李兆炜,胡再强. 基于渗流理论的尾矿坝坝体稳定性分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(1):56-59. (LI Zhaowei, HU Zaiqiang. Analysis of tailing dam's stability based on seepage theory[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010,8(1):56-59. (in Chinese))

[4] 潘建平,孔宪京,邹德高. 尾矿坝地震液化稳定的简化分析[J]. 水利学报. 2006,37(10):1224-1229. (PAN Jianping, KONG Xianjing, ZOU Degao. Simplified analysis of liquefaction and stability of tailing dam during earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(10):1224-1229. (in Chinese))

[5] 尹光志,敬小非,魏作安,等. 尾矿坝溃坝相似模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2010,29(2):3830-3838. (YIN Guangzhi ,JING Xiaofei ,WEI Zuoan ,et al. Experimental study of similar simulation of tailings dam-break[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(2):3830-3838. (in Chinese))

[6] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,1996.

[7] SEED H B, IDRIS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,1971,97(9):1249-1273.

[8] PAN Jianping, KONG Xianjing, ZOU Degao. A procedure of liquefaction evaluation for tailing dams constructed by upstream method[C]//International Conference on Physical Modeling in Geotechnics. London: Taylor & Francis,2006:1361-1366.

[9] CETIN K O, SEED R B. Nonlinear shear mass participation factor(r_d) for cyclic shear stress ratio evaluation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004,24(2):103-113.

[10] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M]. 南京:河海大学出版社,1992.

[11] SL 203—1997 水工建筑物抗震设计规范[S].

[12] 余湘娟,严蕴. 云南磷矿集团头石山尾矿库动力试验报告[R]. 南京:河海大学,2009.

[13] 朱俊高,袁俊平,张富有. 双江口水电站心墙堆石坝坝体材料静力特性及分析理论、方法及应用研究[R]. 南京:河海大学,2008.