

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.020

地震作用下某尾矿坝永久位移分析及稳定性评估

沈欣¹, 果召强², 黄旭东¹, 高永¹, 余家骥³, 潘秋景³

(1. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100038; 2. 中国铁道建筑集团有限公司, 北京 100855; 3. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

摘要:以印度尼西亚某项目尾矿坝为例, 文章基于离散机制, 结合极限分析上限法及 Newmark 法, 提出一种地震作用下尾矿坝坝脚位移的计算方法, 探究坝体几何参数和土体强度参数对尾矿坝稳定性的影响。结果表明:在设计规范地震动下, 该项目尾矿坝最危险滑动面坝脚位移为 0.12 cm; 尾矿坝倾角对坝脚位移影响显著, 随着倾角增大至 25°, 坝体达到界定失稳标准; 随着尾矿坝高度增大, 坝脚位移迅速增大后趋于平缓, 需合理设计高度以平衡稳定性和经济性; 内摩擦角的增大会显著提高坝体的抗震能力, 尤其在使用中风化石料时, 内摩擦角较高能有效减少震后坝脚位移, 提升尾矿坝的地震稳定性。分析了土体黏聚力随深度线性增大情况下的尾矿坝震后位移变化规律, 考虑黏聚力非均匀性导致位移计算值偏小, 不趋于保守。该研究结果对尾矿坝的设计和施工具有一定指导作用。

关键词:尾矿坝; 地震; Newmark 位移; 稳定性; 上限分析

中图分类号:TD926.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)06-0839-07

Permanent displacement analysis and stability assessment of a tailings dam under seismic effects

SHEN Xin¹, GUO Zhaoqiang², HUANG Xudong¹, GAO Yong¹, YU Jiaji³, PAN Qiuqing³

(1. China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing 100038, China; 2. China Railway Construction Corporation Limited, Beijing 100855, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Taking the tailings dam of a project in Indonesia as a case study, a method for calculating seismic-induced foot displacement of the dam is proposed, based on a discrete mechanism combined with the upper-bound method and the Newmark method. The influence of the dam's geometric parameters and soil strength characteristics on the stability of the dam is also investigated. The results show that under design seismic motion, the foot displacement of the most critical sliding surface of the dam is 0.12 cm. The slope angle of the dam significantly affects foot displacement; as the slope angle increases to 25°, the dam reaches the defined instability threshold. With an increase in dam height, the foot displacement initially increases rapidly before stabilizing, indicating the need for careful height design to balance stability and cost-effectiveness. An increase in the internal friction angle significantly enhances the seismic resistance of the dam, particularly when using moderately weathered materials. A higher internal friction angle reduces post-seismic foot displacement and improves seismic stability of the dam. The seismic displacement behavior of the dam, considering the linear increase of soil cohesion with depth, is analyzed. It is found that accounting for non-homogeneous cohesion results in smaller displacement calculations, which are not overly conservative. The findings provide guidance for the design and construction of tailings dams.

Key words: tailings dam; seismic; Newmark displacements; stability; upper-bound analysis

收稿日期:2024-09-06;修回日期:2025-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378424)

作者简介:沈欣(1986—),男,甘肃白银人,中国土木工程集团有限公司高级工程师;

高永(1989—),男,湖南益阳人,中国土木工程集团有限公司高级工程师,通信作者, E-mail:2368029125@qq.com.

0 引 言

尾矿库是矿山生产过程中的重要设施,其安全性直接关系到矿区及周边居民的生命财产安全。在地震等动力荷载作用下,尾矿坝容易发生失稳和大规模变形,国内外因尾矿库溃坝造成的重大灾害事故屡见不鲜^[1-3]。近年来,随着尾矿库规模的扩大和使用年限的增加,尾矿坝的地震响应和稳定性问题逐渐引起广泛关注。

尾矿坝可视为类边坡的构筑物,结构具有明显的非均质性。而地震具有随机性、突发性和强破坏性,使得尾矿坝抗震问题更加复杂^[4]。目前,极限平衡条分法^[5]和有限元法^[6]是尾矿坝地震稳定性分析的主要方法^[7]。文献^[8]研究不同上游条件下基于拟静力法和拟动力法的尾矿坝稳定性;文献^[9]通过有限元软件分析 Aitik 铜矿尾矿坝的变形及地震液化问题;文献^[10]基于等价黏弹性理论和 Newmark 滑动变形理论,对尾矿坝的抗震稳定性及永久变形进行计算分析;文献^[11]利用极限平衡法研究渗流和非渗流条件下土体物理力学参数对尾矿坝稳定性系数的敏感性;文献^[12]在考虑竖向和水平地震作用的基础上,分析不同工况条件下尾矿坝的稳定性。然而,由于尾矿坝材料性质复杂,物理力学参数难以准确选取,缺乏适用于散体材料的有限元力学模型,因此在理论分析和工程实际间仍存在一定差距^[13]。

极限分析法以严密的理论基础为依托,计算过程简便,已被广泛应用于边坡稳定性分析^[14],但在尾矿坝等类边坡结构中的研究较少。本文以印度尼西亚某尾矿坝工程为案例,基于离散机制,结合极限分析上限法及 Newmark 法,计算地震作用下坝脚的位移值,探讨坝体参数和土体强度参数对尾矿坝稳定性的影响。

1 尾矿坝震后位移计算模型

1.1 二维离散旋转破坏机制

尾矿坝土体因其非均质特性,传统的均质模型难以准确预测地震作用下的变形和破坏行为。文献^[15]提出一种针对非均质边坡破坏机制的离散方案,对边坡滑动面进行离散化处理,并严格遵循相关联流动准则。本文基于该方法,将其改进应用于尾矿坝的抗震分析。离散破坏机制如图 1 所示。图 1 中: H 为尾矿坝高度; β 为坡角; O 为旋转中心。此外,关键几何参数包括 θ_0 、 θ_b 、 θ_h 、 r_0 和 r_h 。在该旋转破坏机制中,假设坝体为刚体,

破坏机制 ABC 绕点 O 以恒定角速度 ω 旋转。

以坝脚 C 为原点,建立平面直角坐标系 Cxy 。通过点生点方式生成破坏面 AC ,其被离散为一系列单元 $P_0P_1, P_1P_2, \dots, P_iP_{i+1}$ 。点 O 与 P_i 的连线定义为 L_i ,射线 L_i 与 L_{i+1} 之间的夹角恒定为 $\Delta\theta$, AC 上各点 P_i 的速度方向与滑动面切线方向之间的夹角为土体内摩擦角 φ_i ,以此对内摩擦角非均质性进行考虑。破坏机制的具体离散过程参见文献^[15]。

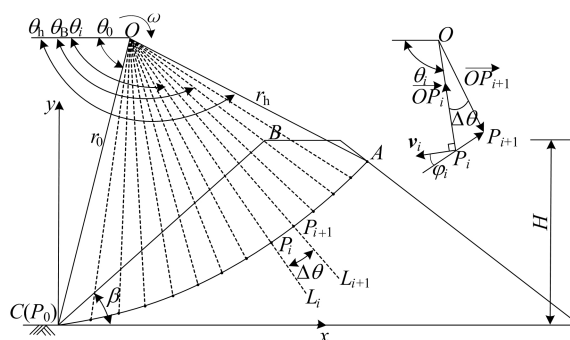


图 1 旋转破坏机制的离散化方案

区别于边坡离散,当 P_i 纵坐标不小于尾矿坝高度 H 时,或 P_i 坐标不在尾矿坝范围内时,结束速度间断面生成。前者通过线性插值得得 $y_i = H$,后者根据 $P_{i-1}P_i$ 与尾矿坝坡面交点,对 P_i 横纵坐标进行调整。

1.2 功率和能耗计算

基于上限法对尾矿坝进行稳定性分析时,需分别计算破坏机制的外力做功及内能耗散。为分析黏聚力和土体重度的非均质性特征,根据离散点的位置将滑动体划分为若干块体 $G_{i,j}$,如图 2 所示。本文不考虑滑动土体内部的能量耗散,计算速度间断面上 P_iP_{i+1} 的内能耗散 D_i 之和。同时,结合各块体的重力功率 $W_{\gamma_{i,j}}$ 与地震荷载功率 $W_{k_{h,i,j}}$,综合进行功率之和的计算与分析。

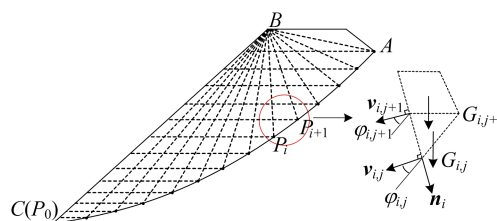


图 2 部分旋转破坏机制的离散化方案

1.2.1 计算外力做功

破坏机制总重力功率 W_γ 为各单元块体的重

力功率 $W_{\gamma_{i,j}}$ 相加,计算公式为:

$$W_{\gamma} = -\omega \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \gamma_{i,j} S_{i,j} R_{G_{i,j}} \cos \theta_{G_{i,j}} \quad (1)$$

其中: $\gamma_{i,j}$ 为各单位块体的土体重度; $S_{i,j}$ 为各单位块体的面积; $R_{G_{i,j}}$ 为各单位块体的重心到点 O 的距离; $\theta_{G_{i,j}}$ 为重心与 x 轴负方向夹角。

水平与竖直 2 个方向的地震加速度较少同时达到峰值,文献[16]表明竖直地震动对边坡永久位移的影响相对较小。本文考虑水平地震系数 k_h ,基于拟静力法得到地震荷载功率 W_{kh} 为:

$$W_{kh} = k_y W_k = k_h \omega \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \gamma_{i,j} S_{i,j} R_{G_{i,j}} \sin \theta_{G_{i,j}} \quad (2)$$

1.2.2 计算滑动面内能耗散

累加滑动面上各微元段 $P_i P_{i+1}$ 上的内能耗散,其计算公式为:

$$D = \omega \sum_{i=1}^n c_i L_i R_i \cos \varphi_i \quad (3)$$

其中: c_i 、 φ_i 分别为点 P_i 处的土体黏聚力和内摩擦角; L_i 为微元段 $P_i P_{i+1}$ 长度; R_i 为点 O 到 $P_i P_{i+1}$ 中点的距离。

1.3 Newmark 位移法

1.3.1 尾矿坝屈服加速度

当尾矿坝处于临界状态时,以水平地震加速度系数 $k_h(t)$ 表征的地震荷载效应参数达到临界屈服加速度 k_y ,即 $k_h(t) = k_y$ 。由极限分析上限定理,得到临界屈服加速度 k_y 为:

$$k_y = \frac{D - W_{\gamma}}{W_{kh}} \quad (4)$$

1.3.2 尾矿坝旋转块体震后位移

尾矿坝在 $k_h(t) > k_y$ 时会发生位移,旋转块体 ABC 绕点 O 的任意时刻角加速度为 $\ddot{\theta}(t)$,得到平衡方程为:

$$I_0 \ddot{\theta}(t) \omega = k_y W_k + W_{\gamma} - D \quad (5)$$

其中: I_0 为转动块体绕点 O 的惯性矩。

由此可得转动角位移 θ 为:

$$\theta = \iint \ddot{\theta}(t) dt dt = \iint \frac{[k_h(t) - k_y] W_k}{I_0 \omega} dt dt = \iint \frac{(k_h(t) - k_y) \gamma \sum_j \sum_i S_{i,j} R_{G_{i,j}} \sin \theta_{G_{i,j}}}{I_0} dt dt \quad (6)$$

将尾矿坝上一点到 O 点的距离 r 与 θ 相乘可得到该位置处的转动弧长,然后利用几何关系求得其水平位移为:

$$S = r \sin \theta \iint \ddot{\theta}(t) dt dt \quad (7)$$

2 尾矿坝震后位移计算

2.1 工程概况

本文研究的尾矿库位于印度尼西亚哈马黑拉岛以南的一座岛屿上,库址由两条支沟汇合形成,总库容约为 $603\ 903\ \text{m}^3$,属于山谷型二等尾矿库,如图 3 所示,可满足该岛 3~4 a 的尾渣堆存需求。拟建尾矿坝主坝分两期建设,采用下游法加高,坝顶标高为 205 m,坝高为 106 m,坝顶宽为 15 m,坝轴线长 385.97 m,上、下游坝坡坡度分别为 1.0 : 2.5、1.0 : 3.0。随着该岛冶炼厂生产规模的扩大,筑坝速度加快,碾压夯实时间相应缩短,对尾矿坝抗滑稳定性的存地不利影响。因此,有必要对尾矿坝在地震作用下的稳定性及位移进行详细分析,并提出相应的工程措施。

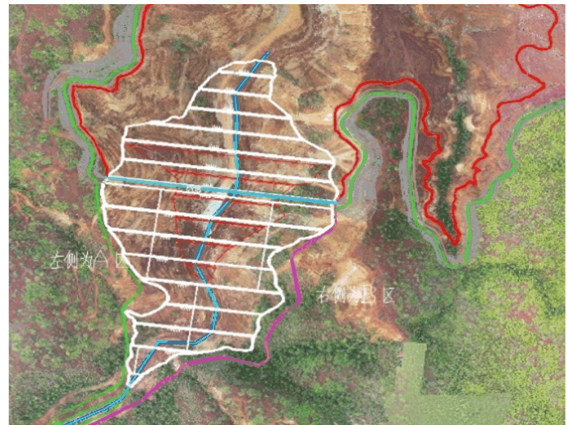


图 3 印度尼西亚某项目尾矿坝及邻近区域地形

根据提供的工程资料,尾矿坝利用库周或库内开采的中风化及强风化石料进行筑坝,采用分层填筑和碾压工艺,材料参数见表 1 所列。为分析地震作用下尾矿坝最不利工况,沿尾矿库主沟走向选择典型计算剖面进行研究,如图 4 所示。

表 1 筑坝材料参数

材料	参数	数值
	H_0/m	106
边坡	$\beta_1/(\text{°})$	18.43
	$\beta_2/(\text{°})$	33.69
	$\beta_3/(\text{°})$	21.80
强风化石料	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	22.05
	c/kPa	10
	$\varphi/(\text{°})$	30
中风化石料	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	23.42
	c/kPa	5
	$\varphi/(\text{°})$	37

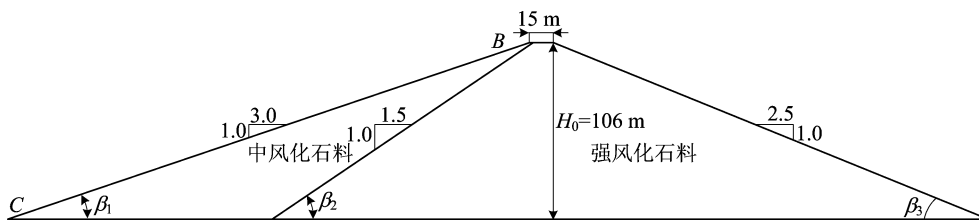


图 4 尾矿坝典型剖面图

2.2 地震动荷载输入

该项目尾矿坝抗震设防烈度为Ⅷ度,设计地震加速度为 $0.48g$,根据设计场地反应谱确定符合设计要求的震动(RSN7),并对其幅值进行调整,时长为 30 s ,时间步长为 0.01 s ,地震加速度时程曲线如图 5 所示。

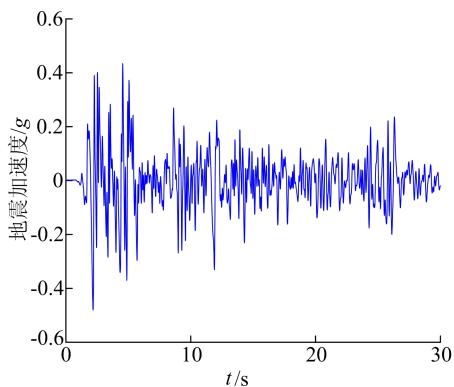


图 5 地震加速度时程曲线

2.3 位移解

通过比较地震作用下不同滑面高度 H 导致的 B 点位移 S_B ,确定该尾矿坝的最危险滑动面,如图 6 所示。

当 $H=H_0$,即滑动面经过坝脚 C 点时 S_B 最大,为最危险滑动面。尾矿坝中不同滑面高度对应的滑动面如图 7 所示,其中红色表示最危险滑动面。目前,国内相应的边坡抗震规范中,通过永久位移量判定边坡失稳尚无明确定义。文献[17]认为当边坡永久位移量为 5 cm 时,边坡破坏程度可以判断为地面开裂且局部滑动。地震作用下该尾矿坝临界地震加速度 k_y 为 $0.36g$,震后坝脚水平位移 S_C 为 0.12 cm ,通过该界定标准可以判定尾矿坝处于稳定状态。

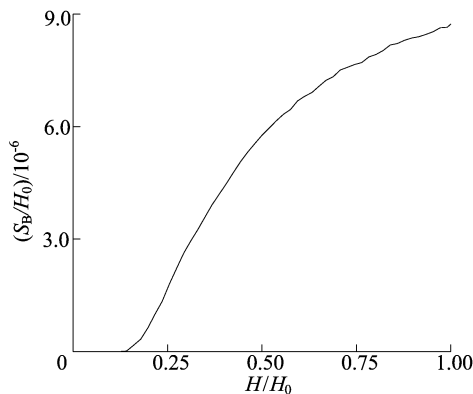


图 6 不同滑面高度对应 B 点位移

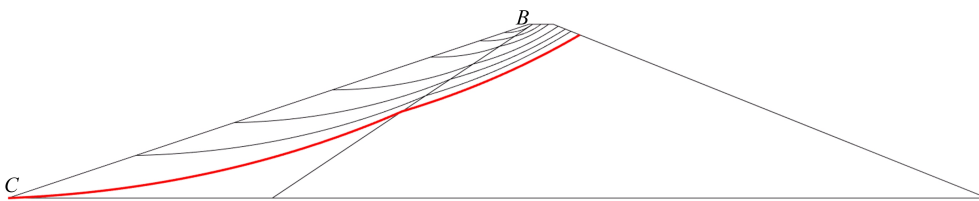


图 7 尾矿坝最危险滑动面判定

3 影响尾矿坝稳定相关因素分析

尾矿坝边坡的破坏机制受到坝体几何形状及土体强度参数的显著影响。本文以印度尼西亚某尾矿坝工程为研究对象,系统探讨了尾矿坝倾角、高度、土体黏聚力和内摩擦角对尾矿坝地震稳定性和震后位移的影响,以为尾矿坝的工程设计与施工提供参考依据。

3.1 尾矿坝倾角

根据计算,当尾矿坝倾角 $\beta_1 = 18^\circ$ 时,尾矿坝能够保持稳定。尾矿坝倾角对坝脚位移 S_C 和临界地震加速度 k_y 的影响如图 8 所示。

由图 8a 可知,较小的 β_1 对应更高的稳定性。随着 β_1 从 15° 增大到 30° , k_y 从 $0.43g$ 线性下降至 $0.08g$;当 $\beta_1 = 25^\circ$ 时, $S_C = 5\text{ cm}$,即尾矿坝失稳的临界值,随后 S_C 出现急剧增长,表明发生破坏性

大型滑坡,尾矿坝完全失稳。尾矿坝倾角 β_2 则反映了筑坝材料中中风化石料与强风化石料的体积比例,由图 8b 可知:当 $\beta_2 < 18^\circ$ 时,可视为筑坝材料完全由高风化石料构成,此时 k_y 为 0.25,震后坝脚位移 S_C 为 2.0 cm;当 $\beta_2 > 36^\circ$ 时,危险滑动面经过区域全部为中风化石料,此时 k_y 为 0.36, S_C 为 0.1 cm。随着 β_2 增大,即中风化石料占体积比越大, k_y 增大, S_C 越小。考虑尾矿坝较不稳定情况,将尾矿坝视作由高风化石料构筑,分析土体强度参数对尾矿坝地震稳定性的影响。

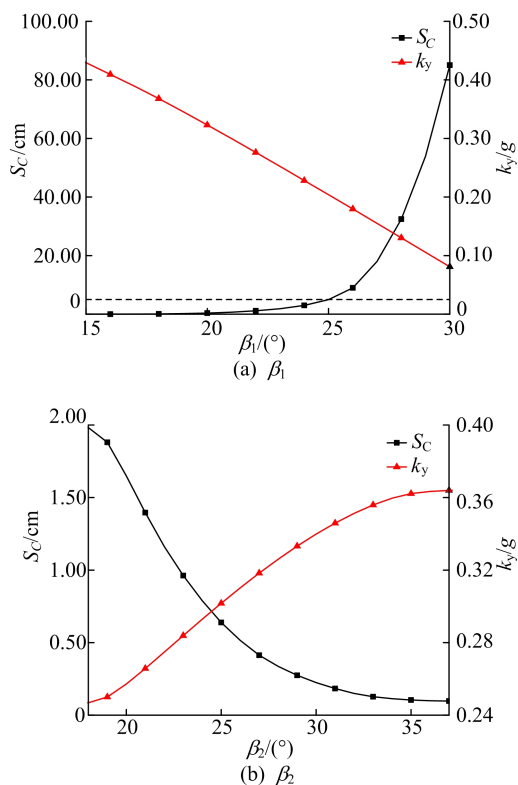


图 8 尾矿坝倾角对坝脚位移和临界地震加速度影响

3.2 尾矿坝土体强度参数

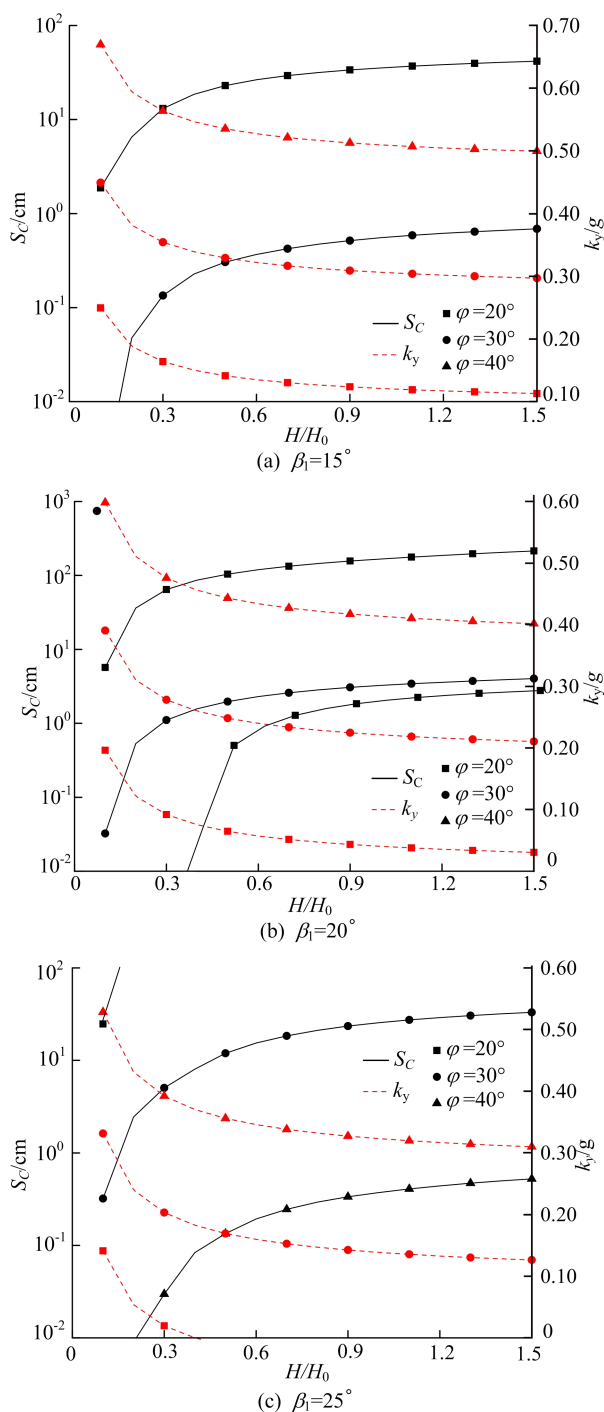
不同参数条件下,采用本文方法计算的尾矿坝坝脚位移 S_C 和临界地震加速度 k_y 如图 9 所示。计算参数包括归一化高度 $H/H_0 = 0.1 \sim 1.5$,内摩擦角为 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 以及尾矿坝倾角 β_1 为 $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 。

由图 9a 和图 9b 可知,当 $\varphi = 40^\circ$ 时,地震作用下尾矿坝区域稳定,坝脚位移 $S_C = 0$;由图 9c 和图 9d 可知,当 $\varphi = 20^\circ$ 时,存在 $k_y < 0$ 情况,此时尾矿坝已经不具备基本抗震稳定的能力,坝脚位移过大,不再进行讨论。

随着尾矿坝高度 H 的增大,相应临界地震加速度 k_y 降低。当 H/H_0 小于 0.6 时,尾矿坝高度 H 对 S_C 和 k_y 的影响尤为显著。以图 9b 中 $\varphi =$

30° 为例,当 H/H_0 从 0.1 增至 0.6, k_y 降低 38.6%, S_C 从 0.03 cm 显著增大到 2.30 cm;而当 H/H_0 从 0.6 增至 1.5, k_y 仅降低 12.3%, S_C 从 2.30 cm 增大到 4.03 cm,增幅逐渐减小。

以 $H/H_0 = 1.0$ 为例,当 $\beta_1 = 15^\circ$ 时,随着 φ 从 20° 增大到 $30^\circ, 40^\circ$,对应 k_y 分别为 0.12g、0.31g、0.51g, S_C 为 35.4、0.55、0 cm;当 $\beta_1 = 20^\circ$ 时,随着 φ 从 20° 增大到 $30^\circ, 40^\circ$,对应 k_y 分别为 0.04g、0.22g、0.41g, S_C 为 167.0、3.3、0 cm。随着 φ 的增长, k_y 呈线性增大,且不受 β_1 变化的影响, S_C 对 φ 的变化十分敏感。



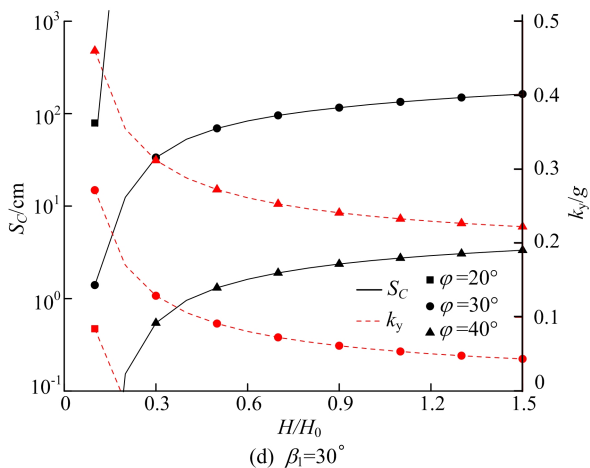


图 9 尾矿坝临界地震加速度 k_y 与 H 、 φ 、 β_1 的关系

3.3 非均质尾矿坝黏聚力线性变化

受材料成分、压实度、水分含量和环境等因素影响,尾矿坝土体黏聚力通常表现出上软下硬的非均质性。充分了解和考虑黏聚力的非均质性,对于保障坝体稳定和防止安全隐患至关重要。基于离散机制,本文提出的尾矿坝震后位移计算模型可以考虑土体的非均质性。土体黏聚力沿深度

呈线性变化, c_0 表示尾矿坝顶部土体黏聚力, λ 表示黏聚力随深度线性增大变化率。

根据该项目尾矿坝筑坝石料的压实处理方式,对 λ 为 0、0.1、0.2 这 3 种情况进行比较,得到黏聚力随深度线性增大的尾矿坝震后坝脚位移和临界地震加速度见表 2 所列,随着变化率 λ 的增大, k_y 增大,且增长率保持稳定, S_c 减小,考虑黏聚力非均匀性使尾矿坝位移计算结果偏小,不趋于保守。

由此可知,在尾矿坝工程设计中,应该充分考虑土体强度参数的影响,尤其是内摩擦角对坝体抗震性能的提升作用。实际工程中,应优化筑坝材料,优先选用高内摩擦角材料。同时,坝体高度、倾角对稳定性的影响较为显著,尤其是针对高地震风险区域,可以采取分级放坡措施,加强填筑料压实度,确保坝体在震前及震后的稳定性。由于尾矿坝黏聚力可能受环境因素影响发生变化,应在坝体运行期间建立完善的长期监测机制,定期测量土体参数,调整坝体维护方案,确保坝体在全寿命周期内的安全性和稳定性。

表 2 黏聚力线性增大的尾矿坝震后位移和临界地震加速度的对比

$\varphi/(^\circ)$	$\beta_1/(^\circ)$	$\lambda=0$		$\lambda=0.1$		$\lambda=0.2$	
		k_y/g	S_c/cm	k_y/g	S_c/cm	k_y/g	S_c/cm
30	15	0.31	0.55	0.32	0.36	0.34	0.23
	20	0.22	3.26	0.24	2.28	0.26	1.64
	25	0.14	25.58	0.16	15.36	0.18	8.94
40	20	0.41	0	0.43	0	0.45	0
	25	0.32	0.37	0.35	0.20	0.37	0.10
	30	0.24	2.56	0.26	1.64	0.28	1.08

4 结 论

1) 基于离散机制,结合极限分析上限法及 Newmark 法,建立地震作用下尾矿坝边坡位移计算方法,得到印度尼西亚某项目尾矿坝在设计规范地震动下最危滑动面坝脚位移为 0.12 cm。

2) 尾矿坝倾角对坝体位移影响显著,当尾矿坝倾角增大至 25° 时,该项目尾矿坝达到失稳标准;边坡高度对坝脚位移 S_c 的影响随高度增大而逐渐减弱,在设计阶段应考虑合理的边坡高度,以平衡稳定性和经济性;随着内摩擦角 φ 的增大, k_y 线性增大, S_c 显著降低, φ 为 20° 、 30° 、 40° 时,对应临界地震加速度 k_y 分别为 0.12g、0.31g、0.51g, S_c 为 35.40、0.55、0 cm。因此应优先使用较高内摩擦角的中风化石料进行填筑,提高坝

体抗震能力。

3) 分析土体黏聚力随深度线性增大情况下的尾矿坝震后位移变化规律,随着黏聚力变化率 λ 的增大, k_y 增大,增长率保持稳定,尾矿坝震后位移减少,考虑黏聚力非均匀性使尾矿坝位移计算结果偏小,不趋于保守。

[参 考 文 献]

[1] RICO M, BENITO G, SALGUEIRO A R, et al. A review of the European incidents in the worldwide context[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 846-852.
 [2] 朱远乐, 王淇萱, 刘文岗, 等. 尾矿库灾害风险防控研究现状及发展态势[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(8): 1054-1064.
 [3] 陈聪聪, 赵怡晴, 姜琳婧. 尾矿库溃坝研究现状综述[J]. 矿

- 业研究与开发,2019,39(6):103-108.
- [4] 尹光志,王文松,魏作安,等.地震作用下高堆尾矿坝永久变形与稳定性分析[J].岩土力学,2018,39(10):3717-3726.
- [5] 于斯滢,邵龙潭,刘士乙.基于有限元极限平衡法的尾矿坝坝体稳定分析[J].岩土力学,2013,34(4):1185-1190.
- [6] 王在军.基于有限元强度折减法的尾矿坝稳定性分析[J].工程建设,2021,53(7):30-33,50.
- [7] 贺林林,钱进,赵陈雨,等.巫山神女峰机场高填方边坡稳定性分析方法研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(5):646-651,703.
- [8] CHAKRABORTY D, CHOUDHURY D. Pseudo-static and pseudo-dynamic stability analysis of tailings dam under seismic conditions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 2013, 83(1): 63-71.
- [9] ZARDARI A M, MATTSSON H, KNUTSSON S, et al. Numerical analyses of earthquake induced liquefaction and deformation behaviour of an upstream tailings dam[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017(1): 1-12.
- [10] 郑长海,岑威钧,赵昱豪.某上游式尾矿坝抗震有限元分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):215-218.
- [11] 陈战旗,解道举,邹莉清,等.物理力学性质对尾矿坝稳定性影响研究[J].地质灾害与环境保护,2023,34(2): 78-85.
- [12] 刘佳浩,刘红岩,邹宗山,等.竖向及水平地震作用下尾矿库动力响应及液化稳定性分析[J/OL].金属矿山,2023-11-21.(2023-11-21)[2025-01-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20231120.1147.002.html>.
- [13] 刘兴宗.齐大山铁矿尾矿坝静动力稳定性分析[D].鞍山:辽宁科技大学,2014.
- [14] 侯超群,丁莹,孙志彬,等.抗滑桩加固边坡三维稳定因素的敏感性分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(8):1092-1099.
- [15] 孙志彬,潘秋景,杨小礼,等.非均质边坡上限分析的离散机构及应用[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7): 1680-1688.
- [16] DU W Q. Effects of directionality and vertical component of ground motions on seismic slope displacements in Newmark sliding-block analysis [J]. Engineering Geology, 2018, 239: 13-21.
- [17] 黄师,吕悦军,彭艳菊.基于永久位移的边坡地震稳定性安全评价方法研究[J].土木工程学报,2016,49(增刊2): 120-125.

(责任编辑 吴亮)

(上接第810页)

- [26] ARP C G, CORREA M J, FERRERO C. High-amylose resistant starch as a functional ingredient in breads: a technological and microstructural approach[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(12): 2182-2193.
- [27] EVŽEN Š, MIROSLAVA K, IVA W, et al. Two resistant starches applied in bread[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2017, 35(1): 67-72.
- [28] BERNHARDT D C, CASTELLI M V, ARQUEROS V, et al. Effect of fibers from bracts of maize (*Zea mays*) as natural additives in wheat bread-making: a technological approach[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 4036-4049.
- [29] 王菲,孙丹蕊,杨留枝,等.苹果酸酯抗性淀粉对曲奇饼干的影响[J].食品工业,2020,41(12):28-32.
- [30] 王晓艳,王宏兹,黄卫宁,等.高膳食纤维面团热机械学及面包的烘焙特性[J].食品科学,2011,32(13):78-83.
- [31] SHYU Y S, HWANG J Y, HUANG T C, et al. Effect of resistant starch on physicochemical properties of wheat dough and bread[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2018, 6(5): 335-340.
- [32] ZHU F, QU W, ZHOU Y, et al. Structural and rheological characteristics of wheat flour doughs with different resistant starch contents[J]. Food Chemistry, 2009, 36(6): 226-232.
- [33] 路飞,孟燕楠,李哲,等.不同酶制剂对预糊处理大米面包品质的影响[J].食品工业,2017,38(5):43-46.
- [34] 程冰,李梦琴,赵龙珂,等.马铃薯抗性淀粉对韧性饼干品质及消化性能的控制[J].食品安全质量检测学报,2022, 12(13): 3746-3753.
- [35] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(suppl 2): S33-50.
- [36] 孙莹,苗榕芯,江连洲.不同贮藏时间和方式对马铃薯面包老化的影响[J].粮食加工,2018,43(4):49-54.

(责任编辑 闫杏丽)