快速拟动力法及其在西藏某尾矿坝地震稳定性评价中的应用*

徐亮,李亮,文嘉辉,李春立,于广明

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛市 266520)

摘要:地震是导致尾矿坝动力失稳的主要原因之一。基于拟动力法结合瑞典圆弧法可以快速确定尾矿坝动力稳定性的评价指标。为提高拟动力法在边坡地震稳定性评价中的计算效率,特引入了分离式危险初始相位搜索策略,提出了快速拟动力法。分别应用传统拟静力法、考虑放大系数的拟静力法以及快速拟动力法,从安全系数与失效概率两个角度对西藏某尾矿坝进行地震稳定性评价。数值分析结果表明:3种方法所得到的尾矿坝安全系数均满足稳定性要求的最小值。从安全系数与滑动面积综合来看,由考虑放大系数的拟静力法所得到的结果偏于保守。纵波波速对计算结果影响较小,随着横波波速的增加,由快速拟动力法所得到的安全系数逐步降低,失效概率逐渐增大,失稳滑动面个数逐渐增多,尾矿坝地震失稳的风险源增多。研究成果对尾矿坝地震稳定性评价具有指导意义。

关键词:尾矿坝;拟动力法;边坡地震稳定性;安全系数;失效概率

中图分类号:TD223;TV641.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)03-0074-09

Fast Pseudo-Dynamic Method and its Application in Seismic Stability Evaluation of Tailings Dam in Xizang

XU Liang, LI Liang, WEN Jiahui, LI Chunli, YU Guangming

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: Earthquakes are one of the main causes leading to dynamic instability of tailings dams. Based on the pseudo-dynamic method combined with the Swedish arc method, the evaluation indexes of dynamic stability of tailings dams can be quickly determined. To improve the computational efficiency of the pseudo-dynamic method in the evaluation of slope earthquake stability, a separated critical initial phase search strategy was introduced, and a fast pseudo-dynamic method was proposed. The traditional pseudo-static method, the pseudo-static method considering the amplification factor, and the fast pseudo-dynamic method were applied respectively to evaluate the seismic stability of a tailings dam in Xizang from two angles of safety factor and failure probability. The results of numerical analysis show that the safety factors obtained by above three methods all meet the minimum stability requirements. In the view of the safety factor and the sliding area comprehensively, the results obtained by the pseudo-static method considering the amplification factor tend to be conservative. The influence of P-wave velocity on the calculation results is small. With the increase of S-wave velocity, the safety factor obtained by the fast pseudo-dynamic method gradually decreases, the failure probability gradually increases, the number of instability sliding surfaces gradually increases, and the risk sources of earthquake instability of tailings dams increase. The research results have a guiding significance for the evaluation of earthquake stability of tailings dams.

Key words: Tailings dam, Pseudo-dynamic method, Slope earthquake stability, Safety factor, Failure probability

0 引言

尾矿库是由一个或多个尾矿坝组成的矿山生产设施,但也是具有高势能的重大危险源。近百年来尾矿坝的溃坝率要比蓄水坝高两个数量级[1],尾矿坝事故通常会造成大量人员伤亡和重大经济损失与环境破坏,如2019年巴西Feijão Ⅰ号尾矿坝事故,造成259人死亡,泄漏1 200万 m^3 尾矿;2008年山西襄汾新塔矿业尾矿坝事故,造成281人死亡,泄漏19万 m^3 尾矿等[2]。作为尾矿库的支撑,尾矿坝的

* **收稿日期**:2024-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52171264);山东省自然科学基金项目(ZR2023ME007)

作者简介:徐亮(1998—),男,山东滨州人,博士研究生,主要从事尾矿坝稳定性与边坡可靠度方面的研究。E-mail:xlstcv@163.com

通信作者:李亮(1977—),男,山东济南人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事岩土工程可靠度方面的研究。E-mail:liliang@qut.edu.cn

稳定性分析，尤其是动力稳定性分析对矿山安全生产具有重要作用。由地震引发的尾矿坝破坏也时有发生，其中巴西 Feijão Ⅰ号尾矿坝事故为动力液化破坏，因此评价尾矿坝动力稳定性是保障尾矿库安全的重要内容。

尾矿坝稳定性评价与传统的边坡地震稳定评价类似。常用的方法主要有拟静力法、拟动力法、Newmark 位移法和动力时程分析法。拟静力法由于具有原理简单、计算效率高等优点，在工程中得到了广泛应用[3-6]，并已被纳入有关规范，但是该方法忽略了地震的波动性质。Newmark 位移法将滑动体视为刚性或柔性块体，以屈服加速度为基准，对作用在块体上的地震加速度时程进行二次积分得到累积变形并用于评价边坡地震稳定性，但由于位移的标准不统一，在工程中的应用受到一定限制[7-8]。动力时程分析法是当前最为严格的边坡地震稳定评价方法，但可观的计算耗时在一定程度上限制了其应用[9-10]。拟动力方法作为拟静力法的一种改进方法，能够考虑地震的波动性质，是一种精度与效率相对平衡的计算方法。

1990 年 STEEDMAN 等[11]提出拟动力法，将地震波视为由基底垂直入射的正弦波，以合理考量不同高程处地震作用力的波动性。从本质上而言，拟动力法是拟静力法的一种改进。拟静力法中，地震力沿高程均匀分布，而拟动力法中，地震力沿高程周期性变化。因此，许多学者将现有的边坡稳定分析方法如极限平衡法、极限分析法与拟动力思想相结合，并进行了研究与应用[12-35]。如：杨楠等[19]将拟动力法与不平衡推力法相结合，研究了横波波长、地震力放大系数等因素对不同高度边坡的影响，并得出放大系数大于 1 时，拟动力法结果有可能小于拟静力法结果的结论。饶平平等[12]将简化毕肖普方法与拟动力法结合，研究了抗滑桩加固边坡的地震稳定性。吴晓磊等[33]在考虑融土层弹性放大效应和阻尼特性的基础上提出了改进的拟动力法，并与传统拟动力法、拟静力法进行对比。蒋青江等[15]将严格法与拟动力法相结合，研究了水平地震波长、放大系数对边坡稳定性的影响。PAN 等[24]将三维旋转破坏机制的极限分析法与拟动力法结合，计算边坡地震稳定安全系数，进而采用蒙特卡洛模拟方法研究了边坡地震失效概率的变化规律。上述研究成果有力推动了拟动力法在岩土工程边坡稳定分析中的应用。

由于拟动力法中地震力沿高程周期性变化，因此拟动力法安全系数亦随基底入射初始相位周期性变化。拟动力安全系数取最小值的初始相位称之为最危险相位。虽然已有研究均采用最危险相位下的拟动力安全系数评价边坡地震稳定性，但是对于最危险相位的确定鲜有明确报道，尤其是双向地震作用下，快速确定最危险相位具有显著的理论价值。根据已有文献的研究结论，由于土体中地震波的波长较长，拟动力法适用于高度较高的边坡计算。此外，蒋青江等[15]关于“放大系数大于 1 时，拟动力法结果有可能小于拟静力法结果的结论”需要进一步验证。

基于以上分析，并考虑到尾矿坝通常为典型的高坝，本文结合拟动力法与瑞典圆弧法，提出了考虑放大系数以及快速确定最危险相位的改进拟动力法，同时提出了考虑放大系数的拟静力法，将两种方法应用于西藏某尾矿坝地震稳定性分析，证明了快速确定最危险相位的有效性，对双向地震下，放大系数、波长等因素对尾矿坝地震稳定性的影响进行了研究，最后对拟静力法与拟动力法结果进行了对比，发现考虑放大系数后，拟静力法结果均比拟动力法结果小。

1 快速拟动力瑞典圆弧法

1.1 给定初始相位下拟动力瑞典圆弧法

如图 1 所示，拟动力法考虑了地震波动效应，将横波、纵波均等效为正弦波，波的入射位置为基底，且保持垂直入射，横波与纵波的最大振幅分别为 $a_h=k_hg$、$a_v=k_vg$，其中 k_h、k_v 分别为水平地震力系数、竖向地震力系数，g 为重力加速度。设横波与纵波的卓越频率为 f_h、f_v，其圆频率 $w_h=2\pi f_h$、$w_v=2\pi f_v$，横波与纵波在土体中传播的速度分别为 v_h、v_v。坡顶 $z=0$，基底 $z=H$。设基底入射时横波与纵波的初始相位为 t_h、t_v，水平与竖向地震力放大系数分别为 β_h、β_v，考虑横波、纵波在土体中传播后，z 深度土条受到的水平、竖向地震加速度 $e_h(z,t_h)$、$e_v(z,t_v)$ 为：

$$e_h(z,t_h)=\alpha_h\left[1+\frac{H-z}{H}(\beta_h-1)\right]\times \sin\left[w_h\left(t_h-\frac{H-z}{v_h}\right)\right] \tag{1}$$

$$e_v(z,t_v)=\alpha_v\left[1+\frac{H-z}{H}(\beta_v-1)\right]\times \sin\left[w_v\left(t_v-\frac{H-z}{v_v}\right)\right] \tag{2}$$

在图 1 中将边坡滑动体划分为 n 个土条，第 i 个土条的受力分析如图 1 右侧所示。z_{i0} 为土条顶部中心点至土坡顶部($z=0$)深度，z_{i1} 为土条底部中心点至土坡顶部的深度，其中 b_i 为土条宽度，α_i 为

土条底部倾角,W_i为土条受到的重力,N_i为土条底部法向力,T_i为土条底部所受抗滑力,C_i为土条底部总黏聚力,φ_i为土条底部内摩擦角,R为圆弧半径,z_c为滑动圆弧圆心的z坐标,$\mathrm{d}z_i$为土条积分微元体,微元体深度为z_i,土条平均密度为ρ_i,则微元体$\mathrm{d}z_i$上所受的水平、竖向地震力分别为$F_{\mathrm{h}}(z_i,t_{\mathrm{h}})$、$F_{\mathrm{v}}(z_i,t_{\mathrm{v}})$,对第$i$个土条沿$z_i$积分,可得到初始相位为$t_{\mathrm{h}}$、$t_{\mathrm{v}}$下第$i$个土条所受的水平、竖向地震力$F_{\mathrm{h}i}(t_{\mathrm{h}})$、$F_{\mathrm{v}i}(t_{\mathrm{v}})$:

$$F_{\mathrm{h}i}(t_{\mathrm{h}})=\int_{z_{i0}}^{z_{i1}} b_i\rho_i\alpha_{\mathrm{h}}\left[1+\frac{H-z_i}{H}(\beta_{\mathrm{h}}-1)\right]\times \sin\left[w_{\mathrm{h}}\left(t_{\mathrm{h}}-\frac{H-z_i}{v_{\mathrm{h}}}\right)\right]\mathrm{d}z_i \tag{3}$$

$$F_{\mathrm{v}i}(t_{\mathrm{v}})=\int_{z_{i0}}^{z_{i1}} b_i\rho_i\alpha_{\mathrm{v}}\left[1+\frac{H-z_i}{H}(\beta_{\mathrm{v}}-1)\right]\times \sin\left[w_{\mathrm{v}}\left(t_{\mathrm{v}}-\frac{H-z_i}{v_{\mathrm{v}}}\right)\right]\mathrm{d}z_i \tag{4}$$

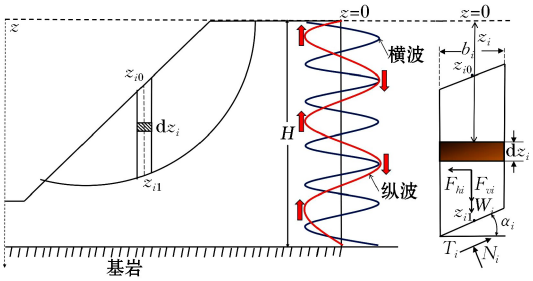


图 1 t_{h}、t_{v}初始相位下拟动力瑞典圆弧法

Fig.1 Swedish arc method of pseudo-dynamics under the initial phase of t_{h} and t_{v}

考虑土条所受力在N_i方向上的平衡:

$$N_i(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})=W_i\cos\alpha_i-F_{\mathrm{h}i}(t_{\mathrm{h}})\sin\alpha_i+F_{\mathrm{v}i}(t_{\mathrm{v}})\cos\alpha_i \tag{5}$$

由摩尔-库伦强度准则,土条底部能发挥的最大抗滑力为:

$$T_i(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})=N_i(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})\tan\varphi_i+C_i \tag{6}$$

第i条块底部产生抗滑力矩$\boldsymbol{M}_{\mathrm{r}i}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})$。由水平地震力引起的下滑力矩$\boldsymbol{M}_{\mathrm{h}i}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})$可由下述积分得到:

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{h}i}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})=\int_{z_{i0}}^{z_{i1}} b_i\rho_i\alpha_{\mathrm{h}}\left[1+\frac{H-z_i}{H}(\beta_{\mathrm{h}}-1)\right]\times \sin\left[w_{\mathrm{h}}\left(t_{\mathrm{h}}-\frac{H-z_i}{v_{\mathrm{h}}}\right)(z_i-z_c)\right]\mathrm{d}z_i \tag{7}$$

第i条块中,由土条重力W_i及竖向地震力$F_{\mathrm{v}i}(t_{\mathrm{v}})$引起的下滑力矩$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}i}$:

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}i}=R[W_i+F_{\mathrm{v}i}(t_{\mathrm{v}})]\sin\alpha_i \tag{8}$$

则边坡的安全系数$F_{\mathrm{s}}(t)$为:

$$F_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})=\frac{\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{M}_{\mathrm{r}i}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})}{\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{M}_{\mathrm{h}i}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})+\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}i}(t_{\mathrm{h}},t_{\mathrm{v}})} \tag{9}$$

1.2 最危险相位的快速确定

公式(9)给出了给定t_{h},t_{v}相位下拟动力瑞典圆弧法的边坡安全系数,为合理评估给定滑动体的安全性,一般需要试算不同t_{h}和t_{v},并寻求最小拟动力安全系数,以合理评估边坡地震稳定性。设横波与纵波的卓越周期为$T_{\mathrm{h}}=1.0/f_{\mathrm{h}}$、$T_{\mathrm{v}}=1.0/f_{\mathrm{v}}$,为寻求最小拟动力安全系数,一般需设定一较小的时间间隔Δt来进行遍历搜索,以$T_{\mathrm{h}}=T_{\mathrm{v}}=1$ s,$\Delta t=0.01$ s为例,遍历搜索寻求最小拟动力安全系数所需的计算次数为10 000次,计算效率较低,尤其是对于安全系数需要迭代的方法如简化毕肖普法和不平衡推力法而言,更是如此。本文提出一种快速确定横波、纵波最危险相位(t_{hd}、t_{vd})及最小安全系数$F_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{hd}},t_{\mathrm{vd}})$的方法,大致思路如下:首先给定$t_{\mathrm{v}}=0$,以$\Delta t$遍历$T_{\mathrm{h}}$寻求$F_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{h}},0)$的最小值,记为$F_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{hm}},0)$;接着,给定$t_{\mathrm{h}}=t_{\mathrm{hm}}$,以$\Delta t$遍历$T_{\mathrm{v}}$寻求$F_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{hm}},t_{\mathrm{v}})$的最小值,记为$F_{\mathrm{s}}(t_{\mathrm{hm}},t_{\mathrm{vm}})$,最后,令$t_{\mathrm{hd}}=t_{\mathrm{hm}}$、$t_{\mathrm{vd}}=t_{\mathrm{vm}}$为最危险相位,具体流程如图2所示。$\Delta t$对计算结果的影响在算例分析中给出。

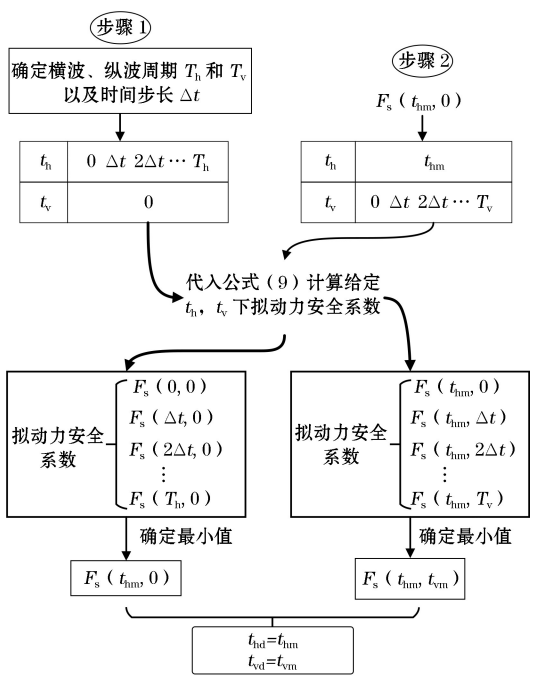


图 2 最危险相位快速确定的流程

Fig.2 Flowchart of rapid determination of the most dangerous phase

1.3　快速拟动力瑞典圆弧法

本文提出的快速拟动力方法的计算流程如图 3 所示。由图 3 可见，首先进行边坡地震稳定分析的准备工作，包括确定边坡的几何模型，根据现场勘察数据和室内土工试验数据确定岩土体物理力学参数，如容重、内摩擦角和黏聚力等，选择合适的横波、纵波频率 f_h、f_v和地震力系数 k_h、k_v。接着，随机生成 N 个圆弧滑动面，记为 S_1，S_2，S_3，…，S_N。然后，利用图 2 所示的最危险相位快速确定流程计算 N 个滑动面对应的拟动力安全系数。最后，从中选择拟动力安全系数最小值作为边坡地震稳定评价的结果。

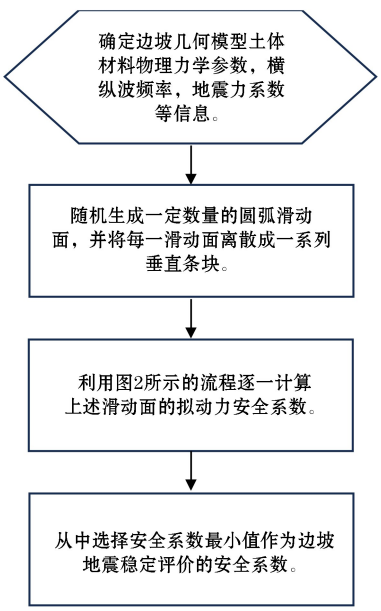


图 3　快速拟动力瑞典圆弧法流程

Fig.3　Flow of fast pseudo-dynamic Swedish arc method

1.4　考虑放大系数的拟静力法

传统的拟静力法假定地震力沿高程均匀分布，如此便可将地震力简化为作用在条块重心的静力，以第 i 个土条为例，作用在土条上的水平与竖向地震力分别为 $W_i k_h$和 $W_i k_v$。水平地震力的方向取为与滑坡方向一致的水平方向，竖向地震力分别取为向上、向下，取两者之间的较小安全系数作为拟静力法结果。为了验证蒋青江等[15]关于“放大系数大于 1 时，拟动力法结果有可能小于拟静力法结果的结论”，本文提出考虑放大系数的拟静力法，地震力沿高程线性分布，以图 1 中第 i 个土条为例，忽略公式(3)、公式(4)中的正弦函数项，即可计算作用在该土条上的水平与竖向地震力，类似地，可由式(5)至式(9)计算考虑放大系数的拟静力法安全系数，需要注意的是，为合理考量竖向地震力的影响，分别假设竖向地震力的方向为竖直向上、竖直向下，选择较小的安全系数作为最终评价结果。

2　尾矿坝地震稳定性评价方法

本文采用安全系数与失效概率综合评价尾矿坝地震稳定性，其分析流程如图 4 所示。

由图 4 可见，可以采用考虑放大系数的拟静力法或者图 3 所示的快速拟动力法计算尾矿坝地震稳定安全系数来定量评价尾矿坝地震稳定性，也可以采用失效概率来评价尾矿坝地震稳定性。如图 4 右半部分所示，首先生成足够数量的随机样本，针对每一随机样本(即一组土体材料参数如内摩擦角和黏聚力的组合值)，进行安全系数的搜索，若该安全系数小于 1，则该随机样本称为失效样本，最后统计失效样本个数并利用蒙特卡罗方法计算尾矿坝地震失效概率。在计算失效概率时，要保证随机样本数量足够多，一般需要进行敏感性分析。关于蒙特卡罗方法计算边坡失效概率的详细步骤与注意事项，可参阅文献[17]和[26]。另外需要指出的是，本文方法是在极限平衡方法框架上提出的，主要适用于土质边坡及尾矿坝边坡地震稳定性初步评价，除给出相应的拟动力安全系数外，亦能确定由于岩土体参数的随机性导致的危险滑动面变化，并量化其贡献。当然，本文方法不能超越极限平衡方法的局限性，未能考虑岩土体的应力和应变对边坡地震稳定性的影响。

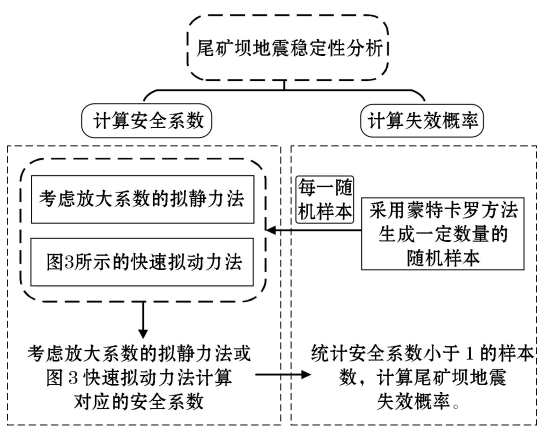


图 4　尾矿坝地震稳定性评价流程

Fig.4　Seismic stability evaluation of tailings dam

3 西藏某尾矿坝地震稳定性评价

西藏某尾矿坝最终堆积标高 5 088 m,其中初期坝高 73 m,堆积坝高 125 m,总坝高 198 m,总库容约 3.76×108 m^3,根据《尾矿库安全规程》(GB 39496—2020)之 4.5 条规定,该尾矿库为二等库。该尾矿坝所属区域的地震设计烈度为Ⅶ度,由《尾矿库安全规程》(GB 39496—2020)之 5.3.17 条规定,该尾矿坝坝坡稳定性计算应考虑地震荷载的影响,计算方法应采用简化毕肖普法或瑞典圆弧法,地震荷载按拟静力法考虑,除拟静力法外,本文应用快速拟动力瑞典圆弧法对该尾矿坝坝坡的抗滑稳定性进行分析。

3.1 尾矿坝地震稳定性分析的基本参数

根据现场勘察数据并经一定的概化,构建该尾矿库的几何模型,如图 5 所示。坝体的分区及各分区的材料物理力学指标的确定主要参考有关工程勘察报告,并根据工程经验进行适当调整,材料参数包括容重,黏聚力 c、内摩擦角 φ。该尾矿库设计地震烈度为Ⅶ度,根据《水工建筑物抗震设计规范》(SL203—97)第 5.1.3 条,取 $\beta_h=\beta_v=3.0$,水平地震力系数取 $k_h=0.1$,$k_v=0.1/3$,$f_h=f_v=1.0$ Hz,本文取 $v_v=\zeta v_h$,其中,v_h分别取 100, 300, 500 m/s,ζ 分别取 1.0,2.0,3.0 以研究波速对计算结果的影响。

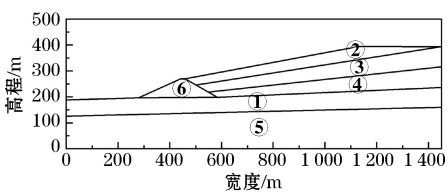


图 5 尾矿库几何模型

Fig.5 Geometric model of the tailings pond

3.2 基于安全系数的尾矿坝地震稳定性评价

用表 1 中各区域材料参数的均值,不考虑其变异性,分别采用不考虑放大系数的拟静力法、考虑放大系数的拟静力法以及图 3 所示的快速拟动力法对该尾矿坝进行地震稳定性评价。首先进行快速拟动力法的验证,取 $\zeta=2.0$,$v_h=100$ m/s,随机生成 30 个滑动面,分别利用图 3 所示的快速拟动力法以及遍历搜索法($\Delta t=0.01$)计算其相应的安全系数,以前者安全系数为横轴,以后者安全系数为纵轴,绘制散点图,如图 6 所示。

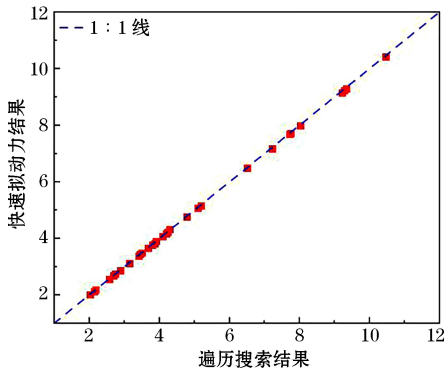


图 6 快速拟动力法验证

Fig.6 Fast pseudo-dynamic method verification

如图 6 所示,散点图与 1∶1 线完全吻合,说明对于随机生成的 30 个滑动面,快速拟动力法所得安全系数与遍历搜索法结果完全一致。在 Intel(R) Core(TM) i3-4170 CPU@3.7Hz,4.00 GB 内存的个人台式机上分别用两种方法计算。本文提出的快速拟动力法仅需 13 s 即可计算 30 个滑动面的安全系数,而遍历搜索法相应耗时为 655 s,是快速拟动力法的 50 倍,本文提出的快速拟动力法的计算效率显著提高,可以应用于尾矿坝地震失效概率计算。

采用不考虑放大系数的拟静力法以及考虑放大系数的拟静力法计算得到的尾矿坝安全系数分别为 1.645 和 1.394,根据《尾矿库安全规程》(GB 39496—2020)之 5.3.16 条中表 7 规定,地震工况下,以瑞典圆弧法计算时,该尾矿坝的稳定安全系数需大于 1.05,由此可见,该尾矿坝地震稳定性满足规范最低要求。取 $\zeta=2.0$,$v_h=100$ m/s,快速拟动力法的计算结果为 1.817,对比发现,在 $\zeta=2.0$,$v_h=100$ m/s 时,拟动力法结果比拟静力法结果要高,其原因在于拟动力法考虑了地震作用力的波动性质。因此,应用拟动力法计算时,横纵波速的选取非常重要。三种方法对应的临界滑动面见图 7。由图 7 可见,考虑放大系数的拟静力法所得到的临界滑动面的滑入点位于最外侧,而快速拟动力法得到的滑入点位于最内侧,不考虑放大系数的拟静力法结果居于二者之间。从安全系数与滑动面积综合来看,考虑放大系数的拟静力法所得结果偏于保守(即安全系数小,滑动面积大)。表 1 汇总了不同 ζ 与 v_h下,快速拟动力法所得安全系数的变化情况。由表 1 可见,当 $v_h=100$ m/s 时,随着 ζ 自 1.0 逐步增至 3.0,快速拟动力法的计算结果维持在 1.82 左右;当 $v_h=300$

m/s时，随着 ζ 自 1.0 逐步增至 3.0，快速拟动力法的计算结果维持在 1.54 左右；$v_h=500$ m/s 时，随着 ζ 自 1.0 逐步增至 3.0，快速拟动力法的计算结果维持在 1.45 左右。对比发现，ζ 的取值对计算结果影响较小，而 v_h 的取值对计算结果有显著影响。随着 v_h 自 100 m/s 增至 500 m/s，快速拟动力法的计算结果由 1.82 降至 1.45，由此可见，随着 v_h 的增加，尾矿坝地震稳定性逐步降低。

与规范中使用的传统拟静力法相比，拟动力法能更合理地考虑地震荷载的动力特性，且所得安全系数均大于拟静力法安全系数，由于合理的假设使所得安全系数较拟静力法更为合理，且根据文献[19]，结合常见的土体波长数据，较拟静力法而言，拟动力法更适合于高坝的稳定性分析。

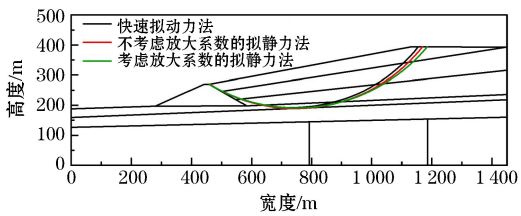


图 7　三种不同方法得到的临界滑动面

Fig.7　Critical sliding faces obtained by three methods

表 1　不同 ζ 与 v_h 下快速拟动力法计算得到的安全系数结果

Table 1　The safety factors calculated by fast pseudo-dynamic method under different ζ and v_h

ζ	v_h/(m/s)		
	100	300	500
1.0	1.817	1.536	1.447
2.0	1.818	1.543	1.453
3.0	1.843	1.547	1.455

3.3　基于失效概率的尾矿坝地震稳定性评价

考虑各区域材料参数的变异性，分别采用不考虑放大系数的拟静力法、考虑放大系数的拟静力法以及图 3 所示的快速拟动力法构建尾矿坝地震稳定性极限状态函数，采用图 4 右半部分所示流程计算尾矿坝地震失效概率，随机样本个数暂取 10 000。在计算过程中，若某次抽样下，尾矿坝地震稳定安全系数小于 1，则称该样本为失效样本，其相应的滑动面称之为失稳滑动面。由不考虑放大系数的拟静力法所得到的失效样本数为 8，失效概率为 0.08%；由考虑放大系数的拟静力法所得到的失效样本数为 198，失效概率接近 2%。

基于 3.2 节研究结论，ζ 对快速拟动力法计算的安全系数影响较小，因此，本节 ζ 取 1.0，v_h 取 100，300，500 m/s，应用快速拟动力法研究波速对失效概率的影响。在不同 v_h 下由蒙特卡罗分析法所得到的概率密度函数(PDF)与累计分布函数(CDF)曲线如图 8 所示。

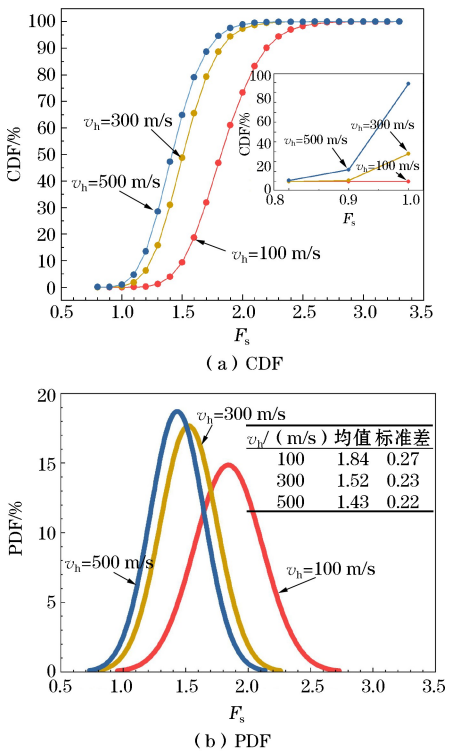
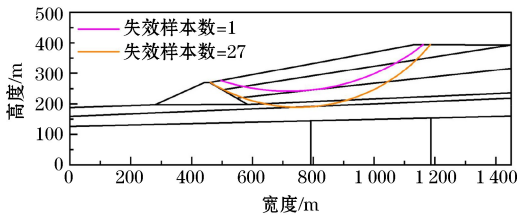


图 8　尾矿坝地震稳定性可靠度分析结果

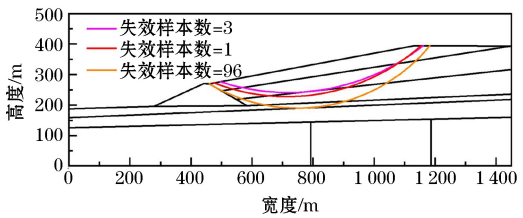
Fig.8　Reliability analysis results of seismic stability of tailings dam

由图 8(a)可知，$v_h=500$ m/s 时，所得失效概率为 1%，$v_h=300$ m/s 时，为 0.28%，$v_h=100$ m/s 时，抽样样本不足，无法准确计算失效概率。由图 8(b)可知，$v_h=100$ m/s 时，10 000 个安全系数的平均值为 1.84，标准差为 0.27；$v_h=300$ m/s 时，10 000个安全系数的平均值为 1.52，标准差为 0.23；$v_h=500$ m/s 时，10 000 个安全系数的平均值为 1.43，标准差为 0.22。对比发现：随着 v_h 的增加，安全系数平均值逐渐减低，标准差亦逐渐减小。若用可靠度指标 β 来评价尾矿坝地震可靠性，随着 v_h 自 500 m/s 降至 100 m/s，β 自 1.95 增至 3.12，随着 v_h 的降低，β 逐渐增加(或者失效概率逐渐降低)，尾矿坝地震稳定性逐渐提高。$v_h=300$ m/s 和 $v_h=500$ m/s 时，尾矿坝地震失稳滑动面的位置及其失效样本个数见图 9。由图 9(b)可见，$v_h=500$ m/s 时，尾

矿坝地震失稳滑动面有 3 个,失效样本数为 96 所对应的滑动面其底部与尾粉质黏土层相切,用橙色表示(颜色标识见电子版)。失效样本数为 3 所对应的滑动面其底部与尾粉土层相切,用紫色表示。失效样本数为 1 所对应的滑动面介于上述两者之间,用红色表示。由图 9(a)可知,当 $v_h=300$ m/s 时,地震失稳滑动面个数降为 2,与图 9(b)对比发现,介于橙色与紫色之间的红色滑动面消失。



(a) v_h=300 m/s 时尾矿坝地震失稳滑动面



(b) v_h=500 m/s 时尾矿坝地震失稳滑动面

图 9 尾矿坝地震失稳滑动面

Fig.9 Sliding surface of seismic instability of tailings dam

4 结论

本研究通过提出考虑放大系数的拟静力方法和快速拟动力方法,为合理评估尾矿坝地震稳定性提供了新的技术手段。研究结果表明,放大系数对尾矿坝地震稳定性评价有显著影响,使得安全系数降低,评价结果更为保守。同时,快速拟动力方法在保持计算精度的同时,大幅提高了计算效率,适用于实际工程中的快速评估。具体结论如下。

(1) 随着横波波速的增加,尾矿坝的地震稳定性降低,失效概率增加,且潜在的失稳滑动面数量增多,从而增加了尾矿坝地震失稳的风险。这些发现为尾矿坝的安全评价和灾害预防提供了重要的参考依据。

(2) 本研究解决了传统拟静力方法在地震稳定性评价中可能高估稳定性的问题,并通过快速拟动力方法提高了计算效率,为尾矿坝地震稳定性评价提供了新的思路。实际应用中,本研究提出的方法能够帮助工程师更快速、准确地评估尾矿坝的地震稳定性,为尾矿坝的安全运营和风险管理提供支持。

(3) 本研究也存在不足之处。首先,未充分考虑尾矿坝材料的非均质性对地震稳定性的影响。其次,参数变异性对模型准确性的影响需要进一步探讨。在模型中引入材料非均质性和参数变异性可以提高模型的适应性和准确性,这也是后续研究的方向。

参考文献(References):

[1] 王昆,杨鹏,KAREN Hudson-Edwards,等.尾矿库溃坝灾害防控现状及发展[J].工程科学学报,2018,40(5):526-539.
WANG Kun, YANG Peng, KAREN Hudson-Edwards, et al. Status and development for the prevention and management of tailings dam failure accidents[J]. Chinese Journal of Engineering,2018,40(5):526-539.

[2] 王昆,张俊阳,杨修志,等.考虑精细地形的尾矿库溃坝外泄泥流运移规律研究[J].中国安全科学学报,2022,32(12):95-101.
WANG Kun, ZHANG Junyang, YANG Xiuzhi, et al. Research on migration law of tailings dam breach runout mud flow considering fine terrains[J]. China Safety Science Journal,2022,32(12):95-101.

[3] 李亮,褚雪松,庞峰,等.地震边坡稳定性分析的拟静力方法适用性探讨[J].世界地震工程,2012,28(2):57-63.
LI Liang, CHU Xuesong, PANG Feng, et al. Discussion on suitability of pseudo-static method in seismic slope stability analysis[J]. World Earthquake Engineering,2012,28(2):57-63.

[4] 邓东平,李亮,赵炼恒.地震作用下边坡稳定性分析的拟静力法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(10):3578-3588.
DENG Dongping, LI Liang, ZHAO Lianheng. Research on quasi-static method of slope stability analysis during earthquake[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2014,45(10):3578-3588.

[5] 刘杰,李建林,张玉灯,等.基于拟静力法的大岗山坝肩边坡地震工况稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1562-1570.
LIU Jie, LI Jianlin, ZHANG Yudeng, et al. Stability analysis of Dagangshan dam abutment slope under earthquake based on pseudo-static method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(8):1562-1570.

[6] 吕擎峰,殷宗泽,王叔华,等.拟静力法边坡稳定分析的改进[J].岩土力学,2005(增刊 1):35-38.
LYU Qingfeng, YIN Zongze, WANG Shuhua, et al. Improvement of pseudo-static method for slope stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2005(Suppl.1):35-38.

[7] LI Chunli, LI Liang, CHENG Yungming, et al. Seismic reliability analysis of slope in spatially variable soils using multiple response surfaces[J]. Engineering Computations, 2023,40(9/10):2940-2961.

[8] JI Jian, WANG Chenwei, CUI Hongzhi, et al. A simplified nonlinear coupled Newmark displacement model with degrading yield acceleration for seismic slope stability analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2021, 45(10): 1303-1322.

[9] 刘汉龙,费康,高玉峰.边坡地震稳定性时程分析方法[J].岩土力学,2003(4):553-556.
LIU Hanlong, FEI Kang, GAO Yufeng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. Rock and Soil Mechanics,2003(4):553-556.

[10] 陈瑜,张小艳,许汉华,等.岩质边坡稳定性时程分析下限法研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):217-224.
CHEN Yu, ZHANG Xiaoyan, XU Hanhua, et al. Lower limit method of time history analysis for dynamic stability of rock slopes[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2021,32(2):217-224.

[11] STEEDMAN R S, ZENG X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall [J]. Géotechnique,1990,40(1):103-112.

[12] 饶平平,童磊磊,师昀巍.基于拟动力法的抗滑桩加固边坡地震稳定性分析[J].世界地震工程,2020,36(1):189-196.
RAO Pingping, TONG Leilei, SHI Yunwei. Seismic stability analysis of slopes reinforced with anti-slide piles based on pseudo-dynamic method[J]. World Earthquake Engineering,2019,36(1):189-196.

[13] 王龙,陈国兴,胡伟,等.基于拟动力法抗滑桩加固非饱和土边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1386-1394.
WANG Long, CHEN Guoxing, HU Wei, et al. Seismic stability of unsaturated soil slopes stabilized by anti-slide piles based on pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6):1386-1394.

[14] 李雨浓,赵巍,刘畅,等.基于修正拟动力法的抗滑桩加固边坡三维地震稳定性分析[J].中国公路学报,2024,37(1):44-54.
LI Yunong, ZHAO Wei, LIU Chang, et al. 3D seismic stability analysis of slopes reinforced with stabilizing piles based on a modified pseudo-dynamic method[J]. China Journal of Highway and Transportation,2024,37(1):44-54.

[15] 蒋青江,邓亚虹,杨楠,等.基于严格条分法的拟动力地震边坡稳定性分析方法研究[J].地震工程学报,2023,45(3):716-723.
JIANG Qingjiang, DENG Yahong, YANG Nan, et al. Pseudo-dynamic seismic slope stability analysis based on rigorous slice method[J]. China Earthquake Engineering Journal,2023,45(3):716-723.

[16] 李见飞.抗滑桩加固三维复杂边坡抗震设计的新方法:拟动力法[J].岩土力学,2022,43(增刊1):275-285.
LI Jianfei. New approach for seismic design of 3D complex slopes reinforced with piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,43(Suppl.1):275-285.

[17] 王上上,陈富,李东贤,等.锚杆不确定性对加固边坡失稳概率的影响[J].地质科技通报,2022,41(2):282-289.
WANG Shangshang, CHEN Fu, LI Dongxian, et al. Influence of anchor uncertainty on the failure probability of reinforced slope[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2022,41(2):282-289.

[18] 王龙,陈国兴,胡伟,等.三维非饱和土边坡拟动力稳定性分析初探[J].岩土工程学报,2023,45(9):1859-1867.
WANG Long, CHEN Guoxing, HU Wei, et al. Three-dimensional seismic stability of unsaturated soil slopes using pseudo-dynamic approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(9):1859-1867.

[19] 杨楠,邓亚虹,慕焕东,等.一种基于拟动力法和剩余推力法的地震边坡稳定性分析新方法[J].工程地质学报,2023,31(2):607-616.
YANG Nan, DENG Yahong, MU Huandong, et al. A new method for seismic slope stability analysis based on pseudo-dynamic method and residual thrust method[J]. Journal of Engineering Geology,2019,31(2):607-616.

[20] AGARWAL E, PAIN A, SARKAR S. Stochastic stability analysis of geosynthetic reinforced slopes subjected to harmonic base shaking[J]. Transportation Geotechnics, 2021,29:100562.

[21] CHEN Guanghui, ZOU Jinfeng, YANG Tao, et al. Three-dimensional modified pseudo-dynamic analysis of reinforced slopes with inclined soil nails[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2022,81(9):377.

[22] SHAO Guoxia, SUN Tianze, LI Ting, et al. Seismic stability analysis of slopes using a pseudo-dynamic method combined with an upper bound method[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering,2023,60(1):79-85.

[23] HAZARI S, GHOSH S, SHARMA R P. New pseudo-dynamic analysis of two-layered cohesive-friction soil slope and its numerical validation[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering,2020,14(6):1492-1508.

[24] PAN Qiujing, QU Xingru, WANG Xiang. Probabilistic seismic stability of three-dimensional slopes by pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Central South University, 2019,26(7):1687-1695.

[25] ZHOU Jianfeng, ZHENG Ziyu, BAO Ting, et al. Assessment of rigorous solutions for pseudo-dynamic slope stability: finite-element limit-analysis modelling[J]. Journal of Central South University,2023,30(7):2374-2391.

[26] LI Liang, WANG Yu, CAO Zijun, et al. Risk de-aggregation and system reliability analysis of slope stability using representative slip surfaces[J]. Computers and Geotechnics,2013,53:95-105.

[27] AGARWAL E, PAIN A. Probabilistic stability analysis of geosynthetic-reinforced slopes under pseudo-static and modified pseudo-dynamic conditions[J]. Geotextiles and Geomembranes,2021,49(6):1565-1584.

[28] KOKANE A K, SAWANT V A, SAHOO J P. Seismic stability analysis of nailed vertical cut using modified pseudo-dynamic method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2020,137:106294.

[29] SUN Jiaping, YU Tiantang, DONG Pingting. Pseudo-dynamic analysis of reinforced slope with anchor cables[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162:107514.

[30] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic stability of tailings dam by using pseudo-dynamic method[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4). Amsterdam:IOS Press,2009:1542-1545.

[31] QIN Changbing, CHAIN Siauchen, GAZERTAS George. Kinematic analysis of seismic slope stability with discretisation technique and pseudo-dynamic approach:a new perspective[J]. Géotechnique,2019,69(11):1031-1033.

[32] FARSHIDFAR N, KESHAVARZ A, MIRHOSSEINI S M. Seismic stability of reinforced soil slopes using the modified pseudo-dynamic method[J]. Earthquake and Structures:An International Journal of Earthquake Engineering & Earth Quake Effects on Structures,2021,20(5):473-486.

[33] 吴晓磊,董建华,苏世林,等.基于改进拟动力法的新型热锚管框架冻土边坡体系稳定性分析[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(5):1243-1261.
WU Xiaolei, DONG Jianhua, SU Shilin, et al. Stability of frozen soil slope system with new thermal anchor based on improved pseudo dynamic method[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2019,31(5):1243-1261.

[34] QIN Changbing, CHIAN Siauchen. Discretization-based kinematic analysis method to seismic stability of geosynthetic-reinforced slopes involving differing earthquake approaches[J]. International Journal of Geomechanics, 2020,20(7):6020010.

[35] LEI Mingfeng, LI Jin, ZHAO Chenyang, et al. Pseudo-dynamic analysis of three-dimensional active earth pressures in cohesive backfills with cracks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2021,150:106917.