

# 基于蒙特卡罗法与多滑动面的拟动力法边坡可靠度分析

徐亮,文嘉辉,李亮\*

(青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266520)

**摘要:** 基于拟动力瑞典圆弧法寻求最危险初始相位下的安全系数以评估给定滑动面的稳定性,将大量可行滑动面引入极限状态函数,最终结合蒙特卡罗法提出了基于拟动力瑞典圆弧法的地震边坡可靠度分析方法。将所提方法应用于某均质土坡稳定性分析中,详细研究了横波波速、水平地震力系数以及滑动面位置对最危险初始相位以及安全系数的影响。研究发现:随着横波波速的增加,最危险初始相位 $t_d$ 对应的安全系数逐渐减小,并最终趋于拟静力方法的结果。随着水平地震力系数的增加, $t_d$ 保持不变,但其对应的安全系数逐渐减小;在其他条件均相同的前提下, $t_d$ 亦随滑动面位置变化而改变。对于均质边坡,基于临界滑动面 $S_c$ 的可靠度分析方法(方法一)得到的 $t_d$ 概率密度函数以及失效概率与基于大量可行滑动面分析方法(方法二)的基本一致,但方法一不能合理考量因滑动面位置发生变化而导致的边坡失效后果,得出的滑动体积会偏小,推荐使用方法二进行地震边坡可靠度分析。

**关键词:** 拟动力法;瑞典圆弧法;可靠度分析;失效概率;临界滑动面

**中图分类号:** TU4

**文献标识码:** A

## Slope Reliability Analysis Using Pseudo-dynamic Method with Monte Carlo Simulation and Multiple Slip Surfaces

XU Liang, WEN Jiahui, LI Liang\*

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

**Abstract:** The pseudo-dynamic Swedish circle method for seeking the factor of safety under critical initial phase is proposed to evaluate the stability for a given slip surface. A significant number of feasible slip surfaces are incorporated into the limit state function of slope reliability, and the Monte Carlo simulation method is combined to propose the seismic slope reliability analysis method based on the pseudo-dynamic Swedish circle method. The proposed methodology is applied to the stability analysis of a homogeneous slope, with a detailed investigation of the effects of shear wave velocity, horizontal seismic coefficient, and slip surface location on the critical initial phase (denoted by  $t_d$ ) and factor of safety. It is found that with an increase in shear wave velocity, the factor of safety corresponding to the critical initial phase  $t_d$  gradually decreases and eventually converges to the result from the pseudo-static method. With an increase in the horizontal seismic coefficient,  $t_d$  remains constant, but the corresponding factor of safety tends to decrease. Moreover, under the same conditions,  $t_d$  also differs with the variation in the slip surface location. For homogeneous slopes, the  $t_d$  probability density function and failure probability obtained from the reliability analysis method based on the critical slip surface  $S_c$  (method 1) are essentially consistent with those derived from the analysis method based on a large number of feasible slip surfaces (method 2). However, since Method 1 fails to properly quantify the consequences of slope failure resulting from the variation in the slip surface location, it has the potential of underestimating the sliding

收稿日期:2024-08-31

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME007);国家自然科学基金资助项目(51778313)

第一作者:徐亮(1988—),男,山东滨州人,博士研究生,主要从事岩土工程可靠度研究。

\*通信作者:李亮(1977—),男,山东济宁人,博士,教授,主要从事边坡稳定可靠度分析与风险量化研究。

volume. Method 2 is recommended for seismic slope reliability analysis.

**Key words:** pseudo-dynamic method; Swedish circle method; reliability analysis; failure probability; critical slip surface

地震边坡稳定性评价是岩土工程中重要的课题之一。在众多的评价方法中,拟动力法因其能兼顾计算效率与精度受到业界广泛关注。1990年,Steedman等<sup>[1]</sup>在拟静力法基础上,将地震波简化为由基底入射的正弦波并引入初始相位概念,首次提出拟动力法以合理考量地震波动态效应对挡土墙压力的影响。Choudhury等<sup>[2]</sup>采用拟动力法分析尾矿坝的地震稳定性,并着重探讨水平与竖向加速度对计算结果的影响。拟动力法与极限平衡法、极限分析法相结合,广泛应用于地震边坡稳定性分析。譬如,在与极限平衡法相结合方面,卢玉林等<sup>[3]</sup>采用拟动力法计算地震惯性力,进而结合极限平衡法推导砂土边坡楔体在地震、渗流双重工况下的稳定系数解析解,其计算结果与动力时程法的最大误差为5%;邓亚虹等<sup>[4]</sup>、Hazari等<sup>[5]</sup>分别将拟动力法与瑞典圆弧法结合开展地震边坡稳定性分析,研究发现,当地震波长与坡高比值小于10时,拟动力法结果较为合理;饶平等<sup>[6]</sup>将拟动力法与毕肖普法相结合,研究地震作用下抗滑桩加固边坡稳定性问题;杨楠等<sup>[7]</sup>将拟动力法与剩余推力法结合开展地震边坡稳定性分析,研究认为,当考虑地震动放大效应时,拟动力安全系数可能小于拟静力安全系数;蒋青江等<sup>[8]</sup>提出基于拟动力法严格条分法的地震边坡稳定性分析新方法;王正振等<sup>[9]</sup>采用拟动力水平条分法,研究地震作用下框架预应力锚杆支护边坡的稳定性。在极限分析法与拟动力法相结合方面,周炜等<sup>[10-13]</sup>分别将拟动力法与极限分析上限法相结合,开展地震边坡稳定性分析;刘诚等<sup>[14]</sup>建立基于拟动力下限法的非线性数学规划模型,并通过算例验证其方法的合理性和有效性;李见飞<sup>[15]</sup>将拟动力法与极限分析上限法结合,提出新的抗滑桩加固边坡抗震设计方法,研究地震荷载、平台宽度、抗滑桩布设位置等因素对边坡稳定性的影响规律;王龙等<sup>[16-17]</sup>结合极限分析上限法,提出改进拟动力水平条分法,探讨抗滑桩加固非饱和土边坡的地震稳定性问题;王振等<sup>[18]</sup>采用拟动力上限分析法,研究三维加筋边坡抗震稳定性。综合上述文献可知,拟动力法能考虑地震波动态特性,易与极限平衡法、极限分析法结合,且具有较高的计算效率。

在拟动力地震边坡可靠度分析方面,相关研究较少。Pan等<sup>[19]</sup>基于拟动力上限分析法,开展三维边坡地震稳定性概率分析,研究表明:与拟静力法相比,拟动力法可给出更为保守的失效概率结果。但其研究未能考虑滑动面变化对计算结果的影响,为此,本文采用拟动力瑞典圆弧法计算给定可行滑动面的安全系数,通过引入大量可行滑动面并结合蒙特卡罗法进行拟动力地震边坡可靠度分析,通过一典型边坡,研究土体参数变异性、滑动面空间分布、危险初始相位变化对地震边坡可靠度的影响。

## 1 拟动力瑞典圆弧法

### 1.1 初始相位 $t$ 下拟动力瑞典圆弧法

相较于拟静力法,拟动力法考虑了地震波的振动效应。如图1所示,以水平地震波为例,拟动力法假设其为从基底垂直入射的正弦波,正弦波的最大振幅为 $\alpha_h = k_h g$ ,以向左为正, $k_h$ 为水平地震力系数。设正弦波的卓越频率为 $f$ ,其圆频率 $\omega = 2\pi f$ ,在土体中传播的速度为 $v_s$ 。

图1中,坡顶座标 $z=0$ ,基底座标 $z=H$ ,设基底入射时的初始相位为 $t$ ,则考虑水平地震波在土体中传播后, $z$ 深度处土条上受到的水平地震加速度 $e_h(z,t)$ 为

$$e_h(z,t) = \alpha_h \sin\left[\omega\left(t - \frac{H-z}{v_s}\right)\right] \quad (1)$$

若考虑振幅在传播过程中的放大效应<sup>[8]</sup>,设 $f_m$ 为振幅放大系数,则公式(1)变为

$$e_h(z,t) = \alpha_h \left[1 + \frac{H-z}{H}(f_m - 1)\right] \sin\left[\omega\left(t - \frac{H-z}{v_s}\right)\right] \quad (2)$$

以图1左侧图中第 $i$ 个土条为例, $Z_{i0}$ 为土条顶部中心点至坡顶( $z=0$ )的深度, $Z_{i1}$ 为土条底部中心点至坡顶( $z=0$ )的深度,第 $i$ 个土条受力分析如图1右侧图所示。其中 $b_i$ 为土条宽度, $\alpha_i$ 为土条底部倾角, $W_i$ 为土条所受重力, $N_i$ 为土条底部法向力, $T_i$ 为土条底部所受抗滑力, $dz_i$ 为土条上积分微元体,微元体深度为 $z_i$ ,土条平均密度为 $\rho_i$ , $F_h(z_i,t)$ 为土条 $z_i$ 深度处所受水平地震力, $F_{hi}(t)$ 为土条所受水平地震力,根据公式(3), $F_h(z_i,t)$ 计算如下:

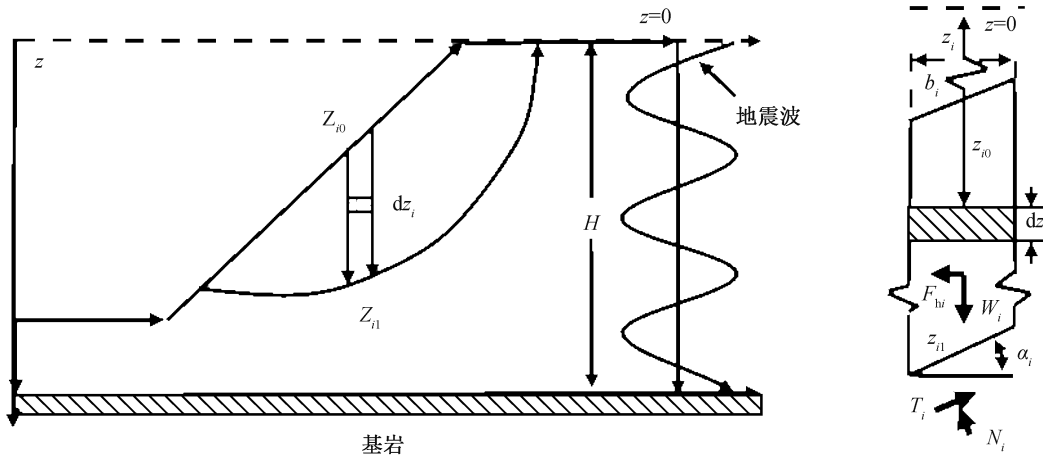


图 1 初始相位  $t$  下拟动力瑞典圆弧法

Fig. 1 Pseudo-dynamic Swedish circle method at initial phase  $t$

$$F_h(z_i, t) = b_i \rho_i \alpha_h \left[ 1 + \frac{H - z_i}{H} (f_m - 1) \right] \times \sin \left[ \omega \left( t - \frac{H - z_i}{v_s} \right) \right] \quad (3)$$

对整个土条进行积分可得  $F_{hi}(t)$  :

$$F_{hi}(t) = \int_{z_0}^{z_{i1}} b_i \rho_i \alpha_h \left[ 1 + \frac{H - z_i}{H} (f_m - 1) \right] \times \sin \left[ \omega \left( t - \frac{H - z_i}{v_s} \right) \right] dz_i \quad (4)$$

考虑土条所受力在  $N_i$  方向上的平衡:

$$N_i = W_i \cos \alpha_i - F_{hi}(t) \sin \alpha_i \quad (5)$$

由摩尔库伦强度准则,土条底部能发挥的最大抗滑力为

$$T_i = N_i \tan \varphi_i + C_i \quad (6)$$

第  $i$  条块底部抗滑力矩  $M_{ri}$ :

$$M_{ri} = RT_i \quad (7)$$

第  $i$  条块中,由水平地震力引起的下滑力矩  $M_{hi}(t)$ :

$$M_{hi}(t) = \int_{z_0}^{z_{i1}} b_i \rho_i \alpha_h \left[ 1 + \frac{H - z_i}{H} (f_m - 1) \right] \times \sin \left[ \omega \left( t - \frac{H - z_i}{v_s} \right) \right] (z_i - z_c) dz_i \quad (8)$$

第  $i$  条块中,由土条重力  $W_i$  引起的下滑力矩  $M_{si}$ :

$$M_{si} = RW_i \sin \alpha_i \quad (9)$$

汇总得到整个滑动体的抗滑力矩和下滑力矩,其安全系数  $F_s(t)$  为

$$F_s(t) = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ri}}{\sum_{i=1}^n M_{hi}(t) + \sum_{i=1}^n M_{si}} \quad (10)$$

式(7)—(9)中,  $R$  为滑动圆弧半径,式(8)中  $z_c$

为滑动圆弧圆心的  $z$  坐标,式(9)中  $n$  为土条总个数。

### 1.2 最危险初始相位 $t_d$ 确定

式(10)给出了某初始相位  $t$  下,拟动力瑞典圆弧法计算的安全系数  $F_s(t)$ ,其反映了地震波以初始相位  $t$  自基岩向上传播时,该滑动体的安全系数。为了合理地评估给定滑动体的安全性,常采用最危险初始相位  $t_d$  下的  $F_s(t_d)$  评价给定滑动体的安全性,在最危险初始相位  $t_d$  下,  $F_s(t_d)$  达到最小值。已有研究发现<sup>[20]</sup>,  $F_s(t)$  亦为一正弦函数,因此,为寻求  $F_s(t_d)$ ,将地震正弦波的卓越周期 ( $T=1/f$ ),以某一较小的步长  $\Delta t$  (譬如取 0.01) 离散为有限个相位点,分别计算有限个相位点下的安全系数,对比找出其最小值,即为  $F_s(t_d)$ 。本文提出的拟动力瑞典圆弧法的计算步骤见图 2。

## 2 基于拟动力瑞典圆弧法的地震边坡可靠度分析

为考虑土体强度参数以及地震波横波波速存在的诸多不确定性,本文采用蒙特卡罗法与拟动力瑞典圆弧法进行地震边坡可靠度分析。与已有的研究类似,本文仍采用安全系数评价边坡的稳定性,利用最危险相位  $t_d$  下的安全系数构建边坡可靠度分析的极限状态函数,进而结合蒙特卡罗法计算其失效概率。

### 2.1 极限状态函数

考虑边坡土体强度参数和地震波在边坡土体中传播波速的不确定性,将黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$

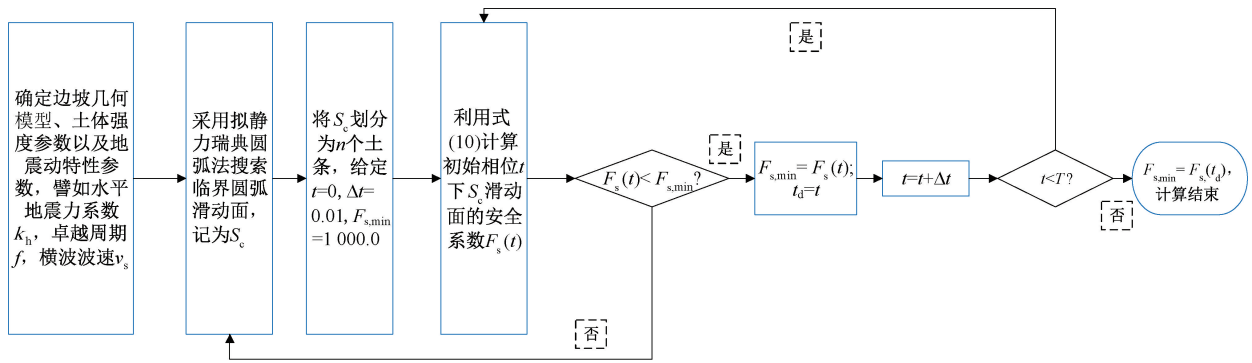


图2 拟动力瑞典圆弧法的计算流程

Fig. 2 Calculation flowchart of pseudo-dynamic Swedish circle method

以及波速  $v_s$  视为服从对数正态分布的随机变量, 构建基于  $c, \varphi, v_s$  的边坡极限状态函数:

$$G(c, \varphi, v_s) = F_s(c, \varphi, v_s, t_d) - 1 \quad (11)$$

式中,  $F_s(c, \varphi, v_s, t_d)$  为在给定黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  以及波速  $v_s$  的条件下, 利用图2所示流程图确定  $F_s(t_d)$ 。若  $F_s(t_d) > 1$ , 则认为基于  $S_c$  评价的边坡处于稳定状态; 若  $F_s(t_d) < 1$ , 则认为边坡处于失稳状态; 若  $F_s(t_d) = 1$ , 则认为边坡处于临界状态。

### 2.2 基于蒙特卡罗法与拟动力瑞典圆弧法的地震边坡可靠度分析

蒙特卡罗法作为广泛应用的可靠度分析非侵入式方法, 能与任意极限状态函数结合。其主要思想是, 首先生成有限个服从假定分布的随机样本, 然后逐一计算某随机样本下极限状态函数值并判断是否失效, 然后统计失效样本所占总体样本的比值, 在抽样样本数目足够多时, 该比值即

为所分析事件的失效概率。以本文研究对象为例, 即生成  $N$  组  $c, \varphi, v_s$  值, 记为  $X_i = (c_i, \varphi_i, v_{si}), i = 1, 2, \dots, N$ 。然后, 利用图2所示流程计算  $F_s(X_i, t_d)$ , 进而根据式(11)确定极限状态函数的值, 最后判断  $X_i$  是否是失效样本, 如此反复计算, 统计失效样本数目  $N_f$ , 利用  $N_f$  与  $N$  的比值近似模拟边坡失效概率。本文分析方法流程如图3所示, 左侧蓝线框为抽样生成  $N$  组样本, 然后对每个样本进行右侧红线框或紫线框操作。紫线框操作针对临界滑动面  $S_c$  展开, 称为方法一; 红线框操作针对大量可行圆弧滑动面展开, 称为方法二。后文算例对比了方法一和方法二对边坡可靠度分析结果的影响。

## 3 算例分析

### 3.1 基于拟动力瑞典圆弧法的边坡确定性分析

考虑如图4所示的一均质边坡, 该边坡高度为

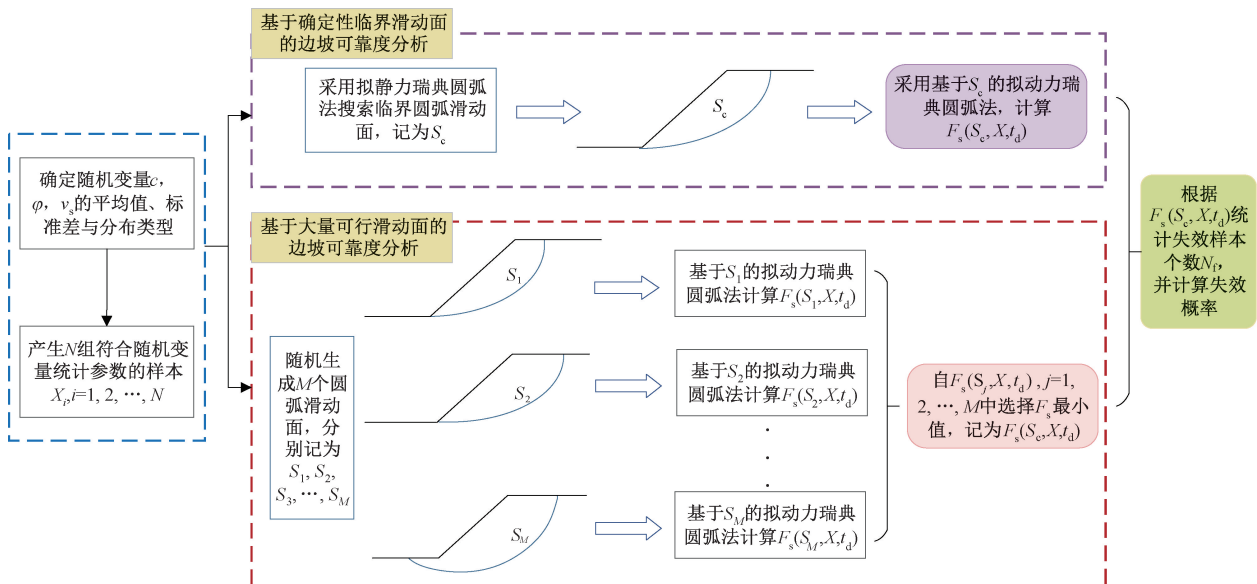


图3 拟动力瑞典圆弧法与蒙特卡罗抽样的边坡可靠度分析流程

Fig. 3 Slope reliability analysis process combining pseudo-dynamic Swedish circle method with Monte Carlo sampling

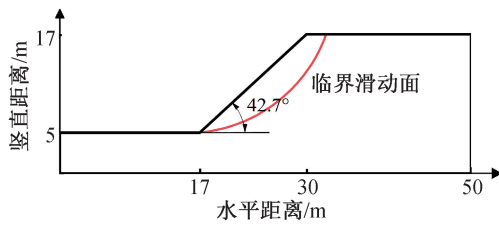


图 4 边坡计算模型

Fig. 4 Slope calculation model

12 m, 坡角为  $42.7^\circ$ , 土体重度  $\gamma$  为  $18 \text{ kN/m}^3$ , 黏聚力  $c=10 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi=28^\circ$ 。横波卓越频率  $f=2 \text{ Hz}$ , 横波波速  $v_s=300 \text{ m/s}$ 。首先采用瑞典圆弧法计算边坡的静力安全系数为 1.122, 给定水平地震系数  $k_h=0.1$ , 即  $\alpha_h=0.1 \text{ g}$ , 采用拟静力瑞典圆弧法计算给定圆弧滑动面的安全系数, 变换不同滑动面, 最终搜索到临界滑动面  $S_c$ 。如图 4 中红色实线所示, 其相应的安全系数为 0.94。

### 3.1.1 初始相位 $t$ 对结果的影响及 $t_d$ 的确定

以横波波速  $v_s=300 \text{ m/s}$  为例, 采用图 2 所示的流程图开展拟动力瑞典圆弧法计算, 地震波的卓越周期为  $0.5 \text{ s}$ , 以  $\Delta t=0.01$  为步长, 计算了不同初始相位  $t$  时, 拟动力瑞典圆弧法的安全系数  $F_s(t)$ , 具体变化曲线如图 5 所示。由图 5 可见,  $F_s(t)$  为一正弦曲线, 确定的最危险初始相位  $t_d=0.16$ ,  $F_s(t_d)$  为 0.947, 对比可知, 在波速为  $300 \text{ m/s}$  时, 采用拟动力法计算所得到的安全系数与拟静力法计算的结果 (0.94) 几乎一致。

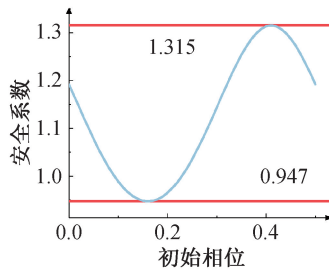


图 5 安全系数随初始相位的变化曲线

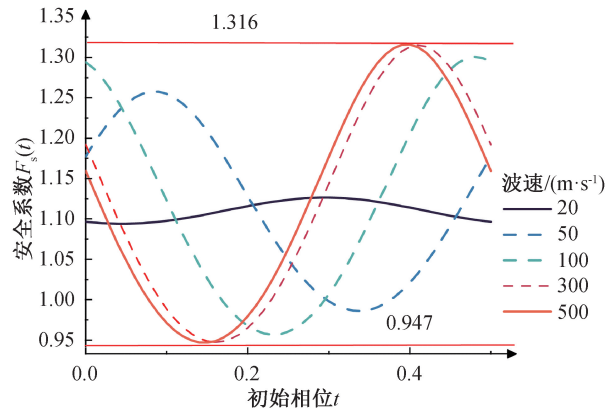
Fig. 5 Variation of factor of safety with initial phase

### 3.1.2 横波波速 $v_s$ 对结果的影响

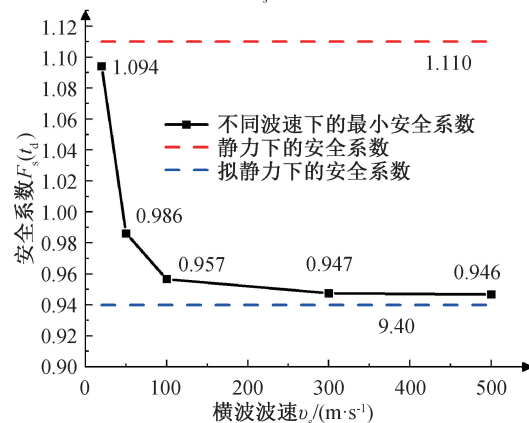
分别取  $v_s=20, 50, 100, 300$  和  $500 \text{ m/s}$ , 采用图 2 所示的拟动力瑞典圆弧法计算不同初始相位  $t$  下边坡的安全系数, 其结果如图 6(a) 所示。图 6(a) 中, 正弦曲线 (红实线) 为  $v_s=500 \text{ m/s}$  时, 安全系数随初始相位的变化曲线, 由图可见, 当波速为  $500 \text{ m/s}$  时, 安全系数最大值为 1.316, 最小值为 0.946, 与  $v_s=300 \text{ m/s}$  的结果 (红虚线) 基本一致。随着  $v_s$  的减小, 安全系数最大值逐渐减小, 最小安

全系数逐渐增大。当  $v_s$  降低为  $20 \text{ m/s}$  时, 最大安全系数 1.105 和最小安全系数 1.094 相差很小, 正弦曲线接近为一条直线。

图 6(b) 绘制了不同波速下  $F_s(t_d)$  的变化曲线, 由图可见, 随着波速自  $20 \text{ m/s}$  逐渐增至  $100 \text{ m/s}$ ,  $F_s(t_d)$  自 1.094 迅速降至 0.957, 然后随着  $v_s$  的增大, 最小安全系数缓慢降低, 最终趋于拟静力法计算结果 0.94。这是因为, 当波速较小时, 土条上不同高度处所受的地震力方向、振幅变化较大, 使边坡下滑力之间抵消作用可能性加大; 反之, 当波速较大时, 土条不同高度处所受地震力的方向和振幅几乎一致, 使边坡下滑力之间抵消作用可能性降低。对比发现, 拟动力法结果介于静力法与拟静力法结果之间, 其上限是静力法结果, 下限是拟静力法结果。



(a)  $F_s(t)-t$  变化曲线



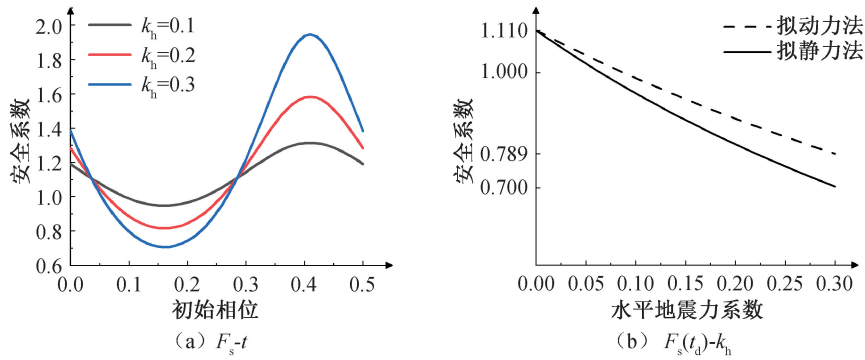
(b)  $F_s(t_d)-v_s$  变化曲线

图 6 横波波速对拟动力法安全系数的影响

Fig. 6 Effect of wave velocity on factor of safety in pseudo-dynamic method

### 3.1.3 水平地震力系数 $k_h$ 对结果影响

横波波速  $v_s=300 \text{ m/s}$  时, 分别取  $k_h=0.1, 0.2$  及  $0.3$ , 绘制安全系数  $F_s$  随不同初始相位  $t$  的变化曲线, 如图 7(a) 所示。由图可见, 随着  $k_h$  的增加,

图7 安全系数随  $k_h$  变化图Fig. 7 Variation of factor of safety with  $k_h$ 

最危险初始相位  $t_d$  保持不变,但其相应的安全系数值逐渐减小,当  $k_h = 0.1, 0.2$  及  $0.3$  时,  $F_s(t_d)$  分别为 0.947、0.815 及 0.706。当  $v_s = 50$  m/s 时,图 7(b)对比了拟动力法  $F_s(t_d)$  与拟静力法安全系数随  $k_h$  的变化情况。由图 7 可见,随着  $k_h$  自 0.0 逐步增加至 0.3,拟静力法结果自 1.110 逐步降低为 0.703;对拟动力法而言,  $F_s(t_d)$  自 1.110 逐步降低至 0.790,对比发现:拟静力法结果与拟动力法结果之间的差距随着水平地震系数  $k_h$  的增大逐步增加。

### 3.1.4 滑动面位置对 $t_d$ 的影响

为深入探讨  $t_d$  的影响因素,考虑如图 8 所示的滑动面 1—6。取  $v_s = 100$  m/s,  $f = 2$  Hz,分别用滑动面 1—6 代替  $S_c$ ,利用图 2 所示的计算流程获取其相应的最危险初始相位  $t_d$ 。滑动面 1—6 的最危险初始相位  $t_d$  分别为 0.21、0.22、0.23、0.24、0.25、0.27。由此可见滑动面位置对于  $t_d$  亦有一定程度影响。

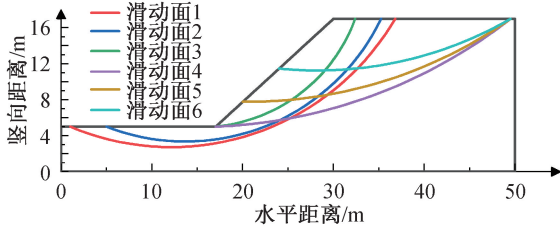


图8 不同滑动面位置图

Fig. 8 Locations of different slip surfaces

## 3.2 基于拟动力瑞典圆弧法的可靠度分析

给定黏聚力  $c$  的平均值为 10 kPa,标准差为 3 kPa;内摩擦角  $\varphi$  的平均值为  $28^\circ$ ,标准差为  $8.4^\circ$ ;横波波速  $v_s$  的平均值为 100 m/s,标准差为 30 m/s。分别用方法一(基于图 3 中紫线框流程)和方法二(基于图 3 中红线框流程,抽样数量  $M =$

10 000)进行边坡可靠度分析,蒙特卡罗法总样本数  $N = 100$ 。本算例中边坡稳定性差、失效概率大,  $N$  取值较小,对于实际工程,需尝试用较大的样本数获取更合理的结果。图 9 绘制了  $k_h = 0.1, 0.2$  时,方法一和方法二的可靠度分析结果,本文主要讨论最危险初始相位  $t_d$  及安全系数变化规律。由图 9(a)(b)可见,  $k_h$  为 0.1 时,方法一与方法二的  $t_d$  平均值、标准差均相近,安全系数的概率密度分布基本相同。图 9(c)(d)分别为  $k_h = 0.1, 0.2$  时,方法一和方法二所得安全系数的概率密度曲线对比图,对比分析发现:  $k_h = 0.1$  时,方法一、二所得安全系数的平均值和标准差基本一致,对应的失效概率为 0.6;  $k_h = 0.2$  时,两者所得安全系数的概率密度曲线略有差别,对应的失效概率均为 0.8。可见,对于均质边坡,方法一和方法二均能给出基本一致的安全系数和  $t_d$  概率密度曲线,进而能够给出基本一致的失效概率。

除计算边坡的失效概率外,滑坡失效后果量化也是滑坡风险评估的重要部分,业界常以临界滑动面面积或体积来衡量其失效后果。面积或体积越大,失效后果越严重,反之亦然。方法一中,以固定的临界滑动面  $S_c$  量化滑坡失效后果。在方法二中,对于每个样本,需从  $M = 10 000$  个滑动面中选择安全系数最小的一个作为临界滑动面。若某滑动面在计算过程中被选择为临界滑动面,则其作为临界滑动面的频次加 1,对 100 个样本计算完毕后,按照出现频次降序排列,汇总得到了滑动面的频次图,如图 10 所示。在图 10 中,左上角滑动面颜色图例,从左至右分别表示滑动面作为临界滑动面的频次由高到低。譬如,图 10(a)中,  $k_h = 0.1$  时,深红滑动面作为临界滑动面的次数为 46,黄颜色滑动面作为临界滑动面的次数为 5。经统计,共有 8 个不同滑动面作为临界滑动面。在图

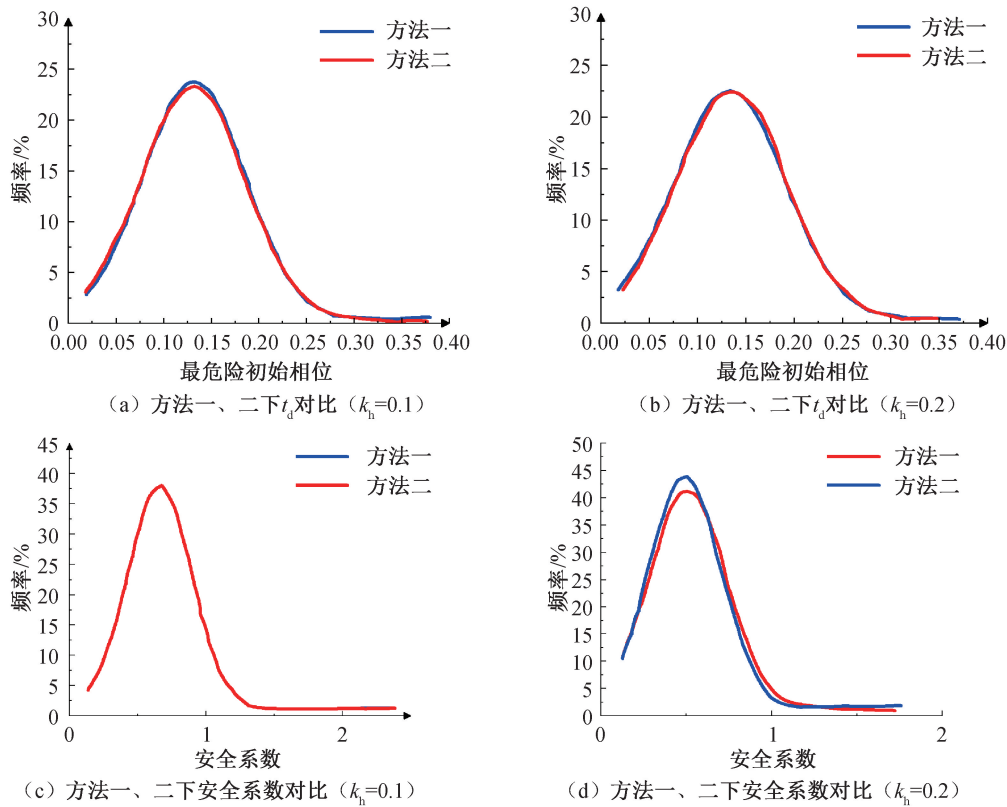


图 9 方法一和方法二下最危险初始相位和安全系数的概率密度曲线

Fig. 9 Probability density functions of  $t_d$  and factor of safety in method 1 and method 2

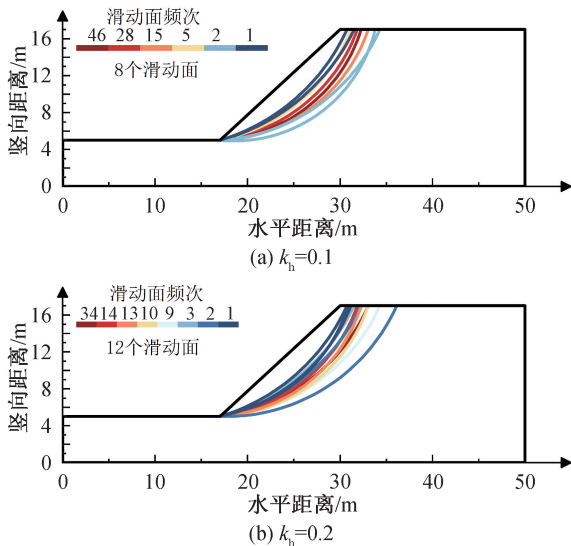


图 10 方法二中临界滑动面频次图

Fig. 10 Frequency diagram of critical slip surface in method 2

10(b)中,  $k_h = 0.2$  时, 共有 12 个不同滑动面作为临界滑动面, 随着  $k_h$  的增加, 临界滑动面的个数略有增加, 滑动面的滑动范围向右侧扩展。对比发现, 方法一虽能给出与方法二较为一致的失效概率, 但是方法一在估计滑坡失效后果方面偏危险, 未能合理考虑临界滑动面可能发生的变化。因

此, 在当前计算机计算水平下, 推荐使用方法二进行地震边坡可靠度分析, 考虑滑动面的变化, 合理评估滑坡失效后果。

#### 4 结论

1) 对于给定的滑动面, 在黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  以及横波波速  $v_s$  等参数确定的条件下, 安全系数随初始相位  $t$  的变化呈现出与地震波相同频率的正弦曲线, 其波谷值为最小安全系数, 对应的相位为最危险初始相位  $t_d$ 。

2) 最危险初始相位  $t_d$  受横波波速  $v_s$  以及滑动面位置的影响, 随着  $v_s$  的增加,  $t_d$  对应的安全系数逐渐减小, 最终趋于拟静力法结果。在其他参数相同的条件下, 拟静力法安全系数与拟动力法安全系数之间的差距随着水平地震系数  $k_h$  的增加而增加。

3) 对于均质边坡, 基于确定性临界滑动面  $S_c$  可靠度分析方法的可靠度计算结果与基于多滑动面可靠度分析方法基本一致, 但是由于不能考虑滑动面的变化, 前者往往会给出偏小的滑动面积或体积结果, 因此, 在滑坡失效后果量化上, 会给出偏危险的结果。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] CHOUDHURY D,BASU S,BRAY J D. Behaviour of slopes under static and seismic conditions by limit equilibrium method[M]. *Embankments, Dams, and Slopes: Lessons from the New Orleans Levee Failures and Other Current Issues*,2012:1-10.
- [3] 卢玉林,薄景山,王丽,等. 渗流地震双重工况下砂土边坡稳定性解析计算[J]. *应用力学学报*,2016,33(5):772-778+932.  
LU Y L,BO J S,WANG L,et al. Analytical calculation of sandy soil slope stability with seepage and earthquake[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*,2016,33(5):772-778+932.
- [4] 邓亚虹,徐召,孙科,等. 一种考虑波动效应的拟动力地震边坡稳定性分析方法[J]. *地球科学与环境学报*,2019,41(5):623-630.  
DENG Y H,XU Z,SUN K,et al. Pseudo-dynamic seismic slope stability analysis method considering wave propagation effects[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*,2019,41(5):623-630.
- [5] HAZARI S,SHARMA R P,GHOSH S. Swedish circle method for pseudo-dynamic analysis of slope considering circular failure mechanism[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*,2020,38(3):2573-2589.
- [6] 饶平平,童磊磊,师响巍. 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 P P,TONG L L,SHI Y W. Seismic stability analysis of slopes reinforced with anti-slide piles based on pseudo-dynamic method[J]. *World Earthquake Engineering*,2020,36(1):189-196.
- [7] 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 N,DENG Y H,MU H D,et al. A new method of seismic slope stability analysis based on pseudo-dynamic method and residual thrust method[J]. *Journal of Engineering Geology*,2023,31(2):607-616.
- [8] 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 Q J,DENG Y H,YANG N,et al. Pseudo-dynamic seismic slope stability analysis based on rigorous slice method[J]. *China Earthquake Engineering Journal*,2023,45(3):716-723.
- [9] 王正振,张振涛,戴国亮,等. 基于拟动力法的框架预应力锚杆支护边坡的稳定性计算[J]. *中国公路学报*,2025,38(1):119-128.  
WANG Z Z,ZHANG Z T,DAI G L,et al. Stability analysis of slope reinforced with a frame-prestressed anchor rod structure using pseudodynamic method[J]. *China Journal of Highway and Transport*,2025,38(1):119-128.
- [10] 周炜,李海波,刘亚群,等. 地震作用下顺层岩质边坡锚固特性的拟动力分析[J]. *岩石力学与工程学报*,2016,35(S2):3570-3576.  
ZHOU W,LI H B,LIU Y Q,et al. Pseudo-dynamic analysis of anchorage characteristics of bedding rock slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2016,35(S2):3570-3576.
- [11] 宋桂锋,杜江梅,柯鉴,等. 基于拟动力法的顺层岩质边坡稳定性极限分析[J]. *地震工程学报*,2019,41(4):931-938.  
SONG G F,DU J M,KE J,et al. Stability limit analysis of bedding rock slopes based on pseudo-dynamic method[J]. *China Earthquake Engineering Journal*,2019,41(4):931-938.
- [12] ZHOU J F,QIN C B. Finite-element upper-bound analysis of seismic slope stability considering pseudo-dynamic approach[J]. *Computers and Geotechnics*,2020,122:103530.
- [13] ZHOU J F,QIN C B. Influence of soft band on seismic slope stability by finite-element limit-analysis modelling[J]. *Computers and Geotechnics*,2023,158:105396.
- [14] 刘诚,刘文连,彭普,等. 基于拟动力下限法的地震作用下岩质边坡稳定性分析[J]. *水电能源科学*,2022,40(4):129-132+103.  
LIU C,LIU W L,PENG P,et al. Stability analysis of rock slope under seismic force based on pseudo-dynamic lower bound method[J]. *Water Resources and Power*,2022,40(4):129-132+103.
- [15] 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(S1):275-285.  
LI J F. New approach for seismic design of 3D complex slopes reinforced with piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2022,43(S1):275-285.
- [16] 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 L,CHEN G X,HU W,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.

- 系统防护能量计算方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(2):91-96+113.
- QI X, WEI T, YU Z X. Energy calculation method of the rigid protective system for low level rockfall[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2):91-96+113.
- [11] 齐欣, 韦韬, 余志祥. 高速铁路防零星落块刚性防护系统试验与数值分析[J]. 铁道标准设计, 2013(10):31-35.
- QI X, WEI T, YU Z X. Test research and numerical analysis of rigid protection system against sporadic rock falling on high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2013(10):31-35.
- [12] 辛春亮. 由浅入深精通 LS-DYNA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019:73-76.
- XIN C L. Master LS-DYNA from shallow to deep[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019:73-76.
- [13] European Organisation for Technical Approvals. ETAG 027: Guideline for European technical approval of falling rock protection kits[M]. Brussels: European Organisation for Technical Approvals, 2013:37-38.
- [14] 张宏. 应用弹塑性力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011:136-143.
- ZHANG H. Applied elastic-plastic mechanics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011:136-143.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 24 页)
- [23] 李波, 余建飞. 基于 PHC 管桩现场静载试验的基桩承载特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10):96-102.
- LI B, YU J F. Research on bearing characteristics of foundation piles based on on-site static load tests of PHC pipe piles[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10):96-102.
- [24] 赵飞涛, 窦斌, 钱进中, 等. 粘性土层中 PHZ 方桩荷载检测数据异常分析[J]. 工程勘察, 2022, 50(10):37-42.
- ZHAO F T, DOU B, QIAN J Z, et al. Analysis of abnormal data of loading test on hollow square pile in clay [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(10):37-42.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 32 页)
- [17] 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 L, CHEN G X, HU W, 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.
- [18] 王振, 孙志彬, 杨胜宇, 等. 三维加筋边坡抗震稳定性的拟动力上限分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(9):1288-1296.
- WANG Z, SUN Z B, YANG S Y, et al. Seismic stability analysis of three-dimensional reinforced slope based on pseudo-dynamic method[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2024, 47(9):1288-1296.
- [19] PAN Q J, QU X R, WANG X. Probabilistic seismic stability of three-dimensional slopes by pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7):1687-1695.
- [20] 李春立, 李东贤, 李亮, 等. 地震对边坡失稳滑动面积的影响研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(4):19-27.
- LI C L, LI D X, LI L, et al. Study of the influence of earthquake on slope failure sliding area[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(4):19-27.
- (责任编辑 王利君)