

文章编号:1673-9469(2025)01-0058-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.008

## 拟动力地震边坡稳定性分析三维极限平衡 Spencer 法研究

罗 贵,万愉快\*,梁金航,丁朋朋,董旭光

(宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021)

**摘要:** 将拟动力法和极限平衡三维 Spencer 法相结合,推导地震力和安全系数计算公式,并编写相应的计算程序,建立考虑波动效应的三维边坡稳定性分析方法,通过算例验证了该方法和程序的正确性。使用该方法分析了几何参数、土体参数及波动效应对边坡拟动力和拟静力安全系数及对两者之间差值的影响规律。研究表明:安全系数随坡高、坡角、破坏面宽度的增大而减小,且拟动力安全系数始终大于拟静力安全系数,两者之间的差值随坡高的增大而增大,随坡角和破坏面宽度的增大而减小;安全系数随黏聚力和内摩擦角的增大而增大,且拟动力安全系数始终大于拟静力安全系数,两者之间的差值随黏聚力和内摩擦角的增大而增大;安全系数随地震动系数的增大而增大,且拟动力安全系数始终大于拟静力安全系数,两者之间的差值随地震动系数的增大而增大。

**关键词:** 边坡;稳定性;拟动力;极限平衡;Spencer 法

中图分类号:TU457

文献标识码:A

## Three-Dimensional Limit Equilibrium Spencer Method for Stability Analysis of Quasi Dynamic Seismic Slopes

LUO Gui, WAN Yukuai\*, LIANG Jinhang, DING Pengpeng, DONG Xuguang

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** Combining the pseudo dynamic method with the limit equilibrium three-dimensional Spencer method, the calculation formulas for seismic force and safety factor are derived, and corresponding calculation programs are written. A three-dimensional slope stability analysis method considering wave effects is established, and the correctness of the method and program is verified through numerical examples. This method was used to analyze the influence of geometric parameters, soil parameters, and wave effects on the pseudo dynamic and pseudo static safety factors of slopes, as well as the difference between the two. The research results show that the safety factor decreases with the increase of slope height, slope angle, and failure surface width, and the pseudo dynamic safety factor is always greater than the pseudo static safety factor. The difference between the two increases with the increase of slope height and decreases with the increase of slope angle and failure surface width; The safety factor increases with the increase of cohesion and internal friction angle, and the pseudo dynamic safety factor is always greater than the pseudo static safety factor. The difference between the two increases with the increase of cohesion and internal friction angle; The safety factor increases with the increase of ground vibration coefficient, and the pseudo dynamic safety factor is always greater than the pseudo static safety factor. The difference between the two increases with the increase of ground vibration coefficient.

**Key words:** slope; stability; pseudo-dynamic; limit equilibrium; Spencer method

收稿日期:2023-12-08

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2023AAC03036);国家自然科学基金资助项目(52408373,52269015);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG03023);宁夏高等学校一流学科建设资助项目(NXYLXK2021A03)

第一作者:罗贵(2000—),男,宁夏中卫人,硕士研究生,从事边坡工程方面的研究。

\* 通信作者:万愉快(1990—),男,河南商丘人,博士,讲师,从事交通岩土工程方面的研究。

地震是诱发边坡失稳的重要因素之一,危害巨大<sup>[1]</sup>。地震荷载作用下的边坡稳定性问题,一直是岩土工程领域研究的热点和难点。地震荷载作用下边坡稳定性评价最常用的方法之一是拟静力法。该方法将地震力简化为一个水平方向的拟静力荷载,作用在滑体的重心上,指向边坡失稳的方向<sup>[2]</sup>。拟静力法原理简单、使用方便,积累了大量的工程使用经验,被纳入相关规范<sup>[3-4]</sup>,在地震边坡稳定性分析中得到了广泛的应用<sup>[5-6]</sup>。但拟静力法将地震动加速度视为不随时间空间变化的定值,完全忽视了地震动加速度的时空分布。为合理评价地震边坡的稳定性,Steedman 等<sup>[7]</sup>考虑水平方向地震力随时间的变化,提出了利用拟动力法分析地震力对挡土墙土压力的影响。在此基础上,Choudhury 等<sup>[8-9]</sup>进一步完善了拟动力法,考虑竖向地震力及地震动放大效应对边坡稳定性的影响<sup>[10]</sup>。随后,学者们开展了拟动力边坡稳定性分析的研究。Chakraborty 等<sup>[11]</sup>对比分析了尾矿坝边坡拟静力和拟动力稳定性,明确了拟静力分析方法会得到偏于保守的分析结果。此外,学者们还探讨了地震动力系数和卓越频率对边坡拟动力安全系数的影响规律<sup>[12-13]</sup>。邓亚虹等<sup>[14]</sup>将拟动力法和极限平衡 Fellenius 法相结合,推导了地震边坡安全系数计算公式,分析了初始相位、地震动幅值和波长坡高比对拟动力安全系数的影响。随后,杨楠等<sup>[15]</sup>将拟动力法和剩余推力法相结合,分析了地震动放大效应下边坡的稳定性。蒋青江等<sup>[16]</sup>则将拟动力法和 Sarma 法相结合,分析了初始相位、地震动幅值和波长坡高比对拟动力安全系数的影响。

目前,国内外学者的研究多集中在二维边坡稳定性分析上,但是滑坡现场观测资料表明:绝大

多数边坡的破坏都呈现出三维空间特性<sup>[17]</sup>。一般认为二维分析方法忽略了滑动面的三维空间效应,会得到相对保守的分析结果。而在土体强度参数反演过程中,二维分析方法则得到偏于危险的分析结果<sup>[18]</sup>。实际边坡工程往往呈现三维空间破坏,为了更合理地分析边坡的稳定性,开展三维边坡稳定性分析方法的研究十分必要<sup>[17]</sup>。因此,本文在已有研究的基础上,将拟动力法和极限平衡 Spencer 相结合,推导安全系数计算公式并编写相应的计算程序,分析几何参数、土体参数及波动效应对边坡拟动力安全系数的影响规律。

## 1 计算方法

### 1.1 基于拟动力的 Spencer 法

边坡稳定性分析三维极限平衡分析方法将滑体划分成具有竖直界面的条块,条块的划分和单个条块上的作用力如图 1 所示。极限平衡法通过边坡滑体在极限状态下力系和力矩平衡来得到问题的解答。

一般情况下问题是超静定的,极限平衡法通过引入一些假设条件,使问题变得静定可解。虽然假设条件的引入破坏了方法的严格性,但是对计算结果影响不大<sup>[19]</sup>。三维 Spencer 法分析滑体力系和力矩平衡时,引入如下假定:

(1)安全系数  $F_s$  定义为土体实际抗剪强度与使边坡保持极限平衡状态的土体抗剪强度之比,即

$$F_s = \frac{c}{c_d} = \frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_d} \quad (1)$$

式中, $c$ 、 $\varphi$  分别是土体的有效黏聚力和有效内摩擦角, $c_d$ 、 $\varphi_d$  分别为边坡极限状态时土体的有效黏聚

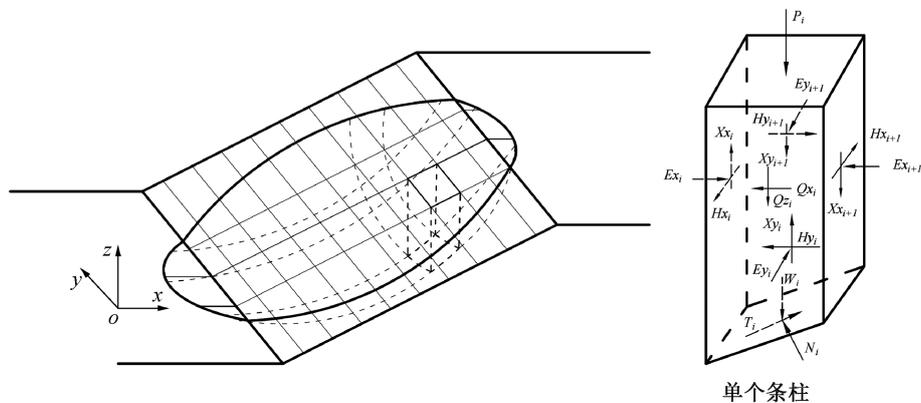


图 1 滑动体条块划分和条块上的作用力

Fig. 1 Division of sliding blocks and forces acting on the blocks

力和有效内摩擦角,单位分别为 kPa 和( $^{\circ}$ )。

(2)采用摩尔-库伦破坏准则。

$$T_i = (N_i - u_i \cdot A_i) \tan \varphi_d + c_d \cdot A_i \quad (2)$$

式中, $T_i$ 为条块底部的切向作用力,kN; $N_i$ 为条块底部的法向作用力,kN; $u_i$ 为孔隙水压力系数; $A_i$ 为条块的底面积, $m^2$ 。

不考虑条块垂直  $y$  轴平面上的条间作用力  $X_{y_i}$ 、 $E_{y_i}$ 、 $H_{y_i}$  和垂直  $x$  轴平面上的水平方向切向作用力  $H_{x_i}$ ,假设垂直  $x$  轴平面上的法向作用力  $E_{x_i}$  和切向作用力  $X_{x_i}$  存在如下关系:

$$X_{x_i} = \lambda \cdot E_{x_i} \quad (3)$$

式中, $\lambda$ 为条间作用力系数。

(3)假定条块底部切向作用  $T_i$  平行于  $xoz$  平面。

根据  $N_i$  和  $T_i$  相互垂直以及方向余弦的基本性质可得

$$\begin{cases} m_{x_i}^2 + m_{y_i}^2 + m_{z_i}^2 = 1 \\ m_{x_i} \cdot n_{x_i} + m_{y_i} \cdot n_{y_i} + m_{z_i} \cdot n_{z_i} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $(n_{x_i}, n_{y_i}, n_{z_i})$ 和 $(m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i})$ 分别为条块底部法向作用  $N_i$  和切向作用  $T_i$  的方向余弦。 $(n_{x_i}, n_{y_i}, n_{z_i})$ 可通过底滑面法线的方向倒数得出。

建立  $x, z$  方向的静力平衡方程:

$$\begin{cases} -W_i + N_i \cdot n_{z_i} + X_{x_i} - X_{x_{i+1}} + T_i \cdot m_{z_i} - Q_{z_i} = 0 \\ N_i \cdot n_{x_i} + E_{x_i} - E_{x_{i+1}} + T_i \cdot m_{x_i} - Q_{x_i} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $W_i$ 为条块的重量,kN; $Q_{x_i}$ 和 $Q_{z_i}$ 分别为水平和竖向的地震力,kN。根据  $N_i$  和  $T_i$  相互垂直以及方向余弦的基本性质可得

$$\begin{cases} m_{x_i}^2 + m_{y_i}^2 + m_{z_i}^2 = 1 \\ m_{x_i} \cdot n_{x_i} + m_{y_i} \cdot n_{y_i} + m_{z_i} \cdot n_{z_i} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据假定(3)可得  $m_{y_i} = 0$ ,代入式(6)可得

$$\begin{cases} m_{x_i} = n_{z_i} / \sqrt{n_{x_i}^2 + n_{z_i}^2} \\ m_{z_i} = -n_{x_i} / \sqrt{n_{x_i}^2 + n_{z_i}^2} \end{cases} \quad (7)$$

将式(2)带入式(5),可以求得  $N_i$ :

$$N_i = \frac{W_i + Q_{z_i} - \lambda \cdot Q_{x_i} - (c_e \cdot A_i - u_i \cdot A_i \cdot \tan \varphi_d) (-\lambda \cdot m_{x_i} + m_{z_i})}{-\lambda \cdot n_{x_i} + n_{z_i} + \tan \varphi_d (-\lambda \cdot m_{x_i} + m_{z_i})} \quad (8)$$

条块底部的切向力  $T_i$  通过式(2)求出。

建立  $x$  方向的整体力的平衡方程和绕  $y$  轴的力矩平衡方程:

$$\begin{cases} \sum F_x = N_i \cdot n_{x_i} + T_i \cdot m_{x_i} - Q_{x_i} = 0 \\ \sum M_y = (W_i + Q_{z_i} - N_i \cdot n_{z_i} - T_i \cdot m_{z_i}) \cdot X_i - (N_i \cdot n_{x_i} + T_i \cdot m_{x_i}) \cdot Z_i + Q_{x_i} \cdot Z_{Q_i} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $X_i$ 为条块竖向作用力的作用位置, $Z_i$ 为条块水平方向静力的作用位置, $Z_{Q_i}$ 为水平方向地震力的作用位置。三维 Spencer 法中包含的两个未知数  $F_s$ 、 $\lambda$ ,可通过求解方程组(9)得到。

## 1.2 滑动面搜索

本文使用“滑入滑出”法搜索临界滑动面和最小安全系数。潜在滑动面通过滑出点坐标、滑入点坐标及切线位置确定。如图2所示,其中滑入点范围  $L_1$  被等分为  $n_1$  份,滑出点范围  $L_2$  等分为  $n_2$  份,切线范围  $H$  等分为  $n_3$  份,最终生成  $n_1 \times n_2 \times n_3$  个不同的圆弧滑动面。采用 Bishop 法对每个圆弧滑动面的安全系数进行计算,从中找出最小安全系数及对应的滑动面。

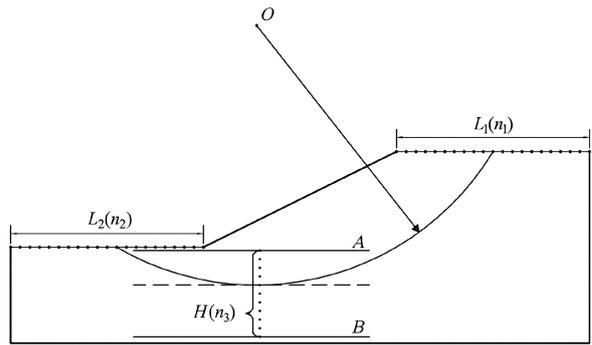


图2 滑动面搜索示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sliding surface search

## 1.3 地震力计算公式

拟动力是在拟静力的基础上,使用简谐波模拟地震波的传播。在  $t$  时刻,第  $i$  个条块的水平 and 竖向地震力计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} Q_{x_i} = k_h W_i \int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \sin[2\pi f_h(t - (H - z)/v_s)] dz \\ Q_{z_i} = k_v W_i \int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \sin[2\pi f_v(t - (H - z)/v_p)] dz \end{cases} \quad (10)$$

式中, $k_h$ 、 $k_v$ 分别为水平和竖向地震动系数; $f_h$ 、 $f_v$ 分别为横波和纵波的卓越频率; $v_s$ 、 $v_p$ 分别为横波和纵波波速; $z_{i1}$ 、 $z_{i2}$ 分别为第  $i$  个条块底部和顶部中点的坐标。竖向地震力的作用点和重力的作用点相同,水平方向地震力的作用点计算公式如下:

$$z_{hi} = \frac{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} z \cdot \sin[2\pi f_h(t - (H - z)/v_s)] dz}{\int_{z_{i1}}^{z_{i2}} \sin[2\pi f_h(t - (H - z)/v_s)] dz} \quad (11)$$

## 2 地震边坡稳定性影响因素分析

### 2.1 程序验证

算例 1 为一均质土坡,其几何形状和土体参数如图 3 所示。该算例是 Zhang<sup>[20]</sup>提供的椭圆滑面中的一个。张常亮<sup>[21]</sup>采用这一典型算例的参数进行分析来验证其方法和程序的正确性。如图 3 所示,边坡土体重度为  $\gamma = 19.2 \text{ kN/m}^3$ ,抗剪强度指标为  $\varphi = 20^\circ, c = 29.3 \text{ kN/m}^2$ 。使用本文方法对此算例重新计算,该算例静力条件下的安全系数为 2.128,与张常亮<sup>[21]</sup>所得结果 2.143 十分接近,相对误差为 0.7%。此外,本文还计算了安全系数随水平拟静力系数  $k_h$  的变化,如图 4 所示。从图中可以看出,安全系数随  $k_h$  的减小而逐渐减小,最终趋近于静力安全系数。该计算结果证明了本文方法和程序的正确性。

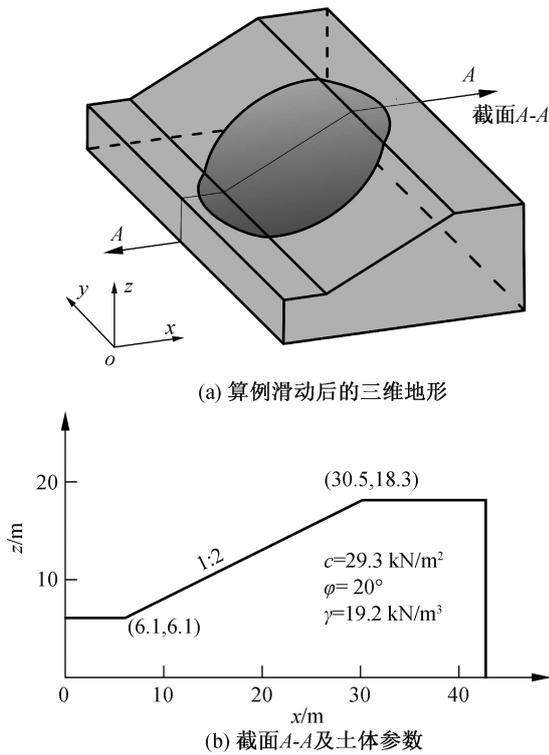


图 3 算例 1 几何形状  
Fig. 3 Geometry of example 1

算例 2 为一均质土坡,其几何形状如图 5 所示。算例 2 是邓亚虹等<sup>[14]</sup>使用二维边坡模型在三维空间上的拓展。邓亚虹等<sup>[14]</sup>使用该二维模型分析了初始相位、地震动幅值及波长与坡高比

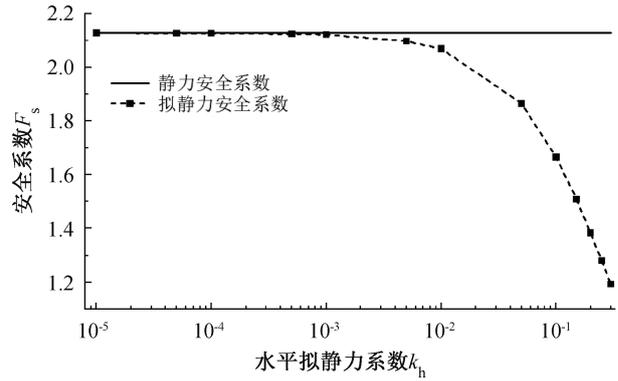


图 4 安全系数与水平拟静力系数的关系图  
Fig. 4 Relationship diagram between safety factor and horizontal quasi-static coefficient

对拟动力边坡安全系数的影响。本文将邓亚虹等<sup>[14]</sup>使用的算例拓展到三维空间,使用本文所述方法对此三维算例进行分析,探索边坡几何形状、土体参数及波动效应对边坡安全系数的影响规律。

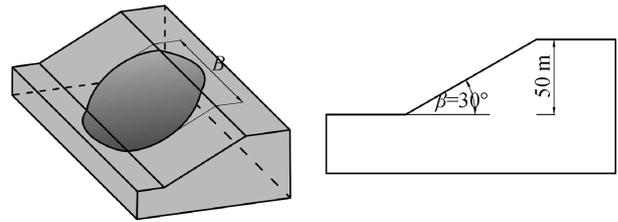


图 5 算例 2 几何形状  
Fig. 5 Geometry of example 2

### 2.2 边坡几何参数

#### 2.2.1 破坏面宽度

土体强度参数  $c = 41 \text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi = 20^\circ$ ,土体重度  $\gamma = 16.7 \text{ kN/m}^3$ ,坡角  $\beta = 30^\circ$ ,坡高  $H = 50 \text{ m}$ ,水平地震动系数  $k_h = 0.1$ ,横波卓越频率为  $f_h = 2 \text{ Hz}$ ,横波波速为  $v_s = 200 \text{ m/s}$ ,纵波的波动参数取值与横波相同,破坏面宽度  $B$  与坡高  $H$  的比值  $B/H = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0$ 。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ ,结果如图 6 所示。从图中可以看出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ ,两者之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随着  $B/H$  增大而减小,在  $B/H$  大于 5.0 以后基本不再变化。

#### 2.2.2 坡高

破坏面宽度与坡高的比值  $B/H = 5.0$ ,坡高  $H = 30, 40, 50, 60, 70 \text{ m}$ ,其他参数与 2.2.1 中的参数取值相同。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ ,结果如图 7

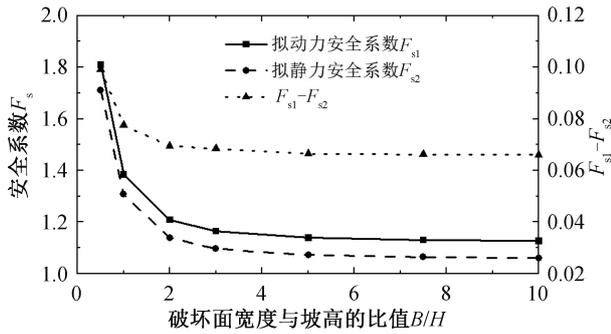


图6 安全系数与破坏面宽度和坡高比值的关系

Fig. 6 Relationship of the safety factor to the ratio of the width of the damage surface to the height of the slope

所示。从图中可以得出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ , 两者之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随  $H$  增大近似呈线性增大。

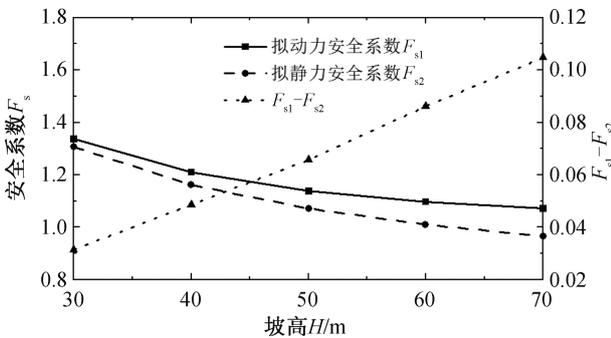


图7 安全系数随坡高的变化

Fig. 7 Variation of safety factor with slope height

### 2.2.3 坡角

破坏面宽度与坡高的比值  $B/H=5.0$ , 坡角  $\beta=20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ , 其他参数与 2.2.1 中的参数取值相同。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ , 结果如图 8 所示。从图中可以看出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ , 两者之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随着坡角  $\beta$  的增大而减小。

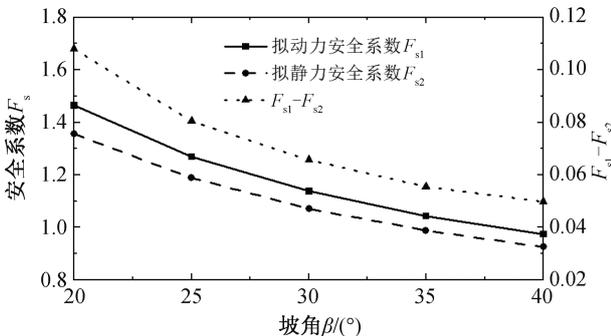


图8 安全系数与坡角的关系

Fig. 8 Relationship between safety factor and slope angle

## 2.3 土体参数

### 2.3.1 黏聚力

破坏面宽度与坡高的比值  $B/H=5.0$ , 黏聚力

$c=32, 35, 38, 41, 44, 47, 50$  kPa, 其他参数与 2.2.1 中的参数取值相同。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ , 结果如图 9 所示。从图中可以看出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ , 两者之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随着黏聚力  $c$  增大近似呈线性增大。

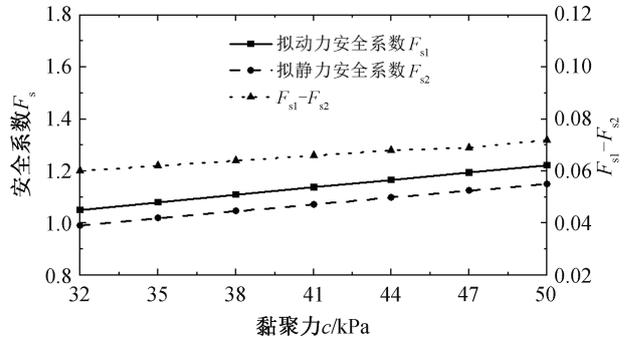


图9 安全系数与黏聚力的关系

Fig. 9 Relationship between safety factor and cohesion

### 2.3.2 内摩擦角

破坏面宽度与坡高的比值  $B/H=5.0$ , 内摩擦角  $\varphi=10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ , 其他参数与 2.2.1 中的参数取值相同。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ , 结果如图 10 所示。从图中可以看出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ , 两者之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随内摩擦角  $\varphi$  的增大而近似呈线性增大。

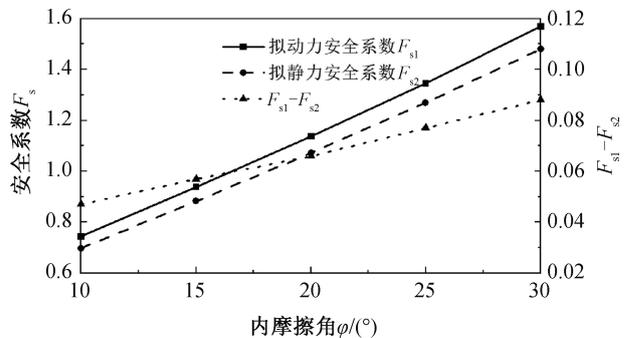


图10 安全系数与内摩擦角的关系

Fig. 10 Relationship between safety factor and angle of internal friction

## 2.4 波动效应对地震边坡稳定性影响

### 2.4.1 地震动幅值

破坏面宽度与坡高的比值  $B/H=5.0$ , 水平地震动系数  $k_h=0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ , 竖向地震动系数  $k_v=0.10$ , 其他参数与 2.2.1 中的参数取值相同。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ , 结果如图 11 所示。从图中可以看出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ , 两者

之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随着水平地震动系数  $k_h$  的增大而增大。

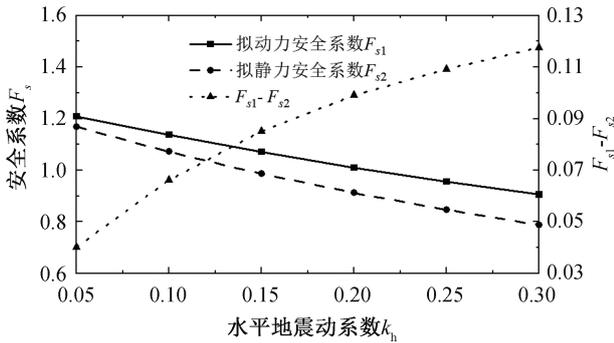


图 11 安全系数随水平地震动系数的变化趋势

Fig. 11 Variation trend of safety factor with horizontal seismic force coefficients

为了分析竖向地震动系数  $k_v$  对安全系数的影响,本文选取水平地震动系数  $k_h = 0.10$ , 竖向地震动系数  $k_v = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$ , 其他参数与 2.2.1 中的参数取值相同。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ , 结果如图 12 所示。从图中可以看出,  $F_{s2}$  始终小于  $F_{s1}$ , 两者之间的差值  $F_{s1} - F_{s2}$  随着  $k_v$  的增大近似保持不变。

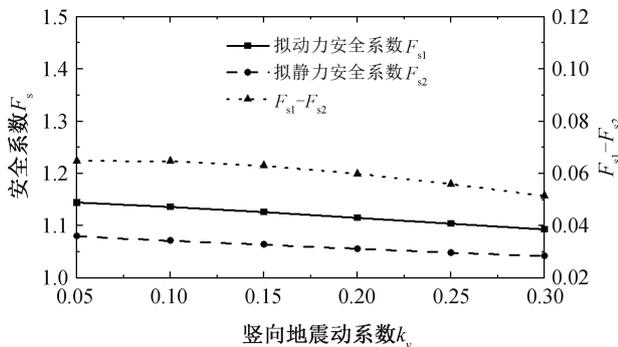


图 12 安全系数随竖向地震动系数的变化趋势

Fig. 12 Variation trend of the safety factor with the vertical seismic force coefficient

### 2.4.2 波长/坡高比

地震波的波长坡高比决定了拟动力安全系数的大小。地震波的波长  $\lambda$ , 横波卓越频率  $f$ , 横波波速  $v$  的关系式为  $\lambda = v/f$ , 本文通过改变  $f$  和  $v$ , 使得  $\lambda/H = 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.5, 17.5, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 40.0, 50.0$ 。使用本文所述方法计算边坡拟静力安全系数  $F_{s2}$  和拟动力安全系数  $F_{s1}$ , 结果如图 13 所示。从图中可以看出, 当  $\lambda/H$  接近于 0 时, 拟动力安全系数逐渐接近于静力安全系数; 当  $\lambda/H$  大于 10 时, 拟动力安全系数近似等于拟静力安全系数。

在分析地震动边坡的稳定性时,应根据边坡具体的坡高和地震波的波长范围,考虑选择拟静力法还是拟动力法分析边坡的稳定性。

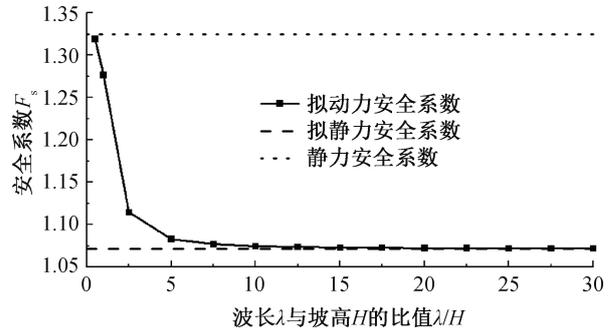


图 13 安全系数随  $\lambda/H$  的变化趋势

Fig. 13 Variation trend of safety factor with  $\lambda/H$

## 3 工程实例

Kettleman Hills 填埋场 (B-19 填埋场) 是一个 I 类危险废弃物填埋场,位于美国加利福尼亚州凯特曼城郊区,占地面积约为 3 600 m<sup>2</sup>,是一个典型的“山谷”型填埋场<sup>[22]</sup>。填埋场三维模型如图 14 所示,侧壁的坡度为 1:2 或 1:3,底部近乎水平,垃圾堆填高度约为 27.4 m。为了预防有毒液体物质渗透至周围土体,进而污染水循环、周边环境,影响人们的健康,填埋场的侧面和底部都铺设了防渗材料黏土和土工膜,并且进行了分层处理。

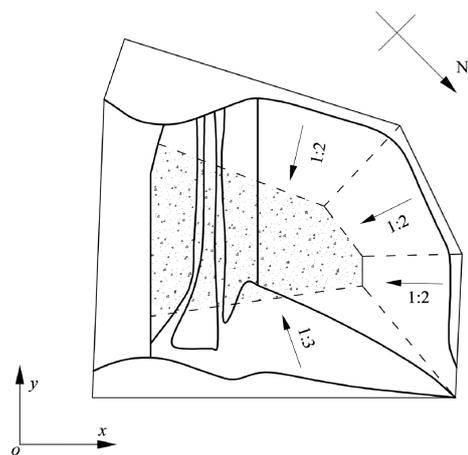


图 14 Kettleman Hills 填埋场示意图

Fig. 14 Schematic of the Kettleman Hills landfill site

1988 年 3 月 19 日, Kettleman Hills 填埋场发生整体失稳破坏,垃圾表面发生了竖向和水平位移,其最大位移量分别达到了 4.3、10.7 m,从填埋场失稳破坏造成的裂缝中可以清晰地观测到撕裂的复合衬垫系统。通过对 Kettleman Hills 填埋场

的实地观测考察,发现整个填埋场沿着土工合成材料和黏土的接触面发生了滑动破坏,这种情况主要是由于黏土和土工膜之间的抗剪强度过低所导致的。

自从1988年 Kettleman Hills 填埋场发生失稳破坏以来,已经有许多学者专家对该滑坡问题进行了深入研究。土工合成材料黏土接触面的抗剪强度参数会因实验设备和极限抗剪位移的不同而有所差异。Chang<sup>[23]</sup>对以往室内试验和边坡稳定性分析中的界面抗剪强度参数进行了总结,现场观测得到填埋场内部堆填物的天然重度为 $17.3\text{ kN/m}^3$ 。本文采用和 Seed 等<sup>[24]</sup>一样的土工合成材料黏土接触面的抗剪强度参数,侧壁衬垫系统的抗剪强度参数为 $c=0\text{ kPa}$ , $\varphi=8.5^\circ$ ;底部厚度小于 $17.7\text{ m}$ 部分的抗剪强度参数为 $c=0\text{ kPa}$ , $\varphi=8.0^\circ$ ;而厚度大于 $17.7\text{ m}$ 部分的抗剪强度参数为 $c=43.1\text{ kPa}$ , $\varphi=0.0^\circ$ 。水平地震动系数 $k_h=0.1$ ,横波卓越频率为 $f_h=2\text{ Hz}$ ,横波波速为 $v_s=200\text{ m/s}$ ,纵波的波动参数取值与横波相同。使用本文所述方法对 Kettleman Hills 填埋场进行分析,所得静力、拟动力和拟静力安全系数分别为 $1.065$ 、 $0.917$ 和 $0.452$ ,拟动力安全系数介于静力和拟静力安全系数之间,拟动力安全系数是拟静力安全系数的2倍左右。

#### 4 结论

本文结合拟动力法和极限平衡三维 Spencer 法推导了边坡安全系数计算公式,并编写了相应的计算程序,构建了基于拟动力的地震边坡稳定性三维分析方法,研究结果表明:

1) 拟动力和拟静力安全系数随着滑动面宽度的增大而增大,当宽高比大于5时,安全系数逐渐趋于稳定。

2) 拟动力安全系数始终大于拟静力安全系数,两者之间的差值随坡高和地震动系数的增大而增大,这与安全系数的变化规律不同,其他条件下均与安全系数的变化规律相同。

3) 拟动力安全系数随波长/坡高比的增大而减小,当波长/坡高比大于10时,拟动力安全系数近似等于拟静力安全系数。

#### 参考文献:

[1] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008(4): 433-444.

- [2] TERZAGHI K. Mechanism of landslides[J]. Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), 1950: 83-123.
- [3] 中国水利水电科学研究院. 水工建筑物抗震设计规范: DL 5073—2000[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [4] 中华人民共和国交通部. 公路工程抗震设计规范: JTJ 004—89[S]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [5] 朱磊, 高欣悦, 万愉快, 等. 地震力对边坡可靠度的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4324-4330.
- [6] PENG W, ZHAO M, ZHAO H, et al. Seismic stability of the slope containing a laterally loaded pile by finite-element limit analysis[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(1): 6021033.
- [7] STEEDMAN R S, ZENG X. The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall[J]. Geotechnique, 1990, 40(1): 103-112.
- [8] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic passive resistance by pseudo-dynamic method[J]. Geotechnique, 2005, 55(9): 699-702.
- [9] CHOUDHURY D, NIMBALKAR S. Seismic rotational displacement of gravity walls by pseudo-dynamic method: Passive case[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(3): 242-249.
- [10] NIMBALKAR S S, CHOUDHURY D. Effect of amplification on seismic stability of Tailings Dam [C]//Geo-Shanghai: Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2010: 340-346.
- [11] 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: 63-71.
- [12] NIMBALKAR S, ANNAPAREDDY V R, PAIN A. A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(6): 1082-1090.
- [13] HOU C, ZHANG T, SUN Z, et al. Seismic analysis of nonhomogeneous slopes with cracks using a discretization kinematic approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(9): 4019104.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525-529.
- [18] WAN Y, GAO Y, ZHANG F. A simplified approach to determine the unique direction of sliding in 3D slopes [J]. Engineering Geology, 2016, 211: 179-183.
- [19] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [20] ZHANG X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(6): 658-671.
- [21] 张常亮. 边坡稳定性三维极限平衡法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [22] 黄茂松, 王浩然, 宁兆轲. Kettleman Hills 填埋场三维稳定性极限上限分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 1994-2001.
- [23] CHANG M. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(8): 587-599.
- [24] SEED R B, MITCHELL J K, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. II: Stability analyses [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(4): 669-690.

(责任编辑 王利君)

(上接第 42 页)

## 参考文献:

- [1] 郭新新, 汪波, 刘锦超, 等. 软岩隧道锚固系统预紧力匹配性设计方法与实践 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 651-660.
- [2] SUN Xiaoming, ZHANG Bo, LI Gan, et al. Application of constant resistance and large deformation anchor cable in soft rock highway tunnel [J]. Advances in Civil Engineering, 2019(1): 4347302.
- [3] KANG Hongpu, GAO Fuqiang, XU Gang, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines-A review [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 37-65.
- [4] 吴拥政. 锚杆附件力学性能匹配性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 95-102.
- [5] 王祥厚, 蔡长安. 锚杆垫板与围岩间的解析解 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1996(1): 34-37.
- [6] 孟繁金, 张景隆. 锚杆用碟形托盘的改进研究 [J]. 矿业安全与环保, 1999(2): 23-24+27+49.
- [7] 刘双跃, 张训涛. 锚杆蝶形托盘合理参数研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1998(2): 65-67.
- [8] 王开松, 陈凯. 基于 ANSYS 的锚杆托盘强度分析及其压力实验 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2013, 33(1): 25-27.
- [9] KANG Hongpu, YANG Jinghe, MENG Xiaozhi. Tests and analysis of mechanical behaviours of rock bolt components for China's coal mine roadways [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(1): 14-26.
- [10] 吴建星, 康红普, 蔡嘉芳. 锚杆托盘的实验应力分析 [J]. 煤矿开采, 2009, 14(2): 58-60.
- [11] 袁溢, 漆泰岳. 全锚锚杆托板效应的数值模拟分析 [J]. 矿业工程, 2006(5): 65-67.
- [12] 杨更社, 何唐镛. 全长锚固锚杆的托板效应 [J]. 岩石力学与工程学报, 1991(3): 236-245.
- [13] 明治清, 顾金才, 张向阳, 等. 锚杆垫板形式对洞室抗爆效果的影响试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2991-2995.
- [14] 王书文, 付玉凯, 金峰, 等. 矿用锚杆托板动静载力学特性试验研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 35-40.
- [15] 林健, 石垚, 孙志勇, 等. 端部锚固锚杆预应力场分布特征的大型模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2237-2247.
- [16] CUI Lan, SHENG Qian, DONG You, et al. A quantitative analysis of the effect of end plate of fully-grouted bolts on the global stability of tunnel [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 114(2): 104010.
- [17] SEEGMILLER B L, REEVES J A. Cable bolt structure and related components; U. S. Patent 5,525,013 [P]. 1996-6-11.
- [18] 刘双跃, 张训涛. 锚杆蝶形托盘合理参数研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1998(2): 65-67.
- [19] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 222-231.
- [20] 郑仰发, 康红普, 鞠文君, 等. 锚杆拱形托板承载力试验与分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 437-443.
- [21] 莫晨聪. 地下工程中锚杆垫板适应性及其与杆体间力学特性关系研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [22] 宋继侠, 刘福林. 环板在局部均布和线性荷载共同作用下的塑性极限分析 [J]. 兵工学报, 1996(2): 188-192.
- [23] 中华人民共和国煤炭行业标准. 矿用锚索: MT/T 942—2005 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.

(责任编辑 王利君)