

基于 3DEC 的节理岩体边坡地震影响下的楔体稳定性分析

周家文, 徐卫亚, 石 崇

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 首先, 对于地震影响下节理岩体边坡的楔体滑动破坏, 给出不同情况下楔体滑动安全系数的计算公式; 然后, 分析滑面上法向力作用点位置变化的距离 l_i 和楔体的安全系数与剪切力和水平面的夹角 β_i , 水平地震力系数 k_h 和竖向地震力系数和水平地震力系数的比值 λ 之间的关系。分析结果表明, l_i 随着 β_i 和 k_h 的增大而增大, 但随着 λ 的增大而减小; 楔体的安全系数随着 β_i 和 k_h 的增大而减小, 但在同样大小的水平地震力系数下, 随着 λ 的增大而增大。最后, 分析考虑地震影响下楔体安全系数计算在 3DEC 中的实现过程, 并且给出计算过程中的 2 个重要步骤: 确定空间三角形的面积和四面体的体积以及确定两节理面的交线矢量。最后, 通过实例分析, 说明该理论分析的正确性及合理性。

关键词: 岩石力学; 节理岩体; 边坡; 楔体滑动; 稳定性分析

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3402 - 08

WEDGE STABILITY ANALYSIS OF JOINTED ROCKMASS SLOPE CONSIDERING SEISMIC INFLUENCES BASED ON 3DEC

ZHOU Jiawen, XU Weiya, SHI Chong

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: According to the wedge sliding failure of jointed rockmass slope under seismic loading, the safety factor calculation formulae of wedge sliding are given under different conditions, and the relationships among distance l_i of normal stress action point, the safety factor of wedge sliding and the angle of shear stress and horizontal plane β_i , horizontal seismic factor k_h , the ratio of vertical seismic factor and horizontal seismic factor λ are analyzed. Its shows that, l_i increases with β_i , k_h increasing, but decreases with λ increasing; at the same condition of horizontal seismic loading, the safety factor of wedge decreases with β_i , k_h increasing, but increases with λ increasing. Then the computation processes of the wedge sliding safety factor considering seismic influences in 3DEC are carried out, and two important steps in the compute process are given: the determination of the area of triangle, the volume of tetrahedron in 3D and the intersect line vector of two joint faces. Finally, an example is presented to explain the rationality of theoretical analysis.

Key words: rock mechanics; jointed rockmass; slope; wedge sliding; stability analysis

收稿日期: 2007 - 04 - 17; **修回日期:** 2007 - 05 - 14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707); 国家自然科学基金重点项目(50539110)

作者简介: 周家文(1982 -), 男, 2003 年毕业于华东交通大学建筑工程系, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: hhzjw@hhu.edu.cn

1 引 言

节理岩体边坡及其开挖的稳定性问题一直是岩土工程中比较关注的问题^[1~3]。在岩体边坡稳定性分析中, 比较常用的方法有: 刚体极限平衡法、有限元法、离散单元法等。对于节理岩体边坡来说, 经常会发生楔体滑动破坏, 所以研究节理岩体边坡楔体稳定性问题很有意义。陈安敏等^[4]采用地质力学模型试验方法, 研究了边坡双滑面楔体稳定性和锚固效应问题; 李爱兵和周先明^[5]在对露天采场南帮边坡临滑体区域进行工程地质调查的基础上, 对该边坡进行了三维楔体稳定性分析; Z. Y. Chen 等^[6, 7]从塑性力学角度出发, 在理论上对楔体的稳定性问题进行分析, 从而证明了边坡稳定性分析的“最大最小原理”; W. S. Yoon 等^[8]从地质力学角度出发, 对楔体的稳定性进行了研究; H. Park 和 T. R. West^[9]基于可靠度理论, 分析了可能发生楔体破坏的概率; 曹兴松和周德培^[10]从楔体稳定性的角度出发, 分析了边坡开挖影响范围和潜在滑动面问题; 陈 菲和邓建辉^[11]采用三维强度折减有限元法分析了边坡楔体稳定性问题。对于受到地震影响下的楔体稳定性问题, 研究地震对楔体稳定性的影响非常重要, H. I. Ling 等^[12~15]对考虑了地震影响下的楔体滑动稳定性进行了分析, 得到了地震影响下楔体稳定性的一些非常有意义结论。

本文首先分析了节理岩体边坡在地震影响下楔体的安全系数计算公式, 得到了地震力对楔体稳定性影响的基本规律。然后通过利用 3DEC 来实现地震影响下楔体的安全系数计算过程, 并且给出了计算过程的 2 个重要步骤: 确定空间三角形的面积和四面体的体积以及确定 2 条节理面的交线矢量。通过对一实例楔体进行稳定性分析, 表明利用 3DEC 来计算地震影响下的楔体稳定性是正确合理的, 并且计算效率比较高。

2 地震影响下楔体稳定性分析

2.1 单滑动面楔体稳定性分析

不考虑地震的影响, 单滑动面楔体破坏的形式和赤平投影分析如图 1 所示。

单滑动面楔体滑动破坏的安全系数计算如下:

$$F_s = \frac{N_i \tan \varphi_i + c_i A_i}{S_i} \quad (1)$$

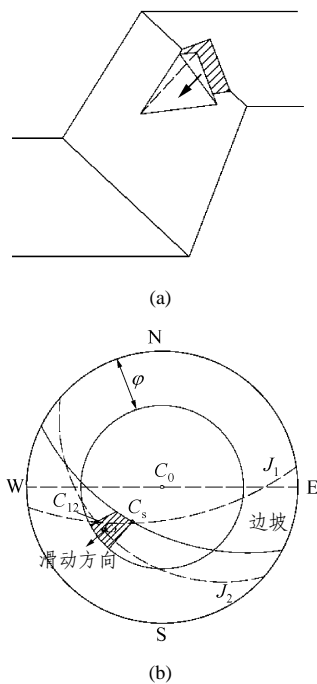


图 1 单面楔体滑动破坏
Fig.1 Single plane wedge sliding failure

式中: A_i 为滑面 i 的面积; c_i , φ_i 分别为滑面 i 的黏聚力和内摩擦角。

以下考虑地震影响之后单滑面楔体的稳定性, 沿滑体重心取一竖直剖面, 首先了解在地震影响下滑面上反力作用点位置的变化。在没有地震影响下的作用点为 o_i , 地震影响下的作用点为 o'_i ; l_i 为作用点位置变化 (o_i 变化到 o'_i) 的距离; β_i 为剪切力与水平面的夹角; W_i 为滑体的重力; N_i , S_i 分别为在没有地震影响下滑面 i 上的法向力和剪切力; N'_i , S'_i 分别为考虑地震影响下滑面上的法向力和剪切力; k_v , k_h 分别为竖向和水平地震力系数, 并且令 $\lambda = k_v / k_h$ 。

在没有地震影响下, 法向和剪切方向的应力分量分别为

$$N_i = W_i \cos \beta_i \quad (2a)$$

$$S_i = W_i \sin \beta_i \quad (2b)$$

为了保证力矩平衡, 对重心点求矩, 不考虑地震影响下, 滑面上反力的作用位置在点 o_i , 即重心沿竖直方向与滑面的交点, 这里假定重心到交点的距离为 h_i (见图 2(a))。

滑体受到地震力影响之后, 法向和剪切方向的应力分量分别为

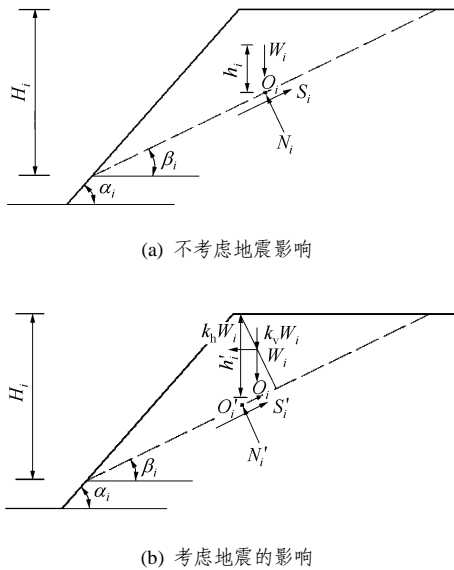


图2 单滑面楔体力学状态

Fig.2 Wedge mechanics status of single sliding face

$$N'_i = [(1 + k_v) \cos \beta_i - k_h \sin \beta_i] W_i \quad (3a)$$

$$S'_i = [(1 + k_v) \sin \beta_i + k_h \cos \beta_i] W_i \quad (3b)$$

为了满足力矩平衡，同样对重心点求矩，在地震力作用下，滑面上反力的作用点位置在向下移动(见图2(b))，力矩平衡要满足下式：

$$N'_i h'_i \sin \beta_i = S'_i h_i \cos \beta_i \quad (4)$$

将式(3a)和(3b)代入式(4)，化简可得

$$h'_i = \frac{(1 + k_v) \sin \beta_i \cos \beta_i + k_h \cos \beta_i \cos \beta_i}{(1 + k_v) \sin \beta_i \cos \beta_i - k_h \sin \beta_i \sin \beta_i} h_i \quad (5)$$

$$h'_i - h_i = \frac{k_h}{(1 + k_v) \sin \beta_i \cos \beta_i - k_h \sin \beta_i \sin \beta_i} h_i \quad (6)$$

由此可得在地震力影响下，滑面上的反力作用点向下移动的距离 l_i 为

$$l_i = (h'_i - h_i) \sin \beta_i = \frac{k_h}{(1 + k_v) \cos \beta_i - k_h \sin \beta_i} h_i \quad (7)$$

从图3中可以看出， l_i 随着 β_i ， k_h 的增大而增大，但随着 λ 的增大而减小。 l_i 的增大或减小代表着 S'_i/N'_i 的增大或减小，这种现象反映到楔体的安全系数中去，表现为楔体的安全系数随着 β_i 的增大而减小，随着 k_h 的增大而减小；但在同样大小的水平地震力系数，楔体的安全系数随着 k_v 的增大而增大。

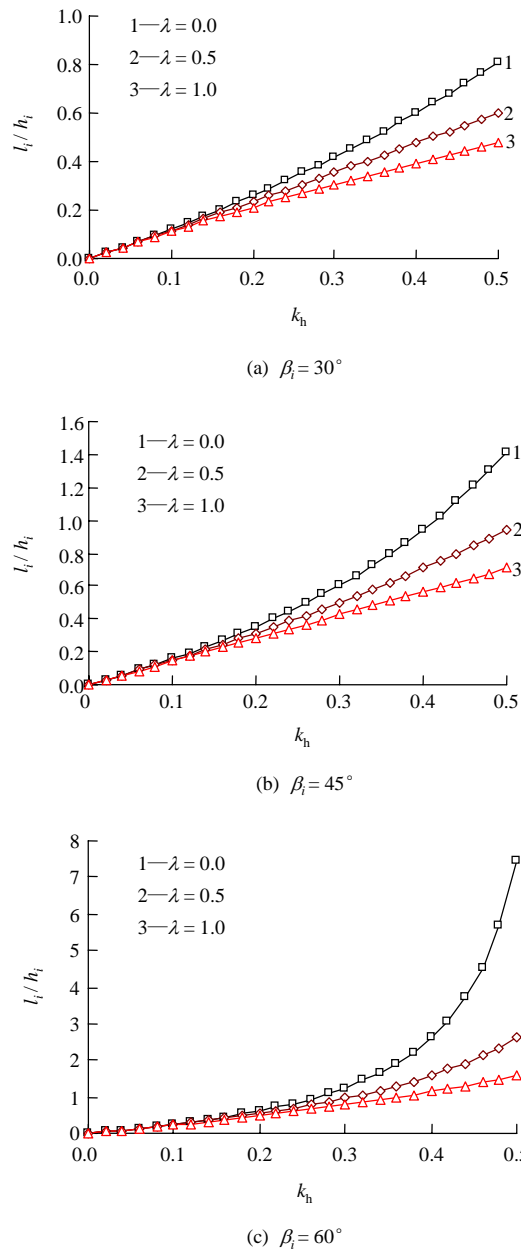


图3 l_i/h_i 与 β_i ， k_h 和 k_v 之间的变化曲线
Fig.3 Variation curves of l_i/h_i vs. β_i ， k_h and k_v

根据式(1)，(3a)，(3b)，可以得到在地震作用下楔体的安全系数为

$$F'_s = \frac{N'_i \tan \varphi_i + c_i A_i}{S'_i} = \frac{[(1 + k_v) \cos \beta_i - k_h \sin \beta_i] W_i \tan \varphi_i + c_i A_i}{[(1 + k_v) \sin \beta_i + k_h \cos \beta_i] W_i} \quad (8)$$

由式(8)可知，楔体的安全系数随着滑面上的黏聚力和内摩擦角的增大而增大。式(8)中影响 F'_s 的参数太多，下面假设 $\varphi_i = 45^\circ$ ， $c_i A_i / W_i = 0.5$ ，研究 β_i ， k_h 和 k_v 对楔体安全系数的影响。

从图 4 中可以看出, 楔体的安全系数随着 β_i , k_h 和 k_v 的变化情况充分反映了前面的描述。通过上述的理论分析, 可以了解 c_i , φ_i , β_i , k_h 和 k_v 对于楔体稳定性影响的基本规律。

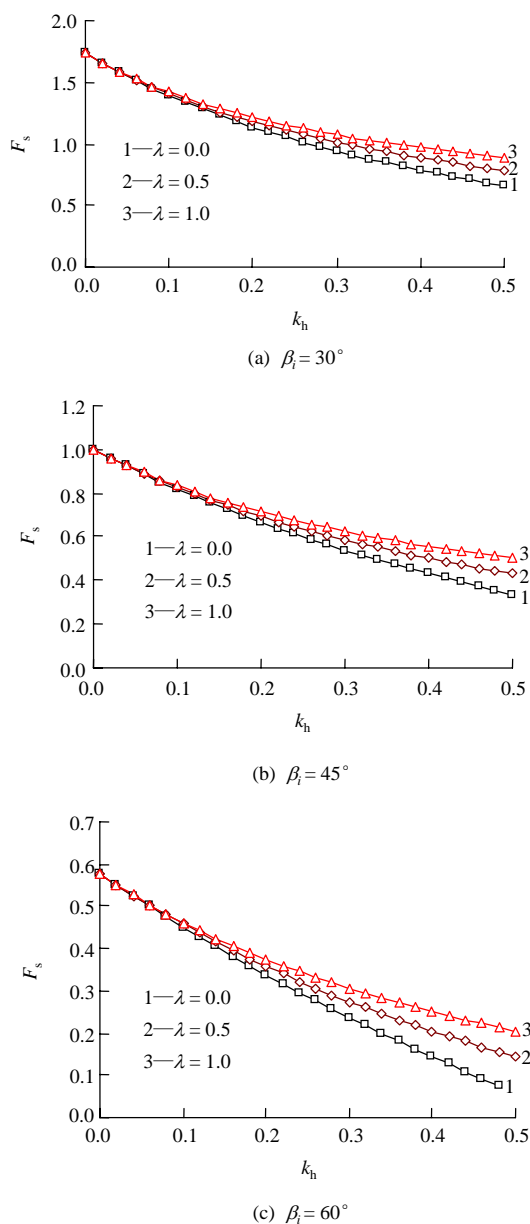


图 4 楔体安全系数与 β_i , k_h 和 k_v 之间的变化曲线
 Fig.4 Curves of safety factor of wedge with β_i , k_h and k_v

2.2 双滑动面楔体稳定性分析

双滑动面楔体破坏的形式和赤平投影分析如图 5 所示。

在不考虑地震力影响情况下, 双滑动面楔体滑动破坏的安全系数计算公式如下:

$$F_s'' = \frac{N_i \tan \varphi_i + N_j \tan \varphi_j + c_i A_i + c_j A_j}{S_{ij}} \quad (9)$$

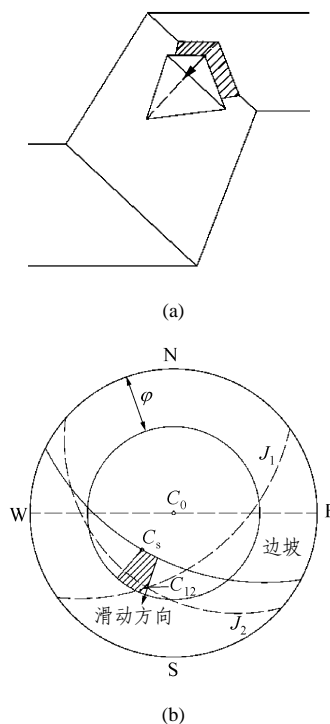


图 5 双面楔体滑动破坏
 Fig.5 Double-plane wedge sliding failure

式中: N_j 为滑面 j 上的法向应力分量, A_j 为滑面 j 的面积, c_j 为滑面 j 的黏聚力, φ_j 为滑面 j 的内摩擦角, S_{ij} 为两滑面交线上的剪切应力分量。假设 $\vec{S}_i // \vec{S}_j // \vec{S}_{ij}$ 。

在考虑地震力影响情况下, 对于双滑动面楔体来说, 沿节理面的交棱线作一垂面, 把楔体分割为 2 个独立的单滑面楔体(见图 6)。

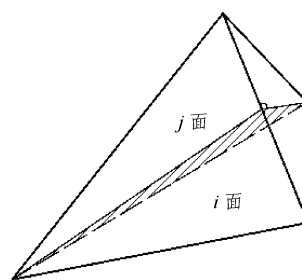


图 6 双滑面楔体的分割
 Fig.6 Wedge partition of double sliding faces

由前面的分析可知, 滑面 i 和 j 上的力学状态如图 7 所示。

滑面 i 上的法向应力和剪切应力可表示为

$$N'_i = [(1 + k_v) \cos \beta_i - k_h \sin \beta_i] W_i \quad (10a)$$

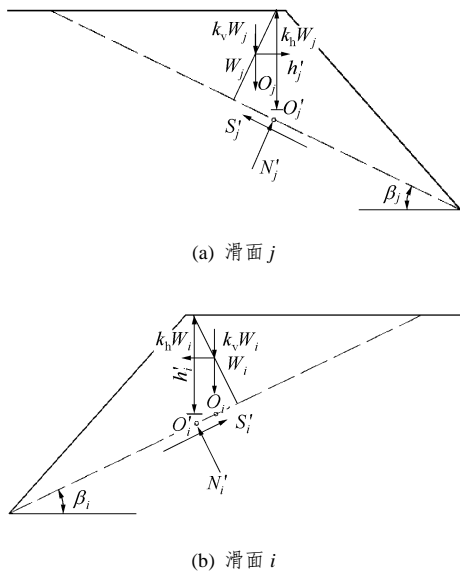


图7 双滑面楔体力学状态

Fig.7 Wedge mechanics status of double sliding faces

$$S'_i = [(1 + k_v) \sin \beta_i + k_h \cos \beta_i] W_i \quad (10b)$$

滑面 j 上的法向应力和剪切应力可表示为

$$N'_j = [(1 + k_v) \cos \beta_j - k_h \sin \beta_j] W_j \quad (11a)$$

$$S'_j = [(1 + k_v) \sin \beta_j + k_h \cos \beta_j] W_j \quad (11b)$$

又由于

$$W_{ij} = W_i + W_j \quad (12)$$

$$S'_{ij} = S'_i + S'_j \quad (13)$$

故结合式(9), (10a)~(13), 可以得到双滑动面楔体在地震力影响下的安全系数为

$$F_s^m = \frac{N'_i \tan \varphi_i + N'_j \tan \varphi_j + c_i A_i + c_j A_j}{S'_{ij}} \quad (14)$$

3 楔体稳定性分析在 3DEC 中的实现

在 3DEC 中, 可以很方便地对岩体边坡进行节理切割, 在考虑地震影响下节理岩体边坡的楔体稳定性分析过程中, 地震力相当于在重心位置作用了一个水平力和竖向力。在计算过程中 2 个重要步骤是确定楔体滑面上的法向力和剪切力以及确定楔体滑面的面积, 而确定楔体滑面上的法向力和剪切力则先需要确定 2 个节理面交线的矢量。有了这些

计算过程, 就可以确定楔体在地震影响下的安全系数。

3.1 空间三角形面积和四面体体积的计算

在考虑地震影响下的楔体稳定性分析中, 需要计算楔体滑面的面积 A_i 和 A_j , 以及滑体的体积 V_i 和 V_j , 其计算公式如下:

(1) 空间三角形(见图 8)面积的计算

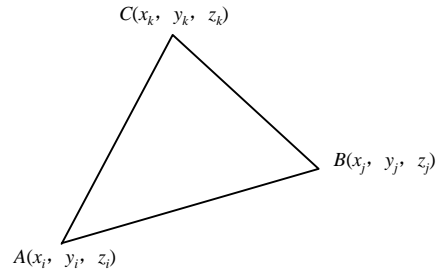


图8 空间三角形

Fig.8 Three-dimensional triangle

已知空间上 3 个点的坐标为: $A(x_i, y_i, z_i)$, $B(x_j, y_j, z_j)$ 和 $C(x_k, y_k, z_k)$, 则有

$$\vec{AB} = \{(x_j - x_i), (y_j - y_i), (z_j - z_i)\} \quad (15a)$$

$$\vec{AC} = \{(x_k - x_i), (y_k - y_i), (z_k - z_i)\} \quad (15b)$$

则三角形面积的计算公式为

$$S_{\Delta ABC} = \frac{1}{2} \|\vec{AB} \times \vec{AC}\| \quad (16)$$

(2) 空间四面体(见图 9)体积的计算

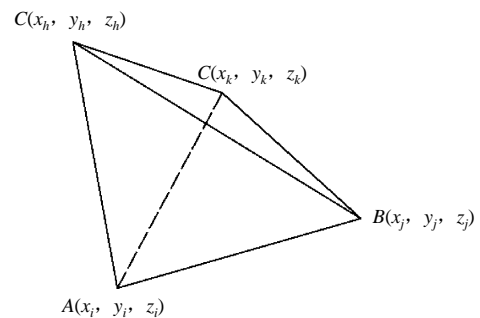


图9 空间四面体

Fig.9 Three-dimensional tetrahedron

已知空间上 4 个点的坐标为: $A(x_i, y_i, z_i)$, $B(x_j, y_j, z_j)$, $C(x_k, y_k, z_k)$ 和 $D(x_h, y_h, z_h)$, 则有

$$\vec{AB} = \{(x_j - x_i), (y_j - y_i), (z_j - z_i)\} \quad (17a)$$

$$\vec{AC} = \{(x_k - x_i), (y_k - y_i), (z_k - z_i)\} \quad (17b)$$

$$\overrightarrow{AD} = \{(x_h - x_i), (y_h - y_i), (z_h - z_i)\} \quad (17c)$$

则四面体体积的计算公式为

$$V_{ABCD} = \frac{1}{6} |(\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}) \cdot \overrightarrow{AD}| \quad (18)$$

3.2 两节理面交线的确定

在确定了如何计算空间三角形面积和空间四面体体积之后, 还要确定两节理面交线的位置, 由于在计算过程中涉及的大多是矢量的运算, 这里介绍一下如何计算交线的矢量, 图 10 给出了节理面 i 的产状。

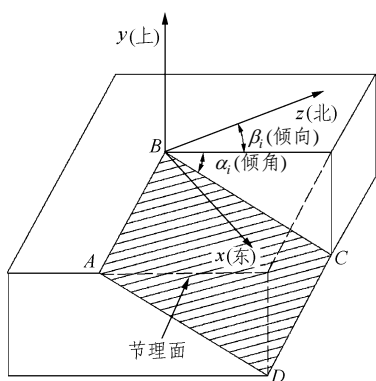


图 10 节理面 i 的产状

Fig.10 Specialty of structural plane i

由图 10 可知, 节理面 i 的法向矢量为

$$\overrightarrow{N}_i = (N_{i1}, N_{i2}, N_{i3}) =$$

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ -\cos \alpha_i \beta_i & -\cos \alpha_i \beta_i & \sin \alpha_i \\ \sin(\beta_i + \pi/2) & \cos(\beta_i + \pi/2) & 0 \end{vmatrix} \quad (19)$$

同理, 节理面 j 的法向矢量为

$$\overrightarrow{N}_j = (N_{j1}, N_{j2}, N_{j3}) =$$

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ -\cos \alpha_j \beta_j & -\cos \alpha_j \beta_j & \sin \alpha_j \\ \sin(\beta_j + \pi/2) & \cos(\beta_j + \pi/2) & 0 \end{vmatrix} \quad (20)$$

\overrightarrow{N}_{ij} 与 $\overrightarrow{N}_i, \overrightarrow{N}_j$ 同时垂直, 则

$$\overrightarrow{N}_{ij} = \overrightarrow{N}_i \times \overrightarrow{N}_j = \begin{vmatrix} i & j & k \\ N_{i1} & N_{i2} & N_{i3} \\ N_{j1} & N_{j2} & N_{j3} \end{vmatrix} \quad (21)$$

通过上面的分析确定了交线的矢量, 这样就得到了楔体稳定性计算时所需要的所有参数, 根据前

面考虑地震力影响下楔体安全系数计算公式就可以得到楔体的安全系数。

3.3 考虑地震影响下楔体滑动安全系数的计算

有了以上的分析, 就可以利用 Fish 语言编制考虑地震影响下楔体安全系数的计算程序, 楔体安全系数的计算过程如下:

(1) 先计算滑体体积和重力; 然后根据水平和竖直地震力系数计算水平和竖直方向上的地震力。

(2) 根据节理面的产状计算两节理面交线的矢量, 由此确定节理面交线与水平面的夹角, 进而可以求得两节理面上的法向和剪切应力分量。

(3) 先根据节理面的产状, 结合空间三角形面积的计算公式, 计算出两滑面的面积; 然后根据两滑面上黏聚力的大小就可以确定黏聚力对抗滑的贡献多少。

(4) 根据考虑了地震力影响下楔体滑动安全系数的计算公式来确定楔体的安全系数。

(5) 根据楔体安全系数的计算公式, 计算楔体在极限平衡状态下地震力系数大小, 即确定楔体稳定的极限地震力系数。

4 算例分析

为了分析地震力对楔体安全系数的影响, 采用如图 11 所示的算例楔体进行稳定性分析。

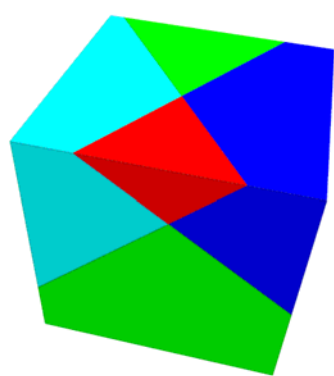


图 11 算例楔体

Fig.11 Example of wedge

岩体的容重 $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$, 重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。节理面 i 产状数据为: 倾角 $dip = 50^\circ$, 倾向 $dd = 235^\circ$; 节理面 j 产状数据为: 倾角 $dip = 40^\circ$, 倾向 $dd = 120^\circ$ 。

假设两节理面上的材料属性相同，其中： $c = 0.1 \text{ MPa}$ ， $\varphi = 30^\circ$ ， $k_h = k_s = 10 \text{ MPa/m}$ 。运用3DEC对上述楔体进行稳定性分析，在其他参数不变的情况下，分析不同 λ 下水平地震力系数对楔体稳定性的影响(见图12)。从图12中可以看出，楔体的安全系数随着水平地震力的增大而减小；在保持水平地震力系数不变的情况下，随着 λ 的增大而增大。

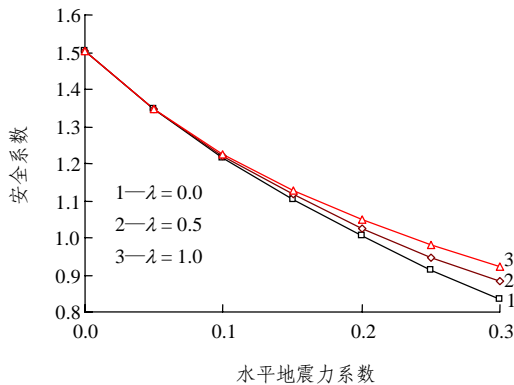


图12 水平地震力系数对楔体稳定性的影响
Fig.12 Seismic factor influence on the wedge stability

从图13中可以看出，楔体的安全系数随着节理面内摩擦角的增大而增大。从表1中可以看出，在保持水平地震力系数不变的情况下，楔体的安全系数随着 λ 的增大而增大。节理面黏聚力对楔体稳定性的影响如图14所示。

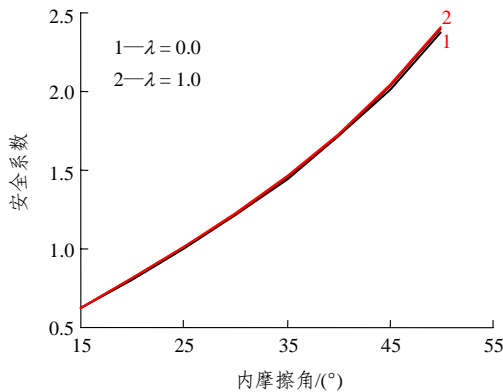


图13 节理面内摩擦角对楔体稳定性的影响($k_h = 0.1$)
Fig.13 Friction angle of joint face influence on the wedge stability($k_h = 0.1$)

从图14中可以看出，楔体的安全系数随着节理面黏聚力的增大而增大。

假设楔体处于极限平衡状态，即楔体的安全系数 $F_s = 1.0$ 时，在岩体力学参数、节理面的产状和力学参数不变的情况下，研究极限平衡状态下水平地震力系数随着 λ 的变化，计算结果如图15所示。

表1 不同内摩擦角下楔体的安全系数

Table1 Safety factor of wedge with different friction angles

$\varphi(^{\circ})$	$\lambda = 0.0$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 1.0$
15	0.629 39	0.629 47	0.629 55
20	0.811 13	0.813 04	0.814 79
25	1.004 80	1.008 70	1.012 20
30	1.215 00	1.221 00	1.226 40
35	1.447 50	1.455 80	1.463 50
40	1.710 40	1.721 30	1.731 40
45	2.015 00	2.028 90	2.041 80
50	2.377 90	2.395 50	2.411 70

注： $k_h = 0.1$ 。

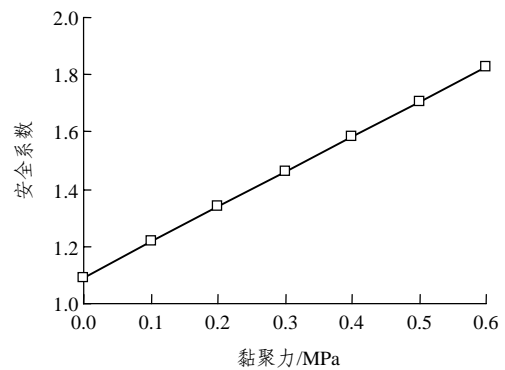


图14 节理面黏聚力对楔体稳定性的影响($k_h = 0.1$, $k_v = 0.0$)

Fig.14 Cohesion of joint face influence on the wedge stability ($k_h = 0.1$, $k_v = 0.0$)

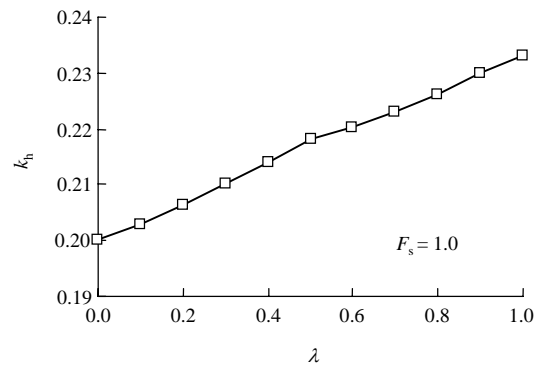


图15 极限平衡状态下 k_h 随着 λ 的变化曲线

Fig.15 Variation curve of k_h with λ in limit equilibrium status

从图15中可以看出，在地震的影响下， k_h 随着 λ 的增大而增大。

由此可知，楔体的稳定性随着节理面上内摩擦角和黏聚力的增大而增大；随着水平地震力系数的

增大而减小; 在同等水平的水平地震力下, 楔体的稳定性随着 λ 的增大而增大, 从而说明前面理论分析所得结论的正确性合理性。

5 结 论

(1) 对于节理岩体的单滑面楔体滑动, 从理论上分析了楔体安全系数的计算过程, 分析了滑面上法向力作用点的位置 o_i 与 o'_i 的距离 l_i 和楔体的安全系数与 β_i , k_h 和 k_v 之间关系。理论分析结果表明, l_i 随着 β_i 的增大而增大, 随着 k_h 的增大而增大, 随着 λ 的增大而减小; 楔体的安全系数随着 β_i 的增大而减小, 随着 k_h 的增大而减小, 但在同样大小的水平地震力系数, 楔体的安全系数随着 k_v 的增大而增大。

(2) 对于双滑动面楔体来说, 沿节理面的交棱线作一垂面, 把楔体分割为 2 个独立的单滑面楔体, 得到了楔体的安全系数计算公式。

(3) 分析了在考虑地震影响下楔体的安全系数计算在 3DEC 中的实现过程, 并且给出了计算过程中的 2 个重要步骤: 确定空间三角形的面积和四面体的体积以及确定两节理面的交线矢量。

(4) 对具体实例楔体进行稳定性分析, 其计算结果表明: 楔体的稳定性随着节理面上内摩擦角和黏聚力的增大而增大; 随着水平地震力系数的增大而减小; 在同等水平的水平地震力下, 楔体的稳定性随着 λ 的增大而增大, 进一步说明了理论分析所得结论的正确性合理性。

参考文献(References):

- [1] HOEK E, BRAY J. Rock slope engineering[M]. 3rd ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- [2] GOODMAN R E. Introduction to rock mechanics[M]. 2nd ed. New York: John and Wiley Inc., 1989.
- [3] HUDSON J A. Rock engineering systems: theory and practice[M]. New York: Ellis Horwood, 1992.
- [4] 陈安敏, 顾欣, 顾雷雨, 等. 锚固边坡楔体稳定性地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 092 - 2 101. (CHEN Anmin, GU Xin, GU Leiyu, et al. Geomechanical model test research on stability of reinforced wedge-shaped rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 092 - 2 101.(in Chinese))
- [5] 李爱兵, 周先明. 露天采场三维楔形滑坡体的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 52 - 55. (LI Aibing, ZHOU Xianming. Stability study of three-dimensional wedge sliding blocks in open-pit slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 52 - 55.(in Chinese))
- [6] CHEN Z Y. A generalized solution for tetrahedral rock wedge stability analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 613 - 628.
- [7] 陈祖煜, 汪小刚, 邢义川, 等. 边坡稳定分析最大原理的理论分析和试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 495 - 499. (CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, XING Yichuan, et al. Theoretical study and physical modeling on principle of maximum in slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 495 - 499.(in Chinese))
- [8] YOON W S, JEONG U J, KIM J H. Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes[J]. Engineering Geology, 2002, 67(1): 51 - 61.
- [9] PARK H, WEST T R. Development of a probabilistic approach for rock wedge failure[J]. Engineering Geology, 2001, 59(2): 233 - 251.
- [10] 曹兴松, 周德培. 边坡开挖影响范围和潜在滑面的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 882 - 2 886. (CAO Xingsong, ZHOU Depei. Study on slope cut-induced influence zone and potential slide surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2 882 - 2 886.(in Chinese))
- [11] 陈菲, 邓建辉. 岩坡稳定的三维强度折减法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 546 - 2 551. (CHEN Fei, DENG Jianhui. Three-dimensional stability analysis of rock slope with strength reduction method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 546 - 2 551.(in Chinese))
- [12] LING H I, MOHRI Y, KAWABATA T. Seismic analysis of sliding wedge: extended Francais-Culmann's analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(3): 387 - 393.
- [13] NOURI H, FAKHER A, JONES C J F P. Development of Horizontal slice Method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(2): 175 - 187.
- [14] KUMSAR H, AYDANO, ULUSAY R. Dynamic and static stability assessment of rock slope against wedge failures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(1): 31 - 51.
- [15] LING H I, CHENG A D H. Rock sliding induced by seismic force[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(6): 1 021 - 1 029.