

基于坐标输入的电算化边坡稳定性分析

陈晓磊¹,孙树林¹,尚文涛²,韩孝峰¹,程亚男¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210098;2. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要: GPS 由于其精度高,可操作性强等诸多优点而被广泛应用于边坡稳定勘查中,但其却不能直接运用 GPS 所测得的坐标,还需要进行转化才能应用于边坡稳定性分析中。该文章在瑞典条分法的基础上,考虑地震动作用的影响,采用 Visual Basic 6.0 进行程序设计。通过工程实例并对结果进行分析,结果表明采用该文编制程序计算的结果与一般瑞典条分法所得结果相吻合,说明结果可靠。

关键词: 边坡;稳定分析;坐标;电算化;地震

中图分类号: TU457

文献标识码: A

The computerized program research on slope stability based on the coordinate input

CHEN Xiao-lei¹, SUN Shu-lin¹, SHANG Wen-tao², HAN Xiao-feng¹, CHENG Ya-nan¹

(1. Earth Science and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China;

2. Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China)

Abstract: Depending on high precision and feasibility, GPS is usually applied in slope stability analysis. Whereas, the coordinates measured by GPS need be transformed if they are applied in slope stability analysis. Considering impact of earthquake motion, the program basing on Swedish slice method was carried out by using Visual Basic 6.0 programming. The calculation results were verified by practical program and the results showed that calculation results obtained by program proposed were feasible and coordinated well with results obtained by Swedish slice method.

Key words: slope; stability analysis; coordinate; computerization; earthquake

通常在评价边坡稳定性时,多采用现场勘查测量,如传统的测量往往精度较低,测量距离短,并且对高程差也有限制,劳动强度大,可操作性较差。随着科学技术的发展,GPS^[1]广泛应用于边坡勘查,与传统的监测手段相比,其可操作性更强,精度更高。但是若将 GPS 测量得到的坐标应用于边坡稳定性分析中时,目前需要将其坐标转化为距离才行。本文旨在解决如何直接利用 GPS 测量得到的坐标进行边坡稳定评价的问题,通过运用自编程序,以更加方便快捷的得到边坡稳定的评价结果。

1 基本原理

1.1 安全系数的定义与公式

1) 基本假定。瑞典条分法^[2]是一种经典的边

坡稳定分析方法,瑞典条分法就是将滑动土体竖直分成若干土条,把土条当成刚体,分别求作用于各土条上的力对圆心的滑动力矩和抗滑力矩,然后求出土坡的稳定安全系数。其计算公式为

$$F_s = \frac{M_R}{M_r} = \frac{\sum(c_i l_i + w_i \cos\theta_i \tan\varphi_i)}{\sum w_i \sin\theta_i}$$

式中 F_s - 边坡稳定系数; c_i - 边坡土体内聚力; φ_i - 边坡土体内摩擦角; w_i - 第 i 条土条重; θ_i - 第 i 条土条底滑面的倾角; l_i - 第 i 条土条底滑面的长度。

参照极限平衡分析中最经典的瑞典条分法,考虑地震作用来分析边坡的稳定性。假定(1)滑动面是一个圆弧面,破坏形式为主动土体绕圆心产生微小转动。(2)滑动面上上的极限平衡条件符合 Mohr - Coulomb 破坏准则。(3)认为条块间

的作用力对边坡的稳定性影响不大,可以忽略。

(4)认为土坡是均质的。

2)公式推导。规定稳定性安全系数^[3-7]为

$$F_s = M_R / M_T \quad (1)$$

式中 M_R - 抗滑力矩; M_T - 滑动力矩。

设将滑动土体分成 n 条。取具有单位宽度的条块 i 进行分析,作用于条块 i 上的力有土体自重 W_i ,法向反力 N_i ,地面超载 Q_i ,如图1。

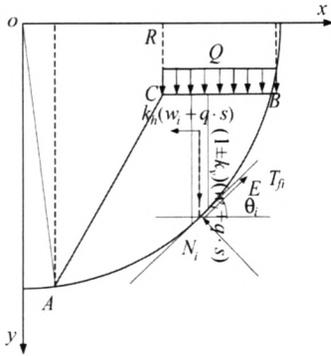


图1 边坡及滑动面尺寸示意图

Fig.1 Dimensions schematic diagram of slope and sliding surface

圆弧滑动面所在方程为 $x^2 + y^2 = R^2$ 。

图中各点的坐标分别为 $O(0,0)$, $A(a_x,$

$\sqrt{R^2 - a_x^2})$, $B(b_x, \sqrt{R^2 - b_x^2})$, $C(c_x, d)$ 。

$$q = \begin{cases} \frac{Q}{b_x - c_x} & (c_x \leq x \leq b_x) \\ 0 & (a_x < x < c_x) \end{cases} \quad (2)$$

$$s = \frac{b_x - a_x}{n} \quad (3)$$

根据径向力平衡条件,有

$$N_i = (1 \pm k_v)(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i + k_h(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i \quad (4)$$

式中 k_v - 竖直地震动系数; k_h - 水平地震动系数。

根据滑动面上的极限平衡条件,有

$$T_{fi} = c_i l_i + N_i \tan \varphi_i \quad (5)$$

式中 c_i - 粘聚力; φ_i - 内摩擦角; l_i - 第 i 条块的底边长。

将式(2)带入式(3),得

$$T_{fi} = c_i l_i + [(1 \pm k_v)(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i + k_h(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i] \tan \varphi_i \quad (6)$$

作用于滑动面上的力对圆心产生的滑动力矩和抗滑力矩分别为

$$M_T = R \cdot \sum_{i=1}^n [(1 \pm k_v)(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i + k_h(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i] \quad (7)$$

$$M_R = R \cdot \sum_{i=1}^n T_{fi} \quad (8)$$

将式(5)带入式(6),得

$$M_R = R \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n c_i l_i + \left[\sum_{i=1}^n [(1 \pm k_v)(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i + k_h(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i] \tan \varphi_i \right] \right\} \quad (9)$$

将式(5)、式(7)带入式(1),得

$$F_s = \left\{ \sum_{i=1}^n c_i l_i + \left(\sum_{i=1}^n [(1 \pm k_v)(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i + k_h(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i] \tan \varphi_i \right) \right\} / \sum_{i=1}^n [(1 \pm k_v)(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i + k_h(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i] \quad (10)$$

即为边坡整体稳定系数公式。

1.2 计算参数坐标化

x_i 为第 i 条土条中点出横坐标,若平均分成 n 条,则易得

$$x_i = b_x - \frac{b_x - a_x}{n} \cdot i \quad (11)$$

计算 BA 段的弧长 l 。有几何关系,可知

$$\cos \angle BOA = \frac{OA^2 + OB^2 - AB^2}{2OA \cdot OB} = \frac{a_x b_x + \sqrt{R^2 - a_x^2} \cdot \sqrt{R^2 - b_x^2}}{R^2}$$

所以 BA 段圆弧长为

$$R \cdot \arccos \angle BOA \quad (12)$$

计算 w_i 。有几何关系,可知横坐标为 x_i 处的圆弧上的倾斜角为

$$\theta_i = \arcsin \frac{x_i}{R} \quad (13)$$

设划分的条块宽度为 s ,计算第 i 条块的重量,用积分法使得计算结果更加精确。应用积分公式,可得

$$w_i = \gamma \left[\int_{x_i - \frac{s}{2}}^{x_i + \frac{s}{2}} \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{d - \sqrt{R^2 - a_x^2}}{c_x - a_x} (x - c_x) - d \, dx \right] = r \left[\frac{R}{2} \left(\sqrt{R^2 - x^2 - \frac{s^2}{4} - sx_i} - \sqrt{R^2 - x^2 - \frac{s^2}{4} + sx_i} \right) + \frac{R^2}{2} \left(\arcsin \frac{x_i + \frac{s}{2}}{R} \right) - \arcsin \frac{x_i - \frac{s}{2}}{R} \right] - \frac{d - \sqrt{R^2 - a_x^2}}{c_x - a_x} sx_i + \frac{s(a_x d - c_x \sqrt{R^2 - a_x^2})}{c_x - a_x} \quad (a_x \leq x_i \leq c_x) \quad (c_x < x_i < b_x) \quad (14)$$

$$w_i = \gamma \left[\int_{x_i - \frac{s}{2}}^{x_i + \frac{s}{2}} \sqrt{R^2 - x^2} - \frac{d - \sqrt{R^2 - b_x^2}}{c_x - b_x} (x - c_x) - d \, dx \right] + q \cdot s =$$

$$r \left[\frac{R}{2} \left(\sqrt{R^2 - x^2 - \frac{s^2}{4}} - sx_i - \sqrt{R^2 - x^2 - \frac{s^2}{4}} + sx_i \right) + \right.$$

$$\left. \frac{R^2}{2} \left(\arcsin \frac{x_i + \frac{s}{2}}{R} - \arcsin \frac{x_i - \frac{s}{2}}{R} \right) - \frac{d - \sqrt{R^2 - b_x^2}}{c_x - b_x} sx_i + \right.$$

$$\left. \frac{s(b_x d - c_x \sqrt{R^2 - b_x^2})}{c_x - b_x} \right] + q \cdot s \quad (c_x < x_x < b_x) \quad (15)$$

由于 Visual Basic 6.0 中无积分函数, 本文将式(12)、式(13)应用辛普森积分公式进行编程。

将式(2)、式(3)、式(11)、式(12)、式(13)代入式(10), 得

$$F_s = c \cdot R \arccos \frac{a_x b_x + \sqrt{R^2 - a_x^2} \cdot \sqrt{R^2 - b_x^2}}{R^2} +$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^n \left[(1 \pm k_r) \left(w_i + \frac{Q}{b_x - c_x} \cdot \frac{b_x - a_x}{n} \right) \cos \arcsin \frac{b_x - \frac{b_x - a_x}{n} \cdot i}{R} + k_h \left(w_i + \frac{Q}{b_x - c_x} \cdot \frac{b_x - a_x}{n} \cdot \frac{b_x - \frac{b_x - a_x}{n} \cdot i}{R} \right) \right] \right\}$$

$$\tan \varphi / \sum_{i=1}^n \left[(1 \pm k_r) \left(w_i + \frac{Q}{b_x - c_x} \cdot \frac{b_x - a_x}{n} \right) \cdot \frac{b_x - \frac{b_x - a_x}{n} \cdot i}{R} + k_h \left(w_i + \frac{Q}{b_x - c_x} \cdot \frac{b_x - a_x}{n} \cdot \cos \arcsin \frac{b_x - \frac{b_x - a_x}{n} \cdot i}{R} \right) \right] \quad (16)$$

式(16)即为坐标化后的安全系数表达式。

2 计算程序的编制

2.1 程序实现过程

边坡稳定性分析过程中, 边坡的形状、强度参数、附加荷载及地震动作用都对 F_s 产生较大影响, 通过对这些参数的输入, 使边坡稳定性系数计算得以程序化。

(1) 首先要确定边坡的几何形状, 输入边坡的坡脚、坡肩、坡顶、滑动圆心的坐标位置以及滑动面的滑动半径。(2) 输入边坡的强度参数 c, φ 值。(3) 对于边坡的附加荷载和地震动作用加以考虑, 输入附加荷载、水平地震动系数 k_h 、竖直地震动系数 k_v 。(4) 结合其它数据, 系统调用程序计算出边坡稳定性安全系数。

2.2 程序流程图及操作界面

利用以上的改进方法及计算公式, 结合工程实际, 根据程序框图(图2), 采用 Visual Basic 6.0 语言编制出相应的计算程序。该程序具有界面友好, 操作简单, 可视性和实用性较强, 计算结果合理, 精度较高等特点。操作人员可直接从界面上按提示输入初始数据, 操作方便。

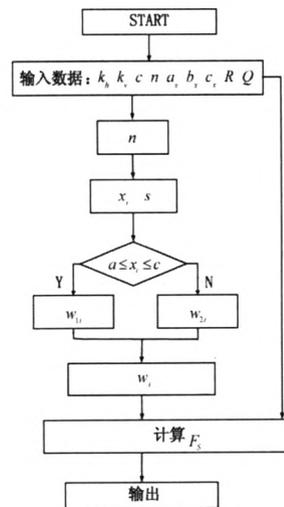


图2 程序流程图

Fig. 2 Program flow chart

3 算例分析

为了验证在该方法下的 Visual Basic 6.0 编程在边坡稳定性分析中是否准确, 现通过一实例说明。

一均质粘性土坡, 坡脚到坡顶高度为 15 m, 坡比 1:2。坡体土的天然重度 $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$, 粘聚力 c 为 40 kPa, 内摩擦角 φ 为 15° , 水平地震动系数 $k_h = 0.1$, 竖直地震动系数 $k_v = 0.05$, 附加荷载 505 kPa。边坡几何形状如图 3 所示。

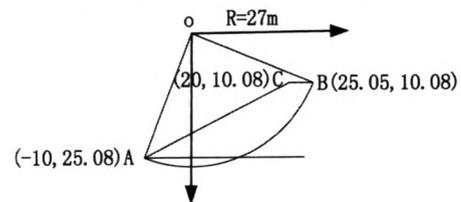


图3 边坡尺寸示意图

Fig. 3 Dimensions schematic diagram of slope

在对边坡进行稳定安全系数计算时, 分别对其采取一般瑞典条分法计算和应用此程序计算, 比较其稳定安全系数。

用一般瑞典条分法计算, 部分计算数据如表 1。

表 1 一般瑞典条分法的部分计算数据

Tab. 1 Partial calculating data of general Sweden method

土条 编号	s	l_i	$\sin a_i$	$\cos a_i$	$w_i + q \cdot s$ kN · m ⁻¹	安全系数计算
1	2.55	5.47	0.880 6	0.4739	375.33	
2	2.5	4.08	0.787 0	0.616 9	564.44	
3	4.0	5.39	0.666 7	0.745 4	691.47	$\sum c l_i = 1\ 691.12$
4	4.0	4.69	0.518 5	0.855 1	732.42	$\Sigma(1 + k_v)(w_i + q \cdot s) \cos \theta_i = 4\ 628.58$
5	4.0	4.31	0.370 4	0.928 9	772.98	$\Sigma k_h(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i = 200.69$
6	4.0	4.10	0.222 2	0.975 0	714.87	$\Sigma(1 + k_v)(w_i + q \cdot s) \sin \theta_i = 2\ 107.28$
7	4.0	4.01	0.074 1	0.997 3	606.06	$\Sigma k_h(w_i + q \cdot s) \cdot \cos \theta = 400.82$
8	3.0	3.00	-0.055 6	0.998 4	355.97	$F_s = 1.19$
9	3.0	3.04	-0.166 7	0.986 0	248.33	
10	4.0	4.18	-0.296 3	0.955 1	126.36	

注: $c_i = 40$ kPa $k_h = 0.1$ $k_v = 0.05$

表 2 本程序的部分计算数据

Tab. 2 Partial calculating data of this program

土条 编号	各土条中间 横坐标 x_i	各条块面积 /m ²	$w_i + q \cdot s$ /kN · m ⁻¹	安全系数计算
1	23.295 4	10.857 1	562.193 45	$\sum c_i \cdot l_i = 1\ 696.46$
2	19.790 7	27.436 6	689.293 7	$\Sigma(1 + k_v)(w_i + q \cdot s) \cos \arcsin \frac{x_i}{R} = 4\ 656.03$
3	16.285 9	33.244 1	648.259 95	
4	12.781 2	34.551 5	673.754 25	$\Sigma k_h(w_i + q \cdot s) \cdot \frac{x_i}{R} = 201.15$
5	9.276 4	34.507	672.886 5	
6	5.771 7	31.965 3	623.323 35	$\Sigma(1 + k_v)(w_i + q \cdot s) \cdot \frac{x_i}{R} = 2\ 112.10$
7	2.266 9	27.689 3	539.941 35	
8	-1.242 6	21.783 7	424.782 15	$\Sigma k_h(w_i + q \cdot s) \cdot \cos \arcsin \frac{x_i}{R} = 443.43$
9	-4.747 3	14.261 3	278.095 35	$F_s = 1.176$
10	-8.247 3	5.046 1	98.398 95	

由上可知,用一般瑞典条分法求得的 $F_s = 1.19$ 。采用该程序时,将程序所需的参数输入到指定位置,然后点击“输入完毕”按钮,可以快速的得到边坡稳定性安全系数。采用该程序计算的结果是 $F_s = 1.17$,其中部分计算数据见表 2。

用一般的条分法得到的 $F_s = 1.19$,而用坐标输入得到的 $F_s = 1.17$,由此可见程序计算的结果与手工计算的结果一致,因此,该程序在对均质土边坡的稳定性计算中是准确的。

在边坡稳定性分析中,粘聚力、土体的内摩擦角和地震作用都会对边坡的稳定性产生影响,现在我们根据该程序的运行结果来看一下其对 F_s 产生的不同影响。

运用程序运算结果绘制下图 4、图 5。由图 4 可见随着粘聚力的增大, F_s 也随之呈线性关系增大。由此可以根据已知的某粘聚力下边坡稳定性系数,推测出具有相同几何关系下的边坡在不同粘聚力下的边坡稳定性系数大小。

图 5 中,曲线呈上升趋势,且变化的斜率越来

越大。可见 F_s 随着内摩擦角的增大而增大,并且增大的速度越来越快。这说明边坡土体的内摩擦角大小对于边坡的稳定性起着重要的作用。

图 4,图 5 均表明,考虑地震作用时的 F_s 比不考虑地震作用的 F_s 要小,并且地震力越大,边坡的稳定性安全系数就越小。因此在实际边坡工程中要考虑地震作用对边坡稳定性的影响。

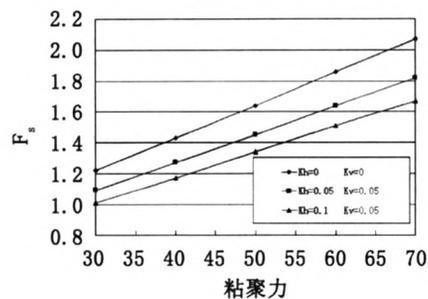


图 4 地震力系数与 F_s 关系图

Fig. 4 Variation of factor of safety (F_s) of the slope with Seismic force coefficient

(下转第 65 页)

石样品进行 Sn、Mo、Pb、Zn、Ag、Zr、Nb、Ga、Ba、Sr 10 种微量元素平均含量及浓度克拉克值对比,可看出,石英斑岩和白岗岩 Mo 的浓集程度远大于地层,地层中微量元素与这两者相应元素浓度克拉克值相差近两个数量级,石英斑岩中 Mo 的浓度略高白岗岩,石英斑岩中 Mo 浓度克拉克值达17.78^[6-10]。

综上,与宽坪群地层相比,本区成矿主元素 Mo 在石英斑岩体中强烈富集,呈强分异型分布,而地层中元素 Mo 分布相对贫乏,表现为较明显的亏损,可认为本区富集成矿的钼源自于岩浆岩中。

3 结论

1) 宽坪群地层中 Sn、Bi、Sb、Ag 四种元素富集,其中 Ag 呈明显富集, Mo 平均含量仅为 0.4×10^{-6} ,浓度克拉克值为0.2,可见本区地层中 Mo 较分散,可认为来自宽坪群地层中的 Mo 对于元素 Mo 富集成矿意义不大。

2) 本区成矿主元素 Mo 在石英斑岩体中强烈富集,形成了强烈的异常,研究区所依附的岩浆岩体主要就是石英斑岩,故可认为本区富集成矿的钼源自于岩浆岩中。

参考文献:

[1] 高洪学,李检禄,成学涛. 中元古界宽坪群岩石化学及

(上接第 57 页)

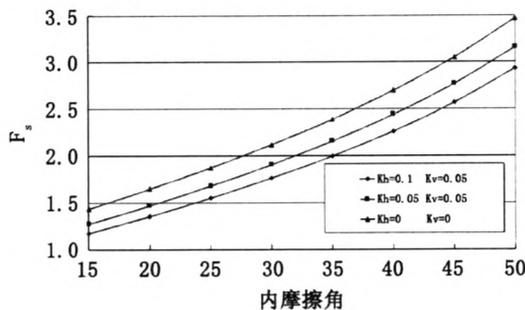


图5 内摩擦角与Fs关系图

Fig.5 Variation of factor of safety (FS) of the slope with angle of inclination

4 结语

本文编制成 Visual Basic 程序,能够快速准确的计算和判定边坡的稳定性,经算例分析表明其计算结果可靠。从而使得在边坡的稳定性评价中能够方便地运用 GPS 的测量结果,大大的提高了工作效率。

微量元素特征[J]. 陕西地质,1989,7(1): 11-27.

[2] 练翠侠,欧阳志强,贺忠春. 陕西省商洛市潘河钼矿地质特征及成因分析[J]. 矿床地质,2011,30(3): 448-456.

[3] 简伟,柳维,石黎红. 斑岩型钼矿床研究进展[J]. 矿床地质, 2010,29(2): 308-316.

[4] 刘建平,王核,李社宏,等. 西昆仑北带喀依孜斑岩型钼矿床地质地球化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报, 2010,26(10): 3095-3105.

[5] 周宏,林森,司雪峰. 甘肃小柳沟钼矿床微量元素地球化学特征[J]. 桂林工学院学报, 2004,24(3): 273-277.

[6] 王玉婷,何明友,白宪洲,等. 四川大水沟碲矿床微量元素地球化学特征. [J]. 新疆地质,2011,29(3): 337-341.

[7] 史长义. 研究微量元素区域分散与富集规律的新方法[J]. 物探与化探,1994,18(3): 219-227.

[8] 刘英俊,曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京:地质出版社,1993.

[9] 熊德信,孙晓明,石贵勇,等. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和 Sr-Nd 同位素组成特征及其意义[J]. 岩石学报,2006,22(3): 733-741.

[10] 支霞臣. 痕量元素地球化学译文集[M]. 北京:地质出版社,1987.

(责任编辑 刘存英)

参考文献:

[1] 周忠谟,易杰军. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,1994.

[2] 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.

[3] 钱家欢,殷宗泽. 土木工程原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996

[4] LING HI, CHENG AHD. Rock sliding induced by seismic force[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997,34(6):1021-1029.

[5] 林丽,郑颖人. 条分法的统一公式及其分析[J] 地下空间, 2002, 22(3): 252-255.

[6] 时卫民,郑颖人,唐伯明. 滑坡稳定性评价方法的探讨[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 545-548.

[7] 吴兆营,薄景山,刘红帅,等. 岩体边坡地震稳定性安全系数分析方法[J]. 防灾减灾工程学报,2004,24(3):237-241.

(责任编辑 刘存英)

基于坐标输入的电算化边坡稳定性分析

作者: [陈晓磊](#), [孙树林](#), [尚文涛](#), [韩孝峰](#), [程亚男](#), [CHEN Xiao-lei](#), [SUN Shu-lin](#), [SHANG Wen-tao](#),
[HAN Xiao-feng](#), [CHENG Ya-nan](#)

作者单位: [陈晓磊, 孙树林, 韩孝峰, 程亚男, CHEN Xiao-lei, SUN Shu-lin, HAN Xiao-feng, CHENG Ya-nan \(河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京, 210098\)](#), [尚文涛, SHANG Wen-tao \(河海大学土木与交通学院, 江苏南京, 210098\)](#)

刊名: [河北工程大学学报 \(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [Journal of Hebei University of Engineering \(Natural Science Edition\)](#)

年, 卷(期): 2013, 30(4)

参考文献(7条)

1. [周忠谟; 易杰军](#) [GPS卫星测量原理与应用](#) 1994
2. [陈祖煜](#) [土质边坡稳定分析、原理、方法、程序](#) 2003
3. [钱家欢; 殷宗泽](#) [土木工程原理与计算](#) 1996
4. [LING HI; CHENG AHD](#) [Rock sliding induced by seismic force](#) 1997(06)
5. [林丽](#) [郑颖人](#) 2002(03)
6. [时卫民; 郑颖人; 唐伯明](#) [滑坡稳定性评价方法的探讨\[期刊论文\]-《岩土力学》](#) 2003(04)
7. [吴兆营; 薄景山; 刘红帅](#) [岩体边坡地震稳定性动安全系数分析方法\[期刊论文\]-《防灾减灾工程学报》](#) 2004(03)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb201304014.aspx