

## 坡顶条形荷载作用边坡潜在滑裂面与稳定性分析

何思明<sup>1,2</sup>, 张晓曦<sup>1,2,3</sup>, 罗渝<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 边坡的潜在滑裂面可能不通过坡趾, 而是在坡面上某点发生了局部剪切破坏。研究条形荷载作用下边坡的滑裂面位置及其稳定性判别方法, 应用 M-C 线性破坏准则结合极限分析上限定理, 建立稳定性系数与多变量的函数, 将相关问题转化为含有多变量的数学优化问题并给出最优解。结果表明: 边坡的潜在破裂面、稳定性与边坡几何形状、土体物理力学性质、荷载特性等因素有关。

**关键词:** 条形荷载; 边坡稳定性; 上限定理; 滑裂面

**中图分类号:** P642

**文献标识码:** A

西部基础设施和城镇化的蓬勃兴起, 使得建设用地的问题日益突出, 在边坡上修筑各种构筑物成为我们合理利用土地的一种有效方式, 但在坡顶不合理地修建构筑物可能诱发边坡破坏。一般认为, 边坡的稳定性与边坡的几何形态、坡顶荷载、土体物理力学特性等因素密切相关。

极限分析理论假设边坡的滑裂面通过坡趾或坡趾下方。实际上自然或加固的边坡常常是在复杂荷载作用下的, 例如: 边坡上方修筑各类建筑物和构筑物; 基坑上方的施工堆载; 边坡上的车辆荷载等。当上部荷载较大时, 边坡可能产生局部的滑裂, 即产生不通过坡趾或坡趾下方的滑裂面。所以, 对于这类边坡采用此假设并不合理。

自 Chen W F<sup>[1]</sup> 系统的提出极限分析以来, 边坡稳定性分析的极限分析方法取得了长足发展。Donald 和 Chen<sup>[2]</sup> 通过构建离散边坡条块的机动许可速度场, 发展了边坡稳定的上限分析方法, 随后 Chen<sup>[3-4]</sup> 等将该方法扩展到三维边坡稳定分析。Yang<sup>[5-7]</sup> 引进了 H-B 非线性准则, 用极限分析方法解决岩质边坡的稳定性问题, 使极限分析理论不

再受传统的 M-C 准则的限制, 并给出了在孔隙水压力和地震荷载作用下的岩质边坡的稳定性极限分析方法。E. Ausilio 等<sup>[8]</sup> 基于 Chen 的稳定系数求法, 研究了抗滑桩和锚索加固的计算方法, 使得极限分析理论在边坡加固方面得到了很大的进展。Michalowski<sup>[9-10]</sup> 对三维边坡稳定性与开挖分析方法做了进一步的研究, 郑颖人<sup>[11]</sup>、王均星<sup>[12]</sup> 等对极限分析有限元方法在岩土工程中的应用进行了研究。

本文以均布荷载作用于坡顶且滑裂面不限制通过坡趾或坡趾下方为计算模型, 结合极限分析上限定理, 以 M-C 准则为基础, 针对上述问题开展系统研究, 推导了相关计算公式, 研究了坡顶荷载下边坡稳定性与各主控影响因素的定量关系, 为山区边坡工程稳定性判别与防护提供指导。在本文的分析过程中做了如下假设: 1. 假设边坡的滑块为刚体; 2. 计算模型为平面应变问题; 3. 岩土体服从 M-C 破坏准则; 4. 滑裂面为对数螺旋曲线; 5. 坡顶填土角度为 0。通过上限定理, 我们建立了稳定性系数与多个变量的函数, 将相关问题转化为含有多变量的数学优化问题并给出了最优解。

收稿日期 (Received date): 2010-08-10; 改回日期 (Accepted): 2010-10-05。

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划资助 (2008CB425802); 国家自然科学基金项目 (40872181); 交通部西部科技项目 (2009-318-792-005)。[This research is supported by state 973 Program project 2008CB425802, National Natural Science Foundation project 40872181 and Western Science and Technology Construction project 2009-318-792-005.]

作者简介 (Biography): 何思明, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 博士生导师。发表论文 80 余篇, 主要从事山地灾害形成机理及防治技术研究。

[Siming He, male, born in 1968, Doctor, Professor, Doctor supervisor, Mainly engaged in mountain hazards formation and prevention.] E-mail: ham112003@yahoo.com.cn



式中  $K$  为给定边坡对应的安全系数。

显然,边坡的安全系数是包含 3 个未知参数  $(\theta_0, \theta_h, h)$  的函数,在所有可能的滑动面中,真实的滑动面对应最小的边坡安全系数,于是有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \theta_0} &= 0 \\ \frac{\partial K}{\partial \theta_h} &= 0 \\ \frac{\partial K}{\partial h} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据上式,可以计算边坡相应的参数,进而确定对应边坡破裂面以及边坡的稳定系数及其滑裂面的位置。

3 算例

已知某边坡见图 2,其中各参数为:坡高  $H=12$  m,土体重度为  $\gamma=18$  kN/m<sup>3</sup>,坡角  $\beta=50^\circ$ ,坡上填土  $\alpha=0^\circ$ ,内聚力  $c=25$  kPa,内摩擦角  $\varphi=30^\circ$ ,坡顶荷载  $q=250$  kN/m,  $B=0$ ,  $b=1$  m。试分析该边坡的稳定性及其滑裂面位置。

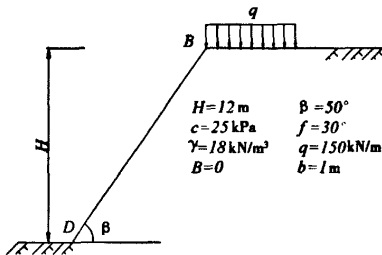


图2 边坡稳定性算例

Fig. 2 Slope stability calculation example

下面给出各参数对边坡稳定性的影响,以及滑裂面的形状,并绘于图 4~16 中,可以为工程实际作为参考。从理论上,方程(9)可以获得最小解,但在实际计算确很困难。在本文中,我们采用数学规划方法,利用的 Mathematics 优化工具箱进行优化计算。

3.1 数值计算

通过数值计算我们分析了边坡的几何形态、坡顶荷载、土体物理力学特性等因素对边坡稳定性的影响。给出稳定性系数与已知边坡的滑裂面高度。

我们首先研究了几何形态对稳定性与边坡滑裂面高度的影响,绘出  $\beta$  与稳定性系数和边坡滑裂面高度的关系曲线,见图 3~4。我们可以知道:边坡

的稳定性系数随着坡角  $\beta$  的增大而减小,稳定性系数在 0.3~1.5 间,当  $\beta>50^\circ$  时,边坡由稳定状态逐渐向不稳定状态转变;滑裂面高度( $h$ )1.8~2.3 m,随着坡角  $\beta$  的增大而先增大后减小,且其最大值在  $50^\circ\sim60^\circ$  间。

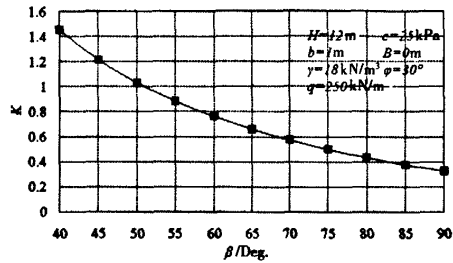


图3 坡角  $\beta$  对边坡稳定性系数  $K$  的影响

Fig. 3 Influence of different slope angles on the slope stability coefficients

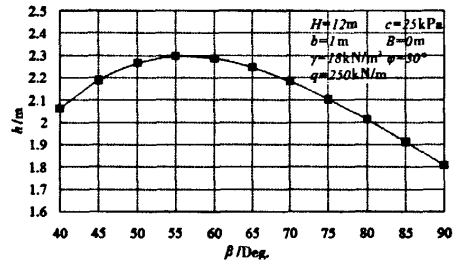


图4 坡角  $\beta$  对滑裂面高度  $h$  的影响

Fig. 4 Influence of different slope angles on the slope sliding surface heights

我们研究了坡顶荷载对稳定性的影响,首先研究荷载大小对边坡稳定性系数与滑裂面高度的影响。图 5~6 分别给出了坡顶均布荷载  $q$  从 75 kN/m 到 300 kN/m 对应的  $K$  与  $h$  值。我们可以知道:在其他参数一定的条件下,边坡的稳定性系数  $K$  与滑裂面高度  $h$  都随着  $q$  的增大而减小。

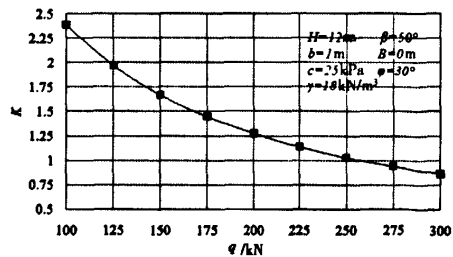


图5 荷载大小  $q$  对稳定性系数  $K$  的影响

Fig. 5 Influence of different loads on the slope stability coefficients

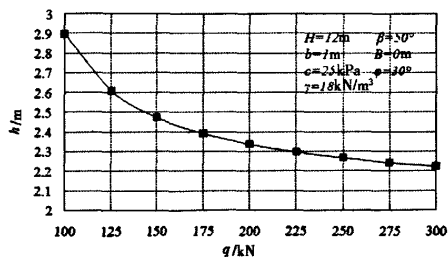
图6 荷载大小  $q$  对滑裂面高度  $h$  的影响

Fig. 6 Influence of different loads on the slope sliding surface heights

接着,我们研究了坡顶荷载长度对边坡稳定性的影响,图7~8分别给出了坡顶均布荷载  $b$  从 0.5 ~ 4.5 m 对应的  $K$  与  $h$  值。我们可以知道:在其他参数一定的条件下,边坡的稳定性系数  $K$  随着  $b$  的增大而减小;滑裂面高度  $h$  都随着  $b$  的增大而增大,且当  $b > 3.5$  m 时边坡滑裂面通过坡趾。

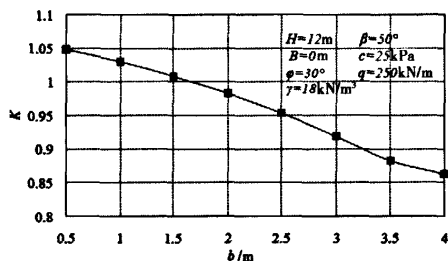
图7 荷载长度  $b$  对稳定性系数  $K$  的影响

Fig. 7 Influence of different load lengths on the slope stability coefficients

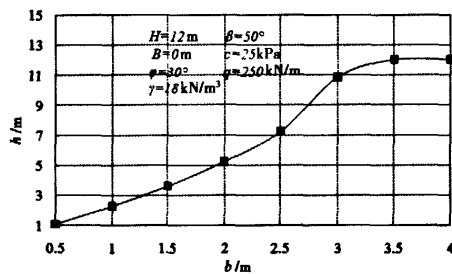
图8 荷载长度  $b$  对滑裂面高度  $h$  的影响

Fig. 8 Influence of different load lengths on the slope sliding surface heights

最后我们研究了荷载距坡顶的距离对边坡稳定性与滑裂面高度的影响。结果见图9~10,从图中可以看出:边坡安全系数随着距离  $B$  的增加而增加;边坡滑裂面高度随着距离  $B$  的增加而增加,且  $B = 1.25$  时,滑裂面高度突然剧烈增大,此时滑

裂面通过坡趾。

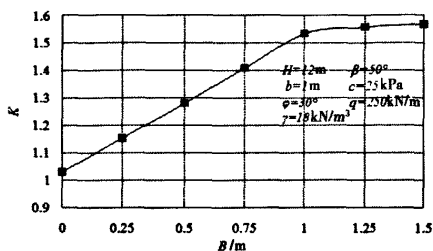
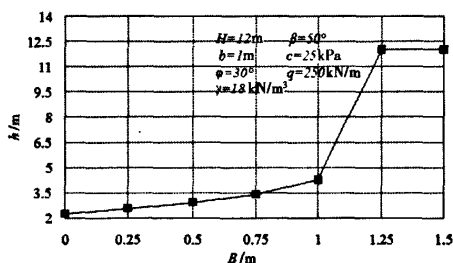
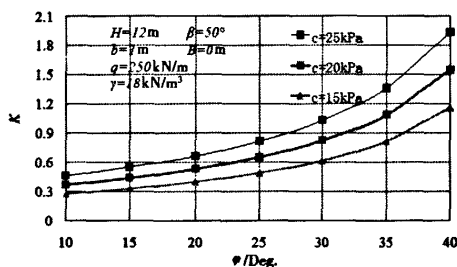
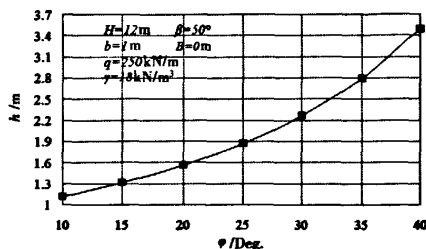
图9 荷载距坡顶距离  $B$  对稳定性系数  $K$  的影响Fig. 9 Influence of different distances  $B$  on the slope stability coefficients图10 荷载距坡顶距离  $B$  对滑裂面高度  $h$  的影响Fig. 10 Influence of different distances  $B$  on the slope sliding surface heights图11 内摩擦角  $\phi$  对边坡稳定性  $K$  的影响Fig. 11 Influence of different internal friction angles on slope stability coefficients with  $c = 15, 20, 25$  kPa图12 内摩擦角  $\phi$  对滑裂面高度  $h$  的影响

Fig. 12 Influence of different internal friction angles on the slope sliding surface heights

### 3.2 滑裂面位置

本文还研究了边坡的坡顶荷载、土体物理力学特性因素对滑裂面位置的影响。并将各种形态下滑面的位置绘于图13~16中。

图13绘制了不同内摩擦角 $\varphi$ 潜在滑裂面的位置及其形状。可以看出:边坡滑裂面高度 $h$ 随着内摩擦角 $\varphi$ 的增大而变大,且稳定性系数增大。

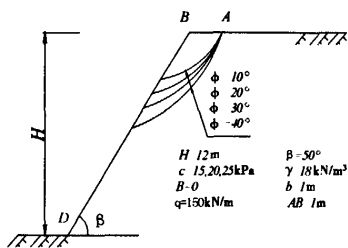


图13 不同内摩擦角的潜在滑裂面位置

Fig. 13 Sliding surface shape and position with different internal friction angles

图14绘制了不同条形荷载大小潜在滑裂面的位置及其形状。可以看出:边坡滑裂面高度 $h$ 随着条形荷载 $q$ 的增大而变小,且稳定性系数变小;然而,边坡的性质与粘结力 $c$ 的大小无关。

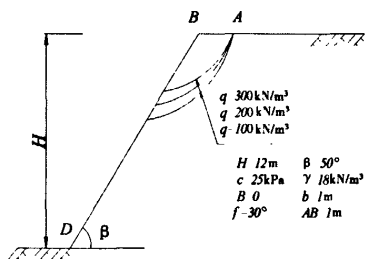


图14 不同条形荷载大小潜在滑裂面位置

Fig. 14 Sliding surface shape and position with different strip loads

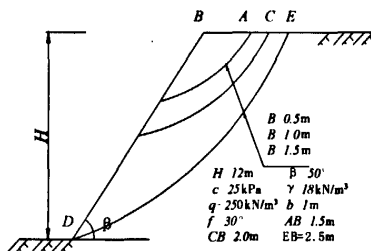


图15 条形荷载距坡顶不同距离滑裂面位置

Fig. 15 Sliding surface shape and position with different distances B

图15绘制了条形荷载距坡顶距离不同潜在滑裂面的位置及其形状。可以看出:边坡滑裂面高度 $h$ 随着距坡顶距离 $B$ 的增大而增大,当 $B=1.5$  m时,则滑裂面通过坡趾即滑裂面高度为12 m。

图16绘制了条形荷载不同长度潜在滑裂面的位置及其形状。可以看出:边坡滑裂面高度 $h$ 随着条形荷载长度 $b$ 的增大而增大,当 $b=2.5$  m时,则滑裂面通过坡趾即滑裂面高度为12 m。

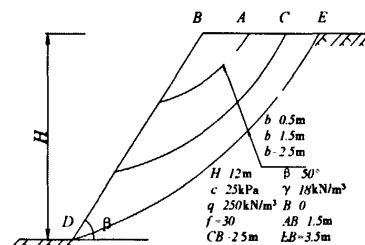


图16 条形荷载不同长度潜在滑裂面位置

Fig. 16 Sliding surface shape and position with different load lengths

## 4 结论

本文给出了一种计算边坡坡顶条形荷载作用下的稳定性的综合分析方法,其中包含滑裂面通过坡趾与不通过坡趾的计算方法。

1. 当边坡坡顶作用条形荷载时,边坡的滑裂面不一定通过坡趾或坡趾下方,有可能发生局部的失稳。

2. 边坡荷载的性质对边坡的滑裂面位置及其稳定性影响较大。其中:当荷载长度 $b$ 增大时,安全性系数随着减小,滑裂面高度 $h$ 随着增大;安全性系数随着 $B$ 的增大而先增大后减小;滑裂面高度随着 $B$ 的增大而增大;安全性系数随着 $q$ 的增大而减小;滑裂面高度 $h$ 也随着 $q$ 的增大而减小。

3. 滑裂面的高度与粘聚力的大小无关,与内摩擦角的大小有关。滑裂面高度随着内摩擦角的增大而增大;安全性系数随着内摩擦角 $\varphi$ 的增大而增大,也随着粘聚力 $c$ 的增大而增大。

4. 边坡的安全性系数随着坡角 $\beta$ 的增大而减小,滑裂面高度 $h$ 随着坡角 $\beta$ 的增大而先增大后减小,且其最大值在 $50^\circ \sim 60^\circ$ 间。

附录:

$$\frac{h}{r_0} = \frac{\sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} \left\{ \sin(\theta_h + \alpha) \exp[(\theta_h - \theta_0) \tan \varphi] - \sin(\theta_0 + \alpha) \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{L}{r_0} &= \frac{\sin(\theta_h - \theta_0)}{\sin(\theta_h + \alpha)} - \frac{\sin(\theta_h + \beta)}{\sin(\theta_h + \alpha)\sin(\beta - \alpha)} \{ \sin(\theta_h + \alpha) \exp[(\theta_h - \theta_0)\tan\varphi] - \sin(\theta_h + \alpha) \} \\ f_1 &= \frac{(3\tan\phi\cos\theta_h + \sin\theta_h)\exp[3(\theta_h - \theta_0)\tan\varphi]}{3(1 + 9\tan^2\varphi)} - \frac{(3\tan\phi\cos\theta_0 + \sin\theta_0)}{3(1 + 9\tan^2\varphi)} \\ f_2 &= \frac{1}{6} \frac{L}{r_0} \left( 2\cos\theta_0 - \frac{L}{r_0} \cos\alpha \right) \sin(\theta_0 + \alpha) \\ f_3 &= \frac{\exp[(\theta_h - \theta_0)\tan\varphi]}{6} \left[ \sin(\theta_h - \theta_0) - \frac{1}{r_0} \sin(\theta_h + \alpha) \right] \\ &\quad \left\{ \cos\theta_0 - \frac{L}{r_0} \cos\alpha + \cos\theta_h \exp[(\theta_h - \theta_0)\tan\varphi] \right\} \\ f_{q1} &= b \left[ r_0 \cos\theta_0 - \left( L - B - \frac{b}{2} \right) \cos\alpha \right] \\ f_{q2} &= (L - B) \left[ r_0 \cos\theta_0 - \left( \frac{L}{2} - \frac{B}{2} \right) \cos\alpha \right] \end{aligned}$$

### 参考文献 (References)

- [1] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. Amsterdam: Elsevier, 1975
- [2] Donald I, Chen Z Y. Slope stability analysis by an upper bound plasticity method [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34 (11): 853-862
- [3] Chen Z Y, Wang X G, Haberfield C, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part I: theory and methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 369-378
- [4] Chen Z Y, Wang J, Wang Y J, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part II: numerical approaches, applications and extensions [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38 (2): 379-397
- [5] Xiao-Li Yang, Jian-Hua Yin. Slope stability analysis with non-linear failure criterion [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130: 267-273
- [6] Xiao-Li Yang. Seismic displacement of rock slopes with nonlinear Hoek-Brown failure criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44: 948-95
- [7] Xiao-Li Yang, Jian-Hua Yin. Stability analysis of rock slopes with a modified Hoek-Brown failure criterion [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28: 181-190
- [8] E. Ausilio, E. Conte, G. Dente. Stability analysis of slopes reinforced with piles [J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28: 591-611
- [9] Michalowski R L, Drescher A. Three-dimension stability of slopes and excavations [J]. Geotechnique, 2009, 59 (10): 839-850
- [10] Michalowski R L. Limit analysis and stability charts for 3D slope failures [J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 136(4): 583-593
- [11] Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 91-98 [郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-98]
- [12] Wang Jun-xing, Wang Han-hui, Zhang You-xiu, et al. Plastic limit analysis of heterogeneous soil slope using finite elements [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 415-421 [王均星, 王汉辉, 张优秀, 等. 非均质土坡的有限元塑性极限分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 415-421]

## Potential Sling Surface Position and Slope Stability Analysis under the Strip Load

HE Siming<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoxi<sup>1,2,3</sup>, LUO Yu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Potential sliding surface may not be through the slope toe, but it can be through the point of slope surface. In this paper, a new approach that potential sliding surface position and slope stability are studied, and the formula is deduced with the M-C failure criterion combining upper bound method. We introduce variables and the slope stability turns into a mathematical optimization problem which contains multiple variables and we find the optimal solution. The numerical results show that slope safety factors are related to the slope shape and the properties of soil and the strip load. Potential sliding surface position is relevant to the slope shape and the strip load and the internal friction angle, but it is not relevant to cohesion.

**Key words:** stripe load; slope stability; upper bound method; sliding surface

作者: [何思明](#), [张晓曦](#), [罗渝](#), [HE Siming](#), [ZHANG Xiaoxi](#), [LUO Yu](#)  
作者单位: [何思明, 罗渝, HE Siming, LUO Yu\(中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都610041; 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都610041\)](#), [张晓曦, ZHANG Xiaoxi\(中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川成都610041; 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都610041; 西南交通大学土木工程学院, 四川成都610031\)](#)  
刊名: [山地学报](#) **ISTIC PKU**  
英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)  
年, 卷(期): 2011, 29(1)

## 参考文献(12条)

1. [Chen W F](#) [Limit analysis and soil plasticity](#) 1975
2. [Donald I](#); [Chen Z Y](#) [Slope stability analysis by an upper bound plasticity method](#) 1997(11)
3. [Chen Z Y](#); [Wang X G](#); [Haberfield C A](#) [A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part I: theory and methods](#) 2001(02)
4. [Chen Z Y](#); [Wang J](#); [Wang Y J A](#) [A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part II: numerical approaches, applications and extensions](#) 2001(02)
5. [Xiao-Li Yang](#); [Jian-Hua Yin](#) [Slope stability analysis with non-linear failure criterion](#) 2004
6. [Xiao-Li Yang](#) [Seismic displacement of rock slopes with nonlinear Hoek-Brown failure criterion](#) 2007
7. [Xiao-Li Yang](#); [Jian-Hua Yin](#) [Stability analysis of rock slopes with a modified Hoek-Brown failure criterion](#) 2004
8. [E. Ausilio](#); [E. Conte](#); [C. Dente](#) [Stability analysis of slopes reinforced with piles](#) 2001
9. [Michalowski R L](#); [Drescher A](#) [Three-dimension stability of slopes and excavations](#) 2009(10)
10. [Michalowski R L](#) [Limit analysis and stability charts for 3D slope failures](#)[外文期刊] 2010(04)
11. [郑颖人](#); [赵尚毅](#) [岩土工程极限分析有限元法及其应用](#)[期刊论文]-[土木工程学报](#) 2005(01)
12. [王均星](#); [王汉辉](#); [张优秀](#) [非均质土坡的有限无塑性极限分析](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2004(03)

## 本文读者也读过(7条)

1. [郑德乾](#). [李天](#). [顾明](#). [ZHENG Deqian](#). [LI Tian](#). [GU Ming](#) [四面坡顶轻钢空旷结构表面风压数值模拟](#)[期刊论文]-[结构工程师](#)2007, 23(3)
2. [张春笋](#). [吴进良](#). [李晓军](#). [陈福丰](#). [ZHANG Chun-sun](#). [WU Jin-liang](#). [LI Xiao-jun](#). [CHEN Fu-feng](#) [边坡荷载作用下的边坡稳定性](#)[期刊论文]-[重庆交通大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 28(3)
3. [高文华](#). [Richard J. Bathurst](#). [GAO Wenhua](#). [Richard J. Bathurst](#) [条形荷载作用下加筋土边坡稳定性分析](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#)2007, 26(2)
4. [宋胜武](#). [严明](#). [SONG Shengwu](#). [YAN Ming](#) [一种基于稳定性评价的岩质边坡坡体结构分类方法](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#)2011, 19(1)
5. [孙超法](#). [Sun Chaofa](#) [住宅坡屋顶空间的气候设计研究](#)[期刊论文]-[工业建筑](#)2008, 38(6)
6. [刘运龙](#) [采暖地区屋顶节能技术分析](#)[期刊论文]-[中国高新技术企业](#)2008(14)
7. [籍存德](#). [郝瑞珍](#). [陈雄](#). [JI Cun-de](#). [HAO Rui-zhen](#). [CHEN Xiong](#) [夏热冬暖地区屋顶隔热构造措施探讨](#)[期刊论文]-[施工技术](#)2006, 35(10)

## 引证文献(1条)

1. [朱少荣](#). [雷国刚](#). [柴永进](#) [坡底特殊土层对不排水粘土边坡稳定性的影响](#)[期刊论文]-[港工技术](#) 2013(1)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201101014.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201101014.aspx)