

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0353-06

斜坡地基上高填方路堤极限承载力研究

王志斌, 李 亮, 杨小礼

(中南大学 土木建筑学院 长沙 410075)

摘 要: 结合山区高速公路建设的实践, 采用大型室内模型试验, 找出了荷载作用下斜坡地基上高填方路堤滑动破坏面出现的位置及形态, 并确定了其极限承载力的大小。在通用条分法的理论基础上运用 Visual Basic 编程语言编制了斜坡地基上填方路堤极限承载力计算程序, 并应用于该试验模型的计算分析, 计算与试验结果的对比分析表明, 利用极限平衡通用条分法不仅简单可行, 且具有较高的计算精度。

关 键 词: 极限承载力; 斜坡地基; 大型模型试验; 极限平衡; 通用条分法

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on the ultimate bearing capacity of embankments on the mountain slope foundation

WANG Zhi-bin, LI Liang, YANG Xiao-li

(School of Civil & Architectural Engineering, Central South Univ., Changsha 410075, China)

Abstract: According to the practical experiences in the expressway construction in the mountain region, the form and position of the slip curve surface, and the ultimate bearing capacity are found out by the large scale model experiment. Based on the generalized limit equilibrium method, the computation procedure for the stability analysis of embankments on the mountain slope is programmed by using Visual Basic. The model experiment is calculated by this program; and the calculation results are compared with those from the experiment; and the comparison shows that the generalized limit equilibrium method is feasible, simple and accurate.

Key words: ultimate bearing capacity; mountain slope foundation; large scale model experiment; limited equilibrium method; generalized limit equilibrium method

1 前 言

近几年, 特别是国家做出西部大开发战略决策以来, 山区高等级公路得到迅速发展。在山区修建高等级公路, 不可避免会遇到大量的斜坡地基上的高填路堤^[1]。斜坡上高填路堤的设计与稳定性分析越来越多地引起设计与科研人员的重视^[2,3]。

在边坡稳定性分析中, 极限平衡方法被广泛地应用, 该方法理论上简单, 易于实施, 方法之间的差异主要是对条的划分及条间力的大小和位置的假定不同而已。很多学者研究表明, 具有任意形状滑动面的滑体, 只有作用其上的力与力矩同时满足平衡条件, 才有可能获得合理的安全系数值^[4]。满足

力与力矩平衡的条分法被称为严格极限平衡条分法(简称严格条分法或严格法)。近年来, 严格条分法得到很大的发展^[5-7], 但始终没有在一般工程中得到普遍应用。

通用竖条分法满足力与力矩平衡, 是一种严格条分法, 它直接将条间力合力的大小和方向作为未知数, 通过定义不同的条间力倾角函数, 可以方便地模拟各种严格条分法^[8]。本文采用大模型试验的方法, 研究了斜坡地基上高填方路堤在外荷载作用下的破坏模式与破坏机理, 得出了破坏荷载的大小。在参阅文献^[8]的基础上对求解斜坡地基上填方路堤极限承载力的通用条分法原理及其解法进行论述, 并运用可视化编程语言 Visual Basic 编制了相应的电算程序, 计算了试验模型的极限承载力, 且

收稿日期: 2006-7-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50408020)。

作者简介: 王志斌, 男, 1975 年, 博士研究生, 主要从事路基与边坡稳定性研究。

将计算与试验结果进行了对比分析。分析表明,利用极限平衡通用条分法不仅简单可行,且具有较高的计算精度。

2 试验概述

2.1 依托工程的考察和确定

根据在建的湖南省常-吉高速公路的具体情况,考虑到试验的可行性和有效性,拟选取有代表性的试验段作为依托工程。具体里程为室内模型试验路段:(a)半堤半堑:k192+640~6600,k192+740~760;(b)高填方路堤:k212+560~576。

3个试验模型均为路堤坡面无约束,斜坡地基为岩质地基。试验模型的几何尺寸见表1所示(k192+640~660,k192+740~760,k212+560~576分别用编号1~3表示)。试验模型图见图1。

表1 试验模型几何尺寸表
Table 1 The geometrical size of models

编号	斜坡坡比	路堤边坡坡比	加载板宽度/m	路堤填土高度/m
1	1:1.8	1:1.6	1.6	2.45
2	1:2	1:1.75	1.34	1.21
3	1:1.5	1:1.5	0.6	1.49

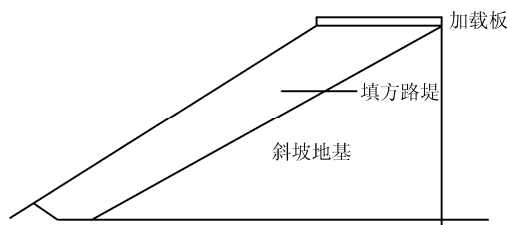


图1 试验模型示意图
Fig.1 Models of embankment

2.2 试验模型制作

根据试验目的与室内现有条件,试验中斜坡的坡度、形状、路堤坡度与原型相同,斜坡高度、路堤填土高度、填土宽度按试验模型与原型比为1:20制作。试验模型槽如图2所示。

斜坡采用砂性土加水泥做斜坡骨架,水泥与土的配比选择5:100,然后在其坡面部位做台阶,台阶的高度和宽度都为20 cm,最后在斜坡坡面加一层

厚度约为40 cm试验用的路堤填土将其包裹,并充分压实。



图2 试验模型槽
Fig.2 Test cavity in Lab

在模型制作过程中,首先按照试验模型的大小和路堤坡度在两侧挡墙上拉线,并将试验用土按最佳含水率制备后倒入模型槽中,借助木模板形成坡面,每20 cm击实一次,一旦一层填筑完成,撤除模板,在相应位置布置传感器,填筑下一层;然后当填筑至设计面下2 cm时,改铺细砂,并安放水泥荷载板和反力装置。

待埋设仪器与周围土体稳定平衡后(大约需要2d的时间),测定各仪器的初始读数,然后开始加载,加载荷载等级分别为50 kPa(初期)及10 kPa(破坏期),加载速度控制在每分钟0.5 kPa左右。每级荷载稳定时间为30 min,并规定当加载到路堤坡面出现明显破坏为止。

2.3 试验材料

试验用土为取自常德-吉首高速公路段的风化红砂岩,在室内将红砂岩破碎并过20 mm筛,并在室内进行了击实试验、三轴试验等常规试验。得出基本的物理力学参数见表2。

3 试验结果分析

本文将通过分析路堤顶面的位移以及试验过程中路堤坡面出现的异常现象来研究试验模型在外荷载作用下其破坏面位置及形态,最后结合模型的开挖来对结果进行验证。试验结果分述如下。

表2 土层物理力学参数
Table 2 Properties of soil

土层类别	液限/%	塑限/%	最优含水率/%	重度/ γ /kN·m ⁻³	弹性模量/ E /MPa	粘聚力/ c /kPa	内摩擦角/ φ /(°)
路堤填料	27.9	17.9	8	22	30	23	29

3.1 荷载-路堤顶面位移

图3为斜坡地基上填方路堤顶部沉降随外荷载变化图。由图可知,试验1由于千斤顶在加载到300 kN时出现故障,存在一个预加压的过程,在300 kN以上荷载作用下其沉降显著增加,由于预加压的影响,尽管其模型尺寸最大,但其沉降反而最小。1号和2号试验曲线均在最后一级荷载作用处出现曲线较平缓状态,即1、2号试验模型在破坏状态下,顶面沉降不再增加,说明其沿水平面破坏,通过与其坡面水平位移和路堤坡面出现的水平破坏线的扩展进行对照分析,对应的荷载即为试验模型的破坏荷载,1号模型的破坏荷载为约500 kN,2号模型的破坏荷载为约350 kN。3号试验模型坡顶沉降大体随外荷载的变化呈直线关系,很难在沉降-荷载曲线上推测其破坏荷载,根据其坡面水平位移与路堤坡面出现的水平破坏线的扩展来定义其破坏荷载为250 kN。试验模型极限承载力见表3。

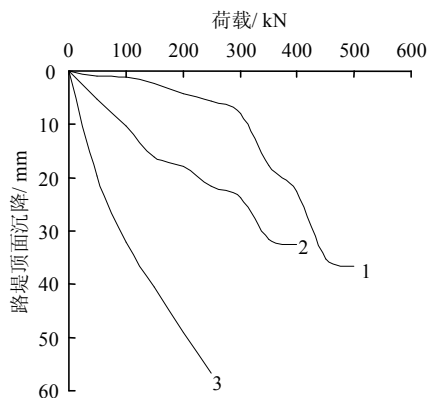


图3 路堤顶部荷载-沉降曲线

Fig.3 Embankment crest sedimentation -Load

表3 极限承载力试验值

Table 3 Ultimate bearing capacity of models

试验编号	试验值 /kPa
1	281.25
2	230
3	201

3.2 破坏面形态与位置

通过综合分析路堤顶面沉降与坡面位移,大体可知1~3号试验模型的破坏面均出现在路堤内部,且1号与2号试验模型的破坏面中存在水平面,2号试验模型在路堤坡肩以下(沿坡面)约80 cm处发生破坏。加载结束后,3个试验模型在路堤顶面以下某处沿整个模型宽度出现了水平破坏线。路堤坡面出现破坏线的具体位置见表4。

将试验模型进行开挖,发现试验模型的破坏面形态如图4所示,破坏面形态为折线型,折线由斜坡坡面和填方路堤层与层之间的填筑面组成。

表4 滑动面位置表

Table 4 Position of slip curve surface

试验编号	路堤填土高度 /cm	滑动面位置 (填筑面以下距离)/cm	与路堤高度的关系
1	245	70	约 2/3 处
2	121	40	约 2/3 处
3	149	45	约 2/3 处

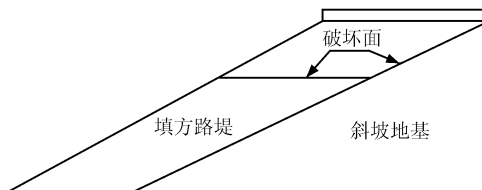


图4 试验模型的破坏模式

Fig.4 Failure mechanism of the model

经过对试验结果进行分析和处理,得出:(1)斜坡地基上的高填方路堤的型式为梯形时,潜在滑动面形态并非圆弧形,而是折线形,折线由填筑层与层之间的交界面和斜坡坡面组成;(2)斜坡地基上的高填方路堤的型式为梯形时,潜在滑动面与填方路堤的交线位置一般出现在路堤高度的2/3处。

4 斜坡地基填方路堤极限承载力计算

4.1 极限平衡通用条分法原理^[8]

严格法要求土条满足所有的静力平衡条件,即2个力平衡条件及1个力矩平衡条件^[9]。以土条为隔离体,斜坡地基上填方路堤条块划分见图5所示,其受力分析见图6所示,图中 F 为安全系数; S_{ai} 为土条的抗剪力; S_{mi} 为土条发挥的抗剪力; W_i 为土条重力; N_i 为条底有效法向力; α_i 为条底倾角; h_i 为土条平均高度; Z_{Li} 、 Z_{Ri} 为土条左、右端水平条间力; h_{Li} 、 h_{Ri} 表征条间力作用位置; θ_{Li} 、 θ_{Ri} 为土条左、右条间力水平倾角。

根据摩尔-库仑屈服准则有:

$$S_{mi} = \frac{S_{ai}}{F} = \frac{c}{F} + N_i \frac{\tan \varphi}{F} = c_m + N_i \tan \varphi_m \quad (1)$$

4.1.1 土条的力平衡方程

(1) 土条底线平行方向的力平衡方程

$$S_{mi} + Z_{Li} \cos(\alpha_i - \theta_{Li}) - Z_{Ri} \cos(\alpha_i - \theta_{Ri}) - W_i \sin \alpha_i = 0 \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 可得:

$$N_i \tan \varphi_m = Z_{Ri} \cos(\alpha_i - \theta_{Ri}) - Z_{Li} \cos(\alpha_i - \theta_{Li}) + W_i \sin \alpha_i - c_m \quad (3)$$

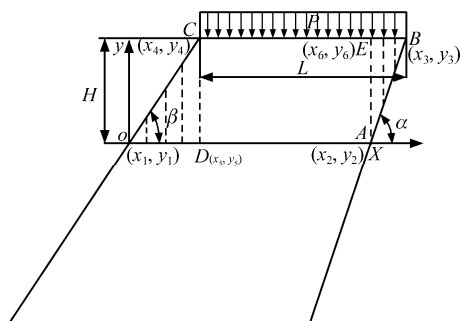


图 5 斜坡地基上填方路堤土条划分

Fig.5 Calculation diagram for embankment slip

(2) 土条底线法线方向的力平衡方程

$$N_i - Z_{Li} \sin(\alpha_i - \theta_{Li}) + Z_{Ri} \sin(\alpha_i - \theta_{Ri}) - (W_i + P_i) \cos \alpha_i = 0 \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 可得:

$$Z_{Ri} = AZ_{Li} [\cos(\alpha_i - \theta_{Li}) + \sin(\alpha_i - \theta_{Li}) \tan \varphi_m] + A[(W_i + P_i) \cos \alpha_i (\tan \varphi_m - \tan \alpha_i) + c_m] \quad (5)$$

$$A = \frac{1}{\cos(\alpha_i - \theta_{Ri}) [1 + \tan \varphi_m \tan(\alpha_i - \theta_{Ri})]} \quad (6)$$

4.1.2 土条的力矩平衡方程

以土条底线中点为取力矩中心, 建立第 i 个土条的力矩平衡方程为

$$Z_{Li} \cos \theta_{Li} \left(h_{Li} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) + Z_{Li} \frac{b_i}{2} \sin \theta_{Li} = Z_{Ri} \cos \theta_{Ri} \left(h_{Ri} + \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) + Z_{Li} \frac{b_i}{2} \sin \theta_{Ri} \quad (7)$$

整理并简化式 (7) 可得:

$$h_{Ri} = \frac{Z_{Li}}{Z_{Ri} \cos \theta_{Ri}} \left[h_{Li} \cos \theta_{Li} - \frac{b_i}{2} (\cos \theta_{Li} \tan \alpha_i - \sin \theta_{Li}) \right] + \frac{b_i}{2} (\tan \theta_{Ri} - \tan \alpha_i) \quad (8)$$

4.1.3 假定垂直条间力倾角函数

据图 6 可知, 在求解斜坡地基上填方路堤极限承载力中, 未知数的个数为:

(1) 坡体极限承载力 P , 假定路堤顶部荷载为均布荷载, 计 1 个; (2) 条底法向应力 N_i , 计 n 个; (3) 条底切向力 S_{mi} , 计 n 个; (4) 垂直条间力

Z_i , 计 $n-1$ 个; (5) 垂直条间力倾角 θ_i , 计 $n-1$ 个;

(6) 垂直条间力作用点位置, 计 $n-1$ 个。未知数的总数为 $5n-2$ 个。

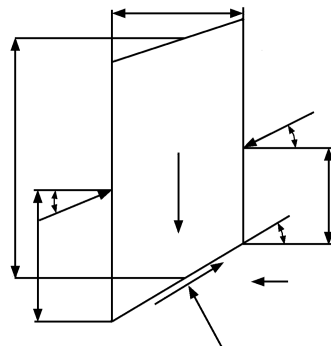


图 6 土条受力分析图

Fig.6 Force acting on a typical slice

根据土体的力平衡条件与力矩平衡条件及土体的屈服准则则可建立的方程数为 $4n$ 个, 因此, 此类问题为超静定问题。为了解求此类问题, 必须减少未知数的个数, 即对 $n-2$ 个未知数进行假定。在采用通用竖直线分法求解时, 通常对垂直条间力的倾角进行假定, 假定其满足形式为

$$\theta = \lambda f(x) \quad (9)$$

式中: θ 为垂直条间力倾角, 计 $n-1$ 个; λ 为与条间力倾角函数有关的常数, 因各个 θ 间具有相同的 λ (表征了条间法向力与切向力所满足的比例关系), 即只有 $n-2$ 个独立的未知数得到假定, 此时方程组的方程总数与未知数总数相等。 $f(x)$ 是一已知函数。

4.1.4 求解步骤

(1) 假定条间力倾角函数 $f(x)$;

(2) 确定极限承载力 P 的迭代初值及 λ 值。

从坡脚第 1 条土条开始, 已知第 1 条土条的 Z_L 等于 0, Z_L 的作用点位置 h_L 也等于 0, $F=1$, 可由式 (5), (8) 分别求得第 1 条土条的 Z_R 及作用点 h_R , 并以此作为第 2 条土条的 Z_L 及 h_L 。以此递推, 可求得最右端土条 (坡顶) 的 Z_R , h_R ;

(3) 对于最右端土条的 Z_R , h_R , 如满足力平衡条件, 则 $Z_R=0$, 此时力平衡对应的极限承载力为 P_f , 否则调整 P , 按式 (5) 递推求解, 直到 $Z_R=0$, 得到 P_f 。如满足力矩平衡条件, $h_R=0$, 此时力矩平衡对应的极限承载力为 P_m , 否则调整 P , 按式 (8) 递推求解, 直到 $h_R=0$, 得到 P_m 。通常 P_f 、 P_m 并不相等。注意本步骤中 λ 值不变, 由此可得到力平

衡点 (λ, P_f) 及力矩平衡点 (λ, P_m) 。判断是否为0时,一般要设定一个容差 $\varepsilon \leq 10^{-3}$;

(4) 改变 λ 值,按步骤(2),(3)进行递推求解,得到1组新的力平衡点 (λ, P_f) 及力矩平衡点 (λ, P_m) ;

(5) 求一系列 λ 值(一般5个左右)对应的力平衡点及力矩平衡点,在 $\lambda-P$ 坐标系中连接对应的点,得到力平衡与力矩平衡曲线。两曲线交点的纵坐标即为满足力平衡又满足力矩平衡的 P 。

4.2 极限平衡通用条分法程序设计

针对斜坡地基上高填方路堤破坏模式与破坏机理,根据极限平衡通用条分法原理及计算步骤,采用可视化编程语言Visual Basic编制了其在斜坡地基上高填方路堤稳定性计算程序。

(1) 条间力倾角函数

假定条间力倾角函数为

$$f(x) = \sin\left(\frac{x-a}{b-a}\pi\right) \quad (10)$$

式中: x 为条间力水平坐标; a 为坡角水平坐标; b 为坡顶水平坐标。

(2) 计算实例几何数字化

假定条间力倾角函数以后,将计算模型几何数据输入如图7所示的窗体中。输入数据主要包括:路堤填土高度、路堤宽度、斜坡坡度和路堤坡度。

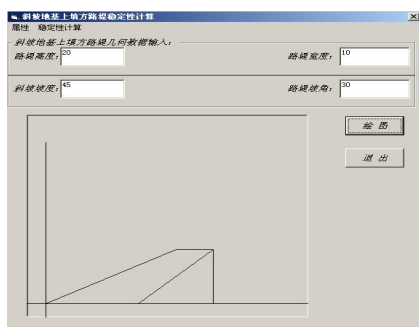


图7 斜坡地基上高填方路堤几何信息窗口
Fig.7 Windows of embankment parameters

(3) 土体属性

土体属性主要为土体物理力学参数,包括:斜坡坡面黏聚力、斜坡坡面内摩擦角、路堤内部土体黏聚力、路堤内部土体内摩擦角和土体重度,见图8。

(4) 极限承载力计算

计算结果显示窗口由通用条分法参数输入,响应按钮组、计算结果输出和检验4个部分组成,如图9所示。在计算极限承载力过程中分别计算力平衡与

力矩平衡条件下的极限承载力值,当计算结果不符合要求时,系统提示重新输入初始极限承载力大小,在检验栏中则显示当前荷载作用下 Z_r 或 H_r 的值。

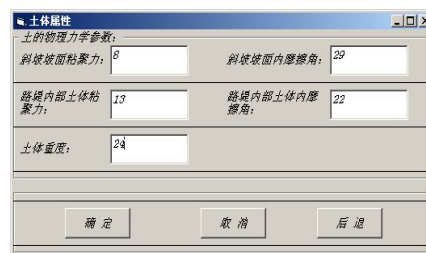


图8 土体力学参数窗口
Fig.8 Windows of soil parameters

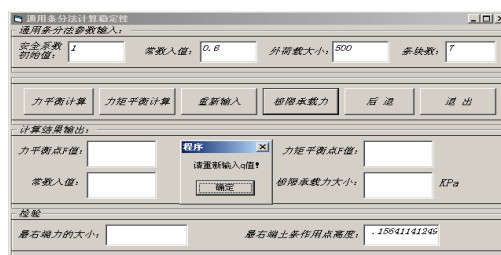


图9 计算结果显示窗口
Fig.9 Windows of result

5 试验模型稳定性分析

试验模型几何数据见表1,土的物理力学性质见表2,且路堤与斜坡坡面的黏聚力 $c' = 6 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi' = 26^\circ$ 。利用通用条分法对每个试验模型的极限承载力进行计算。计算结果如图10所示。

将计算与模型试验结果对比(表5)分析可以看出,计算值与试验值的差值比不大,且计算值均较试验值小,这是由于土工试验参数存在误差和模型试验过程中存在误差,还有就是将模型当成平面问题讨论,没有考虑挡墙的摩擦作用。

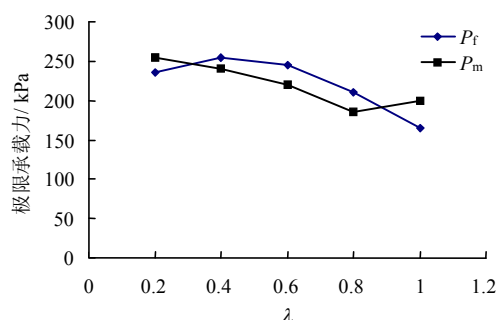
表5 计算值与试验值对比
Table 5 Calculation result

试验编号	计算值/kPa	试验值/kPa	误差/%
1	248	281.25	11.82
2	200	230	13.04
3	173	201	13.93

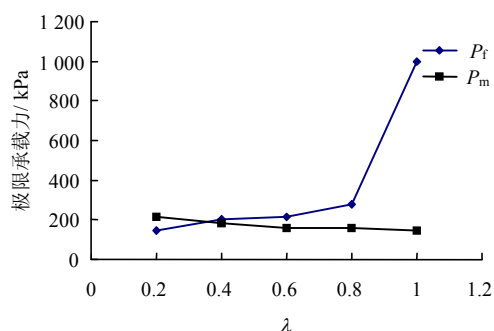
6 结 论

本文在对模型试验结果进行分析和总结的基础上采用极限平衡通用条分法计算了斜坡地基高填方路堤的极限承载力,通过将试验结果与计算结果进

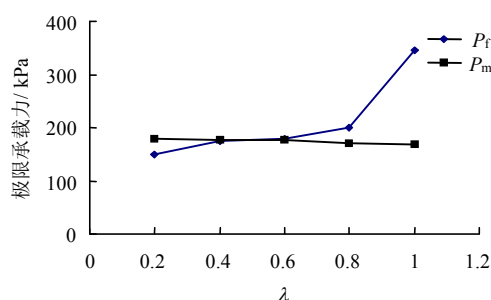
行对比分析, 得出如下结论:



(a) 1 号试验模型



(b) 2 号试验模型



(c) 3 号试验模型

图 10 极限承载力计算结果
Fig.10 Results of ultimate capacities

(1) 采用大型模型试验, 对斜坡地基上的高填方路堤的滑动破坏面的形状与位置进行研究, 发现了斜坡地基上高填方路堤的型式为梯形时, 潜在滑动面形态并非圆弧形, 而是折线形, 折线由填筑层与层之间的交界面和斜坡坡面组成;

(2) 斜坡地基上的高填方路堤的型式为梯形时, 潜在滑动面与填方路堤的交线位置一般出现在路堤高度的 2/3 处;

(3) 采用极限平衡通用条分法计算斜坡地基上高填方路堤的极限承载力具有较高的计算精度, 且基于 Rapid Solver 算法上采用 Visual Basic 语言编制的程序具有简单实用, 窗口界面友好等特点。

参考文献

- [1] JTGD30-2004, 公路路基设计规范[S].
- [2] 吴梦军. 极限分析上限法在公路边坡稳定分析中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 2002.3(21): 52-55.
- [3] 马崇武, 武生智, 苗天德. 对非线性破坏准则下边坡稳定性分析的线性简化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1999. 35(1): 49-52.
- [4] Duncan J M. State-of-the-art: Limit equilibrium and finite element analysis of slope[J]. **Geotech Engrg. ASCE**, 1996, 122(7): 577-596.
- [5] Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis[J]. **Proc. European Conf on Stability of Earth Slope**[C]. [S.L.] Sweden, 1954, 3: 43-49.
- [6] Morgenstern N, Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(1): 79-93.
- [7] 朱大勇, 钱七虎. 严格极限平衡条分法框架下的边坡临界滑动场[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 68-74.
- [8] 张鲁渝. 一个用于边坡稳定分析的通用条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 476-501.