

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907059

斜坡软弱路基稳定性分析的修正瑞典条分法

王春燕^{1,2,3}, 洪宝宁^{1,2,3}, 单浩^{1,2,3}, 刘鑫^{1,2,4}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏南京 210098; 3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏南京 210098; 4. 河海大学隧道与地下工程研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 斜坡软弱路基的滑塌形式与水平软弱路基相比, 具有明显的易滑动性和非对称性。为了反映斜坡软弱路基与水平软弱路基失稳机理的区别, 对两种路基形式进行离心机试验, 证实了斜坡软弱路基的失稳的非对称性, 因此在稳定性分析中要考虑势能差和非对称的影响。为了提高条分法在斜坡软弱路基稳定性计算的准确性, 提出一种考虑不同倾斜角影响的修正瑞典条分法, 引入反映势能差影响的“影响力”和反映滑动体外路堤填土重量的“附加力”。将瑞典条分法、修正瑞典条分法与有限元强度折减法对工程实例的计算结果比较分析, 结果表明: (1) 在稳定性分析中, 斜坡软弱路基需要考虑势能差和非对称的影响; (2) “附加力”在各土条上的分布形式进行简化后, 其计算结果与采用强度折减法进行的有限元计算结果较为接近; (3) 按瑞典条分法计算出的安全系数比修正瑞典条分法偏大 53.5%、比有限元强度折减法偏大 50.5%, 而修正瑞典条分法与有限元强度折减法计算结果只相差不足 2%。

关键词: 斜坡软弱路基; 稳定性分析; 影响力; 附加力; 修正瑞典条分法

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1358-08

Modified Swedish Slice Method for Stability Analysis of Weak Subgrade on Slope

WANG Chunyan^{1,2,3}, HONG Baoning^{1,2,3}, SHAN Hao^{1,2,3}, LIU Xin^{1,2,4}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Research Institute of Tunnel and Underground Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Compared with horizontal weak subgrade, the weak subgrade on slope is easy to slide and the failure form is always asymmetrical. In order to reflect the difference between the weak subgrades on slope and horizontal ground, centrifuge test was carried out on the two subgrade forms. According to the test results, asymmetrical failure of the weak subgrade on slope is confirmed, so the influence of potential energy difference and asymmetry should be considered in the stability analysis. In order to improve the calculation accuracy on stability analysis of the weak subgrade on slope, a modified Swedish slice method is proposed to consider the influence of different inclination angles, and the "influenc-

* 收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51609071)、中央高校基本科研业务费项目(2018B13714)资助

作者简介: 王春燕(1995—), 女, 硕士研究生。主要从事软土地基处理等方面的研究。E-mail: 757282157@qq.com

ing load" reflecting the influence of the potential energy difference and the "additional load" reflecting the weight of the embankment outside the sliding body are introduced to analyze the stability of the weak subgrade. The results obtained by the Swedish slice method, the modified Swedish strip method and the finite element strength reduction method are compared and analyzed for an engineering example. The results show that: (1) the potential energy difference and asymmetry should be considered in the stability analysis of weak subgrade on slope; (2) After the distribution of the "additional load" on each soil slice is simplified, the calculation result is close to the finite element calculation result by the strength reduction method; (3) the safety factor calculated by the Swedish slice method is 53.5% larger than that by the modified Swedish strip method and 50.5% larger than that by the finite element strength reduction method, while the difference between the modified Swedish slice method and the finite element strength reduction method is less than 2%.

Keywords: weak subgrade on slope; stability analysis; influencing load; additional load; modified swedish slice method

引言

软弱路基稳定性一直是人们关注的问题,许多学者对其进行研究^[1-5]。斜坡软弱路基在山区丘陵地区较为常见的一种路基形式,其稳定性问题与水平软弱路基存在很大不同。刘金龙等^[6]对比分析了水平软弱地基和斜坡软弱地基在填筑过程中的水平位移、竖向沉降和稳定性等的变化。X.Jiang等^[7]探讨了当软弱土层沿路堤纵向非通长分布时斜坡软弱路基潜在滑移面的空间分布形态。徐光明等^[8]等研究了在基岩面存在软弱夹层的边坡稳定性和破坏模式。刘望坤^[9]通过离心模型试验,对比斜坡软弱路基与水平软弱路基的变形,并研究了不同坡度的斜坡软土地基路基的变形特性。

强度折减法和最小势能原理被广泛应用于边坡稳定性安全系数计算。赵尚毅等^[10]通过强度折减法求边坡稳定安全系数,与传统方法的计算结果十分接近。黄明星等^[11]基于强度折减法,研究了不同软弱土层性状对斜坡软弱路基稳定性的影响。蒋鑫等^[12]运用强度折减法,斜坡软弱地基在填方时的变形与稳定性变化,分析结果与室内试验成果相当吻合。王明华等^[13]提出基于最小势能原理的斜坡稳定性三维计算方法,针对滑面和滑体进行系统分析,很方便地计算任意形态滑面的滑坡稳定性系数,证明了该方法的合理性和适用性。李小强等^[14]依据势能变化最小原理,从整个边坡的势能变化求得一个满足势能的最小位移,并直接求出滑面上的法向力分布。

拟在斜坡软弱路基失稳机理的试验和数值模拟计算结果的基础上,通过引入能反映势能差影响

的“影响力”和反映滑动体外路堤填土重量的“附加力”,给出一种可以考虑不同倾斜角影响的修正瑞典条分法。该方法涉及参数少,计算步骤简单,便于工程技术人员掌握和应用,而且计算结果更接近实际情况。

1 试验和计算结果分析

1.1 试验系统

试验采用400gt大型可控硅无级调速的土工离心机系统,该系统由离心加载、数据采集和监控三部分构成,并配有一套动态调平系统。模型箱内部有效尺寸为1100mm×400mm×600mm,沿长度侧配有100mm厚有机玻璃板。土体截面位移数据,利用德国Wenglor公司的YP11MG设备由变形网格获取;土体表面沉降和隆起数据,利用VL80型激光传感器获取。

1.2 试验模型简化

在山区丘陵地区的实际工程中,遇到的斜坡软弱路基最一般形式,如图1所示。

根据几何形态参数 θ_1 和 θ_2 ,路基可划分为不同

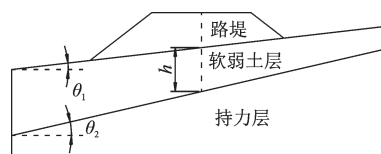


图1 几何形态参数

Fig.1 Geometric parameters

注: θ_1 为软弱土层表面倾角; θ_2 为软弱土底面倾角; h 为路堤中心位置软弱土层厚度

的存在形式,即:

(1)软弱土层的表面水平且底面倾斜,即: $\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0$; (2)表面倾斜且底面水平,即: $\theta_1 \neq 0, \theta_2 = 0$; (3)表面和底面均倾斜,即 $\theta_1 \neq 0$ 且 $\theta_2 \neq 0$ 。当倾斜角 $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 时,即为水平软弱地基。

取两种情况模型试验进行分析,即:软弱土层的表面水平且底面倾斜($\theta_1 = 0, \theta_2 \neq 0$)和水平软弱土层($\theta_1 = \theta_2 = 0$)地基。模型相似比为 $n=100$ 的双向六车道高速公路斜坡软弱土层路基横断面尺寸如图2所示。

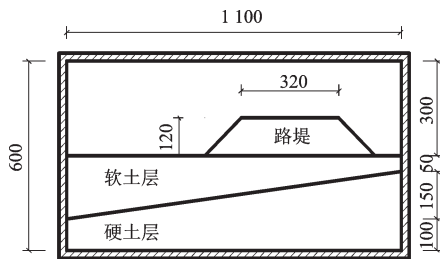


图2 路堤横断面尺寸

Fig.2 Cross section size of the embankment

综合考虑模型箱尺寸、工程实例和反映具有倾斜面对软弱路基的影响等,取软弱土层底面倾角为 15° ;模拟路堤最大填筑高度为16 m。为了能形成类似圆弧形滑动面,取路堤表面中心线处对应的软弱土层厚度 $h=125$ mm。 h 是决定滑动面类型的关键参数,蒋鑫等^[12]通过有限元研究已经证明了这一点。

1.3 路堤分层填筑过程模拟

为了掌握在路堤填筑过程中,路基土体变形情况,按照等效荷载法换算可得各级离心加速度下对应的实际路堤填高,见表1。

试验中软土选用黏土,路堤填土和下卧硬土层

表1 各级离心加速度下实际路堤填高

Table 1 Actual embankment heights under centrifugal acceleration at all levels

离心加 速度/g	路堤填土 高度/m	离心加 速度/g	路堤填土 高度/m
10	0.96	70	7.64
20	1.95	80	8.98
30	2.99	90	10.43
40	4.07	100	12.00
50	5.20	110	13.75
60	6.39	120	15.74

均选用粉质黏土,土体参数见表2。进行离心机试验时,离心加速度每级增大10g,持载时间为2 min,间歇时间为5 min。

表2 试验土层参数

Table 2 Test soil parameters

土层名称	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 $w/\%$	黏聚力 $c/$ kPa	摩擦角 $\varphi/(\circ)$
路堤填土	2.03	23.7	22	22
软土层	1.80	48.3	12	0
硬土层	2.02	24.1	16	12

1.4 滑塌特点分析

(1) 试验现象

当离心加速度加至20g时,斜坡软弱土层路基顶面出现裂缝,裂缝位置距上路肩约3/8路堤顶宽处;随着离心加速度的增加,裂缝逐渐增多、变宽并向下延伸变长,但始终分布于上半幅路堤;当离心加速度加至40g时,斜坡软弱土层路基顶面出现贯通裂缝,此时左幅路堤的沉降和下坡脚的隆起明显,形成连续的滑动面;当离心加速度加至60g时,斜坡软弱土层路基已处于失稳破坏状态,终止试验;而离心加速度加至20g时,水平软弱土层路基顶面未出现裂缝,加至40g时,路基顶面只是在路堤中心线附近出现裂缝,加至70g后,出现失稳破坏状态。

(2) 结果分析

由离心机试验得斜坡软弱土层路基试验终止后的路基总位移场,以及变形情况,如图3所示。细实线表示土体初始位置,细虚线表示终止位置,粗实线约为滑动面位置,有长度和方向的箭头为位移矢量,箭头方向为位移方向,长度为位移大小。A、B、C为三个特征点(绘于初始位置),表示位移、地表沉降和地表隆起最大的点。

与水平软弱路基相比,斜坡软弱路基的变形、失稳特性表现为很强的非对称性;在最大水平位移点、竖向位移点发生处等有明显差异。计算结果显示:斜坡软弱路基土体截面位移矢量均由上坡脚指向下坡脚,最大水平位移点发生在下坡脚处,深度约为180 mm(A点);竖向位移在下坡脚外侧表现为隆起,最大竖向位移点发生在下坡脚外约160 mm处(C点);上坡脚外侧无隆起;在路堤宽度范围内表现为沉降,且下坡脚半幅的沉降远大于上坡脚半幅,最大沉降点靠近下坡脚(B点)。滑动体的滑入

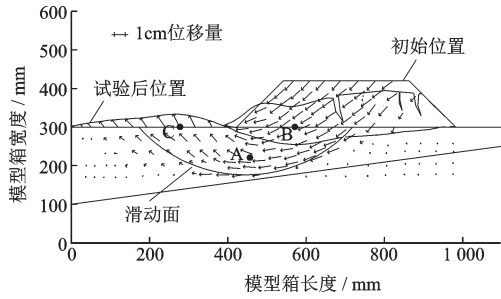


图3 总位移场及变形情况(60g)

Fig.3 Schematic diagram of total displacement field and deformation (60g)

点“越过”路堤中心线,位于上半幅路堤顶面内,滑出点距下坡脚距离较远(与水平软弱路基相比),且路堤裂缝最先出现在上半幅路堤内,并逐步发展到上坡肩处。

根据试验可知,在斜坡软弱路基的稳定性分析中,需要考虑势能差和非对称的影响。本文拟通过引入能反映斜坡势能差的“影响力”和反映非对称性即反映滑动体外非滑动部分路堤填土重量影响的“附加力”,来描述斜坡软弱路基稳定性特征。

2 反映斜坡势能差影响的“影响力”

斜坡软弱路基由于倾斜面使路基丧失对称性,倾斜面上方土体沿该倾斜面有向下滑动的势能差。假设滑动体满足瑞典条分法的所有假设条件;势能零点取圆弧滑动面的最低点。若零势能位置为O点,则滑动土体内任一点M,所具有的势能为:

$$E_p = - \int_{O_M} F dr \quad (1)$$

式中,设土体受到力F的作用,则沿虚微位移dr的元功为F·dr。土体因重力作用而拥有的能量,其表达式为:

$$E_p = mgh_E \quad (2)$$

式中,m为土体质量;g为重力加速度,取9.8 N/kg;h_E为土体与势能零点的水平高度差。

对(1)、(2)式分别求导合并可得:

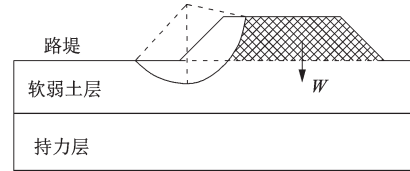
$$\frac{dE_p}{dr} = -F \Rightarrow mg \frac{dh_E}{dr} = -F \quad (3)$$

式中,dh_E/dr对应的是与倾斜面倾角θ有关的函数;F为考虑势能差影响的“影响力”,为了方便论述用F_E表示。由于假设滑动体为刚体,再加之重力势能为标量,可认为F_E作用点在滑动面上,作用方向与微虚位移dr一致,沿倾斜面倾角方向,即:沿倾斜面

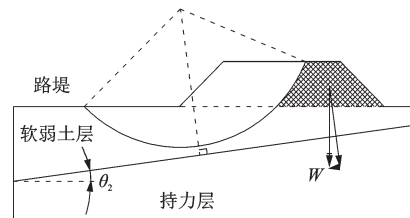
θ₁+θ₂向下。

3 反映非对称影响的“附加力”

对于水平软弱路基,如图4(a)所示。整个路基没有势能差影响,与滑动体相接触的外侧路堤阴影部分土体的重力,对滑动体没有作用,促使滑动体滑动的仅为滑动体内部土体的重力荷载。



(a) 水平软弱路基



(b) 斜坡软弱路基

图4 稳定性影响对比

Fig.4 Comparison of failure mechanism

而斜坡软弱路基,如图4(b)所示。倾斜面使路基丧失对称性,倾斜面上方土体沿该倾斜面有向下滑动的势能差,与滑动体相接触的外侧路堤阴影部分土体的重力有沿倾斜面方向的分力作用于滑动体,除滑动体重力荷载和势能差影响外,该分力对滑动也有促进作用。因此,有必要引入反映非对称即滑动体外非滑动部分路堤填土重量影响的“附加力”。

4 修正瑞典条分法

4.1 受力分析

将斜坡软弱路基中滑动体按瑞典条分法的分析思路进行土条划分,如图5所示。其中,圆弧滑动面的圆心为O₁点,半径为R。

图5中圆弧滑动面最低点O点靠下坡角侧土条编号为1~n_m;靠上坡角侧土条编号为n_{m+1}~n。首先取编号n_{m+1}~n中任一土条i为研究对象,如图6所示,其中,α_i为土条i底面弧线中点处的法向角,l_i

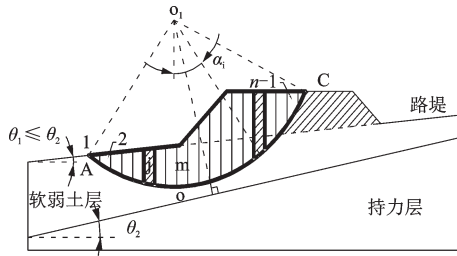


图5 竖直和倾斜土条的划分($\theta_1 \leq \theta_2$)

Fig.5 Division of vertical and inclined strips($\theta_1 \leq \theta_2$)

为土条 i 底面的弧线的割线长度。

土条 i 上的作用力有:土条重力 W_i (含路堤部分填土 W_{1i} 和原地面以下部分 W_{2i}), 方向垂直向下;土条因存在势能差派生的“影响力” F_{Ei} , 方向沿倾斜面 $\theta_1 + \theta_2$ 向下;滑动体外侧非滑动部分路堤重量因存在倾斜面的“附加力” $F_{\theta i}$, 大小、作用点位置和作用方向, 以及在各土条上的分布规律, 参见 4.2 节;作用在圆弧滑动面上的作用反力, 其中:沿切向反力 (抗滑力) T_i , 方向与滑动趋势相反;沿法向反力 N_i , 方向指向圆心。

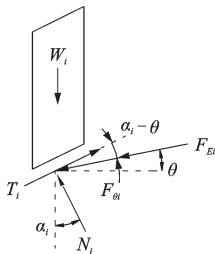


图6 竖直土条 i 受力分析

Fig.6 Stress analysis of inclined soil strip i

土条重力 W_i 可根据土条几何尺寸和土体容重求得;在稳定性安全系数计算中,抗滑力 T_i 可通过库伦强度理论由与土体的抗剪强度值关系求得;沿法向反力 N_i 可由法向正压力求得。而反映斜坡软弱路基稳定性问题特点的“影响力” F_{Ei} 和滑动体外侧路堤重量的“附加力” $F_{\theta i}$, 则需要通过下面二节提供的方法获取。

编号为 $1 \sim n_m$ 中任一土条 j 上, 由于在整个滑动过程中, 均有上升趋势, 故不考虑“附加力”和“影响力”的影响, 其土条受力只有土条自重和作用在圆弧滑动面上作用反力。

4.2 滑动体外侧路堤重量的“附加力”

采用 PLAXIS 有限元软件进行了“附加力”在不同各土条上的分布规律、作用点位置和作用方向

等数值模拟计算分析, 综合分析结果表明:将“附加力”在各土条上的分布形式简化为均匀分布、作用位置在 $1/3$ 处、作用方向为 $\theta_1 + \theta_2$ 时, 计算结果与采用强度折减法进行的有限元计算结果较为接近, 综合误差不足 2.5% 。

滑动体外侧路堤重量的“附加力”, 即沿 $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 方面的重力分力表达式为:

$$F_{\theta} = W_{3k} \sin \theta \quad (4)$$

式中, W_{3k} 为滑动体外侧非滑动部分路堤重量, 可根据路堤尺寸、表面倾角 θ_1 和圆弧滑动面圆心位置、半径及路堤填土容重求得; k 为斜坡软弱路基不同的存在形式。

作用在土条 i 上的滑动体外侧路堤重量的“附加力”表达式为:

$$F_{\theta i} = \frac{W_{3k}}{n - n_{m+1}} \sin \theta \quad (5)$$

式中, 沿圆弧滑动面切向方向和法向法向上的分力为:

$$T_{\theta i} = F_{\theta i} \cos(\alpha_i - \theta) = \frac{W_{3k}}{n - n_{m+1}} \sin \theta \cos(\alpha_i - \theta) \quad (6)$$

$$N_{\theta i} = F_{\theta i} \sin(\alpha_i - \theta) = \frac{W_{3k}}{n - n_{m+1}} \sin \theta \sin(\alpha_i - \theta) \quad (7)$$

4.3 滑动体中各土条的“影响力”

根据第 2 节确定“影响力”的方法, 滑动体内各土条上作用的“影响力”表达式为:

$$F_{Ei} = W_{1ki} \sin \theta \quad (8)$$

式中, W_{1ki} 为土条 i 路堤部分填土重力, 可根据土条尺寸、表面倾角 θ_1 和路堤填土容重求得。

“影响力”沿圆弧滑动面切向和法向上的分力为:

$$T_{Ei} = F_{Ei} \cos(\alpha_i - \theta) = W_{1ki} \sin \theta \cos(\alpha_i - \theta) \quad (9)$$

$$N_{Ei} = F_{Ei} \sin(\alpha_i - \theta) = W_{1ki} \sin \theta \sin(\alpha_i - \theta) \quad (10)$$

4.4 安全系数公式推导

设土条 i 底滑面所在软弱土的黏聚力和内摩擦角分别为 c_i 和 φ_i ; 软弱土和路堤填土的容重分别为 r_1 和 r_2 。

(1) 圆弧滑动面最低点靠上坡角侧土条 (编号 $n_{m+1} \sim n$)

由土条 i 底滑面法向、切向上的静力平衡条件, 可得:

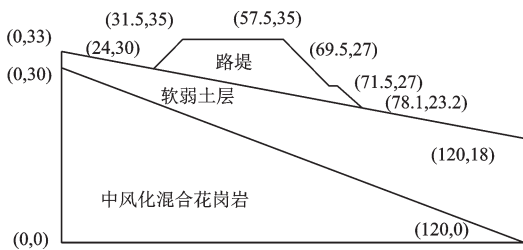


图8 简化计算模型横断面

Fig.8 Simplified calculation cross section

值,以及有限元稳定性分析所需参数,见表3。

表3 各土层物理力学指标和有限元计算参数

Table 3 Physical and mechanical index parameters of each soil layer

土层	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹性模量 E/kPa	泊松比 ν
粉质黏土	1.75	14	10	3 600	0.3
中风化混合花岗岩	2.6	41	46	100 000	0.23
路堤填土	1.9	25	25	22 000	0.3

5.2 计算结果及分析

分别采用瑞典条分法、修正瑞典条分法和有限元方法进行计算和分析。

(1) 条分法

将滑动体划分为20个土条,其中,圆弧滑动面最低点在第9个土条的底部右端点处。根据瑞典条分法的计算步骤,瑞典条分法和修正瑞典条分法的计算结果,见表4。

(2) 有限元方法

设定网格的全局疏密度为中等水平,由PLAXIS自动生成网格,如图9所示。其中,土体网格单元为15节点三角形单元,共188个单元,1 601个节点和2 256个应力点。土体材料采用莫尔-库伦模型。

稳定性安全系数分析,采用基于强度折减法的Phi-c折减计算类型,设定计算步长为0.1,步数由安

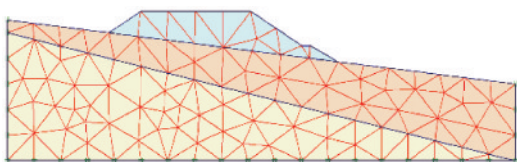


图9 有限元网格划分示意

Fig.9 Finite element mesh grid

全系数是否达到稳定来控制,并忽略路堤荷载施加中产生的位移,可求解路堤荷载施加后路基的整体稳定安全系数。有限元方法计算结果,见表4。

表4 计算结果对比

Table 4 Comparison of calculation results

稳定性分析方法	瑞典条分法	修正瑞典条分法	有限元强度折减法
安全系数 F_s	1.061	0.691	0.705

从表4计算结果可知,按瑞典条分法计算出的安全系数比修正瑞典条分法偏大53.5%、比有限元强度折减法偏大50.5%;而修正瑞典条分法与有限元强度折减法计算结果只相差不足2%。表明修正瑞典条分法反映了具有倾斜面软弱路基更易滑动失稳的特点,所得稳定安全系数更加接近于实际情况。

6 结论

(1)离心机试验和数值模拟结果表明,斜坡软弱路基的滑塌形式与水平软弱路基有很大区别,在稳定性分析中,需要考虑势能差和非对称的影响。

(2)在稳定性分析中,引入了反映势能差影响的“影响力”和反映非对称影响的“附加力”,可以很好的反映斜坡软弱路基稳定性特点。

(3)“附加力”的分布形式简化为均匀分布、作用位置在1/3处、作用方向为 $\theta_1 + \theta_2$ 时,计算结果与采用强度折减法进行的有限元计算结果较为接近。

(4)适用于不同倾斜角的斜坡软弱路基稳定性分析的修正瑞典条分法,其安全系数的计算结果反映了斜坡软弱路基更易滑动失稳的特点,而且更加接近实际情况。

参考文献:

- [1] Liang R, Zeng S P. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization [J]. Soils and Foundations, 2002, 42(2): 83-92.
- [2] Stianson J R, Chan D, Fredlund D G. Role of admissibility criteria in limit equilibrium slope stability methods based on finite element stresses[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 66: 113-125.
- [3] Manzari M T, Nour M A. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis [J]. Journal of Geotechnical

- and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126 (1) : 75-80.
- [4] Lee Seunghyun. Slope stability due to additional embankment[J]. Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2012, 13(7): 3232-3236.
- [5] Cheng Y M, Yip C J. Three-dimensional asymmetrical slope stability analysis extension of Bishop's, Janbu's, and Morgenstern-Price's techniques[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (12): 1544-1555.
- [6] 刘金龙, 陈陆望, 汪东林. 基于倾斜软弱地基的填方工程特性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 2006-2010.
Liu J L, Chen L W, Wang D L. Characters of embankment on inclined weak foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 2006-2010. (in Chinese)
- [7] Jiang X, Qiu Y J, Wei Y X, et al. Application of SSRM in stability analysis of subgrade embankments over sloped weak ground with FLAC3D[C]// Proceedings of 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes. 2008: 741-746.
- [8] 徐光明, 邹广电, 王年香. 倾斜基岩上的边坡破坏模式和稳定性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 703-708.
Xu G M, Zou G D, Wang N X. Failure mode and stability analysis of soil slope on inclined bedrock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 703-708. (in Chinese)
- [9] 刘望坤. 山区高速公路软土路基变形特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
Liu W K. Study on deformation characteristics of soft soil subgrade of highway in mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [10] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- Zhao Sh Y, Zheng Y R, Shi W M, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (3): 343-346. (in Chinese)
- [11] 黄明星, 蒋鑫, 邱延峻. 基于剪切强度折减法的斜坡软弱地基路堤稳定性分析[J]. 铁道标准设计, 2010(10): 40-43.
Huang M X, Jiang X, Qiu Y J. Analysis on stability of embankment on soft foundation of slope based on shear strength reduction method [J]. Railway Standard Design, 2010(10): 40-43. (in Chinese)
- [12] 蒋鑫, 邱延峻, 魏永幸. 基于强度折减法的斜坡软弱地基填方工程特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 622-627.
Jiang X, Qiu Y J, Wei Y X. Engineering behavior of subgrade embankments on sloped weak ground based on strength reduction FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 622-627. (in Chinese)
- [13] 王明华, 李小强, 白世伟. 基于GIS和最小势能原理的斜坡稳定性三维分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2376-2379.
Wang M H, Li X Q, Bai Sh W. 3D stability analysis of slope based on gis and principle of minimum potential energy [J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2376-2379. (in Chinese)
- [14] 李小强, 白世伟, 李钊. 最小势能方法在二维边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 909-912.
Li X Q, Bai Sh W, Li Y. Application of minimum potential energy method in two-dimensional slope stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 909-912. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)